2010년 경제·인문사회연구회 녹색성장 종합연구 총서

기후변화협약에 대응한 산림의 역할과 관리 최적화 방안

1. 녹색성장 종합연구 총서 시리즈

녹색성장 종합연구 총서 일련번호	연구기관 고유 일련번호	연구보고서명	연구기관
10-02-61	R607	기후변화협약에 대응한 산림의 역할과 관리 최적화 방안	한국농촌경제 연구원

2. 참여 연구진

연구기관		연구책임자	참여연구진
주관 연구 기관	한국농촌 경제연구원	이상민 연구위원	김경덕 연구위원 송성환 초청전문연구원

연구보고 R607 | 2010. 10.

기후변화협약에 대응한 산림의 역할과 관리 최적화 방안

이 상 민 연 구 위 원
김 경 덕 연 구 위 원
송 성 환 초청전문연구원

한국농촌경제연구원

연구 담당
이 상 민 연 구 위 원 제1장, 제4장, 제5장, 제6장 집필
김 경 덕 연 구 위 원 제5장, 제6장 집필
송 성 환 초청전문연구원 제2장, 제3장, 제4장 집필

머 리 말

기후변화에 의해 예상하지 못했던 여러 가지 일들이 우리 주변에서 일어나고 있다. 지엽적인 집중호우, 때 이른 한파, 장기간의 가뭄 등 우리가 살고 있는 한반도뿐만 아니라 전 세계적으로 인류가 경험하는 기후변화의 징후들은 온실가스 저감을 위한 인류의 노력을 독촉하고 있는 듯하다. 우리가 기후변화를 방지하기 위해 노력하는 것은 변화에 따라 얻을 수 있는 이익보다는 손해가 더 클 것으로 예상하기 때문이다.

산림은 예로부터 우리에게 다양한 제품과 서비스를 아낌없이 제공하였다. 목제품과 에너지, 건강한 먹을거리 제공을 비롯하여 수자원 보존, 휴양처 제공, 생물 다양성 보존 등이 전통적인 산림의 역할에 속한다. 이에 더하여 최근 들어 기후변화의 위기에서 인류를 구원할 수 있는 역할이 강조되고 있다. 조림과 재조림을 통한 탄소흡수원 확대뿐만 아니라 최적화된 경영을 통한 탄소흡수 증대가 요구되고 있는 것이다.

이 연구는 심각한 기후변화에 대응한 산림의 역할을 조명하고 탄소흡수원으로서의 산림경영 최적화를 위한 방안을 모색함으로써 산림의 새로운 역할에 대한 고찰의 기회를 제공했다고 생각한다. 특히 산림경제 분야 최고 관심사 중의 하나인 최적 벌기령 산정에 관한 문제를 다루었다는 점에서 매우 의의가 있다. 다양한 연구결과 도출을 위하여 많은 노력을 기울인 것으로 여겨진다. 이러한 노력들이 정책으로 이어져 효율적인 산림경영을 위해 이용되기 바란다. 연구과정에서 자료와 제언을 주신 여러분들, 특히 산림관리 효율화를 위해 노력하고 계시는 관계자들께 감사의 말씀을 드린다.

2010. 10.

한국농촌경제연구원장 **오 세 익**

요 약

이 연구는 기후변화협약에 적극 대처하며 타산업의 부담을 감소하기 위한 산림의 역할을 규명하고, 온실가스 배출 및 흡수를 감안한 지속가능한 산림관리의 적정성을 판단하여 최적화된 온실가스 흡수원으로서의 산림부문 관리방안을 마련하는 데 목적이 있다.

산림을 이용한 기후변화 완화방안에는 재조림과 신규조림을 통하여 탄소흡수원을 확충하는 방법, 효율적인 산림경영을 통하여 탄소흡수를 최대화하는 방법 등이 있다. 현재 선진국들은 탄소배출권을 인정받기 위하여 산림부문에서 신규조림, 재조림, 산림전용 및 산림경영활동 등에 대한 정책을 수립하고 있다. 특히, 비용과 시간이 많이 드는 신규조림 및 재조림보다는 산림경영활동을 통한 탄소배출권을 인정받기 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있으며, 의무당사국 대부분이 산림경영을 기후변화협약하의 산림활동으로 선택하고 있다. 그러나 이러한 노력들은 대부분 사회경제적 가치를 고려한 산림경영의 효율성에 대해서는 간과하고 있는 실정이다. 산림경영에 따른 탄소흡수 및 배출의 탄소계정은 산림 전체 차원에서 매년 계산되지만, 이를 증가시키기 위해서는 결국 임분 단위에서 탄소의 흡수를 증가시킬 수 있는 방안을 마련할 필요가 있다.

이를 위하여 최적 산림관리 방안에 대한 분석을 실시하였는데, 동적임분생장모델로 추정한 소나무와 잣나무의 자료를 이용하였다. 간벌만 적용한 소나무 임분에서 목재와 탄소흡수의 경제성을 동시에 고려하면 목재의 경제성만을 고려했을 때보다 간벌연령과 벌기령이 늘어난다. 어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 실시하는 복합관리방법의 경우에도 목재와 탄소흡수의 경제성을 동시에 고려한 관리방법의 벌기령은 목재의 경제성만 고려한 경우보다 늘어난다.

현행 산림관리 방법에 대한 적정 벌기령을 소나무의 일반기준벌기령인 70년(국유림), 50년(공·사유림)과 비교해 보면 공유림과 사유림의 경우 목

재의 경제성만 고려한 벌기령과 비슷하나, 국유림은 목재와 탄소흡수의 경제성을 포함하여 계산한 벌기령과 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 분석에 따라 도출된 최적화 관리방법을 적용하면 벌기령은 줄어들고 가치함수값은 늘어난다. 생리학적인 성장요인을 감안하여 어린나무가꾸기를 실시하더라도 벌기령은 줄어들고 가치함수값은 늘어난다. 이러한 결과를 나타내는 원인은 현행관리 방법에 따를 경우 재적성장이 느려지고, 2차 간벌 시기가 늦어짐에 따라 벌기령이 길어지면서 상대적인 할인요인이 크게 작용하여 최적관리 방법에 비해 가치함수값이 떨어지기 때문이다. 또한 현행관리 방법의 경우 느린 재적성장과 함께 2차에 걸친 간벌비용을 회복하는 기간이 오래 걸리게 된다. 따라서 목재와 탄소의 경제성을 고려한 산림관리를 위해서는 현행 벌기령은 줄이고, 간벌은 1회에 걸쳐 강하게 시행하며 간벌연령은 26년으로 정하고, 어린나무가꾸기는 나무가 잘 자랄 수 있는 주변정리 수준에서 그쳐야 할 것이다.

잣나무의 경우 현행 산림관리 방법을 적용하여 벌기령과 가치함수를 계산하고 잣나무의 일반기준벌기령과 비교해 보면 공·사유림 및 국유림 모두 적정 벌기령보다 매우 낮게 나타났다. 그러나 최적화 관리방법을 적용하면 벌기령은 줄어들고 가치함수값은 늘어난다. 잣나무의 경우 관리작업이 타 수종에 비해 많고 임분연령 35년까지 계속되므로 작업비용을 회복하는 데 많은 시간이 걸린다. 특히 목재의 경제성만 고려했을 경우에는 비용을 회복하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 작업 횟수를 줄이고 연령도 낮추는 것이 필요하다. 또한 소나무와 같이 벌기령을 낮추고 어린나무가꾸기도 필요한 경우에 한해 약하게 시행하는 것이 유리하다.

외생변수 변화에 대한 정책실험을 실시한 결과 이자율(Discount factor)이 올라가면 벌기령은 낮아진다. 또한 최종 생산된 원목가격이 인상될 경우 간벌연령은 낮아지고 강도는 강화되며, 가치함수값은 올라간다. 잣나무의 경우 벌기령도 길어진다. 이산화탄소 거래가격이 인상되면 벌기령과 가치함수값이 동반하여 올라간다. 소나무의 경우 간벌연령도 같이 올라가게 된다.

일반적으로 생각하는 바와 같이 탄소의 경제성을 비롯한 공익적 산림가치를 증진하기 위해서는 벌기령을 늘리는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

반면 작업 횟수와 작업 연령을 적절히 조절함으로써 가치함수값을 높이고 최적화된 관리방법을 찾을 수도 있다. 따라서 벌기령은 일정하게 정할 것이 아니라 수종마다 상이한 관리방법을 감안하여 경제학적인 관점에서 최적화될 수 있도록 결정해야할 것이다.

한편 산불방지노력은 사회적 최적수준에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 산불방지노력의 최적화를 통해 계산된 산림의 사회적 가치는 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 현재의 예산을 증액하여 산불방지노력을 증대할 필요가 있다.

ABSTRACT

The roles of forest and optimal forest management schemes under the Convention of Climate Change

This study is design to define the roles of forest and to find the optimized management schemes if the value of carbon abatement is included in existing forest stands. Mitigation schemes to climate change by forest include reforestation, afforestation and efficient forest management to maximize carbon absorption. Many Annex I industrialized countries try to establish various policies for forest carbon abatement, which can be approved as permissions or credits of carbon emission from Kyoto Protocol. They prefer to focus on forest management rather than expensive reforestation or afforestation. These countries take forest management under Convention on Climate Change as forest management schemes. These efforts to get permissions or credits for carbon emission, however, do not consider the efficiency of forest management, which includes socioeconomic values. Each country needs to account carbon relevant to forest management as a whole, but schemes for each stands are required to enhance carbon absorption.
Therefore this study finds optimal forest management schemes. The rotation period is extended if the value of carbon absorption as well as the timber values are considered for the stands of pine trees and Korean pine trees. The current management method is also analyzed and compared with the optimal scheme. The result says that for the case of pine trees the rotation period is optimal with the current method. But the rotation period decreases and the function value(objective value) increases if the optimal scheme is applied. The reasons are that the late execution of the second thinning brings about slow progress of volume increment and extends rotation period. By the longer rotation period the present value from stands are discounted more seriously. To enhance the value of stands the current rotation should be shorten, and the thinning should be executed at a time.

For the case of Korean pine trees the current rotation period is too short, and it is not optimal even under current management method. Under the optimal management scheme, however, the rotation period becomes shorter than the current method. This happens because the current method includes four times of silvicultural treatments, and they last until 35 years after plantation. The costs for the treatments could not be recovered until after 100 years of plantation. Hence it is required to reduce the number as well as the age of the last application of silvicultural treatments.

The results of simulation says that the rotation period becomes shorter if the discount rate increases. And it becomes longer if the price of carbon dioxide increases.

It is well known that the rotation period lengthens if public values are added to the stands. It is also possible to find optimal management scheme, however, by adjusting the number and the age of silvicultural treatments. Consequently, it could not be an optimal method of forest management to apply long and flat rotation period even some public values are added, but it is required to adjust and apply various rotation period according to the treatment numbers and ages for each species.

The current effort to protect forest fire does not satisfy optimal conditions. The social value of forest increases if we put more efforts on fire protection. Consequently it is necessary to extend the efforts on fire protection by increasing the government budget.

Researchers: Sang-Min Lee; Kyeong-Duk Kim and Seong-Hwan Song
E-mail address: smlee@krei.re.kr

차 례

제1장 서론

1. 연구의 필요성 ····· 1
2. 연구의 목적 ····· 3
3. 선행연구 검토 ····· 3
4. 연구범위와 방법 ····· 9

제2장 산림부문 기후변화협약과 산림의 역할

1. 기후변화 국제협상 동향 ····· 13
2. 기후변화협약과 교토의정서 ····· 15
3. Post-2012 기후변화협약과 산림의 역할 ····· 20

제3장 선진국의 산림부문 기후변화협약 대응과 시사점

1. 일본의 산림부문 기후변화협약 대응 ····· 31
2. EU의 산림부문 기후변화협약 대응 ····· 39
3. 뉴질랜드의 지속가능한 임업 프로그램 ····· 46
4. 시사점 ····· 49

제4장 탄소배출 및 흡수를 고려한 산림사업 최적화 분석

1. 이론적 배경 ····· 52
2. 최적화 분석 ····· 55
3. 사업별 탄소배출 및 흡수 현황 ····· 56
4. 사업별 탄소흡수와 목재생산을 고려한 산림관리 최적화 ····· 64

제5장 산림부문 관리방안

1. 탄소흡수 확대 및 보전 ····· 91
2. 탄소흡수 기능 확대 ····· 92

제6장 요약 및 결론 ····· 109

부록1: 동적임분생장모델(Dynamic stand growth model) ····· 115
부록2: 산림자원관리 표준매뉴얼 주요내용 ····· 125

참고 문헌 ····· 131

표 차례

제2장

표 2 - 1. 기후변화 협약의 주요내용 ····· 14
표 2 - 2. UNFCCC에서 규정하고 있는 국가군별 특정의무 ····· 15
표 2 - 3. CDM 사업분야 ····· 18
표 2 - 4. 배출권의 종류와 특징 ····· 19
표 2 - 5. 숲가꾸기 사업을 통한 탄소감축 효과 ····· 22
표 2 - 6. 기후변화협약 당사국 총회 산림관련 주요 동향 ····· 25
표 2 - 7. 산림활동의 탄소배출권 인정범위 ····· 26
표 2 - 8. 연도별 가이드라인의 주요 내용 ····· 27
표 2 - 9. 연간 ha당 탄소흡수량 ····· 28

제3장

표 3 - 1. 일본의 간벌 실적 ····· 33
표 3 - 2. 일본의 산림경영활동에 따른 온실가스 통계추정 체계 ····· 37
표 3 - 3. EU 소속국가들의 1990년 대비 온실가스 의무감축량 ····· 40
표 3 - 4. 영국의 임지조성 지원제도 ····· 42
표 3 - 5. 뉴질랜드 ECFP의 보조금 ····· 48

제4장

표 4 - 1. 주요 수종의 줄기밀도 ····· 57
표 4 - 2. 소나무 연령 30년 간벌 임분의 강도에 따른 탄소흡수량 (임분연령 50년) ····· 60
표 4 - 3. 잣나무 연령 30년 간벌 임분의 강도에 따른 탄소흡수량 (임분연령 50년) ····· 61
표 4 - 4. 소나무 임분연령 11년 어린나무 제거강도에 따른 탄소흡수량(임분연령 20년) ····· 62
표 4 - 5. 잣나무 임분연령 11년 어린나무 제거강도에 따른 탄소흡수량(임분연령 20년) ····· 62

표 4 - 6. 계절별 산불 발생 추이 ····· 63
표 4 - 7. 산불 피해규모와 방지예산 ····· 63
표 4 - 8. 산림연령별 작업종류 및 비용 ····· 66
표 4 - 9. 소나무 간벌강도별 벌기령 및 가치함수값(간벌연령 30년) ····· 67
표 4-10. 목재의 경제성만 고려한 간벌연령별 최적벌기령 및 간벌강도(소나무) ····· 67
표 4-11. 목재의 경제성만 고려한 간벌연령별 최적벌기령 및 간벌강도(잣나무) ····· 68
표 4-12. 소나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 및 가치함수값의 변화(목재의 경제성만 고려) ····· 70
표 4-13. 잣나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 및 가치함수값의 변화(목재의 경제성만 고려) ····· 70
표 4-14. 소나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안(목재의 경제성만 고려) ····· 72
표 4-15. 잣나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안(목재의 경제성만 고려) ····· 73
표 4-16. 탄소의 경제성만 고려한 간벌강도별 간벌연령 및 가치함수값(벌기령 70년) ····· 76
표 4-17. 소나무 목재와 탄소의 경제성을 고려한 간벌작업 ····· 77
표 4-18. 잣나무 목재와 탄소의 경제성을 고려한 간벌작업 ····· 78
표 4-19. 소나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 가치함수값의 변화(탄소의 경제성만 고려) ····· 79
표 4-20. 잣나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 가치함수값의 변화(탄소의 경제성만 고려) ····· 79
표 4-21. 소나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 가치함수값의 변화(목재와 탄소의 경제성 고려) ····· 80
표 4-22. 잣나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 가치함수값의 변화(목재와 탄소의 경제성 고려) ····· 80
표 4-23. 소나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안(목재와 탄소의 경제성 고려) ····· 82

표 4-24. 잣나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안(목재와 탄소의 경제성 고려) ····· 83
표 4-25. 산림예산의 산불방지로 인한 산림의 경제적 가치 회귀분석결과 ··· 86
표 4-26. 산불방지예산의 산림의 경제적가치 및 이산화탄소 흡수가치 회귀분석결과 ····· 87

제5장

표 5 - 1. Baseline의 주요 외생변수 값 ····· 93
표 5 - 2. 이자율 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화(소나무) ···· 94
표 5 - 3. 이자율 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화(잣나무) ···· 94
표 5 - 4. 고가원목가격 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화 (소나무) ····· 95
표 5 - 5. 고가원목가격 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화 (잣나무) ····· 96
표 5 - 6. 이산화탄소 거래가격 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화(소나무) ····· 97
표 5 - 7. 이산화탄소 거래가격 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화(잣나무) ····· 97
표 5 - 8. 간벌사업의 최적화 조건 ····· 99
표 5 - 9. 소나무산림 관리 작업별 최적화 결과 ····· 100
표 5-10. 잣나무산림 관리 작업별 최적화 결과 ····· 101
표 5-11. 현행 산림관리 방법 ····· 101
표 5-12. 현행 소나무산림관리 최적벌기령 및 가치함수 ····· 102
표 5-13. 현행 잣나무산림관리 최적벌기령 및 가치함수 ····· 104
표 5-14. 외생변수와 관리방법의 관계 ····· 105

부표

부표 1-1. 동적생장모델의 구성식의 계수추정 ····· 120
부표 2-1. 산림의 기능별 관리 목표 및 대상 ····· 125
부표 2-2. 수종별 간벌 개시기 ····· 129

그림 차례

제1장

그림 1 - 1. 연구의 흐름도 ····· 10

제2장

그림 2 - 1. Annex I 국가의 온실가스 감축의무(1990년 대비) ····· 16
그림 2 - 2. 기후변화협약, 교토의정서 및 마라케시 합의문 비교 ···· 17
그림 2 - 3. 배출권 거래제의 개념 ····· 19
그림 2 - 4. 숲가꾸기의 경제적, 사회적, 환경적 효과 ····· 23

제3장

그림 3 - 1. 일본의 신규조림 및 산림전용에 따른 탄소변화량 추정체계 ·· 37
그림 3 - 2. 일본의 산림경영에 따른 탄소변화량 추정체계 ····· 38
그림 3 - 3. 일본의 국가 산림자원 DB 체계 ····· 39
그림 3 - 4. 독일의 신규조림에 따른 탄소변화량추정 체계 ····· 44
그림 3 - 5. 독일의 산림전용에 따른 탄소변화량추정 체계 ····· 45
그림 3 - 6. 독일의 산림경영에 따른 탄소변화량추정 체계 ····· 46

제4장

그림 4 - 1. 경제림 관리에 따른 효용함수 ····· 53
그림 4 - 2. 임분연령 30년생 간벌의 강도에 따른 재적 변화 ····· 59
그림 4 - 3. 잣나무 임분연령 30년생 간벌의 강도에 따른 재적 변화 ·· 60
그림 4 - 4. 간벌강도별 적정 벌기령 ····· 69
그림 4 - 5. 산림예산과 산불방지로 인한 경제적 가치 ····· 85
그림 4 - 6. 산림가치 생산가능곡선과 최적 산림예산 ····· 88

제5장

그림 5 - 1. 최적관리와 현행관리방법에 따른 재적성장 차이 (소나무) ····· 103
그림 5 - 2. 최적관리와 현행관리방법에 따른 가치함수값 추이 (잣나무) ····· 104

부도

부도 1 - 1. 동적임분생장모델의 흐름도 ····· 116
부도 1 - 2. 임령에 따른 최대밀도곡선과 ha당 본수 추정 ····· 119
부도 1 - 3. 동적생장모델 Excel 프로그램 ····· 122
부도 1 - 4. 관리를 안 하는 경우와 3번의 관리를 실행한 경우의 본수발달 ····· 123
부도 1 - 5. 3번의 관리를 실행한 경우의 본수발달 ····· 124

서 론

제1장

1. 연구의 필요성

산업혁명 이후 화석연료 이용의 증가로 인한 기후변화에 대처하기 위해 인류는 1992년 기후변화협약을 채택하였으며, 2005년 교토의정서가 발효되면서 실질적인 온실가스 감축을 위한 노력이 시작되었다. 교토의정서에는 온실가스 배출 및 흡수원 5개 분야 가운데 토지이용, 토지이용변화, 임업(Land Use, Land-Use Change, and Forestry: LULUCF) 분야를 유일한 온실가스 흡수원으로 인정하였으며, 특히 신규조림, 재조림, 산림경영 등을 통한 온실가스 흡수 및 배출에 대해 규정하고 있다.

산림을 통한 온실가스 흡수는 타 산업에서 적용하는 배출량 감축사업에 비해 제약이 많지 않고 미래의 불확실성에 대한 변동이 적으며, 일정 수준의 흡수량을 지속적으로 확보할 수 있다는 장점이 있다. 또한 산림 흡수원의 활용은 조림과 산림의 효율적 관리를 통하여 지구온난화를 방지할 뿐만 아니라 이 외에 생태계 보전, 수자원 함양, 대기정화, 토사유출 방지, 휴양기능 등의 다양한 공익적 기능을 제공한다(Malmsheimer 외, 2008).

국토의 약 65%(644만 ha)가 산림으로 구성되어 있는 우리나라의 경우 산림을 이용한 탄소배출권 취득이 용이할 것으로 전망된다. 효율적인 산림경영을 통하여 약 92만 3천 톤의 탄소를 흡수할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이는 1990년도 배출량의 5%를 감축해야 할 경우 감축량의 약 1/4에 해당한다. 이 양을 국제탄소시장을 통해 구매할 경우 약 414억 원의 비용

이 발생하게 된다.

산림을 비롯한 농지, 초지 등은 타분야와 달리 흡수원으로서의 역할을 탄소계정 방법에 포함하고 있으나, 교토의정서 상에서는 미완성된 상태로 1차 이행기간을 맞이하였으므로 온실가스계정 상에 여러 가지 문제점을 내포하고 있다. 한 가지 예를 들면, 개도국의 산림전용은 전 세계 온실가스 배출의 1/4을 차지하나 전용회피에 따른 크레딧을 인정하지 않으므로 온실가스 감축의 실질적인 효과를 기대하기 힘든 상황이다. 따라서 LULUCF 분야는 교토의정서 1차 이행기간 시작 이전부터 지속적인 논의의 대상이 되었으며, 이 기간이 끝나면 변경된 형태 또는 새로운 형태로 포함될 것으로 전망된다.

한편 과거 우리나라의 산림정책 패러다임은 치산녹화, 산지자원화에 초점이 맞추어져 있었으나 1998년 이후 지속가능한 산림경영 추진으로 변화하였다. 2008년부터는 지속가능한 녹색복지국가 실현을 추구하는 단계로 발전하였다. 따라서 지속가능한 산림경영을 위한 산림사업을 도입하여 적용하고, 탄소배출권 확보를 위한 조림확대, 해외조림, 탄소순환마을 조성 등 다양한 계획을 준비하여 실행하고 있는 중이다. 지속가능한 산림관리를 위한 방안은 경제림조성, 생물다양성 보전, 산림의 사회·경제적 편익 증진 등을 기본방향으로 설정하고 있다. 여기에 탄소흡수원 확충, 바이오에너지 이용확대 등이 추가되어 지속가능한 녹색복지국가를 구현할 수 있다.

숲가꾸기 사업은 지속가능한 산림경영의 기본원칙 아래 산림의 공익적, 사회·경제적 이익을 최적화하도록 산림을 보전하고 관리하는 것으로, 지속가능한 산림관리를 위한 대표적인 산림사업이다. 그러나 현장에서 실시하는 숲가꾸기 사업을 통하여 발생하는 탄소 배출 및 흡수를 모두 고려하였을 경우 실제로 적정한 관리 방안인지에 대한 의문이 제기되고 있는 실정이다. 특히 경제림조성을 위한 관리방법은 온실가스 흡수원 관리방법과 상충되는 부분이 있는 것으로 알려져 있다(Malmsheimer 외, 2008. 황재홍, 2009). 즉 지속가능한 산림관리 방안에는 온실가스 배출 및 흡수가 충분히 고려되지 않았다는 것이다.

우리나라도 2013년부터 본격적인 이행의무를 시행하여야할 것으로 예상

됨에 따라 온실가스 배출을 감축하기 위한 산업별 대응 방안이 다양하게 연구되고 있다. 그러나 온실가스 흡수원인 산림의 관리방안에 대한 논의는 상대적으로 활발하지 못한 실정이다. 따라서 Post-2012 기후변화협약에 대비한 산림의 역할을 재조명하고, 효율적인 관리를 위한 산림의 온실가스 흡수 최적화에 대한 연구가 절실히 필요한 상황이다.

2. 연구의 목적

이 연구는 기후변화협약에 적극 대처하며 타산업의 부담을 감소하기 위한 산림의 역할을 규명하고, 온실가스 배출 및 흡수를 감안한 지속가능한 산림관리의 적정성을 판단하여 온실가스 흡수원으로서의 최적화된 산림부문 관리방안을 마련하는 데 목적이 있다. 따라서 기후변화협약과 관련된 산림의 논의 동향, 선진국 사례 분석 등을 통해 산림의 역할을 규명하고, 지속가능한 산림경영을 위해 실시하고 있는 다양한 산림사업들의 온실가스 감축 적정성을 분석하여 온실가스 감축을 전제로 한 지속가능한 산림관리 방안을 제시하는 것이다.

3. 선행연구 검토

3.1. 기후변화와 산림

김준순(2004)은 기후변화협약의 당사국 총회별 주요 논의 및 합의 내용을 정리하였으며, 산림부문 내용을 추가적으로 정리하였다. 제10차 당사국회의(COP-10)에서 산림경영 개념이 확대됨에 따라 보다 많은 산림 흡수원을 인정받기 위한 노력들이 필요하다고 강조하며, 임업분야에서의 대응방

안으로 국내 산림의 지속가능한 산림경영, 해외조림사업, 북한의 황폐지 복구 사업, 사막화 방지 사업, 목재 이용 및 산림바이오 에너지 활용, 도시림으로서의 신규조림 면적 확대, 수종갱신과 천연림 보육, 통계체계의 구축, 산주에 대한 경제적 인센티브 부여, 한계 농지의 산림으로의 전용 및 산림의 타용도 전환 억제, 산림재해 방지 등을 제시하였다.

한화진 외(2005)는 기후변화의 부문별 영향평가를 실시하고 각 부문별 기후변화 적응정책을 제시하였다. 산림의 경우 기후변화는 산림생태계의 구조와 기능 변화, 산림식생대 이동, 산림 종다양성 변화 등에 영향을 미치며, 산림의 생장 및 생산성에도 영향을 미친다고 하였다. 또한 산림재해의 빈도 및 규모 등에도 지대한 영향이 있음을 강조하였다. 적응수단으로는 생물종에 대한 보호대책 강구, 조림수종 선정과 수종별 조림 및 육림기술 체계 정립, 산불, 산사태, 병해충 등 산림재해에 대한 모니터링 및 예방대책 강구 등을 제시하였다. 적응정책으로 산림기본법 제정(2001)을 통한 지속가능한 산림경영(SFM)을 산림관리의 정책방향으로 법제화하고, 사막화 방지 조림 사업 참여 등 재정 및 기술지원을 확대해야 한다고 주장하였다.

장남정 외(2008)는 IPCC 배출량 산정법에 따른 전라북도 온실가스 배출량을 산정하고 예측하였으며, 특성분석을 통한 지자체 차원의 각 부문별 온실가스 저감방안을 제시하였다. 그 결과 2006년 전라북도 온실가스 총 배출량은 1,965만tCO2e로 계측하였으며, 2005년 대비 7.6% 증가하였다고 밝혔다. 부문별로는 에너지와 산업공정 부문이 각각 111.0%, 1.7%로 증가하였으며, 농업과 폐기물 부문은 5.3%, 7.4% 감소한 것으로 분석하였다. 토지이용변화 및 임업 부문은 141만 2,800tCO2e 순흡수량을 기록한 것으로 나타났다. 예측결과에 따르면 2007년부터 2020년까지 전라북도 온실가스 배출량은 연평균 2.4%씩 증가하여 2020년 총 배출량이 2005년도 대비 50.7% 증가한 2,750만tCO2e이 될 것으로 전망하였다. 2020년 1인당 이산화탄소 배출량도 14.62t/인으로 증가한다고 전망하였다. 산림부문 온실가스 저감방안으로 산업단지 완충녹지 조성, 산림바이오에너지 이용 활성화, 산림재해방지 및 산림훼손억제, 유휴토지 조림조성의 확대 등을 제시하였다.

Malmsheimer 외(2008)는 목제품 이용, 산림 바이오매스 대체, 산불관리, 산림전용회피 등을 통한 온실가스 배출 저감 효과와 산림의 탄소저장을 통한 온실가스 흡수 효과를 소개하였다. 특히 탄소저장 증대를 위해 건강성 유지, 고사·산불·병해충 등으로 인한 손실방지가 필요하다고 주장하였다. 간벌을 이용하여 임분의 밀도를 관리함으로써 지속가능한 목재자원을 공급하고 동시에 탄소를 저장하는 역할을 유지할 수 있으므로 탄소저장 확대와 배출감소를 위해 전통적인 조림은 반드시 고려되어야 한다고 주장하였다. 특히 단순림, 혼합림, 간벌, 가지치기, 윤벌기(벌기령) 결정 등은 탄소저장 확대와 배출감소를 위해 조정해야 한다고 밝혔다.

김점수(2009)는 기후변화협약 및 교토의정서의 산림관련 내용을 정리하였으며, 탄소흡수원으로서 산림에 대한 기준을 검토하였다. 강원도 탄소흡수량을 실제로 산정하였는데, 산림 및 기타 목질계 바이오매스 저장량 변화는 산림자원에 대한 통계인 임목총생장량(총흡수량) 및 총벌채량(총배출량) 자료를 근거로 추정하였다. 타용도 전환에 따른 CO_2 배출 측정은 산림의 타용도 전환에 의한 것만 추정하였으며, 토양관련 활동에 따른 탄소배출은 토지이용(산림, 논, 밭, 기타) 변화활동에 따른 탄소 저장량 변화 추정과 농업용 석회 사용에 따른 이산화탄소 배출량을 추정하였다.

황재홍(2009)은 산림 내에서 이루어지는 탄소저장과 저장증대를 위한 산림경영 방안을 사례중심으로 소개하였다. 조림지 정리작업의 경우 토양탄소를 0~40%까지 감소시키는 것으로 나타났으며, 간벌은 일반적으로 탄소 축적량을 감소시키는데, 미송(Douglas-fir, Pseudotsuga menziesii)과 테다소나무(Loblilly pine, Pinus taeda)에 대한 시뮬레이션 결과 40% 간벌강도의 경우 12~18%의 탄소 축적이 감소한다고 밝혔다.[1] 벌채의 경우 약 10% 미만의 탄소축적 변화가 예상되며, 연간 생장량이 최대인 수령으로 윤벌기를 변경하면 임목의 탄소저장량은 감소하므로 목재수확에 따른 수입과 상충할 수 있다고 주장하였다.

---

[1] 35년 윤벌기(벌기령), 식재밀도 1,500본/ha, 20년생 임분을 대상으로 조사한 결과임.

이지훈(2009)은 동태적 연산균형(Dynamic Computable General Equilibrium: DCGE)을 이용하여 온실가스 감축수단으로서의 탄소배출권 도입에 따른 경제적 효과를 분석하였다. 2006년을 기준으로 이산화탄소 배출량의 96.7%를 차지하는 에너지와 산업공정 및 제품사용의 2개 부문에 적용하였다. 그 결과 탄소배출권 거래제도는 정부의 직접규제보다 이산화탄소감축 비용을 최대 60% 정도 절감할 수 있는 것으로 추정하였으며, 탄소배출권 거래제에 관한 법체계 마련과 함께 글로벌 수준의 관리 시스템 구비를 제언하였다.

한기주와 윤여창(2009)은 교토의정서를 기반으로 하는 온실가스배출권 시장과 자발적 배출권 시장에서의 산림관리 활동의 역할과 인정범위를 조명하며, 국내배출권 시장의 도입에 있어 산림부문 참여의 필요성을 강조하고 정책과제를 도출하였다. 특히 산림부문의 배출권 시장참여의 장애요인과 그 해결방안을 제시함으로써 산림흡수원 배출권 인정에 따른 임업진흥 효과를 극대화할 수 있는 산림정책과제를 제시하였다.

3.2. Post-2012 산림관련 논의 동향

배재수(2007)는 산림전용 방지 노력을 탄소배출권 발행 활동으로 포함시키는 논의가 시작됨에 따라, 그에 따른 각국의 대응방향과 향후 전망을 제시하였다. 산림전용 방지 노력에 대한 인센티브로 탄소배출권을 선정할 경우 매우 많은 양의 탄소배출권이 발생될 가능성이 있으며, 인센티브를 인정받기 위하여 방법론적 쟁점과 정치적 쟁점을 동시에 해결해야 할 필요가 있다고 전망하였다. 또한 우리나라의 경우 산림 전용면적이 과거에 비해 감소하고, 인구에 비해 토지 가용면적이 적어 산림전용을 획기적으로 줄일 수는 없을 것이라고 전망하였다.

이경학 외(2006)는 일본, 독일, 핀란드, 캐나다 등 주요국의 탄소계정체계기반 구축사례를 검토하였다. 또한 줄기재적의 임목탄소전환계수와 관련된 연구결과를 분석하여 국내 주요수종에 적용하고 결과를 도출하였다. 주요 결과는 산림 및 기타 목질계 바이오매스 저장량 변화에 따른 온실가

스 흡수/배출량 산출, 산림 및 초지의 타용도 전환에 따른 CO_2 배출, 토지 이용(산림, 논, 밭, 기타) 변화에 따른 탄소 저장량 변화 추정, 농업용 석회 사용에 따른 이산화탄소 배출 등이다.

이경학 외(2008)는 IPCC의 2006가이드라인의 AFOLU(Agriculture, Forestry and Other Land Use) 중 산림(Forestland) 부문의 적용가능성을 검토하고 향후 Post-2012에 대비한 산림부문 온실가스 인벤토리 체계 구축 방향을 제시하였다. 구체적으로 2006가이드라인에 제시된 온실가스 배출량 산정 접근법에 대한 분석을 실시하였으며, 국내 적용을 위한 배출원/흡수원별 접근방법을 제시하였다. 실제로 2006가이드라인을 이용한 국내 온실가스 통계를 시산하였는데, 2006년 현재 산림의 총순흡수량은 약 880만 tC이며, 연평균 순흡수량은 약 790만 tC이라고 밝혔다.

신은성(2009)은 국가별 기후변화 대응정책을 고찰하고 Post-2012 국제교섭에서 우리나라가 국익을 극대화할 수 있는 방안을 제시하였다. 대응방안으로는 온실가스 감축 참여확대에 대한 준비, 국제사회에서 수용 가능한 방법 및 수준의 의무부담방식에 대한 우리의 입장 정리, 실천 가능한 온실가스 감축 목표 설정, 재정 및 기술지원 문제에 대해 국익을 고려한 전략 수립, 교토메커니즘의 수정·보완에 대비할 것 등을 제안하였다.

Cowie 외(2007)는 교토의정서의 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(LULUCF)의 온실가스 통계 산정을 위한 계정 체계의 문제점을 지적하며, 해결방안으로 국가의 모든 토지와 관련된 산정과정을 모두 포함할 것을 제안하였다. 이를 위하여 Net-Net 계정, 합의에 의해 도출된 baseline을 이용한 net계정, 평균 탄소 축적량 적용방법 등 세 가지 옵션을 제시하였다.

Schlamadinger 외(2007a)는 LULUCF의 계정과 관련된 교토의정서 및 마라케시 협정을 이해하고 문제점을 파악하여 2012 이후 기후변화협약에서 LULUCF 활동을 포함하는 포괄적이고 효율적이며 개선된 탄소계정을 수립할 수 있는 메카니즘을 도입하기 위한 의견을 제시하였다. 성공적인 LULUCF 활동을 위한 전략 조건 및 기준으로 계정체계 및 모니터링의 간편성, 실효성, 공간적·시간적 포괄적인 계정 도입, 무임크레딧 예방, 배출틈새(leakage) 예방을 통한 실질적인 개선 인센티브 제공, 가이드라인의 일

관성, 현시스템 및 장기 기후변화 완화 목적과의 공존성, 투명성 등을 통한 실효성 및 정치적 수용가능성, 바이오매스의 지속가능한 이용 제고, 배출저감 및 흡수제고의 적응전략과의 연계성 등을 제시하였다. 이행 가능한 구조로는 부문별(LULUCF와 비LULUCF) 목표의 연계성에 따른 구분과 이행목표의 지향에 따른 구분을 통합하는 개선방향을 제시하였다.

Schlamadinger 외(2007b)는 Post-2012 기후협약에 포함되어야 할 옵션에 대해 살펴보면서 LULUCF를 수정한 AFOLU(Agriculture, Forestry and Land Use) 계정시스템 설계안을 제시하였다. 부문별 규칙으로 산림전용에 대해 Net-Net 계정을 이용하거나 목표를 설정하여 보고(REDD)하도록 하며, 온실가스 축적 활동에 대해서는 자발적 보고, 악화, 파괴, 배출활동에 대해서는 의무보고, 수확된 목제품의 경우 관리된 산림으로부터의 배출이 보고된 경우에 한하여 계상 가능하도록 제안하였다. 또한 산림전용 방지에 대해서는 국가적 차원의 접근이 필요하며, 재생할 수 없는 바이오매스 사용 억제나 대체 활동에 대한 보상도 필요하다고 주장하였다.

정성춘(2007)은 Post-2012 체제마련에 대한 포괄적인 계획인 발리로드맵의 주요내용을 소개하고, 제13차 COP 및 제3차 COP/MOP(교토의정서 당사국총회)를 평가하였다. 포스트 교토체제에 대해 협의할 수 있는 국제협상의 기본 틀을 구축했다는 점, 과학적 예측을 기초로 한 온실가스 삭감 논의기반을 형성하였다는 점 등을 긍정적으로 평가하였다. 그러나 수치 목표 설정을 둘러싼 국가 간의 갈등, 개발도상국 지원 문제 등에 대해서는 부정적인 의견을 제시하였다. 또한 제14차 COP(2008)에서는 경제위기로 인한 기후변화 관심도 저하, 미국의 신정부 출범, EU의 협상 주도 능력 상실 등으로 인하여 큰 진전을 이루지 못하였다고 비판하였다.

3.3. 선행연구와 본연구의 차별성

본 연구는 산림의 온실가스 흡수원으로서의 가능성을 암시적으로 제시한 여러 연구와 달리, 산림경영 활동에서 발생하는 탄소의 배출과 흡수에

대한 계량화된 결과를 수집하여 모형화하고, 관련된 예를 명시함으로써 탄소흡수를 고려한 지속가능한 산림경영 방안을 도출하는 것이다.

4. 연구범위와 방법

4.1. 연구범위

본 연구는 기후변화에 영향을 미치는 온실가스 가운데 산림이 흡수원으로서의 역할을 수행할 수 있는 탄소를 대상으로 하였다. 또한 다양한 산림사업 가운데 지속가능한 산림경영을 위한 숲가꾸기사업을 검토하며, 탄소배출 및 흡수와 관련된 세부 사업인 간벌, 어린나무가꾸기와 산불방지를 선정하여 분석하였다. 대상 수종은 소나무와 잣나무로 제한하였으며, 최근 자료를 중심으로 하여 2000년대 이후 현황 및 통계를 이용하였다.

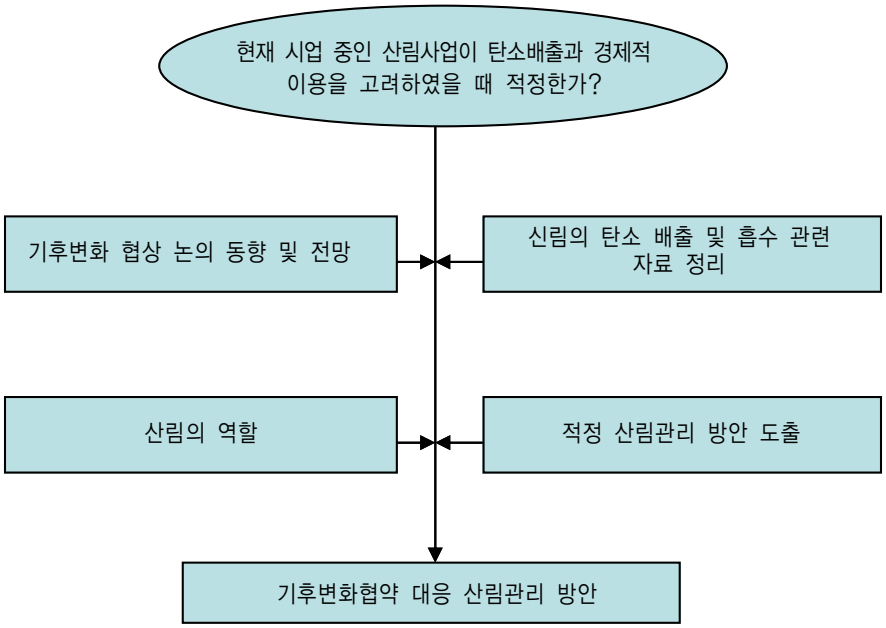
4.2. 연구방법 및 내용

기후변화협약에 대한 연구 가운데 산림관련 문헌을 정리하고, Post-2012 산림관련 기후변화협약의 논의 동향을 살펴보며, 일본과 EU 등의 선진국 사례를 검토하였다. 배출계수와 탄소계정 관련 자료는 이미 연구된 결과를 문헌을 통하여 검색하고 정리하였다. 간벌 및 주벌에 의한 임목의 탄소배출량, 그리고 부피생장을 통한 탄소흡수량 등 탄소 배출 및 흡수와 관련된 자료는 실제 측정치가 없으므로 동적임분생장모델(Dynamic Stand Growth model)[2]을 이용하여 도출한 사업별 ha당 재적을 이용하였다. 적정 산림관

[2] 부록 1 참조.

리 방안을 찾기 위하여 동태모형을 분석하여 벌채시기(벌기령)를 선정하였으며, 이자율 변화, 이산화탄소거래가격 상승, 원목가격 인상 등에 따라 변화하는 적정 관리방법을 찾기 위해 정책실험을 실시하였다.

그림 1-1. 연구의 흐름도



제2장에서는 기후변화 국제협상의 내용, 기후변화협약과 교토의정서의 관계, 추후 논의동향에 대하여 정리하고, 산림의 역할, 산림관련 국제적 논의동향에 대하여 설명하였다. 제3장에서는 선진국들의 산림부분 기후변화 대응방안을 살펴보고 산림경영활동과 관련된 시사점을 도출하였다. 제4장에서는 탄소의 흡수와 목재의 경제성을 고려한 산림사업 최적화 분석을 실시하였다. 우선 분석을 위한 이론을 소개하고, 간벌, 어린나무가꾸기에 대한 탄소흡수현황, 그리고 산불의 발생추이 등에 대하여 살펴보았다. 최적화된 산림관리 방안을 도출하기 위한 분석은 목재의 경제성만 고려했을 경우와 목재와 탄소의 경제성을 고려했을 경우로 나누어 결과를 도출하였다.

또한 각 경우마다 간벌, 어린나무가꾸기, 어린나무가꾸기와 간벌의 복합사업 등 세 가지의 사업에 대해 분석하여 결과를 도출하였다. 산불예방사업에 대해서는 방지노력의 최적화를 도출하였다. 제5장에서는 산림부문 최적관리방안을 도출하기 위하여 분석결과에 대한 정책실험을 실시하고, 최적화 방안을 제시하였다.

산림부문 기후변화협약과 산림의 역할

제2장

1. 기후변화 국제협상 동향

1.1. 추진배경

1980년대 들어 이상기후로 인한 자연재해가 세계 각지에서 빈발하면서 지구 온난화에 대한 논쟁이 가열되기 시작하였다. 전 세계적으로 지구 온난화에 관한 과학적 근거가 필요하다는 인식이 확산되면서 1988년 유엔환경위원회(UNEP)와 세계기상기구(WMO)가 공동으로 설립한 국제 과학자 그룹인 기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC)가 활동을 개시하였다. 1992년 6월 브라질 리우에서 열린 UN환경개발회의에서 “기후변화에 관한 UN 기본협약(UNFCCC)”이 채택되어 1994년 3월 발효되었다. 우리나라는 1993년 12월에 47번째로 UNFCCC에 가입하였는데, 2009년 8월 현재 193개국이 비준하였으며, 165개국이 가입하였다.

1.2. 주요내용

기후변화협약의 목적은 “인간의 활동이 지구 기후 시스템에 위험한 영향을 미치지 않는 수준에서 대기 중 온실가스 농도를 안정화시키는 것”(제2조)이라 명시하고 있다. 원칙으로는 공통의 차별화된 책임, 대응능력을 거

론하고 있으며, 온실가스 감축에 있어 선진국이 리더십을 발휘할 것과 개도국의 특별한 필요와 상황을 고려할 것도 명시하였다(제3조).

표 2-1. 기후변화 협약의 주요내용

구분		내용
목적(2조)		지구 온난화를 방지할 수 있는 수준으로 온실가스의 농도 안정화
원칙(3조)		형평성: 공통의 차별화된 책임, 국가별 특수사정 고려
		효율성: 예방의 원칙, 정책 및 조치, 대상온실가스의 포괄성, 공동이행 경제발전: 지속가능한 개발의 촉진, 개방적 국제경제체제 촉진
의무사항	공통의무사항	배출원 흡수원에 관한 특정의무사항 :1990년 수준으로 온실가스 배출 안정화에 노력(4조 2항)
	특정의무사항	재정지원 및 기술이전에 관한 특정공약(4조 3항~5항)
기구 및 제도	기구	개도국의 특수사항 고려 (4조 8항~10항) 당사국총회(7조) / 사무국 (8국) / 과학기술자문 부속기구(9조) / 이행자문기구(10조) / 재정기구 (11조)
	제도	서약 및 검토 (Pledge and Review) 제도 (12조): 국가보고서 제출 및 당사국 총회 검토 이행과 관련된 의문점 해소를 위한 다자 간 협의과정(13조) / 분쟁조정제도 (14조)

자료: 온실가스 배출량 정보시스템

공통의무 사항(제4조 1항)으로 온실가스 배출저감 정책의 자체적 수립 및 시행, 온실가스 통계 및 정책이행 등 국가보고서 작성 및 제출(선진국은 협약 발효 후 6개월, 개도국은 3년 이내)을 명시하였다. 선진국(부속서 Ⅰ, Ⅱ국가)의 특정 의무사항을 별도로 지정하였는데, 부속서 Ⅰ 국가들은 2000년도 온실가스 배출량을 1990년 수준으로 안정화(비구속적 의무) 시켜야 하며, 부속서 Ⅱ 국가들은 온실가스 감축 노력과 함께 개도국에 대한 재정 및 기술이전 의무도 부담하도록 하고 있다.

표 2-2. UNFCCC에서 규정하고 있는 국가군별 특정의무

구분	Annex Ⅰ 국가	Annex Ⅱ 국가	Non-Annex Ⅰ 국가
국가	협약체결 당시 OECD 24개국, EU와 동구권 국가 등 40개국	Annex Ⅰ 국가에서 동구권 국가가 제외된 OECD 24개국 및 EU	기후변화협약에 서명한 국가들 중 Annex Ⅰ국가 이 외의 국가
의무	온실가스 배출량을 1990년 수준으로 감축하도록 노력, 강제성은 부여하지 않음	감축노력과 함께 개발도상국에 재정지원 및 기술이전의무를 가짐	국가보고서 제출 등의 협약상 일반적 의무만 수행
비고			우리나라 해당

자료: UNFCCC

2. 기후변화협약과 교토의정서

기후변화협약에 의한 온실가스 감축은 구속력이 없다. 따라서 교토의정서에는 온실가스의 실질적인 감축을 위하여 온실가스 배출의 역사적 책임이 있는 선진국(Annex I, 38개국)[3]을 대상으로 제1차 공약기간(2008~2012년) 동안 일정수준의 감축을 규정하였다. 우리나라는 2002년도에 비준하였으며, 2009년 8월 현재 189개국이 비준한 상태이다.

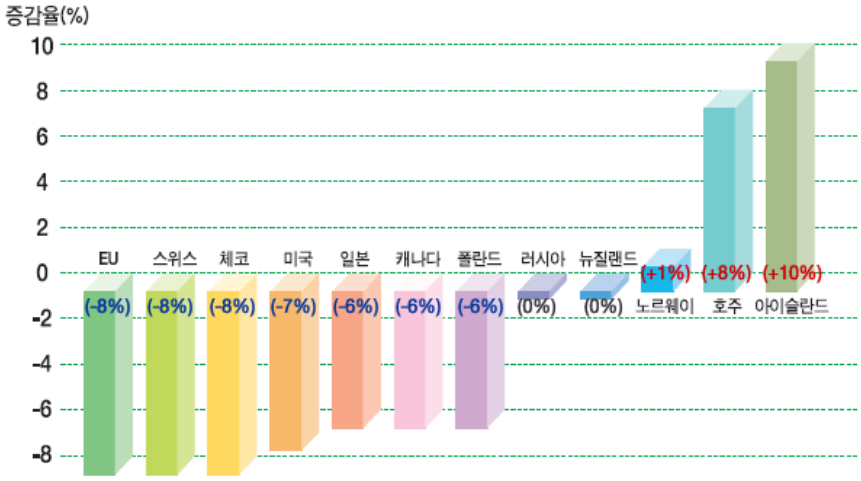
2.1. 교토의정서 주요내용

선진 국가(Annex Ⅰ)들의 구속력 있는 감축 목표는 2008년부터 2012년까지 자국 내 온실가스 배출 총량을 1990년 수준대비 평균 5.2%(각 국별

[3] Annex Ⅰ 국가 중 터키, 벨라루스 제외.

-8～+10%) 감축하는 것이다. 또한 교토 메커니즘을 통해 온실가스를 상품처럼 거래할 수 있도록 허용하였다. 구체적인 방법으로는 공동이행제도(JI), 청정개발체제(CDM), 배출권 거래제도(ET), 흡수원(Sinks) 등이 있으며, 국가 간 연합을 통한 공동 감축목표 달성을 허용한다.

그림 2-1. Annex I 국가의 온실가스 감축의무(1990년 대비)

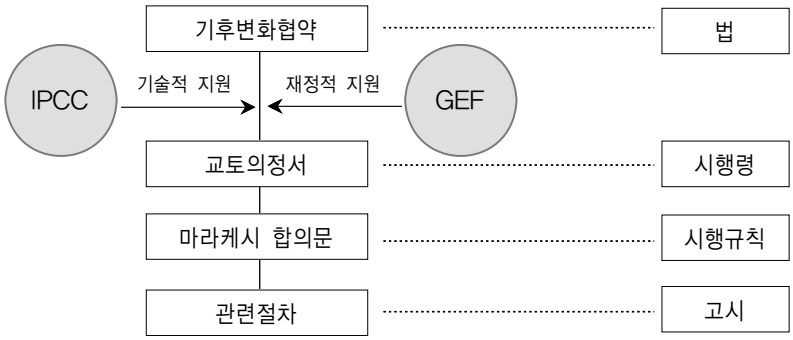


자료: 에너지관리공단.

2.2. 마라케시합의문과 교토메카니즘

마라케시합의문은 교토의정서의 구체적인 이행방안에 대한 합의로서 2001년 11월 제7차 당사국 총회에서 채택되었다. 주요내용으로는 교토 메카니즘의 이행을 위한 규칙 제시, 이행준수체제의 수립, 허용 가능한 토지이용, 토지이용변화 및 임업(LULUCF) 활동의 확정 등이다.

그림 2-2. 기후변화협약, 교토의정서 및 마라케시 합의문 비교



주: 지구환경기금 GEF(Global Environment Facility): 생물 다양성 보존협약, 기후변화협약 등 국제 환경협약상의 수혜국 및 세계은행, 국제개발협회, 국제연합개발계획 등 국제기구의 수혜대상국에 지원.
자료: 에너지관리공단 온실가스검증원.

공동이행제도(Joint Implementation: JI)란 온실가스 감축의무 국가[4]들 사이에서 온실가스 감축 사업을 공동으로 수행하는 것을 인정(교토의정서 제6조)하는 것으로서, 한 국가가 다른 국가에 투자하여 감축한 온실가스 감축량의 일부분을 투자국의 감축실적으로 인정하는 것이다. 특히 EU는 동부유럽국가와 공동이행을 추진하기 위하여 활발히 움직이고 있다.

청정개발체제(Clean Development Mechanism: CDM)란 교토의정서 제12조에 따라 “부속서 I 국가가 비부속서 국가인 개발도상국에서 온실가스 감축사업을 수행하여 달성한 실적의 일부를 선진국의 감축량으로 허용하는 것”을 말한다. 청정개발체제를 통하여 선진국은 온실가스 감축량을 얻고, 개발도상국은 선진국으로부터 기술 및 재정 지원을 받게 된다.

배출권 거래제도(Emission Trading: ET)는 온실가스 감축의무 국가가 의무감축량을 초과하여 달성하였을 경우 초과분을 다른 감축의무 국가와 거래할 수 있도록 허용한 것이다. 반대로 의무를 달성하지 못한 국가는 부족

4 기후변화협약 Annex Ⅰ 국가 중 터키, 벨라루스를 제외한 38개국으로 이들 국가의 배출한도 및 감축목표에 대한 목록이 교토의정서 부속서 B(Annex B)에 제시되어 있음.

분을 다른 감축의무 국가로부터 구입할 수 있다. 온실가스 감축분을 상품으로 사고팔 수 있게 함으로써 감축비용을 절감할 수 있음은 물론, 감축 관련 국제 기술시장을 확대시키고, CDM사업 등을 통해 간접적으로 개발도상국의 참여를 유도하는 등 여러 가지 효과가 발생하게 된다.

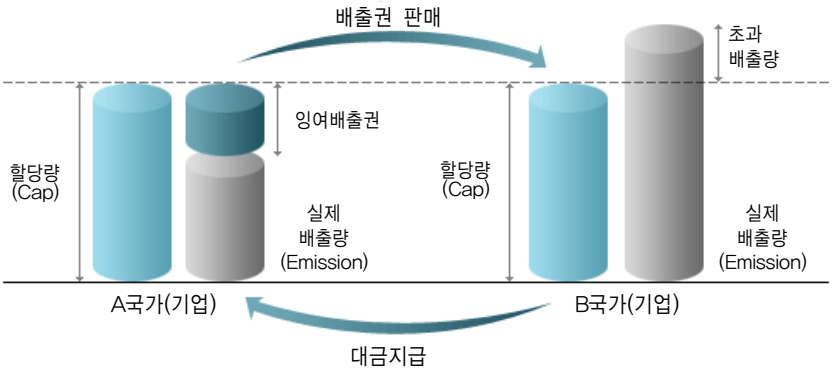
표 2-3. CDM 사업분야

1	에너지 산업	Energy Industries (renewable/Non-renewable sources)
2	에너지 공급	Energy distribution
3	에너지 수요	Energy demand
4	제조업	Manufacturing Industries
5	화학산업	Chemical Industries
6	건설	Construction
7	수송	Transport
8	광업/광물	Mining.Mineral production
9	금속공업	Metal production
10	연료로부터의 탈루성 배출	Fugitive emission from fuels (solid, oil&gas)
11	할로겐화 탄소, 6불화황 생산/소비	Fugitive emission from production And consumption of halocarbons And sulphurhexafluoride
12	용제사용	Solvents use
13	폐기물 취급 및 처리	Waste handling and disposal
14	조림 및 재조림	Afforestation and reforestation
15	농업	Agriculture

자료: 산림청(2009).

배출권의 유형으로는 AAU(Assigned Amount Unit), CER(Certified Emission Reduction), ERU(Emission Reduction Unit), RMU(Removal Unit) 등이 있다.

그림 2-3. 배출권 거래제의 개념



자료: 기후변화홍보포털(http://www.gihoo.or.kr).

표 2-4. 배출권의 종류와 특징

배출권	특징
AAU	- 교토의정서 Annex B 국가들에게 할당된 온실가스 배출권 - AAU를 달성하기 위한 배출권 거래가 이루어짐.
CER	- Annex B 국가와 개도국 간의 온실가스 감축사업인 CDM을 통해 발생되는 크레딧 - 투자국의 AAU에 영향을 주지 않는 추가 보너스 프로젝트에서 발생한 배출권
ERU	- Annex B 국가 간의 JI 사업에서 수행되는 온실가스 감축사업에 의한 감축실적 - 해당국가의 AAU와 RMU에 영향을 줌. - 유럽회원국의 할당량에 대한 포기(Surrender) 대신으로 일정 비율만 유입 허용 - 2008~2012년 기간 동안만 유효
RMU	- 교토의정서에 명시된 토지이용, 토지이용변화 및 산림활동에 대한 온실가스 흡수원에 의한 감축실적

자료: 산림청(2009).

탄소배출권의 거래시장은 일반적으로 할당량 거래시장(allowances market)과 프로젝트 거래시장(project-based market)으로 구분된다. 할당량 거래시장이란 온실가스 배출 허용량이 할당된 국가나 기업들이 할당량 대비 잉여분과 부족분을 거래하는 시장으로 EU-ETS(EU Emissions Trading Scheme), 미국의 CCX(Chicago Climate Exchange)가 대표적이다. 반면 프로젝트 거래시장은 온실가스 감축 프로젝트를 실시하여 거둔 성과에 따라 획득한 크레딧(Credit)을 배출권 형태로 거래하는 시장으로, 청정개발체제(CDM)와 공동이행제도(JI)가 대표적이다. 탄소배출권 시장(거래소)규모[5]는 2005년 108억 달러, 2006년 312억 달러, 2007년 630억 달러에 달했으며, 2010년에는 1,500억 달러 정도 될 것으로 추정된다.

우리나라도 2013년부터 탄소배출권 거래제를 본격적으로 도입할 계획이며, 총량제한배출권거래제(Cap&Trade) 도입을 기본전제로 하여 2009년 12월에는 녹색성장기본법을 제정하였고, 2010년 4월 들어서는 시행령 제정과 별도 배출권거래제법을 제정하는 등 관련법률 제정에 본격적인 박차를 가하고 있다.

3. Post-2012 기후변화협약과 산림의 역할[6]

3.1. 기후변화와 산림의 역할

기후변화는 산업혁명 이후 지난 100여년 동안 화석연료 사용이 급속히 증가함에 따라 온실가스가 증가하여 지구 복사열이 우주로 빠져나가지 못하고, 그로 인해 대기의 온도가 높아지는 현상을 말한다. 온실가스는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄

---

5 시장규모 및 전망치는 이지훈(2009)를 인용함.

6 산림청(2009), 서정호 외(2008) 자료를 요약정리한 내용임.

소(PFCs), 육불화황(SF_6) 등이 있으며, 이 가운데 이산화탄소(CO_2)가 전체 온실가스 배출량의 약 80%를 차지한다.

지구의 산림은 육지면적의 30% 정도이며, 나무의 생장과정에서 광합성을 통해 대기 중의 이산화탄소를 흡수하여 체내에 고정하는 온실가스 흡수원(sink)의 역할을 한다. 그러나 벌채나 산불, 산림전용 등으로 산림이 파괴되면 산림내에 저장되어 있던 탄소가 이산화탄소로 대기 중에 방출되어 산림은 오히려 온실가스 배출원(source)이 되기도 한다.

이와 같이 산림은 직·간접적으로 온실가스 흡수원 혹은 배출원 역할을 하면서 지구온난화 등 지구 대기온도변화에 있어 결정적인 영향을 미친다. 기후변화협약에서는 지구온난화를 막기 위해 산림의 중요성 및 역할을 강조하고, 산림 흡수원을 보호하고 늘리는 활동을 국제사회에 요구하고 있다. 우리나라는 산림의 비율이 높은 국가이므로 산림을 보호하고 관리하는 것은 지구온난화 방지에 있어 중요하다. 따라서 온실가스의 흡수원인 산림을 확대함과 동시에 무분별한 산림파괴와 산불, 병충해 등을 막아 흡수원을 보호하는 노력이 요구된다.

3.2. 산림을 활용한 기후변화 완화방안

산림을 이용한 기후변화 완화방안에는 재조림과 신규조림을 통하여 탄소흡수원을 확충하는 방법, 효율적인 산림경영을 통하여 탄소흡수를 최대화하는 방법 등이 있다. 이 밖에 산림바이오매스의 이용을 확대하여 화석연료 사용을 줄임으로써 탄소배출을 억제할 수 있다. 또한 건축이나 토목공사의 원료로 이용되는 목제품을 확대하여 탄소저장고를 늘리며, 동시에 탄소배출을 저감하는 방법이 있다.

3.2.1. 숲가꾸기

숲가꾸기란 지속가능한 산림경영의 기본 원칙에 따라 생태적으로 건전한 산림을 육성하고 우리 사회의 지속가능한 발전을 위하여 산림의 공익적, 사회·경제적 이익이 최적으로 발휘되도록 산림을 보전하고 관리하는 것을 의미한다. 숲가꾸기 작업으로는 어린나무가꾸기, 덩굴치기, 가지치기, 간벌, 병해충방제 등이 있다.

이러한 숲가꾸기는 건전한 산림 육성을 통한 산림의 환경적·경제적 기능 향상을 목적으로 하는 공공적 국가사업으로 인정받아 현재까지 수행되어 왔으며, 숲가꾸기 사업에 따른 탄소배출권은 교토의정서 상 온실가스 감축을 위한 산림경영활동으로 인정되고 있다. 따라서 숲가꾸기 사업은 산림의 공익기능 향상 및 탄소배출 감축의무의 부담을 감소시키는 국가사업으로서 그 당위성이 확대되고 있으며, 숲가꾸기를 통해 발생된 경제적, 사회적, 환경적 효과는 <그림 2-4>와 같다.

표 2-5. 숲가꾸기 사업을 통한 탄소감축 효과

활동/효과	과정	효과
바이오에너지 이용	석탄, 석유 사용감소	온실가스 배출 감축
목제품 이용	저가공 에너지, 원자재	온실가스 배출 감축
산림 건강성 향상	병충해/산불에 강해짐	온실가스 배출 감축
대경재 생산 가능	내구성 목제품 생산	탄소 저장량 증가

자료: 서정호 외(2006).

그림 2-4. 숲가꾸기의 경제적, 사회적, 환경적 효과

자료: 서정호 외(2006).

3.2.2. 목제품 사용

목제품(wood products)은 산림에서 생산한 나무를 사용하여 만든 제품으로 목조건축을 위한 재료나 가구, 합판, 종이 등의 원료로 사용된다. 아울러 숲가꾸기 사업의 산물로 발생된 간벌재는 목재칩이나 목재펠릿 등 목재연료로 활용할 수 있다.

나무를 잘라 목제품을 만들면 나무에 저장되어 있는 탄소는 목제품이 썩거나 불에 타서 없어질 때까지 저장된다. 동시에 산에는 탄소를 흡수하는 능력이 떨어진 나이 든 나무를 잘라내고 어린 나무를 심어 흡수원을 늘릴 수 있다. 그러므로 나무를 잘라 목제품을 만드는 것은 탄소를 바로 배출하는 것이 아니라 탄소를 저장하는 것으로 볼 수 있다.

아직까지 기후변화협약에서 목제품은 탄소계정에 포함되지 않고 있다. 그러나 향후 협상 결과에 따라 목제품 및 목재연료의 사용이 우리나라의 탄소 배출권에 중요하게 영향을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

3.2.3. 산림바이오매스의 화석연료 대체

나무는 오랫동안 장작, 숯과 같이 연료재로 사용되어 왔으나 현재에는 나무를 이용하여 다양한 연료를 개발하고 있다. 산림에서 얻을 수 있는 지속가능한 천연 자원을 이용하면 화석연료 과다 사용에 따른 지구온난화 현상 극복, 석유 고갈시 필요한 에너지 원료의 다원화, 그리고 산림의 고부가가치화를 이룰 수 있다.

우리나라에서 목재연료로 활용하기 쉬운 산림바이오매스는 숲가꾸기 산물이며, 현재 이용되고 있는 숲가꾸기 산물은 전체의 약 14% 수준에 불과하고 나머지는 산림에 방치되어 이용되지 못하고 있다. 또한 매년 막대하게 버려지는 생활 폐목재, 건축 폐자재 등도 유용한 바이오매스 자원이다. 이들을 효과적으로 수집하고 이용한다면 국내 산림바이오매스 공급을 확충할 수 있고 다양한 에너지원으로 사용할 수 있다.

3.3. 기후변화협약하의 산림관련 논의 동향

기후변화협약에서 산림의 중요성이 부각된 것은 1997년 12월 제3차 당사국총회인데, 교토의정서를 채택하는 과정에서 산림 등을 온실가스 흡수원으로 인정하였기 때문이다. 지구탄소순환에서 토지이용 변화와 산림의 탄소고정기능의 중요성이 인식되면서 '토지이용, 토지이용변화 및 임업(Land Use, Land-Use Change and Forestry: LULUCF)'과 '산림전용 및 산림황폐화방지로부터 탄소 배출 감축(Reduced Emissions from Deforestation and forest Degradation: REDD)'은 중요한 국제적 산림 이슈로 주목받기 시작하였다. IPCC 특별 보고서에 따르면 1850～1998년까지 화석연료 연소와 시멘트 생산으로 270±30 Gt의 탄소가 배출되었는데, 토지이용변경으로 배출된 탄소량이 136±55 Gt이며, 토지이용변환 중 산림전용이 약 87%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 적절한 토지이용, 토지이용변화 및 임업 활동은 효과적으로 온실가스를 감축할 수 있는 방안이다.

표 2-6. 기후변화협약 당사국 총회 산림관련 주요 동향

COP-3('97) 쿄토	• 신규조림, 재조림, 산림전용 활동과 기존의 산림을 경영하는 산림 경영활동에 따른 온실가스 흡수/배출을 감축의무 이행하는 데 사용할 수 있게 함. • 흡수/배출량의 계정은 공약기간 동안의 대상 활동지의 탄소 축적 변화량으로 평가
COP-7('01) 마라케시	• 산림 등 흡수원 활동과 관련된 용어 정의, 산림에서의 온실가스 흡수/배출 통계조사 및 보고 규칙 채택 • 신규조림, 재조림, 산림전용 활동의 적정방식 규칙 및 지침을 정하고 산림경영 활동의 인정 범위 계정방법 및 국가별 상한선 채택 • 탄소배출권확보를 위한 개도국과의 공동프로젝트CDM) 인정 활동범위, 신규조림 및 재조림 및 인정 상한선 채택
COP-9('03) 밀라노	• 신규조림 및 재조림 부문 CDM 사업을 위한 형식 및 절차 등에 관한 합의 도출 • 교토의정서에 따른 온실가스 통계보고 검증에 있어 기본적으로 IPCC 우수실행지침을 따르기로 합의
COP-10('04) 부에노스아이레스	• 산림부문에 있어서 온실가스 통계작성 보고지침인 IPCC 우수실행지침의 구체적 적용 방법 및 개도국과의 소규모 신규조림, 재조림 청정개발체제 기준과 절차 등 방법론 이슈에 대하여 최종 합의
COP-11('05) 몬트리올	• 2006~07년 과학기술자문 부속기구회의에서 개도국 산림전용으로 발생하는 온실가스 배출량 감축에 대하여 논의하기로 결정
COP-13('07) 발리	• 개발도상국의 산림전용 및 산림황폐화 방지로부터 탄소배출 감축(Reduced emissions from deforestation and forest degradation: REDD)을 Post-2012 기후변화협약 의제로 결정
COP-14('08) 포즈난	• REDD 범위 확장(REDD+)

자료: 산림청(2009).

3.4. 교토의정서와 산림활동

교토의정서에는 제1차 공약기간(2008~2012년)에 탄소배출권으로 인정될 수 있는 산림활동을 1990. 1. 1～2012. 12. 31 기간 동안 행해진 신규조림, 재조림, 산림전용 및 산림경영활동이라고 명시하고 있다. 신규조림과 재조림, 산림전용의 탄소흡수/배출량은 100% 인정한다. 그러나 산림경영활동은 15%만을 흡수량으로 인정하며, 기준연도 배출량의 3%를 상한으로 정하였다. 해외조림을 통한 청정개발체제의 경우 1% 상한으로 정하였다.

표 2-7. 산림활동의 탄소배출권 인정범위

구분	신규조림/재조림	산림경영활동
국내활동	양적제한 없음.	제1차 공약기간(2008～2012) 동안 국내분과 공동이행분 합계에 대해 기준연도 총배출량의 3% 상한
공동이행제도 (JI)	양적제한 없음.	
청정개발체제 (CDM)	제1차 공약기간에는 기준연도 총배출량의 1% 상한	제1차 공약기간에는 인정되지 않음.

자료: 산림청(2009).

교토의정서의 실행규칙격인 마라케시합의문에는 탄소배출권을 인정하는 산림경영에 대해 '지속가능한 방법으로 산림의 생태적, 경제적, 사회적 기능을 발휘하게 할 목적으로 임지(林地)를 관리하고 이용하기 위한 시업(施業)시스템'이라고 정의한다. 그러나 이는 개념적인 정의라서 실제 적용은 매우 어렵다. 교토의정서에 따른 보고 방법을 정해 놓은 우수실행지침(Good Practice Guidance: GPG)에 의하면 협의로는 '1990년 이후 일정한 시업을 행한 산림(숲가꾸기사업지, 병해충방제사업지 등)'을 말하며, 광의로는 '일정한 시업체계를 적용하도록 되어 있는 산림(산불방지 등 정책이 미치는 산림영역, 산림경영계획에 의하여 관리되고 있는 산림 등)'을 의미하고 있다. 따라서 우리나라가 산림부문에서 탄소배출권을 정당하게 인정받기 위해서는 협의 또는 광의의 방법 중 유리한 방법을 선택하여야 한다.

3.5. 온실가스 통계와 탄소배출권

기후변화협약 당사국들은 온실가스 국가통계를 작성하고 정기적으로 갱신 및 공표하며 당사국총회에 통보하도록 되어 있다. 부속서 I 국가는 협약이 발효한 후 6개월 이내에 최초로 통보를 하고, 그 밖의 당사국은 3년 이내에 최초로 통보해야 한다(기후변화협약 제4조). 우리나라는 1998년에 최초로 보고하였고, 2003년에 제2차 보고서를 제출한 바 있다.

기후변화협약 당사국들은 협약 이행에 따른 온실가스 배출원 및 흡수원에 대한 제반 통계작성을 IPCC에서 정하는 기준과 지침에 따르도록 합의하였다. IPCC는 1996년에 통계지침서인 「1996가이드라인」을 발표하였고, 이어서 2000년에 가이드라인을 다시 발행하였으나 산림부문은 2003년에 발행하였다. 2006년에 다시 발표한 「2006가이드라인」에는 2003년에 게재되지 않았던 목제품탄소계정 방법론을 포함하였다.

산림흡수원의 탄소배출권을 인정받으려면 IPCC 가이드라인에 따라 신규조림, 재조림, 산림전용, 산림경영활동 등이 언제, 어디서, 어떻게 이루어졌는지에 대한 모든 정보를 UNFCCC에 제출해야 한다. 그러므로 산림을 가꾼 기록과 산림을 다른 용도로 전환한 기록 등에 대한 데이터베이스를 구축하는 것이 필요하다.

표 2-8. 연도별 가이드라인의 주요 내용

구분	주요내용
IPCC 1996 가이드라인	에너지 등 산업부문의 배출량 산정
IPCC 2000 가이드라인	에너지 등 산업부문의 배출량 산정
IPCC 2003 가이드라인	산림 및 산림경영활동에서의 배출/흡수량 산정
IPCC 2006 가이드라인	목제품탄소계정 방법론 추가

자료: 산림청(2009).

지금까지 우리나라는 산림자원조사를 통하여 수집된 나무줄기의 부피자료를 통계에 반영하였으며, 단위는 입목축적(㎥)으로 표시해 왔다. 그러나 탄소흡수량 산출 시에는 나무 전체를 대상으로 한다. 따라서 기존의 통계자료를 이용하여 탄소흡수량을 계산하기 위해서는 줄기의 부피를 나무 전체의 무게로 환산하는 계수, 즉 확장계수를 나무의 종류와 나이별로 구분하여 적용하여야 한다. 또한 나무로부터 나온 낙엽층과 토양의 유기물 탄소도 국가산림자원조사를 통해 측정하고 평가해야 한다.

표 2-9. 연간 ha당 탄소흡수량

단위: tC/ha

수종 \ 임령	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
강원지방 소나무	2.12	2.22	2.28	2.29	2.28	2.25	2.20	2.15	2.09	2.02	1.96
중부지방 소나무	1.40	1.90	2.09	2.12	2.05	1.95	1.83	1.72	1.62	1.52	1.43
잣나무	1.68	1.88	1.98	2.02	2.03	2.01	1.99	1.95	1.91	1.87	1.83
낙엽송	2.58	2.62	2.62	2.60	2.57	2.54	2.50	2.47	2.44	2.41	2.38
리기다 소나무	1.74	2.03	2.17	2.21	2.19	2.12	2.05	1.96	1.88	1.80	1.72
편백	1.56	1.70	1.77	1.79	1.77	1.74	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50
상수리 나무	2.71	2.85	2.91	2.92	2.91	2.88	2.85	2.80	2.76	2.71	2.66
신갈나무	2.94	2.86	2.72	2.61	2.52	2.43	2.35	2.27	2.21	2.15	2.09

자료: 산림과학원(2009).

산림과학원에서는 벌채량과 조림량을 가감하여 계산한 연간 임목축적으로 우리나라 산림의 이산화탄소 흡수량을 산출하였다. 그 결과 2006년 기준으로 전체 산림이 흡수한 이산화탄소 총량은 4,130만tCO_2이며, 배출량은

550만tCO_2로 순 흡수량이 약 3,600만tCO_2인 것으로 나타났다.

수확된 목제품(Harvested Wood Products: HWP) 탄소계정의 경우 제1차 공약기간에 포함되지 않았다. 즉 목제품의 탄소 저장을 인정하지 않았던 것이다. 그러나 제2차 공약기간에 대비하여 목제품에 포함된 탄소를 계정하는 방법에 대해 논의가 활발하게 진행되고 있다. IPCC에서도 2006년 가이드라인에 목제품 탄소계정 방법을 제시하였다. 여기에는 어느 산림에서 나무를 잘랐는지, 어느 나라에서 목제품을 만드는지, 어느 나라에서 사용하는지, 어떤 용도로 사용하는지 등에 대한 정보를 포함하고 있다.

IPCC 우수실행지침(GPG) 2006에는 토지이용, 토지이용변화 및 임업활동(LULUCF) 평가가 개정되어 이전의 1996 IPCC 가이드라인 및 GPG 2000을 바탕으로 농업과 산림분야가 새로운 가이드라인 '농업, 임업 그리고 기타 토지이용(AFOLU: Agriculture, Forestry and Other Land Use)'으로 통합되었다. 이는 각 탄소저장고와 Non-CO_2 배출의 추정방법, 흡수/배출계수, 활동자료의 선택 및 불확실성 평가 그리고 완전성, 시계열, 품질보증 및 품질관리, 보고 및 문서화 등을 주요 내용으로 담고 있다. 특히 산림경영활동의 탄소계정방법에 따라 Post-2012 LULUCF 협상 대안으로 Gross-Net 계정방법, Net-Net 계정방법, 베이스라인 설정 계정방법, 토지기반 계정방법 등의 4가지 방법이 제시되었다.

개도국 산림전용방지를 통한 온실가스 감축(REDD)은 산림 전용 방지를 통해 온실가스 감축을 시도하는 방법으로 재정적인 인센티브가 뒤따른다. REDD 활동을 통해 감축된 탄소량은 탄소 시장에서 거래가 가능한 배출권으로 인정받는다. 따라서 REDD 배출권은 개발도상국의 산림전용을 줄이기 위해 선진국이 개발도상국을 재정적으로 지원할 수 있는 구조를 갖추고 있다. 개발도상국들은 산림 손실로부터 발생하는 탄소배출량을 감축하는데 크게 기여할 수 있다. 제14차 당사국총회 (2008년, 폴란드 포즈난)에서는 REDD 활동의 범위를 확대하였는데 산림전용 및 산림황폐화 방지뿐만 아니라 산림 탄소 축적 보존, 지속가능한 산림 경영, 조림과 산림 복원을 통한 산림 탄소 축적 증진 부문에 대해서도 재정적 보상이 이루어질 수 있도록 하였다. 이와 같이 확장된 REDD의 개념을 REDD+라고 한다. 확대된

개념인 REDD+하에서는 산림을 효과적으로 보호한 국가들 또한 이익을 가질 수 있다. 산림을 기반으로 하는 지역사회의 지속가능한 활동에 대해서도 인정받고 보상받을 수 있을 것이다.

선진국의 산림부문 기후변화협약 대응과 시사점 제3장

1. 일본의 산림부문 기후변화협약 대응[7]

1.1. 기후변화협약에 대응한 일본의 산림정책

일본의 기후변화대책은 1990년의 '지구온난화방지 행동계획'으로 거슬러 올라갈 수 있지만 1997년 교토의정서가 채택된 후 본격화되었다고 볼 수 있다. 교토의정서에 따르면 일본은 부속서 I 에 해당하는 국가로서 1990년 기준 온실가스 배출비중은 8.5%(기준연도: 1,197,474 $GgCO_2$)이며, 1차 공약기간 동안 기준년도 대비 6%의 온실가스 감축의무를 지고 있다. 이 중 3.9%에 해당하는 1,300만 tC를 산림 관련 활동에서 감축하려는 목표를 설정하였다. 이 목표를 달성하기 위하여 '교토의정서 목표달성 계획'을 근거로 지구온난화 방지 대책을 추진함과 동시에 이를 위한 기본법으로 '지구온난화 대책 추진에 관한 법률'을 비롯한 관련 법령을 제정하였다.

6%의 감축 의무중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 산림 관련 활동을 통한 감축을 위하여 2002년 10월 '지구온난화 방지 산림흡수원 10개년 계획'을 공표하였으며, 주요 내용은 다음과 같다.

---

7 산림청(2009)를 요약 정리한 내용임.

1.2. 산림흡수원 10개년 계획의 주요내용

1.2.1. 건전한 산림정비 추진

각 지역별로 효율적인 산림의 정비를 실시하기 위한 행동계획을 작성하여 육성복층림시업, 장벌기시업 등에 의한 다양하고 건전한 산림정비를 추진하고 있다. 도도부현이 시정촌과 연대하여 산림소유자, 산림조합, NPO 등의 산림정비 활동을 지원해 줌과 동시에 산림정비를 착실히 실시하기 위한 계몽활동도 추진하고 있다.

1.2.2. 보안림의 적절한 관리·보전 추진

법령에 기초하여 벌채·전용규제 등의 보호·보전조치가 취해져 있는 보안림 전체에 대하여 지정목적에 따른 기능이 지속적으로 확보되도록 관리·보전 대책을 추진하고 있다.

1.2.3. 목재 및 목질바이오매스 이용 촉진

산림정비를 통하여 발생하는 산물에 대하여 주택 및 공공부문 등에서 이용을 촉진하며, 폐잔재, 제재공장 폐잔재 등에 대한 목질 바이오매스 이용을 촉진하고 있다.

1.2.4. 국민참가에 의한 산림조성 등의 추진

지구온난화방지를 비롯한 산림이 가진 다면적 기능을 지속적으로 유지하기 위하여 임업관계자뿐만 아니라 다양한 주체로 구성된 산림볼런티어 활동을 지원·촉진하는 시책을 실시하고 있다.

1.2.5. 산림흡수량 보고·검증체제 정비

산림에 의한 흡수량의 산정은 교토의정서 등의 규정에 따라 투명하고 과학적 검증이 가능한 방법으로 시행하게 되어 있지만, 일본의 현상은 아직 충분히 대응할 수 있는 상황은 아니다. 따라서 산림흡수원 데이터 구축을 위한 현지 정밀조사, 검증 및 데이터 처리시스템 등을 개발하며 정비하고 있다.

1.3. 일본의 숲 정비사업 및 보조

교토의정서에서 산림흡수원으로 인정되는 육성림은 “산림을 적절한 상태로 유지하기 위해서 1990년 이후 시행되는 산림시업(지존, 정리), 보육(풀깎기, 가지치기 등), 간벌, 주벌을 하고 있는 산림”으로 정의하였다. 따라서 일본은 육성림 면적의 확대를 통해 산림흡수량을 확보하기 위해 2008년 ‘산림 간벌 등의 실시 촉진에 관한 특별 조치법’을 공포하였으며, 2012년까지 집중적으로 간벌을 추진하고 있다.

표 3-1. 일본의 간벌 실적

	간벌실적(천ha)			간벌재이용량(백만㎥)					
	합계	민유림	국유림	합계	민유림				국유림
					소계	재목	통나무	원자재	
’07	521,521	395,395	126,126	537,537	344,344	214,214	4,747	8,383	193,193
’08	548,548	434,434	114,114	566,566	368,368	226,226	3,939	103,103	198,198

1) 간벌 실적은 산림 흡수원 대책의 실적으로 파악한 수치임.
2) 간벌재 이용량은 통나무 재적으로 환산한 양(추정치)임.
3) 재목은 건축 자재, 포장재 등임.
4) 통나무는 통나무 발판, 지주 등임.
5) 원재료는 나무 조각, 톱밥 등임.

자료: 일본 임야청.

일본은 산림 흡수량 목표인 1,300만 Ct(1990년 총 배출량 대비 약 3.9%) 달성을 위해 2007년부터 2012년까지 6년간 매년 55만ha, 총 330만ha의 간벌을 목표로 설정하였으며, 2007년에 52만ha, 2008년에 약 55만ha의 간벌을 완료하였다.

1.4. 그 밖의 산림관련 정책

1.4.1. 산림정비·보전을 위한 산림환경세 도입

최근 일본의 지방자치단체에서는 세계적인 물 부족의 심각성과 함께 지구온난화문제에 대응하는 한 방편으로써 산림의 공익적 기능이 주목받고 있다. 이를 배경으로 도도부현 수준의 지방자치단체가 독자적으로 산림정비나 수원환경 보전 등을 목적으로 한 산림수원환경세를 도입하는 사례가 증가하고 있다. 산림수원환경세는 2003년 4월에 고치현에서 '산림환경세'로 도입된 이후 2008년 현재 29현에서 도입하였다.

1.4.2. 기업참여를 통한 산림정비·보전활동

최근 기업의 사회적 책임(Corporate Social Responsibility: CSR)에 대한 관심이 높아지고 있으며 산림의 정비와 보전도 CSR 활동분야에 포함된다. 일본의 산림볼런티어단체는 2006년 1,863개에 달하였으며 기업들이 이들 단체의 활동자금이나 활동장소를 지원하고 있다.

1.4.3. 국유림 '법인의 숲' 제도

기업과 국가가 공동으로 산림을 조성·육성하고 벌채 후에 수익을 일정 비율(7:3)로 나누는 제도이다. 인공림을 대상으로 하지만 천연림을 대상으로 벌채하지 않는 것을 전제로 하여 계약하는 것도 가능한데, '분수(分收)

육림'과 '분수조림'의 두 가지 제도가 있다. '법인의 숲' 제도에 참여하는 기업은 이산화탄소 흡수량, 수원함양, 국토보전 등 산림조성활동의 환경공헌을 그린마케팅으로 활용할 수 있고, '법인의 숲' 계약지를 체험활동이나 삼림욕 장소로도 이용이 가능하다.

1.4.4. 목재 사용확대 정책

일본은 국산재 자급률이 20% 정도에 불과하다. 이산화탄소를 장기간에 걸쳐 흡수·고정시키는 목재의 이용을 확대하기 위하여 국산재 보급 활동인 '목재사용운동'을 2005년부터 실시 중이다.

1.5. 일본의 산림 탄소계정체계[8]

일본의 탄소배출 감축 목표는 기준연도인 1990년 배출량 대비 6%이며, 그중 3.9%에 해당하는 1,300만 Ct을 산림 관련 활동에서 감축하는 목표를 설정하였다. 따라서 산림경영에 의해 인정받을 수 있는 탄소배출권의 잠재력이 일본의 감축의무이행에 큰 비중을 차지한다. 현재 교토의정서에 대응한 산림경영에 의한 흡수량 산정 방법은 다음과 같은 순서를 따르도록 되어 있다.

1.5.1. 산정절차

1) 단계 1 : 지방별로 일정 구역을 단위로 하여 산림경영이 시행되는 산림을 지정한다. 즉, 구역 내 산림을 산입대상 산림, 산입대상 외 산림으로 구분한다.
   - 대상이 되는 산림(산입대상 산림):

---

8 이경학 외(2006) 자료를 요약 정리함.

· 육성림으로 필요한 시업과 관리가 실시되고 있는 산림(시업 등은 누가 실시해도 무방)
· 천연림 가운데 보안림 등으로 적절히 관리 중인 산림(보안림은 법에 준거하여 적절히 관리되어야 함.)
- 대상이 되지 않는 산림(산입대상 외 산림)
· 육성림으로 시업 등이 불충분한 산림
· 천연림·보안림 등으로 적절히 관리되지 않는 산림
· 간벌이 늦춰져 건전성이 저하된 산림
· 필요한 시업 등이 시행되면 산입대상 산림에 편입
- 대상이 될 수 없는 산림(대책대상외 산림)
· 계속적 시업 및 경상적 관리 대상이 아닌 천연림

2) 단계 2: 지방별로 지정된 산림에 관한 탄소흡수 고정량 기초자료를 집계하여 국가에 제출한다.
- 산림부(森林簿) 정보 및 생장예상표 계산에 의해 수종, 임령(林齡) 등의 임상별 면적, 축적, 수간재적 생장량을 조정하며 벌채량을 집계한다. 여기서 생장예상표는 지역별, 토양 등에 따른 임지구분별, 수종별 연령 및 표준재적 정도를 표시한 것으로, 지역단위의 산림 축적 변화를 산출할 때 이용된다.

3) 단계 3: 지방에서 수집한 데이터를 기초로 전국의 탄소흡수 저장량을 계산한다.
- 전국 각지로부터 모여진 데이터 중 수간재적 생장량과 목재공급량(벌채량)을 이용하여 흡수량을 산정한다.
· 탄소흡수고정량 = 임목재적생장량 × 가지와 뿌리를 합한 목재의 비율 × 부피당 건조중량 × 건조중량 당 탄소비율
· 의정서 상 탄소흡수량 = 탄소흡수량 − 목재공급량(탄소환산)

표 3-2. 일본의 산림경영활동에 따른 온실가스 통계추정 체계

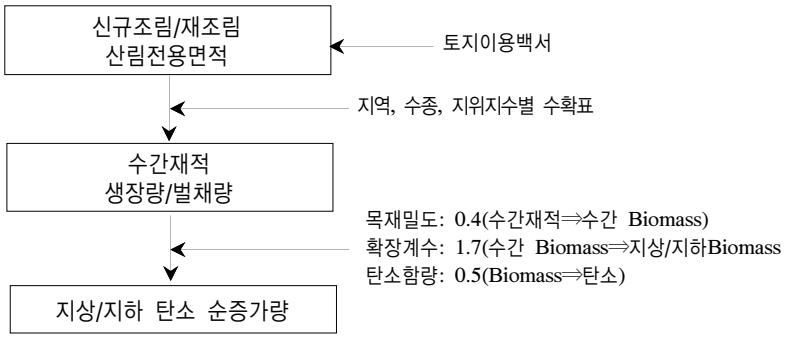
지역별 산림경영활동 대상 산림 구분
- 육성림 중 시업 및 관리 실행 산림 - 천연림의 보안림 중 관리실행 산림
지역별 대상산림에 대한 관련자료 집계·수집
- 산림부 및 생장예정표 이용 - 임상별, 영급별 재적생장량, 벌채량 등
국가 수준의 탄소흡수량 계산
- 탄소총흡수량＝재적생장량×탄소확장계수 - 의정서 상 탄소흡수량＝탄소총흡수량－벌채량(탄소환산)

자료: 이경학 외(2006).

1.5.2. 신규조림/재조림, 산림전용의 탄소계정

먼저 신규조림/재조림, 산림전용 면적에 수확표를 적용하여 활동별 수간재적 생장량 및 벌채량을 구하게 되고, 여기에 목재밀도, 확장계수 및 탄소함량비를 곱하여 지상부와 지하부를 포함한 수목 전체의 탄소증가량 혹은 감소량을 구한다. 이 방법은 산림자원 현황조사에 따라 완전한 계산이 이루어지기 때문에 불확실성이 낮다.

그림 3-1. 일본의 신규조림 및 산림전용에 따른 탄소변화량 추정체계

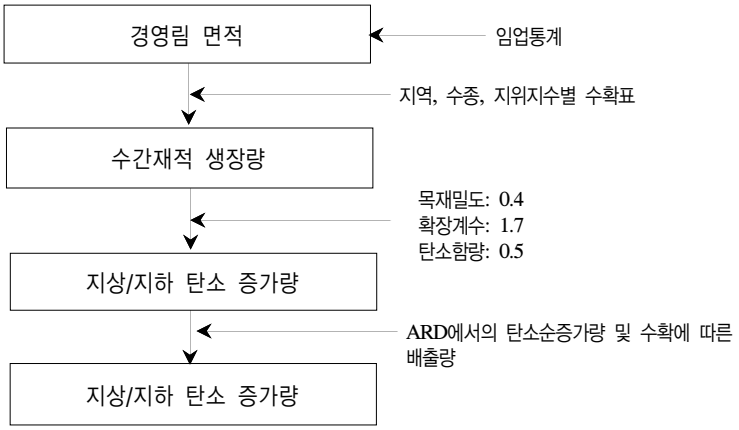


자료: 이경학 외(2006).

1.5.3. 산림경영의 탄소계정

먼저 경영림 면적을 임업통계로부터 얻는다. 여기에 수확표, 목재밀도, 확장계수 및 탄소함량비 등을 곱하여 탄소 증가량을 구하고, 수확벌채에 따른 배출량과 산림에서의 증가량을 제외한 것이 순수하게 산림경영에 의한 탄소순증가량이다. 일본의 임업통계는 산림조사부에 의해 얻어지는 것이므로 완전한 계산이라고 볼 수 있어 불확실성이 떨어지나, 통계적인 표본추출방법이 아니기 때문에 오차율을 구할 수 없다는 단점이 있다.

그림 3-2. 일본의 산림경영에 따른 탄소변화량 추정체계



자료: 이경학 외(2006).

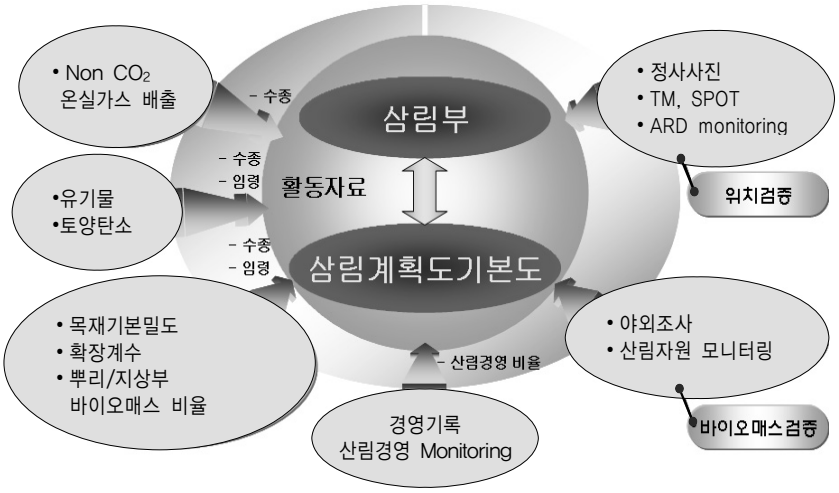
1.5.4. 국가산림자원 DB 구축 연구

교토의정서 상 보고가 요구되는 온실가스 통계 관련 정보인 면적, 축적량(생장량), 확장계수, 용적밀도 등 흡수량 산정에 필요한 정보와 ARD(afforestation, reforestation, deforeatation), 산림경영에 관한 위치정보, 시업이력, 보조사업 등 90년 이후 산림경영을 유추할 수 있는 정보, 교차 검정, 불확실성 평가 등 질적 평가 및 제어(Quality Assessment/Quality Control) 정보를 구축

하기 위하여 국가산림자원 데이터베이스가 필요하다. 따라서 <그림 3-3>과 같은 체계로 DB구축 활동이 이루어지고 있다.

산림자원 DB에는 삼림부의 행정자료가 포함되며, 삼림계획도, 기본도 등 수치 지도자료도 포함된다. 원격탐사자료는 정사사진, Landsat TM, 그리고 산림자원 모니터링 조사구 자료 등도 포함되어 있다.

그림 3-3. 일본의 국가 산림자원 DB 체계



자료: 이경학 외(2006).

2. EU의 산림부문 기후변화협약 대응

2.1. EU의 기후변화협약

EU는 기후변화협약에 가장 적극적으로 대처하는 지역이다. 이는 EU의 경제력이 타 지역보다 우위에 있고 지구온난화에 의한 영향을 가장 심하게 받기 때문인 것으로 생각된다. 교토의정서 상 EU(15개국)는 부속서 I 에 해

당하며 1990년 기준 온실가스 배출 비율은 24.2%에 달한다. EU에서의 기후변화대응 정책 및 방안은 각 회원국 수준과 유럽연합 수준에서 별도로 준비되며, 유럽연합 수준에서의 핵심정책은 유럽 기후변화 프로그램(European Climate Change Programme: ECCP)에서 규정하고 있다.

EU는 2008년 12월 합의된 '기후 및 에너지 패키지'를 통해 2020년까지 이산화탄소 배출한도를 1990년 기준 20% 감축하기로 합의한 데 이어, 2009년 12월 덴마크 코펜하겐 총회에서 가장 높은 수준의 목표치를 공식 발표함으로써 다른 협상 당사자들을 압박하였다. 이는 탄소배출권 시장을 비롯해 다양한 환경 관련 산업들을 장기적인 성장동력으로 삼겠다는 목표에서 나온 것이다. 이미 유럽연합은 온실가스 감축과 친환경산업 지원에 있어 국제 경쟁력을 확보했으며, 기후변화 협상을 통해 미국과 아시아의 경쟁국들보다 앞서나가겠다는 의도를 갖고 있다.

표 3-3. EU 소속국가들의 1990년 대비 온실가스 의무감축량

국가	감축률	국가	감축률
오스트리아	-13.0	이탈리아	-6.5
벨기에	-7.5	룩셈부르크	-28.0
덴마크	-21.0	네덜란드	-6.0
핀란드	0.0	포르투갈	27.0
프랑스	0.0	스페인	15.0
독일	-21.0	스웨덴	4.0
그리스	25.0	영국	-12.5
아일랜드	13.0		
유럽연합			-8.0

자료: 박선희(2008).

2.2. 영국의 지속가능한 산림정책[9]

영국의 에너지 소비에 따른 이산화탄소 배출은 약 5억 4,000만 톤으로 전 세계 배출량의 약 2%를 차지하며, 1인당 배출량은 개도국에 비하여 월등히 높은 수준이다. 영국은 현재 교토의정서 부속서 I 국가로 1990년 대비 12.5%의 감축의무를 지고 있다.

탄소감축을 위하여 지속가능한 임업정책을 펴고 있으며, 주요내용은 지속적인 목재연료 공급체인을 개발하고 지속가능한 개발에서 목재가 가지는 재생자원으로서의 역할을 증진시키는 것이다. 영국은 임지지원제도(England Woodland Grant Scheme)하에서 현재의 수준으로 조림이 계속해서 이루어진다면 2006~2020년 기간에 350만 Ct이 감축될 것이라 예상하고 있다. 또한 재생가능한 에너지 생산을 위하여 단기윤작 버드나무 잡목림 조성을 촉진하는 에너지작물 단기윤벌 펀드(Challenge Fund for Short Rotation Coppice Energy Crops)를 2004년부터 운영하고 있다.

2.2.1. 에너지 작물 지원제도(Energy Crops Scheme: ECS)

에너지 작물 지원제도는 재배조성에 대한 지원과 주체에 대한 지원, 즉 임지조성 지원(Establishment grants)제도와 생산자 조직지원(Producer Group) 제도가 있다.

가) 임지조성 지원제도

- 지원작물: 단기순환목(SRC; Short Rotation Coppice, 버드나무와 포플러)과 억새류(Miscanthus)
- 지원대상: 작물재배를 위한 묘목의 구입, 식재, 육림 등의 비용을 조성 첫해에 지원

---

9 산림청(2009)을 요약 정리한 내용임.

- 지원금액: 단벌기 맹아림의 경우 1,000파운드/ha, 억새류의 경우 920파운드/ha 지원

표 3-4. 영국의 임지조성 지원제도

지원작물	보조금 지원	지원내용	조건
단벌기 맹아림 (버드나무와 포플러)	1,000£/ha ~1,600£/ha	· 묘목구입, 식재, 육림 등의 비용을 조성 첫 해에 지원 · 목초지 조성시 더 높은 지원율	· 최종적 에너지로 이용한다는 증명이 필요 · 최종 이용자는 작물로부터 일정 거리 내에 있어야 함. - 소형시설: 10마일 이내 - 발전소: 25마일 이내 · 재배규모: 최소 3ha 이상 · 농촌환경부와 5년 계약으로 발효
억새류	920£/ha		

자료: 산림청(2009).

나) 생산자조직 지원제도

- 단벌기 맹아림을 재배하는 사람들을 법적으로 조직화하도록 지원하는 제도. 지원은 그룹당 최대 20만 파운드이며, 전문장비의 구입, 인건비, 전문가 활용비, 사무실 운영비, 저장시설, 특화된 교육, 광고와 홍보 등에 이용 가능. 임지조성 지원제도의 조건과 동일하며, 사전 혹은 사후에 농촌환경부의 승인을 받고 5년간의 계약으로 발효.

2.2.2. 임지 지원제도(English Woodland Grant Scheme; EWGS)

이 제도는 농장조림 특별지원제도[10](Farm Woodland Premium Scheme)

10 현재 중단된 제도. 농장 육림지에 대한 식재를 통해 환경을 강화하려는 목적하에 운용되었던 제도임. 새로운 생태 환경을 제공하고 다양성을 증가시키며, 농촌 풍광을 개선한다는 목적하에 농장 육림지의 식재를 촉진해서 환경을 개선

와 임지보조제도[11](Woodland Grant Scheme)를 통합하여 계승한 제도이다. 보조금을 지원하는 주요 목적은 신규조림과 기존의 임지 관리를 지원하는데 있으며 2005년부터 시행되고 있다.

EWGS 내에는 6개의 세부지원제도가 있으며 임지의 조성 계획부터 조성작업, 재조성작업, 관리 등 다양한 지원제도가 준비되어 있다. 임지 조성을 희망하거나 재조성을 원하는 사람들은 비교적 쉽게 필요한 지원을 받을 수 있다.

2.2.3. 바이오 에너지 인프라 지원제도(Bio Energy Infrastructure Scheme)

이 제도는 바이오 에너지의 최종 사용자까지 필요한 공급망을 구축하는 제도로서 에너지 작물과 목질연료의 공급, 가공, 저장과 수확을 돕기 위해 농업인, 임업인, 기업 등을 지원한다.

2.3. 독일의 탄소계정체계[12]

독일은 기후변화협약 당사국으로서 1994년부터 온실가스 인벤토리 기획, 인벤토리 수행에 따른 통계보고서 작성 및 발간 그리고 작성된 온실가스통계의 정기적인 갱신 등의 작업을 수행할 의무가 있다. 2005년 교토의정서의 발효로 온실가스 인벤토리의 수행과 검토, 온실가스 통계작성과 관련된 광범위한 의무들이 추가적으로 부과되었다. EU는 1차 공약기간 동안

하려는 목적하에 지원된 제도임.

11 농장조림 특별지원제도(Farm Woodland Premium Scheme)와 마찬가지로 새로운 제도를 위해 2004. 6. 28일자 종료됨. 역시 농촌지역 경제 부흥과 직업 제공, 농업 대신 다른 용도로의 토지 이용 제공 등의 목표가 있음.

12 이경학 외(2006) 자료를 요약 정리함.

온실가스 배출량을 기준년도 대비 8%를 감축하여야 하며, EU 회원국내 의무감축량 분담에 따라 독일은 온실가스 배출량을 기준연도 대비 21% 감축하여야 한다. 이는 EU전체 감축목표량의 3/4에 달한다. 따라서 독일의 배출감축량과 계산과정은 상당히 중요한 이슈이다. 독일의 온실가스 통계 작성업무는 독일 환경청이 주관하고 있으며 산림부문의 탄소계정 방법은 다음과 같다.

2.3.1. 신규조림/재조림의 탄소계정

독일의 경우에는 연방정부의 장려 정책하에 신규조림이 이루어지고 있으며, 그 결과는 각 주정부가 취합하여 연방정부에 보고하고 있다. 이 면적에 평균 연간 ha당 바이오매스 생장량인 1.5를 곱하여 바이오매스 증가량을 구하고 여기에 탄소밀도 0.5를 곱하여 신규조림에 의한 탄소증가량을 계산한다.

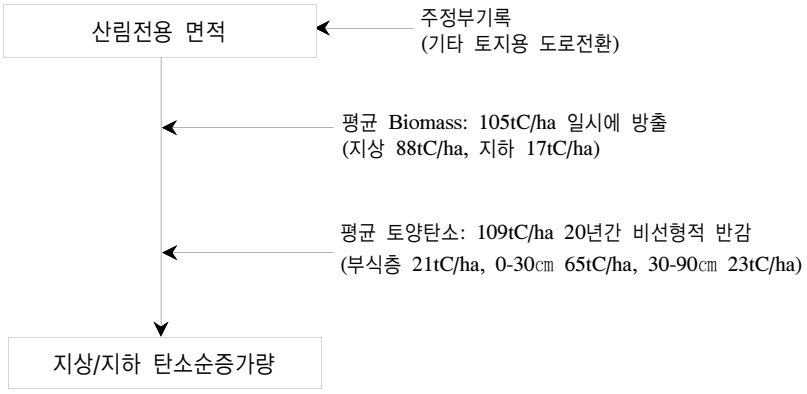
그림 3-4. 독일의 신규조림에 따른 탄소변화량추정 체계

자료: 이경학 외(2006).

2.3.2. 산림전용의 탄소계정

산림전용의 경우 주정부기록에 나타난 타용도로 전환된 산림면적에 평균 바이오매스 탄소량을 곱하여 탄소감소량을 추정하고, 평균토양탄소는 20년간 비선형적으로 반감한다는 가정하에 토양탄소감소량을 구하여 산림전용에 따른 총탄소배출량을 계산한다. 여기서 평균바이오매스 축적량은 1986～1990년에 행한 국가산림자원조사에서 얻어진 평균임목축적량에 전환인자(1.45)를 곱하여 구한 것이며, 토양탄소량은 1987～1993년에 행한 전국 조사에서 얻어진 것이다.

그림 3-5. 독일의 산림전용에 따른 탄소변화량추정 체계

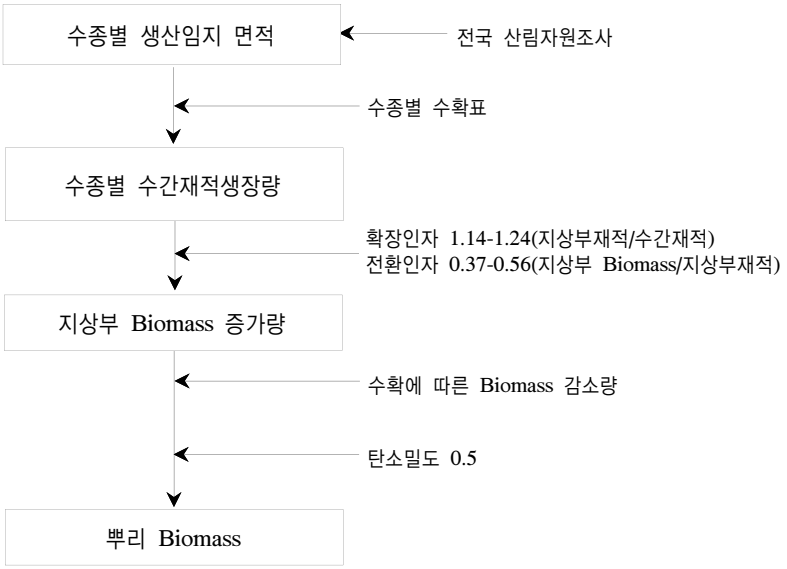


자료: 이경학 외(2006).

2.3.3. 산림경영의 탄소계정

산림경영에 대한 탄소계정은 전국산림자원조사에서 얻은 수종별 생산임지 면적에 수확표와 지상부 재적확장인자 및 지상부 바이오매스 전환인자를 곱하여 지상부 바이오매스 증가량을 얻고, 여기에서 수확통계에 근거한 바이오매스 감소량을 제한 후 탄소밀도(0.5)를 곱하여 경영림에서의 지상부 탄소 순증가량을 측정한다.

그림 3-6. 독일의 산림경영에 따른 탄소변화량추정 체계



자료: 이경학 외(2006).

3. 뉴질랜드의 지속가능한 임업 프로그램[13]

뉴질랜드는 기후변화협약 체결당시 부속서 I 국가에 해당하여 감축의무가 있지만 감축량은 기준연도 대비 0%로 할당되었다. 1990년 뉴질랜드의 온실가스 총 배출량은 약 6,200만tCO_2(CO_2-e, 이산화탄소 환산톤), 2006년 온실가스 총 배출량은 1990년 대비 25.7 % 증가한 약 7,800만tCO_2로 연평균 1.5%의 증가율을 기록하였다. 뉴질랜드는 2006년 LULUCF(Land Use, Land-Use Change and Forestry) 분야에서 총 온실가스 배출량의 약 29%에 해당하는 2억 2,700만tCO_2를 흡수한 것으로 나타났으며, 지속가능한 임업 프로그램을 통해 이를 확대해 나가고 있다.

---

13 산림청(2009)을 요약 정리한 내용임.

3.1. 영구적 산림 탄소고정 이니셔티브(Permanent Forest Sink Initiative: PFSI)

이 제도는 신규조림 및 재조림과 관련하여 새롭게 영구산림을 조성하는 자에게 뉴질랜드 정부가 보상하는 제도로서 조림대상지는 1990년 이전에 산림의 정의를 만족하지 못한 토지이다. 또한 이 제도는 정부의 지속가능 임업 프로그램의 하나이고, 개인 산주가 새로운 영구적 산림에서 탄소배출권을 받을 수 있게 해준다. 제도 가입은 정부와 산주 간의 계약에 의해 이루어진다. PFSI는 신규조림보조제도(Afforestation Grant Scheme)의 보완적인 역할을 하며, 산림분야에 적용될 뉴질랜드 탄소배출권 거래제도(ETS)와 관련이 있다. 이는 영구적인 산림의 조성뿐 아니라 목재생산을 위한 인공림의 조성에서도 탄소배출권의 획득이 가능한데, 목재생산을 위한 인공조림의 경우에는 벌기령을 50년 이상으로 하고 지속적인 산림의 피복을 만족하는 경우에만 탄소배출권을 부여받을 수 있다. 지속적 산림의 피복 관리는 토지가 항상 일정비율의 산림으로 피복되는 것을 의미하는데, 만일 50년 이전에 벌채하거나 개벌을 시행할 경우에는 탄소배출권을 확보하지 못함은 물론 벌금을 지불해야 한다. 토지소유자가 PFSI에 참여하기 위해서는 지속적인 모니터링과 이를 증명하기 위한 비용을 포함한 관리 비용을 부담해야 한다.

3.2. 동부해안임업프로젝트(East Coast Forestry Project: ECFP)

동부해안 임업 프로젝트는 토양침식이 되기 쉬운 북부섬 동해안 지역의 장기적인 산림보전에 대해 NZUs[14]를 부여하는 것이다. 이 정책은 동부해

---

14 뉴질랜드의 탄소거래제(Emissions Trading Scheme: ETS)에 사용되는 탄소배출권 거래단위로 ETS 참여기업들은 ETS 도입기간 중에 1NZU를 정부로부터 25 뉴질랜드달러에 구입할 수 있음.

안의 산주들에게 일정비율의 보조금을 지급하기 위한 것이고, ECFP 참여자는 PFSI에 가입할 수 있다. ECFP의 참여자가 ETS에 참여할 수 있다는 것은 참여자에게 목재와 탄소에 의한 수익을 모두 제공하는 것이다.

산림존치에 대한 보조금은 사업초기에 70%가 지급되고, 나머지 30%는 사업말기에 지급되며, 산림복구에 대한 보조금은 사업초기에 50%, 사업말기에 50%가 각각 지급된다.

표 3-5. 뉴질랜드 ECFP의 보조금

조치	Gisborne[15]항에서의 거리(㎞)	보조율	사업초기	사업말
산림	0~80	NZ$ 1,342/ha	NZ$ 939/ha	NZ$ 403/ha
	81~150	NZ$ 1,880/ha	NZ$ 1,316/ha	NZ$ 564/ha
	151~215	NZ$ 2,686/ha	NZ$ 1,880/ha	NZ$ 806/ha
복구	-	NZ$ 1,375/ha	NZ$ 688/ha	NZ$ 688/ha
조림	-	실비의 70%	보조금의 80%	보조금의 20%

자료: 김의경 외(2008).

3.3. 신규조림 보조제도(Afforestation Grant Scheme: AGS)

교토의정서의 규정에 맞는 토지에 조성된 산림에서는 선진국의 온실가스를 상쇄할 수 있는 탄소고정크레딧(carbon sink credits)인 RMUs(Removal Units)가 지급된다. 신규조림 보조제도는 행동계획에 대한 옵션으로 지속가능한 토지경영과 기후변화를 완화하는 신규 산림사업의 투자를 장려하기 위한 새로운 정책이다. 이 제도하에서 산주들은 산림이 아니었던 땅에 조림을 하여 정부보조를 받을 수 있다.

15 뉴질랜드 노스 섬 동해안의 파버티 만에 면한 항구도시로 토양침식이 가장 심한 지역임.

참여자들은 새로운 산림을 소유하게 되므로 목재수익을 얻을 수 있으며, 정부는 산림의 이산화탄소 흡수에 대한 크레딧을 유지하여 벌채와 산림전용에 대한 책임을 지게 된다. 보조금 지급은 5년간 유효하므로 AGS는 뉴질랜드 탄소배출권거래제도제(Emissions Trading Scheme: ETS)보다 낮은 참가비용과 이전비용이 들어 소규모 산림소유자, 특히 단순림 소유자에게 더욱 매력적이다. AGS는 정부로부터 추가적인 흡수원 크레딧을 받으며, 침식경감, 생물다양성 향상 등의 다른 환경적 편익을 가져오지만 ETS, ECFP, PFSI 등에 참여한 토지에 대해서는 혜택이 없다.

4. 시사점

현재 기후변화협약하에서 제1차 공약기간(2008~2012년)에 탄소배출권으로 인정될 수 있는 산림활동은 1990. 1. 1~2012. 12. 31 기간 동안 행해진 신규조림, 재조림, 산림전용 및 산림경영활동 등으로 되어 있다. 선진국들은 탄소배출권을 인정받기 위하여 산림부문에서 신규조림, 재조림, 산림전용 및 산림경영활동 등에 대한 정책을 수립하여 시행하고 있다. 특히 비용과 시간이 많이 드는 신규조림 및 재조림보다는 산림경영활동을 통한 탄소배출권을 인정받기 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있으며, 의무당사국 대부분이 선택한 산림경영은 기후변화협약하에서 정의된 산림활동이다. 일본의 사례에서 볼 수 있듯이 산림간벌 촉진법을 공포하는 등 중앙정부 차원의 산림경영 및 관리에 역점을 두고 있다.

이러한 정책들은 산림활동에 대하여 보조금을 지급하거나 배출권을 인정해 주는 것으로서 산림활동 증진을 장려하기 위한 것이다. 그러나 이러한 정책은 사회경제적 가치를 고려한 산림경영의 효율성에 대해서는 대부분 간과하고 있는 실정이다. 산림경영을 통해 탄소배출권을 인정받기 위해서는 '경영된 산림[16]'에 대한 정확한 정의가 중요하며, 경영된 산림내에서의 산림보호, 식재, 숲가꾸기 등 여러 활동들에 대한 사회경제적 가치를 평

가해야 할 필요가 있다. 산림경영에 따른 탄소흡수량 및 배출량은 산림 전체 차원에서 계정되지만, 이를 증가시키기 위해서는 결국 임분(林分)[17] 단위의 방안 마련이 필요하기 때문이다. 그러나 실질적으로 탄소 흡수 및 배출을 포함한 산림경영의 경제적인 가치평가에 대한 논의는 활발하게 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이러한 평가는 지역적 특성을 반영해야 하므로 국제적인 논의에 앞서 국내적인 합의 도출이 선행되어야 할 것이다.

---

16 여기서 가리키는 경영이란 다양한 공익적 가치를 포함하는 경영방법인 지속가능한 산림경영을 의미함.

17 산림 안에 있는 나무의 종류, 나이, 생육 상태 따위가 비슷하여 주위의 다른 산림과 구분되는 숲의 범위(http://www.daum.net, 국어사전).

탄소배출 및 흡수를 고려한 산림사업 최적화 분석 제4장

IPCC 우수실행지침(2003)에서 제시한 산림의 탄소 흡수 및 배출에 영향을 미치는 산림경영 활동은 산불방지 및 관리, 병충해 방지, 산림갱신 촉진작업(지존작업, 식재/직파, 풀베기 등), 어린나무가꾸기, 솎아베기(간벌), 가지치기, 비료주기, 벌기령 조절, 취약생태계 보호, 수확방법의 선택, 벌채폐잔재 수거 등이다. 이들 사업 가운데 산불방지 및 관리, 병충해 방지, 생태계 보호 등은 예측하기 힘든 사고 발생에 따른 산림훼손을 방지하기 위한 것이며 사업 과정에서 유래되는 탄소의 배출이나 흡수와는 구별된다. 따라서 이 연구의 대상에서 제외된다고 할 수 있다.[18] 본 연구에서는 다양한 산림사업들 가운데 계획에 따라 체계적인 활동을 통하여 목재를 관리하고 벌채하는 과정에서 탄소축적 변화에 가장 큰 영향을 미치는 경제림 육성사업의 어린나무가꾸기와 간벌을 최적화분석의 대상으로 정하였다.

어린나무가꾸기와 간벌 등에 관한 사업은 산림자원관리 표준매뉴얼(2005. 산림청, 산림과학원)에 자세히 기술되어 있다.[19] 그러나 지속가능한 산림관리를 위해 적용되고 있는 이 매뉴얼은 산림의 기능별 관리지침, 자원조성 및 관리지침 등 생리적 측면에서 지속가능한 산림관리를 위한 기술적인 내용을 수록하고 있을 뿐이다. 이러한 지침에 따라 실시하는 산림관리가 탄소의 배출 및 흡수에 얼마나 관련 있는지, 탄소흡수 확대를 위한

---

18 다만 산불예방 사업에 대해서는 효율성에 대해 평가를 시도하였음.

19 부록 2 참조.

지침은 무엇인지 등에 관한 내용은 부재한 상태이다. 즉, 산림관리 사업에 따른 탄소배출이나 흡수에 대한 기준은 아직 마련되지 못한 실정이다.

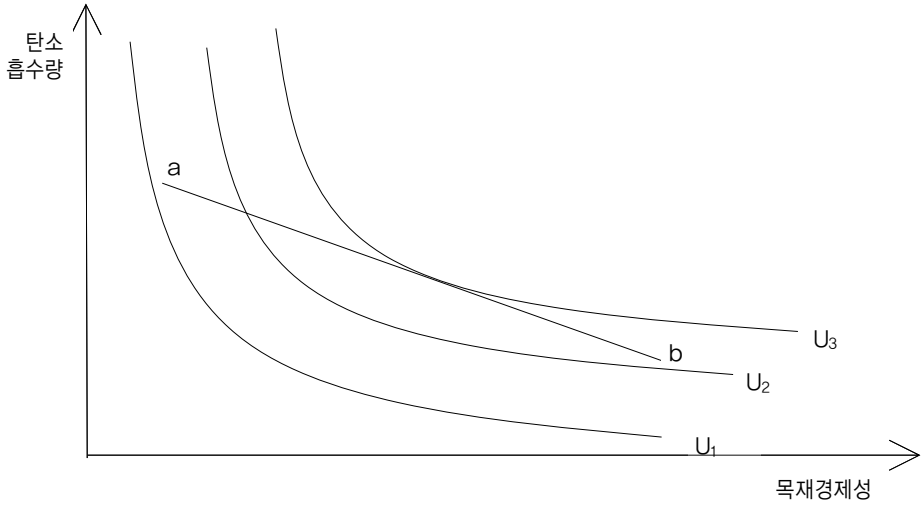
1. 이론적 배경

산림은 성장과정에서 광합성을 통하여 탄소를 흡수하며, 성숙한 임목이 벌채되어 이용될 경우 경제적인 가치를 가지게 된다. 가공 복제품의 탄소 저장 가능성에 대해서는 여러 가지 의견이 있으나 국제적인 합의가 이루어지지 않은 상태이다. 따라서 임목은 벌채되면 저장 탄소를 배출한다는 IPCC의 기본가정을 적용한다.

산림관리의 목적을 탄소흡수와 가치 있는 목재생산을 통한 사회의 효용을 극대화시키는 것이라 가정했을 경우, 효용함수는 <그림 4-1>과 같이 나타난다. 경제림 조성사업을 통하여 탄소흡수와 목재의 경제성을 확보할 수 있다. 간벌과 같은 산림관리 사업의 강도를 높일 경우 목재의 경제성은 일정 수준까지 올라가지만 탄소흡수량은 감소한다고 가정한다. 따라서 단위면적당 산림관리에 따른 효용함수는 왼쪽 위에서 오른쪽 아래로 오목한 형상을 띄는 곡선으로 표현되며, 한계효용 감소의 법칙이 적용된다. 또한 탄소배출을 줄이면서 목재의 경제성을 높이는 기술이 개발되면 효용함수는 위쪽으로 이동하게 된다. 선분ab는 상대가격(탄소가격에 대한 목재가격)을 나타내는 제약선이 되며, 효용곡선과 가격제약선이 접하는 점에서 탄소흡수와 목재생산을 동시에 고려한 최적의 생산활동이 된다.

이상의 이론은 경제림관리의 일정시점에서 측정이 가능한 정태적분석을 설명한 것이다. 그러나 나무는 일생동안 부피생장을 통하여 탄소를 흡수하고, 최종적으로 벌채되어 목재를 제공하므로 위에서 설명한 여러 가지 현상들은 일정한 시차를 두고 지속적으로 발생하게 된다. 정태적 분석은 목적함수에 영향을 미치는 일들이 동시에 일어난다고 가정하기 때문에 분석을 위하여 적용하기는 곤란하다.

그림 4-1. 경제림 관리에 따른 효용함수



산림자원관리는 지속적인 산지이용과 동일한 것으로 간주할 수 있으며, 목적함수가 시간의 지배를 받으므로 동태분석이 필요하다. 따라서 목재 적정관리 모형은 일정한 임분 내의 재적변화를 Equation of motion으로 설정하고, 수확(간벌 및 주벌)에 따른 경제적 가치와 수확하지 않음으로써 얻을 수 있는 환경적 가치(탄소의 경제적 가치)를 변수로 하는 사회적 효용함수를 목적함수로 가정하여 동태분석에 따라 최적의 관리방안을 구할 수 있다. 즉, 목재의 경제적 가치와 환경적 가치를 위한 적정관리 모형은 다음과 같이 설정할 수 있다. 목적함수는 벌채 후 수확한 목재의 경제적 가치와 벌채 전 임목의 탄소흡수로 인해 얻을 수 있는 경제적 가치를 모두 고려한 사회적 효용으로 설정한다. 임분의 재적을 나타내는 변수는 상태변수(s, state variable)이며, 벌채량을 나타내는 변수는 제어변수(x, control variable)이다. 각 변수에 대한 목적함수의 1계편도함수는 음의 값을 가지고, 2계편도함수는 양의 값을 가진다. 임분의 임목재적은 벌채 전 탄소저장에 따른 가치를 측정할 수 있는 변수(state variable)로서, 전기(前期)의 재적량과 제어변수(control variable)인 간벌량 또는 벌채량에 따라 변화한다. 따라서 t기의 시업에 따른 재적변화율($\dot{s}(t)$)은 같은 기간 성장한 부피($\gamma s(t)$)에서 벌채, 간

벌 등을 통해 수확한 부피($x(t)$)를 제외한 값과 같다. 최적 벌채량을 구하기 위한 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$Max_{x(t)} \int_1^T e^{-rt} u(x(t), w(s(t))dt$$

$$s.t. \qquad \dot{s}(t) = \gamma s(t) - x(t)$$

$$x(t) \geq 0$$

$$s(t) \geq s_{\min}$$

여기서 w는 임목의 재적을 탄소량으로 환산하는 함수로서 임목 건중량(=줄기재적×줄기밀도×지상부확장계수)의 50%로 계산할 수 있다. 이 값은 수종에 따라 다른 값을 가지지만, 시간(t)에 따라 변화하지 않는 것으로 가정한다. γ는 임목의 성장을 나타내는 계수이다. 간벌량 또는 벌채량은 영 이상의 값을 가지며, 최종연도 재적량은 최소값보다 크거나 같아야 한다.

최적화 문제의 내부해가 존재할 경우 다음의 식을 만족(필요조건)한다.

- $u'(w(t))\dfrac{dw(s(t))}{ds} = (r-\gamma)u'(x(t)) - u''(x(t))\dfrac{dx}{dt}$

즉, 임목의 한계효용에 재적변화에 따른 탄소흡수량의 변화를 곱한 값은 벌채에 따른 한계효용에 이자율과 성장률의 차이를 곱한 값에서 벌채에 따른 한계효용의 변화에 벌채율을 곱한 값을 뺀 값과 같다.

2계 충분조건은 벌채량과 재적량에 대해 2계편도함수로 형성된 다음의 야코비언행렬이 음반정부호(negative semidefinite)를 가질 경우 만족한다.

- $\begin{bmatrix} e^{-rt}u''(x) & 0 \\ 0 & e^{-rt}u''(w(s(t))(\dfrac{dw}{ds})^2 \end{bmatrix}$

$u''(s) < 0, \quad u''(w(W(t))) > 0$이므로 2계 충분조건을 충족하고 해를 가진다.

시간의 범위를 과거 특정 시점부터 무한대까지로 가정할 수 있으며, 다이나믹프로그래밍(Dynamic programing)을 이용하여 해를 구할 수 있다. 위의 문제를 Bellman 방정식(Bellman equation)으로 나타내면 다음과 같다.

- $V_t(s) = \max_{x \in X(s)} \left\{ u(x(t), w(s(t)) + \delta \sum_{s' \in S} P(s'|s,x) V_{t+1}(s') \right\}$

  $s \in S, \quad s' = \dot{s}$

  $t = 1, 2, ..., T$

여기서 $P(s'|s,x)$는 다음 회기의 상태변수의 확률분포를 나타낸 것으로, 현재의 상태(s), 제어정도(x)에 의해 결정된다. 또한 S는 상태변수 공간을, X는 제어변수 공간을 나타내고, δ는 할인요소(Discount factor)를 나타낸다.

2. 최적화 분석

다이나믹프로그래밍의 경우 수학적인 분석(Mathematical analysis)을 통하여 해를 구하는 것이 불가능한 경우가 많다. 따라서 보간법(Interpolation)을 이용하여 근사값 또는 근사함수를 추정하게 된다. 그러나 다이나믹프로그래밍을 이용하는 경우에도 충격제어(Impulse control) 방식[20]에 따라 벌채의 비율 또는 시기를 정하는 정도의 분석이 가능하지만 간벌이나 어린나무가꾸기 등을 고려한 복잡한 구조의 문제는 다루기 매우 힘들다. 그러나 이 연구의 목적함수는 목재의 경제적 가치와 탄소의 경제적 가치를 평가하여 수익을 비교하는 것이므로 선형방정식 모형을 가지게 되며, 상태변수가 확률분포를 가지지 않는다고 가정할 경우(nonstochastic) 위의 Bellman 방정식을 전개하여 스프레드시트에서 문제를 풀 수 있다. 단, 나무의 연령별 생산재적에 대한 정보를 미리 알고 있을 경우에 한한다.

---

20 이 방법은 엄밀히 말하면 다이나믹프로그래밍과 비슷하지만 구별되는 것으로, 연속된 시간모델의 한 종류임. 상태변수(state variable)가 순간적으로 급격하게 변하는 것을 반영하기 위해 고안된 것임. 상태변수의 drift와 diffusion을 이용하는 Ito Process를 따르게 됨(Mirand & Fackler. 2002. pp347～358).

시간범위를 무한대로 가정할 경우, Bellman 방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

- $V(s) = \max_{x \in X(s)} \{\Pi(x, w(s)) + \delta V(s')\},\ s \in S$

여기서 $\Pi(x, w(s))$는 벌채를 했을 경우 목재판매를 통해 얻는 수익과 벌채 전까지의 탄소저장을 통해 얻는 수익을 나타내는 함수로 아래와 같이 표현된다.

- $\Pi(s, x) = p_t \times x - c + p_{CO_2} \times w(s)$

시간의 범위를 무한대로 가정하면, 최적화의 필요조건은 $V(s^*) = \delta V(s')$이 된다. 즉 상태변수 s^*에서 벌채를 통해 얻을 수 있는 가치함수의 값이 할인요인을 적용한 다음 회기에서의 가치와 같을 때 최적화가 달성된다. 이는 연간 생장재적이 모두 알려진 경우에 한하여(s와 s'를 모두 알고 있는 경우) 만족하는 조건이며, Bellman 방정식에서 표현하는 바와 같이 가치함수가 최대값을 가지는 간벌강도와 벌채시기(벌기령)를 찾으면 되는 것이다. 실제 계산에서는 목재의 경제성과 탄소의 경제성을 따로 계산한 후 더하게 된다.

3. 사업별 탄소배출 및 흡수 현황

재적생장은 탄소흡수와 직접적인 연관이 있다. 즉, 재적의 변화가 탄소흡수량을 결정한게 된다. 연간생장에 대한 실측 자료가 없으므로 관리방법에 따라 임분(林分)의 생장을 다양하게 예측할 수 있는 임분차원의 생장모델인 동적임분생장모델(Dynamic stand growth model)[21]을 바탕으로 만든 자료를 이용하여 분석을 실시하였다. 수종은 현실과 가깝게 추정된 소나무와 잣나무를 대상으로 하였다.

---

21 부록 1 참조.

3.1. 탄소계정 관련 자료

상기한 바와 같이 산림은 광합성을 통하여 대기 중의 탄소를 축적한다. 임목의 경우 탄소 저장량은 건중량의 약 50%에 해당한다. 따라서 산림의 탄소저장량을 계산하기 위해서는 우선 해당 산림의 건중량을 구해야 한다. 그러나 대부분의 통계상 임목재적은 줄기재적을 나타내는 것이므로 이를 나무 전체의 재적으로 변환하기 위해서는 지상부확장계수가 필요하다. 통계상의 줄기재적을 이용하여 탄소 흡수량을 추정하기 위해서는 다음의 공식을 이용할 필요가 있다.

줄기탄소흡수량 = 줄기재적 × 줄기밀도 × 지상부확장계수 × 50%

여기서 줄기밀도는 줄기재적에 대한 건중량을 나타내는 것이다. 즉

줄기밀도 = 줄기건중량/줄기재적

줄기밀도에 대한 자료는 임업연구원에서 그 동안 조사하였으며, 그 결과를 종합하면 소나무, 잣나무 등의 주요 침엽수의 평균이 0.367~0.410을 나타낸다. 또한 참나무의 경우 신갈나무 0.601, 상수리나무 0.625 등으로 침엽수보다 높다는 것을 알 수 있다<표 4-1>. 줄기밀도는 흉고직경에 따른 경향이 없으므로 수령에 관계없이 수종별로 적용할 수 있다.

표 4-1. 주요 수종의 줄기밀도

수종	줄기밀도
중부지방소나무	0.367
강원지방소나무	0.395
잣나무	0.368
리기다소나무	0.402
낙엽송	0.399
편백	0.410
신갈나무	0.501
상수리나무	0.625

자료: 이경학 외(2006).

지상부확장계수란 줄기건중량을 나무 전체 건중량(지상부전체건중량)으로 환산하기 위해 적용하는 것으로 지상부전체건중량을 줄기건중량으로 나눈 것이다.

지상부확장계수 = 지상부전체건중량/줄기건중량

산림과학원의 연구결과(이경학 외. 2006)에 따르면, 침엽수의 경우 임분(林分)의 연령과 줄기건중량이 증가함에 따라 감소한 후 10년 이상인 Ⅱ영급부터 정체되며, 이때 계수값은 1.5 정도를 나타내는 것으로 알려져 있다. 또한 Ⅰ영급 이하 임분의 계수값은 평균적으로 2.0을 나타낸다. 활엽수의 경우 임분의 연령에 관계없이 1.5 정도의 값을 나타내는 것으로 알려져 있다.

뿌리의 탄소흡수에 관한 연구는 미흡한 편이나, 자료에 따르면 지상부 탄소흡수량에 대한 뿌리 흡수량의 비율은 일반적으로 0.2의 값을 나타내는 것으로 알려져 있다.[22]

3.2. 간벌

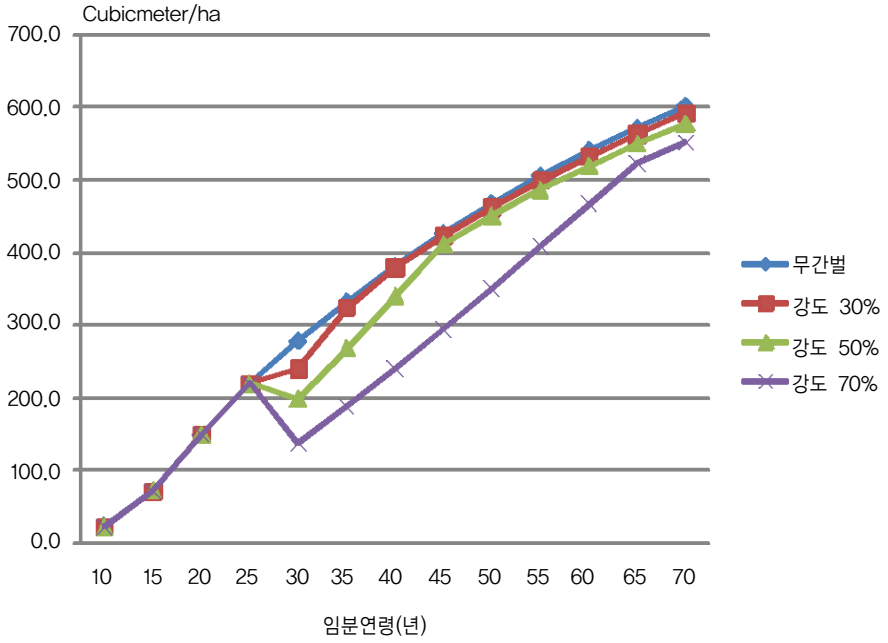
3.2.1. 소나무

소나무 임령(林齡) 30년에서 강도 0%, 30%, 50%, 70%로 간벌했을 경우 오른쪽의 <그림 4-2>와 같이 재적이 변화한다. 무간벌에서 재적이 가장 많이 증가하며 강도가 높을수록 재적은 감소하는 것으로 나타난다. 따라서 해당 임분의 탄소흡수는 무간벌일 때 가장 높다는 것을 짐작할 수 있다. 간벌시기를 제외하면 임목의 재적은 감소하면서 늘어나므로 탄소의 흡수량도 지속적으로 늘어나는 것을 알 수 있다.

---

22 Whittaker & Marks(1975). 이경학 외(2006).

그림 4-2. 임분연령 30년생 간벌의 강도에 따른 재적 변화



임분연령[23] 30년일 때 간벌을 실시하여 임분연령 50년에서 간벌강도별 결과를 비교하여 보면, 수고와 흉고직경은 간벌강도가 높을수록 증가하는데 반해 잔존재적은 감소하는 것을 알 수 있다<표 4-2>. 즉, 개별 입목(立木)의 재적은 늘어나지만 본수가 감소함에 따라 전체 재적도 감소하게 된다. 결국 간벌은 독립 입목의 재적 및 수고생장을 촉진하여 생산하게 될 원목의 품등을 높이는 역할을 한다.

중부지방소나무의 줄기밀도(0.367톤/㎥)와 지상부확장계수(1.5)를 적용하여 건중량을 구하고 임목에 대해서는 탄소흡수량을 계산한 결과 간벌강도가 강할수록 탄소흡수량도 감소하는 것으로 나타났다<표4-2>.

23 임령(林齡)과 동일한 의미로 사용.

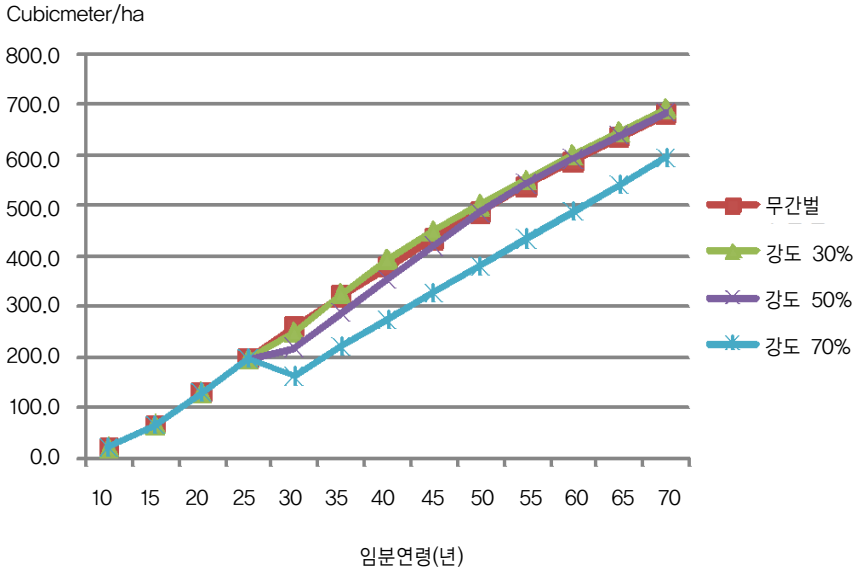
표 4-2. 소나무 연령 30년 간벌 임분의 강도에 따른 탄소흡수량 (임분연령 50년)

간벌강도 (%)	수고 (m)	흉고직경 (cm)	본수	간벌생산량 (㎥/ha)	재적 (㎥/ha)	탄소흡수량 (탄소톤)
0	20.4	20.5	1,673	0	467.1	154.3
30	21.3	20.9	1,533	37.4	462.1	152.6
50	21.9	21.0	1,446	80.0	449.5	148.5
70	22.6	21.9	1,012	141.1	350.0	115.6

3.2.2. 잣나무

소나무와 같은 방법으로 임분연령 30년에서 강도 0%, 30%, 50%, 70%로 간벌했을 경우 재적의 변화를 살펴보았다. 간벌후 재적 생장이 빨라 소나무와 달리 강도 30%일 때의 재적이 가장 많은 것으로 나타났다<그림 4-3>.

그림 4-3. 잣나무 임분연령 30년생 간벌의 강도에 따른 재적 변화



임분연령 30년일 때 간벌을 실시하여 임분연령 50년에서 간벌강도별 결과를 비교하여 보면, 소나무와 같이 수고와 흉고직경은 간벌강도가 높을수록 증가하는 데 반해 잔존재적은 감소하는 것을 알 수 있다. 잣나무의 줄기밀도(0.368톤/㎥)를 적용하여 건중량을 구하고 탄소흡수량을 계산한 결과 간벌강도 30%에서 탄소흡수량이 가장 높게 나타났다<표 4-3>.

표 4-3. 잣나무 연령 30년 간벌 임분의 강도에 따른 탄소흡수량 (임분연령 50년)

간벌강도 (%)	수고 (m)	흉고직경 (cm)	본수	간벌생산량 (㎥/ha)	재적 (㎥/ha)	탄소흡수량 (탄소톤)
0	21.2	18	1,960	0	487.1	161.3
30	21.6	18.4	1,903	11.4	500.1	165.6
50	21.8	18.6	1788	41.3	485.7	160.9
70	22	21.2	1,073	98.5	380.2	125.9

3.3. 어린나무가꾸기

간벌의 경우와 마찬가지로 연간생장에 대한 실측 자료가 없으므로 동적 임분생장모델(Dynamic stand growth model)을 바탕으로 만든 자료를 이용하여 분석하였다. 어린나무가꾸기의 경우 경제적 판단에 의해 가치함수값[24]이 최대를 가지는 간벌강도 또는 간벌연령을 구하는 것이 아니라, 입목의 성장을 방해하는 요인을 제거하는 것이므로 일반적인 작업강도인 20%와 30% 수준에서 어린나무를 제거했을 때의 탄소흡수 변화를 비교하였다.

소나무, 잣나무 임분연령 11년에서 강도 0%, 20%, 30%로 어린나무를 제거했을 경우 임분연령 20년에서의 수고, 흉고직경, 본수, 헥타르당 재적 및 탄소흡수량은 <표 4-4>, <표 4-5>와 같다. 소나무와 잣나무의 경우 평

[24] Bellman 방정식의 V(s).

균수고 및 흉고직경은 늘어나지만 전체 재적이 감소함에 따라 탄소흡수량도 줄어드는 것을 알 수 있다.

표 4-4. 소나무 임분연령 11년 어린나무 제거강도에 따른 탄소흡수량(임분연령 20년)

강도 (%)	수고 (m)	흉고직경 (cm)	본수	간벌생산량 (㎥/ha)	재적 (㎥/ha)	탄소흡수량 (탄소톤)
0	10.2	7.6	6,000	0	148.5	49.1
20	10.4	8.1	4,800	2.08	137.3	45.3
30	10.5	8.4	4,200	3.65	129.8	42.9

표 4-5. 잣나무 임분연령 11년 어린나무 제거강도에 따른 탄소흡수량(임분연령 20년)

강도 (%)	수고 (m)	흉고직경 (cm)	본수	간벌생산량 (㎥/ha)	재적 (㎥/ha)	탄소흡수량 (탄소톤)
0	11.2	6.9	6000	0	129.1	42.8
20	11.3	7.6	4800	0.41	126.9	42.0
30	11.4	8	4200	1.2	124.2	41.1

3.4. 산불

2000년대 산불 발생건수는 연평균 523건이며, 피해면적은 3,604ha, 피해액은 93억 9천만 원에 달하였다. 산불은 봄철에 64%, 겨울철에 25%가 발생하여 강수량이 적은 계절에 집중된 것을 알 수 있다. 최근 기후변화의 영향으로 겨울철 강수량이 감소함에 따라 봄철 산불 발생위험은 더욱 증가할 것으로 생각된다.

표 4-6. 계절별 산불 발생 추이

구분	10년평균		'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09
	건수	비율										
합계	523	100	729	785	599	271	544	516	405	418	389	570
봄 (3~5월)	334	64	503	625	391	201	276	331	251	191	196	377
여 (6~8월)	17	3	17	28	29	3	42	7	1	18	4	17
가을 (9~10월)	44	8	30	56	33	22	43	35	55	21	83	59
겨울 (12~2월)	128	25	179	76	146	45	183	143	98	188	106	117

자료: 「산림통계연보」, 산림청.

산불의 발생으로 말미암아 입목이 흡수하였던 탄소가 다시 대기 중으로 배출되는 양은 연평균 9,762tC[25]으로 추정된다. 정부는 산불로 인한 경제적손실과 탄소배출로 인한 손실을 줄이기 위하여 산불방지 예산으로 2000년대 들어 매년 평균 231억 원을 지출하였으나, 산불로 인한 사회경제적 손실과 예산규모에 대한 적정성 검토는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

표 4-7. 산불 피해규모와 방지예산

	2000~2009 평균	'00	'05	'09
발생건수	523	729	516	570
피해면적	3,604	25,607	2,067	1,381
피해액(억원)	93.9	652.4	75.3	38.8
예산(억원)	231.8	130.8	166.8	361.9

주: 2009년 예산중 추경(진화대)예산은 제외함.
자료: 「산림통계연보」, 산림청 자체자료.

25 추정된 탄소배출량은 제2장 <표 2-9>에 제시된 수종별 연간 탄소흡수량 중 30년 임령의 평균치인 2.7Ct과 피해면적을 적용하여 계산함.

4. 사업별 탄소흡수와 목재생산을 고려한 산림관리 최적화

4.1. 목재의 경제성 최적화

최적화분석에 이용된 자료는 앞서 소개된 동적임분생장모델을 이용하여 만든 자료를 사용하였다. 초기값은 임분연령 10년, 수고(樹高) 4.4m, 가슴높이 직경(흉고직경) 4cm, 본수 6,000본으로 설정되어 있다. 소나무의 경우 지위지수는 12.17이며, 잣나무 11.91이다. 임분의 연령 10년부터 70년까지 생성된 자료를 이용하였으며, 산림사업의 작업시기와 강도를 반영한 자료로 재구성하였다.

최적화 방법은 각 연령별로 벌채를 실시하였을 경우의 총가치함수(V(s)) 값을 구하고, 이 값들을 서로 비교하였을 때 최고의 가치함수 값을 가지는 연령이 최적벌채시기가 된다. 즉, 각 연령을 벌기령(Rotation period)으로 가정하여 반복적으로 벌채할 때의 가치함수(V(s'))값을 구하며, 이 값에 할인요소를 적용하여 합하면 연령별 총가치함수 값이 된다. 각 연령(벌기령)별 미래 가치함수(V(s'))값을 영이 될 때까지 전개하면 사업시기를 무한대로 하는 모형의 분석을 실시할 수 있다.

임분연령 t년에서 간벌 또는 어린나무가꾸기를 시행할 경우의 예를 들면 다음과 같다. 1년부터 t년까지의 가치함수값은 임분연령에 해당하는 재적을 모두 벌채할 때의 이윤과 비용만 고려한다. 반면 t+1년부터의 가치함수값은 벌채 이윤과 비용에 간벌의 이윤과 비용을 함께 고려해야 한다.

용재 부피별로 가격을 차별화하기 위하여 산림조합에서 제공하는 국산원목 가격을 참조하였다. 소나무의 경우 원목으로 사용할 수 있는 30년생 이후의 원목에 대해서는 12~18cm×1.8m 규격의 가격인 58,000원/㎥을 적용하였으며, 30년생까지는 규격에 제한 없이 거래되는 가격인 48,000원/㎥을 적용하였다.[26] 잣나무의 경우 30년생 이후의 원목에 대해서는 15~30cm×2.7m 규격의

[26] 15～30cm×1.8m은 여주 2등급 생산지 가격이며, 제한 없이 거래되는 소나무는

가격인 115,500원/㎥을 적용하였으며, 30년생 이하의 원목 가격은 소나무와 마찬가지로 48,000원/㎥을 적용하였다.[27]

30년생 이하의 원목에 대해서는 헥타르당 생산되는 재적에 모두 낮은 가격(48,000원/㎥)을 적용하였으며, 30년생 이후부터는 높은 가격(소나무의 경우 58,000원/㎥)과 낮은 가격의 가중평균을 계산하여 적용하였다. 가중평균은 정성호 외(2003)에서 제시된 간벌강도별 품등조사결과를 적용하였는데, 간벌률 74% 강도의 경우 2등급이 67.9%를 차지하고, 46% 간벌률의 경우 29.8%, 무간벌의 경우 3.9%를 차지하는 것으로 나타났다.[28] 따라서 무간벌일 경우 생산량의 3.9%만 높은 가격을 적용하고, 나머지 96.1%에 대해서는 낮은 가격을 적용하여 가중한다. 간벌강도가 10%, 20%, 30%, 40% 등 수확량 비율이 나타나있지 않은 경우에는 선형보간법을 이용하여 계산한 값을 적용하였다.

산림작업에서 발생하는 비용은 대상지의 위치에 따라 다양하게 나타나므로 표준화가 매우 어렵다. 이 연구에서는 이우균(1995)이 제시한 작업별 비용을 적용하였는데, 단위노동력의 비용은 41,218원으로 재설정하였다<표 4-8>.[29]

산림작업 연령은 <표 4-8>에 따라 다음과 같이 가정한다. 어린나무가꾸기는 임분연령 11~14년생을 대상으로 하며, 간벌은 15~30년생을 대상으로 실시한다.

양평 2등급 생산지 가격임.

27 잣나무의 경우 30년생 이하의 소경목에 해당하는 참고 가격을 시장정보에서 찾을 수 없으므로 펠릿제조를 위하여 투입되는 원목가격을 대체하여 적용함. 산림조합 내부자료에 따르면 펠릿제조를 위한 원목 구입가격이 70,000원/톤이므로 침엽수 원목의 톤을 부피(㎥)로 환산하는 계수 1.43을 대입하여 원목가격을 산정하면 단위부피(㎥)당 48,951원이 된다. 따라서 소나무와 같은 48,000원/㎥을 적용하였음.

28 정성호 외(2003). 이 연구의 대상지역은 임업연구원 광릉시험림 9임반 파소반으로 총면적 3.95ha, 임목지 3.9ha인 인공 잣나무림. 1966년에 ha당 5,000본을 조림하였고 1983년과 1987년에 각각 1, 2차 간벌을 실시. 벌채 강도별로 구분된 임지의 표준목 10본씩을 채취하여 조사한 결과임. 벌채시기가 만기되지 않았으나 품등의 비율은 벌채 때와 같다고 가정.

29 산림청(2004. 31쪽).

표 4-8. 산림연령별 작업종류 및 비용

작업 종류	임분연령(년)	요구노동력(인/ha)	비용(원/ha)
조림	3	44.6	1,838,323
가지치기	5~7	7.3	300,891
어린나무가꾸기	8~14	19.5	803,751
간벌	15~30	16.7	688,341
주벌	45~	20.0	824,360

자료: 이우균(1995).

4.1.1. 간벌

간벌시기를 임분연령 15~30년으로 구분하고, 각 간벌시기별로 강도 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70% 등으로 나누어 목재의 경제성 최적화를 위한 간벌시기와 간벌강도를 측정하였다.[30] 수령 30년에 간벌을 실시한 소나무 임분의 간벌강도별 벌기령과 가치함수 값은 <표 4-9>와 같이 나타난다. 간벌강도가 55%일 때 최고의 가치함수 값을 나타내며, 이때 벌기령은 47년이 된다.

간벌시기에 해당하는 임분연령 15~30년생에 대해 위와 같은 분석을 각각 실시하면 간벌연령별 최대 가치함수값을 나타내는 벌기령(벌채시기)을 찾을 수 있다. 소나무 가격을 58,000원/㎥과 48,000원/㎥로 나누어 적용할 경우 최적벌기령은 39년인 것으로 나타났으며, 이때 간벌연령은 22년, 간벌강도는 65%인 것으로 분석되었다<표 4-10>. 반면 잣나무의 경우 최적벌기령은 48년이며, 간벌연령은 22년, 간벌강도는 70%인 것으로 나타났다 <표 4-11>.

30 계산의 편의를 위하여 간벌강도를 5%씩 비연속적으로 구분하였음. 따라서 이 연구보고서 상의 최적이라는 표기는 주어진 간벌강도하에서 최적이라는 것을 의미함.

표 4-9. 소나무 간벌강도별 벌기령 및 가치함수값(간벌연령 30년)

간벌강도(%)	벌기령(년)	함수값(백만원/ha)
0	33	13.41
10	33	13.40
15	33	13.82
20	34	14.24
25	35	14.63
30	36	15.01
35	38	15.28
40	39	15.49
45	42	15.66
50	44	15.75
55	47	15.79
60	51	15.65
65	51	15.33
70	50	14.95

표 4-10. 목재의 경제성만 고려한 간벌연령별 최적벌기령 및 간벌강도 (소나무)

단위: %, 백만 원

간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
15	65	38	14.70
16	65	38	15.01
17	65	38	15.35
18	65	37	15.70
19	65	37	16.10
20	65	38	15.42
21	70	41	16.94
22	65	39	17.01
23	65	41	16.97
24	65	43	16.86
25	60	41	16.70
26	60	43	16.56
27	55	42	16.39
28	55	44	16.20
29	55	45	15.99
30	55	47	15.79

표 4-11. 목재의 경제성만 고려한 간벌연령별 최적벌기령 및 간벌강도 (잣나무)

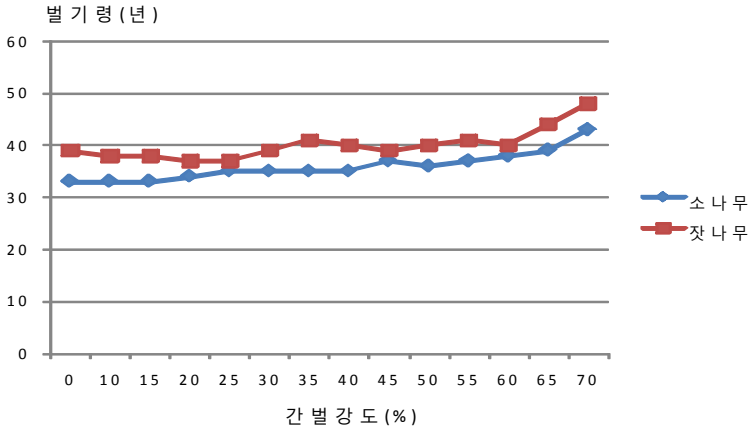
단위:%, 백만 원

간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
15	70	48	23.47
16	70	48	23.62
17	70	48	23.78
18	70	48	23.94
19	70	48	24.11
20	70	48	24.28
21	70	48	24.46
22	70	48	24.48
23	70	47	24.04
24	70	47	23.65
25	70	46	23.31
26	70	46	23.01
27	70	46	22.73
28	70	45	22.46
29	70	45	22.27
30	70	45	22.07

간벌연령별 최적화 조건을 보면 소나무의 경우 간벌연령이 높아질수록 간벌강도는 줄어들고 벌기령은 길어지는 것을 알 수 있다. 그러나 잣나무의 경우에는 반대로 간벌연령이 높으면 벌기령은 짧아지는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 소나무의 경우 간벌 후 부피생장을 위한 충분한 시간이 필요하나 잣나무는 간벌 후 생장이 빨라 이익을 창출하기 위한 시간이 오래 걸리지 않기 때문인 것으로 생각된다.

간벌강도별로 산출된 적정 벌기령을 보면, 강도가 높아질수록 벌기령이 길어지는 것을 알 수 있다<그림 4-4>. 간벌강도가 높아질수록 경제적 가치를 높이기 위한 나무의 생장에 더 많은 시간이 필요하다는 것을 의미한다.

그림 4-4. 간벌강도별 적정 벌기령



4.1.2. 어린나무가꾸기

어린나무가꾸기는 어린나무가 잘 자랄 수 있는 환경을 만들어주는 것이 목적이므로 경제적인 가치를 부여하여 최적시기 및 강도를 결정하는 것은 현실적이지 못하다. 따라서 강도별로 분석하지 않고 일반적으로 현장에서 실시하는 20% 및 30%의 작업강도에 대해서만 분석하였으며, 간벌연령인 15~30년의 헥타르당 가치함수값을 비교하여 분석하였다. 작업연령은 11~14년으로 구분한다.

소나무와 잣나무의 경우 연령별로 비교한 결과나 평균값을 비교한 결과 모두 어린나무가꾸기를 실시하지 않았을 때의 가치함수값이 가장 높은 것으로 분석되었다<표 4-12>, <표 4-13>. 그 이유는 30년까지의 목재는 모두 낮은 가격으로 판매되기 때문에 헥타르당 재적이 가장 많은 무작업(0%)의 경우에 가치함수값이 가장 높게 나타나는 것이다. 이 경우를 제외하면 어린나무가꾸기 강도가 낮고, 작업시기가 늦을수록 평균 가치함수값이 높게 나타난다. 그러나 간벌연령별로 비교하면 소나무, 잣나무 모두 간벌연령이 늦어지면 어린나무가꾸기 작업의 강도를 높이는 것이 현금흐름에 유리하다는 것을 알 수 있다<표 4-12>, <표 4-13>.

표 4-12. 소나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 및 가치함수값의 변화 (목재의 경제성만 고려)

단위: 천 원

강도(%)	0	20				30			
작업연령		11년	12년	13년	14년	11년	12년	13년	14년
15년	2,238	-625	-480	-325	-160	-868	-661	-437	-196
20년	9,193	6,349	6,467	6,593	6,727	5,791	5,958	6,138	6,331
25년	12,245	10,724	10,817	10,915	11,021	10,670	10,813	10,968	11,134
30년	13,143	11,790	11,869	11,954	12,045	11,821	11,932	12,053	12,185
평균 (15~30)	9,784	7,632	7,740	7,855	7,978	7,328	7,482	7,648	7,827

표 4-13. 잣나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 및 가치함수값의 변화 (목재의 경제성만 고려)

단위: 천 원

강도(%)	0	20				30			
작업연령		11년	12년	13년	14년	11년	12년	13년	14년
15년	1,375	-1,118	-1,035	-951	-864	-1,154	-1,043	-926	-806
20년	7,273	5,126	5,194	5,263	5,335	4,955	5,044	5,138	5,236
25년	10,584	9,121	9,179	9,238	9,299	8,943	9,019	9,098	9,181
30년	12,093	10,810	10,860	10,910	10,962	10,875	10,940	11,009	11,081
평균 (15~30)	8,270	6,422	6,486	6,551	6,618	6,332	6,415	6,504	6,596

4.1.3. 어린나무가꾸기와 간벌

나무의 생장촉진을 위해서 어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 적용하는 것이 일반적이다. 어린나무의 성장을 방해하는 요인을 제거하기 위한 작업으로 어린나무가꾸기를 실시하며, 입목(立木)의 수고 및 부피 생장을 돕기 위해 간벌을 실시한다. 현재 시행되고 있는 산림작업과 비교하기 위하여 위에서 분석한 어린나무가꾸기와 간벌을 복합하여 산림작업을 수행할 경우의 목재생산 최적화 관리방법을 찾아보았다.

앞선 방법과 마찬가지로 어린나무가꾸기의 작업강도를 20%와 30%로 나누고, 작업시기는 11~14년으로 구분하였다. 간벌연령은 21~28년으로 구분하였으며, 강도는 0%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70% 등으로 나눈다.

가. 소나무

목재의 경제적 가치만 고려한 가치함수값을 비교하면 어린나무가꾸기 작업강도 20%에서는 작업연령에 관계없이 간벌연령 24년, 강도 65%, 벌기령 43년에서 적정관리가 되며, 30%에서는 간벌연령 25년, 강도 60%, 벌기령 42년이 적정관리가 된다<표 4-14>. 어린나무가꾸기의 최적화 조건을 보면 30%보다 20%에서 가치함수값이 높게 나타나며, 작업연령이 높아질수록 가치함수값이 올라간다. 이 결과는 어린나무가꾸기만 실시했을 경우의 간벌기간 평균 가치함수값을 비교한 것과 동일하다.

최적화 상태를 간벌만 시행했을 경우와 비교해 보면, 간벌연령과 벌기령이 모두 길어진 것을 알 수 있다<표 4-14>, <표 4-10>. 그러나 가치함수값은 어린나무가꾸기 작업연령 14년, 강도 20%에서 1,594만 8천 원, 30%에서 1,579만 9천 원으로 간벌만 했을 경우 발생하는 가치함수값 1,700만 9천 원보다 낮은 것을 알 수 있다. 그 이유는 동일한 임분연령에서 간벌만 실시했을 때보다 재적이 적으므로 벌채시기가 느려지며, 벌채수익에 대한 할인요인이 커지기 때문이다.

표 4-14. 소나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안 (목재의 경제성만 고려)

단위: 년, %, 천 원

	어린나무가꾸기 20%				어린나무가꾸기 30%			
	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값
11년 어린 나무 가꾸기	21	65	42	14,851	21	60	42	14,314
	22	65	42	15,215	22	60	42	14,623
	23	65	42	15,583	23	60	42	14,922
	24	65	43	15,752	24	60	42	15,214
	25	65	45	15,572	25	60	42	15,508
	26	60	43	15,453	26	60	43	15,444
	27	60	45	15,294	27	60	45	15,285
	28	55	44	15,101	28	55	44	15,094
12년 어린 나무 가꾸기	21	65	42	14,925	21	60	42	14,419
	22	65	42	15,290	22	60	42	14,721
	23	65	42	15,659	23	60	42	15,011
	24	65	43	15,813	24	60	42	15,303
	25	65	45	15,630	25	60	42	15,597
	26	60	43	15,513	26	60	43	15,528
	27	60	45	15,353	27	60	45	15,366
	28	55	44	15,160	28	55	44	15,177
13년 어린 나무 가꾸기	21	65	42	15,004	21	60	42	14,531
	22	65	42	15,369	22	60	42	14,817
	23	65	42	15,738	23	60	42	15,107
	24	65	43	15,878	24	60	42	15,400
	25	60	41	15,696	25	60	42	15,694
	26	60	43	15,578	26	60	43	15,620
	27	55	42	15,392	27	60	45	15,456
	28	55	44	15,224	28	55	44	15,268
14년 어린 나무 가꾸기	21	65	42	15,088	21	60	42	14,636
	22	65	42	15,453	22	60	42	14,923
	23	65	42	15,822	23	60	42	15,213
	24	65	43	15,948	24	60	42	15,506
	25	60	41	15,769	25	60	42	15,799
	26	60	43	15,648	26	60	43	15,721
	27	60	45	15,483	27	60	45	15,554
	28	55	44	15,292	28	55	44	15,367

나. 잣나무

어린나무가꾸기 작업강도 20%에서는 간벌연령 24년, 간벌강도 70%, 벌기령 47년에서 적정관리가 되는 것으로 나타났다. 작업강도 30%에서는 간벌연령 26년, 간벌강도 70%, 벌기령 46년에서 적정관리가 된다<표 4-15>. 어린나무가꾸기의 최적화 조건은 작업강도 30%보다 20%에서 가치함수값이 높게 나타나며, 작업연령이 높아질수록 가치함수값이 올라가는 것은 소나무와 동일하다.

최적화 상태를 간벌만 시행했을 경우와 비교해 보면, 간벌연령은 길어지고 벌기령은 오히려 짧아진 것으로 나타났다. 가치함수값은 작업연령 14년, 강도 20%에서 2,263만 3천 원, 30%에서 2,242만 8천 원으로 간벌만 했을 경우 발생하는 가치함수값 2,447만 7천 원보다 낮은 것으로 분석되었다<표 4-15>, <표 4-11>. 소나무와 마찬가지로 동일한 임분연령에서 간벌만 실시했을 때보다 재적이 적기 때문이다.

표 4-15. 잣나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안 (목재의 경제성만 고려)

단위: 년, %, 천 원

	어린나무가꾸기 20%				어린나무가꾸기 30%			
	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값
11년 어린나무 가꾸기	21	70	48	21,978	21	70	47	21,071
	22	70	48	22,155	22	70	47	21,251
	23	70	48	22,333	23	70	47	21,430
	24	70	47	22,509	24	70	47	21,763
	25	70	47	22,400	25	70	47	21,783
	26	70	47	22,088	26	70	47	21,956
	27	70	46	21,807	27	70	46	21,856
	28	70	46	21,557	28	70	46	21,605
12년 어린나무 가꾸기	21	70	48	22,017	21	70	47	21,121
	22	70	48	22,195	22	70	47	21,301
	23	70	48	22,372	23	70	47	21,480
	24	70	47	22,549	24	70	47	21,658
	25	70	47	22,440	25	70	47	21,833
	26	70	47	22,128	26	70	47	22,007
	27	70	46	21847	27	70	46	21907
	28	70	46	21597	28	70	46	21656

표 4-15. 잣나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안 (목재의 경제성만 고려)(계속)

단위: 년, %, 천 원

	어린나무가꾸기 20%				어린나무가꾸기 30%			
	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값
13년 어린나무 가꾸기	21	70	48	22,057	21	70	47	21,175
	22	70	48	22,235	22	70	47	21,354
	23	70	47	22,413	23	70	47	21,534
	24	70	47	22,590	24	70	47	21,712
	25	70	47	22,481	25	70	47	21,887
	26	70	47	22,169	26	70	47	22,060
	27	70	46	21,888	27	70	46	21,961
	28	70	46	21,638	28	70	46	21,710
14년 어린나무 가꾸기	21	70	48	22,099	21	70	47	21,241
	22	70	48	22,277	22	70	47	21,411
	23	70	47	22,456	23	70	47	21,590
	24	70	47	22,633	24	70	47	21,768
	25	70	47	22,524	25	70	46	22,253
	26	70	47	22,211	26	70	46	22,428
	27	70	46	21,931	27	70	46	22,330
	28	70	46	21,681	28	70	46	22,078

4.2. 탄소와 목재의 경제성을 고려한 최적화

목재의 경제성 최적화 방법과 마찬가지로 간벌시기를 임분연령 15~30년으로 구분하고, 각 간벌시기별로 간벌강도 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70% 등으로 나누어 탄소흡수 최적화를 위한 간벌시기와 간벌강도를 계측하였다. 최종적으로 목재생산 가치함수값과 합하여 임분의 적정관리 수준을 결정한다. 벌채 및 간벌에 따른 비용은 목재생산만 고려한 분석에 모두 포함되어 있으므로 따로 고려하지 않았다.

목재가 벌채되는 순간 탄소는 모두 대기 중으로 날아가는 것으로 가정하였으므로 탄소흡수에 따른 가치는 연간 흡수량의 현재가치 합에서 벌채시기의 배출량(연간흡수량의 합)의 현재가치를 빼준 값으로 나타낼 수 있다. 임분연령 k에서 벌채를 실시했다고 가정하면, 탄소흡수 및 배출에 따른 현금의 흐름은 다음과 같이 나타난다.

$$\sum_{t=1}^{k}\frac{1}{(1+r)^t}P_{CO_2}\triangle C_t-\frac{1}{(1+r)^k}\sum_{t=1}^{k}\triangle C_t$$

$$=P_{CO_2}[\sum_{t=1}^{k}\frac{1}{(1+r)^k}\triangle C_t-\frac{1}{(1+r)^k}\sum_{t=1}^{k}\triangle C_t]$$

여기서 $\triangle C_t$는 연간 재적변화에 따른 탄소 흡수량의 변화를 나타낸다. 위 식의 첫째항은 연간 탄소흡수량 증가에 따른 이윤을 타나내며, 둘째항은 벌채나 간벌로 인한 탄소배출 비용을 나타낸다.

탄소흡수량에 44/12을 곱하여 이산화탄소로 환산하며, 이산화탄소의 가격은 2009년 11월 EU시장(ECX)에서 거래된 톤당 21달러[31], 대미환율은 2009년 11월 10일 가격인 1,160원/달러를 적용하였다. 따라서 이산화탄소는 24,360원/tCO_2이며, 탄소 1 톤의 가격은 89,320원이 된다.

4.2.1. 간벌

탄소의 경제성만 고려했을 경우 간벌연령 및 강도와 관계없이 임분의 적정 벌기령은 최고 연령인 70년인 것으로 분석된다. 최고 가치함수 값은 소나무 652만 8천 원, 잣나무 671만 3천 원으로 목재의 경제성만 고려한 최고 가치함수값 1,700만 9천 원, 2,447만 7천 원보다 적은 것을 알 수 있다<표 4-16>, <표 4-10>, <표 4-11>.[32]

---

31 동아 economy(http://economy.donga.com) 2009. 11. 11.

32 그 이유는 목재 1㎥당 탄소흡수량이 약 0.33톤(소나무 0.3302, 잣나무 0.3311)이므로 탄소 1톤의 가치 89,320원이 목재 3㎥가치 144,000원(낮은 가격 적용)

간벌 강도별 간벌연령을 계산해 보면, 소나무와 잣나무는 간벌강도가 약할수록 간벌연령은 늦어지고 강할수록 빨라지는 것으로 나타났다. 따라서 간벌강도 10%에서는 간벌연령 30년이 적당하나, 70%로 높아질 경우 간벌연령은 소나무 21년, 잣나무 15년으로 줄어든다<표 4-16>.

표 4-16. 탄소의 경제성만 고려한 간벌강도별 간벌연령 및 가치함수값 (벌기령 70년)

단위:%, 년, 천 원

간벌 강도	소나무		잣나무	
	간벌연령	가치함수값	간벌연령	가치함수값
무간벌	-	6,528	-	6,595
10	30	6,522	30	6,668
15	30	6,510	30	6,693
20	30	6,491	30	6,709
25	30	6,463	30	6,713
30	30	6,424	30	6,703
35	29	6,372	30	6,675
40	22	6,310	28	6,627
45	22	6,240	26	6,562
50	22	6,153	22	6,481
55	21	6,047	22	6,385
60	21	5,915	22	6,256
65	21	5,747	15	6,095
70	21	5,527	15	5,882

이 결과를 목재의 경제성 최적화 결과와 합하면 목재와 탄소의 경제성을 동시에 고려한 간벌 최적화를 구할 수 있다. 그 결과 소나무의 최적 벌기령은 46년 또는 48년이며, 간벌강도는 65%이다. 이때의 간벌연령은 25년

보다 낮기 때문임.

또는 26년인 것으로 분석되었다<표 4-17>. 즉 임분의 연령이 25년이나 26년일 때 강도 65%로 간벌을 실시하며, 임분의 연령이 46년 또는 48년에 이르렀을 때 벌채하는 것이 최적화된 간벌 및 벌채방법이라 할 수 있다. 목재와 탄소의 경제성을 동시에 고려하면 목재만 고려했을 때보다 간벌연령은 13.6~18.2% 증가하고 벌기령은 18~23.1% 늘어난 것으로 분석되었다.

표 4-17. 소나무 목재와 탄소의 경제성을 고려한 간벌작업

단위: 연, %, 천 원

	목재의 경제성 고려			목재와 탄소의 경제성 고려		
간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값	간벌강도	벌기령	가치함수값
15	65	38	14,697	70	43	17,358
16	65	38	15,014	70	42	17,707
17	65	38	15,350	70	42	18,081
18	65	37	15,703	70	42	18,476
19	65	37	16,103	70	42	18,892
20	65	37	16,513	70	42	19,326
21	70	41	16,936	70	41	19,783
22	65	39	17,009	70	43	20,019
23	65	41	16,974	70	46	20,053
24	65	43	16,860	65	43	20,080
25	60	41	16,703	65	46	20,092
26	60	43	16,562	65	48	20,092
27	55	42	16,389	65	50	20,054
28	55	44	16,199	60	48	19,969
29	55	45	15,987	60	50	19,911
30	55	47	15,788	60	52	19,828

동일한 방법으로 잣나무의 목재와 탄소의 경제성을 고려한 최적화 관리를 산정한 결과 간벌연령 22년, 간벌강도 70%, 벌기령은 52년에서 최고의 가치함수값을 나타내는 것으로 분석되었다<표 4-18>. 목재의 경제성만 고려했을 경우와 비교해보면, 간벌연령이나 강도는 변화가 없으나 벌기령이 8.3% 늘어난 것으로 나타났다.

표 4-18. 잣나무 목재와 탄소의 경제성을 고려한 간벌작업

단위: 연, %, 천 원

	목재의 경제성 고려			목재와 탄소의 경제성 고려		
간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값	간벌강도	벌기령	가치함수값
15	70	48	23,473	70	51	27,344
16	70	48	23,623	70	51	27,484
17	70	48	23,,781	70	51	27,636
18	70	48	23,944	70	51	27,796
19	70	48	24,112	70	51	27,965
20	70	48	24,283	70	51	28,140
21	70	48	24,456	70	51	28,320
22	70	48	24,477	70	52	28,405
23	70	47	24,039	70	56	28,047
24	70	47	23,653	70	58	27,580
25	70	46	23,309	70	57	27,155
26	70	46	23,006	70	56	26,780
27	70	46	22,732	70	56	26449
28	70	45	22,455	70	55	26129
29	70	45	22,268	70	55	25899
30	70	45	22,067	70	54	25671

4.2.2. 어린나무가꾸기

어린나무가꾸기 강도 20% 및 30%에 대해서 분석하였으며, 간벌연령 15~30년의 평균 가치함수값을 비교하였다. 탄소의 경제성만 고려했을 경우 간벌과 마찬가지로 소나무와 잣나무는 어린나무가꾸기를 하지 않았을 경우의 평균 가치함수값이 최대를 나타낸다. 또한 어린나무가꾸기의 작업연령이 높을수록, 강도가 낮을수록 가치함수값이 높아지는 것을 알 수 있다<표 4-19>, <표 4-20>.

표 4-19. 소나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 가치함수값의 변화 (탄소의 경제성만 고려)

단위: 천 원

강도(%)		0	20				30			
작업연령			11	12	13	14	11	12	13	14
임분연령	15	348	329	332	336	341	314	319	327	336
	20	904	844	847	850	855	801	806	812	819
	25	1,615	1,526	1,529	1,532	1,537	1,447	1,451	1,457	1,463
	30	2,325	2,243	2,245	2,249	2,252	2,167	2,170	2,175	2,181
평균 (15~30)		1,282	1,215	1,218	1,222	1,226	1,161	1,165	1,171	1,178

표 4-20. 잣나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 가치함수값의 변화 (탄소의 경제성만 고려)

단위: 천 원

강도(%)		0	20				30			
작업연령			11	12	13	14	11	12	13	14
임분연령	15	321	321	321	320	320	316	316	317	317
	20	816	810	810	811	812	795	796	797	798
	25	1,434	1,421	1,422	1,423	1,425	1,392	1,393	1,395	1,397
	30	2,089	2,085	2,087	2,089	2,091	2,056	2,058	2,060	2,063
평균 (15~30)		1,149	1,142	1,143	1,144	1,145	1,122	1,123	1,124	1,126

목재와 탄소의 경제성을 동시에 고려한 분석결과는 <표 4-21>, <표 4-22>와 같다. 소나무, 잣나무 모두 어린나무가꾸기를 실시하지 않았을 경우에 가장 높은 가치함수값을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 주변 환경에 의해 성장에 방해를 받는 어린나무는 제거해야할 필요가 있을 경우, 생리적인 판단에 의하여 어린나무가꾸기를 실시하되 작업연령은 높고 작업강도는 낮을수록 유리하다.

표 4-21. 소나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 가치함수값의 변화 (목재와 탄소의 경제성 고려)

단위: 천 원

강도(%)		0	20				30			
작업연령			11	12	13	14	11	12	13	14
임분연령	15	2586	-297	-148	11	181	-554	-341	-111	139
	20	10,097	7193	7,314	7,443	7,582	6,593	6,763	6,949	7,150
	25	13,859	12,251	12,346	12,448	12,558	12,117	12,264	12,424	12,597
	30	15,468	14,033	14,115	14,203	14,297	13,988	14,102	14,228	14,366
평균 (15~30)		11,066	8,847	8,958	9,077	9,204	8,489	8,647	8,819	9,005

표 4-22. 잣나무 어린나무가꾸기 강도별·연령별 간벌시기 가치함수값의 변화 (목재와 탄소의 경제성 고려)

단위: 천 원

강도(%)		0	20				30			
작업연령			11	12	13	14	11	12	13	14
임분연령	15	1,696	-797	-714	-630	-544	-838	-727	-610	-489
	20	8,089	5,936	6,004	6,074	6,146	5,751	5,840	5,935	6,035
	25	12,017	10,542	10,601	10,661	10,724	10,335	10,412	10,493	10,578
	30	14,182	12,895	12,947	12,999	13,053	12,932	12,998	13,069	13,144
평균 (15~30)		9,418	7,564	7,629	7,695	7,763	7,453	7,538	7,628	7,722

4.2.3. 어린나무가꾸기와 간벌

어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 적용한 소나무 임분의 경우 간벌연령 26년 강도 65%, 벌기령 48년이 적정 관리방법이며, 이때 어린나무가꾸기의 작업연령은 14년, 작업강도는 20%인 것으로 분석되었다<표 4-23>. 어린나무가꾸기의 최적화 조건은 높은 작업연령과 낮은 작업강도임을 알 수 있다.

잣나무의 경우 어린나무가꾸기 작업강도가 20%일 경우 간벌연령 24년, 벌기령 58년, 30%에서는 간벌연령 26년, 벌기령 56년 또는 57년에서 적정 가치함수값을 가진다. 그러나 어린나무가꾸기 작업강도 20%, 작업연령 14년에서 최대 가치함수값을 나타내어 소나무와 같이 높은 작업연령과 낮은 작업강도에서 최적화 조건을 만족하는 것으로 나타났다<표 4-24>.

표 4-23. 소나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안 (목재와 탄소의 경제성 고려)

단위: 년, %, 천 원

	어린나무가꾸기 강도 20%				어린나무가꾸기 강도 30%			
	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값
11년 어린나무 가꾸기	21	70	48	17,871	21	65	47	17,386
	22	70	47	18,279	22	65	46	17,735
	23	70	47	18,710	23	65	46	18,107
	24	70	48	18,944	24	65	46	18,469
	25	65	46	18,949	25	65	46	18,828
	26	65	48	18,969	26	65	48	18,889
	27	65	50	18,952	27	65	50	18,872
	28	65	52	18,844	28	60	48	18,763
12년 어린나무 가꾸기	21	70	48	17,932	21	65	46	17,474
	22	70	47	18,353	22	65	46	17,840
	23	70	47	18,784	23	65	46	18,202
	24	70	48	19,002	24	65	46	18,557
	25	65	46	19,008	25	65	46	18,917
	26	65	48	19,026	26	65	48	18,969
	27	65	50	19,008	27	65	50	18,950
	28	60	48	18,901	28	60	48	18,845
13년 어린나무 가꾸기	21	70	47	18,007	21	65	46	17,586
	22	70	47	18,431	22	65	46	17,950
	23	70	47	18,851	23	70	52	18,318
	24	70	48	19,065	24	65	46	18,654
	25	65	46	19,072	25	65	46	19,014
	26	65	48	19,089	26	65	48	19,058
	27	65	50	19,068	27	65	50	19,036
	28	60	48	18,964	28	60	48	18,934
14년 어린나무 가꾸기	21	70	47	18,089	21	65	46	17,706
	22	70	47	18,513	22	65	46	18,056
	23	70	47	18,924	23	65	46	18,404
	24	70	48	19,133	24	65	46	18,759
	25	65	46	19,142	25	65	46	19,120
	26	65	48	19,157	26	65	48	19,155
	27	65	50	19,134	27	65	50	19,131
	28	60	48	19,031	28	60	48	19,031

표 4-24. 잣나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안 (목재와 탄소의 경제성 고려)

단위: 년, %, 천 원

	어린나무가꾸기 강도 20%				어린나무가꾸기 강도 30%			
	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값
11년 어린나무 가꾸기	21	70	59	25,943	21	65	60	24,929
	22	70	59	26,122	22	65	59	25,091
	23	70	59	26,304	23	65	59	25,256
	24	70	58	26,488	24	65	59	25,558
	25	70	58	26,339	25	65	59	25,589
	26	70	57	25,957	26	70	57	25,770
	27	70	57	25,619	27	70	57	25,642
	28	70	56	25,321	28	70	56	25,343
12년 어린나무 가꾸기	21	70	59	25,979	21	65	59	24,973
	22	70	59	26,159	22	65	59	25,136
	23	70	58	26,341	23	65	59	25,301
	24	70	58	26,525	24	65	59	25,467
	25	70	58	26,375	25	65	59	25,634
	26	70	57	25,994	26	70	57	25,817
	27	70	57	25,656	27	70	57	25,688
	28	70	56	25,358	28	70	56	25,390
13년 어린나무 가꾸기	21	70	59	26,016	21	65	59	25,022
	22	70	59	26,196	22	65	59	25,185
	23	70	58	26,378	23	65	59	25,350
	24	70	58	26,563	24	65	59	25,515
	25	70	58	26,413	25	65	59	25,682
	26	70	57	26,032	26	70	57	25,866
	27	70	57	25,694	27	70	57	25,738
	28	70	56	25,396	28	70	56	25,440
14년 어린나무 가꾸기	21	70	59	26,054	21	65	59	25,073
	22	70	59	26,234	22	65	59	25,236
	23	70	58	26,418	23	65	59	25,401
	24	70	58	26,603	24	65	59	25,566
	25	70	58	26,453	25	65	58	26,006
	26	70	57	26,071	26	70	56	26,193
	27	70	57	25,733	27	70	56	26,068
	28	70	56	25,436	28	70	55	25,770

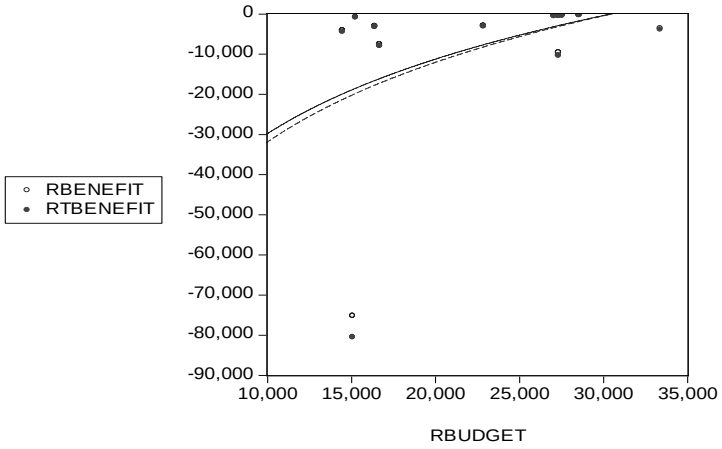
4.3. 산불방지노력 최적화

산불 방지 노력은 산림의 훼손을 방지함으로써 목재의 경제적 가치뿐만 아니라 축적된 이산화탄소를 보존하여 산림의 사회적 가치를 증가시킨다. 1998년 산불피해는 발생건수 265회, 피해면적 1,014ha, 피해재적 44,092㎥로 25억 1,600만 원 상당의 경제적 피해가 발생하였고, 2009년에는 발생건수 570회, 피해면적 1,381ha, 피해재적 91,626㎥로 38억 8,300만 원의 경제적 피해가 발생하였다. 1998~2009년 동안 연간 산불 발생 건수는 증가하였으나 건당 실질피해액은 1998년 1억 926만 원에서 2009년 6,284만 원으로 연평균 5.0% 감소한 것으로 나타났다. 이는 산불 발생 건수에 비해 산불 피해면적이 감소하였기 때문이다. 이러한 결과는 산불 조기진화 노력에 기인한 것이다.

산림의 이산화탄소 흡수량을 고려할 경우 산불로 인한 산림훼손의 피해액은 1998년 27억 2,600만 원에서 2009년 41억 6,900만 원으로 연평균 3.9% 상승하는 것으로 나타났다. 이산화탄소흡수량의 경제적 가치는 ha당 30년생 임목의 평균 이산화탄소 흡수량(8.50ton/ha)에 톤당 이산화탄소 가격(2009년 가격 기준) 24,360원을 곱하여 구한 것이다. 산림의 이산화탄소 흡수량을 고려했을 경우 산불로 인한 산림훼손 피해액은 이산화탄소 흡수량을 고려하지 않은 경우보다 1998년 8.3%, 2009년 7.4% 더 증가하는 것으로 나타났다.

1998~2009년간의 실질산림예산과 산불로 인한 산림가치의 실질훼손금액에 (−)를 곱한 마이너스 실질훼손금액, 즉 실질혜택을 그림으로 나타내면 오른쪽과 같다<그림 4-5>. 산림예산의 증가에 따라 산불방지로부터 발생하는 가치가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 산림예산의 증가는 산불방지노력을 수반하였고 그 결과 산림가치의 훼손을 감소시켰다는 것을 의미한다. 그림의 흰 동그라미와 실선은 산림의 이산화탄소 흡수량을 고려하지 않았을 경우의 산림가치와 로그 추세선을 나타낸다. 반면 검은 동그라미와 점선은 산림의 이산화탄소 흡수량을 고려하였을 경우의 산림가치와 로그 추세선을 나타낸다. 이산화탄소 흡수량을 고려하였을 경우 그렇지 않은 경우보다 산림의 가치가 예산에 대하여 가파르게 반응하는 것을 알 수 있다.

그림 4-5. 산림예산과 산불방지로 인한 경제적 가치



여기서 RBUDGET은 2005년 불변가격 기준의 산림예산, RBENEFIT은 이산화탄소흡수량을 고려하지 않았을 때 산불방지에 따른 산림의 가치, RTBENEFIT는 이산화탄소흡수량을 고려했을 경우 산불방지의 가치를 나타낸다. 따라서 다음의 가설을 택할 수 있다.

<가설 1> 산불예방노력의 증가는 산불로 인한 피해규모를 감소시킨다. 즉, 산불방지 노력이 산림의 훼손을 감소시키고 그 결과 산림가치를 증대시킨다.

위의 <가설 1>에 대한 검정은 다음의 단순회귀분석으로 보여줄 수 있다. 산불예방노력을 측정하는 대체변수는 산불방지를 위한 산림예산으로 가정하였다. 가설을 검정하기 위하여 산불에 의한 연도별 피해액, 산불 발생빈도수, 피해면적 및 재적 등 산불관련 자료를 이용하여 산불발생으로 인한 연도별 산림훼손의 경제적 피해액과 산림예산과의 상관관계를 살펴보고 회귀분석 하였다. 즉, 산림의 실질예산을 독립변수, 산불로 인한 산림훼손의 경제적 가치(RLOSSAMOUNT)에 (-)를 곱한 것을 종속변수로 설정하고 회귀분석 하였다. 추정식은 일차-로그(linear-log) 함수형태이고 자기상관관계(autocorrelation)를 극복하기 위해 AR(1)을 도입하였다. 회귀분석 결과는 <표 4-25>와 같다.

표 4-25. 산림예산의 산불방지로 인한 산림의 경제적 가치 회귀분석결과

변수	계수	표준편차	t-값
상수	-353403.0	167263.2	-2.113
LOG(RBUDGET)	34485.96	16770.8	2.056
AR(1)	-0.435257	0.322347	-1.350
R^2	0.298347		
Adjusted R^2	0.122934		
D. W.	1.9858		

산림예산과 산불방지를 통한 산림의 보전가치는 양(+)의 관계를 갖는 것이 통계적으로 유의하게 계측되었다. 산림예산 한 단위(x) 증가에 따른 산불방지로 인한 산림보전가치 증가분은 34,485.96/x 이다. 따라서 산림예산 평균값 226억 5,670만 원에 대해서 한계산림보전가치는 1.52에 달한다. 이는 산불방지노력의 가치가 비용보다 크다는 것을 의미하며 다음과 같은 가설을 추론할 수 있다.

<가설 2> 현재의 산불방지노력은 최적수준에 미치지 못할 뿐만 아니라 산림의 이산화탄소 흡수량을 고려하면 산불방지노력의 최적수준은 더 증가한다.[33]

위의 가설에 대한 검정은 다음의 회귀식과 <그림 4-6>으로 증명할 수 있다. 먼저 산림의 이산화탄소 흡수량을 고려한 산불방지가치 추정을 위해 종속변수에 산불로 인해 감소한 산림의 경제적 가치뿐만 아니라 훼손된 산림의 이산화탄소 흡수량의 경제적 가치(RLOSSAMOUNT+LOSSCO2)까지 포함하여 추정하였다. 앞의 회귀분석과 마찬가지로 일차-로그함수 형태의 추정식이고, 자기상관관계를 우회하기 위해 AR(1)을 도입하였다. 추정결과 산림의 이산화탄소 흡수량의 경제적 가치를 고려하였을 때 산림예산

33 현재의 산림예산이 효율적으로 사용되고 배분된다고 가정한다. 따라서 산림예산이 산불방지노력을 대변하는 대체변수로 가정함.

(x)의 한계산림보전가치(36,866.48/x)가 그렇지 않은 경우(34,485.96/x)보다 큰 것으로 나타났다<표 4-26>, <표 4-25>. 즉, 산림예산평균값에 대한 한계산림보전가치는 1.63으로 계산되었다. 이는 산림의 이산화탄소흡수기능을 포함한 가치함수가 경제적 가치만을 고려한 가치함수보다 더 가파르게 증가한다는 것을 의미한다.

표 4-26. 산불방지예산의 산림의 경제적가치 및 이산화탄소흡수가치 회귀분석결과

변수	계수	표준편차	t-값
상수	-377824.5	179189.5	-2.109
LGO(RBUDGET)	36866.48	17966.54	2.0526
AR(1)	-0.434601	0.322462	-1.348
R^2	0.297567		
Adjusted R^2	0.121958		
D. W.	1.9854		

한편 산림예산의 한계산림보전가치가 “1”보다 크다는 것은 산림예산으로 대변할 수 있는 산불방지노력이 최적수준에 미치지 못한다는 것을 의미한다. 이는 다음의 산림가치생산가능성 곡선에 의하여 설명된다. 먼저 위의 산림예산과 산불방지로 인한 산림의 경제적 가치와의 회귀식에서 다음과 같이 산림가치생산가능성 곡선을 구할 수 있다.

$y = 34485.96\ln(x) - 353403.0$: 이산화탄수 흡수량 고려하지 않음. (수식1)

$y = 36866.48\ln(x) - 377824.5$: 이산화탄소 흡수량 고려 (수식2)

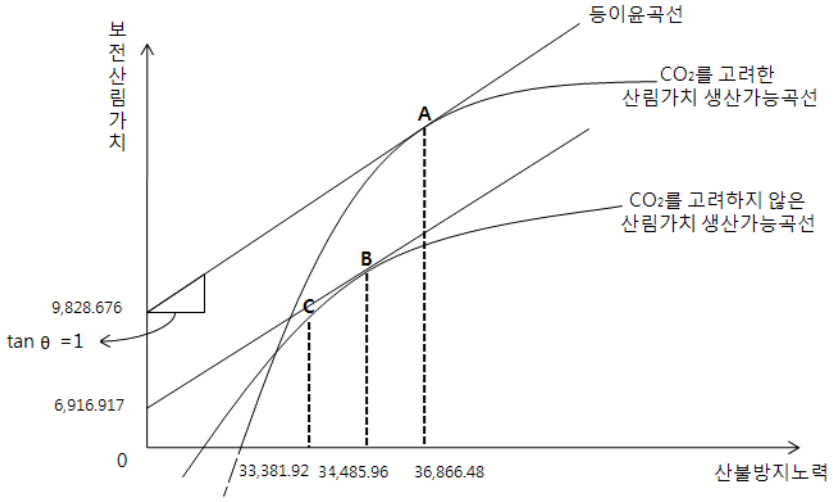
여기서 x는 산불방지를 위한 산림예산, y는 산불 방지를 통한 산림의 보전가치를 나타낸다. 즉, 위의 식은 우리의 단순한 모형에서 산림예산이 최대한 구현할 수 있는 산불방지로 인한 산림의 경제적 혜택의 기술적 제약조건을 의미한다. 따라서 위의 식을 만족하는 상태에서 사회적 이윤을 극

대화하는 예산수준이 최적예산수준이 된다. 사회적 이윤은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{산불방지를 통한산림보전의 사회적이윤}(\Pi) = \text{보전되는산림가치}(y) - \text{산림예산}(x) \quad (\text{수식}3)$$

이를 산림예산(x)과 산불방지를 통해 보전되는 산림가치(y) 평면에 도시하면 $y = x + \Pi$라는 등이윤곡선(iso-profit function)을 얻을 수 있다. 최적예산은 산림가치생산가능성 곡선에서 최대의 이윤을 얻는 점이 된다. 이 점은 등이윤곡선과 접하는 점으로 <그림 4-6>에서 A, B 점으로 나타난다. A, B 점의 값은 산림가치생산가능곡선<수식 1>, <수식 2>을 산림예산에 대하여 미분한 것을 "1"로 놓으면 풀이가 가능하다.[34]

그림 4-6. 산림가치 생산가능곡선과 최적 산림예산



34 등이윤곡선의 기울기가 "1"이기 때문이다. 따라서 산불방지노력에 소요되는 추가비용과 이로부터 추가적으로 얻을 수 있는 사회적 이윤이 동일한 수준까지 산불방지노력하는 것이 사회적으로 최적이 된다는 것을 알 수 있음.

그 결과 이산화탄소 흡수량을 고려하지 않을 경우 최적 산림예산은 344억 8,696만 원으로 계산된다. 이산화탄소 흡수량을 고려할 경우 최적 산림예산은 368억 6,648만 원인 것으로 나타나 이산화탄소 흡수량을 고려하지 않은 경우보다 6.9% 증가하는 것으로 계산되었다.[35] 또한 산불방지를 통한 산림보전의 사회적 이윤은 <수식 3>에서 경제적 가치만을 고려하였을 때 69억 1,692만 원, 이산화탄소 흡수량까지 고려하였을 때에는 98억 2,868만 원인 것으로 나타났다. 이산화탄소 흡수량을 고려하였을 때 최적산불방지 노력은 추가적으로 6.9% 더 소요되는 반면 그로 인한 사회적 이윤은 42.1% 증가하는 것으로 나타났다.

한편 현재 산림예산은 2005년도 불변가격 기준으로 2009년 333억 8,192만 원이 최대치이다. 따라서 현재의 산림예산으로 대변되는 산불방지노력에서 얻을 수 있는 사회적 이윤은 57억 9,482만 원이므로 산림의 목재경제성만 고려하였을 때 얻을 수 있는 사회적 이윤 69억 1,692만원의 83.8%에 불과하다.[36]

2009년도 실질 산불예산 333억 8,192만 원은 위의 그림에서 점 C로 나타난다. 2009년도 실질 산불예산을 기준으로 하면, 이산화탄소를 고려하지 않은 최적산림예산은 3.3%의 증액(B 점), 이산화탄소를 고려할 경우(A 점)는 10.4%의 증액이 요구되는 것을 알 수 있다.

---

35 2005년 불변가격.

36 점 C를 통과하는 등이윤곡선의 절편이 현재의 산불예방수준으로 얻을 수 있는 산림의 목재가치만을 고려한 사회적 이윤임.

산림부문 관리방안

제5장

탄소흡수 증대를 위한 방안으로는 산림면적을 확대하여 탄소흡수원을 증대시키는 방법과 기존의 산림을 효율적으로 관리하여 흡수량을 늘리는 방법 등으로 크게 나눌 수 있다. 또한 산림의 생산물을 적절히 가공하여 이용함으로써 탄소의 저장을 보전하는 방법이 있다. 이 장에서는 탄소흡수 확대 및 보전을 위한 전반적인 방안을 소개한 후 연구결과를 이용한 산림 관리 최적화 방안을 제시하였다.

1. 탄소흡수 확대 및 보전

탄소흡수원 확대를 위한 방안으로는 신규조림 면적을 넓히고 해외조림을 확대하는 방법이 있다. 한계농지나 부실한 초지 등의 방치된 토지에 대한 신규조림사업을 추진하고, 새만금, 혁신도시 및 행복도시 등 새로운 토지에 대한 충분한 녹지를 확보하는 것이다. 이 밖에 폐탄광지역 등에 대한 조림사업도 탄소흡수원을 확대할 수 있는 방법이다.

탄소흡수 기능을 확대하기 위한 방안으로는 탄소흡수 능력이 우수한 수종을 개발하고 보급하는 방법과 기존에 추진하고 있는 숲가꾸기 등의 산림사업을 탄소흡수 최적화가 될 수 있도록 전환하는 방법 등을 들 수 있다. 탄소기능이 저하된 벌채 대상 입목은 과감하게 벌채하여 빠른 성장을 통한 탄소흡수 확대를 기대할 수 있다. 또한 기존의 시업과 탄소흡수 능력을 제

고할 수 있는 방법을 비교·분석할 수 있는 시험림을 조성하여 검증함으로써 최적화된 시업체계를 수립할 수 있도록 해야 한다.[37]

탄소흡수 보전을 위한 방안으로는 목제품 이용 확대를 통하여 탄소고정을 늘릴 수 있는 목재산업 활성화가 필요하다. 이를 위해서는 목조주택 개발 및 보급으로 목조건축 활성화를 이룩하며, 비록 가격경쟁력이 떨어지지만 산림경영의 생산물인 국산재를 구매하여 활용할 수 있는 여건을 조성할 필요가 있다. 또한 목제품이나 목조건축물에 대한 탄소저장량 표시제를 도입하여 일반인들이 쉽게 이해할 수 있도록 홍보하며, 탄소계정을 위한 목재탄소계정 기반을 마련하여야 한다. 아울러 폐목재 재활용 확대를 위해 폐목재 분리배출을 의무화하고, 집재, 건조, 보관 등의 기능이 포함된 폐목재 처리시설을 신축할 필요가 있다.

목재의 연료화를 통해 화석연료 사용을 대체함으로써 탄소배출을 감소시킬 수 있다. 이를 위해 산림바이오매스의 에너지화를 촉진할 필요가 있다. 바이오순환림을 조성하고, 해외조림을 통한 안정적인 공급시스템을 구축하며, 산림바이오매스 수집의 효율성을 제고하는 시스템을 개발하여야 한다.

2. 탄소흡수 기능 확대

2.1. 정책실험

정책실험(Simulation)은 모형의 외부적인 환경의 변화, 특히 정책의 변화에 따른 결과를 예측하기 위하여 실시한다. 이 연구에서는 어린나무가꾸기

---

37 제2절에서부터 소개되는 내용은 동적임분생장모형을 통하여 생성한 자료를 이용하여 실제 시업체계와 비교·분석한 결과를 가지고 최적화된 산림관리 방안을 모색한 내용임.

와 간벌 등 탄소흡수와 관련된 산림사업의 최적화 조건이 주어진 외생변수 변화에 따라 어떻게 달라지는가를 분석하여 외부환경 변화에 대응할 수 있는 산림관리방안을 제시하는 것이 목적이다. 앞서 분석한 어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 적용하는 사업을 베이스라인(Baseline)으로 설정하였는데, 주요 외생변수는 아래와 같다.

표 5-1. Baseline의 주요 외생변수 값

외생변수명	외생변수값	
할인요소의 이자율(r)	2%	
간벌생산재 가격(낮은 가격)	48,000원/㎥	
원목가격(높은 가격)	소나무	5,8000원/㎥
	잣나무	115,500원/㎥
이산화탄소 거래가격(2009년 EU시장)	21달러/tCO_2	
대미환율(2009.11.10)	1,160원/달러	

2.1.1. 이자율

이자율은 자원관련 정책실험의 중요한 대상 중 하나이며, 현재나 미래의 특정 시점에서 가치를 비교하여 최적화 조건을 찾아내는 동태분석에서는 매우 중요한 외생변수이다. 이자율의 상승은 자산의 미래 가치를 하락시켜 가치함수값을 감소시키는 요인이 된다. 즉 자원을 보유하는 시간이 길어질수록 그 가치의 하락폭이 커진다는 것을 의미한다. 그 결과 관리자의 입장에서는 자원을 보유하기보다는 벌채를 통한 수익창출이 장기적으로 유리할 것이다. 따라서 벌기령은 줄어들 것이다.

이자율을 Baseline인 2%에서 변화시켰을 때의 결과는 <표 5-2>와 <표 5-3>과 같이 나타난다. 소나무의 경우 이자율이 감소했을 경우 간벌연령과 벌기령은 늘어나고, 그 반대의 경우 간벌연령과 벌기령은 줄어든다. 이자율이 2%포인트 증가함에 따라 간벌연령은 7.7%, 벌기령은 10.4%, 가치함수값은 59.7% 감소하는 것으로 분석되었다. 그러나 간벌강도는 변화하지 않는 것으로 나타났다. 어린나무가꾸기는 작업연령 14년, 작업강도 20%에

서 최고의 가치함수값을 나타낸다.

잣나무의 경우 이자율이 2%포인트 증가함에 따라 간벌연령은 8.3% 증가하였으나, 벌기령은 25.9%, 가치함수값은 64.4% 줄어들었다. 어린나무 가꾸기는 소나무와 같이 작업연령 14년, 작업강도 20%에서 가장 높은 가치함수값을 나타낸다.

표 5-2. 이자율 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화 (소나무)

단위: 년, %, 천 원

이자율	간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
0.01	27	65	50	42,870
0.015	27	65	50	27,007
Baseline (0.02)	26	65	48	19,157
0.025	25	65	46	14,499
0.03	24	65	43	11,451
0.035	24	65	43	9,304
0.04	24	65	43	7,715
0.045	24	65	43	7,715
0.05	24	65	43	5,543

표 5-3. 이자율 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화 (잣나무)

단위: 년, %, 천 원

이자율	간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
0.01	24	70	64	65,894
0.015	24	70	63	39,394
Baseline (0.02)	24	70	58	26,603
0.025	24	70	53	19,344
0.03	24	70	49	14,758
0.035	26	70	45	11,649
0.04	26	70	43	9,465
0.045	26	70	41	7,837
0.05	26	70	39	6,587

2.1.2. 원목가격

이 모형은 가격을 차별화하여 30년까지 생산되는 간벌재에 대해서는 낮은 가격을, 31년생부터 생산되는 원목에 대해서는 높은 가격을 적용하였다. 원목가격이 인상될 경우 산림관리자는 높은 수익 창출을 위하여 30년 이후에 생산되는 목재의 재적을 증가시키는 노력을 할 것이다. 따라서 간벌 이후 재적이 생장할 수 있는 충분한 기간과 조건을 부여하기 위해 간벌연령은 줄이고, 간벌강도는 높일 것으로 예상할 수 있다.

전체적인 흐름을 살펴보았을 때 높은 가격의 원목 가격이 상승할수록 간벌연령은 줄어들고, 간벌강도는 올라가는 것으로 나타났다. 벌기령의 변화는 잣나무에서만 나타나는데, Baseline에서 가격이 올라갈수록 짧아지는 것으로 나타났다. 가격 10% 상승에 따른 가치함수값의 변화는 소나무 4.5%, 잣나무 6.4%에 불과하다. 이는 원목가격 상승률이 모두 반영된 것이 아닌데, 그 이유는 탄소흡수에 따른 효과가 동시에 고려되었기 때문이다.

표 5-4. 고가원목가격 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화 (소나무)

단위: 년, %, 천 원

고가원목	간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
저가원목과 동일	28	60	48	17,842
Baseline (58,000원/㎥)	26	65	48	19,157
10% 증가	24	70	48	20,023
20% 증가	24	70	48	20,913
50% 증가	24	70	48	23,582
100% 증가	24	70	48	28,032

표 5-5. 고가원목가격 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화 (잣나무)

단위: 년, %, 천 원

고가 원목	간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
20% 하락	25	65	56	23234
10% 하락	24	70	60	24909
Baseline (115,500원/㎥)	24	70	58	26603
10% 인상	24	70	57	28310
20% 인상	24	70	56	30027
30% 인상	24	70	55	31753

2.1.3. 이산화탄소 거래가격

이산화탄소의 가격이 매우 낮게 거래되고 있으므로 실질적인 탄소가스 감축을 위해서는 현재가격보다 훨씬 높은 수준에서 거래될 필요가 있다는 주장이 지속적으로 제기된다. 대표적으로 ABI Research는 CCS(Carbon Capture and Sequestration, 탄소포집 및 저장) 상용화를 위해 이산화거래가격이 톤당 40달러 수준에 이르러야 한다고 밝힌 바 있다.[38]

21달러의 베이스라인 이산화탄소 거래가격이 인상됨에 따라 산림작업 조건이 어떻게 변화할 것인가에 대한 정책실험을 실시한 결과 다음과 같이 나타났다<표 5-6>, <표 5-7>. 이산화탄소 거래가격이 올라가면 간벌연령과 벌기령은 점진적으로 높아지는 것으로 분석되었다. 이는 입목을 보유하여 탄소흡수량을 늘리는 것이 전체적인 수익을 늘릴 수 있는 방법이기 때문이다. 환율 인상에 따른 최적 산림작업 조건 변화에도 같은 결과를 초래할 것으로 예상된다.

---

[38] Business Wire (2010. 1. 4.) “ABI Research sees carbon emission trading reaching $395 billion in 2014” (http://www.businesswire.com).

표 5-6. 이산화탄소 거래가격 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화 (소나무)

단위: 년, %, 천 원

CO_2거래가격 인상률	간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
Baseline	26	65	48	19,157
10%	26	65	48	19,520
20%	27	65	50	19,895
30%	27	65	50	20,276
40%	27	65	50	20,656
50%	28	65	53	21,037
60%	28	65	53	21,444
70%	28	65	53	21,851

표 5-7. 이산화탄소 거래가격 변화에 따른 최적 산림작업 조건 변화 (잣나무)

단위: 년, %, 천 원

CO_2거래가격 인상률	간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
Baseline	24	70	58	26603
10%	24	70	60	27067
20%	24	70	61	27548
30%	24	70	63	28046
40%	24	70	63	28551
50%	24	70	63	29056
60%	24	70	63	29561
70%	24	70	64	30075

2.2. 산림관리 최적화 방안

산림은 시대의 필요에 따라 관리방향이 변화하여 왔다. 경제발전을 위한 치산녹화가 가장 중요한 문제였던 1960~70년대에는 나무를 심는 것이 정책의 목표였다. 1980년대 들어 울창한 산림을 자원으로 이용하기 위한 노력을 경주하였으며, 1990년대부터는 산림의 지속가능한 관리 및 이용방안을 모색하기 위한 노력이 전세계적으로 시작되었다. 현재에는 지속가능한 산림관리를 바탕으로 산림을 이용한 기후변화 완화 및 적응을 위한 대책 마련이 가장 중요하게 논의되고 있는 실정이다.

기후변화 완화를 위한 노력으로 산림은 조림과 재조림에 대하여 탄소의 흡수 및 배출 문제를 중요하게 다루어 왔다. 전체적으로 개도국의 산림전용에 따른 흡수원 증가 및 감소가 가장 큰 문제로 여겨져 왔기 때문이다. 그러나 이러한 문제와 더불어 산림경영에 의한 탄소 감축노력도 중요한 문제로 대두될 것으로 예상된다. 이러한 노력의 일환으로 탄소흡수원으로서의 산림을 보다 효율적으로 관리하기 위한 방안이 적극적으로 논의될 전망이다. 따라서 2012년 이후에는 탄소흡수를 고려한 최적화된 산림경영 전략을 마련하여 기후변화에 적극적으로 대처할 필요가 있다.

2.2.1. 산림관리 최적화 조건

앞선 분석에서 도출된 산림관리 최적화 조건을 살펴보면 다음과 같다. 소나무와 잣나무 모두 목재의 경제성만 고려한 산림작업보다 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려한 작업을 실시하였을 경우 가치함수값이 높은 것으로 나타났다.

소나무 임분을 대상으로 목재와 탄소흡수의 경제성을 고려하고 간벌만 시행했을 경우 간벌연령이 올라갈수록 간벌강도는 약해지고 벌기령은 길어지며, 가치함수값은 상승하다가 하락하게 된다. 또한 간벌강도와 가치함수값은 비례하는 것으로 나타났다. 어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 시행할 경우 어린나무가꾸기의 강도는 약하게, 작업연령은 되도록 늦게 실

시하는 것이 가치함수값을 높일 수 있는 방법이다. 이때 간벌은 간벌만 시행했을 경우와 마찬가지의 조건을 가지게 된다.

잣나무의 경우에는 간벌만 시행했을 경우 간벌연령이 올라갈수록 벌기령과 가치함수값이 같이 늘어났다가 줄어드는 것으로 나타났다. 간벌강도와 가치함수값의 관계는 소나무와 마찬가지로 비례하는 것으로 나타났다. 반면 어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 적용할 경우 간벌연령이 늘어날수록 벌기령은 낮아지고 가치함수값만 상승 후 하락하는 것으로 나타났다. 이때 어린나무가꾸기의 조건은 작업강도가 약하고 작업연령이 올라갈수록 가치함수값이 높아지게 된다.

이상의 최적화 조건을 정리하여 보면 공통적인 결과는 어린나무가꾸기의 경우 강도를 줄이고 작업연령을 늦추는 것이 최적화를 위한 조건에 해당한다는 것을 알 수 있다. 소나무 간벌의 경우 강도와 간벌연령은 서로 반비례한다. 따라서 목재의 경제성을 고려하여 간벌강도를 정한 후, 그 강도에 맞추어 탄소흡수를 통해 가치함수값을 높일 수 있는 간벌연령 수준을 정하면 최적화 조건을 만족할 수 있을 것이다. 반면 잣나무의 경우에는 간벌연령과 간벌강도 및 벌기령의 관계가 명확한 경향을 나타내지 않아 최적화 조건을 찾기가 용이하지 않다.

표 5-8. 간벌사업의 최적화 조건

		간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
소나무	간벌연령		−	+	+−
	간벌강도	−		−+	+
	벌기령	+	−+		?
	가치함수값	+−	+	?	
잣나무	간벌연령		?	+−(−)	+−
	간벌강도	?		?	+
	벌기령	+−(−)	?		?
	가치함수값	+−	+	?	

주: +− 표시는 증가 후 감소한다는 것을 의미하며, 괄호안의 기호는 어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 실시할 경우의 관계를 나타냄.

2.2.2. 산림관리 최적화 결과 비교

앞장에서 도출한 Baseline의 최적화 결과를 비교하여 보면 다음과 같다. 소나무와 잣나무의 최고 가치함수값를 유도하는 작업은 목재와 탄소의 경제성을 동시에 고려하고, 어린나무가꾸기를 실시하지 않은 채 간벌만 하는 것이다. 이때의 간벌연령은 소나무의 경우 목재의 경제성만 고려했을 때보다 13.6~18.2% 늘어난 25년 또는 26년이며, 벌기령은 17.9~23.1% 늘어난 46년 또는 48년이다. 간벌강도는 65%에서 최적을 이룬다. 잣나무의 경우에는 간벌연령은 같으나 벌기령이 8.3% 늘어난 52년이 된다.

어리나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 실시하는 복합관리방법의 경우 어린나무가꾸기는 임분연령 14년에 20%의 강도로 실시하는 것이 소나무와 잣나무 모두에게 유리하다. 소나무 간벌은 26년에 65%의 강도로 하는 것이 적정 관리이며, 잣나무 간벌은 26년에 70%로 실시하는 것이 적정 관리방법이다. 이때 벌기령은 목재의 경제성만 고려한 경우보다 11.6%, 23.4%씩 각각 늘어난다. 간벌만 실시한 경우의 가치함수값이 더 높은 것으로 나타나 어린나무가꾸기가 목재 및 탄소의 경제적 가치를 높이는 데 크게 도움이 되지 않는 것으로 분석되었다.

표 5-9. 소나무산림 관리 작업별 최적화 결과

단위: 년, %, 천 원

작업	고려인자	시행연령	시행강도	벌기령	가치 함수값
간벌	목재 경제성	22	65	39	17,009
	목재와 탄소 경제성	25, 26	65	46, 48	20,092
복합	목재 경제성	14(어린)	20	43	15,948
		24(간벌)	65		
	목재와 탄소 경제성	14(어린)	20	48	19,157
		26(간벌)	65		

표 5-10. 잣나무산림 관리 작업별 최적화 결과

단위: 년, %, 천 원

작업	고려인자	시행연령	시행강도	벌기령	가치 함수값
간벌	목재 경제성	22	70	48	24,477
	목재와 탄소 경제성	22	70	52	28,405
복합	목재 경제성	14(어린)	20	47	22,633
		24(간벌)	70		
	목재와 탄소 경제성	14(어린)	20	58	26,603
		26(간벌)	70		

2.2.3. 산림관리 최적화 방안

산림자원관리 표준메뉴얼에 따르면 수종별 우량중경재(中徑材)를 생산할 목적의 인공 조림지에 대한 작업 방법은 다음과 같다. 두 수종 모두 2차에 걸쳐 간벌을 실시하는 것으로 나타났다. 그러나 어린나무가꾸기의 경우 소나무는 1차, 잣나무는 2차에 걸쳐 실시한다. 초기 식재본수는 소나무가 5,000본이며, 잣나무는 3,000본을 조림한다. 작업강도는 이전 작업에 따른 잔존본수를 기준으로 하여 계산된 비율이다.

표 5-11. 현행 산림관리 방법

			잔존본수(본)	작업연령(년)	작업강도(%)
소나무	식재본수		5000	-	-
	어린나무가꾸기		2000	8	60.0
	간벌	1차	1000	18	50.0
		2차	600	30	40.0
잣나무	식재본수		3000	-	-
	어린나무가꾸기	1차	2000	10	33.3
		2차	1500	15	25.0
	간벌	1차	800	25	46.7
		2차	400	35	50.0

가. 소나무

표 5-12. 현행 소나무산림관리 최적벌기령 및 가치함수

단위: 년, %, 천 원

작업	고려인자	시행연령	시행강도	벌기령	가치함수값
복합	목재	8	60	56	9,222
		15	50		
		30	40		
	목재+탄소	8	60	76	13,579
		15	50		
		30	40		

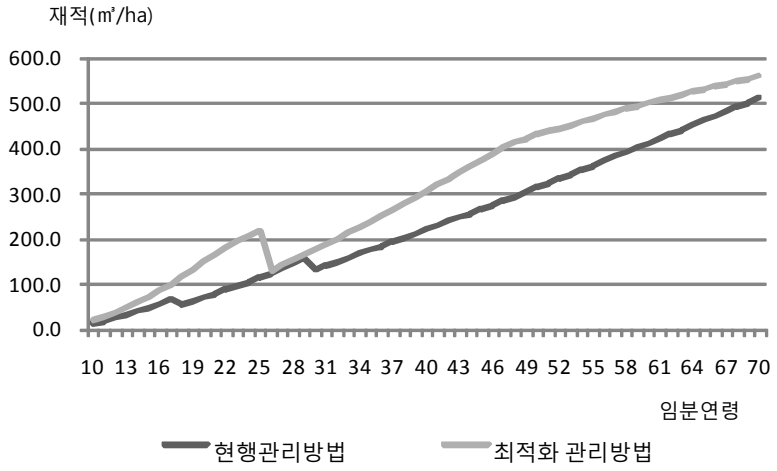
현행 산림관리 방법을 초기본수 6,000본으로 환산하여 벌기령과 가치함수를 계산하여 보면, 목재의 경제성만 고려한 경우 벌기령은 56년, 가치함수값은 922만 2천 원이 된다. 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령 76년, 가치함수값 1,357만 9천 원이 되는 것으로 나타났다. 두 경우의 벌기령을 소나무의 일반기준 벌기령인 70년(국유림), 50년(공·사유림)[39]과 비교해보면 공유림과 사유림의 경우 목재의 경제성만 고려한 벌기령과 비슷하나, 국유림은 탄소의 경제성을 포함하여 계산한 벌기령과 비슷한 것으로 나타났다.

그러나 최적화 관리방법을 적용하면 목재의 경제성만 고려한 경우 벌기령은 56년에서 30.4% 줄어든 39년이 되며, 가치함수값은 922만 2천 원에서 84.4% 늘어난 1,700만 9천 원이 된다. 반면 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 36.9% 줄어든 48년이 되고, 가치함수값은 48% 늘어난 2,009만 2천 원이 되는 것으로 분석되었다. 생리학적인 성장요인을 감안하여 어린나무가꾸기를 실시하더라도 목재의 경제성만 고려한 경우의 벌기령은 23.2% 줄어들고, 가치함수값은 72.9% 늘어났다. 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 36.8% 줄어들고 가치함수값은 41.1% 늘어난다.

---

39 기준벌기령 및 벌채기준(제7조 제2항 관련)(산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙 [별표 3]. 개정 2010. 8. 5.).

그림 5-1. 최적관리와 현행관리방법에 따른 재적성장 차이 (소나무)



이러한 결과를 나타내는 원인은 현행관리 방법에 따를 경우 재적성장이 느려지고, 2차간벌 시기가 늦어짐에 따라 벌기령이 길어지면서 상대적인 할인요인이 크게 작용하기 때문이다<그림 5-1>. 따라서 최적관리 방법에 비해 가치함수값이 떨어진다. 또한 현행관리 방법의 경우 느린 재적성장과 함께 2차에 걸친 간벌비용을 회복할 기간이 오래 걸리게 된다. 따라서 목재와 탄소의 경제성을 고려한 산림관리를 위해서는 현행 벌기령은 줄이고, 간벌은 1회에 걸쳐 강하게 시행하며(간벌연령은 26년으로 정하고) 어린나무가꾸기가 필요한 경우에는 나무가 잘 자랄 수 있는 주변정리 수준의 약한 강도에서 되도록 늦게 실시하는 것이 유리하다.

나. 잣나무

소나무의 경우와 마찬가지로 현행 산림관리 방법을 초기본수 6,000본으로 환산하여 벌기령과 가치함수를 계산하여 보면, 목재의 경제성만 고려한 경우 가치함수값은 음의 값을 가지며, 그 값은 약 －170만 3천 원이 된다. 4차에 걸친 작업비용을 100년이 넘도록 회복하지 못하기 때문이다. 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 최적벌기령은 165년이며, 이때 가치함수

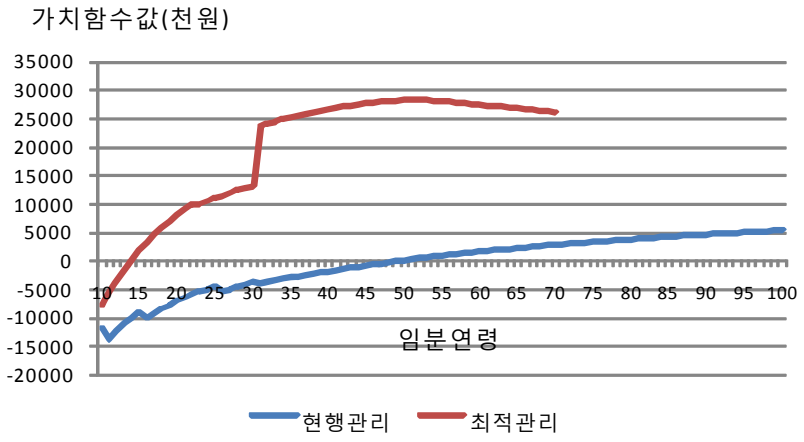
값은 759만 3천 원이 되는 것으로 나타났다. 목재의 경제성과 탄소의 경제성이 모두 감소하면서 증가하므로 최적벌기령은 100년이 넘는 것으로 분석되었다.[40]

표 5-13. 현행 잣나무산림관리 최적벌기령 및 가치함수

단위: 년, %, 천 원

작업	고려인자	시행연령	시행강도	벌기령	가치함수값
복합	목재	10	33.3	128	-1,703
		15	25.0		
		25	46.7		
		35	50		
	목재+탄소	10	33.3	165	7,593
		15	25.0		
		25	46.7		
		35	50		

그림 5-2. 최적관리와 현행관리방법에 따른 가치함수값 추이 (잣나무)



40 분석을 위해 이용한 동적임분생장모델은 100년까지의 결과만 제공하기 때문에 100년을 초과하는 벌기령에 대해서는 임분연령 90~100년까지의 가치함수값 연간 증가율을 적용하여 계산하였음.

잣나무의 일반기준벌기령인 70년(국유림), 60년(공·사유림)[41]과 비교해보면 공·사유림 및 국유림 모두 적정벌기령보다 매우 짧다는 것을 알 수 있다.

최적화 관리방법을 적용하면 목재의 경제성만 고려한 경우 벌기령은 128년에서 62.5% 줄어든 48년이 되며, 가치함수값은 -170만 3천 원에서 1,537% 늘어난 2,447만 7천 원이 된다. 반면 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 68.5% 줄어든 52년이 되고, 가치함수값은 274% 늘어난 2,840만 5천 원이 되는 것으로 분석되었다.

잣나무의 경우 타수종에 비해 관리작업의 횟수가 많으며 임분연령 35년까지 계속되므로 작업비용을 회복하는 데 많은 시간이 걸린다. 특히 목재만 고려했을 경우에는 비용을 회복하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 작업 횟수를 줄이고 연령도 낮출 필요하다. 또한 소나무와 같이 벌기령을 낮추고 어린나무가꾸기도 필요한 경우에 한해 약하게 시행하는 것이 유리하다.

다. 외생변수 변화에 따른 산림관리

외생변수와 관리방법과의 관계는 <표 5-14>와 같다.

표 5-14. 외생변수와 관리방법의 관계

		간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
소나무	이자율	-	○	-	-
	원목가격	-	+	○	+
	이산화탄소거래가격	+	○	+	+
잣나무	이자율	+	○	-	-
	원목가격	-	+	-	+
	이산화탄소거래가격	○	○	+	+

41 기준벌기령 및 벌채기준(제7조 제2항 관련)(산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙 [별표 3]. 개정 2010.8.5.).

이자율(Discount factor)이 올라가면 소나무의 간벌연령과 벌기령은 낮아진다. 그러나 잣나무의 간벌연령은 올라간다. 경기 침체 이후 회복에 따른 출구전략 시행으로 기준금리는 올라갈 것으로 전망된다. 그러나 40년 이상을 내다보는 장기적인 투자인 산림사업의 경우 경제의 안정화가 이룩된다는 가정하에 2%의 이자율이 적절할 것으로 예상된다.

러시아의 수출세 인상, 원목 수출국의 환경보호를 위한 원목 수출 제한 등 다양한 통상여건을 고려했을 때 원목의 수입이 어려워질 것으로 예상된다. 이와 더불어 소득의 증가와 함께 원목에 대한 수요가 늘어날 것이므로 국내산 원목의 가격은 높아질 것으로 전망된다. 따라서 간벌연령은 더욱 줄여야 할 것으로 생각된다. 잣나무의 경우 벌기령도 같이 줄이는 것이 가치함수값을 높일 수 있는 방법이다.

기후변화의 심각성이 높아지면서 탄소시장 활성화를 위한 방편으로 이산화탄소 거래가격은 상승할 것으로 전망된다. 이산화탄소의 거래가격이 높아지면서 소나무의 간벌연령은 증가할 것으로 전망되므로 예상되는 원목가격과의 관계를 감안하여 적절한 수준에서 간벌연령을 조절하여야 할 것이다. 또한 소나무의 벌기령은 분석결과인 최적수준보다 더 늘어날 것으로 전망된다. 그러나 잣나무의 경우에는 원목가격 상승을 감안하여 적절하게 조절하는 것이 바람직하다.

라. 산불

산불방지노력은 최적화 분석에서 밝혔듯이 목재의 경제성만 고려할 때도 사회적 최적수준에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 사회적 최적화 산불방지노력수준에 도달하기 위해서는 2009년도 산불방지노력은 약 3.3% 더 증가되어야 하는 것으로 계산되었다. 산림의 이산화탄소 흡수기능까지 고려할 경우 2009년 산불방지 노력은 10.4% 추가로 증가되어야 하는 것으로 나타났다.

산불방지노력의 최적화를 통해 산림의 사회적 가치는 이산화탄소흡수를 고려하지 않았을 때 19.4% 증가하고, 이산화탄소 흡수기능까지 고려할 경우

69.6% 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 산불방지노력을 각각 3.3%, 10.4% 추가로 증가하여 얻을 수 있는 산림의 사회적 가치 증가액이 더 크기 때문에 산불방지노력은 현재보다 더 많이 경주되어야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 현재의 예산을 증액하여 산불방지노력을 증대할 필요가 있다.

요약 및 결론

제6장

산업혁명 이후 화석연료 이용의 증가로 인한 자연재해가 세계 각지에서 빈발하면서 지구 온난화에 대한 논쟁이 가열되기 시작하였다. 지구 온난화에 관한 과학적 근거가 필요하다는 인식이 확산되고 기후변화에 대처하기 위해 인류는 1992년 기후변화협약을 채택하였으며, 2005년 교토의정서가 발효되면서 실질적인 온실가스 감축을 위한 노력이 시작되었다.

기후변화협약에서 산림의 중요성이 부각된 것은 제3차 당사국총회인데, 교토의정서를 채택하는 과정에서 온실가스 배출 및 흡수원 5개 분야 가운데 토지이용, 토지이용변화, 임업(Land Use, Land-Use Change, and Forestry: LULUCF) 분야를 유일한 온실가스 흡수원으로 인정하였기 때문이다. 산림을 통한 온실가스 흡수는 타 산업에서 적용하는 배출량 감축사업에 비해 제약이 많지 않고 미래의 불확실성에 대한 변동이 적으며, 일정 수준의 흡수량을 지속적으로 확보할 수 있다는 장점이 있다. 또한 산림 흡수원의 활용은 조림과 산림의 효율적 관리를 통하여 지구온난화 방지 이 외에 생태계 보전, 수자원 함양, 대기정화, 토사유출 방지, 휴양기능 등의 다양한 공익적 기능을 제공할 수 있다.

산림을 이용한 기후변화 완화방안에는 재조림과 신규조림을 통하여 탄소흡수원을 확충하는 방법, 효율적인 산림경영을 통하여 탄소흡수를 최대화하는 방법 등이 있다. 이 밖에 산림바이오매스의 이용을 확대하여 화석연료 사용을 줄임으로써 탄소배출을 억제할 수 있다. 또한 건축이나 토목공사의 원료로 이용되는 목제품을 확대하여 탄소저장고를 늘리며, 동시에 탄소배출을 저감하는 방법이 있다.

현재 선진국들은 탄소배출권을 인정받기 위하여 산림부문에서 신규조림, 재조림, 산림전용 및 산림경영활동 등에 대한 정책을 수립하고 있다. 동시에 온실가스 통계 구축에 관한 연구들을 진행하고 있다. 특히, 비용과 시간이 많이 드는 신규조림 및 재조림보다는 산림경영활동을 통한 탄소배출권을 인정받기 위한 노력을 지속적으로 경주하고 있으며, 의무당사국 대부분이 산림경영을 기후변화협약하의 산림활동으로 선택하고 있다. 일본의 사례에서 볼 수 있듯이 산림간벌 촉진법을 공포하는 등 중앙정부 차원의 산림경영 및 관리에 역점을 두고 있다. 그러나 이러한 정책들은 대부분 사회경제적 가치를 고려한 산림경영의 효율성에 대해서는 간과하고 있다. 산림경영을 통해 탄소배출권을 인정받기 위해서는 '경영된 산림'에 대한 정확한 정의가 중요하며, 경영된 산림 내에서의 산림보호, 식재, 숲가꾸기 등 여러 활동들에 대한 사회경제적 가치를 평가해야 할 필요가 있다. 산림경영에 따른 탄소흡수 및 배출의 탄소계정은 산림 전체 차원에서 매년 계산되지만, 이를 증가시키기 위해서는 결국 임분 단위에서 탄소의 흡수를 증가시킬 수 있는 방안을 마련할 필요가 있다.

이를 위하여 최적 산림관리 방안에 대한 분석을 실시하였는데, 동적임분생장모델로 추정한 소나무와 잣나무의 자료를 이용하였다. 간벌만 적용한 소나무 임분에서 목재와 탄소의 경제성을 동시에 고려하면 목재의 경제성만을 고려했을 때보다 간벌연령은 13.6~18.2% 증가하고 벌기령은 18~23.1% 늘어난 것으로 분석되었다. 반면 잣나무 임분의 경우 간벌연령은 변화가 없으나 벌기령이 8.3% 늘어난 것으로 나타났다. 어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 실시하는 복합관리방법의 경우 어린나무가꾸기는 임분연령 14년에 20%의 강도로 실시하는 것이 소나무와 잣나무 모두에게 유리하다. 이때 소나무 간벌은 26년에 65%의 강도로 실시하며, 잣나무 간벌은 26년에 70%로 실시하는 것이 적정 관리방법이다. 벌기령은 목재의 경제성만 고려한 경우보다 소나무 11.6%, 잣나무 23.4%씩 늘어난다.

현행 산림관리 방법에 대한 벌기령과 가치함수값을 계산하여 보면, 소나무 목재의 경제성만 고려한 경우 벌기령은 56년, 가치함수값은 922만 2천원이 된다. 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령 76년, 가치함수

값은 1,357만 9천 원이 되는 것으로 나타났다. 두 경우의 벌기령을 소나무의 일반기준벌기령인 70년(국유림), 50년(공·사유림)과 비교해보면 공유림과 사유림의 경우 목재의 경제성만 고려한 벌기령과 비슷하나, 국유림은 탄소의 경제성을 포함하여 계산한 벌기령과 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 최적화 관리방법을 적용하면 목재의 경제성만 고려한 경우 벌기령은 56년에서 30.4% 줄어든 39년이 되며, 가치함수값은 922만 2천 원에서 84.4% 늘어난 1,700만 9천 원이 된다. 반면 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 36.9% 줄어든 48년이 되고, 가치함수값은 48% 늘어난 2,009만 2천 원이 되는 것으로 분석되었다. 생리학적인 성장요인을 감안하여 어린나무가꾸기를 실시하더라도 목재의 경제성만 고려한 경우의 벌기령은 23.2% 줄어들고, 가치함수값은 72.9% 늘어났다. 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 36.8% 줄어들고 가치함수값은 41.1% 늘어난다. 이러한 결과를 나타내는 원인은 현행관리 방법에 따를 경우 재적성장이 느려지고, 2차 간벌 시기가 늦어짐에 따라 벌기령이 길어지면서 상대적인 할인요인이 크게 작용하여 최적관리 방법에 비해 가치함수값이 떨어지기 때문이다. 또한 현행관리 방법의 경우 느린 재적성장과 함께 2차에 걸친 간벌비용을 회복할 기간이 오래 걸리게 된다. 따라서 목재와 탄소의 경제성을 고려한 산림관리를 위해서는 현행 벌기령은 줄이고, 간벌은 1회에 걸쳐 강하게 시행하며 간벌연령은 26년으로 정하고, 어린나무가꾸기는 나무가 잘 자랄 수 있는 주변정리 수준에서 그쳐야할 것이다.

잣나무의 경우 현행 산림관리 방법을 적용하여 벌기령과 가치함수를 계산하여 보면, 목재의 경제성만 고려한 경우 가치함수값은 음의 값을 가진다. 벌기령도 100년이 넘게 걸리는데, 4차에 걸친 작업비용을 회복하지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 최적벌기령은 165년이며 가치함수값은 759만 3천 원이 되는 것으로 나타났다. 잣나무의 일반기준벌기령인 70년(국유림), 60년(공·사유림)과 비교해보면 공·사유림 및 국유림 모두 적정벌기령보다 매우 짧다는 것을 알 수 있다. 최적화 관리방법을 적용하면 목재의 경제성만 고려한 경우 벌기령은 128년에서 62.5% 줄어든 48년이 되며, 가치함수값은 −1,703천원에서 1,537%

늘어난 2,447만 7천 원이 된다. 반면 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 68.5% 줄어든 52년이 되고, 가치함수값은 274% 늘어난 2,840만 5천 원이 되는 것으로 분석되었다. 잣나무의 경우 타수종에 비해 관리작업의 횟수가 많으며, 임분연령 35년까지 작업이 계속되므로 비용을 회복하는 데 많은 시간이 걸린다. 특히 목재의 경제성만 고려했을 경우에는 비용을 회복하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 작업 횟수를 줄이고 연령도 낮추는 것이 필요하다. 또한 소나무와 같이 벌기령을 낮추고 어린나무 가꾸기도 필요한 경우에 한해 약하게 시행하는 것이 유리하다.

외생변수 변화에 대한 정책실험을 실시한 결과 이자율(Discount factor)이 올라가면 소나무의 간벌연령과 벌기령은 낮아진다. 그러나 잣나무의 간벌연령은 올라간다. 경기침체 이후 회복에 따른 출구전략 시행으로 기준금리는 올라갈 것으로 전망된다. 그러나 40년 이상을 내다보는 장기적인 투자인 산림사업의 경우 경제의 안정화가 이룩된다는 가정하에 현행의 2%가 적절할 것으로 예상된다. 최종 생산된 원목가격이 인상될 경우 간벌연령은 낮아지고 강도는 강화되며, 가치함수값은 올라간다. 잣나무의 경우 벌기령도 길어진다. 러시아의 수출세 인상, 원목 수출국의 환경보호를 위한 원목 수출 제한 등 다양한 통상여건을 고려했을 때 원목의 수입이 어려워질 것으로 예상된다. 이와 더불어 소득의 증가와 함께 원목에 대한 수요가 늘어날 것이므로 국내산 원목의 가격은 높아질 것으로 전망된다. 따라서 간벌연령은 더욱 줄여야 할 것으로 생각된다. 잣나무의 경우 벌기령도 같이 줄이는 것이 가치함수값을 높일 수 있는 방법이다. 이산화탄소 거래가격이 인상되면 벌기령과 가치함수값이 동반하여 올라간다. 소나무의 경우 간벌연령도 같이 올라가게 된다. 기후변화의 심각성이 높아지면서 탄소시장 활성화를 위한 방편으로 이산화탄소 거래가격은 상승할 것으로 전망된다. 이산화탄소의 거래가격이 높아지면서 소나무의 간벌연령은 증가할 것으로 전망되므로 예상되는 원목가격과의 관계를 감안하여 적절한 수준에서 간벌연령을 조절하여야할 것이다. 또한 소나무의 벌기령은 분석결과인 최적수준보다 더 늘어날 것으로 전망된다. 그러나 잣나무의 경우에는 원목가격 상승을 감안하여 적절하게 조절하는 것이 바람직하다.

한편 산불방지노력은 사회적 최적수준에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 사회적 최적화 산불방지노력수준에 도달하기 위해서는 2009년도 산불방지노력은 약 3.3% 더 증가 되어야 하는 것으로 계산되었다. 산림의 탄소흡수기능까지 고려할 경우 2009년 산불방지 노력은 10.4% 추가로 증가되어야 하는 것으로 나타났다. 따라서 현재의 예산을 증액하여 산불방지노력을 증대할 필요가 있다.

일반적으로 생각하는 바와 같이 탄소의 경제성을 비롯한 공익적 산림가치를 증진하기 위해서는 벌기령을 늘리는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 반면 작업 횟수와 작업 연령을 적절히 조절함으로써 가치함수값을 높이고 최적화된 관리방법을 찾을 수도 있다. 따라서 벌기령은 일정하게 정할 것이 아니라 수종마다 상이한 관리방법을 감안하여 경제학적인 관점에서 최적화될 수 있도록 결정해야할 것이다.

이 연구는 산림경제 분야 최고의 관심사 중에 하나인 최적벌기령 산정에 관한 문제를 동태분석이론에 입각하여 분석하였다. 목재생장에 관한 실제 자료가 없어서 모델을 이용하여 계산한 자료를 사용하긴 했지만 결과가 예상했던 바와 같이 도출되어 만족할 수 있었다. 다만 최초에 고려했던 낙엽송에 대한 자료는 이용하기에 부적절했기 때문에 최종 단계에서 생략하였다. 매트랩(Matlab)과 같은 고급 프로그램이 아닌 스프레드시트를 이용하여 모형을 만들어 분석과 정책실험에 이용하였다. 그 결과 경제학적인 직관(Intuition)을 도출하는 데 한계가 있었으며, 더 정확하고 도식화된 최적화 조건을 도출하지 못하고 결과의 경향만 파악하는 데 그쳤다. 고급 프로그램을 이용한 분석은 추후 과제로 남겨둔다.

부록 1

동적임분생장모델(Dynamic stand growth model)[42]

1. 이론

1.1. 개요

정적 임분생장모델에서 관리방법이 고려되지 못하는 이유는 밀도를 모델구성인자로 포함시키지 않기 때문이다. 우리나라의 정적임분생장모델(수확표)의 경우, 흉고직경을 임령 및 지위지수의 함수로만 추정하고 있다. 또한, 밀도를 나타낼 수 있는 ha당 본수도 임령과 지위지수의 함수로 별도로 추정하고 있다. 이는 고정된 관리방법에서 일정한 밀도(ha당 본수)를 전제로 하는 것이다.

정적 임분생장모델인 수확표를 활용하기 위해서는 임령, 수고, ha당 단면적 등의 인자가 필요하고, 임령과 수고로부터 지위지수를 사정하고, 수확표상의 ha당 단면적에 대한 조사한 ha당 단면적의 비로 밀도를 나타내는 척도인 밀도를 추정하고 있다. 여기에서, ha당 단면적은 ha당 본수와 평균 흉고직경으로부터 계산되는 인자이므로 ha당 단면적을 ha당 본수와 평균 흉고직경으로 대체시키면 동적 임분생장모델의 구성이 가능하다.

정적 임분생장모델: dbh = f(Age, SI)

동적 임분생장모델: dbh = f(Age, SI, Nha)

---

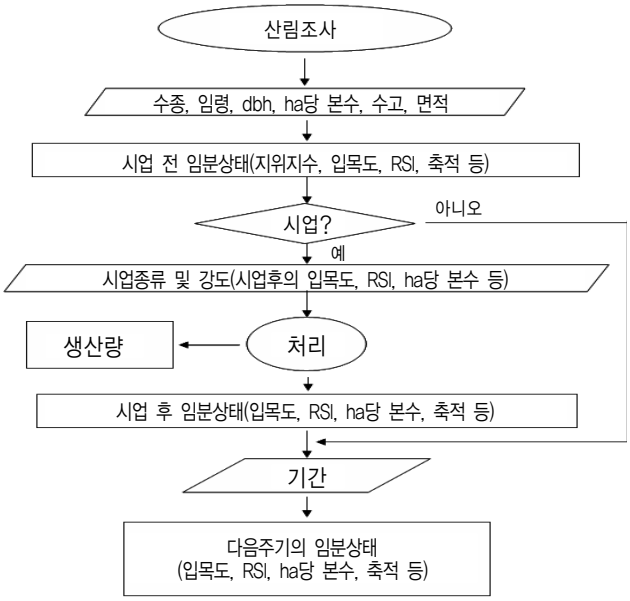
42 본 모델은 고려대학교 환경생태공학부 이우균교수가 만든 것으로 소나무와 잣나무 분석을 위한 기초 자료를 도출하는 데 이용하였음.

동적 생장모델에서는 관리방법을 고려하기 위하여 임분생장이 밀도에 따라 다양하게 추정될 수 있는 생장식을 이용하고 있다. 예를 들면 다음 식은 흉고직경(dbh)이 임령(age) 및 지위지수(SI) 이외에도 ha당 본수(Nha)에 의해 영향을 받는 함수관계를 나타내고 있다(Lee 1993, 1994; 이 1995).

$$dbh = \alpha_1 SI^{\alpha_2} e^{\beta_1 Nha^{\beta_2} age^{\gamma}}$$

동적임분생장모델은 관리방법에 따라 임분의 생장이 다양하게 예측될 수 있는 임분차원의 생장모델을 말한다. 그림 4-12는 시업방법, 시업강도 및 시업주기가 고려되는 동적임분생장모델의 흐름도를 나타낸다. 임령, 흉고직경, 수고, ha당 본수가 입력되면, 이로부터 지위지수, 임분밀도(입목도, RSI), 현재 축적 등이 예측된다. 다음으로 시업을 하는 경우, 입력된 시업종류 및 강도에 따라 생산량과 시업후의 임분상태가 추정된다. 주어진 기간에 의거 다음 주기까지의 생장이 예측된다. 시업을 하지 않는 경우에는 직접 주어진 기간에 의거 다음 주기까지의 생장이 예측되는 활용이 비교적 간단한 모델이다.

부도 1-1. 동적임분생장모델의 흐름도



1.2. 조제방법

1.1.1. 시업후의 임분상태변화 추정 (시업종류 및 강도 고려)

① 평균흉고직경 변화

시업후의 직경을 다음 식을 이용하여 시업 전 직경으로부터 추정할 수 있다.

$$dbh_{after} = dbh_{before}\, e^{\beta\left(\frac{N_{removed}}{N_{before}}\right)}$$

dbh_{after}=시업후의 직경, dbh_{before}= 시업 전의 직경

$N_{removed}$=벌채목 본수, N_{before}= 시업 전의 본수

β=시업계수 λ= $N_{removed}/N_{before}$ = 시업강도계수

여기서 시업전 본수에 대한 시업후 벌채목(시업목)본수의 비율을 나타내는 시업강도계수 λ는 시업강도를 정량화한 것으로서 0부터 1의 값을 가진다. 이 값이 클수록 시업의 강도가 강하고 따라서 직경의 변화폭도 크다. ß는 시업종류 및 임분동질성에 따라 고유한 값을 가지는 시업계수이다. 예를 들면 상층간벌의 경우는 직경급이 비교적 큰 나무가 제거되므로 간벌후의 평균직경은 간벌전보다 작아질 것이며, 시업계수 ß는 부(-)의 값을 가질 것이다. 이와는 달리 비교적 쇠약한 나무를 제거하는 하층간벌에서는 시업계수 ß가 양(+)의 값을 갖게 되어 간벌 후의 직경은 간벌 전보다 증가하게 된다. 또한 시업계수 ß는 임분의 동질성에도 영향을 받는다. 임분이 동질할수록 시업에 따른 직경변화의 폭은 적을 것이고, 계수 ß의 절대치도 작을 것이다.

② ha당 본수의 변화

시업강도계수 λ를 이용하여 시업목의 ha당 본수($N_{removed}$)를 시업 전의 ha당 본수(N_{before})로부터 구할 수 있다.

$$N_{removed} = \lambda\ N_{before}$$

이와 같이 시업목의 ha당 본수가 결정되면, 시업 후 잔존목의 ha당 본수(N_{after})는 시업 전의 ha당 본수(N_{before})와 시업목의 ha당 본수($N_{removed}$)의 차이로 구해진다.

$$N_{after} = N_{before} - N_{removed}$$

1.1.2. 다음주기까지의 생장 추정(시업주기 고려)

① 평균흉고직경

시업주기는 함수식을 대수차이형태(algebraic differences form)로 변환시킴으로써 해결할 수 있다. 다음 식은 흉고직경추정식의 변환형태로서 다음주기의 직경(dbh_{i+1})을 현재의 임령(age_i), 직경(dbh_i), 본수(Nha_i) 및 지위지수(SI_i) 그리고 다음주기에서의 임령(age_{i+1}), 본수(Nha_{i+1}) 및 지위지수(SI_{i+1})로부터 추정하는 것을 나타내고 있다. 이 식을 이용하면 시업주기를 다양화시킬 수 있게 된다.

$$dbh_{i+1} = dbh_i \frac{SI_{i+1}{}^{\alpha_2} e^{\beta_1 Nha_{i+1}{}^{\beta_2} age_{i+1}{}^{\gamma}}}{SI_i{}^{\alpha_2} e^{\beta_1 Nha_i{}^{\beta_2} age_i{}^{\gamma}}} \quad .$$

② ha당 본수변화

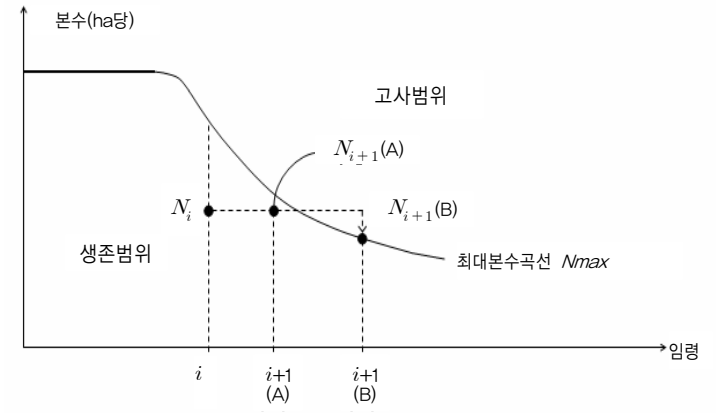
입목본수의 변화는 간벌 등과 같은 인위적인 요인과 고사 등의 자연적인 요인에 의해 발생하는데, 임분관리에 의한 인위적인 감소가 충분하지 않을 때 경쟁 및 환경요인에 의해 자연적인 감소가 일어나게 된다. 일반적으로 다음주기에서의 본수(Ni+1)는 현재의 입목본수(Ni)와 자연감소율(고사율: δ)에 의해 결정된다.

$$N_{i+1} = N_i\ (1-\delta),\ \delta\text{: 고사율},\ 0 \le \delta < 1$$

고사율 파악이 어려운 경우 한 임분이 수용할 수 있는 최대 본수를 이용하는 방식이 있다. 최대본수 또는 최대밀도곡선의 좌하부는 한 임분이 수

용할 수 있는 본수(생존범위)를 나타내고 우상부는 수용할 수 없는 본수(고사범위)를 나타낸다 <그림 1-2>. 생존범위내에서는 다음 시업 시까지 본수의 변화가 없는 것으로 하고 (Ni+1 < Nmax -> Ni+1＝Ni), 고사범위서는 최대본수곡선상의 본수가 다음시업시의 본수 (Ni+1 ≧ Nmax -> Ni+1＝Nmax)로 할 수 있다.

부도 1-2. 임령에 따른 최대밀도곡선과 ha당 본수 추정



2. 동적임분생장모델 구축

2.1. 모델구성식의 계수추정

1장의 동적임분생장모델을 위해 제시된 각 식의 계수를 기존의 수확표를 활용하여 추정하였다.

부표 1-1. 동적생장모델의 구성식의 계수추정

수종	종속변수	측정계수				
		1st	2nd	3rd	4th	5th
KWP	ASI	30				
	v	-9.675607	1.997425	0.821099		
	dbh_a	3.074425863	-0.48908774	-0.226047869		
	dbh_b	185.15121	0.370266	-2.6381528	0.1022694	-0.1467288
	ho	14.07608137	0.157064	-16.519704		
	h_b	0.940517				
	h_a	52.11908901	-1.00841708	-0.90341239		
LA	ASI	20				
	v	-9.98497	1.866728	1.059937		
	dbh_a	1.352702194	-0.31891978	-0.159173202		
	dbh_b	93.15312736	0.38240344	-1.31876002	0.1578473	-0.1168645
	ho	5.331596573	0.411469137	-3.92134197		
	h_b	0.86573				
	h_a	2.395773611	-0.364751402	-0.370509276		
RP	ASI	20				
	v	-9.430896	1.831748	0.870974		
	dbh_a	0.518304598	-0.135740868	-0.012864086		
	dbh_b	51.29939719	0.36381762	-2.84072384	0.1149221	-0.3281235
	ho	5.2800453	0.39091628	-11.30281661		
	h_b	0.833963				
	h_a	0.321096687	-0.096202954	-0.063005995		

주: RP : 소나무, KWP:잣나무, LA:낙엽송.

2.2. 모델구축

1장에서 제시한 동적생장모델을 표 1의 계수를 활용하여 Fortran 및 Excel로 구축하였다.

3. 동적임분생장모델 활용

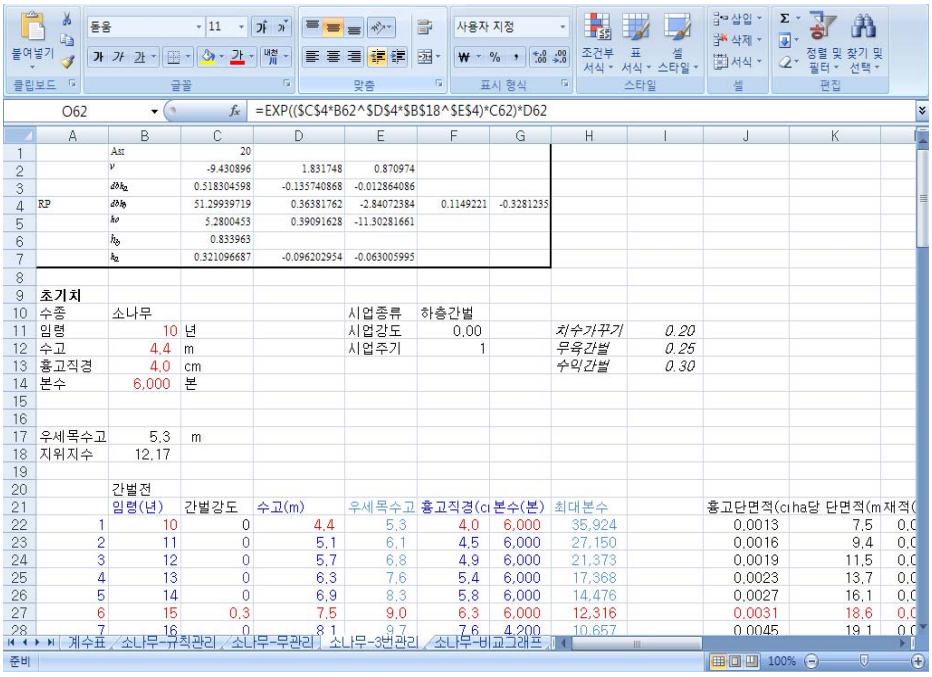
3.1. Fortran 프로그램으로 운영되는 동적생장모델

Fortran Program은 DOS 운영체계로 실행되는 별도의 창에서 작동되도록 되어 있다. 창에서 제시하는 대로 임령, 수고, 직경, 본수 등을 입력하고, 간벌 강도 및 주기를 입력하면 그에 해당하는 생장량이 파일로 출력된다.

3.2. Excel에서 운영되는 동적생장모델

Excel에서는 그림 3에서 보는 것처럼 임령, 흉고직경, 수고, 본수에 대한 초기치만 B열의 11, 12, 13, 14행 (적색으로 표시)에 입력하고, C열에 간벌 강도를 해당하는 연도에 입력하면 간벌전후의 생장량(흉고직경, 수고, ha당 본수, ha당 제적 등)이 1년 단위로 출력된다.

부도 1-3. 동적생장모델 Excel 프로그램



4. 동적임분생장모델 활용사례

소나무림에 대해 초기치를 다음과 같이 주고 관리를 안하는 경우와 15, 30년, 50년에 각각 30%씩 간벌한 경우의 본수 및 재적발달을 비교해 보았다.

- 초기치
- 수종: 소나무
- 임령: 10년
- 수고: 4.4m
- 본수: 6,000본

4.1. 본수발달

그림 4는 관리를 안 하는 경우와 30%강도로 3번의 관리를 한 경우의 ha당 본수 발달을 나타낸다. 그림에서 점선은 관리를 안 하는 경우에서의 최대본 수를 나타낸다. 실선은 3번의 관리를 한경우의 본수 발달이며, 관리를 하더라도 시간이 지나면 최대 본수에 이르러 고사하는 현상을 나타내고 있다.

부도 1-4. 관리를 안 하는 경우와 3번의 관리를 실행한 경우의 본수발달

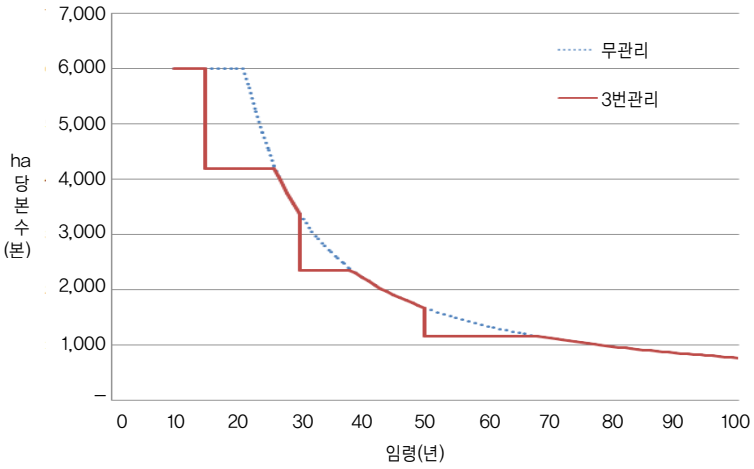
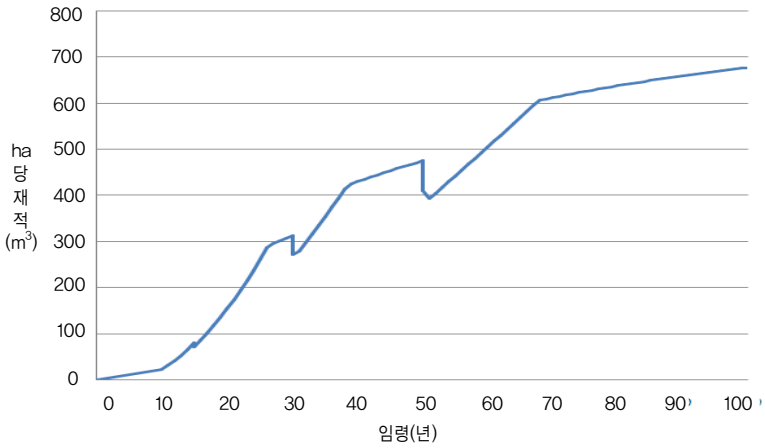


그림 5는 3번의 관리를 15년, 30년, 50년에 30%의 강도로 실시한 경우의 재적발달을 나타낸다. 관리 후에는 재적이 일시적으로 감소되지만, 임령이 증가하면서 급한 상승세를 보이다가 최대본수에 이르러 고사가 일어나면 재적생장이 둔화되는 현상을 잘 나타내주고 있다.

부도 1-5. 3번의 관리를 실행한 경우의 본수발달



부록 2

산림자원관리 표준매뉴얼 주요내용

산림의 생태·환경적인 건전성을 유지하면서 다양한 기능이 최적 발휘되도록 산림을 보전하고 관리하기 위해 마련된 지침은 산림법 또는 법률에서 정한 기능별 산림자원의 관리방향과 구체적인 실행방법 등을 규정하고 있다. 여기서는 산림의 기능을 목재생산림, 수원함양림, 산지재해방지림, 자연환경보전림, 산림휴양림, 생활환경보전림 등 6개로 구분하여, 기능별로 조성·관리 지침을 제공한다.

부표 2-1. 산림의 기능별 관리 목표 및 대상

구 분	관리목표	대상 산림
목재 생산림	양질의 목재를 지속적·효율적으로 생산·공급하기 위한 산림으로 육성	요존국유림, 임업진흥권역 안의 목재생산임지
수원 함양림	수자원 함양과 수질 정화기능이 고도로 증진되는 산림으로 육성	수원함양보안림, 수원보호구역의 산림, 5대강 수계의 산림, 댐으로 집수되는 자연경계구획 산림
산지재해 방지림	각종 산림재해에 강한 산림으로 육성	사방지, 토사방비보안림, 낙석방비보안림
자연환경 보호림	보호할 가치가 있는 산림자원이 건강하게 보전될 수 있는 산림으로 육성	어부보안림, 산림유전자원보호림, 채종림, 백두대간보호지역, 자연생태보전지역, 보전녹지지역, 생태자연도1등급, 조소보호구, 습지보호지역, 특정 도서안의 산림, 보건보안림, 자연공원, 사찰림, 문화재보호구역, 시험림, 연습림, 수목원
산림 휴양림	다양한 휴양기능을 발휘하고, 종다양성이 풍부하며 경관이 다양한 산림으로 육성	자연휴양림
생활환경 보전림	쾌적한 환경을 제공할 수 있는 산림으로 육성	풍치보안림, 도시공원, 개발제한구역, 비사방비보안림

자료: 지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼.

1. 기능별 관리

인공 목재생산림의 경우 우량대경재 생산을 위해 흉고직경이 40cm 이상을 목표로 하며, 주로 문화재, 합판, 고급제재, 구조재, 고급건축재, 가구재, 악기재 등의 용도로 쓰이게 된다. 우량중경재 생산 산림의 경우에는 흉고직경이 2cm 이상 40cm 미만을 목표로 하며, 건축재, 소형가구재, 공예재, 일반제재 등의 용도로 이용된다. 또한 일반소경재 생산 산림은 25cm 미만의 휴고직경을 목표로 하고, 가설재, 포장재, 일반제재, 펄프재, 칩, 톱밥용으로 주로 이용된다. 반면 천연림의 경우 우량대경재 생산을 위해 흉고직경 40cm 이상, 우량중경재 생산을 위해 20cm 이상 40cm 미만, 특용소경재 생산을 위해 20cm 미만 등으로 나누고 있다. 인공림과 천연림 모두 산림자원 조성·관리 일반지침에 따라 숲가꾸기, 벌채 및 산물처리를 실시한다.

수원 함양을 위해서는 다층혼효림(多層混淆林) 조성을 목표로 한다. 수원함양림의 숲가꾸기의 경우 수계로부터 100m 이내 지역 또는 집수지역은 약제를 사용하지 않고 인력으로 덩굴을 제거하며, 기타지역은 약해(藥害)가 발생하지 않도록 소면적으로 제거한다. 솎아베기(간벌)의 경우 수관울폐도(樹冠鬱閉度)를 50~80% 수준으로 유지하며, 산물은 계곡부 홍수위 폭 만큼의 거리 이내 지역, 수변부의 만수위와 하천의 홍수위로부터 30m 이내 지역, 도로·임도·농경지·택지로부터 30m 이내 지역 등에 대해서는 최대한 수집하여 활용하거나, 산림재해로부터 안전한 구역으로 이동시킨다. 이외 지역의 산물은 집재하지 않고 잘라서 지면에 최대한 닿도록 하여 부식을 촉진시킨다. 수확은 우량대경재를 생산하는 장벌기 시업을 목표로 하며, 골라베기를 원칙으로 하되 모두베기와 모수작업은 2ha 미만에 대해 실시한다. 또한 벌채구역 사이에 최소 20m 이상 수림대를 존치시킨다.

산지재해방지림 조성도 수원함양림과 마찬가지로 다층혼효림을 목표 산림으로 한다. 그러나 사방기능 제고를 위한 경우를 제외하고는 숲가꾸기 실시하지 않지만 Ⅲ영급 이상에 대해 솎아베기를 실시한다. 산물은 수원함

양림과 동일하게 처리하며, 산사태, 병충해, 산불 등 산림재해로 인한 피해 복구 등 공익적 목적을 제외하고는 벌채하지 않는다.

자연환경보전림의 경우에도 다층혼효림 조성을 목표로 하거나 해당 지역의 목적을 달성할 수 있는 산림으로 조성한다. 자연환경보전림은 세 가지 유형으로 구분할 수 있는데, 생태계, 유전자원 보호 등을 위해 보전해야 할 보전형 산림, 역사·문화적 가치 보호 등을 위해 보전해야할 문화형 산림, 학술·교육 목적으로 보전해야할 학술교육형 산림 등이 그것이다. 자연환경보전림의 경우 약도의 솎아베기를 5년 내외의 간격으로 수회 실시하나, 채종림은 강도(强度)의 솎아베기를 실시하여 종자 생산량과 품질을 개선하도록 한다. 공익적 목적을 제외하고 벌채를 하지 않으며, 산물은 수원함양림과 동일하게 처리한다.

산림휴양림은 다층혼효림 또는 다층림 조성을 목표로 한다. 생태활력도 제고를 위해 숲가꾸기를 실시하며, 약도의 솎아베기를 한다. 산물은 최대한 수집하여 활용하거나, 수해·산불 등의 산림재해로부터 안전한 구역으로 이동시킨다. 공익적 목적을 제외하고 벌채를 하지 않는다.

생활환경보전림의 경우 공원형, 경관형, 방풍·방음형, 생산형 등으로 나눌 수 있는데, 산림의 형태는 다층혼효림(공원형, 경관형), 다층림(방풍·방음형), 목재생산림(생산형) 등을 목표로 조성한다. 공원형과 경관형의 경우 수계로부터 100m 이내 지역은 덩굴제거를 위한 약제사용을 금지하며, 약도의 솎아베기를 실시한다. 또한 생리적 수확기에 달한 산림이나 재해 피해지 이 외에는 벌채하지 않는다. 방풍·방음형의 경우 약도의 솎아베기를 실시하며, 생산형은 목재생산의 우량대경재에 준하여 관리한다.

2. 산림자원조성 및 관리 일반지침

2.1. 어린나무가꾸기

조림 후 5~10년이 되어 조림목의 수관 경쟁이 시작되고 조림목의 생육이 저해될 때 어린나무가꾸기를 실시하는데, 풀베기 작업 이후부터 솎아베기 이전 단계의 임분(林分)이 그 대상이 된다. 작업 횟수는 1~2회, 6~9월 사이에 실시하는 것을 원칙으로 하되 늦어도 11월 말까지는 완료하는 것이 좋다.

2.2. 가지치기

소나무, 잣나무, 낙엽송, 전나무, 해송, 삼나무, 편백 등을 대상으로 하며, 활엽수는 밀식에 의한 자연 낙지(落枝)를 유도한다. 목표생산재가 톱밥, 펄프, 숯 등의 일반소경재일 경우에는 가지치기를 실시하지 않는다. 또한 지름이 5cm 이상인 가지는 자르지 않는 것이 좋다.

죽은 가지의 제거는 작업 시기에 큰 상관이 없으나, 산 가지치기는 가급적 11월 이후부터 이듬해 5월 이전까지 실행한다. 작업높이는 어린나무가꾸기 단계(수고 6m 내외)로부터 1차 솎아베기단계(수고 10m 내외)이르는 동안 실시하며, 1차 솎아베기 전까지는 어린나무가꾸기 작업 등과 병행하여 으뜸가지 이하만 제거한다. 최종대상 수확목이 선정된 후에는 최종대상 수확목에 대해서만 실시한다.

2.3. 솎아베기(간벌)

솎아베기는 임목상호 간의 경쟁을 조절하여 임목의 정상적인 생육공간을 확보하고 비대생장을 촉진시켜 임분의 형질을 개선하는 육림작업이다.

임분의 발달과정, 수관울폐도, 생장상태, 성림기원 등을 면밀히 검토하여 우선순위를 선정한다. 작업시기는 어린나무가꾸기 작업이 끝난 후 5년이 경과하고, 최종 수확 10년 전까지의 산림에 대해서 실시한다. 주요 대상지로는 나무가 과밀하여 광선이 숲 바닥까지 도달하지 못해 생물 종 다양성이 떨어지며, 생태적 활력도와 뿌리발달이 부실하여 병충해나 산사태 피해가 우려되는 산림, 침엽수림으로서 수원함양기능이 떨어지는 산림, 침엽수 단순림으로서 산불발생 시 대형화될 우려가 있는 지역의 산림, 산사태, 산불, 병해충 등의 각종 산림재해를 입은 산림, 경관의 유지와 개선을 위해 밀도조절이 필요한 산림 등이다.

작업 시기는 산 가지치기를 수반하지 않을 경우에는 연중 실행이 가능하나, 산 가지치기를 수반하는 경우에는 11월 이후부터 이듬해 5월 이전까지 실행하여야 한다. 임목 간의 수관경쟁으로 직경 생장이 감소하기 시작하고, 수관하부에 가지가 고사되어 임목 간에 우열이 나타날 때 간벌을 시작하는 것이 좋다.

부표 2-2. 수종별 간벌 개시기

수종	임령(년)
잣나무, 소나무, 편백(삼나무)	15~25
리기다소나무, 상수리나무	15~20
낙엽송	10~20
전나무	20~30

자료: 지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼. 산림과학원(2005).

간벌방법은 입지조건, 산림기능, 생산목표 등을 고려하여 결정한다. 대표적인 방법으로 정량간벌, 열식간벌, 도태간벌 등이 있다. 정량간벌은 간벌량을 사전에 정하고 임목밀도를 조절하는 방법이다. 수종이 단순하고 수목의 형질이 비슷한 산림을 대상으로 하며, 우세목의 평균수고가 10m 정도인 임분으로 15년생 이상인 산림이 적당하다. 평균 가슴높이 지름을 조사한 후 '간벌 후 잔존본수기준'에 따라 솎아베기 후의 적정 잔존본수를 산

정하여 작업을 실시한다. 목표생산재, 임분의 상태, 작업의 경제성 등을 고려하여 기준본수의 30% 범위 내에서 솎아베기량을 조정할 수 있다.

열식간벌이란 식재열을 두고 간벌 실행기준을 띠 모양으로 조절하는 방법이다. 입목의 생장이 균일하여 입목 간의 우열이 심하지 않는 임지, 열식 인공조림지로서 입목밀도가 식재본수의 70% 이상인 임지 등을 대상으로 한다. 2열 이상 존치시키고 1열을 간벌열로 선정하며, 간벌열의 첫 번째 입목을 존치시키거나 간벌열 내의 우량입목은 존치시킬 수 있다. 마찬가지로 잔존열 내의 불량목은 제거할 수 있다.

도태간벌이란 자질이 우수한 임목(미래목)을 선발하고 집중적으로 무육(撫育)하는 데 방해가 되거나 경쟁이 되는 임목을 제거하는 방법이다. 미래목의 집약적 관리를 통하여 우량대경재 이상을 목표생산재로 하는 산림, 지위(地位)가 '중' 이상으로 지력(地力)이 좋고 입목의 생육상태가 양호한 산림, 우세목의 평균수고 10m 이상 임분으로서 15년생 이상인 산림 등을 대상으로 한다. 나무줄기가 곧고 갈라지지 않으며 병충해 등 물리적인 피해가 없는 상층의 우세목을 미래목으로 선정한다. 미래목 간의 거리는 최소 5m 이상으로 하며, 임지 내에 고르게 분포하도록 한다. 활엽수는 ha 당 200본 내외, 침엽수는 ha당 200～400본을 미래목으로 정한다. 미래목은 가슴 높이에서 10cm의 폭으로 황색 수성페인트로 둘러서 표시한다.

참고 문헌

권순덕, 김선영, 정주상, 김형호. 2007. “잣나무 임분의 개체목 거리독립생장모델을 이용한 간벌효과 분석모델 개발.” 한국임학회지 96(6): pp.742-749.

김석권, 김희채, 배상원, 이경재, 강영호. 2001. “간벌강도에 따른 잣나무림의 생장변화.” 한국임학회(학술대회) 1(1): pp. 119-120.

김의경, 박상병, 김동현. 2008. 뉴질랜드의 산림탄소배출권 거래제도 고찰. 산림경제연구 16(2): pp. 1-19.

김점수. 2009.「기후변화 대응 및 산림가치 증대를 위한 탄소흡수원 확보방안」. 강원발전연구원 연구보고. 08-10.

김준순. 2004. “기후변화협약에 따른 국내임업의 대응방안”. 산림경제 12(2): pp. 58-67.

대한상공회의소. 2009. “코펜하겐 기후변화회의 전망 및 쟁점.”「지속가능경영원 뉴스레터」. 제209호.

박선희. 2008. “유럽연합과 교토의정서: 교토의정서의 비준과 이행 과정속에서 보여준 유럽연합의 역할과 위상변화 중심으로.” 유럽연구 26(3): pp. 221-223.

산림과학원. 2007.「Post-2012 산림 탄소배출권 계정 논의 동향」. 연구자료 제305호

산림청. 2004.「산림사업의 효율성 제고를 위한 표준품셈 개발」. 31쪽.

산림청. 산림과학원. 2005.「지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼」. 산림과학원.

산림청. 2009.「기후변화와 산림」. 산림청.

서정호, 이경학, 손영모, 임종환, 배재수, 유동헌, 노종환. 2006.「지구온난화와 산림 그리고 탄소나무 계산기」. 산림과학원 연구보고 06-14.

신은성. 2008. “Post-2012를 향한 기후변화협약 협상동향과 전망.” 국가안보전략연구소 정책연구 159: pp.57-103.

안영환. 2010. “코펜하겐 기후변화회의의 평가 및 산업계의 반응.” 에너지경제연구원.

유상희, 임동순. 2008. “EU의 기후변화협약 대응 정책 평가 및 시사점.”「유럽연

구」 제26권 1호.

이경학, 손영모, 서정호, 김내현, 박인협, 손요환, 이영진. 2006.「산림부문 온실가스 통계체계 구축」. 산림과학원 연구보고 06-20.

이경학, 손영모, 김래현, 원명수, 정경화. 2008.「산림부문 IPCC 2006 가이드라인 적용성 평가」. 산림과학원 연구보고 08-15.

이경학, 김성호, 김경민, 원명수. 2009.「핀란드와 독일의 온실가스 통계구축」. 산림과학원.

이서원. 2010. "포스트 코펜하겐 기후변화협상 시나리오."「LG Business Insight 2010」. LG경제연구소.

이연상. 2008.「쉽게 풀어보는 기후변화협약」. 한울아카데미.

이우균. 1995. "산림시업의 지속성을 위한 동적 지역산림경영모델: 산림생장 및 경제적 여건을 고려한." 산림경제연구 제3권 제1호: pp. 71-98.

이원학. 2010. "제15차 유엔 기후변화협약의 주요내용과 강원도의 대응방안."「정책브리프」 제 66호. 강원발전연구원.

이주영, 장소영, 남영숙. 2008. "일본의 기후변화대응정책 사례 분석."「(사)한국환경교육학회 발표논문집」.

이지훈. 2009. "탄소배출권 거래제의 경제적 효과." SERI 경제포커스, 2009. 11. 3.

장남정, 김보국, 모영환, 유승수. 2008.「기후변화협약 대응을 위한 전라북도 온실가스 저감전략」. 전북발전연구원 2008-R-17.

정경화, 조준행, 김찬규, 이경학, 윤여창, 노기안, 박규현, 왕광익, 진병복. 2008.「기후변화협약 대응 국가온실가스 IPCC 신규 가이드라인 적용을 위한 기획연구」. 에너지경제연구원.

정성춘. 2007. "발리 로드맵의 주요 내용과 향후 전망." 대외경제정책연구원 오늘의 세계경제 07-52호.

정성춘. 2009. "제14차 기후변화협약 당사국 총회에 대한 평가와 전망." 대외경제정책연구원 오늘의 세계경제 09-01호.

정성호, 정두진, 박병수, 전수경. 2003. "간벌이 한국산 잣나무의 용재품질에 미치는 영향." 목재공학 31(2): pp. 16-23.

한기주, 윤여창. 2009. "해외 배출권 시장 사례분석과 국내배출권 시장도입에 있어서 산림분야 참여에 관한 고찰." 환경정책연구 제8권 제1호.

한화진, 안소은. 2005.「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축」. 환경정책평가연

구원. 경제·인문사회연구회 협동연구총서 RE-01.

황재홍. 2009. “탄소저장 증진을 위한 산림경영.” 월간 산림(2009년 12월호) pp. 82-86.

Cowie, A. L., Miko Kirschbaum, and Murray Ward. 2007. “Options for including all lands in a future greenhouse gas acounting framework.” *Environmental Science & Policy*. 10(4): 306-321.

Malmsheimer, R. W., et al. 2008. “Forest management solutions for mitigating climate change in the United States. *Journal of Forestry*.” 106(3): 115-173.

Miranda, Mario J. and Fackler, Paul L. 2002. *Applied Computational Economics and Finance*. MIT Press.

Schlamadinger, B., et al. 2007a. “A synopsis of land use, land-use change and forestry(LULUCF) under the Kyoto Protocol and Marrakech Accords.” *Environmental Science & Policy*. 10: pp. 271-282.

Schlamadinger, B., et al. 2007b. “Options for including land use in a climate agreement post-2012: Improving the Kyoto Protocol approach.” *Environmental Science & Policy*. 10(4): pp. 295-305.

Whittaker, R. H. and P. L. Marks. 1975. *Methods of assessing terrestrial productivity*. Primary Productivity of the Bioshpere(Lieth and Whittaker ed.). Springer- Verlag New York.

연구보고 R607
기후변화협약에 대응한 산림의 역할과 관리 최적화 방안

등 록 제6-0007호(1979. 5. 25)
인 쇄 2010. 11.
발 행 2010. 11.
발행인 오세익
발행처 한국농촌경제연구원
130-710 서울특별시 동대문구 회기동 4-102
전화 02-3299-4000 http://www.krei.re.kr
인쇄처 동양문화인쇄포럼
전화 02-2242-7120 e-mail: dongyt@chol.com

ISBN 978-89-6013-135-4 93520
• 이 책에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다.