

제 4 장

농산촌 탄소흡수용량 활성화

노희명*

목 차

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1. 기후변화시대를 넘는 농림업 | 3. 탄소순환경제 활성화를 위한 고찰 |
| 1.1. 기후변화와 농림업의 도약 | 3.1. 토양관리에 의한 토양탄소균형 변화 |
| 1.2. 탄소순환계의 중심인 농림업 | 3.2. 유기자원순환 농림업 확립 |
| 2. 탄소순환경제와 토양의 역할 | 3.3. 탄소순환인증과 청정개발체제 활용 |
| 2.1. 지구탄소순환과 토양탄소순환 | 3.4. 안정적 탄소흡수기능 제고 |
| 2.2. 토양탄소격리의 중요성 | |
| 2.3. 농림업의 탄소흡수용량 | |

* 서울대학교 농업생명과학대학 농생명공학부 교수. hmro@snu.ac.kr

1 기후변화시대를 넘는 농림업

1.1. 기후변화와 농림업의 도약

- 클라크는 ‘산업구조이동론’에서 농림업을 1차산업으로 분류하였으나, 이제 기후변화 시대에서 농림업은 토양과 물 등 자연환경을 활용하여 필요한 물품을 얻거나 생산하는 1차산업이 더 이상 아니다. 기후변화는 농림업에 대한 위협일 수 있으나, 우리가 어떻게 대응하느냐에 따라 농림업이 맞는 새로운 도약의 기회가 될 수 있다.
- 기후변화는 대기에 탄산가스 등 온실가스의 농도가 급격히 높아지면서 일어난다고 알려져 있다. 농림업은 공기로부터 탄소를 광합성에 의해 합성한 화학에너지를 순환하고 있다. 한편, 우리는 생활과 산업 전반에 걸쳐 에너지를 이용·순환하고 있다. 농림업이 이렇게 에너지가 흘러가는 시작이자 끝으로서의 역할을 해왔다는 사실에 다시금 주목할 필요가 있다.
- 따라서 농림업은 1차 생산기반으로 활용해왔던 토양을 이제는 농업활동을 통해 발생하는 탄소를 격리하는 데, 나아가 재활용유기자원이 순환하는 기반으로 활용하여야 한다. 이렇게 볼 때, 앞으로 농림업은 1차산업이 아닌 고부가가치 산업으로서 기후변화에 능동적으로 대응할 수 있는 탄소 순환·생산기반으로 그 역할을 수행해야 한다.
- 농림업은 토지이용·토양관리·산업형태 등에 따라 탄소순환메커니즘이 다양할 수밖에 없으며, 이를 통해 결과적으로 나타나는 탄소의 균형은 다를 수밖에 없다. 다시 말하면, 자원의 순환구조에서 어떻게 탄소를 관리하느냐에 따라 농림업이 온실가스 배출원이 되거나 또는 흡수원이 되기도 한다.
- 역으로 말하면, 대기의 온실가스 농도는 농림업을 통해 높아지기도 하고

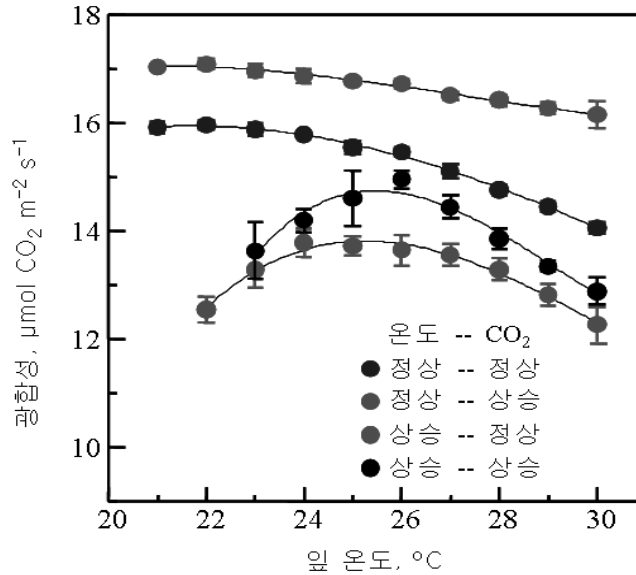
낮아지기도 한다는 것이다. 이는 우리가 농림업에서 일어나는 탄소순환에 효율적으로 개입한다면, 농림업은 그 전체가 탄소를 보다 많이 감축하는 청정개발체제(CDM) 사업이 될 수 있다는 것을 의미한다.

- 농산촌은 농림업에서 생산한 산물이 가공·유통되고 외부와 바이오매스 및 재활용자원이 교환되는 지역으로, 이 안에서 다른 산업과 생활권 사이에 물질이 순환하고 있다. 그래서 농림업 관점에서 볼 때, 탄소는 농림업에서 순환하기도 하고, 다른 산업으로 수송·유통에 의해 거래되기도 하고, 일정 부문은 농림업이 속해 있는 생활권과 거래된다.
- 따라서 농림업을 통해 형성되는 탄소균형은 다른 산업 또는 생활권과 연계할 수밖에 없으며, 이 과정을 통해 농림업으로 들어오는 탄소는 탄소흡수로, 나가는 탄소는 탄소배출로 계산해야 할 필요가 있다. 농산촌에서 탄소는 매우 다양한 형태로 다양하게 존재하므로, 가끔은 전체 관점에서 설명을 하지만, 여기서는 주로 탄소흡수용량 활성화를 농림업에 국한해 설명하고자 한다.

1.1.1. 기후변화가 농림업에 주는 의미

- 산업혁명 이후 화석연료의 사용에 의존하였던 산업구조의 결과, 대기의 탄산가스 농도는 급격히 증가해 왔으며, 지금과 같은 속도로 증가할 경우 21세기 안에 지금의 두 배(720ppm)가 되고, 이는 대기의 평균 온도를 5℃ 높인다고 예측한다.
 - 문헌조사 결과, 대기의 탄산가스 농도가 증가하면 지구상의 고등식물은 꾸준히 광합성을 증가시켜 적응해온 것으로 나타났다. 그러나 적응 정도는 식물이 광합성산물을 이용할 수 있는 능력에 따라 다르다.
- 한편 기후변화 시나리오가 예측하는 환경에서 자란 사과나무가 보여준 결과, 대기의 탄산가스 농도가 두 배 증가하면 광합성 최적온도는 약 5℃ 증가한 것으로 나타났다. 반면 온도만 상승시킨 경우에는 변화가 없는 것으로 나타났다<그림 4-1>.

그림 4-1. 광합성에 미치는 탄산가스 농도와 기온의 영향



자료: 노희명 외 4인(2001).

- 연구결과는 우리가 더 이상 대기 탄산가스 농도가 증가하는 것을 멈출 수 없다면, 적어도 고등식물이 이에 적응할 수 있을 정도로 천천히 그 증가속도를 조절해야 한다는 것을 말하고 있다. 농림업에서의 탄소순환이 중요한 이유가 여기에 있다.

1.1.2. 기후변화의 충격을 흡수하는 농림업

- 지난 세기 말, 농림업은 미래에도 지속경영이 가능하도록 패러다임을 전환하였다. 이는 환경을 보전하는 동시에 생산성을 지속적으로 유지한다는 것으로, 농림업이 기후변화에 적극적으로 대응하여야 한다는 의미를 담고 있다.
- 지난 수십 년간 인류의 활동이 증가하며 화석연료의 연소와 토양탄소의 산화가 늘어나면서, 육상생태계의 탄소저장과 저장용량이 감소하여 왔다.
 - 농림업은 작물·수목의 광합성에 의해 탄산가스를 흡수한다는 긍정적인 가치와 기후변화의 직접적인 피해자로 인식되기도 하지만,
 - 한편으로, 잘못된 바이오매스 및 토지이용 관리 등에 따라 대기로 온실

- 가스를 방출한다는 부정적인 측면도 갖고 있다.
- 따라서 농림업에서 생산과 처리과정에서 탄소를 어떻게 관리하느냐에 따라 농림업의 탄소흡수용량과 가치가 달라진다.
 - 농림업은 농업생산을 통해 탄소를 관리하는 동시에 산업간 유기자원을 연계하며 관리하기 때문에 탄소를 흡수하는 능력이 있다. 농림업에서 이러한 탄소순환 기능을 잘 관리한다면 탄소흡수량은 늘어날 것이다. 그 근거로,
 - 경종산업에서는 어떤 작물을 어떻게 재배하고 또 수확물과 바이오매스 부산물을 어떻게 처리하는가에 따라, 축산산업은 사료를 어떻게 공급하고 바이오매스 부산물을 어떻게 자원화하여 토양에 순환시키는가에 따라 탄소균형이 변하고,
 - 농림업은 다양한 형태의 탄소(재활용 유기자원)를 토양에 처리하면서 탄소흡수원의 역할을 수행하고, 가급적 토양에 탄소를 많이 오랫동안 체류하게 할 수 있는 능력이 있기 때문이다.
 - 농림업에서 탄산가스는 광합성으로 상당량 흡수되는 반면, 바이오매스 부산물을 소각하거나 제대로 재활용하지 못할 경우 이에 못지않은 양이 온실가스로 방출된다. 그러므로 농림업에서 바이오매스 자원의 순환과 토양탄소관리가 탄소흡수에 매우 중요하게 작용한다.
 - 경종바이오매스(kg/ha): 벧짚(653), 왕겨(118), 맥류(298), 대두(269), 고구마(646), 사과(459)
 - 한편, 축산업 부문에서 분뇨로 발생하는 바이오매스는 비료성분이 있어 이를 적절한 형태로 재활용하여야 한다. 퇴비화 등을 통해 경종부문의 유기질 비료로 순환시켜야 한다. 비료성분량을 바탕으로 비료가치가 평가되고, 이는 분명히 탄소가치로 환산해야 한다<표 4-1>.

표 4-1. 축종별 분뇨발생량 및 비료성분량

축종	연간 분뇨발생량(천ton)			비료성분량(ton)		
	분	뇨	분뇨발생량	질소	인산	칼리
한우	5,198	2,316	7,514	30,056	15,028	37,569
젖소	4,885	2,184	7,069	35,344	7,069	35,344
돼지	5,241	8,516	13,757	68,786	110,057	55,029
닭	4,454	-	4,454	75,721	71,266	40,087
계	19,778	13,016	32,794	209,906	203,420	168,029

자료: 김창길과 김태영(2004).

- 농림업에서 탄산가스 흡수를 늘리고자 현재 농경지·산림 흡수, 유기농업 등 친환경농업 확산, 시설원예·농기계 에너지사용 절감, 볏짚·사료작물 재배, 바이오에너지 전환 등 여러 대안이 제시되고 있으나, 농경지의 탄소 저장량을 키우는 것은 농림업의 탄소흡수원의 가치를 늘릴 수 있음에도 불구하고 상대적으로 관심이 부족한 편이다.
- 산림탄소흡수: 흡수효과가 많이 알려졌으나 현재 탄소흡수량이 포화되고 노령화되어 산림갱신과 육림이 필요하다(나무신문, 2009).

표 4-2. 수종별 탄소흡수량

수종	임령별 탄소흡수량(ton ha-1)						
	20	30	40	50	60	70	80
강원지방소나무	2.02	2.17	2.21	2.17	2.13	2.06	1.94
중부지방소나무	1.59	2.33	2.33	2.06	1.82	1.59	1.40
잣나무	2.36	2.64	2.68	2.60	2.52	2.41	2.33
낙엽송	3.09	3.05	2.84	2.64	2.44	2.27	2.11
리기다소나무	2.25	2.45	2.57	2.57	2.57	2.57	2.49
편백	2.06	2.00	1.93	1.90	1.86	1.86	1.83
상수리나무	3.13	3.30	3.24	3.02	2.75	2.53	2.31
신갈나무	4.23	3.73	3.34	2.95	2.67	2.45	2.23

자료: 산림청(2009)

- 경종·축산 바이오매스 부산물: 현재 볏짚 및 과수 전정가지 등이 사료 및 퇴비화를 통해 활용되고 있으나, 앞으로 농경지 환원에 의한 탄소격리 등의 효과와 함께 평가해야 한다.
- 바이오연료: 바이오연료 생산은 연료로 활용할 경우와 농경지에 환원할

경우의 효과를 비교하여 탄소감축 효과가 늘어나는 방향으로 접근해야 한다(Hill등, 2009).

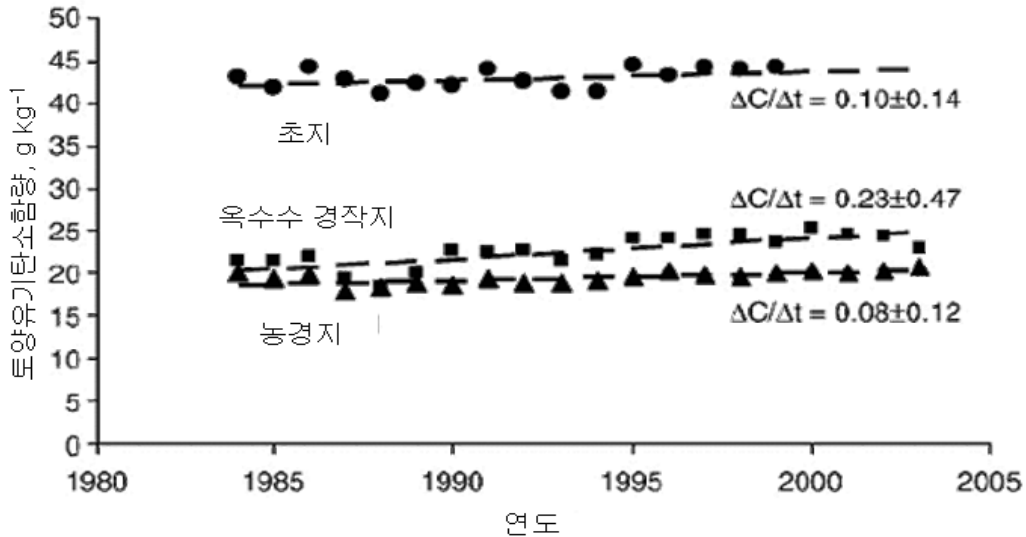
- 따라서 이 소고에서는 현재로도 자료가 많은 기존 탄소감축 관리방안에 대하여 설명을 아끼고, 대신 농경지의 탄소균형 및 순환에 캐스팅보트 역할을 하는 토양탄소저장 효과에 관해 설명하겠다.

1.2. 탄소순환계의 중심인 농림업

- 농림업은 공기로부터 탄산가스를 동화하여 탄소화합물을 생합성하여 생산물을 생산하고 일부는 토양에 유기물로 남아 분해된다. 농산물은 농경지를 떠나 소비되거나 다른 탄소 고리와 연계하여 순환하게 된다.
- 한편, 탄소는 외부로부터 또 다른 에너지의 형태로 농경지에 들어오면서 순환하게 된다. 그래서 농림업에서 일어나는 탄소 순환은 우리 생활과 산업으로 구성되는 탄소순환계의 중심이 된다.
- 생명을 지탱하는 데 필요한 식량과 에너지를 공급하는 기능을 수행하여 온 농림업은 생활과 산업을 통해 나오는 에너지 부산물을 토양에 재활용 처리하여 탄소를 저장할 수 있는 용량도 키워야 한다. 따라서 농림업에서 토양에 탄소가 증가한다는 것은 비옥도뿐만 아니라 온실가스감축 면에서 상당히 바람직하게 여겨지고 있다.
 - 농경지나 녹지를 통해 토양에 탄소를 격리·저장한다는 것은 온실가스를 감축할 수 있는 가능한 전략으로 선진국에서는 장려하고 있다(Lal, 2001).
 - 토양탄소격리(soil carbon sequestration)는 보전경운·무경운, 윤작의 개선, 녹비·퇴비 시용 등 다양한 영농관리법을 통해 증가하기 때문에, 농림업은 탄소순환사회의 중심이 될 수밖에 없다(Smith등, 2005).
- 지난 20년 동안 축분퇴비 시용을 금지한 네덜란드의 무기질 토양에서, 토양탄소는 매년 0.1g/kg씩 증가하였다. 이는 농경지의 농업관리법에 따라 탄소감축량이 많아질 수 있는 가능성을 제시하였다<그림 4-2>.

- 농산촌의 탄소순환경제를 활성화하는 데 지역 토양탄소상태를 주기적으로 정확히 측정할 탄소목록이 바탕이 된다(Mestdagh등, 2006).

그림 4-2. 초지, 옥수수 경작지, 농경지의 토양탄소함량 변화



자료: Reijneveld등(2009).

2 탄소순환경제와 토양의 역할

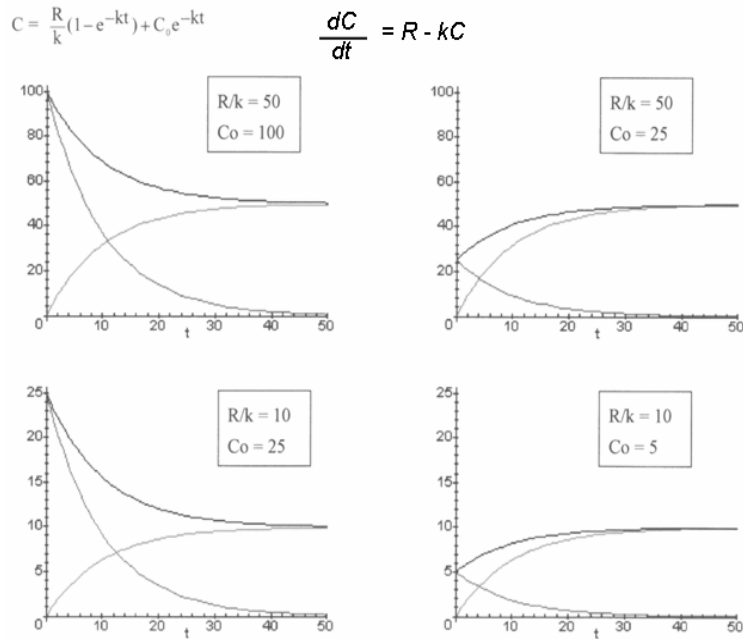
2.1. 지구탄소순환과 토양탄소순환

2.1.1. 지구탄소순환(global carbon cycle)

- 농작물을 포함한 고등식물은 광합성을 통해 탄산가스를 탄수화물로 생산하고, 이 광합성 산물은 동물 및 미생물 등 다양한 생명체의 에너지로 순환한다. 이 순환과정을 통해 호흡·분해에 의해 탄산가스가 대기로 방출되고, 대부분은 다양한 생물·화학반응을 거쳐 토양과 바다에 저장된다.

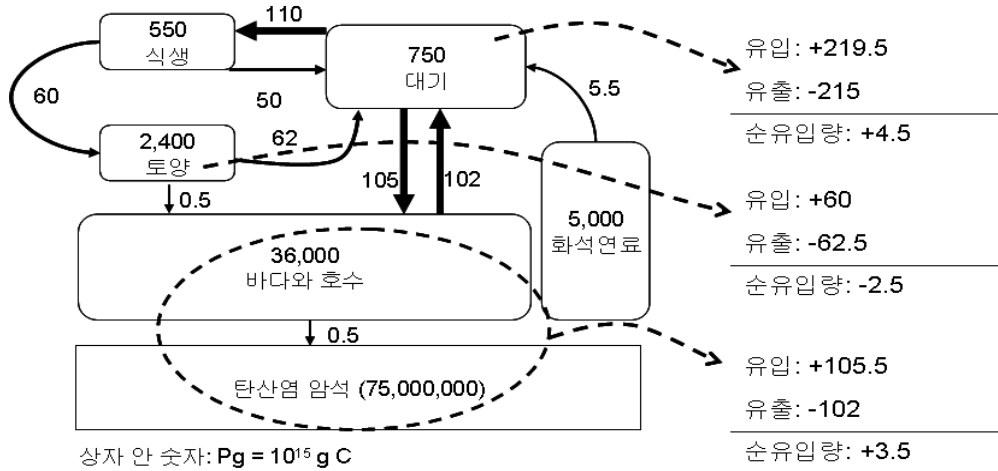
- 바다와는 달리 토양에 저장된 탄소는 농림업 등 인간의 활동에 의해 쉽게 그 양이 변하는데, 토양에 탄소가 얼마만큼 저장되고 얼마만큼 분해되는가에 따라 토양탄소 저장량과 온실가스 감축량이 달라진다.

그림 4-3. 토양탄소의 양에 미치는 탄소 투입량과 분해속도의 영향



- 비표면적이 매우 큰 토양은 농림업의 관리에 따라 온실가스저장용량을 키울 수 있기 때문에, 토양에서의 탄소 관리는 매우 중요하다.
- 토양탄소 관리는 토양에 들어간 양과 분해되는 양을 결정하는데, 이는 결국 대기의 탄산가스 농도를 결정한다. 토양탄소의 시간 변화를 1차 반응속도 방정식($dC/dt=R-kC$)으로 설명하였다<그림 4-3>. 여기서 C는 토양탄소, R은 투입량, k는 분해속도, t는 시간, 그리고 흑색 선은 토양탄소 변화이다.
- 지구탄소순환은 4개 주요 탄소저장소(생물권·지권·수권·대기권) 사이에서 다양한 경로로 일어나는 과정으로, 지상생물권은 토양탄소와 화석연료를 포함하는 가장 크고 활발한 탄소저장소이다. 지구탄소수지는 탄소저장소 간에 교환되는 투입량과 산출량 간의 균형이다<그림 4-4>.

그림 4-4. 지구탄소순환계의 탄소저장량과 흐름

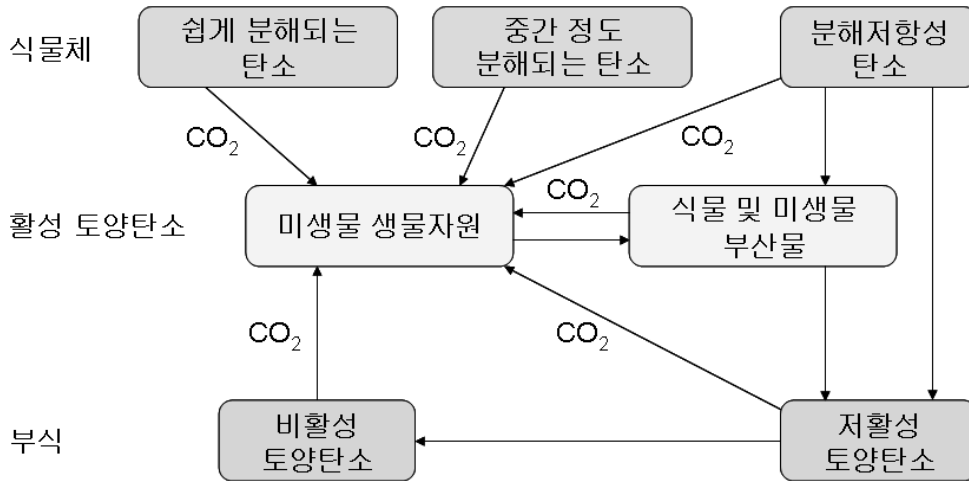


- 지구 수준에서 볼 때, 토양으로부터 나오는 탄소의 흐름은 탄소순환의 가장 중요한 부분으로, 농림업의 탄소 관리방법에 따라 가장 변하기 쉽다. 화석연료는 다른 형태의 토양탄소이기 때문에, 토양탄소격리와 흐름을 이해하는 것이 온실가스 감축으로 이어지는 탄소순환 경제를 활성화하는 데 도움이 된다(Amundson, 2001).
 - 20세기에 탄소는 매년 화석연료연소로부터 6.3Pg씩(Battle등, 2000), 토지 이용변화로부터 1.6Pg씩(Houghton, 1995) 대기로 유입되어왔다<그림 4-4>.
 - 토양을 적절히 관리한다면, 농림업은 대기로부터 탄소저장량을 늘리며 대기의 탄산가스농도가 급격히 상승하는 것을 상쇄시키고 기후변화를 줄일 수 있으며(Ingram과 Fernandes, 2001), 생산과 재활용을 통해 탄소수지를 관리하여 온실가스 감축효과를 얻을 수 있다.
- 토양은 지구탄소균형에 결정적으로 영향을 주는 매우 다양한 탄소의 저장고로, 총 121x1012m²의 면적(깊이 3m)에 2,400 Pg(1015g)의 탄소를 저장하고 있는데, 이 양은 대기·기후·지표변화와 매우 밀접히 반응한다(Jobbagy와 Jackson, 2000). 토심 1m 깊이까지 분포하는 토양탄소량은 1,500 Pg(Batjes, 1996)으로 이는 각각 식생이 갖는 양의 3배, 대기가 갖는 양의 2배이다.

2.1.2. 토양탄소순환(soil carbon cycle)

- 토양에 존재하는 탄소는 무기탄소화합물과 유기탄소화합물로 구분할 수 있다. 호수나 바다 등은 대기와 접촉하는 면이 자유수면에 국한되어 있으나, 토양의 경우 비표면적이 매우 커서 대기뿐만 아니라 토양공기가 지닌 매우 높은 분압(分壓)의 탄산가스와 접하여 토양용액에도 상당히 많은 양의 탄산가스가 용해된다.
 - 용해된 탄소는 탄산염화학(carbonate chemistry)에 의해 탄산염광물로 침전되어 격리되기도 하고, 일부는 유기탄소화합물이 용해된 결과이기도 하다.
 - 그러나 본 소고(小考)에서는 농림업과 연관된 토양 유기탄소화합물에 설명을 국한코자 한다.
- 토양유기탄소는 장기간 탄소순환을 통해 나타나는 생성과 분해의 균형인데, 이는 토양생성인자(기후·지형·모재·식생·시간·인간 활동)의 영향을 받는다(Gregorich 등, 1992). 따라서 이러한 인자를 변하게 하는 어떤 농림업행위든 평형을 교란시켜 토양탄소를 증가시키거나 감소시킨다(Schimel 등, 1994).
- 토양에 들어오는 탄소의 대부분은 지상과 지하에 존재하는 식물잔존물로 그 양과 화학조성은 토양탄소순환의 시작으로 저장토양탄소의 양과 분해 특성을 조절한다. 작목의 선택·윤작·기후변화에 따른 조직의 조성변화는 농림업의 탄소수지에 큰 영향을 준다(Ehrenfeld, 2003). 따라서 농림업에서 유기자원의 공유(예: 축산과 경종)는 농림업이 갖는 탄소배출권의 초과구매력(premium) 요인이 된다.
- 토양유기물 중 분해활성이 큰 분획은 주로 토양호흡에 관여하는 반면, 비활성분획은 유기·점토 복합체를 형성하여 장기간 저장하는데 관여한다. 토양탄소의 양은 토심에 따라 감소하는데, 토양구조가 발달하면 시간이 지남에 따라 깊게 이동하여 궁극적으로 저장탄소량을 증가시킨다(Amundson과 Baisden, 2000). 토양유기물이 분해되며 부식화가 진행되는 동안, 각각 토양탄소 저장소간의 반응과 관계는 <그림 4-5>와 같다.

그림 4-5. 부식화 과정에서 일어나는 탄산가스의 발생



- 토양유기물로 토양에 존재하는 탄소는 분해·수확·유실·용탈 등의 과정에 의해 손실되는데, 손실 정도는 토양생태계의 기능에 따라 다르다. 토양탄소는 토양유기물이 분해 특성이 다양한 화합물로 구성되었기 때문에 토양에 잔류하는 시간 또한 달라진다. 농림업에서 이러한 분해특성을 잘 관리하면 토양탄소저장량뿐만 아니라 저장용량도 늘릴 수 있다.
- 그러면, 인류가 어떻게 하면 대기 탄소농도가 증가하지 않도록 토양 탄소순환을 제어할 수 있을까? 농림업에서는 「어디로부터 탄소가 오고 또 어디로 탄소가 가는가?」라는 양쪽방향의 탄소관리 개념을 가져야 한다.
 - 농법을 바꿔서 비교적 오랫동안 토양에 존재할 수 있는 토양탄소량을 늘릴 수 있다.
 - 농림업에서 대기의 탄산가스 농도를 증가시키는 가장 큰 원인은 토양탄소의 소모로, 이는 과도한 경운, 무분별한 건설, 토양의 유실로 인해 발생한다. 따라서 농림업에서 토양탄소 수준을 늘리거나 줄일 수 있는 어떠한 변화도 대기의 탄소수준에 영향을 줄 수밖에 없다.

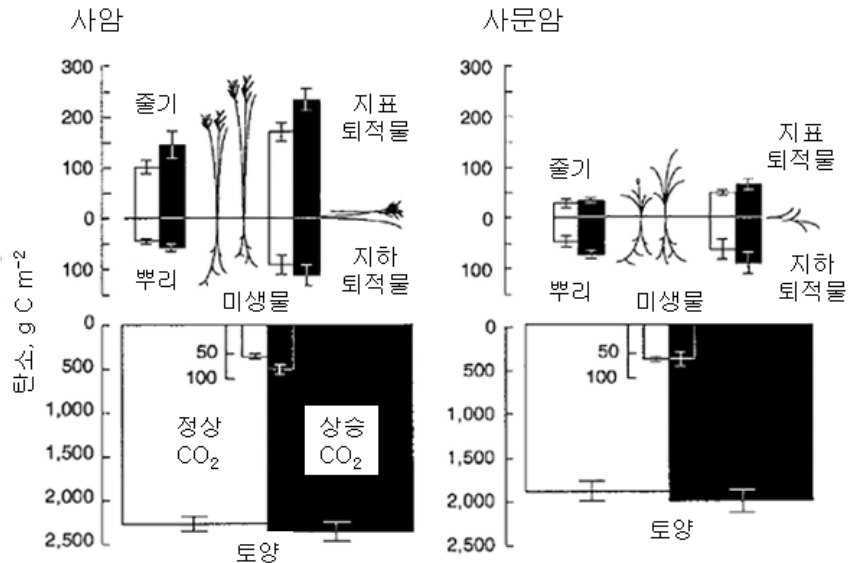
2.2. 토양탄소격리의 중요성

2.2.1. 토양탄소격리(soil carbon sequestration)

- 설명한 바와 같이, 토양유기물은 온실가스효과 또는 지구온난화에 영향을 주는 지구탄소순환에 중요한 역할을 한다. 표토는 대기의 탄산가스 농도에 대한 영향을 변화시킬 정도로 많은 탄소를 갖고 있다(Lal, 2004). 따라서 농림업에서 토양탄소를 적절히 관리한다면, 이는 분명 농림업이 온실가스감축을 늘려 기후변화충격을 최소화하는데 이바지할 수 있다고 본다.
- 토양탄소격리는 대기로부터 탄산가스를 식물잔류물 및 유기 화합물을 통해 토양으로 즉시 재 방출되지 않는 안정한 형태의 탄소 화합물로 옮기는 과정이다. 이를 통해 화석연료의 연소와 다른 탄소를 방출하는 활동에 의한 탄산가스 방출을 상쇄시키는데, 이 과정을 통해 토양질(soil quality)과 장기간 농림업 생산성을 증가시킨다.
 - 토양탄소격리는 토양에 생물자원을 많이 투입하고, 토양교란을 최소화하고, 토양과 물을 보전하고, 토양구조를 개선하고, 토양 동물의 활성을 증가시키는 농림업 관리에 의해 달성할 수 있다. 무경운은 하나의 좋은 예이다.
 - 그러면, 토양탄소격리를 이해하기위해 과학자는 무엇을 하여야하는가? 많은 것을 연구해야하나, 토지이용 및 관리가 미치는 영향과 토양탄소저장용량을 늘리는 방법에 대한 연구를 해야 한다고 생각한다.

2.2.2. 탄소흡수원인 토양

- 토양이 장기적으로 탄소흡수 기능을 수행할 수 있는가? 만일 흡수된 탄소가 쉽게 대기로 방출된다면? 이 물음에 우리는 대답해야 한다.
- 대기의 탄산가스 농도를 2배로 증가시킨 경우 초지에서 탄소흡수가 증가하였으나, 증가한 탄소의 대부분이 토양에서 쉽게 순환하는 탄소가 분배되었다.

그림 4-6. 정상 및 상승 CO₂ 조건에서 탄산저장소 비교

자료: Hungate등(1997).

- 토양탄소격리의 목적은 농림업에서 온실가스 감축량을 늘리는 것으로, 토양으로부터 나가는 탄소의 손실을 최소화하고, 토양이 보유하고 있는 탄소량을 최대화하는 것이다.
 - 농산촌에 재활용이 가능한 유기물을 순환시키고, 경운방법을 바꾸고, 피복작물을 심고, 퇴비를 사용하는 것은 토양의 탄소수준을 높인다.
 - 농산촌에서 기후변화의 충격과 영향을 줄이기 위해 탄소를 적극적으로 격리코자 한다면, 사회는 농림업에 상응하는 보상을 하리라 본다.
- 토양탄소격리는 자연적이고 과학적인 과정을 통해 효율적으로 탄소를 토양으로 격리하는 과정으로, 복원적인 토지이용법, 최적관리법(BMP) 등을 지속적으로 실행하여 한번 토양에 격리된 탄소가 장기간 토양에 머무르게 해야 한다(Win-Win선택권으로 탄소배출권).

2.2.3. 토양탄소격리의 안정화

- 탄소가 토양에 오랫동안 격리시키기 위해서는, 토양이 보유한 탄소량도 중요하지만, 분해과정을 겪으면서 안정화되는 난분해성 탄소화합물의 양

도 중요하다.

- 농림업에서는 매년 생물자원이 투입되고 또 다른 산업과 생활영역으로 나가는 특성이 있다. 따라서 해가 거듭할수록 투입된 탄소화합물은 분해되는 과정에서 난분해성 탄소화합물로 전환되는데, 안정성탄소동위원소 조성($\delta^{13}\text{C}$)을 측정하는 것은 토양탄소의 안정화정도를 평가하는 하나의 방법이다(POM: 입자유기물, Particulate Organic Matter).

표 4-3. 산림의 토양탄소안정화

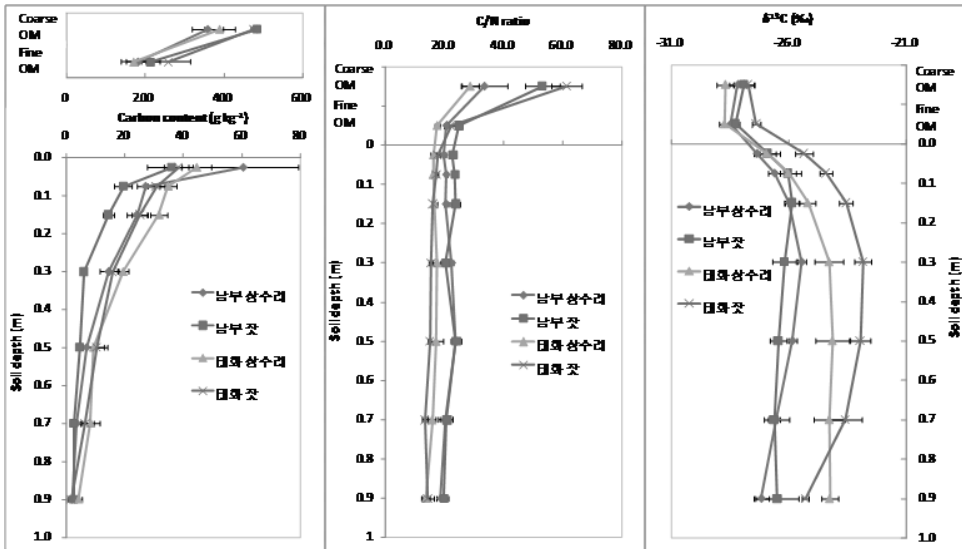
	탄소함량(%)	탄질비	총탄소량(g m ⁻²)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)			
				전체 토양	거친 POM	미세한 POM	<53 μm 분획
임상(林床)							
현재 CO ₂ 농도	38.2	42.7	700.98	-28.90 (leaf litter)			
상승 CO ₂ 농도	37.7	43.4	883.92	-34.15 (leaf litter)			
표토 (0-15 cm)							
현재 CO ₂ 농도	1.3	18.1	1,901.4	-26.24	-26.82	-27.14	-25.83
상승 CO ₂ 농도	1.6	19.0	2,207.7	-28.05	-29.75	-28.48	-27.21
심토 (15-30 cm)							
현재 CO ₂ 농도	0.5	16.1	657.1	-24.20	-24.33	-26.11	-24.10
상승 CO ₂ 농도	0.5	16.2	747.4	-24.96	-25.45	-26.84	-24.52

자료: Schlesinger와 Lichten(2001).

- 토양탄소격리는 궁극적으로 대기로부터 감축한 탄소가 오랫동안 토양에 보유되는 것을 의미하는 것으로, 비용 효율적이고 환경 친화적으로 실행되어야 한다. 토양에 기반을 둔 농림업에서의 탄소감축은 공학적으로 접근하는 탄소감축과는 그 개념과 추진방법이 다를 수밖에 없다.
- 농림업에서는 감축한 탄소의 안정화를 탄소감축 용량과 함께 계량화할 수 있는 노력을 펼쳐야, 농산촌의 탄소순환이 더욱 활성화될 수 있다.
- 농림생태계에서의 토양탄소격리의 속도와 안정화 속도는 토성·토양단면 특성·기후 등에 의해 영향을 받는데, 앞으로 토양이 지닌 탄소저장용량이다 채워질 때까지 20-50년 지속할 것으로 예측한다(West와 Post, 2002). 역으로 말하면, 농림업의 재배 및 토양관리에 따라 탄소감축효과는 늘어난다는 것을 말한다.

- 토양탄소저장 용량 및 영속성(permanence)은 점토 함량과 종류, 토양구조 안정성, 토양 수분 및 온도, 미세 입단의 형성 등과 밀접히 연관되어 있다.
- 위도가 다른 장기 산림생태계에서 탄소의 분해에 따른 함량과 탄질비 및 안정성탄소동위원소 자연존재비 변화(그림 4-7)는 토양탄소단면의 탄소 안정화특성을 보여준다.

그림 4-7. 기온과 수종에 따른 탄소 단면 비교



2.3. 농림업의 탄소흡수용량(carbon sink capacity)

- 농림업의 탄소수지는 농경지나 산림에 남아있는 탄소량, 농경지로부터 나가는 탄소량, 농경지로 들어오는 탄소량(타 산업 연계), 생산과 가공 과정을 통해 소모되는 탄소량에 의해 개략적으로 결정할 수 있다.
- 농산촌의 탄소순환과 이에 따라 순환과정에 의해 결정되는 탄소목록은 지역의 토지이용형태, 토양관리 및 농사법 등에 의해 변할 수 있으나, 탄소저장용량은 궁극적으로 탄소관리법에 의해 장기적으로 변한 입단의 구조·안정화 및 수리특성 등 토양특성에 의해 변하게 된다.

- 토양구조의 발달은 토양에 들어온 탄소를 깊은 곳으로 격리한다.
- 입단의 안정화와 구조의 발달은 토양탄소를 보다 안정한 형태로 토양에 고정하게 되며, 이 과정에서 토양체류시간이 늘어나며 동시에 탄소저장 용량도 키운다.
- 그래서 토양에 존재하는 탄소를 어떻게 관리하느냐에 따라 농업이 지닌 기후변화 억제력은 더 커진다.

2.3.1. 토지이용형태 변화에 따른 탄소함량 변화

- 농림업은 지금까지 재배 및 토양관리에 따라 양상은 다를지 몰라도, 농경지의 토양탄소 함량을 변화시켰다. 토양탄소격리는 농경지, 산림, 산촌 휴양지 등에 멀칭, 보전경운, 조림, 윤작, 종합비배관리를 통하여 증진시킬 수 있다.
- 토양탄소격리의 잠재력은 매년 0.4-0.6 Pg(Sauerbeck, 2001)에서 0.6-1.2 Pg(Nordt등, 2001) 정도로 시간과 용량에 있어 유한하다고 예측하나, 그럼에도 불구하고 토양은 우리에게 새로운 평형에 도달할 때까지 격리시간을 벌여준다.
- 토양탄소격리 잠재력(potential)은 황폐한 농경지의 복원, 유기부산물 자원의 재활용, 간척지의 활용 등을 통해 키울 수 있다.
- 농경지 토지이용형태가 변하면 토양탄소함량이 변하는데, 표 4-4는 콩 재배지를 과수원, 채소재배지, 옥수수 재배지로 전환(8-20년)한 후 토양탄소단면을 비교한 것이다(Xinyu등, 2006).
- 콩을 제외한 모든 경작지에 유기물 시용(kg/hm²): 채소(1,800), 과수(900), 옥수수(450)
- 토지이용형태가 변한 후, 퇴비 등 유기물시용에 의해 토심 25cm까지 토양탄소함량이 증가하였다.

표 4-4. 토지이용 변화에 따른 토양탄소함량(g/kg) 변화

토지이용	토심 (cm)				
	0-10	10-25	25-40	40-70	70-100
과수원	10.00	8.16	5.21	5.33	4.16
채소 재배지	9.67	9.16	6.42	4.73	3.80
콩 재배지	7.73	6.62	4.52	3.38	3.27
옥수수 재배지	9.31	8.30	6.31	5.26	4.73

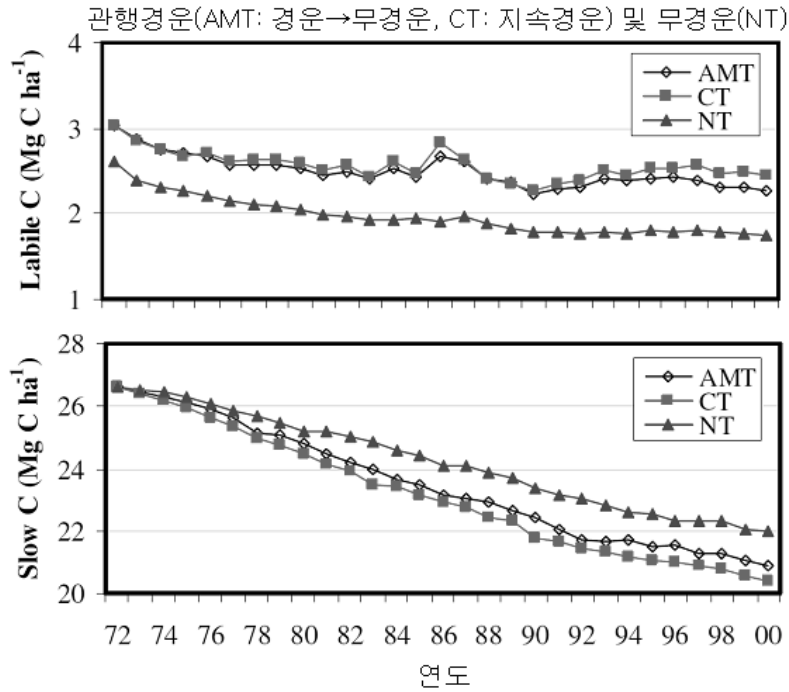
자료: Xinyu등(2006).

2.3.2. 토양관리 및 농법의 변화에 따른 탄소함량 변화

- 기후변화충격을 경감할 수 있는 토양탄소격리에 꼭 고려해야 할 요인은 다음과 같다. 왜냐하면, 선택한 방법에 따라 나타나는 직접효과와 기대효과가 다르기 때문이다.
 - 관행경운 → 무경운: 작기 당 30~35kg C/ha의 탄소감축이 발생한다.
 - 그러나 농법의 선택은 토양탄소격리 자체뿐만 아니라, 식량을 증산하고 토양·수자원의 지속적인 이용이 가능하도록 해야 한다. 재활용할 수 있는 바이오매스 자원은 오염이 일어나지 않는 적절한 처리수준을 제시해야 한다.
 - 그러나 이외에 알맞은 작부체계 등 여러 농법의 선택도 탄소격리효과에 직·간접적으로 영향을 준다. 다양한 효과가 나타나기 때문에, 여기서는 이에 대한 설명을 생략하겠다.

- 토양탄소는 경운에 의해 탄산가스로 대기로 산화되지만, 윤작과 시비관리에 의해 없어지는 양이 보충되기도 한다. 미국 대평원에서 지난 30년간 경운을 달리하여 경작한 토양에서 이분해성 탄소와 난분해성 탄소가 변하는 추세이다<그림 4-8>.
 - 무경운에 의해 이분해성(labile) 탄소함량은 낮아졌으며, 난분해성(slow) 탄소함량은 높아졌다.
 - 이러한 토양탄소 안정화 과정에 대한 평가는 농림업의 탄소감축효과를 양과 질적인 면에서 장기간 효과를 평가하는 것이어야 한다.

그림 4-8. 경운방법에 따른 토양탄소~소함량 변화(Tan등, 2007)



자료: Tan등(2007).

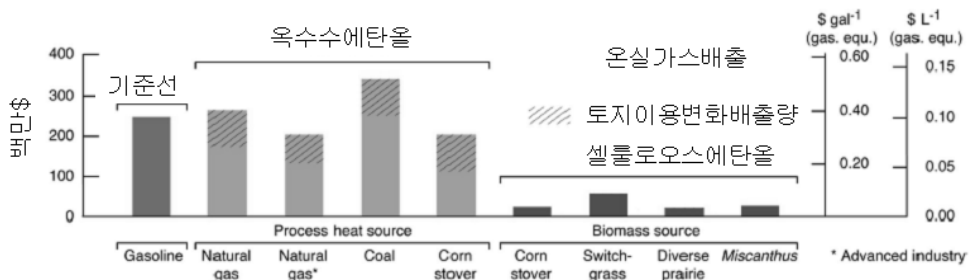
2.3.3. 토양탄소격리와 바이오연료생산

- 최근에 신·재생에너지의 하나인 바이오연료를 생산하기 위해 바이오매스 작물을 재배하는 농장에 대한 관심이 증가하고 있다. 녹색성장을 기치로 하는 우리나라도 예외는 아니다.
- 연간 3 Gt의 농업부산물이 세계 전역에서 생산되는데, 바이오연료 또는 다른 용도로 활용하여 농경지에서 없어지지 않는다면 이는 필히 토양의 질과 탄소저장량을 증진한다.
- 그러나 농업부산물이 생산지역에서 다른 곳으로 이송되거나 바이오연료 생산에 이용된다면, 이는 분명히 농림업의 토양탄소격리 용량을 위협할 것이다. 두 가지 경쟁적인 활용에 대한 환경경제적인 평가가 필요하다.
 - 하나는 바이오연료 생산에 따른 온실가스배출 감축에 대해 생각해야 할 것이고, 다른 하나는 재배 작물이 그 곳에 자라면서 흡수하는 탄소량과

그 재배지에 저장되는 토양탄소량을 평가해야한다.

- 바이오연료의 사용은 화석연료에 비해 상대적으로 적은 양의 온실가스 배출효과가 있다<그림 4-9>. 그러나 대규모 경작에 의한 농경지 탄소의 손실은 바이오연료 대체사용에 따른 온실가스 감축효과를 훨씬 넘어서고 있다.
- 그러나 최근에 목재셀룰로오스를 바이오연료로 생산하는 대안이 나오고 있으나, 이 문제도 역시 온실가스 감축과 토양탄소저장 증진 등 두 가지 측면에서 양방향의 접근이 필요하며, 이는 우리에게 어려운 숙제를 제시하고 있다.
 - 열대우림습지를 개간하면서 토양이 자연 상태로 저장하였던 탄소 약 18억 톤이 대기로 배출된다고 하였다(Green Peace, 2007).
 - 바이오연료를 생산하며 산림훼손과 자연녹지파괴로 배출되는 탄소량은 바이오연료로 인한 온실가스 감축규모의 17-420배에 이른다(미네소타대학과 Nature Conservation).

그림 4-9. 바이오연료생산 가격 비교



자료: Hill등(2009).

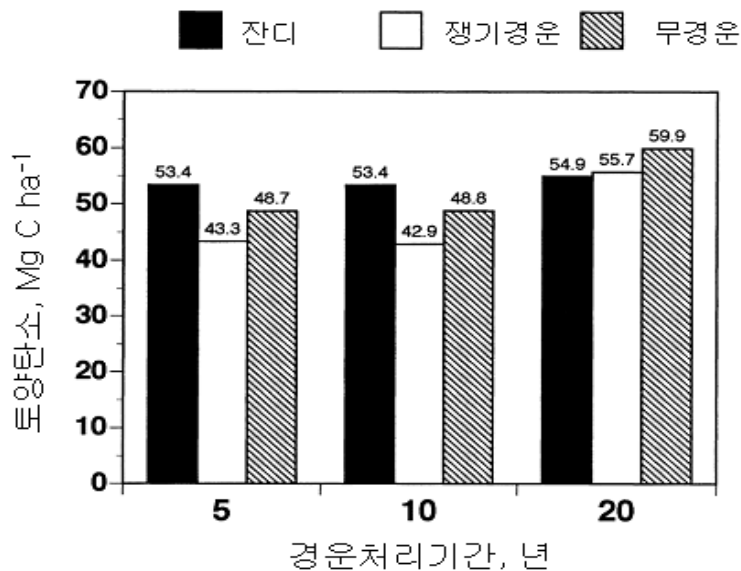
- 토양탄소의 가치는 탄소배출권시장에서 중요하다. 탄소감축 한도와 규제가 엄격해질수록 토양탄소의 가치는 증가하므로, 최소 3-5년간 토양유기탄소 저장량과 탄소의 가치를 평가해야 한다. 토양탄소가치의 저평가는 당장 「공공의 비극」이 될 수 있기 때문이다.

3.1. 토양관리에 의한 토양탄소균형 변화

3.1.1. 경운 및 윤작의 효과

- 옥수수재배지의 토양탄소저장량은 경운에 의해 주변 잔디보다 초기에 낮았으나, 20년이 지난 후 경운한 옥수수재배지의 토양탄소저장량은 잔디와 거의 같았으나 무경운한 재배지에서는 오히려 높았다.

그림 4-10. 잔디와 옥수수재배지 토양탄소저장량



자료: Dick등(1998).

- 퇴비 등 유기물의 투입, 경운, 윤작 등에 의해 토양탄소격리가 영향을 받을 수 있다. 그러나 토양감축량을 유지하기 위해서 지속적인 관리가 뒤따라야 한다.
 - 꾸준한 유기물의 투입과 무경운이 장기간 지속되어야 한다.
 - 지난 30년간 윤작보다는 무경운에 의해 토양탄소저장량이 증가하였다.

표 4-5. 토양탄소함량에 미치는 경운, 윤작 및 상호작용 효과

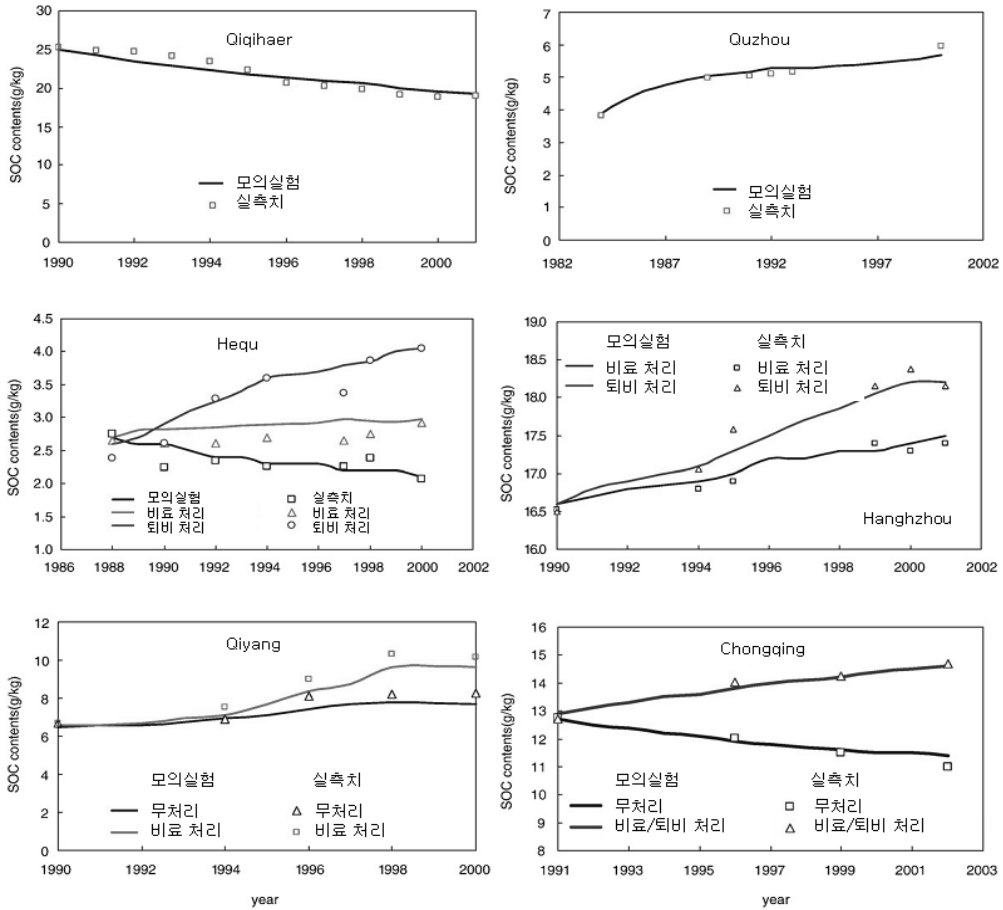
농업관리	토양유기탄소농도 (g/kg)	토양탄소 (Mg/ha)
경운		
무경운(NT)	22.7	95a
관행경운(CT)	18.5	78b
윤작		
옥수수-귀리-초지(COM)	21.9	92a
옥수수 연작(CC)	21.5	90a
옥수수-콩(CS)	18.4	77b
경운/윤작 상호작용		
PT/CS	16.8	71a
PT/CC	19.1	80ab
PT/COM	19.6	82ab
NT/CS	20.0	84ab
NT/CC	23.8	100b
NT/COM	24.2	102b

자료: Dick등(1998).

3.1.2. 작부체계 및 농업관리의 효과

- 토양탄소저장량은 기후대, 토지이용, 작부체계, 농업관리법 등에 따라 변한다. 동일한 작부체계의 농경지라도 시비관리에 따라 토양탄소함량은 달라진다. 중국의 주요 농업지역에서 관행농업과 대안농업이 토양탄소함량변화에 미치는 영향을 20년 동안 측정하고, 이를 탈질-분해(DNDC)모델로 모의(模擬)한 결과를 비교하였다<그림 4-11>.
- Qiqihaer지역은 옥수수연작, Quzhou지역은 겨울밀·옥수수윤작, Hequ지역은 기장·감자윤작, Hangzhou지역은 보리·쌀(2모작)윤작, Qiyang지역은 겨울밀·옥수수윤작, Chongqing지역은 겨울밀·쌀윤작 작부체계이다.
- 토양탄소함량은 논에서 보다 밭에서 훨씬 더 다양하게 변했다.
- 토양에 작물부산물을 처리하거나 축분퇴비 등을 사용하여 토양이 저장하는 탄소의 양이 증가하였다. 작물수확물 일부와 축분퇴비를 농경지에 처리하는 것은 탄소감축을 늘려 탄소순환경제를 활성화시킬 수 있는 하나의 대안이다.

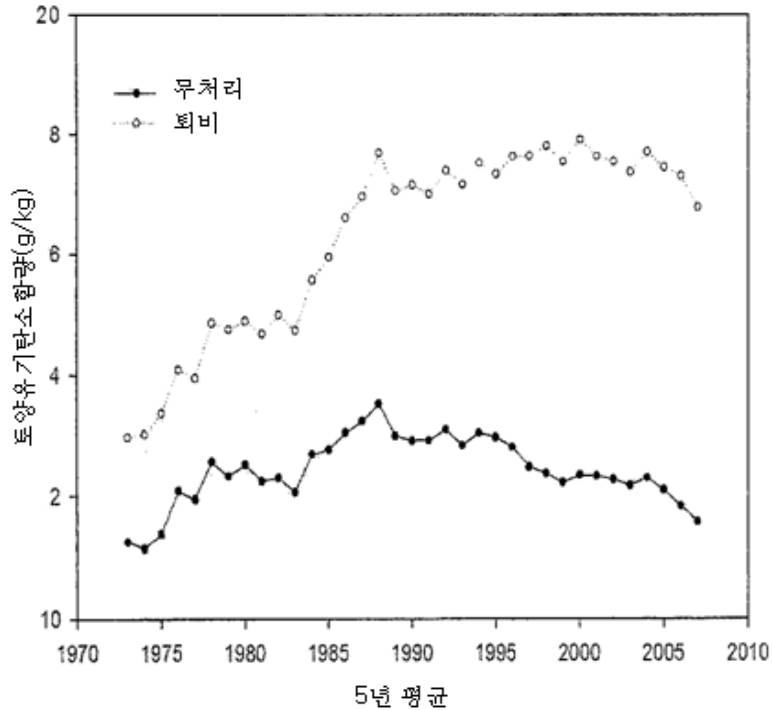
그림 4-11. 작부체계와 농업관리에 따른 토양탄소저장량



자료: Wang등(2008).

- 우리나라 논에서 지난 30여 년 동안 퇴비(7,500kg/ha)를 연용한 결과, 토양의 유기탄소함량이 퇴비를 처리한 경우 무처리에 비해 시간이 지날수록 상당히 증가하였다<그림 4-12>.
- 적절한 형태로 토양에 들어간 유기물을 농림업에서 적절하게 관리하면, 이는 곧 농림업의 탄소흡수용량의 증대와 이를 통한 청정개발체제 사업으로 유도하는 견인력이다.

그림 4-12. 장기간 퇴비사용에 따른 토양유기탄소함량 변화



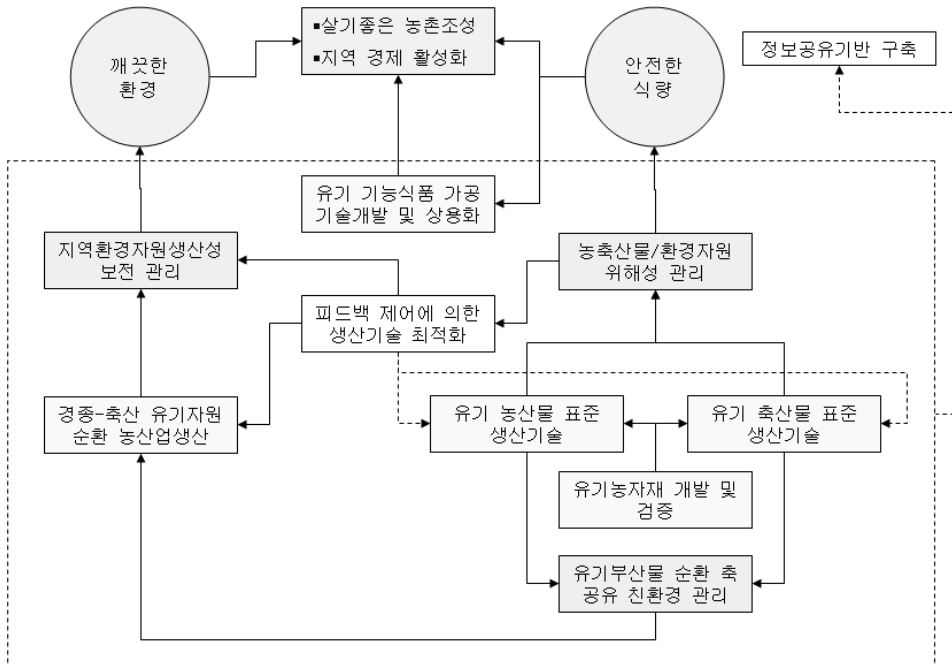
자료: 정원교 외 3인(2007).

3.2. 유기자원순환 농산업 확립

3.2.1. 농산촌 유기자원순환

- 농산촌에서 농림업은 생산·가공·소비와 직간접적으로 연결되어 있고, 이 연결고리를 크게 구분하면, 주로 경종농업과 축산농업이 유기자원순환의 두 축을 이루고 있다<그림 4-13>.

그림 4-13. 농산촌 유기자원 순환 모식도



- 농산촌 지역의 유기자원순환을 원활하게 하기 위해서는 다음 단계의 접근이 필요하다. 이는,
 - 1단계: 지역 내 생태적 경종-축산 농장과 지역 간에 경험을 공유하는 과정을 평가하고 연구하는 단계
 - 2단계: 연구결과를 공유하며, 지역 내 생태적인 생산, 가공 및 재순환하는 농장에서 얻어지는 환경이익을 관행적인 생산과 비교 연구하는 단계
 - 3단계 및 4단계: 이로부터 얻어지는 경제효과를 평가하고, 지역경제 발전 및 고용기회 창출을 포함하는 사회수준의 결과를 평가하는 단계
 - 5단계: 이를 토대로 문제점을 개선하고, 타 지역으로 전파를 권장하여 탄소교역이 이뤄질 수 있는 의제(agenda)를 채택하는 단계이다.

- 농산촌에서 실행이 가능한 농산부산물 바이오매스 순환과 이에 속하는 농업형태를 기존 자료를 토대로 다음과 같이 개략적으로 유형화했다<표 4-6>. 개략적으로 이러한 과정에 의해 탄소가 유기자원으로 순환한다.

표 4-6. 지역 유기자원순환 유형과 농업 형태

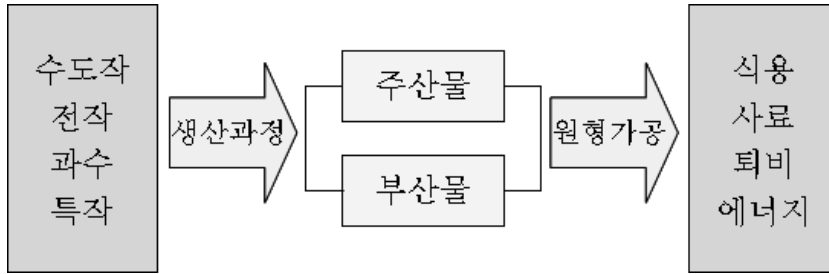
	서브시스템	유기부산물(탄소)자원순환
	농가	경지 내 순환
작부체계 순환		윤작·혼작·녹비작물 재배
가구 내 순환		생활 재활용 유기자원의 퇴비화
지역	토지이용형태 간 순환	농산부산물이용·휴경지윤작(사료작물)·입산부산물퇴비화
	농가 간 순환	경종-축산 농가 간 유기부산물(퇴비·볏짚·액비) 자원화
	농업-지역사회 순환	지역 농산식품재료 급식·공급 및 잔반의 사료·퇴비화
지역	농업지역간 순환	경종-축산 부문간 유기물 교환
	농업-공업 부분 순환	식품가공 등 공업부문 유기부산물의 퇴비화
	농촌-도시 간 순환	생활 유기부산물 사료화·퇴비화

자료: 김창길과 강창용(2002).

3.2.2. 농산부산물 바이오매스

- 농림업에서 발생하는 바이오매스를 이용하는 산업으로 퇴비화, 사료화, 바이오에너지화 등을 들 수 있다. 이렇게 농산부산물 바이오매스를 이용하는 것은 농업이 지닌 기존 역할 이외에 바이오연료 등 재생에너지를 공급할 수 있는 기능을 제공하는 것이다<그림 4-14>.
- 지금까지 농산부산물 바이오매스를 이용하는 과정은 손익분기규모 등 제반 경제성을 어떻게 확보하는가에 따라 달라진다.
 - 이러한 손익분기규모 분석에 지금까지 행하였던 경제성분석 이외에 농업행위를 통해 얻어진 탄소감축과 이를 통한 가치발생의 요인을 추가해야 한다.
 - 농림업에 의해 확보할 수 있는 탄소배출권에는 앞에서 설명한 내용으로부터 짐작하였듯이, 농업에 의해 저장되는 온실가스 감축뿐 아니라 농업에 의해 저장되는 동안 안정화까지 가공을 한 것이기 때문에 이례 관해 가중치를 부여하는 문제도 심각히 고려해야 한다.
 - 바로 이러한 탄소감축 효과가 농산촌의 탄소순환을 활성화할 수 있는 동기발생 요인이 된다.

그림 4-14. 농산 바이오매스의 분류



자료: 박현태와 김연중(2008).

- 한편 지금까지 농산촌의 유기부산물 활용은 논에서 나오는 벗짚·미강·왕겨, 밭에서 나오는 줄기와 잎, 과수원에서 나오는 전정가지를 위주로 하여왔으나, 앞으로는 축산 쪽에서 나오는 분뇨 등 부산물도 경종농업에 적극적으로 활용하여 농산촌의 탄소순환 고리가 이뤄지게 해야 한다.
- 농산부산물 바이오매스 발생량은 재배면적에 비례하는 특성이 있다. 논농사를 통해 연간 6,236천 톤의 벗짚이, 과수농업에 의해 총 1,411천 톤의 전정가지가 발생한다. 이는 탄소를 함유한 농업부산물로 지역에서 재생자원으로 공유되어야 한다.

표 4-7. 논 및 과수원에서의 바이오매스 발생량(2006년)

		재배면적 (천ha)	바이오매스 종류	단위면적발생량 (kg 10a ⁻¹)	발생총량 (천ton/년)
벼		955	벗짚	653	6,236
			왕겨	118	1,127
과수	사과	28	전정가지	1,899	532
	배	21	전정가지	1,433	301
	포도	19	전정가지	2,686	510
	복숭아	13	전정가지	521	68
	계	81	-	-	1,411

자료: 박현태와 김연중(2008).

- 벗짚은 가장 활용도가 높은 농산부산물로 탄소 함량뿐만 아니라 비료 성분도 많기 때문에, 퇴비, 토양개량제 등으로 활용하여왔다. 농가의 약 60% 정도가 퇴비로, 약 25% 정도가 사료로 이용하는 편이었으나(한국농

촌경제연구원, 2006), 최근에는 축산농가의 수요가 증가하면서 볏짚곤포의 형태로 농경지 밖으로 반출되는 경우가 증가하고 있다.

- 이러한 손익분기규모 평가에 볏짚 및 전정가지 등 바이오매스의 탄소가치가 평가된다면, 농림업의 탄소흡수 효과는 지금보다 크리라 본다.

3.3. 탄소순환인증과 청정개발체제 활용

3.3.1. 농림업 바이오매스자원 재활용

- 지역사회의 탄소순환은 농림업을 통해 생산한 바이오매스(주산물 및 부산물)를 사회가 이용하고, 경종부산물과 축산부산물을 서로 재활용할 수 있는 자원으로 이용하는 선순환의 고리를 이뤄야한다. 어느 한쪽이 부족하거나 남는 경우, 바이오매스 순환은 타 지역과 연계하여 그 고리를 형성해야한다.
- 따라서 앞으로 농산촌 지역에서 탄소순환을 활성화하기 위해서는 볏짚을 농경지에 환원한 경우와 밖으로 반출한 경우에 대해 탄소감축과 이에 따른 가격을 평가하는 연구가 반드시 필요하다. 지역순환의 유형은 다양하기 때문에 규모에 따라 규모를 축소·확장해야 한다<표 4-6>.
- 지역단위 바이오매스 순환시스템의 구성은 반드시 탄소순환에 따른 탄소감축과 이에 대한 탄소가치 평가를 토대로 설계되어야 한다.
 - 볏짚 및 수입건초의 국내 단가와 탄소거래 기준단가<표 4-8>.

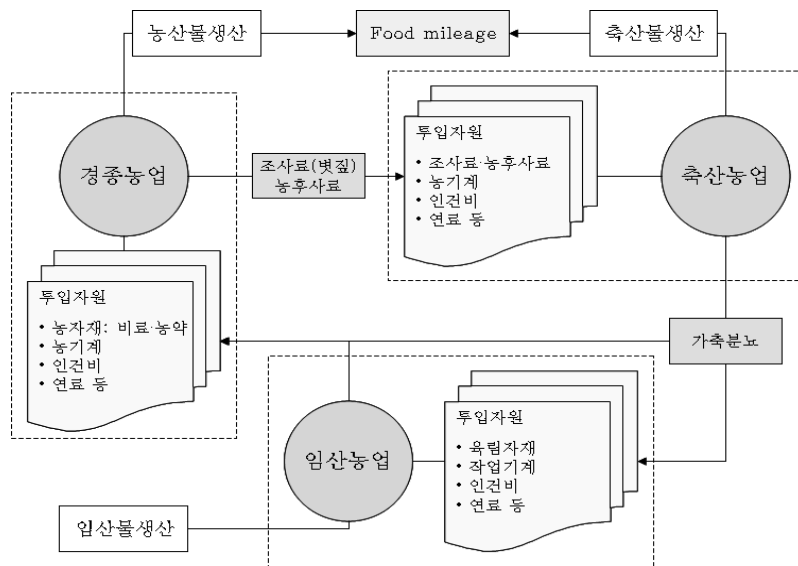
표 4-8. 볏짚 및 수입건초의 국내단가와 탄소거래 기준단가

바이오매스부산물	단가		탄소시장단가*	
	건물중(원 kg ⁻¹)	탄소(원 kg C ⁻¹)	건물중(원 ton ⁻¹)	탄소(원 kg C ⁻¹)
볏짚	183	437	20,172	20
수입건초	600	1,429		

*유럽 탄소시장 단가(12euro ton⁻¹)

- 농산물 바이오매스 순환은 지역의 농림업 구성 등 지역의 특성에 따라 다양하므로 하나의 시스템으로 지역에서 탄소가 순환하는 다양한 과정을 효율적으로 구축하는 것은 어렵다.
- 그러나 지역단위 물질순환은 투입 → 생산 → 소비 단계로 이뤄지는 순환을 기초로 개념적으로 설명할 수 있다. 순환과정을 거치며 물질(M)의 잔여축적(ΔM)이 일어나며, 이 축적은 발생부문에 남기도 하지만, 타 경제부문으로 재활용순환이 가능하기도 하다.
- 물질균형방정식: $\Delta M = M(\text{투입})+M(\text{생산})+M(\text{소비})$
- 지역단위로 볼 때, 경종농업은 축산농업과 임산업간에 서로 연계할 수 있으며, 이들로부터 생산된 주산물을 지역 활용으로 순환한다고 볼 수 있다. 이 순환 과정에서 각 단위 산업계로 탄소목록을 작성하고, 이를 연계해야 한다<그림 4-15>.

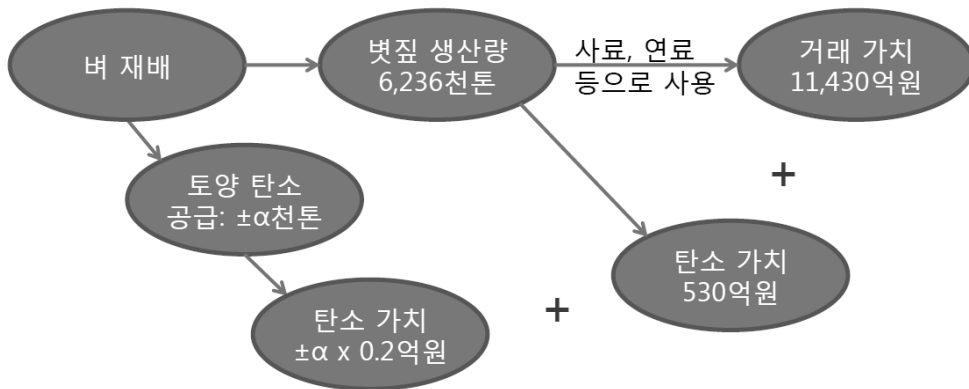
그림 4-15. 지역단위 바이오매스 순환 개념도



- 지역단위의 바이오매스 순환은 투입, 생산 및 소비 등의 단계를 평가함으로써 방향이 결정되었는데, 앞으로는 농산물을 생산하는 과정을 통해 얻어지는 축적의 한 구성항목으로 탄소흡수효과 가치를 포함하도록 탄소목록(carbon inventory)을 작성해야 한다.

- 탄소가치를 제외하여 실행한 농산바이오매스 이용의 손익분기점에 관한 연구(박현태와 김연중, 2008)에서, 볏짚곤포생산 및 과수전정가지 톱밥이용의 손익분기규모는 각각 14.86ha, 1.23ha이었으나, 만일 탄소흡수를 고려한다면 손익분기규모는 더 작아질 수 있다.
- 가축의 조사료로 볏짚과 수입건초를 이용하고 있는데, 국내 총 볏짚생산(6,236천ton)을 kg당 탄소기준 단가(볏짚: 437원, 수입건초: 1,429원)를 적용하여 계산한 거래가치는 11,430억 원이다.
 - 국내에서 생산된 볏짚의 경우, 바이오매스생산에 해당하는 탄소가치는 kg당 탄소거래 단가(20원)를 기준으로 하여 530억 원에 상당하는 탄소배출권을 갖는다.
 - 벼 재배과정에서 토양에 저장되는 탄소의 양($\pm\alpha$)이 증가하므로, 볏짚생산에 추가적으로 탄소배출권을 부여할 수 있다. 앞으로 탄소시장에서 농림업이 지닐 수 있는 가치는 단순 상거래 및 탄소흡수에 따른 가치를 다 포함해야 한다<그림 4-16>.

그림 4-16. 국내 연간 볏짚 생산에 따른 거래가치 및 탄소가치

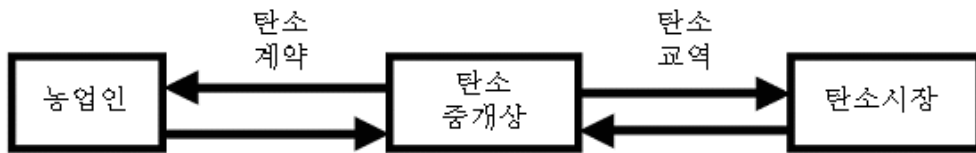


- 시카고 기후거래소(CCX)의 온실가스방출상쇄(offset) 프로젝트 중 가장 많은 부분을 차지하고 있는 것(28.5%)이 농경지 토양의 탄산가스 흡수이다.
 - 토양탄소시장(soil carbon market)은 주로 농경지토양에 의한 온실가스 흡수(무경운, 보전경운, 식재에 의한 토양피복)를 거래하기 위해 형성된 것으로, 단위ha당 흡수량을 탄산가스환산 톤에 고정하여 거래를 표준화

하였다.

- 토양관리상쇄(soil management offsets)는 농지관리, 양분관리, 경운 및 부산물관리, 토지피복, 토지복원 프로그램 등에 의해 토양유기탄소로 고정되는 온실가스흡수 기능을 의미하는데, 이것은 교토의정서에도 제시되어 있으며 IPCC는 토양탄소격리를 온실가스배출 감축에 있어서 가장 중요한 독립부분으로 언급하고 있다.
- 농경지 토양에서 탄소고정의 배출권을 인정하기 위해서는 독립적인 제3기관의 검증을 받아야 하며, 등록된 농업인들은 토양탄소고정과 관련한 이행사항을 준수해야 한다.
 - 등록된 지역에서 최소 5년 동안 지속적으로 보전 경운을 이행해야하고,
 - 무경운과 보전경운 등의 토양관리와 유기토양관리, 농경지복원 프로그램 등을 수행해야하는 등, 농림업에서 탄소순환이 제대로 이루어졌나하는 평가로부터 출발한다.

그림 4-17. 탄소시장에서 농업부문 탄소교역 예(VLC계)



자료: Feng등(2000).

- 그러면, 탄소순환에서 발생하는 가치를 창출하기 위해서는 순환과정을 인증할 필요가 발생한다. 지역단위에서 볼 때, 자원순환은 농림업부문 또는 타 산업부문과 지역 간에 이뤄질 수 있기 때문에 농업부문의 탄소흡수효과를 정량화하기 위해서는 자원의 투입·생산·소비에 따른 탄소순환 과정의 수지를 계산하여야 한다.
 - 이는 탄소순환이 제대로 이루어졌나하는 평가로부터 출발한다.

3.3.2. 탄소순환인증의 필요성과 기술적인 가능성

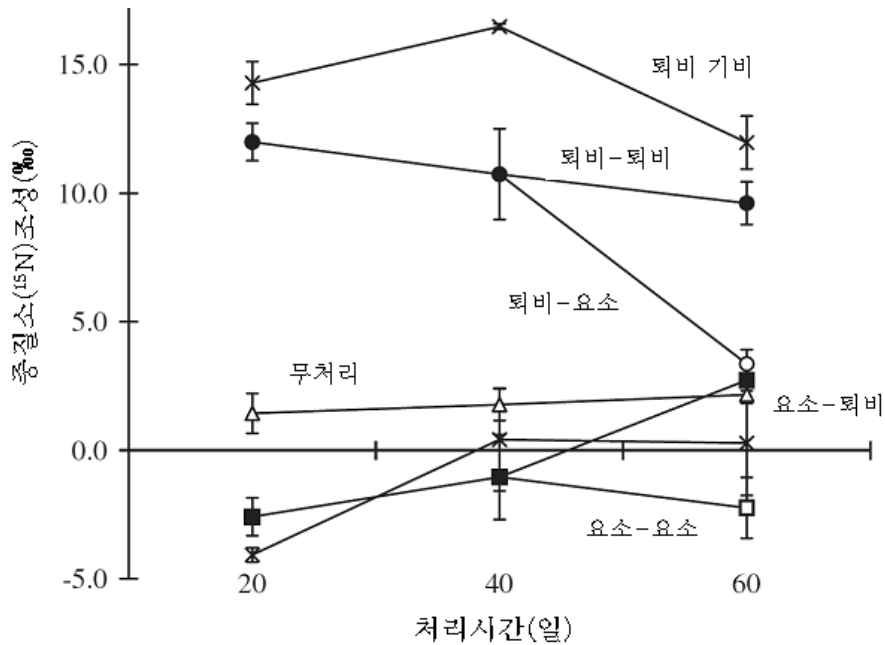
- 농림업을 통해 생산되는 농산물과 부산물은 유기탄소화합물로, 농림업은 지속적으로 안전한 식량을 생산하고 깨끗한 환경을 보전하는 기능을 갖고 있다. 이를 위해,
 - 첫째, 안정적으로 생산량을 확보하기 위해 시용한 질소가 퇴비인지 화학비료인지, 또 시비이력은 어떤지에 대해 판단해야 하며,
 - 둘째, 재활용이 환경오염을 유발하지 않는 적절한 수준인지를 판단해야 하며,
 - 셋째, 지역·국가 사이 농산물 및 생산자원의 탄소교역은 과학적인 표준(yardstick)을 두어 합리적으로 진행하도록 해야 하며,
 - 넷째, 탄소순환에 따른 농림업의 탄소흡수의 안정화를 평가해야 한다.

- 농업과 연계한 지역의 탄소순환은 재활용 바이오매스의 순환이기에, 근본적으로 농산물·사료·축산분뇨의 순환이다. 만일 순환이 제대로 이루어짐을 과학적으로 인증할 수 있다면, 이는 직접적으로는 농림업의 부가가치를 높이고, 간접적으로는 이렇게 생산된 농산물을 구입하는 소비자에게 미래를 위한 에코펀드(eco-fund)에 기부했다는 뿌듯함을 줄 수 있다고 생각한다.

- 농업에서 질소는 안정적으로 농업생산을 달성하기 위해 필수적이다. 그러기에 경종과 축산을 연계하는 농업에서 탄소의 순환과 함께하는 질소의 역할은 중요하다.
 - 따라서 이러한 자연의 법칙은 농림업의 유기자원의 순환을 질소 지문을 통해 추적·인증할 수 있는 과학적 기술을 가능하게 한다.
 - 이를 위해서는 정부의 부단한 노력과 농업에 대한 과학적인 애정이 꼭 필요하다. 왜냐하면 농업에서의 유기자원의 순환은 생산·가공·유통 등 농업 전반에 걸쳐 일어나는 대역사이기 때문이다.
 - 이러한 과학적인 인증기술 개발의 전단계로 현재 유기농산물의 생산지 및 품질과 생산지 시비이력을 인증할 수 있는 기술이 개발되어있다. 현재 유기농산물인증에 적용하고 있는 기술(특허등록(현재 5개국): 호주·

한국·중국·일본·미국)이 산지와 품질의 판정이 가능하게 한다. 이러한 기술을 DNA-marker처럼 농업에서 탄소순환을 인증할 수 있는 규약으로 발전시킨다면, 이는 분명 우리 농업의 가치를 한층 더 높일 수 있다<그림 4-18>.

그림 4-18. 재배과정 중 시비이력에 따른 양배추의 중질소(^{15}N) 조성 변화



자료: 윤석인과 노희명(2006).

- 현재 우리농업은 정부가 국가의 위상을 높이는 정책을 펴고 있음에도 불구하고, 중국의 거센 농산물의 홍수와 소비자의 유기농산물에 대한 갈수 없는 불신으로 인해 수입유기가공식품의 홍수에 시달리고 있다.
- 외래 바이오매스는 분명 우리나라에서 생산된 바이오매스와 함께 처리해야하기 때문에, 이는 고스란히 우리나라의 부담으로 작용한다.
- 이러한 경우는 농림업의 탄소흡수 기능에 부담이 되는 현상임에는 틀림없다.

3.4. 안정적 탄소흡수기능 제고

- 농림업이 지닌 탄소흡수기능을 높이기 위해 정부차원 또는 순환지역차원에서 고려해야할 사항은 매우 많다. 크게 구분하면,
 - 첫째, 탄소배출권 시장에서 농업을 통해 흡수된 탄소의 가치를 제대로 평가할 수 있는 각 단계의 표준과 프로토콜을 설정하고,
 - 둘째, 농경지토양에 격리된 탄소의 안정화정도를 평가할 수 있는 제도의 도입과 이에 따른 가중치를 부여하고,
 - 셋째, 농산촌의 다양한 탄소순환과정을 평가하여 청정개발체제 사업으로 등록 유도하고,
 - 넷째, 이러한 표준에 의한 평가 체계를 농업분야 탄소배출권 시장에서 적극적으로 활용할 수 있도록 제도와 정책을 정비해야하는데,
 - 농림지의 바이오매스의 활용과 이에 따른 가치문제는 단기 효과와 장기 효과의 관점에서 다뤄져야 한다. 지금 우리가 쓰는 화석연료는 이미 오래 전에 토양에 저장된 유기물이기 때문에, 우리도 후세를 위해 화석연료의 원료가 되는 바이오매스를 농경지에 저장할 경우와 화석연료대체 연료에 활용하는 경우에 대해 장·단기적 가치에 대해 선택해야 한다.

3.4.1. 산림 탄소흡수능력 제고

- 농업 분야에서 농경지와는 달리 사람의 간섭이 거의 없는 산림은 탄소흡수용량이 커서 탄소배출권 가치가 큰 것으로 인식되어왔으나, 비록 임종에 따라 다를지라도 나무는 일반적으로 수령 30-40년이 지나면 광합성능력이 포화되거나 심지어 감소하기도 한다<표 4-2>. 따라서 산림의 탄소흡수능을 높이기 위해서는,
 - 첫째, 임종에 따라 다를지라도 광합성이 포화에 달한 수령 30-40년이 지난 나무는 간벌이나 벌채를 통해 재 조림하는 등 적극적으로 산림의 탄소흡수용량을 높이는 관리가 필요하다.
 - 둘째, 숲가꾸기를 통해 목재셀룰로오스 바이오에너지 원료를 생산하거나, 양질의 목제품·가구를 생산하거나, 목조건물을 건축하는 등 탄소배출을 감축하고 탄소흡수를 증대할 수 있도록 해야 한다. 그러나 벌채가 지의 산림 밖 배출은 장기적인 탄소관리에 던지는 숙제이다.

- 최근 연구결과, 이미 포화된 산림의 탄소흡수능을 늘리고자 외국에서는 외부로부터 양질의 바이오매스(바이오솔리드·액비)자원을 산림에 재활용하여 탄소저장량을 늘리는 시도와 조림·육림방법(재식밀도·시비법 등)과 함께 광합성능이 좋은 임종을 개발하는 산림경영이 다양하게 시도되고 있다.
- 따라서 농산촌의 산림경영은 토양의 탄소흡수용량을 키우면서 그 가치를 제고하는 방향으로 관리할 수 있도록 하는 탄소흡수용량 증진과 안정화에 관한 연구가 장·단기적인 단계로 선행하여야 한다.

3.4.2. 농림업 바이오매스 재활용에 의한 탄소흡수능력 제고

- 농림업은 특성상 그 안에서 다양한 종류의 바이오매스를 순환시킨다. 여기에 대한 전제로는 농경지에 처리가 가능한 바이오매스를 적절한 수준으로 처리해야 한다는 것이 전제가 된다.
 - 바이오매스자원을 공유하고 순환시키는 것은 비단 농업분야뿐만 아니라 다른 산업분야 또는 지역경제와의 연계성을 전제로 하는 것이기 때문에, 필히 이 순환과정 전체에 대하여 동위원소지문을 활용하는 등 과학적인 인증이 선행되어야 한다.
 - 다음으로, 농업에 의해 작물이 흡수하는 탄소의 양과 안정도 및 토양에 저장되는 탄소의 양과 안정도에 관한 정량적인 평가를 뒷받침할 수 있는 관련 연구가 뒤따라야 한다.
- 이러한 평가를 통해, 농업에서 이뤄지는 탄소흡수 및 탄소의 안정화에 대한 비용을 탄소배출권으로 인정하도록 청정개발체제사업으로 등록할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해,
 - 농경지 토양이 온실가스 흡수를 높이고 부식화과정을 따라 안정화되는 탄소의 가치를 높일 수 있는 농법(부산물 재활용·무경운·윤작 등)이 이뤄졌을 때, 단위 농가 또는 지역을 적절히 격려할 수 있는 탄소흡수에 따른 보상제도가 도입되어야 하고,
 - 이를 농산촌 지역의 탄소인증(carbon labeling)사업과 상표(regional

- branding)사업으로 유도할 수 있는 정책과 연구가 필요하며,
- 유기농산물, 유기가공식품 및 유기축산 등의 수익성 신장과 생산이력 및 유통과정을 추적하여, 예를 들면 출신지와 성분을 보증할 수 있는 명품 시장 등 시장이원화(dual market)도 추구해야 하며,
- 지역의 local food system과도 연계할 수 있는 시도가 필요하다.

3.4.3. 간척지를 활용한 탄소흡수능력 제고

- 간척지는 특성상 토양의 탄소함량이 매우 낮은 처녀 농경지다. 따라서 이러한 특성을 잘 활용한다면, 간척지를 안고 있는 농림업의 탄소흡수효과는 커질 수밖에 없다.
- 처녀 간척지를 해안염류 생태계의 안정화 과정을 학습할 수 있는 자연체 협학습장으로 활용하고, 이 과정을 통해 탄소흡수를 늘릴 수 있다고 본다. 이는 농업과 토양이 흡수하는 탄소의 가치를 널리 알릴 수 있는 좋은 기회가 아닐 수 없으며, 이를 통해 농업이 미래에 지닌 가치가 크다는 것을 널리 인식시키는 계기가 될 것이다. 우선 새만금(2만8,300ha)을 예로 들면,
 - 평균 토양탄소함량으로 저장한다고 계산할 때, 표토에 어림잡아 4,000만 톤의 탄소를 저장할 수 있고,
 - 간척지 해안염류 생태계가 안정화하는데 유기물이 필수이므로, 농림업 관리에 의한 조기 생태계 안정을 도모함으로써 농림업의 탄소흡수용량을 늘릴 수 있으며,
 - 이렇게 매년 토양에 저장된 탄소는 점점 분해에 저항성을 지닌 안정한 탄소화합물로 변하는데, 이는 간척지 토양질을 향상시키는 동시에 탄소 저장용량을 키우게 되기 때문에, 간척지의 탄소흡수용량에 관한 정책과 연구는 분명 농업이 가야할 또 하나의 블루오션(blue ocean)이다.