플라즈마기술의 농업분야 활용과 해외사례

김 대 웅* · 강 우 석**

1. 들어가며

플라즈마 기술은 반도체와 디스플레이 생산에 필요한 첨단 제조 기술이자, 미세먼지와 유해물질을 제거하는 환경기술, 핵융합 발전을 실현하는 에너지기술로 알려져 농업기술과는 무관하고 생소하게 여겨질 수도 있다. 그러나 플라즈마의 시작은 인류역사상 처음으로 질소계 비료의 대량 생산하여 20세기 초 농업 생산성을 비약적으로 향상시킨 혁명적인 농업기술이었다.

최초의 화학비료기술로 활용된 지 100여 년이 지난 지금 시점에서 플라즈마는 농업분야의 새로운 미래기술로 또다시 주목받고 있다. 살균, 소독, 보존과 생장촉진 등 다양한 농업기술에 대한 활용 가능성이 알려지며 일본과 미국 등 해외 연구기관을 중심으로 수행되어온 플라즈마의 농업분야 연구는 최근에 상용 수준의 실증기술까지 확대되는 등 성장가능성이 더욱 기대되는 분야이다.

본 고에서는 플라즈마의 개념과 플라즈마의 농업기술 적용 원리와 현황을 살펴보고, 해외의 연구개발 현황을 소개하며 미래 농업기술인 플라즈마의 가능성을 살펴본다.

* 한국기계연구원 플라즈마연구실 선임연구원(dwkim@kimm.re.kr)
** 한국기계연구원 플라즈마연구실 책임연구원(kang@kimm.re.kr)

2. 플라즈마 기술 개요

2.1. 플라즈마 기술의 개념과 특징

2.1.1. 플라즈마 기술의 개념

플라즈마(plasma)란 이온화된 기체 상태를 뜻한다. 얼음(고체)에 열을 가하면 녹아서 물(액체)로 바뀌고, 물을 가열하면 수증기(기체가) 되는 물질 상변이 과정의 하나로, 기체 원자가 충분한 전기에너지를 받으며 전자(electron), 이온(ion)과 들뜬(excited) 상태인 활성종(radical)으로 바뀌는 상태를 의미한다. 에너지가 높은 플라즈마 상태의 물질은 매우 강한 화학반응을 일으키고, 기체의 종류에 따라 독특한 색의 빛을 내기도 한다.

플라즈마 환경에서 생명이 공존하기 어렵기 때문에 우리는 우리 주변에서 플라즈마를 직접 접할 수 없지만, 수소 플라즈마의 핵융합 반응으로 우리 지구에 생명을 유지할 수 있는 빛을 전달하는 태양, 우주의 먼지가 모여 형성하는 행성과 항성 등 대부분 우주 공간은 플라즈마 상태이다. 지구상에서 볼 수 있는 오로라 현상도 극지방의 강한 전기장에 의해 형성되는 플라즈마이며, 구름에서 순간적으로 생성된 높은 전기장이 유도하는 번개도 플라즈마의 일종이다.

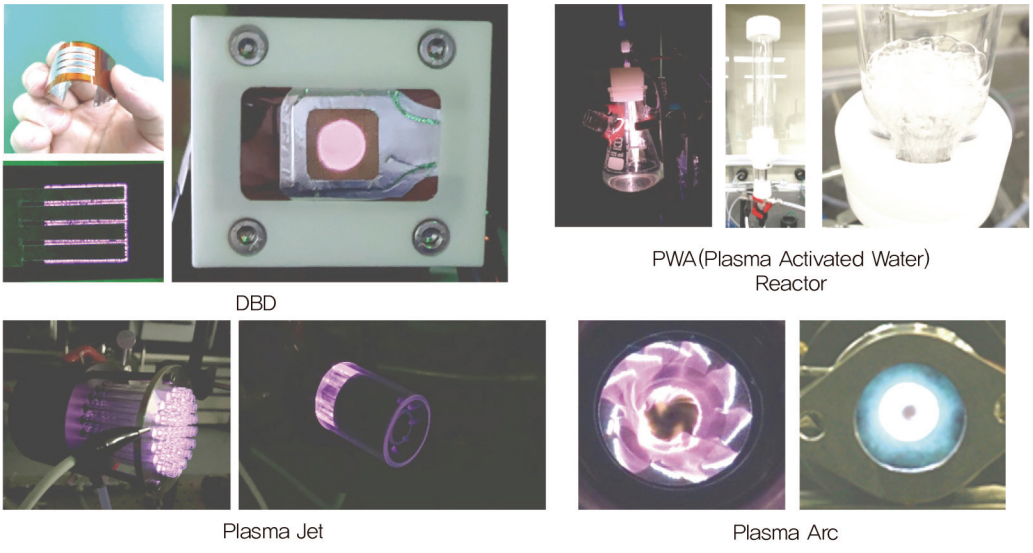
플라즈마 기술은 독일 지멘스(Siemens AG)사에 의해 1857년 오존 발생장치로 처음 상용화되었다. 산소(O_2)가 플라스마 상태에서 두 개의 산소 원자(O)로 분해되고, 다시 주변 산소 분자와 반응해 오존(O_3)으로 합성되는데, 반응성이 매우 높은 오존이 미생물을 제거할 수 있다는 사실이 알려지면서 다양한 산업적 가능성이 시도되었다. 그러나 오늘날 우리가 알고 있는 상수원과 폐수 처리시설, 의료용 소독과 멸균 분야 등에 본격적으로 적용되기까지는 시간이 더 필요했다.

이후 플라즈마는 노르웨이 과학자 크리스티안 버클랜드(Kristian Birkeland)와 사무엘 아이드(Samuel Eyde)에 의해 질소계 비료생산기술로 20세기 초 대규모 상업운전에 성공하며 주목을 받는다. 빛을 낸다는 특성 때문에 플라즈마는 최근까지도 우리 주변에 사용되어온 형광등, 네온사인과 차량용 HID(high-intensity discharge) 램프와 PDP(plasma display panel) 등 조명과 디스플레이 기술로 활용되기도 했다. 반응성이 높은 플라즈마의 특성이 반도체와 디스플레이를 제조하는 나노와 원자 수준의 초미세 제조기술에 적합하다는 점이 알려지면서 식각과 증착 등의 핵심 제조기술로 자리잡게 되고, 반도체-디스플레이 제조

장비 분야는 플라즈마 기술의 가장 큰 시장으로 성장한다.

경제적이고 효과적으로 플라즈마를 발생하는 기술이 개발되면서, 90년대 이후 플라즈마는 질소산화물과 황산화물, 미세먼지 등 대기오염물질을 제거하는 환경기술로, RONS (Reactive Oxygen and Nitrogen Species)를 제어하는 특성을 이용한 의료기술 등으로도 확산되고, 식품과 농업분야로의 기술도 2000년대 이후 본격화되었다. 현대의 플라즈마 기술은 〈그림 1〉과 같이 플라즈마의 발생환경과 응용목적에 따라 다양하게 변모하고 있다.

〈그림 1〉 다양한 플라즈마의 예시



자료: 한국기계연구원.

2.1.2. 플라즈마 기술의 특징

기체에 전기에너지가 가해지면 가장 먼저 전자가 에너지를 얻고, 에너지가 높아진 전자가 다른 입자와 연쇄 반응하며 또 다른 전자, 이온과 활성종 등을 생성시킨다. 전자와 이온의 개수(밀도)가 늘어나 적정수준을 넘어서면 플라즈마 상태로 정의할 수 있다. 플라즈마를 안정적으로 유지하기 위해서는 충분한 전기에너지가 계속 공급되어야 한다.

플라즈마는 화학적 활성종을 생성하며 매우 강한 화학반응을 유도할 수 있으며, 기존 열화학반응과는 다르게 전기만으로도 낮은 온도에서 효과적으로 화학반응을 실현할 수 있다. 이러한 특성을 이용하면 유기화합물질을 분해시키거나, 오존과 질소산화물 등의 화학

물질을 생성하는 등을 플라즈마로 실현할 수 있다.

플라즈마를 발생시키기 위해서는 1) 전기에너지를 발생하는 전원장치, 2) 전기에너지를 전달하는 전극과 플라즈마가 발생되는 영역을 가두는 챔버(또는 반응기), 3) 챔버에 플라즈마를 생성시키는 기체 공급장치 등으로 구성된다. 구동 조건에 따라 진공상태를 유지하는 진공펌프, 밸브와 압력계 등이 필요하고, 대기압에서는 챔버 없이 플라즈마를 발생하기도 한다. 생성시키려는 플라즈마의 특성을 고려해 기체의 종류를 선택할 수 있는데, 일반적으로 플라즈마를 발생시키기 위한 비활성기체에 반응물질을 섞어서 챔버 또는 반응기에 공급한다. 헬륨과 아르곤 등에 산소를 추가해 강력한 산화특성이 유도하거나, 질소를 포함시켜 질소계화합물질을 생성하기도 한다. 경우에 따라 다른 화학물질을 병행해 사용하기도 한다.

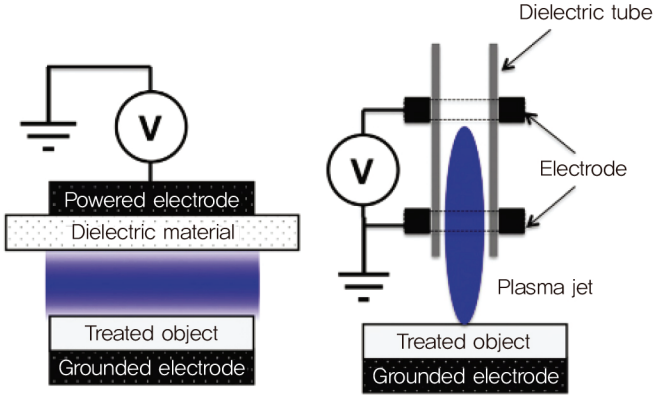
플라즈마는 생성되는 압력과 전류량 등에 따라 저압 플라즈마(low-pressure plasma) 또는 대기압 플라즈마(atmospheric-pressure plasma), 혹은 저온 플라즈마(cold plasma 또는 non-thermal plasma) 또는 열플라즈마(thermal plasma) 등으로 구분하기도 하는데, 통상 의료와 농업분야 목적으로는 대기압에서 생성되는 상온(저온)의 플라즈마를 사용하게 된다. 또한 응용목적에 따라 발생기체만으로 활용하는 건식방식, 플라즈마 상태로 생성된 화합물질을 액상으로 용존시켜 활용하는 습식방식, 두가지가 혼합된 에어로졸 형태 등을 구분할 수 있다.

플라즈마 반응기(generator 또는 reactor)의 명칭은 플라즈마 구동 방식과 발생 형태, 전극 구조, 발생 메커니즘 등의 특성에 따라 정해진다. 대면 전극이 유전체로 쌓여 있는 구조인 유전체장벽방전(dielectric barrier discharge, DBD 또는 무성방전으로도 불리움) 반응기, 코로나(corona) 현상으로 생성된 플라즈마가 분출되는 젯(jet)형태의 반응기, 그리고 아크(arc)가 움직이는 모습을 통해 명명한 글라이딩 아크(gliding arc) 또는 회전 아크(rotation arc) 등이 그 사례이다.

〈그림 2〉는 대표적인 플라즈마 발생방법인 DBD와 젯형 반응기를 도식화하여 나타낸 것이다. DBD 반응기의 경우 양극과 음극 또는 접지로 이루어진 두 개의 전극 사이에 유전체를 두어 전극에 의해 생성되는 강력한 전기장에 의해 플라즈마를 생성시킨다. 〈그림 2〉의 (a)와 같이 대면 전극 사이에 유전체를 두어 플라즈마를 발생시킬 수도 있으며, 〈그림 2〉의 (b)와 같이 유전체면을 공유하는 두 전극 사이에서 발생한 플라즈마를 기체 유량을 밀어내는 젯 형태로도 활용할 수 있다.

각각의 플라즈마 반응기는 발생 메커니즘에 따라 화학적으로 유용하게 쓰이는 RONS 생성량, 오존 생성량, 온도 특성 등이 다를 뿐만 아니라, 동일한 반응기라도 구동 전력, 구동 주파수 및 파형, 구동 가스 등과 같은 운전방법에 따라 다른 특성을 보여준다. 또한, 반응기의 대면적화, 유연화 등과 같은 구조적 변경과 확장의 용이성이 각기 다르기 때문에 목표로 하는 농업 응용분야에서 요구하는 특성에 따라 반응기를 선택하고 최적화할 필요가 있다.

〈그림 2〉 대표적인 대기압 플라즈마 발생형태



(a) DBD (b) 젯

자료: Archives of Biochemistry and Biophysics (2016).

2.2. 플라즈마 기술과 농업

앞서 언급되었듯 플라즈마 기술은 질소계 비료의 인공합성으로 농업분야에 처음 활용되었다. 19세기 유럽은 급격한 인구증가가 초래한 식량문제를 해결하기 위해 작물 생산성을 향상시킬 방안이 필요했다. 비료로 각광받았던 나트륨의 질산염 광물($NaNO_3$)인 칠레의 초석이 고갈되며 질소계 비료를 인공적으로 합성하는 기술에 대한 관심도 커졌다. 이 시기 노르웨이 버클랜드 (Kristian Birkeland) 교수는 질소가 풍부한 토양이 비옥하다는 사실과 질소가 토양에 고정되는 과정인 질소순환계에 플라즈마의 자연현상인 번개가 중요한 역할을 한다는 사실로부터 공기 중 질소를 고정화하는 기술이 인공적인 질소계 비료 합성기술로 활용될 수 있음을 알게 된다. 이후 버클랜드-아이드법(Birkeland-Eyde Process)으로 알려진 플라즈마 발생기술을 상용화하는데, 이 기술은 공기중 질소(N_2)와 산소(O_2)를 플라즈마로 분해해 일산화질소(NO)를 생성시키고, 일산화질소가 산소와 결합하며 이산화질소(NO_2)를,

생성된 이산화질소가 물에 용존되는 과정에 질산염을 생성하는 공정을 거치며 비료의 원료로 사용될 질소화합물(HNO_3)을 만드는 공정이다. 당시의 플라즈마는 전원과 자기장에 의해 플라즈마를 제어하는 동축형 튜브에 고전압 교류를 인가하는 방식을 채택하는데, kWh당 약 60g가량의 질소화합물을 생산한 것으로 알려져 있다. 효율이 낮고 막대한 전기에너지가 필요한 당시 플라즈마 기술을 보완하기 위해서, 버클랜드는 노르웨이에 풍부한 재생에너지인 수력발전을 활용할 계획을 세우고 플라즈마 발생에 필요한 전기를 생산해 공급하는 Norsk-Hydro사(현재 세계 최대 비료생산기업인 YARA International의 전신)를 1905년에 설립한다. 이후 이 기술은 더 경제적인 암모니아 생산 기술인 하버-보쉬법(Haber- Bosch process)이 개발되기까지 약 30여 년간의 상업운전을 하게 된다.

플라즈마 방식의 질소고정기술이 하버보쉬법에 비해 취약했던 이유는 투입된 전기에너지에 비해 질소화합물의 생산성이 낮았기 때문이다. 이는 플라즈마 기술이 대량의 화합물이나 대용량 처리로 확산되기 위해서는 경제적으로 플라즈마를 발생하는 기술이 개발되어야 한다는 점을 시사했다.

이후 플라즈마기술은 지속적으로 진보하며 전원장치의 고효율-경량화를 실현하고 새로운 반응 기술도 개발되며 기존기술과 경쟁할 수준에 이른다. 특히 대기압에서 저온의 플라즈마를 발생하는 기술이 본격적으로 발표되는 2000년대 이후로 플라즈마의 농업분야 연구도 새로운 전기를 맞이한다.

플라즈마의 새로운 농업분야 응용으로는 종자와 농작물의 살균 및 소독, 에틸렌을 제어하는 보존기술과 재배를 촉진하는 기술 등 농업 전반의 기술로 확대, 시도되고 있다.

3. 플라즈마 기술의 해외 농업분야 응용 사례

3.1. 살균 및 소독

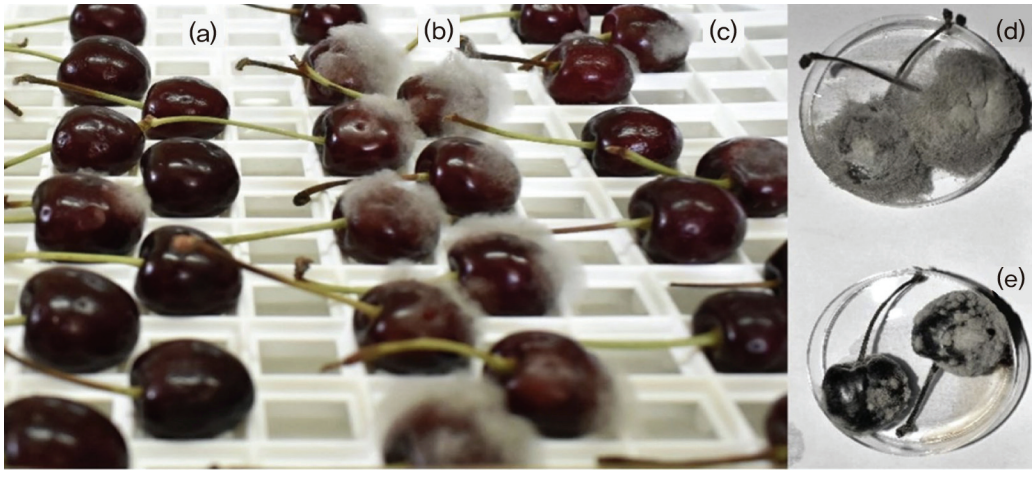
앞서 기술한 바와 같이 플라즈마는 다양한 물리화학적 인자를 생성해 살균과 소독에 응용될 수 있다. 플라즈마 상태에서 생성되는 대표적인 인자인 ROS(Reactive Oxygen Species)는 강한 산화력을 바탕으로 농작물의 표면의 유해균을 제거한다. 플라즈마에서 빛의 형태로 발생하는 UV는 DNA에 영향을 주며 살균효과를 기대할 수 있다. 또한 플라즈마에서

발생하는 전하(electric charge)가 세포 표면에 축적되며 세포가 견딜 수 있는 이상의 전기장을 유도함으로써 균을 제거하는 방식도 시도되고 있다.

농작물의 다양한 형태와 종류를 고려해 플라즈마 반응기를 선정하고 운전조건을 최적화할 경우 효과적으로 살균과 소독 효과를 실현할 수 있다. 2008년 미국 농무부 연구팀은 15 kV, 50 mA 수준으로 구동되는 글라이딩 아크(gliding arc)를 이용한 사과처리 결과를 발표한다. 3분 이내의 처리시간과 최대 40SLM[1]의 유량 조건에서, 사과 표면의 살모넬라균과 대장균을 대조군과 비교하였을 때, 플라즈마로 오래 처리할수록 더 높은 제거율을 얻을 수 있음을 보고하였다.

2020년 이탈리아 연구팀은 8.6 kV 수준의 전압으로 구동되는 DBD 플라즈마 소스가 체리에 접종된 잿빛곰팡이병균(Botrytis cinerea, Monilinia fructicola)을 제거할 수 있음을 보고했다. 오존이 다량 발생(200~300 ppm)하는 조건을 통해 플라즈마에서 발생하는 ROS가 강력한 살균 및 소독효과를 유도한다는 것을 밝혔다. 〈그림 3〉은 균에 감염된 체리에 플라즈마 처리를 하였을 때 대조군과 비교하여 균의 증식이 억제되는 것을 보여주는 결과이다.

〈그림 3〉 DBD처리 전후 체리 표면 살균 효과



주: (a) 5분간 플라즈마 처리, (b) 대조군, (c) 1분간 플라즈마 처리, (d) B. cinerea 감염군, (e) M. fructicola 감염군
자료: Scientific Reports (2020).

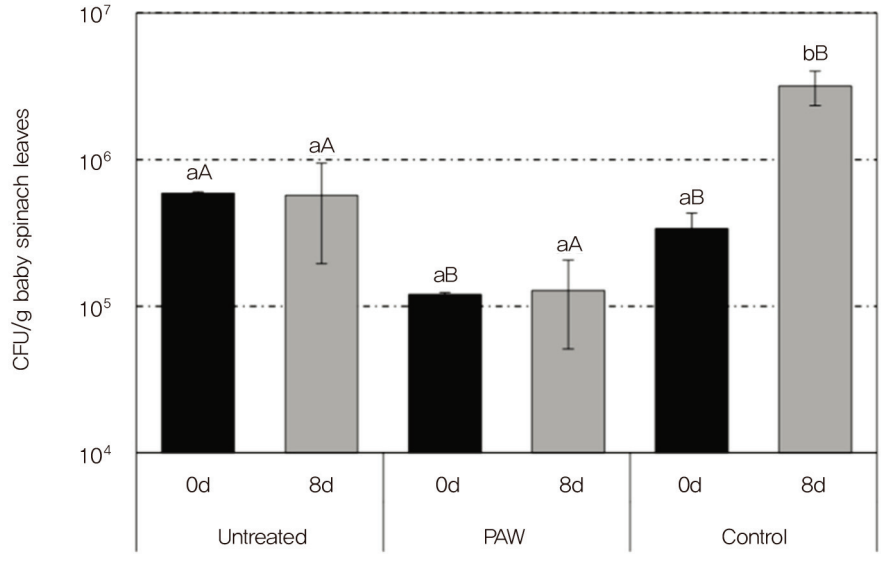
1) SLM은 Standard Liter per Minute의 약어로, 표준 상태에서 기체가 1분당 몇 Liter가 흐르는가를 나타내는 단위임. 즉 1SLM은 표준상태에서 1분에 1L의 기체가 흐른다는 것을 의미함.

3.2. 보존

농식품의 저장성을 저해하는 에틸렌(C_2H_4)을 탄산가스(CO_2)와 물(H_2O)로 분해시키거나 저장과정에서 증식하는 유해균을 억제하는 원리로 농식품 보존에 플라즈마를 활용할 수 있다. 또는 기상의 플라즈마를 직접 처리하는 대신에 액상에 플라즈마를 처리하여 플라즈마의 살균 성분 중 액상에서 장시간 생존하는 화학성분 및 액상특성 변화를 이용하여 농작물 상의 유해균을 제거하는 기술도 검증되는 등, 처리 대상의 형태와 환경에 따라 다양한 방식을 플라즈마를 도입할 수 있다.

2019년 노르웨이 연구팀은 플라즈마를 처리한 물로 시금치를 처리하여 유해 세균의 증식을 억제하고 저장성을 향상했음을 보고하였다. 9-11 kV 수준의 DBD 반응기로 플라즈마 처리된 물로 시금치를 처리하는데, 8일간 4℃에 보관하였을 때 대조군 대비 플라즈마 처리수를 적용한 시금치의 보관과정에서 명백한 유해균 증식 억제 결과를 확인하였다. 이는 플라즈마 처리수의 적용이 농식품 저장성 향상과 농식품 폐기물 저감에 도움을 줄 수 있는 가능성을 입증한다.

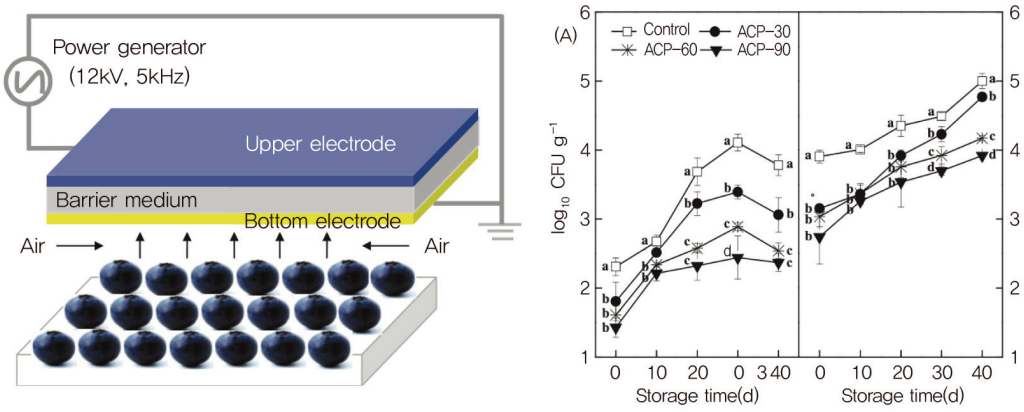
〈그림 4〉 PAW 처리에 따른 시금치 보관상의 항균 효과



주: 미처리 시금치(Untreated) 대비 플라즈마 활성수(PAW)와 증류수(Control) 처리를 한 시금치에서 처리 즉시 및 8일간 4℃로 보관 이후 검출된 유해균
자료: Food (2019).

2020년 중국 대련대학교 연구팀은 수확된 블루베리의 저장과정에서 DBD 플라즈마 처리 후 유해균 증식이 억제되고 저장성이 향상된다는 사실을 확인했다. 〈그림 5〉는 12 kV 수준의 DBD 처리를 최대 90초간 수행한 결과이다. 수확 이후 40일간 블루베리를 저장했을 때, 대조군 대비 플라즈마 처리시 유해균의 증식이 5.8-11.7% 정도로 억제되는 것을 확인하였다. 저장환경의 온습도 변화가 플라즈마 특성에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데, 일본 연구진은 이러한 변동에도 무관하게 장기간 플라즈마 장비가 가동해도 농산물 보존이 가능하다는 점을 검증하기도 했다.

〈그림 5〉 DBD 플라즈마 처리에 따른 40일간의 블루베리 저장기간 중 유해균 증식



자료: J Sci Food Agric (2020).

3.3. 재배기술

플라즈마에서 발생하는 다양한 물리화학적 인자는 농작물의 발아와 재배 그리고 수확에 이르는 기간 동안 각각의 과정에서 유용하게 활용 가능한 것으로 밝혀지고 있다. 특히, 플라즈마 처리한 물(plasma-treated water, PTW)과 같은 액상이 기상의 플라즈마 처리와 유사한 효과를 볼 수 있다는 연구 결과가 보고되는 등 다양한 형태로 처리 효과를 유도할 수 있어 플라즈마 기술 적용의 수월성을 높이고 있다. 〈그림 6〉은 플라즈마 처리수를 이용하여 농작물의 발아와 재배 과정에서 발아율 증대, 생육 촉진, 유해균 제거 등을 기대 할 수 있는 개념을 도식화한 내용이다.

플라즈마 처리로 발아율을 향상시키는 사례도 다양하게 보고된다. 2014년 중국 연구팀은

콩 씨앗에 플라즈마 처리를 함으로써, 발아율이 14.66% 증대됨을 보였을 뿐만 아니라, 발아 후 뿌리의 길이도 대조군과 비교하여 21.42% 증가함을 확인하였다. 플라즈마 처리 시, 씨앗의 수분 흡수율이 14.03% 증가함을 확인함으로써, 플라즈마 처리에 의한 씨앗 표면의 친수성 증대가 발아율 증대의 한가지 기작으로 작용한다는 것을 밝혔다.

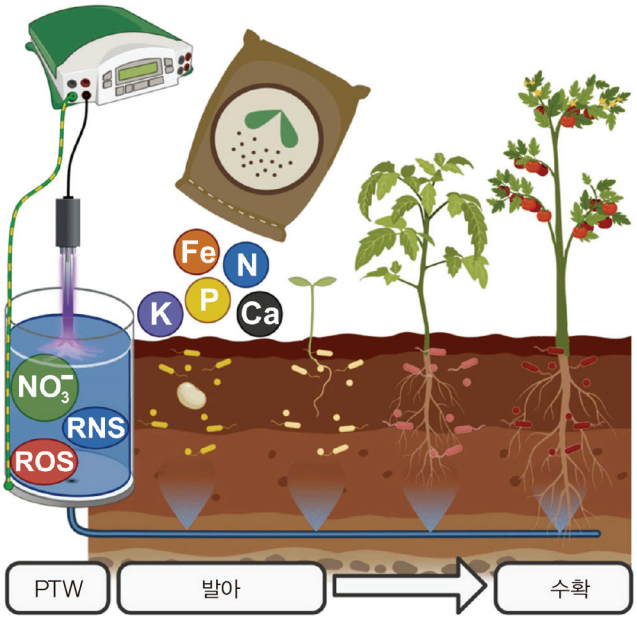
2018년 아르헨티나 부에노스아이레스대학 연구팀은 콩 씨앗에 DBD 플라즈마 처리 할 때, 콩 씨앗의 발아를 저해하는 곰팡이(Diaporthe/Phomopsis, D/P)를 플라즈마가 제거하는 효과를 확인했다. D/P에 의하여 발아율이 저해된 대조군의 발아율(65%) 대비하여 플라즈마 처리를 한 콩 씨앗의 경우 발아율이 75%로 증대됨을 확인하였다.

생육 중 생장촉진에 대한 연구도 여러 사례가 보고된다. 2017년 프랑스 연구팀은 토마토와 감미고추의 씨앗상태와 생육과정에서 각각 기상의 플라즈마와 플라즈마 처리수를 복합적으로 처리함으로써, 발아와 생육 전반의 과정에서 플라즈마 처리가 발아율과 성장속도 관점에서 긍정적인 효과를 줄 수 있음을 밝혔다. 〈그림 7〉은 토마토와 감미고추에 씨앗단계에서 기상의 플라즈마 처리를 하고 플라즈마 처리수를 생육과정에서 적용하였을 때 플라즈마 처리수만을 적용한 경우와 또는 수돗물을 적용한 경우에 비하여 생육이 증진됨을 보여주는 결과이다. 토마토의 경우는 플라즈마 처리수의 효과가 미미하여, 작물의 종류에 따라 플라즈마 처리의 방법(기상 또는 플라즈마 처리수)이 달라져야 함을 보여준다.

일본 이와테 대학교(Iwate University) 코이치 타카키 교수 연구팀은 플라즈마와 전기장을 이용해 버섯생장을 촉진한다는 연구결과를 발표했다. 연구팀은 약 수십-수백 kV의 전압을 100 ns 펄스형태로 주기적으로 버섯을 자극하는 연구를 통해 표고버섯(*Lentinula edodes*)의 생장을 2배 이상 향상시켰는데, 인가전압의 크기에 따라 과도한 자극은 오히려 생산성을 향상시킨다는 점을 밝혀낸다.

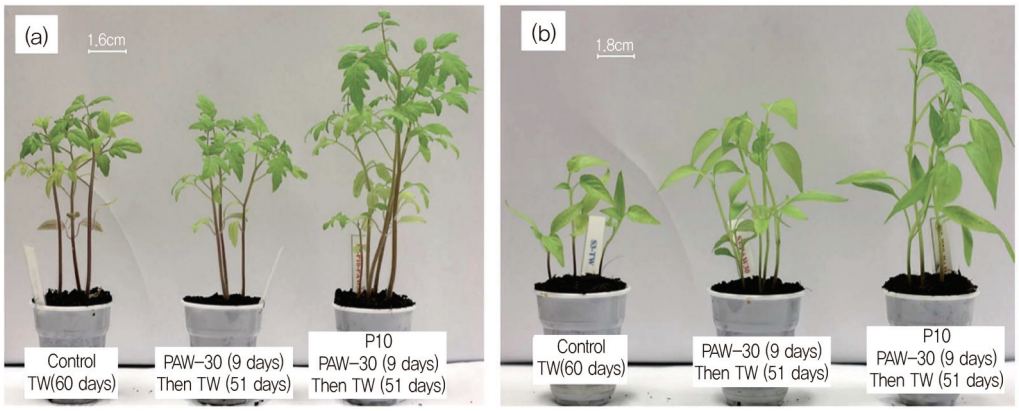
그밖에 노르웨이 스타트업인 N2 Applied는 플라즈마로 질소계 유기비료를 생산하고 기존 비료를 대체하고 생산성도 높이는 기술의 상용화를 목표로 다양한 연구개발과 실증사례를 발굴하고 있다.

〈그림 6〉 농작물 생장 전주기에 처리 가능한 개념의 플라즈마 처리수(PTW) 적용



자료: Plasma Processes and Polymers (2020).

〈그림 7〉 토마토와 감미고추의 생장과정에서 플라즈마 처리에 따른 결과



주: 씨앗을 심은 후 60일 경과된 (a) 토마토 및 (b) 감미고추
자료: RSC Advances (2017).

4. 전망 및 시사점

오랜 농경생활을 경험해온 인류는 농작물을 안정되게 재배하고 풍요로운 수확을 기원하며 다양한 농업의 신을 숭배해 왔는데, 여러 문명에서 상징하는 농업의 신은 모두 날씨와 더불어 번개를 다루는 능력이 있다는 공통점을 보인다. 번개의 발생빈도와 농작물 생산성이 관련있다는 점을 경험적으로 이해한 조상의 지혜는 플라즈마라는 자연현상(번개)가 대기 중 질소를 토양으로 고정하며 비옥하게 만드는 질소순환고리의 핵심이라는 과학으로도 증명된다. 플라즈마 기술의 첫 상업적 응용이 인공번개로 질소계 비료를 대량 생산하는 농업분야라는 사실은 우연이 아닐 것이다.

지난 10여년간 플라즈마기술의 농업분야 응용은 전 세계적인 트렌드가 되어왔다. 살균과 소독의 경우 기존 기술을 대체할 수준으로 성장이 기대되며, 생장촉진과 재배기술 등은 경제성이 검토되는 단계에 이르고 있다.

그러나 플라즈마 기술이 실험실 수준을 넘어서고 미래 농업산업에 본격적으로 진입하기 위해서는 극복해야할 과제가 남아있다. 첫째로, 적용 목적에 따라 유용하게 쓰일 수 있는 플라즈마 인자와 그 적용 메커니즘을 명확하게 이해하고, 플라즈마 인자에 영향을 미치는 반응기의 정량적 및 정성적 특성을 다양하게 검증해야 한다. 둘째로, 적용코자 하는 분야에 플라즈마로부터 기대하는 효과가 발현되는 조건을 찾고, 그 효과를 극대화하기 위해 반응기를 개발하고 운용방법을 찾아야 한다. 마지막으로, 농업현장에 적합하도록 반응기를 최적화는 플라즈마 장비 기술의 고도화가 필요하다.

세계적인 트렌드에 대해 지속적으로 모니터링하며 기술을 고도화하는 노력이 더해질 때 플라즈마는 미래 농업산업의 혁신기술이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

Brendan A. Niemira. 2008, Cold plasma inactivates salmonella stanley and escherichia coli O157:H7 inoculated on golden delicious apples, Journal of Food Protection.

Paolo F. Ambrico. 2020, Surface dielectric barrier discharge plasma: a suitable measure against fungal plant pathogens, Scientific Reports.

Pietro Ranieri. 2020 Plasma agriculture: Review from the perspective of the plant and its ecosystem, Plasma Processes and Polymers.

Koichi Takaki et al. 2014. Effect of electrical stimulation on fruit body formation in cultivating mushrooms, Mocroorganisms, MDPI.

Koichi Takaki. 2021, Influence of relative humidity on ethylene removal using dielectric barrier discharge, IEEE Transactions on Plasma Science.

Kristian Birkeland. 1906. On the oxidation of atmospheric nitrogen in electric arcs. Transactions of Faraday Society, Faraday Society.

Li Ling. 2014, Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean, Scientific Reports.

L. Sivachandiran. 2017, Enhanced seed germination and plat growth by atmospheric pressure cold air plasma: combined effect of seed and water treatment, RSC Advances.

Maria Cecilia Perez Piza. 2018, Effects of non-thermal plasmas on seed-borne Diaporthe/Phomopsis complex and germination parameters of soybean seeds, Innovative Food Science and Emerging Technologies.

Mette Risa Vaka. 2019, Towards the next-generation disinfectant: composition, storability and preservation potential of plasma activated water on baby spinach leaves, Foods.

Yaru Ji. 2020, Effect of atmospheric cold plasma treatment on antioxidant activites and reactive oxygen species production in postharvest blueberries during storage, J. Sci Food Agric.

Yuich Setsuhara. 2016, Low-temperature atmospheric-pressure plasma sources for plasma medicine, Archives of Biochemistry and Biophysics.

참고사이트

N2 Applied (https://n2applied.com/)