

플라즈마 기술의 농식품 분야 활용

<http://dx.doi.org/10.5757/vacmac.2.4.4>

유석재

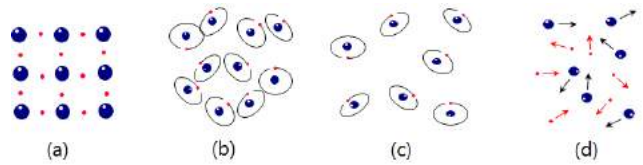
Status of Plasma Technology Applied to Agriculture and Foods

Suk Jae Yoo

Recently, plasma technology has been increasingly applied to agriculture and foods. Owing to the three important plasma characteristics which are activation, sterilization, and catalysis, the plasma technology can be properly applied to agriculture, in the other word, to the whole cycle of agriculture from farm to table: seed germination, plant growth, harvest and storage, washing, packaging, transport, in store, household, cooking, garbage, etc. Some representative case studies for plasma activation, sterilization, and catalysis show well that plasma technology can be successfully applied to the whole cycle of agriculture.

플라즈마란?

플라즈마는 물질을 구성하고 있는 입자들의 내부에너지 크기에 따라 고체, 액체, 기체에 이어 제 4의 물질 상태라고 이른다. 기체 상태에 있는 원자 또는 분자에 전기적으로 에너지를 가하게 되면 전기적으로 양의 전하로 구성된 핵과 그 둘레에 분포되어 있던 전자가 분리되어 이온과 전자로 구성된 기체상태가 된다 (그림 1). 초고온 상태에서 만들어진 플라즈마에서 분자는 완전히 해리되어 원자상태가 되고 원자에 구속되어 있던 모든 전자들이 전자 궤도



[Fig. 1] State of matter
 (a) Solid state (b) Liquid state
 (c) Gaseous state (d) Plasma state

를 자유 전자로 이탈하게 되어 이온과 전자로 이루어진 기체상태가 되지만, 플라즈마의 온도가 높지 않은 경우에는 불완전하게 해리된 분자, 불완전하게 이온화된 이온분자 또는 이온원자 등으로 반응성이 높은 화학종(Radical)들이 생긴다. 즉 저온 플라즈마 경우에는 이온 및 전자를 포함하여 매우 다양한 화학종들로 복잡하게 구성되어 있어 활용 가능한 분야가 매우 넓어진다.

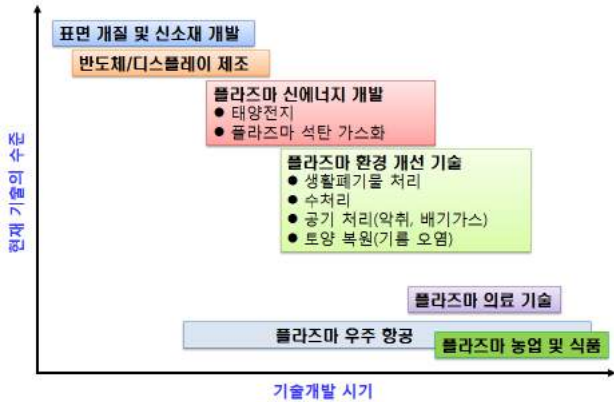
플라즈마기술 현황

플라즈마는 초기에 주로 표면 처리나 코팅 등에 적용되어 오다가 반도체 및 디스플레이 산업이 성장하면서 황금기를 맞게 된다 (그림 2). 초고집적도 반도체 제조 공정의 70% 이상은 플라즈마 공정에 의해 이루어지고 있다. 그러나 반도체 및 디스플레이 분야에서는 현재 플라즈마기술이 성숙되고 포화되어 플라즈마기술은 새로운 응용 분야를 찾아 이동하게 되었다. 즉 태양전지, 저압탄 가스화



<저자 약력>

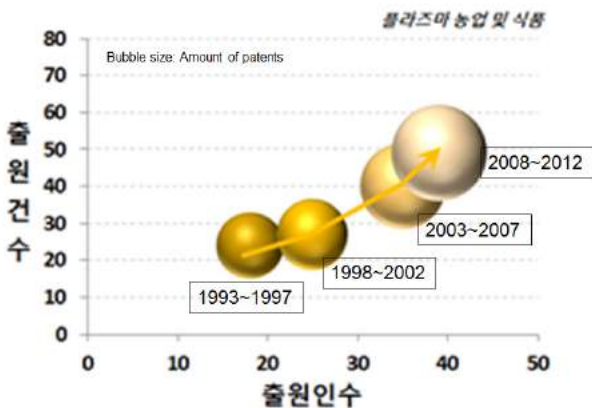
유석재 박사는 1997년 독일 Karlsruhe Institute of Technology (KIT)에서 '플라즈마 분광학 진단' 분야로 박사학위를 받았고, 현재는 국가핵융합연구소에서 선임단장 및 플라즈마기술연구센터 센터장으로 재직중이다. (sjyoo@nfri.re.kr)



[Fig. 2] Trend of plasma applications

와 같은 신에너지 생산 분야, 공기 및 물 정화와 같은 환경 개선 분야, 등으로 플라즈마 응용 분야는 확장되었다. 특히, 2000년 이후에는 바이오 분야의 약진과 더불어 플라즈마기술이 의료 분야에 응용되어 새로운 가능성을 보이고 있다. 그러나 의료 분야는 임상이라는, 플라즈마 분야의 과학기술자들이 생각하는 것보다 훨씬 높은 진입 장벽을 인식하게 되면서 최근에 와서는 주춤하는 추세에 있다. 바이오 분야에서 또 다른 플라즈마 응용 가능한 분야가 농식품 분야이다. 이 분야는 전 세계 시장 규모도 에너지 시장에 이어 두 번째로 크기 때문에 플라즈마기술 관점에서는 발전 가능성이 많은 개척할 만한 분야이다.

최근 농식품 분야의 플라즈마 응용기술 특히 동향을 보면 그림 3에서 보듯이 출원과 출원인 수가 급격히 상승하고 있으므로 점점 관심이 커지고 있다는 것을 알 수 있다.



[Fig. 3] Patent trend of plasma applications to agriculture and food

농업 분야에 활용을 위한 플라즈마의 특성

농식품에 활용 가능한 플라즈마는 온도가 낮아 이온, 전자, 라디칼, UV 등의 여러가지의 구성원소를 갖고 있어 그 특성이 매우 다양하다. 이러한 다양한 구성 원소들로 인해 유도된 활성화, 살균, 촉매의 세 가지 제어기능을 농식품 분야에 활용 가능하다.

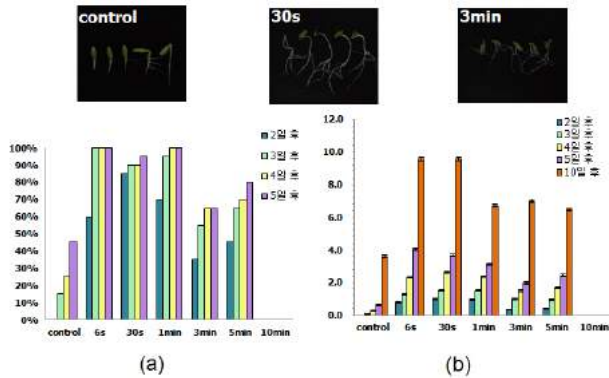
활성화는 플라즈마의 물리적 화학적 자극에 의해 씨앗의 발아율이나 새싹의 성장률을 향상 시킬 수 있다. 플라즈마의 라디칼이나 UV를 이용하여 살균을 할 수 있고, 관련된 적용 분야는 씨앗 살균에서부터 저장, 포장, 유통에 이르기까지 범위가 매우 넓다. 촉매로서의 기능은 전자 및 라디칼에 의해 분자의 해리를 촉진시킬 수 있는데 과일 저장 시 발생하는 에틸렌 가스의 분해, 공기 중의 질소 고정을 위한 질소 분자 해리 등이 있다.

플라즈마기술 적용 가능한 농식품 분야

플라즈마의 세 가지 기능인 활성화, 살균, 촉매 기능을 기반으로 플라즈마기술은 씨앗처리에서부터 수확 후 관리, 그리고 식탁에 이르기까지 농업의 전주기에 걸쳐 적용 가능하다. 이러한 플라즈마기술을 농업의 전주기에 적용하는 방식을 ‘플라즈마 파밍(Plasma Farming)’이라 명명하였고 [1], 이는 ‘농장에서 식탁까지’ 농업의 전주기에 걸쳐 플라즈마기술을 적용하는 것을 이른다. 플라즈마기술 기반 농업의 전주기는 ‘플라즈마 재배(Plasma Cultivation)’, ‘플라즈마 수확후 관리(Plasma

[Table.1] Plasma properties applied to the whole cycle of agriculture

| Plasma Agriculture | Activation | Sterilization | Catalysis |
|--------------------|------------|---------------|-----------|
| Seed Germination | ○ | ○ | — |
| Plant growth | — | ○ | ○ |
| Harvest/Storage | — | ○ | ○ |
| Washing | — | ○ | — |
| Packaging | — | ○ | △ |
| Transport | — | ○ | △ |
| In store | — | ○ | △ |
| Household | — | ○ | △ |
| Cooking | — | ○ | — |
| Garbage | — | ○ | — |



[Fig. 4] Enhancement of (a) Germination and (b) Seedling growth of cucumber seeds by plasma activation

Postharvest), ‘플라즈마 안전(Plasma Safety)’으로 구분할 수 있으며 [2], 현재 국가핵융합연구소에서 정부출연금 지원으로 융합연구사업으로 수행 중에 있다.

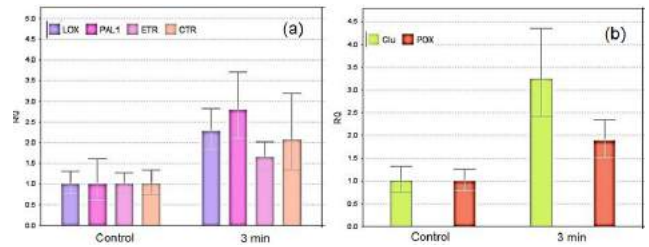
플라즈마의 활성화에 의한 발아율 증대

오이씨에 플라즈마를 쏘이면 씨앗이 활성화 되어 발아율이 높아지는 것을 볼 수 있다. 그림 4에서 보는 것과 같이 발아율은 플라즈마 쏘이는 시간이 6초에서 1분 사이에서 최대 발아율을 보이고 있고, 6초에서 30초 사이에서 새싹 성장률이 증가되었다 [3].

오이 씨에 플라즈마를 쏘인 후 새싹 잎을 채취하여 분석해 보면 식물에 세균이나 바이러스가 침투했을 경우와 유사한 유도 저항성 유전자(Induced systemic resistance)와 PR 단백질 (Pathogenesis related protein)이 발현되는 것을 볼 수 있다. 즉 플라즈마에 의해 어떤 형태의 자극이 세균 침투 경우와 유사한 스트레스를 일으켜 저항성 유전자와 PR 단백질이 발현된 것으로 해석해 볼 수 있다. 여기서 특이한 점은 플라즈마는 씨앗에만 쏘이고 싹이 튼 이후에는 어떤 처리도 없었음에도 불구하고 새싹 잎에서 저항성 물질이 발현되었다는 것이다 [3].

플라즈마 살균에 의한 농식품 포장

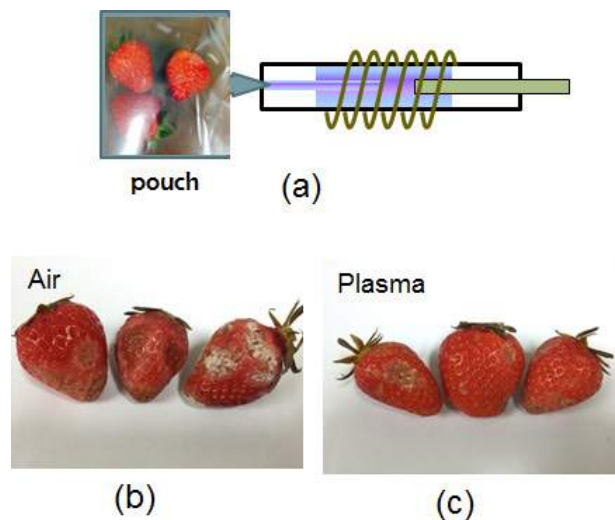
농산물의 유통 기간을 연장하는 것은 경제적 관점에서 매우 중요하다. 유통 기간과 밀접한 관련이 있는 것이 포장이다. 플라즈마를 발생시켜 포장재 속으로 투입하는 방



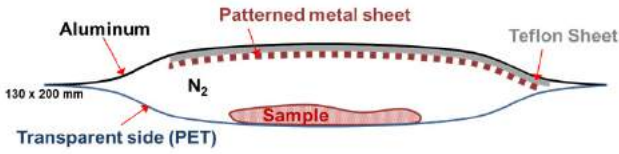
[Fig. 5] Expression of (a) induced systemic resistance (ISR) and (b) Pathogenesis related (PR) protein in leaves of seedling whose seeds were exposed to plasma for 3 minutes

법이 있고, 포장재 자체에 전극을 만들어 포장재 내부에 플라즈마를 발생시키는 방법도 있다.

그림 6과 같이 딸기 포장재 속으로 플라즈마를 주입하면 저장 기간을 늘릴 수 있음을 볼 수 있다 [4]. 그림 6(a)는 공기 환경에서 일반 포장이고 그림 6(b)는 플라즈마를 주입한 후 포장한 딸기를 7일 간 보관 후 상태를 보여 주고 있다. 플라즈마 주입 후 포장한 딸기의 상태는 공기 환경에서 포장한 경우와 비교해서 상당히 양호한 상태로 두 경우는 뚜렷한 차이를 보여 주고 있다. 이 경우에는 플라즈마를 포장재 밀봉 전에 주입하지만 그림 7의 경우에는 포장재 내부에 전극을 코팅하여 밀봉 후 플라즈마를 포장 내부 공간에서 발생시켜 밀봉하는 과정에서 오염되었을



[Fig. 6] Effect of plasma injection into strawberry package in 7 days after packaging: (a) plasma source (b) without plasma injection (c) with plasma injection



[Fig. 7] Plasma generation inside sealed packages by coating thin film electrode on inner surface of packaging material

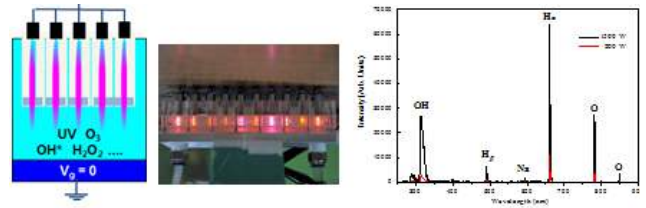
수도 있는 유해 미생물을 밀봉 상태에서 확실히 살균할 수 있는 방법이다 [5]. 그러나 플라즈마 전극 물질의 영향이나 직접 플라즈마에 노출된 포장 대상물의 상태 변화 등에 대한 연구는 더 필요하다.

물 플라즈마에 의한 농식품 세척

2011년 5월 말, 독일에서 유기 농산물 섭취 후 급성 장출혈로 여러 사람이 사망하는 사건이 있었다. 그 후로 유기 농산물에 대한 안전성 문제가 심각하게 인식되기 시작했다. 유기 농산물 재배 환경은 미생물이 번식하기 좋은 환경이므로 유기 농산물은 다양한 종류의 미생물에 오염되기 쉽다. 그리고 오염된 미생물들은 가정의 수도물로는 완전히 세척되지 않는다. 물속 플라즈마를 활용하면 이 미생물들을 친환경적이고, 유해하지 않은 수준으로 살균 세척이 가능하다. 즉, 세척하고자 하는 농산물을 물속에 넣고 플라즈마를 발생시키면 OH 라디칼이 생성되고, 이 OH 라디칼은 농산물 표면에 서식하고 있는 미생물의 세포막의 수소원자와 결합하여 물 분자로 돌아가고 수소원자를 너무 많이 빼앗긴 미생물은 생명력을 잃게 된다.

또 다른 방법은 물속에서 플라즈마를 발생시킨 후에 플라즈마가 없는 상태에서 그 물로 세척을 하여 살균 효과를 보는 방법이다.

그림 8에서 보는 것과 같이 물속에서 플라즈마를 발생시키고 그 물로 과일을 세척했을 경우 뚜렷한 살균 효과를 볼 수 있다.

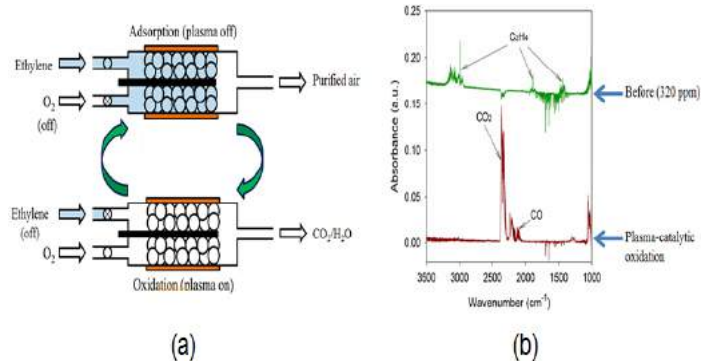


[Fig. 8] Sterilization by plasma discharged water. The mandarins in 2 weeks at 30°C after washing.

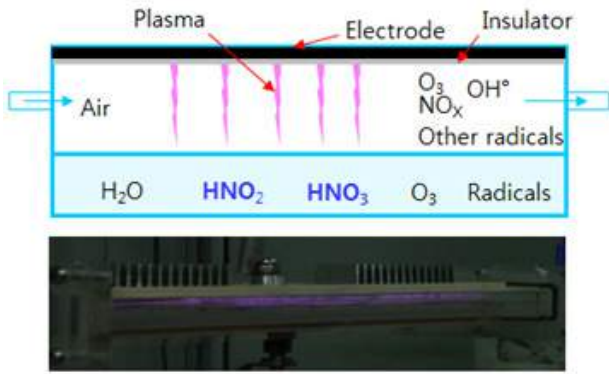
축매로서의 플라즈마 처리

과일이 숙성할 경우에 에틸렌 가스가 발생되고 이 에틸렌 가스는 과일과 반응하여 숙성을 더욱 가속시키기 때문에 숙성 속도를 늦추어 저장 기간을 연장하기 위해서는 에틸렌 가스를 제거해 주어야 한다. 그러나 저장 환경의 공기 중에 과일 숙성에 영향을 주는 에틸렌 함량은 많지 않기 때문에 먼저 플라즈마 반응기에서 흡착 물질로 에틸렌을 흡착하여 모은 후 플라즈마를 발생시켜 효율적으로 제거할 수 있다. 흡착하는 동안에는 플라즈마를 꺼둔 상태로 있기 때문에 플라즈마 발생에 필요한 에너지 소모를 최소화 할 수 있다 [5].

플라즈마의 축매로서의 기능을 공기 중의 질소를 고정하는 데도 활용할 수 있다. 상업적으로 질소 비료 생산에 사용하는 질소 고정 방법은 Harbor-Bosch 법인데 전기 에너지와 천연가스 소모가 매우 커서 [6] 새로운 대안을



[Fig. 9] Plasma catalytic filter to remove ethylene gas for preservation of fresh fruits.



[Fig. 10] Nitrogen fixation by plasma discharge

찾고 있는 실정이다. 플라즈마를 질소분자 해리의 촉매로서 활용하면 효율적으로 공기 중의 질소를 고정할 수 있을 것으로 보고 있다. 그림 10은 플라즈마에 의한 질소 고정 방법의 일례를 보여 주고 있다. 물과 전극 사이의 갭에서 플라즈마가 발생하면서 질소분자가 해리되어 물속에 녹아 질산염 형태로 고정되어 진다.

또 다른 질소 고정 방법으로 물 속에서 직접 플라즈마 방전을 통하여 질산염을 생성하는 경우도 있다 [7].

요약 및 전망

플라즈마기술은 농업의 전주기에 걸쳐 적용 가능하다. 씨앗 발아, 농식물 재배, 수확 및 저장, 세척, 포장, 수송, 상점 진열, 가정 저장, 조리, 음식물 쓰레기 처리, 등의 농장에서 식탁에 이르는 모든 과정에 플라즈마기술이 적용될 수 있다. 이렇게 농업의 전주기에 적용할 수 있는 것은 플라즈마의 활성화, 살균, 촉매와 같은 세 가지 고유한 특성 때문이다.

플라즈마의 활성화 특성을 적용한 경우로는 씨앗처리가 있다. 플라즈마로 처리한 씨앗은 발아율이 높아질 뿐만 아니라 새싹 성장도 빨라진다. 플라즈마의 살균 특성은 농업의 전주기에 걸쳐 적용이 가능하다. 농식품의 저장, 유기농산물의 세척을 예로 들 수 있다. 또한 플라즈마는 촉매로서 기능적 특성을 갖고 있어서 과일 저장 시 문제가 되는 에틸렌 가스를 제거하거나 공기 중의 질소를 플라즈마를 활용하여 효율적으로 해리한 후 물에 녹여 질산염 형태로 질소를 고정하면 질소 비료의 효과를 얻을 수 있다.

플라즈마기술을 농업 분야에 도입하는 것은 전자산업이

트랜지스터의 발명과 더불어 반도체 산업으로 혁명적 변이를 하였고 플라즈마기술을 도입하면서 제2차 반도체 산업 혁신이 이루어 졌듯이 농업에서도 농약과 화학비료의 발명으로 급격한 생산성 향상을 가져 온 제1차 농업혁명이 일어났지만 농식품에 잔존하는 화학 물질로 인해 농식품의 안전성에 대한 문제가 제기되고 있다. 게다가 유기농산물 관련해서도 유기농산물에 잔존하는 유해 세균 문제와 생산성 문제로 어려움을 겪고 있다. 현재 농업 분야에서는 생산성과 안전성 모두를 해결할 수 있는 방법을 통해 제 2의 농업 혁명을 기다리고 있다. 플라즈마기술이 반도체 산업에서 혁신을 일으키게 한 것과 같이 농업 분야에서도 그 해결책이 될 수 있을 것이다.

Acknowledgement

This work was supported by R&D Program of ‘Plasma Advanced Technology for Agriculture and Food (Plasma Farming)’ through the National Fusion Research Institute (NFRI) funded by the Government funds.

References

- [1] 유석재, et. al., 플라즈마-농식품 융합선도기술개발 사업계획 수립에 관한 연구용역 최종 보고서, 전라북도 (2013).
- [2] 김성봉, 한국수확후관리협회지 23권 1호 통권 48, 52-55 (2015).
- [3] 전용호, 플라즈마 처리 후 농식물 생리 시스템 변화 연구, 2014년도 연차실적계획서, 국가핵융합연구소 (2014).
- [4] 문세연, 농작물 저장성 향상 공경 요소 기술 연구, 2014년도 연차실적계획서, 국가핵융합연구소 (2014).
- [5] Hae In Yong, Hyun-Joo Kim, Sanghoo Park, Kijung Kim, Wonho Choe, Suk Jae Yoo, Cheorun Jo, Food Research International 69, 57-63 (2015).
- [6] M. D. Fryzuk, Nature 427, 498-499 (2004).
- [7] Dayonna P. Park, et. al., Current Appl. Phys. 13, S19-S23 (2013).