

파프리카의 저장성 향상을 위한 플라즈마 살균 시스템 개발과 이의 효과 검증

김현승¹, 고선민², 정래동³, 권덕호⁴, 박미리^{5*}

¹철원플라즈마산업기술연구원 주임연구원, ²전남대학교 농업생명과학대학 연구원, ³전남대학교 농업생명과학대학 조교수

⁴서울대학교 농업생명과학대학 연구교수, ⁵철원플라즈마산업기술연구원 책임연구원

Development of a Plasma Sterilization System for Improved Storability of Paprika and Validation of Its Effects

Kim, H. S.¹, S. M. Go², R. D. Jeong³, D. H. Kwon⁴ and M. R. Park^{5*}

¹Assistant Research Engineer, Cheorwon Plasma Research Institute, Cheorwon 24047, Korea

²Researcher, Department of Applied Biology, Chonnam National University, Gwangju 61185, Korea

³Assistant Professor, Department of Applied Biology, Chonnam National University, Gwangju 61185, Korea

⁴Research Professor, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 16386, Korea

⁵Senior Researcher, Cheorwon Plasma Research Institute, Cheorwon 24047, Korea

*Corresponding author: Park, M. R. (E-mail: mrpark@cpri.re.kr)

ABSTRACT

Received: 8 November 2018

Revised: 14 November 2018

Accepted: 15 November 2018

Paprika is an important agricultural export in Korea. However, paprika is not suitable for exporting over long distances as it does not store well. A major cause of damage to fresh agricultural produce, including paprika, is infection with pathogenic microorganisms that cause post-harvest diseases during storage and distribution. To address this problem, research is ongoing to develop a range of surface sterilization techniques. The recent confirmation of the sterilization effects of reactive oxygen species (ROS) generated from plasma discharge has attracted substantial research interest in applying the plasma technology to agriculture. Therefore, a plasma sterilization system was developed in this study to improve paprika storability. This system consists of an atmospheric-pressure plasma generator, a plasma controller, and a chamber for plasma treatment. To validate the system performance, the internal chamber temperature was measured; the volume of ozone, a strong oxidant that generates ROS, was also measured to compute the volume of all ROS generated through plasma discharge; based on this calculation, the concentration of ROS that can effectively deactivate microorganisms was identified. The sterilization effect of the present system was examined using *Erwinia carotovora*, the bacteria responsible for soft rot in paprika. *Erwinia carotovora* samples were treated with plasma for 30 and 60 s with 2.5 bar pressure and 500 W, 700 W, and 1000 W plasma power. The samples treated for 60 s showed a 100% sterilization effect. To then validate the effectiveness of the system in maintaining paprika freshness, paprika were treated at 1000 W plasma power for 30 and 60 s. As a result, browning was observed in the stem end of untreated paprika due to withering, whereas browning was delayed for 26 d in the stem end of plasma-treated paprika.

Keywords: Freshness paprika, Plasma, Sterilization



서론

파프리카는 우리나라의 대표적인 수출 농산물로, 수출량은 2012년 2만1천 톤에서 2016년 3만 톤으로 70% 증가하였으며 인삼류에 이어 두 번째로 수출 비중이 크다(Lee, 2017). 그러나 파프리카의 수출량 90% 이상이 일본에 편중되어 있어 다양한 수출국 확대가 시급하나, 저장성의 문제로 원거리 수출에 한계가 있다. 대부분 저장 및 유통과정에서 저장병을 일으키는 병원성 미생물의 감염에 의해 신선 농산물이 손상되는데, 이를 해결하기 위해 여러 가지 표면 소독 방법을 개발하기 위한 연구가 진행되고 있으나, 신선 농산물의 종류에 따라 특징이 달라 적용이 쉽지 않다. 그동안 신선 농산물의 수확후 품질 관리를 위해 화학약제, 물리적 환경 제어, 친환경 방법 등 다양한 방법들이 사용되었고, 이러한 방법들 중에서 화학약제는 비용이 적게 들고 가장 빠른 효과를 볼 수 있어서 주로 사용되고 있다. 하지만 화학약제는 액상이며 잔류성이 심해 사람이 작물을 섭취하였을 때 인체에 같이 흡수되어 해로운 영향을 줄 수 있으며 토양에 잔류하게 되어 환경오염을 유발한다(Yang et al., 2000). 특히, 파프리카와 같이 과실이 연한 신선 농산물의 경우, 표면에 물이 묻으면 쉽게 손상되므로 세척 등과 같은 방법은 적당하지 않으므로 건식 살균법의 적용이 필요하다.

최근에 다양한 과학기술 분야에서 분야간 기술 융합이 이루어지고 있고, 기존에 사용되는 방법보다 효율적인 기술 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 플라즈마는 제 4의 물질로 불리는데, 음전하를 가진 전자와 양전하를 가지는 이온이 동일한 양으로 존재하는 상태를 말하는데(Eliezer and Eliezer, 2001), 플라즈마의 종류에는 크게 난분해성 기체를 분해하거나 나노 입자를 제조하는 고온 플라즈마와, 반도체 제조 공정 및 형광등에 응용되는 저온 플라즈마가 있다(Winter, 2004). 플라즈마의 한 종류인 대기압 플라즈마는 특정 기체 또는 대기의 공기 등을 이용하여 저온에서 플라즈마를 생성하여 플라즈마를 통해 발생하는 다양한 활성종에 의해 살균 효과가 있음이 알려져 있으며(Fig. 1), 실험적으로 *Staphylococci*, *Streptococci*, *Candida* 종의 colony 생성을 억제한다고 보고되었고(Pointu et al., 2005; Fridman et al., 2007), 오염 제거 및 멸균을 목적으로 하는 응용 분야에서 효과가 있고(Pankaj et al., 2014; Niemira, 2012), 플라즈마를 처리한 딸기의 보존 기간을 연장시켜 저장성 향상에 효과가 있음이 보고되었다(Ma et al., 2015; Xu et al., 2016). 또한 플라즈마 처리는 *Bacillus subtilis*의 포자 형태를 비정상적으로 변형시킴으로써 포자의 활성을 억제함이 증명되었다(Moisan et al., 2001). 이는 플라즈마의 물리 화학적 성질 변화에 의한 부가적인 기능으로 향후 식물 재배,

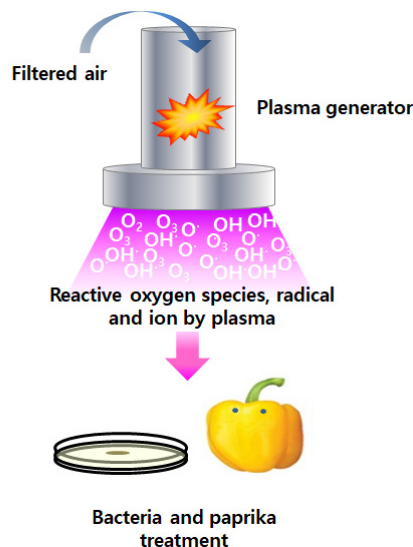


Fig. 1. Diagram of reactive oxygen species (ROS) generated from plasma discharge.

농식품 생산 및 수확후 품질 보존 기술 분야에 적용이 가능하다(Park et al., 2013).

본 연구에서는 파프리카를 대상으로 하여 파프리카의 저장성 향상을 위한 플라즈마 살균 시스템을 개발하였으며, 시스템의 미생물 살균 및 파프리카의 신선도 유지효과를 검증하였다.

재료 및 방법

공시재료

적색 품종의 파프리카(Paprika)를 대상으로 나가노(Nagano) 품종 파프리카를 구매하여 실험에 사용하였다. 저장성 관련 미생물은 전남대학교 식물바이러스학실험실에서 작물에 무름병을 일으키는 *Erwinia carotovora* 균주를 분양받아 실험에 이용하였다.

플라즈마 시스템 구축 및 성능 평가

플라즈마 살균 시스템 구축을 위해, 시스템의 구성은 크게 대기압 플라즈마 토치(발생기), 플라즈마 컨트롤러와 챔버로 이루어졌고, 대기압 플라즈마 토치는 AP-4000R (Advanced Engineering Technology Provider, Korea)을 플라즈마 살균 시스템에 적용하였다(Fig. 2). 플라즈마 처리시 온도를 측정하기 위하여 BK6-M (HanyoungNux) 온도센서(8개)와 UV-106M 모델인 UV Ozone Analyzer (Range: 0.01 – 1,000 ppm, six channel) 측정기를 시스템에 적용하였으며, 챔버 측면에 커튼을 설치하여 활성종의 유출을 방지하였다. 플라즈마 발생시 생성되는 온도를 측정하기 위해 온도 센서가 있는 위치를 A-H까지 명명 후 8곳의 위치를 선정하여 온도를 4분 동안 10초 단위로 온도를 측정하였다. 온도 측정 후 변화가 가장 적은 곳을 J라고 칭하고 오존 측정기를 이용하여 21분까지 1분단위로 오존 농도를 측정하였다. 플라즈마 처리 조건은 2.5 bar, 500 W 파워로 실험을 진행하였다.

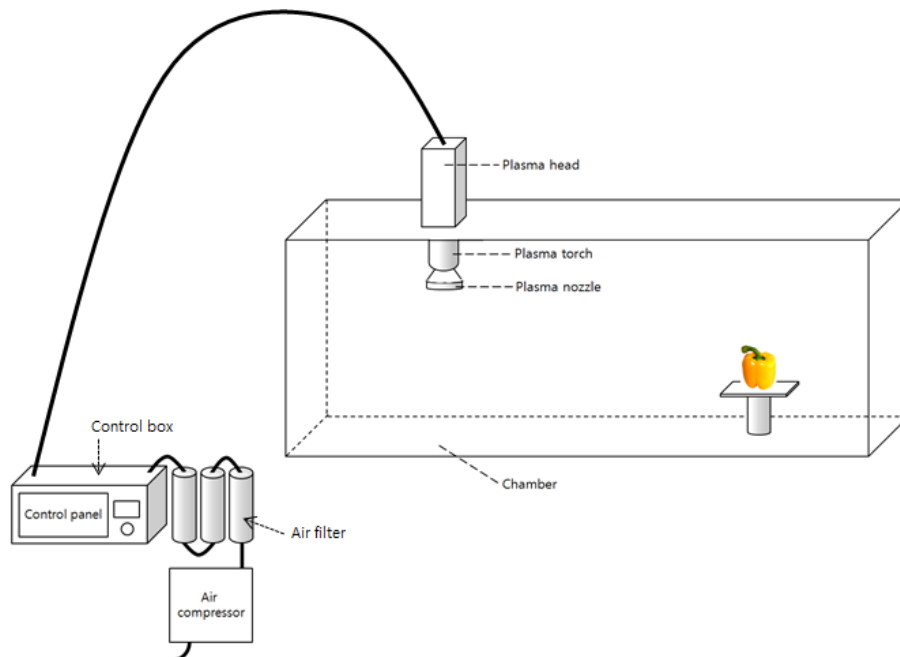


Fig. 2. Organization of the plasma sterilization system.

무름병원균(*Erwinia carotovora*) 살균효과 검정을 위한 플라즈마 처리

분양받은 *E. carotovora* 균주를 LB (Luria broth)배지 10 mL에 접종하여 24시간 배양 후 LA (Luria agar)배지에 20 µL씩 분주하여 배양액이 배지에 스며들 때까지 말린 후 J위치에서 2.5 bar에서 500 W, 700 W, 1,000 W 파워로 각 30초, 60초 조건으로 플라즈마 노즐로부터 20 cm거리에서 3반복 플라즈마를 처리하였다. 처리한 세균은 30°C 배양기에 24시간 배양하여 colony의 사멸 유무를 확인하였다.

파프리카 신선도 유지 검정을 위한 플라즈마 처리

파프리카에 이물질 제거하고자 air gun으로 세척을 진행하였다. 플라즈마 노즐로부터 20 cm거리에서 2.5 bar, 1,000 W 파워 조건으로 30초, 60초 동안 3반복 플라즈마 처리를 진행하였다. 처리한 파프리카는 아크릴 소재의 보관 박스에서 26일 동안 실온 보관하여 꼭지의 마름 및 과육의 상태를 관찰하였다.

결과

대용량 플라즈마 온도 및 오존 농도

대용량 플라즈마 시스템 내에서 A-H까지 위치별로 온도를 측정하였다. 모든 위치에서 온도가 증가하는 경향을 보였으며, 플라즈마 노즐에서 가장 가까운 E와 F 위치에서 최고 31°C까지 온도가 증가하는 경향을 나타냈다. 플라즈마 작동 후 30-60초 시간동안 모든 위치에서 온도가 빠르게 증가하다가 천천히 증가하여 210-240초 시간에서 평형을 이루는 것을 확인하였다(Fig. 3). 이 중에서 온도 변화가 가장 적은 G와 H 중간에 있는 위치를 J로 정하여 오존 농도를 측정하였다. 오존 농도는 4분에 0.17 ppm까지 농도가 증가하는 경향을 보였으며, 이후에 21분까지 0.14-0.17 ppm으로 농도가 증가와 감소를 반복하는 양상을 나타내었다(Fig. 4).

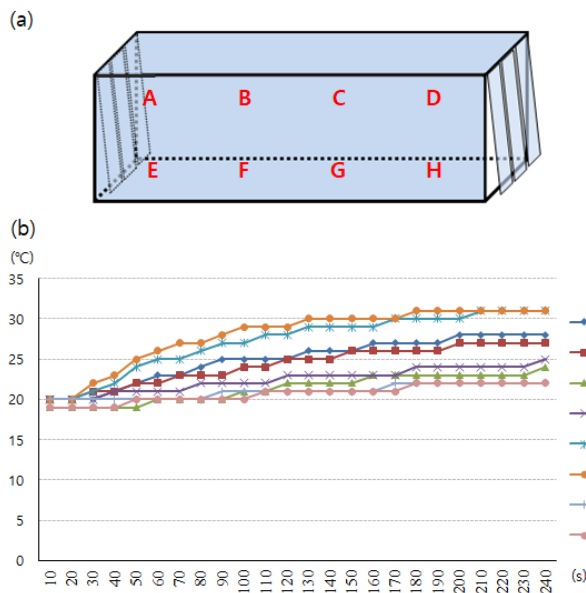


Fig. 3. Internal chamber temperature (°C) in the plasma sterilization system. (a) Temperature measuring sites (A-H); (b) temperature values measured in each site.

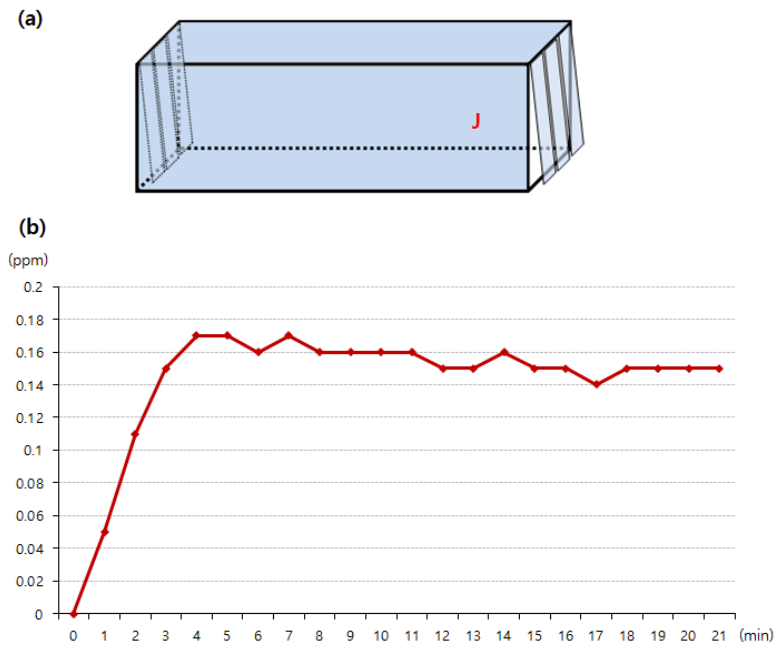


Fig. 4. Volume (ppm) of ozone, one of the reactive oxygen species generated from plasma discharge. (a) Ozone measuring site (J); (b) ozone value measured in site J.

플라즈마 처리 무름병원균(*Erwinia carotovora*)에 대한 플라즈마 살균효과 검정

E. carotovora 현탁액을 60 mm LA 고체배지 중심에 20 μ L씩 분주하여 건조시킨 후 플라즈마를 조건별 처리하여 24시간 뒤에 colony의 형태를 관찰하였다. 그 결과, *E. carotovora*는 무처리와 비교하였을 때 모든 파워 조건에 30초간 처리한 샘플에서 colony가 생성된 것을 확인하였지만 60초간 처리한 샘플에서는 colony가 형성되지 않았다(Fig. 5, Table 1). 이를 통해 30초에서 60초 사이에 오존의 농도가 증가함에 따라 다른 활성종도 발생이 증가하여 colony 생성에 영향을 주는 것을 확인하였다.

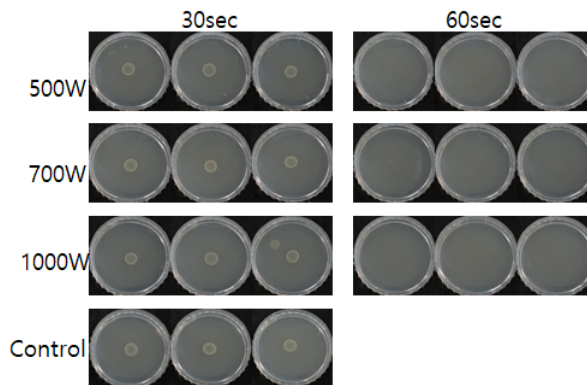


Fig. 5. Sterilization effect of plasma treatment on *Erwinia carotovora*, the bacteria that causes soft rot on paprika.

Table 1. Sterilization effect of plasma system treatment in *Erwinia carotovora*

Pressure	Time	Treatment conditions			Control
		500 W	700 W	1,000 W	
2.5 bar	30 sec	+	+	+	+
	60 sec	-	-	-	

(+): positive, (-): negative.

파프리카 신선도 유지 검정을 위한 플라즈마 처리

저장 중에 파프리카 신선도에 미치는 영향을 확인하고자 적색 파프리카에 플라즈마를 처리하였으며, 처리후 26일 까지 꼭지의 마름 그리고 과실의 상태를 관찰하였다. 그 결과 플라즈마를 처리하지 않은 무처리 샘플은 꼭지 부분의 시들음으로 인한 갈변현상을 보였다. 반면에 플라즈마를 처리한 두 조건의 파프리카 샘플은 꼭지 부분의 시들음이 지연되었으나, 무처리와 처리구 모두 과실 시들음의 차이는 없는 것을 관찰하였다(Fig. 6). 따라서 플라즈마 방전시 생성되는 활성종의 처리에 의해 파프리카 꼭지부분의 시들음이 지연됨을 확인하였다.

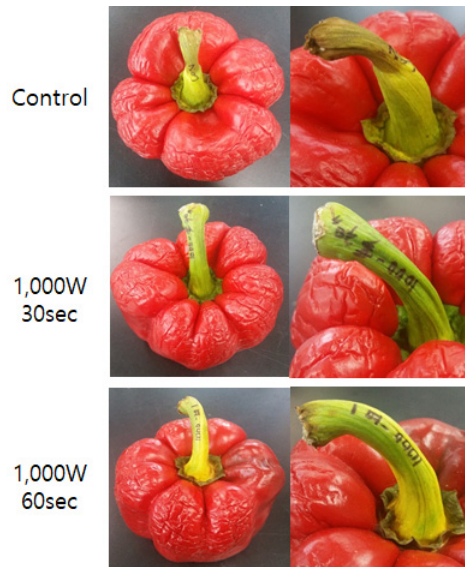


Fig. 6. Effectiveness of the plasma sterilization system in maintaining paprika freshness.

고찰

본 연구에서는 파프리카 적용 플라즈마 살균 시스템을 구축하였고, 시스템의 성능을 평가하기 위해 시스템 챔버 내에 온도와 플라즈마에 의해 발생하는 활성종의 양을 유추하기 위해 활성종 중 하나인 오존을 대표로 하여 활성종 농도를 측정하였다. 플라즈마 처리 4분 이후에 평균적으로 오존 농도는 0.17 ppm으로 측정되었고 30초에서 60초까지 큰 온도 변화가 있다가 이후에 거의 온도가 유지되는 것을 확인하였다. 파프리카에 무름병을 일으키는 세균인 *E. carotovora*를 대상으로 30초간 플라즈마를 처리한 샘플에는 살균효과에 차이가 없었지만 60초간 처리한 샘플에서는 살균효과가 있는 것을 확인하였고, 이는 활성종의 일정 농도에 노출되는 시점에서 활성종이 살균효과에 영향을 미치

는 것을 알 수 있었다. 그러나 30초와 60초간 처리한 샘플에서 모두 무처리 샘플에 비해 꼭지 부분의 시들음이 지연됨을 확인할 수 있었다. 따라서 *E. carotovora*를 대상으로 살균효과는 처리 시간에 의존하지만, 파프리카 신선도 지연에는 플라즈마 처리 자체에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 *Fusarium*과 *Ascochta* 속에 감염된 종자에 플라즈마를 처리하였을 때, 곰팡이의 균사 성장을 억제하여 종자의 품질을 향상시킨다는 선행연구의 결과와도 일치함을 알 수 있다(Filatova et al., 2011). 이는 플라즈마에 의해 생성된 활성종 기체가 미생물의 표면에 노출되어 산화반응에 의한 물리적 손상에 의한 살균에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며, 종자 발아 향상에 기여한다고 보고되었다(Zivkovic et al., 2004). 농업분야의 플라즈마 기술의 적용에 대한 연구는 이제 걸음마 수준이지만 지속적인 연구를 통해 농업분야에서 기존의 생물학적 및 화학적 기술의 한계를 극복할 수 있을 것으로 전망된다.

사사

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 수출전략기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(117034-3).

인용문헌(References)

- Eliezer, Y., Eliezer, S. (2001) The fourth state of matter: an introduction to plasma science. CRC Press.
- Filatova, I., Azharonok, V., Kadyrov, M., Beljavsky, V., Gvozdo, A., Shik, A., Antonuk, A. (2011) The effect of plasma treatment of seeds of some grain and legumes on their sowing quality and productivity. Rom J Phys 56:139-143.
- Fridman, G., Brooks, A. D., Balasubramanian, M., Fridman, A., Gutsol, A., Vasilets, V. N., Ayan, H., Friedman, G. (2007) Comparison of direct and indirect effects of non-thermal atmospheric-pressure plasma on bacteria. Plasma Processes Polym 4:370-375.
- Ma, R., Wang, G., Tian, Y., Wang, K., Zhang, J., Fang, J. (2015) Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce. J Hazard Mater 300:643-651.
- Moisan, M., Barbeau, J., Moreau, S., Pelletier, J., Tabrizian, M., Yahia, L. H. (2001) Low-temperature sterilization using gas plasmas: a review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms. Int J Pharm 226:1-21.
- Niemira, B. A. (2012) Cold plasma decontamination of foods. Annu Rev Food Sci Technol 3:125-142.
- Pankaj, S. K., Bueno-Ferrer, C., Misra, N. N., Milosavljević, V., O'donnell, C. P., Bourke, P., Keener, K. M., Cullen, P. J. (2014) Applications of cold plasma technology in food packaging. Trends Food Sci Technol 35:5-17.
- Park, D. P., Davis, K., Gilani, S., Alonzo, C. A., Dobrynin, D., Friedman, G., Fridman, A., Rabinovich, A., Fridman, G. (2013) Reactive nitrogen species produced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield. Curr Appl Phy 13:S19-S29.
- Pointu, A. M., Ricard, A., Dodet, B., Odic, E., Larbre, J., Ganciu, M. (2005) Production of active species in N₂-O₂ flowing post-discharges at atmospheric pressure for sterilization. J Phys D: Appl Phys 38:1905.
- Winter, J. (2004) Dust in fusion devices—A multi-faceted problem connecting high-and low-temperature plasma physics. Plasma Phys Controlled Fusion 46:B583.
- Xu, Y., Tian, Y., Ma, R., Liu, Q., Zhang, J. (2016) Effect of plasma activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*. Food Chem 197:436-444.

- Yang, Y., Yao, J., Hua, X. (2000) Effect of pesticide pollution against functional microbial diversity in soil. *Wei Sheng Wu Xue Za Zhi* 20:23-25.
- Yoo Seong Lee (2017) A change of market for global agri-food product and its export strategy. The research report of Korea Rural Economic Institute 311-340.
- Zivkovic, S., Puac, N., Giba, Z., Grubisic, D., Petrovic, Z. L. (2004) The stimulatory effect of non-equilibrium (low temperature) air plasma pretreatment on light-induced germination of *Paulownia tomentosa* seeds. *Seed Sci Technol* 32:693-701.