A Study on Inactivation of Pathogenic Bacteria for Nutrient Solution Recycling Using Advanced Oxidation Processes

Gwan-Soon Jang* and Yi Nam¹

Department of Environmental Health, Daejeon Health Institute of Technology, Daejeon 34504, Korea

¹National Agricultural Cooperative Federation

*Corresponding author: kschang@hit.ac.kr

ABSTRACT

Received: September 25, 2017

Revised: November 6, 2017

Accepted: November 6, 2017

This study was conducted to test the applicability of hydroxy radical reactor system, which applied advanced oxidation processes, to sterilize pathogenic bacteria for nutrient solution recycling in closed hydroponics. Removal efficiency was tested on 25 L of nutrient solution maxed with 10 mL culture solution of bacteria, *E. coli*, and *R. solanacearum* in a pilot tank. The testing conditions included various levels of hydroxy radicals resulting from air flow rates of 40, 80, and 120 L min⁻¹, and 12 hours processing time. The removal of bacteria, *E. coli*, and *R. solanacearum* by hydroxy radical in nutrient solution was significantly increased with an increase in the flow rate of the air from 40 L min⁻¹ to 120 L min⁻¹. The optimum removal efficiency was achieved at an air flow rate of 120 L min⁻¹ for 2 hours treatment. There were no significant differences in removal efficiency among bacteria, *E. coli*, and *R. solanacearum* for tested level and time of hydroxy radical. These results verified the efficiency of hydroxy radical in removing the pathogenic bacteria and the applicability of hydroxy radical reactor system in the field.

Keywords: Hydroxy radical, Advanced oxidation processes, *R. solanacearum*, Nutrient solution, Closed hydroponics

Removal efficiency of pathogenic bacteria by hydroxy radical resulting from air flow level of 40, 80, and 120 L min⁻¹.

Removal efficiency of bacteria, *E. coli*, and *R. solanacearum* by hydroxy radical from air flow level of 120 L min⁻¹.

Introduction

수경재배는 토양을 대신하여 생육에 필요한 무기영양분을 골고루 조성한 양액을 배지에 공급하여 작물을 재배하는 것으로 작업과정이 자동화, 기계화되면서 토양재배와 비교하여 노동력이 약 15~30% 정도 절감되고 친환경적인 고품질의 농산물을 대량 생산한다. 세계적으로 시설재배 농업기술의 발달과 더불어 친환경적이고 건강에 유익한 농산물을 선호하는 소비자가 증가하면서 국내에서도 수경재배 면적도 꾸준히 증가하여 2020년에는 3,800 ha 정도로 늘어나 그 비중이 전체 시설면적 중 5.3% 정도로 커질 것으로 전망한다 (Lee, 2014; Nam, 2004; No, 2003).

수경재배 방식에서 비순환식은 비료성분을 함유한 다량의 양액을 외부로 방출하기 때문에 양액비가 가중될 뿐만 아니라 하천 및 토양을 오염시키는 원인이 된다 (Nam, 2004). 반면에 순환식은 초기에 설치비용이 추가되지만 양액의 약 30% 정도를 재사용함으로써 매년 질소배출량 (400 kg ha^{-1}), 수자원 (2700 ton ha^{-1})을 절약할 수 있어 경제적, 환경적으로 매우 유리한 방식이다 (Lee, 2014).

세계적으로 농업생산 기술은 환경보존과 농산물 안전성을 도모하면서 동시에 농업생산을 지속가능하게 창출하는 환경친화적인 농업을 추구하고 있는 상황이다. 국내에서도 환경부에서는 하천의 수질 및 수생태계 개선을 위하여 방류수 수질기준 (총질소 20 mg L^{-1} , 총인 0.2 mg L^{-1})을 강화하고 있으며 (Kim et al., 2000) 농산물에 대한 친환경 인증 여부를 검증하는 과정에서 폐양액으로 인한 환경오염이 없어야 한다는 가이드라인을 두어 양액 재사용을 확대하고 있다. 그러나 우리나라의 순환식 보급률은 약 5% 수준으로 일본 (40%), 네덜란드 (100% 법제화) 등 선진국에 비교하여 현저히 저조한 상태이다 (Cho et al., 2000; Nam, 2004; No, 2003).

수경재배시설은 인위적인 자동시스템 하에서 동질적인 환경으로 조절되기 때문에 병해충 발생 등에 대응하는 자체 조절능력이 매우 부족하다. 특히 시설내부의 온도 등 물리적 조건이 균일하게 관리되는 작물의 근계권 (root zone)에서 빈번하게 발생하는 병원균은 양액순환에 따라서 시설전체로 대량 확산될 가능성이 있다 (Lee et al., 2005; Yun et al., 2004). 따라서 기존의 비순환식 수경재배 방식을 순환방식으로 전환하기 위해서는 양액조절, 양액농도측정 기술과 더불어 재용이하는 양액을 효과적으로 살균하는 양액살균기술의 보급이 매우 중요하다 (Nam, 2004).

양액살균기술로는 자외선살균법, 오존처리법, 전기가열식, 모래여과법, 박막여과법, 효모드처리법, 초음파처리법 및 화학약품으로 처리하는 물리화학적 방법들이 다양하게 개발되어 현장에 활용되고 있으나 (Cho et al., 2000), 처리효율성 향상과 더불어 제품의 농가보급은 아직까지 미흡한 상태이다. 고도처리기술 (AOPs)은 오존과 OH라디칼 및 활성이온들과 같은 산화력이 강한 물질을 투입하여 재래식 방법으로 처리하기 어려운 유기물을 분해시키고 강력한 소독작용으로 오염된 물을 정화하는 수처리 공정에 활용되고 있다 (Guzzella et al., 2002; Zhang et al., 2003). 고도처리기술 (AOPs)의 기본공정은 1970년대 이후 미국, 유럽 등지에서 연구되어 1980년대 후반부터 상수나 하수처리에 상용화되기 시작하였으며, 현재는 캐나다, 프랑스 등을 중심으로 처리효율성을 상승시키는 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, O_3/UV , $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$, O_3/TiO_2 , $\text{O}_3/\text{Metallic oxides}$ 등 여러 방법들이 구현되어 폐수처리공정에 적용하고 있다 (Guzzella et al., 2002; Mamesh et al., 2006; Vogelpohl and Kim, 2004).

본 연구에서는 고도처리기술 (AOPs)을 바탕으로 미세한 나노 유리섬유를 광촉매제로 사용하고 강력한 살균력을 갖는 OH라디칼 연속생성 장치를 구성하여 작물에 피해를 주는 양액내 병원균을 제거하는 효율성을 검증함으로써 양액살균장치로서 현장에 적용 가능성이 있는지를 평가하고자 하였다.

Materials and Methods

양액살균장치 및 운전조건 양액살균장치는 AOPs 원리를 적용하여 자외선 조사 하에 광섬유 촉매작용으로 $O_2 \cdot / HO_2 \cdot / H_3O_2$ 의 페록시 라디칼을 발생시키고, 생성된 라디칼은 활성이온들과 신속히 반응하여 OH라디칼을 생성한다. 살균력이 강한 OH라디칼 생성은 Fig. 1에서 나타난 것과 같이 자외선램프 양쪽에 나노 유리광섬유를 조밀하게 부착함으로써 광촉매 반응을 효율적으로 유도하였고, 광촉매 연속반응장치(cartridge)를 제작하여 OH라디칼 농도를 증폭시킬 수 있도록 하였다. 따라서 양액살균장치는 Fig. 2와 같이 단일장치 내에 광촉매 연속반응장치(cartridge)를 연속적으로 배열하여 시설재배 규모에 따라서 양액살균 용량을 신축성 있게 조절할 수 있다. 본 실험에서는 기본 cartridge만을 탑재하여 운전하였다.

Fig. 1. Cartridge of hydroxy radical generation.

Fig. 2. Nutrient solution sterilizer of amplifying hydroxy radical generation.

실험에 사용한 양액살균장치는 Fig. 3과 같이 공기공급장치, O_3 발생장치, 유리광섬유 OH라디칼 발생장치 및 주입장치로 구성되었으며, OH라디칼을 생성하기 위해 사용한 UV 광원은 200~280 nm의 파장영역, 중심파장 254 nm를 갖는 16 W 램프를 사용하였다. O_3 발생장치는 순산소를 사용할 경우에 발생되는 O_3 은 약 15 g hr^{-1} , 공기를 이용하게 되면 O_3 생성수율은 약 10% 정도가 되며 이때에 공기공급량은 120 L min^{-1} 이다. OH라디칼에 의한 정화처리효율을 평가하기 위하여 공기주입량은 40, 80, 120 L min^{-1} 로 조절할 수 있도록 하였으며, Pilot 반응조는 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 로 아크릴로 제조하였고, 분사노즐은 최적의 효과를 평가하여 $\varnothing 80 \text{ mm}$ (0.02 mm) size로 선정하였다. 처리시간은 12시간까지 하였고, 공기주입량 별로 동일하게 처리하여 최소한 3반복 처리효과를 검증할 수 있도록 운전조건을 설계하였다.

Fig. 3. Schematic diagram of hydroxy radical reactor system for the nutrient solution sterilization.

미생물 적용 양액 살균실험은 bacteria, *E. coli*, *R. solanacearum*을 대상으로 하였다. Bacteria는 nutrient broth에 폐양액 시료를 접종하여 37°C에서 25시간 배양한 후에 균을 확보하였고, *E. coli*는 다람발효관이 들어있는 시험관에 lactose bouillon을 10 mL씩 넣고 일반세균 배양과 동일한 방법으로 일정배율로 희석한 시료를 접종하여 37°C에서 24시간 배양을 한 후에 가스가 발생한 시험관을 대장균 완전시험까지 확인하여 *E. coli*를 확보하였다. *R. solanacearum*은 토마토 시설재배지로부터 분리하여 nutrient broth에 접종하여 30°C에서 150 rpm으로 36시간 배양한 다음에 원심분리 (4,000 rpm, 15 min)하여 균 stock을 확보하였다.

양액조제 및 미생물 살균실험 양액은 아파자키 토마토 전용배양액 (KNO₃, 404 g, NH₄H₂PO₄ 476 g, Ca(NO₃)₂ · 4H₂O 354 g, MgSO₄ · 7H₂O 246 g)을 적정 농도로 제조하여 실험에 사용하였다. 제조한 양액 25 L를 40 cm × 40 cm × 40 cm pilot 반응조에 넣고, 양액 살균실험용으로 확보한 bacteria, *E. coli*, *R. solanacearum* 배양용액을 10 mL씩 각각 양액에 접종하여 초기 미생물 농도를 설정한 후에 반응기를 연속 작동하여 살균실험을 수행하였다. 25~28°C 상온에서 공기주입량은 40, 80, 120 L min⁻¹로 조절하여 OH라디칼 처리수준을 다르게 하였다.

양액살균 효과 검증 양액의 살균효과를 검증하기 위하여 살균처리 2시간 간격으로 시료를 채취, 일정배율로 희석, 배양한 후 접종 균들에 대한 집락수를 측정하였다. 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률에 규정한 시험방법에 따라서 bacteria는 plate count agar, *E. coli*는 desoxycholate agar를 각각 사용하였다 (Ministry of Environment, 2007). *R. solanacearum*은 lab-lemco agar, SMSA배지를 사용하였으며, 모든 배지는 1.2 Kg cm⁻², 121°C, 15 min 조건하에서 고압증기멸균하여 주입평판법으로 1개의 시료당 3개의 평판을 제조, 30~35°C에서 24~48시간 배양하여 생균수 평균값을 측정하였다. 각 처리수준에 따른 미생물 살균효과는 살균처리 전, 후 CFU를 측정하여 ((처리전 colony 수 - 처리후 colony 수) / 처리전 colony 수) × 100으로 계산한 생존율 값 (%)으로 살균효율성을 비교하였다.

Results and Discussion

OH라디칼 처리와 양액의 살균효율성 반응조의 하단부 중앙부위에 노즐 size 0.02 mm, Ø80 mm의 분사기를 부착하여 각 반응조로 40, 80, 120 L min⁻¹의 공기를 주입, 양액살균장치의 cartridge를 통하여 생성되는 OH라디칼에 의한 살균처리 효율성을 검증하였다. Fig. 4는 OH라디칼로 양액을 살균처리한 후에 양액 1 mL를 각각 채취, 배양하여 측정한 균수를 처리대비 생존율로 표시한 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 실험 균의 생존율은 40, 80, 120 L

min^{-1} 처리별로 큰 차이가 있었고, 공기주입량이 증가함에 따라서 균의 생존율은 현저히 감소하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 생존율 변화로부터 OH라디칼 처리수준에 대한 양액의 살균효과 여부를 확인하기 위하여 공기주입량을 40 L min^{-1} 에서 $80, 120 \text{ L min}^{-1}$ 으로 증가시켰을 때에 나타난 각각의 생존율 값에 대하여 유의성을 분석한 결과 공기의 주입량 증가에 따라서 나타난 생존율 감소는 모두 고도의 유의성 ($P < 0.01$)을 보였다.

Fig. 4. Removal efficiency of pathogenic bacteria by hydroxyl radical resulting from air flow level of 40, 80, and 120 L min^{-1} .

OH라디칼 처리시간과 양액의 살균효율성 양액살균장치로 양액을 살균하여 시간별 처리효율성을 분석한 결과는 Fig. 5~7로 나타냈다. 그림에서 나타난 바와 같이 살균효과는 양액살균장치 cartridge로부터 생성되는 OH라디칼 수준과 처리시간에 따라서 큰 차이를 보였다. OH라디칼 수준이 가장 높은 120 L min^{-1} 의 경우에 *bacteria*, *E. coli*, *R. solanacearum* 제거율은 처리시작 후 1시간에 42%, 2시간 만에 2배 이상 증가하여 95%까지 제거율이 급속하게 상승해서 모든 처리들 중에 가장 짧은 시간에 살균효율성이 가장 높은 효과를 보였다. 이것을 동일처리 시간에 80 L min^{-1} 경우와 비교하면 제거율이 17%, 42%, 40 L min^{-1} 경우와 비교하면 제거율이 27%, 58% 이상 우월한 결과를 나타낸 것이다. 그리고 80 L min^{-1} 경우에는 처리시작 후 시간경과에 따라 제거율이 빠르게 증가하여 처리 6시간에 95% 이상 제거율을 보였다. 반면에 40 L min^{-1} 수준으로 처리하였을 때는 처리시간 초기단계 시간경과에 따라 살균효과는 14, 26, 39 그리고 64%로 80과 120 L min^{-1} 의 경우와 비교하여 매우 미미한 제거율을 보였으며, 이후에는 제거율 폭이 20% 내외로 둔화되면서 처리시간이 지속되어도 제거율에는 변화가 없어 12시간 처리에도 불구하고 살균효율성은 약 80% 정도에 머물러 살균효율성이 가장 낮은 수준이었다. 수정재배에서 뿌리병원균의 발생을 억제시키기 위하여 물리화학, 생물학적 방법들이 다채롭게 연구되고 있고 (Back et al., 2012; Do et al., 2015; Kim and Park, 2011, 2014), 그중에 자외선살균법, 오존살균법 등 양액살균기술이 현장에서 많이 이용되고 있다 (Cho et al., 2000). 본 연구를 통하여 검증하고자 한 나노 유리섬유 광촉매 연속공정을 이용한 양액살균장치는 실험결과 양액살균 효과가 매우 우수하게 나타나 자외선 및 오존살균장치와 함께 현장적용이 가능할 것으로 사료되며, Acher et al. (1997), Runia (1994) 등이 지적한 대로 UV 처리는 산화현상으로 철과 망간의 감소와 함께 석영관에 흡착되어 UV 에너지를 감소시키고 양액의 깊이와 유속에 따라 살균처리 효과가 달라지며, 오존처리 후에는 킬레이트철이 산화철로 변화되어 활성탄으로 제거해야 하고, 살균효과를 높이기 위하여 낮은 pH 조건을 위한 산 공급장치가 필요하다는 문제점을 보완할 수 있도록 유리섬유 광촉매 양액살균장치에 대한 지속적인 실증연구가 이루어지면 자외선 및 오존살균장치를 현장에서 적용하였을 때에 나타나는 애로사항을 대체할 수 있을 것으로 추측된다.

Fig. 5. Removal efficiency of bacteria, *E. coli*, and *R. solanacearum* by hydroxy radical from air flow level of 40 L min⁻¹.

Fig. 6. Removal efficiency of bacteria, *E. coli*, and *R. solanacearum* by hydroxy radical from air flow level of 80 L min⁻¹.

Fig. 7. Removal efficiency of bacteria, *E. coli*, and *R. solanacearum* by hydroxy radical from air flow level of 120 L min⁻¹.

처리수준에 따른 미생물 살균력 차이 본 연구에서 살균실험 대상으로 선정된 bacteria는 수중에 존재하는 호기성균으로 유기물이 많은 수질에서는 급성장하기 때문에 유기물에 의한 수질오염 정도를 알아보는 상대적인 지표로 활용하며, *E. coli*는 자연환경에서는 지속적으로 성장하지 않으나 bacteria와 비교하여 환경저항성이 강하기 때문에 폐수처리 방류수에 존재하는 병원균 등의 살균처리 효과를 나타내는 수질오염공정시험 지표로 사용하고 있다. 그리

고 각종 작물의 풋마름병 (bacteria wilt)의 원인세균인 *R. solanacearum*은 열대, 아열대, 온대 기후지역에서 널리 분포하며 작물의 생산성에 심각한 손실을 가져오는 식물병원세균이다. 우리나라에서는 토마토, 고추, 가지, 참깨, 생강, 해바라기 등 많은 작물에 발생하는 것으로 조사되었으며, 그 중에서도 토마토에서 가장 심하게 발생하는 것으로 보고되었다 (Lee et al., 2011; Yun et al., 2004). *R. solanacearum*는 토양에서 오랫동안 생존이 가능하며 토양에서 식물의 뿌리나 줄기에 생긴 상처를 통하여 침입하고 물관으로 이동하여 시들음병을 일으켜 식물을 고사시키는데 토양재배지에서 제거가 쉽지 않고, 수경재배의 경우 시설내부의 계절적인 온도변화 등과 함께 물리적 조건이 균일하게 운전되는 작물 근계권 (root zone)의 완충력 저하로부터 발생하여 양액에 따라서 병원균이 시설전체로 대량 확산되는 것으로 확인되고 있다 (Lee et al., 2005). 양액살균장치로 처리한 bacteria, *E. coli*, *R. solanacearum*에 대한 살균 효율성을 검증한 결과를 보면 Fig. 4에서 보는 바와 같이 OH라디칼 처리에 따라서 유의적인 ($P < 0.01$) 살균효과가 확인되었고, Fig. 5~7과 같이 OH라디칼 처리시간에 따라서 살균양액 내 존재하는 bacteria, *E. coli*, *R. solanacearum* 모두는 생존율이 현저히 감소하는 결과를 나타냈다. Kim et al. (2012), Do et al. (2015), Lee et al. (2016) 등은 여러 가지 병원균에 대한 다양한 살균실험에서 처리방법 및 병원균에 따라 살균 효율성이 다르게 나타난 결과를 보고한 바가 있지만, 본 실험에서는 3가지 균 모두 양액살균처리에 민감하게 반응하여 살균력 차이는 없었다. 이러한 결과는 Back et al. (2012), Guzzella et al. (2002), Kim and Park (2011, 2014), Son and Lee (2011), Vogelpohl and Kim (2003), Zhang et al. (2003) 등이 강력한 산화력과 살균력을 갖는 OH라디칼을 O_3/H_2O_2 , O_3/UV , TiO_2/H_2O_2 , UV/H_2O_2 , O_3/TiO_2 등 다양한 공정을 통하여 발생시켜서 수질정화는 물론 양액살균에 효과가 있음을 제시한 바와 같이 본 실험에서도 양액살균장치의 cartridge를 통하여 공기주입량을 40, 80, 120 L min⁻¹ 씩 처리하였을 때, 각각 발생되는 OH라디칼 수준 모두는 bacteria, *E. coli*, *R. solanacearum*에 민감하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

Conclusions

Pilot 반응조에 bacteria, *E. coli*, *R. solanacearum* 배양액을 각각 10 mL씩 접종한 25 L의 양액을 대상으로 양액살균장치의 cartridge를 통하여 생성되는 OH라디칼로 처리하여 배양액 재사용을 위한 살균효율성을 검증하였다. OH라디칼 처리는 양액살균장치에 40, 80 및 120 L min⁻¹로 주입되는 공기와 cartridge의 광촉매로 생성되는 활성이온들과 반응하여 최종적으로 생성되는 OH라디칼에 따라 달리하였다. 실험결과 40, 80, 및 120 L min⁻¹의 공기주입량에 따라 cartridge에서 생성되는 OH라디칼의 증가에 따라 bacteria, *E. coli*, *R. solanacearum*의 생존율은 유의적으로 크게 감소하였고, 120 L min⁻¹의 처리 2시간에 95% 이상 제거율을 나타내어 모든 처리 중에 살균효율성이 가장 높았다. 80 L min⁻¹의 처리에서는 6시간 살균 처리하였을 때에 95% 이상 제거율을 보였으나 40 L min⁻¹의 처리에서는 배양액 재사용을 위한 살균효과를 얻지 못하였다. 또한 OH라디칼 처리에 의한 bacteria, *E. coli*, *R. solanacearum* 간의 제거율 차이는 발견하지 못하였다.

Acknowledgement

This paper was supported by Daejeon Health Institute of Technology in 2015.

References

- Acher, A., B. Heuer, E. Rubinskaya, and E.E. Fischer. 1997. Use of ultraviolet-disinfected nutrient solutions in green-houses. *J. Hortic. Sci.* 72:117-123.
- Back, S.E., D.S. Kim, and Y.S. Park. 2012. Inactivation of *Ralstonia solanacearum* using aquatic plasma process. *J. Environ. Sci. Int.* 21(7):797-804.
- Cho, J.Y., S.B. Seok, and C.S. Ju. 2000. Present status and prospect of sterilization of nutrient solution for recycled hydroponics. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 18(6):890-899.
- Do, J.S., H.J. Chung, and W.S. Bang. 2015. Bacterial effects of pathogenic bacteria on acid treatment combined with red, green, and blue LED light at a low temperature environment. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 44(11):1725-1732.
- Guzzella, L., D. Feretti, and S. Monarca. 2002. Advanced oxidation and adsorption technologies for organic micro-pollutant removal from lake water used as drinking water supply. *Water Res.* 36(17):4307-4318.
- Kim, D.S. and Y.S. Park. 2011. Optimization of air-plasma and oxygen-plasma process for water treatment using central composite design and responses surface methodology. *J. Environ. Sci. Int.* 20(7):907-917.
- Kim, D.S. and Y.S. Park. 2014. A study on the *Ralstonia solanacearum* inactivation using improved plasma process. *J. Environ. Sci. Int.* 23(3):369-378.
- Kim, H.J., Y.H. Woo, W.S. Kim, and Y.I. Nam. 2000. Problem and optimum control of nutrient solution management in closed hydroponics. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 18(6):884-889.
- Kim, S.A., S.Y. Ahn, W. Oh, and H.K. Yun. 2012. in vitro test of mycelial growth inhibition of 5 fungi pathogenic to strawberries by ultraviolet-C (UV-C) irradiation. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 44(3):634-637
- Lee, H.C. 2014. Necessity and challenge project of closed-system in the hydroponics. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 32:31-32.
- Lee, H.J., E.J. Jo, N.H. Kim, Y. Chae, and S.W. Lee. 2011. Disease responses of tomato pure lines against *Ralstonia solanacearum* strains from Korea and susceptibility at high temperature. *Res. Plant Dis.* 17(3):326-333.
- Lee, J.S., J.H. Choi, S.T. Seo, K.S. Han, J.H. Park, H.I. Jang. 2005. Control of tomato wilt disease by amending pH of nutrient solution in hydroponic system. *Res. Plant Dis.* 11(2):193-197.
- Lee, M.H., S.E. Kim, S.D. Lee, J.E. Lee, H.S. Kim, S.K. Cho, S.Y. Sim, and Y.S. Kim. 2016. Development of drainage water disinfection system by electric shock in recirculation soilless culture. *Protected Horticulture and Plant Factory* 25(1):49-56.
- Mamesh, T., T.O. Kwon, J.C. Jun, S. Balaji, M. Mathrswaran, and I.S. Moon, 2006. Application of several advanced oxidation process for the destruction of terephthalic acid (TPA). *J. Hazard Mater* 142(1-2):308-314.
- Ministry of Environment. 2007. Official testing method with respect to water pollution process.
- Nam, Y.I. 2004. Present status and further prospects for development of closed hydroponic in Korea. *Korea Res. Soc. Protected Hortic.* 17(1):1-7.
- No, Y.M. 2003. Nutrient solution recycling in closed hydroponics. *Kor. Res. Soc. Protected Hort.* 16(2):35-42.
- Runia, W.T. 1994. Elimination of root-infecting pathogens in recirculation water from closed cultivation with ozone. *Act Hortic.* 361:388-396
- Vogelpohl, A. and S.M. Kim. 2004. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *J. Indus. Eng. Chem.* 10(1):33-40.
- Yun, G.G., S.Y. Park, H.J. Kang, K.Y. Lee, and J.S. Cha. 2004. Contamination level of *Ralstonia solanacearum* in soil of greenhouses cultivating tomato plants in Chungbuk province and characteristics of the isolates. *Res. Plant Dis.* 10(1):58-62.
- Zhang P., F. Liang, G. Yu, G. Chen, and W. Zhu 2003. A comparative study on decomposition of gaseous toluene by O₃/UV and O₃/TiO₂/UV. *J. Photochem. Photobio. A: Chemistry*, 156, pp 189-194.