

## 감광제 광산화에 의한 Bisphenol A 안정성 감소

박찬익 · 이재환\*  
서울산업대학교 식품공학과

### Decreased Stability of Bisphenol A by Photosensitization

Chan Uk Park and JaeHwan Lee\*

Department of Food Science and Technology, Seoul National University of Technology

**Abstract** Bisphenol A (BPA) is an endocrine disruptor frequently used in food containers, including epoxy resin and polycarbonates. BPA concentrations were monitored by high performance liquid chromatography (HPLC) under photosensitization of riboflavin (RF), methylene blue (MB), rose bengal (RB), or titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) and the involvement of singlet oxygen was determined using sodium azide (NaN<sub>3</sub>). The stability of BPA decreased significantly in the order of RF, RB, and MB photosensitization ( $p < 0.05$ ), while the concentration of BPA in samples with TiO<sub>2</sub> was not significantly different from that of control samples without photosensitizers under light ( $p > 0.05$ ). The stability of BPA decreased in an MB concentration-dependent manner and increased as the concentration of added NaN<sub>3</sub> increased, implying that singlet oxygen was involved in the photodegradation of BPA during MB photosensitization. The results of this study may help control the BPA content in foods or the environments using photosensitized oxidation and visible light irradiation.

**Keywords:** bisphenol A, photosensitization, singlet oxygen, methylene blue

## 서 론

Bisphenol A(BPA, 2,2-(4,4-dihydroxydiphenyl)propane)는 폴리카보네이트, 에폭시 수지 등 플라스틱 중합체의 단위체로서, 젓병, 전자레인지용기, 음료수 캔 등의 식품 저장용기 제조에 사용되는 물질로(1) 공기, 물, 토양, 식품 및 사람의 세포나 혈액에서도 미량 발견된다(2,3). BPA의 구조는 에스트로겐과 유사하며, 체내에서 정상적인 에스트로겐 작용을 방해하는 내분비교란물질로 작용한다. BPA는 에스트로겐이 관여하는 여러 반응에서 유전적, 비유전적인 독성을 유발시키며(1), 갑상선 호르몬 활성 저해(4) 및 발암 가능성 등도 보고되었다(5).

식품이나 환경에서 BPA 함량 저감을 위해 화학적방법 및 광분해법 등의 다양한 제거방법이 연구되고 있다(6-9). 광분해법으로는 이산화티타늄(titanium dioxide)과 같은 광촉매제(photocatalyst)와 자외선을 조사하는 방법(10)과 과산화수소와 Fe(II)이온, 자외선 조사를 통한 photon-Fenton 반응법 등이 대표적이다(8,11). 최근 Ha 등(12)은 라이보플라빈(riboflavin)이 감광제로 작용 시 가시광선 조사에 의해 BPA 농도가 모델시스템 및 차 음료에서 유의적으로 감소됨을 보고하였다.

광산화 메커니즘은 클로로필(chlorophyll), 라이보플라빈, 메틸렌블루(methylene blue)와 같은 감광제에 의해 전자나 수소원자가

유리되어 라디칼을 생성하는 광산화 제1경로와 삼중항산소로부터 일중항산소를 생성하는 제2경로로 알려져 있다(13). 라이보플라빈은 녹색식품과 유제품에서 쉽게 발견되는 수용성 비타민 B<sub>2</sub>로, 빛의 조사 시 광산화 제1경로와 제2경로에 의해 유제품에서 이취를 유발하고 비타민 D<sub>2</sub>를 파괴하는 주요 요인으로 밝혀졌다(14-16). 로즈벵갈은 가시광선 조사에 의해 17 $\beta$ -estradiol 등의 안정성을 감소시키고(17), 감광제로서 광산화 제2경로에 의해 DNA를 손상시킬 수 있다(18). 메틸렌블루는 광산화 제2경로를 유도하는 대표적인 감광제로 광산화 시 일중항산소 생성을 통해 지방 산화 및 휘발성분 생성을 촉진시킨다(19-21). 이산화티타늄은 자외선 조사에 의해 광촉매 효과를 나타내며, 산업폐수 등에서 폐놀성 물질을 감소시키고 자외선 또는 태양광을 조사할 경우 미생물 생장을 억제한다(22,23). Barbieri 등(24)은 라이보플라빈 첨가와 가시광선 조사 모델시스템에서 BPA 안정성이 감소하며, 일중항산소와 superoxide 음이온이 관여함을 보고 하였다. 또한 Zhan 등(9)은 humic substance 감광제에 의해 생성된 일중항산소 등의 활성산소가 BPA를 분해한다고 보고하였다. 이와 같이 감광제 광산화에 의해 BPA가 분해된다는 보고는 다수 있었으나, 감광제의 종류에 따른 BPA안정성에 대해서는 보고되지 않았다.

본 연구의 목적은 감광제인 라이보플라빈, 로즈벵갈, 메틸렌블루와 광촉매인 이산화티타늄을 활용하여 가시광선 조사 시 BPA 안정성을 확인하고, 감광제 중 메틸렌블루의 농도 변화에 따른 BPA안정성 변화와 일중항산소 관여 여부를 확인하는 것이다.

## 재료 및 방법

### 재료

BPA와 라이보플라빈, 로즈벵갈, 이산화티타늄, sodium azide는 Sigma-Aldrich Co.(St. Louis, Mo, USA)에서, 메틸렌블루는 대정

\*Corresponding author: JaeHwan Lee, Department of Food Science and Technology, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea  
Tel: 82-2-970-6739  
Fax: 82-2-976-6460  
E-mail: jhlee@snut.ac.kr  
Received November 4, 2009; revised December 18, 2009;  
accepted December 19, 2009

화금(Siheung, Korea)사에서 구입하였다. 아세토나이트릴(Acetonitrile, ACN)은 J. T. Baker(Phillipsburg, NJ, USA)사의 HPLC급 시약을 사용하였다. 광산화에 이용한 light box는 자체제작 하였으며 광원은 형광등을, 조도는 1,333 Lux를 사용하였다. 본 연구에 사용된 BPA, 라이보플라빈, 로즈벵갈, 메틸렌블루의 화학구조는 Fig. 1에 나타내었다.

### 감광제 종류에 따른 BPA안정성 변화

BPA는 210  $\mu\text{M}$ (50% ACN 수용액, v/v)을 제조하였고, 라이보플라빈, 로즈벵갈, 메틸렌블루, 이산화티타늄은 각각 200  $\mu\text{M}$ (50% ACN 수용액, v/v)을 제조하였다. 10-mL 시료병에 BPA와 감광제 최종농도가 각각 53, 50  $\mu\text{M}$ 이 되도록 첨가하고 뚜껑이 개방된 상태의 시료병을 상온의 light box에서 0, 6, 12, 24, 48시간 동안 광산화 처리하였다. BPA에 감광제를 첨가하지 않은 감광제 무첨가 시료를 대조구로 하였으며, 모든 실험은 3회 반복하였다. 광산화 후 BPA잔존량은 high performance liquid chromatography (HPLC)로 3반복하여 분석하였다.

### 메틸렌블루 농도에 따른 BPA안정성 변화

최종농도 53  $\mu\text{M}$  BPA에 메틸렌블루 최종농도가 각각 0, 10, 25, 50, 100  $\mu\text{M}$ 이 되도록 첨가하여 밀폐 상태로 상온의 light box에서 0, 12, 24, 48시간 동안 광산화 처리 후 BPA잔존량을 HPLC로 분석하였다.

### Sodium azide 첨가에 따른 BPA안정성 변화

BPA 53  $\mu\text{M}$ 과 메틸렌블루 50  $\mu\text{M}$ , sodium azide 0, 25, 50, 100  $\mu\text{M}$ 을 각각 첨가하여 밀폐 상태로 light box에서 0, 12, 24, 48시간 동안 광산화 처리하였다.

### BPA의 HPLC분석 조건

HPLC는 Hitachi L-2000시리즈(Hitachi, Tokyo, Japan)-ultraviolet detector를 이용하였다. BPA 분석 조건은 고정상으로 Waters Nova-pak C<sub>18</sub> reverse-phase 컬럼(150 mm×3.9 mm i.d, 4  $\mu\text{m}$ )과 Nova-pak C<sub>18</sub> guard 컬럼을, 이동상으로 증류수와 ACN을 50:50의 비율로 혼합하여 0.5 mL/min 유속으로 사용하였다. 시료는 0.2 mm 필터(Alltech Associates Inc., Deerfield, IL, USA)로 여과 후 HPLC에 주입하였다. 시료주입량은 20  $\mu\text{L}$ , 컬럼 온도는 25°C, 검출부의 흡광도는 278 nm이었다. 크로마토그램의 BPA peak는 Ha 등(12)의 방법에 따라 결정된 검량곡선을 활용하여 정량 분석하였다.

### 통계처리

BPA 농도의 유의성 검사는 SPSS(Chicago, IL, USA)의 분산분석 후 유의차가 있는 경우에는 다중비교법인 Duncan's multiple range test를 이용하여  $p < 0.05$  유의수준에서 비교하였다.

## 결론 및 고찰

### 감광제 종류 및 이산화티타늄 첨가에 따른 BPA안정성 변화

감광제 종류에 따른 광산화 시 BPA 잔존량 변화는 Fig. 2에 나타내었다. 대조군은 초기 53  $\mu\text{M}$ 의 BPA 농도가 광산화 시간이 48시간 경과하였을 때 55  $\mu\text{M}$ 로 BPA잔존량이 유의적으로 증가하였다( $p < 0.05$ ). 이는 시료 병의 뚜껑을 개방한 상태로 광산화 처리하여, 용매의 휘발에 따른 BPA 농축효과로 사료된다. 감광제로 라이보플라빈을 첨가한 경우 BPA 농도가 6, 12시간 후 각각 초기농도의 94.7, 99.4% 감소하였으며, 18시간 이후 시료에서는

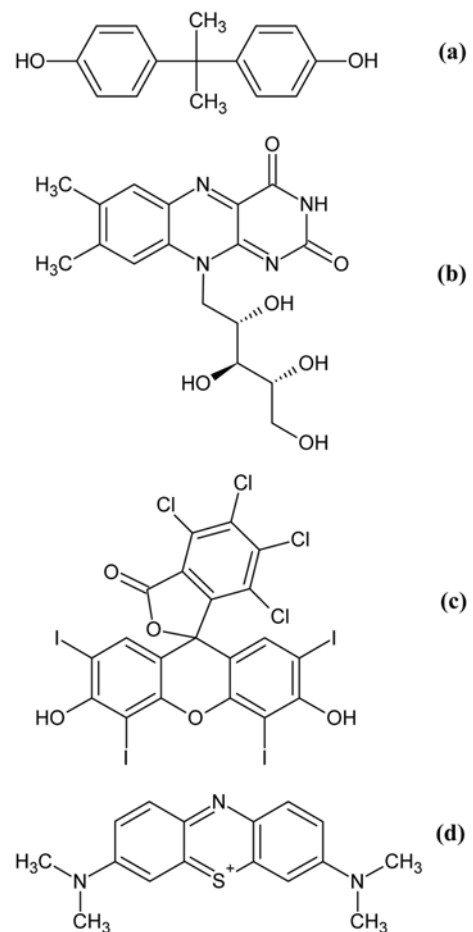


Fig. 1. Chemical structures of bisphenol A (a), riboflavin (b), rose bengal (c), and methylene blue (d).

BPA가 검출되지 않았다. 감광제로 로즈벵갈을 사용한 경우 6, 12, 18시간 후 각각 초기농도의 49.7, 83.0, 96.7% 감소하였으며, 24 및 48시간 시료에서는 검출되지 않았다. 감광제로 메틸렌블루 사용 시 6, 12, 18, 24, 48시간 광산화 후 각각 초기농도의 5.0, 12.2, 20.8, 29.9, 68.0% 감소하였다. 반면 광촉매로 이산화티타늄을 첨가 한 시료의 경우, BPA 잔존량은 대조구와 유의적인 차이가 없었다( $p > 0.05$ ). 또한 메틸렌블루를 첨가하고 암소에서 보관된 시료의 경우 48시간 후의 BPA 함량에는 유의적인 차이가 없었다( $p > 0.05$ ). 빛의 조사와 감광제가 동시에 존재하는 경우에만 BPA의 안정성이 감소하였으며 이는 감광제 활용 광산화의 기존 연구와 일치하는 결과이다(12,25). 광산화에 의한 BPA안정성은 감광제의 종류에 따라 차이가 있었으며, 라이보플라빈, 로즈벵갈, 메틸렌블루의 순서로 BPA안정성이 감소되었다.

감광제와 가시광선 광산화에 의해 다양한 물리·화학적 변화가 유발된다. Skibsted(16)는 유제품에 가시광선 조사 및 라이보플라빈 존재 시 이취가 유발됨을 보고하였고, Lee와 Min(25)은 8시간 광산화에 의해 우유에서 pentanal, hexanal, heptanal 및 dimethyl disulfide가 생성됨을 보였다. Ha 등(12)은 모델시스템 및 차류 식품에서 가시광선 조사 시 라이보플라빈 광산화에 의해 BPA의 안정성이 저하됨을 보고하였다(12). BPA와 구조 유사성을 갖는 아이소플라본 역시 라이보플라빈 광산화에 의해 안정성이 감소되었다(26,27). 반면에 Kim 등(23)은 이산화티타늄과 자외선 조사에 의해 수증 폐놀 함량 감소를 보고하여 BPA의 안정성이

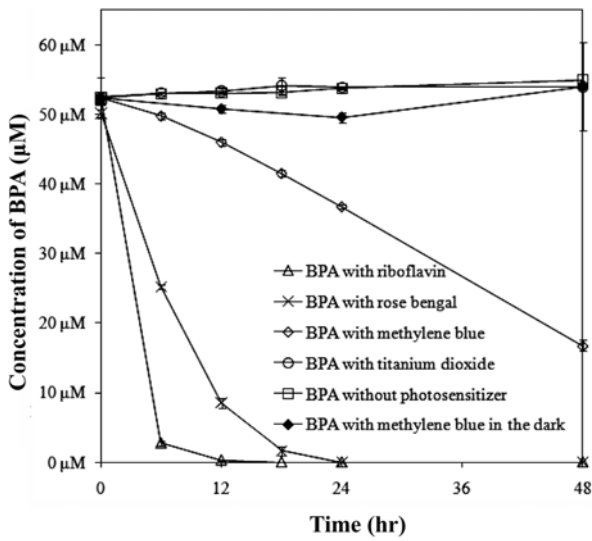


Fig. 2. Effects of riboflavin, rose bengal, methylene blue, and titanium dioxide on the stability of bisphenol A under visible light irradiation for 48 hr.

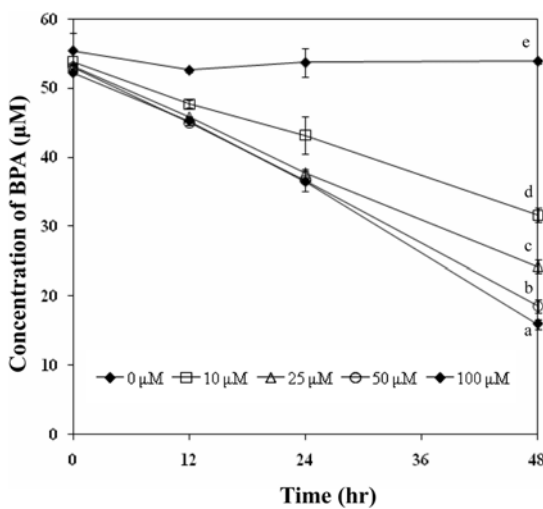


Fig. 3. Concentration-dependent effects of methylene blue on the stability of bisphenol A under visible light irradiation. Points with different letters at 48 hr are significant at  $p < 0.05$  among 48 hr samples.

감소될 것으로 기대되었으나, 본 연구의 가시광선 조사 조건에서는 BPA의 유의적인 안정성 감소는 없었다( $p > 0.05$ ). 이는 자외선 조사와는 달리 가시광선 조사에 의해 이산화티타늄 광촉매 활성이 제한되어 BPA의 농도변화가 발생하지 않은 것으로 고려된다. 기존 연구에서, 이산화티타늄의 광촉매 활성은 주로 자외선 조사에 의해 촉진되었으며 본 연구결과와의 상이점은 가시광선과 자외선과의 파장차이에 의한 에너지차이에 기인한 것으로 사료된다(22,23).

감광제에 의한 광산화는 식품저장 중 지방 산화의 심화, 비타민 D의 파괴, 유제품에서의 이취 발생 등 주로 부정적 결과를 유발하는 것으로 보고되었으나, 본 연구에서는 BPA와 같은 내분비교란물질이나 페놀성 화합물 등의 제거에 이용될 수 있는 가능성을 제시하였다(25).

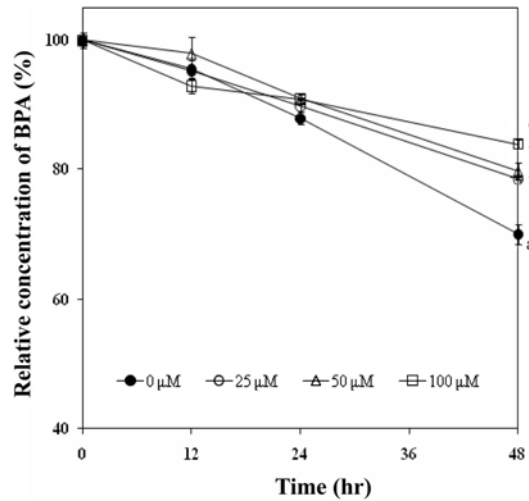


Fig. 4. Effects of sodium azide on the stability of bisphenol A with methylene blue photosensitization. Points with different letters at 48 hr are significant at  $p < 0.05$  among 48 hr samples.

#### 메틸렌블루 농도에 따른 BPA안정성 변화

광산화시 메틸렌블루 농도에 따른 BPA안정성 감소 효과는 Fig. 3에 나타내었다. 메틸렌블루의 농도가 0, 10, 25, 50, 100 µM로 증가함에 따라 BPA 농도는 각각 55.4, 53.8, 53.1, 53.0, 52.2 µM에서 48시간 후 53.9, 31.6, 24.2, 18.6, 15.6 µM로 유의적으로 감소하였다( $p < 0.05$ ). 이는 BPA 안정성 감소가 감광제인 메틸렌블루 농도의존적임을 나타낸다.

#### Sodium azide 첨가에 따른 BPA안정성 변화

Sodium azide는 일중항산소 소거제로서, 광산화 시 감광제에 의한 일중항산소의 발생 여부를 확인하는 용도로 사용되어왔다(12,25,26,28). 메틸렌블루와 BPA의 광산화 시 첨가한 sodium azide 농도의 BPA안정성에 대한 영향은 Fig. 4에 나타내었다. Sodium azide를 첨가하지 않은 경우 BPA 농도가 48시간 후 약 초기농도의 30%가 감소하였으나, sodium azide가 100 µM 첨가된 경우 48시간 후 초기농도의 16.1%만 감소하였다. Sodium azide 첨가 농도가 증가함에 따라 광산화에 의한 BPA의 안정성은 유의적으로 증가하였다( $p < 0.05$ ). 물리적 일중항산소 소거제인 sodium azide 농도 증가는 일중항산소가 BPA 안정성에 영향을 미침을 의미한다. 이는 Ha 등(12)의 라이보플라빈 광산화에 의한 BPA 안정성 감소 메커니즘과 일치하는 결과이며, BPA안정성이 광산화제2경로와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 다만, BPA의 소거에 감광제에 의한 제1경로가 관여함을 배제할 수 없으며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

일중항산소는 단백질, DNA, 지방, 및 lignin과 결합하여 이들 물질을 산화시키는 역할을 수행할 수 있으며(13,14), 본 연구결과와 같이 내분비교란물질인 BPA의 농도를 유의적으로 조절할 수 있다. 사용되는 용매의 종류에 따라 감광제로부터 발생하는 일중항산소의 함량 및 안정성은 달라진다. 로즈벵갈과 메틸렌블루는 에탄올에서는 일중항산소를 각각 0.68, 0.52의 quantum yield로 발생시키고 메탄올 용액에서는 각각 0.76, 0.50의 quantum yield를 발생시킨다(29). 일반적으로 로즈벵갈이 메틸렌블루보다 더 많은 일중항산소를 발생시키기에 본 연구에서 사용된 50% 아세트나이트릴 수용액 상에서도 더 많은 일중항산소가 로즈벵갈로부터

발생하여 BPA와 결합한 것으로 예측된다. 라이보플라빈은 일중항산소를 발생시키는 제2경로 뿐 아니라 제1경로에 의한 광산화도 진행하기에(26) 제2경로로만 광산화를 유발하는 로즈벵갈이나 메틸렌블루보다 BPA의 광분해성을 더 높인 것으로 예상된다.

결론적으로 내분비교란물질의 일종인 BPA는 가시광선 조사 아래 감광제인 라이보플라빈, 로즈벵갈, 메틸렌블루 순으로 안정성이 감소하였으며, 메틸렌블루를 감광제로 활용한 결과, BPA의 광분해성은 감광제 농도 의존적으로 증가하였으며 광산화 제2경로에 의해 발생하는 일중항산소와 관련이 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 식품 및 환경에 잔존하는 내분비계 장애물질을 가시광선 조사 및 감광제 처리에 의해 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 기대된다.

## 요 약

내분비교란물질인 BPA는 식품의 포장용기나 젓병 등의 제조에 이용되며, 라이보플라빈 광산화에 의해 안정성이 감소하는 것으로 보고된 바 있다. 본 연구에서는 광산화 시 메틸렌블루, 로즈벵갈, 라이보플라빈, 또는 이산화티타늄 등의 감광제 종류에 따른 BPA안정성을 비교하였고, sodium azide( $\text{NaN}_3$ ) 농도에 따른 BPA안정성을 확인하였다. BPA 농도는 라이보플라빈, 로즈벵갈, 메틸렌블루 순서로 유의적으로 감소하였지만( $p < 0.05$ ), 이산화티타늄 첨가 시료와 대조군인 감광제 무첨가군의 BPA 농도는 유의적인 차이가 없었다( $p > 0.05$ ). BPA의 안정성은 메틸렌블루 농도 의존적으로 감소하였으며,  $\text{NaN}_3$  농도가 증가할수록 BPA 안정성은 증가하였다. 이는 메틸렌블루 광산화에 의한 BPA농도 감소에 일중항산소가 관여함을 의미한다.

## 문 헌

- Ballesteros-Gómez A, Rubio S, Pérez-Bendito D. Analytical methods for the determination of bisphenol A in food. *J. Chromatogr. A* 1216: 449-469 (2009)
- Vandenberg LN, Hauser R, Marcus M, Olea N, Welshons WV. Human exposure to bisphenol A (BPA). *Reprod. Toxicol.* 24: 139-177 (2007)
- Bergeron RM, Thompson TB, Leonard LS, Pluta L, Gaido KW. Estrogenicity of bisphenol A in a human endometrial carcinoma cell line. *Mol. Cell. Endocrinol.* 150: 179-187(1999)
- Kaneko M, Okada R, Yamamoto K, Nakamura M, Mosconi G, Polzonetti-Magni AM, Kikuyama S. Bisphenol A acts differently from and independently of thyroid hormone in suppressing thyrotropin release from the bullfrog pituitary. *Gen. Comp. Endocr.* 155: 574-580 (2008)
- Keri RA, Ho SM, Hunt PA, Knudsen KE, Soto AM, Prins GS. An evaluation of evidence for the carcinogenic activity of bisphenol A. *Reprod. Toxicol.* 24: 240-252 (2007)
- Lin Y, Shi Y, Jiang M, Jin Y, Peng Y, Lu B, Dai K. Removal of phenolic estrogen pollutants from different sources of water using molecularly imprinted polymeric microspheres. *Environ. Pollut.* 153: 483-491 (2008)
- Imai S, Shiraishi A, Gamo K, Watanabe I, Okuhata H, Miyasaka H, Ikeda K, Bamba T, Hirata K. Removal of phenolic endocrine disruptors by *Portulaca oleracea*. *J. Biosci. Bioeng.* 103: 420-426 (2007)
- Ioan I, Wilson S, Lundanes E, Neculai A. Comparison of Fenton and sono-Fenton bisphenol A degradation. *J. Hazard. Mater.* 142: 559-563 (2007)
- Zhan M, Yang X, Xian Q, Kong L. Photosensitized degradation of bisphenol A involving reactive oxygen species in the presence of humic substances. *Chemosphere* 63: 378-386 (2006)
- Xie YB, Li XZ. Degradation of bisphenol A in aqueous solution by  $\text{H}_2\text{O}_2$ -assisted photoelectrocatalytic oxidation. *J. Hazard. Mater.* 138: 526-533 (2006)
- Katsumata H, Kawabe S, Kaneco S, Suzuki T, Ohta K. Degradation of bisphenol A in water by the photo-Fenton reaction. *J. Photoch. Photobio. A* 162: 297-305 (2004)
- Ha DO, Jeong MK, Park CU, Park MH, Chang PS, Lee JH. Effect of riboflavin photosensitization on the degradation of bisphenol A (BPA) in model and real-food systems. *J. Food Sci.* 74: 380-384 (2009)
- Foote CS, Denny RW. Chemistry of singlet oxygen quenching by  $\beta$ -carotene. *J. Am. Chem. Soc.* 90: 6232-6238 (1968)
- Boff JM, Min DB. Chemistry and reaction of singlet oxygen in foods. *Compr. Rev. Food Sci. F.* 1: 58-72. (2002)
- King JM, Min DB. Riboflavin photosensitized singlet oxygen oxidation of vitamin D. *J. Food Sci.* 63: 31-34 (1998)
- Skibsted LH. Light-induced changes in dairy products. *Bull. Int. Dairy Fed.* 346: 4-9 (2000)
- Díaz M, Luiz M, Alegretti P, Furlong J, Amat-Guerri F, Massad W, Criado S, Garcí NA. Visible-light-mediated photodegradation of 17 $\beta$ -estradiol: Kinetics, mechanism and photoproducts. *J. Photoch. Photobio. A* 202: 221-227 (2009)
- Fischer BB, Krieger-Liszskay A, Eggen RIL. Oxidative stress induced by the photosensitizers neutral red (type I) or rose bengal (type II) in the light causes different molecular responses in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Sci.* 168: 747-759 (2005)
- Kim JI, Lee JH, Choi DS, Won BM, Jung MY, Park JY. Kinetic study of the quenching reaction of singlet oxygen by common synthetic antioxidants (*tert*-butylhydroxyanisole, *tert*-di-butylhydroxytoluene, and *tert*-butylhydroquinone) as compared with  $\alpha$ -tocopherol. *J. Food Sci.* 74: 362-369 (2009)
- Lee JM, Chang PS, Lee JH. Effects of photosensitization and autoxidation on the changes of volatile compounds and headspace oxygen in elaidic *trans* fatty acid and oleic *cis* fatty acid. *Food Chem.* 119: 88-94 (2010)
- Oh YS, Jang ES, Bock JY, Yoon SH, Jung MY. Singlet oxygen quenching activities of various fruit and vegetable juices and protective effects of apple and pear juices against hemolysis and protein oxidation induced by methylene blue photosensitization. *J. Food Sci.* 71: 260-268 (2006)
- Chang HS, Kim JE, Chung DJ, Lee JS, Choi CB, Kim HY. The antibacterial effect of photo-catalytic titanium dioxide on canine skin. *Korean J. Vet. Res.* 46: 279-284 (2006)
- Kim HY, Yang WH. Development of wastewater treatment system by energy-saving photocatalyst using combination of solar light, UV lamp and  $\text{TiO}_2$ . *Kor. J. Env. Health* 29: 51-61 (2003)
- Barbieri Y, Massad WA, Díaz DJ, Sanz J, Amat-Guerri F, García NA. Photodegradation of bisphenol A and related compounds under natural-like conditions in the presence of riboflavin: Kinetics, mechanism, and photoproducts. *Chemosphere* 73: 564-571 (2008)
- Lee JH, Min DB. Changes of headspace volatiles in milk with riboflavin photosensitization. *J. Food Sci.* 74: C563-568 (2009)
- Yang SO, Lee SW, Chung J, Lee JH. Stability of isoflavone daidzein and genistein in riboflavin, chlorophyll *b*, or methylene blue photosensitization. *J. Food Sci.* 73: 100-105 (2008)
- Lee SW, Chang PS, Lee JH. Effects of riboflavin photosensitization on the changes of isoflavones in soymilk. *J. Food Sci.* 73: 551-555 (2008)
- Yang SO, Lee JM, Lee JC, Lee JH. Effects of riboflavin-photosensitization on the formation of volatiles in linoleic acid model systems with sodium azide or  $\text{D}_2\text{O}$ . *Food Chem.* 105: 1375-1381 (2007)
- DeRosa MC, Crutchley RJ. Photosensitized singlet oxygen and its applications. *Coordin. Chem. Rev.* 233-234: 351-371 (2002)