

## Blue LED (Light emitting diode) 조사에 의한 배추김치와 백김치 발효액의 품질 특성 및 분리 균주의 생육 변화

오영지<sup>1</sup> · 홍정일<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 식품바이오융합연구소, <sup>2</sup>서울여자대학교 자연과학대학 식품응용시스템학부

### Changes in the quality characteristics of kimchi broths and growth of the isolated strains due to blue light emitting diode irradiation

Yeong Ji Oh<sup>1</sup> and Jungil Hong<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Food and Animal Biotechnology, Research Institute for Agriculture and Life Sciences,  
Center for Food and Bioconvergence, Seoul National University

<sup>2</sup>Department of Food Science and Technology, Seoul Women's University

**Abstract** Kimchi is a widely consumed traditional Korean food, and its probiotic properties have received great attention. In this study, changes in the quality characteristics of fermentation broths obtained from two types of Chinese cabbage kimchi (red with red pepper and white without red pepper) were assessed after the administration of blue light emitting diode (BLED) irradiation at 4°C; characteristics assessed included acidity, chromaticity, antioxidant activity, and growth modulation of isolated microorganisms. The pH of the white kimchi (WK) broth decreased with time; the decrease was delayed significantly under BLED irradiation ( $p < 0.05$ ). BLED irradiation decreased the L (lightness) and b (yellowness) values and increased a (redness) in WK, whereas the a and b values of the red kimchi (RK) broth increased with BLED irradiation. Growth stimulation of lactic acid bacteria by BLED irradiation was observed in both WK and RK. The numbers of yeast and mold were also increased in RK ( $p < 0.05$ ), but not in WK. There was no change observed in the scavenging activities against ABTS (2,2'-azido-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonic acid) radicals in both kimchi broths after BLED treatment. The results of this study indicated that BLED irradiation could modulate the fermentation process and the quality characteristics of kimchi during storage.

**Keywords:** light emitting diode, blue LED, kimchi, lactic acid bacteria, probiotic food

## 서 론

김치의 글로벌화가 급속히 진행되고 있는 가운데, 일본의 2018년 김치 시장 규모가 약 64,064만 달러로 절임 식품 중 20%를 점하였고, 미국의 온라인 김치 시장은 2016년 기준으로 약 3,730억 달러로 전년 대비 10% 증가했다(Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation, 2019). 국내에서도 식생활의 변화, 여성의 사회진출, 1인 가구의 증가로 가정에서 직접 김치를 담그는 비율이 점차 감소되고, 소포장의 편의성을 향상시킨 시판 김치를 구입하는 경향이 크게 증가하고 있다(Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation, 2019).

소분화, 소포장 되는 다양한 김치 제품의 수요에 발맞춰 제조 공정에서부터 소비자 공급까지 원료의 안정적인 공급과 위생과 저장 기술에 대한 중요성은 한층 더 부각되고 있다. '소규모업체

를 위한 배추김치의 해썬관리기준'(Korea Agency of HACCP Accreditation, 2010)에 의하면 배추의 세척 공정과 숙제료로 사용하는 기타농산물에 대한 세척 공정, 금속검출공정이 중요관리점(CCP; critical control point)으로 제시되고 있다. 김치의 제조과정 중 세척, 절임, 부재료(양념)와의 혼합을 통해 일부 미생물과 유해물질이 제어되기도 하지만, 원/부재료에 잔존하는 미생물 군집과 다양한 발효 조건에 의해 전제적인 맛과 기호성뿐만 아니라 위생과 외관까지 좌우될 수 있다. 특히, 김치의 발효 과정에서 그람 양성균인 유산균이 숙성과정에서 관여하며, 그람 음성균과 효모균 군집이 주로 김치의 연화 과정과 산패에 관여하는 것으로 보고되어(Jung 등, 2014; Kim과 Chun, 2005), 이들 균주의 발효 과정 중의 생육 조절은 김치의 품질변화에 지대한 영향을 미치게 된다. 김치는 제조 공정에서 따로 살균 처리를 하지 않고 자연 발효를 통해 제조되므로, 잡균에 의한 이상 발효를 제어하기 위해 원재료의 선별과 세척, 보관에 각별한 관리가 요구되며 저장성 향상을 위한 다각도의 연구가 필요한 상황이다.

김치의 품질 제고를 위한 연구는 크게 두 가지 측면에서 연구되어왔다. 하나는 제조 과정 중의 위생성 향상 측면으로, 김치 내 천연 추출물 또는 보존제 첨가(Chang과 Chang, 2011; Kang 등, 2019; Kim 등, 2008), 미생물 제어를 위한 물리적 처리(Choi 등, 2019; Kim 등, 2006; Shin과 Shin, 2006; Yu 등, 2011), 포장재를 이용한 미생물 제어(Jaisan 등, 2018; Jeong과 Yoo, 2016; Park 등,

\*Corresponding author: Jungil Hong, Division of Applied Food System, College of Natural Science, Seoul Women's University, Seoul 01797, Korea

Tel: +82-2-970-5639

Fax: +82-2-970-5977

E-mail: hjil@swu.ac.kr

Received August 19, 2020; revised September 16, 2020;

accepted September 28, 2020

2011) 등의 연구가 진행되었다. 다른 한편으로는 발효과정에서 스타터 미생물을 이용한 발효 과정 조절과 저장성 향상에 대한 연구이다. 스타터 미생물로 유산균(Chang 등, 2011; Lee 등, 2015; Moon 등, 2018), 효모(Kandasamy 등, 2018; Kim 등, 1997; Kim 등, 1999)등을 이용한 연구가 존재한다. 현 연구에서 사용된 Blue LED (BLED)는 주로 병원성 미생물 저해를 위한 광역학 치료법(Ogonowska 등, 2019; Sabino 등, 2019)으로 연구되어왔다. 미생물 세포 내 외부에 존재하는 감광성물질들(porphyrin, polyphenol 등)은 Blue light에 의한 광감작활성을 갖게 되어 활성산소들을 생성시킴으로써 미생물 저해의 직접적인 원인을 제공할 수 있다(Bhavaya와 Hebbar, 2019; Dai 등, 2012). 또한, 식품분야에서도 BLED의 식품 내 위해 미생물 저해 연구가 이뤄진 바 있으나(Gong 등, 2015; Liu 등, 2016; Penha 등, 2017; Srimagal 등, 2016; Xu 등, 2014), 발효식품의 가공과정에서 LED 광원에 의한 발효미생물들의 생육 조절 관련 연구는 거의 없다.

이에, 김치의 위생성 향상 및 발효과정 조절 등의 두 가지 측면을 모두 아우를 수 있는 신기술 및 처리방법의 개발이 필요할 것으로 보이며, LED 중 특히 BLED 처리가 각 측면에 모두 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 BLED 처리에 의한 김치발효와 발효균주에 미치는 영향을 파악하기 위해, 냉장온도(4°C)하에 BLED 광원을 김치 국물에 조사하여 미생물의 생육 특성의 변화와 색도 및 기능성 성분의 변화를 비교 분석하였고, 분리 동정된 우점 유산균과 표준 균주에 대해 BLED조사에 의한 생육 특성을 확인하였다.

## 재료 및 방법

### 시료 준비

실험의 재료는 시중 마트에서 4°C 냉장 판매되는 제조일로부터 2일이 경과된 배추김치(red Chinese cabbage kimchi with red pepper, RK)와 백김치(white Chinese cabbage kimchi without red pepper, WK)를 구입해 사용하였다. 외부 포장재는 개봉하기 전 70% 알코올을 이용하여 잘 세척하였다. 개봉 후 즉시 무균 작업대(HB-402; Hanbaek Co., Ltd., Bucheon, Korea)안에서 100 g을 칭량 후, 멸균 백(19×30 cm, Nasco WHIRL-PAK®, Fort Atkinson, WI, USA)에 넣고 블랜더(Digital LED Embo stomacher, BNF Korea Co., Ltd, Gimpo, Korea)를 이용하여 level 10에서 3분 동안 혼합하였다. 원심 분리 후(HWLAB® Clinical centrifuge, Zhe-Jiang HuaWei Scientific Instrument Co., LTD, Zhe Jiang, China) (5000×g) 가라앉은 고형물을 제외하고 혼합액의 액상 부분만 시료로 취했다. 김치의 상태, 모양 및 실험 조건에 따라 편향된 결과와 예상되어, 발효 환경과 발효균 균집을 유지하며 LED에 노출될 수 있는 환경을 조성하기 위해 김치 원물보다 김치의 균질액을 사용하였다.

### 사용 균주

본 연구에 사용된 공시 균주는 *Leuconostoc mesenteroides* (ATCC 8293<sup>T</sup>)와 *Lactobacillus kimchicus* (KCTC 12976<sup>T</sup>)를 분양받아 사용하였다. 실험 전, 유산균의 선택 배지로서 MRS (de Man, Rogosa, and Sharpe) agar (Difco Laboratories, Detroit, MI, USA)와 MRS broth (Difco)를 이용하였고, 2-3회 계대 후에 사용하였다.

### LED 조사 시스템

BLED 처리를 위해 460 nm의 LED 광원(5V, 1.2 A, 5230

LED chip equipped, Leds/m=20 e.a./0.2 m) 시스템(Shenzhen Fuxiang Optoelectronics Technology Co., Ltd., Guangdong, China)을 이용하였다. 조사거리는 40 cm로, 조사 광도는 375 J/cm<sup>2</sup>로 일정하게 유지하였다. 방사 광도(Luminous intensity)의 측정은 Multi-LED Light meter (TM-209M, Tenmars Electronics Co., Ltd., Taipei, Taiwan)를 이용하였다.

### BLED 조사

김치 시료의 주입 용기로 petri dish (35 mm 직경)를 사용하였고, 유산균 시료의 경우 4배 희석한 MRS broth에 배양 접종 후, 96 well plate에 분주하여 생육 특성을 확인하였다. 모든 시료는 뚜껑을 덮어 보관하였으며, 랩을 이용하여 옆면을 두른 후 BLED를 조사하였다. 김치 시료의 경우 4°C 냉장 조건에서 72시간 동안 조사하면서 각 시간대별로 꺼내어 항목별(색도, pH, 산화방지 활성)로 측정하였다. 유산균 시료의 경우 35°C에서 72시간 동안 배양하며(VS-1203P3N, Vision Scientific Co., Daejeon, Korea) 생육 특성을 확인하였다. 모든 시료에 대해 동일한 조건으로 암소대조구를 두었다.

### 시료 내 생균수

김치 시료액에 존재하는 살아있는 유산균 수와 곰팡이 및 효모 수를 확인하기 위해 김치 국물 원액을 멸균된 0.85% 생리식염수로 단계별 희석하여 도말 평판 배양법으로 생균수를 확인하였다. 유산균의 배양과 생균수확인을 위한 배지로 MRS (Difco)를 사용하였고, 곰팡이 및 효모는 potato dextrose agar (PDA, Difco)가 사용되었다. 유산균의 생육 확인을 위한 배지는 37°C에서 24-48시간 동안, 곰팡이 및 효모의 생육 확인을 위한 배지는 25°C에서 5일 동안 배양하였다.

### 색도와 pH 측정

저장 시간대 별로 3 mL의 김치액을 채취하여 petri dish (35 mm 직경)에 주입한 후 색차계(Minolta Chroma Meter CR-400, Minolta Camera Co., Osaka, Japan)를 이용하여 Hunter L\* (lightness, 명도), a\* (redness, 적색도), b\* (yellowness, 황색도) 값을 측정하였다. 광원은 Illuminant D65 10°를 사용하였다. pH 측정은 pH meter (FiveEasy Plus™, Mettler-Toledo, Schwerzenbach, Switzerland)로 측정하였다. 모든 측정은 처리 그룹 당 세 부위에서 무작위적으로 시료를 취하여 각각 3회 이상 반복하였다.

### 산화방지 활성

산화방지 활성 측정을 위해 블랜더(Digital LED Embo stomacher)로 균질화 시키고 10,000×g에서 5분간 원심 분리(HWLAB® Clinical centrifuge)한 상등액을 시료액으로 사용하였다(Spectra Max M3, Molecular device, Sunnyvale, CA, USA). ABTS 라디칼 소거활성은 Re 등(1999)의 방법을 일부 변형하여 분석하였다. 김치 시료액 50 µL를 150 µL ABTS 용액(7.4 mM ABTS and 2.6 mM potassium persulfate)과 혼합하여 상온의 암소에서 30분간 반응시킨 후, 734 nm에서 흡광도를 측정하였다(Spectra Max M3).

### 우점 유산균의 분리 및 동정

배추김치와 백김치에서 우점 유산균을 분리하기 위해 김치시료액을 단계별 희석하여 Bromophenol blue (BPB) MRS에 도말한 후, 35°C 항온배양기에서 24-48시간 배양하면서 유산균 콜로니를 확인하였다. 우점 유산균의 선정은 단계별 희석 후 도말한 BPB MRS배지에서 산을 생성하면서, 콜로니의 수가 가장 많은

것을 선택하여 분리하였다. 유산균은 순수 분리하여 16S rRNA gene 염기서열 분석을 수행하였다(MacroGen Bioinformatics Center, MacroGen, Seoul, Korea). 유전자 증폭은 universal primer인 1492R과 27F를 사용하였다. 분석 결과는 National Center for Biotechnology Institute (NCBI)의 Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) analysis (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>)를 통해 Genbank database와 비교 분석하였다. 생화학적 특성은 API 50CH kit (BioMerieux Co., Craponne, France)를 이용한 당 이용성 검정으로 확인하였다.

### BLED조사에 의한 유산균의 생육 특성

김치시료에서 분리 동정된 2종의 유산균 균주(*Weissella cibaria* WK1와 *W. cibaria* RK1)와 2종의 표준 균주(*Leu. mesenteroides*, *L. kimchicus*)에 대하여 BLED 조사 처리 전후로 생육도를 확인하였다. 4배 희석한 MRS배지에 균액(1%)을 접종하였고, 72시간 동안 BLED를 조사하면서 각 시간대 별로 96 well plate를 이용하여 600 nm에서 흡광도를 측정하였다.

### 실험 설계 및 통계분석

모든 실험은 3회 이상 반복하여 결과값을 측정하였으며, 각 표본 평균 간의 차이를 검증하기 위해 분산분석법(ANOVA, Analysis of variance)을 적용하여 PASW Statistics 24 software (SPSS Inc, Chicago, IL, USA)를 사용하였다. 유의차가 있는 경우, 사후검정 방법으로서 Tukey의 HSD (Honestly Significant Difference) ( $\alpha=0.05$ )를 적용하였다.

## 결과 및 고찰

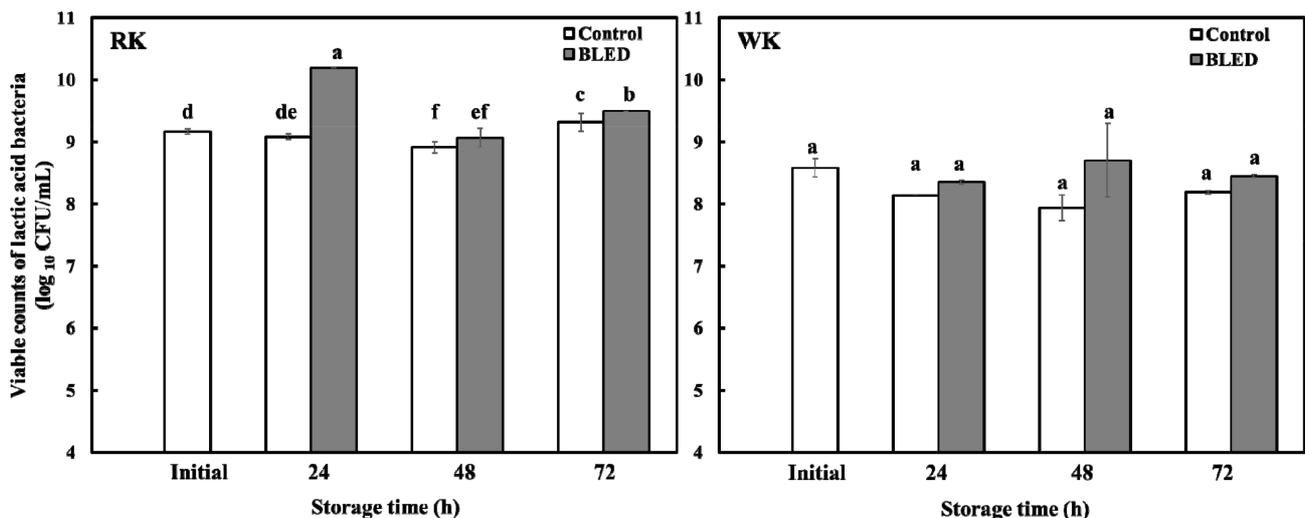
### BLED조사에 의한 김치 액 내 유산균의 생육 변화

배추김치(RK)와 백김치(WK)는 냉장 온도에 저장 중인 C사 상품을 구입하였고(제조 후 2일), 바로 유산균 수를 측정하였다. 초기 유산균 수는 고춧가루가 들어가지 않고 물 함량이 많은 WK보다 RK에서 약 1 log 더 높았다(Fig. 1). BLED를 조사하였을 때 RK의 유산균수는 24시간에 유의적인 증가를 보였으나( $p<0.05$ ),

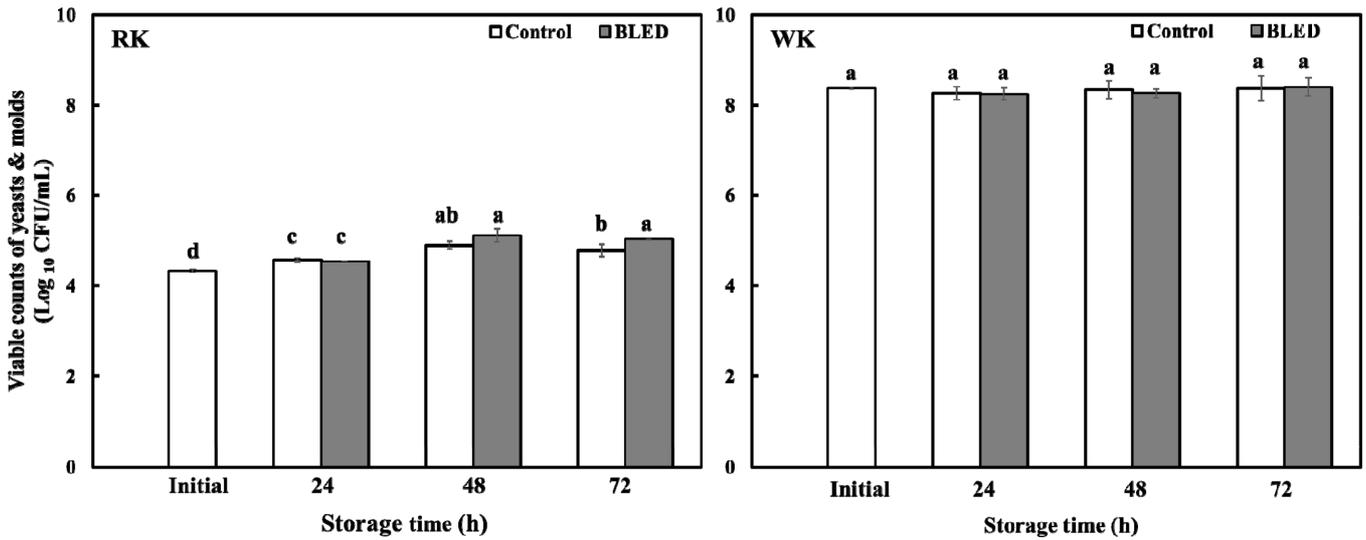
48시간 이후에는 대조구와 유의적인 차이를 보이지 않았다( $p>0.05$ ). 한편 WK의 경우 BLED조사에 의해 48시간에 다소 유산균 수가 증가하는 경향을 나타내었으나, 전체적으로 대조구와 BLED 처리군 간에 유산균 수의 유의적인 차이는 나타나지 않았다( $p>0.05$ ). 이러한 결과는 BLED 광원 자극에 의해 일부 유산균의 생육 증가가 이루어졌으나, 장시간 발효 시에는 한정된 증식 공간과 영양성분의 결여로 인해 대조구와 유의적인 차이가 사라진 것으로 생각된다. BLED에 의한 유산균 증식 변화의 원인은 다음의 두 가지 방향으로 유추해 볼 수 있다. 우선, BLED 광원과 김치 유산균의 직접적인 상호작용이 있을 수 있고, 다음으로 유산균과 김치발효액에 함유된 BLED에 민감한 감광성 생리활성성분과의 상호작용을 고려할 수 있다.

Swartz 등(2007)에 의하면 조류, 균류 또는 식물의 경우, Flavin-containing domain들이 blue light의 광센서로 작용하며, 원핵생물인 *Brucella melitensis*, *Brucella abortus*, *Erythrobacter litoralis*와 *Pseudomonas syringae* 균주들은 blue light에 광활성화되는 histidine kinase를 함유하고 있다고 밝힌 바 있다. 또한, 비광합성 세균에서 blue light에 대한 음성주광성으로 photoreceptor 기능을 하는 단백질인 Photoactive yellow protein (PYP) (Changenet 등, 2005; Kort 등, 1996)와 photoactive bacteriorhodopsin 등의 기작 연구(Stoeckenius와 Bogomolni, 1982)가 진행된 바 있다. 파장이 400-460 nm 대인 BLED를 식품에 처리한 예로서 주로 과일이나 신선채소에 자주 발생하는 식중독 위해 세균이나 우유나 물에서의 대장균의 저해에 대한 연구가 주를 이룬다(Kim 등, 2017b; Penha 등, 2017; Srimagal 등, 2016). 또한 프로바이오틱 유산균을 이용한 블루베리의 발효에 BLED를 조사한 연구에 따르면(Jeong 등, 2018), 발효 과정에서 다양한 중온성 세균의 잠균 오염 제어에 BLED가 효과적이었다고 보고한 바 있다.

이와 같이 BLED를 식품에 조사함으로써 세균의 저해를 보고한 연구는 많으나, 식품의 발효 시스템 안에서 BLED 조사에 의한 유산균의 생육 연구는 거의 이뤄진 바가 없다. Fig. 1의 결과는 김치발효액을 시료로 한 바, 김치 발효액 자체가 복합유산균의 서식처로서 유산균 전체 군집에 대해 BLED에 의한 직접적인 저해 효과를 보이지 않은 것으로 나타났다. BLED 처리가 김치



**Fig. 1.** Effects of Blue LED irradiation on the growth of lactic acid bacteria in kimchi broth. Broths of red cabbage (RK) and white cabbage (WK) kimchi were stored at 4°C during 72 h with or without BLED irradiation. At each time period, viable numbers of bacteria were analyzed using MRS. Data represent mean±SD. (n=4). Different letters indicate significant difference ( $p<0.05$ ) among different samples based on one-way ANOVA and the Tukey's HSD test.



**Fig. 2.** Effects of Blue LED irradiation on the growth of yeasts and molds in kimchi broth. Broths of RK and WK were stored at 4°C during 72 h with or without BLED irradiation. At each time period, viable numbers of yeast and molds were analyzed using PDA. Data represent mean±SD. (n=4). Different letters indicate significant difference ( $p<0.05$ ) among different samples.

내 유산균수의 감소를 유도하지 않았다는 점에서 김치의 유익균은 보존하면서, 여러 선행 연구결과(Jeong 등, 2018; Kim 등, 2017a; Penha 등, 2017; Srimagal 등, 2016)에 근거할 때 김치 내의 잡균이나 유해 균주의 저해에 관여할 수 있다고 보여 BLED에 의해 김치 발효 시 유리한 균집형성의 가능성을 고려할 수 있으며 이에 대한 추후 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

**BLED 조사에 의한 김치 액 내 효모 및 곰팡이의 생육변화**

BLED 조사에 의한 RK와 WK에서 효모와 곰팡이의 수의 변화를 측정하였다. RK와 WK의 곰팡이 및 효모의 초기 균수는 각각 4.34과 8.35 log로 나타났으며 WK에서 현저하게 높은 수준을 나타내었다. 하지만 두 종류 김치에서 모두 BLED 조사에 의한 곰팡이와 효모 균 수의 차이는 나타나지 않았다(Fig. 2). RK의 경우 대조군과 LED 처리군에서 모두 24시간 이후 곰팡이 및 효모의 생균수가 유의적으로 증가하였는데( $p<0.05$ ), 특히 BLED를 조사한 RK의 유산균수가 48시간 대에 감소하는 결과를 고려할 때 (Fig. 1), 배추김치가 숙성되면서 발효 말기의 우점종인 효모 균집이 더욱 많아지는 정상발효과정의 결과로 사료된다. 보통 배추김치의 경우, 발효 말기에 유산균 균집이 감소하면서 낮은 pH에서도 잘 자라는 *Saccharomyces*, *Candida*, *Pichia*, *Kluyveromyces* 종의 효모들이 우점하게 되고(Chang 등, 2008; Jung 등, 2014), 숙성이 계속되면서 *Pichia kudriavzevii* 등에 의해 김치 표면의 산막 필름이 형성되기도 한다(Moon 등, 2014). 백김치와 유사한 물 함량이 높은 동치미에서는 주로 *Saccharomyces*속의 효모가 우점하고 숙성 말기엔 부패균주로도 작용하는 것으로 보고되어(Jeong 등, 2013), 본 연구결과에서 나타난 RK에서 보다 현저하게 높은 WK에서의 곰팡이와 효모 균 수를 설명할 수 있다.

현 연구에서는 BLED 조사에 의해 김치 내 각기 다른 효모의 생장은 예측할 수 없었으나, RK나 WK에서 모두 전체 효모 균집을 저해하거나 정상적인 발효과정을 방해하는 영향은 나타나지 않았다.

**BLED조사에 의한 김치의 색도와 pH의 변화**

BLED조사에 의한 WK와 RK의 발효액의 색도 및 pH 변화를

분석하였다(Table 1). WK의 명도(Lightness; L)는 RK보다 현저하게 높았으며, 발효 72시간 동안 대조군과 BLED 처리군에서 모두 유의적인 변화를 나타내지 않았다( $p>0.05$ ). RK의 명도(L)는 대조군과 BLED 처리군에서 모두 유의적으로 증가하였으며( $p<0.05$ ), BLED 처리군에서는 24시간부터 대조군에서는 48시간에 유의적인 증가가 관찰되었다( $p<0.05$ ). 하지만 72시간 발효 시 모든 시료에서 명도가 다시 감소하는 현상이 나타났다. WK에서는 적색도(a\*, redness)와 황색도(yellowness, b\*) 모두 BLED 처리군보다 대조군에서 시간에 따른 변화의 폭이 더 크게 나타났다. RK는 대조군과 처리군 모두 48시간과 72시간 a, b값에서 유의적인 증가가 나타났으며( $p<0.05$ ), LED처리에 의해 그 증가 폭이 더 크게 나타났다. 이는 WK와는 달리 RK에 포함된 각종 양념 부재료와 고춧가루 색소 성분 등이 BLED 조사에 의해 영향 받았기 때문으로 사료된다. 한편 WK에서는 BLED 처리군에서 시간에 따른 변화가 대조군보다 더 작았는데 이는 BLED 조사가 급격한 색의 변화를 일정기간 지연시켰음을 보여준다.

72시간 동안의 김치 발효액의 pH 변화를 측정한 결과 RK의 경우 초기 4.17에서 점차 감소하여 48시간에 3.91로 저하되었고, WK의 경우 4.64에서 72시간 4.27까지 지속적으로 감소하였다. RK에 BLED를 처리한 경우 24시간째 급격한 pH 감소가 일어났으나 그 이후에는 대조군 보다 다소 높게 유지되었다. 이는 24 시간째 BLED처리군에서의 유산균 수의 증가와 관련이 있다고 판단된다. WK의 경우, LED처리하지 않은 것과 처리한 것 모두 발효가 진행됨에 따라 유의적으로 pH가 감소하였으나( $p<0.05$ ), LED 처리군에서는 대조군에 비해 48시간 까지 pH의 감소가 유의적으로 지연되는 것으로 나타났다( $p<0.05$ ).

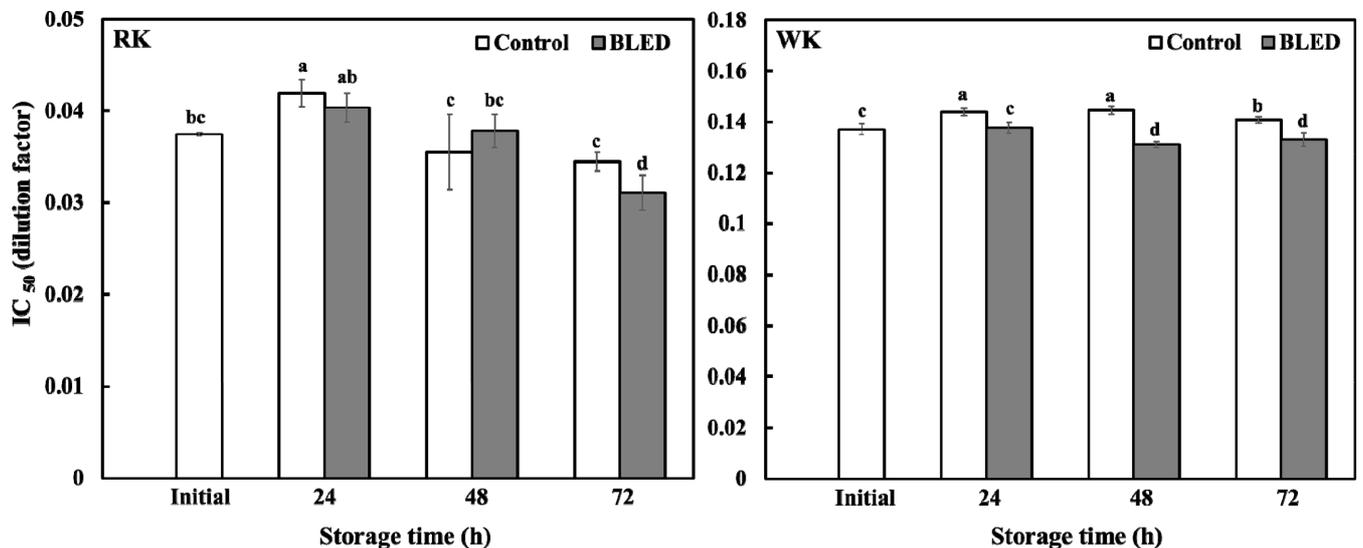
**BLED 조사에 의한 산화방지활성의 변화**

RK와 WK 발효액에 대한 산화방지효과를 ABTS라디칼 소거활성으로 평가하였다. RK는 WK보다 현저히 높은 활성을 나타내면서 원액부터 1/8 희석액(dilution factor 0.125)까지도 99% 이상의 라디칼 소거활성을 보였으며, BLED 처리군에서 발효의 진행에 따라 라디칼 소거 활성이 약간 증가되어 72시간째 최대 활성을 나타내었다(Fig. 3). WK의 경우도 24-72시간 저장 기간 동

**Table 1. Effects of BLED irradiation on the color properties of kimchi broths during 72 h-storage at 4°C**

RK			Storage time (h)			
			0	24	48	72
Control	Color	L*	28.50±0.09 <sup>a1)</sup>	28.45±0.19 <sup>a</sup>	29.01±0.17 <sup>b</sup>	27.50±0.08 <sup>c</sup>
		a*	22.29±0.04 <sup>a</sup>	22.57±0.12 <sup>b</sup>	22.47±0.28 <sup>ab</sup>	20.88±0.1 <sup>c</sup>
		b*	21.40±0.12 <sup>a</sup>	21.67±0.24 <sup>a</sup>	20.59±0.45 <sup>b</sup>	19.92±0.08 <sup>c</sup>
	pH		4.17±0.01 <sup>a</sup>	4.14±0.01 <sup>a</sup>	3.91±0.01 <sup>b</sup>	4.04±0.12 <sup>ab</sup>
BLED -treated	Color	L*	28.50±0.09 <sup>a</sup>	28.87±0.24 <sup>b</sup>	28.92±0.07 <sup>b</sup>	27.54±0.05 <sup>c</sup>
		a*	22.29±0.04 <sup>a</sup>	23.03±0.15 <sup>d</sup>	23.41±0.13 <sup>c</sup>	21.36±0.18 <sup>f</sup>
		b*	21.40±0.12 <sup>a</sup>	22.47±0.42 <sup>d</sup>	22.67±0.12 <sup>d</sup>	20.30±0.03 <sup>b</sup>
	pH		4.17±0.01 <sup>a</sup>	3.98±0.04 <sup>ab</sup>	4.01±0.16 <sup>b</sup>	4.05±0.10 <sup>ab</sup>
WK			Storage time (h)			
			0	24	48	72
Control	Color	L*	53.72±0.33 <sup>a</sup>	52.79±1.52 <sup>b</sup>	53.16±0.63 <sup>a</sup>	53.77±0.84 <sup>a</sup>
		a*	0.9±0.04 <sup>a</sup>	0.41±0.14 <sup>c</sup>	0.57±0.03 <sup>b</sup>	0.35±0.06 <sup>c</sup>
		b*	-0.79±0.12 <sup>a</sup>	1.32±0.49 <sup>bc</sup>	1.21±0.18 <sup>b</sup>	1.79±0.12 <sup>c</sup>
	pH		4.64±0.04 <sup>ab</sup>	4.62±0.17 <sup>ab</sup>	4.38±0.09 <sup>cd</sup>	4.27±0.08 <sup>d</sup>
BLED -treated	Color	L*	53.72±0.33 <sup>a</sup>	52.35±0.88 <sup>a</sup>	52.96±1.61 <sup>a</sup>	52.22±0.44 <sup>a</sup>
		a*	0.9±0.04 <sup>a</sup>	0.61±0.13 <sup>c</sup>	0.86±0.05 <sup>ab</sup>	0.72±0.07 <sup>bc</sup>
		b*	-0.79±0.12 <sup>a</sup>	0.68±0.13 <sup>b</sup>	0.46±0.1 <sup>b</sup>	0.86±0.49 <sup>b</sup>
	pH		4.64±0.04 <sup>ab</sup>	4.66±0.04 <sup>a</sup>	4.50±0.04 <sup>bc</sup>	4.27±0.05 <sup>d</sup>

<sup>1)</sup>Each value represents the mean±S.D. (n=4). Different letters in a same line indicate a significant difference ( $p<0.05$ ) based on one-way ANOVA and the Tukey's HSD test.



**Fig. 3. Effects of BLED irradiation on ABTS radical scavenging activities of kimchi broth.** Broths of RK and WK were stored at 4°C during 72 h with or without BLED irradiation. ABTS radical scavenging activities after 72 h storage of each broth with different dilution folds were analyzed. Changes of  $IC_{50}$  (1=original broth conc.) against ABTS radical scavenging activities of RK and WK were also calculated at each storage time. Data represent mean±SD. (n=4). Different letters indicate significant difference ( $p<0.05$ ) among different samples.

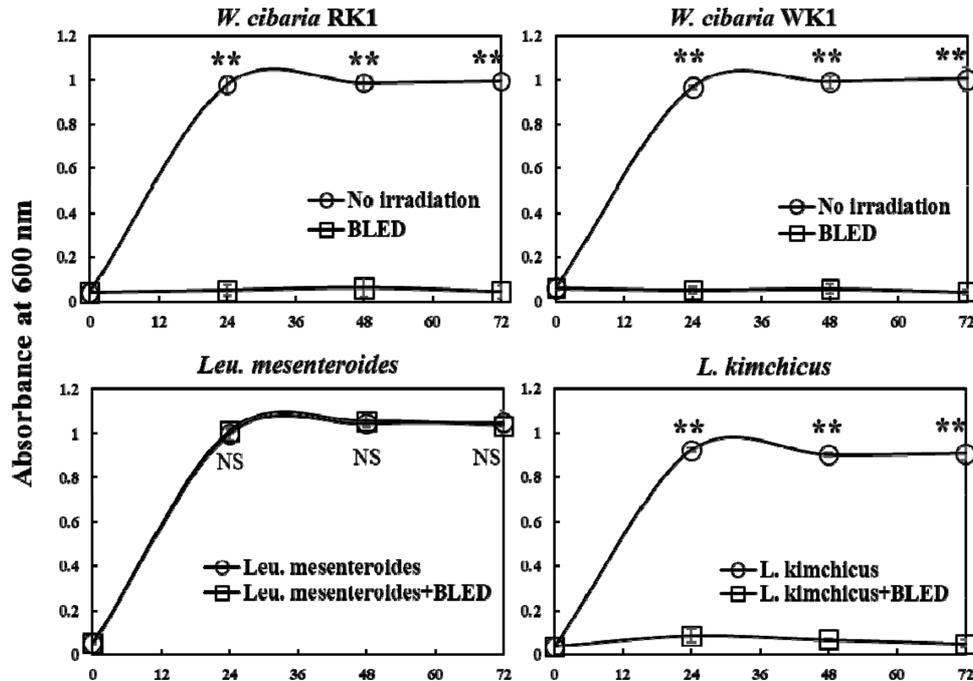
안 ABTS 라디칼 소거능에 대한  $IC_{50}$  값이 BLED 조사시료에서 대조구보다 유의적으로 낮은 수치를 나타내어 ( $p<0.05$ ) (Fig. 3), BLED 조사로 인해 김치의 산화방지 활성이 더 높아짐을 알 수 있었다.

김치발효액은 배추, 마늘, 양파, 고춧가루, 생강 등 다양한 원 재료에서 유래된 폴리페놀 성분들을 비롯한 다양한 phytochemical

이 존재한다. 이러한 성분들은 강한 산화방지 활성은 물론, 감광 활성 등 빛과의 반응성을 보이는 경우가 많아, 이들과 BLED와의 상호작용을 통해 라디칼 소거활성 등 각종 생리활성의 변화가 일어날 것으로 사료된다. 현 연구와 유사하게 blue light에 의한 산화방지 활성의 증가를 보인 연구가 다수 존재한다. 현재까지 다양한 채소(Lee 등, 2010; Liu 등, 2016; Manivannan 등,

**Table 2. Genotypic identification of representative strains isolated from sample by 16S rRNA sequencing**

Sample	Strain	Ascession	Match/Total	Pct. (%)
Red kimchi	<i>Weissella cibaria</i> RK1	LC096236.1	1506/1508	99
	<i>Lactobacillus sakei</i> RK2	LC064899.1	1504/1505	99
White kimchi	<i>Weissella cibaria</i> WK1	LC096236.1	1506/1508	99
	<i>Leuconostoc citreum</i> WK2	LC096222.1	1481/1482	99



**Fig. 4. Effects of BLED irradiation on the growth of isolates and type strains in kimchi.** Isolated strains and type strain LABs in kimchi were cultured individually in MRS at 4°C during 72 h. Each time period, growth of each bacterium was analyzed at 600 nm. \*\*, significantly different from each treatment ( $p < 0.01$ ); NS, not significant.

2015)나 과일류(Gong 등, 2015; Ma 등, 2012; Xu 등, 2014)에 BLED를 조사하여 상품의 산화방지활성을 증가시켜 기능성을 향상시키는 동시에 잡균의 오염을 제거하는 역할로서 BLED를 활용한 연구가 진행되었다.

**BLED 조사에 의한 김치 우점 유산균의 생육변화**

김치발효에 관여하는 개별 균주에 대한 BLED 조사 효과를 분석하기 위해, 실험에 사용된 배추김치와 백김치에서 우점 균주를 선택하여 분리 동정하고 해당 균주에 대한 16S rRNA 분석을 실시하였다(Table 2). 또한, 본 실험에서 분리한 우점 유산균 2종과 표준 균주 2종에 대하여 72시간 동안 배양하며 BLED 조사에 의한 생육도를 관찰하였다.

이들 분리 유산균과 표준균주 각각에 BLED를 조사한 결과 배양 기간 내 거의 대부분 생육이 억제되는 것으로 나타났다(Fig. 4). RK와 WK에서 우점 유산균으로 분리된 *W. cibaria* RK1와 *W. cibaria* WK1는 동일 종으로 분석되었으며, 모두 BLED에 의해 생육이 현저하게 억제되어 BLED에 대해 서로 다른 환경에서 적응된 생육특성의 변화는 나타나지 않았다. 흥미롭게도 김치 주요 발효균인 *Leu. mesenteroides*의 생육은 BLED 조사에 전혀 영향 받지 않았으며, 72시간 동안 비조사군과 차이없이 지속적으로 생육을 유지하였다. *Weissella* 속은 원래 *Leuconostocaceae*에 속해 있는 균주로 처음 발견되어 *Leuconostoc* 유사 균주로 알려진 바

있다(Fusco 등, 2015). 이러한 가까운 근연관계에도 불구하고 *W. cibaria*와 *Leu. mesenteroides*은 BLED 조사에 대해 대단히 상이한 반응을 나타내었다. 또 다른 김치발효균인 *L. kimchicus*의 경우에도 *W. cibaria*와 마찬가지로 BLED에 의해 저해됨을 볼 수 있었다. 현 실험은 24시간 간격으로 측정되었으며, 24시간 동안의 BLED 조사에 의해 육안 관찰이 가능한 콜로니 출현이 없었으나, 6시간의 BLED 조사에는 접종 농도 수준을 유지하는 생균수가 측정되어(data not shown) 그 후에 지속적으로 생장이 저해되었을 것으로 사료된다.

지금까지 진행된 식품에 대한 BLED 조사연구는 대부분 유해 세균에 대한 생육 저해와 관련되어 있다(Ghate 등, 2013; Guffey 등, 2006; Maclean 등, 2009). Kim 등(2017b)은 fresh-cut 망고 표면에 접종된 *Escherichia coli* O157: H7, *Listeria monocytogenes*, 그리고 *Salmonella*에 대해 BLED (405±5 nm)를 조사했을 때, 그람음성인 *Salmonella*의 경우 1.2 log, *Escherichia coli* O157: H7에 대해 완전히 저해한 반면, 그람양성인 *Listeria*는 생육을 지연시키는 효과만 나타냈다고 보고하였다. 이와 같이 Liang 등(2013)에 의하면, 그람음성균주인 *E. coli*에 대해 미량영양성분으로 작용하는 리보플라빈과 함께 BLED를 조사했을 때, 리보플라빈이 DNA에 삽입되어 감광 활성을 일으키며, 결국 라디칼 반응에 의해 DNA손상이 일어남을 보고한 바 있다.

본 연구에서는 BLED 조사에 의해 김치 발효 과정 중의 변화

를 평가하였고, 김치발효액 내 단일 균주에 대한 BLED 효과를 추가적으로 보기 위해 우점 균주를 선택, 동정하였고 이에 대한 효과를 확인하였다. BLED가 조사된 김치 발효액에서 나타난 결과와는 달리, BLED는 분리된 단일 균주인 *W. cibaria*의 성장을 완전히 저해시켰으나, 또 다른 김치 주발효균주인 *Leu. mesenteroides*의 성장에는 거의 영향을 미치지 않았다. 이는 단일균주에 대한 평가를 위해 4배 희석한 MRS broth를 배양에 사용한 바, 김치 발효액 상의 성분과 LED와의 상호작용이 배제된 상태에서 나타난 차이라고 추측된다. 향후 김치 발효액의 성분들과 BLED의 상호작용, 생육 시기에 따른 BLED 조사 효과와 조사 광도에 따른 생육 조절 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 본 연구는 서로 다른 유산균 속에 대한 BLED의 상이한 효과를 확인하였으며, 김치 발효과정 중 변화되는 다양한 유산균 군집에 대해 생육도 조절에 대한 가능성을 확인하였다. 향후, 저렴한 가격의 경제적 효율성을 가진 LED광원에 의해 잡균 억제 효과 이외에도 품질 향상과 발효미생물의 생육도 조절을 통해 식품 산업뿐만 아니라 의약학, 화장품 산업 전반에서 가공, 생산 라인에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

## 요 약

본 연구에서는 배추김치(RK)와 백김치(WK) 시료를 이용하여 72시간의 저장 기간 동안, Blue-LED 조사 효과를 확인하였다. BLED 처리에 의해 RK에서의 유산균 증식이 유의적으로 증가하였으나( $p < 0.05$ ), 곱팡이 및 효모의 생육도에서는 대조구와 차이를 나타내지 않았다. 색도의 경우, BLED 처리 시 대부분 명도가 조금 높아지는 경향을 보였으며, BLED 조사에 의해 색의 변화가 일정기간 지연되는 효과를 확인할 수 있었다. BLED 처리에 의해 WK는 저장기간 동안 pH 감소가 유의적으로 지연되는 것을 관찰할 수 있었다( $p < 0.05$ ). ABTS법에 의해 측정된 산화방지 활성에서는 두 종류의 김치시료액 모두 BLED처리구에서 유의적으로 높은 활성을 보였다( $p < 0.05$ ). 두 김치에서 우점종으로 분리된 *W. cibaria* RK1와 *W. cibaria* WK1 유산균은 BLED에 민감하게 작용하여 모두 생육이 저해되었고, 표준 균주인 *Leu. mesenteroides*는 BLED 조사에 의한 생육도의 변화가 나타나지 않았다. 현재까지 BLED 조사를 이용한 유해 균주 억제 연구가 주로 이루어진 반면, 현 연구에서는 BLED조사에 의한 김치 발효상의 특성 변화와 발효미생물들의 생육도를 확인함으로써 발효 식품의 숙성 시기에 따라 적절한 LED 광원을 이용한 발효 미생물들의 생육 조절과 식품의 기능적 향상 가능성을 제시하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2019년도 교육부와 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2019R111A1A01058950)과 중견연구사업(No. 2019R1A2C1089617)의 결과임.

## References

- Bhavya ML, Hebbar HU. Efficacy of blue LED in microbial inactivation: Effect of photosensitization and process parameters. *Int. J. Food Microbiol.* 290: 296-304 (2019)
- Changenet-Barret P, Espagne A, Plaza P, Hellingwerf KJ, Martin MM. Investigations of the primary events in a bacterial photoreceptor for photomotility: photoactive yellow protein (PYP). *New J. Chem.* 29(4): 527-534 (2005)
- Chang HW, Kim KH, Nam YD, Roh SW, Kim MS, Jeon CO, Oh HM, Bae JW. Analysis of yeast and archaeal population dynamics in kimchi using denaturing gradient gel electrophoresis. *Int. J. Food Microbiol.* 126(1-2): 159-166 (2008)
- Chang JY, Chang HC. Growth inhibition of foodborne pathogens by kimchi prepared with bacteriocin-producing starter culture. *J. Food Sci.* 76(1): M72-M78 (2011)
- Chang JY, Kim IC, Chang HC. Effect of solar salt on the fermentation characteristics of kimchi. *Korean J. Food Preserv.* 18(2): 256-265 (2011)
- Choi EJ, Park HW, Lee JG, Chun HH. Microbial inactivation modeling and salting characteristics of shredded kimchi cabbages (*Brassica pekinensis* L.) treated with radio frequency heating. *Korean J. Food Preserv.* 26(1): 8-16 (2019)
- Dai T, Gupta A, Murray CK, Vrahas MS, Tegos GP, Hamblin MR. Blue light for infectious diseases: Propionibacterium acnes, Helicobacter pylori, and beyond?. *Drug Resist. Update.* 15(4): 223-236 (2012)
- Food Industries Statistical Information. 2015. The market trend of abroad food industries-soft drink market. Available from: <https://www.atfis.or.kr/article/M001050000/view.do?articleId=3325>. Accessed Aug. 06, 2020.
- Fusco V, Quero GM, Cho GS, Kabisch J, Meske D, Neve H, Bockelmann W, Franz CM. The genus *Weissella*: taxonomy, ecology and biotechnological potential. *Front. Microbiol.* 6: 155 (2015)
- Ghate VS, Ng KS, Zhou W, Yang H, Khoo GH, Yoon WB, Yuk HG. Antibacterial effect of light emitting diodes of visible wavelengths on selected foodborne pathogens at different illumination temperatures. *Int. J. Food Microbiol.* 166(3): 399-406 (2013)
- Gong D, Cao S, Sheng T, Shao J, Song C, Wo F, Chen W, Yang, Z. Effect of blue light on ethylene biosynthesis, signalling and fruit ripening in postharvest peaches. *Sci. Hortic.* 197: 657-664 (2015)
- Guffey JS, Wilborn J. *In vitro* bactericidal effects of 405-nm and 470-nm blue light. *Photomed. Laser Surg.* 24(6): 684-688 (2006)
- Jaisan C, An DS, Lee DS. Application of physical gas absorbers in manipulating the CO<sub>2</sub> pressure of kimchi package. *J. Food Sci.* 83(12): 3002-3008 (2018)
- Jeong SH, Jung JY, Lee SH, Jin HM, Jeon CO. Microbial succession and metabolite changes during fermentation of dongchimi, traditional Korean watery kimchi. *Int. J. Food Microbiol.* 164(1): 46-53 (2013)
- Jeong S, Yoo S. Kimchi packaging technology: An overview. *Korean J. Pack. Sci. Technol.* 22(3): 41-47 (2016)
- Jeong SY, Velmurugan P, Lim JM, Oh BT, Jeong DY. Photobiological (LED light)-mediated fermentation of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruit with probiotic bacteria to yield bioactive compounds. *LWT - Food Sci. Technol.* 93: 158-166 (2018)
- Jung JY, Lee SH, Jeon CO. Kimchi microflora: history, current status, and perspectives for industrial kimchi production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 98: 2385-2393 (2014)
- Kandasamy S, Kavitate D, Shetty PH. Lactic acid bacteria and yeasts as starter cultures for fermented foods and their role in commercialization of fermented foods. pp. 25-52. In: *Innovations in Technologies for Fermented Food and Beverage Industries. Food Microbiology and Food Safety.* Panda S, Shetty P (eds). Springer, Cham, Switzerland (2018)
- Kang M, Park J, Yoo S. Effect of clove powder on quality characteristics and shelf life of kimchi paste. *Food Sci. Nutr.* 7: 537-546 (2019)
- Kim HJ, Kang SM, Yang CB. Effects of yeast addition as starter on fermentation of kimchi. *Korean J. Food Sci. Technol.* 29: 790-799 (1997)
- Kim M, Chun J. Bacterial community structure in kimchi, a Korean fermented vegetable food, as revealed by 16S rRNA gene analysis. *Int. J. Food Microbiol.* 103: 91-96 (2005)
- Kim MJ, Bang WS, Yuk HG. 405±5 nm light emitting diode illumination causes photodynamic inactivation of *Salmonella* spp. on fresh-cut papaya without deterioration. *Food Microbiol.* 62: 124-132 (2017a)
- Kim MJ, Park JG, Kim JH, Park JN, Lee HJ, Kim WG, Lee JW, Byun MW. Combined effect of heat treatment and gamma irradiation on the shelf-stability and quality of packaged kimchi during accelerated storage condition. *Korean J. Food Preserv.* 13: 531-

- 537 (2006)
- Kim MJ, Tang CH, Bang WS, Yuk HG. Antibacterial effect of 405±5 nm light emitting diode illumination against *Escherichia coli* O157: H7, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella* on the surface of fresh-cut mango and its influence on fruit quality. *Int. J. Food Microbiol.*, 244: 82-89 (2017b)
- Kim YC, Jung EY, Kim HJ, Jung DH, Hong SG, Kwon TJ, Kang SM. Improvement of kimchi fermentation by using acid-tolerant mutant of *Leuconostoc mesenteroides* and aromatic yeast *Saccharomyces fermentati* as starters. *J. Microbiol. Biotechnol.* 9: 22-31 (1999)
- Kim YS, Kim YS, Kim SY, Whang JH, Suh HJ. Application of omija (*Schiandra chinensis*) and plum (*Prunus mume*) extracts for the improvement of kimchi quality. *Food control*, 19: 662-669 (2008)
- Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation. Process food segment market report. Available from: <https://www.atfis.or.kr/article/M001050000/view.do?articleId=3325&page=&searchKey=&searchString=&searchCategory>. Accessed Aug. 10, 2020
- Korea Agency of HACCP Accreditation and Services. Available from: <https://www.haccp.or.kr/site/haccp/boardView.do?post=59855&boardSeq=119&key=166>. Accessed Aug. 10, 2020
- Kort R, Hoff WD, Van West M, Kroon AR, Hoffer SM, Vlieg KH, Hellingwerf KJ. The xanthopsins: a new family of eubacterial blue-light photoreceptors. *EMBO J.* 15: 3209-3218 (1996)
- Lee ME, Jang JY, Lee JH, Park HW, Choi HJ, Kim TW. Starter cultures for kimchi fermentation. *J. Microbiol. Biotechnol.* 25: 559-568 (2015)
- Lee NY, Lee MJ, Kim YK, Park JC, Park HK, Choi JS, Hyun JN, Kim KJ, Park KH, Ko JK, Kim JG. Effect of light emitting diode radiation on antioxidant activity of barley leaf. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 53: 685-690 (2010)
- Liang JY, Yuann JMP, Cheng CW, Jian HL, Lin CC, Chen LY. Blue light induced free radicals from riboflavin on *E. coli* DNA damage. *J. Photoch. Photobio. B.* 119: 60-64 (2013)
- Liu H, Chen Y, Hu T, Zhang S, Zhang Y, Zhao T, Yu H, Kang Y. The influence of light-emitting diodes on the phenolic compounds and antioxidant activities in pea sprouts. *J. Funct. Food.* 25: 459-465 (2016)
- Maclean M, MacGregor SJ, Anderson JG, Woolsey G. Inactivation of bacterial pathogens following exposure to light from a 405-nanometer light-emitting diode array. *Appl. Environ. Microbiol.* 75: 1932-1937 (2009)
- Ma G, Zhang L, Kato M, Yamawaki K, Kiriwa Y, Yahata M, Matsumoto H. Effect of blue and red LED light irradiation on  $\beta$ -cryptoxanthin accumulation in the flavedo of citrus fruits. *J. Agric. Food Chem.* 60: 197-201 (2012)
- Manivannan A, Soundararajan P, Halimah N, Ho Ko CH, Jeong BR. Blue LED light enhances growth, phytochemical contents, and antioxidant enzyme activities of *Rehmannia glutinosa* cultured *in vitro*. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 56: 105-113 (2015)
- Moon SH, Chang M, Kim HY, Chang HC. *Pichia kudriavzevii* is the major yeast involved in film-formation, off-odor production, and texture-softening in over-ripened Kimchi. *Food Sci. Biotechnol.* 23: 489-497 (2014)
- Moon SH, Kim CR, Chang HC. Heterofermentative lactic acid bacteria as a starter culture to control kimchi fermentation. *LWT-Food Sci. Technol.* 88: 181-188 (2018)
- Ogonowska P, Woźniak A, Pierański MK, Wasylew T, Kwiek P, Brasel M, Grinholc M, Nakonieczna J. Application and characterization of light-emitting diodes for photodynamic inactivation of bacteria. *Light. Res. Technol.* 51: 612-624 (2019)
- Park HY, Ahn JA, Seo HJ, Choi HS. Quality characteristics of small package Kimchi according to packing material and storage temperature. *Korean J. Food Cook. Sci.* 27: 63-73 (2011)
- Penha CB, Bonin E, da Silva AF, Hioka N, Zanqueta ÉB, Nakamura TU, Mikcha JMG. Photodynamic inactivation of foodborne and food spoilage bacteria by curcumin. *LWT-Food Sci. Tech.* 76: 198-202 (2017)
- Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Bio. Med.* 26: 1231-1237 (1999)
- Sabino CP, Wainwright M, Dos Anjos C, Sellera FP, Baptista MS, Lincopan N, Ribeiro MS. Inactivation kinetics and lethal dose analysis of antimicrobial blue light and photodynamic therapy. *Photodiagn. Photodyn.* 28: 186-191 (2019)
- Shin JK, Shin HH. Sterilization and storage of liquid kimchi sauce by high voltage pulsed electric fields. *Food Eng. Prog.* 10: 262-268 (2006)
- Srimagal A, Ramesh T, Sahu JK. Effect of light emitting diode treatment on inactivation of *Escherichia coli* in milk. *LWT-Food Sci. Technol.* 71: 378-385 (2016)
- Stoeckenius W, Bogomolni RA. Bacteriorhodopsin and related pigments of halobacteria. *Annu. Rev. Biochem.* 51: 587-616 (1982)
- Swartz TE, Tseng TS, Frederickson MA, Paris G, Comerci DJ, Rajashekara G, Kim JG, Mudgett MB, Splitter GA, Ugalde RA, Goldbaum FA, Briggs WR, Bogomolni RA. Blue-light-activated histidine kinases: two-component sensors in bacteria. *Science*, 317: 1090-1093 (2007)
- Xu F, Shi L, Chen W, Cao S, Su X, Yang Z. Effect of blue light treatment on fruit quality, antioxidant enzymes and radical-scavenging activity in strawberry fruit. *Sci. Hortic.* 175: 181-186 (2014)
- Yu DJ, Shin YJ, Kim HJ, Song HJ, Lee JH, Jang SA, Song KB. Microbial inactivation in kimchi saline water using microwave plasma sterilization system. *J Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 40: 123-127 (2011)