

Plant Stress Response를 이용한 과채류의 Phytochemicals 함량 증가 기술

김 현 진

바이오제론연구단

Accumulation of Phytochemicals in Edible Plants using Plant Stress Modulators

Hyun-Jin Kim

Biogeron Food Technology Research Group

서 론

급격한 사회변화에 따라 우리의 식생활 패턴도 급격하게 변하고 있다. 특히, 육식위주의 식습관 및 식품의 과잉섭취에 따른 영양섭취의 불균형으로 야기되는 다양한 질병들은 큰 사회적 문제로 대두되고 있다. 이를 극복하기 위하여 국민건강에 대한 정부차원의 지원도 시급하지만 가장 우선시 되어야 할 것이 육식과 과식위주의 식습관에서 과채류의 섭취를 늘리면서 소식을 하는 식생활 개선이다. 특히, 최근에 과채류에 대한 임상학적인 연구결과들은 과채류에 들어있는 다양한 phytochemicals이 암, 고혈압, 당뇨, 염증 등 다양한 질병에 긍정적인

효과가 있는 것으로 밝혀지면서 과채류에 들어 있는 새로운 기능성 물질의 발굴뿐만 아니라 기존에 알려진 기능성 물질의 함량을 증가시키는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 다양한 기능성 phytochemicals을 식물에서 증가시키기 위한 방법들 중 가장 일반적으로 사용하는 것이 유전자 조작과 접목 등을 이용하여 새로운 형태의 식물을 만들어내는 육종방법이다. 그러나 유전자 조작을 통해 특정 기능성 phytochemical을 대량 생산할 수 있지만 유전자 조작 식품의 안전성에 대한 논란 때문에 많은 소비자들이 유전자 조작 식품에 대해 반감을 갖고 있으며 접목을 통한 육종방법은 상대적으로 오랜 연구기간에 비해 낮은 성공률을 보이는 것이 현실이

다. 이런 전통적인 방법들과 더불어 최근에는 식물의 스트레스 방어작용을 이용하여 기능성 phytochemical의 함량을 증가시키는 방법들이 대두되고 있다. 식물 스트레스 방어작용을 이용할 경우 식물의 유전자를 인위적으로 조작할 필요도 없을 뿐만 아니라 식물 재배 중이나 수확 후에 간단한 방법으로 적당량의 스트레스를 식물에게 처리해 줌으로 인하여 투자 비용이나 시간을 최소화 할 수 있으며 처리하는 스트레스에 따라 특정 계열의 phytochemicals의 함량을 증가시킬 수 있는 것으로 연구됨으로써 다른 방법들에 비해 높은 경쟁력을 갖고 있다고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 식품분야, 특히 과채류 분야에서 식물의 스트레스 반응작용을 이용하여 phytochemical의 함량을 증가시킬 수 있는 기술을 소개하고자한다. 과채류에 적용할 수 있는 식물 스트레스 반응 유발 인자들에 대해서 알아보고 이들 유발 인자들이 어떻게 식물 스트레스 반응을 일으키고 어떤 종류의 phytochemicals이 함량이 증가되는지 알아 보았다.

본 론

1. 식물 방어작용과 secondary metabolites

식물은 오랜 진화과정을 거치면서 다양한 외부 환경변화(biotic and abiotic environmental stresses)에 적응하기 위하여 단백질분해 저해제,

항균물질, lignifications 등과 같은 많은 방어 시스템을 구축하였으며 심지어는 외부 스트레스로부터 공격을 당하는 식물이 주위는 다른 동료들에게 휘발성분을 통해 스트레스 신호를 전달하기도 하고 공격하고 있는 벌레의 천적인 다른 포식자를 유인하기도 한다. 외부 환경적 스트레스에 대응하여 식물이 자체 방어 시스템을 구축하는데 관여하는 주요 물질들은 secondary metabolites로 몇 년 전까지만 해도 식물의 생존에 꼭 필요한 호흡, 성장 발달 및 광합성에 직접적으로 관여하지 않는 물질로 primary metabolites(단백질, 탄수화물, 지질 등)의 대사과정 중 실수에 의해서 생성되는 불필요한 부산물로 여겨졌다. Secondary metabolites는 스트레스에 대응하는 방어 시스템을 구축하는 주요 물질일 뿐만 아니라 다양한 건강 기능성을 갖고 있는 것으로 알려지고 있으며 식물의 건강 기능성이 이들 성분들에게서 유래하는 것으로 밝혀짐으로 인하여 그 중요성이 강조되고 있다. 일반적으로 식물의 기능성 물질이라고 말하는 phytochemical은 secondary metabolites이며 크게 phenolic compound, terpenoids, nitrogen-containing compound로 구성되어있다. 특히, 서양 의약품의 25%가 이들 물질들에서 유래되었으며 전세계 80%가 넘는 사람들이 그들의 건강을 위해 secondary metabolites이 함유된 식물유래 건강보조식품을 섭취하는 것으로 나타났다. Secondary metabolites는 식물의 생존에 필요한 에너지를 주로 생성하는 primary metabolites의 다양한 경로, 즉 shikimate, phenyl-

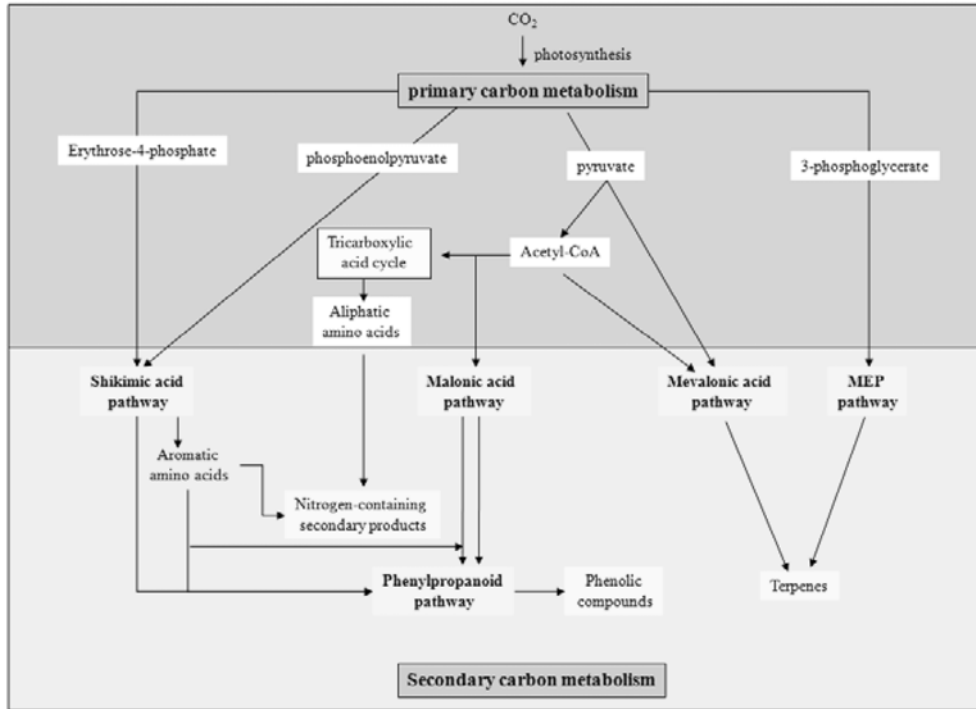


Fig. 1. A simplified view of the major pathways of secondary metabolite biosynthesis and their interrelationship with primary metabolism
(Source: Taiz L, Zeiger E, *Sinauer Assoc. Inc.*, Publishers Massachusetts, p. 286, 2002)

propanoid, malonate, mevelonate, methyerythriol phosphate pathways를 통해 생합성되며(Fig. 1) 식물유래 식품의 품질을 결정짓는 가장 중요한 인자가 되고 있다. 이들 secondary metabolites 는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 빛, 온도, 영양 성분 등 재배조건의 변화, 병원균 및 벌레의 공격, 물리적인 상처 등의 biotic 또는 abiotic stress에 의해서 식물체내에서 축적되며 이들 stress를 인위적으로 조절함으로써 secondary metabolites의 함량을 조절할 수 있다.

2. 식물스트레스 조절인자

2.1. 식물호르몬

외부 환경변화에 적응하기 위하여 식물은 다양한 방어 시스템을 구축하는데 이런 과정은 생체내 식물호르몬들에 의해서 조절되어진다. 가장 대표적인 호르몬은 jasmonic acid, methyl jasmonic acid(MeJA), cis-12-oxophytodienoic acid (OPDA)로 13-lipoxygenase에 의한 linolenic acid의 peroxidation에 의해 시작되는 octadecanoid

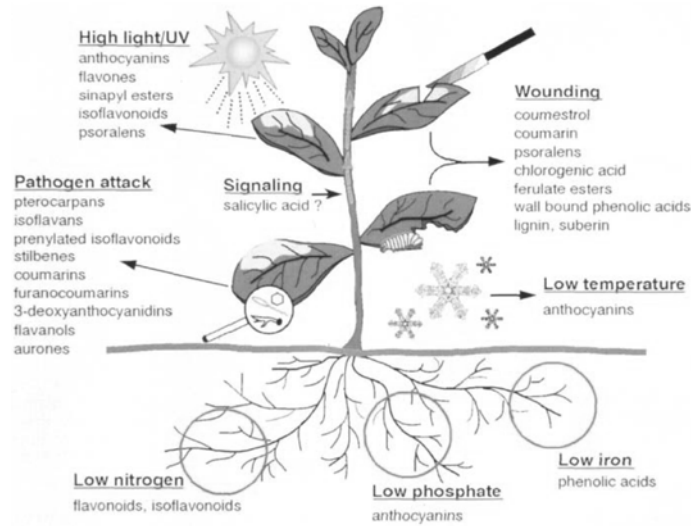


Fig. 2. Stimulation of secondary metabolites in plant by biotic and abiotic stresses
 (Source: Dixon RA Paiva NL Stress-induced phenylpropanoid metabolism, Plant Cell, 7, 1085-1097, 1995)

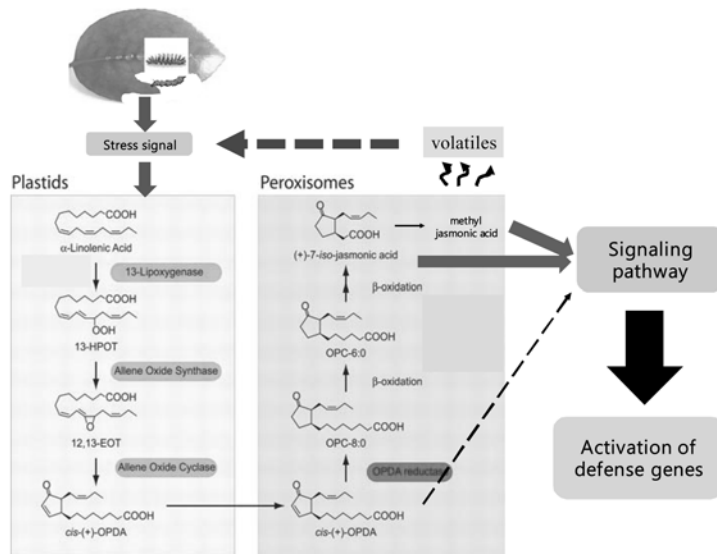


Fig. 3. Biosynthesis of plant stress hormones through the octadecanoid pathway

pathway의 중간대사산물들이다(Fig. 3). 일반적으로 octadecanoid pathway에 의해 생성되는 물

질들은 식물의 성장 및 분화에 관여를 하는데 식물이 병원균이나 물리적 stress로 인하여 상

처를 입게 되면 식물은 octadecanoid pathway를 더 활성화시켜 이들 호르몬의 함량을 증가시키게 되고 이렇게 증가된 호르몬들은 스트레스 방어작용에 관여하는 물질들을 생성하는 신호 전달 물질의 역할을 하게 된다. 특히, MeJA는 다른 호르몬들과는 달리 공기 중으로 휘발되어 주위의 건강한 식물체의 스트레스 신호전달물질로 작용한다. 이들 jasmonic acid 계열의 식물호르몬 이외에 salicylic acid는 아직 명확한 메카니즘이 밝혀지지 않았지만 systemin처럼 상처를 입은 부분에서 식물의 다른 부분으로 스트레스 신호를 전달하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이들 호르몬들을 스트레스를 받지 않은 정상 식물에 처리를 하게 되면 식물은 방어시스템을 구축하게 되는데 이 과정에서 phenolic compounds나 terpenoids의 함량이 증가하는 것으로 보고되고 있다.

2.2. Elicitors

Elicitor라는 용어가 처음 생겨났을 때만해도 elicitor는 식물의 자가 면역시스템을 증가시키는 oligosaccharide을 지칭하였지만 최근에는 자가 면역력을 증가시키는 모든 물질을 통틀어 가리키는 말로 쓰이고 있으며 여기에는 chitosan, β -glucan, yeast 추출물, harpin protein 등이 있는데 이들 물질 또는 추출물은 주로 식물 병원균의 세포벽 구성물질들이다. 식물과 식물 병원균이 오랜 진화과정을 거치면서 서로를 공격하고 방어하는 시스템이 구축되게 되었는데 식물

인 경우 병원균이 공격할 경우 평상시에는 전혀 활성을 보이지 않던 효소들(chitinase, β -glucanase 등)이 분비되어 공격하는 병원균의 세포벽을 파괴하고 세포벽에서 떨어져 나오는 물질들이 wounding(stress) signal로 작용하여 앞에서 언급한 스트레스 관련 식물호르몬들의 활성을 증가시켜 식물의 방어시스템을 구축하게 된다. 따라서 이들 물질을 건강한 식물에게 처리하게 되면 식물호르몬을 처리할 때와 마찬가지로 식물은 실제로 공격을 당하고 있지는 않지만 처리된 elicitors 때문에 병원균으로부터 공격을 당하고 있다고 믿게 되고 병원균이 공격했을 때와 마찬가지로 인위적으로 처리된 이들 물질을 wounding signal로 하여 방어시스템 뿐만 아니라 secondary metabolites의 함량을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 특히 chitosan인 경우 sweet basil에 처리한 결과 다양한 기능성을 갖고 있는 것으로 알려진 rosmarinic acid의 함량이 2.5배 증가하였고 essential oil의 함량도 증가하는 것으로 조사되었지만 물리적인 상처에 의해서는 이들 현상이 나타나지는 않았다. 또한 secondary metabolites의 함량 변화와는 별개로 chitosan 처리에 의해 수확량 증가도 관찰되었지만 이에 대한 메카니즘이 아직 규명되지 않은 상태이다(Fig. 4).

2.3. Environmental stress

식물 호르몬이나 elicitors와는 달리 인위적인 처리없이 식물의 성장 또는 수확 후 처리과정

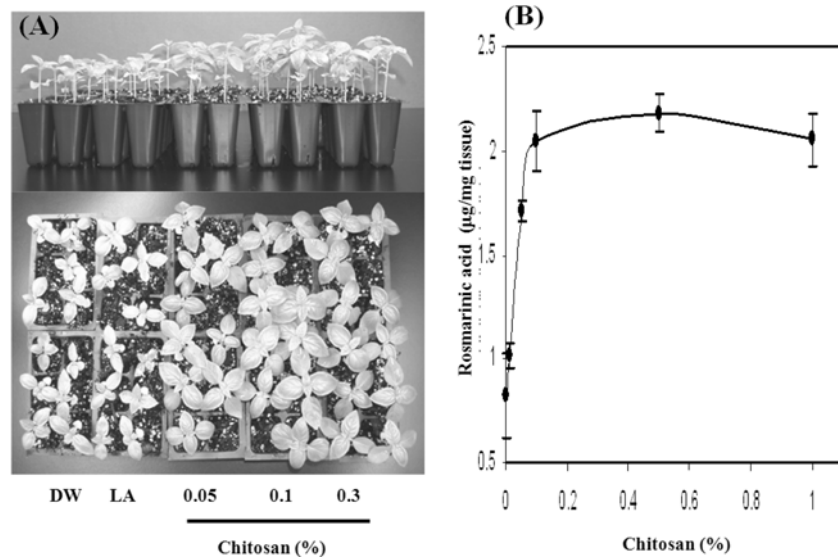


Fig. 4. Effect of chitosan treatment on growth (A) and rosmarinic acid content (B) of sweet basil

에서 재배환경이나 저장 환경을 바꿔 스트레스를 유발함으로써 secondary metabolite 함량을 증가시키는 방법은 주로 식물의 재배에 반드시 필요한 물, 햇빛, 각종 미네랄 등의 조절과 관계있다. 특히 물 부족 또는 염 농도의 증가에서 오는 osmotic stress는 식물이 이용할 수 있는 물의 양이 부족으로 인하여 이를 조절하는 호르몬인 abscisic acid(ABA)를 생성하기 위한 pathway(Fig. 5)를 활성화시키게 되는데 이 과정에서 ABA의 전구물질들인 β -carotene, lutein, zeaxanthin 등의 함량이 증가하게 되지만 앞에서 언급한 식물 호르몬이나 elicitor의 처리에서 증가되던 phenolic compounds와 terpenoids 함량의 증가는 그렇게 크지 않은 것으로 보고되었다. 그러나 Fig. 5에서 보는 바와 같이 고농도의 염이 처리되거나 극심한 물 부족으로

인하여 식물이 사용할 수 있는 물의 양이 심하게 모자라게 되면 식물의 성장에도 문제가 발생할 수 있으므로 NaCl 기준으로 5~50 mM 정도로 낮은 농도가 적당한 것으로 보고되었으나 식물의 염 민감성 정도에 따라 다르게 적용되어야만 할 것으로 사료된다. 다양한 environmental stresses 중 과채류의 최소가공에 가장 널리 쓰이는 것 중의 하나가 UV를 이용하는 것인데 UV-B(290~320 nm)가 일반적으로 secondary metabolites 함량을 증가시키기 위해 사용되며 UV-C(100~290 nm)가 사용되는 경우도 있다. 식물이 일정량의 UV에 노출되게 되면 식물체 내에서는 free radical들이 생성되는데 이를 억제하기 위해서 식물자체내의 항산화물질들의 함량이 급격히 증가되는 것으로 보고되고 있다(Table 1).

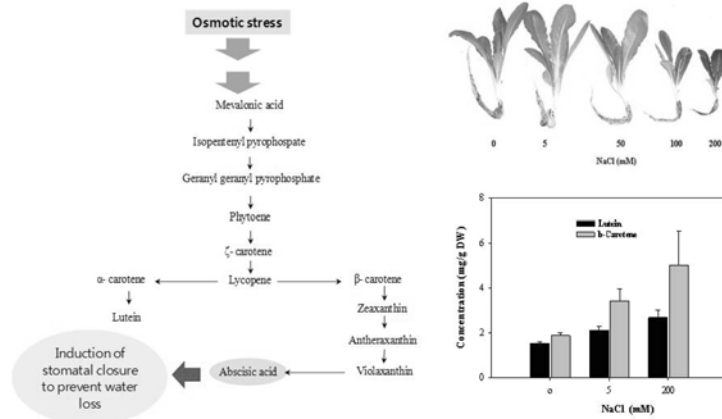


Fig. 5. Biosynthesis of abscisic acid through carotenoid pathway and NaCl effect on growth and carotenoid content of romaine lettuce

Table 1. Effect of UV-B exposure on antioxidants and flavnoids

UV-B treatment	Plant material	Biological impact
Acute exposure (30~120 min) to 0.46 kJ m ⁻² min ⁻¹ UV-B	Broad bean (<i>Vicia faba</i>) detached leaves	4-fold increase in DHA level
Acute exposure to a dose-rate of 1.4 W m ⁻² supplemental UV-B _{be300}	Pea (<i>Pisum sativum</i>) plants	4.0- and 1.4-fold increase in total GSH level after 48 or 144 h UV-exposure, respectively 60-fold increase in GSSG levels after 48 h UV
Acute exposure (50 or 100 min) to a dose-rate of 5.2 Wm ⁻² supplemental UV-B _{be300}	Sunflower (<i>Helianthus annuus</i>) cotyledons	1.5-fold (50 min) and 1.4-fold (100 min) increase in Asc level 13-fold (50 min) and 6-fold (100 min) increase in GSH level
Exposure for 3 days to a dose-rate of 26 Wm ⁻²	Cucumber (<i>Cucumis sativus</i>) cotyledons	50% decrease in α -tocopherol level
Two weeks growth under low, supplemental UV-B (4, 8 or 24 h day ⁻¹) giving doses of 1, 2 or 6 kJ m ⁻² day ⁻¹ UV-B _{be}	Spinach (<i>Spinacea oleracea</i>) plants	2.7-, 1.9- and 0.9- fold increase in Asc level, after 4, 8 and 24 h UV-B, respectively
Exposure for 4 weeks to supplemental doses of 3.6 (ambient) kJ m ⁻² day ⁻¹ of 7.2 (enhanced) kJ m ⁻² day ⁻¹ UV-B _{be}	Willow (<i>Salix myrsinifolia</i> x <i>Salix myrsinites</i>) plants	3-fold increase in levels luteolin derivatives under enhanced UV
Exposure for 48 h to a dose-rate of ca. 1.1 2 W m ⁻² of solar UV-B	White mustard (<i>Sinapis alba</i>) plants	7-fold increase in quercetin derivatives under UV
Exposure for up to 21 days to a supplemental dose of 4.8 kJ m ⁻² day ⁻¹ UV-B _{be}	Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i>) seedlings	Up to 2.2-fold increase in levels quercetin derivatives under UV

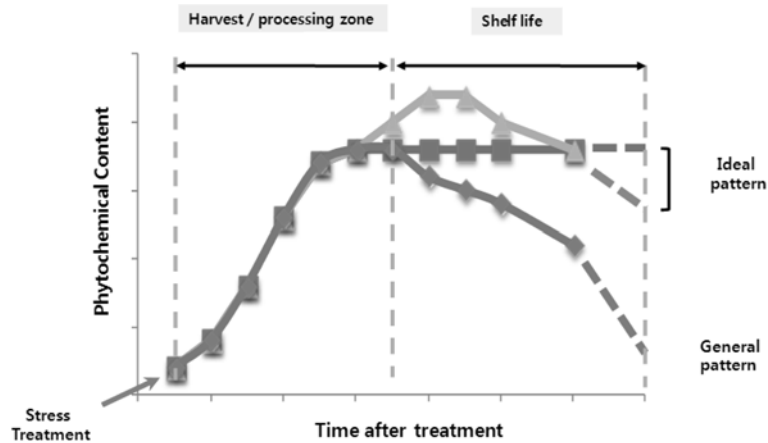


Fig. 6. Time course of general and ideal patterns of phytochemical content in plants after the treatment of stress modulators

결론

Stress modulators를 이용하여 인위적인 유전자 조작없이 과채류내의 기능성물질들의 함량을 증가시키기 위해서는 식물과 stress modulators의 특성을 고려하여 식물의 특정 phytochemicals에 맞는 stress modulator를 선택하고 처리시간이나 처리량도 식물에 맞게 선택함으로써 식물 스트레스 반응의 효과적 조절이 요구되기 때문에 모든 식용식물에 적용할 수 있는 일반적인 기준을 선택하기는 쉽지 않다. 특히 최근 들어 과채류의 대부분이 수확 후 minimal processing을 거쳐 유통되고 있다는 점을 고려한다면 stress modulators를 처리하는 기술이 더 복잡하고 나노공학, 포장공학 등과 융합되어 적용되어야만 할 것으로 사료된다. Fig. 5에서 보듯이 식물의 phytochemical 함량은 스트레스 유발 후 급격히 증가하다가 일정시간이

지나면 정상 수준으로 감소하는 경향이 있다. 따라서 stress modulator를 처리한 과채류를 소비자가 소비할 때까지 고농도의 phytochemical 함량이 유지되어야 하지만 실제로는 정상 수준 또는 정상 수준에 근접한 정도의 농도를 갖고 있는 과채류를 소비할 수도 있다. 따라서 이를 극복하기 위하여 stress modulator가 처리된 과채류의 저장 온도, 포장지내의 공기조성, 유통 기간동안 포장지 내 stress modulator의 미세분사 등 뿐만 아니라 stress modulators 상호간의 시너지 효과도 연구되어야 할 것이다. 또한 stress modulators에 의해 건강한 과채류에 인위적으로 스트레스가 유발되게 되면 유용한 phytochemicals만 생성된다고 단정 지을 수 없기 때문에 유해 물질의 함량 변화도 동시에 조사되어야 할 것이다. 그러나 이런 문제점들을 고려함에도 불구하고 stress modulator 처리 기술은 과채류의 수확 중 뿐만 아니라 수확 후의

minimal processing 과정에서도 충분히 적목시
켜 볼 만한 가치가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Acosta IF, Laparra H, Romero SP, Schmelz E, Hamberg M, Mottinger JP, Moreno MA, Dellaporta SL *tasselseed1* is a lipoxygenase affecting jasmonic acid signaling in sex determination of maize, *Science*, **323**, 262-265, 2009
2. Bennett RN, Wallsgrove RM Secondary metabolites in plant defense mechanisms, *New Phytol.*, **127**, 617-633, 1994
3. Block G, Patterson B, Subar A Fruit, vegetables, and cancer prevention: a review of the epidemiological evidence, *Nutr. Cancer*, **18**, 1-29, 1992
4. de Bruxelles GL Roberts MR Signals regulating multiple responses to wounding and herbivores, *Crit. Rev. Plant Sci.*, **20**, 487-521, 2001
5. Dixon RA Paiva NL Stress-induced phenylpropanoid metabolism, *Plant Cell*, **7**, 1085-1097, 1995
6. DellaPenna D, Nutritional Genomics: Manipulating plant micronutrients to improve human health. *Science*, **285**, 375-379, 1999
7. Espín JC, García-Conesa MT, Tomás-Barberán FA Nutraceuticals: Facts and fiction, *Phytochemistry*, **68**, 2986-3008, 2007
8. Jansen MAK, Hectors K, O'Brien NM, Guisez Y, Potters G Plant stress and human health: Do human consumers benefit from UV-B acclimated crops?, *Plant Sci.*, **175**, 449-458, 2008
9. Jun M, Jeong WS, Ho CT, Health promoting properties of natural flavor substances, *Food Sci. Biotechnol.*, **15**(3), 329-338, 2006
10. Kim HJ, Chen F, Wang X, Rajapakse NC Effect of chitosan on the biological properties of sweet basil (*Ocimum basilicum L.*), *J. Agric. Food Chem.*, **53**, 3696-3701, 2005
11. Kim HJ, Chen F, Wang X, Rajapakse NC Effect of methyl jasmonate on secondary metabolites of sweet basil (*Ocimum basilicum L.*), *J. Agric. Food Chem.*, **54**, 2327-2332, 2006
12. Kim HJ, Chen F, Wang X, Choi JH Effect of methyl jasmonate on phenolic, isothiocyanate, enzymes in radish sprout (*Raphanus sativus L.*), *J. Agric. Food Chem.*, **54**, 7263-7269, 2006
13. Kim HJ, Fonseca JM, Choi JH, Kubota C, Kwon DY Salt in irrigation water affects nutritional and visual properties of romaine lettuce (*Lactuca sativa L.*), *J. Agric. Food Chem.*, **56**, 3772-3776, 2008
14. Kim HJ, Fonseca JM, Kubota C, Kroggel M, Choi JH Quality of fresh-cut tomatoes as affected by salt content in irrigation water and post-processing ultraviolet-C treatment, *J. Sci. Food Agric.*, **88**, 1969-1974, 2008

15. Kim HJ, Kwon DY, Yoon SH, Induction of phenolics and terpenoids in edible plants using plant stress responses; in *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, Hou, CT and Shaw, JF (eds.), CRC Press, Boca Raton, FL, 249-258, 2009
16. Kliebenstein DK, Secondary metabolites and plant/environment interactions: a view through *Arabidopsis thaliana* tinted glasses, *Plant Cell Environ.*, **27**, 675-684, 2004
17. Taiz L, Zeiger E, *Plant Physiology*, third edition, Sinauer Assoc. Inc., Publishers Massachusetts, **286**, 2002
18. Turner JG, Ellis C, Devoto A, The jasmonate signal pathway *Plant, Cell*, **14**, S153-S164, 2002
19. Verpoorte R, Secondary metabolism; in *metabolic engineering of plant secondary metabolism*, Verpoorte, R. and Alfermann, AW. (eds.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1-29, 2000
20. Yeo EJ, Kim KT, Han YS, Nah SY, Paik HD, Antimicrobial, anti-inflammatory, and anti-oxidative activities of *Scilla scilloides* (Lindl.) Druce root extract, *Food Sci. Biotechnol.*, **15**(4), 639-642, 2006
21. Yeoman MM, Yeoman CL, Manipulating secondary metabolism in cultured plant cells, *New Phytol.*, **134**, 553-569, 1996

김현진 농학박사

- 소속 한국식품연구원 바이오제론연구단
- 전문분야 Metabolomics, 식물 스트레스를 이용한 채소류의 기능성 물질 함량 증가 기술
- E-mail hyunjkim@kfri.re.kr
- TEL 031-780-9317