

The Relation between Fertilization Practices and Functional Metabolites of Crops: A Review

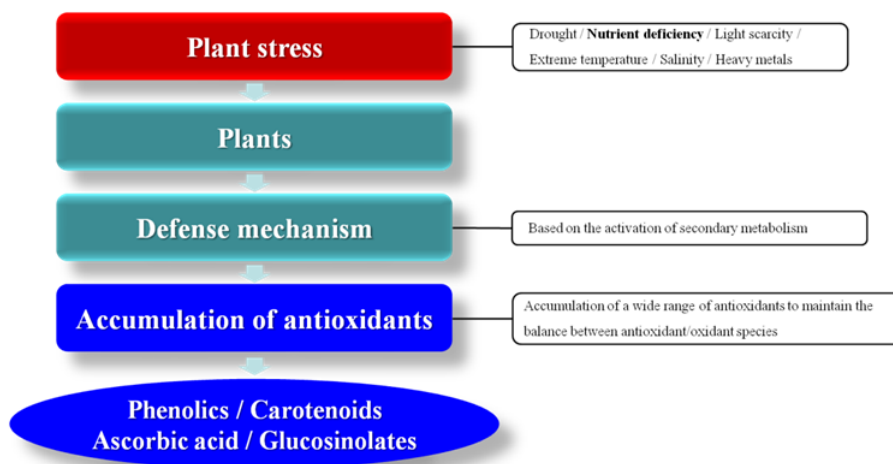
Jung-Eun Lim, Min-Ji Cho, Hye-Jin Yun, Sang-Keun Ha, Deog-Bae Lee, and Jwa-Kyung Sung*

Division of Soil & Fertilizer, National Academy of Agricultural Science, Wanju 55365, Korea

(Received: December 23 2015, Revised: April 27 2016, Accepted: April 27 2016)

Various researches on the effects of fertilization levels on functional metabolites in crop have been conducted. This review summarizes the previous studies on the relation between fertilization supply and accumulation of metabolites (phenolics, carotenoids, ascorbic acid and glucosinolates) which function as antioxidants in crop. The accumulation of phenolic compounds is related to the activation of phenylalanine ammonia lyase (PAL) in phenylpropanoid pathway. Most of the previous studies discuss that low nitrogen (N) supply activates PAL, thereby increasing the synthesis of phenolics. Similarly, high N supply leads to a decrease in ascorbic acid because of the shading effect derived from the accelerated vegetative growth under high N level. Unlike the phenolics and ascorbic acid, carotenoids are accumulated with increasing N supply. In this regard, the previous studies explain that N is a main element closely associated with formation of key enzyme for the synthesis of carotenoids. Glucosinolates are generally increased under decreasing N supply and increasing S supply. Although the previous studies show similar trends about the accumulation of metabolites by nutrient level, they also suggest that many other factors including crop types, cultivars, cultural environment (water, temperature, light, etc.) influence the accumulation of functional metabolites in crop.

Key words: Antioxidants, Ascorbic Acid, Carotenoids, Glucosinolates, Phenolics, Phytochemicals



Conceptual diagram of accumulation of antioxidants in plants.

*Corresponding author: Phone: +82632382445, Fax: +82632383822, E-mail: jksung@korea.kr

§Acknowledgement: This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ010899)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

최근 농업에서는 인간 질병 및 건강 개선에 긍정적 효과를 나타내는 기능성 물질들을 다량으로 함유한 작물의 재배 방법에 관한 연구들이 시도되고 있다. 식물화학물질 (phytochemical)로 알려진 기능성 물질은 식물이 스트레스 조건 (영양결핍, 가뭄, 광량 부족, 온도, 염류, 중금속 등)에 대응하기 위하여 생성하며 항산화물질 대 산화물질의 균형을 유지하기 위한 항산화물질의 축적과 같은 2차 대사물질을 생합성함으로써 식물의 방어기작에 핵심적 역할을 한다 (Fig. 1) (Galieni et al., 2015; Oloyede et al., 2014).

식물에 함유된 기능성 물질을 인간이 섭취하였을 때 체 내에서 항암, 항염증, 항균, 항산화 효과, 혈당 저하 등 건강 개선에 유익한 것으로 알려져 있다 (Chenard et al., 2005; Dai and Mumper, 2010; Duthie et al., 2000). 대표적인 물질로는 페놀성 화합물 (phenolics), 카로티노이드계 화합물 (carotenoids) 등이 있으며, 페놀성 화합물인 안토시아닌 (anthocyanin)의 경우 식물체 내에서 항산화 및 자외선, 병원균으로부터 식물을 보호한다 (Soubeyrand et al., 2014). 특히 적포도 등의 적색과일은 인간 식생활에 있어 안토시아닌의 주요 영양원이며, 심혈관계 질환이나 암으로부터 인체를 보호한다고 알려져 있다 (Åkerström et al., 2009; Soubeyrand et al., 2014). 카로티노이드계 화합물은 황색 (yellow)에서 주황색 (orange)을 나타내는 천연 지용성 색소로 인체 내에서 항산화물질로 작용하여 면역체계를 증진시키며, 암, 심혈관계 질환, 만성질환, 안구질환의 위험성을 낮추는 물질로 과일이나 채소에 다량 함유된 것으로 알려져 있다 (Chenard et al., 2005; Kopsell et al., 2007b; Reif et al., 2012).

작물 재배 방식은 과거부터 작물의 양분질 (nutritional quality)을 결정하는 중요한 요인으로 인식되고 있다 (Erba et al., 2013). 일반적으로 질소가 높은 수준일 때 광합성이 증가하고 생물량이 증대된다 (Tavarini et al., 2015). 질소

시비 및 식물의 질소 상태는 항산화물질과 같은 2차 대사물질의 축적에 중요한 역할을 하나, 현재까지 식물체 내 항산화물질 농도에 대한 질소시비의 효과는 상충되는 결과들이 많다 (Stefanelli et al., 2010; Tavarini et al., 2015). 이와 함께 식물에 축적되는 2차 대사물질의 함량은 품종특성, 기후조건, 계절변화, 성숙, 수확 후 처리, 저장 조건 등에 강력하게 좌우되고 있으나 현재 양분 공급이 미치는 영향은 완벽하게 보고되고 있지 않은 실정이다 (Coria-Cayupán et al., 2009). 국내의 경우도 대부분 기존 작물 내 기능성 물질 함량 평가 (Boo et al., 2009; Choi et al., 2011; Kim and Ahn, 2014; Kim et al., 2013; 2014; 2015; Lee et al., 2012; Shin et al., 2015), 육종 및 형질전환 등에 의한 기능성 물질 함량 증대 (Han et al., 2012; Jang et al., 2015; Lee et al., 2014a; 2014b; Oh et al., 2015; Qin et al., 2015) 등의 연구에 초점이 맞추어져 있어 양분 공급과 관련한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 논문에서는 양분 공급이 작물 내 기능성 물질 함량에 미치는 영향에 대한 지난 20년간의 대표적인 국외 연구결과들을 주요 기능성 물질 별로 정리하였으며, 이를 토대로 향후 국내 기능성 물질 다량 함유 농작물의 생산을 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

페놀성 화합물 (phenolics) 식물은 페놀기를 갖는 다양한 2차 대사물질을 생성하는데 이는 식물의 페놀성 화합물로 분류된다. 플라보노이드 (flavonoid) 계열의 안토시아닌, 루틴 (rutin) 등이 대표적 물질로 주로 채소, 과일, 허브 등에 함유되어 있으며 양분 공급에 따른 식물체 내 함량 변화에 대한 다양한 내용들이 보고되고 있다.

질소 공급 토양 내 질소의 양과 동태는 식물 페놀성 화합물의 생합성에 강력한 영향을 미친다 (Treutter, 2010). 특히, 페놀성 화합물 생합성의 핵심 효소로 알려진 페닐알

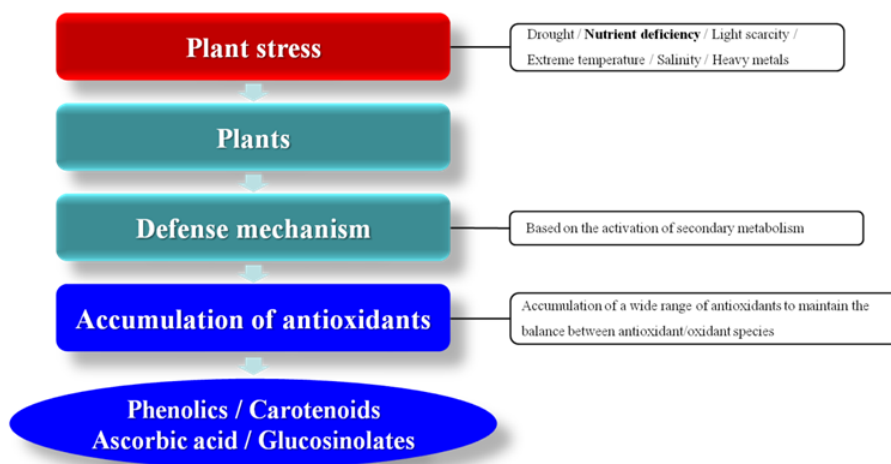


Fig. 1. Conceptual diagram of accumulation of antioxidants in plants.

라닌 탈아미노아분해효소 (PAL, phenylalanine ammonia lyase)는 식물체의 질소 공급 수준에 의해 조절되는 물질이다 (Sin kovič et al., 2015). 페놀성 화합물의 축적은 식물의 종류, 품종, 기타 재배 조건에 따라 영향을 받을 수 있으나 일반적으로 낮은 수준의 질소 공급 조건이 식물의 페놀성 화합물 생합성 경로에 유리하게 작용하여 페놀성 화합물 축적을 높이는 것으로 알려져 있다.

Anttonen et al. (2006)은 딸기 (*Fragaria × ananassa* Duch.) 재배 시 N, P, K 등이 함유된 양액을 전기전도도별 (0.6, 1.2, 2.4 dS m⁻¹)로 토양에 처리한 후 열매 내 폴리페놀 (polyphenol) 화합물인 ellagic acid 및 flavonols (quercetin, kaempferol) 함량을 평가하였다. 연구결과, ellagic acid 함량은 0.6 dS m⁻¹ 처리구가 1.2 dS m⁻¹ 처리구 대비 21% 높은 수준이었으며, kaempferol과 quercetin 함량은 0.6 dS m⁻¹ 처리구가 2.4 dS m⁻¹ 처리구 대비 각각 19%, 57% 높은 것으로 나타났다. Sinkovič et al. (2015)은 치커리 (*Cichorium intybus* L.)의 포트 재배 시 무기질, 유기질, 무기+유기 혼합 시비 처리에 따른 페놀성 화합물의 함량을 평가하였다. 연구결과, 총 페놀성 화합물은 유기질비료 (128.6 mg 100g⁻¹ FW) 및 무기질비료 처리구 (125.5 mg 100g⁻¹ FW)가 무처리구 (254.3 mg 100g⁻¹ FW)와 비교할 때 낮은 수준이었다. Nguyen and Niemeyer (2008)는 허브의 일종인 바질 (*Ocimum basilicum* L.)에 대해 질소 농도별 (0.1, 0.5, 1.0, 5.0 mM as NH₄NO₃) Hoagland 용액 재배 시 총 페놀성 화합물 함량과 개별 페놀성 화합물 (rosmarinic acid, caffeic acid) 함량을 평가하였다. 연구결과, 질소 0.1 mM 처리구에서 총 페놀성 화합물, 개별 페놀성 화합물 함량은 가장 높은 수준이었다. 생육평형 (growth-differentiation balance) 이론은 생체량축적과 2차 대사물질 사이의 반비례 관계를 제안하는데 (Fernández et al., 2006), Nguyen and Niemeyer (2008)는 상기 결과도 식물의 생육평형 이론에 근거하여 질소와 같은 필수 양분 공급이 제한될 때 생육은 감소하는 반면, 식물의 저장과 방어가작을 돕는 2차 대사물질의 생성이 증가된 것에 기인한다고 하였다. 또 다른 이유로 식물이 제한된 양분 조건에서 자랄 때, 식물은 2차 대사물질과 같은 탄소 기반 화합물 생산을 증가시켜 조직 내에 축적한다는 탄소-양분 평형 (CNB, carbon-nutrient balance) 이론에 근거하여, 낮은 수준의 질소 공급이 탄소를 다량 함유한 페놀성 화합물의 축적을 증대시킨 것이라고 하였다 (Nguyen and Niemeyer, 2008). Fernández-Escobar et al. (2006)도 올리브 (*Olea europaea* L.) 재배 시 질소 농도별 (0-1.5 kg N tree⁻¹ year⁻¹) 올리브 열매의 총 폴리페놀 (total polyphenol) 함량을 평가하였다. 연구결과, 총 폴리페놀 함량은 질소 처리 농도가 높을수록 감소하였다. Fernández-Escobar et al. (2006)은 탄소-양분 평형 이론에 근거하여 양분이 제한된 조건에서 식물 생장이 광합성보다 감소하고 과잉의 비구조적 탄소

화물 축적으로 인해 탄소기반의 대사물질이 생성된다고 하였다. 한편, 단백질 경쟁 모델 (PCM, protein competition model)은 1차 대사물질과 2차 대사물질 사이의 특수한 경쟁 관계를 제안하는데 높은 수준의 양분 유효도 조건에서는 PAL에 의한 페닐프로파노이드 (phenylpropanoid)의 생합성보다 페닐알라닌 (phenylalanine)으로부터의 단백질 합성이 우세하게 된다 (Fernández-Escobar et al., 2006). Fernández-Escobar et al. (2006)은 이러한 이론들에 근거하여 통해 올리브에 대한 낮은 수준의 질소 처리가 높은 수준의 총 폴리페놀 농도를 야기한다고 하였다. Stumpf et al. (2015)은 밀 (*Triticum aestivum*)의 포트 재배 시 질소 수준별 처리 (0.25, 0.50, 1.00, 2.00 g pot⁻¹)에 따른 낱알의 free soluble phenolic (F1), conjugated soluble phenolic (F2), insoluble bound phenolic (F3) 농도를 평가하였다. 연구결과, F1은 질소 공급 수준이 높아짐에 따라 증가, F2는 감소, F3는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. F3의 경우 품종에 따른 차이를 나타내며, F1과 F2는 환경적 조건에 영향을 받는다고 하였다. 질소 공급 증가에 따른 페놀성 화합물의 감소는 증가된 질소유효도 조건에서 탄소기반의 2차 대사물질보다는 질소기반의 2차 대사물질의 생성이 우세하다는 Bryant et al. (1983)의 탄소-질소 평형 (carbon-nitrogen balance) 이론에 근거한다고 하였다. 특히 F2의 경우 동물실험을 통해 높은 생물유효도를 나타내는 것으로 알려져 있어 (Adam et al., 2002), 과도한 질소의 사용은 높은 생산비와 환경오염 문제 야기할뿐만 아니라 낱알 내 생물유효성 페놀성 화합물을 감소시킨다고 하였다 (Stumpf et al., 2015). Bénard et al. (2009)은 토마토 (*Solanum lycopersicum* L.)의 양액 재배 시 질소 농도별 (4, 6, 12 mM) 처리에 따른 페놀성 화합물 (rutin, caffeic derivative, naringenin chalcone) 함량을 평가하였다. 연구결과, 정식 5개월 후 rutin, chlorogenic acid, caffeic acid glucoside, caffeic acid derivate 함량은 낮은 수준의 질소 처리구에서 높은 것으로 나타났다. Erba et al. (2013)도 토마토 (*Solanum lycopersicum* L.)의 양액 재배 시 질소 표준 처리 (9.50 meq NO₃⁻ L⁻¹)와 질소 저농도 처리 (5.31 meq NO₃⁻ L⁻¹)에 따른 토마토의 페놀성 화합물 함량을 평가한 결과, kaempferol-3-O-rutinoside, chlorogenic acid가 질소 저농도 처리구에서 상대적으로 높은 수준으로 나타났다. 이와 같은 결과는 낮은 수준의 질소 공급이 페놀성 화합물을 생합성하는 페닐프로파노이드 경로 (phenylpropanoid pathway) 내 핵심 효소들의 자극 및 유도와 연관된다고 하였다 (Bénard et al., 2009; Erba et al., 2013). Hilbert et al. (2003)은 포도 (*Vitis vinifera* L.) 재배 시 양액 내 질소를 결핍수준 (1.4 mM), 평균수준 (3.6 mM), 과다수준 (7.2 mM)으로 처리하였을 때 포도 껍질에 함유된 안토시아닌 함량을 평가하였다. 연구결과, 질소 결핍 처리구에서 안토시아닌 함량이 가장 높았는데, 이는 높은 수준의 질소 공급이

i) 안토시아닌의 정량정성적 생합성을 지연시키고, ii) 안토시아닌의 이화작용을 활성화하여 포도의 성숙과정 중 분해를 증진하며, iii) PAL의 유도를 저해하는 과도한 수준의 인(P)을 야기한 것에 기인한 결과라고 하였다. Soubeyrand et al. (2014)은 포도 (*Vitis Vinifera* L.) 재배 시 질소 무비 (0 kg ha^{-1}), 관행 (60 kg ha^{-1}), 배량 (120 kg ha^{-1}) 처리에 따른 포도 열매 내 안토시아닌 계열 물질 (cyanidin, petunidin, malvidin, peonidin, delphinidin)의 축적을 평가하였다. 연구결과, 질소 시비 수준이 포도의 성숙, 중량, pH 등에는 영향을 주지 않았으나 안토시아닌 계열 물질의 함량은 성숙 26, 49일 후 무비 처리구에서 가장 높았으며, 관행 및 배량 처리구 간에는 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 질소 공급이 포도의 플라보노이드 경로를 유도하는 전사인자 (transcription factor)인 MYB 유전자를 억제하며, 플라보노이드 경로를 억제하는 전사인자인 LBD 단백질의 전사 수준을 증대시킨 것에 기인한 결과라고 하였다 (Soubeyrand et al., 2014).

적절한 수준의 양분 공급이 식물의 페놀성 화합물 축적을 촉진한다는 결과들도 보고되고 있다. Oloyede et al. (2014)은 추키니호박 (*Cucurbita pepo* L.)의 포장 재배 시 NPK (15:15:15) 비료를 0, 90, 180, 270 kg ha^{-1} 수준으로 시비한 후 페놀성 화합물의 함량을 평가하였다. 연구결과, 정식 15주 후 추키니호박 열매 부위의 총 페놀성 화합물, 플라보노이드, cyanidin, proanthocyanidin 함량은 NPK 90, 180 kg ha^{-1} 처리구에서 증가하였으나 180 kg ha^{-1} 이상에서는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 질소 공급 증가에 의한 결과이며, 제한된 질소 공급 조건에서 식물의 플라보노이드 축적이 상승한다고 하였다. 또한 과량의 질소 공급이 추키니호박 열매 양분의 질과 건강상의 이점을 감소시킨다고 하였다. 이와 유사하게 Tavarini et al. (2015)은 스테비아 (*Stevia rebaudiana* Bertoni)의 토양 재배 시 질소 수준별 (0, 50, 150, 300 kg ha^{-1}) 처리에 따른 스테비아 잎의 총 페놀성 화합물 및 플라보노이드 함량을 평가하였다. 연구결과, 150 kg ha^{-1} 처리구에서 총 페놀성 화합물 (110.41 mg g^{-1})과 총 플라보노이드 (104.03 mg g^{-1}) 함량이 가장 높은 것으로 나타났다. 그러나 150 kg ha^{-1} 처리구 대비 질소 수준이 높거나 (300 kg ha^{-1}), 낮은 경우 (50 kg ha^{-1})에 총 페놀성 화합물과 총 플라보노이드 함량은 상대적으로 낮다고 하였다. 그러므로 최적 질소공급량에서 식물의 페놀성 화합물의 축적이 증가하며, 최적 질소공급량 기준으로 공급량이 증가하거나 감소하면 페놀성 화합물의 축적은 감소한다고 하였다. Mogren et al. (2007)은 양파 (*Allium cepa* L.)의 토양 재배 시 질소 수준별 (추천량: 72 kg ha^{-1} , 농가관행: 152 kg ha^{-1}) 플라보노이드 계열의 quercetin (quercetin 3,4'-diglucoside, quercetin 4'-monoglucoside) 함량을 평가하였다. 연구결과, 질소 처리 수준에 따른 양파의 수량과 quercetin 함량은

처리구간 차이가 나타나지 않았다. 그러므로 추천량을 시비하는 질소 적정 처리가 지하수로의 질소 유출 문제를 경감할 수 있으며, 수량이나 quercetin 함량에 부정적 영향이 없다고 보고하였다.

유기물질 공급 소비자들의 안전한 먹거리에 대한 관심과 함께 농약이나 무기질비료의 투입을 최소화하는 유기농업에 대한 연구들도 진행되고 있다. 이 중에서도 유기물질 처리가 식물의 페놀성 화합물 축적에 미치는 영향들이 보고되고 있으며, 주로 유기물질 처리에 의한 스트레스 유발 가능성 및 질소에 의한 영향이 대한 내용이 주를 이룬다.

Verma et al. (2015)은 토마토 (*Lycopersicon esculentum*) 재배 시 'NPK 무기질비료', '유용미생물 (EM) 퇴비', '무기질비료+EM' 처리에 따른 총 페놀성 화합물 함량을 평가하였다. 연구결과, 토마토 열매의 총 페놀성 화합물은 '무기질비료 추천량의 1/2 + EM (유용미생물)' 처리구가 '무기질비료' 처리구 대비 2.06% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 EM에 의한 유기적 시비효과라고 하였다. 이와 유사하게 Toor et al. (2006)은 토마토 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 재배 시 무기질 (NH_4^+ , NO_3^- 함유 양액) 및 유기질 (혈분, 톱밥, 골분 혼합 계분 및 녹비 처리) 양분 처리에 따른 수용성 페놀성 화합물 (soluble phenolics) 함량을 평가하였다. 연구결과, 유기질 양분 처리 시 토마토의 수용성 페놀성 화합물은 무기질 양분 처리구에 비해 17.6% 높은 수준으로 나타났다. 이는 유기적 재배방법에 의해 상대적으로 높아진 병원균 발생 가능성이 토마토의 스트레스 반응을 야기하여 플라보노이드 계열 화합물을 증대시킨 결과이며 같은 생육조건이라 하더라도 각기 다른 양분 공급원이 영향을 준 것이라고 하였다. Hallmann (2012)은 유기농법 (organic farm) 및 관행농법 (conventional farm)에 따른 토마토 열매의 페놀성 화합물함량을 평가하였다. 연구결과, 토마토의 총 플라보노이드, 3-quercetin-rutinoside, myricetin 함량은 유기농법이 관행농법에 비해 높은 것으로 나타났다. 그러나 이는 반대의 경향을 나타낼 수 있음을 보고하였다. 이와 관련하여 Coria-Cayupán et al. (2009)은 상추 (*Lactuca sativa* L.)의 토양 재배 시 유기물질 처리에 따른 페놀성 화합물 (caffeic acid, coumaric acid) 함량을 평가하였다. 연구결과, 상추 생중량은 Na의 함량 ($1.12 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$)이 가장 높은 '도시고형 폐기물 퇴비화 (USW-C)' 처리구를 제외한 모든 처리구에서 무처리구 대비 증가하는 것으로 나타났다. 또한 coumaric acid는 상추의 주된 페놀성 화합물로 'urea + 과일 및 채소 고형 폐기물의 퇴비화 (FVSW-C)' 처리구와 urea 처리구에서 무처리구 대비 각각 36, 33.4% 낮은 수준이었다. 이와 함께 유기물질을 퇴비화, 지렁이 퇴비화하여 처리하는 경우 대부분의 처리구에서 총 페놀성 화합물 함량이 낮은 수준이었는데, 이는 토양 투입을 위한 유기물질의 퇴비화와 지렁이

이 퇴비화 처리가 페닐프로파노이드 경로를 통한 페놀성 화합물의 생합성에 부정적인 영향을 준 것에 기인한다고 하였다. 그러므로 Coria-Cayupán et al. (2009)은 토양에 대한 질소 공급이 페놀성 화합물의 합성에 부정적 영향을 보인다고 하였다.

기타 질소, 유기물질 외에도 타 양분의 처리에 따른 연구들이 보고되고 있다. Moor et al. (2009)은 토양에서 딸기 (*Fragaria × ananassa* Duch.) 재배 시 i) 액상비료 (N:P:K=3:12:15)가 함유한 아인산염 (phosphite, H_3PO_3)과 ii) 수용성비료 (N:P:K=7:4:27)가 함유한 인산염 (phosphate, H_3PO_4)의 처리 방법에 따른 딸기 열매의 안토시아닌 함량을 평가하였다. 연구결과, 정식 전 액상비료 0.3% 용액에 10분간 침지한 처리구의 생중량 기준 안토시아닌 함량은 $32 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ 로 타 처리구 ($26\text{--}29 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ FW) 대비 높은 것으로 나타났다. 이는 정식 전 인산염 비료 용액의 침지가 식물의 방어기작을 활성화 시키면서 안토시아닌 생성에 긍정적 효과를 나타낸 것이라고 하였다. 그러나 이 같은 결과는 품종별, 비료 별로 차이를 나타낼 수 있다고 하였다 (Moor et al., 2009). 한편, Singh et al. (2012)은 당근 (*Daucus carota*) 5개 품종의 양액 재배 시 칼슘 (Ca), 붕소 (B) 결핍에 따른 당근의 페놀성 화합물의 함량을 평가한 결과, ‘붕소결핍 (-B)’ 및 ‘칼슘, 붕소 동시 결핍 (-ve)’ 처리 시 대부분의 당근 품종에서 총 페놀성 화합물의 함량이 증가하였으며, 이는 잘 알려진 것과 같이 붕소 결핍 식물에서 페놀성 화합물이 증가하는 것과 일치하는 결과라고 하였다. 한편, 자색 (purple) 또는 흑색 (black) 당근에 다량 존재하는 것으로 알려진 안토시아닌의 경우 자색당근인 품종에서만 검출되었으며, 이는 ‘-B’, ‘-ve’ 처리구에서 감소하였으나 ‘칼슘결핍 (-Ca)’ 처리구의 경우 증가함을 보고하였다. 일부 처리구를 제외한 페놀성 화합물 증가의 원인으로는 식물세포벽 유지, membrane 기능, 대사활성과 연관된 붕소와 칼슘의 결핍으로 인해 당근의 물리적 상처 발생이 용이해 지면서 당근 외부 조직에서 물리적 상처 발생 시 합성되는 페놀성 화합물 증가 등에 기인한 것이라고 하였다.

페놀성 화합물 종합 식물의 2차 대사물질인 페놀성 화합물의 생합성을 위해 PAL의 활성화는 매우 중요하다. 선행연구 (Table 1)들은 대부분 양분 공급 시 질소 저감에 의해 식물체 내 PAL 활성이 증가하면서 페놀성 화합물 생합성이 증대됨을 보고하고 있다. 질소는 식물 생육의 필수원소로 재배 과정에 있어 반드시 공급하여야 하나 선행 연구 결과들에서 제시된 바와 같이 질소 공급은 페놀성 화합물 축적에 불리하게 작용하는 것으로 판단된다. 그러므로 향후 식물별, 품종별, 재배환경 별로 식물 생육 증진 및 페놀성 화합물 고축적을 위한 최적의 질소 공급 연구가 필요한 것으로 판단된다.

카로티노이드계 화합물 (carotenoids) 카로티노이드 (carotenoid)는 광합성의 보조색소 역할을 하는 노란색, 옐렌지색, 붉은색의 테르페노이드 (terpenoid) 화합물로 알려져 있다. 식물이 함유한 카로티노이드는 lutein, zeaxanthin, violaxanthin과 같은 oxygenated xanthophyll 그룹과 hydro-carbon carotene 그룹의 α -carotene, β -carotene, lycopene 으로 분류할 수 있다 (Chenard et al., 2005; Kopsell 등 2007b).

질소 공급 선행 연구들에 의하면 식물체 내 카로티노이드계 화합물은 식물 종류, 품종 등에 영향을 받으나 전반적으로 높은 수준의 질소 공급조건에 의해 증가하는 것으로 알려져 있다. Chenard et al. (2005)은 파슬리 (*Petroselinum crispum* Nym.)의 양액 재배 시 질소 공급 수준 (6, 13, 26, 52, 105 mg N L^{-1})에 따른 카로티노이드계 화합물인 lutein-zeaxanthin과 β -carotene의 잎 내 함량을 평가하였다. 연구결과, 8주 후 수확하였을 때 lutein-zeaxanthin과 β -carotene의 함량은 질소 공급 수준이 높아지면서 증가하였으며 105 mg N L^{-1} 처리구에서 가장 높아 6 mg N L^{-1} 처리구 대비 각각 99%, 98% 까지 증가하였다. Simonne et al. (2007)은 황색방울토마토 (*Lycopersicon esculentum* Mill.)의 토양 재배 시 질소 추천 시비량인 234 kg ha^{-1} 의 0, 33 (78 kg ha^{-1}), 66 (157 kg ha^{-1}), 100 (234 kg ha^{-1}), 133 (314 kg ha^{-1}), 166% (392 kg ha^{-1})에 해당하는 질소 처리에 따른 열매 내 카로티노이드계열 화합물 (lutein 및 β -carotene) 함량을 평가하였다. 연구결과, lutein과 β -carotene 함량은 질소 처리량 증가에 따라 각각 0.83에서 $0.90 \mu\text{g g}^{-1}$ 과 0.12에서 $0.37 \mu\text{g g}^{-1}$ 으로 증가하는 경향이였다. Kopsell et al. (2007b)은 물냉이 (*Nasturtium officinale* R. Br.)의 양액 재배 시 황 (8, 16, 32 mg L^{-1})과 질소 (6, 56, 106 mg L^{-1}) 수준별 처리에 따른 카로티노이드 함량을 평가한 결과, 질소 농도 증가 시 lutein, β -carotene, 5,6-epoxy lutein, neoxanthin, zeaxanthin 함량은 증가하였으나 황 농도 증가에 따른 카로티노이드계 화합물의 함량은 영향을 받지 않는다고 하였다. 그러므로 양분 관리에 의한 카로티노이드계 화합물 함량 증대를 통해 물냉이의 영양학적 가치 상승이 가능하다고 하였다. Kopsell et al. (2007a)은 케일 (*B. oleracea* L. var. *acephala* DC)의 양액 재배 시 질소 수준별 (6, 13, 26, 52, 105 mg L^{-1}) 및 질소 형태 ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$)에 따른 케일 함유 카로티노이드계 화합물 함량을 평가하였다. 연구결과, 질소 농도가 증가함에 따라 케일의 생중량 기준 카로티노이드계 화합물 함량은 감소하는 경향이였으나 유의한 수준의 차이는 나타나지 않았다. 그러나 건중량 기준으로 평가하였을 때 lutein은 55-63%, β -carotene은 68-100%까지 증가하는 것으로 나타났으며 질소 105 mg L^{-1} 처리구에서 최대치를 나타냈다. 공급되는 질소 형태에 따른 카로티노이드계

Table 1. Effects of nutrient supply types on accumulation of phenolics in selected plants.

Crops	Nutrient treatments	Results	References
Basil (<i>Ocimum basilicum</i> L.)	Different N levels (0.1, 0.5, 1.0 or 5.0 mM N as NH_4NO_3) of Hoagland solutions	Higher total phenolic contents, rosmarinic and caffeic acid concentration at the lowest N level	Nguyen and Niemeier, 2008
Carrot (<i>Daucus carota</i>)	Deficiency of calcium (Ca) and/or boron (B)	Higher total phenolic acids contents in B deficiency treatments	Singh et al., 2012
Chicory (<i>Cichorium intybus</i> L.)	Organic fertilizer, mineral fertilizer and mixture	Higher total phenolic contents in control (no fertilization) compared to organic and mineral fertilization	Sinkovič et al., 2015
Grapevine (<i>Vitis vinifera</i> L.)	Limited (1.4 mM N), mean (3.6 mM N) and excessive (7.2 mM N) N levels	Lower anthocyanin content at the high N level	Hilbert et al., 2003
Grapevine (<i>Vitis vinifera</i> L.)	0, 60 and 120 kg N ha ⁻¹ (as NH_4NO_3)	Higher anthocyanins (cyanidin, petunidin, malvidin, peonidin and delphinidin) contents at the lower N levels	Soubeyrand et al., 2014
Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Organic and mineral fertilizations	Lower total phenolic contents in organic and mineral fertilizations compared to the control	Coria-Cayupán et al., 2009
Olive (<i>Olea europaea</i> L.)	0 or 1.5 kg N tree ⁻¹ yr ⁻¹ (as urea)	Decrease in total polyphenol contents with increasing N level	Fernández-Escobar et al., 2006
Onion (<i>Allium cepa</i> L.)	Low (72 kg N ha ⁻¹) and conventional (152 kg N ha ⁻¹) N levels	N levels not affected quercetins (quercetin 3,4'-diglucoside and quercetin 4'-monoglucoside) contents	Mogren et al., 2007
Pumpkin (<i>Cucurbita pepo</i> L.)	0, 90, 180 and 270 kg ha ⁻¹ as NPK (15:15:15) fertilizer	The highest phenolics (total phenol, flavonoid, cyanidin and proanthocyanidin) contents between 90 and 180 kg ha ⁻¹ of NPK	Oloyede et al., 2014
Stevia (<i>Stevia rebaudiana</i> Bertoni)	0, 50, 150 and 300 kg N ha ⁻¹ (as NH_4NO_3)	The highest total phenols and flavonoids contents at 150 kg N ha ⁻¹	Tavarini et al., 2015
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	Inorganic fertilization (nutrient solution) and organic fertilization (chicken manure, blood powder, etc. and cut grass)	Higher soluble phenolics contents in organic fertilization	Toor et al., 2006
Tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>)	4, 6 and 12 mM NO_3^-	Higher rutin, caffeic acid glycoside and caffeic acid derivate contents at the lowest N level	Bénard et al., 2009
Tomato (not available)	Organic farm vs conventional farm	Higher total flavonoid, 3-quercetin rutinoside and myricetin contents in organic tomatoes	Hallmann, 2012
Tomato (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)	Low (5.31 meq $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$) and standard N dose (9.50 meq $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$)	Higher kaempferol-3-O-rutinoside and chlorogenic acid contents at the low N level	Erba et al., 2013
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	Control, recommended chemical fertilizer, EM compost and combination (half of fertilizer + EM)	Phenol content were slightly increased by 2.06% in combination treatment (EM compost and half recommended dose of chemical fertilizers)	Verma et al., 2015
Strawberry (<i>Fragaria × ananassa</i> Duch.)	Control, soaking in fertilizer solution, soaking + fertigation and fertigation	Higher anthocyanin content in the plant soaked prior to planting in 0.3% liquid NPK fertilizer solution for 10 min	Moor et al., 2009
Strawberry (<i>Fragaria × ananassa</i> Duch.)	Fertigation using 0.6, 1.2, or 2.4 mS cm ⁻¹ of solution including fertilizer	Higher ellagic acid (polyphenol) and flavonols (quercetin and kaempferon) at the lowest fertilization level	Anttonen et al., 2006
Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	0.25, 0.5, 1.0 and 2.0 g N pot ⁻¹ (as NH_4NO_3)	1) Increase in free soluble phenolic and decrease in conjugated soluble phenolics with increasing N level 2) Insoluble bound phenolic : not affected	Stumpf et al., 2015

화합물 함량 평가 결과, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 비율이 증가함에 따라 lutein 함량은 생중량 기준 39–155%, 건중량 기준 30–155% 증가하였으며, β -carotene 함량은 생중량 기준 130–214%, 건중량기준 100–111% 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로 작물의 카로티노이드계 화합물 함량을 증가시키기 위해 질소 공급 관리의 중요성을 보고하였다.

상기 연구결과들과는 달리 Hochmuth et al. (1999)은 당근 (*Daucus carota* L.) 재배 시 질소의 토양처리 (0–220 kg ha^{-1})에 따른 당근 뿌리의 카로티노이드 농도를 평가하였다. 연구결과, 당근뿌리의 카로티노이드 농도는 질소 160 kg ha^{-1} 처리구에서 최대로 나타났으며, 이 때의 질소 처리량은 당근의 최대 수량을 위한 질소 처리량과 유사함을 보고하였다. Reif et al. (2012)은 시금치 (*Spinacia oleracea*)의 토양 재배 시 황 (0, 10, 20, 40, 60, 80 kg ha^{-1}), 질소 (150, 180, 210 kg ha^{-1}) 처리 수준 및 계절에 따른 카로티노이드계 화합물 (lutein, β -carotene) 함량을 평가하였다. 연구결과, 황 처리 수준 별 여름재배 시금치의 lutein, β -carotene 함량은 처리 수준 간에 차이가 없었으나 겨울재배 시금치는 0 kg ha^{-1} 처리구에서 낮은 함량을 나타냈다. 겨울재배 시금치에 대한 질소와 황 수준별 혼합처리 연구결과, 황의 처리수준과 관계없이 낮은 수준의 질소처리 (150 kg ha^{-1})에서 상대적으로 높은 lutein, β -carotene 함량으로 나타났다. 이와 같은 결과는 질소 시비 증대에 따라 카로티노이드계 화합물 함량이 증대됨을 보고한 선행 연구 (Chenard et al., 2005; Kopsell et al., 2007a; 2007b)의 결과와 상반되는 것으로 질소 시비에 의한 카로티노이드계 화합물 함량은 작물별로 다르게 나타나는 것으로 판단된다.

유기물질 공급 무기질비료 처리 외에도 유기물질의 처리에 따른 식물체 내 카로티노이드계 화합물 함량 연구들이 보고되고 있다. Coria-Cayupán et al. (2009)은 상추 (*Lactuca sativa* L.)의 토양 재배 시 유기물질 처리에 따른 카로티노이드계 화합물 (β -carotene, lutein, violaxanthin, lactucaxanthin, neoxanthin) 함량을 평가하였다. 연구결과, ‘과일 및 채소 고형 폐기물의 지렁이 퇴비화 (FVSW-V)’ 처리구를 제외한 모든 처리구에서 무처리구 대비 증가하는 것으로 나타났다. ‘urea + 과일 및 채소 고형 폐기물의 퇴비화 (FVSW-C)’ 처리구의 경우 카로티노이드계 화합물의 함량은 무처리구 대비 50% 이상 높았으며, ‘소 도축장 폐기물의 지렁이 퇴비화 (CSW-V)’ 처리구가 그 뒤를 이었다. 카로티노이드계 화합물 생합성은 무기질소의 공급에 의존하는데 (Mozafar, 1993), CSW-V의 총 유기질소 (TON) 수준은 타 유기물질에 비해 가장 높았으며 (1.6 g 100g^{-1}), TOC/TON 비율 (12.1)이 토양 내에서 CSW-V의 무기화에 적당하였다. 반대로 카로티노이드계 화합물 함량이 가장 낮았던 FVSW-V 처리구의 TOC/TON 비율 (16.9)도 이와 같은 맥락에서 설명

된다고 하였다. Hallmann (2012)은 유기농법 및 관행농법에 따른 토마토 열매의 카로티노이드계 화합물 함량을 평가하였다. 연구결과, 존재하는 카로티노이드의 85% 이상이 lycopene으로 나타났으며, 관행농법으로 재배한 토마토의 카로티노이드계 화합물 함량이 유기농법에 비해 높은 것으로 나타났다. 무기질 비료를 사용하는 관행농법의 경우 토마토는 동화가 가능한 질소를 기질로부터 더욱 용이하게 흡수한다. 질소는 카로티노이드계 화합물의 생합성 및 β -carotene으로부터 라이코펜 변환의 핵심 효소인 acetyl-CoA 형성을 위한 주요 원소이다. 이로 인해 lycopene 및 β -carotene 함량이 관행재배 토마토에서 높은 것으로 보고하였다. 한편, Verma et al. (2015)은 토마토 (*Lycopersicon esculentum*) 재배 시 NPK 무기질비료 추천량 처리 및 추천량 절반+EM (유용미생물) 처리에 따른 lycopene 함량을 평가하였다. 연구결과, 토마토 열매의 lycopene 함량은 추천량 처리구 대비 35.52% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 EM을 통한 유기적 시비에 의한 결과라고 하였다.

기타 질소, 유기물질 외에도 타 양분 처리에 따른 카로티노이드계 화합물 함량 연구가 보고되고 있다. Singh et al. (2012)은 당근 (*Daucus carota*) 5개 품종의 양액 재배 시 칼슘 (Ca), 붕소 (B) 결핍에 따른 카로티노이드계 화합물 4종 (lutein, α -, β -carotene, lycopene)의 당근 내 함량을 평가하였다. 연구결과, 주황 (orange) 당근에 다량 존재한다고 알려진 carotene은 칼슘 또는 붕소를 공급하지 않은 경우 (-Ca, -B 처리구)에 ‘Kuroda (주황계열)’ 당근 내 α -, β -carotene 함량이 대조구 (+ve 대조구: Ca, B 모두 공급, -ve 대조구: Ca, B 무공급)에 비해 각각 50, 32.8% 증가하였다. 이는 붕소 또는 칼슘의 결핍이 카로티노이드계 물질의 전구체인 isopentenyl diphosphate (IPP)의 카로티노이드 생합성 경로를 활성화하는 것에 기인한다고 하였다. 한편, 칼슘과 붕소가 동시에 결핍된 경우 α -, β -carotene 함량의 차이가 나타나지 않았는데 이를 통해 붕소나 칼슘 중 한 원소가 α -, β -carotene 생성에 필요한 것으로 판단하였다. 붕소와 칼슘이 모두 공급될 경우 carotene 생성이 저해되는 데, 이는 붕소와 칼슘 공존 시 carotene 생합성 저해 또는 carotene의 이화작용 증진에 따른 결과라고 하였다. 한편, 적색(red) 당근에 다량 존재하는 것으로 알려진 라이코펜은 칼슘 결핍, 붕소 결핍 처리 시 ‘Nutri-Red (적색계열)’ 당근 내 lycopene 농도가 각각 72, 9.1% 증가한다고 하였다. 이는 붕소 공급이 당근의 lycopene 생성에 긍정적 영향을 나타내기 때문이라고 하였다. 노랑 (yellow) 당근에 주로 존재하는 것으로 알려진 lutein은 칼슘 결핍 처리구에서 미량 증가하였으나 전반적으로 모든 처리구에서 상당한 차이가 없었다. 이는 당근 내에서 lutein이 타 carotene에 비해 10–20배 낮은 수준으로 존재하여 양분 결핍에 따른 효과

가 미미한 것으로 판단된다고 하였다.

Toor et al. (2006)은 토마토 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 재배 시 무기질(NH_4^+ , NO_3^- 함유 양액) 및 유기질(혈분, 톱밥, 골분 혼합 계분 처리 및 grass, clover 녹비) 양분 처리에 따른 lycopene 함량을 평가하였다. 연구결과, lycopene 함량은 grass, clover 녹비 처리구 및 NH_4^+ 함유 양액 처리구가 타 처리구에 비해 낮은 것으로 나타났는데 이는 상대적으로 낮은 수준의 황 (S)을 함유한 grass, clover 녹비 처리구 및 NH_4^+ 함유 양액 처리구 토마토의 광합성을 및 클로로필 함량이 감소된 것에 기인한 결과라고 하였다. 그러므로 낮은 수준의 황 처리가 토마토의 lycopene 생합성을 저해할 수 있다고 하였다.

카로티노이드계 화합물 종합 식물체 내 카로티노이드계 화합물은 녹색채소와 함께 주로 황색을 나타내는 식물에 대한 연구가 주로 이루어졌다. 선행 연구 (Table 2)들의 결과를 살펴보면 카로티노이드계 화합물은 질소 공급 증가에 의해 증대되는 것으로 보고되고 있다. 그러나 과도한 질소의 공급은 과실의 성숙 지연, 비료 구입비용 증가, 환경 악영향 문제 등을 야기할 수 있다. 그러므로 향후에는 식물별, 품종별, 재배환경 별로 수확량 및 카로티노이드계 화합물 축적의 극대화를 위한 최적의 질소 공급 연구가 필요한 것으로 판단된다.

아스코르빈산 (ascorbic acid) Vitamin C로도 알려진 아스코르빈산은 인간을 제외한 대부분의 포유동물의 간에서 glucose로부터 합성되는 물질로 인간에게는 필수 영양소이다 (Kumar and Rizvi, 2012). Vitamin C는 인체 내에서 발암성의 N-nitroso 화합물의 생성을 저해하며 심혈관계 질환, 암의 위험성을 감소시키는 것으로 알려져 있다 (Mozafar, 1996; Kumar and Rizvi, 2012). 그러나 인간은 vitamin C 합성을 위한 gulonolactone oxidase를 체내에 보유하고 있지 않으므로 과일, 채소의 섭취를 통해 vitamin C를 공급받아야 한다. 한편, 과도한 질소비료의 사용은 식물의 영양생장을 가속화하나 식물 조직 내 vitamin C 함량을 감소시킨다고 알려져 있다 (Mozafar, 1996). 이와 관련한 내용을 살펴보면 다음과 같다.

Mozafar (1996)는 시금치 (*Spinacia oleracea*)의 양액 재배 시 수확 전 2일간 질소 공급 배제에 따른 vitamin C 함량을 평가하였다. 연구결과, 저농도 (0.5 mM) 및 고농도 (15 mM)의 질소 함유 양액 처리 후 수확 전 질소 공급을 배제했을 때 vitamin C 함량이 무처리구 대비 각각 51%, 32% 높은 것으로 나타났다. 이와 함께 NO_3^- 함량도 함께 급격하게 감소하는 것으로 나타나 수확 직전의 질소 공급 배제는 vitamin C 함량의 증대 및 NO_3^- 의 함량 감소라는 2가지 긍정적 효과를 나타낸다고 하였다. Simonne et al. (2007)은 황

색방울토마토 (*Lycopersicon esculentum* Mill.)의 토양 재배 시 질소 추천 시비량 (234 kg ha⁻¹)의 0, 33 (78 kg ha⁻¹), 66(157 kg ha⁻¹), 100 (234 kg ha⁻¹), 133 (314 kg ha⁻¹), 166% (392 kg ha⁻¹)을 처리하고 열매 내 아스코르빈산 (ascorbic acid) 함량을 평가하였다. 연구결과, 아스코르빈산 함량은 질소 수준이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 그러므로 토마토의 아스코르빈산 함량을 높게 유지하려는 생산자는 질소를 낮은 수준으로 사용하는 것이 적합하다고 하였다. Xu et al. (2010)은 브로콜리 (*Brassica oleracea* var. *italica*)의 토양 재배 시 질소 처리 수준 (0, 100, 200, 300, 400 kg ha⁻¹)별 농도를 평가하였다. 연구결과, 적절한 수준 (100-200 kg ha⁻¹)의 질소 처리구에서 아스코르빈산 농도는 통계적으로 유의한 차이가 없었으나 높은 수준 (300-400 kg ha⁻¹)의 질소 처리구의 경우 브로콜리 꽃과 줄기의 아스코르빈산 농도가 감소한다고 하였다. Hallmann (2012)은 유기농법 및 관행농법에 따른 토마토 열매의 vitamin C 함량을 평가한 결과, 유기농법으로 재배된 토마토 (354.7 mg 100g⁻¹)가 관행농법으로 재배된 토마토 (346.5 mg 100g⁻¹)에 비해 높은 수준의 vitamin C 함량을 나타냈다. 관행농법의 경우 토마토는 동화가 가능한 질소를 기질로부터 더욱 용이하게 흡수하며, 질소와 같은 다량원소의 높은 농도는 단백질의 합성을 증대시키며 이는 vitamin C와 같은 탄소기반 화합물의 합성을 저해하게 되는데 (Hallmann, 2012), 상기 연구결과들도 높은 수준의 질소 공급 조건에서 vitamin C의 축적이 감소되는 것으로 해석될 수 있다.

질소의 원활한 공급은 작물 잎, 줄기 생장을 활발하게 하여 열매로 도달하는 빛을 차단함으로써 간접적으로 아스코르빈산의 축적을 낮추게 된다. Toor et al. (2006)은 토마토 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 재배 시 무기질 (NH_4^+ , NO_3^- 함유 양액) 및 유기질 (혈분, 톱밥, 골분 혼합 계분 처리 및 grass, clover 녹비) 양분 처리에 따른 수용성 아스코르빈산 함량을 평가하였다. 연구결과, 혼합 계분 및 녹비 처리구에서 토마토 내 아스코르빈산 함량이 무기 양분 처리구 대비 29% 높은 수준으로 나타났다. 이는 무기양분 처리구에서 높은 줄기와 잎의 생장이 그늘효과 (shading effect)를 야기하면서 아스코르빈산 축적 축적에 필요한 빛을 차단한 것에 기인한다고 하였다. Bénard et al. (2009)도 토마토 (*Solanum lycopersicum* L.)의 양액 재배 시 질소 농도별 (4, 6, 12 mM) 처리에 따른 아스코르빈산 함량을 평가한 결과, 낮은 수준의 질소 처리 시 열매 내 아스코르빈산 함량은 11-29% 상승하였는데, 이는 질소 공급 저하에 따라 열매로 도달하는 빛의 증가한 것에 기인한다고 하였다. 이와 유사하게 Erba et al. (2013)은 토마토 (*Solanum lycopersicum* L.)의 양액 재배 시 질소 표준 처리, 저농도 처리에 따른 토마토 열매의 vitamin C 함량을 평가하였다. 연구결과, 토마토의 vitamin C 함량은 질소 저농도 처리구 (평균: 309.9

Table 2. Effects of nutrient supply types on accumulation of carotenoids in selected plants.

Crops	Nutrient treatments	Results	References
Parsley (<i>Petroselinum crispum</i> Nym.)	Different N levels (6, 13, 26, 52 and 105 mg L ⁻¹) of nutrient solutions	The highest levels of lutein-zeaxanthin and β-carotene at the highest N level (105 mg L ⁻¹)	Chenard et al., 2005
Tomato (yellow grape) (<i>Lycopersicon</i> <i>esculentum</i> Mill.)	0, 78, 157, 234, 314 and 392 kg N ha ⁻¹ [0, 33, 66, 100, 133 and 166% of the recommended N rate (234 kg ha ⁻¹)]	Increase in lutein and β-carotene contents with increasing N level. But N rate did not significantly affect those contents.	Simonne et al., 2007
Watercress (<i>Nasturtium officinale</i> R. Br.)	Different S levels (8, 16 and 32 mg L ⁻¹) and N levels (6, 56 and 106 mg L ⁻¹) of nutrient solution	Increase in carotenoids (lutein, β-carotene, 5,6-epoxylutein, neoxanthin and zeaxanthin) contents with increasing N level. But S rate did not affect those contents	Kopsell et al., 2007b
Kale (<i>B. oleracea</i> L. var. <i>acephala</i> DC)	1) Different N levels (6, 13, 26, 52 and 105 mg L ⁻¹) of nutrient solutions at a constant 1NH ₄ -N:3NO ₃ -N ratio 2) Different ratios of N forms (NH ₄ -N and NO ₃ -N) at a constant 105 mg N L ⁻¹	1) Increase in lutein (55-63%) and β-carotenoid (68-100%) contents based on dry weight with increasing N level 2) Increasing in lutein (30-155%) and β-carotenoid (100-111%) contents based on dry weight with increasing NO ₃ -N ratio	Kopsell et al., 2007a
Carrot (<i>Daucus carota</i> L.)	0, 55, 110, 165 and 220 kg N ha ⁻¹	Carotenoid level was maximized at 160 kg N ha ⁻¹	Hochmuth et al., 1999
Spinach (<i>Spinacia oleracea</i>)	Different S levels (0, 10, 20, 40, 60 and 80 kg ha ⁻¹) and N levels (150, 180 and 210 kg ha ⁻¹)	Higher lutein and β-carotene contents at 150 kg N ha ⁻¹ regardless of S levels in winter season	Reif et al., 2012
Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Organic and mineral fertilizations	Higher carotenoids (b-carotene, lutein, violaxanthin, lactucaxanthin, neoxanthin) contents in organic (exception of fruit and vegetable solid waste vermicompost) and mineral fertilizations compared to the control	Coria-Cayupán et al., 2009
Tomato (not available)	Organic farm vs conventional farm	Higher carotenoids (lycopene and β-carotene) contents in conventional tomatoes	Hallmann, 2012
Tomato (<i>Lycopersicon</i> <i>esculentum</i>)	Control, recommended chemical fertilizer, EM compost and combination (half of fertilizer + EM)	Lycopene content was increased by 35.52% in combination	Verma et al., 2015
Carrot (<i>Daucus carota</i>)	Deficiency of calcium (Ca) and/or boron (B)	Higher carotenoids (α- and β-carotene) contents in B or Ca deficiency treatments	Singh et al., 2012
Tomato (<i>Lycopersicon</i> <i>esculentum</i> Mill.)	Inorganic fertilization (nutrient solution) and organic fertilization (chicken manure, blood powder, etc. and cut grass)	Lower lycopene content in the treatments of organic fertilization and nutrient solutions dominant NH ₄	Toor et al., 2006

mg kg⁻¹)가 표준 처리구 (평균: 300.1 mg kg⁻¹)에 비해 높았다. 이는 상대적으로 높은 수준의 질소 공급에 따른 토마토 엽 발달이 열매의 광 노출을 감소시킴으로써 vitamin C 함량 증가에 부정적 영향을 준 것에 기인한다고 하였다.

아스코르빈산 종합 선행 연구결과 (Table 3)들에서 보고된 것과 같이 질소 공급의 증가는 페놀성 화합물과 유사하게 식물체 내 vitamin C 함량을 감소시키는 것으로 판단

된다. 그러므로 향후 식물별, 품종별, 재배환경 별로 식물 생육 증진 및 vitamin C 함량 증대를 위한 최적의 질소 공급 연구가 필요한 것으로 판단된다.

글루코시놀레이트 (glucosinolates)

십자화과 식물에서 발견되는 2차 대사물질인 글루코시놀레이트 (glucosinolate)는 일부 아미노산 (methionine, phenylalanine, tryptophan)으로부터 유래되며 이는 각각 지방족 (aliphatic), 방향족 (aro-

Table 3. Effects of nutrient supply types on accumulation of ascorbic acid (vitamin C) in selected plants.

Crops	Nutrient treatments	Results	References
Spinach (<i>Spinacia oleracea</i>)	Different N levels (0.5 and 15 mM) of nutrient solutions. After 16 days of growth, N-free nutrient solution was supplied	Higher vitamin C contents in the treatment of exclusion of N supply compared to control	Mozafar, 1996
Tomato (yellow grape) (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	0, 78, 157, 234, 314 and 392 kg N ha ⁻¹ [0, 33, 66, 100, 133 and 166% of the recommended N rate (234 kg ha ⁻¹)]	Decrease in ascorbic acid contents with increasing N level	Simonne et al., 2007
Broccoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>)	0, 100, 200, 300 and 400 kg N ha ⁻¹ (as urea)	1) Ascorbic acid contents were not significantly affected at proper N levels (100 and 200 kg ha ⁻¹) 2) Decrease in ascorbic acid contents at higher N levels (300 and 400 kg ha ⁻¹)	Xu et al., 2010
Tomato (not available)	Organic farm vs conventional farm	Higher vitamin C contents in organic tomatoes	Hallmann, 2012
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	Inorganic fertilization (nutrient solution) and organic fertilization (chicken manure, blood powder, etc. and cut grass)	Higher ascorbic acid content in organic fertilization	Toor et al., 2006
Tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>)	4, 6 and 12 mM NO ₃ ⁻	Higher ascorbic acid contents at low N levels	Bénard et al., 2009
Tomato (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)	Low (5.31 meq NO ₃ ⁻ L ⁻¹) and standard N dose (9.50 meq NO ₃ ⁻ L ⁻¹)	Higher vitamin C content at the low N level	Erba et al., 2013
Carrot (<i>Daucus carota</i>)	Deficiency of calcium (Ca) and/or boron (B)	Increase in vitamin C levels (63-70%) in deficiencies of Ca and/or B compared to control	Singh et al., 2012

matic), 인돌 (indole) 글루코시놀레이트로 분류된다 (Kopsell et al., 2007b; Omirou et al., 2009; Rosen et al., 2005). 글루코시놀레이트는 발암물질의 활성 저해효과를 나타내는데, 일례로 indole-3-carbinol의 경우 실험동물의 폐암 등에 대한 예방물질로 알려져 있으며, 발암물질 활성 효소의 저해, 발암물질 무독화 효소들의 증대, 세포자살의 가속화 등과 연관있는 물질로 알려져 있다 (Rosen et al., 2005). 글루코시놀레이트는 질소와 황을 함유하고 있어 식물 생육 시 질소와 황의 처리에 강하게 영향을 받게 된다 (Xu et al., 2010).

Rosen et al. (2005)은 양배추 (*Brassica oleracea* L.) 재배 시 질소, 황의 수준이 낮은 토양에서 질소를 125, 250 kg ha⁻¹ 처리, 황을 0, 110 kg ha⁻¹ 처리하였을 때 양배추 잎의 글루코시놀레이트 함량을 평가하였다. 연구결과, 총 글루코시놀레이트는 지방축 보다는 주로 인돌 형태 (80–85%)로 존재하였으며, 질소가 낮고 황이 높은 수준으로 처리될 때 그 함량이 증가하였다. 그러므로 Rosen et al. (2005)은 질소와 황이 낮은 수준인 토양에서 재배되는 양배추의 글루코시놀레이트 함량은 토양의 비옥도 관리와 품종에 의해 결정된다고 하였다. Kopsell et al. (2007b)도 물냉이 (*Nasturtium officinale* R. Br.)의 양액 재배 시 황 (8, 16, 32 mg L⁻¹)과

질소 (6, 56, 106 mg L⁻¹) 수준별 처리에 따른 글루코시놀레이트 함량을 평가하였다. 연구결과, 질소 농도 증가에 따라 인돌 글루코시놀레이트 함량은 감소하였으며, 방향족 및 총 글루코시놀레이트 함량은 56 mg L⁻¹에서 최대치를 나타냈다. 이와 함께 황 농도 증가에 따라 지방축, 방향족, 총 글루코시놀레이트 함량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로 양분 관리에 의한 글루코시놀레이트 증대를 통해 물냉이의 영양학적 가치 상승이 가능하다고 하였다. Omirou et al. (2009)은 브로콜리 (*Brassica oleracea* var. *italica*)의 토양 포트 재배 시 질소 (50, 250, 600 kg ha⁻¹) 및 황 (10, 30, 70, 150 kg ha⁻¹)의 동시 처리에 따른 글루코시놀레이트 함량을 평가하였다. 연구결과, 질소 처리량 증가 시 브로콜리 잎, 꽃, 뿌리의 글루코시놀레이트 함량은 높아지나 250 kg ha⁻¹ 이상에서는 높아지지 않는 것으로 나타났다. 황 처리량 증가 시 브로콜리의 잎, 꽃, 뿌리에서의 글루코시놀레이트 함량은 급격히 낮아지는 것으로 나타났다. 이를 통해 Omirou et al. (2009)은 황이 식물체 내 글루코시놀레이트 생합성에 직접적으로 관여하는 주 요인이며, 특히 황이 제한된 조건에서 myrosinase-like 단백질에 의한 글루코시놀레이트 분해가 일어난다고 하였다. 또한 질소:황의 비율이 증가할 때 질소 증가에 기인한 영양생장이 황을 함유한 지

Table 4. Effects of nutrient supply types on accumulation of glucosinolates selected plants.

Crops	Nutrient treatments	Results	References
Cabbage (<i>Brassica oleracea</i> L.)	Different N levels (125 and 250 kg ha ⁻¹) and S levels (0, 110 kg ha ⁻¹) and combination	Higher total glucosinolates contents at the low N and high S levels	Rosen et al., 2005
Watercress (<i>Nasturtium officinale</i> R. Br.)	Different S levels (8, 16 and 32 mg L ⁻¹) and N levels (6, 56 and 106 mg L ⁻¹) of nutrient solution	1) Decrease in indole glucosinolate contents with increasing N level 2) Aliphatic and aromatic glucosinolate contents were maximized at 56 mg N L ⁻¹ 3) Increase in total glucosinolate contents with increasing S level	Kopsell et al., 2007b
Broccoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>)	Different N levels (50, 250 and 600 kg ha ⁻¹) and S levels (10, 30, 70, 150 kg ha ⁻¹)	1) Glucosinolates contents were increased until the 250 kg N ha ⁻¹ treatment 2) Glucosinolates contents were sharply decreased with increasing S levels	Omirou et al., 2009
Broccoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>)	0, 100, 200, 300 and 400 kg N ha ⁻¹ (as urea)	Decrease in glucoraphanin contents with increasing N levels	Xu et al., 2010

방축 글루코시놀레이트의 생합성을 앞서게 되어 글루코시놀레이트 농도는 대체적으로 감소한다고 하였다.

한편, Xu et al. (2010)은 브로콜리 (*Brassica oleracea* var. *italica*) 재배 시 질소 처리 수준 (0, 100, 200, 300, 400 kg ha⁻¹)별 토양 처리에 따른 브로콜리 꽃과 줄기의 글루코시놀레이트 함량을 평가하였다. 연구결과, 무처리구와 비교할 때 100–300 kg ha⁻¹ 처리의 경우 꽃과 줄기의 glucoraphanin 농도는 통계적으로 유의한 수준의 감소는 없었다. 400 kg ha⁻¹ 처리구의 경우에는 꽃과 줄기의 glucoraphanin 농도가 급격히 감소하였다. 특히 꽃과 줄기의 glucoraphanin 농도의 경우 'Youxiu' 품종은 각각 50%, 39% 감소하였고, 'Lvling' 품종은 각각 38%, 39% 감소함을 보고하였다. Xu et al. (2010)은 적정 수준의 질소 시비 (200–300 kg ha⁻¹)가 glucoraphanin 농도를 비롯한 브로콜리 상품의 크기, 유통기한 증가에 가장 적절함을 보고하였다.

글루코시놀레이트 종합 선행 연구결과 (Table 4)들을 살펴보면 식물체 내 글루코시놀레이트 함량은 전반적으로 질소 공급 감소 및 황 증가에 따라 증대되나 식물, 품종, 재배 환경에 따라 차이가 있는 것으로 판단된다. 그러므로 향후 다양한 조건별로 글루코시놀레이트 함량 증대를 위한 최적 양분 공급 연구가 필요한 것으로 판단된다.

Conclusion

외국의 경우 작물의 양분 수준에 따른 기능성 물질에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있으나 현재 국내에서는 이

러한 연구들이 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 양분 공급이 향산화 효과 등의 기능성 물질로 알려진 페놀성 화합물, 카로티노이드 화합물, 아스코르빈산, 글루코시놀레이트 축적에 미치는 영향에 대한 문헌을 조사하였으며 이를 토대로 향후 국내 기능성 물질 다량 함유 농작물 생산을 위한 기초 연구자료로 활용하고자 하였다. 전반적으로 살펴보면, 페놀성 화합물의 작물 내 축적은 주로 페닐프로파노이드 생합성 경로의 핵심효소인 PAL의 활성화와 관련하는데, 질소 저감 처리 시 식물체 내 PAL 활성 증대에 의해 페놀성 화합물 생합성이 증가한다. 이와 유사하게 아스코르빈산의 경우 높은 수준의 질소 공급 시 낮은 함량을 보이는데, 이는 질소 공급 수준이 높을 때 영양생장이 가속화되어 그늘효과를 야기하면서 열매 부위로의 빛 도달을 차단한 것에 기인한다는 일부 연구가 이를 뒷받침한다. 반면, 카로티노이드계 화합물의 축적은 질소 공급이 늘어남에 따라 증가하는데, 질소가 카로티노이드계 화합물 생합성의 핵심효소 형성을 위한 주요 원소로 작용한다는 일부 연구가 이를 뒷받침 한다. 글루코시놀레이트 함량의 경우 전반적으로 질소 공급 감소 및 황 증가에 따라 높아지는 것으로 보인다. 그러나 상기 기능성 물질의 함량은 식물별, 품종별, 재배환경 별로 차이가 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 극히 높거나 낮은 수준의 양분 공급은 작물의 생육, 수량, 성숙, 비료구입비용, 환경 등에 악영향을 초래할 수 있으므로 향후 국내 재배환경에 맞는 다양한 조건별로 기능성 물질의 함량을 높일 수 있는 최적 양분 공급 연구가 필요하며, 지속적인 연구결과와 도출을 통해 국내 농업 생산물의 부가가치 상승이 가능할 것이라 생각된다.

References

- Adam, A., V. Crespy, M.-A. Levrat-Verny, F. Leenhardt, M. Leuillet, C. Demigné, and C. Rémésy. 2002. The bioavailability of ferulic acid is governed primarily by the food matrix rather than its metabolism in intestine and liver in rats. *J. Nutr.* 132:1962-1968.
- Åkerström, A., Å. Forsum, K. Rumpunen, A. Jäderlund, and U. Bång. 2009. Effects of sampling time and nitrogen fertilization on anthocyanidin levels in *Vaccinium myrtillus* fruit. *J. Agric. Food Chem.* 57:3340-3345.
- Anttonen, M.J., K.I. Hoppula, R. Nestby, M.J. Verheul, and R.O. Karjalainen. 2006. Influence of fertilization, mulch color, early forcing, fruit order, planting date, shading, growing environment, and genotype on the contents of selected phenolics in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) fruits. *J. Agric. Food Chem.* 54:2614-2620.
- Bénard, C., H. Gautier, F. Bourgaud, D. Grasselly, B. Navez, C. Caris-Veyrat, M. Weiss, and M. Génard. 2009. Effects of low nitrogen supply on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit yield and quality with special emphasis on sugars, acids, ascorbate, carotenoids, and phenolic compounds. *J. Agric. Food Chem.* 57:4112-4123.
- Boo, H.O., H.H. Lee, J.W. Lee, S.J. Hwang, and S.U. Park. 2009. Different of total phenolics and flavonoids, radical scavenging activities and nitrite scavenging effects of *Momordica charantia* L. according to cultivars. *Korean J. Medicinal Crop Sci.* 17:15-20.
- Bryant, J.P., F.S. Chapin, and D.R. Klein. 1983. Carbon/nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. *Oikos.* 40:357-368.
- Chenard, C.H., D.A. Kopsell, and D.E. Kopsell. 2005. Nitrogen concentration affects nutrient and carotenoid accumulation in parsley. *J. Plant Nutr.* 28:285-297.
- Choi, S.H., D.H. Kim, and D.S. Kim. 2011. Comparison of ascorbic acid, lycopene, β -carotene and α -carotene contents in processed tomato products, tomato cultivar and part. *Korean J. Cul. R.* 17:263-272.
- Coria-Cayupán, Y.S., M.I.S. de Pinto, and M.A. Nazareno. 2009. Variations in bioactive substance contents and crop yields of lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivated in soils with different fertilization treatments. *J. Agric. Food Chem.* 57:10122- 10129.
- Dai, J. and R.J. Mumper. 2010. Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules.* 15:7313-7352.
- Duthie, G.G., S.J. Duthie, and J.A.M. Kyle. 2000. Plant polyphenols in cancer and heart disease: implications as nutritional antioxidants. *Nutr. Res. Rev.* 13:79-106.
- Erba, D., M.C. Casiraghi, A. Ribas-Agustí, R. Cáceres, O. Marfà, and M. Castellari. 2013. Nutritional value of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) grown in greenhouse by different agronomic techniques. *J. Food Comp. Anal.* 31:245-251.
- Fernández-Escobar, R., G. Beltrán, M.A. Sánchez-Zamora, J. García-Novelo, M.P. Aguilera, and M. Uceda. 2006. Olive oil quality decreases with nitrogen over-fertilization. *Hortscience.* 41:215-219.
- Galièni, A., C.D. Mattia, M.D. Gregorio, S. Speca, D. Mastrocola, M. Pisante, and F. Stagnari. 2015. Effects of nutrient deficiency and abiotic environmental stresses on yield, phenolic compounds and antiradical activity in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Sci. Hortic.* 187:93-101.
- Hallmann, E. 2012. The influence of organic and conventional cultivation systems on the nutritional value and content of bioactive compounds in selected tomato types. *J. Sci. Food Agric.* 92:2840-2848.
- Han, S.J., S.W. Kwon, S.H. Chu, and S.N. Ryu. 2012. A new rice variety 'Keunnunjami', with high concentrations of cyanidin 3-glucoside and giant embryo. *Kor. J. Breed. Sci.* 44:185-189.
- Hilbert, G., J.P. Soyer, C. Molot, J. Giraudon, S. Milin, and J.P. Gaudillere. 2003. Effects of nitrogen supply on must quality and anthocyanin accumulation in berries of cv. Merlot. *Vitis.* 42:69-76.
- Hochmuth, G.J., J.K. Brecht, and M.J. Bassett. 1999. Nitrogen fertilization to maximize carrot yield and quality on a sandy soil. *Hortscience.* 34:641-645.
- Jang, S.W., J.N. Lee, J.S. Kim, M.H. Cheon, M.H. Seo, M.G. Song, M.J. Um, H.D. Kim, and S.B. Ko. 2015. Breeding of anthocyanin expression and high yield of lettuce 'Misun' in cool season. *Kor. J. Breed. Sci.* 47:154-158.
- Kim, D.Y., S.K. Kim, C. Chen, S. Kim, W.B. Chae, J.H. Kwak, S. Park, S.R. Cheong, and M.K. Yoon. 2013. Variation of anthocyanin content and estimation of anthocyanin content from colorimeter among strawberry accessions. *Kor. J. Breed. Sci.* 45:339-345.
- Kim, H.R. and J.B. Ahn. 2014. Analysis of free amino acids and polyphenol compounds from lycopene variety of cherry tomatoes. *Korean J. Cul. Res.* 20:37-49.
- Kim, H.B., S.L. Kim, Y.S. Seok, S.H. Lee, Y.Y. Jo, H.Y. Kweon, and K.G. Lee. 2014. Quantitative analysis of rutin with mulberry leaves (I). *J. Seric. Entomol. Sci.* 52:52-58.
- Kim, H.K., J.H. Chun, and S.J. Kim. 2015. Method development and analysis of carotenoid compositions in various tomatoes. *Korean J. Environ. Agric.* 34:196-203.
- Kopsell, D.A., D.E. Kopsell, and J. Curran-Celentano. 2007a. Carotenoid pigments in kale are influenced by nitrogen concentration and form. *J. Sci. Food Agric.* 87:900-907.
- Kopsell, D.A., T.C. Barickman, C.E. Sams, and J.S. McElroy. 2007b. Influence of nitrogen and sulfur on biomass production and carotenoid and glucosinolate concentrations in watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.). *J. Agric. Food Chem.* 55:10628-10634.
- Kumar, D. and S.I. Rizvi. 2012. Significance of vitamin C in human health and disease. *Ann. Phytomed.* 1:9-13.
- Lee, J.G., J.H. Kwak, Y.C. Um, S.G. Lee, Y.A. Jang, and C.S.

- Choi. 2012. Variation of glucosinolate contents among domestic broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) accessions. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 30:743-750.
- Lee, W.M., M.J. Kwon, L.S. Song, S. Kim, H.J. Lee, E.Y. Yang, H.S. Choi, Y.C. Huh, D.K. Park, and M.K. Yoon. 2014a. Screening of lycopene-rich germplasms using microplate method in watermelon (*Citrullus Lanatus* (thunb.) Matsum. & Nakai). *Kor. J. Breed. Sci.* 46:37-43.
- Lee, M.J., Y.K. Kim, J.C. Park, M.J. Kim, J.N. Hyun, J.S. Choi, and K.H. Park. 2014b. Hull-less waxy barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivar 'Boseokchal' with high anthocyanin content and purple lemma. *Kor. J. Breed. Sci.* 46:456-462.
- Mogren, L.M., M.E. Olsson, and U.E. Gertsson. 2007. Quercetin content in stored onions (*Allium cepa* L.): effects of storage conditions, cultivar, lifting time and nitrogen fertiliser level. *J. Sci. Food Agric.* 87:1595-1602.
- Moor, U., P. Pöldma, T. Tõnutare, K. Karp, M. Starast, and E. Vool. 2009. Effect of phosphite fertilization on growth, yield and fruit composition of strawberries. *Sci. Hortic.* 119:264-269.
- Mozafar, A. 1993. Nitrogen fertilizers and the amount of vitamin in plants: A review. *J. Plant Nutr.* 16:2479-2506.
- Mozafar, A. 1996. Decreasing the NO₃ and increasing the vitamin C contents in spinach by a nitrogen deprivation method. *Plant Food Hum Nutr.* 49:155-162.
- Nguyen, P.M. and E.D. Niemeyer. 2008. Effects of nitrogen fertilization on the phenolic composition and antioxidant properties of basil (*Ocimum basilicum* L.). *J. Agric. Food Chem.* 56:8685-8691.
- Oh, S.D., S.Y. Park, S.M. Lee, K. Lee, S.I. Sohn, S.K. Park, and T.H. Ryu. 2015. Molecular biological characteristics and biosafety assessment for β -carotene biofortified transgenic rice. *Kor. J. Breed. Sci.* 47:29-38.
- Oloyede, F.M., O.C. Adebooye, and E.M. Obuotor. 2014. Planting date and fertilizer affect antioxidants in pumpkin fruit. *Sci. Hortic.* 168:46-50.
- Omirou, M.D., K.K. Papadopoulou, I. Papastylianou, M. Constantinou, D.G. Karpouzias, I. Asimakopoulos, and C. Ehaliotis. 2009. Impact of nitrogen and sulfur fertilization on the composition of glucosinolates in relation to sulfur assimilation in different plant organs of broccoli. *J. Agric. Food Chem.* 57:9408-9417.
- Qin, Y., S.J. Kweon, Y.S. Chung, S.H. Ha, K.S. Shin, M.H. Lim, T.R. Kwon, H.S. Cho, S.K. Park, and H.J. Woo. 2015. Selection of β -carotene enhanced transgenic soybean containing single-copy transgene and analysis of integration sites. *Kor. J. Breed. Sci.* 47:111-117.
- Reif, C., E. Arrigoni, R. Neuweiler, D. Baumgartner, L. Nyström, and R.F. Hurrell. 2012. Effects of sulfur and nitrogen fertilization on the content of nutritionally relevant carotenoids in spinach (*Spinacia oleracea*). *J. Agric. Food Chem.* 60:5819-5824.
- Rosen, C.J., V.A. Fritz, G.M. Gardner, S.S. Hecht, S.G. Carmella, and P.M. Kenney. 2005. Cabbage yield and glucosinolate concentrations as affected by nitrogen and sulfur fertility. *Hort. Science.* 40:1493-1498.
- Shin, J.H., H.W. Kim, M.K. Lee, G.H. Jang, S.H. Lee, H.H. Jang, Y.J. Hwang, K.Y. Park, B.H. Song, and J.B. Kim. 2015. Effect of thermal treatments on flavonoid contents in domestic soybeans. *Korean J. Environ. Agric.* 34:105-110.
- Simonne, A.H., J.M. Fuzeré, E. Simonne, R.C. Hochmuth, and M.R. Marshall. 2007. Effects of nitrogen rates on chemical composition of yellow grape tomato grown in a subtropical climate. *J. Plant Nutr.* 30:927-935.
- Singh, D.P., J. Beloy, J.K. McInerney, and L. Day. 2012. Impact of boron, calcium and genetic factors on vitamin C, carotenoids, phenolic acids, anthocyanins and antioxidant capacity of carrots (*Daucus carota*). *Food Chem.* 132: 1161-1170.
- Sinkovič, L., L. Demšar, D. Žnidarčič, R. Vidrih, J. Hribar, and D. Treutter. 2015. Phenolic profiles in leaves of chicory cultivars (*Cichorium intybus* L.) as influenced by organic and mineral fertilizers. *Food Chem.* 166:507-513.
- Soubeyrand, E., C. Basteau, G. Hillbert, C. van Leeuwen, S. Delrot, and E. Gomès. 2014. Nitrogen supply affects anthocyanin biosynthetic and regulatory genes in grapevine cv. Cabernet-Sauvignon berries. *Phytochemistry.* 103:38-49.
- Stefanelli, D., I. Goodwin, and R. Jones. 2010. Minimal nitrogen and water use in horticulture: Effects on quality and content of selected nutrients. *Food Res. Int.* 43:1833-1843.
- Stumpf, B., F. Yan, and B. Honermeier. 2015. Nitrogen fertilization and maturity influence the phenolic concentration of wheat grain (*Triticum aestivum*). *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178:118-125.
- Tavarini, S., C. Sgherri, A.M. Ranieri, and L.G. Angelini. 2015. Effect of nitrogen fertilization and harvest time on steviol glycosides, flavonoid composition, and antioxidant properties in *Stevia rebaudiana* Bertoni. *J. Agric. Food Chem.* 63:7041-7050.
- Toor, R.K., G.P. Savage, and A. Heeb. 2006. Influence of different types of fertilisers on the major antioxidant components of tomatoes. *J. Food Comp. Anal.* 19:20-27.
- Treutter, D. 2010. Managing phenol contents in crop plants by phytochemical farming and breeding - Visions and constraints. *Int. J. Mol. Sci.* 11:807-857.
- Verma, S., A. Sharma, R. Kumar, C. Kaur, A. Arora, R. Shah, and L. Nain. 2015. Improvement of antioxidant and defense properties of tomato (var. Pusa Rohini) by application of bioaugmented compost. *Saudi J. Biol. Sci.* 22:256-264.
- Xu, C.J., R.F. Guo, H.Z. Yan, J. Yuan, B. Sun, G.F. Yuan, and Q.M. Wang. 2010. Effect of nitrogen fertilization on ascorbic acid, glucoraphanin content and quinone reductase activity in broccoli floret and stem. *J. Food Agric. Environ.* 8:179-184.