

3 장

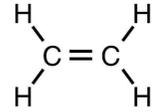
에틸렌 ethylene

3-1. 작용

에틸렌은 지베렐린, 옥신, 사이토키닌, ABA와 함께 식물의 주요 호르몬 중 하나이며 화학식은 C₂H₄이고 과일의 숙성이나 외부에서의 옥신처리, 스트레스, 상처 등에 의해 발생한다. 에틸렌은 노화를 비롯해 과일의 숙성을 유도 또는 촉진시키는 많은 식물 대사에 관여하고 있기에 숙성호르몬ripening hormone 또는 노화호르몬으로 불리며 원예생산물의 수확 후 생리 및 저장력에도 큰 영향을 미친다. 과실의 발육과정에서 에틸렌의 생성량 변화는 호흡의 변화양상과 일치한다. 호흡량이 낮은 비급등형 과실은 에틸렌 생성량이 낮고 급등형 과실에서 호흡의 급격한 증가는 에틸렌 생성의 급격한 증가와 동시 또는 그 이후에 나타난다.

에틸렌은 조직의 성숙을 촉진하므로 식미가치를 높이거나 외관을 좋게 하기도 한다. 에틸렌은 저농도(0.1ppm)에서도 식물의 성장과 발생에 영향을 끼치며 농업에서는 에틸렌 또는 합성호르몬인 에세폰(ethephon)을 이용한다. 에틸렌은 과일의 성숙, 수확촉진, 엽록소 클로로필 분해에 의한 착색 촉진, 맹아촉진, 종자의 발아 촉진, 오이와 호박 등의 암꽃 발생을 유도, 파인애플의 개화 유도, 정아우세 타파로 결논의 발달 조장, 신장 생장 억제와 비대생장 촉진, 휴면타파, 이층 형성 촉진으로 낙엽이나 낙과 발생을 촉진하는 작용을 한다.

일반적으로 에틸렌은 식물의 노화를 촉진해 작물의 저장성을 약화시킨다. 성숙은 되었으나 숙성되지 않아 식미가치가 낮은 경우인 녹숙기의 바나나, 토마토, 뚝은 감, 밀감, 오렌



ethylene

옥신

이층 형성을 억제하여 낙과방지

사이토키닌

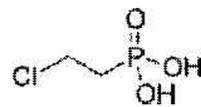
주로 식물의 세포분열을 촉진하고 잎의 노화를 지연시키는 물질

에브시식산(ABA, abscisic acid)

생장억제 호르몬으로 수분스트레스를 감지하여, 기공폐쇄하는 역할

에세폰액제(에스엘, ethephon 39 %)

pH 4 이상의 물에서 에틸렌 가스를 발생하는 약제. 에세폰 액제를 물에 희석하여 작물체에 살포하면 서서히 에틸렌 가스가 발생하여 효과를 나타내는데 주로 식물세포의 신장을 억제하고 비대생장을 촉진하며 종자나 과경, 구근류의 휴면을 타파하는 작용을 가진다. 또한 식물의 노화를 촉진하고 과실의 성숙을 촉진하며 엽록소 파괴 및 색소형성을 하여 착색을 빠르게 하기도 한다.



ethephon

정아우세(頂芽優勢, 정아우성)

식물체에서 끝눈이 자라면 그 가지의 결눈이 자라지 못하는 현상

, 키위와 같은 과실의 경우에 출하전 에틸렌 처리로 상품 가치를 높일 수 있다. 즉, 에틸렌은 엽록소 분해, 착색증진, 감의 탈삼, 키위의 연화 등을 촉진시켜 상품가치를 향상시키는데 이용할 수 있다.

에틸렌은 오이, 수박 등은 과육이나 과피가 물러지는 현상을 일으키며, 농도 5ppm에서 양배추는 엽록소 분해에 의한 황백화 현상이 발생하며, 당근과 고구마의 쓴맛 형성 등을 일으킨다.

[에틸렌에 의한 저장작물의 피해 유형]

작물명	피해 유형	대표적인 증상
시금치, 브로콜리, 파슬리, 애호박	엽록소 분해	황화
대부분 과실류	성숙 및 노화 촉진	연화
양배추	잎의 장애	반점 형성
당근	맛 변질	쓴맛 증가
감자, 양파	후연타파	발아촉진, 건조
관상식물	낙엽, 낙화	이충형성 촉진
카네이션	비정상 개화	개화정지
아스파라거스	육질 경화	조직이 질겨짐
동양배	과피장해	박피, 얼룩

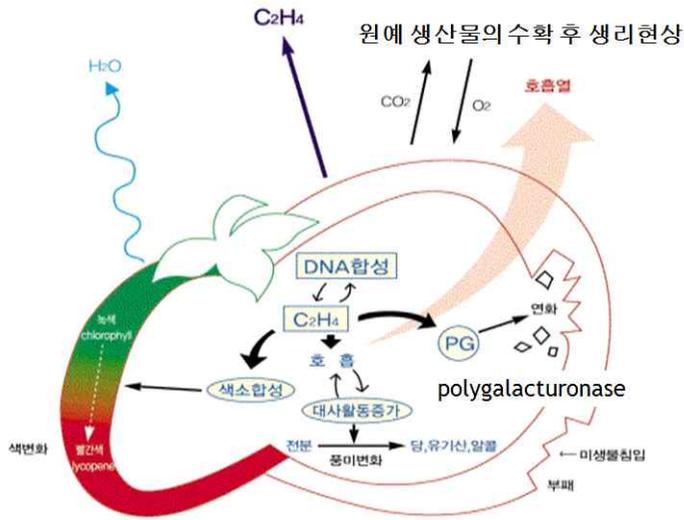
에틸렌의 생성

화학반응 또는 생물체의 대사반응에 식물세포내 DNA로부터 합성 명령이 내려져서 만들어진다. 세포내에서 에틸렌은 아미노산인 메티오닌(methionine)으로부터 SAM(S-adenosylmethionine), ACC (l-aminocyclopropane-l-carboxylic acid)를 거쳐 합성된다. 에틸렌은 일단 생성되면 스스로 생합성을 촉진시키는 자기촉매적 성질이 있다.

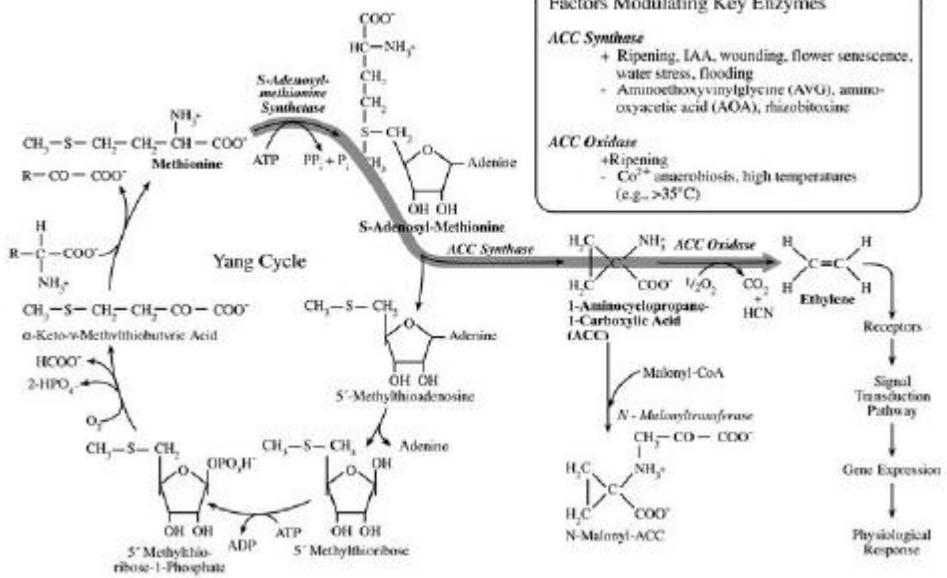
수확 후 노화가 진행되거나 과실이 익는 동안 에틸렌이 생성되고 또한 외부에서의 옥신 처리나, 스트레스, 상처 등에 의해서 발생한다. 원예산물을 취급하는 과정에서 상처나 불리한 조건에 처하면 조직으로부터 에틸렌이 발생하는데 이는 산물의 품질을 나쁘게 변화시키는 요인으로 작용한다.

SAM
S-adenosylmethionine

SAM synthetase (SAM-s)에 의해 ATP로부터 adenosine이 methionine과 결합하여 생성된 물질



ETHYLENE SYNTHESIS PATHWAY



숨을 내쉴 때에도 미량의 에틸렌 가스가 발생하며,

산화될 때 또는 태울 때에도 발생한다. 특히 내연기관에서 화석연료를 연소시킬 때, 불완전 연소가 되면 더욱 많은 에틸렌이 발생한다. 과실의 경우 성숙할 때 에틸렌 발생이 급등하는 경우가 흔하며 고무 등의 재질이 자외선에 노출될 때, 담배연기 등에도 에틸렌이 존재하며, 바이러스 감염 식물, 수확한 작물이 부적절한 환경에 도출되는 경우 작물 등도 정상적인 상태의 식물보다 더욱 많은 에틸렌을 발생한다. 오이, 가지, 호박, 파파야, 미숙토마토, 고추 등 냉해에 약하거나 열대나 아열대 원산의 작물은 12℃ 이하의 온도에 노출될 때 피해를 일으키는데 이러한 피해를 경험한 작물은 에틸렌 발생량이 많아지고 쉽게 부패한다. 이때 발생한 에틸렌을 스트레스에틸렌이라고 한다. 수확한 작물이 직사광선에 노출되었을 때 작물의 품온을 높아져서 대사작용이 촉진되어 에틸렌 발생이 증가된다.

에틸렌을 생성하는 미생물로서는 *Streptomyces*, *Pseudomonas solanacearum*, *Pseudomonas syringae*, *Penicillium digitatum*, *Penicillium cyclopium*, *Penicillium velutinum* 등이 있다.

표 에틸렌 생성

호흡형	에틸렌생성량 ($\mu\text{l/kg/h}$)	원예산물	에틸렌 발생정도
	100 >	체리모야, 살구, 키위, 매실, 백향과	매우높음
Climacteric	10~100	사과, 자두, 복숭아, 아보카도, 파파야, 배	높음
	1~10	바나나, 망고, 감, 메론, 토마토, 무화과, 리지, 멜론	보통
Non-climacteric	0.1~1	올리브, 파인애플, 블루베리, 수박, 호박, 가지, 고추	낮음
	< 0.1	아스파라거스, 포도, 딸기, 엽채류, 근채류, 감 귤류, 레몬, 오이	매우낮음

인위적 처리

에틸렌은 기체 상태의 호르몬으로 가스 또는 액체 상태로 처리한다. 처리 온도는 18~25℃, 상대습도는 90~95%, 처리시간은 24~72시간으로 과실의 종류와 성숙도에 따라 결정된다. 처리한 에틸렌 가스가 고르게 원예산물과 접촉할 수 있도록 처리 실내의 공기순환이 필요하다. 산소가 부족하면 에틸렌의 생합성이 억제되고 탄산가스 농도가 높으면 에틸렌 작용이 방해받기 때문이다.

에틸렌 처리시 처리실 내에 탄산가스 축적이 심하게 발생할 수 있으며, 에틸렌 축적이 발생하면 처리효율이 감소되므로 신선한 공기로 환기시켜 주어야 한다. 에틸렌의 처리농도는 10~100ppm으로 처리실이 밀폐 공간이면 농도를 낮출 수 있으나, 그렇지 못할 경우 처리 농도를 높여 누출되는 가스에 대한 보상을 해주어야 하고 100ppm 이상의 농도는 더 이상의 특별한 효과를 내지 못하므로 고농도 처리는 불필요하다.

고추, 토마토, 감귤 등은 수확 전에 에세폰으로 에틸렌이 발생하도록 처리하거나 수확후 저장고 내에서 가스상태로 주입하는 방법을 이용한다.

에틸렌 농도가 3~32%에서는 폭발할 가능성이 있으므로 실내에서는 화기를 엄금하고 시설물의 전기방전 방지대책을 마련하여야 한다.

에틸렌 농도의 조절

원예산물의 신선한 상태를 오래 지속하기 위해서는 수확 후에도 계속되는 호흡작용을 억제하고 에틸렌의 합성을 낮추어야 한다. 에틸렌의 생성을 낮추기 위해 CA저장법 등이 이용

있으나 일반적인 농산물의 저장에는 적극적으로 활용되지 못하고 있다.

STS(티오황산, silver thiosulfate)와 2,5-NDE(2,5-norbornadiene), 1-MCP(1-Methylcyclopropene), 에탄올 등은 에틸렌의 대표 억제제이다.

에틸렌을 제거하기 위해서는 과망간산칼륨($KMnO_4$)과 반응시켜 카르복시산과 이산화탄소로 변화하도록 한다. 에틸렌($CH_2=CH_2$)은 불포화 결합을 갖고 있어서 첨가반응성이 뛰어나 할로젠 그룹물질과 같은 산화제를 첨가시키면 할로겐화에탄이 된다. 산화제로는 $KMnO_4$, $K_2Cr_2O_7$, I_2 , $KClO_4$, $KClO_3$, H_2O_2 등이 있다. 산화력이 너무 큰 할로젠 계열 산화제의 경우 대기 중에서의 수명이 짧아 지속성이 떨어지는 문제가 있다. 이러한 문제 외에 I_2 는 상온에서 에틸렌기체와 반응하기 어렵고, $KClO_4$, $KClO_3$, H_2O_2 등은 반응과정에서 생기는 산소 때문 오히려 저장감귤의 호흡작용을 촉진시킬 위험성이 있으며, $K_2Cr_2O_7$ 는 사용 후 생기는 6가 크롬처리 문제 등을 고려할 때, 지속성과 안전성 등을 고려하여 가격이 저렴한 과망간산칼륨을 일반적으로 에틸렌기체의 산화제로 사용한다..

브롬화 활성탄은 활성탄에 산화제인 브롬을 도포하여 사용할 경우 저농도의 에틸렌도 효과적으로 제거할 수 있다. 수송 또는 유통중 소포장 상자 내부에 넣어 이용하며, 대량 에틸렌 발생 작물에 적합하다. 누출된 브롬 또는 인산이 작물과 접촉할 경우 피해를 일으키며, 폐기물에 독성물질인 브롬이 발생할 수 있기에 주의한다.

백금 촉매 처리법은 에틸렌을 백금촉매와 함께 고온처리하여 산화시켜서 최종산물이 아세트알데히드와 물로 제거하는 방식으로 CA창고 등에 사용하고 있다. 반영구적이며 습도조

선도유지제

과망간산칼륨 수용액을 건조토 또는 제올라이트(zeolite) 등에 넣어 균형서 사용
농산물에서 발생하는 에틸렌 가스를 빨아들여 농산물의 노화와 부패를 억제

영향을 받지 않으나 고농도 에틸렌 제거에는 불리하며 고가인 것이 단점이다.

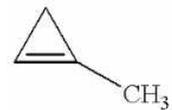
산화티타늄(TiO₂)은 에틸렌 산화 및 실내살균까지 가능하나 반응기에 먼지가 낄 경우 효율이 떨어진다고 한다. 반응 생성물은 이산화탄소와 물이다

오존의 산화력을 이용하여 에틸렌을 제거하는 방법은 에틸렌 제거와 살균효과를 동시에 얻을 수 있다. 높은 농도의 오존이 창고내부에 축적되면 저장작물에 직접적인 피해를 줄 우려가 있다. 최종산물로서는 이산화탄소, 일산화탄소, 포름알데히드 등이 생성된다.

[에틸렌 제거방법별 비교]

에틸렌 제거방법	장점	단점
활성탄 흡착	재활용 가능, 다양한 휘발성 물질 제거 가능	저농도 제거 불가, 수분 영향 큼
Br ₂ 활성탄	탁월한 효과	발암성 Dibromoethane 생성, 고가, 과실 갈변, 수분 영향 큼
PdCl ₂ 활성탄	저농도에 효과적, 물에 영향 없음	고가, 고농도 제거에 불리
과망간산칼륨 KMnO ₄	지속적 효과	CO ₂ 발생, 강한 독성물질, 재활용 불가 작물에 접촉시 작물 피해, 수분영향 큼
오존(O ₃)	탁월한 효과	작물이 오존에 노출될 경우 과채류에 대한 직접적 피해 유발

1-MCP 에틸렌제어제(1-methyl cyclopropene)는 에틸렌 수용체에 자신이 결합함으로써 에틸렌의 발생과 작용을 근본적으로 차단하는 화합물이다



1-MCP

1-MCP는 성장조절제로서 미국환경청(EPA, Environmental Protection Agency)에 1992년 등록되어 2004년 미국식품의약안전청(FDA)이 사용허가했다.

밀폐된 공간에 1-MCP는 처리농도 1,000ppb(1ppm)로 조절하여 사용한다. 사과 품종 중에서 에틸렌 발생이 많은 조중생종인 쓰가루, 홍로 등은 수확 당일 1-MCP처리를 하는 경

많으며 수확후 2일을 넘기지 않는다.

원예작물에 대한 1-MCP 처리는 처리시기, 수확 후 경과 일수, 처리농도, 처리시간 및 처리시 온도에 따라 다양한 조건이 가능하다. 가능하면 수확 직후처리하되 적정농도와 시간을 지켜야 한다. 수확후에도 지속적으로 에틸렌 수용체가 생기는 토마토 등은 2~3회 1-MCP를 처리해야 그 효과가 지속된다.

에틸렌 흡착제로는 제올라이트, 목탄, 활성탄, 오존, 자외선 등이 이용된다

활성탄 또는 숯을 이용할 경우에는 탈취는 되지만 에틸렌 제거 효과가 낮아 실용적 가치가 거의 없다. 활성탄에 제올라이트와 같은 점토 입자를 처리하여 제작한 경우에는 에틸렌 흡착 효율이 증가한다. 환경친화적이지만 저농도 에틸렌 발생 작물에만 적용하며, 포화된 이후에는 흡착된 에틸렌이 누출될 가능성이 있다

CA이용법은 에틸렌이 축적될 때 질소를 투입하여 에틸렌 농도를 낮추는 방식으로 고가인 것이 단점이다

[원예생산물의 1-MCP처리조건]

작 목		처리농도(ppm : $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	처리온도($^{\circ}\text{C}$)	처리시간(h)
과 일	사 과	0.6~2	0, 5, 10, 15, 20~25	7~20
	배	2, 4	2	16
	복숭아	0.1~500	20~24	4~24
	단 감	0.3	20	3
채 소	브로콜리	1, 12	5, 10, 20	6, 12, 16
	토마토	0,005~0,007, 20	20	2~24
	당 근	1	20	4
	결구상추	0,1, 1	6	4
	수 박	5	20	18
	딸 기	0,005~0,015, 0,5, 2	20	2~18