

자 료

광 조사에 의한 토마토의 수확 후 처리기술

Treatment Technology for Harvested Tomatoes Using Light Irradiation

이 귀 현\*

정회원

G. H. Lee

1. 서 론

원예 생산물은 수확한 후에도 호흡 등의 생명현상을 지속한다. 즉, 원예 생산물의 수확 후 생명현상의 유지를 위한 주된 생리 및 생화학적 변화는 호흡의 증가, 에틸렌 합성 및 작용, 세포벽 붕괴에 의한 조직의 연화, 색소의 파괴 및 합성, 당과 유기산의 함량 변화, 방향물질의 생산 등이 있다. 이와 같이 수확된 원예 생산물은 영양분의 공급이 중단되어 자체 내의 저장 양분을 기질로 소모함으로써 품질의 변화를 가져온다. 또한, 원예 생산물은 수확 시기에 에틸렌이 많이 발생하여 숙성과 노화가 촉진된다. 이러한 원예 생산물은 수확 후 선별, 포장, 저장, 수송, 가공 중 하나 이상의 유통 단계를 거치게 되는데 수확 후 생산물의 품질을 잘 보존하기 위해서는 주변 환경의 공기 조성을 조절하거나, 온도 및 습도를 작물의 종류에 따라 적절하게 유지해야 한다. 즉, 수확 후 원예 생산물의 품질을 최상으로 유지하기 위해서는 생산물의 생리 대사작용과 수분 함량의 변화, 장해현상을 최소화시키기 위한 수확 후 처리기술을 유통 단계에서 적절히 이용하여야 한다.

원예 생산물은 소비자에게 판매되기까지 많은 유통 단계를 거치게 됨으로 곡물에 비해 수확 후 손실이 매우 크다. 또한, 원예 생산물은 비교적 크기가

크고, 조직이 연하며, 수분 함량이 높고, 호흡이 왕성하기 때문에 건조 후 유통되는 주곡 작물에 비해 수확 후 손실이 더욱 크다. 원예 생산물의 수확 후 손실은 후진국일수록 심한데 그 이유는 원예 생산물의 유통체계가 매우 비효율적이기 때문이다. 이러한 손실은 유통체계가 잘 되어 있는 미국과 같은 선진국에서도 20% 정도가 수확 후부터 소비자에 이르는 사이에 손실되는 것으로 추정되고 있다. 그러므로, 원예 생산물에 대한 첨단 기술의 수확 후 처리기술을 개발하여 유통 단계에 이용함으로써 바로 이러한 손실을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 소비자에게 우수한 품질의 원예 생산물을 공급할 수 있을 것이다.

지금까지의 수확 후 처리기술에 대한 연구는 주로 원예 생산물의 주변 환경 조건을 변경시킴으로써 장기 저장에 대한 제한 요인을 제거하는데 있었다. 즉, 온도 및 습도의 조절, 공기 조성의 조절, 화학 물질의 처리와 같은 전통적인 기술이 판매 수명과 품질을 극대화하기 위해 이용되었다. 그러나, 최근에는 원예 생산물의 저장기간 연장 뿐만 아니라 수확 및 유통기간 동안의 손실을 줄이기 위해 원예 생산물을 조기에 수확하는 경향이 커지고 있다. 또한, 원예 생산물에 대한 수출이 일본, 대만, 미국 등으로 확대되고 있고 수출량도 매년 크게 증가하고 있는 추세에 있다. 대체로 수출을 위한 원예 생산물은 유통기간

\* 강원대학교 농업생명과학대학 농업공학부 농업기계전공

의 연장을 위해 조기에 수확하게 된다. 그러나, 조기에 수확된 원예 생산물은 수확 후 유통기간 동안의 자체 숙성이 균일하게 이루어지지 않기 때문에 상품성이 크게 떨어지게 된다. 그러므로, 이렇게 조기에 수확된 원예 생산물의 상품성을 향상시키기 위해 수확 후 처리기술을 적용해야 하며, 수확된 생산물의 후숙을 단시간에 촉진시켜 유통과정에서 균일하게 숙성되도록 하여 상품성을 높이는 수확 후 처리기술에 대한 연구의 필요성이 크게 요구되고 있는 실정이다.

대부분의 식물은 광 환경에 반응하며 고정된 장소에서 성장 및 발달을 지속한다. 특히, 식물은 수광체인 피토크롬을 함유하고 있어 특별한 파장대의 적색 및 원적색광에 의해 식물의 성장, 발달 및 생리가 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 식물과 같이 토마토는 특별한 파장대의 광에 조사될 때 민감하게 반응하는 피토크롬을 함유하고 있는 것으로 알려져 있다(Khudairi, 1972; Khudairi와 Arboleda, 1971). 그러므로, 선별된 파장대의 광을 짧은 시간 동안 조기에 수확된 토마토에 조사함으로써 토마토의 적색색소인 리코펜 발현을 촉진 또는 지연시킬 수 있으며, 이로 인해 토마토의 후숙을 시기 적절하게 촉진 또는 지연시킬 수 있을 것이다. 이러한 토마토 후숙 촉진 또는 지연을 위한 수확 후 처리기술은 토마토 농가, 도매 시장, 농산물 집하장 등과 같은 어느 장소에서도 쉽게 이용될 수 있을 것이다. 그러므로, 광을 이용한 수확 후 처리기술의 활용은 토마토 재배 농가 및 마켓 경영인들의 소득 증대에 크게 이바지 할 수 있을 뿐만 아니라 소비자에게도 우수한 토마토 상품을 공급할 수 있을 것이다.

그러므로, 여기에서는 토마토의 색소발현 촉진 또는 억제에 미치는 적색 및 원적색광 처리효과와 기술을 소개하고, 이것을 토마토의 수확 후 처리기술에의 응용 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 토마토의 광반응

식물체내에는 수광체인 피토크롬(phytochrome)이라는 미량의 청색색소가 들어 있으며, 식물의 성장,

발달, 분화 등의 많은 과정이 광에 의해 가역적으로 작용하는 피토크롬에 의해 크게 영향을 받는다(Mohr, 1962). 즉, 종자의 발아, 화아분화, 배축 신장, 절간 신장 등이 피토크롬에 의해 조절된다. 피토크롬은 서로 변환될 수 있는 두 형태로 존재하며, 원적색 광(FR) 조사에 의해 피토크롬은 660 nm의 적색 파장대에서 최대의 흡수 영역을 갖는 P<sub>r</sub>의 형태로 존재하고, 적색광(R) 조사에 의해 730 nm의 원적색 파장대에서 최대의 흡수 영역을 갖는 P<sub>f</sub> 형태로 존재한다(Borthwick 등, 1952; Borthwick, 1972). 이러한 두 형태로 존재하는 피토크롬인 P<sub>r</sub> 및 P<sub>f</sub>은 다음과 같이 R 및 FR에 의해 광 역전효과를 나타낸다.

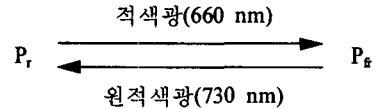


표 1에 나타낸 것과 같이 피토크롬 효과로 인해 적색광은 상추씨의 발아율을 촉진시키며, 원적색 광은 반대로 발아율을 억제시키나 적색 및 원적색광을 교대로 조사할 경우는 이전에 조사된 광의 종류에 관계없이 최종적으로 처리된 광의 종류에 따라 발아율이 촉진 또는 억제된다고 연구된 바 있다(Borthwick 등, 1952). 이와 비슷한 결과는 *Xanthium* (Borthwick 등, 1952; Downs, 1956)과 *Glycine max* (Downs,

Table 1 Germination of Grand Rapids lettuce seed after alternating brief R and FR exposure

Irradiation	Germination(%)
None(dark control)	8.5
R	98
R-FR	54
R-FR-R	100
R-FR-R-FR	43
R-FR-R-FR-R	99
R-FR-R-FR-R-FR	54
R-FR-R-FR-R-FR-R	98

\* R : Red light. FR : Far-red light.

1956) 등에서 관찰되었다. 즉, 개화유도 암기간 중에 적색광과 원적색광을 교대로 조사하였을 때에 적색광은 암반응을 말소시키나, 적색광 조사 후에 오는 원적색광 처리는 적색광에 의한 개화 억제효과를 제거시키고 개화를 유도하는 것으로 알려져 있다.

식물과 마찬가지로 토마토는 피토크롬을 함유하고 있다는 사실이 적색 및 원적색 광 조사 후 토마토 과육의 흡수 스펙트럼을 측정함으로써 밝혀졌다(Jen, 1977). 특히, 피토크롬은 카르티노이드의 생합성에 직접 관계하는 것으로 알려져 있다(Khudairi, 1972; Khudairi와 Arboleda, 1971; Piringer와 Heinze, 1954; Thomas와 Jen, 1975a; Thomas와 Jen, 1975b). 숙성동안 토마토의 색은 녹색, 흰색, 황색, 분홍색을 거쳐 최종적으로 빨간색으로 변한다. 토마토의 숙도 구분은 숙성된 녹색 일 때를 녹색기(mature-green stage)라 하고, 이후에 과일의 정단부에 색의 변화를

시작하는 단계를 착색 개시기(breaker stage), 과일이 어느 정도 빨간 색을 나타냈을 때를 적숙기(pink stage), 마지막으로 노화 직전의 단계로서 완전히 빨간 상태를 완숙기(red stage)라고 구분하고 있다. 토마토의 녹색과가 숙성되면서 빨간색이 익어 가는 과정은 엽록소가 파괴되면서 카로티노이드가 새롭게 생합성 되어 색상이 발현되는 과정이며, 토마토가 빨간색으로 변하는 것은 적색 색소인 리코펜의 합성에 의한 것이다(Gross, 1991). 이와 같은 토마토의 적색 색소인 리코펜 합성은 피토크롬에 의해 잘 조절되는 것으로 알려져 있다(Khudairi와 Arboleda, 1971; Thomas와 Jen, 1975a; Thomas와 Jen, 1975b).

광 스펙트럼 영역에 따라 토마토의 색도 발현 촉진에 미치는 광의 영향이 숙성된 녹색기의 토마토에 대해 1일에 한 번 14일 동안 광을 조사함으로써 연구된 바 있고 표 2에 그 결과를 나타내었다(Piringer

Table 2 Color intensity in tomato fruit cutrices as influenced by wave length of light and period of exposure

Station	Wave length(nm) at center of station	Irradiance (Ergs · cm <sup>2</sup> · sec)	Color intensity after indicated exposure		
			1/3 min	1 min	3 min
1	770	7,450	..	..	..
2	725	7,250	..	..	..
3	677	6,000	6.2	5.3	5.6
4	644	5,700	5.0	5.0	6.0
5	618	5,350	2.7	5.5	6.8
6	590	4,950	3.5	5.5	6.7
7	570	4,600	2.5	3.2	3.7
8	548	4,200	1.5	3.2	4.2
9	532	3,850	..	..	4.0
10	517	3,400	..	..	1.2
11	503	3,000	..	..	2.2
12	493	2,700	..	..	2.2
13	481	2,250	..	..	2.2
14	471	2,000	..	..	..
15	462	1,700	..	..	..
16	454	1,450	..	..	..

\* Numerical values represent color intensities as follows: 0 (colorless) through 3 (yellow tint) through 6 (bright yellow) to 9 (orange).

\*\* Means of four readings.

와 Heinze, 1954). 이러한 결과로 볼 때 짧은 시간동안이라도 적색 파장대의 광 조사는 리코펜 색소의 합성으로 토마토의 색도 발현을 촉진하는데 큰 작용을 함을 알 수 있다. 그러므로 가시광선 중 적색 파장대의 광이 풍부한 광원을 이용함으로써 토마토의 색도 발달을 촉진시킬 수 있다는 것을 알 수 있으며, 이러한 연구로 파장대 650 nm에서 최대 광강도를 갖는 적색 스펙트럼 광이 풍부한 Gro-Lux 형광등 또는 일반형광등이 색도 발달로 인한 토마토의 후숙 촉진에 큰 효과가 있다(Shewfelt, 1970; Shewfelt와 Halpin; 1967). 이러한 피토크롬 작용으로 토마토의 적색 색소 발달은 적색광에 의해 촉진되고, 반대로 원적색 광에 의해 억제된다. 또한, 적색 및 원적색광을 연속적으로 교체하면서 1일에 한 번 일련의 광 조사를 10일간 수행하였을 경우 광 조사가 토마토의 색도 발현 촉진에 미치는 결과는 상추씨의 발아율에 대한 연구 결과와 유사하였다(Piringer와 Heinze, 1954). 즉, 이전에 조사된 광의 종류에 관계 없이 최종적으로 처리된 광의 종류에 따라 토마토의

색도 발달이 촉진 또는 억제되었다(표 3). 이러한 연구 결과와 같이 광을 시기 적절하게 이용한다면 숙숙기에 수확된 토마토의 색도 발현을 촉진 또는 지연시켜 토마토의 유통기간을 조절할 수 있는 수확 후 처리기술에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 광 조사장치

적색 및 원적색 파장대의 광 조사장치의 제작을 위해서는 우선 광원 및 광 필터를 선정해야 한다. 적색 광은 적절한 광필터와 가시광선이 풍부한 일반형광등, Gro-Lux 형광등, Agro-Lite 형광등, 메탈헬라이드 램프, 고압 나트륨 등과 같은 광원의 조합으로 얻어질 수 있다. 또한, 원적색 파장대의 광은 광필터와 백열등과 같은 원적색 파장대의 광이 풍부한 광원의 조합으로 얻어 질 수 있다. 그러나, 원적색광을 얻기 위해 백열등을 광원으로 사용할 경우 백열전구는 적외선 파장대의 스펙트럼이 풍부하여 열을 발생하기 때문에 광원 밑에 열 반사필름을 설치거나 주위에 팬을 설치하여 주위로 열을 방출시킴으로서 광 조사장치내의 온도상승을 막아야 한다. 광 필터로는 적절한 색을 갖는 셀로판지, Plexiglass, Roscolux Acetate, Polyacrylic Sheet 등을 사용할 수 있다. 광원과 광필터의 조합으로 구성된 적색 및 원적색 파장대의 광을 얻기 위해 제작된 광조사장치의 한 모델을 그림 1에 나타내었다(Lee 등, 1996). 이 장치에서 적색 스펙트럼 광을 얻기 위해 광 조사장치 상부에 12개의 Agro-Lite 형광등(Philips Lightening Co., Somerset, NY)을 설치하였으며, 그 밑에 Roscolux No. 19 필터(Rosco Laboratories Inc., Port Chester, NY)를 설치하였다. 원적색 스펙트럼 광을 얻기 위해 4개의 백열전구를 광 조사장치 상부의 구조물에 설치하였으며, 하부에는 열 반사필름과 Roscolux No. 12 및 No. 385를 포개어 설치하였다. 또한, 광 조사장치의 상부 측면에는 열을 주위로 방출시키기 위해 팬을 설치하였다. 이러한 장치로부터 얻어진 적색 및 원적색 광 스펙트럼 분포를 LI-1800 Spectroradiometer(LI-COR, Lincoln, NE)에 의해 측정하였고,

Table 3 Intensity in tomato fruit cuticles as influenced by the sequence of red and far-red radiation

Treatment		Color Intensity
Sequence	Final	
Dark control	..	0, 0, 0, 0
R	R	2, 2, 5, 5
R-FR	FR	0, 0, 0, 0
R-FR-R	R	4, 4, 5, 5
R-FR-R-FR	FR	0, 0, 0, 1
R-FR-R-FR-R	R	2, 4, 5, 5
R-FR-R-FR-R-FR	FR	0, 0, 0, 1
R-FR-R-FR-R-FR-R	R	0, 1, 5, 5
R-FR-R-FR-R-FR-R-FR	FR	0, 0, 1, 1

\* R : 2 min of red radiation. FR : 2 min of far-rad radiation.

\* Numerical values represent color intensities as follows : 0 (colorless) through 3 (yellow tint) through 6 (bright yellow) to 9 (orange).

\*\* Each value represents an individual fruit.

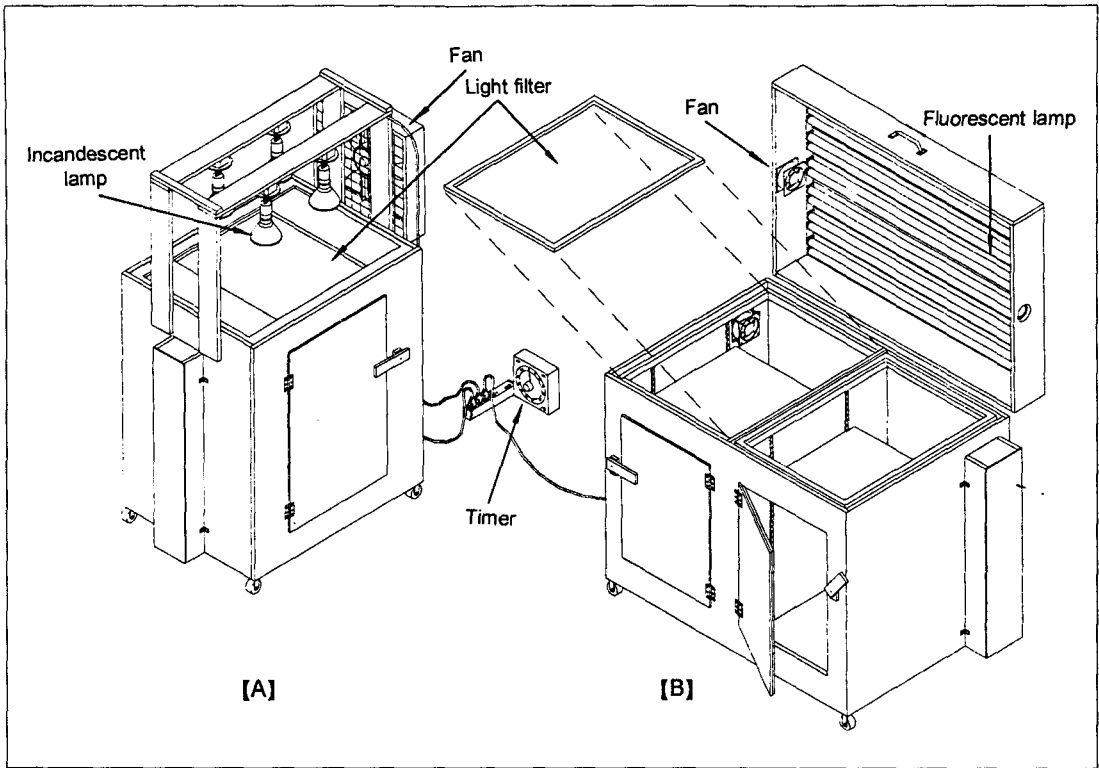


Fig. 1 Irradiation chamber for (A) far-red light and (B) red light.

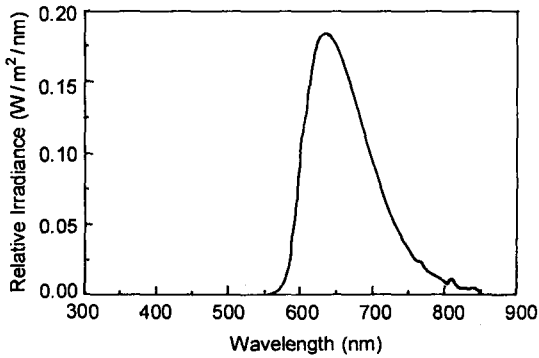


Fig. 2 Spectral irradiance distribution in filter-red light.

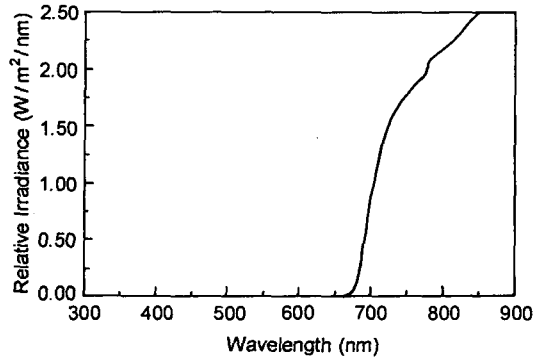


Fig. 3 Spectral irradiance distribution in filter-red far-red light.

그림 2와 그림 3에 나타내었다.

#### 4. 결 론

대부분의 식물은 광 환경에 반응하며 고정된 장소

에서 성장 및 발달을 지속한다. 특히, 식물은 수광체인 피토크롬을 함유하고 있어 특별한 파장대의 적색 및 원적색광에 의해 식물의 성장, 발달 및 생리가 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 식물과 같이 토마토 과실은 특별한 파장대의 광에 조사될 때 민감하

게 반응하는 피토크롬을 함유하고 있는 것으로 알려져 있으며, 선별된 특별한 파장대의 광을 짧은 시간 동안 토마토에 조사함으로써 토마토의 적색 색소인 리코펜 발현을 촉진 또는 지연시킬 수 있고, 이로 인해 토마토의 후숙을 시기 적절하게 촉진 또는 지연시킬 수 있을 것이다.

지금까지의 수확 후 처리기술에 대한 연구는 주로 원예 생산물의 주변 환경 조건을 변경시키는 것이었다. 즉, 온도 및 습도의 조절, 공기 조성의 조절, 화학물질의 처리와 같은 전통적인 기술이 판매 수명과 품질을 극대화하기 위해 이용되었다. 그러나, 화학물질의 처리와 같은 방법은 농산물 소비자에게 좋은 반응을 얻을 수 없을 것이다. 최근에는 원예 생산물의 수출로 저장기간 연장뿐만 아니라 수확 및 유통기간 동안의 손실을 줄이기 위해 원예 생산물을 조기에 수확하는 경향이 커지고 있다. 그러므로, 식물의 광 형태형성과 밀접한 관계가 있는 피토크롬 효과를 수확된 토마토에 적용함으로써 조기에 수확된 토마토의 유통기간 연장 또는 단축을 시기 적절히 조절할 수 있는 새로운 수확 후 처리기술의 응용 가능성을 제시하고자 한다.

### 참 고 문 헌

1. Borthwick, H. A. 1972. The biological significance of phytochrome. In : Phytochrome, eds. K. Mitras and W. Shropshire, Jr., 3-32. Academic Press, London.
2. Borthwick, H. A., S. B. Hendricks, M. W. Parker, E. H. Toole and Vivian K. Toole. 1952. A reversible photoreaction controlling seed germination. Proc. Nat. Acad. Sci. 38:662-666.
3. Downs, R. J. 1956. Photoreversibility of flower initiation. Plant Physiol. 31:279-284.
4. Gross, J. 1991. Pigments in vegetables : chlorophylls and carotenoids. AVI Book, Van Nostrand Reinhold, NY.
5. Jen, J. J. 1997. *In vivo* measurement of phytochrome in tomato fruit. Plant Physiol. 59:628-629.
6. Khudairi, A. K. 1972. The ripening of tomatoes. Amer. Sci. 60:696-707.
7. Khudairi, A. K. and O. P. Arboleda. 1971. Phytochrome-mediated carotenoid biosynthesis and its influence by plant hormones. Physiol. Plant 24:18-22.
8. Lee, G. H., J. M. Bunn, Y. J. Hann and D. R. Decoteau. Determination of optimum levels of light irradiation needed to control ripening of tomatoes. Trans. of the ASAE 39(1):169-175.
9. Mohr, H. 1962. Primary effects of light on growth. Ann. Rev. Plant Physiol. 13:465-488.
10. Piringer, A. A. and P. H. Heinze. 1954. Effect of light on the formation of a pigment in the tomato fruit cuticle. Plant Physiol. 29:467-472.
11. Shewfelt, A. L. 1970. Effects of a light treatment on the ripening of detached tomato fruits. Food Technol. 24:609-613.
12. Shewfelt, A. L. and J. E. Halpin. 1967. The effect of light quality on the rate of tomato color development. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 91:561-565.
13. Thomas, R. L. and J. J. Jen. 1975a. Red light intensity and carotenoid biosynthesis in ripening tomatoes. J. of Food Sci. 40:566-568.
14. Thomas, R. L. and J. J. Jen. 1975b. Phytochrome-mediated carotenoids biosynthesis in ripening tomatoes. Plant Physiol. 56:452-453.