

Prediction of weight loss of low temperature storage tomato (Tiwai 250) by non-destructive firmness measurement

Jinshi Cui, Areum Yoo, Myongkyoon Yang, Seong In Cho*

Department of Biosystems and Biomaterials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

비파괴적인 경도 측정을 통한 저온저장 토마토(티와이250)의 감모율 예측

최금실 · 유아름 · 양명균 · 조성인*

서울대학교 바이오시스템공학과

Abstract

This study was conducted to investigate the weight loss, firmness, external color and vitamin C (VC) content of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) using non-destructive method to measure identical tomato samples during 15 days storage at low temperature and high humidity. Tomatoes were harvested at the light red stage, sorted, box packed and then stored in thermo-hygrostat ($10\pm 1^\circ\text{C}$, $90\pm 10\%\text{RH}$). The quality changes in weight loss, firmness and external color were measured every 3 day interval. Weight loss was increased by $1.13\pm 0.15\%$, but it may not be considered to affect quality. Surface color of fruit was changed, especially in lightness and hue angle value. The color values were analyzed by analysis of variance (ANOVA), and the results were significant ($p<0.001$). Firmness of fruit declined during storage, but it did not decrease in direct proportion. On the storage of day 15, firmness was decreased to 40% of initial state. At last, all the experiment data are summarized and the relationship between firmness and weight loss is analyzed to construct a linear regression mathematical model that can predict the weight loss with the firmness value measured by non-destructive method. This research result could be useful in helping tomato exporters and suppliers to get real-time quality factor by using proposed method and regression model.

Key words : non-destructive method, identical tomato, storage, regression model

서 론

토마토(*Lycopersicon esculentum*)는 라이코펜, 페놀화합물, β -카로틴, 비타민 C, 비타민 E가 및 식이섬유가 풍부한 과채류로서 식생활의 다양화에 따라서 가정소비도 서서히 증가하고, 시장에서도 신선편이 제품으로의 생산 및 소비가 증가하고 있다(1).

현재 국내에서 생산되는 토마토는 국내 시장에 많이 소비되는 동시에 수출은 상대적으로 유통거리가 가까운 나라

를 중심으로 이루어지고 있으나, 최근 원거리 수출을 통한 해외수출을 시도하고 있다. 하지만 토마토는 대표적인 호흡 상습형 과채류로서 호흡 및 에틸렌 발생량이 많아 수확 후 품질변화가 급격히 이루어지기 때문에 장기운송이 필요한 수출에 한계를 보이고 있다. 이처럼 수확 후 관리에 대한 중요성이 강조되므로 토마토 신선도 품질 측정과 수확 후 저장에 대한 연구가 활발히 진행되었다. Modified atmosphere packaging(MAP) 포장재인 숨쉬는 필름이 장거리 수출 조건에서 토마토의 품질과 저장성에 미치는 영향(2), 수확시의 속도에 따른 저온저장 중 토마토의 품질인자의 변화(3), 고 이산화탄소 처리 조건이 토마토의 숙성 중 품질 변화에 미치는 영향(4) 등 다양한 품질측정과 저장성에 대한 연구가 이루어졌으나 대부분 파괴적 방법으로 측정된 품질 인자로서 저장기간별 측정된 결과는 같은 품종이라 하더라도 측정하는 시료 개체에 따라 품질인자가 다른 경우가 많다.

*Corresponding author. E-mail : sicho@snu.ac.kr

Phone : 82-2-880-4603, Fax : 82-2-880-4600

Received 3 January 2017; Revised 13 February 2017; Accepted 15 March 2017.

Copyright © The Korean Society of Food Preservation. All rights reserved.

현재 농산물의 품질 측정에는 화학적 분석 방법을 이용한 다양한 기술이 있으나 시간 및 비용 소모와 전수조사가 어렵고 무엇보다도 파괴된다는 단점이 있다(5). 비파괴적 측정 방법을 이용할 경우 대상 농산물에 큰 영향을 주지 않으며 빠르게 품질측정 및 전수조사가 가능하게 된다(6). 때문에 비 파괴적 방법으로 같은 품종 같은 토마토 시료에 대한 저장기간 별 품질인자 측정에 대한 연구가 필요하다.

토마토에 대한 소비자 기호도는 주로 맛, 외관, 색, 조직감에 의해 결정된다(7,8). 토마토의 단맛은 환원당이나 가용성 고형분 함량과 높은 상관성을 보이고 신맛은 주로 citric acid 함량과 관련되어 있다고 알려져 있다(9). 비타민 C(VC)는 맛에 큰 기여를 하지 않지만 토마토의 VC 함유량은 다른 야채보다 월등히 높은 것으로 알려져 있다. 완숙단계 수확한 토마토의 저장기간 별 당도 변화 결과를 볼 때 대부분 큰 변화가 없으므로(3) 본 연구에서는 색상, 감모율, 경도와 내부에 많이 함유되고 있는 VC의 품질변화에 관하여 연구하였다. 저장환경의 설정에 있어 일반적으로 저장온도가 높을수록 농산물의 호흡속도가 증가하고 품질이 빠르게 나빠지므로 저장력 향상을 위해서는 저온유지가 필수적이다. 토마토의 일반적인 저장조건은 저장온도 8-10°C 상대습도 90-95%에서 4-7일간 저장 가능한 것으로 보고되고 있다(10). 따라서 본 연구에서는 일정하게 온도와 습도(10°C, 90%RH)를 유지한 환경에서 15일간 저장하여 동일한 품종과 동일한 시료에 대해 신선도 품질인자의 변화를 분석하고 품질인자 사이의 관계를 분석하여 토마토 감모율 모델을 제안하고자 하였다.

재료 및 방법

실험시료 및 저장조건

아시아종 ‘티와이250’은 한 화방에 4-6과 정도 수확이 가능하며 생산성이 높다. 뿐만 아니라 과피색은 선명한 붉은색이며 과육이 단단하고 상품성이 높다. 그리하여 실험에 사용된 시료는 경기도 일대에서 재배한 아시아종 ‘티와이250’ 품종을 2016년 10월에 생산된 토마토를 수확당일 구입하여, 결함 없는 200 g 내외의 중과를 선별한 후 포장하여 저장 실험에 사용하였다.

토마토를 박스 포장에 넣고 온도가 10±1°C, 습도가 90±10%RH인 항온항습챔버(Temp. & Humid. Chamber, HB-301SO model, Hanbaek scientific Co., Korea)에 수확직 후부터 15일간 저장하였다. 수확당일 및 저장 3일, 6일, 9일, 12일과 15일 같은 시간 같은 실험 조건에서 동일한 토마토 시료 30개에 대해 무게, 색상과 경도를 측정하고 기록하였다.

감모율 분석

저장 전 각각의 토마토 중량을 측정하고 저장기간 별

품질분석, 당일 각 시료의 중량을 측정하고 아래의 식에 따라 개별 시료의 감모율(WL)을 계산하였다.

$$\text{Weight loss rate(\%)} = \frac{W_{\text{before}} - W_{\text{after}}}{W_{\text{before}}} \times 100$$

W_{before} : 저장 전 중량

W_{after} : 저장 후 중량

색도 변화 분석

토마토의 색도 변화는 색차계(CR-400, Minolta, Osaka, Japan)을 이용하여 표준 백색판(L=96.3, a=0.57, b=0.89)으로 보정한 후 30개의 시료에 대하여 적도 부위의 3점에 대하여 각각 3회 이상 반복 측정할 수 평균값으로 나타내었다. 색도는 명도(lightness)를 나타내는 L 값, 적색도(redness)를 나타내는 a 값과 황색도(yellowness)를 나타내는 b 값을 측정하였다. 저장 전후의 색도 변화와 추세를 보여주기 위하여 각 시료와 저장일의 명도, 적색도와 황색도의 변화량을 분석하였다. 적색도와 황색도의 적 a/b를 계산하고 다음의 식 (A), (B), (C)에 각 시료의 색차값(ΔE), 색의 채도(chroma)와 색조 각(hue angle)을 구하였다.

$$\Delta E = (L_{\text{before}} - L_{\text{after}})^2 + (a_{\text{before}} - a_{\text{after}})^2 + (b_{\text{before}} - b_{\text{after}})^2 \quad (\text{A})$$

$$\text{chroma} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (\text{B})$$

$$\text{hue} = \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad (\text{C})$$

L_{before} : 저장 전 명도

L_{after} : 저장 후 명도

a_{before} : 저장 전 적색도

a_{after} : 저장 후 적색도

b_{before} : 저장 전 황색도

b_{after} : 저장 후 황색도

경도 측정

무게 측정과 색상 측정이 끝난 30개의 토마토에 대하여 적도면 3곳에 대하여 비 파괴적 경도계로(HPE II Fff digital model, Germany) 3반복 측정하였다. 본 실험에 사용된 경도계는 측정범위가 0부터 12.5 N에 해당하고 정확도는 ±0.1 유닛(unit)이다. 측정부분은 단면적이 0.5 cm²인 원형 테스트 프로브이다. 측정된 결과는 12.5 N힘을 100등분한 스케일 값이고 측정단위는 유닛으로 나타내었다.

실험에 사용한 비파괴 경도계는 신뢰도 평가를 위하여 측정값과 파괴적 측정방법으로 결정한 경도를 비교하여 상관성을 분석하였다. 파괴적 방법으로 측정된 조직감은 토마토의 외피를 2 mm 두께로 제거하고 과일 경도계(fruit pressure tester, FT 327 model, Italy)의 직경 11.3 mm 반구형

밀면인 원통형 프로브(11)를 이용하여 토마토의 조직감을 측정하였다. 측정의 매개변수와 검정 기준을 Table 1과 같았다.

Table 1. Comparison of parameters and test criteria between destructed and non-destructed firmness test methods

	Non-destructed firmness test method	Destructed firmness test method
Diameter of test probe	7.97 mm	11.3 mm
End of test probe	Flat; 0.5 cm ² circular cross section	Hemispherical
Tomato peeled/unpeeled	Unpeeled	Peeled
Nature of test	Non-piercing	Piercing

VC 함량 측정

토마토의 VC 함량은 파괴적 방법으로 경도 측정한 시료를 착즙하여 측정하였다. VC 함량은 착즙시료 0.5 g에 metaphosphoric acid 용액 50 mL를 가하고 homogenizer로 2분간 균질화 시킨 후 여과지로 여과하여 50 mL로 적용하였다. 추출물은 0.20 µm nylon syringe filter(Whatman, Clifton, NJ, USA)로 여과하여 Agilent Technologies 1200 series HPLC system(Palo Alto, CA, USA)로 분석하였다.

통계분석

모든 분석 결과는 시료 당 3회 반복 실험과 30개 시료의 결과로부터 평균값과 표준편차로 나타내었으며 통계분석은 IBM SPSS Statistics(20, IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 이용하여 ANOVA test와 Duncan's multiple range test를 통해서 시료 저장 기간별 유의적 차이(p<0.001)를 검정하였다.

상관관계분석 및 선형회귀분석

비 파괴적으로 측정된 토마토 과실 개체의 경도 값과 감모율에 대한 상관성을 선형적으로 분석하였다. 선형회귀

분석을 통하여 독립변수가 토마토 표면의 경도, 종속변수가 감모율인 선형 함수식을 도출하였다. 상관계수와 추정치의 표준오차(standard error of estimate)를 통하여 수확 모형의 감모율 예측능력과 타당성을 검토하였다.

결과 및 고찰

감모율 색상 경도 및 VC 변화

토마토 감모율은 일반 박스 포장임에도 불구하고 온도가 10°C, 상대습도가 90%의 저장조건이었던 관계로 저장기간 15일까지 1.1% 정도에 머물렀다. 저장기간에 따른 감모율 변화는 확연히 차이가 있었지만 토마토 과실의 경우 무게 감모율에 따른 상품성 유지 범위가 5-7%이므로 저장 15일까지는 감모율에 따른 품질 저하는 미비하다고 판단된다(12).

수확된 토마토의 저장기간에 따른 색 변화를 관찰하였다. L 값의 경우 저장기간에 따라 감소하는 경향을 나타냈으나 저장 3일까지의 변화량이 컸고 이후 변화량이 감소하였다(Table 2). 저장기간 동안 a와 b값의 변화는 규칙적인 변화가 나타나지 않았다. 전반적으로 볼 때 수확 당일 토마토 색상 a값은 제일 낮고 b값은 제일 높으나 저장 3일 이후 a의 색상 변화는 불규칙적으로 커지다가 다시 작아지고 b는 a와 반대의 현상을 보여주었다. 토마토 숙성되는 과정 중 a/b 비례로 토마토의 성숙정도를 표시하는데 일반적으로 1.3(성숙)부터 2.9(과숙)까지 발달되고 시장 판매는 0.8 이상이면 된다고 한다(13). 수확일 부터 저장 15일까지 a/b 범위를 볼 때 1.4부터 1.55범위에 있어 성숙과에 속하고 저장 3일 때 조금 상승세가 있지만 이후 유지가 잘되는 것을 볼 수 있다. 수확일로부터 저장기간 15일 때 색상차이 ΔE는 증가하는 추세를 보여주고 저장기간 15일 때 평균 2.70인 것을 확인할 수 있다. 채도는 저장기간에 따라 큰 변화를 나타내지 않았지만 색조 각은 작아지는 추세를 보여주었다. 일원배치분산분석(One-way ANOVA) 결과를 볼

Table 2. Changes in external color value and inner vitamin C value of tomatoes during storage at 10°C, 90%RH

Storage period (day)	L	a	b	a/b	ΔE	Chroma	Hue angle	VC (mg/100 g)
0	39.86±0.86 ¹⁾	23.59±2.54	16.71±1.15	1.42±0.13	0.00±0.00	28.95±2.48	35.45±2.62	16.76±0.56
3	38.82±0.82	24.75±2.01	16.25±1.06	1.53±0.09	1.89±0.86	29.62±2.12	33.35±3.11	15.82±0.53
6	38.50±0.89	24.99±2.02	16.27±1.15	1.54±0.09	2.28±2.17	29.84±2.21	33.11±1.48	13.90±0.57
9	38.33±0.83	24.73±2.25	16.17±1.62	1.53±0.09	2.17±0.92	29.57±2.33	33.26±1.68	10.33±0.43
12	38.14±0.72	25.04±1.90	16.24±1.07	1.54±0.08	2.51±1.10	29.85±2.08	33.01±1.31	9.14±0.42
15	37.70±0.79	24.58±1.93	15.94±1.01	1.54±0.09	2.70±1.01	29.30±2.05	33.02±1.54	8.70±0.49
ANOVA	*** ²⁾	NS ³⁾	NS	***	***	NS	***	***

¹⁾Means±SE (n=30, except VC n=10).

²⁾significantly different (***)p<0.001).

³⁾NS, not significant.

때 L, a/b, ΔE와 색조 각은 저장기간에 따른 유의(p<0.001)한 결과를 보여주었다.

경도는 토마토의 중요한 품질 인자이며 소비자의 구매여부를 결정짓는 최종지표로 작용한다. 수확 후에 발생하는 연화는 주로 수분 손실과 pectinmethylesterase와 polygalacturonase 등의 세포벽 분해효소 활성화에 기인한다 (14). 이러한 효소 활성화는 과실의 숙도 및 저장온도가 높을수록 급격히 증가하므로 저온고습 유지가 더욱 중요하다 (15). 파괴적방법과 비 파괴적방법 측정결과를 정리하여

비교하면 다음과 같은 방정식으로 설명된다.

$$N=11.6 \times D+4.89$$

D : 파괴적방법 경도 측정결과(kg)

N : 비 파괴적방법 경도 측정결과(units)

4.89의 편차가 있지만 관계의 선형성으로 봤을 때 두 가지 방법으로 측정된 결과는 서로 높은 상관성(ρ=0.91)을 가지고 있어 비 파괴적 방법 경도계로 일정한 기간에 동일한 토마토 시료에 대한 경도변화 추정이 가능하다. 비 파괴적 방법으로 동일한 토마토에 대해 경도 측정된 결과 저장기간이 길수록 연화정도가 심화되는 결과를 나타내었으나 경도의 감소가 일정하지 않았다(Fig. 2). 저장기간이 9일인 경우 경도 감소율이 저장기간이 6일 때와 거의 비슷하여 경도유지가 잘 되었다고 볼 수 있지만 저장기간 12일 15일에는 또다시 경도 감소 추세를 보였다. 저장기간 15일 경우 경도 감소율이 40%이상인 것으로 보이는데 이는 토마토가 심하게 연화되는 것을 표시하고 대부분의 상품성 가치를 잃은 것을 나타낸다.

VC는 ascorbic acid라고도 불리며 신선한 과일과 야채에 많이 함유되고 있다. 식물조직에 있는 ascorbate oxidase는 VC 산화 촉매이므로 신선한 과일과 야채는 일정한 시간 저장 후에 VC 함량은 점차적으로 감소한다(Table 2). 저장기간 15일인 토마토의 VC함량과 수확당일 토마토 VC함량을 비교하면 45%이상 감소되었다.

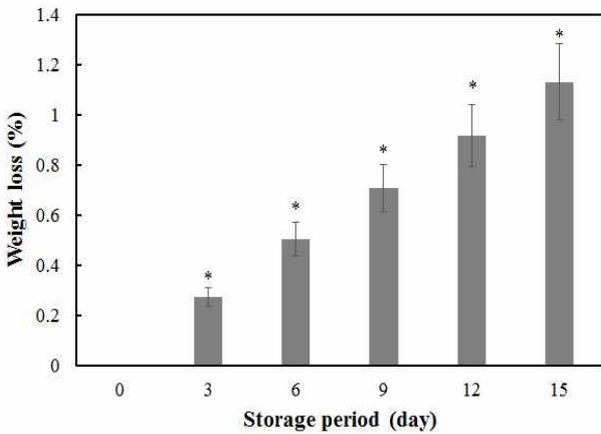


Fig. 1. Weight loss of tomatoes during storage at 10°C, 90% RH.

Data are mean±SD (n=30), within each column followed by the same letter are significantly different (*p<0.001).

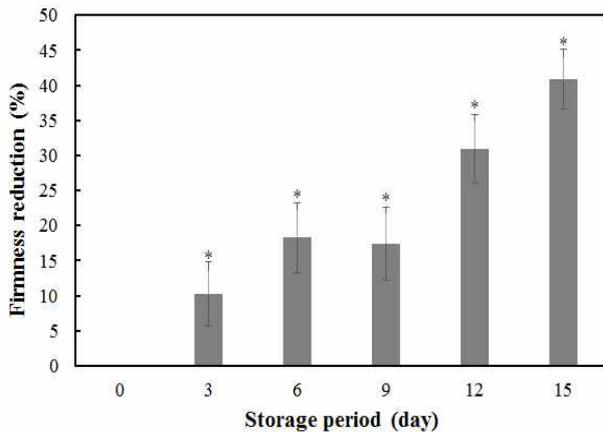


Fig. 2. Firmness reduction rate of tomatoes during storage at 10°C, 90% RH.

Data are mean±SD (n=30).

내부품질인자와 외부품질인자와의 상관관계 결과

Table 3은 내부품질인자 VC함량과 외부품질인자인 무게 감모율, 경도와 표면색상 사이의 상관관계를 보여준다. 경도와 감모율의 상관관계가 제일 높고 그 다음으로는 VC함량과 감모율 사이의 상관관계이다. 내부품질인자와 외부품질인자 사이 낮은 상관관계를 볼 수 있다. 그리하여 상관관계 결과가 제일 높은 경도와 감모율 사이의 관계의 수학적 모델을 도출하였다.

토마토의 경도와 감모율 사이의 상관관계를 분석하기 위해 Fig. 3과 같은 산점도를 표현하였다. 횡축은 독립변수인 경도를 표시하고 종축은 종속변수인 감모율을 표시한다. 경도 수치가 클수록 감모율이 작고 경도 수치가 작을수록 감모율이 큰 경향을 관찰할 수 있는데 이는 음의 상관관계가 있다고 판단되고 상관관계 크기는 ρ=-0.65이다. 선형회귀분석 결과 경도와 감모율사이 선형회귀모형은 다음과 같다.

Table 3. Correlations among inner and external quality factors of tomatoes

	VC	WL	Firmness	L	a	b	a/b	ΔE	Chroma	Hue angle
VC	1	0.44	0.39	0.23	0.25	0.12	0.26	0.20	0.16	0.18
WL		1	0.65	0.32	0.30	0.22	0.28	0.27	0.26	0.26
Firmness			1	0.11	0.10	0.09	0.13	0.12	0.13	0.12

$$WL = -0.0241 \times F + 1.5213$$

WL : 무게감모율(%)

F : 경도 측정결과(units)

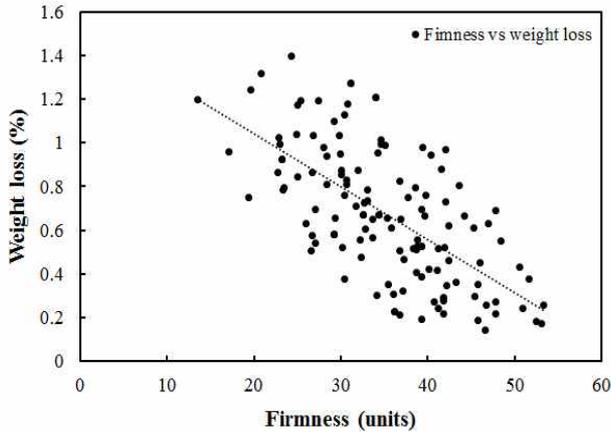


Fig. 3. Scatter plot of firmness and weight loss rate.

비파괴 방법으로 경도를 측정하여 선형모델 수식에 대입하면 과실의 감모율을 추정할 수 있다. 선형회귀모델을 구성한 이외의 토마토 시료의 경도와 감모율의 수치를 대입한 결과 회귀모델의 추정치 오차는 ± 0.231 이고 이는 비파괴 방법으로 측정된 경도로 과실 감모율의 예측능력을 보여 준다.

요 약

본 연구에서는 토마토를 일정한 기간(15일) 동안 저장하여 토마토의 품질인자인 감모율, 색상과 경도를 분석하고 비 파괴적 방법으로 토마토 경도를 측정된 결과로 경도와 감모율 사이의 상관관계를 분석하고 선형회귀모델을 도출하여 토마토 품질을 예측하고자 하였다. 그린하우스에서 재배된 ‘티와이250’ 품종을 수확한 후 일반 과실 종이 박스에 포장한 후 설정환경이 10°C, 90%RH인 항온항습챔버에 저장하여 3일 간격으로 경도, 무게와 색상 변화를 조사하였다. 15일간 저장 중 감모율은 저장기간이 증가함에 따라 증가하나 1.1% 정도에 머물러 단순히 감모율 인자로만 판단했을 때 토마토의 신선도 품질에 영향 끼치는 수준은 아니다. 색상변화 중 명도와 색조 각은 저장기간의 증가에 따라 감소하는 경향을, a/b와 ΔE는 증가하는 경향을 나타냈었고 일원분산분석결과를 볼 때 유의한 수준이었다 ($p < 0.001$). 경도는 저장기간이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며 저장 15일차에는 경도감소율이 40% 이상인 것으로 나타났다. 그리고 비 파괴방법으로 측정된 경도 값과 감모율 사이의 상관관계를 분석하여 선형회귀모델 $WL = -0.0241 \times F + 1.5213$ 을 하였으며 모델의 추정치 오차는

± 0.231 이었다. 이러한 결과에 비추어볼 때 수확 후 일정한 저장환경에서 비파괴적인 경도 측정을 통해 감모율을 추정하고 신선도를 판단하는 지표로 사용하는 것이 가능한 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 파프리카, 토마토 온실 내 신선도 유지를 위한 이송기 개발 사업의 지원을 받아 연구되어, 이에 감사드립니다(과제번호: 50020160140).

References

1. Khachik F, Carvalho L, Bernstein PS, Muir GJ, Zhao DY, Katz NB (2002) Chemistry, distribution and metabolism of tomato carotenoids and their impact on human health. *Exp Biol Med*, 227, 845-851
2. Islam MZ, Kim YS, Kang HM (2011) Effect of breathable film for modified atmosphere packaging material on the quality and storability of tomato in long distance export condition. *J Bio-Environ Control*, 20, 221-226
3. Choi JH, Jeong MC, Kim DM (2013) Changes in quality parameters of tomatoes harvested at different mature stages during storage. *Korean J Food Preserv*, 20, 151-157
4. Choi JH, Jeong MC, Kim BS, Kim DM (2007) Effect of high CO₂ pre-storage treatment on the quality of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.) during ripening. *Korean J Food Preserv*, 14, 578-583
5. Gomez AH, He Y, Pereira AG (2006) Non-destructive measurement of acidity, soluble solids and firmness of Satsuma mandarin using Vis/NIR-spectroscopy techniques. *J Food Eng*, 77, 313-319
6. Jha SN, Matsuoka T (2004) Non-destructive determination of acid-brix ratio of tomato juice using near infrared spectroscopy. *Int J Food Sci Technol*, 39, 425-430
7. Malundo TMM, Shewfelt RL, Scott JW (1995) Flavor quality of fresh tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by sugar and acid levels. *Postharvest Biol Technol*, 6, 103-110
8. Schuch W, Bird C (1994) Improving tomato fruit quality using bioscience. *Acta Hort*, 376, 75-80
9. Tandon KS, Baldwin EA, Scott JW, Shewfelt RL (2003) Linking sensory descriptors to volatile and nonvolatile components of fresh tomato flavor. *J Food Sci*, 68,

- 2366-2371
10. Thompson AK (1998) Controlled atmosphere storage of fruits and vegetables. CAB International, Willingford, UK, p 214-217
 11. Munoz-Bertomeu J, Miedes E, Lorences EP (2013) Expression of xyloglucan endotransglucosylase/hydrolase (*XTH*) genes and XET activity in ethylene treated apple and tomato fruits. *J Plant Physiol*, 170, 1194-1201
 12. Kays SJ (1991) Postharvest physiology of perishable plant products. AVI Publishing, New York, NY, USA, p 115-117
 13. Chavez-Murillo CE, Espinose-Solis V, Apavicio-Saguilan A, Salgado-Delgado R, Tirado-Gallegos JM, Zamudio-Flores PB (2015) Use of zein and ethylcellulose as biodegradable film on evaluation of post-harvest changes in tomato (*Lycopersicon esculentum*). *J Microbiol Biotechnol Food Sci*, 4, 365-368
 14. Vu TS, Smout C, Sila DN, LyNguyen B, Van Loey AML, Hendrickx MEG (2004) Effect of preheating on thermal degradation kinetics of carrot texture. *Innov Food Sci Emerging Technol*, 5, 37-44
 15. Barnavon L, Doco T, Terrier N, Ageorges A, Romieu C, Pellerin P (2001) Involvement of pectin methyl-esterase during the ripening of grape berries: partial cDNA isolation, transcript expression and changes in the degree of methyl-esterification of cell wall pectins. *Phytochemistry*, 58, 693-701