

## 과실의 압축특성에 관한 연구

홍지향 김창수 김재열 김진현 명병수 정종훈 박장우

### Mechanical Behavior of Fruits under Compression Loading

J. H. Hong C. S. Kim J. Y. Kim J. H. Kim B. S. Myung J. H. Chung J. W. Park

#### Abstract

From the production on the farm to the consumer, agricultural products are subject to various physical treatments involving mechanical techniques and devices. It is essential to understand the physical laws governing the response of these biological materials so that the machines, processes, and handling operations can be designed for maximum efficiency and the highest quality of the end products. A compression test system was developed to test the physical properties of fruits including apple, pear, and peach which may lead to a better understanding of the physical laws. The test system consisted of a digital storage oscilloscope and simple mechanism which can apply quasi-static compression to fresh fruits. Rupture force, energy, and deformation were measured at the five levels of compression speed from 1.25 to 62.5 mm/min for each internal and external tissues. Rupture forces for apple and pear were in the range of 42.2 to 46.2 N and 38.8 to 41.2 N for external and internal tissues, respectively. Rupture forces for peach external tissues were in the range of 48.2 to 54.0 N.

**Keywords :** Compression, Fruits, Rupture force, Rupture energy, Rupture deformation

#### 1. 서론

과실의 수확, 선별 및 포장작업과 운송과정에서 부적절한 처리는 과실에 기계적 손상을 발생시켜 과실의 질적, 양적 손실을 초래하므로 상품적 가치를 저하시킨다. 과실의 손상은 주로 마찰, 압축 및 충격 하중과 같은 기계적 요인에 의하여 발생하며 이는 과실의 기계적 특성과 밀접한 관계가 있다. 따라서 과실의 기계적 특성이 구명되면 수확, 선별 및 가공 기계와 시설을 해당 과실의 특성에 적합하게 설계 제작 또는 개선하여 기기 및 시설을 효율적이고 경제적으로 운용할 수 있다. 최근 농산물의 물성을 평가하기 위한 방법으로 초음파나 근적외선을 이용한 비파괴적인 방법이 많이 연구되고 있다. 비파괴적인 방법으로 과실의 물성을 정확히 평가하기 위하여 실제 물성을 나타내는 파괴적인 방법에 의한 측도 설정이 수

행되므로 과실의 기계적 요인에 의한 물성으로 압축하중에 의한 기계적 특성과 같은 연구가 필요하다.

이와 같은 중요성에도 불구하고 압축하중에 의한 과실의 기계적 특성에 관한 국내 연구는 미미한 실정이며, 수확에서 유통 및 소비에 이르는 과정의 작업기술 역시 비효율적이므로 이의 개선 및 기계화를 위하여 체계적인 연구가 요망되고 있다.

압축 하중에 대한 농산물의 기계적 특성에 대한 연구는 공업용 광물질의 기계적 특성의 측정에 사용하는 장치, 기술 및 방법을 응용하여 수행되었다. 농산물의 기계적 특성 시험에는 성숙도 등 조직 변화 측정방법으로 내부조직 시편의 평판시험과 수확 및 처리과정의 손상에 저항하는 지표 측정방법으로 외피조직에 대한 원통형 플런저(plunger)시험이 사용되었다.

Nelson과 Mohsenin(1968)은 사하중(dead load)에 대한 사

The article was submitted for publication in 2005, reviewed in October 2005, and approved for publication by the editorial board of KSAM in October 2005. The authors are Ji Hyung Hong, KSAM member, Visiting Researcher, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Chang Soo Kim, Jea Youl Kim, Jin Hyun Kim, Byung Soo Myung, Sangju National University, Jong Hoon Chung, Seoul National University, Jang Woo Park, Hankyung National University. The corresponding author is J. H. Chung, Associate Professor, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea; Fax : +82-2-873-2049; E-mail : <jchung@snu.ac.kr>

과(McIntosh)의 손상을 명든 체적으로 표시하고 4.4°C에서 24시간 동안 가한 사하중에 대한 명든 체적의 회복식을 구하였다. 준정적압축(quasi-static compression)특성으로부터 사하중의 손상을 예측하기 위한 대비실험 결과 이들 간에 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

Fletcher(1971), Fridley 등(1968), Rao(1974), Wright 등(1968), Wright와 Splinter(1968) 등은 압축하중에 대한 농산물의 기계적 특성을 파괴력, 파괴에너지 및 파괴 변형도를 표시하고 만능시험기를 이용하여 압축속도에 대한 이들 특성의 변이를 측정하였다. Wright 등(1968)은 고구마의 품종, 저장기간, 저장조건 별 기계적 특성의 변이를 측정하고 이들 변이간에 유의성을 발견하였으나 공통적인 전체 경향은 발견하지 못하였다. Fletcher 등(1985)은 하중재하속도 4.6~304800 mm/min의 범위에서 사과 다섯 품종과 배, 복숭아 및 감자의 하중재하속도에 따른 기계적 특성을 측정하였다. 표피 파괴력은 하중재하속도에 따라 증가하다가 일정 속도를 기점으로 감소하였다. 이 임계속도는 시료의 종류, 품종 및 성숙도에 따라서 다르게 나타났다. 파괴 변형도는 하중재하속도에 따라 일정하게 유지하다 임계속도를 기점으로 증가하였다. 파괴력과 파괴 변형도의 임계속도는 서로 상관관계가 없었다. 파괴 에너지는 하중재하속도가 증가함에 따라서 전체적으로 증가하였다. 이상의 각 압축특성의 측정결과는 힘-변형도 곡선으로 나타내었고, 극한강도(ultimate strength)와 극한변형도(rupture deformation)를 측정하였으며, 파괴에너지는 이 특성곡선을 구적계로 적분하여 계산하였다.

국내 연구로는 김 등(1992)이 사과와 배의 과육시편을 부위별로 채취하여 만능시험기를 사용하여 하중재하속도, 저장조건, 저장기간별 기계적 특성을 측정하였다. 대표적인 기계적 특성으로 생물체항복강도, 극한강도, 항복변형량 및 극한 변형도를 측정하였으며, 중심축에 수직한 방향의 시편이 다른 방향의 시편보다 기계적 특성값이 작게, 하중재하속도가 증가할수록 큰 것으로 나타났다. 또한 저장기간이 증가할수록 항복강도와 극한강도가 감소한 반면 항복 극한 변형량은 증가하는 것으로 보고하였다.

이상의 연구에서 농산물의 압축특성을 시험하기 위한 장치로 만능시험기를 이용하여 압축하중을 가하고 자료수집 장치를 구성하고 프로그램을 작성하여 시료의 힘-변형도 곡선을 측정·분석하거나, 플로터로 출력하여 눈금자나 구적계를 사용하여 기계적 요인을 분석하였다. 본 연구에서는 초보자가 사용하기 어려운 자료수집 장치와 프로그램 작성을 하지 않아도 되도록 최근 보편화 되어있는 디지털스토리지 오실로스코프의 신호증폭, 측정모니터링 및 측정 데이터 저장 및 전송

기능을 이용하여 사용이 간편한 측정장치 및 자료수집시스템을 구성하였으며, 고가의 만능시험기를 사용하지 않고 청과물과 같이 강도가 약한 물질의 기계적 특성시험에 적합한 압축시험 장치를 개발하여 과실을 대표하는 사과, 배, 복숭아의 하중재하속도에 따른 내부과육조직과 외피조직의 기계적 특성을 구명하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 실험재료

압축실험의 공시재료로서 사과, 배 및 복숭아의 각 대표적 품종인 후지, 장신랑, 유명을 공시하였다. 시험에 사용된 사과와 배는 각각 50개를 구입하였으며 수원 원예연구소에서 시험 제배한 것으로 수확 후 저장기간 없이 상온에서 바로 압축 시험에 사용하였으며, 복숭아는 대구에서 수확된 것을 서울 가락동 청과물 시장에서 외견상 손상이 없는 것을 선별하여 50개를 구입하였다.

시료의 부피는 Archimedes의 원리를 이용하여 그림 1과 같이 시료를 증류수에 잠기게 하여 측정하였으며 그 관계식은 다음과 같다.

$$V = \frac{W_2 - W_1}{\gamma_w} \quad (1)$$

여기서  $W_1$ : 시료 고정기가 증류수에 잠겼을 때 물과 비이커의 무게(g)

$W_2$ : 시료와 시료 고정기가 증류수에 잠겼을 때 물과 비이커의 무게(g)

$\gamma_w$ : 증류수의 비중량(1.00 g/cm<sup>3</sup>)

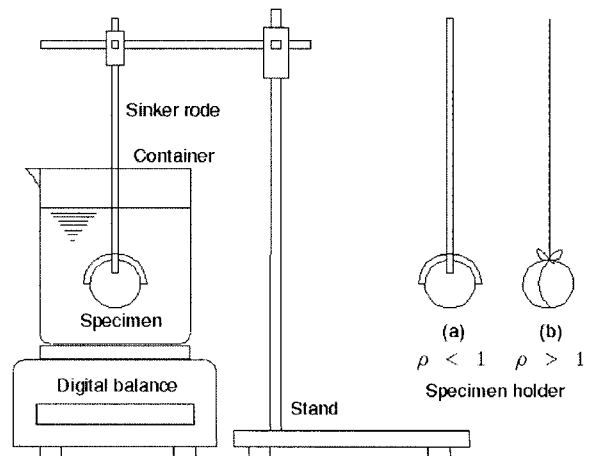


Fig. 1 Apparatus for measurement of density  $\rho$  and volume of specimen.

따라서 시료의 밀도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

여기서  $\rho$  : 시료의 밀도( $\text{g/cm}^3$ )  
 $M$  : 시료의 무게( $\text{g}$ )  
 $V$  : 시료의 부피( $\text{cm}^3$ )

시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 표 1과 같다.

#### 나. 압축시험 장치

과실에 준정적하중(quasi-static compression)을 가하고 압축특성을 측정하기 위하여 그림 2와 같이 압축특성 시험장치를 구성하였다. 시료에 준정적하중을 가하기 위하여 압축장치의 부하 발생으로 인한 구동 직류모터의 속도 변동을 Tacho Generator로 감지하고 이를 지정된 속도와 비교하여 일정속도로 Feed-Back시키는 회로를 구성 제작하였으며 PWM(pulse width modulation) 방법으로 속도를 제어하였다. 이 직류모터 속도 조절장치는 2,100 rpm에서 2% 미만의 속도변화를 보였다. 시료에 압축하중을 가하기 위하여 피치(pitch)가 1.25 mm 인 압축장치를 사용하였다. 시료에 접촉하는 압축장치의 선단은 두께 10 mm, 직경 15 mm의 쇠판과 길이 20 mm 직경 8 mm 곡률반경 4 mm의 플런저(plunger)를 부착할 수 있다.

#### 다. 압축특성 자료수집 및 분석장치

압축특성시험을 위하여 그림 2와 같이 하중변환기, 스트레인 증폭기, 디지털스토리지 오실로스코프, GPIB 인터페이스 및 마이크로컴퓨터로 측정, 수집, 전송 및 분석장치를 구성하였다. 압축시험에 사용한 하중변환기는 LC50KA(Kyowa, Tokyo, Japan)로 490 N 용량이며, 스트레인 증폭기는 CO-50ET(Kyowa, Tokyo, Japan)로 압축하중에 대한 전기적 신

**Table 1** Physical characteristics of fruits for the quasi-static compression test

Item	Dimension (mm)			Weight (g)	Volume ( $\text{cm}^3$ )	Density ( $\text{g/cm}^3$ )
	$L_1$	$L_2$	$L_3$			
Apple	80.5* (3.73)**	83.3 (3.60)	72.0 (4.18)	240.2 (23.3)	285.2 (26.5)	0.848 (0.010)
Pear	93.7 (2.68)	96.3 (2.58)	80.1 (3.99)	441.2 (29.5)	433.9 (29.0)	1.017 (0.005)
Peach	70.7 (3.25)	74.5 (3.04)	68.0 (3.27)	380.8 (24.7)	370.5 (26.4)	1.028 (0.003)

Note  $L_1$ =the largest lateral diameter,  $L_2$ =the smallest lateral diameter,  $L_3$  = height

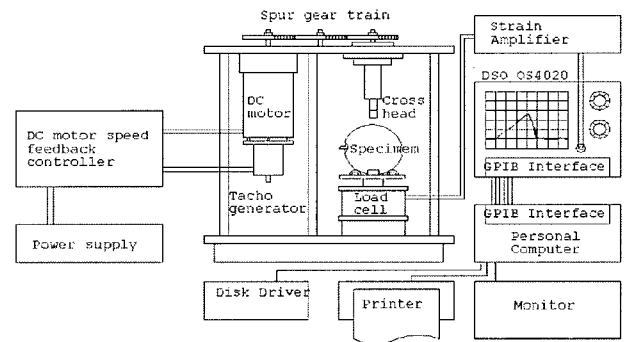
\* average values of six measurements.

\*\* standard deviation.

호의 교정(calibration)은 규정  $\mu$ 스트레인에 해당하는 출력 전압으로 결정하였다. 압축특성 시험자료 수집장치로 디지털오실로스코프 Gould OS4020(Gould Instrument Systems Inc., Valley View, Ohio, USA, 이하 OS4020)를 사용하였다. 자료 수집 및 저장에 사용한 OS4020에 내장된 A/D변환기는 분해능 8 bit, 변환시간이 500 nsec이며, 메모리 용량은 4 kbyte이다. OS4020에 저장된 압축특성자료는 OS4020에 부착된 4024 IEEE 488 인터페이스버스(General Purpose Interface Bus, 이하 GPIB)와 PC에 장착된 GPIB를 이용하여 전송하였다. PC GPIB 인터페이스를 통하여 OS4020의 작동제어, 압축시험자료의 전송 및 분석에 사용하였다. OS4020의 GPIB 제어, 자료전송 및 분석 프로그램은 BASIC으로 작성하였다. OS4020의 측정시작제어신호로 Ext. Trigger 신호를 가하여 시험자료의 측정을 시작하였으며 측정결과는 바로 오실로스코프의 모니터로 확인하였다.

#### 라. 실험방법

표피조직에 대한 압축시험에는 그림 3과 같이 원형의 시료를 사용하였다. 과육조직에 대한 압축시험에서 그림 3과 같은 시편채취기를 이용하여 사과와 배는 측면에서 수직방향으로 직경 1.0 cm, 길이 1.5 cm의 원통형 시편을 만들어 사용하였다 ( $L/D=1.5$ ). 표피조직에 대한 압축시험은 과실의 꼭지에 방향에 수직인 방향으로 압축하중을 가하여 시험하였다. 사과, 배



**Fig. 2** Schematic diagram of compression test apparatus.



**Fig. 3** Schematic diagram for specimen samplers.

및 복숭아를 각각 50개를 원형의 상태로 플린저를 사용하여 표피조직시험을 하였으며 표피조직시험을 한 시료의 플린저 시험방향의 수직으로 내부 과육조직을 채취하여 내부 과육조직의 압축시험을 하였다.

과실의 압축하중에 대한 조직의 파괴특성을 시험하기 위하여 극한강도, 파괴에너지 및 극한변형도를 파괴요인으로 설정하고, 표피조직에는 반경 4 mm 플린저로 내부 과육조직에는 평판으로 준정적하중을 가하고 상기의 압축시험장치로 힘-변형도 곡선을 측정하여 파괴요인을 측정하였다.

하중재하속도는 ASAE Standard(1983) 압축시험 규정속도인 25 mm/min을 기준으로 12.5, 25.0, 37.5, 50.0 및 62.5 mm/min의 5수준의 압축속도에 따른 압축특성의 변이를 측정하였다. 압축특성시험은 사과와 배의 표피조직과 내부 과육조직에 대하여 각 하중재하속도에서 10회 반복시험 하였다. 파괴특성인자로 파괴점(rupture point)과 극한강도(ultimate strength)는 압축시험장치로 측정된 힘-변형도 곡선에서 곡선의 과단점에서의 힘으로 결정하였으며, 파괴에너지  $E_r$ 은 다음 식 (3)으로 결정하였다. 파괴에너지 계산을 위한 적분은 힘-변형도 곡선의 측정값을 측정자료 샘플링간격을 이용한 simpson의 수치적분법으로 계산하였다.

$$E_r = \int_0^{\Delta t} F(t) v dt \quad (3)$$

여기서  $F(t)$  : 힘-변형도곡선의 측정값  
 $v$  : 크로스헤드의 속도  
 $\Delta t$  : 접촉에서 과단점(rupture point)까지 소요된 시간

### 3. 결과 및 고찰

본 연구의 압축시험장치로 측정된 사과의 표피조직의 힘-변형도 측정곡선은 그림 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 사과의 표피조직의 힘-변형도 곡선에서의 변곡점으로 대표되는 생체항복점(bioyield point)이 뚜렷하게 나타나지 않았으며 배와 복숭아의 외피조직은 물론 사과와 배의 과육조직에서도 뚜렷하게 나타나지 않았으며 이는 김 등(1992)의 배의 과육조직에 대한 연구결과와 일치하나 사과의 과육조직에서 뚜렷한 생체항복점이 관측되었다는 결과와는 차이가 있었다. 극한강도는 힘-변형도 곡선의 정점으로 정의하였으며 정점 이후에서 힘-변형도 곡선은 급격히 감소하였다. 파괴변형도는 힘-변형도 곡선에서 준정적하중 시작점에서 정점까지의 거리로 측정하였다. 복숭아의 과육조직은 예비실험 결과 시험에 사용한 복숭아의 과육조직이 압축 변형과정에서 물러지는 현상

이 발생되어 뚜렷한 과단점도 발견되지 않았다. 따라서 복숭아는 표피의 압축시험만 실시하였다.

압축속도에 따른 사과, 배 및 복숭아의 표피조직과 사과와 배의 과육조직에 대한 압축시험 결과는 그림 5와 같았다. 표피조직의 극한강도(ultimate strength)이 과육조직보다 큰 것으로 나타났다. 사과의 과육조직의 파괴력이 배보다 큰 것으로 나타났으며 그 차이는 근소하였다. 이는 김 등(1992)이 연구에서 큰 차이를 보인 것과 대조적으로 시험에 사용한 배의 품종의 차이에 의한 것으로 사료된다. 전체적으로 배와 사과의 표피 및 과육조직의 하중재하속도 12.5~62.5 mm/min의 범위에서 하중재하속도에 의한 극한강도에 대한 영향은 일반적인 경향이나 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

12.5~62.5 mm/min의 하중재하속도 범위에서 파괴에너지와 극한변형도도 그림 6과 7과 같이 하중재하속도에 따른 일반적인 경향이나 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 표피조직의 파괴에 소요되는 에너지가 과육조직에 비하여 큰 것으로 나타났으며 사과가 배보다 큰 파괴에너지가 소요되는 것으로 나타났다. 반면 복숭아의 표피조직 파괴에너지는 사과와 배에 비하여 현격한 차이를 보였으나, 복숭아의 과육 조

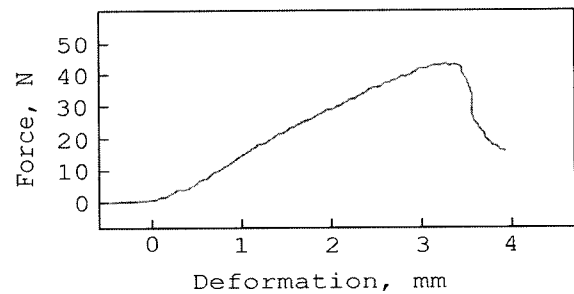


Fig. 4 Force-deformation curve for apple skin tissue at crosshead speed 25 mm/min.

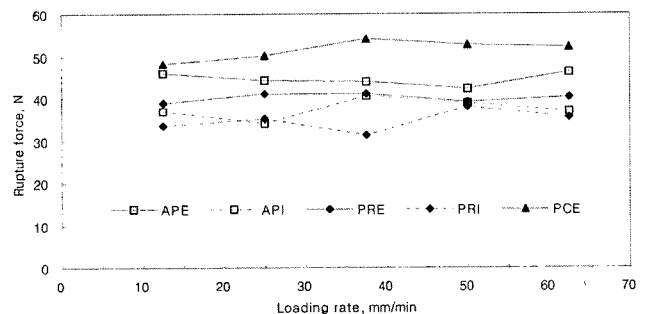


Fig. 5 Effect of compression loading rate on the rupture force (N) of apple, pear and peach (APE : apple flesh with skin, API : apple flesh cylinder, PRE: pear flesh with skin, PRI : pear flesh cylinder, PCE : peach flesh with skin).

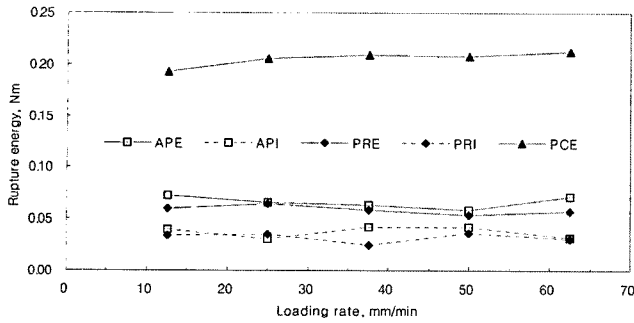


Fig. 6 Effect of compression loading rate on the rupture energy (N·m) of apple, pear and peach (APE : apple flesh with skin, API : apple flesh cylinder, PRE : pear flesh with skin, PRI : pear flesh cylinder, PCE : peach flesh with skin).

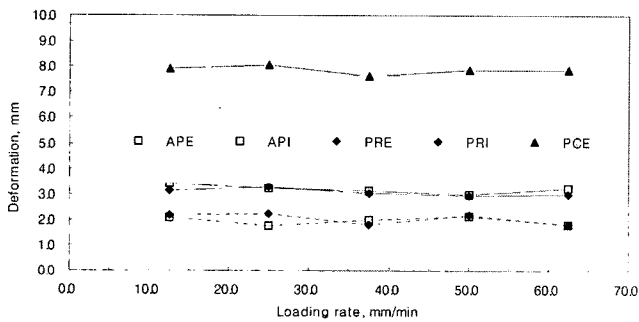


Fig. 7 Effect of compression loading rate on the rupture deformation (mm) of apple, pear and peach (APE : apple flesh with skin, API : apple flesh cylinder, PRE : pear flesh with skin, PRI : pear flesh cylinder, PCE : peach flesh with skin).

직이 스펀지와 같이 물렁하고 플런저가 작용하는 부분에서 표피가 과육과 일부 분리되는 현상으로 플런저가 복숭아 내부로 진입하여 표피층이 파괴되는 지점이 파괴점(rupture point)로 관측되었으며 이와 같은 연유로 파괴에너지나 극한 변형도가 큰 차이를 보이는 것으로 판단되었다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서 개발한 과실 압축특성 시험장치는 간단한 준정적하중을 가할 수 있는 장치와 하중변환기 및 증폭기로 구성하였다. 기존의 연구에서 사용된 자료수집장치와 달리 본 연구에서 사용한 자료수집 장치는 프로그램 개발이 필요 없는 디지털 스토리지 오실로스코프로 편리하게 실시간으로 측정, 관측 및 저장 및 전송할 수 있었다. 사과, 배 및 복숭아에 준정적하중을 가하고, 하중변환기를 이용하여 준 정압이 가해지는 순간의 변위-하중 특성 곡선을 디지털스토리지 오실로스코프로 측정하고 분석프로그램으로 파괴력, 파괴에너지 및 파괴변형도를 측정하였다. 12.5~62.5 mm/min의 압축속

도 범위에서 과실 압축특성 시험장치로 측정된 준정압축하중 속도에 따른 사과, 배 및 복숭아의 파괴력, 파괴에너지와 파괴 변형도의 변이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 사과(후지) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 42.2~46.17 N, 0.059~0.073 Nm, 3.0~3.4 mm 이었으며, 과육조직은 각각 34.0~40.5 N, 0.030~0.042 Nm, 1.7~2.1 mm이었다.
- (2) 배(장신랑) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 38.8~41.2 N, 0.054~0.065 Nm, 2.9~3.3 mm 이었으며, 과육조직은 각각 31.9~38.0 N, 0.024~0.036 Nm, 1.8~2.2mm이었다.
- (3) 복숭아(유명) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 48.2~54.0 N, 0.193~0.209 Nm, 7.9~8.1 mm 이었다.

#### 참고 문헌

1. ASAE. 1983. Agricultural Engineers Yearbook of STANDARDS : 325-337.
2. Fletchers, S. W. 1971. Mechanical Behavior of Processed Apples. Transactions of the ASAE. 14(1):14-19.
3. Fletchers, S. W., Mohsenin, N. N., Hammerle, J. R. and Turkey, L. D. 1985. Mechanical Behavior of Selected Fruits and Vegetables under Fast Rate of Loading. Transactions of the ASAE. 8(3):324-326.6.
4. Fridley, R. B., Bradley, R. A., Rumsey, J. W. and Adrian, P. A. 1968. Some aspects of elastic behavior of selected fruits. Transactions of the ASAE. 11(1):46-49.
5. Kim, M. S., Park, J. M. and Choi, D. S. 1992. Force-Deformation Characteristics of the Fruit Flesh. Journal of the Korea Society for Agricultural Machinery 17(2):156-170. (In Korean)
6. Nelson, C. W. and Mohsenin, N. N. 1968, Maximum Allowable Static and Dynamic Loads and Effect of Temperature for Mechanical Injury in Apples. Journal of Agricultural Engineering Research, 13(4):305-317.
7. Rao, V. N. M., Hamann, D. D. and Humphries, E. G. 1974. Mechanical Testign as a Measure of Kinesthetic Quality of Raw and Baked Sweet Potatoes. Transactions of the ASAE. 17(6): 1187-1190.
8. Wright, F. S. and Splinter, W. E. 1968. Mechanical behavior of sweet potatoes under slow loading and Impact loading. Transactions of the ASAE. 11(1):765-770.
9. Wright, F. S., Splinter, W. E. and Kushmann, L. J. 1968. Influence of variety, time from harvest, and storage conditions on mechanical behavior of the sweet potatoes. Transactions fo the ASAE. 11(1):81-85.