

청과물의 충격특성 측정에 관한 연구

Measurement of mechanical behavior of fruits and vegetables under impact loading

홍지향* 고헌균*

정희원 정희원

J.H. Hong H.K. Koh

1. 서론

청과물의 수확, 선별 및 포장작업과 운송과정에서 부적절한 처리는 청과물에 기계적 손상을 가하게 되며 청과물의 질적, 양적 손실을 초래하여 청과물의 상품적 가치를 저하시킨다. 청과물의 기계화 작업 중 손상 및 손실은 주로 기계적 요인에 의하여 발생하며 이는 청과물의 기계적 특성과 밀접한 관계가 있다. 따라서 청과물의 기계적 특성이 구명되면 각종 청과물의 수확, 선별, 및 가공 기계류와 시설을 해당 청과물의 특성에 적합하게 설계 제작 또는 개선하므로써 기기 및 시설을 효율적이고 경제적으로 운용할 수 있으며, 청과물의 기계적 손상으로 인한 손실을 줄이고 그로인한 청과물의 질적 및 양적 보존을 극대화 하여 농가 소득을 증대시킬 수 있다.

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

농산물의 충격하중에 대한 기계적 특성의 측정 장치 및 방법은 공업용 광물질의 기계적 특성 측정장치와 기술 및 방법이 응용되어 왔다. 이에 언급되는 농산물의 충격 특성시험은 청과물의 기계적 특성 현상의 이해라는 관점에서 다루고자 한다.

농산물의 충격특성 연구는 다음과 같이 충격장치, 충격특성 측정장치 및 충격특성요인으로 그 흐름을 요약할 수 있다. 초기의 충격특성시험은 시료를 강제표면에 떨어뜨리거나 충격체를 시료에 떨어뜨리는 간단한 낙하충격시험으로 농산물의 손상을 주관적 판단으로 측정하였다. Wright와 Splinter(1968)은 수직 낙하운동하는 낙하물체에 가속도계를 부착하여 충격체의 시간-가속도 특성곡선을 측정하였다. Bittner(1967)와 Nelson과 Mohsenin(1968)은 충격하중을 가하기 위한 장치로 펜덜럼을 이용하였다. 이상의 시간-가속도 특성곡선은 오실로스코프나 디지털 스토리지 오실로스코프로 측정하여 사진기로 촬영하거나 오실로그래프로 작도하고 구적계를 이용하여 각 기계적 특성을 측정하였다.

* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 농업기계전공

Bittner 등(1967)은 쿠션물질의 성능평가를 위한 방법으로 낙하물체의 rebound 에너지와 사과와 쿠션이 흡수한 에너지와의 평형이론을 적용하였다. Nelson과 Mohsenin(1968)은 파괴와 멩이드는데 소요된 에너지를 농산물의 충격특성으로 측정하였다. 농산물의 기계적 특성 시험에는 성숙도 등 조직 변화 측정방법으로 속살시편의 평판시험과 수확 및 처리과정의 손상에 저항하는 지표 측정방법으로 외피조직에 대한 원통형 Plunger 시험이 사용되었다.

국내 청과물의 수확 선별 및 취급의 기계화를 위한 선결 문제로서 청과물의 기계적 처리 과정에서 손상을 가하는 제반 하중의 형태중 가장 대표적인 충격 특성에 대한 일부 청과물의 기계적 특성을 구명하려는 바 그 구체적 목적은 다음과 같다.

- 가. 청과물에 충격하중을 가하고, 충격 특성을 측정할 수 있는 충격 특성 시험 장치를 개발한다.
- 나. 마이크로 컴퓨터와 GPIB를 이용하여 압축 시험 장치로 측정된 충격 특성자료를 신속 정확히 수집, 전송, 및 분석할 수 있는 충격 시험 자동화 장치를 개발한다.
- 다. 상기의 충격시험 자동화 장치를 이용하여 충격체의 낙하높이에 대한 청과물의 파괴력, 파괴에너지와 파괴 변형도를 측정 분석하고 낙하높이가 청과물의 기계적 특성에 미치는 영향을 구명한다.

2. 재료 및 방법

1. 실험재료

충격실험의 공시재료로서 사과, 배, 복숭아, 감자 및 고구마의 각 대표적 품종인 후지, 장신랑, 유명, 수미 및, 선미를 선택하여 충격 특성을 측정하였다. 시험에 사용한 사과와 배는 수원 원예시험장에서 시험 재배한 것이며 복숭아는 대구에서 그리고 감자는 강릉에서 수확된 것을 서울 가락동 청과물 시장에서 구입하였다. 고구마는 수원 작물시험장에서 시험재배한 것을 사용하였다.

시료의 부피는 Archimedes의 원리를 이용하여 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)

γ_w : 증류수의 비중 (1.00 g/ml)

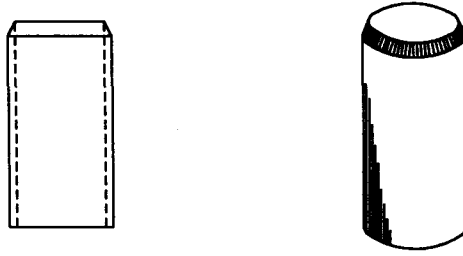


Figure 1. Schematic diagram for specimen samplers.

따라서 시료의 밀도는 다음 식으로 구할 수 있다.

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

여기서 ρ : 시료의 밀도 (g/ml)

M : 시료의 무게 (g)

V : 시료의 부피 (ml)

외피조직에 대한 충격시험에서 사과, 배, 복숭아, 감자는 원형의 시료를 사용하였으며 고구마의 경우 형상의 불균일성으로 가로, 세로, 두께를 각각 4, 8, 2 cm의 규격의 시편을 만들어 충격 특성을 측정하였다. 속살조직에 대한 충격시험에서 그림 1과 같은 시편채취기를 이용하여 사과와 배는 측면에서 수직방향으로 감자는 두께방향으로 그리고 고구마는 조직 섬유질에 평행으로 직경 1.0 cm, 길이 1.5 cm의 원통형 시편을 만들어 사용하였다. 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 표 1과 같다.

2. 실험 장치 및 방법

(1) 충격 시험 장치 구성

청과물에 일정 낙하높이의 충격하중을 가하고 충격특성을 측정하기 위하여 그림 2와 같이

충격특성 시험장치를 구성하였다. 시료에 충격하중을 가하기 위하여 낙하물체가 두줄의 강선을 따라 수직으로 낙하하게 하였으며 낙하물체에 가속도계를 부착하여 충격체가 시료에 충돌할 때 가속도의 변화를 측정하였다. 낙하물체는 두께 10mm, 직경 50mm의 아크릴 평판과 길이 20mm 직경 8mm 곡률반경 4mm의 plunger를 부착할 수 있도록 아크릴로 제작하였다. 낙하물체의 무게는 plunger 부착시 247.49g, 평판 부착시 233.46g이었다. 낙하장치가 시료에 충격을 가하는 순간의 속도는 낙하장치에 부착한 0.8mm 간격의 slit이 Schmitt trigger회로에 내장한 Sharp64 1A17 고속응답 photo interrupter를 통과할 때 발생하는 Schmitt trigger 신호를 이용하여 OS4020으로 측정하였다.

(2) 실험자료 수집, 전송, 및 분석 자동화 장치

충격시험을 신속 정확히 수행하기 위하여 디지털 오실로스코프 Gould OS4020(이하 OS4020으로 표시)와 Apple II Microcomputer와 GPIB를 이용한 충격특성 실험자료 수집, 전송, 및 분석 자동화 장치를 다음과 같이 구성하였다.

1) 충격특성 측정, 자료수집 및 전송장치

낙하물체의 가속도 측정을 위하여 Entran EGA2-1000 가속도계와 Thorn EMI Datatech Signal conditioner 1050과 1054 DC module을 사용하였다. 가속도 측정장치의 calibration은 가속도계에 가한 표준 가속도에 대한 Signal conditioner의 출력 전압으로 결정하였다. 가속도 측정장치의 calibration은 한국 표준연구소에서 Bouch Levy Reciprocity calibration method로 수행하였다.

Table 1. Physical characteristics of fruits and vegetables for the impact test.

Item	Dimension			Weight (g)	Volume (ml)	Density (g/ml)
	L1	L2	L3			
Apple	80.5	83.3	72.0	240.2	285.2	0.848
	(3.7)	(3.6)	(4.2)	(23.3)	(26.5)	(0.010)
Pear	93.7	96.3	80.1	441.2	433.9	1.017
	(2.6)	(2.6)	(4.0)	(29.5)	(29.0)	(0.005)
Peach	70.7	74.5	68.0	380.8	370.5	1.028
	(3.3)	(3.0)	(3.3)	(24.7)	(26.4)	(0.003)
Potato	52.4	65.4	73.9	155.5	145.6	1.068
	(4.0)	(4.6)	(6.9)	(26.4)	(24.6)	(0.008)
Sweet-potato	-	-	-	382.6	301.3	1.270
	-	-	-	(123.4)	(93.7)	(0.008)

낙하물체의 가속도를 측정하고 저장하기 위하여 OS4020을 사용하였다. OS4020에는 일반 오실로스코프와 기능이 같은 Normal mode와 Digital storage 기능을 가지는 Refresh mode와 Roll mode의 세가지 전기적 신호 측정방법이 있으며, 본 연구에서는 Refresh mode를 사용하였다. Refresh mode에서 OS4020이 External trigger 신호를 받게 되면 지정한 Sweep rate에 따라서 해당 시간동안 새로운 데이터가 OS4020의 memory에 저장된다. OS4020에 내장된 A/D변환기는 분해능 8bit, 변환시간이 500nsec이며, 메모리 용량은 4kbyte이다. 청과물에 충격하중을 가하는 순간의 시간-가속도 특성곡선을 측정하기 위하여 그림과 같이 photo interrupter와 flip-flop 회로를 구성하여 OS4020에 external trigger 신호를 가하였다. 시료에 낙하물체가 충돌하는 순간의 가속도는 Real time으로 A/D 변환되어 동시에 OS4020의 화면에 시간-가속도 특성 곡선으로 작도되므로 측정되는 데이터를 실험과정에서 확인할 수 있었다.

OS4020으로 측정되어 메모리에 저장되어있는 시간-가속도 특성곡선은 OS4020의 IEEE 488 Interface 4024(이하 4024로 표시)와 Apple II GPIB(General Purpose Interface Bus)를 통하여 Apple II 마이크로 컴퓨터로 전송하였다. 4024인터페이스는 OS4020의 기능제어와 저장된 데이터를 Apple II로 전송하는데 사용하였다. GPIB는 parallel bus로 8byte의 데이터를 전송할 수 있는 8개의 data line과 데이터 전송을 관리하는 ATN, EOI, SRQ, IFC 및 REN의 5개 management control line과 handshaking system을 위한 NRFD, NDAC 및 DAV의 3개 transfer control line을 사용한다. GPIB bus상의 I/O 장치는 제어명령을 전송받아 데이터를 송신하는 Talker와 데이터를 수신하는 Listener, 그리고 이들 I/O 장치의 기능과 데이터의 흐름을 관리하는 Controller로 구분되며 Controller는 bus 상에 1개만 존재할 수 있다.

본 연구에서는 Apple II를 Controller와 Talker로, OS4020을 Listener로 지정하여 time division과 channel과 데이터 측정 mode를 선택하고 storage memory format 명령을 전송시켜 OS4020의 기능을 원격제어하여 시간-가속도 측정데이터를 메모리에 저장하였으며, 다시 OS4020을 Talker로, Apple II를 Listener로 전환시켜 OS4020의 메모리에 저장된 실험자료와 작동상태를 송신하게 하였다.

2) 충격특성 분석 자동화 장치.

충격특성 분석 자동화 장치는 Scanning block, trimming block, analyzing block, 그리고 printout block으로 구성하였다. Scanning block에서는 측정된 시간-가속도 특성곡선을 낙하물체가 시료에 접촉하기 시작한 부분과 파괴가 발생하는 점을 시간-가속도 곡선에서 검색하며, trimming block에서는 이 시작부분에서 파괴점까지의 곡선만 저장한다. Trimming된 시간-가속도 특성곡선에서 파괴점의 가속도 a 를 측정하여 파괴력(rupture force)을 계산하고 Simpson의 수치적분법으로 파괴에너지와 파괴변형도를 계산하였으며 그 관계식은 다음과 같다.

파괴력 F_r :

$$F_r = ma \quad (3)$$

여기서 m = 낙하물체의 mass

a = 파괴점의 가속도

파괴에너지 E_r 은 에너지 보존의 법칙에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_r = \frac{1}{2} m(v_i^2 - v_f^2) + mg\Delta L \quad (4)$$

여기서 v_i = 충격이 시작되는 점의 속도

v_f = 파괴가 시작되는 점의 속도

ΔL = 파괴 변형도

시료의 파괴가 시작되는 점의 속도는 다음의 관계식으로 구할 수 있다.

$$v_f = v_i - \int_0^{\Delta t} a(t) dt \quad (5)$$

여기서 Δt = 파괴에 소요된 시간

$a(t)$ = 시간-가속도 특성곡선

파괴변형도 ΔL 을 구하는 관계식은 다음과 같다.

$$\Delta L = v_i \Delta T - \int_0^{\Delta t} \int_0^{\Delta t} a(t) dt dt \quad (6)$$

이상의 시간-가속도 특성곡선의 1차, 2차 적분은 Simpson의 수치적분법으로 계산하였다.

(3) 실험 방법

일정 낙하 높이의 충격하중에 대한 청과물의 조직 파괴특성을 시험하기 위하여 속살조직에는 낙하물체에 평판을 사용하였으며 표피조직에는 낙하물체에 plunger를 부착하여 충격하중을 가하였다. 외피조직에 대한 충격시험에는 원형의 시료를 사용하였으며 속살조직에는 그림 1의 시편채취기를 사용하여 직경 1.0cm, 길이 1.5cm의 원통형 시편을 만들어 사용하였다. 상기의 충격시험 자동화 장치로 시간-가속도 특성곡선을 측정하고 파괴력, 파괴에너지, 그리고 파괴변형도를 각 조직의 파괴요인으로 측정하였다. 충격낙하높이는 각 조직이 파괴가 발생하는 높이로부터 점차 그 높이를 증가시켜서 4cm에서 24cm사이의 낙하높이에서 청과물의 충격특성 변이를 측정하였다. 각 조직의 충격특성시험은 각 낙하 높이에서 10회 반복하여 측정하였다.

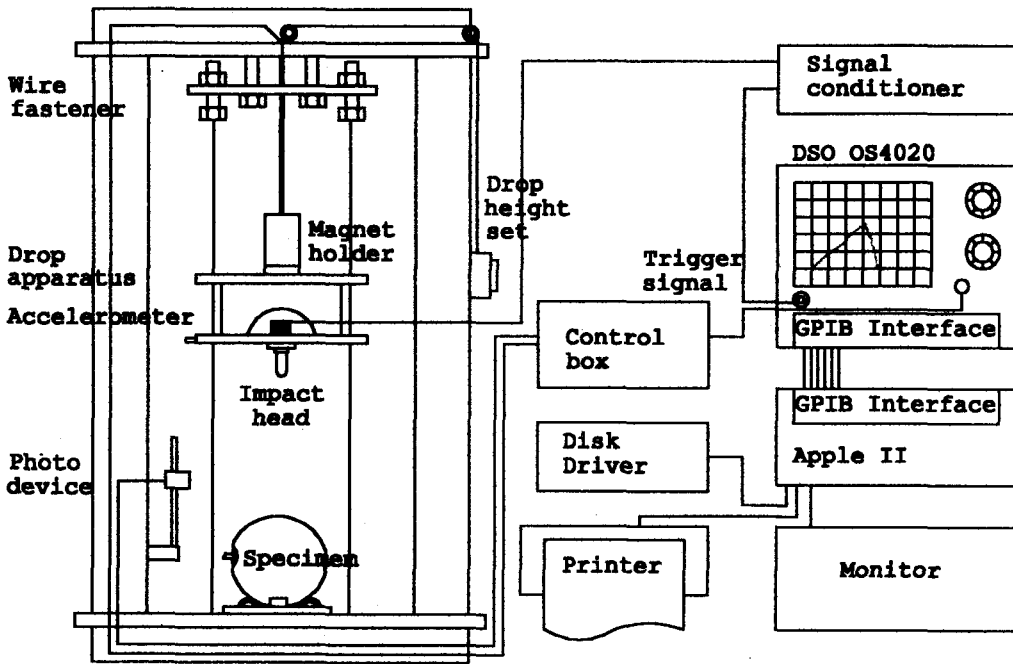


Figure 2. Schematic diagram of impact test apparatus.

3. 결과 및 고찰

사과, 배, 복숭아, 감자, 고구마의 압축특성시험 결과는 표 2와 같다. 사과의 외피조직과 속살조직의 파괴력은 낙하높이가 증가함에 따라서 증가하였으나 파괴에너지는 낙하높이에 따른 일정한 경향을 보이지 않았다. 사과 외피조직의 파괴변형도는 낙하높이에 관계없이 일정한 값을 보였다. 사과의 외피조직은 8.2kg정도의 힘을 가하면 표피가 3.7mm정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 사과의 속살조직은 6.4kg정도의 힘을 가하면 표피가 1.4mm정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 이것은 외피가 속살조직보다 단단하기 때문인 것으로 추정된다. 사과 외피조직의 파괴에너지와 파괴변형도는 낙하높이에 따라서 변이가 적은 반면에 속살조직에서는 파괴력과 파괴에너지의 변이가 큰 것으로 나타났다. 외피조직과 속살조직 모두 낙하높이에 관계없이 일정한 변형도에서 조직이 파괴되었다.

배의 경우 외피조직의 파괴력은 낙하높이가 증가함에 따라 증가하였으나 파괴변형도는 일정한 값을 보였다. 외피조직의 파괴에너지는 낙하높이에 따른 일정한 경향을 보이지 않았다. 속살조직의 파괴력과 파괴에너지는 낙하높이에 따른 일정한 경향을 보이지 않았으나 파

피변형도는 낙하높이에 관계없이 일정하였다. 배의 외피조직은 8.0kg 정도의 힘을 가하면 표피가 3.4mm 정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 배의 속살조직은 4.9kg 정도의 힘을 가하면 표피가 1.9mm 정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 배의 표피가 거의 없는 것을 고려할 때 이것은 플런저로 가하는 충격하중의 분산과 원통형 시편에 가하는 평판의 충격형태의 차이에 의한 것으로 추정된다. 배의 파괴변형도는 외피와 속살조직 모두 낙하높이에 관계없이 일정한 값을 보였다. 이는 일정 변형도에서 충격하중에 대하여 조직이 파괴되는 것으로 해석된다.

복숭아의 경우도 외피조직과 속살조직의 파괴력과 파괴에너지는 낙하높이에 따른 일정한 경향을 보이지 않았으나 파괴변형도는 낙하높이가 증가함에 따라 증가하였다. 복숭아의 외피조직은 4.9kg 정도의 힘을 가하면 표피가 6.7mm 정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 복숭아의 파괴변형도는 다른 정과물에 비하여 큰 값을 보였다. 이는 시험에 사용한 복숭아가 숙성된 것이고 무른 재질이어서 단순히 복숭아 껍질의 파괴특성에 의한 것으로 추정된다. 복숭아의 속살조직은 시간-가속도 특성곡선에서 조직의 파괴점이 나타나지 않아서 충격특성시험을 할 수 없었다.

감자의 경우 외피조직의 파괴력은 낙하높이가 증가에 따라 증가하다 12cm에서 일정한 값을 보였다. 파괴에너지와 파괴변형도는 낙하높이에 따른 일정한 경향을 보이지 않았다. 속살조직의 파괴력은 낙하높이의 증가에 따라 증가하였으며 파괴변형도는 12cm의 낙하높이 이상에서는 일정한 값을 보였다. 파괴에너지는 낙하높이에 따른 일정한 경향을 보이지 않았다. 감자의 외피조직은 8.3kg 정도의 힘을 가하면 표피가 6.6mm 정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 감자의 속살조직은 6.1kg 정도의 힘을 가하면 표피가 5.2mm 정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 감자의 표피가 거의 없는 것을 고려할 때 이것은 플런저로 가하는 충격하중의 분산과 원통형 시편에 가하는 평판의 충격하중의 형태의 차이에 의한 것으로 추정된다. 감자 속살조직의 파괴에너지는 낙하높이에 따라서 변이가 파괴력과 파괴변형도보다 큰 것으로 나타났으며 외피조직에서는 더 큰 변이를 보였다.

고구마의 외피조직과 속살조직 모두 파괴력, 파괴에너지 및 파괴변형도는 낙하높이의 증가에 따라 감소하다 일정 낙하높이에서 다시 증가하는 경향을 보였다. 고구마의 외피조직은 9.0kg 정도의 힘을 가하면 표피가 2.2mm 정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 고구마의 속살조직은 13.7kg 정도의 힘을 가하면 표피가 2.4mm 정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 고구마의 경우 사과, 배, 감자의 경우와 달리 속살조직의 파괴력이 더 큰 것으로 나타났다. 사과, 배, 감자의 경우 표피에서 내부의 조직의 차이가 적은 반면 고구마는 그 차이가 크고, 속살조직이 표피주변의 조직보다 단단한 것으로 추정된다. 이는 고구마의 압축특성시험에서도 같은 경향을 보였다. 고구마도 파괴에너지의 낙하높이에 따른 변이가 파괴력과 파괴변형도보다 큰 것으로 나타났으며 속살조직에서는 더 큰 변이를 보였다.

Table 2. Rupture parameter values of fruits and vegetables at various drop height.

	External tissue					Internal tissue				
	6	8	10	12	14	6	8	10	12	14
Apple										
Drop heights, cm	6	8	10	12	14	6	8	10	12	14
Force, kg	7.4 ⁺	8.1	8.2	8.4	8.9	6.2	6.8	6.6	5.8	6.5
Energy, kg · mm	14.4	14.5	14.1	14.3	14.3	4.1	4.6	4.3	3.6	4.6
Deformation, mm	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7	1.3	1.5	1.5	1.4	1.5
Pear										
Drop heights, cm	6	8	10	12	14	6	8	10	12	14
Force, kg	7.2	7.6	8.2	8.6	8.4	5.3	4.9	4.8	3.2	6.1
Energy, kg · mm	11.1	12.3	13.1	12.8	13.4	4.8	4.1	4.1	3.0	4.9
Deformation, mm	3.2	3.4	3.5	3.3	3.4	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9
Peach										
Drop heights, cm	10	12	14	16	18	-	-	-	-	-
Force, kg	5.1	4.4	6.6	4.3	4.3	-	-	-	-	-
Energy, kg · mm	15.8	15.0	16.5	16.1	16.9	-	-	-	-	-
Deformation, mm	6.3	6.4	6.7	7.0	7.1	-	-	-	-	-
Potato										
Drop heights, cm	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16
Force, kg	6.7	7.9	8.9	8.9	9.0	4.7	5.4	6.4	6.7	7.5
Energy, kg · mm	18.5	25.1	28.6	27.8	28.5	11.8	14.1	17.3	19.4	18.8
Deformation, mm	5.8	6.8	7.0	6.4	6.9	4.6	5.0	5.5	5.6	5.5
Sweet potato										
Drop heights, cm	8	12	16	20	24	8	10	12	16	18
Force, kg	8.6	8.6	8.2	8.3	11.1	14.3	12.9	13.1	14.5	13.9
Energy, kg · mm	9.4	9.1	8.0	6.7	12.2	14.4	10.7	10.4	14.0	14.3
Deformation, mm	2.5	2.2	2.1	1.9	2.5	2.5	2.3	2.0	2.7	2.6

⁺ Average of ten measurements

4. 요약 및 결론

본 연구에서 개발한 청과물의 충격시험 자동화 장치를 이용하여 일부 청과물에 충격하중을 가하고, 가속도계를 이용하여 충격이 가해지는 순간의 시간-가속도 특성 곡선을 디지털 데이터로 신속 정확하게 측정할 수 있었으며, 일부 청과물의 충격하중에 대한 기계적 특성을 신속하고 정확하게 측정할 수 있었다. 청과물 충격특성 시험 자동화 장치로 측정한 일부 청과물의 파괴력, 파괴에너지와 파괴 변형도로 표시되는 기계적 특성의 충격체의 낙하 높이에 따른 변이를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 사과(후지) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 7.4~8.9kg, 11.8~14.5kgmm, 3.3~3.8mm로 측정되었으며, 속살조직은 각각 5.8~6.9kg, 3.3~4.6kgmm, 1.3~1.5mm로 측정되었다.
- 2) 배(장신랑) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 7.2~8.6kg, 11.1~13.4kgmm, 3.2~3.5mm로 측정되었으며, 속살조직은 각각 3.2~6.1kg, 3.0~4.9kgmm, 1.9~2.0mm로 측정되었다.
- 3) 복숭아(유명) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 4.3~5.3kg, 10.9~16.9kgmm, 3.9~7.1mm로 측정되었다.
- 4) 감자(수미) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 6.7~9.0kg, 18.5~30.1kgmm, 5.8~7.3mm로 측정되었으며, 속살조직은 각각 4.7~7.5kg, 11.8~19.4kgmm, 4.6~5.5mm로 측정되었다.
- 5) 고구마(선미) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 8.2~11.1kg, 7.0~12.2kgmm, 1.9~2.5mm로 측정되었으며, 속살조직은 각각 9.8~14.5kg, 8.7~14.4kgmm, 1.9~2.7mm로 측정되었다.

5. 참고문헌

1. ASAE. 1983. Agricultural Engineers Yearbook of STANDARDS: 325-337.
2. Bittner. D.R., H.B. Manbeck, and N.N. Mohsenin. 1967. A method of evaluating cushioning materials used in mechanical harvesting and handling fo fruits and vegetables. Transactions of the ASAE. 10(6): 711-714.
3. Burkhardt, T.H. and B.A. Stout. 1971. A high velocity, high momentum impact testing device for agricultural materials. Transactions of the ASAE. 14(3): 455-457.
4. De Buerdemaeker, J., L. Lemaitre, and R. Meir. 1982. Quality detection by frequency spectrum analysis of fruit impact force. Transactions of the ASAE. 25: 175-178.
5. Fluck, R.C. and E.M. Ahmed. 1973. Imapact testing of fruits and vegetables.

- Transactions of the ASAE. 16(4): 660-666.
6. Franke, J.E. and R.P. Rohrbach. 1981. A nonlinear impact model for a sphere with a flat plate. Transactions of the ASAE 24(6): 1683-1686.
 7. Grant, S.W., M.T. Turczyn, B.A. Ashby, G.D. Kleischmidt, N.D. Halloe, F.W. Wheaton, and W.L. Dunton. 1986. Potato bruising during transport. Transactions of the ASAE. 29(4): 1176-1179.
 8. Hamann, D.D. 1969. Dynamic mechanical properties of apple fruit flesh. Transactions of the ASAE. 12(2): 170-174.
 9. Holt, J.E. and D. Schoorl. 1981. Prediction of bruising in impacted multi-layered apple packs. Transactions of the ASAE. 24(6): 242-247.
 10. Hughes, J.C. 1985. A portable pendulum for testing dynamic tissue failure susceptibility of potatoes. Journal of Agric. Eng. Res. 32: 269-277
 11. Jindal, V.K. and N.N. Mohsenin. 1976. Analysis of a simple pendulum impacting device for determining dynamic strength of selected food materials. Transactions of the ASAE. 19: 766-770.
 12. Mohsenin, N.N. 1978, Physical properties of plant and agricultural materials. Gordon and Breach Science Publishers.
 13. Mohsenin, N.N. . 1978. V.K. Jindal, and A.N. Manor. 1978. Mechanics of impact of a falling fruit on a cushioned surface. Transactions of the ASAE. 21: 594-600.
 14. Nelson, C.W. and N.N. Mohsenin. 1968. Maximum allowable static and dynamic loads and effect of temperature for mechanical injury in apples. Journal of Agric. Eng. Res. 13(4): 305-317
 15. Wright, F.S. and W.E. Splinter. 1968. Mechanical behavior of sweet potatoes under slow loading and Impact loading. Transactions of the ASAE. 11(1): 765-770.
 16. Wright, F.S., W.E. Splinter, and L.J. Kushmann. 1968. Influence of variety, time from harvest, and storage conditions on mechanical behavior of the sweet potatoes. Transactions of the ASAE. 11(1): 81-85.