

# 청과물의 압축특성 측정에 관한 연구

## Measurement of mechanical behavior of fruits and vegetables under compression loading

홍지향\*      고태균\*

정희원      정희원

J.H. Hong   H.K. Koh

### 1. 서론

청과물의 수확, 선별 및 포장작업과 운송과정에서 부적절한 처리는 청과물에 기계적 손상을 가하게 되어 청과물의 질적, 양적 손실을 초래하므로 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 압축하중에 대한 기계적 특성의 측정 장치 및 방법은 공업용 광물질의 기계적 특성 측정장치와 기술 및 방법이 응용되어 왔다. 이에 언급되는 농산물의 압축 특성시험은 청과물의 기계적 특성 현상의 이해라는 관점에서 다루고자 한다.

정하중은 완전 정하중(Dead load)와 준 정하중(Quasi-static Compression)으로 분류된다. 농산물의 기계적 특성 시험에는 성숙도 등 조직 변화 측정방법으로 속살시편의 평판시험과 수확 및 처리과정의 손상에 저항하는 지표 측정방법으로 외피조직에 대한 원통형 Plunger 시험이 사용되었다.

Fletcher(1971), Fridley(1968), Rao(1974), Wright(1968), Wright와 Splinter(1968) 등은 압축시험에 대한 농산물의 기계적 특성을 파괴력, 파괴에너지 및 파괴 변형도를 표현하고 만능시험기를 이용하여 압축강도에 대한 이들 특성의 변이를 측정하였다. Wright 등(1968)은

\* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 농업기계전공

고구마의 품종, 저장기간, 저장조건 별 기계적 특성의 변이를 측정하고 이들 변이간에 유의성을 발견하였으나 공통적인 전체 경향은 발견하지 못하였다. Fletcher(1965)는 0.003~200 psi의 압축시험에서 사과 다섯 품종과 배, 복숭아 및 감자의 기계적 특성을 측정하였다. 파괴 파괴력은 압축속도에 따라 증가하다가 일정 속도를 기점으로 감소하였다. 이 임계속도는 시료의 종류, 품종 및 성숙도에 따라서 다르게 나타났다. 파괴 변형도는 일정하다 임계속도를 기점으로 증가하였다. 파괴력과 파괴 변형도의 임계속도는 상관관계가 없었다. 파괴 에너지는 전체적으로 증가하였다. 이상의 압축특성의 측정결과는 힘 변형도의 곡선으로 작도되었고, 파괴력과 파괴 변형도는 이 특성곡선으로 측정하였고, 파괴에너지는 이 특성곡선을 구적계로 적분하여 계산하였다.

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

- 가. 청과물에 압축하중을 가하고, 압축 특성을 측정할 수 있는 압축 특성 시험 장치를 개발한다.
- 나. 마이크로 컴퓨터와 GPIB를 이용하여 압축 시험 장치로 측정한 압축 특성자료를 신속 정확하게 수집, 전송, 및 분석할 수 있는 압축 시험 자동화 장치를 개발한다.
- 다. 상기의 압축시험 자동화 장치를 이용하여 준 정압하중(Quasi-Static Compression)에 대한 청과물의 파괴력, 파괴에너지와 파괴 변형도를 측정 분석하고 정압 하중속도가 청과물의 기계적 특성에 미치는 영향을 구명한다.

## 2. 재료 및 방법

### 1. 실험재료

압축실험의 공시재료로서 사과, 배, 복숭아, 감자 및 고구마의 각 대표적 품종인 후지, 장신랑, 유명, 수미 및, 선미를 선택하여 압축 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. 각 청과물의 수확시기와 실험조건은 표 1과 같다.

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

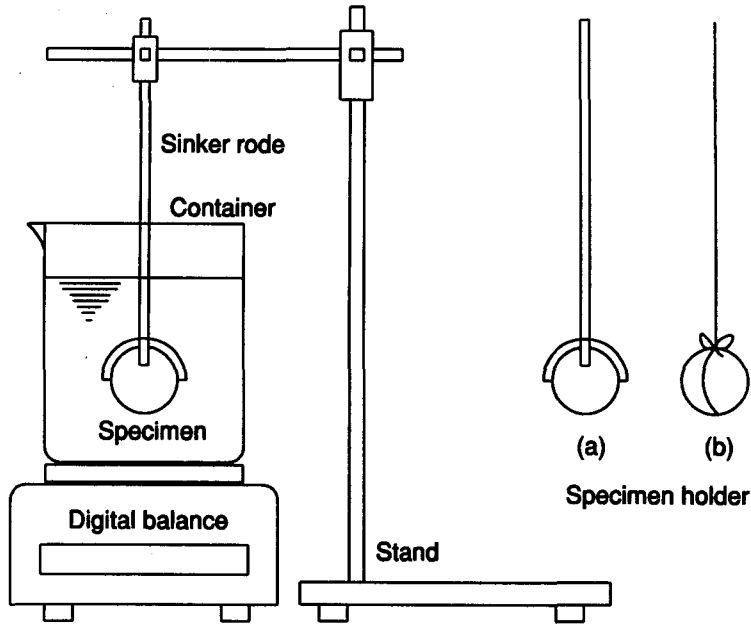


Figure 1. Apparatus for measurement of density  $\rho$  and volume of specimen (a) for  $\rho > 1$  and (b) for  $\rho < 1$ .

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

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 비중 (1.00 g/ml)

Table 1. Agronomic data and test conditions of fruits and vegetables used in the compression test.

| Item         | Date of      |              | Test conditions |       |
|--------------|--------------|--------------|-----------------|-------|
|              | harvest      | experiment   |                 |       |
| Apple        | 1987. 10. 14 | 1987. 10. 25 | 16°C            | 64%RH |
| Pear         | 1987. 9. 22  | 1987. 9. 28  | 20°C            | 66%RH |
| Peach        | 1987. 9. 8   | 1987. 9. 12  | 25°C            | 70%RH |
| Potato       | 1987. 8. 24  | 1987. 9. 21  | 23°C            | 68%RH |
| Sweet-potato | 1987. 9. 29  | 1987. 10. 12 | 18°C            | 65%RH |

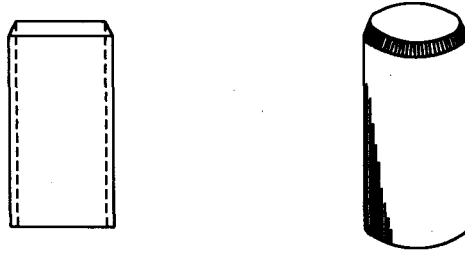


Figure 2. Schematic diagram for specimen samplers.

따라서 시료의 밀도는 다음 식으로 구할 수 있다.

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

여기서  $\rho$ : 시료의 밀도 (g/ml)

$M$ : 시료의 무게 (g)

$V$ : 시료의 부피 (ml)

Table 2. Physical characteristics of fruits and vegetables for the quasi-static compression test.

| Item         | Dimension      |                |                | Weight (g)       | Volume (ml)     | Density (g/ml)   |
|--------------|----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|
|              | L1             | L2             | L3             |                  |                 |                  |
| Apple        | 80.5<br>(3.73) | 83.3<br>(3.60) | 72.0<br>(4.18) | 240.2<br>(23.3)  | 285.2<br>(26.5) | 0.848<br>(0.010) |
| Pear         | 93.7<br>(2.68) | 96.3<br>(2.58) | 80.1<br>(3.99) | 441.2<br>(29.5)  | 433.9<br>(29.0) | 1.017<br>(0.005) |
| Peach        | 70.7<br>(3.25) | 74.5<br>(3.04) | 68.0<br>(3.27) | 380.8<br>(24.7)  | 370.5<br>(26.4) | 1.028<br>(0.003) |
| Potato       | 52.4<br>(3.96) | 65.4<br>(4.62) | 73.9<br>(6.86) | 155.5<br>(26.4)  | 145.6<br>(24.6) | 1.068<br>(0.008) |
| Sweet-potato | -<br>-         | -<br>-         | -<br>-         | 382.6<br>(123.4) | 301.3<br>(93.7) | 1.270<br>(0.008) |

외피조직에 대한 압축시험에서 사과, 배, 복숭아, 감자는 원형의 시료를 사용하였으며 고구마의 경우 형상의 불균일성으로 가로, 세로, 두께를 각각 4, 8, 2 cm의 규격의 시편을 만들어 압축 특성을 측정하였다. 속살조직에 대한 압축시험에서 그림 2와 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 2와 같다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### (1) 압축 시험 장치 구성

청과물에 준정압하중을 가하고 압축특성을 측정하기 위하여 그림 3과 같이 압축특성 시험 장치를 구성하였다. 시료에 준 정압하중을 가하기 위하여 압축장치의 부하 발생으로 인한 구동 DC Motor의 속도 변동을 Tacho Generator로 감지하고 이를 지정된 속도와 비교하여 일정속도로 Feed-Back시키는 회로를 구성 제작하였으며 PWM (pulse width modulation) 방법으로 속도를 제어하였다. 이 DC 모터 속도 조절장치는 2,100 rpm에서 2% 미만의 속도 변화를 보였다. 시료에 압축하중을 가하기 위하여 pitch가 1.25 mm인 압축장치를 사용하였다. 시료에 접촉하는 압축장치의 선단은 두께 10mm, 직경 15mm의 쇠팅판과 길이 20mm 직경 8mm 곡률반경 4mm의 plunger를 부착할 수 있다.

### (2) 실험자료 수집, 전송, 및 분석 자동화 장치

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

압축장치가 시료에 가하는 준 정압하중을 측정을 위하여 Kyowa CO-50ET 하중변환기와 Kyowa LC50KA스트레인 증폭기를 사용하였다. 압축하중 측정장치의 calibration은 스트레인 증폭기의 규정  $\mu$ 스트레인에 해당하는 출력 전압으로 결정하였다. 본 연구에서 사용한 하중변환기의 용량은 50kg이었다.

청과물에 가하는 준 정압 하중은 OS4020을 사용하여 측정하고 저장하였다. 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.

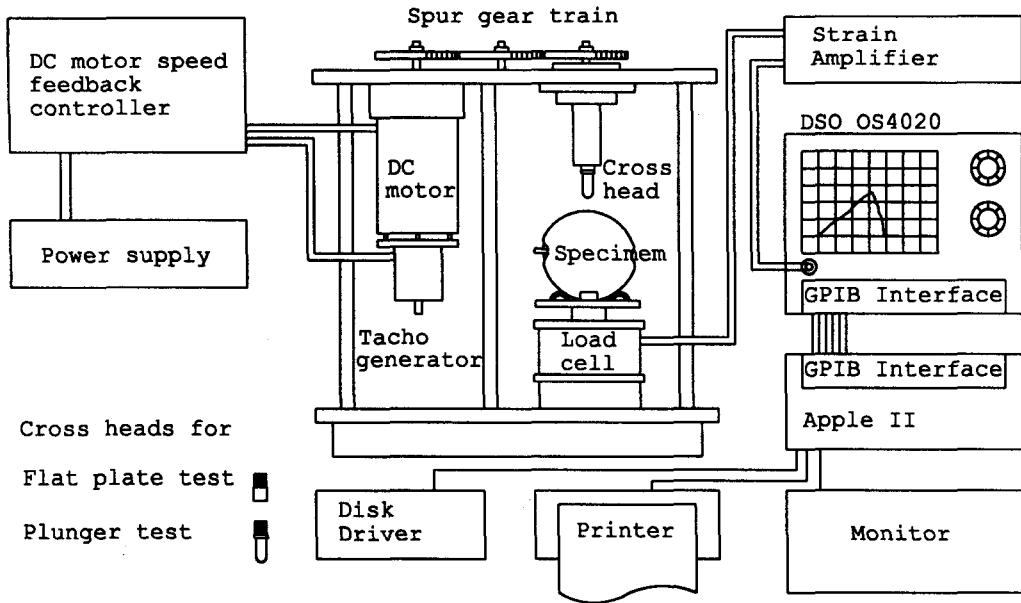


Figure 3. Schematic diagram of compression test apparatus.

청과물에 준 정압하중을 가하는 순간의 변위-하중 특성곡선을 측정하기 위하여 OS4020의 trigger level knob의 조작으로 external trigger 신호를 가하고 변위-하중 특성곡선을 측정하였다. 시료에 낙하물체가 충돌하는 순간의 가속도는 Real time으로 A/D 변환되어 동시에 OS4020의 화면에 변위-하중 특성 곡선으로 작도되므로 측정되는 데이터를 실험과정에서 확인할 수 있었다. OS4020으로 측정되어 메모리에 저장되어있는 변위-하중 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 변위-하중 측정 데이터를 메모리에 저장하였으며, 다시 OS4020을 Talker로, Apple II를 Listener로 전환시켜 OS4020의 메모리에 저장된 실험자료와 작동상태를 송신하게 하였다.

Table 3. Rupture parameter values of fruits and vegetables at various deformation rate.

|                              | External tissue |      |      |      |      | Internal tissue |      |      |      |      |
|------------------------------|-----------------|------|------|------|------|-----------------|------|------|------|------|
| <b>Apple</b>                 |                 |      |      |      |      |                 |      |      |      |      |
| Deformation rate<br>(mm/min) | 12.5            | 25.0 | 37.5 | 50.0 | 62.5 | 12.5            | 25.0 | 37.5 | 50.0 | 62.5 |
| Force, kg                    | 4.7*            | 4.5  | 4.5  | 4.3  | 4.7  | 3.8             | 3.5  | 4.1  | 4.0  | 3.8  |
| Energy, kg · mm              | 7.3             | 6.7  | 6.5  | 6.0  | 7.2  | 4.0             | 3.1  | 4.3  | 3.3  | 2.8  |
| Deformation, mm              | 3.4             | 3.2  | 3.1  | 3.0  | 3.2  | 2.1             | 1.7  | 2.1  | 2.1  | 1.8  |
| <b>Pear</b>                  |                 |      |      |      |      |                 |      |      |      |      |
| Deformation rate<br>(mm/min) | 12.5            | 25.0 | 37.5 | 50.0 | 67.5 | 12.5            | 25.0 | 37.5 | 50.0 | 67.5 |
| Force, kg                    | 4.0             | 4.2  | 4.2  | 4.0  | 4.1  | 3.4             | 3.6  | 3.2  | 3.9  | 3.6  |
| Energy, kg · mm              | 6.1             | 6.6  | 6.0  | 5.5  | 5.8  | 3.4             | 3.6  | 2.5  | 3.7  | 6.1  |
| Deformation, mm              | 3.1             | 3.2  | 3.0  | 2.9  | 3.0  | 2.2             | 2.2  | 1.8  | 2.2  | 3.8  |
| <b>Peach</b>                 |                 |      |      |      |      |                 |      |      |      |      |
| Deformation rate<br>(mm/min) | 12.5            | 25.0 | 37.5 | 50.0 | 62.5 | -               | -    | -    | -    | -    |
| Force, kg                    | 4.9             | 5.1  | 5.5  | 5.4  | 5.3  | -               | -    | -    | -    | -    |
| Energy, kg · mm              | 19.7            | 21.0 | 21.3 | 21.2 | 21.7 | -               | -    | -    | -    | -    |
| Deformation, mm              | 7.9             | 7.9  | 7.6  | 7.9  | 7.9  | -               | -    | -    | -    | -    |
| <b>Potato</b>                |                 |      |      |      |      |                 |      |      |      |      |
| Deformation rate<br>(mm/min) | 12.5            | 25.0 | 37.5 | 50.0 | 62.5 | 12.5            | 25.0 | 37.5 | 50.0 | 62.5 |
| Force, kg                    | 8.6             | 9.2  | 9.6  | 9.4  | 9.6  | 6.4             | 6.5  | 6.1  | 6.2  | 6.6  |
| Energy, kg · mm              | 27.1            | 28.0 | 28.1 | 28.3 | 26.9 | 17.6            | 16.0 | 15.3 | 13.4 | 16.3 |
| Deformation, mm              | 6.9             | 6.8  | 6.6  | 6.7  | 6.4  | 6.4             | 5.7  | 5.8  | 5.1  | 5.8  |
| <b>Sweet potato</b>          |                 |      |      |      |      |                 |      |      |      |      |
| Deformation rate<br>(mm/min) | 12.5            | 25.0 | 37.5 | 50.0 | 62.5 | 12.5            | 25.0 | 37.5 | 50.0 | 62.5 |
| Force, kg                    | 13.5            | 13.3 | 13.4 | 13.1 | 13.4 | 16.9            | 17.4 | 17.4 | 16.3 | 16.2 |
| Energy, kg · mm              | 36.4            | 35.5 | 34.2 | 30.1 | 30.0 | 56.9            | 53.4 | 54.2 | 44.4 | 39.5 |
| Deformation, mm              | 5.8             | 5.7  | 5.6  | 5.1  | 5.1  | 6.6             | 6.6  | 6.4  | 5.7  | 5.3  |

\* Average of ten measurements

### (3) 실험 방법

청과물의 준정압하중에 대한 파괴특성을 시험하기 위하여 파괴력, 파괴에너지, 및 파괴변형도를 파괴요인으로 설정하고 그림 3의 시험장치를 이용하여 표피조직에는 plunger로 그리고 속살조직에는 평판으로 준 정압하중을 가하고 상기의 압축시험 자동화 장치로 각 조직의 파괴요인을 측정하였다. 압축하중속도는 ASAE압축시험 규정속도인 25mm/min을 기준으로 12.5, 37.5, 50.0, 62.5 mm/min의 압축하중속도에 대한 압축특성의 변이를 측정하였다. 압축 특성시험은 각 압축하중속도에 대하여 각 10회 반복실험하였다.

## 3. 결과 및 고찰

사과, 배, 복숭아, 감자, 고구마의 압축특성시험 결과는 표 3과 같다. 사과의 외피조직과 속살조직의 파괴력, 파괴에너지, 및 파괴변형도는 압축하중속도에 따른 일정한 경향을 보이지 않았다. 사과의 외피조직은 4.5kg정도의 힘을 가하면 표피가 3.2mm정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 사과의 속살조직은 3.8kg정도의 힘을 가하면 표피가 2.0mm정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 이것은 외피가 속살조직보다 단단하기 때문인 것으로 추정된다. 사과 외피조직의 파괴에너지는 압축속도에 따라서 변이가 파괴력과 파괴변형도보다 큰 것으로 나타났다.

배의 경우도 사과와 같이 외피조직과 속살조직의 파괴력, 파괴에너지, 및 파괴변형도는 압축하중속도에 따른 일정한 경향을 보이지 않았다. 배의 외피조직은 4.1kg정도의 힘을 가하면 표피가 3.0mm정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 배의 속살조직은 3.5kg정도의 힘을 가하면 표피가 2.4mm정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 배의 표피가 거의 없는 것을 고려할 때 이것은 플런저로 가하는 압축하중의 분산과 원통형 시편에 가하는 평판의 압력형태의 차이에 의한 것으로 추정된다. 배 외피조직의 파괴에너지는 압축속도에 따라서 변이가 파괴력과 파괴변형도보다 큰 것으로 나타났으며 속살조직에서는 더 큰 변이를 보였다.

복숭아의 경우도 외피조직과 속살조직의 파괴력, 파괴에너지, 및 파괴변형도는 압축하중속도에 따른 일정한 경향을 보이지 않았다. 복숭아의 외피조직은 5.2kg정도의 힘을 가하면 표피가 7.8mm정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 복숭아 외피조직의 파괴에너지는 압축속도에 따라서 변이가 파괴력과 파괴변형도보다 큰 것으로 나타났다. 복숭아의 파괴변형도는 다른 청과물에 비하여 큰 값을 보였다. 이는 시험에 사용한 복숭아가 숙성된 것이고 무른 재질이어서 단순히 복숭아 껍질의 파괴특성에 의한 것으로 추정된다. 복숭아의 속살조직은 변위-하중 특성곡선에서 조직의 파괴점이 나타나지 않아서 압축특성시험을 할



수 없었다.

감자의 경우도 사과와 같이 외피조직과 속살조직의 파괴력, 파괴에너지, 및 파괴변형도는 압축하중속도에 따른 일정한 경향을 보이지 않았다. 감자의 외피조직은 9.3kg 정도의 힘을 가하면 표피가 6.7mm 정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 감자의 속살조직은 6.4kg 정도의 힘을 가하면 표피가 5.8mm 정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 감자의 표피가 거의 없는 것을 고려할 때 이것은 플런저로 가하는 압축하중의 분산과 원통형 시편에 가하는 평판의 압력형태의 차이에 의한 것으로 추정된다. 감자 외피조직의 파괴에너지는 압축속도에 따라서 변이가 파괴력과 파괴변형도보다 큰 것으로 나타났으며 속살조직에서는 더 큰 변이를 보였다.

고구마의 외피조직과 속살조직 모두 파괴력이 압축하중속도에 따른 일정한 경향을 보이지 않은 반면에 파괴에너지와 파괴변형도가 압축하중속도에 따라서 감소하는 경향을 보였다. 고구마의 외피조직은 13.3kg 정도의 힘을 가하면 표피가 5.5mm 정도 변형되면서 표피가 파괴되는 것으로 나타났다. 고구마의 속살조직은 16.8kg 정도의 힘을 가하면 표피가 6.1mm 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. 고구마도 파괴에너지의 압축속도에 따른 변이가 파괴력과 파괴변형도보다 큰 것으로 나타났으며 속살조직에서는 더 큰 변이를 보였다.

청과물의 압축특성시험에서 과일류인 사과나 배, 복숭아보다 구근류인 감자와 고구마의 파괴력과 파괴에너지, 및 파괴 변형도가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 압축하중에 대한 고구마와 감자의 내성이 크고 같은 크기의 하중에 대하여 손상이 적다는 것으로 해석할 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서 개발한 청과물의 압축시험 자동화 장치를 이용하여 일부 청과물에 준 정압하중을 가하고, 하중변환기를 이용하여 준 정압이 가해지는 순간의 변위-하중 특성 곡선을 디지털 데이터로 신속 정확하게 측정 할 수 있었다. 청과물 압축특성 시험 자동화 장치로 측정된 일부 청과물의 파괴력, 파괴에너지와 파괴 변형도로 표시되는 기계적 특성의 준정압축하중 속도에 따른 변이를 요약하면 다음과 같다.

1) 사과(후지) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 4.3~5.0kg, 6.0~7.9kgmm, 3.0~3.4mm로 측정되었으며, 속살조직은 각각 2.6~4.1kg, 2.8~4.3kgmm, 1.2~

2.1mm로 측정되었다.

2) 배(장신랑) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 4.0~4.4kg, 5.5~6.6kgmm, 2.9~3.3mm로 측정되었으며, 속살조직은 각각 3.3~3.9kg, 2.5~6.1kgmm, 1.8~3.8mm로 측정되었다.

3) 복숭아(유명) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 4.9~5.5kg, 19.7~21.7kgmm, 7.6~8.1mm로 측정되었다.

4) 감자(수미) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각각 8.6~9.6kg, 26.9~28.3kgmm, 6.4~6.9mm로 측정되었으며, 속살조직은 각각 6.1~6.6kg, 13.4~17.6kgmm, 5.1~6.4mm로 측정되었다.

5) 고구마(선미) 표피조직의 파괴력, 파괴에너지, 파괴 변형도는 각 13.4~13.5kg, 30.0~36.4kgmm, 5.1~5.8mm로 측정되었으며, 속살조직은 각각 16.2~17.7kg, 39.5~56.9kgmm, 5.3~6.6mm로 측정되었다.

## 5. 참고문헌

1. ASAE. 1983. Agricultural Engineers Yearbook of STANDARDS: 325-337.
2. Clark, R., W.R. Fox, and G.B. Welch. 1971. Representation of mechanical properties of nonlinear viscoelastic materials by constitutive equations. Transactions of the ASAE. 14(3): 511-515.
3. Cooke, J.R. and R.H. Rand. 1973. A mathematical impedance technique for evaluating the dynamic characteristics of biological materials. Journal of Agric. Engr. Res. 16: 307-315.
4. Diehl, K.C., G.P. Ordonez, and T.H. N대. 1986. Comparison of normal strains and shear stresses at fracture in uniaxial compression and in a hemispheroid geometry. Transactions of the ASAE. 29(3): 883-887.
5. Finney, E.E., Jr. and C.W. Hall. 1967. Elastic properties of potatoes. Transactions of the ASAE. 10(1): 4-8.
6. Finney, E.E., Jr. and K.H. Norris. 1968. Instrumentation for investing dynamic mechanical properties of fruits and vegetables. Transactions of the ASAE 14(3): 480-485.
7. Fletchers, S.W. 1971. Mechanical behavior of processed apples. Transactions of the ASAE. 14(1): 14-19.
8. Fletchers, S.W., N.N. Mohsenin, J.R. Hammerle, and L.D. Turkey. 1985. Mechanical behavior of selected fruits and vegetables under fast loading. Transactions of the

- ASAE. 8(3): 324-326.
9. Fridley, R.B., R.A. Bradley, J.W. Rumsey, and P.A. Adrian. 1968. Some aspects of elastic behavior of selected fruits. Transactions of the ASAE. 11(1): 46-49.
  10. Hamann, D.D. 1969. Dynamic mechanical properties of apple fruit flesh. Transactions fo the ASAE. 12(2): 170-174.
  11. Miles, J. A. and G.M. Rehkugler. 1973. A failure criterion for apple flesh. Transactions of the ASAE. 16(6): 1148-1153.
  12. Mohsenin, N.N. 1978, Physical properties of plant and agricultural materials. Gordon and Bleach Science Publishers.
  13. Rotz, C.A. and N.N. Mohsenin. 1978. A note on potential application of physical properties of bruised tissue of apples for automated sorting. Transactions of the ASAE. 21(4): 790-792.
  14. Vis, E., D.F. Wolf, B.A. Stout, and D.H. Dewey. 1969. Experimental evaluation of physical properties of apple fruit pertaining to orientation. Transactions of the ASAE. 12(5): 673-676.
  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 conditioins on mechanical behavior of the sweet potatoes. Transactions fo the ASAE. 11(1): 81-85.