

## 감자와 고구마의 충격 및 압축 특성에 관한 연구

홍지향 김창수 김재열 김진현 최중섭 정중훈 박장우

### Mechanical Behavior of Potato and Sweet Potato under Impact and Compression Loading

J. H. Hong C. S. Kim J. Y. Kim J. H. Kim J. S. Choe J. H. Chung J. W. Park

#### Abstract

Mechanical properties of potato and sweet potato were measured under impact and compression loading. The test apparatus consisted of digital storage oscilloscope and simple mechanisms which can apply compression and impact forces to potatoes and sweet potatoes. The mechanical properties could be measured while the tissues were ruptured in a very short period time less than 10 ms by impact loading. Rupture force, energy, and deformation were measured as mechanical properties of potatoes and sweet potatoes under impact and compression loading. Rupture forces under impact and compression loading were in the range of 84.1 to 93.7 N and 128.9 to 132.2 N for external tissues and 60.1 to 64.8 N and 158.9 to 171.1 N for internal tissues of potato and sweet potato, respectively. Compression speeds and drop heights for each test were in the range of 1.25 to 62.5 mm/min and 8 to 24 cm.

**Keywords :** Impact, Compression, Potato, Sweet potato, Mechanical property

## 1. 서론

감자와 고구마는 튀김이나 스낵 및 가공식품의 소비 증가로 수요가 증가하고 있다. 농산물 유통공사 유통자료에 의하면 고구마의 경우 2000년에 10 kg 당 9,128원에서 2004년에 28,000원으로 가격이 상승하고 있으며 큰 농가수익원으로 부각되고 있다. 또한 수확 및 선별작업의 효율을 높이기 위하여 수확 및 선별작업의 기계화나 자동화에 관한 연구가 수행되고 있다. 감자의 경우 진동을 이용한 감자수확기 개발에 관한 연구(Kang 등, 1989), 트랙터용 감자수확기 개발에 관한 연구(Kang 등, 1993)가 있으며 고구마 선별 자동화에 관한 연구로 영상처리를 이용한 고구마 자동 선별시스템 개발(Yang 등, 2005)이 있다. 이와 같이 기계화 자동화된 감자와 고구마의 수확, 선별 및 포장작업과 운송과정에서 부적절한 처리는

기계적 손상을 발생시켜 저류의 질적, 양적 손실을 초래하므로 상품적 가치를 저하시킨다. 청과물의 손상은 주로 마찰, 압축 및 충격 하중과 같은 기계적 요인에 의하여 발생하며, 이는 청과물의 기계적 특성과 밀접한 관계가 있다. 따라서 감자와 고구마의 기계적 특성을 구명하면 고구마와 감자의 수확, 선별 및 가공 기계와 시설을 고구마 및 감자의 기계적 특성에 적합하게 설계 제작 또는 개선하여 기기 및 시설을 효율적이고 경제적으로 운용할 수 있다. 또한 기계적 손상으로 인한 손실을 줄일 수 있으므로 농가 소득 증대에 기여할 수 있다.

이와 같은 중요성에도 불구하고 감자와 고구마의 기계적 특성 특히 충격 및 압축하중에 의한 기계적 특성에 관한 국내 연구는 미미한 실정이며, 압축 및 충격하중에 대한 기계적 특성에 대한 자료는 전무한 실정이다. 또한 수확에서 유통 및 소비에 이르는 과정 역시 비효율적이므로 이의 개선 및 기계

This article was submitted for publication in May 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in August 2006. The authors are J. H. Hong, KSAM member, Visiting Researcher, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, C. S. Kim, J. Y. Kim, J. H. Kim, J. S. Choe, KSAM member, Sangju National University, J. H. Chung, KSAM member, Seoul National University, and J. W. 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>

화를 위하여 체계적인 연구가 지속적으로 요망되고 있다(Kim 등, 2001).

농산물의 기계적 특성 시험에는 성숙도 등 조직 변화 측정 방법으로 내부조직 시편의 평판시험과 수확 및 처리과정의 손상에 저항하는 지표 측정방법으로 외피조직에 대한 원통형 플런저(plunger) 시험이 사용되었다.

Nelson과 Mohsenin(1968)은 청과물이 흡수한 에너지와 멩이든 체적과의 상관관계를 구명하였다. 복숭아, 배, 사과 및 감자에서 멩이나 파괴를 발생시키는 충격에너지는 압축하중에 의한 것보다 더 큰 것으로 나타났다. 이는 압축속도가 증가할수록 강철과 같은 공업용 물질이나 고분자 화합물의 강도가 커지는 것과 같은 것으로 해석하였다.

Wright와 Splinter(1968)는 두 줄의 강선으로 수직 낙하하는 낙하장치에 가속도계를 부착하여 고구마의 표피조직 및 과육조직의 파괴력을 측정하였으며 충격하중에 의한 파괴력이 압축하중에 의한 것의 1/3로 충격하중에 의한 손상이 더 큰 것으로 나타났다.

국내 연구로는 김 등(2001)이 배를 하중변환기에 자유낙하시켜 충격력-시간 특성곡선을 측정하였으며 낙하높이에 따른 배의 측정 최고충격력과 생체항복점, 생체항복강도 및 멩에 대한 상관관계를 분석하였다. 이상의 연구에서 충격하중에 의한 물리적 특성 분석방법은 수 ms의 짧은 시간동안 발생하는 충격하중에 의한 손상을 측정하기 위하여 하중변환기나 가속도계를 사용하여 출력신호를 오실로그래프나 오실로스코프로 측정하고 고속 카메라로 촬영하여 가속도를 측정하는 방법을 사용하였으나 분석과정이 수작업으로 수행되었다.

본 연구에서는 500 ns의 고속 A/D변환기가 장착된 디지털 스토리지 오실로스코프를 이용하여 측정 및 분석을 자동화한 압축 및 충격특성 시험장치(Hong 등, 2005)를 사용하여 감자와 고구마의 외피 및 내부조직의 기계적 특성을 측정하였으며 압축속도 및 충격 낙하높이에 따른 압축 및 충격하중에 대한 기계적 특성을 구명하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 실험재료

충격 및 압축 실험의 공시재료로서 감자와 고구마의 각 대표적 품종인 수미와 선미를 공시하였다. 시험에 사용한 감자는 강릉에서 수확된 것을 서울 가락동 청과물 시장에서 상온 저장된 외견상 손상이 없는 것을 선별하여 50개를 구입하였다. 고구마는 수원 농촌진흥청 작물과학원에서 시험 재배한 것이며 수확 후 50개를 구입하여 저장기간 없이 상온에서 바로 압축 및 충격시험에 사용하였다.

시료의 부피는 Archimedes의 원리를 이용하여 시료를 증류수에 잠기게 하여 측정하였으며 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 표 1과 같다. 시험에 사용한 고구마는 크기가 다양하여 일정한 크기의 시편으로 절단하여 사용하였으며, 원형 형상 치수는 측정하지 않았다.

### 나. 압축 및 충격 시험 장치

감자 및 고구마의 압축 및 충격 하중에 대한 기계적 특성을 측정하기 위하여 Hong 등(2005)이 개발한 과실의 압축 및 충격시험장치를 사용하였으며, 그 구성도는 그림 1과 2와 같다. 시료에 충격하중을 가하기 위한 낙하물체는 직경 1 mm 강선 2줄을 따라 수직으로 낙하며 낙하물체의 가속도를 측정하기 위한 가속도계가 부착되어있다(그림 1). 낙하물체는 아크릴로 제작하였으며 두께 10 mm, 직경 50 mm의 아크릴 평판이나 길이 20 mm, 직경 8 mm, 곡률반경 4 mm의 플런저(plunger)를 장착할 수 있도록 아크릴로 제작되었다. 낙하물체의 무게는 플런저 부착 시 247.49 g, 평판 부착 시 233.46 g 이었다. 충격시험에서 가속도를 측정하기 위하여 사용한 가속도계(EGA3-1000, Measurement Specialties, Inc. Hampton, VA, USA)의 용량은 50g(g: acceleration of gravity, 9.81 kg·m/sec<sup>2</sup>)이다. 가속도계의 출력신호 처리에 EMI signal conditioner(Thorn EMI 1050, Thorn EMI Datatech Ltd, UK)를 사용하였다. 가속도 측정장치의 calibration은 한국 표준연구

Table 1 Physical characteristics of potatoes and sweet potatoes for the experiment

Item	Dimension (mm)			Weight (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Density (g/cm <sup>3</sup> )
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>			
Potato	52.4* (3.96)**	65.4 (4.62)	73.9 (6.868)	155.5 (26.36)	145.6 (24.55)	1.068 (0.008)
Sweet potato	-	-	-	382.6 (123.4)	301.3 (93.740)	1.270 (0.080)

Note L<sub>1</sub> = the largest lateral diameter, L<sub>2</sub> = the smallest lateral diameter, L<sub>3</sub> = height

\* average values of six measurements.

\*\* standard deviation

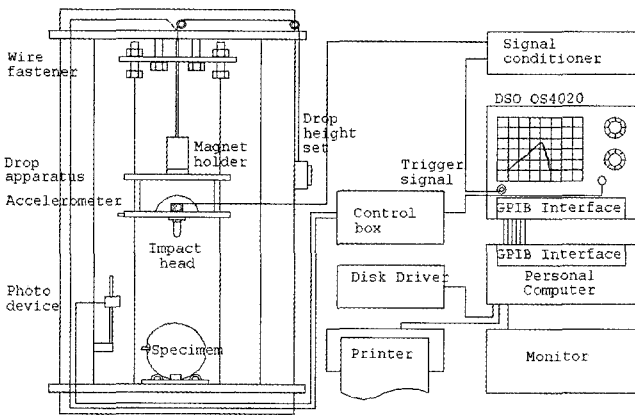


Fig. 1 Schematic diagram of impact test system.

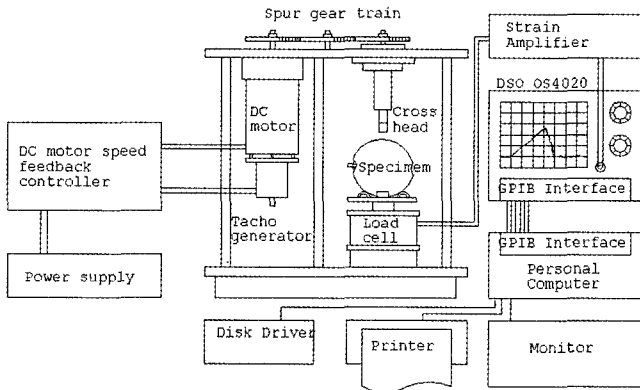


Fig. 2 Schematic diagram of compression test apparatus.

원에서 Bouch Levy Reciprocity calibration method로 검증하였다.

압축특성 시험장치는 그림 2와 같이 하중변환기, 스트레인 증폭기, 디지털스토리지 오실로스코프, GPIB 인터페이스 및 마이크로컴퓨터로 측정, 수집, 전송 및 분석 장치로 구성되었다. 압축시험에 사용한 하중변환기(LC50KA, Kyowa, Tokyo, Japan)는 490 N 용량이며, 스트레인 증폭기(CO-50ET, Kyowa, Tokyo, Japan)를 사용하였고, 압축하중에 대한 전기적 신호의 교정(calibration)은 규정  $\mu$ 스트레인에 해당하는 출력 전압으로 결정하였다.

다. 측정 자료수집, 전송, 분석장치

압축 및 충격 특성 시험자료 수집장치로 디지털오실로스코프(Gould OS4020, Gould Instrument Systems Inc., Valley View, Ohio, USA, 이하 OS4020)를 사용하였다. 자료수집 및 저장에 사용한 OS4020에 내장된 A/D변환기는 분해능 8bit, 변환시간이 500 nsec이며, 메모리 용량은 4 kbyte이다. OS4020에 저장된 압축특성자료는 OS4020에 부착된 4024 IEEE 488 인터페이스버스(General Purpose Interfac Bus, 이

하 GPIB)와 PC에 장착된 GPIB를 이용하여 전송하였다. PC GPIB 인터페이스를 통하여 OS4020의 작동제어, 압축 및 충격 시험자료의 전송 및 분석에 사용하였다. OS4020의 GPIB 제어, 자료전송 및 분석 프로그램은 BASIC으로 작성하였다. OS4020의 측정시작 제어신호로 Ext. Trigger 신호를 가하여 시험자료의 측정을 시작하였으며, 측정결과는 바로 오실로스코프의 모니터로 확인하였다.

라. 실험방법

감자의 표피조직에 대한 압축 및 충격시험에는 원형의 시료를 사용하였다. 고구마의 표피조직에 대한 압축 및 충격시험은 고구마를 길이 방향으로 가운데 부분을 10 cm길이로 절단하고 표피에서 5 cm의 두께로 절단하여 충격특성을 시험하였다. 내부조직에 대한 압축 및 충격시험에서 감자는 원통형 시편채취기를 이용하여 측면에서 수직방향으로 고구마는 길이방향으로 직경 1.0 cm, 길이 1.5 cm의 원통형 시편을 만들어 사용하였다(L/D=1.5).

감자와 고구마의 압축 및 충격하중에 대한 표피 및 내부조직의 파괴특성을 시험하기 위하여 극한강도(rupture force), 파괴에너지(rupture energy) 및 극한변형도(rupture deformation)를 파괴요인으로 설정하고 표피조직에는 반경 4 mm 플런저로 내부조직에는 아크릴 평판으로 압축 및 충격하중을 가하고 압축시험장치로 힘-변형도 곡선과 충격시험장치로 가속도-시간 곡선을 측정하여 파괴요인을 분석하였다.

압축시험에 사용한 하중재하속도는 ASAE Standard(1983) 압축시험 규정속도인 25 mm/min을 기준으로 12.5, 25.0, 37.5, 50.0 및 62.5 mm/min의 5 수준의 압축속도에 따른 압축특성의 변이를 측정하였다. 극한강도는 힘-변형도 곡선의 정점으로 정의하였으며, 정점이후에서 힘-변형도 곡선은 급격히 감소하였다. 파괴변형도는 힘-변형도 곡선에서 준정적 하중 시작점에서 정점까지의 거리로 측정하였다. 압축특성시험은 각 하중재하속도에서 10회 반복시험 하였다.

충격낙하높이는 각 조직의 파괴가 발생하는 높이로부터 점차 그 높이를 증가시켜 8 cm에서 24 cm 사이의 낙하높이에서 감자와 고구마의 충격특성 변이를 측정하였다. 각 조직의 충격특성시험은 각 낙하높이에서 10회 반복 측정하였다.

극한강도는 충격시험장치에서 측정된 가속도-시간 곡선으로부터 파괴가 시작되는 점(rupture point)의 가속도 a를 측정하여 극한강도를 다음 식 (1)로 계산하였다.

극한강도 Fr:

$$Fr = ma \tag{1}$$

여기서  $m$  : 낙하물체의 mass, g  
 $a$  : 파괴점에서의 가속도,  $m/sec^2$

파괴에너지  $Er$ 은 에너지 보존의 법칙에 의하여 운동에너지 변화량과 위치에너지 변화량의 관계식으로 다음 식 (2)로 계산하였다.

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

여기서  $v_i$  : 충격이 시작되는 점의 속도,  $m/sec$   
 $v_f$  : 파괴가 시작되는 점의 속도,  $m/sec$   
 $\Delta L$  : 극한변형도,  $m$

시료의 파괴가 시작되는 점의 속도는 본 연구의 충격시험 장치로 측정한 가속도  $a(t)$ 의 1차적분으로 다음 식 (3)을 사용하여 계산하였다.

$$v_f = v_i - \int_0^{\Delta t} a(t) dt \quad (3)$$

여기서  $\Delta t$  : 파괴에 소요된 시간,  $sec$   
 $a(t)$  : 가속도-시간 특성곡선,  $m/sec^2$

극한변형도  $\Delta L$ 은 가속도시간특성곡선  $a(t)$ 의 이차적분으로 다음 식 (4)로 계산하였다.

$$\Delta L = v_i \Delta t - \int_0^{\Delta t} \int_0^{\Delta t} a(t) dt dt \quad (4)$$

이상의 가속도-시간 특성곡선  $a(t)$ 의 1차, 2차 적분은 simpson의 수치적분법으로 계산하였다.

파괴특성인자로 파괴점(rupture point)과 극한강도(ultimate strength)는 압축시험장치로 측정한 힘-변형도 곡선에서 곡선의 파단점에서의 힘으로 결정하였으며, 파괴에너지  $Er$ 은 본 연구에서 측정한 힘-변형도 곡선의 적분으로 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,  $kgf m/sec^2$   
 $v$  : 크로스헤드의 속도,  $m/sec$   
 $\Delta t$  : 접촉에서 파단점(rupture point)까지 소요된 시간,  $sec$

### 3. 결과 및 고찰

감자와 고구마의 압축시험에서 측정한 힘-변형도 곡선에서 변곡점으로 대표되는 생체항복점(bioyield point)이 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 이는 Hong 등(2005)의 사과, 배 및 복숭아의 압축시험결과와 일치하였다. 감자와 고구마의 하중재하속도의 변이에 따른 파괴요인 측정결과는 그림 3과 같다. 감자의 표피조직의 극한강도는 내부조직의 극한강도보다 큰 것으로 나타났으며, 이는 Hong 등(2005)의 사과와 배의 압축시험 결과와 일치하나 고구마의 경우 내부조직이 외피조직에 비하여 극한강도가 큰 것으로 나타났다. 이는 고구마 내부조직 시료의 균일성을 위하여 길이방향으로 시편을 제작한 것에 의한 것으로 사료된다. 표피조직의 압축시험의 경우 섬유질 방향에 수직으로 하중을 가하는 반면 내부조직은 섬유질 방향으로 압축하중이 작용하여 극한강도가 더 큰 것으로 나타난 것으로 추정된다. 목재의 경우 섬유질 방향과 섬유질 방향에 수직으로 하중을 가한 경우 극한강도가 섬유질 방향으로 더 큰 것과 같은 현상으로 판단된다. 하중재하속도 12.5~62.5 mm/min의 범위에서 감자와 고구마의 내부조직과 고구마의 외피조직의 극한강도에 대한 하중재하속도의 영향은 전체적으로 일반적인 경향이나 큰 차이가 없는 것으로 나타났으나 감자의 외피조직의 경우 극한강도가 하중재하속도의 증가에 따라 완만히 증가하다가 37.5 mm/min 이후에 일정하게 나타났다. Wright와 Splinter(1968)는 하중재하속도 1.27~127 mm/min의 범위에서 고구마 3품종의 파괴력은 외피조직과 내부조직이 각각 59.18~65.41, 248.30~402.71 N으로 본 연구의 128.90~132.24, 158.92~171.09 N와 비교된다. 선미가 외피조직은 더 단단하고 내부조직은 더 약한 것으로 나타났다. 그러나 두 연구에서 모두 내부조직이 외부조직보

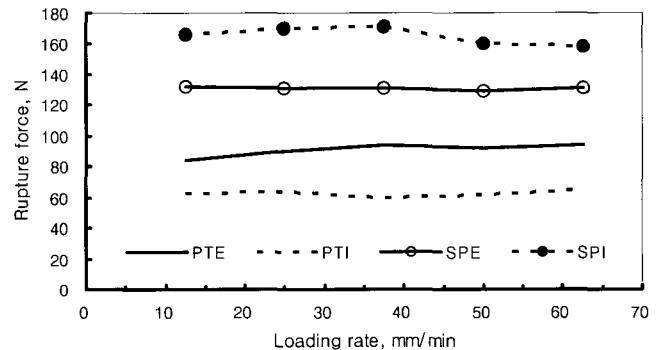


Fig. 3 Effect of compression rate on the rupture force (N) of potato and sweet potato. (PTE: potato flesh with skin, PTI: potato flesh cylinder, SPE: sweet potato flesh with skin, SPI: sweet potato flesh cylinder)

다 파괴력이 더 큰 것으로 나타났다.

감자와 고구마의 하중재하속도에 따른 파괴에너지의 측정 결과는 그림 4와 같다. 고구마의 외피조직과 감자의 외피와 내부조직이 하중재하속도가 증가함에 따라서 완만히 감소하는 반면에 고구마의 내부조직의 경우 하중재하속도의 증가에 따라서 파괴에너지가 현저히 감소하였다. 이는 전체적으로 일정한 극한강도와 완만히 감소하는 극한변형도의 관계에서 압축속도가 증가하면 힘-변형도 곡선의 높이가 일정하고 밑면이 감소하여 결과적으로 면적이 감소하는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 파괴점까지의 힘-변형도 곡선의 면적으로 나타나는 파괴에너지가 감소하는 것으로 해석된다. 압축하중을 가하는 분쇄의 경우 압축속도에 따른 극한강도가 일정한 경우, 빠른 압축속도에서 분쇄를 하면 느린 압축속도를 사용하는 것보다 가공생산성 향상뿐만 아니라 적은 에너지로 경제적으로 분쇄를 할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구의 실험결과는 감자와 고구마의 가공 장치와 기계류의 설계 시 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. Wright와 Splinter(1968)는 하중재하속도 1.27~127 mm/min의 범위에서 고구마 3품종의 파괴에너지는 하중재하속도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였으며 외피와 내부조직이 각각 0.5~0.9, 0.05~0.09 Nm로 본 연구의 고구마 시료 선미의 외피와 내부조직의 파괴에너지 0.29~0.36, 0.39~0.56 Nm에 비하여 외피조직은 크게, 내부조직은 작은 것으로 나타났다. 내부조직의 파괴에너지에서 큰 차이를 보이는 것은 품종간의 물리적 특성차이도 있겠지만 섬유조직이 길이방향(고구마의 길이방향)과 길이방향과 수직인 것에 대한 강도의 차이에 의한 것으로 추정된다. 나무의 강도도 길이방향이 길이방향에 수직인 것보다 큰 강도를 보이는 것에서 유추할 수 있다.

감자와 고구마의 하중재하속도에 따른 파괴변형도 측정 결과는 그림 5와 같다. 파괴변형도는 감자의 내부조직을 제외하고 압축속도의 증가에 따라서 전체적으로 완만하게 증가하였

다. 감자의 외피조직은 내부조직의 파괴변형도보다 작게 나타났다으며, 이는 Hong 등(2005)의 사과와 배의 압축시험 결과에서 나타난 것과 같다. 그러나 고구마의 외피조직의 경우 극한강도 측정결과에서 나타난 바와 같이 내부조직보다 파괴변형도가 작은 것으로 나타났으며 고구마 조직의 수직방향과 조직과 평행한 방향의 물성차이에 의한 것으로 사료된다. 따라서 고구마를 압축분쇄 가공하는 공정을 설계할 경우, 고구마 섬유조직에 수직인 방향으로 압축하중을 가하는 것이 섬유조직방향으로 가공하는 것보다 더 경제적인 가공공정으로 판단되며 이 기계적 특성자료는 효율적인 분쇄 가공공정의 설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

충격체의 낙하높이에 따른 감자와 고구마의 극한강도의 측정 결과는 그림 6과 같으며, 감자의 경우 낙하높이가 증가함에 따라 극한강도가 증가하다 표피조직은 12 cm 이후에 완만히 증가하였으며, 내부조직은 16 cm 이후에 감소하였다. 그러나 고구마의 표피조직의 경우 낙하높이 20 cm까지 일정한 극한강도를 유지하다 24 cm의 낙하높이에서 극한강도가 증가하였다. 고구마의 압축특성시험에서와 같이 내부조직의 극한강도가 표피조직의 극한강도보다 큰 것으로 나타났다. 고구마의 파괴 변형도는 Hong 등(2005)의 사과와 배의 충격시험

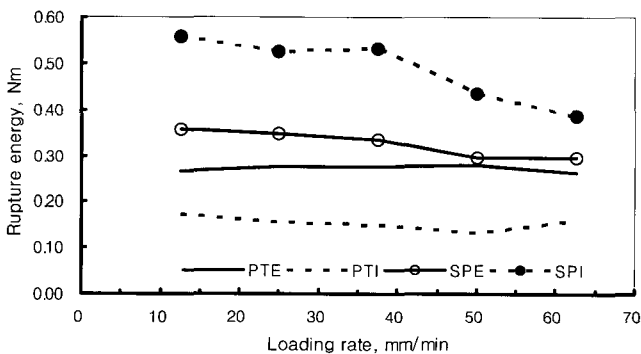


Fig. 4 Effect of compression rate on the rupture energy (N·m) of potato and sweet potato.

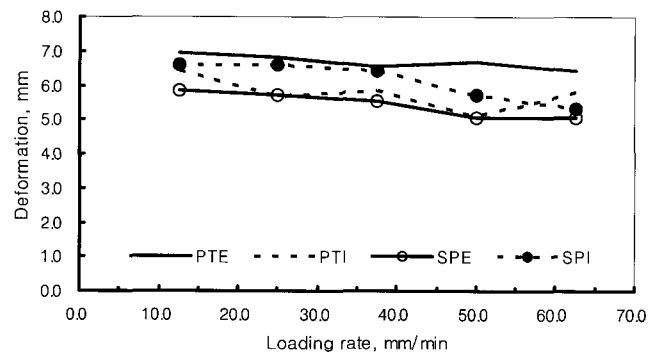


Fig. 5 Effect of compression rate on the rupture deformation (mm) of potato and sweet potato.

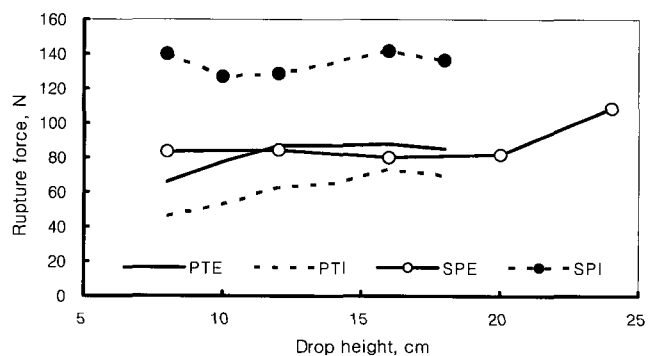


Fig. 6 Effect of drop height on the rupture force (N) of potato and sweet potato.

에서와 같이 낙하높이의 변화에 관계없이 일정한 것으로 나타났으며, 감자의 경우는 복숭아의 파괴 변형도에서와 같이 낙하높이의 증가에 따라서 완만히 증가하였다.

낙하물체가 시료에 접촉하여 충격력을 가하고 조직의 파괴가 일어나는데 소요되는 시간은 고구마의 경우 1~3 ms, 감자는 3~7 ms로 나타났으며 이 순간에 발생하는 가속도계의 출력전압은 OS4020에 트리거(trigger) 신호를 발생시키는 장치를 구성하여 측정을 시작하였으며, 측정결과는 바로 오실로스코프의 모니터로 확인할 수 있었다.

충격체의 낙하높이에 따른 감자와 고구마의 파괴에너지와 극한변형도의 측정결과는 그림 7과 8에 나타난 바와 같다. 고구마 표피와 내부조직의 압축하중에 대한 극한강도는 각각 128.9~132.2, 158.9~171.1 N, 충격하중에 의한 극한강도는 각각 83.9~109.1, 126.6~142.2 N으로 표피와 내부조직 모두 압축하중에 의한 것보다 충격하중에 의한 극한강도가 작은 것으로 나타났으며, 감자 표피와 내부조직의 경우도 압축하중에 의한 극한강도가 각각 84.1~93.7, 60.1~64.8 N, 충격하중에 대한 극한강도는 각각 66.1~88.2, 46.5~73.5 N으로 충격하중에 의한 극한 강도가 대체적으로 압축하중에 의한 것보다 작은 것으로 나타났다.

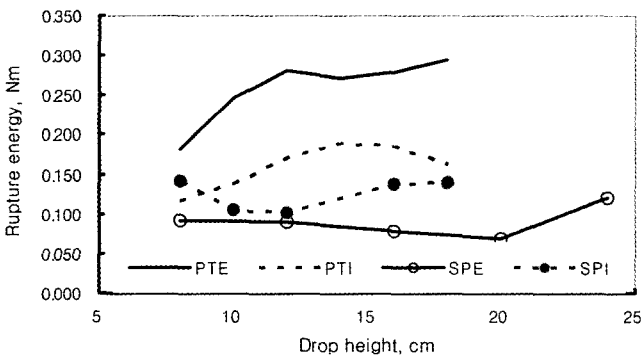


Fig. 7 Effect of drop height on the rupture energy (N·m) of potato and sweet potato.

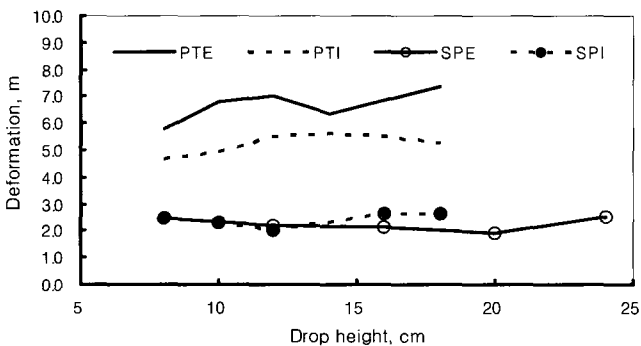


Fig. 8 Effect of drop height on the rupture deformation (mm) of potato and sweet potato.

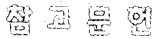
고구마 표피와 내부조직의 극한변형도는 충격하중에 의한 것이 각각 1.90~2.51, 2.05~2.67 mm, 압축하중에 대한 극한변형도는 표피조직의 5.07~5.72 mm, 내부조직이 5.32~6.61 mm로 압축하중에 의한 것이 극한변형도보다 충격하중에 의한 극한변형도가 크게 작은 것으로 나타났다. 감자의 표피와 내부조직의 극한변형도는 압축하중에 대하여 각각 6.44~6.94, 5.08~6.41 mm, 충격하중에 대하여 각각 5.76~7.33, 4.64~5.64 mm로 표피조직의 경우 충격하중과 압축하중에 대한 차이는 없는 것으로 나타났으나, 내부조직의 경우 충격하중에 의한 것보다 압축하중에 의한 것이 큰 것으로 나타났다.

고구마의 경우 압축하중에 의한 표피조직 파괴손상은 충격하중에 비하여 큰 하중으로 깊게 발생하며, 충격하중으로 손상이 발생하는 경우 압축하중에 비하여 작은 하중으로 조직에 얇게 손상을 발생시키는 것을 알 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

Hong 등(2005)이 개발한 압축 및 충격시험장치를 이용하여 감자와 고구마에 충격 및 압축하중을 가하고 파괴력, 파괴에너지 및 파괴변형도를 디지털 데이터로 신속 정확하게 측정할 수 있었다. 12.5~62.5 mm/min의 압축속도 범위와 8~24 cm의 낙하높이에서 가한 압축 및 충격 하중에 대한 감자와 고구마의 압축속도와 낙하 높이에 따른 파괴력, 파괴에너지와 파괴 변형도의 변이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 감자(수미) 압축하중에 대한 표피조직의 극한강도, 파괴에너지, 극한변형도는 각각 84.1~93.7 N, 0.264~0.277 Nm, 6.44~6.94 mm이었으며, 내부조직은 각각 60.1~64.8 N, 0.132~0.173 Nm, 5.08~6.41 mm이었다.
- (2) 감자(수미) 충격하중에 대한 표피조직의 극한강도, 파괴에너지, 극한변형도는 각각 66.1~88.2 N, 0.182~0.295 Nm, 5.76~7.33 mm이었으며, 내부조직은 각각 46.5~73.5 N, 0.116~0.190 Nm, 4.64~5.64 mm이었다.
- (3) 고구마(선미) 압축하중에 대한 표피조직의 극한강도, 파괴에너지, 극한변형도는 각각 128.9~132.2 N, 0.294~0.357 Nm, 5.07~5.72 mm이었으며, 내부조직은 각각 158.9~171.1 N, 0.387~0.558 Nm, 5.32~6.61 mm이었다.
- (4) 고구마(선미) 충격하중에 대한 표피조직의 극한강도, 파괴에너지, 극한변형도는 각각 83.9~109.1 N, 0.068~0.120 Nm, 1.90~2.51 mm이었으며, 내부조직은 각각 126.6~142.2 N, 0.102~0.141 Nm, 2.05~2.67 mm이었다.



1. ASAE. 1983. Agricultural Engineers Yearbook of STANDARDS: 325-337.
2. Hong, J. H., B. S. Myung, J. S. Choe, C. S. Kim, T. W. Kim, J. H. Chung, and J. W. Park. 2005. Mechanical behavior of fruits under impact loading. J. of the Korean Society of Agricultural Machinery 30(5): 274-279. (in Korean)
3. Hong, J. H., C. S. Kim, J. Y. Kim, J. H. Kim, B. S. Myung, J. H. Chung, and J. W. Park. 2005. Mechanical behavior of fruits under compression loading. J. of the Korean Society of Agricultural Machinery 30(5): 280-284. (in Korean)
4. Kang, W. S., Y. B. Shin, S. H. Kim, and Y. C. Hahm. 1993. Development of a potato harvester for tractors. J. of Korean Society for Agricultural Machinery 18(1): 21-29. (in Korean)
5. Kang, W. S., S. H. Kim, and Y. C. Hahm. 1989. Development of an oscillating potato harvester. J. of Korea Society for Agricultural Machinery 14(1): 16-23. (in Korean)
6. Kim, M. S., J. M. Park, R. Seo. I. K. Park, and Y. S. Hwang. 2001. Estimation of allowable drop height for oriental pears by impact test. J. of Korean Society for Agricultural Machinery 26(5): 461-468. (in Korean)
7. 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 Agricultural Engineering Research. 13(4): 305-317. (in Korean)
8. Yang, G. M., K. H. Choi, N. H. Cho, and J. R. Park. 2005. Development of an automatic sweet potato sorting system using image processing. J. of Korean Society for Agricultural Machinery 30(3): 261-267. (in Korean)
9. 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.