

# 무우 및 당근의 기계적특성에 관한 연구

## Mechanical properties of the radish and the carrot

김만수*	정현모*	박종민**
정회원	정회원	정회원
M.S.Kim	H.M.Jung	J.M.Park

### 1. 서론

청과물은 품종, 재배기술, 환경의 요인 등에 영향을 받아 품질, 형상, 색택, 병충해의 상해 정도가 다르게 나타남에 따라 농산물의 다양한 상품성이 결정된다. 또한 수확, 저장, 포장, 수송, 상하차 등 유통과정에서의 취급여하에 따라 기계적으로 손상을 받음은 물론 유통기간이 길어짐에 따라 호흡 및 증산작용 등 생리적 작용으로 부패 및 변질이 진행되어 유통과정 중 농산물의 품질저하가 상당한 수준에 이르고 있으나, 이에 대한 관심은 매우 빈약한 실정이다.

청과물이 가지고 있는 이러한 특성을 고려하여 수확, 저장 및 유통과정중의 청과물의 충격력과 압축력 등의 기계적 외력에 의한 손상을 줄이여 청과물의 상품화 정도를 향상시키기 위해서는 청과물의 기계적특성들이 철저히 구명되어야 한다.

청과물의 기계적특성이 구명되면 과실의 수확, 선별, 포장 및 가공기계와 시설을 해당 청과물의 특성에 적합하게 설계, 개발 및 개량과 적정 작동조건 등을 설정 할 수 있게 되어 기계적 외력에 의한 청과물의 손상을 줄이는데 크게 기여 할 것이다.

또한 이들 자료는 현재 많이 사용되고 있는 청과물의 골판지상자의 허용충격능이 및 충격기간과 포장재의 적정 두께 등과 같은 청과물 포장재에 관련된 분야에도 응용할 수 있을 것이다.

그러나 청과물은 수확 후에도 호흡을 하는 생명체이므로 이들의 기계적특성들은 유통환경에 따라 달라지므로 일반 공업재료에서와 같은 측정방법들을 직접 적용하기가 곤란하고 대체로 실험환경이나 시편 등을 고려한 실험에 의하여 분석하는 방법이 많이 이용되고 있다.

이와 같이 청과물의 기계적특성은 매우 중요한 기초자료이나 품종에 따라 차이가 있을 뿐만 아니라 같은 품종에서도 개체에 따라 그 형상 및 조직 등이 다르기 때문에 이들에 관한 자료는 매우 빈약하고 몇몇 문헌에 보고된 자료들도 같은 청과물에 대한 이들의 값이 매우 다르다.

따라서, 본 논문에서는 우리나라의 대표적인 청과물인 무우와 당근에 대한 기계적특성 실험을 위한 계측시스템을 구성하고 시스템 및 계측용 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, 시료에 의한 무우와 당근의 기계적특성을 분석하고자 하였다.

\* 충남대학교 농과대학 농업기계공학과

\*\* 밀양산업대 기계공학과

## 2. 재료 및 방법

### 가. 실험재료

본 실험에서 사용되어진 청과물은 우리나라에서 많이 생산되어지고 있는 무(진주대평), 당근(신혹전)으로 선정된 청과물은 수확직후 적정저장조건(2~5℃, 90~95% rh)에 저장시켰다. 실험은 저장 후 1~2일 이내 수행되었으며 시료를 실험실의 환경조건(15℃, 75% rh)에 적응시키기 위하여 약4시간 동안 실험실 환경에 적응시킨 후 시료를 채취하여 실험하였다. 또한 시편의 위치는 길이 방향의 중앙위치로부터 약간 머리방향으로 치우친 곳에서 중심을 향하여 직경 17.6mm, 길이 20mm인 원주시편을 채취하였다.

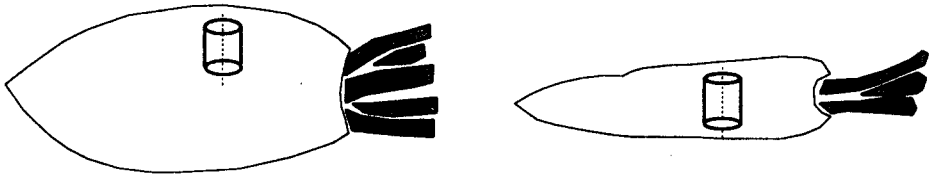


Fig. 1. Sampling position of the radish and the carrot.

### 나. 실험장치

본 실험을 위하여 그림2에서 보는바와 같은 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 크로스헤드(crosshead)를 상하 수직으로 움직이기 위한 AC서보모터(AC servo motor) 및 LM가이드와 볼스큐류(ball screw)조합, 시편에 가하여지는 하중계측을 위한 하중변환기(load cell)와 이들을 제어하고 계측하기 위한 마이크로 컴퓨터로 구성하였다.

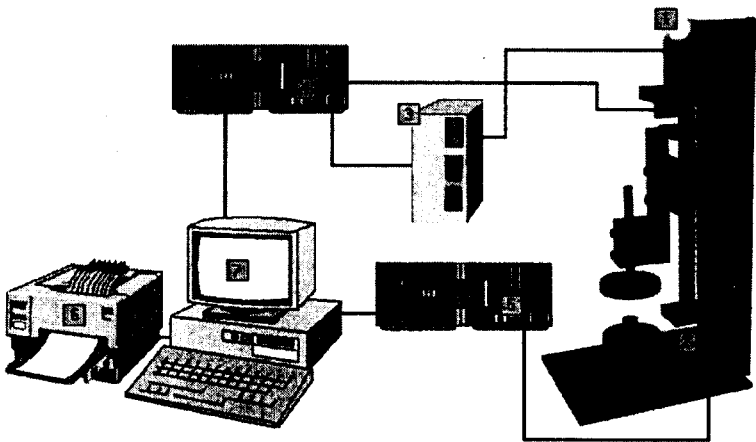


Fig. 2. Schematic diagram of compression test apparatus.

본 시스템 구동 및 계측컴퓨터 프로그램은 컴퓨터 언어인 비주얼 베이직5.0으로 작성하였으며, 압축실험시에 초당 힘(Force), 변위(Deformation), 시간(Time)에 대한 데이터를 각각 10개씩, 총 30개의 데이터를 저장하도록 작성하였다.

또한, 로드셀의 교체에 대비하여 측도설정(calibration)을 할 수 있도록 각각 로드셀에 해당하는 측도설정 데이터를 저장 후 불러들여 측도설정이 이루어지도록 하였으며, 각 시료의 형태 및 실험방법에 따른 분석이 가능하도록 작성되었다.

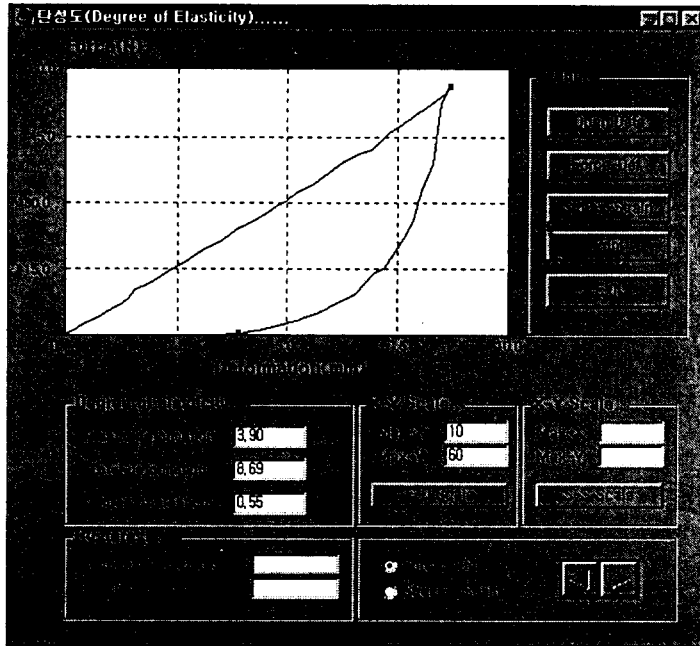


Fig. 3. Window for degree of elasticity in measurement program.

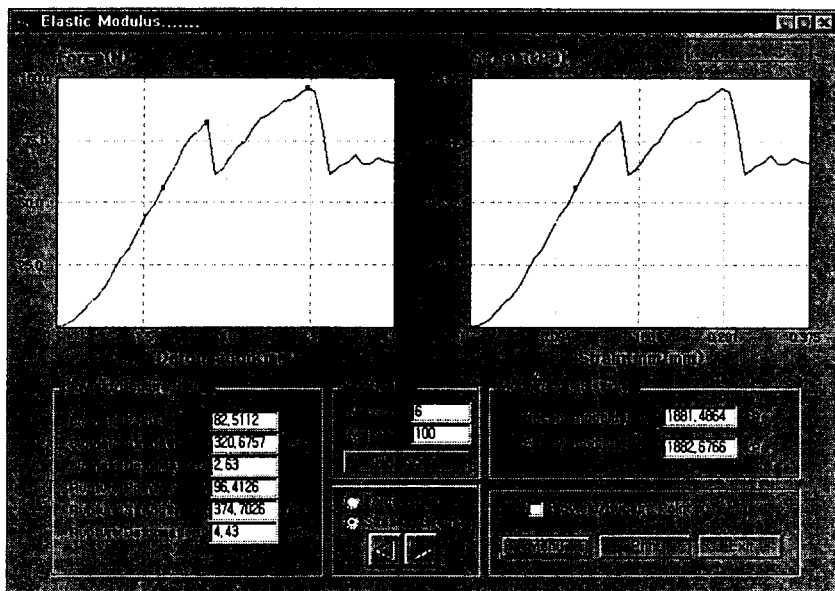


Fig. 4. Test results output window.

그림4는 무 및 당근의 탄성도, 기계적이력 및 이력손실을 구하는 윈도우이며, 그림3은 무 우 및 당근의 힘-변형곡선 및 응력-변형률곡선을 출력하여 생물체항복점, 파괴점, 생물체항복점, 파괴점, 극한변형량, 생물체항복강도, 극한강도, 탄성계수, 레질리언스 및 터프니스를 구하는 윈도우이다.

#### 다. 실험방법

본 연구에서의 모든 실험은 10회 반복으로 수행되었으며, 힘-변형곡선에서 측정될 수 있는 기계적특성들은 생물체항복점, 파괴점, 생물체항복변형량, 극한변형량, 생물체항복강도 및 극한강도 등이다. 생물체항복점 및 파괴점이 힘-변형곡선상에서 뚜렷이 나타나는 경우에는 그 점을 그림 상에 표시하면 개발된 컴퓨터 프로그램에 의하여 컴퓨터에 저장된 계측자료들로부터 그 점에 해당하는 값을 바로 출력하도록 하였으며 이들 점에 해당하는 생물체항복변형량, 생물체항복강도, 극한변형량 및 극한강도 등도 초기 입력된 자료와 계측 저장된 자료로부터 계산하여 출력하도록 하였다.

본 연구에서의 압축실험은 평판압축실험(flat plate compression test)으로 수행되었으며, 하중재하속도는 ASAE S368.3 MAR95에서 규정하고 있는 2.5~30mm/min의 범위내인 25mm/min으로 하였다.

또한 청과물의 탄성계수는 원주형 시편에 대하여 압축실험으로부터 얻은 응력-변형률곡선에서 시컨트 모듈러스(secant modulus)를 구하였다. 시컨트 모듈러스에서는 원점과 연결된 응력-변형률 곡선상의 임의의 점이 매우 중요하다. 따라서 여기서는 이점을 힘-변형곡선에서 파괴점의 약50%에 해당하는 점을 잡았다(Abbot and Lu; 1996). 힘-변형곡선에서 이점이 결정되면 개발된 컴퓨터 프로그램에 의하여 힘-변형곡선은 이점을 가지는 응력-변형률곡선으로 전환되고 이점과 원점을 연결한 직선의 기울기를 시컨트 모듈러스로 규정하였다.

청과물의 탄성도는 탄성계수를 계측할때와 같은 시편을 채취하여 각 청과물의 시편을 압축하면서 생물체항복점 이전의 일정 변위에서 하중재하시의 속도와 같은 일정한 속도로 하중을 제거한다. 그런 후에 압축하중이 0이 될 때까지의 저장된 압축하중과 압축변위를 이용하여 그림4와 같은 힘-변형곡선을 출력하게 하여 탄성도를 계산하였다.

또한 청과물의 레질리언스(resilience, deformation work)는 어떤 재료가 하중을 받았을 때 변형에너지(strain energy)를 저장하는 능력의 척도로서 응력-변형률 곡선에서 비례한계까지의 면적으로 표시되며, 단위체적당 일량( $J/m^3$ )으로 나타낸다. 대체로 청과물의 레질리언스는 생물체항복변형량 이내에서 응력-변형률 곡선으로부터 구하게 된다.

터프니스(toughness)는 어떤 재료의 파괴에 필요한 일량으로 정의되며, 응력-변형률 곡선(stress-strain curve)에서 파괴점 이하의 면적으로 계산된다. 그러나 청과물의 경우 외력에 대한 손상을 고려한 외력에 의한 일량을 계산할 경우 농산물의 생물체항복점을 기준으로 한 레질리언스를 그 척도로 삼는 것이 합리적일 것이다.

또한 이력현상은 청과물이 하중을 받았다가 그것이 제거된 후에도 원형으로 회복되지 않은 현상을 말하며 기계적이력(mechanical hysteresis)은 하중재하시의 일량과 하중제거시의 일량의 차로써 이것은 청과물에 가해진 변형에너지(strain energy)가 열에너지로 소산되는 청과물의 고유한 특성의 척도가 된다. 이력손실(hysteresis loss, %)은 하중재하시의 일량에 대한 기계적이력의 비(%)로써 정의된다. 어떤 청과물의 이력손실이 크다는 것은 그 청과물

이 외력을 받았다가 외력이 제거된 후에도 원상태로 회복되지 않고 영구변형으로 남는 양이 크다는 것으로 그 만큼 외력에 대하여 청과물이 손상을 입기 쉽다는 것을 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 생물체항복점 및 파괴점

채취한 시편에 대한 생물체항복점 및 파괴점을 구하기 위하여 압축실험을 수행하였으며 이들 자료를 가지고 무우와 당근에 대한 힘-변형곡선을 그림5에 도시하였다. 그림들에서 보는바와 같이 당근에서는 생물체항복점이 뚜렷이 나타났으나 무우에서는 생물체항복점이 나타나지 않았다. 따라서 배와 무우의 생물체항복점은 박(1993)이 정의했던 배와 같이 힘-변형곡선상의 첫 번째 변곡점과 파괴점의 평균값인 가상생물체항복점(Imaged bioyield point)으로 표시하였다. 파괴점은 무우 및 당근 시편의 힘-변형곡선에서 뚜렷이 나타났다. 이것은 압축실험시에 시편이 완전히 파괴될 때까지 하중을 가하기 때문에 이점은 항상 나타나는 것이다. 무우와 당근의 생물체항복점은 각각 308.5N 및 258.3N이었으며 파괴점은 각각 348.0N 및 299.6N이었다. 일반적으로 당근이 무우보다 단단하여 생물체항복점 및 파괴점이 더 클 것으로 생각되었으나 본 실험의 결과는 무우의 생물체항복점 및 파괴점이 당근에서 보다 높게 나타났다. 이러한 현상은 당근의 경우 조직이 단단하여 어느 정도의 하중에서도 잘 부서지는 반면 무우는 연성이 있어 어느 정도의 하중을 받을 때까지 파괴되지 않고 조직이 늘어나기 때문인 것으로 생각된다.

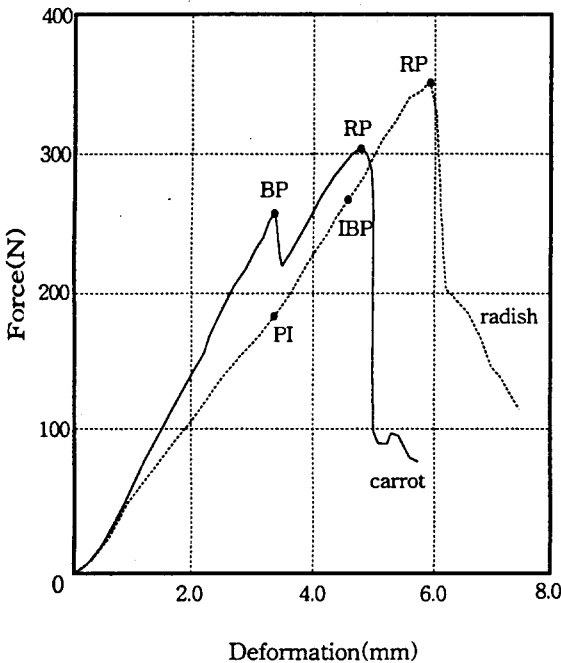


Fig. 5. Force-deformation curves of the radish and the carrot.

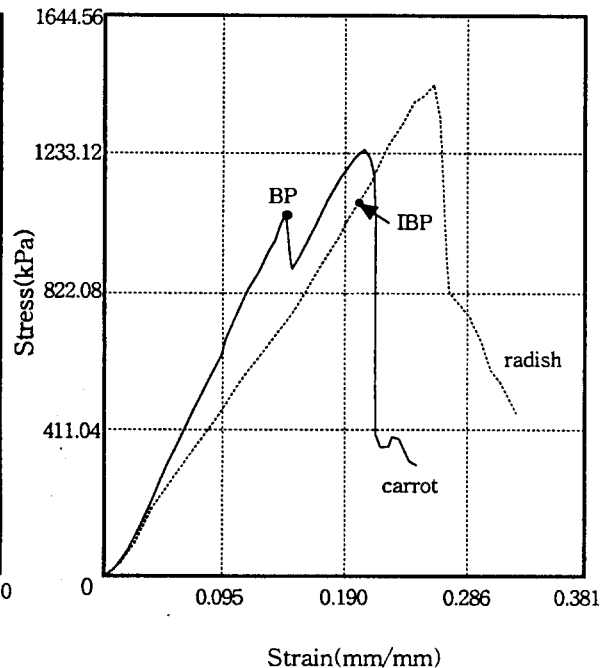


Fig. 6. Stress-strain curve of the radish and the carrot.

#### 나. 생물체항복변형량 및 극한변형량

생물체항복변형량과 극한변형량은 힘-변형곡선에서 생물체항복강도 및 파괴점까지의 시편의 변형량으로써 청과물의 포장 및 운송을 위한 적재시에 청과물의 손상감소 또는 방지를 위한 중요한 기초자료가 된다(박 1993; Mohsenin 1986). 본 실험에 의한 무우 및 당근의 생물체항복변형량은 각각 6.45mm, 3.61mm이었으며, 극한변형량은 6.77mm, 5.22mm이었다.

Ishibashi와 Kozima(1968)는 무우와 당근의 생물체항복변형량은 각각 3.4mm, 2.4mm이었고 극한변형량은 각각 5.0mm 및 4.4mm이었다고 보고하였다. 이들의 결과는 본 연구의 결과보다는 약간 작은 값으로 나타났는데 이것은 압축실험시에 사용한 압축도구가 직경 6.5mm 프런저이었고 하중재하속도가 10mm/min로서 본 연구에서의 압축도구 및 하중재하속도가 이들과 다른데서 기인된 결과라고 판단된다.

#### 다. 생물체항복강도 및 극한강도

생물체항복강도 및 극한강도는 생물체항복점 및 파괴점을 시편의 단면적으로 나누어주는 것으로 정의되기 때문에 압축도구에 따른 차이를 어느 정도 줄이면서 청과물의 기계적특성을 비교할 수 있는 값이다.

공시청과물중 원주시편을 채취하여 실험하였던 결과, 무우 및 당근의 생물체항복강도는 각각 1268.1kPa, 1016.7kPa이었으며 이들의 극한강도는 각각 1430.4kPa, 1231.3kPa이었다.

무우가 당근보다 두값 모두에서 약간 큰 값을 나타내었다. 이와 같이 무우의 강도가 당근의 강도보다 큰 것은 당근은 하중을 받았을 때 잘 부서지는 반면 무우는 어느 정도의 하중까지도 파괴되지 않고 압축되기 때문에 세포의 변형이 시작되는 생물체항복점이나 완전한 파괴가 일어나는 파괴점까지 더 많은 하중을 받기 때문일 것이다. 청과물의 압축강도가 크다는 것은 청과물의 수확후 처리시에 외력에 대한 손상을 적게 입는다는 것을 의미한다 (Abbot and Lu 1996; Fridley and Adrian 1966).

#### 라. 탄성계수

원주시편으로 채취한 청과물에 대한 탄성계수는 응력-변형률곡선(stress-strain curve)으로부터 시컨트모듈러스(secant modulus)로 구하였으며 공시청과물이었던 무우 및 당근의 탄성계수를 측정하기 위한 응력-변형률곡선은 그림6에서 보는바와 같으며 무우 및 당근의 탄성계수는 각각 4278.5kPa 및 5511.3kPa로써 무우의 생물체항복점, 파괴점 및 이들에서의 압축강도인 생물체항복강도 및 극한강도는 당근보다 큰 값이었으나 탄성계수는 당근이 무우보다 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 당근이 일정수준 이상의 외력을 받으면 무우보다도 더 잘 부서진다는 것을 의미한다.

#### 마. 탄성도

무우 및 당근의 탄성도를 구하기 위한 압축실험에서 하중재하시와 하중제거시의 원주시편에 대한 힘-변형곡선을 그림7에 도시하였다. 무우 및 당근의 경우 탄성도는 각각 64.1% 및 72.1%로서 예상했던 대로 당근이 약 10% point 높게 나타났다.

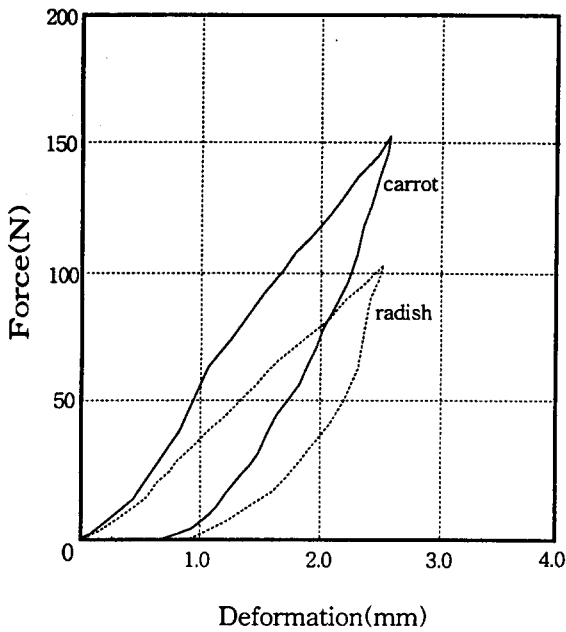


Fig. 7. Loading-unloading curves of the radish and the carrot for degree of elasticity.

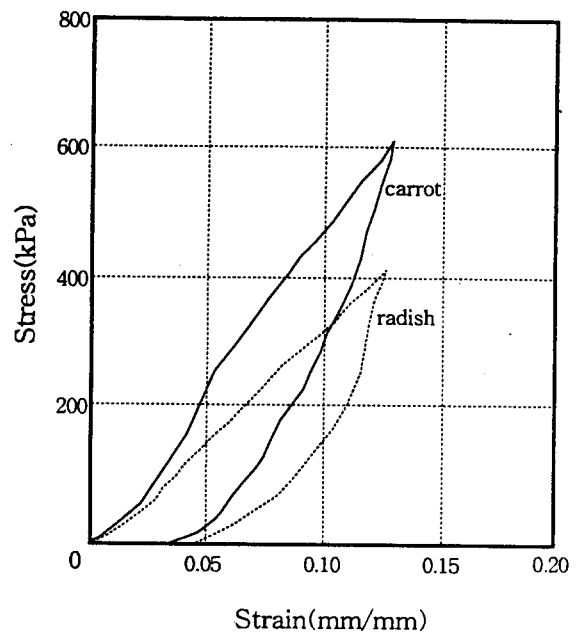


Fig. 8. Loading-unloading curve of the carrot and the carrot for mechanical hysteresis.

Table 1. Mechanical properties of the radish and the carrot

<b>Radish</b>	Maximum	Minimum	Average	Standard deviation
<b>Carrot</b>				
Bioyield Point (N)	313.74	302.20	308.52	13.35
	261.45	253.54	258.30	17.74
Bioyield Deformation (mm)	7.23	5.88	6.45	0.76
	4.23	3.24	3.61	0.64
Bioyield Strength (kPa)	1290.07	1242.61	1268.14	54.87
	1075.04	1042.52	1016.70	72.96
Rupture Point (N)	355.13	329.30	347.98	34.68
	310.15	284.26	299.56	29.85
Rutpture Deformation (mm)	7.26	6.32	6.77	0.93
	5.92	4.70	5.22	0.87
Ultimate Strength (kPa)	1460.23	1354.02	1430.35	142.58
	1275.28	1168.85	1231.28	122.72
Apparant Elastic modulus(kPa)	4401.32	4003.90	4278.48	388.11
	5751.90	5353.64	5511.26	429.98
Degree of Elasticity (%)	65.32	62.67	64.09	4.52
	74.19	70.32	72.10	6.71
Resilience (kJ/m <sup>3</sup> )	124.67	114.30	119.58	9.28
	99.23	90.24	94.26	6.85
Toughness (kJ/m <sup>3</sup> )	192.82	179.21	186.35	10.07
	154.14	143.36	149.60	9.70
Mechanical Hysteresis (kJ/m <sup>3</sup> )	15.89	12.98	14.08	4.13
	12.55	10.12	11.78	3.45
Hysteresis Loss (%)	60.24	55.01	57.54	4.38
	41.13	35.15	38.12	4.97

## 바. 레질리언스 및 터프니스

레질리언스는 청과물이 하중을 받아 변형이 일어날 때 변형에너지를 저장하는 능력의 척도로서 응력-변형률곡선에서 생물체항복점 이하의 면적이고 터프니스는 파괴점이하의 면적으로 정의되며 이들의 단위는 단위체적당의 일량으로 나타낸다. 무우의 레질리언스와 터프니스는 원주시편에서 각각  $119.6\text{kJ/m}^3$  및  $186.4\text{kJ/m}^3$ 로서 당근의  $94.3\text{kJ/m}^3$  및  $149.6\text{kJ/m}^3$ 보다 약 1.2배정도 크게 나타났다.

## 사. 기계적이력 및 이력손실

기계적이력은 청과물에 하중 재하시의 일량과, 하중제거시의 일량의 차로 정의되고 단위체적당의 일량으로 표시하며 이력손실은 하중재하시의 일량에 대한 기계적 이력의 비(%)로서 나타낸다. 그림8은 무우 및 당근의 기계적이력 및 이력손실을 구하기 위한 하중재하-제거시의 응력-변형률곡선이다. 무우 및 당근의 기계적이력은 각각  $14.08\text{kJ/m}^3$ ,  $11.78\text{kJ/m}^3$ 이며, 이력손실은 각각  $57.54\text{kJ/m}^3$ ,  $38.12\text{kJ/m}^3$ 이다. 무우가 당근보다 기계적이력 및 이력손실이 크다는 것은 탄성도가 작기 때문에 주어진 외력에 대하여 하중제거시에도 회복되지 않고 영구변형으로 남는 양이 많다는 것을 의미한다.

## 4. 요약 및 결론

우리 나라의 대표적인 청과물인 무우 및 당근을 공시하여 기계적 특성을 구명하였다. 이를 위하여 압축실험을 할 수 있는 계측시스템을 구성하였으며 시스템구동, 계측 및 분석용 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 또한 무우 및 당근의 원주시편의 기계적 특성을 분석하기 위하여  $25\text{mm/min}$ 의 하중재하속도로 압축실험을 수행하였다.

무우와 당근의 기계적특성을 비교한 결과 당근이 무우보다 탄성계수 및 탄성도에서는 크게 계측되었으나, 다른 기계적특성들은 무우에서 더 크게 계측되었다.

또한 청과물에 대한 기계적특성에 대한 자료가 매우 다르게 보고되고 있는바 이것은 시료의 형태 및 시편의 압축속도인 하중재하속도에 따른 차이에 의한 것으로 판단되어 청과물의 기계적특성은 시료의 크기 및 하중재하속도를 중요하게 취급하여야 할 인자임을 알수가 있었다.

## 5. 참고문헌

1. Abbott, J. A. and R. Lu. 1996. Anisotropic mechanical properties of apples. Trans. of the ASAE 39(4) : 1451-1459.
2. Fletcher, S. W., N. N. Mohsenin, and J. R. Hammerle. 1965. Mechanical behavior of selected fruits and vegetables under fast rates of loading. Trans. of the ASAE 8(2) : 324-326.
3. Fridley, R. B. and P. A. Adrian. 1966. Mechanical properties of peaches, pears, apricots, and apples. Trans. of the ASAE 9(1) : 135-138.



4. Ishibashi, S. and T. Kojima. 1968. Studies on mechanical properties of agricultural products(I) - on the force-deformation curves of some agricultural products. J. of JSAM 30(4) : 231-236, 240.
5. Ishibashi, S. and T. Kojima. 1968. Studies on mechanical properties of agricultural products(II) - on mechanical strength of the tomato during growing, ripening and storage. J. of JSAM 32(1) : 59-64.
6. Maw, B. W., Y. C. Hung, and E. W. Tollner. 1996. Physical and mechanical properties of fresh and stored sweet onions. Trans. of the ASAE 39(2) : 633-637.
7. Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach science publishers, N. Y.
8. Prussia, S. E., D. T. Campbell, and E. W. Tollner. 1985. Apparent modulus of elasticity of maturing pecans. Trans. of the ASAE 28(3) : 1290-1296.
9. Samuel, G., R. B. Fridley, and C. Paul. 1981. Elastic and viscoelastic poisson's ration determination for selected citrus fruits. Trans. of the ASAE 24(2) : 747-750.
10. Wright, F. S. and W. E. Splinter. 1968. Mechanical behavior of sweet potatoes under slow loading and impact loading. Trans. of the ASAE 15(3) : 765-771.
11. 김만수, 김성래, 박종민, 명병수. 1990. 벼의 생물체 항복강도 및 극한강도. 한국농업기계학회지 15(2) : 99-109.
12. 김만수, 박종민, 최동수. 1992. 과실의 힘-변형 특성. 한국농업기계학회지 17(2) : 156-170.
13. 송천호. 1993. 휨 하중을 받는 오이의 점탄성 특성. 충남대학교 석사학위논문.
14. 박종민. 1993. 과실의 점탄성 특성과 그 응용. 충남대학교 박사학위논문.