

토마토 및 참외의 기계적 특성에 관한 연구

Mechanical Properties of Tomato and Oriental melon

김만수* 정현모* 서 룬*
정희원 정희원 정희원
M. S. Kim H. M. Jung R. Seo

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 줄이며 청과물의 상품화 정도를 향상시키기 위해서는 청과물의 기계적 특성들이 철저히 구명되어야 한다.

청과물의 기계적 특성이 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.

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 기계적 특성은 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 토마토 및 참외에 대한 기계적특성 실험을 위한 계측시스템을 구성하고 시스템 및 계측용 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, 시료에 의한 토마토 및 참외의 기계적특성을 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료

본 실험에서 사용되어진 청과물은 우리 나라에서 많이 생산되고 있는 토마토(어얼리어나) 및 참외(성환)로 수확직후 적정저장조건(2~5°C, 90~95% rh)에 저장시킨 후 실험은 1~2일 이내 수행되었으며 시료를 실험실의 환경조건(15°C, 75% rh)에서 약4시간 동안 실험실 환경에 적응시킨 후 시료를 채취하여 실험하였다.

*충남대학교 농과대학 농업기계공학과

나. 실험장치

본 실험을 위하여 그림1에서 보는 바와 같은 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 크로스 헤드를 상하 수직으로 움직이기 위한 AC서보모터 및 LM가이드와 볼스크류(Ball screw)조합, 시편에 가해지는 하중계측을 위한 하중변환기(load cell)와 이들을 제어하고 계측하기 위한 마이크로 컴퓨터로 구성하였다.

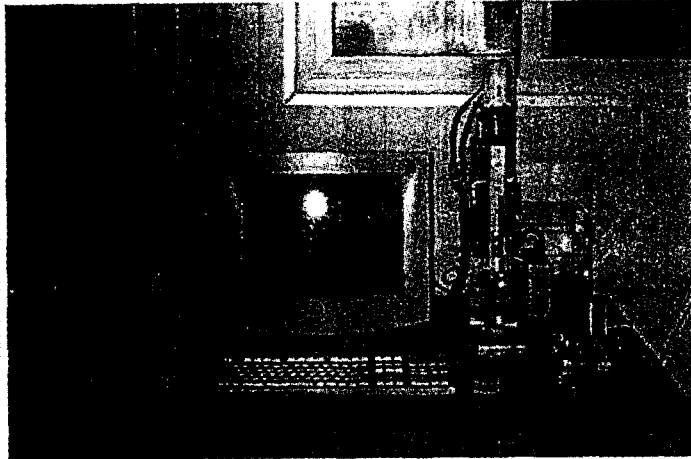


Fig. 1. The experimental equipment for compression tests.

Table 1. Specification of compression test apparatus and measuring system

Items	Specification	Remarks
Micro computer	RAM 32MB (2.1GB Hard disk)	Model Pentium 200MHz
Servo motor	AC	Parasonic MSM011A1A
Servo motor driver	2500p/r	Parasonic MSD011A11XE
Strain Gage Measurement Board	8 channels	ADAC, 5508BG
STP-2M(PC) Board	for IBM PC-XT and AT	CONTEC, STP-2M
Load cell	25, 30kg _f capacity	BONGSHIN 25, 30-OBU

시스템 구동 및 계측 컴퓨터 프로그램은 컴퓨터 언어인 비주얼베이직 5.0(Visual Basic 5.0)으로 작성되었으며, 압축실험시에 초당 힘, 변위, 시간에 대한 데이터를 각각 10개씩, 총 30개의 데이터를 저장하도록 작성하였다. 또한, 로드셀의 교체에 대비하여 속도설정(calibration)을 할 수 있도록 각각 로드셀에 해당하는 속도설정 데이터를 저장 후 불러들여 속도설정이 이루어지도록 하였다.

그림2는 사과 및 배의 시편에 대하여 완전한 파괴가 이루어질 때까지의 저장된 힘, 변위, 시간에 대한 데이터를 불러들여 힘-변형곡선 및 응력-변형률곡선을 출력하여 생물체항복점, 파괴점, 생물체항복변형량, 극한변형량, 생물체항복강도, 극한강도, 탄성계수, 레질리언스 및

터프니스를 구하는 윈도우이며, 그림3은 사과 및 배의 시편에 대하여 생물체항복점 이전에서 하중을 제거하여 하중이 0이 될 때까지의 저장된 데이터를 불러들여 탄성도, 기계적이력 및 이력손실을 구하는 윈도우이다.

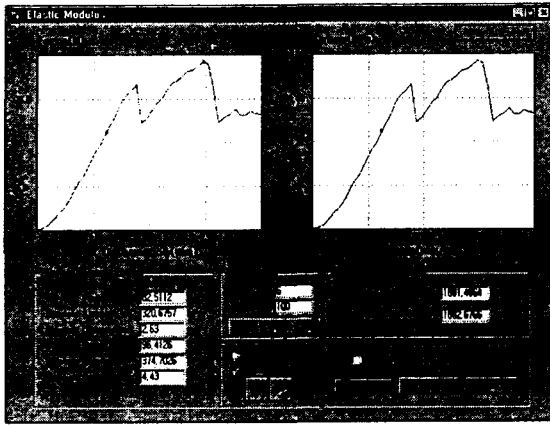


Fig. 2. Test results output window.

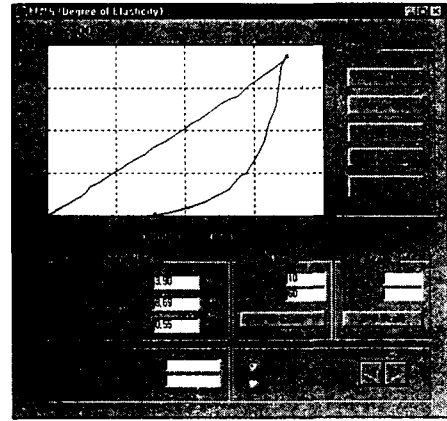


Fig. 3. Window for degree of elasticity in measurement program.

다. 실험방법

본 연구에서의 모든 실험은 10회 반복으로 수행되었으며, 각 시편에 대한 압축실험은 평판압축실험(flat plate compression test)으로 수행되었고 하중재하속도는 ASAE S368.3 MAR95에서 규정하고 있는 2.5~30mm/min의 범위내인 25mm/min으로 하였다. 압축실험시에 사용하였던 시편의 형태는 그림4에서 보는바와 같이 원형시편과 반으로 절단한 시편을 사용하였다.

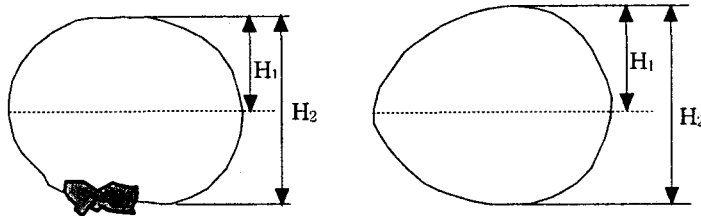


Fig. 4. Sampling position of Tomato and Oriental melon.

여기서, 원형시편과 반으로 절단한 시편의 생물체항복강도 및 극한강도, 탄성계수를 측정하기 위하여, 압축변위에 따른 압축도구와 시편과의 접촉면적(타원)을 식①로 계산하였다.

$$A = \pi ab = \pi \sqrt{h^2(2R_1 - h)(2R_1 - h)} \quad \text{-----} \quad \text{①}$$

여기서, A =압축변위에 따른 접촉면적(m^2), h =압축변위(m)
 a =타원 장축의 반경(m), b =타원 단축의 반경(m)
 R_1, R_1' =상부곡면의 최소, 최대 곡률반경(m)

힘-변형곡선에서 측정될 수 있는 기계적 특성들은 생물체항복점, 파괴점, 생물체항복변형량, 극한변형량, 생물체항복강도 및 극한강도 등이다. 생물체항복점 및 파괴점이 힘-변형곡선상에 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.

탄성계수는 ASAE S368.3 MAR95에서의 Hertz의 탄성체의 접촉응력에 대한 이론을 통하여 블록한 시료에 대한 탄성계수 계산식을 원형시편과 반으로 절단한 시편에 대하여 식② 및 식③으로 계산하였다.

$$E = \frac{0.338K^{3/2}F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \text{-----} \text{②}$$

$$E = \frac{0.338K^{3/2}F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} \right]^{1/2} \text{-----} \text{③}$$

여기서, E=탄성계수(Pa), D=압축변위(m)

μ = 프와송비(무차원), F=압축하중(N), K=1.351

R_1, R_1' = 위쪽의 블록한 표면에서의 시편의 최소, 최대곡률반경(m)

R_2, R_2' = 아래쪽의 블록한 표면에서의 시편의 최소, 최대곡률반경(m)

청과물의 탄성도(degree of elasticity)는 탄성계수를 계측할 때와 같은 시편을 채취하여 각 청과물의 시편을 압축하면서 생물체항복점에서의 변위 60%에 해당하는 점에서 하중재하시의 속도와 같은 일정한 속도로 하중을 제거한다. 그런 후에 압축하중이 0이 될 때까지의 저장된 압축하중과 압축변위를 이용하여 힘-변형곡선을 출력한 후 탄성도를 계산하였다.

또한, 청과물의 기계적이력(mechanical hysteresis)과 이력손실(hysteresis loss)은 탄성도 실험에서 저장된 압축하중, 압축변위로부터 개발된 컴퓨터 프로그램에 의하여 응력-변형률곡선을 출력한 후 기계적이력과 이력손실을 계산하였다.

레질리언스와 터프니스는 각각 응력-변형률곡선에서 생물체항복강도 및 극한강도까지의 면적을 계산하였다. 여기서 레질리언스, 터프니스, 기계적이력 및 이력손실 등에 대한 구체적인 정의는 정(1999) 및 Mohsenin(1986)에서와 같으며, 이들을 구하기 위한 면적의 계산은 응력-변형률곡선 상에서 원점에서 해당점(하중재하시곡선, 하중제거시곡선, 생물체항복강도, 극한강도)까지를 20~30점으로 나누어 표시하면 개발된 프로그램에 의하여 이점들에 해당하는 사다리꼴의 면적을 계산하여 전체를 합산하는 방법을 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

가. 토마토 및 참외의 생물체항복점 및 파괴점

채취한 시편에 대한 생물체항복점 및 파괴점을 구하기 위하여 압축실험을 수행하였으며 이들 자료를 가지고 반으로 절단한 시편에 대한 힘-변형곡선과 원형시료에 대한 힘-변형곡선을 비교하여 그림5에 도시하였다. 그림5에서 보는바와 같이 원형시료와 반으로 절단한 시편에서의 생물체항복점 및 파괴점은 두 시료 모두에서 원형시편에서의 값들이 약간 크게 나

타났으며 힘-변형곡선의 형상은 매우 유사한 모양을 나타냈다. 반으로 절단한 토마토 및 참외의 생물체항복점은 각각 35.5N 및 70.8N이었으며, 파괴점은 각각 47.0N 및 211.4N이었다.

원형시편에 대한 토마토와 참외의 생물체항복점은 각각 48.5N 및 72.1N이었고 파괴점은 각각 58.9N 및 298.9N이었다. 상대적으로 연한조직인 토마토의 파괴점은 생물체항복점의 약 1.2배에 불과하였으나 참외의 경우는 약 4.1배로 크게 나타났다.

이러한 결과는 참외의 경우 토마토에 비하여 상대적으로 조직이 단단하고 원형시편에 압축하중이 가해져 압축과정중에 하중이 참외전체로 분산되어 파괴되는데 큰 하중이 소요되었기 때문인 것으로 생각된다.

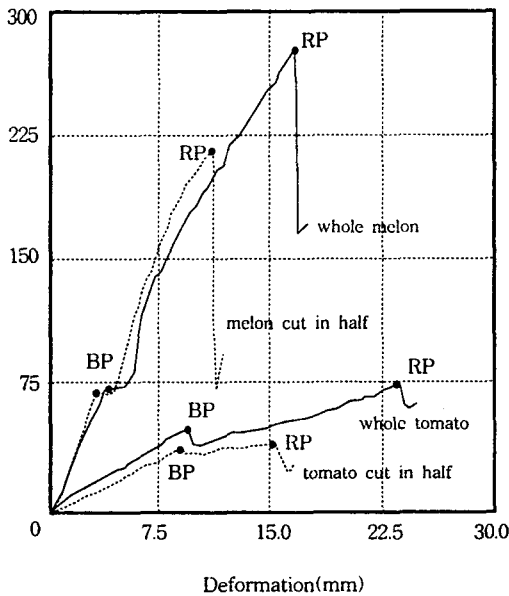


Fig. 5. Force-Deformation curves of Tomato and Oriental melon.

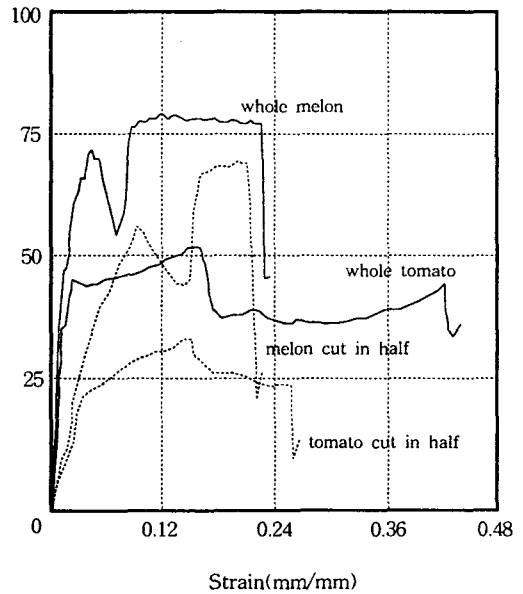


Fig. 6. Stress-Strain curves of Tomato and Oriental melon.

나. 토마토 및 참외의 생물체항복변형량 및 극한변형량

생물체항복변형량 및 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 토마토 및 참외의 경우 원형시편에서의 생물체항복변형량은 각각 9.95mm, 4.52mm이었으며, 극한변형량은 각각 19.97mm, 22.45mm이었으며, 반으로 절단한 시편에서의 생물체항복변형량은 각각 8.35mm, 3.78mm이었으며, 극한변형량은 각각 14.99mm, 12.73mm이었다. 대체로 공시 청과물들의 생물체항복변형량 및 극한변형량은 원형시편에서의 변형량이 반으로 절단한 시편의 변형량보다 크게 나타났다. 이와 같이 시편의 접촉면적이 넓은 경우에는 생물체항복점 및 파괴점에 도달하는 시간이 오래 걸리기 때문에 생물체항복변형량 및 극한변형량이 크게 나타나는 것으로 생각되었다.

다. 토마토 및 참외의 생물체항복강도 및 극한강도

생물체항복강도 및 극한강도는 생물체항복점 및 파괴점을 시편의 단면적으로 나누어주는

것으로 정의되기 때문에 압축도구에 따른 차이를 어느 정도 줄이면서 청과물의 기계적 특성을 비교할 수 있는 값이다.

토마토 및 참외의 생물체항복강도는 각각 24.2kPa 및 52.4kPa, 극한강도 각각 30.0kPa 및 65.6kPa로써 이것은 정(1999)이 보고하였던 과실의 압축강도의 약1/6~1/10의 수준이었다. 이것은 청과물의 단단한 정도를 비교할 경우, 청과물의 생물체항복점이나 파괴점보다는 생물체항복강도 및 극한강도의 값으로 비교하여야 보다 더 합리적이라는 것을 뜻한다.

라. 토마토 및 참외의 탄성계수

토마토 및 참외의 탄성계수는 식② 및 식③에 의하여 측정하였다. 식에서 토마토와 참외의 포와송비는 예비실험을 통하여 미리 구한 0.352와 0.285를 각각 사용하였다. 그림6은 토마토 및 참외의 시편에 대한 응력-변형률곡선을 각각 도시하였으며, 탄성계수는 각각 894.2kPa 및 1921.6kPa로써 토마토의 탄성계수는 참외의 약 반정도이었다.

마. 토마토 및 참외의 탄성도

토마토 및 참외의 시편에 대한 하중재하 및 제거시의 힘-변형곡선은 그림7에 도시하였으며 그 결과를 표2에 나타내었다. 토마토와 참외의 탄성도는 각각 44~55% 및 76%로서 참외가 토마토 보다 약 20% 높은 것으로 나타났다. 원형시료와 반으로 절단한 시편의 탄성도를 비교하면 토마토 경우, 원형시료에서가 반으로 절단한 시편에서 보다 약 10% 높게 나타났으나 참외의 경우에는 두 시료 모두에서 거의 같은 탄성도를 나타내었다. 이러한 현상은 상대적으로 탄성도가 작은 토마토의 경우 원형시료에서는 압축하중을 과실전체로 전달할 수 있기 때문에 반으로 절단한 시편에서 보다 약간 더 탄성적인 것으로 판단된다.

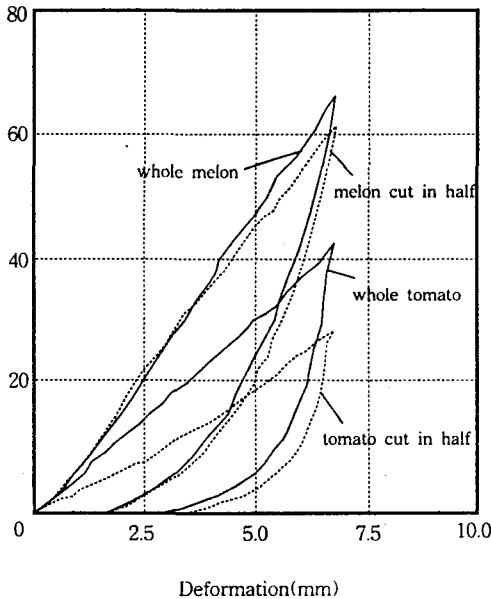


Fig. 7. Loading-unloading curves of Tomato and Oriental melon for degree of elasticity.

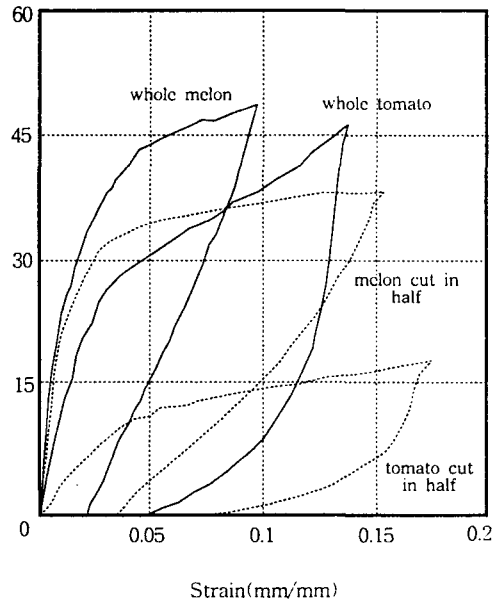


Fig. 8. Loading-unloading curves of the Tomato and Oriental melon for mechanical hysteresis.

바. 토마토 및 참외의 레질리언스 및 터프니스

토마토와 참외의 레질리언스와 터프니스는 그림6에서 구하였으며 그 결과를 표2에 표시하였다. 토마토의 레질리언스와 터프니스는 반으로 절단한 시편에서 각각 3.5kJ/m^3 및 5.8kJ/m^3 이었으며 참외는 각각 2.2kJ/m^3 및 9.5kJ/m^3 이었다. 이러한 결과는 토마토와 참외에 외력이 가하여져 미세한 변형이 일어나는데 까지 소요되는 단위체적당의 에너지는 두 공시청과물에서 비슷하였으나 완전히 파괴시키는데 소요되는 에너지는 참외에서가 약 2배정도 크게 나타났다. 두 공시청과물의 레질리언스와 터프니스에 대한 원형시편에서와 반으로 절단한 시편에서의 값들을 비교하면 원형시편에서의 값들이 반으로 절단한 시편에서 보다 약 3배정도 큰 값들이었다.

Table 2. Mechanical properties of Tomato and Oriental melon

Tomato	Maximum		Minimum		Average		Standard Deviation	
	W.S	S.C.H.	W.S.	S.C.H.	W.S.	S.C.H.	W.S.	S.C.H.
Oriental melon	56.32	37.24	36.95	34.52	48.51	35.52	6.63	4.29
	74.17	72.58	70.29	68.39	72.05	70.83	4.06	3.52
Bioyield Point (N)	10.76	9.11	8.63	7.94	9.95	8.35	1.45	1.14
	4.91	4.20	4.12	3.54	4.52	3.78	0.91	0.15
Bioyield Deformation (mm)	62.36	31.93	54.14	28.45	58.45	30.02	10.65	4.53
	74.59	54.35	68.74	49.70	71.09	52.38	7.47	4.14
Bioyield Strength (kPa)	71.18	49.10	43.77	44.35	58.92	46.70	8.13	5.25
	314.51	241.35	263.11	180.25	298.96	211.39	24.39	21.70
Rupture Point (N)	21.19	15.19	18.17	12.84	19.97	14.99	3.39	2.65
	24.11	13.46	20.43	11.86	22.45	12.73	3.28	2.50
Rupture Deformation (mm)	47.96	26.18	44.25	21.52	46.30	24.19	3.99	5.29
	84.10	66.98	76.58	63.18	79.24	65.57	9.23	4.36
Ultimate Strength (kPa)	1544.61	1021.39	972.53	782.67	1279.01	894.22	212.83	180.39
	2876.19	2350.36	2097.22	1729.54	2396.57	1921.61	285.30	193.21
Apparant Elastic Modulus (kPa)	61.21	46.42	50.23	39.29	55.10	43.60	3.33	4.21
	77.21	76.69	73.49	73.14	75.90	75.30	2.32	2.61
Degree of Elasticity (%)	9.82	3.14	5.33	2.768	7.58	3.51	1.45	1.23
	3.14	2.99	1.79	1.70	2.57	2.21	0.83	0.93
Resilience (kJ/m^3)	20.34	7.42	15.01	4.39	17.24	5.84	1.79	1.29
	18.70	11.73	14.53	8.07	16.19	9.46	1.35	1.32
Toughness (kJ/m^3)	5.42	2.94	4.10	2.32	4.93	2.63	0.85	0.49
	2.15	2.87	1.33	2.04	1.74	2.44	0.42	0.53
Mechanical Hysteresis (kJ/m^3)	83.31	89.28	77.57	83.31	80.50	87.12	1.16	1.16
	62.13	62.49	59.97	60.10	60.24	61.73	2.52	2.96
Hysteresis Loss (%)								

W.S. : Whole Specimen, S.C.H. : Specimen Cut in Half

사. 토마토 및 참외의 기계적이력 및 이력손실

토마토와 참외의 기계적이력 및 이력손실을 구하기 위한 하중재하-제거시의 응력-변형률 곡선은 그림8에 도시하였으며 그 결과를 표2에 나타내었다. 그림 및 표에서 보는 바와 같이 토마토는 참외보다 기계적이력은 크면서도 이력손실이 큰 것은 하중재하시와 제거시의 응력-변형률 곡선이 다른 청과물과는 매우 다르기 때문이다. 즉 대부분의 청과물의 하중재하-제거시의 응력-변형률곡선이 폭이 좁고 위로 서는 형상을 하고 있으나 토마토의 경우 폭이

넓고 옆으로 누워 있는 형상이기 때문이다.

또한 원형시편과 반으로 절단한 시편간의 기계적이력 및 이력손실의 차는 크지 않은 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

우리나라의 대표적인 청과물인 토마토 및 참외를 공시하여 기계적 특성을 구명하였다. 이를 위하여 압축실험을 할 수 있는 계측시스템을 구성하였으며 시스템구동, 계측 및 분석용 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 또한 토마토 및 참외의 원형시편과 반으로 절단한 시편에 대한 기계적특성을 분석하기 위하여 25mm/min의 하중재하속도로 압축실험을 수행하였다.

토마토 및 참외의 기계적특성을 분석하였던 결과 일반적인 기계적특성은 참외에서 더 크게 계측되었으나 레질리언스, 터프니스, 이력손실 및 기계적이력은 토마토에서 크게 계측되었으며, 참외의 탄성도는 두 시편에서 거의 비슷하게 계측되었다. 일반적으로 반으로 절단한 시편보다 원형시편에서 더 크게 계측됨을 알수가 있었다.

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. ASAE. 1996. ASAE Standards. S368.3 MAR95.
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. 1964. Factors affecting impact injury to mechanically harvested fruit. Trans. of the ASAE 7(4) : 409-411.
4. Fridley, R. B., R. A. Bradley, and P. A. Adrian. 1968. Some aspects of elastic behavior of selected fruits. Trans. of the ASAE 15(1) : 46-49.
5. 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.
6. 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.
7. Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach science publishers, N. Y.
8. 김만수, 박종민, 최동수. 1992. 과실의 힘-변형 특성. 한국농업기계학회지 17(2) : 156-170.
9. 박종민. 1993. 과실의 점탄성 특성과 그 응용. 충남대학교 박사학위논문.
10. 정현모. 1999. 청과물의 기계적 특성에 관한 연구. 충남대학교 석사학위논문.