

ENGINEERING

Analysis of mechanical properties of agricultural products for development of a multipurpose vegetable cutting machine

Jeong Gil Park¹, Hyun Mo Jung², Bum Seok Kang¹, Seong Kyu Mun¹, Seung Hun Lee¹,
Seung Hyun Lee^{1*}

¹Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Digital Contents Design, Kyongbuk Science University, Chilgok 39913, Korea

*Corresponding author: seunglee2@cnu.ac.kr

Abstract

The consumption of pre-treated vegetables (including fresh-cut vegetables) that are washed, peeled, and trimmed has been significantly increased because of their easy use for cooking. Vegetable cutting machines have been widely utilized for producing fresh-cut vegetables or agricultural products of different sizes; however, the design standard is not established for specific types of agricultural products. Therefore, this study was conducted to determine mechanical properties (compressive and shear forces) of targeted agricultural products (radish, carrot, squash, cucumber, shiitake mushroom, and sweet potato) for developing a multipurpose vegetable cutting machine. According to ASAE standard (s368.3), compressive and shear forces of targeted agricultural products were measured by using a custom built UTM (universal testing machine). Shape type of samples and speed ranges (5 - 15 mm/min) of loading rate on bioyield and shear points varied depending on the targeted agricultural product. The range of averaged bioyield points of targeted agricultural products were between 7.89 and 146.98 N. On the other hand, their averaged shear points ranged from 22.50 to 53.47 N. Results clearly showed that the bioyield and shear points of targeted agricultural products were thoroughly affected by their components. As measuring compressive and shear forces of a variety of agricultural products, it will be feasible to calculate blade cutting force for designing multipurpose vegetable cutting machine.

Keywords: compression, mechanical properties, shear, vegetables

Introduction

빠른 경제 성장과 함께 소비자의 식생활 문화에 많은 변화가 이루어지게 되었고, 1990년대 이후부터는 음식의 고차원적 기능보다 영양학적 기능이 더 중요한 요소로 인식되었다. 특히 식생활 패턴이 서구적으로 바뀐에 따라 비만, 비대칭 영양 결핍 등으로 인하여 당뇨병 및 대장암과 같은 서구형 질병이 많이 발현되는 문제점들이 발생하여 건강한 식생활에 대한 요구가 계속 증가되고 있다. 이에 따라 채소 위주의 식단을 선호하는 소비자가 증가할 뿐만 아니라 다양한 조리법



 OPEN ACCESS

Citation: Park JG, Jung HM, Kang BS, Mun SK, Lee SH, Lee SH. 2016. Analysis of mechanical properties of agricultural products for development of a multipurpose vegetable cutting machine. Korean Journal of Agricultural Science 43:432-440.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7744/kjoas.20160046>

Editor: Sun-Ok Chung, Chungnam National University, Korea

Received: June 21, 2016

Revised: July 28, 2016

Accepted: August 23, 2016

Copyright: ©2016 Korean Journal of Agricultural Science.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에 따른 채소의 전처리 방식의 중요성 또한 증가되고 있는 실정이다.

채소는 과실과 함께 다양한 비타민과 칼륨(K), 칼슘(Ca) 등의 무기질 등이 포함되어 높은 영양분을 함량하고 있으며, 특히 생리활성물질을 많이 함유하고 있어 노화예방 및 면역력 증대에 탁월한 효과가 있다. 채소는 대부분 체내에 양질의 양분을 가지고 있고, 쉽게 가공할 수 있는 특징을 가지고 있어 식재료로서 사용 범위가 넓고 다양한 장점을 가지고 있다.

국내의 채소 식품 시장은 외식산업의 발달, 학교급식의 확대, 편의지향의 식품소비 흐름으로 인해 단순히 채소를 생산 및 판매하는 시장보다 채소의 전처리 및 가공 시장이 더 크게 형성되어 있는 구조이다. 채소의 전처리라 함은 크게 1, 2차로 나뉘며, 일반적으로 1차 전처리는 세척, 박피 및 포장의 과정을, 2차 전처리는 세척, 박피, 절단 및 포장까지를 의미한다. 전처리 농산물은 관행적으로 사용되는 용어로서 그 의미는 가공 또는 조리의 전단계라는 개념이 강하며, 따라서 바로 먹을 수 있는 농산물이라는 개념은 배제되어 있다.

한국농촌경제연구원의 정책연구보고서(KREI, 2014)에 언급된 바와 같이 농림축산식품부에서 2012년에 조사한 자료에 따르면 전처리 농산물 금액은 전체 농산물의 12%, 전처리/가공의 42.5%인 5,395억원이며, 농림축산식품부(MAFRA, 2013)에서 발간한 보고서에 의하면 세계 식품시장은 2010년 4조 4천억 달러 규모로 추정되며, 2020년에는 6조 4천억 달러로 성장할 것으로 전망하였다. 특히 아시아 식품시장 증가율은 최근 10년간 연평균 4.9% 성장함에 따라 국내외 전처리 농·식품 또한 증가할 것으로 예상되고 있다(MAFRA, 2013). 또한 산업발달, 맛별이 가정 및 1인가구의 증가 추세에 따라 대형 음식점 등의 중간 소비자뿐만 아니라 가정의 소비자에서도 전처리 후 식품, 특히 바로 조리가 가능한 2차 전처리 식품(ready-to-cook)에 대한 요구가 증대되고 있다. 그러므로 채소의 2차 전처리를 위해 슬라이싱, 채썰기 등의 기능을 수행하는 가공 처리 장치(절단기 등)의 수요와 시장은 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.

채소의 고정된 절단 형태를 가공할 수 있는 절단기는 실용화되어 국내외에 시판이 되고 있지만, 기존 개발된 절단기는 특정 채소류의 절단 가공에만 국한되어 있어 전처리를 해야 하는 채소의 종류가 증가할 경우 칼날의 잦은 교체, 청소의 불편함 및 담당자의 안전사고 등의 문제들을 야기하고 그로 인해 작업 효율은 현저하게 저하된다. 따라서 전처리 작업 효율을 개선하기 위하여 다양한 채소와 형태로의 절단이 가능하도록 투입부와 절단부를 범용성 있게 설계하여 절단기를 일체화 할 수 있는 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 다목적 자동 채소절단기 개발을 위한 선행 연구로서 각각의 채소별 기계적 특성을 측정하고 분석하였다.

Material and Methods

실험재료

본 연구에서 사용된 채소들은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 가정식 조리에 주로 사용되고 있는 근채류[무(제주), 당근(제주), 고구마(영암)]와 박과에 속하는 과채류[오이(대전), 애호박(청원)] 및 담자균류[표고버섯(공주)]를 대상으로 선정하였다. 선정된 채소들은 일반 농가에서 수확 후 1일 이내의 제품으로 구입 후 각각 채소별로 분류 저장하였으며, 저장 후 2-3일 이내 실험이 수행되었다. 시료를 실험실 환경에 적응시키기 위하여 약 6시간 이상 실험실에 보관 후 시편을 제작하여 진행하였다.

시편의 위치는 근채류의 경우 채소의 불균일한 성장속도를 고려하여 뇌두 방향과 중심부 두 곳을 반원주형 시편(Fig. 1a and Fig. 1b)으로 제작하였고, 과채류인 오이와 애호박의 경우에는 씨방 부위를 제거하지 않고 과육 부분과 함께 원형 그대로의 모습으로 반원주형 시편(Fig. 1c and Fig. 1d)으로 제작하였다. 담자균류인 표고버섯은 자실체 중 갓과 대를 분리 구분하여 시편(Fig. 1e and Fig. 1f)을 각각 제작하여 실험하였다.

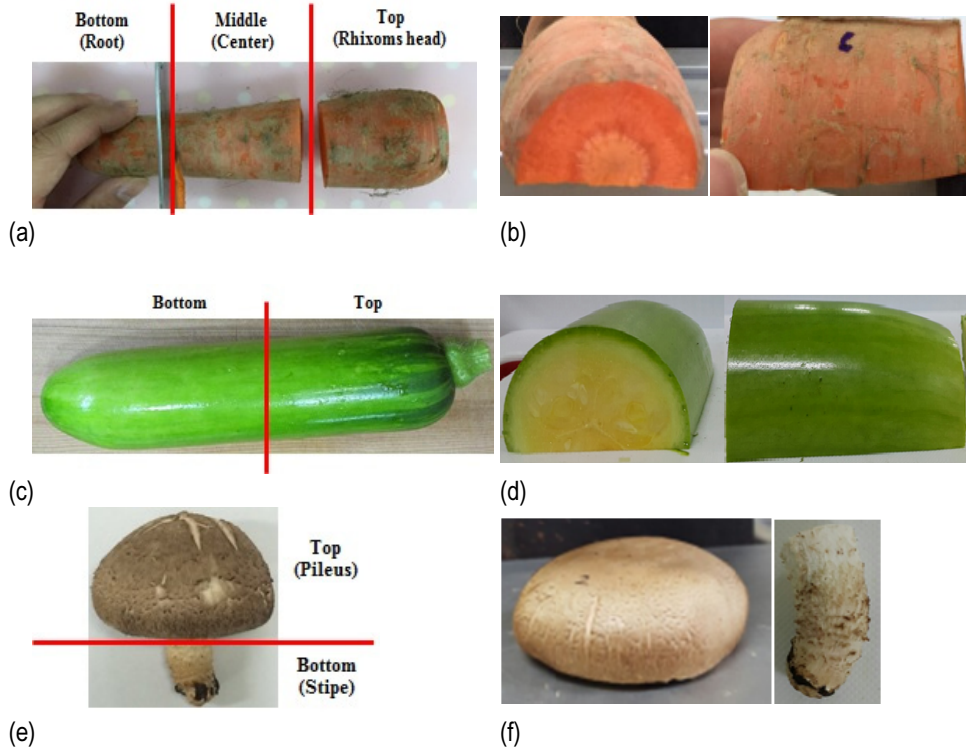


Fig. 1. Sample preparation for compression and shear tests: (a) and (b) carrot, (c) and (d) squash, (e) and (f) Shiitake mushroom.

실험장치

채소 다목적 절단기의 투입 및 이송 장치에서 발생할 수 있는 압착으로부터 채소의 손상을 최소화하고 절단 칼날의 전단 강도를 최적화하고자 압축 및 전단 실험을 실시하였다. 실험을 실시하기에 앞서 제작된 채소 시편의 크기를 측정하였다. 또한 채소의 기계적 특성인자를 구명하기 위해 Fig. 2와 같은 UTM 장비를 사용하였다(Kim et al., 1999a,b). Fig. 3은 반원주형으로 제작된 시편의 완전 파괴가 이루어질 때까지 수평 단면의 수직방향으로 일정한 힘을 가하였고 시간의 변화에 따른 변위와 힘에 대한 시편의 전기적 부하를 계속하였다. 이와 같이 계측된 힘, 변위 및 시간에 대한 데이터를 활용하여 시편의 힘-변형 곡선을 각각 나타내었다. 여기서 반원주형 시편의 생물체 항복강도 및 파괴강도를 계측하기 위하여 실험 지그와 시편의 접촉면적을 식 (1)로 계산하였다(Kim et al., 1999a,b).



Fig. 2. Universal testing machine.

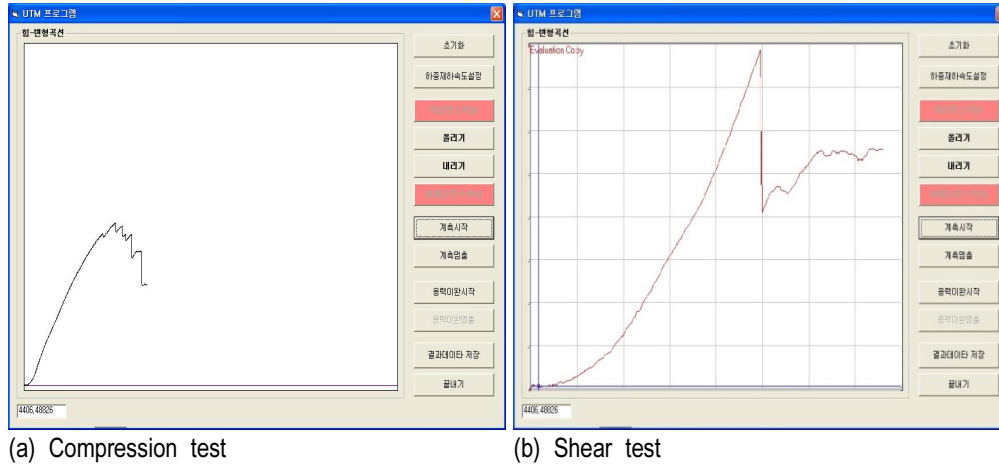


Fig. 3. Force-deformation curve plot.

$$A = \pi ab = \pi \sqrt{h^2(2R_1 - h)(2R_2 - h)} \quad (1)$$

where, A = 변위에 따른 접촉면적(m²), h = 변위(m), a = 타원 장축의 반경(m)
 b = 타원 단축의 반경(m), R₁, R₂ = 상부 곡면의 최대, 최소 곡률반경(m)

실험 장비는 크로스헤드를 상하 수직으로 움직이기 위한 AC servo motor, LM guide 및 ball screw를 조합하였고, 시료의 하중계측을 위한 load cell과 motor를 제어하고 load cell의 신호를 측정하기 위한 컴퓨터로 구성되었다.

실험방법

채소의 기계적 특성을 측정하기 위하여 모든 실험은 30회 이상 반복하여 수행하였다. 일차적으로 채소 시료의 크기를 측정 후 압축 및 전단 실험을 실시하였으며 기계적 특성 중 생물체항복점과 파괴점을 기준으로 생물체항복 강도와 파괴강도를 계측하였다.

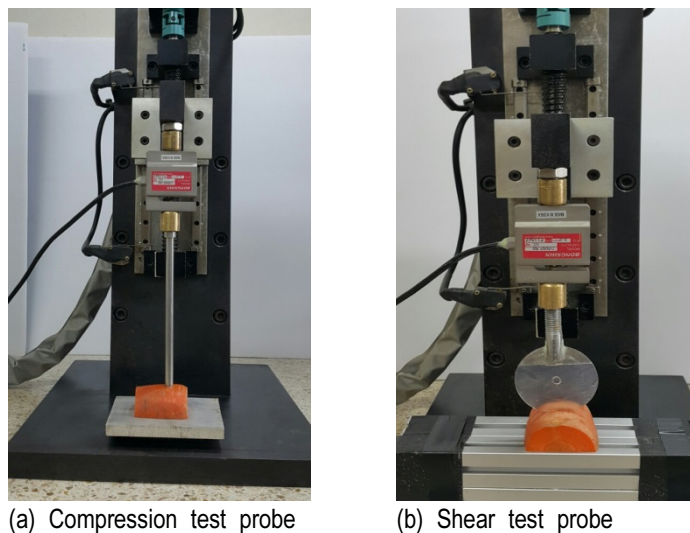


Fig. 4. Test probes of compression and shear.

압축 실험에 사용된 지그는 ASAE standard (1998)에서 규정된 끝 단이 라운드 된 plunger를 사용하였으며(Fig. 4a), 전단 실험에서는 두께 1 mm의 철판을 가공하여 날이 서 있지 않도록 제작하여 사용하였다(Fig. 4b). 이 때 실험에 사용된 실험 장비의 하중재하속도는 ASAE standard(s368.3)에서 규정하고 있는 범위(2.5 - 30 mm/min)내에서 선택하였다(Fletcher et al., 1965). 시편의 기계적 특성 즉, 생물체항복점 및 파괴점과 같은 변곡점들이 힘-변형 곡선상에서 잘 나타날 수 있도록 본 실험에 앞서 예비 실험을 실시하였다. 채소를 이용하여 본 실험과 동일하게 시편을 제작하였고 하중재하속도를 5 mm/min 간격으로 증가시키면서 3회 이상 반복하여 압축 및 전단 실험을 실시하였다. 예비 실험 결과를 토대로 채소의 특성에 맞춰 본 실험에 맞는 하중재하속도를 각각 선택하였다.

Results and Discussion

기계적 특성 규명(I): 압축력

사전 실험을 통해 각각의 시료에 가해지는 힘의 급격한 감소점을 기준으로 하여 생물체 항복점이 분명하게 나타날 수 있도록 적합한 하중재하속도를 선정하였고, 결정된 속도에 맞춰 준비된 시료의 압축실험을 수행하였다(Jeong et al., 1996). Fig. 5는 각 시료에 대해 측정된 힘-변형곡선을 도식화하였으며, 그 결과 값을 Table 1에 정리하였다.

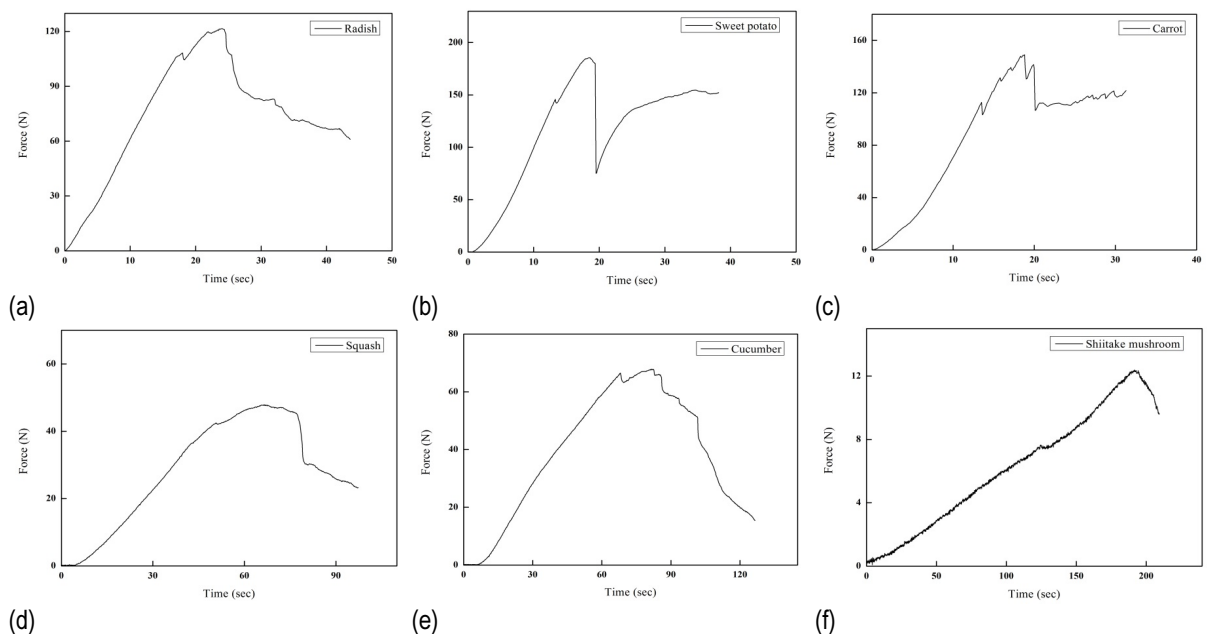


Fig. 5. Compression force-deformation curves of the samples: (a) radish, (b) sweet potato, (c) carrot, (d) squash, (e) cucumber and (f) Shiitake mushroom.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 모든 시료에서 생물체항복점이 뚜렷하게 나타났으며, 생물체항복점 평균값은 고구마, 당근, 무, 오이, 애호박, 표고버섯 순으로 각각 146.98 N, 116.65 N, 100.56 N, 42.72 N, 37.15 N 및 7.89 N으로 나타났다. 또한 생물체항복강도, 파괴점 및 파괴강도 또한 동일한 크기 순으로 나타났다.

계측된 결과 값을 토대로 하여 선행 연구들과 비교해 본 결과, 무와 당근의 경우 Kim et al., (1999c)이 계측한 생물체항복점(무: 308.5 N, 당근: 258.3 N) 및 파괴점(무: 348.0 N, 당근: 299.6 N)에 보다 작은 값으로 나타났는데 이는 압축실험에 사용된 시편과 실험 지그의 형상에 의한 오차 값으로 판단된다. Thompson et al. (1982)은 오이의 절편을 제작하여 직경 0.315 cm인 펀치로 오이 과육의 3점을 돌아가면서 압축 응력을 측정하였으며 측정 결과 펀치 면적 0.2

Table 1. Mechanical property values of compression test for the selected samples.

		Radish	Sweet potato	Carrot	Squash	Cucumber	Shiitake mushroom
Loading rate (mm/min)		15	15	15	10	10	5
Bioyield point (N)	Max.	108.43	177.76	144.14	58.10	48.27	12.89
	Min.	93.74	124.73	76.18	21.96	37.22	3.11
	Avg.	100.56	146.98	116.65	37.15	42.72	7.89
	SD	3.95	14.59	15.61	6.81	2.54	2.51
Bioyield strength (kPa)	Max.	2053.18	3366.05	2729.36	1100.08	914.08	244.07
	Min.	1775.05	2361.83	1442.54	415.75	704.79	58.89
	Avg.	1904.23	2816.59	2208.83	703.45	808.90	149.33
	SD	74.79	295.50	295.58	129.01	48.02	47.61
Rupture Point (N)	Max.	130.76	198.58	167.91	72.51	79.60	30.17
	Min.	108.14	168.44	130.97	46.42	64.85	10.09
	Avg.	119.66	181.35	149.11	61.32	70.86	18.96
	SD	6.62	9.05	9.71	7.14	3.09	5.42
Rupture strength (kPa)	Max.	2476.03	3760.29	3179.43	1373.01	1507.25	571.21
	Min.	2047.73	3189.55	2479.93	880.94	1227.92	189.55
	Avg.	2265.83	3433.95	2823.43	1161.32	1341.75	360.43
	SD	125.38	171.39	183.82	135.44	58.43	104.15

where, Max. = Maximum, Min. = Minimum, Avg. = Average, SD = Standard deviation.

Table 2. Composition of selected samples.

	Moisture (%)	Fiber (%)	Protein (%)	Other components (%)
Radish	90.3	2.1	1.4	6.2
Sweet potato	66.3	3.5	1.4	28.8
Carrot	89.5	3.3	1.1	6.1
Squash	93.0	1.2	0.9	4.9
Cucumber	96.3	0.6	0.8	1.6
Shiitake mushrooms	90.8	9	0.2	

Source: Rural Development Administration National Institute of Agricultural Sciences Agri-Food comprehensive information system (<http://koreanfood.rda.go.kr/>).

cm²에서 압축이 가해지는 힘이 약 18 N이었다고 보고하였다. 이와 같은 결과는 오이의 과육만을 측정된 결과로 과피를 포함하여 측정된 본 실험결과와는 평균값에서 다소 차이(42.72 N > 18 N)가 있음을 알 수 있었다. 또한 Gibe and Lee (2008)는 저온 저장 상태로 보관 중인 호박의 경도를 측정하였으며, 초기 저장 상태에서의 경도 값이 약 25 N - 40 N 사이였다고 보고하였다. 본 실험값과 비교해 본 결과 오차가 있는 것으로 나타났으나 이는 시료의 품종과 측정 환경이 다르기 때문에 나타난 결과라 판단된다.

또한, Table 2에서 보고된 채소 구성 성분들을 비교 판단해 본 결과 일반적으로 중량이 무겁고 표면이 단단한 근채류가 다른 과채류나 담자균류 보다 기계적 특성 값들이 크게 나타났으며, 담자균류를 제외한 채소류는 상대적으로 수분 함량이 적을수록, 섬유질이 많이 함유되어 있을수록 값들이 크게 나타났다. 또한 담자균류의 경우 섬유질 함량은 높지만 수분함량 또한 많이 구성하고 있는 조직이 무르기 때문으로 판단된다(NIAS, 2016).

이와 같이 본 연구에서 수행된 실험과 선행연구들과 비교해 본 결과 계측 값들이 다소 차이가 있었으나 이는 시편과 실험 지그의 형상 및 하중재하속도 등의 차이에서 오는 것이라 판단된다. 따라서 이러한 오차를 줄이고 데이터의 신뢰성을 높이기 위해서는 실험 방법 및 시료를 정량화하여 꾸준히 데이터를 축적하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

기계적 특성 규명(II): 전단력

압축 실험과 동일하게 사전 실험을 통해 각각의 시료에 적합한 하중재하속도를 선정하였고, 시료에 대한 전단 실험을 수행하였다. Table 3과 Fig. 6에는 각 시료에 대한 전단실험 결과를 정리 및 도식화하였다.

Table 3. Mechanical property values of share test for the selected samples.

	Radish	Sweet potato	Carrot	Squash	Cucumber	Shiitake mushroom	
Loading rate (mm/min)	15	10	10	10	15	10	
Share point (N)	Max.	64.65	78.08	33.28	37.37	67.62	83.73
	Min.	31.37	30.79	12.84	21.00	34.61	29.76
	Avg.	42.89	50.88	22.50	28.00	51.64	53.47
	SD	7.46	11.69	4.92	4.03	7.41	13.22

Max. = Maximum, Min. = Minimum, Avg. = Average, SD = Standard deviation.

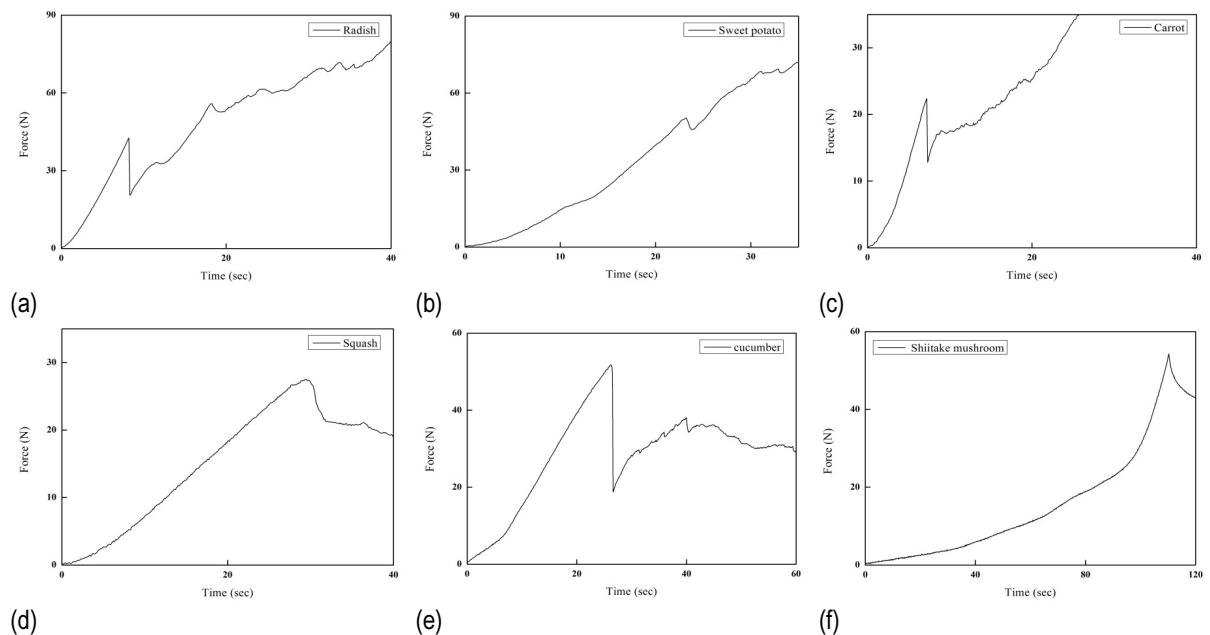


Fig. 6. Share force-deformation curves of the samples: (a) radish, (b) sweet potato, (c) carrot, (d) squash, (e) cucumber and (f) Shiitake mushroom.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 모든 시료에서 전단파괴점이 뚜렷하게 나타났으며, 실험 결과는 앞선 수행한 압축 실험과 달리 전단력의 크기가 표고버섯, 오이, 고구마, 무, 애호박 및 당근 순으로 각각 53.47 N, 51.64 N, 50.88 N, 42.89 N, 28.00 N 및 22.50 N으로 나타났다.

이와 같은 결과로 판단하여 볼 때 표고버섯의 경우 수분과 섬유질을 많이 함유하고 있어 연성이 좋아 전단력에 대한 저항이 높은 것으로 판단되며 과채류인 오이와 애호박의 경우 근채류인 무와 당근에 비해 상대적으로 껍질부분에 섬유질이 많이 모여 있어 전단력이 높게 측정된 것으로 판단된다. 반면에 섬유질이 많이 함유되어 있는 당근의 경우 전단력이 가장 낮게 나타났으며 그 원인으로 Kim et al. (1999c)이 정의했던 바와 같이 조직이 단단하고 다른 채소들에 비해 연성이 부족하여 쉽게 부서지기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 앞서 연구한 압축 실험과 달리 순수하게 채소의 전단 하중을 측정하는 전단 실험의 경우 연구가 부족한 실

정이다. 따라서 다목적 채소 절단기를 개발하기 위해서는 보다 많은 정량화 된 전단실험 데이터가 축적될 필요성이 있어 보인다.

Conclusion

본 연구는 다목적 자동 채소절단기 개발을 위한 사전 연구로 일반적으로 소비가 많이 되고 있는 채소(무, 당근, 애호박, 오이, 표고버섯 및 고구마 등)를 대상으로 하여 각각의 시료에 대한 기계적 특성을 구명하고자 하였다. 이를 위하여 구축한 UTM을 활용하여 채소별 기계적 특성(압축, 전단)을 계측하고 시료별로 비교 분석하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실험을 통해 시료별 최적의 하중재하속도를 측정하여 선정하였고, 선정된 하중재하속도로 측정한 결과 모든 시료에서 생물체항복점과 전단파괴점 등이 뚜렷하게 나타났다.
- 2) 압축 실험을 수행한 결과 고구마, 무, 당근과 같은 근채류 등이 오이, 애호박, 표고버섯에 비해 생물체항복점과 생물체항복강도 등과 같은 기계적 특성 값들이 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 상대적으로 근채류 등이 수분 함량이 적고, 섬유질이 많기 때문으로 판단된다.
- 3) 또한 동종의 채소에 대해 전단력을 측정해 본 결과 압축 실험과 달리 표고버섯, 오이, 고구마, 무, 애호박 및 당근 순으로 나타났으며, 그 값들은 각각 53.47 N, 51.64 N, 50.88 N, 42.89 N, 28.00 N 및 22.50 N으로 나타났다. 이는 표고버섯이 다른 채소시료들에 비해 수분과 섬유질이 많이 함유되어 있어 연성이 좋아 전단력에 대한 저항이 높은 것으로 판단된다. 또한 다목적 채소 절단기를 개발하기 위해서는 보다 많은 정량화 된 전단실험 데이터가 축적될 필요성이 있어 보인다.

이번 연구를 통해 획득한 압축 및 전단 특성 값을 활용하여 절단기 설계에 있어서 시료의 이송 및 공급 장치 구성과 중요 요소 중 하나인 절단칼날의 형상과 절단속도 등에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgements

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 첨단생산기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(115047-02).

References

- ASAE Standard. 1998. Compression test of food materials of convex shape. In ASAE S 368.3. MAR95.
- Fletcher SW, Mohsenin NN, Hammerle JR. 1965. Mechanical behavior of selected fruits and vegetables under fast rates of loading. Transaction of the ASAE 8:0324-0326.
- Gibe AJG, Lee JW. 2008. Incidence of chilling Injury in two varieties of winter squash (*Cucurbita maxima* Duch.) at low temperature storage. Horticulture, Environment, and Biotechnology 49: 104-108.
- Jeong HS, Park NK, Do DH. 1996. Compressive behavior of some vegetables. The Korean Journal of Food and Nutrition 9:466-471. [in Korean]
- Kim MS, Jung HM, Park JM, Lee YH. 1999a. Mechanical properties of apple and pear. Journal of Korean Society for Agricultural Machinery 24:243-252. [in Korean]
- Kim MS, Jung HM. 1999b. Mechanical properties of tomato and oriental melon. Journal of Korean Society for Agricultural Machinery 4: 274-281. [in Korean]
- Kim MS, Jung HM, Park JM. 1999c. Mechanical properties of the radish and the carrot. Journal of Korean Society for Agricultural

- Machinery 4:500-508. [in Korean]
- KREI (Korea Rural Economic Institute). 2014. A Study on efficient management for quality and safety of simple processed agricultural products. pp. 12-13. [in Korean]
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2013. Non heating press process & System model development for nature material of agrifood. pp. 9-10, 79-81. [in Korean]
- NIAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2016. National standard food composition tables search. Accessed in <http://koreanfood.rda.go.kr/kfi/fct/fctFoodSrch/list> on 17 June 2016. [in Korean]
- Thompson RL, Fleming HP, Hamann DD, Monroe RJ. 1982. Method for determination of firmness in cucumber slices. *Journal of Texture Studies* 13:311-324.