

몇 가지 채소류의 압축거동

정현상 · 박남규 · 도대홍*

작물시험장 품질이용과 · *충청전문대 식품공업과

Compressive Behavior of Some Vegetables

Heon Sang Jeong, Nam Kyu Park and *Dae Hong Do

Crop Quality and Utilization, Crop Experiment Station, RDA, Suwon 441-100, Korea

*Dept. Food Science & Technology, Chungcheong College, Cheongwon 363-890, Korea

Abstract

In order to investigate the compression characteristics on the some vegetables - cucumber, garlic, ginger, potato, and radish - compression force, distance, and time were measured with a Struct-O-Graph and correlations between them were investigated. Force distance and distance-time curves were showed simply and reflection points were showed rarely. The time to rupture point was long of 11.7sec at the compression speed of 60mm/min and of 6.16sec at the compression speed of 120mm/min in potato, and short of 9.65, 4.55sec at the different compression speed in garlic, respectively. The rupture force was large of 16.64~20.00N at the different compression speed in potato and radish, and the sample at rupture point was showed crushing behavior under probe. These phenomena were suggested because compression strength of sample was different. In the result of regression analysis for force-time and distance-time to the rupture point, the correlation coefficients were above 0.96, and difference of among samples was small. The slopes of force-time were large of 1.772~3.385 in cucumber and small of 1.743~3.338 in potato, and the slopes of distance-time were obtained with reverse results.

Key words : vegetables, compressive properties, force-time curve, distance-time curve, rupture point

서 론

식품이 외부에서 힘을 받으면 그 식품은 받은 힘을 표현한다. 즉 가해진 힘은 식품을 변형시키거나 구조를 파괴하거나 식품 내의 성분을 압출시킨다. 식품에 힘을 가하고 식품의 거동을 측정하는 방법에는 편치, 압축, 응력이완, 비회복성 일 및 크리프시험 등이 사용되고 있다. 이러한 방법은 모두 힘-변형-시간간의 관계를 측정하고 있다.

Mohsenin 등¹⁾은 힘을 가할 때와 제거할 때, 힘-변형-시간의 관계로부터 과일과 채소의 조직감에 영향을 미치는 요인의 상호관계를 연구하였다. Peleg^{2,3)}는 압축 파괴시 힘-변형의 관계는 과일과 채소류의 성숙도에 영향을 받는다고 하였다. Calzada 등⁴⁾은 응력-변형 곡선은 내부 파괴와 구조적 다짐을 포함한다고 하였으며, Burkner 등⁵⁾은 papaya의 성숙도를 힘-변형-시간의 관계로 측정하였다. 그 밖에 과일과 채소의 기계적 성질⁶⁾, blueberry의 충격과 압축거동 예측모델개발⁷⁾, papaya

의 기계적 성질과 성숙도와와의 관계⁸⁾, 곡류와 과일의 축 압축 시험 기술과 분석 방법⁹⁾, 힘-변형 곡선의 굴곡에 대한 모델 연구¹⁰⁾, 식품 분말의 힘-변형관계^{11,12,13)}, 그 밖에 여러 가지 식품의 물리적 성질에 관한 연구^{14,15,16,17,18,19)}가 있다.

본 연구는 우리 식탁에서 중요한 위치를 차지하는 채소류 중에서 자주 먹고 손쉽게 구할 수 있으며, 물리적 성질이 다른 채소류를 선택하여, 식품물성 측정기로 힘을 가하면서 얻어지는 힘-거리 및 거리-시간 사이의 관계로 압축특성을 살펴보고 얻은 물리적 성질의 결과이다.

재료 및 방법

1. 재료

시료는 충청북도 일원에서 1993년 생산된 오이, 무우, 마늘, 생강, 감자를 시중에서 구입하여 사용하였다. 이들의 수분함량, 섬유소 함량, 비중 및 압착액의 점도

Corresponding author : Heon Sang Jeong

는 AOAC²⁰⁾법에 따라 측정하였다. 세포의 크기와 형태, 조밀도 및 통돌기는 현미경으로 측정하였다.

압축시험용 시료는 가식부분을 cork borer로 직경 5mm, 높이 5mm의 원통형으로 만들어 사용하였다.

2. 측정방법

Struct-O-Graph(Model No.603, Brabender)의 plate에 시료를 올려놓고 일정한 속도로 압축시험하였다. 탐침은 cylinder type probe(15mm)를 사용하였고, compression speed는 60 및 120mm/min, chart speed는 390mm/min로 하여 calibration spring은 20N을 사용하였다.

3. 힘-이동거리-시간 관계 및 파괴점

시료에 힘을 가할 때 가해진 힘 및 탐침의 이동거리를 시간에 따라 측정하고 힘-이동거리 곡선 그리고 이동거리-시간 곡선으로 표현하였고, 힘의 급격한 감소와 이동거리의 급격한 증가점을 파괴점으로 하였다. 그때의 힘, 거리 및 시간을 측정하였다.

4. 상관관계

힘-시간 및 이동거리-시간의 회귀계수 그리고 파괴점에서의 힘, 거리, 시간과 성분함량 간의 상관관계를 통계프로그램(SAS, Statistical Analysis System)으로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 시료특성

시료는 Table 1과 같다. 수분함량은 오이가 95.6%

로 가장 많았으며, 마늘이 62.8%로 작았다. 시료즙액의 점도는 마늘이 25.6 cP로 가장 컸으며, 다른 시료도 유사하였다. 세포의 장축의 길이는 오이가 299 μ m로 가장 컸으며, 세포의 면적은 오이, 무우, 감자가 컸다. 세포의 둥근정도를 나타내는 roundness는 생강과 감자가 각각 0.745 및 0.648로 컸으며, 세포의 조밀도 즉 단위 면적당 세포수는 세포의 장축과 단축이 작은 마늘이 76~80개로 가장 많았다.

2. 힘-거리 곡선

압축시험에서 관찰된 힘-거리의 곡선은 Fig. 1, 2과 같이 조직의 파괴를 나타내는 곡선상의 급격한 변화는 파괴점 까지 계속 작은 크기로 발생하였다. 이것은 시료의 조직이 세포로 구성되어 있으며, 이들이 항복과 저항을 반복하여 나타나는 결과로 생각된다^{2,9)}.

가한 힘이 저항하지 못하고 파괴될 때에는 힘이 감소하고 거리는 급격히 증가하였다. 파괴점에서 시료는 완전히 뭉개졌다. 실험에 사용된 시료 모두 파괴점은 뚜렷하였지만 생물 항복점은 잘 나타나지 않았다. 파괴점이 뚜렷하게 관찰된 시료의 경우 압축속도가 느릴 수록 더 큰 힘에서 파괴되었다²⁾. 이러한 현상은 압축속도가 빠르면 시료에 힘이 급격하게 작용하지만 힘이 시료 전체로 전파되는 데는 시간이 걸리기 때문으로 생각한다. 식품의 힘-거리 곡선상에는 힘과 변형사이에 비례관계가 성립하는 부분, 생물 항복점과 파괴점 사이의 구조적인 변화를 나타내는 부분, 파괴점 이후 압축되는 거동이 나타난다^{3,22)}. 본 결과에서도 이들 세 부분이 뚜렷하게 관찰되었다.

Table 1. Characteristics of samples and sample cells

Common Name	Cucumber	Radish	Garlic	Ginger	Potato
Scientific Name	<i>Cucumis sativus</i> L.	<i>Solanum tuberosum</i>	<i>Allium sativum</i> L.	<i>Zingiber officinale</i> R.	<i>Raphanus sativus</i> L.
Moisture(%)	95.6	93.7	62.8	75.6	84.8
Fiber(%)	0.5	1.0	0.8	1.9	0.4
Viscosity(centipoise)	10.4	8.0	25.6	7.6	8.8
Specific Gravity	0.97	1.00	1.02	1.03	1.09
Cell length(μ m)	299	256	149	184	250
Cell width(μ m)	209	206	100	142	215
Cell area ¹⁾	0.064	0.056	0.016	0.027	0.055
Cell roundness ²⁾	0.465	0.607	0.426	0.745	0.648
Cell density ³⁾	20~24	32~36	76~80	60~64	40~44
Cell regularity ⁴⁾	0.007	0.008	0.033	0.018	0.027

1) Length width 2) A_p : area of largest inscribing circle A_c : area of smallest circumscribing circle 3) A number of cell per 1mm² 4) Standard deviation of size

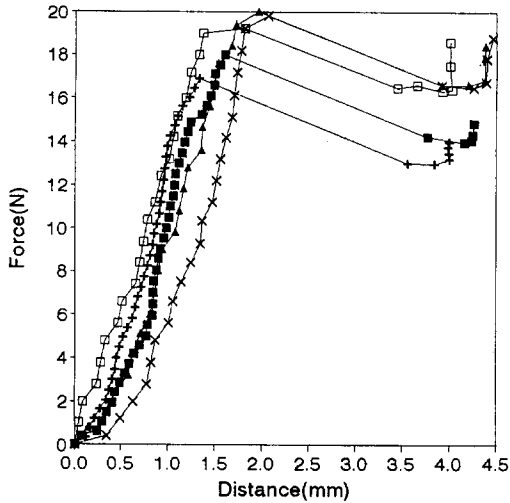


Fig. 1. Force-distance curves at the compression speed of 60mm/min. ■ : cucumber, ▲ : radish, + : garlic, □ : ginger, × : potato.

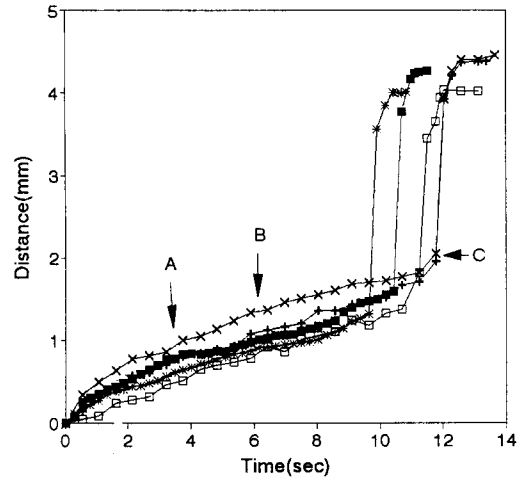


Fig. 3. Distace-time curves at the compression speed of 60mm/min. ■ : cucumber, ▲ : radish, + : garlic, □ : ginger, × : potato.

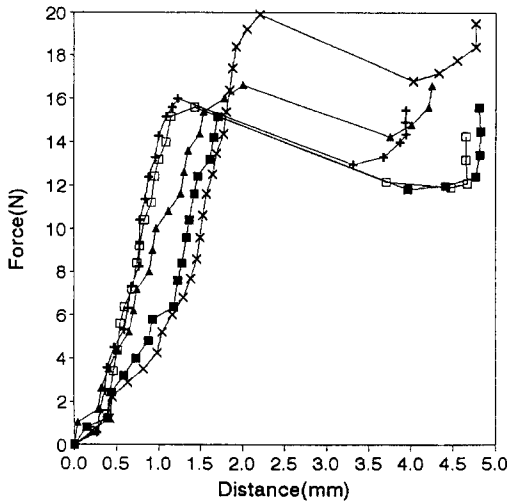


Fig. 2. Force-distance curves at the compression speed of 120mm/min. ■ : cucumber, ▲ : radish, + : garlic, □ : ginger, × : potato.

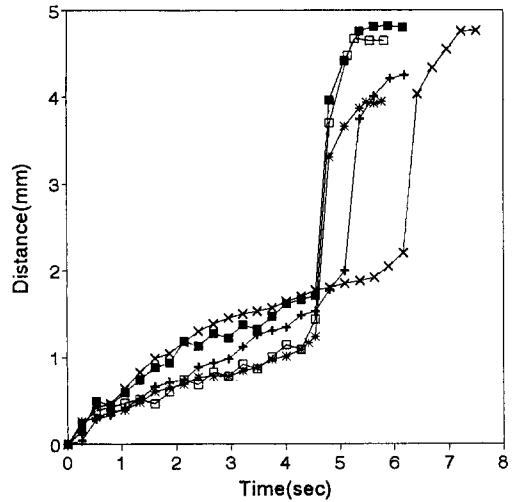


Fig. 4. Distace-time curves at the compression speed of 120mm/min. ■ : cucumber, ▲ : radish, + : garlic, □ : ginger, × : potato.

3. 거리-시간 곡선

압축시험시 거리-시간 곡선은 Fig. 3, 4와 같이 곡선의 기울기는 완만하였다. 그러나 시료의 파괴점 이후 급격히 증가하였고 그 후에는 거의 일정하였다. 이러한 현상은 탐침의 면적이 커서 이동에 대한 저항이 크고, 파괴되는 세포의 수가 많아서 항복시의 변화가 크기 때문으로 생각된다. 거리-시간 곡선의 기울기와 곡선상의 점간의 거리로서 시료가 파괴되는지 저항하는지를 알 수

있다. A점은 이동속도가 큰 부분으로 파괴를 나타내는 점이며, B점은 이동속도가 작은 부분으로 시료가 가한 힘에 대해서 저항하는 점이다. C점은 거리의 변화가 급격히 증가하는 점으로 시료의 거대구조가 파괴되는 점이다. 이러한 점들은 시료의 종류, 즉 구성세포의 형태와 배열 그리고 세포내의 성분 등에 영향을 받는다¹⁾. 압축시험시 최대거리는 시료의 높이에 해당하지만 파괴점을 넘어선 시료는 으깨져서 탐침 밑에 깔리므로 그 두께

만큼의 거리가 감소하게 된다. 이 결과는 시료의 종류에 따라 다르다. 각 시료가 완전히 파괴되었을 때 즉, 압축이 끝났을 때의 시간은, 오이는 압축속도 60과 120 mm/min에서 각각 11.52, 6.16초, 무우는 13.40, 6.19, 마늘은 10.85, 5.76, 생강은 13.13, 5.81, 감자는 13.66, 7.50초이었다. 이론적으로 탐침이 시료의 높이인 5mm를 이동하는 데에는 압축속도에 따라 각각 5 및 2.5초가 소요된다. 실제 압축시험에서는 그 이상이 소요되었다. 이것은 시료가 탐침의 압축에 저항하는 시간이 길어지는 것을 의미하며, 그 결과는 그림과 같이 파괴점 이전에서 거리-시간 곡선의 기울기가 작은 것으로 알 수 있다. 또, 시간이 많이 걸리는 것은 시료가 압축힘에 대해 저항하는 힘이 크다는 것을 의미하며, 이것은 시료의 강도로서도 표현 할 수 있다. 본 결과에서는 압축속도 60mm/min에서는 감자와 생강이 각각 6.97, 6.03초 그리고 120mm/min에서도 감자와 생강이 각각 2.08, 1.74초로 컸다. 결과는 감자와 생강이 큰 강도를 갖고 있음을 나타낸다.

4. 힘의 증가속도 및 탐침의 이동속도

힘-시간 및 거리-시간 곡선의 회귀식으로부터 구한 기울기 값은 Table 2와 같다. 회귀분석에는 파괴점까지의 데이터를 이용하였다.

분석결과 모든 회귀식의 상관계수는 0.96 이상으로 직선적인 관계가 있었다. 파괴와 저항시에 약간의 변화

가 있었지만 회귀식의 도출에는 큰 영향을 주지 않았다. 시간에 따른 힘의 관계에서 기울기의 크기는 압축시험 중 힘의 증가속도를 표시하며 펀치시험과 같이 시료의 저항력 크기와 단단함을 나타낸다. 압축속도 60mm/min에서 힘의 증가속도는 1.743~1.796으로 시료간의 차이가 작았으며, 압축속도 120mm/min에서도 3.338~3.611의 범위를 나타냈다. 이동속도는 압축속도 60mm/min일 때에 0.116~0.143 범위로 시료간의 차이는 작았다.

5. 파괴점

압축시험중 시료가 파괴될 때 즉 파괴점까지의 힘, 거리 및 시간은 Table 3과 같이 시료가 파괴될 때의 힘은 외부 힘에 대한 시료의 최대저항을 나타낸다. 이것은 곧 강도로 표현되며, 힘을 받는 시료 전체면적의 저항으로 표현한다. 시료 전체가 균일한 힘을 받게 되므로 전체적인 힘-거리의 거동을 보이며, 이러한 거동은 부분적인 힘-거리 곡선 결과와 같은 뚜렷한 결과를 나타내지 못한다. 따라서 힘이 작용하면서부터 시료가 완전히 파괴될 때까지 시료는 계속해서 항복과 저항을 반복한다. 그래서 압축시험에 대한 힘-거리 곡선은 Fig. 1, 2와 같은 형태로 나타난다. 파괴점에서의 힘은 오이, 마늘, 생강, 감자, 무우가 15~20N의 힘에서 파괴되었다. 이는 세포의 크기와 밀도의 차이에 의한 결과로 생각된다. 압축속도별 파괴시의 힘은 압축속도 60mm/min에서 약

Table 2. Slope constant of regression equation of force and distance as a function of time

Samples	Force-Time(N/sec)		Distance-Time(mm/sec)	
	60 ¹⁾	120 ²⁾	60	120
Cucumber	1.772	3.385	0.128	0.353
Radish	1.746	3.349	0.141	0.354
Garlic	1.796	3.611	0.116	0.223
Ginger	1.754	3.578	0.137	0.239
Potato	1.743	3.338	0.143	0.313

1) Compression speed : 60mm/min, 2) Compression speed : 120mm/min

Table 3. Force, distance and time to rupture point in compression test¹⁾

Samples	Force(N)		Distance(mm)		Time(sec)	
	60	120	60	120	60	120
Cucumber	18.00	15.20	1.60	1.72	10.45	4.55
Radish	20.00	16.64	1.96	2.01	11.79	5.09
Garlic	16.92	16.00	1.32	1.24	9.65	4.55
Ginger	19.20	15.60	1.81	1.44	11.25	4.55
Potato	19.80	19.92	2.06	2.21	11.79	6.16

1) Refer to table 2 for abbreviation

Table 4. Correlation coefficients among physical properties at the compression speed of 120mm/min¹⁾

	MC	FI	VI	SG	GF	GD	RF	RD	RT
MC	1.00	-0.37	-0.78	-0.44	-0.50	0.51	-0.22	0.72	-0.10
FI		1.00	-0.14	0.13	0.45	-0.42	0.13	-0.47	0.03
VI			1.00	0.05	0.26	-0.25	0.01	-0.65	-0.09
SG				1.00	0.38	0.47	0.65	0.26	0.70
GF					1.00	-0.99**	0.84*	-0.34	0.73
GD						1.00	-0.88*	0.28	-0.78
RF							1.00	0.20	0.98**
RD								1.00	0.36
RT									1.00

1) MC:moisture content, FI: fiber content, VI: viscosity of juice, SG: specific gravity GF: gradient of time-force curve, GD: gradient of time-distance curve RF: rupture force, RD: rupture distance, RT: rupture time * : Significant at $p < 0.05$, ** : Significant at $p < 0.01$

간 크게 나타났다. 이는 120mm/min의 압축속도에 비해 가해진 힘이 빠르게 시료 전체로 확산되기 때문으로 생각된다. 파괴시 무우, 감자, 생강은 큰 힘을 필요로 하였다. 파괴점까지의 이동거리는 감자가 압축속도에 따라 각각 2.06, 2.21mm로 크게 이동한 후에 파괴되었지만 나머지 시료는 1.24~2.01mm의 범위를 나타냈다. 파괴가 일어날 때의 시간은 압축속도에 따라 각각 9.65~11.79, 4.55~6.16초 범위를 나타냈다.

6. 상관관계

압축속도 120mm/min에서 힘-시간 및 거리-시간간의 기울기, 파괴점에서의 힘과 거리, 시간과 성분함량간의 상관관계를 살펴본 결과는 Table 4와 같이 수분함량이 많을 수록 힘-시간간의 기울기는 작아지며, 파괴힘은 커졌다. 힘-시간과 거리-시간간의 기울기는 서로 반비례하였다. ($r = -0.99$) 힘-시간간의 기울기는 파괴힘 및 파괴시간과 플러스의 상관($r > 0.73$)을 나타냈으며, 거리-시간간의 기울기와는 반대의 결과를 나타냈다. 파괴점에서의 힘과 시간은 매우 높은 상관관계($r = 0.98$)가 나타났다.

요 약

오이, 마늘, 생강, 감자 및 무우의 압축특성을 규명하기 위하여 식품물성 측정기로 압축힘, 거리 및 시간을 측정하고 이들의 상관관계를 살펴 보았다. 힘-거리 및 거리-시간 곡선은 비교적 간단한 형태를 나타냈고 변곡점들이 잘 나타나지 않았다. 파괴점까지의 시간은 감자가 압축속도 60mm/min에서 11.79, 압축속도 120mm/min에서 6.16초로 가장 길었다. 마늘은 각각 9.65 및 4.55초로 적게 소요되었는데 이는 시료의 압축강도에 따른 차이때문으로 생각된다. 파괴힘은 무우와 감

자는 압축속도별로 16.64~20.00N으로 가장 컸으며, 파괴시에 시료는 탐침말에 뭉개어지는 거동을 보였다. 압축시험시 파괴점까지의 힘-시간과 거리-시간에 대한 회귀분석 결과 상관계수 값이 0.96이상이었으며, 시료간의 차이는 작았다. 힘-시간 곡선의 기울기는 오이와 마늘이 1.772~3.385로 가장 컸으며, 감자가 각각 1.743 및 3.338로 작았으며, 거리-시간 곡선의 기울기와는 반비례 관계를 나타냈다.

참고문헌

- Mohsenin, N., Cooper, H. E., and Tukey, L. D. : Engineering Approach to Evaluating Textural Factors in Fruits and Vegetables. *Transactions of the ASAE*, **6**, 85~92(1963).
- Peleg, M. and Calzada, J. F. : Stress Relaxation of Fruits and Vegetables. *J. Food Sci.*, **41**, 1325~1329 (1976).
- Peleg, M. : The Role of the Specimen Dimensions in Uniaxial Compression of Food Materials. *J. Food Sci.*, **42**, 649~651(1977).
- Calzada, J. F. and Peleg, M. : Mechanical Interpretation of Compressive Stress-Strain Relationships of Solid Foods. *J. Food Sci.*, **43**, 1087~1092(1978).
- Burkner, P. F. and Kinch, D. M. : Force-Deformation Ratio as an Index of Papaya Maturation. *Transactions of the ASAE*, **11**, 437~440(1968).
- McKenna, B. M. : Mechanical Properties of Fruits and Vegetables. *Food Processing Engineering*, Vol 1, Food Processing System, Edited by Linko P, Y. Maikki and J. Olkku, 274~279(1979).
- Lee, F. F. and Rohrbach, R. P. : Firmness Modeling and Rapid Relaxation Modulus Determination in Blueberries. *Transactions of the ASAE*, **26**, 1654~1660(1983).
- Wang, J. K. and Chang, H. S. : Mechanical Properties of Papaya and Their Dependence on Maturity. *Transactions of the ASAE*, **13**, 369~371(1970).

9. Arnold, P. C. and Mohsenin, N. N. : Proposed Techniques for Axial Compression Tests on Intact Agricultural Products of Convex Shape. *Transactions of the ASAE*, **14**, 78~84(1971).
10. Swyngedau, S. , Normand, M. D. , and Peleg, M. : Comparison of Two Types of Models for Concave Force-Deformation Curves Presentation. *J. Texture Studies*, **22**, 265~275(1991).
11. Gerritsen, A. H. and Stemerding, S. : Crackling of Powdered Materials During Moderate Compression. *Powder Technology*, **27**, 183~188(1980).
12. Moreyra, R. and Peleg, M. : Compressive Deformation Patterns of Selected Food Powders. *J. Food Sci.* , **45**, 864~868(1980).
13. Peleg, M. : Characterization of the Stress Relaxation Curves of Solid Foods. *J. Food Sci.* , **44**, 277~281(1979).
14. Cummings, D. A. and Okos, M. R. : Viscoelastic Behavior of Extruded Durum Semolina as a Function of Temperature and Moisture Content. *Transactions of the ASAE*, **26**, 1888~1893(1983).
15. Dutta, S. K. Nema, V. K. and Bhardwaj, R. K. : Physical Properties of Gram. *J. Agric. Engng. Res.* , **39**, 259~268(1988).
16. Fiedeldej, M. E. Walton, L. R. and Walker, J. N. : Ultimate Strength of Green Bureley Tobacco Stalk Material. *Transactions of the ASAE*, **35**, 596~601(1992).
17. Finney, E. E. Jr. and Hall, C. W. : Elastic Properties of Potatoes. *Transactions of the ASAE*, **10**, 4~8(1967).
18. Galili, N. and Goodrum, J. W. : Impact Shelling of Hard-cooked Eggs. *Transactions of the ASAE*, **36**, 807~810(1993).
19. Henry Waelti and Buchele, W. F. : Factors Affecting Corn Kernel Damage in Combine Cylinders. *Transactions of the ASAE*, **12**, 55~59(1969).
20. A. O. A. C. : Official Methods of Analysis, 15th ed. , Association of Official Analytical Chemists, Washington, D. C.(1990).
21. Fletcher III, S. W. Mohsenin, N. N. , Hammerle, J. R. and Tukey, L. D. : Mechanical Behavior of Selected Fruits and Vegetables Under Fast Rates of Loading. *Transactions of the ASAE*, **8**, 324~326,331(1965).
22. Konstance, R. P. : Axial Compression Properties of Kamaboko. *J. Food Sci.* , **56**, 1287~1291(1991).

(1996년 11월 29일 접수)