果實의 힘－變形 特性

Force－Deformation Characteristics of the Fruit Flesh

金 滿 秀* 朴 鍾 民* 崔 東 洙*
M. S. Kim J. M. Park D. S. Choi

Summary

The force－deformation relationship gives the basic physical properties of the fruits such as the bioyield point, the rupture point, and the deformations at the bioyield point and the rupture point. These informations are very important to study the stress－strain relationships of the fruits.

This study was conducted to analyze those physical properties according to the sampling position of the fruits, and to determine the bioyield point,the rupture point, and the deformations at the bioyield point and the rupture point of the fruits for two different storage conditions(low temperature and normal temperature) and the storage period, and to investigate the effect of loading rate on those physical properties, the hysteresis on the loading－unloading condition and the degree of elasticity of the fruits.

The results of the study were as follows :

1. The physical properties(BS, US, BD, and RD) of the test specimen selected from the different sampling positions were quite different.

The values of the physical properties were shown smallest ones at the cheek of the fruits, and the statistical test results of the physical properties between the cheek from the other two positions of the fruits showed that there were significant difference at the 1 % level between them.

2. The effect of loading rate on the physical properties of the fruits was relatively large, all the considered physical propertis of the fruits increased with the loading rate, but the hysteresis loss decreased with it.

3. The physical properties of the fruits according to the storage conditions and period showed different, and the bioyield deformation and the rupture deformation of the fruits increased with the storage period, but the bioyield strength and the ultimate strength of the fruits decreased with it. The effect of the storage conditions on the those physical properties showed that the normal temperature storage condition was a little higher than the low temperature storage condition.

4. As a whole, it was shown that the bioyield strength and the ultimate strength of the pear decreased a little faster than those of the apple, and the bioyield deformation and rupture deformation of the pear increased a little faster than those of apple at the two storage conditions.

* 忠南大學校 農業機械工學科

1. 緖 論

果實의 粘彈性 特性은 應力弛緩, 크리이프 와 動的實驗을 통하여 잘 알수 있으며, 이들 實驗時에는 우선 이들 實驗의 주요 變數가 되는 初期應力 및 初期變形率이 결정되어야 한다. 이 初期應力 과 初期變形率은 果實의 生物體降伏强度와 降伏變形量 이하에서 결정되어야 하는 데, 이들 物理量들은 果實의 힘－變形 特性曲線으로 부터 얻을 수 있다. 또한 이 特性曲線으로 부터는 이들 物理量 외에도 極限强度, 彈性度(degree of elasticity), 에너지 및 히스테리시스(hysteresis) 등의 많은 物理量들에 대한 정보를 얻을 수 있다.

따라서 果實의 粘彈性 特性중에서 힘－變形 特性은 가장 기본적 이면서 중요한 것으로 많은 研究者들에 의하여 취급되어져 왔다.[3,4,7,12 16, 19,20,22,24 27,29 33, 36 45]

果實을 비롯하여 農產物의 粘彈性 特性을 測定하는 데는 특별한 規定이 없기 때문에 많은 研究者들은 각자 나름대로의 測定裝置와 方法등을 이용하여 왔으며, 農產物은 形狀 자체가 不均一 하고 非均質 이며, 더구나 살아 있는 生命體로서 生命이 다하는 날까지 呼吸과 蒸散作用을 계속하기 때문에 주위의 溫度와 濕度의 영향을 받아 生理的인 변화로 말미암아 物理的 特性이 변화하므로, 이들의 物理的 特性을 정확하게 定量化하는 것은 매우 어려운 일이다.

果實에 壓縮을 가하는 도구로서는 加工하지 않은 原形의 果實에 대하여서는 果實의 成熟度를 測定할 때 이용되는 Magness－Taylor pressure probe인 직경 7.94mm, 11.11mm 혹은 이와 비슷한 치수의 steel plunger[3,12,13,15,16,24,29,42] 나 spherical indenter[7]가, 그리고 일정한 形狀으로 加工된 試片[2,5,8,15,17,18,25,26,35,42] 에 대하여 서는 平板이 주로 이용되어 왔으며, 또한 原形 그대로의 果實을 평판 사이에서 壓縮實驗[9,16,22,23,41]한 경우도 있다.

Fletcher[12], Fletcher등[13], Fridley등[14 16], Rao등[31, 32], Wright와 Splinter [42], 그리고 Wright등[43]은 壓縮荷重에 대한 農產物의 機械的 特性을 破壞荷重, 破壞에너지 및 破壞變形度로 표시하고 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 荷重載荷速度의 변화에 따른 이들 特性의 변화를 고찰하였다.

Fletcher[12]. Fletcher등[13]은 加工하지 않은 사과, 배, 복숭아 및 감자에 대하여 직경 6.35mm의 플랜저로 4.572～304,800mm/min 범위의 다양한 荷重載荷速度로 壓縮實驗을 통한 힘－變形 特性曲線으로 부터 生物體降伏點, 降伏變形量, 破壞荷重 및 破壞에너지 등을 測定하였는 데, 果實의 生物體降伏點은 어느 수준의 荷重載荷速度 이상에서는 힘－변형 曲線상에 나타나지 않았으며, 그 臨界荷重載荷速度는 果實의 종류, 成熟度 및 品種에 따라 다르게 나타 났다고 하였다. 이들은 사과의 臨界荷重載荷速度를 약 9,906mm/min로 보고하였으며, 그 臨界荷重載荷速度 이하에서 사과의 生物體降伏點 및 降伏變形量은 荷重載荷速度가 증가함에 따라 감소하다 어느 기점을 지나서는 증가하였다고 하였다. 이들은 또 果實이 成熟될 수록(收穫前>收穫適期>收穫後) 破壞荷重은 감소하였으며, 果實 껍질의 유무에 따라 30～40％의 차가 있었다고 보고한 바 있다.

Fridley와 Adrian[15]은 加工하지 않은 복숭아, 배, 살구 및 사과에 대하여 끝이 평편한 직경 7.94 mm의 플랜저(plunger)를 이용하여 12.7mm/min의 荷重載荷速度로 果實의 측면 부위(cheek)에 荷重을 가하여 生物體降伏點, 降伏變形量 및 降伏에너지등을 測定하려고 하였는 데, 사과의 경우는 힘－變形의 曲線 상에 降伏點이 잘 나타 났으나, 그 외의 果實에서는 잘 나타 나지 않았다고 하였으며, 이들은 이러한 경우 生物體降伏點을 결정하는 방법으로 같은 成熟度의 果實을 여러 그룹으로 나누고 각각의 그룹에 여러수준의 荷重을 가한 후 일정한 時間이 경과한 후 荷重을 가한 부위를 절단하여 損傷된 정도를 測定하여 이로 부터 平均降伏荷重을 결정하는 방법을 택하였다. Mohsenin과 G ehlich[27]. Horsfield등[19]도 각각 사과 및 복숭아에 대하여 損傷을 일으키는 衝擊에너지와 剪斷應力을 결정하는 데 이와 비슷한 방법을 이용하였으며, Wang과 Chang[41]도 papaya에 대하여 靜的인 荷重 하에

서의 損傷을 일으키는 變形을 결정하는 데 이와 같은 방법을 이용한 바 있다.

Mohsenin등[29]은 사과의 彈性係數를 測定하기 위하여 사과속살로 부터 직경과 길이가 모두 12.7mm인 圓筒形 試片을 제작하여, 두 평판 사이에 놓고 일정 變形量 까지 여러 회의 荷重을 가한 후 2 번 째의 荷重載荷曲線으로 부터 彈性係數를 測定하였는 데, 이와 같이 2 번 째의 荷重載荷曲線을 彈性係數의 계산에 이용한 이유는, 첫번째 荷重載荷時 試片의 회복될 수 없는 요소들이 제거 되었으며, 또한 試片採取 과정에서 발생되는 試片 상하면의 작은 파괴된 입자들이 壓縮되어 제거 되었기 때문 이라고 하였다.

Miles등[26]은 收穫 후 사과를 0℃에서 130일 貯藏하다가, 이 사과의 측면에서 중심축을 향하여 직경 8.46mm, 길이 10.17mm의 圓筒形 試片을 cork borer를 이용하여, 채취한 후, 3.05~67123.06mm/min 범위의 荷重載荷速度로 사과의 極限强度와 極限變形量을 測定한 결과, 荷重載荷速度가 증가함에 따라 이들 物理量들과 剪斷應力이 증가하였다고 보고하였다.

Chen등[7]은 Asian 배에 직경 19mm의 spherical indenter를 이용하여 배의 측면 부위를 荷重載荷速度 10mm/min로 1.5mm 및 3mm를 壓縮하였을 때와 같은 크기의 spherical indenter를 장착한 391.8 N의 막대를 100mm와 60mm의 높이에서 落下하였을 때의 損傷의 형태를 연구한 결과, 두 荷重의 조건에 대한 損傷의 형태는 매우 달랐는 데, 즉 壓縮荷重 하에서의 果實의 損傷은 parabola 형이고, 衝擊荷重 하에서는 衝擊한 부위로 부터 果實의 중심 쪽으로 여러가닥으로 퍼진 형태를 나타 내었다고 보고한 바 있다.[15, 19, 38, 40]

Fridley등[16]은 果實의 껍질 부위의 곡면과 플랜저 혹은 평판과 접촉하는 각각의 경우에 대하여 應力分布의 식을 彈性接觸의 理論을 이용하여 유도하였으며, 평판과 접촉하는 果實의 損傷은 最大剪斷應力이 작용하는 接觸面積 반경의 $\frac{1}{2}$되는 果實 내부에서 발생한다고 하였다.[15, 19, 20, 26, 28, 30, 34, 37~40]

Ishibashi와 Kojima[22]는 토마토, 사과, 배 및 복숭아의 각 부위에 대하여 직경 6mm의 플랜저로 荷重載荷速度 10mm/min로 荷重을 가하여 破壞荷重과 極限變形量을 측정한 결과, 토마토의 경우는 破壞荷重은 cavity shoulder 부분에서 최대였고, 極限變形量은 cheek 부분에서 최대였으나, 그 이외의 果實에서는 apex 부위에서 破壞荷重이 가장 컷다고 보고한 바 있으며, 破壞荷重은 果實이 잘 익은 것일수록 감소하였으나, 變形量은 증가하였다고 하였다. 이들은 사과의 경우 生物體降伏點은 힘-變形의 曲線 상에 잘 나타 났으나, 그 외의 果實에서는 뚜렷하게 나타나지 않았다고 보고한 바 있다. Tsukamoto[39]도 衝擊荷重에 의한 사과 각 부위의 損傷에 대한 敏感度를 測定한 결과, 사과의 측면부위가 다른 부위에 비하여 損傷에 가장 敏感(약) 하다고 보고한 바 있다.

Fridley와 Adrian[15]은 사과, 배, 복숭아 및 살구에 대하여, Wright와 Splinter [42]는 고구마에 대하여, 그리고 Mohsenin와 G ehlich[27]는 복숭아, 배 및 사과 등에 대하여 여러 荷重에 의한 果實의 損傷을 研究한 결과, 壓縮要因 보다는 衝擊要因의 경우가 더 작은 荷重과 變形도에서 損傷을 일으키는 것으로 보고하였다.

Burkner와 Kinch[4]는 papaya에 대한 힘-變形曲線을 이 果實의 成熟度를 표시하는 척도로 이용하려고 시도한 바 있다.

이상에서 살펴 본 바와같이 外國에서는 '60년대 초부터 이 분야의 研究가 본격적으로 시작되어 비교적 다양한 연구결과가 보고되어 있으나, 우리나라의 경우는 본 研究者[45,46]를 비롯하여 소수의 研究者들에 의하여 벼를 중심으로 몇몇 農產物에 대하여 수행되고 있으나, 아직 매우 미흡한 형편이다. 더구나 국내의 果實에 대한 이 분야의 研究는 거의 보고된 바가 없는 실정이다.

따라서 본 研究에서는 우리나라의 주요 果實인 사과와 배에 대하여 貯藏期間 및 貯藏條件別로 壓縮實驗을 통한 힘 一變形 特性을 究明하고자 하며, 세부목적은 다음과 같다.

가. 果實의 生長方向에 따른 物理的 特性을 分析 하며, 나. 收穫 후 果實의 貯藏條件및 貯藏

期間에 따라 生物體降伏强度, 極限强度, 降伏 變形量 및 極限變形量을 測定하고, 貯藏條件 및 貯藏期間이 이들 物理的 特性에 미치는 影響을 究明한다.

다. 또한, 荷重載荷速度가 이들 物理量과 히스테리시스 및 彈性度에 미치는 影響을 究明 하는데 그 목적이 있다.

2.材料 및 方法

가. 實驗材料

본 硏究에 사용된 供試果實은 우리나라의 대표적인 果實인 사과(Fuji)와 배(Niitaka)이며, 이들 果實들은 忠南大學校 農科大學 부속 과수원에서 試驗栽培된 것으로, 收穫時期 및 收穫 당시의 주요 기본적인 物性들은 표 1에서와 같다.

收穫 직후의 果實들을 서늘한 곳에서 4시간

Table 1. Agronomic data and physical characteristics of the fruits used in the quasi－static compression tests.

Fruits	Cultivar	Date of		Volume (m^3)	Weight (Kg_f)	Grade*
		full bloom	harvest			
Apple	Fuji	1991.5. 1	1991.11.7	3.129×10^{-4}	0.2625	56
Pear	Niitaka	1991.4.23	1991.10.1	3.830×10^{-4}	0.3801	38

Note :

* : No. of fruits per 15 kg_f(with standard corrugated shipping box)[49]

이상 안정을 취한 다음, 3± 1℃의 低溫室(rh, 85℃5%)과 15± 1℃의 常溫室(rh, 45± 5%)에 나누어 貯藏하였다.

實驗은 收穫 직후와 貯藏 후 10일 간격으로 실시하였으며, 매 회 實驗을 실시하기전 8시간 이상 室溫에 방치하여 果實의 溫度를 室溫과 平衡을 이루게 하였고, 實驗室의 溫度와 相對濕度는 가급적 17℃와 50%를 유지하도록 하였다.

壓縮實驗에 사용된 試片은 果實의 중심축에 수직한 방향으로 한 곳과 평행한 방향으로 아래 부위와 윗부위에서 각각 한 곳을 잡아 모두 3곳에서 cork borer를 이용하여 果實의 속살을 채취한 다음, 껍질을 포함하여 약 2mm를 잘라낸 후, 직경 17.6mm, 길이 20mm의 圓筒形 試片(cylindrical specimen)을 만들어 사용 하였다. (L/D＝1.14)

試片의 壓縮時 과대한 水分損失을 막기 위하여 0.05mm의 얇은 비닐로 試片을 코팅한 후 사용 하였다.

나. 實驗裝置 및 方法

본 硏究에서 果實의 壓縮實驗을 위하여 구성된 資料蒐集(Data Acqusition system) 및 實驗裝置의 개략도는 그림 1과 같다.

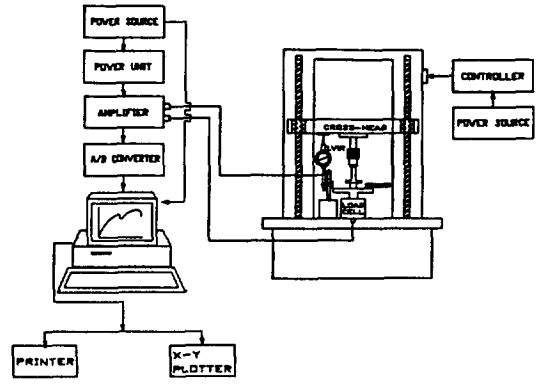

Fig. 1. Schematic and block diagram of compression test apparatus.

만능재료시험기의 crosshead가 일정한 速度로 두 평판 사이에 놓인 試片을 壓縮할 때, 試片이 받는 힘은 최종변환기 (Load cell)로, 그 때의 變形量은 선형변위계(LVDT)로 동시에 각각 감지되어 스트레인 증폭기(Amplifier)에서 증폭되어 나오는 전기적인 아날로그 신호(analogy signal)을 A/D 컨보터에 의하여 데지탈 신호(digital signal)로 바뀌여 퍼스날 컴퓨터에 내장된 하드디스크에 하나의 화일로 기록됨과 동시에 모니터 상으로 확인할 수 있도록 그래픽 프로그램을 개발 하였다. 이렇게 하드 디스크에 입력된 資料는 測度設定(calibration)에 의해 얻어진 수식에 의해 본 硏究에서 필요로 하는 힘과 變形量으로 변환하여 필요한 資料를 프린터로 출력 시킬 수 있는 프로그램을 개발 하였다.

본 硏究에서 사용된 주요 計測器와 그 제원을 표2에 나타 내었다.

荷重載荷速度는 ASAE standards S368.1[1]의

Table 2. Specifications of compression test apparatus and measuring system.

Items	Specifications	Remarks
Micro－computer	32bit, CPU 2MB memory (with 100MB Hard disk)	Model, 386－DX
A/D converter	16 channels, resolution 12bit	PCL－712
Dynamic strain Amplifier	6 channels, 2V excitation	Kyowa, CO－50ET
Load cell	50kg capacity	Kyowa, LU－50KE
Linear Variable Differential Trans－former(LVDT)	0.01(1/100)mm readability	Kyowa, DT－20D
Universal Testing Machine(UTM)	500kgf capacity, 0.05mm/min loading rate accuracy	Daeyoung

20～30mm/min 범위를 기준으로, 粘彈性 物体의 時間因子를 보다 더 세밀히 分析하기 위하여 이보다 크고 작은 범위인 5～125mm/min에서 7수준의 荷重載荷速度를 택 하였다.

3.結果 및 考察

가. 果實의 힘－變形 特性曲線

果實의 속살試片에 準靜的 壓縮荷重을 가할 때, Load cell에 의한 힘－時間 曲線과 LVDT에 의한 變形－時間 曲線을 각각 分析하여, 이를 평면좌표 위에 함께 나타 내면 그림 2와 같은 힘－變形의 特性曲線을 얻을 수 있다.

이러한 特性曲線으로 부터는 前述한 바와같이 여러가지 果實의 物理的 特性値들을 얻을

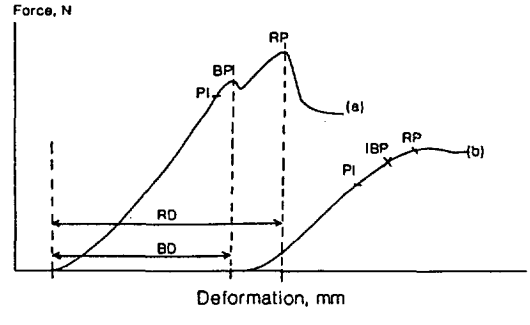

Fig. 2. Force － deformation characteristic curves for biomaterials.
(a)with bioyield point, (b)without bioyield point

수 있는 데, 본 硏究에서는 生物體降伏强度, 極限强度, 降伏變形量 및 極限變形量 등을 구하였

다.

대개의 農產物의 힘－變形 特性曲線은 sigmoid 型[1, 17, 20, 26, 28, 36]을 나타내며, 이는 農產物 내부에 존재하는 水分, 空隙 및 不均一한 물질로 인한 structure stiffening과 hydrostatic pressure가 주요 원인인 것으로 알려져 있으며[17, 25, 28, 36] 이 曲線 상에 처음 나타나는 변곡점이 農產物 損傷發生의 척도가 되는 生物體降伏點(Bioyield Point,BP) 이고, 두번 째의 변곡점이 破壞點(Rupture Point, RP)이 된다. 이러한 두점에서의 힘을 試片의 처음 단면적으로 나눈 값이 降伏强度(Bioyield Strength,BS)와 極限强度(Ultimate Strength,US)가 되며, 각 점에서의 試片의 變形量이 각각 降伏變形量(Bioyield Deformation, BD)과 極限變形量(Rupture Deformation,RD)이 된다.

그러나 果實에 따라서는 그 특성상 이 두 점이 뚜렷이 구별되어 나타 나지 않는 경우가 있다.[12, 13, 15, 20, 22] 본 硏究에서의 供試果實인 사과와 배를 대상으로 충분한 예비실험을 실시해 본 결과, 사과의 경우는 그림 2의 (a)와 같이 힘－變形 曲線 상에 두 점이 뚜렷하게 구별되어 나타 났으나, 배의 경우는 (b)와 같이 生物體降伏點을 찾기가 매우 힘들었다.

따라서 본 硏究에서는 배의 生物體降伏點을 破壞點에 도달하기 전의 변곡점(Point of Inflection,PI)과 破壞點의 두 荷重의 평균 값〈Imaged Bioyield Point,IBP〉으로 정의 하였다.

나. 果實의 生長方向에 따른 物理的 特性의 차이

果實은 生長方向에 따라 物理的 特性이 다르다는 것은 여러 硏究者들에 의하여 이미 많이 보고된 바 있다.[22~24, 39]

본 硏究에서는 收穫 직후의 果實을 4시간 이상 室溫에서 안정을 취한 다음, 그림 3에서 보는 바와같이 果實의 길이방향의 중심축을 중심으로 果實 폭의 되는 지점에서 위쪽에서 아래 쪽으로(A), 아래 쪽에서 위쪽으로(C), 그리고 果實의 측면에서 果實의 중심 축에 수직한 방향으로(B)

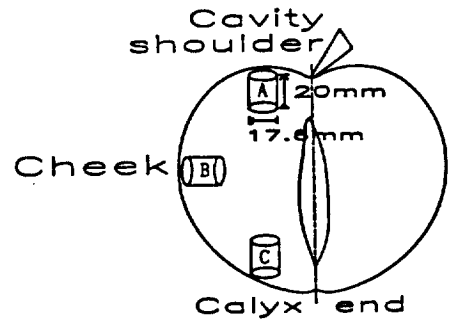

Fig. 3. Sampling position of the fruit.

圓筒形의 試片을 채취하여, 각 試片에 대하여 荷重載荷速度 25mm/min로 壓縮實驗한 결과를 그림 4와 5에 각각 도시하였다.

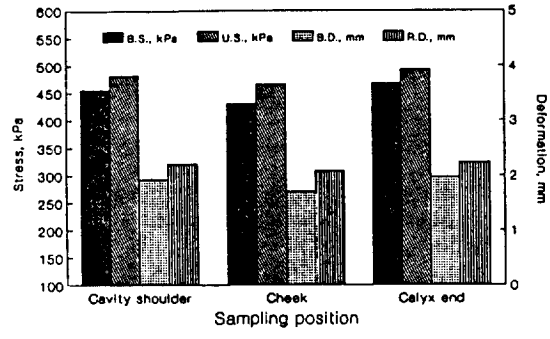

Fig. 4. Some physical properties of the apple flesh according to the sampling position at the loading rate of 25mm/min.

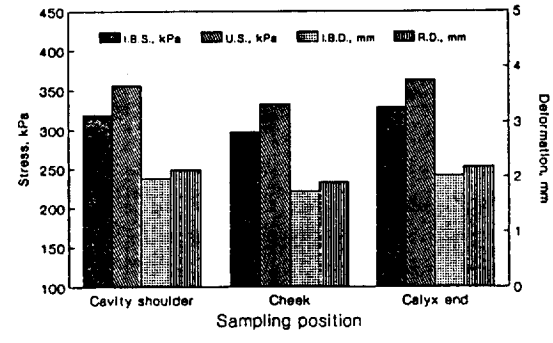

Fig. 5. Some physical properties of the pear flesh according to the sampling position at the loading rate of 25mm/min.

그림 4와 5에서 보는 바와같이 사과, 배 모두에서 果實의 측면에서 중심 축에 수직한 방향으로 채취한 試片에서 본 硏究에서 分析하려는 모든 物理量들이 가장 작게 나타 났으며, 중심 축을 중심으로 아래 쪽에서 위쪽으로 채취한 試片에서 가장 큰 값으로 나타났다.

이들 실험결과를 대상으로 F-檢定과 Duncan의 多重檢定(Duncan's multiple range test)을 실시한 결과, 표 3에서 보는 바와같이 두 果實 모두에서 본 硏究에서 分析하려는 物理量들이 試片의 채취 위치에 따라 고도의 有意差가 인정되었으며(1%, F-test), 사과에서는 生物體

Table 3. The results of statistical analysis of the bioyield strength, the ultimate strength, the bioyield deformation, and the rupture deformation of the fruit flesh according to the sampling position.

Fruits	Items	Sampling position	F - test		Duncan's multiple range test	
			F-value	f0.05(2,8)	LSD-value	Ranked order
APPLE	BS	A	43.26	4.46 (8.65)	5.8512 (8.5139)	C A B
		B				
		C				
	US	A	26.45		4.9887 (7.2589)	C A B
		B				
		C				
	BD	A	15.88		0.0652 (0.0949)	C A B
		B				
		C				
	RD	A	9.45		0.0461 (0.0671)	C A B
		B				
		C				
Pear	IBS	A	26.14	4.46 (8.65)	5.8770 (8.5513)	C A B
		B				
		C				
	US	A	42.00		4.5383 (6.6036)	C A B
		B				
		C				
	IBD	A	18.34		0.0652 (0.0949)	C A B
		B				
		C				
	RD	A	19.05		0.0652 (0.0949)	C A B
		B				
		C				

Note : ① underline : not significant at 5% level, ② ( ) : 1% level
③ A : cavity shoulder, B : cheek, C : calyx end
④ (I)BS : (Imaged) Bioyield Strength, US : Ultimate Strength,
(I)BD : (Imaged) Bioyield Deformation, RD : Rupture Deformation

降伏强度와 極限强度, 배에서는 生物體降伏强度 이외의 物理量에서 果實의 중심축을 중심으로 상하 양 끝단면에서 채취한 試片 사이에서는 차이가 인정되지 않았다. 그러나 果實의 측면에서 중심축에 수직한 방향으로 채취한 試片에서는 다른 부위에서 채취한 試片과는 본 硏究의 연구 대상인 모든 物理量에서 현저한 차가 인정되었다.(1%,Duncan's multiple range test)

따라서 같은 크기의 荷重이 果實의 각 방향에 작용되었을 때 果實의 측면에서 損傷을 입을 확율이 가장 크므로, 果實의 壓縮實驗을 비롯하여 應力弛緩이나 크리이프 실험시 試片은 果實의 측면에서 중심축에 수직한 방향으로(B) 채취하여야 할 것으로 思料된다.

이와 같은 결과는 Tsukamoto[39], Ishibashi와 Kojima[22]의 토마토, 사과, 배 및 복숭아에 대한 이들 果實들의 각 부위에 대한 衝擊 및 壓縮實驗의 결과와 매우 유사한 결과 이었다.

果實의 측면부위가 다른 부위에 비하여 生物體降伏强度 및 極限强度가 작게 나타 나는것은 果實의 측면 부위가 果樹에서 태양의 日射量을 가장 많이 받으므로 상대적으로 成熟이 빠른것이 가장 큰 원인이 되며, 또한 그 부분의 細胞의 크기가 다른 부위에 비하여 커서 단위 면적당의 細胞의 수가 적은 것이 다른 한 원인인 것으로 판단된다.

果實 試片의 破壞는 荷重의 作用方向과 약 45°를 이루고 있었는데, 이 면은 最大剪斷應力이 작용되는 면으로서, 이러한 사실로 부터 과실이 壓縮荷重을 받을때 果實의 破壞는 剪斷應力에 기인된다는 사실을 잘 알수 있다.[16, 19, 20, 26, 28, 30, 34, 37～40]

다. 荷重載荷速度가 果實의 降伏强度, 極限强度 및 變形量에 미치는 影響

收穫 直後의 사과 및 배로 부터 측면에서 중심축에 수직한 방향으로 채취한 試片에 대하여 荷重載荷速度 5～125mm/min 범위의 7 수준으로 壓縮實驗을 실시한 결과를 그림 6과 그림 7에 각각 도시 하였다.

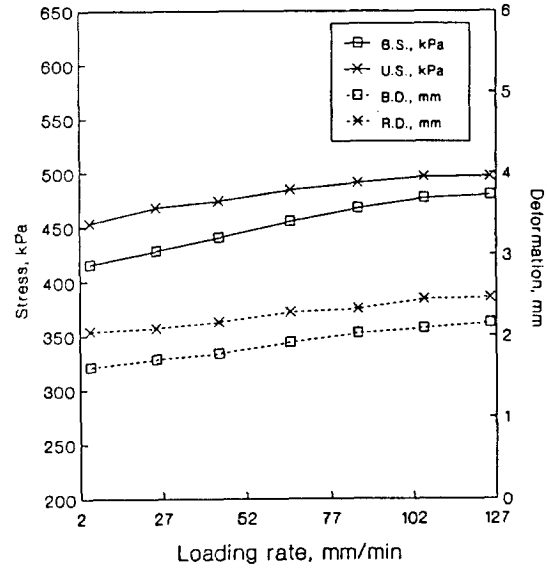

Fig. 6. Effect of the loading rate on the bioyield strength, the ultimate strength, the bioyield deformation, and the rupture deformation of the apple flesh.

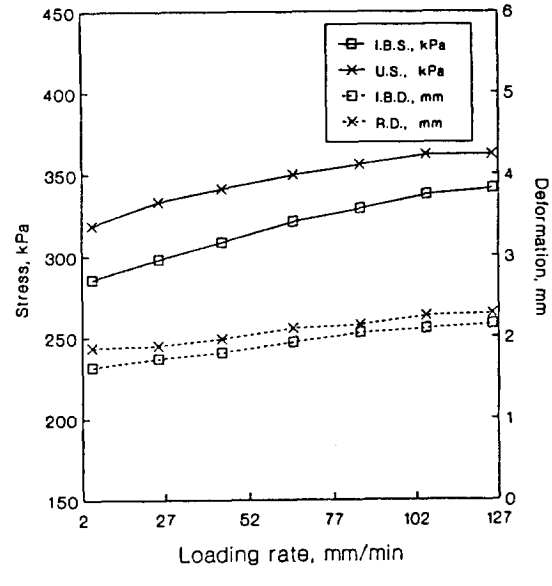

Fig. 7. Effect of the loading rate on the imaged bioyield strength, the ultimate strength, the imaged bioyield deformation, and the rupture deformation of the pear flesh.

대체로 본 硏究의 荷重載荷速度 범위 내에서, 荷重載荷速度가 증가할수록 두 果實 모두에서 본 硏究에서 分析하려는 모든 物理量들이 증가하는 경향으로 나타 났으며[12~16, 20, 26, 31, 32, 42, 43, 45], 荷重載荷速度 약 85mm/min 이상에서는 그 증가율이 점차 둔화되는 경향 이었다. 이 처럼 果實에서 荷重載荷速度가 어느 한도까지 증가함에 따라 生物體降伏强度와 極限强度가 증가하는 원인에는 여러가지의 요인이 있겠으나, 가장 큰 요인은 應力弛緩으로, 荷重載荷速度가 느린 경우는 荷重載荷와 동시에 應力弛緩이 함께 일어나기 때문에 荷重載荷速度가 빠른 경우 보다 같은 조건하에서 더 작은 應力이 載荷되었기 때문인 것으로 판단되며, 또한 荷重載荷速度가 빠를수록 試片의 structure stiffening과 hydrostatic pressure의 급격한 상승이 원인인 것으로 판단된다[25].

이 처럼 荷重載荷速度가 증가할 수록 生物體降伏强度와 極限强度가 증가하는 현상은 Fletcher[12] Fletcher등[13] Miles등[26]에 의하여 언급된 바 있으며, Fridley등[16]·Fridley와 Adrian[15]는 果實의 힘－變形 特性曲線이 荷重載荷速度가 증가함에 따라 또는 變形量이 적을 수록 彈性理論에 입각한 힘－變形 曲線에 근접하므로 果實은 더 彈性的으로 擧動한다고 보고한 바 있다.

본 硏究의 荷重載荷速度 범위인 5~125mm/min에서 果實의 生物體降伏强度는 사과가 약 415.4~479.6kPa, 배가 약 285.4~341.4kPa, 그리고 極限强度는 사과가 약 453.2~496.6kPa, 배가 약 318.7~362.1kPa로 사과가 배에 비하여 매우 큰 것으로 나타 났다.

그림 8은 收穫 후 사과를 3±1℃의 低溫室에 10일 간 貯藏 하였다가, 몇 수준의 荷重載荷速度로 試片을 1.5mm 變形 시킨 뒤 순간적으로 같은 荷重載荷速度로 제거되는 loading－unloading 과정을 나타 낸 그림으로, 각 cycle의 폐쇠된 구간의 면적은 loading－unloading 시의 損失된 일량을 나타 내는 값, 즉 hysteresis로 荷重載荷速度5~45mm/min 범위에서 약 0.31~0.16으로 荷重載荷速度가 증가함에 따라 감소하는 경향 이었으며, 彈性度(degree of elasticity)는 증가하는

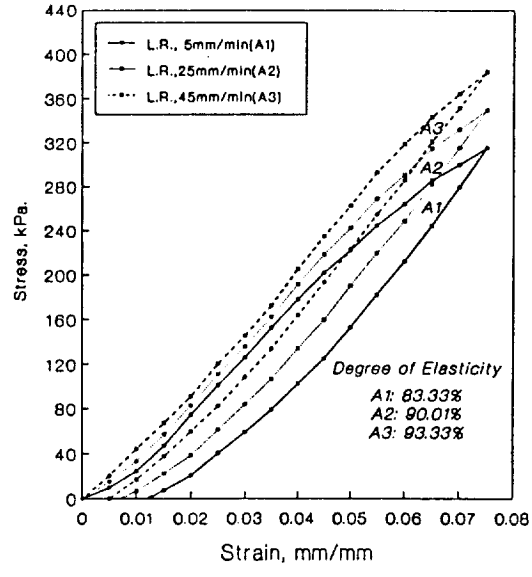

Fig. 8. Loading－Unloading curves for the apple flesh at the initial strainof 0.075mm/mm according to the loading rate.

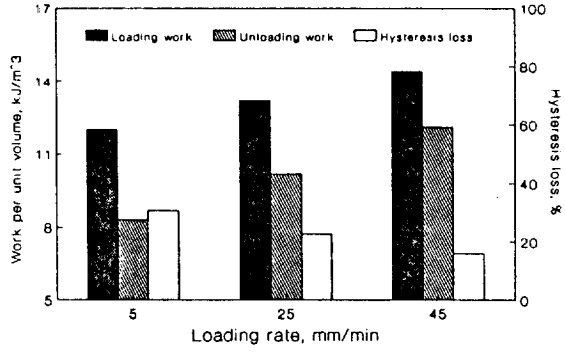

Fig. 9. Work done per unit volume at initial strain of 0.075mm/mm(1.5mm deformation) according to the loading rate.

것으로 나타 났다. 이는 그림 9에서 보는 바와같이 試片을 1.5mm 變形 시키는 데 試片에 작용된 試片의 단위 체적당의 일량이 荷重載荷速度가 증가함에 따라 증가되는 율이 荷重除去時의 회복되는 일량의 증가율에 비하여 작기 때문인 것으로 판단된다.

Hysteresis loss가 0.31~0.16 이라는 의미는

loading－unloading 시의 損失된 일량을 나타내는 의미 이외에 荷重載荷時의 총 입력에너지의 약 69～84 %가 試片에 저장되어 crack과 같은 破壞에 관여하는 에너지의 크기를 의미하는 것으로, 이 크기는 일단 crack이 시작되면 그 crack의 진행정도와 속도에 큰 영향을 주게된다. Holt와 Schoorl[18]는 이 에너지에 관련하여 crack되는 단위 면적당의 이 에너지의 크기를 Fracture resistance란 표현을 사용하였으며, 이 값은 貯藏期間과 음의 相關關係가 있음을 보고한 바 있다.

라. 果實의 貯藏條件 및 貯藏期間이 物理的 特性에 미치는 影響

果實은 살아있는 生命體로서 收穫 후에도 呼吸을 계속하게 된다. 果實의 軟化되는 속도는 일반적으로 收穫 후 果實의 呼吸作用 및 蒸散作用과 관계가 깊으며, 이들의 작용은 貯藏室의 溫度와 매우 깊은 관계가 있다. 즉 貯藏室의 溫度가 낮을 수록 果實의 呼吸作用과 蒸散作用을 억제 시킬 수 있어 그 만큼 果實로 부터의 水分蒸發을 막을 수 있기 때문에 果實이 軟化되는 速度를 지연 시킬 수 있다.[34,47,48]

따라서 본 硏究에서는 貯藏條件이 果實의 物理的 特性에 미치는 영향을 究明하기 위하여 收穫 후 果實을 15±1℃의 常溫室과 3±1℃의 低溫室에 나누어 貯藏하면서 10일 간격으로 壓縮實驗을 실시 하였다.

그림 10과 11에는 果實의 貯藏期間과 貯藏條件에 따라 果實의 生物體降伏點 과 極限强度를 도시한 그림이다.

이들 그림에서 보는 바와같이 貯藏期間이 길어질 수록 生物體降伏强度와 極限强度 모두 감소하는 경향 이었고, 그 감소율은 貯藏期間에 따라 점점더 컸으며, 常溫貯藏한 果實이 低溫貯藏한 果實에 비하여 그 감소율이 더 크게 나타났다. 따라서 貯藏室의 溫度가 이들 物理量에 미치는 효과는 收穫 후 貯藏期間이 길어질 수록 더욱 뚜렷하게 나타났다.

供試果實을 20일 貯藏하였을 때 사과의 경우,

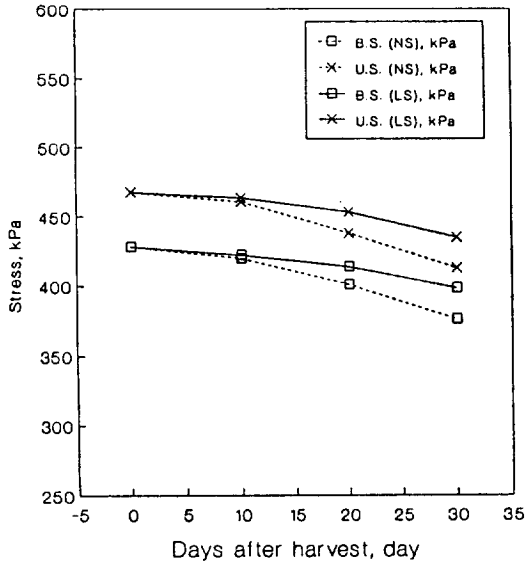

Fig. 10. Effect of the storage condition and the storage period on the bioyield and the ultimate strength of the apple flesh at the loading rate of 25mm/min.(NS : Normal Temperature Storage, LS : Low Temperature Storage)

生物體降伏强度는 低溫貯藏하였던 사과에서 약 3.4%, 常溫貯藏 하였던 사과에서 약 6.5% 감소하였으며, 極限强度의 경우는 低溫貯藏에서 약 3.2%, 常溫貯藏의 경우가 약 6.4% 감소한 것으로 나타 났다. 또한 배의 경우의 生物體降伏强度는 低溫貯藏에서 약 4.9%, 常溫貯藏의 경우가 10.3% 감소하였으며, 極限强度는 低溫貯藏에서 약 4.4%, 常溫貯藏의 경우가 약 8.6% 감소하였던 바, 두 果實 모두에서 生物體降伏强度가 極限强度에 비하여 貯藏期間에 따라 약간 더 크게 감소하는 것으로 나타 났으며, 일반적으로 배가 사과에 비하여 이 두 物理量의 감소율이 더 컸고, 低溫貯藏하였던 果實에서 보다는 常溫貯藏 하였던 果實에서 두 果實 간의 차이가 더 컸다.

이와같은 현상은 높은 溫度에 貯藏된 果實은 呼吸 및 蒸散作用이 활발하여 果實의 水分損失이 크고, 에틸렌(ethylene) 등의 老化 agent의 작용과 細胞壁의 붕괴(pectin)로 軟化가 촉진되

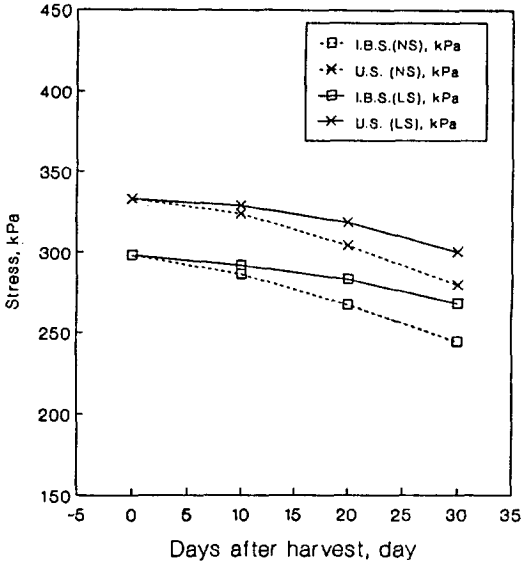

Fig. 11. Effect of the storage condition and the storage period on the imaged bioyield and the ultimate strength of the pear flesh at the loading rate of 25mm/min. (NS : Normal Temperature Storage, LS : Low Temperature Storage)

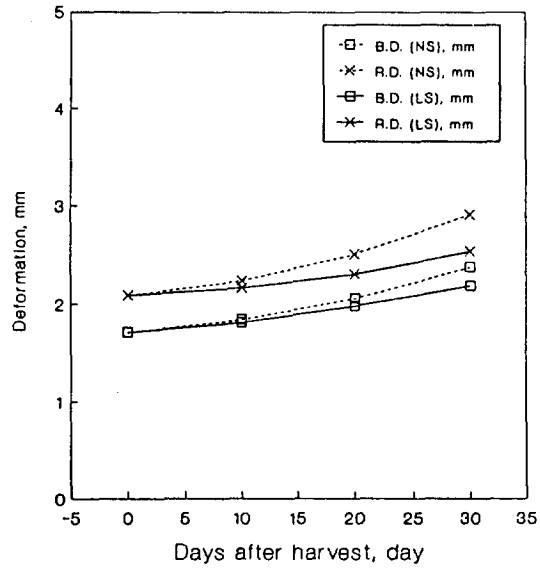

Fig. 12. Effect of the storage condition and the storage period on the bioyield and the rupture deformation of the apple flesh at the loading rate of 25mm/min. (NS : Normal Temperature Storage, LS : Low Temperature Storage)

었기 때문인 것으로 판단된다.

여기서 生物體降伏强度와 極限强度는 試片 채취 당시의 試片의 단면적을 기준으로 계산된 값이므로, 貯藏期間에 따른 降伏變形量 및 極限變形量의 증가에서 오는 단면적의 증가는 고려하지 않았기 때문에 실제 試片의 단면적을 기준으로 이들 物理量들을 계산 하였를 때는 이와는 다른 경향으로 나타 날 수도 있을 것으로 思料된다.

貯藏條件 및 貯藏期間에 따른 사과 및 배의 降伏變形量 과 極限變形量을 그림 12와 13에 각각 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 貯藏期間이 길어질수록 이들 두 物理量은 증가하는 경향 이었으며, 그 증가율은 常溫貯藏한 果實에서 더 크게 나타 났다.

供試果實을 20일 貯藏하였을 때, 사과의 경우 降伏變形量은 低溫貯藏하였던 사과에서 약 15.8 %, 常溫貯藏 하였던 사과에서 약 20.5%, 그리고 極限變形量은 低溫貯藏의 경우가 약 10.5%, 常溫貯藏의 경우가 약 20.1%가 收穫直後의 사과의 降伏變形量 및 極限變形量에 비하여 증가되는 것으로 나타 났다. 또한 배의 경우는 降伏變形量이 低溫貯藏에서 약 15.5%, 常溫貯藏의 경우가 약 20.7% 더 증가되었으며, 極限變形量은 低溫貯藏에서 약 11.6%, 常溫貯藏의 경우가 약 22.1 % 더 증가된 것으로 나타 났던 바, 사과와 배 두 果實 모두에서 貯藏條件에 따라서는 이들 物理量들이 뚜렷한 차이가 있는 것으로 나타났다.

4.結 論

이상에서 사과 및 배의 속살試片에 대하여 貯藏條件 및 貯藏期間 別로 壓縮實驗한 결과를 要約하면 다음과 같다.

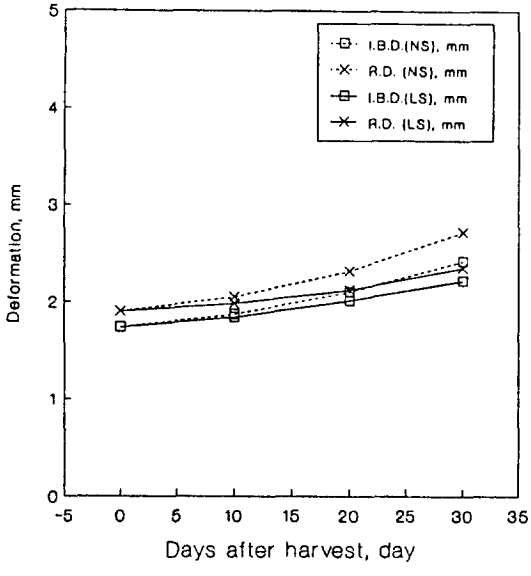

Fig. 13. Effect of the storage condition and the storage period on the imaged bioyield and the rupture deformation of the pear flesh at the loading rate of 25mm/min.(NS : Normal Temperature Storage, LS : Low Temperature Storage)

가.果實은 生長方向에 따라 物理的 特性이 매우 달랐으며, 果實의 측면에서 중심축에 수직한 방향으로 채취한 試片에서 본 硏究에서 究明한 모든 物理量들이 가장 작게 나타 났으며, 果實의 다른 부위에서 채취한 試片과 1%의 有意水準에서 그 有意差가 충분히 인정되었다.

나.荷重載荷速度가 果實의 生物體降伏强度, 極限强度, 降伏變形量 및 極限變形量에 미치는 영향은 매우 컷으며, 대체로 본 硏究의 荷重載荷速度 범위인 5～125mm/min에서 荷重載荷速度가 증가함에 따라 이들 物理量들은 증가하는 경향 이었다. 또한 荷重載荷速度가 증가함에 따라 Hysteresis loss는 감소하였으며, 彈性度는 증가하는 것으로 나타 났다.

다.果實의 貯藏條件과 貯藏期間에 따라 본 硏究에서 測定한 모든 物理量들은 뚜렷한 차이가 있었으며, 貯藏期間이 증가할 수록 生物體降伏强度와 極限强度는 감소하였으나 降伏變形量과 極限變形量은 증가하는 경향 이었는 데, 이들의 증감의 비율은 常溫貯藏한 果實에서 더 크게 나타 났다.

라. 대체로 사과에 비하여 배가 두 貯藏條件 모두에서 더 큰 폭으로 生物體降伏强度 및 極限强度가 감소하였으며, 降伏變形量 및 極限變形量 역시 배의 경우가 사과에 비하여 더 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다.

參 考 文 獻

1. ASAE Year Book. 1983. ASAE Standard S 368.1 : 332－335.
2. Baerdemaeker, J. G.D. and L. J. Segerlind. 1976. Determination of the viscoelastic properties of apple flesh.Trans. of the ASAE 17 (2) : 346－348, 353.
3. Bourne, M. C. 1974. Textural change in ripening peaches. Can. Inst. Food. Sci. Technol. J. Vol. 7. No. 1, 11－15.
4. Burkner, P. F. and D. M. Kinch. 1968. Force－Deformation ratio as an index of papaya maturation. Trans. of the ASAE 15(5) : 437－440.
5. Chappell, T. W. and D. D. Hamann. 1968. Poisson's ratio and Young modulus for apple flush under compressive loading. Trans. of the ASAE 15(6) : 608－610.
6. Chen, P. and H. E. Studer. 1977. Physical properties related to maturity and puffiness of flesh market tomatoes. Trans. of the ASAE 20(5) : 575－578.
7. Chen, P., M. Ruiz, F. Lu and A. A. Kader. 1987. Study of impact and compression damage on Asian pears. Trans. of the ASAE 30 (4) : 1193－1197.

8. Chen, P. and S. Chen. 1986. Stress relaxation functions of apples under high loading rates. Trans. of the ASAE 29(6) : 1754-1759.
9. Chuma, Y. S., S. Murata, and T. Kii. 1969. Measurement of relaxation spectrum of fruits and vegetables in natural shape. J. of JSAM 31(2) : 147-154.
10. Clevenger, J. T. and D. D. Hamann. 1968. The behavior of apple skin under tensile loading. Trans. of the ASAE 11(1) : 34-37.
11. Finney, E. F., Jr. and K. H. Norris. 1968. Instrumentation for investigation dynamic mechanical properties of fruit and vegetables. Trans. of the ASAE 11 (1) : 94-97.
12. Fletcher, S. W. 1971. Mechanical behavior of processed apples. Trans. of the ASAE 14(1) : 14-19.
13. Fletcher, S. W., N. N. Mohsenin, J. R. Hammerle and L. D. Turkey.1965. Mechanical behavior of selected fruits and vegetables under fast rate of loading. Trans. of the ASAE 8(3) : 324-326.
14. Fridley, R. B., H. G ehlich, L. L. Claypool, and P. A. Adrian. 1964. Factors affecting impact injury to mechanically harvested fruit. Trans. of the ASAE 7(5) : 409-411.
15. Fridley, R. B. and P. A. Adrian. 1966. Mechanical properties of peaches, pears, apricots and apples. Trans. of the ASAE 9(1) : 135-138, 142.
16. Fridley, R. B., R. A. Bradley, J. W. Rumsey and P. A. Adrian. 1968. Some aspects of elastic behavior of selected fruits. Trans. of the ASAE 11(1) : 46-49.
17. Gyasi, S., R. B. Fridley and P. Chen. 1981. Elastic and viscoelastic Poisson's ratio determination for selected citrus fruits. Trans. of the ASAE 24(3) : 747-750.
18. Holt, J. E. and D. Schoorl. 1984. Mechanical properties and texture of stored apples. J. of Texture Studies 15(4) : 377-394.
19. Horsfield, B. C., R. B. Fridley and L. L. Claypool, 1972. Application of theory of elasticity to the design of fruit harvesting and handling equipment for minimum bruising. Trans. of the ASAE 15(4) : 746-750.
20. Huff, E. R. 1967. Tensile properties of Kennebec potatoes. Trans. of the ASAE 10(4) : 414-419.
21. Hung, Y. C. and S. E. Prussia. 1989. Effect of maturity and storage time on the bruise susceptibility of peaches(CV. Red Globe). Trans. of the ASAE 32(4) : 1377-1382.
22. Ishibashi. S. and T. Kojima. 1970. 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.
23. Kojima, T. 1975. Study on the physical properties of horticultural products (I) - on the shape and mechanical properties of cucumber. J. of JSAM 36(4) : 549-554.
24. Kojima, T. and S. Ishibashi.1970. Studies on mechanical properties of agricultural products(Part III)- on strength change of apples, pears and peaches after harvest. J. of JSAM 32(2) : 145-149.
25. Lee, Y. C., J. R. Rosenau and M. Peleg. 1983. Rheological charactization of TOFU. J. of Texture Studies 14(2) : 143-154.
26. Miles, J. A. and G. E. Rehkugler. 1973. A failure criterion for apple flesh. Trans. of the ASAE 16(6) : 1148-1153.
27. Mohsenin, N. N. and H. G. Göehlich. 1962. Techniques for determination of mechanical properties of fruits and vegetables as related to design and development of harvesting and processing machinery. J. of agricultural engineering

Research 7(4) : 300－315.

28. Mohsenin, N. N. 1980. Physical properties of plant and animal materials.
Gorden and Breach science publishers, N. Y.
29. Mohsenin, N. N., H. E. Cooper, and L. D. Tukey. 1963. Engineering approach to evaluating textural factors in fruit vegetables. Trans. of the ASAE 6(1) : 85－88, 90.
30. Mohsenin, N. N., V. K. Jindal and A. N. Manor. 1978. Mechanics of impact of a falling fruit on a cushioned surface. Trans. of the ASAE 21(2) : 594－600.
31. Rao, V. N. M., J. R. Hammerle and D. D. Hamann. 1974. Uniaxial modulus of sweet potato flesh using various types of loading. Trans. of the ASAE 17(5) : 956－959.
32. Rao, V. N. M., D. D. Hamann and A. E. Purcell. 1976. Dynamic structural properties of sweet potato. Trans. of the ASAE 19(2) : 771－774.
33. Rider, R. C., R. B. Fridley and M. O'Brien. 1973. Elastic behavior of a pseudo－fruit for determining bruise damage to fruit during mechanized handling. Trans. of the ASAE 16(2) : 241－244.
34. Rumsey, T. R. and R. B. Fridley. 1977. Analysis of vscoelastic contact stresses in agricultural products using s finite－element method. Trans. of the ASAE 20(1) : 162－167, 171.
35. Sharma, M. G. and S. S. Rafie. 1983. Rheological constitutive relations for the apple cortex. J. of Rheology 27(6) : 637－657.
36. Sitkei, Gy. 1986. Mechanics of agricultural materials. Elsevier Science Publishers. 114－283.
37. Sitkei, Gy. and I. Bajsz and I. Nagy. 1979. Reducing of apple fruit damage using cushioning materials. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, Tomus 89 : 353－362.
38. Tsukamoto, M. 1979. Studies on the mechanical injury of fruit : I. Degree of bruising in peach fruits as related to maturity, size of fruit and
location damaged. J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 48 (3) : 374－380.
39. Tsukamoto, M. 1981. Studies on the mechanical injury of fruit : II. Susceptibility to impact and compression in apple fruit as related to storage
periods and fruit portions. J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 49(4) : 571－575.
40. Tsukamoto, M. 1981. Studies on the mechanical injury of fruit : III. The resistitivities of fruits of Japanese pear and oriental persimmon to impact
and compression. J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 49 (4) : 576－582.
41. Wang, J. K. and Hang－sun Chang. 1970. Mechanical properties of papaya and their dependence on maturity. Trans. of the ASAE 13(3) : 369－371.
42. Wright, F.S. and W.E. Splinter. 1968. Mechanical behavior of sweet potatoes under slow loading and impact loading. Trans. of the ASAE 11(5) : 765－770.
43. Wright, F. S. and W. E. Splinter and L. J. Kushmann. 1968. Influence of variety, time from harvest and storage conditions on mechanical behavior of sweet potatoes. Trans. of the ASAE 11(1) : 81－85.
44. Zoerb, G. C. 1967. Instrumentation and masurement techniques for determining physical properties of farm products. Trans. of the ASAE 10(1) : 100～109, 113.
45. 金滿秀, 金聲來, 朴鍾民, 明炳洙. 1990. 벼의 生物體 降伏强度 및 極限强度.
韓國農業機械學會誌 15(2) : 99－109.
46. 金滿秀, 朴鍾民. 1991. 果實 包裝用 填充物의 適正두께 豫測과 果實의 許容山積높이 및

山積期間 豫測模型. 韓國農業機械學會誌 16 (3) : 281－289.
47. 김정호 외, 果樹園藝 總論, 향문사.
48. 김종천 외, 果樹園藝 各論, 향문사.
49. 農產物 標準出荷規格集. 1990. 農協協同組合中央會.

祝

學位取得

姓　　名：曺 光 煥
生 年 月 日：1955年 3月 10日
勤 務 處：農業機械化研究所
取得學位名：農學博士
學位授與大學：日本筑波大學
學位取得年月日：1992年 3月 25日
學 位 論 文：籾のマイクロ 波乾燥に關する基礎的研究

祝

學位取得

姓　　名：金 在 烈
生 年 月 日：1949年 5月 17日
勤 務 處：尚州 產業大學
取得學位名：農學博士
學位授與大學：慶北大學校 大學院
學位取得年月日：1992年 2月 25日
學 位 論 文：고추의 熱風 및 遠赤外線 乾燥特性 比較研究