휨荷重을 받는 오이의 力學的 特性

Mechanical Properties of Cucumber under Bending Force

金滿秀* 宋天鎬** 朴鍾民*
M. S. Kim C. H. Song J. M. Park

Summary

Cucumbers being living biological materials are generally vulnerable to external forces, especially, bending force during the processes, because they have usually longish shape. Understanding the mechanical and viscoelastic properties of cucumber is important to analyze various characteristics which might be helpful in determining design parameters for the processing equipment such as sorting, packaging and transporting machine.

The objectives of this study were to determine ultimate bending strength, deflections, and hysteresis losses for the cucumbers from the bending tests.

Within the range of loading rate from 20 to 100mm/min, the ultimate bending strength of the cucumber samples were 525~630kPa at the Gyeousalicheongjang and the Baekdadagi, and 476~618kPa at the Cheongjangmadi, respectively, but the ultimate bending deflection ratio of the Cheongjangmadi showed the highest value among the tested samples.

The effect of loading rate on the physical properties of the cucumber was relatively significant, all considered physical properties and degree of elasticity of the cucumber increased with the loading rate, but the hysteresis loss decreased with it.

Ⅰ. 緖 論

우리나라의 果菜類 總生產量은 '89년도 약 1,209천 M/T에서 '91년도 1,496천 M/T으로 2년 사이에 약 23.7% 증가하였다. 이중 오이는 資本, 勞動 및 土地生產性이 높고 生育期間이 짧아 收益性이 높은 果菜類로서, 최근 시설하우스의 보급 확대에 따른 栽培技術의 發達로 '89년도 약 212천 M/T에서 '91년도 약 267천 M/T으로 약 26% 증가하였고, 이는 전체 果菜類 生產量의 약 17.8%에 해당되는 양이다.[20]

대부분의 果菜類는 살아있는 生物體로서 特性上 外力에 매우 敏感하며, 收穫時나 收穫 後 여러 處理段階에서 여러형태의 外力에 의하여 損傷을 입는 경우가 많다.

이 外力의 形態는 農產物의 形狀과 밀접한 관계가 있다.[9,14] 즉, 球型의 果實類는 주로 壓縮 및 衝擊荷重을 받게되나, 오이를 비롯하여 가지, 고추 등의 果菜類는 그 形狀이 길쭉하기 때문에 이들이 받는 荷重은 주로 휨荷重이 된다.

農產物의 휨實驗時 荷重을 가하는 방법으로는 3점

* 忠南大學校 農業機械工學科
** 農村振興廳 園藝試驗場

荷重載荷方法[2,4,5,7,8,13]과 외팔보型 荷重載荷方法[5,6,12,15,16]이 있으나, 외팔보型의 荷重載荷方法은 試片의 한쪽 끝을 固定裝置로 固定하여야 하므로, 이로 인하여 고정된 試片部位가 壓傷될 위험이 있다. 이러한 점은 引張實驗時 試片의 고정에서 오는 어려운 점과도 같다. 따라서 대부분의 硏究者들은 휨 實驗時 3점 荷重載荷方法을 사용하고 있다.

Prince[12]는 牧草줄기에 대하여 3점 荷重載荷方式의 휨 實驗을 통하여 牧草의 단위 길이당의 무게 즉, 線型密度(linear density)와 極限 휨强度와의 관계를 究明하였는바, 이들 사이에는 직선적인 관계가 있다고 하였다.

Moustafa 等[11]은 밀 줄기에 대하여 휨 및 壓縮實驗을 통한 휨－變形曲線의 직선부위로부터 각 경우의 彈性係數를 계산하였는 바, 휨實驗을 통한 彈性係數가 壓縮實驗에 의한 값보다 컸는 데, 이는 壓縮實驗時의 試片 양끝에서의 미끄럼으로 試片의 變形이 실제의 값보다 크게 測定되었기 때문이라고 하였다.

Balastreire와 Herum[4]은 옥수수胚乳(corn endosperm)를 단순보로 가정하고 여러 含水率및 溫度水準에서 弛緩彈性率을 測定하여, 溫度 및 含水率의 變動係數(shift factor)를 계산하므로써 弛緩彈性率과 時間으로 표현되는 하나의 곡선식을 통하여 溫度 및 含水率이 弛緩彈性率에 미치는 영향을 究明하였다.

Anazodo[1]는 옥수수속(corn cob)을 경사진 종합보(tapered composite beam)로 가정하고, 휨荷重 下에서의 휨强度와 彈性係數를 계산하기 위한 理論式을 유도하였으며, 계산된 이 두 物理量들은 옥수수品種, 收穫時期 및 含水率 등에는 큰 영향을 받았으나 荷重載荷速度에 따라서는 큰 차이가 없었다고 하였다.

Suggs와 Spinter[15]는 담배줄기를 경사진 외팔보로, Morita 와 Taya[8]는 벼줄기를 단순보로 간주하고 각각 이들의 휨特性을 究明한 바 있으며, Curtis 와 Hendrick[5]도 牧草줄기에 대하여 휨實驗 方法을 적용시켜 각각에 대한 휨特性을 究明한 바 있다.

先進外國의 경우는 果菜類를 비롯하여 食品材料에 대하여 이 분야의 硏究가 비교적 활발히 진행되고 있으나, 國內의 경우는 일부에서 벼를 비롯하여 果菜類에 대한 硏究[17,18,19]가 진행되고 있으나 아직 매우 빈약한 편이며, 더구나 우리나라의 오이에 대한 硏究結果는 전무한 실정이다.

따라서 本 硏究에서는 收穫直後 휨荷重에 대한 오이의 力學的 特性을 究明하기 위하여 휨實驗裝置를 구성하고, 오이의 品種 및 荷重載荷速度에 따른 휨强度, 처짐량 및 履歷損失등을 究明하고자 한다.

II. 휨모멘트에 대한 휨應力의 理論的 考察

오이의 形狀은 길쭉하고 대부분의 오이의 단면적은 위치에 따라 다르다. 이러한 形狀을 하고 있는 오이에 대하여 휨 荷重을 작용시켜 오이의 휨 應力 및 처짐량을 分析하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

① 오이의 斷面은 껍질(bark), 속살 및 연한고갱이(soft pith)부분으로 이루어진 非均質이나 分析의 편의를 위하여 오이의 전 단면은 均質인 것으로 가정한다.

② 오이는 길이방향으로 경사(linear tapered)져 있으며, 수평중심축에 대하여 상하 대칭이다.

③ 휨 荷重을 작용시키기 위하여 오이를 單純支持보(simple supported beam)로 보고 오이 중앙점에 集中荷重만 작용시킨다.

④ 오이의 自重으로 인한 처짐은 무시한다.

이상의 가정하에서 그림 1과 같이 b점에 集中荷重 F가 작용하고 있을때, a점으로부터 임의의 거리 x의 단면에 작용하는 最大휨應力은 다음과 같이 표시된다.

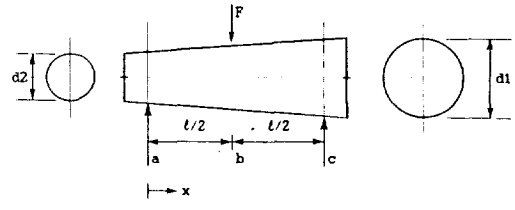

Fig. 1. Uniformly tapered beam used for analysis of simple bending of the sample.

$$\sigma_{max}(x)=\frac{M(x)\cdot c(x)}{I(x)} \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서,

M(x)＝임의의 x점에 있어서의 휨모멘트

I (x)＝임의의 x점에 있어서의 단면 2차 모멘트

c (x)＝임의의 x점에 있어서의 중립면으로부터 표면까지의 거리

a점으로 부터 임의의 거리 x에서의 단면 2차 모멘트, 휨모멘트 및 중립축으로 부터의 거리 c(x)는 다음과 같이 각각 표시된다.

$$I(x)=\frac{\pi d^4(x)}{64}=\frac{\pi}{64}\left[d_1-\frac{(d_1-d_2)}{\ell}x\right]^4 \quad \cdots (2)$$

$$M(x)=\frac{F}{2}x \quad \cdots (3)$$

$$c(x)=\frac{d_1\ell-(d_1-d_2)x}{2\ell} \quad \cdots (4)$$

集中荷重이 작용하는 試片의 중앙점에서 휨모멘트가 최대가 되므로, 그 지점에서 의 最大휨應力(max. bending stress, 이하 휨應力)은 다음과 같이 誘導된다.

$$\sigma_{max(x=\ell/2)}=\frac{8F\ell}{\pi}\left[\frac{(d_1+d_2)}{2}\right]^{-3} \quad \cdots (5)$$

위의 휨應力에 관한 수식에서 단면 2차 모멘트는 試片의 斷面形狀과 크기에 큰 영향을 받으며, 결국 단면의 크기를 얼마나 정확하게 測定하느냐에 따라 계산되는 휨應力의 크기를 크게 좌우할 것이므로 가능한한 단면을 정확하게 測定할 필요가 있다.

이와 관련하여 Moini 等[7], Gowin과 Hamman[6]은 彈性係數 대신 彈性係數와 단면 2차 모멘트의 곱인 EI를 각각 휨剛性(bending stiffness)과 굽휨剛性(flexural rigidity)이란 物理量으로 각자의 실험대상 農產物의 휨特性을 說明하였다.

式(5)를 粘彈性 物體에 적용시키기 위해서는 荷重 F를 시간의 함수인 F(t)로 바꿔줘야 한다. 따라서 式(5)로 부터 휨荷重－時間의 資料를 대입하므로써 휨 應力을 계산할 수 있다.

$$\sigma_{max}(t)=\frac{8F(t)\ell}{\pi}\left[\frac{(d_1+d_2)}{2}\right]^{-3} \quad \cdots (6)$$

III. 材料 및 方法

가. 實驗材料

본 硏究에 使用된 供試材料는 우리나라에서 많이 栽培되고 있는 오이品種인 청장마디(Cheongjangmadi), 겨우살이청장(Gyeousali-cheongjang) 및 백다다기(Baekdadagi)의 3種이었다. 이들 오이들은 農村振興廳 園藝試驗場의 비닐하우스 속에서 試驗栽培된 것으로, 1992年 6月 30日 滿開狀態에 있는 오이를 選擇的으로 샘플링하여 滿開日로부터 10일째 되는날 샘플링된 오이를 일괄 收穫하였다.

收穫 당시의 供試材料의 主要 物理的 特性들은 表 1에 표시하였다.

收穫直後의 오이는 서늘한 곳에서 4시간 이상 안정을 취한 다음 實驗時 까지 3℃의 低溫室에 貯藏하였으며, 실험시작 5시간 전에 室溫에 방치하여 室溫과 平衡을 이루게 하였다.

實驗의 試片으로는 原形의 오이를 사용하였으며, 實驗變數의 각 조합에서 반복수는 10회로 하였다.

Table 1. Agronomic data and physical characteristics of the cucumber used in this study

Cultivar	Date of		Volume	Weight	True density	Length
	full bloom	harvest	(m^3)	(kg)	(kg/m^3)	(m)
Baek dadagi	1992.6.30	1992.7.10	2.5891×10^{-4} (0.2663×10^{-4})	0.2509 (0.0266)	98.6740 (0.4138)	0.2680 (0.0180)
Cheongja-ngmadi	1992.6.30	1992.7.10	2.0668×10^{-4} (0.4638×10^{-4})	0.1868 (0.0330)	93.9408 (11.9126)	0.3367 (0.0210)
Gyeousali cheong jang	1992.6.30	1992.7.10	3.1076×10^{-4} (0.5855×10^{-4})	0.2904 (0.0411)	96.1315 (6.8147)	0.2785 (0.0254)

Note : ( ) Standard devitation

나. 實驗裝置 및 方法

본 硏究에서 오이에 휨荷重을 가하기 위한 實驗裝置와, 이 裝置로 부터 오이가 받는 휨荷重과 처짐량을 시간에 따라 연속적으로 測定하기 위한 資料蒐集裝置의 槪略圖는 다음의 그림 2와 같다.

오이에 휨荷重을 가할 때 휨荷重을 가하는 道具와 試片을 지지하는 지지대의 크기 및 形態는 매우 중요한 의미를 갖게 된다. 휨荷重을 가하는 道具는 대부분 棒을 이용하는 데 棒의 직경이 너무 작을 경우는 오이 試片에 剪斷力이 주로 작용되어 剪斷破壞를 일으킬 위험이 있고, 棒의 직경이 너무 클 경우에는 오이에 순수한 集中휨荷重을 가할 수 없게 된다. 또한 지지대의 棒은 試片과의 摩擦을 감소시키기 위해 자유로이 회전할 수 있게 하는것이 중요하다.

본 硏究에서는 이러한 문제점들을 충분히 고려하여 휨荷重을 가하는 道具와 지지대 奉의 직경을 12.5mm로 하였으며, 試片과 지지대 사이의 거리는 여러 오이品種의 크기를 고려하여 일률적으로 116mm로 하였다.

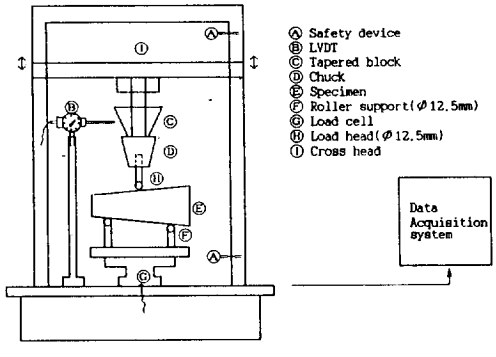

Fig. 2. Block diagram of bending test apparatus.

荷重載荷速度는 ASAE standards S368.1[3])의 20~30mm/min 범위를 기준으로 荷重載荷速度의 효과를 보다 더 세밀히 분석하기 위하여, 이 범위의 한 수준과 이 보다 큰 범위에서 4 수준의 荷重載荷速度를 택하였다.

Ⅳ. 結果 및 考察

가. 오이의 휨强度와 極限처짐率

오이에 準靜的 휨荷重을 가할 때, 荷重變換器에 의한 힘-時間 曲線과 線型變位計에 의한 처짐-時間 曲線을 각각 分析하여, 이를 평면좌표 위에 함께 나타내므로서 이 곡선으로 부터 生物體 降伏휨强度, 極限휨强度 및 처짐량과 같은 物理量들의 정보를 얻을 수 있다.

대개의 農産物은 壓縮荷重 下에서 힘-變形의 特性曲線은 S字 型(sigmoid type)을 나타내며, 이는 農産物 內部에 존재하는 水分 및 空隙等과 그 材質이 非均質(heterogeneous material)이기 때문인 것으로 알려져 있다.[9,14,19] 이 곡선 상에 처음 나타나는 變曲點이 農産物 損傷發生의 척도가 되는 生物體降伏點(bioyield point)이고, 두번 째의 變曲點이 破壞點(rupture point)이 된다. 이러한 두 점에서의 힘을 試片의 처음 단면적으로 나눈 값이 각각 降伏强度(bioyield strength)와 極限强度(ultimate strength)가 되며, 각 점에서의 試片의 變形量이 각각 降伏變形量(bioyield deformation)과 極限變形量(rupture deformation)이 된다.

그러나 供試材料인 오이를 對象으로 충분한 豫備實驗을 실시해 본 결과, 破壞點은 그 곡선상에 뚜렷하게 나타났으나 破壞點 전에 나타나는 生物體降伏點은 거의 나타나지 않았다. 이는 農産物이 壓縮荷重 下에서 S字 型을 나타내는 반면, 본 硏究에서와 같이 휨荷重 下에서는 荷重-처짐의 곡선은 위로 볼록한 2차식의 형태(convex type)로 나타나기 때문이다.

그림 3은 式(6)으로 부터 계산된 오이의 品種別로 荷重載荷速度에 따른 極限휨强度(UBS)와 極限처짐率(RDR)을 나타 낸 그림이다. 極限휨强度는 대체로 荷重載荷速度가 증가할 수록 증가하였으며, 겨우살이청장과 백다다기는 약 525~630kPa로서 거의 차이가 없는 반면, 청장마디는 이들보다 약간 작은 값인 476~618kPa로 나타났으며, 이러한 品種間의 차이는 表 2의 統計分析 결과에도 잘 나타나 있다.

Table 2. The results of statistical analysis of the ultimate bending stress and rupture defletion ratio of the cucumber according to the cultivar

Items	Cultivar	Duncann's multiple range test	
		LSD-Value	Ranked order
Ultimate bending stress	Cheongjangmadi(C) Baekdadagi(B) Gyeousalicheongjang(G)	6.1471	G B C
Rupture deflection ratio	Cheongjangmadi(C) Baekdadagi(B) Gyeousalicheongjang(G)	0.0322	C G B

Note ; Underline : not significant at 5% level

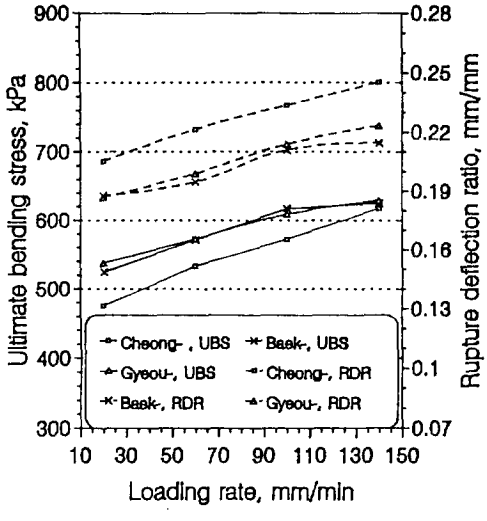

Fig. 3. Effect of the loading rate on the ultimate bending stress and the rupture deflection ratio of the cucumber.

또한 極限처짐率(RDR)은 試片의 길이와 極限처짐量의 비로서 荷重載荷速度가 증가함에 따라 이 역시 증가하는 것으로 나타났으며, 이에대한 統計分析 결과에서도 겨우살이청장과 백다다기 간에는 차이가 없음을 알 수 있다.

나. 오이의 履歷損失과 彈性度

그림 4, 5 및 6에는 오이의 각 品種別로 몇수준의 荷重載荷速度로 오이의 중간부위를 15mm까지 처지게한 후 순간적으로 같은 荷重載荷速

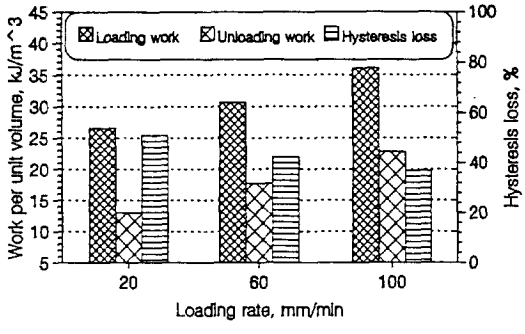

Fig. 4. Work done per unit volume for the Cheongjangmadi cucumber at initial deflection ratio of 0.1293㎜/㎜.

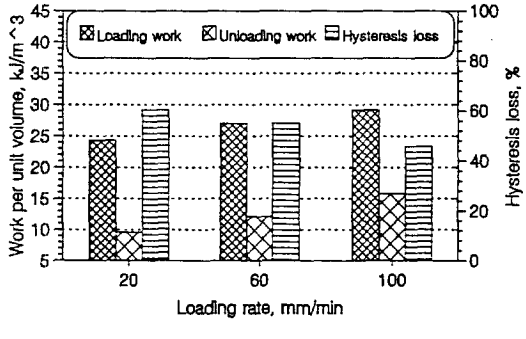

Fig. 5. Work done per unit volume for the Baekdadagi cucumber at initial deflection ratio of 0.1293㎜ /㎜.

度로 回復시키는 과정에서의 오이가 받은 일량, 損失된 일량 및 回復되는 일량과의 관계를 나타낸 그림이다.

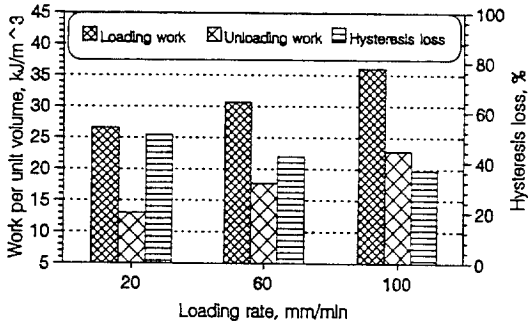

Fig. 6. Work done per unit volume for the Gyeousalicheongjang cucumber at initial deflection ratio of 0.1293㎜/㎜.

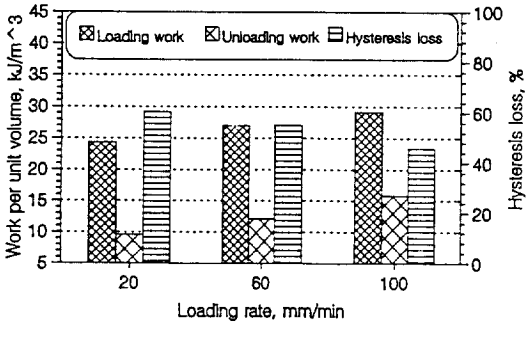

Fig. 7. Effect of the loading rate on the degree of elasticity of the cucumber at initial deflection ratio of 0.1293㎜/㎜.

荷重載荷 및 除去시에 형성되는 荷重－變形 곡선의 면적의 차는 荷重載荷－除去時의 損失된 일량을 나타내는 값이고, 이 값과 荷重載荷時의 오이에 대한 총일량과의 비가 履歷損失(hysteresis loss)이다. 모든 供試材料에서 荷重載荷速度가 증가함에 따라 履歷損失은 감소하는 경향이었는 데, 이는 試片을 일정량 처지게 하는 데 試片에 작용된 단위 체적당의 일량이 荷重載荷速度가 증가함에 따라 증가되는 率이 荷重除去時의 回復되는 일량의 증가율에 비하여 작기 때문인 것으로 판단된다.

대체로 供試오이 品種 中 청장마디의 履歷損失이 가장 큰 반면, 겨우살이청장이 가장 작은 값을 나타내었다. 荷重－變形 곡선에서 總變形量에 대한 荷重除去時(回復時)의 回復된 變形量의 비인 彈性度(degree of elasticity)는 그림 7과 같이 荷重載荷速度가 증가할 수록 증가하는 것으로 나타났다.

일반적으로 다른 農産物에서는(벼, 果實) 彈性度가 크면 履歷損失은 작게 나타났으나 오이에서는 彈性度가 모든 供試品種에서 대체로 컸을 뿐만 아니라 履歷損失도 크게 나타났다. 이러한 현상은 오이가 벼나 果實에 비하여 훨씬 더 非均質이고 組織成分의 차이인 것으로 판단된다.

V. 結 論

우리나라의 果菜類 中 상당 비율을 차지하고 있는 오이를 대상으로 본 硏究에서 구성한 횡實驗裝置를 사용하여 收穫直後의 오이의 力學的 特性을 測定한 결과를 要約하면 다음과 같다.

1) 荷重載荷速度 20～100mm/min 범위에서 오이의 極限휨强度는 겨우살이청장 및 백다다기에서 525～630kPa, 청장마디 476～618kPa로서 供試品種 中 청장마디가 가장 작은 값을 나타내었으며, 오이의 휨强度는 荷重載荷速度와 함께 증가하였다.

2) 오이의 極限처짐率은 같은 조건하에서 供試品種중 청정마디 오이가 가장 큰 값을 나타내었으며, 대체로 荷重載荷速度가 증가할수록 증가하였다.

3) 청장마디의 履歷損失은 다른 供試品種에 비하여 약간 크게 나타났으며, 荷重載荷速度가 증가할 수록 履歷損失은 감소하였으나 彈性度는 증가하는 것으로 나타났다.

參 考 文 獻

1. Anazodo, U.G.N. 1983. Mechanical properties of the corn cob under quasi-stat ic radial compression. Trans. of the ASAE 25(5) : 1222-1228.

2. Anazodo, U.G.N. 1983. Mechanical properties of the corn cob in simple bending. Trans. of the ASAE. 25(5) : 1229-1233.
3. ASAE Year Book. 1983. ASAE Standard S 368.1 : 332-335.
4. Balastreire, L.A. and F.L. Herum. 1978. Relation modulus for corn endosperm in bending . Trans. of the ASAE 21(2) : 767-772.
5. Curtis, L.M. and J.G. Hendrick. 1969. A study of bending-strength properties of cotton stalks. Trans. of the ASAE 12(1) : 39-40, 45.
6. Gowin, J. and J.S. Hamman. 1984. Feasibility of using holographic interfero-metry to determine the mechanical properties of wheat stalks. Trans. of the ASAE 27(3) : 697-700.
7. Moini, S., J.A. Miles, and P. Chen. 1981. Physical properties of ponderosa pine tree. Trans. of the ASAE 24(4) : 1058-1061.
8. Morita, Noboru and Taya, Nobuhisa. 1957. Studies in rice-straw dynamics with reference to lodging. Part II (in Japanese). Laboratory of Agricultural Engineering, Hirosaki U., Hirosaki, Japan.
9. Mohsenin,N.N. 1970. Physical properties of plant and animal materials.Gordon and Breach Science Publishers.N.Y.
10. Moustafa, S.M.A., B.A. Stout, and W.A. Bradley. 1968. Elastic and inelastic stability of a biological structure. J. Agric. Engng Res 13 (1) : 64-82.
11. Pickett, L.K., J.B. Liljedahl, C.G. Haugh, and A.J. Ulstrup. 1969. Rheological properties of cornstalks subjected to transverse loading. Trans. of the ASAE 12(3) : 392-396.
12. Prince, R.P. 1961. Measurement of ultimate strength of forage stalks. Trans. of the ASAE 4(2) : 208-209.
13. Prussia, S.E., D.T. Campbell, E.W. Tollner, and J.W. Daniell. 1985. Aparent modulus of elasticity of measuring pecans. Trans. of the ASAE 28(4) : 1290-1296.
14. Sitkei, Gy. 1986. Mechanics of agricultural materials. Elsevier Science Publishers. : 114-283.
15. Suggs, C. W. and Splinter, William E. 1968. Mechanical properties of tobacco stalks. Trans. of the ASAE 8(3) : 361-364.
16. Upadhyaya, S.K., J.R. Cooke, and R.H. Rand. 1987. Variation in Young,s modulus along apple limbs. Trans. of the ASAE 30(5) : 1501-1505.
17. 金滿秀. 金聲來. 朴鍾民. 1990. 벼의 리올로지 特性(I) -穀粒의 應力弛緩-. 韓國農業機械學會誌 15(3) : 207-218.
18. 金滿秀. 金聲來. 朴鍾民. 1990. 벼의 리올로지 特性(II) -穀粒의 壓縮 크리이프- 韓國農業機械學會誌 15(3) : 219-229.
19. 金滿秀. 1991. 果實의 粘彈性 特性. 學術振興財團 研究報告書.
20. 農振聽 園藝試驗場. 1992. 韓國의 園藝作物 生產現況.