

보통형 콤바인의 수확작업에 관계하는 벼줄기의 굽힘 특성

Deflection Characteristics of the Rice Stalk in Harvesting Operation by Combine for Multi-crops

김영근 홍종태 최중섭
정회원 정회원 정회원
Y. K. Kim J. T. Hong J. S. Choe

ABSTRACT

Flexural rigidity(EI) and deflection characteristics of rice stalks were studied to investigate the mechanical interaction between a rice stalk and a combine reel in harvesting. Deflection of a rice stalk caused by reel operation is so large that conventional equation of small deflection for elastic beam cannot be applied to the study of deflection characteristics. Therefore, an equation of large deflection for elastic beam was introduced in this study. Feasibility of this equation was examined by comparing theoretical calculation with the measured results for piano wire, and by the relationship between deflection and load acting on a rice stalk which was presumed by this equation. Results showed that the large deflection equation could predict the measurement data quite well. From this research, the following results were obtained.

- Flexural rigidity(EI) calculated from the equation of large deflection was $4.0 \times 10^4 N \cdot mm^2$ (diameter 1.4mm, deflection 300mm) while the actual EI value of a piano wire(diameter 1.4mm) was $3.9 \times 10^4 N \cdot mm^2$.
 - The relationship between deflection and load acting on a rice stalk could be presumed by the large deflection equation. Flexural rigidity values of tested rice stalks calculated from the equation of large deflection were $1.6 \sim 2.4 \times 10^4 N \cdot mm^2$ (Hwa sung), $2.7 \sim 3.5 \times 10^4 N \cdot mm^2$ (Il pum) and $1.7 \sim 2.4 \times 10^4 N \cdot mm^2$ (Damakum)

Keywords : Flexural rigidity(EI), Deflection characteristics, Equation of large deflection, Rice stalk, Combine for multi-crops, Reel.

1. 서 론

기간작물인 벼의 수확작업은 자탈형콤바인의 보급으로 인해 지속적으로 수확작업의 능률과 정도가 향상되어 왔다. 금후로도 농산물시장의 자유화가 확대되어 경쟁이 더욱 치열해짐에 따라 생산비 절감과 토지생산성 향상이 긴급한 과제가 되고, 포장구획의 확대와 적기수확의 필요성으로부터 수확작업의 대폭적인 능률개선이 더욱 필요하게 될 것이다. 그에 따라 수확기도 점점 대형화, 고속화가 추진되고, 지금 까지 벼수확 작업기로 이용되어왔던 자탈형콤바인을 대신하여, 높은 작업정도를 유지하면서도 여러 작물

에 폭넓게 적용할 수 있고 작업능률도 크게 향상 가능한 보통형콤비인(Ichikawa와 Sugiyama, 1996)이 개발·보급될 것으로 전망된다.

지금까지의 콤바인 개발은 능률향상의 관점에서 예취속도, 탈곡기용량, 엔진출력 등의 향상이 주목표였으나, 대상이 되는 작물과의 상호작용으로부터 능률을 개선하려는 시도는 그다지 없었다. 특히 보통형 콤바인의 수확작업은 예취부의 릴이 작물을 접촉을 하는 것으로부터 시작되며, 작물을 예취하여 수집하는 예취부의 성능은 수확의 능률과 정도를 한정하는 가장 중요한 요인이다. 때문에 예취·수집시 기계와 작물과의 역학특성을 구명하여 예취부의 성능을 향

This study was conducted by the Post Doc. program and supported by the Rural Development Administration of Korea. This article was submitted for publication in May 2003; reviewed and approved for publication by editorial board of KSAM in June 2003. The authors are Y. K. Kim, J. T. Hong, National Agricultural Mechanization Research Institute, 249 Seodun-dong, Kwonsun-ku, Suwon City, 441-100, Korea; J. S. Choe, Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering, 386 Gajang-dong, Sangju-city, Kyung Buk, 742-711, Korea. The corresponding author is Y. K. Kim, National Agricultural Mechanization Research Institute, 249 Seodun-dong, Kwonsun-ku, Suwon City, 441-100, Korea. E-mail : ykkim206@rda.go.kr .

상시키는 것이 곧 콤바인 전체의 성능을 향상시키는 것과 직결된다.

이 분야와 관련된 연구로서, 태풍 등 강한 바람에 의한 작물의 도복성을 검정하기 위한 벼·보리 줄기의 역학강도 측정(井上, 1963), 보리 줄기 형상을 이용한 강성(剛性) 계산(Mueller, 1988) 등이 있지만 대부분 기초 물성의 측정에 머물렀으며, 비교적 최근에 일본에서 탈곡통 내 벼의 역학특성을 해석하기 위한 벼의 굽힘강성 측정(Umeda, 1992)과, 수확작업시 릴 작용에 의한 벼 줄기의 굽힘 특성을 탄성 외팔보의 굽힘식에 의해 추정한(Kim, 1998) 연구가 수행되었으나, 국내에서는 아직 관련 연구가 수행된 바 없다.

본 연구는 릴 방식의 전처리부를 선택한 보통형 콤바인의 수확작업 시의 릴과 벼의 기계적 작용(릴의 수집작용)을 구명하여 금후 보통형 콤바인의 개발을 위한 기초자료로 제공하기 위해, 국내에서 재배되고 있는 3품종의 벼를 대상으로, Inoue 등(1998)이 도입한 탄성 외팔보식을 이용한 이론치와, 하중의 크기와 작용위치에 따른 벼 줄기의 굽힘량을 실측한 값을 비교함으로써 벼 줄기의 굽힘특성을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

가. 굽힘의 이론식

(1) 굽힘이 작은 경우의 굽힘식

재료역학(Timoshenko 등, 1984)의 일반적인 굽힘 이론에서, 하단이 고정된 굽힘이 작은 탄성 기둥의 상단에 집중하중을 받을 경우의 굽힘모멘트와 곡률 사이의 관계는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2\omega}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (1)$$

식(1)은 굽힘곡선의 미분방정식으로, 이 식으로부터 식(2)가 얻어진다.

$$EI = \frac{P l^3}{3\omega} \quad (2)$$

여기서, EI = 굽힘강성($N \cdot mm^2$)
 P = 하중(N)

l = 기둥 높이(mm)

ω = 굽힘량(mm)

(2) 굽힘이 큰 경우의 굽힘식

포장에서 보통형 콤바인으로 작물을 수확할 경우

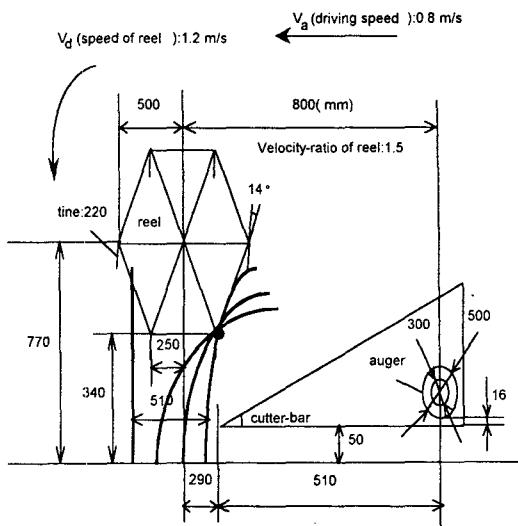


Fig. 1 Relationship between rice stalk and reel of combine for multi-crops.

벼의 굽힘량은 상당히 크다. 벼가 보통형 콤바인 릴의 작용을 받아 예취될 때의 릴과 벼 줄기의 관계를 나타낸 Fig. 1과 같이, 예취작업 시 벼 줄기는 대략 70~340mm 범위에서 휘어지며 그 휨량은 340mm 높이 부근에서 290mm에 이르는 것으로 알려져 있다(Kim, 1998).

그러므로 식(1)에 나타낸 「굽힘이 작은 경우의 굽힘식(이하 작은 굽힘식)」을 굽힘량이 큰 벼 줄기에 그대로 적용하기에는 무리가 있다고 판단하여, 본 연구에서는 Inoue 등(1998)이 식(1)과 식(2)를 유도·정리하여 도입한 굽힘이 큰 경우에도 적용할 수 있는 식(3)(이하 큰 굽힘식)을 원용하기로 하였다.

$$-\frac{M}{EI} = \frac{\frac{d^2\omega}{dx^2}}{\left\{1 + \left(\frac{d\omega}{dx}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

식(3)을 적분하여 정리하면 굽힘각에 대하여 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\omega}{dx} = \sqrt{\left(\frac{EI}{P}\right)^2 - \left(lx - \frac{x^2}{2}\right)^{-2}} \quad (4)$$

여기서, EI = 굽힘강성($N \cdot mm^2$)

P = 하중(N)

l = 벼의 기둥(mm)

ω = 굽힘량(mm)

그런데, 식(4)의 굽힘각의 적분은 일반적으로 티원 함수가 되어 굽힘량 ω 를 구하는 일반해를 도출하는 것이 대단히 복잡하기 때문에 수치계산으로 그 값을 구했다. 수치계산은 Runge-Kutta법을 이용하여 Visual Basic 프로그램으로 행하였다.

나. 계측 시스템

벼줄기 굽힘 계측시스템은 Fig. 2와 같이 디지털비디오카메라(DCR-VX1000, SONY), 퍼스널 컴퓨터, 영상소프트웨어 등으로 구성하였다.

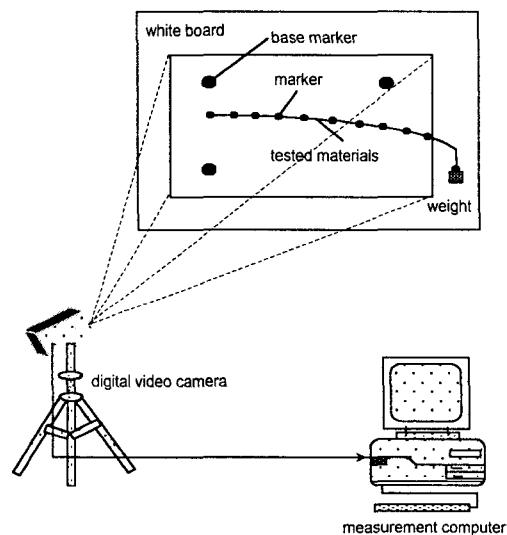


Fig. 2 Composition of measurement system.

Table 1 Physical property of piano wires

Diameter(mm)	Modulus of longitudinal elasticity (E , N/mm 2)	Flexural rigidity (EI , N · mm 2)	Polar moment of Inertia(I , mm 4)
1.2	2.1×10^5	2.1×10^4	0.102
1.4	2.1×10^5	3.9×10^4	0.189
1.6	2.1×10^5	6.6×10^4	0.322

Table 2 Cultivation condition of tested rice stalks

Variety	Hwa sung	Il pum	Damakum
Cultivating pattern	Transplanting	Transplanting	Direct sowing
Height(mm)	941.8	908.6	895.7
Standing angle(°)	87.4	87.8	88.7
Moisture content(% w.b.)	59.2	71.1	69.2

디지털비디오카메라로 벼줄기의 변위(각 마커의 위치)를 촬영하면, 촬영된 영상은 캡쳐보드(DVBK-1000, SONY)를 통해 받아지고, 영상처리 프로그램이 256단조 이상의 영상 및 흑백영상으로 변환하여 각 마커의 위치를 좌표데이터로 저장한 후, 기준마커와 벼줄기에 붙어있는 각 마커의 거리로 벼줄기의 굽힘량과 굽힘각을 계산하고 각 마커간의 거리로 높이를 계산하도록 하였다(물체의 중심, 면적 등의 변화도 검출 가능). 마커는 직경 6mm의 흑색 비닐로 만들어서 공시재료에 직접 붙이고 측정하였다.

다. 실험 방법 및 재료

실험은, 먼저 굽힘식 적용의 타당성을 검증하기 위하여 굽힘강성을 알 수 있는 피아노선에 대한 실험을 통하여 큰 굽힘 이론식의 유효성을 확인하고, 공시한 벼에 대해서 동일한 실험을 실시하는 순서로 행하였다.

마커의 인식이 용이하도록 배경이 흰 판에 공시재료를 고정시킨 후 공시재료에 일정한 간격으로 흑색의 마커를 붙이고 하중을 가하였다. 피아노선의 경우 크게 휘어질 때까지 하중을 점차적으로 증가시켰지만, 벼줄기의 경우는 하중이 과도하면 부러질 염려가 있으므로 상황에 맞추어 하중의 크기를 설정하였다. 피아노선은 직경 1.2mm, 1.4mm, 1.6mm의 3종류를 사용하였다. 피아노선의 하중을 가하는 위치는, 콤바인이 수확작업을 할 때 레일이 벼줄기에 닿는 높이가 지상으로부터 약 600mm 전후인 점을 고려하여 580mm 부근으로 하였다.

실험에 이용된 벼는 2000년 10월에 농업기계화연구소 입북동 포장에서 수확한 화성과 일품, 그리고 충남 서산간척지에서 수확한 다마금이었다.

또한 실험시의 벼줄기는 이삭의 자중에 의한 굽힘 영향을 없애기 위하여 이삭을 제거하고, 1개씩 벼줄기 선단부에 하중을 가하였으며 피아노선과 동일한 방법으로 하중에 의한 굽힘과 높이의 변화를 품종당 30개씩 측정하였다. Table 1에 공시 피아노선의 종류와 물리적 성질을, Table 2에 공시 품종의 수확시기 작물조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

가. 굽힘량의 실측치와 계산치의 비교

Fig. 3과 4는 각각 직경 1.6mm의 피아노선의 선단(585mm)과 일품벼의 선단(560mm)에 각각 0.5N과 0.06N의 하중을 걸었을 때의 높이와 굽힘량의 관계를 기준의 작은 굽힘식 및 이번 연구에 도입한 큰 굽힘식으로 계산한 계산치와 실측치로 비교하여 나타낸 것이다.

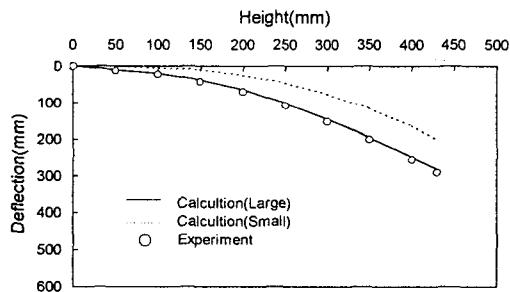


Fig. 3 Comparison between experiment and theoretical calculation for the deflection of piano wire(diameter 1.6mm, load 0.5N).

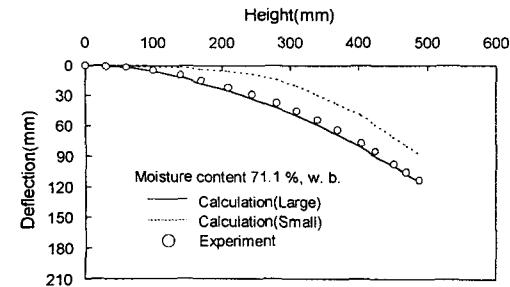


Fig. 4 Comparison between experiment and theoretical calculation for the deflection of II pum rice stalk(load 0.06N).

이 두 그림에서 보는 바와 같이, 피아노선과 벼줄기 모두 실측치는 큰 굽힘식의 계산치와 거의 일치하는 경향을 나타냈으나, 작은 굽힘식의 계산치와는 상당한 차이를 나타내었다. 이로써, 이번 연구에 처음으로 도입한 큰 굽힘식이 보통형 콤바인의 벼 수확작업시의 릴 작용에 의한 벼줄기의 굽힘특성을 고찰하는데 있어서 매우 유용하다는 것이 입증되었다.

나. 굽힘량과 굽힘강성(EI)과의 관계

Fig. 5는 직경 1.4mm 피아노선의 굽힘량과 굽힘강성(EI)의 관계를 나타낸 것이다. 피아노선의 선단부분인 높이 585mm 위치에 0.03N, 0.05N, 0.1N, 0.15N, 0.2N, 0.25N, 0.3N의 하중을 순차적으로 걸면서 그 지점에서의 굽힘량을 측정하였고, 그때의 굽힘강성을 큰 굽힘식과 작은 굽힘식으로 계산하여 비교하였다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 피아노선의 경우 큰 굽힘식으로 계산한 굽힘강성은 굽힘량이 53.1mm일 때 실제 굽힘강성의 97% 정도의 값을 나타내어 가장 큰 차이를 보였으나, 전반적으로 굽힘량의 증가와 관계없이 실제 굽힘강성의 값인 $3.88 \times 10^4 N \cdot mm^2$ 와 거의 일치하였다. 그러나 작은 굽힘식으로 계산한 굽힘강성은 그림과 같이 굽힘량이 커지면 커질수록 실제 치와 점점 멀어지는 경향을 나타내었다. 따라서 콤바인 수확작업시의 릴 작용에 의한 벼줄기의 굽힘량을 고찰하는데 있어서 큰 굽힘식이 훨씬 적합하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 벼줄기의 각 마디에 다른 크기의 하중을 가하면서 각 마디마다 굽힘량을 2회씩 측정하고, 큰 굽힘식에 실측치를 대입하여 굽힘강성을 계산한 것이다. Fig. 6 및 Fig. 7로부터 벼줄기는 뿌리 부근으로 갈수록 굽힘강성이 점점 커진다는 것을 알

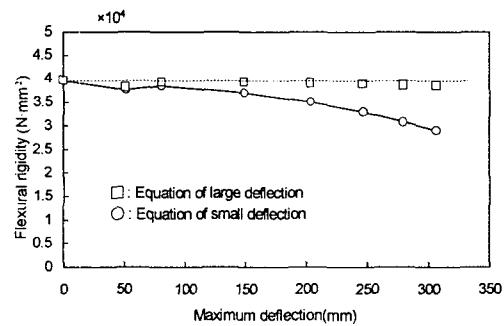


Fig. 5 Relationship between maximum deflection and flexural rigidity(EI) of piano wire (diameter 1.4mm, height 585mm).

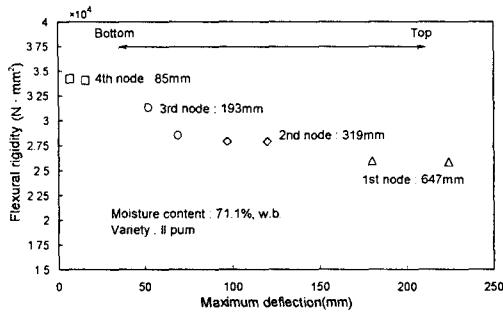


Fig. 6 Relationship between maximum deflection and flexural rigidity(EI) of Il pum rice stalk.

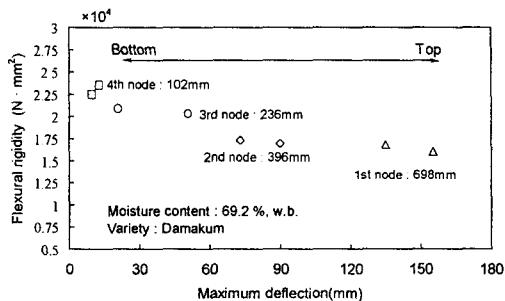


Fig. 7 Relationship between maximum deflection and flexural rigidity(EI) of Damakum rice stalk.

수 있는데, 이는 뿌리부근으로 갈수록 직경이 증가하는데 가장 큰 원인이 있는 것으로 판단된다.

다. 벼줄기 높이방향의 굽힘강성(EI)

벼줄기의 굽힘강성(EI)은 각 마디에 따라 다르고 마디 사이 내에서도 위치에 따라 차이가 난다는 것이 단면형상의 관찰로부터 추측 가능하다. 기존의 벼줄기 굽힘강성에 관한 연구에서는, 마디와 마디 사이 내에서는 굽힘강성이 동일하다고 가정하고, 마디 사이마다 평균적인 굽힘강성을 계산한 예(Inoue 등, 1998)와, 높이방향의 굽힘강성이 높이에 비례하여 변화한다고 가정하여 추정한 예(Umeda, 1992)가 있다. 본 연구에서는 벼줄기 높이방향의 굽힘강성이 높이에 비례하여 변화한다고 가정하여 추정한 후자의 예를 참고로 하여, 벼줄기의 임의의 높이의 굽힘강성을 추정할 수 있는 굽힘강성 추정식에 대해 검토하였다. 그 결과 Fig. 8, 9, 10과 같이 벼줄기의 굽힘강성은 뿌리에서 선단으로 갈수록 직선적으로 감소하는 경

향이 나타났고, 그 관계를 직선회귀식으로 나타낸 결과 상관계수도 높게 나타났다. 그러므로 이 식들은 벼 수확작업시 렐에 작용하는 벼줄기 임의점의 굽힘강성을 추정하는데 유용하게 이용될 수 있다고 생각된다. 그러나 본 연구의 실험 및 이론 분석시, 벼줄기의 직경과 단면적 변화가 적극적으로 고려되지 않았고, 벼의 품종, 작물조건 등에 따라 벼줄기의 물성

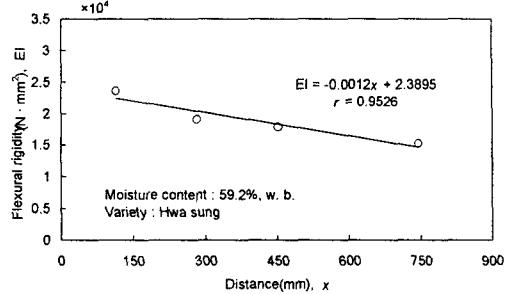


Fig. 8 Relationship between distance and flexural rigidity(EI) of Hwa sung rice stalk.

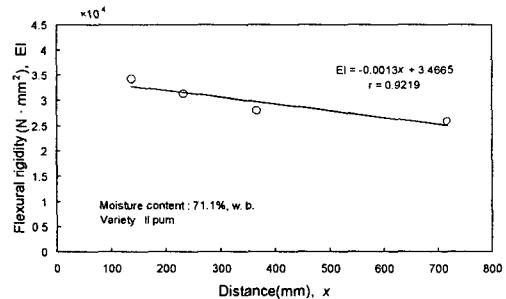


Fig. 9 Relationship between distance and flexural rigidity(EI) of Il pum rice stalk.

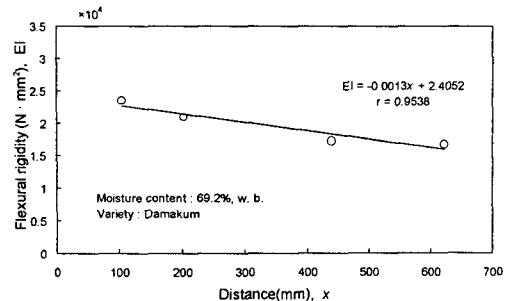


Fig. 10 Relationship between distance and flexural rigidity(EI) of Damakum rice stalk.

이 달라질 수 있으므로 앞으로 이와 유사한 연구에서는 벼줄기의 직경과 단면적의 변화에 대한 고려가 필요하고 더욱 광범위한 실험을 통한 검토와 고찰이 요구된다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 릴 방식의 전처리부를 채택한 보통형콤바인의 수확작업 시의 릴과 벼의 기계적 작용(릴의 수집작용)을 구명하여 금후 보통형콤바인의 개발을 위한 기초자료로 제공하기 위해, 국내에서 재배되고 있는 3품종의 벼를 대상으로, Inoue 등(1998)이 도입한 탄성 외팔보식을 이용한 이론치와, 하중의 크기와 작용위치에 따른 벼줄기의 굽힘량을 실측한 값을 비교함으로써 벼줄기의 굽힘특성을 고찰하였다.

그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 피아노선을 이용하여 하중, 높이, 굽힘량, 굽힘 강성(EI)의 관계를 실측치와 큰 굽힘식의 계산치 및 작은 굽힘식의 계산치와 비교함으로써 큰 굽힘식의 타당성을 검증하였다.
- 2) 벼줄기의 굽힘실험을 통하여, 벼 수확작업 시 릴 작용에 의한 벼줄기의 굽힘특성을 추정하는데 새로 도입한 큰 굽힘식이 유용하다는 것을 입증하였다.
- 3) 공시재료인 벼줄기의 굽힘강성을 큰 굽힘식으로 계산한 결과, 화성은 $1.6 \sim 2.4 \times 10^4 N \cdot mm^2$, 일품은 $2.7 \sim 3.5 \times 10^4 N \cdot mm^2$, 다마금은 $1.7 \sim 2.4 \times 10^4 N \cdot mm^2$ 의 범위에 있었다.
- 4) 벼줄기의 높이방향에 따른 굽힘강성의 변화를 회귀식을 이용하여 검토한 결과, 벼줄기의 굽힘강성은 뿌리에서 선단으로 가면서 직선적으로 감소한다는 것이 판명되었다.

참 고 문 헌

1. Ichikawa, T. and T. Sugiyama. 1996. Studies on the Development of a Combine for Multi-Crops(Part I). Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery 58(3):77-86.(In Japanese)
2. Inoue, E., Y. K. Kim, K. Hashiguchi, T. Okayasu, and J. Kashima. 1998. Mechanical Characteristics of Rice Stalk. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery 60(2):97-102.(In Japanese)
3. Kim, Y. K. 1998. Study on Mechanical Characteristics of Crop Stalk in Harvesting Operation by Combine Harvester. Ph.D Dissertation. Kyushu University, Japan.(In Japanese)
4. Mueller, Z., 1988, An Investigation on Mechanical and Geometrical Properties Influencing the Stability of Wheat-Stalk, Physical Properties of Agricultural Material and Products, Hemisphere Publishing Co., New York:194-204.
5. Timoshenko, S. P. and D. H. Young 1984. Elements of Strength of Materials, Fifth Edition, McGraw Hill.
6. Umeda, M. 1992, Analysis of Threshing Mechanism of Head Feeding Thresher(Part I), Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 54(1):47-55.(In Japanese)
7. 井上榮一, 1963, 耕地風と作物耕地等との関係, 農業技術研究所報告誌, A(10), 42-51.