

콤바인 벼수확시의 벼줄기 굽힘특성에 관한 연구

Study on Deflection Characteristics of Rice Stalk in Harvesting Operation by Combine Harvester

김영근* 이동현* 박원규* 홍종태* 井上英二**
정희원 정희원 정희원 정희원
Y.K.Kim D.H.Lee W.K.Park J.T.Hong E.Inoue

1. 서론

기간 작물인 벼, 보리의 수확작업은 콤바인의 보급에 의해 능률 및 정도가 향상되어 왔다. 그렇지만 앞으로 농산물 자유화에 대비한 생산비의 절감 및 토지생산성 향상이 요구되고, 포장구획 확대와 적기 수확의 필요성으로부터 수확작업의 대폭적인 능률개선이 필수 불가결한 요소로 되었다. 그런데, 곡물생산의 고능률화를 도모하기 위해서는 벼, 보리 수확작업이 가능한 자탈형 콤바인보다 벼, 보리 이외의 작물과 도복된 작물에도 폭 넓게 적용 가능한 투입식 콤바인의 보급이 바람직하다.

한편, 종래의 콤바인의 개발은 예취속도, 탈곡기 용량, 엔진의 출력 등의 증대가 대부분이었고, 작업대상인 작물과의 상호작용으로부터 능률을 개선하려는 시도는 그다지 많지 않았다. 그런데, 작물이 예취되고, 예취된 작물이 모여지는 예취부에서는 기계와 작물과의 역학특성이 중요한 항목이 된다. 이 분야의 연구로는 벼의 품종별의 압축특성과 종탄성계수의 특성, 보리줄기의 형상으로부터 보리의 강성계산, 자탈형 콤바인의 탈곡통내 벼의 역학특성을 해석하기 위한 벼의 물성계측이 보고되고 있으나 대부분 기초 물성을 측정하는 수준에 그치고 있는 실정이다.

본 연구는 작물을 대상으로 수확 작업을 할 때 작물줄기에 작용하는 투입식 콤바인의 띠에 의한 기계적 작용을 구명하기 위해 벼줄기의 굽힘특성을 실험 및 이론 해석에 의해 밝히는데 목적이 있다. 그런데, 벼줄기의 굽힘특성은, 그 크기로부터 일반적인 재료역학의 보끝에 집중하중을 받는 외팔보 굽힘식(굽힘이 매우 작을 때의 식)을 그대로 적용하는 것은 무리가 있기 때문에, 굽힘이 큰 경우에도 적용 가능한 탄성 외팔보 식을 도입했다.

그리고, 식의 타당성을 검증하기 위해, 실측치의 변위계측에 계측장치를 이용해, 먼저, 물리적성질을 알 수 있는 급속선(피아노선)의 굽힘계측을 실시하였고, 본 식을 이용, 하중과 높이에 의한 벼줄기의 굽힘양 관계를 실측치와 비교해 추정하였다.

또한 벼줄기 실험을 실시, 벼줄기의 임의점에서의 하중과 굽힘양의 관계 및 굽힘강성(EI)에 관해 해명, 벼줄기의 기계적 작용에 의한 굽힘특성을 고찰했다.

* 농촌진흥청 농업기계화연구소

** 日本九州大學 農學部 生物資源環境學科

2. 굽힘의 이론식

가. 굽힘이 큰 경우의 굽힘식

포장에서 실제로 버틀 수확할 경우 버줄기의 굽힘은 상당히 크다. 버줄기가 릴에 의한 작용을 받고, 예취될때, 버줄기는 적어도 200mm 이상 휘어진다. 그러므로, 나항에 서술한 「굽힘이 작은 경우의 굽힘식」을 굽힘양이 큰 버줄기에 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 그래서, 굽힘양이 큰 경우에도 적용 가능한 식(1)을 도입하였다.

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

여기서, 식(1)을 적분해서 정리하면, 굽힘각에 관한 식(2)가 얻어진다.

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

그리고, 식(2)에서 굽힘양 ω 는 수치해석을 이용하여, 컴퓨터 프로그램으로 계산하였다.

나. 굽힘이 작은 경우의 굽힘식

재료역학의 굽힘이론에서는 굽힘이 작은 경우, 식(1)의 근사식으로 식(3)이 얻어진다.

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

식(3)은 굽힘곡선의 미분방정식이다. 그리고, 식(3)에서 식(4)가 얻어진다

$$EI = \frac{Pl^3}{3\omega} \quad (4)$$

단,

EI =굽힘강성 ($N \cdot mm^2$)

P =하중 (N)

l =높이 (mm)

ω =굽힘 (mm)

한편, 식(4)는 선단에 집중하중을 받는 탄성 외팔보의 식이다.

3. 재료 및 방법

가. 계측시스템의 구성

그림 1 은 버줄기 굽힘 계측시스템의 구성을 나타낸 것이다

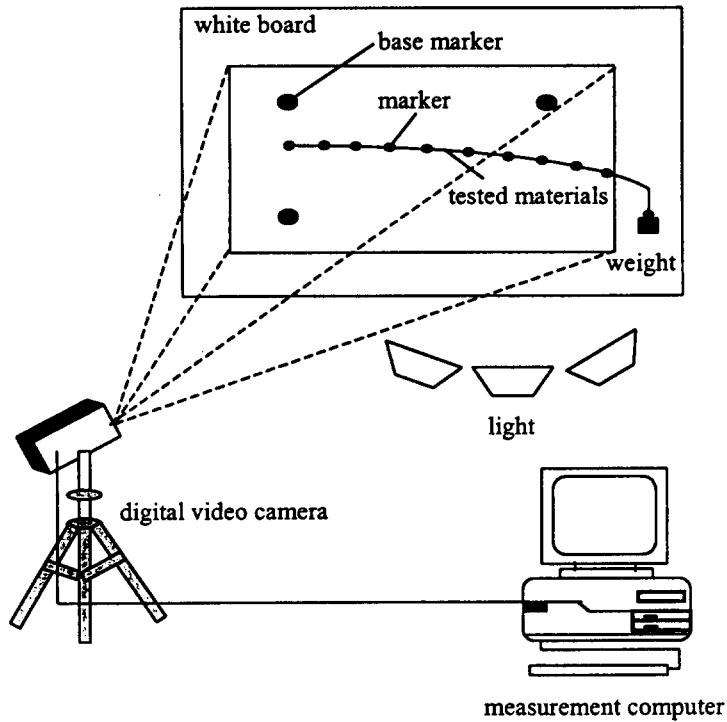


Fig.1 Composition of measurement system

본 계측시스템은 그림 1 과 같이 구성되며, 디지털 비디오 카메라로 작물줄기(각각의 마커)의 변위를 검출·촬영하고, 촬영한 영상화면을 영상 처리용 프로그램을 이용하여 좌표 데이터로써 컴퓨터에 보존한다. 한편, 굽힘량과 각은 마커와 기준마커의 차이로 계산되고, 높이는 각 마커간의 거리로 계산된다.

나. 실험방법 및 실험재료

도입한 굽힘식의 타당성을 검증하기 위해 먼저, 재료의 굽힘강성을 알 수 있는 피아노 선을 이용해, 굽힘실험을 실시하여, 이론식의 유효성을 확인하였으며, 벼에 대해서도 같은 실험을 실시하였다. 실험방법은 공시재료에 일정한 간격으로 마커(검은색)를 붙인 다음에 하중을 걸었다. 하중은 피아노선의 경우, 점차적으로 크게 휘어질때까지 하중을 걸렀지만, 벼의 경우, 하중이 너무 크면 부러질 수가 있어서 그때그때 상황에 맞게 하중의 크기를 설정했다. 피아노선은 직경이 각각 1.2mm, 1.4mm, 1.6mm 의 것을 사용했다. 하중위치는 밀이 벼줄기에 작용하는 높이가 지상에서 약 600mm 전후이므로, 580mm 부근에서 하중을 점차로 걸어서 굽힘과 높이의 변화를 측정했다. 한편, 벼는 농업기계화연구소 입북동 포장에서 재배, 수확한 벼와 서산간척지(A 지구) 포장에서 재배, 수확한 벼를 이용하였다. 품종은 일반 계인 화성과 일품(입북동 포장) 및 다마금(서산간척지 포장)을 공시하였다.

또한, 실험시 벼줄기는 이삭의 자중에 의한 굽힘의 영향을 줄이기 위해, 이삭을 제거, 1

개씩 선단부에 하중을 걸었고, 피아노선과 동일하게 측정했다. 표 1에 공시 피아노선의 종류와 물리적 성질을 나타냈다.

Table 1 Physical property of piano wire

| 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 |

4. 결과 및 고찰

가. 높이와 굽힘양의 실측치와 계산치의 비교

그림 2, 그림 3은 피아노선과 벼줄기에 각각 0.5N과 0.06N의 하중을 걸었을때의 높이와 굽힘양의 관계를 굽힘이 작은 경우의 식과 도입한 굽힘이 큰 경우의 식에 의한 계산치와 실측치를 비교한 것이다. 그림 2에 나타낸 피아노선은 직경이 1.6mm이고, 선단 위치(585mm)에 하중을 0.5N 걸었다. 그림과 같이 굽힘이 300mm 정도 생겼을 경우, 실측치는 도입한 식의 계산치와 거의 일치하는 경향을 나타냈으나, 굽힘이 작은 경우의 식에 의한 계산치와는 상당한 차가 나타났다. 한편, 벼줄기도 피아노선과 동일하게 선단 위치(560mm)에 하중 0.06N을 걸었다. 그림과 같이 굽힘이 120mm 정도에서 피아노선과 같은 경향이 나타났다. 그러므로, 새로 도입한 큰 굽힘식의 타당성은 검증되었고, 투입식 콤포바인의 벼수확작업시, 릴 작용에 의한 굽힘의 범위내에서는 새로 도입한 큰 굽힘식의 유효성이 인정된다고 생각된다.

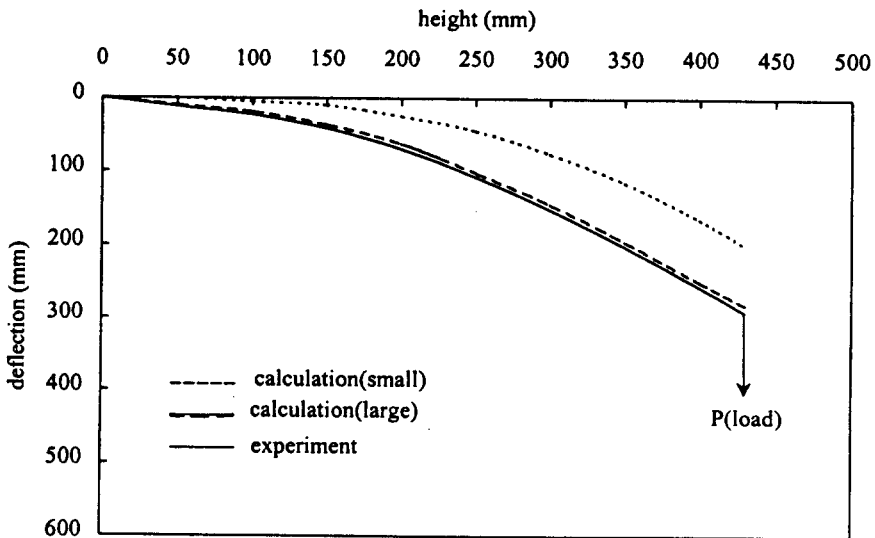


Fig.2 Comparison between experiment and theoretical calculation for the deflection of piano wire. (diameter 1.6mm, load 0.5N)

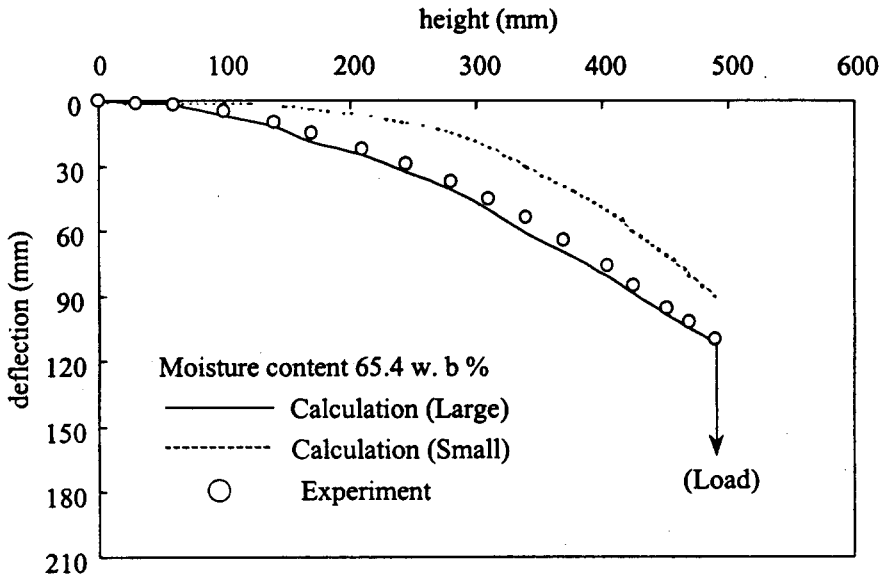


Fig.3 Comparison between experiment and theoretical calculation for the deflection of rice stalk (Load 0.06N)

나. 굽힘양과 굽힘강성(EI)과의 관계

그림 4는 피아노선의 굽힘양과 굽힘강성(EI)과의 관계를 나타낸다. 피아노선은 직경 1.4mm, 높이 585mm의 위치에 하중을 0.03N, 0.05N, 0.1N, 0.15N, 0.2N, 0.25N, 0.3N과 같이 순차적으로 걸어서, 굽힘양을 측정하였고, 그때의 굽힘강성(EI)을 큰 굽힘식과 작은 굽힘식으로 계산했다.

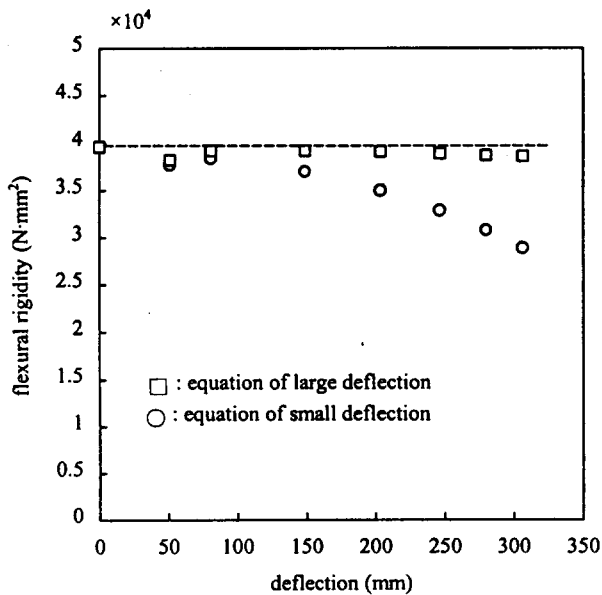


Fig.4 Relationship between deflection and flexural rigidity(EI) of piano wire. (diameter 1.4mm, height 585mm)

그림과 같이 피아노선의 경우, 새로 도입한 큰 굽힘식으로 계산한 굽힘강성(EI)은 굽힘이 51.3mm 일 때가 실제치의 97%로 가장 큰 차이를 나타냈으나, 전반적으로 실제치인 $3.88 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{mm}^2$ 와 거의 일치했다. 반대로, 작은 굽힘식으로 계산한 굽힘강성(EI)은 특히, 굽힘양이 커지면 커질수록 실제치와 멀어지는 경향을 나타냈다. 그러므로, 본 연구의 대상인 투입식 콤바인 수확작업에서 릴 작용에 의한 벼줄기 굽힘양 문제에 대해서는 새로 도입한 큰 굽힘식이 유효하다고 생각되어진다.

그림 5와 그림 6은 벼줄기 각 절에 적당한 하중을 걸어서, 그 때의 굽힘양을 측정하고, 실측치로 큰 굽힘식을 이용 굽힘강성(EI)을 계산한 것이다. 벼줄기는 뿌리부분으로 갈수록 직경이 커지는 경향이 있었고, 굽힘강성(EI)은 점점 커졌다. 그러므로, 뿌리부분으로 갈수록 강도적으로 강해진다고 생각된다.

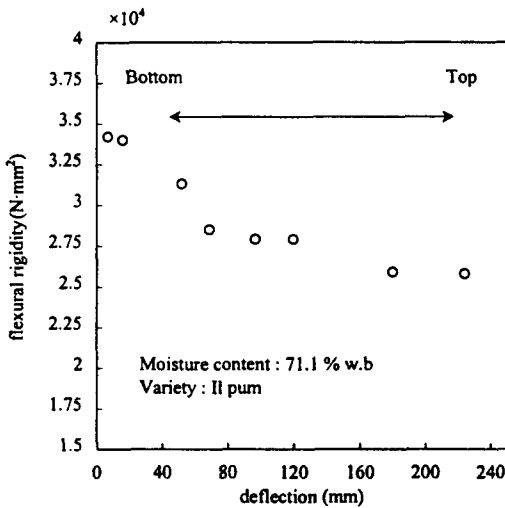


Fig.5 Relationship between deflection and flexural rigidity(EI) of rice stalk

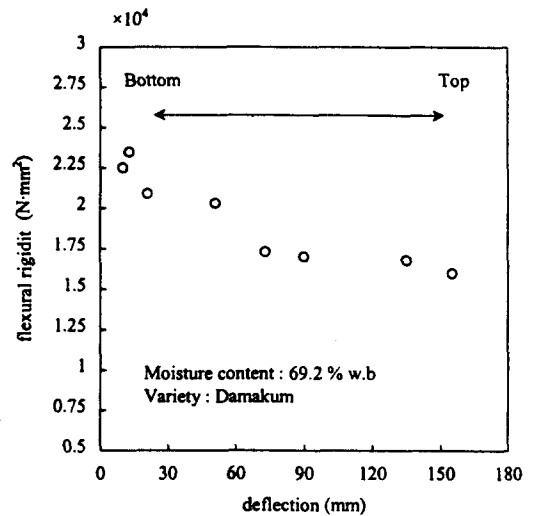


Fig.6 Relationship between deflection and flexural rigidity(EI) of rice stalk

다. 벼줄기 높이방향의 굽힘강성(EI)

벼줄기의 굽힘강성(EI)은 절간부, 절부에 따라 다르고, 절간부내에서도 위치에 따라 차가 있는 것은 단면형상으로 추측이 가능하다. 종래, 벼줄기의 굽힘강성(EI)에 관해서는, 절간은 동일한 굽힘강성(EI)이라고 가정하고 절간마다 평균적인 굽힘강성(EI)을 계산한 예와 높이방향의 굽힘강성(EI)이 거리에 비례해서 변화한다고 가정하고 추정한 예가 있었다. 본 연구에서는, 연구 방안으로 위에서 말한 벼줄기의 높이방향의 굽힘강성(EI)이 거리에 비례해서 변화한다고 가정하고 추정한 예를 참고해서, 하중이 작용하는 높이방향의 임의점에 대표되는 굽힘강성(EI)의 추정식을 검토했다. 그 결과 그림 7-9 과 같이 굽힘강성(EI)은 벼줄기의 뿌리부분에서 선단을 향해서 직선적으로 저하하는 경향이 나타났다. 그래서, 그 관계를 직선회귀한 결과, 상관계수도 높게 나타났다. 그러므로, 이 식은 투입식 콤바인 수확작업시 릴에 작용하는 벼줄기 임의점의 굽힘강성(EI)을 추정하는데 유효하다고 사료된다. 그렇지만, 벼의 품종, 작물조건 등에 의해 물성치는 변화하므로, 지속적인 실측에 의거하여

검토와 고찰이 필요하다고 생각된다.

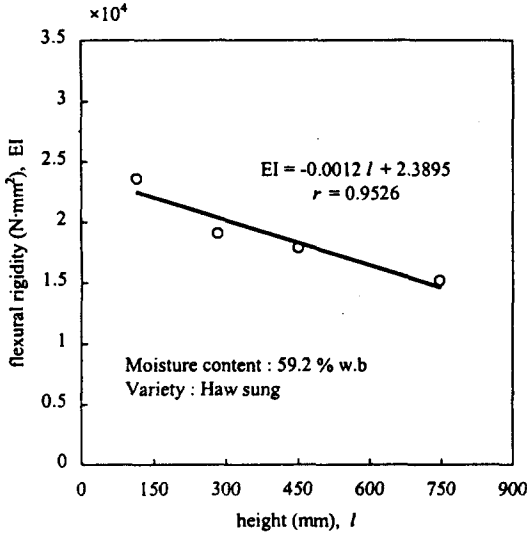


Fig.7 Relationship between height and flexural rigidity(EI) of rice stalk

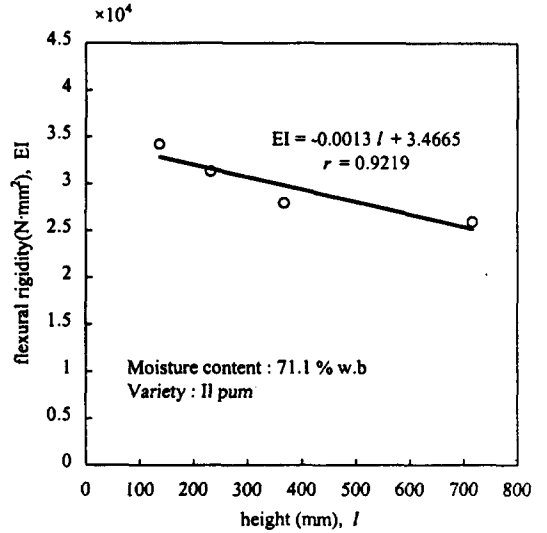


Fig.8 Relationship between height and flexural rigidity(EI) of rice stalk

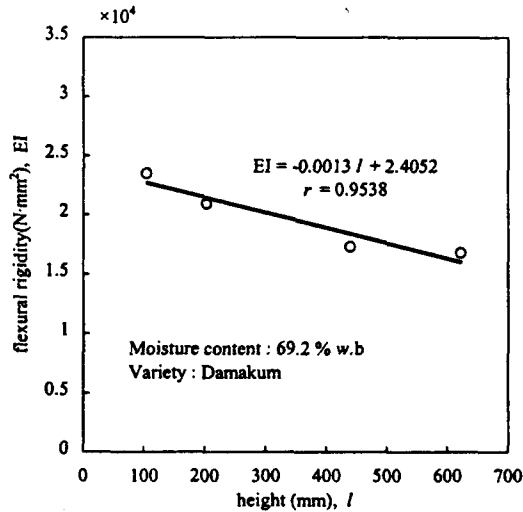


Fig.9 Relationship between height and flexural rigidity(EI) of rice stalk

5. 요약 및 결론

콤바인 벼수확시 벼줄기에 작용하는 굽힘특성을 구명하기 위해, 벼줄기의 굽힘강성(EI) 및 굽힘에 관해서 고찰한바, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 피아노선을 이용해서, 하중, 높이, 굽힘양, 굽힘강성(EI)의 관계를 실측치와 큰 굽힘식의 계산치, 작은 굽힘식의 계산치와 비교하여, 새로 도입한 큰 굽힘식의 타당성을 검증·확인했다.

- 2) 벼줄기의 굽힘 실험을 실시하고, 실측치와 계산치를 비교한 결과, 투입식 콤바인 수확 작업시 톨 작용에 의한 벼줄기의 굽힘특성 추정에 새로 도입한 큰 굽힘식이 적용 가능하다는 것이 검증되었다.
- 3) 벼줄기에 하중이 작용하는 높이방향의 굽힘강성(EI)을 회귀식에 의해 검토한 결과, 굽힘강성(EI)은 벼줄기의 뿌리부분에서 선단을 향해서 저하하는 1차관수로 표현 가능한 것이 검증되어, 이 식이 벼줄기 임의점의 굽힘강성(EI)을 추정하는데 유효하다는 것이 확인되었다.

6. 참고문헌

1. 江崎春雄, 1959, 稻·麥稈の壓縮性, 農機誌, 21(4), 146-148
2. 江崎春雄, 1986, 穀類收穫機, (株) イセブ
3. 井上榮一, 1963, 耕地風と作物耕地等との關係, 農業技術研究所報告誌, A(10), 42-51
4. 井上英二 他 3人, 1996, 作物稈の動特性に関する基礎的研究, 第55回農業機械學會年次大會講演要旨, 97-98
5. 井上英二 他 4人, 1998, 稻稈のたわみ特性に関する一考察, 農機誌, 60(2), 145-150
6. 市川友彦, 杉山隆夫, 1996, 汎用コンバインの開発研究(第1報), 農機誌, 58(3), 77-86
7. 金暎根, 1998, コンバイン收穫に關わる作物稈の力學的特性に関する研究, 九州大學校, 博士學位論文
8. 中原一郎, 1989, 材料力學, 養賢堂, 108-110
9. 梅田幹雄, 1992, 自動脫穀機の脫粒機構の解析(第1報), 農機誌, 54(1), 47-55
10. 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