

# 고해 조건과 평량이 라이너 판지의 휨강성에 미치는 영향

원종명<sup>†</sup>

(2004년 2월 10일 접수: 2004년 7월 30일 채택)

## Effect of Refining Conditions and Grammage on the Bending Stiffness of Linerboard

Jong Myoung Won<sup>†</sup>

(Received on February 10, 2004; Accepted on July 30, 2004)

### ABSTRACT

The effect of refining conditions and grammage on the stiffness of linerboard was investigated. The correlations between Taber stiffness and resonance stiffness were very low due to the different measuring principle. The refining conditions did not affect significantly on both Taber and resonance stiffness estimated here. This means that it is strongly recommended to find and apply the refining conditions which can reduce specific energy consumption. Taber stiffness showed very high correlation for the thickness and elastic modulus of linerboard, while the resonance stiffness showed much lower correlation. Effective thicknesses for Taber stiffness were very well fitted with measured thickness, while those for resonance stiffness depended on the grammage of linerboard.

**Keywords** : *refining, air permeability, roughness, strength, drainage, refining consistency, plate gap, freeness, grammage, elastic modulus, Taber stiffness, resonance stiffness, effective thickness*

### 1. 서론

휨강성은 종이뿐만 아니라 특히 판지에 있어서 매우 중요한 성질의 하나로서 용도에 따라 그에 부합되는 수준의 휨강성이 충족되지 못할 경우 상

품으로서의 가치를 상실하게 된다. 종이 및 판지의 휨강성에 영향을 미치는 인자로서는 각 층에 사용된 펄프의 특성(탄성계수, 섬유장, 헤미셀룰로오스 함량 등), 두께, 판지를 구성하는 각 층의 중심으로 부터의 거리와 해당 층에 사용된 펄프의 탄성계수,

• 본 논문은 강원대학교 부설 창강제지기술연구소의 재정 지원에 의하여 수행되었음.  
• 강원대학교 산림과학대학 제지공학과(Dept. of Paper Science & Engineering, College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

<sup>†</sup> 주저자(Corresponding author) : E-mail: wjm@kangwon.ac.kr

표면처리, 섬유 배향, 섬유간 결합 강도, 밀도 등 매우 다양한 인자가 고려될 수 있으며, 이들 인자들이 복합적으로 작용되기 때문에 다른 종이의 물성을 분석하고 조절하는 것보다 복잡한 특성을 지니고 있다. 즉 일반적으로 섬유간 결합이 많이 일어나고, 밀도가 높아지면 탄성계수가 증가되고, 따라서 휨강성이 증가될 것으로 예상되나, 불행하게도 종이의 두께가 감소됨으로써 휨강성에 악영향을 미치는 인자로도 작용하게 된다. 여기에서 어느 것에 대한 기여도가 더 크게 작용되었는지에 따라 개선 또는 저하의 여부가 결정된다고 할 수 있다. 이러한 이유 때문에 종이 또는 판지의 휨강성의 조절 및 관리가 쉽지 않다. 또한 휨강성을 측정하였을 때 실제로 어떤 성질을 측정하였는지 정확히 이해하는 것이 쉬운 일이 아니다. 즉 측정 방법에 따라 그 결과에 영향을 미치는 인자가 다르게 작용하며, 결과적으로 얻은 수치는 매우 복합적인 결과로써 나타나기 때문에 측정 방법에 대한 정확한 이해가 없을 경우 잘못된 평가를 초래할 수도 있다.

따라서 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 방법은 판지 또는 종이의 휨강성에 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자를 조절하는 것이며, 그 대표적인 예로써 다음 식이 널리 사용되고 있다.

$$Stiffness = \frac{ET^N}{12} \cdot \frac{W}{L^2} \quad (1)$$

여기에서 T는 종이 또는 판지의 두께를 나타내며, N은 동일한 밀도에서 비교할 경우에는 3, 동일한 평량에서 비교할 경우에는 2의 상수 값이 반영된다. W는 종이의 폭이며, L은 종이의 길이를 나타낸다. 종이의 경우에는 상기 방법에 의하여 어느 정도 조절이 가능하나, 다층 구조를 지니는 판지의 경우에는 각 층에 사용된 펄프의 탄성계수와 판지 중심으로부터의 거리에 의하여 각 층의 판지의 휨강성에 대한 기여도가 달라진다. 따라서 다층 판지 제조 시에는 이러한 원리에 근거하여 각 층에 사용되는 원료의 선택 및 처리 조건을 정하게 된다.

따라서 본 연구에서는 고해 조건, 평량 및 측정 방법이 라이너 판지의 휨강성에 미치는 영향을 검토하고자 실시되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시 재료

공시 재료로는 미국 위스콘신주 소재의 그린베이 판지공장에서 제조된 라이너를 분양받아 사용하였다. 본 공시 재료는 94%의 반화학 크라프트펄프와 6%의 재생섬유인 AOCC로 제조되었으며, 라이너의 한쪽 면은 왁스로 처리되었다.

### 2.2 실험 방법

라이너를 해리시키기 전에 먼저 손으로 적당한 크기로 찢어 물에 약 18시간 동안 침적시켰다가 고농도 펄프에서 10%의 농도로 약 40분간 해리를 실시하고, 특수 제작된 아스피레이터(진공 탈수 장치)와 압착 탈수 장치를 이용하여 약 20% 정도의 농도로 농축시키고, flutter를 이용하여 펄프 덩어리를 잘게 부순 후 함수율을 측정하고 비닐 봉지에 담아 실험에 사용하기 위하여 냉장실에 보관하였다.

펄프의 고해를 위하여 직경 12인치의 싱글 디스크 리화이너(Sprout-Waldron사)를 사용하였으며, 펄프 공급량의 변이에 따른 고해 세기의 변화를 최소화하기 위하여 콘베이어 벨트 방식의 펄프 공급 장치를 사용하였다. 디스크 리화이너 플레이트의 온도 변화가 미치는 영향을 배제하기 위하여 열수를 지속적으로 공급하여 플레이트의 온도를 조절하고, 고해 농도를 조절하기 위한 희석수로도 사용하였다. 고해를 실시하는 동안 소비된 전기 에너지를 측정하기 위하여 전력계를 사용하였으며, 각 고해 조건에서 무부하 에너지를 먼저 측정하여 총 고해 에너지로부터 빼어주어 비교해 에너지 소비량 산출 시 순 고해 에너지로 사용하였다. 고해 조건은 플레이트의 간격을 0.01, 0.007, 0.004 인치로 조절하였으며, 각 간격에서 5%, 8% 및 12%의 고해 농도를 적용하였다. 상기 조건에 의하여 고해된 펄프에 대하여 TAPPI Standard T205 sp-02에 의거 각각 평량 126, 185 및 205 g/m<sup>2</sup>의 수초지를 제조하였으며, TAPPI Standard T402 sp-03에 의거 조습처리를 실시한 후 휨강성(Taber stiffness, resonance stiffness), 두께, 탄성계수를 측정하였고, 휨강성과 탄성계수로부터 유효두께를 산출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 휨강성 측정 원리

휨강성과 관련된 종이 또는 판지의 성질을 측정하기 위하여 4점법, 3점법, 2점법 및 공명(resonance)법 등이 이용될 수 있다.<sup>1)</sup> 휨강성은 방정식 (2)에서 보는 바와 같이 굴곡 시험에서 소량의 변형에 대하여 M(휨 모멘트)과 R(곡률 반경)의 곱으로부터 얻어질 수 있으며, 종이의 순수한 휨 특성에 대한 정보는 원상의 호를 이루도록 구부러 종이 및 판지의 탄성, 가소성 및 파괴 특성의 측정을 통하여 얻어진다.<sup>2)</sup>

$$S_b = MR \tag{2}$$

Taber 휨강성은 2점법으로써 시편의 한쪽 끝이 고정되고, 다른 한쪽 끝에서 하중이 가해지는 방법이다.<sup>2)</sup> 4점법과 달리 고정된 지점으로부터 거리가 증가됨에 따라 휨모멘트가 직선적으로 감소된다(방정식 3). 결국 x값이 커질수록 곡률 반경도 증가된다. 따라서 변형( $\delta$ )과 곡률 반경(1/R) 사이의 관계를 구하기 위하여 식 (4)과 같은 미분 방정식이 사용되며, 휨강성은 방정식 (5), (6) 또는 (7)에 의하여 얻어질 수 있다.

$$M = F(l - x) \tag{3}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \tag{4}$$

$$S_b = \frac{F}{\delta} \cdot \frac{l^3}{3} \tag{5}$$

$$S_b = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \cdot \frac{l^3}{3} \tag{6}$$

$$S_b = \frac{\Delta F}{\Delta \theta} \cdot \frac{60l^2}{\pi} \tag{7}$$

공명 휨강성은 시편의 한 쪽 끝을 자유 진동시킬 경우 이때 얻어질 수 있는 재료의 주파수가 휨강성에 의하여 영향을 받는다는 사실에 근거를 두고 개발된 것으로 시편의 한쪽을 고정시키고 다른 쪽 끝

을 25 Hz의 일정한 주파수로 시편을 진동시키는데 필요한 길이를 측정하여 휨강성을 식 (8)에 의하여 산출하는 방식이다.<sup>3-4)</sup>

$$S_b = 2 \cdot 10^3 \cdot l^4 \cdot W \tag{8}$$

#### 3.2 Taber 휨강성과 공명 휨강성의 관계

2점법인 Taber 휨강성과 공명 휨강성과의 상관관계를 조사하기 위하여 평량 및 고해 조건 별로 도정한 바 Figs. 1~4와 같이 그림 상으로는 어느정도 상관관계가 있는 것으로 보이나, 결정계수가 0.63~0.70의 사이의 매우 낮은 값을 나타내었다.

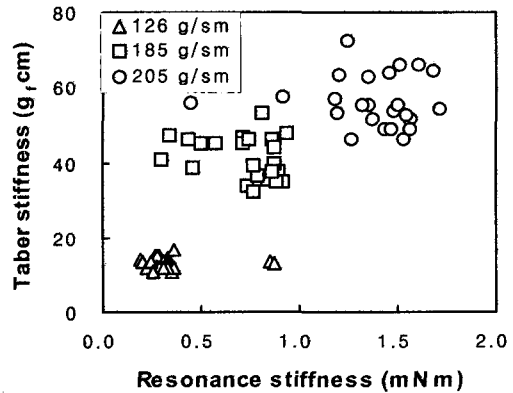


Fig. 1. Effect of grammage on the relation between Taber and resonance stiffness.

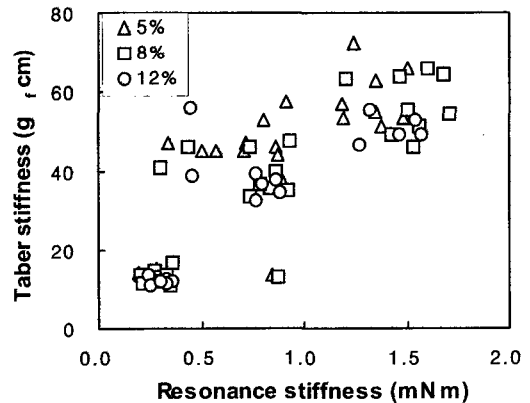


Fig. 2. Effect of refining consistency on the relation between Taber and resonance stiffness.

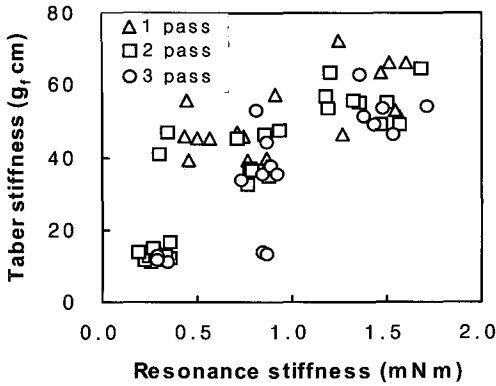


Fig. 3. Effect of refining degree on the relation between Taber and resonance stiffness.

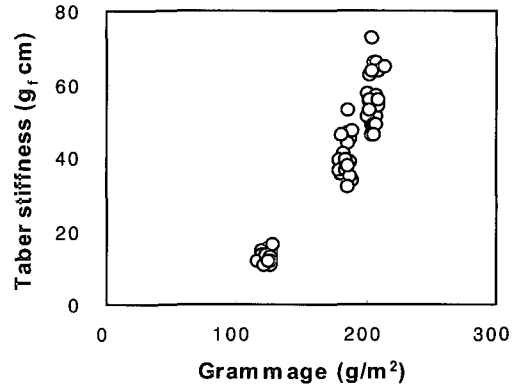


Fig. 5. Effect of grammage on Taber stiffness.

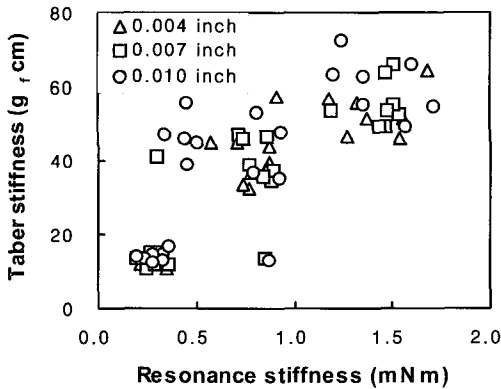


Fig. 4. Effect of refiner plate gap on the relation between Taber and resonance stiffness.

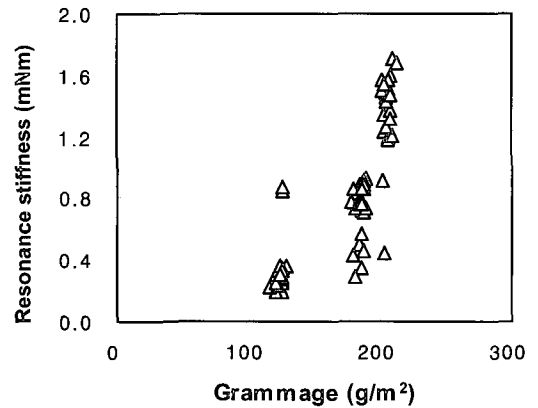


Fig. 6. Effect of grammage on resonance stiffness

이와 같은 결과는 이들 두 가지의 휨강성 측정법이 유사한 성질을 측정하면서도 근본적으로 다른 측정 원리로 말미암아 서로 다른 특성을 내포하고 있는 것으로 분석된다.

### 3.3 평량이 라이너의 휨강성에 미치는 영향

동일한 성질을 지니는 펄프를 원료로 하여 종이 또는 라이너 판지를 제조할 경우 이때 얻어질 수 있는 휨강성은 평량에 의하여 좌우된다고 할 수 있다. Figs. 5~6은 각각 평량에 대하여 Taber 휨강성과 공명 휨강성을 도시한 것으로 전반적으로 평량이 증가됨에 따라 휨강성도 증가되는 경향을 나

타내고 있으나, 공명 휨강성의 경우 측정치가 더 분산되는 경향을 보여주었다. 비록 Feller는 그의 연구 보고에서 공명 휨강성의 측정 변이가 여러 가지 휨강성 측정 방법 중 가장 낮았고, Taber 휨강성에서 가장 높은 변이를 나타내었다고 했으나,<sup>5)</sup> 고해 조건 및 평량의 변화에 대한 결과는 공명 휨강성에서 더 분산된 값이 얻어지는 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과는 비록 반복성 측면에서는 공명 휨강성 측정법이 우수할 수 있으나, 라이너 제조와 관련된 제반 영향 인자가 미치는 영향의 평가에 있어서는 Taber 휨강성이 더 안정적인 결과를 제공해줄 수 있다.

### 3.4 고해 조건이 휨강성에 미치는 영향

Figs. 7~10은 고해 농도와 리화이너 플레이트 간격 별로 얻은 값을 도시한 것으로 Tabler와 공명 휨강성의 경우 모두 고해 조건이 미치는 영향이 명백히 확인되지 않았다. 따라서 기 보고된<sup>6)</sup> 바와 같이 비교해 에너지 소비가 적게 드는 조건으로 고해를 하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. Figs. 11~12는 평량 별로 도시한 것으로 두 가지 측정 방식에서 모두 평량이 높을수록 높은 휨강성을 나타내었다. 그러나 고해가 진행될수록 Taber 휨강성은 감소되었으나, 공명 휨강성은 뚜렷한 변화를 나타내지 않았다.

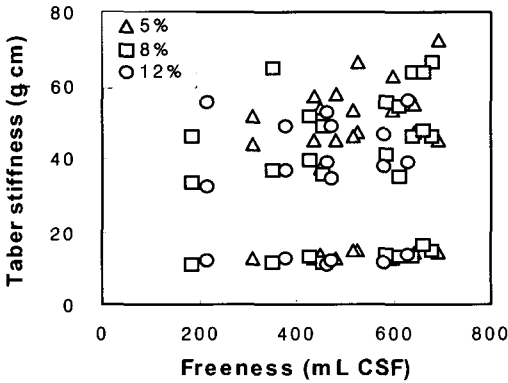


Fig. 7. Effect of refining consistency on the relation between Taber stiffness and freeness.

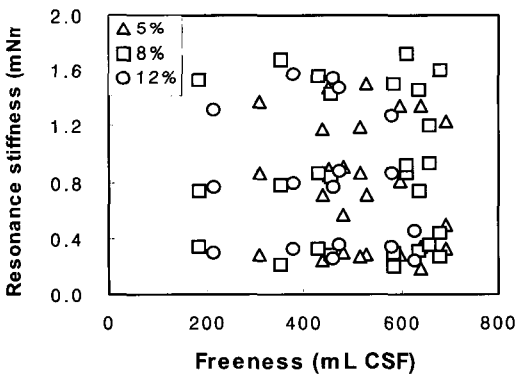


Fig. 8. Effect of refining consistency on the relation between resonance stiffness and freeness.

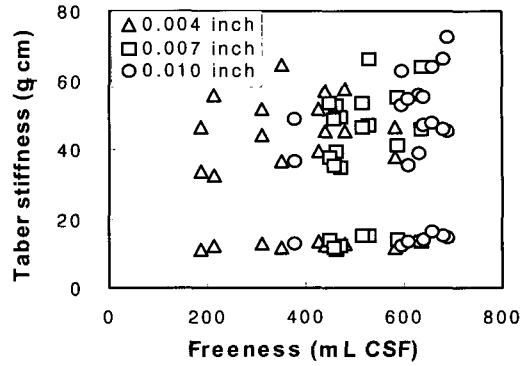


Fig. 9. Effect of refining plate gap on the relation between Taber stiffness and freeness.

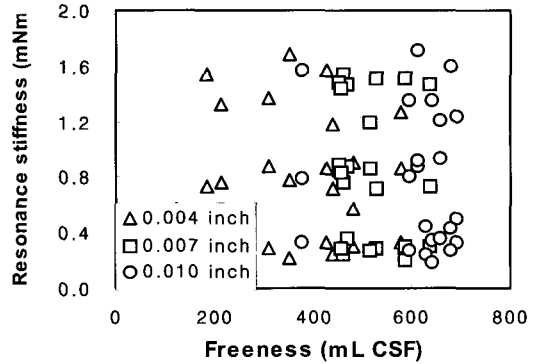


Fig. 10. Effect of refining plate gap on the relation between resonance stiffness and freeness.

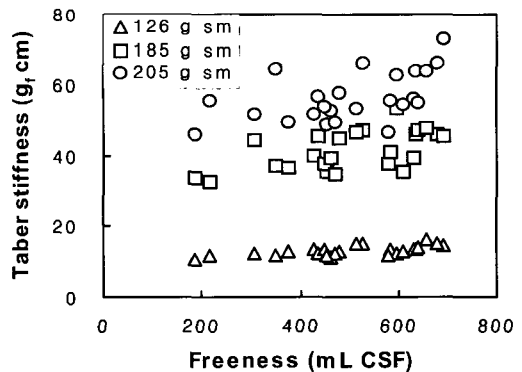


Fig. 11. Effect of grammage on the relation between Taber stiffness and freeness.

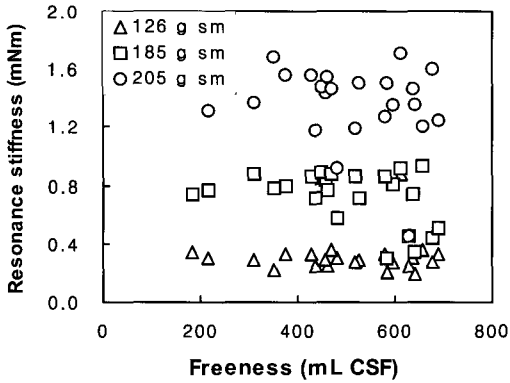


Fig. 12. Effect of grammage on the relation between resonance stiffness and freeness.

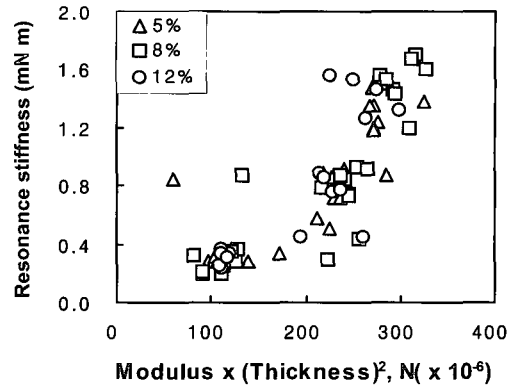


Fig. 14. Effect of refining consistency on the relation between resonance stiffness and  $ET^2$ .

### 3.5 탄성계수와 두께의 영향

종이와 판지의 휨강성에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서 펄프의 탄성계수와 두께를 꼽을 수 있다. Figs. 13~20은 고해 농도와 리화이너 플레이트 간격의 조건별로 탄성계수와 두께가 휨강성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Taber 휨강성의 경우(결정계수 : 0.87~0.92)에는 비교적 유의성이 높은 상관관계를 보여주었으나, 공명 휨강성(결정계수 : 0.69~0.70)의 경우에는 유의성이 매우 낮았다. 그리고 Taber 휨강성의 경우 “탄성계수 x (두께)<sup>2</sup> (결정계수 : 0.87)”보다 “탄성계수 x (두께)<sup>3</sup> (결정계수 : 0.92)”의 관계에서 더 높은 상관관계를 보여주었다. 그러나 고해 농도와 리화이너 플레이트 간격의 영

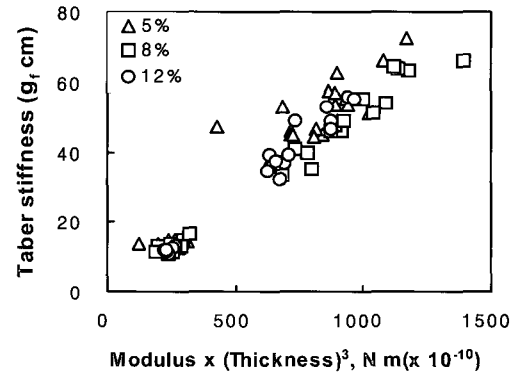


Fig. 15. Effect of refining consistency on the relation between Taber stiffness and  $ET^3$ .

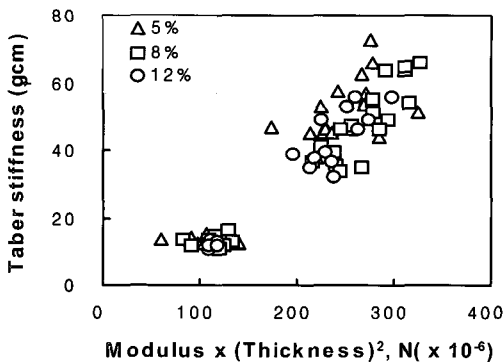


Fig. 13. Effect of refining consistency on the relation between Taber stiffness and  $ET^2$ .

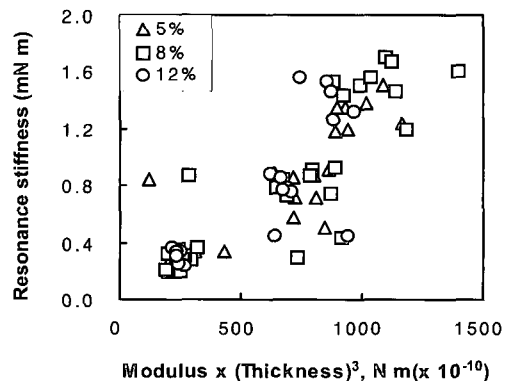


Fig. 16. Effect of refining consistency on the relation between resonance stiffness and  $ET^3$ .

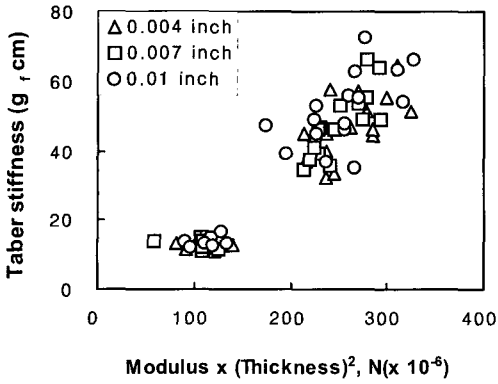


Fig. 17. Effect of refiner plate gap on the relation between Taber stiffness and  $ET^2$ .

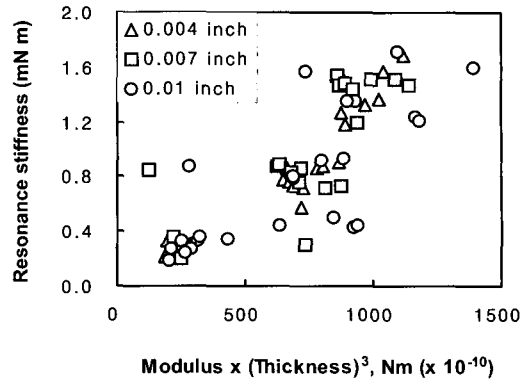


Fig. 20. Effect of refiner plate gap on the relation between resonance stiffness and  $ET^3$ .

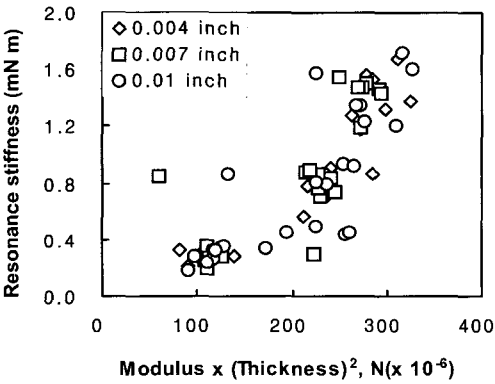


Fig. 18. Effect of refiner plate gap on the relation between resonance stiffness and  $ET^2$ .

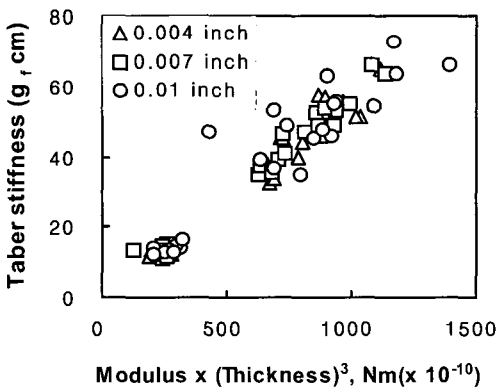


Fig. 19. Effect of refiner plate gap on the relation between Taber stiffness and  $ET^3$ .

향은 확인되지 않았다.

### 3.6 유효 두께

Figs. 21~22는 Taber와 공명 휨강성, 그리고 탄성계수로부터 유효 두께를 산출하여 라이너 판지의 두께에 대하여 도시한 것으로 Taber 휨강성과 공명 휨강성은 각기 다른 특성을 나타내었다. 즉 Taber 휨강성의 경우에는 두께 측정치와 매우 유사한 값과 경향을 나타내었으나, 공명 휨강성의 경우에는 평량 126 g/m<sup>2</sup>에서는 유효 두께가 측정치보다 낮았고, 185 g/m<sup>2</sup>에서는 측정치와 거의 유사했으나, 205 g/m<sup>2</sup>에서는 훨씬 높은 값을 나타내었다. 이와 같이 두 측정 방법에 의하여 얻어진 휨강성

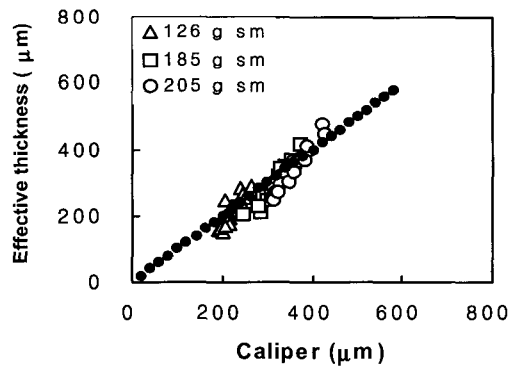


Fig. 21. Effect of grammage on the relation between effective thickness and caliper for Taber stiffness.

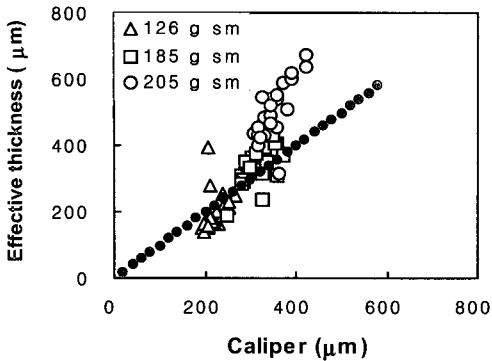


Fig. 22. Effect of grammage on the relation between effective thickness and caliper for resonance stiffness.

으로부터 산출된 유효 두께 값의 분포가 다르게 나타난 것은 다른 측정 원리가 적용됨으로써 적용되는 종이의 성질이 다른데서 비롯된 것으로 판단되었다.

#### 4. 결론

라이너 판지용 펄프의 고해 조건 및 평량이 휨강성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Taber 휨강성과 공명 휨강성을 측정하여 비교한 결과 Taber 휨강성과 공명 휨강성 사이의 상관관계(결정계수: 0.63 ~ 0.70)는 매우 낮았는데 이는 서로 다른 측정 원리에서 비롯된 것으로 생각된다. 평가된 두 가지 휨강성은 모두 고해 조건에 의한 영향이 뚜렷하지 않았다. 따라서 비교해 에너지의 소비가 적게 요구되는 고해 조건을 적용하는 것이 바람직하다고 할

수 있다. 한편 라이너 판지의 두께와 탄성계수가 휨강성에 미치는 영향을 조사한 결과 Taber 휨강성은 주요 고해 조건 및 평량에서 두께 및 탄성계수에 대하여 매우 높은 상관관계를 보여준 반면 공명 휨강성은 상관 정도가 현저히 떨어지는 경향을 나타내었다. 유효 두께는 Taber 휨강성의 경우에는 실제 측정치와 매우 유사한 값이 얻어졌으나, 공명 휨강성의 경우에는 낮은 평량에서는 측정치보다 낮은 유효 두께가 얻어졌으며, 평량이 증가됨에 따라 더 붙어 증가되어 205 g/m<sup>2</sup>에서는 훨씬 높은 값이 얻어져서 유효 두께의 적용에 문제가 있음이 확인되었다.

#### 인용문헌

1. ISO Standard 5628, Paper and board - Determination of bending stiffness by static methods - General principles.
2. TAPPI Test Method T489, Bending resistance(stiffness) of paper and paperboard (Taber-type tester in basic configuration).
3. TAPPI Test Method T535, Bending stiffness of paper and paperboard(resonance length method).
4. ISO Standard 5629, Paper and board - Determination of bending stiffness - Resonance method.
5. Feller, C., Bending stiffness of paper and paperboard : a round robin study, Nord. Pulp Pap. Res. J. 12(1):42-45(1997).
6. 원종명. 라이너 제조용 펄프의 고해 조건이 에너지 소비 및 종이 물성에 미치는 영향. 한국펄프종이공학회 2002 추계학술발표논문집. pp. 19-25(2002).