

라이너판지의 bending stiffness에 대한 검토

원 종 명

강원대학교 체지공학과

1. 서 론

휨강성(bending stiffness)은 종이 뿐만 아니라 특히 판지에 있어서 매우 중요한 성질의 하나로써 용도에 따라 그에 부합되는 수준의 stiffness가 충족되지 못할 경우 상품으로서의 가치를 상실하게 된다. 종이 및 판지의 휨강성에 영향을 미치는 인자로서는 각 층에 사용된 펄프의 특성(탄성계수, 섬유장, 헤미셀룰로오스 함량), 두께, 판지를 구성하는 각 층의 중심으로부터의 거리와 해당 층의 탄성계수, 표면처리, 섬유의 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 인자로 작용하게 된다. 여기에서 어느 것의 기여도가 더 많이 작용되었는지에 따라 개선 또는 저하의 여부가 결정된다고 할 수 있다. 이러한 이유 때문에 종이 또는 판지의 휨강성의 조절 및 관리가 쉽지는 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 측정 결과를 얻을 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.

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

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.

본 연구는 이전 연구에서 라이너판지의 Taber stiffness와 압축강도로부터 산출된 유효두께를 실제로 측정한 두께에 대하여 도시한 결과 평량에 따라 두께의 군으로 분리되는 결과가 얻어져¹⁾, 그 원인을 파악하고, 측정 방법 및 평량이 휨강성에 미치는 영향을 검토하고자 실시되었다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

공시재료로는 미국 위스콘신주 소재 그린베이 판지공장에서 제조된 라이너를 분양받아 사용하였다. 본 연구에서 공시재료로 사용된 라이너는 94%의 반화학 크라프트펄프와 6%의 재생섬유인 AOCC로 제조되었으며, 라이너의 한면은 왁스로 처리되었다.

2.2 실험방법

라이너를 해리시키기 전에 먼저 손으로 적당한 크기로 찢어 물에 약 18시간 동안 침적시켰다가 고농도 펄프에서 10%의 농도로 약 40분간 해리를 실시하고, 특수 제작된 아스피레이터와 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, 고해세기를 일정하게 유지할 수 있도록 하기 위하여 콘베이어 벨트 방

식의 펄프 공급 장치를 사용하였고, 디스크 리화이너 플레이트의 온도 변화가 미치는 영향을 최소화하기 위하여 열수를 지속적으로 공급하여 플레이트의 온도를 조절하고, 또한 고해 농도를 조절하기 위한 희석수로도 사용하였다. 고해를 실시하는 동안 소비된 동력을 측정하기 위하여 전력계를 사용하였으며, 각 고해 조건에서 무부하 동력을 먼저 측정하여 총 고해 동력으로부터 빼어주어 순 고해동력으로 사용하였다. 고해 조건으로서 플레이트의 간격을 0.01, 0.007, 0.004 인치로 조절하였으며, 각 간격에서 5%, 8% 및 12%의 고해 농도를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Bending stiffness 측정법

bending stiffness와 관련된 종이 또는 판지의 성질을 측정하기 위하여 여러 가지 측정법으로는 4점법, 3점법, 2점법 및 resonance법이 이용될 수 있다. bending stiffness는 방정식 (2)에서 보는 바와 같이 굴곡 시험에서 소량의 변형에 대하여 M과 R의 곱으로부터 얻어질 수 있으며, 종이의 순수한 휨 특성에 대한 정보는 원상의 호를 이루도록 구부려 종이 및 판지의 탄성, 가소성 및 파괴 특성의 측정을 통하여 얻어진다.²⁾

$$S_b = MR \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

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

$$M = F(l - x) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

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

$$S_b = \frac{F}{\delta} \times \frac{l^3}{3} \dots \dots \dots (5)$$

$$S_b = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \times \frac{l^3}{3} \dots \dots \dots (6)$$

$$S_b = \frac{\Delta F}{\Delta \theta} \times \frac{60l^2}{\pi} \dots \dots \dots (7)$$

Resonance stiffness는 시편의 한 쪽 끝을 자유 진동시킬 경우 이때 얻어질 수 있는 재료의 주파수가 bending stiffness에 의하여 영향을 받는다는 사실에 근거를 두고 개발된 것으로 시편의 한쪽을 고정시키고 다른 쪽 끝을 25 Hz의 일정한 주파수로 시편을 진동시키는데 필요한 길이를 측정하여 bending stiffness를 식 (8)에 의하여 산출하는 방식이다.

$$S_b = 2 \times 10^3 \times l^4 \times W \dots \dots \dots (8)$$

3.2 Taber stiffness와 Resonance stiffness의 관계

2점법인 Taber stiffness와 resonance stiffness와의 상관관계를 조사하기 위하여 평량별, 고해 조건별로 도시한 바 그림 상으로는 어느 정도 상관관계가 있는 것으로 보이나, 결정계수가 0.63~0.70의 사이의 매우 낮은 값을 나타내었다. 이와 같은 결과는 이들 두가지의 bending stiffness 측정법이 유사한 성질을 측정하면서도, 근본적으로 다른 측정 원리로 말미암아 서로 다른 특성을 내포하고 있는 것으로 분석되며, resonance stiffness의 측정치가 더 크게 분산되는 현상을 볼 때 taber stiffness보다 훨씬 예민한 것으로 판단된다.

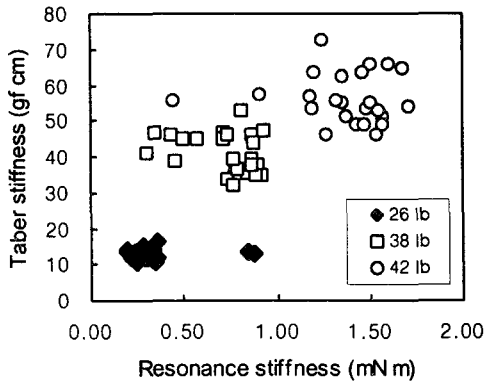


Fig. 1. Effect of grammage on the relation between taber and resonance stiffness.

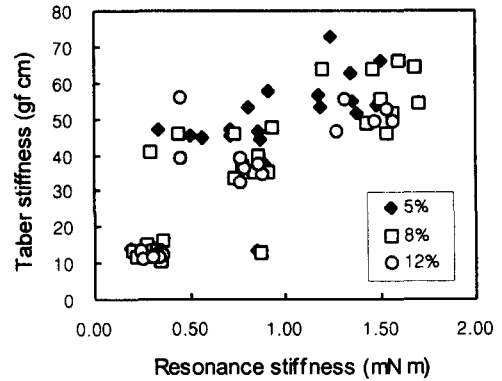


Fig. 2. Effect of refining consistency on the relation between taber and resonance stiffness.

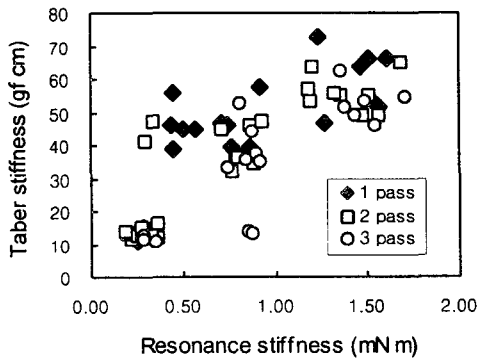


Fig. 3. Effect of refining degree on the relation between taber and resonance stiffness.

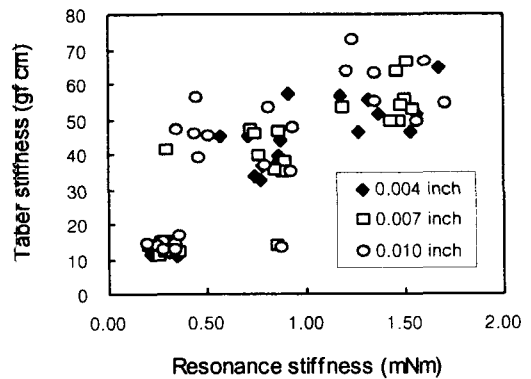


Fig. 4. Effect of refiner plate gap on the relation between taber and resonance stiffness.

3.3 평량이 라이너의 휨강성에 미치는 영향

동일한 성질을 지니는 펄프를 원료로 하여 종이 또는 판지를 제조할 경우 이때 얻어질 수 있는 bending stiffness는 평량에 의하여 좌우된다고 할 수 있다. Fig. 5와 6은 각각 평량에 대하여 taber stiffness와 resonance stiffness를 도시한 것으로 전반적으로 bending stiffness가 평량이 증가됨과 더불어 증가되는 경향을 나타내고 있으나,

resonance stiffness의 경우 측정치가 더 분산되어 있고, 고평량으로 갈수록 taber stiffness에 비하여 평량의 영향이 감소되는 경향을 보여주었다. Fig. 7~12는 각각 고해 농도, refiner plate gap 및 고해 정도에 따라 도시한 것으로 이들의 영향이 구분되지 않았다.

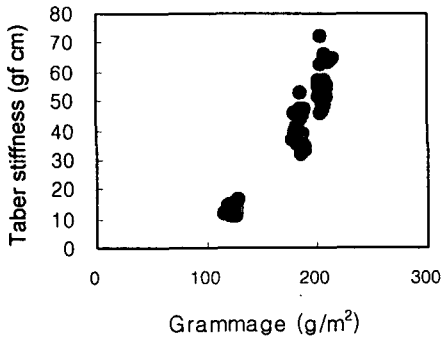


Fig. 5. Effect of grammage on taber stiffness.

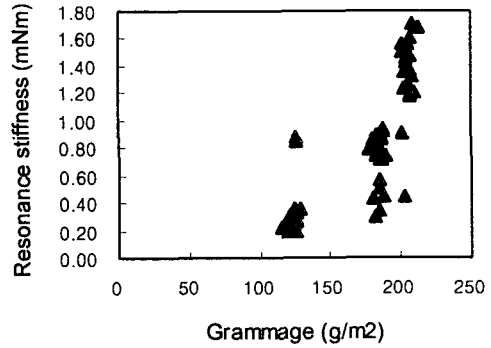


Fig. 6. Effect of grammage on resonance stiffness.

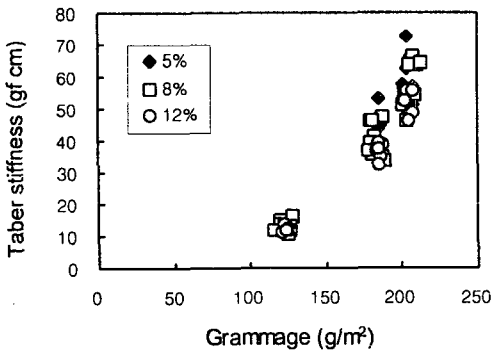


Fig. 7. Effect of refining consistency on the relation between taber stiffness and grammage.

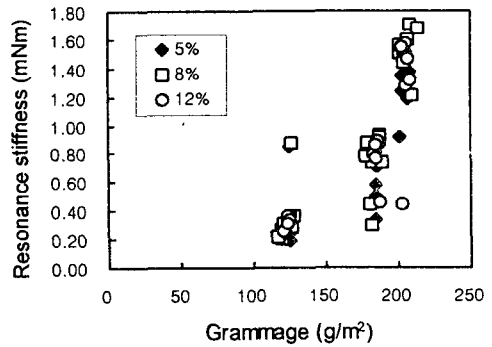


Fig. 8. Effect of refining consistency on the relation between resonance stiffness and grammage.

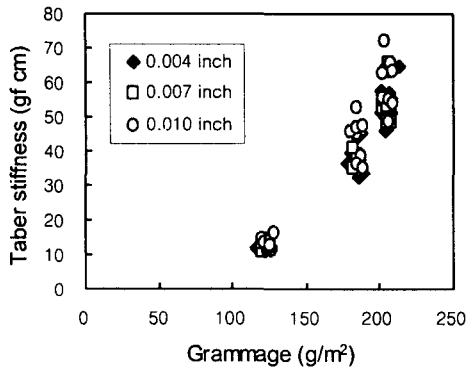


Fig. 9. Effect of refiner plate gap on the relation between taber stiffness and grammage.

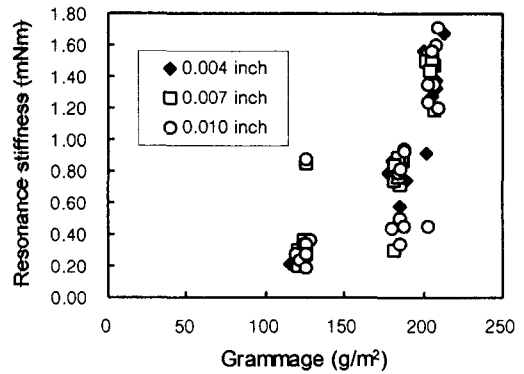


Fig. 10. Effect of refiner plate gap on the relation between resonance stiffness and grammage.

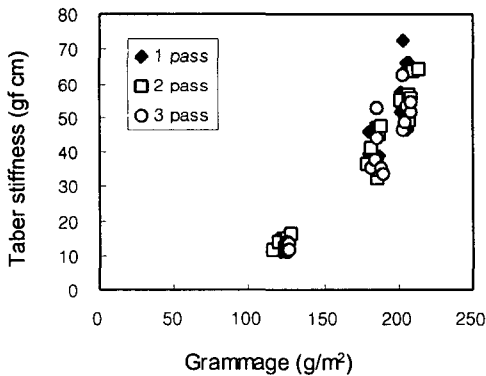


Fig. 11. Effect of refining degree on the relation between taber stiffness and grammage.

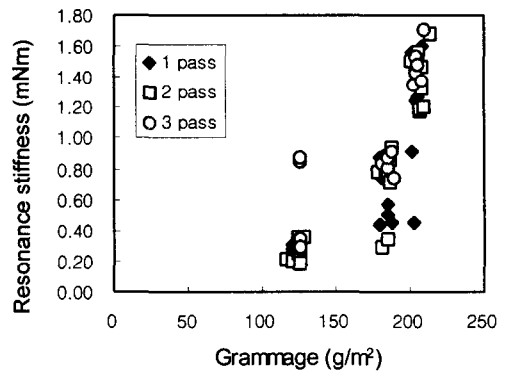


Fig. 12. Effect of refining degree on the relation between resonance stiffness and grammage.

3.4 고해 수준이 bending stiffness에 미치는 영향

Fig. 13~16은 고해 농도와 refiner plate gap 별로 얻은 값을 도시한 것으로 전혀 어떤 경향을 확인할 수 없었으나, Fig. 17과 18은 평량 별로 도시한 것으로 taber stiffness는 동일한 평량에서 의 증가와 더불어 다소 증가되었으나, resonance stiffness는 일정한 경향을 나타내지 않았다.

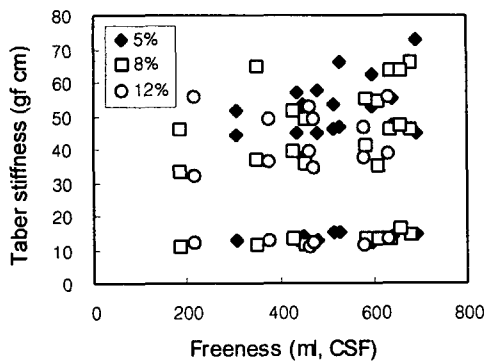


Fig. 13. Effect of refining consistency on the relation between taber stiffness and freeness.

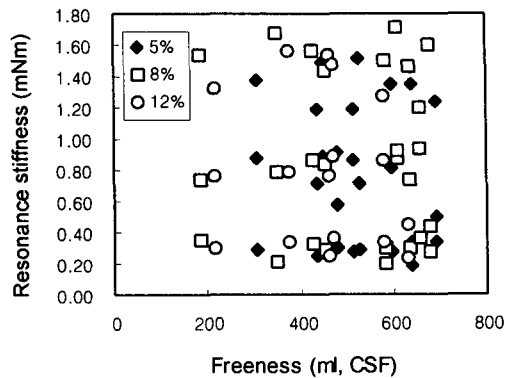


Fig. 14. Effect of refining consistency on the relation between resonance stiffness and freeness.

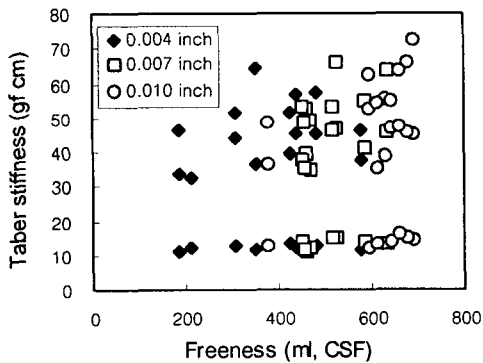


Fig. 15. Effect of refining plate gap on the relation between taber stiffness and freeness.

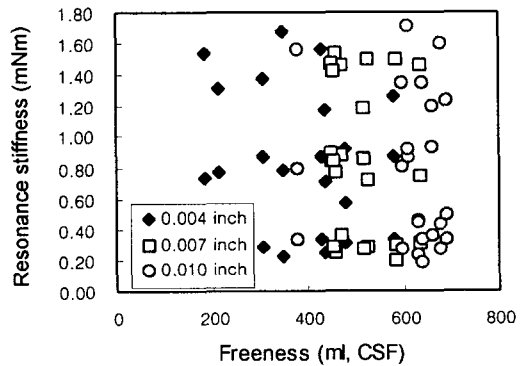


Fig. 16. Effect of refining plate gap on the relation between resonance stiffness and freeness.

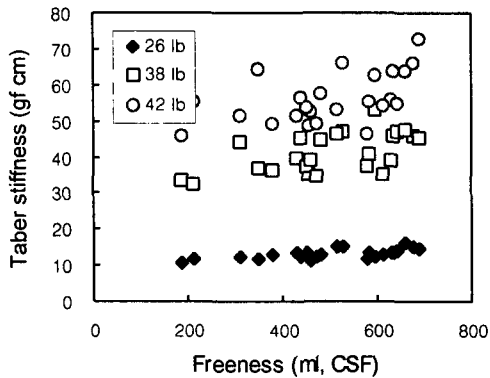


Fig. 17. Effect of grammage on the relation between taber stiffness and freeness.

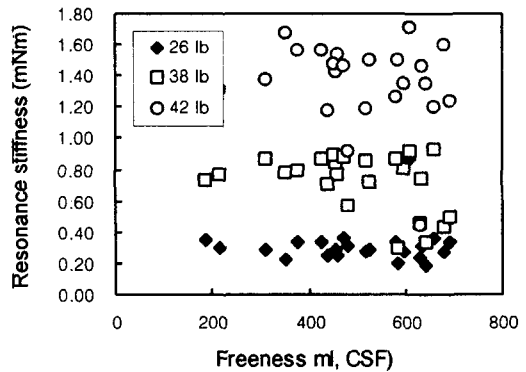


Fig. 18. Effect of grammage on the relation between resonance stiffness and freeness.

3.4 탄성계수와 두께의 영향

종이와 판지의 bending stiffness에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서 필프의 탄성계수와 두께를 꼽을 수 있다. Fig. 19~26은 고해 농도와 refiner plate gap의 조건별로 탄성계수와 두께가 bending stiffness에 미치는 영향을 나타낸 것으로 taber stiffness의 경우에는 비교적 유의성이 높은 상관관계를 보여주었으나, resonance stiffness의 경우에는 유의성이 매우 낮았다. 그리고 taber stiffness의 경우 탄성계수 \times (두께)²보다 탄성계수 \times (두께)³과 더 높은 상관관계를 보여주었다. 그러나 고해 농도와 refiner plate gap의 영향은 확인되지 않았다.

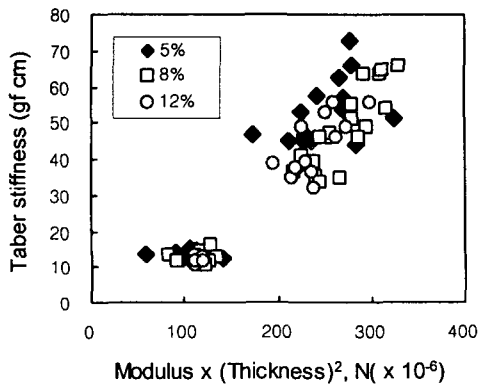


Fig. 19. Effect of refining consistency on the relation between taber stiffness and ET^2 .

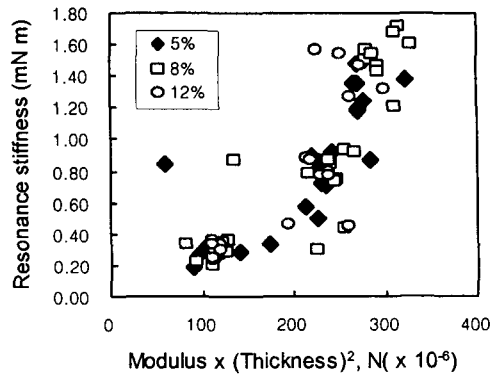


Fig. 20. Effect of refining consistency on the relation between resonance stiffness and ET^2 .

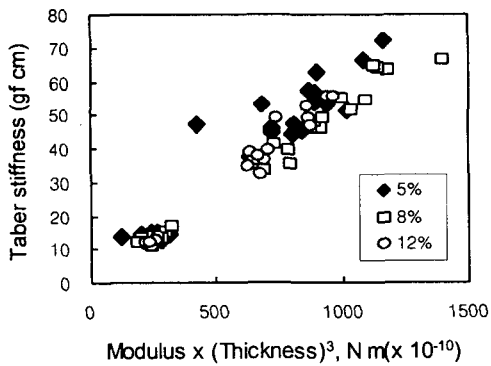


Fig. 21. Effect of refining consistency on the relation between taber stiffness and ET^3 .

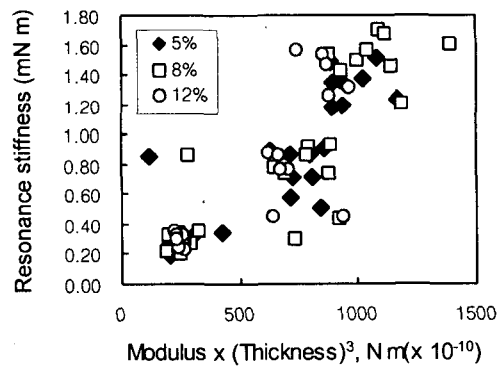


Fig. 22. Effect of refining consistency on the relation between resonance stiffness and ET^3 .

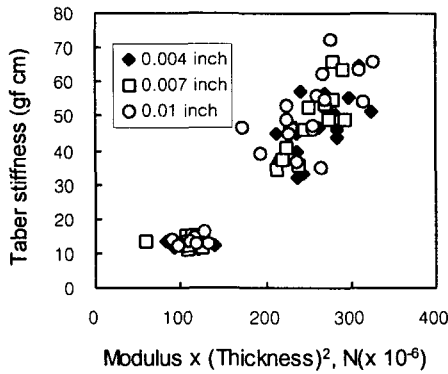


Fig. 23. Effect of refiner plate gap on the relation between taber stiffness and ET^2 .

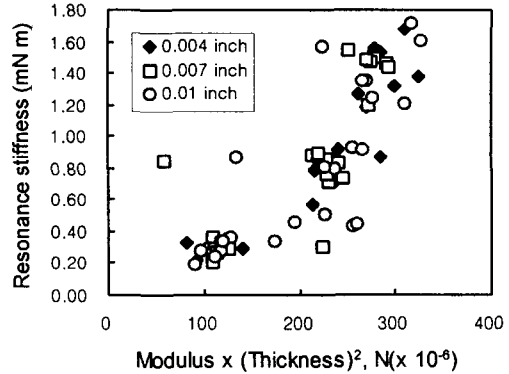


Fig. 24. Effect of refiner plate gap on the relation between resonance stiffness and ET^2 .

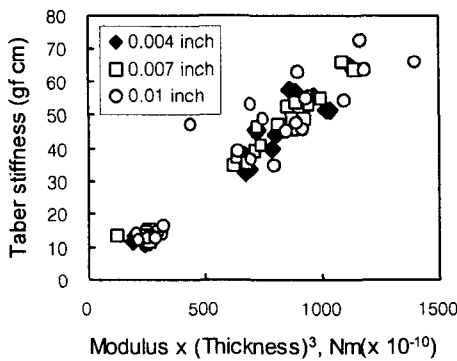


Fig. 25. Effect of refiner plate gap on the relation between taber stiffness and ET^3 .

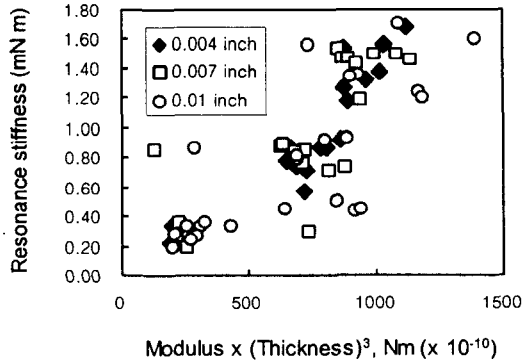


Fig. 26. Effect of refiner plate gap on the relation between resonance stiffness and ET^3 .

3.5 Effective thickness

Fig. 27과 28은 taber와 resonance bending stiffness와 탄성계수로부터 유효두께를 산출하여 라이너 판지의 두께에 대하여 도시한 것으로 taber stiffness와 resonance stiffness는 각기 다른 특성을 나타내었다. 즉 taber stiffness의 경우에는 두께 측정치와 매우 유사한 값과 경향을 나타내었으나, resonance stiffness의 경우에는 평량이 증가될수록 유효두께가 높게 나타났다. Fig. 29와 30은 평량 별로 도시한 것으로 두 bending stiffness의 특성을 더욱 분명히 보여주었다.

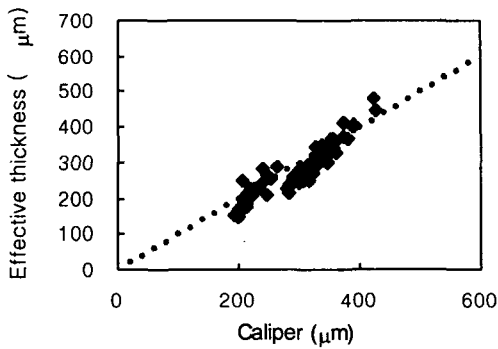


Fig. 27. Relation between effective thickness and caliper for taber stiffness.

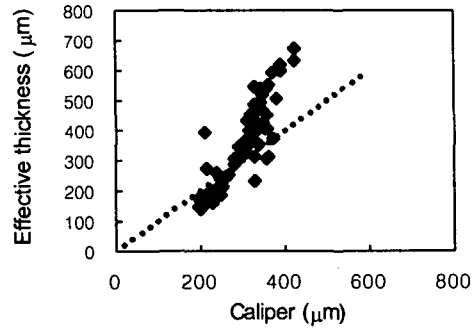


Fig. 28. Relation between effective thickness and caliper for resonance stiffness.

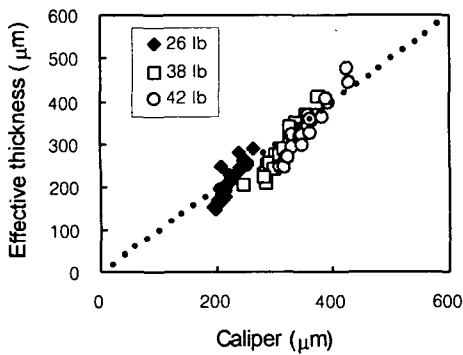


Fig. 29. Effect of grammage on the relation between effective thickness and caliper for taber stiffness.

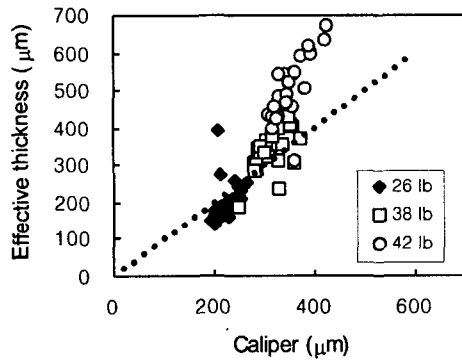


Fig. 30. Effect of grammage on the relation between effective thickness and caliper for resonance stiffness.

4. 결 론

종이와 판지의 bending stiffness는 여러 가지 요인이 매우 복잡하게 작용한다. 현재 까지 일반적으로 알려진 사실은 각 층에 사용된 펄프의 탄성계수, 종이의 두께가 bending stiffness에 결정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러나 원료 뿐만 아니라 제지 관련 공정 조건들이 복합적으로 작용하기 때문에 품질 관리가 매우 복잡하다. 본 연구에서는 taber stiffness와 resonance stiffness를 비교한 결과 taber stiffness

가 비교적 주요 인자에 대하여 매우 높은 상관을 보여준 반면에 resonance stiffness는 상관 정도가 현저히 떨어지는 경향을 나타내었다. 그러나 실용적인 측면에서 taber stiffness 사용시에도 가끔 밝혀지지 않은 문제들이 대두된다. 이러한 문제를 분석하기 위한 수단을 찾기 위한 일환으로 effective thickness가 검토되었다.

참고문헌

1. 원종명. 라이너 제조용 펄프의 고해 조건이 에너지 소비 및 종이 물성에 미치는 영향. 한국펄프종이공학회 2002 추계학술발표논문집. pp. 19-25(2002).
2. Feller, C. and Carlsson, L.. Measuring the pure bending properties of paper. A new method. Tappi 62(8):107(1979).