

접힘 각도 및 속도에 따른 판지의 접힘 특성 평가

진성민 · 류재호 · 권현승 · 윤혜정[†]
(2007년 4월 28일 접수: 2007년 8월 24일 채택)

Evaluation of Folding Properties of Paperboard with Folding Angle and Rate

Seong Min Chin, Jae Ho Ryu, Hyun Seung Kwon, and Hye Jung Youn[†]
(Received April 28, 2007: Accepted August 24, 2007)

ABSTRACT

Folding performance is very important in box manufacturing process using paperboard. To evaluate the folding performance of various paperboards, we measured the folding moment and folding behavior at the different folding angle and rate conditions. When linerboard with grammage of 300 g/m² was folded up to 90°, the compression break and delamination of sheet were observed. The maximum folding moment was little affected by folding angle, but it was increased logarithmically with folding rate. And the effect of paperboard thickness was significant. The maximum folding moment of MD sample was higher than one of CD sample by 40%.

Keywords : paperboard, folding, folding moment, compression break, delamination, creasability

1. 서 론

최근 각종 환경규제 및 자원재활용 문제 등에 의해 포장산업에서 지류 포장에 대한 관심과 수요가 늘어나고 있으며, 이에 따라 포장 재료로서 판지의 물성 수준이 높아지고 있다. 다양한 요구 물성 중에서 내용물 보호 및 저장효율을 높이기 위해 판지는 일정 수준 이상의 휨강성(bending stiffness)을 요구한다.¹⁾ 또한 상자 제

조 시 지함 조업성과 상자의 형태를 유지하기 위해 우수한 접힘성(foldability)이 필요하다.²⁾ 휨강성과 접힘성은 구부리는 것에 대한 종이 또는 판지의 저항과 관련된 것이라는 측면에서는 유사하지만, 보통 휨강성은 15° 이내의 작은 각도의 휨에 대한 것인 반면 접힘성은 재료가 90°이상의 큰 각도로 과도하게 접힐 때 쉽게 접히는 정도를 의미한다. 판지의 경우 휨강성은 사용 시 상자의 휨에 대한 예측을 할 수 있지만, 접힘성은 그와 달리

• 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 (Dept. of Forest Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 151-921 Seoul, Korea)

† 주저자 (Corresponding Author): E-mail: page94@snu.ac.kr

상자를 제조하는 공정에서 불량없이 쉽게 잘 접히는 정도를 나타낸다고 할 수 있다. 접힘성을 좋게 하기 위해 상자 제조 시 패션을 부여하기도 한다. 패선이 부여되었음에 불구하고 간혹 패선을 넣은 부분이 접힘 시 터지는 문제가 발생하기도 한다. 이를 패선터짐이라 하며, 겨울철과 같은 저습조건에서 빈번하게 발생하는 품질 불량문제라고 할 수 있다. 패선터짐은 원지, 골판지 및 상자의 물성과 환경에 따라 발생 정도가 달라지지만, 원지 및 판지 접힘 특성에 부합하는 제함 공정을 적용시키지 못하여 발생하기도 한다.³⁾ 즉, 패선의 형상, 접힘 시의 조건 등이 원지 인자와 더불어 접힘성과 패선터짐에 영향한다. 따라서 용도 및 조건에 따라 판지의 접힘 특성을 정확히 이해하고 적절하게 조절하는 것이 중요하다. 판지의 접힘 특성에 대한 평가와 적절한 적용은 상자의 강도 및 조업성 향상에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

골판지의 패선터짐에 대한 기초 연구로서 본 연구에서는 과도한 접힘에 대한 판지의 거동을 평가하고자 하였다. 골판지의 원료가 되는 라이너지와, 카톤보드로 널리 이용되는 백판지를 선정하여 접힘 각도와 속도 등 접힘 공정 인자를 변화시켰을 때 나타나는 모멘트 거동을 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

판지의 접힘 특성 평가를 위해 국내산 상업용 라이너지와 백판지를 공시재료로 이용하였다. 평량에 따른 영향을 살펴보기 상이한 두 평량을 갖는 용지를 분양받아 사용하였다. Table 1은 사용한 각 재료의 물성을 보여주고 있으며, 본 논문에서는 편의상 라이너지는 LB로, 백판지는 CB로 표기하였다. 준비된 공시 재료는 접힘

특성 평가를 위해 5 cm × 10 cm 크기로 잘라 시험편을 준비하였다.

2.2 접힘 특성 측정

접힘 작업 시 저항을 측정할 수 있는 Creasability tester (L&W Co., Sweden)를 이용하여 라이너지와 백판지의 접힘 특성을 평가하였다 (Fig. 1). 시편은 기기의 클램프에 고정되고, 클램프로부터 일정 간격 떨어진 위치에 로드 셀에 연결된 바(bar)가 시편과 접촉되어 있는 일종의 캔틸레버 (cantilever) 형태이다. 작동 시 바를 기준으로 클램프가 일정 각도까지 설정된 속도로 회전하여 시편을 구부린 뒤 다시 본래의 위치 즉, 0°로 돌아온다. 이 때 로드셀은 시편에 의해 가해진 힘을 측정한다. 측정된 힘과 벤딩 길이를 이용하여 Eq. [1]과 같이 폴딩 모멘트를 구하였으며, 일정 각도까지 구부러질 때 변형각에 따른 폴딩 모멘트의 거동 변화를 그래프로 얻었다. 구부러지는 최대 접힘 각도는 5°, 90°, 160°로 변화시켰으며, 접힘 속도는 5°/sec, 90°/sec, 900°/sec로 조절하였다. 또한 시편의 MD 방향과 CD 방향을 달리하여 평가하였다.

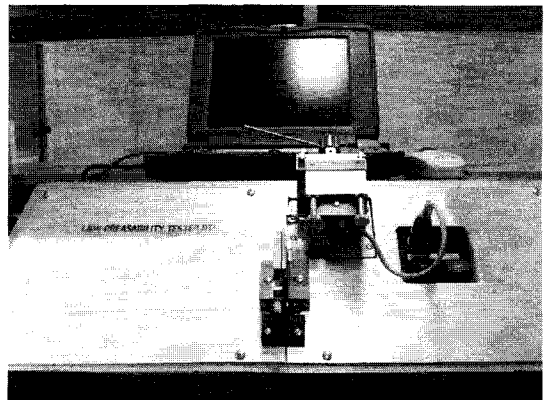


Fig. 1. Picture of creasability tester.

Table 1. Physical properties of various paperboards

	Linerboard		White lined chipboard	
	LB 225	LB 300	CB 300	CB 500
Grammage, g/m ²	223	303	319	496
Thickness, μm	288	441	386	664
Apparent density, g/cm ³	0.78	0.69	0.83	0.75
MD Tensile index, N-m/g	67	94	52	44

$$M = P \times x \quad [1]$$

where, M : Folding moment, Nm

P : Folding force, N

x : Unsupported length of the momentum arm, m.

2.3 시편의 단면 촬영

접힘에 따른 판지 내 구조적 변화를 살펴보기 위해, 일정 각도로 구부러진 시편을 취해 그 단면을 주사전자현미경 (SEM, 서울대학교 NICEM 보유)을 이용하여 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 접힘 각도 및 속도에 따른 접힘 특성

접힘 각도와 속도를 달리하여 판지의 구부렸을 때 각도에 따른 폴딩 모멘트의 변화를 creasability tester를 이용하여 평가하였다. Fig. 2는 LB 300 지중 MD 방향 시편을 5°/sec의 속도로 90°만큼 구부렸을 때 폴딩 모멘트의 거동을 보여주고 있다. 폴딩 모멘트는 35°의 구부림 각도 근처에서 최대값을 나타낸 후 감소하여 52°의 구부림 각도 근처에서 극소값을 보였다. 이후 다소 증가하던 폴딩 모멘트는 90°에 도달된 후 클램프가 본래의 위치로 돌아올 때 급격하게 감소하여 45°근처부터 0을 나타냈다. 각도에 따른 폴딩 모멘트의 변화 거동으로부터 극대 및 극소점을 발견할 수 있었다. 대체로 1차 극대점 이후 폴딩 모멘트는 비선형적인 거동을 나타내었다. 즉, 이 지점을 넘는 각도로 판지를 구부릴 경우 비가역적인 변화가 종이 내부에 발생하는 것으로 생각된다. 판지에 발생된 구조적 변화를 살펴보기 위해 주요 회전 각도에서 판지의 단면을 주사전자현미경을 이용하여 촬영하였다 (Fig. 3). 초기 판지는 치밀한 단면 구

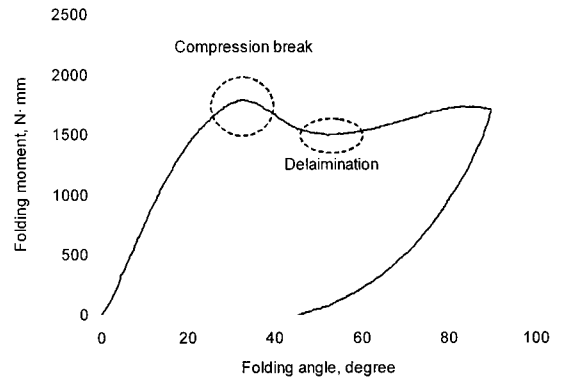


Fig. 2. Folding moment behavior of linerboard (LB 300 MD) with bending angle.

조를 보였지만, 일차 극대점 근처인 40°지점까지 구부러질 경우 압축력을 받는 판지 부분에서 비드(bead)가 형성되었으며, 비드 근처에서 층분리가 발생되기 시작했다. 이러한 비드의 형성이 판지의 접힘 시 최대 저항을 야기하게 된다. 이 지점을 압축파괴 (compression break)라 하며, 층간결합력보다 층분리 에너지가 커짐으로 인해 국부적인 층분리가 발생한다.⁴⁾ 압축파괴 지점 이상으로 접힐 경우 폴딩 모멘트가 극소에 달하는 지점에 도달되는데, 이를 층분리 (delamination) 지점이라 하며, 층분리가 본격적으로 확대된다. 판지가 90°까지 접힌 경우 단면 내 층분리가 더욱 확대되었음을 Fig. 3 (c)로부터 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 최종 구부림 각도를 달리하여 측정한 LB 300 지중의 폴딩 모멘트 변화를 보여주고 있다. 접힘 각도가 5°일 때의 모멘트 곡선은 90° 및 160°의 곡선과 겹쳐져서 구별이 되지 않지만, 최종 회전 각도까지 폴딩 모멘트가 선형적으로 증가한 후 클램프가 제자리로 돌아올 때 저항치는 동일한 크브를 따라 감소함으로써 가

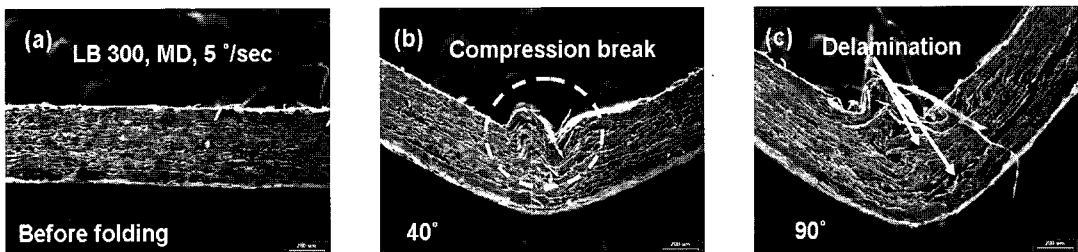


Fig. 3. Cross sectional image of linerboard at the different folding angle.

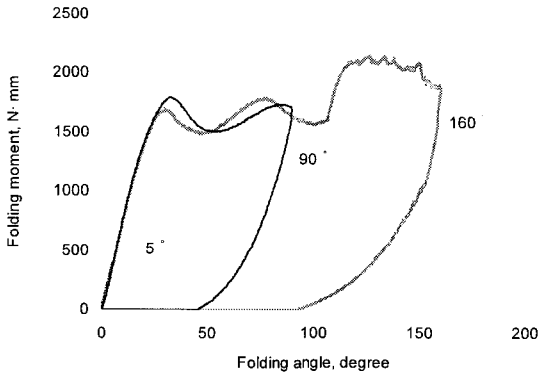


Fig. 4. Folding moment behavior of linerboard at the different folding angle.

역적 탄성 거동을 나타내었다. 즉, 일정 각도 미만의 작은 접힘 각도 영역에서는 선형적인 폴딩 모멘트 거동을 나타내었으며, 시편 또한 가역적인 변형을 일으켰다. 일반적으로 휨강성은 선형적인 변화를 보이는 15°이내에서 측정되며,⁵⁾ 이 영역의 그래프 기울기는 탄성계수로 결정된다. 접힘 각도가 90° 및 160°로 커지더라도 선형적인 모멘트 영역은 달라지지 않았지만 34° 근처에서 폴딩 모멘트 곡선의 극대점이 나타났으며, 55° 근처에서 극소점이 나타났다. 이와 같이 최종 접힘 즉, 회전 각도가 변해도 압축파괴와 층분리는 거의 일정한 각도에서 발생함을 알 수 있다. 160°로 구부릴 경우, 100° 이상에서 폴딩 모멘트가 급격히 증가하는 것은 시편이 둔각으로 접힐 때 시편의 두께 때문에 고정 클램프에 의해 야기된 추가적인 압력과, 형성된 비드에 의한 공간 방해로 인해 나타나는 거동으로 판단되었다.

Fig. 5는 구부림 속도를 달리하였을 때의 라이너지 폴딩 모멘트 거동을 보여주고 있다. 접힘 속도가 빨라

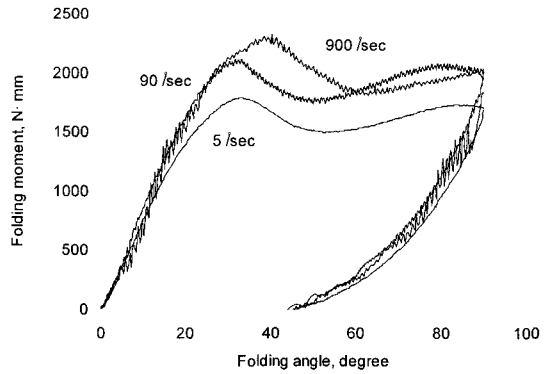


Fig. 5. Folding moment behavior of linerboard at the different folding rate.

질수록 폴딩모멘트가 증가하였으며, 폴딩 모멘트 곡선의 노이즈가 증가하였다. 이는 일정 각도를 굽히는 데 요구되는 구부림 시간이 짧을수록 저항이 크게 발생함을 나타내며, 접힘 속도에 따라 압축파괴가 일어나는 각도 및 층분리가 발생하는 지점도 달라졌다. 급격한 접힘의 경우 폴딩 모멘트의 극대점이 다소 큰 각도에서 발생하였다.

최대 폴딩 모멘트가 클수록 접힘 시 저항이 크다는 것을 의미한다. 과도하고 급격한 접힘은 구부러지는 판지의 외곽에 많은 응력을 집중시켜 접힘 부분의 터짐을 유발할 수 있다. 따라서 압축파괴가 일어나는 지점 및 이때의 폴딩 모멘트는 매우 중요한 의미를 갖는다. 이 폴딩 모멘트를 적절한 수준이하로 낮출수록 패션터짐 발생 확률은 줄어든다. 또한 적절한 패션 공정 인자를 선택함으로써 역시 폴딩 모멘트를 낮출 수 있다. Fig. 6은 접힘 각도 및 속도의 변화에 따라 라이너지의 최대

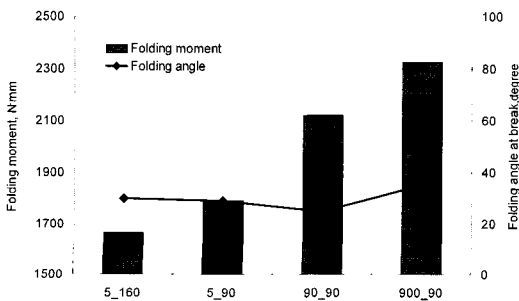


Fig. 6. The maximum folding moment of linerboard at the different folding conditions.

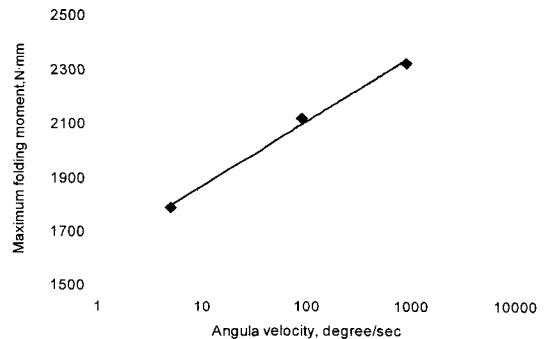


Fig. 7. The relationship between maximum folding moment and folding rate.

폴딩모멘트와 압축파괴가 발생하는 구부림 각도를 비교한 결과이다. x축의 a_b에서 a는 접힘 속도이고 b는 접힘 각도를 의미한다. 최대 폴딩 모멘트는 라이너지의 구조적 특성에 의해 야기된 첫 번째 극대 저항으로 구하였다. 접힘 속도가 같으면 최대 폴딩 모멘트 및 압축파괴 발생 각도는 큰 차이를 보이지 않아 접힘 각도의 영향은 크지 않음을 알 수 있었다. 그러나 90°의 일정한 각도로 구부렸을 때 접힘 속도가 빨라지면 최대 폴딩 모멘트가 증가하는 경향을 보였다. 최대 폴딩 모멘트와 접힘 속도 사이의 상관성을 분석하면 Fig. 7에서 보는 바와 같이 로그함수적인 관계를 나타내었다.

3.2 판지 지종의 영향

Fig. 8은 평량이 다른 라이너지와 백판지의 폴딩 모멘트를 접힘 각도에 달리하여 평가한 결과를 보여주고 있다. LB는 라이너지, CB는 백판지를 의미한다. 평량이 가장 높은 CB 500이 가장 큰 폴딩 모멘트를 나타내었으며, 이어 LB 300, CB 300, LB 225 순이었다. 평량이 접힘 저항에 미치는 영향이 큰 것으로 보이지만, 유사 평량일 경우 두께가 큰 것이 더 높은 폴딩 모멘트를 보이는 것으로 보아 지종에 관계없이 두께가 가장 큰 영향 인자라고 판단된다. 상용지 LB 300과 CB 300을 비교할 경우 실제 평량은 CB 300이 높지만, 도공지의 경우 비중이 높은 안료의 코팅으로 인해 실제 종이의 두께는 라이너지가 높았다 (Table 1). 과도한 각도로 접히는 경우지만, 휨강성의 인자가 동일하게 작용하는 것으로 판단되었다. 압축파괴 (1차 극대점)와 판지 내부의 층분리 (1차 극소점) 발생 지점은 지종에 따라 달리 나타났다. 대체로 두께가 높은 지종이 더 작은 각도에서 압

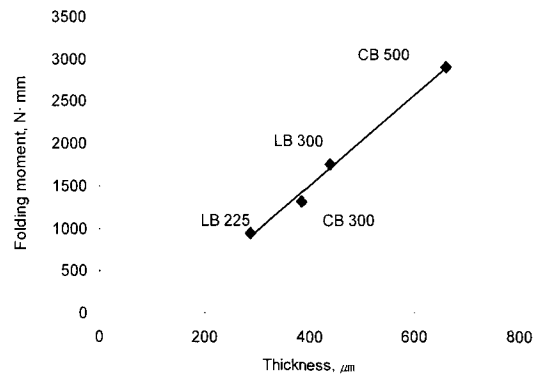


Fig. 9. The relationship between thickness of paperboards and the maximum folding moment.

축파괴가 발생되었다. 이는 동일한 탄성계수를 가질 경우 두꺼운 종이 접힐 때 얇은 종이에 비해 neutral plane을 중심으로 압축되는 부피가 더 크기 크기 때문에 작은 각도에서 이미 비드가 형성되기 때문이다.⁶⁾ 특히 가장 두께가 컸던 CB500의 경우 1차 압축파괴와 층분리가 다른 지종에 비해 작은 구부림 각도에서 발생하고 이후 2차, 3차 압축파괴 및 층분리가 일어나서 극대, 극소 지점이 여러 번 나타난 것으로 판단된다. 이에 반해 LB 225의 경우 더 과도하게 접혔을 때 최대 폴딩 모멘트를 나타내었으며, 비드의 형성도 육안으로 판단하기 어려울 정도로 작았다. 1차 극대점에 해당되는 최대 폴딩 모멘트와 판지의 두께와의 관계를 Fig. 9에 도시하였다. 일반적으로 휨강성은 탄성계수와 두께의 세제곱에 비례하는 관계를⁵⁾ 가지는데, 본 연구에서 평가된 두께에 대해서 최대 폴딩 모멘트는 비교적 선형적인 관

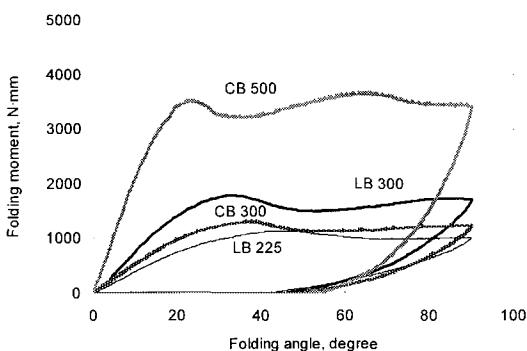


Fig. 8. Effect of paperboard grade on folding moment with folding angle.

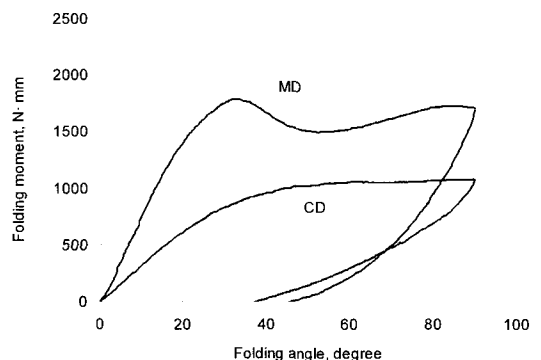


Fig. 10. Effect of paper directionality on folding moment.

계를 갖는 것으로 보인다.

판지의 MD 방향과 CD 방향의 접힘 특성을 각각 측정한 결과가 Fig. 10에 나타나 있다. MD 방향의 폴딩 모멘트는 CD 방향에 비해 약 40% 가량 높게 나타났다. 또한 CD 방향 시편은 극대점을 갖지 않는 것으로 보아 접힘 시 비드형성에 의한 저항이 거의 없는 것으로 생각된다. 이로부터 MD 방향보다는 CD 방향의 접힘이 더 용이함을 알 수 있다.

4. 결론

일반적인 휨강성 측정에 비해 더 큰 각도로 접을 때 판지의 성능을 살펴보기 위해 접힘 각도 및 속도를 달리 하여 다양한 판지의 접힘 특성을 평가하였다. 판지를 90°까지 구부릴 경우 폴딩 모멘트의 거동은 판지의 압축파괴와 충분히 인한 극대 및 극소점을 보였다. 접힘 각도가 최대 폴딩 모멘트에 영향을 미치는 정도는 미비하였지만, 접힘 속도는 로그함수적인 관계를 나타내었다. 지종을 달리하여 평가한 결과 판지의 두께에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 MD 방향이 CD 방향에 비해 약 40% 더 높은 접힘 저항을 나타내었다. 이후 과선 공정 등을 통해 접힘 저항을 낮추는 것이 상자 가공에 유리할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 산업자원부 신기술실용화기술개발사업

지원에 의해 수행되었음. 일부 BK 21 핵심 사업 지원을 받아 연구를 수행하였음.

인용문헌

1. Kiviranta, A., Paperboard grades, in 'Paper and Board Grades,' Papermaking Science and Technology series, Vol.18 (Paulapuro, H., Ed.), Fapet Oy, pp. 55-72 (2000).
2. Joukio, R. and Mansikkamäki, S., Cartonboard package manufacturing and applications, in 'Paper and paperboard converting,' Papermaking Science and Technology series, Vol.12 (Savolainen, A., Ed.), Fapet Oy, pp. 228-235 (1998).
3. Corrugating Defect/Remedy Manual 6th ed., TAPPI Press, pp. 176-177 (1999).
4. Calvin, S. I., The unique convertibility of paperboard, Packaging Technology and Science, 1:77-92 (1988).
5. Levllin, J.-E., General physical properties of paper and board, in 'Pulp and Paper Testing,' Papermaking Science and Technology series, Vol.17 (Levlin, J.-E. and Söderbjelm, L., Ed.), Fapet Oy, pp. 152-155 (1999).
6. Fellers, C. and Carlsson, L., Bending stiffness, with special reference to paperboard, in 'Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard,' Vol. 1, (Mark, R.E., Ed.), Marcel Dekker, New York, pp.324-326 (1983).