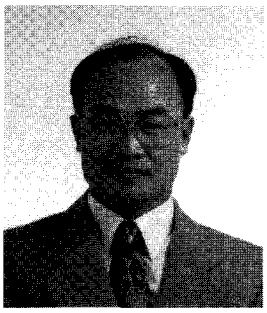
제지기술 강 의

紙類包裝 强度 硏究

Ⅳ. 상자의 압축강도 ③



강원대학교 제지공학과 교수
농학박사 원 종 명

목 차

Ⅰ. 개설
1. 골판지 포장강도의 필요성
2. 골판지 원지강도와 골판지 포장강도와의 관계 개설
3. 골판지포장강도와 인자
(이상 제23호 게재)
Ⅱ. 골판지 원지의 제강도
1. 평면 압축강도(Inplane compression strength)
2. Tensile stiffness
Ⅲ. 골판지의 강도
1. 골판지 파열강도
2. 골판지 압축강도
(이상 제24호 게재)
Ⅳ. 상자의 압축강도
1. 상자의 압축강도 시험(Box Compression Test)
2. 압축강도 시험기
3. 골판지 상자의 강도에 영향을 미치는 성질
4. Mckee의 방정식
5. BCT의 최적화
(이상 본 제26호 게재)

Ⅳ. 상자의 압축강도

골판지 상자의 압축강도는 골판지 포장을 쌓아올릴 경우 견딜 수 있는 강도를 직접적으로 평가하는 방법의 하나이다. 그러나 경우에 따라서는 수송 조건에서 상자에 가해지는 하중에 대하여 견딜 수 있는 성질이 중요한 인자로 고려될 수 있기 때문에 골판지 포장의 성능을 평가하는 일반적인 수단으로도 활용될 수 있다. 그림 28은 상자의 압축강도가 충분하지 못하여 쌓아올린 상자가 찌그러지는 변형을 나타낸 예이다.

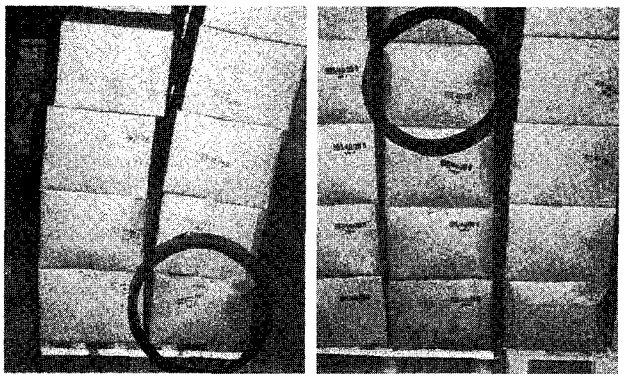


그림 28. 골판지 상자의 압축 변형 예

1. 상자 압축강도 시험(Box Compression Test)

상자 압축강도는 속이 빈 골판지 상자를 압축강도 시험기의 평행판 사이에 놓고, 보통 10-13 mm/min의 항속으로

압축을 가하여 측정하며, 완전히 압축 파괴가 일어날 때까지 계속 하중과 변형량을 기록한다. 시편의 조습 처리 및 압축강도 측정시 온도와 관계습도는 각국에서 정하고 있는 표준 조건에 따른다. 이때 얻어진 최대 하중을 골판지 상자의 압축강도로 사용한다. 골판지 상자의 압축강도를 측정하는 방법들은 각종 표준시험법(KS A 1012, TAPPI T-804, FEFCO No. 50, DIN 55440, ASTM D642 등)에 자세히 기록되어 있다.

2. 압축강도 시험기

정확하고 균일한 방법으로 상자 압축강도를 측정하려면 압축강도 시험기가 표준시험법에서 규정한 기본 사항을 만족시켜 주어야 한다. 이러한 사항들은 시험 결과에 영향을 미칠 수 있는 다른 시험 조건들을 고정시킴으로써 가능한 한 통제하에 일관성 있는 결과를 제공할 수 있게 해준다. 이러한 규정은 특히 시험이 어디에서 이루어지던 간에 그 결과를 서로 비교하고자 할 때 매우 중요하다.

표준 시험법에서 언급되는 일부 사항은 압축판의 디자인에 관한 것으로 압축판은 판상 이어야 하면, 견고해야한다. 상하 판의 평행 정도는 대체로 2/1,000 이상, 즉 만약 판의 길이가 1,000 mm 이라면 평형 편차는 2 mm를 초과해서는 안 된다.

표준 시험법에서 규정하고 있는 다른 중요한 사항은 고정된 압축 속도(10-13 mm/min)이다. 상자가 실제로 받는 하중이 아주 짧은 기간동안 하중을 받는 경우부터 1년 이상의 장기간 동안 정적인 하중을 받는 것이 있는 등 매우 다양한 조건하에서 하중을 받는 점을 고려하면, 압축 속도를 비교적 정확하게 규정하고 있는 것이 다소 이상하기는 하다. 측정된 BCT 값의 80-90%에 상당하는 정적인 하중이 가해질 경우 상자는 수분 이내에 파괴될 것이다. 따라서 표시된 하중 속도는 실제로 상자에 하중이 가해지는 것과 관계가 없기는 하나, 비교시험을 위해서는 좁은 범위 내에서 규정된 속도를 적용하는 것이 매우 중요하다.

하중 측정 시스템의 정확성도 규정되어 있다. (FEFCO 표준 시험법에서는 하중의 2% 이내를 정하고 있다) 비록 변형량을 FEFCO 표준 시험법에 따라 보고해야 할 필요는 없기 때문에 다소 모순이 있기는 하지만, FEFCO 표준 시험법은 또한 변형량 측정시 5% 이내의 정확성을 요구하고 있다. 반면에 TAPPI 표준 시험법 T-804에서는 하중-변형 곡선을 보고서에 포함시킬 것을 요구하고 있다. 따라서 압축강도 시험기는 아날로그 기록기에 하중-변형을 기록할 수 있는 기능을 지녀야 한다. 만약 압축강도 시험기에 컴퓨터가 장착되어 있을 경우 하중-변형 곡선을 다른 시험 결과와 함께 기록하는 것이 가능하다.

3. 골판지 상자의 강도에 영향을 미치는 성질

골판지 상자의 강도에 영향을 미치는 성질들에 대하여 단적으로 설명하기는 매우 어렵다. 왜냐하면 전술한 표준 시험법에서는 빈 상자에 대한 압축강도 측정을 실시하나, 실제로는 전혀 다른 상태에서 골판지 상자가 하중을 받기 때문이다. 따라서 보다 정확한 답을 얻기 위해서는 다음 사항들에 대하여 고려되어야 한다.

- ◈ 골판지 상자는 보통 내용물로 채워지기 때문에 상자의 내부에 힘이 가해져 바깥쪽으로 굽는 경향이 있다.
- ◈ 하중은 보통 장시간 동안 가해진다.
- ◈ 수송을 하는 동안 상자는 진동과 충격 하중을 받는다.
- ◈ 쌓아 올려 저장을 하는 동안 가해지는 하중은 압축 시험기에서 처럼 균일하지 않다.

실제적인 시험 결과는 실험실에서 측정한 BCT 강도의 단지 20-35%를 나타내어 3-5배의 안전 지수를 필요로하며, 운송을 하는 동안 가해지는 하중에 의하여 여러 번 응력-이완이 되거나 다른 기후에서 장시간 저장하는 등 바람직하지 않은 조건에서 상자가 다루어질 경우에는 더 높은 안전지수를 적용해주어야 한다.

그럼에도 불구하고 BCT 값은 저장 또는 운반을 하는 동안 골판지 상자의 성능을 나타내는 매우 중요한 성질임에는 틀림없다. 이러한 측면에서 골판지 상자 자체의 강도를 제공해주는 성질들을 검토할 수 있다. 여기에서 한 걸음 더 나아가 이미 전장에서 다룬 골판지 상자를 구성하는 원료인 라이너와 골심지가 골판지의 성질에 어떻게 영향을 미치는지도 알아볼 수 있다.

무수히 많은 논문들이 이 주제에 대하여 발표되었는데, 보통 골판지 상자와 골판지 사이의 관계에 가끔 골판지 재료의 압축강도와 굴곡강도 및 상자의 둘레 값을 포함하기도

한다. McKee와 그의 동료들이 1960년대 초에 이들에 대한 기초 연구를 수행하였다. 대부분의 논문들은 또한 McKee의 방정식을 이용해서 어떻게 BCT 성질을 최적화할 것인지에 대하여 다루었다. 일부 논문들은 라이너 및 골심지 제조업체가 McKee 방정식의 도움을 받아 그들의 제품이 우수하다는 것을 골판지 제조업자에게 어필하는 수단으로 쓰여진 것도 있다. 그러나 무엇보다도 중요한 것은 골판지 제조 실무자가 어떻게 하면 우수한 품질의 골판지를 제조할 수 있는지? 그리고 최적화하기 위해서는 어떤 조치가 필요한지를 아는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 골판지 제조 원지의 특성, 골판지의 특성 및 골판지 상자의 특성과의 관계를 이해하고, 정확한 측정 기술을 확립하는 것이 중요하다. 즉 라이너, 골심지, 골판지 및 골판지 상자의 성질을 정확히 측정하지 않을 경우, 모든 최적화 노력은 무용지물이 될 것이다. 잘못된 측정 방법은 오히려 혼동을 가중시킬 뿐이다.

4. McKee의 방정식

McKee의 방정식에 의하면 다음과 같은 사항으로부터 RSB(Regular Slotted Box) 디자인의 골판지 상자 압축강도를 예측하는 것이 가능하다.

1) 골판지의 ECT
2) 골판지의 MD(Sb_{MD}) 및 CD(Sb_{CD})에서의 bending stiffness
3) 상자의 둘레(Z)

일반적으로 McKee formula는 다음과 같이 표현되며,

$$BCT = k_1 \times ECT^{b} \cdot S^{1-b} \cdot Z^{2b-1}$$

골판지에 대해서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$BCT = k_1 \times ECT^{0.75} \times Sb^{0.25} \times Z^{0.5}$$

여기서 Sb는 기하학적인 평균 stiffness로 다음 식과 같이 표현된다.

$$Sb = \sqrt{Sb_{MD} \cdot Sb_{CD}}$$

상기 방정식을 단순화하면 bending stiffness는 골판지의 두께 T로 치환될 수 있다.

$$BCT = k_2 \times ECT \times T^{0.5} \times Z^{0.5}$$

McKee 방정식의 이론적인 배경은 bending stiffness의 변화가 골판지의 중심선에서 표면 라이너의 중심까지의 거리에 의하여 크게 영향을 받는데 있다. 그러나 단순화한 방정식은 라이너 층과 골심지의 CD 방향에서의 tensile stiffness에 의하여 영향을 받는 실제적인 bending stiffness를 고려하지 않았기 때문에 다른 라이너와 골심지가 사용되었을 경우 비교를 위해 이 방정식을 이용하여 BCT 값을 구하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 소비자 입장에서 볼 때 크라프트 라이너 제조업자들은 McKee의 완전한 방정식으로 그들 제품의 우수성을 나타내고자 할 것이며, 골심지와 test liner 제조업자 측면에서는 오히려 단순화한 방정식의 사용을 즐길 것이라는 것을 예상할 수 있다.

최근 품질이 양호한 test liner와 골심지는 최소한 크라프트 라이너의 수준에 버금가는 압축강도를 제공해줄 수 있으며, 크라프트 라이너가 실제로 매우 높은 파열강도를 나타내나, 파열강도와 BCT와의 사이에 진정한 의미의 상관관계는 존재하지 않는다. 그러나, 크라프트 라이너를 사용함으로써 보통 test liner보다 매우 높은 tensile stiffness를 얻을 수 있으며, 이로부터 높은 bending stiffness를 지니는 골판지와 높은 BCT 강도를 지니는 골판지 상자를 생산하는 것이 가능하다.

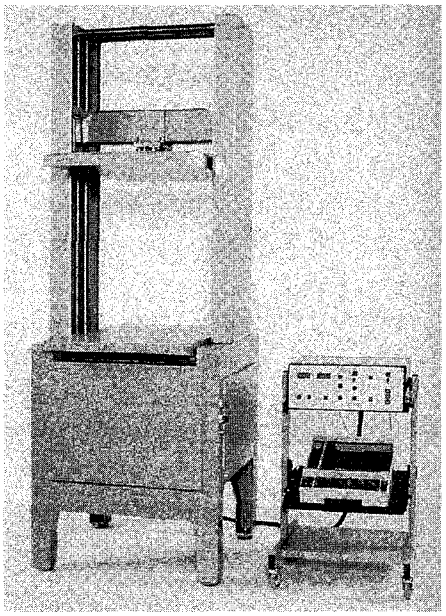


그림 29. 압축강도 시험기

McKee가 처음에 단순화한 방정식을 개발할 당시 골판지 bending stiffness를 배제한 이유는 bending stiffness를 정확히 측정할 수 있는 장치가 없었기 때문이다. 다행히도 이제는 bending stiffness를 정확히 측정할 수 있는 장치(그림 29)가 개발되어, 더 이상 압축강도와 bending stiffness를 포함시킨 완전한 McKee 방정식의 사용을 꺼릴 필요가 없게 되었다. 그러나 McKee 방정식은 골판지 상자의 BCT 값이 골판지의 ECT와 bending stiffness에 의하여 어떻게 영향을 받는지에 대하여 완벽한 답을 줄 수는 없다. 또한 주름 선과 같이 상자 제조시 발생되는 각종 변형이 편차를 가져오기는 하지만, 다른 크기의 골판지 상자, 다른 골판지로 만들어진 골판지 상자들에 대하여 통계적으로 명백한 관계를 나타내어 준다.

McKee 방정식은 골판지의 압축강도와 bending stiffness가 BCT 강도와 높은 상관관계가 있음을 보여준다. 골판지의 압축강도가 높으면 역시 BCT 강도가 높게 나온다. 골판지 상자가 하중을 받는 동안 발생되는 파괴 현상에 대하여 연구해보면 또한 높은 bending stiffness가 필요함을 알 수 있다.

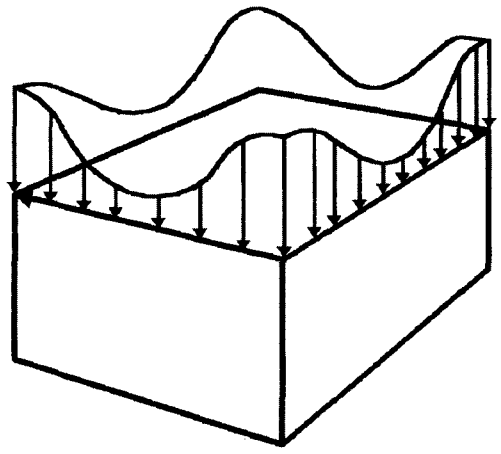


그림 30. 골판지 상자의 응력 분포

그림 30은 골판지 상자가 하중을 받을 때 응력이 집중되는 현상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 응력은 상자의 모서리에서 가장 높은 값을 나타낸다. 낮은 하중이 가해질 경우에는 하중이 상자 둘레를 따라 균일하게 가해진다. 그러나 하중이 증가될 경우 상자의 측면에서 한계 하중 수준에 달하여 탄성적으로 불룩하게 변형이 일어나게 되는 한편, 상자의 수직 가장자리는 직선 상태를 그대로 유지한다(그림 31). 따라서 상자 주위를 따라 나타나는 하중의 분포가 모서리 쪽으로 집중되는 현상을 나타내게 된다. 만약 하중이 더욱 증가되면 수평 가장자리와 수직 가장자리가 만나는 모서리 근처에서 파괴가 먼저 일어나기 시작하며, 내부 라이너에서의 압축 파괴를 통하여 상자의 측면 부분의 파괴가 일어나게 된다(그림 32).

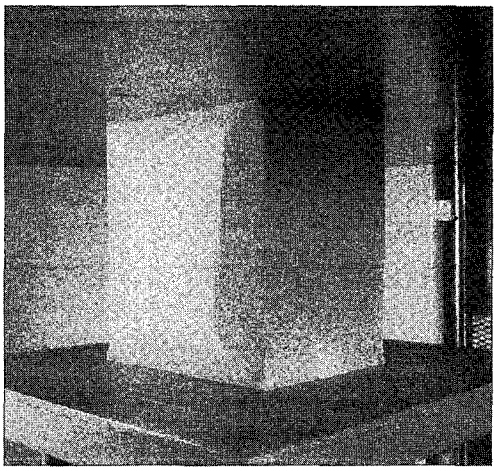


그림 31. 골판지 상자의 버클링 현상

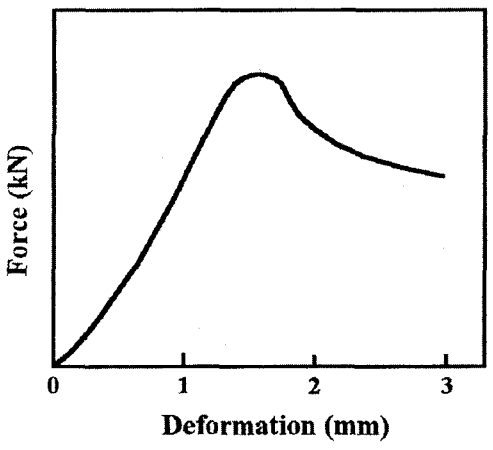


그림 32. 골판지 상자의 파괴하중과 변형

따라서 골판지 상자가 버틸 수 있는 최대 하중은 골판지가 견딜 수 있는 압축하중 뿐만 아니라 골판지 상자의 면이 버클링에 대하여 버틸 수 있는 능력(bending stiffness)에 의해서도 좌우된다. 골판지의 bending stiffness가 높을수록 가해진 하중을 분담하는데 골판지 재료가 보다 많이 기여할 수 있게 된다.

5. BCT의 최적화

그림 33은 라이너와 골심지의 성질과 최종적으로 제조되는 골판지 상자의 성질을 좌우하는 골판지의 성질과의 관계를 나타낸 것이다. 원지에서부터 골판지 상자에 이르기까지의 관계에 대한 연구는 특히 바람직한 성질을 지니는 최종 제품(가장 저렴한 가격으로 가능한 한 높은 BCT 강도를 지니는)을 얻기 위하여 측정되어야 하는 중요한 성질을 나타낸다.

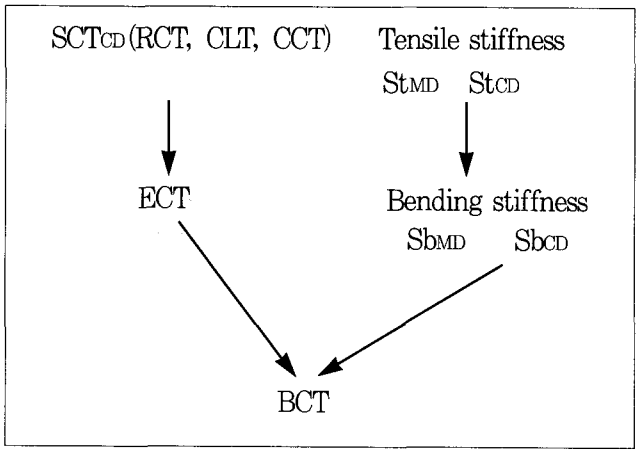


그림 33. BCT의 영향 인자 측정 방법

1) 골판지의 ECT 강도와 라이너 및 골심지 압축강도 사이의 관계

ECT 값과 라이너 및 골심지 압축강도 사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$ECT = k(F_{L1} + F_{L2} + \alpha F_f)$

F : 압축강도

L1 : 라이너 1

L2 : 라이너 2

f : 골심지

α : 골심의 take-up factor

k : 상수

문제는 상수 k의 정확한 값을 찾는 것이다. 거의 무시될 정도이기는 하지만 골을 만드는 동안 발생되는 골심지 압축강도의 저하 현상을 보완하기 위하여 상수 k는 1 또는 다소 낮은 값을 지녀야 하며, 이를 위해서 이론적으로 라이너와 골심지 압축강도의 합이 ECT 값과 일치해야 한다. 그러나 불행하게도 실제로는 좀더 복잡하다. 판지의 ECT와 라이너 및 골심지의 압축강도를 같은 조건하에서 측정하는 것이 어렵기 때문에 선택된 측정 방법의 함수인 상수 k를 적용해야 한다. 더욱이 "라이너와 골심지 압축강도의 합이 ECT와 일치해야 된다"는 사항은 단지 파괴시 변형량이 라이너와 골심지가 모두 같은 경우에만 적용이 되며, 이런 경우는 흔하지 않다. 대부분의 압축강도 측정시 관례적으로 파괴시 변형량의 측정이 실시되지는 않으나, 미국 임산물 연구소에서 이 분야에 대한 연구가 실시된 바 있다. 다음 예(표 7)는 스웨덴 SCA사에 의하여 발표된 것으로 측정 방법에 따라 k 값이 어떻게 변하는 가를 나타낸 것이다.

표 7. 각 시험방법 별 상수 값

시험 방법	k 값
RCT	1.28±0.08
CCT	0.97±0.04
SCT	0.71±0.03

2) 골판지 bending stiffness와 라이너 및 골심지 tensile stiffness의 관계

골판지의 bending stiffness와 라이너 및 골심지의 tensile stiffness 사이의 관계는 아마도 이론적으로 계산하기가 더욱 복잡할 것이다. 양호한 bending stiffness를 얻기 위하여 골판지를 구부리는 동안 골심지의 기능을 인장 및 압축 하중을 받는 라이너와 분리시킬 경우 다음과 같이 훨씬 단순화 될 수 있다.

$Sb = k \times E_L \times WI$

Sb : bending stiffness

EL : tensile stiffness index (kNm/kg)

WI : 굽힘시 관성 모멘트

ELMD는 기계방향에서의 골판지의 bending stiffness (SbMD)를 제공해주며, ELCD는 가로방향에서의 골판지의 bending stiffness (SbCD)를 제공해준다.

이론적으로 골판지의 bending stiffness는 대략 골판지 총 두께의 자승에 비례한다. 골판지의 두께는 골(flute)의

종류 및 flute profile이 골판지 및 상자 제조 과정에서 얼마나 잘 유지될 수 있는지에 의하여 좌우된다. 골판지의 두께는 상당한 정도까지 굽힘에서의 관성 모멘트에 영향을 미치기 때문에 특히 골판지 측정용으로 개발된 표준화된 두께 측정기로 주의스럽게 측정되어야 한다. 그러나 표준화된 측정 압력이 너무 낮아서 BCT에 영향을 미칠 수 있는 판지의 찌그러짐에 의한 두께 변화가 잘 관찰되지 않는다.

$Sb = 0.5 \times D_L \times T^2$

Sb : bending stiffness

D_L : 라이너의 tensile stiffness($E_L \times t_L$)

E_L : 라이너의 탄성계수

t_L : 라이너의 두께

T : 골판지의 두께

만약 골판지의 bending stiffness에 대한 골심지의 기여를 무시할 경우 골판지의 bending stiffness가 다소 과소평가 되기는 하나 상기 식과 같이 계산은 매우 간단해진다.

3) BCT 최적화 방법

높은 압축강도를 지니는 라이너와 골심지를 사용하거나 동일한 원료를 사용할 경우 평량을 높이는 방법으로 골판지의 ECT 값 뿐만 아니라 골판지 상자의 BCT 값을 증가시키는 것이 가능하다. 골판지 상자의 BCT에 대한 McKee 방정식에 의하면 BCT는 ECT 값의 0.75승에 비례한다.

일정한 골의 높이와 골판지 평량에서의 가능한 한 평량의 상당 부분을 라이너 쪽에 분포시키고, 골판지의 표면에 tensile stiffness가 높은 라이너를 사용하는 방법으로 bending stiffness를 높여줄 수 있다. McKee의 방정식에서 기하학적 평균 bending stiffness($\sqrt{Sb_{MD} \times Sb_{CD}}$)의 기여도는 0.25승에 해당된다. 따라서 bending stiffness의 BCT에 대한 영향이 과소평가 되기 쉽다. 실제로는 가끔 bending stiffness를 증가시키는 방법을 통하여 BCT 강도를 가장 쉽게 증가시키기도 한다. 이와 같은 효과를 얻을 수 있는 이유는 라이너의 평량을 조금만 증가시켜도 bending stiffness가 크게 증가되기 때문이다. BCT 강도를 최적화 하고자 할 경우 FCT(flat crush test) 및 파열강도와 같은 다른 강도적 성질들이 완전히 무시되지 않도록 고려 사항에 포함시켜야 한다.

골판지 제조용 원지의 성질이 골판지의 성질에 미치는 영향에 대한 정보를 확보할 경우 McKee 방정식에서 ECT(edgewise crush test) 및 bending stiffness 대신에 이들 관계를 사용할 수 있다. 이럴 경우 McKee 방정식이 더욱 복잡하게 되기는 하지만 컴퓨터의 도움을 받거나 시중에 판매되고 있는 각종 계산 프로그램을 사용할 경우 쉬우면서도 비교적 매우 정확하게 최적화 하는 것이 가능하다. 또한 원자재의 가격 및 다른 생산 관련 인자를 방정식에 포함시킬 경우 경제성 분석까지도 가능하다.

〈다음호 계속〉

지구환경정화 CAMPAIGN

샛강이 살아야 큰 강이 삽니다.

Save Our Streams