

# 유한요소법에 의한 Corrugated Board의 휨 발란스 해석

## Buckling Analysis of Corrugated Board using Finite Element Method

박 종 민  
정희원  
J. M. Park

### ABSTRACT

The top-to-bottom compression strength of corrugated board box is the most important mode of loading during its use, and it depends largely on the edgewise compression strength of the corrugated board in the cross-machine direction and to a considerable extent on the flexural stiffness in both principal directions (CD; cross-machine direction, MD; machine direction) of the corrugated board.

Corrugated board is a sandwich structure with an orthotropic property. The purpose of this study was to elucidate the principal design parameters for board combination of corrugated board from the viewpoint of bending strength through the finite element analysis [FEA] for the various corrugated board.

In general, the flexural stiffness [FS] in the MD was 2~3 times larger than that in the CD, and the effect of liner for the FS of corrugated board was much bigger than that of corrugating medium. The flexural stiffness index [FSI] was high when the stiffness of liner was in the order of inner, outer, and middle liner in double-wall corrugated board [DW], and the effect of the stiffness arrangement or itself reinforcement of corrugating medium on the FSI was not high. In single-wall corrugated board [SW] with DW, the variation of FSI with itself stiffness reinforcement of liner was much bigger than that with stiffness arrangement of liner. The highest FSI was at the ratio of about 2:1:2 for basis weight distribution of outer, middle, and inner liner if the stiffness of liner and total basis weight of corrugated board were equal in DW. Secondly, basis weight was in the order of inner, outer, and middle liner. However, the variation of FSI with basis weight distribution between liner and corrugating medium was much bigger than that with itself basis weight distribution ratio of liner and corrugating medium respectively in both DW and SW, and the FSI was high as more total basis weight was divided into liner. These phenomena for board combination of corrugated board based on the FEA were well verified by experimental investigation.

**Keywords** : Corrugated board, Board combination, Flexural stiffness, Finite element analysis, Four-point bending test, Orthotropic material.

---

The article was submitted for publication in May 2002, reviewed in and approved for publication by the editorial board of KSAM in March 2003. The author is Jong Min, Park, Associate Professor, Dept of Mechanical Engineering, Miryang National University, Korea. The corresponding author is Jong Min, Park, Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Miryang National University, 1025-1 Nei-dong, Miryang-si, Kyungnam, 627-702, Korea. E-mail:<parkjssy@mnu.ac.kr>.

## 1. 서 론

물류의 대형화, 기계화 및 현대화에 따라 물류의 시작 단계인 포장에 있어, 상자 압축강도에 대한 이해와 중요성이 더해가고 있고, 주재료인 corrugated board에 대한 여러 품질 특성이 요구된다.

Corrugated board는 샌드위치형(sandwich) 공학적 구조물로서, 구성 요소인 라이너(liner)와 골심지(corrugating medium) 자체의 품질 특성 및 이들의 구조적 결합 형태에 따라 다양한 역학적 거동을 나타내며, 고품질의 원지 사용이나 기능성 첨가제에 의한 강도 유지도 중요하지만, 원지 구성의 강도적 최적화를 통해 강도적 잇점과 부가가치 향상을 꾀하는 것이 보다 더 근본적인 문제이다.

이미, 선진 외국에서는 corrugated board가 물류와 포장 공정중에 받을 수 있는 다양한 스트레스에 대한 역학적 분석과 강도 적정화, 각종 기능성 물질의 라미네이션, 코팅 또는 내첨에 의한 특수 기능을 갖는 corrugated board의 설계 등, corrugated board의 부가 가치 향상과 강도적 최적화를 위한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으나(Jónson, 1993; Maltenfort, 1989; Patel et al., 1997; Nordstrand, 1995; Nordstrand and Carlsson, 1997), 우리 나라의 경우는 이 분야의 연구 활동이 매우 부진하며, corrugated board의 생산과 설계에 관한 한 아직 경험적인 방법에 의존하고 있고, 원지 자체의 품질 특성에 의존하는 경향이 너무 지배적이다.

Corrugated board를 원단으로 하는 상자 구조물에 압축 하중이 가해질 때, 그 하중은 상자의 수직 모서리와 측면 판넬이 지탱하는데, 이때 수직 모서리는 CD방향(cross-machine direction)으로 수직 압축상태(edgewise compression)이고, 측면 판넬은 CD 및 MD(machine direction) 양 방향으로 휨 상태에 놓이게 된다. 따라서 구조 역학적 측면에서 상자의 압축강도는 corrugated board의 CD방향 수직 압축강도(ECT, edgewise compression strength)와 CD 및 MD 양 방향의 휨 강성(flexural stiffness)에 따라 결정된다(Jónson, 1993; Maltenfort, 1989; Park, 2001).

물품을 포장한채 압축 하중을 받는 상자의 경우(특히, 피포장물이 부정형인 경우), 상자 판넬은 이면에서 표면 라이너 쪽으로 좌굴(buckling)되는데, 이때 corrugated board의 원지 구성 방법에 따라, 즉 원지의 강성(stiffness)과 평량(basis weight)을 어떻게 배치하는냐에 따라 이 좌굴에 저항하는 정도가 달라지며, 결국 상자 압축강도에의 영향이 크다. 이러

한 corrugated board의 원지 구성에서 원지의 강성과 평량 배치에 따른 휨 강성 변화를 실험적 방법으로 분석하기에는 샘플의 제작, 소요 경비 및 소요 시간면에서 많은 어려움이 있으며, 반면, 유한요소 해석과 같은 공학적 기법을 적용할 경우는 샘플의 제작과 소요 경비면에서 자유롭고, 인자 변동에 따른 보다 상세하고 다양한 분석이 가능하나, 해석 결과에 대한 신뢰성을 어떻게 확보하느냐가 중요한 문제이다.

따라서, 본 연구의 목적은 corrugated board의 골(flute) 형태별 유한요소 해석을 통해, 4점-휨하중 조건에 대한 원지 구성의 적정 밸런스를 분석함으로써, 휨강도 면에서 유리한 원지 구성의 설계 조건을 도출하려는 것이다.

## 2. 골 형태별 유한요소 해석

### 가. 유한요소 모델링

본 연구에서는 corrugated board를 골 형태별로 유한요소 모델로 표현한 후, 각 구성 원지(라이너와 골심지)의 두께와 물성을 바꿔가며 휨 거동에 대한 정성적인 비교를 위해, 원지의 다양한 두께를 적용하기 쉬운 셀(cell)요소를 사용하여 모델링하였다. 이 요소의 특징은 각 절점당 6개의 자유도를 가지며, 각각의 자유도는 x, y, z방향에 대한 변위와 각 좌표축에 대한 회전을 자유도로 가진다(ANSYS Inc., 1998).

유한요소 모델링시 골의 기하학적 형태와 주요 치수는 그림 1에서 보는 바와 같이, 골정(flute top)과 골저(flute bottom)에서의 곡면을 중심으로 좌우 대칭되게 120°, 골의 정강이(shank) 부분은 60°의 직선으로 간주하였다. 또한 골의 연속적인 형상 즉, 기하학적 대칭성과 해석 시간을 고려하여 CD방향

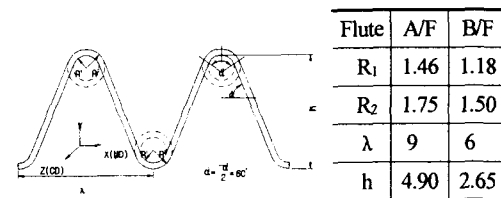


Fig. 1 Geometry parameters and coordinate systems of the corrugated board investigated.

에 대해서는 A/F(A-flute)의 한 파장에 해당하는 폭만큼을, 그리고 MD방향에 대해서는 시험편의 폭 50 mm(TAPPI T820; Markström, 1988)의 20% 만을 모델링하였다.

아래의 그림 2에는 SW(single-wall)와 DW(double-wall) corrugated board의 MD 및 CD방향 각각에 대한 솔리드 모델을 나타내었다.

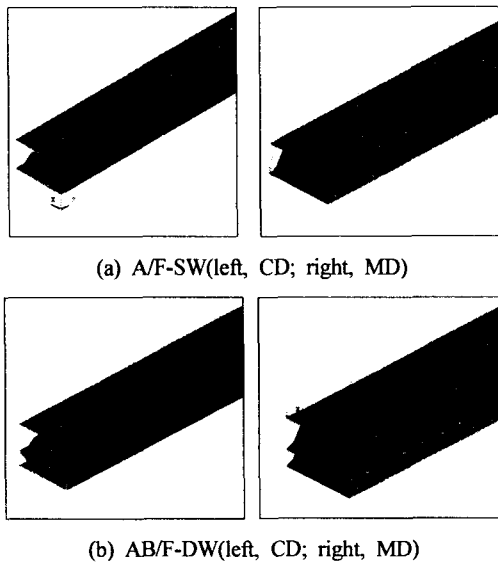


Fig. 2 FE model for the corrugated board investigated.

나. 해석 방법

4점-휨하중 조건에 대한 corrugated board의 구조 해석에는 후처리기(post-processor)로 ANSYS를 사용하였으며, 해석 대상의 특성상 비선형·대변위 문제로 처리하였다.

축소된 모델과 동일한 비율로 축소된 하중을 유한요소 모델의 폭방향의 절점수로 나누어 각 절점에 집중 하중으로 작용시켰고, 이때 하중의 작용 방향은 그림 3에서 보는 바와 같이, 물품을 포장한 상자의 실제 조건을 고려해 이면 라이너에는 압축 응력, 표면 라이너에는 인장응력이 작용하도록 하였다.

4점-휨 실험시 지지엔빌과 접촉하는 부분의 시험편은 y방향으로 변위가 없기 때문에, 해석시 유한요소 모델에서도 그 부분의 절점들을 y방향으로

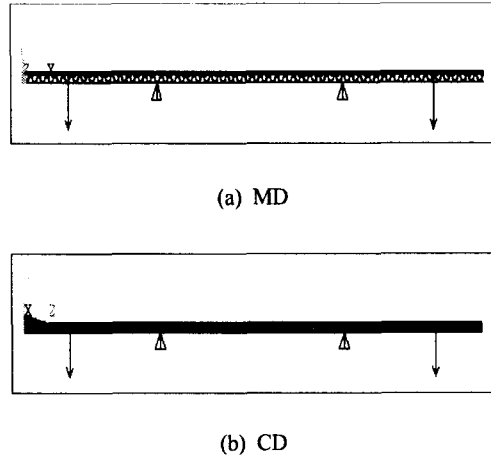


Fig. 3 Loading and boundary conditions under four-point bending.

만 구속하였다(그림 3). 이때 지지점(supporting point)의 간격은 200 mm, 하중점(loading point)의 간격은 이의 두 배인 400 mm로 하였다(TAPPI T820).

다. 해석 결과

4점-휨하중 조건에 대한 유한요소 해석은 corrugated board의 구성 원지들 간의 강성 배치와 평량 배분에 따른 것으로 크게 두 가지 방향으로 수행되었다.

강성 배치에 따른 유한요소 해석은, 표 1에서 계획한 바와 같이, 강성이 서로 다른 라이너 3종과 골심지 2종을 가정해, 골심지의 강성이 같을때와 같지 않을 때 각각에 대하여, 라이너 3개 모두를 다르게, 2종을 같게, 또한 모두 같은 것으로 배치했을 경우로, DW에서는 216조합, SW에서는 16조합에 대한 해석이 수행되었다. 또한, 평량 배분에 따른 해석은, 표 2에서 계획한 바와 같이, corrugated board의 전체 평량이 동일한 상태에서 라이너와 골심지의 평량 배분을 60%:40%, 50%:50% 및 40%:60%로 하였을 때, 각 배분비에서 라이너와 골심지 각각의 평량 배분에 따른 경우로, DW에서는 144조합, SW에서는 18조합에 대한 해석이 수행되었다.

표 1과 2에서 가정하였던 각 원지들의 물성은 실제 corrugated board 원지의 다양한 물성을 포함하면서, 직교 이방성 재료(orthotropic material)의 특성인 식(1)을 만족하도록(Pilkey, 1994) 고려된 값이었다.

Table 1 Material properties applied in FEA by stiffness arrangement of the corrugated board

Items	Linerboard			Corrugating medium	
	a	b	c	A	B
Young's modulus, GPa	2.01(MD), 0.67(CD)	4.02(MD), 1.34(CD)	6.03(MD), 2.01(CD)	2.01(MD), 0.67(CD)	4.02(MD), 1.34(CD)
	$E_{MD}/E_{CD}=3, a:b:c=1:2:3$			$E_{MD}/E_{CD}=3, A:B=1:2$	
Poisson's ratio, —	0.36(MD), 0.12(CD), $\mu_{MD}/\mu_{CD}=3$			0.36(MD), 0.12(CD), $\mu_{MD}/\mu_{CD}=3$	

Notes : examples of board combination; (DW)OL/ML/IL/OC/IC=b/a/c/A/B, (SW)OL/IL/C=b/a/B (OL=outer liner, ML=middle liner, IL=inner liner, OC=outer corrugating medium(B/F), IC=inner corrugating medium(A/F))

Table 2 Material properties applied in FEA by basis weight distribution of the corrugated board

Items	AB/F-DW		A/F-SW	
	Linerboard	Corrugating medium	Linerboard	Corrugating medium
Basis weight <sup>1)</sup> , g/m <sup>2</sup>	1,200		700	
Density <sup>2)</sup> , g/cm <sup>3</sup>	0.8	0.7	0.8	0.7
Young's modulus, GPa	4.02(MD), 1.34(CD)	2.01(MD), 0.67(CD)	4.02(MD), 1.34(CD)	2.01(MD), 0.67(CD)
	$E_{MD}/E_{CD}=3$		$E_{MD}/E_{CD}=3$	
Poisson's ratio, —	0.36(MD), 0.12(CD), $\mu_{MD}/\mu_{CD}=3$		0.36(MD), 0.12(CD), $\mu_{MD}/\mu_{CD}=3$	

Notes : examples of board combination; (DW)liner:fluting proportion→(liner)OL:ML:IL(%)/(fluting)OC:IC(%)=60:40→33:23:43/46.6:53.4, (SW)liner:fluting proportion→(liner)OL:IL(%)/(fluting)C(100%)=60:40→40:60/100, 1)basis weight of corrugated board, 2)to calculate thickness of the board constituents from density, t(mm)= BW/(D×1,000) (BW=basis weight(g/m<sup>2</sup>), D=density(g/m<sup>3</sup>), take-up factor=(A/F)1.6, (B/F)1.4)(KS M7021)

$$E_{MD} \mu_{CD} = E_{CD} \mu_{MD} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $E_{CD}$ ,  $E_{MD}$  = 각각 원지의 CD 및 MD 방향의 영률

$\mu_{CD}$ ,  $\mu_{MD}$  = 각각 원지의 CD 및 MD방향의 포와송비

4점-휨하중 조건 하에서 corrugated board 원지 구성의 강성 배치와 평량 배분에 따른 해석 결과 (총 394개)의 대표적인 예를 그림 4~7에 각각 나타내었다. 그림 4와 5는 원지 구성 b/a/c/A/B의 CD 및 MD방향 각각에 대한 해석 결과이고, 그림 6과 7은 전체 평량 1,200 g/m<sup>2</sup>을 라이너와 골심지의 평량 배분이 60%:40%, 그리고 골심지와 라이너 자체의 각각의 평량 구성을 46.6%:53.4% 및 33%:23%:43%로

하였을 때, CD 및 MD방향에 대한 해석 결과이다. 여기서 corrugated board의 MD 및 CD 양 방향을 모두 고려한 좌굴에 저항하는 성질의 정성적인 비교의 한 수단으로 휨강성 지수(flexural stiffness index, FSI)를 정의하였는데, 이는 해석 결과의 값(작용 하중과 중간지점에서의 좌굴량)을 가지고 4점-휨하중 조건에 대한 식(2)(Timoshenko and Goodier, 1970)에 의해 각 조합에서 MD 및 CD 방향의 휨강성을 각각 계산한 후, 이들 값의 곱으로 정의된다.

$$\left\{ \begin{aligned} S_b &= \frac{1}{16} \left( \frac{F}{\delta} \right) \left( \frac{L^3}{\omega} \right) \left( \frac{\alpha}{L} \right) \dots\dots\dots (2) \\ FSI &= [S_b]_{MD} \times [S_b]_{CD} \end{aligned} \right.$$

여기서,  $S_b$  = 단위 폭당의 휨강성(Nm)

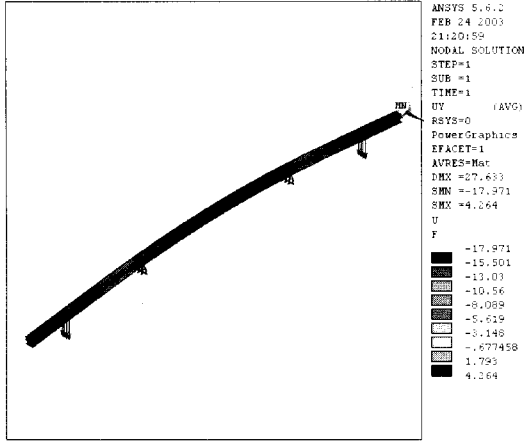


Fig. 4 Deformed shape of AB/F-CD,  $b/a/c/A/B$ .

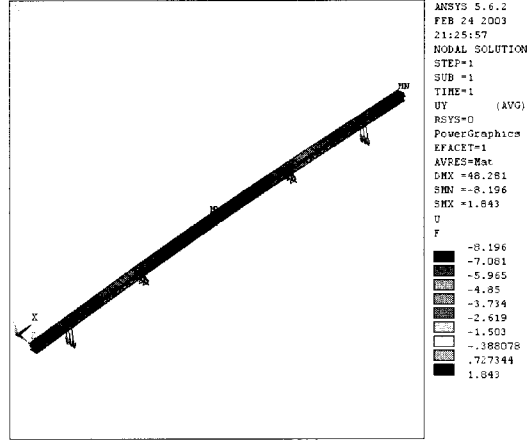


Fig. 5 Deformed shape of AB/F-MD,  $b/a/c/A/B$ .

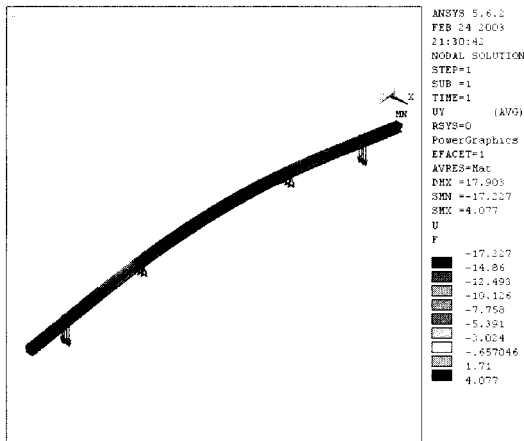


Fig. 6 Deformed shape of AB/F-CD, 60% :40%→33%:23%:43%/46.6%:53.4.

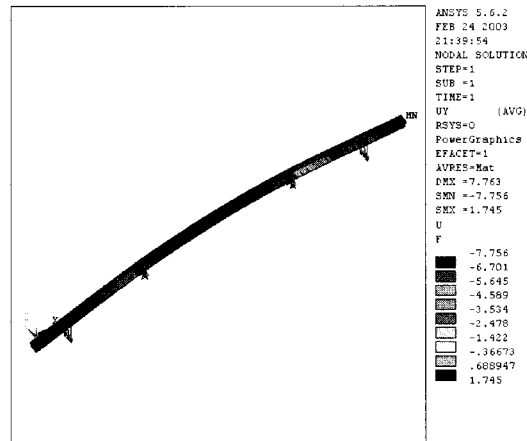


Fig. 7 Deformed shape of AB/F-MD, 60% :40%→33%:23%:43%/46.6%:53.4%.

- FSI = 휨강성 지수
- F = 작용하중 수준(N)
- $\omega$  = 시험편의 폭(m)
- L = 지지점 사이의 거리(m)
- $\alpha$  = 지지점과 하중점 사이의 거리(m)
- $\delta$  = 시험편 중간부에서의 좌굴량(m)

그림 8은 DW와 SW 각각 1종류의 원지 구성(그림속의 밑줄친 것)에 대해 라이너와 골심지중 어느

하나의 원지 강성을 보강하였을 때, 휨강성에 미치는 효과를 분석한 것이다. 대체로 MD방향의 휨강성이 CD방향에 비하여 2~3배 컸으며, DW의 경우 원지 구성 a/a/a/A에서 어떤 라이너의 강성을 a→b로 보강한 a/a/b/A의 CD 및 MD방향의 휨강성이 각각 33.8%, 43.2% 상승한 반면, 바깥쪽 골심지의 강성을 A→B로 보강한 a/a/a/B의 CD 및 MD방향의 휨강성은 각각 12.5%, 0.5% 상승하여, 골심지보다는 라이너가 corrugated board의 휨강성에 미치는

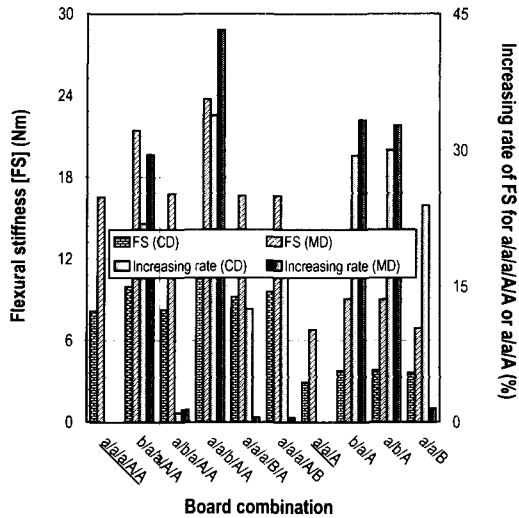


Fig. 8 The variation of flexural stiffness by reinforcement of board constituents.

영향이 월등히 컸으며, 세부적으로는 라이너는 MD 방향, 골심지는 CD방향의 휨강성에 각각 다른 방향에 비해 큰 영향을 주었다.

한편, SW의 경우는 원지 구성 a/a/A에서 이면 라이너를 a→b로 보강한 a/b/A의 휨강성이 CD에서는 30.0%, MD에서는 32.7% 각각 상승한 반면, 골심지를 A→B로 보강한 a/a/B의 휨강성은 CD에서 23.9%, MD에서 1.5% 각각 상승하여, SW의 경우도 골심지

보다 라이너의 영향이 월등히 컸다. 그러나, 이와 같은 방법으로 corrugated board의 라이너와 골심지의 보강에 따른 두 방향의 휨강성 효과의 정량적인 비교에는 한계가 있고, 더구나 corrugated board의 휨강성은 양 방향 모두 중요하므로(Maltenfort, 1989; Park, 2001), 두 방향의 휨강성을 모두 고려한 휨강성 지수의 정성적인 비교를 통해 원지 구성의 설계 조건을 도출하는 것이 더 바람직 하다.

Corrugated board 원지 구성의 강성 배치에 따른 휨강성 지수를 그림 9~12에 나타내었다. DW에서는 중간 라이너 보다는 표면과 이면 라이너에 강성이 큰 원지를 배치하였을 때와 이면 라이너의 강성이 표면 라이너의 강성보다 큰 경우가 휨강성 지수가 큰 것으로 나타나 강도적 측면에서 더 유리하였다. 특히, 중간 라이너의 강성에 따른 휨강성 지수의 변화는 매우 작았다. 따라서 동일한 조건일 때, 라이너의 강성이 이면, 표면 및 중간 라이너의 순일 때 휨강성 지수가 높았으나, 골심지 자체의 강성 보강이나 강성 배치에 따른 휨강성 지수의 변화는 그리 크지 않았다.

SW에서는 DW에 비하여 동일한 조건일 때, 라이너의 강성 배치에 따른 휨강성 지수의 변화 보다는 라이너 자체의 강성 보강에 따른 휨강성 지수의 변화가 월등히 큰 것으로 나타났고, DW 보다 골심지의 강성 보강에 따른 휨강성 지수의 변화도 더 컸다.

그림 13~16에는 corrugated board의 전체 평량과 구성 원지인 라이너와 골심지 각각의 강성이 모두

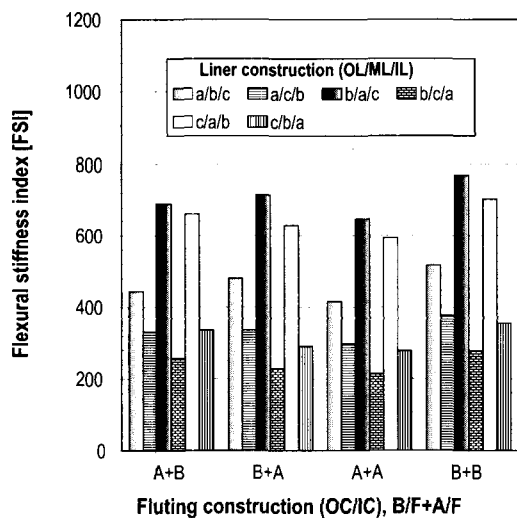


Fig. 9 FSI of AB/F-DW(liner: a,b,c, apply).

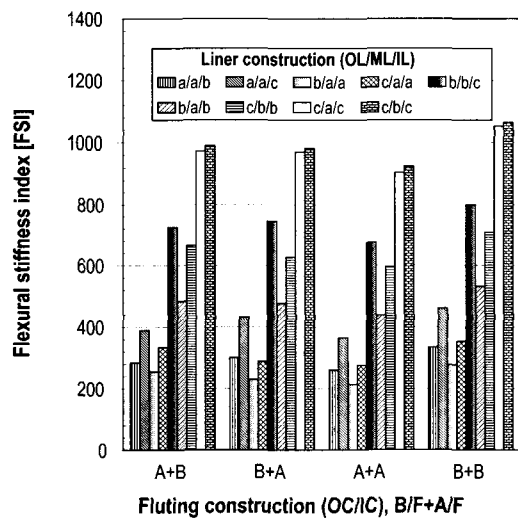


Fig. 10 FSI of AB/F-DW(liner: a,b,c×2, apply).

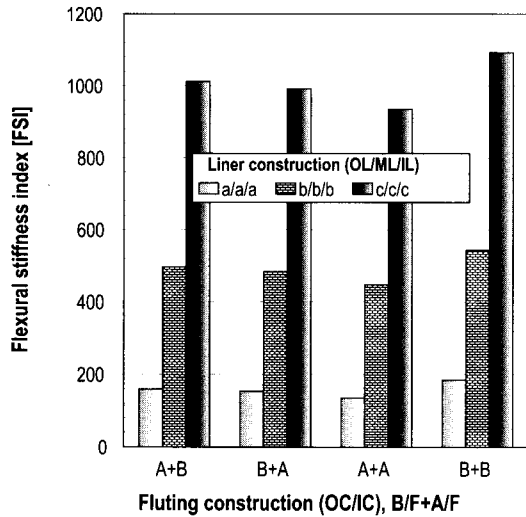


Fig. 11 FSI of AB/F-DW(liner: all same, apply).

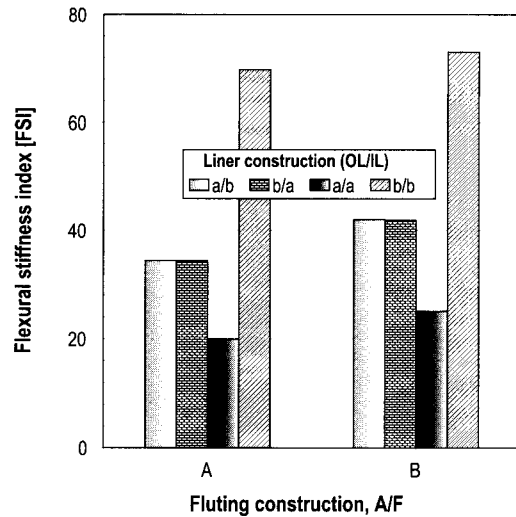


Fig. 12 FSI of A/F-SW.

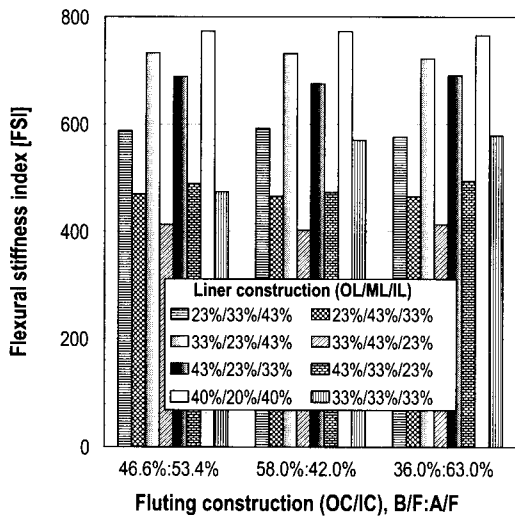


Fig. 13 FSI of AB/F-DW(liner:corrugating = 60%:40%=720g/m<sup>2</sup>:480g/m<sup>2</sup>).

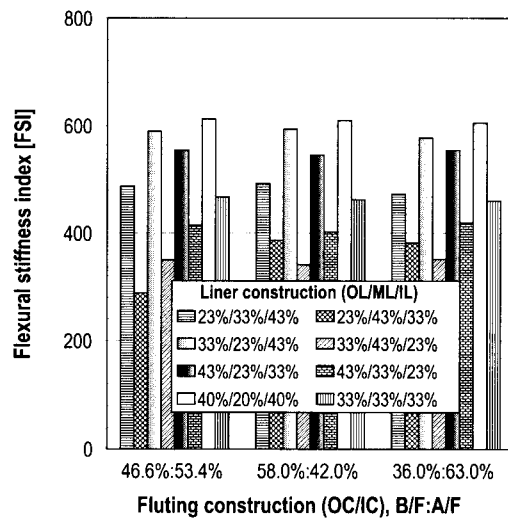


Fig. 14 FSI of AB/F-DW(liner:corrugating = 50%:50%=600g/m<sup>2</sup>:600g/m<sup>2</sup>).

동일한 상태에서, 이들의 평량 배분에 따른 휨강성 지수를 나타내었다. 즉, 평량이 변하므로 원지의 두께가 주요 변수가 된다(KS M7021).

DW에서 라이너의 강성이 모두 같을 경우, 표면과 이면 라이너의 평량이 중간 라이너 보다 높게 하여, 표면, 중간 및 이면 라이너의 평량비가 대략 2:1:2일 때 휨강성 지수가 가장 높았고, 그 다음은 이면, 표면 및 중간 라이너의 순일 때 였다. 그러

나, SW와 DW 모두 라이너와 골심지 자체의 평량 배분 보다는 전체 평량에 대한 라이너와 골심지 간의 배분에 따른 휨강성 지수의 변화가 월등히 컸으며, 전체 평량을 라이너에 많이 배분할 수록 휨강성 지수는 높았다.

그림 16의 SW에서 라이너 자체의 평량 배분 즉, 표면과 이면 라이너의 평량 배분이 50%:50%인 경우는 상하 대칭 구조(symmetrical board)로, 전체 평

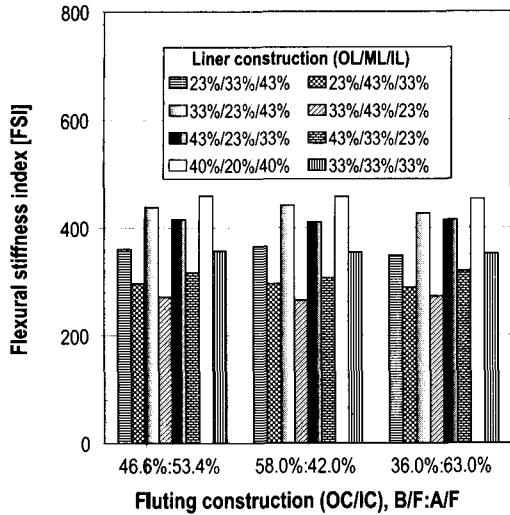


Fig. 15 FSI of AB/F-DW(liner:corrugating = 40%:60%=480g/m<sup>2</sup>:720g/m<sup>2</sup>).

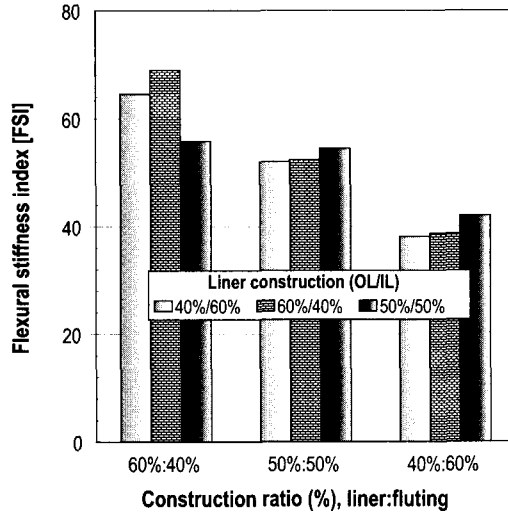


Fig. 16 FSI of A/F-SW(liner:corrugating = 60% : 40% = 420g/m<sup>2</sup> : 280g/m<sup>2</sup>, 50 %:50% = 350g/m<sup>2</sup> : 350g/m<sup>2</sup>, 40% : 60% = 280g/m<sup>2</sup> : 420g/m<sup>2</sup>).

량에 대한 라이너와 골심지의 평량 배분에서 골심지가 차지하는 비율이 높아질수록 다른 비대칭 구조(asymmetrical board) 보다 큰 휨강성 지수를 나타내었다.

### 3. 해석 결과에 대한 실증 분석

#### 가. 실험 방법

해석 결과에 대한 실증 분석을 위해 표 3에 나타난 바와 같이, 서로 다른 원지 구성을 하는 12종의 corrugated board가 선발되었다. 먼저, 이들에 대하여 유한요소 해석을 실시하였고, 이 중 4종(#01, #02, #09 및 #10)에 대해서는 corrugated board 샘플을 실제 제작하여 4점-휨 실험을 실시하였다(그림 17).

Corrugated board에 대한 4점-휨 실험시 시험편의 크기는 TAPPI T820 규정에 따라 MD 및 CD방향 모두에서 길이×폭을 500 mm×50 mm, 하중재하 속도는 25.4 mm/min로 하였다. 그 밖에는 앞에서의 유한요소 해석시와 동일한 조건을 부여하였다.

실험전 샘플은 표준 대기조건(23±1℃, rh 50±2%)으로 잘 조성된 항온 항습기내에서 48시간 이상 평형시켰으며, 실험은 온도와 상대습도가 비교적 잘 유지되는 실험실 내에서 수행하였다.

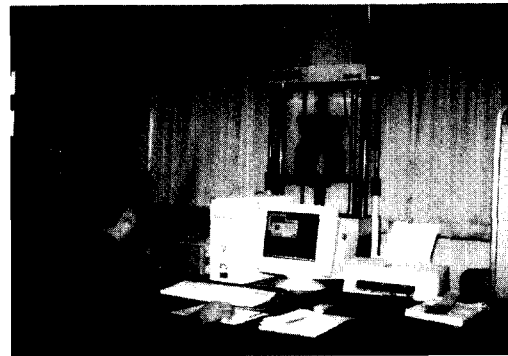


Fig. 17 Experimental setup for measurement of flexural stiffness of the corrugated board.

#### 나. 실험 결과

표 3의 12종의 원지 구성에 대한 유한요소 해석과 이종 4종류의 샘플에 대한 4점-휨 실험을 통해 분석된 휨강성 지수를 그림 18에 함께 나타내었다.

앞의 2가지 방향의 유한요소 해석을 통해 얻은 결과와 실제 corrugated board를 대상으로 한 실증 분석 결과를 비교하여 보면, 샘플 #01과 #02는 이면과 표면 라이너의 강성이 서로 바뀐 형태로, 이



Table 3 Board combinations and material properties (Park, 2001) of board constituents in the corrugated board applied an actual proof

Samples	Board combination(OL/OC/ML/IC/IL)	BW <sup>1)</sup> , g/m <sup>2</sup>	Material properties
#01	KLB175/K180/B150/K180/KA180	1,045	KLB175 ; (t)0.22mm, (RC)25.0kgf, (E <sub>MD</sub> )4.24MPa, (E <sub>CD</sub> )0.98MPa
#02	SK180/K180/B150/K180/KLB175	1,045	
#03	KLB175/K180/KLB175/K180/KLB175	1,065	K180 ; (t)0.24mm, (RC)20.2kgf, (E <sub>MD</sub> )3.83MPa, (E <sub>CD</sub> )0.78MPa
#04	KLB175/K180/B150/K180/KLB175	1,040	
#05	KLB175/K180/B150/B150/KA180	997	B150 ; (t)0.21mm, (RC)14.9kgf, (E <sub>MD</sub> )2.84MPa, (E <sub>CD</sub> )0.59MPa
#06	KLB175/B150/B150/K180/KA180	1,003	
#07	SK180/K180/B150/B150/KLB175	997	KA180(SK180) ; (t)0.22mm, (RC)21.0kgf, (E <sub>MD</sub> ) 3.49MPa, (E <sub>CD</sub> )0.69MPa
#08	SK180/B150/B150/K180/KLB175	1,003	
#09	KA300/B150/KA180/K180/KA210	1,188	KA210 ; (t)0.25mm, (RC)30.5kgf, (E <sub>MD</sub> )3.49MPa, (E <sub>CD</sub> )0.69MPa
#10	KA210/B150/KA180/K180/KA300	1,188	
#11	KA300/B150/KA210/K180/KA180	1,188	KA300 ; (t)0.36mm, (RC)41.0kgf, (E <sub>MD</sub> )3.49MPa, (E <sub>CD</sub> )0.69MPa
#12	KA180/B150/KA300/K180/KA210	1,188	

Notes : <sup>1)</sup> basis weight of the corrugated board.

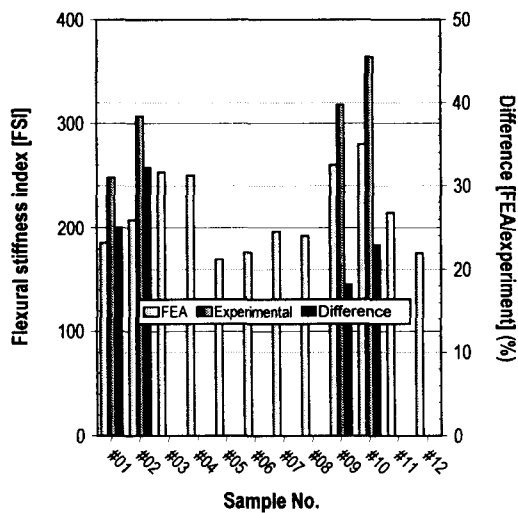


Fig. 18 Comparison between FEA and experimental results.

면 라이너의 강성이 표면 라이너의 강성보다 큰 #02의 경우가 유한요소 해석 결과에서는 약 12%, 실험적 방법에서는 이 보다 큰 19% 정도 큰 것

로 나타났고, 샘플 #09와 #10의 비교에서는 라이너의 강성이 같을 때, 표면 라이너 보다 이면 라이너에 더 고풍량을 배치한 #10이 유한요소 해석에서는 약 7%, 실험적 방법에서는 약 13% 정도 더 큰 것으로 나타나, 앞에서의 해석 결과와 잘 일치하는 경향이였다. 그러나, 샘플 #05와 #06, #07과 #08의 라이너의 배치가 동일할 때 골의 강성 배치에 따른 휨강성 지수의 차이는 앞에서의 해석 결과와 같은 경향을 보였으나, 그 차이는 매우 작았다. 이는 앞에서 가정하였던 원지들의 물성값 보다 실증 분석에서 적용한 원지들의 물성값의 차가 적기 때문으로 판단된다.

샘플 #03은 #04에서 중간 라이너의 강성만을 보강한 경우로, 휨강성 지수면에서 거의 차이가 없는 것으로 나타나, 중간 라이너의 강성이 휨강성 지수에 미치는 영향이 매우 작았다. 또한 샘플 #09~#12는 전체 평량과 골심지가 모두 동일한 상태에서 라이너의 평량 배치를 서로 다르게 한 경우로, 중간 라이너 보다 이면과 표면 라이너의 평량이 높고, 표면 보다는 이면 라이너의 평량이 높을 때 휨강성 지수가 커 그 만큼 강도적으로 유리하다는 것을 알 수 있다.

유한요소 해석과 실험적 방법으로 분석된 휨강성 지수값 사이에는 약 18~33%의 차이를 보이고 있는데, 이는 식(2)로부터 휨강성 지수의 계산시 F/δ의 값으로 유한요소 해석에서는 일정 하중에 대한 좌굴량을, 그리고 실험적 방법에서는 4점-휨 실험을 통해 얻은 하중-좌굴량 곡선의 직선 부분의 기울기 값을 각각 적용하였으므로, 방법간의 차이에 기인되는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

Corrugated board는 환경 친화적인 포장재로 여러 산업 분야에서 폭 넓게 사용되고 있다. 이 재료의 품질은 수직 압축강도와 휨강성이 좌우하는데, 바로 이들 특성이 이 재료를 원단으로하는 포장 상자의 압축강도를 결정짓는 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 직교 이방성 재료로서의 corrugated board에 대한 유한요소 해석을 구성 원자들간의 강성 배치와 평량 배분에 따라 크게 2방향으로 실시해, 강도적 측면에서 유리한 원지 구성의 설계 조건을 도출하였다.

대체로 MD방향의 휨강성이 CD방향에 비하여 2~3배 컸으며, 골심지 보다는 라이너가 corrugated board의 휨강성에 미치는 영향이 월등히 큰 것으로 나타났고, DW에서는 동일한 조건하에서 라이너의 강성이 이면, 표면 및 중간 라이너의 순일 때 휨강성 지수가 높았으나, 골심지의 강성 배치나 자체 보강에 따른 휨강성 지수의 변화는 그리 크지 않았다. SW는 DW에 비하여 라이너의 강성 배치 보다는 라이너 자체의 강성 보강에 따른 휨강성 지수의 변화가 월등히 큰 것으로 나타났다.

DW에서 각 라이너의 강성과 전체 평량이 동일할 경우, 표면, 중간 및 이면 라이너의 평량 배분을 대략 2:1:2로 할 경우가 휨강성 지수가 가장 높았고, 그 다음은 이면, 표면 및 중간 라이너의 순으로 평량을 배분하였을 때가 높았다. 그러나, DW와 SW 모두 라이너와 골심지 각각의 자체 평량 배분비 보다는 전체 평량에 대한 라이너와 골심지의 배분에 따른 휨강성 지수의 변화가 월등히 컸고, 전체 평량을 라이너에 많이 배분할 수록 휨강성 지수는 높았다.

해석 결과에 대한 실증 분석을 위해 서로 다른

원지 구성을 하는 12종의 corrugated board를 선발해, 이들에 대한 유한요소 해석과 일부 샘플을 대상으로 4점-휨 실험을 실시하였는 바, 대체로 앞의 두 가지 방향의 유한요소 해석 결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다.

#### 참 고 문 헌

1. ANSYS Inc. 1998. ANSYS theory reference. Release 5.5.1.
2. Jönson, G. 1993. Corrugated board packaging. Leatherhead. Pira International.
3. KS M7021. Testing method for thickness and bulk density of paper and paperboard.(In Korean)
4. Markström, H. 1988. Testing methods and instruments for corrugated board. Stockholm. Lorientzen & Wettre.
5. Maltenfort, G. G. 1989. Performance and evaluation of shipping containers. Plainview, N. Y. Jelmar Publishing Co.
6. Nordstrand, T. M. 1995. Parametric study of the post-buckling strength of structural core sandwich panels. Composite Structures. 30(4):441-451.
7. Nordstrand, T. M. and L. A. Carlsson. 1997. Evaluation of transverse shear stiffness of structural core sandwich plates. Composite Structures. 37(2): 145-153.
8. Park, J. M. 2001. Balance analysis and optimum design program in board combination of corrugated board. Ministry of Commerce, Industry and Energy · Korea Institute of Packaging Development & Research Final Report(In Korean).
9. Patel, P., T. Nordstrand and L. A. Carlsson. 1997. Local buckling and collapse of corrugated board under biaxial stress. Composite Structures. 39(1-2):93-110.
10. Pilkey, W. D. 1994. Stress, strain and structure matrices. New York. John Wiley & Sons, Inc.
11. TAPPI T820. Flexural stiffness of corrugated board.
12. Timoshenko, S. and J. N. Goodier. 1970. Theory of elasticity, 3rd ed., New York. McGraw-Hill.