

## 종이성형구조물의 휨강성에 대한 실험적 연구

박종민, 이명훈\*  
밀양대학교 기계공학과, \*한국포장시스템연구소

### Experimental Investigation for Flexural Stiffness of Paperboard-stacked Structure

Jong-Min Park, Myung-Hoon Lee\*  
Dept. of Mechanical Engineering, Miryang National University  
\*Institute of Korea Packaging Systems

#### Abstract

Top-to-bottom compression strength of corrugated fiberboard boxes is partly dependent on the load-carrying ability of the central panel areas. The ability of these central areas to resist bending under load will increase the stacking strength of the box. The difference of box compression strengths, among boxes which are made with identical dimensions and fabricated with same components but different flute sizes, is primarily due to difference of the flexural stiffness of the box panels. Top-to-bottom compression strength of a box is accurately predicted by flexural stiffness measurements and the edge crush test of the combined boards. This study was carried out to analyze the flexural stiffness, maximum bending force and maximum deflection for various corrugated fiberboards by experimental investigation. There were significant differences between the machine direction (MD) and the cross-machine direction (CD) of corrugated fiberboards tested. It was about 50% in SW and DW, and 62%~74% in dual-medium corrugated fiberboards(e.g. DM, DMA and DMB), respectively. There were no significant differences of maximum deflection in machine direction among the tested fiberboards but, in cross direction, DM showed the highest value and followed by SW, DMA, DMB and DW in order. For the corrugated fiberboards tested, flexural stiffness in machine direction is about 29%~48% larger than cross direction, and difference of flexural stiffness between the two direction is the lowest in DMA and DMB.

**Key words:** corrugated fiberboard box, flexural stiffness, maximum bending force, maximum deflection, top-to-bottom compression strength

#### 서론

원지로 부터 완성된 골판지상자에 이르기까지의 역학적 상관관계에 대한 연구는 요구되는 최종제품의 특성을 파악케하며, 여기에 수반되는 실험법도 매우 다양하

다<sup>(1-8)</sup>.

골판지상자의 압축강도는 (1)골판지의 ECS, (2)골판지의 MD 및 CD방향의 휨강성, (3)상자의 주변장(perimeter)으로 결정되며<sup>(3,6,7,9-11)</sup>, 특히 골판지의 휨강성은 충격된 상자의 좌굴(buckling)에 직접관련되는 것으로 골판지상자의 실제 사용상에 요구되는 중요한 특성이다.

골판지의 휨실험에 의한 휨강성의 분석방법은 하중작

Corresponding author : Jong-Min Park, Dept. of Mechanical Engineering, Miryang National University, 1025-1 Neidong, Miryang-si, Kyungnam, 627-702, Korea.

용점의 수에 따라 분류되는데, 가장 많이 사용되는 방법이 4점 휨실험법(four-point bending test)으로 골판지와 관련된 권위있는 규정에서도 이 방법을 채택하고 있다<sup>(12)</sup>.

본 연구의 목적은 4점 휨실험법에 의하여 골판지의 단면형태별로 휨강성, 휨하중 및 처짐특성을 분석함으로써, 상자압축강도 향상을 위한 주요설계인자를 도출하려는 것이다.

### 휨강성에 대한 이론적 고찰

#### 상자압축강도와 휨강성과의 관계

판지원지를 제조할 때 섬유(cellulose fiber)는 제조방향(또는 초출방향)으로 정렬되는데, 이 MD방향(machine direction)으로 원지의 역학적 특성이 우수하다. 따라서 골판지원지는 MD방향과 이 방향과 직각인 CD방향(cross-machine direction)으로의 역학적 특성(특히, strength property)을 달리하는 대표적인 이방성 재료(orthotropic material)이다.

보통의 골판지는 Fig.1에 나타낸 바와같이 원지(라이너, 골심지)의 방향과 골판지의 생산방향이 일치하며,

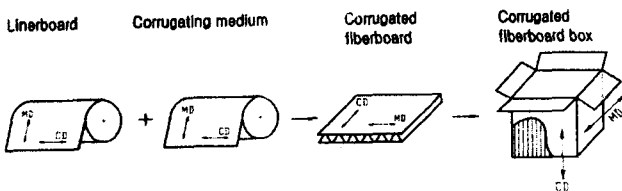


Fig. 1. Machine direction and cross-machine direction according to the manufacturing processes of corrugated fiberboard box

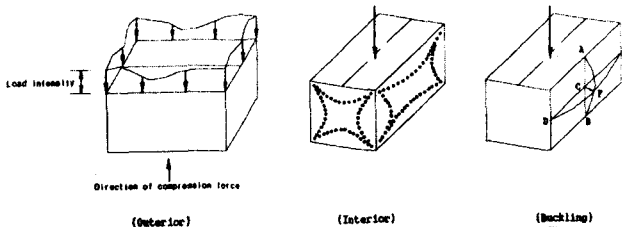


Fig. 2. Stress distribution and buckling configuration in a corrugated fiberboard box

상자에 가해지는 압축하중은 상자의 네 수직모서리와 상자측면(panel)에서 지탱하게되는데, 이때 상자의 네 수직모서리는 edgewise compression 상태이고, 상자 panel은 MD 및 CD방향 모두 휨상태에 있게된다<sup>(1,3,5-7,13)</sup>. 따라서 골판지의 ECS, MD 및 CD방향으로의 휨강성이 골판지상자의 층적강도(stacking strength, load-carrying ability)를 결정하는 주 인자가 된다.

골판지의 MD방향 휨강성은 라이너와, 그리고 CD방향의 휨강성은 골심지와 더 큰 관련성이 있는 것으로 알려져 있다. 여기서 골판지의 CD방향의 휨강성이라 함은 골판지의 생산방향인 MD방향과 나란하게 힘이 작용할 때를 그리고 MD방향의 휨강성은 골판지의 MD방향과 직각방향으로 힘이 작용할 때의 휨강성을 의미한다(Fig. 6).

#### 휨하중에 대한 휨강성의 이론전개

일반적으로 골판지의 휨강성 분석방법에는 하중작용점(load application point: supporting & loading point)의 수에따라 2점, 3점 및 4점 휨실험법이 있는데, Fig.3에 도시한 4점 휨실험법(four-point bending test)이 가장 신뢰성있는 방법으로 인정되고 있다<sup>(6,14-16)</sup>.

4점 휨실험법의 특징은 지지점(supporting point) 사이의 시험편 L에는 순수 휨모멘트만이 균일하게 분포하고(Fig.3의 BMD), 어떠한 전단력도 작용하지 않아 골판지는 원호의 형상으로 굽게되어(pure moment beam, Fig.3의 SFD), 골판지의 순수 휨모멘트와 처짐량의 관계를 얻을 수 있는 점이다.

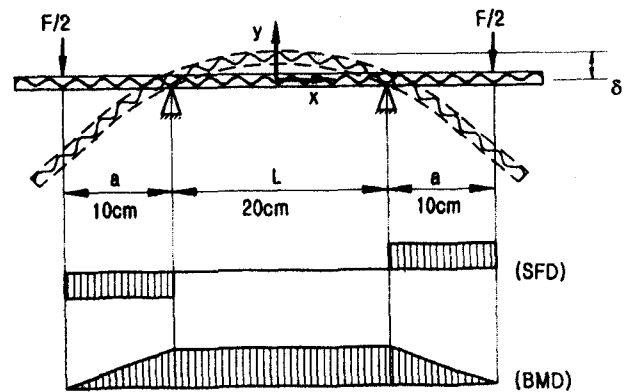


Fig. 3. The loading principle and distribution of bending moment for four-point bending test

Fig. 3에서 굽은 중심축에 대한 탄성선(elastic line)의 미분방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M \quad (1)$$

4점 휨상태에서의 최대휨모멘트는  $M = \frac{F}{2} a$ 이므로,

위의 탄성선의 미분방정식은 다음과 같이 적분된다.

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{Fa}{2} x + c_1 \quad (2)$$

$$EIy = -\frac{Fa}{4} x^2 + c_1 x + c_2 \quad (3)$$

Fig. 3에서 경계조건은  $x = a + \frac{L}{2}$  에서  $\frac{dy}{dx} = 0$ ,  $x = a$  에서  $y = 0$  이므로, 이 두 조건으로부터 식(2)와 식(3)의 적분상수  $C_1$ ,  $C_2$ 를 구하면 다음과 같다.

$$c_1 = \frac{Fa}{2} \left( a + \frac{L}{2} \right)$$

$$c_2 = \frac{Fa^3}{4} - \frac{Fa^2}{2} \left( a + \frac{L}{2} \right)$$

따라서 식(3)으로부터 휨강성(flexural stiffness)  $EI$ ( $E$ =탄성계수,  $I$ =관성모멘트)는 다음과 같이 정리된다.

$$EI = \frac{1}{y} \left[ -\frac{Fa}{4} x^2 + \frac{Fa}{2} \left( a + \frac{L}{2} \right) x + \frac{Fa^3}{4} - \frac{Fa^2}{2} \left( a + \frac{L}{2} \right) \right] \quad (4)$$

Fig. 4에 도시한 바와같이 비례한도(탄성범위)내에서 시험편의 중심 축,  $x = a + \frac{L}{2}$ 에서의 처짐량을  $\delta$ 라 하면, 식(4)는 다음과 같이 정리된다.

$$EI = \frac{1}{\delta} \left[ \frac{Fa}{4} \left( a + \frac{L}{2} \right)^2 + \frac{Fa^3}{4} - \frac{Fa^2}{2} \left( a + \frac{L}{2} \right) \right], Nm^2 \quad (5)$$

만일  $a = \frac{L}{2}$  라면, 시험편의 단위폭당의 휨강성  $S_b$  (Nm)와 이를 같은 물리적 의미를 갖는 항으로 분해하여 정리하면 식(6)과 같다.

$$S_b = \frac{EI}{w} = \frac{FL^3}{32w\delta} = \frac{1}{16} \left( \frac{F}{\delta} \right) \left( \frac{L^3}{w} \right) \left( \frac{a}{L} \right), Nm \quad (6)$$

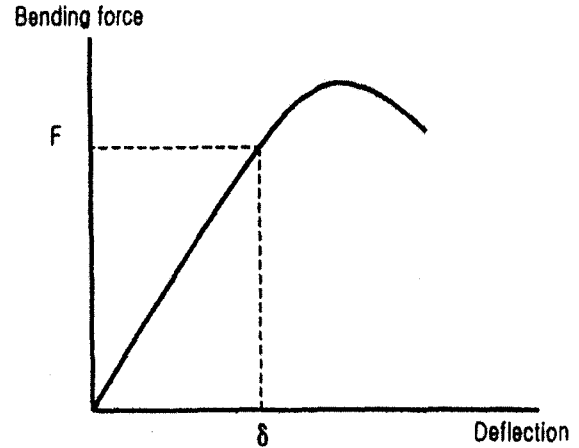


Fig. 4. Relationship between bending force and deflection

여기서,  $F$ = 비례한도 내의 최대휨하중, N

$w$ = 시험편의 폭, m

$L$ = 지지점 사이의 거리, m

$a$ = 지지점과 가압점 사이의 거리, m

$\delta$ = 비례한도 내의 시험편 중간부에서의 최대처짐량, m

### 실험설계 및 방법

골판지의 휨강성 실험에 사용된 골판지는 서로 다른 단면형태를 하고 있는 5종이며(Fig. 5), 이 골판지들의 원지구성과 기본제원을 (Table.1)에 나타내었다.

골판지에 대한 휨실험은 Fig. 5에 나타낸 바와같이 시험편의 크기는 골판지의 MD 및 CD방향 모두에서 길이 × 폭을 500mm × 50mm로 하였고, 시험편에 하중을 가하는 loading anvil 사이의 간격은 400mm로 하여, supporting anvil 사이의 간격인 200mm의 두배가 되도록 하였다<sup>(12)</sup>.

골판지의 MD 및 CD방향의 휨강성이 모두 상자압축 강도를 결정짓는 중요한 인자이므로, 본 연구에서는 Fig. 6에 도시한 바와같이 골판지의 MD 및 CD방향 각각에 대하여 휨실험을 실시하고, anvil과 시험편간의 접촉조건은 특별히 고려하지 않았다.

UTM(TSH-50)에 의한 시험편의 하중재하속도 (loading rate)는 25.4mm/min로 하였고, 실험전 시험편을 표준대기조건(23±1℃, rh 50±2%)으로 잘 조성

Table 1. Physical dimensions of the corrugated fiberboards used to bending test

Kinds	Flute type	Board combination	Total basis weight, g/m <sup>2</sup>	Take-up factor
SW	A	SK210/K <sub>2</sub> 180/SK210	700.80	(A/F)1.560
DW	AB	SK210/K <sub>2</sub> 180/SK210/K <sub>2</sub> 180/SK210	1167.12	(A/F)1.560 (B/F)1.424
DM	AA'	SK210/K <sub>2</sub> 180/K <sub>2</sub> 180/SK210	961.62	(A/F)1.560 (A'/F)1.449
DMA	AA'+A	SK210/K <sub>2</sub> 180/K <sub>2</sub> 180/SK210/K <sub>2</sub> 180/SK210	1452.42	(A/F)1.560 (A'/F)1.449
DMB	AA'+B	SK210/K <sub>2</sub> 180/K <sub>2</sub> 180/SK210/K <sub>2</sub> 180/SK210	1427.94	(A/F)1.560 (A'/F)1.449 (B/F)1.424

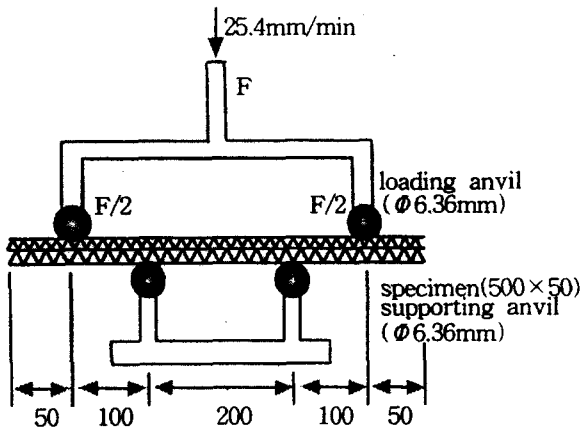


Fig. 5. Four-point bending test [unit: mm]

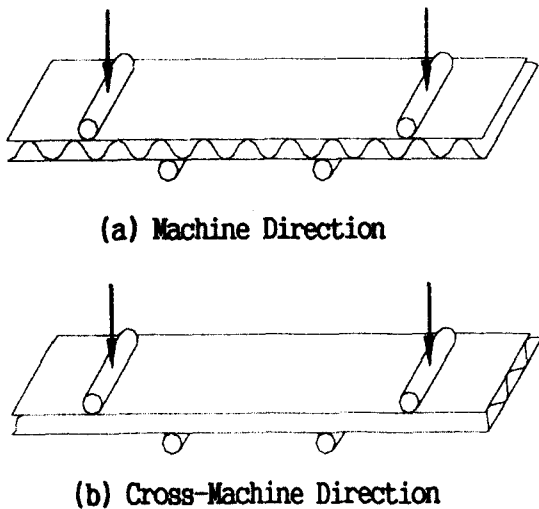


Fig. 6. Orientation of specimen for determination of flexural stiffness of corrugated fiberboard

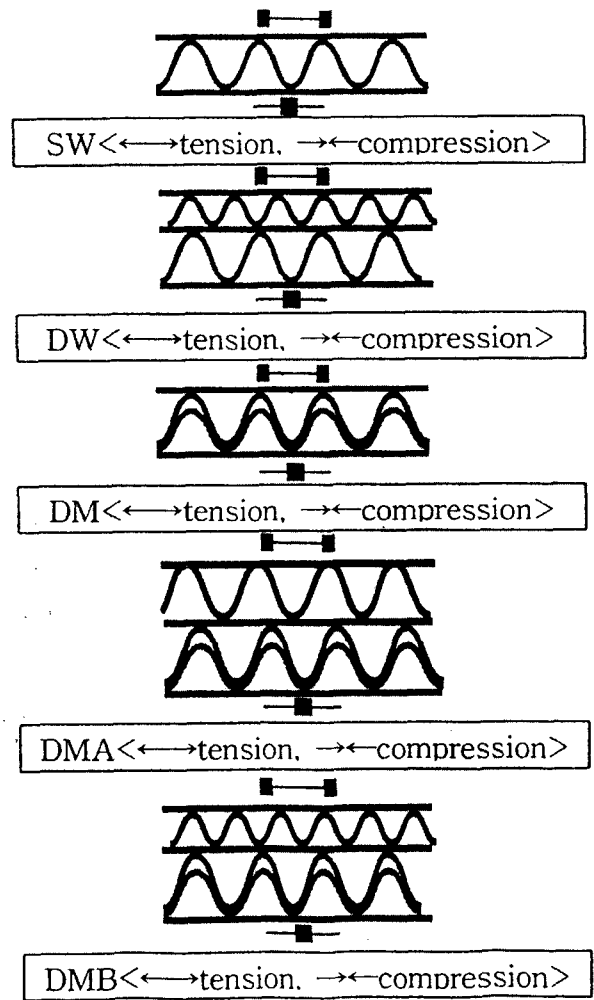


Fig. 7. Applied load direction in a bending test of corrugated fiberboards

된 항온항습기내에서 48시간 이상 평형시킨 후, 온도 및 상대습도가 비교적 일정하게 유지되는 실험실에서 실험을 수행하였다<sup>(17,18)</sup>.

골판지에 하중을 가하는 방향은 Fig. 7에 도시한 바와 같이 공시한 골판지로 상자를 제작하였을 때, 물품을 포장한 상자의 안쪽에서 바깥쪽으로 휨이 발생하는 현상을 감안하여 골판지의 이면라이너에 압축응력이, 그리고 표면라이너에 인장응력이 작용하도록 하였다.

식(6)에서 는 시험편의 중심부에서의 처짐량이며, 그 크기는 식(4)로부터 유도된 식(7)과 식(8)에서 보는 바와같이 UTM의 cross-head 이동량의 1/2에 해당하는 값으로 하였다.

$$\text{가압점에서, } y_{x=0} = \frac{1}{EI} \left( -\frac{3FL^3}{32} \right) \quad (7)$$

$$\text{중심점에서, } \delta = y_{x=a+L/2} = \frac{1}{EI} \left( \frac{FL^3}{32} \right) \quad (8)$$

### 실험결과 및 고찰

#### 최대휨하중과 처짐량

Fig. 8은 골판지에 대한 휨실험시 시험편과 하중가압 부분을 상세히 나타낸 그림이다. 공시한 골판지에 대한 MD 및 CD방향의 최대휨하중과 처짐량의 측정결과를 Table 2, Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다. 골판지중 SW를 제외하고는 하중방향(이면라이너 표면라이너)에 따라 측정되는 값 사이에 큰 차이를 보였으며, 골판지의 CD방향에 대한 휨하중-처짐량의 특성곡선상에는 파괴점 이전에 하나의 항복점만 나타났는데 비하여 MD방향의 경우는 2개 혹은 그 이상의 항복점들이 나타났다.

CD방향의 최대휨하중이 MD방향에 비하여 매우 높게

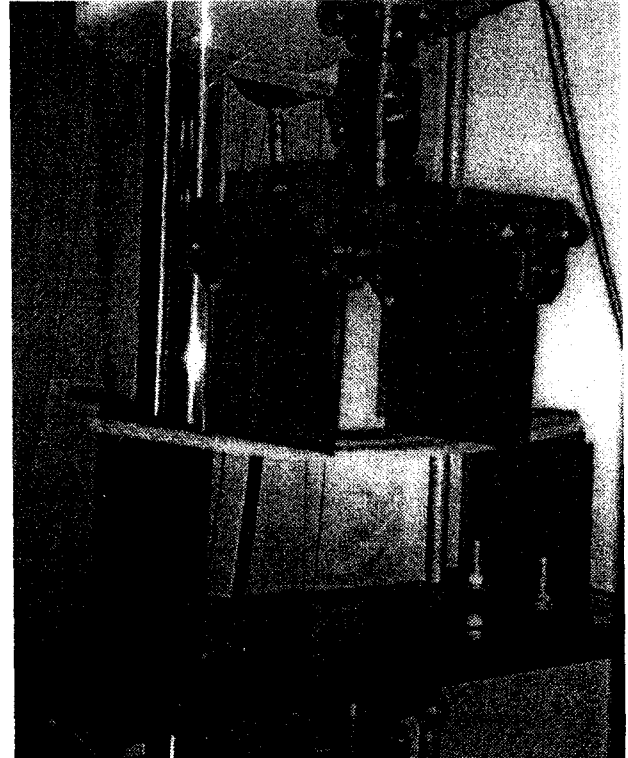


Fig. 8. Experimental arrangement for four-point bending test

나타났으며, 두 방향간의 차이는 SW와 DW에서는 약 50%인 반면에 이층골심판지인 DM, DMA 및 DMB에서는 62~74%로 비교적 크게 나타났다.

DW와 DM 또는 DW와 DMB 사이의 최대휨하중을 비교하면, CD방향에서는 DW와 DM간의 차이는 거의 없었으나, DMB의 최대휨하중은 DW에 비하여 약 2배의 큰 값을 보였다. 그러나 MD방향에서는 DW와 DMB간의 차이는 없으나, DW와 DM사이에는 DW가 다소 높게 나타났다.

최대처짐량 역시 공시한 골판지 모두에서 MD방향에 비하여 CD방향에서 큰 값을 보였는데 특히, DM에서의

Table 2. Maximum bending force and deflection for various corrugated fiberboards

Kinds	Max. bending force, N			Max. deflection, mm			Flexural stiffness, Nm		
	MD	CD	Difference,%	MD	CD	Difference,%	MD	CD	Difference,%
SW	7.01	15.34	54	1.46	6.28	77	27.16	14.05	93
DW	12.26	23.94	49	1.71	4.17	59	43.12	25.15	71
DM	8.77	23.27	62	1.56	12.27	87	39.25	21.32	84
DMA	16.71	57.98	71	1.50	6.40	77	89.18	63.72	40
DMB	12.44	47.45	74	1.79	7.52	76	64.04	41.85	53

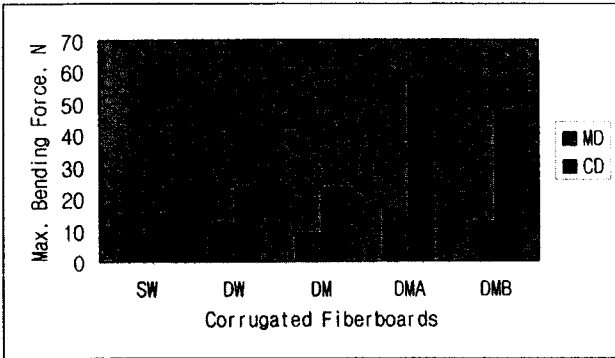


Fig. 9. Maximum bending forces for various corrugated fiberboards

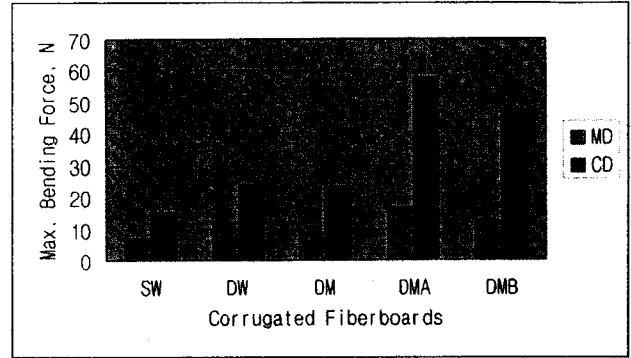


Fig. 11. Flexural stiffness for various corrugated fiberboards

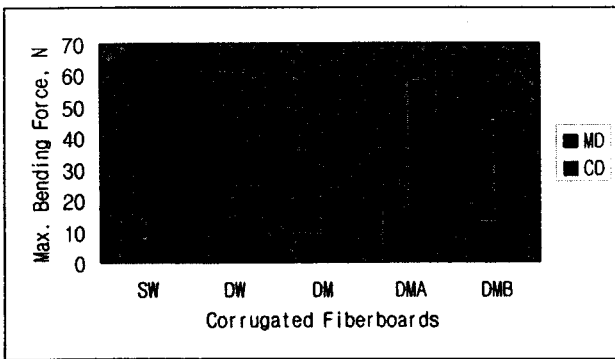


Fig. 10. Maximum Deflections for various corrugated fiberboards

두 방향간의 차이가 가장 큰 것으로 나타났다. 공시한 골판지간에 최대처짐량의 절대량은 MD방향에서는 큰 차이가 없었으나, CD방향에서는 DM→SW, DMA, DMB→DW의 순으로 DM이 가장 큰 값을 보였다.

**휨강성**

일반적으로 골판지의 휨강성은 MD방향이 CD방향에 비하여 높은값을 보이는 데, 본 실험결과에서도 공시한 모든 골판지에서 MD방향이 CD방향에 비하여 약 29~48% 정도 높게 나타났으며, 두 방향간의 휨강성의 차이는 DMA와 DMB에서 가장작은 것으로 나타났다(Fig. 11).

공시한 골판지의 MD 및 CD방향 모두에서 휨강성의 크기는 DMA→DMB→DW→DM→SW 순 이었으며, 골판지의 제작에 소요된 원지의 단위면적당의 휨강성의 크기도 DMA와 DMB에서 다른형태의 골판지에 비하여 높게 나타났다.

**결론**

골판지의 단면형태별로 4점 휨실험법에 의해 최대휨하중, 처짐량 및 휨강성등을 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) MD 및 CD의 두 방향간의 최대휨하중의 차이는 SW와 DW에서는 약 50%인 반면에 DM, DMA 및 DMB에서는 62~74%로 비교적 큰 것으로 나타났다.
- (2) 공시한 골판지간에 최대처짐량은 MD방향에서는 큰 차이가 없었으나, CD방향에서는 DM→SW, DMA, DMB→DW의 순으로 DM이 가장 큰 값을 보였다.
- (3) 공시한 모든 골판지에서 MD방향이 CD방향에 비하여 약 29~48% 정도 높게 나타났으며, 두 방향간의 휨강성의 차이는 DMA와 DMB에서 가장 작게 나타났다. 한편, MD 및 CD방향 모두에서 휨강성의 크기는 DMA→DMB→DW→DM→SW 순이었다.

**문헌**

1. Gartaganis, P. A. Strength properties of corrugated containers. Tappi 58(11): 102-108 (1975)
2. Koning, J. W. Compressive properties of linerboard as related to corrugated fiberboard containers: theoretical model verification. Tappi 61(8): 69-71 (1978)
3. Kutt, H. and B. B. Mithel. Structural strength characteristics of containers. Tappi 52(9): 1685-1690 (1969)
4. Little, J. R. A theory of box compressive resistance in

- relation to the structural properties of corrugated paperboard. Paper Trade Journal **116(24)**: 31-34 (1943)
5. JMaltenfort, G. G. Compression failure analysis. Paperboard Packaging 172 (1979)
  6. Maltenfort, G. G. Corrugated shipping containers: an engineering approach. Jelmar Publishing Co. (1988)
  7. McKEE, R. C., J. W. Gander and J. R. Wachuta. Compression strength formula for corrugated boxes. Paperboard Packaging (Aug.): 144-159 (1963)
  8. Johnson, M. W., T. J. Urbanik, W. E. Denniston. Maximizing top-to-bottom compression strength. Paperboard Packaging 98 (1980)
  9. Aoi, K., Takasu, Tsuchiya, A.M. and Okada, M.: Miscibility of chitin-graft-poly(2-ethyl-2-oxazoline) with PVA. Macromol. Chem. Phys., **199**, 2805 (1998)
  10. Kutt, H. and B. B. Mithel. Studies of compressive strength of corrugated containers. Tappi Journal **51(4)** (1968)
  11. Seth, R. S. Relationship between edgewise compressive strength of corrugated board and its components. Tappi Journal(March): 98-101 (1985)
  12. TAPPI T820. Flexural stiffness of corrugated board)
  13. Maltenfort, G. G. Compression load distribution on corrugated boxes. Paperboard Packaging 98 (1980)
  14. Billerad Handbook. Testing of corrugated board and its components
  15. Lorentzen & Wettre. Testing instruments
  16. McKEE, R. C., J. W. Gander and J. R. Wachuta. Flexural stiffness of corrugated board. Paperboard Packaging **47(12)**: 111-118 (1962)
  17. TAPPI T402. Standard conditioning and testing atmospheres for paper, paperboard, pulp hand-sheets, and related products.)
  18. ASTM D685. Practice for conditioning paper and paper products for testing