

종이성형구조물의 구조적 강도에 대한 이론분석과 유한요소해석

박종민, 이명훈*
밀양대학교 기계공학과, 한국포장시스템연구소*

Theoretical and Finite Element Analysis for Structural Strength of Paperboard-stacked Structure

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

Abstract

Not only is it important that the physical properties of the paperboards be appropriate for the intended end use, but the proper arrangement of the components in the built-up board is essential for attaining the optimum moment of inertia and the maximum load-carrying ability in a box. It is known to be impossible to estimate the stress distribution and deflection pattern by experiments or theoretical analysis when the corrugated fiberboard get the bending force. This study was tried theoretical and finite element analysis to analyze structural strength characteristics of corrugated fiberboards. If the linerboard and corrugating medium of every corrugated fiberboards is made from the same material, the location of neutral axis comes close to inside liner in order of DMA, DM, DMB, SW and DW, and moment of inertia of area decreases in order of DMA, DMB, DW, DM and SW. With the finite element analysis, deflection of applied loads represneted SW, DM, DMA, and TW in the order of their value.

Key words : finite element, paperboard, structural strength

서론

골판지는 종이를 여러겹 적층시킨 형태로 구성요소인 라이너(linerboard)와 골심지(corrugating medium) 자체의 물성과 이들의 적층형태에 따라 다양한 역학적 특성을 갖는 일종의 공학적 구조물(engineering structure)이다.⁽¹⁻⁵⁾ 따라서 이 공학적 구조물의 강도적 특성을 최적화하기 위해서는 원지자체의 물성보강도 중요하지만, 골구조의 합리적 설계에 의한 강도적 최적화의 기법이 더 합리적이고 경제적이라 하겠다. 즉, 골판지원지로부터 최종 상자까지의 역학적인 상관관계의 연구로부터 최적의 상자압축강도(box compression strength)를 얻는 것이 보다 중요하며, 이는 포장상자의 품질규격화, 표준화 및 포장비용절감

에도 기여한다.

골판지상자의 압축강도는 골판지의 수직압축강도(edgewise compression strength, ECS)와 휨강성(flexural stiffness)에 따라 결정되는데, 이들은 골판지의 구조적인 요소 즉, 골구조와 깊은 관련성이 있다.⁽⁶⁻¹²⁾

골판지의 휨강성은 골판지상자가 응적되었을 때 상자측면에서의 좌굴(buckling)에 저항하는 성질로 골판지의 단면성질을 나타내는 관성모멘트(moment of inertia of area)와 탄성계수의 함수이다. 따라서 같은 등급, 같은 양의 원지를 가지고도 단면형태에 따라 관성모멘트가 크게 달라지므로 골판지의 휨강성과 상자압축강도가 또한 달라지게 된다.^(1-3, 5, 13-15)

본 연구에서는 이론분석을 통하여 골판지의 고조적인 강도와 관련되는 역학적 인자들을 분석하고, 유한요소해석에 의해 휨하중에 대한 응력분포 및 변위형태를 분석하고자 한다.

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

단면성질에 대한 이론분석

골판지의 단면성질에 대한 이론분석을 위하여 그림 1과 같이 3축의 직각좌표계를 설정하였다.

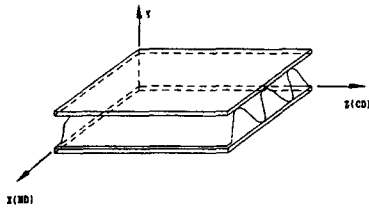


Fig. 1 Corrugated fiberboard and its principal planes

골판지의 라이너와 골심지를 같은 원지의 균일단면으로 가정하면, 도심(centroid)과 중립축(neutral axis)이 일치하므로, 이와같은 조건하에서 그림 2의 다양한 형태의 골판지에 대한 CD방향의 관성모멘트(moment of inertia of area)를 다음과 같이 각각 구할 수 있다.

SW 골판지의 폭을 w , 골조울 α , 골높이를 h 라할 때, 중립축의 위치는 단면 1차모멘트(geometrical moment of area)의 성질로부터 다음과 같이 결정된다.

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \int_A y dA = \frac{0.5t_1^2 + t_2(t_1 + 0.5t_2 + h) + c_m \alpha (t_1 + 0.5h)}{t_1 + t_2 + c_m \alpha} \quad (1)$$

따라서 SW 골판지의 중립축에 대한 관성모멘트는 다음과 같다.

$$I_x = \frac{wt_1^3}{12} + (\bar{y} - \frac{t_1}{2})^2 wt_1 + \frac{wt_2^3}{12} + (\bar{y} - \frac{t_2}{2})^2 wt_2 + (I_m)_m + (\bar{y} - t_2 - \frac{h}{2})^2 wc_m \alpha \quad (2)$$

여기서, $\bar{y} = (t_1 + t_2 + h) - y$, \bar{m}

식(2)에서 $(I_m)_m$ 은 골심지의 중립축에 대한 관성모멘트로서 다음과 같이 결정된다. (그림 3)

$$\text{골심지의 미소면적요소, } dA = c_m ds \quad (3)$$

$$\text{골심지의 미소길이요소, } ds = \sqrt{1 + (\frac{dy}{dx})^2} dx \quad (4)$$

만일 골형태를 정현함수(sinusoidal)로 본다면,

$$y = \frac{h}{2} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{\pi h}{\lambda} \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \text{ 가 되므로}$$

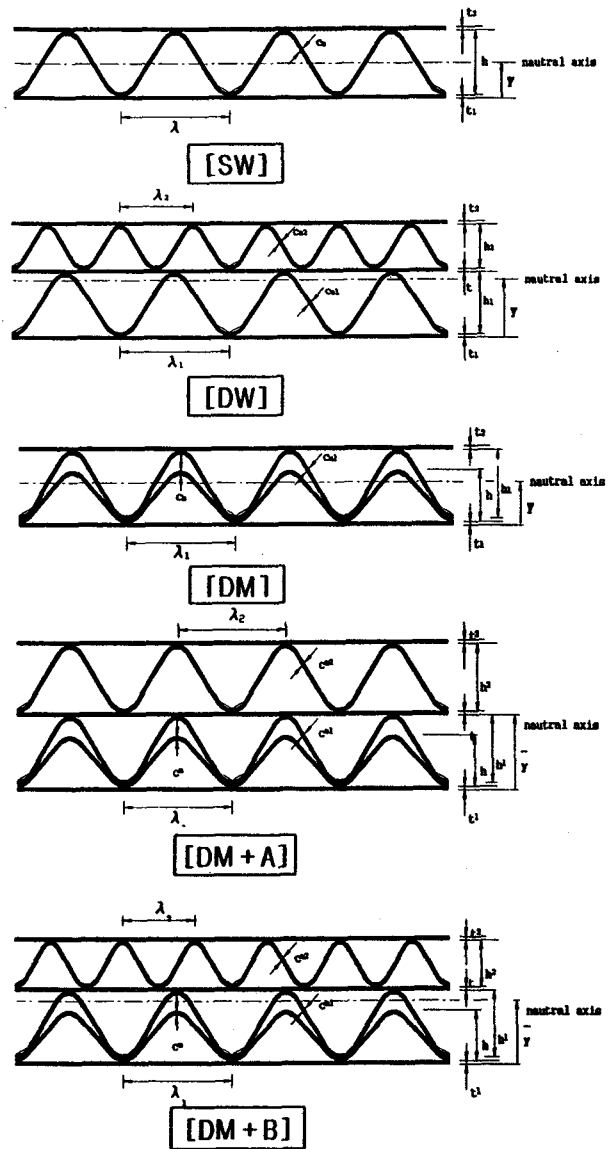


Fig. 2 CD cross-sections of various corrugated fiberboards

골심지의 중립축에 대한 관성모멘트는 다음과 같이 결정된다.

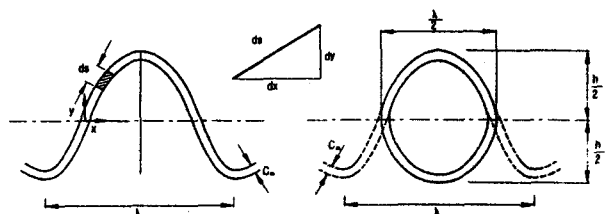


Fig. 3 Diagram of a flute

$$(I_{\bar{a}})_m = \int y^2 dA = \frac{4w}{\lambda} \left[\int_0^{\frac{\lambda}{4}} \frac{c_m h^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h^2}{\lambda^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{a}})_m = \frac{w}{\lambda} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \left(\frac{h}{2} - c_m \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} - 2c_m \right) \right] \quad (5)$$

위와같은 방법으로 그림 2의 DW, DM, DM+A 및 DM+B 플판지 각각에 대한 중립축의 위치와 중립축에 대한 관성모멘트를 구하여 정리하면 다음과 같다.

[DW 플판지]

$$\bar{y} = \frac{0.5t_1 \bar{t} t(t_1 + 0.5t + h_1) + t_2(t_1 + t + 0.5t_2 + h_1 + h_2) + c_{m1} \alpha_1(t_1 + 0.5h_1) + c_{m2} \alpha_2(t_1 + t + h_1 + 0.5h_2)}{t_1 + t + t_2 + c_{m1} \alpha_1 + c_{m2} \alpha_2} \quad (6)$$

$$I_{\bar{a}} = \frac{wt_1^3}{12} + (\bar{y} - \frac{t_1}{2})^2 wt_1 + \frac{wt_2^3}{12} + (t_1 + h_1 + \frac{t}{2} - \bar{y})^2 wt + \frac{wt_2^3}{12} +$$

$$(\bar{y} - \frac{t_2}{2})^2 wt_2 + (I_{\bar{a}})_1 + (\bar{y} - t_1 - \frac{h_1}{2})^2 wc_{m1} \alpha_1 + (\bar{y} - t_2 - \frac{h_2}{2})^2 wc_{m2} \alpha_2$$

여기서, $\bar{y} = (t_1 + t_2 + t + h_1 + h_2) - \bar{y}, m$

$\alpha_1, \alpha_2 = DW$ 에서 각각 A골과 B골의 골조율

$$(I_{\bar{a}})_1 = \frac{4w}{\lambda} \left[\int_0^{\frac{\lambda}{4}} \frac{c_{m1} h_1^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h_1^2}{\lambda^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{a}})_1 = \frac{w}{\lambda} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h_1}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \left(\frac{h_1}{2} - c_{m1} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} - 2c_{m1} \right) \right] \quad (8)$$

$$(I_{\bar{a}})_2 = \frac{4w}{\lambda} \left[\int_0^{\frac{\lambda}{4}} \frac{c_{m2} h_2^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h_2^2}{\lambda^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{a}})_2 = \frac{w}{\lambda} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h_2}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \left(\frac{h_2}{2} - c_{m2} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} - 2c_{m2} \right) \right] \quad (9)$$

[DM 플판지]

$$\bar{y} = \frac{0.5t_1^2 \bar{t} t(t_1 + 0.5t_2 + h_1 + c_m) + c_{m1} \alpha_1(t_1 + 0.5h_1 + c_m) + c_m \alpha(t_1 + 0.5h)}{t_1 + t_2 + c_{m1} \alpha_1 + c_m \alpha} \quad (10)$$

$$I_{\bar{a}} = \frac{wt_1^3}{12} + (\bar{y} - \frac{t_1}{2})^2 wt_1 + \frac{wt_2^3}{12} + (\bar{y} - \frac{t_2}{2})^2 wt_2 + (I_{\bar{a}})_1 + (\bar{y} - t_2 - \frac{h_1}{2})^2 c_{m1} w \alpha_1 + (I_{\bar{a}}) + (\bar{y} - t_1 - \frac{h}{2})^2 c_{m1} w \alpha \quad (11)$$

여기서, $\bar{y} = (t_1 + t_2 + h_1 + c_m) - \bar{y}, m$

$\alpha_1, \alpha = DM$ 에서 각각 A골과 변형 A골(A')의 골조율

$$(I_{\bar{a}})_1 = \frac{4w}{\lambda} \left[\int_0^{\frac{\lambda}{4}} \frac{c_{m1} h_1^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h_1^2}{\lambda^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{a}})_1 = \frac{w}{\lambda} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h_1}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \left(\frac{h_1}{2} - c_{m1} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} - 2c_{m1} \right) \right] \quad (12)$$

$$(I_{\bar{a}}) = \frac{4w}{\lambda} \left[\int_0^{\frac{\lambda}{4}} \frac{c_m h^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h^2}{\lambda^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{a}}) = \frac{w}{\lambda} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \left(\frac{h}{2} - c_m \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} - 2c_m \right) \right] \quad (13)$$

[DM+A 플판지]

$$\bar{y} = \frac{0.5t_1 \bar{t} t(t_1 + 0.5t + h_1 + c_m) + t_2(t_1 + t + 0.5t_2 + h_1 + c_m + h_2) + c_{m1} \alpha_1(t_1 + 0.5h_1 + c_m) + c_m \alpha(t_1 + 0.5h) + c_{m2} \alpha_2(t_1 + t + h_1 + 0.5h_2 + c_m)}{t_1 + t + t_2 + c_{m1} \alpha_1 + c_m \alpha + c_{m2} \alpha_2} \quad (14)$$

$$I_{\bar{a}} = \frac{wt_1^3}{12} + (\bar{y} - \frac{t_1}{2})^2 wt_1 + \frac{wt_2^3}{12} + (t_1 + c_m + h_1 + \frac{t}{2} - \bar{y})^2 wt + \frac{wt_2^3}{12} +$$

$$(\bar{y} - \frac{t_2}{2})^2 wt_2 + (I_{\bar{a}})_1 + (\bar{y} - t_1 - c_m - \frac{h_1}{2})^2 wc_{m1} \alpha_1 + (I_{\bar{a}}) + (\bar{y} - t_1 - \frac{h}{2})^2 wc_m \alpha + (I_{\bar{a}})_2 + (\bar{y} - t_2 - \frac{h_2}{2})^2 wc_{m2} \alpha_2 \quad (15)$$

여기서, $\bar{y} = (t_1 + t + t_2 + c_m + h_1 + h_2) - \bar{y}, m$

$\alpha_1, \alpha = DM+A$ 에서 DM의 A골과 변형 A골(A')의 각각 골조율

$\alpha_2 = DM+A$ 에서 A골의 골조율

$$(I_{\bar{a}})_1 = \frac{4w}{\lambda} \left[\int_0^{\frac{\lambda}{4}} \frac{c_{m1} h_1^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h_1^2}{\lambda^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{a}})_1 = \frac{w}{\lambda} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h_1}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \left(\frac{h_1}{2} - c_{m1} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} - 2c_{m1} \right) \right] \quad (16)$$

유한요소 모델링 및 해석방법

$$(I_{\bar{x}}) = \frac{4w}{\lambda} \left[\int_0^{\frac{\lambda}{2}} \frac{c_m h^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h^2}{\lambda^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{x}}) = \frac{w}{\lambda} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \left(\frac{h}{2} - c_m \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} - 2c_m \right) \right] \quad (17)$$

$$(I_{\bar{x}})_2 = \frac{4w}{\lambda_2} \left[\int_0^{\frac{\lambda_2}{2}} \frac{c_{m2} h_2^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda_2} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h_2^2}{\lambda_2^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda_2}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{x}})_2 = \frac{w}{\lambda_2} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h_2}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda_2}{2} \right) - \left(\frac{h_2}{2} - c_{m2} \right)^3 \left(\frac{\lambda_2}{2} - 2c_{m2} \right) \right] \quad (18)$$

[DM+B 골판지]

$$\bar{y} = \frac{0.5t_1^3 + t(t_1 + 0.5t + h_1 + c_m) + t_2(t_1 + t + 0.5t_2 + h_1 + c_m + h_2) + t_1 + t + t_2 + c_{m1} \alpha_1 + c_m \alpha + c_{m2} \alpha_2}{c_{m1} \alpha_1 (t_1 + 0.5h_1 + c_m) + c_m \alpha (t_1 + 0.5h) + c_{m2} \alpha_2 (t_1 + t + h_1 + 0.5h_2 + c_m)} \quad (19)$$

$$I_{\bar{x}} = \frac{wt_1^3}{12} + (\bar{y} - \frac{t_1}{2})^2 wt_1 + \frac{wt^3}{12} + (t_1 + c_m + h_1 + \frac{t}{2} - \bar{y})^2 wt + \frac{wt_2^3}{12} + (\bar{y} - \frac{t_2}{2})^2 wt_2 + (I_{\bar{x}})_1 + (\bar{y} - t_1 - c_m - \frac{h_1}{2})^2 wc_{m1} \alpha_1 + (I_{\bar{x}}) + (\bar{y} - t_1 - \frac{h}{2})^2 wc_m \alpha + (I_{\bar{x}})_2 + (\bar{y} - t_2 - \frac{h_2}{2})^2 wc_{m2} \alpha_2 \quad (20)$$

여기서, $\bar{y} = (t_1 + t + t_2 + c_m + h_1 + h_2) - \bar{y}$, m
 $\alpha_1, \alpha = DM+B$ 에서 DM의 A골과 변형 A골(A')의 각각 골조울
 $\alpha_2 = DM+B$ 에서 B골의 골조울

$$(I_{\bar{x}})_1 = \frac{4w}{\lambda} \left[\int_0^{\frac{\lambda}{2}} \frac{c_{m1} h_1^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h_1^2}{\lambda^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{x}})_1 = \frac{w}{\lambda} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h_1}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \left(\frac{h_1}{2} - c_{m1} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} - 2c_{m1} \right) \right] \quad (21)$$

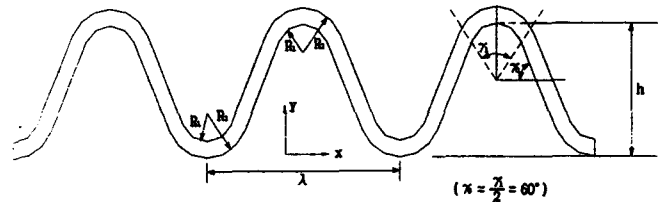
$$(I_{\bar{x}}) = \frac{4w}{\lambda} \left[\int_0^{\frac{\lambda}{2}} \frac{c_m h^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h^2}{\lambda^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{x}}) = \frac{w}{\lambda} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} \right) - \left(\frac{h}{2} - c_m \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2} - 2c_m \right) \right] \quad (22)$$

$$(I_{\bar{x}})_2 = \frac{4w}{\lambda_2} \left[\int_0^{\frac{\lambda_2}{2}} \frac{c_{m2} h_2^2}{4} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda_2} \times \sqrt{1 + \frac{\pi^2 h_2^2}{\lambda_2^2} \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda_2}} dx \right] \text{ 또는}$$

$$(I_{\bar{x}})_2 = \frac{w}{\lambda_2} \times \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h_2}{2} \right)^3 \left(\frac{\lambda_2}{2} \right) - \left(\frac{h_2}{2} - c_{m2} \right)^3 \left(\frac{\lambda_2}{2} - 2c_{m2} \right) \right] \quad (23)$$

1. 골판지의 유한요소 모델링
 휨하중에 대한 골판지의 휨거동을 해석하기 위하여 유한요소해석을 실시하였는데, 여기서 해석은 현재 solution의 신뢰성을 인정받아 각 공학분야서 널리 사용되고 있는 유한요소 구조해석 패키지인 ANSYS 5.5.1을 이용하였다.⁽¹⁶⁾
 유한요소 해석을 위해서는 먼저 골판지를 절점 (node)으로 연결되어 있는 수개의 요소(element)의 결합체로 이상화하고, 이러한 이상화 과정에 있어서 여러종류의 유한요소(finite element)들이 있지만, 골판지의 해석에는 브릭(brick)요소를 사용하여 모델링하였다. 골판지의 유한요소 모델링시 기하학적인 대칭성을 이용하여 골판지의 한 부분만을 모델링하였으며, 이로부터 계산시간은 물론 부분적인 모델에 대하여 더 자세하고 정확한 계산결과를 얻을 수 있도록 하였다.



Kinds		R ₁	R ₂	λ	h	Take-up factor	No. of flute /30cm	Thickness mm	Remarks
Flute	A/F	1.46	1.75	9.106 (8.33 - 9.38)	4.90 (4.6 - 4.8)	1.560 (1.6)	32.90 (34 ± 2)	0.261	K ₂ 180
	A'F	1.75	2.02	9.106 (5.27 - 6.25)	4.20 (2.5 - 2.7)	1.449 (1.4)	32.90 (50 ± 2)	0.261	
	B/F	1.18	1.50	6.042 (5.27 - 6.25)	2.65 (2.5 - 2.7)	1.424 (1.4)	49.66 (50 ± 2)	0.261	
Liner	inside	-	-	-	-	-	-	0.253	SK 210
	middle	-	-	-	-	-	-	0.253	
	outside	-	-	-	-	-	-	0.253	

[참고] ()KS A1502⁽¹⁷⁾

Fig. 4 Physical dimensions of corrugated fiberboards used to FEM modeling

골판지에 대한 모델링에서 골심지와 라이너의 기하학적인 형태와 기본치수를 그림 4에 나타내었으며, 특히 골의 기하학적 형태는 골정(flute top)과 골저(flute bottom)에서의 곡면을 중심으로 좌우대칭되게 60°, 골의 shank부분은 60°의 직선으로 보고 모델링하였다.⁽¹⁾

2)경계조건 설정

본 연구에서와 같이 기하학적인 대칭성을 가지는 요소에 대한 경계조건은 대칭면에 대한 경계조건의 설정을 반드시 해 주어야 하며, 이러한 경계조건은 일반적으로 대칭면의 변위를 구속하는 방법을 택하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 그림 5에서 보는 바와같이 모델의 양쪽 측면을 따라 기하학적으로 단순화된 면의 변위를 구속하는 방법을 사용하였다. 또한 길이 방향으로 중심에서 양쪽으로 100mm 지점에서 anvil(φ6.36mm)에 의한 지지가 이루어지므로 이 부분은 일반적인 단순지지 빔(beam)과 같은 조건으로 경계조건을 설정하여야 한다. 즉, 한 곳은 y 방향과 z 방향의 자유도를 모두 구속하여야 하고, 나머지 한 곳은 y 방향의 자유도만을 구속하여야 한다. (그림 6)^(1, 16)

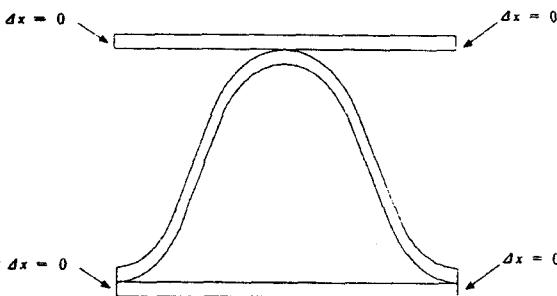


Fig. 5 Boundary conditions for symmetry condition

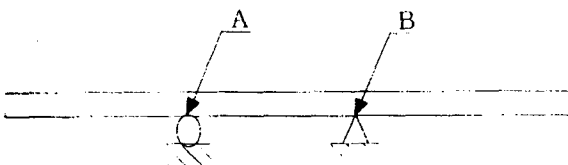


Fig. 6 Boundary conditions for anvil supporting point

하중조건에 있어서는 이러한 두가지 조건이 결정되면 골판지의 휨해석에 대한 대략적인 경계조건의 설정은 끝나게 된다. 그밖에 하중조건은 중심으로부터 200mm 지점에서 -y방향으로 적용되었으며, 각각의 절

점(node)에 집중하중을 가하는 방법을 선택하였다.

이론분석 및 유한요소해석 결과

1)이론분석결과

골판지의 종류별 CD방향의 단면성질에 대한 이론적 분석결과를 컴퓨터프로그래밍하여 컴퓨터에 의한 분석을 실시하였다.

컴퓨터 분석에 적용된 골판지의 주요제원은 표 1에 나타낸 바와같이, 현재 D사에서 생산되는 대표적인 골판지를 모델로 설정하여, 이들 골판지와 골게이터(corrugator)의 기본 설계자료와 일부 실측한 자료를 활용하였다.⁽¹⁸⁻²⁰⁾

Table 1. Physical dimensions of the corrugated fiberboards used to the theoretical analysis

Kinds	Physical dimensions	Remarks
SW	$\lambda=9.106\text{mm}$, $t_1=t_2=0.253\text{mm}$, $c_m=0.261\text{mm}$ $h=5.161\text{mm}$, $\alpha=1.560$	
DW	$\lambda=9.106\text{mm}$, $\lambda_2=6.042\text{mm}$, $t_1=t_2=t=0.253\text{mm}$, $c_{m1}=c_{m2}=0.261\text{mm}$, $h_1=5.161\text{mm}$, $h_2=2.911\text{mm}$, $\alpha_1=1.560$, $\alpha=1.424$	
DM	$\lambda_1=9.106\text{mm}$, $t_1=t_2=0.253\text{mm}$, $c_{m1}=c_{m2}=0.261\text{mm}$, $h=4.461\text{mm}$, $h_1=5.161\text{mm}$ $\alpha_1=1.560$, $\alpha=1.449$	
DMA	$\lambda_1=\lambda_2=9.106\text{mm}$, $t_1=t_2=t=0.253\text{mm}$, $c_{m1}=c_{m2}=c_m=0.261\text{mm}$, $h_1=h_2=5.161\text{mm}$, $h=4.461\text{mm}$, $\alpha_1=\alpha_2=1.560$, $\alpha=1.449$	
DMB	$\lambda_1=9.106\text{mm}$, $\lambda_2=1.424\text{mm}$, $t_1=t_2=t=0.253\text{mm}$, $c_{m1}=c_{m2}=c_m=0.261\text{mm}$, $h_1=5.161\text{mm}$, $h_2=2.911\text{mm}$, $h=4.461\text{mm}$, $\alpha_1=1.560$, $\alpha_2=1.424$, $\alpha=1.449$	

골판지상자에 물품을 포장한체 층적된 경우는 상자의 안쪽에서 바깥쪽을 향하여 휨현상이 있다. 그림 7에서 보는 바와같이 골판지의 MD 및 CD방향 단면에서 중립축을 중심으로 이면라이너(inside liner)쪽으로는 압축응력이, 표면라이너(outside liner) 쪽으로는 인장응력이 작용하는데 그 크기는 중립축의 위치에 따

라 달라진다.⁽²¹⁾

골판지원지의 인장 및 압축력에 대한 각각의 특성과 상자의 붕괴가 이면라이너로부터 시작됨을 고려할 때, 골판지 전체 두께에 대한 중립축이 이면라이너 가까이에 위치할 수록 응력분포면에서 유리하다고 할 수 있다.

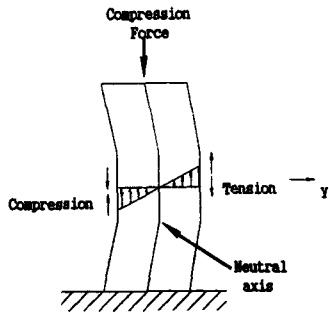


Fig. 7 Schematic of stresses in a compressed corrugated fiberboard panel

중립축의 위치는 골판지의 골형태와 밀접한 관계가 있고, 상자의 압축력에 의한 붕괴는 상자의 네 수직모서리의 안쪽으로부터 시작되어 점차 상자 panel 안쪽 중심부위로 진행되므로⁽²²⁾ (Fox 등, 1979), 골판지의 골구조와 원지구성의 발란스 또한 상자의 압축강도를 결정짓는 중요한 인자가 된다⁽⁹⁾ (Vollmer, 1971; Maltenfort, 1988). 따라서 구조역학적으로만 볼 때 이면라이너에 보다 강성이 있는 원지가 오도록 원지구성을 하는 것이 유리하다고 판단된다.

그림 6의 컴퓨터 분석결과에서 나타난 바와같이, 분석한 골판지중 DMA→DM→DMB, SW→DW 순서로 중립축이 이면라이너 가까이에 위치하였으며, 반면, 관성모멘트의 크기는 DMA→DMB→DW→DM→SW 순이었다.

Solid한 재료의 경우는 동일한 재료에 관성모멘트가 같으면 휨강성도 같게되나, 골판지와 같이 라이너와 골심지가 여러형태로 적층되어 있을 경우는 그 적층형태에 따라 관성모멘트가 각기 다르므로 휨강성 또한 달라지게 된다. 골판지의 라이너와 골심지 모두 같은 등급의 원지라 할 경우 관성모멘트가 클 수록 휨강성도 커지게 된다.

2) 유한요소해석 결과

유한요소 해석에 적용된 골판지원지의 물성은 표 2와 같으며, 유한요소해석시 작용하중은 골판지의 폭 9.106mm에 대하여는 0.981N, 1.962N, 2.943N 3수준 이

Test method...2 _PBT(1), 3 _PBT(2), 4 _PBT(3) : 3
 Flute type...SWA(1), SWB(2), DW(3), TW(4), DM(5), DMA(6)
 DMB(7) : 1, 3, 5, 6, 7
 Specimen direction...MD(1), CD(2) : 2
 Specimen dimensions(L _ mm, W _ mm) : 500, 50
 REMARKS:NP(neutral axis position), IM(moment of inertia), TT(total thickness)

**** RESULTS OF COMPUTER ANALYSIS FOR THE CORRUGATED FIBERBOARDS ****

	NP(mm)	Percentage(NP/TT)(%)	IM(mm ⁴)
SW	2.8335	50.00	305.9303
DW	4.8407	54.81	808.3990
DM	2.8646	48.32	413.3491
DMA	5.1247	45.78	1566.0708
DMB	4.5467	50.01	1025.5389

press any key to continue

Fig. 8 Theoretical analysis results by a computer program

었는데, 이것을 폭 50mm의 시험편에 대하여 환산하면, 5.387N(0.981×9.106/50), 10.773N(1.962×9.106/50), 16.160N(2.943×9.106/50)이다.^(18-20, 23-25)

작용하중 10.773N에 대한 골판지의 종류별 유한요소해석결과를 그림 9~그림 12에 각각 나타내었다.

Table 2. Physical properties of the linerboard and the corrugating medium used to finite element analysis.

Kinds	Density, g/cm ³	Thickness, mm	Tensile strength, Pa		Elastic modulus, Pa		Poisson's ratio,-	
			MD	CD	MD	CD	MD	CD
Corrugating medium[K,180]	0.725	0.253	40.83 × 10 ⁶	13.65 × 10 ⁶	2.58 × 10 ⁹	0.56 × 10 ⁹	0.30	0.12
Linerboard [SK210]	0.800	0.261	54.01 × 10 ⁶	23.04 × 10 ⁶	2.79 × 10 ⁹	0.51 × 10 ⁹	0.30	0.12

종이성형구조물의 구조적 강도에 대한 이론분석과 유한요소해석

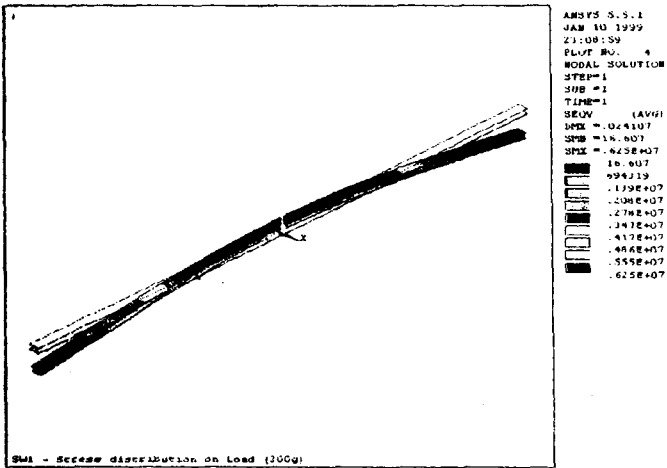


Fig. 9 Result of finite element analysis for SW [applied load: 10.773N]

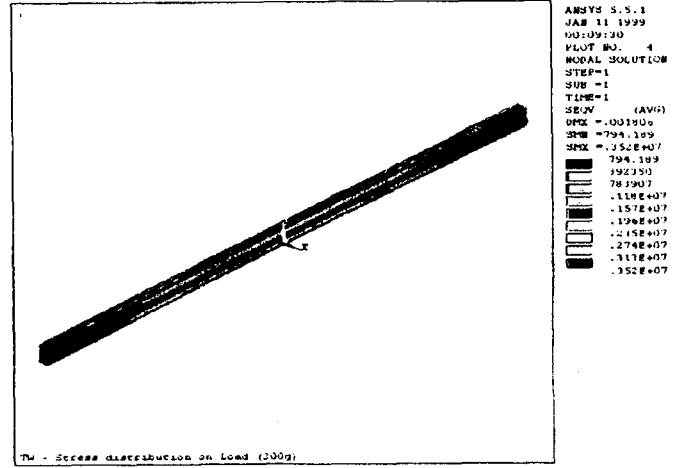


Fig. 12 Result of finite element analysis for TW [applied load: 10.773N]

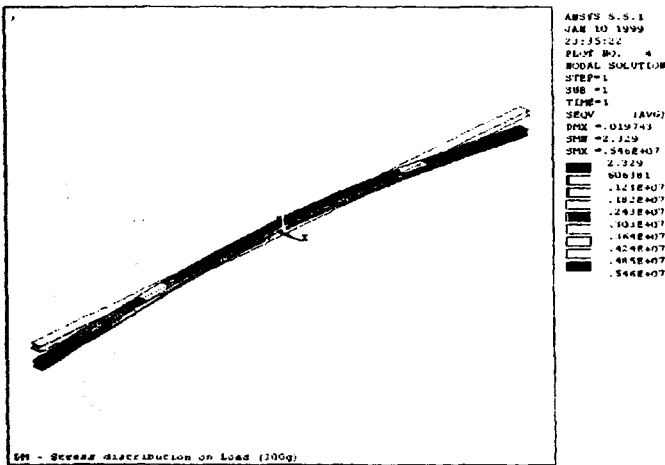


Fig. 10 Result of finite element analysis for DM [applied load: 10.773N]

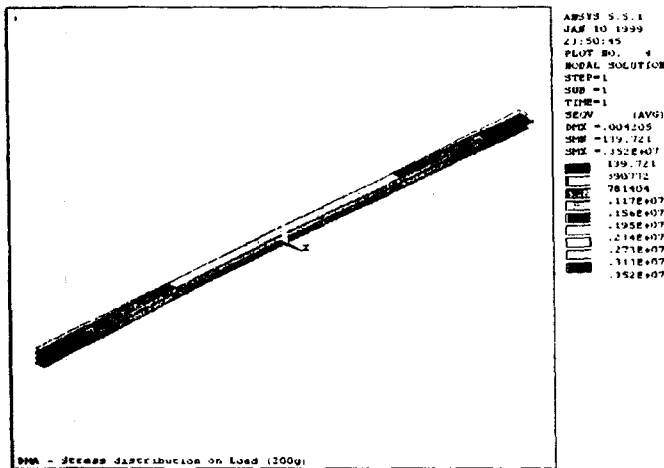


Fig. 11 Result of finite element analysis for DMA [applied load: 10.773N]

골판지의 휨하중에 대한 유한요소해석의 결과와 휨 실험에 의한 결과를 표 4에 함께 나타내었다.

Table 3. Comparison of the deflection by experimental method and finite element analysis

[unit: mm]

Kinds	Applied load, 5,387N		Applied load, 10,773N		Applied load, 16,160N	
	FE Analysis	Experimental	FE Analysis	Experimental	FE Analysis	Experimental
SW	2.90	1.76	5.77	3.51	8.57	5.77
DM	2.37	1.60	4.73	3.05	7.04	4.93
DMA	0.50	0.38	1.00	0.77	1.50	1.23
TW	0.21	-	0.42	-	0.63	-

유한요소 해석에 의한 처짐량은 작용하중 3수준 모두에서 SW→DM→DMA→TW 순서로 나타내었으며, 실험에 의한 측정치에 비하여 다소높게 나타났다.

결 론

골판지의 골형태별 CD방향의 단면성질과 유한요소 해석에 의한 휨거동을 분석하였다. 이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 이론분석한 골판지중 중립축의 위치는 DMA→DM→DMB, SW→DW 순서로 이면라이너 가까이 위치하였으며, 관성모멘트의 크기는 DMA→

- DMB→DW→SW2→DM→SW1 순 이었다.
- (2) 응력분포면에서 이면라이너 가까이에 골이 차지하는 면적밀도가 높은 DMA와 DMB가 다른 형태의 골판지에 비하여 구조역학적으로 다소 유리하였으며, 골판지상자의 압축하중에 대한 buckling 형태로 보아 골판지의 이면라이너에 보다 강성이 있는 원지를 사용하고, 이면라이너 가까이에 골이 차지하는 면적밀도가 높도록 골을 구성하는 것이 응력분포면에서 유리한 것으로 분석되었다.
- (3) 유한요소 해석에 의한 처짐량은 작용하중 3수준 모두에서 SW→DM→DMA→TW 순서로 나타났으며, 실험에 의한 처짐량에 비하여 다소높게 나타났다.

참고문헌

1. DieMex Y. 1997~1998. 段ボール原典シリーズ. CARTON BOX: 第0回'第10回
2. Kutt, H. and B. B. Mithel. Structural strength characteristics of containers. Tappi 52(9), 1685-1690(1969)
3. Little, J. R. A theory of box compressive resistance in relation to the structural properties of corrugated paperboard. Paper Trad Journal 116(24), 31-34(1943)
4. Maltenfort, G. G. Compression failure analysis. Paperboard Packaging, Dec. (1979)
5. Maltenfort, G. G. Corrugated shipping containers: an engineering approach. Jelmar Publishing Co. (1988)
6. Koning J. W. Compressive properties of linerboard as related to corrugated fiberboard containers: a theoretical model. Tappi 58(12), 105-108(1975)
7. Koning, J. W. Compressive properties of linerboard as related to corrugated fiberboard containers: theoretical model verification. Tappi 61(8), 69-71(1978)
8. Kutt, H. and B. B. Mithel. Studies of compressive strength of corrugated containers. Tappi Journal 51(4), 79A-81A(1968)
9. Leake, C. H. Measuring corrugated box performance. Tappi Journal(October), 71-75(1988)
10. McKEE, R. C., J. W. Gander and J. R. Wachuta. Compression strength formula for corrugated boxes. Paperboard Package(August), 144-159(1963)
11. Seth, R. S. Relationship between edgewise compressive strength of corrugated board and its components. Tappi Journal(March), 98-101(1985)
12. Thorpe, J. L. and D. Choi. Corrugated containers failure-strain measurements in laboratory compression tests. Tappi Journal(July), 122-130(1992)
13. Billerad Handbook. Testing of corrugated board and its components
14. TAPPI T820. Flexural stiffness of corrugated board
15. Ibid. Flexural stiffness of corrugated board. Paperboard Packaging, Dec. (1962)
16. ANSYS Inc., ANSYS theory reference. Release 5.5(1998)
17. KS A1502. 외부포장용 골판지
18. ASTM D685. Practice for conditioning paper and paper products for testing
19. Lorentzen & Wettre. Testing instruments
20. TAPPI T411. Thickness(caliper) of paper, paperboard, and combined board
21. Jonson, G. Corrugated board packaging. The Ipswich Book Company(1995)
22. Fox, T. S., R. W. Nelson, J. A. Watt, and W. J. Whitsitt. Shipping containers & cartons shown to fail only in compression when loaded internally. Paperboard Packaging, May(1979)
23. ASTM D828. Test method for tensile breaking strength of paper and paperboard
24. baum, G. A., L. R. bornhoeft. Estimating poisson ratios in paper using ultrasonic techniques. Tappi 62(5), 87-90(1979)
25. Markstrom, H. The elastic properties of paper-test methods and measurement instruments. Lorentzen & Wettre. Stockholm(1993)