

통기성 상자 구조물의 강도적 최적화 연구(Ⅱ)-유한요소해석

박종민
밀양대학교 기계공학과

Strength Optimization of Ventilating Container(Ⅱ) - Finite Element Analysis

Jong-Min Park

Dept. of Mechanical Engineering, Miryang National University

Abstract

Corrugated board is composed of cellulose fibers which are arranged with the same direction as the board manufactured. The direction is classified with machine direction (MD) and cross-machine direction (CD). Therefore, corrugated board is orthotropic material that has totally different strength properties at each direction and especially, at machine direction, the mechanical properties of fiberboard is superior. The compression strength of the corrugated fiberboard boxes is very important information to the manufacturers and the end users. This study was carried out to design the optimum pattern, size, and location of ventilating hole for ventilating container through the finite element analysis. The optimum pattern and location of ventilating and hand hole were vertical oblong, a short distance to the right and left from the center of panel, and center or a short distance to the top of both sides, respectively. We identified the effect on both stress dispersion and stress level from the analysis of redesigned hand hole.

Key words : optimum design, ventilating container, finite element analysis, strength reduction

서론

골판지(상자)는 MD 및 CD방향으로 역학적 특성을 달리 하는 이방성 역학적 구조물로서, 이 구조물의 역학적 거동 해석과 최적설계 문제에 유한요소해석법을 적용하려는 연구가 국내·외의 입부에서 진행되고 있다.^{1,2)}

통기성 상자의 통기공에 의한 압축강도 열화현상은 앞선 연구를 통해 발표된 바 있다.³⁾ 앞선 연구에서는 현재 유통되는 통기성 상자에 대한 실증분석을 통해, 통기공에 의한

압축강도 저하율은 8.5~20.2%이며, 통기공의 면적 비율 보다는 통기공의 형태와 위치에 따른 압축강도 저하가 더 뚜렷한 것으로 보고되었다.

본 연구에서는 앞선 연구결과를 바탕으로, 여러 형태의 통기성 상자에 대한 유한요소해석을 통한 정성적인 비교로부터 통기공을 최적설계하고(통기공의 형태, 위치 및 크기), 최적설계안의 확대 적용방안에 대하여 연구하려는 것이다.

통기공의 형태별 유한요소해석

해석재료에 대한 물성분석

유한요소해석에 적용할 재료는 DW 골판지로 원지구성은

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

Table 1. Physical characteristics of paperboards applied to FEA

Paperboard	Basic weight, g/m ²	Bursting strength, kgf/cm ²	Ring crush(CD), kgf	Thickness, mm
K2180	180	3.0	19.0	0.24
SK210	210	6.2	32.2	0.25

SK210/K2180/SK210/K2180/SK210 이며, 이 원지(라이너 및 골심지)에 대한 기초 물성값을 Table 1에 나타내었다.

유한요소해석에는 골판지 원지에 대한 물성 이외에도 원단인 골판지에 대한 탄성계수, 포와송비 및 휨강도가 필요하다. 골판지는 MD 및 CD방향으로 물성이 다른 대표적인 이방성 재료이고, 또한 단면형태가 매우 복잡하다. 이러한 단면구조를 한 재료의 탄성계수를 직접 측정하는 것은 불가능하므로, 본 연구에서는 골판지에 대한 4점 휨실험(4-point bending test)으로부터 휨강성(bending stiffness)을 측정하고, 이로부터 탄성계수를 산출해 내는 방법을 택하였다. ((Eq.(1))⁴⁾

$$E = \frac{S_b \omega}{I}, Pa \tag{1}$$

여기서, ω =시험편의 폭, m, I=관성모멘트, m⁴, S_b=휨강성, Nm

Eq.(1)에서 I는 관성모멘트로서 DW 골판지의 MD 및 CD 방향에 대한 관성모멘트는 본 연구자에 의해 이미 발표

된 바 있다.^{2,4)} 따라서 본 연구에서는 이들 연구결과와 해석 재료인 Table 2에 나타낸 골판지에 대한 재원 및 휨강성의 측정결과(MD방향: 43.12Nm, CD방향: 25.15Nm)를⁵⁾ 토대로 위의 원지배합을 갖는 DW 골판지에 대한 탄성계수를 추정하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3. The prediction results of Young's modulus for DW corrugated board

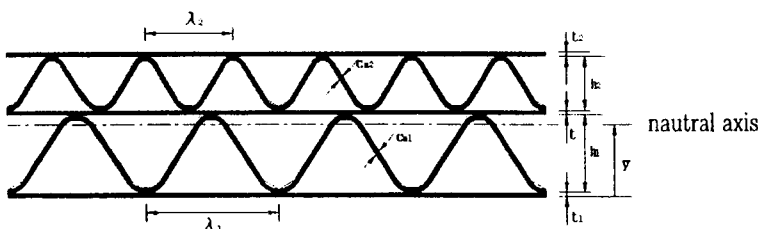
Items	Units	DW	
		CD	MD ^{*)}
Neutral axis position, \bar{y}	mm	4.84	4.69
Moment of inertia, I	mm ⁴	808	584
Young's modulus, E	GPa	1.56	3.69

(Note) ^{*)}DW(MD): \bar{y} = 4.13, 5.34, 4.60, I = 695.28, 526.01, 532.13

Table 2. Physical dimensions of the corrugated board used for FEA

Corrugated board	Flute	Board combination	Physical dimensions ^{*)}
DW	AB/F	SK210/K ₂ 180/SK210/K ₂ 180/SK210	$\lambda_1 = 9.106\text{mm}, \lambda_2 = 6.042\text{mm}, t_1 = t_2 = t = 0.25\text{mm}, C_{m1} = C_{m2} = 0.24\text{mm}, h_1 = 5.16\text{mm}, h_2 = 2.91\text{mm}, \alpha_1 = 1.56, \alpha_2 = 1.38(\alpha = \text{take-up factor})$

(Note) ^{*)}DW corrugated board



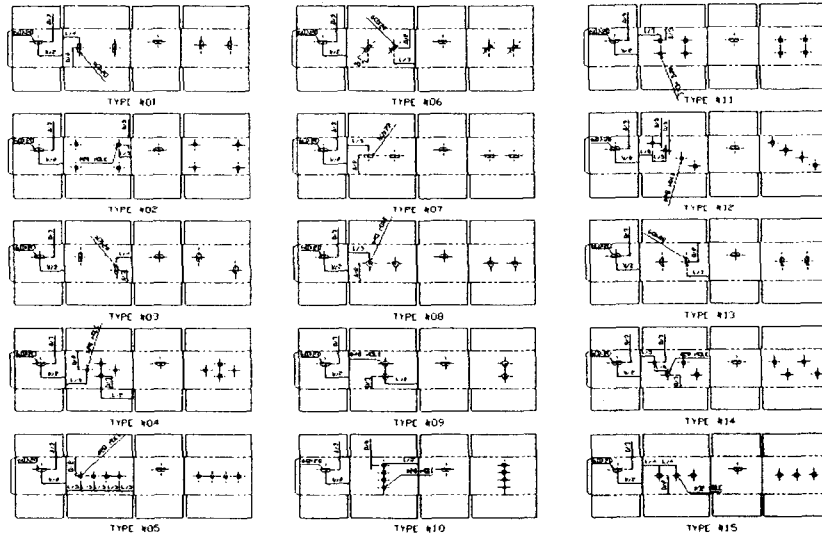


Fig. 1. Ventilating hole patterns applied to FEA

유한요소 모델링 및 해석방법

유한요소법에 의한 응력해석으로부터 통기공과 손잡이의 적정위치 및 형태를 분석하기 위하여, 상자치수 410×300×250mm의 측면적 대비 2%의 동일한 통기공 면적을 갖는 15가지의 기본 모델을 설정하여 이들에 대해 각각 모델링하였다.(Fig. 1)

포장상자를 유한요소모델로 표현하기 위해서 상자를 속이 비어있는 직육면체와 두께를 가진 판으로 즉, plane stress/plane strain 조건으로 가정하였다. 이때 각방향 (X, Y, Z)으로 변위와 회전이 발생하므로, 이러한 출력값들을 가진 3차원 shell요소를 선정하였다. 3차원 shell요소의 기본자유도는 절점당 6 자유도를 가지며, 이는 각각 X, Y, Z 방향의 변위와 각 절점에서의 회전자유도가 포함된 것이다.

유한요소해석에는 현재 solution의 신뢰성을 인정받아 각 공학분야에서 널리사용되고 있는 유한요소 구조해석 패키지인 ANSYS 5.5를 사용하였으며,⁶⁾ 유한요소해석을 위해서는 상자의 유한요소모델에 재료의 물성값을 부여해야 하는데, 이때 상자의 실제 현상에 일치하게, Fig. 2에서 보는 바와같이, 골판지의 이방성 특성을 충분히 고려하여 물성값을 적용하였다.

유한요소해석시 구속조건(boundary conditions)에 따라 해석결과에 많은 차이를 나타내므로, 본 연구에서는 포장상자의 유통조건을 고려하여 실제 현상에 근접하도록 상자의 밑면, 즉, Fig. 2에서 Y=0가 되는 지점의 모든 절점의 좌표값들은 Y방향의 변위가 없다고 가정하였다.

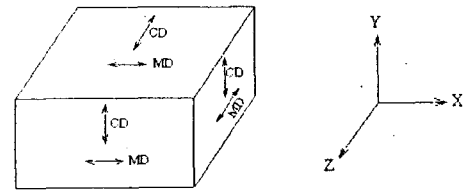


Fig. 2. Grant conditions of physical characteristics for FEA model

상자의 상하면 응력 분포보다는 측면의 응력 분포에 관심이 있으므로, 측면 응력분포가 잘 나타날 수 있도록 균일한 변위를 상자의 윗면 전체에 가하는 방법을 적용하였다.

유한요소해석 결과

통기공과 hand hole을 동시에 고려하여 유한요소해석을 수행할 경우, 손잡이의 영향 때문에 통기공의 형태별 정성적인 비교가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 통기공과 손잡이의 적정 위치 및 형태를 도출하기 위해 Fig. 3과 같은 순서로 유한요소해석을 실시하였다.

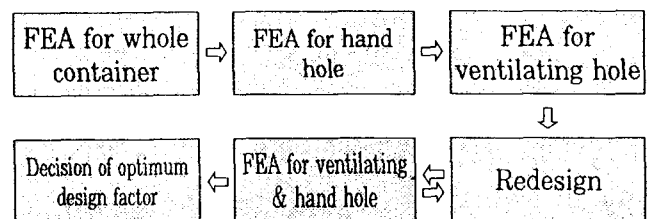


Fig. 3. Application order of FEA

통기공과 손잡이가 없는 완전한 상자에 대한 유한요소해석 결과, 최대응력이 나타나는 부분은 상자의 각 코너였으며, 각 코너를 잇는 대각선 방향으로 응력집중라인(stress concentration line)이 형성되었다.(Fig. 4) 이는 응력이 stress line을 따라 작용하고 있으므로, 상자에 통기공과 손잡이를 뚫을 경우 그 위치와 형태에 따라 상자 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다.

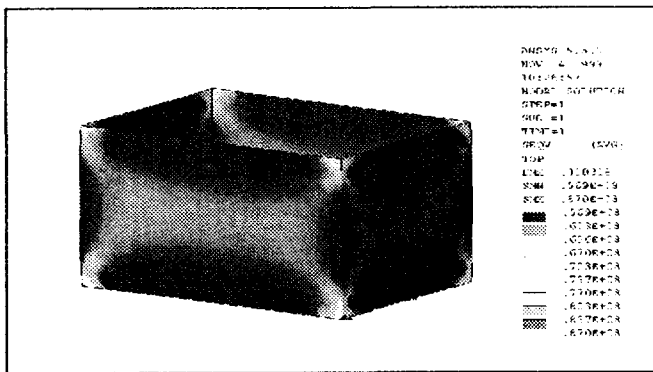


Fig. 4. FEA result of the whole container

Hand hole의 위치가 panel의 좌우 방향, 즉, (W/5, D/2), (W/3, D/2), (W/2, D/2)에 위치할 때와 상하 방향 즉, (W/2, D/6), (W/2, D/3), (W/2, D/2)에 위치할 때에 대한 각각의 응력해석 결과, 손잡이가 (D/3~D/2, W/2)의 위치에 있을 때 구조적으로 가장 안정함을 보였다.

통기공의 면적비율은 같고 형상과 위치가 서로다른 Fig. 1의 15 가지 모델에 대한 유한요소해석의 결과, 통기공의 전체 면적비율이 동일할 경우, 통기공의 수가 적고, 또한 통기공의 배치가 대칭인 경우가 뒤틀린 구조를 한 경우에 비하여 작용하는 응력수준이 작고, 균일하게 분포되었다. 통기공의 형태는 수직 장원형의 형태가 가장 작은 최대응력값을 가지고 있고, 또한 stress line이 발생하는 범위가 가장 작아 구조적으로 가장 안정하였다.

Hand hole과 통기공 각각에 대한 유한요소해석 결과를 통해 15가지의 모델중 TYPE #01과 #13과 같이 통기공과 hand hole의 형태 및 배치를 한 경우가 다른 형태의 상자에 비하여 큰 힘에 견딜 수 있는 구조라는 결과를 얻었다. 그러나 hand hole의 양측면의 곡선부에 집중되는 응력을 다소 분산시킬 필요가 있고, hand hole의 크기와 형태를 인간공학적인 측면에서 재설계할 필요성이 있다.

Hand hole은 인간공학적 측면을 고려할 때 장방향의 폭은 최소한 70mm 정도는 되어야 하고, 측면에 집중되는 응

력을 분산시키기 위해서는 곡률반경을 크게하여야 한다.⁷⁾ 이러한 조건들을 고려하여 재설계한 hand hole의 형태가 Fig. 5이다.

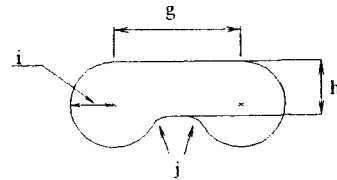


Fig. 5. Redesigned hand hole pattern

재설계된 hand hole에 대한 유한요소해석을 실시하였는데, Fig. 6은 유한요소모델링한 것이고, Fig. 7은 유한요소해석의 결과이다. 동일한 조건으로 재설계 전후의 hand hole에 대한 해석결과를 확대한 Fig. 8과 Fig. 9를 비교할 때, 재설계된 hand hole의 형태가 최대응력값은 약 8% 감소되었고, 옆 절단면 주위의 응력 집중이 많이 분산되는 효과를 보였다.

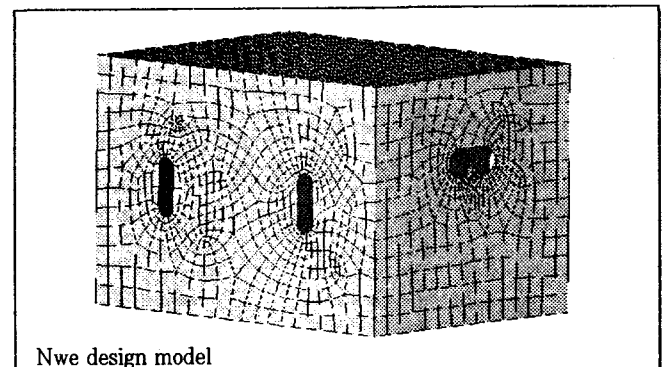


Fig. 6. FEA model for redesigned ventilating and hand hole

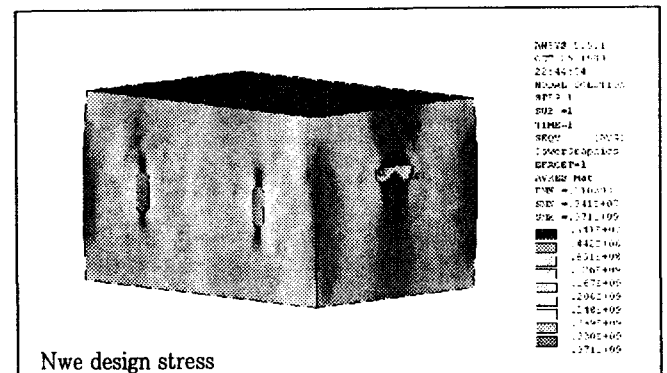


Fig. 7. The result of FEA for redesigned ventilating and hand hole

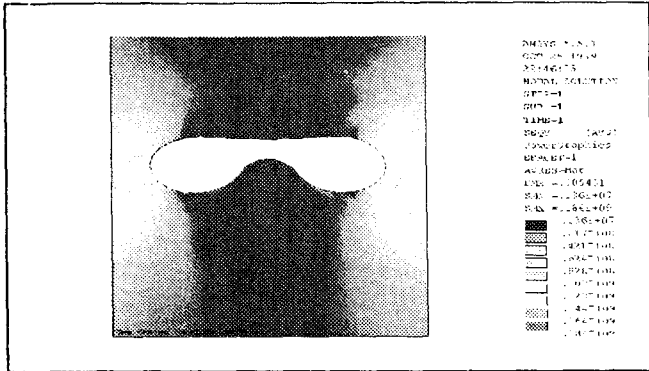


Fig. 8. Stress distribution for redesigned hand hole

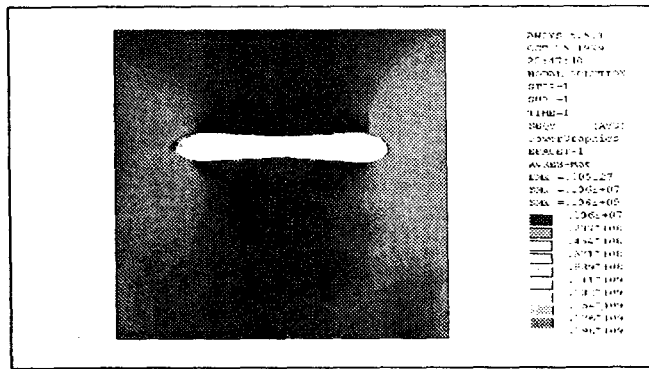


Fig. 9. Stress distribution for hand hole before redesign

유한요소해석 결과의 실험적 검증

실험방법

유한요소해석에 적용되었던 동일한 치수와 원지배합을 갖는 상자에 Fig. 1의 15가지의 통기공 형태를 전기드릴과 특별히 제작한 커터날이 사용하여 각각 제작하였다.

상자의 압축시험시에는 ASTM D642⁸⁾를 참고하여, 하중 재하속도는 12.7±2.5mm/min 이고, 45kgf의 초기하중이 작용된 상태에서 측정이 시작되었다. 시험전 상자를 온도 23±1℃, 상대습도 50%로 잘 조성된 대형 항온항습기내에서 48시간 이상 충분히 평형시킨후 시험에 사용하였으며, 상자의 각 형태별 5반복 실험하여 그 평균값을 취하였다.

실험결과

유한요소해석에 적용된 통기성 골판지상자 15가지 모델에 대하여 압축강도 저하율을 실험적으로 분석한 결과를

Fig. 10에 나타내었다. 앞의 유한요소해석 결과에서는 상자의 각 코너 부분에 응력이 집중되고, 이로부터 상자 panel의 대각선으로 stress line이 형성되었다. 실증분석 결과에서도 응력이 집중되는 곳, 즉, 상자의 각 코너로부터의 대각선 방향과 수평 및 수직 모서리 가까이에 통기공을 제작한 #02, #03, #12, #14 등에서 압축강도 저하율이 크게 측정되었다.

#01, #08, #13과 같이 상자 앞뒤면의 중심부위를 중심으로 일정 간격을 두고 수평으로 통기공을 배치할 경우가 대체로 압축강도 저하율이 작았다. 이는 상자가 압축하중을 받을 경우 panel이 휨상태가 되는데, 이때 panel의 바깥쪽은 인장상태에 놓이게 된다. 이 인장응력의 일부는 상자의 각 코너 부분으로 전달되어 그곳에 total stress가 증가되는 것이 일반적인 현상인데, 상자 panel 중심부위에 가로 방향으로 통기공이 설치되면 이 응력의 증가를 억제시켜 상대적으로 상자의 수직 모서리는 더 큰 하중을 지탱하기 때문에 판단 된다. 그러나 비교적 높이가 있는 상자에서는 높이 방향의 상자 중앙부에 최대휨모멘트가 집중해 좌굴(buckling)이 생기기 때문에 #15와 같이 panel의 정 중앙부에 통기공을 가동하면 압축강도에의 영향이 크다.

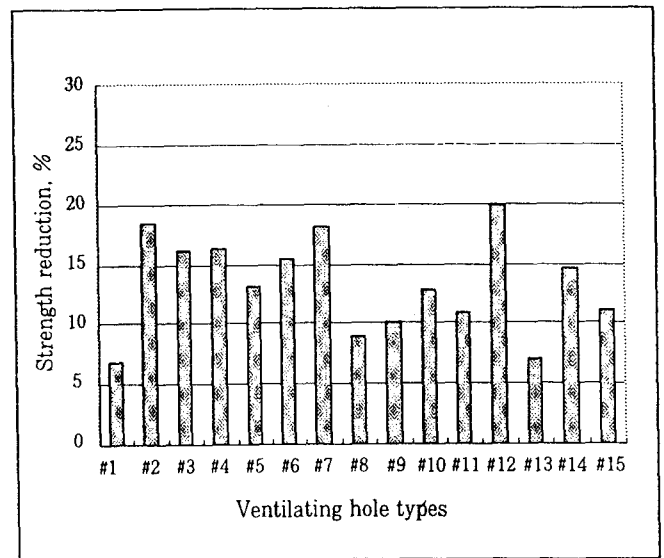


Fig. 10. Strength reduction according to various ventilating hole patterns

Table 4는 hand hole의 위치에 따른 상자 압축강도의 변화를 실험한 결과이다. Hand hole의 위치가 각 코너에 접근할 수록 강도저하가 큰 것으로 나타났다. 이와같은 결과는 유한요소해석의 결과와 같은 경향을 보이나, 보다더 세부적

Table 4. Strength reduction according to locations of hand hole

Locations	Side area, mm ²	Area, mm ²		Ventilating area/ side area, %	Strength reduction, %
		Ventilating hole	Hand hole		
no	355,000	—	—	—	0
(W/2, D/6)	355,000	—	2,228	0.63	8.6
(W/2, D/3)	355,000	—	2,228	0.63	3.3
(W/2, D/2)	355,000	—	2,228	0.63	2.4
(W/5, D/2)	355,000	—	2,228	0.63	4.9
(W/3, D/2)	355,000	—	2,228	0.63	3.8

으로 분석해 보면, 약간의 다른 경향을 보이고 있다. 즉, 유한요소해석 결과에서는 손잡이의 위치가 panel의 중심에서 좌우측으로 변화할 때가 상하로 변화할 때에 비하여 최대응력이 더 크게 작용했던 것에 비하여, 실험에 의한 압축강도 저하율 분석에서는 이와 반대의 경향을 보였다. 이와같은 경향은 실험용으로 제작한 상자의 staple이 일정하지 못한 데서 오는 원인이 클 것으로 판단된다.

이상의 실험결과와 유한요소해석의 결과로 미루어 볼 때, 통기공의 형태는 수직 장원형, 그 위치는 상자의 panel 중심에서 좌우방향으로 약간의 거리를 둔 위치가 적정하며, hand hole의 형태와 위치는 상자의 양옆면의 중앙부나 중앙부에서 윗쪽으로 약간 벗어난 위치가 적절한 것으로 판단할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 통기공의 형태별 유한요소해석을 통해 통기성 상자의 통기공의 적정 형태, 크기 및 위치 등을 설계하였다.

통기공의 형태는 수직방향의 장원형, 그 위치는 상자의 panel 중심에서 좌우방향으로 약간의 거리를 둔 위치가 적정하며, hand hole의 형태와 위치는 상자의 양옆면의 중앙부나 중앙부에서 윗쪽으로 약간 벗어난 위치가 적절한 것으로 분석되었다. 또한 hand hole을 재설계한 결과, 응력분산과 응력수준 면에서 효과를 보였다. 해석 결과에 대한 실험적 검증에서도 해석결과와 유사한 결과를 얻었다.

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. 박종민외 1 : 종이성형 구조물의 구조적 강도에 대한 이론분석과 유한요소해석. 한국포장학회지, 5(1), 13-20(1999).
3. 박종민 : 통기성 상자 구조물의 강도적 최적화 연구(1)-실증 분석. 한국포장학회지 7(2), 출판중(2001).
4. 박종민 : 이방성 종이성형 구조물의 역학적 특성의 자료화. 산업과학기술, 제 10집, 113-119(2000).
5. 박종민외 1 : 종이성형 구조물의 휨강성에 대한 실험적 연구. 한국포장학회지 5(2), 17-23(1999).
6. ANSYS Inc., ANSYS theory reference. Release 5.5(1998).
7. 임연웅 : 디자인 인간공학, 미진사, p171-206(1994).
8. ASTM D642. Standard method for determining compressive resistance of shipping containers, components, and unit loads.