

## 통기성 상자 구조물에 대한 유한요소 해석

### Finite Element Analysis of a Ventilating Box Structure

박종민                      권순구  
정희원                      정희원  
J. M. Park                  S. G. Kwon

#### ABSTRACT

Corrugated board is an efficient low-cost structure material for the boxes that are widely used for transporting, storing and distributing goods. Corrugated board is also considered as an orthotropic because the principal material directions are the same as in paperboard.

The purpose of this study was to elucidate the principal design parameters of ventilating box through the FEA on the various types of ventilating hole. From the viewpoint of the stress distribution and stress level, the optimum pattern and location of the ventilating hole were vertically oblong, and symmetry position with a short distance to the right and left from the center of front and rear panel. And, the optimum location and pattern of hand hole were a short distance to the top from the center of both side panels, and modified shape to increase the radius of curvature of both side in horizontal oblong.

In general, the optimum pattern and location of both the ventilating hole and hand hole based on the FEM analysis were well verified by experimental investigation. It is suggested that decrease in compressive strength of the box could be minimized in the same ventilating hole area under the condition of the length of major axis of ventilating hole is less than 1/4 of box length, the ratio of minor axis/major axis is 1/3.5~1/2.5, and number of the ventilating holes is even and symmetrical.

**Keywords :** Ventilating box structure, Package, Compression strength, Finite element analysis, Corrugated board, Orthotropic material.

#### 1. 서      론

최근 물류 합리화의 추세는 포장 상자의 다단 적재와 저온 유통을 강하게 요구하고 있어, 고압 축강도와 통기성을 갖는 포장 상자의 필요성이 크게 높아지고 있으며, 아울러 제반 기술에 대한 정립이 절실한 시기이다.

통기성 상자의 주요 기능은 보관 창고와 상자

내부와의 사이에 공기유동 채널(ventilating channel)을 형성시켜 피포장물의 품질 유지를 위한 것이다. 통기성 상자는 한 구조물로서 주 요소인 통기공의 위치, 크기 및 형태에 따라 강도적 특성이 달라지며, 또한 통기성 면에서도 큰 차이가 나타나는데, 현재 국내의 경우는, 통기성 상자에 대한 설계기준이 없고, 주로 경험적인 방법으로 설계·제작됨으로써, 이로 인한 압축강도 저하는 물론이

---

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

고, 통기성 측면에서도 양호하지 못한 실정이다.

Park(2000)의 연구 결과에 따르면, 현재 과실 유통용 통기성 상자의 통기공에 의한 압축강도 저하율은 약 9~20%이며, 통기공의 점유 면적 비율보다는 통기공의 형태와 위치에 따른 압축강도 저하가 더 큰 것으로 보고한 바 있다. 따라서, 부적합한 통기공에 의한 압축강도 약화는 필요 이상으로 상자의 압축강도를 높여 수입 원지의 사용을 촉진하는 등 포장 원가 상승의 한 요인이 되어왔다.

포장 상자의 재료로는 환경 친화적인 골판지(corrugated board)가 주로 사용되는데, 골판지는 MD(machine direction) 및 CD(cross-machine direction) 방향으로 역학적 특성을 달리하는 이방성 재료(anisotropy engineering material)이다. 골판지와 포장 상자의 역학적 거동분석과 최적설계 문제에 유한요소법을 적용하려는 연구가 최근에 진행되고 있다(Patel et al., 1997; DieMex Y., 1997, 1998; Park and Lee, 1999).

본 연구에서는 여러 형태의 통기공에 대한 유한요소해석을 실시해, 응력해석 결과의 정성적인 비교로부터 통기공에 대한 최적 설계인자(형태, 위치 및 크기)를 도출하고, 실험적 방법에 의한 결과와의 차이점을 비교 분석하려고 한다.

## 2. 통기공의 형태별 유한요소 해석

### 가. 해석 재료의 물성

포장 상자의 재료는 DW(double-wall) 골판지로 원지 구성은 SK210/K<sub>2</sub>180/SK210/K<sub>2</sub>180/SK210이며, 구성원지에 대한 기초 물성값은 표 1에 나타내었다.

유한요소 해석에는 표 1의 골판지 원지에 대한 물성 외에도 원단인 골판지에 대한 영률(Young's modulus)과 포와송비(Poisson's ratio) 값이 필요하다. 그러나 골판지는 구성 원지들의 재료 주방향(principal material direction)과 같은 직교 이방성 재

료(orthotropic material)이며 (Jones, 1975; Hahn, 1991), 또한 단면 형태도 복잡하다. 따라서 이러한 단면 구조를 한 재료의 영률과 포와송비를 직접 측정하기란 불가능하므로, 본 연구에서는 영률의 경우는, Park and Lee(1999) 및 Park(2000)에 의해 이미 발표된 바 있는 DW 골판지의 MD 및 CD 방향의 휨강성(flexural stiffness) 값과 관성 모멘트를 활용해 식(1)로부터 각각 계산하였다(Timoenko and Goodier, 1970).

$$E = S_b \frac{\omega}{I}, \text{ Pa} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  
 $\omega$ =시험편의 폭(m),  
 $I$ =관성모멘트(m<sup>4</sup>),  
 $S_b$ =휨강성(Nm)

또한, 포와송비는 직교 이방성 재료의 구성식인 식(2)를 활용해  $\mu_{CD} : \mu_{MD} = 1.56 : 3.69 \approx 1 : 2.4$ 가 되는 0.12와 0.28을 각각 CD 및 MD 방향의 값으로 가정하였다(Pilkey, 1994)(표 2).

$$\frac{\mu_{MD}}{E_{MD}} = \frac{\mu_{CD}}{E_{CD}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  
 $\mu_{CD}, \mu_{MD}$  = 각각 CD 및 MD방향의 포와송비  
 $E_{CD}, E_{MD}$  = 각각 CD 및 MD방향의 영률

### 나. 유한요소 모델링과 해석방법

유한요소법에 의한 응력해석으로부터 통기공(hand hole 포함)의 적정 위치 및 형태를 분석하기 위하여, 그림 1과 같이 상자치수 410 mm×300 mm×250 mm의 측면적 대비 2%의 동일한 통기공 점유 면적을 가지면서 통기공의 위치와 형태가 각기 다른 15가지의 기본 모델을 설정하여, 이들을 각각 유한요소 모델로 나타내었다(그림 2).

Table 1 Material properties of each paperboard in the DW corrugated board

Paperboard	Basic weight (g/m <sup>2</sup> )	Bursting strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ring crush <sup>1)</sup> (kgf)	Thickness (mm)
K <sub>2</sub> 180	180	3.0	19.0	0.24
SK210	210	6.2	32.2	0.25

Notes : <sup>1)</sup> value in cross-machine direction(CD).

통기성 상자 구조물에 대한 유한요소 해석

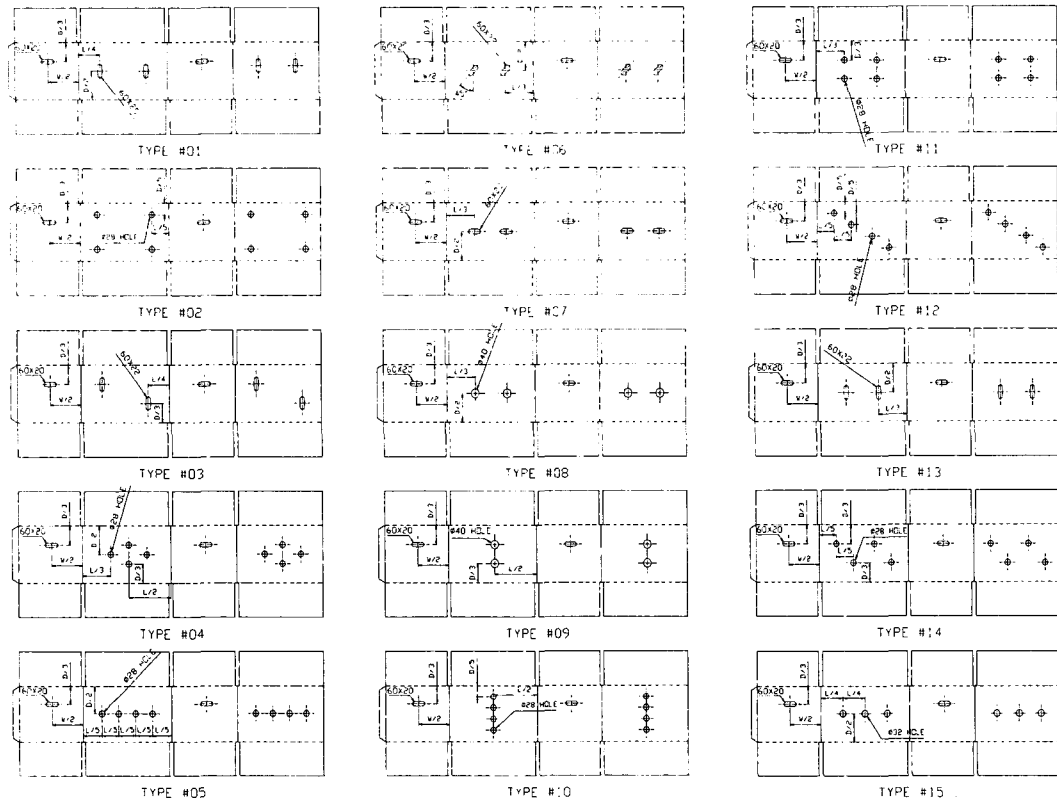


Fig. 1 Various ventilating holes investigated.

Table 2 Material properties of the DW corrugated board used in this analysis

Items	DW corrugated board	
	CD	MD
Young's modulus, E, GPa	1.56	3.69
Poisson's ratio, $\mu$	0.12	0.28

상자 구조물을 유한요소 모델로 표현하기 위해 상자를 속이 비어있는 직육면체와 일정한 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 기본 자유도는 절점당 6 자유도를 가지며, 이는 각각 X, Y, Z 방향의 변위와 각 절점에서의 회전 자유

도가 포함된다(ANSYS Inc., 1998).

유한요소 해석 패키지로는 ANSYS 5.5.1을 사용하였으며, 해석을 위해서는 상자의 유한요소 모델에 재료의 물성값을 부여해야 하는데, 이때 골판지의 이방성 특성을 고려해 각 방향에 대한 물성값을 적용하였다(그림 3).

유한요소 해석시 구속 조건과 하중 조건은 상자 사용상의 실제 조건에 부합되게 상자의 밑면 즉, Y=0가 되는 지점의 모든 절점의 좌표값들은 Y방향으로 변위가 없다고 가정하였고, 상자 구조물의 상하면보다는 측면의 응력 분포가 잘 나타날 수 있도록 상자의 윗면 전체에 균일한 변위(상자 높이 250 mm의 4%인 10 mm)를 가하는 방법을 적용하였다(top-to-bottom compression).

다. 해석 결과

통기공과 hand hole을 동시에 고려하여 유한요

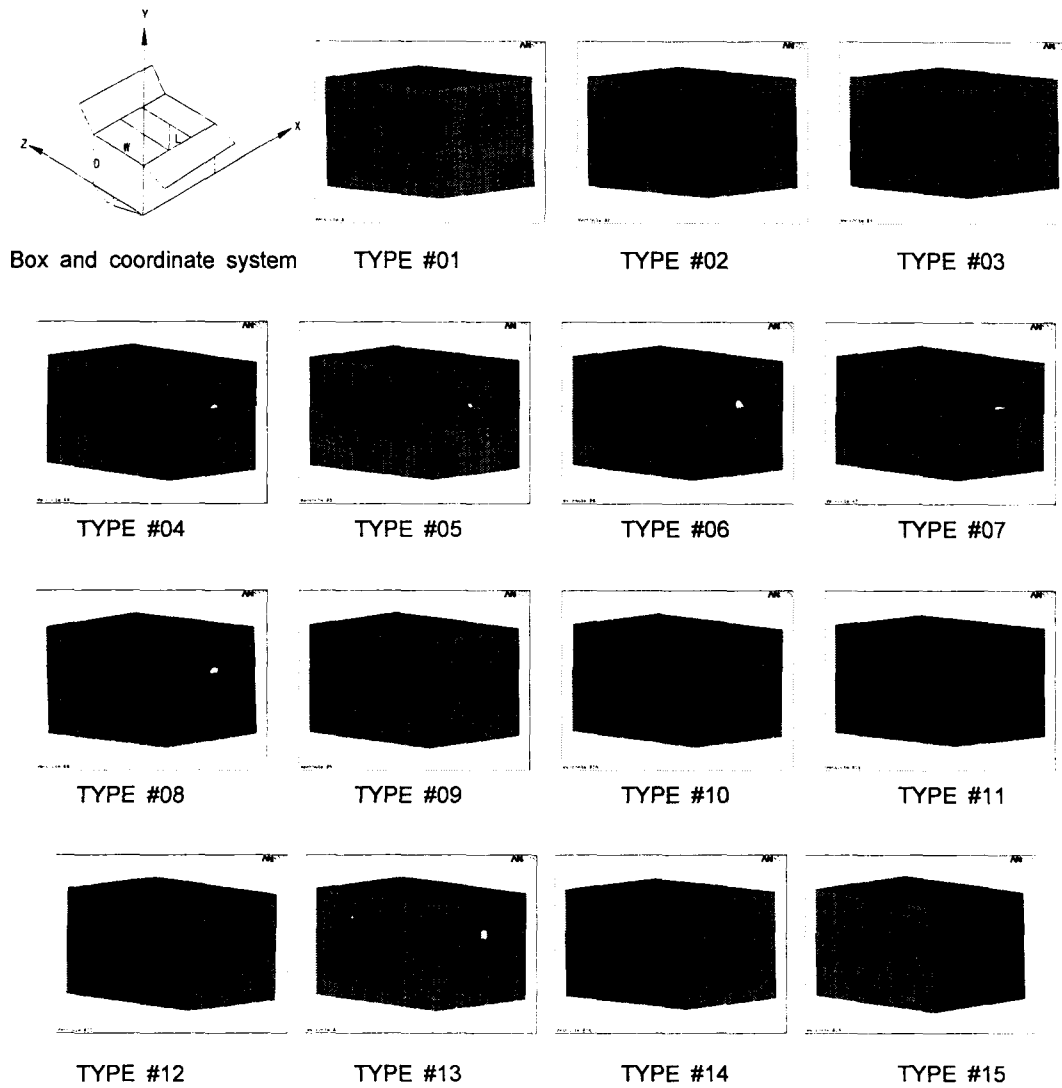


Fig. 2 FE model for various ventilating holes investigated.

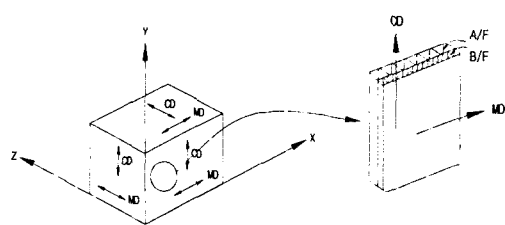


Fig. 3 Orthotropic directions of the corrugated board.

소 해석을 수행할 경우, hand hole의 영향 때문에 통기공의 형태별 정성적인 비교가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 통기공과 hand hole의 적정 위치 및 형태를 도출하기 위해 그림 4와 같은 순서로 유한요소 해석을 적용하였다.

통기공이 없는 완전한 상자에 대한 해석 결과 (그림 5), 최대 응력이 나타나는 부분은 상자의 각 코너였으며, 각 코너를 잇는 대각선 방향으로 응력집중 라인(stress concentration line)이 형성되었다. 이는 상자에 통기공과 hand hole을 가공할 경우

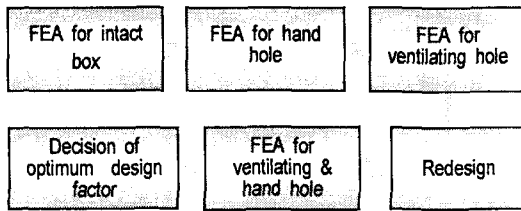


Fig. 4 Application order of FEA.

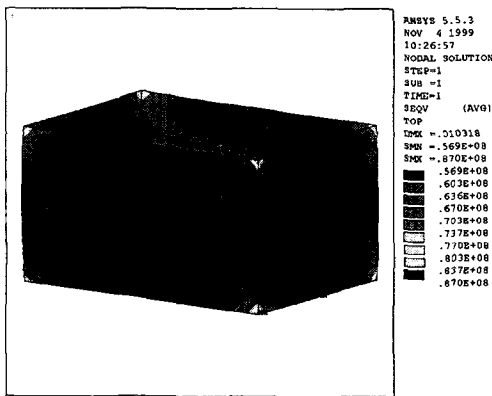


Fig. 5 Stress distribution for the intact box.

그 위치와 형태에 따라 상자 구조물의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

통기공이 없이 hand hole만을 상자의 양 옆면(그림 3의 Y-Z면)에 좌우 방향 또는 상하 방향으로 위치할 때, 각각에 대한 응력 해석 결과, hand hole이  $(W/5, D/2)$ ,  $(W/3, D/2)$  및  $(W/2, D/2)$ 에 위치할 때 최대 응력값은 각각 0.267 GPa, 0.219 GPa 및 0.209 GPa이었고,  $(W/2, D/6)$ ,  $(W/2, D/3)$  및  $(W/2, D/2)$ 에 위치할 때, 최대 응력값은 각각 0.189 GPa, 0.198 GPa 및 0.209 GPa로 나타나, hand hole이 판넬의 좌우에 위치할 때의 응력수준이 높았고, 그 위치에 따라 최대 22%의 큰 차이를 보였다. 따라서 hand hole은 상자의 위로부터  $(D/3 \sim D/2, W/2)$ 의 위치에 있을 때 구조적으로 가장 안정함을 보였다.

통기공의 점유면적 비율(hand hole은 60 mm×20 mm의 수평 장원형으로 상자 양 옆면  $(W/2, D/3)$  위치에 고정)이 측면적 대비 2%로 동일하고, 그 위치와 형상이 서로 다른 그림 2의 15가지 모델에 대한 유한요소 해석의 결과에 의하면, 통기공의 수가 적을수록, 또한 통기공의 배치가 좌우 대칭인 경우가 뒤뜰린 구조를 한 경우에 비하여 작음

하는 응력 수준이 낮고, 응력 또한 균일하게 분포하였다. 한 예로, 그림 2에서 통기공의 형태는 원형이고, 그 수가 2개, 3개 및 4개인 #08, #15 및 #05의 최대 응력값은 각각 0.149, 0.166 및 0.190 GPa이었다.

통기공의 수가 2개이면서, 그 형태가 원형, 수평 장원형 및 수직 장원형인 #08, #07 및 #01의 각각 최대 응력값이 0.145, 0.209 및 0.129 GPa로 나타나, 통기공의 형태가 수직 장원형의 형태가 원형이나 수평 장원형에 비해 응력 수준이 낮았고, stress line이 발생하는 범위가 가장 작아 구조적으로 안정되었다.

Hand hole과 통기공 각각에 대한 유한요소 해석 결과를 통해 15가지의 모델중 #01과 #13과 같은 통기공과 hand hole의 형태 및 배치를 한 경우가 다른 형태에 비하여 큰 힘에 견딜 수 있는 구조였다. 그러나 hand hole의 양측면의 곡선부에 집중되는 응력의 분산과 hand hole의 크기와 형태를 인간 공학적 측면에서 재설계할 필요성이 있다.

Hand hole은 인간 공학적 측면을 고려할 때, 장 방향의 폭은 최소한 70 mm 정도는 되어야 하고 (Lim, 1994), 측면에 집중되는 응력을 분산시키기 위해서는 곡률반경을 크게 하여야 한다. 이러한 조건들을 고려하여 재설계한 hand hole의 형태는 그림 6과 같다.

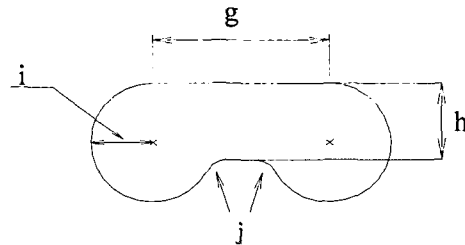


Fig. 6 Redesigned hand hole.

이 재설계된 hand hole과 유한요소 해석 결과로부터 구조적으로 가장 안정된 것으로 평가된 통기공 #01과 결합된 통기성 상자 구조물에 대한 유한요소 해석을 다시 실시하였다(그림 7; 그림 8). 동일한 조건으로 재설계 전후의 hand hole에 대한 해석 결과를 비교할 때(그림 9; 그림 10), 재설계된 hand hole의 형태가 재설계 전의 것에 비하여 응력 수준면에서 약 8% 감소되었고, 옆 절단면 주위의 응력 집중이 많이 분산되는 효과를 보여 구조적으로 한층 더 안정되었다.

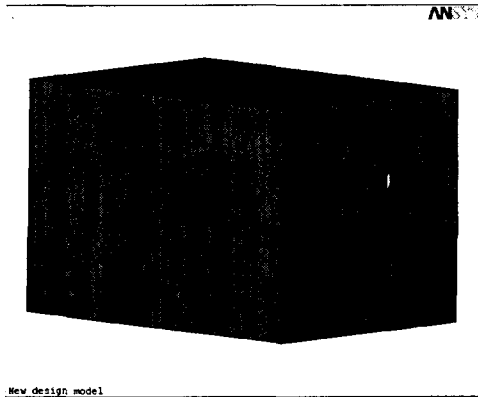


Fig. 7 FE model for the redesigned ventilating and hand hole.

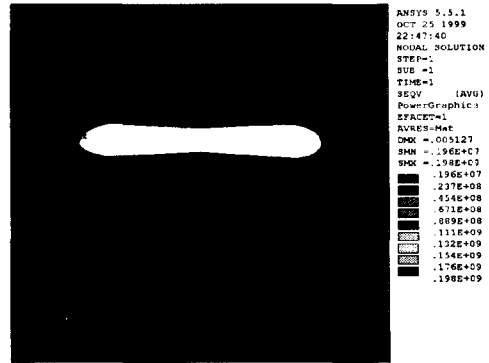


Fig. 10 Stress distribution around the hand hole before redesign.

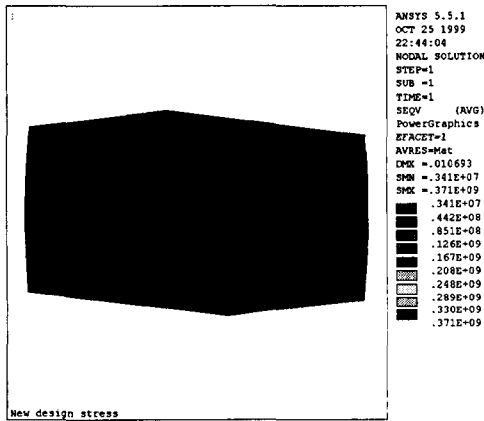


Fig. 8 Stress distribution for the redesigned ventilating and hand hole.

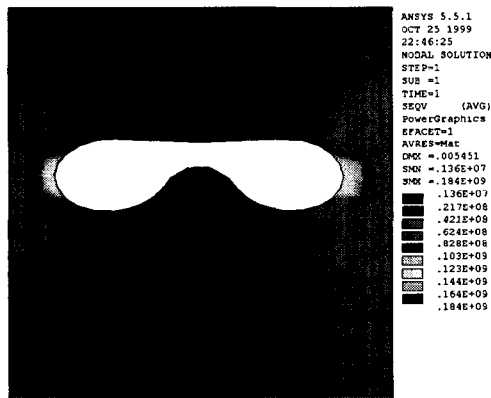


Fig. 9 Stress distribution around the redesigned hand hole.

### 3. 해석 결과에 대한 실증 분석

#### 가. 실험 방법

유한요소 해석시와 동일한 치수 및 원지 구성을 갖는 상자에 그림 1의 15가지 형태의 통기공을 특별히 제작한 커터날과 전기 드릴을 사용해 각각 가공하였다.

상자에 대한 압축시험은 ASTM D642를 참고하여, 하중재하 속도는  $12.7 \pm 2.5$  mm/min, 45 kgf의 초기 하중이 작용된 상태에서 측정은 시작하였다. 실험전 상자를 온도  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ , 상대습도 50%로 잘 조성된 대형 항온 항습기 내에서 48시간 이상 충분히 평형시킨 후 실험에 사용하였으며, 상자의 각 형태별로 5반복 실험하여 그 평균값을 취하였다.

#### 나. 실험 결과

통기공을 설치하지 않은 상자의 압축강도에 대비한 통기공의 각 형태별 압축강도 저하율을 그림 11에 나타내었다. 앞의 유한요소 해석 결과에서는 상자의 각 코너 부분에 응력이 집중되었고, 이로부터 상자 panel의 대각선 방향으로 응력집중 라인이 형성되었다. 실험적 방법에서도 응력이 집중되는 곳 즉, 상자의 각 코너로부터 대각선 방향과 수평 및 수직 모서리 가까이에서 통기공을 설치한 #02, #03, #12 및 #14 등에서 압축강도 저하율이 큰 것으로 나타났다.

상자 앞뒷면의 중심 부위를 중심으로 수평으로 일정 간격을 두고 좌우 대칭되게 통기공을 배치한

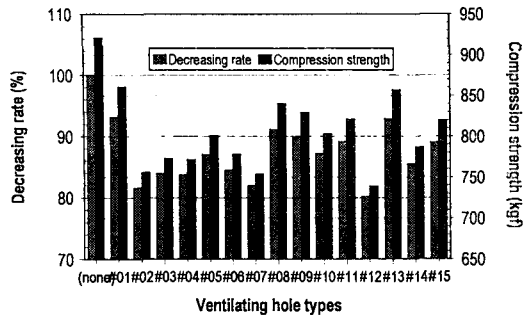


Fig. 11 Decreasing rate of compression strength of various ventilating hole types.

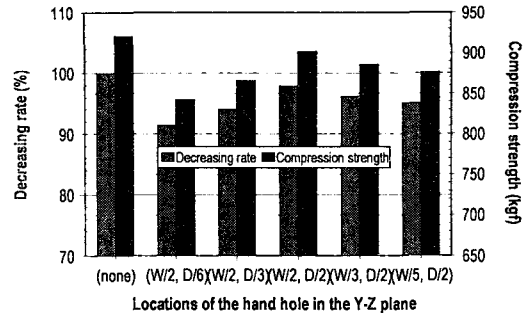


Fig. 12 Decreasing rate of compressive strength by the locations of hand hole.

#01, #08 및 #13 등에서 대체로 압축강도 저하율이 낮았다. 이는 상자가 압축하중을 받을 때 panel은 휨상태에 놓이고, 이때 panel의 바깥쪽은 인장상태에 놓이게 된다. 이 인장응력의 일부는 상자의 각 코너 부분으로 전달되어 그 곳의 total stress가 증가되는 것이 일반적인 현상인데, 이와같이 통기공을 배치할 경우는, 이 응력의 증가를 억제시켜 상대적으로 상자의 수직 모서리는 더 큰 하중을 지탱할 수 있기 때문으로 판단된다.

압축하중을 받는 상자의 panel 중앙 부위는 최대 휨모멘트로 인해 좌굴(buckling)이 발생하는데, 이 부근에 통기공을 가공할 경우(예, #15), 이로 인하여 압축강도에 미치는 영향이 크다.

수평 장원형의 hand hole(hand hole 60 mm×20 mm, 면적 2,228 mm<sup>2</sup>, 상자 측면적 대비 점유면적 비율 0.63%)을 통기공이 없는 상자의 양 옆면에 각각 1개씩 설치하였을 때, 그 위치별 압축강도 저하율(hand hole이 없는 상자의 압축강도 대비)을 그림 12에 나타내었다.

Hand hole의 위치가 각 코너에 접근할수록 강도 저하가 큰 것으로 나타났는데, 이와 같은 결과는 유한요소 해석의 결과와 같은 경향을 보이나, 보다 더 세부적으로 분석해 보면, 유한요소 해석 결과에서는 hand hole의 위치가 panel의 중심에서 좌우측으로 변화할 때가 상하로 변화할 때에 비하여 응력 수준이 높았던 것에 비하여, 실험에 의한 압축강도 저하율 분석에서는 이와 반대의 경향을 보였다. 이와 같은 경향은 실험용으로 제작한 상자의 staple이 일정하지 못해서 오는 원인이 클 것으로 판단된다.

대체로 유한요소 해석에 의해 분석된 통기공과 hand hole의 적정 형태 및 위치는 실험적 방법에

의한 검증에서도 잘 확인되었으며, 통기성의 요구 정도에 따라 가능하면 통기공의 장방향 길이가 상자 높이의 1/4 이하, 단방향/장방향 비가 1/3.5~1/2.5가 되도록 하여 통기공의 수를 짝수가 되도록 조절하여 좌우 대칭된 구조로 하면, 동일한 통기공 점유면적 비율에서 상자의 압축강도 저하를 최소 한도로 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 팔레트(pallet)를 이용 유닛 로드(unit-load)된 상태에서 상자 내의 특별한 통기성이 요구될 때는, 상자의 양옆면과 앞뒷면에 각 수직 모서리로부터 L/4 위치에 통기공을 설치하면, 상자를 서로 교차시켜도(cross-stacking) 통기공이 일치되어 냉기가 서로 교환될 수 있어, 상자간의 균일한 통기성과 온도 분포를 확보하는데 기여할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

최근 물류 합리화의 추세에 대비하고, 포장의 고기능화를 위해 통기성 골판지 상자의 최적설계에 유한요소법이 적용되었다. 통기성 상자의 주요 설계 인자로는 통기공의 적정 형태, 위치 및 크기 등이며, 이 해석 결과와 실험적 방법에 의한 결과를 비교 분석하였다.

통기공의 적정 형태는 수직 장원형으로, 그 위치는 상자 panel 중심에서 좌우 대칭된 위치가 적합하고, 또한 hand hole은 상자의 양옆면의 panel 중앙부에서 윗쪽으로 약간 벗어난 위치에 수평 장원형에서 양측면의 곡률반경을 크게 변형한 형태가 응력수준과 응력 분산면에서 볼 때, 구조적으로 안정된 형태이었다.

대체로 유한요소 해석에 의해 분석된 통기공과 hand hole의 적정 형태 및 위치는 실험적 방법에 의한 검증에서도 잘 확인되었으며, 통기성의 요구 정도에 따라 가능하면 통기공의 장방향 길이가 상자 높이의 1/4 이하, 단방향/장방향 비가 1/3.5~1/2.5가 되도록 하여, 통기공의 수를 작수 단위하여 좌우 대칭된 구조로 하면, 동일한 통기공 점유면적 비율에서 상자의 압축강도 저하를 최소로 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. ANSYS Inc. 1998. ANSYS theory reference. Release 5.5.
2. ASTM D642. Standard method for determining compressive resistance of shipping containers, components, and unit loads.
3. Hahn, K. A. 1991. Study of the compressive behaviour of corrugated board panels. Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
4. Jones, R. H. 1975. Mechanics of composite materials. Hemisphere Publication Corporation, New York, NY, USA.
5. Park, J. M. and M. H. Lee. 1999. Theoretical and finite element analysis for structural strength of paperboard-stacked structure. Journal of Korea Society of Packaging Science & Technology. 5(1):13-20.(In Korean)
6. Park, J. M. and M. H. Lee. 1999. Experimental investigation for flexural stiffness of paperboard-stacked structure. Journal of Korea Society of Packaging Science & Technology. 5(2):17-23. (In Korean)
7. Park, J. M. 2000. Mechanical characteristics of paperboard-stacked structural with anisotropy. Journal of Industrial Science & Technology. Vol. 10:113-119.(In Korean)
8. Patel, P., T. Nordstrand and L. A. Carlsson. 1997. Local buckling and collapse of corrugated board under biaxial stress. Composite Structure. 39(1-2):93-110.
9. Pilkey, W. D. 1994. Stress, strain and structure matrices. John Wiley & Sons, Inc.
10. Timoshenko, S. and J. Goodier. 1970. Theory of elasticity, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
11. 박종민. 2000. 저온 창고용 통기성 골판지 상자의 설계. 산업자원부·한국포장개발연구원 보고서.
12. 임연웅. 1994. 디자인 인간공학. 미진사. p171-206.
13. DieMex Y. 1997, 1998. 段ボール原典シリーズ. CARTON BOX: 第0回~第10回.