

## 유한요소해석을 위한 골판지 소재의 물성측정 및 분석

강규열\* · 배덕근\*\* · 노선종\* · 진심원\* · 강우종\*\*\*†

## Measurement and Analysis of the Material Behavior of Corrugated Paperboard for Finite Element Analysis

Gyu-Yeol Kang\*, Duk-Geun Bae\*\*, Sun-Jong Noh\*, Sim-Won Chin\*, Woo-Jong Kang\*\*\*†

**ABSTRACT:** This paper measures the mechanical properties of corrugated cardboard, an eco-friendly packaging material, and applies these measurements to the MAT\_PAPER model in LS-DYNA for finite element analysis. Although MAT\_PAPER is primarily designed for modeling the behavior of paper, this research demonstrates its applicability to corrugated cardboard as well. Tensile, compression, and shear behaviors of a corrugated cardboard were measured and analyzed, and based on these results, six yield surfaces were derived and integrated into the MAT\_PAPER model. By comparing the finite element analysis of the material tests and the low velocity collapse analysis of the corrugated cardboard square boxes with each experimental results, it was shown that the behavior of corrugated cardboard could be equivalently considered well by the MAT\_PAPER model. However, since the model is not rate-dependent, the high strain rate properties of liner materials were measured and used for strain rate correction. Consequently, this matches well with the results of the high-speed compression tests of the corrugated cardboard square boxes.

**초 록:** 본 논문에서는 친환경 포장재인 골판지의 기계적 물성을 측정하고, 이를 LS-DYNA의 MAT\_PAPER 모델에 적용하여 유한요소해석을 수행하였다. MAT\_PAPER는 주로 종이의 거동을 모델링 하기 위한 재료모델이지만 본 연구를 통해 골판지에 대해서도 적용 가능함을 보였다. 인장, 압축, 전단 거동에 대하여 골판지의 방향별 기계적 물성을 측정 및 분석하고, 이를 바탕으로 6개의 항복면을 도출하여 MAT\_PAPER 모델에 통합하였다. 재료시험 시편의 유한요소해석과 골판지 사각관의 저속 붕괴해석 결과를 각 실험 결과와 비교함으로써, 골판지의 거동을 등가적으로 잘 고려할 수 있음을 보였다. 그러나 해당 모델은 골판지의 변형률 속도효과를 고려하지 못하므로, 골판지의 원소재인 원심지의 고속물성을 측정하여 이를 보정하였으며, 이에 따라 골판지 사각관의 고속 압괴 실험 결과와 잘 일치함을 보였다.

**Key Words:** 골판지(Corrugated paperboard), 유한요소해석(Finite element analysis), 재료시험(Mechanical test), 변형률속도(Strain rate)

### 1. 서 론

골판지는 친환경 포장재로써 다양한 산업분야에서 운송

중에 발생할 수 있는 다양한 충격으로부터 제품을 보호하기 위해 많이 사용되고 있다. 특히 재활용이 가능한 생분해성 소재이기 때문에 물류산업의 발전과 더불어 사용이 급

Received 20 May 2024, received in revised form 12 June 2024, accepted 13 June 2024

\*Air Solution R&D Lab., LG Electronics

\*\*Multi-Material Research Center, Korea Automotive Technology Institute

\*\*\*†School of Smart Engineering, Kyungil University, Corresponding author (E-mail: [wjkang@kiu.ac.kr](mailto:wjkang@kiu.ac.kr))

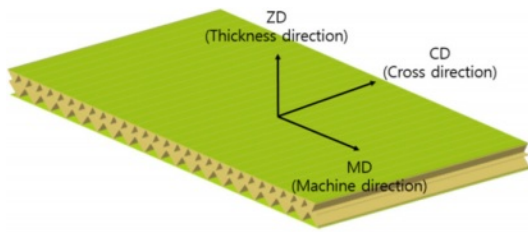


Fig. 1. Geometry and principal directions of corrugated paper-board

격히 증가하고 있다. 골판지는 여러 종류의 원심지를 조합하여 제작되며, 내부 골의 형태에 따라 양면골판지, 이중양면골판지, 삼중양면골판지 등으로 구분된다.

골판지의 표면 층이 주로 굽힘 강성을 제공하고 코어가 전단 강성을 제공하는 샌드위치 구조이며, Fig. 1에 나타난 바와 같이 MD, CD, ZD 방향에 따라 서로 다른 직교이방성 재료 성질을 갖는다[1,2].

골판지는 전자제품의 포장운송에도 많이 사용되며 낙하 충격 발생시 충격하중이 가장 먼저 전달되기 때문에 고가의 제품 보호를 위해서는 골판지의 성능 분석과 최적화를 통한 포장 설계가 중요하다. 그러나 골판지 또는 골판지의 원소재인 종이는 거동이 매우 복잡하므로 이와 관련한 구성방정식은 아직 연구가 진행중인 분야이다. 특히 골판지는 샌드위치 구조이기 때문에 정확한 거동 모사를 위해 종이의 구성방정식과 더불어 골판지 코어의 3D 모델링이 필요할 수 있으나, 이는 장시간의 계산이 소요되는 방법이기 때문에 실제 산업에 사용되기에는 비효율적이라 할 수 있다. 따라서 현재 거동을 균질화(homogenization)하여 직교이방성 성질을 등가적으로 요소에 고려한 후 해석하는 방법들이 많이 사용되고 있다[1-3].

Simon[4]은 258편의 관련 문헌 분석을 통해 종이 및 골판지의 연구현황을 정리하였으며, 이방성, 탄소성, 변형률 속도 효과, 점탄성, 온도, 습도의 영향 등 고려해야 할 인자들이 매우 많기 때문에 실험적으로 얻어내야 할 재료상수들이 매우 많고, 특히 면내(In-Plane) 하중에 대한 거동과 두께방향에 대한 거동이 크게 다르기 때문에 이를 결합한 통합 구성방정식이 필요함을 언급하고 있다. 면내 탄소성 거동과 두께 방향 탄소성 거동을 분리한 종이에 대한 구성방정식들은 제안되어 있으나, 압축 거동시 밀도가 증가하는 효과를 잘 고려하지 못하는 한계가 있다.

LS-DYNA에 적용되고 있는 MAT\_PAPER 모델은 Xia[5]와 Nygård[6]의 3차원 연속체 구성모델에 기반하고 있는, 직교이방 탄소성 구성방정식으로 하중 조건에 따라 종이의 접힘, 주름 생성, 박리 등의 현상이 잘 묘사되며 실험 상관성이 높음을 보여주고 있다. 이 모델은 MD 인장, 압축, CD 인장, 압축 그리고 면내 전단, 두께 방향 압축, 두께 방향 전단에 대하여 항복면을 독립적으로 정의하고 있으며, 총 7

개의 항복면을 정의하고 있다. Simon[4]이 언급한 바와 같이 면내 방향 거동과 두께 방향 거동은 독립적으로 고려되며, 변형률 속도 효과는 고려할 수 없다. Karlsson[7]은 판지 소재를 모델링하기 위해 LS-DYNA의 MAT\_PAPER와 MAT\_COHESIVE\_PAPER를 적용한 두꺼운 판지의 구조해석을 통해 이들 모델들이 실험결과와 우수한 상관성을 보여주고 있음을 보였다.

Rodrigues[8]는 골판지로 만들어진 포장의 가장 흔한 두 가지 파손 모드인 인장 또는 압축하중에 의한 파손을 고려하기 위해 Tsai-Wu 모델을 사용하였으며, Luong[9]은 탄소성 균질화 등가모델을 적용하여 반복적인 충격하중 조건에서 정성적, 정량적으로 골판지의 피로 파손을 모사할 수 있음을 보였다.

이와 같이 판지 또는 골판지 소재는 거동이 매우 복잡하며 제조과정 또한 복잡하기 때문에 산업적으로 널리 사용되고 있는 소재임에도 불구하고 현재 일반화된 구성방정식이 없고, 따라서 골판지의 구조에 따라 충격으로부터 제품을 보호하는 성능을 예측하기 위한 유한요소해석방법 또한 골판지 단위 부피에 대한 거동을 등가적으로 요소에 적용하고 탄성 직교이방성으로 고려하는 방법이 일반적이다.

본 논문에서는 낙하충격시 골판지의 특성을 고려한 유한요소해석을 위하여 LS-DYNA의 MAT\_PAPER[10]를 적용하고자 한다. 3차원 연속체 구성모델에 기반하고 있는 MAT\_PAPER 모델은, 두꺼운 판지 소재에 대해서는 성능이 어느 정도 알려져 있으나[7,11] 골판지에 대해서 적용한 사례를 찾기 어렵기 때문에 본 연구에서는 MAT\_PAPER 모델을 골판지에 적용하고 해석결과와 실험결과를 비교를 통해 성능과 한계를 검토해보고자 한다. 이를 위하여 두께 8 mm의 두꺼우면서 이중골이 형성된 골판지를 대상으로 하였다. 골판지의 MD, CD, ZD 방향별 물성시험을 통해 인장, 압축, 전단 거동을 측정하여 MAT\_PAPER 모델의 각 항복면 정의를 위한 경화함수를 결정하고자 한다. 또한 동일 골판지로 사각관을 제작하여 저속 및 고속 압괴 실험을 실시하고 그 결과를 해석과 비교하여 MAT\_PAPER 모델의 골판지에 대한 적용성을 분석하고자 한다.

## 2. 골판지 물성시험

### 2.1 LS-DYNA MAT\_PAPER MODEL

LS-DYNA의 MAT\_PAPER 모델은 식 (1)과 식 (2)에 나타난 바와 같이 면내 변형에 대하여 6개의 항복면  $f$  및 경화함수  $q$ 를 소성변형률에 대하여 정의하며 두께 방향으로 식 (3)과 같이 항복면  $g$ 를 두께방향 소성변형률에 대하여 정의한다. 그러나 LS-DYNA의 경우 면내 전단하중에 대해서는 방향에 따른 차이를 고려하지 않기 때문에 총 5개의 면내 항복면과 1개의 두께 방향 항복면이 사용되고 있다. 또한 두께 방향에 대하여 전단 항복면을 정의하고 있으나

본 연구에서는 골판지의 두께방향 전단거동은 고려하지 않았다.

$$f = \sum_{i=1}^6 \left[ \frac{\max(0, S : N_i)}{q_i(\varepsilon_p^f)} \right]^{2k} - 1 \leq 0 \quad (1)$$

$$q_i(\varepsilon_p^f) = S_i + A_i \tanh(B_i \varepsilon_p^f) + C_i \varepsilon_p^f \quad (2)$$

여기서 경화함수를 정의하고 있는  $S, A, B, C$ 는 실험적으로 결정해야 할 값들이며, 첨자  $i$ 의 정의는 다음과 같다.

1: MD tension, 2: CD tension, 3: Positive Shear,

4: MD compression, 5: CD compression, 6: Negative shear

$$g = \frac{-S_{33}}{A_{\sigma} + B_{\sigma} \exp(-C_{\sigma} \varepsilon_p^g)} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

여기서 두께방향 소성변형률에 따른 경화함수를 정의하고 있는  $A_{\sigma}, B_{\sigma}, C_{\sigma}$ 는 실험적으로 결정해야 할 값들이다.

## 2.2 골판지 및 원심지 물성시험 방법

본 연구에서 사용된 골판지는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 상하 이중 골이 형성된 두께 8 mm의 골판지이며, 0.2 mm 두께의 KLB175, K180의 두 종류의 원심지로 제조되었다. Fig. 3은 골판지 물성 시험에 사용된 시편의 형상과 크기를 나타내었다. 인장 및 압축 시험편의 형상은 ASTM D828-97[12]을 참조하였다. 인장 및 MD, CD 방향 압축 시험시편의 폭은 24 mm이며 전단시편의 게이지(gauge)부 폭은 33 mm이다. Fig. 4는 각 시험별 시편의 장착방법을 나타내고 있다.

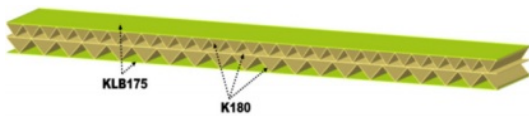


Fig. 2. Corrugated paperboard with double flutes shown with liner materials

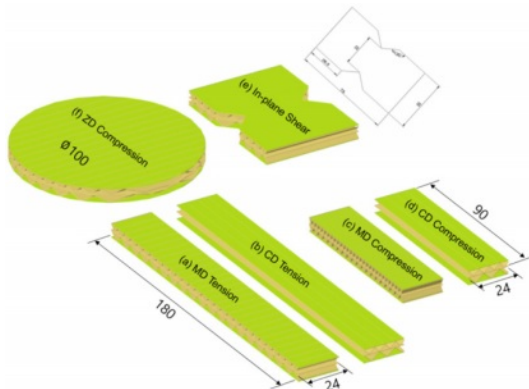


Fig. 3. Shapes and dimensions of specimens of various test types

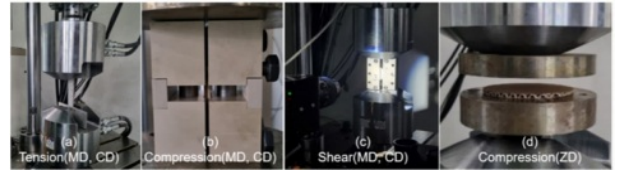


Fig. 4. Fixtures for various types of specimens of corrugated paperboard

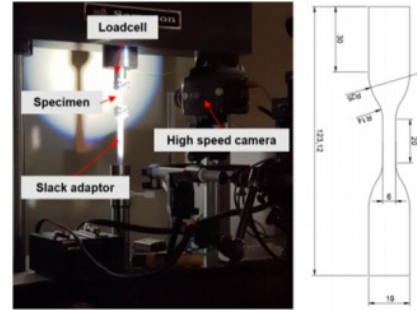


Fig. 5. High strain rate test equipment for liner materials and specimen dimension

면내 압축 시험의 경우 좌굴이 발생할 수 있으므로 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 별도의 좌굴 방지 지그를 설치하여 시험을 진행하였으며, 시편의 변형률 분석을 위하여 DIC(Digital Image Correlation) 방법을 사용하였다.

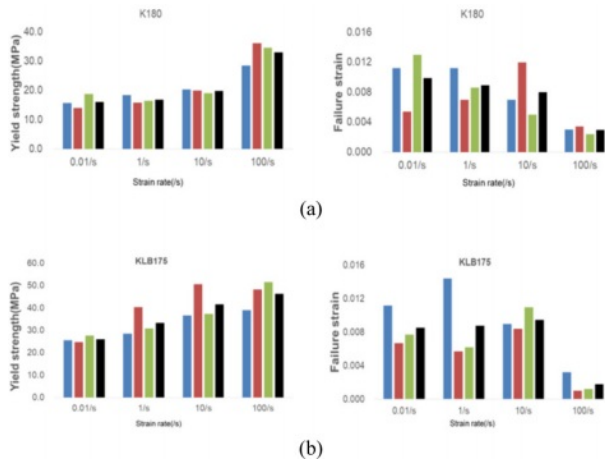
골판지 물성 측정과 병행하여 원심지 2종의 물성측정도 함께 진행하였다. 원심지가 매우 얇기 때문에 압축, 전단 시험은 실시하지 않았으며, ASTM D638 type-IV 시편을 이용한 인장시험을 실시하였다. 원심지 인장시험의 변형률 속도는 0.01/s~100/s에서 실시되었으며, Fig. 5에 나타난 바와 같은 고속인장시험기를 사용하였다.

원심지의 물성이 LS\_DYNA MAT\_PAPER 모델에 직접 사용되는 것은 아니며, 두꺼운 골판지의 변형률 속도 영향을 측정하는 것이 매우 어렵기 때문에 원심지의 변형률 속도 효과로부터 골판지의 고속 변형 거동을 추정해보고자 하였다. Fig. 3에 나타난 골판지 시편의 3D 모델과 측정된 KLB175, K180 원심지들의 고속물성을 이용한 골판지의 고속 인장해석을 통해 골판지의 변형률 속도 효과를 계산하는데 활용하였다.

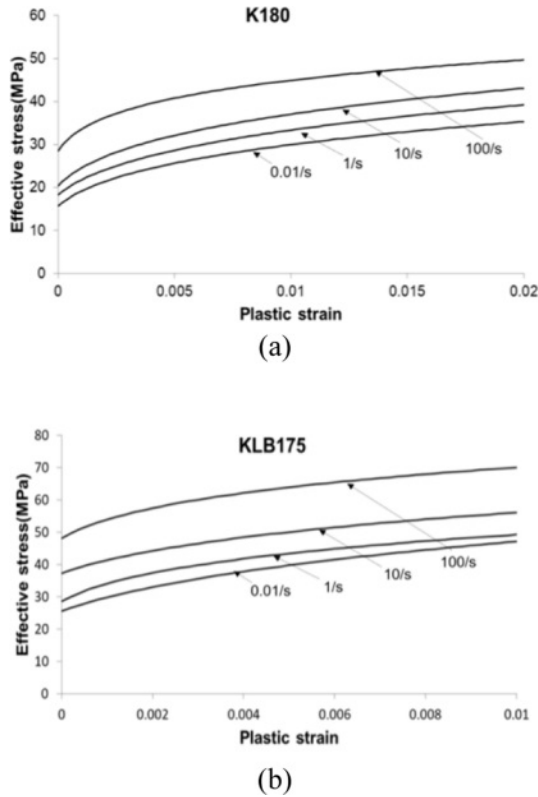
## 2.3 골판지 및 원심지 물성시험 결과

골판지 제조에 사용되는 원심지의 경우에도 MD방향, CD 방향에 대하여 재료의 거동이 다른 것으로 알려져 있다[1,3-5,12]. 본 연구에서는 골판지의 변형률 속도 효과를 간접적으로 알아보기 위한 참조데이터로 사용하고자 하는 것이기 때문에, 일반적으로 강도가 더 크게 나타나는 MD방향에 대해서만 시험을 실시하였다.

시험결과 소재의 물성은 Fig. 6과 같이 변형률 속도에 대

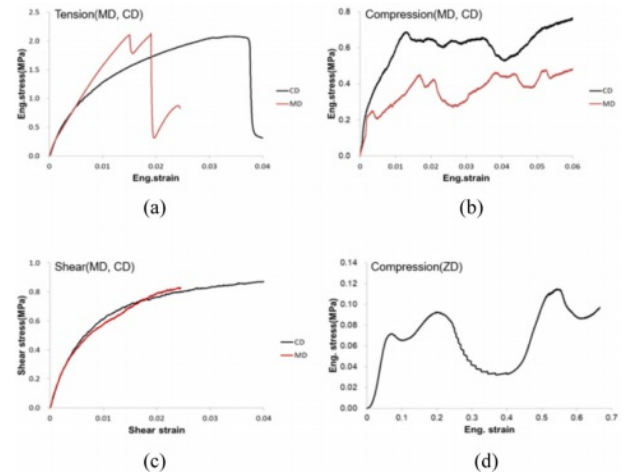


**Fig. 6.** Mechanical properties of liner materials at different strain rates: (a) K180, (b) KLB175



**Fig. 7.** Effective stress-plastic strain curves of liner materials at different strain rates: (a) K180, (b) KLB175

하여 항복강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 파단 연신률이 대체적으로 변형률 속도 증가에 대하여 감소하는 경향을 보였다. 골판지 내부에 사용된 K180소재가 외부에 사용된 KLB 175소재에 비하여 약 35% 정도 강도가 낮은 것으로 나타났다. 0.01/s~100/s에 대한 원심지의 유효응력-소성 변형률 선도는 Fig. 7에 나타난 바와 같으며, 변형률 속도가 원심지의 물성에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라



**Fig. 8.** Material test results of the corrugated paperboard by test directions and test types: (a) tension, (b) in-plane compression, (c) Shear, (d) out-of-plane compression

**Table 1.** Material properties of the corrugated paperboard

Test types	MD		CD	
	E (MPa)	$\sigma_Y$ (MPa)	E (MPa)	$\sigma_Y$ (MPa)
Tension	183	0.98	188	0.85
Compression	90	0.32	56	0.55
Shear	136	0.43	170	0.41

서 이러한 원심지를 이용하여 제조된 골판지의 경우에도 변형률 속도 효과가 있을 것으로 생각된다.

골판지 방향 및 하중조건에 따른 실험 결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같다. MD-인장, CD-인장, MD-압축, CD-압축, ZD-압축, 면내 전단의 총 6종의 시험을 진행하였으며, 실험 결과를 셀 요소 또는 솔리드 요소와 같은 연속체 요소에 적용하고자, 응력의 계산은 각 측정된 하중을 시편의 두께 8 mm와 Fig. 3에 나타난 해당 시편의 폭을 곱한 단면적으로 나누어 산출하였으며, 측정된 탄성계수와 항복강도 및 응력-변형률 선도는 Fig. 8과 Table 1에 나타난 바와 같다.

인장물성의 경우 MD, CD 탄성계수는 거의 비슷하게 나타났다. MD 인장 파단 연신률은 CD 인장 파단연신률의 약 50% 수준으로 측정되었다. 압축물성의 경우에는 CD 방향으로의 강도가 MD방향에 비하여 약 1.7배 크게 나타났다. 전단의 경우 MD와 CD에 대하여 강도의 차이가 크지 않은 것으로 측정되었다. 두께방향 압축의 경우 Fig. 8(d)에 나타난 바와 같이 변형과정에서 상부골과 하부 골의 붕괴가 발생함에 따라 응력이 크게 변동하는 것으로 나타났다.

이와 같은 두께방향 압축 특성을 일반적인 솔리드 요소를 이용하여 나타낼 수 없으므로, 골판지 두께 방향으로의 압축 거동이 중요한 경우에는 골의 구조적 형상을 고려한 해석이 필요할 것으로 보인다. 본 연구에서는 이러한 골의

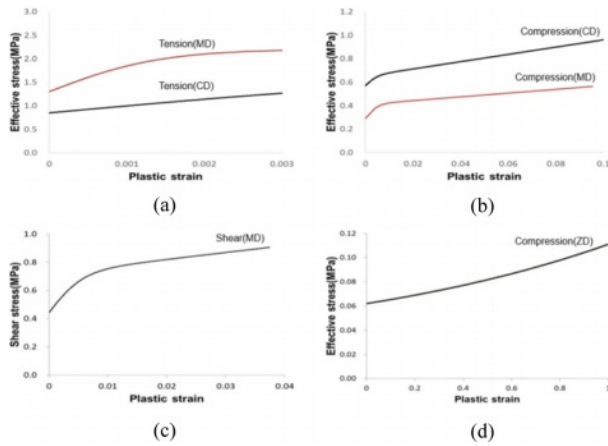


**Table 2.** Hardening parameters for MAT\_PAPER model of corrugated paperboard (MD, CD)

$i$	$S_i$	$A_i$	$B_i$	$C_i$
1	0.80	0.90	250.0	1.0
2	0.85	0.63	185.4	33.0
3	0.44	0.28	172.7	4.9
4	0.28	0.12	200.0	2.0
5	0.57	0.08	200.0	3.1

(ZD)

	$A_\sigma$	$B_\sigma$	$C_\sigma$	EC	CC
Compression	0.22	0.04	-0.82	1.23	1.05

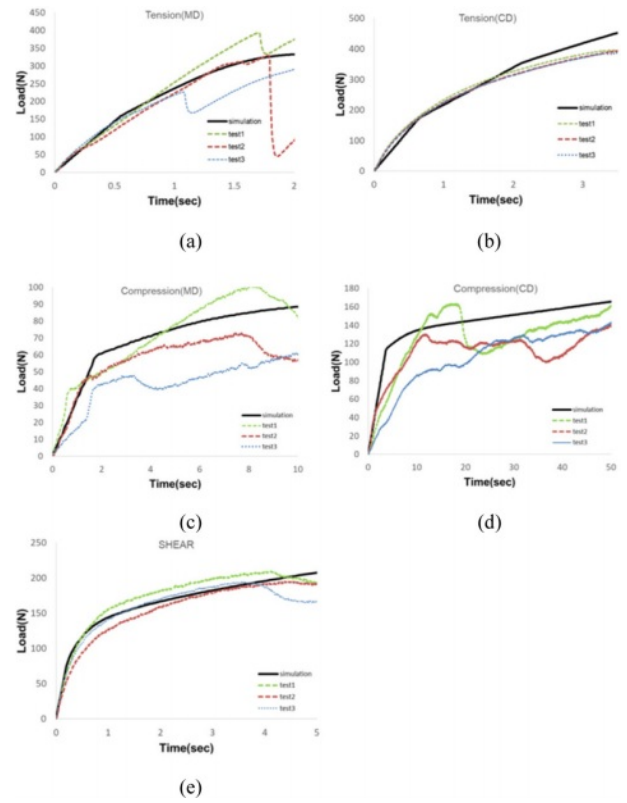
**Fig. 9.** Effective stress-plastic strain curves of the corrugated paperboard by test directions and test types: (a) tension, (b) in-plane compression, (c) Shear, (d) out-of-plane compression

붕괴에 따른 두께방향 압축 특성을 등가적으로 고려하여 식 (3)의 경화함수를 구하여 유한요소해석에 적용하였다.

실험 결과를 이용하여 식 (1), 식 (2), 그리고 식 (3)의 면 내 및 두께방향 항복면을 정의하기 위한 소성변형률에 따른 경화함수의 파라미터들을 Table 2와 같이 도출할 수 있으며, Fig. 9는 Table 2의 값들로부터 얻어진 유효응력-소성 변형률 선도를 나타낸 것이다.

### 3. 골판지 유한요소해석

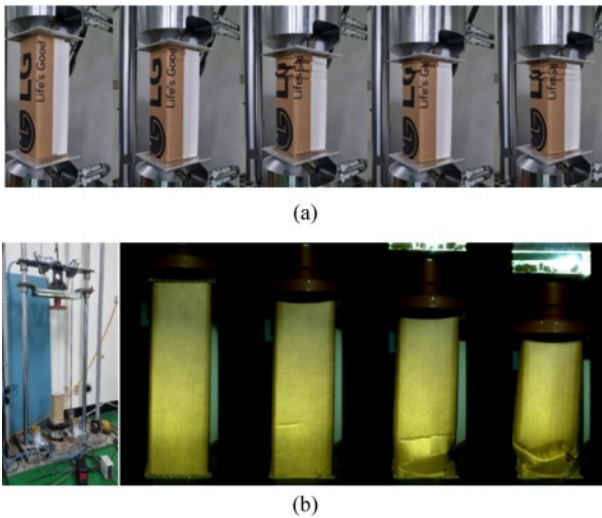
이상과 같이 골판지의 거동을 LS-DYNA의 MAT\_PAPER 모델로 균질화하여 등가적으로 나타낼 수 있으며, MD, CD 인장과 압축의 특성은 골판지의 골의 방향에 따라 고려가 가능하지만, 두께 방향 압축 거동은 골의 붕괴로 인한 압축 강도의 변화 특성을 정확하게 고려하기 어려울 것으로 판단된다. 또한 해당 모델의 경우 변형률 속도에 대한 영향을

**Fig. 10.** Comparison of material test results and simulations using shell elements and MAT\_PAPER model of corrugated paperboard: (a) MD tension, (b) CD tension, (c) MD compression, (d) CD compression, (e) ZD compression

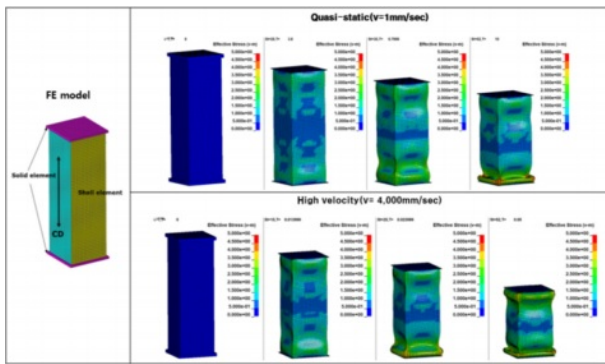
고려할 수 없으므로 원심지의 고속물성 시험을 통해 나타난 바와 같은 변형률 속도 효과를 잘 고려할 수 없는 한계가 있을 것으로 생각된다. Table 2의 값들을 이용한 골판지 인장, 압축, 전단 시험의 상관성 해석 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

시험 해석 결과가 실험 결과와 매우 유사하게 나타났으며, 골판지의 3D 모델링을 하지 않고 연속체 요소를 사용하여 골판지의 특성을 잘 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로부터 MAT\_PAPER 모델을 골판지에 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 골판지로 제작된 사각관의 압괴 실험과 해석 결과의 비교를 통해 MAT\_PAPER 모델 적용성에 대한 추가 검토를 실시하였다.

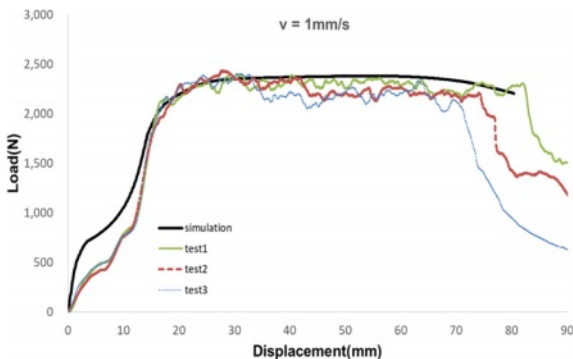
제작된 골판지 사각 박스의 크기는 가로 100 mm, 세로 100 mm, 높이 300 mm이며, Fig. 11에 나타난 바와 같이 저속(1 mm/sec)과 고속(4,000 mm/sec)에서 압괴 실험을 실시하였다. 고속의 경우 drop-tower 시험기를 이용하였으며, 47 kg의 중량을 낙하하였다. 시간에 따른 골판지 박스의 변형 형상은 Fig. 11에 나타난 바와 같다. 대변형이 발생하여 최종적으로는 골판지 박스의 찢어짐이 발생하였으나, 본 연구에서는 찢어짐에 대한 모사는 고려하지 않았다.



**Fig. 11.** Corrugated paperboard box collapse tests and results: (a) quasi-static test ( $v = 1$  mm/s), (b) drop test ( $v = 4,000$  mm/s)

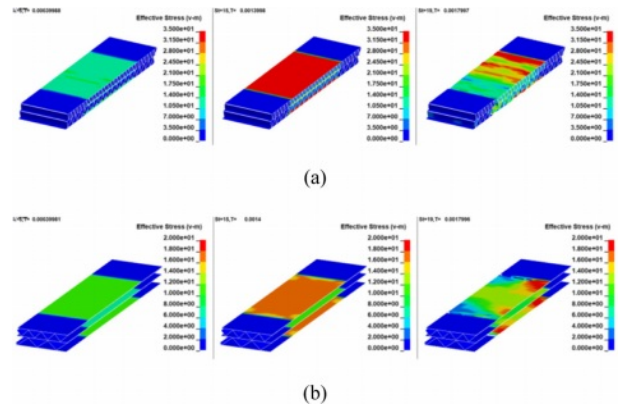


**Fig. 12.** Deformed shapes from FE simulation using MAT\_PAPER model of corrugated paperboard

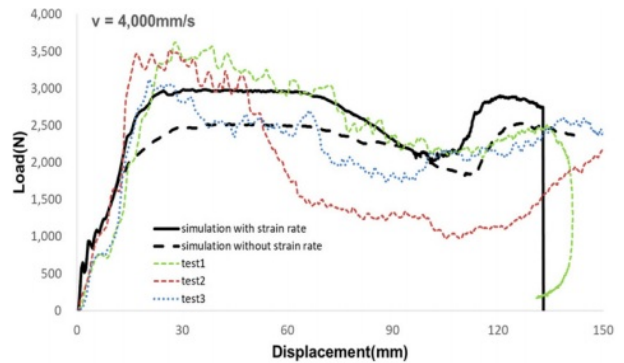


**Fig. 13.** Comparison of load-displacement curves between the simulation with MAT\_PAPER model and quasi-static test

Fig. 12는 실험에 사용된 골판지 사각관을 쉘요소와 솔리드 요소로 모델링 한 후 얻어진 변형형상을 나타내고 있다. 지그와 접촉이 발생하는 골판지 사각관의 상단과 하단



**Fig. 14.** High strain rate tensile test simulations with 3D model of the tensile specimen of corrugated paperboard using a rate dependent plasticity model of MAT\_24 in LS-DYNA: (a) MD tension, (b) CD tension



**Fig. 15.** Comparison of load-displacement curves between the simulation using MAT\_PAPER model and drop test

부는 882개의 솔리드 요소를 사용하였으며, 나머지 부분은 4,560개의 쉘 요소를 사용하여 모델링하였다. 실험과 해석 결과는 일반적인 사각관의 압괴 모드를 잘 나타내고 있으며, Fig. 13은 저속 압괴 실험으로 측정된 하중-변위선도를 해석 결과와 비교한 것이며, 실험결과와 해석결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

고속 압괴 해석의 경우 Fig. 15의 검은색 점선으로 나타난 결과와 같이 변형률 속도를 고려하지 않은 경우에는 실험과 해석의 하중-변위 선도 차이가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 MAT\_PAPER 모델이 변형률 속도 효과를 고려하지 못하기 때문인 것으로 보여진다. 고속 압괴 해석을 통해 1차 peak 하중이 발생할 때의 변형률 속도는 대략 10/s인 것으로 나타났으며, 10/s의 변형률 속도에서 골판지의 물성을 고려할 수 있을 경우 고속 압괴에서도 해석과 실험의 상관성이 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

골판지의 고속인장시험은 실시할 수 없었으나, Fig. 14에 나타난 바와 같이 본 연구를 통해 측정된 원심지의 고속 물성을 골판지 시편의 3D 형상에 적용한 가상 고속인장시험

을 실시할 수 있으며, 해석을 통해 얻어진 하중을 검토한 결과 10/s의 변형률 속도에서 골판지 물성이 약 29% 증가할 것으로 예측되었다. 이 결과를 골판지 박스의 고속 압괴 해석에 적용할 경우 Fig. 15와 같이 고속 압괴 해석과 실험의 상관성이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 골판지의 기계적 물성을 측정하고, 이를 LS-DYNA의 MAT\_PAPER 모델에 적용하여 유한요소해석을 수행하였다. MD 인장, 압축, CD 인장, 압축, ZD 압축 그리고 면내 전단 시험 등 6종의 시험을 통하여 MAT\_PAPER의 각 항복면을 정의하기 위한 경화함수를 구하였으며, 이를 유한요소해석에 적용하였다.

골판지 제조에 사용된 원소재의 경우 변형률 속도에 따라 강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 골판지의 경우 MD, CD 방향의 인장, 압축, 전단 거동 및 두께방향 압축 거동은 MAT\_PAPER 모델을 이용한 해석에 등가 고려가 가능한 것으로 판단된다.

시편해석 및 골판지 사각관의 저속 압괴 해석 결과가 실험결과와의 높은 상관성을 보였으며, 골판지를 구성하고 있는 원심지들의 변형률 속도 효과를 고려한 보정을 통해서 고속 압괴 해석의 결과도 실험과의 상관성을 높일 수 있었다. 따라서 주로 판지 소재의 거동에 사용되는 MAT\_PAPER 모델이 골판지의 각 방향별 거동을 특성을 고려할 경우 골판지의 유한요소해석에도 사용될 수 있음을 보였다.

#### 후 기

본 연구를 위한 경일대학교 연구년 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. Fadji, T., Berry, T., Coetzee, C., and Opara, U.L., "Investigating the Mechanical Properties of Paperboard Packaging Material for Handling Fresh Produce Under Different Environmental Conditions: Experimental Analysis and Finite Element Modeling," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Vol. 9, No. 2, 2017, pp. 20-34.
2. Park, J.M., Park, M.J., Choi, D.S., Jung, H.M., and Hwang, S.W., "Finite Element-Based Simulation for Edgewise Compression Behavior of Corrugated Paperboard for Packaging of Agricultural Products," *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 19, 2020, pp. 6716-6723.
3. Kang, S.G., Im, J.M., Shin, K.B., and Choi, W.S., "Effective Equivalent Finite Element model for Impact Limiter of Nuclear Spent Fuel Shipping Cask made of Sandwich Composites Panels," *Composites Research*, Vol. 28, No. 2, 2015, pp. 58-64.
4. Simon, J.W., "A Review of Recent Trends and Challenges in Computational Modeling of Paper and Paperboard at Different Scales," *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 28, 2021, pp. 2409-2428.
5. Xia, Q.S., *Mechanics of Inelastic Deformation and Delamination in Paperboard*, Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA, 2002.
6. Nygård, M., Just, M., and Tryding, J., "Experimental and Numerical Studies of Creasing of Paperboard," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, 2009, pp. 2493-2505.
7. Karlsson, J., Schill, M., and Tryding, J., "MAT\_PAPER and MAT\_COHESIVE\_PAPER: Two New Models for Paperboard Materials," *14<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference*, 2016, June 12-14.
8. Rodrigues, D., and Pereira, J., "Experimental Tests and Numerical Simulations for Failure Investigation on Corrugated Boxes Used on Household Appliance Packaging," *Journal of Applied Packaging Research*, Vol. 10, No. 3, 2018, pp. 56-69.
9. Luong, V.D., Bonnin, A.S., Abbès, F., Nolot, J.B., Erre, D., and Abbès, B., "Finite Element and Experimental Investigation on the Effect of Repetitive Shock in Corrugated Cardboard Packaging," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Vol. 7, No. 2, 2021, pp. 820-830.
10. LS-DYNA Keyword User's Manual, ANSYS, 2024.
11. Sekhar, C., and Chatiri, M., "Corrugated Fiber Board as a Packaging Material: Experimental and Numerical Analysis of the Mechanical Behavior," *15<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference*, 2018, June 10-12.
12. ASTM International, Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus, 2002, ASTM D828-97.