

종이성형 내충격 흡수재의 충격특성에 관한 연구

The Impact Characteristics of Paper Impact Absorber

이 영 신* 김 동 진** 최 명 환*** 김 인 우****
Lee, Young-Shin Kim, Dong-Jin Choi, Myoung-Hwan Kim, In-Woo

요 지

본 연구에서는 종이 충격흡수재의 효율적인 기하형상이 연구되었다. 일반적으로 충격흡수재는 골판지, 스폰지, 종이, 고무등으로 제작된다. 에너지 흡수거동에 대한 종이 충격 흡수재의 보강형태, 크기, 재료 특성에 대한 영향이 ABAQUS/Explicit5.5에 의한 유한요소 해석과 미끄럼 충격시험을 통해 연구되었다. 종이 충격 흡수재의 최대 변위는 충격속도에 따라 증가하며, 내부단수에 따라 감소하였다. 충격이력 특성은 내부단수가 7단일때 5 msec까지 급속히 변형되며, 그 이후에는 영구변형으로 존재한다.

핵심용어 : 골판지, 충격흡수재, 미끄럼 충격시험기, 충격속도

Abstract

The efficient geometric shapes of the paper impact absorber are studied in the paper. The effects of the reinforcement type, size and material properties of the impact absorber on the energy absorbing behavior are examined using both a finite element program of ABAQUS/Explicit5.5 and a sliding impact tester. It is found that the maximum displacement of the paper impact absorber is increased with the impact velocity and decreased with the corrugation step numbers. The impact history shows that the absorber of 7 corrugation steps rapidly deforms until 5 msec and the permanent deformation remains afterwards.

Keywords : corrugated cardboard, impact absorber, sliding type impact tester, impact velocity

1. 서 론

1.1 연구목적

산업 발달로 인한 환경오염의 심각성은 날이 갈수록 사회에 더욱 큰 문제로 대두되어지고 있다. 이런 시점에서 산업폐기물과 제품 생산으로

나오는 잔재들에 처리는 하루 빨리 개선해야 할 문제중의 하나이다. 일반적으로 산업의 많은 분야에서 우수한 충격흡수능력과 감쇠특성, 가공상의 용이성 및 저렴한 생산비용 등의 이유로 스티로폼의 재료가 내충격재로서 사용되고 있다. 그러나 이러한 재료는 재생이 어려운 단점이 있다.

* 정회원·충남대학교 기계설계공학과, 교수
** 충남대학교 기계설계공학과, 석사과정
*** 충남대학교 기계설계공학과, 박사후 과정
**** 충남대학교 기계설계공학과, 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 1998년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

그러므로 자연상태에서 잘 분해되며, 환경오염을 줄일 수 있는, 그리고 재활용이 가능한 종이를 이용한 내충격재 개발이 시급해졌다. 따라서 종이 재질의 충격흡수능력 및 형상변화에 따른 충격흡수능력을 분석하는 것이 중요하다. 이 중에서 가장 최적화된 형상과 재질을 분석할 수 있다면 기존의 스티로폼으로 제작된 내충격재만큼이나, 아니 그보다도 더욱 효과적인 충격 완화재를 개발할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 삼각 단면의 종이 재질 내충격재 시편을 사용하였으며 충격시 형상 변화의 변수로서 내부단수를 변화시켰으며, 단수의 변화에 따른 변이를 측정해서 충격량과 단면의 형상변화의 상관성을 분석하였다. 따라서 본 연구는 종이 재질의 물성을 측정하고 형상에 대한 변화를 주어서 특정한 하중과 가속도에서 발생하는 충격력에 대해서 시편의 형상 변화를 고찰하고 유한 요소 해석에 의한 결과치를 비교, 검토하였다.

1.2 연구 동향

현재 생산되고 있는 산업 제품들 특히 정밀하게 제조되어지는 전자 제품들의 수송 중에 발생하는 충격 완화 문제는 많은 중요성을 가지고 대두되어지고 있다. 포장 제품 운송시 발생하는 충격, 휴대용 전자 장비의 충격 완화에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

수송 용기의 충격 연구 분야에서 Pfeiffer¹⁾은 선박 수송 용기의 자유 낙하 충격 응답을 연구하였으며 이영신²⁾등은 낙하 충격을 받는 방사성 물질의 수송 용기 등에 관한 연구를 하였다. 또한 강희영³⁾등은 KSC-4 수송 용기의 안전성을 분석하였다. 전자 제품의 충격 분야에서 Bresk⁴⁾는 전자 제품의 신뢰성 실험을 하였다. Newer⁵⁾은 파손 경계를 고찰하였다. 또한 Ho⁶⁾는 I-DE-AS를 이용하여 FEM기법으로 휴대용 전화의 충격 문제를 해석하였다. 또한 이영신⁷⁾등은 충격자의 형상 및 재질 변화에 따른 펄스형성에 관해 연구하였다. 그 외에도 산업 안전 분야 및 많은 전자 업계에서도 관련된 연구를 많이 수행하고 있다^{8)~17)}.

1.3 연구 방법

본 연구에서는 실험과 유한요소법을 통해서 종

이 재질의 내충격소재 시편의 충격에 의한 형상 변화를 분석하고 충격 거동을 연구하였다. 비선형 유한요소해석에 적합한 ABAQUS^{18), 19)}를 이용하여 해석하였으며, 저속충격에 적합한 슬라이딩 형태의 충격시험기를 이용하여 자유낙하 충격시험을 수행하였다. 이러한 실험 결과를 유한요소해석의 결과와 비교, 검증하였다. 실험시 발생하는 충격에 의해 변형된 시편의 변형 형상을 분류하므로써 충격 하중에 따른 충격 흡수 능력을 분석하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 해석모델

일반적인 포장재의 충격 흡수재는 골판지의 형상이나 스티로폼으로 제작되었다. 그러나 본 연구에서 고려된 충격 흡수재는 상하 판재와 내부에는 삼각형의 보강판재를 삽입하여 제작하였다. 또한 재료는 재생이 가능한 종이재질로 제작되었다. 시편의 형상변수로는 상하판사이에 삽입되어있는 보강판재(충격흡수판재)의 단수변화에 따라 분석하였으며, 그 단수는 6, 7, 8 그리고 9단으로 형성되었다. Fig. 1은 본 연구에서 해석과 실험에 사용된 충격 흡수재의 형상을 나타낸다.

2.2 해석과정

본 연구의 유한요소해석은 실제 실험조건과

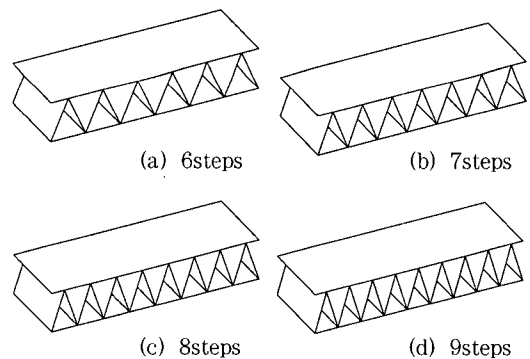


Fig. 1 Dimensions of the paper impact absorber with various corrugation step number.

동일한 조건의 모델형상으로 모델링하였다. 해석상에 고려된 물성을 찾기위해 일점지지 경계조건을 만족하는 외팔보를 구성하였으며, 굽힘 응력에 대한 처짐을 측정해서 실험에 사용된 종이의 탄성계수를 측정하였다. 계산된 물성치는 ABAQUS에 대입해서 해석상에 고려된 물성을 정의해 주었다.

ABAQUS 입력프로그램은 백터 슈퍼컴퓨터인 Cray YMP C60상에서 해석되었으며 ABAQUS Post에서 시간에 따른 변형형상 및 응력과 진행과정, 가속도 분석을 하였다. 이러한 과정을 다양한 변수에 따라 반복적으로 각각의 형상변화에 따른 해석을 수행하였다. Fig. 2는 유한요소해석과정을 나타낸다.

2.3 유한요소 모델링

ABAQUS 입력프로그램에 사용된 요소는 ABAQUS/Explicit 에서 지원되는 CAX4요소로서 한 개의 요소에 4개의 절점으로 구성되었으며, 각 절점당 6자유도가 허용된다. 해석상에서 많은 계산량을 감소시키기 위해 미끄럼 충격자를 블록 형태로 간략하게 모델링하였으며, 실험상에 사용된 충격자의 무게 (10kg)를 고려하여 블록을 모

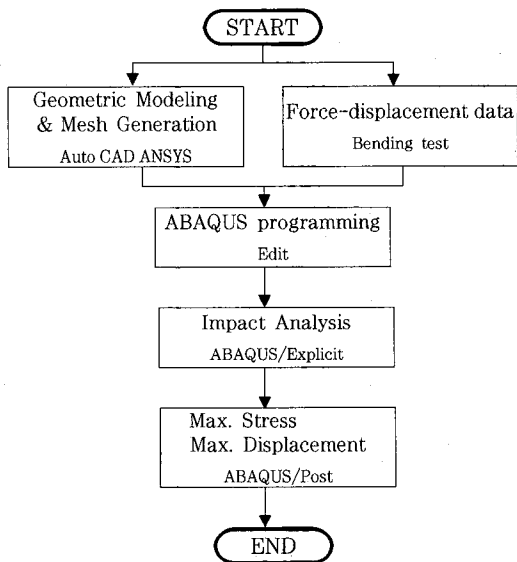


Fig. 2 Finite element analysis procedure of the paper specimen

델링하였다. 또한 가격되는 충격자의 다양한 속도 (0.7m/s, 1.0m/s, 1.2m/s, 1.5m/s)를 고려하여 블록을 모델링하였다. 계산량을 줄이기 위해 충격전의 모습으로 모델링을 하였으며, 종이성형 충격자의 시편은 실제 실험조건과 동일한 형상과 경계조건으로 모델링하였다. 또한 종이시편의 굽힘시험을 통해 탄성계수를 측정하였으며, 정밀도가 0.5g인 정밀한 전자저울을 이용하여 밀도를 측정하였다. 이러한 시험에서 얻은 물성은 유한요소해석 프로그램의 물성으로 사용되었다.

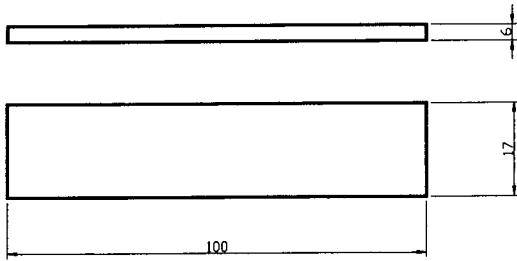
경계조건으로는 종이성형 시편의 하부 부분을 완전 고정된 것으로 가정하여 6자유도를 고정하였으며, 미끄럼충격을 주는 블록에 충격속도를 고려하여 주었다. 다양한 충격하중을 부여하기 위해 블록의 낙하높이 변화에 따른 낙하속도를 0.7m/s, 1.0m/s, 1.2m/s와 1.5m/s로 고려하여 해석하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 유한요소 모델링을 나타낸다.

2.4 재료의 굽힘시험 및 물성분석

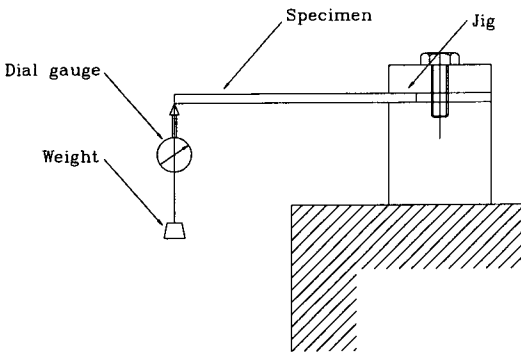
충격시편의 재료로 사용된 종이는 가공상의 방법 및 다양한 실험환경(습도, 온도)에 따라 변화가 크므로 어떤 정확하며 일정한 물성으로 고려할 수 없다. 본 연구에서는 종이의 물성을 측정하기 위해 가로길이 100mm, 세로길이 17mm, 두께 6mm 종이시편을 제작하여 Fig. 4와 같이 외팔보의 끝단에 집중하중이 작용하는 굽힘시험장치를 구성하였다. 집중하중에 의한 처짐으로 발생된 처짐식을 적용하여 탄성계수를 구하였다. 외팔보의 끝단에 작용하는 집중하중에 의한 처짐식(δ



Fig. 3 Finite element modeling of the paper impact absorber with 8 corrugation steps.



(a) specimen



(b) bending tester

Fig. 4 The configuration of bending tester and paper specimen

$= PL^3/3EI$ 을 이용하여 탄성계수(E) 값을 얻을 수 있다. 이러한 실험에 의해 계산된 물성은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 입력프로그램 상에 시편의 물성으로 고려되어 해석을 수행하였다. Fig. 5는 외팔보의 굽힘실험에서 얻은 하중 변위선도를 나타낸다. 종이시편의 굽힘실험에서 탄성계수는 3.1GPa값을 얻었으며, 무게 측정법으로 종이시편의 밀도 $\rho=656.86\text{kg/m}^3$ 로 구하였다. 그리고 포와송비 $\nu=0.3$ 으로 가정하였다.

3. 충격특성 실험

3.1 실험장치

충격력을 가하는 방법이나 충격력의 크기에 따라 다양한 종류의 충격시험기가 활용되고 있다. 충격속도의 크기에 따라 저속충격시험기, 고속충

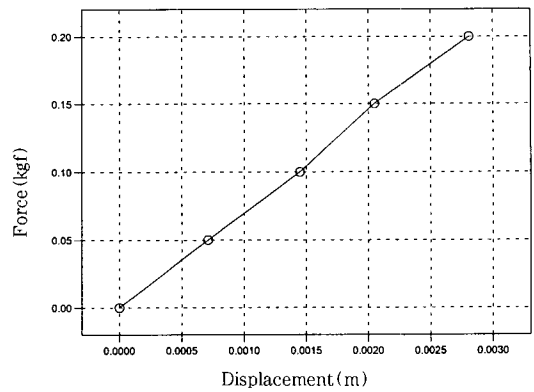
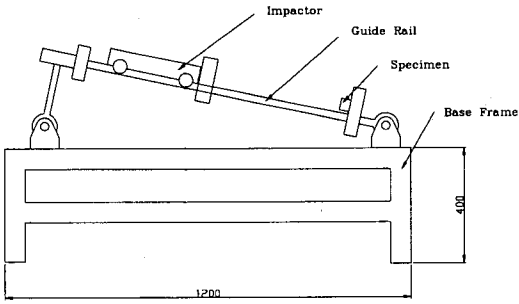


Fig. 5 The force vs displacement diagram for paper bending test

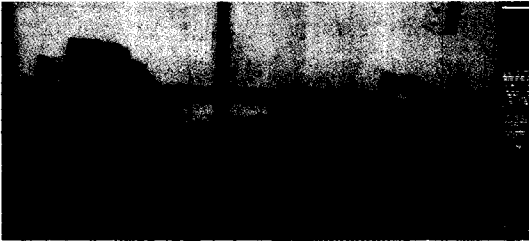
격시험기, 그리고 초고속 충격시험기로 구분된다. 저속 충격실험 장치로서 중력을 이용한 자유낙하형, 미끄럼형, 진자형 시험기 등이 있으며 고속 충격시험장치로서 압축공기, 가스, 폭발 등을 이용한 충격시험기가 있다. 그 외에도 레일건, 흡킨스바, 회전원반, 전자기포, 그리고 이단 가스건 등 다양한 작동방법 및 작용에너지의 크기에 따라 많은 시험법이 구사되고 있다. 본 연구에서 사용된 실험장치는 중력에 의해 저속 충격을 부여할 수 있는 미끄럼형 충격시험기를 사용하였으며, 그 구성은 Fig. 6에 나타내었다. 충격 흡수재로 사용된 종이성형 시편에 일정한 균일분포 충격하중을 부여하기 위해 시편전면에 강재로 제작된 판재를 시편의 양편에 부착하였으며, 뒷편의 강판에는 일정한 속도를 가지고 경사진 레일을 타고 내려오는 하중을 가진 구조물을 충돌시키므로써 시편에 충격하중을 가하였다. 본 연구에 사용된 충격시험기는 최고 충격력 98N을 부여할 수 있으며, 충격속도는 0.7m/s에서 1.5m/s의 속도 범위를 부여할 수 있다.

3.2 실험시편

시편의 형상은 충격량을 원활히 흡수하면서도 충격하중을 적절히 버틸 수 있는 삼각형 형태의 트러스구조를 선택했다. 트러스구조물 내부의 삼각형 구조물의 보강단수를 6, 7, 8 그리고 9단으로 다양하게 변화시켰으며, 충격흡수시편에 작용하



(a) schematic diagram of the impact tester



(b) photograph of impact tester

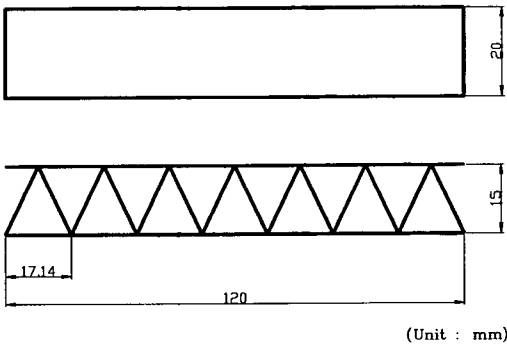
Fig. 6 Configuration of the sliding type impact tester.

는 충격력을 다양하게 변화시켜서 충격거동을 분석하였다. 시편의 형상은 길이 120mm, 높이 15mm, 폭 20mm로 제작하였다.

Fig. 7은 단수가 7개인 시편의 치수를 나타낸다.

3.3 실험방법

본 연구에서 충격실험 순서는 첫째로 원하는



(Unit : mm)

Fig. 7 Dimensions of impact absorber with 7 corrugation.

충격시험을 위해 시험기의 정확한 사양분석과 그에 따른 시험의 가능여부를 분석해야 된다. 둘째로 충격시편을 시험기에 완전고정 되도록 체결한다. 셋째로 설치된 시편에 원하는 충격력을 부여하도록 낙하높이를 선정하여 충격자를 설치한다. 다섯째로 충격자에 자유낙하를 가능하도록 작동한다. 이때 충격자는 자중에 의해 운동하게 되며, 충격자는 충격시편에 직각방향으로 작용하도록 두개의 기둥을 따라 미끄러져 나간다. 여섯 번째로 충격자의 자중에 의한 자유낙하로 충격이 이루어진다. 일곱 번째로 충격후 충격시편을 충격시험기에서 분리된 후 변형된 형상을 측정하여 충격흡수량을 계산한다. 이러한 과정은 동일한 충격속도와 시편을 5회 이상 실험한후 평균값을 취하여 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

내충격 흡수재의 다양한 형상 및 충격에너지 변화에 따른 유한요소해석 결과 및 자유낙하 충격실험을 수행하여 Table 1과 같은 최대 변위결과를 얻었다. 실험결과 최대변위는 유한요소해석보다 상당히 크게 발생하였으며 이는 시편의 접착강도가 이상적인 조건을 사용한 유한요소해석

Table 1 Maximum displacement of paper impact absorber for various shape and impact velocity.

| Corrugate steps | Impact Velocity (m/s) | Max. Displacement (mm) | |
|-----------------|-----------------------|------------------------|------------|
| | | ABAQUS | Experiment |
| 6 | 0.7 | 0.65 | 8.55 |
| | 1.0 | 1.15 | 7.43 |
| | 1.2 | 1.77 | - |
| | 1.5 | 3.46 | - |
| 7 | 0.7 | 0.51 | 7.25 |
| | 1.0 | 0.92 | 6.82 |
| | 1.2 | 1.21 | - |
| 8 | 1.5 | 2.40 | - |
| | 0.7 | 0.46 | 5.89 |
| | 1.0 | 0.81 | 5.03 |
| 9 | 1.2 | 1.11 | - |
| | 1.5 | 1.83 | - |
| | 0.7 | 0.42 | 4.41 |
| 9 | 1.0 | 0.73 | 3.96 |
| | 1.2 | 1.04 | - |
| 9 | 1.5 | 1.54 | - |

에 비해 크게 저하되었기 때문으로 판단된다.

4.1 충격력 변화에 따른 충격특성분석

충격시험기에 작용하는 충격력은 자유낙하 충격자의 무게와 가속도에 의해서 결정된다. 실험에서 시편에 작용하는 다양한 충격에너지량은 출발점의 높이를 조절하므로써 변화를 줄 수 있었으며, 유한요소해석에서 충격블록의 속도를 부여함으로 충격에너지값을 줄 수 있다. 유한요소해석 결과 종이성형 충격자의 내부단수가 6단일 경우 블록에 작용하는 낙하속도가 0.7m/s, 1.0m/s, 1.2m/s와 1.5m/s일 경우 최대변형량은 0.65mm, 1.15mm, 1.77mm과 3.46mm의 결과를 얻을 수 있었다. 이와 마찬가지로 7단의 경우 0.51mm에서 2.40mm로 증가되었고, 8단일 경우 0.46mm에서 1.83mm로 증가하였다. 마지막으로 9단일 경우 0.42mm에서 1.54mm로 증가되었다.

결과적으로 충격에너지의 크기가 증가될수록 최대변위값은 점진적으로 증가됨을 알 수 있었다. 또한 단수가 증가될수록 변위값은 감소됨을 볼 수 있었다. Fig. 8은 충격에너지의 변화 즉, 충격속도의 변화에 따른 종이성형 충격자의 변형량을 나타낸다.

본 연구결과 종이성형 충격자의 내부 충격 흡수재의 수가 적을수록 충격시 발생하는 충격에너지에 대

하여 충분히 저항하지 못함을 볼 수 있었다. 그러나 과도한 변형은 내부판재와의 간섭을 일으킬 수 있으므로 포장상품에 치명적인 손상을 줄 수 있다.

4.2 형상 변화에 따른 충격특성분석

본 연구에서는 종이성형 충격 흡수재 시편의 상,하판 사이에 부착된 트러스형태 흡수부재의 수에 따라 분석하였다. 충격속도가 0.7m/s에서 단수의 증가(6,7,8,9)에 따른 최대 변위값은 0.65mm, 0.5mm, 0.46mm와 0.42mm로 미소하게 감소되었다. 또한 1.0m/s에서는 1.15mm에서 0.73mm로 감소되었으며, 1.2m/s에서는 1.77mm에서 1.04mm로 감소되었다. 마지막으로 1.5m/s에서는 3.46mm에서 1.54mm로 감소됨을 볼 수 있었다. 결과적으로 단수가 증가될수록 변형량이 감소됨을 볼 수 있었다. 즉, 단수가 감소될수록 많은 변형과 함께 충격력이 흡수되는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 단수가 6에서 9단으로 증가함에 따른 종이성형 충격 흡수재의 최대 변형값을 나타낸다. Fig. 10은 다양한 단수변화에 따른 유한요소해석과 실험값의 비교를 나타낸다. 실험과 해석상의 차이는 종이재질의 온도 및 습도와 같은 다양한 환경변화에 따른 영향과 시편 제작시 사용된 접착재료의 물성에 의한 것으로 보인다. 이때 최대 변위값은 실험 및 해석에서 보강단수에 따라 감소되는 경향을 확인하였다.

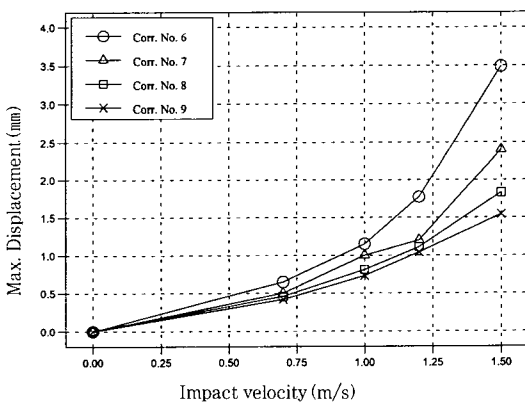


Fig. 8 Numerical maximum displacement of paper impact absorber for various impact velocity

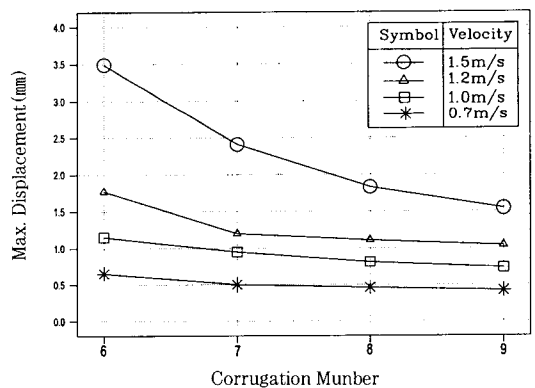


Fig. 9 Numerical maximum displacement of paper for various corrugation step.

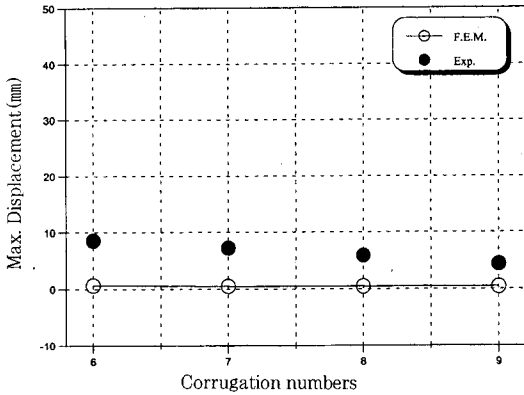


Fig. 10 Comparison of numerical and experimental results on maximum displacement with various paper corrugation step.

4.3 충격시간에 따른 응력분석

본 연구의 결과 7단의 내부흡수재가 결합된 종이성형 충격자에 1.5m/s의 충격속도가 발생될 때 응력은 1.43ms, 5.71ms, 11.43ms 와 22.86ms의 시간에 따라 170MPa, 100MPa, 106MPa, 104MPa과 108MPa의 응력이 작용된다. 초기 충격이 작용되는 경우 큰 변형이 발생되나 곧바로 탄성회복되며, 일정시간이 지난 후 영구적인 변형이 발생된다. 순간적인 변형이 발생될 때 큰응력이 작용하나 다시 급격히 응력이 회복되며 영구 변형 내에서 미소한 차이의 응력변동을 나타낸다. Fig. 11은 시간에 따른 최대응력선도 그래프를 나타내고, Fig. 12는 시간에 따른 응력분포 및 변형형상을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서 다양한 형상과 충격에너지가 작용하는 종이성형 충격 흡수재의 충격특성 연구는 ABAQUS/Explicit를 이용한 유한요소해석과 미끄럼 형태의 충격시험을 통해 이루어졌으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 고려된 여러 보강단을 갖는 시편에서 충격속도가 0.7m/s~1.5m/s 범위일 때, 유한요소해석에

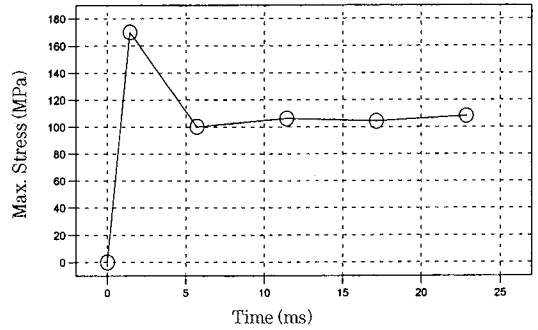


Fig. 11 Numerical maximum stress history of paper impact absorber with 7 steps under impact velocity 1.5m/s.

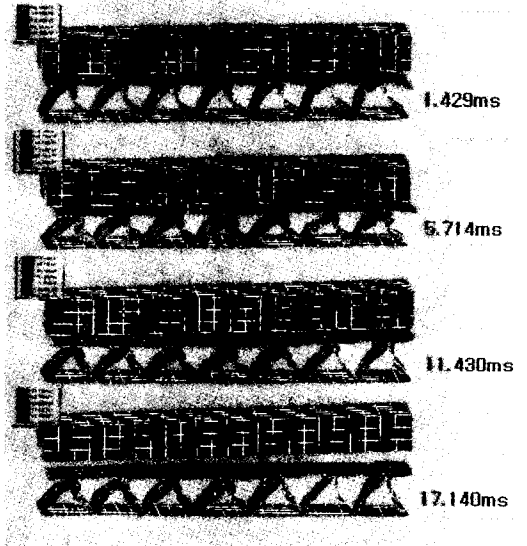


Fig. 12 Numerical stress and displacement contour history of paper impact absorber under impact velocity 1.5m/s.

의한 최대 변위 값은 0.42mm~3.46mm 범위이다.

2) 동일한 충격속도를 갖는 시편에서 시편의 보강 단수가 6단에서 9단까지 증가될수록 최대 변위 값은 감소된다.

3) 충격초기에 최대응력이 발생되며, 초기 충격 응력값의 60%의 일정한 응력으로 유지되면서 변형이 이루어진다.

4) 실험과 해석상의 차이는 종이재질의 온도 및 습도와 같은 다양한 환경변화에 따른 영향과 시편 제작시 사용된 접착재료의 물성에 의한 것으로 보인다. 이때 최대 변위값은 실험 및 해석에서 보강단수에 따라 감소되는 경향을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. P. A. Pfeiffer, and J. M. Kennedy, "Free Drop Impact Analysis of Shipping Cask," Nuclear Engineering and Design, Vol. 114, No. 1, pp.33~52, 1989
2. 이영신, 김용재, "낙하충격하중을 받는 방사성 물질 수송용기의 동적거동에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제11호, pp. 2805~2826, 1994
3. 강희영, "KSC-4 수송용기 안전성분석 보고서," 한국에너지연구소, KAERI/TR-137/89, 1989
4. F. C. Bresk, "Electronic Product Reliability Testing a Review of Present Methods," ASME paper, No.89-WA/EEP-25, 1989
5. R.Newer, "The Damage Boundary Revisited," ASME paper, No.89-WA/EEP-24, 1989
6. H. Ho, "A Finite Element Analysis of the Impact-Contact Problem of a Portable Telephone Using I-DEAS and ADINA," Computers & Structures, Vol. 56, No. 2/3, pp.397~409, 1995
7. 이영신, 김동진, 강근희, 오종수, "충격자의 형상 및 재질 변화에 따른 펄스형성에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제22권, 제1호, pp.52~63, 1998
8. 정완진, 부성운, 진삼표, 김동철, "전자제품의 충격해석," 대한기계학회 고체 및 구조역학 부분 학술대회 논문집, pp.3~12, 1995
9. L. Gaul, "Calculated and Measured Dynamics of Elastomer Support Mounts," The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol. 6, No. 1, pp.45~54, 1991
10. A. Sfaoui, "On the Viscoelasticity of the Polyurethane Foam," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 97, No. 2, pp. 1046~1052, 1995
11. K. T. Danielson, A. K. Noor, and J.S.Green, "Computational Strategies for Tire Modeling and Analysis," Computers & Structures, Vol. 61, No. 4, pp.673~693, 1996
12. A. P. Christoforou, and S. R. Swanson, "Analysis of Simply-Supported Orthotropic Cylindrical Shells Subject to Lateral Impact Loads," Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 57, No. 5, pp. 376~382, 1990
13. A.P.Christoforou, and S.R.Swanson, "Analysis of Impact Response in Composite Plates", International Journal of Solids Structures, Vol. 27, No. 2, pp.161~170, 1991
14. 이영신, 강근희, 박웅, "혼합적충된 복합재료 평판의 저속충격응답," 대한기계학회논문집, 제15권, 제3호, pp.713~722, 1991
15. K.Chandrashekhara, and T.Schroeder, "Non-linear Impact Analysis of Laminated Cylindrical and Doubly Curved Shells," Journal of Composite Materials, Vol. 29, No. 16, pp.2160~2179, 1995
16. P. A. Lagace and E. Wolf, "Impact Damage Resistance of Several Laminated Material Systems," AIAA Journal, Vol. 33, No. 6, pp.1106~1113, 1995
17. A. P. Christoforou and A. S. Tigit, "Normalized Impact Response and Damage in a Thin Composite Laminate Supported by a Rigid Substrate," Journal of Composite Materials, Vol. 28, No. 16, pp.1553~1573, 1994
18. Hibbit, Karlsson and Sorensen ABAQUS Theory Manual, Version 5.4, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1994
19. Hibbit, Karlsson and Sorensen ABAQUS/Standard Theory Manual, Version 5.4, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1994

(접수일자 : 1998. 1. 21)