

# 낙하충격해석을 통한 대형 전자제품의 완충포장재 최적설계

## Optimal Design for Cushioning Package of a Heavy Electronic Product Using Mechanical Drop Analysis

금대현<sup>†</sup> · 김원진<sup>\*</sup> · 김성대<sup>\*\*</sup> · 박상후<sup>\*\*</sup>

Dae-Hyun Kum, Won-Jin Kim, Sung-Dae Kim and Sang Hu Park

(2003년 10월 6일 접수 : 2003년 12월 20일 심사완료)

**Key Words** : Mechanical Drop Analysis(낙하충격해석), Heavy Electronic Products(대형 전자제품), Cushioning Package(완충포장), Finite Element Method(유한요소법)

### ABSTRACT

Generally, heavy electronic products undergo many different types of shocks in transportation from a manufacturer to customers. Cushioning package is used to protect electronic products from severe shock environments. Since the mass distribution of heavy electronic products is usually unbalanced and complex, it is very difficult to design a cushioning package with having high performance by considering only the equivalent stiffness of that. Therefore, when designing the cushioning package for a heavy electronic product, it is necessary to optimize its shape in order to maximize the cushioning performance. In this study, it is focused on designing an optimal shape of cushioning package for a large refrigerator and an efficient design method is suggested by using a dynamic finite element analysis. As the results of this study, the optimal shape of cushioning package, which has high cushioning performance and minimized volume, was obtained through the mechanical drop analysis and a optimization process. Through free drop tests of refrigerators, it was identified that the cushioning performance of the cushioning package was improved up by 25 % and the its own volume was reduced by 22 %.

### 1. 서론

생활수준 향상 및 기술의 발전으로 전자제품에 대한 소비자의 요구는 점차 증대하고 있으며, 외부 충격으로부터 제품을 보호하기 위하여 낙하, 진동에 관한 환경시험 조건들을 보다 엄격하게 강화하고 있다. 또한 최근 들어 포장재에 대한 원가 절감 측면뿐만

아니라 친환경 문제를 감안하여 포장 완충재로 쓰이고 있는 합성수지에 대한 사용량과 재활용에 대한 규제가 강화되고 있는 실정이다. 냉장고, TV, 전자렌지 등과 같은 대형 전자제품은 공장에서 생산되어 소비자에게 전달되기까지 다양한 운송과정 동안 발생하는 충격에너지가 제품에 손상을 끼칠 수 있다. 따라서 제조사들은 제품의 설계단계부터 충격에 강한 구조로 만들고, 충격에너지를 잘 흡수할 수 있도록 완충설계를 함으로써 제품을 보호하고 완충재의 사용량을 줄이고 있다.

낙하충격에 따른 충격해석은 1945년 미국 벨연구소의 Mindlin(1)에 의해 다양한 완충재의 특성에 따른 충격해석이 수행되었다. 충격을 고려한 제품개발

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, LG전자

E-mail : kumdh@lge.com

Tel : (055) 260-3345, Fax : (055) 282-5582

<sup>\*</sup> 정희원, 계명대학교 기계·자동차공학부

<sup>\*\*</sup> 한국과학기술원 대학원 기계공학과

과정 및 측정 방법은 1968년에 제안되어 1976년 ASTM(american society for testing and materials)의 표준으로 채택되었으며, 현재까지도 이 기준에 따라서 제품을 개발하고 있다. 노트북, TV, LCD 모니터, 오디오, 전자렌지, 핸드폰 등의 전자제품의 낙하충격에 따른 동적 거동 및 포장설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(2-7)</sup>

대형 전자제품의 경우에 있어서는 질량 분포가 상대적으로 넓고 복잡하므로 완충재의 전체 등가강성을 고려한 설계만으로는 효과적인 완충성능을 도출하기 어렵고 완충재의 형상에 대한 최적설계가 필요하다. 기존의 방법에서는 직접 낙하충격 시험을 통해 완충포장의 성능을 평가하고 개선하여 왔으나, 제품의 개발기간이 짧아지고 보다 높은 완충 성능을 요구하는 조건에서는 해석을 통한 개발 프로세스 정립이 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 대형 전자제품인 냉장고를 중심으로 유통과정에서 발생할 수 있는 낙하 충격에 의한 충격에너지를 최대한 흡수하여 제품의 손상 및 변형을 방지할 수 있으며, 완충재의 사용량도 저감할 수 있도록 완충포장재의 구조 최적화에 관한 연구를 진행하였다. 최적설계 조건을 찾기 위하여 다구찌 방법을 적용하였다.

## 2. 낙하충격 해석

### 2.1 냉장고 해석모델

본 연구를 위해 사용된 냉장고의 외부 치수(mm)는 900×2,000×700, 무게는 약 100 kg이며, 완충 포장재는 EPS(expanded polystyrene)를 사용하였다. 냉장고는 유통환경 중에 발생할 수 있는 충격 중에서 수직낙하 충격에 의한 냉장고문의 처짐변형이 가장 중요한 문제이며 냉동실문 보다 무거운 냉장실문이 더 취약하다. 따라서 본 연구에서 중점적으로 분석하는 부분도 냉장고문의 변형에 관한 부분이다. 이러한 변형과 관련된 부분은 냉장고문을 연결해 주는 힌지(hinge)부분과 냉장고 본체의 전체 강성이다. 따라서 힌지와 냉장고 본체의 강성을 유지하는 부분은 상세히 모델링하였으며, 나머지 부분에 대해서는 부품의 단순화를 통하여 요소의 수와 해석시간을 줄였다.

냉장고는 외부 플레이트들을 먼저 조립한 후 내부에 폴리우레탄을 발포하게 된다. 냉장고의 가장 큰 골격을 이루고 강성을 유지하는 부분은 외부 플레

트들과 열전달을 방지하기 위한 내부 폴리우레탄 폼(polyurethane foam)의 형상이다. 해석모델은 내부 폴리우레탄 폼에 대해서 먼저 3차원 요소를 생성한 후 폴리우레탄 폼과 부착되는 외부 플레이트들을 2차원 쉘(shell)요소로 추출하는 방법을 통하여 냉장고 전체 강성을 유지하는 기본 골격에 대한 모델링을 수립하였다. 단면형상이 복잡한 외부 플레이트 부분은 등가 두께를 구하는 방법으로 단순화하였다. 그리고 힘을 집중적으로 받으며 냉장고문의 처짐에 큰 영향이 있는 상단, 중간, 하단의 3개의 힌지와 바닥의 레그(leg) 및 이 부분과 결합되는 부분에 대해서는 상세한 요소를 생성하였다. 냉장고의 전체 강성에 영향을 미치지 않는 냉장고 내부 부장품, 전자 부품 등의 형상은 개략적으로 모델링하고 질량은 실제 값을 정확하게 고려하였다. Fig. 1은 냉장고 해석모델의 상세도를 나타낸 것이다.

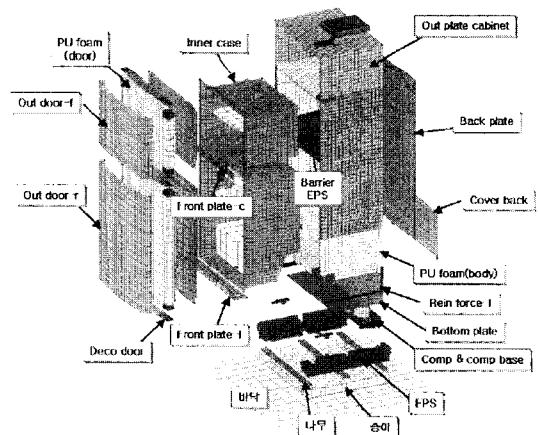


Fig. 1 Analysis model of refrigerator

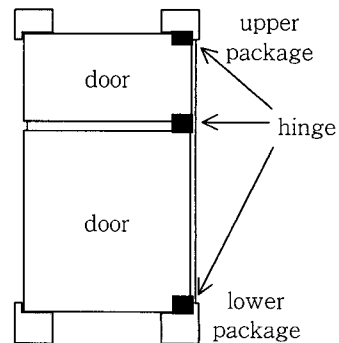


Fig. 2 Cushioning package for refrigerator

냉장고의 해석 모델은 약 73,000개의 절점과, 3차원 요소 약 32,000개, 2차원 요소 약 26,000개로 구성되어 있다. 해석에 사용된 내부 폴리우레탄 폼의 3차원 요소의 거동은 탄-소성요소(elastic-plastic for solid elements)를 사용하였으며, 완충재의 3차원 요소의 거동은 높은 압축성을 가진 탄성 폼(elastic foam with hysteresis for solid element)을 사용하였고, 외부 플레이트와 힌지의 2차원 요소 거동은 탄-소성을 가진 얇은 쉘 요소(elastic-plastic for thin shell elements)를 사용하였다.<sup>(8)</sup> 재료의 물성치는 시편에 대한 실험을 통하여 구하였으며, 특히 비선형성이 매우 큰 완충포장재의 경우, 인장과 압축에 대한 실험값을 각각 구하였으며, 높은 압축성을 잘 표현할 수 있는 요소를 사용 하였다.

냉장고의 완충포장은 Fig. 2에 나타난 완충포장의 개략도에서 알 수 있듯이 상단과 하단 양쪽에 완충재를 사용하고 있으며, 본 연구에서는 하단 완충재에 대한 구조 최적화를 수행하였다.

해석 코드는 접촉이 많이 발생하고 복잡한 모델에 대해서 안정적인 해석이 가능하며, 충돌과 같이 짧은 시간에 일어나는 동적거동 해석에 적합한 외연적(explicit) 방법<sup>(9)</sup>을 사용하는 충격 전문 상용해석 코드인 Pam-crash를 사용하였다.

유통과정 중에 발생할 수 있는 냉장고의 수직낙하 높이에 대한 규격은 18 cm(GE규격)이며, 지면과 충돌시의 초기속도를 이용하여 해석하였다. 바닥을 강체 평면으로 가정하여 충돌시켰고 35 ms 동안의 충격 거동을 해석하였다. 제품에 손상의 원인이 되는 요소에는 가속도와 속도 변화가 있으며, 충격 지속시간이 극히 짧은 경우에는 속도 변화량의 크기로 제품의 내충격성이 결정되지만 충격 지속시간이 길 경우에는 충격파형의 최대 가속도값에 영향을 받는다. 따라서 충격지속시간이 긴 완충 포장된 제품의 내충격성은 충격시의 최대 가속도 값에 의하여 결정된다.

2.2 해석결과

기존의 완충재에 대한 충격해석을 통하여 현상 분석을 하였다. Fig. 3은 냉장실문의 충격가속도를 나타낸 것이며, 최대 충격가속도는 약 22.5 G이다. 해석결과에서의 여러 부품사이의 충돌에 의해 발생하는 가속도의 고주파 성분은 주요 가속도 평가를 위해 여러 부품 사이의 고주파성분은 필터링으로 제거하였다.

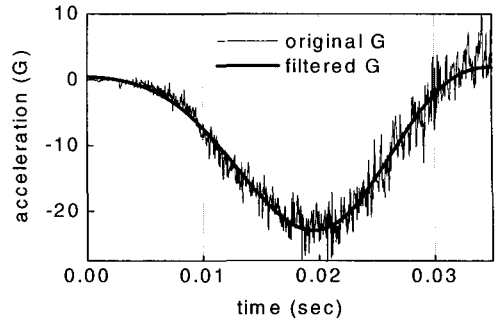


Fig. 3 Shock acceleration of the door of refrigerator

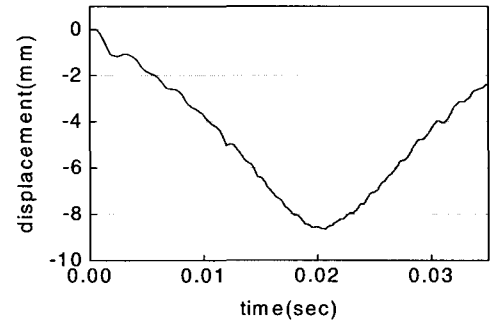


Fig. 4 Deformation of the door of refrigerator

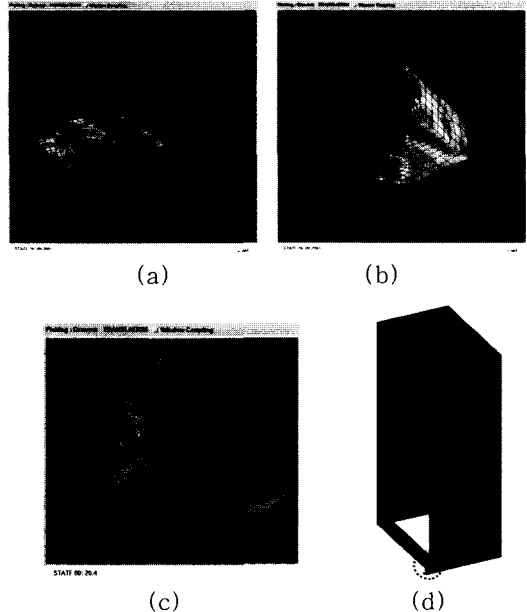


Fig. 5 Stress distributions of (a) Upper hinge, (b) Center hinge, (c) Lower hinge, (d)Cabinet

Fig. 4은 수직낙하 충격 시의 냉장실문의 처짐 변형량을 나타낸 그래프이며 최대 변위는 약 8.7 mm이다. 변형량의 측정위치는 Fig. 2에서 냉장실문 좌측 하단부에서의 상대적인 변위값이다.

냉장고문 처짐의 원인을 규명하기 위하여 힌지와 외부 플레이트의 응력과 변형을 분석하였다. 응력 분포는 Fig. 5에 나타나 있다. 상단, 중간, 하단 힌지의 최대 응력은 각각 245 MPa, 241 MPa, 389 MPa이며, 무거운 냉장실문을 지탱하고 있는 하단 힌지에서의 응력이 크게 발생하였다. 외부 플레이트의 응력은 전체적으로 힌지에서의 응력과 비교했을 때 작은 값을 나타내었으며, 부분적으로 하단 힌지 부근에서 크게 발생하였다. Fig. 6은 힌지와 외부 플레이트의 변형 현상을 분석한 것이며, 최대 변형시의 30배 확대된 형상이다. 그림에서 알 수 있듯이 냉장고문의 처짐은 냉장고 본체 및 힌지의 변형으로 발생됨을 알 수 있다.

### 2.3 해석모델의 신뢰성 검증

냉장고의 수직낙하 충격해석 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 완충 포장된 냉장고의 수직낙하 충격실험을 수행하였으며, 냉장실문의 충격가속도와 최대 처짐량을 측정하였다. Fig. 7은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 가속도계를 이용하여 냉장실문의 최대 가속도를 측정하였으며, 접이식 소형 안테나를 이용하여 고안한 센서로 냉장실문의 처짐량을 측정하였다. 실험조건은 해석과 동일하게 하였으며, 2개의 시료에 대하여 각각 3번씩 실험하여 평균을 구하였다.

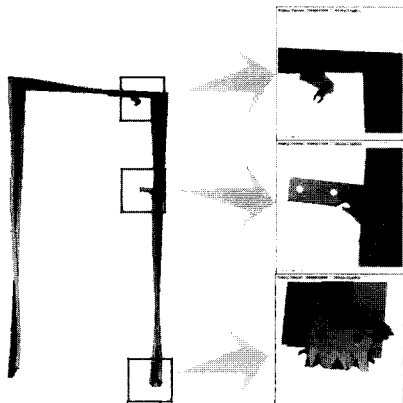


Fig. 6 Magnified (X30) deformation shape of hinges and cabinet

냉장고의 수직낙하 충격실험 결과에서 최대 충격가속도는 평균 24.5 G, 최대 처짐량은 평균 9.2 mm로 나타났다. 해석과 실험에서의 최대 충격가속도와 냉장실문의 최대 처짐량을 비교해 보면, 최대 충격가속도의 오차는 8.2 %, 냉장실 문의 최대 처짐량은 5.7 %로 근사한 값을 가진다.

Fig. 8은 실험에서 측정된 냉장실문의 가속도와 해석에서 구한 가속도를 비교하였으며, 가속도의 최대

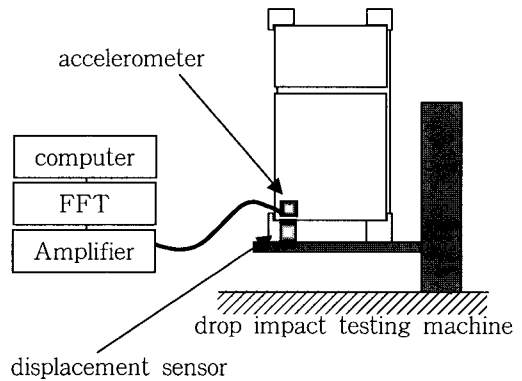


Fig. 7 Experiment set up

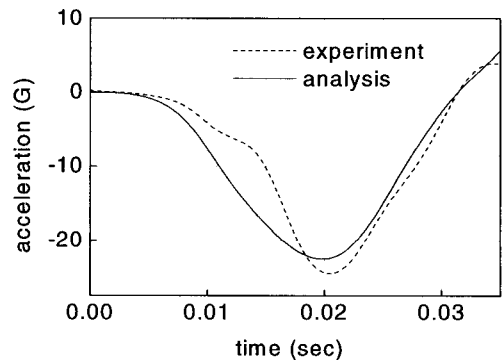


Fig. 8 Comparison of the door acceleration response obtained from FE analysis and experiment

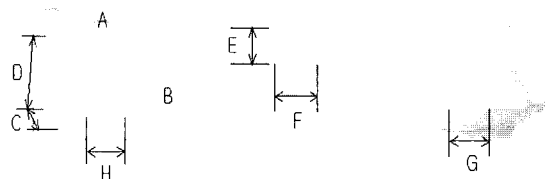


Fig. 9 Design parameters of the cushioning package

값과 충격 지속시간이 거의 유사함을 알 수 있다. 이상과 같이 해석과 실험결과의 비교를 통하여 해석모델의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

### 3. 충격해석을 이용한 완충재의 최적설계

#### 3.1 설계변수의 선정

앞 절에서 검증된 해석모델에 대한 수직낙하 충격 해석을 통하여 완충능력이 우수하고, 완충재의 양을 저감할 수 있는 최적의 형상을 갖는 완충재를 설계하였으며, 이 과정에서 안정적으로 설계변수를 최적화하기 위하여 다구찌 기법(Taguchi method)<sup>(10)</sup>을 적용하였다. 먼저 설계변수의 변화에 따른 효과를 분석하기 위하여 완충재의 성능을 평가하기 위한 목적함수를 선정하였다. 완충재의 파손이 발생되지 않는 범위 내에서 최소의 부피를 가지고 냉장고가 받는 충격

에너지를 효과적으로 흡수할 수 있는 완충재를 설계하기 위한 목적함수는 다음의 세 가지로 선정하였다. 첫 번째는 냉장고의 충격가속도 값( $G_{max}$ )이며, 두 번째는 완충재의 앞쪽에서의 최대 응력( $\sigma_1$ ), 마지막으로 완충재의 뒤쪽에서의 최대 응력( $\sigma_2$ )으로 선정하였다. 다음으로 설계변수를 선정하고 변화량을 결정해야 한다. 설계변수는 다음의 8가지로 선정하였으며, Fig. 9에 나타나 있다. A와 B는 충격시 냉장고와 직접 접촉하지 않는 부분이며, 유무에 따른 완충 특성을 평가하였다. C와 D는 완충재의 전체 높이와 폭이다. 높이가 높고 폭이 좁을수록 충격흡수성이 좋으며, 최적값을 찾아서 부피를 줄이고자 하였다. E와 F는 냉장고의 중간을 지지하는 부분이다. 이 부분의 면적을 줄여서 충격 흡수성을 향상시키고 완충재의 부피를 줄이고자 하였다. G와 H는 냉장고와 직접 접촉하지 않으며, 흡의 넓이에 따라서 완충재의 파손 가능성이 있는 부분이다. 각 설계변수에 대한 수준은 A와 B는 유무에 따른 특성을 파악하기 위하여 2수준을 선택하였으며, 나머지는 3수준을 적용하였다. Table 1에 설계변수별 수준을 나타내었으며, 1수준이 현재 수준이다. 각 설계변수에 대한 수준은 완충재의 양을 줄이는 방향으로 치수를 변경하였다. 직교배열표를 선택하여 8가지 설계변수에 대한 해석을 실시하고 각 설계변수의 효과를 분석하였으며, 설계변수 B는 2, 3수준을 같은 값으로 정하는 의수준법을 적용하였다. 다구찌 기법의 L18 직교배열표는 Table 2에 나타나 있으며 표 안의 값들은 각 변수의 수준을 나타낸다. L18 직교배열표는 설계변수를 많이 배치할 수 있으며, 많은 설계변수에 비해 해석 경우가 많지 않고 재현성도 높은 장점을 가진다.

Table 1 Levels of Design parameters

level	A	B	C	D	E	F	G	H
1	유	유	120	111	56.5	60	60	60.5
2	무	무	105	101	50	75	75	75.5
3	-	무	90	91	43.5	90	90	90.5

Table 2 L18 orthogonal array

No.	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

#### 3.2 완충재의 최적설계

Table 2에 나타난 L18 직교배열표에 따라 완충재를 모델링하고 냉장고에 적용하여 각각에 대하여 해석을 수행하였다. 앞서 선정된 3가지 목적함수인 냉장고의 충격가속도( $G_{max}$ ), 완충재의 앞쪽에서의 최대 응력( $\sigma_1$ ), 완충재의 뒤쪽에서의 최대 응력( $\sigma_2$ )에 대한 해석결과는 Table 3에 정리하였다. Table 3에 나타난 해석결과를 이용하여 각 설계변수의 수준별로 3가지 목적함수의 평균값을 계산하여 설계변수에 대한 효과를 분석하였다. 평균을 계산하여 Fig. 10에 그래프로 나타내었다.

결과에서 보면 기울기가 급할수록 기여도가 큰 설계변수이며, 현재 조건과 비교해서 그 차이로 개선정도를 평가할 수 있다. 요인효과 분석을 통하여 냉장고가 받는 충격가속도의 값이 최소가 되도록 우선적으로 선정하였다. 다음으로 완충재의 파손방지를 위하여 완충재의 응력을 동시에 고려하고 완충재의 부피가 최소가 되도록 최적 형상을 결정하였다. 완충재 설계변수들의 최적 형상에 대한 결과는 Table 4에 나타나 있으며, Fig. 11은 기존 형상과 최적 형상 완충재에 대한 형상을 비교한 그림이다.

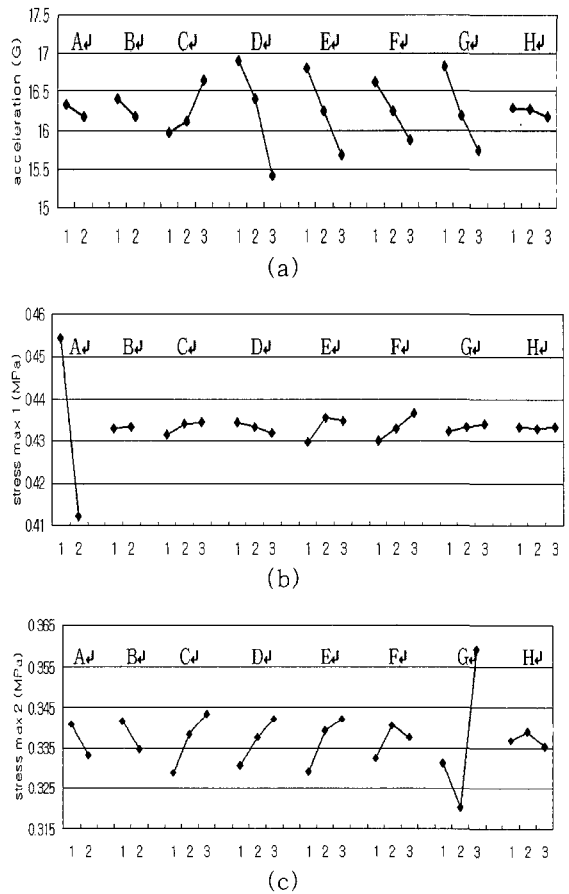
### 3.3 최적 형상의 완충재에 대한 성능 평가

도출된 최적 형상을 갖는 완충재의 성능을 수직낙하 충격해석 및 실험을 통하여 평가하였다. 낙하 충격해석과 실험의 결과는 각각 Table 5와 6에 정리하였다. 최적 형상의 완충재를 적용한 경우에 있어서 해석에서는 냉장고의 충격가속도는 25 % 정도 개선되고 냉장실문의 처짐량도 감소되었으며, 완충재의 성능뿐만 아니라 부피도 22 % 정도 감소시킬 수 있었다.

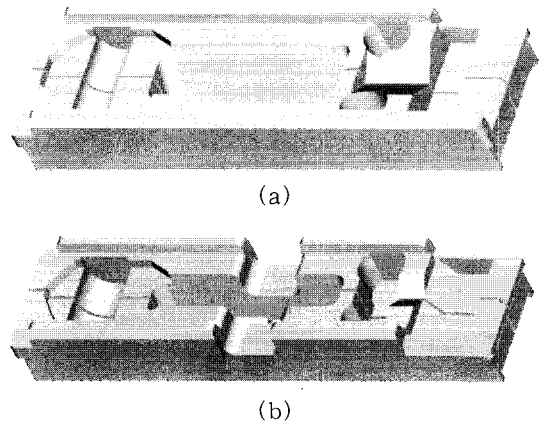
최적 형상과 기존 완충재에 대한 비교 평가 실험을 하였다. 냉장고 샘플의 산포에 의한 영향을 배제하기

**Table 3** Analysis results of the L18 orthogonal array

No.	$G_{max}(G)$	$\sigma_1(MPa)$	$\sigma_2(MPa)$
1	18.42	0.4458	0.3167
2	16.48	0.4568	0.3425
3	14.55	0.4597	0.3882
4	16.02	0.4573	0.3448
5	15.94	0.4593	0.3354
6	16.70	0.4480	0.3178
7	16.20	0.4524	0.3080
8	15.23	0.4535	0.3673
9	17.37	0.4563	0.3462
10	14.65	0.4104	0.3234
11	16.60	0.4146	0.3462
12	17.79	0.4116	0.3324
13	15.26	0.4094	0.3504
14	16.14	0.4066	0.3275
15	16.73	0.4202	0.3189
16	15.25	0.4140	0.3298
17	16.32	0.4129	0.3110
18	16.79	0.4107	0.3580



**Fig. 10** Plot of parameter effects on (a) Acceleration of refrigerator, (b) Max. stress of package front, (c) Max. stress of package rear



**Fig. 11** Comparison of the original and optimal shape of cushioning package

위하여 동일한 냉장고 시료에 기존의 완충재와 최적형상의 완충재를 차례로 적용하여 실험하였다. 실험결과 최적형상의 완충재가 냉장실문의 처짐량, 냉장고문의 영구변형, 충격가속도 등 모든 특성을 상당히 향상시킴을 확인할 수 있었다. Fig. 12는 기존 완충재

와 최적형상 완충재를 적용한 경우에 대하여 냉장고가 받는 충격가속도를 비교한 것으로, 최적형상의 완충재를 적용했을 경우에 충격가속도가 줄어들을 알 수 있다.

그리고 최종적으로 도출된 최적형상의 완충재를 적용하여 규격시험을 실시한 결과, 냉장고의 영구변형 및 완충재의 파손이 발생하지 않았다.

**Table 4** Design parameters for the optimum shape

	A	B	C	D	E	F	G	H
Original (mm)	유	유	120	111	56.5	60	60	60.5
Optimum (mm)	무	무	120	91	43.5	90	75	90.5

**Table 5** Estimation of the optimal design through FE analysis

	Original	Optimal design	Improvement (%)
Door deformation (mm)	8.65	7.91	8.6
$G_{max}$ (G)	18.42	13.87	24.7
$\sigma_1$ (MPa)	0.4458	0.4188	6.1
$\sigma_2$ (MPa)	0.3167	0.3291	-3.9

**Table 6** Estimation of the optimal design through experiment

	Original	Optimal design	Improvement (%)
Door deformation (mm)	9.2	7.0	23.9
$G_{max}$ (G)	18.55	14.67	20.9

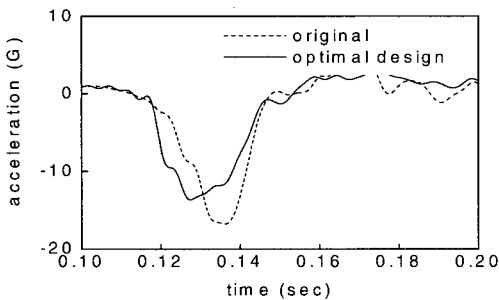
#### 4. 결론

질량이 크고 외부 충격에 민감한 대형 전자제품은 유통과정 중에 발생할 수 있는 충격에 의해 쉽게 손상이 발생할 수 있다. 이러한 충격으로부터 제품을 보호하기 위하여 충격 흡수성이 뛰어난 완충재를 설계할 필요가 있다. 본 연구에서는 대형 전자제품의 냉장고를 대상으로 충격해석과 다구찌 기법을 적용하여 완충 포장재의 형상을 최적화하는 방법을 제시하였다. 그리고 제안된 방법으로 도출된 최적형상의 완충재를 실제 제품에 적용하여 수직낙하를 포함한 규격시험을 통하여 완충성능을 평가하고 신뢰성을 검토하였다. 본 연구에서 제안한 최적설계 방법을 통하여 충격 흡수성이 뛰어나고 동시에 작은 부피를 갖는 완충재를 도출할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 포장재 설계방법을 대형 냉장고에 적용해 본 결과, 완충 포장재를 22 % 정도 감소하면서 낙하충격시 냉장고가 받는 최대 충격가속도를 25 % 정도 개선할 수 있었다. 따라서, 이러한 결과를 바탕으로 냉장고뿐만 아니라 다른 대형 전자제품에도 제안된 방법을 적용하여 충격 흡수성이 뛰어나고 작은 부피를 갖는 완충재를 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

- (1) Mindlin, R. D., 1945, "Dynamics of Package Cushioning," Bell Sys. Tech. Journal, Vol. 24, pp. 353~461.
- (2) 박용석 등, 1994, "충격해석을 통한 결과의 예측", 한국소음진동공학회는문집, 제 4 권, 제 3 호, pp. 345~352.
- (3) Kim, J.-K. and Kang, T.-g., 1998, "Studies in Drop Analysis of Mobile Communicators,"



**Fig. 12** Comparison of the original and optimal shape of acceleration

HANFAM 1998 User Conference in Korea, pp. 110 ~117.

(4) 조원준 등, 2000, "Drop-impact Simulation of Micro Wave Oven," HANFAM 2000 user conference in Korea, pp. 61 ~67.

(5) 윤한영 외, 2000, "컴퓨터의 충격해석 및 실험적 검증," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 737 ~741.

(6) Low K. H., 2003, "Drop-impact Cushioning Effect of Electronics Products Formed by Plates," Advances in Engineering Software, Vol. 34, pp. 31

~50.

(7) 김한바라, 박상후, 김원진, 2000, "유한요소법을 이용한 모니터의 완충 포장재 설계에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 17, No. 12, pp.88~93.

(8) Pam-Crash User manual, 2002, ESI software.

(9) Petyt Maurice, 1990, Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Press.

(10) Taguchi Genichi, 1992, Taguchi Methods, Michigan, ASI Press.