

# 유한요소법을 이용한 모니터의 완충 포장재 설계에 관한 연구

김한바라\*, 박상후\*, 김원진\*\*

## A Study on the Cushion Package Design of a Monitor using Finite Element Method

H.B.L Kim\*, S.H. Park\*, and W.J. Kim\*\*

### ABSTRACT

The reduction of the cushion material such as Expanded Polystyrene (EPS) is one of the urgent tasks of the package design process in home electrical appliances considering environmental protection. EPS reduction often causes the structural damage of products, which must be protected in the environment of transportation. CAE simulation can help the efficient package design with low material cost. The mechanical drop simulation of packaged product was performed with commercial FEM code and Taguchi approach was used partially to determine the dominant design parameters. As results of this study, about 20% reduction of EPS was accomplished in the monitor package design.

**Key Words** : Expanded Polystyrene, (EPS 완충 포장재), Finite Element Method(유한 요소법), Free Drop Test(자유 낙하시험), Dynamic Analysis(동적해석), Taguchi Method(다꾸찌 기법)

### 1. 서론

고객의 신뢰를 받는 제품은 우수한 품질 뿐만 아니라 고객의 사용환경에서 발생하는 예기치 않은 문제로부터도 일정한 수준의 품질을 유지해야 한다. 그러한 문제 중 하나로써 낙하 충격은 유통 중이나 취급 부주의에 의해 자주 발생하는 것으로 제품의 파손과 같은 치명적인 품질저하를 야기한다. 이와 같이 환경요인으로부터 제품을 보호하기 위해 제품에 포장을 하게 되는데, 포장설계는 제품 자체의 내충격 강도설계와 더불어 설계의 중요한 분야이다. 일반적으로 채택하고 있는 포장설계 방법은 제품의 특성이나 유통 및 사용환경에 따라

차이가 있지만, 주로 실험에 의한 시행 착오법에 의존하고 있다. 또한 제품 개발에서부터 양산의 단계까지 반복되는 내충격 강도시험과 금형수정은 많은 시간과 비용을 초래한다.

따라서 각 기업에서는 제품의 내충격 강도설계 기술의 확보와 설계단계에서 제품의 기계적 강도를 사전에 평가하고 포장설계와의 유기적 관계를 갖는 개발 프로세스의 혁신을 위한 노력을 기울이고 있다. 최근 컴퓨터의 급속한 성능향상과 해석기술의 발달에 따라 유한 요소법(finite element method)을 이용한 설계방법이 활발하게 확산되고 있으며, 디스플레이 제품에서 이러한 해석적 방법을 설계에 적용함으로써 납기단축 및 재료절감 등

\* LG 생산기술원 디자인엔지니어링센터

\*\* 계명대학교 자동차공학부

의 효과를 이룬 사례들이 발표되고 있다<sup>[1-2]</sup>.

본 연구에서는 PC 용 15" 모니터의 포장 제품을 대상으로 자유낙하 충격시험을 실시하여 파손을 일으키는 낙하조건과 파손위치 등을 찾아내고 시험에서와 동일한 조건으로 완충 포장재(Expanded Polystyrene, EPS)를 포함한 제품의 낙하 충격 해석을 수행하였다. 또한 다꾸찌 기법(Taguchi method)을 이용하여 주요 설계변수에 대한 민감도 분석을 통하여 완충 포장재 형상을 최적화하였다.

## 2. 내충격 특성 분석

### 2.1 파손한계 시험

자유 낙하시험(free drop test)은 일정 높이에서 포장된 상태의 제품을 낙하시켜서 제품의 안전성 평가 및 낙하 충격시 포장재의 파손유무를 고찰하기 위한 실험이다. 본 연구에서는 한국공업규격의 낙하시험규격<sup>[4, 5]</sup>에 따라 실험을 수행하였다. 파손이 발생하는 조건을 찾기 위하여 규격 낙하 높이에서부터 그 높이를 조금씩 증가시켜서 파손이 발생될 때까지 시험을 반복 수행하였으며, 완충 포장재는 낙하 높이를 변화시킬 때마다 신뢰성을 위하여 새것으로 교체하여 실험하였다. Fig.1은 실험에 사용된 자유 낙하시험 장치를 나타낸다.



Fig.1 A free drop tester

일반적으로 낙하 방향은 제품의 특성을 고려하여 규정되며, 여기서는 모니터 제품의 특성을 고려하여 Fig.2에 정의한 것과 같이 6면(밀면→ 상면→ 우측면→ 좌측면→ 전면→ 후면 순서대로)에 대하여 낙하시험을 수행하고, 각 낙하방향에 대하여

제품과 포장에 대한 이상유무를 판정하였다. Table 1에는 시험 결과를 정리하였다.

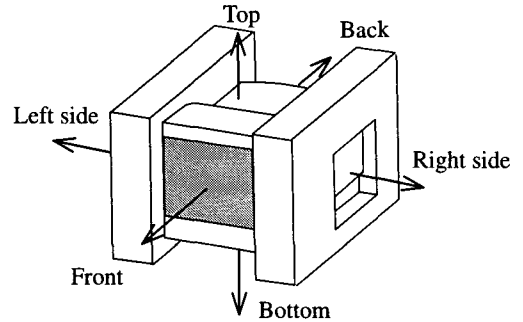


Fig. 2 Definition of directions for free drop test

일반적으로 낙하 방향은 제품의 특성을 고려하여 규정되며, 여기서는 모니터 제품의 특성을 고려하여 Fig.2에 정의한 것과 같이 6면(밀면→ 상면→ 우측면→ 좌측면→ 전면→ 후면 순서대로)에 대하여 낙하시험을 수행하고, 각 낙하방향에 대하여 제품과 포장에 대한 이상유무를 판정하였다. Table 1에는 시험 결과를 정리하였다.

Table 1 Results of free drop test

Condition Sample	Height of Drop h[cm]	Fracture of PCB	Fault of CRT
#1	1st	NO	NO
	2nd	NO	NO
	3rd	NO	NO
	4th	Fracture near FBT (Right side Drop)	Fault
#2	1st	Fracture near Heatsink/GBT (Right side Drop)	Fault
#3	1st	NO	Fault
#4	1st	Fracture near FBT (Right Side Drop)	Fault

본 연구에 적용된 모니터 모델의 경우, 자유 낙하시험에서 높이가 110 cm일 때, 기판(PCB)에서 상대적으로 큰 하중을 받는 고압발생장치(FBT) 부

근에서 미소한 균열이 발생하였고(Fig.3 참조), 음극선관(CRT)에서는 새도우 마스크의 변형에 의한 색 얼룩 현상(miss landing)이 나타났다. 이러한 파손은 측면 낙하시 주로 나타났으며, 이것은 측면 낙하시 기관에 납땜되어 있는 무거운 중량의 부품이 관성모멘트를 발생시켜 기관에 급격한 굽힘변형을 주기 때문이다. 이러한 부품으로써는 FBT와 다른 부품에 비하여 비교적 형상이 큰 히트 싱크(heat sink)가 있다<sup>5)</sup>. 그리고 완충 포장재의 파손 역시 측면 낙하시 정도가 심하게 나타났다. 이것은 완충 포장재의 두께가 상하면에 비하여 측면이 얇기 때문이다. Fig.4 에는 측면낙하에서 파손된 완충 포장재를 나타낸 것이다.

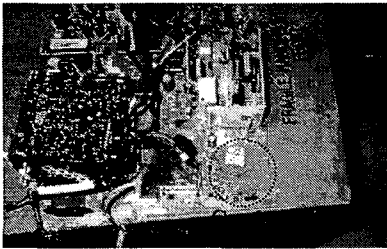


Fig. 3 Crack happened under the FBT of PCB

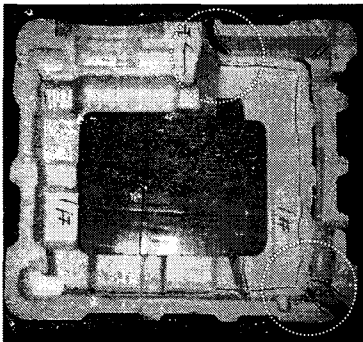


Fig. 4 Fracture of EPS package

## 2.2 재료 물성 시험

해석적 접근 방법을 수행하기 위하여 재료 물성에 대한 정량적인 값이 필요하다. 특히, 완충 포장재와 기관에 대한 물성은 해석 결과의 신뢰성에 많은 영향을 주므로 정확한 특성을 표현할 수 있어야 한다. 따라서 두 재료의 물성치를 충격하중조건에서 실험적으로 각각 규명하였다.

먼저, 완충 포장재인 EPS의 경우에는 실제 모니터 포장용 완충재로 사용되는 포장재에서 시편을 채취하여 동적 압축시험(dynamic compression test)을 시행하였다. 이 시험에서는 시험편의 압축 방향 변위가 초기 두께에 비하여 30%정도(strain 70%)가 될 때까지 중추의 질량과 낙하높이를 조절하여 구하였다. 실험 장비와 시험편 규격은 다음과 같다.

- (1) 시험장비 : YOSHIDA SEIKI CST-320SB
- (2) 시험편(EPS) :
  - 재료밀도 :  $1.8 \times 10^{-8} [\text{kg}/\text{mm}^3]$
  - 시편크기 :  $100 \times 100 \times 40 [\text{mm}]$

시험결과 초기의 5%정도의 변형률까지는 선형적인 거동을 하며, 약 50%의 변형률까지 큰 하중의 증가 없이 압축되었다. 50%이후의 변형률부터는 저항응력의 크기가 급격히 증가하여 70% 변형률에서는 약 0.44 MPa의 응력이 작용하였다.

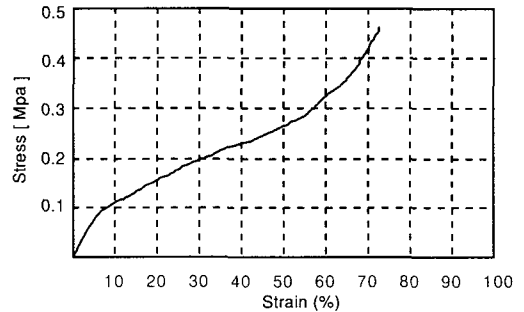


Fig. 5 Stress-strain curve of EPS under dynamic load

소형 모니터에 사용되는 기관의 재질은 일반적으로 가격이 저렴한 페놀수지를 사용한다. 따라서 복합재료를 사용한 에폭시(epoxy)기관에 비하여 취성을 가지며, 특히 굽힘에 의해서 쉽게 파단되는 특성이 있다. 페놀수지 기관의 재료특성곡선을 얻기 위해 평면상에서 0°, 45°, 90° 방향으로 시편을 가공하여 3 점 굽힘시험(3 points bending test)을 하였다. 일반적으로 충격에 의한 기관의 변형 거동을 살펴보면, 하중이 많이 나가는 부품에 의한 굽힘변형이 지배적이기 때문에 인장시험보다 굽힘 변형에 의한 파단 강도와 탄성계수를 구하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 시험방법으로는 각 방향에 대해 2 개의 시편을 만들어서 시험하였으며, 재료의 두께는 1.6 mm로 하였다. 시험결과 재료의 이방성은 뚜렷하지 않았으며, 파단 강도

(fracture strength)는 약 168 MPa, 탄성계수는 132.9 GPa로 측정되었다. Table 2 에는 굽힘 시험 결과를 나타내었다.

Table 2 Results of 3 points bending test

Sample	Direction	Stress (MPa)	Elasticity Modulus (GPa)
#1	0°	177.1	144.6
#2	0°	174.1	129.7
#3	45°	165.6	124.5
#4	45°	173.1	132.8
#5	90°	158.6	129.4
#6	90°	160.7	136.5
Average Values		168.2	132.9

### 3. 낙하 충격 해석

#### 3.1 해석 모델

본 연구에서 충격 해석을 통하여 검토해야 될 설계 사항으로는 완충 포장재의 최적화, 기판 파손 그리고 영상불량을 방지하기 위해서 음극선관(CRT)의 충격 가속도를 최소화시키는 것이다. 그리고 이러한 설계 검토사항을 동시에 고려하기 위해서는 실제의 형상을 가능하면 정확히 묘사할 수 있는 모델링이 필요하다. 대상물의 형상을 최대한 고려하여 외형을 이루는 케이스(cabinet, back cover)와 기판을 포함한 대부분의 부품들은 쉘 요소(shell element)를 사용하였으며, 음극선관은 강체로 가정하였다. 대상 모델의 경우에 있어서 포장재가 가장 취약한 부분은 측면이며, Fig.6 은 좌측면 낙하충격 해석을 위한 해석모델의 예를 나타낸 것이다. 여기서 비교적 무게가 가벼워 해의 결과에 영향을 거의 주지않는 우측면의 포장재를 해석시간 단축을 위해서 생략하였다. 그리고 완충 포장재는 압축 변형을 잘 표현할 수 있는 8 절점(node)를 갖는 연속체 요소(brick element)로 모델링하였다<sup>6, 7</sup>. 해석조건은 제품의 실제 낙하높이로부터 바닥면에 부딪히는 순간의 속도를 구하여 전체 절점에 초기 속도로 부여하고, 바닥면을 강체로 가정하여 해석하였다. 해석 프로그램은 충격해석 전용 소프트웨어인 PAM-CRASH를 이용하였다.

먼저 실험과 해석 결과의 비교를 통하여 해석 모델의 신뢰성을 검토하였다. 2.1 절의 낙하충격 실험

에서 제품에 가장 취약한 낙하방향으로 나타난 측면 낙하에 대해서 실험과 해석 결과를 비교해보면, 측면 낙하시 음극선관 정점에 걸리는 가속도 값(G : gravity)의 최대치와 측면 낙하시 기판에서의 취약부 위치가 실험과 해석이 서로 잘 일치함을 알 수 있었다. 해석결과 음극선관 정점에서의 최대 가속도는 실험결과와 비교하여 오차범위 10%이내 수준으로 나타났다. Table 3 에는 이러한 음극선관 정점에서 구한 가속도 값을 나타내었다.

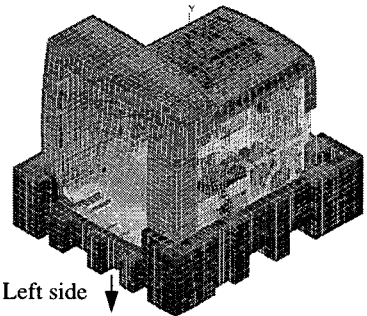


Fig. 6 A finite element model of monitor for drop simulation in the direction of left side.

Table 3. Comparison of maximum accelerations on center point of CRT from experiment and simulation

Acceleration Direction	Maximum Acceleration [G]	
	Experiment	Simulation
Left side	64.0	70.0
Right side	67.2	70.0

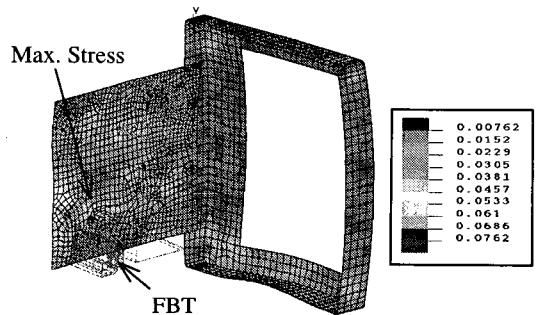


Fig. 7 Von Mises stress distribution on PCB (unit: GPa)

또한, 낙하 충격해석에서 기관에서의 최대 응력 발생 부분이 하중이 많이 나가는 FBT 부근에서 나타남으로써 해석과 실험의 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig.7 에는 해석에서 구해진 Von Misses 응력 분포를 나타낸 것이다.

**3.2 완충 포장재 형상 최적화**

다구찌 기법을 이용하여 완충 포장재의 설계 인자 민감도 분석을 하였다. 이 방법을 적용하기 위해 기존에 사용되고 있는 완충재 형상에서 변경 가능한 설계변수를 도출해 내고, 이 변수들의 적절한 조합을 위한 직교 배열표를 선정하였다. 변경 가능 인자는 8 개이므로 L18 직교 배열표(L18 orthogonal arrays)를 사용하였으며, Fig.8 에는 선정된 인자와 수준을 나타내었다.

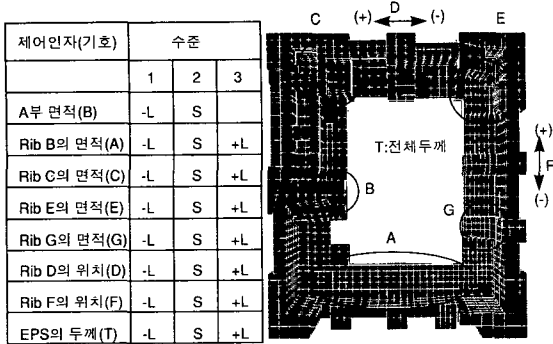


Fig. 8 Design parameters for Taguchi method

또한 최적안을 선정하기 위해서는 평가 특성을 결정해야 하는데, 자유 낙하시험에서 불량으로 판정되는 파손이 가장 먼저 발생하는 PCB 에서의 최대 응력을 망소특성으로 하여 완충 포장재 형상에 따른 완충성능을 평가하였다<sup>[8]</sup>. (Table 4 참조)

Table 4. Maximum stresses on the L18 orthogonal arrays

Simulation No	A	B	C	인 자	E	G	D	F	T	Max. Stress (GPa)
1	-L	-L	-L	S	-L	-L	-L	-L	-L	0.09972
2	-L	-L	S	-L	S	-L	-L	S	S	0.0833724
3	-L	-L	+L	+L	-L	S	+L	+L	+L	0.0849229
4	-L	S	-L	-L	S	S	S	+L	+L	0.0881685
5	-L	S	S	S	-L	+L	+L	-L	-L	0.1050330
6	-L	S	+L	+L	-L	-L	S	S	S	0.0881815
7	-L	+L	-L	-L	S	-L	+L	S	+L	0.0813458
8	-L	+L	S	+L	S	-L	-L	-L	-L	0.0916697
9	-L	+L	+L	-L	+L	S	S	S	S	0.102269
10	S	-L	-L	-L	-L	S	S	-L	-L	0.0978347
11	S	-L	+L	S	-L	+L	S	+L	S	0.0989901
12	S	-L	+L	S	S	-L	-L	-L	+L	0.0918431
13	S	S	-L	S	+L	-L	+L	S	S	0.0949174
14	S	S	S	+L	-L	S	-L	-L	+L	0.0860367
15	S	S	+L	-L	S	S	+L	S	-L	0.104745
16	S	+L	-L	+L	S	+L	-L	-L	S	0.0975711
17	S	+L	S	-L	-L	-L	S	+L	S	0.0968835
18	S	+L	+L	S	-L	S	+L	-L	-L	0.0923782

PCB 에서의 최대응력을 평가특성으로 결과를 분석한 결과 각각의 완충 포장재 형상변경 인자가 PCB 에 미치는 영향을 판단할 수 있었다. Fig.9 에서 나타난 바와 같이 완충재의 두께에 의한 영향이 가장 현저히 나타났으며, 리브(Rib) E의 면적은 클수록, 리브 F의 위치는 뒤로 이동될수록 기관의 취약부에 걸리는 최대 응력값이 적게 나타났다. 따라서 중간부 보다는 뒷부분의 리브 E의 면적을 늘리는 것이 유리한 구조로 나타났다(Fig.8 참조).

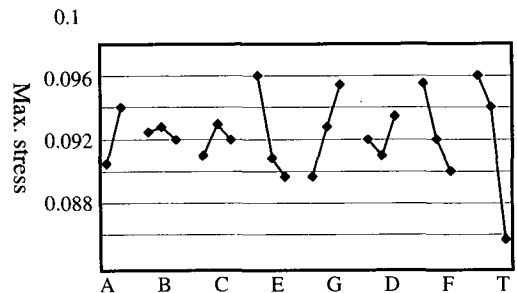
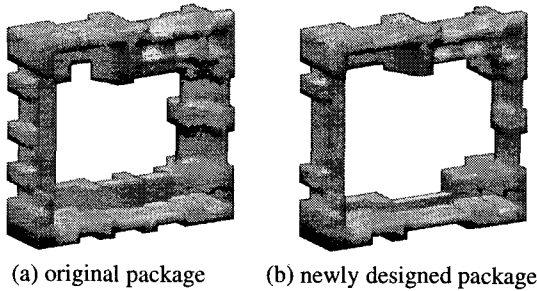


Fig. 9 Analytical results of sensitivity of the parameters

다구찌 기법을 적용하여 민감도 해석을 수행한 결과로부터 평가 특성인 PCB 에서의 최대 응력값에 많은 영향을 미치는 인자에 대해서는 설계에서 허용하는 범위 내에서 최대값으로 반영하였다. 그리고 전체 완충 포장재 두께는 기존대로 하지만, 리브 E 부분을 보강하고 PCB 의 최대 응력값에 미치는 영향이 적은 인자의 경우는 제거하는 방향으로 완충재를 설계하여 재료절감과 동시에 완충 효율을 높이는 개선안을 도출할 수 있었다.

그 결과 완충재는 기존 대비 20% 감량하였다. 또한, 양산제품의 적용성 평가를 위해 개선된 형상대로 완충 포장재를 만들어 시험한 결과, 가장 취약한 측면 낙하에서 음극선관 중심에서의 최대 가속도가 개선전과 비교하여 약 10G 정도 감소하는 것으로 나타나 완충 효율이 개선되었음을 실험적으로도 검증하였다. 또한, 본 연구를 통하여 구해진 포장재의 형상을 기초로 하여 전 모니터 모델에 적용이 가능한 포장재의 형상설계를 할 수 있도록 표준화 작업을 수행하였다.

Fig.10 에는 기존의 완충 포장재 형상과 본 연구에서 최적화된 형상을 나타내었다.



(a) original package (b) newly designed package

Fig. 10 Comparison of geometric shapes of packages

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 모니터의 완충 포장재 설계에 관하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 완충 포장재를 포함한 제품의 낙하충격 시험을 통해 불량으로 판정되는 파손이 일어나는 낙하 높이와 파손에 취약한 낙하조건, 그리고 실제 파손이 일어나는 위치를 파악하였다.
2. 낙하 충격해석 및 설계 정보를 얻기 위해 완충 포장재의 동적 압축시험을 통해 동적 거동특성을 구하고, PCB 의 재료특성인 경우에는 3 점 굽힘시험을 수행하였다.
3. 완충재 형상의 최적화를 위해 다꾸찌 기법을 충격 해석에 활용하였으며, 이를 통하여 완충 포장재료를 기존 대비 20% 절감하였고, 음극선관의 정점에서 측정되는 가속도 값은 측면 낙하에서 기존대비 10G 정도 개선되었다.

#### 참고문헌

1. K. Ha, S.H Lee and J.S. Kim, "A Simulation of Shadow Mask Forming with the Application of Anisotropic Material Property," 대한기계학회 춘계학술대회논문집, Vol. A, pp. 464~469, 1999.
2. S. Tanaka, M. Kakino, "Development and Application of Package Designing Method Using CAE," JPI Journal, Vol. 32, No. 2, 1994.
3. 소형 전기 기기의 충격시험 방법, 한국공업규격(KS C 0905).
4. 환경 시험 방법(전기,전자) 충격시험 방법, 한국공업규격(KS C 0241).
5. 박상후, 김한바라, 이재진, 장성기, 김규선, "모니터 내충격 설계를 위한 PCB 파손 평가에 관

한 연구," 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회 논문집, 1998.

6. Victor C. Li, Chiho A. Wong, Noboru Kikuchi, and Jun Zhang, "Constitutive Modeling and Material Characterization of Forms and Hybrid III Dummy Tissue Materials in Automobile Applications," AAMA Report, 1994.
7. 김원택, 최형연, "Finite Element Modeling of Foam Material," 한국자동차공학회 차량동력학 학술강연초록집, 1995.
8. G. Taguchi, S. Konishi, Y. Wu, "Taguchi Methods," Quality Engineering Series vol.1, Japanese standards association, 1992.