

광 디스크 드라이브용 완충포장재의 낙하충격 해석 및 활용

Analysis of Package Drop and its Application for Optical Disc Drives

석기영*·윤기원**·나정민***·박창배***

Ki-Young Seok, Ki Won Yoon, Jeong Min Na, and Chang Bae Park

Key Words : Optical Disc Drive (광 디스크 드라이브), Expanded Polystyrene (EPS, 발포폴리스티렌), Drop (낙하 충격), Cushion Package (완충포장재), Response Surface Method (반응표면법), Central Composite Design (중심합성설계)

ABSTRACT

Electronic products are subjected to many different types of shock environment. As the Optical Disc Drive (ODD) market grows, the number of failures related to shock increases. Therefore, it is necessary to improve the performance of cushion package as well as the product design. Cushion materials such as expanded polystyrene are often used to protect electronic products from shock environment. In this paper, the drop analysis of the cushion package for optical disc drives was carried out with the explicit method of LS-DYNA and verified by the drop test. For the optimization of package, response surface approximation model was created using central composite design. As a result, cushioning performance was improved under the critical condition and practical design guidelines of cushion package were suggested.

1. 서 론

전자 제품은 생산에서부터 소비자에게 전달되기까지 다양한 종류의 충격에 노출될 수 있다. 외부의 충격으로부터 발생할 수 있는 제품의 손상을 방지하기 위하여 완충성을 갖는 포장재가 사용된다. 완충포장재는 포장된 제품에 가해지는 충격량이 시험 규격을 만족하도록 설계되고 있으나, 특수 지역의 열악한 물류 환경조건에 대응하기 위하여 포장물의 자유낙하 높이를 상향하는 추세이다.

낙하충격에 따른 충격해석은 다양한 완충포장재의 특성에 따라 Mindlin^[1]에 의하여 수행되었으며, Steinberg^[2]은 전자제품에 대한 여러 진동조건에 따른 연구를 수행하였다. 이후 전자제품과 포장재의 충격 설계 및 평가에 관한 연구가 이루어졌다.^[3-4] 충격을 고려한 시험 평가방법은 ASTM (American Society for Testing and Materials) 및 ISTA (International Safe Transit Association)에 의하여 표준화 되었다. 이와 같은 기준에 따라 전자제품의 낙하충격에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 제품 개발에 소요되는 비용을 절감하고 시제품의 시험 횟수를 감소시킬 수 있는 장점으로 인하여 유한요소법(Finite Element Method)을 이용한 해석기법 및 최적설계가 활발히 적용되고 있다.^[5-6]

본 논문에서는 10 개 단위로 포장된 광 디스크 드라이브의 운송 시 발생하는 외부 충격에 대한 신뢰성을 확보하고 완충포장재의 낙하충격 성능을 개선하고자 한다. 포장물의 낙하충격 해석은 충격 및 진이 해석에 널리 사용되는 LS-DYNA 를 사용하였으며, 실험을 통하여 해석 결과와 비교 검증하였다. 충격가속도로부터 취약한 방향을 확인하고 취약부의 완충 성능을 보강하고자 포장재의 리브 형상을 설계변수로 선정하였다. 상용 최적설계 소프트웨어인 iSIGHT 를 활용하여 중심합성설계(Central Composite Design)를 통한 반응표면 근사모델(Response Surface Approximation Model)을 생성하였다. 형상 최적설계로 완충포장재의 완충성을 향상시켰다.

2. 낙하충격 해석

2.1 광 디스크 드라이브의 낙하충격

광 디스크 드라이브라고 총칭하는 레이저를 이용한 재생 기록 기기는 개발 초기에 비하여 고성능화·복잡화 되면서 내충격성 측면에서는 취약한 구조를 가지게 되었다. 이는 운반 및 사용시에 발생하는 외부 충격에 의하여 광 Pick-up 및 Guide Rail 의 파손, 베젤의 백화 현상, Tray 열림 또는 단힘 불량, 그 외 기타 외관 불량이 발생하는 원인이 된다.

특히 물류 환경이 열악한 특수 지역에서의 운송과정 중 발생하는 충격량은 자유낙하 규격 한계를 초과하는 상황이다. 이는 운송도중 과도한 충격으로 인해 드라이브 부품이 파손될 충분한 가능

* TSST KOREA Advanced Core Technology 그룹
E-mail : kiyoung.seok@samsung.com
Tel : (031) 200-7886, Fax : (031) 200-7890

** TSST KOREA Advanced Core Technology 그룹

***삼성전자 기술총괄 개발인프라 그룹

성이 있으므로 제품 뿐만 아니라 완충포장재의 성능 개선이 필요하다.

2.2 낙하충격 해석 조건

광 디스크 드라이브는 날개 포장으로 개인 사용자에게 직접 판매되거나, PC 업체에 운반 납품하기 위하여 10 개 단위로 완충포장재에 넣고 Box로 마감 포장하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 광 디스크 드라이브의 10 개 단위 포장에 대한 낙하충격 해석을 수행하였다.

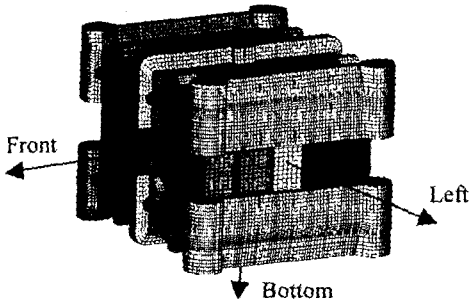


Fig. 1 Finite element model for package drop

낙하충격 시 완충포장재의 영향만을 평가하기 위하여 광 디스크 드라이브에 발생하는 변형에너지는 없는 것으로 가정하였다. 광 디스크 드라이브는 8 절점을 갖는 brick 요소를 사용하였으며 Rigid 로 설정하였다. 해석에 사용된 광 디스크 드라이브 모델은 개당 0.77kg 의 질량을 가지며, 10 개 단위 포장 시 37,240 개의 절점과 43,200 개의 요소로 구성된다.

완충포장재는 압축에 의한 변형을 표현하는데 적합한 8 절점을 갖는 brick 요소와 수치해석 상의 정확도에 영향을 미치지 않는 범위에서 삼각기둥 요소를 사용하였다. 재질은 Crushable form 으로 설정하였다. 완충포장재 모델은 137,554 개의 절점과 91,468 개의 요소로 구성되었다.

완충포장재와 광 디스크 드라이브의 접촉은 LS-DYNA 에서 지원하는 Automatic Single Surface Contact 을 사용하여 자동적으로 처리되도록 하였다. 마찰력을 고려하기 위하여 정적 및 동적 마찰 계수와 Rigid wall friction 을 설정하였다. 포장재의 찢김 현상은 TSC(Tensile Stress Cutoff)로 표현하였으며 Strain Rate Sensitivity 에 대한 감쇠 인자도 고려하였다. 완충포장재의 재료는 발포 배울 60 배의 EPS (Expanded Polystyrene)로서 응력-변형을 곡선은 Fig. 2 에 도시하였으며, 밀도는 $1.667 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^3$

이다. Box 는 Rigid wall 로 표현하였고 해석 시간을 줄이기 위하여 96cm 높이에 해당하는 속도를 초기 속도로 부여하였다.

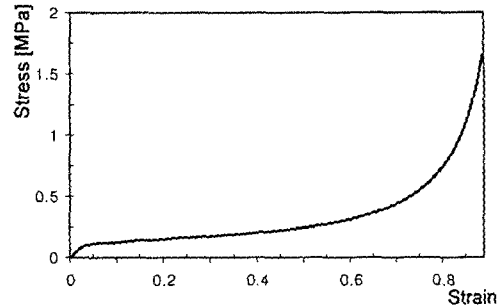


Fig. 2 Stress-Strain curve of EPS60 under dynamic load

2.3 실험 및 해석결과 검증

해석 결과를 검증하기 위하여 제품 포장물의 낙하충격 실험을 실시하였다. 낙하방향은 제품의 특성을 고려하여 3 방향(Bottom, Left, Front)으로 설정하였다. 충격가속도를 측정하기 위하여 가속도계를 설치하여 해석조건과 동일한 96cm 높이에서 지면으로 낙하를 시행하였다. Table 1 에 해석과 실험의 충격가속도 피크레벨을 비교하여 나타내었다.

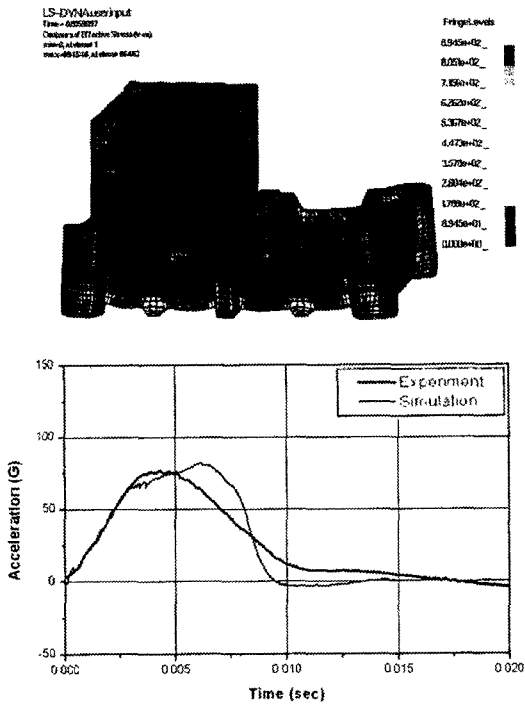
Table 1 Comparison of simulation and experiment results

	Simulation	Experiment
Bottom direction	82.4 G	77 G
Left direction	109.9 G	98 G
Front direction	127.5 G	79.5G

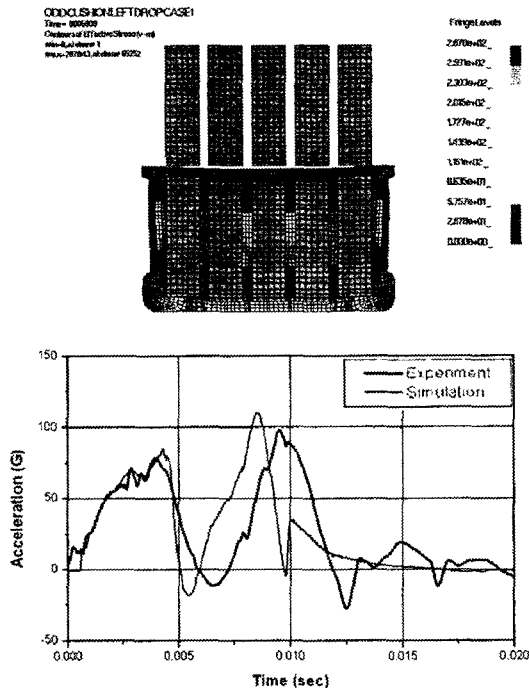
3 방향에 대한 실험 결과로부터 낙하충격 작용 시 발생하는 가속도를 비교해 보면, Left 방향의 충격력이 Bottom 및 Front 방향에 비하여 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

실험 결과와 해석 결과의 상관 관계를 확인하기 위하여 충격 가속도 파형을 Fig. 3 에 도시하였다. 3 방향의 해석 결과 중 Bottom 방향과 Left 방향은 실험에 비하여 약 10% 정도 크게 나타나며 가속도 파형의 경향은 일치하는 것으로 나타났다. 반면에 광 디스크 드라이브가 적층 포장되는 방향인 Front 방향의 충격가속도는 실험과 해석 결과의 편차가 크게 발생하였으며, 가속도 파형의 경향도 다르게 나타났다. 이와 같은 결과는 광 디스크 드라이브와 완충포장재 사이의 비닐과 적층 방향의 유격에 의한 영향 등 해석 시 고려하기 어려운 인자들에 의하여 유발된 것으로, 향후 해석의 정밀

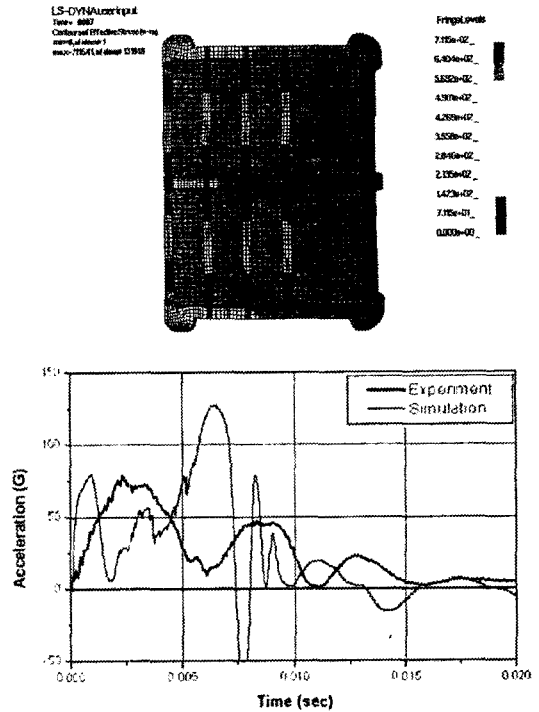
도를 높이기 위해서는 상기 사항들에 대한 추가 검토가 필요할 것으로 판단된다.



(a) Bottom direction



(b) Left direction



(c) Front direction

Fig. 3 Experiment and simulation results

3. 최적 설계

3.1 설계 파라미터 설정

3 방향의 해석 결과를 바탕으로 실험과의 충격 가속도 및 파형의 상관관계가 일치하는 Bottom 방향과 Left 방향에 대하여 최적화를 위한 설계 변수를 선정하였다.

Bottom 방향은 Fig. 4 와 같이 리브의 높이는 기존 모델과 동일하게 설정하고 주 리브의 폭 B_x

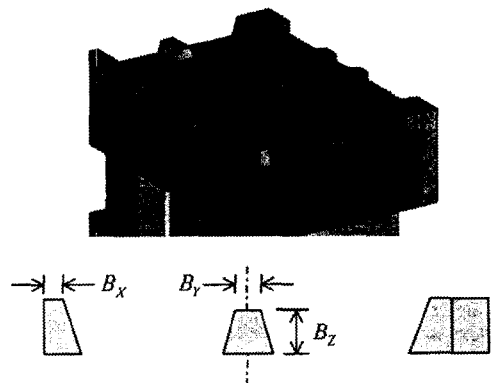


Fig. 4 Design parameters - Bottom direction

및 보조 리브의 폭 B_y 와 높이 B_z 를 설계 변수로 선택하였다.

Left 방향은 기존 포장재의 해석 결과 광 디스크 드라이브중 바깥쪽에 위치한 4 개는 약 100G의 충격량을 받으나 가운데에 위치한 6 개의 경우 최대 150G의 가속도가 발생하여 유통과정 중 충격에 의한 불량 발생 가능성이 있는 것으로 판단되었다. 따라서 포장재의 중심부에 Fig. 5 와 같이 보조 리브를 추가하여 보완하고 주 리브의 폭 L_x 와 보조 리브의 폭 L_y 및 높이 L_z 를 설계 변수로 선택하였다.

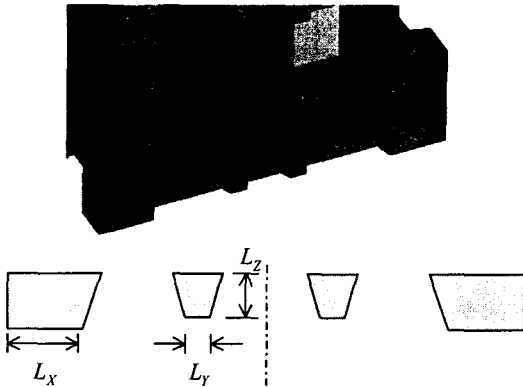


Fig. 5 Design parameters - Left direction

3.2 Design Matrix 설정

제품과 포장재가 닿은 수면적과 가속도와의 관계는 2 차 함수의 형태로 알려져 있으므로 반응표면 모델은 Quadratic 모델을 채택하였다.

$$F(x, y, z) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3z + c_4x^2 + c_5y^2 + c_6z^2 + c_7xy + c_8yz + c_9zx$$

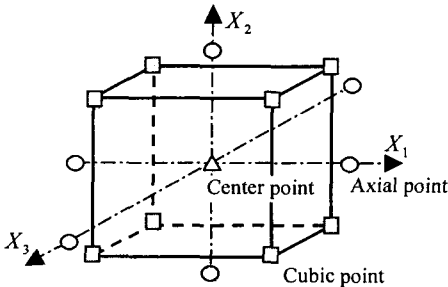


Fig. 6 Central Composite Design

반응표면 근사모델을 생성하기 위하여 Fig. 6 과 같이 중심합성설계를 이용하였다. 중심합성설계는

삼원배치법(3 Factor Full Factorial Design)보다 적은 실험 횟수로 2 차 반응표면 함수를 생성하기 위하여 고안된 방법이다. 이 방법을 사용하여 근사함수를 얻게 되면 직교배열이나 Latin 방격법을 이용한 것보다 많은 정보를 얻게 되며, 근사함수를 직접 최적설계에 적용할 수 있는 장점이 있다.

설계변수에 대한 모델링에서부터 충격해석을 위한 과정은 ANSYS 의 APDL(ANSYS Parametric Design Language)과 TCL(Tool Command Language) Script 언어를 이용하여 자동으로 수행되도록 하였다. 또한 중심합성설계를 적용하기 위한 입력 파일은 통합화, 자동화 및 최적화 기능을 가진 iSIGHT 를 사용하였으며 Fig. 7 에 최적설계 과정을 도시화하였다.

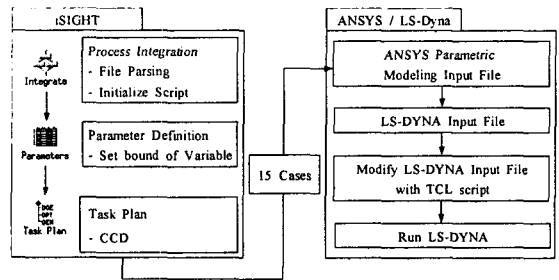


Fig. 7 Optimization process

Bottom 방향과 Left 방향의 design matrix 를 설정하기 위하여 각 변수별 parameter study 를 통하여 변수를 특성을 알아내고, 최적의 해를 찾아내기 위하여 설계변수의 범위는 비교적 넓게 설정하였다. Table 2 와 Table 3 에 중심합성설계 모델의 설정 수준과 각각의 경우에 대한 LS-DYNA 해석 결과 중 충격가속도를 도표하였다. 생성된 데이터로부터 반응표면 근사모델을 생성하였다.

Table 2 Design matrix - Bottom direction

Case	B _x	B _y	B _z	G
1	12.15	12.150	10.8	91.0
2	12.15	12.150	13.2	86.9
3	12.15	14.850	10.8	88.7
4	12.15	14.850	13.2	85.7
5	14.85	12.150	10.8	86.1
6	14.85	12.150	13.2	82.5
7	14.85	14.850	10.8	85.0
8	14.85	14.850	13.2	82.7
9	13.50	13.500	12.0	83.6
10	11.50	13.500	12.0	90.7
11	15.50	13.500	12.0	84.1
12	13.50	10.935	12.0	83.9
13	13.50	16.065	12.0	84.2
14	13.50	13.500	6.0	91.8
15	13.50	13.500	18.0	85.0

Table 3 Design matrix - Left direction

Case	L _x	L _y	L _z	G
1	31.5	22.50	11.7	111.7
2	31.5	22.50	14.3	110.7
3	31.5	27.50	11.7	111.6
4	31.5	27.50	14.3	123.3
5	38.5	22.50	11.7	124.0
6	38.5	22.50	14.3	123.3
7	38.5	27.50	11.7	124.0
8	38.5	27.50	14.3	123.5
9	35.0	25.00	13.0	117.8
10	26.6	25.00	13.0	101.9
11	43.4	25.00	13.0	129.4
12	35.0	20.67	13.0	117.7
13	35.0	29.33	13.0	118.0
14	35.0	25.00	10.0	117.6
15	35.0	25.00	16.0	112.9

3.3 최적설계 결과

중심합성설계를 적용하여 계산된 Bottom 방향과 Left 방향 각각 15 개의 해석 결과로부터 반응표면 근사모델을 만들기 위하여 통계 분석용 소프트웨어인 Minitab 을 사용하였다. 3 변수 2 차함수의 계수를 계산한 결과 아래와 같은 함수를 얻었다.

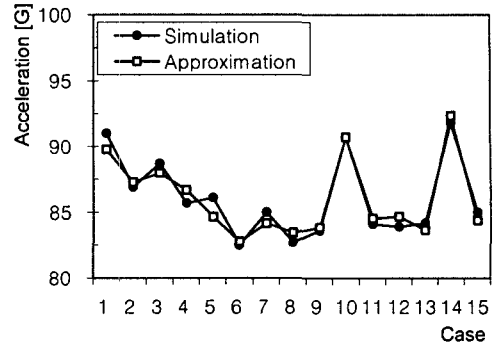
Bottom 방향의 반응표면 근사모델은 식 (1)과 같이 생성되었다. 여기서 x 는 주 리브의 폭 B_x 이며 y 와 z 는 보조 리브의 폭 B_y 와 높이 B_z 를 나타낸다.

$$G_{Bottom} = 393.264 - 30.714x - 6.176y - 7.441z + 0.95x^2 + 0.05y^2 + 0.126z^2 + 0.178xy + 0.185yz + 0.093zx \quad (1)$$

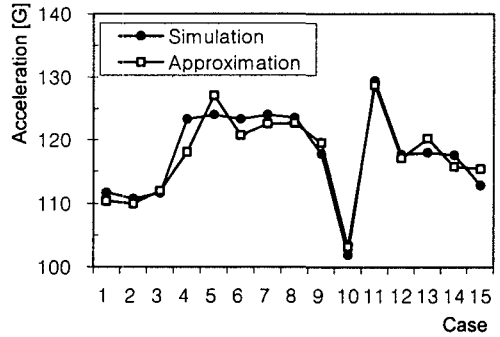
Left 방향의 반응표면 근사모델도 식 (2)와 같이 생성되었으며, x 는 주 리브의 폭 L_x 이며 y 와 z 는 보조 리브의 폭 L_y 와 높이 L_z 이다.

$$G_{Left} = -249.439 + 13.739x + 2.414y + 10.43z - 0.051x^2 - 0.047y^2 - 0.44z^2 - 0.176xy + 0.496yz - 0.327zx \quad (2)$$

반응표면 근사모델인 식 (1)과 (2)에 의하여 계산된 가속도와 낙하충격 해석을 통하여 구해진 가속도를 Fig. 8 에 도시하였다. 비교 결과 상기 방법으로 생성된 2 차 함수 형태인 반응표면 근사모델은 완충포장재의 형상에 따른 가속도의 변화량을 잘 묘사함을 알 수 있다. 따라서 포장재의 형상변경에 따른 가속도의 예측은 중심합성설계에서 사용되었던 변수의 범위내에서 제한적으로 사용 가능하다.



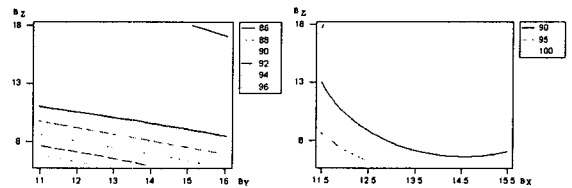
(a) Bottom direction



(b) Left direction

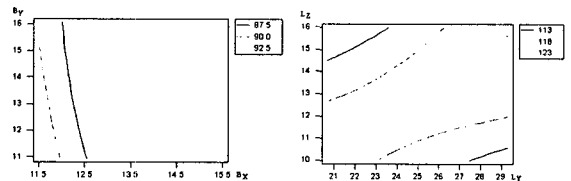
Fig. 8 Comparison of simulation and response surface approximation model results

반응표면 근사모델의 최적점을 찾기 위하여 설계변수의 변화 양상을 확인하였다. Bottom 방향과 Left 방향 각각의 설계변수 중 한 변수를 Center Point 값으로 고정 한 상태에서 다른 두 변수의 변화 양상을 Fig. 9 에 나타내었다.



(a) $B_x = 13.5$

(b) $B_y = 13.5$



(c) $B_z = 12.0$

(d) $L_x = 35.0$

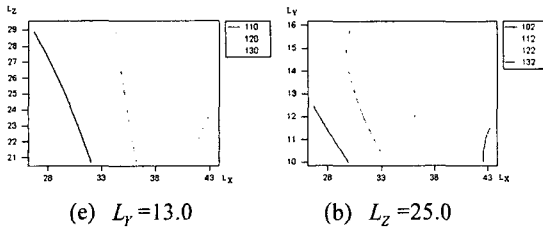


Fig. 9 Contour plot

위의 결과로부터 근사함수의 최적점을 Table 4 에 나타내었다. Bottom 방향의 가속도는 82.4G 에서 81.4G 로 개선의 폭이 작으나, 충격시의 취약부인 Left 방향의 가속도는 109.9G 에서 92.1G 로 약 17.8G 정도 감소하여 기존 대비 16.2% 개선되었다.

Table 4 Optimized design parameters and results

	Bottom direction		Left direction
B_x	14.3	L_x	26.6
B_y	10.9	L_y	20.7
B_z	16.3	L_z	16.0
G	81.4	G	92.1

4. 결론

본 연구에서는 광 디스크 드라이브에 적용되는 완충포장재의 낙하충격에 관하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 낙하해석 결과 Bottom 방향과 Left 방향은 실험과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 적

층 포장 방향인 Front 방향은 실험과 해석 결과의 편차가 발생하였다. 향후 해석의 정밀도를 높이기 위해서는 추가 검토가 필요하다.

2. 완충포장재의 형상에 대한 최적 치수를 결정하기 위하여 중심합성설계를 이용하여 반응표면 근사모델을 생성하였다. 낙하충격 해석을 통하여 구해진 가속도와 비교한 결과, 반응표면 근사모델은 포장재의 형상에 따른 가속도의 변화량을 잘 묘사함을 확인하였다.
3. 반응표면 근사함수의 최적점을 찾아 포장재 리브의 형상을 최적화하였다. Bottom 방향의 가속도는 개선의 폭이 작게 나타났으나, 충격시의 취약부인 Left 방향은 기존 대비 16.2% 개선되었다.

참고 문헌

- (1) Mindlin, R. D., 1945, "Dynamics of Package Cushining," Bell Sys. Tech. Journal, Vol.24, p.353~461
- (2) Steinberg, D. S., 1988, Vibration Analysis for Electronic Equipment, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc.
- (3) 정완진 외, 1995, "전자제품의 충격설계," 대한기계학회지, 제 35 권, 제 8 호, pp.678~690
- (4) 박용석 외, 1994, "충격해석을 통한 결과의 예측," 한국소음진동공학회지, 제 4 권, 제 3 호, pp.345~352
- (5) 김한바라 외, 2000, "유한요소법을 이용한 모니터의 완충 포장재 설계에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp.88~93
- (6) S. S. Choi, 1998, "Drop Impact Simulation for Optimum Design of TFT-LCD," 5th International LS-DYNA Users Conference
- (7) C. M. Harris, 1998, Shock and Vibration Handbook, 4th Ed., McGraw-Hill, Inc.