

완충 포장한 모니터의 자유낙하시험을 위한 유한요소모델

A Finite Element Model for the Free Drop Test of the Monitor Packed by Cushioning Materials

황 용 익** 윤 성 호*
Hwang, Yong-Ik Yun, Seong-Ho

ABSTRACT

This paper deals with the finite element model of the monitor for the simulation of directional free drop tests such as backward, sideward, edge and vertex drop. The model was made for an unconditional stable solution for the explicit integration algorithm. The general behaviors at the time of impact were found to well correlate with the actual situation in terms of acceleration, displacement, contact force and stress of monitor components even though the experiment of the associated drop is performed for the validity of the model.

Keyword : Free Drop Simulation, Finite Element Modeling, Directional Free Drop

1. 서론

제품이 유통과정에서 예측하지 못한 상황으로 인해 손상된다면 비록 우수한 제품이라 할지라도 그 신뢰도가 떨어질 것이다. 그러므로 제품의 내충격성 및 운송환경을 만족하는 포장설계가 매우 중요하다. 특히 최근의 가정용 전자제품은 고도로 정밀한 부품을 내장하고 있으며, 일정한 충격이상이 되면 제품으로서의 가치를 잃어버리는 경우가 대부분이다.

따라서 이러한 제품의 손상을 미연에 방지하기 위하여 순수 제품 낙하시험을 이용하여 제품을 포장하지 않은 상태에서 낙하시켜 각각의 내장재의 내충격에 대한 파손강도를 파악한다. 근래까지도, 경험적으로 설계된 포장재로 제품을 포장한 상태로 자유낙하 시험기를 이용하여 낙하시킨다. 이들 실험을 통해 제품의 내충격 강도와 완충포장재로 인해 흡수된 충격량을 비교검토 함으로써 포장설계를 수행하였다. 하지만 이와 같은 방법은 Mock-up제작과 반복시험으로 인하여 포장재 설계에 많은 시간과 비용이 요구되어진다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 유한요소법(finite element method)을 적용한 시뮬레이션을 통해 포장기술을 개발함으로써 시간 단축과 비용절감 효과를 거두고 있다.⁽¹⁾

본 연구에서는 저밀도 완충포장재(EPP: expanded polypropylene)를 사용하여 포장한 모니터의 낙하시험조건과 재료시험으로부터 도출된 물성치를 적용하여 자유낙하 시뮬레이션(free drop simulation) 결과치를 충격의 일반적인 거동과 비교 검토함으로써 그 유한요소모델을 검증하고자 한다.

* 정희원 · 금오공과대학교 기계공학부 조교수

** 금오공과대학교 자동차공학과 석사과정

2. 충격가속도

충격은 정적 평형 상태에서부터 급격한 속도변화에 의하여 발생하는 물리적인 현상이며, 과도적인 진동이 동시에 일어난다. 예를 들면, 제품의 운송중에 발생할지도 모르는 내장품의 충격가속도는 완충재료의 완충특성, 하중-변위, 낙하높이, 질량, 낙하자세, 형상 등이 복잡하게 연관되어 나타나게 된다. 하지만 충격가속도 G 를 산출하는 방법은 정현반파(half-sine wave)를 이용하는 것이 일반적인 방법이며, 이때 정현반파와 관계없는 고주파 성분이 중첩되어 발생하므로 저역통과필터(low pass filter)를 이용하여 제거하여야 한다.⁽⁶⁾

따라서 질량 m 의 제품이 일정한 높이 h 에서 자유낙하 한다고 가정하면, 낙하하기 전의 제품의 위치에너지는 충돌과 동시에 운동에너지로 모두 변환되며, 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$mgh = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

초기속도 v_i 와 나중속도 v_f 사이의 속도변화는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$v_f - v_i = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

따라서, 정현반파의 각 진동수 ω 와 속도변화의 관계를 이용한 가속도는 다음과 같다.

$$a = (v_f - v_i) \times \omega \quad (3)$$

$$G = (v_f - v_i) \times \omega / g = \sqrt{2gh} \times \frac{\pi}{D} / g \quad (4)$$

여기서 G 는 제품의 가속도 a 와 중력가속도 g 와의 비이며, D 는 제품이 낙하충돌시 발생하는 내장품의 정현반파 진폭이며, 이의 측정방법은 ASTM규정^{(2),(3)}에 나타나 있다.

3. CAE 시뮬레이션

CAE(computer aided engineering) 모델은 실제모델에 대한 낙하 충격실험을 재현할 수 있도록 만들어져야 한다. 낙하자세는 돌발적이며 임의적이지만, 그 대표적인 자유낙하는 포장된 상자를 기준으로 1각 3면 6면 방향에 대하여 연속적으로 수행되어야 한다. 그러나 이러한 방향성을 가진 자유낙하(directional free drop) 시뮬레이션에서는 연속적인 시험에 대하여 제한을 받아 1각 1면 2면 방향의 자유낙하를 수행한다.

또한 모니터의 유한요소모델을 생성시, 낙하충격으로 인하여 치명적으로 손상을 받는 규칙적인 천공으로 이루어진 박막형태의 폼드 마스크(formed mask)에서의 변형을 측정할 수 있도록 충격력을 전달할 수 있는 구성품의 조합으로 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 튜브 외곽부(funnel)와 화면보호대(panel), 스프링, 지지틀(support frame)과 내부 보호대(inner shield), 폼드 마스크를 구성품 모델로 만들었다.⁽⁴⁾

3-1 낙하시험용 유한요소 모델링

시뮬레이션을 이용하기 위한 유한요소모델을 만들기 위해서는 와이어 프레임을 형성하기 위한 도면이 만들어진 후, 모니터의 6개 구성품과 박스는 실제형상을 표현하고자 3차원 솔리드 요소를 사용하면 좋으나, 요소 수의 증가로 해석시간이 길어진다. 이에 대하여 요소 수를 줄이고자 규칙적인 분할

(mapped mesh)로서 쉘 요소를 이용하여 모니터의 구성품들에 대한 유한요소 모델을 완성하였다.

또한 수많은 자유곡면으로 형성된 복잡한 패키징부는 사면체의 솔리드 요소를 이용한 임의적인 분할 (free mesh)로서는 해석시간이 늘어날 뿐 아니라, 모델 생성시 체적을 인식하지 못하는 요소를 생성하는 오류(no-area element)가 빈번히 발생하기 때문에 규칙적인 분할을 모색하게 되었다. 패키징부에서의 이러한 분할은 어느 정도로 자유곡면을 선형곡면으로 이상화함으로써 실제형상과 차이가 있으나, 자유낙하에서의 충격가속도는 관성량에 따라 달라지므로 이에 상응하는 질량을 보존하여 모델을 수정하였다. 따라서 본 낙하시험용 유한요소모델에 사용된 요소는 쉘 요소와 솔리드 요소뿐이다.

완성모델의 낙하시험은 동적해석으로 도출된 거동이 저주파수 영역에서 나타나는지 아니면 충돌과 같은 고주파수 영역에서 나타나는지를 판단해야 한다. 그리고 해석용 소프트웨어의 수치해석 방법이 양함수(explicit) 체계를 이용하는지 음함수(implicit) 체계를 이용하는지를 알아야 한다. 하지만 충돌과 같은 고주파수를 갖는 해석을 하기 위해서는 양함수(explicit) 체계를 이용하는 수치해석 코드(code)가 유리하다. 그 이유는 양함수를 이용할 경우, 해를 구하기 위한 강성행렬을 풀기 위한 방정식이 불필요하며, 시간 간격(time step)이 안정하면 정확도가 보장된다. 하지만 음함수 법을 이용한 코드는 이와 반대의 경우이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 양함수(explicit) 적분체계를 사용하는 해석기 구인 Pam-Crash를 사용하였다.⁽⁷⁾ 모니터의 구성품에 사용된 쉘 요소와 패키징부에 사용된 솔리드 요소의 특성길이(characteristic length) l 의 값에 따라서 양함수(implicit) 시간적분법으로 안정한 해를 구할 수 있으며, 이에 요구되어지는 시간간격(time step) Δt_c 는 다음과 같다.⁽⁵⁾

쉘 요소(shell elements)

$$\Delta t_p = \frac{l_p}{C_p} = \sqrt{\frac{\rho l_p^2}{E(1-\nu^2)}} \quad (5)$$

여기서 C_p 는 음속, E 는 영률, ρ 는 밀도, ν 는 프와송비이다.

솔리드 요소(solid elements)

$$\Delta t_s = \frac{l_s}{C_s} = \sqrt{\frac{\rho l_s^2}{\lambda + 2G}} \quad (6)$$

여기서 λ 는 라메상수, G 는 전단탄성계수이다.

3-2 유한요소 모델

앞 절에서 설명한 바와 같이, 모니터를 구성하는 6개의 부품과 완충포장재로 사용된 박스는 얇은 평판의 형태를 가지므로 와이어 모델은 중립 면을 기준으로 하는 쉘 요소를 이용한 유한요소 모델을 그림 1과 같이 완성하였다. 그러나 패키징부의 유한요소 모델을 완성과정을 살펴보면 첫째로, 생성한 유한요소 모델의 솔리드(solid) 요소의 형태는 선형 삼각형 요소를 이용하였다. 그런데 그림 2에서 보는 바와 같이 패키징(packing)의 곡면 부에서 요소들의 심한 편중현상이 일어나며 이로 인해 요소 생성에 려가 발생되었다. 즉, 왜곡 요소(wrapping error), 형상비(aspect ratio)가 지나치게 큰 요소 등을 포함하는 유한요소 모델이 생성된다는 것이다. 그리고 해석시간에 절대적인 영향을 미치는 요소의 수가 지나치게 많이 생성되었다. 이러한 문제점이 발생한 근본적인 원인은 와이어 모델이 수많은 곡면 부를 가지고 있기 때문이다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해서는 와이어 모델의 곡면 부의 선형화가 불가피하였고, 지나치게 많은 해석시간의 원인이 되는 요소의 수를 줄이기 위해 유한요소 모

델의 솔리드 요소의 형태를 선형 사면체 요소(linear tetrahedral element)와 직육면체 요소(brick element)를 복합적으로 적용하였다. 그 결과 그림 3에서 보는 보와 같이 유한요소의 수와 에러 요소가 현저히 감소하였지만, 여전히 많은 해석시간이 요구되어지는 모델이다.

따라서 그림 4과 같이 규칙적인 분할을 이용하여 유한요소 모델 전체에 직육면체 요소(brick element)적용하여 에러 요소를 완전히 제거하고, 요구되는 해석시간을 줄이기 위해 유한요소 모델의 요소의 수를 감소시켰다. 그림 5는 각 부품에 완성된 유한요소 모델을 모두 결합한 해석모델 이다. 그리고 아래의 표 1을 통해 유한요소의 수와 해석시간과의 관계를 정리하였다.

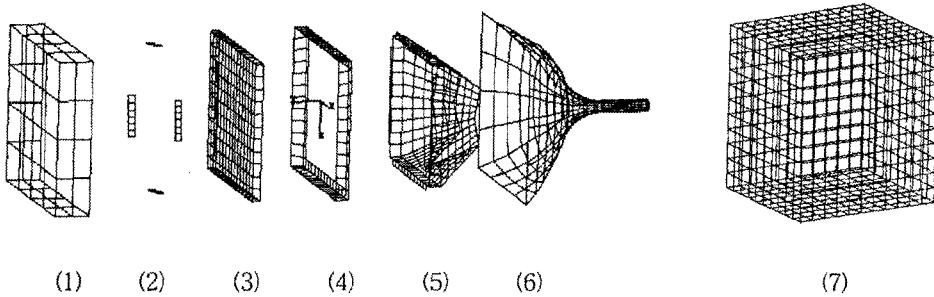


그림 1 튜브를 구성하는 6개의 구성부품과 박스: (1) panel, (2) spring, (3) formed mask, (4) support frame, (5) inner shield, (6) funnel, (7) box.

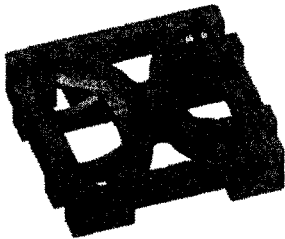


그림 2 패킹부 요소의 수: 340,000

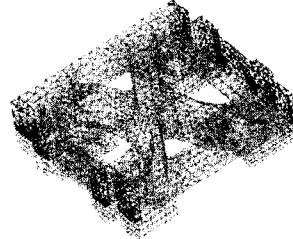


그림 3 패킹부 요소의 수: 16,000

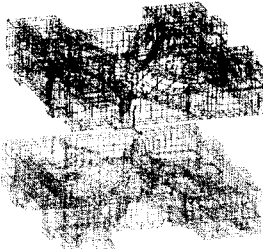


그림 4 패킹부 요소의 수: 4,296

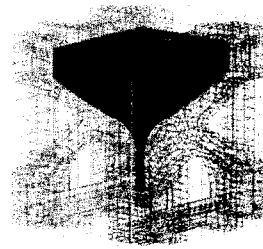


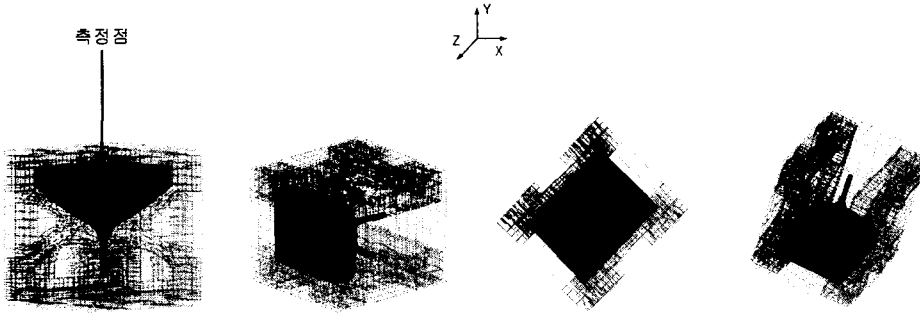
그림 5 조합한 유한요소 모델

표 1 유한요소 모델의 비교

		No. of Elements	Mesh Type	Mesh Quality	Solving Time
1	6 Components	1,500	Linear Quadrangle	Best	Longer than 10 days
	Packing	340,000 × 2	Linear Tetrahedron	Worse	
2	6 Components	1,500	Linear Quadrangle	Best	72 hours
	Packing	16,000 × 2	Linear Tetrahedron/Brick	Good	
3	6 Components	1,500	Linear Quadrangle	Best	2 hours
	Packing	4,296	Brick	Best	

3-3 해석

해석에 사용되어진 소프트웨어는 양함수 알고리즘(explicit algorithm)을 이용하는 Pam-Crash이용하여 해석하였으며, 재료 물성치는 실험으로부터 도출되었다. 그리고 시뮬레이션 방법은 앞 절에서 설명한 바와 같이 대표적인 낙하자세를 아래의 그림 6과 같이 나타냈다. 1각 1변 2면의 형태를 -Y 방향으로 낙하시켜 아래의 그림 6-1에서 표시한 바와 같이 충격가속도는 모니터 패널(panel)의 중심과 폼드 마스크(formed mask)중심에서 500 [Hz]의 저역통과필터를 사용하여 산출하였다.



(1) (2) (3) (4)

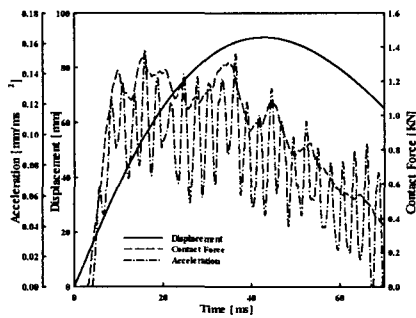
그림 6 해석 모델의 낙하방향: (1) 후면 낙하, (2) 측면 낙하, (3) 변 낙하, (4) 모서리 낙하

3-4 해석 결과

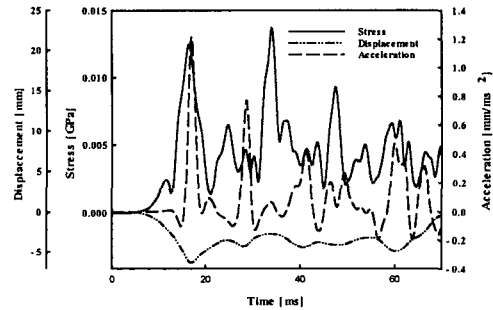
패널 중앙부에서는 가속도와 변위, 모니터와 패킹(packing)사이에서 발생하는 접촉력(contact force)을 아래의 그림 7~10의 (1)을 비교 분석하여 보면, 가속도와 접촉력(contact force)을 나타내는 그래프는 후면낙하를 제외한 나머지 경우의 파형은 정현반파의 형태의 그래프에 가까워진다는 것을 알 수 있다. 이 때 후면낙하인 경우는 그림 6의 -Y방향에서 측정된 결과치이며, 이는 향후 실험으로 측정 가능하고 폼드 마스크의 손상에 직접적인 영향을 준다. 그러나 나머지 경우는 후면낙하 방향과 기울어진 방향의 물성치이며 실험적으로 측정하기 어려운 값들이다. 또한 충격작용시간이 비교적 긴 후면낙하의 경우, 다른 방향에서의 가속도 보다 낮다는 것을 알 수 있으며, 이는 충격낙하의 일반적인 경향을 잘 보여주고 있다. 충격가속도와 접촉력을 비교하여 보면, 충격력의 전달과정에서 접촉력이 발생한 후 패널에 충격을 줌으로써 어느 정도 시간지연이 발생하나, 이 두 가지 물리량의 절대값 변화는

거의 일치함을 알 수 있다. 모니터 끝단의 변위는 2면 낙하, 즉 후면낙하와 측면낙하에서만 측정할 수 있다. 이때 후면낙하의 변위는 실제로 모니터에 손상을 줄 수 있는 측정치로서 낙하시 박스에 모니터 끝단의 접촉여부를 추적할 수 있는 물리량이다.

폼드 마스크 중앙부에서의 가속도와 응력과 변위를 알아보기 위해 그림 7~10의 (2)를 비교 분석하여 보면, 낙하 충돌시에 내장 부품인 폼드 마스크에 발생하는 응력과 가속도는 거의 동일한 시간에 최대값을 가리키는 것을 알 수 있으며, 응력은 허용응력(yield stress) 0.23 GPa 에 훨씬 못 미치지만, 충돌 시에 발생하는 가속도 값은 후면낙하시에 상대적으로 큰 값을 가리키고 있는 것을 표 2에 정리하였다. 하지만 폼드 마스크는 두께가 얇은 박막으로서 탄성이 큰 재료이기 때문에 매우 큰 값의 충격가속도 G 가 발생함을 알 수 있으나 그 진폭은 매우 미미하다. 따라서 폼드 마스크의 손상여부를 판단하기 위해서는 표 2에서와 같이 응력을 기준으로 판단하여야 한다.

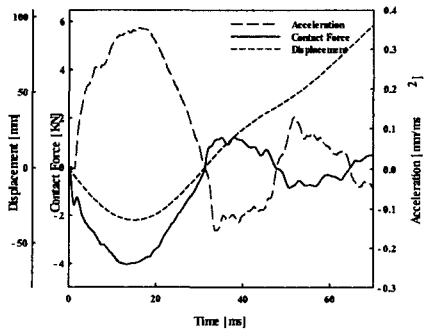


(1)

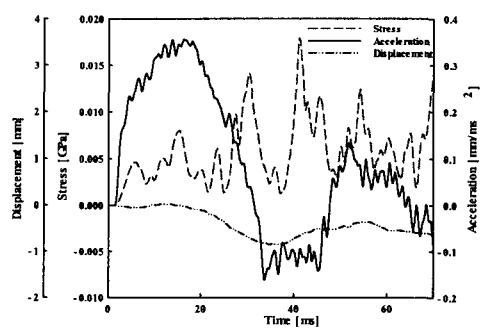


(2)

그림 7 후면낙하: (1) 패널(panel) 중앙부에서의 가속도와 변위 그리고 튜브와 패킹(packing)사이에서 발생하는 접촉력(contact force), (2) 폼드 마스크(formed mask) 중앙부에서의 가속도와 응력과 변위

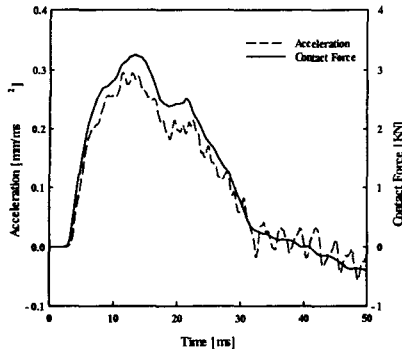


(1)

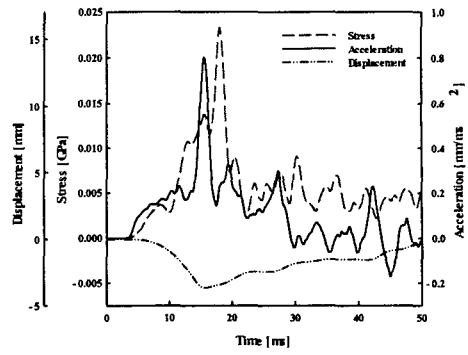


(2)

그림 8 측면낙하: (1) 패널(panel) 중앙부에서의 가속도와 변위 그리고 튜브와 패킹(packing)사이에서 발생하는 접촉력(contact force), (2) 폼드 마스크(formed mask) 중앙부에서의 가속도와 응력과 변위

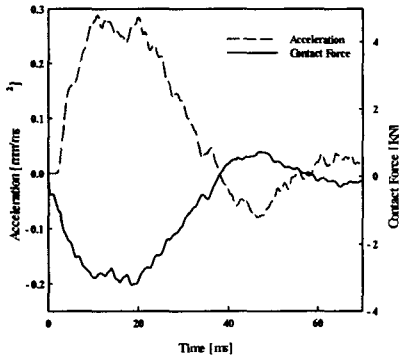


(1)

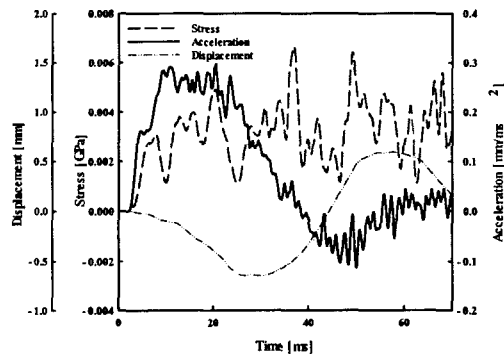


(2)

그림 9 모서리 낙하: (1) 패널(panel) 중앙부에서의 가속도와 변위 그리고 튜브와 패킹(packaging)사이에서 발생하는 접촉력(contact force), (2) 폼드 마스크(formed mask) 중앙부에서의 가속도와 응력



(1)



(2)

그림 10 변 낙하: (1) 패널(panel) 중앙부에서의 가속도와 변위 그리고 튜브와 패킹(packaging)사이에서 발생하는 접촉력(contact force), (2) 폼드 마스크(formed mask) 중앙부에서의 가속도와 응력과 변위

표 2 시뮬레이션 결과 비교

Drop Direction	Backward	Sideward	Edge	Vertex
Acc. @ Panel [G]	20.8	43.0	44.2	36.3
Dis. @ Panel [G]	91.1	35.0	-	-
Acc. @ CG [G]	11.6	34.8	28.3	38.3
Acc. @ Formed Mask [G]	353.7	42.7	51.0	39.2
Stress @ Formed Mask [GPa]	0.017	0.018	0.024	0.007
Evaluation	Safe	Safe	Safe	Safe

4. 결론

본 연구에서는 모니터의 자유낙하 중에서 대표적인 자세인 후면, 측면, 변, 모서리 낙하에 대하여

충격거동을 살펴보고자 유한요소 모델을 완성하여 구성품의 가속도, 변위, 접촉력(contact force), 응력을 기준으로 충격의 일반적인 거동과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모니터의 6개 구성 구성부품과 패킹(packing) 및 박스(box)의 유한요소 모델을 완성하는데 있어, 양함수 알고리즘(explicit algorithm)에 의한 안정적인 해를 위하여 쉘 요소와 솔리드 요소에 대하여 특성길이를 만족하는 모델을 만들었다.
- 2) 유한요소 모델의 후면, 측면, 변, 모서리방향의 낙하 시물레이션에서 패널에서의 가속도, 튜브와 패킹사이의 접촉력의 변화형태는 서로 잘 일치하며, 충격작용시간에 대한 가속도의 관계는 일반적인 경향과 잘 일치한다.
- 3) 각 방향의 낙하에서 폼드 마스크(formed mask)의 가속도는 박막형태의 진동으로 매우 높은 값을 가지나, 그 진폭은 매우 미미하다. 따라서 마스크의 손상여부는 응력을 기준으로 항복응력 안에 있는지 판단할 수 있다.
- 4) 본 연구에서 도출한 유한요소 모델이 낙하충격의 일반적인 경향을 잘 보여 줄 지라도, 낙하 시물레이션을 보다 양호한 타당성을 확보하기 위해서는 향후 순수낙하시험 및 포장낙하시험의 결과를 비교하여야 한다.

참고문헌

1. 김한바라, 박상후, 김원진, “유한요소법을 이용한 모니터 완충 포장재 설계에 관한 연구”, 한국정밀구조공학회, 제17권 제12호, 2000, pp.88~93
2. “Mechanical-shock fragility of product, using shock machines”, ASTM D 3332-88
3. 환경 시험 방법 (진기, 전자) 충격시험 방법, 한국 공업규격(KS C 0241)
4. Kug Weon Kim and Nam Woong Kim, “Analysis of Shadow Mask Thermal Deformation and Prediction of Beam Landing Shifts for Color CRT” ,IEEE Transaction on Consumer Electronics Vol. 44, No. 2, MAY 1998
5. Jonas A. Zukas, Theodore Nicholas, Hallock F. Swift, Longin B. Greszczuk, and Donald R. Curran, “IMPACT DYNAMICS” John Wiley & Sons, Inc. pp 377 - 382
6. Lisa K. Wells, “LabVIEW-Student Edition User’s Guide” , Prentice Hall, 1995
7. “Pam-Crash User’s Manual” , 2001