

자유낙하 충돌을 고려한 모니터 포장설계

윤성호*

A Packing Design of the Monitor by Considering the Free Drop Impact

Seong-Ho Yun*

ABSTRACT

This paper deals with the finite element model of the monitor for the simulation of directional free drop tests such as the backward and vertex free drop as well as the associated free-drop experiment. The model was made for an unconditional stable solution for the explicit integration algorithm. It was found through the comparison between simulation and experimental results that the general behaviors at the time of impact were observed to well correlate with each other in terms of acceleration, displacement, contact force and stress of monitor components.

Key Words : Finite Element Modeling (유한요소법), Free Drop Simulation (자유낙하 모사실험), Free Drop Test (자유낙하 실험)

기호설명

()_p = subscript for the shell element
 ()_s = subscript for the solid element
 ()_i = subscript for the initial state
 ()_f = subscript for the final state
 C = speed of the air
 l = characteristic length
 λ = Lamé constant
 G = impact acceleration or shear modulus
 ω = angular frequency
 h = height or distance of the free drop

g = gravitational acceleration
 ρ = material density
 v = the free-drop velocity

1. 서론

유통과정에서 제품이 예측하지 못한 상황 때문에 낙하하여 손상된다면 비록 고급 제품이라 할지라도 그 신뢰도가 떨어질 것이다. 따라서 제품은 내충격성과 운송환경을 만족하는 포장설계를 반드시 병행해야 된다. 특히 최근의 가정용 전자제품은

접수일: 2005년 7월 12일; 게재승인일: 2005년 10월 7일
 * 교신저자: 금오공과대학교, 기계공학부(자동차)
 E-mail shyun@kumoh.ac.kr Tel. (054) 478-7324

고도로 정밀한 부품을 내장하고 있으며, 어느 일정한 충격량에 도달하면 제품의 기능을 완전히 상실하게 되는 경우가 대부분이다.

이러한 제품의 손상을 미연에 방지하기 위하여 순수 제품의 낙하시험을 수행하여, 즉 제품이 미포장된 상태에서 낙하시켜 내장재의 내충격에 대한 파손강도를 미리 파악해야 한다. 종래에도 경험적으로 설계된 포장재를 사용하여 시험을 수행하고 있다. 이러한 시험을 통해 얻은 제품의 내충격 강도와 완충포장재가 흡수된 충격량을 반복적으로 측정하고 비교함으로써 포장설계를 하였다. 그러나 이와 같은 시행착오는 시제작과 반복시험으로 인하여 포장재 설계에 많은 시간과 비용이 요구되어진다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 유한요소법을 이용하여 제품과 포장재를 설계한 후, 낙하 시뮬레이션을 통해 제품의 파손강도 이하가 되도록 포장기술을 개발함으로써 개발비용 절감효과를 거둘 수 있으리라 예측된다.¹

따라서 본 연구에서는 모니터와 포장재를 자유낙하용 유한요소모델로 생성하여 해석하고, 이를 낙하충격시험 결과와 비교하여 포장재 설계의 방법을 제시하고자 한다.

2. 유한요소 모델링

2.1 모니터 모델링

시뮬레이션에 이용하기 위한 유한요소모델을 만들기 위해서는 와이어 프레임 형성을 위한 도면이 만들어진 후, 모니터의 6개 구성품과 박스의 실제형상을 표현하고자 3차원 솔리드 요소를 사용하면 좋으나, 요소 수의 증가로 해석시간이 길어진다. 이를 피하고자 규칙적인 분할(mapped mesh)과 셸 요소를 이용하여 모니터의 구성품들에 대한 유한요소 모델을 Fig. 1과 같이 완성하였다. 이때 낙하충격으로 인하여 치명적으로 손상을 받는 부품, 즉 천공으로 이루어진 박막형태의 폼드 마스크(formed mask)에서 변형을 측정할 수 있도록 충격력을 전달할 수 있는 구성품의 조합으로 이루어져야 한다. 본 연구에서는 튜브 외곽부(funnel)와 화면 보호대(panel), 스프링, 지지틀(support frame)과 내부 보호대(inner shield), 폼드 마스크(formed mask)를 구성품 모델로 만들었다.²

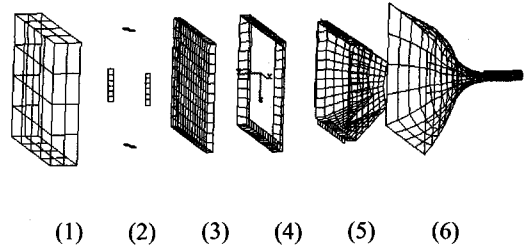


Fig. 1 Six components consisting of monitor tube and their containing box: (1)panel, (2)spring, (3)formed mask, (4)support frame, (5)inner shield, (6)funnel

2.2 패키징부 모델링

완충포장재로 사용된 박스는 얇은 평판의 형태를 가지므로 와이어 모델은 중립면을 기준으로 하는 셸 요소를 사용하였다. 저밀도용 완충 포장재(EPP: expanded polypropylene)를 재료로 하는 패키징부의 기하학적 형상은 단순하지가 않다. 수 많은 자유곡면으로 형성된 복잡한 패키징부는 사면체의 솔리드 요소를 이용한 임의적인 분할(free mesh)을 적용하면 해석시간이 늘어날 뿐 아니라, 모델 생성시 체적을 인식하지 못하는 요소를 생성하는 오류(no-area element)가 빈번히 발생하기 때문에 규칙적인 분할을 사용하였다. 패키징부에서 이러한 분할은 자유곡면을 유한갯수의 선형곡면으로 이상화시킴으로 실제형상과 차이가 있다. 그러나 자유낙하에서의 충격가속도는 관성량에 따라 달라지므로 이에 상응하는 질량을 보정하여 모델을 수정하였다. 따라서 패키징부 유한요소모델은 셸 요소와 직육면체 요소로만 생성되었다.

패키징부의 유한요소 모델 완성과정을 살펴보면 솔리드 요소를 선형 삼각뿔 요소로 선택했을 때, 패키징의 곡면부에서 요소들의 심한 편중현상이 일어나며 이로 인해 요소의 생성 에러가 발생하였다. 즉, 왜곡 요소(warping element)와 형상비(aspect ratio)가 지나치게 큰 요소를 포함하는 유한요소 모델이 생성됨을 의미한다. 그리고 해석시간에 절대적인 영향을 미치는 요소의 수가 지나치게 많이 생성된다. 이러한 문제점이 발생한 근본적인 원인은 와이어 모델이 수많은 곡면 부를 가지고 있기 때문이다. 그러므로 와이어 모델 곡면부의 선형화가 불가피하였고, 요소의 수를 획기적으로 줄이기 위해 솔리드 요

소의 형태를 직육면체 요소(brick element)로 사용하여 Fig. 2와 같이 패킹부 모델을 생성하였다. 이것은 모니터 구성품을 모두 결합한 자유낙하용 해석모델이다.

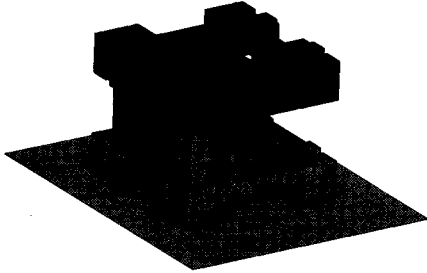


Fig. 2 A combined model of the packing and the monitor

해석모델을 낙하시켰을 때, 동적 거동이 저주파 영역에서 나타나는지 아니면 충돌과 같은 고주파수 영역에서 나타나는지를 판단해야 한다. 이러한 주파수 범위를 고려하고 충돌과 같은 고주파수를 갖는 해석을 하기 위해서는 양함수(explicit) 체계를 이용하는 수치해석 코드가 유리하다. 그 이유는 양함수를 이용할 경우, 해를 구할 때 강성행렬을 풀기 위한 방정식이 불필요하며, 적분시간 간격이 안정하면 정확도가 보장된다. 따라서 본 연구에서는 양함수 적분체계를 사용하는 해석기구인 Pam-Crash를 사용하였다.³ 모니터의 구성품에 사용된 쉘 요소와 패킹부에 사용된 솔리드 요소의 특성길이(characteristic length) l 의 값에 따라서 시간적분법으로 안정한 해를 구할 수 있다. 이때 요구되어지는 시간간격 Δt 는 쉘 요소와 솔리드 요소의 경우 각각 식 (1)과 (2)로 표현된다.⁴

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

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

여기서, 첨자 p 와 s 는 각각 쉘과 솔리드, C 는 음속, E 는 영률, ρ 는 밀도, ν 는 프와송비, λ 는 라메상수, G 는 전단탄성계수이다.

2.3 자유낙하 시뮬레이션

CAE(Computer Aided Engineering) 모델은 실제 모델에 대한 낙하 충격실험을 재현할 수 있도록 만들어져야 한다. 시뮬레이션에 사용되는 재료 물성치는 실험으로부터 도출되었다. 낙하자세는 돌발적이고 임의적이지만, 그 대표적인 자유낙하는 포장된 상자를 기준으로 1각 3면 6면 방향에 대하여 연속적으로 수행되어야 한다. 그러나 방향성을 가진 자유낙하(directional free drop) 시뮬레이션에서 순차적인 시험은 불가능하다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 충격량이 가장 작을 것으로 예상하는 후면방향과 Fig. 4와 같이 충격량이 가장 클 것으로 예상하는 모서리방향의 자유낙하만을 수행할 것이다.

낙하방향을 -Y로 했을 때, 낙하 충돌직후의 모습을 Fig. 5에 나타냈다. 이때 측정하는 충격가속도는 모니터 패널(panel)의 중심과 폼드 마스크(formed mask)중심에 설정하고 500 Hz의 저역통과필터를 사용하여 산출하였다.⁵

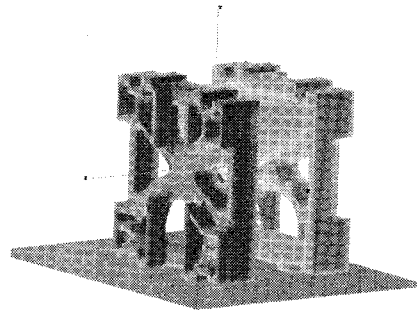


Fig. 3 The backward free drop simulation

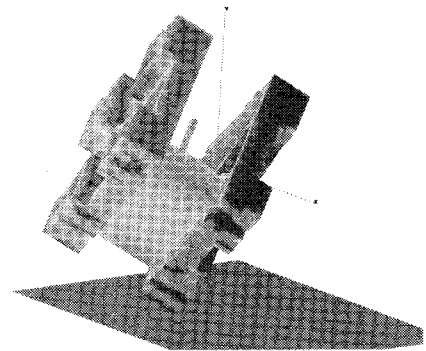


Fig. 4 The vertex free drop simulation

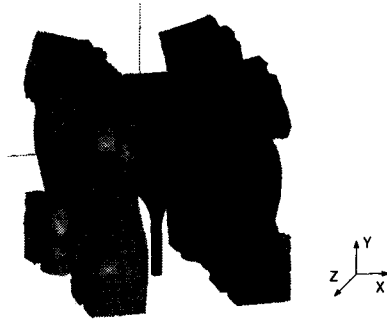


Fig. 5 The configuration after the impact of the free drop

2.4 시뮬레이션 결과

패널 중앙부에서는 가속도와 변위, 모니터와 패킹(packaging)사이에서 발생하는 접촉력(contact force)을 Fig. 6과 Fig. 8에서 비교하여 보면, 가속도와 접촉력의 경우 모서리낙하의 파형은 정현반파 형태에 가까워진다는 것을 알 수 있다. 이때 후면낙하인 경우 패널의 가속도는 다음장에서 논의 될 실험으로도 측정 가능하고 폼드 마스크의 손상에 직접적인 영향을 준다. 그러나 모서리낙하시에는 해석치와 같은 측정치를 실험적으로 구하기가 어렵다. 또한 충격작용시간이 비교적 긴 후면낙하의 경우, 모서리방향 낙하시의 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 전달함으로써 어느 정도 시간지연이 발생한다. 그러나 이 두 가지 물리량의 절대값이 변화하는 형태는 거의 일치함을 알 수 있다. 모니터 끝단의 변위를 살펴보면, 후면낙하의 변위는 실제로 모니터에 손상을 줄 수 있는 측정치로서 낙하시 박스에 모니터 끝단의 접촉여부를 추적할 수 있는 중요한 물리량이다.

폼드 마스크 중앙부에서의 가속도와 응력 및 변위를 알아보기 위해 Fig. 7과 Fig. 9를 비교하여 보면, 낙하 충돌시에 내장 부품인 폼드 마스크에 발생하는 응력과 가속도는 거의 동일한 시간에 최대값이 발생함을 알 수 있다. 응력은 항복응력(yield stress) 0.23 Gpa에 훨씬 못 미치지만, 충돌시

에 발생하는 가속도 값은 후면낙하시에 상대적으로 큰 값을 가리키고 있는 것을 Table 1에 정리하였다. 하지만 폼드 마스크는 두께가 얇은 박막으로서 탄성이 큰 재료이기 때문에 매우 큰 값의 충격가속도 G 가 발생하나 그 진폭은 매우 미미하다. 따라서 폼드 마스크의 손상여부를 판단하기 위해서는 응력을 기준으로 판단하여야 한다.

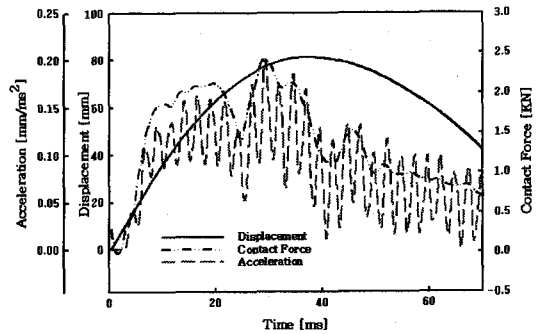


Fig. 6 Acceleration and displacement at the panel center and contact force between tube and packing in case of the backward drop

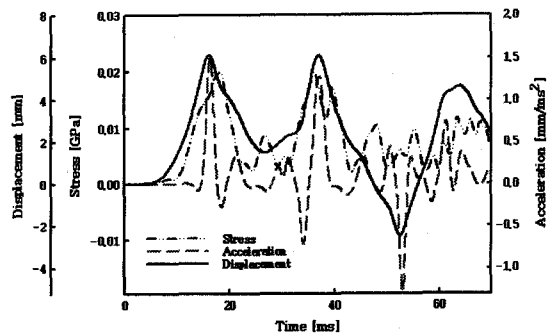


Fig. 7 Acceleration, stress and displacement at the formed mask center in case of the backward drop

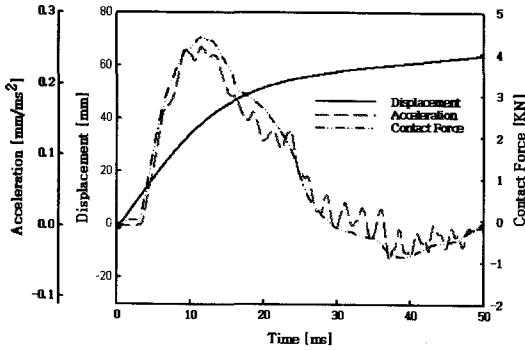


Fig. 8 Acceleration and displacement at the panel center and contact force between tube and packing in case of the vertex drop

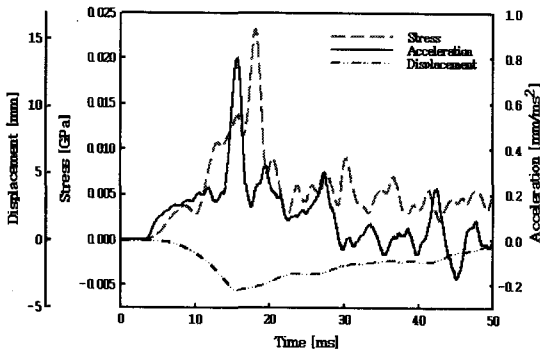


Fig. 9 Acceleration, stress and displacement at the formed mask center in case of the vertex drop

Table 1 The simulation result

측정치	낙하	후면	모서리
패널가속도	[G]	20.1	54.6
무게중심 가속도	[G]	13.6	28.5
폼드 마스크 가속도	[G]	247.7	52.2
폼드 마스크 응력	[Gpa]	0.020	0.017
평가		안전	안전

3. 낙하충격실험

3.1 낙하충격 실험이론

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, 낙하 자세, 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(lowpass filter)를 이용하여 제거하여야 한다.

따라서 질량 m 의 제품이 일정한 높이 h_f 에서 h_i 로 자유낙하 한다고 가정하면, 낙하 전후 제품의 위치에너지 변화량이 충돌과 동시에 운동에너지로 모두 변환된다면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$mg(h_f - h_i) = \frac{1}{2} m (v_f^2 - v_i^2) \quad (3)$$

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

$$v_f - v_i = \sqrt{2gh} \quad (4)$$

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

$$a = (v_f - v_i) \times \omega \quad (5)$$

$$G = (v_f - v_i) \times \omega / g = \sqrt{2gh} \times \frac{\pi}{D} / g \quad (6)$$

여기서 G 는 제품의 가속도 a 와 중력가속도 g 와의 비이며, D 는 제품이 낙하충돌시 발생하는 내장품의 정현반파 진폭이고 이의 측정방법은 ASTM규정에 나타나 있다.⁶⁻⁷

3.2 순수 모니터 낙하실험

낙하충격시험의 목적은 순수 제품이 낙하 충격에 견디는 충격가속도 값을 파악함으로써 완충포장재의 설계 기준을 제시하기 위한 것이다. 그리고 순수 모니터 낙하시험에 의해 측정되는 충격파형, 최대가속도, 작용시간은 제품의 부위에 따라 응답가속도가 다르기 때문에 패널의 충격가속도를 제품가속도의 기준으로 정한다. 그리고 Fig. 10과 같이 패널위에 사각케이스로 튜브를 고정시키고 패널을 후면방향으로 낙하시켜 베이스 위의 완충재(cushioning material)에 충돌시킨다. 이때 완충재와 베이스 사이에 가속도 측정장치를 설치

하여 제품에 미치는 충격가속도를 얻는다.⁸ 이 방법 및 절차는 ASTM의 기준을 적용하였다. 여기서 최대 충격가속도의 측정기준은 순수 모니터 내에 내장되어 있는 폼드 마스크의 변형이 생기기 직전에 튜브에서 발생하는 가속도로 정하였다.

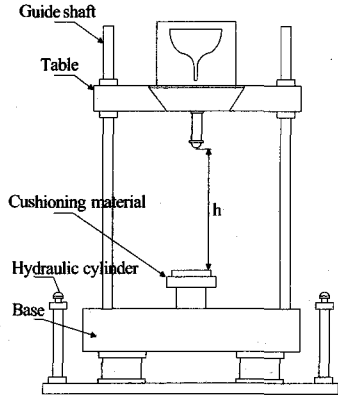


Fig. 10 The schematic of the pure drop test equipment

낙하높이가 340 mm, 낙하질량이 12.0 kg일 때, 순수 튜브내의 폼드 마스크 변형이 이루어지는 최대 충격가속도는 패널 중앙에서 평균 37.2 G로 측정되었다. 따라서 이 충격가속도 값이 완충포장재의 설계의 기준이 되며, 완충포장한 모니터의 자유낙하 시뮬레이션에서 패널 중앙부에서 측정한 충격가속도 값이 이들 값보다 작아야 한다.

3.3 완충포장된 모니터 낙하실험

이 실험은 완충포장된 상태에서 낙하높이가 760 mm, 낙하질량이 18.32 kg일 때, 순수 모니터 낙하시험의 충격가속도 측정치와 비교하여 안전한 완충 포장재를 설계하기 위함이 목적이며, 순수 모니터 낙하시험과는 달리 가속도계(accelerometer)를 모니터를 완충포장한 상태에서 패널의 중앙에 설치한 상태에서 후면 방향으로 수직 낙하시킨다.⁸ 그리고 데이터 획득 및 실험방법 및 절차는 ASTM의 기준을 적용하였다.⁶⁻⁷ 이때, 충격가속도가 평균 21.2 G로 측정되었다. 순수 튜브낙하 시험에서 패널의 허용 충격가속도에 비해 낮은 수치를 나타내고 있음을 알 수 있었고, 구성품의 손상은 일어나지 않았다.

3.4 낙하실험과 시뮬레이션 결과비교

3.2절에서 이루어진 순수 모니터 낙하시험 중에서 후면낙하시, 패널 중심에서 충격 가속도를 관찰한 결과, 평균 37.2 G이하의 충격에서는 모니터가 손상되지 않는다는 것을 알 수 있었다. 그리고 3.3절에서 완충 포장한 모니터를 낙하시킨 결과의 평균 가속도 값이 21.2 G를 나타냈다. 따라서 모니터를 보호하기 위한 완충포장재로 사용된 패킹부와 박스 골판지가 적합하다는 것을 알 수 있었으며, Table 1의 해석치인 20.1 G와 비교하여 볼 때 약 5% 오차를 가짐으로써 실험과 시뮬레이션이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 2 The comparison of results between pure/packed monitor test and simulation

측정치		후면낙하	모서리
순수낙하	패널가속도 [G]	37.2	-
완충포장낙하	패널가속도 [G]	21.2	-
시뮬레이션	패널가속도 [G]	20.1	54.6
	무게중심가속도 [G]	13.6	28.5
	폼드 마스크가속도 [G]	247.7	52.2
	폼드 마스크응력 [GPa]	0.020	0.017
	폼드 마스크항복응력 [GPa]	0.230	0.230
	평가		안전

Table 2는 후면방향의 순수 모니터 낙하시험 및 완충포장한 모니터 낙하시험과 시뮬레이션 결과를 비교하여 보면 시뮬레이션을 위한 유한요소 모델이 적합하다는 것을 알 수 있다. 그리고 모서리방향의 완충포장한 모니터의 자유낙하시험과 순수 모니터 낙하시험은 가속도계 설치와 G값의 측정이 불가능하였지만 낙하 시뮬레이션을 이용하여 폼드 마스크에서 발생하는 응력을 항복응력과 비교하여 볼 수 있었다. 그 결과 모서리방향에서도 안전하다는 것을 알 수 있다. 또한 유한요소 모델의 모서리방향 낙하 시뮬레이션에서 패널의 가속도 G값이 후면낙하에 비해 상대적으로 높다. 그 이유는 후면낙하에 비하여 낙하시 지면과의 접촉면적이 매우 작고, 상대적으로 완충재로 사용되어진 패킹의 두께가 얇기

때문이다. 하지만 G 값이 후면낙하에 비하여 높아지더라도 패널은 손상되지 않는다는 것을 알 수 있다. 무게중심에서 발생하는 가속도와 패널 중심의 가속도 G 값이 유사한 경향성을 가지고 있으며, G 값의 차이는 측정하는 위치가 서로 다르기 때문임을 알 수 있다.

따라서 후면낙하 시뮬레이션 결과의 타당성이 완충포장한 모니터의 자유낙하시험을 통해 비교 검증되었기 때문에 모서리방향에서는 시뮬레이션만으로도 완충재의 적합성을 판단할 수 있다. 그리고 완충재의 설계가 변경되더라도 이미 확보된 재료 물성과 정형화된 구속조건을 활용한다면, 시험을 거치지 않고 시뮬레이션만으로 포장설계를 할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 모니터의 자유낙하 중에서 대표적인 자세인 후면방향과 모서리방향 낙하에 대하여 충격거동을 살펴보고자 유한요소 모델을 완성하여 해석한 결과치인 구성품의 가속도, 변위, 접촉력, 응력을 순수낙하시험 및 완충포장후 낙하시험의 결과치와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모니터의 6개 구성부품과 패킹(packaging) 및 박스(box)의 유한요소 모델을 완성하는데 있어, 양할 수 알고리즘(explicit algorithm)에 의한 안정적인 해를 위하여 쉘 요소와 솔리드 요소에 대하여 특성길이를 만족하는 모델을 만들었다.
- 2) 유한요소 모델의 후면 및 모서리방향의 낙하 시뮬레이션에서 패널에서의 가속도, 튜브와 패킹 사이의 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) 자유낙하 시뮬레이션의 결과치는 실제낙하시험과 약 5%의 오차범위에서 일치하므로 포장설계의 타당성을 확보할 수 있다.

후 기

본 연구는 2003년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문임.

참고문헌

1. Kim, H, Park, S. H. and Kim, W. J., "A Study on the Cushion Package Design of a Monitor using Finite Element Method," J of the KSPE, Vol. 17, No. 12, pp. 88-93, 2000.
2. Kim, Kug Weon and Kim, Nam Woong, "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.
3. "Pam-Crash User's Manual," ESI Group, 2002.
4. Zukas, Jonas A., Nicholas, Theodore, Swift, Hallock F., Greszczuk, Longin B. and Curran, Donald R., "Impact Dynamics," John Wiley & Sons, Inc. pp 377-382, 1992.
5. Wells, Lisa K., "LabVIEW-Student Edition User's Guide," Prentice Hall, 1995.
6. "Mechanical-shock fragility of product, using shock machines," ASTM D 3332-88.
7. "Environmental Impact Test (Electricity & Electron)," Korean Standard, KS C 0241.
8. "Impact Test Machine Manual," Yoshida Seiki Co. Ltd., Japan, 2000.