

# 휴대용 단말기의 낙하충격해석 및 실험적 검증

김진곤<sup>†</sup> · 이준영\* · 이신영\*\*

(2000년 9월 20일 접수, 2001년 2월 10일 심사완료)

## Drop/Impact Simulation and Experimental Verification of Mobile Phone

Jingon Kim, Joonyoung Lee and Shinyoung Lee

**Key Words :** Drop/Impact Simulation(낙하충격해석), Mobile Phone(휴대용 단말기), LS-DYNA

### Abstract

In this paper, the drop/impact simulation for a mobile phone has been carried out with the explicit code LS-DYNA and its validation has been experimentally verified. The small size of this kind of electronics products makes it time-consuming, and difficult to conduct drop tests to detect the failure mechanism and identify their drop behaviors. Strict drop/impact performance criteria of such hand held electronic products as mobile phones play an important role in their design because these products must withstand both normal and unexpected shock. Usually, the product durability on drop impact depends on designer's experience. The present reliable methodology of drop/impact simulation provides an efficient and powerful vehicle to improve the design quality and reduce the design period.

### 1. 서론

전자제품의 충격설계는 대부분 가전 제품에 대하여는 유통과정에서의 파손 방지 및 이를 위한 포장설계<sup>(1-4)</sup>가 목적이었으나 최근에는 고가 휴대용 전자제품의 급격한 보급에 따라 사용 중 충격 파손에 대한 대책도 요구되고 있다. 낙하나 외부 충격은 휴대용 전자제품의 가장 주된 파손요인이며, 충격방지설계를 위해서는 금형제작이 끝난 후 시제품에 의해서 충격시험이 이루어지게 된다. 제품의 충격 허용치가 낮은 경우 금형을 수정해야 하며 이는 금형수명단축 및 납기지연으로 인한 시장 선점의 기회를 상실하는 큰 원인이 된다. 현재까지의 휴대용 전자제품의 충격설계는 대부분 설계자의 경험에 의존한 반복적인 설계방법에 의존하고 있으며, 축적된 경험지식의 부재로 낙하/충격 시뮬레이션을 이용한 과학적 설계방법의 필요성은 더욱 커지고 있다.

하드웨어의 급속한 성능향상과 충격해석 소프트웨어의 발달은 이러한 시뮬레이션에 의한 휴대용 전자제품의 충격설계를 가능하게 하였다. 하지만, 다른 분야와는 달리 아직까지 휴대용 단말기의 특성을 고려한 신뢰성 있는 모델링 기법 및 해석결과의 검증에 대한 연구<sup>(5-7)</sup>는 국내에서는 미흡하다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 낙하/충격 해석결과를 실험결과와 비교 검증함으로써 휴대용 단말기에 대한 신뢰성 있는 해석기법을 마련하고자 하였다. 해석검증 방법은 첫째, 시뮬레이션을 통하여 구한 단말기의 충격에 의한 포괄적인 거동을 초당 2000 프레임을 촬영할 수 있는 고속촬영기를 이용하여 관찰한 실제 충격거동과 비교하였다. 특히, 배터리의 충격에 의한 해리 및 앞쪽 폴더 부분의 회전 거동 등의 충격거동을 살펴보았다. 둘째, 실제제품의 충격실험으로부터 구한 특정위치의 가속도 결과를 해석으로부터 구한 결과와 비교함으로써 제품의 국부적인 위치에서 결과의 신뢰성을 검증하였다. 마지막으로, 실제 충격에 의한 신뢰성 검사결과 발생된 제품의 파손위치와 해석상의 파손가능위치를 비교하였다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

E-mail : hybrid67@unitel.co.kr  
TEL : (053)850-2724 FAX : (053)850-2705

\* 삼성전자 E-CIM 팀

\*\* 회원, 삼성전자 E-CIM 팀

해석에는 충격해석 및 동적천이해석(transient dynamic analysis)에 가장 널리 쓰이고 있는 LS-DYNA<sup>(8)</sup>를 사용하였으며, 제품의 모델링은 I-DEAS master series 7.0을 이용하였다. 해석 결과와 실험결과와의 검증은 통하여 본 연구에서 사용한 모델링 및 해석 방법의 신뢰성을 확인할 수 있었으며, 이러한 모델링 및 해석기법은 향후 휴대용 단말기의 내충격 설계에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만, 보다 더 정확하고 가치있는 해석결과를 위해서는 재료의 물성치 및 액정과 PCB의 파손 기준등에 대한 체계적인 연구가 지속적으로 수반되어야 할 것으로 보인다.

## 2. 충격실험

충격실험은 제품의 충격강도를 평가하기 위해서 수행하나, 본 연구에서는 충격실험을 대체할 충격해석 기법의 확립이 목적이므로 해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 충격실험을 수행하였다. 본 연구에서는 해석결과의 검증을 위해서 크게 3가지 방법으로 충격 시험을 수행하여 그 결과를 비교/검증하고자 한다.

- 고속촬영을 통한 전체 충격거동 비교
- 낙하충격으로 인한 국부 충격가속도 비교
- 통계적 신뢰성 시험 결과와의 비교

먼저, 고속 디지털 카메라를 이용하여 휴대용 단말기의 낙하충격 시 전체적인 제품의 충격거동을 살펴보았다. 사용한 고속 디지털 카메라는 일본 NAC Inc.사의 MEMRECAM Ci-4-U 모델로서 100~2000 fps(frame per second)의 촬영속도를 가지고 있다. 본 실험에서는 2000 fps로 촬영하였다.

다음으로, Fig. 1과 같은 충격시험기를 이용하여 낙하충격으로 인한 휴대용 단말기의 국부적인 위치에서 발생하는 충격가속도를 측정하여 해석결과와 정량적으로 비교하였다. 사용된 충격시험기는 Fig. 1과 같이 제품을 올려 놓는 테이블과 충격파의 형태 및 크기를 조절할 수 있는 프로그래머, 그리고 테이블을 상하로 이동하는 호이스트 등으로 구성되어 있다. 측정 장비는 가속도를 측정하기 위한 가속도계와 이들 값을 저장하기 위한 데이터 레코드로 구성되어 있다. 시험은 휴대용 단말기의 수직, 수평방향으로 나누어 수행하였으며, 수직방향은 Fig. 1과 같은 충격시험기를 사용하여 53 cm높이에서 낙하시켜 제품상단의 가속도를 측정하였으며, 수평방향은 Fig. 2와 같은 자유낙하시험기를 이용해 28 cm높이에서 자유 낙하시켜 바닥에 충돌된 후의 폴더부에 발생하는 가속

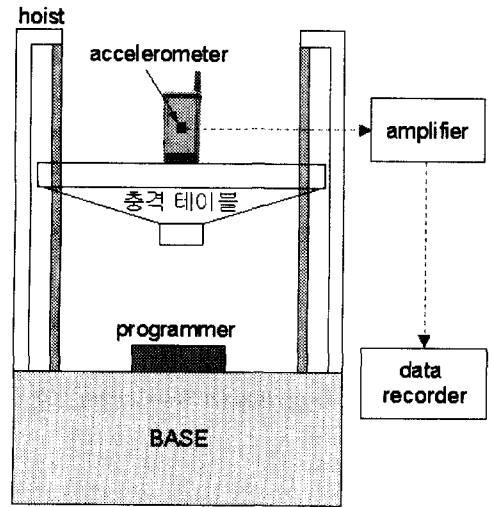


Fig. 1 Drop/Impact test in vertical direction

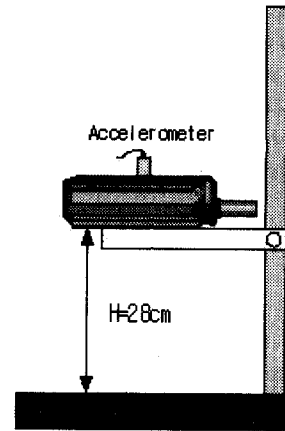


Fig. 2 Drop/Impact test in horizontal direction

도를 직접 측정하였다. 충격시험기를 사용한 수직 방향 낙하의 경우는 제품이 지그로 고정되어 있어 바닥면과의 접촉이 일정하지만, 자유낙하의 경우 제품의 무게관점으로 인해 수평으로 떨어뜨리는 것이 어렵다. 따라서, 충격해석 결과와의 비교를 정확히 하기 위해서, 높이를 28 cm로 낮게 하여 제품이 바닥에 충돌될 때 최대한 수평으로 면접촉이 이루어지게 하였다.

## 3. 유한요소모델링 및 해석조건

Fig. 3은 본 논문에서 해석하고자 하는 휴대용 단말기의 삼차원 솔리드 모델링이다. 제품의 주요 부품은 크게 폴더부 하우징, 액정, 본체부 하우징, PCB, 안테나, keypad, 배터리 그리고 기타 부품들

로 구성되어 있으며, 제품은 약 117 g 정도의 질량을 가진다.

제품의 유한요소 모델은 I-DEAS Master Series 7.0을 이용하여 Fig. 4와 같이 생성하였다. 제품의 형상을 보다 정확히 표현하여 유한요소모델링에 의한 수치적 오류를 최소화하기 위하여 폴더부 하우징과 본체부 하우징, PCB 등을 솔리드요소와 셸 요소를 혼합하여 모델링하였다. 하지만, NASTRAN이나 ANSYS와 같은 일반적인 내연적 (implicit) 시간 적분법을 적용한 유한요소 프로그램과 달리, 충격해석을 위해 본 논문에서 사용한 외연적 (explicit) 시간 적분법을 적용한 프로그램인 LS-DYNA는 솔리드 요소와 셸요소 간 결합 시 솔리드 요소의 회전 자유도를 적절히 생성시켜 주는 기능을 제공하고 있지 않다. 따라서, 보다 정확한 해석결과를 얻기 위하여 Fig. 5와 같이 솔리드 요소와 셸 요소간의 연결부에서 솔리드 요소에 회전자유도를 보완하기 위하여 보조 셸 요소를 추가

로 모델링하였다. 이 경우 추가되는 보조 셸 요소의 밀도만 인접한 요소들보다 상대적으로 매우 작게 부과함으로써 추가적인 셸 요소로 인해 증가되는 질량은 무시할 수 있는 수준이 되게 하였다.

충격시 배터리부의 이탈현상을 보다 정확히 구현하기 위하여, 배터리 하단부와 본체 뒷면 하우징부의 연결 부위를 실제 형상대로 모델링하였다. 그리고, 배터리 상단 고리 리브와 본체 하우징의 위쪽 연결부는 선형 병진 스프링(linear translational spring)을 이용하여 모델링하였다. 폴더부와 본체부 간의 힌지 연결부는 충격 시 회전을 고려하기 위하여 실제 형상과 유사하게 LS-DYNA의 레벨루트 조인트(revolute joint)를<sup>(8)</sup> 이용하여 모델링한 후, Fig. 6과 같이 비선형 강성을 가지는 회전 스프링(torsional spring)으로 연결하였다.

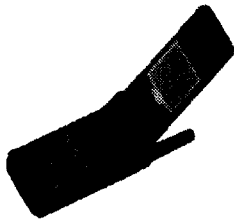


Fig. 3 3D solid modelling of mobile phone

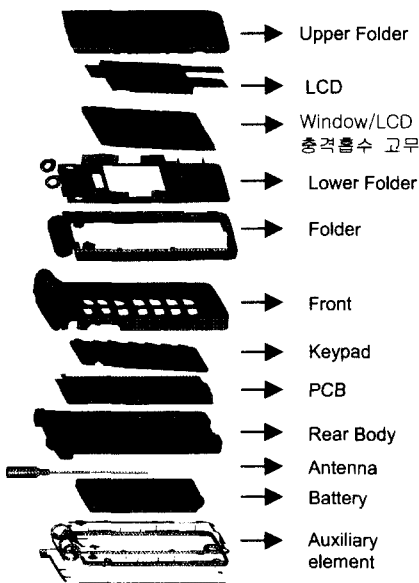


Fig. 4 Finite element modelling of mobile phone

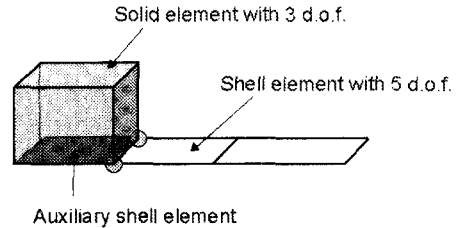


Fig. 5 Connection of shell and solid elements

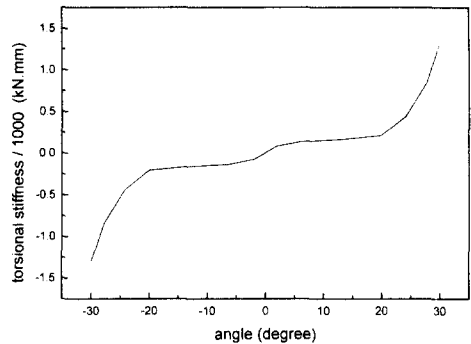


Fig. 6 Nonlinear torsional spring to depict the hinge between the folder and body housing

Table 1 Number of elements

Type	Number
Quadratic Shell Element	8206
Triangular Shell Element	547
Solid Element	10016
Beam Element	1
Spring Element	2

Table 2 Material properties of parts (unit = kN, mm, kg, ms)

Part	Material	Material Type	E	$\nu$	density	$\sigma_Y$
Body-Front	Plastic	Piecewise_Linear_Plasticity	2.45	0.38	1.30e-6	0.058
Decoration	Al	Elastic	70.0	0.32	3.57e-6	
Keypad	Rubber	Elastic	0.72	0.4	1.20e-6	
Window	Acryl	Piecewise_Linear_Plasticity	2.80	0.38	1.68e-6	0.041
PCB	Epoxy	Elastic	14.8	0.38	4.90e-6	
LCD	Glass	Elastic	107	0.29	3.32e-6	
Antenna	Steel	Elastic	207	0.29	3.10e-6	
Auxiliary	-	Piecewise_Linear_Plasticity	2.45	0.38	1.00e-7	0.058

제품의 유한요소 모델링 시 삼각형 요소의 수는 수치 해석상 정확성을 높이기 위해 전체 셀 요소의 10%를 넘지 않도록 하였으며, Table 1에 제품의 유한요소 모델링에 대한 전체적인 정보를 요약하였다. PCB에는 여러가지 복잡하고 미세한 반도체 소자들이 조립되어 있으나, 모델링에서는 크기가 큰 몇 개의 소자만 모델링하였으며 총 질량을 측정하여 물성치에 반영하였다. 구조물이 동적 하중 및 충격하중을 받을 경우 변형률은 시간에 따라 변화하는데 높은 변형률 속도하에서는 탄성 에너지파의 전파효과가 커지므로 재질 특성치를 변형률에 따라 다르게 해야 한다. 하지만, 파손이 발생하지 않는 대부분의 영역에서 변형률이 적어서 본 연구에서는 변형률 속도를 고려한 재료물성치를 사용하지 않았다. 본 해석에서 사용한 부품별 재료 물성치는 Table 2에 정리하였다.

### 3.1 해석조건

높이  $h$ 에서의 낙하충격 해석을 위하여 바닥면을 강체 벽(rigid wall)으로 모델링하여 제품과 접촉을 정의하였다. 실험방법과 동일하게 수평방향과 수직방향에 대해 낙하충격해석을 실시하였다. 계산시간을 절약하기 위하여 해당 높이에서 자유낙하 하였을 때의 속도를 제품에 초기속도로 부여하였다. 초기속도는 에너지 보존의 법칙에 의하여 아래와 같이 구하여진다.

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

접촉 타입에 따른 해석 결과의 차이는 관심영역이 충격 후 몇 번 되튐(rebound) 후가 아니면 결과에 큰 영향이 없으며, 외연적 방법에서는 접촉 처리에 소요되는 계산시간이 전체 계산시간에서 차지하는 비중이 낮으므로 각 부품간의 접촉은 "automatic single surface" 타입을 이용하여 자동적으로 처리되도록 하였다. 부품간의 체결시 조임

력에 의한 초기 응력 상태가 충격에 의한 제품의 동적거동에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 초기 응력 상태는 ANSYS/LS-DYNA 프로그램의 Implicit-to-Explicit Sequential 해석기법을<sup>(9)</sup> 사용한다면 고려하는 것이 가능하지만, 본 해석에서는 해석의 간략화를 위하여 그 영향이 크지 않다고 가정하여 고려하지 않았다.

본 연구에서 사용한 LS-DYNA와 같은 외연적 방법은 중앙차분법(central difference method)과 같은 시간적분법을 사용하여 시간  $t_{n+1}$ 에서 식 (2)와 같은 최종적인 방정식을 가지게 되며, 시간 간격에 대한 안정성 문제로 매우 짧은 시간 동안의 동적 해석에는 해석시간이 적당하고 대변형과 재료의 비선형성을 쉽게 처리할 수 있어 충격해석에 널리 사용되고 있다.

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] + \frac{2}{\Delta t}[C]\right)\{u_{n+1}\} = \{F_n^a\} - [k]\{u_n\} + \dots \quad (2)$$

하지만, 해석시 시간 간격의 크기는 가장 작은 요소에 대해 Courant-Friedrichs-Levy 조건에<sup>(9)</sup> 의해 설정된다. 제품의 상세 모델링을 위해 불가피하게 사용되어지는 매우 작은 요소는 해석시간을 증가시켜, 제품의 내충격 설계를 위한 반복적 해석작업을 빠른 시간 안에 수행하는 것을 어렵게 만든다. 그렇지만, LS-DYNA에서 제공하는 질량보정(mass scaling) 방법을 이용하여 크기가 아주 작은 요소들의 질량을 아래 식과 같이 조정함으로써, 매우 작은 해석 시간간격을 원하는 시간 간격  $\Delta t_{specified}$ 로 변경시킬 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta t_{specified}}{l_i}\right)^2 = \frac{(1-\nu^2)\rho_i}{E}$$

$$\rho_i = \frac{(\Delta t_{specified})^2 E}{l_i^2 (1-\nu^2)} \quad \text{for element "i"} \quad (3)$$

위 식에서,  $\rho_i$ 는 요소  $i$ 의 질량밀도,  $E$ 는 탄성계수,  $\nu$ 는 Poisson's ratio를 나타내며, 그리고  $l_i$ 는 요소의 특성길이(characteristic length)로서 셀 요소의 경우 다음과 같이 정의된다.<sup>(9)</sup>

$$l_i = \frac{A}{\max(l_1, l_2, l_3, l_4)} \quad (4)$$

여기서,  $A$ 는 요소의 면적을,  $l_1 \sim l_4$ 는 사각형 셀 요소의 4변의 길이를 의미한다. 하지만, 이 방법의 사용시 해당 요소들의 질량이 변하여 해석대상 모델의 질량중심이 변경되므로, 질량 변화량이 해석 결과에 무시할 수준의 영향을 주도록 주의하여야 한다. 본 해석모델의 경우 가장 작은 요소에 대한 초기해석 시간 간격이  $0.5664e-4$  ms가 나왔으며, 10msec 해석시 CPU time이 HP J5000 하드웨어에서 14시간 23분이 소요되었다. 하지만 이러한 질량 보정 방법을 통하여 시간간격을  $0.8019e-4$  ms로 늘리면 제품에 추가되는 질량은 0.0016% 정도 늘어나게 되어 무시할 수준인 반면, CPU time은 9시간 7분으로 약 40%정도 감소시킬 수 있었다.

#### 4. 낙하충격해석 및 실험적 검증

##### 4.1 충격해석

해석은 각각 실험과의 비교를 위하여 수평방향과 수직방향에 대한 낙하충격해석을 수행하였다. 해석은 수직방향의 경우 53 cm높이에서 자유낙하하여 충격시험기의 충격테이블에서 측정된 가속도를 제품 바닥 유한요소 모델에 하중조건으로 주었으며, 제품의 지그로 고정된 부분은 적절한 구속을 부과하였다. 수평방향은 실험과 같은 높이로 자유낙하 되는 효과를 주기 위하여 충돌면 바로 아래에 강체벽(rigid wall)을 만들고, 제품과 강체벽 사이의 충돌이 일어나도록 접촉처리를 한 후, 충돌직전 식 (1)과 같이 계산된 초기속도와 충격가속도를 제품의 유한요소모델에 초기조건으로 부여하였다.

Fig. 7은 수평방향 낙하시 시간에 대한 제품이 발생하는 에너지 분포를 보여주고 있다. 제품이 낙하하면 낙하높이 만큼의 위치에너지가 낙하하면서 운동에너지로 바뀌게 되고, 이러한 에너지는 충돌 후 변형에너지로 바뀌게 된다. 제품이 되될 때에는 변형에너지 중 일부는 운동에너지로 다시 환원되어 되튀는데 기여하고, 나머지는 제품의 변형에너지로 남게 된다. Fig. 7의 해석 결과로부터 불안정한 변형모드를 유발시키는 가성에너지(hourglass energy)는 변형에너지에 비해 무시할 수

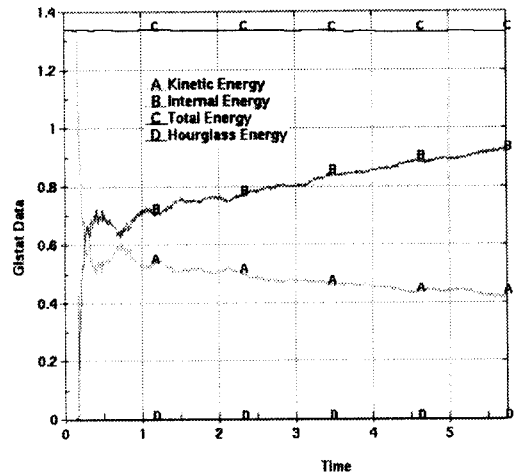


Fig. 7 Energy distribution over time in horizontally drop test (total, internal, kinetic, hourglass energy)

있는 수준으로, 전체적인 에너지 분포가 타당하게 나타나고 있어 본 해석이 제대로 수행되었음을 알 수 있다.

##### 4.2 실험적 검증

###### 4.2.1 충격거동 비교

고속촬영을 통한 비교는 제품의 외관적 거동만 볼 수 있으므로, 배터리의 해리와 앞쪽 폴더 힌지부의 회전거동을 해석결과와 중점적으로 살펴보았다.

Fig. 8은 수평방향 낙하시, 지면과의 충격 후 5.7 ms후의 충격거동을 비교한 결과이다. 비교결과 아래 몸체와의 충격 후 힌지에 의한 위쪽 폴더부의 회전 거동과 휴대용 단말기의 전체 회전거동이 비교적 잘 일치하였다. 이를 통해, 비선형 회전스프링을 이용한 폴더 힌지부의 모델링 기법의 타당성을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 수직방향 낙하시, 지면과의 충격 후 4msec 후의 충격거동을 비교한 결과이다. 수직방향 낙하의 경우 낙하충돌 직후의 전체적인 거동과 배터리의 해리현상 및 폴더부의 회전거동이 실제 고속촬영 한 실험 결과와 유사하게 나타났다.

###### 4.2.2 충격가속도 비교

다음으로, 정량적인 해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위해, 낙하충격시 제품의 국부적인 위치에서 발생하는 충격가속도를 측정하여 해석결과와 비교하였다. 수직방향은 Fig. 1과 같은 충격시험기를 사용하여 53 cm 높이에서 지그에 고정된 제품을 낙하시켜 제품상단의 가속도를 측정하였으며, 수평방

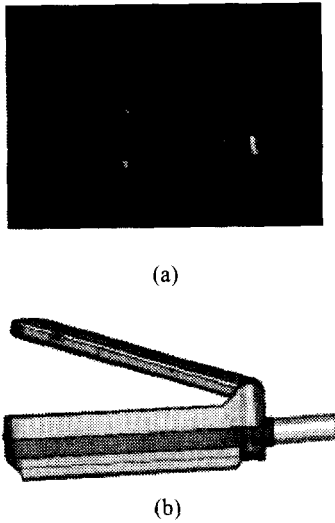


Fig. 8 Comparison of horizontal impact behavior at 5.7 ms obtained from (a) high speed camera and (b) simulation

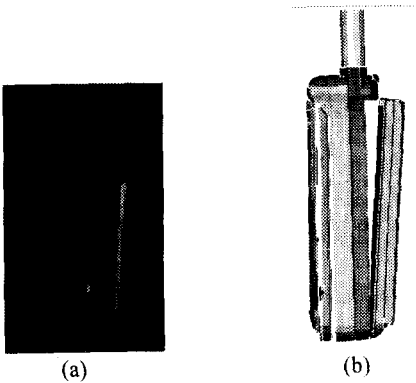


Fig. 9 Comparison of horizontal impact behavior at 3 ms obtained from (a) high speed camera and (b) simulation

향은 Fig. 2와 같은 자유낙하 시험기를 이용해 28 cm 높이에서 자유 낙하시켜 바닥에 충돌된 후의 폴더부 가속도를 직접 측정하였다. 낙하충격으로 인한 가속도는 같은 방향에 대해 3회씩 떨어뜨린 후 결과들의 평균값을 구하였으며, 주파수 필터링은 1000 Hz를 기준으로 진행하였다.

Fig. 10과 11은 각각 수평방향과 수직방향 낙하시의 측정위치에서의 실험과 해석으로부터 구한 가속도 이력을 보여주고 있다. 최대가속도는 수평방향 낙하의 경우 실험에서는 350 G, 해석결과는 462 G로 해석결과와 약 24% 정도의 차이를 보였다.

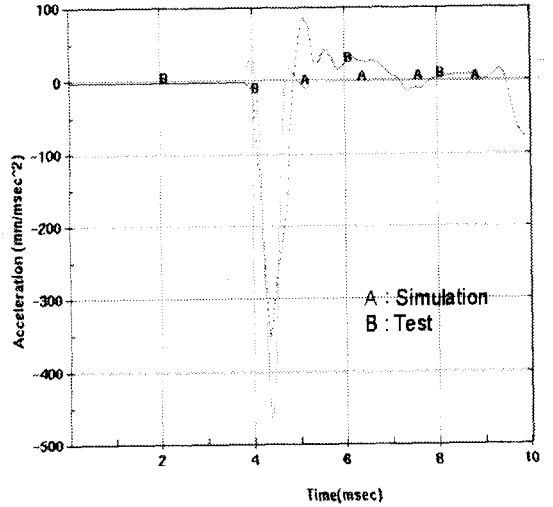


Fig. 10 Comparison of acceleration obtained from simulation and drop test in horizontal direction (drop height = 280mm)

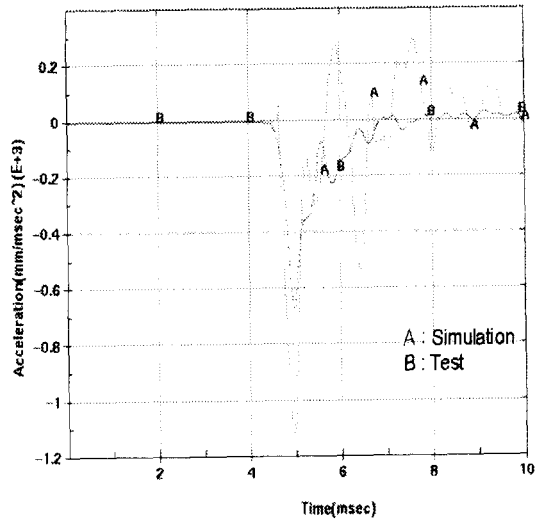


Fig. 11 Comparison of acceleration obtained from simulation and drop test in vertical direction (drop height = 530mm)

수직방향 낙하의 경우 수평방향 낙하시보다 실험 결과와 차이가 나는 이유는 제품의 충격낙하시 그에 고정된 부분의 해석상의 구속조건과 실제 조건과의 차이로 인한 것으로 판단된다.

결과로부터 본 연구에서 설정된 모델이 실제 실험한 결과와 비교적 근사한 거동을 보이고 있음을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

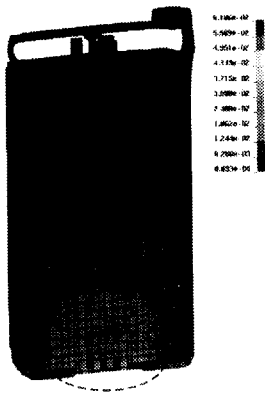


Fig. 12 Maximum stress distribution on lower body

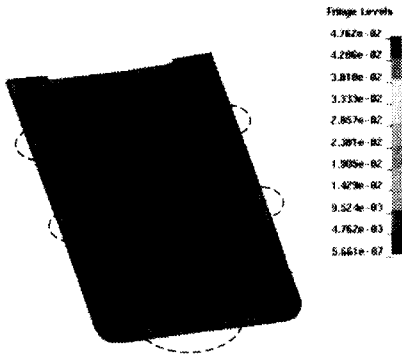


Fig. 13 Maximum stress distribution on upper folder

#### 4.2.3 신뢰성 시험 결과와의 비교

마지막으로, 제품의 1.5 m 낙하충격 신뢰성 시험으로부터 발생한 문제점들과 해석결과를 비교하였다. 1.5 m 높이에서의 자유낙하해석을 통한 제품의 정확한 파손예측은 정확한 재료의 물성값 미비, 부품간 체결에 의한 초기 응력상태 미고려 및 요소 형상에 따른 결과의 민감성 등으로 인하여 현실적으로 어렵지만, Von-Mises 응력값과 분포 영역을 고려하여 상대적 취약부위를 예측하였다.

신뢰성 시험에서 발생한 후면의 배터리 지지 리브의 파손 문제는, 해석에서도 Fig. 12와 같이 이 부위에서 항복응력( $0.041 \text{ kN/mm}^2$ )을 넘어서는  $0.0845 \text{ kN/mm}^2$  최대 응력이 넓은 범위에 걸쳐 발생하여 구조적인 문제가 야기될 가능성이 큰 것으로 나타났다. 그리고, 폴더 체결 후크(hook) 체결부의 벌어짐 현상도, 해석에서 Fig. 13과 같이 체결 부위에서 상대적으로 큰 응력과  $0.147$ 의 최대 변형률이 발생하여 신뢰성 실험 결과와 비교적 유

사한 결과를 보여주고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 휴대용 단말기 설계에 있어서 제품 설계 후 낙하충격실험을 통해 설계수정을 반복하는 기존의 방식에서 탈피하여, 설계 단계에서부터 제품의 낙하충격 시뮬레이션을 통하여 문제점을 발견하고 설계개선을 할 수 있는 보다 정확한 해석방법을 찾고자 하였다. 이를 위하여, 고속촬영을 통한 충격거동 비교, 국부적인 위치에서의 충격가속도 비교 그리고 제품의 신뢰성 시험결과 등과의 비교를 통하여 휴대용 단말기에 대한 최적의 모델링 방법 및 해석조건을 찾고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 해석결과는 실제 충격시 배터리의 해리 현상과 폴더부의 충격 후 회전거동 등 충격거동은 비교적 잘 묘사하였다.

(2) 국부적인 위치에서의 충격 가속도는 실험과 다소 차이를 보였다. 보다 정확한 비교를 위해서는 실험방법의 개선을 통하여 해석시 정확한 경계 및 충격조건 등을 손쉽게 구현하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

(3) 제품의 상대적 취약부위는 해석을 통하여 어느 정도 예측할 수 있었다. 하지만, 해석을 통한 제품의 명확한 파손 유무를 판정하기 위해서는 재질별 정확한 비선형 물성값 확보 및 부품간 체결에 의한 초기 응력상태 등을 고려하는 것이 필요할 것으로 보인다. 아울러, 실제 1각 3모서리 6면 방향에 대해 반복적으로 수행되는 제품의 충격실험 시 누적되는 충격손상을 해석에서 고려할 수 있는 방법 등에 대해서는 향후 지속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) 정완진, 부성운, 전삼표, 김동철, 1995, "전자제품의 충격설계," 대한기계학회지, 제35권, 제8호, pp. 678~690.
- (2) 최성식, 이종규, 1997, "낙하충격해석을 통한 Pulp Mold 완충재의 최적설계," '97 CAE for Industry, 대한기계학회, pp. 87~94.
- (3) Lye, S.W., Teo, M.Y. and Lew, S.C., 1995, "A Study of Shock Characterization for Protective Packaging Design," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 4, pp. 308~313.
- (4) Nakagima, T., Nogami, R., Teragish, Y. and Takada, T., 1993, "Optimum Design Method for Package Cushions," 일본기계학회논문집, 제59권, 제558호, pp. 624~628.

- (5) Wu,J., Yeh,C. and Wyatt,K., 1996, "Drop/Impact Simulation of Electronic Products," 4<sup>th</sup> International *LS-DYNA3D* Users Conference.
- (6) Song,G., Yeh,C. and Wyatt,K., 1998, "Phone Drop Simulation and Effect of Small Variations of Drop Angle," 5<sup>th</sup> International *LS-DYNA* Users Conference.
- (7) Choi,S.S., 1998, "Drop Impact Simulation for Optimum Design of TFT-LCD," 5<sup>th</sup> International *LS-DYNA* Users Conference.
- (8) LSTC, 1999, *LS-DYNA Keyword Users's Manual*, Ver. 950.
- (9) ANSYS, Inc., 1998, *ANSYS/LS-DYNA User's Guide*, U.S.A.