

전자 부품 충격 테스트를 위한 자유 낙하식 충격 시험기 개발

Development of Free Fall Drop Tester for Electronic Components

정인준¹, 장재영¹, 신동길^{2,#}
In Jun Jung¹, Jae Young Jang¹, and Dong-Kil Shin^{2,#}

¹ 영남대학교 대학원 자동차조명융합공학과 (Graduate School of Department of Automotive Lighting Convergence Engineering, Yeungnam University)

² 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam University)

Corresponding Author / E-mail: dkshin@yu.ac.kr, TEL: +82-53-810-4627

ORCID: 0000-0003-4995-799X

KEYWORDS: Drop tester (낙하 충격 시험기), Drop reliability (충격 신뢰성), Impact (충격), Electronic component (전자 부품), PCB (인쇄회로기판)

In this study, a free-fall drop tester was studied to test the impact reliability of small electronic components. The electronic component was fixed to the drop table and the table was fallen along guide rods. The impact energy was adjusted by the initial drop height, and the impact duration time was adjusted by inserted soft layers under the drop table. Table acceleration was achieved in the form of a half-sine that conforms to international standards. The developed tester was evaluated by a small printed circuit board. It was observed that the developed tester was fully utilized for the impact reliability assessment of electronic components.

Manuscript received: May 14, 2020 / Revised: August 12, 2020 / Accepted: September 8, 2020

NOMENCLATURE

t = Time

s = Displacement

v = Velocity

v_0 = Initial velocity

a = Acceleration

m = Mass of material

Subscript 1, 2 = Number of material

Subscript i = Initial state before impact

Subscript j = Final state after impact

1. 서론

휴대용 전자기기의 종류가 다양해지고, 크기가 작아짐에 따라 내부의 전자 부품들은 충격에 취약하지만 충격 하중에 노출

되는 경우가 많아지고 있다.¹ 친환경 자동차, 자율주행 자동차, 군용 장비 등의 분야에서도 전자 부품의 사용이 큰 폭으로 증가하고 있다. 차량용 전자 부품들은 차량의 주행 및 운용 상황에서 외부 충격에 대하여 내구성과 신뢰성을 높여 승객의 안전성을 확보하여야 한다. 이에 따라 전자 부품들의 충격 신뢰성 평가에 대한 요구가 증가하고 있다.^{2,3} 이와 연관된 국제 기구들에서는 시험법에 대한 표준을 제정하여 시행하고 있으며, 대표적으로 국제반도체표준협의기구(Joint Electron Device Engineering Council, JEDEC), 자동차전자부품협회(Automotive Electronics Council, AEC) 등이 있다.^{4,5}

전자 부품의 사용자 환경에서의 충격에너지는 비교적 낮고, 충격 변형률 속도는(Strain Rate) 보통 100 sec 이하의 값을 가지므로 이를 시험하기 위한 시험기는 자유 낙하 또는 강제 낙하식 시험 방법을 적용하는 것이 적절한 것으로 알려져 있다.⁶ 자유 낙하식으로 충격을 인가하는 방법은 크게 두 종류가 있다. 제품을 직접 바닥에 떨어뜨리는 방법과 가이드봉을 따라서 낙하하는 방식이 그것이다. 먼저, 측정 대상체를 바닥에 직접 떨어뜨리는 방법은 비교적 크기가 큰 완제품 단위 또는 제품의 포장재

단위로 많이 적용되고 있다. 이 방법은 특정 높이에서 제품을 바닥으로 떨어뜨리면 되기 때문에 시험 방법이 쉽고, 시험 도구도 비교적 간단하다. 이에 따라 제품의 품질 또는 포장재의 적절성 등의 단순 평가에 많이 활용되고 있다.⁷ 다음으로, 측정 대상체를 낙하테이블에 고정된 후 테이블을 정해진 가이드봉을 따라 자유 낙하하게 하는 방법은 부품 단위에 적용하기에 적당하다. 이 방법은 충격에너지의 정량화 및 표준화가 가능하며 정밀한 반복 실험이 가능하므로 부품의 신뢰성 평가에 많이 활용되고 있다. 그러나 장비가 상대적으로 복잡하고 높은 가격대를 형성하고 있다.^{8,9}

소형 휴대용 전자기기의 반도체 패키지, 차세대 자동차의 전력 반도체, 소형 센서 등의 충격 신뢰성은 JEDEC의 보드 레벨(Board Level) 충격 시험법을 많이 적용하고 있다. 이 방법은 반도체 패키지가 실장된 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)을 낙하테이블에 고정된 후 특정 높이에서 자유 낙하시킬 때, 낙하테이블에서의 충격 가속도가 하프 사인(Half Sine) 함수의 형태를 가지도록 최대치와 지속 시간을 정의하고, 낙하 높이와 충돌면에서의 반발력을 조정함으로써 충격에너지를 조정하는 방법이다.^{10,11}

JEDEC 시험법을 바탕으로 다양한 연구들이 수행되고 있다. 충격 조건에 따른 충격 가속도, 패키지의 가속도, 처짐량, 변형률 등을 정량적으로 측정하여 제품의 신뢰성과의 상관성을 연구하였다.¹² 전자 부품의 충격 신뢰성은 특히 인쇄회로기판의 두께도 제품의 신뢰성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.^{13,14} 충격에 의한 짧은 시간 동안의 변형은 유한요소해석을 통하여 많이 해석되고 있다.¹⁵

그런데 최근 제품들이 다양해지고 크기가 작아짐에 따라, 스크류를 이용한 체결이 어려워지는 경우가 많이 발생하고 있다.¹⁶ 기존 상용 충격 시험기로는 실험 조건을 구현하기가 어렵거나, 조건을 만족하기 위한 고가의 장비를 필요로 하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 전자 부품의 실제 체결 조건을 시험기의 시험 단위에서 구현할 수 있으며, 제품의 충격 하중 조건을 모사할 수 있고, 국제 표준 JEDEC의 충격 가속도 조건을 만족하면서도, 소형 부품에 적용 가능하며, 소규모의 실험을 다양하게 수행할 수 있는 시험기를 개발하고자 한다.

2. 낙하 충격 시험기 개발

2.1 낙하 충격 시험기의 구성

국제 표준 시험 조건을 만족하는 자유 낙하식 충격 시험기를 제작하였다. 충격 시험기의 작동 원리는 전자 부품을 낙하테이블에 지그(Jig)를 이용하여 고정시키고 호이스트가 낙하테이블을 끌어올린 후 고리를 해제하면 낙하테이블이 가이드봉을 따라서 낙하하여 강체베이스와 충돌하여 제품에 충격을 인가하는 방식이다. 충격파는 낙하테이블에서 지그를 통해 전자 부품으로 전달된다.

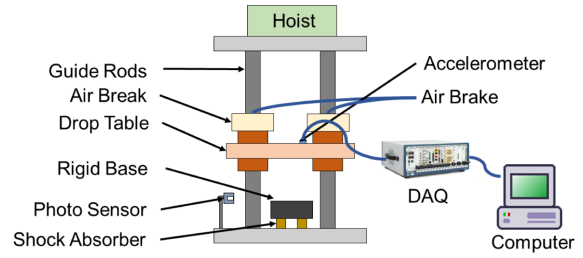


Fig. 1 Schematic of a free fall drop tester

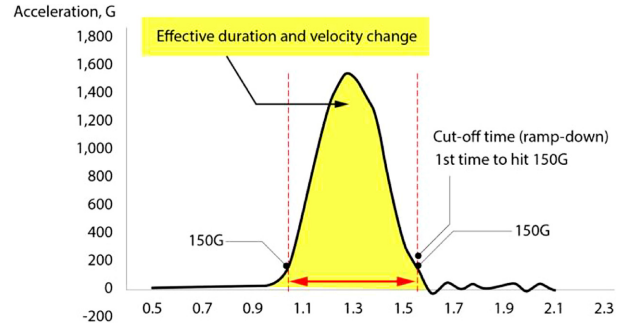


Fig. 2 Acceleration condition of drop table according to JESD22-B111

Fig. 1은 자유 낙하 충격 시험기의 시스템 구성도이다. 테이블 높이를 조절하여 위치에너지와 최대가속도를 조절한다. 낙하테이블과 강체베이스 사이에는 연한 완충재를 삽입하여 충격 지속 시간을 조정한다. 강체베이스의 아래쪽으로는 쇼크 업소버(Shock Absorber)가 흡수하게 하였다. 초기 충격 후 낙하테이블이 반발되어 튀어 오르면 공압 브레이크가 작동하여 테이블이 다시 내려와서 충돌되지 않고 잡도록 하였다. 가속도 센서는 낙하테이블에 부착하며, 데이터 수집 장치(Data Acquisition System, DAQ, NI)로 데이터를 수집하고 컴퓨터에 저장한다.

2.2 낙하 시험 조건

국제 표준에서 요구하는 낙하테이블의 충격 가속도는 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 JESD22-B111의 시험 조건 중에서 Condition-B에 해당하는 조건으로 특정되었다. 가속도 파형은 Half Sine 형태일 때, 최대가속도는 1,500 G이며 지속 시간(Duration Time)은 0.5 ms이다. 여기서 1 G = 9.806 m/s²이고, 지속 시간은 최대가속도의 10%인 150 G를 컷오프 조건으로 적용하였다.

2.3 낙하테이블의 설계 및 제작

낙하테이블 설계를 위하여 다음 Fig. 3과 같은 3가지의 테이블을 제작 및 평가하였다. Fig. 3(a)는 하단부가 직사각형 블럭 형태이며 중량은 5 kg이다. Fig. 3(b)는 충격을 끝고루 분산시키기 위해 하단부가 역피라미드 형태이며, 중량은 3.75 kg이다. Fig. 3(c)는 충격 분산을 극대화하기 위해 사다리꼴 형태로 제작하였다. 낙하테이블의 중량을 줄이기 위해 원형의 구멍을 뚫었다.

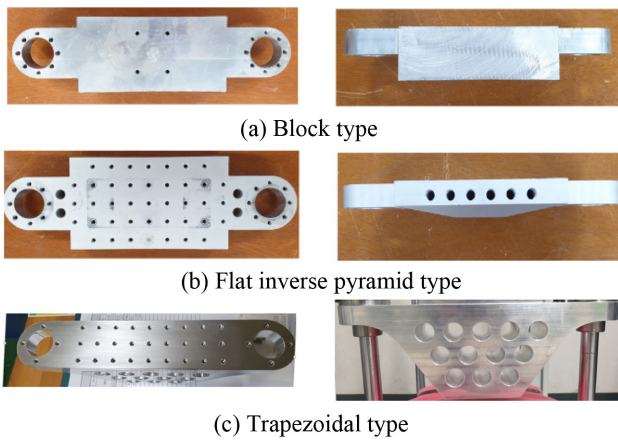


Fig. 3 Various types of drop table: (a) Block type, (b) Flat inverse pyramid type and (c) Trapezoidal type

Fig. 4(a)는 Fig. 3(a)의 테이블을 적용했을 때 측정된 가속도 그래프이다. 첫 번째 피크 이후 가속도가 떨어지는 구간에서 작은 파형이 합성되어 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 낙하테이블이 강체베이스와 평형이 충분하지 않아서 이단으로 충돌되기 때문으로 사료된다. Fig. 4(b)는 Fig. 3(b)의 테이블을 적용했을 때 가속도 그래프이다. 가속도 그래프는 Half Sine 그래프로 나타난 후 음의 가속도가 크게 발생하였다. 이는 낙하테이블이 얇고 가벼워지면서 강체베이스와의 질량비가 커지고 테이블 자체의 진동 모드가 더해지기 때문으로 사료된다. Fig. 4(c)는 Fig. 3(c)의 테이블을 적용했을 때 가속도 그래프이다. 사다리꼴 형태가 충분하게 커지면서 충격이 골고루 분산되어, 가속도 그래프가 Half Sine으로 나타나고 음의 가속도가 최소화되는 것을 알 수 있다.

중력장 내에서의 물체의 거리, 속도, 가속도는 다음 식과 같이 나타난다.¹⁷ 중력장 a 에서 낙하 높이와 시간의 관계는 식(1)과 같으며, 이때 낙하속도는 식(2)로 나타난다. 운동량 보존의 법칙과 강체베이스의 초기속도(0 : Zero), 충돌 직전의 낙하테이블의 속도를 고려하면 낙하테이블과 강체베이스의 충돌 전(i)과 후(f)의 속도는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \tag{1}$$

$$v = v_0 + a t \tag{2}$$

$$v_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_{1i}, \quad v_{2f} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_{1i} \tag{3}$$

여기서 s 는 거리, v 는 속도, v_0 는 초기속도, a 는 가속도, v_{1i} 는 낙하테이블의 충돌 전 속도, v_{1f} 는 낙하테이블의 충돌 후 속도, v_{2f} 는 강체베이스의 충돌 후 속도이다.

낙하테이블의 충격 거동을 Simulia (Dassault Co.)를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 5는 유한요소모델을 충돌 시점에서의 von Mises 응력 분포와 함께 나타내었다. Dynamic

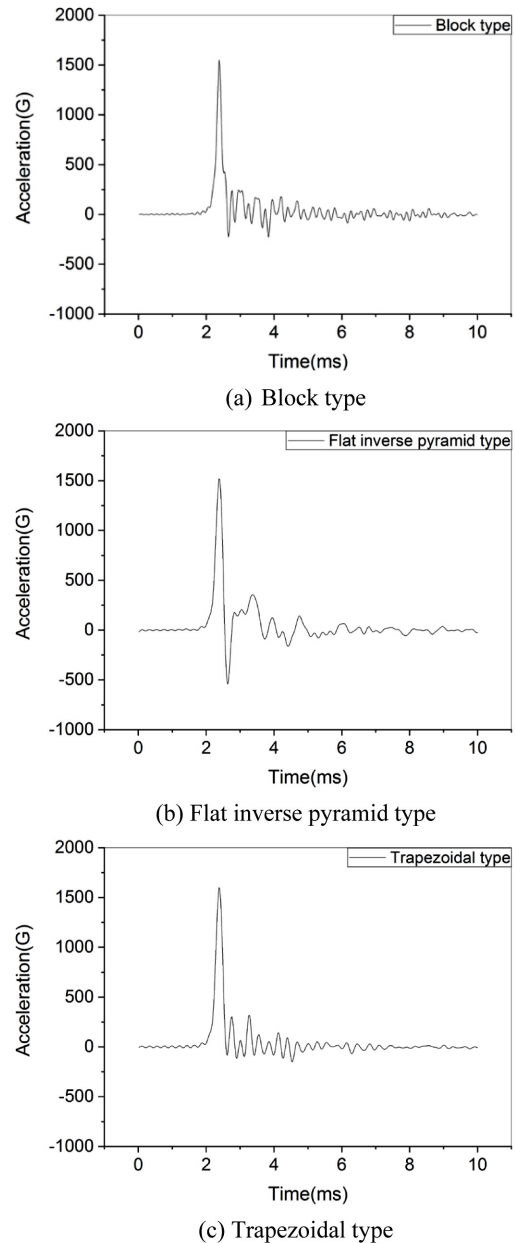


Fig. 4 Measured acceleration signals on a drop table with respect to the shape of table at (a) Block type, (b) Flat inverse pyramid type and (c) Trapezoidal type

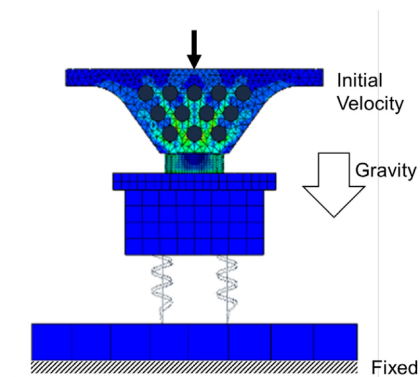


Fig. 5 FEA model of free fall impact

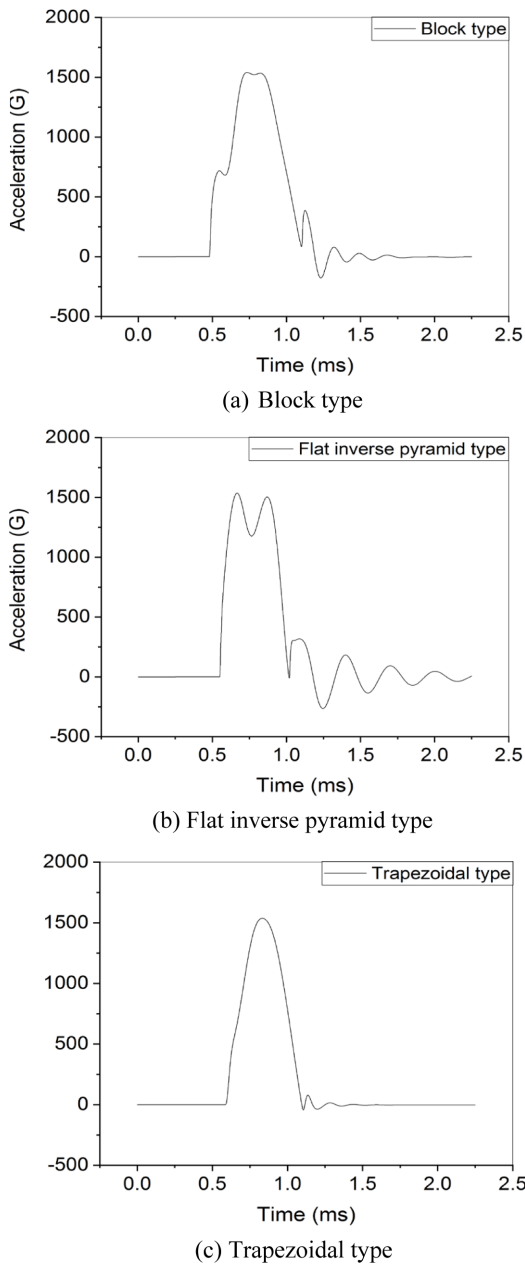


Fig. 6 Analyzed acceleration by FEA on the drop table at (a) Block type, (b) Flat inverse pyramid type and (c) Trapezoidal type

Implicit 해석을 수행하였으며 Reduced Integration을 적용한 3차원 육면체 요소(C3D8R)를 이용하였으며, 요소의 개수는 46,176개이다. 중력 가속도를 모델 전체에 인가하고, 날개 부분의 윗면의 양 끝을 x, y축을 구속하고, z축으로 움직일 수 있게 하였다. 낙하테이블과 강체베이스가 충돌하기 1.0 mm 전에 낙하속도를 z축 방향으로 -2.7 m/s를 초기속도 조건으로 인가하였다. 그리고 강체베이스의 하단부에 x, y축을 구속하고 쇼크 업소버는 스프링+데쉬팟 요소를 삽입했다. 낙하테이블의 밀도는 2.7 g/cm³이며, 탄성 계수는 69 GPa이며, 푸아송 비는 0.33이다.

낙하테이블의 상단부 중간 위치에서의 가속도를 추출하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 블럭 모양 낙하테이블의 가속도

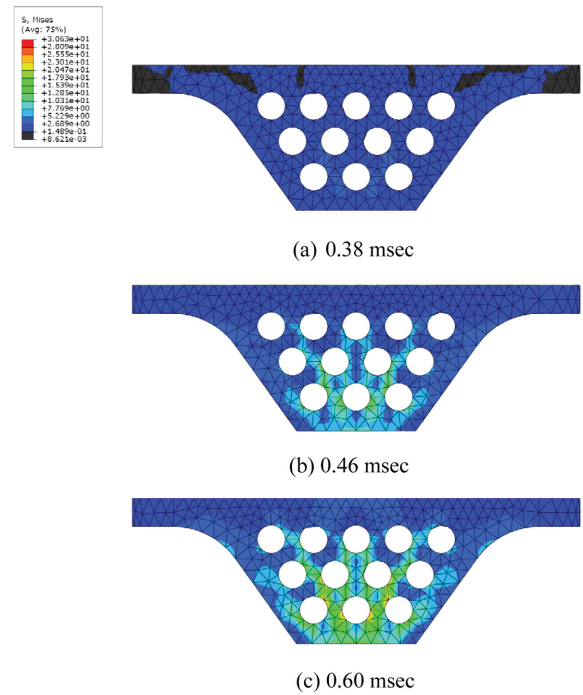


Fig. 7 Propagation of elastic wave at (a) 0.38, (b) 0.46 and (c) 0.60 msec

이다. 중간이 두껍고 충돌 부위와 테이블의 상단 표면과의 거리가 짧다. 그래서 충격이 제대로 전달되지 않아서 지속 시간이 매우 짧고 얇은 날개 부분이 충격 때문에 아래위로 흔들리면서 충돌이 발생하여 그림과 같은 파형이 발생하였다. Fig. 6(b)는 납작한 역피라미드 형태의 낙하테이블의 가속도이다. 중간 부분과 날개 부분이 유선형으로 연결되어있어 Fig. 6(a)에 비해 충격은 비교적 고루 분포되나 테이블의 전반적인 두께가 얇고 테이블 하단부가 충돌 패드보다 면적이 작아서 충격이 충분히 분산되지 않았기 때문에 지속 시간이 매우 짧고 추가적인 파형이 발생하였다. Fig. 6(c)는 사다리꼴 형태의 낙하테이블이며, 날개와 중간 부분이 유선형으로 되어있으며, 역피라미드 형태의 하단부를 충분히 만들어 사다리꼴 형태로 만들었으며, 하단부 면적을 패드보다 넓게 하여 충격을 골고루 분산시켰다. 이를 통하여 지속 시간이 0.5 ms로 나타났고, Half Sine 형태의 안정적인 가속도값이 도출되었다.

Fig. 7은 앞의 Fig. 5의 해석 모델에서 von Mises 응력 분포를 나타내었다. 시간이 경과함에 따라 탄성파의 전달을 확인할 수 있다. Fig. 7(a)는 접촉이 일어나기 직후의 응력 분포이다. Fig. 7(b)는 충격이 일어나는 중의 응력 분포이며, 충격 부위를 중심으로 응력이 부채꼴 형태로 전파됨을 알 수 있다. Fig. 7(c)는 충격파가 많이 진행되었을 때의 상태를 나타낸다. 사다리꼴 형태가 탄성파를 골고루 확산시키는 것을 확인할 수 있다.

2.4 충격흡수시스템

낙하테이블의 충격은 다음 Fig. 8과 같이 쇼크 업소버를 이용하여 흡수되도록 하였다. 테이블의 위치에너지를 바탕으로 시간당

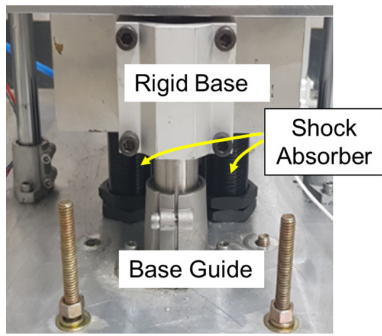


Fig. 8 Shock absorbing system

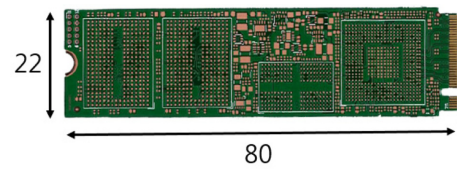


Fig. 11 Dimensions of PCB specimen (Unit: mm)

흡수에너지와 충격력을 계산하여 쇼크 업소버(한성 Co.)를 선정하였고 4개를 사용하였다. 쇼크 업소버의 강도는 여러 단계로 설정 가능하다. 쇼크 업소버의 위치는 x축 및 y축을 고정하였고, z축으로는 움직임이 가능하도록 강체베이스에 연결하였다.

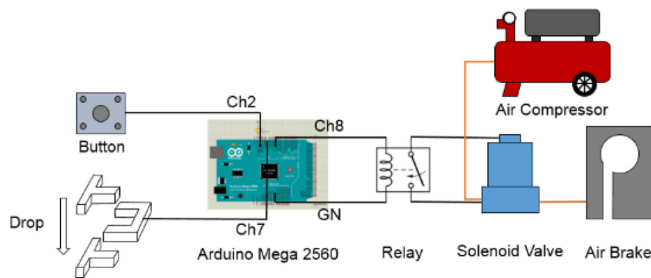
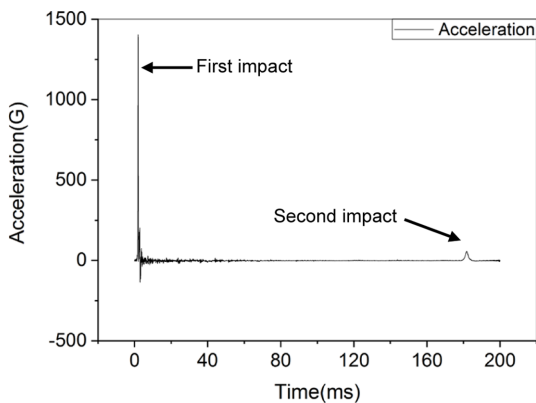


Fig. 9 Control diagram of braking system

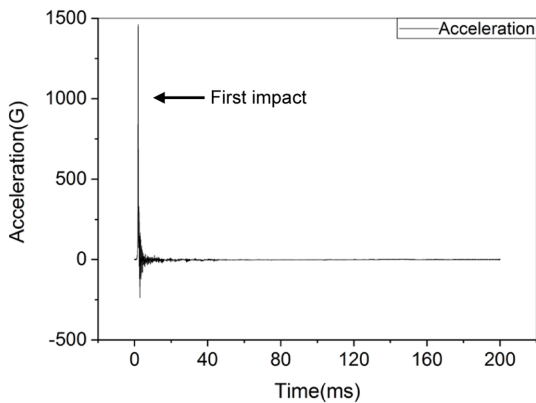
2.5 재충돌 방지 시스템

Fig. 9는 아두이노를 이용한 공압 브레이크 제어 시스템을 나타내었다. 버튼을 누르면 릴레이가 작동하고 솔레노이드 밸브가 공압 브레이크를 완화시킴으로써 테이블을 움직일 수 있도록 한다. 테이블이 아래로 자유 낙하하면 투과형 광센서가 이를 인식하고 공압 브레이크를 수축하여 가이드봉을 잡음으로써 테이블을 재충돌이 일어나지 않도록 하였다.

Fig. 10은 재충돌 방지 시스템 유무에 따른 테이블 가속도 측정값을 나타내었다. Fig. 10(a)는 재충돌 방지 시스템이 없을 때의 가속도이다. 첫 번째 충돌 이후 약 185 ms에서 100 G의 두 번째 피크가 나타났는데, 이는 테이블의 2차 충돌에 기인된 것이다. Fig. 10(b)는 재충돌 방지 시스템을 적용한 경우의 가속도 값이다. 초기에 큰 값의 가속도가 한 번만 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 재충돌 방지 시스템이 없는 경우, 구조가 간단하기 때문에 제작이 간단하겠지만 제어가 되지 않은 다수의 충돌로 인하여 신뢰성 시험 시 정량화가 어렵고 부정확한 단점이 있다. 그러나 재충돌 방지 시스템을 통하여 충격량을 균질하게 유지함으로써 정량적인 수명시험을 할 수 있게 되었다.



(a) Without braking system



(b) With braking system

Fig. 10 Comparison on acceleration with and without air braking system at (a) Without braking system and (b) With braking system

3. PCB 낙하 충격 시험

3.1 낙하 충격 시험 조건

Fig. 11은 본 연구의 충격 시험에 사용된 소형 부품용 PCB이며 가로는 길이 80, 세로 22, 두께는 0.8 mm이다.

PCB 설치를 위한 지그는 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12(a)는 베이스이고, Fig. 12(b)는 뒷개이고 나사로 체결한다. PCB가 커넥터에 삽입되는 쪽은(Fig. 12의 오른쪽) 3.0 mm를 잡아주며, 나사로 체결되는 쪽은(Fig. 12의 왼쪽) 2.0 mm를 잡아주도록 하였다.

3.2 PCB의 가속도 특성

아래의 Fig. 13과 같이 소형 PCB 중간에 접착제를 사용하여 가속도 센서를 부착하였다. 샘플링 속도는 51.2 kS/s (kilo Samples per second)로 데이터를 수집하고 저장하였다.

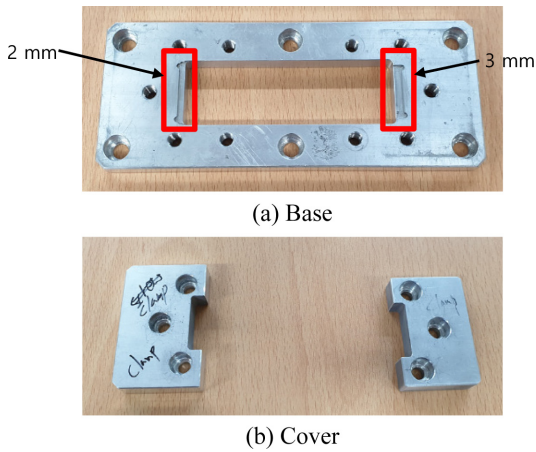


Fig. 12 Clamping jig for PCB specimen

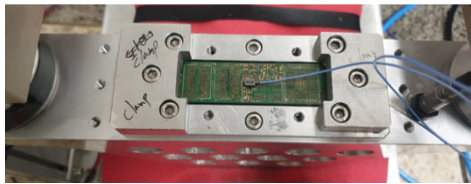


Fig. 13 Specimen installation to measure the acceleration

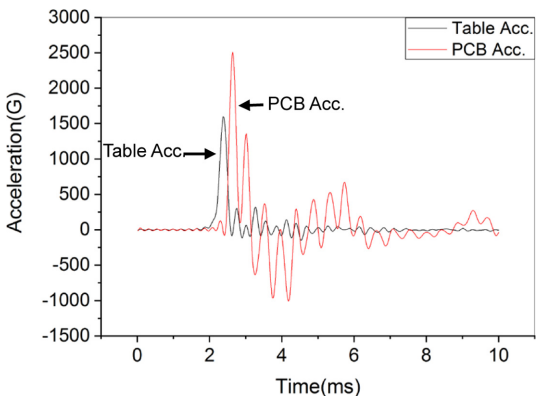


Fig. 14 Acceleration of PCB

Fig. 14는 PCB의 가속도이다. PCB 최대가속도는 2,500 G이며, 낙하테이블의 가속도보다 더 높게 측정되었다. 이는 테이블 가속도가 PCB에 전달되면서 PCB의 고유진동모드 특성이 반영되어 처짐이 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

3.3 PCB의 처짐량 특성

처짐 측정 방법은 Fig. 15(a)와 같이 관성에 의해 처지는 PCB의 처짐량을 측정하기 위해 지그를 제작하였다. Fig. 15(b)와 같이 지그에 비접촉 변위 센서를 체결하였다.

센서에서 멀어질수록 양의 값을 가지고 가까워질수록 음의 값을 가진다. 그래프의 방향과 처지는 방향을 일치시키기 위해 Fig. 16의 오른쪽 y축의 부호가 반대로 되어 있다. PCB의 처짐 측정 결과 주기는 약 2.4 ms이며, 최대 처짐은 1.06 mm로 나타났다.

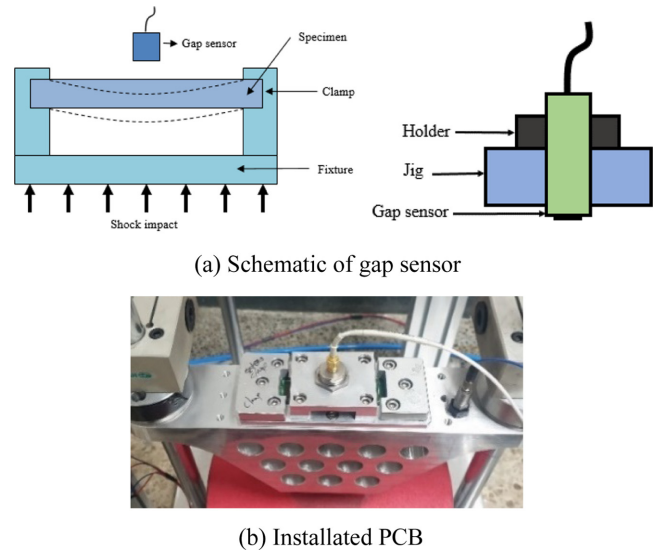


Fig. 15 Installation of specimen to measure the deflection, (a) Schematic of gap sensor and (b) Installed PCB

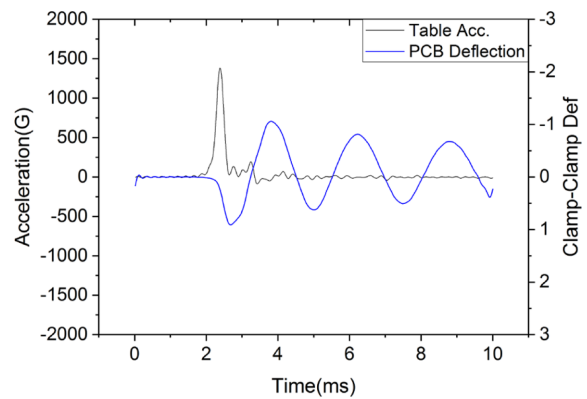


Fig. 16 Measured deflection data

4. PCB의 충격에 대한 유한요소해석 해석

Fig. 17은 PCB의 처짐 해석 유한요소모델을 변위 분포와 함께 나타내었다. Dynamic Implicit 해석을 수행하였으며 Reduced Integration을 적용한 3차원 육면체 요소(C3D8R)를 이용하였으며, 요소의 개수는 40,992개이다. PCB의 양쪽 끝단을 고정되는 거리만큼 선택하여 x, y축을 고정하였다. 고정 위치에 z방향으로 Fig. 4(c)의 테이블 가속도값을 하중 조건으로 인가하였다. PCB의 물성은 참고문헌을 참고하여 계산하였다.^{18,19} PCB의 다층 복합층은 밀도가 2 g/cm³이며, 탄성 계수는 34.7 GPa이며, 푸아송 비는 0.312인 단일층으로 모사하였다. PCB의 최외곽 Solder Resist층은 밀도가 1.15 g/cm³이며, 탄성 계수는 5.7 GPa이며, 푸아송 비는 0.33을 적용하였다.

유한요소해석을 통한 PCB에서의 가속도를 Fig. 14의 실측값과 함께 Fig. 18에 나타내었다. 최대가속도값은 유한요소해석의 경우 실측값보다 다소 낮은 1,740 G로 나타났다.

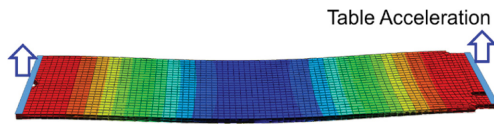


Fig. 17 FEA model of PCB with deflection contour at 2.8 msec

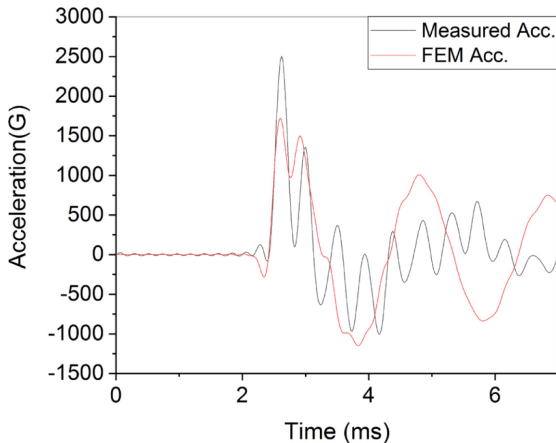


Fig. 18 Comparison of acceleration between measured and FEA

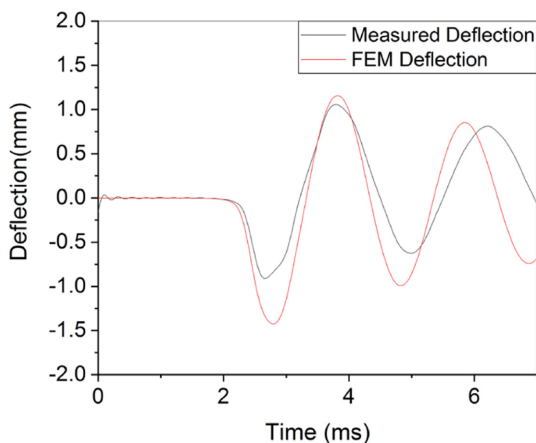


Fig. 19 Comparison of deflection between measured and FEA

치짐 해석 결과는 Fig. 16의 실측값과 함께 Fig. 19에 나타내었다. 최대 치짐이 1.5 mm이며, 측정된 치짐량과는 약 0.44 mm 정도 차이가 발생하였다. 치짐의 주기는 약 2.5 ms로써 실측값과 비교하여 약간 짧았지만 크게 차이는 나타나지 않았다. 유한요소해석과 실측 결과가 차이는 지그에서의 체결부 경계 조건 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 가이드봉을 따라 자유 낙하하는 충격 시험기를 설계 제작하였다. 낙하테이블의 형태에 따른 충격 특성을 시험적 및 유한요소해석적으로 검증하여 사다리꼴 형태의 테이블 형상을 도출하였다. 베이스 및 하부 지지 시스템을 설계하였다.

낙하테이블의 2차 충동을 방지하도록 브레이크를 이용하여 제충돌 방지 시스템을 적용하였다. 이러한 결과를 바탕으로 개발된 시험기는 국제 표준 규격의 테이블 가속도 요구 조건을 충족할 수 있었다. 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 낙하테이블의 최적 형상을 설계 제작하였다. 직사각형, 납작한 역피라미드형, 사다리꼴 모양에 대하여 유한요소해석을 수행하고 제작 후 지속 시간을 검증하였다.
- (2) Half Sine 형태의 충격 가속도 확보를 위하여 쇼크 업소버와 충격패드를 사용하였다. 낙하테이블을 정확하게 반발시켜 국제 표준 시험 수준의 데이터의 정확성을 높였으며, 연속 낙하 충격 시험이 가능한 충격흡수시스템을 구축하였다.
- (3) 투과형 광센서를 사용하여 테이블의 낙하를 인식하고 아두이노로 공압 브레이크를 제어하여 2차 충돌 방지 시스템을 구축하였다.
- (4) 전자 부품 충격 테스트 국제 표준 조건에 만족하는 낙하 충격 시험기를 제작하였으며, 낙하테이블에 인가되는 가속도의 측정값과 유한요소해석값을 비교하여 검증하였다.
- (5) 충격 시험기의 낙하테이블에 가속도를 인가했을 때, PCB의 가속도와 변위 측정값과 유한요소해석값을 비교하여 검증하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2018R1D1A1A09083672).

REFERENCES

1. Singh, B., Menezes, G., McCann, S., Jayaram, V., Ray, U., et al., "Board-Level Thermal Cycling and Drop-Test Reliability of Large, Ultrathin Glass BGA Packages for Smart Mobile Applications," IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 7, No. 5, pp. 726-733, 2017.
2. Hande, M. and Kumar, V., "Failure Prediction & Mitigation of Electronic Component in Automotive Controller during Transient Dynamic Event," SAE Technical Paper, Paper No. 2017-26-0356, 2017.
3. Dal Kim, M., Kim, C. J., and Kim, D. H., "A Study of Characteristics of Vibration and Shock for the Mounting Equipment of the Military Wheel Vehicle," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 36, No. 8, pp. 713-719, 2019.
4. Joint Electron Device Engineering Council, "JC-14 Quality and Reliability of Solid State Products," <https://www.jedec.org/committees/jc-14> (Accessed 23 NOVEMBER 2020)

5. AEC-Q100-Rev-H, "Failure Mechanism Based Stress Test Qualification for Integrated Circuits," 2014.
6. Meyers, M. A., "Dynamic Behavior of Materials," John Wiley & Sons, 1994.
7. Tempelman, E., Dwaikat, M., and Spítás, C., "Experimental and Analytical Study of Free-Fall Drop Impact Testing of Portable Products," *Experimental Mechanics*, Vol. 52, No. 9, pp. 1385-1395, 2012.
8. Cheng, H. C., Cheng, T. H., Chen, W. H., Chang, T. C., and Huang, H. Y., "Board-Level Drop Impact Reliability of Silicon Interposer-Based 2.5-D IC Integration," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 6, No. 10, pp. 1493-1504, 2016.
9. Gu, J., Lin, J., Lei, Y., and Fu, H., "Experimental Analysis of Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder Joint Board-Level Drop/Vibration Impact Failure Models after Thermal/Isothermal Cycling," *Microelectronics Reliability*, Vol. 80, pp. 29-36, 2018.
10. JESD22-B104C, "Mechanical Shock," 2004.
11. JESD22-B111A, "Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products," 2016.
12. Shin, D., Lee, D., Ahn, E., Kim, T., and Cho, T., "Development of Multi Stack Package with High Drop Reliability by Experimental and Numerical Methods," *Proc. of the 56th Electronic Components and Technology Conference*, p. 6, 2006.
13. Luan, J., Tee, T. Y., Pek, E., Lim, C. T., and Zhong, Z., "Modal Analysis and Dynamic Responses of Board Level Drop Test," *Proc. of the 5th Electronics Packaging Technology Conference*, pp. 233-243, 2003.
14. Lee, T. K. and Xie, W., "Effect of Board Thickness on Sn-Ag-Cu Joint Interconnect Mechanical Shock Performance," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 43, No. 12, pp. 4522-4531, 2014.
15. Tee, T. Y., Luan, J. and Ng, H. S., "Development and Application of Innovational Drop Impact Modeling Techniques," *Proc. of the Electronic Components and Technology*, pp. 504-512, 2005.
16. Kang, T. M., Jung, I. J., Jang, J. Y., and Shin, D. K., "Effect of Test Fixture on the Drop Reliability of Solid State Drive," *Proc. of the 22nd European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition*, pp. 1-4, 2019.
17. Hibbeler, R. C., "Engineering Mechanics: Dynamics," Young Press, pp. 236-313, 2011.
18. Kim, H., Ko, B., Park, No., and Park, Y., "Finite Element Modeling of SSD for Vibrational Analysis," *Proc. of the KSME Conference*, pp. 2754-2786, 2016.
19. Pecht, M., Agarwal, R., McCluskey, F. P., Dishongh, T. J., Javadpour, S., et al., "Electronic Packaging Materials and Their Properties," CRC Press, pp. 21-55, 1998.

**In Jun Jung**

Graduate School, Yeungnam University. His research interests are impact and vibration.
E-mail: wjddswns324@naver.com

**Jae Young Jang**

Graduate School, Yeungnam University. His research interests are design of snap-fit and adhesion measurement.
E-mail: wkdwodud91@naver.com

**Dong-Kil Shin**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Yeungnam University. His research interests includes the reliability analysis of electronic package and mechanical system, and micromechanics of adhesion.
E-mail: dkshin@yu.ac.kr