한국정밀공학회지 제 18 권 제 1 호 (2001 년 1 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 1, January 2001.

변형 모드를 이용한 모니터용 회로 기판의 파손 저감 설계에 관한 연구

박상후*, 이부윤**

Failure-Proof Design of the PCB of a Monitor Using Deformed Mode Shape

S.H. Park*, B.Y. Lee**

ABSTRACT

A practical scheme to reduce failure of the PCB(Printed Circuit Board) of a monitor is introduced using deformed mode shape under mechanical shock. When the monitor is given critical shock loads, cracks are commonly initiated at the tip of a hole on the PCB. Accordingly, a deformed mode shape of the PCB is obtained using a FEM code to define a weak point on the PCB under mechanical shock, and then the position and direction of the hole is determined to prevent the failure at the critical mode shape. Also, the stress intensity factor around the weak point on the PCB is calculated to check the possibility of fracture by normal tensile stress. In conclusion, present research is useful to assist the practical design of components-layout on the PCB.

Key Words : PCB(Printed Circuit Board, 회로기판), Fragility Test(내충격 시험), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Deformed Mode Shape(변형 모드), Fracture Toughness(파괴인성치), FEM(유한 요소법)

1. 서론

일반적으로 제품 개발시 유통 과정 또는 소비자의 취급 부주의에 의해서 발생할 수 있는 낙하충격에 대하여 제품이 일정한 품질을 유지할 수 있도록 내충격 설계를 한다. 모니터의 경우에는 외관을 이루는 캐비넷(cabinet)과 백 커버(back cover)의 파손, 회로기판(PCB)의 파손, 영상불량이 낙하충격에서 발생하는 주된 문제점이다. 최근에 모니터가 점차 대형화되고, 환경문제가 대두되어 완충 포장재에 대한 규제가 현실화 됨에 따라 모니터 자체의 내충격성 확보에 대한 중요성이 증가되고 있는 실정이다.

실험과 경험에만 의존하는 기존의 내충격 설계 방법은 제품의 파손 및 변형에 대한 주요 원인의 정량적 분석과 대책안 마련에 상당한 어려움이 있다. 따라서 이러한 점을 보완하기 위하여 최근에는 유한 요소법(finite element method, FEM)을 이용한 해석적 접근 방법을 적용하여 디스플레이 제품의 내충격 설계를 위한 최적안을 도출함으로써 기존의 방법에 비하여 시간과 비용을 절감한 연구사례가 많이 발표되고 있다[1~2].

본 연구는 모니터 충격시 발생하는 결함 중에서 PCB 파손 평가에 중점을 두었다. 일반적으로 널리 사용되는 모니터용 회로기판은 비교적 가격이 저렴한 페놀수지(phenolic resin)에 동판(copper

* LG 생산기술원 디자인엔지니어링센터
** 계명대학교 자동차공학부

plate)을 입힌 페놀기판을 사용하는데, 이러한 페놀 기판의 경우에 재질의 특성이 취성이므로 충격에 의한 파손이 쉽게 발생한다. 또한, 회로기판에는 부품 실장(mounting)을 위한 구멍(hole)과 열의 방출을 위한 구멍 그리고 히트싱크(heat sink)와 같은 열방출 구조물을 기판에 고정하기 위한 다양한 형태의 구멍들이 존재하여, 충격하중이 기판으로 전달되면 이러한 구멍의 끝단부에서 균열 발생이 시작되어 파손이 발생하게 된다. 그리고 회로기판의 파손은 영상처리를 위한 전기적 신호의 전달을 중단시키므로 모니터의 기능에 직접적인 영향을 주게 된다. Fig.1 은 모니터의 내충격 시험에서 자주 발생하는 히트싱크 납땜부의 파손 형태를 나타낸 것이다.

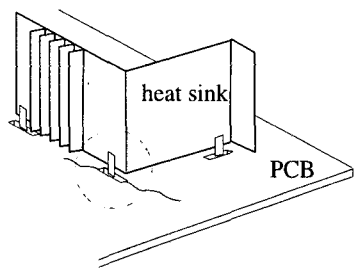


Fig. 1 Schematic diagram of fracture initiated at a hole under soldering part of heat sink on the PCB

본 연구에서는 충격 해석에서 구한 회로기판의 변형모드(deformed mode shape) 분석을 통하여 내충격 향상을 위한 기판 구멍형상 설계에 관하여 연구하였으며, 파괴역학적 접근 방법을 통하여 기판의 구멍 형상에 따른 정량적인 파손 분석을 하였다.

2. 회로기판 파손 분석

2.1 내충격 시험

개발된 모니터의 충격 특성을 평가하기 위해서 내충격 시험(fragility test)을 수행하였다. 내충격 시험은 포장을 고려하지 않는 상태에서 충격시험기를 이용하여 모니터에 전달되는 충격력에 대한 제품의 품질을 검토하는 규격 시험 중 하나이다[3]. 모니터 자체의 내충격 특성을 평가하기 위해서 완충 포장재 대신에 나무로 만든 지그를 사용하여 충격시험기에서 전달되는 충격력이 대부분 모니터로 전달되도록 하고, 모니터에 결함이 발생하는 경우에는 취약부에 강성을 증대시키는 방향으로 설계를 수정한다. 그리고 제품이 갖는 내충격성만으로 부족한 경우에는 완충 포장재를 이용하여 내충격성을 보완하게 된다. Fig.2 에는 모니터의 내충격 시험장치를 나타낸 것인데, 사용된 장비는 Lansmont 사의 Shock Test System(Model 65/81)을 사용하였다.

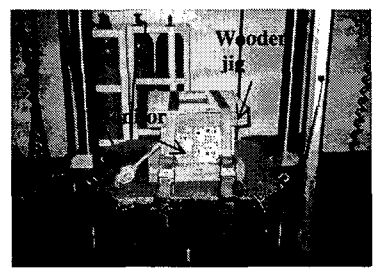


Fig. 2 Experimental equipment for fragility test

충격 시험은 6 면 방향에 대하여 수행하며, 파손 여부는 매번 시험마다 확인하였다. Fig.3 에는 본 연구에서 정의한 6 면의 낙하방향을 나타내었다.

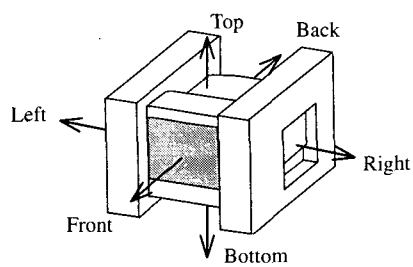


Fig. 3 Directions of fragility test

내충격성 평가를 위한 입력 조건은 대형파 펄스(trapezoid pules) 형태[4]로 주어지며, 충격 지속시간(duration time)과 가속도 값(G)을 각각 x, y 축으로 하여 충격 파형의 형태를 정의한다. 그리고 파형 곡선의 면적은 속도 변화량(velocity change)이 되는데, 이러한 속도 변화량을 제품 규격에 맞는 특정한 값이 되도록 하고 가속도를 단계적으로 높이면서 충격 지속시간을 조절하여 임계 가속도(critical acceleration)에 도달할 때까지의 제품의 내

충격 특성을 평가하였다.

10 대의 시료를 통하여 구한 평가 결과를 살펴보면, 모니터가 임계 가속도의 조건에서 탑(top) 방향으로 떨어질 때 회로기판 파손이 발생하였고, 발생 부위로는 타 부품에 비하여 형상이 큰 히트싱크의 납땜부에서 주로 발생하였다(Fig.1 참조). 이러한 현상은 충격하중이 가해질 때, 회로기판을 고정하기 위한 기판 위의 나사 체결, 캐비닛과 백커버의 리브(rib) 위치, 그리고 무게가 많이 나가는 부품 또는 형상이 커서 관성 모멘트가 큰 부품에 의해서 회로기판의 변형모드가 결정되는데, 본 연구에 사용된 모델의 경우에는 히트싱크 납땜부의 구멍이 열려서 균열이 쉽게 성장하도록 변형모드가 발생되었기 때문이다. 따라서 주어진 기판의 구속 조건과 부품의 배치하에서 파손을 최소화할 수 있는 방안에 대한 검토가 필요하며, 본 연구에서는 변형모드를 고려하여 기판의 납땜부 구멍이 열리지 않는 위치로 히트싱크의 납땜부 위치를 변경하여 균열 발생을 최소화하는 방법을 제안하였다.

2.2 페놀 기판의 임계 응력확대계수 측정

균일한 선형 탄성체 내의 균열 선단에서 응력장의 크기를 나타내는 물리량인 응력강도계수(stress intensity factor)의 값이 파괴 인성치(fracture toughness, K_{IC})에 도달하게 되면 파손이 발생하게 된다. 이러한 파괴 인성치는 균열의 거동을 평가하는데 유용하게 사용되므로 본 연구에서도 정량적인 파손 평가를 위하여 페놀 기판에 대한 파괴 인성치를 측정하였다.

실험 방법은 플라스틱 재질에 대한 파괴 인성치 측정에 관한 표준시험법[5]을 기준으로 하였다. 이러한 규정을 따르면 복잡한 해석 및 검증 방법을 거치지 않고서도 안정적이며 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. Fig.4 에는 실험에 사용된 CT(compact tension) 시편의 형상을 나타내었다. 실험에 사용된 장비로는 비교적 낮은 하중에서 측정이 가능한 INSTRON (max. 500kgf)을 사용하였으며, 재료의 이방성을 검토하기 위해서 시편을 0°, 45°, 90° 로 나누어 제작하여 실험하였다. 시편제작에서 균열 선단을 만들기 위해 블레이드(blade)를 사용하여 균열 선단부를 두세 번 슬라이딩하는 공정을 거쳐서 제작하였다. 실험 조건으로는 하중 속도 0.1mm/min 을 주어 변위 제어를 통하여 최대 하중을 측정하였다. 측정된 최대 하중으로부터 식 (1)을 이용하여 임계 응력확대계수를 구하였다.

$$K_C = \frac{P_Q}{t\sqrt{W}} f(X) \qquad (1)$$

$$f(X) = \frac{(2+X)(0.886+4.64X-13.32X^2+14.72X^3-5.6X^4)}{(1-X)^{3/2}}$$

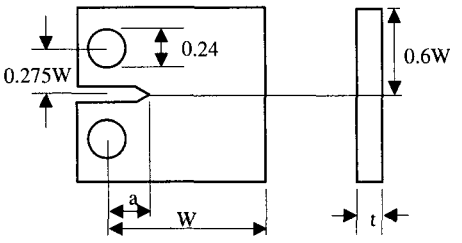


Fig. 4 CT specimen configuration by ASTM-D5045

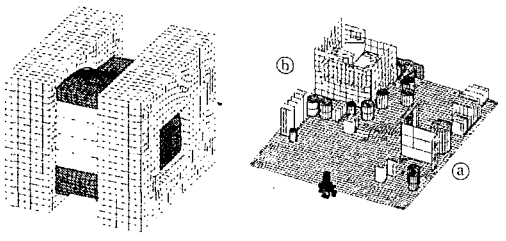
여기서, P_Q는 실험에서 구한 최대하중을 의미하고, X=a/W 이다. 실험의 결과를 분석한 결과, 파괴의 형태는 선형적인 하중 변화를 유지하다가 갑자기 부서지는 전형적인 취성 파괴의 형태를 나타내며 방향성이 거의 없는 것으로 나타났다. 그리고 두께가 평면변형률 조건(plane strain condition)을 만족하지 않기 때문에 측정된 값은 엄밀한 의미에서 파괴 인성치(K_{IC})는 아니지만 기판의 고유한 임계 응력강도계수(critical stress intensity factor, K_C)라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 3 개의 CT 시편에 대하여 평균 값으로 임계 응력확대계수를 구하였으며, 3.97MPa· $m^{1/2}$로 계산되었다.

3. 충격 해석

3.1 해석 모델

회로기판에 걸리는 응력을 평가하기 위해서는 모니터에 전달되는 충격력의 전파과정을 정확하게 표현되어야 하므로 나무 지그(wooden jig)를 포함한 모니터의 전체 형상을 해석 모델에 반영하였다. 이것은 실제 모니터에 충격을 가할 때, 회로기판에 전달되는 경계조건(boundary condition)을 정확하게 예측하기 어렵기 때문에 실제와 동일한 조건으로 모델링하고 체결되는 부분도 실제 제품과 동일

한 조건으로 하였다. 그리고 기판의 파손 평가에 중심을 두었기 때문에 회로기판에서 무게가 많이 나가는 부품과 히트싱크 중심으로 실제와 동일한 형상으로 해석 모델을 만들어서 강체로 두었고, 각 부품의 무게 중심을 계산하여 입력함으로써 충격시 부품들의 관성력에 의한 기판의 변형거동을 나타낼 수 있도록 하였다. Fig.5 에는 해석에 적용된 유한요소 모델의 전체 형상과 모니터 내부에 위치한 회로기판을 나타내었는데, 가장 무게가 많이 나가는 부품은 고압발생장치(FBT, Fig.5(b)의 ⓑ) 부근이며, 그 다음은 히트싱크(Fig.5(b)의 ⓐ) 부근이다. 그리고 해석 모델에서 나무 지그와 음극선관(CRT)은 강체(rigid body)로 가정하였다.



(a) (b)

Fig. 5 Finite element model for impact analysis (a) a full shape of the model and (b) the PCB in the monitor

3.2 기판의 취약부 분석 및 대안 제시

낙하 방향에 대한 회로기판의 취약부 분석을 위하여 실험과 동일한 조건으로 6 면 방향에 대한 충격 해석[6]을 수행하였다. 실험에서와 같이 탑 방향 낙하시 히트싱크 납땜부에 응력이 많이 걸렸으며, 이 방향이 가장 취약한 방향임을 알 수 있었다. Table 1 에는 몇 가지 방향에 대하여 회로기판에 나타난 해석결과를 비교하였다.

Table 1. Comparison of maximum von Mises stress and maximal displacement on PCB

Directions	Max. von Mises stress (MPa)	Max. displacement (mm)
Top	115.4	11.3
Left	68.2	6.1
Back	108.0	6.3
Bottom	102.5	9.0

탑 방향 충격시 기판의 변형 거동을 살펴보면, 일반적으로 무게가 가장 많이 나가는 부품인 고압발생 장치 부근에서 최대 von Mises 응력이 발생하게 된다. 그러나 파손에 영향을 많이 주는 인장응력을 비교해 보면, 회로기판을 구속하는 리브(rib)와 나사체결의 영향으로 히트싱크 부근에서 가장 큰 굽힘 변형과 인장응력이 걸리도록 변형모드가 발생한다. 따라서 회로기판의 체결조건 영향으로 히트싱크(Fig.5(b)의 ⓐ) 부근이 무게가 많이 나가는 고압발생장치 부근보다 더 파손에는 취약함을 알 수 있었다. Fig.6 에는 회로기판의 변형모드를 나타낸 것이며, 부품의 위치 배열은 Fig.5 (b)와 같다.

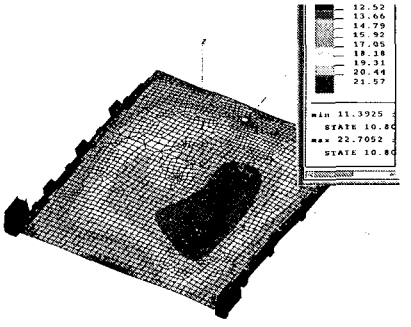


Fig. 6 Contour of displacement on the PCB (unit: mm)

그리고 특정한 회로기판의 구속 조건에 의해서 변형 모드가 달라지며, 이러한 특정한 변형 모드의 영향으로 취약부가 결정됨을 알 수 있었다.

본 연구에서는 취약부인 히트싱크 납땜부(Fig.5 (b)의 ⓐ) 부근에 분포하는 인장응력의 크기가 최소화될 수 있도록 변형 모드를 고려하여 기판의 구멍 방향과 위치를 결정하였는데, 이러한 변형 모드는 나사체결 등의 구속 조건에 따라서 달라질 수 있다. 본 연구에 적용된 회로기판의 경우에는 중앙부와 고압발생장치가 있는 부분 그리고 고압발생장치 뒷부분의 가장자리 양단에 나사로 체결이 되어 있어 변형을 강하게 구속하고 있으며, 회로기판의 세로축 가장자리는 구조물(bracket)을 이용하여 끼움 형식으로 6 군데에서 기판을 약하게 구속하는 구조로 되어 있다. 그리고 히크싱크를 납땜하기 위한 구멍은 장, 단축의 비가 큰 타원형 형상이며, Fig.7 은 회로기판에 나타나는 변형 모드 상에서 히트싱크 납땜부 구멍의 장축 방향에 수직한 인장응력(normal tensile stress)의 크기를 비교한 것이다.

Fig.7 로부터 히트싱크(Fig.5(b)의 ⓐ)를 실장하

기 위한 구멍의 방향이 B 위치인 경우에는 변형 모드가 구멍을 열리도록 힘이 가해지는 형태가 되어 구멍 주변에 134MPa 의 수직 인장응력이 가해졌으며, A 위치에 비하여 수직인장응력의 크기가 3 배 이상 높게 나타났음을 알 수 있다. 이것으로부터 구멍의 방향에 따라 구멍의 장축에 수직한 인장응력의 값을 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

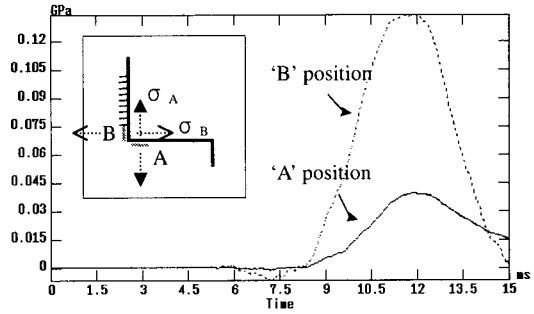


Fig. 7 Comparison of the normal tensile stress of two types of mounting holes on the PCB

3.3 회로기판의 파손 평가

회로기판의 정량적인 파손 평가를 위하여 Fig.7 에 나타낸 두 가지 형태의 히트싱크 납땜 체결부의 수직인장응력을 Lukas 와 Klesnil[7]이 제안한 수식에 적용하여 응력확대계수를 구하였다.

페놀 기판은 취성이 강한 재료이므로 인장에 의해서 주로 파손이 발생한다고 가정하여 수직 인장응력만 고려하였으며, Fig.8 에는 계산에 사용된 Lukas 와 Klesnil[7]의 타원 형상을 나타내었다.

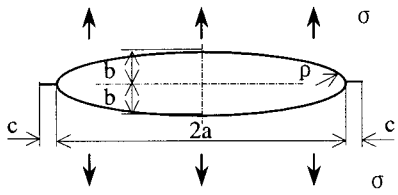


Fig. 8 Schematic diagram of Lukas and Klesnil's hole

여기서, a, b 는 구멍의 장, 단축 길이의 반을 나타내고 c 는 초기 균열(initial crack)의 길이를 의미한다. 그리고 ρ 는 구멍의 선단부 곡률(root radius)을, σ 는 구멍 주변에 걸리는 응력을 의미한다. 다음의 식 (2), (3)에는 Lukas 와 Klesnil[7]의 응력확대계수 계산식을 나타내었다.

$$K_I = F(\lambda)\sigma\sqrt{\pi c} \qquad (2)$$

$$F(\lambda) = 1.1215\alpha / \sqrt{1 + 4.5\lambda} \qquad (3)$$

여기서, λ =c/ρ 이며, α =1+(2a/b)는 응력집중계수를 의미한다. 그리고 본 연구에서 각 변수에 대한 측정값은 a=2.45mm, b=1.1mm 그리고 ρ =b^2/a 이다. 초기균열의 길이 c 는 구멍 주변의 거칠기를 5 개의 샘플에 대하여 측정하였으며, 안전계수를 고려하여 0.2mm 로 하였다. Lukas 와 Klesnil[7]의 수식을 적용하여 해의 정밀도가 5% 이하의 오차를 유지하려면 식 (4)를 만족하여야 하는데, 본 연구의 적용 모델의 경우 이를 잘 만족하였다.

$$c/b \le 0.2 \quad or \quad c/\rho \le 0.2(a/b) \qquad (4)$$

그리고 Table 2 에는 계산된 응력확대계수를 나타내었으며, 여기서 A 와 B 는 Fig.7 에 기술한 납땜부의 위치를 의미한다.

Table 2. Calculated stress intensity factors

	Normal tensile stress (MPa)	Stress intensity factor (MPa· $m^{1/2}$)
B	134	12.21
A	41	3.74

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모니터의 내충격 시험에서 탑 방향 충격에서 회로기판의 파손이 발생하였으며, 탑 방향이 타 방향보다 더 취약함을 알 수 있었다.
2) 회로기판의 변형 모드를 고려한 납땜부 설계 방법으로 모니터의 내충격성을 향상시킬 수가 있었다.
3) 히트싱크의 납땜부 위치를 변경함으로써 임계 응력확대계수 이하의 조건을 구할 수 있었다.
4) 개선안을 제품에 적용하여 제품 규격시험으로 검증한 결과 해석과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. 정완진, 부성운, 전삼표, 김동철, "전자제품의 충격 설계," 대한기계학회지, No. 8, Vol. 35, pp. 678~690, 1995.
2. K.Ha, K.Kim and J.In, "Prediction of CRT Shock Test and Design Improvement for Shock Resistance," SID Int. symposium, CA., USA, Vol. 31, pp. 952~955, 2000.
3. ASTM D 3332-93, D 4169 Annexes, "Mechanical-Shock Fragility of Products, using Shock Machines," pp. 166~171
4. KS C 0241, "환경시험 방법(전기, 전자) 충격 시험 방법," 한국공업시험규격.
5. ASTM D 5045091a, "Standard Test Methods for Plane Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials," 1991.
6. Pam-Crash Users Manual, ESI, 1999.
7. P.Lukas and M.Klesnil, "Fatigue Limit of Notched Bodies," Mat. Sci. Eng., Vol. 34, No. 1, pp. 61~66, 1978.