

액정 디스플레이(LCD)의 패널유리 파손평가에 관한 연구

박상후*, 이부윤**, 엄윤용***

Analysis on the Fracture of a Panel Glass in a Liquid Crystal Display Module under Mechanical Shock

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

ABSTRACT

Analysis on failure of the panel glass under mechanical shock is the main topic of this study. Since the glass for the LCD panel is thin, it needs to be designed to have enough toughness against mechanical shock. In this paper, a process of estimating fracture of the panel glass is proposed to guarantee reliability of the product. The fracture toughness of the panel glass is used as a criterion of the fracture based on an experimental approach. The stress intensity factor was calculated considering a model with the largest initial crack size on a cut surface and with the boundary force obtained from a dynamic finite element analysis. Critical surface roughness on the cut surface of a typical glass panel, to prevent fracture in case of bending mode, is obtained.

Key Words : LCD(liquid crystal display), 파괴인성치(fracture toughness), 패널(panel glass), 충격시험(shock test), 초기균열(initial crack), 응력강도계수(stress intensity factor)

1. 서론

액정 디스플레이(liquid crystal display, LCD)는 최근 디스플레이 장치 중에서 그 수요가 가장 급증하고 있는 제품으로써 전자시계, 노트북 및 기타 문자도형표시장치 등에 사용되는 액정표시장치를 말하며, 음극선관(Cathode-ray Tube)에 비하여 부피가 작고 같은 화면 크기의 음극선관과 비교하여 평균 소비전력이 약 30~40% 정도이며 발열량도 작은 특징을 가지고 있다.

일반적인 LCD 모듈의 주요 구성은 Fig.1 과 같으며, 얇고 끝이 봉해진 유리판 사이에 방향성을 가지는 액정이 들어 있고, 내면에는 상(image)을 표시하기 위한 전극과 색세포(Red-Green-Blue)가

도포되어 있어 외부 단자에 의해 전기적 신호가 들어오면 액정 분자의 배열을 달리하여 원하는 상을 나타내도록 되어 있는 패널(panel)과 여기에 원하는 신호(signal)를 전달하기 위한 장치로서 회로기판(PCB)과 커넥터필름(TCP) 그리고 빛을 발생시켜 화면으로 보내어 주는 백 라이트(back light assembly)가 있다. 또한 전체 LCD 모듈의 강성을 유지하기 위해서 프레임(main supporter)과 금속으로 된 탑 케이스(top case)가 있다.

LCD 는 일반적으로 휴대가 용이한 제품의 디스플레이로 사용되므로 그 두께가 날로 얇아지고 있다. 따라서 LCD 모듈이 가지는 기계적인 강성을 줄어들게 되어 제품 사용환경에 따라서 많은 문제를 야기되기도 한다. 따라서 기계적 강성 즉, 충분

* LG 생산기술원 디자인엔지니어링센터

** 계명대학교 자동차공학부

*** 한국과학기술원 기계공학과

한 내충격성이 요구된다. 일반적으로 제품의 사용 환경뿐만 아니라 운송환경, 생산환경에서 발생 가능한 모든 충격 조건을 고려하여 내충격성 보장을 위한 제품 시험규격을 설정하게 된다.

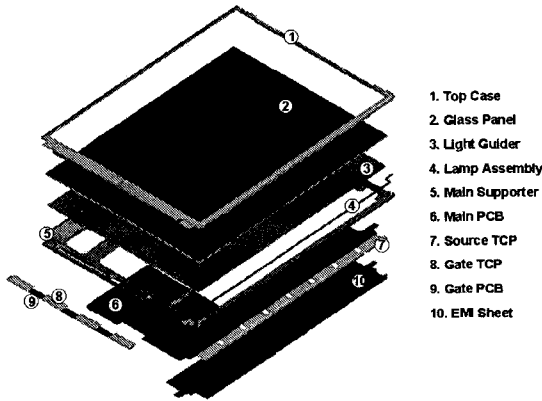


Fig. 1 Schematic structure of the LCD module

LCD 의 충격 시험에서 자주 발생하는 결함 중에 하나는 액정을 감싸고 있는 유리판의 파손이다. LCD 에 사용되는 유리는 두께가 일반적으로 0.7mm 정도이므로 충격에 비교적 약하다. 유리판이 파손되면 외관상 문제뿐만 아니라 유리판에 부착된 전기적 신호선이 파손되어 원하는 상을 나타낼 수가 없다. Fig.2 는 일반적으로 충격 시험에서 자주 나타나는 판넬의 파손 형태를 나타낸 것인데, 커넥터 필름과 연결되는 하판이 굽힘 변형에 의하여 모서리가 파손되는 형태를 보여준다.

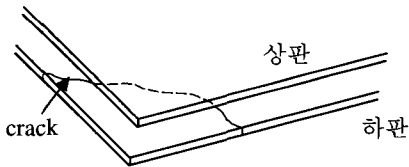


Fig. 2 Schematic diagram of a damaged panel glass

따라서, 설계 단계에서 충격에 의한 유리판 파손을 미리 예측하는 방법이 요구되어진다. 일반적으로 유리와 같은 취성 재료는 소성변형을 수반하는 연성재료와 달리 파괴강도가 재료 내에 존재하는 결함의 영향을 많이 받으므로 동일한 시편의 경우에도 그 강도의 변화가 매우 심하다. 연성재료의 경우에는 형상과 크기가 같으면 강도 변화가

평균값의 4~8% 정도로 그 평균값을 설계에서 바로 적용할 수 있는데 반해, 취성 재료의 경우에는 강도 변화가 매우 커서 확실적인 분포를 구하여 적용하고 있다^[1].

본 논문에서는 실험적 방법을 통하여 LCD 판넬유리의 파괴인성치(fracture toughness)를 구하고, 충격 해석을 통하여 얻은 응력 분포를 이용한 응력강도계수(stress intensity factor)를 구하여 판넬 유리판의 파손을 정량적으로 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 현상 분석

2.1 충격 실험장치 구성 및 실험조건

충격실험 방법은 일반적으로 LCD 모듈 구매업체의 요구사항에 따라 다소 차이가 난다. 즉, LCD 모듈상태에서 실험을 하는 것을 요구하는 경우도 있으며, 노트북 등의 다른 장치에 결합된 형태로 충격 실험을 요구하는 경우도 있다. 본 연구에서는 LCD 모듈 자체의 충격 강도를 평가하기 위하여 지그(jig)를 만들어서 LCD 모듈을 체결하여 충격시험 장치를 만들었다. 여기서 충격시험기는 LANSMONT 사의 shock test system (model 65/81)을 사용하였다. Fig.3 에는 LCD 모듈이 충격시험기에 장착된 형태와 사용된 지그의 형태를 나타내었다.

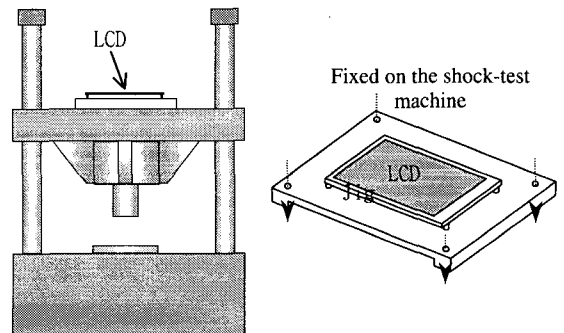


Fig. 3 Schematic diagram of a shock test device for the LCD module

충격시험에서 하중 조건은 일반적으로 LCD 의 주요 고객인 노트북 제조업체에 따라 달라지는데, 여기서는 C 사의 시험 규격인 가속도 100G ($1G=9.81m/s^2$), 지속시간 6ms 의 사각파형의 충격량을 입력조건으로 하였다.

충격시험 후의 검사 방법으로는 유리의 파손 여부를 확인하기 위하여 LCD 를 구동시켜서 육안으로 검사하는 방법을 선택하였다. 파손이 일어나는 부위는 LCD 모듈의 종류에 따라서 다소 차이가 나지만, 실험적 결과에 의하면 일반적으로 탑재케이스와 프레임의 나사체결 부위와 인접한 부분이 충격에 취약함을 알 수 있었다.

2.2 판넬 절단면의 거칠기 측정

판넬의 파손부를 정밀하게 검토해 보면, 균열의 시작점이 판넬 유리의 가장자리에 있음을 알 수 있었다. 이것은 판넬 유리를 휠커터(wheel cutter)를 사용하여 절단할 때 절단면에 많은 미세한 초기 균열(initial crack)이 발생하게 되어, 판넬의 중앙부에 비하여 절단면이 더 취약함을 알 수 있다. Fig.4 는 절단면을 50 배 확대한 그림으로서 휠커터의 자국을 나타낸 것이다.

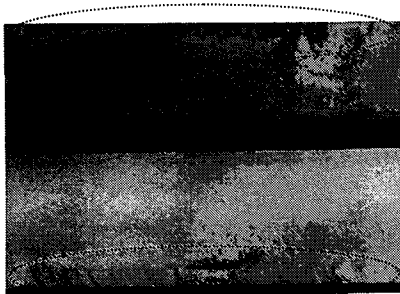


Fig. 4 Initial damage on the cut surface of the panel glass

파괴 해석에서 초기 균열의 크기를 결정하기 위하여 판넬 가장자리 절단면의 표면 거칠기를 측정하였다. Fig.5 에는 측정에 사용된 장비의 구성도를 나타내었다.

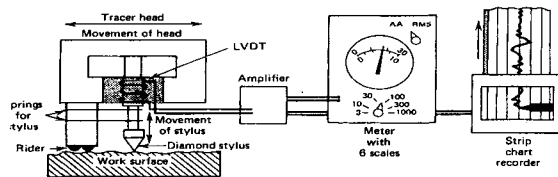


Fig. 5 Schematic diagram of the system for measuring surface roughness (Mitutoyo Surftest 402)

절단면의 표면 거칠기는 오차량을 줄이기 위하여 각 시료별 3 회 중복 측정을 하였고, 시료를 10 개로 하여 평균값을 구하였다. Fig.6 은 측정된 표면 거칠기를 나타낸 것인데 측정길이 방향인 수평축은 100 배 증폭하고 측정값인 수직 축은 10000 배 증폭하여 나타낸 그림이다. 측정 길이 내에서 측정된 표면거칠기의 최대값은 3.92 μm 로 나타났다.

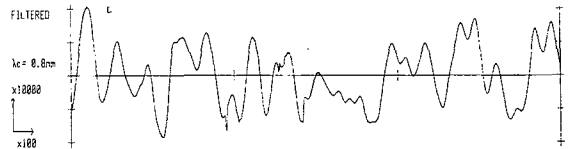


Fig. 6 Experimental result of surface roughness on a cut surface of the glass panel

측정한 표면거칠기로부터 다음 식(1)에 의하여 평균표면거칠기를 구하였다.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} f(x)^2 dx} \quad (1)$$

여기서, R_q 는 평균표면거칠기를 나타내고 l_m 은 측정 길이를 의미하며 $f(x)$ 는 길이 x 를 따라 측정된 표면거칠기 값을 나타낸 것이다. 계산된 평균 표면거칠기는 0.88 μm 로 나타났다.

2.3 판넬 유리의 파괴인성치 측정

유리와 같은 취성재료인 경우에는 소성변형이 거의 없으므로 ASTM E399 등에서 규정하는 CT 시편과 같은 형태를 만들어서 실험하는 것 보다 간편한 방법이 여러 연구자들에 의하여 제안되었다^[3-5].

본 연구에서는 Niihara^[5]가 제안한 비커스 시험기(Vickers indenter)를 이용한 측정방법을 사용하였다. 파괴인성치 K_{IC} 는 실험에서 구한 시편에 가해지는 하중 P_V 와 경도시험에 의해 발생한 직선 균열의 길이 l 과 ASTM-E384 에 규정된 비커스 경도 H 로부터 아래의 식(2)~(4)에 의해서 구할 수 있다.

$$K_{IC} = 0.129 \frac{H\sqrt{a}}{\Phi} \left(\frac{E\Phi}{H} \right)^{2/5} \left(\frac{c}{a} \right)^{-3/2} \quad \text{for } \frac{c}{a} \geq 2.5 \quad (2)$$

$$K_{IC} = 0.035 \frac{H\sqrt{a}}{\Phi} \left(\frac{E\Phi}{H} \right)^{2/5} \left(\frac{l}{a} \right)^{-1/2} \text{ for } \frac{l}{a} \leq 2.5 \quad (3)$$

$$H = 1.8544 \frac{P_V}{(2a)^2} \quad (4)$$

위의 식(2)에서 E 는 탄성계수(Young's modulus)이고, $\Phi = 3$ 이다. 그리고 a 는 시편 위에 발생한 자극의 대각선 길이의 반을 의미하고 c 는 시편 위에 발생한 균열의 전체 길이의 반을 나타낸 것이다. Fig.7 에는 균열형상과 치수를 나타내었다.

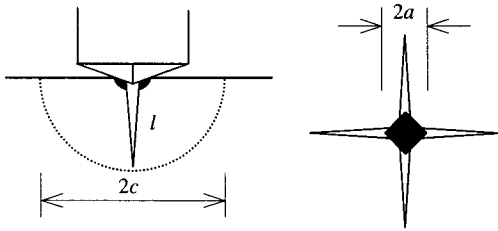


Fig. 7 Schematic view of crack shape and dimension

본 연구에서 사용된 LCD 판넬 유리의 경우에는 $E=75.0\text{GPa}$ 이고, 시편에 가한 하중은 $P_V=0.6\text{kgf}$ 이다. 5 번의 측정 결과에 대하여 a 의 평균값은 $21.0\ \mu\text{m}$ 였고, l 의 평균값은 $31.7\ \mu\text{m}$ 였다. Table 1 에는 측정 결과를 나타내었다.

Table 1 Fracture toughness of LCD panel glass

| Indentation No. | a(μm) | l(μm) | K _{IC} (MPa√m) |
|-----------------|---------|---------|-------------------------|
| #1 | 22.3250 | 26.5550 | 1.221 |
| #2 | 22.2075 | 33.4875 | 1.088 |
| #3 | 19.9750 | 34.8580 | 1.106 |
| #4 | 21.2675 | 31.3725 | 1.134 |
| #5 | 19.3875 | 32.1950 | 1.141 |

실험에서 구한 판넬 유리의 평균 파괴인성치는 $1.138\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 계산되었다.

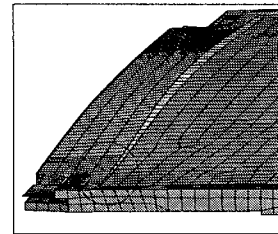
3. 판넬 유리의 파손 평가

3.1 취약부의 최대굽힘 응력계산

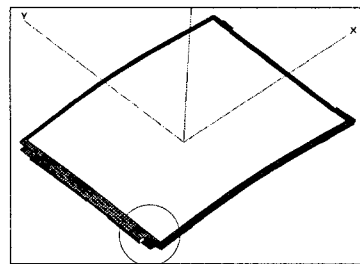
충격해석을 통하여 LCD 모듈의 취약부 분석과 취약부에 걸리는 최대 주응력(principal stress)을 구하였다. 충격해석은 비선형 충돌해석 전용 소프트웨어인 Pam-Crash 를 이용하였으며, 해석 모델은 충돌시 접촉조건 변화로 정확한 경계조건(boundary condition)을 계산해야 하므로 실제와 거의 동일한 형상과 조건으로 해석 모델을 만들었으며, 고려된 부품 및 형상은 Fig.1 과 같다. 해석에 사용된 입력 조건은 앞서 기술한 바와 같이 노트북 제조사인 C사의 충격 시험규격을 사용하였다.

Fig.8 에는 panel 면방향 낙하 시 변형형상의 일부와 판넬에 걸리는 von Mises 응력 분포를 나타내었다. 여기서 최대 응력이 걸리는 부위는 실험에서 자주 균열이 발생한 부분(Fig.2 참조)과 잘 일치하였다.

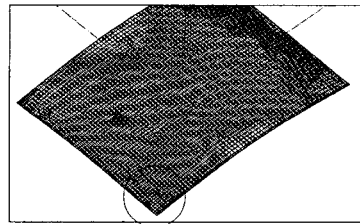
Fig.8 에는 panel 면방향 낙하 시 변형형상의 일부와 판넬에 걸리는 von Mises 응력 분포를 나타내었다. 여기서 최대 응력이 걸리는 부위는 실험에서 자주 균열이 발생한 부분(Fig.2 참조)과 잘 일치하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Results of the impact analysis of the LCD module.

(a)Deformation shape. (b)von Mises stress distributions of the top case. (c)von Mises stress distributions of the panel glass(unit : GPa)

해석 결과(Fig.8)에서 탑 케이스와 프레임의 나

사 체결부에서 변형이 구속되므로 이 근방에서 변형 구배가 급변하게 되고, 이러한 영향으로 판넬 유리에 집중적인 굽힘 변형이 발생하였다. 이러한 굽힘 응력에 의하여 판넬의 절단면에서부터 균열이 발생하여 판넬 중심부로 성장한 것으로 판단된다. 충격 해석에서 판넬 유리의 굽힘에 의한 최대 주 응력은 130MPa로 계산되었다.

3.2 응력강도계수의 계산

LCD 모듈에서 판넬의 파손은 크게 접촉에 의한 Hertzian 파괴와 굽힘 하중에 의한 파손으로 구별할 수 있다. 전자의 경우는 일반적으로 LCD 모듈의 수직 방향 낙하시 프레임의 리브(rib) 또는 발광체인 램프(lamp)와 접촉에 의해서 일어나는 경우가 대부분이다. 그러나 이러한 것은 프레임의 강성 증대 및 설계 변경을 통하여 쉽게 해결책을 구할 수 있는 여지가 있으므로 본 연구에서는 굽힘에 의한 판넬 파손평가에 중심을 두었다.

주어진 설계 및 충격 실험 조건에 대하여 판넬의 파손 가능성을 평가하기 위하여 응력강도계수 K_I 를 2 차원 평면에 표면 균열이 있는 경우에 대한 이론식을 사용하였다. 이것은 재료가 선형 탄성 재료이고, 균열의 길이가 다른 길이에 비하여 매우 작을 경우에는 실제로 J 적분^[2]을 이용한 방법과 거의 동일한 결과를 준다^[6].

응력강도계수를 구하기 위한 모델을 Fig.9에 나타내었는데, 굽힘 변형에 의한 균열의 시작점을 판넬 유리의 가장자리인 절단면에 두었다. 이러한 가정의 근거는 Fig.4에 나타낸 바와 같이 많은 결함때문에 절단면이 일반적으로 취약하기 때문이다.

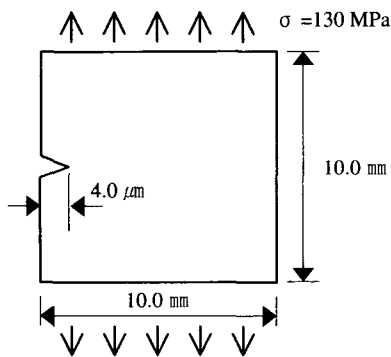


Fig. 9 Schematic diagram of analytical model to calculate the K_I -value

초기 균열의 크기는 2.2 절에서 실험을 통하여 측정된 판넬 유리 절단면의 표면 거칠기의 최대값 (3.92 μm)보다 안전계수를 고려하여 조금 더 큰 값 (4.0 μm)으로 주었고 하중으로는 3.1 절에서 구한 최대 주응력인 130MPa 이 정적으로 외부에서 작용하는 경우를 고려하였다. 이론식^[7]을 이용한 응력강도계수를 식(5)에 나타내었다.

$$K_I = 1.12\sigma\sqrt{\pi a} = 0.516\text{MPa}\sqrt{m} \quad (5)$$

위 식(5)에서 구한 응력 강도 계수는 2.3 절에서 구한 평균 파괴인성치 1.138 $\text{MPa}\sqrt{m}$ 에 비해 작은 값이다. 따라서 본 연구에서 해석한 LCD 모듈의 모델은 충격시험 조건 하에서 굽힘에 의한 판넬의 파손은 일어나지 않을 것으로 예상된다. 그리고 이러한 이론식을 이용하여 판넬에 가해질 수 있는 한계 주응력과 유리 표면에 존재할 수 있는 한계 표면 거칠기의 크기를 구하면 식(6), (7)과 같다.

$$\sigma_{\max} = \frac{K_{IC}}{1.12\sqrt{\pi a}} = 286.6\text{MPa} \quad (6)$$

$$a_{\max} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{1.12\sigma} \right)^2 = 19.4\mu\text{m} \quad (7)$$

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 충격해석에서 구한 주응력을 이용하여 파괴강도계수를 구하여 판넬유리의 파손을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.
- 2) 프레임과 탑케이스의 나사체결부 부근의 판넬은 충격하중에 의한 변형구배가 심하게 되어 굽힘에 의한 파손이 쉽게 발생할 수 있는 취약부이다.
- 3) 판넬 유리의 절단면은 휠커터의 영향으로 인하여 초기 결함을 많이 내포하게 되어 균열성장의 시작점이 된다.
- 4) 본 연구에 사용된 특정 LCD 모듈의 경우에는 판넬 절단면 표면 거칠기의 최대 값이 19.4 μm 이하가 되도록 하면 굽힘에 의한 파손을 방지할 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. A. de S. Jayatilaka and Trustrum, "Application of a statistical method to brittle fracture in bi-axial loading systems," *J. Mater. Sci.*, Vol. 12, pp. 2043~2048, 1977.
2. J. R. Rice, "A path independent integral and approximation analysis of strain concentration by notches and cracks," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 35, pp. 379~386, 1968.
3. K. Zeng, K Breder and Rowcliffe, "The Hertzian stress field and formation of cone cracks-I. Theoretical approach.," *Acta. Metall. Mater.*, Vol. 40, No.10, pp. 2595~2600, 1992.
4. A. G. Evans, "Fracture toughness: The role of indentation techniques," *Fracture mechanics applied to brittle materials* (ed. By S.W. Freiman), ASTM STP678, pp. 112~135, 1979.
5. K. Niihara, R. Morena and D.P.H. Hasselman, "Indentation fracture toughness of brittle materials for Palmqvist cracks," *Fracture mechanics of ceramics*, Vol. 5, pp. 97~105, 1983.
6. 이경우, 김재현, 엄윤용 "유리 및 아크릴 판의 파손에 관한 해석," 한국과학기술원 연구보고서, 1998.
7. Y. Murakami, "Stress Intensity Factors Handbook," Pergamon Press, New York, 1987.