

## 고속 충격을 받는 취성재 평판의 관통파괴 강도

### A Study on the Penetration Fracture Strength of Fragile Plates subjected to High Speed Impact

김 지 훈\* · 심 재 기\*\* · 양 인 영\*\*

Ji-Hoon Kim · Jae-Ki Sim · In-Young Yang

(1995년 11월 22일 접수, 1996년 12월 14일 채택)

#### ABSTRACT

In this study, comparison of theoretical solutions with experimental results is examined through fracture conditions for the case of float glasses subjected static loading. The range of fracture generation limits and critical penetration energies are solved according to the impactor mass under the high velocity, and analytical method of fracture strength and penetration strength are presented. Also, fracture patterns are investigated according to impact velocities. The results obtained from this study are as follows ;

- 1) Radial cracks are generated from the loading point regardless of plate thickness in the case of the plate subjected to the static loading. In the case of high-speed impact, dimensions of ring cracks become to smaller and length of radial cracks becomes shorter with the rapidity of impact velocity.
- 2) Kinetic change volume of collision after/before is constant regardless of velocities over the range of critical penetration velocity.
- 3) Although the same impact energy is working, the critical penetration energy is increased with the shorter of impactor mass.
- 4) Although the same impact energy is working, the penetration fracture of lighter impactor mass is generated more than that of heavier impactor mass, and the impulse of lighter impactor mass appear more than that of heavier impactor mass. Therefore, the penetration fracture in the case of greater impulse is generated earlier regardless of the of the dimensions of impact loading.

---

\* 조선대학교 대학원

\*\* 조선대학교

### 1. 서 론

취성재료는 충격 흡수능이 낮아 충격력에 대하여 취성적인 파괴를 일으키기 때문에 구조용 부재 등으로 사용할 경우 충격 파괴를 막기 위해서는 충격 하중 작용점에서의 충격 강도를 이론적으로 규명하는 것이 반드시 필요하다<sup>1)</sup>.

특히, 취성재료의 대표적인 플로우트 유리판이 수송 도중에 전도 또는 비래물체의 충돌을 받으면 달리는 버스의 유리창에서 흔히 볼 수 있듯이 고속으로 비산하는 물체에 의해 충격을 받을 경우 파괴 현상은 가지각색이어서 파괴 현상을 정량적으로 평가하는 것은 극히 어려운 문제이다.

최근에는 TV브라운관의 파괴방지에 대한 안전 대책을 위해 충격 실험<sup>2-4)</sup>을 행하여 가속도, 변형도를 구하여 충격 실험 결과와 비교하여 TV의 구조를 개선하려는 연구 및 동적 팽탄성 실험을 행하여 강구의 낙하에 의한 충격응력분포를 추정하는 연구 등이 행하여졌다. 그러나 이들 모두 실험적인 결과를 보고한 것뿐이며 파괴강도 및 임계 관통에너지의 관계등 실제 파괴에 이르는 조건 및 강도해석은 이루어져 있지 않다. 특히, 충격에 의한 파괴 상황은 동일조건에서도 일정하지 않고 파괴기구에 관해서는 아직 미지의 부분이 많다.

따라서 본 연구에서는 플로우트 유리판이 정적 하중을 받을 경우의 파괴 상황을 관찰하여 파괴에 이를 때까지의 변형에 관해서 검토한 후 이론 해석 결과와 비교하여 파괴 현상을 실험적으로 고찰하고, 고속충격을 받을 경우 충격체 질량의 크기에 따른 파괴 발생 한계 및 임계 관통에너지의 범위를 구하여 유리판의 파괴강도 및 관통강도를 계산하는 해석 방법을 제안하고자 한다. 또한 충격속도의 변화에 따른 파괴패턴에 관하여 규명하고자 한다.

본 연구에서의 실험은 한 변의 길이가 300mm이고 두께가 2, 3, 5mm인 정방형 유리판에 정적 및 충격실험을 행하였으며, 해석방법으로는 직각좌표계를 이용한 3차원 동탄성이론과 변위 포텐셜이론<sup>5)</sup>을 이용하여 충격응력을 해석하고 충격하중의 해석은 구가 무한판에 충돌하는 경우를 대상으로 Hertz접촉이론<sup>6)</sup>을 적용하였고 수치 Laplace 역변환은 F. F. T.의 알고리즘을 이용하였다. 또한 정적 강도의 해석은 Laplace변환 파라메타를 0으로 하여 계산하였다.

### 2. 이론 해석

저자는<sup>7)</sup> Fig. 1과 같이 정방형 평판의 중앙에 집중 충격하중이 작용할 경우 충격응력을 해석하기 위하여 3차원 동탄성이론과 변위 포텐셜이론을 이용하여 충격응력해석 방법을 제안하였고, 충격실험결과와 비교하므로써 본 해석방법의 타당성을

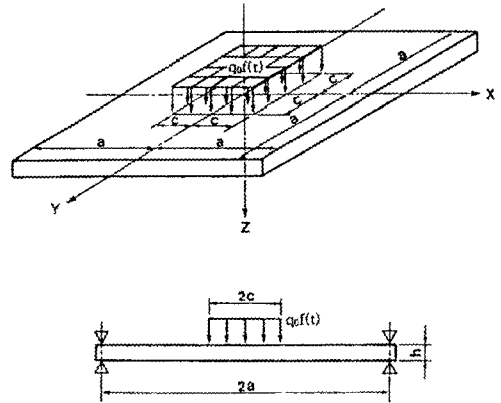


Fig. 1 A square plate subjected to partial distributed impact loading on the center

입증하였다. 또한 충격하중의 측정이 곤란한 경우인 강구가 무한판에 충돌할 때의 충격하중의 계산식을 제안하였고 실험 결과, 집중 충격하중 작용점에서의 충격응력 해석 방법을 제안한 본 응력해석 방법의 타당성을 입증하였다. 저자가 제안한 충격응력 해석 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x = & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( -\alpha_m^2 + \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{p^2}{c_1^2} \right) e^{\beta_{mn}z} C_1 \right. \\ & + \left( -\alpha_m^2 + \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{p^2}{c_1^2} \right) e^{-\beta_{mn}z} C_2 \\ & \left. - \alpha_m \gamma_{mn} E_1 e^{\gamma_{mn}z} + \alpha_m \gamma_{mn} e^{-\gamma_{mn}z} E_2 \right] \\ & \cos \alpha_m x \cos \alpha_n y \\ \bar{\sigma}_y = & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( -\alpha_n^2 + \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{p^2}{c_1^2} \right) e^{\beta_{mn}z} C_1 \right. \\ & + \left( -\alpha_n^2 + \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{p^2}{c_1^2} \right) e^{-\beta_{mn}z} C_2 \\ & \left. - \alpha_n \gamma_{mn} e^{\gamma_{mn}z} D_1 - \alpha_n \gamma_{mn} e^{-\gamma_{mn}z} D_2 \right] \\ & \cos \alpha_n x \cos \alpha_m y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_z = & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( -\beta_{mn}^2 + \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{p^2}{c_1^2} \right) e^{\beta_{mn}z} C_1 + \right. \\ & \left. \left( \beta_{mn}^2 + \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{p^2}{c_1^2} \right) e^{-\beta_{mn}z} C_2 \right. \\ & - \alpha_n \gamma_{mn} e^{\gamma_{mn}z} D_1 + \alpha_n \gamma_{mn} e^{-\gamma_{mn}z} D_2 \\ & \left. + \alpha_n \gamma_{mn} e^{\gamma_{mn}z} E_1 - \alpha_m \gamma_{mn} e^{-\gamma_{mn}z} E_2 \right] \\ & \cos \alpha_m x \cos \alpha_n y \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

여기서  $\bar{\quad}$  기호는 Laplace 변환을 나타내며  $\alpha_m$  은  $\pi(2m-1)/2a$ ,  $\alpha_n$  은  $\pi(2n-1)/2a$ ,  $c_1$  은 종파의 전파 속도로서  $2(1-\nu)G/(1-2\nu)\rho$ ,  $c_2$  는 전단파의 전파 속도로서  $G/\rho$ ,  $G$  는 판의 전단 탄성계수,  $\rho$  는 판의 밀도,  $\nu$  는 판의 포아송비,  $p$  는 Laplace 변환 파라메타,  $\beta_{mn}^2 = \alpha_m^2 + \alpha_n^2 + (p^2/c_1^2)$ ,  $\gamma_{mn}^2 = \alpha_m^2 + \alpha_n^2 + (p^2/c_2^2)$ ,  $C_1, C_2, D_1, D_2, E_1, E_2$  는 미정 계수로서 다음과 같은 판의 상하면의 경계조건에 의해서 결정된다.

평판의 상면에서

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_z = & -q_0 \bar{f}(p) H(c-|x|) H(c-|y|), \\ \bar{\tau}_{zx} = & \bar{\tau}_{zy} = 0 \end{aligned}$$

평판의 하면에서

$$\bar{\sigma}_z = \bar{\tau}_{zx} = \bar{\tau}_{zy} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $H$  는 단위 스텝함수이다.  
또한 Laplace 변환 영역에서 변형률의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_x = & \frac{\partial u}{\partial x} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2G} [(-\alpha_m^2)(C_1 e^{\beta_{mn}z} + C_2 e^{-\beta_{mn}z}) \\ & - \alpha_m \gamma_{mn} (E_1 e^{\gamma_{mn}z} - E_2 e^{-\gamma_{mn}z})] \cos \alpha_m x \cos \alpha_n y \\ \bar{\epsilon}_y = & \frac{\partial v}{\partial y} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2G} [(-\alpha_n^2)(C_1 e^{\beta_{mn}z} + C_2 e^{-\beta_{mn}z}) \\ & + \alpha_m \gamma_{mn} (D_1 e^{\gamma_{mn}z} - D_2 e^{-\gamma_{mn}z})] \cos \alpha_m x \cos \alpha_n y \\ \bar{\epsilon}_z = & \frac{\partial w}{\partial z} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2G} [\beta_{mn}^2 (C_1 e^{\beta_{mn}z} + C_2 e^{-\beta_{mn}z}) + \\ & \alpha_n \gamma_{mn} (E_1 e^{\gamma_{mn}z} - E_2 e^{-\gamma_{mn}z}) - \alpha_n \gamma_{mn} (D_1 e^{\gamma_{mn}z} \\ & - D_2 e^{-\gamma_{mn}z})] \cos \alpha_m x \cos \alpha_n y \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

또한 Lagrange의 고전판 이론과 충돌시 강구와 판에서의 국부변형의 영향을 고려하여 Hertz 접촉이론을 이용하여 구한 무차원 충격하중의 식은 다음과 같다.

$$I_p P(\tau)^{2/3} = \tau \int_{\eta_1}^{\tau} \int_{\eta_1}^{\xi} P(\eta) d\eta d\xi - \int_{\eta_1}^{\tau} P(\eta) d\eta \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $P(\tau)$  는 무차원 충격 하중이며 계수  $I_p = 1/m(1/V)^{1/3}(1/k)^{2/3}(8D/C_b)^{5/3}$  이고,  $m$  은 강구의 질량,  $V$  는 강구의 속도,  $k$  는 Hertz의 접촉상수,  $D$  는 판의 굽힘 강성계수이고  $C_b = \sqrt{D/\rho h}$  이다.

충격하중의 식(4)는 비선형 적분방정식이므로 해석적으로 풀기가 곤란하여 전진차분 근사식을 이용하여 수치계산 하였으며 충격응력 해석시 충격하중은 다음과 같은 해석 가능한 함수근사식을 이용하여 수치계산 하였다.

$$f(t) = Ate^{-wt} \dots\dots\dots (5)$$

응력해석 시에는 함수근사식 식(5)를 Laplace 변환한 후 식(2)의 경계조건에 대입한 후 Laplace 변환 영역에서의 응력성분의 식(1)에 대입하여 미정계수를 구하여 해석했다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 이용한 유리판은 1번의 길이 300mm 인 정방형 플로우트 유리판이며 정적실험의 경우는 시험편을 아크릴제의 지지 상자위에 올려놓고 재료시험기에 의해 유리판의 중앙에 정하중을 가하면서 유리판이 파괴할 때까지의 변형률을 계측하였다.

스트레인 게이지는 2축 전기 저항선 스트레인 게이지를 정방형 유리판의 하중 작용점 배면에 붙여  $\epsilon_x, \epsilon_y$  의 peak값이 같을 때를 중앙에 하중이 작용하는 것으로 하였으며, 만능 재료시험기의 크로스 헤드의 강하 속도를 5mm/min. 로 하였다. 또한 3점 굽힘시험에 의해 측정된 유리판의 재료정수는 포아송비 0.22, 탄성계수 67.6GPa이었다.

충격시험 장치 및 관통속도 측정장치는 Fig. 2

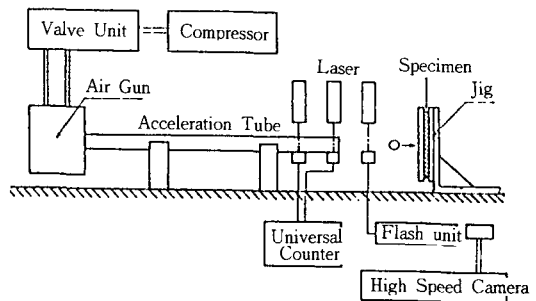


Fig. 2 Schematic Diagram of Impact Apparatus

와 같은 공기압 고속 충격시험 장치를 이용하였으며 시험편 지지 조건은 Fig. 3과 같이 고정 지지하였으며, 충격속도의 측정에는 충격 시험 장치의 선단에 있는 2점점간의 거리(10cm)를 가속화한 강구가 통과하는 시간을 검출하여 측정하였고, 관통후의 강구 속도는 고속카메라를 이용하여 측정하였다. 또한 강구의 발사 속도를 충격속도로 하였으며 충격파괴 실험시 직경 5mm, 10mm의 강구를 이용하였다.

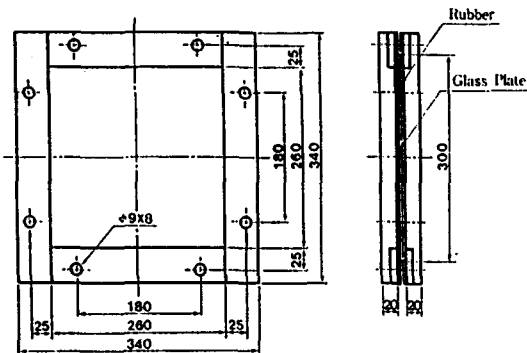


Fig. 3 Supporting Conditions of Specimen

#### 4. 실험결과 및 이론해석 결과와의 비교

##### 4.1 정적파괴 실험

본 장에서는 3차원 동탄성 이론과 변위 포텐셜 이론을 이용하여 해석한 충격응력의 식(1)의 Laplace 변환 파라메타  $p$ 를 0으로 하여 집중하중 작용점에서의 변형율을 수치계산하여 정적 파괴 실험 결과와 비교하였다.

Fig. 4는 두께 2, 3, 5mm의 판이 정하중에 의해서 파괴할 때 까지의 작용하중과 변형율의 측정 결과와 식(3)에 의한 이론해석 결과의 비교를 나타낸 것으로서, Fig. 4 중 실선은 이론해석 결과를 나타내며 ×표시는 파괴점을 나타낸다. Fig. 4로부터 판두께가 두꺼울 수록 이론해석 결과와 실험 결과와는 잘 근사함을 알 수 있으며 얇은 시험편의 경우 파괴점 직전에서의 이론해석 결과와 실험 결과와의 사이에 오차가 생기는 것은 얇은 판은 판의 굽힘강성이 크기 때문이라 생각된다.

수치계산시에 이용한 재료정수는 3점 굽힘시험

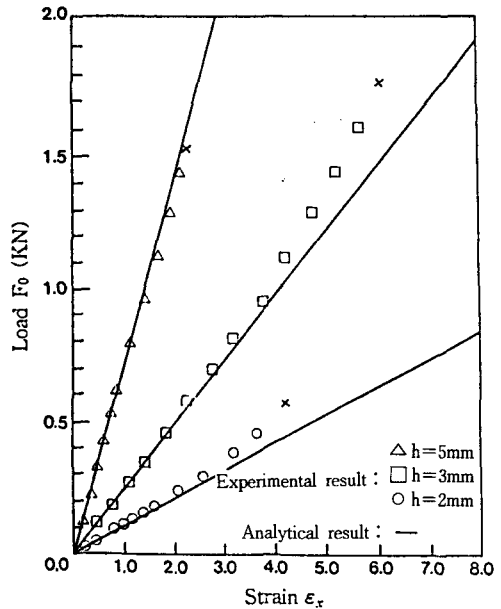


Fig. 4 Comparison of analytical results with experimental results of strain from the concentrated load point

에 의해서 얻은 재료정수값을 대입하였으며 등분포하중 영역(Fig. 1 참조)  $c$ 를 0으로 수렴시켜 한 중앙에 집중하중이 작용하는 것으로 하여 계산하였다.

##### 4.2 충격파괴 실험

충격파괴 실험은 Fig. 2와 같은 고속 충격시험 장치를 이용하여 직경 10mm의 강구를 판두께 3mm인 정방형 유리판에 고속충격을 가하여 유리판이 파괴되는 충격속도 전후에서 수신회의 충격 실험을 반복하여 유리판이 관통되는 임계속도를 구하였다. 관통속도의 측정은 관통후의 강구의 속도를 고속카메라를 이용하여 측정하였다. 10mm의 강구로 3mm의 유리판에 고속 충격하중을 가했을 경우의 관통파괴 실험 결과를 Fig. 5에 나타내며 Fig. 5 중 실선은 관통파괴 실험 결과를 최소자승법으로 플로트한 것으로서 임계관통속도는 약 29m/sec였고 수식으로 표시하면  $V_{out} = [1.067V_{in} - 31]m/s$ 였다. 또한 임계관통속도를 운동에너지로 나타내면  $E_{crit} \approx 1.723J$ 이었다.

Fig. 5으로부터 알 수 있는 바와 같이 충돌 전후의 속도 변화량은 충돌 전의 속도의 크기에 관계없

이 거의 일정으로 약 30m/sec였다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 예측한 관통임계속도와 강구 및 유리판의 재료 정수를 식(1)(2)(4)에 대입하여 구한 관통파괴가 생기지 않을 유리판의 파괴강도의 계산 결과를 나타낸다. Fig. 6로부터 10mm의 강구로 3mm의 유리판에 충격을 가했을 때 유리판이 관통하지 않을 파괴강도는 11.33GPa이었고 peak부의 시간은 10.94  $\mu$ sec이었다.

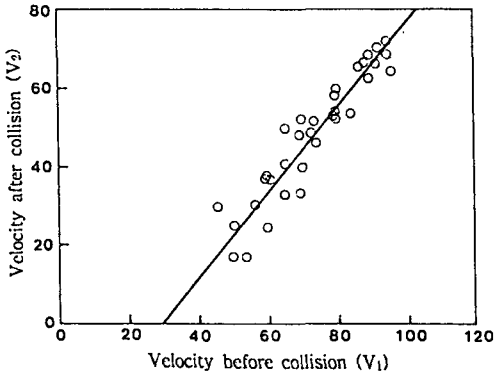


Fig. 5 Critical Penetration Velocity

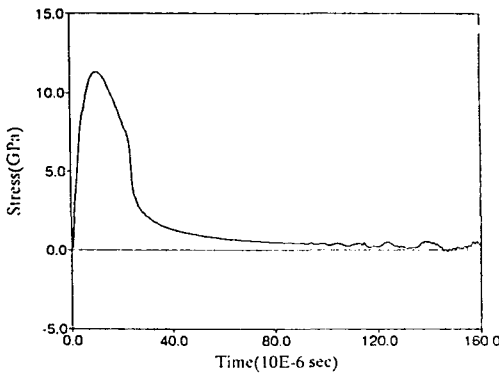


Fig. 6 Fracture Strength at Critical Penetration Velocity (steel sphere :  $\phi$  10, impact velocity : 29m/sec, plate thickness : 3mm)

또한, 충돌 속도의 변화에 따라 파괴패턴이 어떻게 변화하는가를 고찰하기 위하여 강구경 10mm로 3mm 두께의 유리판에 80m/sec의 속도로 충격을 가했을 경우의 파괴패턴을 Fig. 7에 나타낸다. Fig. 7에서 알 수 있는바와 같이 파괴패턴은 관통공(①), 환상크랙(②③)과 방사상크랙(④)이 병존

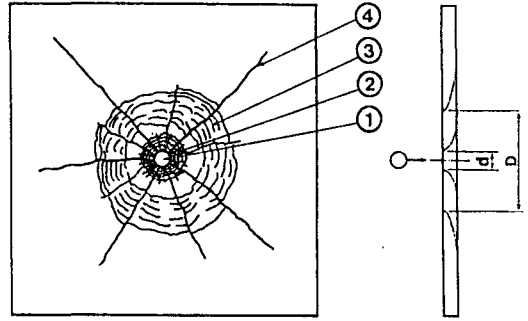


Fig. 7 Fracture Patterns

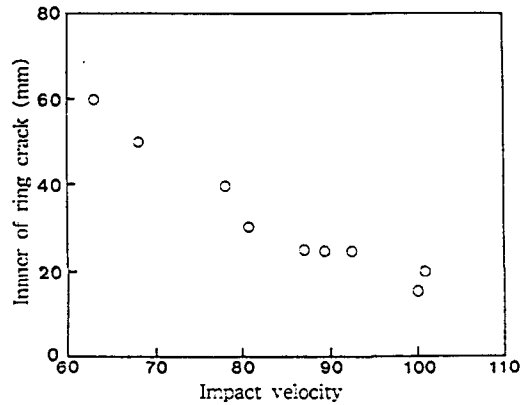


Fig. 8 Inner Diameter of ring cracks with the to variety of collision velocity

한다. 방사상의 크랙은 거의 판의 단까지 도달하며, 충돌점 근방의 환상크랙②의 내측 부분은 충돌에 의해 가늘게 분쇄되어 있고 강구의 직경과 거의 같은 원공(직경 d)이 생긴다. 환상크랙②와 ③의 사이의 부분은 비교적 큰 파편으로 되며 보통은 비산된다. 또한 충돌속도가 100m/sec인 경우는 파괴패턴은 Fig. 7과 거의 같은 형태이나 속도가 빠를수록 환상크랙은 거의 보이지 않고 방사상크랙은 Fig. 7에서 보다 훨씬 짧아 단까지 도달하지 않는다. 또 환상크랙의 내경도 속도가 빠를수록 작게 된다. Fig. 8에 충돌속도의 변화에 따른 환상크랙의 내경의 개략치를 나타낸다.

또, Table 1은 직경 5mm의 강구로 3mm 두께의 유리판에 충격을 가했을 때의 파괴상황을 나타내며 Fig. 9은 충돌속도의 변화에 따른 crack 패턴의 변화를 나타낸다. 직경 5mm강구의 경우 관통속도

를 측정하지 않은 것은 강구의 질량이 0.5g이므로 관통후 속도의 측정이 곤란하여 파괴 상황만을 관찰하였다. 특히 관통이 생기기 전후의 속도 범위에서 많은 실험을 행하였으며 대략 94m/sec 범위에서 관통파괴가 시작되었고, 84m/sec 이전에는 아무런 파괴가 생기지 않았으나 84m/sec~92m/sec 범위에서는 정적 파괴 패턴과 유사하게 충격점을 기점으로 방사상의 크랙이 발생하였다.

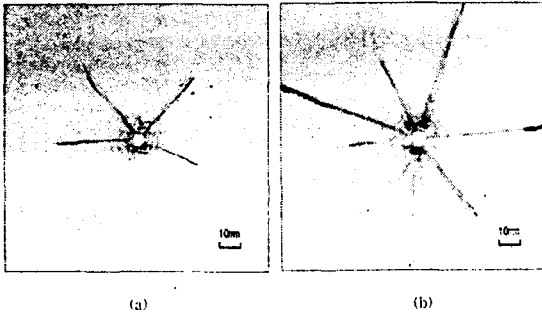


Fig. 9 Crack patterns with the variety of collision velocity (steel ball :  $\phi 5$ , plate thickness : 3mm, impact velocity : (a) 102m/sec, (b) 94m/sec)

Table 1 Fracture conditions

Impact Velocity	Diameter of ring crack(mm)	Fracture form
60m/sec	—	Non-fracture
72m/sec	—	"
74m/sec	—	"
75m/sec	—	"
80m/sec	—	"
84m/sec	—	Radial crack, non-penetration
90m/sec	—	"
92m/sec	—	"
94m/sec	50~100	penetration
102m/sec	40~60	"
110m/sec	40~50	"
118m/sec	30~40	"
125m/sec	15~20	"
130m/sec	15	"

Table 1로 부터 직경 5mm의 강구로 충격을 가할 경우 파괴가 발생하는 충격속도는 약 84m/sec로서 운동에너지로 나타내면 1.764J, 관통파괴가 발생하는 충격속도는 94m/sec로서 운동에너지로 나타내면 2.21J이었다. 이 결과를 Fig. 5에서의 관

통임계에너지와 비교하면(강구경이 10mm일 때는 약 1.72J) 강구경이 5mm일 때가 강구경이 10mm일 때보다 관통에 요하는 운동에너지는 약 28% 증가함을 알 수 있으며, 충격파괴가 발생하는 임계 에너지와 비교해도 약 2.5%정도 증가하였다. 즉, 강구경이 작은 경우가 큰 경우보다 충격파괴 및 관통파괴에 요하는 임계에너지가 더 커짐을 알 수 있다. 또한 환상크랙의 크기를 충격속도와 비교하면 Fig. 9와 Table 1에서와 같이 충격속도가 빠를수록 환상크랙의 직경은 작아졌으며 방사상 크랙의 길이 역시 짧아졌다.

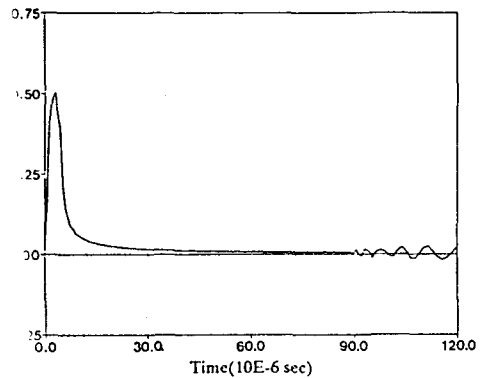


Fig. 10 Fracture strength velocity at penetration fracture initiation ( $\phi 5$ , h3, V=94m/sec)

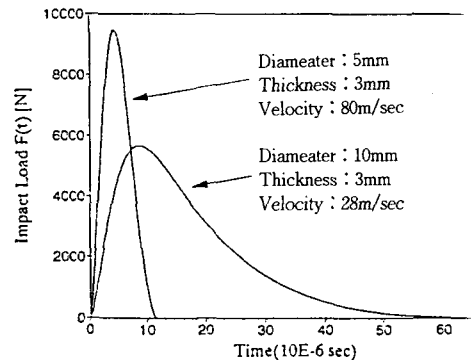


Fig. 11 Max. loading with the difference of masses of impactor (Impact energy E=1.6J)

Fig. 10은 직경 5mm로 충격을 가했을 때의 관통 파괴가 시작되는 94m/sec의 충격속도에서의 판의 파괴강도의 수치계산 결과이다. 계산결과 직경 5mm의 강구로 충격을 가했을 경우 유리판의 파괴

강도는 4.99GPa이었고, 유리판의 관통 파괴강도는 5.03GPa 로써 직경 10mm의 강구로 충격을 가했을 때의 임계관통속도 범위에서의 관통파괴강도는 11.33GPa 보다도 훨씬 작음을 알 수 있다. 이와 같이 강구의 질량이 작을 수록 관통 파괴강도가 작아지는 이유는 Fig. 11에서와 같이 같은 충격에너지(강구경 10mm인 강구가 28m/sec의 충격속도로 충돌하는 경우와 강구경 5mm인 강구가 80m/sec의 충격속도로 충돌하는 경우 모두 충격에너지는 1.6J로써 동일범위)의 범위에서라 할지라도 충격량의 크기를 비교해 보면 강구경 10mm로 충격을 가한 경우는 0.1176Nsec, 강구경 5mm로 충격을 가한 경우는 0.0560Nsec로써 충격체의 질량이 큰 경우가 충격체의 질량이 작은 경우보다 충격량이 크기 때문이라 생각된다. 즉, 충격하중의 크기보다(강구경 10mm인 강구가 28m/sec의 충격속도로 충돌하는 경우는 pack부의 하중이 5.67KN, 강구경 5mm인 강구가 80m/sec의 충격속도로 충돌하는 경우는 pack부의 하중이 9.46KN으로서 같은 충격에너지 범위에서는 강구의 질량이 작은 경우가 충격하중의 pcak값이 크다)는 충격량이 큰경우가 빨리 관통파괴에 이른다.

### 5. 결 론

- 1) 고전판이론으로는 집중하중 작용점에서는 해가 발산하기 때문에 응력해석이 불가능하나 본 연구에서 제안한 3차원탄성이론을 이용한 해석 방법에 의해 정확한 해석이 가능하였고 파괴실험결과와 비교하므로써 본 해석의 타당성이 입증되었다.
- 2) 정하중이 작용할때는 판두께에 관계없이 하중점을 기점으로 방사상의 크랙이 발생하였으며 고속충격의 경우 충격속도가 빠를 수록 환상크랙의 크기는 작아졌고 방사상 크랙의 길이는 짧아졌다.
- 3) 임계관통속도의 범위를 넘으면 충돌전후의 운동량 변화량은 속도의 크기에 관계없이 거의

일정하였다.

- 4) 같은 충격에너지가 작용하더라도 충격체의 질량이 작을 수록 임계 관통에너지는 증가하였다.
- 5) 같은 크기의 충격에너지가 작용하더라도 충격체의 질량이 큰경우가 작은 경우보다 충격량이 크며 더 빨리 관통파괴가 발생하였다. 즉 충격하중의 크기보다는 충격량이 큰 경우가 빨리 관통파괴를 일으켰다.

이 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비 지원 및 우수연구센터 기자재 활용에 의해 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- 1) 宇治橋貞幸, 松本浩之, 足立忠晴, “鋼球の衝突により硝子板に生ずる衝撃應力解析”, 日本機械學會論文集(A編) 52卷, 474號, pp. 525~532, 1986.
- 2) 김용배, 이선영, 김동철, “충격해석을 통한 대형 TV의 구조개선연구”, 대한기계학회 1993년 추계학술대회 논문집(I), pp. 81~84, 1993.
- 3) 本堂 實, 能澤鉄雄, 米山光暎, “カラーテレビ用ブラウン管の破壊機構”, 日本機械學會論文集(I), 44卷, 386號, pp. 3363~3370, 1978.
- 4) 伊藤順子, 吉岡純夫, 大杉重夫, CRTの衝撃解析, 日本機械學會材料力學部門講演論文集, pp. 423~427, 1993.
- 5) 中原一郎, “應用彈性學”, 實教出版社, 東京, p. 207, 1985.
- 6) Goldsmith, w, Impact, Edward Arnold, London, pp. 82~91, 1960.
- 7) 양동윤, 김기환, 양인영, “취성재료의 충격응답에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집, 제12권, 제13호, pp. 481~488, 1988.