

## 계장화한 긴 바를 사용한 세라믹판의 충격 파괴 거동

신형섭<sup>†</sup> · 오상엽<sup>\*</sup> · 최수용<sup>\*\*</sup> · 서창민<sup>\*\*\*</sup> · 장순남<sup>\*\*\*\*</sup>  
(2001년 11월 10일 접수, 2002년 1월 21일 심사완료)

### Impact Fracture Behavior of Ceramic Plates Using Instrumented Long Bar

Hyung-Seop Shin, Sang-Yeob Oh, Su-Yong Choi, Chang-Min Suh  
and Soon-Nam Chang

**Key Words:** Instrumentation of Impact Load(충격하중 계측), Long Bar Impact(긴 바 충격), Confinement(구속), Contact Pressure(접촉면압), Radial Crack(레이디얼크랙), Hertzian Cone Crack(헤르츠안 콘크랙)

#### Abstract

In this study, a bar impact test of low velocity was carried out to gain an insight into the damage mechanism and sequence induced in alumina plates(AD 85 and AD 90) under impact conditions. An experimental setup utilizing an instrumented long bar impact was devised, that can measure directly the impact force applied to the specimen and supply a compressive contact pressure to the specimen. During the bar impact testing, the influences of the contact pressure applied along the impact direction to the specimen on the fracture behavior were investigated. The measured impact force profiles explained well the damage behavior induced in alumina plates. The higher contact pressure to the specimen led to the less damage due to the suppression of radial cracks due to the increase in the apparent flexural stiffness of plate. It had produced the change of damage pattern developed in the specimen; from the radial cracks to the local contact stress dominant damage. It would contribute to the improvement of the ballistic property in ceramic plates. The observed results showed the following sequence in damage developed: The development of cone crack at impact region, the formation of radial cracks from the rear surface of plate depending on the plate thickness, the occurrence of crushing within the cone envelope and the fragmentation.

#### 1. 서론

유리와 세라믹 등의 취성재료는 강성과 경도가 높고, 높은 압축강도와 경량을 나타내기 때문에 고등 장갑재료로 사용되고 있다. 그러나 인장강도와 파괴인성이 낮기 때문에 외부의 충격으로부터

터 손상을 입기 쉽다. 구형입자 압입시 대표적인 손상으로는 헤르츠안 콘크랙(Hertzian cone crack)을 들 수 있다.<sup>(1)</sup> 취성재료에 대한 입자충격시 발생하는 헤르츠안 콘크랙에 대한 임계값과 파괴 메카니즘에 대하여 다양한 연구가 행해져 오고 있다.<sup>(2)</sup>

일반적으로 취성재료는 저속 충격시 콘크랙에 의해 주로 파괴가 이루어진다. 또한 충격입자의 속도나 압입력이 증가하면 콘크랙 주위에 레이디얼크랙(radial crack), 레터럴크랙(lateral crack), 메디언크랙(median crack) 등 여러 종류의 균열과 더불어 파쇄가 발생한다.<sup>(1,2)</sup> 이들의 파괴기구는 주로 세라믹 복합 방탄의 성능 향상에 응용되어 왔고<sup>(3,4)</sup> 최근 가스터빈용 세라믹 부품의 신뢰성 확보 측면에서 입자충격후 잔존강도를 평가하기

† 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학부  
E-mail : hsshin@andong.ac.kr  
TEL : (054)820-5675 FAX : (054)823-5495  
\* 회원, 경북대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 안동대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\* 회원, 경북대학교 기계공학부  
\*\*\*\* 국방과학연구소

위한 연구에도 적용되어 오고 있다.<sup>(5)</sup>

취성재료판에 충격하중 부하시 충격점의 손상 거동은 상당히 복잡하다. 이때 취성재료에 가해진 충격하중은 물론 균열 발생시 임계 충격하중을 구하기는 쉽지 않다. 그러나 최근 행해지고 있는 수치계산을 통한 취성재의 손상거동 해석을 위해서는 입력데이터의 확보가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 계장화한 긴 바를 사용하여 충격시 시험편에 가해진 충격력을 측정하려고 시도하였다. 또한 시험편에 접촉면압을 부가하여 충격시 시험편의 구조적인 굽힘의 구속(confinement) 뿐만 아니라, 충격점에서 발생하는 원주방향의 인장응력을 일시적으로 상쇄시키고자 하였다. 이 경우 재료의 Poisson 효과를 이용하므로 그 효과는 재료의 탄성정수에 의존하게 된다.

본 연구에서는, 긴 바의 저속충격시 고밀도 알루미늄판에 발생하는 손상을 해석하고, 손상의 발생기구와 순서를 파악하였다. 이때 손상거동에 미치는 시험편의 가압조건과 측정된 충격력의 거동을 바탕으로 취성재료의 충격파괴 특성을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시험편과 충격봉

시험편은 두 종류 시판의 알루미늄 세라믹(AD 85와 AD 90)을 사용하였다. 시험편은 소결처리한 타일재(100×100×25 mm)로부터 가로와 세로 33×33 mm, 두께 3.4 mm로 가공하였다. 시험편 두께에 대한 사이즈의 비가 10에 해당한다. 시험편 표면은 손상 관찰이 용이하도록 충격면은 #1,500 번, 나머지 면은 #1,000번 다이아몬드 저석으로 연마하였다.

Table 1은 알루미늄 시험편과 가압 다이, 긴 바에 사용한 탄소강(S45C)의 기계적 특성치를 나타내고 있다. 여기서 기계적 임피던스( $\rho C_0$ )는 계면에서 응력파의 반사 및 투과거동에 영향을 미치게 된다. 충격실험에는 직경 10 mm의 긴 원형봉(이하 긴 바라고 부른다.)을 사용하였고, 그 길이는 충격시 발생하는 응력파의 전파에 따른 영향을 고려하여 2,100 mm로 하였다. 시험편에 가해진 충격력을 측정하기 위하여, 긴 바 선단에서부터 0.7 m 높이에 스트레인게이지를 부착하여 로드셀을 구성하였다. 긴 바의 선단 형상은 반경 5

**Table 1** Mechanical properties of target and impact bar

Material	$\rho \times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	H <sub>v</sub> (GPa)	$\rho C_0 \times 10^6$ (kg/m <sup>2</sup> s)
AD 85	3.44	236	9.2	28.5
AD 90	3.59	278	12.8	31.6
Steel	7.85	207	8.0	40.3

mm의 반구형으로 하였고, 충격으로 인한 마손을 막기 위해 가공후 담금질처리를 하였다.

### 2.2 충격시험장치

긴 바의 충격시험은 세라믹 시험편에 높이 0.5 m에서 긴 바를 낙하시켜 수행하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 긴 바의 낙하시 시험편 중앙부에 충격을 보장하기 위하여, 상 하부에 긴 바를 지지하는 가이드 링을 설치하였다. 이때 낙하하는 긴 바와의 마찰을 최소화하기 위하여 가이드 링의 접촉부 길이를 2 mm이하로 하였다. 또한 긴 바가 시험편에 도달하기 직전에 테이퍼부를 갖는 안내판을 설치하여 클램핑 장치와 연결하여 긴 바가 시험편 중앙에 충격하도록 하였다.

Fig. 2는 시험편에 접촉면압(구속)을 가하기 위한 가압용 다이와 시험편의 정열 상세를 나타내고 있다. 가압용 다이와 뒷판의 재질은 S45C를 사용하였다. 시험편의 윗면에 D<sub>2</sub>=18 mm, 내경 D<sub>1</sub>=10.5 mm의 가압용 다이(pressing die)를 두고, 시험편을 뒷판(back plate) 위에 놓은 후 원통형 캡슐에 넣어, 로드셀을 통하여 유압잭으로 가압하여 시험편에 접촉면압을 부가하였다. 시험조건은 시험편에 가압하지 않은 경우(p=0 MPa)와 100 MPa, 200 MPa로 가압한 경우에서 각각 충격실험을 실시하였다.

### 2.3 충격력의 측정

시험편에 가한 충격력의 측정은 긴 바에 부착한 스트레인게이지에서 검출한 변형률 신호  $\epsilon(t)$ 를 동적변형률 증폭기를 거쳐 디지털 오실로스코프에 보내 측정하였다. 이때 충격하중 P(t)는 검출된 변형률 신호  $\epsilon(t)$ 를 사용하여 다음 식으로부터 계산하였다.

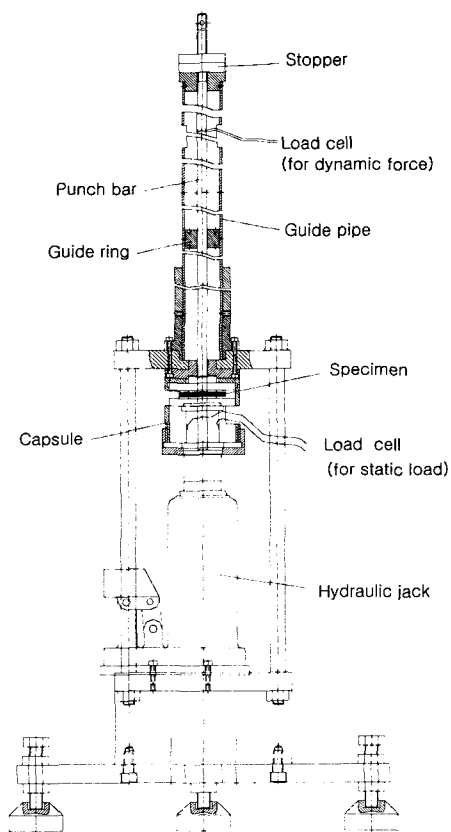


Fig. 1 Experimental setup for a low velocity long-bar impact testing

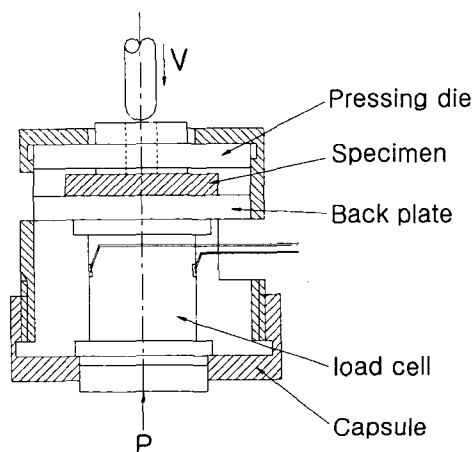


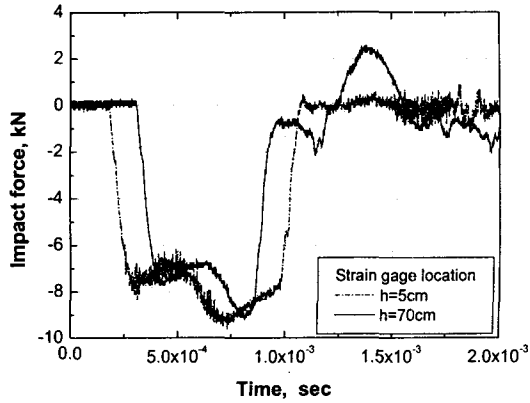
Fig. 2 Detail of pressing die and specimen arrangement

$$P(t) = A\alpha(t) = AE\epsilon(t) \quad (1)$$

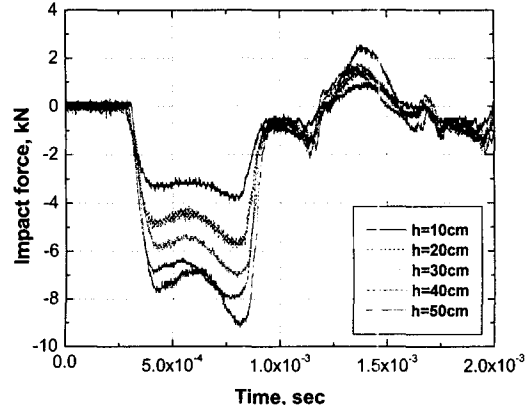
여기서,  $E$ 는 긴 바(S45C)의 영률로 200 GPa로 산정하였다.

본 연구에서는 충격단으로부터 70 cm 높이에 부착한 스트레인게이지에서 검출한 응력과 신호를 사용하여 충격력을 측정하였다. 이때 응력과 전파거동에 미치는 측정 위치에 따른 영향을 파악하기 위하여, 충격단으로부터 5 cm 떨어진 선단에 가까운 위치에 스트레인게이지를 부착한 경우와 70 cm 높이에서 측정한 경우의 충격력신호를 비교하였다. Fig. 3은 스트레인게이지의 부착 위치에 따라서 측정한 충격력의 전파거동을 비교하여 나타내고 있다. (a)는 두께 8 mm의 유리판에 낙하높이 50 cm에서 긴 바 충격을 가한 경우에 얻어진 충격력 신호이다. 이 경우 유리시험편의 충격부에 콘크랙 만이 발생하였고 시험편의 파단 분리나 관통은 일어나지 않았다. 따라서 응력파가 긴 바의 끝단에서 인장파로 반사되어 돌아올 때까지 긴 바 선단이 시험편과 접촉을 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. (b)는 시험편에 파단과 파쇄가 일어난 경우에 대한 신호이다. 시험편의 파쇄로 인해 충격 초기에 접촉이 해지되면서 이에 따라 충격력의 급격한 저하를 나타내고 있다. 두 경우 모두 충격단에서 70 cm 떨어진 곳에서 측정한 충격력 신호는, Fig. 3에 보인 바와 같이 부착 위치에 따른 응력파의 지연 도착(120  $\mu$ s)과 반사파의 이른 도래에 따라서 선단 부근에서 측정한 경우보다 짧은 하중 유지시간을 나타낼 뿐, 일차원 응력파의 전파거동을 나타내었다. 따라서 긴 바를 사용하여 측정한 충격력 신호는 스트레인게이지의 부착 위치에 따른 응력파의 감쇄, 분산의 영향을 거의 받지 않았다는 것을 확인할 수 있다.

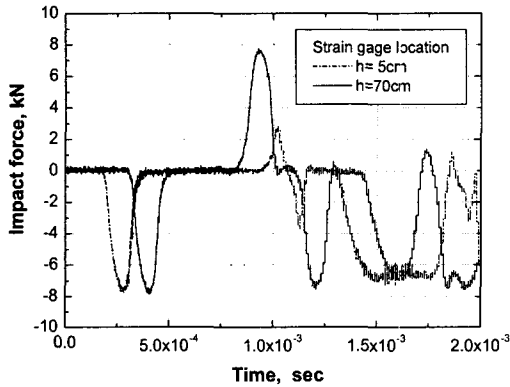
Fig. 4 (a)는 충격단에서부터 70 cm 위치에서 측정한 긴 바의 낙하높이에 따른 충격력의 변화를 나타내고 있다. 충격개시후 100  $\mu$ s가 경과하면 시험편의 지지부에서부터 반사된 압축응력파의 중첩으로 인해 다소의 충격력 증가가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이때 최대충격력의 크기,  $P_{max}$ 와 낙하높이,  $h$  사이의 관계를 Fig. 4 (b)에 나타내었다. 충격력의 최대치는 낙하높이에 제곱근으로 비례하는 관계를 나타내었다.



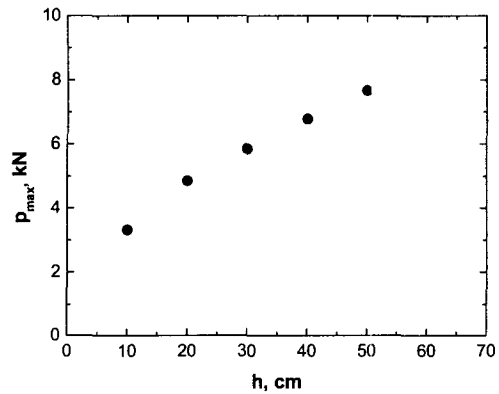
(a)



(a) Profiles of impact force signal



(b)



(b)  $P_{max}$  vs drop height of bar

Fig. 3 Comparison of impact force measured at different locations along impact bar

Fig. 4 Variation of impact force according to drop height of impact bar (measured at 70 cm location)

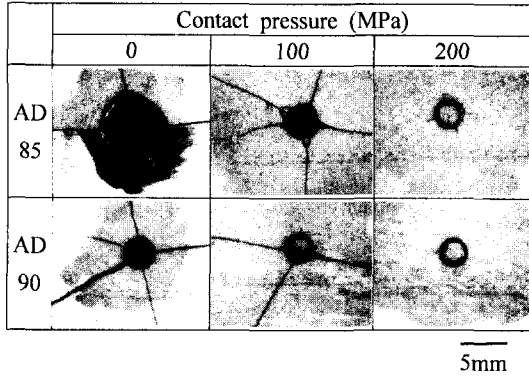
3. 실험 결과

두께 3.4 mm인 두 종류의 알루미늄 시험편(AD 85, AD 90)에 대하여 긴 바를 사용한 저속충격시험을 실시하였다. Fig. 5는 알루미늄 시험편에 발생한 충격면의 손상 모양을 나타내고 있다. 가압을 하지 않은 경우는 모두 시험편을 관통하여 발달한 콘크랙의 성장으로 충격부의 뒷부분이 원추형으로 시험편에서부터 탈락하였고, 탈락부는 잘게 파쇄가 일어났다.

먼저 AD 85재의 경우, 충격점에 직경 4.5 mm의 부분이 관통되었다. 관통된 부분은 잘게 파쇄되어 조각이 났고, 시험편은 4조각으로 파단되었다.  $p=100$  MPa으로 가압한 경우에는 충격점에

다중 링크랙이 발생하였고, 레이디얼크랙은 발생하였지만 단부까지는 전파하지 않아서, 시험편의 분리는 일어나지 않았다. 그로 인해 충격부에서 파쇄나 관통은 일어나지 않았다.  $p=200$  MPa로 가압한 경우는 충격부에 내경 1.4 mm, 외경 2.1 mm의 다중 링크랙이 발생하였고, 그 주위에 길이 0.5 mm 정도의 레이디얼크랙이 4개 발생하는 정도로 손상 발생이 억제되었다. 이 레이디얼크랙은 충격점에서 발생한 소성변형에 따른 접촉부 응력장의 변화에 기인하여 발생한 것이다.<sup>(5)</sup>

한편, AD 90재의 경우,  $p=0$  MPa에서도 AD 85재 보다 경도가 높은 관계로 손상 정도는 크지 않다는 것을 볼 수 있다. 그러나 콘크랙의 성장



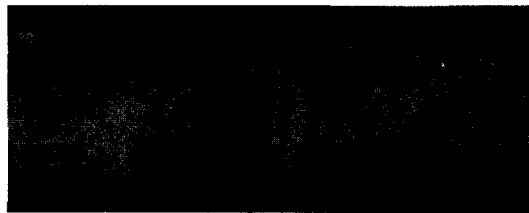
**Fig. 5** Appearance of surface damage caused by a long bar impact at  $h=0.5$  m in 3.4 mm-thick AD85 and AD90 specimens

으로 인해 AD 85재의 경우와 마찬가지로 시험편 뒷부분의 탈락이 발생하였고, 시험편은 5조각으로 파단되었다.  $p=100$  MPa에서는 충격점에 다중 콘크랙이 발생하였고, 그것을 관통하여 3개의 반경 방향 레이디얼크랙이 발생하였지만 시험편은 분할되지 않았다.  $p=200$  MPa로 구속한 경우, 충격부에는 내경 1.4 mm, 외경 2.0 mm의 다중 링크랙만 발생하였을뿐 주위에 레이디얼크랙은 발생하지 않았다. 따라서 접촉면압이 증가하면 그 영향으로 인한 결보기 굽힘 강성이 증가하여, 긴 바 충격시와 같은 점 부하(point loading)시 발생하는 굽힘응력을 현저하게 저하시켜 두꺼운 시험편에서와 유사한 손상거동을 나타내었다.

한편 긴 바 충격으로 시험편 내부에 발생한 손상거동을 살펴보기 위하여, 충격후 파단면 관찰을 실시하였다. Fig. 6은  $p=100$  MPa하에서 AD 85 및 AD 90 시험편의 파단면 양상을 나타내고 있다. 두 경우 모두 콘크랙을 가로질러 파단면이 생성되었다. (a) AD 85재의 경우, 가장 현저히 발생한 콘크랙이 두께 방향으로 약 1.1 mm 깊이까지 발달하였다. 콘크랙의 열림각은 저속충격의 경우에 해당하여 비교적 큰 값을 나타내었고,<sup>(6)</sup> 콘크랙과 시험편 표면사이 각도는 약  $25^\circ$  이다. 또한 시험편의 뒷면 부근에는 복수의 방사상 균열의 개시 흔적을 볼 수 있다. 따라서 이 경우 충격시 시험편 뒷면에서부터 굽힘 응력에 기인한 다수의 방사상 균열이 충격점을 중심으로 발생하였다는 것을 알 수 있다. (b) AD 90재의 경우, 충격부 주위에는, AD 85재에 비해 작은 크기의 콘



(a) AD 85 1mm



(b) AD 90 1mm

**Fig. 6** Appearance of fracture surface caused by a long bar impact at  $h=0.5$  m under  $p=100$  MPa

크랙이 형성되었지만, 콘크랙의 경사각은 거의 같은 값을 나타내었다. 뒷면 부근에 여러 개의 균열이 개시된 흔적을 볼 수 있고, 또한 원형균열이 관찰되지 않는 점으로 미루어 뒷면에서 발생한 방사상 균열에 의해서 나중에 시험편의 파단이 일어났다는 것을 알 수 있다.

이러한 손상거동으로부터 긴 바의 저속 충격시 알루미늄 세라믹에 발생한 손상기구 및 발생 순서를 추정할 수 있다. 먼저 가압을 하지 않은 경우, 충격점 표면에 링크랙이 발생하면서, 동시에 시험편의 뒷판에서 굽힘응력의 작용으로 인해 충격점을 중심으로 한 방사상 균열(레이디얼크랙)이 발생하였다. 이 레이디얼크랙은 시험편의 두께가 얇고 접촉면압이 낮은 경우 시험편 두께를 관통하여 표면까지 진전하여 시험편을 4~5조각으로 분리시키게 된다. 이후 링크랙은 콘크랙으로 성장하여 시험편의 내부로 진전하면서 콘크랙 내부에 해당하는 부분에서 파쇄 및 탈락을 초래하였다. 한편  $p=100$  MPa와  $p=200$  MPa로 가압한 경우는, 가압으로 인해 충격시 시험편의 굽힘 변형이 억제되었지만 가압이 충분치 않은  $p=100$  MPa에서는 뒷면 부근에서 레이디얼크랙이 발생하였다. 그러나 시험편의 표면 또는 단부까지 성장하지 않아서 시험편 파단이나 분리는 일어나지 않았

다. 따라서 콘크랙은 시험편 내부에 간혀 있게 되었다. 이때 세라믹 시험편의 경우 인장강도가 압축강도에 비하여 크게 작아서, 충격 초기에 뒷면에서부터 방사상 균열이 먼저 발생하였고, 그것은 이후에 발생한 링크랙/콘크랙을 지나서 발생해 있는 것으로부터도 알 수 있다.

Fig. 7은 긴 바 충격시, Fig. 5에 보인 손상양상에 대응하는 경우로, 시험편에 가해진 충격력 신호를 나타내고 있다. (a) AD 85재의 경우, 시험편에서 관통이 일어난  $p=0$  MPa의 경우는 충격력 신호가 가압한 두 경우와는 다른 거동을 나타내었다. 긴 바가 충격시 시험편에 접촉한 순간부터  $32 \mu\text{s}$ 까지 8 kN의 준정적인 압축상태를 유지한 뒤, 콘크랙의 성장과 파쇄로 인해 시험편이 분리되면서 뒷부분이 탈락되어 인장 반사파가 선단으로부터 전파되어 충격력의 저하를 가져왔다. 한편 (b) AD 90재에서  $p=0$  MPa의 경우, 긴 바의

충격으로 시험편의 일부 탈락이 있었지만(Fig. 5), 충격력의 거동으로부터 볼 때 충격이 끝날 때까지 긴 바 선단은 시험편과 접촉을 유지하고 있었다는 것을 알 수 있다.  $p=100$  MPa이나  $200$  MPa로 가압한 경우는 콘크랙만 발생하였고 관통이 일어나지 않아 충격력은 반사파가 도래할 때까지 접촉을 유지하는 거동을 나타내었다.

따라서 시험편 두께가 얇은 경우, 세라믹판에 접촉면압의 부가는 시험편의 겉보기 굽힘 강성을 증가시켜 방사상 균열의 발생을 현저하게 감소시켰다. 이러한 방사상 균열 발생의 억제는 충격부에서 국부적인 접촉을 보장하여 접촉응력장에 의한 균열 발생과 미세 파괴 등의 손상을 일으키게 하였다. 결국 접촉면압의 부가는 시험편에 발생한 손상 형태를 레이디얼크랙에서부터 접촉응력이 지배하는 국부적인 손상으로 변화시켰다. 이러한 국부적인 손상 발생에 보다 많은 충격에너지 소모를 초래하여 결국 세라믹의 방탄성능 향상에 기여하게 된다고 생각한다.

#### 4. 결 론

취성재료의 충격 파괴거동을 조사하기 위해 가압조건을 달리한 알루미늄판(AD 85재, AD 90재)에 계장화한 긴 바를 사용한 충격시험을 실시하여 얻어진 결과는 아래와 같다.

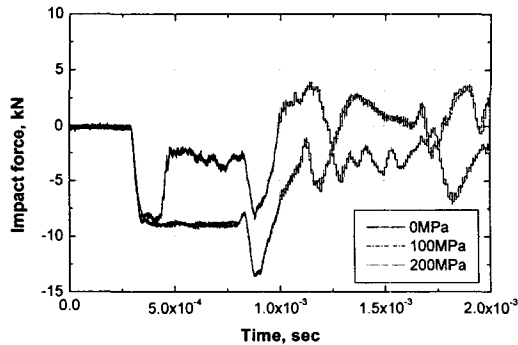
(1) 긴 바를 사용한 충격시험장치로 측정한 충격력 신호와 손상 양상 관찰로부터 알루미늄 시험편의 충격 파괴 거동을 해석할 수 있었다.

(2) 알루미늄 시험편에 부가한 접촉면압이 높을수록 시험편에 발생한 손상과 균열의 크기는 감소하였다.

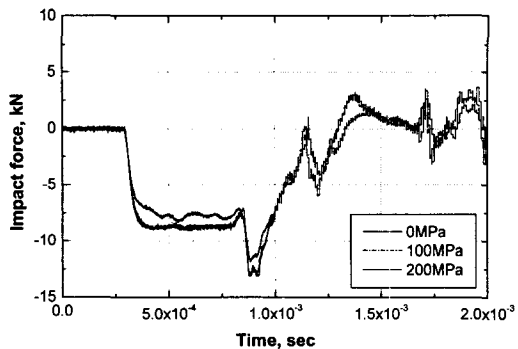
(3) 손상관찰을 통해 파악한 알루미늄판의 충격 파괴 기구는, 충격부에서 콘크랙의 발생과 더불어 뒷면에서 레이디얼크랙을 형성하였고, 이후 구속 정도에 따라서 콘크랙 내부에서 파편 및 파쇄의 발생 그리고 시험편의 파단을 가져왔다.

(4) 두께가 얇은 세라믹판에 접촉면압의 부가는 시험편의 겉보기 굽힘 강성을 증가시켜 방사상 균열의 발생을 현저하게 감소시켰다. 이것은 시험편에 발생하는 손상 형태를 방사상 균열에서부터 접촉응력이 지배하는 국부적인 손상으로 변화시켰다.

(5) 긴 바 충격시 시험편에 가해진 충격력 신호



(a) AD 85



(b) AD 90

Fig. 7 Profiles of impact force applied to 3.4 mm-thick alumina specimens

의 거동은 타겟의 손상 거동뿐만 아니라 충격바와 시험편간 접촉조건에 따라 결정되었다.

### 후 기

본 연구의 일부는 BK21사업의 지원으로 수행되었습니다. 또한 실험에 협조해 준 당시 안동대학교 대학원생 김태환군에게 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Cook, R. F. and Pharr G. M., 1990, "Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glass and Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, No. 4, pp. 787~817.
- (2) Chaudhri, M. M. and Kurkjian, C. R., 1986, "Impact of Small Steel Spheres on the Surfaces of Normal and Anomalous Glass," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 69, pp. 404~410.
- (3) Shockey, D. A., Marchard A. H., Skaggs, S. R., Cort, G. E., Burkett, M. W., Parker, R., 1990, "Failure Phenomenology of Confined Ceramic Targets and Impacting Rods," *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 9, pp. 263~275.
- (4) Sherman, D. and Brandon, D. G., 1997, "The Ballistic Failure Mechanisms and Sequence in Semi-infinite Supported Alumina Tiles," *J. Mater. Res.*, Vol. 12, No. 5, pp. 1335~1343.
- (5) Shin, H. S. and Maekawa, I., 1995, "Characterization of Particle Impact Damage and Strength Degradation Behaviors in Structural Ceramics," *JSME Int. J.*, Vol. A-38, pp. 116~124.
- (6) 오상엽, 신형섭, 서창민, 2002, "입자충격 속도에 따른 세라믹재료의 콘크랙 형상 변화," 대한기계학회논문집 A권, 제26권 2호, pp. 380~386.