

계장화한 긴 바를 사용한 세라믹판의 충격 파괴 거동

신형섭*, 배영준**, 오상엽***, 김창욱⁺, 장순남⁺

Impact Fracture Behavior of Ceramic Plates Instrumented Long Bar

Hyung-Seop Shin, Young-Jun Bae, Sang-Yeob Oh, Chang-Uk Kim
and Soon-Nam Chang

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

Abstract

A long bar impact test to alumina plates(AD 85 and AD 90) was carried out by using fabricated impact testing apparatus. The apparatus adopting a long bar of 2.1m in length made it possible to measure directly the applied impact force to the specimen during bar impact. The dimension of specimens was $33 \times 33\text{mm}$ and thickness was 3.4mm. Confinement of $D_2=18\text{mm}$ outer diameter and $D_1=10.5\text{mm}$ inner diameter was used to provide contact pressure to the specimen. Contact pressure of $p=100$ or 200MPa was applied to specimen before impact test. Damage caused in those cases were compared with the case of without contact pressure. The damage of specimen was different depending upon the pressure level of confinement. The existence of confinement had suppressed the development of radial cracks from the bottom of specimen and reduced the extent of damage as compared with cases without contact pressure($p=0\text{MPa}$). Because the application of contact pressure to the specimen increased the apparent flexural stiffness of specimen during bar impact, it had produced the change of developed damage 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.

1. 서 론

유리와 세라믹 등의 취성재료는 강성과 경도가 높고, 높은 압축강도와 경량을 나타내기 때문에 고등 장갑재료로 사용되고 있다. 그러나 인장강도와 파괴인성이 낮기 때문에 외부의 충격으로부터 손상을 입기 쉽다. 구형입자 압입시 대표적인 손상으로는 헤르츠안 콘크랙(Hertzian cone crack)을 들 수 있다⁽¹⁾. 취성재료에 대한 입자충격시 발생하는 헤르츠안 콘크랙에 대한 임계값과 파괴 메카니즘에 대하여 다양한 연구가 행해져 오고

있다⁽²⁾.

일반적으로 취성재료는 저속 충격시 콘크랙에 의해 주로 파괴가 이루어진다. 또한 충격입자의 속도나 압입력이 증가하면 cone crack 주위에 radial crack, lateral crack, median crack 등 여러 종류의 균열과 더불어 파쇄가 발생한다^(1,2). 이들의 파괴기구는 주로 세라믹 복합 방탄의 성능 향상에 응용되어 왔고^(3,4) 최근 가스터빈용 세라믹 부품의 안전성 확보 측면에서 입자충격후 잔존강도를 평가하기 위한 연구에도 적용되어 오고 있다⁽⁵⁾.

한편, 취성재료판에 충격하중 부하시 충격점의 손상거동은 상당히 복잡하다. 또한 취성재료에 가해진 충격하중은 물론 균열 발생시 임계 충격하중을 직접 구하기는 쉽지 않다. 그러나 수치계산을 통한 손상거동의 해석을 위해서는 입력데이터의 확보가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 계

* 회원, 안동대 기계공학부

E-mail : hsshin@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5675 FAX : (054)823-5495

** 학생회원, 안동대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 경북대학교 기계공학부

+ 회원, 국방과학연구소

장화한 긴 바를 사용하여 충격시 시험편에 가해진 충격력을 측정할려고 시도하였다. 또한 시험편에 접촉면압을 부가하여 충격시 시험편의 구조적인 굽힘의 구속(confinement) 뿐만 아니라 충격점에서 발생하는 원주방향의 인장응력을 일시적으로 상쇄시키고자 하였다. 이 경우는 재료의 Poisson 효과를 이용하므로 그 효과는 재료의 탄성정수에 의존하게 된다.

본 연구에서는 긴 바의 자유낙하시 고밀도 알루미나판에 발생하는 준정적 손상을 해석하고, 손상기구와 순서를 파악하였다. 이때 손상거동에 미치는 시험편의 가압조건과 측정된 충격력의 거동을 바탕으로 취성재료의 파괴특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편과 충격봉

시험편은 두 종류의 시판의 알루미나 세라믹(AD85와 AD90)을 사용하였다. 시험편의 크기는 $33\text{mm} \times 33\text{mm}$, 두께를 3.4mm로 하였다. 즉 두께에 대한 시험편 길이의 비가 10에 해당한다. 시험편의 표면은 손상관찰이 용이하도록 충격면은 #1,500번, 나머지 면은 #1,000번 다이야몬드 저석으로 연마하였다.

Table 1은 시험편과 가압다이, 긴 바의 기계적 특성을 나타내고 있다. 여기서 기계적 임피던스(ρC_0)는 계면에서 응력파의 반사 및 투과거동에 영향을 미치게 된다. 충격실험에는 직경 10mm의 긴 봉(재질: S45C, 이하 긴 바라고 부른다.)을 사용하였고, 충격시 발생하는 응력파의 전파에 따른 영향을 고려하여 그 길이를 2,100mm

Table 1 Mechanical properties of target and impact bar.

| Material | $\rho \times 10^3$ (kg/m^3) | E (GPa) | Hv (GPa) | $\rho C_0 \times 10^4$ ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) |
|----------|--|------------|-------------|--|
| AD85 | 3.44 | 236 | 9.2 | 28.5 |
| AD90 | 3.59 | 278 | 12.8 | 31.6 |
| Steel | 7.85 | 207 | 8.0 | 40.3 |

로 하였다. 시험편에 가해진 충격력을 측정하기 위하여, 바 선단에서부터 0.7m 높이에 스트레인 게이지 2매를 부착하여 로드셀의 역할을 하게 하였다. 긴 바의 선단은 반경 5mm의 반구형으로 하였고, 충격시 손상을 막기 위해 담금질처리를 하였다.

2.2 충격시험장치

긴 바 충격은 세라믹 시험편에 0.5m 높이에서 긴 바를 자유 낙하시켜 수행하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 긴 바의 자유낙하시 시험편의 중앙부에 충격을 보장하기 위하여, 상 하부에 긴 바를 지지하는 가이드 링을 설치하였다. 이때 낙하하는 긴 바와의 마찰을 최소화하기 위하여 가이드 링의 접촉부 길이를 2mm이하로 하였다. 또한 긴 바가 시험편에 도달하기 직전에

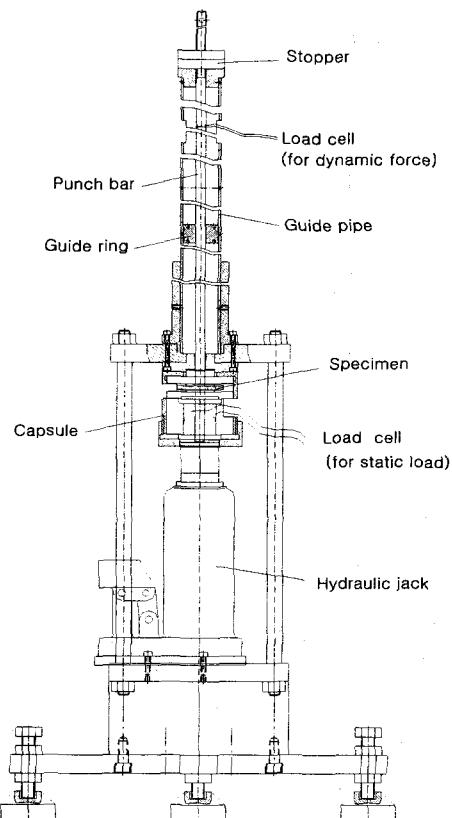


Fig. 1 Experimental setup for a low velocity long-bar impact testing.

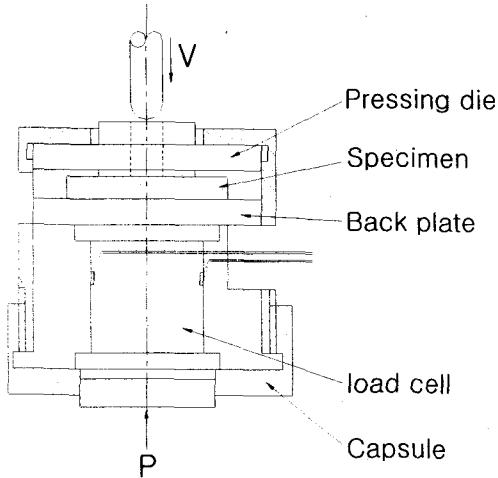


Fig. 2 Detail of pressing die and specimen arrangement.

테이퍼부를 갖는 안내판을 설치하여 클램핑 장치와 연결시켜서 충격 바가 시험편 중앙에 충격이 가능토록 하였다.

Fig. 2는 시험편에 접촉면압(구속)을 가하기 위한 가압용 다이와 시험편의 정렬 상세를 나타내고 있다.

가압용 다이와 뒷판의 재질은 S45C를 사용하였다. 시험편의 윗면에 $D_2=18\text{mm}$, 내경 $D_1=10.5\text{mm}$ 의 중공 다이를 두고, 시험편을 뒷판(back plate)위에 놓은 후 원통형 캡슐에 넣어, 로드셀을 통하여 유압잭으로 가압하여 시험편에 접촉면 압을 부가하였다. 가압조건은 시험편에 가압하지 않은 경우($p=0\text{MPa}$)와 $p=100\text{MPa}$ 와 $p=200\text{MPa}$ 로 가압한 경우에서 각각 충격실험을 실시하였다.

2.3 충격력의 측정

시험편에 가한 충격력의 측정은 긴 바에 부착한 스트레인 게이지에서 검출한 신호를 동적변형률 증폭기를 거쳐 디지털 오실로스코프에 보내 측정하였고, 컴퓨터에서 해석하였다. 충격하중 $P(t)$ 는 검출된 변형률신호 $\varepsilon(t)$ 를 사용하여 다음 식으로부터 계산하였다.

$$P(t) = A\sigma(t) = AE\varepsilon(t) \quad (1)$$

여기에서 E 는 긴 바(S45C)의 영률로서, 200GPa

로 산정하였다.

본 연구에서는 충격단으로부터 70cm 높이에 부착한 스트레인 게이지에서 검출한 응력파를 사용하여 충격력을 측정하였다. 이때 측정위치에 따른 응력파의 전파거동을 파악하기 위하여 충격단으로부터 3cm 떨어진 선단에 가까운 경우와 70cm 높이에서 측정한 경우의 충격력신호를 비교하였다. Fig. 3은 스트레인 게이지의 부착위치에 따라서 측정한 충격력의 전파거동을 비교하여 나타내고 있다. (a)는 두께 8mm 유리판에 낙하높이 50cm 에서 충격을 가한 경우로, 충격부에 콘크리트만이 발생한 경우이다. 따라서 응력파가 긴 바의 끝단에서 인장파로 반사되어 돌아올 때까지 접촉을 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. (b)는 시험편에 파단과 파쇄가 일어난 경우에 대한 신호이다. 시험편의 파쇄로 인해 충격 초기에 접촉이 해지되면서 이에 따라서 충격력의 급격한 저하를 나타내고 있다. 두 경우 모두 충격단에서 70cm 떨어진 곳에서 계측된 충격력은, Fig. 3에 보인 바와 같이 부착위치에 따른 응력파의 도착지연($120\mu\text{s}$)과 이른 반사파의 도래에 따라서 선단부근에서 측정한 경우보다 짧은 하중유지시간을 나타낼 뿐, 일차원 응력파의 전파거동을 나타내 스트레인 게이지의 부착위치에 따라 계측된 충격력신호의 변화는 전혀 없다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4 (a)는 충격단에서부터 70cm 위치에서 측정한 낙하높이에 따른 충격력의 변화를 나타내고 있다. 충격개시후 $100\mu\text{s}$ 가 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.

3. 실험결과

두께 3.4mm 로 한 두 종류의 알루미나 시험편(AD85, AD90)에 대하여 긴 바를 사용한 저속충격시험을 실시하였다. Fig. 5는 두께 3.4mm 의 알루미나 시험편에 발생한 충격면의 손상을 나타내

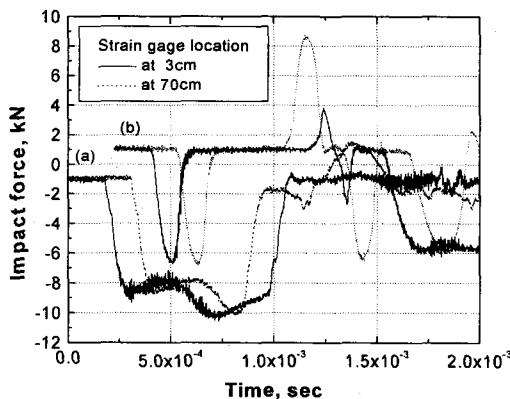
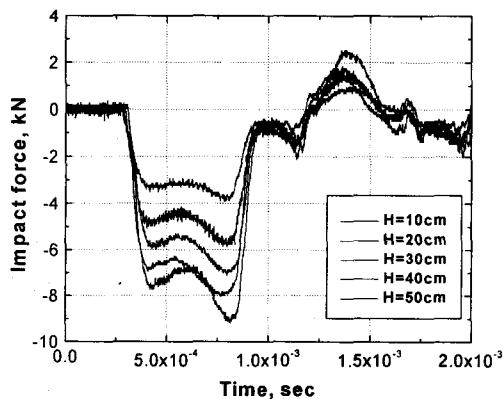
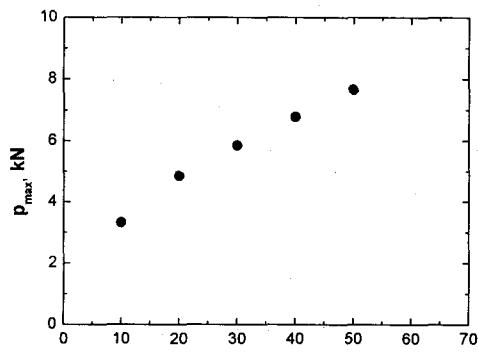


Fig. 3 Comparison of impact force measured at different locations along impact bar.



(a) Profile of impact force signal



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

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

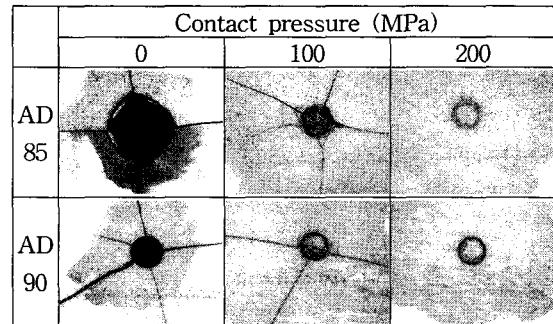


Fig. 5 Appearance of surface damage caused by a long bar impact at $h=0.5m$ in 3.4mm-thick AD85 and AD90 specimens.

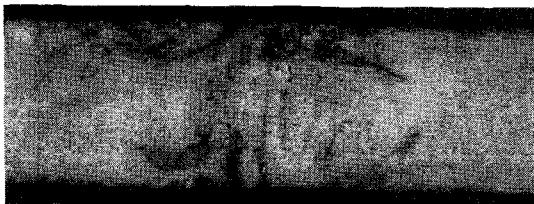
고 있다. 가압을 하지 않은 경우는 모두 시험편의 두께를 관통하여 발달한 콘크랙의 성장으로 충격부의 뒷부분이 원추형으로 시험편이 탈락하였고, 잘게 파쇄가 일어났다.

AD85재의 경우, 충격점에 직경 4.5mm의 부분이 관통되었다. 관통된 부분은 잘게 파쇄되어 조각이 났고, 시험편은 4조각으로 파단되었다. $p=100$ MPa에서는 충격점에 다중 링크랙이 발생하였고, 레이디얼 크랙은 발생하였지만 단부까지는 전파하지 않았아서, 시험편의 분리는 일어나지 않았다. 그로인해 충격부에서 파쇄나 관통은 일어나지 않았다. $p=200$ MPa의 경우 충격부에 내경 1.4mm, 외경 2.1mm의 다중 링크랙이 발생하였고, 그 주위에 길이 0.5mm 정도의 레이디얼크랙이 4개 발생하였다.

한편, AD90재의 경우, $p=0$ MPa에서도 AD85재 보다 경도가 높았기 때문에 손상 정도가 크지 않았다는 것을 알 수 있다. 그러나 콘크랙의 성장으로 AD85재의 경우와 마찬가지로 시험편 뒷부분의 탈락이 발생하였고 시험편은 5조각으로 파단되었다. $p=100$ MPa에서는 충격점에 다중의 콘크랙이 발생하였고, 그것을 관통하여 3개의 반경 방향 레이디얼크랙이 발생하였지만 시험편은 분할되지 않았다. $p=200$ MPa로 구속한 경우, 충격부에는 내경 1.4mm, 외경 2.0mm의 다중 링크랙이 발생하였으나, 그 주위에 레이디얼크랙은 발생하지 않았다. 따라서 접촉면압이 증가하면 그 영향으로 인한 겉보기 굽힘강성이 증가하여 충격 발생하는 굽힘응력이 현저하게 저하하여 두꺼운 시험편에 가까운 손상거동을 나타내었다.



(a) AD 85

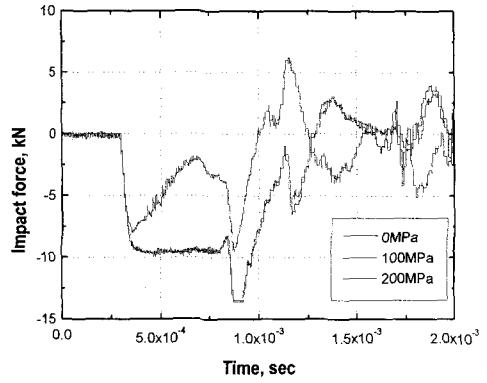


(b) AD 90

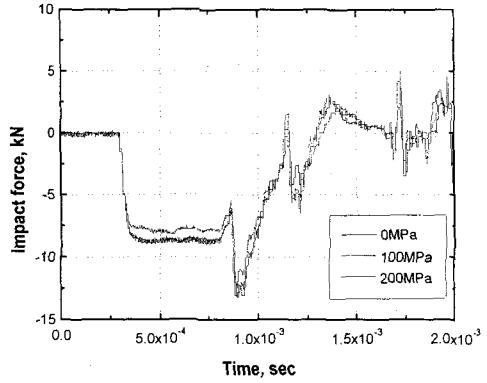
Fig. 6 Appearance of fracture surface caused by a long bar impact at $h=0.5\text{m/s}$ under $p=100\text{MPa}$.

충격시험후 시험편 내부의 손상기동을 살펴보기 위하여 파단면을 관찰하였다. Fig. 6은 $p=100\text{ MPa}$ 하에서 AD85, AD90 시험편에서 파단면 양상을 나타내고 있다. 두 경우 모두 파단면이 콘크랙을 가로질러 발생하였다. (a) AD85의 경우, 가장 현저히 발달한 콘크랙이 두께 방향으로 약 1.1mm 깊이까지 발달하였다. 콘크랙의 열립각은 저속충격의 경우에 해당하여 비교적 큰 값을 나타내었고, 콘크랙과 시험편 표면사이 각도는 약 25°이다. 또한 시험편의 뒷면 부근에는 복수의 방사상 균열의 개시 흔적을 볼 있다. 따라서 이 경우 충격시 시험편 뒷면에서부터 굽힘응력에 기인한 다수의 레이디얼크랙이 충격점을 중심으로 발생하였다는 것을 알 수 있다. (b) AD90의 경우, 충격부 주위에는, AD85재에 비해 작은 크기의 콘크랙이 형성되었지만, 콘크랙의 경사각은 거의 같은 각도를 나타내고 있다. 뒷면 부근에서 여러 개의 균열이 개시된 흔적을 찾을 수 있고, 또한 원형균열이 관찰되지 않는 점으로 미루어 뒷면에서 발생한 방사상 균열에 의해서 나중에 파단이 일어났다는 것을 알 수 있다.

이러한 손상기동으로부터 긴 바의 저속 충격시 알루미나판에 발생한 손상기구 및 발생 순서를 추정할 수 있다. 먼저 가압을 하지 않은 경우, 충격점 표면에 링



(a) AD 85



(b) AD 90

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

크랙이 발생하면서, 동시에 시험편의 뒷판에서 굽힘응력의 작용으로 인해 충격점을 중심으로 한 방사상 크랙(레이디얼크랙)이 발생하였다. 레이디얼크랙은 시험편의 두께가 얕고 접촉면압이 낮은 경우 시험편의 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 $p=100\text{MPa}$ 와 $p=200\text{MPa}$ 로 가압한 경우는 시험편에 압축력의 작용으로 인해 바 충격시 시험편의 굽힘변형이 억제되었지만 충분치 않아서 뒷면부근에서는 레이디얼크랙이 발생하였다. 그러나 시험편의 표면 및 단부까지 성장하지 않아서 시험편의 파단과

그에 따른 분리는 일어나지 않았다. 따라서 콘크랙은 타켓 내부에 갖혀 있게 되었다. 이때 세라믹시험편의 경우 인장강도가 압축강도에 비하여 크게 작아서, 충격의 초기에 뒷면에서부터 방사상이 크랙이 먼저 발생하였다. 그것은 이후에 발생한 링크랙/콘크랙을 지나서 레이디얼크랙이 발생해 있는 것으로부터도 알 수 있다.

Fig. 7은 긴 바 충격시 Fig. 5의 손상양상에 대응하는 충격력의 신호를 나타내고 있다. AD85재에서 시험편의 관통이 일어난 $p=0\text{MPa}$ 의 경우, 충격력은 가압한 두 경우와는 다른 거동을 나타내었다. 긴 바가 충격시 시험편에 접촉한 순간부터 $32\mu\text{s}$ 까지 8kN 의 준정적인 압축상태를 유지한 뒤, 콘크랙의 성장과 파쇄로 인해 시험편이 분리되면서 뒷부분이 탈락되어 인장반사파가 충격파로 전파되어 충격력의 저하를 가져왔다. 한편 AD90재에서의 $p=0\text{MPa}$ 의 경우 충격력의 거동으로 볼 때 긴 바의 충격으로 시험편의 일부 탈락이 있었지만 충격이 끝날 때까지 긴 바 선단과 접촉을 유지하고 있었다는 것을 알 수 있다. $p=100\text{ MPa}$ 이나 200 MPa 로 가압한 경우는 콘크랙만이 발생하였고, 관통이 일어나지 않아 충격력의 거동이 거의 유사하였다.

따라서 시험편의 두께가 얇은 경우 세라믹판에 접촉면압의 부가는 시험편의 겉보기 굽힘강성을 증가시켜 방사상크랙의 발생을 현저하게 감소시켰다. 따라서 방사상균열 발생의 억제는 충격부에서 국부적인 접촉을 보장하고 접촉응력장에 의한 균열발생과 미세 파괴에 등을 수반하는 손상을 가져오게 되고, 이것이 세라믹의 방탄성능 향상에 기여하리라 생각된다.

4. 결 론

취성재료의 충격 손상의 거동과 순서를 살펴보기 위해 가압조건을 달리한 알루미나판(AD85, AD90)에 긴 바 충격을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 제작한 계장화 충격시험장치를 사용하여 알루미나판에서 발생하는 손상거동을 충격력과 관련지어 해석할 수 있었다.
- (2) 알루미나 시험편에 부가한 접촉면압이 높을

수록 시험편에 발생한 손상과 균열이 줄어들었다. 시험편의 두께가 얇은 경우 접촉면압의 부가는 시험편의 겉보기 굽힘강성을 증가시켜 방사상크랙의 발생을 현저하게 감소시켰고 두꺼운 시험편에 가까운 손상거동을 나타내었다. 이러한 방사상균열 발생의 억제는 충격부에서 미세 파괴에 등을 수반하는 손상을 보장하여 세라믹의 방탄성능의 향상에 기여하리라 생각된다.

(3) 긴 바 충격시 시험편에 가해진 충격력 신호의 거동은 타겟에서 일어나는 손상 거동에 따른 바와 시험편간의 접촉조건에 의해서 결정되었다.

후 기

본 연구의 일부는 안동대학교 BK21(지방대육성사업)의 일환으로 수행되었습니다.

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) Shockley, 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.