

## 볼 충격을 받는 유리의 콘크랙형성에 대한 경계조건의 영향

김문생<sup>†</sup> · 허진<sup>\*</sup> · 이현철<sup>\*\*</sup> · 김호종<sup>\*\*\*</sup>  
(2002년 11월 15일 접수, 2003년 4월 11일 심사완료)

### The Effects of Boundary Condition in Cone Crack Formation of Soda-lime Glass by Ball Impact

Moon Saeng Kim, Jin Heo, Hyeon Chul Lee and Ho Jong Kim

**Key Words:** Impact Damage(충격손상), Cone Crack(원추형균열), Single-Sealing(단일실링), Double-Sealing(이중실링), Contact Area(접촉면적), Punching Process(편칭가공)

#### Abstract

In order to investigate the possibility of processing of brittle material by ball impact, the effects of boundary conditions about impact damage of soda-lime glass by small spheres were evaluated experimentally. It was investigated that crack appearance developed in soda-lime glass with boundary conditions of without sealing, single-sealing and double-sealing by impact velocity. The double-sealing was most effective in the development of perfect cone than other boundary condition. In case of double-sealing condition, PVC and Polyurethane sealing were more effective in producing a perfect cone formation than other sealing materials. The impact velocity range over which perfect cones were formed was influenced by both the contact area and diameter of impact particle.

#### 1. 서론

유리 또는 세라믹과 같은 취성재료는 낮은 파괴인성과 균열민감도로 인해 미세한 결함이나 충격에서도 파괴가 일어날 수 있어 가공에는 많은 제한이 따르고 있다. 그러나 취성재료를 가공할 때 나타나는 크랙을 예측하고, 제어할 수 있다면 그 활용범위는 증대될 것이다. 지금까지 취성재료의 표면손상 매커니즘과 함께 손상발생에 의한 재료의 강도저하 현상을 규명하기 위해서 충격입자를 작은 구로 모델링한 접촉이론<sup>(1,2)</sup>과 볼 충격에 의해 취성재료에서 발생하는 콘크랙의 형태에 대해서 연구들이<sup>(3-6)</sup> 진행되었다. 또한, 취성재료

를 가공에 응용하는 방법으로 충격을 이용한 편칭가공(punching process)에 대한 연구들<sup>(7-8)</sup>도 많이 나타났다. 편칭가공을 이용하여 구멍(hole)이나 노즐(nozzle)을 가공하기 위해서는 시편의 다른 부위에는 손상을 주지 않는 완전콘크랙(perfect cone crack)의 형상이 많이 생성되어야 한다. 따라서, 적당한 크기의 완전콘크랙을 만들기 위해서는 콘크랙이 형성되는 경계조건에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 논문은 취성재료이고, 크랙이 발생하였을 때 내부관찰이 용이한 유리(soda-lime glass)시편을 이용하여 경계조건에 따른 충격손상의 양상, 접촉면적에 따른 완전콘크랙의 발생범위, 충격입자의 크기에 따른 완전콘크랙의 발생범위를 알아보려고 한다.

<sup>†</sup> 책임저자, 부산대학교 기계공학부

E-mail : kimos@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2318 FAX : (051)514-7640

<sup>\*</sup> 부산대학교 대학원 기계설계공학과

<sup>\*\*</sup> 두원공과대학 컴퓨터응용설계학과

<sup>\*\*\*</sup> 회원, 두원공과대학 컴퓨터응용설계학과

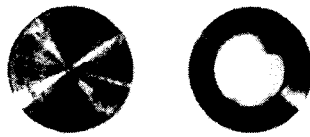
#### 2. 실험 방법

##### 2.1 충격입자와 시험편

충격 입자로는 강구(steel ball)를 사용하였고,

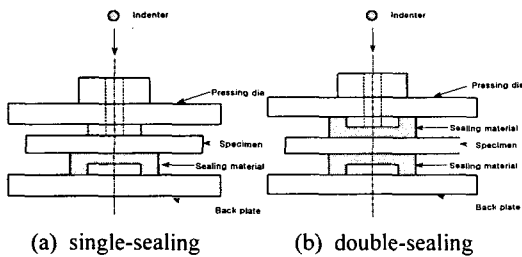
**Table 1** Mechanical properties of the specimen and indenter

material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E(GPa)	$\nu$	H <sub>v</sub> (GPa)	C <sub>0</sub> (m/s)
glass	2.5	70	0.25	6.5	5,291
steel ball	7.85	210	0.29	8.0	.



(a) without-hole sealing (b) with-hole sealing

**Fig. 1** Appearance of sealing materials



(a) single-sealing (b) double-sealing

**Fig. 2** Schematic of specimen assembly with pressing-die and sealing material

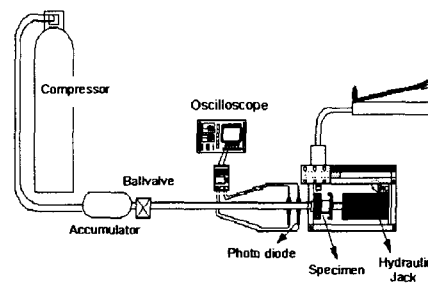
시편은 충돌에 의한 내부 크랙 관찰이 용이한 유리(soda-lime glass)를 사용하였으며, 시편의 크기는 40mm×100mm×5mm이다. Table 1은 시편과 충격입자의 물성치를 나타내고 있다.

**2.2 실링재료**

충격실험에서 시편의 경계조건으로 사용된 실링재료(Sealing material)로는 알루미늄(Al), 구리(Cu), PMMA, PVC, 폴리우레탄(PU), 고무(Rubber)를 이용하여 실링을 제작하였다. 실링의 형상은 Fig. 1에 나타나 있으며, 왼쪽은 구멍이 없는 실링으로 외경 d<sub>o</sub>=40mm, 두께 t=5mm이고, 오른쪽은 구멍이 있는 실링으로 외경 d<sub>o</sub>=40mm, 내경 d<sub>i</sub>=25mm, 두께 t=5mm 두 종류로 하여 실링재료의 접촉면적에 따라 크랙 발생에 미치는 영향을 알아보고자 한다. Fig. 2는 경계조건에 따른 시편의 결합형태를 나타내고 있으며, Table 2는 실링재료의 물성치를 나타내었다.

**Table 2** Mechanical properties of sealing materials

material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E(GPa)	C <sub>0</sub> (m/s)	$\rho C_0$ (kg/m <sup>2</sup> s×10 <sup>4</sup> )
Al	2.7	70	5,091	1,375
Cu	8.96	110	3,504	3,140
PMMA	1.19	2.9	1,561	186
PVC	1.38	2.7	1,399	193
PU	1.2	0.7	764	92
Rubber	1.81	0.0076	64.8	12



**Fig. 3** Schematic diagram of whole experimental system

**2.3 충격실험**

충격실험은 Fig. 3과 같이 에어 콤프레샤로 공기압을 제어하여 볼 밸브를 순간적으로 개방시킨다. 이때 볼은 관성에 의해 비행을 계속하여 시편에 충격을 가하게 된다. 이때 볼의 충격속도 측정에는 배럴 선단의 끝에 2쌍의 속도 측정용 광다이오드를 설치하여 캐리어가 지날 때의 신호를 잡아 오실로스코프(oscilloscope)를 통해 시간을 측정하여 속도를 계산하였고, 충격속도는 10%~110%의 범위에서 실험하였다.

**3. 실험결과 및 고찰**

**3.1 경계조건에 따른 충격손상의 양상**

시편의 경계조건에 따른 충격손상을 알아보기 위하여 직경 2mm 강구와 두께 5mm 시편을 이용하여 충격실험을 하였다. 그리고, 시편의 경계조건으로 Fig. 2의 (a),(b)와 같이 단일 실링과 이중 실링의 결합형태를 이용하였으며, 시편뒷면에는 구멍이 있는 실링을 사용하였다. 그리고, 실링재료는 Table 2에 나타난 알루미늄 실링과 폴리우레탄 실링 두 가지를 선택하여 충격속도에 따른 크랙의 길이(시편 두께 방향의 콘의 직경)변화를

알아보고자 한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 경계조건이 없는 경우와 알루미늄 실링과 폴리우레탄 실링을 이용하여 단일 실링, 이중 실링으로 경계조건을 주었을 때에 따른 콘크랙의 길이변화를 나타내었다. 시편에 경계조건이 없는 경우 충격속도가 78.1m/s까지 콘크랙의 길이는 완만하게 성장하다가 그 이후에는 감소하는 경향을 보였으며, 시편의 두께 방향으로의 완전한 성장이 일어나지 않았다.<sup>(6)</sup> 그러나, 실링재료를 이용하여 경계조건을 둔 경우에는 경계조건이 없는 경우에는 발생하지 않았던 완전콘크랙이 나타났으며, 콘크랙 길이가 6mm이상 증가하였다.

Fig. 4에서 알루미늄 실링의 경우 경계조건으로 이중 실링을 사용한 것이 단일 실링보다 콘크랙 길이가 v=15m/s 빨리 급격하게 성장하였다. 그리고, 경계조건에 상관없이 비슷한 충격속도에서 시편이 파단되었다. Fig. 5에서 폴리우레탄 실링

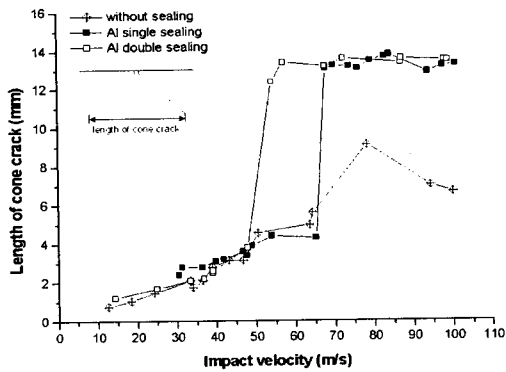


Fig. 4 Length of cone crack by 2mm steel ball for different boundary conditions(with-hole sealing)

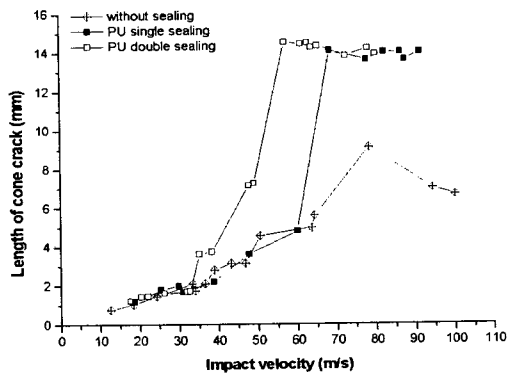


Fig. 5 Length of cone crack by 2mm steel ball for different boundary conditions(with-hole sealing)

의 경우 경계조건에 따라 v=12m/s의 속도전이가 발생하였다. 그리고, 이중 실링을 사용하였을 때 단일 실링보다 약 15%정도 빨리 시편이 파단되는 것을 알 수 있다. 전체적으로 보면 이중 실링을 사용하면 단일 실링보다 더 낮은 충격에너지에서 콘크랙 길이가 급격하게 성장하였다.

Fig. 6은 충격속도에 따른 크랙양상을 나타낸 것이다. 완전콘크랙의 경우 이중 실링이 단일 실링을 사용하였을 때보다 알루미늄 실링은 v=17.1m/s 빨리 발생하였고, 크랙의 형태가 변화되는 러프콘크랙이 나타나기까지 더 넓은 충격속도범위에서 완전콘크랙이 나타났다. 폴리우레탄 실링의 경우 이중 실링에서 v=20.7m/s 빨리 완전콘크랙이 발생하였다. 그리고, 래터럴 크랙의 반경과 래디얼 크랙의 수가 이중 실링을 사용하였을 때 더 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 경계조건으로 이중 실링을 사용하였을 때 충격손상영역이 더욱 작아지는 것을 알 수 있다.

3.2 접촉 면적에 따른 완전콘크랙의 발생범위  
3.1절로부터 이중 실링을 사용한 경우가 다른

		ring crack	perfect cone crack	rough cone crack	lateral and radial crack
Single Sealing	Al				
	PU				
Double Sealing	Al				
	PU				

Fig. 6 Crack aspects by impact velocity for different boundary conditions and sealing materials

경계조건보다 콘크랙의 성장에 유리하였고, 크랙 손상범위도 좁게 형성되는 것을 알 수 있었다. 본 절에서는 이중 실링의 결합형태에서 실링의 접촉면적에 따른 완전콘크랙의 발생범위를 알아보기 위해서 지름 3mm 강구와 두께 5mm 시편을 사용하여 시편 뒷면에 구멍이 있는 실링(with-hole sealing)과 구멍이 없는 실링(without-hole sealing)으로 접촉면적의 차이를 두어 콘크랙 성장과 길이변화를 알아보고자 한다.

Fig. 7에서 알루미늄 실링의 경우 접촉면적에 따라 9.8%의 속도천이가 발생하였고, 콘크랙이 급격하게 성장한 후의 길이 변화는 접촉면적에 상관없이 거의 비슷한 길이를 유지하였다. 구리 실링의 경우 접촉면적에 따라 16.5%의 속도천이가 발생하였고 콘크랙이 완전히 성장한 후 길이를 비교해 보면 구멍이 있는 실링을 사용하였을 때 1.5mm 이상 증가하였다. Fig. 8에서 PMMA 실링의 경우 접촉면적에 따라 6.3%의 속도천이가 발생하였고, 콘크랙이 급격하게 성장한 후 길이변화를 보면 접촉면적에 영향을 받지 않았다. PVC 실링의 경우 접촉면적에 따라 4.1%의 속도천이가 발생하였고, 콘크랙이 급격히 성장한 후 길이변화를 보면 구멍이 없는 실링이 1.5mm 길게 나타났으나  $v=40.5\%$  이후에는 구멍이 있는 실링이 1mm 이상 증가함을 알 수 있다. Fig. 9에서 PU 실링의 경우 접촉면적에 따라 5.8%의 속도천이가 발생하였고, 구멍이 있는 실링을 사용하였을 때 1.6mm 이상 증가함을 알 수 있다. Rubber 실링의 경우 접촉면적에 따라 8.9%의 속도천이가 발생하였고 구멍이 없는 실링을 사용하였을 때 0.5mm 이상 증가함을 알 수 있다. Fig. 7~Fig. 9에서 모든 실링재료에서 구멍이 없는 실링이 구멍이 있는 실링을 사용하였을 때보다 더 낮은 충격에너지에서 콘크랙이 급격히 성장하였고, 속도천이는 실링의 종류에 따라 4.1%~16.5%의 차이가 발생하였다.

Fig. 10과 Fig. 11의 그래프에서 전체적으로 구멍있는 실링이 구멍이 없는 실링을 사용하였을 때보다 조금 더 넓은 충격속도범위에서 완전콘크랙이 발생하였다. PVC 실링, 폴리우레탄 실링, 고무 실링의 경우는 구멍이 있는 실링에서 조금 더 넓은 충격속도범위에서 완전콘크랙이 발생하였지만 나머지 실링은 접촉면적에 큰 영향을 받지 않았다. 접촉면적에 상관없이 완전콘크랙 발

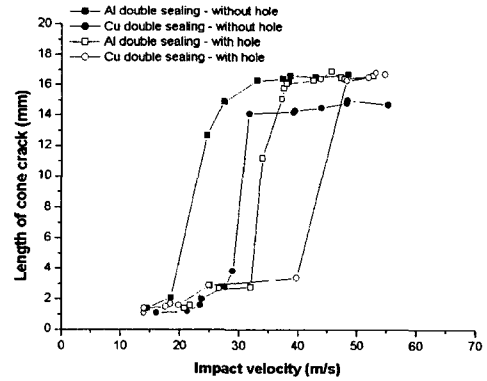


Fig. 7 Length of cone crack by Al and Cu double-sealing materials

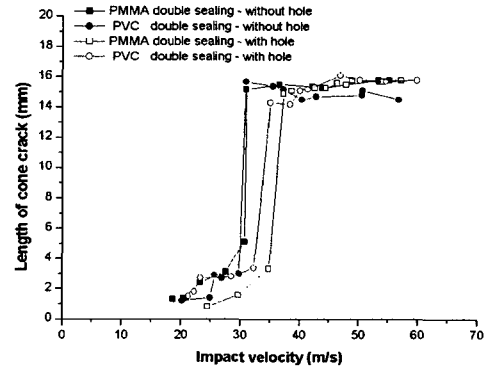


Fig. 8 Length of cone crack by PMMA and PVC double-sealing materials

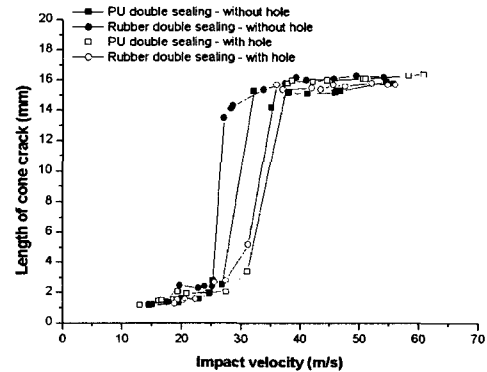


Fig. 9 Length of cone crack by PU and Rubber double-sealing materials

생에 가장 효과적인 실링은 PVC 실링과 폴리우레탄 실링이며 다음으로는 PMMA 실링, 알루미늄 실링, 구리 실링, 고무 실링 순서로 나타났다.

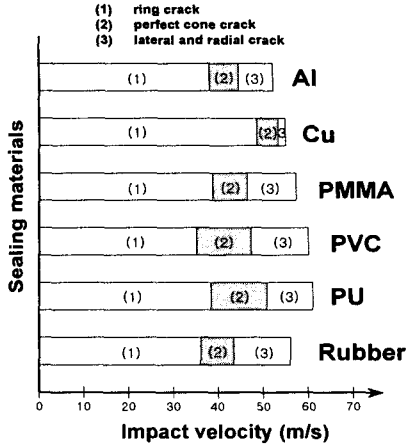


Fig. 10 Range of crack shapes by impact velocity for double-sealing materials (with-hole sealing)

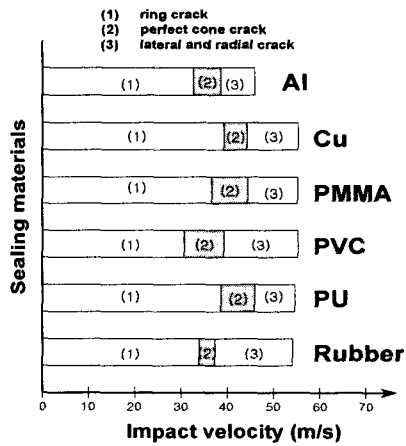


Fig. 11 Range of crack shapes by impact velocity for double-sealing materials (without-hole sealing)

3.3 충격입자의 크기에 따른 영향

충격입자의 크기에 따른 완전콘크랙의 발생범위를 알아보기 위하여 직경 3, 4mm 강구, 두께 5mm 시편을 이용하여 충격실험을 하였다. 이전 실험을 통하여 완전콘크랙의 발생에 가장 효과적인 실링 재료인 Al, PVC, PU 실링과 구멍이 있는 실링을 이용하여 충격입자의 크기에 따른 충격거동을 알아보려고 한다. 그래프에서 + 표시는 완전콘크랙의 발생범위를 나타낸다.

Fig. 12에서 충격입자의 크기가 3mm인 경우  $v=37.4\%$ 에서 콘크랙이 급격하게 성장하였고, 콘크랙 길이는 15.1mm ~ 16.9mm의 변화를 보였다. 그리고, 4mm 강구의 경우  $v=25.1\%$ 에서 급격하게

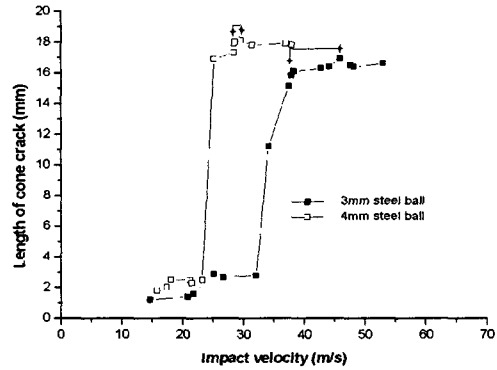


Fig. 12 Length of cone crack for impact velocity with Al double-sealing (with-hole sealing)

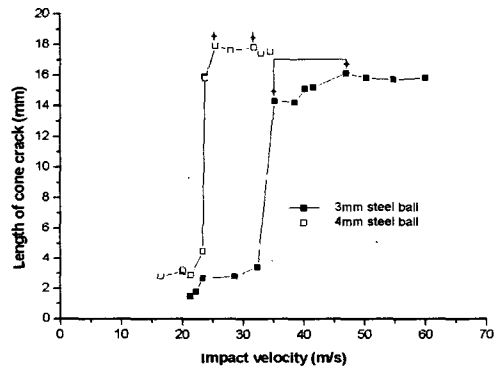


Fig. 13 Length of cone crack for impact velocity with PVC double-sealing (with-hole sealing)

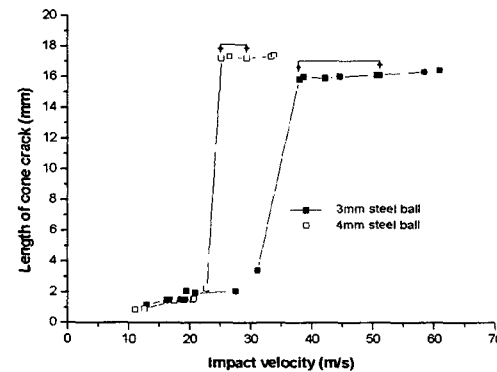


Fig. 14 Length of cone crack for impact velocity with PU double-sealing (with-hole sealing)

성장하였고, 콘크랙 길이변화는 16.9mm ~ 18.1mm이다. Fig. 13에서 충격입자의 크기가 3mm인 경우  $35.2\%$ 에서 콘크랙이 급격하게 성장하였고, 콘크랙 길이변화는 14.2mm ~ 16.1mm이다. 그리고, 4mm

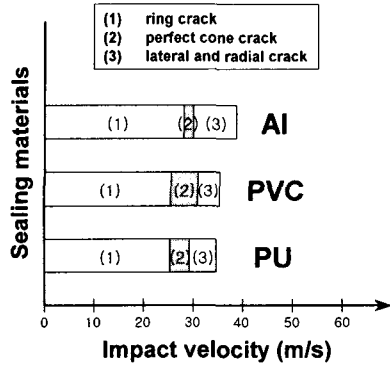


Fig. 15 Range of crack shapes by impact velocity for double sealing materials (with-hole sealing,  $d=4\text{mm}$ )

강구의 경우 23.8%에서 급격하게 성장하였고, 크랙길이의 변화는 15.8mm~17.9mm이다. Fig. 14에서 충격입자의 크기가 3mm인 경우  $v=38\%$ 에서 콘크랙이 급격하게 성장하였고, 콘크랙 길이변화는 15.8mm~16.4mm이다. 그리고, 4mm 강구의 경우  $v=25.3\%$ 에서 급격히 성장하였고, 콘크랙의 길이 변화는 17.2mm~17.4mm이다.

Fig. 12~Fig. 14로부터 충격입자의 크기에 따라  $v=12\%$ 의 속도천이가 발생하였고, 이것은 충격입자의 질량에 따른 운동량의 차이로 인한 결과이다. 그리고, 콘크랙 시편의 두께방향으로 완전히 성장하였을 때 길이변화를 보면 4mm강구를 사용하였을 때가 3mm강구를 사용하였을 때보다 콘크랙 길이가 10% 증가됨을 알 수 있다. 이것은 접촉초기의 링크랙 크기의 증대에 따른 것이다.

Fig. 10과 Fig. 15를 통해 완전콘크랙의 발생범위를 비교해 보면 충격입자의 크기가 증가함에 따라 완전콘크랙의 발생범위가 50%이상 줄어들었으며, 실링재료 중에서 완전콘크랙이 발생되는 데에는 PVC실링을 사용하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

(1) 경계조건으로 이중 실링을 사용한 경우가 낮은 충격에너지에서도 완전 콘크랙 형성에 유리하였고, 래터럴크랙과 레디얼크랙의 손상범위도 좁게 형성되었다.

(2) 이중 실링에서 구멍이 없는 실링이 구멍이 있는 실링을 사용하였을 때보다 더 낮은 충격에

너지에서 콘크랙이 급격하게 성장하였다. 그리고, 접촉면적에 상관없이 완전콘크랙 형성에 가장 효과적인 실링은 PVC 실링과 PU 실링이었다.

(3) 충격입자의 크기에 따라  $v=12\%$ 의 속도천이가 발생하였고, 직경 4mm 충격입자를 사용하였을 때 콘크랙 길이가 직경 3mm일 때 보다 10% 증가하였다.

#### 후기

본 논문은 한국과학재단 지역대학 우수과학자 지원연구(R05-2000-000-00312-0)에 의해 수행된 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Frank F. C. and Lawn B. R., 1967, "On the Theory of Herzian Fracture," *Proc. R. Soc.* Vol. A299, pp. 291~306.
- (2) Knight C. G. K., Swain M. V. and Chaudhri, M. M., 1977, "Impact of Small Spheres on Glass Surface," *J. Mater. Sci.* Vol. 12, pp. 1573~1586.
- (3) Fields J. E., Sun Q. and Townsend D., 1989, "Ballistic Impact of Ceramic," *Inst Phys Conf Ser.* Vol. 102, pp. 387~393.
- (4) Persion J., Breder K. and Rowcliffe D. J., 1993, "Loading Rate Effects during Indentation and Impact on Glass with Small Spheres," *J. Mater. Sci.* Vol. 28, pp. 6484~6489.
- (5) Woo, S. C., Kim, M. S., Shin, H. S. and Lee, H. C., 2001, "Impact Damage on Brittle Materials with Small Spheres (I)," *Trans KSPE*, Vol. 18, No. 11, pp. 93~100.
- (6) Kim, M. S., Shin, H. S., Lee, H. C. and Woo, S. C., 2002, "Impact Damage of Brittle Materials by Small Spheres (II)," *Trans KSME A*, Vol. 26, No. 1, pp. 153~159.
- (7) Nojima T., Sakaguchi K., Sugiyama F., 1995, "Blanking of Engineering Ceramic Plate by Press-Working," *Trans JSME*, C-62, pp. 346~352.
- (8) Shin H. S., Kim C. H., Oh S. Y., 2001, "Development of Experimental Setup for Impact Punching in Brittle Materials and Analysis of Punching Mechanism" *Trans KSME A*, Vol. 25, pp. 629~636.