

볼 충격을 받는 유리의 콘크랙형성에 대한 실링재료의 영향

김문생[#], 허진^{*}, 이현철^{**}, 김호종^{**}

The Effects of Sealing Materials in Cone Crack Formation of Soda-lime Glass by Ball Impact

Moon Saeng Kim[#], Jin Heo^{*}, Hyeon Chul Lee^{**} and Ho Jong Kim^{**}

ABSTRACT

In order to investigate the possibility of punching process of brittle material by ball impact, the effects of sealing materials about impact damage of soda-lime glass by small spheres were evaluated experimentally. The using of sealing materials in the development of perfect cone crack was more effective than no using of sealing materials. At the sealing materials condition, in the case of 5mm-thick specimen, Copper and PMMA sealing were more effective in producing a perfect cone formation than the other sealing materials. And in the case of 8mm-thick specimen, Aluminum sealing was most effective in producing a perfect cone formation. The impact velocity range over which perfect cones were formed was influenced by both the thickness of specimen and sealing materials. By a proper selection of sealing materials, the application for industrial technology for hole (or nozzle) punching process of brittle materials is expected

Key Words : Impact Damage (충격손상), Cone Crack (원추형균열), Sealing Material (실링재료), Contact Area (접촉면적), Punching Process (편칭가공)

기호설명

ρ = Density
 E = Young's Modules
 ν = Poisson's Ratio
 H_v = Vickers Hardness
 C_0 = Wave Velocity

1. 서론

취성재료는 낮은 파괴인성과 균열민감도로 인

해 미세한 결함이나 균열에서도 파괴가 일어날 수 있어 취성재료의 가공에는 많은 제한이 따르고 있다. 그러나, 취성재료의 가공시에 발생할 수 있는 균열을 예측하고, 제어할 수 있다면 유리나 세라믹과 같은 취성재료의 활용범위는 증대될 것이다. 취성재료를 가공에 응용하는 방법으로 충격에 의한 편칭가공을 생각할 수 있다. 편칭가공으로 간단한 구멍이나 노즐을 만들기 위해서는 충격을 받는 재료 표면외의 다른 부위에는 전혀 손상을 주지 않는 완전콘크랙(perfect cone crack)의 형상이 많이 생성되어야 한다. 따라서, 적당한 크기의 완전한 콘크랙

[#] 2002년 10월 2일 접수
[#] 교신저자, 부산대학교 기계공학부
Email kimos@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2318
^{*} 부산대학교 대학원 기계설계공학과
^{**} 두원공과대학 컴퓨터응용설계학과

을 만들기 위해서는 콘크랙이 형성될 수 있는 경계 조건에 대한 연구가 선행되어야 한다. 지금까지는 취성재료인 유리와 세라믹에 대한 입자충격에 의한 표면손상에 대한 연구들이¹⁻⁷ 많이 이루어져 왔으며, 취성재료의 편칭가공에 대해서도 연구들이⁸⁻¹⁰ 이루어지고 있다. 하지만 시편에 실링재료를 이용하여 경계조건을 주었을 때 발생하는 완전콘크랙의 형성범위에 대한 연구는 아직 미흡하다. 따라서, 본 논문은 취성재료인 유리(soda-lime glass)시편을 이용하여 경계조건으로 시편뒷면에 실링(sealing)재료를 접촉시킨 후 볼(ball) 충격을 가하였을 때 실링이 콘크랙 발생에 미치는 영향, 시편과 실링재료의 접촉면적에 따른 영향 그리고, 실링재료의 종류와 시편의 두께에 따른 완전콘크랙의 발생범위를 알아보고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 충격시험의 개념

Fig. 1과 같이 시편 중앙에 볼(ball) 충격을 가하게 되면 시편에는 응력파가 전파되어 시편의 볼 충격을 받는 면과 반대면에는 각각 압축과 인장이 발생하게 된다. 이때 인장이 작용되는 시편표면상의 일정한 거리에 실링재료(sealing material)를 접촉함으로써 취성재료의 충격거동을 살펴보고자 한다. 실링재료를 이용하여 경계조건을 준 후 볼 충격을 가하게 되면 시편에는 응력파가 전파됨과 동시에 실링재료에 의해 응력파는 흡수 또는 반사로 인해 콘크랙의 성장과 완전콘크랙의 발생범위가 달라질

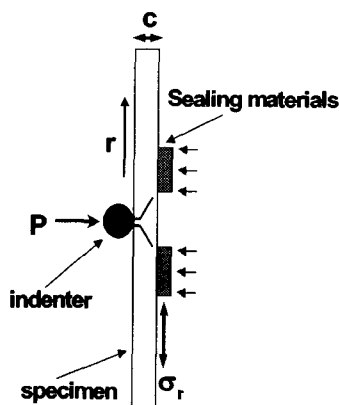


Fig. 1 The concept of impact test

것이다. 일반적으로 콘크랙의 생성은 압축력과 인장력이 작용하는 경계면으로부터 발생된다. 그러나 충격입자의 질량, 충격속도, 시편의 두께, 실링재료의 종류에 따라 각각 다른 인장과 압축영역을 가지게 된다. 따라서, 콘크랙이 발생에서 파단될 때까지 각각의 조건에 따라 콘크랙의 길이와 균열양상이 달라짐을 알 수 있다.

2.2 충격입자와 시험편

충격입자는 볼 베어링 강인 강구(steel ball)를 사용하였다. 그리고, 시편은 취성재료로서 다른 세라믹 재료와 유사한 파괴거동을 보이며, 투명성을 이용하여 충돌에 의한 내부 균열 관찰이 용이한 장점이 있는 유리(soda-lime glass)를 사용하였으며, 시편의 크기는 40mm×100mm×5mm와 40mm×100mm×8mm 두 종류를 사용하였다. Table 1은 시편과 충격입자의 물성치를 나타내고 있다.

Table 1 Mechanical properties of the specimen and indenter

Material	ρ (g/cm ³)	E (GPa)	ν	H _v (GPa)	C ₀ (m/s)
Glass	2.5	70	0.25	6.5	5,291
Steel ball	7.85	210	0.29	8.0	.

2.3 실링재료

충격시험에서 시편의 경계조건으로 사용된 실링은 알루미늄(Al), 구리(Cu), PMMA, PVC, 폴리아레탄(PU), 고무(Rubber)를 이용하여 제작하였다. 실링의 형상은 Fig. 2에 나타나 있으며, 왼쪽은 구멍이 없는 실링으로 외경 d_o=40mm, 두께 t=5mm이고, 오른쪽은 구멍이 있는 실링으로 외경 d_o=40mm, 내경 d_i=25mm, 두께 t=5mm 두 종류로 하여 실링재료

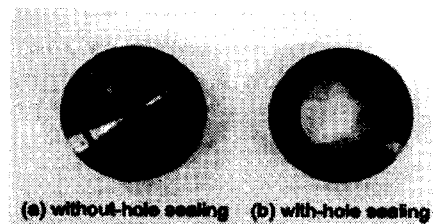


Fig. 2 Appearance of sealing material

의 접촉면적에 따라 콘크랙 발생에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

Fig. 3은 클램프와 시편의 결합 상태를 나타내고 있으며, 실링재료를 뒷판(back plate)에 장착한 후 시편을 압력다이(pressing die)와 실링재료 사이에 놓고 볼 충격을 가할 수 있게 설계되었다. 그리고, Table 2는 실링재료의 물성치를 나타내고 있다.

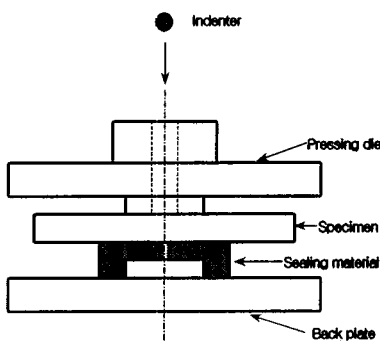


Fig. 3 Schematic of specimen assembly with pressing die and sealing material

Table 2 Mechanical properties of sealing materials

Material	ρ (g/cm ³)	E (GPa)	C ₀ (m/s)	ρC_0 (kg/m ² s×10 ⁴)
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

2.4 충격실험

충격실험은 Fig. 4와 같이 에어 콤프레샤를 사용하여 에어건의 원리로 실험을 수행하였으며, 작동과정은 볼을 실은 캐리어(carrier)를 배럴(barrel)의 내부에 넣고, 공기 압축기로 공기압을 일정하게 제어한 후 볼 밸브를 순간적으로 개방시킨다. 이때 캐리어는 압축공기에 의해 가속되며 시편의 40mm 전방에 위치한 stopper에 의해 캐리어는 정지가 되고, 볼은 관성에 의해 비행을 계속하여 시편에 충격을 가하게 된다. 그리고, 볼의 충격속도 측정은 배럴 선단의 끝, 즉 시편을 전방으로 100mm와

200mm지점에 위치한 2쌍의 속도 측정용 광 다이오드를 설치하여 캐리어가 지날 때의 신호는 오실로스코프(oscilloscope)를 통해 시간을 측정하여 충격속도를 계산하였고, 충격속도는 10m/s~80m/s의 범위에서 충격실험을 하였다.

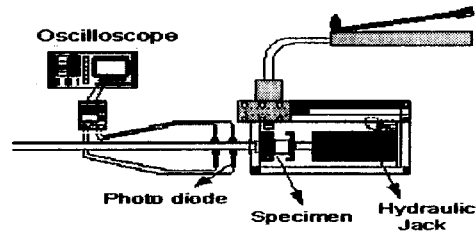


Fig. 4 Schematic diagram of whole experimental system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 콘크랙성장에 대한 실링재료의 영향

시편의 경계조건으로 실링을 사용함으로써 콘크랙 성장에 미치는 영향을 알아보기 위해 직경 3mm 강구, 두께 5mm 시편을 이용하여 충격실험을 수행하였다. 실험에 사용된 실링재료는 기계적 임피던스의 차이를 고려하여 알루미늄, PVC, 고무 세 가지 실링재료를 선택하여 실험을 한 후 실링재료가 없는 경우(경계조건이 없는 경우)와 비교하여 콘크랙이 급격하게 성장하는 충격속도와 콘크랙 길이의 변화에 대한 실링재료의 영향을 알아보았다.

Fig. 5는 시편에 경계조건이 없는 경우와 알루미늄 실링, PVC 실링, 고무 실링을 이용하여 경계조건을 주었을 때의 충격속도에 따른 콘크랙의 길이를 나타내고 있다. 그래프에서 콘크랙 길이가 $v=32\text{m/s}\sim 38\text{m/s}$ 의 충격속도범위에서 급격하게 성장하였고, 실링재료가 없는 것과 PVC 실링, 고무 실링을 사용한 것은 비슷한 충격속도에서 콘크랙의 급격한 성장을 보이지만 기계적 임피던스가 가장 큰 알루미늄 실링은 상대적으로 높은 충격속도에서 콘크랙이 급격하게 성장하는 것을 알 수 있다. 그리고, 시편 뒤에 실링재료를 이용하여 경계조건을 준 것이 실링재료를 사용하지 않았을 때 보다 좀 더 넓은 충격속도범위까지 시편이 파단되지 않고 콘크랙이 발생되는 것을 알 수 있다. 이것은 실링재료에 의해 충격에너지가 흡수 또는 반사되어 래터럴 크랙과 래디얼크랙의 성장을 억제시켜 실링재료가

없을 때보다 더 넓은 충격속도범위까지 파단이 일어나지 않았다. 또한, 실링재료의 종류에 따라 최대 콘크랙 길이는 3mm 정도의 차이가 발생하였다.

Fig. 6은 경계조건에 따라 완전콘크랙이 발생하는 충격속도범위를 나타내고 있다. 충격입자의 직경이 3mm인 경우 실링재료를 사용한 것이 경계조건이 없는 것보다 더 넓은 충격속도범위에서 완전콘크랙이 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고, 실링재료가 없는 경우 $v=51\text{m/s}$ 에서 파단되었지만 알루미늄 실링, PVC 실링, 고무 실링은 약 60m/s 전후에서 파단되었다. 따라서, 실링재료를 사용함으로써 래터럴크랙과 레디얼크랙의 성장을 둔화시켜 시편의 파단이 지연되는 것을 알 수 있다.

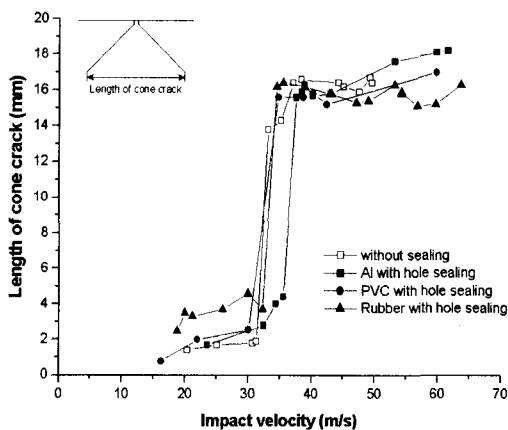


Fig. 5 Length of cone crack for the 3mm-diameter steel ball with different sealing materials

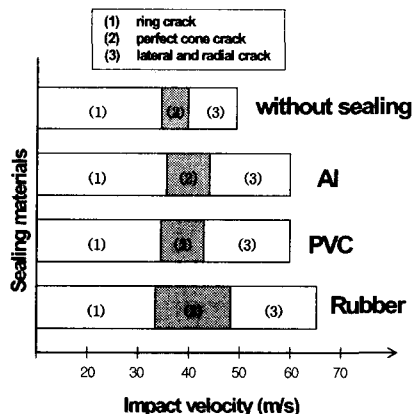


Fig. 6 Range of crack shapes by impact velocity for sealing material

Fig. 7은 속도에 따른 시편의 충격손상 중 완전콘크랙(perfect cone crack)과 러프콘크랙(rough cone crack)을 시편의 정면과 측면에서 관찰한 것이다. 충격손상의 진행에서 러프콘크랙이 발생한 후 좁은 속도영역에서 손상형태가 변화되는 래터럴크랙과 레디얼크랙이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다.

material	perfect cone crack	rough cone crack
without sealing	 V= 37.1m/s	 V= 49.3m/s
Al	 V= 38.9 m/s	 V= 59.8 m/s
PVC	 V= 40.2m/s	 V= 59.8m/s
Rubber	 V= 35.5m/s	 V= 63.7m/s

Fig. 7 Appearance of cone crack for 3mm-diameter steel ball with different sealing materials (scale=1mm)

3.2 시편과 실링의 접촉면적에 따른 영향

시편과 실링의 접촉면적에 따른 영향을 규명하기 위해 직경 3mm 강구, 두께 5mm 시편을 사용하였으며, 접촉면적의 차이를 주기 위하여 Fig. 2와

같이 구멍이 있는 실링과 구멍이 없는 실링을 사용하였다. 그리고, Table 3은 콘크랙이 급격하게 성장할 때 각각의 실링재료에 따른 충격속도를 나타내고 있다.

Fig. 8에서 알루미늄 실링의 경우 접촉면적에 따라 $v=10.7\text{m/s}$ 의 속도천이가 발생하였고, 구멍이 있는 실링을 사용하였을 때가 구멍이 없는 실링을 사용하였을 때 보다 더 낮은 충격속도에서 콘크랙이 급격하게 성장하였다. 구리 실링의 경우에서도 접촉면적에 따라 $v=7.8\text{m/s}$ 의 속도천이가 발생하였고, 구멍이 있는 실링을 사용하였을 때 더 낮은 충격속도에서 콘크랙이 급격하게 성장하였다. 알루미늄 실링이 구리 실링을 사용한 것보다 콘크랙의 급격한 성장이 지연되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에서 PMMA 실링의 경우 접촉면적에 따라 $v=4.6\text{m/s}$ 의 속도천이가 발생하였고, 구멍이 있는 실링에서 먼저 콘크랙이 급격하게 성장하였다. PVC 실링의 경우 접촉면적에 따라 $v=2.2\text{m/s}$ 의 속도천이를 보였으며, 모든 실링재료 중에서 접촉면적에 따른 속도천이가 가장 작은 실링이었다. 콘크랙이 시편의 두께 방향으로 완전히 성장하였을 때 콘크랙의 길이변화를 보면, PMMA 실링의 경우 구멍이 있는 실링이 구멍이 없는 실링을 사용한 것보다 콘크랙의 길이가 더 짧게 나타났지만, PVC의 경우 구멍이 있는 실링이 구멍이 없는 실링을 사용한 것보다 콘크랙의 길이가 더 길게 나타났다.

Fig. 10에서 폴리우레탄 실링의 경우 접촉면적에 따라 $v=4.9\text{m/s}$ 의 속도천이가 발생하였고, 고무 실링에서도 접촉면적에 따라 $v=4.2\text{m/s}$ 의 속도천이가 발생하였다. 그리고, 콘크랙이 급격하게 성장되기 전까지의 콘크랙 길이변화를 보면 같은 충격속도에서 실링 종류에 따라 약 2mm의 길이차이가 발생하였다.

전체적으로 보면 접촉면적이 좁은 실링(with-hole sealing)이 접촉면적이 넓은 실링(without-hole sealing) 보다 더 낮은 충격속도에서 콘크랙이 급격하게 성장하는 것을 알 수 있다(Table 3 참고).

Table 3 Impact velocity for increment of cone crack

sealing materials	Al	Cu	PMMA	PVC	PU	Rubber
with-hole sealing(m/s)	37.6	33.1	37.4	34.8	40.1	34.5
without-hole sealing(m/s)	48.3	40.9	42	37	45	38.7

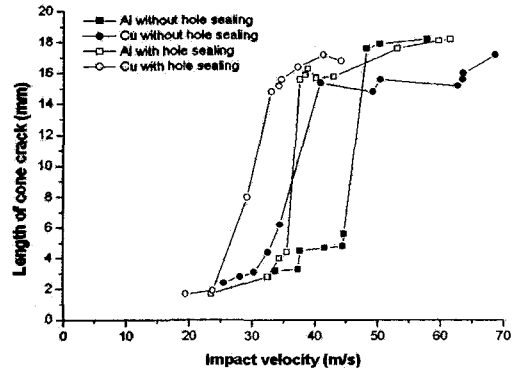


Fig. 8 Length of cone crack by Al and Cu sealing materials

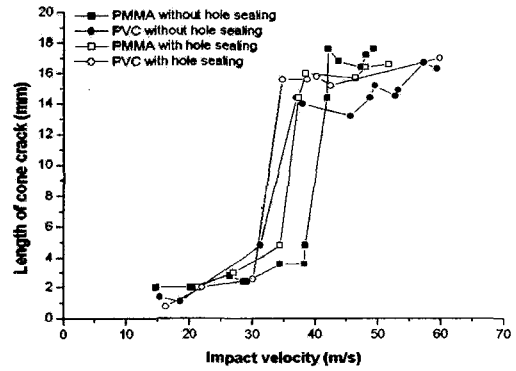


Fig. 9 Length of cone crack by PMMA and PVC sealing materials

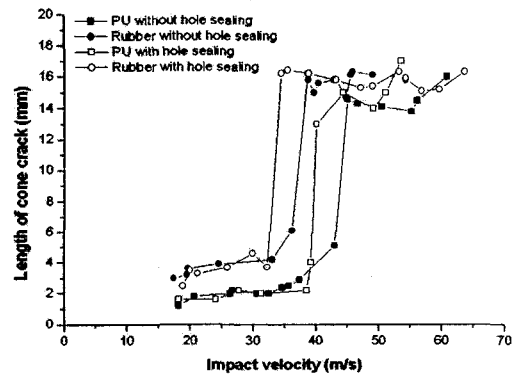


Fig. 10 Length of cone crack by PU and Rubber sealing materials

3.3 실링재료의 종류와 시편의 두께에 따른 완전콘크랙의 발생범위

취성재료를 가공에 응용하는 방법으로 볼 충격에 의한 펀칭가공을 생각할 수 있다. 펀칭가공으로 간단한 구멍이나 노즐을 만들기 위해서는 충격을 받는 재료 표면의 다른 부위에는 전혀 손상을 주지 않는 완전콘크랙(perfect cone crack)의 형상이 많이 생성되어야 한다. 따라서, 적당한 크기의 완전콘크랙을 생성하기 위하여 실링재료의 종류와 시편의 두께에 따른 완전콘크랙의 발생범위를 알아보려고 한다. 본 실험에 사용된 충격입자는 직경 4mm 강구를 이용하였고, 시편의 두께는 5mm와 8mm 두 종류를 사용하여 충격실험을 수행하였다. 그리고, 시편에 경계조건으로 구멍이 있는 실링과 구멍이 없는 실링을 사용하였을 때 따른 완전콘크랙의 발생범위를 알아보려고 한다. Fig. 11~Fig. 16은 각각의 실링재료에서 충격속도에 따른 콘크랙의 길이 변화를 보여주고 있으며, Fig. 17~Fig. 20은 실링재료의 종류와 충격속도에 따라 발생하는 균열양상의 범위를 나타내고 있다.

전체적으로 접촉면적에 따른 속도천이를 살펴 보면, 두께 5mm 시편의 경우 구리 실링은 같은 충격속도에서 콘크랙이 급격하게 성장하였고, 나머지 실링재료에서는 접촉면적에 따라 1.8m/s~6.9m/s의 속도천이가 발생하였다. 그리고, 두께 8mm 시편의 경우는 접촉면적에 따라 1m/s~9.9m/s의 속도천이가 발생하였다. 또한, 시편의 두께가 증가함에 따라 콘크랙의 길이도 두께 5mm의 시편을 사용하였을 때보다 전체적으로 12.4%~33.8% 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 17과 Fig. 18을 비교해보면, PMMA 실링과 고무 실링의 경우는 구멍이 있는 실링을 사용하였을 때가 구멍이 없는 실링을 사용하였을 때보다 조금 더 넓은 충격속도범위에서 완전콘크랙이 발생하였지만, 폴리우레탄 실링은 구멍이 없는 실링에서 조금 더 넓은 충격속도범위에서 발생하였다. 그리고, 알루미늄, 구리, PVC 실링의 경우 접촉면적에 상관없이 비슷한 충격속도범위에서 완전콘크랙이 발생하였다. 그리고, Fig. 19와 Fig. 20을 비교해보면, PMMA, PVC, 고무 실링의 경우는 구멍이 있는 실링이 구멍이 없는 실링을 사용하였을 때보다 조금 더 넓은 충격속도범위에서 완전콘크랙이 발생하였지만, 폴리우레탄 실링에서는 두께 5mm 시편을 사용하였을 때와 마찬가지로 구멍이 없는 실링에서

조금 더 넓은 충격속도범위에서 발생하였다. 그리고, 알루미늄 실링과 구리 실링의 경우는 접촉면적에 상관없이 비슷한 충격속도범위에서 완전콘크랙이 발생하였다.

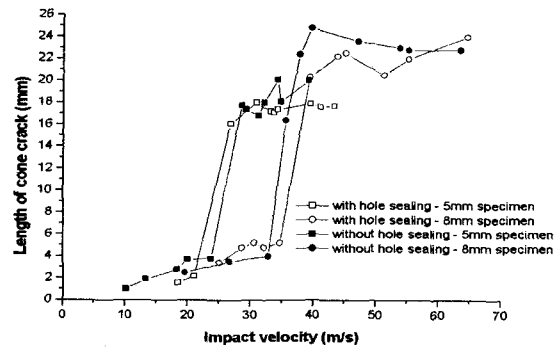


Fig. 11 Length of cone crack for thickness of specimen and contact area by Al sealing

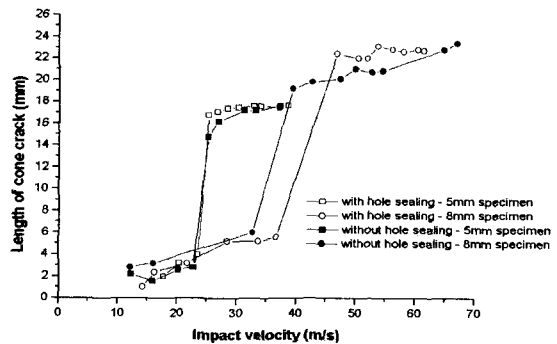


Fig. 12 Length of cone crack for thickness of specimen and contact area by Cu sealing

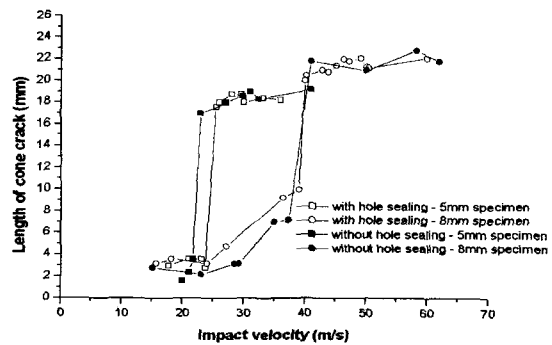


Fig. 13 Length of cone crack for thickness of specimen and contact area by PMMA sealing

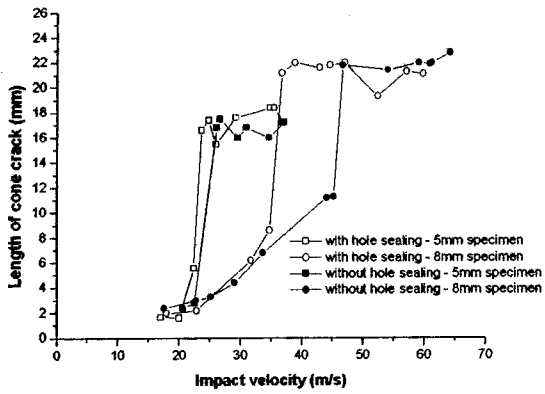


Fig. 14 Length of cone crack for thickness of specimen and contact area by PVC sealing

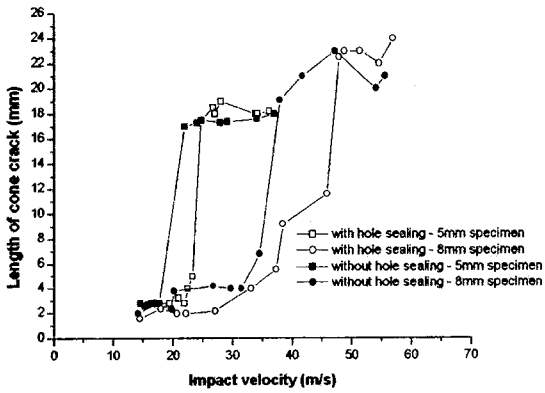


Fig. 15 Length of cone crack for thickness of specimen and contact area by PU sealing

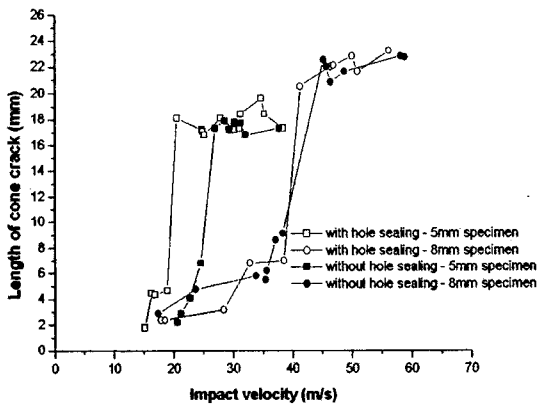


Fig. 16 Length of cone crack for thickness of specimen and contact area by Rubber sealing

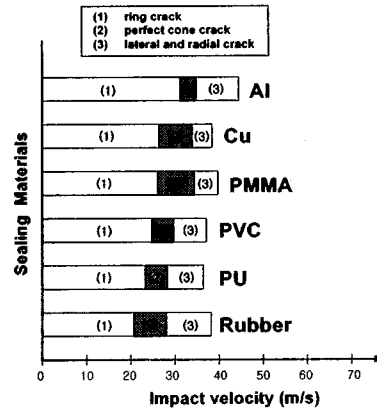


Fig. 17 Range of crack shapes by impact velocity for sealing materials (with-hole sealing, t=5mm)

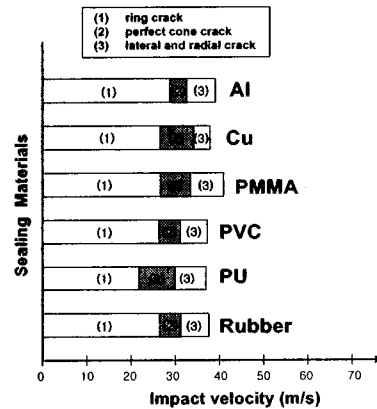


Fig. 18 Range of crack shapes by impact velocity for sealing materials (without-hole sealing, t=5mm)

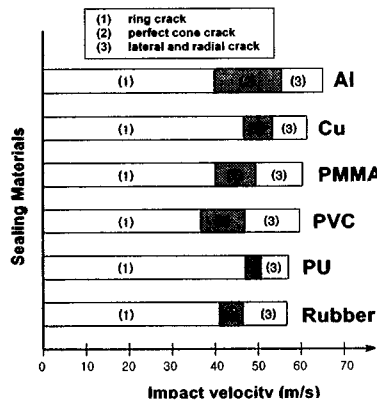


Fig. 19 Range of crack shapes by impact velocity for sealing materials (with-hole sealing, t=8mm)

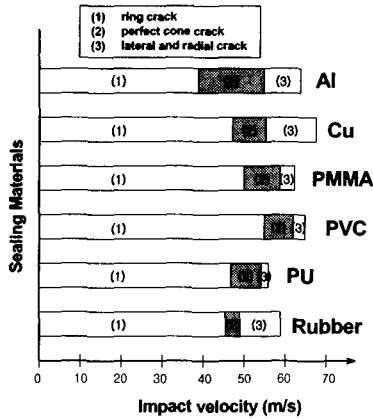


Fig. 20 Range of crack shapes by impact velocity for sealing materials (without-hole sealing, t=8mm)

4. 결론

취성재료인 유리(soda-lime glass)를 시편으로 사용하여 콘크랙 성장에 대한 실링재료의 영향, 시편과 실링의 접촉면적에 따른 영향, 실링재료와 시편의 두께에 따른 완전콘크랙의 발생범위에 대해서 규명해 보았다.

- I. 실링재료를 사용함으로써 시편에 경계조건이 없을 때보다 더 다양한 충격속도범위에서 완전콘크랙이 발생하였으며, 콘크랙의 길이 변화에도 영향을 주었다.
- II. 충격입자의 크기가 3mm인 경우 시편과 실링재료가 접촉하는 면적에 따라 콘크랙의 길이가 급격히 성장되는 충격속도가 달랐으며, 구멍이 있는 실링이 구멍이 없는 실링보다 더 낮은 충격속도에서 콘크랙이 급격하게 성장하였다. 그리고, 실링재료의 종류에 따라 4.2m/s~10.7m/s의 속도천이가 발생하였다.
- III. 완전콘크랙이 발생하는 초기속도는 전반적으로 구멍이 있는 실링을 사용하였을 때가 일찍 발생하였다. 그리고, 접촉면적에 상관없이 두께 5mm시편의 경우 구리 실링과 PMMA 실링이 가장 넓은 충격속도 범위에서 완전콘크랙이 발생하였으며, 두께 8mm 시편의 경우 알루미늄 실링을 사용하였을 때가 완전콘크랙을 발생시키는 데 가장 효과적인 실링재료이다. 또한 시편의 두께가 증가할수록 콘크랙의 성장이 지연되었다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 지역대학 우수과학자 지원연구(2000-1-30400-015-2)에 의해 수행된 것입니다.

참고문헌

1. Frank, F. C. and Lawn, B. R., "On the Theory of Hertzian Fracture," Proc. R. Soc., Vol. A299, pp. 291-306, 1967.
2. Knight, C. G. K., Swain, M. V. and Chaudhri, M. M., "Impact of Small Spheres on Glass Surface," J Mater Sci. Vol. 12, pp. 1573-1586, 1977.
3. Chaudhri, M. M. and Kurkjian, C. R., "Impact of Small Steel Sphere on the Surfaces of Normal and Anomalous Glasses," J Am Ceram Soc., Vol. 69, pp. 404-410, 1986.
4. Fields, J. E., Sun, Q. and Townsend, D., "Ballistic Impact of Ceramic," Inst Phys Conf Ser, Vol. 102, pp. 387-393, 1989.
5. Persson, J., Breder, K. and Rowcliffe, D. J., "Loading Rate Effects during Indentation and Impact on Glass with Small Spheres," J. Mater. Sci., Vol. 28, pp. 6484-6489, 1993.
6. Woo, S. C., Kim, M. S., Shin, H. S. and Lee, H. C., "Impact Damage on Brittle Materials with Small Spheres (I)," Trans KSPE, Vol. 18, No. 11, pp. 93-100, 2001.
7. Kim, M. S., Shin, H. S., Lee, H. C. and Woo, S. C., "Impact Damage of Brittle Materials by Small Spheres (II)," Trans KSME A, Vol. 26, No. 1, pp. 153-159, 2002.
8. Nojima, T. and Sakaguchi, K., "A Study of Fracture Behaviors in Ceramic Plates by Impact Load and Its Application to Development of Hole-Punching Technique," Proceeding of the IUTAM Symposium CRHVHRSR, Noda, pp. 233-240, 1995.
9. Nojima, T., Sakaguchi, K., Sugiyama, F., "Blanking of Engineering Ceramic Plate by Press-Working," Trans JSME, C-62, pp. 346-352, 1995.
10. Shin, H. S., Kim, C. H. and Oh, S. Y., "Development of Experimental Setup for Impact Punching in Brittle Materials and Analysis of Punching Mechanism," Trans KSME A, Vol. 25, pp. 629-636, 2001.