

## Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 플라즈마 용사 코팅된 유리의 입자충격에 의한 손상기구

서 창 민\* · 이 문 환\*\* · 김 성 호\*\*\* · 장 종 윤\*\*\*\*  
(98년 4월 23일 접수)

### Damage Mechanism of Particle Impact in a Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Plasma Coated Soda-lime Glass

Chang-Min Suh\* · Moon-Whan Lee\*\* · Sung-Ho Kim\*\*\* · Jong-Yun Jang\*\*\*\*

**Key Words** : 플라즈마 코팅(plasma coating), 입자충격(particle impact), 손상완화(damage relaxation), 링크랙(ring crack), 콘크랙(cone crack), 레디얼크랙(radial crack), 레터럴크랙(lateral crack),

#### Abstract

The damage mechanism of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plasma coated soda-lime glass and uncoated glass by steel ball particle impact was analyzed in this study. And the shape variation of the cracks was investigated by stereo-microscope according to the impact velocity and steel ball diameter.

In order to improve the damage reduction effect by Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating layer, crack size was measured and surface erosion state was observed for both of two kinds of specimen after impact experiment. And the results were compared with each other. The 4-point bending test was performed according to ASTM D790 testing method to evaluate the effect of coating layer for bending strength variation. As a result, it was found that the crack size of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated specimen was smaller than that of uncoated one, because of the impact absorption by interior pores in the coating layer and the load dispersion by the structural characteristic of the coating layer. For the specimens subjected to the steel ball impact, the bending strength of coated specimen was higher than that of uncoated specimen.

#### 1. 서 론

현재 사용되어지고 있는 기계 구조물 중 일부는

상당한 고온에 노출되어 있으며, 이와 같은 사용 환경의 고온화 추세는 앞으로도 계속될 전망이다. 따라서, 이러한 극고온용 기계 구조물의 대체 재

\* 종신회원, 경북대 공대

\*\* 구미 전문대학

\*\*\* 경북대 대학원

\*\*\*\* 포항 전문대학

료로써, 세라믹 재료가 주된 연구 대상이 되고 있다.

특히, 일부 국가에서는 발전용 터빈 및 항공기용 가스터빈 개발분야에서, 고온에서의 성능 향상을 위한 방법으로 극고온에서도 사용이 가능한 세라믹 가스터빈(CGT : Ceramic Gas Turbine)의 개발 및 실용화에 대한 연구결과가 보고된 바 있다[1].

그러나, 이러한 세라믹 재료는 금속 재료에 비해 파괴 인성치가 낮고, 특히 충격에 약한 단점이 있다. 따라서, 항공기에 장착된 세라믹 가스터빈의 고속회전 시, 외부에서 흡입된 외래물 입자에 의한 충격손상(FOD : Foreign Object Damage)이 큰 문제점으로 대두되고 있다[2,3]. 외래물 입자 충격은 세라믹 부재에 크랙을 발생시킴으로써 기계적 강도를 크게 저하시키며, 기계 구조물의 수명을 단축시키는 결과를 초래한다. 또한, 미세 입자들의 연속적인 충격은 치핑(chipping)에 의한 표면 입자 탈락과 함께 심각한 침식(erosion)을 야기시키게 된다[4~8].

따라서 본 연구에서는 기계구조용 세라믹 부재의 입자 충격에 의한 손상기구를 해석을 위한 일련의 연구로써, 손상완화 및 방지를 위해 표면에 내충격성 및 내마모성이 우수한 다른 종류의 세라믹 재료를 표면 코팅한 후 동일한 해석을 실시하였다.

코팅 모재로는 대표적인 취성재료로써 크랙 생성기구가 세라믹과 유사하며, 투명성을 이용하여 내부에 생성된 크랙 관찰이 용이한 상업용 유리를 선택하였다. 입자 충격시험을 행하여 시험편 내부의 크랙 생성과 손상 정도를 정량적으로 분석하였다. 또한, 코팅재료로는 내충격성과 내마모성이 우수하며, 특히 다른 세라믹 코팅재료에 비해 접착강도가 우수한 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 택하여 유리표면에 플라즈마 용사 코팅한 후, 동일한 실험을 행하여 입자 충격에 대한 손상 완화 효과를 비코팅재와 정량적으로 비교, 분석하였다. 또한 충격시험 후, 4점 굽힘 시험을 실시하여 충격손상에 따른 굽힘 강도의 저하를 비교함으로써 표면 코팅에 의한 충격손상 완화효과를 평가하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 충격 시험편 및 충격입자

본 연구에 사용된 시험편 모재는 일반 상업용 유

리(soda-lime glass)이다. 두께 5mm의 판유리를 100×20mm 치수로 절단하여 사용하였다. 충격 입자로는 볼 베어링 강으로 널리 쓰이고 있는 직경 1mm, 2mm의 STB2 강구(steel ball)를 각각 사용하였다.

### 2.2 코팅방법과 코팅층의 특성

본 실험에서 실시한 플라즈마 용사 코팅법은 코팅층과 모재와의 밀착력을 강화하기 위한 전처리 과정으로 샌드블라스팅(sand blasting) 작업을 거치게 된다. 이러한 샌드블라스팅에 의한 모재 표면의 적절한 표면 조도는 코팅층의 기계적 결합력과 내마모성을 크게 증가시킨다.

샌드블라스팅에 의한 모재의 표면손상 정도를 알아보기 위해 현미경 관찰과 표면 거칠기 테스트를 실시하였다. 그 결과, 모재 표면에 미세한 표면 요철이 관찰되었으나, 표면크랙은 발생하지 않았음이 관찰되었다.

Table 1은 본 실험에서 실시한 샌드블라스팅 조건을 나타내고 있으며, Table 2는 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 플라즈마 용사 코팅조건을 각각 나타내고 있다.

Table 1 Conditions of sand blasting

Particle	Particle size	Target distance	Impact angle	Blasting pressure
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤250 $\mu$ m	100mm	90°	4×10 <sup>4</sup> KPa

Table 2 Conditions of plasma spraying

Coating powder	Current	Flow quantity (Ar)	Flow quantity (H <sub>2</sub> )
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	650A	60 l/min	12 l/min
Powder size	Target distance	Feed quantity (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Feed quantity (Ar)
15~45 $\mu$ m	90mm	25g/min	10 l/min

본 실험에 사용한 코팅장비는 프랑스 2PS사에서 제작한 80kW급 "Hexaplasma"로써 코팅장비 내부에서 아크에 의해 발생된 고온의 플라즈마가 분사노즐을 통해 고속으로 분사되면서 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말과 혼합되어, 순간적으로 용융된 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 코팅 모재쪽으로 날아가게 된다. 그 과정에서 용융된 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 적당한 표면 요철을 가진 시험편 모재 표면과 맞물림

(interlocking)에 의한 기계적 결합을 함으로써 강한 접착강도를 유지하면서 밀착하게 된다.

Fig. 1은 플라즈마 용사 코팅에 의해 형성된 코팅층의 단면을 스케치한 그림이다. 즉 불규칙한 형태의 타원형 벽돌이 적층된 듯한 층상구조(lamellar structure)를 하고 있으며, 용융된 입자들이 모재표면에 적층되면서 다수의 미세한 기공(pore)을 가지게 된다. 이와 같이 무수히 내재하고 있는 기공들이 충격흡수에 있어서 상당한 효과를 가질 것으로 예상된다. 이때, 코팅층 내부의 기공율은 코팅 재료 및 코팅 조건에 따라 크게 달라진다고 보고되고 있다[9,10].

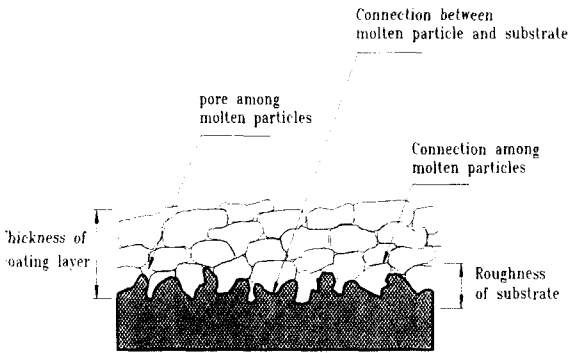


Fig. 1 Schematic diagram of the cross section of coating layer



Fig. 2 SEM fractograph on the cross section of coating layer

Fig. 2는 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 용사 코팅층을 SEM 촬영한 사진으로 Fig. 1의 개략도와 유사한 미세 구조임을 알 수 있다. 즉, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 용융 입자가 작은 덩어리를 이룬채 모재 위에 겹겹이 적층되어 있음을 확인할 수 있다.

코팅층의 경도를 측정된 결과, 표면 경도는 약 960Hv로써, 모재인 유리의 경도 560Hv에 비해 약 1.8배 정도 높다. 코팅층의 이러한 높은 경도치는 입자충격에 대한 표면손상 및 모재의 손상 완화에 중요한 인자로 작용할 것으로 생각된다.

### 2.3 표면상태의 분석

일반적으로 강구가 고속으로 충돌했을 경우, 시험편의 표면상태는 강구와 접촉부 주위의 응력 분포, 크랙발생 임계값 등에 큰 영향을 주게된다. 특히, 본 실험에서 시험편 모재로 사용된 석회소다 유리는 취성이 강한 재료로써 표면 상태가 응력 분포를 불규칙하게 발생시키는 작용 외에, 시험편 모재의 굽힘강도를 크게 저하시키는 역할을 하게될 것으로 예상된다.

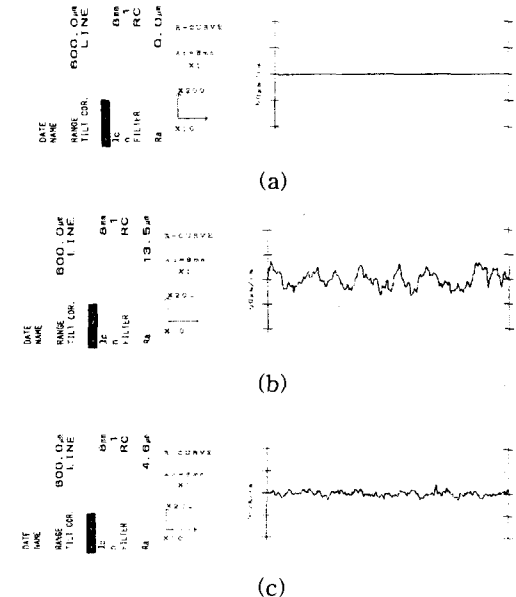


Fig. 3 Results of surface roughness test (a) uncoated smooth glass specimen (b) sand blasted glass specimen (c) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated glass specimen

따라서, 이러한 각 시험편의 표면 상태를 비교하기 위해 비코팅 평활재와 샌드블라스팅만 실시한 시험편 및 코팅재에 대해 각각 표면거칠기 테스트를 실시하였다.

Fig. 3은 각 시험편에 대한 표면거칠기 테스트의 결과로써 (a)는 비코팅 평활재에 대한 표면상태를, (b)는 샌드블라스팅 처리만을 실시한 시험편에 대한 표면 상태를, 그리고 (c)는 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재의 표면상태를 각각 나타내고 있다. (a)의 비코팅 평활재의 경우에 있어서는 매끄러운 표면 상태를 보여주고 있는 반면, (b)와 (c)의 샌드블라스팅재와 코팅재의 경우 다소 거친 표면 상태를 보여주고 있다.

## 2.4 충격시험 장치

본 실험에서 사용한 입자 충격 시험장치는 10기압 용량의 공기 압축기에 의해 압축된 공기의 압력을 이용한 에어건(air gun)을 사용하였다. 먼저, 강구를 실어 고속으로 운반할 수 있도록 중앙에 구멍을 가공한 캐리어(carrier)를 제작하여 직경 1mm, 2mm의 강구를 각각 실은 다음, 축압기(accumulator)의 공기 분사구 앞에 장착한 후, 솔레노이드 밸브(solenoid valve)를 이용하여 공기 압축기에 의해 압축된 공기를 순간적으로 분사하였다.

분사 공기의 분사압에 의해, 강구를 실은 캐리어는 분사구로부터 고속으로 발사된 후, 길이 1,550mm의 투명한 아크릴관을 따라 가속되어, 아크릴 관의 끝에 설치된 스톱퍼(stopper)에 부딪혀 정지하게 된다. 그러나, 캐리어에 실려있던 강구는 관성에 의해 캐리어를 빠져나와 시험편에 고속으로 충돌하게 된다. 이때, 강구의 충돌 속도는 아크릴관 끝 부분에 설치된 두 개의 광 센서와 오실로스코프를 이용하여 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 각종 크랙의 발생과 성장

비코팅 평활재와 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재에 대해 입자 충격 시험을 실시한 결과, 다양한 형태의 크랙이 발생하였다. 이러한 크랙들은 충돌 속도가 증가함에 따라, 충격하중의 크기와 응력 분포의 변화에 의해 ①링

크랙(ring crack), ②콘 크랙(cone crack), ③레디얼 크랙(radial crack), ④레터럴 크랙(lateral crack)의 순서로 발생하였다.

그러나, 실제 실험에서 발생하는 크랙의 종류 및 발생순서의 명확한 경계는 없었으며, 전단계 크랙의 초기 발생부 또는 끝단을 발생 기점으로 해서 서로 혼합되어 매우 복잡한 형태로 발생하였다.

Fig. 4는 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅 시험편의 전면에서 관찰한 표면 손상의 형태와 내부로 발생한 크랙의 형상을 스케치하여 정리하여 나타낸 것으로 충돌속도 증가에 따른 크랙의 형상 및 표면손상의 변화를 보여주고 있다. 여기서, (a)는 직경 1mm 강구 충격에 의한 손상을, (b)는 직경 2mm 강구 충격에 대한 손상을 나타낸다.

Fig. 4와 같이 충돌 속도가 증가함에 따라 4가지 종류의 크랙들이 발생하여 점차 성장하였다. 특히 68m/sec이상의 고속 충돌에서는 코팅층이 탈락되면서 칩핑(chipping) 및 크러싱(crushing)에 의한 모재의 표면손상 및 부분탈락이 관찰되었다.

#### 3.1.1 링크랙의 발생

링크랙은 비교적 저속 충돌에서 발생하였으며, 충격 시험편의 표면에만 약간의 손상을 일으킬 뿐, 표면 입자 탈락이나 시험편의 강도 저하에는 거의 영향이 없다[18,19].

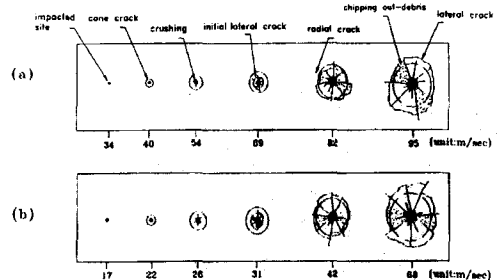


Fig. 4 Variation of crack pattern for coated specimen according to impact velocity and steel ball diameter (a) d=1mm steel ball (b) d=2mm steel ball

즉, 강구가 평판에 충돌하는 순간, 강구의 접촉면 내부에서는 반경방향의 레디얼 응력(radial stress)

이 압축 응력으로 작용하지만, 접촉면의 외부에서는 반경방향 응력이 인장응력으로 작용하게 된다. 이때, 최대 인장응력은 접촉면의 외곽 경계면에 발생하며, 충격에 의해 발생한 최대 인장응력이 세라믹 평판의 인장강도보다 크게 되면 링크랙이 발생하게 된다.

직경 1mm 강구 충격의 경우, 비코팅 평활재에 있어서는 임계속도 약 18m/s에서 최초로 링크랙이 발생한 후, 충돌속도가 증가함에 따라 초기 링크랙의 외곽에 2차 링크랙이 연속적으로 발생하였다.



Fig. 5 Photograph on front view of ring crack (uncoated specimen, d=1mm, V=19m/s)

그러나, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재에 있어서는 약 34m/s 정도의 충돌 속도에서 코팅층 아래 부분에 불규칙한 형태의 링크랙이 관찰되었다. 이는 코팅층의 미세한 표면 결함들이 충격하중을 분산시킨 것에 기인한 것으로 추측되며, 더욱이 코팅층이 충격하중을 완화시키므로써 링크랙 발생 속도를 지연시킨 것으로 판단된다. 이러한 영향들로 인해 비코팅 평활재에 있어서는 Fig. 5와 같이 완전한 원형의 링크랙이 발생하였으나, 코팅재에서 발생한 링크랙의 경우 형태상 원형으로 정의하기 어려운 불규칙한 형태의 링크랙이 발생하였다. 또한, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅층의 완충효과에 의해 링크랙 발생의 임계속도가 약 16m/s 정도 지연된 것으로 보인다.

2mm 강구 충격에 있어서는 1mm 강구의 경우와 동일한 결과가 관찰되었으며, 링크랙의 크기가 1mm 강구 충격에서보다 다소 크게 나타났다.

충돌 속도가 증가함에 따라, 링크랙의 원주 테두리로부터 콘크랙이 발생하여 시험편 내부로 성장하였다. Fig. 5는 비코팅 평활재에 발생한 링크랙을

정면에서 촬영한 사진의 예로써, 링크랙 원주 테두리로부터 짧은 콘크랙이 발생하였음을 확인할 수 있다.

### 3.1.2 콘크랙의 발생과 성장

충돌속도가 증가함에 따라 링크랙의 외곽 테두리로부터 원추 형태의 콘크랙이 발생하였으며, 콘크랙의 경사면을 따라 여러 개의 짧은 레디얼크랙이 관찰되었다. Fig. 6은 시험편 측면에서 실제 현미경으로 사진 촬영한 콘크랙의 형상을 보여주고 있다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 표면 링크랙의 외곽에서 발생한 콘크랙은 충돌 속도가 증가함에 따라 그림상의 화살표와 같이 시험편 내부로 성장하였다. 따라서, 콘크랙은 표면 손상에만 영향을 미치는 링크랙과는 달리, 시험편 내부로 성장함으로써 강도 저하에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며, 특히 저속 충돌 영역에서 현저한 강도 저하를 유발하게 된다[18].

콘크랙 발생과 더불어 모재의 표면분쇄인 크러싱(crushing)현상이 발생했으며, 크러싱부 바로 아래에는 모재 내부로 성장한 여러 개의 날카로운 형태의 스플린터(splinter)가 관찰되었다. 그러나, 크러싱 발생의 임계속도는 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재의 경우가 약 54m/s로써 비코팅 평활재의 44m/s에 비해 약 10m/s 정도 지연된 것으로 나타났다[18].



Fig. 6 Photograph on side view of cone crack (coated specimen, d=2mm, V=39m/s)

크러싱은 유리나 세라믹과 같은 극취성 재료의 표면 압입에 의한 소성변형이 재료의 표면분쇄로 나타나는 현상으로써, 링크랙 생성에서 관찰된 모

재의 탄성변형과는 달리 콘크랙 발생에 있어서는 모재의 소성변형이 발생한 것으로 볼 수 있다. 그러나, 크러싱은 미세한 입자 탈락과 침식(erosion)에 의한 표면 마멸에는 영향을 미치나, 굽힘 강도 저하에는 거의 영향이 없던 것으로 보고된 바 있다 [18,19].

Fig. 7은 코팅 유무에 따른 콘크랙의 크기 변화를 비교한 그래프로서 다음 사항을 알 수 있다. 즉, 전체적으로 2mm 강구충격에 비해 1mm 강구충격에 의해 발생한 크랙의 크기가 매우 작게 나타났으며, 또한, 비코팅재에 발생한 크랙에 비해 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재에 발생한 크랙 길이가 일정한 크기 만큼 작게 나타났다. 즉, 1mm 강구충격에서는 전체 속도대에 걸쳐서 콘크랙이 약 0.4mm 만큼 작게 나타났다. 2mm 충격에서도 동일한 충격 속도에 대해 비코팅재에 비해 코팅재에 발생한 크랙의 크기가 약 0.7mm 만큼 작았다. 이 결과는 코팅층이 입자 충돌에 의한 충격을 어느 정도 완화시켰기 때문이다.

이와 같은 충격손상 완화효과는 코팅층 내부에 무수히 산재한 기공들이 순간적으로 가해지는 충격하중을 흡수·완화시켰기 때문인 것으로 생각된다. 또한, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅층의 표면 경도는 모재 유리에 비해 약 2배정도 큰 값을 가지므로, 고경도 코팅막에 의한 손상방지 효과가 상당한 것으로 추측된다.

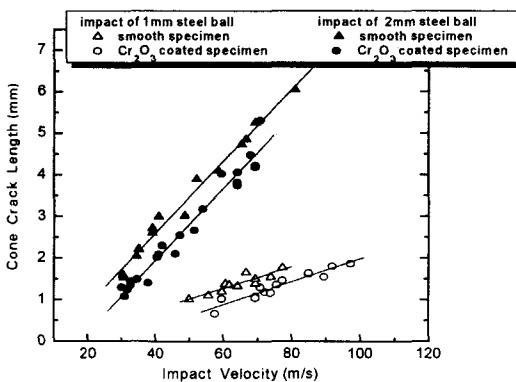


Fig. 7 Comparison of cone crack lengths occurring in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plasma coated glass specimens and uncoated glass specimen

### 3.1.3 레디얼크랙의 발생과 성장

충돌 속도가 증가함에 따라, 콘크랙 발생과 함께 충돌 중심으로부터 방사상으로 반경방향의 짧은 레디얼크랙들이 관찰되었다. 링크랙을 발생기점으로 해서 콘크랙의 경사면에서만 관찰되던 레디얼크랙은 충돌 속도가 증가함에 따라 반경 방향으로 길게 성장하면서, 콘크랙 경사면에서 분리되어 표면으로 완만하게 상승하면서 성장했다.

Fig. 8는 시험편 배면에서 촬영한 레디얼크랙의 사진을 나타낸다. 중심으로부터 방사상으로 길게 성장했음을 확인할 수 있다. 이렇게 표면에 대해 수직면을 이룬 채 성장한 레디얼크랙은 표면에 대해 수평으로 성장한 레터럴크랙과 합체하여 표면 입자의 판상 탈락을 일으킴으로써, 크러싱과 함께 표면 손상에 큰 영향을 미치게 된다.

그러나, 코팅재에 있어서는 레디얼크랙과 레터럴크랙이 어느 정도 성장한 이후에 비로소 코팅층의 파손이 발생했으며, 코팅층 파손과 함께 모재의 표면까지도 손상이 발생했다. 코팅층 파손의 임계 속도는 1mm 강구 충격에 있어서는 약 82m/s, 2mm 강구 충격에 있어서는 약 42m/s로 나타났다. 따라서, 비코팅재의 크러싱 및 레터럴크랙에 의한 표면 입자 탈락에 대한 임계 속도와 비교하면, 코팅층의 충격 흡수 및 표면손상 방지 효과가 뛰어난 것으로 증명되었다.

Fig. 9는 이러한 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재에서 발생한 레디얼크랙에 대해 충돌 강구의 직경에 따른 변화를 비교한 것이다. 이때 크랙 크기는 충돌 중심에서부터 가장 길게 성장한 레디얼크랙의 선단까지의 거리로 정의하였다.

그림과 같이 직경 2mm 강구 충격에 의한 크랙이 1mm 강구에 비해 다소 크게 나타났다. 또한, 콘크랙 크기 변화와 마찬가지로 충격 속도가 증가함에 따라 그 크기의 차이가 점차 증가한다는 사실을 알 수 있었다. 또한, 이 그림에는 코팅 유무에 따라 레디얼 크랙의 크기를 비교하였다. 먼저 1mm 강구 충격에 의한 레디얼크랙 크기를 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅유무에 따라 비교해보면, 전체 속도 영역에서 비코팅재에 발생한 크랙에 비해, 코팅재에 발생한 레디얼크랙 크기가 작게 나타났다.

특히, 속도 영역별로 비교했을 때, 충돌속도 약

65m/s의 저속충돌 영역에서는 비코팅재와 코팅재에서 발생한 크랙 크기 차이가 약 0.2mm 정도로 적었고, 충돌속도 약 90m/s 이상의 고속영역에서의 크랙 크기 차이는 약 0.5mm 정도로 나타났다. 즉, 충돌속도가 증가함에 따라 레디얼크랙 발생에 대한 충격손상 완화효과가 더욱 커짐을 알 수 있다.

2mm 강구 충격에 의한 레디얼크랙의 크기 변화에 있어서는 이러한 현상이 더욱 두드러졌다. 충돌속도 약 40m/s의 저속충돌 영역에서는 코팅유무에 관계없이 크랙의 크기가 거의 동일한 크기로 발생하였으나, 충돌속도가 증가함에 따라 비코팅재에 발생한 크랙의 크기에 비해 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재의 크랙 크기가 현저히 작아지는 현상을 보였다. 그리고, 충돌속도가 약 70m/s 이상의 고속충돌 영역에서는 비코팅재에 비해 코팅재의 크랙 크기가 약 1.5mm 정도까지 작게되어 코팅효과가 크게 나타났다. 따라서, 표면 코팅을 함으로써, 저속충돌보다는 고속충돌에서 레디얼크랙에 의한 손상 완화효과가 더욱 뛰어남을 알 수 있었다.

이러한 현상은 콘크랙 발생에 대한 결과와는 다소 차이가 생겼다. 즉, 코팅유무에 따른 콘크랙의 크기 변화를 비교한 경우, 비코팅재에 대한 데이터와 코팅재의 데이터가 서로 평행한 결과를 보임으로써, 코팅재에 발생한 콘크랙 크기가 비코팅재에 비해 전체 속도대에 걸쳐 일정한 크기 만큼 작게 나타났다. 따라서, 코팅층의 콘크랙에 대한 손상 방지효과가 본 연구에서 실시한 모든 속도대에서 동일한 정도로 평가된다.



Fig. 8 Photograph on rear view of radial crack (coated specimen, d=1mm, V=77m/s)

그러나, 레디얼 크랙의 경우, Fig. 9에 보여지는 바와 같이 저속영역보다는 고속영역에서 손상 완화효과가 두드러지게 나타났다. 이와 같은 결과로부터 코팅층이 콘크랙에 의한 손상에 대해서는 초기 발생에만 영향을 미치는 반면, 레디얼크랙에 의한 손상에 있어서는 발생뿐만 아니라, 성장에도 상당한 영향이 있다는 사실을 알 수 있다. 이러한 효과에 대한 원인들은 앞서 제시한 콘크랙의 경우와 마찬가지로 코팅층 내의 용융 입자간의 특유한 적층구조와 코팅층 내부에 산재한 기공들에 의한 것으로 추측된다.

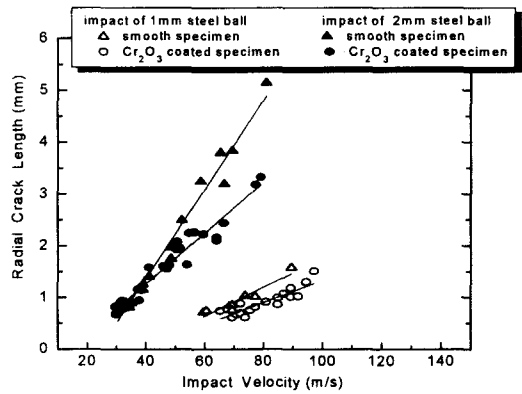


Fig. 9 Variation of radial crack lengths occurring in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated glass specimens and uncoated glass specimen

### 3.1.4 레터럴크랙의 발생과 성장

레터럴크랙은 Fig. 10과 같이 콘크랙의 경사면을 기점으로 발생하여 표면에 대해 수평면을 이루면서 완만하게 성장하는 초기 레터럴크랙(initial lateral crack)과 콘크랙의 끝단에서 되돌림 현상(turn up)에 의해 발생하는 레터럴크랙으로 나눌 수 있다.

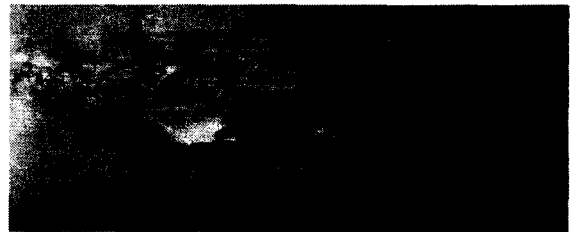


Fig. 10 Photograph on side view of turn up and lateral crack (coated specimen, d=1mm, V=68m/s)

Fig. 11은 강구 직경에 따라 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재와 비코팅재에 발생한 래터럴크랙의 크기를 비교한 것이다. 여기서, 충돌하중과 접촉반경이 더 큰 직경 2mm 강구 충격에 의해 발생한 래터럴크랙의 크기가 1mm 강구 충격에 비해 더 큰 것으로 나타났다.

또한, 코팅 유무에 따라 비교했을 경우, 충격속도 증가에 따른 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재의 래터럴크랙 크기 증가율이 비코팅재에 비해 완만하며, 그 결과 고속 충격으로 갈수록 내충격 효과가 크게 증가함을 알 수 있다. 특히, 래터럴크랙은 래디얼크랙과 함께 얇은 판 형태로 합체하여 표면파손 및 연속적인 입자충돌에 의한 에로존현상에 상당한 영향을 미치게 된다.

그러나, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재의 경우에 있어서는 1mm 강구 충격, 2mm 강구 충격 모두에서 표면입자 탈락에 의한 모재의 표면손상이 크게 감소했다. 또한, 저속영역에서 표면손상의 주된 요인이 되는 치핑과 크러싱에 의한 손상감소 효과 등을 고려한다면, 코팅층에 의한 내충격 효과는 기계적 강도 저하에 중요한 요인이 되는 내부 크랙뿐만 아니라, 표면손상 방지도 큰 효과가 있음이 실험적으로 입증되었다.

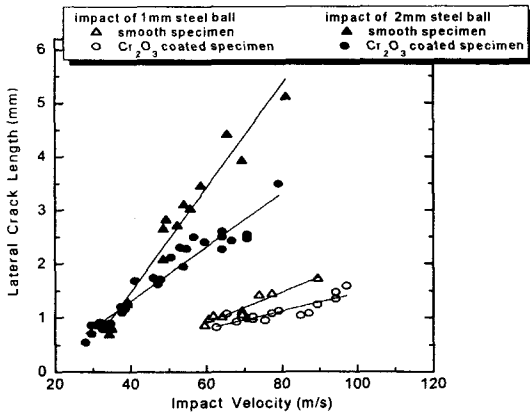


Fig. 11 Variation of lateral crack lengths occurring in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated glass specimens and uncoated glass specimen

### 3.2 굽힘강도의 변화

직경 1mm 강구와 2mm 강구 입자 충돌에 의해

손상을 받은 시편의 굽힘강도의 변화를 조사하기 위해 4점 굽힘시험을 실시하였다. 본 실험에서 실시한 굽힘시험은 충격부 주위를 순수굽힘(pure bending) 상태로 만들기 위해 4점 굽힘시험으로 행하였고, 지그의 형상과 시험 방법은 ASTM D790에 제시된 방법을 이용하였다.

Fig. 12는 비코팅 평활재와 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 용사 코팅재, 그리고 샌드블라스팅한 시험편에 대한 굽힘강도를 각각 나타내는 그래프로써 충격 손상이 없는 상태에서 얻은 데이터를 각각 나타내고 있다. 각 시험편의 굽힘강도는 비코팅 평활재가 약 70MPa 정도로 나타났으며, 코팅재는 약 55MPa, 샌드블라스팅재가 약 36MPa로 나타났다. 따라서, 코팅의 전처리과정인 샌드블라스팅 처리에 의해 비코팅 평활재의 굽힘강도가 약 34MPa정도 저하되었으며, 이후, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 표면 코팅에 의해서 다시 약 20MPa 정도 상승하였다.

이러한 굽힘강도의 차이는 코팅층의 밀착력 강화를 위해 실시된 샌드블라스팅 처리에 의해 발생한 표면 결함들이 굽힘강도를 크게 저하시킨 결과로 나타난 현상이며, 강한 밀착력을 가진 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅층이 이러한 표면 결함들을 다시 어느 정도 상쇄 시킴으로써 굽힘강도를 다시 상승 시킨 것으로 추측된다.

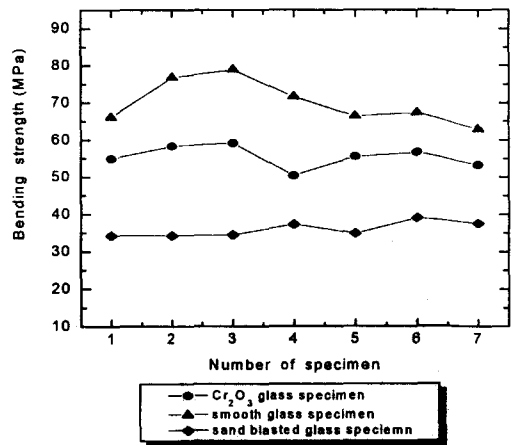


Fig. 12 Bending strength of smooth, sand blasted and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated glass specimens before particle impact test



Fig. 3의 표면거칠기 테스트 결과에서 알 수 있듯이, 비코팅 평활재의 표면상태에 비해 샌드블라스팅 처리된 시편의 표면은 굽힘강도에 큰 영향을 미칠만한 표면 거칠기를 포함하였다. 특히, 본 실험에서 사용한 유리는 취성이 강하며 파괴인성치가 낮아, 코팅층 하부에 내재하고 있는 샌드블라스팅에 의한 표면 결함들이 미소 크랙 내지는 표면 노치(notch)의 역할을 함으로써 실제적으로는 약 15MPa 정도로 저하된 것이다.

Fig. 13은 충돌입자의 크기와 속도에 따른 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재와 비코팅재의 굽힘강도의 변화를 비교하여 나타낸 그래프이다. 그래프와 같이 1mm 강구 충격, 2mm 강구 충격 공히 충돌 속도가 증가함에 따라 급격한 굽힘강도의 저하를 나타내었다. 그러나, 데이터의 분산폭이 상당히 넓게 나타났으며, 이는 유리의 굽힘강도가 크랙의 크기와 형상에 의해 매우 민감하게 반응했기 때문으로 분석된다.

특히, 유리의 입자충격 실험결과[18]에 따르면, 초기의 저속영역에서 발생하는 링크랙에 의해 굽힘강도가 완만하게 감소하다가, 콘크랙이 발생하기 시작하면서부터 굽힘강도가 급격히 저하하는 것으로 보고되었다.

이러한 현상은 링크랙이 표면에 약간의 손상을 가하는데 반해, 콘크랙은 표면과 경사를 이루면서 내부로 성장함으로써 시험편 내부에 심각한 크랙 손상을 초래하여 굽힘강도를 현저히 저하시켰기 때문인 것으로 분석되었다.

충돌 강구의 직경에 따라 비교했을 경우, 1mm 강구 충격에 비해 2mm 강구 충격에 의한 굽힘강도가 전체 속도대에 걸쳐 약 13~17MPa 정도 낮게 나타났으며, 충돌 속도가 증가함에 따라 전체 속도대에 걸쳐서 비슷한 기울기를 가지고 감소하였다. 따라서, 충돌 입자의 크기가 굽힘강도 저하에 매우 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

또한, Fig. 13에서 1mm 강구 충격에 의한 굽힘강도 변화를 코팅유무에 따라 비교해 보면 다음과 같다. 충돌속도 60m/s 이하의 저속 충돌영역에서는 코팅유무에 관계없이 동일한 굽힘강도 변화를 보이고 있으나, 60m/s 이상의 고속 충돌영역에서는 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재의 굽힘강도가 비코팅재에 비해 약 5~8MPa 정도 높게 나타났다.

그러나, Fig. 12의 충격시험 전 평활재에 대한 결과를 고려했을 때, 코팅재의 굽힘강도가 비코팅재에 비해 약 15MPa 정도 낮게 나타났던 것을 감안하면, 코팅층이 굽힘강도를 15MPa 정도 향상시킨 것으로 볼 수 있다. 특히, 1mm 강구 충격에 있어서는 60m/s 이상의 고속 충돌로 갈수록 그 효과가 더욱 크게 나타남으로써 약 20~23MPa의 굽힘강도를 향상시킨 것으로 볼 수 있다.

Fig. 13에 도시된 2mm 강구 충격에 의한 굽힘강도 변화는 1mm 강구 충격과는 다소 상이한 결과를 보였다. 1mm 강구 충돌시 굽힘강도는 코팅유무에 따라 고속 충돌영역에서 약간의 차이를 보였으나, 2mm 강구 충격의 경우에 있어서는 충돌속도가 증가함에 따라 코팅유무에 관계없이 거의 동일한 굽힘강도의 변화를 보이고 있다.

그러나, 이 경우에 있어서도 Fig. 12에서 설명된 바와 같이 샌드블라스팅 처리에 의한 굽힘강도 저하를 고려한다면, 실제로 코팅재의 굽힘강도가 비코팅재에 비해 약 15MPa 정도 향상된 것으로 분석된다.

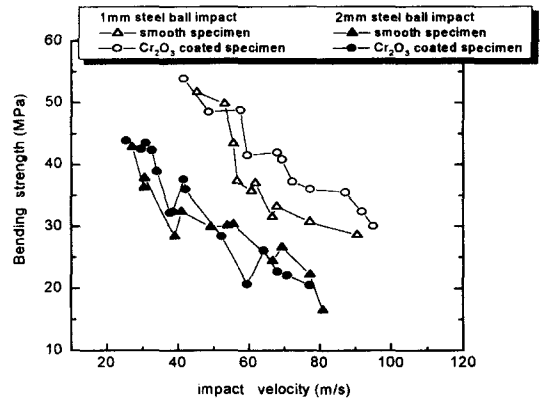


Fig. 13 Bending strength variation of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated glass specimen according to impact velocity and steel ball diameter

따라서, 표면코팅이 입자충격에 의한 크랙 발생 및 성장을 지연시킬 뿐만 아니라, 기계적 강도인 굽힘 강도 저하를 완화시키는데 큰 효과를 미친다는 결과를 얻었다.

본 실험에서 평활 시험편의 굽힘강도 저하에 주

요한 요인으로 밝혀진 샌드블라스팅 조건은 코팅 모재의 종류와 코팅층의 종류에 따라 다소 달라질 수 있으며, 샌드의 메시(mesh)나 샌드블라스팅 압력 등을 적절히 조절함으로써 평활 시험편의 굽힘 강도 저하를 최소화시킬 수 있다.

따라서, 코팅층의 밀착력 유지와 함께 샌드블라스팅에 의한 표면 손상을 최소화할 수 있는 최적의 샌드블라스팅 조건을 구해내는 계속적인 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 생각된다. 또한, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 외에 다른 코팅재료를 선택함으로써, 내충격성 및 내마모성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

1. 입자 충격에 의해 발생한 콘크랙의 크기를 비교한 결과, 동일 충격 속도에 대해 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재에 발생한 콘크랙의 크기가 비코팅재에 비해 일정한 길이만큼 작게 나타났다.
2. 입자 충격에 의해 발생한 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재의 레디얼크랙과 레터럴크랙의 크기를 코팅유무에 따라 비교한 결과, 저속 영역에서는 거의 동일한 크기로 발생했으나, 충돌속도가 증가함에 따라 코팅재에 발생한 크랙이 비코팅재에 발생한 크랙에 비해 점점 작아지는 결과를 얻었다.
3. 표면손상의 주원인이 되는 크러싱과 표면입자의 탈락은 비코팅재에 비해 코팅재의 손상정도가 적게 나타났다. 따라서 표면 코팅층이 입자충격에 의한 표면마멸 방지에도 상당한 효과가 있을 것으로 판단된다.
4. 굽힘시험을 통해 입자충격에 의한 굽힘강도의 변화를 관찰한 결과, 코팅재의 굽힘강도가 비코팅재에 비해 약 15~20MPa 정도 향상되었으며, 특히, 직경 1mm 강구 충격에서 그 효과가 큰 것으로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학 ME 97-C-04)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계자에게 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 山田幸生, セラミックス ガスタピンの 研究開發, 日本機械學會誌, Vol. 93, pp.129-135 (1990).
2. D.A. Shockey, D.C. Erlich and K.C. Dao, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride at 1400°C", J. Metal. Sci., 16, pp. 477-482 (1981).
3. D.A. Shockey, D.J. Rowcliffe, C.D. Kim, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride", J. Am. Ceram. Soc., 73[6], pp. 1613-1619 (1990)
4. H.S. Shin, I. Maekawa and C.M. Suh, "Influences of Particle Property and Its Size on Impact Damage and Strength Degradation in Silicon Carbide Ceramics", Trans. of KSME, 16-10, pp. 1869-1876 (1992).
5. M.M. Chaudhri and C.R. Kurkjian, "Impact of Small Steel Spheres on the Surface of Normal and Anomalous Glasses" J. Am. Ceram. Soc., 69 [5], pp. 404-410 (1986).
6. S.M. Wiederhorn and B.R. Lawn, "Strength Degradation of Glass Resulting from Impact with Spheres", J. Am. Ceram. Soc., 60 [9-10], pp. 451-458 (1977).
7. A.G. Evans, "Strength Degradation by Projectile Impacts", J. Am. Ceram. Soc., 56 [8], pp. 405-409 (1973).
8. D.A. Shockey, D.J. Rowcliffe, Kim C. Dao and Lynn Seaman, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride", J. Am. Ceram. Soc., 73 [6], pp. 1613-1619 (1990).
9. H. Nakahira, J. Nagai and j. Takeuchi, "Physical Properties of Some Oxide Coatings by Low Pressure Plasma Spraying", Plasma-Technik Sympo., 2nd ed., Vol. 2, pp. 145-150 (1990).
10. 김성완, 김창근, "플라즈마 용사 기술의 새로운 이해", 기계와 재료, 4-1, pp. 84-93 (1992).
11. C.G. Knight, M.V. Swain and M.M. Chaudhri, "Impact of Small Steel Spheres on Glass Surfaces", J. Mater. Sci 12, pp. 1573-1586

- (1977).
12. M.M. Chaudhri and S.M. Walley, "Damage to Glass Surfaces by the Impact of Small Glass and Steel Spheres", *Philos. Mag.*, [Part] a, 37[2], pp. 153-165 (1978).
  13. R.M. Davies, *Proc. R. Soc. A*, 197, pp. 416 (1949).
  14. D. Tabor, "Hardness of Metals", London: Oxford Univ. Press (1951).
  15. S.P. Timoshenko and J.N. Goodier, "Theory of Elasticity", New York : McGraw-Hill, Chap. 12 (1970).
  16. R.F. Cook, G.M. Pharr, "Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.* 73(4), pp. 787-817 (1990).
  17. K.L. Johnson, "Engineering Plasticity", London: Cambridge Univ. Press, pp. 341 (1968).
  18. 서창민, 신형섭, 정성목, 황병원, "입자 충격에 의한 유리의 손상기구에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집, 제20권, 제6호, pp. 1903-1912, (1996).
  19. 서창민, 정성목, 이문환, "표면거칠기를 가진 유리의 입자 충격 손상기구에 관한 실험적 연구", 대한 기계학회 논문집, 제20권, 제7호, pp. 2196-2204, (1996).