

Al₂O₃-TiO₂ 플라즈마 코팅된 유리의 입자충격에 의한 손상기구

서창민* · 이문환** · 홍대영***

(1997년 3월 13일 접수)

Damage Mechanism of Particle Impact in a Al₂O₃-TiO₂ Plasma Coated Soda-lime Glass

Chang-Min Suh, Moon-Hwan Lee, Dea-Yeong Hong

Key Words : Plasma Coating (플라즈마 코팅), Impact Damage (충격손상), Lateral Crack (레터럴크랙), Cone Crack (콘크랙), Radial Crack (레디얼크랙), Critical Velocity (임계속도)

Abstract

A quantitative study of impact damage of Al₂O₃-TiO₂ plasma coated soda-lime glass was carried out and compared with that of the uncoated smooth glass specimen. The shape of cracks by the impact of steel ball was observed by stereo-microscope and the decrease of the bending strength due to the impact of steel ball was measured through the 4-point bending test. At the low velocity, cone cracks were occurred. As the impact velocity increases, initial lateral cracks were propagated on the slanting surface of a cone crack, and radial cracks were generated at the crushed site. When the impact velocity of steel ball exceeds the critical velocity, the contact site of specimen was crushed due to plastic deformation and then radial and lateral cracks were largely grown. Crack length of coated specimens was smaller than that of uncoated smooth specimen due to the effect of coating layer on the substrate surface. According to impact velocity, the bending strength of coated specimens had no significant difference, compared with that of the uncoated smooth specimen. But this represents that the bending strength of coated specimens was increased, considering the effect of sand blasting damage which was performed to increase the adhesion force of coating layer.

1. 서 론

현재 사용되어지고 있는 기계 구조물 가운데 제트엔진과 가스터빈의 터빈블레이드는 상당한 고온 환경에서 사용되고 있다. 따라서, 이러한 고온 환경에서의 고효율성을 달성하기 위해서는 최근 주로

사용되고 있는 내열 합금강에서 새로운 대체 재료로의 소재변화가 요구되며, 특히 내열성이 매우 우수한 세라믹 재료가 사용될 것으로 전망된다.

그러나, 이러한 세라믹 재료의 경우 파괴인성치가 매우 낮고 재료표면 또는 내부에 존재하는 결함에 따라 기계적 강도가 민감하게 변하며 특히 충격에 약하다. 만약 세라믹 소재의 터빈을 사용한 제트엔진에 수 백 μm 정도의 입자가 고속으로 유입될 경우 표면의 손상이 예상되며, 만일 표면입자가 탈락된다면 뒷부분의 터빈블레이드의 연속적인 손

*회원, 경북대학교 기계공학과

**회원, 구미전문대학 자동차과

***회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

Table 1 Mechanical properties of specimen and particle.

Material		Young's modulus (GPa)	Hardness (Hv)	Specific Gravity	Ultimate Strength (GPa)	K _{1c} (MPa√m)	Poisson's ratio (ν)
Specimen	Soda-lime glass	70	560	2.6	-	0.75	0.2~0.27
Particle	Steel	208	880	7.83	1.7	-	0.3

Table 2 Conditions of sand blasting.

Particle	Particle size	Target distance	Impact angle	Blasting pressure
Al ₂ O ₃	≤250 μm	100 mm	90°	2.943×10 ⁵ Pa

상까지도 일으킬 수 있다. 또한 수 십내지 수 μm의 입자가 유입된다면 장시간 사용에 따른 에로존(erosion)의 문제도 고려되어야한다.

이러한 세라믹 재료의 입자충격에 의한 손상방지를 위해서 최근 비약적으로 발전하고 있는 플라즈마 코팅기술을 이용한 방법이 대안으로 대두되고 있다. 즉, 구조용 세라믹 소재의 표면에 내충격성이 우수한 세라믹 분말을 플라즈마 용사코팅함으로써 손상방지가 가능하다. 최근 미국과 일본에서 유리^(1~3) 및 세라믹^(4~9)의 충격에 대한 정성적인 연구가 활발하게 수행되고 있지만 정량적인 분석은 아직 미미한 편이다. 특히 국내에는 아직도 많은 연구를 통한 자료의 축적이 필요한 실정이다.

본 연구의 대상재질은 취성재료이면서 충격에 의한 크랙생성 기구가 세라믹과 유사하며 관찰이 용이한 유리를 선택하였다. 그리고 유리표면에 세라믹층 충격저항 및 내마모성이 매우 우수한 Al₂O₃-TiO₂를 플라즈마 용사코팅한 시편을 제작하여 입자 충격시험을 행하였다. 또한 비교 자료를 얻기 위해 코팅하지 않은 유리에 대해서도 입자충격시험을 실시하였다. 충격시험후 충격속도와 충격입자의 크기에 따라 유리내부에 발생하는 크랙의 종류와 크기를 정성적으로 분석하였고 그 형상을 코팅 반대면에서 실제 현미경으로 관찰, 촬영하였다. 또한 충격입자가 충돌한 표면상태는 표면거칠기 테스트로 분석하였으며, 충격시험한 시편을 4점 굽힘시험하여 입자충격손상에 따른 잔류굽힘강도를 평가하였다.

따라서, Al₂O₃-TiO₂ 코팅된 세라믹재의 내충격성을 입증하고, 세라믹 가스터빈의 터빈블레이드와 같은 고속 회전체에 이러한 코팅법을 이용함으로써 입자충돌에 의한 손상을 최소화하는데 연구목적

두었다.

2. 실험방법

2.1 충격입자와 시험편 모재

본 실험에서 사용한 충격입자는 탄성계수와 경도가 비교적 높고 형상이 완전한 구형으로 가공된 볼베어링강인 STB2로서 직경 1 mm, 2 mm의 것이다. 또 코팅 시험편의 모재는 두께 5 mm인 일반 상업용 유리(soda-lime glass)이며, 이것을 판상모양인 100×15(mm)의 치수로 절단하여 충격 시험편으로 사용하였다. Table 1은 시험편 모재인 유리와 충격입자에 대한 기계적 물성치를 나타내고 있다.

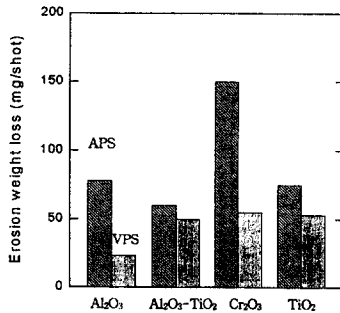
2.2 코팅과정 및 코팅층의 특성

입자충격 시험편은 시험편 유리의 한쪽면을 샌드블라스팅(sand blasting)한 후, 그면에 Al₂O₃-TiO₂ 물질을 0.1 mm 두께로 플라즈마 용사코팅하여 사용하였다. 플라즈마 용사코팅은 물리적 증착코팅(PVD)보다 코팅층이 두껍고 모재에 전압을 걸어 주지 않는 비전도 아크법(non-transferred arc)이기 때문에 코팅층과 모재의 밀착력 강화를 위해 표면 거칠기를 주는 샌드블라스팅 과정을 거친다.

Nakahira 등⁽¹⁰⁾에 의한 미시적 관찰에 의하면 Al₂O₃-TiO₂ 코팅막 단면은 박막이 여러 겹으로 된 층상구조를 하고 있고, 층과 층사이에는 기공을 가지고 있으며, 이러한 기공들이 모재에 대해 내충격성을 제공하는 것으로 보고하고 있다. 여기서 기공율은 플라즈마의 분출속도에 의해 조절이 가능한 것으로 보고된 바 있다. 본 실험에 사용된 Al₂O₃-TiO₂의 경우, Fig. 1에 보여지는 바와 다른 세라믹

Table 3 Conditions of plasma spraying.

Coatng powder	Current	Flow quantity (Ar)	Flow quantity (H ₂)
Al ₂ O ₃ (60%) -TiO ₂ (40%)	650 A	60 l/min	12 l/min
Powder size	Target distance	Feed quantity (Al ₂ O ₃ -TiO ₂)	Feed quantity (Ar)
15 ~ 45 μm	70 mm	25 g/min	8 l/min

Fig. 1 Durability of impact for various ceramic material.⁽¹⁰⁾

재료에 비해 내충격성이 매우 우수한 것으로 나타나고 있다. 여기서, APS는 대기압 플라즈마 코팅을 VPS는 저기압 플라즈마 코팅조건을 의미한다.

유리표면의 손상정도를 알기위해 현미경 관찰과 표면거칠기 테스트를 실시하였으며, Table 2는 샌드 블라스팅의 조건을 보여주고 있다. 그 결과 표면에 미세한 소성변형이 생겼고, 표면거칠기 Rmax는 최대 50 μm를 넘지 않았으며, 크랙은 생성되지 않았다. Al₂O₃-TiO₂ 플라즈마 코팅조건은 Table 3에 나타냈으며, 플라즈마 코팅장비로는 프랑스 2PS社의 80 μm급 "Hexaplasma"를 사용하였다.

2.3 충격시험장치

본 실험에서는 입자충격시험장치⁽¹⁴⁾로서 압축 공기를 이용하는 에어건(air gun)을 사용하였다.

먼저 10기압 용량의 공기압축기에서 압축된 공기를 압력조절기(regulator)를 통해 필요로 하는 압력으로 축압기(accumulator)에 저장하고, 직경 1 mm, 2 mm 강구가 들어갈 수 있도록 만든 캐리어(carrier)에 강구를 싣는다. 강구가 싣린 캐리어를 배럴 앞부분에 장착한 다음 솔레노이드밸브를 순간적으로 개폐하여 캐리어를 가속시켜서 배럴 끝부분의 스톱퍼(stopper)에 부딪치게 하면 강구는 관성력에 의해 캐리어를 나와 시편에 충돌하게 된다. 이

때 강구의 충돌속도는 두개의 광센서와 오실로스코프로 캐리어의 속도를 측정한 값으로 하였으며 오차를 줄이기위해 가능한 광센서 사이의 거리를 작게하여 배럴의 끝부분에 장착하였다.

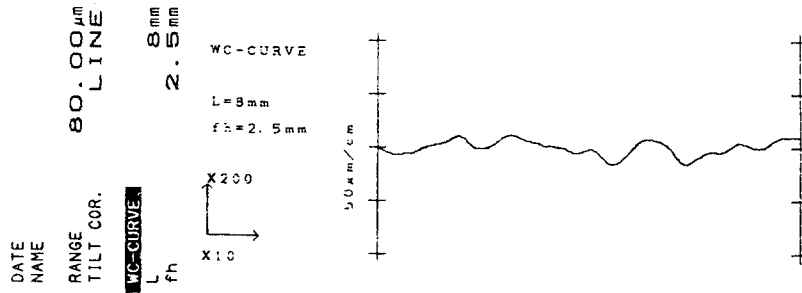
솔레노이드 밸브는 10기압 용량의 것을 사용하였고 배럴은 광센서의 감지를 위해서 투명한 아크릴 재질로 된 외경 12 mm, 내경 8.3 mm, 길이 1,550 mm의 것을 사용하였다.

캐리어는 가공이 쉬운 플라스틱 재질로 직경 8 mm, 길이 10 mm이고, 중앙에는 각 강구의 크기에 맞는 구멍을 5 mm 깊이로 가공하여 사용하였다. 여기서 캐리어 중앙 홈(hole)부분의 직경은 강구가 캐리어를 나오는 동안 속도 손실을 최대한 줄이기 위해 강구의 직경보다 10%정도 크게 가공하였다. 또한 속도조절은 특정한 속도값이 아닌, 압력조절에 의한 간접적인 조절방식을 택하였다.

3. 실험결과 및 고찰

충격시험을 행하기 전 샌드블라스팅된 모재와 Al₂O₃-TiO₂로 코팅된 시험편에 대해서 표면상태를 알아보기 위해 표면거칠기 테스트를 실시하였다. Fig. 2는 이러한 표면거칠기 테스트의 결과로서 보는 바와 같이 코팅된 시험편이 모재보다 표면 상태가 매끄러움을 알 수 있다. 또한, Fig. 3은 Al₂O₃-TiO₂ 코팅된 시편의 코팅면의 상태를 보여주고 있다.

이와 같은 코팅 시험편에 대해서 90°의 각도로 충격시험을 행하였고, 이때 발생한 여러 종류의 크랙을 강구의 직경과 충격속도 범위에 따라 Fig. 4에 개략적으로 나타내었다. 또한 비코팅 평활층에 대해서도 같은 방법으로 충격시험을 행하여 각종 크랙의 크기와 잔류굽힘강도를 코팅재와 상호 비교함으로써 코팅층의 영향을 분석하였다.



(a) Sand blasted specimen

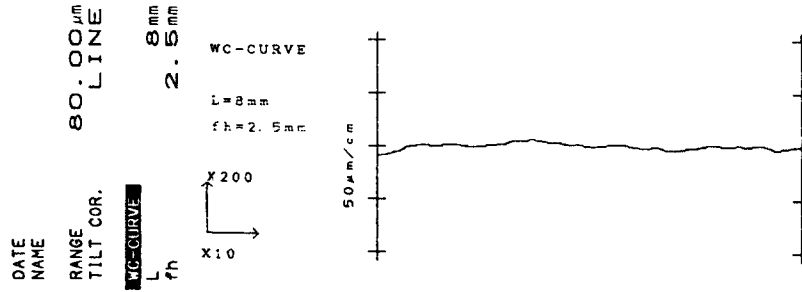
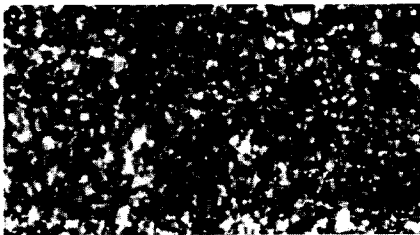
(b) Al₂O₃-TiO₂ coated specimen

Fig. 2 Surface roughness test results for sand blasted specimen.

Fig. 3 Photograph of surface shape of Al₂O₃-TiO₂ coated specimen.

3.1 각종 크랙의 성장

3.1.1 링크랙

비교적 저속 충돌에서 생성되는 링크랙(ring crack)은 Al₂O₃-TiO₂ 플라즈마 코팅재에서는 명확하지 않았다. 평활재의 경우 링크랙은 시험편 표면에 완전한 원의 형태로 뚜렷이 나타나지만^(13, 14) 코팅재의 경우 코팅된 샌드블라스팅 처리에 의해 표면에 미세한 소성변형 결함에 의해서 링형태의 크랙이 형성되지 못한 것으로 보인다.

헤르쯔접촉이론(Hertz's contact theory)에 의한 구형 입자가 평판에 하중을 가할 때 하중분포는 헤르쯔분포를 따르며, 평판 표면에 생기는 응력분

포는 접촉면 내부는 반경응력(radial stress)이 압축응력이고, 외부는 인장응력이 된다. 이때 최대 압축응력은 접촉면의 중앙에, 최대 인장응력은 접촉면의 바깥 경계면에 생긴다.

Johnson 등⁽¹¹⁾은 재료내 내부마찰을 도입하여 수정한 헤르쯔이론을 제시하였는데 구형 압입자(spherical indenter)의 탄성계수가 평판(flat)의 탄성계수보다 클 경우 최대 반경인장응력이 접촉면의 바깥쪽에 발생하는 것으로 보고하고 있다.

구형 입자충격의 경우 매우 짧은 시간내에 하중의 크기가 변하기는 하나 본 실험이 입자의 탄성영역에서의 충격이므로 최대 충격하중이 작용한 시점에 대해서 Johnson이 수정한 헤르쯔이론을 적용하면 링크랙의 발생을 설명할 수가 있다. 즉, 최대 충격하중이 작용했을 때 접촉면 바깥의 최대 인장응력이 재료의 인장강도를 넘으면 링크랙을 형성한다고 볼 수 있다. 그러나, 본 실험에서와 같이 표면이 매끈하지 못한 경우는 표면에 응력분포의 확산이나 불규칙성에 의해서 링크랙이 생성되지 않은 것으로 추정된다.

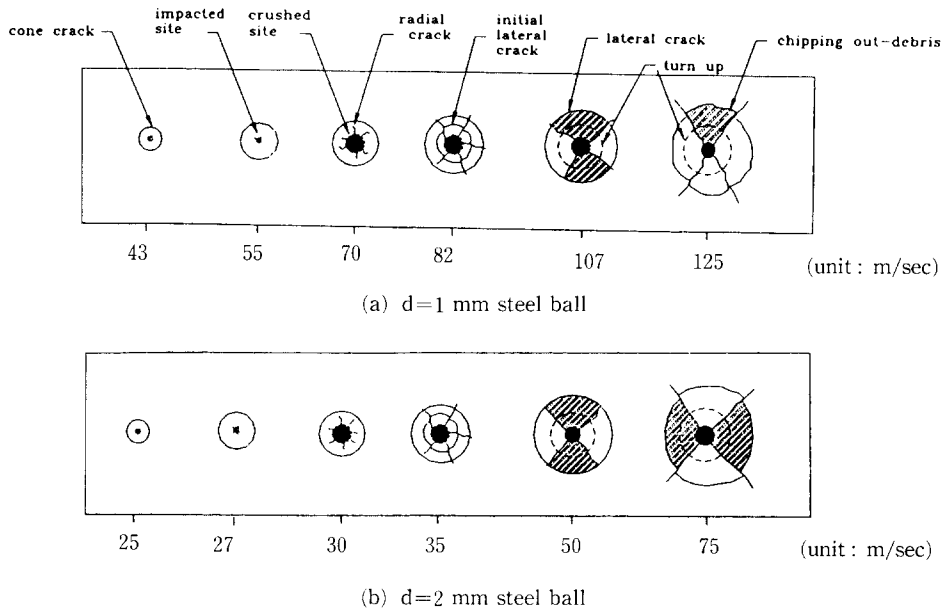


Fig. 4 Variation of crack pattern for coated specimen according to impact velocity and ball diameter

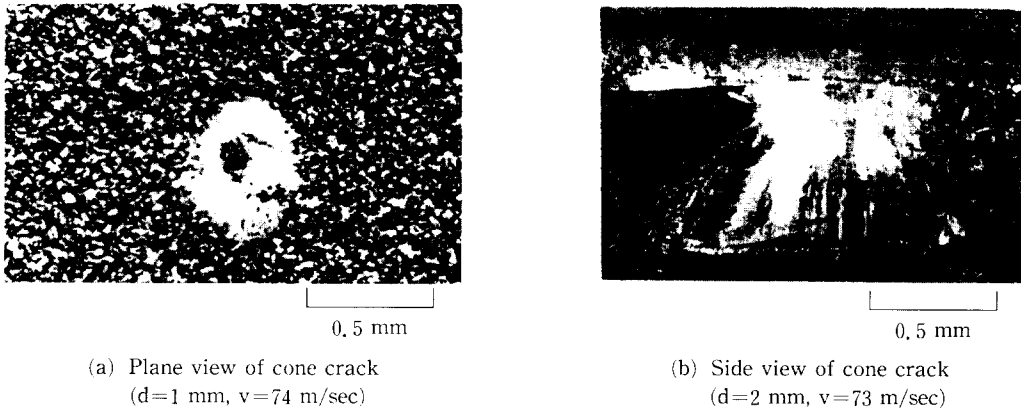


Fig. 5 The shape of cone crack.

3.1.2 콘크랙의 발생 및 성장

현미경 관찰에 의하면 용사코팅된 시험편에 발생한 콘크랙은 Fig.5(a)와 같이 모양이 불규칙한 링 크랙을 표면균열의 발생기점으로 하여 표면과 약간의 경사를 이루거나, Fig.5(b)와 같이 일부는 표면과 약 45°경사를 이루면서 시험편 내부로 성장하는데 평활재의 콘크랙과 별다른 형상의 차이는 없었다. 이러한 콘크랙 발생의 임계속도는 2 mm 강구 충격의 경우 비코팅 평활재가 37 m/s, 코팅재가 29.6 m/s로 나타났으며, 1 mm 충격의 경우는 각각 45 m/s, 44.2 m/s로 나타났다.

이러한 형상의 콘크랙에 대한 균열성장 구동력은 콘크랙이 생성될 상호면에서 생기는 마찰력이 모드 I에 의한 균열성장의 핵을 제공한다⁽¹²⁾고 하나, 이렇다할 구체적이고 확연한 이론적 뒷받침은 아직 없다. 그러나 앞에서 언급한 정적 압입에 대한 헤르쯔 응력분포를 입자충격에 적용하면 콘크랙의 성장기구에 대해서 추측이 가능하다.

즉, 최대 충격하중이 가해질 때까지의 시간이 매우 짧기 때문에 압축응력은 충격방향으로의 전파는 빠르나 측면방향으로의 전파는 느리므로 길이방향으로 긴 타원형의 응력분포를 이루고 접촉면 주위

의 표면부는 시험편 주위에 대한 구속력 내지는 정지 관성력에 의해서 정적 압입보다는 훨씬 큰 인장응력 분포의 골(valley)이 형성될 것으로 추정된다. 충격속도가 증가할수록 표면과 콘크랙의 각이 커지는 현상은 이를 뒷받침한다고 볼 수 있다. 이러한 콘크랙을 충격입자 크기, 코팅의 유무에 따라 충격속도와 콘크랙 길이에 대한 관계로 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, 콘크랙의 크기는 콘크랙의 양 끝단 사이의 거리로 정의하였다.

Fig. 6에서 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 플라즈마 코팅시험편에 대하여 직경 1 mm, 2 mm 강구 입자충격에 의해 생긴 콘크랙의 크기를 비교해 보면, 2 mm 강구의 경우 1 mm의 경우보다 콘크랙의 길이가 낮은 충격속도에서도 크게 증가함을 알 수 있다. 또 1 mm 강구는 충격속도에 의한 콘크랙의 크기가 선형적으로 증가함에 비하여 2 mm의 경우에는 분산폭이 커 비교적 불안정한 균열성장을 보이고 있다.

또한, 직경 1 mm과 2 mm 강구 입자 충격에 대한 본 연구에서 실시된 코팅재와 비코팅 평활재간의 입자 충격속도에 따른 콘크랙의 길이 분포를 비교하면, 코팅재쪽이 비코팅 평활재에 비해서 콘크랙의 길이가 작아지는 경향을 확인할 수 있다. 또, 각 자료를 선형식으로 나타낼 때 대표 1차 함수의 기울기가 서로 거의 평행하므로 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 플라즈마 코팅의 효과가 상당히 크며 콘크랙의 길이가 크랙 발생초기에는 비코팅 평활재에 비해 50% 정도 감소함을 알 수 있다.

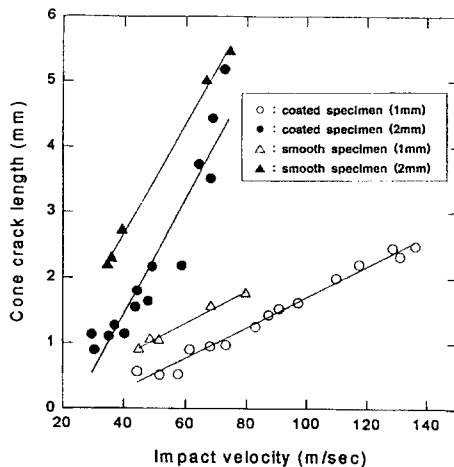


Fig. 6 Comparison of cone crack lengths on the impact experiment in $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ coated specimen and uncoated smooth specimen.

위에서 언급한 바와 같이 직경 1 mm와 2 mm 강구 입자충격에서 충격속도와는 관계없이 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 플라즈마 코팅된 시험편의 경우는 비코팅재보다 콘크랙의 길이가 약 10~50%까지 감소하므로 플라즈마 코팅의 효과가 콘크랙의 균열 성장을 크게 억제하는 장점을 가진 것을 알 수 있다.

이러한 콘크랙 성장의 억제효과는, 저속에서는 모재인 유리보다 경도가 큰 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 코팅피막이 강구를 잘 반사시켜 반동(rebound)운동 에너지를 크게 함으로써 같은 속도대에서 콘크랙의 크기가 작은 것으로 분석된다. 고속 충돌의 경우는 현미경 관찰결과 플라즈마 코팅막의 손상이 크기 때문에 충격입자의 반사현상보다는 코팅층의 큰 기공성으로 인한 충격에너지 흡수효과가 콘크랙의 성장을 지연시킨 것으로 보인다.

3.1.3 레디얼크랙의 발생 및 성장

유리 평판이 탄성범위에서 입자 충격을 받을 경우 원주방향으로 압축응력이 작용하지만 시험편이 소성변형을 하게 되면 반대로 인장응력 상태로 되며, 이때 소성변형이 발생하게 된다. 취성재료에서는 구형 입자의 압입에 의한 소성변형을 표면분쇄(crushing)라 하며, 그 형상의 예를 Fig. 7에 나타내었다. 크러싱은 원주방향 응력상태의 전환점이 되며, 레디얼크랙(radial crack)은 원주방향 응력이 인장응력이 되는 크러싱 이후에만 나타나게 된다. 실제적으로 현미경 관찰에 의하면 코팅재의 경우 링크랙 존재의 모호성으로 인한 초기 크러싱의 발생여부가 분명치 못하므로 초기 레디얼크랙의 발생유무는 그리 명확하지 않다.

레디얼크랙의 길이는 가장 큰 균열에 대해 강구 접촉부의 중앙에서 최외곽 끝단으로 정의하였으며, 강구 입자의 크기, 코팅유무에 따라 충격속도에 대해서 그 크기를 분석하였다. 또한 그 형상의 예를



Fig. 7 Morphology of radial crack and lateral crack from back direction ($d=1$ mm, $v=128$ m/sec).

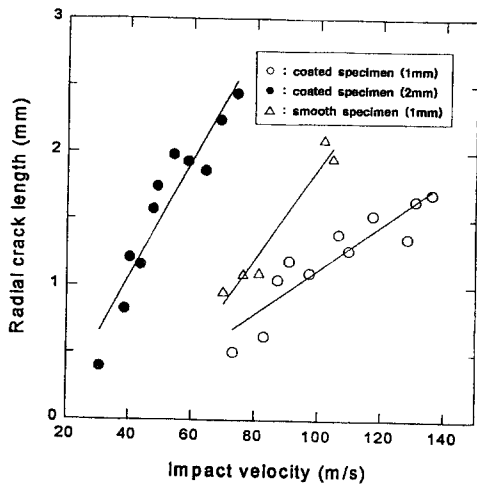


Fig. 8 Variation of radial crack lengths occurring in coated specimens according to impact velocity and steel ball diameter.

Fig. 7에 나타내었는데 보통 2개 이상의 레디얼크랙이 성장하며 불규칙한 형상을 보이고 있다.

Fig. 8은 Al₂O₃-TiO₂ 플라즈마 코팅재에 대해서 직경 1 mm, 2 mm 강구 충돌에 의한 레디얼크랙의 길이를 충격속도에 따라 비교한 것이다. 두 자료의 경우 공히 분산폭이 비교적 크게 나타나고 있다. 이것은 레디얼크랙의 정의상 가장 긴 균열의 길이를 그래프상에 나타냈기 때문이라 생각되며 실제로 생긴 여러 개의 레디얼크랙들은 상호간에도 가장 긴 레디얼크랙을 기준하여 20~30% 정도 길이의 차이가 존재하고 있다.

그러므로 이러한 분산정도는 입자충격시 실제의 원주방향의 응력에 대한 비대칭적이고 불규칙한 정도와 재료의 불균질성을 의미하게 된다. Fig. 6의 콘크랙과 비교했을때 레디얼크랙의 경우, 2 mm 강구 충격이 1 mm 강구 충격에 비해서 균열의 크기 차이가 훨씬 큰 특징을 보이고 있다. 이는 레디얼크랙을 발생시키는 원주방향의 인장응력이 평판이 압입된 부피와 관련이 되기 때문인 것으로 보여진다.

Fig. 8은 1 mm 강구 충격에 있어 코팅재와 비코팅 평활재의 레디얼크랙에 대한 그래프를 나타내고 있다. 코팅재에 대한 데이터의 분산폭이 다소 있지만 충격속도가 증가할수록 평활재와 균열의 크기 차가 커지고 있다. 이는 콘크랙의 경우 1차 대표함수의 두 기울기가 평행한 것과는 다른 양상을 보

이는 것으로, 콘크랙의 경우는 균열발생 초기에만 코팅층이 보호역할을 할뿐 성장과정에는 영향을 받지 않기 때문이다.

그러나 레디얼크랙의 경우는 표면분쇄 경계면에서 균열이 발생하여 표면을 따라 내부로 성장하므로 균열성장과정에서 표면 코팅층의 손상을 의미하게 된다. 그러므로 Al₂O₃-TiO₂로 코팅된 경우에는 레디얼크랙의 균열성장이 코팅층에 의하여 억제된 것으로 해석된다.

즉, 레디얼크랙은 균열성장 구동력이 원주방향의 인장응력이므로 충돌시 소성영역에서 압입 정도에 따라 다르므로 코팅층의 경도가 높을 경우에는 강구의 압입 부피를 줄임으로써 레디얼크랙의 성장을 억제할 수 있다.

본 실험의 코팅재 Al₂O₃-TiO₂ 세라믹의 경도는 Nakahira 등⁽¹⁰⁾의 비슷한 코팅조건에 의한 마이크로 비커스경도시험에 의하면 693 Kgf/mm² 정도이다. 따라서 모재인 유리의 경도치 560보다 코팅층의 경도가 크므로 레디얼크랙의 성장 지연효과는 상당한 타당성이 있다. 또한 코팅층의 경도는 플라즈마 코팅의 경우 코팅기공률과 관계가 있으므로 위의 세가지 요인은 레디얼크랙의 성장에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

레디얼크랙은 링크랙이나 콘크랙과는 달리 표면입자 탈락과 관계가 있으므로 기계 구조물의 사용 환경에서 충격입자의 크기, 충격속도 범위에 따라 코팅조건 조절에 의한 최적 코팅두께 및 기공율 설정은 충격손상을 최소화하는데 좋은 효과가 있을 것으로 예상된다.

3.1.4 레터럴크랙의 발생 및 성장

코팅 시험편에 크러싱이 발생하게 되면 표면으로부터 약간의 깊이에 있는 콘크랙의 경사면으로부터 원주둘레 전체에 걸쳐 표면근처까지 성장하는 균열이 생기는데 이를 초기 레터럴크랙(initial lateral crack)이라 한다. 또한 충격속도가 조금 더 증가하게 되면 콘크랙의 끝부분의 방향이 표면으로 전환되는 턴업(turn up)현상을 일으키게 되고 이러한 균열선단이 표면 근처까지 성장하면 레터럴크랙을 형성하게 되는데, 이 과정을 Fig. 9에 나타내었다.

초기 레터럴크랙은 표면까지 완전히 성장하지 못한 경우도 있으나 표면까지 성장하였다더라도 표면입자 탈락현상이 없는 경우가 대부분이며 이것은 코팅층까지 레터럴크랙이 진전하지 않았기 때문이다. 즉, 시험편의 모재인 유리는 밀도가 비교적 큰

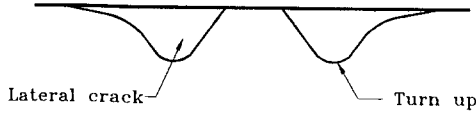


Fig. 9 Schematic diagram of turn up.

데 비해 코팅층은 기공률이 50% 정도로 충전율이 낮아 충격압이 코팅층에서 분산되었기 때문에 주된 균열을 형성하지 못한 것으로 생각된다.

Fig. 7은 이러한 래터럴크랙의 평면적 형상을 나타내며 측면 관찰결과 균열선단이 모재 표면까지 완전히 성장하였으나 코팅층에 의해서 입자탈락은 일어나지 않았다. 이러한 원인은 앞에서 언급한 코팅층의 기공률과 관련된 것으로 판단된다.

Knight⁽²⁾에 의한 일반유리의 입자충격 순간의 고속 카메라 촬영에 의하면 초기 래터럴크랙과 래터럴크랙은 충격입자가 반사되는 제하과정에서 균열이 생성, 진전된다. 이에 대한 분석은 현상학적인 관찰만으로 이루어졌으며 균열성장 구동력 및 응력에 대한 해석은 이루어지지 않고 있다. 그러나 위의 두 가지 균열의 경우 균열선단이 표면으로 향하여 있고 표면과 완전한 기공기를 이루고 있는 것으로 보아 스프링백현상에 의한 모드 I의 균열성장 특성을 가지는 것으로 추정된다.

실제로 래터럴크랙은 주된 균열 외에도 그 밑부분에 콘크랙 사면에서 표면방향으로 성장한 몇 개의 작은 균열들이 존재하며 콘크랙 끝단에서도 종종 턴업에 의한 래터럴크랙이 성장하게 되는데 이는 비교적 주위의 구속력이 적은 표면 부분이 충격입자가 반사되는 과정에서 스프링백현상을 일으킨 것으로 판단된다. 또한 표면각이 크고 깊게 성장한 콘크랙에서는 보통 턴업현상이 발생하지 않게되는데 이는 스프링백현상이 발생하기엔 주위 구속력이 크기 때문인 것으로 보인다.

본 실험에서는 래터럴크랙과 함께 성장한 부채꼴 모양의 래터럴크랙중 반경방향 길이가 가장 큰 균열의 반경을 그 크기로 정의하여 측정하였다.

Fig. 10은 1 mm 강구와 2 mm 강구로 충격시킬 때 코팅 시험편에 발생한 래터럴크랙의 크기를 충격속도에 따라 비교한 그래프이다. 다소 분산폭이 있지만 충격속도에 대해 선형적으로 증가하는 것으로 평가된다. 또 충격속도에 대한 균열크기의 증가율이 2 mm 강구 충격의 경우가 1 mm인 경우보다 훨씬 크며 표면입자 탈락에 충격입자가 미치는 영향은 매우 큰 것으로 분석된다.

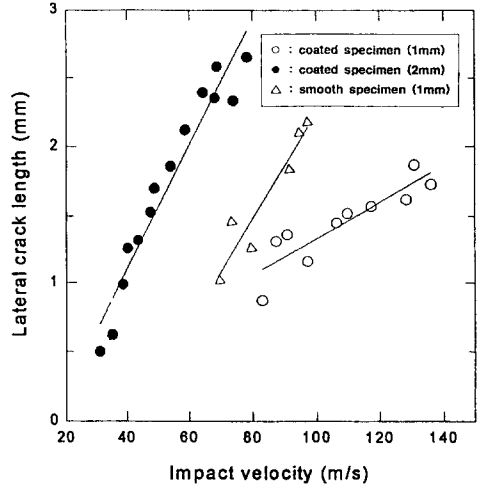


Fig. 10 Variation of lateral crack lengths occurring in coated specimens according to impact velocity and steel ball diameter.

또한, 1 mm 강구 충격에 의한 코팅재와 평활재에 발생한 래터럴크랙의 크기 분포를 비교해 보면, 평활재와 코팅재의 균열발생 초기에 래터럴크랙이 나타나는 속도는 15 m/sec 정도 차이가 나고 같은 충격속도에서는 코팅재의 경우가 균열의 크기가 뚜렷이 작게 나타나며, 증가 기율기도 작아져 고속 충격으로 갈수록 평활재에 발생한 균열의 크기와 큰 차이를 나타내고 있다.

래터럴크랙이 곧 표면입자 탈락을 의미하는 것은 아니지만 2차적인 응력이 가해지면 입자 탈락을 초래할 가능성이 커지고 때로는 그 자체가 탈락 입자일 수도 있으므로 기계 구조물 손상(erosion 등)과 가장 밀접한 균열의 형태라고 할 수 있다.

따라서 입자충격 환경에 있는 경우라면 세라믹, 유리 등의 극취성재에서는 래터럴크랙의 기동을 반드시 고려해야 한다. 본 연구의 Al₂O₃-TiO₂의 플라즈마코팅 시험편의 입자충격시험 결과, 충격속도가 빠른 영역에서는 코팅층이 래터럴크랙 성장억제에 효과가 있으므로 표면입자 탈락방지에 좋은 결과를 기대할 수 있다고 판단된다. 특히, 사용 환경에 따라 코팅두께와 기공률 및 조성을 최적화한다면 표면입자 탈락에 따른 기계 구조물 손상을 최대한 줄일 것으로 기대된다.

3.2 강구 충격에 의한 굽힘강도의 변화

강구 충격에 의한 코팅재의 기계적 강도평가와 비코팅 평활재와의 비교를 위해서 4점 굽힘시험을

실시하였다. 실험방법은 ASTM D790에 준하였으며, 하중속도는 2.4 mm/min으로 하였다.

Fig. 11에는 충격시험을 하지 않은 코팅재와 비코팅 평활재에 대해 굽힘시험을 행하여 굽힘강도를 비교한 결과이다. 코팅재의 굽힘강도는 약 50~56 MPa으로 평활재보다 평균 20~25 MPa 정도로 평활재를 기준하여 약 30% 굽힘강도가 낮은 것으로 나타났다. 이것은 코팅재의 경우에는 코팅과정에서 코팅전 단계인 샌드블라스팅 작업에 의한 표면돌기의 영향인 것으로 분석된다.

즉, 샌드블라스팅 작업을 통한 표면처리과정에서 코팅 물질의 밀착력을 증가시키고와 함께 표면의 소성변형에 의한 미세한 결함을 유발하게 되는데 이러한 결함들이 굽힘강도 저하의 주원인이 된 것이다. 코팅층 또한 굽힘강도 향상의 원인이 될 수 있으나, 본 실험의 코팅재의 경우 플라즈마 코팅조건이 기공률이 낮은 경우이기 때문에 별다른 영향을 미치지 않은 것으로 보인다.

과단부는 시험편 전체가 상부지그의 접촉선 사이의 순수 굽힘응력이 작용하는 임의 선상에서 과단됐고 과단면은 현미경 관찰결과 최대 인장응력을 받는 시험편 아랫부분이 극미의 소성변형을 했을 뿐 대부분의 면적이 취성파괴의 형태로 나타났다.

Fig. 12는 1 mm 강구와 2 mm 강구 충격에 의한 코팅재의 굽힘강도 변화를 충격속도에 따라 나타낸 그래프이다. 두 경우 공히 충격시험하지 않은 코팅재의 굽힘강도인 50~60 MPa에서 실험치가 시작되어 급격한 감소를 보이다가 다시 완만한 감소를 보

이고 있다. 입자의 크기에 따라서는 2 mm 강구 충격의 경우가 1 mm 강구 충격보다 낮은 속도분포대에서 굽힘강도의 급격한 저하를 보이고 같은 속도대에서는 비교적 큰 강도의 차이를 보이고 있는데 이는 굽힘강도의 가장 큰 영향을 미치는 각종 균열의 크기와 관련되어 있기 때문이다. 또한 두 경우 모두 비교적 큰 분산 폭을 나타내는데 취성재인 모재의 특성과 시험편 절단시 측면 모서리 부위의 미소결함에 기인한 것으로 보인다.

Fig. 13은 2 mm 강구 충격에 의한 코팅재 및 평활재의 강도변화를 나타낸 그래프이다. 다소 분산 폭이 있지만 코팅재에 대한 1 mm 강구 충격에 비하여 초기의 뚜렷한 굽힘강도 저하와 고속 충격에서 비교적 완만한 강도 저하를 나타내며, 실험한 전체 속도 분포대에 걸쳐 분산폭내에서 거의 같은 굽힘강도를 보이고 있다.

굽힘시험에 의한 충격 시험편의 파면은 모두가 충격손상부를 포함한 하나의 일직선이 파단선이 되었는데 코팅재의 경우 충격손상부 외에도 샌드블라스팅한 소성변형 결함부가 전체에 걸쳐 포함되어 있다. 따라서 같은 충격속도에서 평활재의 비교적 큰 손상이 코팅재의 경우의 위의 두 가지 손상과 같은 것으로 비교된다.

Fig. 11에서 두 종류의 시험편이 20~25 MPa 정도의 굽힘강도 차이를 나타내는데 이러한 코팅재의 굽힘강도 저하가 코팅층을 무시한 샌드블라스팅에 전적으로 기인한다고 가정하면, Fig. 13에서 코팅

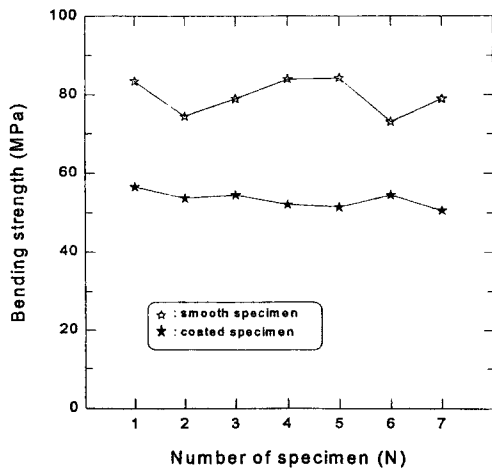


Fig. 11 Bending strength variation of coated specimens without a particle impact test.

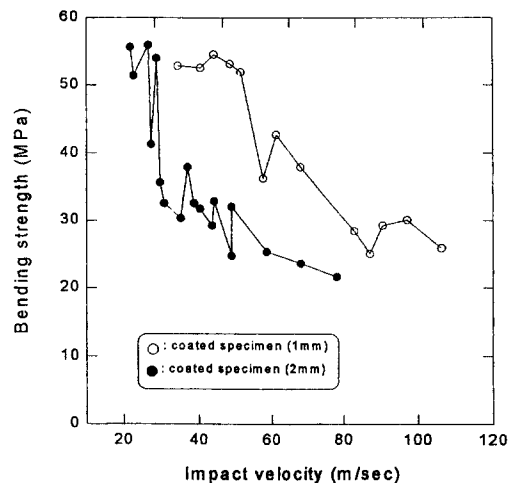


Fig. 12 Bending strength variation of coated specimens according to impact velocity and steel ball diameter.

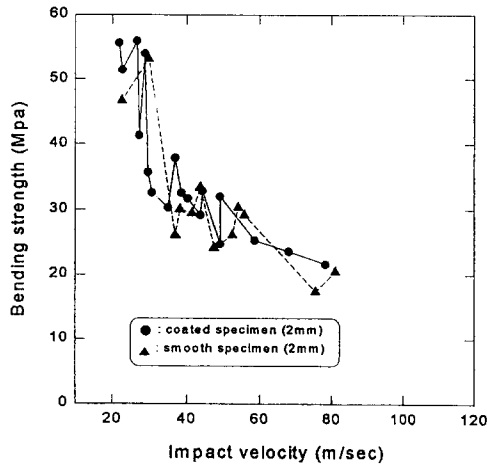


Fig. 13 Comparison of bending strength of coated specimen with that of smooth specimen when impacted by a 2 mm steel ball.

재와 평활재의 굽힘강도가 거의 같다고 할 때 코팅층은 20~25 MPa 정도의 충격에 의한 굽힘강도 저하를 방지하는 효과를 가진다고 할 수 있다.

이러한 효과는 본 실험의 플라즈마 코팅조건에 의한 코팅두께와 기공률 및 샌드블라스팅조건인 샌드입자크기, 샌드압일 경우이며 이러한 파라미터를 상호 적절히 변화시켜 코팅한다면 입자충격속도 등의 사용환경에 맞는 적절한 코팅을 함으로써 모재의 표면입자 탈락 및 기계적 강도 저하방지에 좋은 결과를 얻을 것으로 분석된다.

4. 결 론

Al_2O_3 - TiO_2 플라즈마 코팅된 유리와 비코팅 평활재 유리에 대한 입자충격시험을 행하여 현미경 관찰을 통한 균열길이를 측정하고 4점 굽힘시험을 실시하였다. 이를 통한 결과를 정성적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 강구 입자충격에 의해 각각의 충격속도 범위에서 코팅재에 발생한 콘크랙의 크기는 비코팅 평활재에 나타난 균열보다 일정 크기만큼 작게 나타났다.

(2) 코팅재에 성장한 레디얼크랙은 비코팅 평활재의 균열 크기와 비교하여 저속충격에서는 별 다른 차이가 없었지만 고속충격으로 갈수록 코팅층의 영향에 의하여 현저히 작아지는 경향을 나타내었다.

(3) 표면입자 탈락 및 에로존(erosion)과 관계가

깊은 레디얼크랙 크기는 코팅재의 경우가 비코팅 평활재와 비교하여 저속 충격에서는 큰 차이가 없었으나 고속충격으로 갈수록 훨씬 더 작아지는 경향을 보였다.

(4) 현미경 관찰과 표면거칠기 테스트 결과 코팅층의 기공률은 충격흡수에 좋은 결과를 갖는 것으로 나타났다.

(5) 입자충격에 의한 코팅재의 4점 굽힘시험결과 비코팅 평활재와 별다른 차이는 없었으나 코팅재의 샌드블라스팅 표면처리에 의해 존재하는 손상을 감안하면 굽힘강도 향상에 미치는 효과가 크게 향상되었음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학 ME 96-C-02)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Chaudhri, M. M. and Kurkjian, C. R., 1986, "Impact of Small Steel Spheres on the Surface of Normal and Anomalous Glasses," *J. Am. Ceram. Soc.*, 69 (5), pp. 404~410.
- (2) Knight, C. G., Swain, M. V. and Chaudhri, M. M., 1977, "Impact of Small Steel Spheres on Glass Surfaces," *J. Mater. Sci* 12, pp. 1573~1586.
- (3) Chaudhri, M. M. and Walley, S. M., 1978, "Damage to Glass Surfaces by the Impact of Small Glass and Steel Spheres," *Philos. Mag.*, (Part) a, 37 (2), pp. 153~165.
- (4) Evans, A. G., 1973, "Strength Degradation by Projectile Impacts," *J. Am. Ceram. Soc.*, 56 (8), pp. 405~409.
- (5) Shockey, D. A., Rowcliffe, D. J., Dao, K. C., and Lynn Seaman, 1990, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride," *J. Am. Ceram. Soc.*, 73 (6) pp. 1613~1619.
- (6) Evans, A. G. and Wilshaw, T. R., 1976, "Quasi-Static Solid Particle Damage in Brittle Solid -1.Observations, Analysis and Implications," *Acta. Metal.*, 24, pp. 939~956.
- (7) Shockey, D. A., Erlich, D. C. and Dao, K. C.,

- 1981, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride at 1400°C," *J. Metal. Sci.*, 16, pp. 477~482.
- (8) Cook, R. F. and Pharr, G. M., 1990, "Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramic," *J. Am. Ceram. Soc.*, 73(4) pp. 787~817.
- (9) Shin, H. S., Maekawa, I. and Suh, C. M., 1992, "Influences of Particle Property and Its Size on Impact Damage and Strength Degradation in Silicon Carbide Ceramics," *Trans of the KSME*, Vol. 16, No. 10, pp. 1869~1876.
- (10) Nakahira, H., Nagai, J. and Takeuchi, J., 1990, "Physical Properties of Some Oxide Coatings by Low Pressure Plasma Spraying," *Plasma -Technik Sympo.*, 2nd ed., Vol. 2, pp. 145~150.
- (11) Johnson, K. L., 1968, "Engineering Plasticity," London: Cambridge Univ. Press, pp. 341.
- (12) Bieniawski, Z. T., 1967, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 4, p. 407.
- (13) 서창민, 신형섭, 정성목, 황병원, 1996, "입자충격에 의한 유리의 손상기구에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제6호, pp. 1903~1912.
- (14) 서창민, 정성목, 이문환, 1996, "표면거칠기를 가진 유리의 입자충격 손상기구에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제7호, pp. 2196~2204.