

균열 길이와 코팅방법에 따른 Si₃N₄의 균열 치유 특성

남기우*† · 문창권* · 박상현** · 은경기** · 김종순***

* 부경대학교 신소재공학부, ** 부경대학교 대학원, *** NGE Tech

Characterization of Crack Healing of Si₃N₄ Ceramic Structures According to Crack Length and Coating Methods

Ki Woo Nam*†, Chang Kwon Moon*, Sang Hyun Park**, Kyung Ki Eun** and Jong Soon Kim***

* Division of Advanced Materials Science and Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

** Dept. of UR Interdisciplinary program of Mechanical Engineering, Graduate School, Pukyong Nat'l Univ.

*** 1545-5 Songjeong-dong, Gangseo-gu, Busan

(Received July 19, 2010 ; Revised August 27, 2010 ; Accepted September 1, 2010)

Key Words: Si₃N₄ Ceramics(질화규소 세라믹스), Bending Strength(굽힘 강도), Crack Healing(균열치유), Crack Lengths(균열길이), Coating Methods(코팅방법), SiO₂ Nano Colloid(SiO₂ 나노 콜로이드)

초록: 본 연구에서는 장균열을 가지는 Si₃N₄ 세라믹스의 균열 길이와 코팅 방법에 따르는 균열 치유 특성을 규명하였다. 약 100 ~ 500 μm의 균열 길이는 24.5 ~ 98 N의 하중을 사용하여 비커스 압자를 이용하여 만들었다. 24.5 N의 하중으로 만든 단균열의 경우, SiO₂ 나노 콜로이드 코팅된 균열재는 모재보다 약 140 % 증가한 가장 높은 굽힘 강도를 보였지만, 장균열은 모재보다 낮은 굽힘 강도를 나타내었다. 그러나 대부분의 장균열 시험편의 굽힘 강도는 균열재보다 약간 증가하였다. 이러한 결과에 따라서, 복수 압입에 의한 Si₃N₄ 세라믹스의 균열 치유 특성을 코팅방법에 따라 연구하였다. 장균열 시험편의 가장 효과적인 코팅 방법은 정수압코팅방법이었다.

Abstract: In this study, we analyzed the crack-healing characteristics of specimens; different crack lengths and coating methods of Si₃N₄ ceramic structures with long cracks were analyzed. Cracks with lengths of about 100-500 μm were obtained using a Vickers indenter for a load of 24.5-98 N. In the case of a crack obtained by applying a load of 24.5 N, the crack-healed specimen with SiO₂ nanocolloid coating exhibited the highest bending strength, which was higher than that of a smooth specimen by 140%, but the bending strength of a crack-healed specimen that had a SiO₂ nanocolloid coating and originally had multiple cracks was lower than that of a smooth specimen. However, when compared to the cracked specimens, the bending strength of most specimens with multiple cracks increased slightly. On the basis of these results, the crack-healing characteristics of Si₃N₄ ceramic structures with multiple indentations were studied for different coating methods. The most effective coating method for long-crack specimens was hydrostatic pressure coating.

1. 서론

질화규소(Si₃N₄)는 구조재료용으로 뛰어난 기계적 성질, 내마모성, 내식성 및 열적 특성 때문에 터보 차저 로터, 디젤엔진 부품, 공구류 및 베어링 등 산업에 많이 응용된다. 또한 고온고강도, 고내식, 고내마모가 요구되는 고온구조재, 터보 차저 로터, 디젤엔진 부품, 공구류, 절삭공구 및 베어링 등 산업에 많이 응용된다. 최근에는 각종 전자기계적 특성을 나타내는 세라믹스가 많이 발견

되고 응용되면서 전자기계적 기능성을 또 하나의 장점으로 가지고 있다. 그러나 구조용 세라믹스는 파괴인성이 낮아 깨어지기 쉬워 가공성이 나쁘고, 공정 제어가 어려운 단점도 있다. 이러한 낮은 신뢰성은 세라믹스의 적용에 제한이 생기므로, 적용범위를 넓히기 위해 신뢰성을 높이는 것이 중요하다. 질화규소를 비롯하여 일부 세라믹스는 균열 치유 능력이 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 공학적 응용면에서 구조부품에 대한 자기 균열 치유 능력은 신뢰성 증가와 정밀 검사, 기계 가공 및 연마 단가의 감소와 같은 큰 장점이 있다.^(5,6) Si₃N₄,⁽⁸⁻¹²⁾ SiC⁽¹³⁻¹⁵⁾ 및 Al₂O₃^(7,16)는 매우 흥미있는 균열 치유

† Corresponding Author, namkw@pknu.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

능력을 가진다. 균열 치유는 열처리에 의하여 표면에 형성된 SiO₂ 산화물에 의하여 이루어진다. 이와 같은 원리에 의하여 Si₃N₄는 SiO₂ 나노 콜로이드를 균열부에 코팅하여 1273 K, 대기중에 1시간 유지함으로써 시험편 표면에 도입한 약 100 μm의 예균열을 완전히 치유할 수 있었다.^(4,7) 하지만 SiO₂ 나노 콜로이드를 균열부에 코팅하는 방법에 따른 강도 향상에 대한 연구와 복수압입으로 도입된 장균열의 열처리 후의 균열 치유에 따른 강도 회복에 대한 연구는 아직까지 전무하다.

따라서 본 연구에서는 복수압입에 따른 균열길이와 SiO₂ 나노 콜로이드의 코팅 방법에 따른 Si₃N₄ 세라믹스의 균열 치유 거동에 대하여 연구하였다.

2. 재료 및 실험 방법

본 실험에 사용한 분말은 평균 직경 0.2 μm의 Si₃N₄와 평균 직경 0.27 μm의 SiC 분말이다. 소결 보조제는 33 nm의 Y₂O₃, 아나타제 TiO₂ 그리고 12 wt.%의 SiO₂ 나노 콜로이드가 사용되었다.

Table 1 Batch composition of specimens

Si ₃ N ₄ (wt.%)	SiC (wt.%)	Y ₂ O ₃ (PHR)	TiO ₂ (PHR)
80	20	5	3

PHR = Part per hundred resin

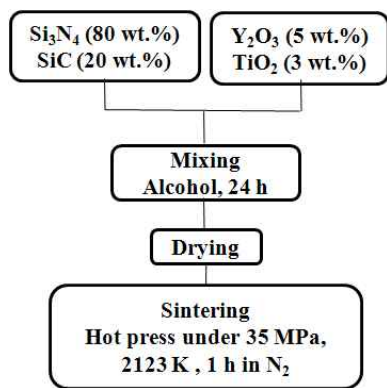


Fig. 1 Sintering flow chart

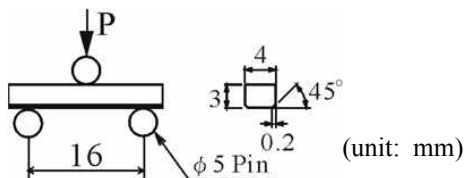


Fig. 2 Dimensions of the specimen and the three-point bending system used for this study

각 시험편의 조성을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 Si₃N₄ 세라믹의 소결 공정도를 나타낸다.

분말의 혼합은 Si₃N₄ 볼과 알코올을 첨가하여, 24시간 동안 실시하였다. 혼합한 분말은 용매가 증발할 때까지 진공로에서 건조시킨 후, 분말을 만들어 소결에 사용하였다. 분말의 소결은 N₂ 가스 분위기의 35 MPa 압력하에서 2123 K, 1시간 동안 유지시켜 고온 가압 소결(Hot-press)을 실시하였다. 생성된 소결체는 3 × 4 × 22 mm의 시험편으로 자른 후, 경면 연마하였다. 시험편의 모서리 부분은 가공 시에 미세 균열이 발생할 수 있으므로 45°의 각도로 모따기를 실시하였다. Fig. 2는 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

Fig. 3은 비커스 압입에 의해 생성된 균열의 형상을 보여준다. 예균열은 24.5 N의 하중을 사용한 비커스 경도기로 시험편 표면의 중앙부에 길이 약 100 ~ 500 μm의 균열을 만들었다. 예균열의 도입 후, 균열면 위에 SiO₂ 나노 콜로이드를 코팅하고 1273 K에서 1시간 동안 대기중에서 열처리 실시하였다. SiO₂ 나노 콜로이드는 773 K 이상에서 결정상 SiO₂를 형성한다.

모든 파괴 실험은 상온(RT)에서 3점 굽힘 시험하였으며, 시험편은 KS규격보다 약간 짧은 3 x 4 x 22 mm,⁽¹⁷⁾ 크로스헤드 속도 0.5 mm/min로 사용하였다. 그리고 SEM(Scanning electron microscope)을 사용하여 균열부를 관찰했으며, EDS(Energy dispersive X-ray spectroscopy)로 파괴 후에 표면의 Si, O의 양을 조사하여 강도 변화와의 상관성을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단균열의 균열 치유 특성

비커스 하중 24.5 N으로 도입된 시험편은 모재의 평균 굽힘 강도 이상을 회복하였으며, 하중에 크기에 따른 균열길이가 길어짐에 따라 강도 회복 정도를 알아볼 필요가 있었다. Fig. 4는 시험편 표면에 24.5 ~ 98 N의 비커스 하중으로 압입한 균열 길이에 따른 균열치유 특성을 나타낸 것이다. 모재(■)의 평균 굽힘 강도는 595 MPa를 나타냈으며, 모재에 SiO₂ 나노 콜로이드를 코팅하고 1273 K에서 1시간 동안 대기 중에서 열처리 실시한 열처리모재(□)의 평균 굽힘 강도는 약 1110 MPa의 값을 보여 186 % 상승하였다. 24.5

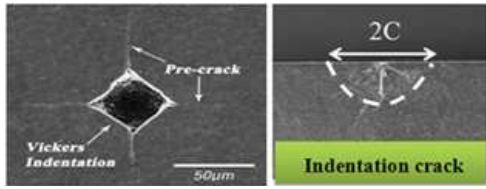


Fig. 3 Vickers indentation

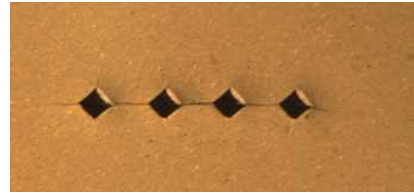


Fig. 5 The microscope pattern of cracked specimen by multiple indentation

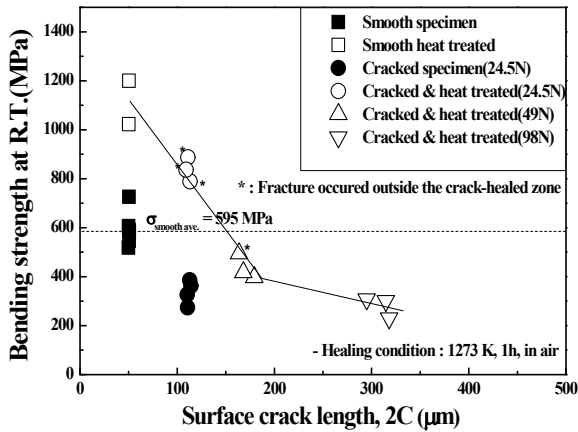


Fig. 4 The characteristics of crack healing according to the crack length

N에 의한 균열재(●)의 평균 균열 길이는 약 110 µm이며, 굽힘 강도는 모재의 약 절반인 336 MPa를 나타내었다. 균열재에 SiO₂ 나노 콜로이드를 코팅하여 열처리한 균열치유재(○)의 굽힘 강도는 약 837 MPa를 나타내어, 모재(■)의 평균 굽힘 강도 595 MPa 보다 약 140 % 상승하였다. 또한 각 시험편은 균열치유부 이외에서 파단하였다. 그림에서 *는 균열치유부 이외에서 파단한 시험편을 나타낸다. 49 N 하중에 의한 평균 균열 길이는 약 170 µm이며, 균열치유재(△)의 굽힘 강도는 약 436 MPa로 나타났다. 이것은 모재(■)의 평균 굽힘 강도 595 MPa의 73 %를 나타내어, 강도 회복이 되지 않았다. 또한 98 N하중에 의한 평균 균열 길이는 약 310 µm이며, 균열치유재(▽)의 굽힘 강도는 약 280 MPa로서 24.5 N하중에 의한 균열재(●)보다 더 낮은 강도(83 %)를 나타내었다. 이것은 압입 하중에 따라서 압입부 단면적과 깊이가 증가하여 응력집중이 크게 작용하여 나타났다고 판단되며, 향후 연구 과제라 생각한다. 따라서 SiO₂ 나노 콜로이드를 코팅한 균열치유재의 균열 치유 한계 길이는 24.5 N 하중에 의한 약 110 µm이었다.

3.2 장균열의 균열 치유 특성

단균열의 균열 치유 한계길이는 24.5 N에 의한 약 110 µm이었다. 이 결과로부터 치유 가능한 한계 균열 길이를 알아보기 위하여 단균열을 연결시켜 장균열을 만들기 위하여 복수압입하여 장균열을 만들었다. Fig. 5는 24.5 N의 하중으로 단수압입 균열 4개를 연결한 복수압입균열시험편의 균열형상을 나타낸다. 그림에서 보는 것처럼, 24.5 N의 비커스 하중에 의한 압흔과 균열이 연결되어 최대 500 µm의 장균열을 도입하였다.

Fig. 6은 장균열에 SiO₂ 나노 콜로이드를 코팅하여 1273 K에서 1시간 동안 대기 중에서 열처리한 균열재의 굽힘 시험 결과이다. 단수압입 균열 2개를 연결시킨 균열은 약 264 µm이며, 균열치유재(△)의 굽힘 강도는 약 428 MPa이었다. 이것은 단수압입 균열재(●)의 강도보다 높으나, 모재(■)의 강도보다 낮았다. 단수압입 균열 3개를 연결시킨 약 343 µm의 균열치유재(▽)의 굽힘 강도는 약 435 MPa로 단수압입 균열 2개를 연결시킨 균열치유재(△)와 비슷하였다. 그러나 단수압입 균열 4개를 연결시킨 약 470 µm의 균열치유재(◇)의 굽힘 강도는 약 341 MPa로 나타났다. 이것은 단수압입 균열재(●)의 굽힘 강도와 비슷한 값으로 복수압입 균열시험편은 모재(■)이상으로 회복되지 않았다. 그러나 약 343 µm까지의 복수압입 균열치유재는 균열재(●)의 굽힘 강도보다 약간 회복되어 어느 정도의 치유 효과는 있는 것으로 판단되며, 압입부 2~3개는 응력집중 영향이 비슷한 것으로 판단된다. 이와 같이 복수 압입 균열재의 강도가 회복되지 않은 것은 압입부가 치유되지 않아 많은 압입부에서 응력집중이 발생하여 강도의 회복이 이루어지지 않은 것이라 판단된다.

SiO₂가 강도회복에 기여한 것을 알아보기 위하여, SiO₂ 나노 콜로이드를 균열부에 코팅하여 열처리한 후의 표면을 SEM으로 관찰하여 Fig. 7에

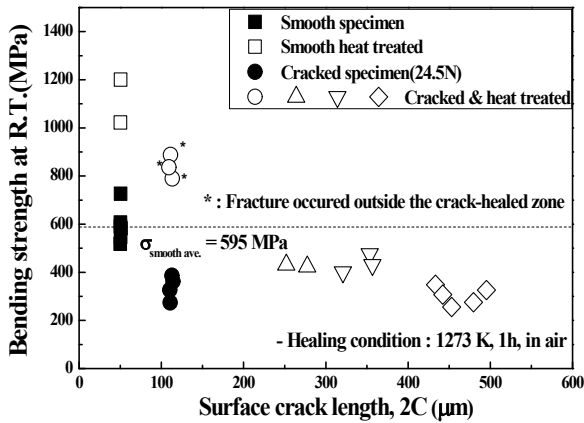


Fig. 6 The characteristics of crack-healing of long crack from multiple indentation by 24.5 N

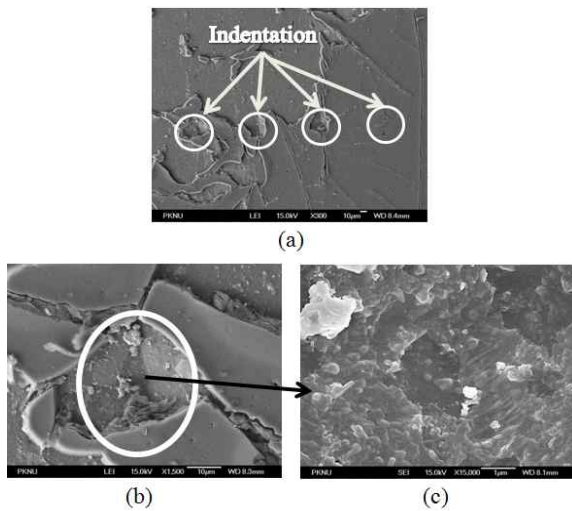


Fig. 7 The crack surface pattern by SEM of heat treated specimens at 1,273 K, 1 h in air ; (a) x 300, (b) x 1,500, (c) x 15,000

나타내었다. 그림(a)는 300배율의 관찰면으로 표면에 콜로이드 막이 형성되었음을 볼 수 있다. 그러나 압입부는 선명하게 볼 수 있다. 그림(b)는 그림(a)의 복수압입 균열의 특정 압입부를 1500배율로 확대한 그림이다. 그림(a)와 마찬가지로 압입부 이외는 콜로이드 막의 형성과 균열 치유가 되었지만, 압입부까지는 침투하지 않았음을 알 수 있다. 압입부의 상태를 확인하기 위하여 15000배율로 확대한 그림을 (c)에 나타내었다. 그림(c)의 압입부에는 얇은 막이 덮고 있는 것을 볼 수 있었다. 이 막은 SiO₂ 나노 콜로이드를 코팅하여 열처리시에 만들어진 유리상 SiO₂가 얇은 막

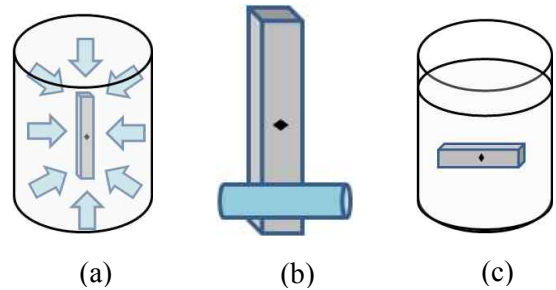


Fig. 8 Schematic diagram of three types of coating method. (a) Hydrostatic pressure coating, (b) Roll coating, (c) Dip coating

을 형성하여 강도 회복에 기여하는 것으로 판단된다.⁽¹⁸⁾ 이와 같이 SiO₂ 나노 콜로이드의 도포에 의하여 미세균열은 완전하게 치유되었으나, 압입부는 치유되지 않았다. 이것이 복수압입에 의한 균열이 모재 이상의 강도 회복을 나타내지 않은 원인이라 판단한다. 즉 압입부가 많을수록 치유에 의한 강도회복보다 응력집중에 의한 영향이 더 크게 나타나 강도가 작게 나타났다고 판단된다. 만약 복수압입에 의한 압입부를 제거할 수 있다면 단순 압입에 의한 강도만큼 상승하리라 판단한다.

3.3 코팅 방법에 따른 장균열의 치유 특성

복수압입균열에 의한 장균열을 가진 Si₃N₄ 세라믹스 시험편은 모재(■)의 평균 굽힘강도 이상을 회복할 수 없었지만, 균열재(●)의 강도보다 높았다. 이것은 Fig. 7에서 비커스 경도기에 의해 도입된 압흔이 완전히 메워지지 않아 강도 회복에 충분히 기여할 수 없어서 생긴 결과로 판단된다. 따라서 본 절에서는 복수압입에 의한 장균열의 균열 치유 능력을 향상시키기 위하여 SiO₂ 나노 콜로이드를 균열에 깊숙이 침투할 수 있는 코팅 방법의 개선이 필요하였다.

열처리 처리된 균열부의 SiO₂ 나노 콜로이드 코팅은 3가지 방법을 사용하였다. Fig. 8은 각각의 코팅방법의 개략도를 나타낸 것이다. (a) 정수압 코팅은 SiO₂ 나노 콜로이드를 담은 용기에 균열을 도입한 시험편을 담근 후, 모든 방향에서 6 N의 힘이 작용하게 하여 코팅한 방법이다. (b) 롤 코팅은 시험편 표면에 SiO₂ 나노 콜로이드를 도포한 후에 붓으로 밀어 코팅하였다. (c) 딥 코팅은 단순히 콜로이드 용액에 담근 후 꺼내는 방법이다.

Table 2 The composition analysis of crack-healed part according to coating methods (%)

	Si	O	N	Ti	Y
Dip coating	64.97	11.28	19.79	3.63	0.33
Hydrostatic pressure coating	52.31	29.61	16.21	1.62	0.25

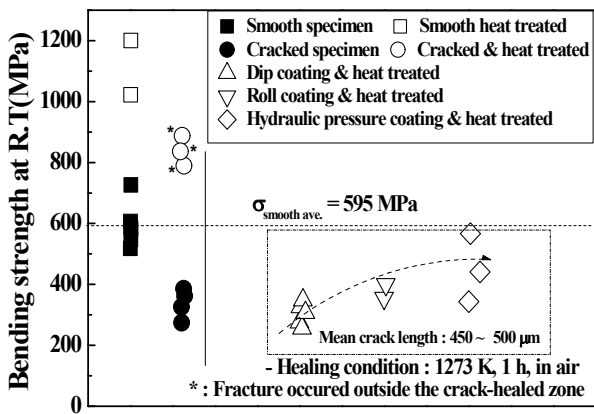


Fig. 9 The crack healing characteristic of long-crack according to the coating methods

Fig. 9은 장균열의 강도 회복을 알아보기 위하여 실시한, 코팅 방법에 따르는 균열 치유특성을 나타내고 있다. 딥 코팅한 치유시험편(△)은 약 303 MPa로 균열재(●)의 평균 굽힘강도와 비슷한 값을 나타내어 강도가 회복되지 않았다. 롤 코팅한 치유시험편(▽)은 약 378 MPa의 평균 굽힘 강도값을 나타내어, 강도가 약간 회복된 것으로 나타났다. 그러나 정수압 코팅한 치유시험편(◇)은 평균 450 MPa로 가장 높은 강도값을 나타내었으며, 특히 최대 566 MPa의 강도값을 나타내어 모재(■)의 평균 굽힘 강도와 유사한 값으로 회복되었다. 따라서 딥 코팅과 롤 코팅은 시험편의 표면장력에 의하여 SiO₂ 나노 콜로이드가 미세한 균열 심층부까지 침투하지 않은 것으로 판단되며, 정수압 코팅은 미세한 균열 심층부까지 침투한 것으로 판단된다.

위의 결과를 증명하기 위하여 균열 치유효과를 보이지 않은 딥 코팅 치유 시험편과 최대의 균열 치유효과를 보인 정수압코팅 치유 시험편의 균열 부를 EDS로 성분 분석하였다. Table 2는 두 코팅재의 치유 처리 표면의 성분을 나타낸 것이다.

딥 코팅 균열치유재는 Si가 약 65 %이고, O는 약 11 %이었다. 한편 정수압 코팅 균열치유재는 Si가 약 52 %로 딥 코팅에 비하여 낮은 값을 나타내었다. 그리고 O의 경우는 약 30 %로 딥 코팅의 O보다 많은 양을 나타내었다. 이것으로 딥 코팅한 균열치유재에 비하여 정수압 코팅 균열치유재에서 더 많은 SiO₂가 생성되어 강도 회복에 기여하였음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Si₃N₄ 세라믹스의 단복수압입에 의해 도입된 균열길이에 따른 치유거동과 SiO₂ 나노 콜로이드의 코팅 방법에 따른 치유거동에 대하여 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 24.5 N의 하중으로 도입한 균열치유재가 균열을 도입하지 않은 모재의 평균 굽힘 강도 595 MPa보다 약 140 % 높은 강도를 나타내어 완전히 회복되었다. 한계균열길이는 약 110 μm이었다.

(2) 24.5 N의 하중으로 도입한 복수압입 균열치유재는 전부 모재보다 낮은 강도를 나타냈다. 그러나 열처리 하지 않은 단수압입 균열재보다 대부분 높은 강도를 나타내어 강도회복이 약간 되었다. SiO₂ 나노 콜로이드를 도포한 후 열처리한 관찰한 압입부는 유리상 SiO₂막이 약간 형성되었으며, 이 SiO₂가 강도회복에 어느 정도 기여하였다.

(3) 24.5 N의 하중으로 4개의 균열이 연결되어 도입된 장균열의 코팅방법에 따른 균열 치유효과는 정수압코팅 > 롤(roll)코팅 > 딥(dip)코팅 순으로 나타났으며, 정수압코팅처리는 균열심층부까지 SiO₂ 나노 콜로이드의 침투가 용이하여 가장 뛰어난 효과를 나타내었다. 정수압코팅 균열치유재는 딥 코팅 균열치유재에 비하여 O가 더 많이 검출되어 강도회복에 영향을 끼친 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 환경부(192-091-001)지원으로 수행된 연구임.

참고문헌

(1) Choi, S. R. and Tikara, V., 1992, "Crack-Healing Behavior of Hot-Pressed Silicon Nitride Due to

- Oxidation," *Scripta Metall. Mater.*, Vol. 26, pp. 1263~1268.
- (2) Ogasawara, T., Hori, T. and Okada, A., 1994, "Threshold Stress Intensity for Oxidative Crack Healing in Sintered Silicon Nitride," *J. Mat. Sci. Lett.*, Vol. 13, pp. 404~406.
- (3) Zhang, Y. Z., Edwards, L. and Plumbridge, W.J., 1998, "Crack Healing in a Silicon Nitride Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 81, pp. 1861~1868.
- (4) Ando, K., Ikeda, T., Sato, S., Yao, F. and Kobayashi, Y., 1998, "A Preliminary Study on Crack Healing Behaviour of Si₃N₄/SiC Composite Ceramics," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 21, pp. 119~122.
- (5) Ando, K., Chu, M. C., Sato, S., Yao, F. and Kobayashi, Y., 1998, "The Study on Crack Healing Behavior of Silicon Nitride Ceramics," *Jpn. Soc. Mech. Engng.*, Vol. 64, pp. 1936~1942 (in Japanese).
- (6) Ando, K., Shirai, Y., Nakatani, M., Kobayashi, Y. and Sato, S., 2002, "(Crack-healing + Proof test): A New Methodology to Guarantee the Structural Integrity of a Ceramics Component," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 22, pp. 121~128.
- (7) Nam, K. W., Kim, H. S., Son, C. S., Kim, S. K. and Ahn, S. H., 2007, "Cracked-Healing and Elevated Temperature Bending Strength of Al₂O₃ Composite Ceramics by an Amount of Y₂O₃," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 31, pp. 1108~1114.
- (8) Nam, K. W., Kim, M. K., Park, S. W., Ahn, S. H. and Kim, J. S., 2007, "Crack Healing Behavior and Bending Strength of Si₃N₄/SiC Composite Ceramics by SiO₂ Colloidal," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 471, pp. 102~105.
- (9) Kim, M. K., Kang, S. B., Ahn, S. H. and Nam, K. W., 2007, "Strength and Surface Morphology of Si₃N₄ Composite Ceramics Coated with SiO₂ Gel," *Solid State Phenomena*, Vols. 124-126, pp. 719~722.
- (10) Kim, M. K., Park, S. W., Son, C. S., Ahn, S. H. and Nam, K. W., 2006, "Crack Healing and Bending Strength of Si₃N₄/SiC Composite Ceramics by Additive Powder TiO₂," *Proceeding of The KSME 2006 Fall Annual Meeting*, pp. 149~152.
- (11) Park, S. W., Kim, M. K., Ahn, S. H. and Nam, K. W., 2006, "Bending Strength of Crack Healed Si₃N₄/SiC Composite Ceramics by SiO₂ Colloidal," *2006 Annual Conference & International Workshops of the 20th Anniversary of the Korean Society of Ocean Engineers*, pp. 166~168.
- (12) Nam, K. W. and Lee, K. C., (2009), "Characterization of High Temperature Strength of Si₃N₄ Composite Ceramics According to the Amount of SiO₂ Nano Colloidal Added", *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 33, pp. 1233~1238.
- (13) Lee, S. K., Ishida, W., Lee, S. Y., Nam, K. W. and Ando, K., 2005, "Crack-Healing Behavior and Resultant Strength Properties of Silicon Carbide Ceramic," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 25, pp. 569~576.
- (14) Nam, K. W. and Kim, J. S., (2010), "Critical Crack Size of Healing Possibility of SiC Ceramics," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 3236~3239.
- (15) Nam, K. W., Kim, J. S. and Park, S. W., (2010) "The High Temperature Strength of SiC Ceramics Based on SiO₂ Nano-Colloidal Employed", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 5400~5404.
- (16) Kim, H. S., Kim, M. K., Kim, J. W., Ahn, S. H. and Nam, K. W., 2007, "Strength of Crack Healed-Specimen and Elastic Wave Characteristics of Al₂O₃/SiC Composite Ceramics," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 4, pp. 425~431.
- (17) Lee, S. K., Ishida W. and Ando, K., 2003, "Strength Properties of Crack-Healed Silicon Ceramics," *J. Soc. Mat. Sci., Japan*, pp. 674~680.
- (18) Takahashi, K., Kim, B. S., Chu, M. C. Sato, S. and Ando, K., (2002), "Self Crack-Healing Behavior Under Stress of Silicon Nitride Ceramics and Resultant Strength at the Crack-Healed Temperature," *Transactions of the JSME*, Vol. 68, pp 1063~1070.