

# 소결조제 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함유량에 따른 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹스의 음향방출 특성

김진욱\* · 안석환\*\* · 남기우\*\*\*

\*재료연구소

\*\*부경대학교 기계공학부

\*\*\*부경대학교 신소재공학부

## The Characteristics of Acoustic Emission of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics by an Amount of Additive Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

JIN-WOOK KIM\*, SEOK-HWAN AHN\*\* AND KI-WOO NAM\*\*\*

\*Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*\*Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Alumina ceramics 알루미나 세라믹스 Additive 첨가제 Crack healing 균열치유 Acoustic emission 음향방출 Wavelet analysis 웨이블릿 해석, Dominant frequency 탁월주파수

**ABSTRACT:** This paper illustrates how Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contributes to crack-healing strengths as a function of crack-healing temperature and the additive amount. In investigating mechanical properties, the indentation fracture method is very simple and useful, but careful attention must be paid to the statistical data processing because data may be scattered excessively, especially for brittle materials. To estimate accurate AE signal properties we applied the useful time-frequency method with a discrete wavelet analysis algorithm. In experiments, three kinds of specimens were prepared. After the specimens were indented by a Vickers indenter, they were heat-treated and crack-healed to evaluate bending strength and the AE signal. With higher amounts of the additive powder, as 1, 3, or 5% wt. of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, the concentrative tendency of dominant frequency trended toward lower frequency groups. The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic with 3% wt. of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was judged most suitable because it demonstrated superior crack-healing ability and relative concentration on the highest frequency group.

### 1. 서 론

세라믹스는 내마모, 내열, 고강도 등의 특성이 우수하여 기계분야의 핵심소재로 부각되고 있으며 해양개발, 원자력, 에너지, 정보통신, 항공·우주, 생체 및 의료산업 등 첨단산업기술과 차세대 산업기술의 핵심재료로 중요하다. 따라서 인공어초, 가스터빈 블레이드, 소나의 세라믹스 진동자, 해수용 필터, 해양토목·건축용 등 해양산업에 적용되고 있다. 그러나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 전형적인 취성재료의 특성을 나타내며, 금속에 비하여 인성이 매우 낮은 결점을 가진다. 따라서 가공이 어려운 것은 물론이고, 가공 시 결함 발생률이 높은 단점이 있다(Mistler and Coble, 1971). 이러한 약점을 보완하기 위하여, 세라믹 재료에 치유능력을 부여하여 균열을 치유 하는 방법이 제안 되어 있다(Lange and Radford, 1970; Zhao et al., 1991; Ando et al., 1999; Ahn et al., 2004; Lee et al., 2005).

이와 같은 방법을 이용한다면, 사용 중에 발생한 균열을 사용 중에 치유 하는 것이 가능하고, 더욱이 치유한 온도에서 충분한

강도로 회복하는 것이 가능하다면 사용 전부터 사용 중에 이르는 신뢰성 향상을 기대할 수 있을 것이다(Ando et al., 2002). 이에 저자는 균열의 치유 효과를 높이기 위해서 소결조제 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 주목하였으며, 이에 대한 균열치유 온도, 첨가량과 기계적인 특성 등에 대하여 연구하여 왔다(남기우 등, 2007; 김해숙 등, 2007). 그리고 균열 발생에 대한 특성 평가를 위하여 비커스 압입자를 사용한 균열 가공시에 발생하는 탄성파를 검출하여 강도와와의 상관성을 연구하였다(Nam et al., 2006; 김진욱 등, 2007).

본 연구에서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC 복합세라믹스 소결조제 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 첨가량의 변화에 대하여 굽힘강도 특성을 평가하였다. 또한, 평활재와 균열재를 사용하여 열처리 전후에 대한 각각 AE 주파수 특성을 조사하였으며, 이러한 결과들에 대하여 시험체의 굽힘강도와와의 상관성을 비교하였다. 재료의 AE 주파수 특성과 강도와와의 상관성을 파악하면, 별도의 굽힘 파괴 시험용 시험편의 준비가 없어도 간편한 AE 신호의 주파수 측정만으로도 사용중의 재료 또는 균열치유재의 강도를 파악할 수 있는 잇점이 있다.

### 2. 재료 및 실험방법

본 실험에 사용한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>분말은 평균입경이 0.5 μm인 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

교신저자 남기우: 부산광역시 남구 용당동 산 100

051-629-6358 namkw@pknu.ac.kr

(일본 Sumitomo 화학 AA-04)이고, SiC분말은 평균입경 0.27 $\mu$ m (일본 Ividen사)이며, 소결조제 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>분말은 Nippon Yttrium사의 0.27 $\mu$ m이다. 분말의 조성은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC 15wt.%의 복합세라믹스에 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 첨가량의 영향을 검토하기 위하여, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 1, 3, 5wt.%를 각각 첨가하였다. 이 후 각각의 시험편을 Y1, Y3, Y5라 부르기로 한다. 분말은 알코올을 붓고 24시간 불밀을 실시한 후, 건조시켜 혼합 분말을 추출하였다. 시험편의 소결은 35MPa의 압력, 500mmHg의 N<sub>2</sub> 가스 분위기의 1,873K에서 1시간 동안 가압 소결(Hot-press)하였다. 소결 후 소결체는  $\phi$ 60mm, 두께 4mm를 얻었다.

연삭 가공된 소결체는 절단기를 이용하여 3.0mm×4.0mm×22mm의 크기로 절단하여, 경면연마 하였다. 시험편의 모서리 부분은 가공 시에 발생하는 미세균열에 의한 응력 집중완화를 위해서 45°의 각도로 모따기를 실시하였다. 예균열의 도입은 비커스 경도기의 압자를 이용하여 19.6N의 하중으로 시험편 표면의 중앙부에 길이 약 80~120 $\mu$ m의 균열을 만들었다. 최적의 균열치유 조건을 알아보기 위하여 1373, 1473, 1573, 1673K의 4 가지 온도조건하에서 1시간 동안 대기 중에서 열처리를 실시하였다. 모든 시험은 실온에서 3점 굽힘시험으로 실시하였으며, 스펠은 16mm이며, 크로스헤드 속도(Cross head rate)는 0.5mm/min으로 실시하였다.

탄성과 신호를 얻기 위해 사용된 Fracture Wave Detector (FWD; Model FM-1, Digital Wave Corp., Englewood, co.) 시스템 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. AE 센싱용 지그는 플라스틱 판을 사용하여 센서가 고정되도록 제작되었으며, 센서 앞면에는 접촉매질을 바르고 그 위에 시험편이 위치하도록 하였다. 비커스 경도기의 압입하중은 다음과 같이 3단계로 적용하였다. 압축하중은 19.6N으로 하중 부하시간 5초, 유지시간 10초, 제거시간 5초로 실시하였다. 돌발형 신호는 진폭의 크기가 설정된 임계치를 통과하는 시점에서 소급된 시간(Trigger)을 설정하게 된다. 신호검출은 파의 시작과 끝 부분이 충분히 포함되도록, 전체 데이터 기록 시간에 대하여 보통 약 20% 정도이면 적당하다. 본 실험에서는 약 5 $\mu$ sec로 설정하였으며, Event 지속시간은 약 1024 $\mu$ sec로 하였다. AE 신호는 웨이브릿 해석법을 이용하여 주파수 분석을 수행하였다(Kim et al., 2005).

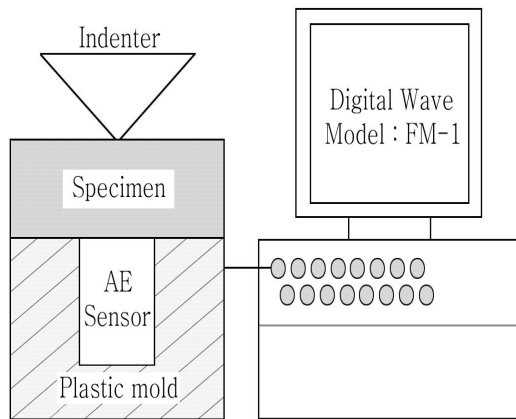


Fig. 1 Schematic diagram of the elastic wave detection system

### 3. 웨이브릿 해석법

본 연구에 이용한 웨이브릿 해석법(Mean-square wavelet maps)을 간략히 설명한다. 측정된 파형, 또는 임의의 파형을 하나의 함수로 두고, 이 함수는 웨이브릿 함수로 된 이산화한 합 의 형식으로 표현하는 등식으로 표현할 수 있다.

$$f(x) = a_0 + \sum_j \sum_k a_{2^{j+k}} W(2^j x - k) \quad 0 \leq x < 1 \quad (1)$$

여기서  $a$ 는 웨이브릿 계수이며,  $W(2^j x - k)$ 는 웨이브릿 함수이다. 이 함수를 제공한 것을 신호의 시작(0)에서 끝부분(1)까지 웨이브릿 함수에 대하여 구간적분을 할 수 있다.

$$\int_0^1 f^2(x) dx = a_0^2 + 2a_0 \sum_j \sum_k a_{2^{j+k}} \int_0^1 W(2^j x - k) dx + \dots + \sum_j \sum_k \sum_r \sum_s a_{2^{j+k}} a_{2^{r+s}} \int_0^1 W(2^j x - k) W(2^r x - s) dx \quad (2)$$

웨이브릿 함수의 직교성과 면적특성 등을 이용하면, 최종적으로 웨이브릿 함수의 계수에 대한 제공항으로 표시된 형태로 유도할 수 있다. 구해진 각 계수의 제공항들을 횡축(시간)과 종축(주파수)에 따라서 각각 배분하여 표시할 수 있다 (Newland, 1993).

$$\int_0^1 f^2(x) dx = a_0^2 + a_1^2 + \frac{1}{2}(a_2^2 + a_3^2) + \frac{1}{4}(a_4^2 + \dots + a_7^2) + \frac{1}{8}(a_8^2 + a_9^2 + \dots + a_{15}^2) + \frac{1}{16}(a_{16}^2 + \dots + a_{31}^2) + \dots \quad (3)$$

즉, 함수에 대한 웨이브릿 계수의 제공값(정수,  $j$ )은 로그 스케일로써 종축에 표시한다. 이것은 주기적으로 보면 기하급수적으로 짧아지게 되며, 주파수는 그와 반대로 배씩 증가하는 형태로 표현된다. 이러한 제공된 각 계수의 항인 웨이브릿 진폭의 도시는 등고선 형태로써 주파수 스펙트라 밀도의 분포를 나타내게 되고 시간-주파수에 따라 전개되는 윤곽으로 나타낼 수 있다. 즉, Fig. 3(c)와 같이 나타난다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 균열치유 온도에 따른 굽힘 강도

Fig. 2는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC 복합 세라믹스에 소결 보조제 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 굽힘강도와 균열치유거동에 미치는 영향을 비교 조사한 것이다. 먼저 흰 기호는 평활제, 절반 흰 기호는 균열제, 십자 기호는 1,573K에서 1 시간 열처리한 평활제, 검은 기호는 균열치유제

의 강도를 나타낸다.

흰 기호인 평활재의 평균 굽힘강도는 각각 596MPa (Y1), 647MPa (Y3) 및 299MPa (Y5)를 나타낸다. 십자 기호인 열처리 평활재의 평균 굽힘강도는 각각 755MPa (Y1), 758MPa (Y3) 및 367MPa (Y5)를 나타낸다. 이것은 평활재에 표면 균열이나 표면 흠과 같은 것이 존재한다고 하더라도, 열처리에 의하여 치유함으로써 약 17~27%의 강도 증가를 올릴 수 있다는 것을 의미한다. 절반 검은 기호인 균열재의 평균 굽힘강도는 각각 287MPa (Y1), 282MPa (Y3) 및 212MPa (Y5)으로 감소되었다. Y5 평활재의 강도가 Y1 및 Y3의 평활재와 열처리 평활재의 평균 굽힘 강도에 비하여 거의 48%나 떨어졌다.

균열 치유재는 검은 기호로 나타낸다. Y1의 경우는 1,373K와 1,473K에서 강도 회복이 불충분하지만, 1,573K에서 1시간 열처리한 균열치유재가 같은 조건에서 열처리한 평활재와 비슷한 강도까지 회복된 것으로 보아, 균열치유가 충분히 이루어진 것으로 판단된다. 또한 1,673K에서 열처리한 균열치유재의 강도가 1,573K에서 열처리한 균열치유재의 강도와 비슷한 것으로 보아, 최적 균열 치유 온도는 1,573K라고 판단된다.

Y3의 경우는 1,473K에서 1 시간 열처리 한 균열재의 강도가 1,573K에서 1 시간 열처리 한 평활재의 강도와 비슷하게 회복되었다. 1,673K에서 1시간 열처리한 균열재의 강도는 오히려 약간 감소되는 경향을 보이고 있다. 이것으로 보아 Y1의 경우보다도 낮은 온도, 즉 1,473K가 최적 균열치유 온도라고 판단된다.

Y5의 경우는 평활재 강도가 Y1 및 Y3보다 대폭으로 저하되었으며, 열처리에 의한 강도회복이 미약하게 나타났다. 즉, 1,573K에서 1 시간 열처리 한 균열재의 경우 평활재를 열처리

한 시험편과 비슷한 강도를 나타내고 있으며, 1,673K에서 균열 치유한 시험편의 경우 강도가 저하되는 경향을 보였다.

☆는 평균입경 0.4~0.6 $\mu$ m Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 0.27 $\mu$ m SiC를 15wt.% 혼합한 복합세라믹스를 1,873K에서 4 시간 동안 35MPa 압력에서 소결한 것의 각 치유 온도 상온 굽힘 강도를 나타낸다 (Ando et al., 2004). Y1과 유사한 강도를 나타낸다.

따라서 Y5 강도는 Y1 및 Y3의 약 1/2 정도 평활재 강도를 나타내었다. Y1, Y3 및 Y5 세라믹스는 전부 열처리에 의하여 강도 회복을 나타내고 있지만, 특히 Y3의 경우 1,473K에서 1 시간 열처리 한 균열재가 1,573K에서 1 시간 열처리 한 평활재와 비슷한 강도를 가지는 것으로 보아 Y3 경우가 균열치유 특성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다.

4.2 소결조제 함유량에 따른 주파수 특성

압입자에 의한 균열발생시 얻어진 신호에 대하여 소결조제의 첨가량에 따라 주파수 분석이 이루어졌다. Fig. 3은 Y3에 대한 균열치유재의 AE 신호(a)와 주파수 분석(b), 그리고 이산화 웨이브릿 해석법에 의한 결과(c)를 나타내고 있다.

가장 높은 주파수의 스펙트럼 밀도는 AE 신호 Fig. 3(a)를 웨이브릿 해석한 결과 Fig. 3(c)의 313kHz 부근에 위치하고 있음을 알 수 있으며, 주파수 분석 Fig. 3(b)에서 459kHz 성분을 찾을 수 있다.

459kHz 주파수가 Fig. 3(c)의 종축 313kHz에 표시되는 이유는 웨이브릿 해석법에서 설명한 바와 같이 종축의 각 레벨 중간 값으로 나타나기 때문이다. 즉, 234kHz 이상과 469kHz 이

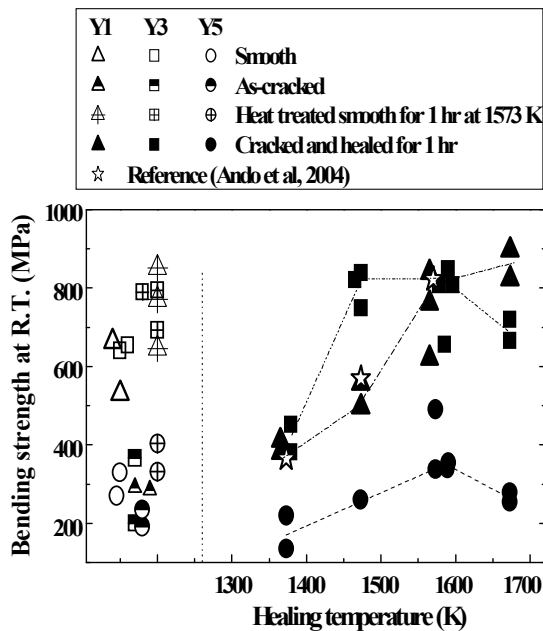


Fig. 2 Relation between bending strength and crack healing temperature according to an amount of additive powder Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

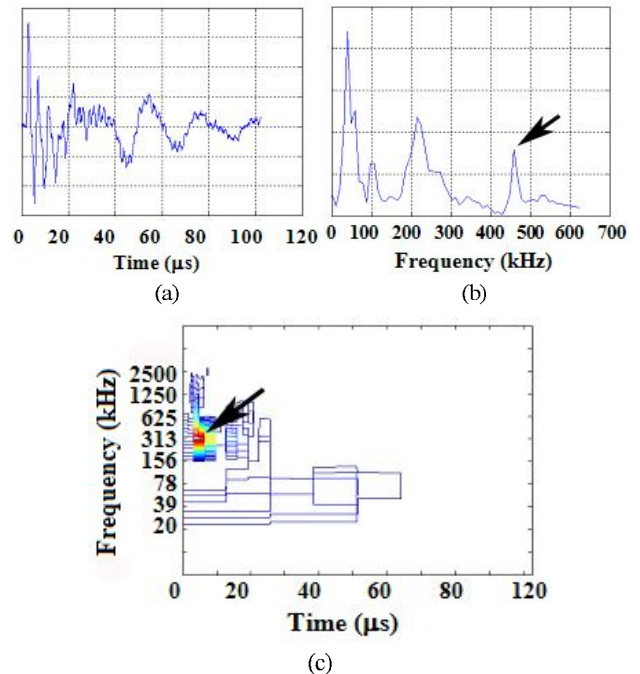
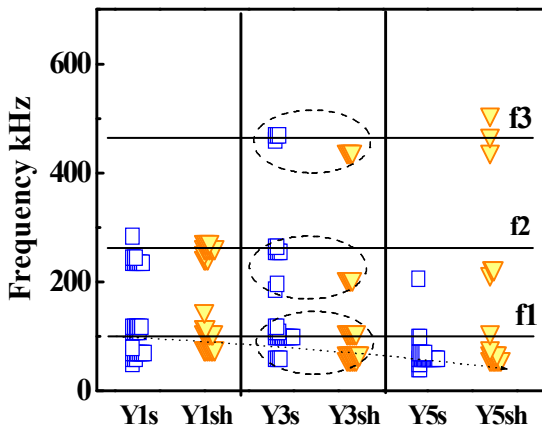


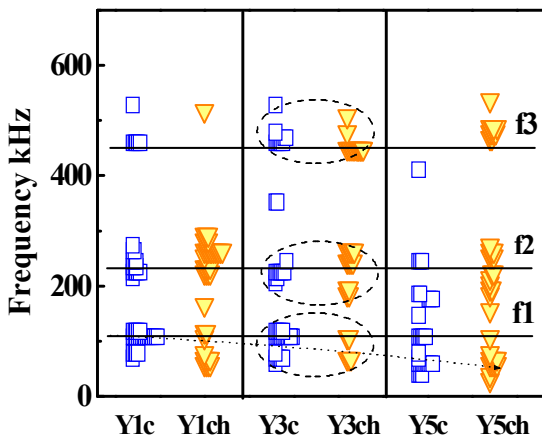
Fig. 3 (a) Time response of AE signal, (b) Frequency spectrum and (c) Contour map of WT analysis for the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC ceramics healed at 1573 K

하의 성분은 모두 313kHz를 기준으로 하여 주파수 스펙트럼 밀도가 등고선 형태로 표시되어 나타나기 때문이다. Fig. 3(b)의 459kHz는 Fig. 3(c)의 주파수 스펙트럼 밀도에서 화살표시한 가장 높은 탁월 주파수 성분으로 나타나있다. 대개의 경우, 이러한 주파수 성분이 돌발형 AE 신호의 발생 초기에 내재되어 있다. 웨이브릿 해석 결과를 소결조제의 첨가량에 따라 이러한 특성 성분을 조사한 것이 Fig. 4이다.

Fig. 4(a)는 대표적인 탁월 주파수 대역인  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ 을 평활재(Y3s)의 결과를 기준으로 소결조제  $Y_2O_3$  첨가량에 따라 나타내었다. 마찬가지로 Fig. 4(b)의 대표적인 탁월 주파수 대역인  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ 은 균열재(Y3c)의 결과를 기준으로 한 것이며, 균열재(c)와 균열치유재(ch)에 대한 탁월 주파수를 표시한 것이다.



(a) Smooth and heat treated smooth  
( $f_1 = 98$  kHz,  $f_2 = 254$  kHz,  $f_3 = 459$  kHz)



(b) Cracked and crack-healed  
( $f_1 = 107$  kHz,  $f_2 = 224$  kHz,  $f_3 = 459$  kHz)

Fig. 4 Relationship of dominant frequencies and an amount of additive powder  $Y_2O_3$

Fig. 4(a)에서 Y3s와 Y3sh는 Y1과 Y5와는 달리 상대적으로 높은 주파수 대역  $f_3$ 에서 나타나 있다. 어느 경우이든 Y3의 경우가 상대적으로 높은 강성임을 보였다. Fig. 2에서 Y3의 경우, 1,473 K에서 1 시간 열처리 한 균열재의 강도가 1,573K에서 1 시간 열처리 한 평활재의 강도와 비슷하게 회복되었다. 마찬가지로 Fig. 4(b)에서 Y3의 경우, 열처리한 균열재 Y3ch는  $f_1$ 과  $f_2$ 보다도 상대적으로 높은 강성의 주파수 대역  $f_3$ 에 집중되어 있다.

$Y_2O_3$ 의 함유량이 많은 평활재 Y5의 주파수는 Y1과 Y3 주파수 대역  $f_1$ 보다 낮은 분포 특성을 보인다. 균열 치유재 Y5는 주파수가 대체적으로 넓은 범위에 분포하며, 상대적으로 낮은 주파수인  $f_1$ 보다 더 낮은 영역에도 많이 분포하고 있다. 이와 같이  $f_1$ 과  $f_2$  주파수의 넓은 분포와 낮은 영역의 집중적인 분포는 재질의 불균질함과 작은 강성을 갖는 것으로 판단된다. 평균 굽힘강도가 최대인 첨가량 3wt.%의 Y3는 탁월 주파수가 대체적으로  $f_1$ ,  $f_2$ 와  $f_3$ 의 주파수 대역에 집중되어 있으며, 균열치유재의 경우는 높은  $f_3$ 에 집중하는 특성을 보인다.

### 5. 결 론

소결조제  $Y_2O_3$ 의 첨가량을 다르게 한  $Al_2O_3/SiC$  복합세라믹스는 비커스 압입자를 사용하여 미세균열을 만들고, 이때 발생한 AE신호에 대하여 주파수 특성을 조사하였다. 이러한 결과를 시험편의 굽힘강도의 특성과 비교하여, 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 열처리 전후의 평활재에 대한 AE신호의 낮은 탁월 주파수는  $Y_2O_3$ 의 첨가량이 증가할수록 더 낮은 주파수 대역으로 집중하는 특성을 보였다.
- (2) 균열재와 균열 치유재의 탁월 주파수는 특정 주파수 영역에서 모두 나타났으며, 3wt.%  $Y_2O_3$ 의 균열 치유재 Y3ch는 충분히 회복된 굽힘 강도를 가지면서 평활재와 비슷한 특정 주파수 분포를 보였다.
- (3) 재료의 특정 주파수와 굽힘 강도와의 비교를 통하여, 소결조제 3wt.%  $Y_2O_3$ 의 경우가 상대적으로 가장 우수한 기계적 특성을 보이는 것으로 확인되었다.

평활재와 균열 치유재의 굽힘 강도와 특정 주파수 분포의 상관성을 이용하면 사용 중의 재료를 파괴시험을 하지 않고서도 굽힘강도의 회복을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

### 후 기

“본 연구는 2007학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음(PK-2007-033).”

### 참 고 문 헌

김진욱, 김해숙, 손창석, 안석환, 남기우 (2007). “ $Al_2O_3$  복합 세라믹스의 균열 진전에 따른 탄성과 특성”, 2007년도 한국

- 해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 295-298.
- 김해숙, 안석환, 손창석, 남기우 (2007). "Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 양에 따른 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합 세라믹스의 고온 강도 특성", 2007년도 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 303-306.
- 남기우, 김해숙, 손창석, 김성광, 안석환 (2007). "Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량에 의한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재 세라믹스의 균열 치유와 고온 굽힘강도 특성", 대한기계학회논문집A, 제31권, 제11호, pp 1108-1114.
- Ahn, S.H., Nam, K.W. and Ando, K. (2004). "The Bending Strength of Brittle Materials and The Characteristics of the Elastic Wave Signal by Vickers Indentation", Key Engng. Mater., Vol 261-263, pp 1635-1640.
- Ando, K., Chu, M.C., Kobayashi, Y., Yao, F. and Sato, S. (1999). "Crack Healing Behavior and High Temperature Strength of Silicon Nitride Ceramics", Jpn. Soc. Mech. Eng., Vol 65-633A, pp 1132-1139 (in Japanese).
- 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.
- Ando, K., Kim, B.S., Chu, M.C., Saito, S. and Takahashi, K. (2004). "Crack-healing and Mechanical Behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Composites at Elevated Temperature", Fatigue Fract Engng Mater Struct Vol 27, pp 533-541.
- Kim, J.W., Park, B.W., Ahn, S.H. and Nam, K.W. (2005). "Elastic Wave Signal Characteristics of SiC Ceramics with Crack Healing Ability by Wavelet Analysis", Key Engineering Materials, Vol 297-300, pp 2046-2051.
- Lange, J.J. and Radford, K.C. (1970). "Healing of Surface Cracks in Polycrystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", J. Am. Ceram. Soc., Vol 53, pp 420-421.
- 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.
- Nam, K.W., Kim, M.K., Kim, H.S., Kim, J.W. and Ahn, S.H. (2006). "Bending Strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Monolithic and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC Composite Ceramics and Elastic Wave Characteristics by Wavelet Analysis", International Journal of Modern Physics B, Vol 20, No 25-27, pp 4279-4284.
- Mistler, R.E and Coble, R.L. (1971). "Rate-determining Species in Diffusion-Controlled Processes in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", J. Am. Ceram. Soc., Vol 54, pp 60-61.
- Zhao, J., Stearns, L.C., Harmer, M.P., Chan, H.M. and Miller, G.A. (1991). "Mechanical Behavior of Alumina-silicon Nonocomposites", J. Am. Ceram. Soc., Vol 76, pp 503-510.
- Newland, D.E. (1993). An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis, Wiley, pp 348-353.

---

2008년 3월 21일 원고 접수

2008년 6월 9일 최종 수정본 채택