

< 논문 >

알루미나 탄화규소 복합세라믹스 균열치유재의 강도와 탄성파 특성

김해숙* · 김미경** · 김진욱*** · 안석환**** · 남기우†
(2006년 8월 8일 접수, 2007년 2월 27일 심사완료)

Strength of Crack Healed-Specimen and Elastic Wave Characteristics of Al₂O₃/SiC Composite Ceramics

H. S. Kim, M. K. Kim, J. W. Kim, S. H. Ahn and K. W. Nam

Key Words: Al₂O₃/SiC Composite Ceramics(Al₂O₃/SiC 복합세라믹스), Additive Powder Y₂O₃(첨가재 Y₂O₃), Bending Strength(굽힘강도), Crack Healing(균열치유), Dominant Frequency(탁월주파수), Elastic Wave(탄성파), Wavelet Analysis(웨이브렛 해석)

Abstract

Al₂O₃/SiC composite ceramics were sintered to evaluate the bending strength and elastic wave characteristics. The three-point bending test was carried out under room temperature. The elastic wave was detected by fracture wave detector. The crack healing behavior was investigated from 1373 K to 1723 K. The bending strength of Al₂O₃/SiC composite by nanocomposite is higher than that of Al₂O₃ monolithic. Crack-healing behavior depended on an amount of additive powder Y₂O₃. In Al₂O₃/SiC composite ceramics with 3 wt. % Y₂O₃ for additive powder, the bending strength at 1573 K is about 100% increase than that of the smooth specimens. From the result of wavelet analysis of elastic wave signal, the smooth specimen and heat treated specimen of Al₂O₃ monolithic and Al₂O₃/SiC composite ceramics showed characteristics of frequency about 58 kHz. The strength of Al₂O₃/SiC composite ceramics was a little higher than those of Al₂O₃ monolithic. The dominant frequencies were high with increasing of Y₂O₃ for additive powder. The dominant frequencies had direct connection with the bending strength.

1. 서론

세라믹스는 고온기기 등 내열재료로서 응용이 기대되는 재료이다. 가스터-빈은 사용온도를 상승 시킴으로서 열효율을 향상시킬 수 있지만, 금속재의 가스터-빈은 사용 한계온도인 1,573 K에서 운용되고 있다. 더욱이 고효율화를 위해서는 금속재료를 대체할 세라믹스 고온기기재료의 개발이 급선무이다.^(1,2) 세라믹스 재료를 더욱 광범위

하게 응용하기 위해서는 해결해야하는 2가지 큰 문제가 있다. 하나는 세라믹스 부품의 단가이고, 둘째는 세라믹스 재료의 취성문제 해결이다. 단가 문제는 원료 분말의 새로운 합성법, 소결 프로세스의 개선, 새로운 제조 프로세스의 개발, 마무리 가공의 개량, 품질 보증법의 개선 등을 통하여 신뢰성 높은 부품을 제조함으로써 해결할 수 있다. 취성 극복방법은 균열 치유 방법이 유용하다.^(3,4) Si₃N₄는 1,573 K⁽⁵⁾에서, SiC는 1773 K⁽⁶⁾에서, 대기중에 1시간 유지함으로써 재료 표면에 도입한 약 100 μm의 예균열을 완전하게 치유할 수 있었다. 세라믹스 재료의 파괴 기점이 되는 표면균열을 치유하고, 무결합화하는 것이 가능하므로 재료의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 더욱이 고온기기재료로 주목받는 세라믹스 재료는 질화

† 회원, 부경대학교 신소재공학부
E-mail : namkw@pknu.ac.kr
TEL : (051)620-1640 FAX : (051)624-0746

* 부경대학교 대학원

** 京都大學 大學院

*** 한국기계연구원 원자력공인사업단

**** 부경대학교 기계공학부

규소와 탄화규소이지만, 단가가 비싸고, 고온 대기 중에서 산화하는 결점이 있다. 한편, 알루미늄은 다른 세라믹스와 비교하여 소결성이 좋고 가격이 싸므로 가장 일반적으로 사용되고 있다. 산화물계 재료인 알루미늄은 내산화성이 매우 뛰어나지만, 강도 및 인성이 질화규소에 비하여 떨어지므로 구조재료로서 신뢰성이 낮다. 이 문제를 해결하면 질화규소와 탄화규소의 대체 재료로 사용될 수 있다.⁽⁷⁾

한편 세라믹스부품의 신뢰성 보증상 문제가 되는 균열치수는 표면에 존재하는 균열로 직경 10~30 μm 정도로, 미세균열을 검출할 수 있는 비파괴검사기술은 아직 미개발상태이다. 그 때문에 중요 부품의 신뢰성이 낮다. 따라서 사용 전에 비파괴 검사를 통하여 위험한 균열을 검출·보수하고 있다. 그러나 가공 후에 표면에 존재하는 균열을 치유하면, 세라믹스 강도의 신뢰성을 높일 수 있다. 세라믹스는 가공함으로써 표면에 미세한 균열이 존재하므로, 치유 전·후 균열 진전에 따라 발생하는 탄성파를 검출하여 웨이브렛 해석으로 세라믹스 강도의 신뢰성을 보증하는 연구가 실시되고 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

본 연구는 신뢰성 높은 알루미늄 개발을 위하여 나노 복합화에 의한 고강도화, 고인성화 및 이트리아 첨가에 의한 균열 치유특성을 평가하였다. 그리고 균열 진전시 검출한 탄성파는 시간-주파수 해석을 실시하여 탁월한 주파수와 강도와의 상관성을 규명하였다.

2. 재료 및 소결체 제작

본 실험에 사용한 Al_2O_3 분말은 평균입경이 0.3 μm 인 α - Al_2O_3 (일본 sumitomo 화학 AKP-30)이고, SiC 분말은 평균 입경 0.27 μm (일본 Ibiden사 Betarundum UF)이며, Y_2O_3 분말은 Nippon Yttrium 사의 Fine grade 0.27 μm 이다. 분말의 조성은 Al_2O_3 의 단상에 SiC와 Y_2O_3 의 첨가량의 영향을 검토하기 위하여, SiC 15%, Y_2O_3 을 1%, 2%, 3%를 각각 첨가하였다. Al_2O_3 의 밀도 $d=3.97$, SiC의 밀도 $d=3.18$, Y_2O_3 의 밀도 $d=4.84$ 이다.

A: Al_2O_3 단상체

B: Al_2O_3 85 wt% + SiC 15 wt%

C: (Al_2O_3 85 wt% + SiC 15 wt%) + Y_2O_3 1 wt%

D: (Al_2O_3 85 wt% + SiC 15 wt%) + Y_2O_3 2 wt%

E: (Al_2O_3 85 wt% + SiC 15 wt%) + Y_2O_3 3 wt%

분말의 혼합은 플라스틱 볼과 알코올을 첨가하여, 24시간 동안 실시하였다. 혼합이 완료되면 Hot-plate 위에서 용매를 추출하고 건조시켜 혼합물을 만들었다. A, C, D 및 E의 소결은 35 MPa의 압력 하에서 500 mmHg의 N_2 가스 분위기에서 승온속도 333 K/min로 가열하여, 1,273 K에서 5분간 유지 후, 1,873 K까지 승온속도 303 K/min으로 가열하였다. 1,873 K에 도달한 후, 1시간동안 유지시켜 고온가압소결(Hot-press)을 실시하였다. B는 다른 조건은 동일하나, 소결 온도가 1,923 K이고 유지시간은 4시간이다. 소결체는 ϕ 60, 두께 4 mm를 얻었다.

소결체의 연삭은 다이아몬드 스톨 80 mesh를 이용하여 표면에 소결 시 발생된 잔유물의 제거 및 평면을 형성하였고, 400 mesh를 이용하여 연마(Polishing)하기에 적당한 면으로 만들었다. 연삭가공된 소결체는 절단기를 이용하여 $3.1 \times 4.1 \times 24$ mm의 크기로 절단하였다. 연마는 다이아몬드 연마재 #250, #125, #30, #10번을 이용하여 연마 한 후, 연마 전에 5 μm 의 다이아몬드 용액으로 경면연마 하였다. 시험편의 모서리 부분은 가공 시에 미세균열이 발생할 수 있으므로 45°의 각도로 모따기를 실시하였다. Fig. 1에 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

3. 실험방법

예균열의 도입은 비커스 경도기의 압자 이용하여⁽¹¹⁾ 24.5 N의 하중으로 Fig. 2(a)와 같이 시험편 표면의 중앙부에 길이 약 100 μm 의 균열을 만들었다. Fig. 2(b)는 열처리 후의 압흔 모양이고, 균열 형상은 Fig. 2(c)와 같이 메디안균열로 깊이는

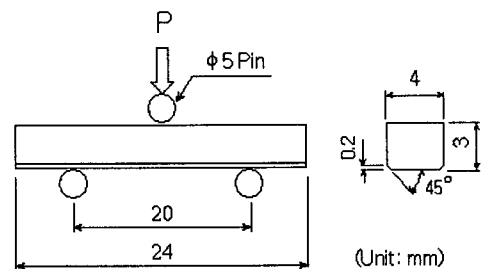


Fig. 1 Three point bending specimen and rough scheme of test system (unit: mm)

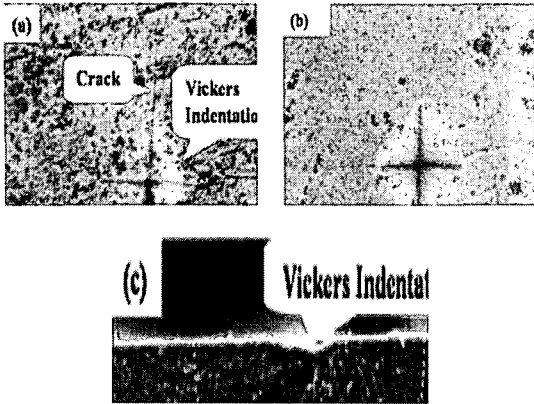


Fig. 2 SEM photographs of (a) Vickers indented crack on the surface, (b) After crack healing surface and (c) Median crack of fracture surface

표면길이의 약 절반이며, aspect비는 0.9이다. 최적의 균열치유 조건을 알아보기 위한 치유 조건은 1,373, 1,473, 1,573 및 1,723 K의 네 가지 온도조건하에서 1시간동안 공기 중에서 치유 처리를 실시하였다. 모든 파괴시험은 실온에서 3점 굽힘시험으로 실시하였으며 스펠 20 mm이며, 크로스헤드 속도는 0.5 mm/min으로 실시하였다. 탄성과 측정은 인장시험에서 최고 강도를 나타내는 조건을 선택하였다. 즉, Al₂O₃ 단상재는 1723 K, 복합재는 1573 K에서 열처리 한 것을 사용하였다. 탄성과 신호를 얻기 위해 사용된 Fracture Wave Detector(FWD; Model FM-1, Digital Wave Corp., Englewood, co.) 시스템 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 탄성과 검출을 위한 센서는 특수 제작된 플라스틱판에 고정시킨 후 접촉매질을 바르고, 그 위에 시험편을 올려놓았다. 비커스 경도기의 압입하중은 다음과 같이 3단계로 적용하였다. 압축하중은 24.5 N으로 하중 부하시간 5초, 유지시간 10초, 제거시간 5초로 실시하였다. 탄성과 검출시의 Trigger와 Event 지속시간은 각각 약 10 μs와 102.4 μs 하였다. 얻어진 탄성과 신호는 웨이브렛을 통하여 해석하였다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

4. 결과 및 고찰

4.1 굽힘강도 특성

Fig. 4는 Al₂O₃ 단상재와 Al₂O₃/SiC 복합재의 굽

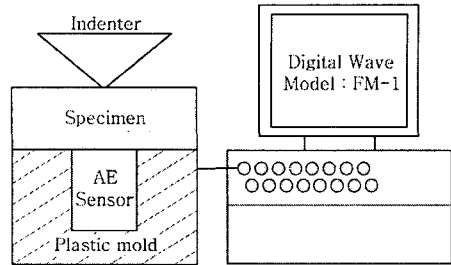


Fig. 3 Schematic diagram of the elastic wave detection system

힘강도를 조사한 것이다. 1573 K에서 Al₂O₃ 단상재의 균열치유제 강도는 약 220 MPa로 균열제 213 MPa과 비슷하며, 열처리한 평활제가 약간 높은 강도를 나타내고 있다. 그러나 Al₂O₃/SiC 복합재는 균열제의 강도가 204 MPa이고, 균열치유제의 굽힘강도가 크게 회복 또는 강화되어 1573 K에서 433 MPa로 약 2.12배 상승하여 SiC의 치유 능력이 뛰어나게 작용한 것을 알 수 있다. 한편, Al₂O₃/SiC 열처리 평활제는 평균 강도가 613 MPa이고, Al₂O₃ 단상재 강도 약 256 MPa보다 약 2.5배 상승하였다.

Fig. 5, 6와 7은 Al₂O₃/SiC/Y₂O₃ 복합재에 Y₂O₃ 첨가량의 영향을 조사하였다. 그림에서 평활제의 굽힘강도는 Al₂O₃/SiC에 Y₂O₃를 첨가한 경우가 첨가하지 않은 경우보다 굽힘강도가 높게 나타났다. 그리고 열처리 평활제의 강도는 평활제보다 훨씬 높은 강도 값을 나타내었으며, 첨가량이 증가할수록 강도의 상승이 더 크게 나타났다. 균열치유제의 굽힘강도는 Y₂O₃ 1~3%를 첨가한 경우, 1,473 K 이상에서 치유한 시험편은 평활제의 강도보다 높게 나타났다. Fig. 5, 6 및 7에서 Y₂O₃ 2% 이상 첨가한 경우는 대체적으로 열처리 온도에 따라서 굽힘강도의 변화가 직선적으로 증가한다면, 1%의 경우는 비교적 완만하게 증가하는 경향이다. 그리고 Y₂O₃ 1, 2, 3 % 첨가한 균열제의 평균강도는 각각 약 296, 249, 236 MPa이고, 균열치유제의 평균 강도는 각각 약 748, 759, 846 MPa로 각각 약 2.52, 3.05, 3.58배 강도가 상승하였다. Y₂O₃ 3% 첨가한 Al₂O₃/SiC/Y₂O₃ 복합재가 균열치유 효과가 가장 우수한 것을 알 수 있었다. 참고로 Al₂O₃분말 평균입경 0.5 μm에 Y₂O₃를 1, 3, 5 % 첨가한 Al₂O₃/SiC/Y₂O₃ 복합재는 열처리에 의하여 강도 상승이 3 %가 가장 우수하였

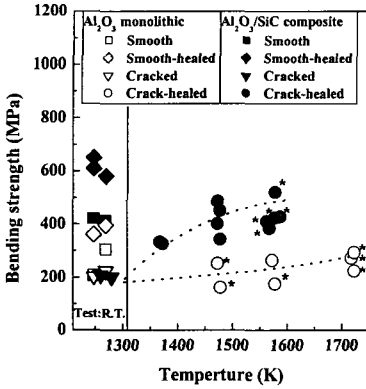


Fig. 4 Relation between bending strength and crack healing temperature of Al_2O_3 monolithic and Al_2O_3/SiC composite

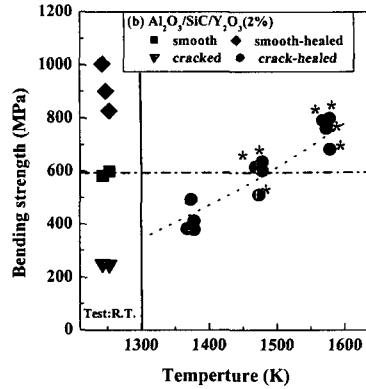


Fig. 6 Relation between bending strength and crack healing temperature of $Al_2O_3/SiC/Y_2O_3$ (2 %) composite

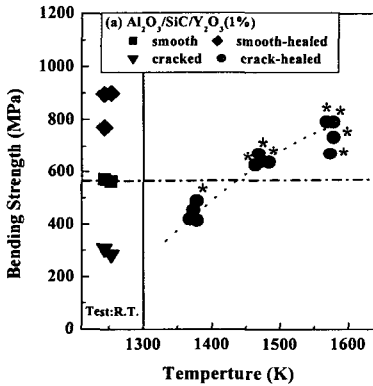


Fig. 5 Relation between bending strength and crack healing temperature of $Al_2O_3/SiC/Y_2O_3$ (1 %) composite

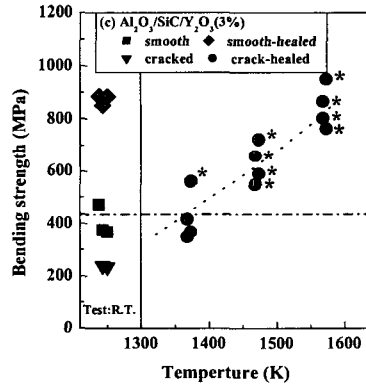


Fig. 7 Relation between bending strength and crack healing temperature of $Al_2O_3/SiC/Y_2O_3$ (3 %) composite

고 5 %는 오히려 감소하였다. 이것은 차후 발표할 예정이다. 그림에서 *를 붙인 것은 균열 도입부 이외에서 파단이 발생한 것으로서, 본 연구에서는 균열 치유가 충분히 일어났다고 판단하였다. 이것으로부터 소결보조제 Y_2O_3 는 강도 상승 및 표면에 존재하는 균열 치유에 효과적인 것을 알 수 있었다.

4.2 신호특성

세라믹스 재료는 주파수 응답 특성 시험을 위

해 연속적인 가진 시험을 할 수 없어서, 1회씩 행하는 단속적인 가진 시험을 할 수 밖에 없는 실험적인 한계가 있지만, 단속적으로 측정된 데이터라 하더라도 반복된 시험결과는 어느 정도 재료의 물리적 특성을 나타낸다. 즉, 재료의 응답 주파수 성분은 각각 재료의 밀도와 강성으로써 함수관계에 있고, 재료의 기계적 강도는 밀도와 강성과 밀접한 관계가 있는 것으로서, 실험적 측정이 간편한 탄성과 신호만 취득하여도 재료의 기계적 강도를 비교적으로 알 수 있다.

Fig. 8과 9는 Al₂O₃ 단상재의 시간 응답, 주파수 및 시간-주파수 응답의 분석 결과로써 대표적으로 평활재와 균열치유제의 것을 나타낸다.

Fig. 8과 9같은 그림에서 탁월한 주파수 성분을 구하여 Fig. 10에 나타낸다. 이것은 평활재와 최적 온도에서 균열치유된 시험편을 사용하여 비커스 압입 시에 얻어진 탄성파 신호에 대하여 시간-주파수 해석을 수행한 결과이다. 평활재와 균열치유제의 중심주파수를 나타내기 위해서 사용된 유효 데이터는 각각 20~45개 정도 사용하였다. 각 시험편의 평활재는 A, B, C, D, E로 나타내었으며, 균열치유제는 Ach, Bch, Cch, Dch, Ech로

나타내었다. 여기서 첨자 ch는 crack healing의 약자이다. 먼저 Al₂O₃ 단상재인 경우, Fig. 10에서 A와 Ach의 탁월 주파수 응답 특성의 분포는 거의 변화가 없이 일정한 산포 내에서 분포하고 있는데, 특성의 범위 이내로 분산정도가 적으면 적을 수록, 이것은 재료의 미세구조가, 즉, 밀도의 분포가 균질하며 유사한 구조(일정한 강성을 유지)를 이루고 있으므로 평활재와 균열치유제의 강도 변화가 거의 없이 일정함을 알 수 있다. Fig. 4에서 Al₂O₃ 단상재의 굽힘강도는 균열재에 대한 치유온도 변화에 대한 치유효과는 그다지 크지 않고 완만하다.

Al₂O₃/SiC 복합재인 B와 Bch의 경우, 대체적으로 아래쪽에 위치한 재료의 '특성 주파수 대역'에서는, 주파수 응답이 밀집된 분포를 하고 있다. 그러나 붉은 점선의 원내를 주목하면, 평활재에 비하여 균열치유제의 주파수 응답이 보다 높은 주파수 대역에 일부 분포하고 있다. 즉, 평활재와 균열치유제의 주파수 응답이 낮은 쪽의 특성 주파수 대역에서는 양쪽 모두 대등한 분포를 이루고 있으면서도, 보다 높은 쪽의 붉은 점선 원내의 주파수 응답이 더 많이 분포하고 있는 것으로 미루어 보아, 균열치유제가 오히려 더 높은 강도를 보이고 있는 듯하다. 이러한 원인은 SiC의 치유능력의 작용으로 인한 것으로 판단된다. 이것은 Fig. 4에서 1,373 K와 1,473 K의 강도를 비교하면 거의 평활재 강도와 비슷하거나, 또는 그것 이상인 것들이 보이고 있다.

Al₂O₃/SiC에 Y₂O₃ 1% 첨가한 복합재인 C와 Cch의 경우, 탁월 주파수의 성분 분포는 거의 일정하여서 평활재와 균열치유제에 대한 Y₂O₃ 1%의 주파수 응답 특성상의 차이는 알 수 없을 정도로 적다. Fig. 5에서 굽힘강도의 회복 또는 강화 정도는 1,373 K와 1,473 K에서 비교적으로 완만한 증가를 보이고 있다.

Al₂O₃/SiC에 Y₂O₃ 2% 첨가한 복합재인 D와 Dch의 경우도 중심주파수 대역에서 거의 일정한 분포를 보이고 있으며, 강도 상승에 영향을 미친다. 마찬가지로 Fig. 6에서 균열치유제의 굽힘강도의 변화 경향은 치유 온도에 따라서 비교적으로 선형적인 증가 추세를 보이고 있다.

Al₂O₃/SiC에 Y₂O₃ 3% 첨가한 복합재인 E와 Ech의 경우, 재료의 중심주파수 대역은 일정한 분포를 보이면서도, 열처리된 경우는 붉은 점선

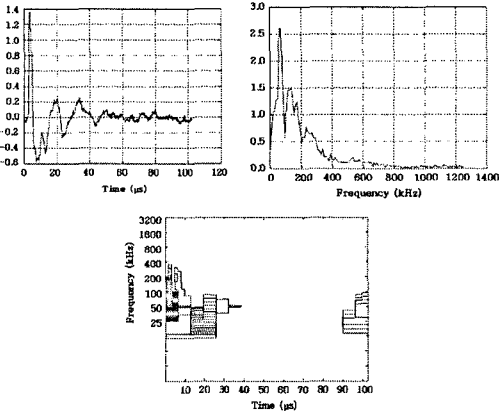


Fig. 8 Waveform, power spectrum and time-frequency analysis of Al₂O₃ monolithic(smooth specimen)

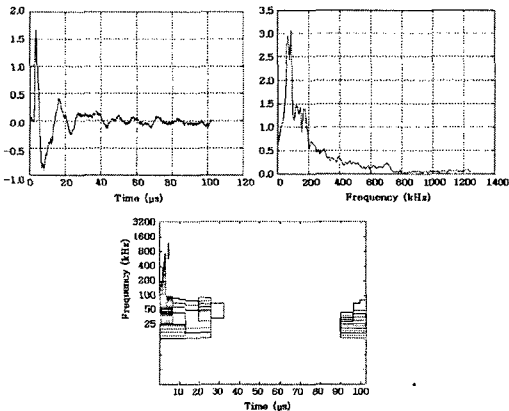


Fig. 9 Waveform, power spectrum and time-frequency analysis of Al₂O₃ monolithic(crack healed specimen)

원내와 같이 분포하였다. Ech는 재료강도에 영향을 미치는 치유작용이 강하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig. 7에서 균열치유재의 굽힘강도는 치유온도가 높아짐에 따라 비교적 높은 비율의 증가 추세를 보이면서, Y₂O₃의 첨가효과로 굽힘강도가 평활재에 비교하여 1,573 K에서 거의 2배에 이르고 있다. Fig. 9에서 주파수 응답 특성은 붉은 점선 원내와 같은 분포 이외에는 중심 주파수가 거의 일정한 특성의 범위 이내에 집중하고 있다. 이것은 재료의 미세구조가 Y₂O₃의 첨가 효과로 밀도와 강성구조가 더욱 균질하게 치밀함 또는 향상되었음을 의미한다.

Fig. 10에서 전체적인 주파수 응답 특성은 모든 시험편이 거의 약 58 kHz 부근에서 재료의 고유 특성 주파수를 보이고 있으며, A재료와 B재료에 대한 강도비교는 B재료가 약간 높다는 것을 의미한다. 이것은 Fig. 4에서 확인된다. C, D 및 E재료는 Y₂O₃를 1%에서 3%로 높일수록, 열처리 후 최고의 강도는 Y₂O₃ 3%의 1,573 K에서 가장 효과적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 7에서 확인된다. B Bch와 E Ech 재료에 대한 주파수 특성과 Fig. 4~7에서 같은 재료에 대한 재료의 강도 특성을 살펴보면, 주파수 응답 특성으로 볼 때 E 재질이 B 재질에 비하여 더 균질하며, 강도 측면에서는 더 강하다. 이러한 사실은 B Bch 재질에 대한 주파수 분포 특성이 큰 폭의 범위로 분포하고 있는 것에 반해서, E Ech 재료의 주파수 분포 특성은 상대적으로 특정한 영역이내에 집중적(빨간원)으로 분포되어 있기 때

문이다. 또한 강도 측면에서도 E재질의 강도가 B 재질의 강도에 비하여 비슷하거나 그 이상이며, Y₂O₃ 3%의 1,573 K 균열치유의 경우에는 거의 2 배 가까운 것을 알 수 있다.

5. 결론

Al₂O₃ 단상재와 Y₂O₃ 첨가한 Al₂O₃/SiC 복합재의 평활재, 균열재 및 치유 온도 변화에 따른 균열치유재의 굽힘강도를 조사하였으며, 각 재료의 최고 굽힘강도 값을 갖는 재료를 사용하여 미세 균열의 발생시 탄성파의 시간응답을 구하였다. 이에 대한 시간-주파수 응답해석과 굽힘강도 결과를 비교하였으며, 재료의 강도 파악을 위해 본 연구에서 적용한 준-비파괴적인 해석방법을 적용 하더라도 강도 비교법으로써 간편하면서도 충분히 유용한 방법임을 확인하였다.

(1) 1573 K에서 Al₂O₃ 단상재의 강도는 균열치유재가 약 220 MPa로 균열재 213 MPa과 비슷하며, 열처리 평활재가 약간 높은 강도를 나타내었다. 그러나 Al₂O₃/SiC 복합재의 강도는 균열재가 204 MPa, 균열치유재가 433 MPa로 약 2.12배 상승하였다. 한편, 열처리 평활재 평균강도는 Al₂O₃/SiC가 약 613 MPa, Al₂O₃ 단상재가 약 256 MPa로 약 2.5배 상승하였다.

(2) 1573 K에서 Y₂O₃ 1, 2, 3 % 첨가한 Al₂O₃/SiC 균열재의 평균강도는 각각 약 296, 249, 236 MPa이고, 균열치유재의 평균 강도는 각각 약 748, 759, 846 MPa로 각각 약 2.52, 3.05, 3.58배 강도가 상승하였다. 따라서 Y₂O₃ 3% 첨가한 Al₂O₃/SiC 복합재의 균열치유 효과가 가장 우수하였다.

(3) 시간-주파수 응답을 해석하여 탁월 주파수를 확인하였으며, 주파수 응답이 재료 특유의 탁월 주파수 주위에 집중하는 정도로써 재료의 균질성을 알 수 있었다. 그리고 최고 굽힘강도에서 탁월 주파수는 물론, 이를 상회하는 고주파수 응답을 보이는 등, 최고 굽힘강도와 고주파수는 유사한 기계적 특성을 보였다.

후 기

“이 논문은 2005학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음”

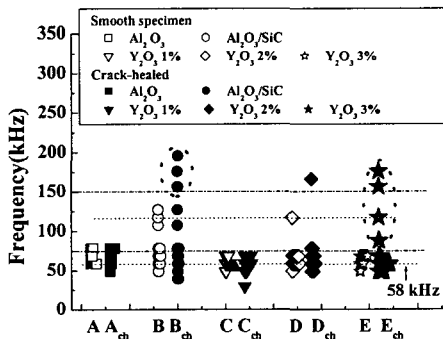


Fig. 10 The dominant frequency distribution of smooth specimen and crack-healed specimen

참고문헌

- (1) Filsinger, D., Gutmann, C., Schulz, A. and Wittig, S., 1997, "Design of Thermally High-Loaded Ceramic Components for Gas Turbines," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 17, pp. 1655~1663.
- (2) Hirano, K., 2005, "Application of Eutectic Composites to Gas Turbine System and Fundamental Fracture Properties up to 1700 °C," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 25, pp. 1191~1199.
- (3) Lange, J. J. and Gupta, T. K., 1970, "Crack-Healing by Heat Treatment," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 53, pp. 54~55.
- (4) Lange, J. J. and Radford, K. C., 1970, "Healing of Surface Cracks in Polycrystalline Al_2O_3 ," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 53, pp. 420~421.
- (5) 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, pp. 1132~1139 (in Japanese)
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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 Engng. Mater.*, Vol. 297-300, pp. 2046~2051.
- (10) Nam, K. W., Kim, M. K., Kim, H. S., Kim, J. W. and Ahn, S. H., 2006, "Bending Strength and Elastic Wave Characteristics of Si_3N_4 Monolithic and Si_3N_4/SiC Composite Ceramics by Wavelet Analysis," *Inter. J. Modern Phys. B*, Vol. 20, pp. 4279~4284.
- (11) Lawn, B. R., Evans, A. G. and Marshall, D. B., 1980, "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 63, pp. 574~581.