

Mechanical Properties of AlN/hBN Ceramic Composites

Jaehyung Lee, Hyun Wook Ahn, Young Sik Yoon, Myeong-Woo Cho,* and Won-Seung Cho**†

School of Materials Science and Engineering, Yeungnam University, Gyongsan 712-749, Korea

*School of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

**School of Materials Science and Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received July 13, 2005; Accepted July 25, 2005)

AlN/hBN 복합재료의 기계적 성질

이재형 · 안현욱 · 윤영식 · 조명우* · 조원승**†

영남대학교 신소재공학부

*인하대학교 기계공학부

**인하대학교 재료공학부

(2005년 7월 13일 접수; 2005년 7월 25일 승인)

ABSTRACT

AlN-BN ceramic composites were fabricated and their mechanical properties were investigated. The relative density of hot-pressed composites decreased with increasing BN content, but over 99% could be obtained with 30 vol% BN in AlN. YAG was formed in the composites and monolithic AlN as a second phase by the reaction between Y_2O_3 , added as sintering aid, and Al_2O_3 . As expected, Vickers hardness and Young's modulus decreased with increasing BN content. The three-point flexural strength also showed similar behavior decreasing from 500 MPa of monolith down to 250 MPa by the addition of 30 vol% BN. However, interestingly, the standard deviation of the strength values decreased significantly as BN was added to AlN. As a result, the Weibull modulus of the AlN-30 vol% BN composite was 21.3, which was extremely high. Fractography and crack path studies revealed that BN platelets induced grain pull-out and crack bridging in a bigger scale during crack propagation. Consequently, fracture toughness increased as more BN was added, reaching $4.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ at 40 vol% BN.

Key words : Mechanical properties, Flexural strength, Fracture toughness, BN, AlN

1. 서 론

AlN-BN 복합체는 높은 열전도성, 타 재료와의 낮은 화학적 반응성, 내부식성, 내열성, 내열충격성, 높은 열전도도 등의 우수한 물성을 지니고 있다.¹⁻⁴⁾ 또한 AlN-BN 복합체는 특히 소위 머시너블 세라믹으로 알려져 있으며, 다이아몬드가 아닌 저가의 고속도강이나 초경 공구로 절삭가공이 가능하다는 중요한 이점을 가지고 있다.⁵⁾ 이러한 높은 가공성은 다른 BN 복합체 즉 질화규소 등의 비산화물에 BN이 첨가된 복합체 또는 운모 상을 지니는 유리에서도 나타난다.⁶⁻⁸⁾ 흑연과 같은 판상입자이면서 육각 망면구조의 2층 주기구조로 벽개성을 지니는 육방정상의 BN(hBN)을 함유한 AlN-BN계 세라믹 복합재료는, 판상형태의 hBN 입자의 벽개면을 따라 파괴저항성이 크게 저하되어 기계가공이 매우 용이한 것으로 알려져 있으며,

이에 대한 연구 결과는 이미 본 연구팀에 의해 발표된 바 있다.⁵⁾

또한 최근에 본 연구팀은 Si_3N_4 -BN 복합체의 균열저항 거동(R-curve 거동)에 대한 연구결과를 보고한 바 있다.⁹⁾ 이에 의하면 Si_3N_4 -BN 복합체는 파괴될 때 판상의 BN 결정립을 따라 균열이 쉽게 진행되고 균열굴절을 초래해서 결정립 풀아웃(pull-out) 현상으로 더욱 큰 스케일로 균열 가교를 일으킨다. 이는 작은 균열에서는 BN의 벽개성으로 인해 Si_3N_4 의 본래의 높은 파괴인성을 크게 저하시키나, 균열이 크게 성장할수록 파괴인성이 증진되어 결과적으로 BN이 첨가됨에 따라 서서히 증가하는 R-curve 거동을 나타내었다. 이러한 R-curve 거동은 BN 복합체가 가지는 높은 가공성의 근본 원인이 될 수 있다. 즉, BN의 영향으로 작은 균열은 낮은 파괴인성으로 쉽게 생겨서 가공성을 부여하며, 긴 균열에서는 파괴인성이 증가하여 균열을 멈추게 하여 취성재료의 큰 단점인 catastrophic 파괴를 방지하고 가공 손상을 최소화 시킨다.

AlN-BN 복합체는 BN이 함유되어 Si_3N_4 -BN과 유사한 R-curve 거동을 가질 것으로 예상되며 따라서 높은 가공

†Corresponding author : Won-Seung Cho

E-mail : wscho@inha.ac.kr

Tel : +82-32-860-7528 Fax : +82-32-862-5546

성을 지니는 것으로 보인다. 그러나 Si_3N_4 -BN 복합체와 다른 점은, Si_3N_4 단미는 원래부터 고인성 재료이나, AlN 단미는 파괴인성이 비교적 낮은 재료라는 것이다. 또한 AlN-BN 복합체는 많은 매우 독특한 우수한 물성들을 보이고 있음에도 불구하고, 지금까지 이 복합체의 일반적인 기계적 특성에 대한 연구보고는 드물었다. 본 연구팀이 이전에 발표한 논문에서는 주로 AlN-BN계 복합체의 이방성과 가공성에 대해 논의하였으며, 기계적 특성도 다루고 있으나,⁵⁾ 본 논문에서는 이후에 나온 연구 결과로서, 특히 AlN-BN 복합체의 굽힘강도, 신뢰도 그리고 파괴인성에 주안점을 두어 기계적 특성을 연구한 결과를 보고하고자 한다.

2. 실험 방법

AlN-BN 복합재료를 제조하기 위해 AlN(순도: 99.15%, 평균입도: 2.9 μm Tokuyama, Japan)에 BN(순도: 99%, 평균입도: 2.6 μm , TDK, Japan)을 10~40 vol%로 첨가하였다. 소결조제로는 AlN 단미 및 복합체의 모든 시편에 3 wt%의 Y_2O_3 (순도: 99.99%, Shinetsu chemical, Japan)를 첨가하였다. 혼합분말은 폴리우레탄 용기에서 에탄올 용매와 Si_3N_4 볼($\phi 8$ mm)을 사용하여 48시간동안 밀링되었다. 밀링된 분말 슬립은 건조과정에서의 중력에 의한 편석을 방지하기 위해 회전진공중발기를 사용하여 가열 건조하였다. 이렇게 얻어진 복합분말은 0, 10 및 20 vol% BN이 첨가된 경우는 1800°C, 그리고 30 및 40 vol% BN이 첨가된 분말은 1850°C에서 N_2 분위기를 유지하며 2시간동안 25 MPa의 압력으로 가압소결되었다. 가압소결된 30 × 30 × 7 mm의 사각 시편은 다이아몬드 절삭기를 이용하여 절삭하였으며, 평면 연삭 및 경면 연마를 통해 3 × 3 × 30 mm의 사각막대를 제조하였다. 압입면이나 굽힘강도 측정에서 인장 응력이 가해지는 면은 경면 연마가 되었으며, 이는 가압소결에서 가압이 되는 방향과 항상 수직이 되는 면이었다.

이렇게 얻어진 사각 막대 시편에 대해 아르키메데스 원리를 이용하여 소결체의 밀도를 측정하였으며, 측정된 밀도와 혼합분말의 이론밀도 즉 $(A\text{질량}+B\text{질량}) / \{(A\text{질량}/A\text{밀도}) + (B\text{질량}/B\text{밀도})\}$ 와의 비로써 상대밀도를 계산하였다. 시편의 3점 굽힘강도는 20 mm의 하부 폭에, 크로스 헤드 속도 0.5 mm/min로 하중을 가하여 시편이 파괴될 때까지의 최대 하중을 측정하여 계산하였다. 와이블 계수는 3점 굽힘강도 데이터에서 구해졌으며, 각 시편 군의 개수는 16개였고, 계산에서 사용된 각 시편의 파괴확률은 제일 낮은 강도를 1로 하여 매겨진 순서를 전체 개수에 1을 더한 값(16+1)으로 나눈 값을 취했다. 시편의 경도는 비커스 경도계를 사용하여 측정하였고, 파괴인성(K_{IC})의 측정은 압자 압입법(Indentation Fracture method; IF법, 보정상수는 0.016)¹⁰⁾과 Indentation Strength(IS)법¹¹⁾의 두 가

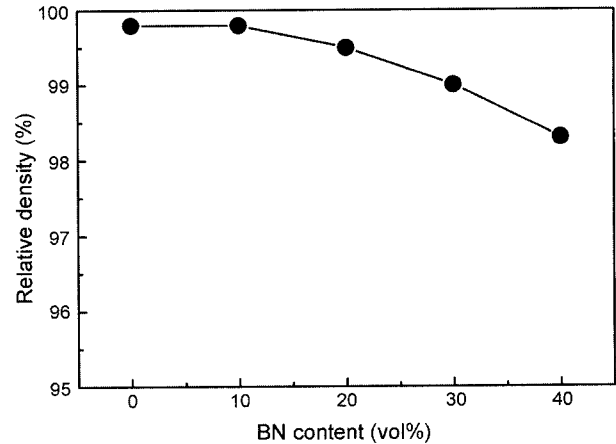


Fig. 1. Effect of BN content on the relative density of monolithic AlN and AlN-BN composites. Hot pressing temperature was 1800°C for monolithic AlN and composites containing up to 20 vol% BN and 1850°C for specimens with higher BN content.

지를 사용하였다. 경도 및 파괴인성(IF법 및 IS법 모두)은 비커스 압자의 압입하중으로 49, 98 및 196 N을 사용하여 이들의 평균값을 취하였다. 시편의 탄성계수(Young's modulus)는 공진법을 사용하여 동적 탄성계수를 구하였다. 또한 각 시편의 파단면 및 비커스 압흔의 균열 전파를 SEM으로 관찰하였다. 시편의 결정상 및 생성상은 연마면에 대해 XRD(Philips, PW3719)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

제조된 복합체의 상대밀도가 Fig. 1에 보인다. 상대밀도는 BN 첨가량이 증가함에 따라 점차적으로 감소하였으나 30 vol%까지는 99% 이상의 높은 치밀화도를 나타냈다. 첨가량이 40 vol%인 조성에서는 상대밀도가 98.3%로 다소 낮았다. BN 첨가량에 따르는 밀도의 차이가 이후 보고되는 여러 기계적 특성에 다소 영향을 주었으리라고 예상되지만, 상대밀도 99% 내외의 비교적 높은 밀도는 이러한 영향을 최소화 하였을 것으로 생각된다. BN 첨가에 따른 상대밀도의 감소는 화학적인 반응이 없는 이차상을 함유하는 복합체에 흔히 나타나며,¹²⁾ 판상형태의 BN 입자가 액상소결시 입자의 재배열과정을 방해하여 잔류 기공이 존재하기 때문이다.

Fig. 2는 제조된 AlN-BN 복합체의 생성상을 동정하기 위해 XRD 분석을 행한 결과를 나타내었다. 예상대로 주피크는 AlN과 육방정상 BN이었으며, 이외에도 YAG($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)상이 관찰되었다. YAG상은 AlN 분말의 표면에 일반적으로 존재하는 산소로 인해 Al_2O_3 와 본 실험에서 소결조제로 첨가한 Y_2O_3 와의 반응($3\text{Y}_2\text{O}_3 + 5\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)에 의해 생성되었다고 판단된다. 이러한 YAG상은 나중에 논

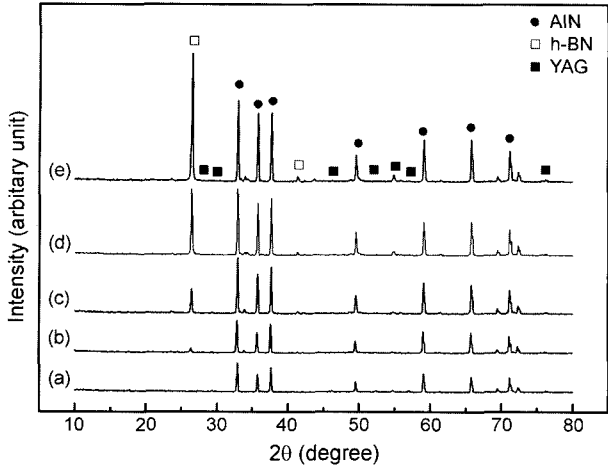


Fig. 2. XRD patterns for AlN monolith and AlN-BN composites containing; (a) 0, (b) 10, (c) 20, (d) 30, and (e) 40 vol% BN.

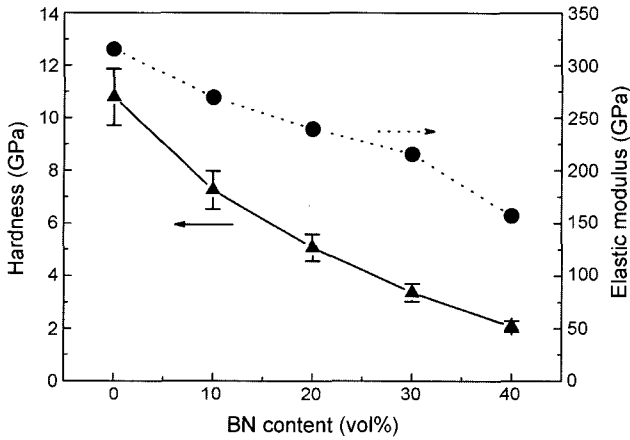


Fig. 3. Effect of BN content on the hardness and Young's modulus of monolithic AlN and AlN-BN composites.

의되는 연마면에서도 관찰되었다(Fig. 7 참조).

Fig. 3에 BN의 첨가량에 따른 AlN-BN 복합재료의 탄성계수와 경도의 변화를 나타내었다. 매우 낮은 탄성계수 (Y_2O_3 대신 1.7 wt% B_2O_3 가 함유된 BN의 탄성계수는 약 50 GPa^4)와 경도를 가지는 BN이 첨가됨에 따라 두 가지 모두 점차적으로 감소하였으며, 특히 경도는 AlN 단미의 약 11 GPa에서 30 vol% BN 첨가에 의해 3 GPa로 크게 감소하였다.

BN 첨가량에 따른 3점 굽힘 강도의 변화가 Fig. 4에 보인다. 굽힘 강도 역시 BN 첨가량이 증가할수록 감소하며, AlN 단미의 약 500 MPa에 비해 30 vol% BN이 첨가된 시편은 약 250 MPa로서 50% 정도 감소하였다. 낮은 강도는 복합재료의 탄성계수가 앞서의 Fig. 3에 보인 바와 같이 낮은 것이 근본 원인일 것이며, 또한 hBN이 벽개 파괴가 쉽게 일어나고 강도 자체가 매우 낮으므로(Y_2O_3 대

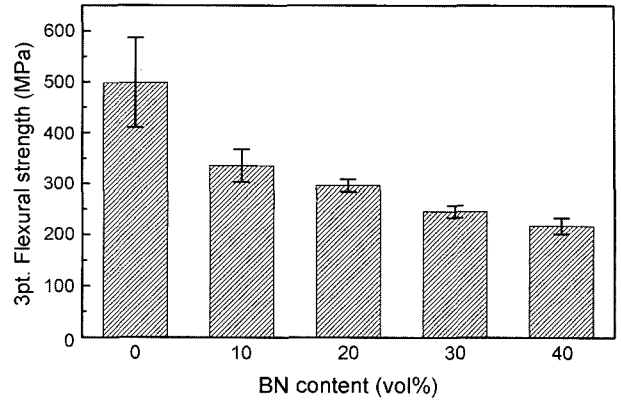


Fig. 4. Effect of BN content on the three-point flexural strength of monolithic AlN and AlN-BN composites.

신 1.7 wt% B_2O_3 가 함유된 BN의 강도는 95 MPa^4) 당연한 결과이다. 물론 상대밀도의 감소도 다소나마 기여했을 것이다. 이러한 약한 BN 판상형 결정립은 강도에 거의 기여하지 않는 또는 역으로 기여하는 결함으로 간주될 수 있다. 따라서 이 복합체는 BN 결정립 크기에 해당하는 수많은 결함을 지니고 있다고 볼 수 있다. BN의 함량이 증가하면, 약한 BN의 양 뿐만 아니라 미세조직에서 판상의 BN이 서로 만나는 확률이 커지고 따라서 결함의 크기가 증가한다. 또 하나 재미있는 것은 Fig. 4에 보이는 AlN-BN 복합체의 강도값의 표준편차가 현저히 작다는 것이다. 이는 AlN 단미에 비해서도 그렇지만 통상의 세라믹스에 비해서도 매우 작은 것으로 보인다. BN 함량에 따른 시편종의 강도 시편의 개수는 각각 16개였으며, 따라서 표준편차의 값은 의미 있는 것으로 생각된다. 시편의 신뢰도 또는 균질성을 나타내는 보편화된 척도는 와이블 계수이다. 정확한 와이블 플롯을 그리기 위해서는 통상 30개 또는 그 이상 시편의 강도값이 요구되나,¹³⁾ 여기서는 그 경향성을 보기 위해 16개 시편의 강도값으로 와이블 계수를 구했으며, Fig. 5에 나타나 있다. AlN 단미의 와이블 계수는 통상적인 세라믹스의 값인 5.0이었으며, BN이 첨가됨에 따라 증가하여, 30 vol% BN이 첨가된 복합체의 와이블 계수는 21.3으로서 AlN-BN 복합체 증가가 높았다. 와이블 계수 21.3은 일반적인 세라믹스에서는 볼 수 없는 높은 값으로서, 재료의 균질성과 신뢰도가 매우 높음을 의미한다. BN의 첨가로 인한 와이블 계수의 증가 즉 신뢰도의 증가는 강도가 다른 요인에 의한 결함보다 BN 결정립의 크기와 양에 의해 결정되기 때문이며, 또 하나의 원인은 이후에 논의 되는 BN 함량의 증가에 따르는 파괴인성의 증진일 것이다. 높은 파괴인성은 결함에 대한 내성(tolerance)을 증가시키는 것으로 잘 알려져 있다.¹⁴⁾ 40 vol% BN에서는 기공율도 다소 증가하고 BN이 서로 쉽게 연결되기 시작하는 함량이어서 30 vol% BN보다 와이블 계수가 감소한 것으로 보인다.

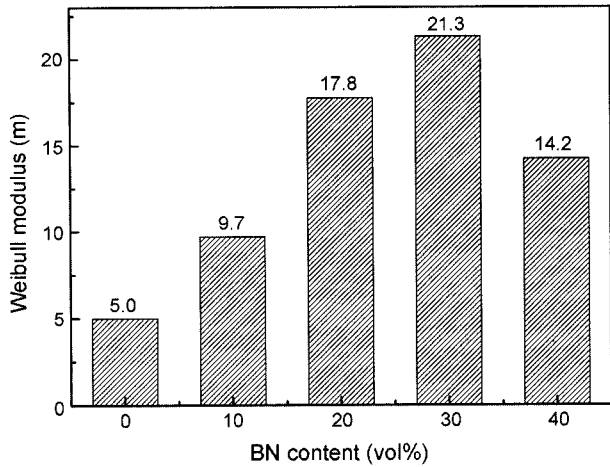


Fig. 5. Effect of BN content on the Weibull modulus (m) of monolithic AlN and AlN-BN composites.

Fig. 6에 AlN 단미와 AlN-BN 복합재료에 대하여 굽힘 강도 측정후의 파단면을 관찰한 결과를 나타내었다. 우선 복합재료에서 판상형의 BN이 옆으로 배향되어 있는 것이 보인다. 이는 가압소결로 제조될 때 BN 입자의 c축이 열간가압 방향에 평행하게 배향되는 강한 집합조직을 나타내기 때문이다.⁵⁾ 모든 시편에서 거친 파단면이 관찰된다. 그러나 많은 BN이 첨가될수록 파단면은 더욱 큰 스

케일로 거칠어지며 가압방향에 수직하게 배향된 판상 BN 입자의 풀아웃(pullout) 흔적이 많이 관찰되었다. Fig. 7에 AlN 단미와 AlN-BN 복합재료의 열간가압 방향에 수직한 면을 경면 연마한 후 비커스 압입균열을 도입하여 균열의 전파양상을 관찰한 결과를 나타내었다. 우선, 그림에서 보이는 1 μm 내외의 입자의 흰 입자들은 앞서 논의한 YAG상 입자로서, 균열 전파 양상에는 영향을 미치지 않은 것으로 보인다. AlN 단미 및 AlN-BN 복합체의 모든 시편에서 균열이 많이 굴절되고 있으나, BN이 첨가된 시편의 경우 BN 입자로 인해 균열이 보다 큰 스케일로 굴절이 일어나며, 따라서 보다 큰 스케일의 균열가교(crack bridging) 현상이 있었음을 짐작할 수 있었다. 이러한 경향은 BN 함량이 증가할수록 더욱 증가했으며, 균열이 주로 약한 AlN-BN 계면이나 BN 입자를 따라 전파되었기 때문이다. 균열가교는 그 스케일이 클수록 즉 뽑히는 결정립 크기가 클수록 파괴인성 증진 효과가 크다.¹⁵⁾ 또한 일반적으로 열간가압소결에 의해 제조한 BN계 머시너블 세라믹 복합체는, 앞에서 언급했듯이, 판상형 BN이 열간가압 방향에 평행하게 배향된다. 이러한 이방적 집합조직은 판상의 BN 입자로 인한 균열가교 현상에 의해 파괴인성을 더욱 증진시킬 수 있다.

Fig. 8에 IF법과 IS법으로 구한 파괴인성 결과를 나타내었다. 두 가지 방법으로 측정된 파괴인성은 절대값은 서

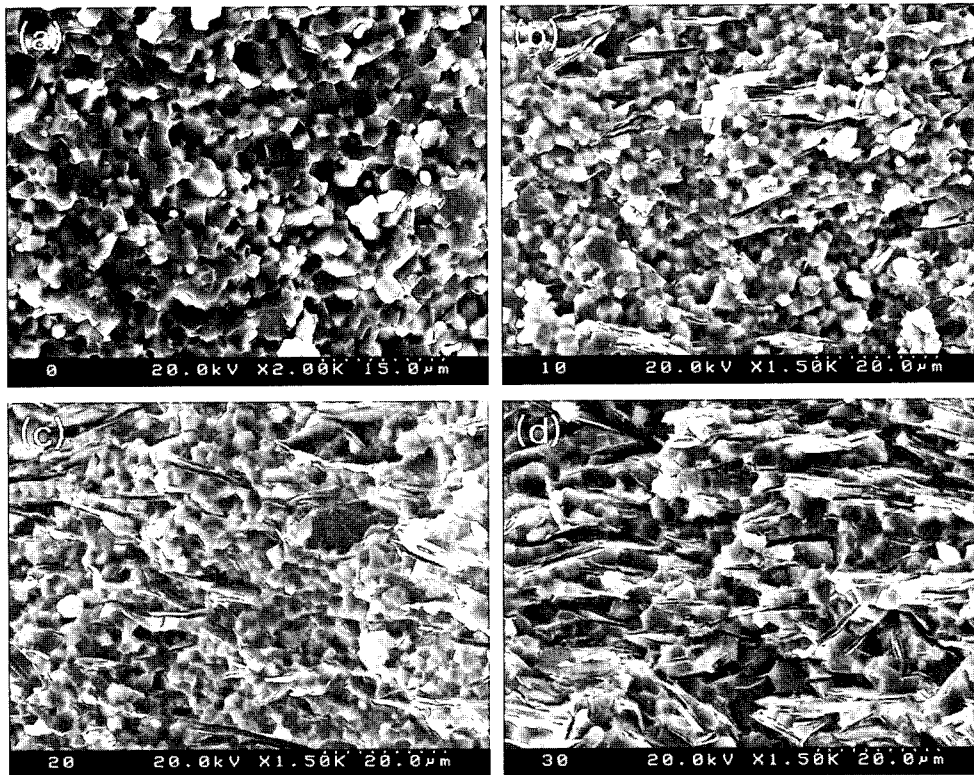


Fig. 6. SEM micrographs of fracture surfaces of the (a) monolithic AlN, and AlN-BN composites containing (b) 10, (c) 20, and (d) 30 vol% BN.

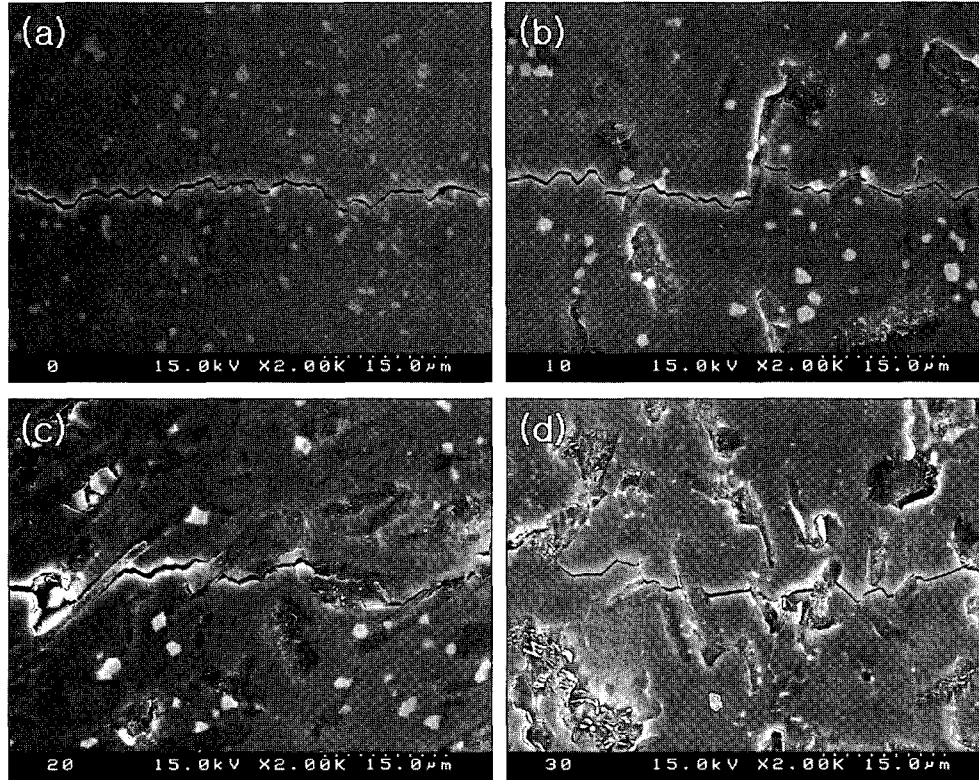


Fig. 7. SEM micrographs of crack paths, obtained by Vickers indentation, of the (a) monolithic AlN, and AlN-BN composites containing (b) 10, (c) 20, and (d) 30 vol% BN.

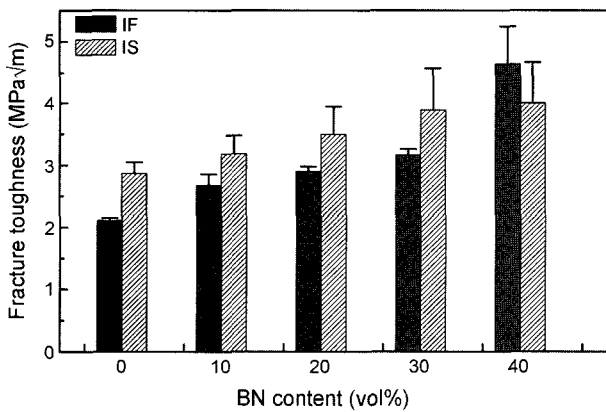


Fig. 8. Fracture toughness determined by Indentation Fracture (IF) and Indentation Strength (IS) methods for the monolithic AlN and AlN-BN composites containing 10, 20, 30, and 40 vol% BN.

로 다소의 차이를 보이지만, 모두 BN이 첨가될수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 앞서 Figs. 6과 7의 파단면과 연마면에서의 압입 균열 전파 양상에서 논의된 균열가교 현상의 결과이다. 참고로, 이전에 AlN/hBN 복합재료에 대하여 IF법으로 측정된 파괴인성이 BN 첨가량과 더불어 감소한다고 보고한 바 있으나,³⁾ 이는 이전에 사용

했던 IF 계산식¹⁶⁾이 탄성계수를 고려하지 않은 결과로 생각되며, BN 복합체에서는 이러한 IF 계산식이 적용되지 않는 것으로 사료된다. 또한 본 논문에서는 논의를 생략했지만, AlN-BN 복합체의 R-curve 형태는¹⁷⁾ 서론에서 언급한 Si₃N₄-BN의 R-curve와⁹⁾ 유사했으며, 균열이 성장할수록 파괴인성이 증가하였다. BN의 함량이 높을수록 R-curve는 더욱 서서히 성장하여, 더 높은 값에서 포화되었다. 즉 판상의 BN 입자들은 짧은 균열에서는 파괴인성을 낮추며, 긴 균열에서는 균열을 굴절시키고 결과적으로 큰 스케일의 균열가교를 일으켜서 균열이 성장할수록 파괴인성이 증가되었다. 이렇게 서서히 증가하여 높은 포화값을 가지는 R-curve 거동은 앞서 논의하였던 복합체의 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있다. 또한 이는 복합체의 기계가공성에서 매우 중요한 의미를 가질 수 있다. 즉, 짧은 균열에서의 낮은 파괴인성은 많은 미세균열을 쉽게 만들어 작은 질삭력으로 기계가공이 가능하도록 한다. 그러나 긴 균열에서의 높은 파괴인성은 복합체의 내부로 균열이 깊이 전파하는 것을 방해하여 기계가공에 의한 손상을 최소화 한다. 이러한 이유로 인해 BN 복합체는 기계가공성이 매우 좋은 소위 머시너블 세라믹스가 될 수 있는 것으로 사료된다. AlN-BN 복합체의 기계가공성은 본 저자들의 다른 논문에서 논의한 바 있으며, 15 vol%의 BN 첨

가에 의해 절삭저항이 급격히 감소되었다.⁵⁾ 또한 10 vol%의 BN 첨가한 시편의 경우, 절삭속도가 증가함에 따라 절삭력과 배분력 모두 증가하는 결과를 나타냈으나, 15 vol% 이상에서는 큰 차이가 없었고, 우수한 기계가공성을 나타내었다. 이러한 서서히 증가하는 R-curve 거동과 높은 기계가공성은 본 논문의 BN 첨가에 따른 강도의 신뢰도 및 파괴인성의 증진과 밀접한 관계를 가진다.

4. 결 론

AlN-BN 세라믹 복합재료를 제조하여 이의 기계적 성질을 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소결체의 상대밀도는 BN 첨가량의 증가와 더불어 약간 감소하였으나 30 vol% BN 첨가에도 상대밀도 99%를 얻을 수 있었다. Al₂O₃와 Y₂O₃와의 반응에 의해 2차상인 YAG상이 생성되었다.

2. 비커스 경도와 영율은 예상대로 BN 양이 증가함에 따라 감소하였다.

3. 3점 굽힘 강도 역시 BN 첨가에 의해 감소하였으며, 30 vol% 첨가는 BN 단미에 비해 약 50%의 감소를 가져왔다. 그러나 강도 값의 표준편차는 BN의 첨가로 급격히 작아졌고, 이에 따라 30 vol% BN을 함유한 복합체의 와이블 계수는 세라믹 재료로는 매우 높은 21.3이 얻어졌다.

3. 매우 거친 복합체의 파단면과 압입균열의 전파 양상은 결정립의 풀아웃 현상에 의한 균열가교의 흔적을 많이 보여주었다. 특히 BN이 많이 첨가될수록 균열가교의 스케일이 커졌으며, 따라서 파괴인성은 BN이 첨가됨에 따라 증가했다.

4. AlN-BN 복합체의 높은 와이블 계수는 강도가 세라믹스에서의 일반적인 결합보다는 판상의 BN 입자 크기와 양에 좌우되며, 또한 BN의 첨가에 따라 파괴인성의 증진하기 때문이었을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구과제(R01-2001-00257-0)지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. K. S. Mazdiyasi, R. Ruh, and E. E. Hermes, "Phase Characterization and Properties of AlN-BN Composites," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **64** [8] 1149-54 (1985).
2. T. Kanai, K. Tanemoto, and H. Kubo, "Hot-Pressed BN-AlN Ceramic Composites of High Thermal Conductivity,"

- Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** [8] 683-87 (1990).
3. T. Kusunose, T. Sekino, B. S. Kim, Y.-H. Choa, T. Nomoto, Y. Yamamoto, and K. Niihara, *Materials Science Forum*, **439** 131-36 (2003).
4. A. Lipp, K. A. Schwetz, and K. Hunold, "Hexagonal Boron Nitride: Fabrication, Properties and Applications," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **5** 3-9 (1989).
5. Y.-H. Lee, J.-G. Kim, W.-S. Cho, M.-W. Cho, E.-S. Lee, and J. Lee, "Effect of h-BN Content on Microstructure and Mechanical Properties of AlN Ceramics(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [9] 874-80 (2003).
6. K. Isomura, T. Fukuda, K. Ogasahara, T. Funahashi, and R. Uchimura, "Machinable Si₃N₄-BN Composite Ceramics with High Thermal Shock Resistance, High Erosion Resistance," pp. 624-34 in *UNITECR '89 Proceedings*, Edited by L. J. Trostel, Jr., American Ceramic Society, Westerville, OH, 1989.
7. M. W. Cho, D. W. Kim, E. S. Lee, W. S. Cho, J. Lee, D. S. Park, and T. Seo, "Machinability Evaluation of Si₃N₄-hBN Composites for Micro Pattern Making Processes," *Key Eng. Mat.*, **264-268** 869-72 (2004).
8. J. Lee, Y.-S. Yoon, W.-S. Cho, E.-S. Lee, and M.-W. Cho, "R-Curve Behavior and Mechanical Properties of Mica-Glass," To be presented in the 4th China International Conference on High-Performance Ceramics, Chengdu, Sichuan Province, China, Oct. 23-26, 2005.
9. Y. S. Yoon, S. W. Na, J. Lee, M.-W. Cho, E.-S. Lee, and W.-S. Cho, "R-Curve Behavior of Si₃N₄-BN Composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, **87** [7] 1374-77 (2004).
10. G. R. Antis, P. Chantikul, B. R. Lawn, and D. B. Marshall, "Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I. Direct Crack Measurement," *J. Am. Ceram. Soc.*, **64** [9] 533-38 (1981).
11. P. Chantikul, G. R. Antis, B. R. Lawn, and D. B. Marshall, "Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: II. Strength Methods," *J. Am. Ceram. Soc.*, **64** [9] 539-43 (1981).
12. R. K. Bordia and G. W. Scherer, "Overview No. 70-On Constrained Sintering-Part III. Rigid Inclusions," *Acta Metall.*, **36** [9] 2411-16 (1988).
13. D. Green, "An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics," pp. 286-91, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
14. B. Lawn, *Fracture of Brittle Solids*, 2nd Ed., pp. 72-9, Cambridge University Press, Cambridge, 1993.
15. B. Lawn, *Fracture of Brittle Solids*, 2nd Ed., pp. 230-41, Cambridge University Press, London, Cambridge, 1993.
16. K. Niihara, "Indentation Microfracture of Ceramics(in Jpn.)," *Ceramics Japan*, **20** [1] 12-8 (1985).
17. Y. S. Yoon, H. W. Ahn, B. K. Koo, J. Lee, M.-W. Cho, E.-S. Lee, and W.-S. Cho, "R-Curve Behavior of Si₃N₄-BN and AlN-BN Composites," Presented in the 2nd Korea-Slovenia Joint Workshop on Advanced Materials, Pohang, Korea, Nov. 11, 2004.