

머시너블 세라믹스의 기계적 특성 및 가공성

윤영식, 이재형, 조원승*, 조명우**, 이은상**
 영남대학교 재료금속공학부, *인하대학교 재료공학부, **기계공학부
 jhlee@yu.ac.kr

1. 서 론

구조세라믹스의 가장 큰 장점은 높은 경도, 내마모성 등의 우수한 기계적 특성과 화학적 안정성일 것이다. 반면에 이러한 좋은 특성은 기계적 가공을 힘들게 하여 복잡한 형상을 만드는 데 어려움이 따른다. 일축 프레스나 사출성형 등의 일반적인 세라믹스 공정에 의해 정밀 제품을 제조하기 위해서는 형틀 제작에서부터 시작하여 소결하여 이에 따르는 수축까지 고려해야 하고, 따라서 치수 정밀도가 높거나 표면조도가 중요한 세라믹 제품을 위해서는 기계적 후가공이 필수적이다. 그러나 세라믹스는 높은 취성으로 인해 기계 가공 시 균열전파가 일어나며, 강도의 감소를 초래하든지 심지어는 균열전파에 따르는 파괴가 발생하기 쉽다. 결과적으로, 기계 가공에 고도의 숙련된 기술을 요하며, 다이아몬드 공구나 레이저 등을 이용하여 가공하기 때문에, 세라믹스의 제조비용을 높이는 큰 원인이 된다. 실제로 세라믹스의 가공 비용이 많은 경우 전체 공정 단가의 50%에 달한다는 보고가 있다.¹⁾ 그럼에도 불구하고 소량 다품종일 때는 기계적 가공으로 여러 형상을 구현하는 것이 경제적이 수 있으며, 또한 제품 형상에 따라 가공이 상당량 요구되는 경우가 있고, 이와 더불어 높은 경도가 요구되지 않으면서 고온에서의 화학적 안정성 및 반응성 그리고 열충격 저항성이 중요한 응용에는 머시너블 세라믹스가 적합하다. 머시너블 세라믹스는 일반적인 기계 가공에 사용되는 공구인 고속도강으로도 빠른 가공이 가능하기 때문에 가공 비용이 크게 낮아진다. 특수내화노즐 및 튜브, 철의 연속주조를 위한 브레이크링, 반도체 등의 공정에 쓰이는 치구, 전자 및 의료기기용 정밀부품들이 대

표적인 응용분야이다. 이러한 머시너블 세라믹스는 가공을 용이하게 하기 위해 첨가되는 재료의 종류에 따라 특성을 다양화시킬 수 있는데, 가장 많이 이용되는 첨가 재료로는 h-BN, 운모, Al₂TiO₅, LaPO₄ 등이 있다. 본 논문에서는 가장 널리 쓰이는 h-BN 및 운모를 함유하는 머시너블 세라믹스에 대해 기계적 특성 및 가공성 등을 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 질화물-BN계 머시너블 세라믹스

Si₃N₄는 파괴인성, 굽힘강도, 경도, 내화학적 특성, 내식성, 열충격 저항성 등의 기계적 특성이 우수하여 그 응용이 아주 폭넓다.²⁾ 특히 내마모 용품, 정밀기계 부품, 자동차용 고효율엔진 부품, 항공우주용 부품, 절삭공구 등으로의 응용이 확대되고 있는 상황이다. 그리고 AlN^{3,4)}의 경우 높은 열전도도, 적당한 유전특성, Si와 거의 같은 낮은 열팽창계수 등의 우수한 특성들을 가지며, 또한 화학적 안정성이 뛰어나 그 응용이 확대되고 있다. 최근에 많이 이용되고 있는 분야로는 전자부품분야에서 IC package substrate 재료로서 사용되고 있으며, 반도체 공정에서의 절연체에 많이 이용되고 있다. 이렇게 구조용 질화물의 응용이 확대되면서 정확한 치수제어를 위해 기계가공성은 필수적인 요구사항이 되고 있다.

복합체에 2차상으로 첨가되어 가공을 가능하게 해주는 매체인 h-BN의 결정구조는 흑연의 구조와 유사한 판상 구조를 가지고 있다. 따라서 층과 층사이의 결합이 약해 가공 시에 약한 결합이 먼저 떨어지면서 가공을 용이하게 한다. 그리고 h-BN은 낮은 탄성계수와 낮은 경

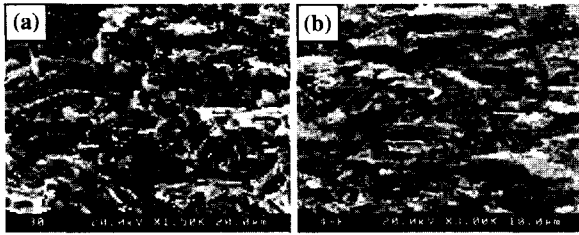


Fig. 1. SEM micrographs of fracture surface of (a) AlN-30 vol% BN composite and (b) Si₃N₄-30 vol% BN composite.

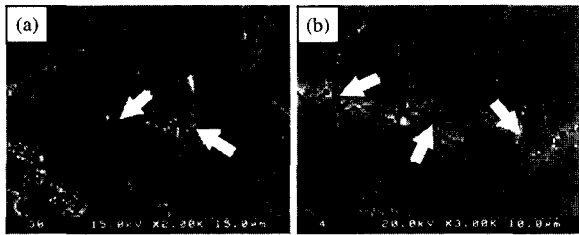


Fig. 2. SEM micrographs of crack path of (a) AlN-30vol% BN composite and (b) Si₃N₄-30 vol%BN composite. Arrows indicate BN-platelets.

도값을 가지고 있어 2차상으로 첨가될 시에 모체의 경도를 감소시키고 가공 에너지를 낮추는 역할을 한다. 이러한 h-BN이 첨가된 복합체에서는 균열이 쉽게 크게 성장하여 파괴가 일어나는 일반적인 세라믹과는 달리, 절삭공구가 재료 내로 도입되면 벽개성을 가진 h-BN 입자

로 균열이 유도되고 가지치기를 하여 균열의 긴 성장이 어려워지며, 반면에 절삭공구 주위에 많은 미세균열을 형성하여 공구의 진행을 용이하게 만든다.

h-BN을 이차상으로 응용할 경우 문제시되는 것은 소결성이다. h-BN은 대표적인 난소결성 물질로서 h-BN계 복합체는 주로 열간가압 소결법에 의해 제조된다. 이러한 방법으로 만들어진 복합체에서는 미세구조적인 이방성과 기계적 특성의 이방성을 지닌다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 가압 방향에 따라 h-BN 입자들이 배열되어진 모습을 볼 수 있다. 따라서 실제 적용에서는 미세구조적인 이방성을 고려하여 부품의 설계가 이루어진다. 열간가압 소결법은 다양한 형상을 구현하기 힘들어서 제조비용이 높은 것이 단점이나, 머시너블 세라믹스는 기계적 가공이 수월하며 어차피 가공을 하는 것이 특징이므로 가압소결의 단점에도 불구하고 상업화되고 있다. 최근에는 이러한 열간 가압 소결법의 단점을 보완하기 위해 반응소결법⁵⁾이나 TPPP(Transient Plastic Phase Processing)⁶⁾에 관한 연구가 활발히 진행 중이다.

열간가압 소결법에 의해 제조된 Si₃N₄-BN⁷⁻¹⁰⁾과 AlN-BN복합체^{11,12)}의 대표적인 기계적 특성들을 Table 1에 나타내었다. 두 복합체 모두 높은 상대밀도를 나타내었으며 BN의 첨가량이 30%를 넘어서면서 상대밀도는 다

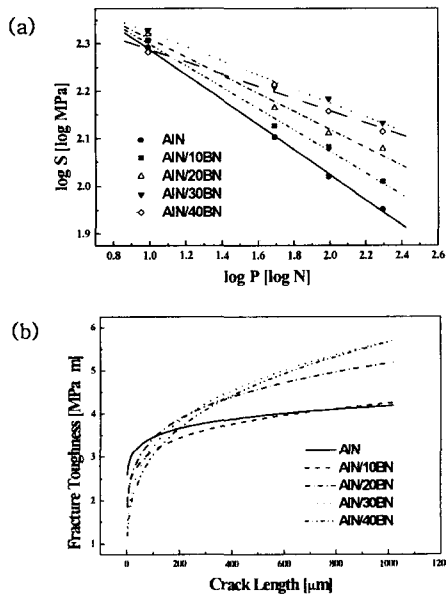


Fig. 3. (a) Log strength versus log indentation load, (b) R-curves for AlN-BN based ceramics.

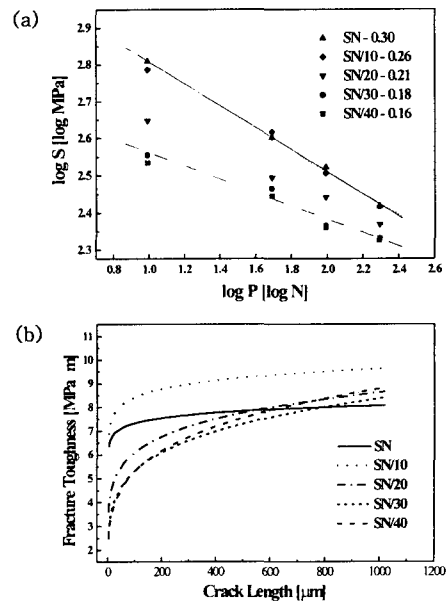


Fig. 4. (a) Log strength versus log indentation load, (b) R-curves for Si₃N₄-BN based ceramics.

Table 1. h-BN계 머시너블 세라믹스의 기계적 특성

	SN	SN/ 10%BN	SN/ 20%BN	SN/ 30%BN	SN/ 40%BN	AlN	AlN/ 10%BN	AlN/ 20%BN	AlN/ 30%BN	AlN/ 40%BN
Relative Density(%)	99.5	98.29	99.1	97.3	96.39	99.98	99.98	99.51	99.01	98.27
Hv(GPa)	14.25	10.49	6.53	4.58	2.56	11.01	7.46	5.2	3.33	2.14
Young's modulus(GPa)	320	240	139.5	119	105	315.57	269.4	239.7	215.5	157.1
3pt. flexural strength (MPa)	995.31	892.7	556.49	409.4	373.75	487.81	331.11	293.43	245.42	216.2
IF(MPam ^{1/2})	9.62	4.86	4.26	3.94	2.54	2.16	2.77	2.9	3.36	3.94
IS(MPam ^{1/2})	6.53	6.49	5.45	5.1	5.16	2.87	2.96	3.5	3.89	4.0

소 낮아졌다. 그리고 BN의 첨가량이 늘어남에 따라 영률, 경도 그리고 강도도 감소했으며, 압입파괴법에 의해 측정된 파괴인성은 Si₃N₄-BN 복합체의 경우에는 감소했으나, AlN-BN 복합체의 경우에는 증가하였다. BN의 첨가량이 늘어나면서 강도가 감소하는 것은 선형파괴역학의 개념에서 이해할 수 있다. 즉 임계결합의 크기가 커짐에 따라 강도값이 떨어지는데, BN계 머시너블 세라믹스의 경우 BN의 첨가량이 늘어남에 따라 밀도가 낮아지고 잔류기공의 양이 늘어나며 또한 BN 입자의 크기가 증가하여 결합의 크기가 증가한다. 그리고 BN의 낮은 영률로 인해 BN의 첨가량이 증가함에 따라 복합체는 점점 낮은 영률을 가지게 되며, 이에 따라 강도도 낮아진다. Si₃N₄-BN 복합체에서는 BN의 첨가량이 늘어남에 따라 파괴인성도 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지

만 AlN-BN 복합체의 경우 파괴인성이 오히려 증가하는 경향을 보인다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 균열의 진행을 방해하는 인성기구는 균열정착과 균열편향이다. BN의 첨가량이 늘어남에 따라 균열정착 및 균열편향의 효과가 더욱 커지면서 AlN-BN 복합체의 파괴인성은 점차 증가하였다.

Si₃N₄-BN복합체의 경우 이와는 다른 경향을 보이는데 이는 단일체 Si₃N₄의 파괴인성이 이미 7 MPam^{1/2} 이상의 높은 값이며, BN의 첨가에 따라, 높은 파괴인성을 가져오는 주상형 Si₃N₄ 입자들의 균열정착 효과가 줄어들고 크랙이 상대적으로 약한 판상형태의 BN 입자 쪽으로 쉽게 이동하기 때문이다. 그러나 최근의 연구에서

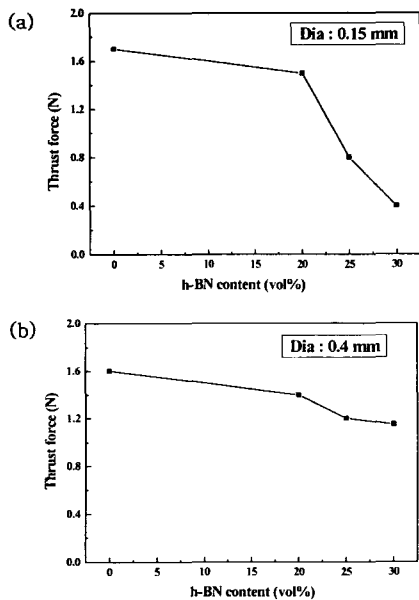


Fig. 5. (a) Thrust force variation (Dia: 0.15 mm), (b) Thrust force variation (Dia: 0.4 mm) for Si₃N₄-BN based ceramics.

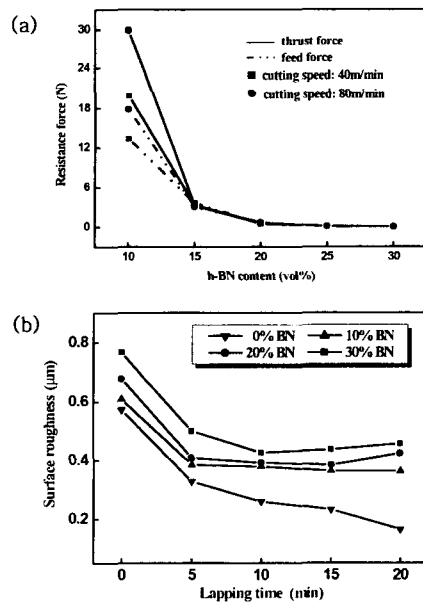


Fig. 6. (a) Effect of h-BN content on the thrust and feed force of AlN-BN based ceramics. (b) Effect of lapping time on the surface roughness of AlN-BN based ceramics.

는 Si_3N_4 -BN에서도, 짧은 균열에서는 파괴인성이 이렇게 감소하지만, 균열이 성장하면 또는 긴 균열에서는 여러 결정립들이 뭉뚱이로 뿔히면서 균열접속 현상을 일으켜서 파괴인성이 증가하는 것이 확인되었다.⁷⁾

Figs. 3과 4는 두 복합체의 압입하중 대 강도의 그래프와 R-curve 특성을 보여준다. 각각의 Si_3N_4 , AlN 단일체에서의 압입하중 대 강도의 기울기는 모두 0.3에 가까워서 균열 성장에 따라 파괴인성이 거의 증가하지 않을 것을 예상할 수 있다. 즉 단일체에서는 R-curve 거동을 보이지 않거나 또는 짧은 균열 길이에서 포화되며, 복합체에서는 BN의 첨가량이 늘어나면 균열 성장에 따라 파괴인성이 크게 증가되는 경향을 보이며 점점 더 긴 균열 길이에서 포화가 됨을 알 수 있다. Si_3N_4 -BN과 AlN-BN 복합체의 이러한 현상과 가공성과의 관계를 살펴보면 짧은 균열 길이에서의 낮은 파괴인성은 절삭공구가 초기에 도입될 시에 미세균열을 쉽게 형성하여 가공을 더욱 용이하게 해주며 절삭공구의 손상을 최소화하고, 긴 균열 길이에서의 높은 파괴인성은 가공시 생기는 균열의 성장을 방해하여 피삭체에의 손상을 최소화한다. 일반적으로 절삭이나 연삭가공 후 미세균열들이 피삭체 내에 존재하게 되는데, 긴 균열 길이에서의 높은 파괴인성은 가공 후 강도의 감소를 완화시키고 제품의 신뢰성을 향상시킬 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 5는 BN 함량에 따른 두 가지 직경의 미세드릴(마이크로 드릴링 머신, TUNGALOY사의 SDM-01-15B)에 의한 Si_3N_4 -BN 복합체의 트러스트 절삭력의 값을 나타낸다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 BN이 전혀 함유되지 않은 순수한 Si_3N_4 는 높은 경도로 인하여 높은 절삭력 값을 나타내었다. 하지만 BN 함량의 증가에 따라 절삭력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 이러한 절삭력의 감소는 BN 함량이 20%에서 25%로 증가했을 때 크게 나타나는 것으로 관찰되었으며, 드릴의 직경이 작을수록 이런 경향은 더욱 현저히 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 공구의 직경이 작아질수록 즉 공구의 강성이 작아질수록 절삭력은 BN 함량의 영향을 더욱 크게 받는다는 것을 알 수 있다

Fig. 6(a)는 이송속도가 50 mm/min, 절삭 깊이가 0.1 mm로 고정된 상태에서 AlN-BN 복합재료의 절삭속도

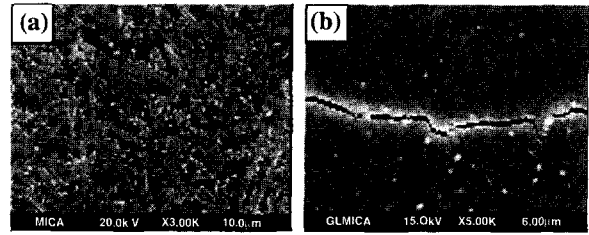


Fig. 7. (a) Chemically etched surface and (b) Crack path for Mica glass-ceramics.

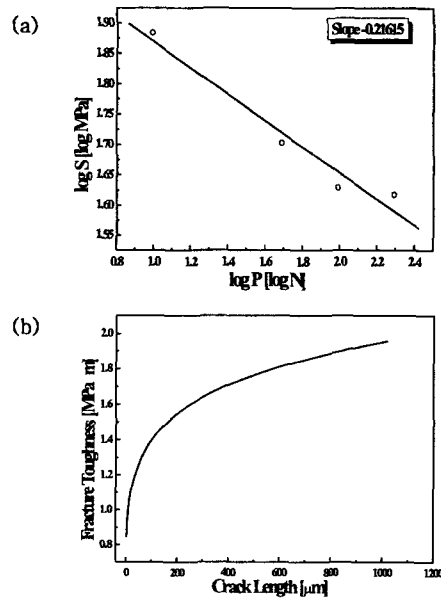


Fig. 8. (a) Log strength versus log indentation load (b) R-curves for mica glass-ceramics.

의 변화에 따른 공구 톱의 절삭력 (feed force)과 배분력 (thrust force)을 측정된 결과를 나타낸다. 참고로, 그림에는 AlN 단미와 AlN-5% BN 복합재료의 결과는 생략하였는데, 이는 높은 취성으로 인하여 측정이 불가능하였기 때문이다. 그림에서 보는 바와 같이 h-BN 첨가량이 10% 이상일 때 절삭이 가능하였다. 이는 절삭 방향에 수직인 방향으로의 균열전파가 AlN 매트릭스 내에 존재하는 h-BN 입자의 벽개면에 의해 흡수 또는 감소되기 때문이다. 절삭저항은 h-BN의 첨가량이 증가할수록 감소하였는데, 이는 h-BN 첨가량이 증가할수록 h-BN 벽개면간의 평균자유행로(mean free path)가 짧아진 결과로 생각된다. 주목할 점은, 15%의 h-BN 첨가에 의해 절삭저항이 급격히 감소한다는 것이다. 또한 10 vol%의 h-BN을 첨가한 시편의 경우, 절삭속도가 증가함에 따라 절

삭력과 배분력 모두 증가하는 결과를 나타냈으나, 15 vol% 이상에서는 큰 차이가 없었다.

Fig. 6(b)에서는 AlN-BN계 기계 가공성 세라믹스의 표면 래핑가공(휠 속도; 70 rpm, 피크전류 (Ip); 40 A, on/off time; 20 μ s, 가압하중; 2.5 kg, 가공시간, 20 min)을 수행한 후, 표면 거칠기를 측정된 결과를 나타내었다. 가공시간 20분에서 AlN 단미의 경우가 표면 거칠기 0.163 μ m로 가장 낮은 수치를 나타내었으며, h-BN의 함량이 늘어남에 따라 표면거칠기 수치는 늘어났으나, 모든 조성에서 20분 내의 짧은 시간에 경면에 가까운 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 전반적으로 AlN-BN 복합 재료는 0.5 μ m이하의 비교적 양호한 표면 거칠기를 보였다.

2.2 Mica-glass계 머시너블 세라믹스

Mica glass-ceramics는 기계 가공성 glass-ceramic의 한 종류로서 glass내에서 운모 결정을 성장시켜 기계가공을 용이하도록 한 제품이다. 1970년대 초반 Corning사에 의해 Macor라는 상품명으로 출시된 제품은 유리 안에 fluormica 결정을 성장시킨 제품으로서 지금까지 많은 분야에 응용되고 있다. 이 이외에도 Dicor, VKB-MgO 등의 여러 상품명을 가진 mica glass-ceramics가 선보였다. 이들은 유리 결정 내에 성장시키는 운모 결정의 종류가 서로 다르며, 대표적인 운모 결정으로는 K-phlogopite, borofluorophlogopite, sodiumphlogopite, tetrasilicofluoromicas 등이 있다. 운모 결정에 따라 mica glass-ceramics는 서로 다른 화학적, 기계적 특성을 지니고 있으며 그 응용 예도 각기 다르다.

이러한 mica-glass는 유리를 만드는 공정과 거의 유사하게 녹여서 제조하기 때문에 가공이 거의 없고 1000°C 이상의 고온에서도 사용이 가능하기 때문에 금속이나 고분자 제품을 대체하고 금속과의 접합성이 뛰어나 고진공 절연재 또는 마이크로 튜브관에 많이 응용되고 있다.

Tetrasilico-fluoromicas¹³⁾의 경우 화학적 내식성은 다소 떨어지지만 굽힘강도가 뛰어나고 투명한 성질이 있어 의치용으로 많이 쓰이며, sodiumphlogopite¹⁴⁾는 뛰어난 화학적 내식성을 이용하여 응용되고 있다.

운모 결정들이 각기 기계가공성을 부여하는 이유는

그것들의 결정구조에서 쉽게 알 수 있다. 대부분의 운모 결정들은 층상구조를 가져 층간의 결합이 약하고, 미세 구조를 살펴보면 길쭉한 카드 모양의 구조를 가지며, 이러한 결정들이 상호 연결되어 있어 일반 공구강으로도 정확한 공차의 가공이 용이하다.

Fig. 7(a)는 fluorphlogopite(KMg₃AlSi₃O₁₀F₂)¹⁵⁾가 유리 내에 결정화되어 있는 모습을 보여준다. 모유리의 조성은 중량비로 SiO₂ 50%, Al₂O₃ 20%, MgO 15%, K₂O 8%, Li₂O 0.9%, F 6.1%로 하여 1500°C에서 용융하여 다시 1100°C에서 운모를 결정화시켰다. 막대 모양의 결정립들이 운모이며 운모의 양은 조성을 변화시켜 다르게 할 수 있다.

Mica-glass 세라믹에서의 균열 성장은 운모결정과 유리상의 계면이나 운모결정을 통해 일어난다. 이 운모결정들에 의해 가공 시에 미세 크랙들이 형성되며 반면에 균열편향이나 유리기지의 접착이 크랙의 진행을 억제한다. Fig. 7(b)는 균열이 진행하면서 균열접착과 균열편향이 일어나는 것을 보여준다. 따라서 운모-유리의 파괴인성은 1.4 MPam^{1/2}으로서 모유리의 0.8 MPam^{1/2}보다 크게 증가하였다.

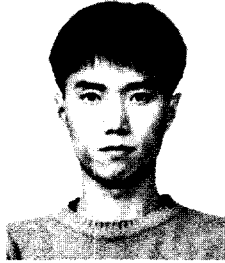
Fig. 8는 압입하중 대 강도의 그래프와 R-curve 특성을 보여준다. 압입하중 대 강도의 기울기는 -0.22로서 압입하중이 커짐에 따라 강도의 감소치는 줄어들고 있음을 알 수 있다. 실제 취성을 가지는 모유리에서의 R-curve는 평평한 반면, Mica glass-ceramic의 R-curve는 균열 성장에 따라 증가하여, 1000 μ m이상의 긴 균열에서의 파괴인성치가 거의 2.0 MPam^{1/2}에 가까워짐을 알 수 있다. 이러한 사실은 h-BN의 첨가에 따라 R-curve의 포화가 느려지는 현상과 비슷한 맥락으로 생각할 수 있으며, 기계가공성에 유사한 영향을 미칠 것임을 예측할 수 있다. 즉 짧은 균열길이에서의 낮은 파괴인성은 가공성을 높이고 연마연삭재의 소모를 줄이며, 긴 균열길이에서의 높은 파괴인성은 파삭체에의 가공손상을 최소화할 수 있다. 이처럼 R-curve 특성은 가공성 및 가공 후 기계적 특성에 많은 영향을 줄 수 있다. 따라서 이러한 특성과 미세구조 그리고 가공성과의 연관성을 잘 살핀다면, 보다 우수한 머시너블 세라믹스를 개발할 수 있을 것이며 응용을 더욱 확대시킬 수 있을 것이다.

3. 향후 과제 및 전망

지금까지 BN계와 운모계 머시너블 세라믹스의 미세 구조와 기계적 특성 그리고 가공성에 대해 알아보았다. 기계 가공성을 향상시키기 위해 이차상을 첨가하면 어느 정도의 경도, 탄성계수나 파괴강도 등과 같은 기계적 특성의 저하는 불가피하다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 머시너블 세라믹스는 내열성, 내화학성, 절연성 등의 전기 화학적 특성이 뛰어나다. 그리고 머시너블 세라믹스는 일반적으로 제조단가가 높은 반면에 동일한 조건 하에서 다른 세라믹과 비교해볼 때 복잡한 형상을 빠른 시간 내에 제조할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 따라서 화학적 안정성이 요구되는 특히 소량 다품종의 복잡형상 부품에서는 타 소재에 비해 경쟁력이 높다. 현재 해외뿐만 아니라 국내에서도 머시너블 세라믹에 대한 관심은 매우 높으며, 특히 반도체 공정 치구 및 전자 및 의료 기기 산업에서의 정밀 부품에의 응용이 확대 될 것으로 기대된다. 이밖에도, 가공성을 부여하기 위한 이차상 첨가로 인한 경도나 강도 등의 기계적 특성의 저하를 최대한 완화시킬 수 있다면, 그 응용은 일반적인 기계 부품에도 널리 확대될 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 머시너블 세라믹스의 기계적 특성, 미세구조 그리고 가공성 간의 관계를 좀 더 세심히 파헤쳐 나간다면 머시너블 세라믹스의 보다 넓은 응용을 기대할 수 있을 것이다.

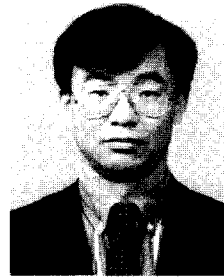
참고문헌

1. P. Blake, T. Bifano, T. Dow, and R. O. Scattergood, "Precision Machining of Ceramic Materials," *Ceramic Bull.*, **67** [6], 1038 (1988).
2. F. L. Riley, "Silicon Nitride and Related Materials", *J. Am. Ceram. Soc.*, **83**[2] 245-265 (2000).
3. M. Okamoto, H. Arakawa, M. Oohashi, S. Ogihara, "Effect of Microstructure on Thermal Conductivity of AlN Ceramics," *J. Ceram. Soc. Jpn. Inter. Ed.* **97** [1486-1493] (1989).
4. W. Werdecker and F. Aldinger, "Aluminum Nitride-An Alternative ceramic Substrate for High Power Applications in Microcircuits," *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.*, CHMT-7, 399-404 (1984).
5. T. Kanai, K. Tanemoto, and H. Kubo, "Reaction-Bonded Nitride-Aluminum Nitride Ceramic Composites," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** [6] 1235-1238 (1991).
6. J. Cheng, Z. Zeng, C. Wu, X. Hu, and H. Miao, "Boron Nitride-Aluminum Nitride Ceramic Composites Fabricated by Transient Plastic Phase Processing," *J. Am. Ceram. Soc.*, **84** [4] 887-89 (2001).
7. Y. S. Yoon, S. W. Na, J. H. Lee, M. W. Cho, E. S. Lee, and W. S. Cho, "R-Curve Behavior of Si₃N₄-BN Composite," Accepted for publication by *J. Am. Ceram. Soc.*
8. E. H. Lutz and M. V. Swain, "Fracture Toughness and Thermal Shock Behavior of Silicon Nitride-Boron Nitride Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **75** [1] 67-70 (1992).
9. 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.
10. W. Sinclair and H. Simmons, "Microstructure and Thermal Shock Behaviour of BN Composites," *J. Mat. Sci. Let.*, **6**, 627-29 (1987).
11. K. S. Mazdiyasi, R. Ruh, and E. E. Hermes, "Phase analysis and characteristics of AlN-BN composites," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **64** [8] 1149-54 (1985).
12. T. Kanai, A. Ando, and K. Tanemoto, "Hot-pressed BN-AlN Ceramic Composites with High Thermal Conductivity," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** 1426-1427 (1992).
13. D. G. Grossman, Tetrasilicic Mica Glass-Ceramic Article, US Patent 3, 839, 055(1974).
14. G. H. Beall, R. C. Doman and L. R. Pinckney, Sodium Fluoromica Glass-Ceramics, US Patent 4, 624, 933 (1986).
15. D. S. Baik, K. S. No, S. S. Chun, "Mechanical Properties of Mica Glass-Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**[5] 1217-1222 (1995).



윤영식

- 2002년 영남대학교 재료금속공학부 공학사
- 현재 영남대학교 무기재료공학과 석사과정 재학



이재형

- 1975년 서울대학교 재료공학 공학사
- 1984년 (미)오하이오주립대 요업공학 공학박사
- 1984년 (미)Ferro Corp., Research Engineer
- 1989년 (미)Union Carbide Corp., Development Scientist
- 1991년 영남대학교 재료금속공학부 교수
- 현재



조원승

- 1983년 인하대학교 금속공학(공학사)
- 1985년 인하대학교 금속공학 (공학석사)
- 1992년 일본 동경대학 재료학 (공학박사)
- 1992년 동경대학 생산기술 연구소 문부교관(조수)
- 1995년 인하대학교 재료공학부 부교수
- 현재



조명우

- 1983년 서울대학교 기계설계학 (공학사)
- 1985년 서울대학교 기계설계학 (공학석사)
- 1985년 한국 생산성본부 자동화
- 1989년 사업부 전문위원
- 1992년 (미) 일리노이주립대(시카고) 기계공학(공학박사)
- 1993년 대우전자 시스템 사업부 부장
- 1997년
- 1997년 인하대 기계공학과 부교수
- 현재



이은상

- 1985년 인하대학교 기계공학사 (공학사)
- 1987년 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1987년 삼성전자 Medical 연구소
- 1992년 주임연구원
- 1997년 부산대학교 전임강사
- 1999년
- 1998년 KAIST 기계공학과(공학박사)
- 2000년 세종대학교 조교수
- 2000년 인하대학교 기계공학과
- 현재 조교수