

IED 초정밀 래핑을 통한 Si₃N₄/h-BN의 표면특성 분석

황성철*, 이정택*, 이은상#, 조명우**, 조원승***

Analysis of Surface Characteristics in the Si₃N₄/h-BN Ceramic by IED Ultra-Precision Lapping

Sung Chul Hwang*, Jung Taik Lee*, Eun Sang Lee#, Myeong Woo Cho** and Won Seung Cho***

ABSTRACT

Recently, application of ceramics has increased gradually due to excellent mechanical properties. Si₃N₄-BN ceramic which is one of ceramics is very hard and has superior resistance against volatile temperature and wear. However, extremely high hardness of the Si₃N₄-BN ceramic makes conventional machining very difficult. Therefore, the use of machinable ceramic has been in a poor because of difficult industrial processes in spite of many advantages. And so new technology being called IED(In-process electrolytic dressing) was introduced to solve this problem. The aim of this study is to determine the machining characteristics in terms of pressurized weight to the workpiece and the influence with h-BN content using IED lapping system. Also, Acoustic Emission (AE) is used for the monitoring of surface characteristics.

Key Words : In-Process Electrolytic Dressing (IED, 연속 전해 드레싱), Machinable Ceramic (머신어블 세라믹), h-BN (육방정계 질화붕소), Ultra-precision Lapping (초정밀 래핑), Acoustic Emission (음향 방출)

1. 서론

세라믹은 높은 기계적 성질을 가지고 있음에도 가공이 어려워 그 사용이 제한되어 왔다. 질화규소(Si₃N₄)는 세라믹의 한 종류로써 높은 내열성과 내마모성을 갖는 고강도, 고경도의 재료로써 낮은 열팽창계수와 내열 충격성 및 화학적으로 안정한 재료적 특성을 지니고 있어 여러 산업분야에서 각광받고 있고 사용 빈도가 높아지고 있다. 특히, 고온

의 에너지변환장치, 우주·항공산업의 구조적 부품의 목적과 지속적인 정밀도와 내구성을 필요로 하는 베어링 등에 응용되어 더욱 더 높은 치수정밀도가 요구되어지고 있다. 하지만 질화규소(Si₃N₄)세라믹은 기계 가공 시에 높은 취성으로 인한 균열전파가 진행되어 재료파괴가 쉽게 일어나 일반 공작기계에서 사용되는 고속도강, 초경합금으로는 신속하고 정밀한 가공이 어렵고 그 결과 이 같은 세라믹제품의 가공 시에는 다이아몬드 스톤 등 특수한

접수일: 2008년 1월 8일; 게재승인일: 2008년 4월 14일

* 인하대학교 기계공학과 대학원

교신저자: 인하대학교 기계공학과

E-mail: leees@inha.ac.kr Tel. (032) 860-7308

** 인하대학교 기계공학과

*** 인하대학교 신소재공학부

장비를 사용하기 때문에 가공비용이 증가하는 경제적 단점을 보인다.^{1,2}

가공의 편의성과 경제적 효율을 위해 흑연과 유사한 판상구조의 벽계성을 지닌 육방정계 질화붕소(h-BN)를 Si₃N₄계 세라믹의 소결과정에 첨가 하여 순수 세라믹 계에 비해 기계적 가공성을 높인 머신어블 세라믹이 개발되었다.²

본 논문은 질화규소(Si₃N₄)에 h-BN의 함유를 다르게 한 머신어블 세라믹들을 IED(In-process Electrolytic Dressing)를 적용한 래핑가공을 통하여 가압조건변화에 따른 표면 거칠기의 변화와 h-BN 함량 변화가 머신어블 세라믹의 가공성에 미치는 영향에 대해 분석하고자 한다.

2. IED 메커니즘

전도성 전해액에 전류를 흐르게 하여 숫들의 초지립을 안정적으로 가공에 이용할 수 있는 드레싱 방법을 연속 전해 드레싱(IED)이라고 한다.

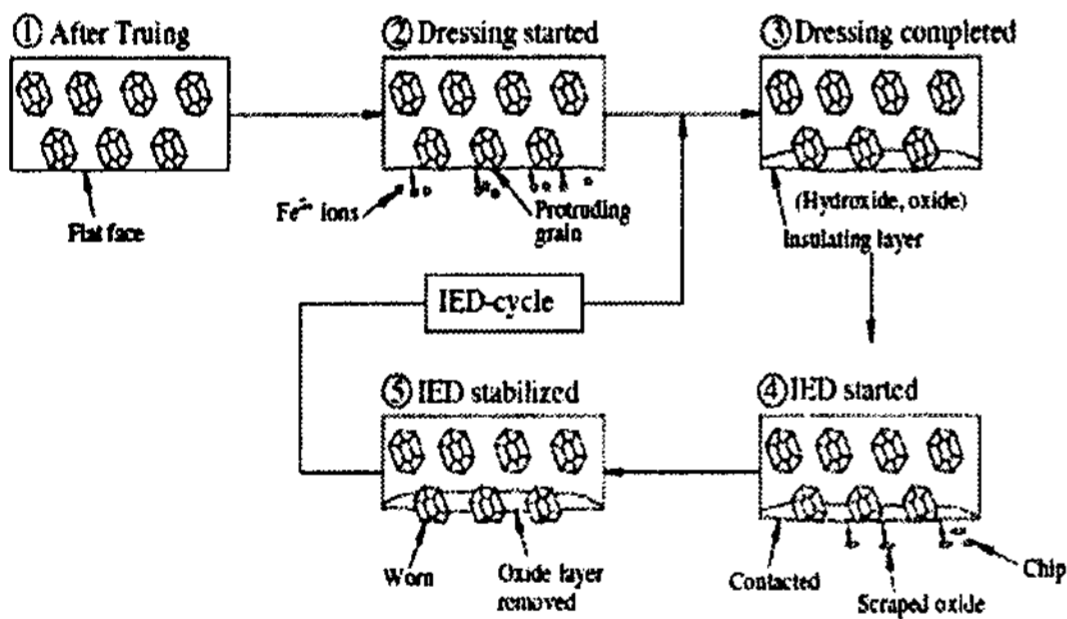


Fig. 1 Mechanism of IED

Fig. 1은 IED의 원리를 나타낸 것으로서 미세한 다이아몬드 연마재를 가진 메탈본드 숫들은 트루잉(Truing) 작업 후에 Diamond의 미세입자와 결합재가 평탄화 되어 연마성이 저하된다. ①

그래서 초기 전해 드레싱을 통하여 Diamond의 미세입자를 돌출시킨다. ②

이 전해현상에서 래핑 숫들의 결합재가 용출한 후 빠르게 부도체 피막(수산화철, 산화철 등)에 의한 절연 층이 래핑 숫들 표면에 형성되어 과도한 용출은 방지된다. ③

그리고 래핑을 시작하면 공작물이 이 부도체 피

막과 접촉하여 연마재가 마멸된 분량만큼 피막이 벗겨진다. ④

이렇게 되면 피막에 의한 절연이 저하되고 또다시 결합재가 필요한 만큼 용출되어 연마재의 돌출이 유지된다. ⑤

연속 전해드레싱을 적용하는 가공의 장점은 자율적인 제어에 의해 연속적인 드레싱(Dressing)에 의한 고능률 초정밀 가공이 가능하다는 것이다. 그러므로 연속적인 드레싱에 의해 가공간 공구의 눈메움 또는 날 무디어짐의 발생을 억제시킬 수 있게 된다. 따라서 IED를 래핑에 적용할 경우 지속적인 드레싱(Dressing)이 가능하여 가공간 공구의 눈메움 또는 날 무디어짐의 현상을 해결할 수 있으며 기존의 래핑가공보다 빠른 시간 안에 효과적으로 공작물을 제거할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 실험장치 및 구성

Fig. 2와 같이 전원공급 장치의 양극은 흑연 브러쉬를 사용하여 초지립 메탈 본드 숫들에 연결하고, 순동으로 제작된 전극에 음극을 연결하였다.

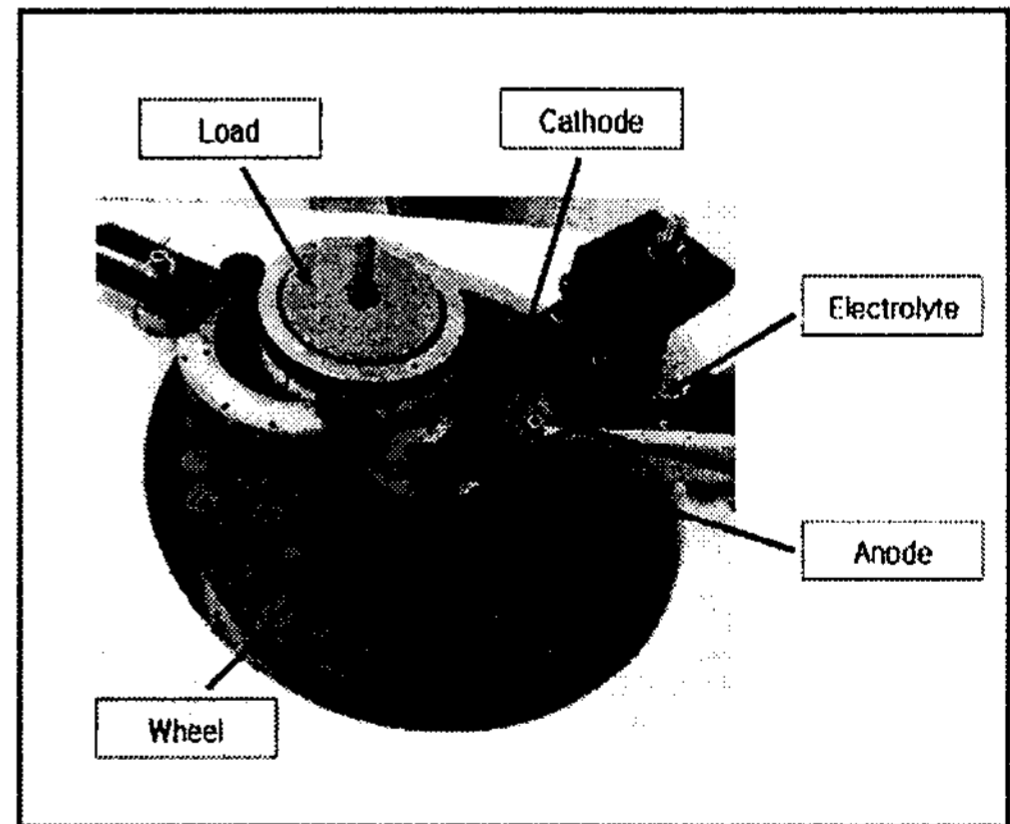


Fig. 2 IED Lapping System

숫들과 전극사이 전도성 전해액(수용성)을 통과 시키고 드레싱 양과 부도체 피막 두께의 제어성을 높이기 위해 고주파 직류 펄스를 공급하였다. 가공 중 공작물의 입자 탈락으로 인한 불순물의 유입을 제거하여 전해액의 안정적인 공급이 이루어지도록 필터를 설치하였다. 공작물을 고정하기 위

해 리테이너와 템플릿을 사용하고 가압조건을 달리 하여 실험하였다. Table 1은 IED를 적용한 래핑 시스템의 실험조건을 나타낸다.

Table 1 Experiment Setup

Machine	In-process Electrolytic Dressing lapping Machine
Wheel	Cast-Iron metal bonded diamond lapping wheel(CIB-D) (ϕ 380 × w25 mm #2000 conc. 100)
Electrolytic Fluid	Solution type : H ₂ O_N3 (20 : 1)
Power	IP:25A τ on/off : 20/10 μ s
Wheel speed	70 rpm
Lapping Time	10 min
Work Piece	BN 0 (Si ₃ N ₄ /h-BN-0%) BN 10 (Si ₃ N ₄ /h-BN-10%) BN 20 (Si ₃ N ₄ /h-BN-20%) BN 30 (Si ₃ N ₄ /h-BN-30%)
Load	2.5kg, 5kg, 10kg, 15kg

가공된 머신어블 세라믹들은 접촉식 표면 조도 측정기(Taylor hobson SURTRONIC 3+)를 사용하여 표면 거칠기(Ra) 값을 측정하였다. 그리고 각 머신어블 세라믹 시편의 측정부분을 진공상태에서 백금막을 입힌 후 주사전자현미경(SEM)으로 촬영을 하였다.

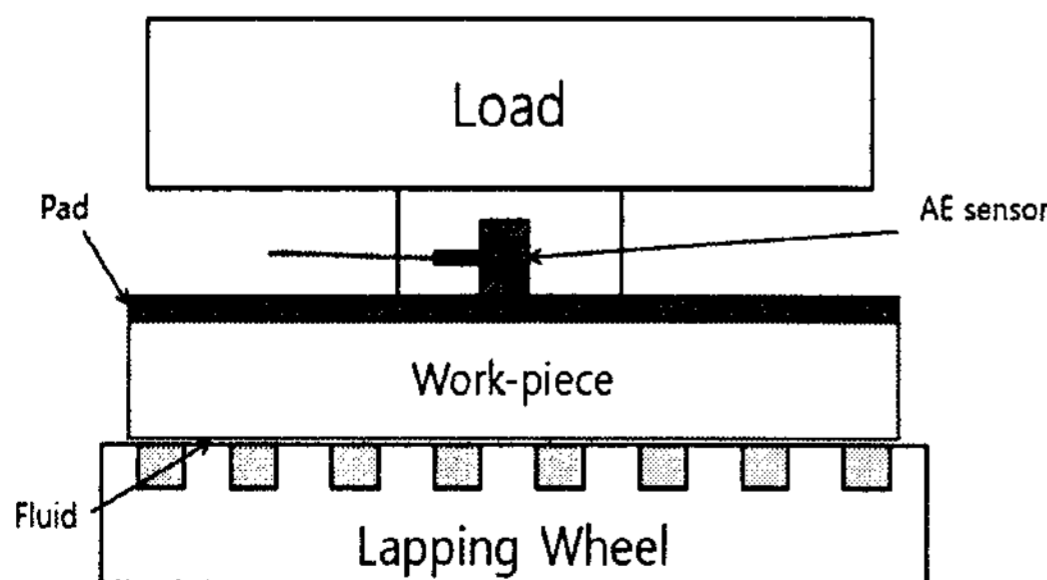
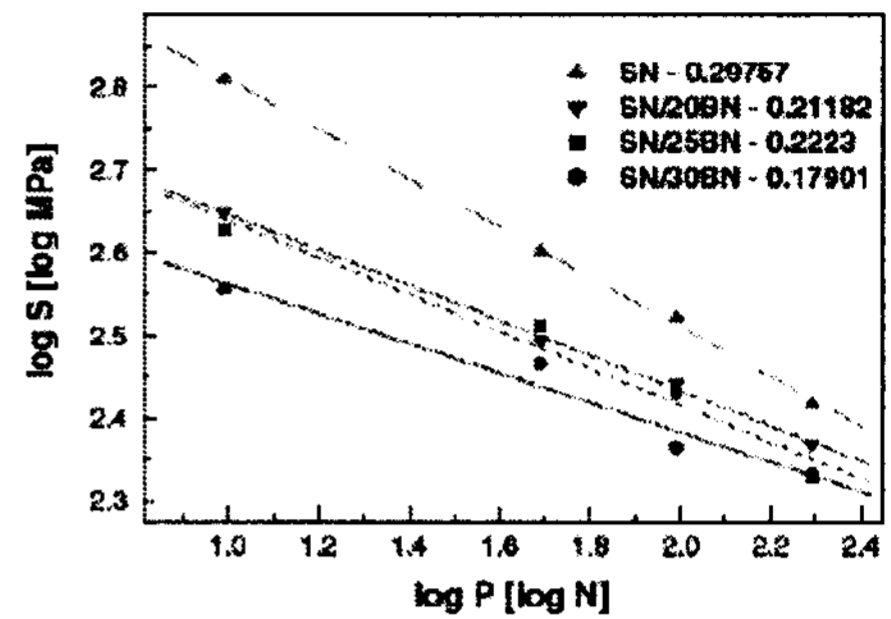


Fig. 3 Signal acquisition by AE sensor

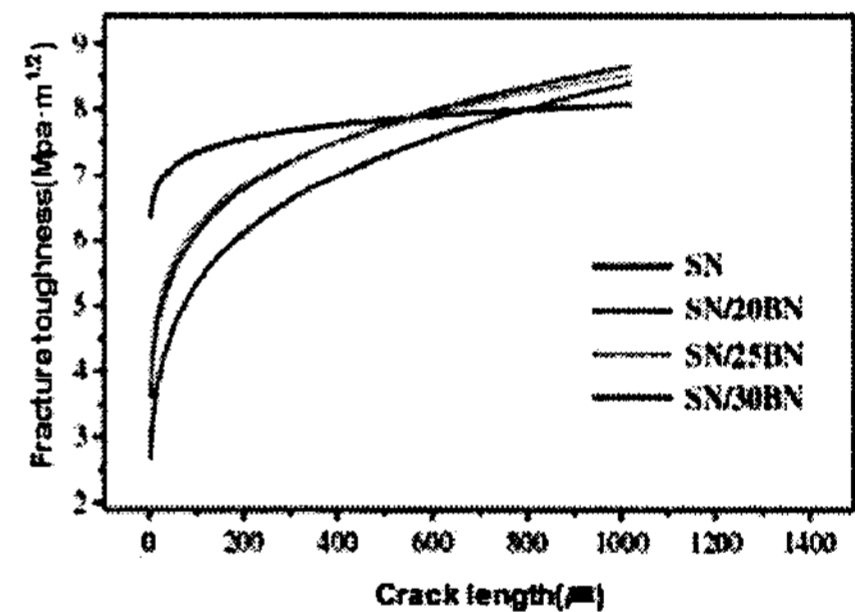
또한, Fig. 3과 같이 AE 센서를 부착하여 머신어블 세라믹의 IED를 적용한 래핑 가공 시 발생하는 신호를 획득하여 h-BN의 함량에 따른 머신어블 세라믹의 가공 특성을 모니터링 하였다.

3.2 Si₃N₄-BN 세라믹

Fig. 4(a)는 압입하중에 따른 압입강도를 나타낸 것이고, Fig. 4(b)는 R-Curve 특성을 나타낸 것이다.



(a) Indentation strength vs. indentation load of Si₃N₄-BN



(b) R-curves of Si₃N₄-BN

Fig. 4 Indentation strength vs. indentation load and R-curves of Si₃N₄

h-BN을 포함하지 않은 BN 0에서는 R-curve 거동이 나타나지 않거나 짧은 균열 길이에서 포화되며, h-BN을 함유한 Si₃N₄에서는 h-BN의 함량이 높아지면 균열성장에 따라 파괴 인성이 크게 증가하는 경향을 보이며 점점 더 균열길이에서 포화가 된다. h-BN을 함유하고 있는 Si₃N₄에서 이러한 현상과 가공성과의 관계를 살펴보면 짧은 균열길이에서의 낮은 파괴인성은 절삭공구가 초기에 도입될 시에 미세균열을 쉽게 형성하여 가공을 더욱 용이하게 해주며 절삭공구의 손상을 최소화하고, 긴 균열길이에서의 높은 파괴인성은 가공 시 생기는 균열의 성장을 방해하여 피삭체의 손상을 최소화 한다.^{3,4} Fig. 5는 Si₃N₄에 포함된 h-BN의 함량의 변화에 따른 파괴인성과 경도 값을 보여준다.⁴

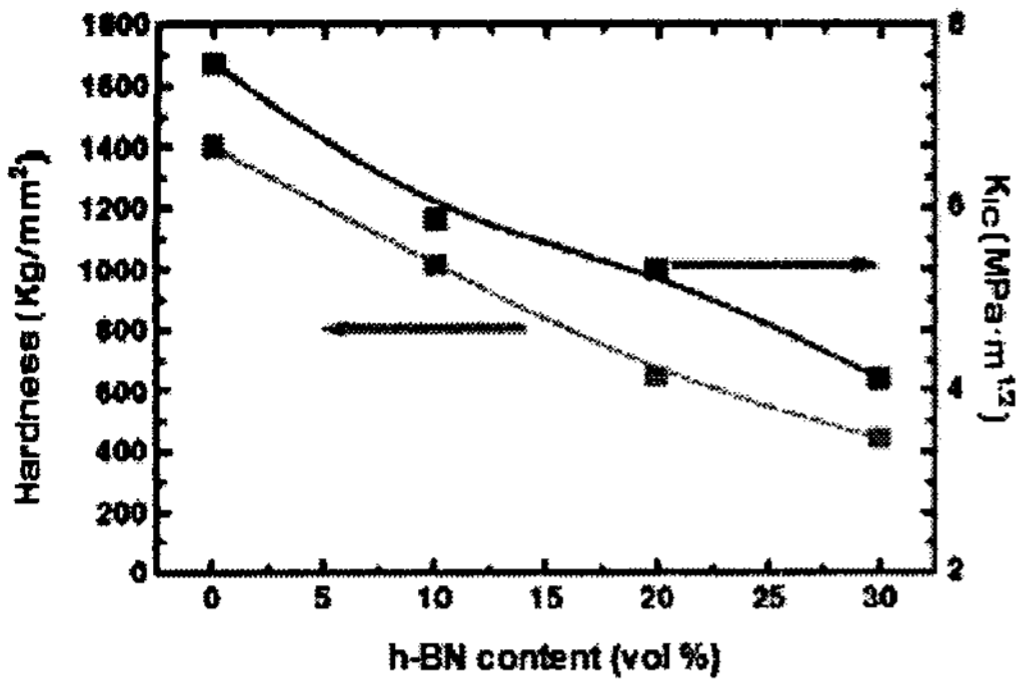


Fig. 5 The effect of the percentage of h-BN on the fracture toughness and hardness

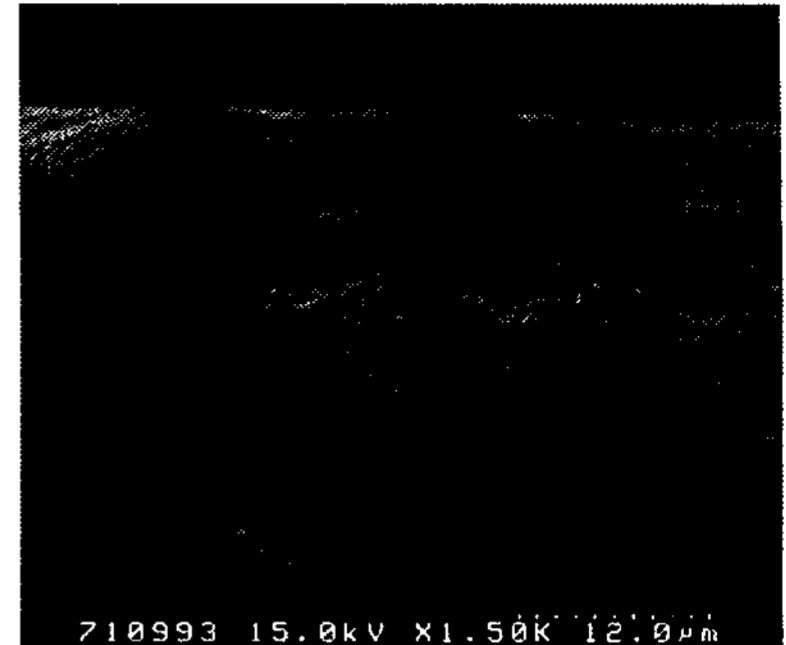
4. 실험결과

4.1 SEM 사진에 의한 표면분석

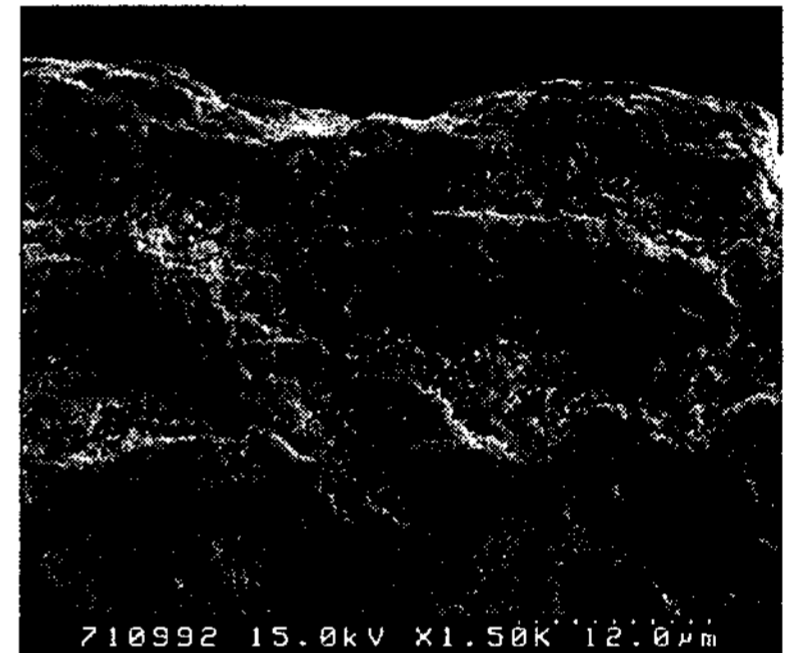
이번 연구에 사용된 머신어블 세라믹 시편들의 각 분자들의 구조적 위치와 결집정도를 알아보기 위해 시편 단면의 경계면을 주사전자현미경(SEM)을 통해 촬영하였다. Fig. 6은 시편의 단면 모서리 부분을 1,500배 확대 한 SEM사진이다.

순수 Si₃N₄인 BN 0은 그 결정들의 결집도가 치밀하고 결정이 크게 이루어진 것을 볼 수 있으나, h-BN이 함유된 BN 10, 20, 30은 그 함량이 늘어날수록 결정들의 입자 크기가 작고 결집도가 낮아지며 발생한 공극의 수가 많음을 볼 수 있다. 이는 머신어블 세라믹에 포함되어 있는 h-BN이 Si₃N₄의 분자 구조 사이에 위치하여 Si₃N₄의 결집도가 낮아져 공극이 발생하게 되고 이러한 공극으로 인하여 Si₃N₄의 분자 간 인력이 감소하게 되어 h-BN이 가진 벽계성은 Si₃N₄사이에서 탈락되어 균열을 차단하기 때문이다.

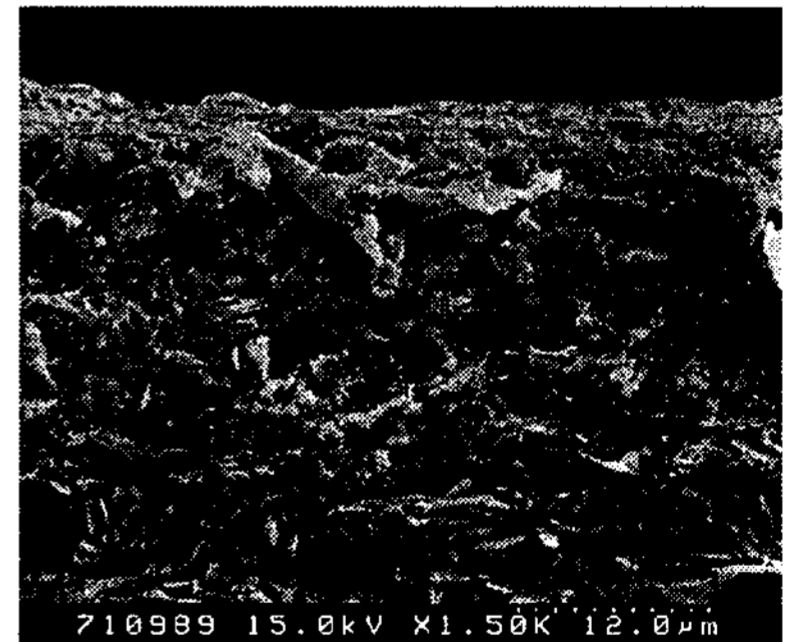
Fig. 7은 래핑 가공된 세라믹 시편을 2,000배 확대한 SEM 사진으로 BN 0은 Fig. 6에서와 마찬가지로 치밀하고 h-BN을 함유하고 있는 BN 10, 20, 30 들과 반대로 큰 결정을 갖는다. Fig. 7 (a)에서 BN 0은 래핑가공동안 Si₃N₄의 균열이 전파되어 발생된 균열이 적은 것에 비해 h-BN이 함유된 Si₃N₄에서는 균열의 발생이 많아진 것으로 보아 h-BN의 함유는 Si₃N₄의 래핑가공에 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다. Si₃N₄는 h-BN의 첨가량이 증가할수록 분자간의 결집도가 낮아져 강도와 경도 값이 감소된다.



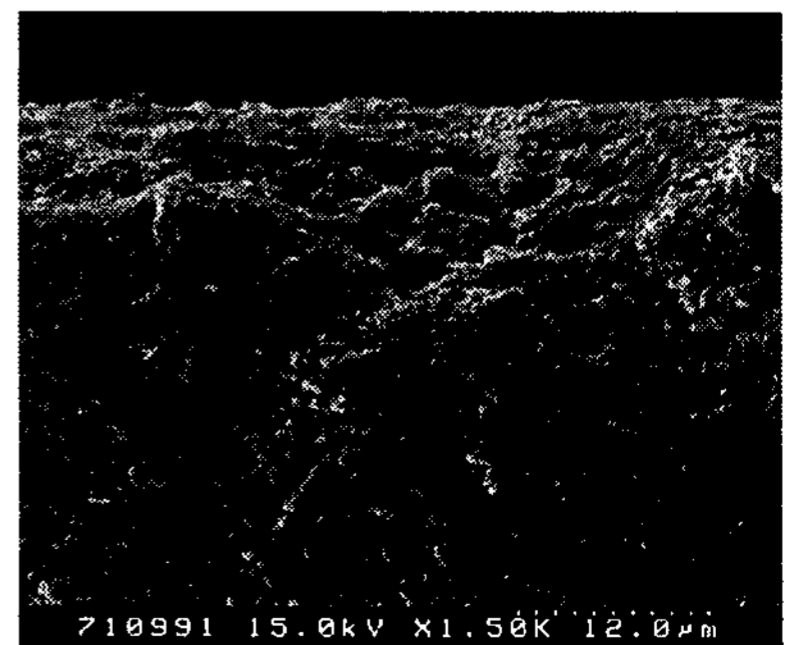
(a) BN 0



(b) BN 10

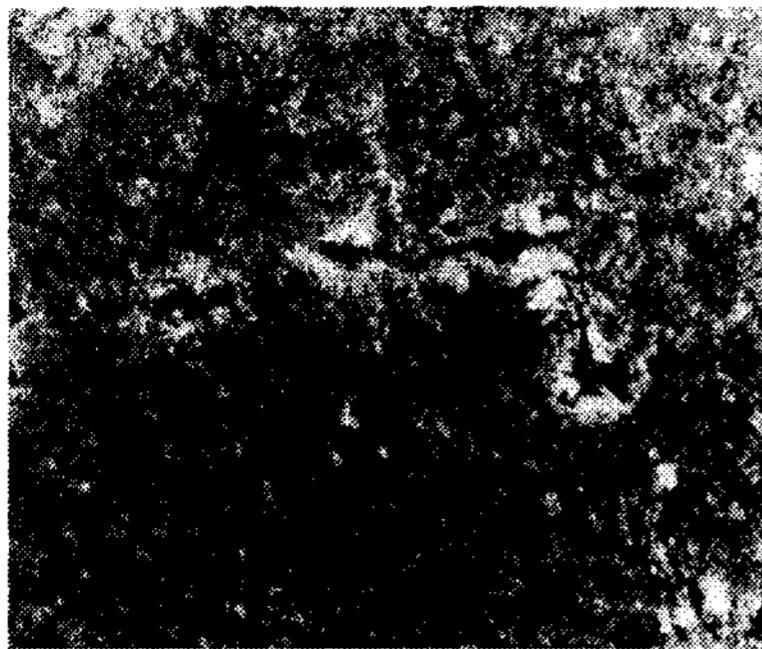


(c) BN 20

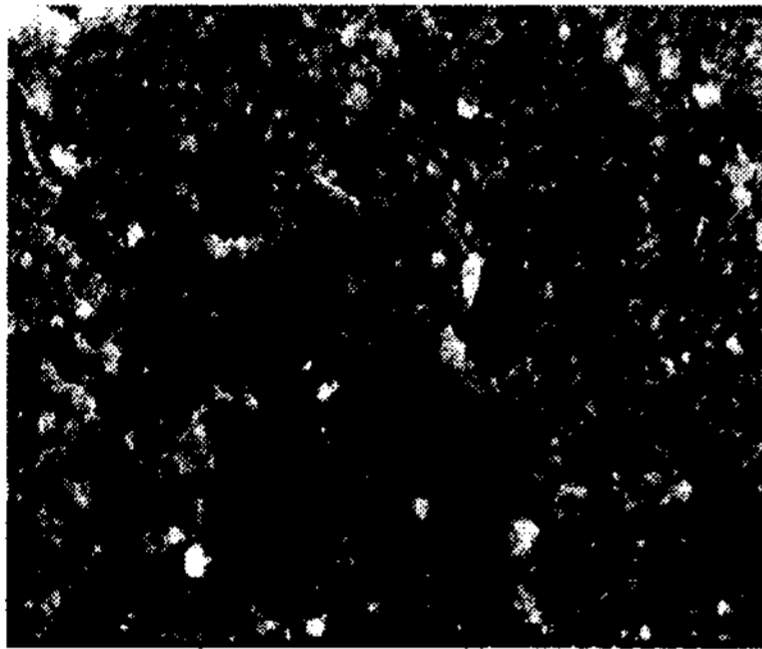


(d) BN 30

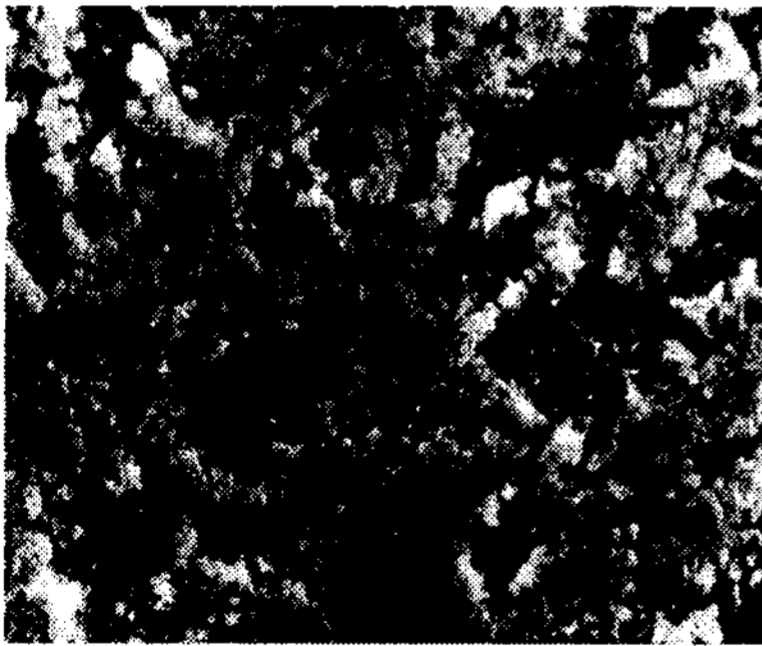
Fig. 6 SEM of Cross Section on Si₃N₄/h-BN



(a) BN 0



(b) BN 10



(c) BN20

Fig. 7 SEM of $Si_3N_4/h-BN$ surface after lapping with the applied force of 2.5kg

그로인해 h-BN이 함유된 Si_3N_4 는 입자 탈락이 BN 0에 비해 쉽게 일어나게 되어 표면에 많은 균열을 일으킨 것으로 판단된다.

BN20은 BN10과 비교하여 빈공간의 크기가 크고 그 주위의 결정들이 치밀하지 않음을 볼 수 있다. 이는 가공면 벽개성을 갖는 h-BN의 함량이 증가함에 따라 Si_3N_4 의 분자 간 결합도를 더욱 약화시켜 래핑 가공 중 입자들의 탈락이 많이 이루어졌기 때문이다. BN30은 BN20과 비슷한 양상을 보여 사진에서 제외하였다.

4.2 가압 조건에 따른 표면 거칠기 비교

래핑가공에서 중요한 변수로 자리 잡고 있는 요소 중 하나인 가압조건에서의 머신어블 세라믹의 가공경향을 알아보기 위하여 각각의 시편을 같은 조건하에서 가압하중의 변화를 주어 실험을 수행하였다.

래핑가공의 목적은 가공물 표면 거칠기의 향상으로서 고품위, 고품격의 표면을 얻는 것으로 래핑가공의 평가를 가공된 시편의 표면 거칠기(Ra) 값을 기준으로 평가를 내렸다. Fig. 8은 각 시편의 가압하중 조건별 Ra값의 평균을 나타낸 것으로서 4가지 조건의 결과 값을 보여주고 있다.

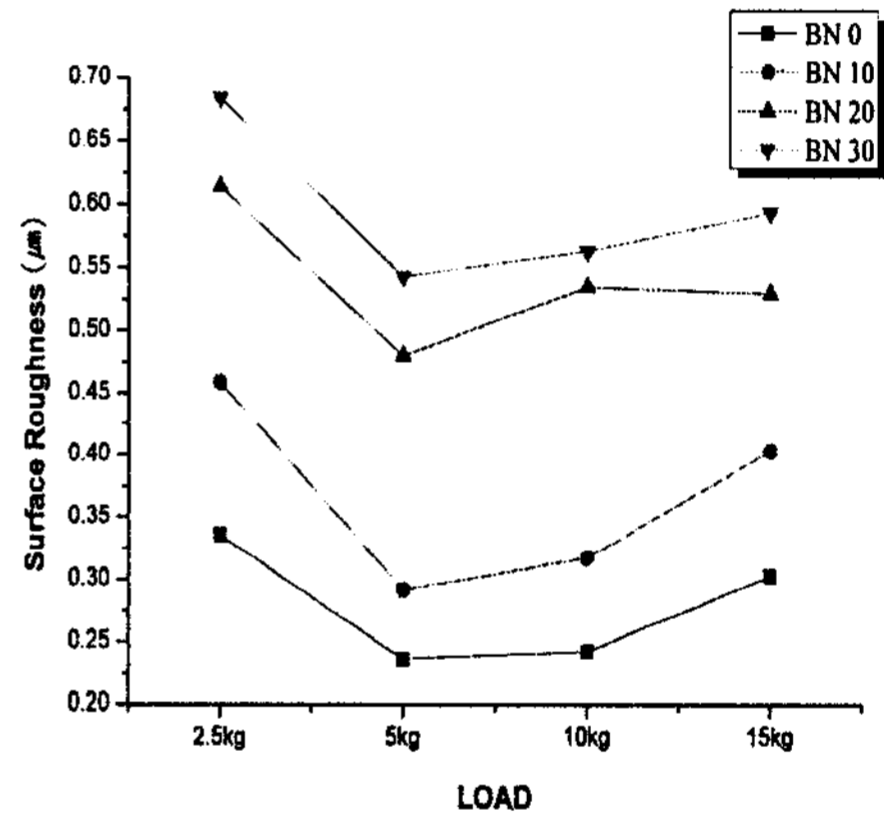


Fig. 8 Average of surface roughness as variable of load

우선 Fig. 8의 그래프에서 BN 0과 h-BN을 함유하고 있는 BN10, 20, 30의 평균 표면 거칠기 값을 비교해보면 BN 0의 표면 거칠기 값이 가장 낮게 나타나고 h-BN의 함량이 증가할수록 같은 조건 하에서의 표면 거칠기 값은 증가함을 볼 수 있는데 이는 앞에서 살펴본바와 같이 BN 0은 분자간의 결합력이 강해 강도와 경도가 높아 래핑 가공 중 입자탈락이 적어 표면의 균열이 적게 발생하여 표면 거칠기 값이 낮게 나온 반면 h-BN을 함유하고 있는 BN10, BN20 및 BN30은 많은 입자탈락과 그로 인한 균열 과 공극의 발생으로 인하여 표면 거칠기 값이 증가한 것으로 사료된다.

가압하중 별 평균 표면 거칠기 값을 비교해보면 가압하중이 5kg 일 때 가장 좋은 표면 거칠기 값을 보여준다. 가압 하중이 2,5kg에서 5kg으로 늘어났

을 경우 표면 거칠기 값이 낮아지지만 10kg 이상의 가압하중이 걸리면 표면 거칠기 값이 높은 것을 볼 수 있다. 이는 2.5kg의 가압하중에서는 Si_3N_4 세라믹 시편에 가해지는 압력이 낮아 세라믹 시편과 래핑 휠 사이의 마찰력이 줄어들어 원활한 절삭이 이루어지지 않았고, 10kg 이상의 하중에서는 세라믹 시편에 가해지는 압력이 커져 세라믹 시편과 래핑 휠 사이의 마찰력이 증가하여 과도한 절삭이 이루어졌기 때문인 것으로 판단할 수 있다.

h-BN이 함유된 BN10, BN20 그리고 BN30에서는 BN10의 표면 거칠기가 가장 좋게 나와 표면 가공 품질이 가장 좋은 것을 확인 할 수 있다.

h-BN의 함량이 래핑 가공 중 표면 거칠기에 미치는 영향을 알아보기 위해 가압하중 5kg일때 h-BN을 함유하고 있는 BN 10, BN 20 그리고 BN 30의 래핑 가공 전과 후의 평균 표면 거칠기 값을 Fig. 9에 나타내었다. h-BN의 함량이 증가할수록 가공 전과 후의 표면 거칠기 값의 차이가 점점 커짐을 확인할 수 있는데, 이는 h-BN의 함량이 많아질수록 래핑가공 중 절삭량이 증가한 것으로 볼 수 있다. 그러므로 h-BN이 Si_3N_4 의 가공성을 높여준다는 사항을 알 수 있다.

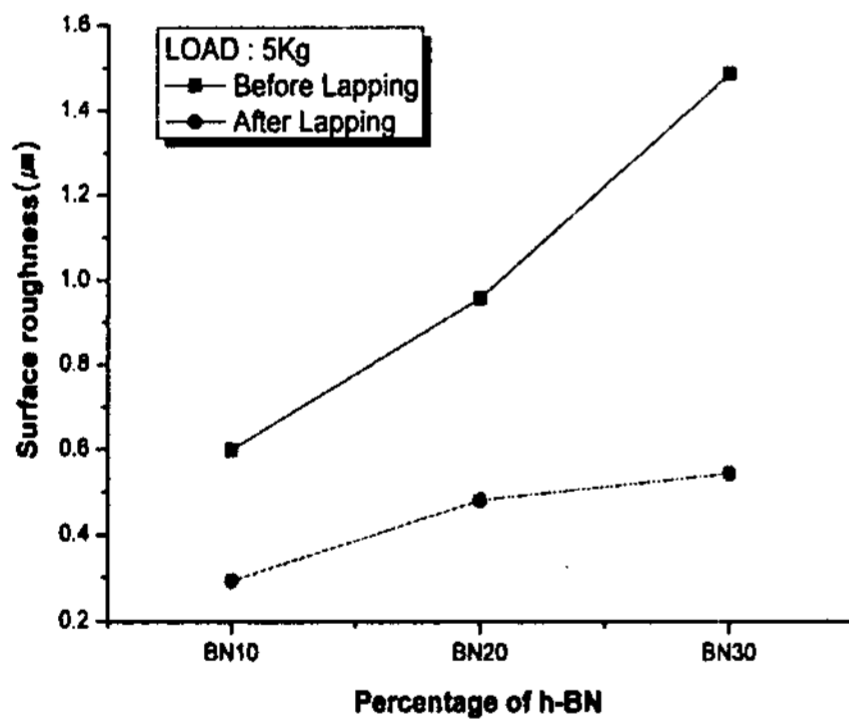
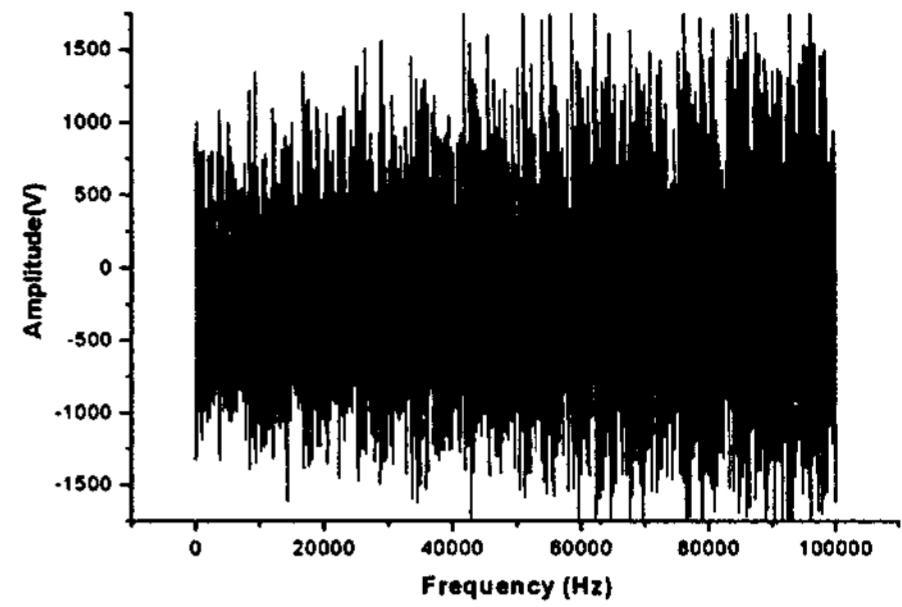


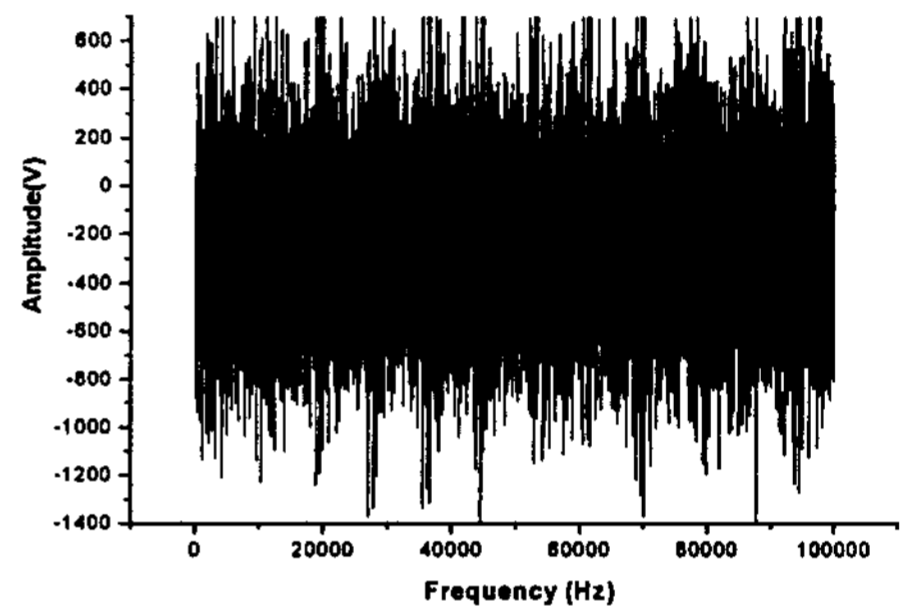
Fig. 9 Comparison of surface roughness before and after lapping

4.3 AE signal 분석

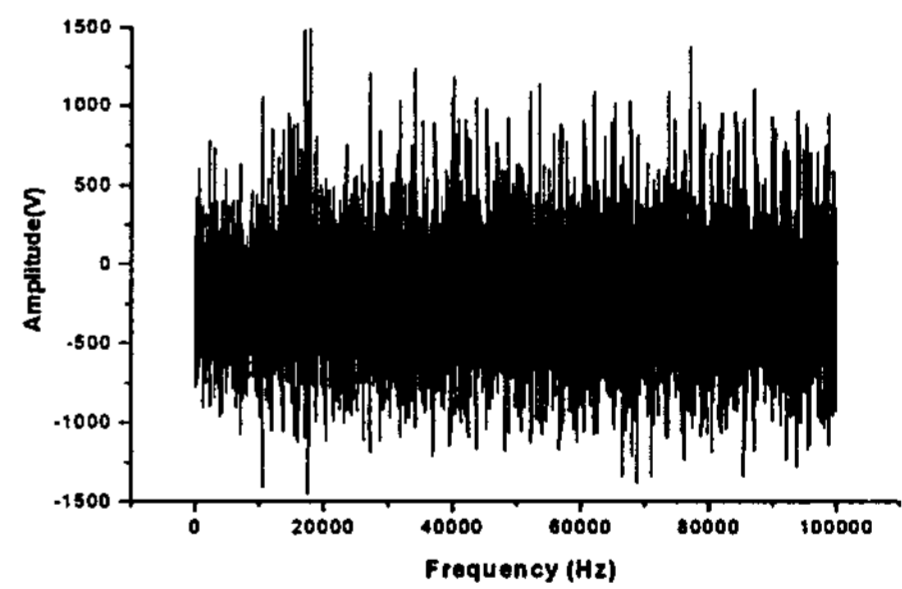
h-BN의 함량에 따른 Si_3N_4 의 표면 가공성을 모니터링 하기 위해 AE센서를 이용하여 분석 하였다. 5kg의 가압을 주어 머신어블 세라믹들의 IED 래핑 가공 시 발생하는 음파를 검출하였고 AE센서는 Fig. 3과 같이 부착하였다. 받아들인 데이터는 1초



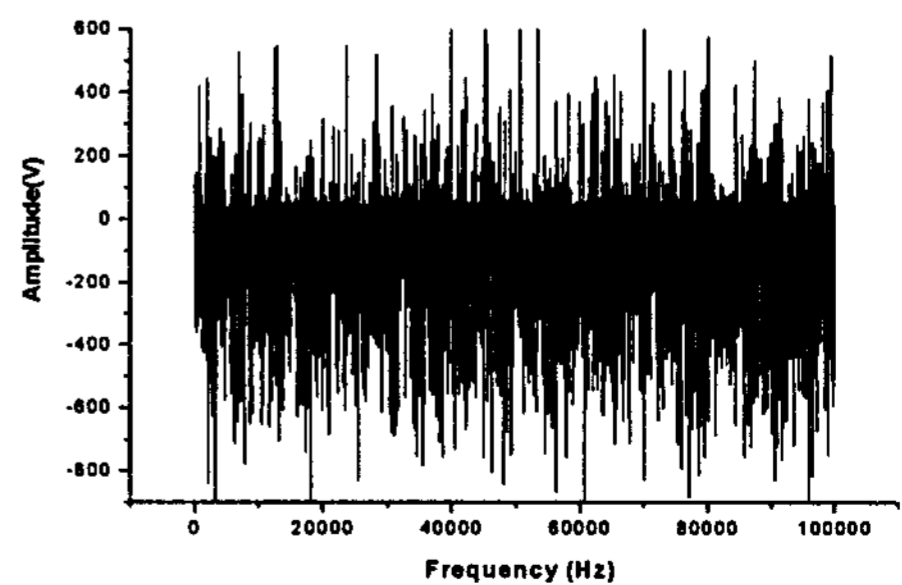
(a) BN 0



(b) BN 10



(c) BN 20



(d) BN 30

Fig. 10 Raw signal of AE sensor

에 10,000개로 10초간 실시한 것이다. Fig. 10은 머신어블 세라믹의 IED 래핑가공 시 AE센서에 의해 검출된 Raw signal을 나타낸다.

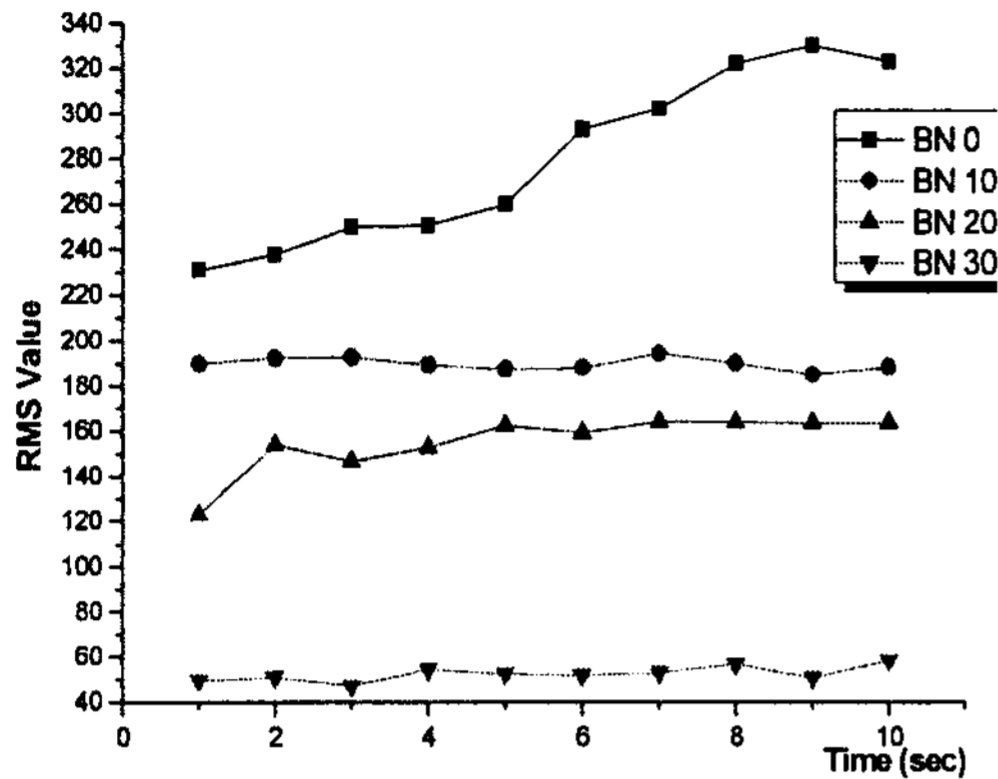


Fig. 11 RMS Value of AE sensor

Fig. 11은 AE센서에 의해 받아들여진 데이터를 RMS 값으로 변환하여 나타낸 것이다.

Fig. 10과 Fig. 11에서 살펴보면 h-BN의 함량이 높을수록 음파의 발생이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 h-BN의 함량이 높을수록 Si_3N_4 의 분자 간 결합도가 약화되어서 표면이 연화되어 가공 중 래핑 휠과의 접촉 시 저항이 줄어들어 음파발생이 낮았던 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 8의 가압하중이 5kg 일 때 h-BN의 함량에 따른 표면 거칠기 값과 비교해보면 음파 발생이 낮은 머신어블 세라믹 일수록 표면 거칠기 값이 나빠지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 h-BN의 함량이 높아짐에 따라 Si_3N_4 의 표면이 연화되어 가공 중 음파 발생이 낮아지고, 표면이 연화된 만큼 래핑 가공 중 절삭량이 증가하여 표면 품질에 나쁜 영향을 준 것으로 사료된다.

5. 결론

$Si_3N_4/h-BN$ 머신어블 세라믹의 재료 특성과 h-BN 함량 변화가 Si_3N_4 의 가공에 미치는 영향을 알아보기 위해 SEM사진 분석과 IED 래핑가공 중 가압조건의 변화에 따른 세라믹 시편의 표면 거칠기 평균을 측정하였고 AE 센서에 의한 모니터링을 실시하였다.

h-BN 함유는 Si_3N_4 의 래핑가공 결과에 영향을 미치는 요소이고 함량이 높을수록 Si_3N_4 의 분자 간 결합력이 약화되어 래핑 가공 중 입자들의 탈락을 촉진시켜 표면에 균열과 공극을 발생시켰다.

가압 하중에 따른 실험 결과에서는 5kg의 하중 일 때 표면가공품위가 가장 좋게 나타났고, 5kg보다 낮은 하중에서는 원활한 가공이 이루어지지 않았고 이보다 높은 하중에서는 과도한 절삭작용이 일어나 표면가공 품위를 떨어뜨렸다. h-BN이 함유된 Si_3N_4 세라믹 시편 중에서는 BN10에서 가장 좋은 표면 거칠기가 나왔다.

IED 래핑 가공 전과 후의 표면 거칠기 값 차이가 h-BN의 함량이 늘어날수록 증가하였고, AE 센서에 의한 신호에서도 h-BN의 함량이 높을수록 음파의 발생이 낮아져 h-BN의 함량이 늘어나면 Si_3N_4 의 표면이 연화되어 절삭량이 증가하여 가공성이 좋아짐을 알 수 있다.

참고문헌

1. Kim, S. H., Lee, Y. H., Cho, W. S., Kim, J. G., Cho, M. W., Lee, E. S. and Lee, J. H., "Effect of h-BN on Microstructure and Mechanical Properties of Si_3N_4 ," Journal of the Korean Ceramic Society, Vol. 40, No. 9, pp. 867-873, 2003.
2. Lian, G., Xihai, J., Jingguo, L., Yaogang, L. and Jing, S., "BN/ Si_3N_4 nanocomposite with high strength and good machinability," Materials Science and Engineering A, Vol. 415, Issues 1-2, pp. 145-148, 2006.
3. Kim, D. W., Cho, M. W., Cho, W. S., Lee, E. S. and Lee, J. H., "A Study on the Micro Hole Drilling Characteristics of Si_3N_4 -h-BN Based Machinable Ceramics," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 48-56, 2004.
4. Lee, E. S., Won, J. K., Chun, Y. J., Cho, M. W., Cho, W. S. and Lee, J. H., "Ultra-precision lapping of machinable ceramic Si_3N_4 -BN by in-process electrolytic dressing," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 31, No. 11, pp. 1101-1108, 2007.
5. Lee, E. S., Song, J. B. and Choi, J. Y., "A study on ultra-precision lapping of ceramics with

- in-process electrolytic dressing,” Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 9, No. 5, pp. 34-39, 2000.
6. Lee, S. H. and Son, J. M., “Optimization of Nano Machining Parameters Using Acoustic Emission and the Taguchi Method,” Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 163-170, 2004.
 7. Ye, S., Qingchang, M., Dechang, J. and Chunglong, G., “Effect of hexagonal BN on the microstructure and mechanical properties of Si_3N_4 ceramics,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, Issues 1-3, pp. 134-138, 2007.
 8. Wang, R., Pan, W., Chen, J., Jiang, M. and Fang, M., “Fabrication and characterization of machinable $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{h-BN}$ functionally graded materials,” Materials Research Bulletin, Vol. 37, Issue 7, pp. 1269-1277, 2007.
 9. Won, J. K. and Lee, E. S., “Ultra Precision Lapping of Machinable Ceramic by In-process Electrolytic Dressing,” Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 12, No. 3, pp. 223-226, 2003.