

연마판의 거칠기에 따르는 SiC 세라믹스의 굽힘강도 특성

남기우*† · 김은선**

* 부경대학교 신소재공학부, ** 부경대학교 학연협동기계공학과

Bending Strength Properties of SiC Ceramics at Different Roughness Values of Polishing Plates

Ki Woo Nam*† and Eun Sun Kim**

* Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

** Dept. of UR Interdisciplinary program of Mechanical Engineering, Graduate School, Pukyong Nat'l Univ.

(Received January 14, 2011 ; Revised April 4, 2011 ; Accepted April 4, 2011)

Key Words: SiC Ceramics(탄화규소 세라믹스), Bending Strength(굽힘 강도), Surface Grinding(표면 연마), Sintering Additive(소결보조제), Roughness of Polishing Plate(연마판 거칠기)

초록: 본 논문은 첨가제 SiO₂를 가지는 3종류의 SiC 세라믹스의 연마판 거칠기에 따르는 균열 치유 연구를 실시하였다. 혼합물은 질소가스 분위기에서 2053 K, 35 MPa, 1시간 동안 소결하였다. SiC 세라믹스 시험편의 최적 균열 치유 조건은 1373 K에서 1시간이다. 균열부의 치유 물질은 SiC와 O₂의 산화반응에 의한 유리상 SiO₂이다. 최적 치유 조건에서 미연마 SiC 세라믹스의 굽힘 강도는 완전하게 회복되지 않았다. 그러나 SAY, SAYS-1 및 SAYS-2 시험편에서 경제적인 면을 고려하면 1시간 열처리에서 상온 굽힘 강도가 가장 높게 나타난 SAY 시험편이 우수하다. 125 μm 연마판의 연마 시험편은 결함의 수나 크기가 줄어들었으나, 열처리 후에도 표면 미세 결함이 완전하게 치유되지 못하였다. 40 μm 연마판의 연마 시험편은 1시간 열처리 후 표면 결함이나 기공은 거의 없었으며, 굽힘 강도는 6 μm 연마판 경면 시험편의 강도만큼 회복하였다.

Abstract: This study was carried out on the crack healing of three types of SiC ceramics based on a SiO₂ additive, taking into account the roughness of the polishing plate used for polishing the specimens. The mixtures were subsequently hot-pressed in N₂ gas for one hour under 35 MPa at 2053 K. In these specimens, the optimized crack-healing condition was 1373 K for one hour in air. The crack-healing material of the cracked part was the glassy phase of SiO₂ that was formed by the oxidation of SiC. In the optimum healing condition, the bending strength of non-polished SiC ceramics was not completely recovered. However, the bending strength of the SAY specimen was excellent, considering the economic aspects of SAY, SAYS-1, and SAYS-2. The SAY specimen is definitely superior to the others after an hour of heat treatment. There was a decrease in the number and size of defects in the specimen polished by using a 125-μm polishing plate; however, the micro-surface defects were not completely repaired. The specimen polished by using a 40-μm polishing plate showed little voids or surface defects after an hour of heat treatment. The bending strength of the specimen mirror-polished by using a 6-μm polishing plate was completely recovered.

1. 서론

세라믹스 중에서도 공유결합성이 가장 높은 재료인 탄화규소 세라믹스는 고온강도, 내마모성, 내산화성, 내식성 및 크리프에 대한 저항성이 매우 우수하여 고온용 구조재료로 주목받고 있다. 하지만 세라믹스 부재는 가공 시 균열발생이 생기기 쉬울 뿐만 아니라 사용 중 균열이 발생하면 취성적인 성질로 인하여 급격한 파괴로 이어지고

그 파괴양상이 결함에 의하여 좌우된다. 세라믹스의 실제 응용에서는 표면에 있는 균열이 특히 나쁜 영향을 미친다. 그것은 표면균열의 선단이 날카로워, 재료의 표면에 최고 인장응력이 작용하여 큰 응력의 집중이 발생하여 재료의 신뢰성에도 큰 문제가 되고 있다. 따라서 균열의 둔화 및 최소화를 위하여 경면 연마 후 균열 치유 거동을 Si₃N₄,⁽¹⁾ Al₂O₃/SiC,⁽²⁾ SiC 휘스커⁽³⁾ 및 입자 강화 Al₂O₃,⁽⁴⁾ SiO₂ 첨가 Si₃N₄,⁽⁵⁾ 및 SiC⁽⁶⁾ 세라믹스를 사용하여 실시하였다.⁽⁷⁻¹³⁾ 그러나 경면 연마를 위해서는 많은 가공비가 필요하므로, 연구자

† Corresponding Author, namkw@pknu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

들은 Al_2O_3 ,⁽⁷⁾ Si_3N_4 ,⁽⁸⁾ SiC ,⁽⁸⁾ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$,⁽⁹⁻¹¹⁾ $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$,⁽¹²⁾ Mullite/ $\text{SiC}/\text{Y}_2\text{O}_3$ ⁽¹³⁾ 등을 사용하여, 기계 가공 후 열처리를 실시하여 강도 회복을 평가하였다.⁽¹⁴⁾ 이와 같이 경면 연마하지 않고도 재료 종류에 따른 최적의 균열치유조건에서 열처리하여 모재와 비슷하거나 높은 강도특성을 나타낸다면, 경제적인 측면에서 가공비가 크게 줄어들 것이라 생각한다.

따라서 본 연구에서는 연마판의 거칠기에 따르는 SiC 세라믹스의 강도 특성을 평가하였다. 즉, 저자들이 경면 연마 SiC 세라믹스에서 얻어진 최적 열처리 온도 1373 K⁽¹⁵⁾에서 열처리하여 표면 거칠기에 따르는 굽힘강도 특성을 평가하였다. 또, 최적 열처리 온도에서 열처리 시간에 따르는 표면 상태와 굽힘강도 특성을 평가하였다.

2. 재료 및 실험방법

본 연구에서는 평균입자의 크기가 0.27 μm 인 SiC(Ibiden, ultra fine, Japan)를 사용하였으며, 소결 보조제는 Al_2O_3 (0.1 μm , AKP700, Sumitomo chemical, Japan), Y_2O_3 (31 μm , CI chemical, Japan) 및 SiO_2 를 사용하였다. SiO_2 의 사용에 따른 SiC세라믹스의 제 특성을 평가하기 위하여 SiO_2 는 SiO_2 powder(25 nm, CI chemical, Japan)와 SiO_2 nano-colloid (12 wt.% solid solution, NGE Tech, Korea)의 2종류를 사용하였다. Al_2O_3 와 Y_2O_3 는 60 : 40의 비로 10 또는 12 wt.% 첨가하였으며, SiO_2 는 powder 및 nano-colloid를 0 또는 3 wt.% 첨가하였다. 각각의 분말들은 이소프로판올과 Si_3N_4 볼($\Phi 5$)을 사용하여 24시간 동안 혼합하였다. 각 시험편의 조성은 Table 1에 나타내었다. 혼합한 슬러리는 90 °C의 로에서 24시간 건조하여 용매를 제거하였다. 건조된 분말은 분쇄하고 106 μm 망으로 체질하여 소결에 사용하였다. 소결은 HP(Hot Press)장치로 60 * 38 mm 탄소몰드를 사용하여 질소 분위기에서 35 MPa의 압력으로 2053 K에서 1시간 동안 실시하였다. 소결된 재료는 3 * 4 * 18 mm 크기로 절단하여 거칠기 다른 연마판을 사용하여 연마하였다.

연마판은 #60~#3000을 사용하였으며, #60은 소결체의 표면에 고착되어 있는 이물질을 제거하기 위하여 연삭(Grinding)에 이용하였다. 경면 연마시 #60으로 연삭 후, #120, #500, #3000을 순차적으로 사용하였고, SAYS-1과 SAYS-2 미연마 시험편에 대하여 최적의 균열치유온도인 1373 K에서

Table 1 Batch composition for each specimen

Specimen	Batch composition (wt.%)
SAY	90 SiC - 6 Al_2O_3 - 4 Y_2O_3
SAYS-1	85 SiC - 7.2 Al_2O_3 - 4.8 Y_2O_3 - 3 SiO_2 powder
SAYS-2	85 SiC - 7.2 Al_2O_3 - 4.8 Y_2O_3 - 3 SiO_2 colloid

Table 2 Polishing plate information and surface roughness of SAY

Polishing plate information			
# [number/inch]	Diamond particle size [μm]	Order of polishing	Ry [μm]
#60	260	Grinding	8.57
#120	125	First	0.96
#500	40	Second	0.42
#3000	6	Third	0.17

열처리 시간을 1~10시간으로 변화시켜 표면 상태에 따른 강도특성을 연구하였다. 연삭 후 일차 연마 시 사용한 125 μm 연마판(#120)과 40 μm 연마판(#500)에서 연마 후 최적의 치유온도 1373 K에서 열처리를 1, 3시간 실시하였다. 굽힘 강도 시험편(단, 스펀길이 16 mm)은 JIS규격에 따라 제작하였고, 굽힘 시험의 cross head 속도는 0.5 mm/min로 하였다.

한편, 시험편의 표면의 조도 및 관찰을 위하여 조도측정(HOMMEL TESTER T1000) 및 SEM분석을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미연마재의 강도 특성

Table 2는 연마판 정보와 연마정도에 따른 조도측정결과를 나타낸다.

경면연마 시험편과 미연마 시험편(연삭 시험편; Grinding)의 표면사진과 표면 조도는 Fig. 1에서 나타낸다. SAYS-1과 SAYS-2 경면연마 시험편의 조도는 $R_y = 0.04 \mu\text{m}$ 이었다. 그러나 미연마 시험편은 연삭에 의하여 표면이 거칠었고, 조도는 R_y

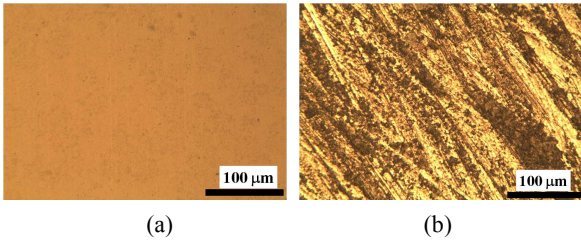


Fig. 1 Appearance of surface condition of SAY; (a) Polished specimen, (b) Non-polished specimen

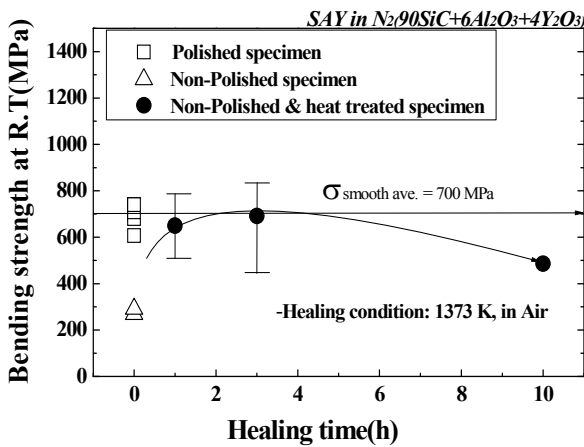


Fig. 2 Relationship between healing time and bending strength of non-polished specimen from 260 μm polishing plate

= 16.39 μm이었다. SAY 경면연마 시험편의 조도는 Ry = 0.17 μm이었고, 미연마 시험편은 Ry = 8.57 μm이었다. 만약, 경면연마하지 않고도 재료 종류에 따른 최적의 균열치유조건에서 열처리하여 모재와 비슷하거나 높은 강도특성을 나타낸다면, 경제적인 측면에서 가공비가 크게 줄어들 이 점이 있을 것이다. 이와 같은 관점에서 SAYS-1, SAYS-2 및 SAY 미연마 시험편에 대하여 최적의 균열치유온도인 1373 K에서 열처리 시간을 1~10시간으로 변화시켜 강도 특성을 연구하였다.

Fig. 2는 대표적으로 SAY 미연마한 시험편의 굽힘 강도에 대한 열처리 시간 의존성을 나타낸다. 그림에서 1 ~ 10시간 열처리한 미연마 모재의 굽힘 강도(●)는 연마 시험편(□)의 모재와 비슷하거나 낮은 강도를 나타내었다. 그러나 미연마 모재의 강도(△)보다 약 1.5~2.5배의 강도 상승을 나타내었다. 따라서 연삭에 의하여 생성된 거친 표면은 적절한 열처리 시간 및 최적 치유온도인 1373 K에서 충분히 치유될 수 있다고 판단된다.

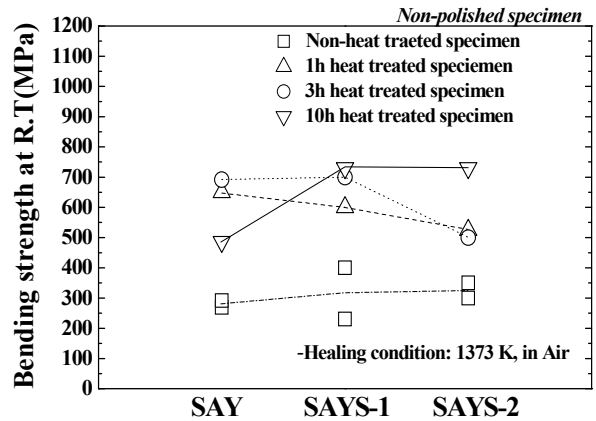
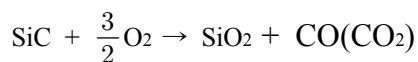


Fig. 3 Relationship between healing time and bending strength of non-polished specimen from 260 μm polishing plate at SAY, SAYS-1 and SAYS-2

Fig. 3은 각각의 시험편에서 열처리 시간과 굽힘 강도의 비교를 나타낸 것이다. 1시간 열처리한 경우는 SAY의 굽힘 강도가 가장 높게 나타났다. 3시간 열처리한 경우는 SAY의 굽힘 강도가 SAYS-1보다 약 10 MPa 낮게 나타났으나, SAYS-2보다 약 150 MPa 높게 나타나 3가지 재료 중 SAY의 경우가 가장 우수하다고 판단된다. 10시간 열처리한 경우는 SAYS-2가 SAYS-1과 SAY보다 약 200 MPa 높게 나타났다. 그러나 에너지 효율 등 경제적인 측면을 고려하면 1시간 열처리에서 강도가 가장 높게 나타난 SAY가 가장 우수하다고 판단된다.

상세한 조사를 위해 SAY시험편의 치유시간에 따른 표면상태의 SEM사진을 Fig. 4에 나타내었다. (a)는 미연마 시험편, (b)와 (c)는 1373 K에서 각각 1시간 및 3시간 열처리한 시험편, (d)는 (c)를 확대한 것이다. (a)는 표면 결함을 많이 확인할 수 있다. (b)는 (a)에 존재하던 표면 결함 등이 치유에 의하여 많이 사라졌지만, 여전히 미세한 표면 결함이 약간 남아있다. 이와 같이 표면 결함이 치유되는 것은 Lee 등의 연구에 의하면, 다음과 같은 반응에 의하여 이루어진다.⁽¹⁶⁾



SiO₂는 유리상과 결정상이 있으며, 균열 치유는 유리상에 의하여 치유가 된다.

1373 K에서 3시간 열처리한 시험편 (c)와 (d)는 열처리 시 표면에 기지가 기화되어 빠져나간 홀(hole)들을 발견할 수 있다. 고온에서 시험편의 노출 시간이 늘어남에 따라서 기지의 기화로 인한

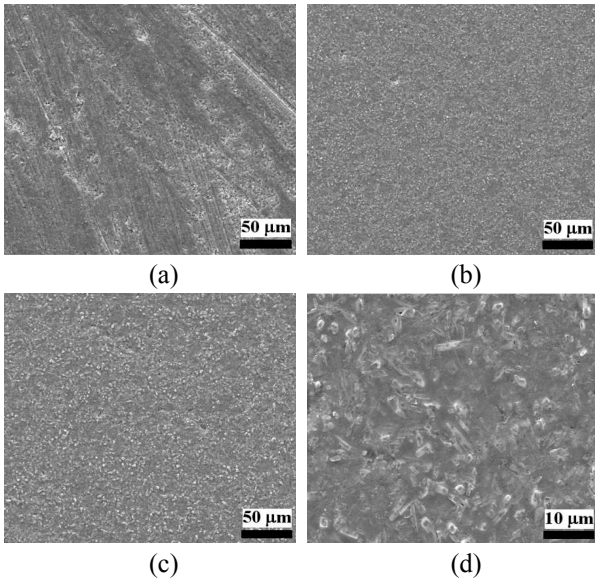


Fig. 4 Surface SEM images of non-polished before and after heat treatment.; (a) Non-polished, (b) Non-polished and heat treated at 1373 K for 1 h in air, (c) Non-polished and heat treated at 1373 K for 3 h in air, (d) Non-polished and heat treated at 1373 K for 3 h in air

홀의 발생과 재료의 열화가 일어났으며 결정이 과도하게 성장하여 굽힘 강도가 더 이상 증가하지 않았다고 판단된다. 즉, 열처리 시간의 증가에 따른 재료의 열화는 균열치유특성에 나쁜 영향을 미쳤으며, 열처리 시간 증가에 따른 균열치유 거동에 대하여 추후 자세한 연구가 필요하다고 판단된다.

3.2 125 μm 연마판에서 SAY의 강도 특성

미연마 모재는 연삭 시 발생한 큰 표면 결함들로 인하여 완전한 치유가 불가능했다. 그러나 SAY 시험편의 경우는 1시간 열처리에서 가장 높은 치유효과를 나타내었다. 이러한 결과로부터 본 절에서는 SAY를 사용하여 연마 정도에 따르는 치유 효과를 평가하였다. 연삭 후 125 μm 연마판(#120)에서 연마 후 최적의 치유온도 1373 K에서 1 ~ 10시간 열처리한 SAY의 굽힘 강도 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에는 비교하기 위하여 6 μm 연마판에서 경면 연마한 시험편(▲)의 결과도 같이 나타내었다. 경면 연마한 모재 시험편은 굽힘 강도(Δ)는 약 700 MPa을 나타내었다. 그리고 1시간 및 3시간 열처리 시험편은 약 910 MPa의 강도를 나타내었으며, 10시간 열처리한 시험편은 약 980 MPa을 나타내었다. 이와 같

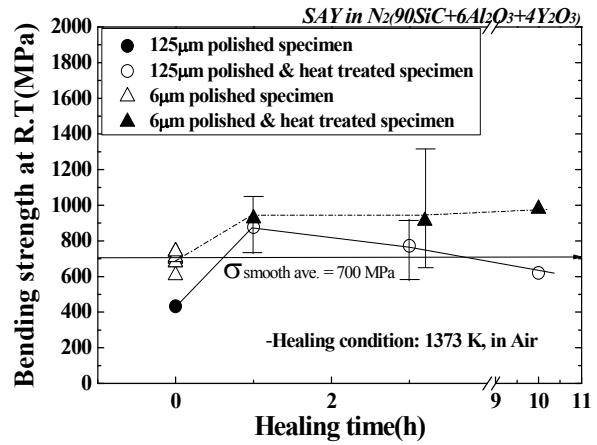


Fig. 5 Relationship between heating time and bending strength of polished smooth specimen from 125 μm polishing plate

이 경면 연마한 모재 시험편은 열처리 시간이 증가함에 따라서 강도가 약간 상승하는 것을 알 수 있었다. 한편 125 μm 연마판에서 연마한 모재(●)의 평균 굽힘 강도는 경면 연마한 모재 시험편(△, 약 700 MPa)보다 약 300 MPa 정도 낮은 굽힘 강도를 나타내었다. 그러나 1시간 열처리재(○)의 평균 굽힘 강도는 경면 연마 열처리재(▲)와 비슷하게 나타났다. 이것은 연마 시 생성된 미세 균열이 모두 치유가 되었다는 것을 의미한다. 하지만 열처리 시간이 증가함에 따라서 강도는 저하하는 것을 알 수 있었다. 10시간 열처리재는 산화 및 기지의 기화에 의하여 강도가 더욱 떨어졌다. 이것은 열처리 시간이 길어짐에 따라서 표면 결함이 산화되어 더 큰 결함을 만들기 때문이다.

3.3 40 μm 연마판에서 SAY의 강도 특성

40 μm 연마판에서 연마한 시험편을 1 ~ 10시간 동안 열처리하여 얻어진 굽힘 강도의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 40 μm의 연마판에서 연마한 모재(●)는 6 μm에서 경면 연마한 모재(△, 약 700 MPa)보다 약 270 MPa 정도 낮은 430 MPa의 굽힘 강도를 나타내었으나, 1시간 열처리재의 경우는 약 900 MPa로 비슷하게 나타났다. 40 μm에서 연마한 3시간 열처리재의 경우에는 6 μm에서 경면 연마한 모재 평균(약 700 MPa)보다 약 200 MPa 정도 높은 약 900 MPa로 나타나 경면 모재의 강도보다 우수하였다. 그러나 40 μm에서 연마한 3시간 및 10시간 열처리재는 1시간 열처리재와 비슷한 강도(약 900 MPa)를 나타내어 열처리 시간과는 관계없었다. 한편 6 μm에서 경면 연마한 시

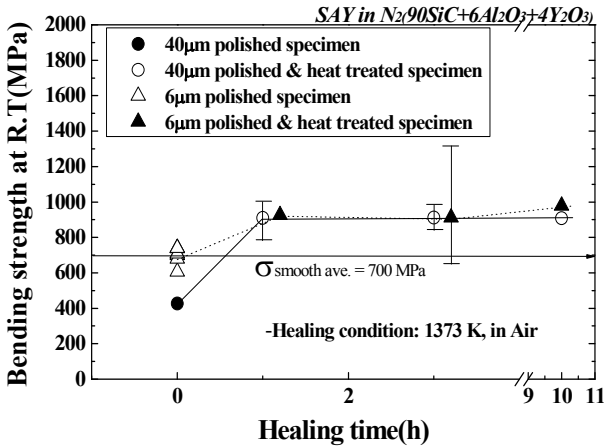


Fig. 6 Relationship between healing time and bending strength of polished smooth specimen from 40 μm polishing plate

험편도 1 ~ 10시간 열처리에서 평균 굽힘 강도가 비슷하게 나타났다. 이것은 경면 연마를 하지 않고 40 μm 연마판에서 연마한 정도의 미세 결함은 균열 치유를 통하여 강도가 회복할 수 있다는 것을 의미한다.

미연마 시험편과 125 μm 및 40 μm 연마판에서 연마된 시험편을 사용하여 열처리 시간에 따르는 시험편 표면 미세 결함의 크기를 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 미연마 모재(\square)의 경우는 표면결함의 수가 많고 크기도 1.3 ~ 4.5 μm 까지 다양한 분포를 나타내었다. 그러나 1시간 열처리재(\triangle)의 경우는 0.8 ~ 2.5 μm , 3시간 열처리재(\circ)의 경우는 0.5 ~ 2.2 μm 의 표면 미세 결함이 확인되었다. 이 결과로부터 미연마재의 표면 미세결함은 약간 치유할 수 있으나, 완전하게 치유할 수는 없다고 판단된다. 125 μm 연마판 연마재의 경우, 모재(\square)는 1.3 ~ 2.8 μm 의 표면결함을 가지며, 1시간 열처리재(\triangle)는 0.3 ~ 1.8 μm , 3시간 열처리재(\circ)는 1.2 ~ 1.8 μm 의 표면결함이 확인되었다. 미연마재의 경우보다 결함의 수나 크기가 줄어들었으나, 열처리 후에도 표면 결함이 완전하게 치유되지 못하였다고 판단된다. 40 μm 연마판 연마재의 경우, 모재(\square)는 0.3 ~ 2 μm 의 표면 결함이 확인되었으며, 1시간 열처리재(\triangle)의 경우는 0.25 μm , 3시간 열처리재(\circ)의 경우 0.3 μm 의 표면 결함이 확인되었다. 40 μm 연마판 연마재의 경우, 열처리 후 표면 결함이나 기공은 거의 없었으며, 그 크기 또한 매우 작았다. 이러한 결과와 Fig. 6의 결과로부터 약 1.5 μm 이하의 표면 미세 결함은 열처리를 통하여 치유할 수 있다고 판단된다.

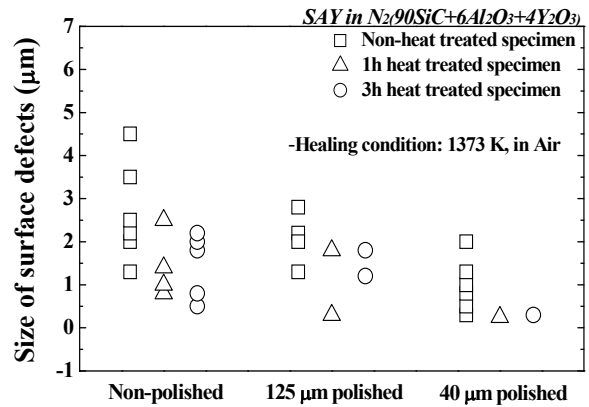


Fig. 7 Size of surface defects according to healing time of polished smooth specimen from each polishing plate

위와 같은 결과로부터 균열에 민감한 세라믹스를 가공할 때 경면연마까지 시행하지 않고도 가공시 발생하는 균열과 같은 결함을 치유프로세스를 활용하여 강도 회복이 가능하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 균열치유능력을 가지는 탄화규소 세라믹스에 대하여 연마판 거칠기에 따르는 연마 정도에 따른 균열치유특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) SiC 세라믹스의 미연마 시험편은 최적 치유 온도 1373 K에서 강도가 완전하게 회복되지 못하였다. 그러나 SAY, SAYS-1 및 SAYS-2 시험편에서 경제적인 면을 고려하면 1시간 열처리에서 상온 굽힘 강도가 가장 높게 나타난 SAY 시험편이 우수하다.
- (2) 125 μm 연마판의 연마 시험편은 결함의 수나 크기가 줄어들었으나, 열처리 후에도 표면 미세 결함이 완전하게 치유되지 못하였다.
- (3) 40 μm 연마판의 연마 시험편은 1시간 열처리 후 표면 결함이나 기공은 거의 없었으며, 굽힘 강도는 6 μm 연마판 경면 시험편의 강도만큼 회복하였다.
- (4) 이것으로부터 균열에 민감한 세라믹스를 가공할 때 경면연마까지 시행하지 않고도 가공시 발생하는 균열과 같은 결함을 치유프로세스를 활용하여 강도 회복이 가능하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Nam, K. W., Park, S. W., Do, J. Y. and Ahn, S. H., 2008, "Cracked-Healing and Bending

- Strength of Si_3N_4 Ceramics," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 32, pp. 957~962.
- (2) Nam, K. W., 2010, "Crack-Healing Behavior and Bending Strength of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ Composite Ceramics According to the Amount of Added Y_2O_3 ," *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol. 11, pp. 471~474.
- (3) Takahashi, K., Yokouchi, M., Lee, S. K. and Ando, K., 2003, "Crack-Healing Behavior of Al_2O_3 Toughened by SiC Whiskers," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 86, pp. 2143~2147.
- (4) Takahashi, K., Uchiide, K., Kimura, Y., Nakao, W. and Ando, K., 2007, "Threshold Stress for Crack Healing of Mullite Reinforced by SiC Whiskers and SiC Particles and Resultant Fatigue Strength at the Healing Temperature," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 90, pp. 2159~2164.
- (5) Nam, K. W., Kim, J. S. and Lee, H. B., 2009, "Room Temperature Strength and Crack Healing Morphology of Si_3N_4 Composite Ceramics with SiO_2 Colloidal," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 33, pp. 652~657.
- (6) Nam, K. W., Kim, J. S. and Park, S. W., 2010, "Crack-Healing Behavior and Bending Strength Properties of SiC Ceramics Based on the Type of Additive SiO_2 Employed," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 24, pp. 2869~2874.
- (7) Matsuo, Y., Ogasawara, T., Kimura, S., Sato, S. and Yasuda, E., 1991, "The Effect of Annealing on Surface Machining Damage of Alumina Ceramics," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, Vol. 99, pp. 384~389.
- (8) Liu, M., Takagi, J. and Tsukuda, A., 2002, "Strength Recovery of Ground Ceramics via Electric Furnace Heating," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 127, pp. 107~114.
- (9) Wu, H. Z., Lawrence, C. W., Roberts, S. G. and Derby, B., 1998, "The Strength of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ Nanocomposite After Grinding and Annealing," *Acta Mater.*, Vol. 46, pp. 3839~3848.
- (10) Osada, T., Nakao, W., Takahashi, K., Ando, K. and Saito, S., 2007, "Strength Recovery Behavior of Machined $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ Nano Composite Ceramics by Crack Healing," *J. Euro. Ceram. Soc.*, Vol. 27, pp. 261~3267.
- (11) Nam, K. W., Kim, H. S., Son, C. S., Kim, S. K. and Ahn, S. H., 2007, "Cracked-Healing and Elevated Temperature Bending Strength of Al_2O_3 Composite Ceramics by an Amount of Y_2O_3 ," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 31, pp. 1053~1133.
- (12) Jung, Y. S., Nakao, W., Takahashi, K., Ando, K. and Saito, S., 2009, "Crack Healing of Machining Cracks Introduced by Wheel Grinding and Resultant High Temperature Mechanical Properties in a $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ Composite," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 92, pp. 167~173.
- (13) Lee, S. K., Ono, M., Nakao, W., Takahashi, K. and Ando, K., 2005, "Crack-Healing Behavior of Mullite/SiC/ Y_2O_3 Composites and Its Application to the Structural Integrity of Machined Components," *J. Euro. Ceram. Soc.*, Vol. 25, pp. 3495~3502.
- (14) Nam, K. W. and Ahn, S. H., 2007, "Crack Healing of Ceramics," *Journal of the KSME*, Vol. 47, pp. 67~71.
- (15) Nam, K. W. and Kim, J. S., 2010, "Critical Crack Size of Healing Possibility of SiC Ceramics," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 3236~3239.
- (16) 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," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 25, No. 5, pp. 569~576.