

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.12.987>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 크기가 다른 Shot에 의하여 Peening한 ZrO<sub>2</sub> 복합 세라믹스의 비커스 압입하중에 따른 와이블 통계 해석<sup>§</sup>

안석환\* · 김대식\*\* · 남기우\*\*\*†

\* 중원대학교 메카트로닉스학과, \*\* 부경대학교 학연협동기계공학, \*\*\* 부경대학교 재료공학과

### Weibull Statistical Analysis According to Vickers Indentation Load of Peened ZrO<sub>2</sub> Composites Ceramics by Different Shot Size

Seok Hwan Ahn\*, Dae Sik Kim\*\* and Ki Woo Nam\*\*\*†

\* Dept. of Mechatronics, Jungwon Univ.,

\*\* UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

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

(Received January 19, 2016 ; Revised July 21, 2016 ; Accepted October 4, 2016)

**Key Words:** Vickers Hardness(비커스경도), Weibull Statistical Analysis(와이블 통계 해석), Shot Peening(쇼트 피닝), Ball Size(볼 크기), ZrO<sub>2</sub> Composite Ceramics(ZrO<sub>2</sub> 복합 세라믹스)

**초록:** 본 연구는 ZrO<sub>2</sub>의 비커스 경도에 대한 쇼트 피닝 효과를 연구하였다. 쇼트의 크기는  $\phi 180 \mu\text{m}$ 와  $\phi 300 \mu\text{m}$ 를 사용하여 피닝하였다. 비커스경도는 압입하중 98 N과 294 N으로 측정하였다. 비커스 경도는 와이블 통계 해석을 수행하여, 볼 크기 및 압입 하중에 따르는 영향을 평가하였다. 척도 파라미터는 98 N 압입 하중 및  $\phi 180 \mu\text{m}$  쇼트 볼에서 크게 나타났다. 형상 파라미터도 대체적으로 작은 쇼트 볼(180sp)이 크게 나타났다. 이것으로부터 SP처리에 의한 압축 잔류 응력은 ZrO<sub>2</sub>의 기계적 성질의 향상에 좋은 방법이다.

**Abstract:** In this study, the effects of shot peening (SP) on the Vickers hardness of ZrO<sub>2</sub> were studied. The size of the shot balls were  $\phi 180 \mu\text{m}$  and  $\phi 300 \mu\text{m}$ . The Vickers hardness was measured using an indentation load of 98 N and 294 N. The Vickers hardness was evaluated using Weibull statistical analysis. The scale parameters were significantly evident from the indentation load of 98 N and the shot ball of  $\phi 180 \mu\text{m}$ . Generally, the shape parameters were also evident from the small short ball (180sp). Thus, it is shown that the introduction of a compressive residual stress by SP is an effective technique for increasing the mechanical properties of ZrO<sub>2</sub>.

#### 1. 서 론

일부 세라믹스는 뛰어난 균열 치유능력과 높은 기계적 특성을 가지고 있어, 차세대 기계구조용 부재 및 절삭 공구로 응용이 기대된다. 많은 연구자들은 SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC 등의 균열치유 현상을 연구하였다.<sup>(1~7)</sup> ZrO<sub>2</sub>는 임플란트 및 인공

뼈에 많이 사용되고 있지만, 구조용으로 적용이 다소 부족한 편이다. 구조용으로 적용하기 위하여 SiC 및 TiO<sub>2</sub>를 첨가한 ZrO<sub>2</sub>는 균열 치유 특성, 기계적 특성<sup>(8)</sup> 및 비커스 경도의 와이블 통계 해석을 실시하였다.<sup>(9~11)</sup> SiC의 첨가에 의하여 강도는 약간 저하하지만, 균열 치유 능력을 보였고, TiO<sub>2</sub>를 첨가함으로써 강도가 향상되었다. 또한 비커스 경도는 와이블 확률 분포를 잘 따랐다. 그리고 연구자들은 세라믹스의 표면에 잔류응력을 부여하여, 파괴 인성 및 기계적 특성이 향상되는 것을 확인하였다.<sup>(12~14)</sup>

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015. 11. 10.-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, [namkw@pknu.ac.kr](mailto:namkw@pknu.ac.kr)

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

**Table 1** Batch composition and processing conditions

Speci.	Batch composition (wt.%)	Conditions	
		Sintering	Heat treatment
Z	100 wt.% ZrO <sub>2</sub>	30 MPa, 1723 K, 1 hr in vacuum	1073 K, 5hr in air
ZS	90 wt.% ZrO <sub>2</sub> 10 wt.% SiC		1173 K, 1hr in air
ZST	88.8 wt.% ZrO <sub>2</sub> 10 wt.% SiC 1.2wt.% TiO <sub>2</sub>		1073 K, 1hr in air

**Table 2** Shot peening conditions

Shot system	Direct pressure system
Shot material	ZrO <sub>2</sub> (1250 Hv)
Shot diameter	φ 180 μm, φ 300 μm
Shot pressure	0.2 MPa
Projector distance	100 mm
Time	30 sec
Coverage	300 %

본 연구는 ZrO<sub>2</sub> 단상재와 복합재에 잔류 응력을 부여하기 위하여, 2종류의 쇼트 볼을 사용하였다. 모재와 잔류응력이 부여된 시험편은 2종류의 압입하중으로 비커스 경도를 측정하여, 쇼트 볼 크기 및 압입 하중의 영향을 평가하기 위하여 와이블 통계 해석을 수행하였다.<sup>(15)</sup>

## 2. 재료 및 실험 방법

소결에 사용한 분말은 평균입경 0.026 μm의 ZrO<sub>2</sub> (TZ-3Y-E, Tosho Co. Ltd., Japan)와 ZrO<sub>2</sub>에 균열 치유특성을 부여하기 위하여 평균입경 0.27 μm의 SiC(Wako Pure Chemical Industries, Ltd Japan)를 사용하였다. TiO<sub>2</sub> 첨가에 따르는 ZrO<sub>2</sub>의 특성을 평가하기 위하여 평균입경 0.3 μm 분말(아나타제)을 사용하였다. 분말은 이소프로판올과 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 볼(φ5)을 사용하여 24시간 혼합한 후, 363 K의 전기로에서 24시간 건조하여 용매를 제거하였다. 건조된 분말은 분쇄하여 소결에 사용하였다. 각 시험편의 분말 조성, 소결 및 열처리 조건은 Table 1에 나타내었다. 여기서 ZrO<sub>2</sub> 복합재 ZST는 열처리에 의하여 큰 균열 및 찢김 등의 발생이 적고, 기계적 특성이 우수한 조건을 선정하였다.<sup>(8)</sup>

소결은 1,723 K, 30 MPa의 압력, 진공에서 1시

**Table 3** Condition for X-ray diffraction

Characteristic X-ray	Cu-K α
X-ray tube	Cu
Diffraction plane	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (323)
Diffraction angle [deg]	141.26
Tube voltage [kV]	40
Tube current [mA]	30

간 동안 유지시킨 후, 로냉하여 60×35×3 mm의 소결체를 얻었다. 쇼트피닝(SP) 시험편은 경면 연마하여 사용하였다.

쇼트피닝 표면 처리는 직압식 쇼트피닝 장치(FDQ type)를 사용하였다. Table 2에 SP표면처리 조건을 나타낸다. 이 후 φ 180 μm로 쇼트피닝한 시험편은 180sp 시험편이라 하고, φ 300 μm로 쇼트피닝한 시험편은 300sp 시험편이라 부른다.

표면조도측정은 촉침식 표면 조도 측정기를 사용하였으며, 측정방법은 JIS B0601에 기준하여 측정하였다. 측정 길이는 1.60 mm(cut off 0.80 mm), 측정속도는 0.30 mm/sec로 하였다. SP처리에 의한 표면의 잔류응력은 x-ray 잔류응력 측정장치를 사용하여 평가하였다. Table 3에 x-ray 잔류응력 측정 조건을 나타낸다.

경도는 비커스 경도기(HV-114, Mitutoyo)를 사용하여, 모재 시험편, 열처리 시험편, 180sp 시험편 및 300sp 시험편에서 98 N 및 294 N의 압입하중으로 10초간 측정하였다. 와이블 통계 해석은 각 시험편에서 22개의 경도를 측정하여 그 중에서 20개를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 모재와 열처리재의 와이블 통계 해석

Fig. 1은 Z, ZS 및 ZST 시험편의 비커스 경도를 나타낸다. 여기서 Z, ZS, ZST는 모재 시험편을 나타내고, Zh, ZSh 및 ZSTh는 열처리재 시험편을 나타낸다. 이 때 비커스 경도기의 압입하중은 98 N이다. 그림에서 Z 모재 시험편은 1200~1450 Hv로 분산이 많으나, ZS와 ZST 모재 시험편은 각각 1290~1350 Hv 및 1270~1310로 나타났다. 그리고 Zh 열처리재 시험편은 Z 모재 시험편보다는 분산이 적으며, ZSh와 ZSTh 열처리재 시험편은 ZS와 ZST 모재 시험편보다 약간 증가하였다. 특히 ZSTh 열처리재 시험편은 평균 약

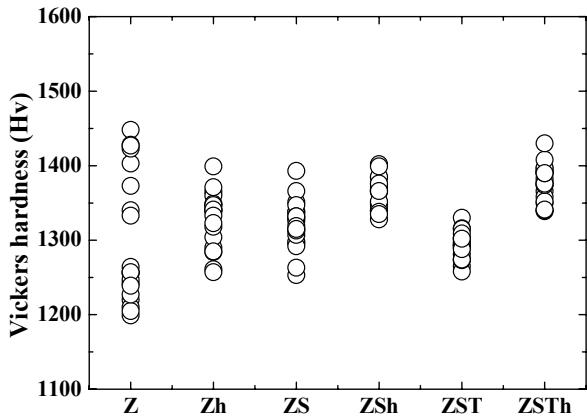


Fig. 1 Comparison of Vickers hardness between as-received specimen (Z, ZS and ZST) and heat treatment specimen (Zh, ZSh and ZSTh)

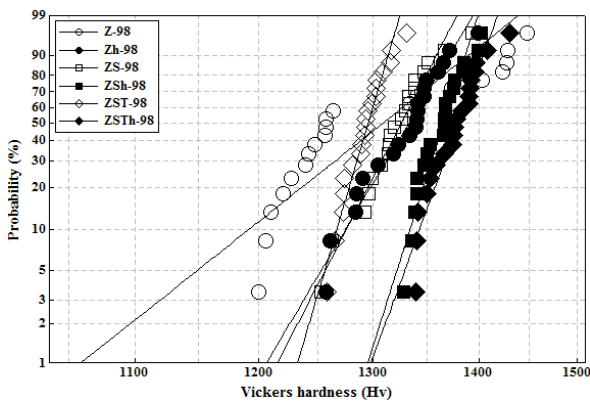


Fig. 2 Weibull plot of Vickers hardness of as-received specimen(Z, ZS, ZST) and heat treatment specimen(Zh, ZSh, ZSTh) under indentation load of 98 N

6%정도 증가하였다. 그러나 비커스 경도는 일정한 값인 확정치가 아니라 통계적으로 변동하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 변동하는 비커스 경도 해석의 편의성과 최약 링크 가설을 고려하여, 다음과 같은 2-파라미터 와이블 분포를 적용하여 와이블 통계 해석을 실시하였다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right]$$

여기서  $\alpha$ 는 확률변수의 변동성을 의미하는 형상 파라미터이며,  $\beta$ 는 63.2% 확률에서 특성치를 나타내는 척도 파라미터이다.

Fig. 2는 Z, ZS 및 ZST의 모재 시험편과 열처리재 시험편에 대한 비커스 경도를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 비커스 경도는 와이블 확률

Table 4 The estimated Weibull parameters of 3 kinds of specimen under 98 N

Parameter Specimen	Shape parameter	Scale parameter	Mean/STD COV
Z	19.9994	1332.99	1305/98.19 0.075
Zh	42.2839	1344.40	1328/37.37 0.028
ZS	48.7790	1335.54	1321/32.47 0.025
ZSh	79.2620	1371.89	1363/21.04 0.015
ZST	85.5526	1300.63	1293/18.12 0.014
ZSTh	69.1720	1386.97	1376/24.36 0.018

분포에 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 비커스 경도에 대한 해석 결과를 Table 4에 나타낸다. 표에는 산술통계에 의한 평균, 표준편차(Std) 및 변동계수(COV)도 함께 나타내었다. 이상의 결과에서, Z 모재 시험편과 ZS 모재 시험편의 척도 파라미터는 비슷하게 나타났으며, ZST 모재 시험편은 이들보다 약 2.5% 정도 적게 나타났다. 그리고 형상 파라미터는 Z 모재 시험편이 약 20, ZS 및 ZST 모재 시험편은 각각 약 49 및 86으로 나타났다. 즉, ZrO<sub>2</sub>에 합성 원소가 증가할수록 크게 나타났다. 그러나 Zh 열처리 시험편은 약 42로서 Z 모재 시험편보다 약 111% 크게 나타났다. ZSh 열처리 시험편은 ZS 모재 시험편보다 약 62% 크게 나타났으나, ZSTh 열처리 시험편은 ZST 모재 시험편의 약 20% 작게 나타났다. 또한 변동계수는 형상 파라미터와 비슷한 경향을 나타내었다. 즉, Z 모재 시험편은 0.075로 가장 크게 나타났으나, Zh 열처리 시험편과 ZS 모재 시험편, ZSh 열처리 시험편과 ZST 모재 시험편 및 ZSTh 열처리 시험편은 비슷하였다.

### 3.2 압입 하중에 따른 와이블 통계 해석

Fig. 3(a)~(c)는 압입 하중 98 N 및 294 N에서 얻어진 Z, ZS 및 ZST 모재 시험편 및 열처리 시험편의 비커스 경도를 와이블 확률 분포로 나타낸 것이다. Z, ZS 및 ZST 모재 시험편의 경도 분포는 98 N이 294 N보다 높으며, 분산이 작은 경향을 나타내었다. TiO<sub>2</sub> 첨가에 의한 ZST 시험편의 경도 분포는 하중에 의한 차이가 크게 나타났다.

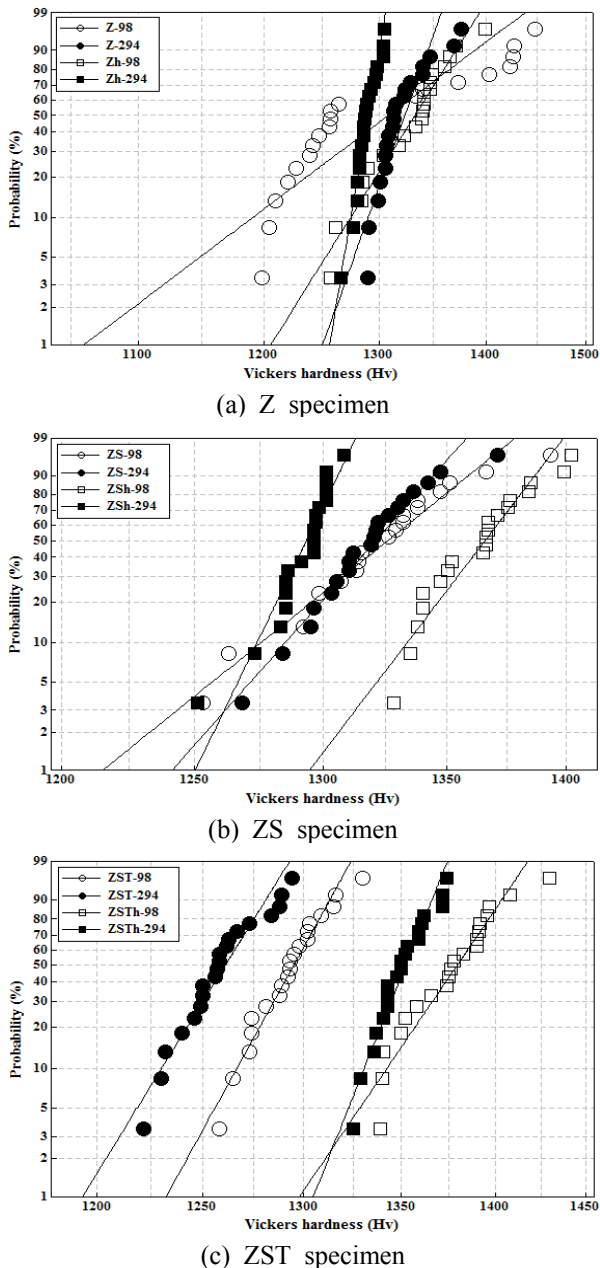


Fig. 3 Weibull plot of Vickers hardness according to indentation load

Zh 열처리 시험편의 경도 분포는 모재 시험편과 거의 비슷한 확률 분포를 나타내었으며, 분산이 작게 나타났다. ZSh 및 ZSTh 열처리 시험편의 경도 분포는 모재 시험편보다 약간 적게 나타났으나, 분산이 작아지는 경향을 나타내었다. 특히 Zh 및 ZSh 열처리 시험편은 294 N이 작게 나타났으나, TiO<sub>2</sub> 첨가한 ZSTh 열처리 시험편은 294 N이 크게 나타났다. 이것은 TiO<sub>2</sub>의 첨가는 열처리에 의한 강화 효과가 있는 것으로 판단한다. 또한 열처리 시험편의 경도가 모재 시험편보

Table 5 The estimated Weibull parameters of Z specimen by indentation load

Specimen	Parameter	Shape parameter	Scale parameter	Mean/STD COV
Z-98		19.9994	1332.99	1305/98.19 0.075
Z-294		74.2877	1329.96	1320/23.58 0.018
Zh-98		42.2839	1344.40	1328/37.37 0.028
Zh-294		157.5700	1293.22	1289/9.876 0.008

Table 6 The estimated Weibull parameters of ZS specimen by indentation load

Specimen	Parameter	Shape parameter	Scale parameter	Mean/STD COV
ZS-98		48.7790	1335.54	1321/32.47 0.025
ZS-294		68.3922	1327.78	1317/23.18 0.018
ZSh-98		79.2620	1371.89	1363/21.04 0.015
ZSh-294		125.2040	1296.92	1291/12.63 0.010

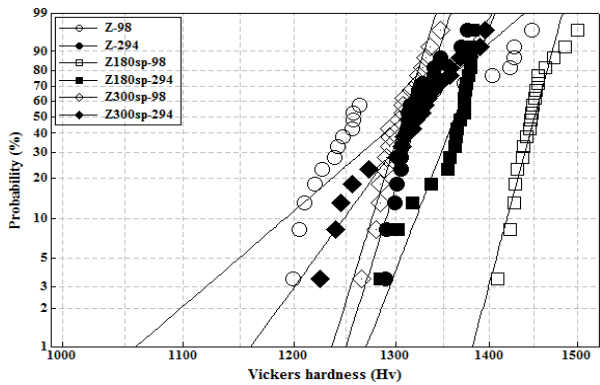
Table 7 The estimated Weibull parameters of ZST specimen by indentation load

Specimen	Parameter	Shape parameter	Scale parameter	Mean/STD COV
ZST-98		85.5526	1300.63	1293/18.12 0.014
ZST-294		76.3153	1267.26	1258/20.02 0.016
ZSTh-98		69.1720	1386.97	1376/24.36 0.018
ZSTh-294		117.6830	1356.64	1350/13.85 0.010

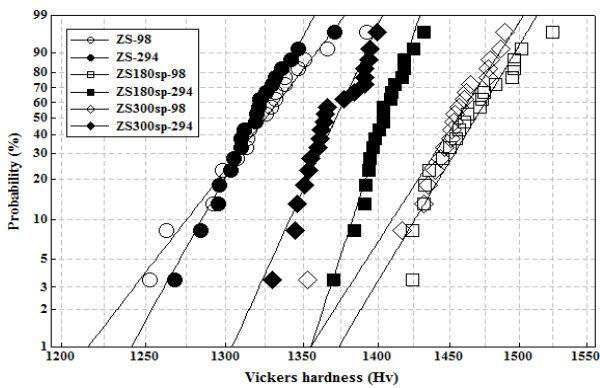
다 작아지는 것은 열처리에 의하여 표면에 형성된 산화물의 영향이라 판단한다.

Table 5~7은 비커스 하중 98 N과 294 N 하중에서 Z, ZS 및 ZST 모재 시험편 및 열처리 시험편에 대하여 추정된 와이블 분포함수의 파라미터 값을 나타낸다. 또한 Table 5~7에 산술통계에 의한 평균, 표준편차 및 변동계수(COV)도 함께 나타내었다.

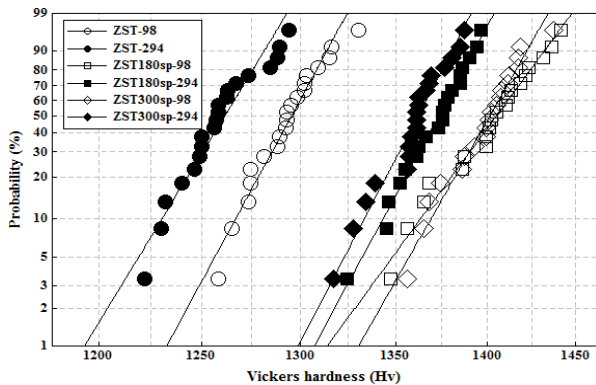
Fig. 4(a)~(c)는 압입 하중 98 N 및 294 N에서



(a) Z specimen



(b) ZS specimen



(c) ZST specimen

Fig. 4 Weibull plot of Vickers hardness according to indentation load

얻어진 Z, ZS 및 ZST의 모재 시험편, 180sp 시험편 및 300sp 시험편의 비커스 경도를 와이블 확률분포로 나타낸 것이다. (a), (b), (c)에서 각각의 SP시험편은 압입 하중에 관계없이 모재 시험편보다 확률 분포가 높게 나타났다. (a) Z180sp-98 시험편은 Z-98 모재 시험편 및 Z300sp-98 시험편보다 높은 확률 분포를 나타내었다. 그러나 294 N의 압입 하중은 98 N보다 분산이 작게 나타났다. Z180sp-294 시험편은 Z180sp-98 시험편보다 확률

Table 8 Weibull parameters of Z specimens

Parameter Specimen	Shape parameter	Scale parameter	Mean/STD COV
Z-98	19.9994	1332.99	1305/98.19 0.075
Z-294	74.2877	1329.96	1320/23.58 0.018
Z180sp-98	86.1561	1456.83	1448/21.20 0.015
Z180sp-294	60.4441	1370.82	1359/27.60 0.020
Z300sp-98	74.6613	1314.99	1306/21.30 0.016
Z300sp-294	32.1173	1338.44	1317/48.46 0.037

Table 9 Weibull parameters of ZS specimens

Parameter Specimen	Shape parameter	Scale parameter	Mean/STD COV
ZS-98	48.7790	1335.54	1321/32.47 0.025
ZS-294	68.3922	1327.78	1317/23.18 0.018
ZS180sp-98	63.2353	1477.35	1465/28.63 0.020
ZS180sp-294	114.6060	1410.36	1404/14.61 0.010
ZS300sp-98	58.8670	1464.94	1452/29.98 0.021
ZS300sp-294	83.2629	1377.94	1369/20.02 0.015

Table 10 Weibull parameters of ZST specimens

Parameter Specimen	Shape parameter	Scale parameter	Mean/STD COV
ZST-98	85.5526	1300.63	1293/18.12 0.014
ZST-294	76.3153	1267.26	1258/20.02 0.016
ZST180sp-98	63.1090	1412.85	1401/26.15 0.019
ZST180sp-294	85.9629	1378.78	1370/18.70 0.014
ZST300sp-98	81.4170	1407.34	1398/20.37 0.015
ZST300sp-294	102.4820	1368.06	1361/15.97 0.012

분포가 작게 나타났지만, Z-294 및 Z300sp-294 시험편보다 높은 확률 분포를 나타내었다.

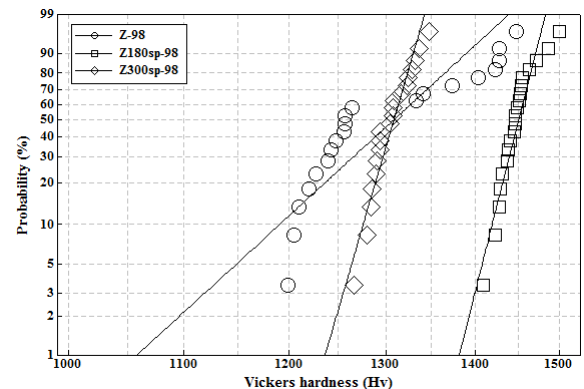
(b) ZS180sp-98 시험편은 ZS300sp-98 시험편보

다 높은 확률 분포를 나타내었으며, ZS180sp-98 및 ZS300sp-98 시험편은 ZS-98 모재 시험편보다 98 N 압입 하중에 의한 확률 분포도 98 N 압입 하중과 같은 경향을 나타내었다. (c) ZST 시험편의 확률 분포는 ZST180sp-98, ZST300sp-98 및 ZST-98 순으로 높게 나타났다. 294N에 의한 확률 분포는 98N보다 작게 나타났으나, 경향은 같았다. 그리고 98 N 압입하중에 의한 확률 분포가 294 N 압입 하중의 확률 분포보다 높게 나타났으며, 각 시험편에서 180sp 시험편의 경도 확률 분포가 높게 나타났다.

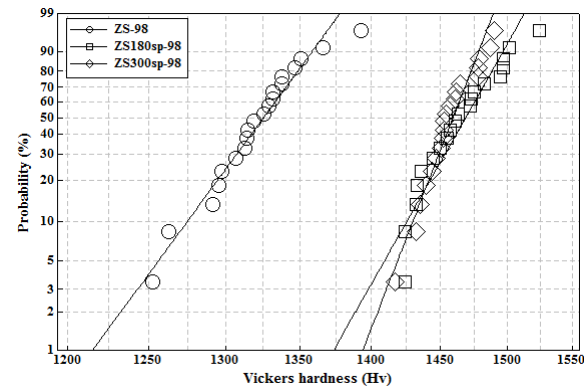
Table 8~10은 압입 하중 98 및 294 N에서 얻어진 Z, ZS 및 ZST의 모재 시험편, 180sp 시험편 및 300sp 시험편에 대하여 추정된 와이블 분포함수의 파라미터 값을 나타낸다. 또한 Table 8~10에 산술통계에 의한 평균, 표준편차 및 변동계수(COV)도 함께 나타내었다.

98 N의 형상 파라미터 및 척도 파라미터는 앞에서 설명하였다. 294 N의 형상 파라미터와 척도 파라미터는 다음과 같다. (a) Z 시험편의 형상 파라미터는 Z180sp 및 Z300sp 시험편이 Z 모재 시험편보다 약 20% 및 57% 작게 나타났다. 그러나 Z180sp 및 Z300sp 시험편의 척도 파라미터는 Z 모재 시험편보다 약 3% 및 6% 크게 나타났다. (b) ZS 시험편의 형상 파라미터는 ZS180sp 및 ZS300sp 시험편이 ZS 모재 시험편보다 68% 및 22% 크게 나타났다. 그리고 ZS180sp 및 ZS300sp 시험편의 척도 파라미터는 ZS 모재 시험편보다 약 6% 및 4% 크다. (c) ZST 시험편의 형상 파라미터는 ZS180sp 및 ZS300sp 시험편이 ZST 모재 시험편보다 13 및 34% 크게 나타났다. ZS180sp 및 ZS300sp 시험편의 척도 파라미터는 ZST 모재 시험편보다 둘 다 약 8% 크게 나타났다. 이와 같이 압입 하중 98 N이 294 N보다 경도 분포가 크게 나타났다. 이것은 압입 하중이 작으면 압입 면적이 작아서 경도 감소 요인이 작아지기 때문이라 판단된다.

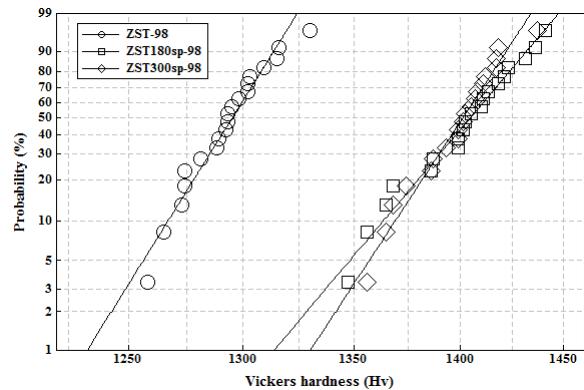
98 N에 의한 모재 시험편의 평균 비커스 경도는 비슷하게 나타났으나, SP처리 시험편은 Z300sp 시험편을 제외하고, 모재보다 약 10% 높게 나타났다. 즉, 180sp 시험편의 형상 및 척도 파라미터가 모재 시험편 및 300sp 시험편보다 크게 나타났다. 294 N에 의한 모재 시험편의 평균



(a) Z specimen



(b) ZS specimen



(c) ZST specimen

Fig. 5 Weibull plot of Vickers hardness according to shot ball sizes

경도는 Z 및 ZS가 비슷하였으나, ZST는 약 5% 작게 나타났다. Z180sp 및 ZS180sp 시험편은 각각의 Z 및 ZS 모재 시험편보다 3% 및 6% 크게 나타났다. 300sp 시험편은 각각의 Z, ZS 및 ZST 모재 시험편보다 0%, 4% 및 8% 크게 나타났다. 이것은 쇼트 볼의 크기에 따른 잔류응력과 표면 거칠기에 의한 영향이라고 판단된다.

**Table 11** The Estimated Weibull parameters of Z specimens by shot ball size

Parameter Speci.	Shape parameter	Scale parameter	Mean/STD COV
Z-98	19.9994	1332.99	1305/98.19 0.075
Z180sp-98	86.1561	1456.83	1448/21.20 0.015
Z300sp-98	74.6613	1314.99	1306/21.30 0.016

**Table 12** The Estimated Weibull parameters of ZS specimens by shot ball size

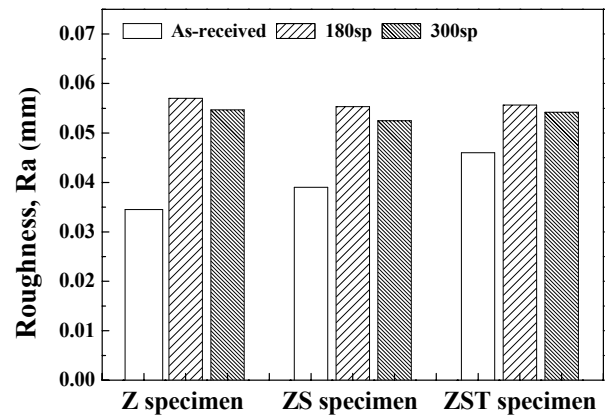
Parameter Speci.	Shape parameter	Scale parameter	Mean/STD COV
ZS-98	48.7790	1335.54	1321/32.47 0.025
ZS180sp-98	63.2353	1477.35	1465/28.63 0.020
ZS300sp-98	58.8670	1464.94	1452/29.98 0.021

**Table 13** The Estimated Weibull parameters of ZST specimens by shot ball size

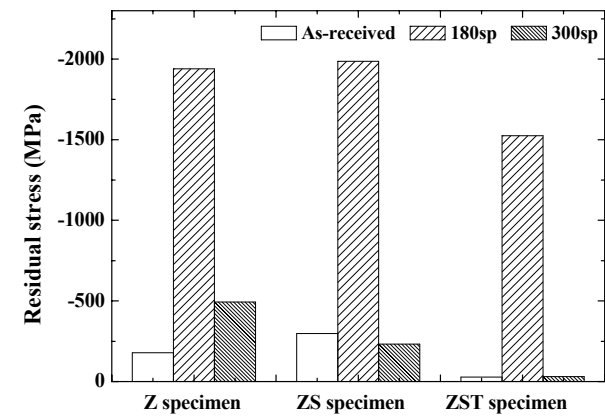
Parameter Speci.	Shape parameter	Scale parameter	Mean/STD COV
ZST-98	85.5526	1300.63	1293/18.12 0.014
ZST180sp-98	63.1090	1412.85	1401/26.15 0.019
ZST300sp-98	81.4170	1407.34	1398/20.37 0.015

3.3 쇼트 볼 크기에 따른 와이블 통계 해석

Fig. 5(a)~(c)는 압입하중 98 N에서 얻어진 Z, ZS 및 ZST 모재 시험편과 180sp 및 300sp 시험편의 비커스경도를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. (a) Z 모재 시험편의 형상 파라미터는 작아서 분산이 많았으나, Z180sp 및 Z300sp 시험편은 크게 나타나 분산이 적었다. 또한 Z180sp 시험편의 척도 파라미터는 Z 모재 시험편보다 크게 나타나, 높은 확률 분포를 나타내었다. 그러나 300sp 시험편은 비슷하게 나타났다. (b) ZS 모재 시험편의 형상 파라미터는 ZS180sp가 가장 크고, ZS300sp 및 ZS으로 나타나, 쇼트 피닝(sp)에 의하여 분산이 적게 나타났다. 또한 척도 파라미터는 형상 파라미터와 같은 경향을 나타내었다. (c) ZST 모재 시험편의 형상 파라미터는 Z 및 ZS 모재 시험편보다 크게 나타나, 경도의 분산이 작으



**Fig. 6** Surface roughness of Z, ZS and ZST specimens according to shot peening



**Fig. 7** Residual stress by SP treatment

며, 쇼트 피닝(sp) 시험편은 비슷하게 나타났다. ZST의 모든 척도 파라미터는 Z 및 ZS 시험편보다 작게 나타났다. 즉, 180sp 시험편은 모재 및 300sp 시험편보다 확률 분포를 나타내었다.

Table 11~13에는 Z, ZS, ZST 시험편에 대하여 추정된 와이블 함수의 파라미터 값을 나타낸다. 또한 산술통계에 의한 평균, 표준편차, 변동계수도 함께 나타내었다.

3.4 쇼트피닝전후의 조도 및 압축잔류응력

쇼트 피닝(shot peening) 전후의 표면 조도를 Fig. 6에 나타낸다. 모재의 조도는 ZST > ZS > Z 시험편으로 나타났다. 그러나 쇼트피닝 후의 조도는 3종류의 시험편에서 비슷하게 나타났으며, 모재보다 180sp와 300sp 시험편의 조도가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 180sp 시험편의 조도가 300sp 시험편보다 약간 크게 나타났다.

Fig. 7은 쇼트피닝에 의하여 표면에 도입된 압축잔류응력을 나타낸다. 3종류의 시험편은 180sp

의 압축잔류응력이 크게 나타났으나, 300sp 시험편은 급감하였다. 그리고 비커스 경도는 쇼트의 압입부에서 측정되는 부위에 따라서 경도의 분산이 나타났다. 또한 압축잔류응력은 깊이 약 10  $\mu\text{m}$ 에서 0이므로 압입하중이 작은 98 N이 294 N보다 높은 비커스 경도를 나타낸다. 이와 같이 지르코니아 단상체 및 복합체는 쇼트피닝에 의하여 압축잔류응력이 도입됨을 알 수 있었으며, 180sp는 300sp보다 효과가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나 쇼트의 크기에 따라서 잔류 응력의 차이가 나타나는 것은 금후 연구 과제이다.

#### 4. 결 론

ZrO<sub>2</sub>의 단상재(Z 시험편)와 복합재(ZS, ZST 시험편)의 모재 시험편, 열처리 시험편, 180sp 시험편 및 300sp 시험편에서 98 및 294 N의 압입하중으로 측정한 비커스 경도의 신뢰성을 평가하기 위하여 와이블 통계 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 98 N에 의한 모재 시험편의 형상 파라미터는 Z가 약 20, ZS 및 ZST가 각각 약 49 및 86으로, ZrO<sub>2</sub>에 합성 원소가 증가할수록 분산이 적었다. Z 열처리 시험편은 약 42로서 Z 모재 시험편보다 약 111% 크게 나타났으며, ZS 열처리 시험편은 ZS 모재 시험편보다 약 62% 크게 나타났다. 그러나 ZST 열처리 시험편은 ZST 모재 시험편의 약 20% 작게 나타났다.

(2) 모재 시험편의 척도 파라미터는 Z 및 ZS가 1330으로 비슷하며, ZST는 1300이지만, 열처리에 의하여 각각 0.6, 3 및 7% 증가하였다.

(3) 98 N 압입하중에 의한 모재 및 열처리 시험편의 척도 파라미터는 294 N보다 각각 0.2%(Z), 4%(Zh), 0.5%(ZS), 6%(ZSh), 3%(ZST), 2.2%(ZSTh) 크게 나타났으나, 형상 파라미터는 294 N이 98 N보다 크게 나타나, 분산이 작다.

(4) 180sp 및 300sp의 척도 파라미터는 압입하중 98 N이 294 N보다 대체적으로 크게 나타났다. 180sp-98N은 1457(Z 시험편), 1477(ZS 시험편) 및 1413(ZST 시험편)으로, 180sp-294N, 300sp-98N 및 300sp-294N보다 높게 나타났다.

(5) ZS 및 ZST 쇼트 피닝(sp) 시험편의 형상 파라미터는 294N이 98N보다 크게 나타났으나, Z는 98N이 294N보다 크게 나타났다. 이상에서 세라

믹스의 표면 개질은 쇼트 크기가 작은 것이 우수하다고 판단된다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Ando, K., Houjyou, K., Chu, M. C., Takeshita, S., Takahashi, K., Sakamoto, S. and Sato, S., 2002, "Crack-healing Behaviour of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC Ceramics under Stress and Fatigue Strength at the Temperature of Healing (1000°C)," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 22, No. 8, pp. 1339~1346.
- (2) Houjou, K., Ando, K., Chu, M. C., Liu, S.P. and Sato, S., 2004, "Crack-Healing and Oxidation Behavior of Silicon Nitride Ceramics," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, No. 8, pp. 2329~2338.
- (3) Takahashi, K., Murase, H., Yoshida, S., Houjou, K., Ando, K. and Saito, S., 2005, "Improvement of Static Fatigue Strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC Crack-healed under Cyclic Stress," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 25, No. 11, pp. 1953~1959.
- (4) Nam, K. W., Kim, M. K., Park, S. W., Ahn, S. H. and Kim, J. S., 2007, "Crack Healing Behavior and Bending Strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC Composite Ceramics by SiO<sub>2</sub> Colloidal," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 471, Nos. 1-2, pp. 102~105.
- (5) Kim, H. S., Kim, M. K., Kim, J. W., Ahn, S. H. and Nam, K. W., 2007, "Strength of Crack Healed-Specimen and Elastic Wave Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Composite Ceramics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 4, pp. 425~431.
- (6) 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Ceramics by an amount of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 11, pp. 1108~1114.
- (7) Nam, K. W., Park, S. W., Do, J. Y. and Ahn, S. H., 2008, "Cracked-Healing and Bending Strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 11, pp. 957~962.
- (8) Nam, K. W., 2016, "Mechanical Characteristics and Crack-Healing of ZIRCONIA(ZrO<sub>2</sub>) Composite Ceramics with SiC and TiO<sub>2</sub>," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 40, No. 3, pp. 267~273.



- (9) Nam, K. W. and Hwang, J. R., 2012, "The Crack Healing Behavior of ZrO<sub>2</sub>/SiC Composite Ceramics with TiO<sub>2</sub> Additive," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, pp. 2093~2096.
- (10) Nam, K. W., Kim, S. J. and Kim, D. S., 2015, "Weibull Statistical Analysis on Mechanical Properties in ZrO<sub>2</sub> with SiC Additive," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 39, No. 9, pp. 901~907.
- (11) Kim, S. J., Kim, D. S. and Nam, K. W., 2015, "Determining Mechanical Properties of ZrO<sub>2</sub> Composite Ceramics by Weibull Statistical Analysis," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 39, No. 10, pp. 955~962.
- (12) Orlovskaya, N., Lugovy, M., Subbotin, V., Radchenko, O., Adams, J., Chheda, M., Shih, J., Sankar, J. and Yarmolenko, S., 2005, "Robust Design and Manufacturing of Ceramic Laminates with Controlled Thermal Residual Stresses for Enhanced Toughness," *Journal of Materials Science*, Vol. 40, No. 20, pp. 5483~5490.
- (13) Orlovskaya, N., Kuebler, J., Subbotin, V. and Lugovy, M., 2005, "Design of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based Ceramic Laminates by the Residual Stresses," *Journal of Materials Science*, Vol. 40, No. 20, pp. 5443~5450.
- (14) Abrams, M. B. and Green, D. J., 2004, "Prediction of Stable Crack Growth Geometry in Residually Stressed Glass," *International Journal of Fracture*, Vol. 130, No. 2, pp. 601~615.
- (15) Nam, K. W. and Kim, D. S., 2015, "Weibull Statistical Analysis on Vickers Hardness of shot-peened ZrO<sub>2</sub> composites," *Proceeding of The KSME 2015 Fall Annual Meeting*, pp. 2494~2499.