

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.9.901>

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

SiC 첨가한 ZrO₂의 기계적 특성에 대한 와이블 통계 해석[§]

남기우* · 김선진**† · 김대식***

* 부경대학교 재료공학과, ** 부경대학교 기계설계공학과, ***하이에어코리아(주)

Weibull Statistical Analysis on Mechanical Properties in ZrO₂ with SiC Additive

Ki Woo Nam*, Seon Jin Kim**† and Dae Sik Kim***

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

** Dept. of Mechanical Design Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

*** TFT, Hi Air Korea, Co., Ltd.

(Received February 5, 2015 ; Revised June 16, 2015 ; Accepted July 7, 2015)

Key Words: Weibull Statistical Analysis(와이블 통계 해석), Bending Strength(굽힘강도), ZrO₂(지르코니아), ZrO₂/SiC Composite Ceramics(ZrO₂/SiC 복합 세라믹스), Weibull Distribution(와이블 분포)

초록: 비커스 경도 실험은 세라믹스 재료의 경도를 특성화하는데 사용되는 일반적인 실험법이다. 그러나 경도도 하나의 확률변수로 취급하는 것이 일반적이다. 본 연구의 목적은 단상 ZrO₂ 와 SiC 첨가한 ZrO₂/SiC 복합 세라믹스의 굽힘강도와 비커스 경도의 통계적 성질을 조사하는 것이다. 본 연구에서는 와이블 통계 해석에 기초하여 그들의 결과를 특성치와 변동을 비교 고찰하였다. 굽힘강도 및 비커스 경도는 모두 와이블 분포에 비교적 잘 적합할 수 있음을 알았다. 또한 단상 ZrO₂ 와 SiC 첨가한 ZrO₂/SiC 복합 세라믹스와 그들의 열처리재에 대한 비커스 경도의 확률분포에 대한 척도 및 형상 파라미터 값을 평가하였다.

Abstract: The Vickers hardness test is a common method used to characterize the hardness of ceramic materials. However, the hardness is not a deterministic value, but is a random variable. The objective of this paper is to investigate the statistical properties of the bending strength and a set of Vickers hardness values in single ZrO₂ and composite ZrO₂/SiC with a SiC additive. In this work, we compare the characteristic value and variation with the results based on Weibull statistical analysis. The probability distributions of the bending strength and Vickers hardness agreed relatively well with the Weibull distribution. We evaluate the scale parameter and shape parameter in as-received ZrO₂ and ZrO₂/SiC composite ceramics, as well as in their heat treated ceramics.

1. 서론

세라믹스는 특히 내열성, 내식성 및 내마모성 등이 우수하고, 금속재료가 갖지 못하는 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 고온 구조용 재료로서 활발하게 연구되고 있다. 이러한 특성을 이용하여

가스 터빈, 자동차 엔진 등의 열 사이클 기관에 응용함으로써 에너지 절약에 큰 효과가 기대된다. 그러나 일반적으로 세라믹스는 파괴인성이 낮고 신뢰성이 부족할 뿐 아니라, 가공성도 나빠서 제품화 된 예가 적다. 이상과 같은 단점을 극복하기 위하여 세라믹스의 저인성 극복, 신뢰성 향상을 위하여 많은 연구자가 다양한 제안을 했지만, 현재 세라믹스에 SiC 를 첨가함으로써 균열 치유 능력을 부여하여 상기와 같은 단점을 극복하고자 하는 연구를 하고 있다.^(1~7) 즉, 질화규소(Si₃N₄)와 알루미나(Al₂O₃) 등에 SiC 를 첨가하여 열처리함으로

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2015. 2. 25-27., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, sjkim@pknu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

써 균열 치유 물질인 SiO_2 의 형성으로 균열 치유 및 강도 증가에 관한 연구를 활발하게 수행하였다.

그러나 지르코니아(ZrO_2)에 SiC 를 첨가하여, 균열 치유 및 강도 증가에 관한 연구는 거의 찾아볼 수 없다. 지르코니아는 다른 세라믹스에 비하여 소결이 쉽고, 인성이 높아서 구조재료로 적합하다. 또 부하 응력 및 온도에 의하여 정방정에서 단사정으로 마르텐사이트형 변태를 유기하는 것으로 알려져 있다.⁽⁸⁾ 이것을 이용하여 고인성 및 고강도를 실현하는 특성을 가지고 있다. 과도한 변태는 강도를 저하시키는 가능성도 보고되었다.

경도 등과 같은 기계적 성질의 평균치나 분산 등의 통계적 특성뿐 아니라 그들의 정량적 확률분포 특성을 파악하고 평가하는 것은 재료의 설계, 제조 및 개발의 기초 데이터로 아주 중요하다.⁽⁹⁾

이러한 관점에서 본 연구에서는 세라믹스 볼 등에 널리 이용되는 이트리아 안정화 ZrO_2 단상 세라믹스와 이것에 균열 치유 능력을 갖는 SiC 10 wt.%를 첨가하고 소결한 ZrO_2/SiC 복합 세라믹스, 그리고 1073K 와 1173K 에서 1, 5 및 10 시간 열처리한 시험편을 제조하여, 굽힘강도와 비커스 경도를 측정하여 그들의 확률통계적 성질을 고찰하고자 하였다. 즉, 굽힘강도나 비커스 경도는 일반적으로 소수의 측정 데이터로부터의 평균치가 사용되고 있으나, 본 연구에서는 이들의 측정 데이터의 신뢰성을 평가하기 위하여 와이블 통계 해석을 수행한 결과를 보고하고자 한다.

2. 재료 및 실험 방법

본 연구에서 사용한 분말은 Tosoh 사에서 생산한 평균입경 $0.026 \mu\text{m}$ 의 지르코니아(ZrO_2) TZ-3Y-E(안정화제 Y_2O_3 3 mol.% 포함)와 ZrO_2 에 균열 치유 특성을 부여하기 위하여 Wako Pure Chemical 사에서 생산한 평균 입경 $0.27 \mu\text{m}$ 의 탄화규소(SiC)를 사용하였다. 분말은 이소프로판올과 Si_3N_4 볼($\phi 5$)을 사용하여 24 시간 혼합한 후, 363K 의 로에서 24 시간 건조하여 용매를 제거하였다. 건조된 분말은 분쇄하고 $106 \mu\text{m}$ 망으로 체질하여 소결에 사용하였다. 이 후, 단상 ZrO_2 시험편은 Z 라 표기하고, ZrO_2/SiC 복합 세라믹스의 시험편은 ZS 라 표기한다. Z 와 ZS 시험편의 조성은 Table 1 과 같다. 소결은 고온가압소결방법으로 진공분위기에서 Table 1 의 조건으로 진행하였다. 굽힘강도 시험편은 $3 \times 4 \times 18 \text{ mm}$ 의 크기로 절단하여, 경면 연마하였다. 시험편의 모서리 부분은 가공 시에 미세균열이 발생할 수 있으므로, 45 도의 각도로 모따기

Table 1 Batch composition and processing

Specimen	Z	ZS
Batch Composition (wt.%)	100 wt.% ZrO_2	90 wt.% ZrO_2 10 wt.% SiC
Hot Pressing	30 MPa 1723K 1 hour in vacuum	30 MPa 1723K 1 hour in vacuum
Heat Treatment	1073 K and 1173K From 1 to 10 hours In air	1073 K and 1173K From 1 to 10 hours In air
Relative Density (%)	100.17	100.90

가공을 실시하였다. 한편 3 점 굽힘시험의 스펠은 16mm 이며, 크로스헤드속도는 0.5mm/min 으로 상온에서 수행하였다. 경도는 비커스 경도기(HV-114, Mitutoyo)를 사용하여 측정하였으며, 모재 및 열처리재는 9.8 N 의 압입 하중으로 10 초간 측정하였다. 또한 압입 하중이 경도의 통계적 성질에 미치는 영향을 비교하기 위하여 모재는 98 및 294 N 으로도 측정하였다. 경도는 각 시험편에서 20 개를 측정하여 해석에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 굽힘강도의 와이블 통계 해석

Fig. 1 은 ZrO_2 단상 세라믹스인 Z 모재 시험편과 ZrO_2/SiC 복합 세라믹스인 ZS 모재 시험편에 대한 굽힘강도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 굽힘강도는 Z 모재 시험편이 ZS 모재 시험편보다 평균적으로 약 2 배 정도 높음을 알 수 있다. 그러나 굽힘강도의 경우도 확정치가 아니라 통계적으로 변동하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 관점에서 해석의 편의성과 최약링크 가설을 고려하여, 아래와 같은 2-파라미터 와이블 분포를 적용하여 와이블 통계 해석을 행하고자 한다.⁽⁹⁾

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

여기서 α 는 확률변수의 변동성을 의미하는 형상 파라미터(shape parameter)이며, β 는 고장확이 63.2%가 되는 특성수명을 나타내는 척도 파라미터(scale parameter)이다.

Fig. 2 는 Fig. 1 의 ZrO_2 단상 세라믹스인 Z 모재 시험편과 ZrO_2/SiC 복합 세라믹스인 ZS 모재 시험편

에 대한 굽힘강도의 데이터를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 확률지상에서 직선으로 표현되고 있으므로 와이블 확률분포에 잘 따르고 있다고 볼 수 있다. 굽힘강도에 대한 해석결과를 Table 2에 나타낸다. 표에는 산술통계에 의한 평균, 표준편차 및 변동계수(COV)도 함께 나타내었다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이, Z 모재 시험편의 척도 파라미터가 ZS 모재 시험편보다 2 배 이상 크게 나타났으며, 형상 파라미터는 Z 모재 시험편이 ZS 모재 시험편보다 높게 나타났다. 즉, 상대적으로 Z 모재가 ZS 모재보다 특성 수명이 길며 굽힘강도의 변동은 적음을 알 수 있다.

3.2 비커스 경도의 와이블 통계 해석

Fig. 3 및 Fig. 4는 각각 모재(as-received)와 열처리 조건에 따르는 Z 및 ZS 시험편의 압입 하중 9.8 N에서 얻어진 비커스 경도를 나타낸다. Z 및 ZS 시험편 모두 정도의 차이는 있으나 산포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 최근 세라믹스 재료의 강도평가에 있어서, 평가 정도의 향상을 위하여 산포 분포를 고려한 확률론적 평가가 중요시되고

있다. 이와 같은 관점에서 본 절에서도 굽힘강도와 동일하게 비커스 경도에 대해서도 와이블 통계 해석을 실시하였다. Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 Fig. 3 및 Fig. 4의 Z 시험편과 ZS 시험편에 대한 비커스 경도를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 확률지상에서 직선으로 표현되고 있으므로 와이블 확률분포에 적합하다고 판단된다. 그림에서 채워진 표식은 2-파라미터 와이블 확률분포함수에 적합한 것이다.

Table 2 The estimated Weibull parameters

Specimen	Z specimen	ZS specimen
Shape parameter	20.03	15.13
Scale parameter	1709	804
Mean	1668	779
Standard deviation	94.2	60.9
COV	0.056	0.078

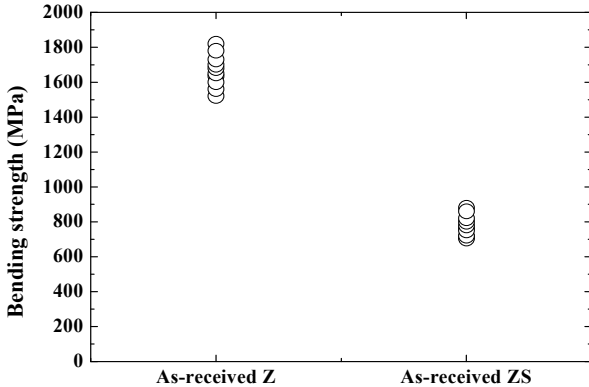


Fig. 1 Comparison of bending strength between Z and ZS specimens

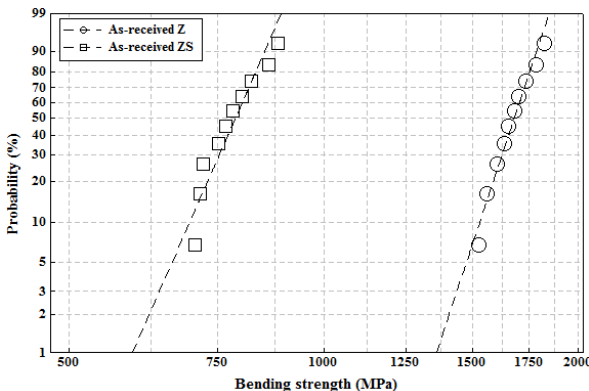


Fig. 2 Weibull plot of bending strength for Z and ZS specimens

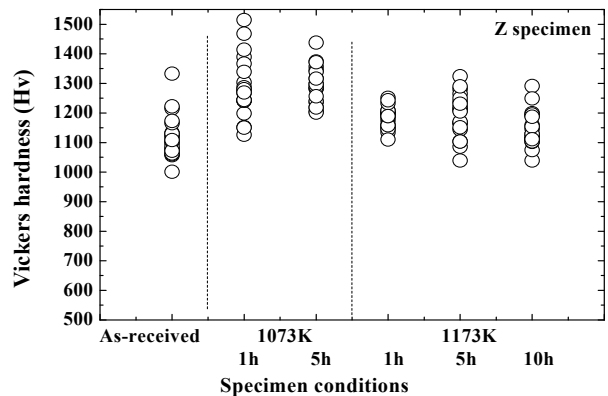


Fig. 3 Vickers hardness values for Z specimen

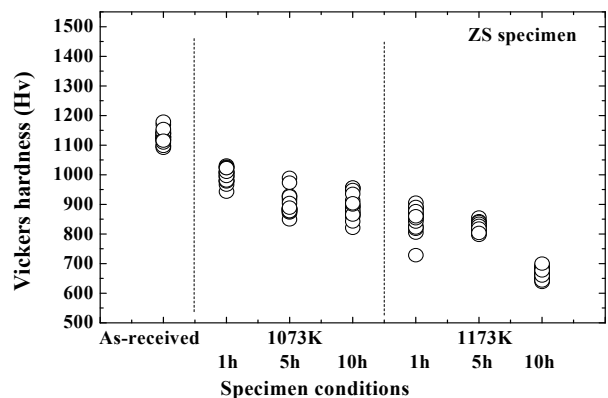


Fig. 4 Vickers hardness values for ZS specimen

Table 3 The estimated parameters for Z specimen

Specimen	Shape parameter	Scale parameter	Mean/Std COV
As-received	20.55	1149	1121/73.50 0.066
1073K-1h	15.73	1329	1288/102.60 0.080
1073K-5h	25.52	1325	1299/61.98 0.048
1173K-1h	38.72	1200	1184/36.56 0.031
1173K-5h	18.72	1255	1193/74.42 0.062
1173K-10h	24.62	1169	1146/59.47 0.052

Table 4 The estimated parameters for ZS specimen

Specimen	Shape parameter	Scale parameter	Mean/Std COV
As-received	60.61	1139	1129/22.92 0.020
1073K-1h	55.06	1009	1000/21.50 0.022
1073K-5h	54.51	897	889/21.02 0.024
1073K-10h	27.93	910	893/39.33 0.044
1173K-1h	23.06	867	848/42.48 0.050
1173K-5h	61.51	832	825/16.13 0.020
1173K-10h	43.91	676	669/18.32 0.027

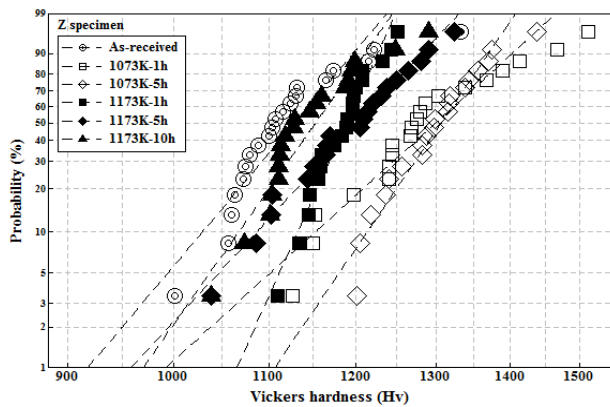


Fig. 5 Weibull plots for Vickers hardness values for Z specimen

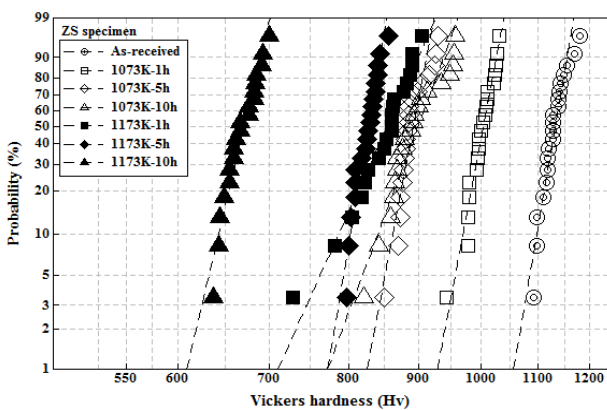


Fig. 6 Weibull plots for Vickers hardness values for ZS specimen

Table 3 및 Table 4 에 각각 Z 시험편과 ZS 시험편에 대하여 추정된 와이블 분포함수의 파라미터 값과 평균, 표준편차 및 변동계수(COV)를 나타내었다. Z 모재 시험편과 ZS 모재 시험편의 수명특성

을 나타내는 척도 파라미터의 값은 각각 1149 및 1139 로 Z 모재 시험편이 다소 우수한 것으로 나타났다. 이는 Table2 와 비교할 때 척도 파라미터에는 굽힘강도와 비커스 경도 모두에서 Z 모재가 ZS 모재 보다 크다. Z 모재의 척도 파라미터는 굽힘강도가 더 크며 ZS 모재의 경우는 비커스 경도가 크다. 하지만 Z 모재와 ZS 모재간 척도 파라미터의 차이는 굽힘강도가 비커스 경도보다 크다.

한편 변동의 특성을 나타내는 형상 파라미터는 Z 모재 시험편이 20.55, 그리고 ZS 모재 시험편이 60.61 로 굽힘강도와는 다른 산포의 특성을 나타내었다. 통상 경도의 경우 물체간 원자 결합력의 대소에 의존하는 것으로 향후 이에 대한 추가적인 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

열처리한 Z 시험편은 1073 및 1173 K 에서 열처리 시간에 관계없이 모재보다 높은 경도의 특성을 나타내었다. 특히 1073 K 의 1 및 5 시간 열처리 시험편은 모재보다 약 15% 높게 나타났다. 그리고 1173 K 의 1, 5 및 10 시간 열처리 시험편은 시간에 관계없이 모재보다 약 2~6% 높은 평균 경도를 나타내었다. 그러나 ZS 시험편은 열처리 온도 및 시간의 증가에 따라서 평균 경도가 모재보다 약 11~40% 작게 나타났다. 이것은 열처리에 의하여 표면에 만들어진 균열 치유에 기여하는 유리상 SiO₂ 의 영향이라 판단된다.⁽⁴⁾

이하에서는 비커스 경도의 형상 파라미터와 척도 파라미터의 특성을 고찰하고자 한다. Fig. 7 은 Z 시험편과 ZS 시험편에 대한 와이블 확률분포의 형상 파라미터와 척도 파라미터를 다시 정리하여 나타낸 것이다. 흰 표식은 Z 시험편을 나타내고,

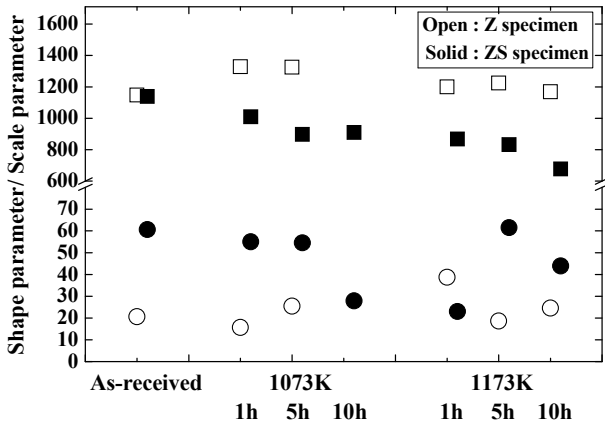


Fig. 7 Comparison of shape and scale parameters for Z and ZS specimens

검은 표식은 ZS 시험편을 나타낸다. 그리고 원 표식은 형상 파라미터를 나타내고, 사각형 표식은 ZS 시험편을 나타낸다. ZS 시험편의 형상 파라미터는 Z 시험편보다 2~3 배 큰 값을 나타내었다. 그러나 1173K-1h 은 약 0.6 배를 나타내어 다소 다른 경향을 보였다. 형상 파라미터가 크다는 것은 경도의 변동계수가 적은 것을 의미한다. 한편 척도 파라미터는 모재를 제외하고 열처리재에서 Z 시험편이 ZS 시험편보다 모두 크게 나타났다.

확률론적 평가 관점에서 비커스 경도를 종합적으로 고찰하여 볼 때, Z 시험편의 경우가 ZS 시험편의 경우보다 척도 파라미터 값이 상대적으로 높게 나타났지만, 형상 파라미터의 경우는 상대적으로 ZS 시험편 보다 작게 나타났다. 산포의 관점에서 이는 경도의 변동계수가 ZS 시험편 보다 크다는 것을 의미한다. 실제적 응용에 있어서 세라믹스의 파괴는 표면이나 내부에 존재하는 결함에 의해서 발생하고, 강도는 존재하는 결함의 크기에 의존하는 경우가 많으므로, SiC 를 첨가한 ZS 시험편의 경우 굽힘강도 측면에서는 Z 시험편보다 우월하나 굽힘강도 측면에서는 우월하다고 볼 수 없다. 따라서 향후 세라믹스의 제조 공정 등의 연구가 더욱 필요할 것으로 사료된다.

3.3 압입 하중이 비커스 경도의 통계적 성질에 미치는 영향

Fig. 8 및 Fig. 9 는 압입 하중 9.8, 98 및 294 N 에 따르는 Z 및 ZS 모재 시험편의 비커스 경도 영향을 나타낸다. 또한 Fig. 10 에 Z 및 ZS 모재 시험편의 압입 하중에 따르는 평균 비커스 경도를 비교하여 나타내었다. Z 모재 시험편의 경우 모든 압입 하중에서 산포를 나타내고 있으며, 또한

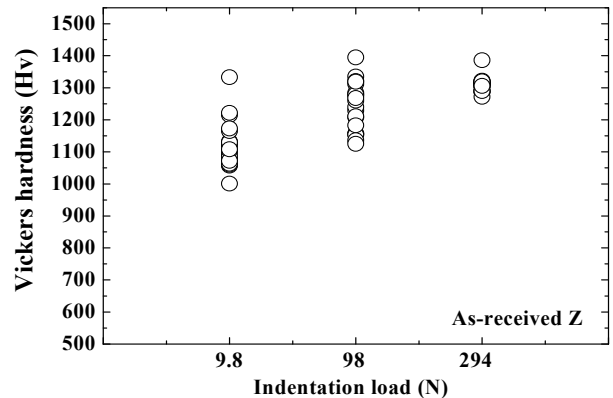


Fig. 8 Effects of indentation load on Vickers hardness values for Z specimen

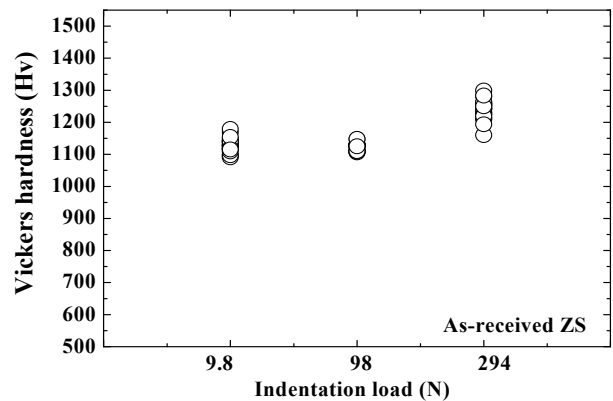


Fig. 9 Effects of indentation load on Vickers hardness values for ZS specimen

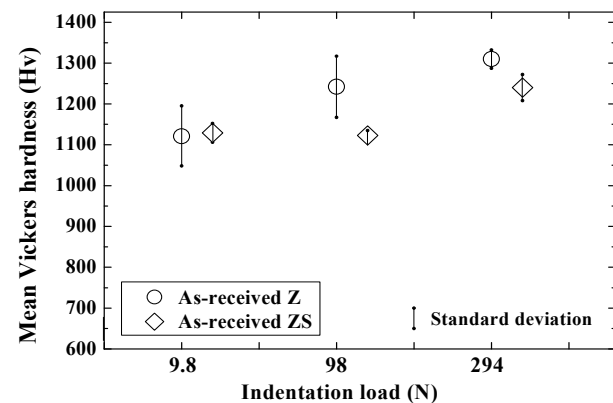


Fig. 10 Comparison of mean Vickers hardness values for Z and ZS specimens

거시적으로 그 평균 경도는 압입 하중이 증가하면 증가하는 경향을 나타내었다. 한편 ZS 시험편의 경우도 Z 시험편보다 산포는 적으나 확정치로 보기에는 어렵고 그 평균강도도 98 N 에서는 다소 낮으나 전체적으로는 압입 하중의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 이상과

Table 5 The estimated Weibull parameters for Z specimen

Indent. Load	9.8 N	98 N	294 N
Shape parameter	20.55	20.04	84.3
Scale parameter	1149	1274	1318
Mean	1121	1242	1310
Standard deviation	73.50	75.27	22.58
COV	0.066	0.061	0.017

Table 6 The estimated Weibull parameters for ZS specimen

Indent. Load	9.8 N	98 N	294 N
Shape parameter	60.61	119.07	45.11
Scale parameter	1139	1128	1255
Mean	1129	1123	1240
Standard deviation	22.92	12.04	32.32
COV	0.020	0.011	0.026

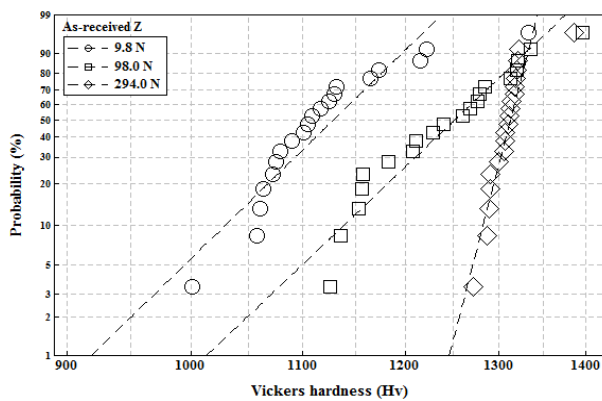


Fig. 11 Weibull plots of Vickers hardness values according to indentation load for Z specimens

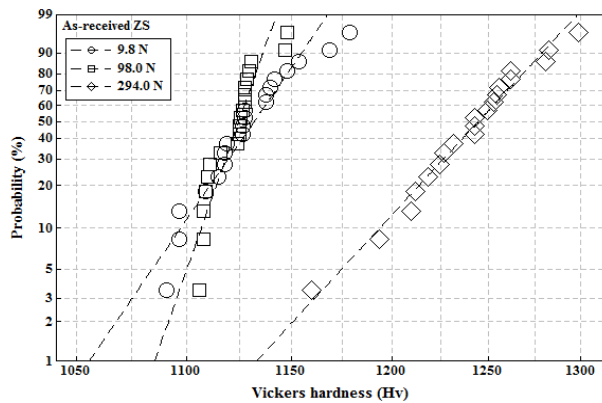


Fig. 12 Weibull plots of Vickers hardness values according to indentation load for ZS specimen

같은 관점에서 압입 하중이 비커스 경도의 확률분포에 미치는 영향을 좀 더 명확히 고찰하기 위하여 와이블 확률지에 플롯트 하였다.

Fig. 11 및 Fig. 12는 각각 Z 및 ZS 모재 시험편에 대하여 압입 하중에 따르는 비커스 경도를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. Z 및 ZS 모재 시험편에 대하여 추정된 와이블 분포함수의 형상 및 척도 파라미터와 그 통계적 성질을 각각 Table 5 및 Table 6에 정리하여 나타낸다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 압입 하중이 정도에 미치는 영향은 Table 5로부터 Z 시험편의 경우 압입 하중이 증가하면 척도 파라미터와 평균값이 증가하는 경향을 보였다. 이는 Gong 등의⁽¹⁰⁾ 50 N 이하의 낮은 하중하에서 압입 하중의 증가와 더불어 경도가 감소한다는 결과와는 반대가 된다는 것에 주목하고 싶다. 통상 정도는 압입 하중에 의존하는데, 아주 낮은 하중에서의 이 현상을 압입 치수효과(indentation size effect)라 부르고 있다.⁽¹⁰⁾ 본 실험의 경우는 비교적 높은 하중하에서 압입 하중이 증가함에 따라서 압입이 깊어지면서, 산화된 표면보다 내부의 정도를 측정하였기 때문이라 판단된다. 하지만 ZS 시험편의 경우는 Z 시험편과는 다소 다른 경향을 보여주고 있다. 즉, 척도 파라미터는 98 N의 압입 하중에서 9.8 N보다 다소 낮게 나타났으나 전체적으로는 약간 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 또한 형상 파라미터는 전반적으로 압입 하중의 증가와 더불어 감소하는 경향을 보였다. 이는 SiC 첨가 ZrO₂/SiC 복합 세라믹스 시험편의 제조공정에 의한 재료특성이 반영된 영향이라 사료된다.⁽⁴⁾

3. 결론

ZrO₂ 단상 세라믹스(Z 시험편)와 ZrO₂/SiC 복합 세라믹스(ZS 시험편)에 대하여 굽힘 강도와 비커스 정도 측정 데이터의 신뢰성을 평가하기 위하여 와이블 통계 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 굽힘강도와 비커스 정도의 확률분포를 2-파라미터 와이블 분포로 적합할 수 있었다.

(2) 굽힘강도의 경우, Z 모재 시험편이 ZS 모재 시험편보다 척도 파라미터가 2 배 이상 크게 나타났다. 또한 형상 파라미터는 Z 모재 시험편이 20.03로 ZS 모재 시험편의 15.13보다도 크게 나타났다.

(3) 비커스 정도의 경우, Z 시험편의 경우가 ZS 시험편의 경우보다 척도 파라미터 값이 상대적으로

로 높게 나타났다. 반면, 형상 파라미터의 경우는 Z 시험편의 경우가 상대적으로 ZS 시험편 보다 작게 나타났다.

(4) Z 시험편의 경우 압입 하중이 증가하면 척도 파라미터와 형상 파라미터는 증가하는 경향을 보였으나, ZS 시험편의 경우는 압입 하중이 증가하면 척도 파라미터는 감소 증가하였으며 형상 파라미터는 증가 감소하는 경향을 나타내었다.

참고문헌

(References)

- (1) Ando, K., Tsuji, K., Hirasawa, T., Kobayashi, Y., Chu, M. C. and Sato, S., 1999, "Crack Healing Behavior and High Temperature Strength of Mullite/SiC Composite Ceramics," *Journal of the Society of Materials Science (Japan)*, Vol. 48, No. 5, pp. 489~494.
- (2) Ando, K., Houjyou, K., Chu, M. C., Takeshita, S., Takahashi, K., Sakamoto, S. and Sato, S., 2002, "Crack Healing Behavior of Si₃N₄/SiC Ceramics under Stress and Fatigue Strength at the Temperature of Healing," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 22, pp. 1339~1346.
- (3) Kim, B. A., Ando, K., Chu, M. C. and Sato, S., 2003, "Crack Healing Behavior of Monolithic Alumina and Strength of Crack-Healed Member," *Journal of the Society of Materials Science(Japan)*, Vol. 52, No. 6, pp. 667~673.
- (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 Si₃N₄/SiC Composite Ceramics by SiO₂ 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 Al₂O₃/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, "Crack Healing and Elevated Temperature Bending Strength of Al₂O₃ Composite Ceramics by an amount of Y₂O₃," *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, "Crack Healing and Bending Strength of Si₃N₄ Ceramics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 11, pp. 957~962.
- (8) Hori, S., 1990, *Kyoujin Jirukonia*, Uchidaroukakuho, Tokyo, pp. 106~112.
- (9) Kim, S. J., Kong, Y. S. and Lee, S. Y., 2009, "Weibull Statistical Analysis of Micro-Vickers Hardness using Monte-Carlo Simulation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No. 4, pp. 346~352.
- (10) Gong, J. H., Wu, J. J. and Guan, Z. D., 1999, "Examination of the Indentation Size Effect in Low-load Vickers Hardness Testing of Ceramics," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 19, pp. 2625~2631.