

Ball-on-3-ball 시험에서 이축 강도의 결정

박성은 · 이중현 · 이홍림
연세대학교 세라믹공학과
(1998년 10월 2일 접수)

Determination of the Biaxial Strength by Ball-on-3-Ball Test

Sung Eun Park, Joong Hyun Lee and Hong Lim Lee

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749 Korea
(Received October 2, 1998)

초 록

Ball-on-3-ball 시험에서 이축 강도를 결정하기 위한 방법에 대해 고찰하였다. 알루미늄 시편을 이용하여 ball-on-3-ball 시험과 piston-on-3-ball 시험을 하여 이축 강도를 측정하였다. piston-on-3-ball 시험에서의 강도 식과 등가 반지름을 이용하여 계산한 ball-on-3-ball 시험에서의 이축 강도와, piston-on-3-ball 시험에서의 이축 강도를 분산 분석(ANOVA)한 결과, 두 평균이 동일하다고 할 수 있었다. 따라서, ball-on-3-ball 시험에서의 이축 강도는 piston-on-3-ball 시험에서의 강도 식과 등가 반지름을 이용하여 계산할 수 있다. 또한, 유한 요소법을 이용하여 ball-on-3-ball 시험시 시편에 인가되는 응력 분포를 고찰해 보았다.

ABSTRACT

The method to determine the biaxial strength in ball-on-3-ball test was studied. The biaxial strength of alumina specimen was measured by ball-on-3-ball test and piston-on-3-ball test. As the results of ANOVA (Analysis of Variance) for the biaxial strength by piston-on-3-ball test and the biaxial strength by ball-on-3-ball test which was calculated using the equation of the strength by piston-on-3-ball test and equivalent radius, the mean values of the both methods were almost same. Consequently, the biaxial strength by the ball-on-3-ball test can be calculated using the equation of the strength in piston-on-3-ball test and equivalent radius. The stress distribution of the specimen in ball-on-3-ball test was calculated by FEM(finite element method).

Key words : Biaxial strength, Ball-on-3-ball test, Piston-on-3-ball test, Equivalent radius, Analysis of variance, Finite element method

1. 서 론

막대형 시편의 3점, 4점 쥐임 같은 일축 강도(uniaxial strength) 시험을 하여 세라믹스의 강도를 결정하여 왔다. 그러나, 일축 강도 시험보다는 이축 강도(biaxial strength) 시험의 장점이 많다. 첫째, 일축 강도의 경우 인장 응력과 평행한 균열이 존재할 때 강도의 저하가 나타나지 않는다. 예를 들면, 막대형 시편의 열충격 시험 후 육안으로 확인할 수 있을 정도의 큰 균열이 시편의 길이 방향으로 존재할 때에도 4점 쥐임 강도의 저하는 일어나지 않는다.¹⁾ 그러나 방사 응력(radial stress)과 접선 응력(tangential stress)이 인가되는 이축 강도 시험은 균열의

방향에 상관없이 정확한 강도를 나타낸다. 둘째, 이축 강도 시험은 모서리 파괴(edge failure)를 막을 수 있다. 일축 강도 시험의 경우는 파괴에 직접적인 영향을 미치는 최대 인장 응력이 인가되는 영역에 모서리가 포함되어 파괴원(fracture origin)이 이 지점이 될 수 있다. 그러나, 디스크형 시편을 사용하는 이축 강도의 경우는 최대 인장 응력이 시편 중심부에 인가되고 모서리에는 응력이 거의 인가되지 않는다. 셋째, 일축 강도보다는 이축 강도의 시편 제조가 용이하다. 일축 강도 시편은 4면 및 4모서리의 가공이 필요하지만, 이축 강도 시편은 2면의 가공만이 필요하다.

이축 강도 시험은 시편 지지부와 하중 인가부의 형태

에 따라 ball-on-ring,^{2,5)} piston-on-3-ball,^{2,6-8)} ring-on-ring,^{2,8-11)} uniform-pressure-on-disk,¹²⁻¹⁴⁾ piston-on-ring,⁷⁾ ball-on-3-ball 등으로 구분할 수 있다. 시편 지지부나 하중 인가부에 ring이나 piston을 사용하는 경우, 일반적으로 높은 탄성률과 경도를 나타내는 세라믹스는 시편 지지부나 하중 인가부와 시편과의 완전히 평행한 접촉을 이루기 힘들고, 응력장의 방사상 대칭이 부분적으로 편향되어 강도 측정의 오차를 유발하게 된다. 그러나, 시편 지지부와 하중 인가부에 ball을 사용하면 이런 오차를 줄일 수 있다.

ASTM에 규정되어 있는 piston-on-3-ball 시험에서의 강도(S)는 Eq. (1)과 같다.⁶⁾

$$S = \frac{0.2387P}{t^2} \left[(1+\nu) \left\{ 1 + \ln \left(\frac{a}{c} \right)^2 \right\} + (1-\nu) \left(\frac{a}{c} \right)^2 - (1+\nu) \ln \left(\frac{b}{c} \right)^2 - \frac{(1-\nu)}{2} \left(\frac{b}{c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, P는 시편에 인가된 파괴시의 하중, t는 시편의 두께, ν 는 시편의 프와송비(Poisson's ratio), a는 3개의 지지볼이 위치한 원의 반지름, b는 피스톤의 반지름, c는 시편의 반지름이다. 그러나 ball-on-3-ball 시험에서의 b는 시편 중심에 균일한 하중이 인가되는 평면 영역의 반지름(피스톤 단면에 해당하는 등가 반지름)을 대입하여야 한다. 본 연구에서는 ball-on-3-ball 시험에서 이축 강도를 결정하기 위한 방법에 대하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 구조재료용 세라믹스로 널리 사용되고 있는 알루미나 시편을 제작하여 실험하였다. 상용 알루미늄 분말(AES-11, Sumitomo, Japan)을 이용하여 냉간 정수압 성형(cold isostatic pressing)한 후 소결하여 두께 2 mm, 반지름 10 mm의 디스크형 시편을 제작하였다. 이 시편을 정밀 절단 연삭기(SFG-200M, Samsung clover, Korea)를 사용하여 #150 및 #600의 다이아몬드 휠(wheel)로 표면 연마하였다. Fig. 1에 시험에 사용한 시편의 표면을 경면 연마한 후 관찰한 주사 전자현미경의 사진을 나타내었다.

이축 강도는 ball-on-3-ball 시험법과 piston-on-3-ball 시험법으로, 만능 재료 시험기(H10K-C, Hounsfield Test Equipment Ltd., U.K.)를 이용하여 측정하였다. ball-on-3-ball 시험법은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 시편 지지부에는 120° 간격으로 지름 12 mm의 원주

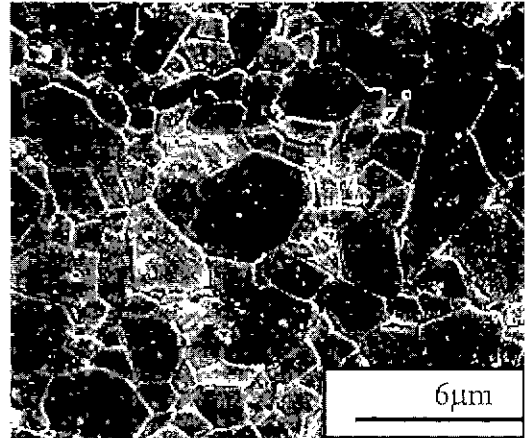


Fig. 1. SEM micrographs of alumina specimen used in strength test.

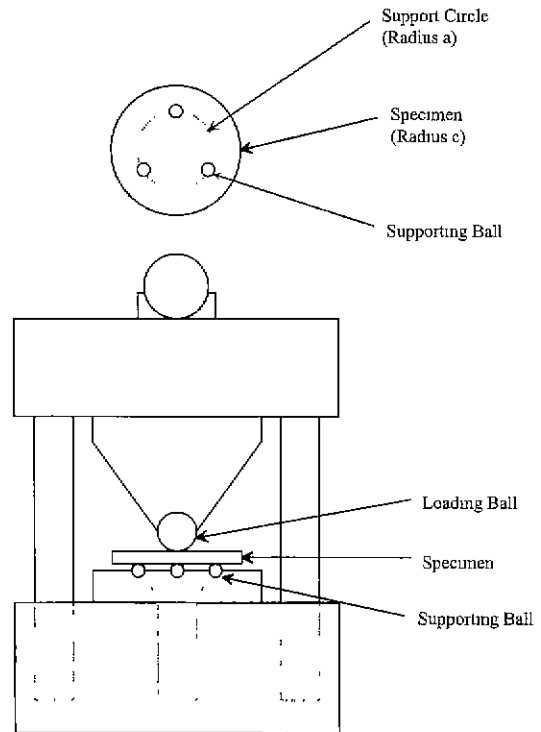


Fig. 2. Schematic diagram of ball-on-3-ball test apparatus.

상에 지름 2 mm의 볼 3개가 위치하고, 하중 인가부에는 지름 5 mm의 볼이 중심에 위치한다. piston-on-3-ball 시험법은 ASTM에서 규정하고 있는 방법을 따르었다.⁶⁾

시편 두께에 따른 crosshead 속도는 Fig. 3의 ASTM 표준 그래프에 의거 결정하였다.⁶⁾

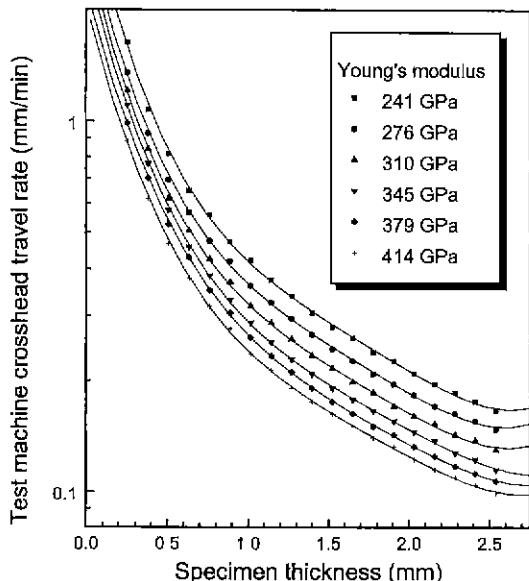


Fig. 3. ASTM standard graph for biaxial strength method.

3. 결과 및 고찰

볼을 이용하여 하중을 인가하는 이축 강도 시험에서는 Eq. (1)의 피스톤의 반지름(b) 대신에 Eq. (2)와 같은 시편 중심에 균일한 하중이 인가되는 영역의 등가 반지름(equivalent radius) \bar{b} 을 이용할 수 있다.²⁾

$$\bar{b} = \sqrt{1.6b^2 + t^2} - 0.675t \quad (b < 0.5t) \quad (2)$$

여기서, b 는 볼과 시편이 닿는 실제 영역의 반지름, t 는 시편의 두께이다. 본 실험에서 측정된 b 는 0.55 mm이었고, Eq. (2)에 의해 계산된 등가 반지름은 0.77 mm이었다. Eq. (2)를 이용하여 ball-on-3-ball 시험에서의 이축 강도를 계산하고, 그 Weibull 도표를 Fig. 4에 나타내었다. ball-on-3-ball 시험에서 시편의 이축 강도는 517 ± 41 MPa이었고, Weibull 계수는 12.93이었다. 또한, piston-on-3-ball 시험에 의한 이축 강도는 510 ± 41 MPa이었고, Weibull 계수는 13.28이었다.

ball-on-3-ball 시험과 piston-on-3-ball 시험에 의한 이축 강도의 평균의 동질성을 검증하기 위하여 분산 분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 행하였다. 분산 분석 결과, 분산의 비율(variance ratio) F 는 0.253이었고, 검정에 대한 p -값은 0.618로 유의수준 0.05보다 작으므로 두 평균이 동일하다고 할 수 있었다.^{15,16)}

시편에 인가되는 응력 해석을 위해서 유한 요소 해석은 ANSYS FEM package를 이용하였다.¹⁷⁾ 사용된 시편의 반지름은 10 mm, 두께는 2 mm, 중심에서 지지볼(지

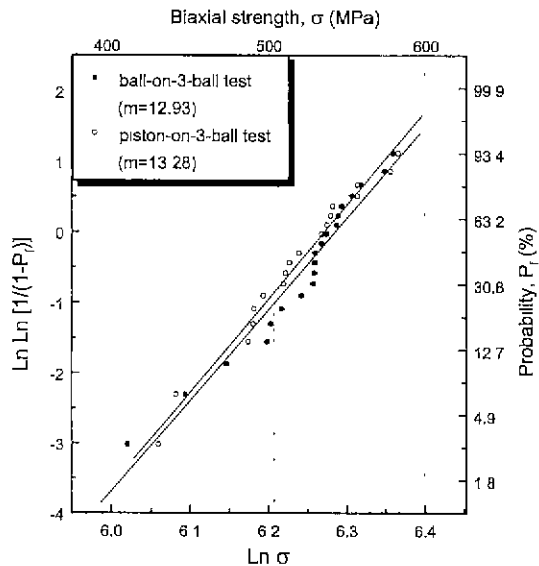


Fig. 4. Weibull plot of the biaxial strength of alumina specimens for ball-on-3-ball test and piston-on-3-ball test.

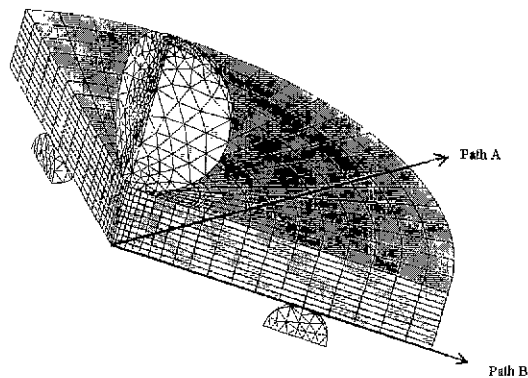


Fig. 5. Finite element mesh used in numerical calculation of stresses in ball-on-3-ball test.

름 2 mm)까지의 거리는 6 mm, 하중 인가볼의 지름은 5 mm이며, 시편 중심으로 3회축 대칭이므로 형상의 1/3만 모델링하여 Fig. 5와 같이 meshing하였다. 알루미늄 시편의 영률은 330 GPa, 프와송비는 0.25, 하중 인가부와 지지부의 볼의 영률은 210 GPa, 프와송비는 0.285로 하였다. 하중 조건은 이축 강도 시험에서 측정된 시편 중 하나를 선택하였고, 하중은 1050 N이었다.

유한 요소 해석 결과는 Fig. 6과 7에 각각 시편 아랫면에 인가되는 방사 응력과 접선 응력으로 나타내었다. 대부분의 이축 강도 시험에서 시편의 윗면에는 압축 응력, 아랫면에는 인장 응력이 인가된다. 세라믹 시편의 강도를 결정하는 것은 인장 응력이므로 시편 아랫면의

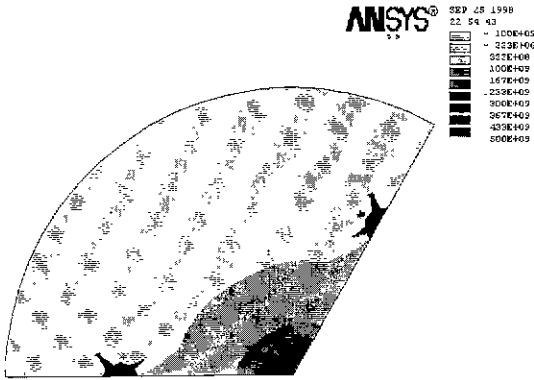


Fig. 6. Radial stress distribution on the lower face of the specimen.

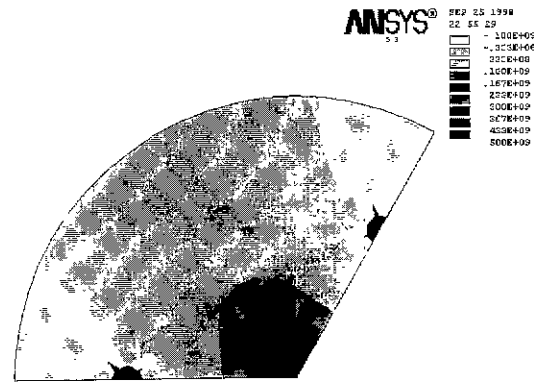


Fig. 7. Tangential stress distribution on the lower face of the specimen.

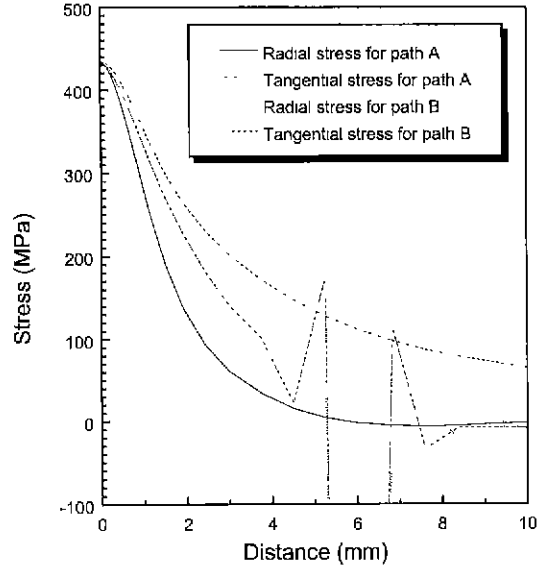


Fig. 8. Radial and tangential stress for path A and B of the finite element model in ball-on-3-ball test.

응력 분포를 나타내었다. 방사 응력과 접선 응력 모두 시편 중심에서 높은 응력이 인가되고 시편 가장자리로 갈수록 낮은 응력이 인가된다. 방사 응력과 접선 응력을 비교하기 위하여 Fig. 4의 경로 A와 B를 따라 각각의 응력을 Fig. 8에 나타내었다. 경로 A는 시편 아랫면에서 지지볼 사이를 지나가는 경로이고 경로 B는 지지볼을 지나가는 경로이다. 경로 A와 B 모두 접선 응력이 방사 응력보다 높았으며, 그 차이는 시편 중심에서의 거리가 멀어질수록 더 커졌다. 접선 응력과 방사 응력과의 차이는 경로 A보다는 B의 경우가 더 작았다. 또한, 경로 B의 경우 지지볼 부근에서 큰 압축 응력이 인가되는 것을 알 수 있었다. 경로 A에서 최대 방사 응력은 435 MPa, 최대 접선 응력은 433 MPa이었고, 경로 B의 경우도 마찬가지로 최대 방사 응력은 435 MPa, 최대 접선 응력은 433 MPa이었다.

Ball-on-ring 시험에서 시편 중심에서의 거리에 따른 방사 응력(σ_r)과 접선 응력(σ_t) 분포는 다음 식과 같다.²⁾

$$\sigma_r = \frac{3P(1+\nu)}{4\pi t^2} \left[2\ln \frac{a}{r} + \frac{(1-\nu)}{2(1+\nu)} \left\{ \frac{a^2-r^2}{a^2} \right\} \frac{b^2}{r^2} \frac{a^2}{R^2} \right] \quad (r > b) \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{3P(1+\nu)}{4\pi t^2} \left[2\ln \frac{a}{r} + \frac{(1-\nu)}{2(1+\nu)} \left\{ 4 - \frac{b^2}{r^2} \right\} \frac{a^2}{R^2} \right] \quad (r > b) \quad (4)$$

여기서, P는 시편에 인가된 하중, ν 는 시편의 프와송비, t는 시편의 두께, a는 시편 지지부인 링의 반지름, r은 시편 중심에서의 거리, b는 시편 중심에 균일한 하중이 인가되는 영역의 반지름, R는 시편의 반지름이다. Eq. (3)과 (4)에 의한 ball-on-ring 시험에서의 방사 응력 및 접선 응력과 FEM 응력 해석에 의한 ball-on-3-ball 시험에서의 방사 응력 및 접선 응력을 각각 Fig. 9와 10에 나타내었다. 시편 중심에서 최대칭인 ball-on-ring 시험에서의 응력 분포는 ball-on-3-ball 시험에서 지지볼을 지나지 않는 경로 A보다는 지지볼을 지나가는 경로 B의 응력 분포와 더 유사하였다.

유한 요소 해석 결과, 시편과 하중 인가볼이 닿는 부분의 반지름은 0.57 mm이었고, 이축 강도 시험에서 직접 측정된 0.55 mm와는 잘 일치하였다. 또한, Eq. (2)에 의해 계산된 등가 반지름은 0.78 mm이었다.

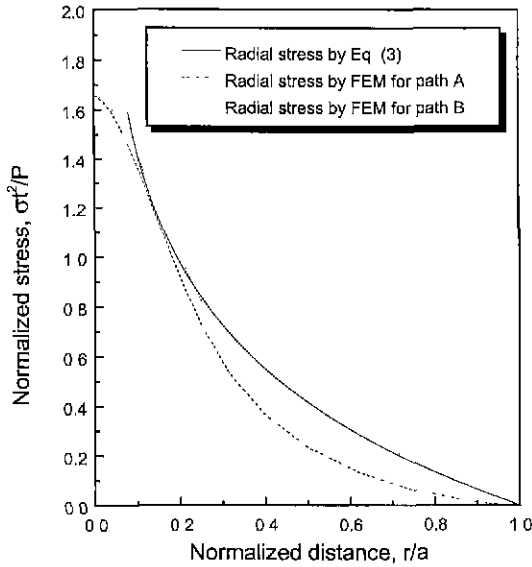


Fig. 9. Radial stress by the equation of ball-on-ring test and the FEM of ball-on-3-ball test.

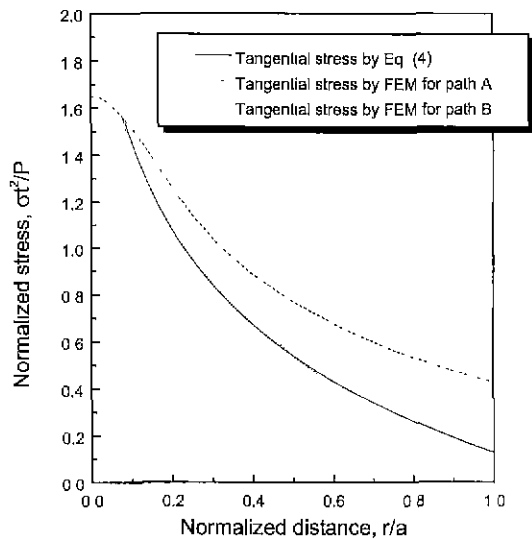


Fig. 10. Tangential stress by the equation of ball-on-ring test and the FEM of ball-on-3-ball test.

4. 결 론

ball-on-3-ball 시험에서 이축 강도를 결정하기 위하여, 알루미늄 시편을 이용하여 ball-on-3-ball 시험과 piston-on-3-ball 시험을 하였다. piston-on-3-ball 시험에서의 이축 강도는 510 ± 41 MPa 이었고, piston-on-3-ball 시험에서의 강도 식과 등가 반지름을 이용하여 계산한 ball-on-3-ball 시험에서의 이축 강도가 517 ± 41

MPa 이었다. 두 이축 강도의 분산 분석 결과, 두 평균이 동일하다고 할 수 있었다. 따라서, ball-on-3-ball 시험에서의 이축 강도는 piston-on-3-ball 시험에서의 강도 식과 등가 반지름을 이용하여 계산할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한국과학기술원 재료계면공학 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며 이에 감사드리는 바입니다.

REFERENCES

1. 한봉석, "Al₂O₃ 세라믹스의 열충격 파괴 거동과 열응력 해석," 연세대학교 대학원 박사학위논문 (1997.12).
2. D. K. Shetty, A. R. Rosenfield, P. McGuire, G. K. Bansal and W. H. Duckworth, "Biaxial Flexure Tests for Ceramics," *Ceramic Bulletin*, **59**(12), 1193-1197 (1980).
3. D. K. Shetty, A. R. Rosenfield, G. K. Bansal and W. H. Duckworth, "Biaxial Fracture Studies of a Glass-Ceramic," *J. Am. Ceram. Soc.*, **64**(1), 1-4 (1981).
4. R. M. Williams and L. R. Swank, "Use of Weibull Statistics to Correlate MOR, Ball-on-Ring and Rotational Fast Fracture Tests," *J. Am. Ceram. Soc.*, **66**(11), 765-768 (1983).
5. R. Ham-Su and D. S. Wilkinson, "Strength of Tape Cast and Laminated Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**(6), 1580-1584 (1995).
6. ASTM Standard F394-78, pp.466-450 in ASTM Annual Book of Standards, Vol. 15.02, Section 15. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. 1996.
7. K. C. Radford and F. F. Lange, "Loading(L) Factors for the Biaxial Flexure Test," *J. Am. Ceram. Soc.*, **61**(5-6), 211-213 (1978).
8. D. B. Marshall, "An Improved Biaxial Flexure Test for Ceramics," *Ceramic Bulletin*, **59**(5), 551-553 (1980).
9. M. N. Giovan and G. Sines. "Biaxial and Uniaxial Data for Statistical Comparisons of a Ceramic's Strength," *J. Am. Ceram. Soc.*, **62**(9-10), 510-515 (1979).
10. K. Breder, T. Andersson and K. S. Lin, "Fracture Strength of α - and β -SiAlON Measured by Biaxial and Four-Point Bending," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(7), 2128-2130 (1990).
11. T. Thiemeier and A. Brckner-Foitt, "Influence of the Fracture Criterion on the Failure Prediction of Ceramics Loaded in Biaxial Flexure," *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**(1), 48-52 (1991).
12. D. K. Shetty, A. R. Rosenfield, W. H. Duckworth and P. R. Held, "A Biaxial-Flexure Test for Evaluating Ceramic Strengths," *J. Am. Ceram. Soc.*, **66**(1), 36-42 (1983).
13. J. Lamon, "Statistical Approaches to Failure for Ceram-

- ic Reliability Assessment," *J. Am. Ceram. Soc.*, **71**(2), 106-112 (1988).
14. L.-Y. Chao and D. K. Shetty, "Reliability Analysis of Structural Ceramics Subjected to Biaxial Flexure," *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**(2), 333-344 (1991).
- 15 이준형, "통계분석," pp. 400-472, 대영문화사, 1998.
16. 성용현, 최영훈, 이승천, 박동련, 변종석, "STATISTICA를 이용한 통계정보분석," pp. 210-238, 도서출판 탐진, 1998.
17. Swanson, J. A., ANSYS-Engineering Analysis System User's Manual, Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, PA