

취성재의 손상후 잔류강도 평가

오상엽*·신형섭**·서창민***

Evaluation of Residual Strength in Damaged Brittle Materials

Sang-Yeob Oh, Hyung-Seop Shin and Chang-Min Suh

Key Words: Uniaxial Flexure Strength(단축 굽힘강도), Biaxial Flexure Strength(2축 굽힘강도), Ball-on-Ring Test(2축 굽힘시험), 4-Point Bend Test(4점 굽힘시험), Residual Strength(잔류강도), Damage Tolerance Design(손상허용설계)

Abstract

In structural applications, brittle materials such as soda-lime glasses and ceramics are often subjected to multiaxial stress. Brittle materials with crack or damaged by foreign object impacts are abruptly fractured from cracks, because of their properties of very high strength and low fracture toughness. But in most cases, the residual strength has been derived from tests under uniaxial stress such as a 4-point bend test. The strengths under multiaxial stresses might be different from the strength. In comparable tests, the residual strength under biaxial stress state by the ball-on-ring test was greater than that under the uniaxial one by the 4-point bend test. In the case that crack having 90deg. to loading direction, the ratio of biaxial to uniaxial flexure strength was 1.12. At a different crack angle to loading direction when it was evaluated by the 4-point bend test, the residual strength was different and the ratio of 45deg. to 90deg. was 1.16.

1. 서 론

취성재는 낮은 파괴인성으로 인하여 사용중 외래물 충격에 의한 손상을 받거나, 가공 및 제조시 내재한 이물질이 표면 균열로 작용하여 응력집중에 의한 급작스런 파괴를 일으키고 파단강도의 급격한 저하를 가져온다. 그러므로, 취성재를 구조용 재료로 적용하는데 있어서 잔류강도를 정량적으로 평가하는 것은 손상허용설계 관점에서

매우 중요하다.^(1,2)

그러나 실험적으로 잔류강도를 평가하는 문제는 복잡하여 얻어진 데이터의 실기에의 적용은 용이하지 않다. 구조물에서 취성재는 다축 응력(multiaxial stress)을 받는 것이 보통이다. 그러나 현재 사용되고 있는 취성판재의 잔류강도는 단축 응력(uniaxial stress)에서 굽힘에 의한 값이 주로 사용되고 있어서 실제 적용 응력 상태와는 다르다.⁽³⁾

일반적으로, 재료의 강도 평가에서 연성재료는 인장시험을, 취성재료인 경우는 단축 굽힘(uniaxial flexure) 상태인 4점 굽힘시험(4-point bend test : 4PB)을 주로 사용하고 있다. 또한 시험의 목적 및 재료의 형상에 따라서는 인장시험 및 굽힘시험을 병행하게 된다. 이러한 인장 및 굽힘시험 결과를 통계적인 방법으로 정량적으로 비교한 연구⁽⁴⁾가 보고된 바 있으나, 실험 결과와 통계적인

* 회원, 가톨릭상지대학 자동차계열

E-mail : osyeob@unitel.co.kr

TEL : (054)820-5675 FAX : (054)820-5675

** 회원, 안동대학교 기계공학부

*** 회원, 경북대학교 기계공학부

이론 결과와는 잘 맞지 않았다.

취성재에서 규정된 인장시험편은 가공의 난이성과 큰 제작비가 소요된다. 그러므로, 상대적으로 기계적 강도 측정이 훨씬 쉽고 일반적인 단축 굽힘시험을 사용하여 취성재의 잔류강도를 평가하는 4점 굽힘시험을 이용하는 경우가 많다. 이 방법은 시험편 표면의 최대 인장응력이 작용하는 부위의 표면 균열중, 인장하중 방향에 수직인 최대 균열에 의하여 잔류강도가 결정되어, 실제로 인장하중 방향과 평행으로 존재하는 등, 균열 발생 양상 등 균열의 형상 영향이 제대로 고려되지 않는 문제가 있다.

이에 ball-on-ring 방법과 같은 2축 응력하에서 잔류강도 평가가 바람직하다는 제안도 있어, 2축 응력에 대한 연구^(3,5,6)가 많이 진행되고 있다. 특히, Shetty, D. K. 등⁽¹⁾은 순수 세라믹 재료에 대한 2축 굽힘시험(biaxial flexure test)으로서 3종류의 test geometry ; ball-on-ring(BOR), piston-on-3-ball(PO3B), ring-on-ring(ROR) 방법을 서로 비교한 연구 결과를 보고한 바 있다. 여기에서 세라믹 재료의 2축하 굽힘강도 시험으로서 ball-on-ring 방법이 가장 유용함을 제시하였다. 그러나 손상을 갖는 취성판재의 잔류강도를 평가하는데 있어서 단축 응력과 2축 응력에 대한 비교 시험 예는 거의 없다.

따라서, 본 논문에서는 취성재료에 발생된 손상 양상에 따른 부재의 잔류강도 평가에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 단축 및 2축 응력 상태에서 굽힘하중축에 대하여 각도를 갖는 표면 균열에 대하여 각도에 따른 굽힘강도의 변화를 평가 비교하였다.

2. 굽힘 응력 이론

2.1 단축 응력 조건

단축 응력 상태로서 Fig. 1과 같은 4점 굽힘시험 방법을 사용하여 시험편 하부 표면의 최대 굽힘 응력을 다음 식으로 구한다.

$$\sigma_{\max} = \frac{3Ps}{bt^2} \quad (1)$$

여기서, P는 최대 부하하중, s, b, t는 시험편의 상하부 지지점 사이의 길이, 폭 및 두께를 각각

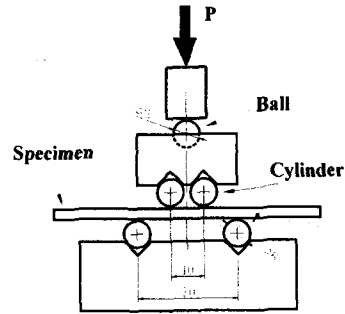


Fig. 1 Schematics of 4-point bend test apparatus.

나타낸다.

그리고 최대 인장 응력이 작용하는 시험편 표면에 균열이 존재하면, 전단변형 이론(Reissner's theory)⁽⁷⁾의 파괴역학 개념을 적용하여 균열 선단에서의 원통좌표계(r, θ, z) 응력장은 다음과 같다.

$$\sigma_x(r, \theta, z) = \frac{k_1(z)}{\sqrt{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{k_2(z)}{\sqrt{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_y(r, \theta, z) = \frac{k_1(z)}{\sqrt{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \frac{k_2(z)}{\sqrt{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3)$$

$$\tau_{xy}(r, \theta, z) = \frac{k_1(z)}{\sqrt{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{k_2(z)}{\sqrt{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (4)$$

$$\tau_{xz}(r, \theta, z) = -\frac{k_3(z)}{\sqrt{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

$$\tau_{yz}(r, \theta, z) = \frac{k_3(z)}{\sqrt{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (6)$$

여기서, 임의의 균열선단 A, B점에서의 응력확대계수는 다음과 같다.

$$k_{1,A} = k_{1,B} = F_1 \sigma_b \sin^2 a \sqrt{a} \quad (7)$$

$$k_{2,A} = k_{2,B} = F_2 \sigma_b \sin a \cos a \sqrt{a} \quad (8)$$

$$k_{3,A} = -k_{3,B} = F_3 \tau \sin a \cos a \sqrt{a} \quad (9)$$

$$\sigma_b = \frac{12z}{t^3} M, \quad \tau = \frac{\sqrt{10}}{(1+\nu)t} \left[\frac{3(t^2 - 4z^2)}{2t^3} \right] M \quad (10)$$

여기서, F₁, F₂, F₃는 시험편의 기하학적 형상의

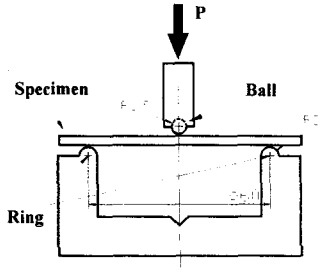


Fig. 2 Schematics of biaxial flexure test using a ball-on-ring test apparatus.

영향을 나타내는 것으로 참고 문헌의 도표⁽⁷⁾로부터 구한다. a 는 최대 균열길이의 반, α 는 응력작용축과 균열 발생 방향 사이의 각도이다.

2.2 2축 응력 조건

Fig. 2와 같은 ball-on-ring 방법을 이용한 시험편의 최대 굽힘응력은 Kirstein과 Woolley의 해로서 다음과 같다.^(5,8)

$$\sigma_{\max} = \frac{3P(1+\nu)}{4\pi r^2} \left[1 + 2 \ln \frac{r}{q} + \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)} \left\{ 1 - \frac{b^2}{2r^2} \right\} \frac{r^2}{R^2} \right] \quad (11)$$

여기서, r 은 원판재 지지점의 반경, R 은 원판재의 반경, q 는 중심부에서 균일 하중이 작용하는 영역의 반경 및 ν 는 포아송비를 나타낸다. 본 연구에서는 원형 실린더 대신 구를 사용하여 헤르츠안 접촉이론을 고려한 등가 균일 하중 영역의 반경 $q_{\text{equ}} \approx t/3$ 를 사용한다.⁽⁵⁾

3. 실험방법

3.1 시험편

시험에 사용한 취성재료에는 시판의 소다라임 유리 판재를 사용하였다. 두께 3mm 시판의 유리 판재를 13×80mm의 직사각판과 지름 80mm인 원판으로 절단하여, 각각 단축, 2축 굽힘시험에 사용하였다. 유리판은 절단후 모서리 부분의 영향

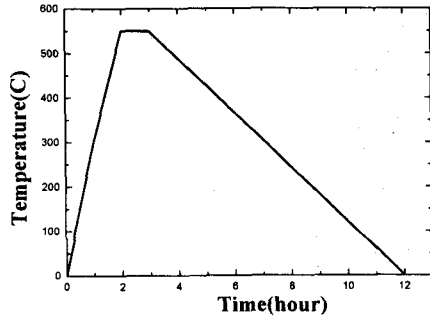


Fig. 3 Heat treatment diagram.

을 없애기 위하여 연마지 #600번으로 C0.2로 모따기 가공을 하였다. 그리고 시험편 표면의 잔류 응력을 제거하기 위하여, 전기로에 넣어 550°C까지 가열한 후 1시간 유지시킨 후 노냉시키는 아닐링 열처리를 하였다. (Fig. 3)

Table 1에는 시험에 사용한 유리 재질의 기계적 성질을 나타내고 있다.

3.2 4점 굽힘시험 장치

단축 응력 상태로서 4점 굽힘시험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 이 장치는 상부 스패는 10mm, 하부 스패는 30mm, 폭 14mm, 지름 8mm인 4개의 원기둥과, 1개의 강구로 구성되어 있다. 또한 하중 부하시 지지 스패 중심과 부하 중심을 정렬시켜 주는 보조 장치가 있다.

3.3 Ball-on-ring 시험 장치

현재 2축 굽힘시험에 대한 규정은 piston-on-3-ball에 대한 시험법만 ASTM에 규정되어 있다.⁽¹⁰⁾ 그러나, 본 연구에서는 Fig. 2의 개략도에 보인 바와 같이 시험편 하부 하중 지지부에 연속 ring을 사용한 ball-on-ring 시험 장치를 개발하였다. 이 장치에서 연속 ring부는 지름 6mm이고, 시험편 지지부 원형링의 직경은 60mm이다. 또, 하중부의 강구 직경은 5mm를 사용하였다.

Ball-on-ring 시험 치구는 Shetty, D. K. 등⁽³⁾이 사용한 시험 치구와는 달리, 시험편 하부 하중 지지부에 ball 대신 연속 ring을 사용하였다.

Table 1 Mechanical properties of soda-lime glass specimen.

Material	Density, ρ (g/cm^3)	Poisson's ratio, ν	Young's modulus E (GPa)	Hardness, Hv (GPa)	Flexure strength σ (MPa)	Fracture toughness K_{Ic} ($MPa\sqrt{m}$)
Soda-lime Glass	2.5	0.23	69	500	69	0.75

그리고, 굽힘시험후 시험편 중심으로부터 방사형의 동일한 간격으로 균열이 형성되면서 균열면과의 마찰에 의해 ring 부분이 손상되는 것을 알 수 있었다. 완전한 접촉 상태를 유지하도록 표면 상태를 매 시험마다 확인하였다.

3.4 잔류강도 측정 시험 절차

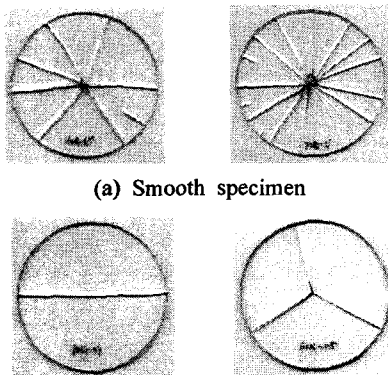
준정적 압축 부하 시험은 유압식 만능재료시험기(Instron 8516, 용량 100kN)를 사용하여 시험속도 0.5mm/min로 하였다. 그리고 손상을 입은 시험편의 잔류강도를 평가하기 위하여, 마이크로비커스 경도계(Shimadzu, HMV-2000)에서 2kgf의 하중을 사용하여 균열을 형성시켰다. 또, 균열의 방향에 따른 잔류강도의 영향을 조사하기 위하여, 다이아몬드 압자의 압흔을 이용한 메디안 크랙 및 레디얼 크랙을 굽힘응력축에 90도, 45도로 형성시켰다. 이때, 발생된 균열의 길이를 실체현미경으로 측정하여 계산식에 이용하였다.

특히, 취성판재는 시험 환경에 민감하기 때문에 시험편에 균열을 형성시킨 후 곧바로 굽힘시험을 실시하여 외부 환경의 영향을 최소화하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 평활재 시험편에 대한 손상 형태

균열이 없는 평활재 소다라임 유리 판재에 있어서 2축 응력 조건으로 굽힘 응력에 의한 파괴 양상의 예를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 시험편 하부



(a) Smooth specimen
(b) Specimen with indentation crack
Fig. 4 Fracture patterns in specimen.

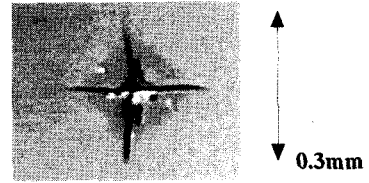


Fig. 5 Shape of crack after Vickers indentation test.

표면에서 최대 응력이 작용하는 위치에서부터 균열이 발생되어 점차 방사상과 상부로 성장되어 여러 조각으로 파단되었다. 또한 시험편의 파단된 조각의 수가 증가할 경우 파괴 에너지가 더 많이 필요하기 때문에 최대 굽힘응력이 증가하였다. 또한, 파단된 조각 수의 차가 심한 것은 시험편 제조 및 가공시 내재된 결함의 크기 및 분포가 불균일하였기 때문으로 생각된다. 단축 응력 조건에서도 비슷한 파괴 형태를 보였다.

4.2 균열재 시험편에 대한 손상 형태

Fig. 5는 하중 19.6N에서 비커스 압입시험후 손상의 형태를 나타내고 있다. 이때 최대 균열의 방향이 굽힘 응력축에 0도(수평), 45도, 90도(수직)가 되도록 발생시켰다. 다이아몬드 압입부의 대각선 길이는 약 0.1mm이고, 최대 균열길이는 약 0.30mm이었다.

손상 형태는 2축 응력에서 Fig. 4(b)와 같이 2-3 조각으로, 단축 응력에서는 2조각으로 파단되었다. 시험편 하부의 최대 응력이 작용하는 위치에 있는 균열 선단으로부터 방사상과 상부로 성장하

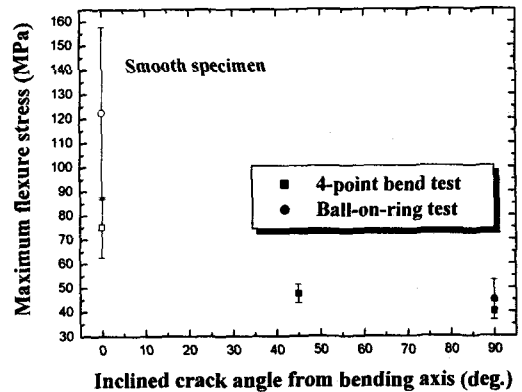


Fig. 6 Variation of maximum flexure stress according to inclined crack angles.

Table 2 Ratios of flexure strengths

Test conditions	4-point bend σ_{max} (MPa)	ball-on-ring σ_{max} (MPa)	BOR/4PB Ratios
No crack	75.2	122.4	1.63
45deg. crack	47.5	-	-
90deg. crack	40.1	44.9	1.12

여 파단되었다.

따라서, 각 균열 조건에서 평균 10개의 시험 데이터를 사용한 균열 위치에 따른 굽힘강도 변화를 Fig. 6에 편차와 함께 나타내었다. 여기서 균열이 위치한 각도가 응력축에 0도에서 90도로 증가함에 따라 균열 선단에 작용하는 응력집중의 차이로 인하여 굽힘강도가 감소함을 알 수 있다. 평균 균열길이가 0.29mm인 단축 응력조건에서 최대 굽힘강도는 평활재에 비하여 45도인 경우 약 37%, 90도인 경우 약 47%정도 감소하였다. 또한, 45도인 균열에 비해 90도인 균열이 약 16%정도 감소하였다.

Table 2에는 단축 응력 조건에 대한 2축 응력 조건에서 얻은 굽힘강도의 비를 나타내었다. 최대 굽힘강도는 평활재인 경우 약 63%, 90도인 경우 약 12%정도 높게 나타났다. 보통 취성판재에 존재하는 결함에 따른 데이터 편차가 매우 큼을 고려한다면, 90도인 2축 응력조건과 단축 응력의 45도인 경우와 비슷한 최대 굽힘강도를 얻을 수 있었다. 따라서, 잔류강도의 손상평가 방법으로 4점 굽힘시험의 적용은 손상의 과소 평가를 제공할 수 있다. 손상을 입은 취성판재의 잔류강도 평가에 본 연구에서 사용한 2축 응력시험 방법을 적용하게 되면, 균열의 발생 방향 및 위치에 따른 영향을 고려하지 않는 기존의 4점 굽힘시험에 의한 data의 불합리한 문제점을 개선할 수 있을 것이다.

4.3 균열 선단에서의 응력확대계수

Table. 3에는 전단변형 이론에 의한 식(1)~(10)을 이용하여 계산한 균열 선단에서의 응력확대계수 k_1 , k_2 를 나타내었다. 단축 응력 조건에서 45도 균열이 존재할 경우, 전단파괴 모드(k_2)에 의한 영향으로 응력확대계수 k_1 값이 90도 균열인 경우보다 낮게 나왔다. 그러나 k_2 의 영향이 없는 인장파괴 모드(k_1)인 90도 균열인 경우에는 단축 응력 조건에 비하여 2축 응력 조건에서 10%정도 높게 나타났다.

따라서, ball-on-ring 시험 방법을 사용하면 단축 응력 조건에서 전단파괴 모드의 영향을 최대한 줄일 수 있으며, 실제 취성판재의 잔류강도를 평가하는데 있어서 균열 위치의 영향을 받지 않게 된다.

5. 결론

소다라임 유리에서 잔류응력에 미치는 부하 응력 상태와 하중축에 대한 균열 방향의 영향, 파단 형태를 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 동일 압입 하중하에서 도입된 균열을 갖는 시험편에 대한 4점 굽힘시험에서는 균열이 하중축에 45도인 경우에 비해 90도인 경우의 최대 굽힘강도가 약 16%정도 낮게 나타내, 잔류강도의 손상평가 방법으로 4점 굽힘시험의 적용은 손상의 과소 평가 데이터를 제공함을 알 수 있다.
- (2) 하중축에 90도인 균열을 가진 시험편에 대한 ball-on-ring 굽힘시험이 4점 굽힘시험보다 최대 굽힘강도는 약 12%정도 높은 값을 나타내, 응력 상태에 따른 차를 나타내었다.
- (3) 입자 충격손상에 의해 발생하는 레디얼크랙의 발생과 같은 손상을 받은 취성판재의 잔류강도 평가시 ball-on-ring 시험과 같은 축대칭 부하 모드의 시험법을 적용하면 기존의 4점 굽힘시험에 의한 전단파괴 모드(k_2)의 영향을 받는 균열의 각도에 따른 문제를 해소할 수 있다.

Table 3 Stress intensity factors calculated by Reissner's theories.⁽⁷⁾

Test condition (inclined crack angle)		crack length (mm)	σ_{max} /s.d. (MPa)	k_1 /s.d. (MPa \sqrt{m})	k_2 /s.d. (MPa \sqrt{m})	k_3 /s.d. (MPa \sqrt{m})
4-point bend	45deg.	0.29	47.5 /3.80	0.29 /0.01	0.29 /0.01	0
4-point bend	90deg.	0.29	40.1 /3.68	0.48 /0.05	0	0
Ball-on-ring	90deg.	0.28	44.9 /8.15	0.53 /0.10	0	0

참고문헌

- (1) 신형섭, Maekawa, I., 서창민, 1992, "탄화규소 세라믹의 충격손상 및 강도저하에 미치는 입자의 재질 및 크기의 영향," 대한기계학회논문집, Vol. 16, No. 10, pp. 1869~1876.
- (2) Akimune, Y., 1989, "Spherical-Impact Damage and Strength Degradation in Silicon Nitride," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 27, pp. 1422~1428.
- (3) Shetty, D. K., Rosenfield, A. R., Bansal, G. K. and Duckworth, W. H., 1981, "Biaxial Fracture Studies a Glass-Ceramic," *J. of the American Ceramic Society*, Vol. 64, pp. 1~4.
- (4) Orestes E., Alarcon, Ricardo E., and Peter P. Gillis, 1994, "Fracture of Glass in Tensile and Bending Tests," *Metallurgical and Materials Trans. A*, Vol. 25A, pp. 961~968.
- (5) Shetty, D. K., Rosenfield, A. R., McGuire, P., Bansal, G. K. and Duckworth, W. H., 1980, "Biaxial Flexure Tests for Ceramics," *Ceramic Bulletin*, Vol. 59, No. 12, pp. 1193~1197.
- (6) Bennison Stephen J., Jagota Anand, and Anthony Smith, C., 1999, "Fracture of Glass/Poly(vinyl butyral)(Butacite[®]) Laminates in Biaxial Flexure," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, No. 7, pp. 1761~1770.
- (7) Murakami, Y., 1987, "Stress Intensity Factors Handbook," Pergamon Press, Vol. 2, pp. 1249~1250, pp. 1312~1316.
- (8) Kirstein, A. F. and Woolley, R. M., 1967, "Symmetrical Bending of Thin Circular Elastic Plates on Equally Spaced Point Supports," *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 71C, Vol. 1, pp. 1~10.
- (9) ASTM Designation : F394-78, 1991, "Standard Test Method for Biaxial Flexure Strength (Modulus of Rupture) of Ceramic Substrates," Annual Handbook of ASTM Standard, pp. 431~435.