

스트레인게이지법을 사용한 그라스세라믹의 동적 파괴특성평가

노 남 수* · 김 재 훈* · 이 영 신* · 김 덕 회* · 문 순 일**

Evaluation of dynamic fracture characteristics for advanced glass ceramics using strain gage method

Nam-Su Rho* · Jae-Hoon Kim* · Young-Shin Lee* · Duck Hoi Kim* · Soon-Il Moon**

ABSTRACT

The objectives of this study are to evaluate the dynamic fracture toughness of advance glass ceramics(MACOR glass-filled ceramic, Corning Glass Works) for dome port cover of the ramjet. Static and dynamic fracture toughness tests are performed using strain gage method in the variation of notch radii.

초 록

본 연구는 램제트 엔진의 돔포트 커버의 소재로 사용 될 첨단 그라스 세라믹(MACOR) 소재에 대한 동적 파괴인성 시험을 목적으로 한다. 다양한 노치반경의 시험편에 대하여 스트레인게이지법을 사용한 정적과 동적 파괴인성 시험을 수행하였다.

Key Words: Glass ceramic(세라믹), Ramjet engine(램제트 엔진), Dynamic fracture toughness(동적 파괴인성), Strain gage method(스트레인게이지법)

1. 서 론

돔 포트 커버(Dome port cover)는 일체형 램제트 추진기관에서 가속을 얻기 위해 사용되는 램제트와 로켓 부스터 사이에 존재하게 되며 램제트가 작동하기 위하여 부스터가 소진되고 난 후에 곧바로 램제트 내부를 손상 시키지 않고 완전 제거되

어야 한다. 이를 위해 돔포트 커버의 적절한 파괴를 위한 동적 파괴특성을 평가 램제트 엔진의 구조 설계에 적용하는 것이 요구되고 있다.

본 연구에서는 돔 포트 커버의 소재로 주목되고 있는 그라스 세라믹 재료 중에서 MACOR glass-filled ceramic (Corning Glass Works)에 대한 정적 및 동적 파괴특성을 평가하기 위하여 스트레인게이지법을 적용하여 파괴인성시험을 수행하고 ASTM법의 결과와 비교 분석하였다.

* 충남대학교 기계설계공학과

** 국방과학연구소

김재훈, E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

2. 관련 이론

2.1 ASTM법에 의한 응력확대계수 결정

정적 하중 하에서의 응력확대계수를 결정하는 방법은 ASTM E399[1]에서 규정되어 있으며, 3점 굽힘시험편의 경우는 아래와 같다.

$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

여기서, $f\left(\frac{a}{W}\right) =$

$$\frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2}}{2\left(1 + 2\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{2.15} - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

이다. W 는 시험편의 폭, B 는 시험편의 두께, a 는 균열길이, P_Q 는 균열개시 하중, S 는 시험편 지지점 사이의 거리이다. 파괴인성은 균열개시 하중, P_Q 에서의 K_Q 을 계산하고 평면변형을 파괴인성 조건을 만족할 때 K_{IC} 로 인정한다.

2.2 스트레인게이지법에 의한 응력확대계수 결정

Westergaard의 응력함수를 사용하여 Dally and Sanford에 의해 개발된 변형을 측정에 의한 파괴인성 평가 식을 사용하였다. 인장시험으로부터 얻어진 탄성계수($E = 63.92 \text{ GPa}$)와 프와송비($\nu = 0.27$)를 고려하여, 스트레인게이지는 Fig. 1과 같이 균열선단에서 $\theta = 70.16^\circ$, $\alpha = 62.54^\circ$ 의 위치에 부착하였다. 이때 변형을 측정에 의한 정적파괴인성은 스트레인게이지의 변형률 신호를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다[2].

$$K_I = 3.07253 E \sqrt{r \epsilon_{xx}} \quad (2)$$

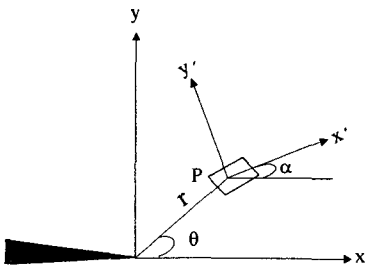


Fig. 1 Definition of coordinate systems O_{xy} and $P_{x'y'}$

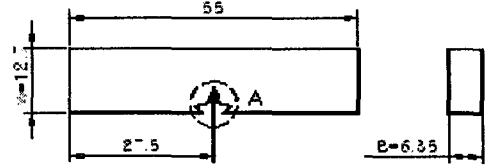


Fig. 2 Shape and dimensions of the 3PB specimen

3. 실험 방법

정적 및 동적파괴인성 시험에서 사용한 시험편은 노치에 의한 CT 및 소형 3점 굽힘 시험편을 이용하였다. CT 시험편은 노치반경 0.25mm로 동일하게 제작하였으며, 3점 굽힘 시험편의 노치 반경은 0.25mm 부터 2mm사이로 변화시켜 가공하였다. Fig. 2는 정적 및 동적 파괴인성 시험에 사용된 3점 굽힘 시험편의 형상이다. 스트레인게이지는 노치선단에서 $r=1\text{mm}$ 와 1.5mm 거리에 부착하였다. 정적 상태에서 변형률은 Measurements group Inc.의 System 5000 스트레인 앰프를 사용하여 측정하였고, 현미경을 이용하여 스트레인게이지 부착위치를 확인하여 변형률 측정에 의한 파괴인성 산출에 이용하였다.

동적 파괴인성시험은 3점 굽힘 시험편으로 낙하식 충격 시험기(drop weight impact testing machine, Model : Dynatup 8250)를 이용하여 실험하였다. 충격 텡 및 추의 무게는 2.38 kgf으로 일정하게 유지하였으며, 일정높이에서의 자유낙하여 텡이 시험편을 타격하는 순간 속도를 2 m/s가 되도록 일정하게 유지하였다. 스트레인게이지에서 발생하는 변형률을 측정하기 위하여 동적 스트레인 앰프(Measurement group, Model: 2210)를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 정적 파괴인성 시험 결과

Figure 3은 각 노치반경 변화에 따른 3점 굽힘 시험편의 정적파괴인성 시험 결과를 나타낸

것이다. 그라스 세라믹이 너무 취성이 강하여 피로 예비 균열을 삽입할 수 없어 노치 반경의 변화에 따라 결보기 파괴인성시험을 수행하였다. ASTM에 규정된 방법에 비해 스트레인게이지법에 의한 결과는 월등히 큰 파괴인성을 보여주고 있으며 이것은 그라스 세라믹의 재료특성을 기 존 스트레인게이지 법이 정확히 반영하지 못하는 데서 비롯된 것으로 여겨진다. Table 1은 동일한 노치 반경 ($\rho=0.25\text{mm}$)하에서 3PB 시험편과 CT 시험편의 결과를 비교한 결과이다. 두 시험편에서의 파괴인성 결과는 서로 거의 일치하고 있었으며 이것은 3PB 시험편의 정적시험에서 ASTM의 하중법에 의한 결과가 적절함을 보여 주고 있다.

4.2 스트레인게이지법의 보정

Figure 4는 $K_{IS-Strain}/K_{IS-ASTM}$ 을 각 노치 반경에 따라 정리한 것이다. 이것은 스트레인게이지 법이 ASTM 법에 의한 결과보다 일정한 비율로 과대평가되었음을 나타낸다. 그러므로 동적 파괴 인성시험에 스트레인 게이지 법을 적용하기 위해서 과대평가된 스트레인 게이지 법을 ASTM 법에 일치시키는 식 (3)과 같은 보정식을 적용 하였다.

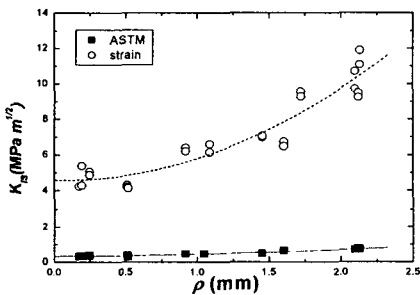


Fig. 3 Influences of ρ on K_I for static fracture toughness

Table 1. Comparisons of static stress intensity factor for 3PB and CT specimens

3PB			CT		
ρ (mm)	P_{max} (N)	K_I ($MPa\sqrt{m}$)	ρ (mm)	P_{max} (N)	K_I ($MPa\sqrt{m}$)
0.20	24.24	0.33	0.24	69.92	0.34
0.25	21.14	0.31	0.25	71.51	0.35
0.25	24.72	0.35	0.25	65.04	0.33

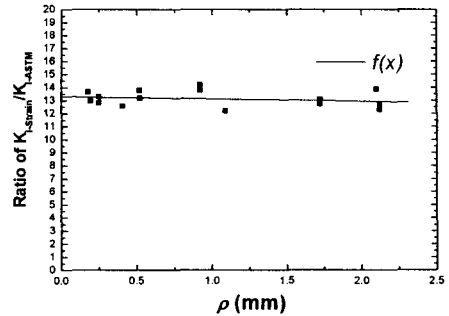


Fig. 4 Influences of ρ on $K_{IS-Strain}/K_{IS-ASTM}$ for static fracture toughness results of glass ceramic

$$K_I = \frac{3.07253E\sqrt{rc} \cdot x'}{f(x)} \quad (3)$$

여기서 $f(x)$ 는 Fig. 4의 데이터를 피팅한 함수이다. 식 (4)는 식(3)과 Fig. 4로부터 보정된 스트레인 게이지법의 식이다. Fig. 5는 식 (4)를 적용하여 얻은 스트레인게이지법의 결과를 ASTM법에 의한 결과와 비교한 것이다. 보정된 식을 사용한 결과 정적하중 하에서 스트레인게이지법과 ASTM법의 결과가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이것으로부터 식 (4)를 그라스세라믹의 동적 파괴인성에 적용할 경우 정적 파괴인성 시험에서 ASTM법에 의한 결과와 비교 평가 할 수 있을 것으로 예상된다.

$$K_I = 0.2327674E\sqrt{rc} \cdot x' \quad (4)$$

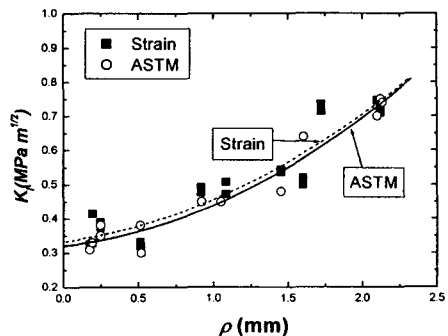


Fig. 5 $K_{IS-ASTM}$ and $K_{IS-Strain}$ for static tests

4.3 동적 파괴인성 시험 결과

Figure 6은 동적 파괴인성 시험에서 ASTM법과 식 (4)의 스트레인게이지법을 동적 파괴인성 시험에 적용하여 얻은 결과이다. ASTM법의 결과는 스트레인게이지법에 비해 크게 평가되었으며 불규칙하게 분포되었으나 스트레인게이지법의 결과는 일정한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그라스 세라믹 시험편의 정적 파괴 하중은 금속 등의 일반 재료에 비해 무척 작은 값을 가지며 동적시험에서는 충격 텅의 무게와 속도가 이에 비해 상당히 크기 때문에 관성의 영향이 크게 작용한다. 그러므로 본 연구에서는 스트레인게이지법에 의한 파괴인성을 평가하였다[3]. Fig. 7은 스트레인게이지 법에서 얻어진 정적시험결과와 동적시험 결과를 비교한 것이다.

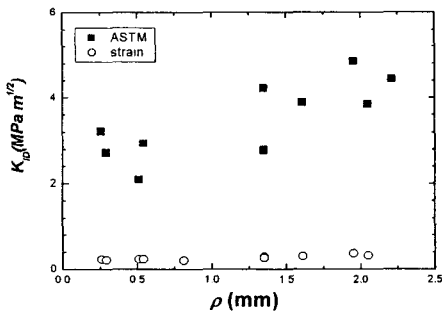


Fig. 6 $K_{ID-ASTM}$ and $K_{ID-Strain}$ for dynamic tests

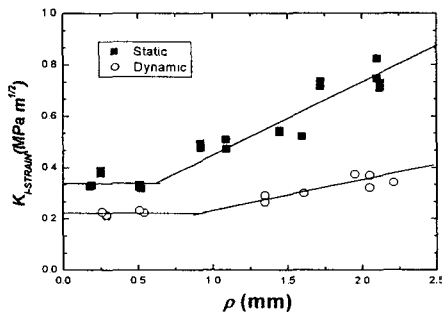


Fig. 7 $K_{IS-Strain}$ and $K_{ID-Strain}$ for 3PB tests

4. 결 론

- 1) 정적 파괴인성평가에서 노치 반경이 약 0.5mm 이하가 될 경우 일정한 K_I 에 근접하게 되며 노치 시험편을 이용한 파괴인성 평가는 유효한 것으로 나타났다.
- 2) 스트레인게이지법에 의한 정적 파괴인성 결과는 ASTM법에 비해 상당히 크게 평가되었으며, ASTM법과 변형을 측정법에 의한 결과의 차이를 보정하였다.
- 3) 동적파괴인성은 정적파괴인성보다 작고 노치에 민감한 것으로 나타났다.
- 4) 정적 파괴인성 K_{IC-S} 는 $0.33MPa\sqrt{m}$ 이고, 동적 파괴인성 K_{IC-D} 는 $0.22MPa\sqrt{m}$ 로 평가되었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구비 지원에 의한 연구 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. ASTM, 1997, Metals Test Methods and Analytical Procedures.
2. J. W. Dally and R. J. Sanford, 1987, "Strain-Gage Methods for Measuring the Opening Mode Stress Intensity Factor, K_I ", Experimental Mechanics, Vol. 27, No. 4, pp. 381~388.
3. P. R. Sreenivasan, A. Moitra, S. K. Ray and S. L. Mannan, 1996, "Dynamic Fracture Toughness Properties of a 9Cr-1Mo Weld from Instrumented Impact and Drop Weight Tests", International Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 69, No. 2, pp. 149~159.