

Machinable Glass Ceramic의 기계적 특성 평가

노남수* · 김덕희* · 박철규* · 김재훈* · 이영신* · 문순일**

Evaluation of Mechanical Properties for Machinable Glass Ceramic

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

ABSTRACT

The objectives of this study are to evaluate mechanical properties of glass ceramic for dome port cover material of the ramjet. Candidate material for dome port cover of the ramjet is selected the machinable glass ceramic(MACOR glass-filled ceramic, Corning Glass Works, code 9658). Static and dynamic fracture toughness tests were performed to evaluate the apparent fracture toughness of notched specimen.

초 록

본 연구는 램제트 돔 포트 커버용 글라스 세라믹의 기계적 특성, 정적 및 동적 파괴인성을 평가하기 위해 수행하였다. 램제트 추진기관의 돔 포트 커버의 재료로 MACOR 글라스 세라믹 9658을 선정하였으며, 취성재료인 글라스 세라믹의 파괴인성을 측정하기 위해 노치시편에 대한 정적 및 동적 파괴인성시험을 수행하였다.

Key Words: Ram Jet Engine (램 제트 엔진), Static Fracture Toughness(정적 파괴인성), Dynamic Fracture Toughness(동적 파괴인성), Dome Port Cover (돔 포트 커버)

1. 서 론

돔 포트 커버(dome port cover)는 일체형 램제트 추진기관에서 가속을 얻기 위해 사용되는 램제트와 로켓 부스터 사이에 존재하게 된다. 이러한 커버는 램제트가 작동하기 위하여 부스터가 소진되고 난 후에 바로 제거된다. 부스터 챔버가 연

소실의 역할을 하기 때문에 커버는 신속하고 정확하게 제거되어야 한다. 커버는 부스터가 연소되는 동안 열 변형이 없어야 하며, 램제트가 시작되기 전에 공기 압력에 의해 열려져서는 안 된다 [1]. 램제트 설계에 있어서 구조를 간단히 하며 중량을 줄이고, 신뢰성을 지니기 위해서는 커버가 일회용으로 제작되어 노즐로 방출하는 방법이 가장 적절하다[2].

돔 포트 커버의 소재로 사용이 주목되는 MACOR glass-filled ceramic (Corning Glass Works, Code 9658)은 가공 가능한 글라스 세

* 충남대학교 기계설계공학과
** 국방과학연구소
김재훈, E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

라믹(machinable glass ceramic)이며, 고온 환경에서 잘 견디고 내부 결함이 없는 특징이 있다.

따라서 본 연구에서는 본 재료를 돔 포트 커버에 적용하기 위하여 인장, 압축, 4점 굽힘 및 경도 시험을 실시하고, 정적 및 동적 파괴인성시험을 통하여 기계적 특성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 돔포트 커버의 설계 및 해석에 대한 기초자료로 사용하고자 한다.

2. 실험 방법

가공할 수 있는 Glass Ceramic의 인장시험은 ASTM C1273, 압축 시험은 ASTM C695, 4점 굽힘 시험은 ASTM C1161, 파괴인성 시험은 ASTM E399에 준하여 수행하였다[3]. 각 시험은 로드셀 10톤 용량의 유압식 만능재료시험기(Model MTS-810)를 사용하여 하중속도 0.1 mm/min의 변위 제어 방식으로 실험하였다. 경도시험은 ASTM C1326에 준하여 전자식 로크웰 경도시험기(HR-521)를 사용하여 A 스케일로 수행하였다.

취성재료의 경우 데이터의 분산이 매우 크므로 신뢰성 해석을 통하여 시험데이터를 정리하였다. 취성재료의 굽힘, 압축 시험 데이터는 이모수 와이블 분포로 가정하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 이모수 와이블 분포는 다음과 같은 분포함수로 표현할 수 있다.

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{K_{IC}}{\zeta}\right)^m\right\} \quad (1)$$

여기서, $F(x)$ 는 누적손상확률, m 은 와이블 계수(Weibull coefficient) 혹은 형상계수(shape parameter), ζ 는 척도 모수(scale parameter)이다. 본 연구에서 누적손상확률은 메디안 순위법을 이용하여 계산하였다. 와이블 분포에서 얻어지는 와이블 계수 및 척도 모수를 이용하여 다

음과 같이 평균 및 분산을 계산하였다.

$$Ave. = m \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\zeta}\right) \quad (2)$$

$$Dev. = \zeta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\zeta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\zeta}\right) \right] \quad (3)$$

본 연구의 정적 및 동적파괴인성 시험에서 사용한 시험편은 소형 3점 굽힘 시험편으로, 소재의 국부적인 영역에서 파괴특성을 평가할 때 유용하게 사용될 수 있다. 노치 반경은 0.25, 0.5, 1.5, 2 mm로 변화시켜 가공하였고, 노치 길이 a/W 는 0.48이 되도록 일정하게 하였다. 가공한 시험편은 500배율의 광학 현미경을 이용하여 노치 반경을 확인한 후에 변형을 측정용을 이용한 실험 방법을 적용하여 수행하였다[4].

변형을 측정에 의한 파괴인성을 평가하기 위하여 프와송 비($\nu=0.27$)를 고려하여, 스트레인게이지는 균열선단에서 $\theta = 70.16^\circ$, $\alpha = 62.54^\circ$ 의 위치에 부착하였다. 이때, Machinable Glass Ceramic의 변형을 측정에 의한 정적파괴인성은 스트레인게이지의 변형률 신호를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다[4].

$$K_I = 3.07253E\sqrt{r\epsilon_{xx}} \quad (3)$$

스트레인게이지는 노치 선단에서 $r=1\text{mm}$, 1.5 mm 거리에 부착하였다. 정적 상태에서 변형률은 Measurements group Inc.의 System 5000 스트레인 앰프와 Model 5100 스캐너를 사용하여 측정하였고, 100배 확대현미경으로 스트레인게이지를 부착한 위치를 확인하여 변형을 측정에 의한 파괴인성 산출에 이용하였다.

노치 시험편의 동적 파괴인성시험은 낙하식 충격 시험기(Model : Dynatup 8250)를 이용하여 실험하였다. 충격 덩의 순간 속도는 2 m/sec로 일정하게 유지하였다. 스트레인게이지에서 발생하는 변형률을 측정하기 위하여 동적 스트레인 앰프(Measurement group. Model: 2210)를 사용하였고, 증폭된 변형률 신호는 A/D 보드를 통하여 개인용 컴퓨터에 데이터를 입력하여 얻어진 데이터로 동적 파괴인성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 기계적 특성 결과

Table 1은 가공할 수 있는 Glass Ceramic에 대한 인장, 압축, 4점 굽힘 및 경도시험을 10회의 반복 시험하여 얻어진 결과의 평균을 나타낸 것이다. 인장 응력과 프아송비, 탄성계수 및 경도는 제조사에서 제시한 값과 유사하였으나, 굽힘과 압축 시험 결과는 제조사의 1/5 수준으로 작게 평가 되었다. Fig. 1은 와이블 분포에 의한 압축시험 결과이다. Fig. 2는 와이블 분포에 의한 4점 굽힘시험 결과이다.

Table 1 Mechanical properties of Machinable Glass Ceramic

Mechanical property	Value
Young's modulus, 25 °C	63.92 GPa
Poisson's ratio	0.27
Tensile strength	65.01 MPa
bending strength	16.93 MPa
Hardness, Rockwell A (H _{RA})	47.1
Compressive strength	68.34 MPa

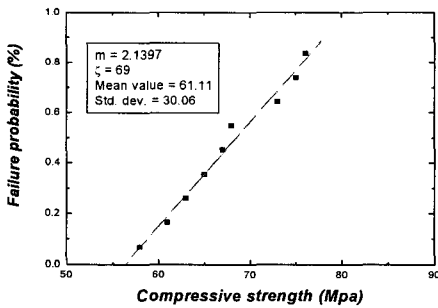


Fig. 1 Weibull distribution of compressive strength

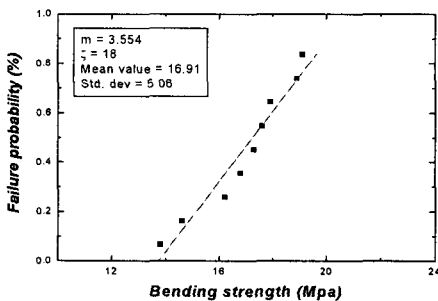


Fig. 2 Weibull distribution of bending strength

3. 2 정적 및 동적 파괴인성 시험

Fig. 3은 정적 하중 하에서 시간-변형을 선도를 보여주고 있다. Fig. 4는 동적하중 하에서 시간-변형을 선도를 나타낸 것이다. 정적 하중에서는 최대 하중을 이용한 결과가 시험기의 오차 범위 내로 평가 되어 하중 결과에 의한 파괴인성을 인정할 수 없었기 때문에 최대 변형을 기준의 변형을 측정법으로 파괴인성을 계산하였다. Fig. 5는 동적 하중 하에서 시간-하중 선도를 나타낸 것이다. 동적 파괴인성 시험에서 하중을 이용하여 파괴인성을 평가하는 경우 관성력 등의 영향으로 하중 값의 오차가 크기 때문에 본 연구에서는 스트레인 게이지 법에 의한 파괴인성을 평가 하였다[5]. Table 2, 3은 각각 정적과 동적의 파괴인성 평가시험 결과를 보여준다. 정적 및 동적 파괴인성은 노치반경이 증가함에 따라 증가한다.

Table 2 Results of static fracture toughness using strain gage method

R (mm)	P _{max} (N)	r (mm)	ε (με)	K _I (MPa√m)
0.25	24.72	1.38	298	2.18
		0.85	346	1.98
0.5	24.94	1.18	639	4.31
		1.59	535	4.19
1.5	45.80	1.49	890	6.74
		1.48	861	6.48
2.0	53.17	2.21	1028	9.48
		2.00	1052	9.23

Table 3 Results of dynamic fracture toughness using strain gage method

R (mm)	P _{max} (N)	r (mm)	ε (με)	K _I (MPa√m)
0.25	81	1.27	422	2.95
		1.43	43	0.32
0.5	145	1.43	281	2.09
		1.48	59	0.45
1.5	84	1.43	524	3.89
		1.73	78	0.64
2.0	298	1.84	526	4.44
		1.97	54	0.47

동적 파괴인성 시험에서 변형률 측정 결과는 정적에 비해 상당히 적게 평가되었으며 게이지 위치에 따른 변형률의 차이가 상당히 큰 것으로 나타났다. 변형률 측정을 이용한 결과를 기준으로 할 때 소재의 동적파괴인성은 정적파괴인성에 비하여 작게 평가된다. 스트레인게이지법에 의한 결과에서 노치반경이 증가함에 따라 동적 파괴인성 값이 증가하였다.

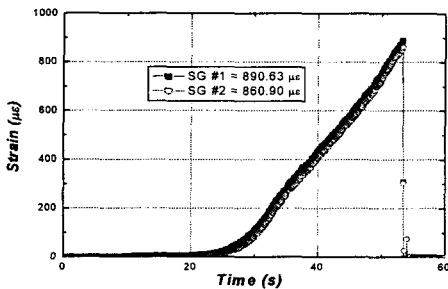


Fig. 3 Strain-time curves under static loading

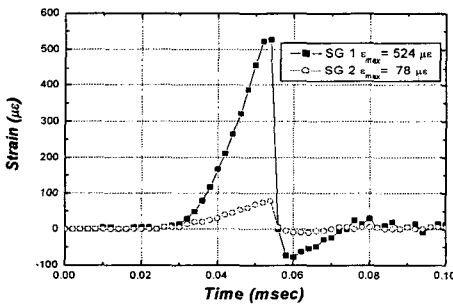


Fig. 4 Strain-time curves under dynamic loading

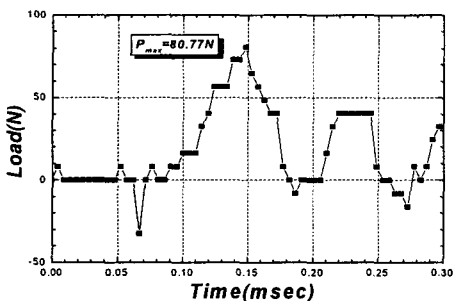


Fig. 4 Load-time curve under dynamic loading

4. 결 론

- 1) Machinable glass ceramic의 압축강도와 굽힘 강도는 제조사의 자료보다 1/5 정도 작게 평가 되었다.
- 2) 동적시험에서 스트레인게이지의 위치가 균열선 단에서 멀어질수록 변형률이 크게 감소한다.
- 3) 정적 및 동적 파괴인성 시험 결과에서 노치 반경이 증가할수록 결보기파괴인성은 증가한다.
- 4) 스트레인게이지법에 의해 구한 동적파괴인성은 정적파괴인성에 비하여 작게 평가되었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구사업의 연구비 지원(과제번호: ADD 03-04-02)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] T. D. Myers and John A. Trimble , 1978, "Transition Technologies For Integral Rocket Ramjets" pp. 2~3
- [2] P. A. Scannell, N. R. Milich, and E. O. Kalil, 1980, "Advanced Integral Rocket Ramjet Port Cover Development" AI AA/SAE/ASME 16th Joint Propulsion Conference, pp. 1~4
- [3] ASTM, 1997, Metals Test Methods and Analytical Procedures.
- [4] 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.
- [5] P. R. Streenivasan, et al., 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.