

그라파이트 재료의 고온 크랙특성 평가

구송회* · 이영신**

A Characteristics of Crack Behavior on Graphite

Songhoe Koo* · Youngshin Lee**

ABSTRACT

The purpose of the present study is to evaluate high temperature fracture toughness through the experimental and analytical method.

The analysis method is proposed to simulate the fracture toughness of high temperatures. Load-COD curves of compact test specimen acquired by finite element method analysis using hypo elastic model are simulated to determine the crack initiation load on high temperatures.

The results of experimental work are in accord with analysis in thermal shock test.

초 록

본 연구의 그라파이트는 로켓 노즐목 재료로 많이 사용되는 것으로써 다른 어떤 내열재료보다 로켓추진기관의 작동시간 동안 그 형상을 유지할 수 있는 삭마저항성과 열전도도가 큰 재료이다.

노즐목으로 사용되는 그라파이트는 내삭마성, 사용가능 온도, 가격, 무게측면에서 유리하지만 열충격 강도가 상대적으로 작기 때문에 설계시 구조적인 안전성을 충분히 확보해야만 한다.

본 연구에서는 로켓 노즐목으로 많이 사용하는 ATJ 그라파이트에 대하여 실험과 해석을 통하여 고온 파괴 인성치를 결정하였으며, 열충격시험 결과를 그라파이트 재료의 비선형성을 고려한 hypo elastic 기법을 이용한 해석적 방법으로 비교하여 해석의 정확성을 확인하였다.

Key Words: Graphite, Rocket Throat(로켓노즐목), Thermal shock Resistance(열충격저항), Hypo-elastic

1. 서 론

로켓 노즐목에 사용하는 그라파이트 재료의 열충격 크랙특성을 평가하기 위해서는 고온에서

파괴 인성치가 필요하다. 고온에서의 파괴 인성치를 구하기 위한 실험은 실험 장치 구성의 어려움 뿐 아니라 실험 특성상 오차[1]가 많기 때문에 많은 어려움이 있다. 그라파이트 재료는 소성이 존재하지 않는 전형적인 취성 재료로써 탄성범위 내에서 재료 비선형 특성을 보여주고 있다. 본 연구에서는 상온 및 고온에서 얻어진 인장시험 결과를 이용하여 고온에서의 파괴 인성

* 국방과학연구소 1본부-6부-3그룹

** 충남대학교 기계설계공학과

연락처, E-mail: song4537@hanmail.net

치를 예측하는 방법을 제안하였다. 파괴 인성치를 예측하기 위해서는 탄성구간에서 재료비선형 현상을 정확히 예측해야 하는데, 이를 위해서 본 연구에서는 hypo elastic 이론을 적용하여 비선형 해석을 수행하였다. CT시편의 크랙개시하중을 구하기 위한 하중-COD 곡선을 해석적으로 예측하고 크랙개시하중을 구하였다. 열충격 파괴 인성치의 정확한 평가를 위하여 디스크형 열충격 시편에 레이저 열원을 조사하여 열충격 파괴 특성을 분석하였다. 열구조 해석 및 크랙해석은 ABAQUS 6.5-4를 사용하였다.

2. 비선형 재료 모델

hypo elasticity 비선형 거동은 미소 변형률 (infinitesimal strain)에서 비선형 응력-변형률 거동을 모델링할 수 있으며, 그라파이트와 같은 응력-변형률이 작은 취성재료에 적용할 수 있다. 미소 변형률 텐서 및 응력-변형률 관계 식(2.1), (2.2)와 같다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2.1)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \phi}{\partial \epsilon_{ij}} \quad (2.2)$$

hypo elastic에서 포텐셜(ϕ)은 식(2.3)과 같이 표현된다.

$$\phi = KI_1^2 + \frac{2n\sigma_0\epsilon_0}{n+1} \left(\frac{\sqrt{I_2}}{\epsilon_0} \right)^{1+1/n} \quad (2.3)$$

power-law 형태의 응력-변형률 선도를 갖는 비압축성 재료를 모사하기 위해서는 $K \gg \sigma_0$ 이어야 한다. 이러한 변형에서 deviatoric stress 는 식(2.4)와 같다.

$$S_{ij} = \sigma_0 \left(\frac{\sqrt{I_2}}{\epsilon_0} \right)^{1/n} \frac{\epsilon_{ij}}{\sqrt{I_2}} \quad (2.4)$$

hypo elastic에서 구성방정식은 식(2.5)과 같이 표현되며, 증분형태의 응력 변형률 관계로 표현

된다.

$$d\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(d\epsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} d\epsilon_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (2.5)$$

여기서 E 와 ν 가 변형률 불변량의 함수로 표현되며, 본 논문에서 사용한 ABAQUS 코드에서는 user subroutine을 사용하여 적용하였다.

3. 해석결과 분석

3.1 파괴인성 시편 시험 및 해석결과 분석

hypo elasticity 모델을 적용하여 하중-COD 선도를 예측하여 실험과 해석결과를 Fig. 1에서 비교하였다. 탄성 범위내에서 대체로 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 하중-COD 선도에서 크랙 개시하중 예측

파괴인성시험에서 얻어진 하중-COD 곡선과 해석결과를 비교분석하여 해석결과에서 크랙 개시 하중을 예측하였다. 그라파이트는 인장시험 결과 소성역이 거의 존재하지 않는 취성재료이기 때문에 곡선의 형태에서 크랙이 성장하며, Fig. 1와 같이 크랙이 성장하기 전에 급격한 비선형성을 보여주고 있다.

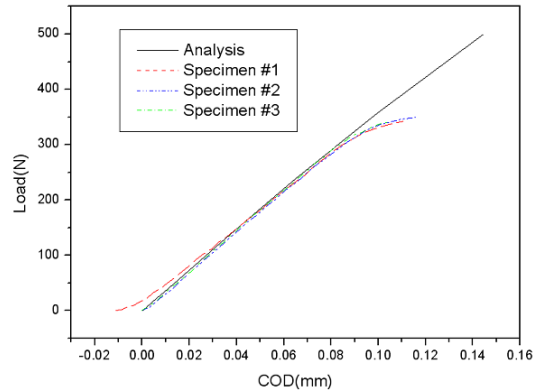


Fig. 1. Experimental and analysis results for fracture toughness test

파단이 일어나는 하중이 아닌 그 전에 벌써 크랙은 성장하기 시작하기 때문에 그라파이트의 경우에도 취성의 금속재료와 같이 95%의 활선에

서 크랙 개시하중을 정의하였다. 상온과 고온에서의 CT시편에 대한 유한요소해석 결과에서 파괴개시하중을 예측하여 고온에서의 파괴인성치를 예측하였다. Fig.2는 고온에서의 크랙개시하중 예측 그림이며, Fig. 3에서 해석결과를 외국 문헌과 비교하였다. 외국문헌과 비교할 때 해석적인 방법으로 고온에서 파괴인성치를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

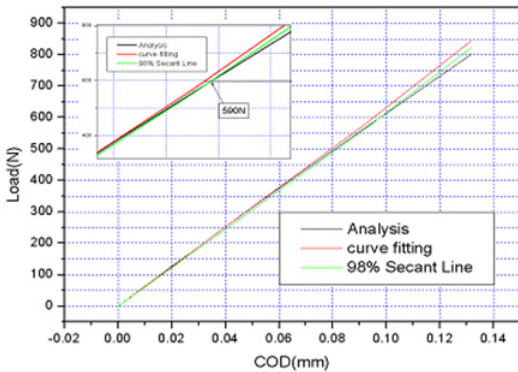


Fig. 2. Estimation of crack initiation load at 2800°C

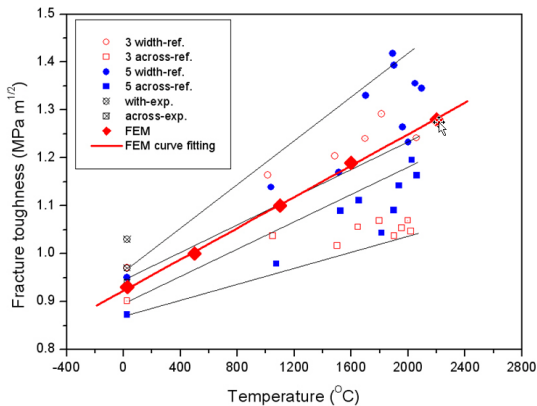


Fig. 3. Comparison of analysis results and reference data

3.3 열충격 파괴인성 해석 및 결과분석

참고문헌[2]에서 제안한 열충격 파괴인성시험을 수행된 수행하였다. 실험 결과 두께 3t의 열충격 파괴시편의 경우 laser power 2.5 kW에서 크랙이 발생하였으며, 이결과를 유한요소해석을 통하여 예측하고 실험 결과와 비교 분석하였다.

Fig. 4는 시험에 사용한 열충격 파괴인성 시험시편을 보여주고 있다.

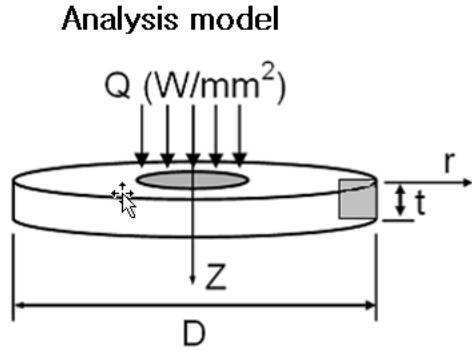


Fig. 4. Analysis model for thermal shock fracture toughness specimen

Table 1. Results of thermal shock fracture toughness test for ATJ graphite

Power(kW)	1.8	2.0	2.2	2.3	2.5	2.7
t=3.0 mm	○	○	○	○	●	●
○ : No crack, ● : Crack						

열충격에 의한 시편 크랙부위의 응력확대 계수를 예측하기 위하여 Fig. 5와 같이 시편을 모델링하여 구조해석을 수행하였다.

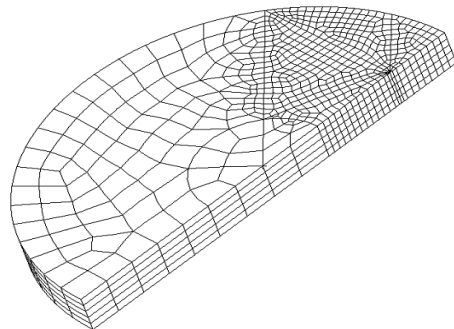


Fig. 5. FE model of thermal shock fracture specimen

해석결과 열충격파괴 시편의 온도분포 및 크랙주위에서 응력확대계수를 구하였다. Fig. 6은 열유량 2.1 kW에서 발생하는 열충격 파괴인장시

편의 최대 응력확대계수 값과 그 온도에서 파괴 인성치를 보여주고 있다. 최대 응력확대계수가 발생하는 0.5초 때 크랙주위의 온도는 약 180 °C 이며, 그 온도에서 파괴 인성치는 약 0.96 MPa m^{1/2}의 값을 보여주고 있다. Fig. 7에서 열유량에 따른 응력확대계수를 나타내었는데, 2.22kW의 열유량에서 파괴가 발생할 것으로 예측되었다. 실제 크랙이 있는 열충격 파괴인성시험편의 실험 결과 2.3kW와 2.5kW에서 크랙이 성장되었기 때문에 실험과 해석의 오차는 최대 11.0%로 실험과 해석이 잘 일치함을 알 수 있다.

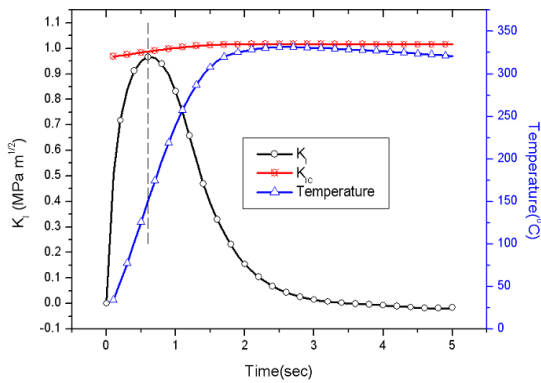


Fig. 6. Comparison of stress intensity factor and fracture toughness

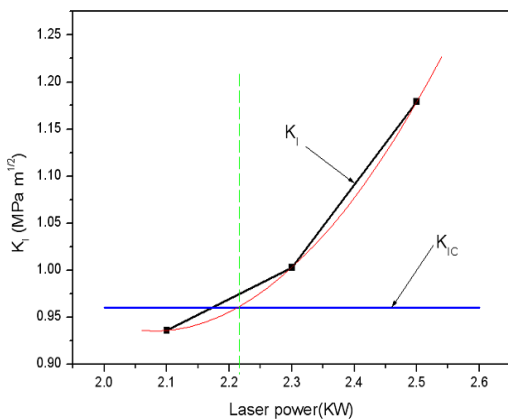


Fig. 7. Estimate of cracking laser power on thermal shock specimen

4. 결 론

ATJ 그래파이트의 고온물성과 재료비선형을 고려한 유한요소법을 이용하여 고온에서의 파괴인성치를 예측하였으며, 예측결과를 열충격파괴시험 실험 결과와 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상온 및 고온에서 응력-변형을 관계는 hypo elastic으로 표현되는 재료비선형 특성을 이용하여 모사할 수 있다.
- 2) 고온에서의 파괴인성치는 비선형 구조해석으로 구한 하중-COD 선도에서 크랙성장 하중을 계산하여 결정할 수 있다.
- 3) 두께 3.0 mm 열충격 파괴인성 시험편의 크랙 성장을 위한 열유량을 실험으로 확인하였으며, 유한 요소법을 이용하여 응력확대 계수를 분석한 결과 실험결과와 해석결과가 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

1. L. R. Hettche and T. R. Tucker, "Fracture Toughness of ATJ-S Graphite and CVD Carbon-Carbon Composites at Elevated Temperature", Crack and Fracture, ASTM STP 601, pp. 109~124, 1976.
2. S. Sato, A. Kurumada, K. Shirota and N. Saito, "Evaluation of Thermal Shock Resistance and the Fracture Toughness of Graphite for Rocket Nozzle Throat", Journal of the Japanese Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 32, No. 370, pp. 651~660, 1984.
3. J. H. Kim, Y. S. Lee, D. H. Kim, N. S. Park and S. I. Moon, "Evaluation of Thermal Shock Fracture Toughness for ATJ Graphite Using Laser Irradiation Method", Key Engineering Materials, Vol. 261~263, pp. 93-98, 2004.