

그라파이트 재료의 열충격 특성에 대한 실험적 연구

박노석* · 김덕회* · 한영욱* · 김재훈** · 이영신** · 문순일***

An Experimental Study on Thermal Shock Characteristics for Graphite Materials

No-Seok Park* · Duck-Hoi Kim* · Young-Uk Han*
Jae-Hoon Kim** · Young-Shin Lee** · Soon-Il Moon***

ABSTRACT

Thermal shock is a physical phenomenon that occurs upon a rapid, large temperature and pressure change or in the quenching condition of materials. In this study, thermal shock fracture resistance and thermal shock fracture toughness were evaluated by using laser irradiation. The temperature distribution of a specimen was detected using type K and C thermocouples. The irradiated surfaces were observed by SEM. It is concluded that the critical laser power necessary to fracture can be the major factor of thermal shock resistance and thermal shock fracture toughness of materials.

초 록

열충격은 재료가 갑작스런 온도나 압력변화 혹은 급냉 조건하에 있을때 발생하는 물리적 현상이다. 본 논문에서는 레이저 조사를 이용하여 열충격 강도와 열충격 파괴인성을 평가하였다. 시험편의 온도 분포는 타입 K와 C 열전대를 이용하여 측정하였다. 조사된 표면은 SEM을 이용하여 관찰하였다. 파괴에 필요한 임계 레이저 파워가 재료의 열충격 강도와 열충격 파괴인성을 결정짓는 주요한 요소라고 할 수 있다.

1. 서 론

로켓 추진기관 부재중에서 노즐부는 고온의 연소가스에 노출되어 있기 때문에 열충격에 의한 파손 및 침식변형을 일으킬 수 있는 가능성이 높다. 노즐목부는 로켓 추진기관의 성능을

좌우하는 중요한 부품이기 때문에 기대되는 성능을 확보하기 위해서는 열충격에 의한 노즐목부 형상과 기능의 손실이 발생하지 않고 그대로 유지될 수 있는 재료를 선택하여야 한다[1].

탄소나 세라믹 재료의 열충격 특성은 전통적으로 quenching 방법을 이용하여 평가되었다.

* 충남대학교 대학원 (Chungnam National University, Graduate School)

** 충남대학교 기계설계공학과(Chungnam National University, Dept. of Mechanical Design Engineering)

*** 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

그러나 뜨거운 시편이 찬 유체 속에서의 냉각될 때 열전달이 불안정하다는 단점이 있다. 따라서 새롭게 소개된 레이저를 이용한 방법이 탄소나 세라믹 재료에 적용되었다.

레이저를 이용하여 재료의 열충격 특성을 평가하는 방법으로는 열충격 강도 Δ [2]와 열충격 파괴인성 ∇ 을 구하는 방법과[3], 임계전력밀도 (critical power density), P_c 를 구하는 방법[4] 등이 있다. 본 논문에서는 로켓의 연소 압력하에서 순간적으로 2000 °C 이상의 온도가 발생하는 부위에 CO₂ 레이저를 이용하여 순간 가열한 후 열충격 강도와 열충격 파괴인성을 평가하는 시험 방법 및 그 결과에 대하여 서술하고자 한다. 표면에 레이저를 조사한 시편은 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 균열의 발생여부를 관찰하였다.

2. 본 론

2.1 시험 재료

시험에 사용한 재료는 UCRA Carbon 사에서 가공한 grade ATJ 그래파이트로서 transversely isotropic 재료이다. 따라서, 등방성 평면에 수직 방향을 횡방향(AG, across grain), 이에 반해 등방성 평면에 평행한 방향을 종방향(WG, with grain) 이라고 불리어 진다[5].

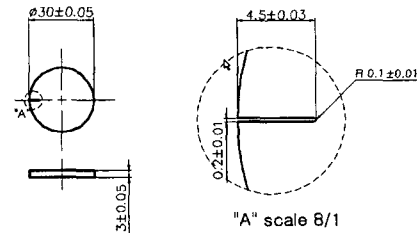
Table 1과 같이 ATJ 그래파이트는 종방향과 횡방향에 따라 기계적 특성 및 파괴인성의 차이가 있다.

Table 1. Mechanical properties and fracture toughness of ATJ graphite

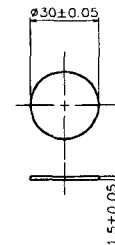
Properties	25 °C		1000 °C	
	WG	AG	WG	AG
E (GPa)	8.93	7.80	10.14	7.04
ν	0.13	0.11	-	-
$\sigma_{tensile}$ (MPa)	27.39	24.08	35.07	26.27
σ_{comp} (MPa)	63.71	70.50	-	-
K_{IC} (MPa \sqrt{m})	1.12	1.08	-	-

2.2 시험 방법

열충격 강도와 열충격 파괴인성 시험편은 Fig. 1과 같은 형상과 치수를 갖는 두께가 얇은 디스크형상이다. Fig. 2는 열충격 시험 모습을 보여주고 있다. 본 시험에서 열원으로 사용한 레이저는 Rofin-Sina America 사의 5kW급 CO₂ 레이저이다. 이 장비의 레이저 광선은 타원형의 펄스(pulse) 신호로, 가열부의 장축과 단축의 길이 차는 1mm 미만인데, 이로 인해 발생하는 온도 분포의 차이는 극히 미소하므로 가열부를 원형 가열이라고 가정하였다. 본 시험에서는 가열 반경비 $a/R=0.3$, 가열시간 $t=1$ 초로 하여 시험 평가하였다. 시험편 표면의 온도를 측정하기 위하여 type K와 C등 두 종류의 열전대를 사용하였다. 열전대 끝단은 T/C welder를 사용하여 용접하였고, 시험편 중심으로부터 반경방향으로 4.5, 7.5, 15mm 위치에 부착하였다. 각각의 열전대는 데이터 획득장비(MM, system 5000)와 응용소프트웨어를 이용하여 온도를 μV 로 측정 한 후, 전압을 다시 온도로 산출하였다.



(a) Thermal shock resistance specimen



(b) Thermal shock fracture toughness specimen

Fig. 1 Configurations and dimensions of the specimens for the thermal shock test

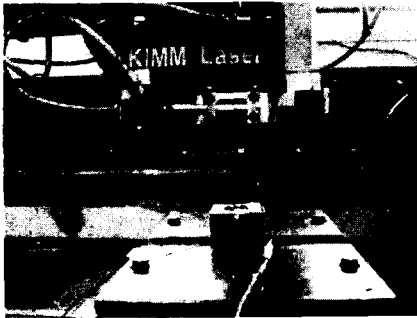


Fig. 2 Configurations of experimental apparatus for thermal shock test

열충격 강도(Δ)와 열충격 파괴인성(∇)은 시험편 중앙에 CO_2 레이저를 열원으로 가열한 후 균열이 발생하기 시작하는 임계 파워값 W_C 에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta = \frac{\sigma_t k}{Ea} = \frac{S_* \beta W_C}{\pi h (a/R)^2} (W/mm) \quad (1)$$

$$\nabla = \frac{K_{Ic} k}{Ea} = F_{Ie} \sqrt{\pi c} \frac{\beta W_C}{\pi h (a/R)^2} (W/mm^{1/2}) \quad (2)$$

여기서, k , E , a , σ_t 와 K_{Ic} 는 각각 재료의 열전도도, 탄성계수, 열팽창계수, 인장강도와 파괴인성이다. 또한, R , h , a 와 c , β 는 각각 시험편의 반경, 원판두께, 가열반경과 슬릿의 길이, 가열효율이다.

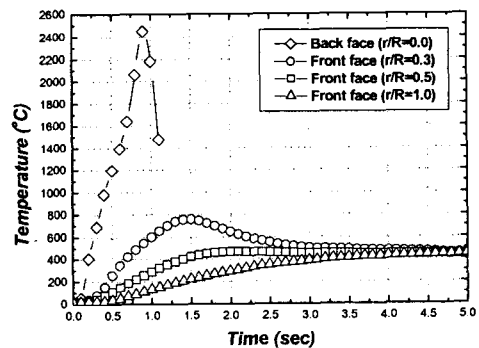
Fig. 3은 레이저 파워 2.7kW에 대한 열충격 강도와 열충격 파괴인성 시험편의 표면 온도분포를 나타낸다. 열충격 강도 시험편의 온도분포가 더 높은 이유는 중앙에 burn-off현상이 발생했기 때문이다. 1000°C에서의 열전도도 k 와 열팽창계수 α 는 각각 $57 W/m \cdot ^\circ C$, $7.7 \times 10^{-6} / ^\circ C$ 이다. S_* 와 F_{Ie} 는 무차원 열응력과 무차원 응력확대계수로서 고온 물성실험에 의한 기계적 특성, 시험편의 형상, 레이저의 가열반경 및 발열량 등의 함수이다

3. 시험결과 및 고찰

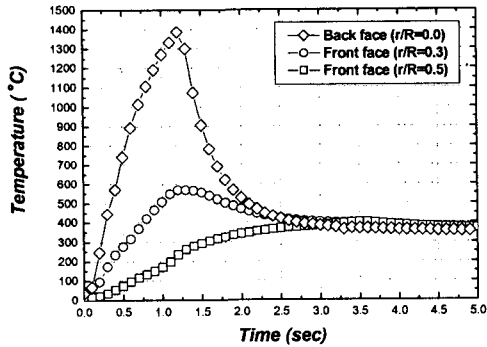
Fig. 3은 레이저 파워 2.7kW에 대한 열충격 강도와 열충격 파괴인성 시험편의 표면 온도분포를 나타낸다. Fig. 3을 보면 $r/R=0.0$ 지점과 0.5 지점 사이에 큰 온도 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, 시험편의 중앙부는 압축 응력장이 생성되고, 바깥쪽에는 인장응력장이 발생한다. 열충격을 받는 그라파이트는 최대 인장 응력장에서 균열이 발생한다고 알려져 있다.

열충격 강도 시험편은 2.7kW 이상의 레이저 파워에서 균열이 관찰되었고, 열충격 파괴인성 시험편은 2.5kW 이상의 레이저 파워에서 균열이 관찰되었다. 따라서, 열충격 강도 시험편과 열충격 파괴인성 시험편의 임계 레이저 파워는 각각 $2.5kW < W_C \leq 2.7kW$, $2.3kW < W_C \leq 2.5kW$ 의 범위 내의 값이라고 예측할 수 있다. 식 (1)과 (2)에서 무차원 열응력 $S_* = 0.017356$, 무차원 응력확대계수 $F_{Ie} = 0.005946$, 가열효율 $\beta = 0.5$ 로 놓고, 열충격 강도와 열충격 파괴인성을 계산하면, $\Delta = 51.2 \sim 55.2 (W/mm)$, $\nabla = 30.3 \sim 32.9 (W/mm^{1/2})$ 의 범위로 평가할 수 있다.

Fig. 4는 SEM을 이용하여 열충격 시험편의 균열 형상을 관찰한 것이다. 열충격 강도 시험편의 경우 레이저 가열부 근방에서 균열이 개시되었고, 열충격 파괴인성 시험편은 슬릿 선단으로부터 균열이 개시된 것을 볼 수 있다.



(a) Thermal shock resistance



(b) Thermal shock fracture toughness

Fig. 3 Temperature distribution for thermal shock specimens subjected to laser powers of 2.7kW



(a) Thermal shock resistance



(b) Thermal shock fracture toughness

Fig. 4 SEM images of thermal shock specimens for ATJ graphite

4. 결론

본 연구에서는 CO₂레이저를 이용하여 ATJ 그래파이트의 열충격 강도와 열충격 파괴인성을 평가하였고, type K와 C 열전대를 이용하여 표면의 온도 분포를 측정하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 시험편 중앙부와 바깥부 사이의 큰 온도차로 인하여 시험편의 중앙부는 압축 응력장이 발생하고, 바깥쪽에는 인장응력장이 발생한다.
- 2) ATJ 그래파이트의 열충격 강도는 $\Delta=51.2 \sim 55.2 (W/mm)$, 열충격 파괴인성은 $\nabla=30.3 \sim 32.9 (W/mm^{1/2})$ 의 범위로 각각 평가할 수 있다.
- 3) 열충격 강도 시험편은 레이저 가열부 근방에서 균열이 개시되었고, 열충격 파괴인성 시험편은 슬릿 선단으로부터 균열이 개시되었다.

참고 문헌

1. S. Sato, et al, "Evaluation of thermal shock resistance and fracture toughness of graphite for rocket nozzle throat", Journal of JSASS Vol.32, No.370, 1984, pp.651~660
2. S. Sato, et al, "Determination of the thermal shock resistance of graphite by arc discharging heating", Carbon Vol.13, 1975, pp. 309~316
3. S. Sato, et al, "Evaluation of the thermal shock fracture toughness of reactor graphite by arc discharging heating", Carbon Vol.16, 1978, pp.103~109
4. S. Amada, et al, "Thermal shock resistance of carbon-carbon(C/C) composite by laser irradiation technique", Ceramics International Vol.25, 1999, pp.61~67
5. H. S. Starrett, A. D. Cull and G. R. Irwin, "Application of fracture mechanics to the thermostructural failure of graphite", ASTM STP 601, 1976, pp.86~108