

CO₂ 레이저 조사법을 이용한 ATJ 그래파이트의 열충격 특성 평가

Evaluation of thermal shock characteristics for ATJ graphite using CO₂ laser irradiation technique

충남대학교 대학원 기계설계공학과 박노석, 김덕희, 한영욱
충남대학교 기계설계공학과 김재훈
한국기계연구원 레이저응용연구그룹 서 정, 김정오

I. 서론

열충격(thermal shock)은 구조물이 극히 짧은 시간동안에 고온·고압에 노출되어 있거나 고온의 재료가 급냉 조건 하에 있을 때에 발생하는 현상으로 급격한 온도차와 재료 비선형성으로 인한 구조물에 열응력(thermal stress)에 의해 발생한다. 구조물이 열충격을 받게 되면 내면(inner face)과 배면(back face)의 온도차에 의해 열응력, 파손 및 침식변형이 발생하게 되는데 이러한 열충격 현상은 각종 구조물이나 소재 자체의 기능에 큰 영향을 준다.

로켓 추진기관 부재중에서 노즐부는 고온의 연소가스에 노출되어 있으므로 열충격에 의한 파손 및 침식변형을 일으킬 수 있는 가능성이 매우 높다. 이는 로켓 노즐목부에 고온 연소가스가 통과하면서 열충격 현상이 발생하게 되는데, 이러한 현상은 노즐목 내부는 연소 압력 하에서 2100℃의 고온 상태이나 배면은 저온이므로, 큰 온도차가 발생하기 때문이다. 따라서, 노즐목부(nozzle throat)는 추진기관의 성능을 좌우하는 중요한 부품이므로 기대되는 성능을 확보하기 위해서는 열충격에 의한 노즐목부 형상과 기능의 손실이 발생하지 않고 그대로 유지될 수 있는 재료를 사용하여야 한다[1].

재료의 열충격 특성을 평가하는 방법으로 열충격 강도(thermal shock resistance) Δ [2]와 열충격 파괴인성(thermal shock fracture toughness) ∇ 을 구하는 방법과[3], 임계 전력 밀도(critical power density) P_c 를 구하는 방법[4] 등이 있다. 이들의 시험 방법으로는 순간적으로 고온 상태로 가열이 가능한 레이저 조사법과 아크 방전법 등이 있으나, 아직 국내에서는 거의 시험 평가가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 본 논문은 로켓의 연소 압력하에서 순간적으로 내면과 배면에 2000℃ 이상의 온도가 발생하는 부위에 사용하는 ATJ graphite에 CO₂ 레이저로 순간적으로 가열하여 열충격 파괴인성을 평가하는 시험적인 방법 및 그 결과에 대하여 서술하고자 한다. 표면에 레이저를 조사한 시험편은 방사선 투과 검사법(RT, radiographic testing)을 이용하여 균열 발생 유무를 평가하고, SEM(scanning electronic microscopes)을 이용하여 균열을 관찰하였다.

II. 재료 및 시험방법

본 연구에서 사용한 재료는 UCRA Carbon 사에서 몰딩(molding) 성형 재료로 가공한 grade ATJ 그래파이트이다. 이 재료는 내열성이 우수하고 열전도도와 열충격 저항성이 높고 우수한 기계적 성질과 낮은 탄성계수를 가지고 있어 다이아몬드 코아 비트, 로켓 모터 노즐 등에 사용된다[5].

Table 1 Mechanical properties of ATJ graphite

Property	RT		500°C		1100°C	
	With the grain	Across the grain	With the grain	Across the grain	With the grain	Across the grain
Young's modulus (GPa)	8.93	7.80	9.24	9.47	10.14	6.98
Poisson's ratio	0.13	0.10	-	-	-	-
Tensile strength (MPa)	27.39	24.06	32.00	28.2	35.07	26.75
Compressive strength (MPa)	63.71	70.50	-	-	-	-
Flexural strength (MPa)	32.83	27.82	-	-	-	-
K_{IC} ($MPa\sqrt{m}$)	1.11	1.07	-	-	-	-

ASTM 규정[6-9]에 준하여 상온과 고온에서의 구한 기계적 특성 및 파괴인성은 Table 1과 같다. Table 1과 같이 ATJ 그래파이트는 with the grain 과 across the grain에 따라 기계적 특성값의 차이가 있다. 이는 그래파이트가 이방성이며, 라멜라 구조의 코크 입자를 가지고 있는 복합 재료이기 때문으로 알려져 있다[10].

열충격 파괴인성 시험편은 Fig. 1과 같은 형상과 치수를 갖는 두께가 얇은 디스크형으로 제작하였다. 열충격 파괴인성 시험편에서 슬릿은 직경 0.2 mm 와이어로 가공하였다.

Fig. 2는 열충격 시험 모습을 보여주고 있다. 본 시험에서 사용한 CO₂ 레이저는 한국기계연구원 이 보유하고 있는 Rofin-Sina America Inc.사의 5 kW급 CO₂ 레이저이다. CO₂ 레이저 신호는 타원형의 펄스(pulse) 신호인데, 이로 인하여 발생하는 가열부의 장축, 단축의 길이 차는 1mm 정도이므로 이로 인해 발생하는 구배는 극히 미소하여 원형 가열부라고 가정하였다. 가열반경비 $a/R=0.3$, 가열시간 $t=1.0$ 초로 하여, 전력을 1~2.7kW까지 변화시키면서 시험 평가하였다. 여기서, a 는 CO₂ 레이저의 가열반경이고, R 은 시험편의 반경이다.

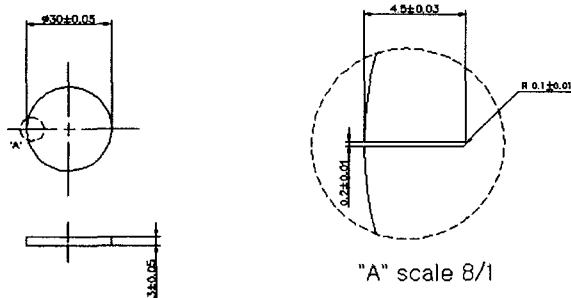


Fig. 1 Shape and dimension of thermal shock fracture toughness specimen

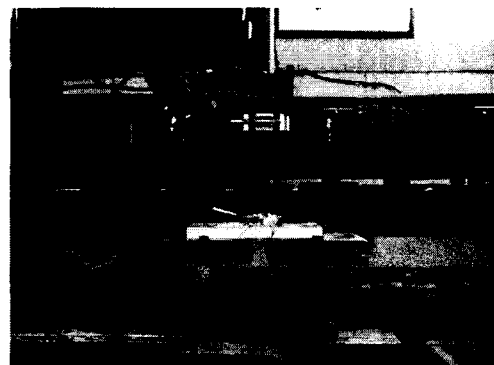


Fig. 2 Experimental apparatus

시험 시 시편의 온도분포를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 열전대(thermocouple)를 부착하였다. 열전대는 -200~1250℃까지 측정이 가능한 type K 열전대와, 0~2320℃ 측정범위인 type C 열전대 등 두 종류를 사용하였다. 열전대는 끝단을 용접하고, 시편 표면에 그라파이트 접착제를 사용하여 부착한 후, 항온조에서 100℃로 하루동안 건조하였다. 그라파이트 접착제는 그라파이트가루와 경화제, 리퀴드를 중량비를 5.5 : 0.5 : 4로 혼합하여 제조하였다.

열충격 파괴인성은 시편 중심에 CO₂레이저를 이용하여 가열하고, 균열이 발생하기 시작하는 임계 전력값 P에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$\nabla = K_{1c} k/Ea = F_{1e}(\pi c)^{1/2} \beta P/\pi h(a/R)^2 \quad (1)$$

여기서, k , E , a , K_{1c} 는 각각 재료의 열전도도, 탄성계수, 열팽창계수, 파괴인성이다. 또한, R , h , a 와 c , β 는 각각 시험편의 반경, 원판두께, 가열반경과 슬릿의 길이, 가열 효율이다. 1000℃에서의 열전도도 k 는 57 W/m℃, 열팽창계수 α 는 $7.7 \times 10^{-6}/\text{℃}$ 이다. F_{1e} 는 무차원 응력확대계수로, 고온 물성 실험에 의한 기계적 특성, 시험편의 형상, 레이저의 가열반경 및 발열량 등의 함수이다.

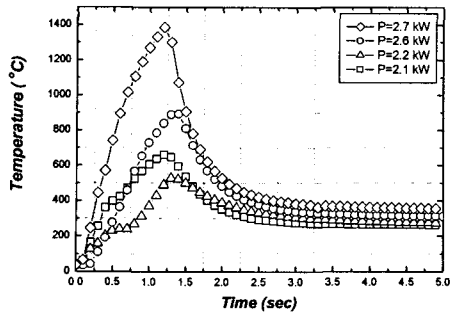
III. 시험결과 및 고찰

Fig. 3은 CO₂ 레이저를 이용하여 2.1kW에서 2.7kW의 전력으로 1초 동안 가열하였을 때 시편 표면에서 측정된 온도 분포를 나타낸 결과이다. 레이저 전력이 높을수록 동일한 시간에서 온도가 높게 측정되는 것을 볼 수 있다. 하지만, 실험적 오차로 인하여 2.2 kW 보다 2.1 kW 전력에서 시험한 온도 분포가 약간 높은 결과가 나오는 것을 볼 수 있다. 이것은 향후 추가 시험을 통하여 보완해야 할 사항으로 판단된다. 또한, $r/R=0.0$ 지점과 $r/R=0.5$ 지점 사이에 온도가 최대 1100℃의 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 이로 인하여, 시험편의 중앙부는 압축응력장이 발생하고, 바깥으로 갈수록 인장 응력장이 발생한다. Table 1을 참조하면 그라파이트는 압축강도가 인장강도의 약 3배임을 알 수 있다. 따라서, 대부분의 열충격을 받는 그라파이트는 최대 인장응력장에서 균열이 발생하는 것으로 알려져 있다. 슬릿이 있는 시험편의 경우 슬릿 선단이 인장 응력장에 위치하므로 슬릿 선단에서 균열이 개시하기 쉽다. Amada[4]등은 슬릿이 없는 원형 시험편이 열충격을 받는 경우 최대 인장 응력 발생 지점 r/R 이 약 0.5라고 유한 요소 해석을 이용하여 제시하였다.

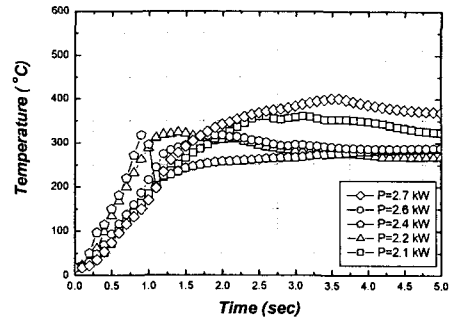
Table 2는 1~2.7kW 범위의 전력 하에서 열충격 시험을 수행한 시험편들을 방사선 투과 검사법 및 SEM을 이용하여 균열 개시 여부를 관찰하고, 이 결과를 정리한 것이다. 열충격 파괴인성 시험편은 2.5 kW의 전력 이상에서 균열이 개시되었다. 따라서, 열충격 파괴인성시험편의 임계 전력값(critical power value)이 $2.3 \text{ kW} < P_c \leq 2.5 \text{ kW}$ 범위 안에서 존재하는 것으로 예측할 수 있다. 식(2)에서 무차원응력확대계수 $F_{1e}=0.05976$, 가열효율 $\beta=0.5$ 로 놓고, 열충격 파괴인성을 계산하면, $\nabla=30.310\sim 32.946 \text{ (W/mm}^{1/2})$ 의 범위로 평가할 수 있다.

Fig. 4는 레이저 전력 2.5 kW와 2.7 kW로 1초 동안 가열한 후 슬릿 선단을 방사선 투과검사법을 이용하여 관찰한 결과이다. Fig. 5는 SEM을 이용하여 균열선단부를 자세히 관찰한 결과이다. 균열은 슬릿 선단으로부터 개시되어 시편의 중심부로 진전한 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 슬릿이 있는 원형 디스크 시험편을 대상으로 열충격 파괴인성을 평가한 사항을 주로 기술하였다. 현재, 슬릿이 없는 원형 디스크 형태의 열충격 강도 시험이 진행되고 있으며, 정확한 균열 개시 지점을 측정하기 위한 연구가 더불어 진행되고 있다. 이들의 결과는 추후에 발표될 예정이다.



(a) $r/R=0.0$



(b) $r/R=0.5$

Fig. 3 Temperature distribution of (a) back face($r/R=0.0$) and (b) front face($r/R=0.5$) according to versatile laser irradiation powers as irradiation time is 1 sec

Table 2 Results for crack initiation of thermal shock fracture toughness test

Power(kW)	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
Crack initiation	○		○		○		○		○		○		○		○	●	●	●

※ ○(no crack), ●(crack)

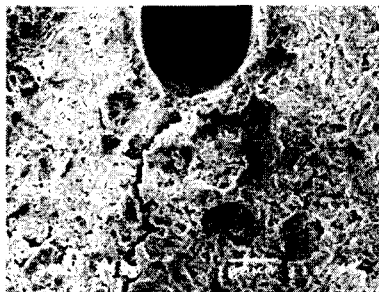


(a) P=2.5 kW

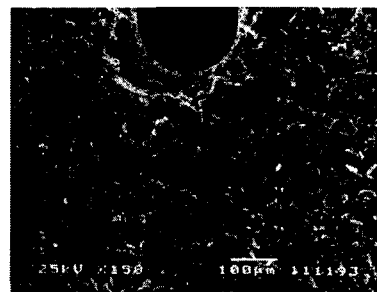


(b) P=2.7 kW

Fig. 4 Radiographic test images of thermal shock fracture toughness test for ATJ graphite



(a) P=2.5 kW



(b) P=2.7 kW

Fig. 5 SEM images($\times 150$) of thermal shock fracture toughness test for ATJ graphite

IV. 결론

본 연구에서는 레이저 조사법을 이용하여 ATJ 그래파이트의 열충격 파괴인성을 평가하였다. 5.0 kW 용량의 CO₂ 레이저를 이용하였으며, 가열한 시험편을 방사선 투과법 및 SEM을 이용하여 균열 개시 여부를 관찰하여 열충격 파괴인성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) CO₂ 레이저를 이용한 열충격 파괴인성 시험 결과 시험편의 중심부와 r/R=0.5 지점 사이의 온도가 최대 1100°C 이상 차이가 발생하였고, 이로 인하여 슬릿선단으로부터 중심부로 균열이 개시하여 진전하고 있다.
- 2) ATJ 그래파이트의 열충격 파괴인성은 $\nabla = 30.310 \sim 32.946 (W/mm^{1/2})$ 으로 평가되었고, 이때 임계 전력 범위는 $2.3 kW < P_c \leq 2.5 kW$ 로 측정되었다.

V. 참고문헌

1. S. Sato, et al : Evaluation of thermal shock resistance and the fracture toughness of graphite for rocket nozzle throat, 日本航空宇宙學會, 32, pp. 651-659, (1984)
2. S. Sato, et al : Determination of the thermal shock resistance of graphite by arc discharging heating, Carbon, 13, pp. 309-316, (1975)
3. S. Sato, et al : Evaluation of the thermal shock fracture toughness of reactor graphite by arc discharge heating, Carbon, 16, pp. 103-109, (1978)
4. S. Amada, et al : Thermal shock resistance of Carbon-carbon(C/C) composite by laser irradiation technique, Ceramics International, 25, pp. 61-67, (1999)
5. UCAR Carbon Company Inc. : The industrial graphite engineering handbook.
6. ASTM : Standard test method for tensile stress-strain of carbon and graphite, ASTM C 749, CD edition, pp. 1-12, (2000)
7. ASTM : Standard test method for compressive strength of carbon and graphite, ASTM C 695, CD edition, pp. 1-3, (2000)
8. ASTM : Standard test method for flexural strength of manufactured carbon and graphite articles using four-point loading at room temperature, ASTM C 651, CD edition, pp. 1-3, (2000)
9. ASTM : Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials, ASTM E 399, pp. 407-437, (1990)
10. H. S. Starret, et al : Application of fracture mechanics to the thermostructural failure of graphite, ASTM STP 601, pp. 86-108, (1976)