

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2014.18.4.061>

로켓 노즐목에 사용하는 ATJ 흑연의 압축 파단 특성

최훈석^a · 김재훈^{a,*} · 김연욱^a · 서보휘^a · 문순일^b

Compression Fracture Behavior of ATJ Graphite for Rocket Nozzle throat

Hoonseok Choi^a · Jaehoon Kim^{a,*} · Yeonwook Kim^a · Bohwi Seo^a · Soonil Moon^b

^aDepartment of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Korea

^bAdvanced Propulsion Technology Center, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

ABSTRACT

Graphite is commonly used for rocket nozzle. The purpose of the present study is to evaluate compression fracture behavior of ATJ graphite. Uniaxial compression test is conducted in accordance with ASTM C 695 in the range of R.T to 900°C. The size effects of specimen on the compressive strength and fracture behavior were investigated. Two types of cylindrical specimen, i.e., where the diameter to length ratio is 1:2 (ASTM C 695 specimen) or 1:1, were tested at room temperature

초 록

본 연구의 흑연은 로켓 노즐목 재료로 많이 사용되는 것으로써 온도, 가공성 및 무게 측면에서 유리하다. 하지만 고온 및 고압상태에서 고속으로 취성파괴 되므로 설계 시 구조적 안정성을 충분히 확보해야 한다. 본 연구에서는 로켓 노즐목에 이용되는 ATJ 흑연의 압축 파괴 거동에 대해 연구했다. 상온 및 고온에서 ASTM C 695에 준하여 일축 압축 시험을 수행하였다. 또한 시편의 단면적 변화에 의한 압축강도 및 파단특성을 분석하였다.

Key Words: ATJ Graphite(ATJ 흑연), Uniaxial Compression(일축 압축), Compressive Strength(압축 강도), Size Effects(크기 효과), Antioxidant(산화방지제)

1. 서 론

로켓 추진기관에서 사용되는 노즐은 고온, 고압의 가스에 노출 되어있다. 특히, 노즐목에 사용하는 재료는 고온, 고압의 조건에서 그 형상 및 기능을 유지해야하기 때문에 열 충격 저항성, 열전도도가 커야하며 열팽창계수는 상대적으로 작아야 한다[1]. 따라서 본 논문에서는 이러한 열적 특징을 지닌 ATJ 흑연 재료에 대해 연구하

Received 9 December 2013 / Revised 4 July 2014 / Accepted 7 July 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers





pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 추계학술대회(2013. 12. 4-5, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Table 1. Mechanical properties of ATJ graphite.

Manufacturer	Density (g/cm^3)	Grain size (μm)	Young's Modulus (GPa)
UCAR	1.76	25.4	9.6

Table 2. Types of compressive specimens.

Type	Standard	Extended
Specimen		
Dimension ($d \times h$, mm)	10 × 20	20 × 20
Type	Non-coated	Coated
Specimen		
Dimension ($d \times h$, mm)	10 × 20	10.1 × 20.1

였다. 한편, ATJ 흑연은 취성재료로써 낮은 파괴 인성을 가지며 파괴 직전까지 소성영역이 크게 나타나지 않고 소속으로 파괴된다. 또한 구조적으로 압축강도가 인장강도보다 약 3배 정도 강한 특성을 보이고 있으며, 파괴 시 내부에 내재된 균열 등이 파괴 원인이 된다[2].

일반적으로 UCAR Carbon사[3]에서 상온 및 고온에서 ATJ 흑연의 구조 및 열적특성에 대한 자료를 일부 제공하고 있으나, 이는 표준 시험법으로써 여러 변수를 고려하지 않은 기초 자료이다. 따라서 실제 구조체의 적용을 위해서 크기효과, 고온특성 등의 조건을 고려한 기계적·열적 특성에 대한 시험평가가 반드시 수행되어야 한다.

본 연구에서는 로켓 노즐목부 소재로 ATJ 흑연의 적용을 위해 ASTM 기준 시편[4] 외 확대 시편을 이용하여 단면적 변화에 대한 파단특성을 분석하였다. 또한 고온에서 산화하는 흑연 소재의 특성을 고려하여 산화방지제를 도포한 시편을 이용하여 고온 압축 시험을 수행하였다.

2. 재료 및 시험방법

2.1 재료 및 시편

Table 3. Compositions of antioxidant (Type SC-1400).

Silicon Carbide	Phosphorous oxide	Alumina
75%	8%	6%
Silica	Boron oxide	Mullite
6%	4%	4%

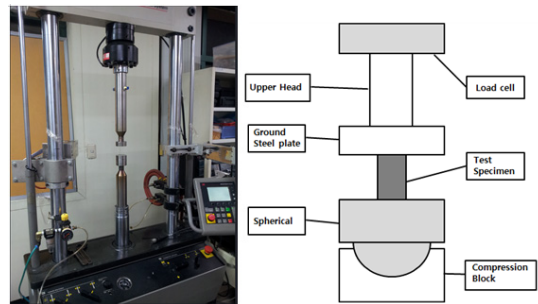


Fig. 1 MTS 810 and schematic diagram of compressive test.

본 연구에서 사용된 압축시편 재료는 UCAR Carbon사에서 등압적 몰딩 가공한 Grade ATJ 흑연이다. 이 재료는 높은 강도를 지니며, 매우 정밀한 공차 및 표면처리로 가공될 수 있는 미립자 흑연으로써 내열성이 우수하고 열전도도와 우수한 기계적 성질과 낮은 탄성계수를 가지고 있다. 이 재료의 기계적 특성은 Table 1에 요약되어 있다[3].

본 연구의 압축시험에 이용된 시편형상은 Table 2에 나타내었다. 상온 압축시험에 이용된 시편은 직경 대 높이 비가 1:2인 원통형 표준 시편(ASTM C 695)이며, 단면적 증가에 따른 압축 강도 경향을 분석하기 위하여 직경 대 높이 비가 1:1인 비표준 확대시편[5]을 이용하였다.

고온 압축시험에 사용된 시편은 표준시편이며 실리콘 카바이드를 기반으로 제조된 산화방지제를 0.1 mm 도포한 시편 및 일반시편을 이용하여 비교·분석 하였다. 산화방지제의 구성 성분은 Table 3에 나타내었다.

2.2 시험 장비 및 방법

본 연구에서 이용된 시험장치는 Fig. 1의 10

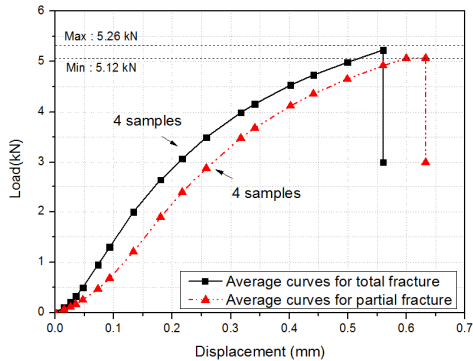


Fig. 2 Load-displacement curves for standard specimens at room temperature.

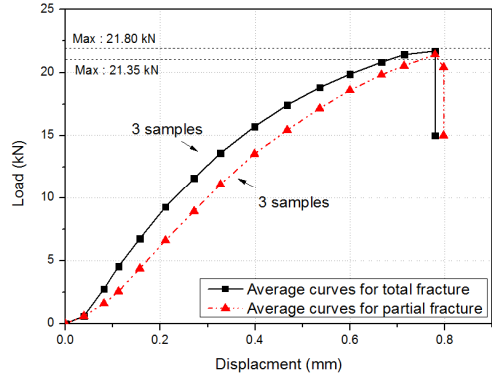


Fig. 3 Load-displacement curves for extended specimens at room temperature.

Ton 용량의 MTS 810이다. 시편과 접촉면 사이의 평면도를 유지하기 위해 ATM 규격에 부합하는 구면치구를 이용하였다[3]. 상온 압축시험은 표준 및 비표준 확대시편으로 원형 표시가 있는 접촉면 중심에 위치시킨 후 평면도를 유지하기 위해 내압판에 윤활제를 얇게 바른 후 0.1 mm/min의 변형률 속도로 변위 제어방식을 이용하여 재료의 파괴까지 가압하여 시험하였다. 고온 압축시험은 고온 환경을 위해 가열장치는 653.02 고온노를 이용하였다. 또한 흑연의 고온 산화특성을 고려하여 산화방지제를 코팅한 시편 및 일반시편을 이용하여 시험편을 가열한 후 고온노 내부가 시험온도에 도달했을 때부터 20분 동안 온도를 유지한 후 0.1 mm/min의 변형률 속도로 변위 제어방식을 이용하여 시험했다. 압축강도를 측정하는 식은 다음과 같다.

$$C = W/A \tag{1}$$

여기서 C는 압축강도(MPa), W는 파괴하중, A는 시편의 단면적(mm³)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 상온 압축시험

상온에서 표준 및 비표준 확대시편을 이용하여 압축을 수행하였으며, Fig. 2는 직경 대 높이

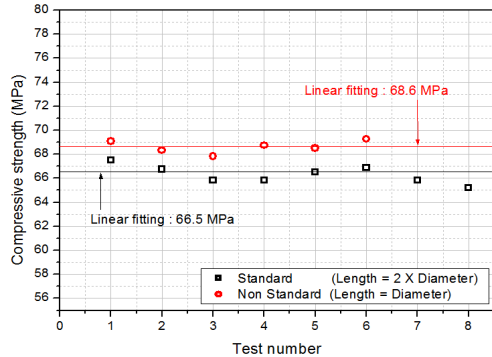


Fig. 4 Comparison of compressive strengths for standard and extended specimens at room temperature.

비가 1:2인 ASTM 규격에 맞는 표준시편의 압축 시험에 대한 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. Fig. 2에 도시된 것과 같이 선도는 소성영역을 포함하지 않으며 비선형의 형태를 나타낸다[2]. 이는 시편 내의 크랙 손상 누적에 의해 발생한 것으로 판단된다. 또한 선도는 두 가지의 파단 형태를 나타낸다. 압축시험 초기에 상대적으로 하중이 급격하게 증가하는 시편은 완전파단 및 전단파단 형태를 보였으며, 상대적으로 하중이 느리게 증가하는 시편은 부분파단 형태를 보였다.

Fig. 3은 직경 대 높이 비가 1:1인 비표준 확대 시편의 하중-변위 선도이다. 표준시편의 경우와 비슷하게 완전파단, 전단파단 및 부분파단의 형태를 나타낸다.

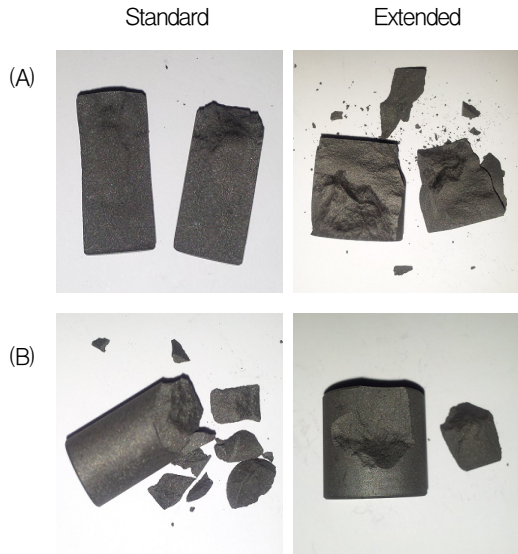


Fig. 5 Fracture shape of specimens after compressive test.

Fig. 4는 표준시편 및 비표준 확대시편의 압축 강도를 비교한 것이다. 표준시편은 약 66.5 MPa의 평균 압축강도를 보였고, 비표준 확대시편은 약 68.6 MPa의 압축강도를 나타낸다. 일반적으로 흑연은 시편내의 잠재하는 균열로부터 시편의 파괴되므로 부피가 커질수록 균열이 존재할 수 있는 확률이 높아져 강도가 감소한다[2]. 반면, 본 시험에 이용된 확대시편들이 일반시편보다 압축강도 미소하게 증가하는 원인은, 시편 내 존재하는 균열에 의한 강도저하 효과 보다 시편 및 치구의 경계조건, 즉 단면적 마찰력에 의한 시편 변형의 구속으로 판단된다.

Fig. 5는 상온에서 표준 및 비표준 확대시편의 파단형태를 나타낸 그림이다. Fig. 5(A)는 완전파단 및 전단파단 된 시편이다. 표준시편의 경우 원주방향의 인장력에 의한 균열 파단형태를 보인다. 비표준 확대시편의 경우 전단 파단형태로 파단면과 축이 만드는 각도는 약 45°이다. Fig. 5(B)는 부분 파단형태를 나타낸 시편이다. 압축 강도 측정 결과, 부분파단이 발생한 시편은 완전 파단 시편보다 낮은 압축강도를 보이는 경향이 있다[6]. 이는 시편 제작 시 발생한 결함이 존재하거나 압축시험 중 치구와 시편의 평행도 오차

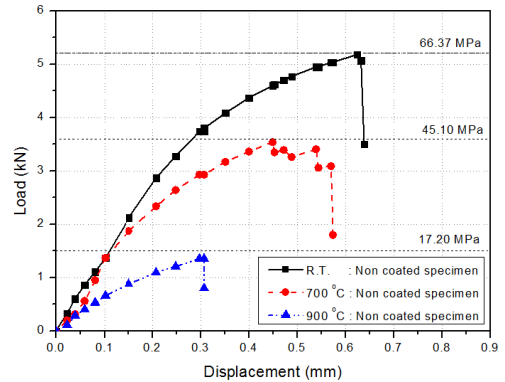


Fig. 6 Load-displacement for non-coated specimen at R.T. and elevated temperature.

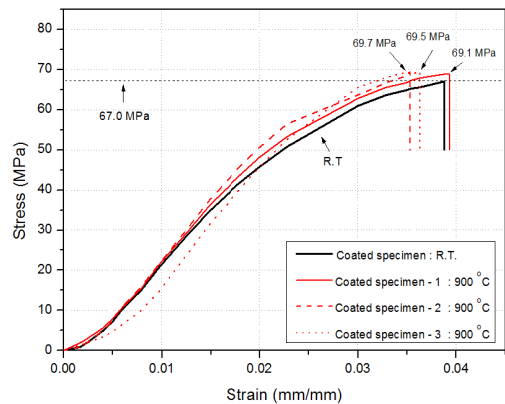


Fig. 7 Comparison of compressive strength for coated specimen at R.T. and 900°C.

에 의해 발생된 것으로 판단된다.

3.2 고온 압축 시험

일반시편 및 산화방지제 시편을 이용하여 상온 및 700°C, 900°C에서 압축시험을 수행하였다. Fig. 6은 상온 및 고온에서 일반시편에 대한 하중-변위 선도를 도시한 것이다. 선도에서 알 수 있듯이 흑연은 고온에서의 산화로 인해 압축강도가 현저히 감소한다. 일반시편의 압축강도는 상온 및 700°C, 900°C에서 각각 67.0 MPa, 45.1 MPa의 17.2 MPa 수준의 압축강도를 보인다.

Fig. 7은 산화방지제 시편에 대한 900°C에서의 압축강도 증가 경향을 알아보기 위해 3가지 산

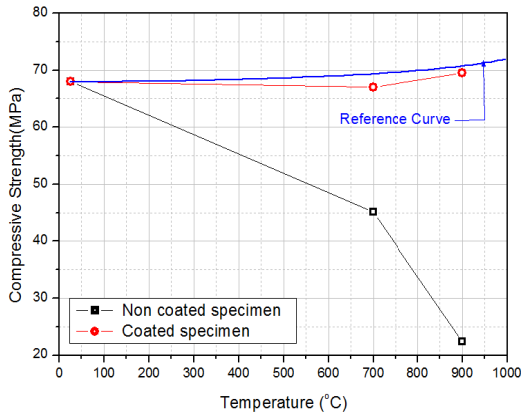


Fig. 8 Comparison of compressive strengths for non-coated, coated specimen and reference data.

화방지제 시편을 동일한 조건에서 시험하여 얻은 결과를 나타낸 응력-변위 선도이다. 그래프에서 나타나듯이 900°C에서 모든 산화방지제 시편의 압축강도가 상온(67.0 MPa) 보다 약 2~2.5 MPa 정도 약간의 증가를 보인다. Fig. 8은 상온 및 고온에 대한 일반시편 및 산화방지제 코팅시편의 압축강도를 비교한 선도이다. 선도에서 나타나듯이 일반시편은 고온 환경에서 흑연의 산화로 인해 상온보다 900°C에서 압축강도가 약 60% 이상 감소하였다. 반면, 산화방지제 코팅시편은 900°C에서 상대적 강도(R.T.=100)가 약 104인 참고문헌[1]과 비슷한 경향을 나타냈다.

4. 결 론

본 논문은 노즐 목에 이용되는 ATJ 흑연 소재에 대하여 적용 환경을 고려한 온도 및 단면적을 변수로 하여 ASTM 규정에 의거하여 압축 시험을 진행하고 압축 파단 특성을 평가하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 상온에서 표준시편 및 비표준 확대시편에 대한 압축 시험 결과 완전 파단이 일어나거나 부분 파단이 일어난 시편이 존재 하였으며, 완전 파단이 일어난 시편의 압축강도가 조금

높게 나오는 경향이 나타났다.

- 2) 상온에서 표준시편 및 비 표준 확대시편을 비교한 결과 단면적이 큰 비 표준 확대시편의 압축강도가 약 2 MPa 정도 높게 나타났다. 이는 시편과 치구에 작용하는 단면적 마찰력에 의해 시편 변형이 구속되어 나타난 결과로 판단된다.
- 3) 고온에서 일반시편 및 코팅 시편을 비교한 결과, 일반시편은 고온에서 산화가 일어나 압축강도가 현저히 감소하였다. 하지만 산화방지제 코팅시편은 고온 환경에서 압축강도가 유지되거나 특히 900°C에서는 약간의 증가를 보였다. 이로부터 비 산화 환경의 고온에서 압축강도가 증가하는 흑연의 특성에 대해 확인하였다.

References

1. Kim, J.H. and Lee, Y.S., "Evaluation of Thermal Shock Strengths for Graphite Material Using a Laser Irradiation," *Material Science and Engineering: A*, Vol. 387-389, pp. 385-389, 2004.
2. Nemeth, N.N. and Bratton, R.L., "Statical Models of Fracture Relevant to Nuclear Grade Graphite : Review and Recommendation," NASA/TM 2011-215805, 2011.
3. Page, D.J., *The Industrial Graphite Engineering Handbook*, UCAR Carbon Company Inc., 1991.
4. ASTM Standard C695-91, "Standard Test Method for Compressive Strength of Carbon and Graphite," ASTM International, 2010.
5. Ji, S.H., "Specimen Size Effects on the Compressive Strength and Weibull Modulus of Nuclear Graphite of different Coke Particle Size IG-110 and NBG-18," *Journal of Nuclear Material*, Vol. 436, Issues 1-3, pp.

-
- 185-190, 2013.
6. Han, D.Y., Kim, E.S. and Ji, S.H., "Fracture Properties of Nuclear Graphite Grade IG-110," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 43, No. 7, pp. 439-444, 2006.