

## 로켓 노즐목에 이용되는 ATJ 그래파이트 압축거동 평가<sup>§</sup>

최훈석\* · 서보휘\* · 김재훈\*† · 문순일\*\*

\* 충남대학교 기계설계공학과, \*\* 국방과학연구소

### Compressive Fracture Behavior of ATJ Graphite for Rocket Nozzle

Hoon Seok Choi\*, Bo Hwi Seo\*, Jae Hoon Kim\*† and Soon Il Moon\*\*

\* Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

\*\* Propulsive group, Agency for Defense Development.

(Received April 1, 2014 ; Revised August 27, 2014 ; Accepted September 10, 2014)

**Key Words:** ATJ Graphite(ATJ 그래파이트), Uniaxial Compression(일축 압축), Compressive Strength(압축 강도), Size Effect(크기효과), Antioxidant(산화방지제)

**초록:** 로켓 노즐 목에 이용되는 ATJ 그래파이트에 대해 시편크기 및 온도에 따른 압축강도를 평가하였다. 압축시험은 ASTM C 965 규정에 준하여 상온 및 고온에서 수행되었다. 상온에서는 직경 대 높이가 1:2 인 ASTM 규정에 부합하는 표준시편 및 직경 대 높이비가 1:1 및 1:0.5 인 Type I, Type II 등 2 종류의 확대시편이 일축 압축시험에 이용되었다. 또한 고온에서는 산화제를 도포한 코팅시편 및 일반시편을 이용하였다. 시험결과 상온에서 모든 확대시편들이 표준시편보다 약간의 압축강도 증가를 보였다. 고온환경에서의 압축시험결과 코팅시편은 900 °C 까지 압축강도가 유지되거나 약간의 증가를 보였으나, 일반시편은 산화로 인해 압축강도가 급격하게 감소했다.

**Abstract:** The effects of the specimen size and temperature on the compressive strength of ATJ graphite were investigated. Compressive tests were conducted in accordance with ASTM C 965 at room temperature, 700°C and 900°C. Three types of cylindrical specimen at room temperature were used in uniaxial tests, where the diameter-to-length ratios were one to two for the ASTM standard specimen, one to one for the Type I specimen, and one to 0.5 for the Type II specimen. Two kinds of cylindrical specimens, with and without antioxidant coating, were tested at elevated temperature. The Compressive strength of the expanded specimens(Type I, II) were slightly higher than that of standard specimen at room temperature. The compressive strength of a specimen with antioxidant coating increased as the temperature increased to 900°C. In contrast, that of the non-coated specimen decreases sharply due to the oxidation of the specimen

#### 1. 서론

로켓추진기관 부재중에 노즐은 고온의 연소가스에 노출되어 있기 때문에 열 충격에 의한 파손 및 침식 변형을 일으킬 수 있는 가능성이 매우 높다. 특히 노즐 부는 로켓추진기관의 성능을 좌우하는 중요한 부

품이기 때문에 기대되는 성능을 발휘하기 위해서는 열 충격에 의한 노즐 목 형상과 기능의 손실이 발생하지 않는 재료를 사용한다. 따라서 노즐 목에 사용되는 재료는 높은 기계적 강도, 내열성, 내식성, 열충격 저항성, 침식저항성과 높은 열전도도를 지녀야 하며 열팽창계수는 작아야 한다. 이러한 특징을 지니고 있는 재료로는 그래파이트(graphite)와 C/C(carbon fiber reinforced carbon composite) 등의 복합재료가 있는데, C/C는 그 성능에 비해 가격이 비싸기 때문에 이를 대체하기 위한 재료로 그래파이트에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구에서 사용된 그래파이트는

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계 학술대회(2014. 4. 3.-4., 서귀포 KAL 호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

ATJ 계열 그래파이트 재료로써 로켓노즐목이나 우주 왕복선 날개 등에서 요구하는 조건과 거의 일치하기 때문에, 이러한 분야에 널리 사용되고 있다.<sup>(1)</sup>

그래파이트는 취성재료로서 전형적인 구조재료에 이용되는 금속성 재질에서 보이는 소성변형 구간을 포함하지 않으며, 강도분포가 상당히 넓게 분포된다.<sup>(2)</sup> 따라서 실제 구조체의 적절한 적용을 위해서는 구조적 안정성을 충분히 확보해야 한다. 일반적으로 제조사에서는 표준 외 시험 법에 의해 획득된 ATJ 그래파이트 구조, 기계적·열적특성에 대한 기초자료를 일부 제공하고 있으나, 실제 구조체의 적용을 위해서는 이 재료에 대한 크기효과, 경계조건, 형상 및 온도변화에 따른 기계적 특성평가가 반드시 수행되어야 한다.

본 연구에서는 일차적으로 상온에서 시편의 단면적 변화에 의한 압축강도 및 파단특성에 대해 연구하였다. 이를 위해서 현재 ASTM C695 에서 제시하고 있는 표준시편<sup>(3)</sup> 외 확대시편<sup>(4)</sup>을 이용하여 압축특성을 평가하였다. 또한 고온환경에서 그래파이트의 압축특성에 대해 시험·평가하였다. 이때 고온환경에서 시편의 산화방지를 위해 기존에 이용되는 방법인 불활성가스인 아르곤 등을 주입하는 대신 산화방지제를 도포한 시편을 이용하여 고온환경에서의 압축시험을 수행하였다.

## 2. 재료 및 시험방법

### 2.1 시험 재료

본 연구에서 사용된 압축시편 재료는 UCAR Carbon 사에서 등압적 몰딩 가공한 ATJ 계열 그래파이트이다. 이 재료는 높은 강도를 가지며, 매우 정밀한 공차와 표면처리로 가공될 수 있는 미립자 그래파이트이다. 또한 이 재료는 내열성이 우수하고 열전도도와 열충격 저항성이 높고 우수한 기계적 성질과 낮은 탄성계수를 가지고 있으며, 연속적인 주조용 형판과 주형, 로켓노즐 및 우주왕복선 날개 등에 사용된다.<sup>(5)</sup> 전형적인 구조재료와 비교할 때, 그래파이트는 강도나 파괴인성 측면에서 소성영역을 동반하지 않고 고속으로 파괴되는 취

성이 강하여 상대적으로 약하지만, 2700°C 이상의 온도에서 구조 건정성(Structural integrity)를 유지하므로 고온 구조재료에 많이 사용되고 있다. 본 연구의 ATJ 그래파이트는 평균 입자 크기는 25.4 μm 이며, 밀도는 1.76 g/cm<sup>3</sup> 이고 탄성계수는 9.6 GPa 이다.

Table 1 은 UCAR 에서 제공하고 있는 ATJ 그래파이트에 대한 기본 물성을 요약한 것이다.

### 2.2 시험 시편

본 연구에서 이용된 그래파이트는 취성이 강한 재료로서 다른 연성재료보다 압축강도의 오차 및 분산이 크게 나타날 수 있다. 따라서 압축시험을 통해 보다 정확한 실험값을 획득하기 위해서는 ASTM 에 부합하는 규정에 준수하여 정밀한 압축시편으로 가공해야 한다. 압축시편은 ASTM C695-61 규정에 따라 정교한 평면도 및 평형도를 갖도록 가공한 실린더 형상이다. 본 연구의 압축시편은 ASTM C 695 에서 요구하는 평면도 및 조도를 만족하도록 제작하였으며 ASTM 에 부합하는 직경대 높이 비율이 2.0 인 직경 10 mm, 높이 20 mm 인 원통 형상의 표준시편을 제작하였다.<sup>(3)</sup> 또한 단면적 크기에 대한 압축강도의 변화를 분석하기 위하여 표준 시편보다 직경이 큰, 지름 20 및 40 mm 인 Type I 및 Type II 시편으로 제작하였다.

고온 시험의 경우 산화를 방지하기 위해 일반적으로 고온로 안에 불활성 기체인 Ar 등을 주입하면서 시험하지만 이와 같은 방법은 복잡할 뿐만

Table 2 Types of compressive specimens






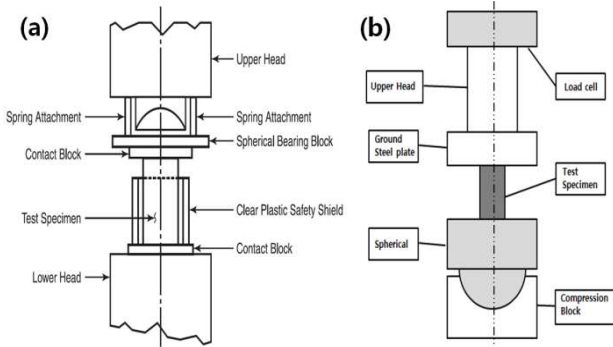
Type	Standard	Type I	Type II
Specimen			
Dimension (d × l, mm)	10 × 20	20 × 20	40 × 20
Type	Non coated	Coated	
Specimen			
Dimension (d × l, mm)	20 × 20	20.1 × 20.1	d = diameter l = length

Table 1 Properties of grate ATJ graphite

Properties	Unit	Value
Density	g/cm	1.78
Grain size	μm	26
Elastic modulus	GPa	9.6
Tensile strength	MPa	26
Thermal conductivity	W/m·K	120

Table 3 Compositions of Antioxidant

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



**Fig. 1** (a) Elements of compressive strength load train with ASTM C 695 (b) Compressive test arrangement with spherical block used present study

아니라 실제 구조체에 적용하기 어려운 점이 많다. 따라서 본 연구에서는 실리콘 카바이드로 제작한 산화방지제를 이용하여 도포한 압축시험을 이용하였다. Table 2 는 본 연구에 이용된 압축시험에 대한 형상을 보여주고 있고, Table 3 은 이용된 코팅재의 소결된 성분을 나타낸 것이다.

2.3 시험장비 및 방법

상온 및 고온에 대한 압축시험은 ASTM C 695 규정<sup>(3)</sup>에 의거하여 수행하였다. 시험장치는 10 Ton 용량의 유압식으로 작동되는 MTS810 만능재료시험기로 변위 제어방식을 이용하였다. Fig. 1(a)는 ASTM 에서 제시한 치구 및 압축시험 정렬방식을 나타낸 것이고 Fig. 1(b)는 본 연구에서 사용된 치구 및 압축시험의 정렬 방식에 대한 개략도이다. 압축시험 시 구면 베어링 블록의 원활한 움직임을 위해, 고압에서도 충분히 유막을 형성할 수 있는 윤활제를 얇게 도포하였고, 구면 베어링 중앙에 표시된 원에 압축 시험편들을 각각 위치시키고 0.1 mm/min 의 속도로 변위제어 방식을 이용하여 재료의 파괴까지 가압하여 시험하였다. 고온 압축시험은 고온 환경을 위해 고온로 및 고온 컨트롤러를 이용하였다. 본 시험에 이용된 코팅재는 400 °C 에서 완전한 아웃가싱(out-gasing)이 발생되므로 이전까지는 기체가 치구에 달라붙지 않게 고온로를 밀폐시키지 않고 온도를 증가시켰으며 완전한 아웃가싱이 된 이후에는 고온로를 완전히 밀폐시킨 후 설정온도까지 온도를 증가시켰다. 시험 속도 및 시험방법은 상온과 동일하다.

압축강도를 측정하는 식은 다음과 같다.

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

여기서 C 는 시험편의 압축 및 파괴강도(MPa), W

는 파괴하중(kN), A 는 시험편의 원형부 단면적(mm<sup>2</sup>)이다.

3. 결론 및 고찰

3.1 상온 시험

상온에서 그라파이트 압축시험은 표준 시험편의 경우 10 개 수행하였으며, 시험 단면적에 대한 압축강도 경향을 파악하기 위한 Type I 및 Type 시험 II도 동일하게 10 개씩 압축시험을 수행하였다.

Fig. 2 는 상온에서 표준시험편의 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 선도에서 볼 수 있듯이 그래프는 비선형 형태를 보인다.<sup>(2)</sup> 파단 하중의 최대값은 5.30 kN 이고 최소값은 5.12 kN 이다. 또한 Fig. 2 에서 도시된 것과 같이 그래프는 두 가지 형태를 보인다. 그래프 형태에 따라 파단 양상도 다르게 나타나고 있다. 압축시험 초기 상대적으로 하중이 높게 나타나는 시험편들은 주로 완전파단(전단 및 균열)형태를 보였다. 반면 시험초기에 상대적으로 하중이 낮게 나타나는 시험편들은 주로 부분파단이 발생하는 경향을 보였다. 파단 강도를 표준시험편의 원형부 단면적으로 나눈 결과, 평균압축강도는 66.3 MP 을 보이며 이 수치는 UCAR 에서 제공된 평균 압축강도 67.0 MPa 과 유사하다. Fig. 3 은 Type I 시험편으로부터 얻은 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 표준시험편과 동일하게 그래프가 두 가지 형태로 분류된다. 이 시험편들의 평균압축강도는 68.4 MPa 로 표준시험편보다 압축강도가 약 3 % 증가했다. Fig. 4 는 Type II의 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 앞서 분석한 표준 및 Type I 과는 다르게 대부분의 시험편들이 대부분 완전 파단 형태를 보이고 있으며, 파단 하중의 최대 및 최소값의 차이가 크다. Type II의 평균압축강도는 69.0 MPa 로 표준 시험편보다 5 % 증가한 수치이다. 또한 표준 및 Type I 시험 대비 파단 시 변위 값이 크다

Fig. 5 는 표준시험편 및 Type I, II에 대한 대표적인 응력-변형률 선도를 비교한 것이다. 시험편의 단면적이 증가할수록 파단 시 변형량이 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 단면적이 커질수록 시험편에 내포하는 기공 및 결함의 수의 증가에 의한 것으로 판단된다.<sup>(2)</sup>

압축시험의 직경 대 높이 비 (d<sub>0</sub>/l<sub>0</sub>)에 대한 평균 압축강도 경향을 Fig. 6 에 나타내었다. 표준시험 대비 Type I 및 Type II의 압축강도가 미세하게 증가하였으며, 이는 시험 경계조건 즉, 시험 치구 및 시험편에 작용하는 단면마찰력에 의한 시험 변형의 구속으로 판단된다. 일반적으로 취성재료가 인

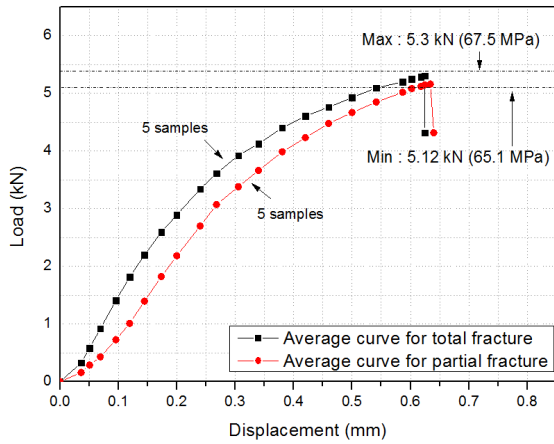


Fig. 2 Representative load-displacement curves for standard specimens at room temperature

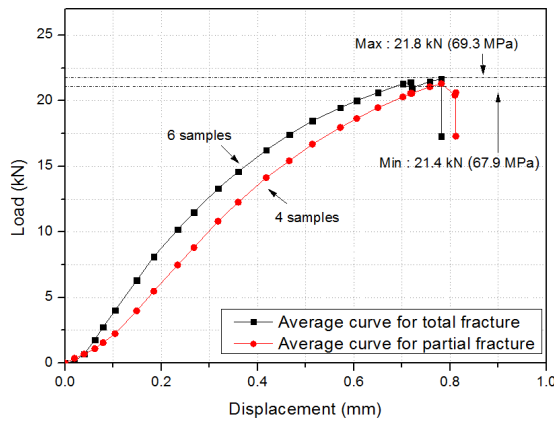


Fig. 3 Representative load-displacement curves for type I specimens at room temperature

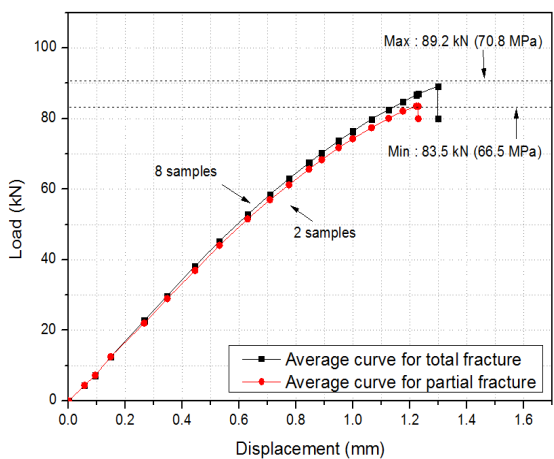


Fig. 4 Representative load-displacement curves for type II specimens at room temperature

장 및 굽힘력을 받는 경우 최약링크에 의하여 부피가 커질수록 강도가 감소<sup>(2)</sup>하는 반면, 본 연구의 압축시험의 경우는 시험 치구 및 시편의 경계조건에 의하여 시편의 단면적이 증가할수록 압축강도

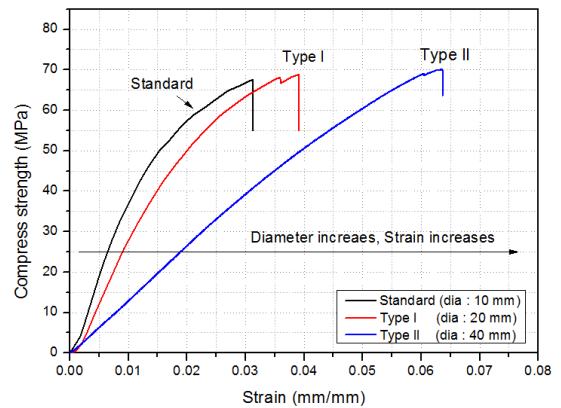


Fig. 5 Comparison of stress-strain curves for standard, type I and type II specimens at room temperature

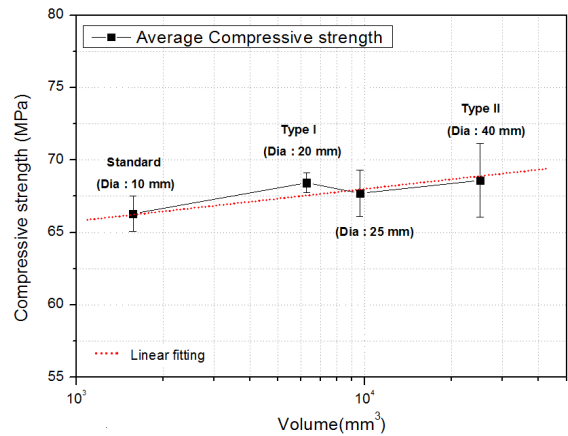


Fig. 6 Comparison of fracture strength of  $d_0/l_0$  at room temperature

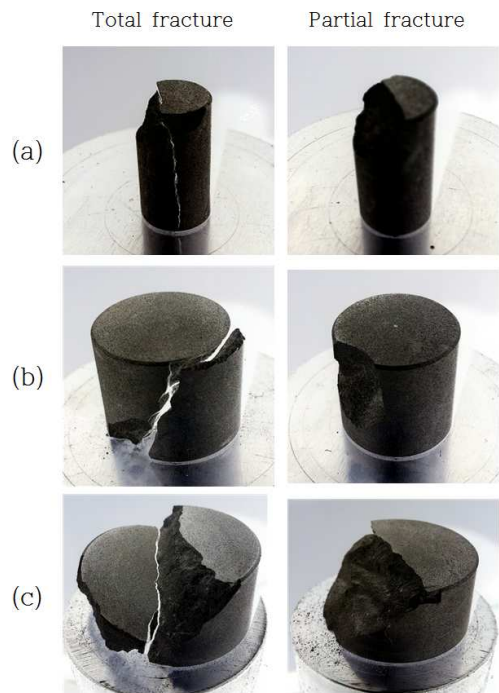


Fig. 7 Representative fracture types of (a) standard, (b) Type I and (c) Type II specimens for compressive test

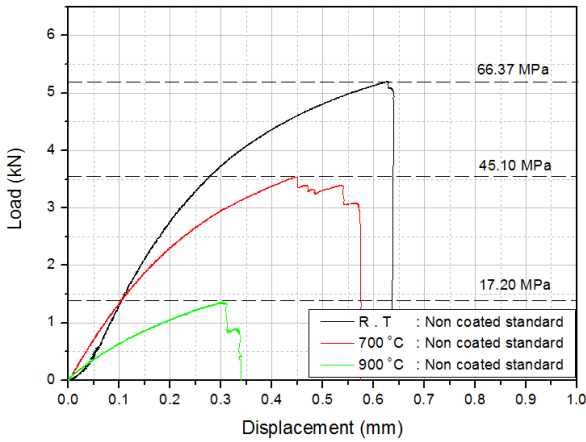


Fig. 8 Load-displacement curves of non-coated standard specimens at R.T to 900°C

가 미세하게 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 7 은 상온 압축시험 이후 시편의 파단 양상을 나타낸 것이다. 파단은 크게 두 가지 형태로 분류되어 완전파단 및 부분파단이 발생하였다. 표준, Type I, Type II 시편 모두 완전 파단시편의 압축강도가 약간 높게 측정되었다.<sup>(6)</sup> 균열파단은 지름 방향에 인장력 방향으로 균열의 형태를 보이고 전단파단은 파단 면과 축의 각도가 45°인 방향으로 파단된다. 부분파단은 시편의 모서리 쪽이나 면 쪽에서 부분적으로 파단되는 형태를 보이며 이는 치구와 시편의 축방향 중심선 오차이거나 시편에 존재하는 결함으로부터 생기는 파단 형태로 판단된다.

### 3.2 고온 시험

그래파이트의 고온 압축시험은 표준시편 및 Type I 시편 각각 5 개씩 수행하였고 일반시편 및 산화방지 코팅시편을 이용하였다. 먼저 그래파이트의 고온 산화특성을 알아보기 위해 표준시편 형태의 일반시편을 이용해 상온, 700°C, 900°C 에서 시험을 수행하였다. Fig. 8 은 표준-일반시편의 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 이 선도로부터 알 수 있듯이 온도가 증가할수록 시편의 파단 하중이 현저히 감소하고 있다. 특히 900°C 에서는 38 %의 압축감소율을 보이고 있다. 따라서 시편의 산화방지를 위해 실리콘카바이드로 제작한 산화 방지제를 그래파이트 시편에 도포하여 시험하였다. 이때, 보다 정확한 고온특성을 파악하기 위해 상대적으로 분산이 작은 Type I 시편을 이용하였다. Fig. 9 는 코팅시편에 대해 고온 압축시험을 수행하여 획득한 하중-변위 선도이다. 모든 시편의 압축강도는 고온에서 유지되거나 1~2 MPa 정도 미소한 증가를 보이고 있다. 본 연구에서는 약간의 압축강도

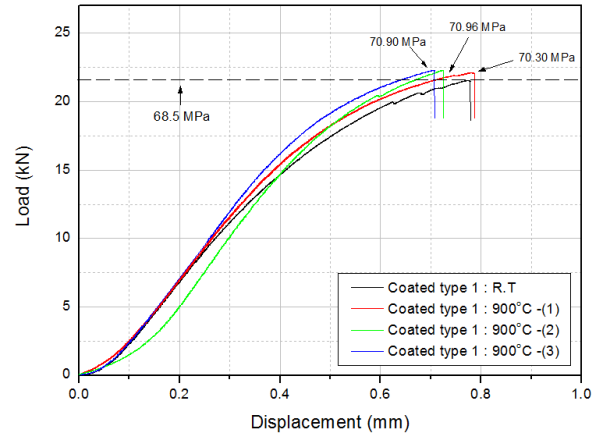


Fig. 9 Load-displacement curves of coated type I specimens at R.T and 900°C

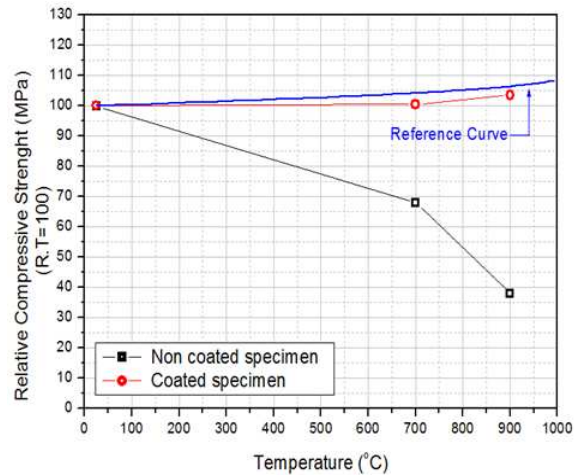


Fig. 10 Comparison of relative compressive strength for non-coated, coated specimens and reference data

차이를 보이는 일반 및 Type I 시편을 이용하여 고온 압축시험을 수행하였기 때문에 상온 대비 고온 환경에서의 강도 증가량을 알아보기 상온에서 압축강도를 100 으로 설정하여 이에 대하여 상대적인 고온 압축강도를 비교하였다. Fig. 10 은 온도에 따른 일반시편 및 코팅시편의 상대적 강도를 나타낸 선도이다. 이 선도로부터 알 수 있듯이 일반시편의 경우 고온에서 발생된 산화반응에 의해 상대적 압축강도가 현저히 감소하고 있다. 700°C 및 900°C 에서 각각 상대적 강도는 68.0 및 38.3 을 보인다. 반면에 산화방지제를 도포한 코팅시편의 경우 고온환경에서도 압축강도를 유지하거나 특히, 900°C 에서는 상대적 강도가 104 인 UCAR 에서 제공한 문헌<sup>(1)</sup>과 비슷한 경향을 나타낸다.

### 4. 결론

본 연구는 노즐 목에 이용되는 ATJ 그래파이트

소재에 대하여 적용환경을 고려한 단면적 및 온도를 변수로 하여 ASTM C 695 규정에 따라 압축시험을 수행하고 압축강도 및 파단특성에 대해 고찰하였다. 본 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 상온에서 ASTM 에 의거한 표준시편을 이용하여 압축시험을 수행한 결과 ATJ 그라파이트의 평균압축강도는 66.3 MPa 로 UCAR 에서 제공된 평균압축강도 67.0 MPa 과 유사하다.

(2) 확대시편(Type I, II)은 표준시편보다 평균 압축강도가 약 3~4 % 수준으로 증가한다. 이는 시편과 치구에 작용하는 단면마찰력에 의한 시편 변형의 구속이 원인이다. 이로부터 압축하중을 받는 ATJ 그라파이트 소재의 경우 직경 대 높이 비( $d_0/l_0$ )가 증가할수록 압축강도가 미소하게 증가한다.

(3) 일반시편은 고온에서 산화가 발생하여 압축강도가 현저히 감소하지만 산화방지제 후 처리한 코팅시편은 고온환경에서 압축강도가 유지되거나 증가한다. 특히 900°C 에서는 상대적 압축강도가 103.7 로 약간 증가한다. 따라서 고온에서 산화가 발생하지 않으면 그라파이트의 압축강도는 증가한다.

## 참고문헌

(References)

- (1) UCAR Carbon Company Inc., 1991, "The Industrial Graphite Engineering Handbook"
- (2) Nemeth, N. N. and Bratton, R. L., 2011, "Statical Models of Fracture Relevant to Nuclear Grade Graphite: Review and Recommendation," NASA/TM 2011-215805."
- (3) ASTM Standard C695-91, 2010, "Standard Test Method for Compressive Strength of Carbon and Graphite," ASTM international
- (4) Ji, S. H., 2013, "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, pp. 185~190
- (5) Kim, J. H., Lee, Y. S. and Kim, D. H., 2004, "Evaluation of Thermal Shock Strengths for Graphite Materials Using a Laser Irradiation Method," *Material Science and Engineering:A, Volumes*, pp. 387~389
- (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, pp.439~444