

## 크롬-카바이드 복합체의 고온 크리프 거동

김지환 · 한동빈\* · 김기태

포항공과대학교 기계공학과

\*산업과학기술연구소

(1995년 2월 24일 접수)

### High Temperature Creep Behavior of $Cr_3C_2$ Composites

J. H. Kim, D. B. Han\* and K. T. Kim

Dept. of Mechanical Eng., Pohang Univ. of Sci. and Tech.

\*Research Institute of Sci. and Tech., Pohang 790-784, Korea

(Received February 24, 1995)

#### 요 약

고온에서 90 wt%  $Cr_3C_2$ 와 10 wt% Ni로 구성된  $Cr_3C_2$  복합체의 크리프 거동을 조사하였다. 상압 아르곤 분위기 하에서 1000°C의 압축 크리프 실험과 1000°C 및 1050°C의 굽힘 크리프 실험을 수행하였다. 모든 실험 조건에서 1차 크리프와 2차 크리프 거동이 관찰되었으며 실험 결과로부터 응력 급수와 활성화 에너지를 구하였다. 크리프 실험 후 미세조직 관찰을 통하여 Ni상이 응집되어 분리되었음을 관찰하였다. 굽힘 시편의 인장과 압축 크리프 거동의 차이를 가정한 후 수치해석을 통해 굽힘 크리프 거동을 해석하였다. 굽힘 크리프시, 시편에 작용하는 응력이 비선형적으로 재분포되며 작용응력의 크기가 증가할수록 중립축이 압축 영역으로 이동함이 예측되었다. 실험 결과로부터 구한 크리프 계수들을 이용하여 변형률 속도를 예측한 뒤 이를 실제 변형률 속도와 비교하였다.

#### ABSTRACT

Creep behaviors of  $Cr_3C_2$  composites containing 90 wt%  $Cr_3C_2$  and 10 wt% Ni were studied at high temperature. Compression tests at 1000°C and bending tests at 1000°C and 1050°C were done in argon environment. In all test conditions, primary and steady-state creep behaviors were observed. Stress exponent and activation energy were determined from the experimental data. By microstructural analysis of  $Cr_3C_2$  composites after creep test, the separate agglomerations of Ni phase were observed. Numerical analysis was also studied to analyze bending creep behaviors of  $Cr_3C_2$  by assuming different tensile and compressive creep behavior in a bending sample. From the analysis, it was found that the stress state at the cross-section of a crept sample was redistributed nonlinearly and the neutral axis moved toward the compressive region as applied stress increased. The observed creep rates were compared with the predicted creep rates by estimating power-law creep parameters from bending test data

**Key words:** Creep behaviors, Bend test, Compression test, Composites, Stress distribution, Creep strain rate

#### 1. 서 론

고온 구조용 소재들은 용융점의 1/2을 상회하는 온도에서 사용되며 이러한 고온에서는 작용 하중의 상태에 따라 소재의 크리프 변형이 발생할 수 있다. 크리프 변형은 하중의 즉각적 변형 반응인 탄성이나 소성과는 달리 시간에 의존하는 변형 과정으로 재료의 특성과 외적 변수에 좌우된다. 주요 외적 변수들로서는 온도와 응력이

고려되고 있는데 이들이 최소 크리프 속도와 파단 수명이 미치는 영향은 보편적으로 보고되는 자료들이다. 로켓 엔진 노즐이나 군용 항공기 엔진의 터빈 블레이드 같이 비교적 수명이 짧은 재료의 반응을 평가할 때는 주로 주어진 온도와 응력에서의 파단 수명이 조사되며, 수십년 동안 작동해야 하는 핵발전소의 부품과 같은 장수 재료의 응용에는 최소 크리프 속도가 주요 재료 반응으로 연구된다<sup>1)</sup>.

고온에서의 크리프 거동은 인장, 압축, 굽힘 실험등을 통하여 관찰할 수 있다. 인장 크리프 실험은 시편에 굽힘 모우멘트가 발생하는 것을 최소화할 수 있는 그립(grip)과 시편의 제작이 필요하며 압축 크리프 실험은 시편의 형상과 실험 장치는 간단하나 시편과 하중을 가하는 램 사이의 정렬이 어려우므로 굽힘 응력을 야기할 수 있고<sup>2)</sup> 또한 시편의 접촉면에 작용하는 마찰력도 크리프 거동에 영향을 미친다<sup>3)</sup>. 굽힘 실험방법은 인장시험 대신에 때로 많이 사용되고 있는데, 이는 고온에서 취성재료의 인장 시험에서 통상적으로 겪는 시편의 축 정렬과 그립의 어려운 문제점 없이 좀 더 쉬고 안정하게 실험결과를 구할 수 있기 때문이다<sup>4)</sup>.

Hollenberg 등<sup>5)</sup>은 4점 굽힘 실험에서 변형률과 변형률 속도, 그리고 응력과의 관계에 대하여 최초의 역학적인 해석을 시도하였다. 이들은 시편 내부의 인장 크리프와 압축 크리프 거동이 동일하며, 시편의 중립축이 시편 단면의 도심(centroid)에 고정되어 있다고 가정하였다. 그러나 일반적으로 미소 균열이나 공동등의 생성으로 인하여 인장 크리프와 압축 크리프 거동은 동일하지 않으므로 굽힘 실험의 경우 시편 내부의 비선형적인 하중 분포를 야기할 수 있다. Chuang<sup>6)</sup>은 이러한 크리프 거동의 비대칭성을 가정한 뒤 중립축의 위치와 크리프 상수(creep parameter), 작용 모우멘트의 관계를 수치 해석적인 방법을 이용하여 조사하였다. Chuang과 그의 공동 연구자들<sup>4,6,7)</sup>은 굽힘 크리프 거동시 시편의 중립축이 도심에 있지 않고 굽힘 하중의 크기에 의존하여 압축 영역으로 이동함을 이론적으로 보였다. 이러한 해석을 바탕으로 굽힘 실험의 결과로부터 크리프 상수를 구하거나<sup>6,8)</sup>, 실제의 인장, 압축 크리프 실험의 결과와 비교하는 시도가 행해졌다<sup>2)</sup>. Chen 등<sup>9)</sup>은 중립축의 이동 현상을 실험적으로 관찰하였으며 크리프 상수를 해석적인 방법으로 구하였다.

본 논문에서 조사한  $Cr_3C_2$  복합체는 기계적 성질은 그다지 우수하지 않으나 내식성과 내산화성이 우수하며 높은 열 팽창계수와 낮은 비중 및 비자성등의 특성을 갖고 있으므로 오일 펌프용 rotor, 펄름 절단용 절단기, 원심 분리기의 blade, 석유 화학 공업의 밸브, 다이 캐스팅용 금형 등에 광범위하게 사용된다<sup>9)</sup>. 또한  $Cr_3C_2$  복합체는 구조재로 사용 가능한 강도를 지니며 Fe와의 반응 저항성이 높은 것으로 알려져 있다<sup>10)</sup>. 현재  $Cr_3C_2$  복합체는 제철소의 가열로에서 강관을 지지하는 부품인 내열 합금강 skid button의 대체 소재로 사용되고 있으며 고온 환경에서의  $Cr_3C_2$  복합체의 크리프 거동과 같은 기계적 물성은 현재 거의 알려져 있지 않다.

본 논문에서는 1000°C 이상의 온도에서  $Cr_3C_2$  복합체의 압축 크리프와 굽힘 크리프 거동을 조사하였다. 정상상태 크리프의 변형률 속도와 작용응력의 관계를 통하여 응력 급수를 조사하였으며 온도와와의 관계로부터 시편이 크리프 변형을 일으키는데 필요한 활성화 에너지를 구하였다. 또한 굽힘 실험의 결과로부터 크리프 계수들을 구하여 굽힘 크리프 거동시의 작용 모멘트와 중립축의 위치 및 곡률 속도 사이의 관계를 수치해석적인 방법을 통하여 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시편

본 실험에서는 90 wt%  $Cr_3C_2$ (Hermann C. Starck, 독일)와 10 wt% Ni(주) 대한중석)로 구성된  $Cr_3C_2$  복합체를 사용하였다. 실험용 시편은 (주)대한 중석에서 제조되었으며 제조 공정은 다음과 같다. 각 분말들을 혼합하여 Hexane에서 20시간 동안 milling을 한 후, 분무 건조법으로 조립하고 325 mesh로 screening하여 최종 분말을 얻었으며 1470 MPa의 압력으로 냉간 정수압(cold isostatic pressing) 성형하였다. 이를 700°C의 진공 상태에서 1시간 동안 소결한 후 1500°C의 아르곤 분위기에서 1시간 동안 1470 MPa의 압력으로 열간 등방가압 소결(hot isostatic pressing)을 하여 시편을 제조하였다. 굽힘 시편은 전체 길이가 51 mm이며 단면의 폭이 3 mm, 높이가 4 mm이다. 압축 시편의 직경과 높이는 각각 7 mm로 종횡비(aspect ratio)는 1이다.

### 2.2. 실험장치

$Cr_3C_2$  복합체의 압축 및 굽힘 크리프 실험용 실험장치는 재료 시험기(MTS Servohydraulic Tester)에 진공 분위기와와 고온 변위측정 장치를 부착하여 사용하였다. 고온 변위측정 장치에는 변위를 측정할 수 있는 LVDT (Linear Variable Displacement Transducer)와 시편과 접촉하고 있는 직경 3.2 mm의 3개의 흑연 단자가 포함되어 있다. 4점 굽힘 실험장치와 압축 실험장치는 고온에서 강도가 우수한 흑연으로 제작하였으며,  $Cr_3C_2$  복합체와의 반응을 피하기 위하여 SiC 압반을 사용하였다. Fig. 1은 압축 실험장치의 개략도이다. 4점 굽힘 실험장치는 Kim 등<sup>11)</sup>의 보고에 설명되어 있다.

압축실험에서 시편의 압축 변형률을 정확하게 측정하기 위하여 중앙의 흑연단자는 시편의 아래 면에 위치한 SiC 압반에 접촉하며, 양쪽의 흑연단자는 시편의 윗면에 위치한 SiC 압반에 접촉하도록 하였다. 한편 SiC 압반과

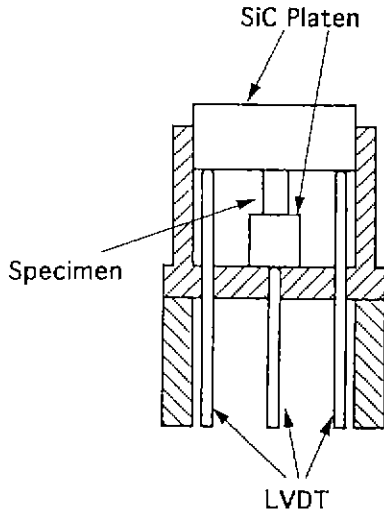


Fig. 1. Schematic drawing of a compression fixture.

시편 사이의 마찰력을 줄이기 위하여 접촉면에 탄탈륨 박판( $t=0.0127\text{ mm}$ )을 삽입하였다.

### 2.3. 실험 방법

압축 실험과 굽힘 실험은 일정한 크기의 하중을 가하는 방법으로 하였으며, 이 때 하중의 크기와 초기의 하중 속도는 재료 시험기에 부착된 microprofiler로 제어하였다. 압축 실험은  $1000^{\circ}\text{C}$ 에서  $10\sim 40\text{ MPa}$ 의 응력 범위에서 실험하였으며, 굽힘 실험은  $1000^{\circ}\text{C}$ 와  $1050^{\circ}\text{C}$ 에서  $15\sim 40\text{ MPa}$ 의 응력 범위에서 실험하였다. 소정 온도에 도달하면 시편이 열적 평형상태가 되도록 약 20분 정도 온도를 유지한 후 하중을 가하였다. 실험중 LVDT로 측정된 변위는 컴퓨터에 자동으로 입력되었다. 모든 실험은 상압의 아르곤 분위기에서 행하였다.

굽힘 실험시 중립축의 위치를 측정하기 위하여 압흔 측정법(indentation measurement)<sup>6)</sup>을 이용하였다. 굽힘 시편의 측면을  $0.25\ \mu\text{m}$ 의 다이아몬드 페이스트로 최종 연마한 후 비커스 미소 경도기로 중앙 부위에 2줄의 압흔을 표시하였다. Fig. 2는 압흔 측정법의 개략도이며, 줄 사이의 행 간격( $L_0$ )은  $2\text{ mm}$ 이며 열 간격은  $0.2\text{ mm}$ 이다. 압흔은  $1\text{ kg}$ 의 하중을  $10\text{ 초}$  동안 가하여 표시하였다. 정상 상태 크리프에 도달한 후 실험을 중단하고 압흔의 길이를 다시 측정하여 신장률(elongation)을  $(L-L_0)/L_0$ 로 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 크리프 거동

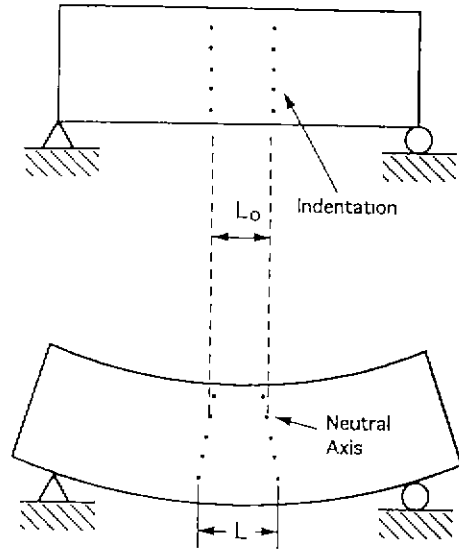


Fig. 2. Schematic drawing of neutral axis measurement by indentation technique.

Fig. 3은  $1000^{\circ}\text{C}$ 에서 초기 최대 굽힘응력이 각각  $17.3$ ,  $22.9$ ,  $32.0$  및  $42.9\text{ MPa}$ 일 때, 시간에 따른 최대 굽힘 변형률의 변화를 나타낸 크리프 곡선이다. 본 실험에 사용된 4점 굽힘 치구는 약  $0.04$ 까지의 변형률을 측정할 수 있다. 관찰한 시간동안 시편의 파괴는 발생하지 않았다.

Fig. 4에는 Fig. 3의 크리프 곡선을 최대 변형률과 최대 변형률 속도와의 관계로 나타내었다. 실선은 Fig. 3의 크리프 곡선을 다항식이나 지수함수가 포함된 형태의 함수로 보간하여 시간에 대해 미분한 곡선이다. 정상상태 크리프의 구간이 길며 비교적 분명히 구분되는 곡선은 주로 Garofalo의 식<sup>10)</sup>으로 보간하였다. Fig. 4에서 작용한 모든 하중에 대하여 1차 크리프와 정상상태 크리프의 특성을 볼 수 있으며 3차 크리프는 관찰되지 않았다.

Fig. 5는  $1050^{\circ}\text{C}$ 에서 굽힘 응력의 크기에 따른 크리프 곡선이다.  $1000^{\circ}\text{C}$ 의 결과와 비교하여 짧은 시간 안에 더 많은 크리프 변형이 발생하였다. Fig. 6은  $1050^{\circ}\text{C}$ 에서 최대 변형률 속도와 최대 변형률 사이의 관계를 나타낸 것으로 모든 실험 하중에 대하여 1차 크리프와 정상상태 크리프를 관찰할 수 있다. 정상상태의 크리프 변형률 속도는  $1000^{\circ}\text{C}$ 의 결과보다 더 높은 값을 보였다.

Fig. 7은  $1000^{\circ}\text{C}$ 에서 수행한 압축 크리프 실험의 결과로 최대 압축 변형률까지 관찰하였으며 관찰한 시간동안 시편의 파괴는 일어나지 않았다. Fig. 8에서 변형률 속도와 변형률과의 관계를 살펴 보면  $10.1\text{ MPa}$ 의 하중에서는 1차 크리프 거동만 관찰되었으며  $20.1$ ,  $30.0$  및  $39.4$

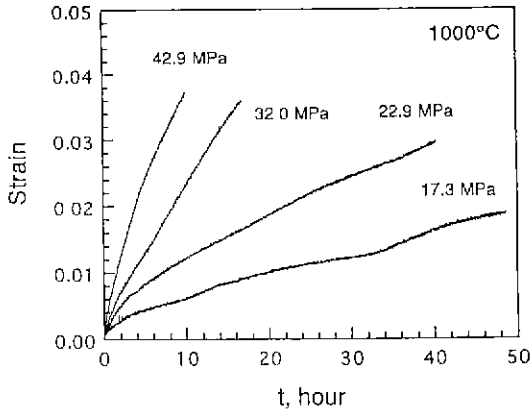


Fig. 3. Creep curves under various initial flexural stresses at 1000°C.

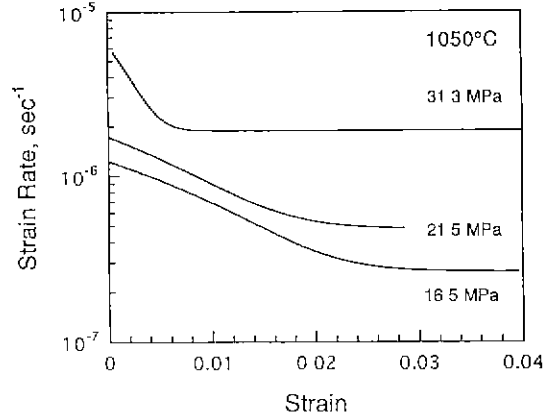


Fig. 6. Strain rate vs. strain under various initial flexural stresses at 1050°C.

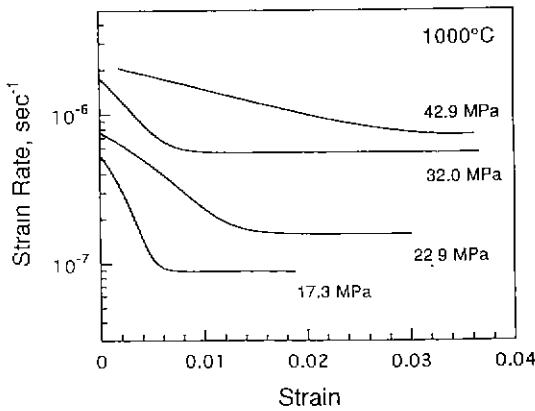


Fig. 4. Strain rate vs. strain under various initial flexural stresses at 1000°C.

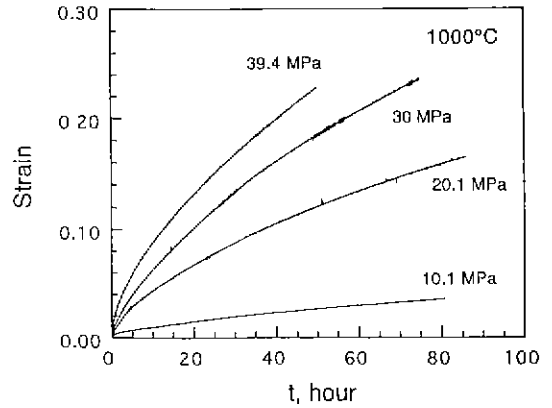


Fig. 7. Creep curves under various compressive stresses at 1000°C.

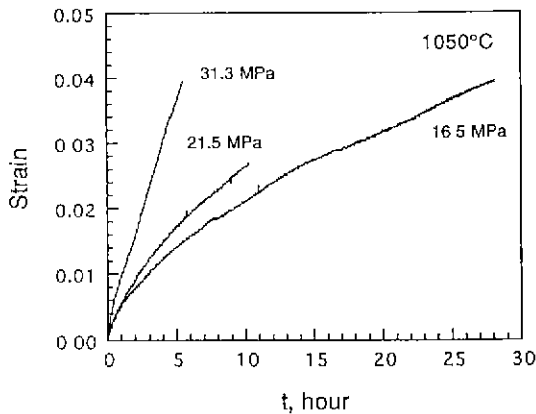


Fig. 5. Creep curves under various initial flexural stresses at 1050°C.

MPa의 하중에서는 상당히 넓은 변형률 구간에 걸쳐 1차 크리프 거동을 보이며 관찰한 변형률 구간의 끝 부분에 이르러 정상상태 크리프 거동을 보이기 시작하였다.

### 3.2. 응력 급수 및 활성화 에너지

일반적으로 고온에서 정상상태 크리프 구간의 변형률 속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{ADGb}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \quad (1)$$

여기서 D는 확산 계수이며, G는 전단 탄성계수, b는 Burger 벡터의 크기, k는 볼츠만 상수, T는 절대 온도이다. 또한, d는 결정립의 크기이며 p와 n은 결정립 크기의 역 멱급수와 작용응력의 멱급수이며 A는 무차원 상수이다. 확산계수 D는 다음과 같이 쓸 수 있다.

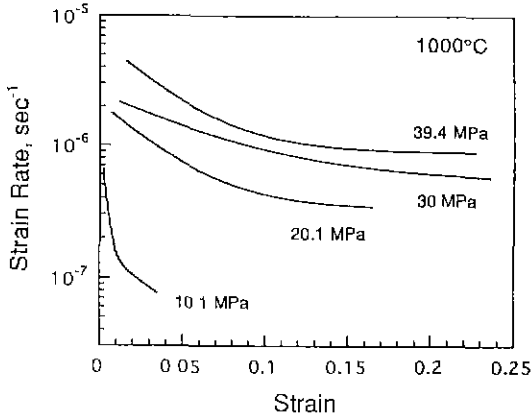


Fig. 8. Strain rate vs. strain under various compressive stresses at 1000°C.

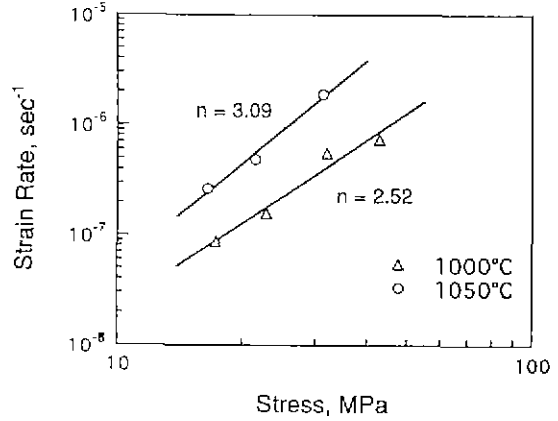


Fig. 9. Steady-state strain rate vs. stress during bending test at 1000°C and 1050°C.

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

여기서 Q는 확산 과정의 활성화 에너지이며 R은 기체 상수로 8.314 J/mol/K의 값을 갖는다. 크리프 기구는 A, p, n, Q 등의 값으로 추정할 수 있으나 A의 실험값은 p, n, Q에 크게 의존하므로 그다지 중요하지 않다<sup>13)</sup>. 응력 급수 n은 다음과 같이 주어지며 log(de/dt)와 logσ의 관계에서 직선 기울기에 해당한다.

$$n = \frac{\log \dot{\epsilon}}{\log \sigma} \quad (3)$$

활성화 에너지 Q는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = - \frac{R \partial(\log \dot{\epsilon})}{\partial(1/T)} \quad (4)$$

실제적으로 Q는 log(de/dt)와 1/T의 관계에서 직선 기울기로부터 구할 수 있으며 이 때의 Q는 온도 변화에 따른 전단 탄성계수의 변화량은 포함할 수 없으므로 겉보기 활성화 에너지(apparent activation energy)라고 한다.

Fig. 9는 굽힘 실험으로부터 얻어진 응력 급수 n을 나타내며 각각 1000°C에서 2.52, 1050°C에서 3.09이었다. Fig. 10은 1000°C의 압축 크리프 실험과 굽힘 크리프 실험으로부터 구한 n 값을 비교한 것으로 압축 실험에서 구한 n 값은 굽힘 실험에서 구한 값보다 작은 1.40였다.

Fig. 11은 1000°C와 1050°C의 굽힘 실험에서 응력의 크기에 따라 구한 겉보기 활성화 에너지를 나타낸다. 이때, 겉보기 활성화 에너지를 구하는데 사용된 응력은 1000°C와 1050°C의 굽힘 실험에서 근사한 크기를 갖는

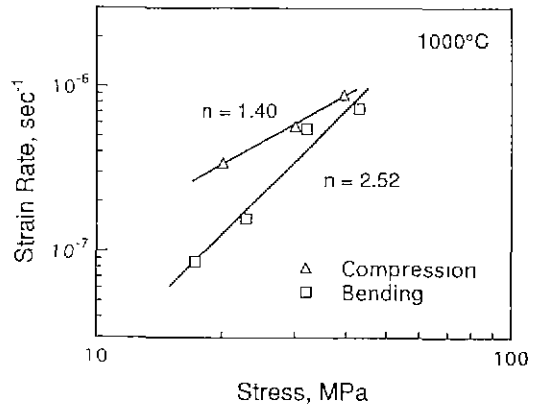


Fig. 10. Steady-state strain rate vs. stress during bending and compression test at 1000°C.

굽힘 응력들의 평균 응력값이다. 그림의 기울기로부터 구한 활성화 에너지는 313.3~340.0 kJ/mol 정도의 값을 지니며 응력의 크기가 증가함에 따라 활성화 에너지도 증가하는 경향을 보인다.

### 3.3. 압축 시편의 관찰

Fig. 12(a)는 변형전의 시편 단면의 주사 전자 현미경 사진이다. 단면은 화학적 부식<sup>14)</sup>처리를 한 다음 전자 현미경으로 관찰하였다. 검은 부분은 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>이며 흰 부분은 Ni 상이다. Ni 상이 입계에 광범위하게 존재하여 제 2 상을 이루고 있으며 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 입자들이 명확하게 관찰된다. Fig. 12(b)는 1000°C에서 39.4 MPa의 응력으로 약 50시간 동안 압축 크리프 실험을 한 뒤 시편 단면의 중앙 부위의

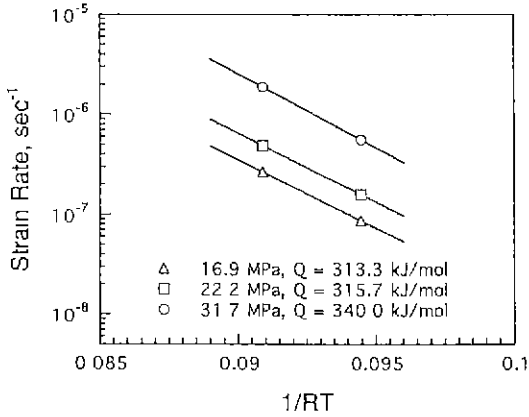


Fig. 11. Variations of steady-state strain rate with respect to reciprocal temperature.

주사 전자 현미경 사진이다. Fig. 12(a)와 비교하여 Ni 상이 입계에서 연결되어 있지 않고 분리되어 곳곳에 응집된 채로 변형된 형상을 관찰할 수 있다. 또한, 입계를 따라 생성된 균열과 기공도 관찰된다. 압축 크리프의 응력 급수는 1.40으로 확산 크리프에 가까우며 Ni 상과 Cr<sub>7</sub>C<sub>2</sub> 입자간의 확산이나 Cr<sub>7</sub>C<sub>2</sub> 입자의 확산 크리프 거동 혹은 Ni 상의 점성 유동등에 의해 크리프 변형이 발생하였다고 추측된다.

### 3.4. 굽힘 크리프의 해석

굽힘 크리프 실험시 시편의 단면에 작용하는 응력의 크기는 다음과 같이 쓸 수 있다<sup>4)</sup>.

$$\sigma_y = \sigma_0 \left( \frac{\dot{\kappa} y}{A_1} \right)^{1/n_1} \quad (5)$$

여기서  $\kappa$ 는 중립축의 곡률이며  $y$ 는 중립축으로부터의 거리를 나타낸다.

시편의 단면에 작용하는 인장응력과 압축응력을 고려한 힘과 모우멘트의 평형 방정식으로부터 다음 식들을 구할 수 있다<sup>14)</sup>.

$$\left[ R^{-1/(1+c)} k^{(1-t)/(1+t)} \left( \frac{1+t}{1+c} \right)^{1/(1+t)} \right] h^{(1+c)/(1-t)} + h = 1 \quad (6)$$

$$\frac{M}{BH^2 \sigma_0} = k^c \frac{1}{2+c} h^{2+c} + R^t k^c \frac{1}{2+t} (1-h)^{2+t} \quad (7)$$

여기서,

$$k = \frac{\kappa H}{A_1}, R = \frac{A_c}{A_t}, t = \frac{1}{n_t}, c = \frac{1}{n_c}, h = \frac{H_c}{H} \quad (8)$$

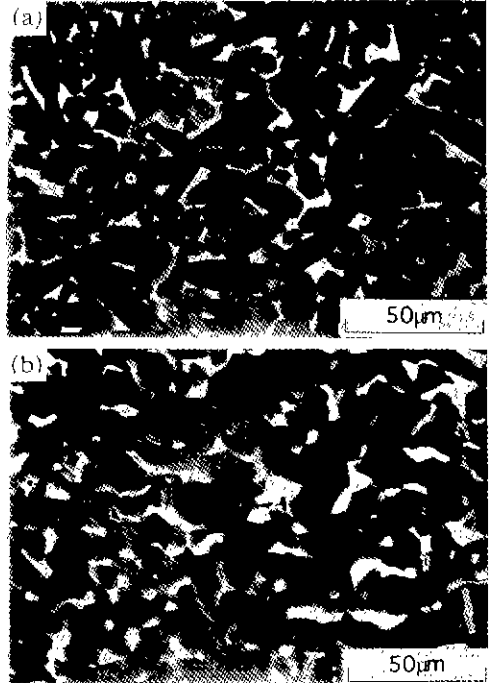


Fig. 12. Scanning electron micrographs of cross-sections of (a) original specimen and (b) a crept specimen under 39.4 MPa at 1000°C.

또한 B와 H는 각각 굽힘시편 단면의 폭과 높이를 나타낸다.

식 (6)과 (7)은 미지수  $h$ 와  $k$ 의 대수 연립 방정식으로 작용 모우멘트  $M$ 과 크리프 상수들은 주어진 계수로 취급할 수 있다. 그러나, 두 식은 비선형적으로 연결되어 해석해를 구할 수 없으므로 수치 해석적인 방법을 이용하여 중립축의 위치와 곡률 속도, 그리고 크리프 상수와 작용 모우멘트 사이의 관계를 규명할 수 있다<sup>14)</sup>.

Fig. 13은 1000°C의 굽힘 크리프 실험의 결과를 식 (6)과 (7)을 이용하여 보간한 곡선을 나타낸다. 여기서 구해진 크리프 계수들은  $A_1 = 4.0 \times 10^{-11} \text{ scc}^{-1}$ ,  $n_1 = 3.4$ ,  $A_c = 1.1 \times 10^{-9} \text{ sec}^{-1}$  및  $n_c = 1.4$ 이다. 식 (6)과 (7)로부터 해를 얻기 위한 수치해석법은 Krause<sup>14)</sup>의 알고리즘을 사용했으며 이는 Newton-Raphson 법의 연속적인 반복에 의하여 주어진 크리프 계수에 대한 중립축의 위치와 곡률 속도, 작용 모우멘트의 관계를 계산하는 방법이다. Krause<sup>14)</sup>는 Chuang<sup>1)</sup>의 알고리즘에 사용된 식들을 수치 해석에 응용하기 쉽도록 수정하였으며 굽힘 변형량의 측정 방법에 따른 오차를 피하기 위하여 변형률 속도 대신에 곡률 속도와 초기 굽힘 응력간의 관계를 고찰하였다. 본 실험에서 이용한 굽힘 변형량의 측정방법에

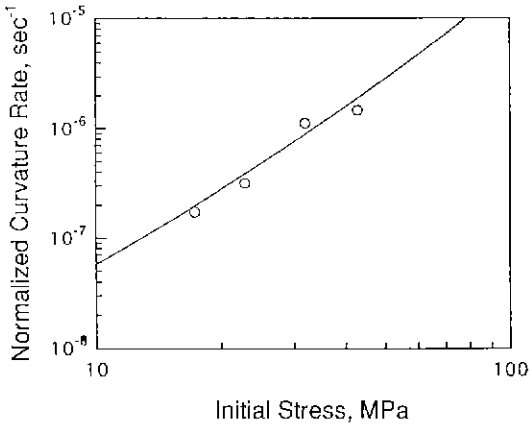


Fig. 13. Normalized curvature rate vs. initial flexural stresses during steady-state creep at 1000°C.

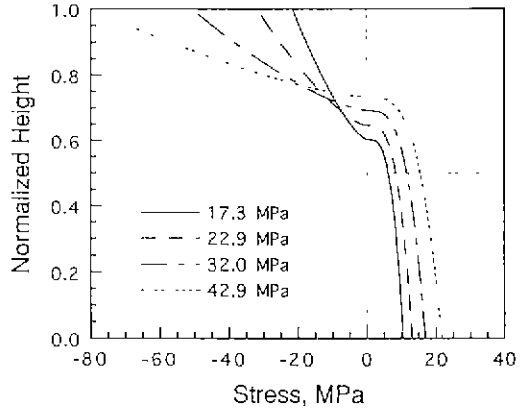


Fig. 15. Steady-state stress distribution under various initial flexural stresses at 1000°C.

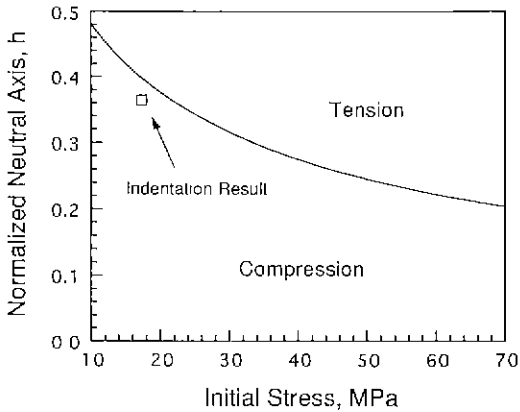


Fig. 14. Normalized neutral axis vs. initial flexural stresses during steady-state creep at 1000°C.

서는 내부 하중점 사이의 곡률이 시편 단면의 높이 방향으로 모두 일정하다고 가정하였다. Fig. 13에서는 실험 결과를 Krause<sup>11)</sup>의 방법을 따라 정규화된 곡률 속도(normalized curvature rate,  $k=(dk/dt)H$ )와 초기 굽힘 응력의 관계로 나타내었다. Fig. 13의 보간 곡선을 나타내기 위하여 사용한 크리프 계수들은 시행 오차범위로 실험 결과를 잘 표현할 수 있도록 적절한 오차 범위안에 드는 값으로 구하였다.

Fig. 14는 Fig. 13에서 사용한 크리프 계수들을 사용하여 식 (6)과 (7)로부터 구한 중립축의 위치와 초기 굽힘 응력과의 관계이다. 초기 굽힘 응력의 크기가 증가함에 따라 중립축의 위치가 압축 영역으로 이동함을 예측하고 있다. 압흔 측정법을 이용하여 17.3 MPa의 초기 굽힘

응력으로 약 48시간 동안 크리프 실험을 한 후, 압흔의 간격을 재측정하여 연신률이 0인 중립축의 위치를 구한 결과,  $h$ 가 0.364로 중립축이 압축 영역으로 이동하였음을 볼 수 있으며 수치해석으로 예측한 결과와도 비교적 잘 일치한다. 중립축의 이동 원인으로는 인장 영역에서 존재하는 미소 기공에 의한 손상등을 들 수 있다<sup>12)</sup>. 굽힘 응력이 증가함에 따라 인장 영역에서의 기공 밀도와 미소 기공의 성장 속도가 증가하여 결과적으로 인장 영역의 단면적이 감소한다. 따라서, 굽힘 응력이 증가하면 힘의 평형상태를 만족하기 위하여 인장 영역의 단면적이 증가해야 한다<sup>13)</sup>. Fig. 13에서  $n_1$ 가  $n_2$ 보다 크다는 것은 재료의 인장 크리프에 대한 저항성이 압축 크리프에 대한 저항성보다 작음을 의미한다.

Fig. 15는 수치 해석에서 구한 중립축의 곡률 속도와 크리프 계수 그리고, 식 (5)를 이용하여 계산한 시편 단면의 응력 분포이다. 초기의 선형적인 응력 분포에서 정상상태 크리프에 도달한 후 비선형적으로 응력이 재분포된다. 이동한 중립축 부근에서 높은 전단 응력의 영역이 존재하며, 인장 영역에서는 응력의 크기 변화가 그다지 크지 않으며 초기 상태에 비해 응력의 크기가 감소하는 응력 이완이 일어난다.

Fig. 16에서는 1000°C의 실험 결과와 굽힘 크리프의 해석시 구한 크리프 계수를 이용하여 예측한 인장 크리프와 압축 크리프의 변형률 속도를 비교하였다. 실험의 결과를 Norton의 멱수 법칙으로 표현하면 압축 크리프는  $A_c=5.098 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ ,  $n_c=1.4$ 이며, 굽힘 크리프는  $A_b=6.68 \times 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$ ,  $n_b=2.52$ 이다. 예측된 압축 크리프의 변형률 속도는 실험 결과와 비교하여 유사한 기울기를

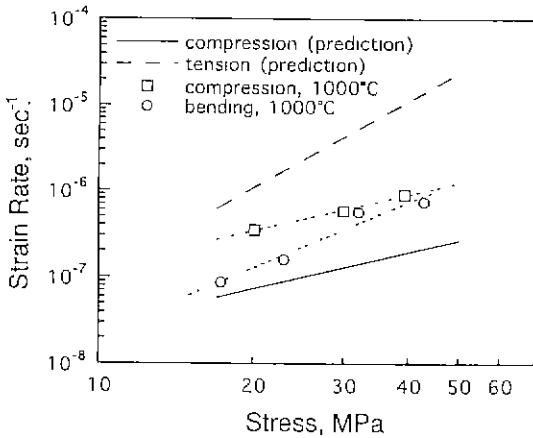


Fig. 16. Comparison of observed strain rates and calculations from numerical analysis

가지고 있으나 전체적으로 낮은 값을 예측하였다. 인장 크리프 변형률 속도는 압축 크리프 변형률 속도보다 큰 값으로 예측되었으며  $n_c$ 보다 큰  $n_t$  값에 의해 인장 크리프가 압축 크리프보다 더 큰 기울기를 보이고 있다. 예측된  $n_c$ 와  $n_t$ 의 평균값은 Fig. 9에서 구한 굽힘 크리프 실험의 응력 급수 2.52와 유사함을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 1000°C와 1050°C에서  $Cr_3C_2$  복합체에 대한 굽힘 크리프 실험과 압축 크리프 실험을 수행하여 크리프 거동을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 굽힘 크리프 실험에서 응력 급수는 1000°C에서 2.52, 1050°C에서 3.09의 값을 나타내었으며 활성화 에너지는 313.3~340 kJ/mol이었다. 한편 압축 크리프 시험에서는 1000°C에서의 응력 급수는 1.40이었다.
2. 압축 크리프 실험 후 단면을 관찰한 결과 주로 입계의 Ni 상이 변형되었음을 알 수 있었다.
3. 수치 해석적인 방법을 이용하여 굽힘 크리프 거동에 대한 역학적인 해석을 수행한 결과, 정상상태일 때 시편 내부에 존재하는 비선형적인 응력 분포와 압축 영역으로 중립축이 이동함을 예측할 수 있었다.
4. 굽힘 크리프 실험에서 구한 인장과 압축 크리프 계수로부터 변형률 속도를 예측하여 실험결과와 비교하여 본 결과 압축 크리프 변형률 속도는 실험치의 유사한 기울기를 가지나 전반적으로 낮은 값을 보였고, 인장 크리프 변형률 속도는 압축 변형률 속도보다 더 큰 값을

예측하였다.

#### REFERENCES

1. 이동녕, 김정수, 이성근 공역, 변형 및 파괴역학, 최증당 (1992).
2. M.K Ferber, M.G. Jenkins, and V.J. Tennerly, "Comparison of Tension, Compression, and Flexural Creep for Alumina and Silicon Nitride Ceramics," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **11**(7-8), 1028-45 (1990).
3. K.D. Debschutz, B. Caspers, G.A. Schneider, and G. Petzow, "Critical Evaluation of the Compression Creep Test," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**(10), 2468-74 (1993).
4. T.J. Chuang, "Estimation of power-law creep parameters from bend test data," *J. Mater. Sci.*, **21**, 165-75 (1986).
5. G.W. Hollenberg, G.R. Terwilliger, and R.S. Gordon, "Calculation of Stresses and Strains in Four-Point Bending Creep Tests," *ibid.*, **54**, 196-99 (1971).
6. C.F. Chen, and T.J. Chuang, "Improved Analysis for Flexural Creep with Application to Sialon Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(8), 2366-73 (1990).
7. R.F. Krause, and T.J. Chuang, "A Test Method for Tensile Creep of Structural Ceramics Using Flexural Beams," *Ceramic Today-Tomorrow's Ceramics*. Edited by P. Vincenzini. Elsevier Science Publishers B.V., 1865-74 (1991).
8. R.B. Thayer, and J.M. Yang, "Analysis of flexural creep for an SiC fiber-reinforced  $Si_3N_4$  Composite," *J. Mater. Sci.*, **29**, 693-99 (1994).
9. 정은, 김홍식, " $Cr_3C_2$ 계 초경합금 제조 및 기계적, 화학적 성질 향상에 관한 연구," *대한금속학회지*, **24**(9), 949-58 (1986).
10. 한동빈, 홍기곤, 박병학, "Fe-Scale과의 반응에 의한  $Cr_3C_2$ 계 복합체의 산화손상," *한국요업학회지*, **31**(7), 761-71 (1994).
11. 김지환, 권영삼, 김기태, "알루미나의 고온 굽힘크리프 및 크리프 파괴," *한국요업학회지*, **31**(5), 543-51 (1994).
12. G.E. Dieter, "Mechanical Metallurgy," *McGraw-Hill*, 440 (1988).
13. W.R. Cannon, and T.G. Langdon, "Review: Creep of Ceramics, Part I Mechanical Characteristics," *J. Mater. Sci.*, **18**, 1-50 (1983).
14. R.F. Krause, Jr., "Observed and Theoretical Creep Rates for an Alumina Ceramic in Flexure," *J. Am. Ceram. Soc.*, **75**(8), 1307-310 (1992).
15. C.F. Chen, S.M. Wiederhorn, and T.J. Chuang, "Cavitation Damage During Flexural Creep of SiAlON-YAG Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**(7), 1658-62 (1991).