

## 티타늄합금(Ti-6Al-4V)의 0.3Tm에서 크리프 특성

윤종호\* · 황경충 · 우현구

경일대학교 기계자동차학부

### Creep Characteristics of Titanium Alloy(Ti-6Al-4V) at 0.3Tm

Jongho Yoon\* · Kyungchoong Hwang · Hyun-Gu Woo

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University, Gyeongbuk 712-701, Korea  
(Received 23 November 2004 / Accepted 28 January 2005)

**Abstract** : Titanium alloy has widely been used as material for glasses frame parts because it has high specific strength. It is also light and harmless to human body. However, we have little design data about the mechanical properties such as the creep behaviors of the alloy. Therefore, in this study, creep tests under four constant stress conditions have been conducted with four different temperature conditions. A series of creep tests had been performed to get the basic design data and life prediction of titanium products and we have gotten the following results. First, the stress exponents decrease as the test temperatures increased. Secondly, the creep activation energy gradually decrease as the stresses became bigger. Thirdly, the constant of Larson-Miller parameter on this alloy was estimated as about 2.5. Finally, the fractographs at the creep rupture showed the ductile fracture due to the intergranular rupture and some dimples.

**Key words** : Creep rate(크리프 속도), Rupture strain(파단 변형율), Stress dependence (응력의존성), Activation energy(활성화에너지), Life prediction(수명예측), Creep rupture(크리프 파단), SEM(주사 전자현미경), Fractography(파단면 관찰)

### 1. 서론

티타늄(Ti-6Al-4V) 합금은 경량이면서도 비강도가 일반 철강의 2배, 알루미늄에 비해서는 6배나 큰 장점을 갖고, 1,675°C의 높은 용융온도를 갖기 때문에 고온의 온도 범위까지도 우수한 기계적 특성을 나타낸다. 근래들어서는 그 용도가 항공우주, 군수용, 원자력, 열교환기, 자동차, 조선, 인공관절, 치아(임플란트), 가전제품, 스포츠용품(골프채) 및 일반 산업용(교량)에 이르기까지 그 응용분야가 매우 넓다. 특히 티타늄 합금은 인체에 무해하여 안경테산

업 및 BT산업에 활발한 연구와 제품들이 확산되고 있다. 자동차 10년 이상 타기 운동과 폐자원 재활용 운동이 활발하게 추진되고 있는 점과 지하자원의 부족 및 지구 온난화를 막을 수 있는 소재로 각광을 받고 있다. 또한, 티타늄합금은 내식성이 우수하여 산(acid)이나 바닷물에 잘 견딘다. 따라서 해안가에 있는 자동차나 교량 등에 적용하는 것은 효율적인 응용이 될 것이다.

티타늄 합금의 미세 조직형태는 등축정 조직(equiaxed structure), 층상 조직(lamellar structure), 및 이들이 일정한 비율로 섞여있는 혼합 조직(bimodal structure) 등으로 구분되고 있으며, 등축정조직은 강도, 연신율, 피로균열 생성에 대한 저항성 등의 특징

\*To whom correspondence should be addressed.  
jhyoon@kiu.ac.kr

이 우수한 반면, 층상조직은 크리프 저항성등이 우수한 것으로 알려져 있다.

티타늄 합금의 크리프 특성에 관한 연구는 국내에서는 황<sup>1)</sup> 등이 알파티타늄 합금의 용체화 처리후의 정적인 크리프 거동을 연구한 바 있다. Cuddy<sup>2)</sup>는 크리프 중에 유발되는 내부응력 및 구조에 대한 연구를 수행하였다. Bradley<sup>3)</sup>는 실온에서 순수한 알루미늄의 피로 크리프특성에 대한 연구 등이 발표된 바 있다.

본 연구에서는 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)을 대상으로 응력과 0.3 Tm 부근에서 온도를 변화시키면서 크리프시험을 통하여 각종 실험데이터를 구하는 한편 크리프 변형기구를 규명하고 파단의 균열형태를 관찰하여 파괴기구를 분석함으로써 본 재료의 안정된 사용범위를 예측하고자한다. 크리프 시험의 조건으로는 4가지의 온도조건과 4단계의 하중을 가하여 티타늄 합금에 대한 크리프시험을 하여 관련산업의 잔여수명을 예측할 수 있고 파괴양상을 파악하여 향후 본 연구를 토대로 신소재 개발에 필요한 기초 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 크리프 이론

허용 응력을 규정하는 크리프강도는 크리프시험을 통하여 얻어지고, 이들을 이용한 기계부품들의 수명예측이 가능하다. 크리프시험에서는 시험편에 일정한 하중을 유지시킨 후 파단에 소요되는 파단 시간과 파단 변형율을 계측한다. 일정한 하중을 가하고 시험하는 경우는 시험도중 시험편의 단면적 감소에 따라 응력이 계속 증가하게 된다. 크리프 변형속도는 응력에 크게 의존하므로 일정한 응력하에서 시간에 따른 변형을 측정하여 온도와 응력의 불변조건 하에서 변형율( $\epsilon$ )과 정상 크리프 변형속도( $\dot{\epsilon}_s$ )를 계측할 수 있다. 정상적인 크리프곡선에서 변형초기에는 시간변화에 대한 크리프속도가 낮으나 어느 정도 시간이 경과된 후에는 변형속도가 일정해진다. 그 후 계속하여 변형이 진행되면 변형속도가 점진적으로 빨라지는 구간에 도달되며, 결국은 파단된다.<sup>4,6)</sup>

### 2.1 크리프 변형율속도의 응력의존성

변형율 속도에 대해 Cuddy가 제안한 식<sup>2,6)</sup>은

$$\dot{\epsilon}_s = K\sigma^n \quad (1)$$

여기서,  $K$ : 구조상수,  $\sigma$ : 응력(MPa),  
 $n$ : 응력지수

식 (1)의 양변에 로그를 취하면 다음 식이 얻어진다.

$$\log \dot{\epsilon}_s = \log K + n \log \sigma \quad (2)$$

### 2.2 크리프 활성화에너지와 변형율 속도의 관계

크리프변형은 열적 활성화과정에 의해 진행되므로 크리프 변형속도는 다음의 Arrhenius 방정식으로 표시할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_s = K \cdot \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (3)$$

여기서,  $Q_c$ : 크리프 활성화에너지(kcal/mol),  
 $K$ : 응력, 조직, 온도에 따른 구조상수,  
 $R$ : 기체상수(8.314 kcal/mol)  
 $T$ : 절대온도(K)

식 (3)의 양변에 로그를 취하면 다음과 같다.

$$\log \dot{\epsilon}_s = \log K - \frac{Q_c}{2.303RT} \quad (4)$$

### 2.3 파단수명의 예측

다양한 합금들에 대하여 폭넓게 적용되는 Larson-Miller<sup>7)</sup>변수를 활용할 수 있다. 이 변수  $P$ 는 다음 식으로 계산된다.

$$P = T (\log t_r + C) \quad (5)$$

여기서,  $T$ : 켈빈 온도(K),  $t_r$ : 파단시간(hr),  $C$ : 상수

## 3. 실험 및 연구방법

### 3.1 시험편

본 크리프시험에 사용된 티타늄 합금은 Ti가 주성분을 이루고, Al과 V 및 미량의 Fe, O를 함유한 합

금으로 화학적 성분은 Table 1과 같다. 크리프시험편 제작은 ASTM 규격에 의하여 두께 1mm의 판상으로 인장방향과 압연방향이 평행하도록 한 표점거리는 9.6mm인 인장 크리프 시험편으로 와이어 방전 가공기를 사용하여 가공하였다. 시험편의 압연방향에 있을 수 있는 가공 영향을 제거시키고, 강도와 경도를 높이기 위해 진공로에서 균질화 처리로 900°C에서 1시간동안 열처리후 노냉(furnace cooling)을 실시하였다. 시험편의 치수는 Fig. 1에 나타내었으며, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

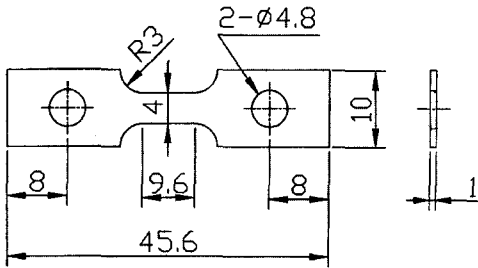


Fig. 1 Dimension of tensile creep specimen (unit:mm)

Table 1 Chemical compositions of Ti Alloy

|      |      |     |     |       |      |      |      |      |     |
|------|------|-----|-----|-------|------|------|------|------|-----|
| Al   | V    | Fe  | O   | H     | N    | C    | Cu   | Sn   | Ti  |
| 6.22 | 4.01 | .15 | .14 | .0072 | .004 | .004 | .003 | .002 | BAL |

Table 2 Mechanical properties of specimen

|                           |                                 |                    |
|---------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Yield-point Strength(MPa) | Ultimate Tensile Strength (MPa) | Percent Elongation |
| 138.3                     | 148.7                           | 12                 |

### 3.2 크리프시험 장치

실험장치는 Andrade와 F. Garfalo<sup>8,9)</sup> 등이 고안한 레버형의 크리프 실험기를 활용하였다. 시험기의 가열로는 타원형의 적외선 노이며, 시험편은 가열로의 석영관 내에 장치할 수 있도록 되어있다. 실험할 때 노내에 일정한 시험온도가 유지되도록 시험편의 온도변화가 ±1°C 이하로 조절되도록 하는 제어장치를 노에 연결한 실험기기 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 그리고 시험편의 크리프 변형량은 LVDT(linear variable differential transformer)를 활용하여 ±1 μm까지 측정 가능하도록 하였다.

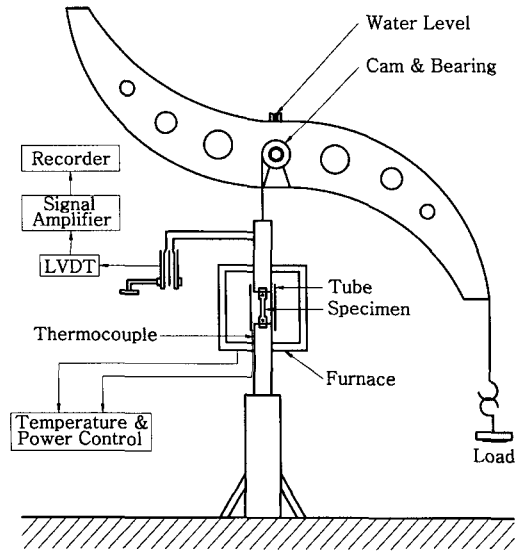


Fig. 2 Schematic diagram of static creep tester with constant load

Table 3 Experimental static creep data of Ti alloy

| Temp. (°C) | Stress (MPa) | Creep rate, (hr <sup>-1</sup> ) | Rupture time, (hr) |
|------------|--------------|---------------------------------|--------------------|
| 500        | 70           | 7.825×10 <sup>-7</sup>          | over 168           |
|            | 80           | 1.082×10 <sup>-6</sup>          | "                  |
|            | 90           | 1.465×10 <sup>-6</sup>          | "                  |
|            | 100          | 2.426×10 <sup>-6</sup>          | "                  |
| 520        | 70           | 1.235×10 <sup>-6</sup>          | "                  |
|            | 80           | 2.113×10 <sup>-6</sup>          | 163                |
|            | 90           | 3.138×10 <sup>-6</sup>          | 146                |
|            | 100          | 6.250×10 <sup>-6</sup>          | 119                |
| 540        | 70           | 1.991×10 <sup>-6</sup>          | 165                |
|            | 80           | 3.426×10 <sup>-6</sup>          | 148                |
|            | 90           | 5.617×10 <sup>-6</sup>          | 118                |
|            | 100          | 1.232×10 <sup>-5</sup>          | 93                 |
| 560        | 70           | 2.697×10 <sup>-5</sup>          | 144                |
|            | 80           | 5.830×10 <sup>-5</sup>          | 108                |
|            | 90           | 1.054×10 <sup>-4</sup>          | 85                 |
|            | 100          | 2.615×10 <sup>-4</sup>          | 44                 |

### 3.3 시험방법

크리프시험에서 시험편의 양단은 볼트로 고정시키고, 열전대를 시험편 중앙에 위치시켰다.

크리프시험 설정조건은 시험편에 미치는 영향을 알아보기 위하여 500°C로부터 20°C의 온도간격으로 상승시켜 520, 540 및 560°C의 4가지 온도조건으로

로 설정하였으며, 응력은 70, 80, 90 및 100 MPa의 4가지 조건을 설정하여 전체적으로 16가지의 조건 하에서 시험을 실시하였다. 시험조건은 Table 3에 나타내었다. 시험후 주사 전자현미경(SEM)으로 파단면을 관찰하여 파괴의 양상을 분석한다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

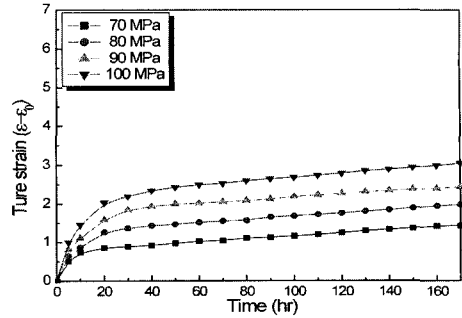
##### 4.1 크리프 곡선

본 연구에서 크리프시험 조건인 온도범위 500~560°C의 구간과 응력범위 70~100 MPa의 구간에서 온도와 하중을 변화시키며, 시험한 결과 Fig. 3의 크리프곡선을 얻었다. 시험에서 얻어진 시간-변위 값으로부터 시간변화에 대한 진 변형률(true strain)을 계산하여 그린 것이다. Fig. 3의 크리프 변형률 곡선은 Table 3을 기초로 하여 그린 것이다. (a)는 500°C에서의 크리프 곡선으로 초기 단계가 짧게 나타났으며, 정상 크리프 구간이 계속되는 현상을 보여준다. 70~100 MPa에서는 시험편의 파단이 일어나지 않았고, 1주일(168시간) 이상 계속해서 늘어나는 양상을 보여주고 있다. (b)는 온도 520°C에서 크리프 시험 응력 70 MPa에서는 1주일 이상 계속 늘어났다. 80~100 MPa 조건 하에서 각각 시험편의 파단은 각각 163, 146 및 119시간만에 나타났다. (c)는 온도 540°C에서는 전 구간에서 I 단계, II단계 및 III단계가 구분가능한 일반적인 크리프 곡선형태를 보여주었다. 크리프저항성과 파단 변형은 70~100 MPa 조건 하에서 시험편의 파단에 소요된 시간은 165, 148, 118 및 93시간만에 나타났다.

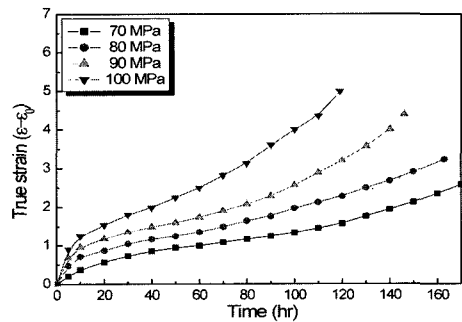
(d)는 온도 560°C에서는 하중의 증가에 따라 크리프저항성이 감소하였고 파단 변형률도 감소하였으며, 70~100 MPa에서 각 시험편의 파단시간은 144, 108, 85 및 44시간만에 나타났다.

##### 4.2 크리프변형과 응력의존성

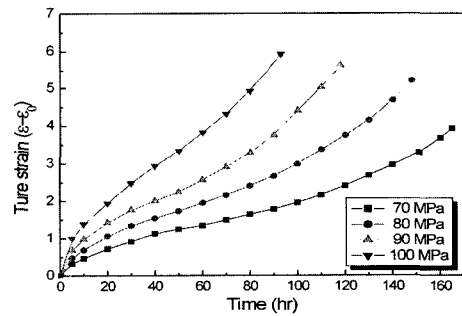
식 (2)에 따라  $\dot{\epsilon}_s$ 와  $\sigma$ 의 관계를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 4이다.  $\dot{\epsilon}_s$ 와  $\sigma$ 의 관계는 선형적으로 나타났으며, 이 직선의 기울기가 응력지수값( $n$ )이 된다. 크리프시험 온도가 500°C에서 560°C로 20°C씩 증가함에 따라 응력지수 값은 각각 5.25, 5.09, 4.92



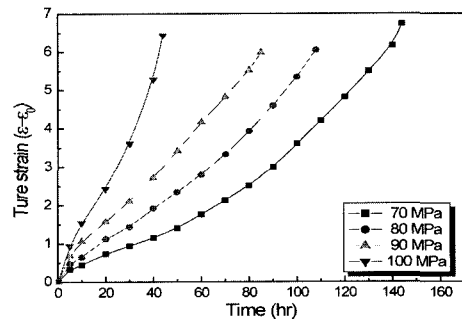
(a) 500°C



(b) 520°C



(c) 540°C



(d) 560°C

Fig. 3 Creep true strain curves according to temperature conditions

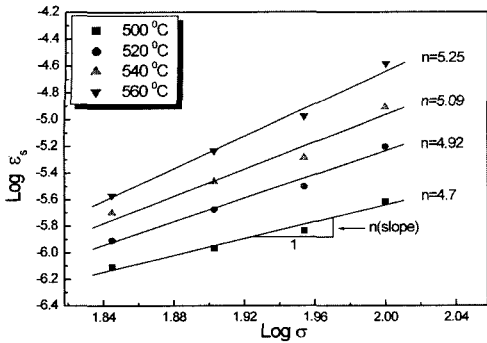


Fig. 4 Dependence of creep rate on applied stresses

및 4.7의 순서로 점점 작아지는 경향을 보여주었다. 이와 같은 경향은 온도가 높아질수록 전위밀도가 감소하고 이에 따라 응력 감소효과가 높아지기 때문이다.

### 4.3 크리프변형에 대한 활성화 에너지

식 (4)에서 크리프 활성화에너지  $Q_c$  값은  $\ln \dot{\epsilon}_s$  과  $1/T$  와의 기울기  $[-Q_c/(2.303R)]$ 로부터 구할 수 있으므로 Fig. 5에서 직선의 기울기를 계산하면  $Q_c$  를 계산할 수 있다. 응력 70~100 MPa에 대해 각각의 활성화에너지를 계산하면 86.09, 82.08, 81.29 및 79.66 kcal/mol값을 얻었다. 활성화에너지는 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이와 같은 현상은 Bradley<sup>3)</sup> 등이 주장한 크리프 활성화에너지와 유효응력 관계에서도 확인할 수 있다.

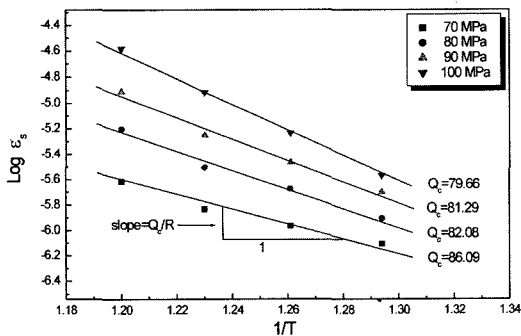


Fig. 5 Dependence of creep rate on temperature

### 4.4 크리프 잔존수명 예측

크리프시험 데이터 Table 3에서 재료의 파괴시간

을 비교해보면 외부응력 증가에 따라 파괴수명은 급격히 감소하고 있다. 같은 응력에서 온도증가에 따라 파단수명은 급격히 감소한다. 어느 온도영역에서의 파단수명을 알고 있으면 다른 온도영역에서의 파단수명을 예측할 수 있다.

Table 3의 데이터를 이용하여 각각의 응력별로  $\log(t_r)$  과 절대온도의 역수 ( $1/T$ ) 간의 상관관계 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 응력별로 직선식의 계산을 위해 최소 자승오차 회귀직선식을 구하면 각 응력별 기울기가  $P$  의 값이 되고, 상수  $C$  는 2.5 정도로 계산되었다. Larson-Miller 변수  $P$  와 응력간의 관계곡선은 Fig. 7에서 보는 것과 같다.

$$P = T (\log t_r + 2.5) \quad (6)$$

이 식으로부터 온도와 응력 조건들이 주어지면 티타늄 합금의 수명 ( $t_r$ )이 계산될 수 있다.

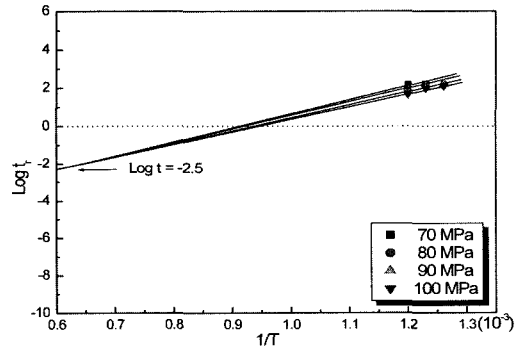


Fig. 6 Determination of C in Larson-Miller parameters from relation plots between  $\log(t_r)$  and  $(1/T)$  according to the stress

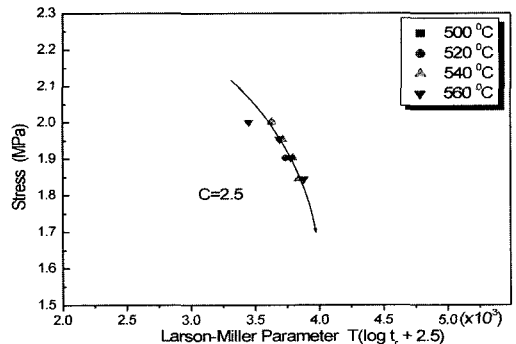


Fig. 7 Correlation of Larson-Miller parameter for Ti alloy by the experimental stress-rupture curves

#### 4.5 주사 전자현미경 고찰

티타늄 합금의 크리프시험 후 파단면의 미세 조 직 관찰은 주사 전자현미경으로 관찰하였으며, 16가 지의 실험조건들 중에서 대표적인 파단면의 사진들 을 분석해 본 결과 입계파단에 의한 연성 파괴현상 을 Fig. 8에서 확인할 수 있다.

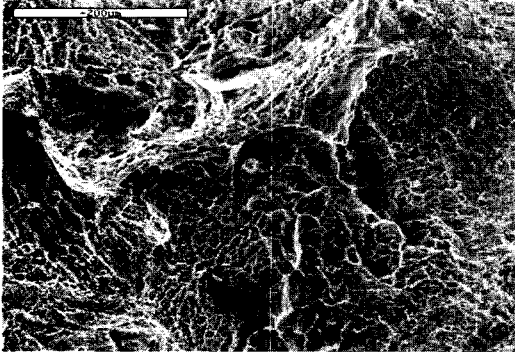


Fig. 8 SEM micrograph of static creep rupture after creep test under the various stresses

### 5. 결 론

본 연구에서는 가볍고, 비강도가 높으며, 바닷물 등의 부식에 강한 자동차부품 들의 개발을 위해 자동차 부품들에 활용가능성이 매우 높은 티타늄합금 (Ti-6Al-4V)에 대한 정적인 크리프시험연구를 하였고, 그 파단면들의 조직을 검토한 결과 다음과 같은 결과들을 얻었다.

- 1) 크리프 시험온도가 증가함에 따라 크리프 변형에 따른 응력지수는 5.25, 5.09, 4.92 및 4.7로 점차 적으로 감소하는 경향이 나타났다.
- 2) 크리프 변형의 활성화에너지는 가해진 응력의 증가에 따라서 86.09, 82.08, 81.29 및 79.66 kcal/mol 로 점차적으로 감소하는 경향을 보였다.
- 3) 티타늄 합금강은 본 연구의 조건들에서 Larson-Miller 변수의 계산에서 수명예측 상수 C값은 약 2.5정도로 확인되었다.
- 4) 파단면은 입계파단에 의한 연성파괴 현상이 주

도적으로 나타났으며, 덩풀현상도 일부분 나타났 다.

### References

- 1) K. C. Hwang and J. H. Yoon, "Creep Behaviour of Solution Treated Alpha Titanium Alloy for Automotive Parts," Transactions of KSAE, Vol.13, No.1, pp.153-158, 2005.
- 2) L. J. Cuddy, "Internal Stresses and Structures Developed During Creep," Met. Trans., Vol.1, pp.395-401, 1970.
- 3) W. L. Bradley, S. W. Nam and D. K. Matlock, "Fatigue Perturbed Creep of Pure Aluminum at Ambient Temperatures," Met. Trans., Vol.7A, pp.425-430, 1976.
- 4) J. H. Dorn, The Mechanical Behaviour of Materials at Elevated Temperature, McGraw-Hill, New York, pp.432-443, 1961.
- 5) E. N. da C. Andrade, "On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena," Proc. Roy. Soc., Series A, London, UK, Vol.84, pp.1-12, 1910.
- 6) F. Garofalo, Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals, The Macmillian Company, New York, p.258, 1965.
- 7) F. R. Larson, and J. Miller, "A Time- Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses," Transaction of the ASME, Vol.74, pp.765-775, 1952.
- 8) E. N. da C. Andrade, "On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena," Proc. Roy. Soc., Series A, London, UK, Vol.84, pp.1-12, 1910.
- 9) F. Garofalo, O. Richmond and W. F. Domis, "Design of Apparatus for Constant Stress or Constant Load Creep Tests," Trans. of ASME, Series D, J. of Basic Engineering, Vol.84, pp.287-293, June 1962.