

Monkman-Grant법에 의한 순수 Ti의 크리프 수명예측

원보엽[†] · 정순억^{*}

Creep Life Prediction of Pure Ti by Monkman-Grant Method

Bo-Youp Won and Soon-Uk Jeong

Key Words: Monkman-Grant Relationship(M-G 관계), Modified Monkman-Grant Relationship(수정 M-G관계), Titan(티탄), Creep Curve(크리프 곡선), Creep Rupture(크리프 파단), Minimum Creep Rate(최소 크리프속도)

Abstract

Creep tests for Titan were carried out using constant-load at 600℃, 650℃ and 700℃. Material constants necessary to predict creep life were acquired from the experimental creep data. And the applicability of Monkman-Grant(M-G) and modified M-G relationships was discussed. It was discovered the log-log plot of M-G relationships between the rupture time(t_r) and the minimum creep rate($\dot{\epsilon}_m$) was conditional on test temperatures. The slope of m was 2.75 at 600℃ and m was 1.92 at 700℃. However; the log-log plot of modified M-G relationships between $t_r/\dot{\epsilon}_r$ and $\dot{\epsilon}_m$ was independent on stresses and temperatures. That is the slope of m' was almost 3.90 in all the data. Thus, change M-G relationships to creep life prediction could be utilized more reasonably than that of M-G relationships for type Titan. It was divided that the constant slopes never theless of temperatures of practical stresses in the modified relationship were due to an intergranular break grown by wedge-type cavities.

1. 서론

본 연구에서는 순수 티탄의 고온크리프 특성을 알아보려고 한다. 티탄의 기계적 특성을 살펴보면 은백색의 금속으로, 순수한 것은 전성(展性), 연성(延性)이 있고, 가열에 의해서 단련할 수 있으며, 내부식성(耐腐蝕性)이 있기 때문에 공업상 중요한

금속이다. 티탄은 상온에서 조밀육방정의 결정구조이며, 882℃에서는 체심입방정으로 변하며, 녹는점은 1675℃이며 끓는점은 3260℃, 비중은 4.50(20℃), 선팽창계수는 $8.5 \times 10^{-6}/\text{℃}$ 이다. 강도는 탄소강과 거의 같고, 자중(自重)에 대한 강도비는 철의 약 2배, 알루미늄의 약 6배이다. 또, 열전도율, 열팽창율이 작고, 400℃ 이하에서는 강도의 변화가 작다. 공기 중에서는 안정하나, 산소 속에서 강열하면 산화티탄이 된다. 할로젠과 가열하면 반응하고, 잘 녹지 않는다. 바닷물 속에서는 백금에 이어서 내식성(耐蝕性)이 강하며, 많은 금속과 합금을 만든다.

[†] 경상대학교 대학원 기관공학과

^{*} 회원, 경상대학교 기계항공공학부

E-mail : sujeong@gaechuk.gsnu.ac.kr

TEL : (055)640-3126 FAX : (055)640-3128

여러 설계 변수중 크리프 성질이 중요하게 고려된다. 고온 플랜트의 설계시 장시간 크리프 곡선 데이터들이 필요하게 되지만 크리프 시험이 수십만 시간 이상이 되는 경우는 크리프 곡선을 직접 실험에서 구하는 것이 불가능한 경우가 많고 경제적이므로 비교적 단시간의 파단 실험자료로부터 크리프 강도를 설계목적에 충분할 정도로 정확히 유추해 낼 수 있는 방법이 사용된다. 가장 많이 사용 되는 방법중의 하나는 크리프 파단시간 (t_r)과 최소 크리프 속도 ($\dot{\epsilon}_m$ 또는 정상상태 크리프 속도) 실험 데이터를 Monkman-Grant 경험 관계식이 있다.

$$\log t_r + m \log \dot{\epsilon}_m = C \text{ -----(1)}$$

M-G 관계식(1)은 최소크리프 속도 $\dot{\epsilon}_m$ 와 파단 시간, t_r 과의 관계를 log-log 대수좌표로 나타내면 선형관계가 있으며, t_r 은 $\dot{\epsilon}_m$ 에 반비례한다. 그리고 상수 m, C 만 알면 단시간 파단시간으로부터 파단 시간을 장시간에 외삽하여 얻을 수 있다. 실제 M-G 관계식은 여러 금속재료에 잘 일치되는 것으로 알려져 왔다.

본 연구에서는 티탄의 크리프 시험을 수행하여 얻은 파단시간과 최소 크리프속도 데이터들 이용하여 M-G 관계식과 수정된 M-G 관계식으로 크리프 수명을 예측시 그 적용성을 조사하고자 하였다. 이를 위하여 수명예측에 필요한 상수 m, C 를 각각 얻고, 크리프속도에 대한 재료의 조성, 온도, 응력의 의존성과 크리프 변형 과정에서의 기공형성과 성장에 영향을 미치는 크리프 파손기구를 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편의 화학성분 및 규격

본 실험에 사용된 시험편 재료의 화학성분은 Table 1과 같고 시험에 사용된 시험편은 한국공업 Table 1 Chemical composition of Titan material.

Comp	Ti	Fe	O	N	C
Wt(%)	99.80	0.05	0.10	0.004	0.01

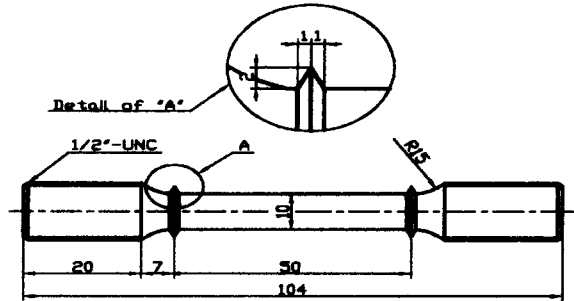


Fig. 1 Creep test specimen.

규격에 명시된 표준시험편으로 사용했으며, 시험편의 치수와 형태는 Fig. 1에 도시하였다.

2.2 실험조건

시험편을 가열(상온)하는 로는 온도 조절장치를 구비한 것으로 열전대의 접점은 시험편의 표면과 열적으로 잘 접촉하고 노벽으로 부딪히의 방사열을 피할 수 있도록 차폐하였으며 로내의 부분은 절연되도록 하였다.

또한, 표점거리가 50mm를 초과하는 시험편의 온도는 표점거리의 양 끝부와 중앙부 3곳에 측정하며 그 평균치를 취한 값으로 하고 표점 거리가 50mm 이하인 경우에는 중앙 열전대를 생략하여도 좋다는 KS B 0814 규정에 따라 본 실험에서도 양 끝부에 열전대를 설치 평균값으로 하였으며, 시험관에 직접 센서를 부착하여 온도를 일정간격 체크하였으며 그 결과 본 실험에서는 $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 편차가 발생하였다.

본 시험을 위해 실험시작 10시간 이상 로를 가열하여 열평형을 유지하였으며 시험편의 스트레인을 측정하는 마이크로미터는 온도의 영향을 받지 않으며 연신을 0.01mm의 변화를 판독 할 수 있는 것으로 표점거리 편차는 $\pm 1\%$ 이내로 하였다.

최소크리프 속도는 정상상태 크리프 영역에서의 시간변화에 따른 변형량을 측정후 식(2)를 이용하여 계산하여 얻었다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d[(l-l_0)/l_0]}{dt} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl}{dt} \text{ -----(2)}$$

여기서, l_0 는 초기 표점거리이고, 크리프 파단면은 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

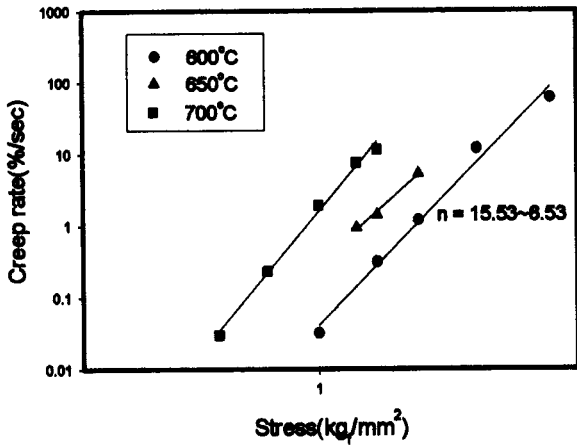


Fig. 2 Relation between Stress(kg/mm²) and Creep rate(%/sec)

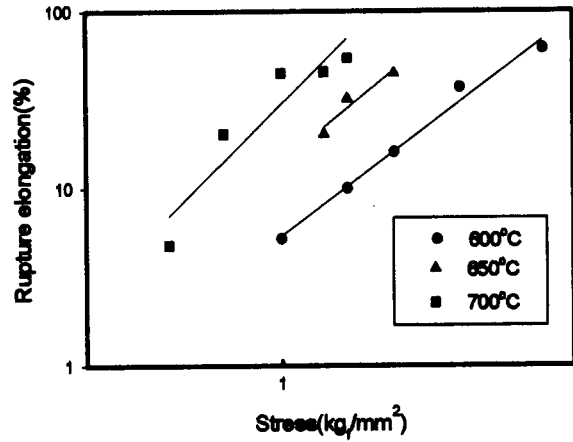


Fig. 4 Rupture time vs.applied stress at each temperature and phosphorus content.

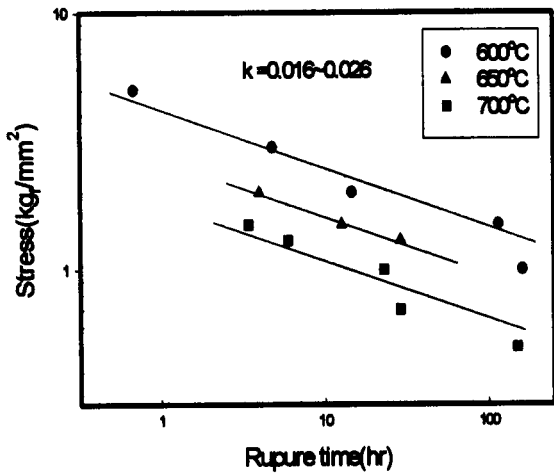


Fig. 3 Applied stress vs. time to rupture at each temperature and phosphorus content.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 크리프 시험 데이터 분석

본 실험에서 사용한 타탄에 대하여 크리프 수명 예측식으로 사용하고자 하는 M-G 기본식은 $\dot{\epsilon}_{min}^m \cdot t_r = C$ 이다. 이 때 스트레인(ϵ^*)은 $\epsilon^* = \epsilon_s - \epsilon_0 = t_r \cdot \dot{\epsilon}_{min}$ 로 된는데 이 때의 상수는 $m=1$ 이다. 이에 비해 수정된 관계식은 식(3)과 같이 크리프 속도와

$$\log\left(\frac{t_r}{\epsilon_r}\right) + m' \log \dot{\epsilon}_m = C \quad (3)$$

연신율(ϵ_r)을 포함하고 있는 식이다. 그리고, 식(4)는 최소크리프 속도는 크리프 시험 온도와 응력에 의존하는 식이다.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}(T, \sigma) \quad (4)$$

power-law에 의해 크리프속도에 의한 응력 의존성은 식(5)로 표시할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \quad (5)$$

$$n' = \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}_m}{\partial \ln \sigma}\right)_T \quad (6)$$

여기서, A는 크리프 상수이고, n은 크리프 지수이다. power-law에 의한 전위 크리프하에서 식(5)의 n은 크리프 변형인 경우 식(5)의 n'과 같은 의미를 갖는다. 민감지수 n'는 정량화 되어, 그 의존성 정도를 타탄의 본 시험 조건에 해당하는 온도 및 응력에서의 크리프 변형기구도를 조사하면 power-law의 영역에 해당된다. 따라서 최소크리프 속도와 응력과의 관계는 power-law 식으로 나타낼 수 있고 이로부터 응력 지수 n값을 구할 수 있다.

Fig. 2는 최소크리프 속도와 응력과의 관계를 log-log로 나타낸 것으로 기울기 n값은 15.5~6.53로 나왔다. 그리고 응력의 차이에 의한 크리프 속도는 분명한 차이를 보이지만 각각의 온도에서의 시험의 n의 값은 거의 같으므로 크리프 변형기구가 동일함을 알 수 있다.

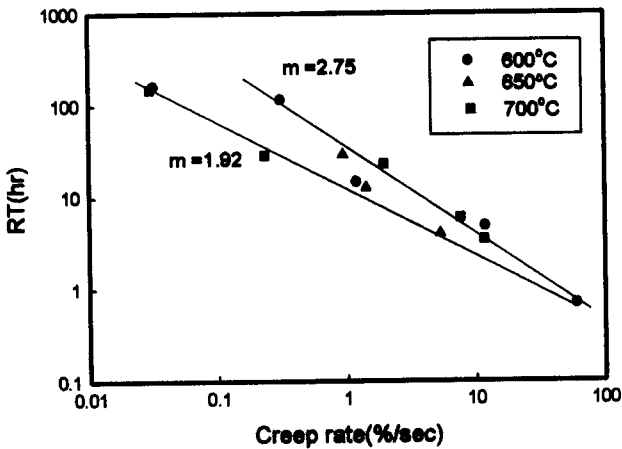


Fig. 5 Time to rupture vs. creep rate for Ti.

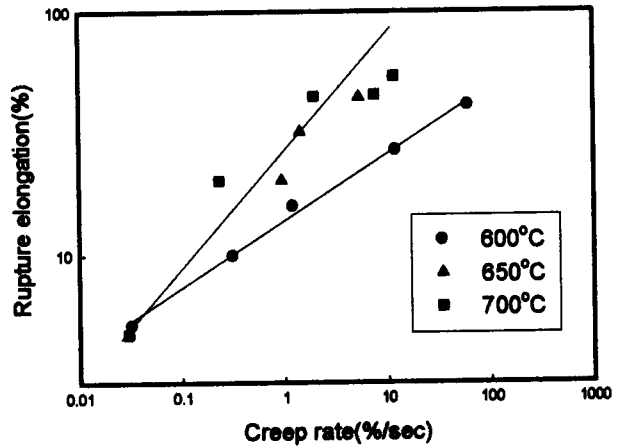


Fig. 7 Relation between creep rate and rupture elongation for Ti.

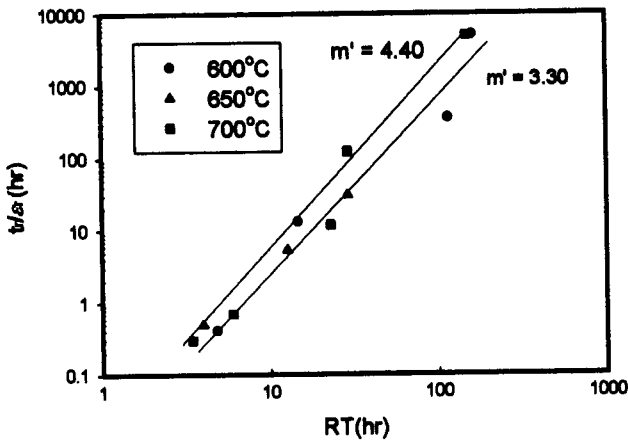


Fig. 6 Dependence of ratio of rupture time to creep rupture elongation on creep rate for Ti.

$$t_r \cdot \sigma^k = K \quad \text{----- (7)}$$

위의 식 (7)과 Fig. 3은 응력과 파단 시간의 관계를 log-log로 나타낸 것이다. 그림에서 응력과 파단 시간에 의해 k의 값을 구하면 0.016~0.026의 범위로 계산된다. 로그는 선형관계로서 파단수명은 온도 및 응력의 의존성을 보인다. 전체적인 직선의 기울기는 조성이나 온도에 관계없이 같으므로 크리프 변형기구가 변형되지 않음을 각 응력에 따라 크리프 수명의 차이가 있지만 알 수 있다.

Fig. 5는 크리프 파단 연신율과 응력의 관계를 나타낸 것으로 전체적인 경향은 온도별 의존성을 보이고 있으나 크리프 파단 연신율은 동일한 응력 조건에서 온도가 높을수록 크며, 응력이 증가 할수록 연신율은 비례 관계 증가한다.

3.2 M-G 수명식의 적용 및 고찰

Fig. 5는 M-G 관계의 두 인자인 최소크리프 속도와 파단시간을 log-log로 나타낸 것이다. 그래프에서의 모든 데이터들은 각 온도별 의존성을 보이고 있다. 이 때의 상수 m은 600°C에서 m=2.75 700°C일 때 m=1.92로 나타난다. 이것은 앞의 Fig. 2 및 3의 크리프 실험결과와 같은 최소크리프 속도나 파단시간은 온도에 크게 의존하기 때문이다.

Fig. 6은 식(3)을 적용하여 과 같은 결과를 얻을 수 있다. 수정 M-G 관계로 표현된 Fig. 6은 Fig. 5의 결과와는 달리 각 온도별로 기울기의 변화가 거의 없는 선형 관계를 보이고 있다. 각 온도별 기울기 m'는 600°C인 경우 m'=3.40 700°C인 경우 m'=4.4 이는 앞의 Fig. 4의 결과와는 달리 수정 M-G에서는 온도에 관계없이 같은 기울기를 갖는다. 같은 크리프 속도에 대한 파단 연신율이 온도별로 기울기가 다르기 때문에 이유는 Fig. 7의 파단 연신율과 최소크리프 속도 관계에서 볼 수 있다. 즉 M-G 식의 기본 가정은 시간변화에 따른 크리프 연신율이 일정한 비례관계에 있게 되는데, 크리프 파단연 신율을 적용하는 수정 M-G 식에서

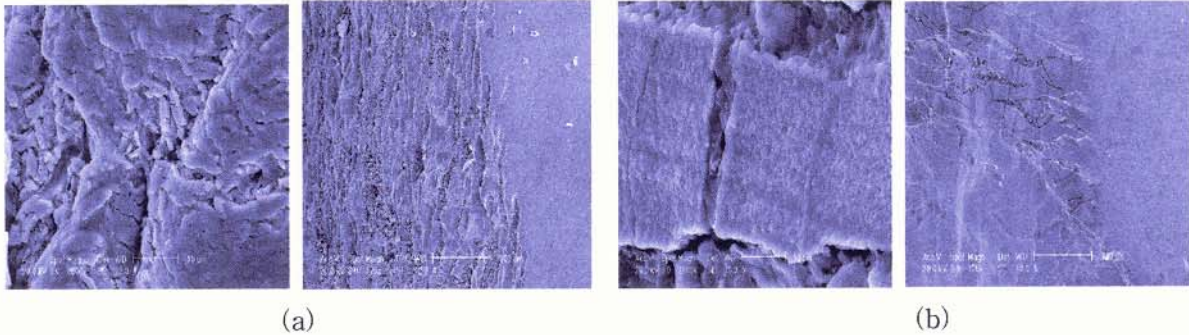


Photo. 1 SEM photograph of creep rupture surface.



(a) 1 kg/mm² (b) 1.3 kg/mm²

Photo. 2 Photograph of creep rupture specimen at 700°C.

크리프 연신율이 일정한 비례관계에 있게 되는 크리프 파단면 신율을 적용하는 수정 M-G 식에서는 온도별에 따른 비례상수에서 차이가 발생하여 그 차이만큼 일정량 보정시키므로 온도별 기울기 변화가 없는 것으로 분석된다. 결국, 티탄의 수정 M-G 식으로 크리프 수명을 예측하는데 있어서 최소 크리프 속도에 대한 t_r/ϵ_r 비로 나타내면 온도별 절대값의 편차는 약간 있지만, 전체적으로 보면 거의 같은 기울기를 보이므로 M-G 식보다 용이하게 활용될 수 있음을 알 수 있다.

3.3 판단면 조사

이와 같이 크리프 연신율은 전 크리프 변형과정을 잘 나타내므로 크리프속도와 파단시간과 긴밀

한 관계를 갖는다. Photo. 1에 나타난 크리프 균열과 크리프 기공의 생성과 성장 그리고 최종 파단에 이르는 크리프변형 과정의 이들 관계로부터 크리프 파단기구를 알 수 있게 되는데, 이러한 것을 관찰하기 위하여 크리프 파면조직을 관찰하여 (a)는 600°C, 응력 5kg/mm²의 파단면을 나타낸 것으로 대부분의 파단이 벽계파괴로 일어났음을 알 수 있고 그림 (b)에서는 700°C, 1kg/mm²의 파면을 관찰한 것으로 고응력조건에는 연성파괴가 대부분 일어난 것을 알 수 있다.

또한, Photo. 2는 700°C의 일정한 온도에서 1kg/mm²과 1.3kg/mm²에서의 본 실험에서 사용한 시편으로 동일한 온도에서는 응력이 높을수록 시편의 길이가 많이 늘어남을 알 수 있다.

M-G식의 경우 온도별로 다른 기울기를 갖는 것은 파단속도의 차이에 영향을 받아 기울기의 차이가 생기고, 반면 수정식의 경우는 파단연신율과 크리프속도에 온도별로 영향을 주어 같은 기울기를 갖는 것으로 분석된다.

4. 결론

티탄의 크리프 수명을 예측에 필요한 재료상수들을 크리프 파단 시험을 수행하여 얻은 데이터를 이용하여 얻을 수 있었다. 이에 Monkman-Grant의 수명 관계식을 적용한 결과 파단시간 t_r 과 최소 크리프 속도 $\dot{\epsilon}_m$ 는 600℃에서 $m=2.75$, 700℃에서 $m=1.92$ 로 이들은 선형관계로 각기 온도의존성을 갖는 각기 다른 기울기를 갖는 선형관계를 보였다. 그러나 수정 M-G관계식에서는 $t_r/\dot{\epsilon}_m$ 과 $\dot{\epsilon}_m$ 로 표현되는 온도별 절대값에서의 약간의 편차는 갖지만 온도나 응력에 관계없이 약 $m'=3.9$ 의 기울기를 보이는 최소 크리프속도에 대한 $t_r/\dot{\epsilon}_m$ 의 기울기이다. 따라서 티탄의 연신율을 반영하는 수정된 M-G 관계식을 적용하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

후기

이 논문은 2002학년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. George E. Dieter. 1976. Mechanical Metallurgy pp.451~487
2. T. Sakuma and K. Yagi. 1999. "Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures" pp. 99~107, 179~187, 245~252, 395~402.
3. 이용태, 김승언, 현용택, 정희원. 2001. "꿈의 신소재 티타늄" pp. 29~98
4. 이용태, 이종형. 2002 "티타늄 가공기술"
5. 오세욱, 오환섭, 김상태, 오환교. 1994. "재료시험 입문". 원창출판사 pp.255~273.
6. 조용이, 김희송. 1993. "A17075합금의 고온 크리프 활성화에너지의 상태 의존성" 대한기계학회논문집 pp.131~140.
7. 박종진, 최제하. 1985. "AISI 316스테인레스강의 0.6Tm에서의 Creep거동에 관한 연구" 대한기계학회논문집 pp.1136~1145.
8. 이익선, 홍성경. 1994. "코스틱스방법을 이용한 고온 크리프파괴 현상에 관한 연구" 대한기계학회논문집 pp.2543~2553.
9. Norton, F, H. 1929. "The Creep of steel at High Temperature Mcgraw-Hill" New York pp. 67
10. H. Ishikawa. 1987. "Relation Between Cyclic Creep and Pure Creep on Copper" ASTM pp.22