

항공기용 가스터빈 재료의 열처리에 따른 크리프 특성

공 유 식* · 오 세 규** · 박 노 광***
(99년 10월 19일 접수)

Creep Properties of Aircraft Gas Turbine Materials in relation to Heat Treatment

Yu Sik Kong* · Sae Kyoo Oh** · No Kwang Park***

Key Words : Creep Properties(크리프특성), Creep Life Prediction(크리프 수명 예측), Creep Stress(크리프응력), Rupture Time(파단시간), Initial Strain(초기연신률), LMP(Larson-Miller Parameter)

Abstract

In this paper, the creep properties and creep life prediction by Larson-Miller Parameter method for Udimet 720 to be used for aircraft gas turbine engines or other high temperature components were presented at the elevated temperatures of 538, 649 and 704°C.

It was confirmed experimentally and quantitatively that a creep life predictive equation at such various high temperatures was well derived by LMP.

1. 서 론

항공산업은 재료, 기계 및 전자분야의 첨단기술이 종합되는 산업으로서 다른 산업에 미치는 기술적 파급효과가 큰 선도산업이며 고부가가치 산업이다. 따라서 군사전략 차원이나 국가경제 차원에서 항공산업의 육성은 대단히 중요하고 시급한 과제이다.

또한, 항공기의 성능은 엔진의 성능에 크게 좌우되는데, 이는 가스터빈 엔진의 재료가 고온, 고

응력 및 부식성 분위기가 조합된 가혹한 조건에서 얼마나 견딜 수 있는가에 달려 있으므로 우수한 특성을 갖는 부품소재의 개발과 공정기술을 개발하는 것은 항공재료 기술향상에 필수적인 요건이라 하겠다. 그러므로 가스터빈 부품 및 소재를 제조하는 공정기술은 다른 어떤 산업기술 분야보다도 고급이면서 대단히 까다로운 기술수준을 요한다.

본 연구에서는 항공기용 가스터빈 재료(Udimet 720)의 크리프 손상 특성 평가를 위하여 U720의

* 정회원, 부경대학교 대학원 학연기계공학과

** 종신회원, 부경대학교 기계·자동차 공학부

*** 한국기계연구원

고온(538°C, 649°C, 704°C) 크리프 특성인 크리프 응력과 정상 크리프 속도, 정상 크리프 속도와 초기연신률, 초기연신률과 총 크리프 속도, 크리프 응력과 크리프 수명등의 상관성 조사를 수행하였다.^{1,2)} 그리고 현재 널리 쓰이고 있는 Larson-Miller Parameter (LMP)³⁾에 의하여 크리프 수명에측식을 도출하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 항공기용 가스터빈의 디스크에 사용되는 초내열합금이다. 사용재료의 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 사용재료에 대한 표준열처리와 장시간 노출시험을 행한 각 조건을 Table 3에 나타내었다. 여기서 표준열처리는 영국 Rolls-Royce사의 열처리 기준을 적용하였으며, 사용된 시험편 형상은 Fig. 1과 같고, 시험기는 미국 SATEC사의 DLF-10-1029 크리프 시험기이다.

Table 1 Chemical composition of material(wt.%)

| Material | C | Cr | Co | Mo | W | Ti | Al | B | Zr | Ni |
|----------|-------|----|-------|----|------|----|-----|-------|-------|-----|
| U720 | 0.025 | 18 | 14.75 | 3 | 1.25 | 5 | 2.5 | 0.035 | 0.035 | bal |

Table 2 Mechanical properties of U720

(a) Room temperature

| Treatment | σ_t (MPa) | σ_y (MPa) | ϵ (%) | ψ (%) | Hv |
|-----------|------------------|------------------|----------------|------------|-----|
| Standard | 1385 | 1025 | 10 | 11.9 | 466 |
| Exposed | 1185 | 959 | 2.6 | 4.6 | 454 |

σ_t : Tensile strength, σ_y : Yield strength,
 ϵ : Elongation, ψ : Reduction of area,
 Hv : Vickers hardness

(b) High temperatures

| Temp. Treat. | 538°C | | | | 649°C | | | | 704°C | | | |
|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| | σ_t (MPa) | σ_y (MPa) | ϵ (%) | ψ (%) | σ_t (MPa) | σ_y (MPa) | ϵ (%) | ψ (%) | σ_t (MPa) | σ_y (MPa) | ϵ (%) | ψ (%) |
| Standard | 1432 | 1070 | 11.9 | 14.3 | 1359 | 941 | 13 | 14.3 | 1233 | 977 | 15.1 | 18.5 |
| Exposed | 1347 | 929 | 6.6 | 7.8 | 1289 | 889 | 21.7 | 27.8 | 1167 | 887 | 19.8 | 23.7 |

Table 3 Heat treatments of U720

| Treatment | Temp. × Time | Cooling | Hv |
|-----------|----------------|-------------|--------|
| Standard | 1105°C × 4 h | Air cooling | Hv 429 |
| | 650°C × 24 h | Air cooling | Hv 456 |
| | 760°C × 16 h | Air cooling | Hv 466 |
| Exposed | 800°C × 1000 h | Air cooling | Hv 454 |

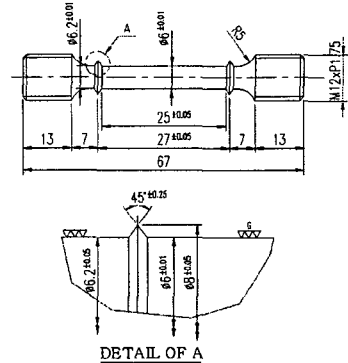


Fig. 1 Shape and dimension of high temperature tensile and creep specimen (ASTM E139-83)

2.2 실험방법

온도 측정은 K형 열전대를 사용하여 직접 시험편에 부착하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않는 무부하 상태에서 설정온도까지 8.5°C/min로 가열하였다. 그리고 부하전에 노내의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켰고, 실험중 온도를 일정온도에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 크리프 시험중 발생하는 연신을 측정하기 위하여 표점거리 27mm되는 양단에 플랜지를 기준으로 하여 LVDT(linear variable displacement transformer)로써 측정하였으며, 제어반에 부착된 레코더로 기록하여 이들로부터 크리프 곡선을 작성하였다. 초기 연신률(initial strain)은 하중을 가한 후 1분이 될 때 측정된 것으로 통일 하였다.

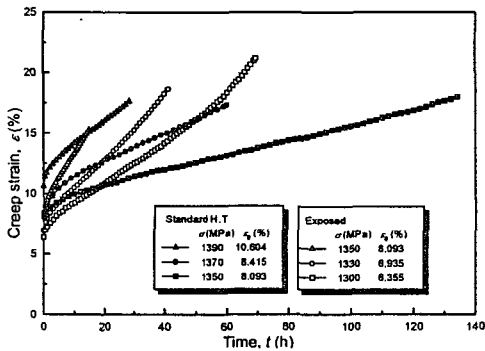
3. 실험결과 및 고찰

3.1 크리프 곡선

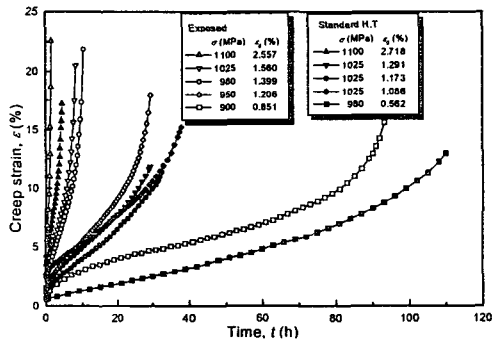
일정 온도(538, 649, 704°C)하에서 응력을 변화시

켰을 때 실험적으로 구한 U720의 크리프 곡선은 각각 Fig. 2(a), (b), (c)에 표시한 바와 같다.

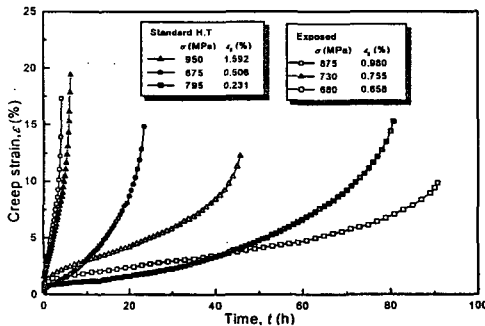
Fig. 2(a), (b), (c)에서 알 수 있듯이 열처리에 따른 동일 온도하에서 응력이 증가함에 따라, 초기연신률은 모두 증가하나 파단수명은 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 초기연신률의 증감은 응력, 파단수명 및 온도에 민감하게 상관성이 있음을 알 수 있다.



(a) 538°C



(b) 649°C



(c) 704°C

Fig. 2 Creep curve for U720 at 538, 649 and 704°C

Table 4(a), (b)는 Fig. 2(a), (b), (c)를 통하여 Table 3의 열처리에 의한 정적 크리프 시험한 결과의 데이터를 정리한 것으로 응력(σ , MPa), 파단시간(t_r , h), 초기연신률(ϵ_0 , %), 총 크리프 속도($\dot{\epsilon}_T$, %/h), 정상 크리프 속도($\dot{\epsilon}$, %/h)를 나타내고 있으며, 모두 실험에 의하여 구하여진 값들이다.

Table 4(a) Data by creep test of U720 according to standard heat treatment conditions shown in Table 3

| Temp. | Stress | Rupture time | Initial strain | Total creep rate | Steady state creep rate | Total strain |
|-------|----------------|--------------|------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|
| °C | σ (MPa) | t_r (h) | ϵ_0 (%) | $\dot{\epsilon}_T$ (%/h) | $\dot{\epsilon}$ (%/h) | ϵ_T (%) |
| 538 | 1390 | 28.3 | 10.604 | 0.623 | 0.183 | 17.640 |
| | 1370 | 60.0 | 8.415 | 0.289 | 0.116 | 17.369 |
| | 1350 | 134.1 | 8.093 | 0.134 | 0.062 | 17.979 |
| 649 | 1100 | 4.6 | 2.718 | 3.739 | 2.184 | 17.201 |
| | 1025 | 29.3 | 1.291 | 0.404 | 0.284 | 11.851 |
| | 1025 | 33.0 | 1.173 | 0.361 | 0.260 | 11.919 |
| | 1025 | 38.0 | 1.086 | 0.401 | 0.240 | 15.237 |
| | 980 | 109.8 | 0.562 | 0.118 | 0.068 | 12.969 |
| 704 | 950 | 6.3 | 1.592 | 3.080 | 1.467 | 19.402 |
| | 875 | 23.7 | 0.506 | 0.626 | 0.320 | 14.831 |
| | 795 | 80.7 | 0.231 | 0.190 | 0.047 | 15.305 |

Table 4(b) Data by creep test of U720 according to exposed (800°C × 1000h) conditions shown in Table 3

| Temp | Stress | Rupture time | Initial strain | Total creep rate | Steady state creep rate | Total strain |
|------|----------------|--------------|------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|
| °C | σ (MPa) | t_r (h) | ϵ_0 (%) | $\dot{\epsilon}_T$ (%/h) | $\dot{\epsilon}$ (%/h) | ϵ_T (%) |
| 538 | 1350 | 14.8 | 8.093 | 1.032 | 0.415 | 15.269 |
| | 1330 | 41.3 | 6.935 | 0.452 | 0.245 | 18.656 |
| | 1300 | 69.5 | 6.355 | 0.305 | 0.172 | 21.195 |
| 649 | 1100 | 1.6 | 2.557 | 14.115 | 7.788 | 22.584 |
| | 1025 | 8.3 | 1.560 | 2.472 | 1.344 | 20.518 |
| | 980 | 10.5 | 1.399 | 2.083 | 1.070 | 21.872 |
| | 950 | 29.6 | 1.206 | 0.607 | 0.351 | 17.979 |
| | 900 | 93.3 | 0.851 | 0.167 | 0.074 | 15.608 |
| 704 | 875 | 4.2 | 0.980 | 4.119 | 2.007 | 17.301 |
| | 730 | 45.7 | 0.755 | 0.267 | 0.137 | 12.222 |
| | 680 | 90.7 | 0.658 | 0.109 | 0.055 | 9.852 |

3.2 크리프 응력과 정상 크리프 속도의 상관성

Fig. 3은 538, 649, 704°C에서의 크리프 시험결과에 대한 크리프 응력 σ (MPa)와 정상 크리프 속도

$\dot{\epsilon}$ (%/h)와의 상관성을 나타내고 있다.

양대수 좌표에서 정상 크리프 속도는 응력이 높아질 수록 증가하며, 온도가 상승할 수록 그 증가율이 높아지고 있음을 알 수 있고, 이는 Oh^4 의 보고와 일치한다. 그 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

Standard heat treatment :

538°C; $\log \sigma = 0.027 \log \dot{\epsilon} + 3.162$, ($R^2=1.00$) (1)

649°C; $\log \sigma = 0.033 \log \dot{\epsilon} + 3.030$, ($R^2=1.00$) (2)

704°C; $\log \sigma = 0.052 \log \dot{\epsilon} + 2.969$, ($R^2=1.00$) (3)

Exposed :

538°C; $\log \sigma = 0.042 \log \dot{\epsilon} + 3.147$, ($R^2=0.97$) (4)

649°C; $\log \sigma = 0.043 \log \dot{\epsilon} + 2.999$, ($R^2=0.98$) (5)

704°C; $\log \sigma = 0.070 \log \dot{\epsilon} + 2.921$, ($R^2=1.00$) (6)

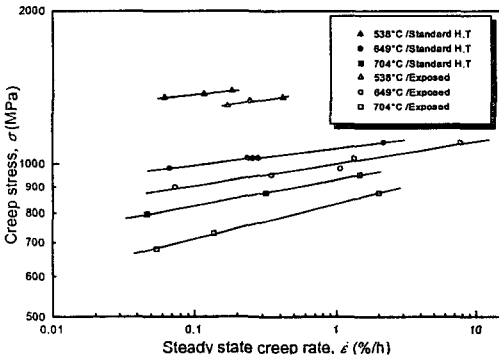


Fig. 3 Relationship between creep stress and steady state creep rate of U720 at 538, 649 and 704°C

3.3 초기 연신률과 크리프 속도와의 상관성

Fig 4와 Fig. 5는 크리프 초기 연신률 ϵ_0 (%)와 정상 크리프 속도 $\dot{\epsilon}$ (%/h) 및 총 크리프 속도 $\dot{\epsilon}_T$ (%/h)와의 상관성을 538, 649, 704°C에서 각각 구한 실험결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 초기연신률은 정상 크리프 속도 및 총 크리프 속도가 상승할 수록 증가하며, 그 증가율도 온도가 상승할 수록 더욱 높아진다. 이는 Oh 의 보고^{5,6)}와 매우 일치한다. 그 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

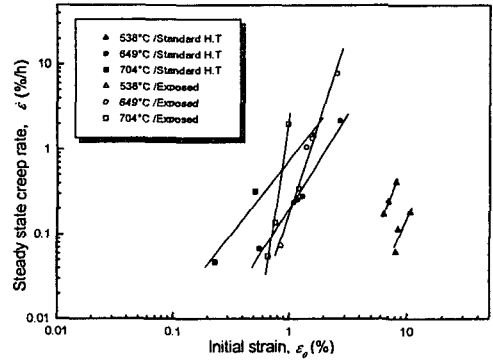


Fig. 4 Relationship between steady state creep rate and initial strain of U720 at 538, 649 and 704°C

Standard heat treatment :

538°C; $\log \dot{\epsilon} = 3.299 \log \epsilon_0 - 4.104$, ($R^2=0.89$) (7)

649°C; $\log \dot{\epsilon} = 2.199 \log \epsilon_0 - 0.692$, ($R^2=0.99$) (8)

704°C; $\log \dot{\epsilon} = 1.749 \log \epsilon_0 - 0.126$, ($R^2=0.98$) (9)

Exposed :

538°C; $\log \dot{\epsilon} = 3.617 \log \epsilon_0 - 3.663$, ($R^2=1.00$) (10)

649°C; $\log \dot{\epsilon} = 4.250 \log \epsilon_0 - 0.751$, ($R^2=0.99$) (11)

704°C; $\log \dot{\epsilon} = 9.195 \log \epsilon_0 - 0.351$, ($R^2=1.00$) (12)

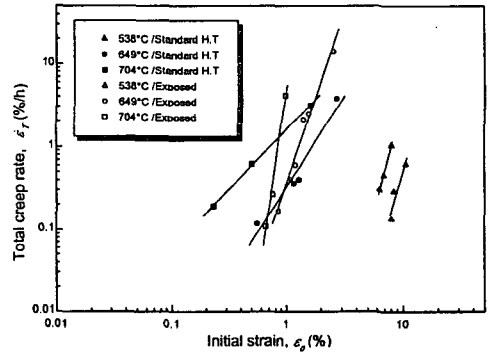


Fig. 5 Relationship between total creep rate and initial strain of U720 at 538, 649 and 704°C

Standard heat treatment :

538°C; $\log \dot{\epsilon}_T = 4.866 \log \epsilon_0 - 5.176$, ($R^2=0.92$) (13)

649°C; $\log \dot{\epsilon}_T = 2.187 \log \epsilon_0 - 0.493$, ($R^2=0.98$) (14)

704°C; $\log \dot{\epsilon}_T = 1.439 \log \epsilon_0 + 0.205$, ($R^2=1.00$) (15)

Exposed :

538°C; $\log \dot{\epsilon}_T = 5.077 \log \epsilon_0 - 4.602$, ($R^2=1.00$) (16)

$$649^{\circ}\text{C}; \log \dot{\epsilon}_T = 4.089 \log \epsilon_0 - 0.446, (R^2=0.99) \quad (17)$$

$$704^{\circ}\text{C}; \log \dot{\epsilon}_T = 9.297 \log \epsilon_0 + 0.662, (R^2=1.00) \quad (18)$$

식(7)~(18)에서 초기연신률을 크리프 초기순간에 측정하면, 장시간의 크리프특성을 정량적으로 예측할 수 있음을 보여준다^{6,7)}.

3.4 크리프 응력과 크리프 수명과 상관성

Fig. 6은 538, 649, 704°C에서의 크리프 응력 σ (MPa)와 크리프 수명(파단시간) t_r (h)과의 상관성을 나타내는 실험결과이다. 그림에서 크리프 수명은 응력이 증가할 수록 감소하며, 온도가 상승할 수록 그 감소율이 더욱 커짐을 알 수 있다. 또한 동일 응력하에서 수명을 비교하여 보면, 538°C에서 1350MPa일 때 9.1배, 649°C에서 1100MPa일 때 2.9배, 1025MPa일 때 4.6배, 980MPa일 때 10.5배, 704°C에서 875MPa일 때 5.6배로 표준열처리용 재료가 수명이 높음을 알 수 있다.

Standard heat treatment :

$$538^{\circ}\text{C}; \log \sigma = -1.876 \times 10^{-2} \log t_r + 3.170, (R^2=1.00) \quad (19)$$

$$649^{\circ}\text{C}; \log \sigma = -3.605 \times 10^{-2} \log t_r + 3.065, (R^2=1.00) \quad (20)$$

$$704^{\circ}\text{C}; \log \sigma = -6.974 \times 10^{-2} \log t_r + 3.035, (R^2=1.00) \quad (21)$$

Exposed :

$$538^{\circ}\text{C}; \log \sigma = -2.302 \times 10^{-2} \log t_r + 3.158, (R^2=0.91) \quad (22)$$

$$649^{\circ}\text{C}; \log \sigma = -4.957 \times 10^{-2} \log t_r + 3.050, (R^2=0.97) \quad (23)$$

$$704^{\circ}\text{C}; \log \sigma = -8.046 \times 10^{-2} \log t_r + 2.993, (R^2=1.00) \quad (24)$$

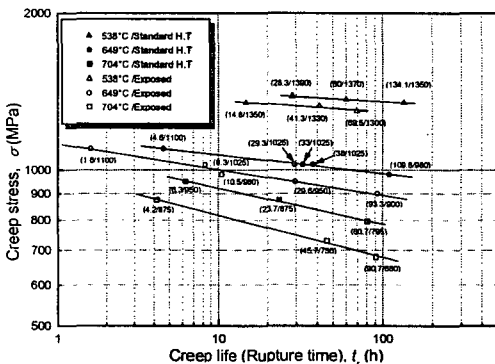


Fig. 6 Relationship between creep stress and creep life of U720 at 538, 649 and 704°C

그래프에서 알 수 있듯이 양대수 좌표에서 선형적으로 나타나며, 온도 538, 649, 704°C에서 응력이 결정되면 단기간 실험을 통하여 외삽에 의해 장시간의 크리프 수명을 예측할 수 있다. 그러나, 고온일 수록 장시간($10^3 \sim 10^5$ h)에서는 실제 수명이 예측치 보다 훨씬 단축되므로, 더욱 신뢰성 있는 장시간 예측을 위한 연구가 필요하다고 생각된다^{5~7)}.

3.5 LMP에 의한 크리프 수명예측

금속의 조직 변화는 일반적으로 보다 높은 고온에서는 보다 짧은 시간 안에 생긴다. 실제 요구되는 온도보다 몇 백도 높은 온도에서의 응력-파단시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 Larson-Miller Parameter(LMP)에 의해 다음과 같이 정의되어 있다³⁾.

$$LMP = T(\log t_r + C_i) \quad (25)$$

식(25)에서 T 는 절대온도(K)이고, C_i 은 고온 내 열재료인 경우 20으로 재료정수이며, LMP는 응력($\log \sigma$)의 1차함수이므로

$$LMP = T(\log t_r + 20) = K_1 \log \sigma + K_2 \quad (26)$$

이다. 여기서 K_1 과 K_2 는 재료상수이다.

식 (26)은 온도 538, 649, 704°C에서의 $\log \sigma$ 와 $LMP[T(\log t_r + 20)]$ 의 그래프 Fig. 7에서 K_1, K_2 의 값은

Standard heat treatment :

$$K_1 = -16460.437, \quad K_2 = 69312.765$$

Exposed :

$$K_1 = -14267.868, \quad K_2 = 62099.919 \text{로 계산되며,}$$

LMP는 다음과 같이 된다.

Standard heat treatment :

$$LMP = T(\log t_r + 20)$$

$$= -16460.437 \log \sigma + 69312.765, (R^2=0.99) \quad (27)$$

Exposed :

$$LMP = T (\log t_r + 20)$$

$$= -14267.868 \log \sigma + 62099.919, (R^2=0.99) \quad (28)$$

$$C_1=20, K_1=-14267.868, K_2=62099.919$$

참고 문헌

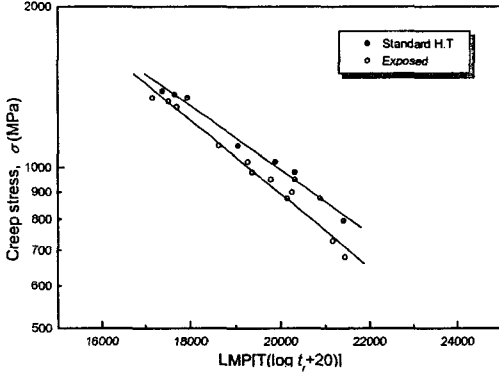


Fig. 7 Master creep curve of U720 at 538, 649 and 704°C

4. 결론

항공기용 가스터빈 재료인 U720에 대한 열처리에 따른 고온 크리프 특성을 538, 649, 704°C에서 조사하였고, LMP에 의한 크리프 수명예측식을 도출한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 크리프 수명은 응력과 온도가 상승할 수록 선형적으로 감소하며, 표준열처리용 재료에 비해 장시간 노출시험(800°C × 1000h)한 재료의 수명이 현저히 감소함을 알수있다.
- 2) 정상 크리프 속도나 총 크리프 속도 등 장시간 크리프 특성이 초기연신률과 정량적 선형관계가 성립하여 초기연신률에 의한 장시간 수명예측이 가능하게 되었다.
- 3) LMP에 의한 크리프 수명예측식은 다음과 같으며, 10²h시간까지는 매우 유효하지만, 장시간(10³~10⁵h)예측에는 실제 파단시간보다 더욱 길게 예측되므로 장시간 예측으로는 위험하다.

Standard heat treatment :

$$LMP[T(\log t_r + C_1)] = K_1 \log \sigma + K_2$$

$$C_1=20, K_1=-16460.437, K_2=69312.765$$

Exposed :

$$LMP[T(\log t_r + C_1)] = K_1 \log \sigma + K_2$$

- 1) Oh, S. K., T. Kunio and A. Hasui, "Effects of Initial Strain on Evaluation of High Temperature Creep Properties of Friction Welded Joints.", Conf. of Asian-Pacific Congress on Strength Evaluation. APCS-86, pp.549-554, 1986
- 2) Norton, F. H., "The Creep of Steel at High Temperatures", McGraw Hill, New York, pp.67, 1910
- 3) Larson, F. R and J. Miller, "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Transaction of the ASME, pp.765-775, 1952
- 4) 오세규 외 3인, "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법 (1), (2), (3)", 대한기계학회 논문집 17권 3호, pp.512-519, pp.520,526, 17권 4호 pp.746-754, 1993
- 5) 오세규, 이원석, 송정근, 이상국, 정민화, "엔진 배기밸브의 내열강 이중재 마찰용접의 최적화와 고온크리프의 실시간 예측 및 AE에 의한 실시간 평가(1), (2)", 한국해양공학회 강연논문집, pp.249-254, pp.281-287, 1996
- 6) Oh, S. K., S. J. Kim, T. E. Jeon, "Development of Long-Time Creep Safety Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel and AE Evaluation(1st Report)-Possibility of Creep Prediction by Initial Strain Method", Proc. of 6th International Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Los Angeles, pp.275-279, 1996
- 7) Oh, Sae Kyoo, "Relationship between Cyclic Creep Properties and Initial Strain of Cr-Mo Alloy Steels at High Temperatures and AE Evaluation," Int. J. of Ocean Engineering and Technology, Vol.1, No.1, pp.78~86, 1998