

ISM에 의한 항공기용 가스터빈 재료의 크리프 수명예측

공 유 식
부경대학교 기계공학부

Creep Life Prediction of Aircraft Gas Turbine Material by ISM

YU-SIK KONG

Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Creep life prediction 크리프 수명예측, Initial strain method 초기인선률법, Larson-Miller parameter 라슨-밀러 파라미터

ABSTRACT: In this paper, the real-time prediction of high temperature creep strength and creep life for nickel-based superalloy Udimet 720 (high-temperature and high-pressure gas turbine engine materials) was performed on round-bar type specimens under pure load at the temperatures of 538, 649 and 704°C. The predictive equation of ISM creep has better reliability than that of LMP and LMP-ISM, and its reliability is getting better for long time creep prediction ($10^5 \sim 10^8$ h).

1. 서 론

국내 항공산업의 생산기술 수준은 선진국에 비해 매우 낙후되어 있고 연구개발 역사가 짧아 조보적인 단계를 벗어나지 못하고 있다(최 등, 1997).

항공기의 성능은 엔진의 성능에 크게 좌우되는데, 이는 가스터빈 엔진의 재료가 고온, 고응력 및 부식성 분위기가 조합된 가혹한 조건에서 얼마나 견딜수 있는가에 달려있으므로 우수한 특성을 갖는 부품소재의 개발과 공정기술을 개발하는 것은 항공재료 기술 향상에 필수적인 요건이라 하겠다. 가스터빈 재료는 고온에서 장시간 사용되므로 정적 크리프와 사용반복에 따른 동적 크리프에 의한 크리프 손상을 분시에 일으키게 되어, 파손은 물론 급기야 사고로 인하여 인명피해가 우려되는 것으로서 치명적 손실이 아닐 수 없다. 따라서 가스터빈재료의 장시간(10^5 h) 고온 크리프 특성을 단시간 실험을 통하여 파악하고 예측한다는 것은 항공기용 가스터빈 재료의 설계, 제조 및 교체에 있어서 가장 기본적이고 필수적인 요건 중의 하나이다.

국내외적으로 항공기용 가스터빈 재료에 대한 고온하에서의 정적 크리프와 동적 크리프의 확실한 상관성 규명과 ISM(initial strain method)에 의한 크리프 수명예측에 관한 연구는 미약한 실정이다(오 등, 1993; 오 등, 1993; 오 등, 1993).

따라서 본 연구에서는 항공기용 가스터빈 재료인 Udimet 720(U720)의 정적 크리프와 초기인선률(IS)과의 상관성 규명 및 초기인선률법(ISM)에 의한 크리프 수명예측식 도출, 타에측적인 LMP법과 LMP-ISM과의 비교 검토에 관한 연구를 수행하고자 하였다(Oh et al., 1996; Oh, 1998).

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 영국의 Rolls-Royce사로부터 구입한 것으로서 항공기용 가스터빈의 디스크에 사용되는 초내열합금이다. 사용재료의 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 사용재료에 대한 열처리 조건을 Table 3에 나타내었다. 여기서 표준 열처리법은 영국 Rolls-Royce사의 열처리 기준을 적용하였으며, 사용된 시험편 형상은 Fig. 1과 같고, 크리프 시험기는 미국 SATEC사(DLF-10-1029)의 크리프 시험기이다.

2.2 실험 방법

온도 측정은 K형 열전대를 사용하여 직접 시험편에 부착하였고, 노(furnace)내의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않는 무부하 상태에서 설정온도까지 8.5°C/min로 가열하였다. 그리고 무부하 상태에서 노내의 온도분포가 균일하게 유지되게 하기위하여 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켰으며, 실험중 온도를 일정온도에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 크리프 시험중 발생하는 연신을 측정하기 위하여 표점거리 27mm되는 양단에 풀네지를 기준으로 고정하였고, LVDT(linear variable displacement transformer)로써 측정하였으며, 제어반에 부착된 레코더로 기록하여 이로부터 크리프 곡선을 작성하였다. 초기인선률(initial strain)은 하중을 가한 후 1분이 될 때 측정하였고, 이는 모든 조건에서 1분으로 통일 하였다.

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

Material	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elonga-ti on ϵ (%)	Reduction of area ψ (%)	Vickers hardness Hv
U720	1385	1025	10	11.9	466

(b) High temperatures

Material	538℃				649℃				704℃			
	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	ψ (%)	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	ψ (%)	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	ψ (%)
U720	1432	1070	11.9	14.3	1359	941	13	14.3	1233	977	15.1	18.5

Table 3 Heat treatments of U720

Treatment	Temp. × Time	Cooling	Hv
Standard	1105℃ × 4 h	Air cooling	429
	650℃ × 24 h	Air cooling	456
	760℃ × 16 h	Air cooling	466

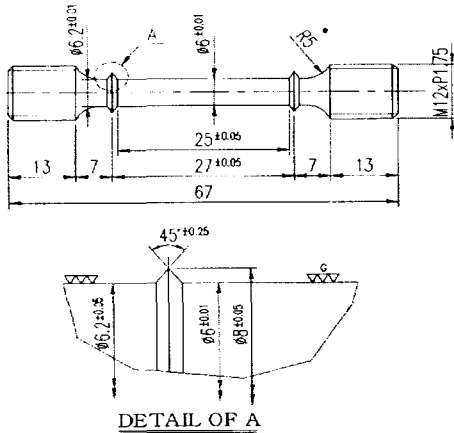
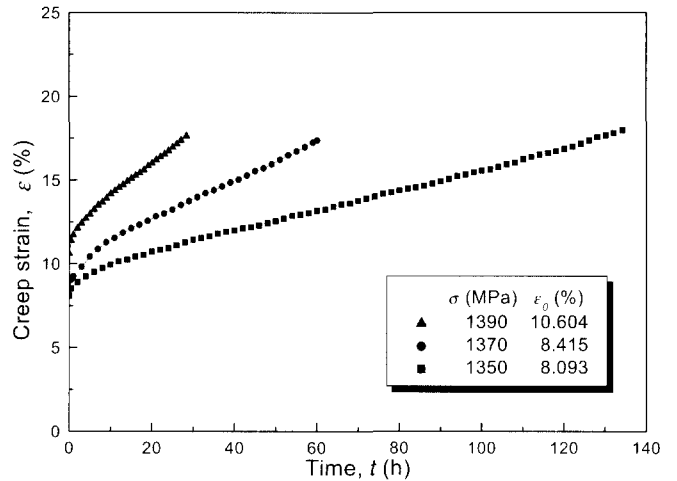


Fig. 1 Shape and dimension of creep specimen (ASTM E139-83) (unit : mm)

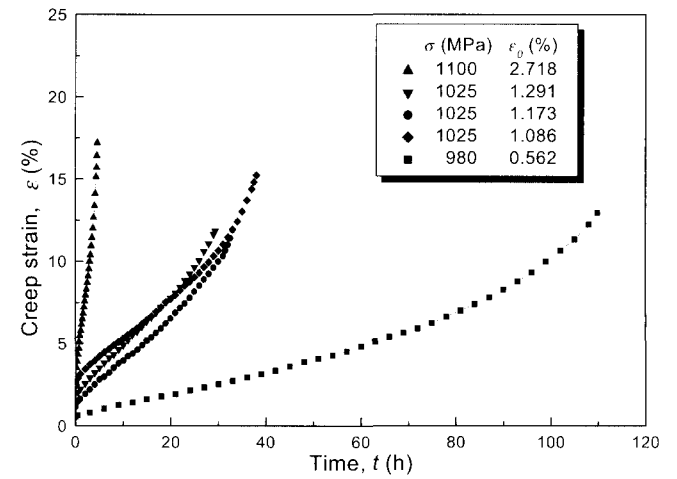
3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온 크리프 시험

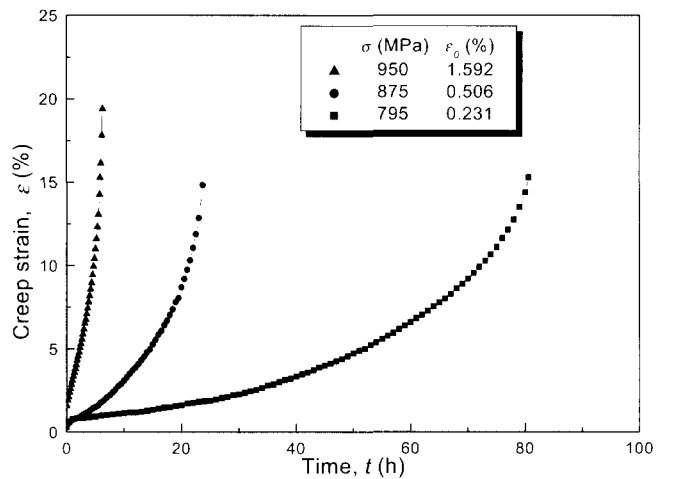
일정 온도(538, 649, 704℃)하에서 응력을 변화시켰을 때 실험



(a) 538℃



(b) 649℃



(c) 704℃

Fig. 2 Creep curves for U720 at 538, 649 and 704℃

적으로 구한 U720재료의 크리프 곡선은 각각 Fig. 2(a), (b), (c)에 나타낸 바와 같다.

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

또한, 538 °C에서의 그래프를 보면, 3차 크리프 구간이 거의 나타나지 않고, 2차 크리프 후 파단에 이르는 것을 알 수 있다. 그리고 크리프 파단면은 649, 704 °C에서는 입계파괴 양상인 반면에 538 °C에서는 입내파괴 양상으로 나타났다. 이는 결정입계 크기와 γ' 량과의 영향이 있다고 사료되며, 차후 실험적으로 이를 규명할 필요가 있다고 생각된다.

Table 4는 Fig. 2(a), (b), (c)를 통하여 고온 크리프 시험한 결과의 데이터를 정리한 것으로 응력(σ , MPa), 파단시간(t_r , h), 초기연신률(ϵ_0 , %), 총 크리프속도($\dot{\epsilon}_t$, %/h), 정상크리프속도($\dot{\epsilon}_s$, %/h)를 나타내고 있으며, 모두 실험에 의하여 구하여진 값들이다.

3.2 초기연신률과 크리프 응력과의 상관성

Fig. 3은 크리프 응력 σ (MPa)와 초기연신률 ϵ_0 (%)와의 관계를 나타낸 것이다.

그래프에서와 같이, 응력이 증가함에 따라 초기연신률은 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

$$538 \text{ } ^\circ\text{C} : \log \sigma = 0.131 \log \epsilon_0 + 3.012 \quad (R^2=0.99) \quad (1)$$

$$649 \text{ } ^\circ\text{C} : \log \sigma = 0.092 \log \epsilon_0 + 3.004 \quad (R^2=0.99) \quad (2)$$

Table 4 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
($^\circ\text{C}$)	σ (MPa)	t_r (h)	ϵ_0 (%)	$\dot{\epsilon}_t$ (%/h)	$\dot{\epsilon}_s$ (%/h)	ϵ_t (%)
	1390	28.3	10.604	0.623	0.183	17.640
538	1370	60.0	8.415	0.289	0.116	17.369
	1350	134.1	8.093	0.134	0.062	17.979
	1100	4.6	2.718	3.739	2.184	17.201
	1025	29.3	1.291	0.404	0.284	11.851
649	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
	950	6.3	1.592	3.080	1.467	19.402
704	875	23.7	0.506	0.626	0.320	14.831
	795	80.7	0.231	0.190	0.047	15.305

$$704 \text{ } ^\circ\text{C} : \log \sigma = 0.088 \log \epsilon_0 + 2.961 \quad (R^2=0.99) \quad (3)$$

여기서 R^2 은 데이터의 커브 피팅(curve fitting)에서 기여율(coefficient of determination)을 나타내며, 모두 1에 가깝게 나타나므로 신뢰성이 매우 높다.

식 (1) - (3)에서 초기연신률은 크리프 응력과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 다음과 같이 모델화 시킬 수 있다. 이는 여러 재료에 대한 Oh의 보고(Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998)에 대한 경우와 비교해서 모두 잘 일치한다.

$$\begin{aligned} \log \sigma &= \log A + B \log \epsilon_0 \\ &= \log A \epsilon_0^B \\ \sigma &= A \epsilon_0^B \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서 A, B는 온도항이 포함되어 있는 재료상수이다.

여기서,

$$\begin{aligned} \log A &= 0.012 + 0.007T - 4.1 \times 10^{-6}T^2 \quad (R^2=0.99) \\ B &= 1.568 - 0.003T + 1.541 \times 10^{-6}T^2 \quad (R^2=0.99) \end{aligned}$$

3.3 초기연신률과 크리프 수명과의 상관성

Fig. 4는 크리프 수명(파단시간) t_r (h)과 초기연신률 ϵ_0 (%)와의 상관관계를 나타내고 있다.

그래프에서 알 수 있듯이, 양태수 좌표에서 단시간에서는 서로 선형적인 양상을 나타내지만 외삽에 의한 장시간 파단수명을 적용시킨 결과는 2차 곡선을 나타내고 있다. 그리고 초기연신률이 증가할 수록 크리프 수명이 감소함을 알 수 있다.

이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$538 \text{ } ^\circ\text{C} : \log t_r = 3.859 - 1.101 \log \epsilon_0 - 1.142 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=0.98) \quad (5)$$

$$649 \text{ } ^\circ\text{C} : \log t_r = 1.608 - 1.799 \log \epsilon_0 - 0.394 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (6)$$

$$704 \text{ } ^\circ\text{C} : \log t_r = 1.081 - 1.167 \log \epsilon_0 - 0.162 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (7)$$

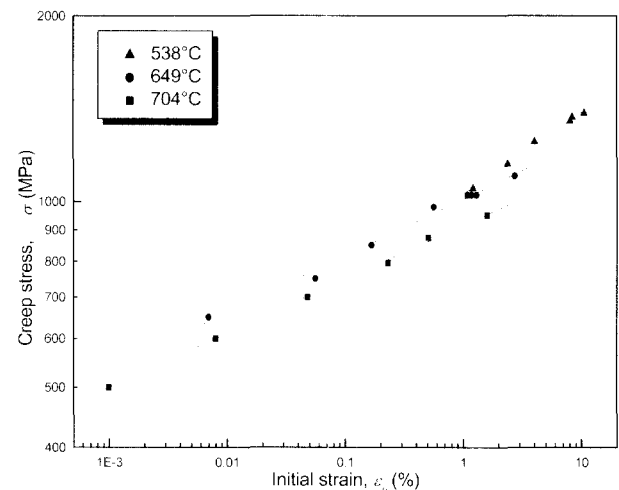


Fig. 3 Relationship between creep stress and initial strain of U720 at 538, 649 and 704 °C

식 (5)~(7)에서와 같이 초기연신률은 크리프 수명과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이, 초기연신률은 고온 크리프의 여러 가지 특성, 즉 크리프 응력, 파단수명, 정상 크리프 속도 및 총 크리프 속도와 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있다. 이는 Oh(오 등, 1993; 오 등, 1993; 오 등, 1993)의 발표와 매우 일치한다.

식 (5)~(7)은 $\log t_r$, $\log \epsilon_0$ 가 2차 함수적 관계식이므로 다음과 같이 모델화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \log t_r &= \log A' + B' \log \epsilon_0 + C' (\log \epsilon_0)^2 & (8) \\ &= \log A' + \log \epsilon_0 (B' + C' \log \epsilon_0) \\ &= \log(A' \epsilon_0^{B' + C' \log \epsilon_0}) \end{aligned}$$

$$\text{즉, } t_r = A' \epsilon_0^{B' + C' \log \epsilon_0} \quad (9)$$

여기서 A' , B' , C' 는 재료와 온도의 함수이다.

3.4 크리프 응력과 크리프 수명과의 상관성

Fig. 5는 표준 열처리한 재료(U720)의 고온 크리프 응력 σ (MPa)와 크리프 수명(파단시간) t_r (h)과의 정량적 상관성을 나타내고 있다.

그래프에서 알 수 있듯이, 양대수 좌표에서 2차 함수적 관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 크리프 수명은 응력이 증가할수록 감소하며, 그 감소율은 온도가 높을수록 더욱 감소함을 알 수 있다.

이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

$$538^\circ\text{C}; \log \sigma = 3.129 - 0.034 \log t_r - 0.017 (\log t_r)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (10)$$

$$649^\circ\text{C}; \log \sigma = 3.035 - 0.020 \log t_r - 0.022 (\log t_r)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (11)$$

$$704^\circ\text{C}; \log \sigma = 2.961 - 0.052 \log t_r - 0.045 (\log t_r)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (12)$$

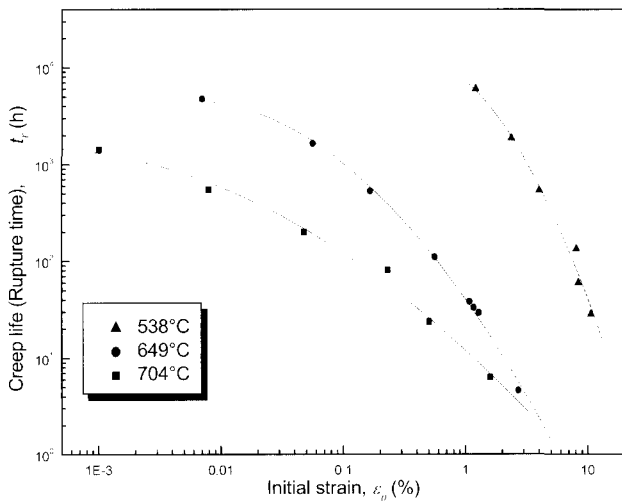


Fig. 4 Relationship between rupture time and initial strain of U720 at 538, 649 and 704°C

식 (10)~(12)는 시험온도와 초기연신률을 포함(온도-응력-수명-초기연신률)하는 수명예측식을 ISM에 의해 도출 할 필요가 있다.

3.5 LMP에 의한 크리프 수명예측

금속의 조직 변화는 일반적으로 보다 높은 고온에서는 보다 짧은 시간 안에 생기므로, 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)가 다음과 같이 정의되어 있다(Larson and Miller, 1952).

$$LMP = T(\log t_r + C_1) \quad (13)$$

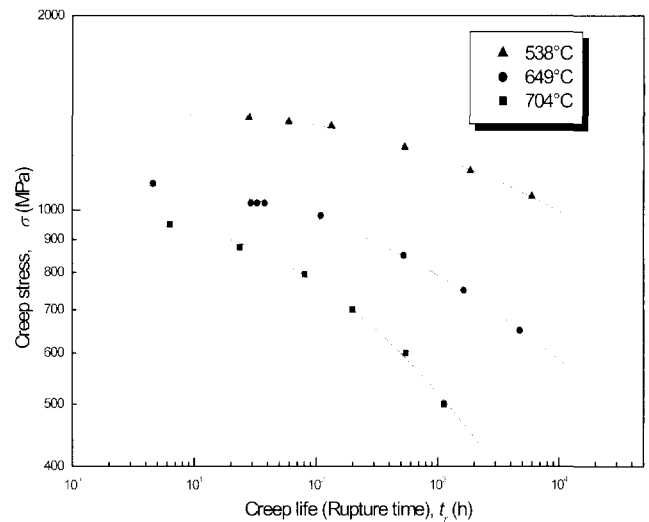


Fig. 5 Relationship between creep stress and creep life of U720 at 538, 649 and 704°C

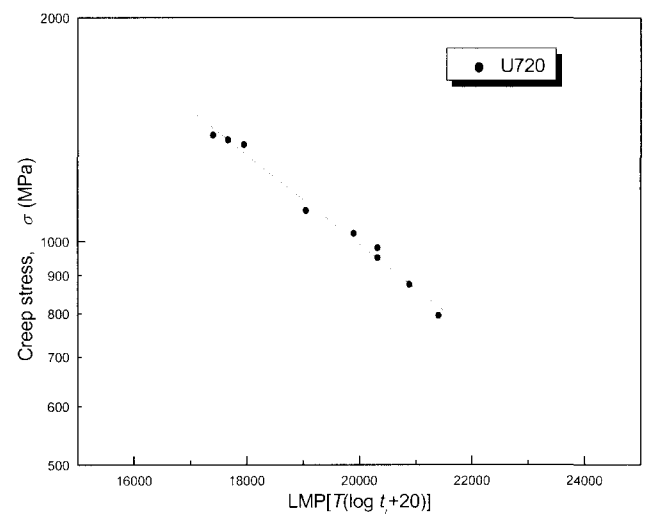


Fig. 6 Master creep curve of U720 at 538, 649 and 704°C

식(13)에서 T 는 절대온도(K)이고, C_1 은 고온 내열재료인 경우 20으로 재료상수이며, LMP는 응력($\log \sigma$)의 1차함수이므로 다음과 같다.

$$LMP = T(\log t_r + 20) = K_1 \log \sigma + K_2 \quad (14)$$

여기서 K_1 과 K_2 는 재료상수이다.

식 (14)는 온도 538, 649, 704 °C에서의 $\log \sigma$ 와 LMP[$T(\log t_r + 20)$]의 그래프(Fig. 6)에서 K_1, K_2 의 값은

$$K_1 = 16460.4, K_2 = 69312.8 \text{ 이므로 LMP는 다음과 같이 된다.}$$

$$LMP = T(\log t_r + 20) = 16460.4 \log \sigma + 69312.8 \quad (R^2=0.99) \quad (15)$$

3.6 LMP-ISM에 의한 크리프 수명예측

초기연신률법(ISM)(오 등, 1993; 오 등, 1993; 오 등, 1993)에 의한 크리프 수명예측식과 앞장에서 구한 LMP법(Ling, 1990)을 이용한 크리프 파단수명식을 짐복시켜 서로 연립하여 구한 크리프 온도, 응력, 수명, 초기연신률을 포함하는 식을 LMP-ISM에 의한 크리프 수명예측식이라 하여 다음과 같이 도출하였다.

앞장에서 LMP의 식은 $C_1=20$ 이므로

$$T(\log t_r + 20) = K_1 \log \sigma + K_2 \quad (16)$$

$$\log t_r = \frac{K_1 \log \sigma + K_2}{T} - 20 \quad (17)$$

이다. 여기서 K_1, K_2 는 재료 상수이고, T 는 절대온도($K=C+273$)이다.

초기연신률법에 의한 파단수명식은 식 (5)~(7)에서 도출된 바와 같이, 그 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log t_r = \log A' + B' \log \epsilon_0 + C' (\log \epsilon_0)^2 \quad (18)$$

따라서 식(17)과 식(18)를 연립해서 풀면, LMP-ISM 크리프 수명예측식은 다음과 같다.

$$2 \log t_r = \frac{K_1 \log \sigma + K_2}{T} + \log A' + B' \log \epsilon_0 + C' (\log \epsilon_0)^2 - 20 \quad (19)$$

여기서 $K_1, K_2, \log A', B'$ 및 C' 의 값은 다음과 같다.

$$K_1 = 16460.4, K_2 = 69312.8$$

$$\log A' = 74.586 - 0.146T + 7.233 \times 10^{-5}T^2 \quad (R^2=0.99)$$

$$B' = 84.111 - 0.192T + 1.071 \times 10^{-4}T^2 \quad (R^2=0.99)$$

$$C' = -18.448 + 0.034T - 1.582 \times 10^{-5}T^2 \quad (R^2=0.99)$$

이와 같이 $\log A', B'$ 및 C' 의 값은 Fig. 4에서 도출된 일반식(18)에서 구한 것이다.

3.7 ISM에 의한 크리프 수명예측

온도, 응력, 수명, 초기연신률이 포함되는 ISM에 의한 크리프 수명예측식은 다음과 같이 도출된다.

식 (4)에서 $\sigma = A \epsilon_0^B$ 와 식 (9)에서 $t_r = A' \epsilon_0^{B+C \log \epsilon_0}$ 를 풀면,

$$\sigma t_r = AA' \epsilon_0^{B+B'C \log \epsilon_0} \text{ 가 된다.}$$

따라서 ISM에 의한 크리프 수명예측식은 다음과 같이 도출된다.

$$t_r = AA' \epsilon_0^{B+B'C \log \epsilon_0} \sigma^{-1} \quad (20)$$

$$\therefore t_r = \alpha \epsilon_0^\beta \sigma^{-1} \quad (21)$$

여기서 α, β 의 값은 다음과 같다.

$$\alpha = \log(AA') = 10^{71.598 - 0.139T + 6.823 \times 10^{-5}T^2}$$

$$\beta = \beta' + C' \log \epsilon_0$$

$$\beta' = B + B'$$

$$= 85.679 - 0.195T + 1.087 \times 10^{-4}T^2$$

$$C' = 18.448 + 0.034T - 1.582 \times 10^{-5}T^2$$

위 식 (21)에서 알 수 있듯이, 어떤 응력(σ), 온도(α, β)와 초기연신률(ϵ_0)을 알 때, 크리프 수명(t_r)을 계산할 수 있다.

Fig. 7은 LMP식 (14), LMP-ISM식 (19)와 ISM에 의한 크리프 수명예측식 (21)에서 구한 크리프 설계곡선(creep design curve)을 나타내고 있다. 이들 3가지 식은 표준 열처리용 재료에 대한 실제 실험값들을 538, 649, 704 °C에서 서로 비교한 결과이다.

그림에서 명백히 증명될 수 있듯이, LMP식은 단시간에서는 큰 차이가 없지만, 장시간의 크리프 수명예측에는 실험값과 큰 오차가 있으므로 이 식을 이용하면 매우 위험함을 알 수 있다. LMP-ISM식도 LMP식과 다소 비슷한 경향을 보이고 있지만, 이는 10²시간 이상의 장시간 크리프 수명예측에는 이용될 수 없음이 확인되었다. 하지만, ISM식만이 10³시간의 장시간 수명예측은 물론 모든 시간에서 실험값과 매우 일치하기 때문에 본 연구의 ISM에 의한 크리프 예측식의 신뢰성이 매우 높음이 확인되었다. 그 이유는 Fig. 8에서도 다시 한번 확인할 수 있다.

Fig. 8은 ISM 수명예측식 (21)에서 계산된 크리프 수명(파단시간)과 실제 파단시간(실험값)과의 관계를 나타내고 있다. 그래프

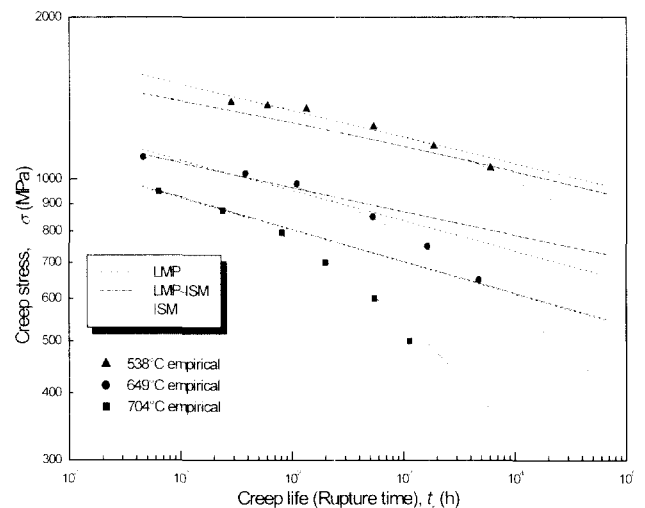


Fig. 7 Comparison of creep design curves for U720 by ISM with those by LMP-ISM, LMP methods and the empirical data at 538, 649 and 704 °C

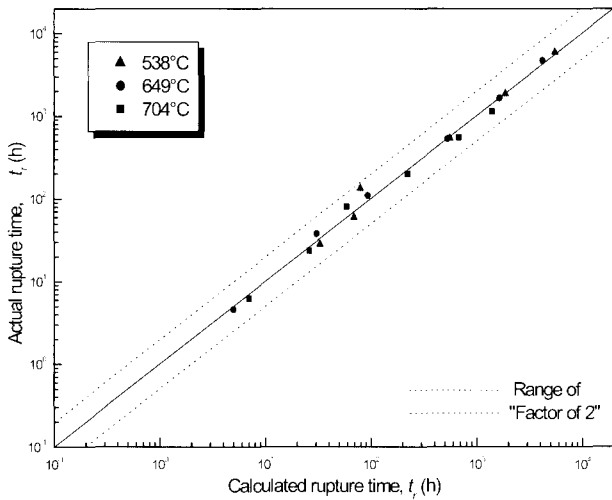


Fig. 8 Comparison of actual rupture time and calculated rupture time for U720 by ISM at 538, 649 and 704°C

에서 알 수 있듯이, ISM에 의한 크리프 수명예측식에서 계산된 크리프 수명과 실제 실험에 의한 값이 거의 일치하고 있다. 그러므로 크리프 온도, 응력, 초기연신률을 고려한 크리프 파단 수명예측식으로써 신뢰성이 높음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 도출된 ISM에 의한 크리프 수명예측식은 그 이용가치가 매우 크리라고 생각된다.

4. 결 론

항공기용 가스터빈 재료의 초내열합금(U720)에 대한 고온 크리프 수명예측에서, 초기연신률법(ISM)에 의한 수명예측식 도출과 타 예측법(LMP, LMP-ISM)과의 비교 후 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) LMP에 의한 크리프 수명예측식은 다음과 같으며, 10²시간까지는 매우 유효하지만, 장기간 (10³~10⁵h)예측에는 실제 파단시간보다 더욱 길게 예측되므로 위험함을 알 수 있다.

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

$$C_1 = 20, K_1 = 16460.4, K_2 = 69312.8$$

(2) 초기연신률은 응력이 높아질 수록 증가하고, 온도가 상승할 수록 그 증가율도 더욱 상승하며, 응력(σ)과 초기연신률(ε₀)의 관계식은 다음과 같이 모델화될 수 있다.

$$\sigma = A \epsilon_0^B \quad (A, B \text{는 온도항이 포함되는 재료상수})$$

여기서 A, B의 값은 각각 다음과 같다.

$$A = 10^{0.012 + 0.007T - 4.1 \cdot 10^{-4}T^2}$$

$$B = 1.568 - 0.003T + 1.541 \times 10^{-6}T^2$$

(3) 초기연신률법(ISM)에 의한 크리프 수명예측식이 다음과 같이 도출되었으며, LMP와 LMP-ISM의 예측식보다 더욱 신뢰성이 높음이 확인되었고, 장시간(10³~10⁵h) 크리프 수명예측에서

도 그 신뢰성이 높게 나타남이 확인되었다.

$$t_r = \alpha \epsilon_0^\beta \sigma^{-1}$$

여기서 α, β의 값은 다음과 같다.

$$\alpha = \log(AA') = 10^{71.508 - 0.130T - 6.823 \cdot 10^{-4}T^2}$$

$$\beta = \beta' + C' \log \epsilon_0$$

$$\beta' = B + B'$$

$$= 85.679 - 0.195T + 1.087 \times 10^{-4}T^2$$

$$C' = -18.448 + 0.034T - 1.582 \times 10^{-5}T^2$$

참 고 문 헌

오세규, 김선진, 정순억, 오정환(1993). “내열강의 마찰용 접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법-(3), 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법”, 대한기계학회논문집, 제17권 제4호, pp 746~754.

오세규, 윤병환, 정순억, 오정환(1993). “내열강의 마찰용 접 최적화와 장시간 고온크리프 수명의 초기 실시간 예측법-(1), SUH3과 SUS303의 마찰용접 최적화와 용접재의 고응력 고온크리프 특성”, 대한기계학회논문집, 제17권 제3호, pp 512~519.

오세규, 정순억, 오정환(1993). “내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법-(2), SCM4와 SUS304 및 그 용접재의 고응력 고온 크리프 특성과 초기 변형률의 상관성”, 대한기계학회논문집, 제17권 제3호, pp 520~526.

최승주, 유영수, 김인수 외 한국기계연구원 5명(1997). “항공기 가스터빈 핵심 재료 기술 개발”, 과학기술처 연구과제 최종 보고서, pp 9~49.

Larson, F. R. and Miller, J.(1952). “A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses”, Transaction of the ASME, pp 765~775.

Ling, Lu.(1990). “Effects of Carbon and Boron on Alloy720”, Ph. M. Thesis, Purdue University, USA.

Oh, S. K., Kim, S. J. and Joon, T. E.(1996). “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.

Oh, S. K.(1998). “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.

2000년 12월 18일 원고 접수
2001년 3월 30일 수정본 채택