

초내열합금 U720의 노출시험에 따른 크리프 특성

Creep Properties of Superalloy Udimet 720 in relation to Exposed

공유식 · 오세규

Y. S. Kong, S. K. Oh

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

Abstract : Gas turbine performance is highly dependent on the engine performance which is closely related to the engine materials since they are exposed to severe working environments, i.e. high temperature and high stresses. For this reason, advanced materials with improved properties are required for the engine. The purpose of this research is to develop key materials technologies for aircraft industry and to tester domestic production of related parts. 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 the gas turbine engine materials) was performed on round-bar type specimens under pure load at the temperatures of 538, 649 and 704°C.

1. 서론

가스터빈 엔진의 출력 향상에 대한 요구가 증대되고 니켈기 초내열합금과 같은 터빈엔진 소재의 사용조건이 점차 고온, 고응력의 더욱 가혹한 조건으로 변화함에 따라 재료의 퇴화에 대한 철저한 이해가 요구되고 있다¹⁾. 이는 가스터빈 엔진의 재료가 고온 및 부식성 분위기가 조합된 조건에서 얼마나 견딜 수 있는가에 달려있으므로 우수한 특성을 갖는 부품소재의 개발과 공정기술을 개발하는 것은 재료기술 향상에 필수적인 요건이라 하겠다.

가스터빈 디스크용 소재로서는 Ni기, Fe기 초내열합금과 12Cr강 및 저합금강이 주로 사용되고 있다. 즉, 대형터빈에서는 Cr-Mo-V, Ni-Cr-Mo-V강 등의 저합금강이 사용되고, 중형터빈에서는 12Cr강, A286 등의 Fe기 초내열합금이 사용되며, 소형경량화를 위한 고효율의 소형터빈에서는 718합금의 Ni기, Fe기 초내열합금이 사용되고 있다. 이와 같이 초내열합금이 고효율의 소·중형 터빈에서만 주로 사용되는 이유가 초내열합금 디스크는 약 800°C까지의 온도에서도 별도의 냉각장치 없이 사용할 수 있어 이로 인한 가스터빈의 소형·경량

화와 고효율화에 적합하기 때문이다²⁾.

따라서 본 연구에서는 실제사용 온도가 450~700°C인 항공기용 가스터빈 재료인 Udimet 720(U720)의 고온(538°C/1000°F, 649°C/1200°F, 704°C/1300°F) 크리프 특성으로서 크리프 응력과 정상 크리프 속도, 정상 크리프 속도와 초기연신률, 초기연신률과 총 크리프 속도, 크리프 응력과 크리프 수명 등의 상관성 조사를 수행하였으며, 일반적으로 현재 널리 쓰이고 있는 Larson-Miller Parameter(LMP)에 의하여 크리프 수명예측식을 도출하였다³⁾.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 니켈기 초내열합금인 U720은 분말야금(powder metallurgy)한 합금이며, 열간 정수압(hot isostatic pressing; HIP)으로 지름 230mm, 길이 205mm로 제작되었다. 사용재료의 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 그리고 사용재료를 표준열처리 후 실제 사용조건에 맞게 장시간 노출시험(800°C × 1000h)을 행한 각 조건을 Table 3에 나타내었다. 여기서 표준열처리는 용체화처리(1105°C × 4h) + 공냉 → 1차시효(650°C × 24h) + 공냉 → 2차시효(760°C × 1

접수일 : 2001년 2월 17일
공유식, 오세규 : 부경대학교 기계공학부

6h) + 공냉을 실시하였다. 또한 고온인장 및 크리프 시험편 제작은 지름 13mm, 길이 70mm 봉으로 방전가공(electrospark machining)하였고, 노출시험한 후 선반가공 및 연삭가공으로 마무리하였다. 사용된 시험편 형상은 Fig. 1과 같으며, 크리프 시험기는 미국 SATEC사의 DLF-10-1029 크리프 시험기를 사용하였다.

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)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area ψ (%)	Vickers hardness Hv
U720	1385	1025	10	11.9	466

(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

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

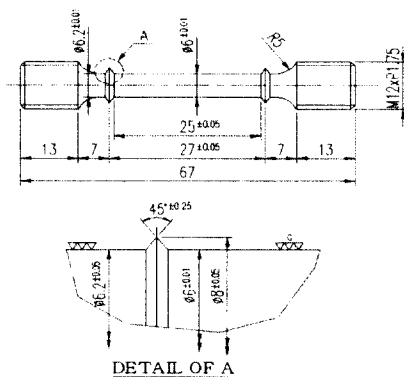


Fig. 1 Shape and dimension of creep specimen (ASTM E139-83) (unit: mm)

2.2 실험 방법

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온 인장시험

Fig. 2는 U720에 대한 장시간 노출시험 후 상온(20°C), 538, 649 및 704°C에서의 인장시험을 수행한 결과를 나타낸다.

고온 인장시험의 결과를 보면, 상온에 비해 538°C에서 인장강도가 가장 높게 나타났으며, 649°C에서 704°C로 온도가 상승함에 따라 인장강도가 급격하게 감소함을 알 수 있다.

538°C까지의 고온에서 인장강도가 상승하는 이유는 니켈기 초내열합금인 U720은 일반 금속재료의 성질과는 달리, γ' 상의 온도에 따른 슬립계(slip system) 변화에 기인한다⁴⁾고 생각된다.

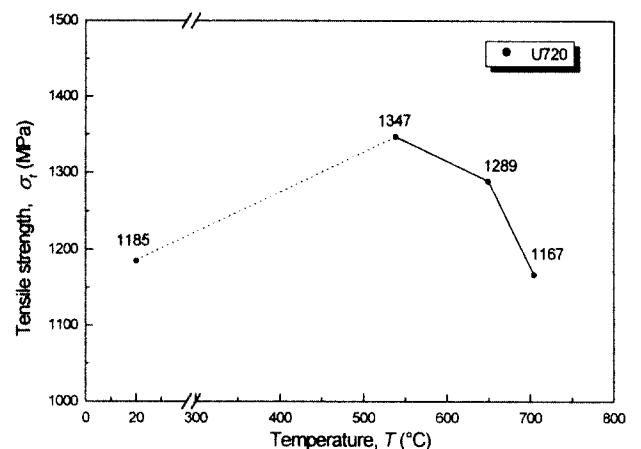
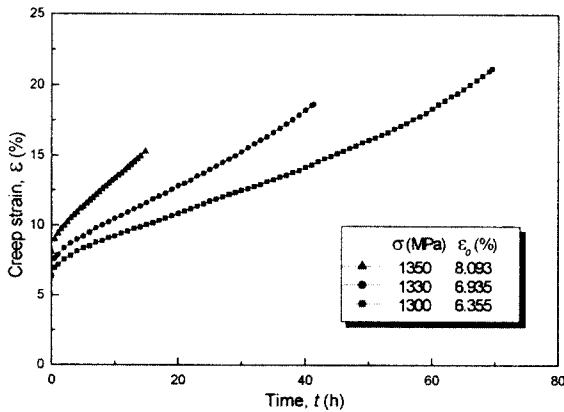


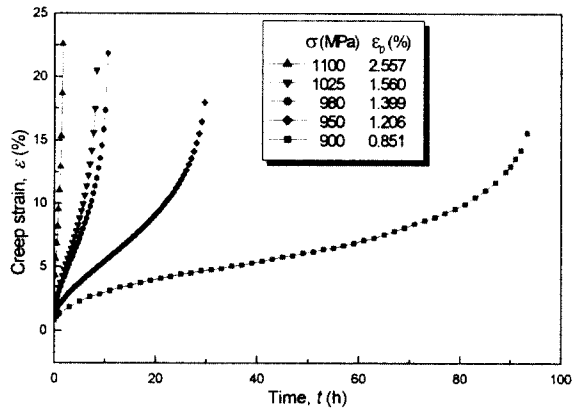
Fig. 2 Relationship between tensile strength and temperature for U720 at 538, 649 and 704°C

3.2 크리프 곡선

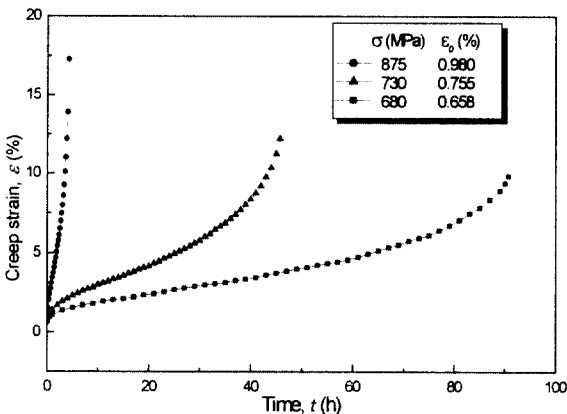
일정 온도(538, 649, 704°C)하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 U720 재료의 크리프 곡선은 각각 Fig. 3(a), (b), (c)에 표시한 바와 같다. 그래프에서 알 수 있듯이, 동일 온도하에서 응력이 증가함에 따라 초기연신률은 모두 증가하지만 파단수명은 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 초기연신률의 증감은 응력, 파단수명 및 온도에 민감하게 상관성이 있음을 알 수 있다.



(a) 538°C



(b) 649°C



(c) 704°C

Fig. 3 Creep curve for U720 at 538, 649 and 704°C

Table 4는 Fig. 3(a), (b), (c)를 통하여 Table 3의 장시간 노출시험 조건에 의한 고온 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 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

3.3 크리프 응력과 정상 크리프 속도와의 상관성

Fig. 4와 Fig. 5는 538, 649, 704°C에서의 크리프 시험결과에서 크리프 응력 σ (MPa)와 정상 크리프 속도 $\dot{\epsilon}$ (%/h) 및 총 크리프 속도 $\dot{\epsilon}_T$ (%/h)와의 상관성을 나타내는 그래프이다.

양대수 좌표에서 정상 크리프 속도와 총 크리프 속도는 응력이 높아질 수록 증가하며, 온도가 상승할 수록 그 증가율이 높아지고 있음을 알 수 있고, 이는 Oh의 보고^{5, 6)}와 일치한다. 그 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 4에서 $\sigma - \dot{\epsilon}$ 관계식

538°C; $\log \sigma = 0.042 \log \dot{\epsilon} + 3.147$, ($R^2=0.97$) (1)

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

704°C; $\log \sigma = 0.070 \log \dot{\epsilon} + 2.921$, ($R^2=1.00$) (3)

Fig. 5에서 $\sigma - \dot{\epsilon}_T$ 관계식

538°C; $\log \sigma = 0.029 \log \dot{\epsilon}_T + 3.131$, ($R^2=0.94$) (4)

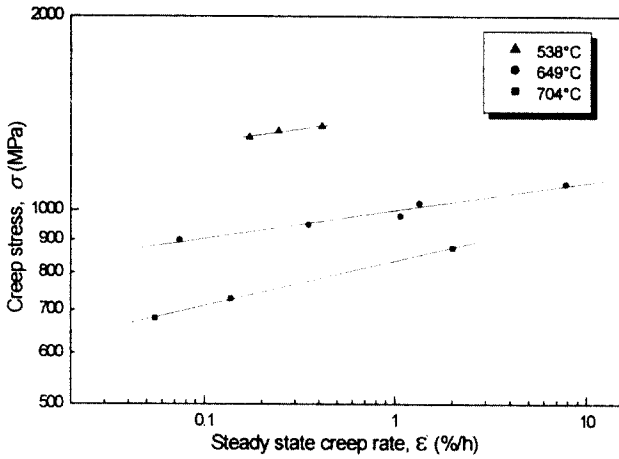


Fig. 4 Relationship between creep stress and steady state creep rate of U720 at 538, 649 and 704°C

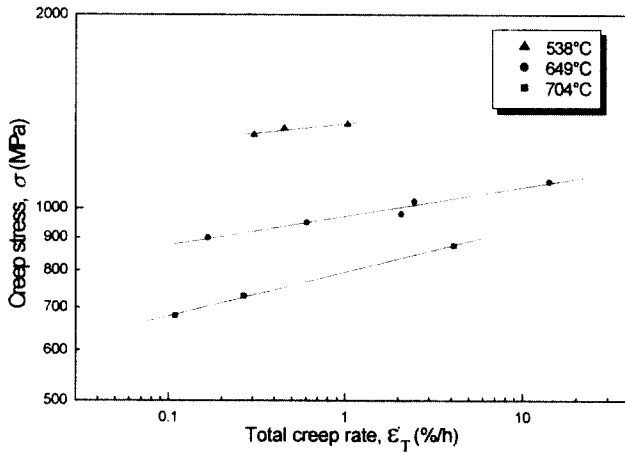


Fig. 5 Relationship between creep stress and total creep rate of U720 at 538, 649 and 704°C

649°C; $\log \sigma = 0.045 \log \dot{\epsilon}_T + 2.987$, ($R^2=0.98$) (5)

704°C; $\log \sigma = 0.069 \log \dot{\epsilon}_T + 2.900$, ($R^2=0.99$) (6)

3.4 초기 연신률과 크리프 속도와의 상관성

Fig. 6과 Fig. 7은 초기연신률 ϵ_0 (%)와 정상 크리프 속도 $\dot{\epsilon}$ (%/h) 및 총 크리프 속도 $\dot{\epsilon}_T$ (%/h)와의 상관성을 각각 구한 실험결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 초기연신률은 정상 크리프 속도 및 총 크리프 속도가 상승할 수록 선형적으로 증가하며, 그 증가율도 온도가 상승할 수록 더욱 높아짐을 알 수 있다. 이는 Oh의 보고⁷⁻⁹⁾와 매우 일치한다. 그 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 6에서 $\dot{\epsilon} - \epsilon_0$ 관계식

538°C; $\log \dot{\epsilon} = 3.617 \log \epsilon_0 - 3.663$, ($R^2=1.00$) (7)

649°C; $\log \dot{\epsilon} = 4.250 \log \epsilon_0 - 0.751$, ($R^2=0.99$) (8)

704°C; $\log \dot{\epsilon} = 9.195 \log \epsilon_0 - 0.351$, ($R^2=1.00$) (9)

Fig. 7에서 $\dot{\epsilon}_T - \epsilon_0$ 관계식

538°C; $\log \dot{\epsilon}_T = 5.077 \log \epsilon_0 - 4.602$, ($R^2=1.00$) (10)

649°C; $\log \dot{\epsilon}_T = 4.089 \log \epsilon_0 - 0.446$, ($R^2=0.99$) (11)

704°C; $\log \dot{\epsilon}_T = 9.297 \log \epsilon_0 + 0.662$, ($R^2=1.00$) (12)

식(7)~(12)에서 알 수 있듯이, 초기연신률을 크리프 초기에 측정하면 장시간의 크리프 특성을 정량적으로 예측할 수 있음을 보여준다.

3.5 크리프 응력과 크리프 수명과의 상관성

Fig. 8은 크리프 응력 σ (MPa)와 크리프 수명(파단시간) t_r (h)과의 상관성을 나타내는 실험결과

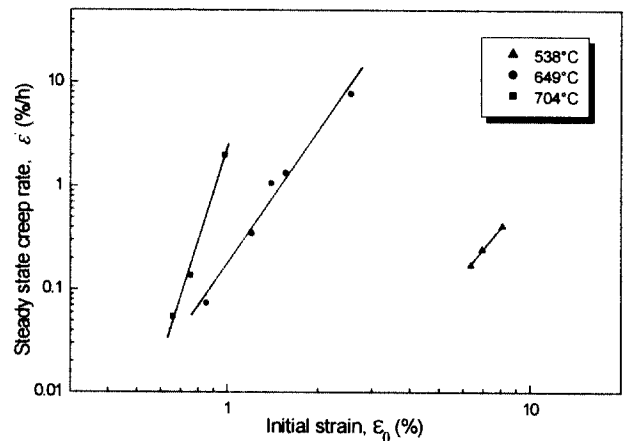


Fig. 6 Relationship between steady state creep rate and initial strain of U720 at 538, 649 and 704°C

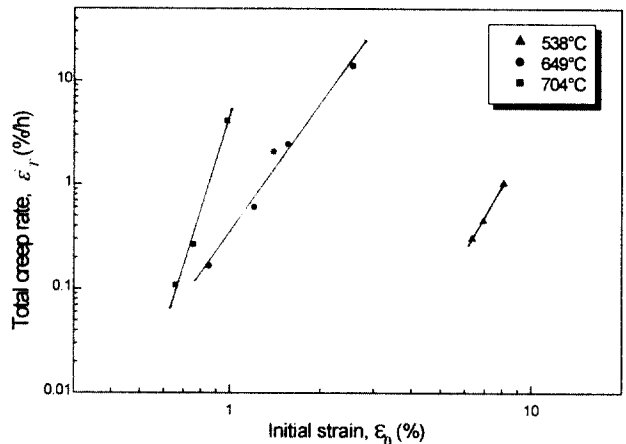


Fig. 7 Relationship between total creep rate and initial strain of U720 at 538, 649 and 704°C

로서, 크리프 설계 곡선(creep design curve)이다. 그림에서 크리프 수명은 응력이 증가할 수록 선형적으로 감소하며, 온도가 상승할 수록 그 감소율이 더욱 커짐을 알 수 있다.

$$538^{\circ}\text{C}; \log \sigma = -2.302 \times 10^{-2} \log t_r + 3.158, (R^2=0.91) \quad (13)$$

$$649^{\circ}\text{C}; \log \sigma = -4.957 \times 10^{-2} \log t_r + 3.050, (R^2=0.97) \quad (14)$$

$$704^{\circ}\text{C}; \log \sigma = -8.046 \times 10^{-2} \log t_r + 2.993, (R^2=1.00) \quad (15)$$

식(13)~(15)는 온도 538, 649, 704°C에서 응력이 결정되면, 단기간 실험을 통하여 외압에 의해 장시간의 크리프 수명을 예측할 수 있으나(10²h까지는 대체로 안전) 고온일 수록 장시간(10³~10⁵h)에서는 실제 수명이 계산 예측치 보다 훨씬 단축되므로, 더욱 신뢰성 있는 장시간 예측을 위한 연구가 필요하다^{5,9)}.

3.6 LMP에 의한 크리프 수명 예측

금속의 조직 변화는 일반적으로 보다 높은 고온에서는 보다 짧은 시간 안에 생기므로, 실제 요구되는 온도보다 높은 온도에서 응력-과단시간을 조사하여, 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외압에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 Larson-Miller Parameter(LMP)에 의해 다음과 같이 정의되어 있다¹⁰⁾.

$$\text{LMP} = T(\log t_r + C_1) \quad (16)$$

식(16)에서 T는 절대온도(K)이고, C₁은 고온 내열재료에서는 20으로 재료정수를 적용하고 있으며, LMP는 응력(log σ)의 1차함수이므로 다음과 같다.

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

여기서 K₁과 K₂는 재료상수이다.

식(17)은 log σ와 LMP[T(log t_r+20)]의 그래프 Fig. 9에서 K₁, K₂의 값은 K₁=-14267.9, K₂=62099.9 이므로 LMP는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= T(\log t_r + 20) \\ &= -14267.9 \log \sigma + 62099.9, (R^2=0.99) \quad (18) \end{aligned}$$

4. 결 론

가스터빈 재료인 U720의 표준열처리 후 장시간 노출시험에 따른 고온 크리프 특성을 538, 649, 704°C에서 조사하였고, LMP에 의한 크리프 수명 예측식을 도출한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 실제 사용조건에 따른 장시간 노출시험(800°C × 1000h)한 크리프 수명은 응력이 증가할 수록 감소하며, 온도가 상승할 수록 그 감소율이 더욱 커짐을 알 수 있었다.
- 2) 정상 크리프 속도나 총 크리프 속도 등 크리프 특성이 초기연신률과 정량적 상관관계가 성립함에 따라 초기연신률에 의한 장시간 수명예측이 가능함을 알 수 있었다.
- 3) LMP에 의한 크리프 수명 예측식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\begin{aligned} \text{LMP}[T(\log t_r + C_1)] &= K_1 \log \sigma + K_2 \\ C_1 &= 20, K_1 = -14267.9, K_2 = 62099.9 \end{aligned}$$

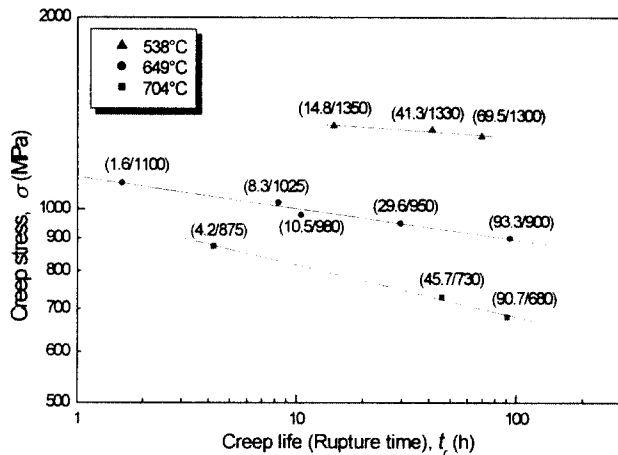


Fig. 8 Relationship between creep stress and creep life of U720 at 538, 649 and 704°C

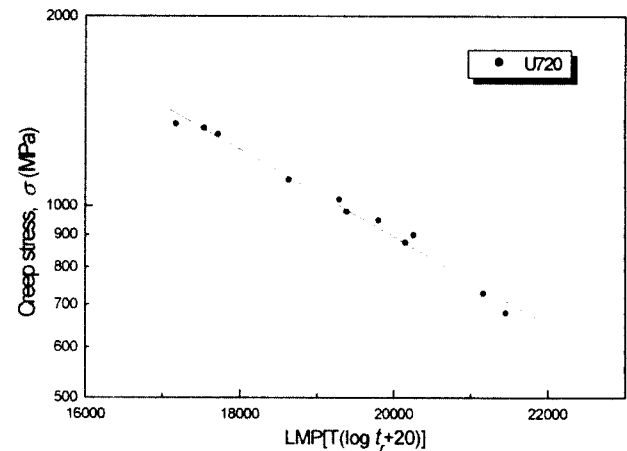


Fig. 9 Master creep curve of U720 at 538, 649 and 704°C

참고문헌

1. 나영상, 김승언, 박노광, "X선 회절법을 이용한 Udimet 720Li에서의 시그마상 석출거동 연구", 대한금속학회지, 제36권, 제4호, pp. 481~485, 1998
2. 최승주, 유영수, 김인수 외 한국기계연구원 5명, "항공기 가스터빈 핵심 재료 기술 개발", 과학기술처 연구과제 최종 보고서, pp. 9~49, 1997
3. Ling. Lu., "Effects of Carbon and Boron on Alloy 720", MS Thesis, Purdue University, USA, 1990
4. 조현수, 서성재, "Inconel 713C와 SCM440의 마찰용접", 대한용접학회지, 제15권, 제6호, pp. 78~84, 1997
5. 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
6. 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
7. 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
8. Oh, S. K., Kim, S. J., Jeon, T. E., "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 Angels, pp. 275~279, 1996
9. Oh, S. K., "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
10. Larson, F. R and Miller, J., "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Transaction of the ASME, pp. 765~775, 1952