

핵융합로용 저방사화 철강재료(RAFs)의 크리프 특성평가

공유식* · 윤한기** · 남승훈***

*부경대학교 기계공학부

**동의대학교 기계공학과

***한국표준과학연구원

Evaluation on Creep Properties of Reduced Activation Ferritic Steel(RAFs) for Nuclear Fusion Reactor

YU-SIK KONG*, HAN-KI YOON** AND SEUNG-HOON NAHM***

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Dongeui University, Busan, Korea

***Institute of Industrial Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Reduced Activation Ferritic Steel; RAFs 저방사화 철강재, Creep Life Prediction 크리프 수명예측, Larson-Miller parameter LMP 라손-밀러 파라미터, Creep Properties 크리프 특성, Rupture Time 파단시간

ABSTRACT: Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steels (RAFs) are leading candidates for structural materials of a D-T fusion reactor. One of the RAFs, JLF-1 (9Cr-2W-V, Ta) has been developed and has shown to have good resistance against high-fluency neutrino irradiation and good phase stability. Recently, in order to clarify the strengthening mechanisms at high temperatures, a new scheme to improve high temperature mechanical properties is desired. Therefore, the test technique development of high temperature creep behaviors for this material is very important. In this paper, the creep properties and creep life prediction, using the Larson-Miller parameter method for JLF-1 to be used for fusion reactor materials or other high temperature components, are presented at the elevated temperatures of 500°C, 550°C, 600°C, 650°C and 704°C. It was confirmed, experimentally and quantitatively, that a creep life predictive equation, at such various high temperatures, is well derived by the LMP method.

1. 서 론

21세기에는 환경부하가 작고 저렴한 가격의 에너지를 대량 공급할 수 있는 원자력 및 핵융합로를 이용한 해양 환경 친화적 핵에너지의 실현과 재료개발이 필수적인 과제로 인식되고 있다. 국제 에너지 산업 분야에서는 이러한 관점에서 대량의 고효율 청정에너지 생산을 추구하는 핵융합로 연구를 단계적으로 국제적 공동연구의 기구를 구성하여 추진하고 있다 (Abdou, 2002; Muroga et al., 2002).

저방사화 페라이트 마르텐사이트강은 오스테나이트강에 비해 열팽창계수가 낮고, 열전도도가 우수하므로 핵융합로 블랭킷(blanket)과 같은 열교환기 구조용 재료로 사용하기 위해서 개발 중에 있다. 저방사화 페라이트강은 Cr-Mo 내열강을 기본으로 한 합금강으로서 Mo을 W과 V으로 대체하여 핵융합로 구조물의 블랭킷, 제 1 벽 (first wall) 등으로서 사용하기에 적합하도록 기계적 성질과 방사화 특성 등의 성질을 개선한 재료이다. 내열 Cr-Mo강에서 Mo을 W, V, Ti으로 대체하면 고온인

장강도, 피로강도 및 크리프 강도 등이 향상되고 특히 W은 고용강화 및 석출경화 효과를 동시에 나타내며, V과 Ti은 석출강화 효과를 나타내는 것으로 보고되고 있다(Kohyama et al., 1996; Furuya et al., 1999). 한편, Fe-Cr-W형의 9~12 wt% Cr을 함유한 저방사화 페라이트강은 동일 계열 중 600°C 이하 온도에서의 고온강도가 오스테나이트계(STS304, 316)에 비해 우수한 페라이트강계 재료이다.

핵융합로용 저방사화 철강재료는 고온에서 장시간 사용되므로 정적크리프 및 사용반복에 따른 동적크리프에 의한 크리프 손상을 불시에 일으키게 되어 고장수리 및 파손에 의한 사고로 인하여 보수내지 교체 등의 재산손실과 인명피해가 우려된다. 그러므로 저방사화 철강재료(JLF-1)의 장시간(105 h)의 크리프 특성(Kohyama et al., 1994; Kim et al., 2001)을 단시간 실험을 통하여 파악하고 예측한다는 것은 핵융합로용 저방사화 철강재료의 설계, 제조, 운전 및 보수에 있어서 가장 중요하고 필수적인 요건이므로 장시간 크리프 안전수명 예측에 관한 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에는 JLF-1에 대한 크리프 특성을 규명하고, 라손-밀러 파라미터 (Larson-Miller parameter, LMP)에 의한 수명 예측식을 도출하였다.

제1저자 공유식 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산100
051-620-1608 kongys@mail1.pknu.ac.kr

2. 시험편 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서는 실제사용 온도가 400~500℃인 저방사화 철강재료(JLF-1)의 고온(500, 550, 600, 650, 700℃) 크리프 특성으로서 크리프 응력과 정상 크리프 속도, 정상 크리프 속도와 초기연신률, 초기연신률과 총 크리프 속도, 크리프 응력과 크리프 수명 등의 상관관계를 조사하였으며, 일반적으로 현재 널리 쓰이고 있는 LMP에 의하여 크리프 수명예측식을 도출하였다.

본 실험에 사용된 JLF-1의 화학조성과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타낸다. 그리고 시험편은 ASTM E139-96의 규격에 따라 직경 6mm, 표점거리 30mm로 선반가공 및 연삭가공하였다. 또한 크리프 시험기는 미국 SATEC사의 (DLF-10-1029)의 시험기를 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of JLF-1 (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	W	V	N	B
0.10	0.05	0.45	0.003	0.002	0.003	8.85	1.99	0.20	0.0231	0.002

Table 2 Mechanical properties of JLF-1

Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Reduction of area Ψ (%)	Elongation ϵ (%)	Hardness Hv
622	470	80	27.8	236

2.2 실험장치 및 실험방법

정적(static, pure) 및 동적(cyclic) 고온 크리프 시험이 가능한 크리프 시험장치는 미국 SATEC사의 용량 5톤급으로서, 라중과 변형의 서보제어가 가능한 전기-기계장치의 크리프 시험기(Model: DLF-10)이며, 최고온도 1200℃의 고온 크리프시험이 가능하며, 인장 및 압축시험도 가능하다.

온도 측정은 K형 열전대를 사용하여 시험편에 직접 부착 후 디크롬선으로 감아서 고정하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않는 무부하 상태에서 설정온도까지 10℃/min로 가열하였다. 그리고 부하 전에 노(furnace)의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에 도달하기까지 2단계로 상승하였으며, 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켰고, 실험 중 설정온도에서 ±1℃ 범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 크리프 시험 중 발생하는 연신율을 측정하기 위하여, 표점거리 30mm의 양단에 플랜지를 부착하였고, LVDT(linear variable displacement transformer)를 이용하여 측정하였으며, LVDT에서 나온 신호를 팬 레코더(pan recorder)에서 받아 결과를 나타내었다. 초기연신율(initial strain)은 하중을 가한 후 1분이 경과할 때 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고온 크리프 곡선

일정온도(500, 550, 600, 650, 700℃)하에서 응력을 변화시켰을 때, 실험적으로 구한 JLF-1의 크리프 곡선을 각각 Fig. 1(a), (b), (c), (d), (e)에 나타내었다. 그래프에서 응력이 증가함에 따라 파단수명은 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 700℃의 고온에서는 비교적 낮은 하중에서 크리프 거동이 더욱 현저함을 나타내고 있다. 이는 활성화 에너지로 인한 고온에서의 열거동이 커져, 확산이 활발해 지는데 기인하며, 온도가 크리프 특성치에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 또한 각 온도에서 응력의 차이(10MPa 이하)가 소폭임에도 불구하고 단시간에서 파단수명의 차이는 크게 나타난다. 그러므로 장시간에서 더욱 파단수명의 차이가 크게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 동일 온도 조건에서 장시간의 추가 실험을 통한 규명이 필요하다고 생각된다.

3.2 크리프 응력과 크리프 속도와의 상관성

Fig. 2와 Fig. 3은 크리프 응력(σ , MPa)과 정상크리프 속도($\dot{\epsilon}$, %/h), 총크리프 속도($\sigma - \dot{\epsilon}_T$, %/h)와의 상관관계를 나타낸다. 그래프에서 응력이 증가함에 따라 정상크리프 속도와 총크리프 속도는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 여기서 정상크리프 속도($\sigma - \dot{\epsilon}$)와 총크리프 속도($\sigma - \dot{\epsilon}_T$)의 관계식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 2에서 $\sigma - \dot{\epsilon}$ 관계식:

- 500℃; $\log \sigma = 0.032 \log \dot{\epsilon} + 2.523$ (1)
- 550℃; $\log \sigma = 0.044 \log \dot{\epsilon} + 2.438$ (2)
- 600℃; $\log \sigma = 0.053 \log \dot{\epsilon} + 2.338$ (3)
- 650℃; $\log \sigma = 0.069 \log \dot{\epsilon} + 2.202$ (4)
- 700℃; $\log \sigma = 0.145 \log \dot{\epsilon} + 2.075$ (5)

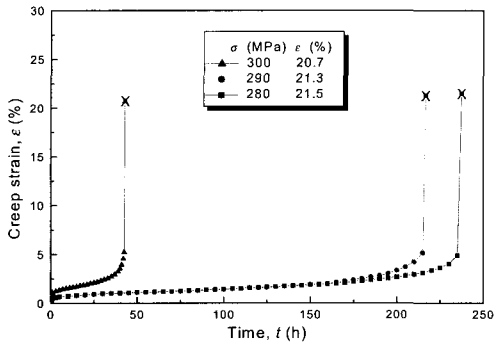
Fig. 3에서 $\sigma - \dot{\epsilon}_T$ 관계식:

- 500℃; $\log \sigma = 0.032 \log \dot{\epsilon}_T + 2.488$ (6)
- 550℃; $\log \sigma = 0.041 \log \dot{\epsilon}_T + 2.395$ (7)
- 600℃; $\log \sigma = 0.052 \log \dot{\epsilon}_T + 2.289$ (8)
- 650℃; $\log \sigma = 0.073 \log \dot{\epsilon}_T + 2.142$ (9)
- 700℃; $\log \sigma = 0.155 \log \dot{\epsilon}_T + 1.930$ (10)

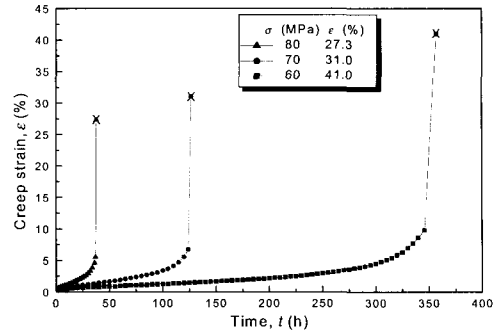
각각의 온도에서 얻어진 $\sigma - \dot{\epsilon}$ 의 관계식은, 다음과 같이 모델화 할 수 있다. 이는 Norton(1910)에 의해 제안된 모델식과 일치한다.

$$\dot{\epsilon} = m\sigma^n \tag{11}$$

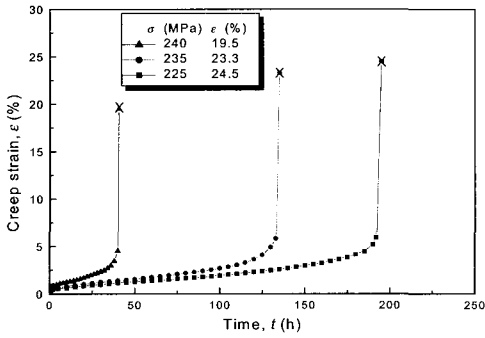
여기서 m, n은 온도에 의존하는 재료정수이다.



(a)

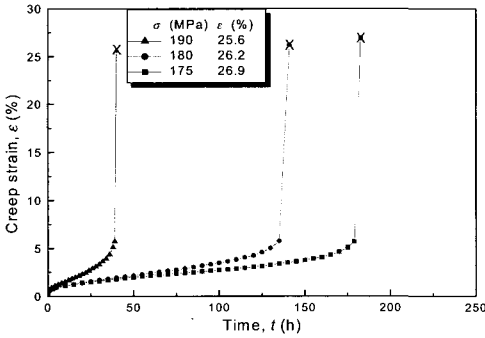


(e)



(b)

Fig. 1 Creep curves for JLF-1 at (a) 500°C (b) 550°C (c) 600°C (d) 650°C and (e) 700 °C



(c)

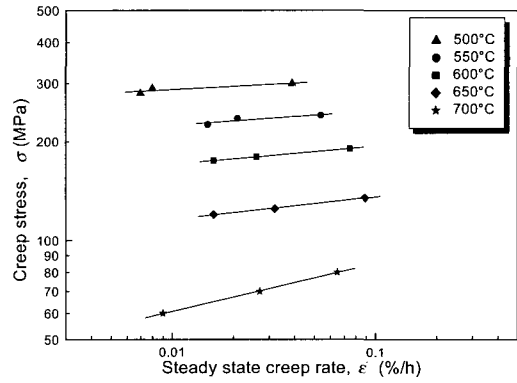
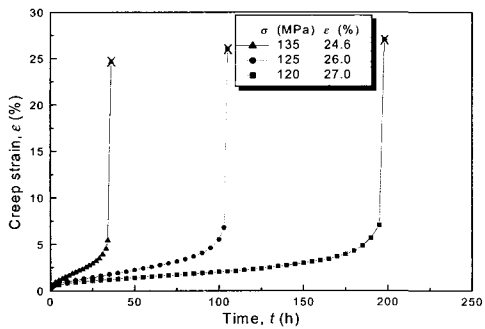


Fig. 2 Relationship between creep stress and steady state creep rate of JLF-1 at 500, 550, 600, 650 and 700 °C



(d)

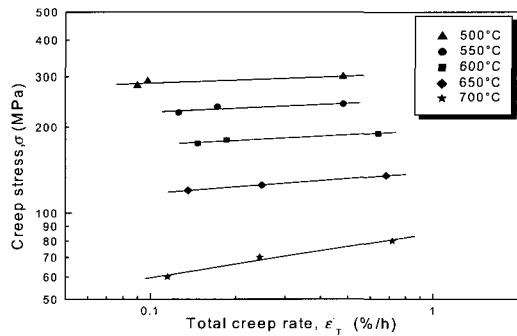


Fig. 3 Relationship between creep stress and steady state creep rate of JLF-1 at 500, 550, 600, 650 and 700 °C

3.3 초기연신율과 크리프 속도와의 상관성

Fig. 4와 Fig. 5는 크리프 초기연신율 ϵ_0 (%)와 정상크리프 속도 $\dot{\epsilon}$ (%/h) 및 총 크리프 속도 $\dot{\epsilon}_T$ (%/h)와의 실험결과를 나타낸다. 초기연신율은 정상크리프 속도 및 총크리프 속도가 상수할수록 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 4에서 $\dot{\epsilon} - \epsilon_0$ 관계식:

$$500^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon} = 6.586 \log \epsilon_0 + 0.084 \quad (12)$$

$$550^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon} = 4.177 \log \epsilon_0 - 0.028 \quad (13)$$

$$600^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon} = 5.449 \log \epsilon_0 + 0.636 \quad (14)$$

$$650^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon} = 7.564 \log \epsilon_0 + 2.160 \quad (15)$$

$$700^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon} = 7.477 \log \epsilon_0 + 3.048 \quad (16)$$

Fig. 5에서 $\dot{\epsilon}_T - \epsilon_0$ 관계식:

$$500^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon}_T = 6.499 \log \epsilon_0 + 1.154 \quad (17)$$

$$550^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon}_T = 4.418 \log \epsilon_0 + 0.993 \quad (18)$$

$$600^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon}_T = 5.498 \log \epsilon_0 + 1.572 \quad (19)$$

$$650^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon}_T = 7.171 \log \epsilon_0 + 2.874 \quad (20)$$

$$700^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon}_T = 7.022 \log \epsilon_0 + 3.799 \quad (21)$$

식(12)~(21)에서 알 수 있는 바와 같이, 크리프 초기에 초기연신율을 측정하면, 장시간의 크리프 특성을 정량적으로 예측할 수 있음을 보여준다.

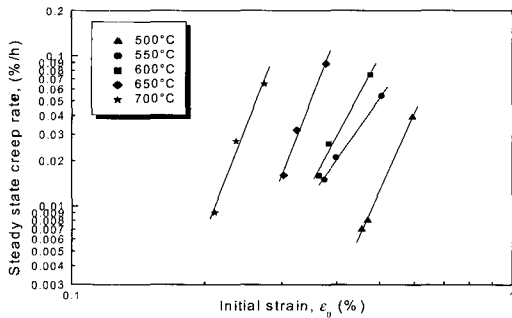


Fig. 4 Relationship between steady state creep rate and initial strain of JLF-1 at 500, 550, 600, 650 and 700 °C

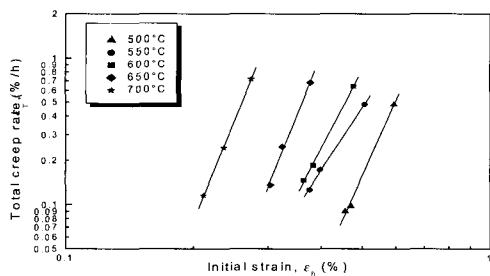


Fig. 5 Relationship between total creep rate and initial strain of JLF-1 at 500, 550, 600, 650 and 700 °C

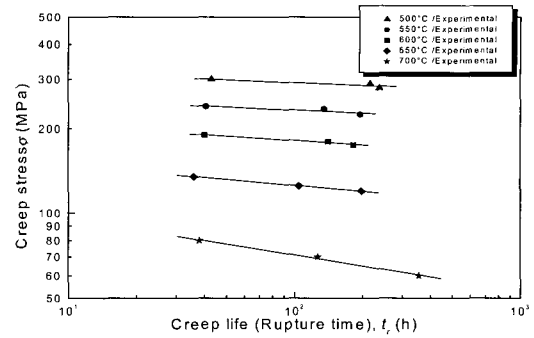


Fig. 6 Relationship between creep stress and creep life of JLF-1 at 500, 550, 600, 650 and 700 °C

3.4 크리프 응력과 크리프 수명과의 상관성

Fig. 6은 각 온도에서 얻어진 크리프 응력 σ (MPa)와 크리프 수명(파단시간) t_r (h)과의 상관성을 나타내는 실험결과이며, 이는 크리프 설계 곡선(creep design curve)이다. 그림에서 크리프 수명은 응력이 증가할 수록 감소하며, 온도가 상승할 수록 그 감소율이 더욱 커짐을 알 수 있다. 또한 양대수 좌표에서 선형적으로 나타나며, 이는 응력이 결정되면 단시간의 실험을 통하여 장시간의 크리프 수명을 예측할 수 있다.

3.5 크리프 응력과 초기연신율과의 상관성

Fig. 7은 크리프 응력 σ (MPa)와 초기연신율 ϵ_0 (%)와의 관계를 나타낸다. 응력이 증가함에 따라 초기연신율은 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 기울기는 온도가 증가 할수록 급격히 증가하고 있음을 보여 주고 있다. 이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

$$500^\circ\text{C}; \log \sigma = 2.527 + 0.216 \log \epsilon_0 \quad (22)$$

$$550^\circ\text{C}; \log \sigma = 2.435 + 0.179 \log \epsilon_0 \quad (23)$$

$$600^\circ\text{C}; \log \sigma = 2.372 + 0.287 \log \epsilon_0 \quad (24)$$

$$650^\circ\text{C}; \log \sigma = 2.353 + 0.527 \log \epsilon_0 \quad (25)$$

$$700^\circ\text{C}; \log \sigma = 2.520 + 1.090 \log \epsilon_0 \quad (26)$$

식 (22)~(26)에서 초기연신율은 크리프 응력과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 다음과 같이 모델화시킬 수 있으며, 이는 여러 재료에 대한 타 문헌(Oh et al., 1999; Kong et al., 2002)의 경우와 비교해서 모두 잘 일치하였다.

$$\begin{aligned} \log \sigma &= \log A + B \log \epsilon_0 \\ &= \log A \epsilon_0^B \end{aligned} \quad (27)$$

$$\sigma = A \epsilon_0^B$$

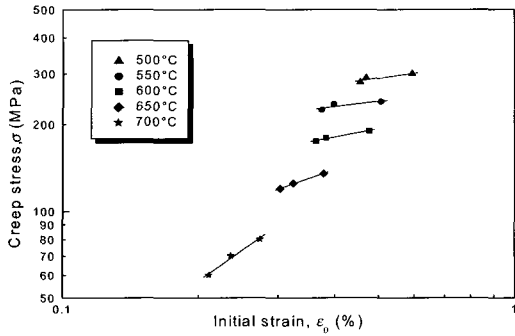


Fig. 7 Relationship between steady creep stress and initial strain of JLF-1 at 500, 550, 600, 650 and 700 °C

위 식에서 A, B는 온도 항이 포함되어 있는 재료상수이다. 그러므로 식 (22)~(26)에서 각 온도(절대온도)를 X축으로 두고, $\log A$ 항과 B 항을 Y축으로 하여 커비피팅 하면, 다음과 같이 $\log A$ 와 B를 도출할 수 있다.

$$\log A = 14.769 - 0.028T + 1.606 \times 10^{-5} T^2$$

$$B = 25.645 - 0.062T + 3.809 \times 10^{-5} T^2$$

3.6 크리프 수명과 초기연신율과의 상관성

Fig. 8은 크리프 수명(파단시간) $t_r(h)$ 과 초기연신율 $\epsilon_0(\%)$ 와의 상관관계를 나타낸다. 양대수 좌표에서 서로 선형적인 경향을 보이고 있다. 그리고 초기연신율이 증가할수록 크리프 수명이 감소함을 알 수 있다. 또한 그 기울기는 거의 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이들의 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

$$500^\circ\text{C}; \log t_r = 0.133 - 6.624 \log \epsilon_0 \quad (28)$$

$$550^\circ\text{C}; \log t_r = 0.072 - 5.179 \log \epsilon_0 \quad (29)$$

$$600^\circ\text{C}; \log t_r = -0.214 - 5.652 \log \epsilon_0 \quad (30)$$

$$650^\circ\text{C}; \log t_r = -1.654 - 7.058 \log \epsilon_0 \quad (31)$$

$$700^\circ\text{C}; \log t_r = -3.235 - 8.547 \log \epsilon_0 \quad (32)$$

식 (28)~(32)에서 초기연신율은 크리프 수명과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있다. 이상에서 알 수 있는 바와 같이, 초기연신율은 고온 크리프의 특성(크리프 응력, 파단수명, 정상크리프 속도 및 총크리프 속도)과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있다. 이는 타 문헌(Oh et al., 1999; Kong et al., 2002)의 발표와 일치하였다. 하지만 이 상관성은 더욱 낮은 응력 즉, 장시간 파단수명의 실제 데이터 연구가 추후 과제라 하겠다.

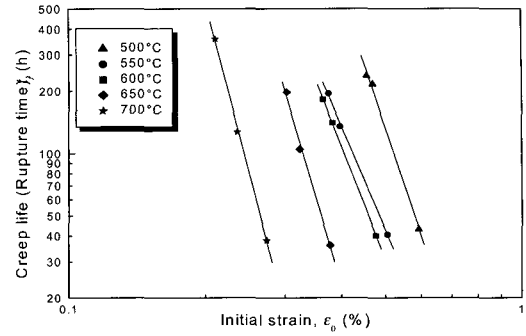


Fig. 8 Relationship between rupture time and initial strain of JLF-1 at 500, 550, 600, 650 and 700 °C

식 (28)~(32)에서 $\log t_r - \log \epsilon_0$ 의 관계식은 다음과 같이 모델화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \log t_r &= \log A' + B' \log \epsilon_0 \\ &= \log A' + \log \epsilon_0^{B'} \\ &= \log A' \epsilon_0^{B'} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\therefore t_r = A' \epsilon_0^{B'} \quad (34)$$

여기서 A' , B' 는 온도 항이 포함되어 있는 재료상수이다.

그러므로 식 (28)~(32)에서 각 온도(절대온도)를 X축으로 두고, $\log A'$, B' 항을 Y축으로 하여 curve fitting 하면, 다음과 같이 $\log A'$, B' 를 도출할 수 있다.

$$\log A' = -76.951 + 0.192T - 1.199 \times 10^{-4} T^2$$

$$B' = -143.748 + 0.328T - 1.943 \times 10^{-4} T^2$$

따라서 식 (22)~(34)에서 시험온도와 초기연신율을 포함하는 온도-응력-수명-초기연신율에 의한 수명예측식을 ISM(Initial Strain Method)에 의해 도출할 수 있으며, 이를 LMP식과 실제 실험치와 비교하여 그 신뢰성을 검토할 수 있겠다.

3.7 LMP에 의한 크리프 수명예측

금속의 조직 변화는 일반적으로 높은 온도에서는 짧은 시간 내에서 발생한다. 실제 요구되는 온도보다 몇백도 높은 온도에서의 응력-파단시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 LMP에 의해 다음과 같이 정의되어 있다(Larson and Miller, 1952).

$$LMP = T(\log t_r + C_1) \quad (35)$$

참고 문헌

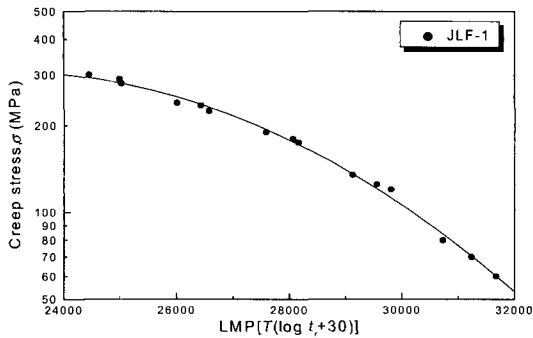


Fig. 9 Master creep curve of JLF-1 at 500, 550, 600, 650 and 700 °C

식 (35)에서 T는 절대온도(K)이고, C1은 30으로 재료정수이다. 그러므로 LMP는 응력의 2차 함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$LMP = T(\log t_r + 30) = K_1 \sigma^2 + K_2 \sigma + K_3 \tag{36}$$

여기서 K1, K2, K3은 재료상수이며, Fig. 9의 그래프에서 LMP식은 다음과 같이 도출되었다.

$$K_1 = 0.00801, K_2 = -32.1, K_3 = 33442.8 \tag{37}$$

$$T(\log t_r + 30) = 0.00801 \sigma^2 - 32.1 \sigma + 33442.8$$

4. 결 론

핵융합로용 저방사화 철강재료의 크리프 특성과 수명예측에 관한 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 크리프 수명은 응력과 온도가 상승 할수록 감소하며, 특히 700°C에서는 수명이 현저히 감소함을 알 수 있었다.
- 2) 정상 크리프 속도나 총 크리프 속도 등의 크리프 특성이 초기연신율과 정량적 상관관계가 성립하며, 초기연신율에 의한 수명예측이 가능함을 알 수 있었다.
- 3) LMP에 의한 수명예측은 실험치와 비슷한 결과를 나타내었고, 그 수명예측식은 다음과 같이 도출되었다.

$$LMP = T(\log t_r + 30) = K_1 \sigma^2 + K_2 \sigma + K_3$$

$$K_1 = 0.00801, K_2 = -32.1, K_3 = 33442.8$$

- 4) 크리프 수명은 초기연신율이 증가 할수록 감소하며, 그 감소율은 온도가 상승 할수록 더욱 크게 나타났다. 그리고 초기 연신율은 응력이 높아질수록 증가하고, 온도가 상승 할수록 그 증가율도 더욱 상승하였다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원(KRISS)의 2002년도 산학연공
관연구의 일부분이며, 관계자들께 감사드립니다.

Abdou M. (2002). "Recent Advances in Chamber Science and Technology", 6th Int. Symp. on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-6), PLEN 1,2, April 7-12, San Diego, USA.

Furuya, K., Enoeda, M., Kuroda, T., Ohara Y. and Mohri K. (1999). "Fabrication Study for Demo Blanket Structure Made of Reduced-Activation Ferritic Steel F82H", JUPITER Workshop on Recent Progress in RAFs, Dec. 1-2, Kyoto Univ., pp 25-30.

Kim, W.G., Kim S.H. and Ryu, W.S. (2001). "Creep Characterization of Type 316LN and HT-9 Stainless Steels by the K-R Creep Damage Model", KSME Int. J., Vol 15, No 11, pp 1463-1471.

Kohyama, A., Hishinuma, A., Gelles, D.S., Klueh, R.L., Dietz, W. and Ehrlich K. (1996). "Low-Activation Ferritic and Martensitic for Fusion Application", J. of Nuclear Material, Vol 233, No 237, pp 138-147.

Kohyama, A., Kohno, Y., Asakura, K., Yoshino, M., Namba C. and Eiholzer C.R. (1994). "Irradiation Creep of Low Activation Ferritic Steels in FFTF/MOTA", J. of Nuclear Materials Vol 212, No 215, pp 751-754.

Kong, Y.S., Yoon, H.K. and Oh, S.K. (2003). "Creep Life Prediction for Udimet720 Material Using the Initial Strain Method(ISM)", KSME Int. J., Vol 17, No 4, pp 469-476.

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

Muroga, T., Gasparotto, M. and Zinkle, S.J. (2002). "Overview of Materials Research for Fusion Reactors", 6th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-6), PLEN 1,4, April 7-12, San Diego, USA.

Norton, F.H. (1910). The Creep of Steel at High Temperatures, McGraw Hill, New York, pp 67.

Oh, S.K., Kong Y.S. and Yang H.T. (1999). "Creep Prediction by Initial Strain Method for Aging Treated Friction Welds of Heat Resisting Steels", Int. J. of Ocean Engineering and Technology, Vol 2, No 2, pp 13-18.

2004년 1월 20일 원고 접수

2004년 2월 16일 최종 수정본 채택