

미소시험편에 의한 재질열화된 내열강의 고온 크리프 특성 평가

류대영* · 백승세** · 유효선†

전북대학교 기계항공시스템공학부, 자동차신기술연구센터

*전주공업대학 정밀기계과

**전북대학교 대학원 정밀기계공학과

High Temperature Creep Characteristics Evaluation for Degraded Heat Resistance Steel of Power Plant by Mini-Specimen

Dae-Young Lyu*, Seung-Se Baek** and Hyo-Sun Yu†

Mechanical and Aero System Eng. School, Chonbuk National Univ., Jeonju, 561-756

*Division of Precision Mechanical Eng., Jeonju Technical College, Jeonju, 561-760

**Department of Precision Mechanical Eng., Chonbuk National Univ., Jeonju, 561-756

(2003년 4월 14일 받음, 2003년 6월 9일 최종수정본 받음)

Abstract In this study the new creep test using miniaturized specimen($10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$) was performed to evaluate the creep characteristics for degraded materials of 2.25Cr-1Mo steel. For this creep test, the artificially aged materials for 330 hrs and 1820hrs at 630°C were used. The test temperatures applied for the creep deformation of miniaturized specimens was 550°C and the applied loads were between 45 kg~80 kg. After creep test, macro- and microscopic observation were conducted by the scanning electron microscope(SEM). The creep curves depended definitely on applied load and microstructure and showed the three stages of creep behavior like uniaxial tensile creep curves. The load exponents of virgin, 330 hrs and 1820 hrs materials based on creep rate showed 14.8, 9.5 and 8.3 at 550°C respectively. The 1820 hrs material showed the lowest load exponent and this behavior was also observed in the case of load exponent based on creep rupture time. In contrast to virgin material which exhibited fined dimple fractography, a lot of carbides like net structure and voids were observed on the fractography of degraded materials.

Key words miniaturized specimen, initial creep strain(ϵ_{qt0}), steady state creep rate($\dot{\epsilon}_{qt-ss}$), creep rupture time(t_r), load exponent(n, m), larsen miller parameter, carbide, void, degraded material

1. 서 론

발전소 고온 부재의 열화기구에는 크게 크리프(creep) 변형, 뜨임취화, 탄화물 유기취화, σ 상취화 그리고 열피로 등이 있으며, 이들은 설비부재의 사용온도 및 사용시간, 부식환경 그리고 불규칙적인 부하변동 등에 의해 크게 지배된다. 이중 크리프 변형은 재료의 열적 활성화에 의해 일어나는 발전소의 대표적인 열화현상으로 재료의 크리프 강도는 위의 지배인자와 함께 최종적으로 재료의 미세조직에 의해 좌우된다.^{1,2)} 여기서 재료의 미세조직을 결정하는 기본적인 주요인자는 화학조성, 열처리, 가공 프로세스(소성변형, 용접) 등이 있다. 그러나 고온·고압 환경 하에서 장시간 운전되는 내열부재는 단조, 압출, 압연 그리고 NT(normalizing and Tempering)처리와 같은 제조 공정의 효과가 장시간까지 유지되지 못한다. 이 같은 이유는 가혹한 실기현장에서 장시간 사용되는 내열재료가 탄화물의 석출 및 조대화 그리고 불순물의 입계편

석, 고용강화 원소의 감소 등과 같은 재질열화(material degradation) 현상을 일으키기 때문이다. 이러한 열화현상에 의해 석출강화와 하부조직에 의한 강화효과가 사용시간에 따라 소멸되며, 결국 고온 크리프 강도에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 장시간 열화된 내열재료의 고온 크리프 특성 평가는 설비부재의 안전성 및 신뢰성 그리고 현상태의 진단을 위해 중요하다고 말할 수 있다.³⁾

한편, 재료의 크리프 파괴기구에는 수명말기까지 크리프의 void 발생·성장이 뚜렷하지 않고 탄화물의 석출 및 조대화 그리고 석출물간의 거리증대와 석출물의 증가에 의한 고용강화 원소의 농도 저하가 주요한 원인인 연성 크리프(ductile creep)와 입계 cavity와 void의 성장이 뚜렷하여 입계균열의 결함이 주요 원인인 취성 크리프(brittle creep)로 대별된다.⁴⁾ 이러한 연성과 취성의 크리프 변형은 설비부재의 강종 및 응력의 크기 그리고 사용온도 및 사용시간에 의존하여 발생된다. 이러한 크리프 변형의 감수성은 페라이트 혹은 베이나이트 조직강 그리고 고 Cr강에서 높은 것으로 알려져 있기 때문에 이들 조직을 갖는 Cr-Mo(V)강계와 스테인리스강계의 과열

†E-Mail : yuhs@moak.chonbuk.ac.kr

기관 및 석유정제 플랜트의 반응탑 등과 같은 내열 구조부재에 대한 크리프 손상의 정량적 평가는 매우 중요하다 할 수 있다.⁵⁾

따라서 본 연구에서는 최근 발전소 현장의 준 비파괴 시험방법(semi non-destructive test method)으로 적용 가능성이 있는 미소시험편(miniaturize specimen : $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$)을 사용한 소형편치 시험기법⁶⁾을 이용하여 발전설비 재료인 2.25Cr-1Mo강의 인공열화재를 대상으로 고온환경 하에서 재질열화재의 크리프 특성을 알아보았다.

2. 시험편과 실험장치

2.1. 실험재료와 시험편

본 연구에서 사용한 2.25Cr-1Mo강의 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다. 2.25Cr-1Mo강의 인공열화재를 얻기 위해 시험재를 실제 사용온도($500^\circ\text{C} \sim 538^\circ\text{C}$)보다 높고, 뜨임온도보다 낮은 630°C 온도에서 인공열화, 즉 등온노화열처리를 행하였다. 이때 인공 열화시간은 철의 자기 확산에 필요한 활성화에너지 식에 의해 실기 사용온도인 538°C 에서 각각 18,000 hrs 과 100,000 hrs에 해당된다. 또한 인공열화에 따른 내 크리프 특성의 변화를 알아보기 위해 as-received 상태의 2.25Cr-1Mo 강 신재의 크리프 시험결과와 비교·검토하였다. 이때 크리프 파괴시험에 사용된 미소시험편의 크기는 SP시험편의 규격인 $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}$ 으로 제작하였다.

2.2. 시험장치의 구성과 실험방법

발전소 내열강의 크리프 특성을 평가하기 위해 고안된 미소시험편을 이용한 고온 크리프 시험장치(high tem-

perature creep tester)는 Fig. 1과 같다.⁶⁾ 시험장치는 크게 시험편 가열장치 및 냉각장치, 정하중 부하장치, 그리고 제어장치와 데이터 획득처리 장치로 구성되어 있으며, 시험편은 가열로 안에 위치하는 소형편치 지그의 상부다이어 및 하부다이어 사이에 고정된다.

미소 시험기법을 이용한 크리프 시험은 시험편의 상부에 $\phi 2.4 \text{ mm}$ 의 Si_3N_4 세라믹 강구를 놓고 이를 통하여 하중을 가함으로써 시간에 따른 시험편의 크리프 변형 거동을 조사하였다. 크리프 시험온도는 550°C 로 하였으며, 시험편 가열온도의 오차범위는 약 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위로 하였다. 크리프 하중은 45kg~80 kg로 제어하였다. 크리프 시험도중 미소 시험편의 중앙변위(central displacement: δ)는 LVDT 시스템을 이용하여 최소 $1 \mu\text{m}$ 까지 계측하였으며, 시험 중 미소시험편의 표면산화에 따른 시험오차를 제거하기 위해 모든 크리프 시험은 아르곤(Ar) 분위기에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 2.25Cr-1Mo강 열화재의 미세조직과 크리프 곡선 거동

Fig. 2는 2.25Cr-1Mo강의 신재와 인공열화재에 대한 미세조직 관찰사진이다. 신재의 경우는 전형적인 페라이트와 퍼얼라이트 조직으로 구성되어 있으나, 열화재의 경우는 퍼얼라이트의 지하와 함께 페라이트 조직이 증가되고 있음을 관찰할 수 있다. 이와 같은 거동은 1820 hrs의 경우가 330 hrs 경우 보다 약간 더 크게 나타났다. 또한 입내 및 입계부에는 2.25Cr-1Mo강의 장시간 열화에 따라 M_{23}C_6 로 생각되는 탄화물을 관찰할 수 있었으며, 이 같은 탄화물의 거동은 1820 hrs 열화재의 경우에 보다 뚜렷하게 나타나 기존의 결과와도 일치하고 있음을 알 수 있다.⁷⁾ 이들 조직의 마이크로 비커스(작용하중: 500 g)의 평균 경도값은 신재, 330 hrs 그리고 1820 hrs에 있어 각각 156, 147 그리고 140을 보여 신재보다 열화

Table 1. Chemical composition (wt.%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.13	0.01	0.42	0.02	0.29	2.23	1.12

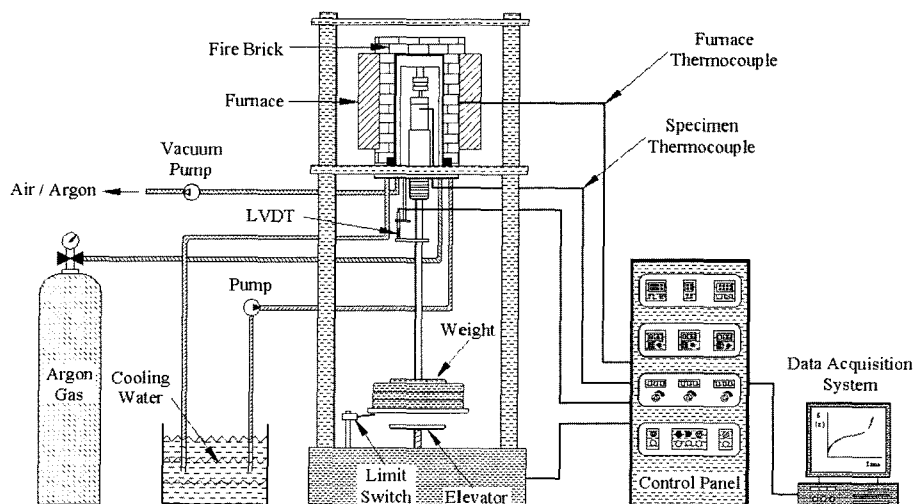


Fig. 1. The schematic diagram of micro-creep test equipment.

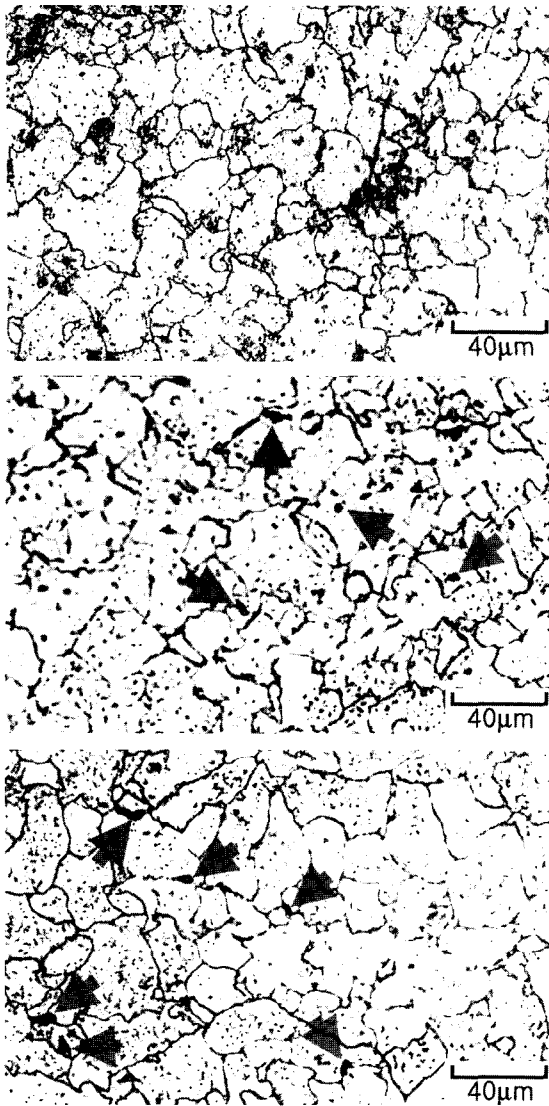


Fig. 2. Microstructures of virgin and aged materials of 2.25Cr-1Mo steel.

재가 그리고 인공열화시간이 증가할수록 미세조직의 연화거동을 관찰할 수 있다. 결국 이 같은 미세조직의 차이가 크리프 변형에 영향을 줄 것으로 사료된다.

Fig. 3은 630°C-330 hrs과 1820 hrs의 인공 열화재를 대상으로 550°C의 고온환경에서 크리프시험으로부터 얻어진 미소시험편의 변형률(ϵ_{gf}) 대 시간(t)의 크리프 곡선이다. 비교를 위해 신재에 대한 고온 크리프 곡선도 함께 도시하였다. 이때 미소시험편의 변위로부터 얻은 등가파괴변형률(equivalent fracture strain: ϵ_{gf})은 재결정(recrystallization) 열처리 시험을 통해 얻어진 아래와 같은 실험 경험 식을 이용하여 산출하였다.⁸⁾

$$\epsilon_{gf} = 0.15 \left(\frac{\delta}{t_0} \right)^{3/2} \quad (1)$$

여기서 δ 는 시험편의 중앙변위이고, t_0 는 시험편의 초기 두께이다. 이러한 등가파괴변형률(ϵ_{gf})은 종래의 파괴인성치인 COD(crack opening displacement) 및 연성-취

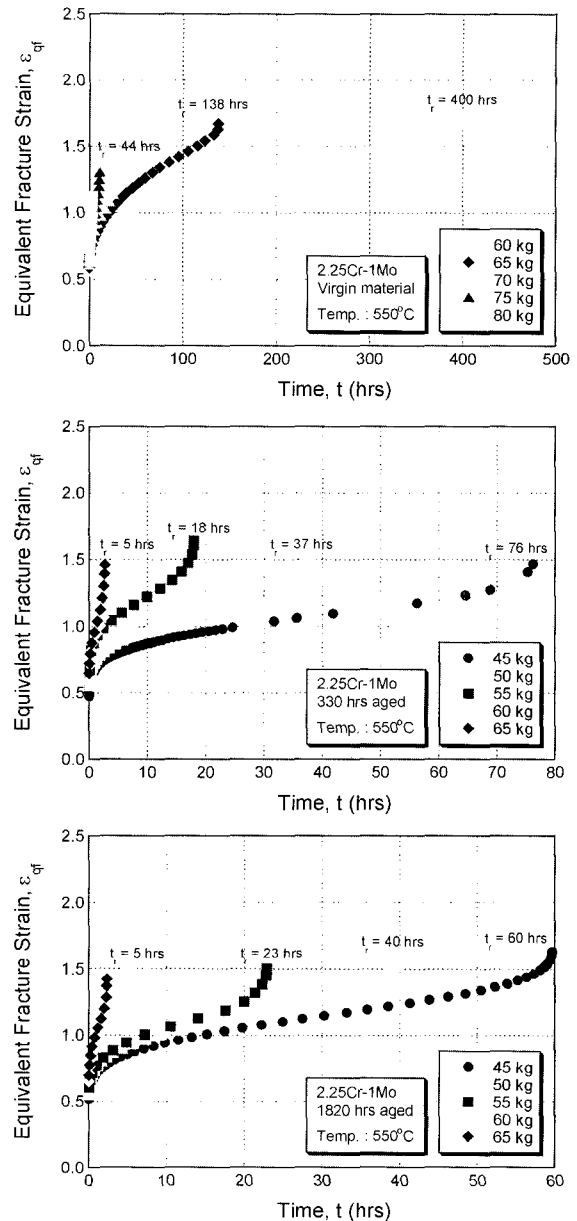


Fig. 3. The creep curves for virgin and aged materials at 550°C.

성전이온도(DBTT)와 뚜렷한 상관관계가 있다고 보고되고 있다.⁹⁾

얻어진 크리프 곡선들은 시험조건에 따라 차이는 있지만, 종래의 단축 인장 크리프 곡선의 변형거동과 같이 3단계의 크리프 거동 즉, 천이 크리프 거동(transient creep behavior)과 정상상태 크리프 거동(steady state creep behavior) 그리고 가속 크리프 거동(accelerative creep behavior)을 명확히 보이고 있다. 그리고 크리프 하중이 감소함에 따라 정상상태의 2차 크리프 거동은 크게 증가되고 있음을 알 수 있다. 반면, 크리프 하중이 증가할수록 정상 상태의 크리프 변형률 속도와 파단수명은 감소하였다. 또한 전체적으로 볼 때 열화재의 경우는 동일 하중 조건에서 신재보다 크게 낮은 내 크리프 특성을 보이고 있다. 일반적으로 정상상태의 크리프 변형은 고온

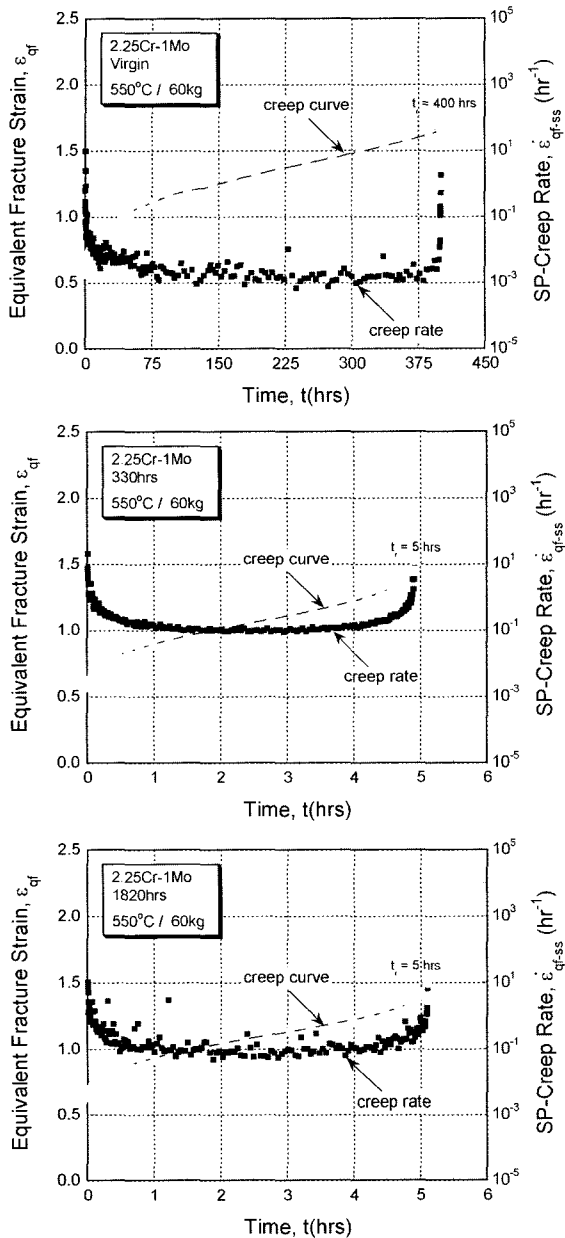


Fig. 4. The creep and strain rate curves for virgin and aged materials at 550°C and 60 kg.

에서 외력에 기인한 미세조직 내의 전위밀도의 증가에 따른 가공경화 속도($d\sigma/d\varepsilon$)와 원자들의 국부적인 확산과 동적 연화에 따른 회복속도($d\sigma/dt$)가 균형을 이루는 단계이다. 시험재료의 2차 정상상태 크리프 거동은 이들에 의해 결정되며, 앞서 설명하였듯이 시험온도와 응력, 그리고 재료의 고용강화원소(Mo, V, Nb, W 등) 및 탄화물 거동에 의해 또한 크게 의존한다. 본 시험 결과에 있어 동일 하중에 대해 신재와 열화재의 2차 정상상태의 크리프 변형률 속도의 차이는 Fig. 4에 나타난 부하하중 60 kg의 경우인 크리프 속도 관계 곡선에서 보다 명확히 알 수 있다. 그러나 330 hrs과 1820 hrs 열화재 사이의 최소 크리프 변형률 속도의 차이는 크게 보이지 않았으나, 1820 hrs는 330 hrs 재보다 다소 큰 정상상태의

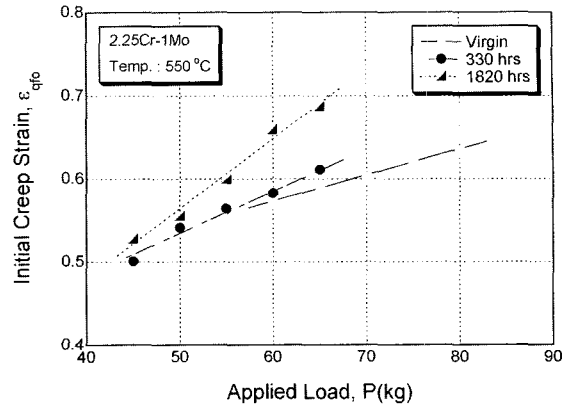


Fig. 5. The relationship between initial equivalent strain and applied load for virgin and aged materials at 550°C.

크리프 변형영역을 보이고 있어 크리프 변형시 미세조직의 빠른 변형과 이로 인한 빠른 전위밀도의 증가 및 원자들의 국부적인 회복 속도가 1820 hrs가 330 hrs 보다 큰 것으로 사료된다. 이 같은 고찰은 뒤에 후술할 크리프 초기 크리프변형을 거동에서도 확인 할 수가 있다.

3.2. 크리프 초기 크리프변형률(ε_{qfo}) 거동

크리프 초기 크리프변형률은 시간 의존적인 크리프 변형과는 독립적인 변수이나 크리프 응력과 온도에는 매우 민감한 변수이다. Fig. 5는 단축 인장크리프 시험의 초기변형률에 대응하는 미소시험편에 대한 크리프 초기 크리프변형률(ε_{qfo})을 살펴본 결과이다. 이때 초기 크리프변형률(initial creep strain: ε_{qfo})은 크리프 하중을 부하한 후 1분이 경과되었을 때의 변위 값을 이용하여 구하였다. 전체적으로 볼 때 작용 하중이 증가함에 따라 초기 크리프변형률 값을 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 동일하중에서 초기 크리프변형률의 거동은 신재, 330 hrs 그리고 1820 hrs 순으로 증가하고 있어, 세 시험재 중 1820 hrs 열화재가 가장 큰 초기 크리프 변형률 거동을 보였다. 이같은 거동은 1820 hrs 시험재의 장시간 노화열처리에 따른 경도저하 및 연화조직에 의한 결과로서, 재질열화된 시험재의 크리프 초기 크리프변형률 특성을 관찰할 수 있다. 반면, 신재의 경우는 가장 낮은 크리프 초기 크리프변형률 거동을 보였다.

3.3. 크리프 하중과 정상상태 크리프 변형률 속도 및 크리프 수명의 관계

일반적으로 단축 인장 크리프 시험에서 정상상태 크리프 변형률 속도($\dot{\varepsilon}_{qf-ss}$) 및 크리프 수명(t_r)의 크리프 응력 의존성은 식 (2) 및 식 (3)과 같은 멱수법칙(power law)이 성립된다.

$$\dot{\varepsilon}_{qf-ss} = A \cdot \sigma^n \quad (2)$$

$$t_r = B \cdot \sigma^m \quad (3)$$

여기서, A와 B는 재료상수(structural constant), σ 는

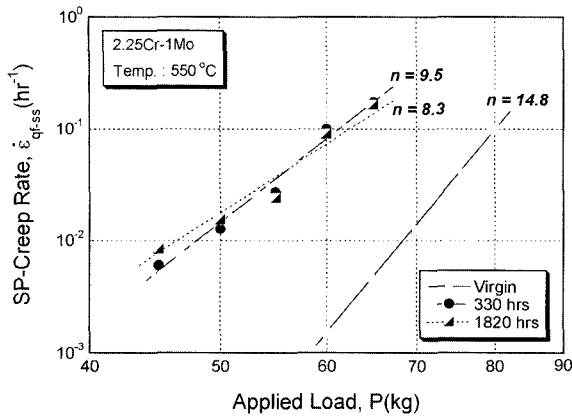


Fig. 6. The power law relationship in terms of SP-Creep rate for virgin and aged materials at 550°C.

작용응력(applied stress), n 과 m 은 응력지수(stress exponent)이다.

Fig. 6은 크리프 시험에 있어 정상상태의 크리프 속도 (steady state creep rate: $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$)의 부하 하중에 대한 의존성을 조사하여 나타낸 결과이다. 모든 경우에 있어 작용하중이 증가함에 따라 정상상태의 크리프 변형률 속도는 크게 증가함을 알 수 있다. 전체적으로 정상상태의 크리프 속도는 하중에 대해 매우 뚜렷하게 의존함을 관찰할 수가 있다. 따라서, 다양한 시험하중에 대한 정상상태 크리프 속도를 나타낸 $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$ vs. P 의 관계선도에서 크리프 하중지수(load exponent: n)는 신재, 330 hrs, 그리고 1820 hrs에서 각각 14.8, 9.5, 그리고 8.3를 나타내어, 인공 열화재는 신재보다 월등히 낮은 하중지수를 보이고 있다. 또한 큰 차이를 보이지 않았지만, 1820 hrs 재는 330 hrs 열화재보다 낮은 하중지수를 보였다. 일반적으로 단축인장 크리프 시험에서는 재료의 강화효과가 저하될수록 응력지수가 감소된다는 종래 보고¹⁰⁾와 비교할 때 1820 hrs 열화재에서 내 크리프 성질의 저하를 확인할 수 있다. 이때 하중지수 값이 감소하는 이유는 $M_{23}C_6$ 로 알려진 입계부의 미세 탄화물에 기인한 미세조직내의 고용 강화원소의 감소, 이로 인한 전위이동의 용이성에 기인한 결과로 생각된다. 또한 이 같은 거동은 그 차이가 작지만 고하중에서 저하중으로 갈수록 커짐을 알 수 있다. 이상의 작용 하중에 따른 정상상태의 크리프 속도 관계로부터 구한 $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$ vs P 의 상관 관계식은 다음과 같이 표현되었다.

$$\begin{aligned} \text{Virgin} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 6.43 \times 10^{-30} P^{14.82} \\ 330 \text{ hrs} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 6.43 \times 10^{-30} P^{14.82} \\ 1820 \text{ hrs} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 6.43 \times 10^{-30} P^{14.82} \end{aligned} \quad (4)$$

한편, 부하하중과 크리프 파단수명(creep rupture life: t_r)의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 그림으로부터 미소시험편을 이용한 크리프 파단수명 또한 단축 인장 크리프 시험결과와 같이 작용하중이 증가함에 따라 크게 감소함을 관찰할 수 있어 미소시험편에 의한 크리프 파단수명

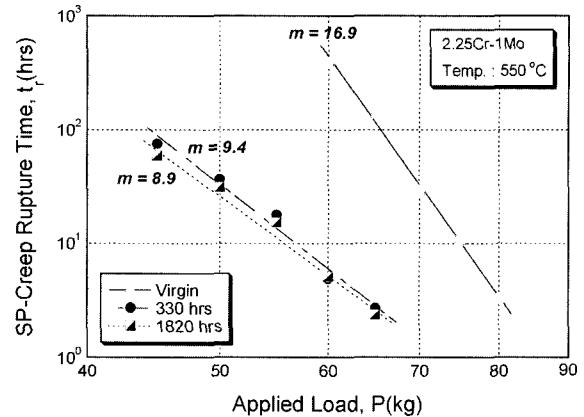


Fig. 7. The power law relationship in terms of creep rupture time for virgin and aged materials at 550°C.

에 대한 부하하중의 의존도가 매우 뚜렷함을 관찰할 수가 있다. 그리고 동일 부하하중에서 열화재의 크리프 수명은 신재보다 크게 저하되고 있음을 관찰할 수가 있어 미소시험편에 의한 재질 열화된 내열강의 크리프 특성 평가 가능성도 확인할 수 있다. 그러나 330 hrs와 1820 hrs 열화재의 뚜렷한 크리프 수명의 큰 차이는 보이지 않았다. 그러나 저하중의 경우에는 두 열화재의 차이가 있음을 관찰할 수 있어 향후 저하중 영역의 크리프 수명 평가결과가 요구된다. 이 같은 결과로부터 크리프 파단수명에 근거한 하중지수(m)는 신재, 330 hrs, 그리고 1820 hrs에서 각각 16.9, 9.4, 그리고 8.9를 보여 크리프 변형률($\dot{\epsilon}_{qf-ss}$)에 의해 산출된 하중지수의 결과와 같은 거동을 보였다. 크리프 파단수명 결과로부터 구한 멱수법칙의 정량적 상관 관계식은 다음과 같이 정리되었다.

$$\begin{aligned} \text{Virgin} : t_r &= 4.46 \times 10^{32} P^{-16.87} \\ 330 \text{ hrs} : t_r &= 3.34 \times 10^{17} P^{-9.42} \\ 1820 \text{ hrs} : t_r &= 4.11 \times 10^{16} P^{-8.93} \end{aligned} \quad (5)$$

3.4. 2.25Cr-1Mo강 열화재의 L.M.P 특성

일반적으로 크리프 파단결과는 아래 식 (6)과 같은 Larson-Miller Parameter(L.M.P) 방법에 의해 크리프 파단 데이터를 정리할 수가 있다. 이와 같은 L.M.P 방법은 여러 온도에 대한 파단시간을 하나의 Parameter로 계산하여 작용 외력에 대해 정리한 하나의 곡선으로 표현되며, 이는 크리프 파단시험결과에서 다른 온도의 시험 결과를 추정할 때 또는 서로 다른 온도에서 시험된 재료간의 크리프 강도를 비교하는데 유용한 방법이다. 여기서, T : 부재의 온도, t_r : 크리프 파단시간, 그리고 C : 재료의 종류에 따라 결정되는 상수(=20) 이다.

$$\text{L.M.P} = T(\log t_r + C) \quad (6)$$

Fig. 8은 신재와 인공 열화재의 L.M.P_{SP} 특성 값을 작용하중에 대해 정리한 그림이다. 그림에서 신재에 대해 인공 열화재는 두 인자사이의 관계선도가 모두 좌측으로

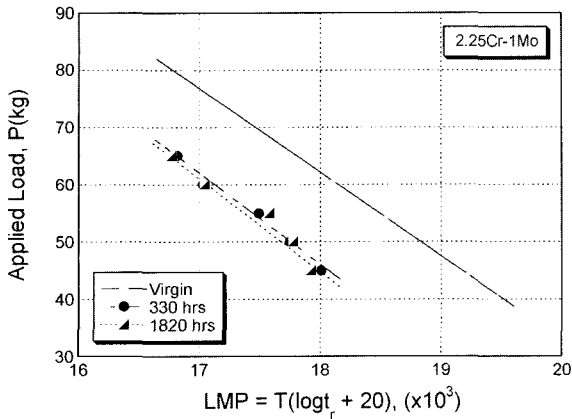


Fig. 8. The relationship between applied load and L.M.P for virgin and aged materials.

이동하는 낮은 크리프 파단강도 특성을 보이고 있어 미소시험편에 의한 열화재의 크리프 평가의 가능성을 확인할 수가 있다. 그러나 열화재의 경우를 비교해 보면, 330 hrs와 1820 hrs 시험재 사이에 뚜렷한 차이를 보이지 않고 있어 이에 대한 추가적인 실험과 고찰이 요구된다. 현재 본 대학에서는 미세조직에 대한 초기 변형량 특성 및 크리프 파단면의 경도 시험결과 등을 응용한 연구가 진행되고 있다. 이상과 같은 시험결과로부터 다음과 같은 L.M.P_{sp}와 작용 하중사이의 관계식을 얻을 수 있다.

Virgin:

$$L.M.P_{sp} = (21.80 - 0.061 P_{sp}) \times 10^3$$

330 hrs:

$$L.M.P_{sp} = (20.83 - 0.062 P_{sp}) \times 10^3$$

1820 hrs:

$$L.M.P_{sp} = (20.75 - 0.061 P_{sp}) \times 10^3$$

(7)

이상과 같은 실험식과 함께 향후 더 많은 데이터 베이스(D/B)가 구축된다면, 재질열화에 따른 그리고 실기 부재의 운전이력에 따른 크리프 강도 및 잔여수명 평가 시 미소시험편의 L.M.P방법을 이용한 새로운 준 비파괴적인 크리프 평가기술의 확립이 가능할 것으로 기대한다.

3.5. SEM에 의한 크리프 파단면 관찰

Fig. 9와 Fig. 10은 크리프 시험을 행한 후 신재, 330 hrs 그리고 1820 hrs 열화재에 대한 고하중 및 저하중 영역에서 미소시험편의 거시적, 미시적 SEM 파면사진을 보여주고 있다. 먼저 거시적인 SEM 사진의 결과를 보면, 미소 크리프 시험편은 모두 화산구 모양으로 파괴가 됨을 관찰할 수 있으며, 모두 연성 크리프 파면임을 알 수 있다. 또한 Fig. 9(a)의 거시적 사진을 보면 시험온도 550°C, 크리프 하중 60 kg 조건에서 크리프 파단시간이 약 400 hrs인 신재의 경우를 보면, 원주방향의 다수 균열을 보이고 있다. 이에 대한 미세 파면사진에서는 장시간 크리프 변형에 의한 미소 크기의 dimple 크리프 파면을 보이고 있다. 이에 반해 동일하중인 Fig. 9(b)와 (c)에서 크리프 파단시간이 작은 330 hrs 열화재 경우는 미세 공동(void)의 형성과 함께 큰 dimple 크리프 파면을 보이고 있으며, 크리프 파단 수명이 거의 같은 1820 hrs 열화재는 330 hrs와 달리 파면상에 미세 탄화물 존재와 탄화물 및 공동(void) 주위의 기지조직의 연신을 관찰할 수가 있다.

Fig. 10의 저 하중영역의 보다 긴 크리프 파단수명을 보인 330 hrs와 1820 hrs 열화재의 경우는 Fig. 9의 고하중 경우와는 달리 크리프 파면상에 뚜렷한 망상구조의 미세 탄화물의 존재와 함께 보다 큰 공동(void)의 형성을 관찰할 수가 있다. 그리고 1820 hrs의 경우가 330 hrs 보다 더 많은 공동(void)들이 관찰되었다.

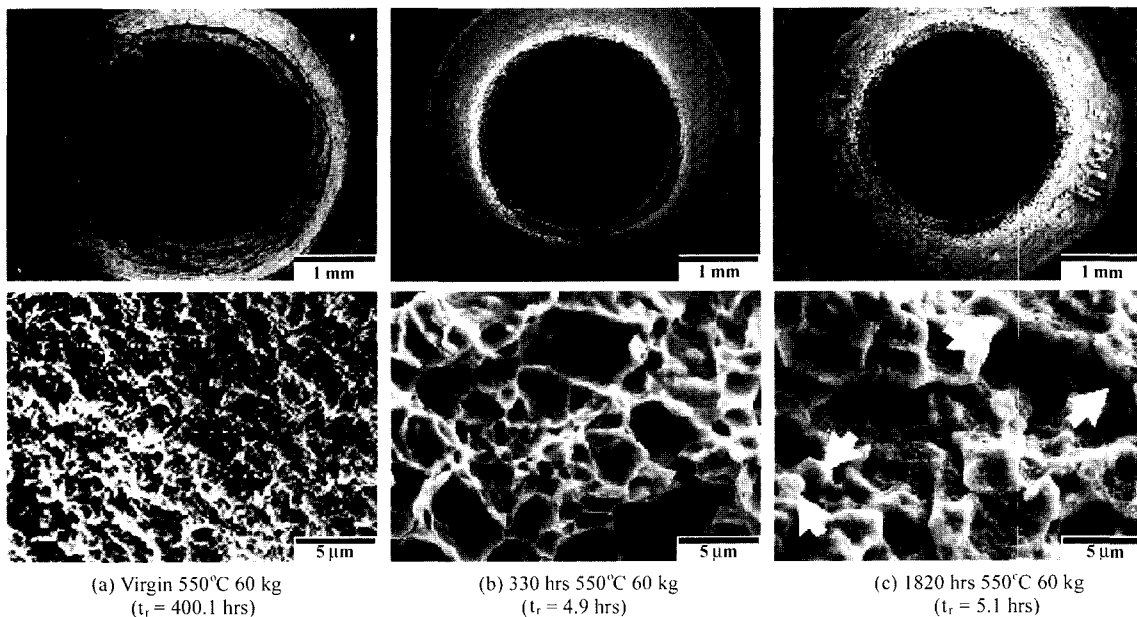


Fig. 9. Macro- and micro SEM creep fractography for virgin, 330 hrs and 1820 hrs materials at 550°C and 60 kg.

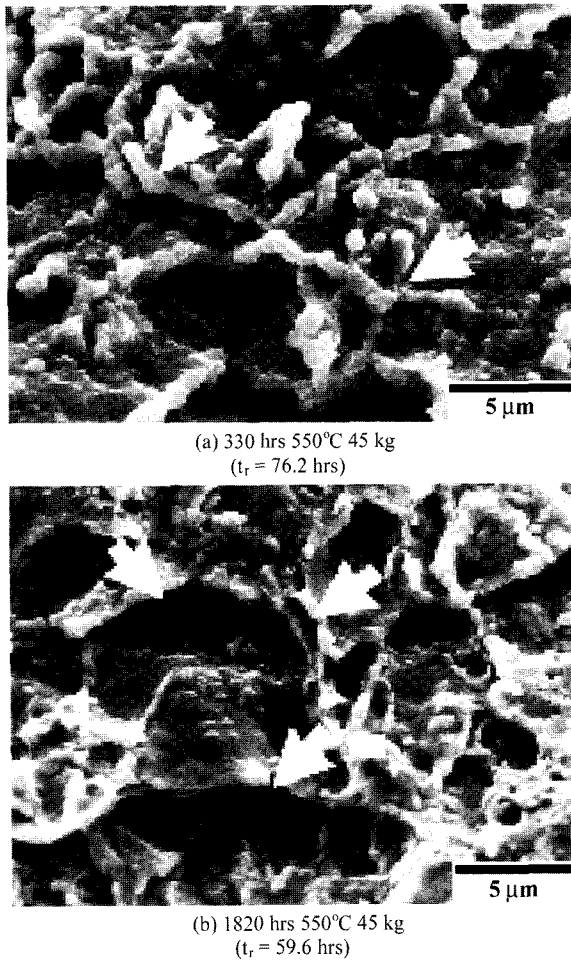


Fig. 10. Macro- and micro SEM creep fractography for 330 hrs and 1820 hrs materials at 550°C and 45 kg.

이상과 같이 크리프 시험조건에 따라 크리프 파면의 차이가 존재하며, 특히 신재와 열화재의 뚜렷한 크리프 파면의 차이를 관찰할 수가 있어 재질열화된 내열강의 크리프 특성 평가시 미소시험편에 의한 크리프 시험의 적용성을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 미소시험편을 사용한 준 비파괴적인 미소시험기법을 이용하여 재질열화된 2.25Cr-1Mo강의 크리프 특성을 조사하고, 신재와 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 동일하중 조건에서 초기변형률의 거동은 신재, 330 hrs 그리고 1820 hrs 순으로 증가하여, 세 시험재 중 1820 hrs 열화재가 가장 큰 초기 변형률 거동을 보였다.
- 2) 신재 및 열화재 모두 작용하중이 증가함에 따라 정상상태의 크리프 변형률 속도는 크게 증가하였으며, 크

리프 하중지수(load exponent: n)는 신재, 330 hrs, 그리고 1820 hrs에서 각각 14.8, 9.5, 그리고 8.3을 나타내어, 열화재는 신재보다 월등히 낮은 하중지수를 보이고 있다.

3) 미소시험편의 크리프 파단수명 또한 단축 인장 크리프 시험결과와 같이 작용하중이 증가함에 따라 크게 감소하여, 열화재의 크리프 파단수명에 대한 뚜렷한 부하하중의 의존성을 관찰할 수가 있었다.

4) 동일 하중에서 열화재의 크리프 파단수명(creep rupture time: t_r)은 신재보다 크게 저하되었고, 크리프 파단수명에 근거한 하중지수(m)는 신재, 330 hrs, 그리고 1820 hrs에서 각각 16.9, 9.4, 그리고 8.9를 보여 크리프 변형률($\dot{\epsilon}_{qf-ss}$)에 의해 산출된 하중지수의 결과와 같은 거동을 보였다.

5) 인공 열화재의 L.M.P_{SP} 관계선도는 신재에 대해 모두 좌측으로 이동하는 낮은 크리프 파단강도 특성을 보여 미소시험편에 의한 신재에 대한 열화재의 L.M.P 사용 가능성을 확인할 수가 있었다.

6) 신재의 경우는 미소 크기의 dimple 크리프 파면특성을 보인 반면, 저 하중영역에서 330 hrs와 1820 hrs 열화재의 경우는 고하중과는 달리 미세 크리프 파면 상에 망상구조의 미세 탄화물의 존재와 함께 공동(void)의 형성을 보다 많이 관찰할 수가 있었다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 전주공업대학 산업기술연구소의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. Viswanathan and S. M. Gehl, JOM Feb., 34 (1992).
2. G. A. Webster and R. A. Ainsworth, CHAPMAN & HALL (1993).
3. R. Viswanathan, ASM International Metals Park, 183 (1993).
4. EPRI, Manual for Investigation and Correction of Boiler Tube Failures, 1-110 (1985).
5. 新谷紀雄, 鐵と鋼, 73(9), 13 (1987).
6. S. S. Baek, S. H. Na, E. G. Na and H. S. Yu, Transactions of the KSME, 25(12), 1995 (2002).
7. H. Yang and S. Kim, Material Science & Engineering A, 319(321), 316 (2001).
8. JAERI-memo, 小型パンチ(SP)試験法(案), 日本原子力研究所, 62 (1987).
9. X. Mao, T. Shoji and H. Takahashi, Journal of Testing and Evaluation, 15(1), 30 (1987).
10. S. H. Ryu, Effects of Alloying Elements on the Creep Rupture Strength of Advanced 9-12% Cr Steels, KAIST, (1998).