

〈論 文〉

3.5Ni-Cr-Mo-V 강의 크리프 수명예측에 재질열화 및 오스테나이트 결정립 조대화가 미치는 영향

홍성호* · 조현춘**

(1994년 1월 13일 접수)

Effect of Material Degradation and Austenite Grain Coarsening on the Creep Life Prediction in 3.5 Ni-Cr-Mo-V Steel

Sung-Ho Hong and Hyeon-Choon Cho

Key Words : Life Prediction(수명예측), Material Degradation(재질열화), Grain Coarsening(결정립 조대화), Cavity(기공), Creep Rupture Life(크리프 파단수명), Creep Damage(크리프손상), Carbide Coarsening(탄화물 조대화), Weld HAZ(용접열영향부)

Abstract

Several methods have been developed to predict on the remaining life of the old power plants. However, Larson-Miller parameter, one of existing creep life prediction methods, has not reflected the effect of material degradation and grain size. So this study has been carried out to research the effects of material degradation and austenite grain coarsening on the life prediction of 3.5Ni-Cr-Mo-V steel. An experimental result shows that carbide coarsening has no significant effects on the creep rupture life and the Larson-Miller parameter, but grain coarsening has an important influence on the creep rupture life and the Larson-Miller parameter. Therefore Larson-Miller constant, K should be determined to consider on the chemical composition and the grain size of materials.

1. 서 론

노후 화력발전 설비의 수명연장에 관하여서는 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있고 국내에서도 인천화력을 비롯하여 영월, 부산화력 등에 대하여 수명연장을 위한 정밀진단이 실시되었다. 이들 발전설비의 수명연장을 위해선 각 부품에 대한 수명예측이 이루어져야 한다. 특히 보일러 튜브, 헤

다 및 주증기관과 같이 고온고압이 작용하는 설비의 열화재에 대한 정확한 수명예측은 매우 중요하다. 따라서 고온설비의 수명예측을 위해 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다.^(1~7)

현재 사용되고 있는 여러 수명예측방법 중에는 Larson-Miller parameter법⁽⁸⁾이나 Monkman-Grant법,⁽⁹⁾ Minimum-Commitment method⁽¹⁰⁾ 등과 같은 매개변수를 이용하여 설비수명을 예측하는 방법이 있다.

이들중 주로 사용되는 Larson-Miller parameter법은 발전설비 재료의 파단거동을 넓게 표현할 수

*정회원, 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소

**정회원, 유피테크(주)

있고 측정된 데이터를 일정한 형태로 표현할 수 있는 유용한 면이 있다. 그러나 원래 Larson-Miller parameter는 금속의 열처리시 필요한 경도값을 얻기 위해 사용하는 수식이고 크리프 파단수명에측시 적용된 데이터는 짧은 실험시간 동안 얻어진 결과이기 때문에 실험시간보다 긴 시간이나 낮은 온도까지 데이터를 연장하여 사용하는 데는 의문점이 있다. 그리고 Larson-Miller parameter에서의 데이터들을 보면 분포 폭이 넓어 같은 응력조건에서 크리프 파단수명이 매우 차이가 있다. 예를 들어 설계응력이 37.2 MPa, 설계온도가 584°C인 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강으로 제작된 과열기관(superheater tube)의 예상되는 크리프 파단수명은 평균 52년으로 추정되나 14년으로 감소할 수 있어 수명예측시 어려움이 많다. 또한 고온설비 소재는 사용중에 재질열화(material degradation)가 발생하는데 이들이 Larson-Miller parameter에 어떠한 영향을 미치는지는 아직 명확치가 않다. 그런데 인산화력 기기의 수명연장시에 Larson-Miller parameter를 적용한 결과를 보면 고응력에서는 미사용재(updegraded)와 사용재(degraded)와의 잔존수명에 차이점이 발생하나 저응력에서는 차이점이 없어지고 있다.⁽¹¹⁾ 따라서 발전설비의 실제 운전응력 범위가 100 MPa 이하인 저응력 조건인 것을 고려하면 Larson-Miller parameter를 이용한 수명예측은 많은 오차가 예상된다. 현재 이와 유사한 현상들이 일본의 NKK 철강연구소⁽¹²⁾의 연구결과를 비롯하여 石川

중공업,⁽¹³⁾ Westinghouse,⁽¹⁴⁾ Hitachi 및 Toshiba⁽¹⁵⁾의 연구결과 등에서 많이 발견되고 있으나 명확한 이유가 아직 밝혀지지 않고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 고온설비에서 발생하는 재질열화현상이 크리프 파단수명과 수명예측에 미치는 영향을 규명하는데 있다. 한편 재질열화시 발생하는 현상은 크게 탄화물의 석출 및 조대화와 기공의 발생 등으로 분류되고 있는데 기공의 발생이 수명을 감소시키는 것은 이미 알려져 있으나,⁽¹⁶⁾ 탄화물의 조대화가 수명에 미치는 영향은 잘 알려지지 않고 있다. 그러므로 본 연구에서는 터빈로터용 3.5Ni-Cr-Mo-V 강을 이용하여 열처리를 조절해 탄화물을 임의로 조대화시킨 후 일축 응력하에 크리프실험을 실시하였다.

한편 발전설비의 배관이나 튜브의 경우 용접열영향부에서 주로 파괴가 일어나는 것으로 알려져 있다. 그런데 용접열영향부의 가장 큰 특징은 결정립 조대화현상이다. 따라서 이들 현상이 크리프 파단수명 및 수명예측에 미치는 영향도 연구하고자 3.5Ni-Cr-Mo-V 강에 대하여 오스테나이트 온도를 조절해 결정립을 조대화시킨 후 일축 응력하에 크리프실험을 행하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시편준비

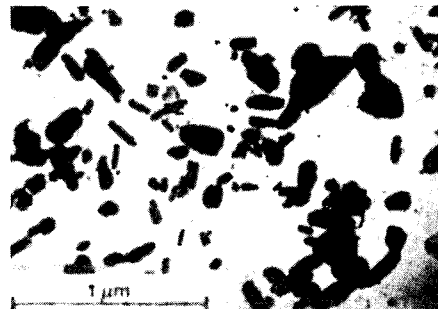
본 연구에 사용한 3.5Ni-Cr-Mo-V 강은 현재 발

Table 1 Chemical composition of the 3.5Ni-Cr-Mo-V steel(wt.%)

C	Ni	Cr	Mn	Mo	Si	P	S	V	As	Fe
0.29	3.3	1.11	0.29	0.29	0.19	0.013	0.023	0.082	0.005	Balance



(a) 1 hour tempered at 650°C (Rc 35)



(b) 5 hour tempered at 690°C (Rc 25)

Fig. 1 TEM photos of the two kinds of specimens

Table 2 Heat treatment to obtain five different prior austenite grain sizes in 3.5Ni-Cr-Mo-V steel

Austenitizing Temperature (°C)	Austenitizing Time (hours)	Average Grain Diameter (μm)	ASTM No.
1300	5	600	-2
1200	3	180	2
1100	1	100	4
1000	1	60	5
900	1	32	7

전소의 터빈-로터용 재료로 사용되고 있으며 화학적 조성은 Table 1과 같다.

본 재료는 미세조직을 균질화시키기 위하여 진공 분위기하에 1100°C에서 1시간 동안 오스테나이트화 후 유냉시켰다. 이때 오스테나이트 결정립 크기는 ASTM No. 4이었다. 이것을 재가열하여 650°C에서 1시간 동안 템퍼링시킨 후 공냉시켜 Rc 35의 경도를 얻었다. 그리고 탄화물 조대화의 영향을 알기 위해 다른 시편을 690°C에서 5시간 동안 템퍼링시킨 후 공냉시켜 경도 Rc 25를 얻었다. 경도차이 Rc 10은 Cheruvu⁽¹⁴⁾의 연구결과에서 탄화물의 조대화로 인한 경도 감소가 Rc 5 정도이므로 이보다 더 충분한 탄화물 조대화 효과를 주기 위함이다. 이때의 미세조직은 템퍼드 마텐사이트였고 투과전자현미경(TEM)으로 관찰한 결과 탄화물 분포는 Fig. 1과 같다.

그리고 결정립 조대화의 영향을 조사하기 위해 Table 2와 같이 5가지 온도에서 오스테나이트화 후 유냉시켜 32~600 μm(ASTM No. 7~No. -2)의 결정립 크기를 얻었다. 이때 경도는 Rc 35로 동일시켰다. 모든 열처리가 끝나 후 압연방향과 응력축이 수직이 되도록 표점거리 39.5 mm, 지름 8.4 mm의 봉상시편을 제작하였다.

2.2 실험장치

모든 실험은 크리프 실험기를 이용하여 일정 하중하에 공기중에서 이루어졌다. 하중은 시편의 인장축에 하중계를 설치하여 측정하였고 변형률은 시편에 신장계(extensometer)를 부착하고 LVDT로 2 μm의 정확도 이내에서 측정하였다. 실험중 저항로의 온도변화는 ±1°C 이내였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 탄화물 조대화가 크리프 파단수명과 Larson-Miller parameter에 미치는 영향

550°C 일축인장 크리프실험(uniaxial creep test)에서 탄화물 조대화가 크리프 파단수명(t_r)과 응력(σ)과의 관계에 미치는 영향은 Fig. 2와 같다. 이때 파단은 발전설비의 파괴현상과 같은 기공의 생성 및 성장으로 인한 입계파괴(intergranular fracture)에 의하여 발생하였는데 파단면에서 기공의 형태는 Fig. 3과 같다. Fig. 2를 보면 경도변화, 즉 탄화물 조대화가 크리프 파단수명에 미치는 영향은 적다고 볼 수 있다.

한편 온도증가가 크리프 파단수명을 감소시키는 것은 이미 많이 알려져 있다.⁽¹⁷⁾ 따라서 본 연구에

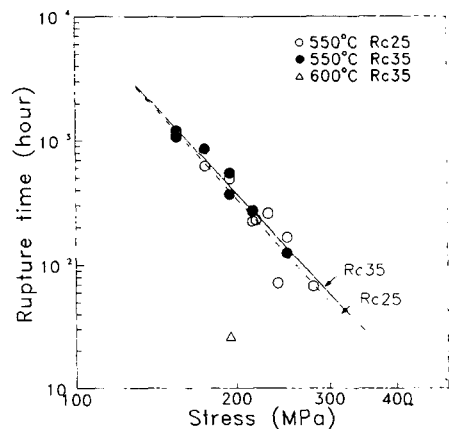


Fig. 2 Effect of carbide coarsening on creep rupture life in 3.5Ni-Cr-Mo-V steel

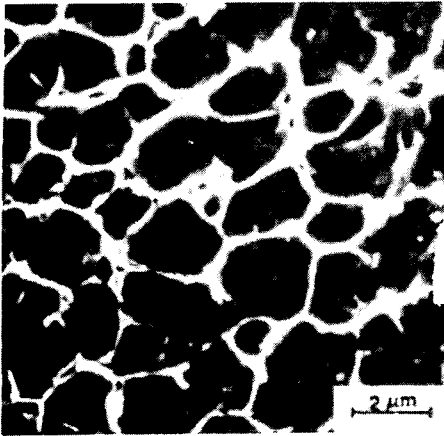


Fig. 3 SEM micrograph of the rupture surface of a specimen

서는 Rc 35 시편을 가지고 600°C에서 1회 실험만 실시하여 이를 검증하였다. 실험결과는 Fig. 2에 도시하였는데(기호 △), 역시 온도증가는 3.5 Ni-Cr-Mo-V 강에서도 크리프 파단시간을 현저히 감소시키고 있다.

앞에서의 결과들은 재질열화시의 기공발생⁽¹⁶⁾이나 온도증가는 파단수명을 단축시킬 수 있으나 탄화물의 조대화는 파단수명에 별 영향을 미치지 못했음을 보이고 있다.

한편 탄화물 조대화가 Larson-Miller parameter에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 2의 응력과 파단시간과의 관계를 Fig. 4와 같이 응력과 Larson-Miller parameter, $P(\sigma)$ 와의 관계로 환산하여 도시하였다. (기호 ○ △) 이때 사용한 수식은 다음과 같다.

$$P(\sigma) = T(K + \log t_f) \times 10^{-3} \quad (1)$$

여기서, T 는 온도로 절대온도를 사용할 경우에는 $T(K)$ 로, Rankine온도($R = ^\circ F + 460$)를 사용할 경우에는 $T(R)$ 로 표시한다. 그리고 t_f 는 크리프 파단수명이고 Larson-Miller 상수값 K 는 재료종류에 따라 다르나 보통 20을 사용하고 있다.

Fig. 4를 보면 탄화물 조대화에 의한 영향은 Fig. 2에서와 마찬가지로 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 또한 Fig. 4의 600°C 결과(기호 □)를 보면 이미 널리 알려진 것처럼 Larson-Miller parameter 값이 동일 응력에서는 550°C에서와 거의 같은 것을 알 수 있다. 즉 온도변화나 재질열화시 발생하는 탄화물 조대화는 Larson-Miller parameter에 거의

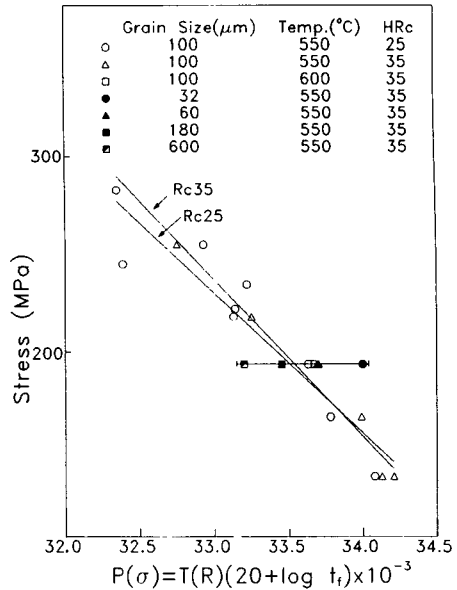


Fig. 4 Effect of carbide coarsening and grain size on Larson-Miller parameter in 3.5Ni-Cr-Mo-V steel

영향을 미치지 않았음을 나타낸다.

이러한 현상의 발생원인은 Ashby의 파괴기구도(fracture mechanism map)⁽¹⁸⁾를 이용하여 다음과 같이 분석할 수 있다. 본 실험결과에서 주된 파괴 기구는 입계에서의 기공발생과 성장이다. 일반적으로 고온에서 재료 파괴는 높은 응력에서는 입내 파괴(transgranular fracture), 낮은 응력에서는 입계 파괴에 의하여 주로 발생한다. 입내파괴는 전위(dislocation)의 이동으로 인한 파괴로 상당한 단면적의 감소와 커다란 변형이 수반된 연성파괴 형태이나 입계파괴는 확산에 의해 입계에서 기공이 생성되고 성장되어 이루어진 취성파괴로 단면적의 감소가 거의 없고 파괴시 변형이 적은 것이 특징이다. 그런데 전위의 이동은 탄화물이 조대화될수록 용이하므로 탄화물 조대화가 수명을 단축시킬 수 있다. 그러나 기공의 생성 및 성장시 탄화물 조대화는 오히려 기공의 핵생성 장소를 감소시켜 기공의 발생을 억제하여 수명을 증가시킬 수 있다. 그러므로 전위의 이동이 발생하는 고응력에서는 탄화물 조대화가 크리프 파단수명을 감소시킬 수 있지만, 전위이동보다는 확산에 의해 지배되는 저응력에서는 탄화물 조대화가 크리프 파단수명에 별 영향을 끼치지 않을 수 있다. 한편 기공의 생성 및 성장은 온도 및 응력에 크게 의존적이어서 비록 온

전온도는 높으나 부과되는 응력이 작은 경우, 기공 발생은 억제된다. 그러나 탄화물 조대화현상은 응력이 없어도 온도만 높으면 발생할 수 있다. 따라서 온도는 높으나 응력이 적게 부과되는 설비는 전위이동이 발생하지 않는 저응력 조건에서 Larson-Miller parameter를 측정해 보면 미사용재와 사용재의 차이점이 별로 발생하지 않을 수 있다. 그러므로 인천화력,⁽¹¹⁾ NKK 철강연구소⁽¹²⁾ 및 石川 중공업⁽¹³⁾의 보고 결과와 같이 고응력에서는 미사용재 (undegraded)와 사용재 (degraded)와의 잔존수명에 차이점이 발생하나 저응력에서는 차이점이 없어지는 현상은 비록 탄화물 조대화는 발생하였으나 기공발생은 적어 발생한 것으로 분석된다.

3.2 오스테나이트 결정립 조대화가 Larson-Miller parameter에 미치는 영향

오스테나이트 결정립 크기변화가 크리프 파단수명에 미치는 영향은 Riedel 등에 의해 1Cr-1/2Mo 강의 두가지 결정립 크기에 대하여 95~310 MPa의 응력범위에서 연구되었는데 결과는 Fig. 5와 같다.⁽¹⁾ 오스테나이트 온도 1300°C일 때 결정립 크기는 88 μm이고 930°C일 때 18 μm이다. Fig. 5를 보면 결정립 조대화가 파단수명을 상당히 감소시키고 있음을 알 수 있다.

한편 Fig. 5의 응력과 파단수명과의 관계를 응력과 Larson-Miller parameter와의 관계로 환산하여 도시하면 Fig. 6과 같다. (기호 ■ ●) K값은 20을 사용하였다.

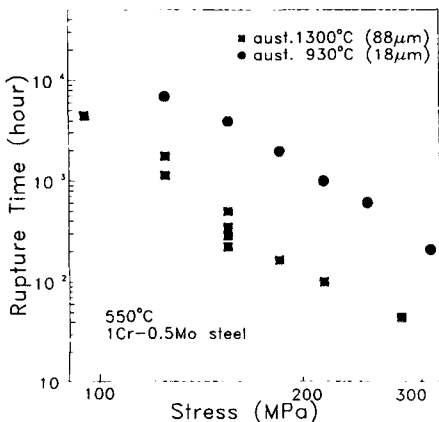


Fig. 5 Rupture lifetimes of two heats of 1Cr-1/2Mo steel⁽¹⁾

Fig. 6을 보면 결정립 크기변화가 Larson-Miller parameter에 매우 큰 영향을 미치고 있다.

그러나 Fig. 5는 여러 응력범위에서 연구되었으나 두가지 결정립 크기에 대하여서만 조사된 결과로 여러 결정립 크기와 다른 재질에서도 이와같은 현상이 발생하는지에 대하여서는 불충분한 점이 있다.

따라서 본 연구에서는 Rc 35의 3.5 Ni-Cr-Mo-V 강을 사용하여 550°C, 195 MPa의 응력조건하에 5

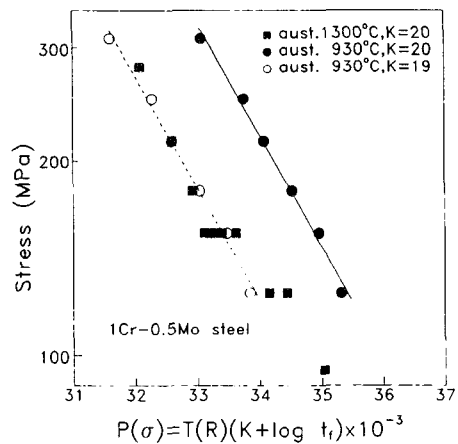


Fig. 6 Effect of grain size on Larson-Miller parameter in 1Cr-1/2Mo steel. Solid lines: Larson-Miller parameter of aust. 930°C when Larson-Miller constant, K is 20. Dashed lines: Larson-Miller parameter of aust. 930°C when Larson-Miller constant, K is 19

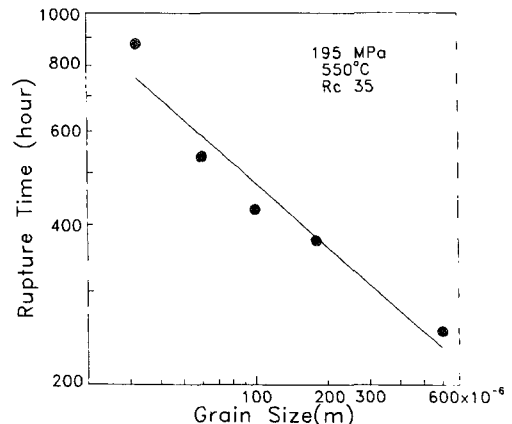


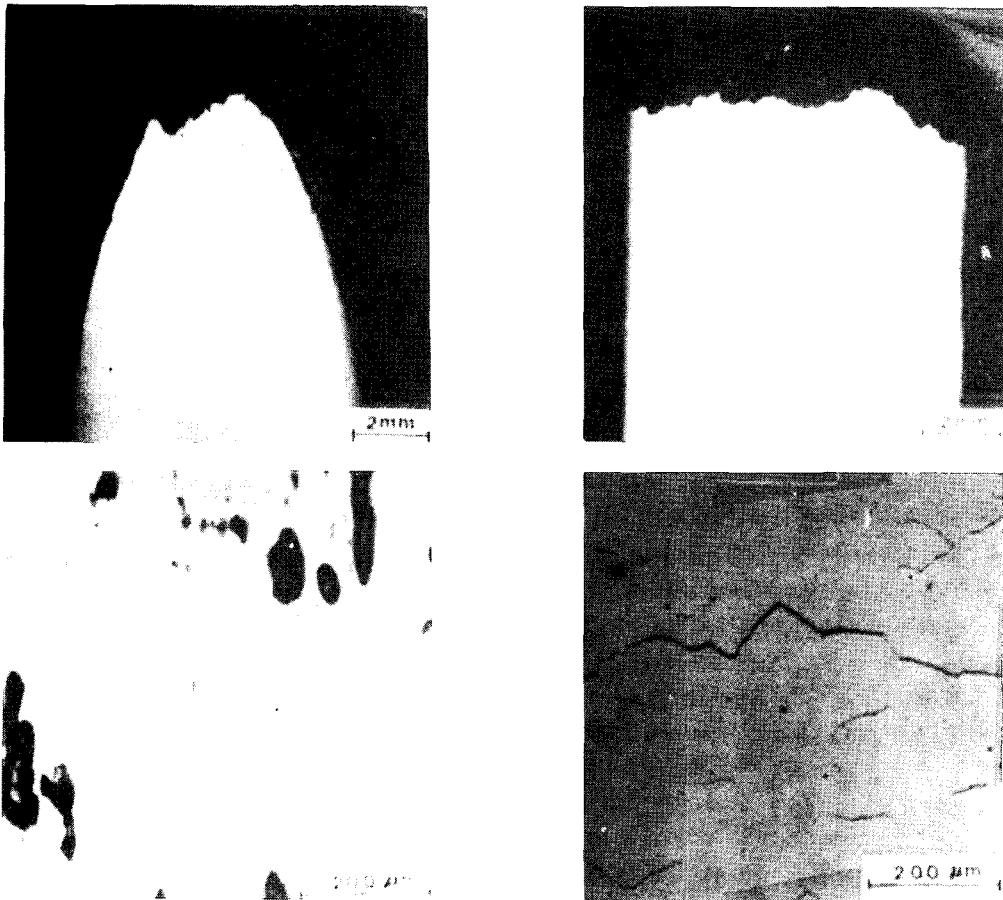
Fig. 7 Effect of grain size on creep rupture lifetime in 3.5Ni-Cr-Mo-V steel

가지 종류의 결정립 크기(32~600 μm)에 대하여 결정립 크기와 크리프 파단수명과 관계는 조사하였는데 이는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7를 보면 동일 응력과 온도조건하에서도 크리프 파단수명은 결정립 조대화에 의하여 감소되는데 결정립이 가장 큰 시편(600 μm)의 파단수명은 결정립이 가장 작은 시편(32 μm)의 약 30%정도 밖에 되지않는다. 이때의 파단형태는 Fig. 8과 같은데 결정립이 가장 작은 ASTM No. 7은 상당한 단면적의 감소와 파단변형률의 증가를 보이는 연성 파괴 형태를 나타내고 있으나 결정립이 ASTM No. 5 이상은 거의 단면적의 감소가 없고 파단 변형률도 적은 취성파괴 형태를 나타내고 있다.

또한 Larson-Miller parameter에 결정립 크기 변화가 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 7의 결과를 응력과 Larson-Miller parameter와의 관계로 Fig. 4에 도시해 본 결과(기호 ● ▲ ■ ▽), 동일 응력상태에서 탄화물 조대화나 온도변화보다 결정립 크기변화가 Larson-Miller parameter에 더 심각한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

이와같이 결정립 조대화가 크리프 파단수명을 감소시키는 현상은 결정립 크기 증가가 입계활주(grain boundary sliding)의 증가나 삼중점(triple junction)에서의 응력증가⁽¹⁹⁾ 또는 높은 온도에서의 열처리로 인하여 MnS 등과 같은 석출물이 미세하게 분산되어 기공생성을 용이하게 한 결과로 분석되고



(a) The crept specimens at 550°C with the prior austenite grain size ASTM No. 7(transgranular fracture)

(b) The crept specimens at 550°C with the prior austenite grain size ASTM No. 4(intergranular fracture)

Fig. 8 Low and high magnification micrographs of cross-section of sample from ruptured tests

있다.⁽¹⁾ 한편 Riedel은 결정립 크기의 증가는 기공의 성장시간을 단축시켜 크리프 파단시간을 감소시킬 수 있다고도 하였다.⁽¹⁾

그러므로 본 연구결과는 재질열화시 발생하는 탄화물 조대화보다는 설비의 열처리 과정이나 용접중 용접열영향부(HAZ)에서 발생하는 결정립 크기 변화가 크리프 파단수명 및 Larson-Miller parameter에 더 현저한 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다. 따라서 용접열영향부(HAZ)에서 발생하는 결정립 조대화 방지는 설비의 안전성 및 수명측면에서 매우 중요한 것을 알 수 있다.

3.3 오스테나이트결정립크기변화를고려한

Larson-Miller parameter의 보정식

앞의 연구 결과들을 보면 결정립 크기변화가 크리프 파단수명과 수명예측에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

결정립 크기변화가 크리프 파단수명에 미치는 영향은 Riedel 등에 의하여 일부 분석되었으나⁽²⁰⁾ 아직까지는 실험결과를 정확히 해석하지 못하고 있고 이들 수식은 너무 복잡하여 현장에 적용하기는 아직 어렵다. 한편 Larson-Miller parameter에서는 결정립 크기변화에 대한 영향이 전혀 반영되지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 Larson-Miller parameter를 보완하고자 Hollomon-Jaffee 식⁽²¹⁾과 Riedel의 크리프 파단수명 예측식⁽²⁰⁾을 결합하여 다음과 같은 식(2)를 유도하였다.

$$t_r = \frac{A}{d^x} \exp\left(-\frac{B(\sigma)}{T}\right) \quad (2)$$

여기서, A는 재료의 특성함수이고 d는 결정립 크기 (grain size), x는 크리프 파단수명과 결정립 크기와의 관계를 나타내는 지수이고 B(σ)는 응력의 함수이다. 식(2)를 log함수로 바꾸고 재배열하면 다음과 같다.

$$-\frac{B(\sigma)}{2.3} = T\left(\log t_r - \log \frac{A}{d^x}\right) \quad (3)$$

식(3)의 $-B(\sigma)/2.3$ 을 Larson-Miller parameter, P(σ)로 놓으면 식(4)와 같은데 이는 현재 사용되고 있는 Larson-Miller parameter 식(1)과 같은 형태이다.

$$P(\sigma) = T\left(\log t_r - \log \frac{A}{d^x}\right) \quad (4)$$

그런데 식(1)에서 Larson-Miller 상수, K는 재료 성분만의 고유상수로 알려져 있으나 식(4)를 보면 결정립 크기에 의해서도 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

식(4)를 앞의 1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo 강에 대하여 적용하면 $A=1.317 \times 10^{-26} m^x$, $x=1.45$ 가 산출된다. 따라서 결정립 크기가 18 μm 재료의 경우 식(1)에서의 K는 19가 되므로 이를 고려하여 Larson-Miller parameter 값을 재산출하여 Fig. 6에 점선으로 도시해 보면 여러 응력범위에서 결정립 크기가 88 μm인 경우와 상당히 일치함을 알 수 있었다. 그러므로 고온설비의 수명예측시 Larson-Miller parameter를 재료성분 뿐만 아니라 결정립 크기 변화도 고려하여 적용하면 기존의 방법보다 고온설비의 수명을 더 정확히 예측할 수 있어 대폭 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

한편 본 연구에서 사용한 3.5Ni-Cr-Mo-V 강에 대하여 식(4)를 적용하면 $A=2.089 \times 10^{-22} m^x$, $x=0.42$ 가 된다. 그러므로 식(1)에서의 K는 600 μm 재료의 경우 20.23, 180 μm의 경우 20.11, 60 μm의 경우 19.91이고 32 μm의 경우는 19.79로 변경하여 적용해야 한다. 그리고 Larson-Miller parameter에 미치는 결정립 크기의 영향은 $x=0.42$ 로 1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo 강의 $x=1.45$ 보다 매우 적은 것을 알 수 있다. 즉, 3.5 Ni-Cr-Mo-V 강에서 Larson-Miller parameter에 결정립 크기변화가 미치는 영향은 1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo 강보다 작다고 할 수 있다.

3.4 Monkman-Grant 법에 재질열화 및 결정립 크기변화가 미치는 영향

앞에서 Monkman-Grant법을 수명예측에 사용하는 데는 다소 문제가 있다고 하였다. 이를 확인하고자 본 연구의 실험결과를 사용하여 재질열화 및 결정립 크기변화가 Monkman-Grant법에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해 아래와 같은 식⁽⁹⁾을 이용하여 Monkman-Grant 상수 C_{MG} 를 구한 결과는 Fig. 9와 같다.

$$\dot{\epsilon}_{st} t_f = C_{MG} \quad (5)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_s$ 는 정상상태 변형률속도 (steady state strain rate) 이고 t_f 는 파단시간이다.

Fig. 9를 보면 각 경도값에서 C_{MG} 가 상수가 아니라 응력의 함수이고, 탄화물 조대화에 따라 C_{MG} 값이 변하므로 재질열화시 식(5)를 적용하기는 어렵

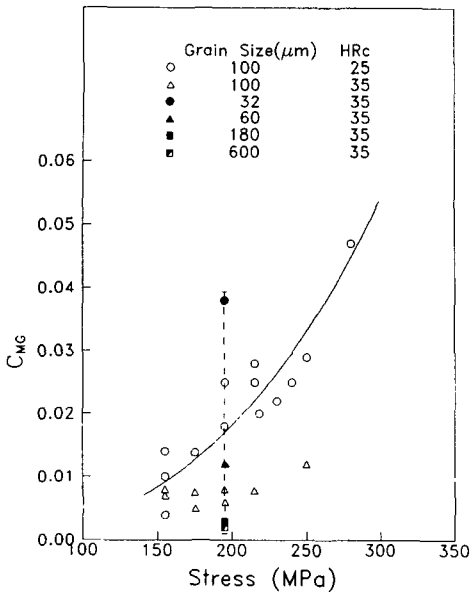


Fig. 9 Effect of carbide coarsening and grain size on Monkam-Grant product in 3.5Ni-Cr-Mo-V steel

다. 또한 결정립 크기에 따라 C_{MG} 값이 최저 0.002에서 최고 0.038까지 변하고 있다. 그러므로 Monkam-Grant 식을 이용한 고온설비의 수명예측은 많은 오차를 발생시킬 수 있다고 본다.

4. 결 론

3.5Ni-Cr-Mo-V 강에서의 재질열화 및 결정립 크기변화가 크리프 파단수명 및 수명예측에 미치는 영향을 실험적으로 고찰한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 재질열화시 발생하는 탄화물 조대화현상은 기공의 발생 및 성장으로 입계파괴가 발생하는 저응력조건에서는 파단수명에 거의 영향을 미치지 않고 있다. 그런데 실제 발전설비의 운전응력 및 온도조건은 대부분 전위이동이 발생하지 않는 저응력 범위이므로 발전설비 수명예측에서 탄화물 조대화는 사실상 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

(2) 재료의 결정립 조대화는 크리프 파단수명을 현저히 감소시킬 뿐만 아니라 Larson-Miller parameter에도 커다란 영향을 주고 있다. 따라서 현재 사용되고 있는 Larson-Miller parameter는 재료의 성분 뿐만 아니라 결정립 크기 변화도 고려하여 다

음과 같이 수정되어야 한다.

$$P(\sigma) = T \left(\log t_r - \log \frac{A}{d^x} \right)$$

본 연구에서 사용한 3.5Ni-Cr-Mo-V 강의 경우 $A = 2.089 \times 10^{-22} m^x$, $x = 0.42$ 이다.

(3) Monkam-Grant 상수값은 경도 및 응력과 결정립 크기에 따라 변하므로 Monkam-Grant 식을 사용한 수명예측은 많은 오차를 발생시킬 수 있다.

참고문헌

- (1) Riedel, H., 1985, "Continuous Nucleation of Grain Boundary Cavity in Creep Rupture," *Z. Metallkde*, Vol. 76, pp. 669~675.
- (2) 김정기, 윤재영, 송기욱, 이주진, 정세희, 1991, "입계부식법에 의한 플랜트용 고온기기의 경년재질열화 평가에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 898~906.
- (3) 홍성호, 1991, "기공의 면적에 의한 수명예측법," 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, pp. 1455~1461.
- (4) 김정기, 이종기, 윤기봉, 정세희, 1991, "소형편치시험법에 의한 발전용 증기관의 경년재질열화 평가에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, pp. 1665~1673.
- (5) 오세규, 정순억, 1993, "화력발전용 로터강의 초기 변형률법에 의한 장시간 크리프 수명 및 강도예측," 대한기계학회논문집, 제17권, 제6호, pp. 1321~1329.
- (6) 권재도, 진영준, 류승우, 장순식, 1993, "다단계 모의 열화재의 재료강도 평가와 수명예측," 대한기계학회논문집, 제17권, 제9호, pp. 2271~2279.
- (7) Eggeler, G., Earthman, J. C., Nilsvang, N. and Ilschner, B., 1989, "Microstructural Study of Creep Rupture in a 12% Chromium Ferritic Steel," *Acta. Metall.*, Vol. 37, pp. 49~60.
- (8) Larson, F. R. and Miller, J., 1952, "Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses," *Trans. ASME*, Vol. 74, pp. 765~775.
- (9) Monkman, F. C. and Grant, N. J., 1956, "An Empirical Relationship between Rupture Life

- and Minimum Creep Rate in Creep-Rupture Tests," *Proceedings ASTM*, Vol. 56, pp. 593~605.
- (10) Manson, S. S. and Ensign, C. R., 1971, "A Specialized Model for Analysis of Creep Rupture Data by the Minimum-Commitment Method," *NASA T. M. X-52999*, pp. 1~14.
- (11) 한국과학기술연구원, 1990, "인천화력 제1호기 수명연장을 위한 재질열화시험 연구," 한국전력공사 연구보고서, pp. 253~256.
- (12) Yusuke, M., Yoshito, I. and Takemi, Y., 1991, "Application of Aged $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Data to Estimation of Remaining Life for Boiler Tubes," *The Thermal and Nuclear Power*, Vol. 42, No. 1, pp. 103~111.
- (13) 馬木秀雄, 1990, "發電用ボイテの余壽命診斷技術," 配管技術, 第3號 pp. 76~86.
- (14) Cheruvu, N. S., 1989, "Degradation of Mechanical Properties of Cr-Mo-V and 2.25Cr-1Mo Steel Components after Long-Term Service at Elevated Temperature," *Metall. Trans. A*, Vol. 20, pp. 87~97.
- (15) Tamemura, K., Sugai, K. and Sugai, S., 1988, "Material Degradation of Long-Term Service Turbine Rotor," *International Conference, "Life Assessment and Extension," Netherlands, Proceedings Session I* pp. 172~178.
- (16) Yu, K. S. and Nix, W. D., 1984, "Effect of Pre-existing Grain Boundary Cavities on Creep Rupture Life of Cu-Sb," *Scripta Metall.*, Vol. 18, pp. 259~264.
- (17) 이동녕, 1983, 금속강도학, 문운당, 서울, pp. 336~338.
- (18) Fields, R. J., Weerasooriya, T. and Ashby, M. F., 1980, "Fracture-Mechanisms in Pure Iron, Two Austenitic Steels, and One Ferritic Steel," *Metall. Trans. A.*, Vol. 11, pp. 333~347.
- (19) Riedel, H., 1987, *Fracture at high temperature*, B. Ilshner(Ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 92~102.
- (20) Riedel, H., 1987, *Fracture at High Temperature*, B. Ilshner(Ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 227~238.
- (21) Hollomon, J. H. and Jaffee, L. D., 1945, "Time-Temperature Relations in Tempering Steel," *AIME*, Vol. 162, pp. 22.