

STS304강의 단시간 크리프 파단특성 평가

김선진* · 공유식*
*부경대학교 기계공학부

Characteristics of Short-Term Creep Rupture in STS304 Steels

SEON-JIN KIM* AND YU-SIK KONG*

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

KEY WORDS: Short-term creep rupture 단시간 크리프 파단, Elevated temperature 승온, Rupture time 파단수명, Monkman-Grant relationship Monkman-Grant 관계, Creep rupture behavior 크리프 파단 거동

ABSTRACT: The objective of this paper is to investigate the relationship between the short-term creep rupture time and the creep rupture properties at three different elevated temperatures in STS304 stainless steel. Uniaxial constant stress creep rupture tests were performed on the steel to observe the creep rupture behaviors at the elevated temperatures of 600, 650 and 700, according to the testing matrix. It is very important to predict creep life in practical creep design problems. As one of the series of studies on the statistical modelling of probabilistic creep rupture time and the development of creep life prediction techniques, the relationship between applied stress and creep rupture behaviors, such as creep strain rate and rupture time, were investigated. In addition, the Monkman-Grant relationship was observed between the steady-state creep rate and the creep rupture time. The creep rupture surfaces observed by SEM showed up dimple phenomenon at all conditions.

1. 서 론

크리프(Creep)란 일정 하중 또는 일정 응력하에서 시간의 경과와 더불어 변위 혹은 변형률이 증가하는 현상을 말한다. 상온에서 탄소성거동을 보이는 재료라 하더라도 고온하에서는 일정 하중 또는 응력하에서 시간에 따라 변형률이 증가하는 것이 일반적이다. 이와 같이 시간에 의존하는 변형을 크리프 현상이라 하며, 경험에 의하면 이 현상은 온도와 아주 밀접한 관계가 있고, 또한 크리프 속도는 온도의 상승과 더불어 급격히 증가하는 것으로 알려져 있다(Hult, 1966).

현재 선박이나 해양구조물 등의 열기관, 자동차나 항공기 등의 엔진, 발전소 보일러, 터빈, 원자로 부품 등의 여러 가지 고온 분위기하에서의 사용 기회가 증가하고 있을 뿐 아니라 효율 면에서도 이들의 사용 온도가 높아지는 추세이다. 이러한 고온 분위기하에서 사용되는 내열강 또는 내열합금의 개발과 더불어 이들 재료에 대한 고온 강도, 특히 크리프 강도 특성에 관한 연구가 중요하다. 이와 같은 재료는 고온에서 장시간 사용되므로 고온 파괴, 즉 크리프 손상에 의한 고장 및 파손으로 경제적 손실은 물론 인명 피해까지도 발생할 수 있다. 그러므로 이러한 강재의 장시간 고온 크리프 특성을 비교적 단시간 크리프 실험을 통하여 파악하고 크리프 안전 강도와 수명을 예측함으로써 고장이나 파손을 방지하는 하는 것은 고온 재료의 사용에 있어서 중요한 요소라 할 수 있다(이상국 등,

2000; Kim et al., 2001).

저자 등은 크리프의 주요인자, 즉 크리프 응력, 파단수명, 정상 크리프 속도, 크리프 연신을 그리고 총 크리프 속도 등의 정량적인 상관관계를 규명하고 이를 정량화하여 파단수명을 도출하는 크리프 수명 예측 평가에 관한 일련의 연구를 수행해 왔다(Oh et al., 1996; Kong et al., 2003; Kong et al., 2004).

그러나 이러한 연구에서 극히 짧은 시간의 실험 데이터를 외삽하여 장시간의 수명 예측을 하는 것은 자칫 위험할 수도 있고, 또 사용 수명 요인인 열화 현상으로 인한 파단은 반드시 외부 표면에서부터 일어나는 것은 아니며 변형, 공공, 미소 균열 등의 손상에 의해 일어나며 실제 설비의 사용 환경에 있어서의 손상은 재질, 온도, 압력, 그리고 시간에 의존하여 복합적으로 발생하게 되므로 이들의 예측 수명을 진의 수명과 다르게 평가할 가능성도 배제할 수 없다. 또한, 크리프 파단수명 혹은 강도도 다른 기계적 성질과 같이 확정적인 값을 보이는 것이 아니라 확률적인 변동을 나타내는 것이 일반적이다(Evans, 1994; 김선진 등, 2004). 이러한 관점에서 크리프 파괴의 기구를 고려한 부재의 수명 혹은 잔여 수명을 확률·통계적으로 예측·평가하는 기술의 개발이 요구된다. 이와 같은 관점에서 저자 등(김선진 등, 2004)은 먼저 STS304강의 고온 인장 시험을 통하여 인장강도, 연신율, 단면수축률 등의 확률분포 특성을 검토하여 이들의 분포가 3-parameter Weibull 분포에 잘 따르고 있음을 확인하였으며, 연신율이나 단면수축률의 변동계수가 인장강도의 변동계수보다도 크다는 사실을 알았다. 한편, 고온 인장강도 분포의 형상 파라미터는 온도의 증가와 더불어 증가하는 온도 의존성이 확인

교신저자 공유식: 부산광역시 남구 용당동 산 100

051-620-1623 kongys@pknu.ac.kr

되었다.

이어서 본 연구에서는 크리프 파단 데이터의 확률·통계적 모델링과 확률론적 크리프 수명 예측법 개발 연구의 일환으로서, 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)을 이용한 단시간 크리프 파단 시험을 통하여 1차적으로 크리프의 현상론적 거동에 근거하여 각종 크리프 파단 특성치와 파단수명과의 상관관계를 고찰하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 550℃ 이상의 보일러 과열기관, 재열기관, 증기기관, 증기터빈의 케이싱, 벨브본체, 로터, 터빈 블레이드 등에 사용되는 18-8계 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304이며, 화학 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었고, 이는 실험적으로 얻은 결과이다.

또한, 고온 크리프 시험에 사용된 시험편은 ASTM E139의 규정에 따라 시험편 평행부의 직경은 13mm의 환봉으로부터 6mm로 가공하였으며, 표면은 사포400번에서 1200번까지 연마한 후 다시 0.3에서 0.05 μ m의 산화분말을 사용하여 표면을 경면 연마하여 표면 거칠기가 시험결과에 미치는 영향을 최소화 하도록 하였다. 파단된 시험편의 파단부를 약 5mm의 크기로 절단하여 아세톤 용액에서 1시간 동안 초음파 세척 후 SEM에 의하여 파단면을 관찰하였다.

2.2 실험장비 및 실험방법

정적(Static) 및 동적(Cyclic) 고온 크리프 시험이 가능한 크리프 시험장치는 미국 SATEC사(Model: DLF-10-1029)의 시험기를 사용하였다. 하중과 변형의 서보제어가 가능한 전기, 기계장치의 크리프 시험기이며, 고온 크리프, 응력/완화시험, 인장 및 압축시험이 가능하다.

온도측정은 K형 열전대를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 설정온도까지 약 10℃/min로 가열하였다. 그리고 부하전에 노내의 온도분포가 균일하게 유지되도록 하기 위하여 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 적용시켰으며, 실험 중 온도를 일정 온도에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 이내로 유지하였다. 또한 시험 중 발생하는 변형률 측정은 표점거리 30mm되는 양쪽지점의 턱 부위에 양단의 플랜지를 기준으로 LVDT(Linear variable displacement transformer)로 측정된 후 실시간적으로 컴퓨터에 저장하여 고온 크리프 변형거동을 관찰하였다.

시험편 가열을 위한 전기로는 개폐식을 사용하였으며, 노의 온도를 제어하는 자동 온도 조절장치는 1200℃까지 전 범위의 $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 의 정확도를 가지며, 노의 내부는 $\pm 1.5^\circ\text{C}$, 노 전체 3구간(Top, Middle, Bottom zone)의 온도 구배는 2℃정도이다. STS304강이 주로 사용되는 사용 환경을 고려하여 시험 온도의 결정을 600℃, 650℃, 700℃로 하였다.

Table 1 The chemical composition of STS304 steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Fe
0.020	0.40	1.83	0.029	0.009	8.13	18.22	0.24	2.06	0.012	Bal.

Table 2 The mechanical properties of STS304 steel

(a) Room temperature

Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area ϕ (%)	Hardness (HV)
706	490	18	45	250

(b) High temperatures

Temp. (°C)	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area ϕ (%)	Hardness (HV)
600	526	456	13.6	41	245
650	463	409	16.3	40	230
700	403	373	22	36	207

Table 3 Testing matrix showing the number of specimens tested on 3 different temperatures and stresses

Stress (MPa)	Temperature (600℃)	Temperature (650℃)	Temperature (700℃)
340	1	-	-
320	5	-	-
300	5	-	-
260	-	5	-
240	-	5	-
220	-	1	-
200	-	-	1
180	-	-	5
160	-	-	5

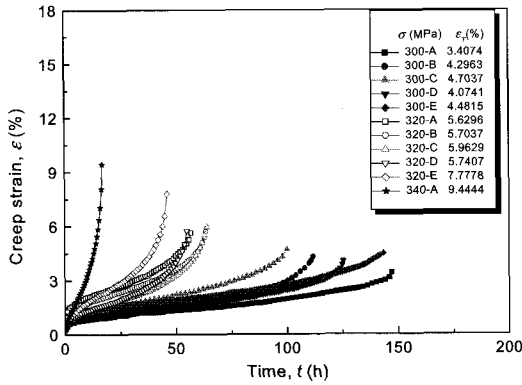
2.3 실험 매트릭스

실험 매트릭스는 연구실 실험 환경을 고려하여 Table 3과 같은 제한적인 조건으로 수행하였다. 각 온도에서 두 응력 레벨에서는 각각 5개의 시험편에 대하여 수행하였으며, 또한 각 온도에서 한 응력 레벨에서는 하나의 시험편에 대하여 수행되었다. 총 33개의 시험편에 대하여 단시간 크리프 파단 시험을 수행하여 파단 특성치와 파단수명과의 상관관계를 고찰하였다.

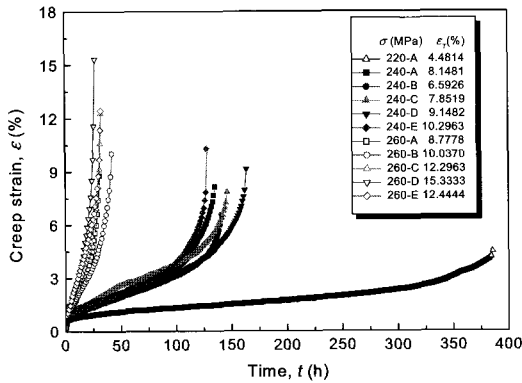
3. 결과 및 고찰

3.1 온도에 따른 크리프 곡선

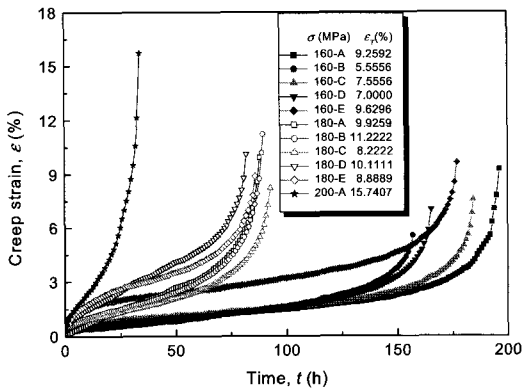
일정 온도(600, 650, 700°C)하에서 응력을 변화시켜 실험적으로



(a) 600 °C



(b) 650 °C



(c) 700 °C

Fig. 1 Creep curves for STS304 at 600 °C, 650 °C and 700 °C

구한 STS304 재료의 단시간 크리프 곡선을 Fig. 1(a), (b), (c)에 각각 나타내었다. 그래프에서 응력이 증가함에 따라 파단수명은 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 700°C의 고온에서는 비교적 낮은 응력에서 크리프 거동이 더욱 크게 나타나고 있다. 이는 활성화 에너지로 인한 고온에서의 열거동이 커져, 확산이 활발해 지는데 기인하며, 온도가 크리프 파단 특성치에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 또한 각 온도에서 응력의 차이가 소폭임에도 불구하고, 동일 온도와 동일 응력에서도 크리프 곡선에는 차이가 나타났다. 즉, 파단수명 등과 같은 크리프 특성치에는 상당한 산포가 존재함을 알 수 있다. 이에 대해서는 다음 보에서 논하기로 한다.

3.2 크리프의 현상론적 거동

크리프의 현상론적 이론에 포함되는 기본량은 연신율(Strain, %), 응력(Stress, MPa) 및 파단수명(Time)이다. Fig. 2는 본 실험의 하나의 예로 600°C, 인장응력 300MPa에서의 크리프 곡선과 그에 대응하는 크리프 속도(de/dt)와 시간과의 관계를 나타낸 것이다.

이들의 그림에서 알 수 있듯이 크리프 속도의 크기가 감소, 거의 일정 그리고 갑자기 증가하는 3단계가 명확히 관찰되었다. 다른 모든 실험의 경우에 있어서도 거의 동일한 결과를 보였다. 즉 본 실험의 범위에 대한 단시간 크리프 변형의 메카니즘에는 특별한 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 Evans(Evans and Ward, 2000)의 Ti-6246합금의 500°C의 실험 결과와도 잘 일치한다.

이들의 단계를 제1기 크리프, 제2기 크리프 및 제3기 크리프의 단계로 나눌 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 제1기 단계의 초기, 즉 부하 직후의 크리프 속도는 통상 아주 크다. 이 때문에 초기 연신율(Initial strain) 혹은 순간 연신율(Instantaneous strain) ϵ_0 로서 측정된 값은 연신측정기의 종류에 의해서도 크게 변할 수 있으며, 특히 하중을 정확히 순간적으로 가하는 것에도 어려움이 있고, 또한 시험조건의 부정확성에 의하여 산포가 있을 것이라 사료된다. 그러나 Oh et al. (1999)의 연구결과에 의하면, 초기연신율은 응력과 온도에 아주 민감하다고 보고하고 있다. 즉, 온도가 증가할수록 초기연신율도 증가하며, 일정 고온에

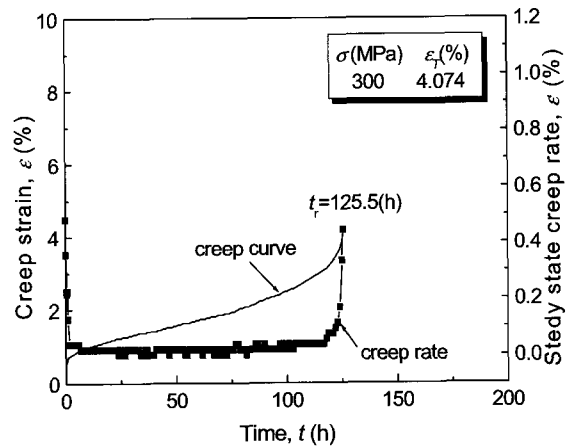


Fig. 2 Creep and creep rate curves at 600 °C and 300 MPa

서 응력의 변화에 따라서도 초기연신율은 약간씩 다른 값을 가진다고 보고하고 있다.

상기와 같은 초기연신율의 현상론적, 물리적 성질의 고찰은 초기연신율법에 의한 수명예측의 가능성을 시사할 수 있으므로 이에 대한 고찰이 더욱 필요하다고 생각되나, 본보에서는 현상론적인 크리프 파단 특성치와 파단수명과의 상관을 고찰하는 것에 국한한 것이므로 생략한다.

3.3 크리프 응력과 속도, 크리프 연신율과의 상관성

Fig. 3 및 Fig. 4는 각각 크리프 응력(σ , MPa)과 정상 상태 크리프 속도($\dot{\epsilon}$, %/hr), 총 크리프 속도($\dot{\epsilon}_T$, %/hr)와의 관계를 나타낸 것이다. 그래프에서 응력이 증가함에 따라 정상크리프 속도와 총 크리프 속도는 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 특히 700°C에서 기울기가 더욱 커짐을 알 수 있다. 여기서 이들의 상관 관계식은 다음과 같이 도출되었다.

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

- 600°C; $\log \sigma = 0.0446 \log \dot{\epsilon} + 2.558$ (1)
- 650°C; $\log \sigma = 0.0455 \log \dot{\epsilon} + 2.449$ (2)
- 700°C; $\log \sigma = 0.0865 \log \dot{\epsilon} + 2.366$ (3)

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

- 600°C; $\log \sigma = 0.0445 \log \dot{\epsilon}_T + 2.545$ (4)
- 650°C; $\log \sigma = 0.0449 \log \dot{\epsilon}_T + 2.435$ (5)
- 700°C; $\log \sigma = 0.0992 \log \dot{\epsilon}_T + 2.344$ (6)

이상의 각 온도에서 얻어진 $\sigma - \dot{\epsilon}$ 의 관계식은 일정 온도에서 Norton(1929)의 제안식과 잘 일치함을 알 수 있으며, 응력에 대한 $\dot{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}_T$ 의 기울기는 온도가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 그 기울기는 700°C에서 2배 정도 더 큼을 알 수 있다. 이는 온도 상승에 의한 미세조직내의 고용강화 원소의 감소와 이로 인한 전위이동의 활성화에 기인한 결과로 생각된다.

한편, Fig. 5는 크리프 응력과 연신율과의 상관성을 나타내는 실험결과로서, 크리프 연신율은 응력이 증가할수록 선형적으로 증가하며, 특히 700°C에서 증가율이 다소 커짐을 알 수 있다. 이상과 같이 본 실험 범위에서도 크리프 응력과 총 크리프 연신율 사이에도 상관이 존재함이 확인되었다.

3.4 크리프 응력과 파단시간과의 상관성

Fig. 6은 600, 650, 700°C에서의 크리프 응력(σ , MPa)과 크리프 파단시간(t_f)과의 상관성을 나타내는 실험결과로서, 크리프 설계 곡선(Creep design curve)이다. 크리프 응력과 파단시간의 상관성을 조사한 결과, 크리프 수명은 응력이 증가하면 감소하는 결과를 얻었으며, 또한 온도가 상승하면 그 감소율은 더욱 증가함을 알 수 있었다. 크리프 속도와 파단시간과의 상관성은 각 온도에서 아래와 같은 상관관계식으로 모델화 되었다. 이 결과는 Norton(1929)에 의해서 제안된 모델식과 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

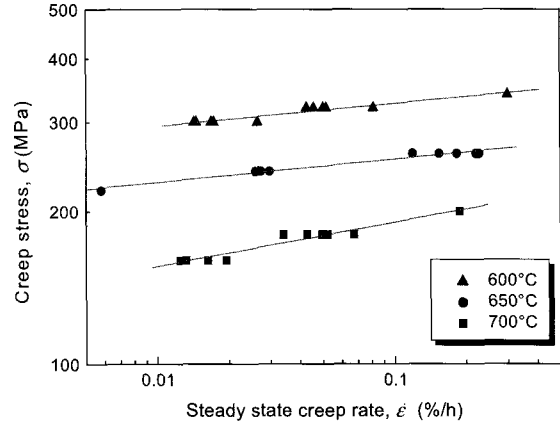


Fig. 3 Relationship between creep stress and steady state creep rate

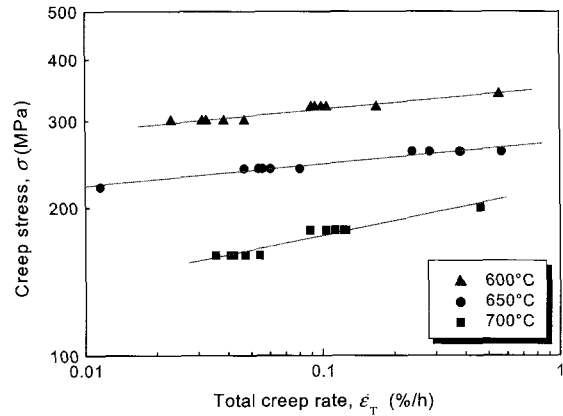


Fig. 4 Relationship between creep stress and total creep rate

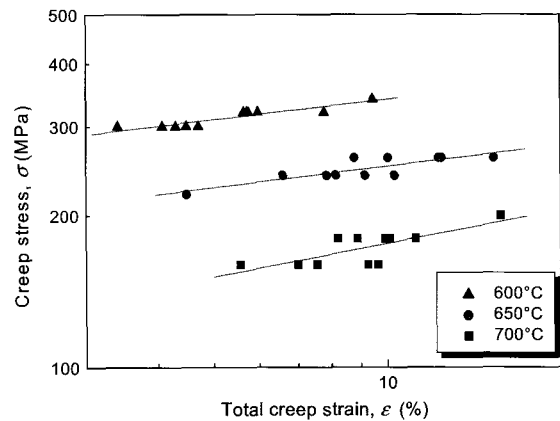


Fig. 5 Relationship between creep stress and total creep strain

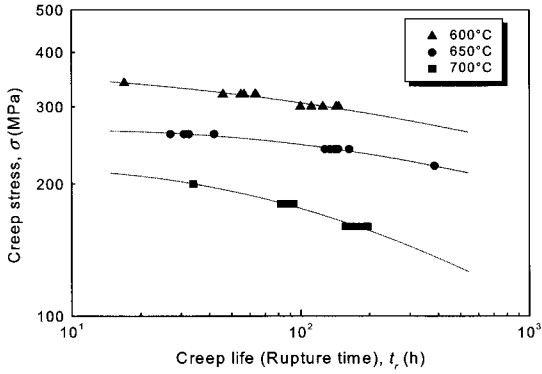


Fig. 6 Relationship between creep stress and creep life

여기서 이들의 상관관계식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 6에서 $t_r - \sigma$ 관계식

$$600^\circ\text{C}; \log \sigma = 0.0446 \log t_r' + 2.558 \quad (7)$$

$$650^\circ\text{C}; \log \sigma = 0.0455 \log t_r' + 2.449 \quad (8)$$

$$700^\circ\text{C}; \log \sigma = 0.0865 \log t_r' + 2.366 \quad (9)$$

3.5 Monkman-Grant 관계식

크리프 수명의 재료의 선정과 같은 고온 설계의 문제에 있어서 대단히 중요한 요소 중의 하나이다. 크리프 수명은 통상 시험편의 파단 시간으로 나타내게 된다. 실용적인 관점에서 크리프 수명의 평가에 Larson-Miller parameter(Larson and Miller, 1952)법이 많이 사용되고 있다. 이 방법은 정상 상태의 크리프 속도에 기초하고 있지만, 전 크리프 과정 동안 일정 변형률 속도가 가정한다. 본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 제2기 정상상태 크리프 속도가 거의 일정한 값을 가지고 있으며, 이를 Monkman-Grant(Monkman and Grant, 1956) 식에 적용하여 보았다.

Fig. 7은 각각의 온도에 있어서 파단시간과 정상크리프 속도와의 상관관계를 나타낸 Monkman-Grant 관계를 플로트 한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 파단시간이 감소함에 따라 정상 크리프 속도는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 3.3과 3.4절에서 논한 바와 같이, 응력-정상상태 크리프 속도, 응력-파단시간과의 사이에는 실험적 상관관계가 존재함을 알 수 있다. 즉, 이들 관계식으로부터 파단시간과 정상 상태의 크리프 속도 사이에는 실험적 상관관계가 존재하여, Monkman-Grant 관계식에 의해서도 수명 예측이 가능함을 보여준다. 본 실험의 범위에 대한 작용 응력과 온도에 무관한 다음과 같은 Monkman-Grant 식으로 나타낼 수 있다.

$$\log t_r = C - p \log \dot{\epsilon} \quad (10)$$

여기서, 구한 재료 상수 p 와 C 는 각각 0.6803, 0.9869의 값을 얻었다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 온도에 대해서 고려할 때는 p 값이 다소 다르게 나타남을 알 수 있다. 이는 본 실험결과에 대한 산포의 영향이라 사료되며, 이에 대한 고찰이 더욱 필요하다고 하겠다.

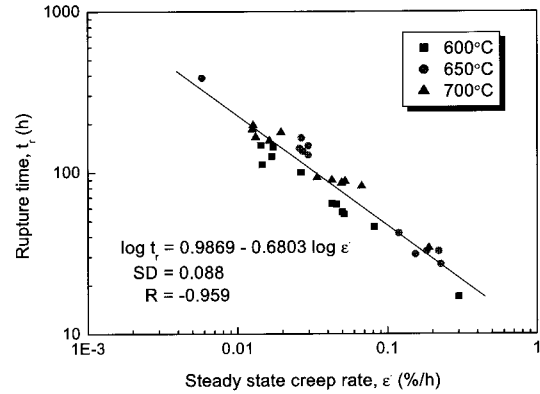


Fig. 7 Monkman-Grant relationship for STS304 at the respective temperature

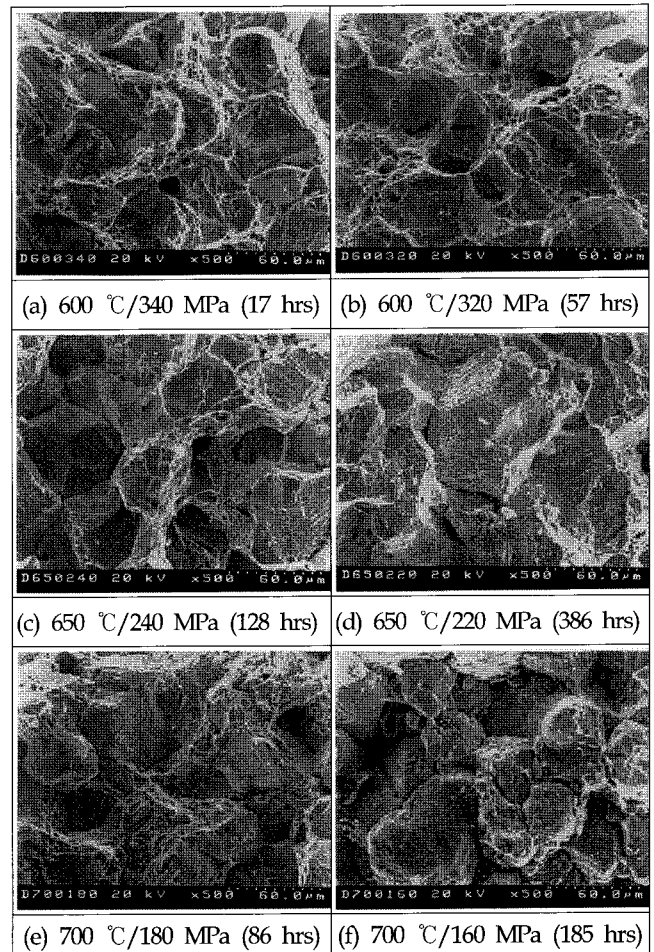


Fig. 8 Fracture surface of creep by SEM for STS304 at 600 °C, 650 °C and 700 °C (x500)

3.6 파단면 관찰

Fig. 8은 600, 650, 700°C에서 크리프 실험을 수행한 시험편의 파단면 사진을 각 온도별 두 가지 응력조건에서 나타내었다. 사진에

서 보듯이 세 가지 온도 모두 균열전파부에서는 인장유지 시간부과로 인한 크리프 손상에 의해 일부 입내파괴를 보였지만, 온도가 증가함에 따라 입내에서 입계파괴로의 천이가 일어남을 볼 수 있으며, 연성파괴가 지배적임을 알 수 있다. 이는 결정입계에서 탄화물 형성과 전위의 움직임에 의해서 파괴가 발생한 것으로 판단된다. 또한 파단된 결정립 내부에 Cavity와 연성파단의 양상인 덩플이 혼재되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

STS304강의 고온 크리프 특성과 크리프 파단시간과 상관관계를 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 크리프 수명은 응력과 온도가 상승 할수록 감소하며, 특히 700°C에서는 수명이 급격히 감소함을 알 수 있었다.
- (2) 정상 크리프 속도와 총 크리프 속도 등의 크리프 특성이 크리프 응력과 파단시간과의 정량적 상관관계가 성립함을 알 수 있었다.
- (3) 본 실험의 범위 내에서 Monkman-Grant 관계식으로부터의 수명예측이 가능함을 시사하며, 본 실험에서 구한 재료 상수 p 와 C 는 각각 0.6803, 0.9869의 값을 얻었다.
- (4) 각 온도별 조건에서 파단부는 전형적인 연성파괴를 나타내는 덩플(Dimple) 현상이 나타났으며, 온도가 증가함에 따라 입내에서 입계파괴로의 천이가 일어남을 관찰할 수 있었다.

후 기

본 연구의 수행에 있어서 실험과 데이터 정리에 도움을 주신 대학원생 노영진, 정원택군에게 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

김선진, 광명규, 권상우, 공유식 (2004). "스테인리스강의 고온 기계적 성질에 대한 확률분포 특성", 한국해양공학회지, 제18권, 제2호, pp 64-69.

이상국, 이인철, 장홍근 (2000). "주파수 분석법에 의한 발전소 고온배관 재료의 크리프손상 평가", 비파괴검사

학회지, 제20권, 제1호, pp 10-17.

Evans, M. and Ward, A.R. (2000). "Statistical and Probabilistic Modelling of Uniaxial Creep Life of a Ti-6246 Alloy", Materials Science and Technology, Vol 16, pp 1149-1157

Hult, J. (1966). Creep in Engineering Structures, Blaisdell Publishing Company.

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

Monkman, F.C. and Grant, N.J. (1956). "An Empirical Relationship Between Rupture Life and Minimum Creep Rate in Creep-Rupture Tests", Pro. of ASTM, Vol 56, pp 593-605.

Norton, F.H. (1929). "Creep of Steel at High Temperatures", McGraw Hill, New York, pp 67.

Oh, S.K., Kim, S.J. and Jeon, T.E. (1996). "Development of Long Time Creep Safety Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel and AE Evaluation", Proc. of 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles, pp 275-279.

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.

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.

Kong, Y.S., Yoon, H.K., Park, Y.H. and Kim, S.J. (2004). "Creep Life Prediction of High Temperature Tube Materials for Power Plants", Key Engineering Materials Vols 261-263, pp 1115-1122.

2007년 6월 29일 원고 접수

2007년 8월 7일 최종 수정본 채택