

STS 316L 스테인리스강의 크리프 수명예측

윤종호* · 황경충

경일대학교 기계자동차학부

Creep Life Prediction of SUS 316L Stainless Steel

Jong Ho Yoon* · Kyung Choong Hwang

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University, Gyeongbuk 712-701, Korea

(Received 11 June 2005 / Accepted 15 December 2005)

Abstract : Stainless steel has widely been used in various industrial fields because it has high corrosion resistance. But, we have little design data about the creep life prediction of SUS316L stainless steel. Therefore, in this study, a series of creep tests and study on them under 16 constant stress and temperature combined conditions have been performed to get the creep design data and life prediction of SUS316L stainless steels and we have gotten the following results. First, the stress exponents decrease as the test temperatures increase. Secondly, the creep activation energy gradually decreases as the stresses become bigger. Thirdly, the constant of Larson-Miller parameters on this alloy is estimated about 10. And last, the creep rupture fractographs show the intergranular ductile fracture with many dimples.

Key Words : Creep strain rate(크리프 변형율 속도), Stress dependence(응력의존성), Activation energy(활성화 에너지), Creep life prediction(크리프 수명예측), Fractography(파단면 분석)

1. 서론

STS 316L 스테인리스강은 오스테나이트 계로 내식성, 내산화성 및 내구성이 큰 특징을 갖는다. 자동차 배기계 및 외장재, 화학공장의 설비류, 환경보존 분야, 해수관련 장치, 석유화학 공업의 열교환기, 원자력발전소 등 고온 설비에 널리 사용되고 있으며, 사용빈도가 점차적으로 많아지고 있는 추세를 보여 주는 소재이다. 국내에서 스테인리스강의 크리프에 관한 연구로는 황¹⁾ 등이 자동차부품 소재개발을 위한 알파티타늄합금의 용체화처리후 정적인 크리프 거동을, 윤²⁾ 등이 티타늄합금(Ti-6Al-4V)의 0.3Tm에서 크리프 특성에 관한 연구를 발표한 바 있다. 해외에서는 1960년도 이전에 소재들에 대한 고온에서의

거동특성³⁾에 대한 연구가 시작되었으며, 1970년에 Cuddy⁴⁾는 크리프 중에 유발되는 내부응력 및 구조에 대한 연구를 발표하였다. Bradley⁵⁾는 실온에서 순수한 알루미늄의 피로 크리프특성에 대한 연구를 발표한 바 있다.

본 연구에서는 STS 316L 스테인리스강을 대상으로 4가지의 일정한 응력 조건들과 4가지의 온도조건들을 조합하여 총 16가지의 시험 조건들에서 크리프 실험을 수행하였다. 세부적인 연구로는 크리프 파단수명예측, 크리프 변형율 속도의 응력의존성, 온도에 따른 크리프 변형 활성화 에너지의 특성, 크리프 파단면들의 특성 등에 대하여 연구하였다. 크리프에 의한 잔존 수명예측은 Larson-Miller 변수법⁶⁾을 도입하여 계산함으로써 본 재료의 안정된 사용 응력 및 온도 범위를 예측하고자 하였다. 크리프

*Corresponding author. E-mail: jhyoon@kiu.ac.kr

잔여수명에 대한 연구결과는 본 연구의 소재로 만들어진 각종의 고온설비들에서 유용한 기초 설계자료로 활용되도록 하였다.

2. 크리프 파단수명 이론

2.1 크리프 파단수명 예측 이론

어느 온도영역에서의 파단수명을 알고 있으면 다른 온도영역에서의 파단수명을 예측할 수 있다. 파단수명의 예측은 비교적 간편하면서도 여러 합금에 폭넓게 적용되는 Larson-Miller변수를 사용하였는데, 이 변수 P 는 다음 식으로 계산된다.

$$P = f(\sigma) = T(\log t_r + C) \quad (1)$$

여기서, T : 켈빈 온도(K), σ : 응력(MPa)
 t_r : 파단 시간(hr), C : 상수

식 (1)에서 파단수명(t_r)의 대수 값은

$$\log t_r = \frac{P}{T} - C \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있어, 식 (2)에서 파단시간이 계산될 수 있다.

2.2 크리프 변형률과 응력의 의존성

각각의 시간 t 에 대한 변형률 ϵ_t 를 이용하여 정상상태 크리프속도 $\dot{\epsilon}_s$ 는 다음 식으로 된다.

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_s$: 정상상태의 크리프속도
 ϵ_1, ϵ_2 : t_1, t_2 에서 변형률
 t_1, t_2 : 각각의 크리프시간

크리프 변형률속도의 응력 의존성은 Cuddy와 Garofalo가 제안한 정상 변형률 속도는 다음 식으로 표현될 수 있다.^{3,7)}

$$\dot{\epsilon}_s = K\sigma^n \quad (4)$$

여기서, K : 구조상수, σ : 응력(MPa),
 n : 응력지수

식 (4)의 양변에 로그를 취하면, 다음 식을 얻을

수 있다.

$$\log \dot{\epsilon}_s = \log K + n \log \sigma \quad (5)$$

2.3 크리프변형에 대한 활성화에너지

크리프변형은 열적으로 활성화과정에 의해 진행되므로 이는 온도에 대한 크리프 변형속도는 Arrhenius 방정식으로 표시할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_s = K \cdot \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (6)$$

여기서, Q_c : 크리프 활성화 에너지(kcal/mol),
 K : 응력, 조직, 온도에 따른 구조상수,
 R : 기체상수(8.314 kcal/mol)
 T : 절대온도(K)

식 (6)의 양변에 로그를 취하면 다음같이 된다.

$$\ln \dot{\epsilon}_s = \ln K - \frac{Q_c}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (7)$$

$$\text{즉, } \log \dot{\epsilon}_s = \log K - \frac{Q_c}{2.303RT} \quad (8)$$

3. 실험 및 연구방법

3.1 시험편

본 크리프시험에 사용된 STS 316L 스테인리스강은 Fe가 주성분을 이루고, 소량의 Cr, Ni, Mo과 미량의 Mn, Si, C 및 P를 함유한 합금으로 EDS방법으로 분석한 화학적 성분은 Table 1과 같다. 크리프시험편 제작은 ASTM 규격에 의하여 두께 1mm의 판상으로 인장방향과 압연방향이 동일하도록 하였고, 표점거리가 9.6mm인 인장 크리프 시험편을 와이어 방전가공기를 사용하여 제7호 시험편을 제작하여 이용하였다. 이 시험편의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of creep specimen

Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	P	Fe
16.2	12.6	2.3	.43	.43	.025	.023	BAL.

Table 2 Mechanical properties of creep specimen

Yield point strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Percent elongation
281.45	602.13	54

3.2 시험편의 열처리

시험편 소재의 압연방향이 갖는 영향을 없애고 강도와 경도를 높이기 위하여 진공로에서 소재의 균질화 처리를 위하여 1,100°C에서 30분 동안 용체화 처리(solution treatment)를 한 후 수냉으로 담금질을 하였다. 담금질 후 강도와 연신율이 극대화되는 등축정과 층상조직의 혼합조직으로 변화시키기 위하여 950°C에서 30분 동안 열처리를 시킨 후 노냉(furnace cooling)으로 풀림처리하였다. Fig. 1은 열처리과정을 도식적으로 보여준다.

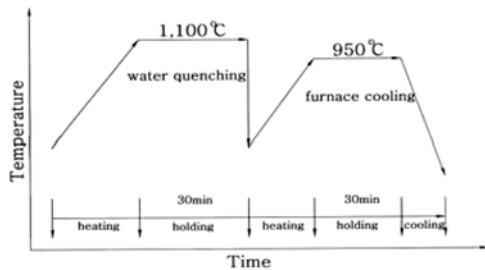


Fig. 1 Heat treatment process

3.3 크리프 실험장치

실험장치는 Andrade와 F. Garofalo 등이^{8,9)} 고안한 레버-빔 형이며, 크리프 변형기구의 정확한 해석을 위해 크리프 변형량에 무관하게 응력이 일정하게 유지되는 크리프 시험기이다. 최대 허용하중은 500 MPa이고, 자동 레버 조절형 시험기이다. 기기에 부착된 가열로는 타원형의 적외선 노이며, 시험편은 가열로의 석영관 내에 장치할 수 있도록 되어있다. 실험할 때 노내에 일정한 시험온도가 유지되도록 시험편의 온도변화가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이하로 조절되도록 하는 제어장치를 노에 연결하였다. 그리고 시험편의 크리프 변형량은 LVDT(선형가변차동변압기)를 활용하여 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 까지 측정 가능하도록 하였다.¹⁾

3.4 시험방법

크리프 시험편의 양단은 볼트로 고정시키고, 열전대를 시험편 중앙에 위치시켰다. 또한 유리섬유를 이용하여 열이 밖으로 새지 않도록 하였다.

크리프시험 설정조건은 시험편에 미치는 영향을 알아보기 위하여 550°C로부터 15°C의 온도간격으

로 상승시켜 565, 580 및 595°C의 4가지 온도조건으로 설정하였으며, 응력은 213, 227, 240 및 253 MPa의 4가지 조건을 설정하여 전체적으로 16가지의 크리프 시험조건 하에서 시험을 실시하였다. 시험조건은 Table 3에 나타내었다. 시험 후 주사 전자현미경(SEM)으로 파단면을 관찰하여 파괴의 양상을 분석한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 크리프

본 연구에서 크리프시험 조건인 온도범위 550 ~ 595°C의 구간과 응력범위 213~253 MPa의 구간에서 온도와 하중을 변화시키며, 시험한 결과 Table 3의 크리프 데이터를 얻었다.

크리프온도 550°C에서는 213~227 MPa에서는 시험편이 3주일(500시간) 이상 계속해서 늘어나는 양상을 보여주고 있으며, 240 및 253 MPa에서는 각각 406시간 및 229 시간 만에 크리프 파단이 일어났음을 보여준다.

크리프온도 565°C에서는 크리프응력 213 MPa에서만 500시간이상 계속 늘어났고, 227, 240 및 240 MPa의 크리프응력 조건 하에서의 시험편들의 파단시간은 각기 427, 339 및 110시간 만에 일어났음을 보여

Table 3 Experimental static creep data of stainless alloy

Temp. (°C)	Stress (MPa)	Creep rate, (hr-1)	Rupture time,(hr)
550	213	0.00113	over 500
	227	0.00183	over 500
	240	0.00396	406
	253	0.00749	229
565	213	0.00208	over 500
	227	0.00435	490
	240	0.00987	339
	253	0.01813	110
580	213	0.00303	457
	227	0.00619	269
	240	0.02112	140
	253	0.03256	95
595	213	0.00601	273
	227	0.01126	186
	240	0.0462	81
	253	0.09776	39

준다.

크리프 온도 580°C에서는 전체 응력조건들에서 3주 이내에 모두 크리프 파단이 발생하였으며, 파단 수명들은 응력조건별로 각각 95, 140, 289 및 457시간으로 나타났다.

크리프 온도 595°C에서는 크리프응력의 증가에 따라 크리프저항성이 감소하였고 파단 변형율도 감소하였다. 크리프온도가 제일 높은 관계로 표에서 보는 것과 같이 각 응력별 비교에서 가장 짧은 시간에 크리프파단현상들이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2의 크리프 변형율 곡선들은 각각의 온도 및 응력 조건별로 최초 1주일 동안 크리프가 진행되는 과정을 그림으로 보여주고 있다.

4.2 크리프변형률과 응력의존성

2.2절의 식 (5)에 따라 $\dot{\epsilon}_s$ 와 σ 의 관계를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3이다.

$\dot{\epsilon}_s$ 와 σ 의 관계는 선형적으로 나타났으며, 이 직선

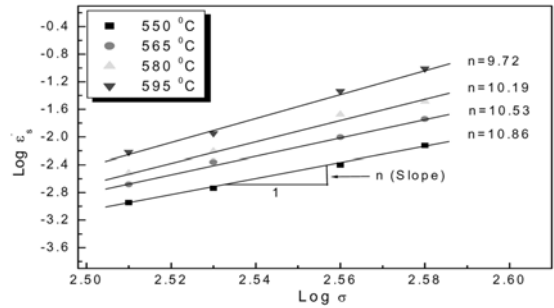


Fig. 3 Dependence of creep rate on applied stresses

의 기울기는 응력지수(n)를 나타낸다. 크리프시험 온도가 550°C에서 595°C로 15°C씩 증가함에 따라 응력지수 값은 각각 10.86, 10.53, 10.19 및 9.72의 순서로 점점 작아지는 경향을 보여주었다. 이와 같은 경향은 온도가 높아질수록 전위밀도가 감소하고 이에 따라 응력 감소효과가 높아지기 때문으로 생각된다.

4.3 크리프변형에 대한 활성화 에너지

2.3절의 식 (7)로부터 Q_c 값은 $\ln \dot{\epsilon}_s$ 과 $1/T$ 와의 기

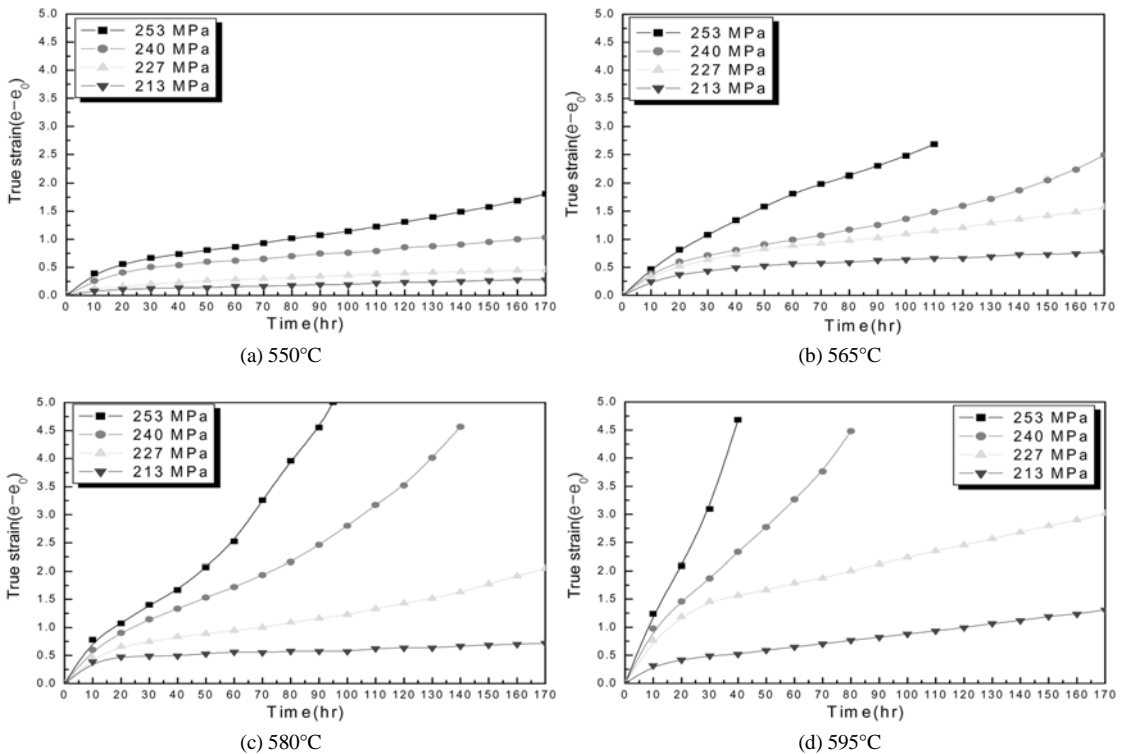


Fig. 2 Creep strain curves as time functions

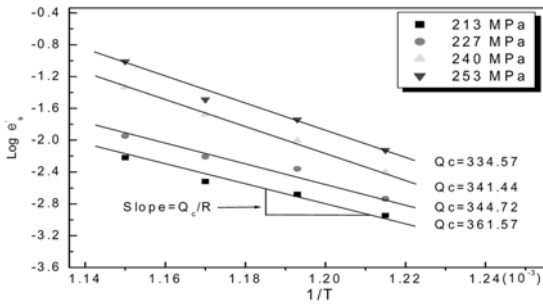


Fig. 4 Dependence of creep rate on temperature

울기 $[-Q_c/(2.303R)]$ 로부터 구할 수 있으므로 Fig. 4에서 직선의 기울기를 계산하면 크리프 활성화 에너지 Q_c 를 계산할 수 있다. 가해진 응력 213~253 MPa에 대해 각기 활성화 에너지를 계산하면 361.57, 344.72, 341.44 및 334.57 kcal/mol값을 얻었다. 활성화 에너지는 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이와 같은 현상은 Bradley 등이 주장한 크리프 활성화 에너지와 유효응력 관계에서도 확인할 수 있다.⁴⁾

4.4 크리프 잔존수명 예측

크리프시험 데이터 Table 3에서 재료의 파괴시간을 비교해보면 외부응력 증가에 따라 파괴수명은 급격히 감소하고 있다. 같은 응력에서도 온도증가에 따라 파단수명은 급격히 감소한다.

Table 3의 데이터를 이용하여 각각의 응력별로 $\log(t_r)$ 과 절대온도의 역수($1/T$) 사이의 상관관계와 Larson-Miller 변수의 상수C를 계산하기 위한 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 응력별로 네 개의 직선들이 최소 자승오차 회귀 직선으로 계산되었으며, 이 식들에서 상수 C는 그림내의 식들에서 확인할 수 있듯이 10정도로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 일부 온도구간에서의 파단수명이 예측되면 다른 온도구간에서의 파단수명도 Larson-Miller 변수식을 이용하여 계산해 낼 수 있다.

아울러 응력과 Larson-Miller 변수의 관계를 나타내는 그래프를 Fig. 6에 나타내었다.¹⁰⁾ 즉,

$$P = T (\log t_r + 10) \quad (9)$$

식 (9)로부터 온도와 응력 조건들이 주어지면 STS 316L의 수명(t_r)이 계산될 수 있다.

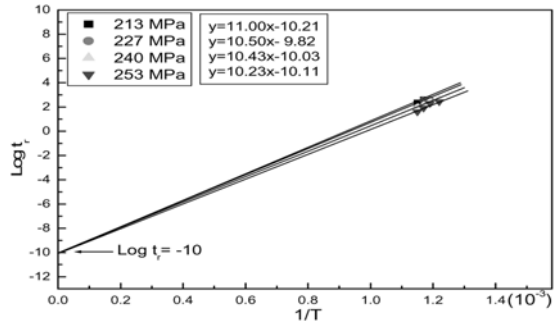


Fig. 5 Determination of constant at Larson-Miller parameters from relation plots between $\log(t_r)$ and $1/T$ according to the stresses

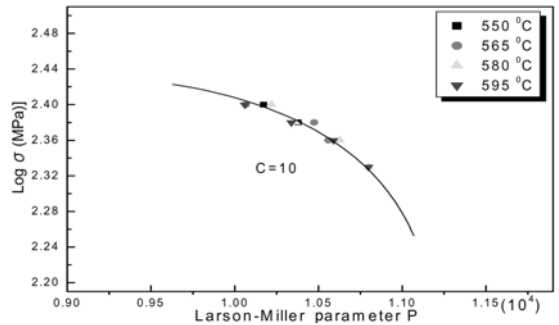


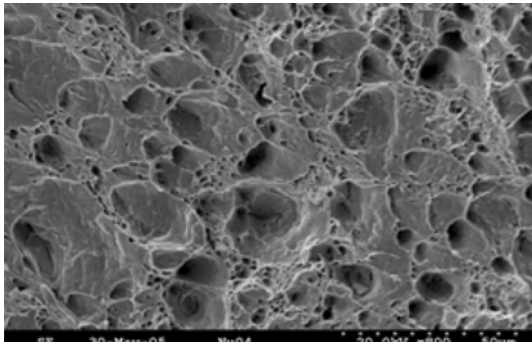
Fig. 6 Correlation between Larson-Miller parameter and creep stresses for stainless steel

4.5 파단면 분석

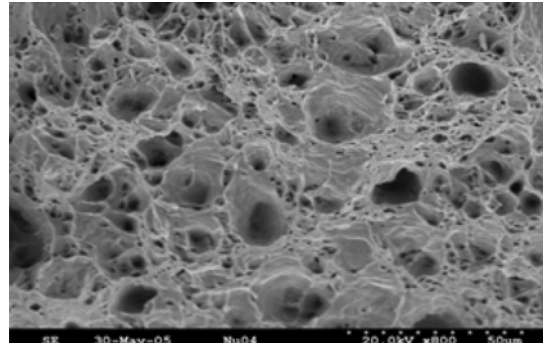
스테인리스강의 크리프시험 후 파단면의 미세 조직 관찰은 아세톤 용액으로 초음파세척 후 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

Fig. 7에 보인 사진들은 800배의 배율로 촬영하였으나 사진의 편집과정에서 그 크기가 약간 조정이 이루어진 사진들이다. 정확한 스케일은 사진들의 아래 부분에 있는 검은 띠의 오른쪽에 흰 점들이 일정한 간격으로 나열되어 있는데 이 점들의 간격이 50 μ m을 나타낸다. 모두 16가지의 실험조건들 중에서 대표적인 파단면 사진들을 분류해 Fig. 7에 나열하였다.

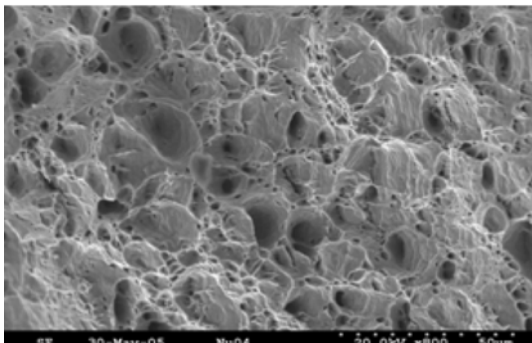
사진들에서 확인할 수 있는 것처럼 뒤틀림현상이 파단면에 주도적으로 나타나는 것을 확인할 수 있습니다. 종합적으로 관찰할 수 있는 결론은 같은 온도에서는 응력이 작아질수록 그리고 같은 응력조건 하에서는 온도가 높아질수록 뒤틀림현상들이 확대되



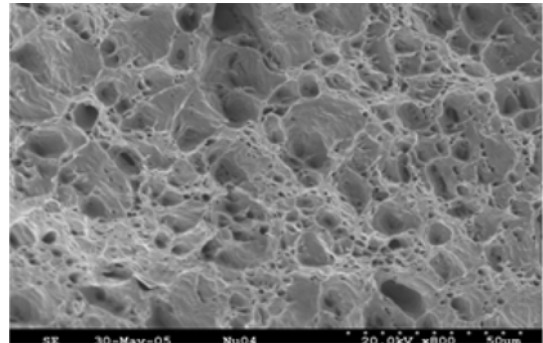
(a) 213 MPa, 595°C



(b) 227 MPa, 595°C



(c) 240 MPa, 595°C



(d) 253 MPa, 595°C

Fig. 7 SEM micrograph of static creep rupture after creep test under the various stresses

는 것을 확인하였습니다. 이러한 현상들은 고온에서 단축방향으로의 인장을 받는 크리프이므로 입계에서 형성되는 미소기공들의 형성 및 합병에 따라 크리프 파단면들이 입계 덩플 연성과피에 의해 생성되는 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 경도와 강도를 높이기 위해 용체화 처리한 STS 316L 스테인리스강에 대한 크리프시험을 실시하였고, 크리프 파단수명 예측, 크리프변형과 응력의 의존성, 크리프변형에 대한 활성화 에너지 및 파단면에 대하여 연구하였다. 본 실험연구를 통해 다음과 같은 결론들을 얻었다.

1) 크리프 시험온도가 550, 565, 580 및 595°C로 증가함에 따라 크리프 변형에 따른 응력지수는 10.86, 10.53, 10.19 및 9.72로 점차적으로 감소하는 경향이 나타났다.

2) 크리프 변형에 따른 활성화 에너지는 가해진 응력들이 213, 227, 240 및 253 MPa로 증가함에 따라 361.57, 344.72, 341.44 및 334.57 kcal/mol로 점차적으로 감소하는 경향을 보였다.

3) STS 316L 스테인리스강의 피로수명을 예측하기 위해 본 연구에서는 Larson-Miller 변수를 사용하였으며, 이 Larson-Miller 변수의 수명예측 상수 C 값이 약 10 정도로 수렴하였다.

4) STS 316L 스테인리스강의 크리프 파단면에서는 덩플현상들이 주도적으로 나타났다. 이 현상들은 같은 온도조건하에서는 응력이 작아질수록, 같은 응력조건하에서는 온도가 높아질수록 덩플 현상들이 크게 나타났다.

5) 단축 하중을 받는 크리프이기에 입계에서 형성되는 미소기공들의 형성 및 합병에 따라 크리프 파단면들은 입계 덩플 연성과피에 의해 생성되는 것이 확인되었다.

References

- 1) K. C. Hwang and J. H. Yoon, "Creep Behaviour of Solution Treated Alpha Titanium Alloy for Automotive Parts," Transactions of KSAE, Vol.13, No.1, pp.153-158, 2005.
- 2) J. H. Yoon and K. C. Hwang, "Creep Characteristics of Titanium Alloy(Ti-6Al-4V) at 0.3Tm," Transactions of KSAE, Vol.13, No.3, pp.117-122, 2005.
- 3) J. H. Dorn, The Mechanical Behaviour of Materials at Elevated Temperature, McGraw-Hill, New York, pp.432-443, 1961.
- 4) L. J. Cuddy, "Internal Stresses and Structures Developed During Creep," Met. Trans., Vol.1, pp.395-401, 1970.
- 5) W. L. Bradley, S. W. Nam and D. K. Matlock, "Fatigue Perturbed Creep of Pure Aluminum at Ambient Temperatures," Met. Trans., Vol.7A, pp.425-430, 1976.
- 6) F. R. Larson and J. Miller, "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses," Trans. of the ASME, Vol.74, pp.765-775, 1952.
- 7) F. Garofalo, Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals, The Macmillian Company, New York, p.258, 1965.
- 8) E. N. da C. Andrade, "On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena," Proc. Roy. Soc., Series A, Vol.84, London, UK, pp.1-12, 1910.
- 9) F. Garofalo, O. Richmond and W. F. Domis, "Design of Apparatus for Constant Stress or Constant Load Creep Tests," Trans. of ASME, Series D, J. of Basic Engineering, Vol.84, pp.287-293, June 1962.
- 10) K. C. Hwang, J. W. Kwon and J. H. Yoon, "Creep Behaviours of Deuplex Stainless Steel," J. of KSMTE, Vol.14, No.2, pp.42-47, 2005.