2상 스테인리스강(STS 329J1)의 크리프 특성

황경충*, 권종완+, 윤종호+

(논문접수일 2004. 12. 9, 심사완료일 2005. 1. 24)

Creep Behaviours of Duplex Stainless Steel

Kyung-Choong Hwang*, Jong-Wan Kwon+, Jong-Ho Yoon+

Abstract

Micro duplex stainless steel is used to denote a fine scale two-phase micro structure consisting austenite and ferrite. The developement of this structure was done by proper thermo-mechanical processing. The objective of present investigation is to study creep characteristics of this alloy. Since we have little design data about the creep behaviors of the alloy. An apparatus has been designed and built for conducting creep tests under constant load conditions. A series of creep tests on them have been performed to get the basic design data and life prediction of micro duplex stainless steel products 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 higher. Thirdly, the constant of Larson-Miller parameters on this alloy is estimated as about 5. Last, the fractographs at the creep rupture show both the ductile and brittle fracture modes according to the creep conditions.

Key Words : Creep rate(크리프 속도), Rupture strain(파단변형율), Creep rupture(크리프 파단), SEM(주사형 전자현미경), Life prediction (수명예측), Activation energy(활성화에너지)

1. 서 론

스테인리스강의 사용처로는 원자력 발전설비를 비롯하여 내구성이 크게 요구되는 소비재, 화학공업 및 자동차 배기가스 정화장치 등의 환경보전 분야와 내해수 관련장치의 수요분야 등이다. 스테인리스강의 종류로는 페라이트계(α), 마르텐사이트계(β) 및 오스테나이트계(γ) 등으로 대별할 수 있다. 페라이트 계 스테인리스강은 응력에 대한 저항성은 우수하나 내식성, 연성 및 인성 등의 기계적 성질과 가공성 및 용접성이 오스테나이트 계의 스테인리스강에 비해 떨어진다. 2상 ($\alpha+\gamma$) 스테인리스강은 오스테나이트 상과 페라이트상이 동시에 존재함으로써 오스테나

* 경일대학교 기계자동차설계학과 (kchwang@lycos.co.kr)
주소: 712-701 경북 경산시 하양읍 부호리 33
+ 경일대학교 기계자동차학부

이트계 스테인리스강이 가지는 우수한 연성과 내식성을 갖고, 높은 항복강도를 갖는다. 더불어 응력저항성이 큰 균열진전 특성과 열팽창계수가 작은 특징도 갖고 있다. 또한 페라이트계 스테인리스강이 가지는 우수한 강도를 동시에 가지는 강으로서 내식성과 강도가 동시에 요구되는 구조물 및 원자력 발전설비들의 소재로써 많이 활용되고 있다. $\alpha+\gamma$의 2상을 함유하고 있는 2상 스테인리스강(STS 329J1)은 응력부식균열 특성 및 내공부식을 나타낸다.

2상 스테인리스강은 고Cr, 저Ni 및 Mo을 첨가하고 α/γ 상 비율을 조정하여 얻어진 양호한 내식성을 갖는 강이다. 2상 스테인리스강은 강도가 높고 내공부식성, 내응력 부식균열성이 종래의 오스테나이트 강이나 페라이트 강에 비하여 뛰어나며, 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 인성이 양호하고 용접성이 비교적 우수하여 점점 더 사용범위가 확대될 것으로 사료된다. 본 크리프 시험에서는 오스테나이트계인 2상 스테인리스강을 대상으로 선정하였다. 2상 스테인리스강의 소재에 대한 관련 기계적 성질과 화학적 성분을 토대로 고온상태의 크리프 실험을 하여 어느 정도의 취성과 연성파괴 양상이 일어나는지 먼저 확인하였다. 스테인리스강의 크리프에 관한 연구는 국내에서는 Lim[1]이 스테인리스강의 크리프 특성을 연구한 바 있고, Hwang[2]은 인코넬 690합금에 대한 크리프 특성을 발표한 바 있다. Cuddy[3]는 크리프 중에 유발되는 내부응력 및 구조에 대한 연구를 수행하였다. Bradley[4]는 실온에서 순수한 알루미늄의 피로크리프특성에 대한 연구를 발표하였다.

본 연구에서는 2상 스테인리스강을 대상으로 응력과 온도를 변화시키면서 정적 크리프시험을 통하여 피로수명 고선, 크리프 응력지수, 크리프 활성화에너지 및 크리프 수명예측 등의 실험데이터를 구하였다. 또한, 크리프 변형기구를 규명하였고 파단의 균열형태를 관찰하여 파괴기구를 분석함으로써 본 재료의 안정된 사용범위를 예측할 수 있도록 하였다. 크리프 실험의 조건으로는 4가지의 온도조건과 4단계의 하중을 가하여 2상 스테인리스강에 대한 크리프시험후 실험결과를 제시함으로써 산업현장에서 유효적절하게 활용될 수 있는 연구자료를 제시하였다.

2. 크리프이론

2.1 크리프 강도 및 이론

크리프 허용응력을 규정하는 강도는 크리프 파단시험을 통하여 얻어지고, 이들을 이용한 기계부품들의 수명예측이 가능하다. 크리프시험에서는 시험편에 일정한 하중을 유지시킨 후 파단에 소요되는 파단시간(rupture time)과 파단 변형률(rupture strain)을 관찰한다. 최저 크리프 변형속도를 측정하여 재료의 유효수명 및 사용조건에 맞는 허용 하중을 알아낼 수 있다. 일정한 하중을 가하고 시험하는 경우는 시험도중 시험편의 단면적 감소에 따라 응력이 계속 증가하게 된다. 크리프 변형속도는 응력에 크게 의존하므로 일정한 응력하에서 시간에 따른 변형을 측정하여 온도와 응력의 불변 조건 하에서 정상 크리프 변형속도(steady state creep rate)를 측정할 수 있다. 정상적인 크리프곡선에서 변형초기에는 시간변화에 대한 크리프속도가 늦으나 어느 정도 시간이 경과된 후에는 변형속도가 일정해진다. 그 후 계속하여 변형이 진행되면 변형속도가 점진적으로 빨라지는 구간에 도달되며, 결국은 파단된다[5~7].

3. 실험 및 연구방법

3.1 시험편 및 실험방법

고온 크리프시험에 사용된 소재는 Cr, Ni 및 Mo이 주성분을 이루고 있으며, 미량의 Mn, Si와 N 등을 함유하였으며, 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같다. 크리프시험편 제작은 ASTM 규격에 따라 와이어 방전가공기를 사용하여 시험편을 가공하였다. 시험편의 치수는 Fig. 1에 나타내었으며, 시험편 소재에 대한 풀림온도는 850°C로 1시간 정도 유지한 후에 노냉처리 하였다.

3.2 크리프시험 장치

실험장치는 Andrade와 Garofalo 등이[6~8] 고안한 레버빔 형의 기기를 이용하였다. 실험장치에 부착된 가열로는 타원형의 적외선 노이며, 시험편은 가열로의 석영관 내에 장치

Table 1 Chemical composition of duplex stainless steel (weight %)

Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	P	C	O
23.40	5.11	3.21	.95	.47	.133	.018	.013	.008

Table 2 Mechanical properties of specimen

Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation Percent(%)	Hardness HV(500g)
549	755	18	227

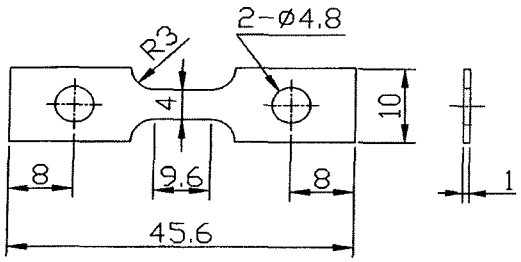

Fig. 1 Dimensions of tensile creep specimen(unit : mm)

할 수 있도록 되어있다. 실험할 때 노내에 일정한 시험온도가 유지되도록 시험편의 온도변화가 ±1℃ 이하로 조절되도록 하는 제어장치를 노에 연결하였다. 그리고 시험편의 크리프 변형량은 LVDT를 활용하여 ±1.0 μm의 단위까지 측정 가능하도록 설정하였다. 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 도시하였다.

3.3 시험방법

Fig. 2에 보인 크리프 시험편의 양단은 볼트로 고정시키고, 열전대를 시험편 중앙에 위치시켰다. 또한 유리솜을 이용하여 열이 외부로 새지 않도록 하였다. 크리프시험 설정조건은 시험편에 미치는 영향을 알아보기 위하여 455℃로부터 10℃의 온도간격으로 상승시켜 465, 475 및 485℃의 4가지의 온도조건을 설정하였으며, 응력은 256, 296, 336 및 376㎫의 4가지 조건을 설정하여 전체적으로 16가지의 조건 하에서 시험을 실시하였다. 시험조건은 Table 3에 나타내었다. 시험후 주사 전자현미경(SEM)으로 파단면을 관찰하여 파괴의 양상을 분석하였다.

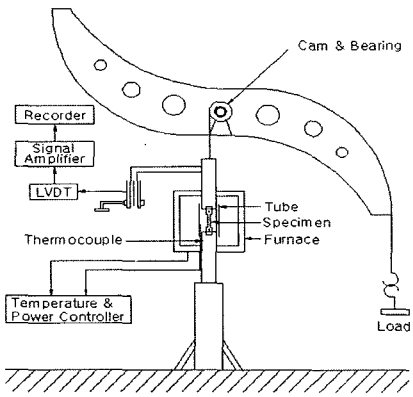

Fig. 2 Schematic diagram of static creep tester with constant load

Table 3 Experimental static creep data of duplex stainless steel

Temp. (℃)	Stress (MPa)	Creep rate (hr^{-1})	Rupture time (hr)
455	256	1.399^{-3}	over 168
	296	1.69^{-6}	//
	336	2.43^{-6}	//
	376	3.55^{-6}	//
465	256	2.29^{-3}	//
	296	2.99^{-3}	//
	336	4.53^{-3}	164
	376	7.88^{-3}	151
475	256	4.85^{-3}	153
	296	6.54^{-3}	139
	336	8.61^{-3}	122
	376	1.497^{-2}	104
485	256	7.85^{-3}	138
	296	1.428^{-2}	118
	336	2.128^{-2}	100
	376	3.472^{-2}	77

4. 실험결과 및 고찰

4.1 크리프

본 연구에서 크리프시험 조건인 온도범위 455, 465, 475 및 485℃의 구간과 응력범위 256, 296, 336 및 376㎫의 구간에서 온도와 하중을 변화시키며 시험하였다. 시험에서 얻어진 시간-변위 값으로부터 시간변화에 대한 진변형률(true strain)을 계산하여 그린 것이다. ε_o이 초기 변형률이라 하면, 전체 변형률, ε은 다음 식으로 정의된다.

$$\varepsilon = \ln(e+1) = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right) \quad (1)$$

여기서, e : 공칭 변형률, l_0 : 초기 길이, Δl : 변형길이

각각의 시간 t에 대한 변형률 ε_t를 이용하여 정상 상태 크리프속도 $\dot{\varepsilon_s}$는 다음 식으로 된다.

$$\dot{\varepsilon_s} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

여기서, $\dot{\varepsilon_s}$: 정상상태의 크리프속도

ε_1, ε_2 : t_1, t_2에서 변형률

t_1, t_2 : 각각의 크리프시간

455℃에서의 크리프 시험응력 256~376㎫에서는 시험편의 파단이 일어나지 않았고, 1주일(168시간) 이상동안 계속해서 늘어나는 양상이다. 크리프온도 465℃시험에서 256~296㎫의 응력에서는 1주일 이상 계속 늘어났다. 응력영역 336~376㎫ 에서 시험편의 파단시간은 각각 164 및 151시간 만에 일어났다. 크리프온도 475℃시험에서 크리프 시험응력범위 256~376㎫ 에서 시험편의 파단에 소요된 시간은 응력이 커짐에 따라 153, 139, 122 및 104시간으로 점점 짧게 나타났다. 또한 크리프온도 485℃에서는 256~376㎫의 응력영역에서 각 시험편들의 파단시간이 응력이 커짐에 따라 각각 138, 118, 100 및 77 시간만에 나타났다.

4.2 크리프변형과 응력의존성

크리프 변형율속도의 응력 의존성은 Cuddy와 Garofulo가 제안한 정상 변형률속도에 대하여 다음 식으로 표시된다[3,7].

$$\dot{\varepsilon}_s = K\sigma^n \tag{3}$$

여기서, K : 구조상수, σ : 응력(MPa), n : 응력지수

식 (3)의 양변에 로그를 취하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\log \dot{\varepsilon}_s = \log K + n \log \sigma \tag{4}$$

식 (4)에 따라 $\dot{\varepsilon}_s$와 σ의 관계를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3이다. $\dot{\varepsilon}_s$와 σ의 관계는 선형적으로 나타났으며, 이 직선의 기울기가 응력지수값(n)이 된다. 크리프시험 온도가 455~485℃로 10℃씩 증가함에 따라 응력지수 값은 각각 4.86, 4.71, 4.56 및 4.35의 순서로 점점 작아지는 경향을 보여주었다. 이와 같은 경향은 온도가 높아질수록 전위밀도가 감소하고 이에 따라 응력 감소효과가 높아지기 때문으로 사료된다.

4.3 크리프변형에 대한 활성화 에너지

크리프변형은 열적 활성화과정에 의해 진행되므로 크리프 변형속도는 다음의 Arrhenius방정식으로 표시할 수 있다.

$$\dot{\varepsilon}_s = K \cdot \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \tag{5}$$

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

식 (5)의 양변에 로그를 취하면 다음같이 된다.

$$\ln \dot{\varepsilon}_s = \ln K - \frac{Q_c}{R} \cdot \frac{1}{T} \tag{6a}$$

즉, $$\log \dot{\varepsilon}_s = \log K - \frac{Q_c}{2.303RT} \tag{6b}$$

이 식으로부터 Q_c값은 $\ln \dot{\varepsilon}_s$과 $1/T$와의 기울기[$-Q_c/(2.303R)$]로부터 구할 수 있으므로 Fig. 4에서 직선의 기울기를 계산하면 크리프 활성화에너지 Q_c를 계산할 수 있다. 가해진 응력 256~376㎫에 대해 각각 활성화에너지를 계산하면 129.13, 123.11, 121.94 및 119.49kcal/mol값을 얻었다. 활성화에너지는 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 크리프 활성화에너지가 클수록 크리프 변형은 억제되어서 최소 크리프 속도가 늦어지고 크리프 활성화에너지가 작을수록 최소 크리프 속도는 빨라지게 된다. 이와 같은 현상은 Bradley 등이 주장한 크리프 활성화에너지와 유효 응력 관계에서도 확인할 수 있다[4].

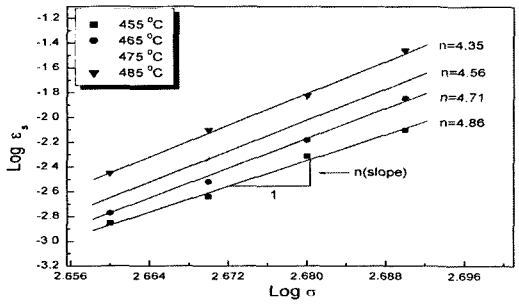

Fig. 3 Dependence of creep rate on applied stresses

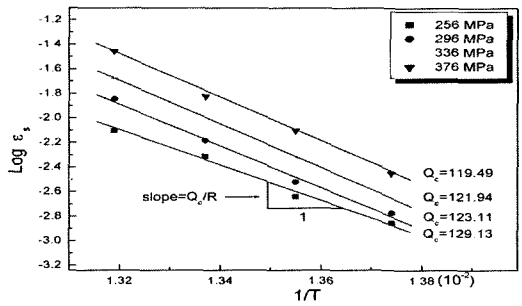

Fig. 4 Dependence of creep rate on temperature

4.4 크리프 잔존수명 예측

크리프시험 데이터 Table 3에서 재료의 파괴시간을 비교해보면 외부응력 증가에 따라 파괴수명은 급격히 감소하고 있다. 같은 응력에서 온도증가에 따라 파단수명은 급격히 감소한다. 어느 온도영역에서의 파단수명을 알고 있으면 다른 온도영역에서의 파단수명을 예측할 수 있다. 파단수명의 예측은 비교적 간편하면서도 여러 합금에 폭넓게 적용되는 Larson-Miller변수[9]로 사용하였는데, 이 변수 P는 다음 식으로 계산된다.

$$P = f(\sigma) = T(\log t_r + C) \tag{7a}$$

$$\log t_r = \frac{P}{T} - C \tag{7b}$$

여기서, T : 켈빈온도(K), t_r : 파단시간(hr), C : 상수

Table 3의 데이터를 이용하여 각각의 응력별로 $\log(t_r)$과 절대온도의 역수$(1/T)$간의 상관관계와 Larson-Miller 파라메타의 그래프를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 응력별로 직선식의 계산을 위해 최소 자승오차 회귀직선식을 구하면 각 응력별 기울기는 P의 값이 되고, 상수 C는 5정도로 확인되었다. 즉,

$$P = T(\log t_r + 5) \tag{8}$$

이 식으로부터 온도와 응력 조건들이 주어지면 2상 스테인리스강의 수명(t_r)이 계산될 수 있다.

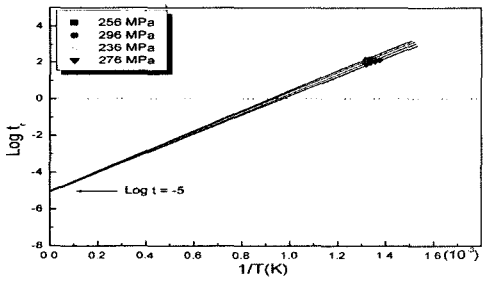

Fig. 5 Determination of constant at Larson-Miller parameters from relation plots between log(tr) and (1/T) according to the stresses

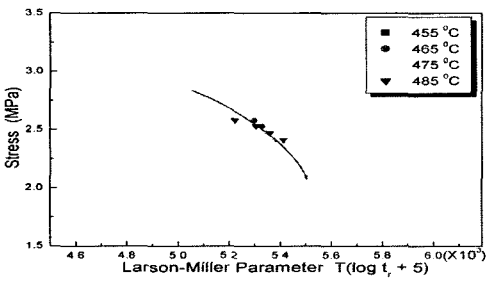

Fig. 6 Correlation of Larson-Miller parameter for uplex stainless by the experimental stress-rupture curves

4.5 광학 및 주사현미경 관찰

2상 스테인리스강의 시험전 조직사진에서 페라이트 기지에 압연방향으로 길게 신장된 오스테나이트계가 석출한 미세양상을 Fig. 7에서 관찰할 수 있다.

파단면의 미세 조직관찰은 주사 전자현미경으로 관찰하였으며, 실험조건들 중에서 대표적인 파단면의 사진인 Fig. 8에서 보는 바와 같이 입내파단에 의한 취성파괴 현상을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 2상 스테인리스강에 대한 네 단계의 크리프 온도(455～485°C)와 네 단계의 응력(256～376㎫)에 대

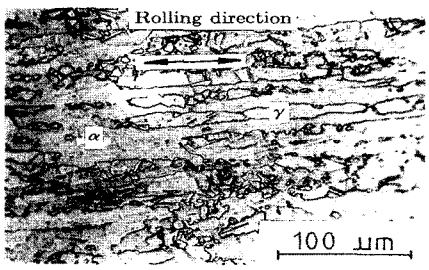

Fig. 7 Optical microscope photograph of the surface of specimen

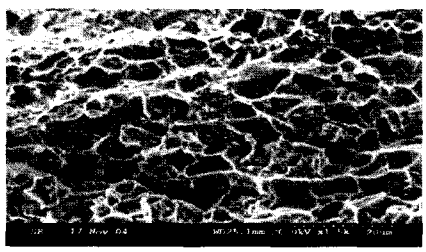

Fig. 8 Optical micrograph of static creep rupture(475°C, 336MPa)

한 고온 크리프 거동 및 파단면에 대한 실험연구를 하였다. 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 크리프 시험온도가 증가함에 따라 크리프 변형에 따른 응력지수는 4.86, 4.71, 4.56 및 4.35로 점차적으로 감소하는 경향이 나타났다.
(2) 크리프 변형의 활성화 에너지는 가해진 응력의 증가에 따라서 129.13, 123.11, 121.94 및 119.49로 점차적으로 감소하는 경향을 보였다.
(3) 2상 스테인리스강은 본 연구의 시험 조건들에서 Larson-Miller변수의 계산에서 수명예측 상수 C값은 약 5 정도로 계산되었다.
(4) 2상 스테인리스강의 크리프 시험에서 온도와 응력의 조건에서 입내파단에 의한 취성파괴 현상이 주기적으로 나타났다

참 고 문 헌

(1) Im, J. W., and Lim, B.-S., 1999, "Thermal Aging and Creep Rupture Behaviour of STS 316," *J. of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 4, pp. 123～129.
(2) Hwang, K. C., Yoon, J. H., Choi, J. H., and Kim, S. C., 2002, "Creep Behaviours of Inconel 690 Alloy," *Trans. of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 4, pp. 54～61.
(3) Cuddy, L. J., 1970, "Internal Stresses and Structures Developed During Creep," *Met. Trans.*, Vol. 1, pp. 395～401.
(4) Bradley, W. L., Nam, S. W. and Matlock, D. L., 1976, "Fatigue Perturbed Creep of Pure Aluminum at Ambient Temperatures," *Met. Trans.*, Vol. 7A, pp. 425～430.
(5) Dorn, J. H., 1961, *The Mechanical Behaviour of Materials at Elevated Temperature*, McGraw-Hill, New York, pp. 432～443.
(6) Andrade, E. N. da C., 1910, "On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena," *Proc. Roy. Soc.*, Series A, London, UK, Vol. 84, pp. 112.
(7) Garofalo, F., 1965, *Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals,* The Macmillian Company, New York, p. 258.
(8) Garofalo, F., Richmond, O., and Domis, W. F., 1962, "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.
(9) Larson, F. R., and Miller, J., 1952, "A Time- Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses," *Trans. of the ASME*, Vol. 74, pp. 765～775.