

오스테나이트계 25Cr-20Ni 스테인리스강의 실온예변형이 크리프 수명에 미치는 영향

박인덕[†] · 안석환^{**} · 남기우^{*}

(2003년 8월 19일 접수, 2004년 2월 20일 심사완료)

Effect of Room Temperature Prestrain on Creep Life of Austenitic 25Cr-20Ni Stainless Steels

In-Duck Park, Seok-Hwan Ahn and Ki-Woo Nam

Key Words: Dislocation Velocity(전위밀도), Grain Size(결정립경), Precipitates(석출물), Prestrain(예변형), Recrystallization(재결정)

Abstract

25Cr-20Ni series stainless steels have an excellent high temperature strength, high oxidation and high corrosion resistance. However, further improvement can be expected of creep strength by work hardening prior creep. In the present study, the effect of prestraining at room temperature on the creep behavior of a Class M(STS310S) and a Class A(STS310J1TB) alloy containing precipitates have been examined. Prestraining was carried out at room temperature and range of prestrain was 0.5~2.5 % at STS310J1TB and 2.0~7.0 % at STS310S. Creep behavior and creep rate of pre-strained specimens were compared with that of virgin specimens. Room temperature prestraining produced the creep life that is longer than that of a virgin specimen both for STS310J1TB and STS310S when creep test was carried out at the temperature lower than recrystallization temperature. The reason for this improvement of creep life was ascribable to the interaction between dislocations and precipitates in addition to the dislocation-dislocation interaction in STS310J1TB and the dislocation-dislocation interaction in STS310S. The beneficial effect of prestraining in STS310J1TB was larger than that of STS310S.

1. 서 론

오스테나이트계 스테인리스강은 탄소강 또는 페라이트계 스테인리스강에 비해 냉간 가공에 의해 경화되기 쉽다. 이러한 성질을 이용하여 일반적으로 오스테나이트계 스테인리스강을 냉간 가공하여 강도를 높이는 방법이 널리 이용되어진

다. 이러한 오스테나이트계 스테인리스강의 가공 경화는 마르텐사이트의 생성과 오스테나이트 상체의 가공경화에 기인한다. 그러나, Grant 등은 347스테인리스강에 있어서 크리프 변형중 재결정이 일어나지 않는 온도영역에서는 냉간 가공에 의해 크리프 파단 수명이 증가하지만, 완전히 재결정이 일어나는 온도범위에서는 반대로 그 수명이 감소한다고 보고하고 있다.^(1,2)

또한, 재결정 온도는 가공도에 의해 영향을 받으며 일반적으로 가공도가 클수록 연화는 보다 작은 온도에서 일어난다. 또한, 석출물의 존재 여부, 합금의 종류 등에 따라 그 온도는 다를 것으로 사료된다.^(2~4)

본 연구에서는 Class A 합금이며 석출강화형 합금인 STS310J1TB와 Class M 합금인 STS310S^(4,5)를

[†] 책임저자, 회원, 부경대학교 재료공학과
E-mail : parkid@mail1.pknu.ac.kr
TEL : (051)620-1645 FAX : (051)624-0746

^{*} 회원, 부경대학교 재료공학과

^{**} 회원, 부경대학교 기계공학과

사용하여 크리프 시험 전, 실온에서 예변형을 실시, 합금의 종류와 석출물의 존재 여부에 따라 실온 예변형이 크리프 거동과 크리프 수명에 미치는 영향을 비교 검토하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용한 시험편은 STS310J1TB와 STS310S로 그 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 또한, Table 2에는 실온에서의 두 합금의 인장특성을 나타내었다. 시험편은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 두께 2 mm, 표점거리 40 mm의 평판시험편으로 연신계를 부착하기 위해서 돌기부분을 가진 형상으로 방전 가공하여 제작하였다. 최종 시험편은 1473 K에서 2시간 용체화처리 하였다. 본 연구의 정하중 크리프 시험에는 JIS규격을 만족하는 일정 하중 방식의 레버식 C-3L형 시험기를 사용하였다. 시험기의 최대 하중은 3 ton이며, 레버비는 1 : 10이다. 또한, 시험 중의 온도 변화는 ± 2 K로 제어하였다. 변형률의 측정에는 1/100 mm까지 측정 가능한 연신계를 사용하여 변형률을 연속적으로 자동 기록하였다. 예변형량은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 크리프 변형률이 최소크리프 속도에 도달했을 경우(Fig. 2의 ②), 도달하기 전(Fig. 2의 ①) 그리고 도달한 후(Fig. 2의 ③)의 세 가지 조건으로, STS310J1TB의 경우 예변형량은 각각 파단 변형률의 약 0.5, 1.5, 2.5%이고, STS310S의 경우의 예변형량은 약 2.0, 4.0, 7.0%이다(이후부터는 각각의 세 가지 조건을 1, 2, 3이라고 함). 예변형은 실온에서 실시하였으며, 예변형 부하 후의 크리프 시험의 온도 조건은 923, 948, 973 K이며, 응력 조건은 254.9 MPa이다. 크리프 시험의 해석방법에는 Ω 법^(5,6)을 이용하였다.

또한, 각각의 예변형재를 크리프 파단 시험을 실시한 후 광학현미경 관찰을 실시하였다. 광학현미경 관찰용 부식액은 $\text{CH}_3\text{COOH}:\text{HCl} = 3:1$ 용액을 사용하였다.

3. 결과

3.1 크리프 파단 수명에 착목한 크리프 거동

Fig. 3은 STS310J1TB와 STS310S의 948 K에서의 크리프 곡선으로, 검은색의 표시가 미변형재이고, 흰색의 표시가 예변형재이다. 두 합금 모두

Table 1 Chemical composition (wt. %)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Nb	N
STS310 J1TB	0.06	0.40	1.20	20.0	25.0	0.45	0.2
STS310S	0.08	0.40	1.60	20.0	25.0	-	-

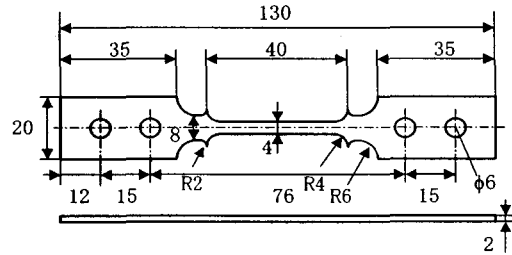


Fig. 1 Dimension of specimen (All dimensions in mm)

Table 2 Results of tensile tests in room temperature

	σ_y (MPa)	σ_{UTS} (MPa)
STS310J1TB	385	755
STS310S	205	520

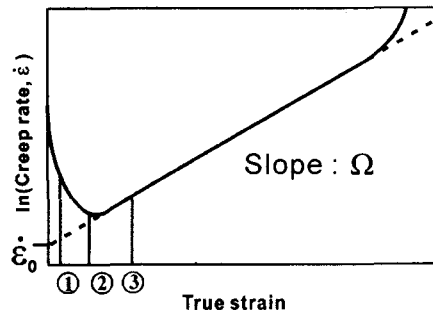


Fig. 2 Schematic illustration of logarithm of strain rate plotted against true strain

예변형량에 관계없이 예변형재와 미변형재의 크리프 곡선이 위쪽으로 볼록한 제 1차 크리프를 나타낸 후 아래쪽으로 볼록한 제 3차 크리프의 형상을 나타내고 있다. 이는 923, 973 K에서도 같은 경향을 나타내었다. 파단수명은 STS310J1TB의 경우, 예변형량에 관계없이 예변형재가 미변형재보다 약간 감소하였으나, STS310S의 경우에

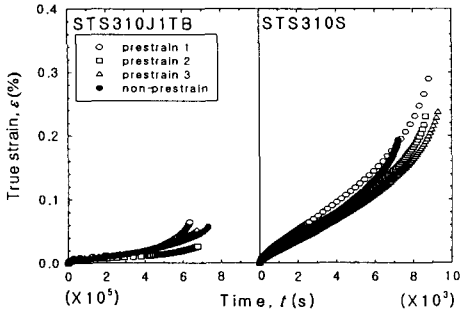


Fig. 3 Creep curves of STS310J1TB and STS310S strain steels in prestrain creep tests at 948K

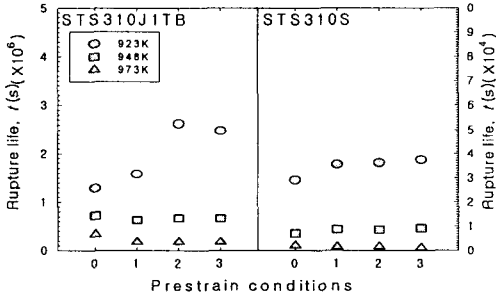


Fig. 4 Relationship between rupture life and prestrain conditions in STS310J1TB and STS310S

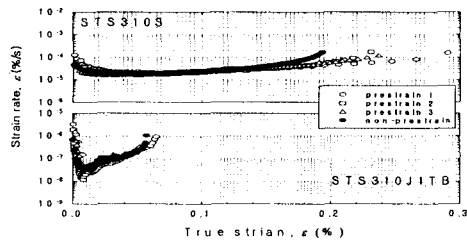


Fig. 5 Relationship between strain rate and true strain in prestrain creep tests in STS310J1TB and STS310S at 948K

는 예변형재의 파단 수명이 미변형재보다 약 최대 130%까지 증가하였다.

Fig. 4에 두 합금의 전 시험온도에서의 파단수명

Table 3 Results of prestrain creep test

Tested material	Temp. (K) and stress (MPa)	Pre-strain (%)	Imaginary initial strain rate $\dot{\epsilon}_0$ (%/s)	Rupture strain (%)	Creep life (s)
STS310 J1TB	923 254.9	0	1.15×10^{-8}	5.9	1296000
		0.5	4.15×10^{-8}	1.7	1579974
		1.0	2.32×10^{-9}	2.0	2630574
		1.5	2.72×10^{-9}	2.0	2412760
	948 254.9	0	2.57×10^{-8}	5.7	729720
		0.5	2.22×10^{-8}	6.4	633512
		1.5	1.20×10^{-8}	2.6	676601
		2.5	2.55×10^{-8}	5.1	670854
	973 254.9	0	5.78×10^{-8}	6.9	339120
		1.0	6.42×10^{-8}	4.6	186102
		2.0	3.62×10^{-8}	2.3	185542
		2.5	2.23×10^{-8}	1.7	180642
STS 310S	923 254.9	0	2.81×10^{-6}	20.9	29160
		3.0	3.98×10^{-6}	21.0	35562
		4.0	3.91×10^{-6}	24.2	36184
		7.0	3.55×10^{-6}	19.9	37474
	948 254.9	0	1.20×10^{-5}	19.3	7200
		2.0	1.88×10^{-5}	26.5	8558
		4.0	1.57×10^{-5}	21.7	8560
		7.0	1.41×10^{-5}	22.7	9200
	973 254.9	0	5.36×10^{-5}	24.3	2160
		2.0	1.12×10^{-4}	28.6	1584
		4.0	1.01×10^{-4}	24.7	1640
		7.0	1.17×10^{-4}	22.8	1206

과 예변형량의 관계를 나타내었다. 그림에서 예변형량을 0으로 표시한 경우가 미변형재이며, 1, 2, 3으로 표시한 경우가 각각의 예변형재에서의 예변형 조건이 1, 2, 3인 경우이다. 두 합금 모두에서 923 K에서는 예변형재의 파단수명이 미변형재의 파단수명보다 증가하였고, 증가폭은 STS310J1TB의 예변형량이 2, 3의 경우가 가장 커 미변형재에 비하여 증가폭이 약 2배 정도였고, STS310S에서는 예변형을 부여하면 최대 약 130% 까지 파단 수명이 증가하였다. 948 K의 경우는 위의 Fig. 3의 결과에서 나타내었고, 973 K의 경우에는 두 합금 모두에서 예변형재의 파단 수명이 미변형재보다 오히려 감소하였다.

3.2 변형률 속도에 주목한 예변형재의 크리프 거동

Fig. 5는 948 K에서의 STS310J1TB와 STS310S의 변형률 속도의 대수와 진 변형률의 관계를 나타낸 것으로, 그림에서 검은색의 표시가 미변형재이고, 흰색의 표시가 각각의 조건에서의 예변형재이다. 948 K의 경우, 두 합금 모두에서 예변형량에 관계없이 예변형재의 가상적 초기 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_0$ 와 미변형재의 $\dot{\epsilon}_0$ 가 거의 같음을 알 수 있다. 그러나, 923 K의 경우(Table 3참조), STS310J1TB에서는 예변형 조건이 1인 경우에는 미변형재의 $\dot{\epsilon}_0$ 와 차이가 크지 않았으나, 2와 3의 경우의 $\dot{\epsilon}_0$ 는 미변형재의 $\dot{\epsilon}_0$ 보다 약 1/5정도로 작았다. 그리고, 같은 온도의 STS310S에서는 예변형재의 1, 2, 3의 모든 경우의 $\dot{\epsilon}_0$ 와 미변형재의 $\dot{\epsilon}_0$ 가 거의 같았다. 한편, 973 K의 경우(Table 3참조), STS310J1TB에서는 예변형량에 관계없이 예변형재의 $\dot{\epsilon}_0$ 가 미변형재의 $\dot{\epsilon}_0$ 보다 작았고, STS310S에서는 예변형량에 관계없이 예변형재의 $\dot{\epsilon}_0$ 가 미변형재의 그것보다 커졌다. 또한, $\dot{\epsilon}_0$ 만을 고려 할 경우, 2와 3의 조건으로 예변형을 하여 923 K에서 크리프 시험을 실시한 STS310J1TB의 경우의 $\dot{\epsilon}_0$ 가 가장 작아 크리프 수명 향상의 가능성이 크다고 할 수 있다.

3.3 결정립경의 변화

Fig. 6은 두 합금의 예변형량이 2인 경우의 각각의 온도에서의 크리프 파단 후의 광학현미경조직으로, (a)가 STS310J1TB의 경우이고 (b)가 STS310S의 경우이다. 그림으로부터 두 합금 모두에서 시험 온도에 따라 결정립경이 다르게 나타났다. 이것을 확인하기 위하여, 조직사진으로부터 결정립경의 빈도 분포를 조사하여 그림에 함께 나타내었다. 결정립경을 구할 때, 사진으로부터 결정립의 면적을 측정하여, 이것을 같은 면적의 원의 직경으로 계산하였다. 각각을 비교해 보면, STS310J1TB의 경우, 시험온도 948 K의 경우가 923, 973 K의 경우보다 결정립경이 작은 경향을 나타내고 있고, STS310S의 경우에는 973 K의 결정립경이 923, 948 K의 결정립경보다 작은 경향을 나타내고 있다.

4. 고찰

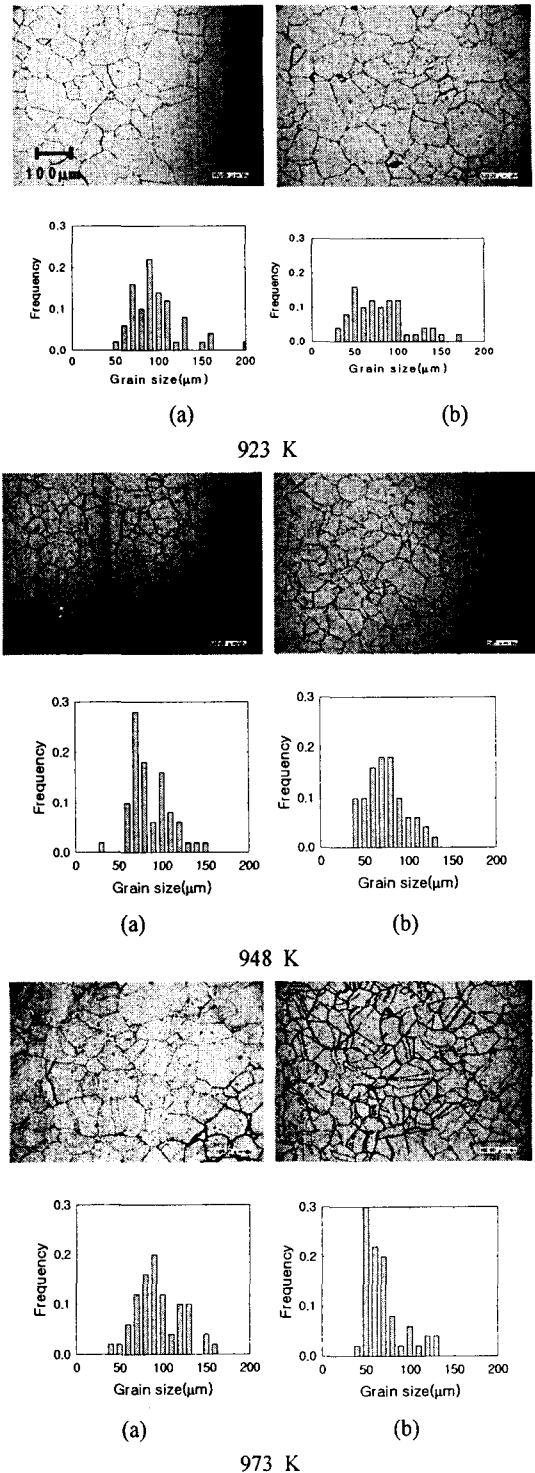


Fig. 6 Optical micrographs and distributions of grain size of (a) STS310J1TB and (b) STS310S

4.1 가공에 의한 오스테나이트의 마르텐사이트
에의 변태

오스테나이트계 스테인리스강의 가공경화기구는 오스테나이트의 마르텐사이트 변태와 오스테나이트 자체의 가공경화 두 가지로 생각할 수 있다. 오스테나이트의 마르텐사이트 변태에 대하여 고찰하면 오스테나이트계 스테인리스강의 상온에서의 조직은 일반적으로 알려진 준안정오스테나이트이고, 이것을 어떤 온도 이하로 냉각하면 자연발생적으로 모상인 오스테나이트(fcc구조)로부터 α 마르텐사이트(bcc구조)나 ϵ 마르텐사이트(hcp구조)가 생긴다. 이것을 비등온 내지는 등온 마르텐사이트변태라고 부르고,⁽⁷⁾ 이 마르텐사이트 변태개시온도를 M_s 점이라 한다. 또, M_s 점 이상의 온도에서도 응력을 가하거나 소성가공을 가하면 모상인 오스테나이트로부터 α 마르텐사이트나 ϵ 마르텐사이트가 생긴다. 이것을 가공유기 마르텐사이트라 부르고 이 변태가 발생하는 최고온도를 M_d 라 한다. 또한, M_d 와 M_s 를 산출하는 식이 제안되어져 있다.⁽⁸⁾ 또한, Angel은 강을 단축인장시험에 의하여 30%의 변형을 가할 때, 50%의 마르텐사이트를 발생하게 하는 온도를 M_{d30} 이라 하여 가공경화가 조직에 미치는 영향을 고려한 식을 제안하였다.⁽⁸⁾

본 연구에서 산출한 두 합금의 M_s 온도와 M_{d30} 온도는, STS310J1TB의 M_s 는 -85.46 K, M_{d30} 은 -19.98 K이고 STS310S의 M_s 는 -108.28℃, M_{d30} 은 99.9 K이다. 따라서, 본 연구에서 실시한 크리프 전의 예변형 조건에서는 STS310J1TB 및 STS310S에서 모두 오스테나이트의 마르텐사이트 변태는 일어나지 않는다고 사료되며, 이는 Fig. 6의 미세조직관찰의 결과와도 잘 일치하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 오스테나이트 자체의 가공경화 및 오스테나이트의 재결정과 이것들의 상호관계에 대하여 고찰한다.

4.2 냉간가공에 의한 가공경화

오스테나이트계 스테인리스강은 13Cr강과 같은 마르텐사이트계 강에서처럼 열처리에 의하여 강도를 높이는 것이 불가능하기 때문에 냉간 가공에 의하여 재료강도를 높이는 것이 일반적으로 행하여지고 있다.

본 연구의 결과, STS310J1TB에서는 923 K, STS310S에서는 923 K 및 948 K에서 예변형재의

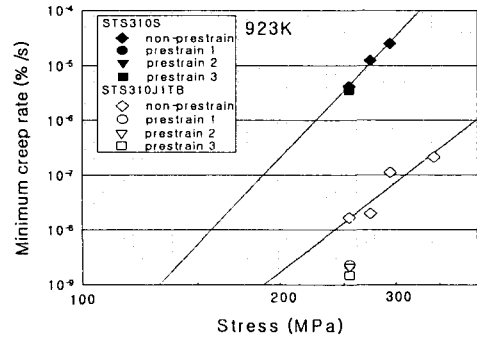


Fig. 7 Minimum creep rate as a function of applied stress

과단 수명이 미변형재보다 길었던 결과에 대하여 살펴보면, 금속을 인장 시험하면, 항복점을 지나 가공경화가 일어나며, 이것은 변형이 진행함에 따라 전위밀도가 높아져 전위사이의 상호작용으로 인해 운동전위가 움직이기 어려워진다.⁽⁸⁾ 이때 응력 σ 와 전위밀도 ρ 의 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha Gb\sqrt{\rho} \tag{1}$$

여기에서 σ_0 는 다른 전위의 방해 없이 전위가 결정입내를 운동할 때 받는 마찰저항, α 는 1정도의 비례정수, G 는 강성률, b 는 버거스 벡터의 크기이다. 위의 식으로부터 알 수 있는 것과 같이 냉간 가공에 의한 전위밀도의 증가는 재료의 강도를 상승시킨다. 여기에서 Fig. 7에 STS310J1TB 및 STS310S에서 냉간 가공에 의한 크리프 수명이 향상된 온도인 923K에서의 부하 응력과 최소 크리프 속도의 관계를 나타내었다. 그림에서 \diamond 표시가 STS310J1TB, \blacklozenge 표시가 STS310S의 미변형재의 크리프시험 결과로 이전의 연구에서의 결과치이다.⁽⁶⁾ 먼저 STS310J1TB 및 STS310S의 미변형재를 연결한 두 직선이 왜 일치하지 않은가를 살펴보면, 그것은 STS310J1TB에서는 NbCrN이 입내에 미세하게 분산석출해서 STS310S에 비하여, 전위의 운동이 석출물에 의해 방해받기 때문인 것으로 사료된다.⁽⁹⁾ 이 경우 위의 식을 다음과 같은 식으로 개선할 수 있다.

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_p + aGb\sqrt{\rho} \quad (2)$$

여기에서, σ_p 는 STS310J1TB에서 관찰된 석출입자의 분포에 의해서 나타나는 석출강화응력으로, STS310J1TB가 석출강화형 합금이라는 것은 이전의 연구에서 보고하였다.⁽⁹⁾ 따라서, STS310J1TB의 923 K와 STS310S의 923, 948 K에서의 예변형재의 파단수명이 증가한 이유는 예변형에 의한 전위밀도의 증가 때문이라고 사료된다.

다음으로 본 연구의 STS310J1TB에서 예변형재의 수명이 미변형재보다도 최대 2배 이상 증가하여 STS310S에서의 수명증가량 보다 비교적 큰 것에 대하여 고찰해보면, Fig. 7의 STS310S에서의 예변형재의 표시(그림에서 ●, ▼, ■)와 미변형재의 근사 직선⁽⁶⁾의 차, 즉 식 (1)의 변형인 $\sigma - \sigma_0 = aGb\sqrt{\rho}$ 에 대응하는 가공경화량은 그림에서 예변형조건이 1인 경우에는 약 4 MPa, 2인 경우에는 약 2 MPa, 3인 경우에는 약 5 MPa정도였고, 위의 식에서 $a=1$, γ -Fe의 $G = 75000 \text{ MPa}(\gamma\text{-Fe, } 923 \text{ K})$, $b = 2.58 \times 10^{-10} \text{ m}(\gamma\text{-Fe})$ 를 이용해서 전위밀도 ρ 를 구하면, 예변형 조건이 1인 경우에는 약 $8.5 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$, 2인 경우에는 약 $2.1 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$, 3인 경우에는 약 $1.3 \times 10^{11} \text{ m}^{-2}$ 이었다. 또한, STS310J1TB에서도 각각 가공경화량과 전위밀도를 구하면, 예변형 조건이 1인 경우에는 약 45 MPa, $1.1 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$, 2인 경우에는 약 50 MPa, $1.3 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$, 3인 경우에는 약 60 MPa, $1.9 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ 이었다. 따라서, STS310J1TB가 STS310S보다 전위밀도의 증가량이 커서 파단수명의 증가량이 컸다고 사료된다.

여기서, STS310J1TB의 예변형량이 작음에도 불구하고 ρ 가 큰 이유에 대하여 고찰해 보면, STS310J1TB에는 입자 내에 미세 분산되어 있는 석출물이 전위의 이동을 방해하기 때문에 같은 변형량만큼의 변형에도 STS310J1TB에는 상당히 많은 양의 전위가 필요하다. 이것은 다음 식에 의해서도 분명하다.

$$\varepsilon = \rho bs \quad (3)$$

여기에서, ε 은 변형량, ρ 는 전위밀도, b 는 버거스 벡터의 크기, s 는 전위의 이동거리이다. STS310J1TB와 같이 석출물이 있을 경우에는 s 는 매우 작기 때문에 석출물이 없을 경우와 같은 ε

을 얻기 위해서는 매우 큰 ρ 값이 필요하여 작은 예변형에도 쉽게 가공 경화된다고 사료된다. 따라서, STS310J1TB가 작은 예변형량에도 불구하고 전위밀도가 STS310S보다 커 크리프 파단 수명의 증가량이 더 컸다.

4.3 가공과 재결정 및 결정립과의 관계

일반적으로 냉간 가공한 금속이 가열에 의하여 고온이 되면 재결정이 일어나 전위밀도가 매우 낮은 새로운 결정으로 변화한다. 또한, 재결정 온도를 지나 더욱 고온으로 가열하게 되는 경우는 결정의 어떤 것은 인접하는 결정을 병합하여 결정립 성장이 일어나 기계적 성질이 저하한다.

본 연구에서 사용한 오스테나이트계 스테인리스강의 재결정은 1173~1223 K 근처에서 일어나기 시작하고, 1323~1473 K 근처에서 완료되며, 가공도가 클수록 재결정은 낮은 온도에서 일어난다.⁽⁸⁾ 또, 동일 금속에서도 측정할 때마다 재결정 온도가 상당히 다르지만, 이것은 순도의 차이에 의한 것으로 고순도 일수록 낮은 수치를 나타내는 것에도 주의를 해야한다. 여기에서, 본 연구 결과를 보면, STS310J1TB에서는 948 K 및 973 K에서, STS310S에서는 973 K에서 모든 예변형재가 그 온도에서의 미변형재보다 파단 수명이 짧았다. 이것은 재결정이 일어났기 때문이라고 사료되어진다. 즉, STS310J1TB에서는 923~948 K 사이에서 재결정이 일어나고 그 이하의 온도에서는 예변형에 의하여 파단 수명이 증가하고, 그 이상의 온도에서는 역으로 감소한다. 이것은 Fig. 6에 표시한 입도 분포에서도 948 K에서의 입경이 923, 973 K의 입경과 비교해서 작은 것, 즉 948 K에서는 재결정이 일어나고 그 이후 973 K에서는 결정립 성장이 일어나는 것으로서 설명이 가능하다. STS310S에서는 948~973 K에서 재결정이 일어나고 STS310J1TB과 같이 그 이하의 온도에서는 예변형에 의하여 파단 수명이 증가하고 그 이상의 온도에서는 역으로 파단 수명이 감소한다. 이것도 Fig. 6에 표시한 입도 분포로부터 973 K에서의 입경이 923 K, 948 K의 입경과 비교해서 작은 것으로 보아 973 K에서 재결정이 일어난다고 설명할 수 있다.

여기에서 두 합금의 재결정온도가 다른 것은, 먼저 가공도가 클수록 재결정은 낮은 온도에서 일어나는 것으로 설명할 수 있지만, 이것은 일반

적으로 20% 이상의 강가공을 실시한 경우이고, 반대로 5% 정도의 약가공에서는 가공도가 작을수록 재결정은 낮은 온도에서 일어난다.^(1,2) 즉, 본 연구에서 부여한 낮은 예변형은 후자의 경우에 해당되며, 즉 STS310J1TB에서 부여한 예변형량은 STS310S에서의 예변형량에 비하여 매우 낮기 때문에 STS310S의 재결정온도보다도 낮은 온도에서 재결정이 일어났다고 사료되어진다.

4. 결론

오스테나이트계 스테인리스강중 Class A합금이며 석출경화형 합금인 STS310J1TB와 Class M합금인 STS310S의 실온 예변형제에 대하여 크리프 시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) STS310J1TB에서는 크리프 시험온도가 923 K에서 예변형을 부여하면 파단 수명이 약 2배로 증가하였고, 948 K, 973 K의 경우에는 파단 수명이 감소했다. STS310S에서는 크리프 시험온도가 923 K, 948 K에서는 예변형을 부여하면 최대 약 130%까지 파단 수명이 증가했으나 973 K에서 파단 수명은 감소했다. 이것은 각각의 온도에서 재결정이 일어났기 때문이다.

(2) 두 합금의 재결정 이하의 온도에서 예변형에 의한 파단수명 증가율이 다른 것은 STS310J1TB에서는 석출물과 전위의 상호작용이 주된 원인인 것을 확인하였고, 재결정온도가 다른 것은 부여한 예변형량이 다르기 때문이었다.

(3) 냉간 가공에 의하여 재료의 고온크리프강도를 개선하는 것은 크리프온도가 재결정온도 이하일 때 유효하고, 더욱이 석출강화형 합금의 경우가 강도의 개선이 큰 것도 주목해야 할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) Grant, N. J., Bucklin, A. G. and Rowland, W., 1956, "Creep-Rupture Properties of Cold-Worked Type 347 Stainless Steel," *Trans. ASM*, Vol. 48, pp. 446~455.
- (2) Baba, E., Kanemura, O., Abe, F. and Yagi, K., 1995, "Effect of Cold-rolling on Creep Behavior of a 10Cr-30Mn Austenitic Steel," *TETSU-TO-HAGANE*, Vol. 81, pp. 845~850.
- (3) Chalmers, B and Hume-Rothery, W., 1966, "Progress in Materials Science," Pergamon Press.
- (4) Kikuchi, S. and Iilschner, B., 1986, "Effects of a Small Prestrain at High Temperatures on the Creep Behavior of AISI 304 Stainless Steel," *Scripta Metall*, Vol. 20, pp. 159~162.
- (5) Park, I. D. and Endo, T., 2000, "Stress Relaxation Behavior of an Austenitic 25Cr-20Ni Stainless Steel in the Range of Power Law Breakdown," *J. Japan Inst. Metals*, Vol. 64, No. 12, pp. 1189~1195.
- (6) Park, I. D. and Nam, K. W., 2002, "Creep Behavior Analysis of 25Cr-20Ni Stainless Steel by the Omega Method," *KSME A*, Vol. 26, No. 2, pp. 349~356.
- (7) Mika, M., Yukawa, N. and Ishikawa, T., 2000, "Effect of Working Process to Strain Induced Transformation of Austenite Stainless Steel," *JSTP*, Vol. 41, No. 474, pp. 675~679.
- (8) Hasegawa, M., 1973, "Stainless Handbook," Nikkankogyo Ltd., pp. 85~89.
- (9) Park, I. D. and Nam, K. W., 2002, "Effect of Combined Addition of N and Nb on the High Temperature Behavior of a 25Cr-20Ni Stainless Steel," *J. Kor. Inst. Met. & Meter.*, Vol. 40, No. 5, pp. 478~483.