

# 신재 및 가동이력 Gr.91강의 재료강도 거동에 미치는 동적변형시효의 영향

남기연\* · 이형연†\* · 어재혁\* · 김형모\*\* · 홍현욱\*\*\*

## Influence of dynamic strain aging on material strength behavior of virgin and service-exposed Gr.91 Steel

Ki-Ean Nam\*, Hyeong-Yeon Lee†\*, Jae-Hyuk Eoh\*, Hyungmo Kim\*\* and Hyun-Uk Hong\*\*\*

(Received 31 May 2024, Revised 10 June 2024, Accepted 12 June 2024)

### ABSTRACT

This study investigates the effects of temperatures and strain rates on the strength and ductility of Gr.91 (ASME Grade 91) steel which is widely being used as a heat-resistant material in Generation IV nuclear and super critical thermal power plants. The tensile behavior of modified 9Cr-1Mo (Gr.91) steel was studied for the three strain rates of  $6.67 \times 10^{-5}/s$ ,  $6.67 \times 10^{-4}/s$  and  $6.67 \times 10^{-3}/s$  over the temperature range from room temperature (RT) to  $650^\circ C$ . Experimental results showed that at specific combinations of temperatures ( $300\sim 400^\circ C$ ) and strain rates, serrations appeared in the stress-strain curves. Concurrently, abnormal behaviors such as a plateau in yield strength and tensile strength, a minimum in ductility and negative strain rate sensitivity were observed. These phenomena were analyzed as significant characteristics of dynamic strain aging (DSA). Since this abnormal behavior in Gr.91 steel affects the material strength, it is judged that a correlation analysis between DSA and material strength should be crucial in the design and integrity evaluation of Gr. 91 steel pressure vessel and piping subjected to high-temperature loading.

**Key Words :** Dynamic Strain Aging(동적변형시효), Grade 91 Steel (그레이드 91강), Material Strength(재료강도), Ductility(연성), Tensile Test(인장시험)

### 기호설명

DSA	= dynamic strain aging
FM	= ferritic-martensitic
Gr.91	= ASME grade 91
SEM	= scanning electron microscope
SFR	= sodium-cooled fast reactor
SS	= stainless steel
TEM	= transmission electron microscope
$\sigma$	= true stress
$K'$	= constant, stress at strain rate of s-1

$\dot{\epsilon}$	= true strain rate
$m$	= strain-rate sensitivity factor = $d \log \sigma / d \log \dot{\epsilon}$

## 1. 서론

제4세대 원자력 시스템(Generation IV nuclear system)<sup>(1)</sup>은 크리프 영역인  $500^\circ C$  이상의 고온에서 가동되며, 설계수명도 현재 상업 운전 중인 원자로의 통상 수명인 40년보다 긴 60년 이상의 장수명을 목표로 하고 있다. 제 4세대 원자력 시스템에서 사용되고 있는 대표적인 내열강은 Type 316계열(316SS, 316L, 316LN 등)의 오스테나이트 스테인리스강과 FM(Ferritic-Martensitic)강 계열의 Mod.9Cr-1Mo(ASME Grade 91, 이후 'Gr.91')강이다. 페라이트 계열의 Gr.91강은

†교신저자, 회원, 한국원자력연구원  
E-mail : hylee@kaeri.re.kr  
TEL : (042)868-2956 FAX : (050)4010-2949  
\* 한국원자력연구원  
\*\* 경상국립대학교  
\*\*\* 창원대학교

소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR) 및 초임계 화력발전소의 압력기와 배관에 일반적으로 사용되는데, 316 스테인리스강(Stainless Steel, 이후 SS)에 비해 열전도도가 높고 열팽창 계수가 낮아 상대적으로 고온 열응력이 더 적게 발생하는 특성이 있다.<sup>(2)</sup> 본 연구에 사용된 재료는 미국 ASME 코드<sup>(3,4)</sup>에는 9Cr-1Mo-V로, 유럽 RCC-MRx<sup>(5,6)</sup>의 경우 X10CrMoNbV9-1로 등재되어 있다.

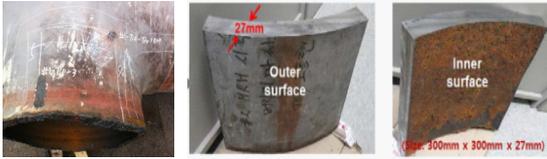


Fig. 1 Gr.91 steel plates sampled in a thermal power plant

Table 1 Chemical composition of Gr.91 steel (wt.%)

Code/Test	C	Mn	P	S	Si	Cr
RCC-MRx (Tom 2)	0.08- 0.12	0.30- 0.60	≤ 0.020	≤ 0.005	0.20- 0.50	8.00- 9.50
ASME (II-Part A)	0.08- 0.12	0.30- 0.60	0.020 max	0.010 max	0.20- 0.50	8.00- 9.50
Gr.91 (Virgin)	0.08	0.38	0.018	0.003	0.34	8.75
Aged Gr.91 (73,716h)	0.11	0.42	0.008	< 0.003	0.25	8.32
Ni	Mo	N	V	Nb	Al	Other
≤ 0.20	0.85- 1.05	0.03- 0.07	0.18- 0.25	0.06- 0.10	≤ 0.040	Cu ≤0.10
0.40 max	0.85- 1.05	0.03- 0.07	0.18- 0.25	0.06- 0.10	0.02 max	Ti0.01 max Zr0.01 max
0.29	0.875	0.038	0.242	0.079	0.014	
0.18	0.93		0.21			

FM강(예, Gr.91)에서 온도 및 변형률 속도(Strain Rate)가 강도 및 연성에 영향을 미치며, 이는 파괴인성에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또, 크리프 영역의 고온에 노출되면 재료강도 및 파괴인성 측면에서 신재에 비해 재료물성이 크게 저하되는 것으로 보고되고 있다.<sup>(2,7-9)</sup>

동적변형시효(Dynamic Strain Aging, 이후 DSA)는 재료의 인성, 강도 및 연성에 영향을 크게 미치므로 이에 대한 분석이 필요하며, 특정 온도 및 변형률 속도 조건에서 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>(7,8)</sup> 본 연구에서는 국내 초임계압 화력발전소의 재열증기배관에서 사용되는 신재 및 가동이력(Service-exposed) Gr.91강 시편을 사용하여

온도와 변형률 속도가 재료의 강도 및 연성에 미치는 영향을 분석하고, 동 영향과 DSA의 상관관계를 일련의 재료강도 시험 및 미세조직 분석을 통하여 조사하였다.

## 2. Gr.91강 재료 및 시험

### 2.1 시험재료

고온에서 가동되는 제4세대 원자력시스템의 주요 기기 및 배관계통의 설계·평가를 위한 고온설계기술기준<sup>(3,5)</sup>에서 FM강 계열의 Gr.91강에 대해 고온 영역과 저온 영역 아래의 분기 온도는 ASME Section III Div.5<sup>(3)</sup> 및 RCC-MRx<sup>(5)</sup>에서 동일하게 375 °C로 정의되어 있다. Mod.9Cr-1Mo에는 9Cr-1Mo강에 니오븀(Nb) 및 바나듐(V)와 같은 강한 탄화물 형성 원소를 첨가한 것으로 제4세대 원자력 및 초임계압 화력발전소 등에서 널리 사용되고 있다.

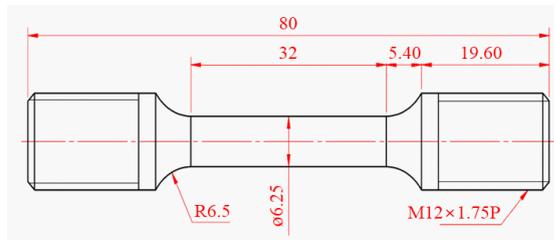


Fig. 2 Dimensions of Tension test specimen

Table 2 Test matrix of the tension tests for Gr.91 steels

Material	Strain rate(1/s)	Test temperature(°C)
Gr.91 (Virgin)	$6.67 \times 10^{-3}$	RT, 200, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650
	$6.67 \times 10^{-4}$	
	$6.67 \times 10^{-5}$	
Aged Gr.91 (73,716h)	$6.67 \times 10^{-4}$	

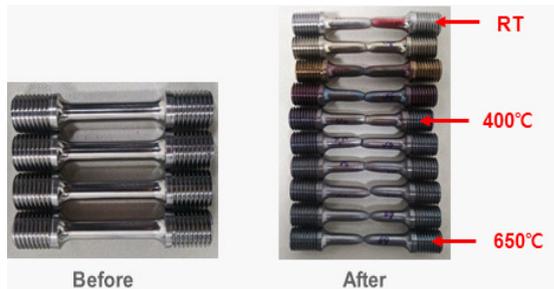


Fig. 3 Specimen shapes before and after experiments

본 연구에서 재료강도 시험의 시편은 Mod.9Cr-1Mo 재료로 초임계압 화력발전소의 재열증기 배관계통(Reheat Steam Pipe System)에서 사용되고 있는 신재(이후 Virgin) 및 가동이력(이후 Aged) Gr.91강 재료로서 Fig. 1과 같고, ASME<sup>(10)</sup> 및 RCC-MRx<sup>(11)</sup> 코드에 등재되어 있는 동일 계열강의 화학조성비를 비교하면 Table 1에서와 같다. 신재(Virgin) 및 열화재(Aged)는 발전소에 통상 장기간 재료를 보관하고 있지 않아 동일 재료(동일 heat number)는 아니지만, 두 재료의 화학조성비는 모두 RCC-MRx와 ASME 코드 요건 내에 들어오는 것으로 나타났다.

동 재료는 고온(569℃), 고압(46.7bar)의 운전 조건에서 73,716시간(~8.4년)의 가동이력을 겪은 국내 화력 재열증기 배관 Tee에서 채취한 것이다. Gr.91강 Tee의 제원은 배관부 내경이 760mm, 두께는 27mm이고, 샘플링된 블록의 크기는 300mm(W)×300mm(H)이다. 재열증기 배관의 Tee 용접부에서 균열이 발생함에 따라 Tee 블록에서 시편을 채취하였다.

본 연구의 재료시험에서는 ASTM E8<sup>(12)</sup>/E21<sup>(13)</sup> 표준에 따라 시편을 가공하고, 재료시험을 수행하였다. 시편은 Fig. 2 형상으로 직경 6.25mm의 표준환봉 시편이고, 게이지 길이는 25mm이다.

2.2 인장 시험

인장 시험에서는 Shidmazu 社の 250kN 전기모터식 시험기를 사용하였으며, 실온(RT)부터 650℃까지의 인장시험을 수행하였다. Table 2의 시험 매트릭스를 기반으로 신재 Gr.91강 및 Aged Gr.91강 시편에 대하여

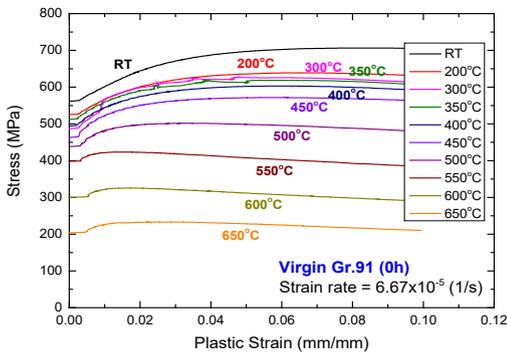
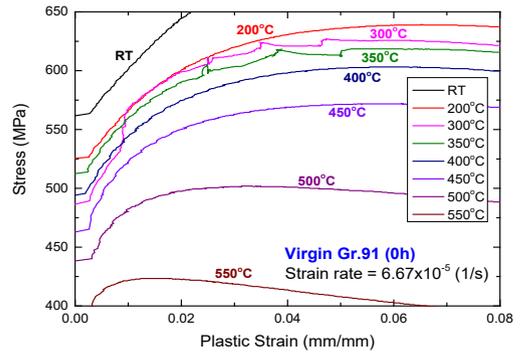
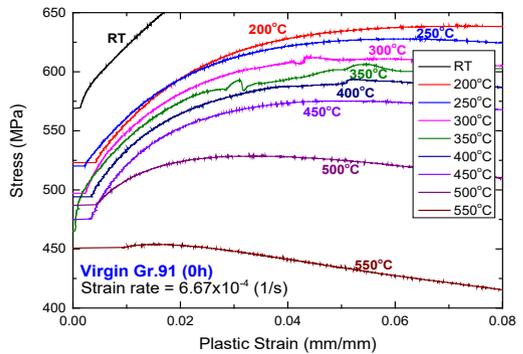


Fig. 4 Tension test results of the stress-plastic strain for strain of  $6.67 \times 10^{-5}/s$

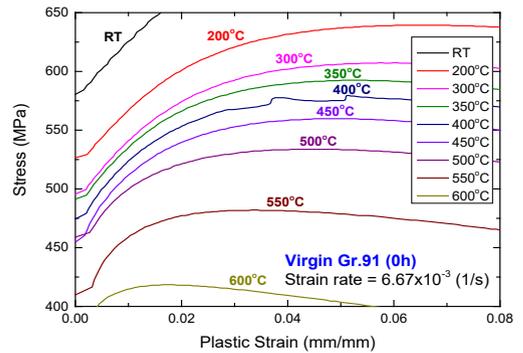
RT~650℃의 온도 범위 및 변형률 속도( $6.67 \times 10^{-5}$ ,  $6.67 \times 10^{-4}$  및  $6.67 \times 10^{-3}$  1/s)에 따른 영향을 조사하기 위한 일련의 인장시험을 수행하였다. 그리고, Gr.91강 시편의 시험 전후 이미지는 Fig. 3에서와 같다.



(a) Strain rate of  $6.67 \times 10^{-5}/s$



(b) Strain rate of  $6.67 \times 10^{-4}/s$



(c) Strain rate of  $6.67 \times 10^{-3}/s$

Fig. 5 Magnified view with serrated flow for the strain rate on virgin Gr.91 steel

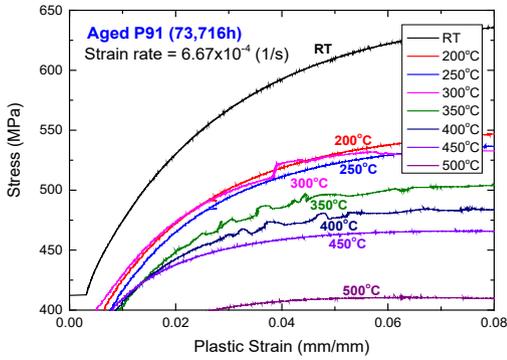


Fig. 6 Magnified view with serrated flow for the strain rate of  $6.67 \times 10^{-4}$ /s on aged Gr.91 steel

### 3. 시험 결과

#### 3.1 인장(Tension) 시험 결과

시편의 게이지 길이 부분에서의 변형률 속도가  $6.67 \times 10^{-5}$ /s인 경우에 대하여 상온(RT)에서부터 650 °C까지 10개 온도에서 인장시험을 수행한 결과 전체적으로 Fig. 4에서와 같이 응력-소성 변형률 선도의 특정 온도 범위에서 톱니 모양의 흐름(Serrated Flow, 이후 SF)이 관찰되었고, 동 SF가 포함된 확대 부의 시험 결과인 Fig. 5(a)를 보면 세레이션이 관찰되는 온도는 300~350 °C인 것으로 나타났다.

인장시험의 재현성을 조사하기 위해 세 개 온도(500 °C, 550 °C, 600 °C)에서 동일 소재 두 개씩의 시편을 사용하여 반복시험을 수행한 결과 동일 변형률에서 최대 응력 차이가 500 °C에서 1.51%, 550 °C에서 3.88% 그리고 600 °C에서 0.61%로 시험 결과들이 잘 일치하는 것으로 나타났다.<sup>(9)</sup> 이에 따라 각 온도 및 변형률 속도에 대해 하나의 시편을 사용한 시험을 수행하였다.

변형률 속도가  $6.67 \times 10^{-4}$ /s인 경우에 Virgin 및 Aged Gr.91강에 대한 인장시험 결과에서 세레이션이 관찰된 확대 그림은 Fig. 5(b) 및 Fig. 6에서 보는 바와 같이 세레이션이 300~400 °C의 범위에서 발생한 것으로 나타났으며, Fig. 5(b) 및 Fig. 6(동일 scale)을 비교해 보면 재료강도에서 가동이력 재료가 신재 대비 전체적으로 상당히 감소된 것을 확인할수 있다. 또한, 변형률 속도가  $6.67 \times 10^{-3}$ /s인 경우의 인장시험 결과에서 세레이션이 확대 이미지인 Fig. 5(c)에서 보는 바와 같이 400 °C의 온도영역에서 발생한 것으로 나타났다. 따라서 인장시험

결과를 종합해 보면 변형률 속도가 빨라질수록 세레이션이 발생하는 온도가 상승하는 경향을 보여주고 있다.

이러한 세레이션은 전위 주변의 용질 원자들이 이동하는 전위의 반복적인 고착(Locking) 및 풀림(Unlocking) 과정으로 인해 발생하는 것으로 알려져 있으며,<sup>(7)</sup> 세레이션은 DSA가 발생했다는 것을 보여주는 가장 보편적으로 나타나는 단서 중의 하나이다.

Virgin 및 Aged Gr.91강은 Table 3과 같이 중간온도(300~400 °C)에서 인장 변형 동안 톱니모양의 흐름을 나타냈고, 본 연구에서 조사된 변형률 속도에서는 실온 및 고온에서 부드러운 응력-소성 변형을 곡선을 나타냈다. Rodriguez<sup>(14)</sup>는 Fig. 7에서와 같이 세레이션(톱니) 유형을 A, B, C, D 및 E 등 다섯 가지 유형으로 분류하였는데, 간단한 설명은 아래와 같다.

- 1) Type A : 시편 끝에서 반복적으로 시작하여 동일한 방향으로 전파되는 주기적인 톱니모양
- 2) Type B : 인장-변형률 곡선의 일반적인 수준을

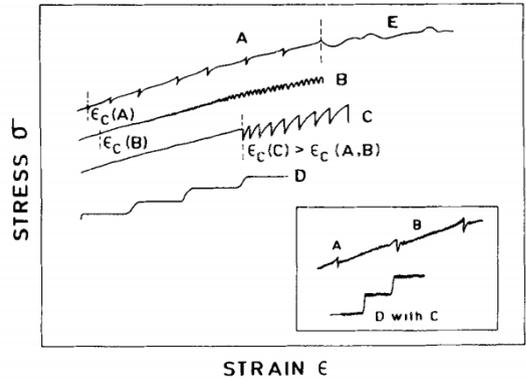


Fig. 7 Type of serration<sup>(14)</sup>

Table 3 Different types of serrated flow(SF) with temperatures and strain rate combination

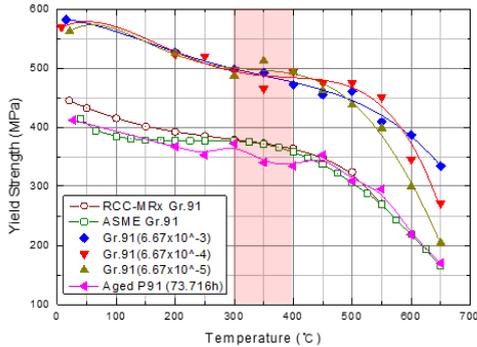
Material	SR (1/s)	Temperature (°C)				
		250	300	350	400	450
Gr.91 (Virgin)	$6.67 \times 10^{-5}$	x	SF (A+D)	SF (A+D)	---	---
	$6.67 \times 10^{-4}$	---	SF (Type D)	SF (A+D)	SF (Type D)	---
	$6.67 \times 10^{-3}$	x	---	---	SF (Type D)	---
Aged Gr.91	$6.67 \times 10^{-4}$	x	SF (Type D)	SF (A+E)	SF (A+D)	---

--- Smooth flow, x-test not performed.

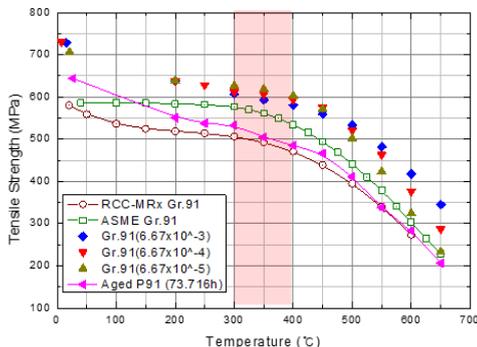
중심으로 전위의 불연속적 전파로 인해 빠르게 연속적으로 발생

- 3) Type C : 인장-변형을 곡선의 일반적인 수준 아래로 급격히 떨어졌다가 평균 수준으로 급격히 증가
- 4) Type D : 경화나 변형없이 평탄한 구간
- 5) Type E : A형과 유사하지만, 높은 변형률에서 변형되면서 가공 경화가 거의 또는 전혀 없는 것이 특징

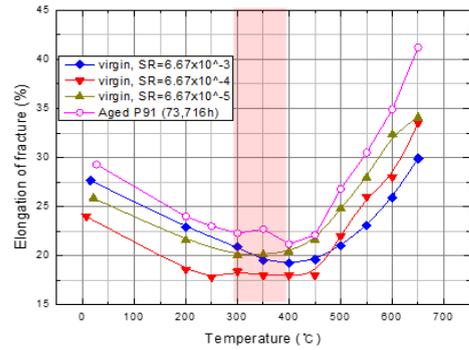
본 연구에서의 재료 강도시험 결과 세레이션이 나타난 유형을 관찰해보면 세레이션 유형은 D, A+D 및 A+E 형태로 나타났다. 다양한 변형률 속도와 온도에서 얻은 다양한 유형의 톱니 모양은 Table 3에 요약하였다. 응력-소성 변형률 곡선의 일반 수준에서 응력 값이 초기에 급격하게 증가한 후 피크 이후 응력값이 거의 안정(Plateau) 되거나 감소하는 D유형의 경우는 Virgin 및 Aged Gr.91강 모두 변형률 속도가 중간인  $6.67 \times 10^{-4}/s$  경우  $300^{\circ}C$  및  $400^{\circ}C$  온도 영역에서 관찰되었다.



(a) Yield strengths



(b) Tensile strengths



(c) Elongation

Fig. 8 Comparison in test results for virgin and Aged Gr.91 steels depending on strain rates and temperatures

반면에, 변형률 속도가 가장 빠른  $6.67 \times 10^{-3}/s$  경우  $400^{\circ}C$  온도 영역에서 관찰되었다. 응력의 급격한 증가와 응력-소성 변형률 곡선의 일반적인 수준 아래로 불연속적인 감소를 나타내는 A형 세레이션과 D형이 복합적(A+D)으로 관찰되는 경우는 변형률 속도가 최저인  $6.67 \times 10^{-5}/s$ 인 경우에는  $300 \sim 350^{\circ}C$ 의 온도 범위에서, 변형률 속도가 중간인  $6.67 \times 10^{-4}/s$ 인 경우에는  $350^{\circ}C$  온도영역에서 관찰되었다. 반면 Aged Gr.91강의 경우 A+D 유형은  $6.67 \times 10^{-4}/s$  및  $400^{\circ}C$  온도영역에서 관찰되었다.

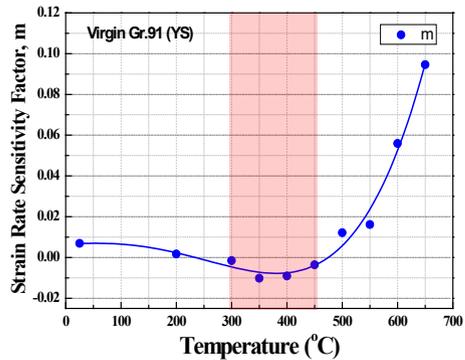


Fig. 9 Variation of strain rate sensitivity factor with temperature based on yield strength

Table 4 Microstructure analysis points (circled) in test matrix of the tension tests for virgin Gr.91 steel

Material	Strain Rate (1/s)	Temperature(°C)									
		RT	200	300	350	400	450	500	550	600	650
Gr.91 (Virgin)	$6.67 \times 10^{-5}$	X	X	SF	SF	X	X	X	X	X	X
	$6.67 \times 10^{-4}$	X	X	SF	SF	SF	X	X	X	X	X
	$6.67 \times 10^{-3}$	X	X	X	(X)	(SF)	(X)	X	X	X	X

마지막으로, E 유형은 일반적으로 더 높은 변형률에서 A 유형 다음에 나타난다. Aged Gr.91강에서는 350℃ 온도영역에서 A+E 유형이 관찰되었다.

### 3.2 동적변형시효(DSA) 거동

Virgin 및 Aged Gr.91강 시편의 인장시험 결과 특정 온도 및 변형률 속도에서 톱니모양의 흐름(SF)이 관찰되었으며, 재료강도에서는 온도 증가에 따라 강도가 감소하는 것처럼 보이는 Fig. 8(a)의 항복강도와 Fig. 8(b)의 인장강도는 온도 증가에 따라 유지되거나 오히려 증가하는 특이 거동을 보였다. 재료강도 시험 결과의 분석을 위해 RCC-MRx 및 ASME 코드에 등재되어 있는 항복강도와 인장강도 데이터들도 함께 Fig. 8(a)과 Fig. 8(b)에 나타내었다. 또한, Fig. 8(c)에서와 같이 연신율의 최소값은 변형률 속도가 감소함에 따라 더 낮은 시험 온도 쪽으로 이동하는 것으로 나타났으며, 연성이 온도 증가에 따라 모든 변형률 속도에서

300~400℃의 범위에 걸쳐 감소했다 증가하는 특이 거동을 보였다. 이는, DSA가 나타나는 특성인 연성이 최소가 되는 온도영역과 일치한다. 또한, 고온에 장기간 노출된 Aged Gr.91강은 DSA 영향으로 400℃에서 재료 강도(YS/TS)가 각각 최대 32.4%/18.4% 떨어진 것으로 나타났다. 그렇지만, 연성은 최대 15% 증가한 것으로 나타났다.

그리고, Fig. 9의 음의 변형률 속도 민감도(Negative Strain Rate Sensitivity)도 300~450℃의 범위에서 감소하다 증가하는 특이 거동을 보이는데, 이들이 전형적인 DSA 거동의 특징으로 알려져 있다.<sup>(7,8)</sup> Fig. 9의 변형률 속도 민감도 인자(m)은 다음의 식 (1)로부터 결정된다.

$$\sigma = K' \dot{\epsilon}^m \tag{1}$$

여기서,  $\sigma$ 는 진응력(True Stress),  $K'$ 은 상수(Constant)로 변형률속도(1/s)에서의 응력을 의미하고,  $\dot{\epsilon}$ 은 진변형률속도(True Strain Rate)이며  $m$ 은 변형률속도 민감도 인자(=  $d \log \sigma / d \log \dot{\epsilon}$ )이다.

Virgin 및 Aged Gr.91강의 상기 인장시험 결과를 종합해 보면 SF가 관찰되었고, 재료 강도, 연성, 그리고 음의 변형률 속도 민감도 계수가 특정 온도 및 변형률 속도에서 특이 거동을 보이는 것으로 나타남에 따라 상기 재료가 전형적 DSA 현상을 겪은 것으로 분석되었다.

본 연구에서 사용한 재료인 Mod.9Cr-1Mo강은 DSA의 열적 활성화(Thermal Activation) 에너지(75kJ/mol)는 질소 확산의 활성화 에너지(80kJ/mol)와 동일한 수준으로 분석되었으며, 이에 따라 DSA를 유발한 용질 원자는 질소인 것으로 분석되었다. 이는 용질 원자인 질소의 이동속도를 결정하고, 변형률 속도가 전위의 이동속도를 결정하기 때문에 DSA는 온도와 변형률 속도가 조합된 특정 범위에서 발생하는 것이 특징이다.<sup>(16)</sup>

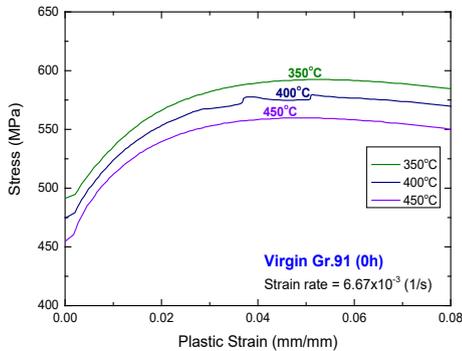


Fig. 10 Tension test results for 350℃, 400℃ and 450℃ with strain rate of  $6.67 \times 10^{-3} / s$

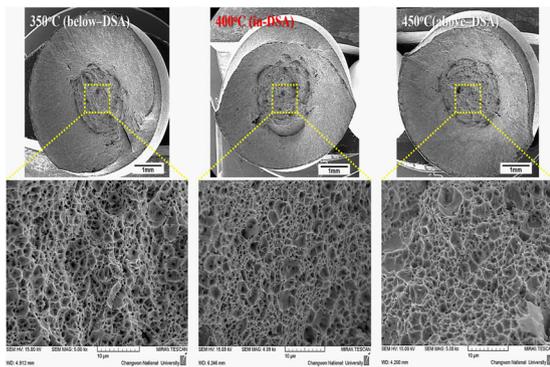
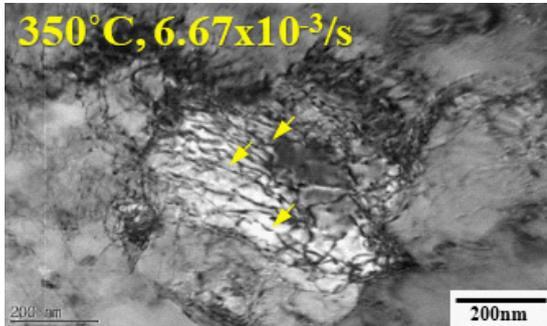
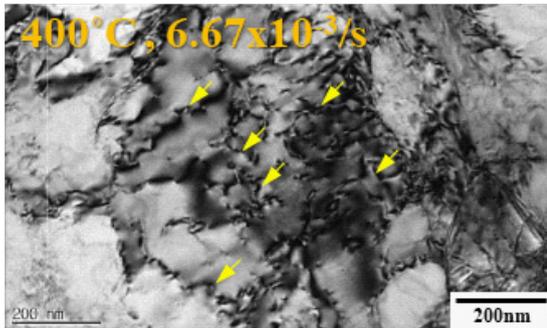
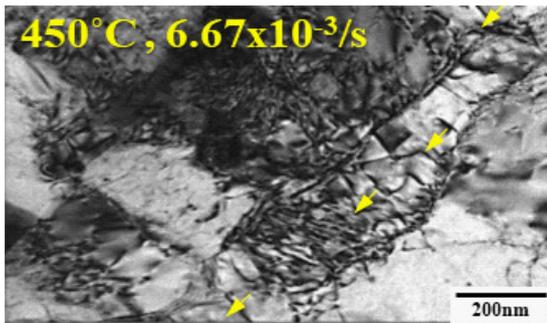


Fig. 11 Observation results with SEM for Gr.91 steel specimens of three different temperatures

### 3.3 신재 Gr.91강의 미세조직 분석

Virgin Gr.91강의 DSA 현상이 일련의 온도 및 변형률 속도 범위에서 관찰됨에 따라 본 연구에서는 인장시험 후의 파단 시편에 대해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)과 투사전자현미경(Transmission Electron Microscope: TEM)을 활용한 미세조직 분석을 수행하였다.

Table 4의 시험 매트릭스 중 인장시험의 온도 및 변형률

(a) 350°C and  $6.67 \times 10^{-3}/s$ (b) 400°C and  $6.67 \times 10^{-3}/s$ (c) 450°C and  $6.67 \times 10^{-3}/s$ 

**Fig. 12** Microstructures of temperatures and strain rates specimen from TEM observations

속도 범위에서 SEM 및 TEM 관찰을 수행한 대상은 원형 표시가 된 세 가지 경우, 즉 변형률 속도는  $6.67 \times 10^{-3}/s$ , 온도는 350°C, 400°C, 450°C인 세 가지 경우이다. 이들 경우의 세레이션 발생 여부 및 강도를 보기 위한 변형된 형태의 응력-소성 변형률 선도인 Fig. 10를 보면 350°C와 450°C에서는 세레이션이 발생하지 않았고, 400°C에서는 약하게 발생한 것으로 나타났다.

여기서, Fig. 11의 SEM 관찰 결과를 보면 DSA 현상이 발생하는 특징인 세레이션의 유무와 관계없이

파손된 표면의 모양이 유사한 경향을 보였다. 그러나, 통상 1,000~30,000배까지 조직의 확대 관찰이 가능한 SEM으로는 전위거동을 분석하는 것은 가능하지 않으며, 최대 50만 배의 확대능을 가진 TEM 분석을 통해 전위의 이동 및 조직 분석이 가능하기 때문에 본 분석에서는 Table 4에서와 같이  $6.67 \times 10^{-3}/s$  변형률 속도에서 350°C, 400°C 및 450°C 세 가지 온도영역에 대해 TEM을 활용한 미세조직 분석을 수행하였다.

DSA는 확산에 의해 제어되는 불균일한 변형 거동으로 나타나는데, 이는 용질 원자와 이동 전위 사이의 상호작용으로 인해 일어난다. 즉, 톱니 모양의 항복은 용질 원자가 글라이딩 전위 위치로 확산되어 시스템을 평형 상태로 유지하고 전위 코어(Core) 주위에 용질 대기를 형성함으로써 발생한다. 전위와 용질 원자 사이의 이러한 상호작용은 미끄러짐 경로에서 전위를 일시적으로 정지시킨다.

먼저, 세레이션이 관찰되지 않은 350°C의 경우는 DSA 영역(400°C)보다 온도가 낮은 영역이다. 변형조직은 Fig. 12(a)에서와 같이 전체적으로 전위가 서로 상호작용하고, 열적 활성화 과정인 recovery, cross-slip을 통해 결과적으로 cell 구조를 형성하였으며, cell 크기는 약  $0.4\mu m$ 이고, 반듯한 고밀도 전위들이 특별한 움직임의 제한이나 구속(pinning) 없이 활주(Glide)하는 배열이 관찰되었다.

반면, 400°C 경우에는 인장 곡선으로부터 세레이션 또는 DSA가 나타나기 시작했고, Fig. 12(b)에서와 같이 셀(Cell) 크기는 약  $0.5\mu m$ 이고, 래스(Lath) 내에 반듯하고 평행한 전위들은 관찰할 수 없었다. 대신, 전위들이 휘어짐(bowing)이 있고, 작은 전위 잔해(debris)와 움직임이 제한되어 구속된 듯한 전위들로 관찰되었다. 이는 변형 동안 전위들의 움직임이 비교적 자유롭지 못하고, 고정되거나 dragging 되어 제한적으로 일부 segment만 움직이려 한다는 것을 보여준다. 이로부터, 400°C에서는 DSA 현상을 겪었음을 알 수 있다.

450°C 경우에는 Fig. 12(c)에서와 같이 DSA 영역(400°C)보다 온도가 바로 위의 높은 영역으로 셀 크기는 약  $0.3\mu m$ 이고, 구속 없이 활주하는 배열이 관찰되었다. 따라서, DSA 현상을 겪지 않았음을 유추할 수 있고, 이러한 전위구조는 DSA 영역 아래의 350°C 전위구조와 유사하다.

앞에서 보여주듯이 DSA 현상의 징후로 응력-변형률

곡선에서의 serration 발생, YS 및 TS - 온도 곡선에서의 특이 거동, 연신율-온도 곡선에서 연성의 최소, negative strain rate sensitivity 발생 등 여러 가지의 특성이 나타나지만, DSA의 발생 여부는 TEM 조직 분석을 통해 가장 명확하게 판단할 수 있다. 본 연구에서는 신재에 대한 TEM 조직만을 분석하였는데, 향후 연구에서는 Aged Gr.91강에 대하여 TEM 미세조직 분석을 수행하고, 동 분석결과를 신재의 것과 비교함으로써 신재와 가동이력 재료의 DSA 거동 특성을 비교·분석할 계획이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 제4세대 원전 및 초임계압 화력발전소의 내열강 재료로 널리 채택되고 있는 Gr.91강에 대해 온도 및 변형률 속도가 재료의 강도와 연성에 미치는 영향을 조사하기 위해 10개 온도(RT~650℃)와 세 가지 변형률 속도( $6.67 \times 10^{-5}/s$ ,  $6.67 \times 10^{-4}/s$ ,  $6.67 \times 10^{-3}/s$ )에 대해 인장시험을 수행하였다.

시험 결과 응력-소성 변형률 선도에서 톱니 모양으로 발생하는 세레이션(Serration)은 변형률 속도  $6.67 \times 10^{-5}/s$ 의 경우 300~350℃에서,  $6.67 \times 10^{-4}/s$ 의 경우 300~400℃에서,  $6.67 \times 10^{-3}/s$ 의 경우 400℃ 온도영역에서 관찰되었으며, 변형률 속도가 증가할수록 세레이션 발생 온도가 증가하는 것으로 나타났다.

또한 세레이션 발생온도 범위인 300~400℃에서 항복강도와 인장강도의 비정상 거동, 최소의 연성 그리고 변형률 속도 민감도의 특이 거동이 관찰되었다. 이는 동적변형시효(DSA) 현상의 전형적인 특징으로, 본 연구에서 사용된 Virgin 및 Aged Gr.91강은 300~400℃ 온도 범위에서 DSA가 발생한 것으로 확인되었으며, 고온에 노출된 Aged Gr.91강은 DSA의 영향으로 재료 강도는 저감되었고, 연성은 증가한 것으로 나타났다.

미세조직 분석 결과 DSA 영역(400℃) 내에서는 전위들의 휘어짐(bowing)과 작은 전위 잔해(debris)가 형성되었으며, DSA 현상이 발생되면 용질 원자에 의한 전위의 구속(pinning)과 생성이 반복되면서 전위밀도가 증가하고, 이로 인해 강도 증가와 연성 감소가 나타난다.

Gr.91강에 DSA 발생 시 재료 강도에서 비정상적 거동이 관찰된 바 고온기기의 설계 신뢰성 제고를 위해서는 DSA와 재료강도의 상관관계에 대해 분석하고, 동 영향을

설계기술기준의 물성치에서 고려하는 방안에 대해 검토할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국연구재단(2021R111 A2057941, 2021K1A3A1A 78097845 and 2021M2E2A2081063) 및 국가과학기술연구회(CAP20032-100)의 지원을 받아 수행됨.

#### 참고문헌

- (1) IAEA, 2012, "Status of Fast Reactor Research and Technology Development," IAEA-TECDOC-1691.
- (2) Lee, H. Y., Kim, W. G., Son, S. K., Hong, S. W. and Seok, C. S., 2016, "Effect of Thermal Aging on Material Strength and Fracture Behavior in Mod.9Cr-1Mo Steel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 4, No. 2, pp.101-109. doi:http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2016.4.2.101
- (3) ASME BPVC Sec.III, Div.5, 2023, "Rules for Construction of Nuclear Facility Components," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (4) ASME BPVC Sec.II, Part D, 2023, "Materials," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (5) RCC-MRx, 2022, "Section III-Tome 1-Subsection B: Class N1<sub>Rx</sub> Reactor Components," *AFCEN*.
- (6) RCC-Mrx, 2022, "Section III-Tome 1-Subsection Z-Appendix A3.18AS," *AFCEN*.
- (7) Yoon, J. H., Lee, B. S., Oh, Y. J. and Hong, J. H., 1999, "Effects of Loading Rate and Temperature on J-R Fracture Resistance of an SA516-Gr.70 Steel for Nuclear Piping," *Int. J. Pres. Ves. Pip.*, Vol. 76, pp. 663-670. doi:https://doi.org/10.1016/S0308-0161(99)00033-2
- (8) Choudhary, B. K., Samuel, E. Isaac, Sainath, G., Christopher, J. and Mathew, M. D., 2013, "Influence of Temperature and Strain Rate on Tensile Deformation and Fracture Behavior of P92 Ferritic Steel, *Mater. Trans. A*, Vol. 44, No. 11, pp.4979-4992. doi:https://doi.org/10.1007/s11661-013-1869-6
- (9) Lee, H. Y., Lim, D. W. and Jeong, J. Y., 2017, "Effects of Long-time Service at High Temperature on the Material Strength and J-R Curve of Grade 91 Steel," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 178, pp.445-456. doi:https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.02.022
- (10) ASME BPVC Sec.II, Part A, 2023, "Materials," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (11) RCC-MRx, 2022, "Section III-Tome 2: Materials," *AFCEN*.
- (12) ASTM E8/E8M-22, 2022, "Standard Test Methods

- for Tension Testing of Metallic Materials,” ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/E0008\_E0008M-22
- (13) ASTM E21-20, 2020, “Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials,” ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/E0021-20
- (14) Rodriguez, P., 1984, “Serrated Plastic Flow,” *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 6, No. 4, pp.653-663. doi:https://doi.org/10.1007/BF02743993
- (15) Lee, H.Y., Lee, J. H. and Choi, H. S., 2020, “Schemes to enhance the integrity of P91 steel reheat steam pipe of a high-temperature thermal plant,” *Trans. of the KPVP*, Vol. 16, No. 1, pp.74-83. doi:http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2020.16.1.074
- (16) Verma, P. , Rao, G. Sudhakar, Chellapandi, P., Mahobia, G. S., Chattopadhyay, K., Santhi Srinivas, N. C. and Singh, V., 2015, “Dynamic Strain Ageing Deformation, and Fracture Behavior of Modified 9Cr-1Mo Steel,” *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, Vol. 621, pp.39-51. doi:https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.011