



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021년 2월  
석사학위 논문

저합금강 배관재의 동적변형시효  
특성에 미치는 미세조직의 영향 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 상 언

# 저합금강 배관재의 동적변형시효 특성에 미치는 미세조직의 영향 연구

**A Study on the Effect of Microstructure on Dynamic Strain  
Aging Characteristics of Low-alloy Steel Piping Materials**

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 상 언

# 저합금강 배관재의 동적변형시효 특성에 미치는 미세조직의 영향 연구

지도교수 김 진 원

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 상 언

# 김상언의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위원 조선대학교 교수 송종순 (인)

위원 조선대학교 교수 김진원 (인)

2020년 11월

조선대학교 대학원

## 목 차

<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>제1장 서론</b> .....	1
<b>제2장 인장시험</b> .....	5
<b>제1절 재료 및 시편</b> .....	5
1. 재료 .....	5
2. 시편 .....	5
<b>제 2 절 시험 조건 및 절차</b> .....	6
1. 시험 조건 .....	6
2. 시험 장치 및 절차 .....	6
3. 미세조직 분석 .....	6
<b>제3장 시험 결과 및 토의</b> .....	13
<b>제1절 미세조직 특성 분석</b> .....	13
<b>제2절 응력 변형률 곡선</b> .....	13
1. SA508 Gr.1a(D) 배관재 .....	13
2. SA508 Gr.1a(I) 배관재 .....	14
<b>제3절 시험 온도에 따른 인장물성치 변화</b> .....	14
1. 표면부 .....	14
2. 중심부 .....	15
<b>제4절 DSA 특성에 미치는 미세조직의 영향 분석</b> .....	15
1. 온도에 따른 인장물성치 변화 .....	16
2. 시편 채취 위치에 따른 인장물성치 변화 .....	16

3. 미세조직에 따른 DSA 특성 비교 및 분석 .....	16
<b>제 4 장 결론</b> .....	32
참고문헌 .....	33

## 표 목차

표 2.1.1 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 화학조성(wt%) .....	8
표 2.1.2 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 열처리 조건 .....	8
표 2.2.1 DSA 특성에 미치는 미세조직의 영향 연구를 위한 인장시험 조건 .....	9



## 그림 목차

그림 1.0.1 변형시효 현상의 발생 원리 .....	3
그림 1.0.2 동적변형시효의 개념 .....	3
그림 1.0.3 동적변형시효의 변위 속도 의존성 .....	4
그림 1.0.4 동적변형시효의 온도 의존성 .....	4
그림 2.1.1 표준 인장시험에 사용된 인장시편 .....	10
그림 2.1.2 인장시편 채취 위치 및 방향 .....	11
그림 2.1.3 인장시험 장면 .....	12
그림 3.1.1 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면부와 중심부에서의 미세조직 비교(OM) .....	18
그림 3.1.2 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면부와 중심부에서의 미세조직 비교(SEM) .....	19
그림 3.2.1 SA508 Gr.1a(D) 배관재의 표면에서의 공칭응력-변형률 곡선 .....	20
그림 3.2.2 SA508 Gr.1a(D) 배관재의 중심부에서의 공칭응력-변형률 곡선 .....	21
그림 3.2.3 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면에서의 공칭응력-변형률 곡선 .....	22
그림 3.2.4 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 중심부에서의 공칭응력-변형률 곡선 .....	23
그림 3.3.1 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교 .....	24
그림 3.3.2 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 중심부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교 .....	26
그림 3.4.1 SA508 Gr.1a(D) 배관재의 표면과 중심부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교 .....	28
그림 3.4.2 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면과 중심부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교 .....	30

## ABSTRACT

### A Study on the Effect of Microstructure on Dynamic Strain Aging Characteristics of Low-alloy Steel Piping Materials

Kim Sang Eon

Advisor : Prof. Kim Jin Weon, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

SA508 Gr.1a low-alloy steel (LAS) is used as a reactor coolant piping material of nuclear power plants (NPPs). SA508 Gr.1a LAS is made by forging followed by quenching and tempering, and it has a good mechanical properties. However, it is known that the LAS is typically susceptible to dynamic strain aging (DSA) in the range of operating temperatures of NPPs, and the DSA phenomenon increases strength and decreases ductility and fracture resistance of the materials. Also, it causes abnormal strain rate dependence of LAS. Thus, the mechanical properties of SA508 Gr.1a LAS at operating temperature of NPPs are influenced by its DSA characteristic, and it is important to understand the DSA characteristics for ensuring the reliability of mechanical properties of SA508 Gr.1a LAS tested at operating temperature of NPPs. The DSA phenomenon in LAS is known to be caused by the interaction between diffusing atoms, i.e., free carbon and nitrogen atoms, and mobile dislocations. Therefore, the susceptibility and temperature range of DSA are dependent on the amount of free carbon and nitrogen atoms, which is affected by the chemical composition, heat-treatment, and deformation rate of materials. A number of studies have been carried out to understand the parameters affecting the

DSA characteristics and to mitigate the DSA susceptibility of LAS. In this study investigates the effect of microstructure, which is characterized by manufacturing process, on the DSA characteristics of SA508 Gr.1a LAS pipe material via tensile tests.

## 제 1 장 서론

일반적으로 저합금강 배관재는 단조로 제작된 후 퀀칭과 템퍼링 열처리를 거친다. 따라서 저합금강 배관재는 기계적 물성이 우수하며 원자력발전소 (이하, 원전)의 주냉각재 배관으로 사용된다.[1] 그러나, 탄소강과 저합금강 등 페라이트강은 소성변형시 변형시효 현상이 발생하는 것으로 알려져 있으며, 변형시효 현상은 크게 정적변형시효와 동적변형시효(DSA, Dynamic Strain Aging)로 구분된다. 저합금강에서 변형시효 현상은 그림 1.0.1에 나타낸 것과 같이 C이나 N와 같은 침입형 불순물 원자와 전위 사이의 상호작용으로 인해 발생한다.[2] 그림 1.0.2을 보면 고온 상태에서 불순물 원자의 확산이 활발해짐에 따라 불순물 원자에 의한 이동전위의 고착과 해방이 반복되면서 변형이 진행되는 중에 변형시효 현상이 발생하는데 이것을 DSA 현상이라고 한다. 따라서, DSA 현상은 용질원자의 확산을 지배하는 온도와 전위의 속도를 지배하는 변형률속도에 의존한다. 특히, 저합금강은 원전 운전 온도인 200~350°C 부근에서 DSA 현상이 발생하게 되는데, 일반적으로 저합금강의 경우에는 DSA 현상이 발생하는 구간에서는 재료의 강도를 증가시키고 연성 및 파괴인성을 감소시키는 것으로 알려져 있다.[2-4] 일반적으로 온도가 증가하게 되면 재료의 강도는 낮아지고 연성은 증가하는데, 저합금강의 경우에 DSA 현상이 발생하는 구간에서는 온도가 증가함에 따라 재료의 강도가 증가하고 연성이 감소하게 된다. 또한, 변형률 속도가 증가함에 따라 재료의 강도가 감소하고 연성이 증가한다. 이러한 재료의 온도와 변형률 속도에 따른 강도 증가 및 연성 감소 그리고 파괴인성의 감소는 그림 1.0.3에 잘 나타나있다.

이러한 DSA 현상이 발생하게 되면 시험속도와 온도에 따른 재료의 물성이 변화하게 되고, 그 영역에서는 주어진 재료의 물성을 정확하게 파악하기 어렵다. 즉, DSA 현상이 발생하는 구간에서는 재료물성의 불확실성이 커지게 된다. 이러한 재료물성의 불확실성은 구조 건전성 평가결과의 불확실성을 야기하고, 재료의 건전성 측면에서도 안 좋은 영향을 미치게 된다. 따라서 DSA 특성에 미치는 주요 인자들을 파악할 필요가 있다. 화학조성, 온도, 변형률 속도, 열처리 조건 등과 같은 DSA 특성에 미치는

영향 인자들에 대한 연구가 많이 진행되었다.[2-8] 그러나 미세조직에 의한 영향은 여전히 명확하지 않다.

본 연구에서는 서로 다른 제작사에서 제작된 두 종류의 저합금강 배관재를 이용하여 각 배관의 표면과 중심에서 시편을 채취하여 원전 운전 온도를 포함한 RT~350°C에서 인장시험을 수행하였다. 인장시험 결과로부터 배관재 종류와 표면과 중심부에서의 온도에 따른 인장물성의 변화를 분석함으로써 재료종류와 위치별 DSA 거동을 분석하고 비교 해보았다. 또한 두 배관재의 표면과 중심부의 미세조직을 분석함으로써 DSA 특성에 미치는 미세조직의 영향을 파악하였다.

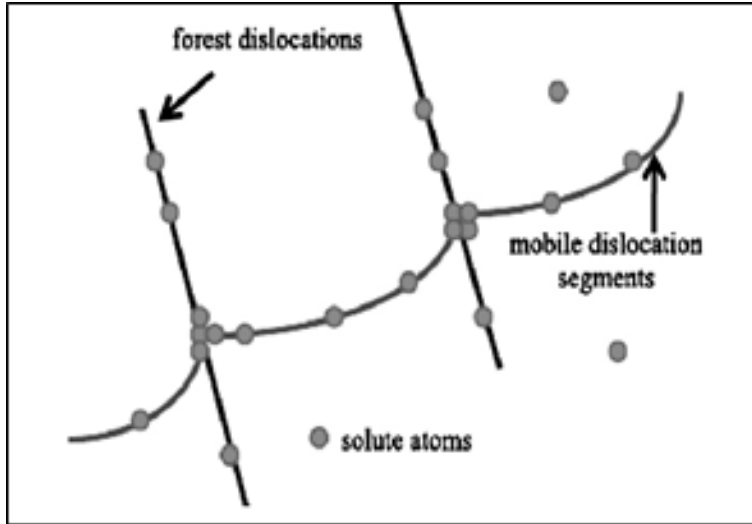


그림 1.0.1 변형시효 현상의 발생 원리

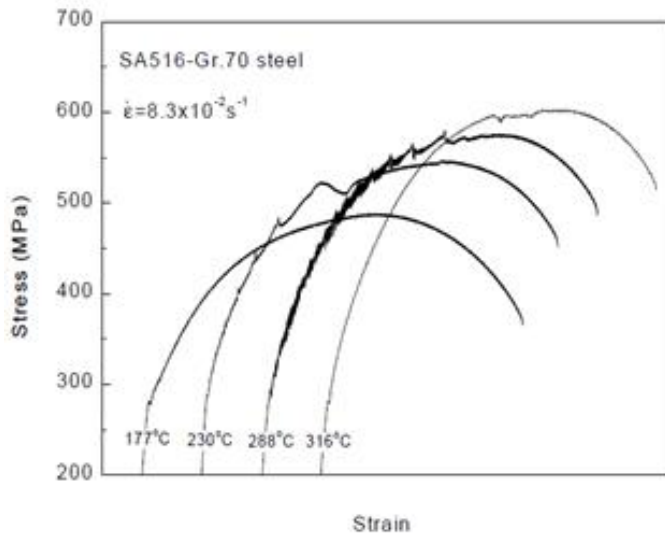


그림 1.0.2 동적변형시효의 개념

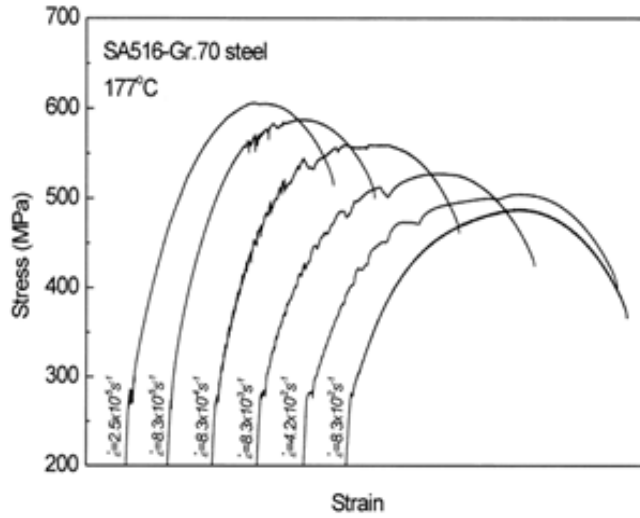


그림 1.0.3 동적변형시효의 변위 속도 의존성

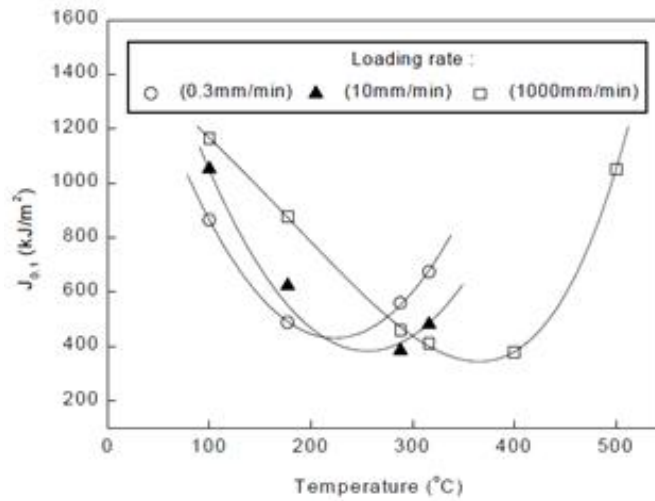


그림 1.0.4 동적변형시효의 온도 의존성

## 제 2 장 인장시험

### 제1절 재료 및 시편

#### 1. 재료

본 연구에서는 저합금강 배관재의 DSA 특성에 미치는 미세조직의 영향을 파악하기 위해서 동일한 사양의 미세조직이 상이한 두 종류의 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재가 사용되었다. 또한 이 배관재들은 내경과 두께가 각각 1075.4mm, 102.6mm 인 주냉각재 배관으로 사용되고 남은 잔재를 사용하였다. 본 논문에서는 각각의 배관을 SA508 Gr.1 a(D)와 SA508 Gr.1a(I)로 명명하였다.

아래의 나타난 표 2.1.1과 2.1.2는 각 배관재에 대한 화학 조성과 열처리 조건을 나타낸 것이다. 화학 조성을 살펴보면, 두 배관재의 화학조성은 Si, Mn, P, S, Al, Cu 등 다소 차이가 있으나 DSA 특성에 영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 판단된다. 열처리 조건을 살펴 보면 두 배관재 모두 퀴칭과 템퍼링 열처리 되었으나, 열처리 시간과 온도는 다소 차이를 보였다. SA508 Gr.1a(D) 배관재의 경우에는 880℃에서 10시간 동안 오스테나이징 후 수냉한 다음 660℃에서 8시간 동안 템퍼링이 진행되었다. SA508 Gr.1a(I) 배관재는 905℃에서 3시간 동안 오스테나이징 후 수냉 후, 640℃에서 6시간 동안 템퍼링 처리가 된 것을 확인 할 수 있다. 즉, SA508 Gr.1a(D)에 비해 SA508 Gr.1a(I) 배관재는 고온에서 짧은 시간 동안 오스테나이징 처리되었으며, 상대적으로 낮은 온도에서 짧은 시간 동안 템퍼링 처리되었다.

#### 2. 시편

인장시편은 표준 인장시편으로 ASTM E8/E8M-15의 기준에 따라 평형부가 32mm(게이지길이 25mm)이고 직경이 5mm인 봉상으로 설계되었다.[9] 그림 2.1.1은 설계 및 가공 완료된 인장시편을 보여주고 있다. 시편은 재료의 종류에 관계없이 배관의 길이 방향으로 채취되었으며, 동일한 배관에서 미세조직의 차이를 확인하기 위해서 배관의 표면부와 중심부에서 채취하였다.



## 제2절 시험 조건 및 절차

### 1. 인장시험 조건

저합금강 배관재에 대한 DSA 특성에 미치는 미세조직의 영향을 파악하기 위한 인장 시험은 다양한 온도 조건에서 수행되었으며, 준정적 시험속도 ( $\dot{\epsilon} = 4.6875 \times 10^{-4} s^{-1}$ )에서 상온~350℃에서 수행되었다. 저합금강 배관재에 대한 DSA 특성에 미치는 미세조직의 영향을 파악을 위한 구체적인 인장시험 조건은 표 2.2.1에 제시되어 있다.

### 2. 시험 장치 및 절차

인장시험에는 고온 전기로와 50kN의 로드셀이 부착된 기계식 만능시험기가 사용되었다. 시편의 변형을 측정에는 게이지길이가 25mm이고 50%의 연신률까지 측정이 가능한 고온용 신률게이지가 사용되었다. 고온 시험의 경우에는 시편의 양쪽 끝단 어깨부에 열전대를 점 용접하여 측정된 온도가 설정온도의  $\pm 2^\circ C$  범위에서 20분 이상 유지된 상태에서 시험이 진행되었다. 그림 2.1.3은 인장시험 장면을 보여주고 있다.

### 3. 미세조직 분석

두 종류의 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재 및 각 배관재의 표면과 중심부에서의 미세조직을 분석하기 위해서 시편 커팅, 마운팅, 폴리싱, 에칭의 과정을 거쳐서 미세조직을 나타내게 한 후 시편들을 광학현미경(OM)과 주사 전자현미경(SEM)으로 촬영을 하였다.

먼저 인장시험이 완료된 시편으로부터 단면을 커팅하여 미세조직 시편을 채취하고, 각 시편들의 크기가 작기 때문에 시편들을 폴리싱에 용이하게 만들기 위해서 각 시편을 콜드 마운팅을 진행하였다. 콜드 마운팅의 경우 다음과 같은 순서로 진행하였다. 첫 번째로 마운팅 지그에 WD-40을 충분히 뿌려준 뒤 지그 바닥 중앙에 시편을 둔다. 두 번째로 종이컵에 Resin과 Epoxy를 25:3 비율로 넣은 후 스틱으로 기포가 생기지 않을 때까지 저어준다. 마지막으로 시편을 놓아 둔 지그에 혼합액을 붓고 12시간 이상 상온

에서 굳힌다. 마운팅이 완료된 시편을 폴리싱하기 위해 사용된 기기는 R&B 사의 METPOL RB204 폴리싱기가 사용되었다. 먼저 각 시편들을 #400-#800-#1200-#1500-#2000 순으로 폴리싱 페이퍼로 시편을 폴리싱 후 DP phaste( $6\ \mu\text{m}$ ,  $1\ \mu\text{m}$ )를 이용하여 micro 폴리싱을 진행하였다. 각각의 폴리싱 과정은 이전 폴리싱의 스크레치가 다 사라질 때까지 진행하였다. 에칭은 페라이트 강에 주로 사용되는 2% nital acid 용액을 사용하였으며, 에칭 시간은 에칭 용액을 뿌려준 후 약 10~13초 정도 에칭을 진행하였다.

표 2.1.1 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 화학조성(wt%)

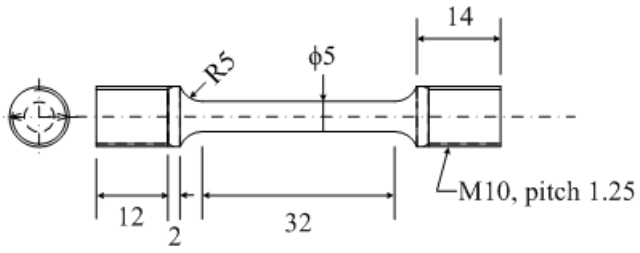
재료 종류	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	V
SA508 Gr.1a(D)	0.25	0.28	1.22	0.007	0.001	0.02	0.05	0.20	0.34	0.06	0.007
SA508 Gr.1a(I)	0.25	0.24	1.09	0.004	0.0020	0.018	0.06	0.15	0.32	0.06	0.002

표 2.1.2 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 열처리 조건

재료 종류	열처리 조건
SA508 Gr.1a(D)	Quenched: 10 hrs @ 880°C & W.C./ Tempered: 8 hrs @ 660°C & A.C.
SA508 Gr.1a(I)	Quenched: 3 hrs @ 905°C & W.C./ Tempered: 6 hrs @ 640°C & A.C.

표 2.2.1 DSA 특성에 미치는 미세조직의 영향 연구를 위한 인장시험 조건

시험 재료	시험 속도	시험 온도	인장시험 개수
SA508 Gr.1a(D) 표면 및 중심부	준정적 시험속도 ( $\dot{\epsilon} = 4.6875 \times 10^{-4} s^{-1}$ )	RT	2
		150 °C	3
		200 °C	3
		250 °C	3
		286 °C	3
		316 °C	3
		350 °C	3
SA508 Gr.1a(I) 표면 및 중심부	준정적 시험속도 ( $\dot{\epsilon} = 4.6875 \times 10^{-4} s^{-1}$ )	RT	2
		150 °C	3
		200 °C	3
		250 °C	3
		286 °C	3
		316 °C	3
		350 °C	3



(a) 시편 도면



(b) 시편 사진

그림 2.1.1 표준 인장시험에 사용된 인장시편

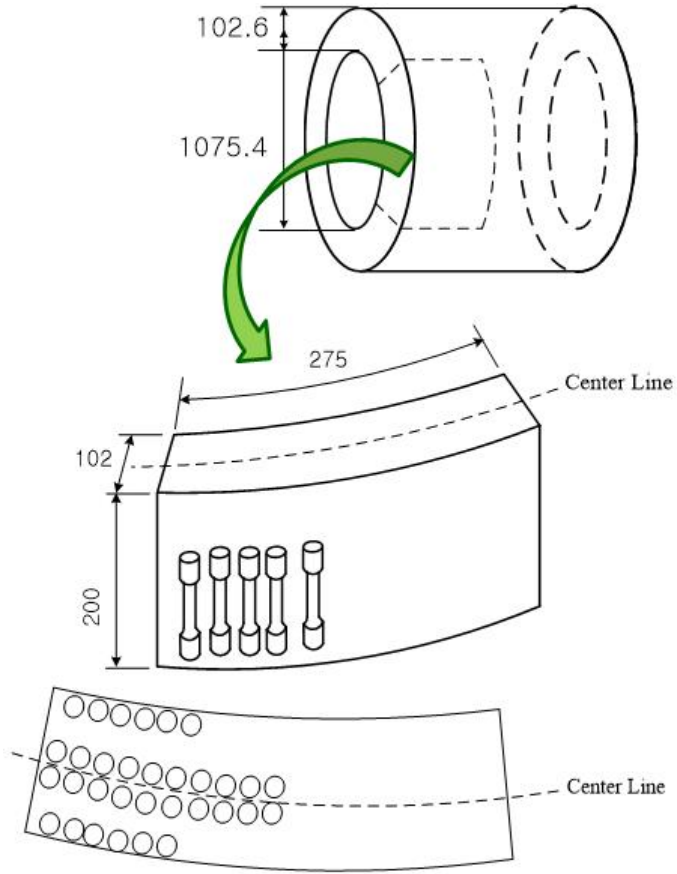


그림 2.1.2 인장시편 채취 위치 및 방향

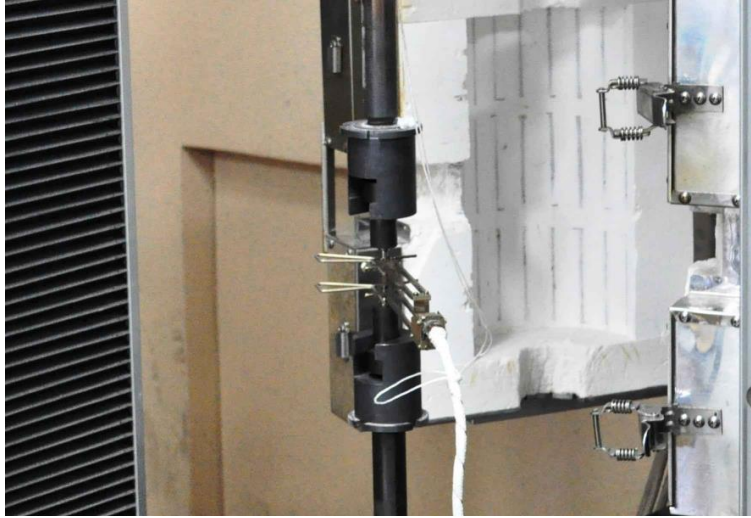


그림 2.1.3 인장시험 장면

## 제3장 시험 결과 및 토의

### 제1절 미세조직 특성 분석

인장시험 결과를 분석하기에 앞서 두 배관재는 동일한 기술기준에 따라 제작되었으나, 미세조직과 열처리 조건이 상이하다. 그림 3.1.1은 각각의 배관재의 표면과 중심부에서의 미세조직을 광학현미경으로 찍은 사진을 나타낸 것이다. 그림 3.1.1에 나타낸 바와 같이 SA508 Gr.1a(D) 배관재는 표면과 중심부 모두 페라이트-펄라이트 구조를 가지고 있고, SA508 Gr.1a(I) 배관재의 경우에는 베이나이트가 주를 이루고 있으며, 표면과 중심부의 결정립의 크기의 차이가 뚜렷하였다. 또한 SA508 Gr.1a(D) 배관재에 비해 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 결정립의 크기가 더 작았다. 그림 3.1.2는 각각의 미세조직을 좀 더 세부적으로 보기 위해서 SEM으로 촬영한 사진을 나타낸 것이다. 그림 3.1.2에서 보는 바와 같이 실제로 SA508 Gr.1a(D) 배관재는 페라이트-펄라이트 구조를 가지고 있었고, SA508 Gr.1a(I) 배관재의 경우에는 베이나이트 구조를 가지고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 표면에서 결정립이 미세하고 베이나이트 분율이 높은 것은 중심부에 비해 표면부에서 쿨링시 냉각속도의 차이가 있었던 것으로 판단된다.

미세조직적인 차이를 분석하기 위해서 제작사별 열처리 과정을 자세히 살펴 보았다. 제작사별로 이러한 미세조직적인 차이는 열처리시 배관재의 두께와 열처리 후 배관의 내·외면 가공량의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, SA508 Gr.1a(D) 배관재가 SA508 Gr.1a(I) 배관재에 비해 두꺼운 상태로 열처리를 하고 열처리 후 내·외면을 많이 가공함으로써 표면과 중심부에서 냉각속도 차이에 따른 미세조직적인 차이가 적은 반면에, SA508 Gr.1a(I) 배관재의 경우에는 상대적으로 얇은 상태로 열처리를 하고 열처리 후 내·외면 가공량이 작으므로 최종 배관재에서 표면과 중심부의 냉각속도 차이에 따른 미세조직 적인 차이가 뚜렷한 것이다.

### 제2절 응력 변형을 곡선

#### 1. SA508 Gr.1a(D) 저합금강 배관재

그림 3.2.1과 3.2.2는 준정적 속도에서 시험된 SA508 Gr.1a(D) 배관재의 표면과 중심부에서의 공칭응력-공칭변형을 곡선을 시험온도에 따라 나타낸 것이다. 시험온도에 관계없이 연신률에서 약간씩 차이를 보이는 것을 제외하면 동일한 온도 조건에서 시험된 공칭응력-공칭변형을 곡선이 거의 일치하였다. 286℃ 이하의 시험온도에서는 항복점



현상이 관찰되었다.

DSA 관점에서 그래프를 살펴 보면 응력-변형을 곡선에서 톱니모양 요철이 보이는데 이를 serration이라 칭하고, 응력-변형을 곡선에서 DSA 증거로 많이 나타난다.[1-3] 이 serration은 DSA 현상의 대표적인 증거로 볼 수 있고, 이러한 serration은 표면부와 중심부 모두 200℃와 250℃에서 관찰되었고, 표면과 중심부 모두 200℃에 비해 250℃에서 더 뚜렷하게 관찰되었다.

위의 내용들을 종합해볼 때, SA508 Gr.1a(D) 배관재는 약 250℃ 부근에서 DSA 현상이 발생하고 있다고 볼 수 있다.

## 2. SA508 Gr.1a(I) 저합금강 배관재

그림 3.2.3과 3.2.4는 준정적 속도에서 시험된 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면과 중심부에서의 공칭응력-공칭변형을 곡선을 시험온도에 따라 나타낸 것이다. SA508 Gr.1a(I) 배관재 또한 시험온도에 관계없이 연신률에서 약간씩 차이를 보이는 것을 제외하면 동일한 온도조건에서 시험된 공칭응력-공칭변형을 곡선이 거의 일치한 것을 확인할 수 있었다.

추가적으로 DSA 측면에서 그래프를 살펴 보면 응력-변형을 그래프에서 SA508 Gr.1a(D) 배관재에서 관찰된 것처럼 serration이 200℃와 250℃에서 관찰되었다. 그러나 SA508 Gr.1a(D) 배관재의 표면과 중심부에서와는 다르게 SA508 Gr.1a(I) 배관재에서는 200℃와 250℃에서의 serration이 큰 차이가 없었다. 또한 serration의 관찰로 미루어 볼 때 SA508 Gr.1a(D) 배관재처럼 SA508 Gr.1a(I) 배관재 또한 약 250℃ 부근에서 DSA 현상이 발생하고 있는 것으로 판단된다.

## 제3절 시험 온도에 따른 인장물성치 변화

앞서 보았던 응력-변형을 곡선에서 각각의 인장물성(강도, 연신률, 단면수축률)을 좀더 정량적으로 비교 해보기위해서 각 배관재의 표면과 중심부에서의 인장물성들을 그래프로 나타내고 이들의 변화를 살펴 보았다.

### 1. 표면부

그림 3.3.1은 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면부의 응력-변형을 곡선으로부터 인장물성들을 시험온도에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모든 시험 온도에서 SA508 Gr.1a(D) 배관재에 비해 SA508 Gr.1a(I) 배관재가 높은 강도와 낮은 연성을 나타내었다. 또한 두 배관재의 경우 시험 온도가 증가함에 따라 인장 강도가 초기에는 감소하였다가 다시 증가하여 최댓값에 도달하는 것을 볼 수 있었다. SA508 Gr.1a(D) 배관재의 경우 최댓값은 316℃에서 나타났고, SA508 Gr.1a(I) 배관재의 경우에는 최댓값은 286℃에서 나타난 것을 확인할 수 있었다. 단면수축률의 경우에는 시험 온도가 증가함에 따라 초기에 감소하였다가 최솟값에 도달한 다음 점차적으로 증가하는 것이 관찰되었다.

일반적으로 시험온도가 증가함에 따라 강도 증가 및 연성 감소는 저합금강 배관재의 DSA 현상의 대표적인 증거이다.[1-3] 따라서 DSA 관점에서 보면 SA508 Gr.1a(D) 배관재는 SA508 Gr.1a(I) 배관재보다 약간 더 높은 온도에서 DSA 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

## 2. 중심부

그림 3.3.2는 두 저합금강 배관재의 중심부에서의 응력-변형을 곡선으로부터 인장물성을 시험 온도에 따라 나타낸 것이다. 표면부에서 나타난 것과 마찬가지로 시험온도에 관계 없이 SA508 Gr.1a(D) 배관재에 비해 SA508 Gr.1a(I) 배관재가 높은 강도와 낮은 연성을 나타내었다.

DSA 관점에서 바라보면 인장강도의 감소 후 증가 및 연성 감소 등으로 이루어 볼 때 표면부에서와 같이 SA508 Gr.1a(I) 배관재에 비해 SA508 Gr.1(D) 배관재가 더 높은 온도 영역에서 DSA 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

## 제4절 DSA 특성에 미치는 미세조직의 영향 분석

저합금강 배관재의 DSA 특성에 미치는 미세조직의 영향을 분석하기 위해서 앞서 살펴 보았던 온도에 따른 인장물성치 변화 및 시편 채취 위치에 따른 인장물성치 변화 그리고 마지막으로 미세조직이 저합금강 배관재의 DSA 특성에 미치는 영향을 분석해 보았다. 먼저 온도에 따른 인장물성치 변화를 살펴 보았다.

## 1. 온도에 따른 인장물성치 변화

앞서 그림 3.3.1과 3.3.2에서 살펴본바와 같이 각각의 표면과 중심부에서의 SA508 Gr.1a(D) 배관재와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 인장물성치의 변화를 살펴 보았다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시편의 위치에 관계없이 모든 시험온도에서 SA508 Gr.1a(D) 배관재에 비해 SA508 Gr.1a(I) 배관재가 뚜렷이 높은 항복강도와 인장강도를 보였으며, 약간 낮은 연신률과 단면수축률을 보였다. SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 뚜렷한 강도 차이는 두 배관재 사이의 미세조직 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

한편 그림 3.3.1과 3.3.2에서 온도에 따른 각 인장물성치의 변화 경향을 살펴보면, SA508 Gr.1a(I)에 비해 SA508 Gr.1a(D)에서 최대 인장강도와 최소 연신률 및 단면수축률에 해당하는 온도가 상대적으로 높다. 즉, SA508 Gr.1a(I)에 비해 SA508 Gr.1a(D) 배관재에서는 DSA 현상이 상대적으로 높은 온도에서 나타났다고 볼 수 있다.

## 2. 시편 채취 위치에 따른 인장물성치 변화

그림 3.4.1과 3.4.2는 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 각각의 표면과 중심부에서의 인장 물성치를 온도에 따라 나타낸 것이다. 그림을 살펴 보면 SA508 Gr.1a(D) 배관재와 SA508 Gr.1a(I) 배관재 모두 표면부가 중심부에 비해 높은 강도와 낮은 연성을 나타내는 것을 관찰되었다. 이러한 강도와 연성의 차이는 두배관재의 표면과 중심부에서의 미세조직적인 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

DSA 관점에서 살펴보면 SA508 Gr.1a(D) 배관재와 SA508 Gr.1a(I) 배관재 모두 표면과 중심부에서의 강도 증가와 연성 감소 및 단면수축률의 감소로 이루어 볼 때, SA508 Gr.1a(D) 배관재의 경우에는 316°C에서, SA508 Gr.1a(I) 배관재의 경우에는 286°C부근에서 DSA 특성이 나타나는 것으로 판단된다. 즉, 각각의 배관재의 표면과 중심부에서의 미세조직적인 차이가 있다하더라도 DSA 현상이 발생하는 온도영역은 동일한게 나타났다.

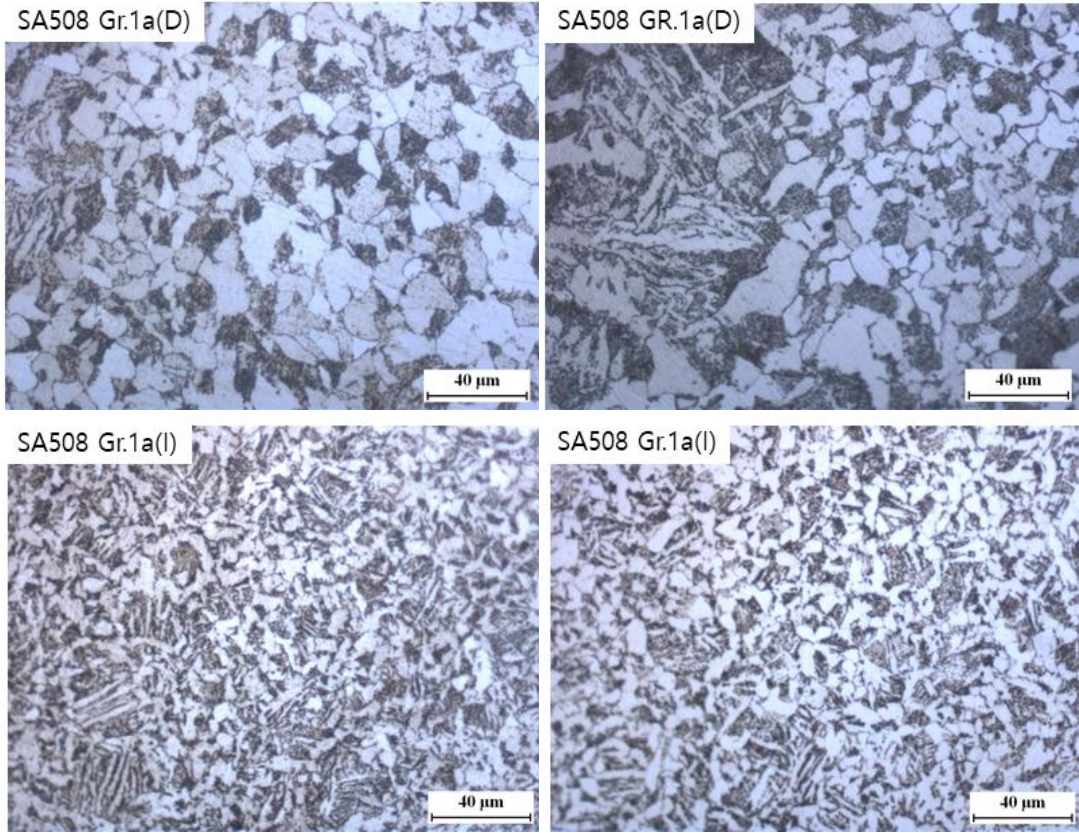
## 3. 미세조직에 따른 DSA 특성 비교 및 분석

그림 4.36과 4.37에서 온도에 따른 각 인장물성치의 변화 경향을 살펴보면, SA508 Gr.1a(I)에 비해 SA508 Gr.1a(D)에서 최대 인장강도와 최소 연신률 및 단면수축률에 해

당하는 온도가 상대적으로 높다. 즉, SA508 Gr.1a(I)에 비해 SA508 Gr.1a(D) 배관재에서는 DSA 현상이 상대적으로 높은 온도에서 나타났다. 동일한 배관재에서 표면부와 중심부에서 인장물성치를 비교하면, 전반적으로 중심부에 비해 표면부에서 강도가 높지만 최대 인장강도와 최소 연신률 및 단면수축률이 나타나는 온도는 위치에 관계없이 서로 일치하였다. 즉, 동일한 배관에서 표면부와 중심부에서 미세조직의 차이는 있을지라도 DSA 특성의 차이는 미미하다.

SA508 Gr.1a(D) 배관재에서 상대적으로 높은 온도 영역에서 DSA 현상이 나타나는 것은 SA508 Gr.1a(D) 배관재가 SA508 Gr.1a(I)에 비해 템퍼링 온도가 높고 시간이 길기 때문이다. 즉, 고온에서 장시간 템퍼링됨에 따라 상대적으로 많은 양의 탄화물과 질화물이 석출되어 기지 내에 원자 상태로 존재하는 탄소와 질소의 수가 감소하였기 때문이다.

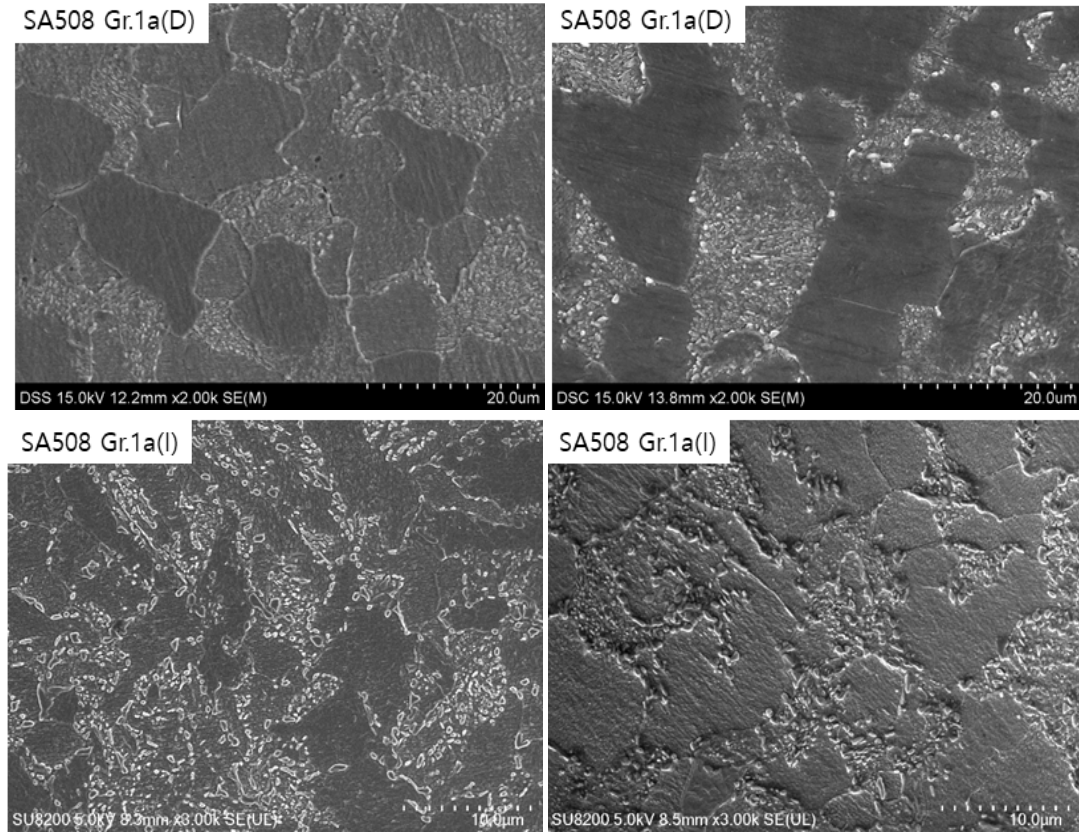
따라서, SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재에 대한 인장시험 결과로부터 퀴칭 후 템퍼링된 저합금강의 경우에는 퀴칭시 냉각 속도 차이에 기인하는 미세조직의 차이는 DSA 특성에 거의 영향을 미치지 않지만, 템퍼링 온도와 시간 차이는 DSA의 특성에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



(a) 표면

(b) 중심부

그림 3.1.1 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면부와 중심부에서 미세조직 비교(OM)



(a) 표면

(b) 중심부

그림 3.1.2 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면부와 중심부에서 미세조직 비교(SEM)

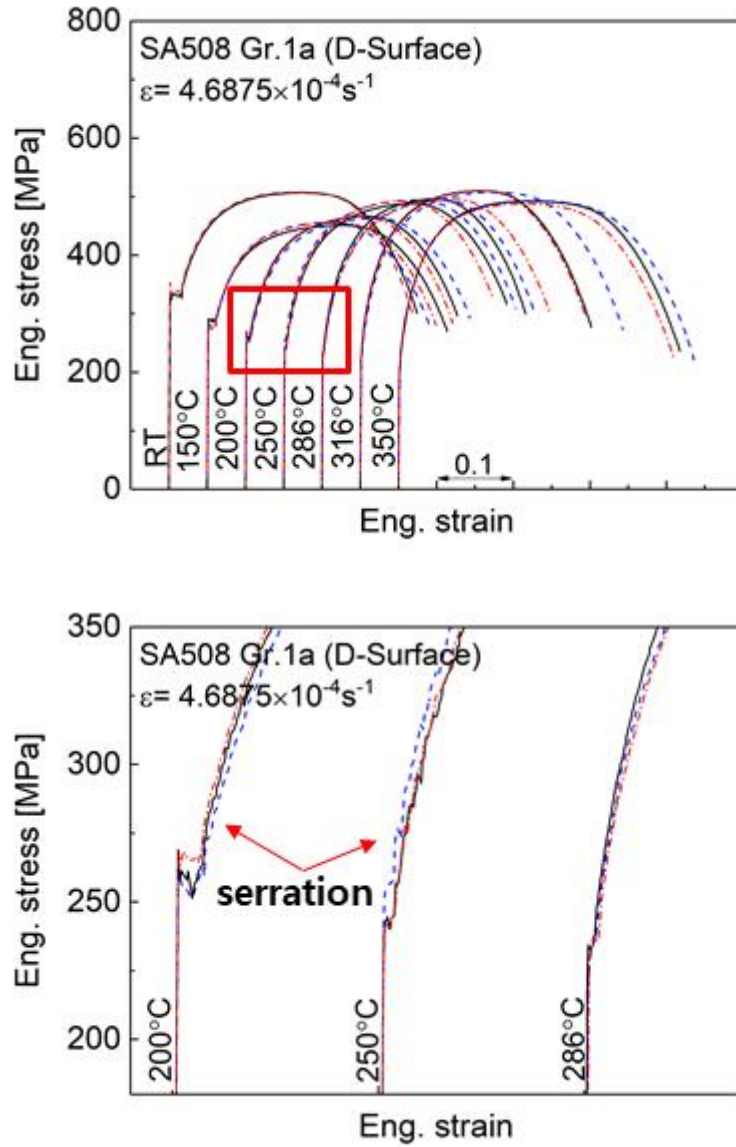


그림 3.2.1 SA508 Gr.1a(D) 배관재의 표면에서의 공칭응력-변형률 곡선

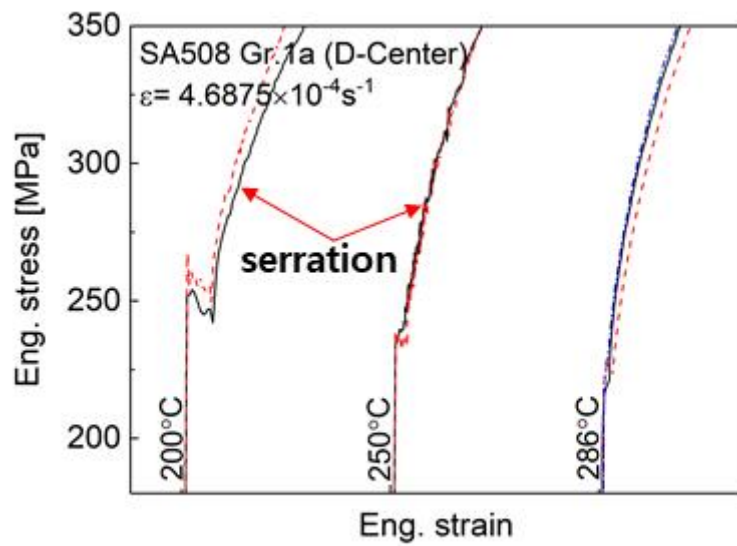
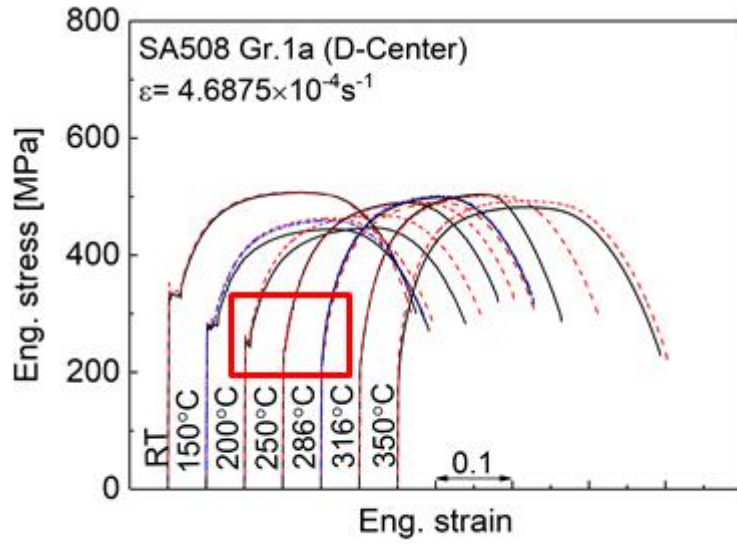


그림 3.2.2 SA508 Gr.1a(D) 배관재의 중심부에서의 공칭응력-변형률 곡선



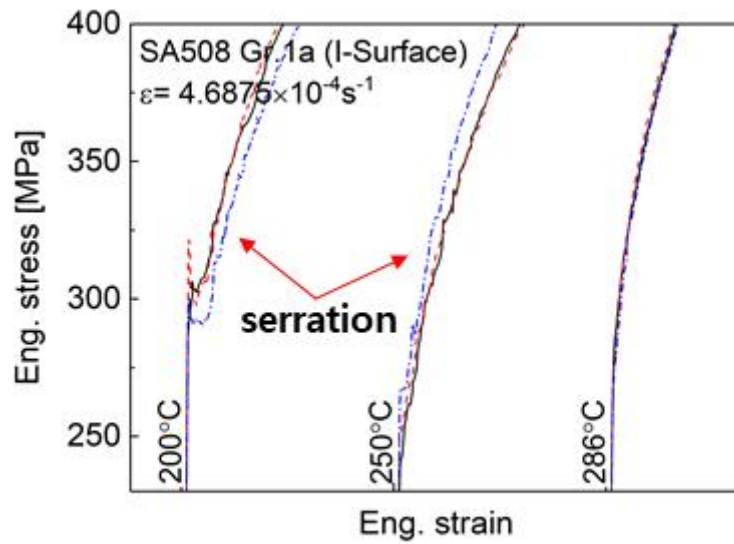
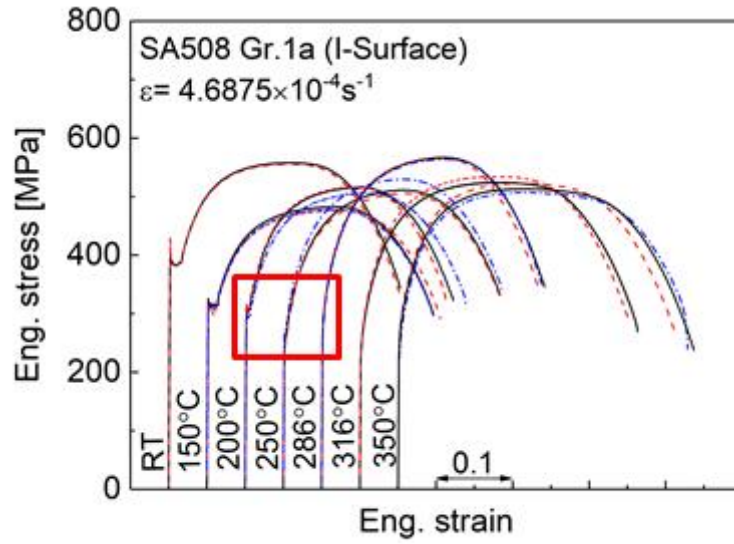


그림 3.2.3 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면에서의 공칭응력-변형률 곡선

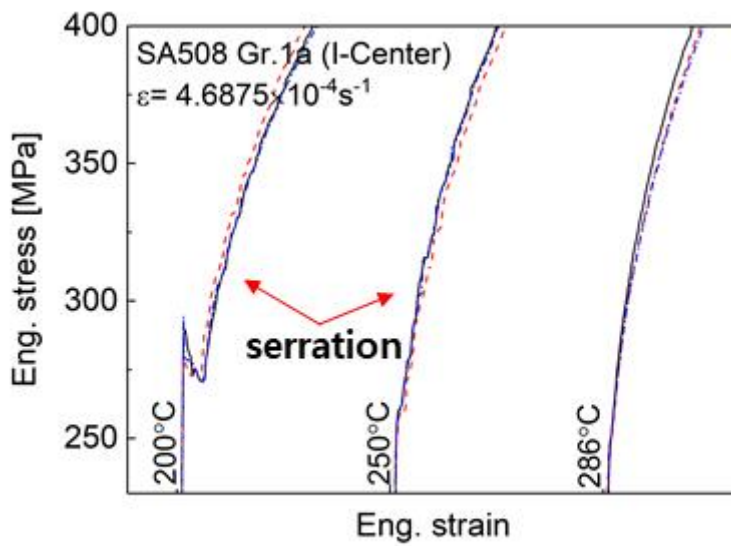
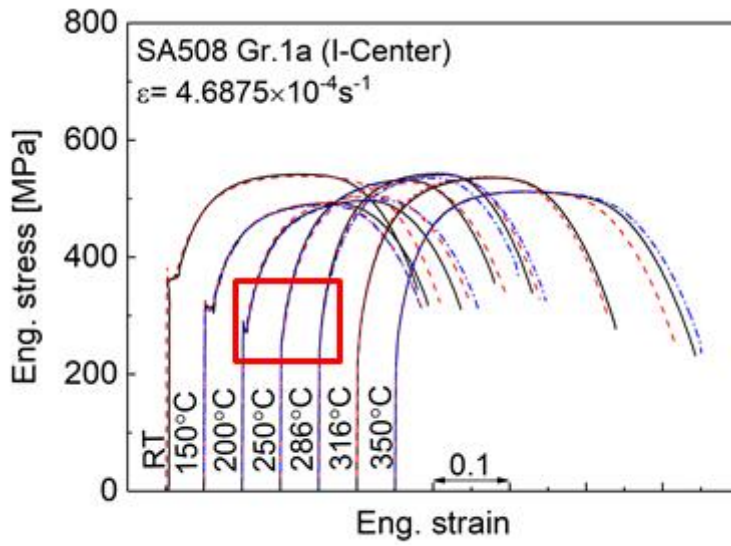
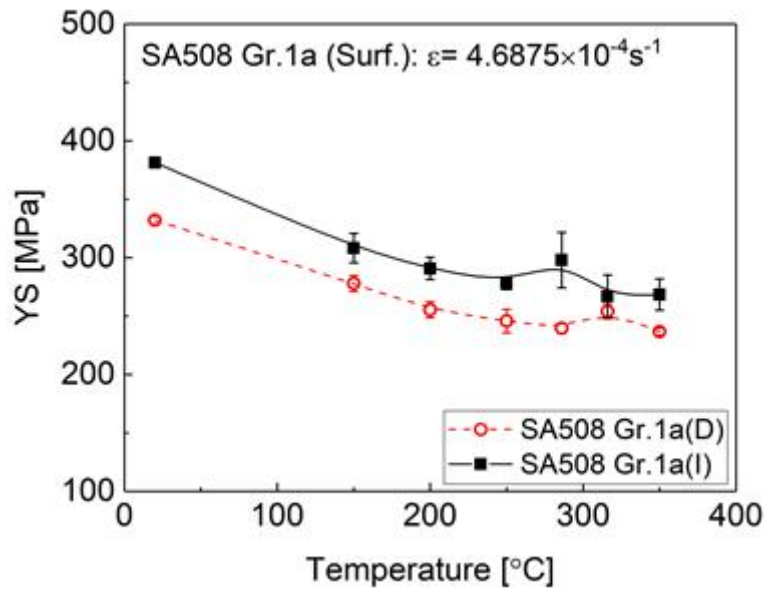
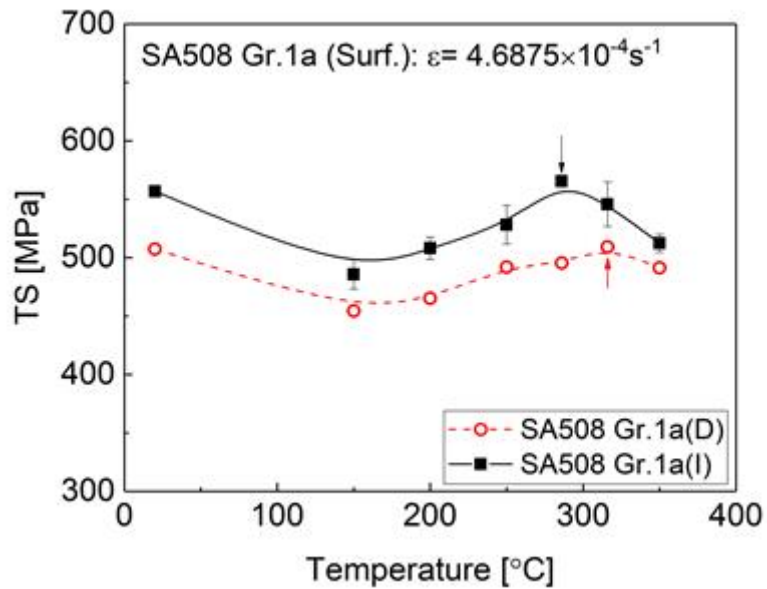


그림 3.2.4 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 중심부에서의 공칭응력-변형률 곡선

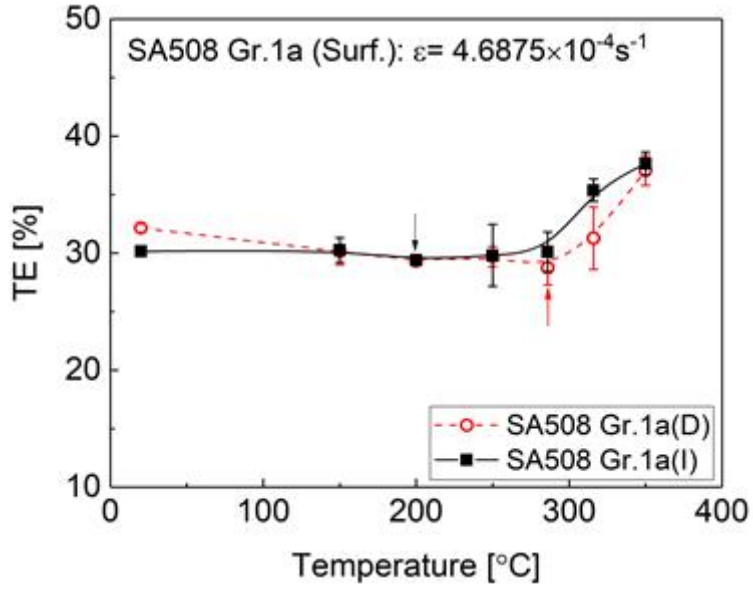


(a) 항복강도

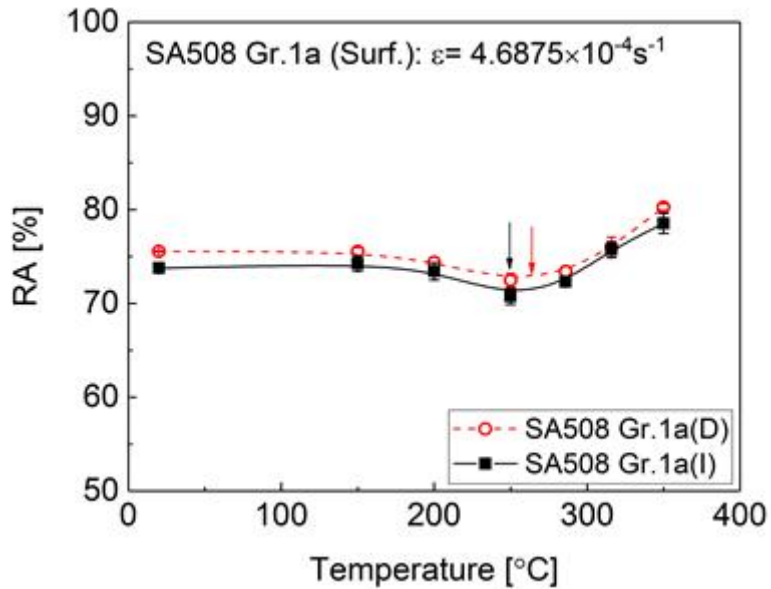


(b) 인장강도

그림 3.3.1 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교

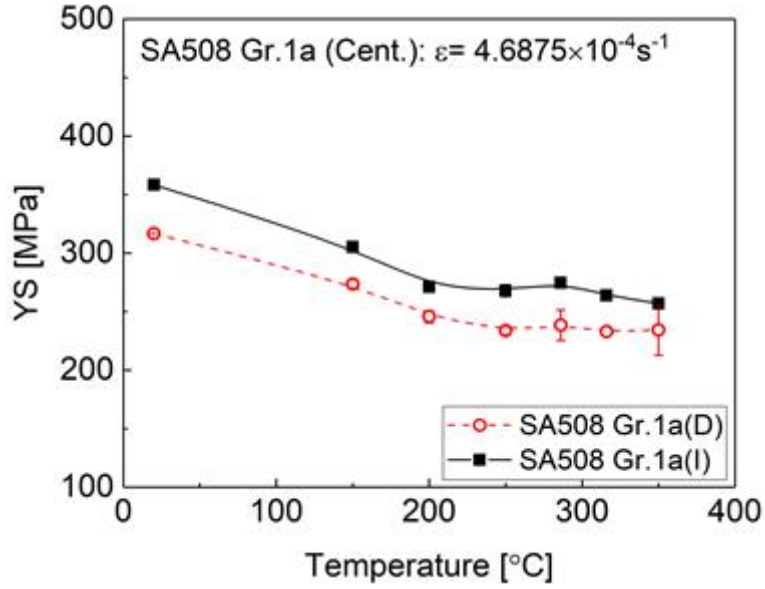


(c) 총연신률

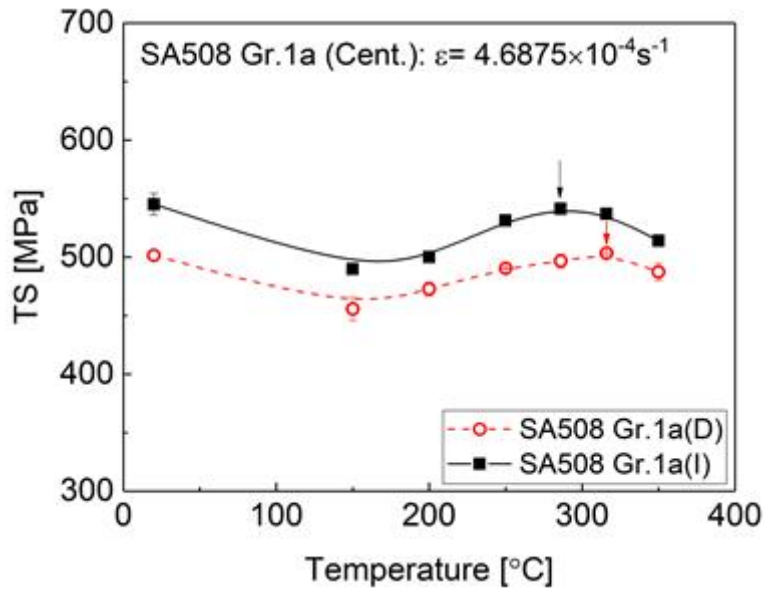


(e) 단면수축률

그림 3.3.1 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교(계속)

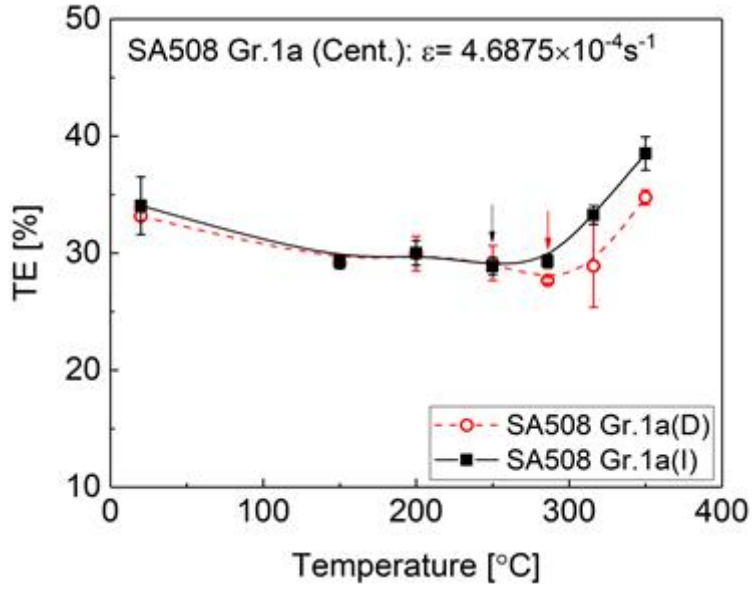


(a) 항복강도

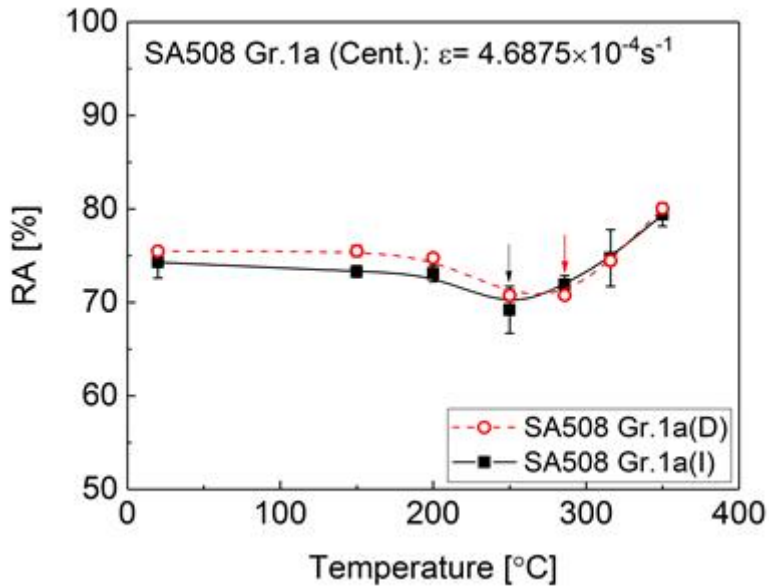


(b) 인장강도

그림 3.3.2 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 중심부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교

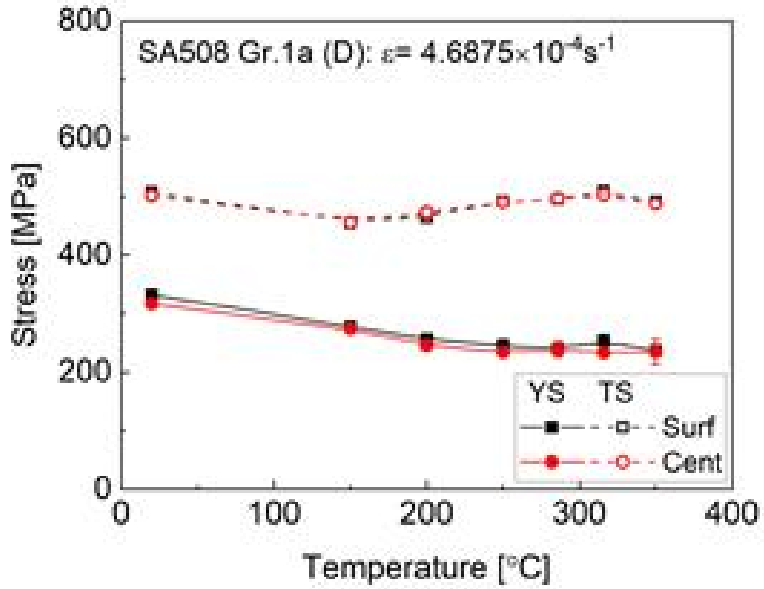


(c) 총연신률

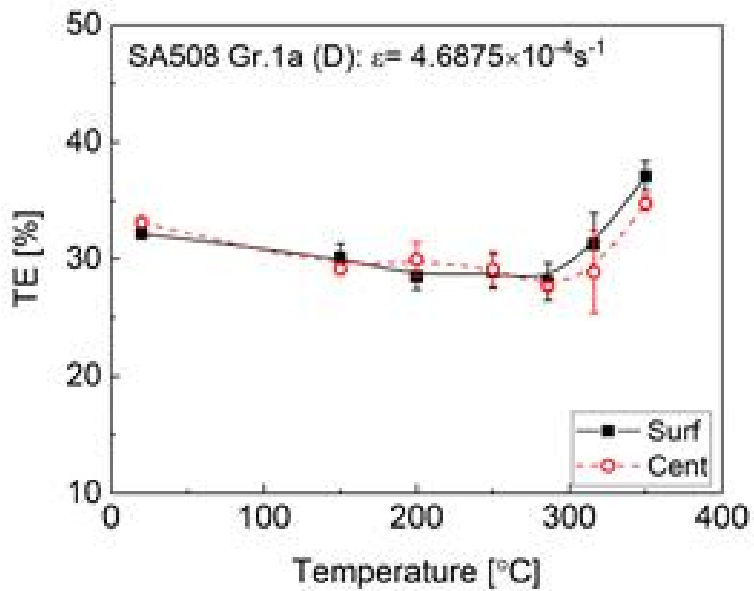


(e) 단면수축률

그림 3.3.2 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 중심부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교(계속)

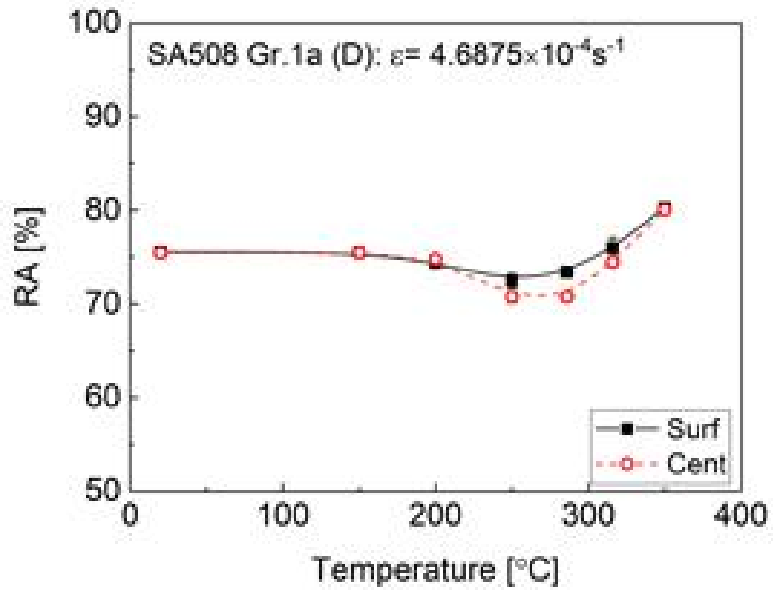


(a) 항복강도



(b) 총연신률

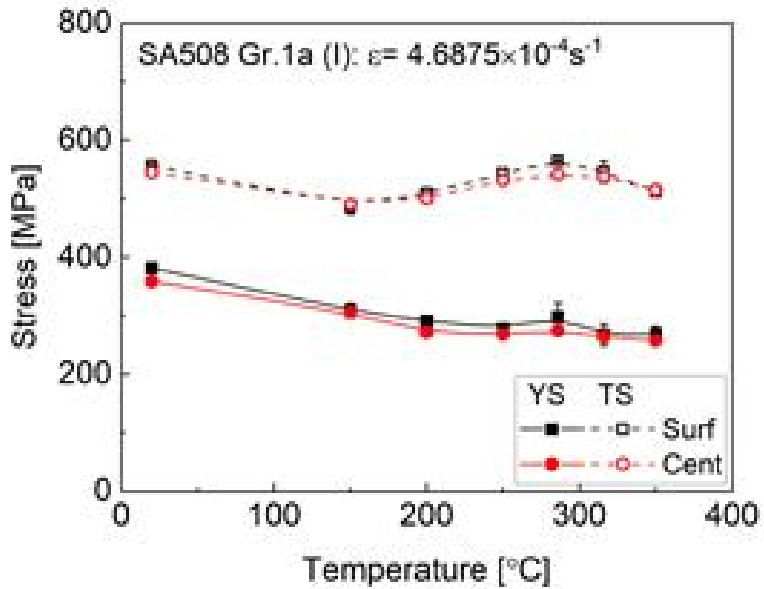
그림 3.4.1 SA508 Gr.1a(D) 배관재의 표면과 중심부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교



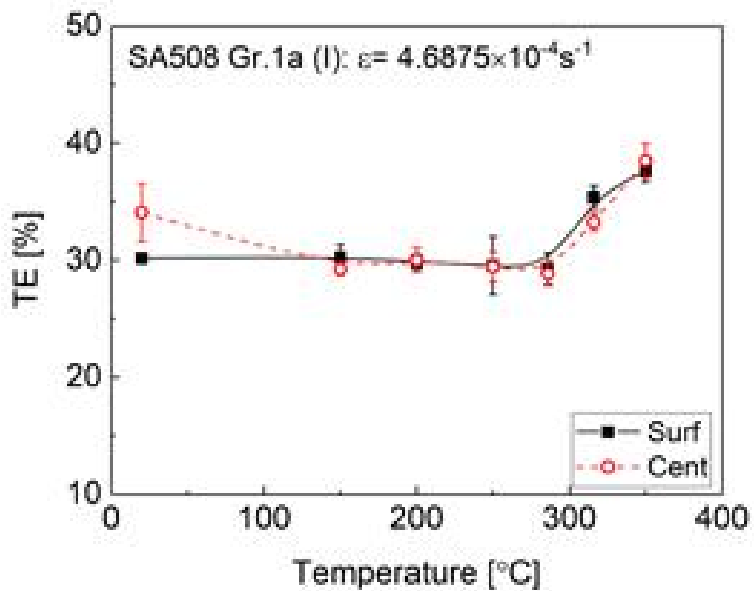
(c) 단면수축률

그림 3.4.1 SA508 Gr.1a(D) 배관재의 표면과 중심부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교(계속)



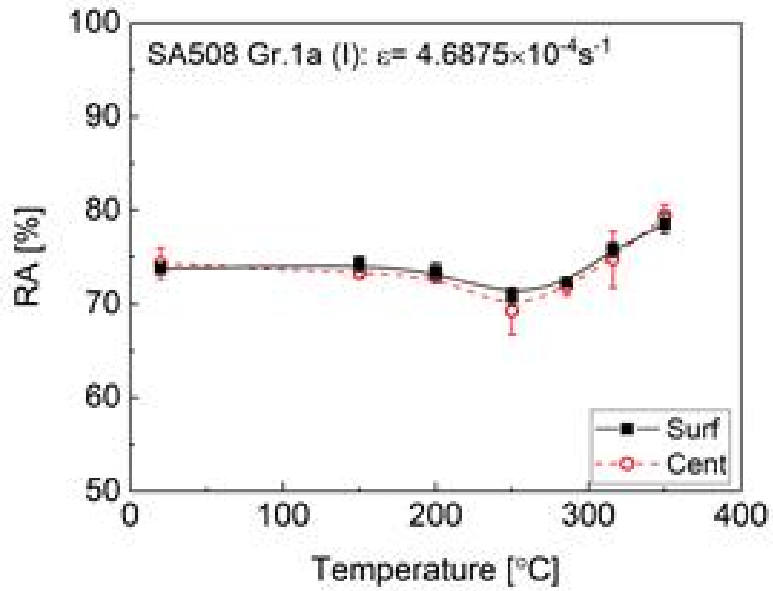


(a) 항복강도



(b) 총연신률

그림 3.4.2 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면과 중심부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교



(c) 단면수축률

그림 3.4.2 SA508 Gr.1a(I) 배관재의 표면과 중심부에서 온도에 따른 준정적 인장물성치 비교(계속)

## 제4장 결론

본 연구에서는 저합금강 배관재의 동적변형시효 특성에 미치는 미세조직의 영향을 연구하기 위해서 동일한 사양의 서로 다른 두 제작사에서 제작한 SA508 Gr.1a(D)와 SA508 Gr.1a(I) 배관재를 확보하였다. 각각의 배관의 표면과 중심부로부터 인장시편을 채취한 후 준정적 시험속도에서 상온~350℃ 온도 조건에서 인장시험을 수행하였다. 추가적으로 각각의 배관재의 표면과 중심부의 미세조직을 관찰 및 분석을 진행하였다.

결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 미세조직의 경우 SA508 Gr.1a(D)에 비해 SA508 Gr.1a(I) 배관재가 결정립의 크기가 작았고, 또한 SA508 Gr.1(D) 배관재는 표면부와 중심부의 미세조직의 차이가 크지 않았지만, SA508 Gr.1a(I) 배관재는 표면부와 중심부의 미세조직의 차이가 있었으며, 중심부에 비해 표면부에서 베이나이트 분율이 높게 나타났다. 두 배관과 각 배관의 표면과 중심부에서의 미세조직의 차이는 퀴칭시에 냉각속도에 의한 것이다.

2) SA508 Gr.1a(D) 배관재가 SA508 Gr.1a(I) 배관재에 비해 낮은 강도와 차이는 미미하나 약간의 높은 연성을 보였다. 또한 SA508 Gr.1a(D) 배관재는 표면부와 중심부의 물성 차이가 미미하였으나, SA508 Gr.1a(I) 배관재는 중심부에 비해 표면부에서 약간 높은 강도와 낮은 연성이 나타났다. 기계적 물성의 차이는 퀴칭시에 발생한 미세조직의 차이 때문이다.

3) 온도에 따른 serration 관찰, 인장강도 증가, 그리고 연성 감소 및 단면수축률 감소 등으로 판단할 때, SA508 Gr.1(D) 배관재가 SA508 Gr.1a(I) 배관재보다 상대적으로 높은 온도에서 DSA 현상이 나타났지만, 동일한 배관재의 DSA 현상이 나타나는 온도는 표면부와 중심부에서 서로 동일하게 나타났다.

4) 퀴칭과 템퍼링된 저합금강의 경우 퀴칭시에 냉각속도에 의해 발생하는 미세조직의 차이는 전반적인 기계적 물성을 지배하였지만, 퀴칭 후 템퍼링 조건이 동일하다면, 퀴칭 시에 형성된 미세조직적인 차이가 있다하더라도 저합금강의 DSA 특성에 거의 영향을 미치지 않았다.

## 참고문헌

- [1] ASME, Materials, ASME B&PV code, Sec. II (2010)
- [2] W. Marschall, R. Mohan, P. Krishnaswamy, G.M. Wilkowski, "Effect of dynamic strain aging on the strength and toughness of nuclear ferritic piping at LWR temperatures," NUREG/CR-6226, BMI-2176 (1994)
- [3] J.H. Yoon, B.S. Lee, Y.J. Oh, and J.H. Hong, "Effects of loading rate and temperature on J-R fracture resistance of an SA508 Gr.70 steel for nuclear piping," Int. J. Press. V es. & Piping, Vol.76, pp.663-670 (1999)
- [4] I.S. Kim, S.S. Kang, "Dynamic strain aging in SA508-class 3 pressure vessel steel," In t. J. Press. Ves. & Piping, Vol.62, pp.123-129 (1995)
- [5] S. Xu, X.Q. Wu, E.H. Han, W. Ke, "Effects of dynamic strain aging on mechanical pr operties of SA508 class 3 reactor pressure vessel steel," Journal of Materials Science, Vol.44, pp.2882-2889 (2009)
- [6] D. Wagner, J.C. Moreno, C. Prioul, "Dynamic strain aging sensitivity of heat affected z ones in C-Mn steels," Journal of Nuclear Materials, Vol.252, pp.257-265 (1998)
- [7] A. Mardoukhi, J. Ramo, T. Vuoristo, A. Roth, M. Hokka, V. T. Kuokkala, "Effects of microstructure on the dynamic strain aging of ferritic-pearlitic steels at high strain rate s," EPJ Web of Conferences 183, 03009 (2018)
- [8] M. Koyama, T. Sawaguchi, K. Tsuzaki, "Overview of Dynamic Strain Aging and Assoc iated Phenomena in Fe-Mn-C Austenitic Steels," ISIJ International, Vol.58, pp.1383-139 5 (2018)
- [9] ASTM, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM E8/ E8M-15 (2015)