



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2017년 2월  
석사학위 논문

# 반복하중 조건에서 원전 배관재의 파괴거동에 미치는 하중속도의 영향

조선대학교 대학원

원자력공학과

최 명 락

반복하중 조건에서 원전 배관재의  
파괴거동에 미치는 하중속도의 영향

Effect of Loading Rate on the Fracture Behavior of  
Nuclear Piping Materials under Cyclic Loading Condition

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

원자력공학과

최 명 락

# 반복하중 조건에서 원전 배관재의 파괴거동에 미치는 하중속도의 영향

지도교수 김 진 원

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

최 명 락

## 최명락의 석사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교    교수              송종순              (인)

위    원    조선대학교    교수              나만균              (인)

위    원    조선대학교    교수              김진원              (인)

2016 11월

조선대학교 대학원

## 목 차

<b>ABSTRACT</b> .....	vi
표 목 차 .....	iii
그 림 목 차 .....	iv
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 재료 및 시험절차 .....	2
제 1 절 시험 재료 및 시편 .....	3
1. 재 료 .....	3
2. 시 편 .....	3
제 2 절 시험조건 및 절차 .....	5
1. 시험조건 .....	5
가. 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험 .....	5
나. 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 .....	5
2. 시험 장치 및 절차 .....	5
가. 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험 .....	5
나. 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 .....	7
다. 미세조직 및 파면 분석 .....	11
제 3 장 시험 결과 및 토의 .....	21
제 1 절 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험 .....	21
1. SA508 Gr.1a 저합금강 배관 .....	21
가. 정규화 하중-변위 곡선 .....	21
(1) 변형속도에 따른 영향 .....	21

나. J-R 곡선 .....	21
(1) 변형속도에 따른 영향 .....	21
<b>2. SA312 TP316 스테인리스 배관 .....</b>	<b>22</b>
가. 정규화 하중-변위 곡선 .....	22
(1) 변형속도에 따른 영향 .....	22
나. J-R 곡선 .....	22
(1) 변형속도에 따른 영향 .....	22
<b>제 2 절 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 .....</b>	<b>23</b>
<b>1. SA508 Gr.1a 저합금강 배관 .....</b>	<b>23</b>
가. 정규화 하중-변위 곡선 .....	23
(1) 하중 비에 따른 영향 .....	23
(2) 변형속도에 따른 영향 .....	24
나. J-R 곡선 .....	24
(1) 하중 비에 따른 영향 .....	24
(2) 변형속도에 따른 영향 .....	25
<b>2. SA312 TP316L 스테인리스 배관 .....</b>	<b>26</b>
가. 정규화 하중-변위 곡선 .....	26
(1) 하중 비에 따른 영향 .....	26
(2) 변형속도에 따른 영향 .....	27
나. J-R 곡선 .....	27
(1) 하중 비에 따른 영향 .....	27
(2) 변형속도에 따른 영향 .....	28
<b>제 3 절 반복하중 조건의 파괴특성 분석 .....</b>	<b>29</b>
1. 파면 분석 .....	29
2. 파단측면 분석 .....	29
<b>제 4 장 결 론 .....</b>	<b>57</b>
<b>【참고문헌】 .....</b>	<b>59</b>

## 표 목 차

표 2.1.1 시험에 사용된 SA508Gr.1a 저합금강의 화학조성 (wt%) .....	12
표 2.1.2 시험에 사용된 SA312 TP316L 스테인리스강의 화학조성 (wt%) .....	12
표 2.2.1 단일하중 조건의 J-R 파괴인성시험에서 고려된 시험조건 .....	12
표 2.2.2 반복하중 조건의 J-R 파괴인성시험에 고려된 하중조건 .....	12



## 그 림 목 차

그림 2.1.1 J-R 파괴인성시험의 채취 방향 .....	13
그림 2.1.2 시험에 사용된 CT 시험편의 형상 .....	14
그림 2.1.3 가공이 완료된 1T-CT 및 0.5T-CT 시험편 .....	15
그림 2.2.1 J-R 파괴인성시험 장면 .....	15
그림 2.2.2 Cyclic J-R 파괴인성시험 장면 .....	16
그림 2.2.3 직류전위차법을 적용한 Cyclic J-R 파괴인성시험 장치의 구성 .....	17
그림 2.2.4 Cyclic J-R 파괴인성시험에서 하중작용 방법 .....	18
그림 2.2.5 직류전위차법을 이용한 균열진전길이 측정 개념도 .....	18
그림 2.2.6 균열진전에 따른 전압강하 측정 예 .....	19
그림 2.2.7 반복하중 조건의 J-R 파괴인성시험에서 하중-하중선 변위 곡선 예 .....	20
그림 3.1.1 하중속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 하중-하중선 변위 곡선 비교 .....	30
그림 3.1.2 변형속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교 .....	31
그림 3.1.3 하중속도에 따른 SA312 TP316L 배관재의 하중-하중선 변위 곡선 비교 .....	32
그림 3.1.4 변형속도에 따른 SA312 TP316L 배관재의 J-R 곡선 비교 .....	33
그림 3.2.1 상온에서 하중 비에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 비교 .....	34
그림 3.2.2 316oC에서 하중 비에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 비교 .....	35
그림 3.2.3 하중 비에 따른 최대하중 및 최대하중까지의 변위 비교 .....	36
그림 3.2.4 상온에서 하중속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선 비교 .....	37
그림 3.2.5 316oC에서 하중속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선 비교 .....	38
그림 3.2.6 상온에서 하중 비에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교 .....	39
그림 3.2.7 316oC에서 하중 비에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교 .....	41
그림 3.2.8 상온의 반복하중 조건에서 하중속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교 .....	43
그림 3.2.9 316oC의 반복하중 조건에서 하중속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교 .....	44
그림 3.2.10 상온에서 하중 비에 따른 SA312 TP316L 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선 비교 .....	45
그림 3.2.11 316oC에서 하중 비에 따른 SA312 TP316L 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선 비교 .....	46

그림 3.2.12 하중속도에 따른 SA312 TP316L 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선 비교 ..... 47  
 그림 3.2.13 상온에서 하중 비에 따른 SA312 TP316L 배관재의 J-R 곡선 비교 ..... 48  
 그림 3.2.14 316oC에서 반복하중 비에 따른 SA312 TP316L 배관재의 J-R 곡선 비교 ..... 49  
 그림 3.2.15 반복하중 조건에서 하중속도에 따른 SA312 TP316L 배관재의 J-R 곡선 비교 ..... 50  
 그림 3.3.1 SA508 Gr.1a 배관재의 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험 후 파면 ..... 51  
 그림 3.3.2 SA508 Gr.1a 배관재의 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 후 파면 ..... 52  
 그림 3.3.3 SA312 TP316L 배관재의 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험 후 파면 ..... 53  
 그림 3.3.4 SA312 TP316L 배관재의 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 후 파면 ..... 54  
 그림 3.3.5 SA508 Gr.1a 배관재의 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험 후 파단측면 미세조직 ..... 55  
 그림 3.3.6 SA508 Gr.1a 배관재의 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 후 파단측면 미세조직 ..... 56

## ABSTRACT

### **Effect of Loading Rate on the Fracture Behavior of Nuclear Piping Materials under Cyclic Loading Condition**

Choi, Myung Rak

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

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

The piping components of nuclear power plants (NPPs) should be designed and maintained to ensure their structural integrity under seismic condition as well as normal operation condition. Thus, the reliability of integrity assessments of piping components under the seismic loading condition is an important issue. In the current integrity assessment procedures, seismic loading is treated as monotonic and applied once; the mechanical properties obtained under the monotonic and quasi-static loading conditions are used for the assessment. However, the seismic load has both dynamic and cyclic characteristics and the mechanical properties under dynamic and cyclic loading conditions are different from those under monotonic and quasi-static loading conditions. Hence it is important to clearly understand the dynamic and cyclic loading characteristics in the mechanical properties of materials. Although a number of studies have investigated the cyclic loading effect on the fracture behavior of materials, the loading rate effect on the fracture behaviour under the seismic loading condition is not clear yet. This study investigated the loading rate effect on the fracture resistance under cyclic loading conditions to clearly understand the fracture behavior of piping materials under seismic conditions. J - R fracture toughness tests were conducted under monotonic and cyclic loading conditions at various displacement rates at room temperature (RT) and the operating temperature of

NPPs(316°C). SA508 Gr. 1a low-alloy steel (LAS) and SA312 TP316L stainless steel (SS) piping materials were used for the tests. The fracture resistance under a reversible cyclic load was considerably lower than that under monotonic load regardless of test temperature, material and loading rate. Under both cyclic and monotonic loading conditions, the fracture behavior of SA312 TP316L SS was independent of the loading rate at both RT and 316°C. For SA508 Gr. 1a LAS, the loading rate effect on the fracture behavior was appreciable at 316°C under cyclic and monotonic loading conditions. However, the loading rate effect diminished when the cyclic load ratio of the load ( $R$ ) was  $-1$ . Thus, it was recognized that the fracture behavior of piping materials, including seismic loading characteristics, can be evaluated when tested under a cyclic load of  $R = -1$  at a quasi-static loading rate.

## 제 1 장 서론

후쿠시마 원전 사고 이후 지진하중 조건에서 원전 기기 및 설비에 대한 건전성 평가의 중요성이 크게 대두 되고 있다. 정상운전 조건과 비교하여 지진하중 조건에서 원전 기기 및 설비에 대한 건전성 평가의 가장 큰 차이는 동적하중이 반복적으로 작용한다는 것이다. 특히, 원자력발전에서 배관은 고에너지의 유체를 이송하는 기기로 사고 조건에서도 기능이 유지되어야 하므로 정상운전뿐 아니라 지진과 같은 과도상태에서도 건전성이 유지 되어야 한다.

따라서, 지진하중 조건에서 신뢰성 있는 기기 및 설비의 건전성 평가를 위해서는 동적 · 반복하중의 특징을 고려하여야 할 것이다. 왜냐하면 지진하중 조건에서 건전성 평가와 관련된 연구들에 의하면 현재 적용되고 있는 지진하중 조건의 기기 건전성 평가 방법은 몇가지 한계를 가지며 이들 중 하나가 지진하중 조건에서 배관의 기계적물성치에 대한 불확실성이다. 일반적으로 기기 건전성 평가에는 준정적 · 단일하중 조건에서 시험된 기계적물성치가 입력으로 작용된다. 그러나, 동적 · 반복하중은 기기 및 설비의 동적 거동과 작용하중의 크기를 평가하는데 직접적으로 영향을 미칠 뿐 아니라 기기 및 설비의 재료물성치에도 영향을 미치기 때문이다.

실제 재료의 종류와 온도에 따라 차이가 있으나 금속 재료의 강도, 연성, 인성과 같은 기계적물성치는 재료의 하중속도에 의존한다[1]. 특히 탄소강이나 저합금강과 같은 페라이트계 금속은 원전 운전온도 범위에서 재료의 기계적물성치가 하중속도에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다[2,3]. 또한, 반복하중의 작용으로 인해 재료의 강도와 파단변형을 그리고 파괴인성이 변화되며, 변화 경향이 재료의 종류와 반복하중의 형태에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 알려졌다[4].

따라서, 본 연구에서는 단일하중 조건에서 동적하중이 원전 배관재의 파괴거동에 미치는 영향과, 지진하중의 특징인 반복하중 조건에서 동적하중이 원전 배관재의 파괴거동에 미치는 영향을 알아보기 위해서 J-R 파괴인성시험을 수행하였다. J-R 파괴인성 시험은 원전에서 주로 사용되고 있는 SA508 Gr. 1a 저합금강(SA508 Gr. 1a low-alloy steel) 배관재 및 SA312 TP316L 스테인리스강(SA312 TP316L stainless steel) 배관재를 시험에 사용하였으며 상온과 원전 운전온도(316℃)에서 시험이 수행되었으며, 지진하중 속도를 포함한 다양한 하중속도와 단일하중 조건과 반복하중 조건에서 시험을 수행하였다. 또한, 시험 결과로부터 반복하중 조건에서 원전 배관재의 파괴거동에 미치는 영

향을 명확하게 설명하기 위해서 주사전자현미경을 이용하여 J-R 파괴인성시험 후 시편의 파면을 관찰하고 광학현미경으로 시편의 파괴측면을 관찰하였다.

## 제 2 장 재료 및 시험절차

### 제 1 절 시험 재료 및 시편

#### 1. 시험재료

본 연구에는 원전 1차측 배관에 주로 사용되는 2종류의 배관재가 적용되었다. 한국 표준형원전의 주냉각재 배관에 사용되는 SA508 Gr.1a 저합금강(SA508 Gr. 1a low-alloy steel) 배관재이며, 다른 하나는 원전의 안전주입 및 안전정지계통 등 원전 1차측 배관으로 흔히 사용되는 SA312 TP316L 스테인리스강(SA312 TP316L stainless steel) 배관재이다.

시험에 사용된 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재는 국내 원전의 주냉각재 배관에 사용되고 남은 잔재로 외경( $D_o$ )이 1075.4mm이고 두께(t)가 102.6mm이며, 재료성적서(Certified Material Test Report, CMTR) 상의 화학조성은 표 2.1.1에 나타난 바와 같다. SA312 TP316L 배관재는 4-inch, Sch.160 (공칭외경=114.3mm, 공칭두께=13.49mm)이며, CMTR상의 화학조성은 표 2.1.2와 같다.

#### 2. 시편

파괴거동에 미치는 변형속도의 영향을 파악하기 위한 J-R 파괴인성시험에는 CT 시편이 사용되었다. 그림 2.1.1에 나타난 것과 같이 SA508 Gr.1a 저합금강 배관에서는 ASTM E1820-09[5]의 기준에 따라 두께가 25.4mm인 표준 1T-CT 시편으로 채취되었고 SA312 TP316L 스테인리스강 배관에서는 배관 크기의 제한으로 인해 두께가 10.6mm인 0.5T-CT 시편이 채취되었다. 배관의 종류에 관계없이 모든 시편은 그림 2.1.2에 나타난 바와 같이 배관의 원주방향을 따라 균열이 진전하도록 가공되었다. 1T-CT 시편과 0.5T-CT 시편 모두 가능한 평면변형을 조건에서 균열이 진전될 수 있도록 하기 위해서 시편의 양쪽 측면에 두께의 10%에 해당하는 깊이의 홈을 가공하였다. 시편의 양쪽 측면에 홈을 가공하기에 앞서 ASTM E1820-09[5]의 기준에 따라 피로예비균열을 생성시켰으며, 피로예비균열 생성 후 기계가공을 포함한 초기 균열길이( $a_0$ )는 시편 폭의 58%(0.58W)가 되도록 하였다. 그림 2.1.3는 가

공이 완료된 CT 시편을 보여주고 있다.



## 제 2 절 시험 조건 및 절차

### 1. 시험조건

#### 가. 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험

J-R 파괴인성시험은 배관재의 종류에 관계없이 모두 상온과 원전 운전온도인 316°C의 공기 분위기에서 수행되었다. 1T-CT 시편이 적용된 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재에 대한 J-R 파괴인성시험에는  $V_{LL}=0.9, 9.0, 90, 2280\text{mm/min}$ 의 하중선 변위속도가 고려되었으며, 0.5T-CT 시편이 적용된 SA312 TP316L 스테인리스강 배관재에 대한 시험에는  $V_{LL}=0.45, 4.5, 45, 1140\text{mm/min}$ 의 하중선 변위속도가 적용되었다. 표 2.2.1는 J-R 파괴인성시험에서 고려된 시험조건을 정리한 것이다.

#### 나. 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험

반복하중 조건 J-R 파괴인성시험은 배관재의 종류에 관계없이 모두 상온과 원전 운전온도인 316°C의 공기 분위기에서 수행되었다. SA508 Gr.1a 저합금강 배관재에 대한 시험에는  $R=-0.5$ 와  $-1.0$ 의 반복하중 비와  $V_{LL}=0.9, 9.0, 90, 2280\text{mm/min}$ 의 하중선 변위속도가 고려되었으며, 0.5T-CT 시편이 사용된 SA312 TP316L 스테인리스강 배관재에 대한 시험에는  $R=-0.5$ 와  $-1.0$ 인 반복하중 비와  $V_{LL}=0.45, 45\text{mm/min}$ 의 하중선 변위속도가 고려되었다. 표 2.2.2는 각 배관재료별로 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 조건을 정리한 것이다.

### 2. 시험 장치 및 절차

#### 가. 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험

J-R 파괴인성시험에는 시편 크기와 시험 속도에 관계없이 10톤 용량의 로드 셀이 부착된 유압식 만능시험기가 사용되었다. 시험에서 하중선 변위는 게이지 길이가 6mm이고 측정 길이가 10mm인 고온용 COD 게이지를 사용하여 측정하였다. 고온 시험을 위해 시편의 양면에 K-type 열전대를 설치하여 시편의 온도를 측정하고 고온전기료를 제어하였다. 시험은 시편의 양면에서 측정한 온도가 설정온도의  $\pm 1^\circ\text{C}$  범위에서 30분 이상 유지된 이후에 시작하였다. 그림 2.2.1은 시험 장치에

0.5T-CT시편이 거치된 상태를 보여주고 있다.

일반적으로 준정적 변형속도에서 수행되는 J-R 파괴인성시험에서는 균열진전길이를 하중제하(Unloading Compliance)법으로 측정한다. 그러나, 본 시험에는 다양한 하중속도에서 J-R 파괴인성시험이 수행되어야 하며, 특히  $V_{LL}=1000\text{mm/min}$  이상의 동적 변형속도에서 시험이 진행되므로 하중제하법을 적용하기 어렵다. 따라서, 본 시험에서는 ASTM 1820-09[5]에 제시된 정규화법(Normalization Method)을 적용하여 균열진전길이를 평가하였다.

정규화법을 적용한 J-R 파괴인성시험에서는 먼저 시험을 통해 하중(P)-변위( $\nu$ ) 곡선을 얻고, 하중과 변위를 식(2.2.1)로 무차원화하여 무차원 하중( $P_N$ )-변위( $\nu'_{pl}$ ) 곡선을 구한다. ASTM E1820-09 기준에 따라 무차원 하중-변위 데이터를 식(2.2.2)로 curve fitting하여 4개의 파라미터(a, b, c, d)를 결정한다. 파라미터(a, b, c, d)가 결정된 식(2.2.2)와 실제 측정된 초기 균열길이, 최종 균열길이, 그리고 하중-변위 데이터로부터 균열진전길이( $\Delta a$ )에 따른 J-적분(J-int)을 계산한다.

$$P_N = \frac{P}{WB \left[ \frac{W - a_b}{W} \right]^{\eta_{pl}}}, \quad \nu'_{pl} = \frac{(\nu - PC)}{W} \quad \text{식(2.2.1)}$$

여기서,  $W$ 는 시편의 폭이며,  $B$ 는 시편의 두께이다.  $a_b$ 는 균열둔화에 따른 균열진전길이가 고려된 균열길이이며,  $C$ 는 각 균열길이에 해당하는 탄성 컴플라이언스이다.

$$P_N = \frac{a + b\nu'_{pl} + c\nu'^2_{pl}}{d + \nu'_{pl}} \quad \text{식(2.2.2)}$$

앞서 구한  $\Delta a$ 와 J-적분 데이터에 식(2.2.3)을 적용하여 curve fitting한 곡선과 0.2mm offset 선의 교점에서  $J_Q$ 를 결정하였다.  $J_Q$ 가  $J_{IC}$  기준을 만족하는 경우에  $J_Q$ 를  $J_{IC}$ 로 결정하였다.

$$J = C_1 \left( \frac{\Delta a}{1mm} \right)^{C_2} \quad \text{식(2.2.3)}$$

### 나. 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험

반복하중 조건 J-R 파괴인성시험에는 고온 챔버와 100kN의 동적 로드셀이 부착된 유압식 만능시험기가 사용되었다. 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험에서 시편의 하중선 변위(load-line displacement)는 시편의 종류에 관계없이 게이지 길이가 6.0mm인 고온용 COD 게이지를 사용하여 측정하였다. 그림 2.2.2은 시편이 시험장치에 거치된 상태를 보여주고 있다.

반복하중 조건 J-R 파괴인성시험에서는 직류전위차(d-c potential drop, d-c PD) 방법을 적용하여 균열진전길이를 측정하였다. 직류전위차법을 적용하여 균열진전길이를 측정하기 위해서는 일정한 전류를 공급하기 위한 직류전류공급기, 균열진전에 따른 전압강하를 측정하기 위한 전압측정기, 그리고 데이터 취득을 위한 DAQ 장치 등이 필요하다. 본 시험에는 25A 용량의 DC Power Supply, 1nV까지 측정이 가능한 Digital Nano-voltmeter, 그리고 DAQ 장치를 구축하여, 시편에 반복하중 조건 하중이 작용되는 동안 하중과 하중선 변위 뿐 아니라 d-c PD 데이터를 취득하였다. 그림 2.2.3은 직류전위차법을 적용하여 J-R 파괴인성시험을 수행하기 위한 시험장치의 구성을 개략적으로 나타낸 것이다.

반복하중 조건 J-R 파괴인성시험에서는 시편에 인장하중과 압축하중을 반복적으로 작용하여 균열을 진전시킨다. 따라서, 그림 2.2.4에 나타낸 바와 같이 인장하중은 변위제어 형태로 일정한 크기의 변위를 설정된 하중선 변위속도로 작용하며, 각 Cycle 마다 작용되는 변위의 크기를 일정하게 증가( $\delta$ )시켜 시편에 가해지는 총 변위를 증가시켰다. 압축하중은 각 cycle 마다 시편에 작용된 최대 인장하중( $P_{max,i}$ )에 하중 비(R)을 곱해서 얻은 압축하중( $P_{min,i} = R \times P_{max,i}$ )을 하중제어 형태로 작용시켰다. 따라서, R=-0.5인 경우에는 최대 인장하중의 50%, R=-1.0인 경우에는 최대 인장하중의 100%인 압축하중이 각 cycle 마다 시편에 작용된다. 반복하중이 작용되는 경우에 재료의 파괴거동은 작용되는 cycle당 변위증분의 크기에 영향을 받는

것으로 알려져 있다[6]. 따라서, 본 실험에서는 재료 종류와 시험 온도 및 속도에 관계없이 일정한 변위증분( $\delta=0.15\text{mm}$ )을 적용하였다. 시편에 작용되는 압축하중의 크기(하중 비)에 따라 cycle당 균열진전길이가 다르므로, 본 시험에서는 시편의 형상에 관계없이 하중비가  $R=-0.5$ 일 때 51회,  $R=-1.0$ 일 때 27회의 반복하중을 작용하였다.

앞서 언급한 바와 같이 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험에는 d-c PD법을 적용하여 균열진전길이를 측정하였다. d-c PD 방법을 적용한 균열진전길이 측정 방법은 그림 2.2.5에 개념적으로 나타낸 것과 같이 균열진전 방향에 수직인 방향으로 일정한 세기의 전류(I)를 흘려주고 균열개구부에서 전압을 측정함으로써, 균열진전에 따른 전기저항의 변화를 전압 변화로 측정하는 방법이다. 전류를 가해주는 위치와 전압을 측정하는 위치에 따라 측정되는 값이 민감하게 변화하므로 일정한 위치를 선정하는 것이 중요하다. 본 시험에는 시편 종류에 관계없이 그림 2.2.5에 나타낸 것과 같이 시편의 중심(W/2)에 전류를 가해주고 노치 입구에서 전압강하를 측정하였다. 균열진전에 따른 평균적인 전압강하 값을 얻기 위해서, 전압 측정 단자를 시편의 상·하부에 서로 교차되도록 연결하였다. 전류는 시편의 상·하부 중심에 전선을 나사로 연결하여 공급하고, 전압강하는 0.5mm 백금선을 노치 입구에 연결하여 측정하였다.

d-c PD법을 적용하여 균열진전길이를 측정할 때 시편의 전기적인 절연이 매우 중요한데, 본 시험에서는 그림 2.2.3에 나타낸 것과 같이 시편과 시험기를 연결하는 지그를 절연함으로써 시편을 전기적으로 절연하였다. 본 시험에서 균열진전길이를 측정하기 위해 시편에 흘려준 전류의 세기는 시험 온도와 시편 크기에 따라 차이가 있는데, 초기 전압강하 값이  $100\sim 200\ \mu\text{V}$  범위가 되도록 전류의 세기를 설정하였다. 그림 2.2.6은 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험에서 측정된 전압강하 데이터의 예로 균열진전에 따른 전압의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 단일하중이 작용되는 경우와 달리 반복하중이 작용됨에 따라 d-c PD 데이터가 진동한다. 그러나, 균열이 진전함에 따라 전압강하가 전체적으로 증가하는 경향을 잘 보여주고 있으며, 그림 2.2.6(b)에서 알 수 있는 바와 같이 압축하중에 의한 균열달힘 현상도 d-c PD 데이터에서 보여주고 있다. 그림 2.2.6(b)의 d-c PD vs. 하중선 변위 곡선에 표시된 점들은 그림 2.2.7의 하중-하중선 변위 곡선에서 하

중재하(unloading) 직전의 d-c PD 값으로 각 Cycle에서 J-적분을 계산하기 위한 균열길이 계산에 적용된다.

측정된 전압강하 데이터로부터 균열진전길이를 계산하는 데는 다양한 방법이 적용될 수 있는데, 일반적으로 식(2.2.4)의 Johnson's 식이 널리 사용되고 있다. 본 시험에서도 기본적으로 Johnson's 식을 적용하여 균열길이를 계산하였다. 식(2.2.4)을 적용하여 균열길이를 계산할 때, 전압강하 데이터에서 실제 균열이 진전하기 시작하는 전압( $V_{ini}$ )과 이때의 균열길이( $a_{ini}$ )를 결정하여 식(2.2.4)에 대입하여야 한다. 본 시험에서는 그림 2.2.6(b)에 나타낸 것과 같이 d-c PD vs. 하중선 변위 곡선에서 하중선 변위에 따른 d-c PD 데이터의 증가율이 변화되는 지점을 균열진전 시작 위치로 결정하였다[7].

$$\frac{a}{W} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cosh\left\{\left(\frac{V}{V_{ini}}\right) \cosh^{-1} \left[ \frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi a_{ini}}{2W}\right)} \right]\right\}} \right] \quad \text{식 (2.2.4)}$$

여기서  $a$ 는 균열길이,  $W$ 는 시편의 폭,  $V$ 는 전압강하 값,  $y$ 는 시편에서 전압강하를 측정하는 위치(그림 2.2.5 참조)이다.  $V_{ini}$ 와  $a_{ini}$ 는 시편에서 균열이 진전하기 시작할 때의 전압강하 값과 균열길이이며,  $a_{ini}$ 는 피로균열생성으로 만들어진 초기 균열길이( $a_o$ )에 균열둔화에 의해 성장된 균열길이( $\Delta a_b$ )가 추가된 것이다.

균열진전이 시작되지 전까지( $a_{ini}$  미만 영역)의 균열길이는 식(2.2.5)과 같이 ASTM E1820-09[5]의 정의에 따라 계산되었으며,

$$a = a_o + \Delta a_b = a_o + \frac{J}{2\sigma_Y}, \text{ for } a < a_{ini} \quad \text{식 (2.2.5)}$$

여기서  $\sigma_Y = (YS + UTS)/2$ 이다.

실제 균열이 진전하는  $a_{ini}$ 부터 최종 균열길이( $a_f$ )까지의 균열길이는 식(2.2.4)에 전압강하 데이터를 입력하여 계산하였다. 최종적으로 시편을 파단하여 측정된 초

기 균열길이( $a_o$ )와 최종 균열길이( $a_f$ )를 적용하여 균열진전 길이( $\Delta a$ )를 보정하였다.

본 연구에서는 반복하중이 작용되는 경우에도 일반적으로 J-R 파괴인성시험에서 적용하고 있는 것과 같은 방법으로 J-적분을 계산하였다. 즉, ASTM E1820-09[5]에 따라 그림 2.2.7과 같이 주어지는 반복하중 조건 하중-하중선 변위 데이터에서 하중제하 직전의 하중과 균열길이를 이용하여, 식(2.2.6)~식(2.2.8)에 따라 J-적분 값을 계산하였다. 계산된 J-적분 값을 균열진전길이( $\Delta a$ )에 따라 나타냄으로써 J-R 파괴인성곡선을 얻었다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad \text{식 (2.2.6)}$$

여기서,

$$J_{el(i)} = \frac{(K_{(i)})^2(1-\nu^2)}{E} \quad \text{식 (2.2.7)}$$

$$K_{(i)} = [P_{(i)}/(BB_N W)^{0.5}]f(a_{(i)}/W)$$

$$f(a_{(i)}/W) =$$

$$\frac{[(2 + a_{(i)}/W)(0.886 + 4.64(a_{(i)}/W) - 13.32(a_{(i)}/W)^2 + 14.72(a_{(i)}/W)^3 - 5.6(a_{(i)}/W)^4]}{(1 - a_{(i)}/W)^{3/2}}$$

$$J_{pl(i)} = \left[ J_{pl(i-1)} + \left( \frac{\eta_{(i)}}{b_{(i)}} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \left[ 1 - \gamma_{(i)} \frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i)}} \right] \quad \text{식 (2.2.8)}$$

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + [P_{(i)} - P_{(i-1)}][\delta_{pl(i)} - \delta_{pl(i-1)}]/2$$

$$\eta_{(i)} = 2.0 + 0.522b_{(i)}/W$$

$$\gamma_{(i)} = 1.0 + 0.76b_{(i)}/W$$

여기서  $A_{pl(i)}$ 는 주어진 하중제하 시점(i)에서 하중-하중선 변위 곡선 아래의 소성성분 면적,  $a_{(i)}$ 는 주어진 하중제하 시점에서 균열길이,  $b_{(i)}$ 는  $(W - a_{(i)})$ ,  $B_N$ 는 측면 홈을 제외한 실제 두께,  $\delta_{pl(i)}$ 는 주어진 시점에서 하중선 변위의 소성성분,  $P_{(i)}$

는 주어진 하중제하 시점에서 하중이다.

반복하중이 작용되는 경우에는 그림 2.2.7에서 알 수 있는 바와 같이 하중-하중선 변위 곡선의 아래 면적이 단일하중 조건과 큰 차이를 보인다. 즉, 압축하중이 작용되므로 음의 하중이 작용되는 면적이 존재하며, 인장하중이 작용되는 영역에서도 면적이 중첩되는 영역이 존재한다. 여기서는 ASTM E1820-09[5]의 하중제하법에 의한 J-적분 계산 방법을 그대로 적용하여 인장하중이 작용되는 영역의 면적만 계산하였으며, 면적이 중첩되는 경우에도 새롭게 증가하는 하중 vs. 하중선 변위 곡선의 면적만 J-적분 계산에서 고려하였다.[6, 8, 9]

#### 다. 파면 및 미세조직 분석

파면 분석은 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 후 파면부분을 시편에서 채취하여 주사현미경(SIRION사 Model FEI)이 사용되었으며, 10.0kV의 가속전압을 가하였다.

파괴측면 분석은 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 후 파면 분석한 시편 파면부분을 측면으로 자른 후 측면의 미세조직을 관찰하였다. 미세조직 관찰에는 광학현미경(OLYMPUS사 Model GX51)이 사용되었다. 에칭액은 2% nital(2mL nitric acid + 98mL ethyl alcohol)을 사용하였다.

표 2.1.1 시험에 사용된 SA508Gr.1a 저합금강의 화학조성 (wt%)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu
0.223	1.27	0.009	0.0047	0.225	0.242	0.118	0.026	0.003	0.024	0.200

표 2.1.2 시험에 사용된 SA312 TP316L 스테인리스강의 화학조성 (wt%)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.021	1.25	0.038	0.004	0.45	12.21	16.31	2.06

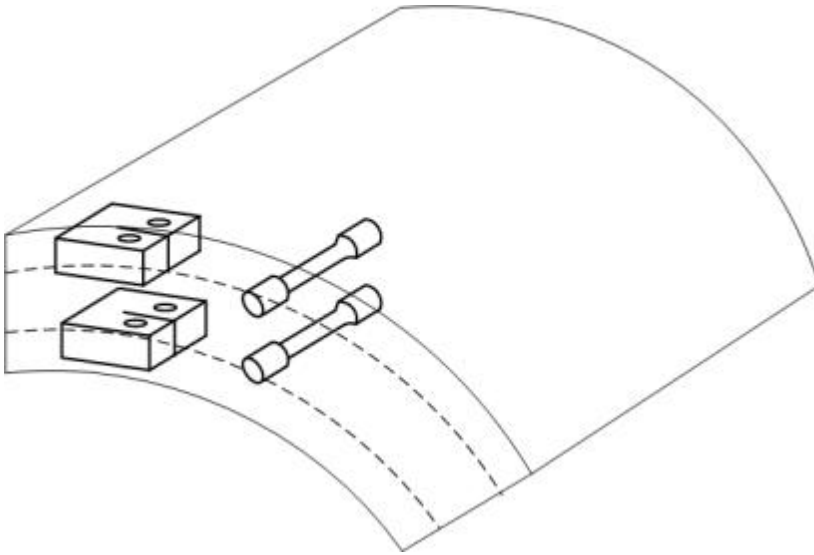
표 2.2.1 단일하중 조건의 J-R 파괴인성시험에서 고려된 시험조건

시험 재료	시험온도	하중선 변위속도 ( $V_{LL}$ )
SA508 Gr.1a 저합금강 배관재	RT	0.9, 9.0, 90, 2280mm/min
	316°C	0.9, 9.0, 90, 2280mm/min
SA312 TP316L 스테인리스강 배관재	RT	0.45, 4.5, 45, 1140mm/min
	316°C	0.45, 4.5, 45, 1140mm/min

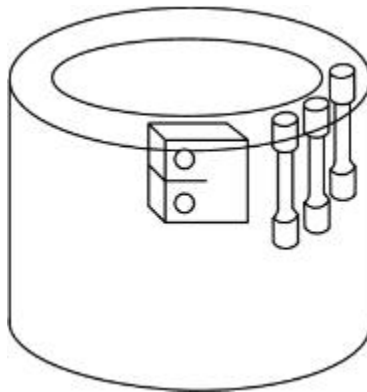
표 2.2.2 반복하중 조건의 J-R 파괴인성시험에 고려된 하중조건

재료 종류	반복하중 비(R)	하중선 변위속도 ( $V_{LL}$ )
SA508 Gr.1a 저합금강 배관재	-0.5, -1.0	0.9, 9.0, 90, 2280 mm/min
SA312 TP316 스테인리스강 배관재	-0.5, -1.0	0.45 mm/min
	-1.0	45 mm/min



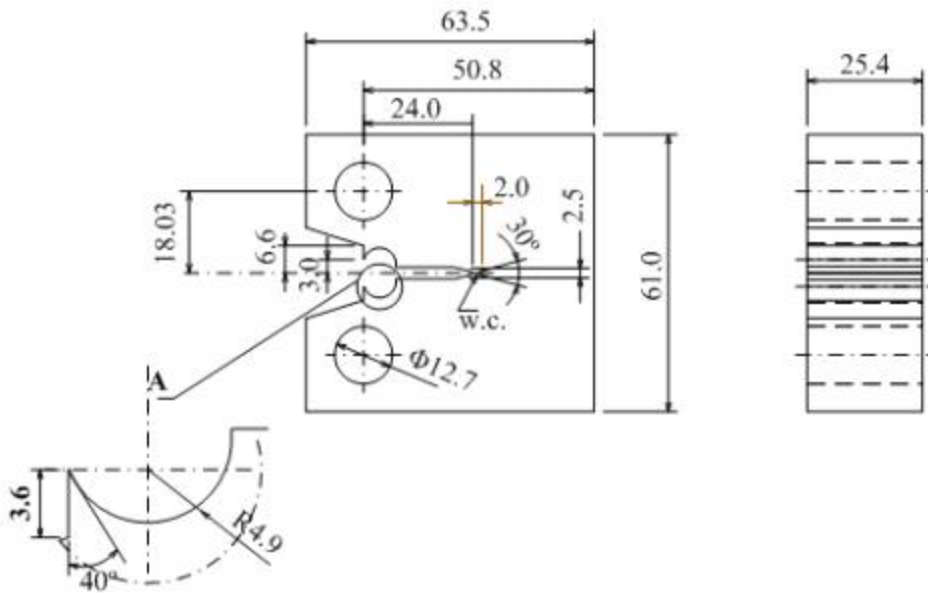


(a) SA508 Gr.1a 저합금강 배관재

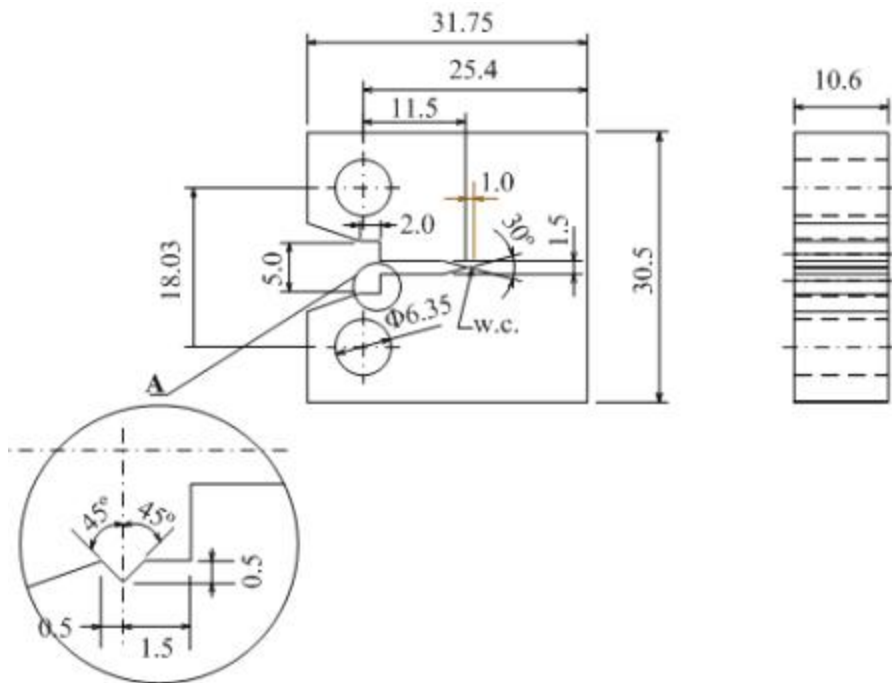


(b) SA312 TP316 스테인리스강 배관재

그림 2.1.1 J-R 파괴인성시험의 채취 방향



(a) 1T-CT



(b) 0.5T-CT

그림 2.1.2 시험에 사용된 CT 시편의 형상

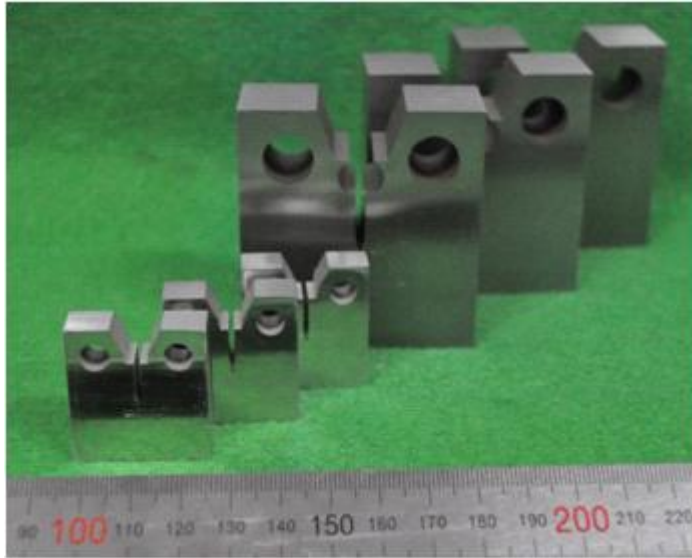


그림 2.1.3 가공이 완료된 1T-CT 및 0.5T-CT 시편

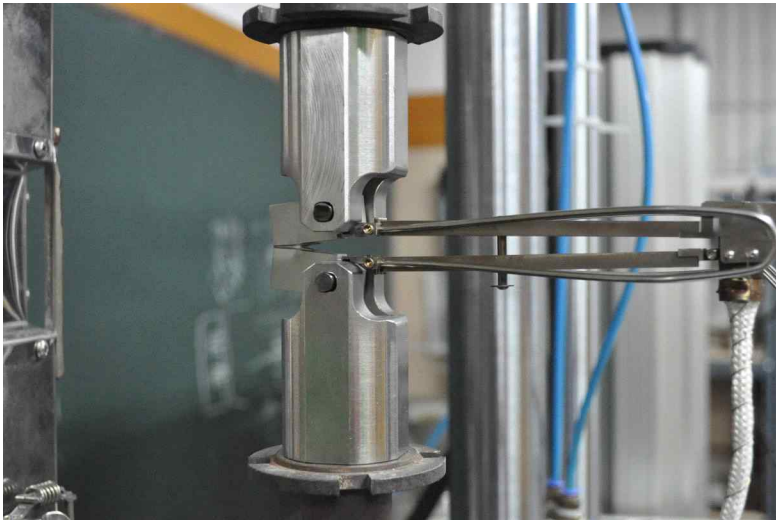


그림 2.2.1 J-R 파괴인성시험 장면



그림 2.2.2 Cyclic J-R 파괴인성시험 장면

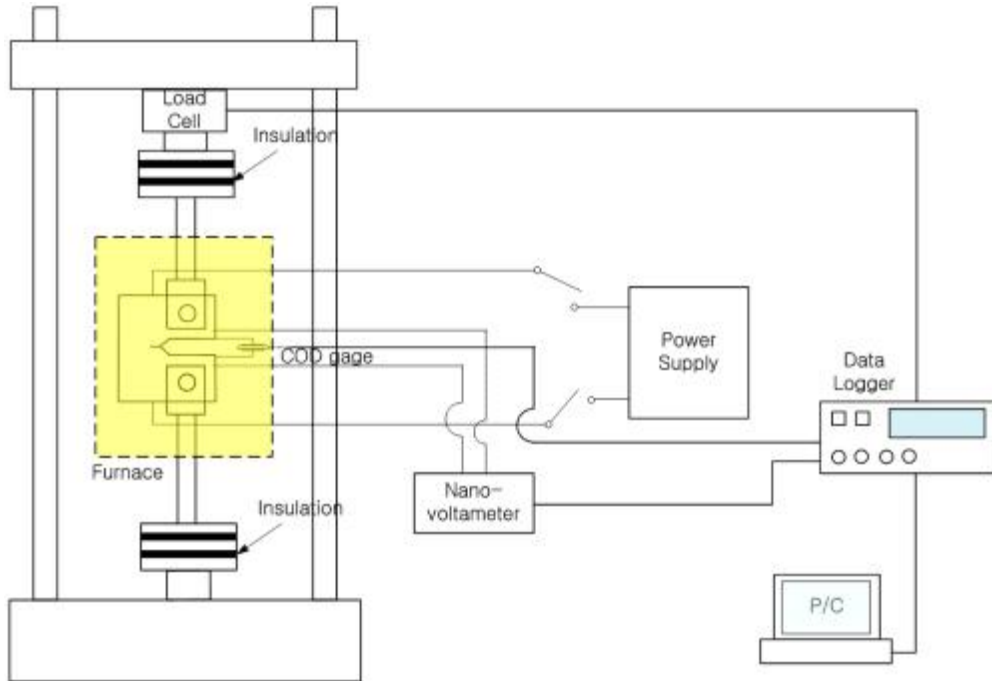


그림 2.2.3 직류전위차법을 적용한 Cyclic J-R 파괴인성시험 장치의 구성

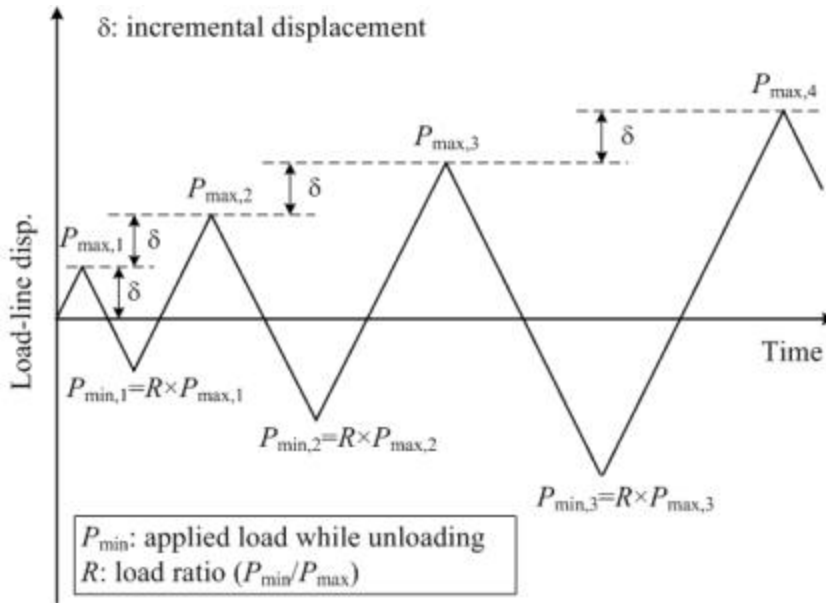


그림 2.2.4 Cyclic J-R 파괴인성시험에서 하중작용 방법

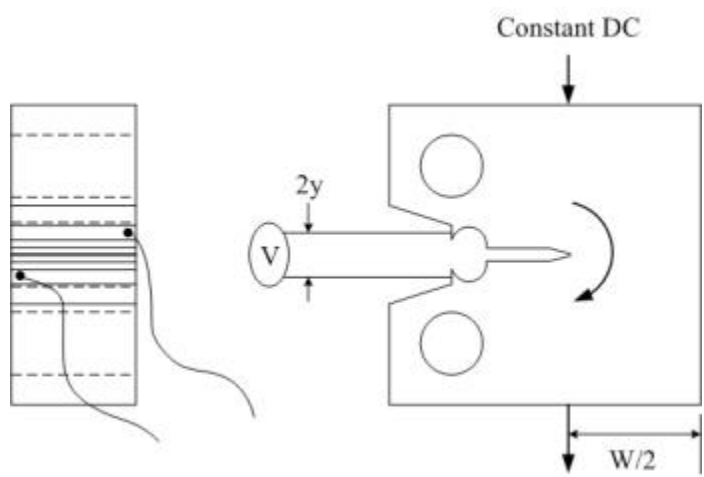
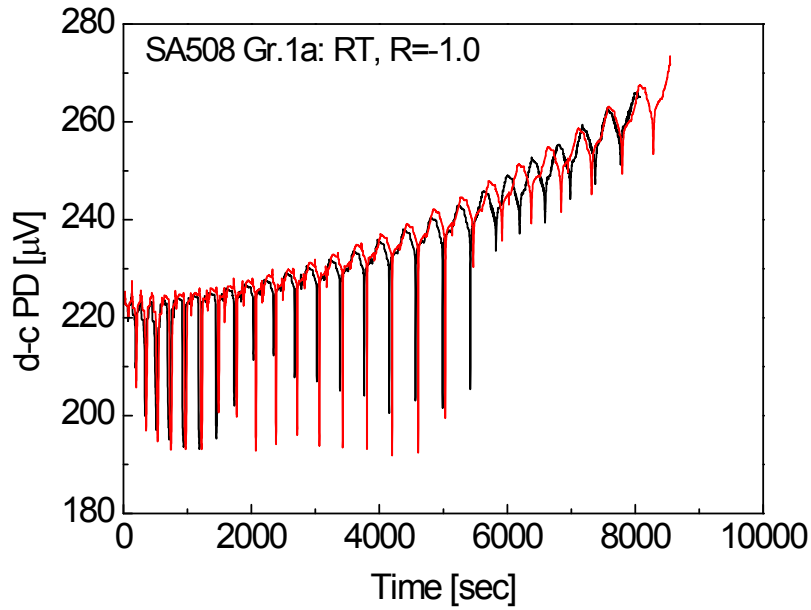
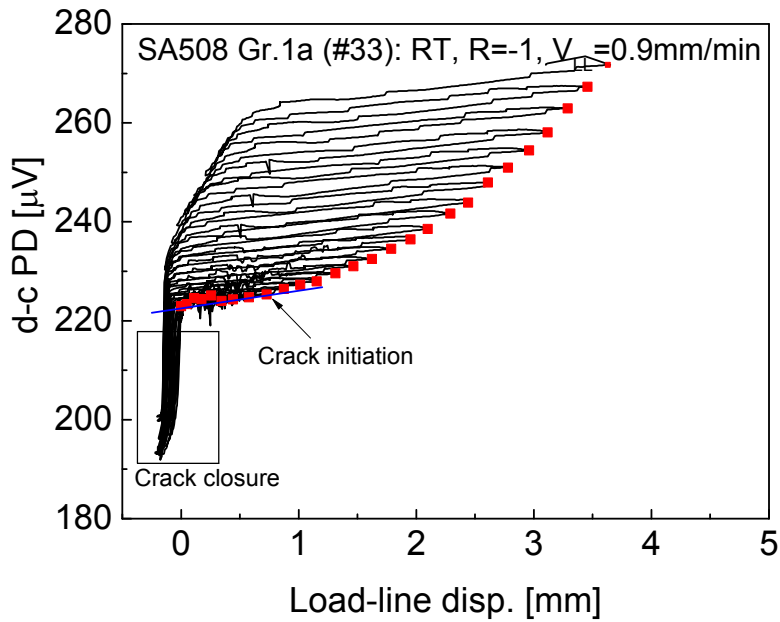


그림 2.2.5 직류전위차법을 이용한 균열진전길이 측정 개념도



(a) d-c PD vs. time



(b) d-c PD vs. Load-line displacement

그림 2.2.6 균열진전에 따른 전압강하 측정 예

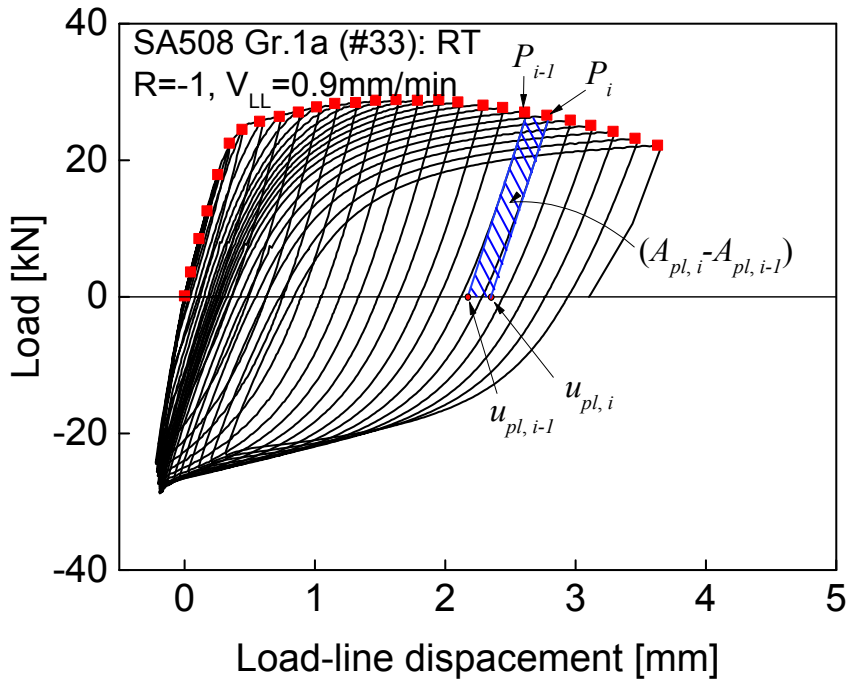


그림 2.2.7 반복하중 조건의 J-R 파괴인성시험에서 하중-하중선 변위 곡선 예



## 제 3 장 시험 결과 및 토의

### 제 1 절 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험

원전 배관재의 파괴거동에 미치는 하중속도의 영향을 파악하기 위해서, 지진하중 속도를 포함하는 다양한 변형속도를 고려한 단일하중 조건에서 SA508 Gr.1a 저합금강과 SA312 TP316L 스테인리스강 배관재에 대한 단일하중 조건 J-R 파괴인성 시험을 상온과 원전 운전온도인 316°C 에서 수행하였다.

#### 1. SA508 Gr.1a 저합금강 배관

##### 가. 정규화 하중-변위 곡선

###### (1) 변형속도에 따른 영향

그림 3.1.1에서 알 수 있는 바와 같이 상온의 경우 단일하중 조건에서는 변형속도가 증가함에 따라 하중-하중선 변위 곡선에서 하중이 뚜렷이 증가하는 경향을 보였다. 원전 운전온도인 316°C에서는 단일하중 조건의 하중-하중선 변위 곡선은 변형속도에 따라 약간씩 차이를 보였으나 차이가 크지 않은 것을 알 수 있다.

##### 나. J-R 곡선

###### (1) 변형속도에 따른 영향

그림 3.1.2은 상온과 원전 운전온도인 316°C 에서 수행된 J-R 파괴인성시험에서 구한 단일하중 조건의 J-R 곡선을 변형속도에 따라 나타낸 것이다. 그림 3.1.2(a)에서 알 수 있는 것과 같이 상온에서는 변형속도에 따라 J-R 곡선의 차이가 거의 없는 것으로 확인되었다. 따라서, SA508 Gr.1a 배관재의 경우 상온에서 변형속도에 따라 강도는 증가하고 연성이 뚜렷이 감소하지만, 파괴거동에 미치는 변형속도의 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다.

한편, 원전 운전온도인 316°C에서는 그림 3.1.2(b)에서 알 수 있는 바와 같이 차이가 크지는 않지만 변형속도에 따라 J-R 곡선이 다소 변하는 것을 확인하였다. 준정적 변형속도인  $V_{LL}=0.9\text{mm/min}$ 에 비해  $V_{LL}=9.0$ 과  $90\text{mm/min}$ 에서 낮은 J-R 곡선을 보였으며,  $V_{LL}=2280\text{mm/min}$ 에서는 다시 증가하여  $V_{LL}=0.9\text{mm/min}$ 와 유사한 J-R 곡

선을 보였다. 즉, SA508 Gr.1a 배관재의 경우, 316°C에서는 준정적 변형속도나 동적 변형속도가 아닌 중간 변형속도에서 가장 낮은 파괴인성을 보였으며, 동적 변형속도에서는 준정적 변형속도와 유사한 파괴인성을 보이는 것으로 파악되었다. 이와 같은 파괴인성의 변형속도 의존성은 재료의 동적변형시효 특성에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 원전 운전온도에서 SA508 Gr.1a 배관재의 파괴거동은 동적 변형시효 현상으로 인해 재료의 일반적인 변형속도 의존성과 다른 변형속도 의존성을 보이기 때문에 기존의 변형속도 의존성 모델로는 지진하중 조건에서 배관의 파괴거동을 정확히 예측하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

## 2. SA312 TP316 스테인리스 배관

### 가. 정규화 하중-변위 곡선

#### (1) 변형속도에 따른 영향

그림 3.1.3에서 알 수 있는 바와 같이 상온의 경우에는 단일하중 조건에서 변형속도가  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에서  $45\text{mm/min}$ 로 증가함에 따라 하중-하중선 변위 곡선이 약간씩 증가하는 경향을 보였다. 원전 운전온도인 316°C에서는 단일하중 조건에서 하중-하중선 변위 곡선은 변형속도 관계없이 거의 일치하였다.

### 나. J-R 곡선

#### (1) 변형속도에 따른 영향

그림 3.1.4는 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 수행된 SA312 TP316L 배관재에 대한 단순하중 조건의 J-R 곡선을 변형속도에 따라 나타낸 것이다. 그림 3.1.4(a)에서 알 수 있는 것과 같이 상온의 J-R 곡선에서 변형속도에 따른 차이가 뚜렷하지는 않지만, 변형속도가 증가함에 따라 J-R 곡선이 약간 증가하여  $V_{LL}=45\text{mm/min}$ 에서 최대를 보이고  $V_{LL}=1140\text{mm/min}$ 에서는 다시 감소하여 준정적 변형속도와 유사한 값을 보였다. J-R 파괴인성에서는 변형속도 의존성이 상대적으로 미미한 것을 알 수 있다. 한편, 원전 운전온도인 316°C에서는 그림 3.1.4(b)에 나타낸 것과 같이 변형속도에 따른 J-R 곡선의 차이가 거의 나타나지 않았다. 즉, 316°C에서는 파괴인성이 변형속도에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 따라서, SA312 TP316L 배관재는 지진하중 조건에서 건전성 평가시 재료의 변형거동

과 파괴거동에 미치는 변형속도의 영향을 심각하게 고려할 필요가 없는 것으로 파악되었다.

## 제 2 절 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험

원전 배관재의 파괴거동에 미치는 반복하중의 영향을 파악하기 위해서, 지진하중 속도를 포함하는 다양한 변형속도를 고려한 반복하중 조건에서 SA508 Gr.1a 저합금강과 SA312 TP316L 스테인리스강 배관재에 대한 Cyclic J-R 파괴인성시험을 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 수행하였다.

### 1. SA508 Gr.1a 저합금강 배관

#### 가. 정규화 하중-변위 곡선

##### (1) 하중 비에 따른 영향

그림 3.2.1와 3.1.2는 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 시험된 SA508 Gr.1a 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선을 시험에 적용된 반복하중의 하중 비에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험온도와 시험에 적용된 변형속도에 관계없이 단일하중( $R=1.0$ )에 비해 반복하중이 작용되는 경우, 하중-하중선 변위 곡선에서 최대하중과 최대하중까지의 변위가 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 최대하중까지의 변위는 하중 비가 감소할수록 뚜렷이 감소하는 경향을 보였다.

그림 3.2.3은 하중 비에 따른 최대하중과 최대하중까지의 변위의 감소를 보다 정량적으로 비교하기 위해서, 각 시험 조건에서 주어진 최대하중과 최대하중까지의 변위를 하중 비에 따라 나타낸 것이다. 그림 3.2.3(a)에서 알 수 있는 바와 같이 최대하중은 시험온도와 변형속도에 관계없이 단일하중( $R=1.0$ )에 비해  $R=-0.5$ 에서 뚜렷이 감소하였으며,  $R=-0.5$ 에 비해  $R=-1.0$ 에서는 최대하중이 감소하였으나 감소 폭은 크지 않았다. 한편, 그림 3.2.3(b)에서 하중 비에 따른 최대하중까지의 변위를 살펴보면, 하중 비가 감소함에 따라 최대하중까지의 변위가 거의 선형적으로 감소하였다. 즉, 단일하중에 비해  $R=-0.5$ 에서 최대하중까지의 변위가 뚜렷이 감소하였을 뿐만 아니라 하중 비가  $R=-0.5$ 에서  $R=-1.0$ 로 감소한 경우에도 변위의 감소는 뚜렷하였다. 따라서, 이들 결과로부터 결함이 존재하는 배관에 지진하중과 같이 반복하중이 작용되면 단일하중에 비해 배관의 하중지지능력이 감소하며 변형수용능력

도 뚜렷이 감소한다는 것을 알 수 있다.

(2) 변형속도에 따른 영향

반복하중 조건에서 SA508 Gr.1a 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선에 미치는 변형속도의 영향을 살펴보기 위해서, 동일한 하중 비에서 변형속도에 따른 하중-하중선 곡선을 비교하였다. 그림 3.1.1(a)에서 알 수 있는 바와 같이 상온의 경우 단일하중 조건( $R=1.0$ )에서는 변형속도가 증가함에 따라 하중-하중선 변위 곡선에서 하중이 뚜렷이 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 그림 3.2.4에서 알 수 있는 바와 같이 인장-압축의 반복하중이 작용되는 경우( $R=-0.5, -1.0$ )에는 변형속도에 따른 하중-하중선 변위 곡선의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. 원전 운전온도인  $316^{\circ}\text{C}$ 에서는 그림 3.1.1(b)에서 알 수 있는 바와 같이 단일하중 조건의 하중-하중선 변위 곡선은 변형속도에 따라 약간씩 차이를 보였으나 차이가 크지 않은 반면, 그림 3.2.5에서 알 수 있는 바와 같이 반복하중이 작용되는 경우에는 준정적 시험 속도인  $V_{LL}=0.9\text{mm/min}$ 에 비해  $V_{LL}=9\text{mm/min}$ 와  $2280\text{mm/min}$ 에서 하중-하중선 변위 곡선의 하중이 뚜렷이 감소하는 경향을 보였다. 특히  $V_{LL}=9\text{mm/min}$ 에서는 반복하중의 cycle 수가 증가함에 따라 하중의 차이가 더욱 뚜렷해지는 것을 알 수 있다. 이것은 단일하중 조건에서 파악된 바와 같이 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재는  $316^{\circ}\text{C}$  일 때  $V_{LL}=9\text{mm/min}$  변형속도 부근에서 동적변형시효 현상이 나타나며, 이로 인해 다른 변형속도에 비해 파괴인성이 낮기 때문으로 판단된다. 이러한 차이는 J-R 파괴인성곡선에서 명확히 관찰될 것으로 예상된다.

**나. J-R 곡선**

(1) 하중 비에 따른 영향

그림 3.2.6와 3.2.7은 J-R 파괴인성시험에서 구한 상온과  $316^{\circ}\text{C}$ 에서 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선을 하중 비에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험온도와 변형속도에 관계없이 단일하중( $R=1.0$ )에 비해 반복하중이 작용되는 경우에 J-R 곡선이 뚜렷이 감소하였으며, J-R 곡선의 감소는 하중 비가 낮을수록 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

반복하중에 따른 J-R 곡선의 감소는 시험온도와 변형속도, 그리고 균열진전길이

에 따라 약간씩 차이가 있는데, 균열이 1mm 진전( $\Delta a = 1.0mm$ ) 위치에서 J-R 곡선을 비교하면 전반적으로  $R=-0.5$ 의 J-R 곡선은 단일하중에 비해 약 30% 정도 감소하였다. 또한,  $R=-1.0$ 의 경우에는 단일하중에 비해 J-R 곡선이 60-70% 까지 감소한 것을 알 수 있다.

인장과 압축의 반복하중이 가해지는 경우에 재료의 J-R 파괴인성이 감소하는 것은 압축하중에 의해 균열선단이 예리해져 응력집중에 의한 균열전파가 쉽기 때문인 것으로 알려져 있으며, 따라서 압축하중이 클수록 J-R 파괴인성이 더욱 감소하는 것이다[6, 8, 9]. 그러나, 최근 일부 연구결과에서는 인장과 압축의 반복하중이 작용되는 경우에는 J-적분 계산에서 압축하중에 의한 에너지를 고려하지 않았기 때문에 J-R 곡선이 낮게 평가되는 것이며, 반복하중이 작용되는 경우에 압축하중에 의한 에너지 손실을 고려하여 J-적분을 계산하면 단일하중 조건과 유사한 J-R 파괴인성을 보이는 것으로 보고하고 있다[7]. 따라서, 인장-압축이 반복되는 반복하중 조건에서 수행된 Cyclic J-R 파괴인성시험 결과의 해석은 추가적인 파괴역학적 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

## (2) 변형속도에 따른 영향

반복하중 조건에서 J-R 파괴인성에 미치는 변형속도의 영향을 살펴보기 위해서, 각각 하중 비에서 변형속도에 따른 J-R 곡선을 비교하였다. 그림 3.1.2, 3.2.8에서 알 수 있는 바와 같이 상온의 경우, 변형속도가  $V_{LL} = 0.9mm/min$ 에서  $2280mm/min$ 로 증가할지라도 단일하중 뿐 아니라 압축하중이 작용되는 반복하중 조건에서 변형속도에 따른 J-R 곡선의 차이는 거의 없었다.

반면, 원전 운전온도인  $316^{\circ}C$ 에서는 그림 3.1.2, 3.2.9에서 알 수 있는 바와 같이 상온에 비해 변형속도에 따라 J-R 곡선이 약간씩 차이를 보였다. 단일하중 조건에서 J-R 곡선은  $V_{LL} = 0.9mm/min$ 에 비해  $9.0mm/min$ 에서 약간 감소하고  $V_{LL} = 2280mm/min$ 에서는 다시 증가하는 경향을 보였는데, 이러한 경향은 반복하중이 작용되는 경우에도 유사하게 나타났다.  $R=-0.5$ 인 조건에서 J-R 곡선은  $V_{LL} = 0.9mm/min$ 에 비해  $9.0mm/min$ 에서 뚜렷이 감소한 후  $2280mm/min$ 에서는 다시 증가하는 경향을 보였으며,  $R=-1.0$ 의 경우에도  $9.0mm/min$ 에서 가장 낮은 J-R 파괴인성 곡선을 보였다.  $316^{\circ}C$ 에서 변형속도에 따른 이러한 거동은 앞서 변형속도에 따른

하중-하중선 변위 곡선의 변화에서 설명한 바와 같이 316°C에서는  $V_{LL} = 9.0\text{mm/min}$  변형속도 부근에서 동적변형시효 현상으로 인해 다른 변형속도에 비해 파괴인성이 낮기 때문으로 판단된다. 따라서, 본 시험 결과로부터 단일하중 조건에서 관찰된 동적변형시효 현상에 의한 파괴인성의 저하가 인장과 압축의 반복하중이 작용되는 경우에도 파괴인성에 여전히 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 다만,  $R=-0.5$ 에 비해  $R=-1.0$ 에서 변형속도에 따른 J-R 곡선의 변화가 작게 나타나고 있다. 즉,  $R=-1.0$ 에서는 J-R 파괴인성에 미치는 동적변형시효의 영향이 낮다. 이것은 J-R 파괴인성에 미치는 동적변형시효의 영향보다 큰 압축하중에 의한 균열선단 예리화로 인한 응력집중 효과가 더욱 크기 때문으로 판단된다.

## 2. SA312 TP316L 스테인리스 배관

### 가. 정규화 하중-변위 곡선

#### (1) 하중 비에 따른 영향

그림 3.2.10과 3.2.11는 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 시험된 SA312 TP316L 스테인리스강 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선을 반복하중의 하중 비에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 앞서 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재에서 살펴본 바와 같이 상온과 316°C에서 모두 변형속도에 관계없이 단일하중( $R=1.0$ )에 비해 반복하중이 작용되는 경우에 하중-하중선 변위 곡선에서 최대하중과 최대하중까지의 변위가 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 최대하중까지의 변위는 하중 비가 감소할수록 뚜렷이 감소하는 경향을 보였다.

단일하중 조건과  $R=-0.5$ 인 반복하중 조건에서는 시험이 종료될 때까지 하중-하중선 변위 곡선의 최대하중에 도달하지 않았기 때문에 하중 비에 따른 최대하중과 최대하중까지의 변위의 감소를 정량적으로 비교하기는 어렵다. 그러나, 그림 3.1.63과 3.2.11에서 알 수 있는 바와 같이 SA312 TP316L 스테인리스강 배관재의 경우에는  $R=-0.5$ 에 비해  $R=-1.0$ 인 반복하중 조건에서 최대하중과 최대하중까지의 변위가 더욱 심하게 감소하는 것을 알 수 있다.

#### (2) 변형속도에 따른 영향

반복하중 조건에서 SA312 TP316L 스테인리스강 배관재의 Cyclic 하중-하중선

변위 곡선에 미치는 변형속도의 영향을 살펴보기 위해서, 단일하중과  $R=-1.0$ 인 반복하중 조건에서 하중-하중선 곡선을 변형속도에 따라 비교하였다. 그림 3.1.3(a), 3.2.12(a)에서 알 수 있는 바와 같이 상온의 경우에는 단일하중 조건( $R=1.0$ )에서 변형속도가  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에서  $45\text{mm/min}$ 로 증가함에 따라 하중-하중선 변위 곡선이 약간씩 증가하는 경향을 보였다. 그러나,  $R=-1.0$ 의 반복하중이 작용되는 경우에는 변형속도가  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에서  $45\text{mm/min}$ 로 증가함에 따라 최대하중까지는 거의 유사한 하중-하중선 변위 곡선을 보이고 최대하중 이후에는  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에 비해  $V_{LL}=45\text{mm/min}$ 에서 더 낮은 하중-하중선 변위 곡선을 보였다.

원전 운전온도인  $316^\circ\text{C}$ 에서는 그림 3.1.3(b), 3.2.12(b)에 나타낸 것과 같이 단일하중 조건에서 하중-하중선 변위 곡선은 변형속도 관계없이 거의 일치하였다. 그러나  $R=-1.0$ 의 반복하중이 작용되는 경우에는 앞서 상온에서 관찰된 것과 같이 최대하중까지는 두 변형속도에서 거의 유사한 하중-하중선 변위 곡선을 보이고 최대하중 이후에는  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에 비해  $45\text{mm/min}$ 에서 약간 낮은 하중-하중선 변위 곡선을 보였다.

## 나. J-R 곡선

### (1) 하중 비에 따른 영향

그림 3.2.13과 3.2.14은 J-R 파괴인성시험에서 구한 상온과  $316^\circ\text{C}$ 에서 SA312 TP316L 스테인리스강 배관재의 J-R 곡선을 하중 비에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험온도와 변형속도에 관계없이 단일하중( $R=1.0$ )에 비해 반복하중이 작용된 경우에 J-R 곡선이 뚜렷이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, J-R 곡선의 감소는 하중 비가 감소할수록 더욱 크게 나타났다.

반복하중에 따른 J-R 곡선의 감소 정도를  $\Delta a = 0.5\text{mm}$  위치에서 J-R 곡선을 비교함으로써 정량적으로 살펴보면, 전반적으로  $R=-0.5$ 의 J-R 곡선은 단일하중에 비해 약 45% 정도 감소하였으며  $R=-1.0$ 의 경우에는 단일하중에 비해 약 80% 정도까지 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서, 하중 비가 감소함에 따라 J-R 파괴인성이 감소하는 경향은 앞서 살펴본 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재와 유사하지만, 반복하중에 의한 J-R 파괴인성의 감소 정도는 SA312 TP316L 스테인리스강 배관재가 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재에 비해 더 큰 것을 알 수 있다.

이것은 앞서 설명한 바와 같이 반복하중 조건에서 J-R 파괴인성의 감소가 압축하중에 의한 균열선단의 예리화에 기인하는 것과 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉, SA312 TP316L 스테인리스강 배관재는 SA508 Gr.1a 배관재에 비해 강도가 낮기 때문에, 단일하중이 작용되는 경우에는 균열선단에서 큰 소성변형과 함께 균열선단이 둔화되어 높은 파괴인성을 보인다. 반면, 압축하중이 작용되는 경우에는 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재에 비해 더 쉽게 균열선단이 예리하게 변형될 수 있다. 따라서, SA312 TP316L 스테인리스강 배관재에서 반복하중에 의한 J-R 파괴인성의 감소가 크게 나타나는 것이다.

## (2) 변형속도에 따른 영향

반복하중 조건에서 J-R 파괴인성에 미치는 변형속도의 영향을 살펴보기 위해서, 각각의 하중 비에서 변형속도에 따른 J-R 곡선을 비교하였다. 상온의 경우 그림 3.1.4(a)에서 알 수 있는 바와 같이 단일하중 조건( $R=1.0$ )에서는 변형속도가  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에서  $45\text{mm/min}$ 로 증가함에 따라 J-R 파괴인성 곡선이 약간 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 그림 3.2.15(a)에서 알 수 있는 바와 같이  $R=-1.0$ 의 반복하중이 작용되는 경우에는  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에 비해  $45\text{mm/min}$ 에서 약간 낮은 J-R 곡선을 보였다. 실제 동일한 변위가 가해진 경우에  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에 비해  $45\text{mm/min}$  시편에서 균열이 더 크게 진전하는 것을 파면에서 관찰할 수 있었다. 그러나,  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에 비해  $45\text{mm/min}$ 에서 낮은 파괴인성을 보이는 이유를 명확히 설명하기는 어렵다.

한편, 원전 운전온도인  $316^\circ\text{C}$ 에서는 그림 3.1.4(b), 3.2.15(b)의 J-R 곡선 비교에서 알 수 있는 바와 같이 단일하중 뿐 아니라  $R=-1.0$ 의 반복하중 조건에서도 변형속도에 따른 J-R 파괴인성 곡선의 차이는 거의 없었다. 앞서 수행된 단일하중 조건의 J-R 파괴인성 시험에서 SA312 TP316L 스테인리스강 배관재의 경우에는 변형속도가  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에서  $1140\text{mm/min}$ 로 증가할지라도 J-R 파괴인성 곡선의 차이가 거의 없었으며, 인장시험 결과에서 강도와 연성의 차이도 거의 없었다. 따라서, SA312 TP316L 스테인리스강 배관재의 경우에는 원전 운전온도 조건인  $316^\circ\text{C}$ 에서 하중형태와 응력상태에 관계없이 기계적물성치가 변형속도에 거의 영향을 받지 않는다는 것을 확인할 수 있다.



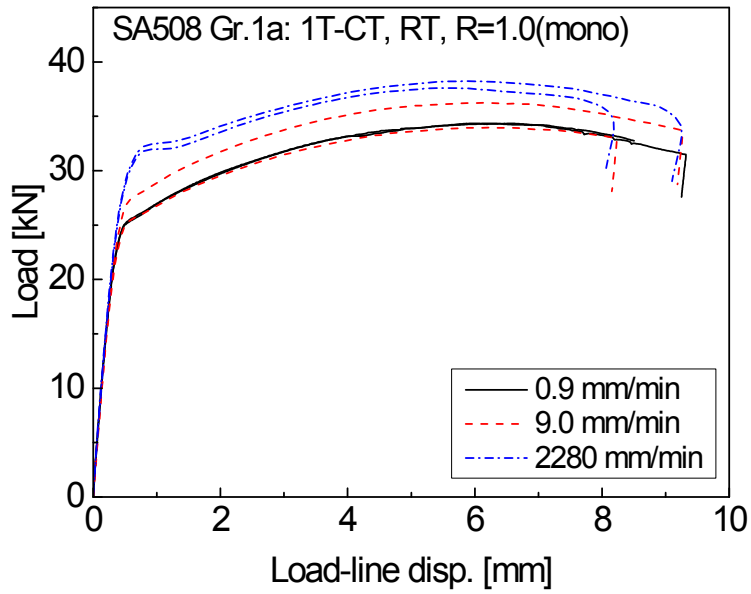
## 제 3 절 반복하중 조건의 파괴특성 분석

### 1. 파면 분석

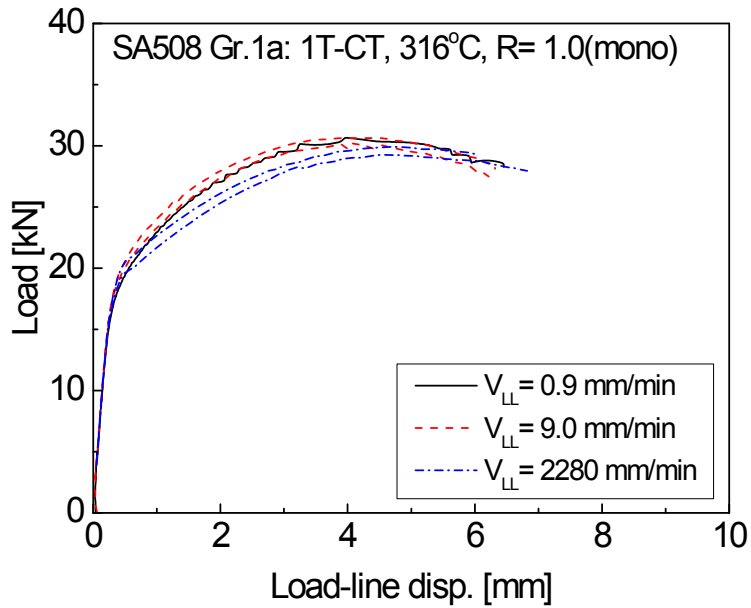
그림 3.3.1과 3.3.2는 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 대한 단일하중 조건 반복하중 조건에서 J-R 파괴인성 시험이 완료된 시편의 파면 사진을 나타낸 것이다. 준정적 변형속도인  $V_{LL}=0.9\text{mm/min}$ 에서 단일하중 조건과 파괴인성의 변화가 가장 큰 반복하중 조건  $R=-1.0$ 에서 파면을 관찰하였다. 단일하중 조건의 파단면은 연성파면의 특징인 덩플들이 관찰되었다. 반복하중 조건( $R=-1.0$ )의 파면은 단일하중 조건에 비해 파면이 평평하고 연성파면의 특징인 덩플들이 단일하중 조건보다 작고 수가 줄어든 것을 관찰하였다. 그림 3.3.3과 3.3.4는 SA312 TP316L 스테인리스 배관재의 대한 단일하중 조건 반복하중 조건에서 J-R 파괴인성 시험이 완료된 시편의 파면 사진을 나타낸 것이다. 준정적 변형속도인  $V_{LL}=0.45\text{mm/min}$ 에서 단일하중 조건과 파괴인성의 변화가 가장 큰 반복하중 조건  $R=-1.0$ 에서 파면을 관찰하였다. 단일하중 조건의 파단면은 균열에서 대부분 블런팅이 진행된 형태가 나타나고 반복하중 조건( $R=-1.0$ )의 파면은 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 결과와 동일하게 단일하중 조건에 비해 파면이 평평하고 연성파면의 특징인 덩플들이 단일하중 조건보다 작고 수가 줄어든 것을 관찰하였다. 인장과 압축의 반복하중이 가해지면서 압축하중에 의해 균열 선단이 예리해지고 인장하중에 의해 응력집중에 의한 미세한 균열들이 관찰되어 단일하중 조건보다 균열전파가 쉽게 전파되는 것으로 판단된다.

### 2. 파단측면 분석

그림 3.3.5과 3.3.6는 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 대한 단일하중 조건 반복하중 조건에서 J-R 파괴인성 시험이 완료된 시편의 파면사진 촬영한 측면 미세조직 사진을 나타낸 것이다. 단일하중 조건에서 파면사진과 일치하는 형태를 보였다. 관찰된 측면 미세조직은 덩플형태처럼 균열이 진전하는 것을 볼 수 있고 결정립계가 늘어나있는 것이 관찰되었다. 반복하중 조건에서도 파면에서와 같이 평평한 형태의 균열진전이 이루어진 것을 알 수 있고 파면에서 관찰된 미세한 균열을 관찰 할 수 있었다. 반복하중 조건의 결정입계는 인장하중에서 늘어난 형태와 압축하중에 찌그러진 것을 관찰하였다.

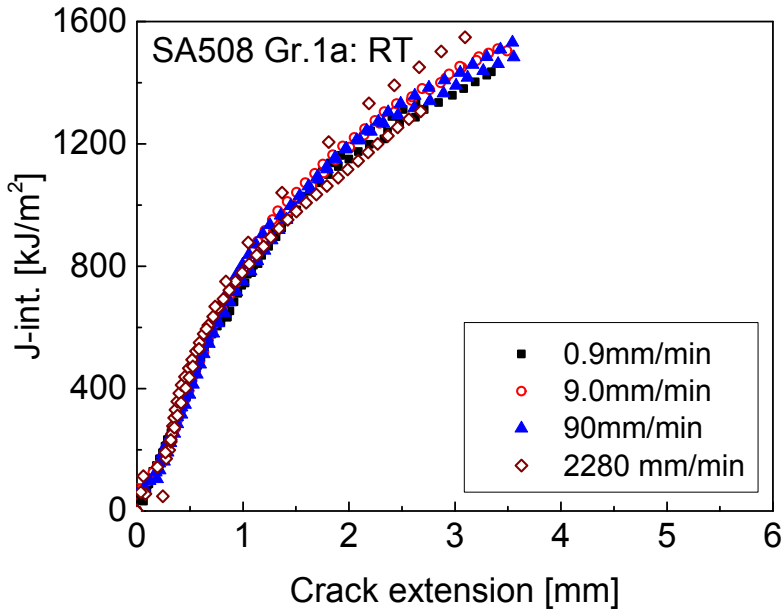


(a) RT

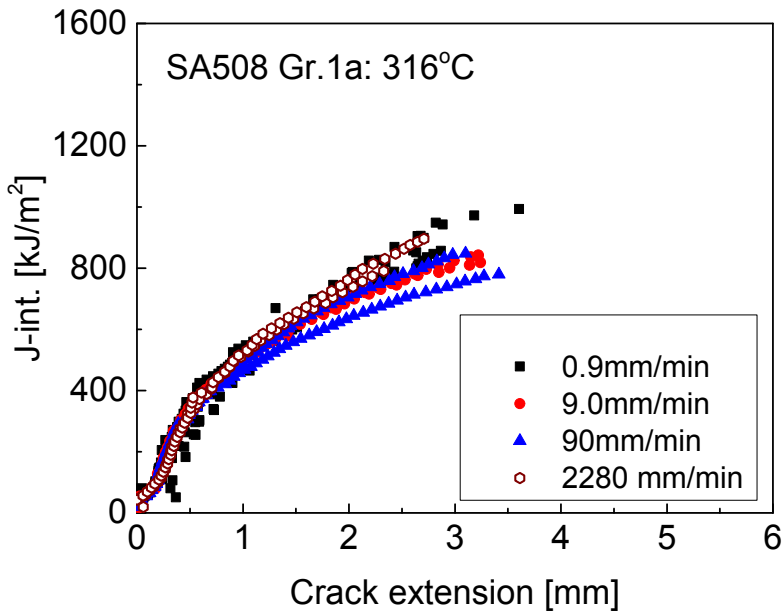


(b) 316°C

그림 3.1.1 하중속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 하중-하중선 변위 곡선 비교

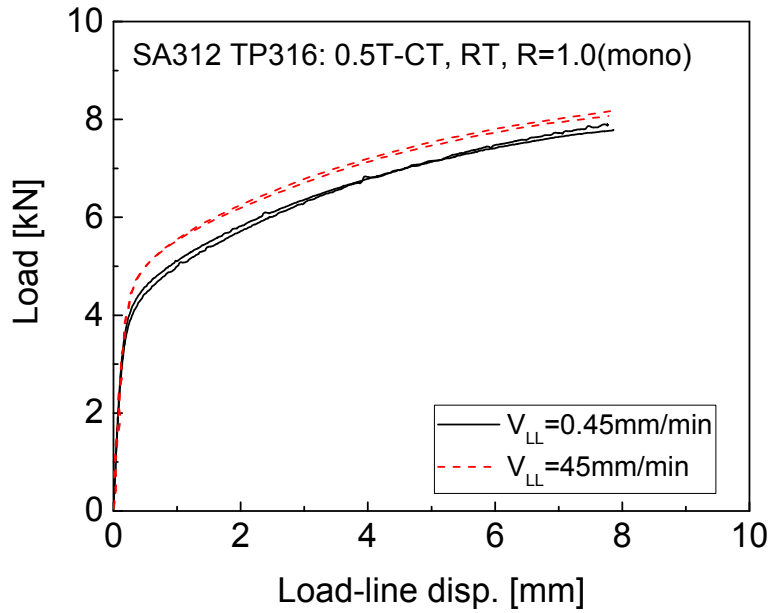


(a) 상온

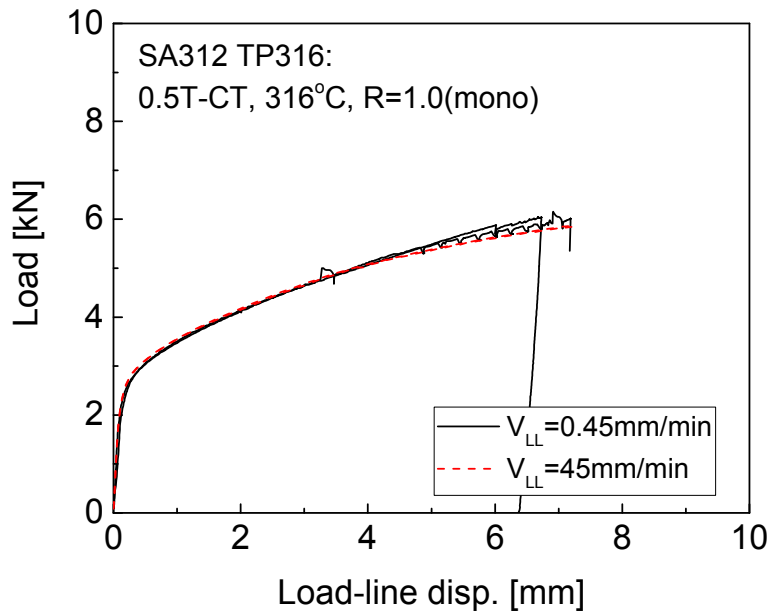


(b) 316°C

그림 3.1.2 변형속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교

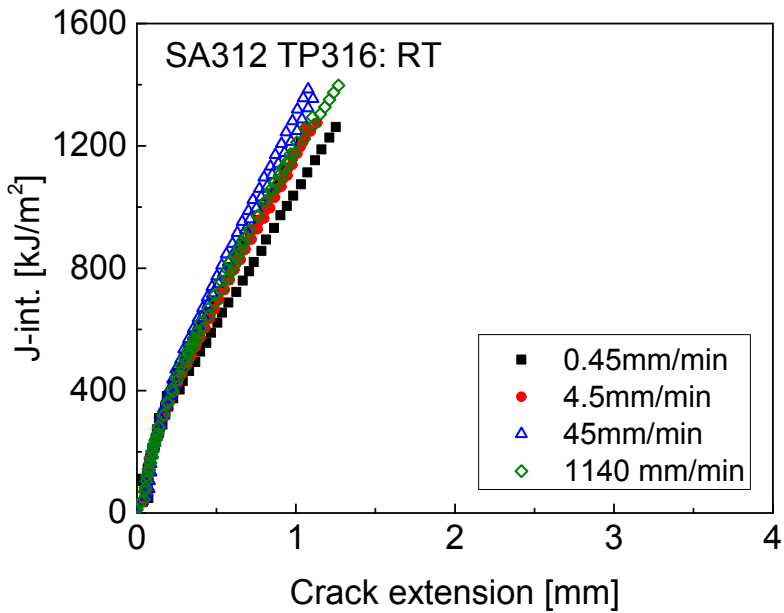


(a) RT

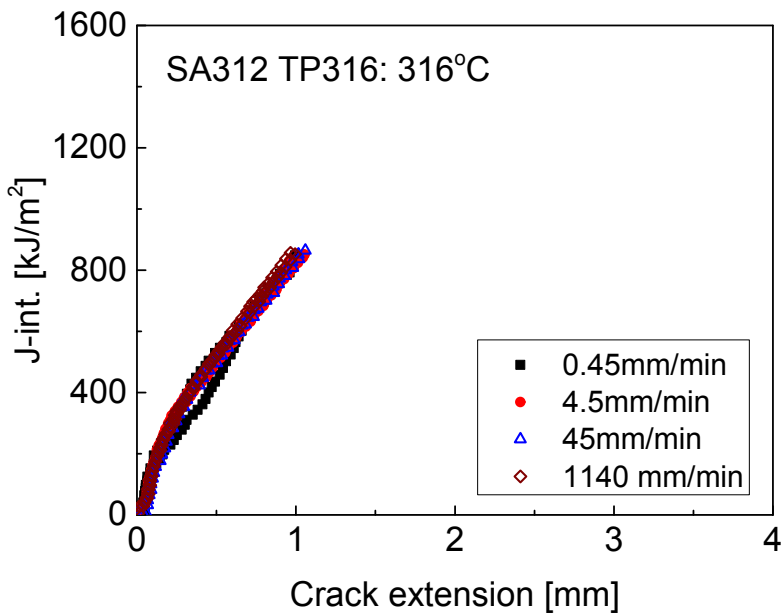


(b) 316°C

그림 3.1.3 하중속도에 따른 SA312 TP316L 배관재의 하중-하중선 변위 곡선 비교

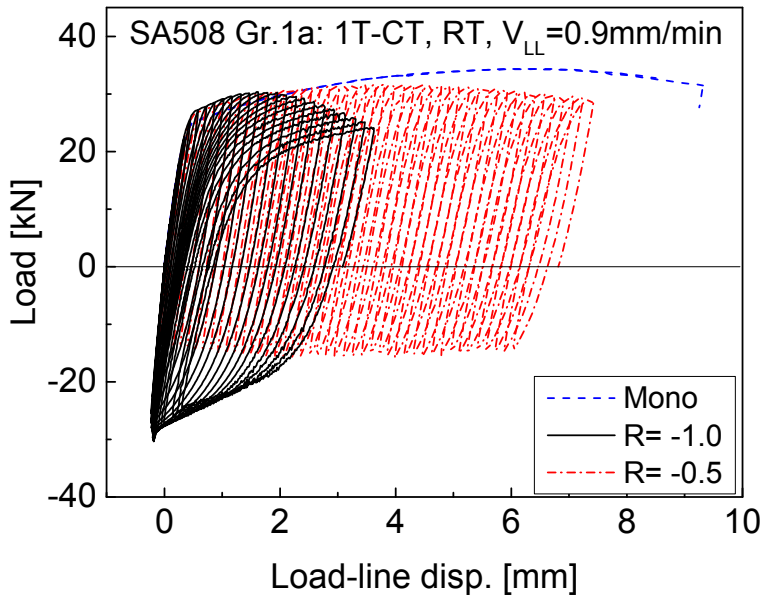


(a) 상온

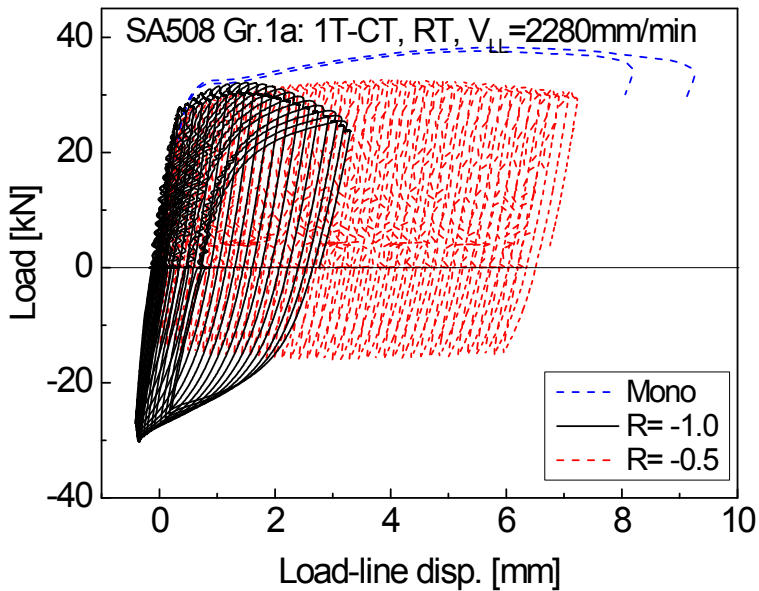


(b) 316°C

그림 3.1.4 변형속도에 따른 SA312 TP316L 배관재의 J-R 곡선 비교

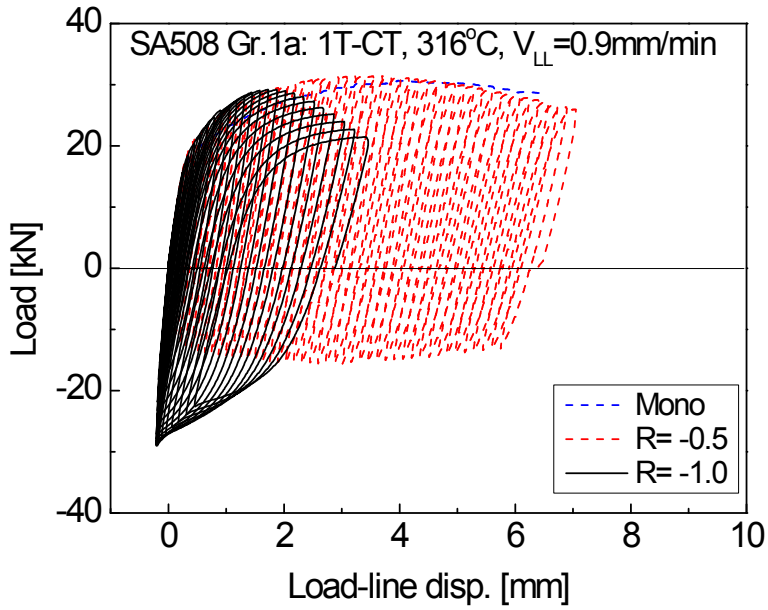


(a)  $V_{LL}=0.9$  mm/min

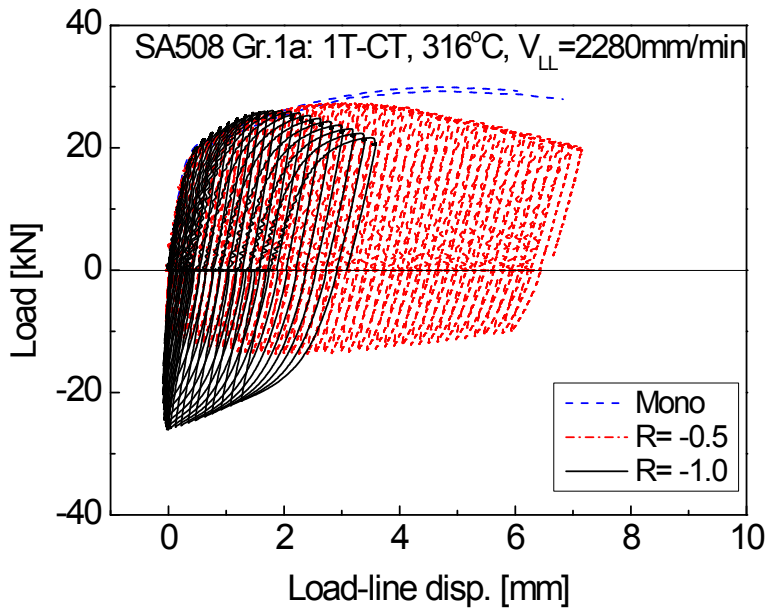


(b)  $V_{LL}=2280$  mm/min

그림 3.2.1 상온에서 하중 비에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 비교

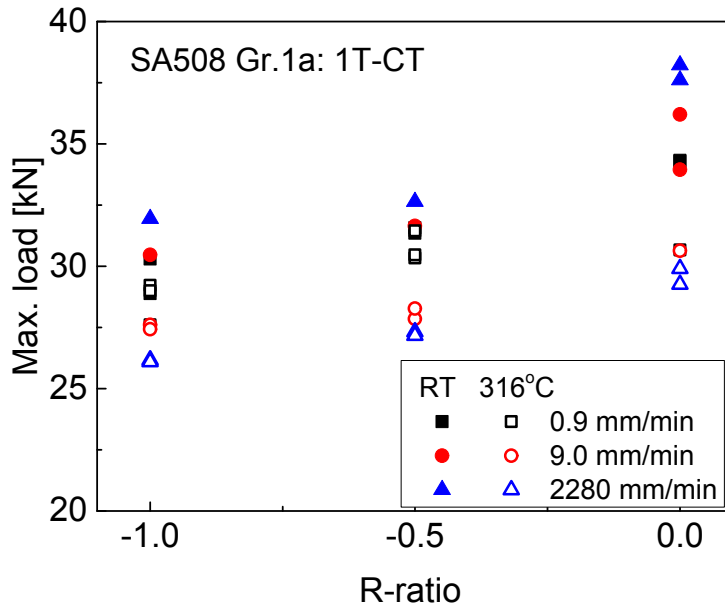


(a)  $V_{LL}=0.9$  mm/min

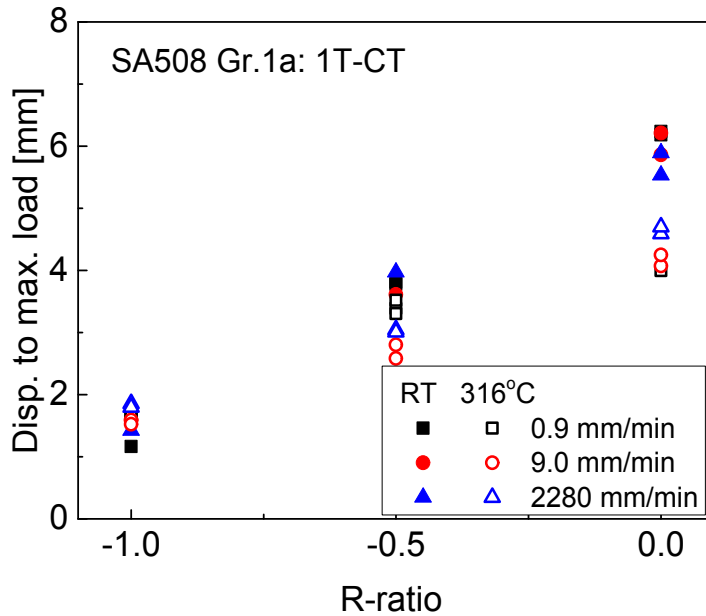


(b)  $V_{LL}=2280$  mm/min

그림 3.2.2 316°C에서 하중 비에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 Cyclic 하중-하중 선 변위 비교



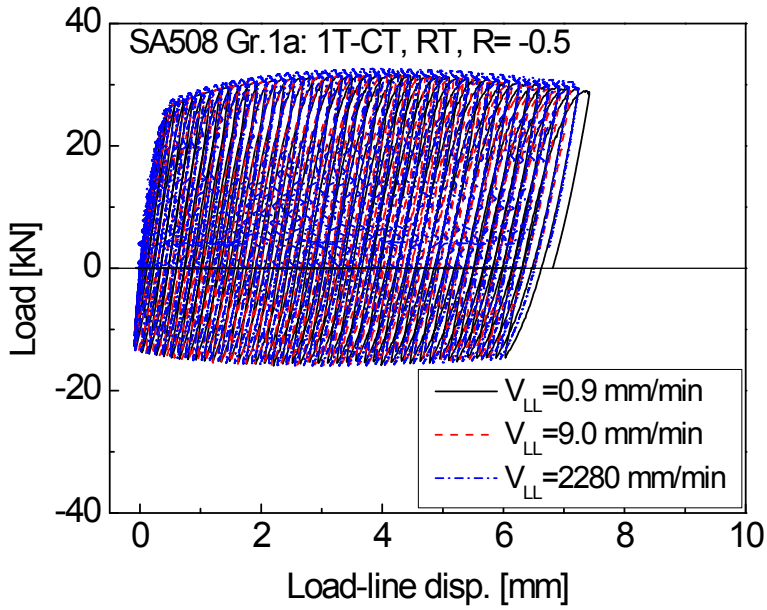
(a) 최대하중



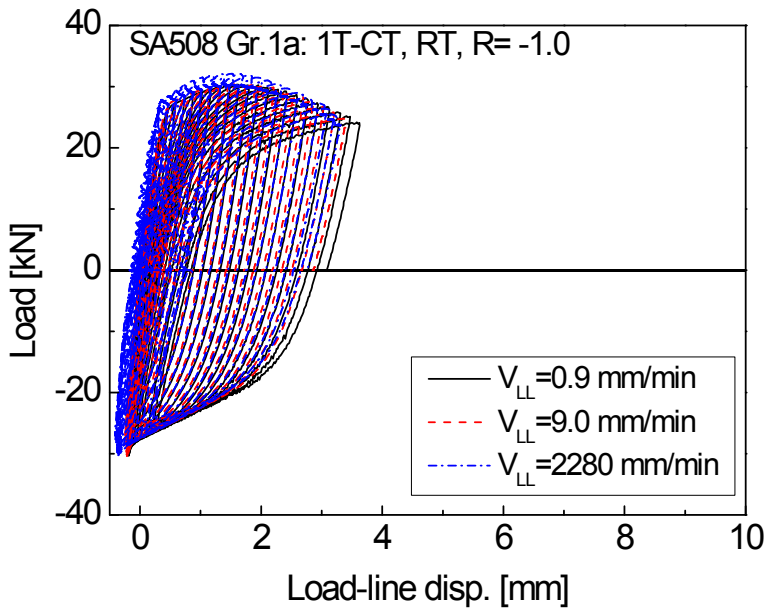
(b) 최대하중까지의 변위

그림 3.2.3 하중 비에 따른 최대하중 및 최대하중까지의 변위 비교



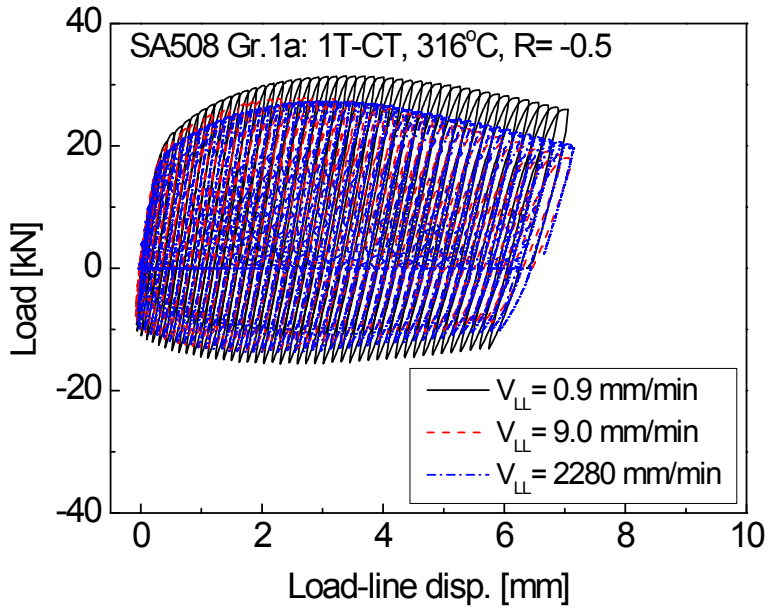


(b) R=-0.5

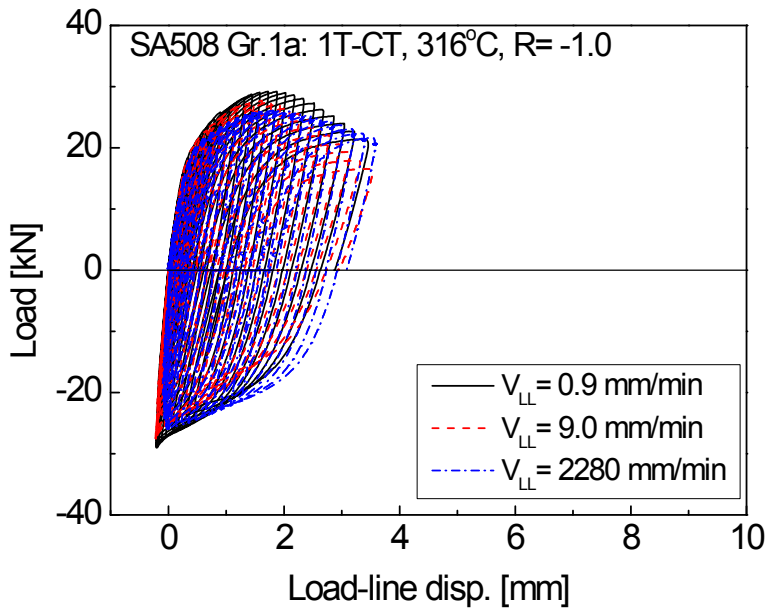


(c) R=-1.0

그림 3.2.4 상온에서 하중속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 Cyclic 하중-하중 선 변위 곡선 비교

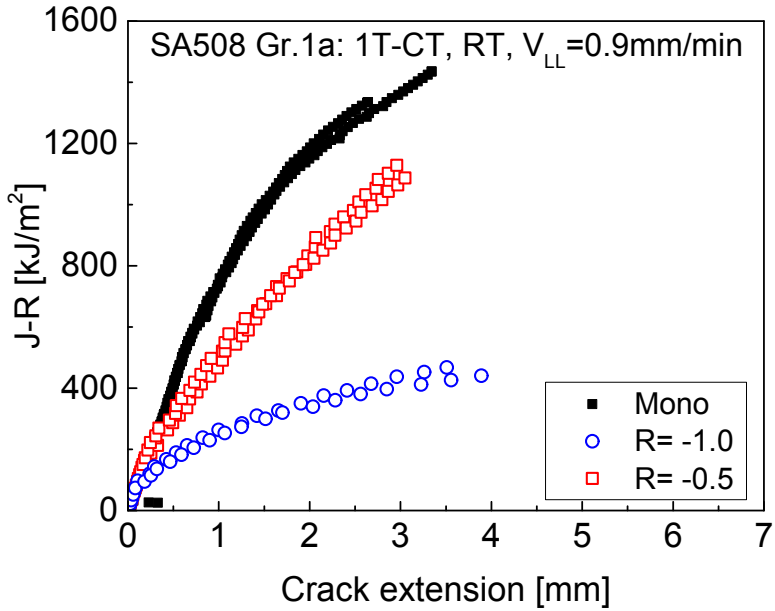


(b) R=-0.5

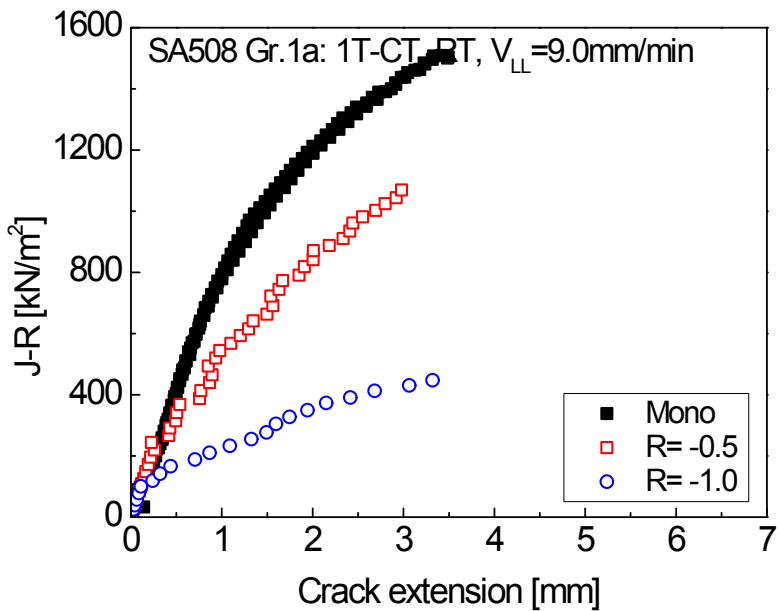


(c) R=-1.0

그림 3.2.5 316°C에서 하중속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 Cyclic 하중-하중 선 변위 곡선 비교

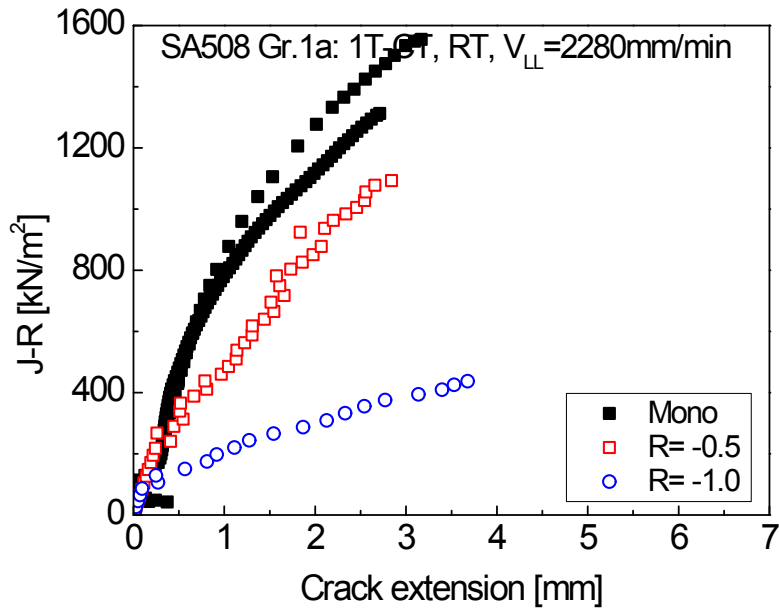


(a)  $V_{LL}=0.9$  mm/min



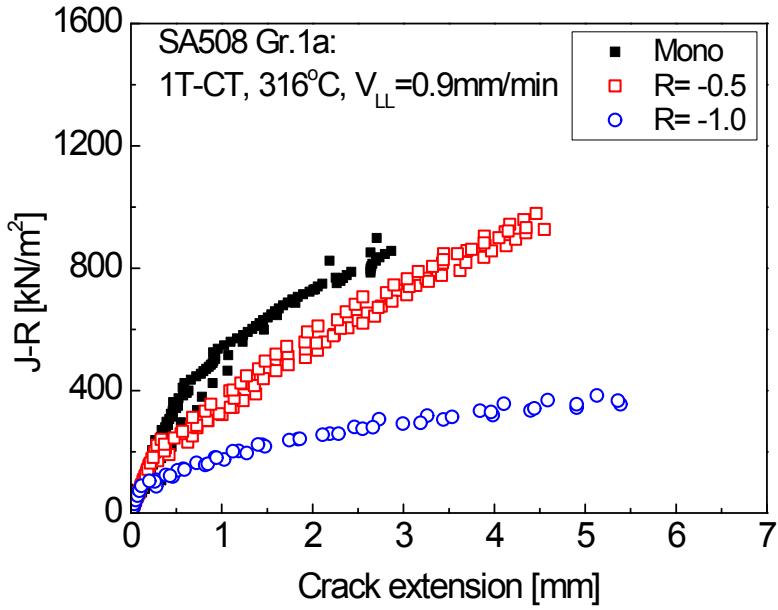
(b)  $V_{LL}=9.0$  mm/min

그림 3.2.6 상온에서 하중 비에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교

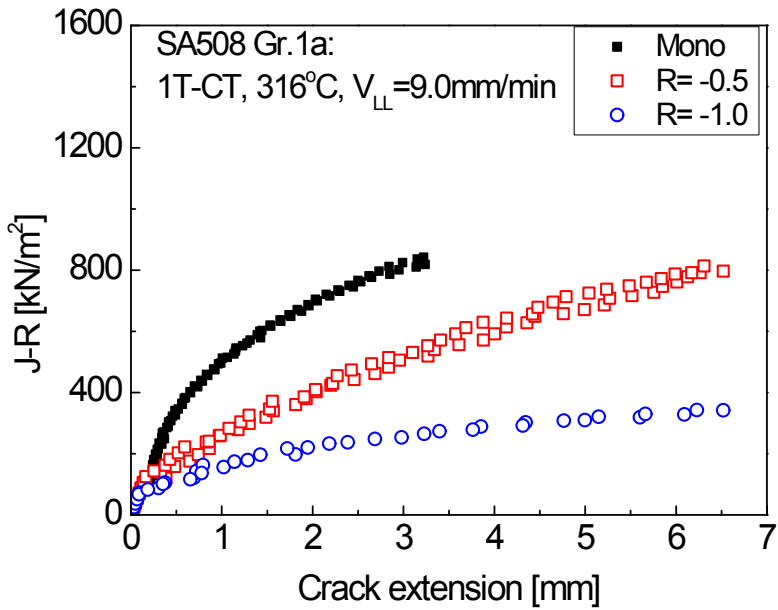


(c)  $V_{LL}=2280$  mm/min

그림 3.2.6 상온에서 하중 비에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교 (계속)

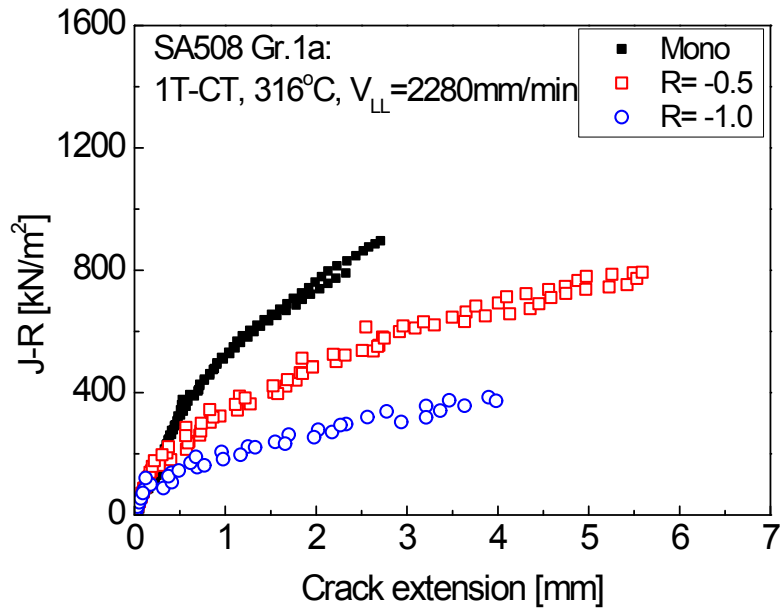


(a)  $V_{LL} = 0.9 \text{ mm/min}$



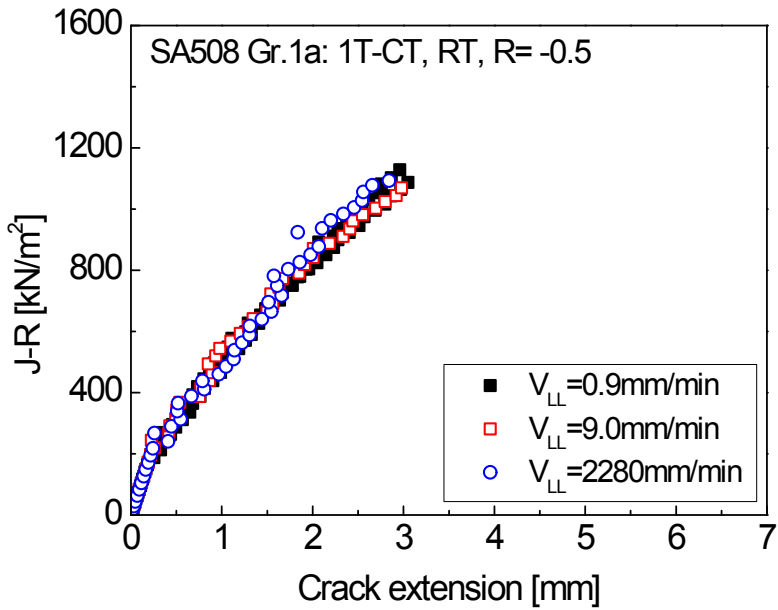
(b)  $V_{LL} = 9.0 \text{ mm/min}$

그림 3.2.7 316°C에서 하중 비에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교

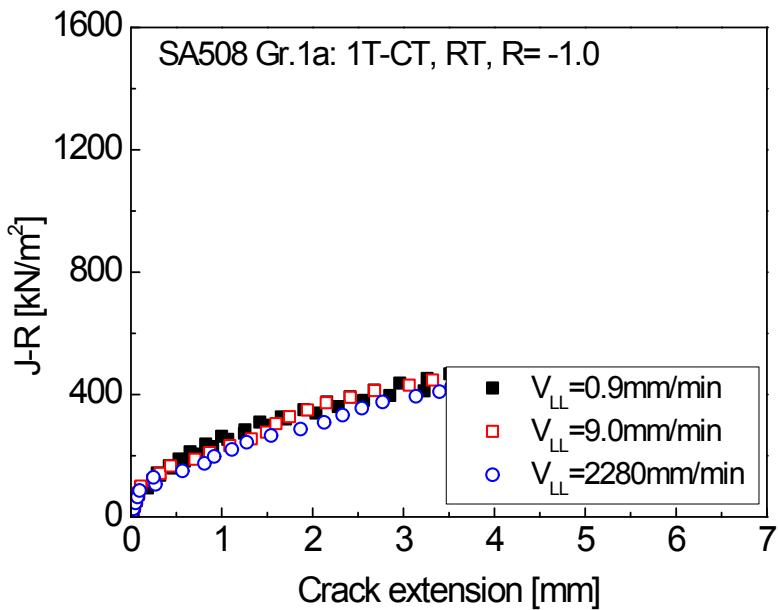


(c)  $V_{LL}=2280$  mm/min

그림 3.2.7 316°C에서 하중 비에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교 (계속)

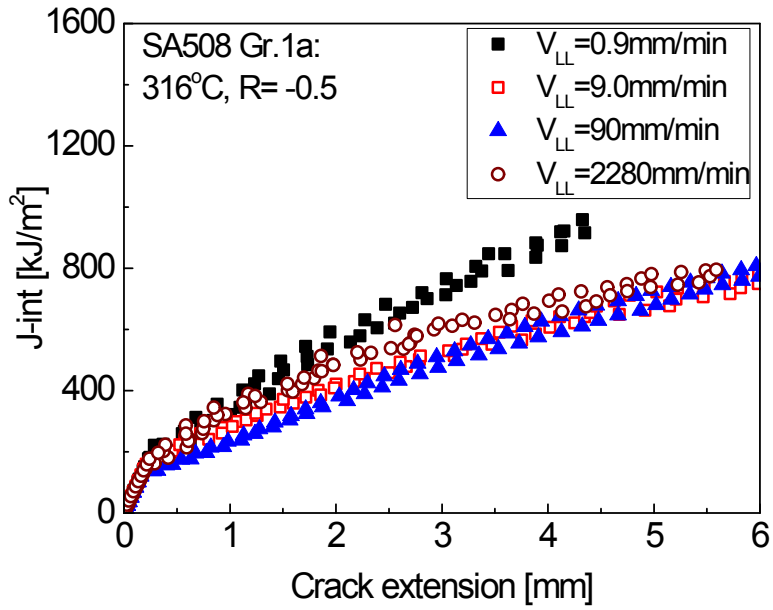


(a) R=-0.5

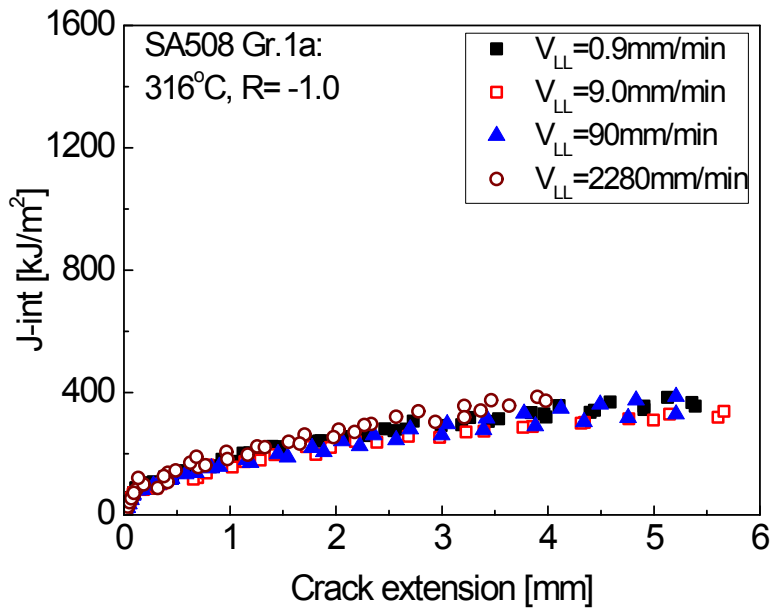


(b) R=-1.0

그림 3.2.8 상온의 반복하중 조건에서 하중속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교



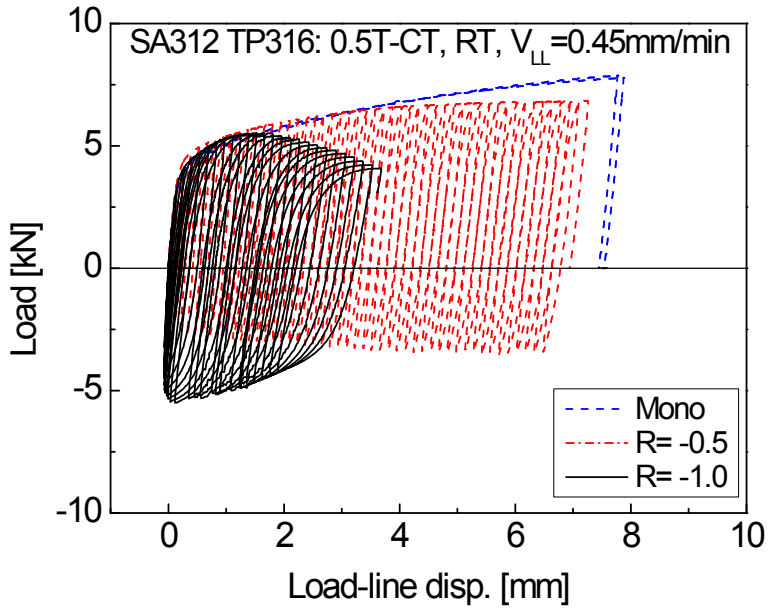
(a) R=-0.5



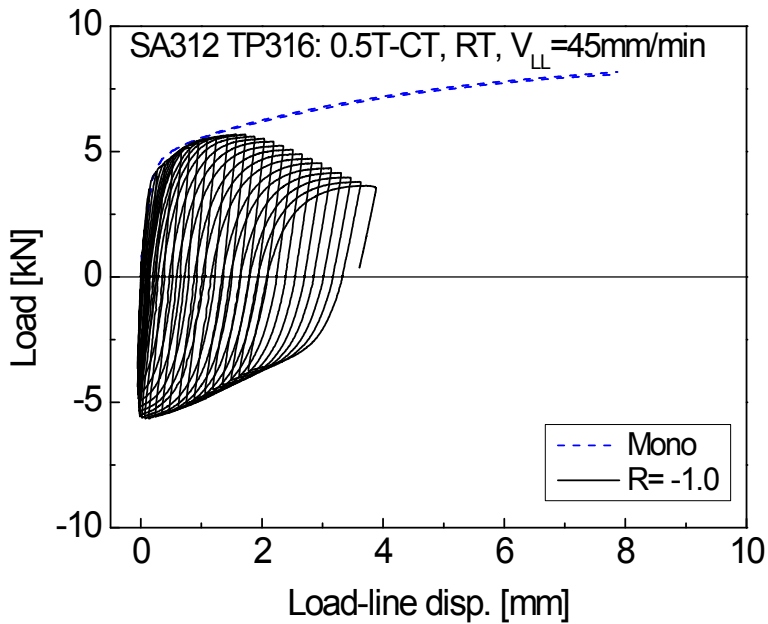
(b) R=-1.0

그림 3.2.9 316°C의 반복하중 조건에서 하중속도에 따른 SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 곡선 비교



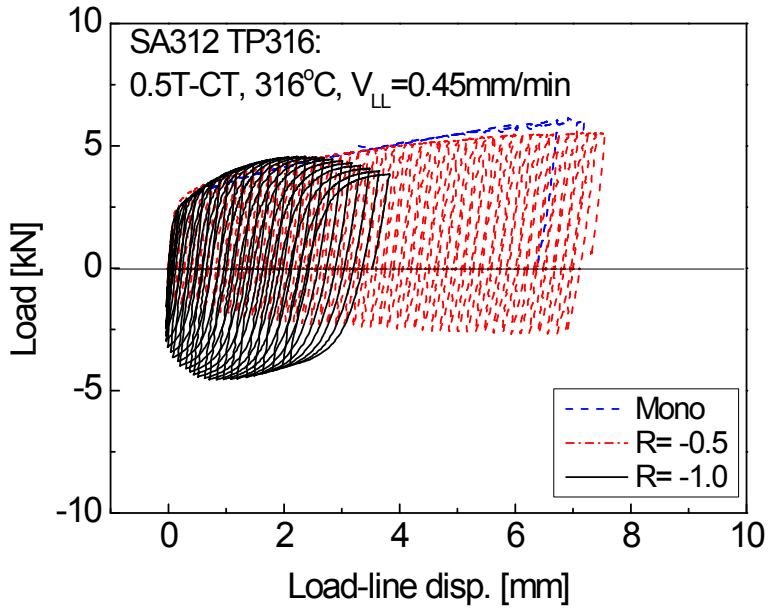


(a)  $V_{LL}=0.45$  mm/min

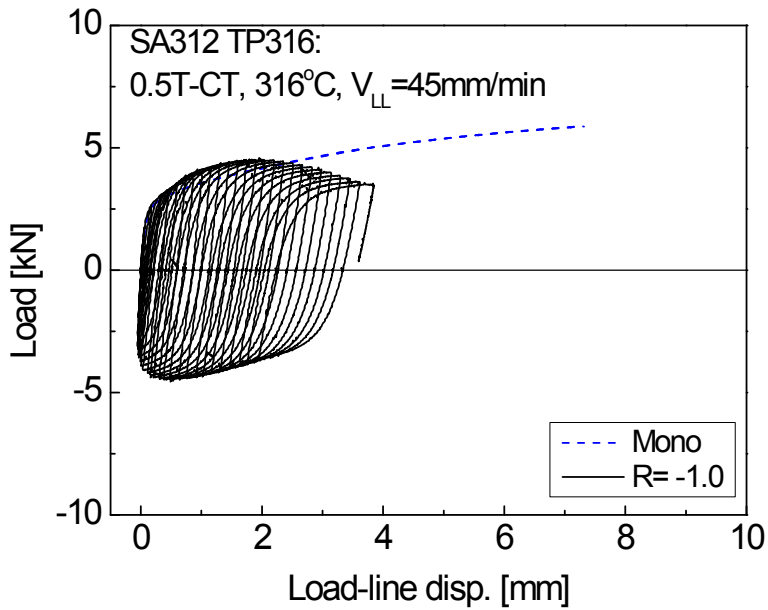


(b)  $V_{LL}=45$  mm/min

그림 3.2.10 상온에서 하중 비에 따른 SA312 TP316L 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선 비교

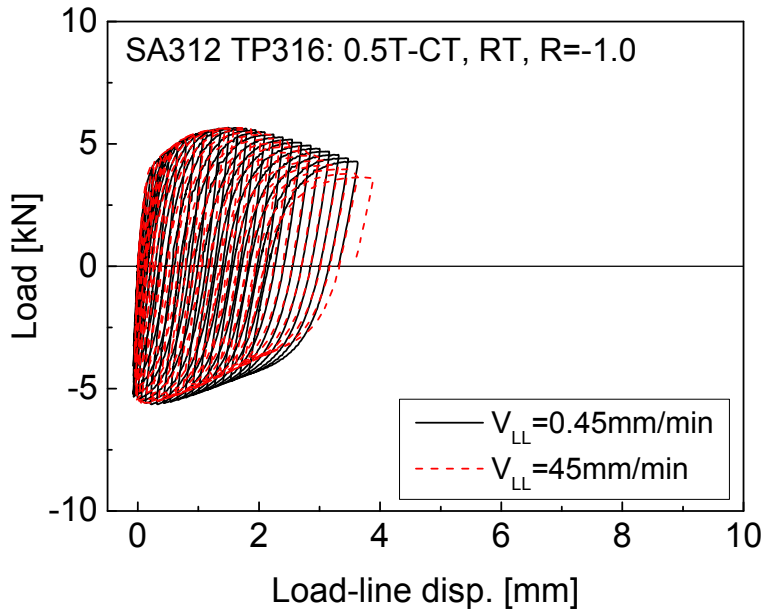


(a)  $V_{LL} = 0.45 \text{ mm/min}$

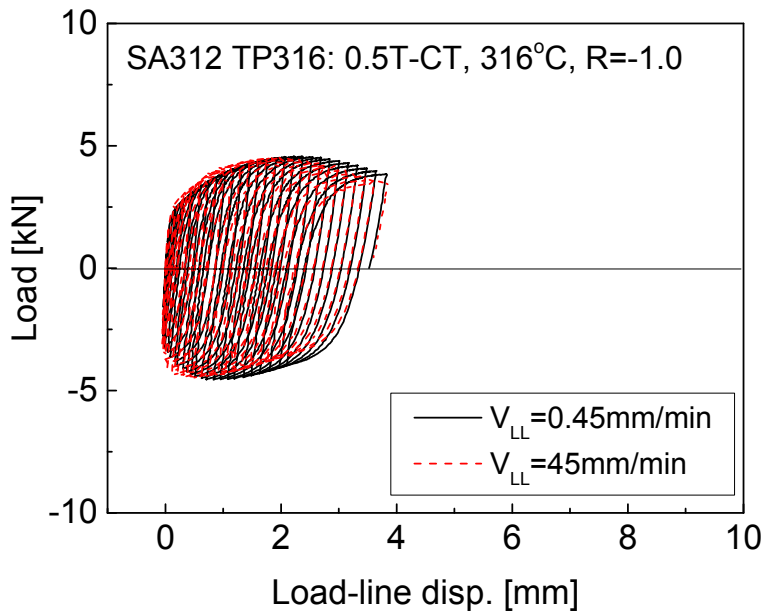


(b)  $V_{LL} = 45 \text{ mm/min}$

그림 3.2.11 316°C에서 하중 비에 따른 SA312 TP316L 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선 비교

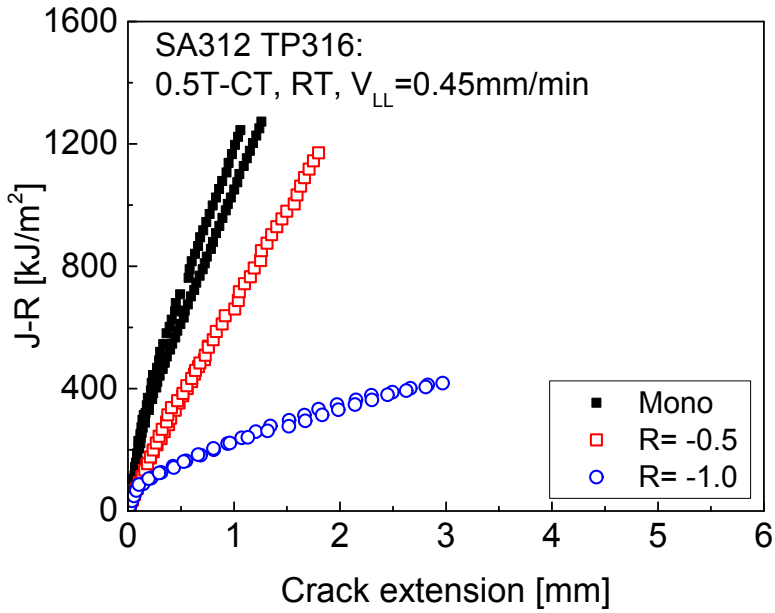


(a) RT

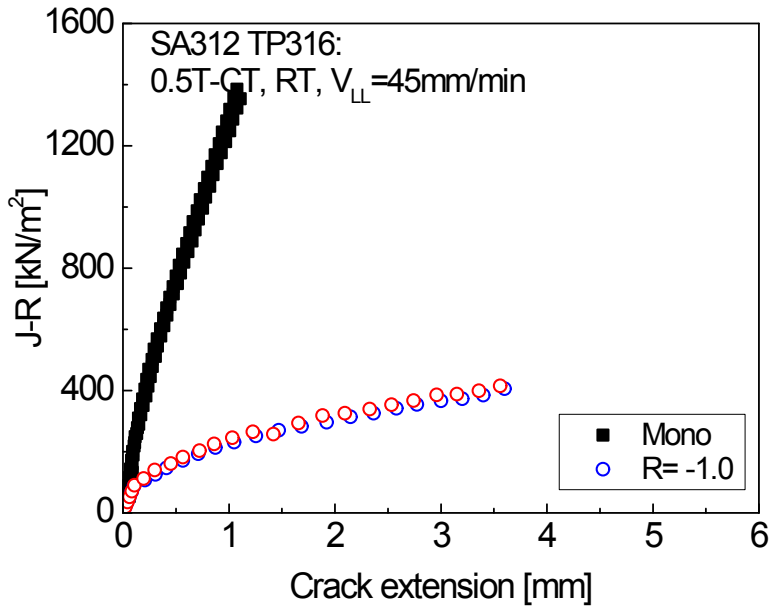


(b) 316°C

그림 3.2.12 하중속도에 따른 SA312 TP316L 배관재의 Cyclic 하중-하중선 변위 곡선 비교

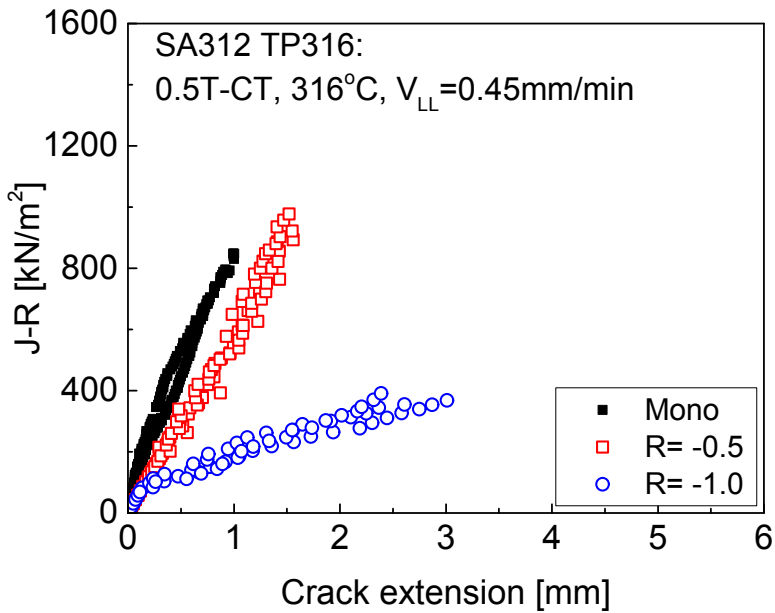


(a)  $V_{LL} = 0.45 \text{ mm/min}$

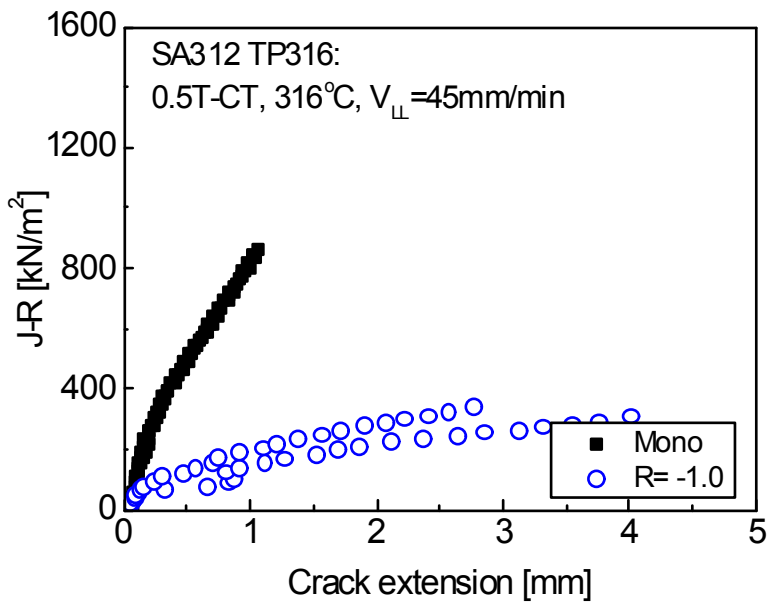


(b)  $V_{LL} = 45 \text{ mm/min}$

그림 3.2.13 상온에서 하중 비에 따른 SA312 TP316L 배관재의 J-R 곡선 비교

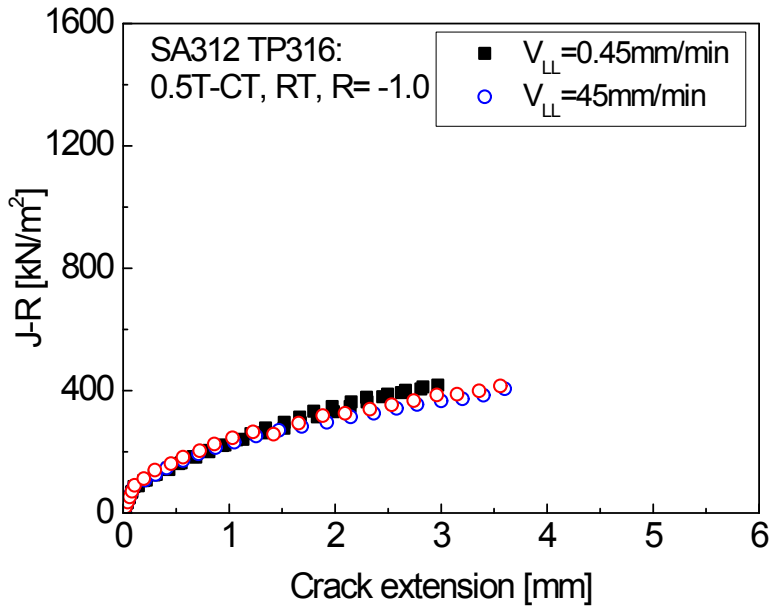


(a)  $V_{LL}=0.45$  mm/min

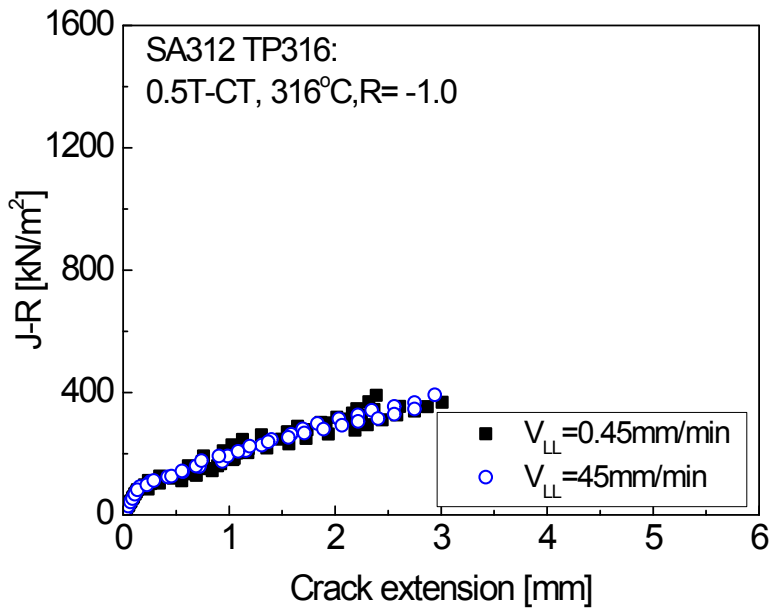


(b)  $V_{LL}=45$  mm/min

그림 3.2.14 316°C에서 반복하중 비에 따른 SA312 TP316L 배관재의 J-R 곡선 비교

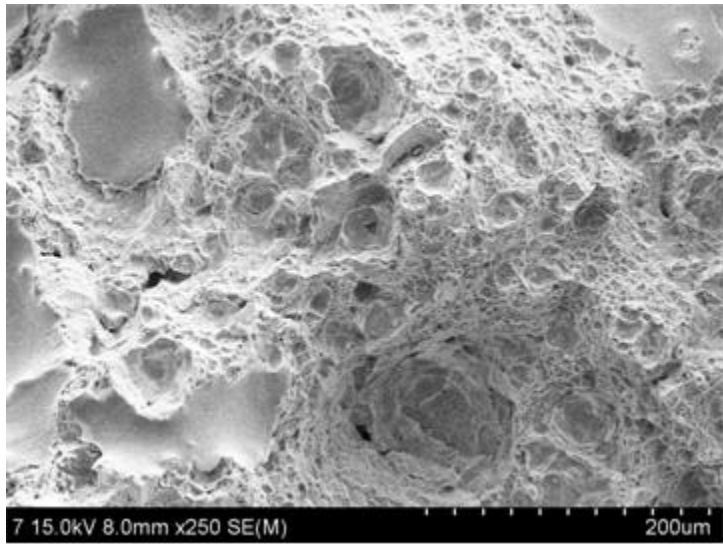
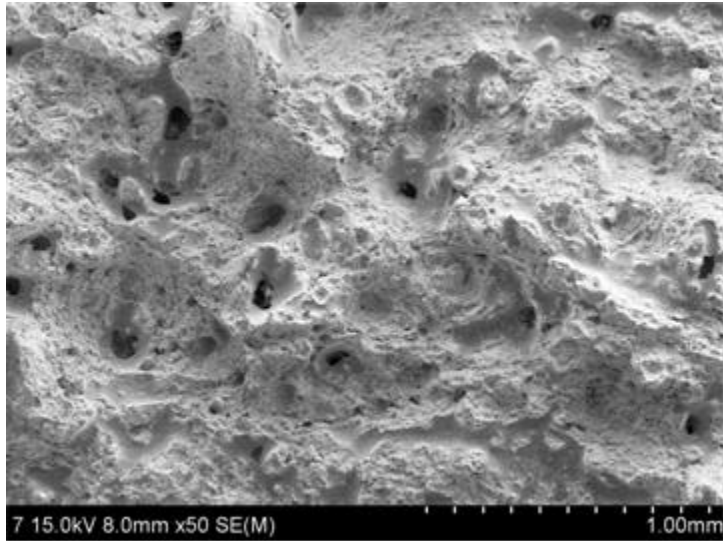


(a) RT



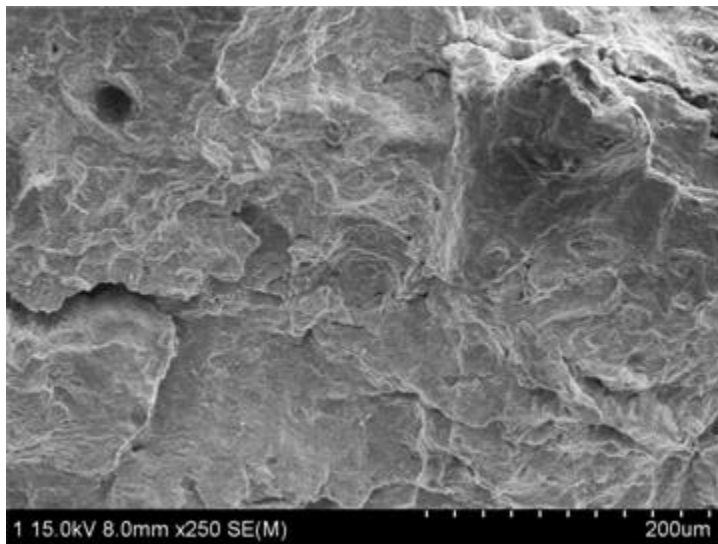
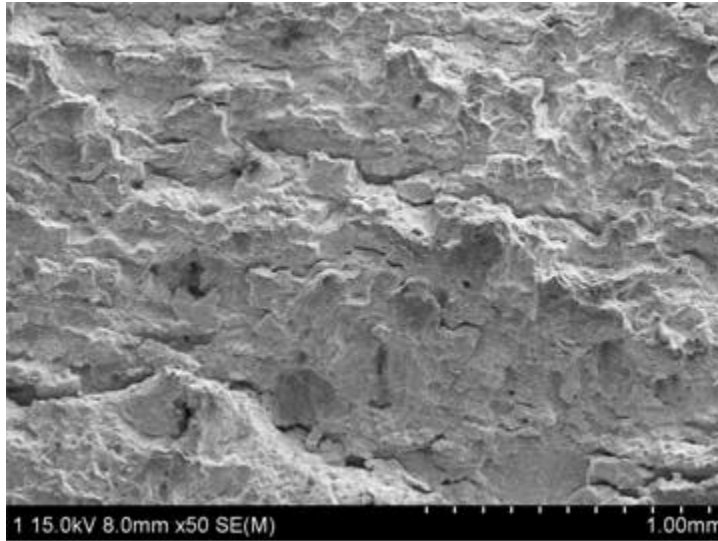
(b) 316°C

그림 3.2.15 반복하중 조건에서 하중속도에 따른 SA312 TP316L 배관재의 J-R 곡선 비교



<확대>

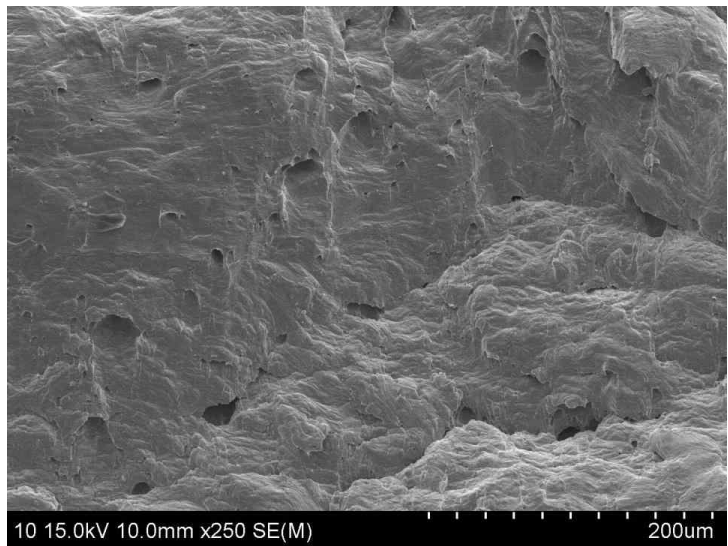
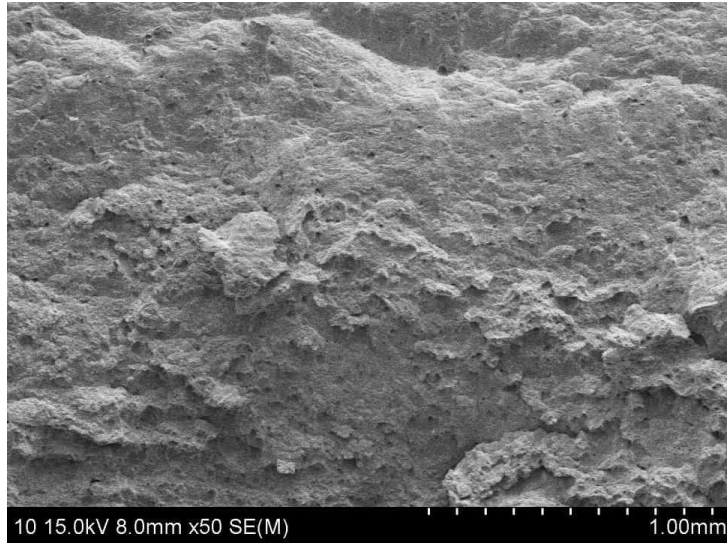
그림 3.3.1 SA508 Gr.1a 배관재의 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험 파면



<확대>

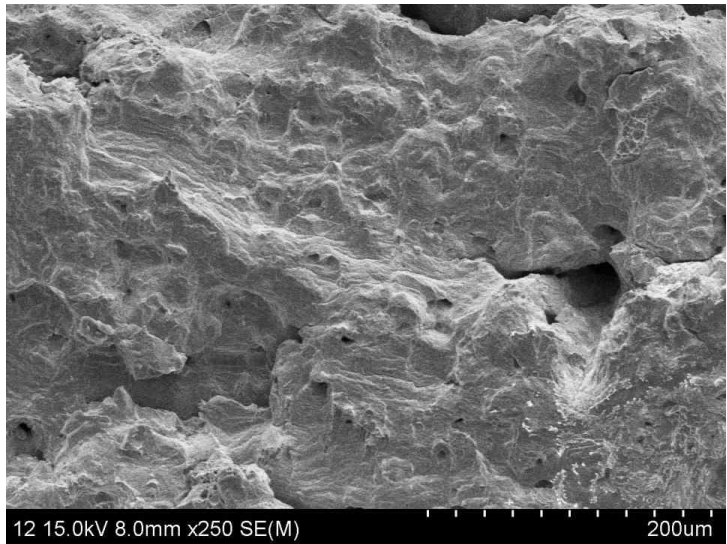
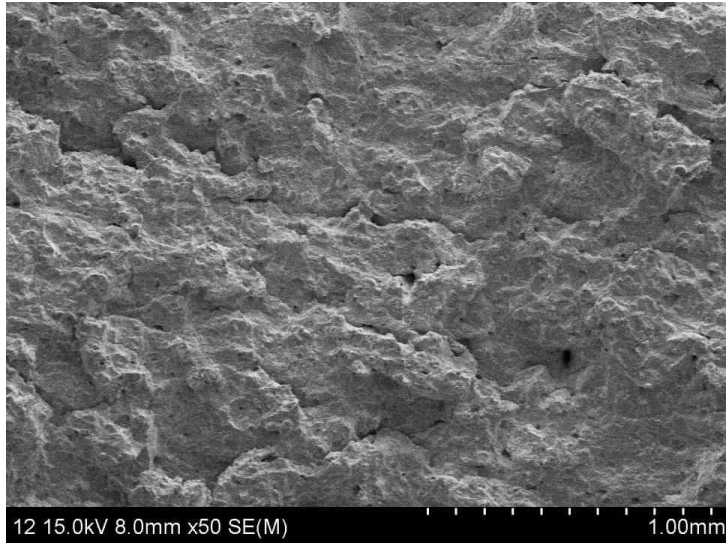
그림 3.3.2 SA508 Gr.1a 배관재의 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 파면





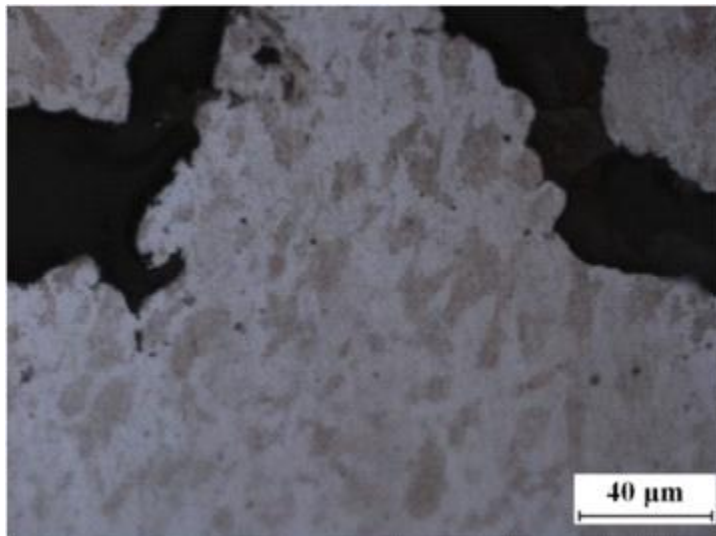
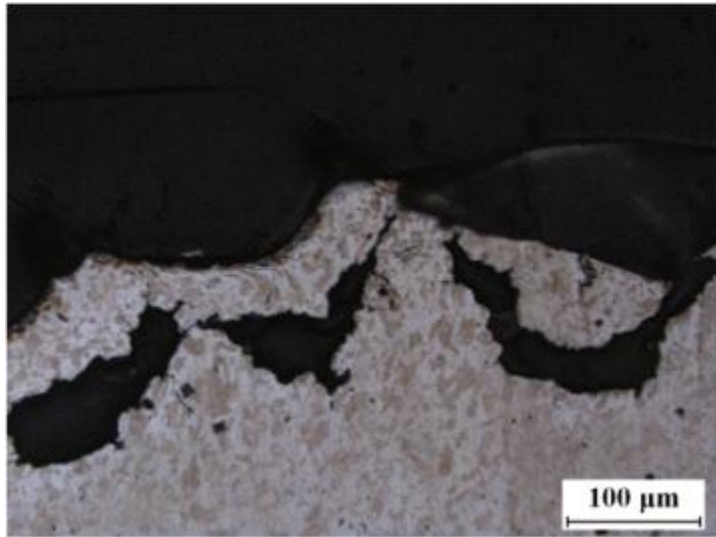
<확대>

그림 3.3.3 SA312 TP316L 배관재의 단순하중 조건 J-R 파괴인성시험 파면



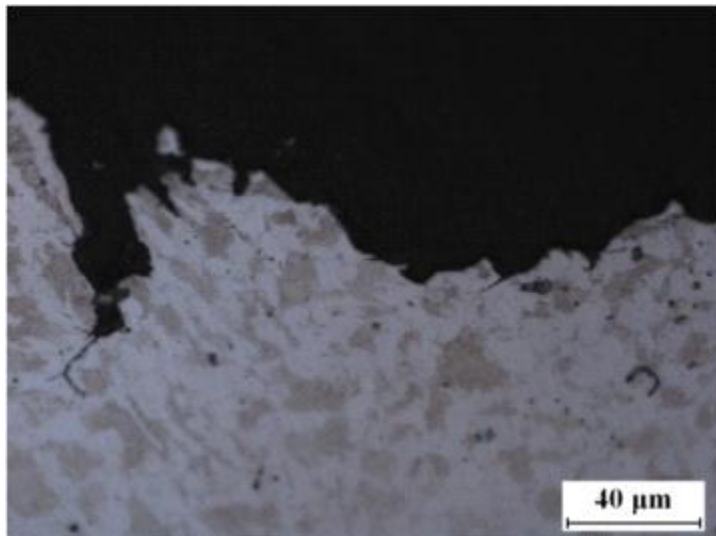
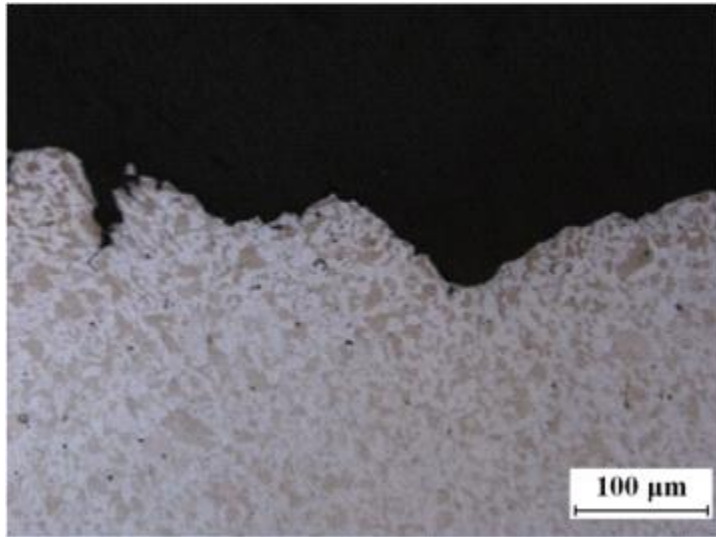
<확대>

그림 3.3.4 SA312 TP316L 배관재의 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 파면



<확대>

그림 3.3.5 SA508 Gr.1a 배관재의 단일하중 조건 J-R 파괴인성시험 파단측면 미세조직



<확대>

그림 3.3.6 SA508 Gr.1a 배관재의 반복하중 조건 J-R 파괴인성시험 파단측면 미세조직

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 반복하중 조건에서 원전 배관재의 파괴거동에 미치는 하중속도의 영향을 파악하기 위해서, 먼저 단일하중 조건에서 SA508 Gr.1a와 SA312 TP316L 배관재의 파괴거동에 미치는 동적하중의 영향을 파악하였다. 파괴거동에 미치는 동적하중의 영향을 파악하기 위해서, 지진하중 속도를 포함하는 다양한 변형속도에서 J-R 파괴인성시험을 수행하였다. 이들 결과로부터 파괴인성에 미치는 변형속도 영향을 파악하였다.

또한, 반복하중조건에서 SA508 Gr.1a와 SA312 TP316L 배관재의 변형속도 영향이 파괴거동에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 이를 위해서 2종류 배관재에 대한 다양한 변형속도에서 Cyclic J-R 시험을 수행하였다. 이들 결과로부터 반복하중조건에서 파괴인성에 미치는 변형속도 영향을 파악하였다.

- ▶SA508 Gr.1a 배관재의 경우, 상온에서는 단일하중 조건 J-R 파괴인성이 변형속도에 관계없이 거의 일정한 값을 보였으며, 원전 운전온도인 316°C에서는 변형속도가 증가함에 따라 감소하여 특정한 변형속도( $V_{LL}=9.0\text{mm/min}$ )에서 최소를 보이고 다시 증가하여 동적 변형속도에서는 준정적 변형속도와 유사한 값을 보였다.
- ▶SA312 TP316 배관재의 경우, 상온과 316°C에서 모두 단일하중 조건 J-R 파괴인성에 미치는 변형속도의 영향이 크지 않았다. 특히, 원전 운전온도인 316°C에서는 변형속도에 관계없이 파괴인성이 거의 일정한 값을 보였다.
- ▶배관 재료의 종류에 관계없이 단일하중 조건에 비해 인장-압축의 반복하중이 작용될 때, 시편의 하중지지능력과 변형수용능력이 뚜렷이 감소되는 것을 확인하였다.
- ▶SA508 Gr.1a 저합금강과 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모두 단일하중에 비해 인장-압축의 반복하중이 작용될 때, J-R 파괴인성이 뚜렷이 감소하였으며 반복하중의 하중 비(압축하중/최대하중)가 감소할수록 J-R 파괴인성의 감소가 증가하였다.
- ▶SA312 TP316 SS경우 반복하중 조건 하에서의 파괴거동은 시험 온도에 상관없이 J-R 파괴인성이 거의 하중속도 영향을 받지 않는다.
- ▶원전 운전온도인 316°C에서 SA508 Gr. 1a LAS의 파괴거동은 단일하중 조건과 하중비  $R = -0.5$ 에서 하중속도의 영향이 나타나지만 하중비  $R = -1$ 에서는 반복하중에 영향이 하중속도의 영향보다 더 크게 나타나었다.
- ▶반복하중에 따른 J-R 파괴인성의 감소는 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재에 비해



SA312 TP316 스테인리스강 배관재에서 더욱 큰 것으로 관찰되었다.

- ▶SA508 Gr.1a 저합금강과 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모두 J-R 파괴인성에 미치는 변형속도 의존성은 반복하중이 작용되는 경우에도 단일하중이 작용되는 경우와 거의 유사한 것으로 평가되었다.
- ▶지진하중 조건에서 시험이 수행될 때 하중비  $R=-1$ 에서 준정적 하중속도로 파괴거동을 평가 가능하다고 판단된다.

## 【참고문헌】

- [1] William, D. Callister, Jr, Materials Science and Engineering - 6th edition, 2003, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Yoon, J.H. et al., "Effects of loading rate and temperature on J-R fracture resistance of an SA516-Gr.70 steel for nuclear piping," *Int. J. Press. Ves. & Piping*, Vol.76, pp.663-670.
- [3] Marschall, C.W. et al., "Effect of dynamic strain aging on the strength and toughness of nuclear ferritic piping at LWR temperatures," 1994, *NUREG/CR-6226*.
- [4] Scott, P., et al., 2003, "The Battelle Integrity of Nuclear Piping (BINP) Program Final Report," *NUREG/CR-6837, Vol.2*.
- [5] ASTM, ASTM E1820-09, "Standard Test Methods for Measurement of Fracture Toughness"
- [6] Singh, P.K. et al, 2003, "Effect of cyclic loading on elastic-plastic fracture resistance of PHT system piping material of PHWR," *Int. J. of Press. Ves. & Piping*, Vol.80, pp.745-752.
- [7] Chapuliot, B.T. et al., 2014, "Ductile Fracture Analysis Under Large Amplitude Cycles," Proc. PVP2014, PVP2014-28426.
- [8] Marschall, C.W et al., 1991, "Effect fo cyclic loading on ductile fracture resistance," *J. of Press. Ves. Tech.*, Vol.52, pp.337-356.
- [9] Seck, C.S. and Murty, K.L, 2000, "A study on the decrease in fracture resistance curve under reversed cyclic loading," *Int. J. of Press. Ves. & Piping*, Vol.77, pp.303-311.