



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](#)

2018년 2월
석사학위 논문

모사시편을 이용한 설계기준초과지진
하중 조건에서 변형 및 손상 거동 평가

조선대학교 대학원

원자력공학과

송 익 현

모사시편을 이용한 설계기준초과지진
하중 조건에서 변형 및 손상 거동 평가

**Evaluation of Deformation and Damage Behaviors under
Beyond Design Basis Earthquake Loading Condition using a
Simulated Specimen**

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

원자력공학과

송 익 현

모사시편을 이용한 설계기준초과지진
하중 조건에서 변형 및 손상 거동 평가

지도교수 김 진 원

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

송 익 현

송익현의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

위 원 조선대학교 교수 정 운 관 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	vii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 재료 및 시험절차	2
제 1 절 시험 재료 및 시편	2
1. 시험 재료	2
2. 시 편	2
제 2 절 시험 장치	3
1. 시험 장치	3
제 3 절 시험 조건 및 절차	3
1. 시험 조건	3
2. 반복하중의 진폭	4
3. 반복하중의 형태	5
4. 시험 방법 및 절차	6
제 3 장 시험 결과	14
제 1 절 일정한 변위진폭 조건	14
1. SA312 TP316 스테인리스강 배관재	14
2. SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재	16
제 2 절 임의의 변위진폭 조건	17
1. SA312 TP316 스테인리스강 배관재	18
2. SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재	19
제 4 장 결 론	48

【참고문헌】 49

표 목 차

표 2.1.1 모사시편 손상시험에 사용된 재료의 화학조성(wt%)	7
표 2.1.2 모사시편 손상시험에 사용된 재료의 기계적물성치	7
표 2.3.1 모사시편을 이용한 손상시험 조건 및 시편 수량	7
표 2.3.2 시험 재료별 온도별 설계응력세기(S_m)	7
표 2.3.3 손상시험에 적용될 설계기준지진 및 설계기준초과지진 조건의 응력 기준(MPa)	8
표 2.3.4 손상시험에 적용될 설계기준지진 및 설계기준초과지진에 해당하는 하중선변위 크기(mm)	8
표 3.1.1 일정한 변위진폭 조건에서 수행된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편 시험 결과	21
표 3.1.2 일정한 변위진폭 조건에서 수행된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편 시험 결과	22
표 3.2.1 임의의 변위진폭 조건에서 수행된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편 시험 결과	23
표 3.2.2 임의의 변위진폭 조건에서 수행된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편 시험 결과	25

그 림 목 차

그림 2.1.1 모사시편 도면	9
그림 2.1.2 가공이 완료된 모사시편 사진	9
그림 2.2.1 모사시편 시험을 위한 시편과 시편이 설치된 상태의 사진	10
그림 2.3.1 유한요소해석을 통한 노치단면 응력 분포	11
그림 2.3.2 하중선변위의 크기에 따른 막응력과 굽힘응력 합 의 최대값	12
그림 2.3.3 모사시편 손상시험을 위한 반복하중의 형태	13
그림 3.1.1 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 모사시편 사진	26
그림 3.1.2 일정한 변위진폭 조건의 모사시편 시험에서 취득된 데이터의 예 · 27	27
그림 3.1.3 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편의 균열 형상	29
그림 3.1.4 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편의 하중-하중선변위 곡선	30
그림 3.1.5 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편의 최대하중	31
그림 3.1.6 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편에서 측정된 변형률 데이터	32
그림 3.1.7 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편에서 측정된 d-c PD 데이터	33
그림 3.1.8 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편의 균열 형상	34
그림 3.1.9 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편의 하중-하중선변위 곡선	35
그림 3.1.10 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편의 최대하중	36
그림 3.1.11 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편에서 측정된 변형률 데이터	37
그림 3.2.1 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 모사시편 사진	38
그림 3.2.2 임의의 변위진폭 조건의 모사시편 시험에서 취득된 데이터의 예 · 39	39

그림 3.2.3 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재
모사시편의 균열 형상 41

그림 3.2.4 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재
모사시편의 하중-하중선변위 곡선 42

그림 3.2.5 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재
모사시편에서 측정된 변형률 데이터 43

그림 3.2.6 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재
모사시편에서 측정된 d-c PD 데이터 44

그림 3.2.7 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재
모사시편의 균열 형상 45

그림 3.2.8 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재
모사시편의 하중-하중선변위 곡선 46

그림 3.2.9 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재
모사시편에서 측정된 변형률 데이터 47

ABSTRACT

Evaluation of Deformation and Damage Behaviors under Beyond Design Basis Earthquake Loading Condition using a Simulated Specimen

Song Ik Hyun

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

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Interest in the structural integrity of systems, structures, and components (SSCs) of nuclear power plants (NPPs) during a seismic event increased greatly after the nuclear accident in the Fukushima Daiichi NPPs. Since several NPPs experienced a beyond design basis earthquake (BDBE), in particular, structural integrity under beyond design basis earthquake conditions has come under greater scrutiny; recently, integrity assessments for SSCs under beyond design basis earthquake conditions are required for newly designed NPPs. Thus, the reliability of integrity assessments under beyond design basis earthquake conditions has become an important issue, and several studies have conducted to improve and develop integrity assessment procedure for SSCs under beyond design basis earthquake condition. For such studies, the verification of analytical model and acceptance failure criteria using experimental data are essential to ensure the reliability of assessment procedure. In general, the experiment data for verification are obtained from the large-scale system tests that can take into account realistic seismic loading characteristics and geometry effects. However, these are too expensive and difficult to handle.

Therefore, this study designed specimen and loading, which can simulate strain

accumulation and crack initiation in SSCs of NPPs under beyond design basis earthquake loading condition, and conducted failure test at RT and 316°C using these specimen and loading. From the results, the deformation and damage behaviors under beyond design basis earthquake loading condition are investigated. The results showed, regardless of test material and temperature, the cracks initiated at the center of round notch, at which the maximum strain appeared from the finite element analysis. For SA312 TP316 SS, the cracks were detected at cyclic load of 7×SSE for RT and at cyclic load of 6×SSE for 316°C. The cracks for SA508 Gr.3 Cl.1 LAS were detected at 4×SSE for both RT and 316°C. From these results, it is concluded that for both materials the failure of specimen occurs under seismic load levels several times higher than the design basis earthquake. Also, SA316 TP316 SS has higher safety margin under excessive seismic loading condition than SA508 Gr.3 Cl.1 LAS regardless of test temperature. Finally, it is confirmed that the specimen used in this study can adequately simulate the deformation and failure behaviors of SSCs under excessive seismic loading condition.

제 1 장 서 론

후쿠시마 원전 사고 이후 국내·외적으로 지진에 대한 관심이 크게 증가되고 있다. 특히 설계기준을 초과하는 지진 조건에서 원전의 안전성 확보가 요구됨에 따라 설계기준초과지진 하중 조건에서 기기와 설비의 건전성 평가 방법과 허용기준의 개발 필요성이 요구되고 있다[1,2]. 또한 여러 원전이 설계기준초과의 지진을 겪고[1,2], 설계기준초과의 지진 조건에서 원전의 안전성 평가가 요구된다. 따라서, 일본과 ASME Code 위원회 등은 설계기준초과지진 조건에서 원전 기기 및 설비의 건전성 평가를 위한 방법과 절차를 수립하기 위해 다양한 연구를 진행하고 있다[3-6]. 이와 관련하여 본 연구에서는 “설계기준초과지진 하중 조건에서 모사시편을 이용한 변형 및 손상 거동 평가”를 연구하였다.

설계기준초과지진 하중 조건에서 기기 및 설비의 손상 평가 기법과 제안된 변형을 기반 허용기준의 신뢰성 확인을 위해서는 반복하중에 따른 변형을 누적과 결함 생성 등 검증할 수 있는 시험 데이터가 필요하다. 일반적으로 지진하중을 고려한 검증시험은 실구조물을 대상으로 수행하며, 이를 통해 반복하중에 따른 구조물의 동적 거동과 국부적인 변형을 변화, 손상모드와 손상조건 등을 파악한다[5,6]. 실구조물을 이용한 검증시험은 실제 지진하중의 특성과 구조물의 형상적 특성을 고려할 수 있으나, 시험에 상당한 비용과 시간이 소요되며 시험을 수행하는 과정에 정밀한 제어가 어려운 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 설계기준초과지진을 고려한 하중 조건에서 변형률의 누적현상과 손상 발생을 파악하기에 적합한 모사시편과 하중을 설계하여, 상온과 원전 운전 온도인 316°C에서 손상시험을 수행하였다. 시험에는 2종류의 재료(노즐재 및 배관재)가 사용되었으며, 일정한 변위진폭(constant displacement amplitude)과 임의의 변위진폭(random displacement amplitude)을 갖는 반복하중이 변위제어 모드로 적용되었다. 시험은 시편에서 균열이 생성될 때까지 반복하중의 진폭을 증가시키며 진행하였으며, 시험 결과로부터 각 시험조건 별로 시간에 따른 하중선변위, 하중, 변형률(상온에서만), 그리고 전압강하(d-c PD) 데이터를 확보하였다. 또한, 시편에서 균열이 생성되는 하중 조건을 파악하였다.

제 2 장 재료 및 시험절차

제 1 절 시험 재료 및 시편

1. 시험 재료

본 연구에는 원전 1차측 배관에 사용되고 있는 2종류의 재료가 적용되었다. 한국표준형 원전에서 사용되는 SA312 TP316 스테인리스강(stainless steel, SS) 배관재와 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강(low alloy steel, LAS) 노즐재가 사용되었다.

표 2.1.1과 표 2.1.2은 시험에 사용된 2종류 재료의 화학조성과 상온의 기계적물성치를 정리한 것이다. 표 2.1.1의 화학조성은 재료성적서(CMTR)에 제시된 값이며, 표 2.1.2의 기계적물성치는 시험을 통해 확보된 인장물성치이다.

2. 시편

모사시편 시험에 사용할 수 있는 표준시편이 없기 때문에 본 연구에서는 반복하중 작용의 편의성과 시편에 작용되는 하중의 크기, 그리고 시편에서 변형률 분포 등을 고려하여 모사시편을 설계하였다. 즉, 시편에 변위제어 모드의 반복하중이 작용되는 동안, 시험기에 작용되는 하중은 크지 않으면서 시편에서 충분한 크기의 인장과 압축 변형률이 생성될 수 있는 형상을 갖도록 설계하였다. 또한, 시편에서 균열 생성 시 균열의 관찰과 변형률 측정의 편의성을 고려하였다. 시편 설계 시 형상에 따른 작용 하중의 크기와 변형률 분포 등은 유한요소해석을 통해 정량적으로 평가하였다.

그림 2.1.1은 설계가 완료된 시편의 형상을 나타낸 것으로, 시편의 외형은 ASTM E1820-15[7]에 제시된 파괴인성시험용 1T-CT 시편과 동일하다. 즉, 시편의 두께(B)는 25.4mm이며, 폭(W)은 50.8mm이다. 다만, 균열 대신 반경(Rn)이 6.0mm인 원형노치가 고려되었으며, 노치선단까지의 길이(ln)는 32.0mm이다. COD 게이지를 이용한 하중선변위(Load-line displacement) 측정을 위해 하중선 위치에 Knife Edge (d=10.0mm)를 가공하였으며, 전압강하(d-c Potential Drop, d-c PD)방법을 적용하여 균열 개시를 확인하기 위한 입·출력 단자 설치 탭을 가공하였다. 재료 종류에 관계없이 시편의 노치가 배관과 노즐의 원주방향을 향하도록 채취(L-C dir)되었으며, 그림 2.1.2는 가공이 완료된 모사

시편을 보여주고 있다.

그림 2.1.1과 같이 시편이 설계되는 경우에 COD 게이지의 최대 측정 길이를 고려하면, 시편에 가할 수 있는 최대 하중선변위는 이론적으로 +6.0mm, -4.0mm이다. 시험 온도와 재료 종류에 따라 차이는 있으나 예비해석 결과에 의하면, 그림 2.1.1의 시편에 +6.0mm의 하중선변위가 가해질 때 시편에 작용되는 최대하중은 40kN 미만이며, 노치 선단에서 최대 변형률은 약 12% 정도인 것으로 확인되었다.

제 2 절 시험 장치

1. 시험 장치

모사시편에 대한 손상시험에는 고온 챔버가 부착된 100kN 용량의 유압식 동적시험기(Instron사 Model 8801MT)가 사용되었다. 모든 시험에서 시편의 하중선변위는 게이지 길이가 6mm이고 측정 거리가 10mm인 고온용 COD 게이지(Epsilon사 Model 3601-006M-100M-HT)를 사용하여 측정하였다. 고온 시험 시 시편의 온도는 K-type 열전대를 시편의 양면에 용접하여 2채널의 디지털 온도계(OMEGA사 Model HH-23)로 측정하였다. 또한, 상온 시험의 경우에는 시편의 양쪽 표면(노치 선단에서 4.0mm 떨어진 위치)과 후면 중심에 소성 변형률게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 그림 2.2.1은 변형률 게이지와 d-c PD 단자가 부착된 상태의 시편과 챔버 내에 시편이 거치된 상태의 사진을 보여주고 있다.

제 3 절 시험 조건 및 절차

1. 시험 조건

모사시편을 이용한 손상시험은 크게 2가지 형태의 반복하중 조건에서 진행되었다. 하나는 일정한 변위진폭을 갖는 반복하중(constant amplitude, LP-1)이며, 다른 하나는 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중(random amplitude, LP-2)이다. 각 재료별, 하중 조건별로 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 시험이 진행되었다. 표 2.3.1은 모사시편을 이용한 손상시험의 조건을 정리한 것이다. 각 시험에 적용된 반복하중의 구체적인 크기와 형태를 설명하면 다음과 같다.

2. 반복하중의 진폭

모사시편을 이용한 손상시험에는 설계기준지진(Design Basis Earthquake, DBE) 뿐 아니라 설계기준을 초과하는 지진을 모사한 반복하중이 고려되었다. 따라서, 설계기준지진과 설계기준초과지진을 가정하여 이들 지진하중의 응력기준에 도달하는 하중선변위의 크기를 결정하고, 결정된 하중선변위를 진폭으로 갖는 반복하중을 변위제어 모드로 시편에 적용하였다.

이를 위해 먼저 설계기준지진에 해당하는 하중선변위를 결정하였다. 본 영역에서는 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)를 설계기준지진의 크기로 설정하였다. 원전 안전등급 기기의 설계에 적용되고 있는 ASME Code Sec.III [8]에서는 SSE 지진하중 조건의 설계에서 관성력에 대한 허용응력기준으로 $3S_m$ 을 적용하고 있으며, 추가적으로 앵커 이동에 대한 허용응력기준으로 $3S_m$ 을 적용하고 있다. 즉, 각 하중별로 막응력(σ_m)과 굽힘응력(σ_b)의 합이 $3S_m$ 을 초과하지 않도록 설계하고 있다. 지진 조건에서는 기기 및 설비에 관성력과 앵커 이동이 동시에 작용하지만, 모사시편을 이용한 손상시험에서는 두 하중을 동시에 고려할 수 없으므로 SSE에 대한 허용응력기준을 $6S_m$ 으로 보수적으로 설정하였다. 즉, 시편에서 하중선변위에 의해 유발되는 막응력과 굽힘응력의 합이 $6S_m$ 을 초과하지 않는 조건을 SSE에 대한 허용기준으로 적용하였다(식 (2.3.1)).

$$\sigma_m + \sigma_b \leq 6S_m \quad \text{식 (2.3.1)}$$

모사시편에서 식 (2.3.1)을 만족하는 하중선변위의 크기를 결정하기 위해서, 그림 2.3.1(a)에 나타낸 것과 같이 모사시편에 대한 선형탄성 유한요소해석을 수행하여 재료와 온도별로 노치 중심의 단면에서 위치에 따른 응력을 계산하였다(그림 2.3.1(b)). 식 (2.3.1)의 허용응력기준을 적용하기 위해서 그림 2.3.1(b)의 결과에서 각 하중선변위 별로 응력성분을 분리하였다(그림 2.3.2(a)). 응력성분을 분리하여 구한 막응력과 굽힘응력 합의 최대값을 하중선변위의 크기에 따라 나타내면 시험 재료와 온도별로 그림 2.3.2(b)와 같이 주어진다.

시험 재료와 온도별로 그림 2.3.2(b)에 식(2.3.1)을 적용하여 SSE의 허용응력기준에 해당하는 하중선변위의 크기를 결정하였다. 이때 상온과 316°C 에서 각 재료에 대한 설계응력세기(S_m)는 표 2.3.2와 같으며, SSE에 해당하는 하중선변위는 표 2.3.4에 제시되었다. 표 2.3.2의 S_m 는 ASME Sec.II [9]의 값을 참조하였다.

한편, 모사시편을 이용한 손상시험에 적용할 설계기준초과지진 하중 조건의 하중선변위도 동일한 방법으로 계산되었다. 본 시험을 위한 설계기준초과지진 조건으로는 표

2.3.3에 나타낸 바와 같이 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 경우 5단계, SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 경우에는 4단계 크기를 고려하였다. 각 설계기준초과지진 하중 조건에 해당하는 허용응력의 크기는 표 2.3.3에 정리되었다. 여기서 $1.67 \times SSE$ 조건은 미국과 국내 원전에서 내진성능 평가시 적용하는 설계기준초과지진의 크기이다 [1]. 표 2.3.4은 표 2.3.3에 제시된 각 설계기준초과지진 하중 조건에 해당하는 허용응력 기준을 그림 2.3.3(b)에 적용하여 구한 하중선변위를 나타낸 것이다.

따라서, 모사시편을 이용한 손상시험에는 표 2.3.3의 하중선변위를 최대진폭으로 갖는 변위제어 모드의 반복하중이 적용되었으며, 반복하중의 형태와 적용 방법은 다음 절에 기술하였다.

3. 반복하중의 형태

원전 안전등급 기기 및 설비의 피로설계 절차를 검토하면, 설계수명 기간 동안 1회의 SSE와 5회의 OBE(Operating Based Earthquake) 또는 2회의 SSE가 발생하는 것으로 가정한다. 또한, 1회 지진 발생시 최대진폭을 갖는 반복하중이 10 cycles 작용하는 것으로 가정한다. 따라서, 원전 안전등급 기기에 대한 피로설계에서는 설계수명 동안 SSE에 해당하는 최대 진폭을 갖는 반복하중이 20 cycles 작용되거나, SSE에 해당하는 진폭과 OBE에 해당하는 진폭을 갖는 반복하중이 각각 10 cycles과 50 cycles씩 작용되는 것으로 고려한다.

따라서, 모사시편 시험에서는 가정된 지진하중의 크기에 따라 표 2.3.4에 제시된 하중선변위를 진폭으로 갖는 20 cycles의 반복하중을 1세트의 LP-1 하중(Constant amplitude)으로 설정하였다. 또한, LP-1 형태의 하중과 비교를 위해서 최대진폭은 표 2.3.3에 제시된 하중선변위과 같지만, 임의의 진폭을 갖는 반복하중을 LP-2 하중(Random amplitude)으로 설정하였다. 구체적으로 LP-2 하중은 최대진폭의 100 %(2 cycles), 90 %(2 cycles), 80 %(2 cycles), 70 %(2 cycles), 55 %(2 cycles), 40 %(2 cycles), 30 %(4 cycles), 15 % (4 cycles)의 진폭을 갖는 20 cycles의 반복하중으로 구성되었다. 따라서, 실제 손상시험에서는 시편에서 균열이 생성될 때까지 SSE에 해당하는 진폭부터 20 cycles(1 세트)씩 지진하중의 크기를 1단계씩 증가시키면서 반복하중을 가하도록 하중을 설계하였다. 그림 2.3.3는 손상시험에 적용된 LP-1 하중과 LP-2 하중의 예를 보여주고 있다.

4. 시험 방법 및 절차

가공이 완료된 모사시편은 먼저 시편 번호를 부여하였다. 시편 번호가 부여된 시편은 세척 후 시편의 두께, 폭, 노치길이 및 반경 등의 형상을 측정하고, 설계된 형상에서 크게 벗어나는 시편($\pm 0.1\text{mm}$ 초과)은 시험에서 제외하였다. 상온 시험용 시편에 대해서는 시편의 양쪽 측면(노치선단에서 4.0mm 떨어진 위치)과 시편의 후면 중심에 변형을 게이지를 부착하였다. 또한, 시험 온도에 관계없이 모든 시편에는 d-c PD 신호를 받기 위해 전류의 입·출력단자와 d-c PD 측정단자를 연결하였다. 시험기에 시편을 장착한 후 COD 게이지를 설치하였다. 시험에 앞서 오동작에 의한 시험기, 시편, 그리고 게이지를 보호하기 위해서, 시험기 제어기에 변위 제한치를 설정하였다. 시험을 시작하기에 앞서 로드 셀, COD 게이지, 변형률게이지, 그리고 Nano-voltmeter의 출력선을 DAQ에 연결하고, 정상적인 신호 입력 여부를 확인한 후 모든 값이 '0'이 되도록 초기화 후 시험을 시작한다.

시편에 가해지는 반복하중의 형태(LP-1, LP-2)에 관계없이 SA316 TP316 스테인리스강 배관재의 경우에는 SSE, 1.67 × SSE, 3 × SSE, 5 × SSE, 6 × SSE, 7 × SSE로 진폭을 단계적으로 증가시키면서 20cycles씩 반복하중을 가했으며, 각 단계별로 20cycles의 반복하중을 가한 후 균열생성을 육안으로 확인하였다. 또한, SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 경우에는 SSE, 1.67 × SSE, 3 × SSE, 4 × SSE, 5 × SSE로 진폭을 증가시키면서 20cycles씩 반복하중을 가하고 각 단계마다 균열생성 여부를 확인하였다. 반복하중은 삼각파 형태의 변위제어 모드로 적용되며, 시험기는 COD 게이지에서 측정되는 하중선 변위를 입력으로 제어되었다. 시험에 적용된 하중선변위 속도는 2.0mm/min이다. 상온 시험의 경우에는 시편의 전면에 저배율 현미경을 설치하여 균열생성 여부를 확인하였으며, 고온 시험에서는 챔버 옆면에 설치된 창을 통해 균열생성 여부를 확인하였다. SA316 TP316 스테인리스강 배관재는 7 × SSE, SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재는 5 × SSE까지 20cycles씩 반복하중을 가한 후 균열이 생성되지 않으며, 균열이 생성될 때까지 각각 7 × SSE와 5 × SSE에 해당하는 반복하중을 20cycles씩 반복하여 가하면서 균열생성 여부를 확인하였다.

고온 시험의 경우에는 시편의 양면에 열전대를 용접하여 온도를 측정하였으며, 측정온도가 설정 온도의 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내에서 20분 이상 유지된 상태에서 시험을 시작하였다. 또한, 시험이 진행되는 동안 시편의 온도가 설정 온도의 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내에 유지할 수 있도록 고온 챔버를 제어하였다.

표 2.1.1 모사시편 손상시험에 사용된 재료의 화학조성(wt%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
SA312 TP316 SS	0.009	0.385	1.22	0.008	0.000	11.2	16.2	2.08	-	-	-
SA508 Gr.3 Cl.1 LAS	0.22	0.25	1.31	0.006	0.001	0.76	0.21	0.49	0.016	0.03	0.002

표 2.1.2 모사시편 손상시험에 사용된 재료의 기계적물성치

Materials	항복강도, YS(MPa)	인장강도, TS(MPa)	균일연신률, UE(%)	총연신률, TE(%)	단면수축률, RA(%)
SA312 TP316 SS	275.3	611.9	58.9	78.1	-
SA508 Gr.3 Cl.1 LAS	497.7	644.7	10.05	23.30	74.14

표 2.3.1 모사시편을 이용한 손상시험 조건 및 시편 수량

Materials	Temp.	Loading type	No. of spec.	etc.
SA312 TP316 SS	RT	LP-1	2	Constant amp.
		LP-2	3	Random amp.
	316°C	LP-1	2	Constant amp.
		LP-2	2	Random amp.
SA508 Gr.3 Cl.1	RT	LP-1	2	Constant amp.
		LP-2	2	Random amp.
	316°C	LP-1	2	Constant amp.
		LP-2	2	Random amp.

 표 2.3.2 시험 재료별 온도별 설계응력세기(S_m)

SA312 TP316 SS 배관재		SA508 Gr.3 Cl.1 LAS 노즐재		etc.
RT	316°C	RT	316°C	-
137.9 MPa	117.2 MPa	184.1 MPa	184.1 MPa	-

표 2.3.3 손상시험에 적용될 설계기준지진 및 설계기준초과지진 조건의 응력 기준 (MPa)

재료 종류		설계기준	설계기준초과					
		SSE(6Sm)	1.67×SSE	3×SSE	4×SSE	5×SSE	6×SSE	7×SSE
SA312	RT	827.4	1381.8	2482.2	-	4137.0	4964.4	5791.8
TP316	316°C	703.3	1174.4	2109.8	-	3516.3	4219.6	4922.8
SA508	RT	1104.5	1844.6	3313.6	4418.2	5522.7	-	-
Gr.3 Cl.1	316°C	1104.1	1844.6	3313.6	4418.2	5522.7	-	-

표 2.3.4 손상시험에 적용될 설계기준지진 및 설계기준초과지진에 해당하는 하중선변위 크기 (mm)

재료 종류		설계기준	설계기준초과					
		SSE(6Sm)	1.67×SSE	3×SSE	4×SSE	5×SSE	6×SSE	7×SSE
SA312	RT	0.46774	0.77827	1.39468	-	2.32162	2.80644	3.27418
TP316	316°C	0.44508	0.74042	1.32670	-	2.20832	2.67048	3.08994
SA508	RT	0.59779	0.99545	1.78484	2.39116	2.97189	-	-
Gr.3 Cl.1	316°C	0.66005	1.09942	1.97161	2.62739	3.28318	-	-

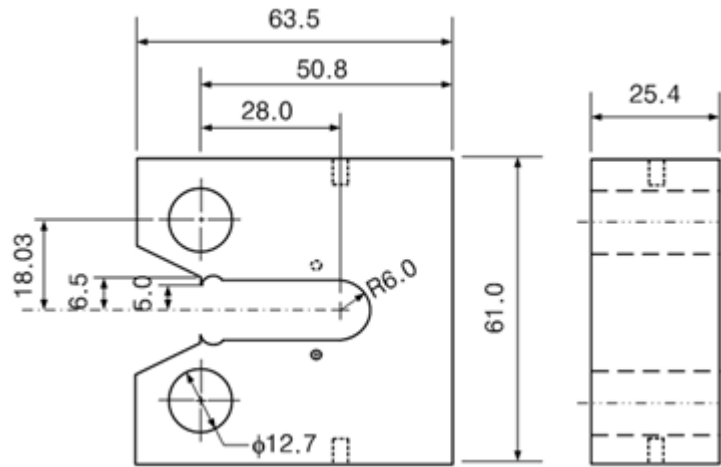
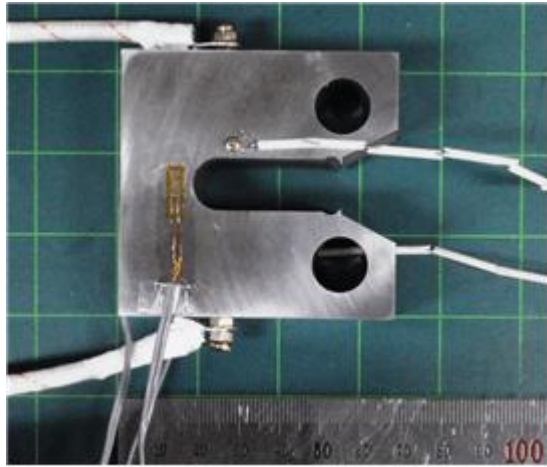


그림 2.1.1 모사시편 도면



그림 2.1.2 가공이 완료된 모사시편 사진

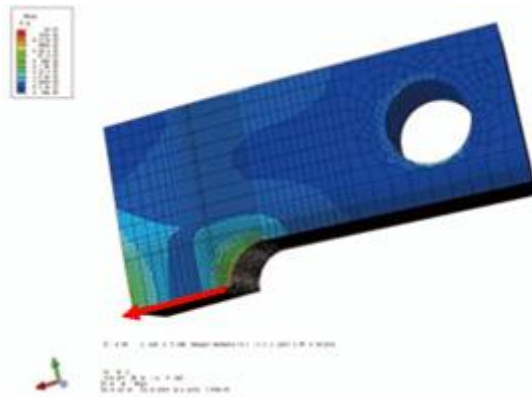


(a) 모사시편 시험을 위한 시편

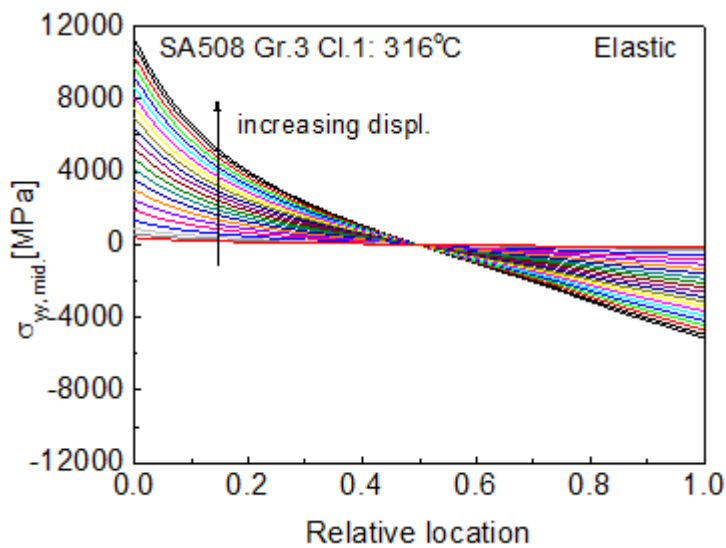


(b) 모사시편이 설치된 상태

그림 2.2.1 모사시편 시험을 위한 시편과 시편이 설치된 상태의 사진

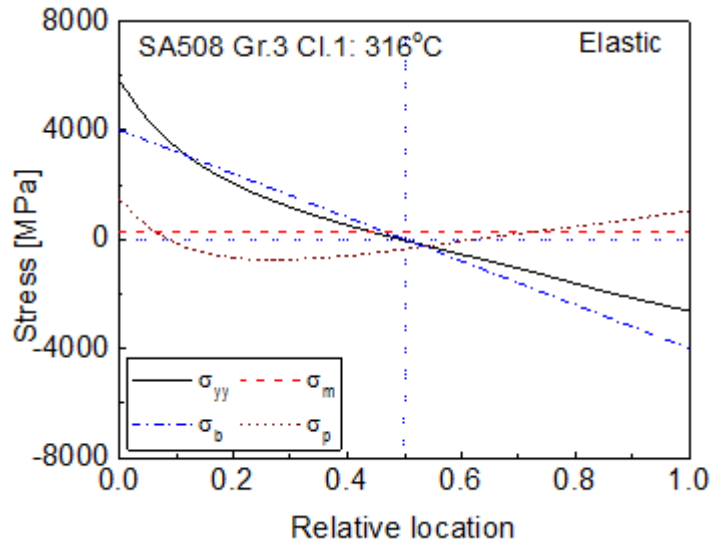


(a) 유한요소해석 모델

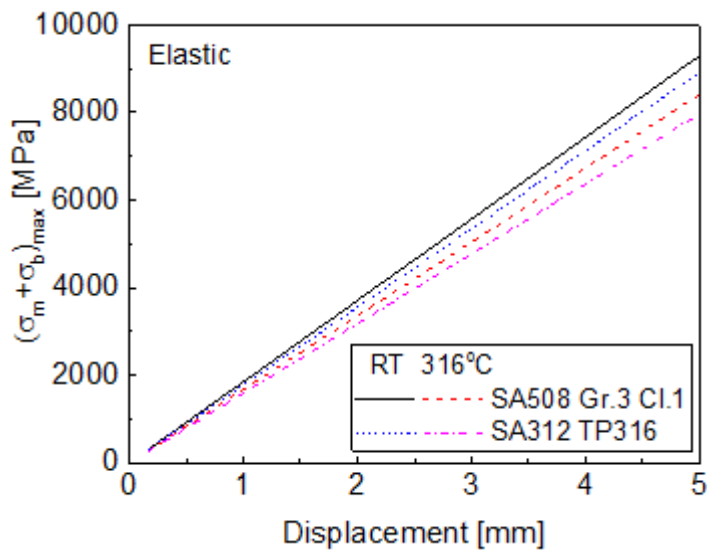


(b) 노치선단 응력분포

그림 2.3.1 유한요소해석을 통한 노치단면 응력 분포

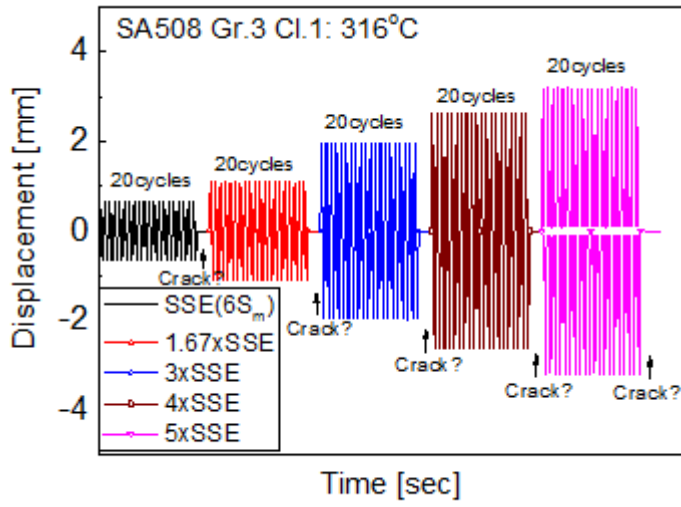


(a) 응력성분 분리

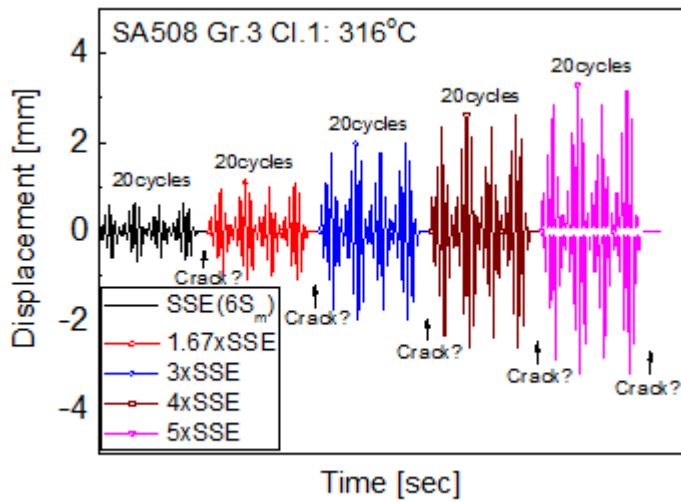


(b) 막응력과 굽힘응력의 합

그림 2.3.2 하중선변위의 크기에 따른 막응력과 굽힘응력 합의 최대값



(a) LP-1 (Constant amplitude)



(b) LP-2 (Random amplitude)

그림 2.3.3 모사시편 손상시험을 위한 반복하중의 형태

제 3 장 시험 결과

제 1 절 일정한 변위진폭 조건

본 연구에서는 SA312 TP316 스테인리스강 배관재와 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재를 대상으로 일정한 변위진폭을 갖는 반복하중 조건(LP-1)에서 모사시편에 대한 손상시험을 수행하였다. 시험은 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 수행되었으며(그림 3.1.1참조), 시험 결과로부터 하중선변위, 하중, d-c PD, 변형률(상온의 경우) 데이터를 취득하고 균열이 생성되는 하중 조건을 파악하였다. 그림 3.1.2는 일정한 변위진폭 조건에서 취득된 하중선변위, 하중, 변형률, d-c PD 신호 데이터의 예를 보여주고 있다.

1. SA312 TP316 스테인리스강 배관재

일정한 변위진폭을 갖는 반복하중 조건에서 SA312 TP316 스테인리스강 배관재에 대한 모사시편 시험 결과, 그림 3.1.3에 나타난 바와 같이 시험온도에 관계없이 노치부에서 여러 개의 미세균열이 생성되었으며, 이들 중 중심에 위치한 결함이 가장 크게 성장하였다. 노치부 중심은 시험 전 수행된 유한요소해석에서 응력과 소성변형률이 최대인 위치로 시험 결과가 해석 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 각 시편별로 균열이 관찰된 하중 조건은 표 3.1.1에 정리되었으며, 시험에 적용된 반복하중의 크기와 회수가 함께 제시되었다. 또한, 균열이 명확하게 관찰되기 전에 노치부에서 결함의 흔적이 나타나기 시작한 시점도 함께 기록하였다. 표 3.1.1에서 알 수 있는 바와 같이 상온의 경우에는 동일한 두 시편에서 균열 생성 조건이 거의 일치하였다. 즉, SSE의 7배에 해당하는 진폭을 갖는 반복하중이 작용될 때 노치선단에서 균열이 관찰되었으며, SSE의 6배에 해당하는 진폭의 반복하중이 작용될 때 노치부에서 결함의 흔적이 발견되었다. 316°C에서는 두 시편에서 모두 SSE의 6배에 해당하는 진폭의 반복하중이 작용될 때 균열이 발견되었다. 따라서, SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 경우에는 시험 온도에 관계없이 설계기준지진의 6~7배에 해당하는 상당히 큰 지진하중 조건에서 손상이 발생하였으며, 상온에 비해 316°C에서는 상대적으로 낮은 지진하중 조건에서 손상이 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 3.1.4은 상온과 316°C에서 시험된 모사시편에 대한 하중-하중선변위 곡선을 나

타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 변위제어 모드의 반복하중 조건에서 시험이 진행되는 동안 하중선변위가 매우 잘 제어되었음을 알 수 있다. 또한, 시험온도에 관계없이 SA312 TP316 스테인리스강 배관재는 설계기준초과지진 하중을 모사한 각 하중 조건에서 반복하중에 의한 경화 현상이 뚜렷한 것을 확인하였다. 그림 3.1.4는 반복하중이 작용되는 동안 각 Cycle의 최대하중을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동일 조건에서 최대하중이 거의 일치하였으며, SSE 하중 조건을 제외하면 각 하중 단계별로 초기 5cycles 정도까지 반복경화에 의해 최대하중이 크게 증가한 이후 최대하중이 안정화되는 경향을 보였다. 다만, 상온에서 $7.0 \times SSE$ 에 해당하는 진폭의 반복하중이 작용되는 경우, 초기에는 반복경화에 의해 하중 증가가 나타나지만 약 7~8 cycles 이후부터 최대하중이 감소하는 경향을 보였다. 이것은 균열 생성에 의한 하중지지 능력의 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

그림 3.1.6은 상온에서 시편의 양쪽 표면(Left, Right)과 후면 중심(Back)에서 측정된 변형률 데이터를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시편의 양쪽 측면(노치선단에서 4mm 떨어진 위치)에서 측정된 변형률의 진폭이 거의 일치하였으며, 후면 중심에서 측정된 변형률이 측면에서 측정된 변형률에 비해 훨씬 큰 값을 보였다. 그러나, 일부 시험에서는 시편 후면에 부착된 변형률 게이지가 조기에 탈락됨에 따라 균열이 생성되는 시점까지 변형률을 측정하지 못하는 한계를 보였다. 전체적으로 위치에 관계없이 반복하중의 진폭이 증가됨에 따라 변형률의 진폭은 뚜렷이 증가하였으며, 동일한 진폭의 반복하중 조건에서는 Cycle 수가 증가함에 따라 변형률의 평균값이 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 즉, 일정한 진폭의 변위가 반복적으로 작용됨에 따라 모사시편에서 변형률이 누적되고 있는 것을 알 수 있다.

한편, 그림 3.1.7는 상온과 $316^{\circ}C$ 에서 측정된 d-c PD 데이터를 시간에 따라 나타낸 것이다. 시험온도에 관계없이 주기적으로 반복하중이 작용됨에 따라 d-c PD 데이터의 진동(증가/감소) 현상이 나타났다. 상온의 경우에는 작용되는 반복하중의 진폭이 증가함에 따라 d-c PD 데이터의 진폭이 함께 증가하는 경향을 보였으며, Cycle이 증가함에 따라 d-c PD 데이터가 전체적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 육안으로 관찰된 균열 관찰시점과 d-c PD 데이터를 비교할 때, d-c PD 데이터에서 균열 발생 시점을 정확히 파악하기는 어려운 것으로 판단되었다. 특히 $316^{\circ}C$ 조건의 시험에서는 그림 3.1.7에서 알 수 있는 바와 같이 d-c PD 데이터에서 노이즈가 크게 발생하여 균열 발생 시점을 파악하는 것이 불가능하였다. 따라서, 표 3.1.1에 제시된 각 시편의 균열 발생 시점은 육안으로 확인한 것이다.

2. SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재

SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재에 대한 모사시편 시험이 상온과 316°C에서 수행되었다. SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 경우에도 시험온도에 관계없이 노치부 중심에서 균열이 생성되었다(그림 3.1.8). 각 시편에서 균열이 관찰된 하중 조건과 결함의 흔적이 발견된 시점은 표 3.1.2에 정리되었으며, 시험에 적용된 반복하중의 크기와 Cycle 수가 함께 제시되었다. 표 3.1.2에서 알 수 있는 바와 같이 상온에서는 각각 SSE의 4배와 SSE의 5배에 해당하는 진폭을 갖는 반복하중 조건에서 균열이 관찰되었으며, 316°C에서는 두 시편에서 모두 SSE의 4배에 해당하는 하중조건에서 균열이 발견되었다. 상온 시험의 경우, 4.0 × SSE의 15번째와 5.0 × SSE의 1번째 cycle에서 균열이 발견됨에 따라 실제 거의 동일한 하중조건에서 균열이 발생한 것으로 판단된다. 상온과 316°C에서 모두 4.0 × SSE에 해당하는 반복하중 조건에서 손상이 발생하였으나, 상온에 비해 316°C에서는 더 작은 Cycle 수에서 균열이 발견되었다. 따라서, SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 경우에도 설계기준지진 보다 상당히 큰 반복하중 조건에서 손상이 발생하였으며, 상온에 비해 316°C에서 약간 일찍 손상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 표 3.1.1의 SA312 TP316 스테인리스강 배관재에 대한 시험 결과와 비교하면, SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재가 상대적으로 낮은 지진하중 단계에서 손상이 발생한 것을 알 수 있다.

그림 3.1.9은 상온과 316°C에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 하중-하중선변위 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 경우에도 변위제어 모드의 반복하중 조건에서 손상시험이 적절히 진행된 것을 알 수 있다. 또한, 시험온도에 관계없이 설계기준초지진을 모사한 반복하중 조건에서 반복경화 현상은 크지 않은 것을 알 수 있다.

그림 3.1.10은 일정 변위진폭의 반복하중이 작용되는 동안 Cycle에 따른 최대하중의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 시험 조건에서 Cycle에 따른 최대하중의 변화가 거의 일치하였다. 또한, SA312 TP316 스테인리스강 배관재와 달리 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재에서는 반복하중의 진폭이 증가됨에 따라 하중의 변화는 큰 반면, 주어진 진폭 조건(하중 단계)에서 반복하중에 따른 최대하중의 변화는 크지 않았다. 즉, 설계기준초과지진 하중 조건에서 반복하중에 따른 경화 현상이 미미하였다. 상온의 경우에는 각 진폭 조건에서 cycle이 증가함에 따라 최대하중이 약간씩 감소하는 경향을 보였으며, Cycle 증가에 따른 최대하중의 감소는 작용되는 반복

하중의 진폭이 클수록 더욱 뚜렷하였다. 316°C에서는 전체적으로 반복하중에 따른 최대하중의 변화가 거의 없었다. 다만, 반복하중의 진폭이 큰 4.0×SSE에서는 약 5cycles 이후부터 하중이 감소하는 경향을 보였다. SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재에서 설계 기준초과지진 하중을 모사한 반복하중 조건에서 이러한 최대하중의 변화는 앞서 수행된 Cyclic 응력-변형을 물성시험에서 파악된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 변형 특성과 일치하는 것이다.

SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재에 대해서도 상온에서는 시편의 양쪽 측면과 후면 중심에서 변형률을 측정하였으며, 그림 3.1.11은 측정된 변형률을 시간에 따라 나타낸 것이다. 이 경우에도 시편의 양쪽 측면(노치선단에서 4mm 떨어진 위치)에서 측정된 변형률은 거의 일치하였으며, 후면 중심에서 측정된 변형률의 진폭은 측면에서 측정된 변형률에 비해 큰 값을 보였다. 위치에 관계없이 시편에 작용된 변위의 진폭이 증가됨에 따라 변형률의 진폭은 뚜렷이 증가하였으며, 동일한 반복하중 조건에서 Cycle 수가 증가함에 따라 평균 변형률이 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 즉, SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 경우에도 설계기준초과지진 하중을 모사한 변위제어 모드의 반복하중이 시편에 작용될 때, 노치단면에서 변형을 누적 현상이 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

한편, SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재에 대한 시험에서도 d-c PD 데이터를 측정하였다. 그러나, SA312 TP316 스테인리스강 배관재에 대한 시험 결과와 같이 d-c PD 데이터만으로 모사시편에서 균열 생성을 확인하기 어려운 것으로 판단되었다. 특히 고온 시험에서는 노이즈로 인한 균열 발생 시점을 파악하는 것이 불가능하다. 따라서, 표 3.1.2에 제시된 각 시편의 균열 발생 시점은 육안으로 확인한 것이다.

제 2 절 임의의 변위진폭 조건

SA312 TP316 스테인리스강 배관재와 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재를 대상으로 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중 조건(LP-2)에서 모사시편에 대한 손상시험을 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 수행하였다(그림 3.2.1 참조). 시험 결과로부터 하중선변위, 하중, d-c PD, 변형률(상온의 경우) 데이터를 취득하고 시편에서 균열생성 조건을 파악하였다. 그림 3.2.2은 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 손상시험 데이터의 예를 보여 주고 있다.

1. SA312 TP316 스테인리스강 배관재

임의의 변위진폭을 갖는 반복하중 조건에서 SA312 TP316 스테인리스강 배관재에 대한 모사시편 시험 결과, 시험온도에 관계없이 노치부 중심에서 균열이 생성되었다(그림 3.2.3). 균열생성 위치와 균열 형상은 앞서 일정한 변위진폭의 반복하중 조건에서 수행된 모사시편 시험 결과와 일치한다. 각 시편별로 균열이 관찰된 하중 조건은 표 3.2.1에 정리되었으며, 손상시험에 적용된 반복하중의 크기와 Cycle 수가 함께 제시되었다. 표 3.2.1에서 알 수 있는 바와 같이 상온에서는 각 시편 별로 3번째 7×SSE 하중의 8번째 Cycle, 4번째 7×SSE 하중의 7번째 Cycle, 3번째 7×SSE 하중의 17번째 Cycle에서 균열이 관찰되었으며, 316°C에서는 3번째 7×SSE 하중의 8번째와 13번째 Cycle에서 균열이 관찰되었다. 따라서, 임의의 변위진폭 조건에서도 SA312 TP316 스테인리스강 배관재는 SSE의 6~7배에 해당하는 큰 지진하중 조건에서 손상이 발생하였다. 비록 차이는 크지 않지만 임의의 변위진폭 조건에서도 상온에 비해 316°C에서 약간 일찍 손상이 발생하는 것으로 평가되었다. 또한, 일정한 변위진폭을 갖는 반복하중 조건에 비해 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중 조건에서 손상이 늦게 발생하였다. 이것은 일정한 변위진폭을 갖는 반복하중에 비해 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중의 진폭이 평균적으로 작기 때문이다.

그림 3.2.4는 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중 조건에서 주어진 하중-하중선변위 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 임의의 변위진폭 조건에서도 반복하중이 작용되는 동안 하중선변위가 매우 잘 제어되었으며, 이를 통해 신뢰성 있는 손상시험 결과가 확보된 것을 알 수 있다.

그림 3.2.5은 상온에서 시편의 양쪽 측면과 후면 중심에서 측정된 변형률 데이터를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중이 작용되는 경우에도 시편의 양쪽 측면(노치선단에서 4mm 떨어진 위치)에서 측정된 변형률은 거의 일치하는 값을 보였으며, 후면 중심에서 측정된 변형률의 진폭이 측면에서 측정된 변형률에 비해 훨씬 큰 값을 보였다. 변형률의 진폭은 작용되는 반복하중의 진폭에 비례하여 변화되었으며, 전체적으로 반복하중의 Cycle이 증가됨에 따라 평균 변형률이 상승하는 경향을 보였다. 따라서, 임의의 변위진폭을 갖는 설계기준초과지진 하중 조건에서도 모사시편에서 변형률 누적 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

한편, 그림 3.2.6는 상온과 316°C에서 반복하중이 작용되는 동안 측정된 d-c PD 데이

터를 시간에 따라 나타낸 것이다. 시험온도에 관계없이 시편에 임의의 진폭을 갖는 반복하중이 작용됨에 따라 d-c PD 데이터에서도 진폭을 보였으며, 진폭의 크기가 작용하중의 진폭과 비례하는 경향을 보였다. 따라서, 시편에서 균열 생성과 무관하게 d-c PD 신호가 인장과 압축 변형에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 시험 온도에 따라 살펴보면, 상온에서는 반복하중의 Cycle이 증가됨에 따라 전체적으로 d-c PD 데이터가 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 거동은 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 결과와 일치한다. 그러나, d-c PD 데이터에서 균열생성을 파악할 수 있는 특징은 파악되지 않았다. 특히 316°C에서는 노이즈로 인해 d-c PD 데이터에서 균열 발생을 파악하는 것이 불가능하였다. 따라서, 임의의 변위진폭 조건에서도 육안으로 시편을 직접 관찰함으로써 균열생성 여부를 판단하였다.

2. SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재

임의의 변위진폭을 갖는 반복하중 조건에서 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재에 대한 손상시험 결과, 시험 온도에 관계없이 응력과 변형률이 가장 높은 노치부 중심에서 균열이 생성되었다(그림 3.2.7). 각 시편별로 균열이 관찰된 하중 조건은 표 3.2.2에 정리되었으며, 시험에 적용된 반복하중의 크기와 Cycle 수가 함께 제시되었다. 표 3.2.2에서 알 수 있는 바와 같이 상온의 두 시편에서는 2번째 5×SSE 하중의 8번째 Cycle과 2번째 5×SSE 하중의 3번째 Cycle에서 균열이 관찰되었으며, 316°C에서는 1번째 5×SSE 하중의 18번째와 13번째 Cycle에서 균열이 관찰되었다. 따라서, 임의의 변위진폭 조건에서도 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재는 설계기준지진의 5배에 해당하는 큰 설계기준초과지진 조건에서 손상이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 상온에 비해 316°C에서 약간 일찍 손상이 발생하였으며, SA316 TP316 스테인리스강 배관재와 비교하여 낮은 지진하중 조건에서 손상이 발생하였다. 이러한 거동은 앞 절에서 살펴본 일정한 변위진폭 조건의 시험 결과와도 잘 일치한다. 또한, 시험온도에 관계없이 일정한 변위진폭을 갖는 반복하중에 비해 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중이 작용될 때 더 큰 지진하중 조건에서 손상이 발생되었다. 이것은 일정한 변위진폭에 비해 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중에서 평균 진폭이 작기 때문이다.

그림 3.2.8은 상온과 316°C에서 하중-하중선변위 곡선을 나타낸 것으로, 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중 조건에서 하중선변위가 잘 제어된 것을 알 수 있다. 또한, SA312 TP316 스테인리스강 배관재와 달리 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재는 반복하

중이 작용될 때 316°C에서도 상온과 유사한 하중지지능력을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 3.2.9은 상온에서 시편의 양쪽 측면과 후면 중심에서 측정된 변형률을 시간에 따라 나타낸 것이다. SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재에 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중이 작용되는 경우에도 시편의 양쪽 측면(노치선단에서 4mm 떨어진 위치)에서 측정된 변형률에 비해 후면 중심에서 측정된 변형률의 진폭이 훨씬 큰 값을 보였으며, 위치에 관계없이 변형률의 진폭이 시편에 작용된 반복하중의 진폭과 거의 비례하는 경향을 보였다. 또한, 전체적으로 반복하중 Cycle이 증가됨에 따라 평균 변형률이 상승하는 경향을 보였다. 따라서, 임의의 진폭을 갖는 지진하중이 작용될지라도 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 시편에서는 변형률이 누적되는 것을 확인할 수 있다.

한편, 그림으로 나타내지 않았으나 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 경우에도 SA312 TP316 스테인리스강 배관재와 같이 시험 온도에 관계없이 반복하중이 작용됨에 따라 d-c PD 데이터에서 진폭을 보였으며, 진폭의 크기는 시험에 적용된 반복하중의 진폭에 비례하였다. 또한, 상온에서는 반복하중의 Cycle이 증가함에 따라 d-c PD 데이터가 전체적으로 증가하는 경향을 보였으나, d-c PD 데이터에서 균열 생성을 판단할 수 있는 뚜렷한 변화는 관찰되지 않았다.

표 3.1.1 일정한 변위진폭 조건에서 수행된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편 시험 결과

시험 온도	Spec. I.D	작용 반복하중	흔적 관찰	균열 관찰
RT	TS-02	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 6.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 14cycles	19th cycle (6.0 × SSE)	14th cycle (7.0 × SSE)
	TS-03	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 6.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 14cycles	18th cycle (6.0 × SSE)	14th cycle (7.0 × SSE)
316°C	TS-06	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 6.0 × SSE: 20cycles	-	13th cycle (6.0 × SSE)
	TS-09	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 6.0 × SSE: 20cycles	-	15th cycle (6.0 × SSE)

표 3.1.2 일정한 변위진폭 조건에서 수행된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편 시험 결과

시험 온도	Spec. I.D	작용 반복하중	흔적 관찰	균열 관찰
RT	SS-02	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 4.0 × SSE: 20cycles	5th cycle (4.0 × SSE)	15th cycle (4.0 × SSE)
	SS-03	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 4.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 2cycles	15th cycle (4.0 × SSE)	1st cycle (5.0 × SSE)
316°C	SS-07	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 4.0 × SSE: 14cycles	-	7th cycle (4.0 × SSE)
	SS-08	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 4.0 × SSE: 14cycles	-	6th cycle (4.0 × SSE)

표 3.2.1 임의의 변위진폭 조건에서 수행된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편 시험 결과(계속)

시험 온도	Spec. I.D	작용 반복하중	흔적 관찰	균열 관찰
RT	TS-04	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 6.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles	-	8th cycle (3rd, 7.0 × SSE)
	TS-05	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 6.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles	-	7th cycle (4th, 7.0 × SSE)
	TS-13	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 6.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles	-	17th cycle (3rd, 7.0 × SSE)

표 3.2.1 임의의 변위진폭 조건에서 수행된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편 시험 결과(계속)

시험 온도	Spec. I.D	작용 반복하중	흔적 관찰	균열 관찰
316°C	TS-11	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 6.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles	-	13th cycle (3rd, 7.0 × SSE)
	TS-12	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 6.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles 7.0 × SSE: 20cycles	-	8th cycle (3rd, 7.0 × SSE)

표 3.2.2 임의의 변위진폭 조건에서 수행된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편 시험 결과

시험 온도	Spec. I.D	작용 반복하중	흔적 관찰	균열 관찰
RT	SS-04	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 4.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles	18th cycle (1st, 5.0 × SSE)	8th cycle (2nd, 5.0 × SSE)
	SS-06	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 4.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles	17th cycle (1st, 5.0 × SSE)	3rd cycle (2nd, 5.0 × SSE)
316°C	SS-09	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 4.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles	3rd cycle (5.0 × SSE)	18th cycle (5.0 × SSE)
	SS-11	SSE(6Sm): 20cycles 1.67 × SSE: 20cycles 3.0 × SSE: 20cycles 4.0 × SSE: 20cycles 5.0 × SSE: 20cycles	8rd cycle (5.0 × SSE)	13th cycle (5.0 × SSE)

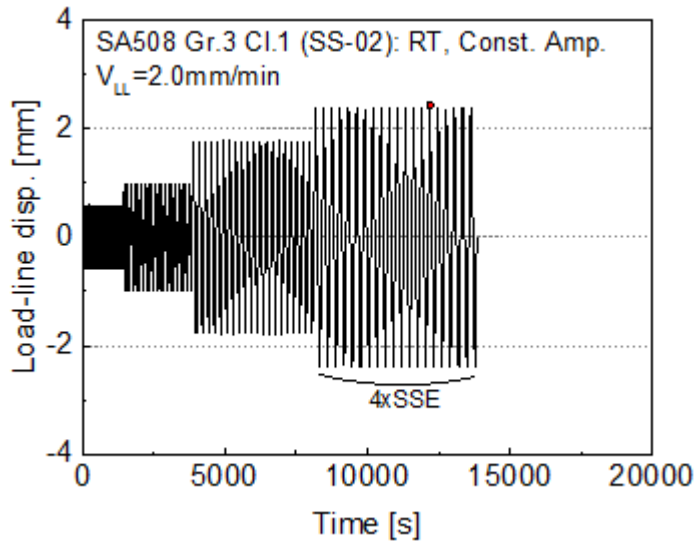


(a) SA312 TP316 스테인리스강 배관재

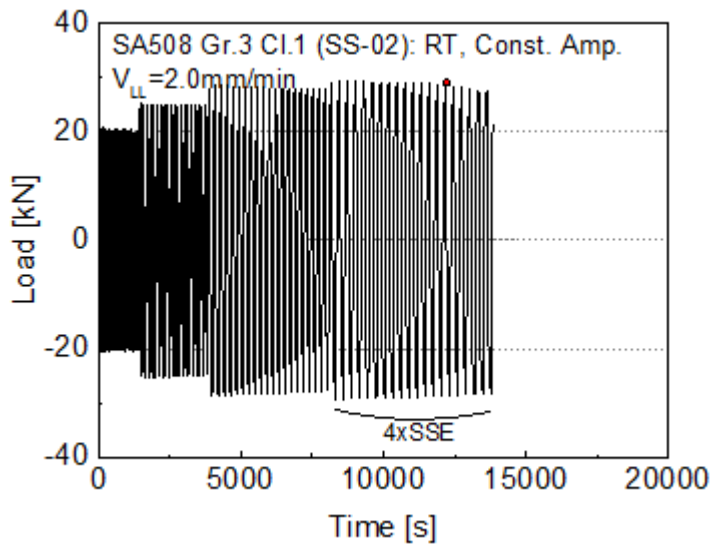


(b) SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재

그림 3.1.1 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 모사시편 사진

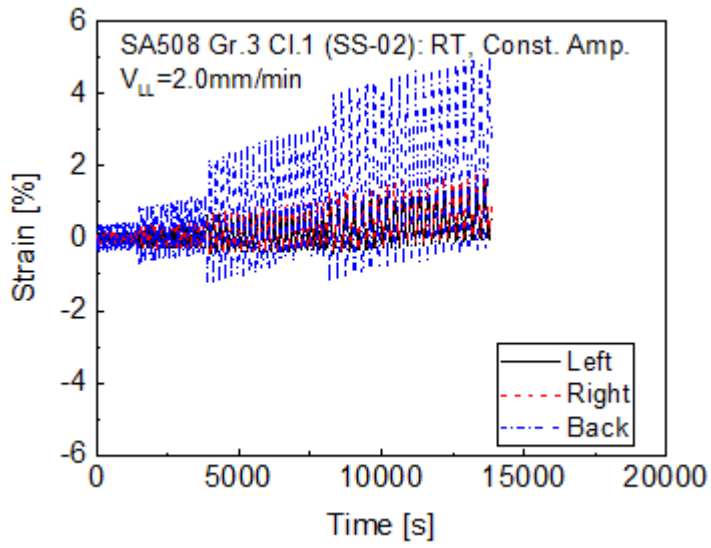


(a) 하중선변위

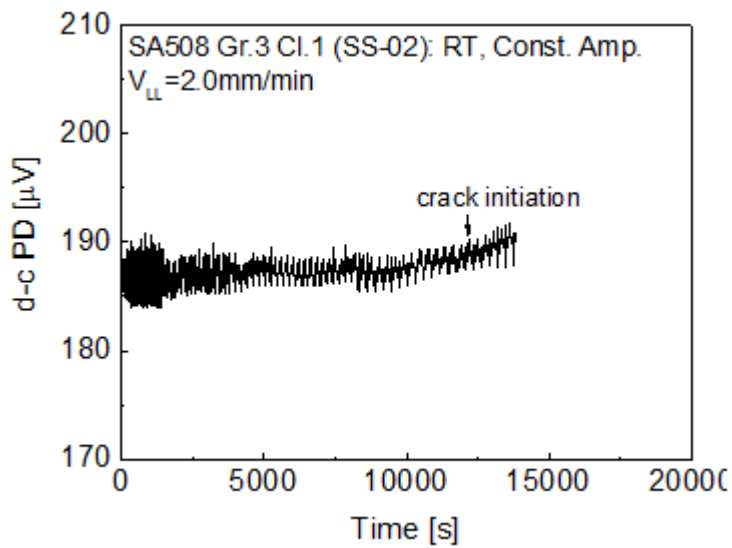


(b) 하중

그림 3.1.2 일정한 변위진폭 조건의 모사시편 시험에서 취득된 데이터의 예 (계속)

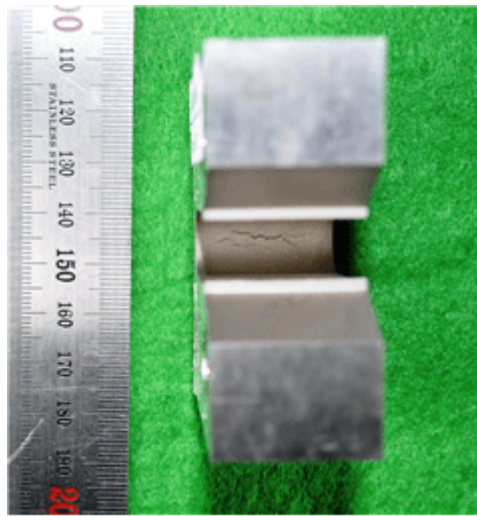


(c) 변형률

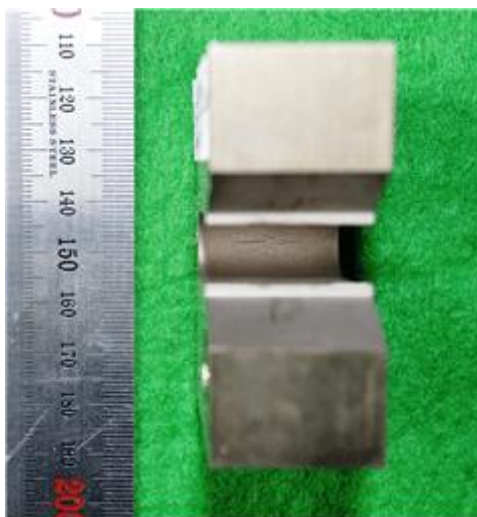


(d) d-c PD

그림 3.1.2 일정한 변위진폭 조건의 모사시편 시험에서 취득된 데이터의 예

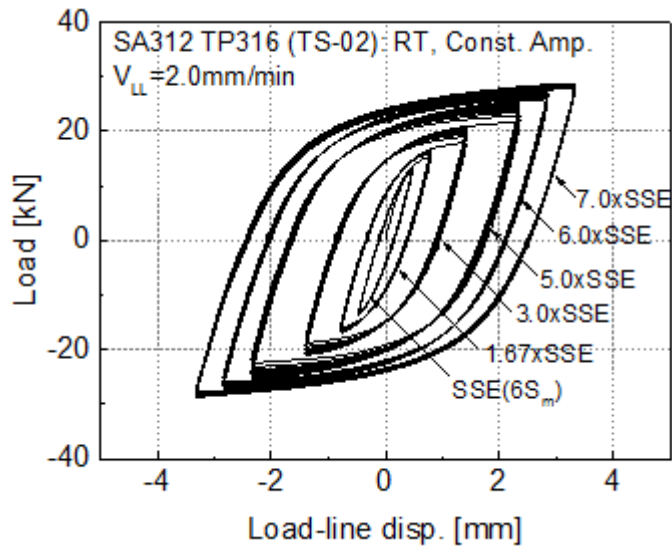


(a) 상온

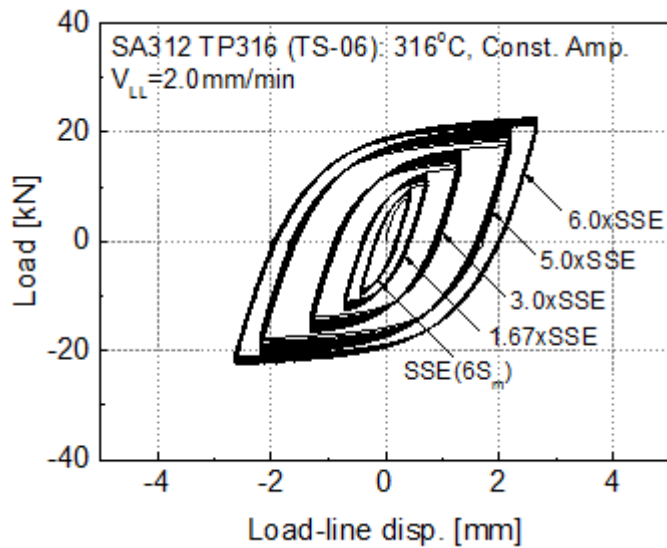


(b) 316°C

그림 3.1.3 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편의 균열 형상

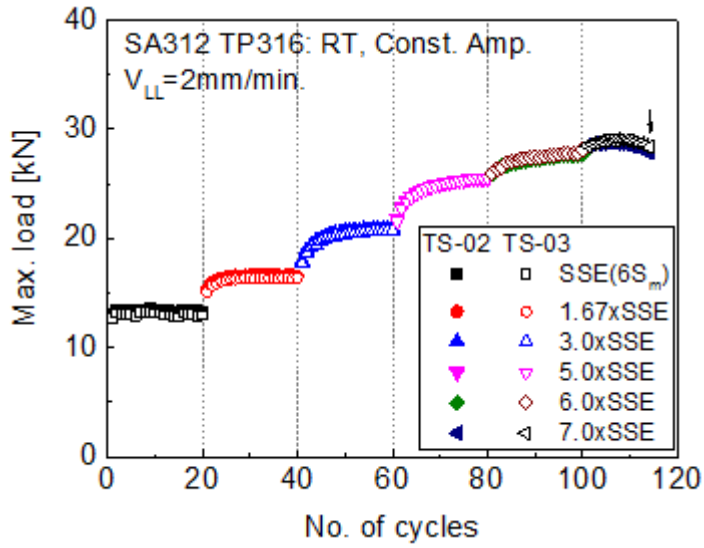


(a) 상온

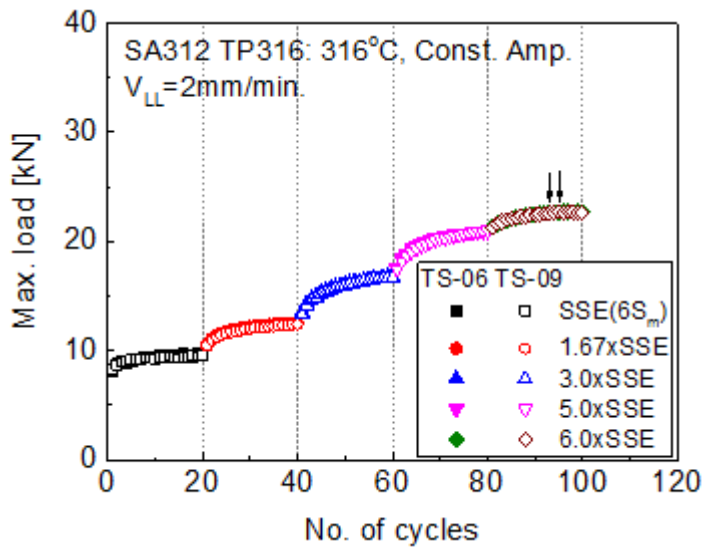


(b) 316°C

그림 3.1.4 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편의 하중-하중선변위 곡선



(a) 상온



(b) 316°C

그림 3.1.5 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편의 최대하중

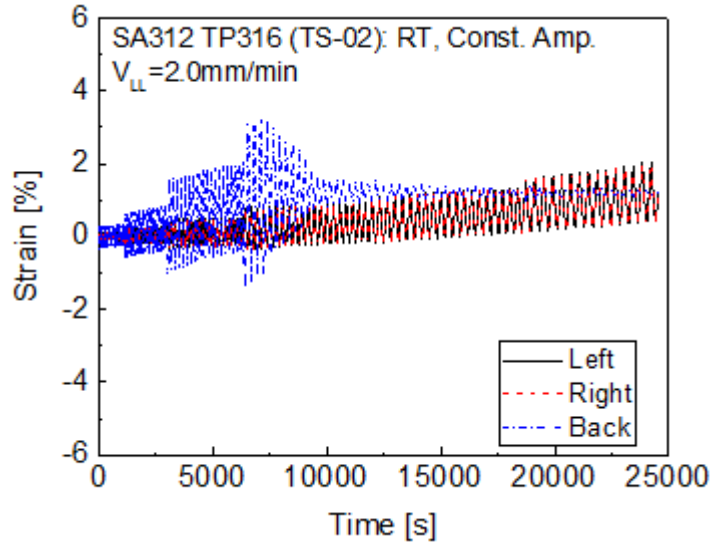
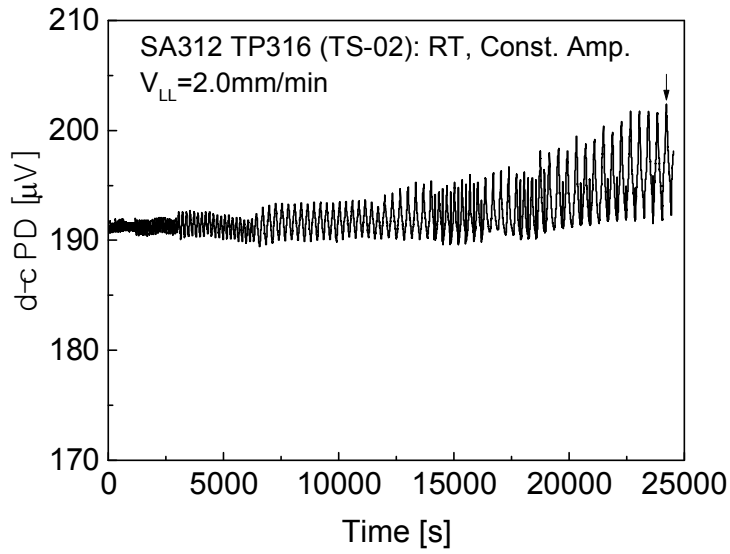
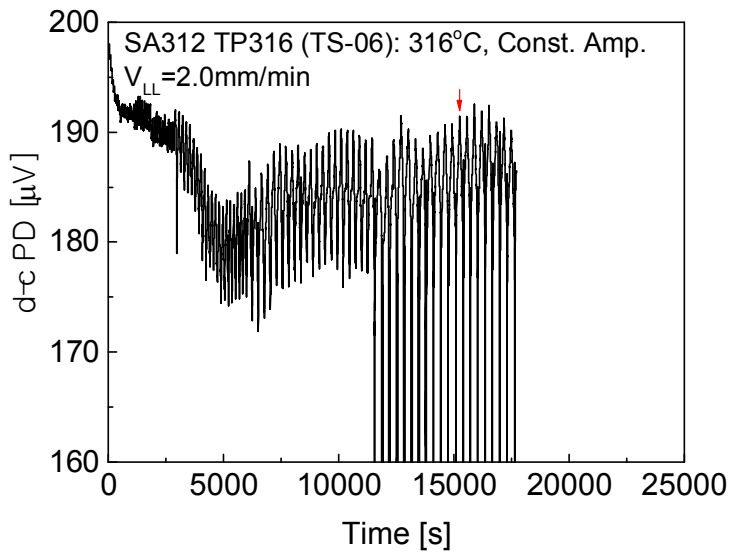


그림 3.1.6 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편에서 측정된 변형률 데이터

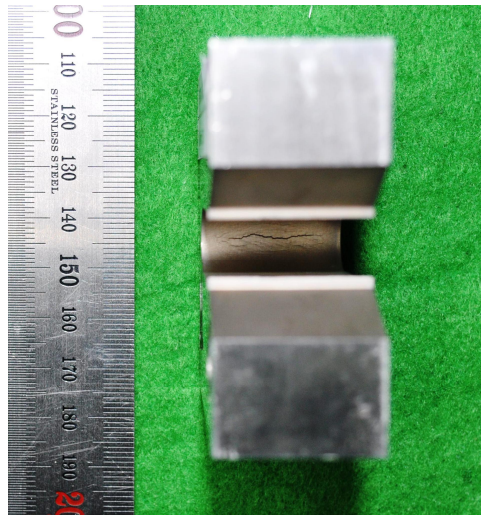


(a) 상온



(b) 316°C

그림 3.1.7 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편에서 측정된 d-c PD 데이터

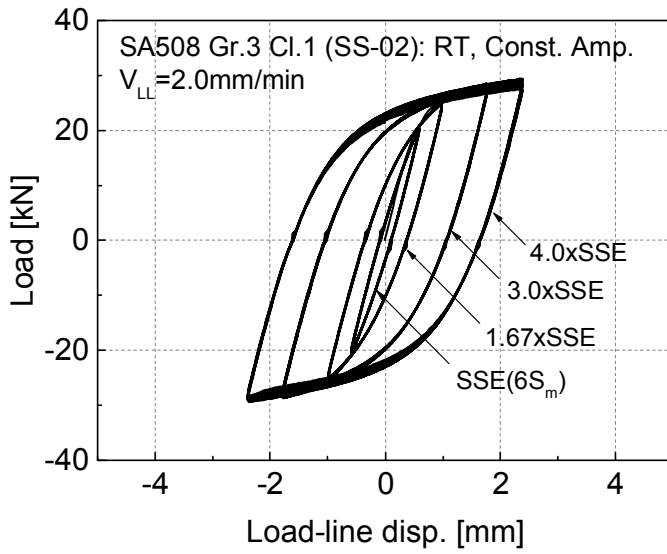


(a) 상온

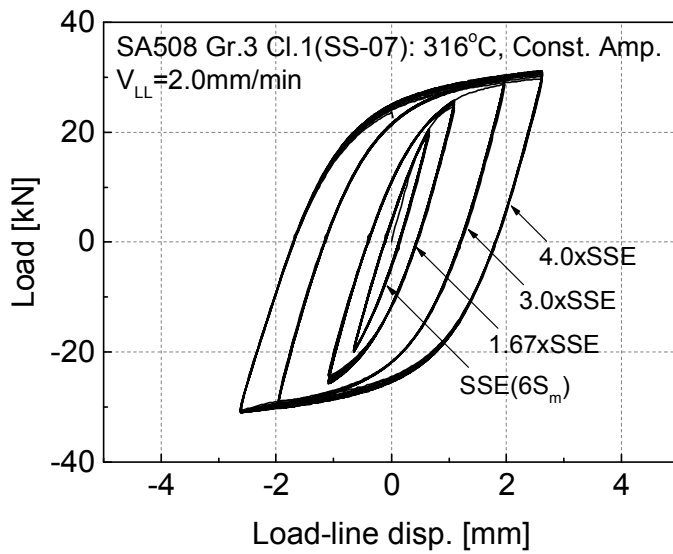


(b) 316°C

그림 3.1.8 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편의 균열 형상

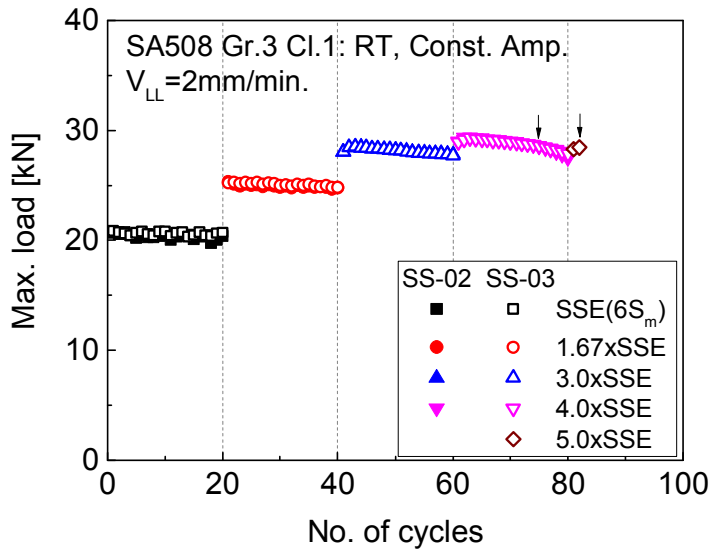


(a) 상온

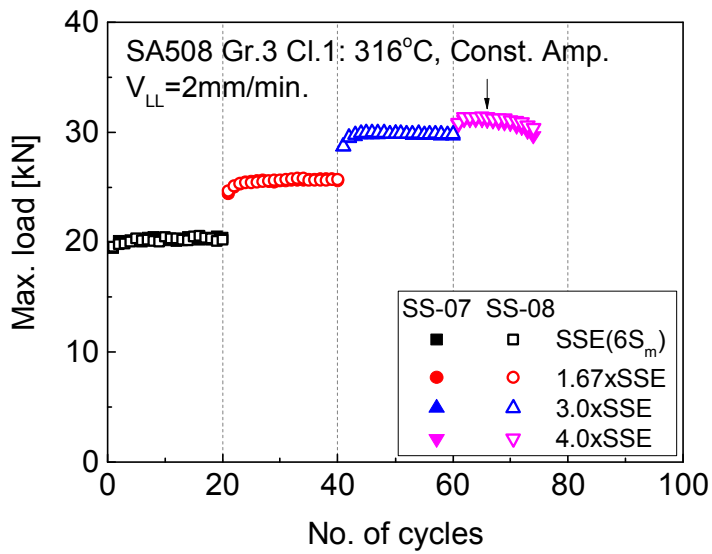


(b) 316°C

그림 3.1.9 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편의 하중-하중선변위 곡선



(a) 상온



(b) 316°C

그림 3.1.10 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편의 최대하중

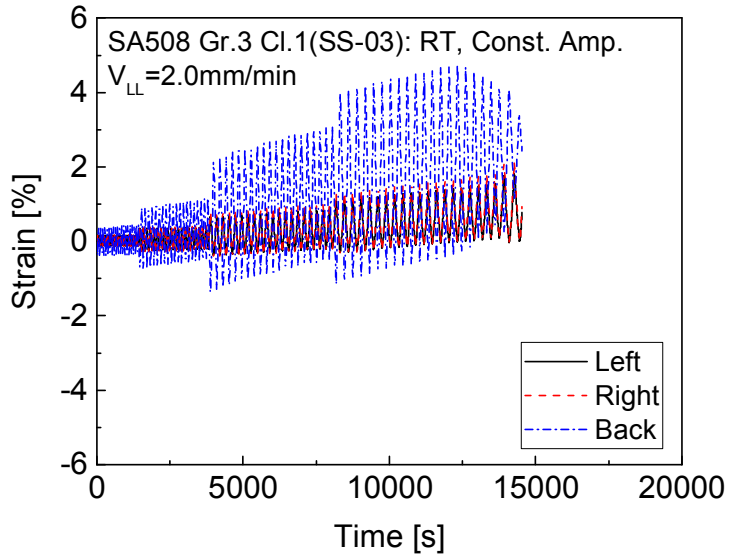
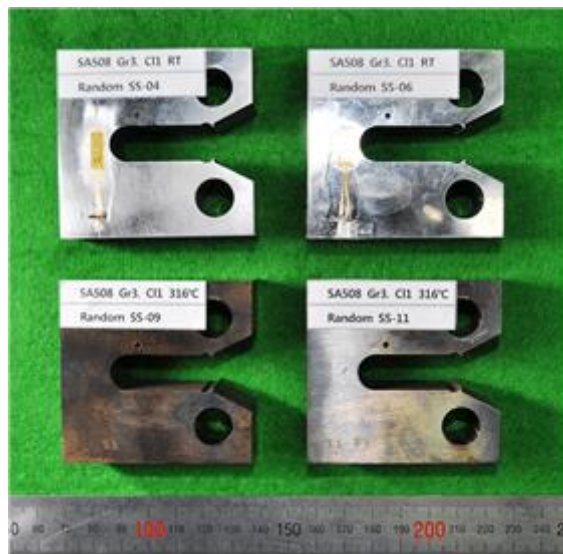


그림 3.1.11 일정한 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편에서 측정된 변형률 데이터

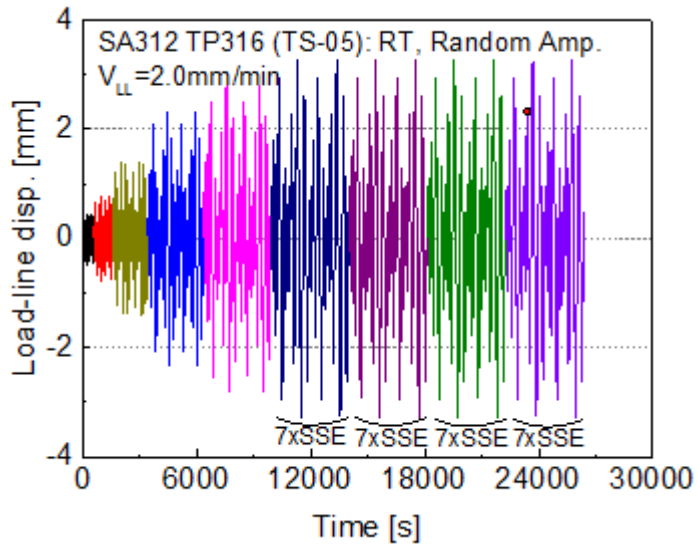


(a) SA312 TP316 스테인리스강 배관재

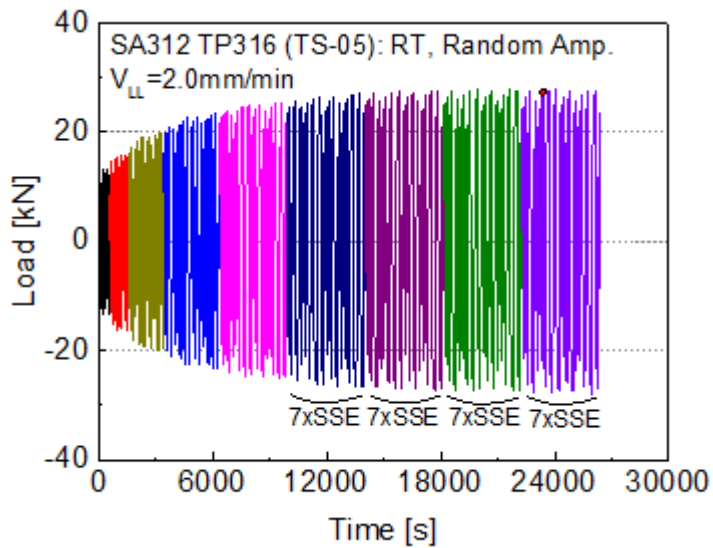


(b) SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재

그림 3.2.1 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 모사시편 사진

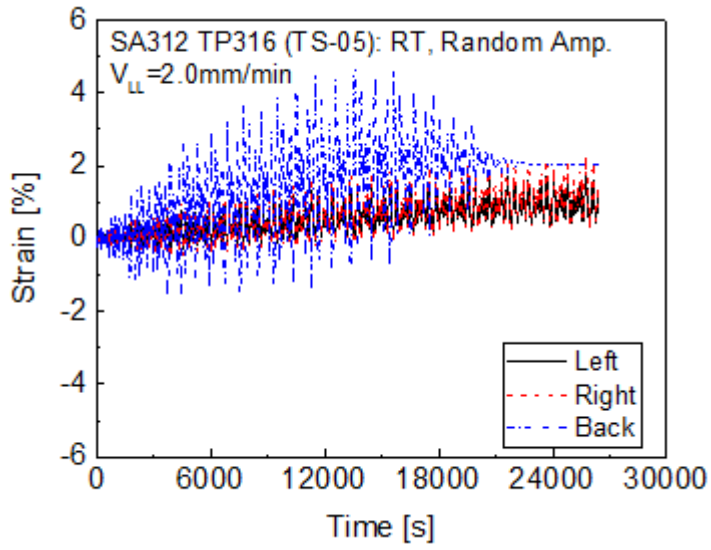


(a) 하중선변위

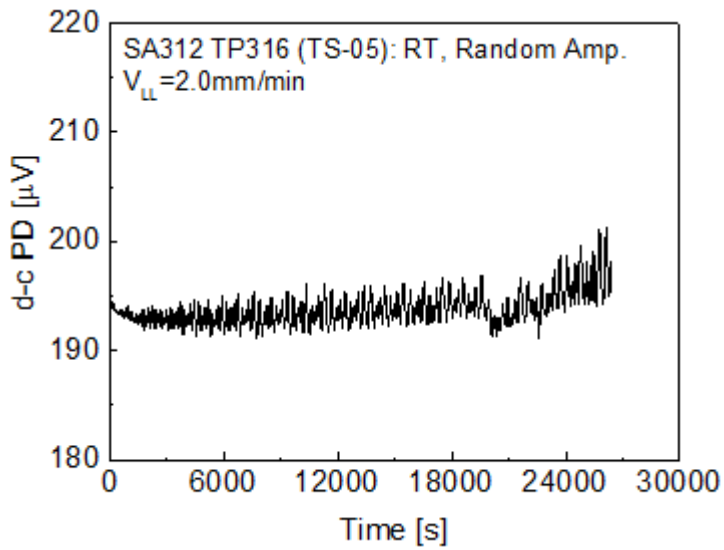


(b) 하중

그림 3.2.2 임의의 변위진폭 조건의 모사시편 시험에서 취득된 데이터의 예 (계속)



(c) 변형률

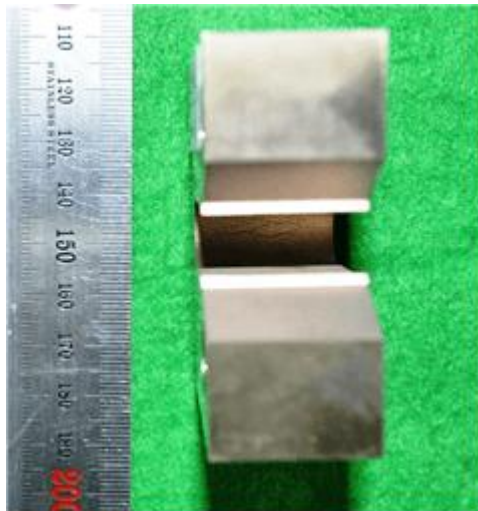


(d) d-c PD

그림 3.2.2 임의의 변위진폭 조건의 모사시편 시험에서 취득된 데이터의 예

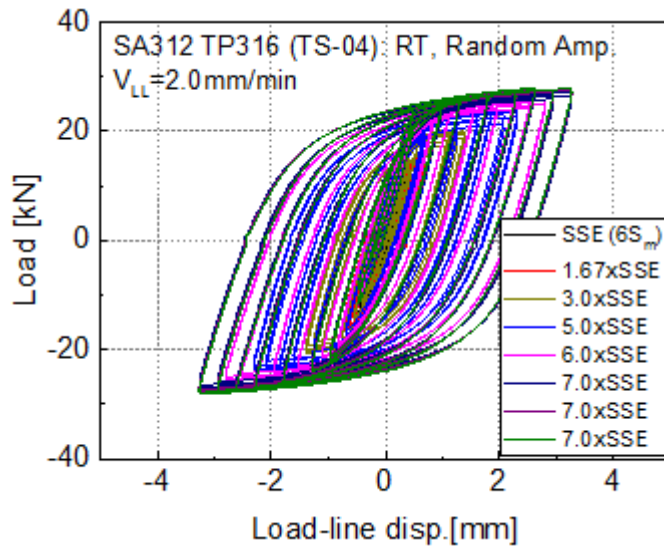


(a) 상온

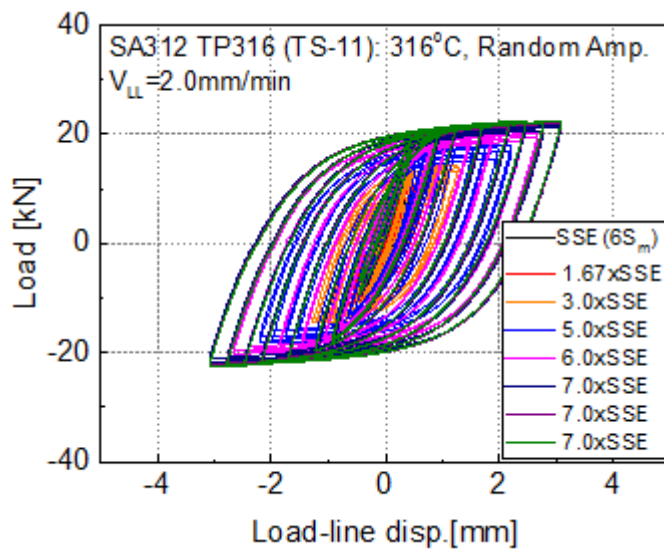


(b) 316°C

그림 3.2.3 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편의 균열 형상



(a) 상온



(b) 316°C

그림 3.2.4 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편의 하중-하중선변위 곡선

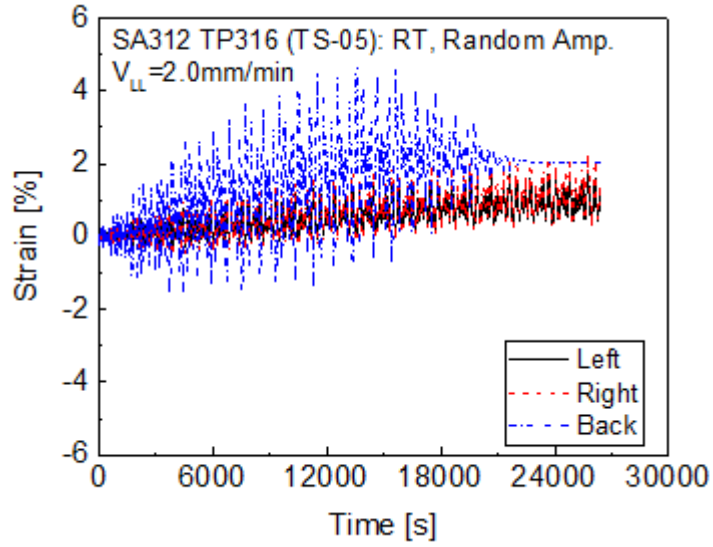
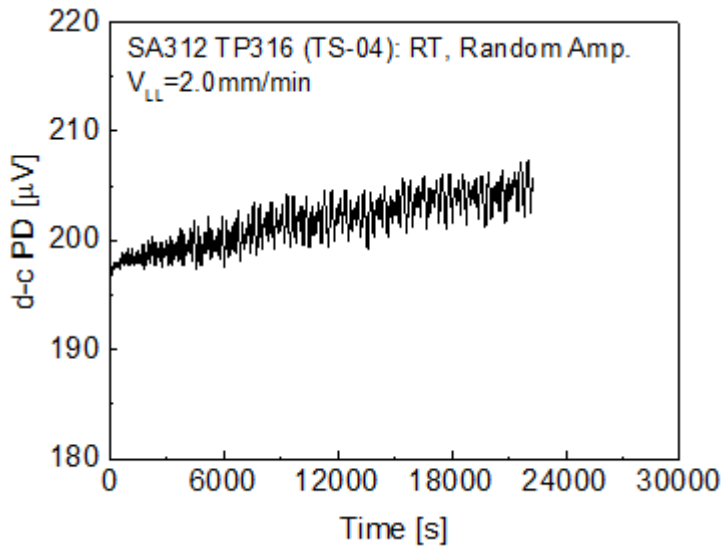
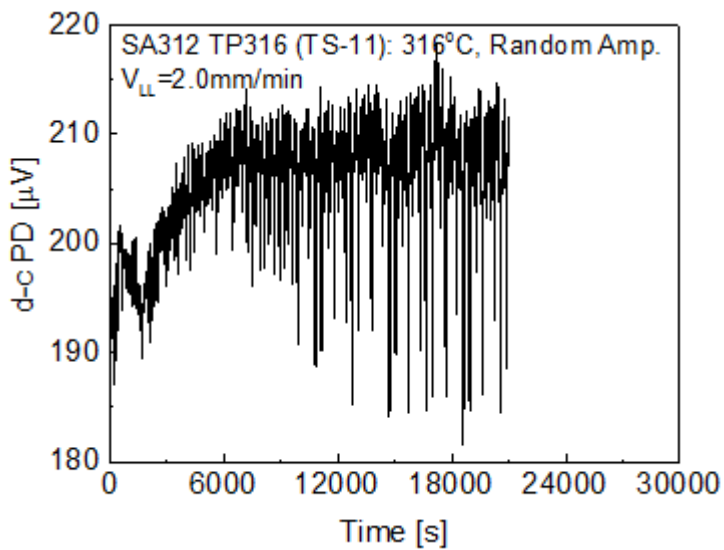


그림 3.2.5 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재 모사시편에서 측정된 변형률 데이터



(a) 상온

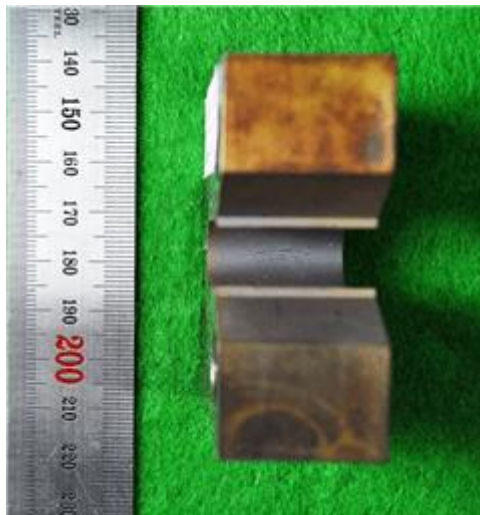


(b) 316°C

그림 3.2.6 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재
 모사시편에서 측정된 d-c PD 데이터

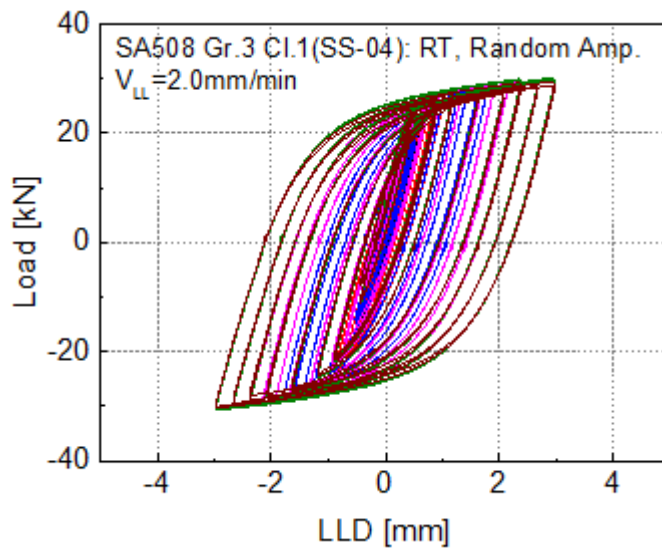


(a) 상온

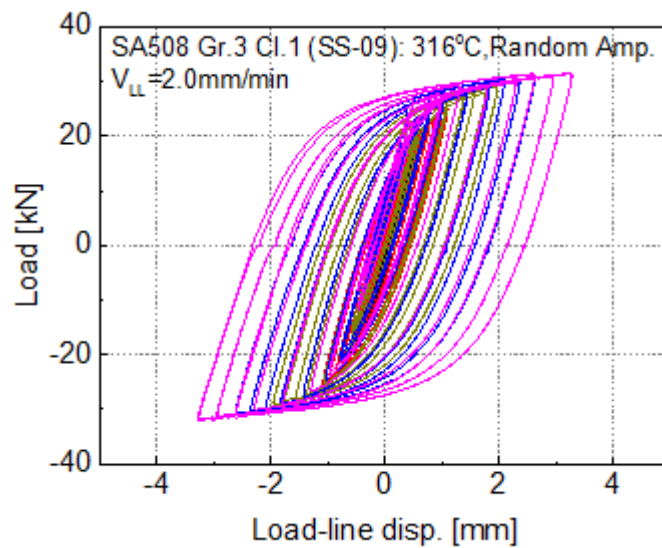


(b) 316°C

그림 3.2.7 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편의 균열 형상



(a) 상온



(b) 316°C

그림 3.2.8 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편의 하중-하중선변위 곡선

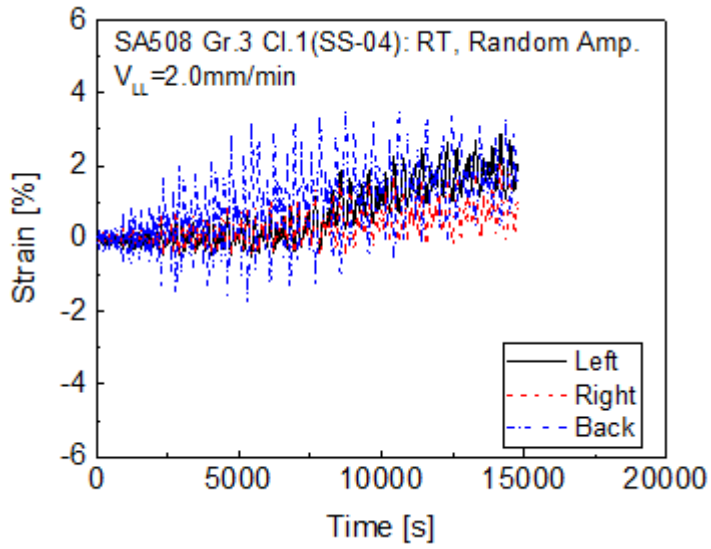


그림 3.2.9 임의의 변위진폭 조건에서 시험된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모사시편에서 측정된 변형률 데이터

제 4 장 결 론

본 연구에서는 설계기준초과지진 하중 조건에서 반복하중에 따른 변형률의 누적과 손상 발생 조건을 파악하고 검증 데이터를 생산하기 위해서, 모사시편을 이용한 손상 시험을 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 수행하였다. 시험에는 SA312 TP316 스테인리스강 배관재와 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재가 사용되었으며, 일정한 진폭과 임의의 진폭을 갖는 변위제어 모드의 반복하중이 적용되었다. 시험 결과로부터 각 시험 조건별로 손상이 발생하는 하중 조건과 반복하중에 따른 변형 거동을 파악하였다. 시험 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 시험 온도에 관계없이 SA312 TP316 스테인리스강 배관재와 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모두 설계기준지진에 비해 상당히 큰 진폭의 반복하중 조건에서 손상이 발생함.
 - ✓ SA312 TP316 스테인리스강 배관재는 설계기준지진의 6~7배에 해당하는 일정한 진폭의 반복하중 작용 시 손상 발생
 - ✓ SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재는 설계기준지진의 4배에 해당하는 일정한 진폭의 반복하중 작용 시 손상 발생
- 시험 온도에 관계없이 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재에 비해 SA312 TP316 스테인리스강 배관재가 상대적으로 더 큰 지진하중 조건에서 손상이 발생됨.
- 시험에 적용된 반복하중의 형태(일정한 진폭 또는 임의의 진폭)에 관계없이 두 시험 재료에서 모두 상온에 비해 316°C에서 손상이 약간씩 빨리 발생함.
- 시험에 적용된 반복하중의 형태에 관계없이 SA312 TP316 스테인리스강 배관재와 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재 모두 설계기준초과지진에 해당하는 반복하중 작용시 시편에서 변형률의 누적(라체팅 현상)이 발생됨.
- 설계기준을 초과하는 하중 조건에서 재료의 변형과 파괴 거동을 적절히 모사함.

【참고문헌】

- [1] G., Saji, 2014, “Safety goals for seismic and tsunami risks: Lessons learned from the Fukushima Daiichi disaster,” Nucl. Eng. Des., Vol. 280, pp. 449 - 463.
- [2] J.D., Stevenson, 2014, “Summary of the historical development of seismic design of nuclear power plants in Japan and the U.S.,” Nucl. Eng. Des., Vol. 269, pp. 160 - 164.
- [3] I., Nakamura, and N., Kasahara, 2015, “Excitation tests on elbow pipe specimens to investigate failure behavior under excessive seismic loads,” Proc. of PVP2015, PVP2015-45711.
- [4] P.R., Donavin, R., Gilada, H. Gustin, T. Vo, and R., Pace, 2016, “Technical Basis for Proposed ASME Section XI Code Case on Beyond Design Bases Earthquake,” PVP2016-63827.
- [5] OECD/NEA, 2015, “Interim Report on Metallic Components Margins Under High Seismic Loads,” NEA/CSNI/R(2015)8.
- [6] USNRC, 2008, “Seismic Analysis of Large-Scale Piping Systems for the JNEC-NUPEC Ultimate Strength Piping Test Program,” NUREG/CR-6983
- [7] ASTM, 2015, “Standard test method for measurement of fracture toughness,” ASTM E1820-15.
- [8] ASME, 1998, “Nuclear Components,” ASME code Sec.III
- [9] ASME, 1998, “Materials,” ASME code Sec.II
- [10] USNRC, SRP 3.7.3 Seismic Subsystem Analysis Review Responsibilities, NUREG-0800