

반복 응력-변형률 시험을 통한 반복하중 조건에서 원전 주요 구조재료의 변형거동 평가

김진원[†]·김종성*·권형도**

Evaluation of Deformation Behavior of Nuclear Structural Materials under Cyclic Loading Conditions via Cyclic Stress-Strain Test

Jin Weon Kim[†], Jong Sung Kim* and Hyeong Do Kweon**

(Received 31 May 2017, Revised 19 June 2017, Accepted 23 June 2017)

ABSTRACT

This study investigated deformation behavior of major nuclear structural materials under cyclic loading conditions via cyclic stress-strain test. The cyclic stress-strain tests were conducted on SA312 TP316 stainless steel and SA508 Gr.3 Cl.1 low-alloy steel, which are used as materials for primary piping and reactor pressure vessel nozzle respectively, under cyclic load with constant strain amplitude and constant load amplitude at room temperature (RT) and 316°C. From the results of tests, the cyclic hardening and softening behavior, stabilized cyclic stress-strain behavior, and ratcheting behavior of both materials were investigated at both RT and 316°C. In addition, appropriate considerations for cyclic deformation behavior in the structural integrity evaluation of major nuclear components under excessive seismic condition were discussed.

Key Words : Earthquake (지진), Cyclic Loading Condition (반복하중 조건), Cyclic Stress-Strain Test(반복 응력-변형률 시험), Deformation Behavior (변형거동), Structural Materials (구조재료)

1. 서 론

후쿠시마 원전 사고 이후 국내외적으로 지진에 대한 관심이 크게 증가되고 있으며, 설계기준을 초과하는 지진 하중 조건에서 원전 기기/설비의 건전성 평가를 위한 방법과 절차, 그리고 허용기준의 필요성이 대두되고 있다.^(1,2) 일본과 ASME Code Committee 등은 이미 이와 관련된 다양한 연구들을 진행하고 있다.^(3,4) 일본은 배관 요소에 대한 반복하중 조건의 손상시험 뿐 아니라 배관 계통을 대상으로 대규모 진동대 시험을 수행하여 설계기

준초과지진 조건에서 안전여유도와 극한강도를 평가하고, 이를 바탕으로 설계기준초과지진 조건의 건전성 평가 방법과 절차를 개발 중이다. ASME에서는 기존 연구 결과들을 종합하여, 설계기준초과 지진 이후 원전 기기의 건전성과 재가동성을 평가하기 위한 방법과 절차를 ASME Sec.XI Code Case로 개발 중이며 초안이 마련된 상태이다.

일반적으로 안전정지지진 (Safe Shutdown Earthquake, SSE)과 같은 설계기준지진 조건에서 원전 기기/설비의 거동은 선형탄성해석 기반의 설계코드⁽⁵⁾에 따라 평가된다. 따라서, 평가 결과에 미치는 재료물성의 영향은 미미하다. 그러나, 설계기준초과지진 조건에서는 기기/설비가 소성변형 거동을 보이므로, 평가시 변형속도와 반복하중과 같이 작용하중의 형태에 따라 크게 영향을 받는 재료의 탄소성 변형 거동을

[†] 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과

jwkim@chosun.ac.kr

TEL: (062)230-7109 FAX: (062)230-7109

* 세종대학교 원자력공학과

** 한수원(주) 중앙연구원 신행원전연구소

고려해야 한다. 따라서, 설계기준초과지진 조건에서 기기/설비의 변형과 손상 거동을 정확히 평가하고 예측하기 위해서는 반복하중 조건에서 재료의 변형 거동을 파악하고 이를 해석적 평가에 적절히 반영하는 것이 매우 중요하다.^(6,7)

따라서, 본 논문에서는 원전의 주요 기기/설비에 사용되는 대표적인 구조재료인 스테인리스강과 저합금강을 이용하여, 일정 변형률진폭 조건과 일정 하중진폭 조건에서 반복 응력-변형률 시험 (Cyclic Stress-Strain Test)을 상온 (RT)과 원전 운전온도인 316°C에서 수행하였다. 시험 결과로부터 이들 구조재료의 반복 강화/연화 (Cyclic Hardening/Softening) 거동, 반복 응력-변형률 (Cyclic Stress-Strain) 곡선, 라체팅 (Ratcheting) 변형 특성 등을 파악하였다.

2. 시편 및 시험방법

2.1 재료 및 시편

시험에는 원자로용기의 노즐재와 원전 1차측 배관 재료 사용되고 있는 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강과 SA312 TP316 스테인리스강이 사용되었다. Table 1 과 Table 2는 시험에 사용된 2종류 재료의 화학조성과 상온의 기계적물성치를 정리한 것이다.

반복 응력-변형률 시험에 사용된 시편은 ASTM E606-12⁽⁸⁾ 기준에 따라 설계되었다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 시편은 평형부 길이 (l)가 13mm (게이지 길이 12.5mm)이고 직경 (ϕ)이 6mm인 봉상이다. Fig. 1에서 상온과 고온시험에 사용된 시편의 평형부 형상은 동일하지만, 체결부의 형상은 상이하다. 이것은 고온 시험시 시편의 체결 정렬도를 높이기 위해 체결 방법을 수정하였기 때문이다. 모든 시편은 재료 종류에 관계없이 길이방향 (L-dir)으로 채취되었다.

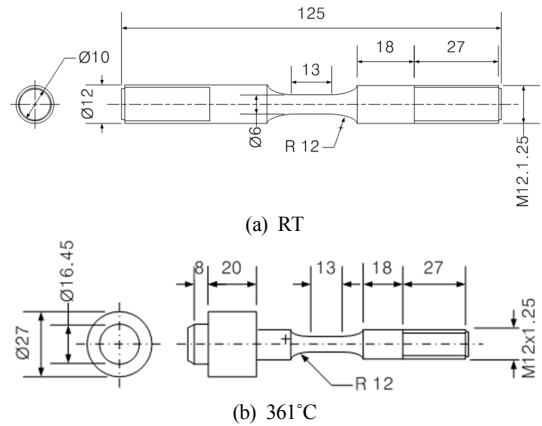


Fig. 1 Dimensions of specimen used for cyclic stress-strain test

2.2 시험 조건 및 방법

2.2.1 시험 조건

원전 주요 구조재료의 반복 경화/연화거동, 반복 응력-변형률 곡선, 그리고 라체팅 변형 특성을 파악하기 위해서, 일정 변형률진폭 (Constant Strain Amplitude) 조건과 일정 하중진폭 (Constant Load Amplitude) 조건에서 반복 응력-변형률 시험이 수행되었다. 시험은 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 준정적 변형률속도 ($\dot{\epsilon} \sim 10^{-4} s^{-1}$)로 진행되었다.

일정 변형률진폭 조건의 시험에는 3가지 변형률진폭 ($\epsilon_a = 0.4, 0.8, 1.2\%$)이 고려되었으며, 변형률진폭은 변형률제어 모드의 삼각파 형태로 적용되었다. 일정 변형률진폭 조건의 시험은 2가지 형태로 진행되었다. 먼저 각 변형률진폭 별로 개별시편 (Multi)을 이용하여 반복 응력-변형률 시험을 수행하였으며, 시험은 시편에서 균열이 발생될 때까지 진행되었다. 단, 10,000 cycles까지 균열이 생성되지 않는

Table 1 Chemical composition of materials used for cyclic stress-strain test (wt%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
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
SA312 TP316 SS	0.009	0.385	1.22	0.008	0.000	11.2	16.2	2.08	-	-	-

Table 2 Mechanical properties of materials used for cyclic stress-strain test at RT

Materials	항복강도, YS(MPa)	인장강도, TS(MPa)	균일연신률, UE(%)	총연신률, TE(%)	단면수축률, RA(%)
SA508 Gr.3 Cl.1 LAS	499.7	644.7	10.05	23.30	74.14
SA312 TP316 SS	313.6	590.4	54.7	71.4	83.18

경우에는 10,000 cycles에서 시험을 종료하였다. 추가적으로 1개의 단일시편 (Single)을 이용하여 100 cycles 씩 변형률진폭을 증가 (0.4% (100 cycles) → 0.8% (100 cycles) → 1.2% (100 cycles))시키며 다단계로 반복 응력-변형률 시험을 수행하였다. 단일시편을 이용한 다단계 시험에서는 각 변형률진폭 별로 100 cycles까지의 응력진폭 데이터를 확보하였다.

한편, 일정 하중진폭 조건의 시험은 하중제어 모드로 수행되었으며, 반복하중은 삼각파 형태로 작용되었다. 시험에 적용된 반복하중의 최대값 (P_{max})은 각 재료 별로 인장강도 (TS)의 85% ($\sigma_{max} = 0.85 \times TS$)에 해당하는 하중으로 설정되었으며, 반복하중의 하중비 ($R = P_{min}/P_{max}$)는 $R = -0.1$ 이다.

2.2.2 시험 방법 및 절차

시험에 앞서 모든 시편은 평형부를 연마지로 #1500까지 연마하여 기계가공에 따른 노치를 제거하였다. 개별시편을 이용한 일정 변형률진폭 조건의 시험에서는 반복하중의 진폭이 최대값 대비 20% 이상 감소하는 시점을 균열 발생 시점으로 정의하고 시험을 종료하였으며, 10,000 cycles까지 균열이 생성되지 않으면 시험을 종료하였다. 단일시편을 이용한 다단계 시험에서는 각 변형률진폭 별로 100 cycles 씩 반복하중을 가한 후 다음 단계 반복하중은 항상 변형률이 0%인 상태에서 시작되도록 하였다. 일정 하중진폭 조건의 시험에서는 시험 재료에 관계없이 상온에서는 300 cycles, 316°C에서는 1,000 cycle까지 반복하중을 가하면서 변형률의 변화를 측정하였다.

시험에는 100kN 용량의 로드셀과 고온로가 부착된 유압식 만능시험기가 사용되었다. 시편의 변형률은 게이지 길이가 12.5mm인 신률게이지 (Extensometer)를 이용하여 측정되었으며, 일정 변형률진폭 조건의 시험에서는 변형률을 시험기 제어를 위한 입력 신호로 적용되었다. 상온 시험에서는 시편에 신률게이지를 거치하여 직접 변형률을 측정하였으며, 고온 시험에서는 시편의 양쪽 어깨부에 거치대를 설치하여 고온로 밖에서 변형률을 측정하였다. 시편의 평형부와 어깨부에서 측정되는 변형률의 차이는 유한요소 해석을 통해 보정되었다. 고온 시험에서는 시편의 양 끝단에 열전대를 용접하여 시편의 온도를 측정하였으며, 측정 온도가 설정 온도의 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내에서 30분 이상 유지된 상태에서 시험을 시작하였다.

3. 시험 결과 및 토의

3.1 반복 경화/연화 거동

3.1.1 SA312 TP316 스테인리스강 배관재

Fig. 2는 상온과 316°C에서 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 반복 경화/연화 거동을 파악하기 위해서, 각각의 변형률진폭에서 cycle 수에 따른 응력진폭의 변화를 나타낸 것이다. 상온의 경우, Fig. 2(a)에서 알 수 있는 바와 같이 변형률진폭의 크기에 관계없이 약 20 cycles까지 반복경화에 의해 응력진폭이 증가하였으며, 응력진폭의 증가는 변형률진폭이 클수록 더욱 뚜렷하였다. 20 cycles 이후에는 반복하중에 따른 응력진폭의 변화가 작용된 변형률진폭의 크기에 따라 다소 차이를 보였다. 변형률진폭이 작은 경우 ($\epsilon_a = 0.4\%$)에는 10,000cycle까지 반복 연화에

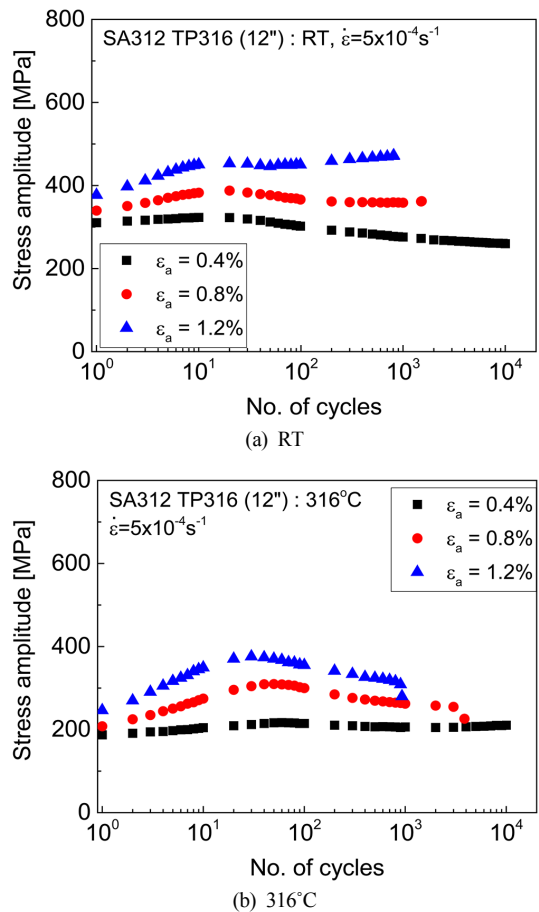


Fig. 2 Variations in the stress amplitudes with number of cycles of SA312 TP316 stainless steel

의해 응력진폭이 지속적으로 감소하였으나, $\epsilon_a = 0.8\%$ 에서는 응력진폭이 감소하다 약 200 cycles부터 반복연화 현상이 안정화되어 최종 손상이 발생할 때까지 거의 일정한 응력진폭을 보였다. 변형률진폭이 큰 경우($\epsilon_a = 1.2\%$)에는 cycle 수가 증가함에 따라 응력진폭이 약간씩 감소하다 50 cycles 이후부터 다시 증가하는 2차 경화 현상 (Secondary Hardening)을 보였다. 따라서, 상온에서 SA312 TP316 스테인리스강 배관계는 전체적으로 반복 경화 후 연화 현상이 나타났으며, 반복 경화/연화 현상은 작용되는 변형률진폭이 클수록 뚜렷하였다. 또한, 초기 반복 경화 이후의 연화 거동은 변형률진폭의 크기에 따라 차이를 보였다.

316°C에서도 변형률진폭의 크기에 따라 다소 차이가 있으나, 전체적으로 반복하중 초기에는 cycle 수가 증가함에 따라 응력진폭이 증가하고 이후부터 응력진폭이 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 2(b)). 변형률진폭에 따라 $\epsilon_a = 0.4\%$ 에서는 반복하중에 따른 응력진폭의 변화가 미미한 수준이다. $\epsilon_a = 0.8\%$ 와 $\epsilon_a = 1.2\%$ 에서는 각각 50 cycles과 30 cycles까지 반복 경화에 의한 응력진폭의 뚜렷한 증가가 나타나고, 이후 최종 파단이 발생할 때까지 지속적으로 반복 연화에 의한 응력진폭의 감소가 나타났다. 상온과 비교하면 (Fig. 2(a)), $\epsilon_a = 0.8\%$ 와 $\epsilon_a = 1.2\%$ 에서 반복 경화/연화 현상에 의한 응력진폭의 증가와 감소가 상온에 비해 더욱 뚜렷한 것을 알 수 있다. 또한, 상온과 달리 316°C에서는 1차 경화 현상이 나타난 이후, 반복 연화 현상의 안정화나 2차 경화 현상이 나타나지 않았다. 따라서, SA312 TP316 스테인리스강 배관계는 상온과 원전 운전온도에서 유사한 반복 경화 거동을 보이지만 반복 연화 거동에서 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

3.1.2 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재

Fig. 3은 $\epsilon_a = 0.4, 0.8, 1.2\%$ 변형률진폭 조건에서 cycle 수에 따른 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 응력진폭을 나타낸 것이다. 상온에서는 Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이 변형률진폭의 크기에 관계없이 거의 유사한 반복 경화/연화 거동을 보였다. 즉, 약 5~6 cycles까지는 응력진폭이 증가하고, 이후부터 최종 손상 시점까지 지속적으로 반복 연화에 의해 응력진폭의 감소가 나타났다. 또한, 반복하중에 따른 응력진폭의 감소 기울기도 거의 유사했다.

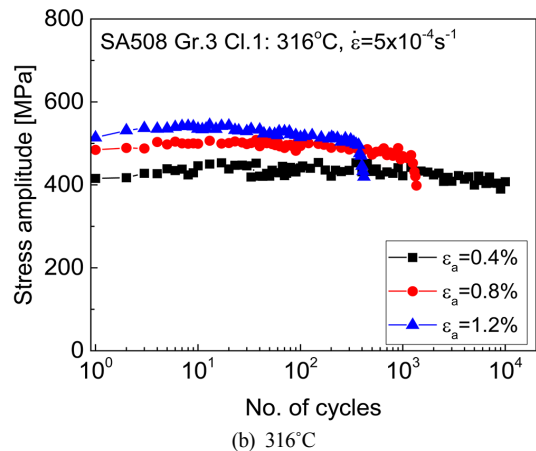
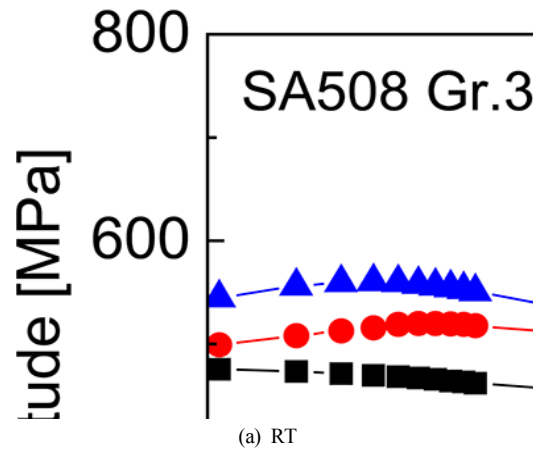


Fig. 3 Variations in the stress amplitudes with number of cycles of SA508 Gr.3 Cl.1 low-alloy steel

Fig. 3(b)는 316°C에서 반복하중에 따른 응력진폭의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 316°C에서도 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재는 변형률진폭에 관계없이 초기에 약 10 cycles까지는 응력진폭이 약간 증가하지만, 이후부터 최종 손상 시점까지 반복 연화에 의해 응력진폭이 감소하였다. 그러나, 상온 결과와 비교하면, 전체적으로 반복 연화에 의한 응력진폭의 감소는 미미한 것을 알 수 있다. 특히 변형률진폭이 작을수록 반복 연화에 의한 응력진폭의 감소는 더욱 작았다.

SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 경우, 시험 온도에 관계없이 초기 수 cycle 동안 나타나는 미미한 반복 경화 현상을 제외하면, 반복하중이 작용되는 동안 지속적으로 연화 현상이 발생하였다. 이것은 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강이 열처리를 통해 강도를

증가시킨 템프드 베이나이트 조직을 갖기 때문에 판단된다. 또한, 상온에 비해 316°C에서 반복 연화에 의한 응력진폭의 감소가 작게 나타나는 것은 동적변형시효의 영향에 의한 강도 증가에 기인하는 것으로 판단된다.⁽⁹⁾

3.2 반복 응력-변형률 곡선

반복하중 조건에서 안정화된 재료의 응력-변형률 특성을 파악하기 위해서, 각 변형률진폭 조건에서 반복 경화/연화 현상이 안정화된 응력진폭 데이터로부터 반복 응력-변형률 거동을 파악하였다. 일반적으로 재료의 종류와 시험온도에 따라 다소 차이가 있지만 금속 재료는 약 100 cycles 정도에서 반복 경화/연화 현상이 안정화되는 것으로 알려져 있다.^(10,11) 따라서, 여기서는 개별시험과 단일시험 시험에서 주어진 100 cycles에 해당하는 응력진폭을 이용하여 반복 응력-변형률 데이터를 얻었다. 만약, 100 cycles 이후에도 지속적으로 반복 연화에 의해 응력진폭이 감소하는 경우에는 반복 연화현상이 안정화되는 시점의 응력진폭을 이용하여 추가적인 반복 응력-변형률 데이터를 얻었다.

3.2.1 SA312 TP316 스테인리스강 배관재

Fig. 4는 SA312 TP316 스테인리스강 배관재에 대한 상온과 316°C 조건에서 반복 응력-변형률 데이터를 단일하중 조건 (표준 인장시험)에서 주어진 응력-변형률 곡선과 함께 나타낸 것이다. Fig. 4에서 응력과 변형률은 진응력과 진변형률이다. 또한, Fig. 4에는 기존의 연구에서 제시된 TP316 스테인리스강, TP316NG 스테인리스강, 그리고 TP304 스테인리스강에 대한 반복 응력-변형률 곡선식을 함께 나타내었다.⁽¹²⁾ 식(1)~(3)은 상온에서 각 재료 별로 반복 응력-변형률 곡선식이며, 식(4)~(6)은 원전 운전온도에서 각 재료 별로 반복 응력-변형률 곡선식이다.

$$\epsilon_a(\%) = \frac{\sigma_a}{1950} + \left(\frac{\sigma_a}{588.5} \right)^{1.94} \quad \text{for TP 316} \quad (1)$$

$$\epsilon_a(\%) = \frac{\sigma_a}{1950} + \left(\frac{\sigma_a}{447.0} \right)^{2.59} \quad \text{for TP 316 NG} \quad (2)$$

$$\epsilon_a(\%) = \frac{\sigma_a}{1950} + \left(\frac{\sigma_a}{503.2} \right)^{2.19} \quad \text{for TP304} \quad (3)$$

$$\epsilon_a(\%) = \frac{\sigma_a}{1760} + \left(\frac{\sigma_a}{496.8} \right)^{2.19} \quad \text{for TP 316} \quad (4)$$

$$\epsilon_a(\%) = \frac{\sigma_a}{1760} + \left(\frac{\sigma_a}{330.1} \right)^{3.24} \quad \text{for TP 316 NG} \quad (5)$$

$$\epsilon_a(\%) = \frac{\sigma_a}{1760} + \left(\frac{\sigma_a}{373.9} \right)^{2.31} \quad \text{for TP304} \quad (6)$$

상온의 경우, Fig. 4(a)에서 알 수 있는 바와 같이 반복 응력-변형률 데이터는 단일하중 조건의 응력-변형률 곡선에 비해 훨씬 높은 응력을 보였다. 기존의 반복 응력-변형률 곡선식과 비교하면, 본 시험에서 주어진 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 반복 응력-변형률 거동은 TP316NG 스테인리스강의 반복 응력-변형률 곡선과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 원전 운전온도인 316°C에서도 단일하중 조건에

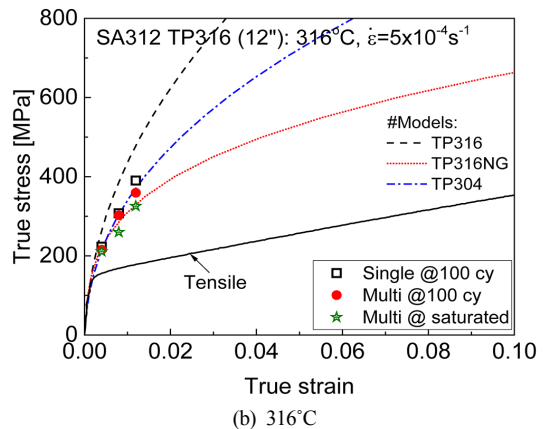
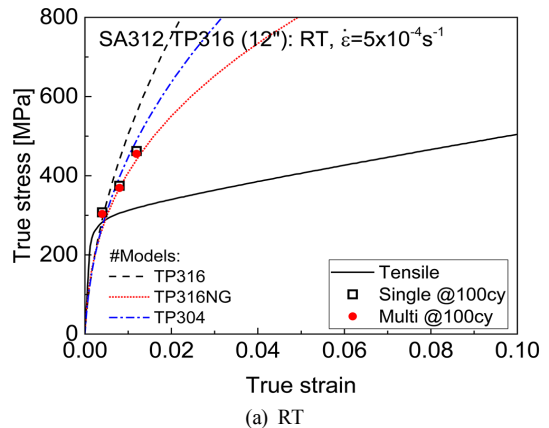


Fig. 4 Cyclic stress-strain data of SA312 TP316 stainless steel

비해 반복하중 조건에서 뚜렷이 높은 응력-변형률 거동을 보였다 (Fig. 4(b)). 또한, 식(4)~(6)의 반복 응력-변형률 곡선식과 비교하면, 100 cycles에 해당하는 응력진폭에 기초한 반복 응력-변형률 데이터는 TP304 스테인리스강의 반복 응력-변형률 곡선식과 일치하지만, 반복 연화 현상이 안정화된 상태의 반복 응력-변형률 데이터는 TP316NG 스테인리스강의 반복 응력-변형률 곡선식과 거의 일치하는 것으로 확인되었다.

이들 결과로부터 SA312 TP316 스테인리스강 배관재는 시험 온도에 관계없이 반복하중 조건에서는 단일하중 조건에 비해 훨씬 높은 응력-변형률 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 또한, 반복 경화/연화 현상이 안정화된 상태에서 반복 응력-변형률 거동은 TP316NG 스테인리스강의 반복 응력-변형률 곡선식을 따르는 것으로 확인되었다. 따라서, 설계기준초과지진 조건에서 SA312 TP316 스테인리스강 배관의 거동을 해석적으로 평가할 때, 단일하중 조건에서 주어진 응력-변형률 거동을 적용하는 것은 지나치게 보수적인 결과를 줄 것으로 판단된다. 반면, 식(2)과 (5)의 TP316NG 스테인리스강에 대한 반복 응력-변형률 곡선식을 적용함으로써 반복하중 조건에서 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 응력-변형률 거동을 적절히 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2.2 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재

Fig. 5(a)는 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재에 대한 상온의 반복 응력-변형률 데이터를 단일하중 조건에서 주어진 응력-변형률 곡선과 함께 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 상온에서 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재는 단일하중에 비해 반복하중 조건에서 더 낮은 응력-변형률 거동을 보였다. 반복 연화 현상이 안정화된 상태의 반복 응력-변형률 데이터는 더욱 더 낮은 응력-변형률 거동을 보였다. 이러한 현상은 변형률이 작을수록 더욱 뚜렷하게 나타났다. 그러나, 반복하중 조건에서 응력-변형률 데이터의 기울기는 단일하중 조건의 응력-변형률 곡선과 거의 일치하였다. 한편, 316°C에서는 단일하중에 비해 반복하중 조건에서 약간 높은 응력-변형률 거동을 보였다 (Fig. 5(b)). 또한, 100 cycles과 반복 연화현상이 안정화된 상태에서 반복 응력-변형률 데이터의 차이가 크지 않았다.

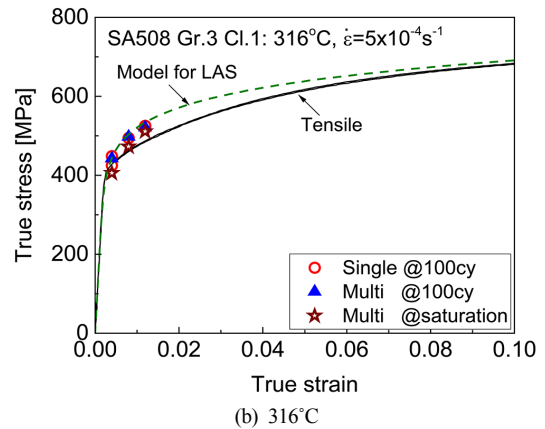
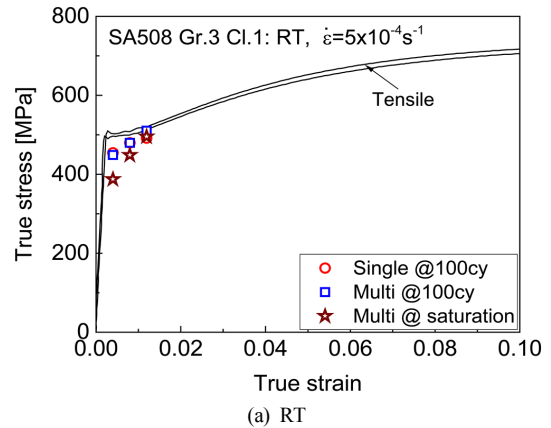


Fig. 5 Cyclic stress-strain data of SA508 Gr.3 Cl.1 low-alloy steel

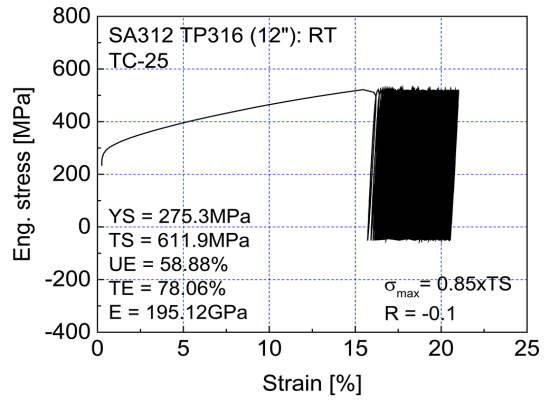
기존의 시험 결과⁽¹³⁾에 의하면 상온에서 저합금강은 반복하중과 단일하중 조건에서 거의 유사한 응력-변형률 거동을 보였으며, 원전 운전온도에서는 단일하중에 비해 반복하중 조건에서 높은 응력-변형률 거동을 보였다. 또한, 원전 운전온도에서 저합금강의 반복 응력-변형률 거동은 변형률속도에 영향을 받았다. 따라서, 본 시험에 사용된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재도 이러한 저합금강의 일반적인 반복 응력-변형률 거동을 따르는 것으로 판단된다. 식(7)은 이들 연구에서 제시한 원전 운전온도 조건의 반복 응력-변형률 곡선식으로 Fig. 5(b)에 함께 나타내었다. Fig. 5(b)에서 알 수 있는 바와 같이 100 cycles의 응력진폭에 기초한 반복 응력-변형률 데이터는 식(7)과 잘 일치하였다. 또한, 반복 연화 현상이 안정화된 상태의 반복 응력-변형률 데이터는 식(7)보다 약간씩 낮은 응력-변형률 거동을 보였다.

$$\epsilon_a(\%) = \frac{\sigma_a}{1965} + \frac{1}{2} \left(\frac{2\sigma_a}{962 - 30.31 \log(\dot{\epsilon})} \right)^{9.09} \quad (7)$$

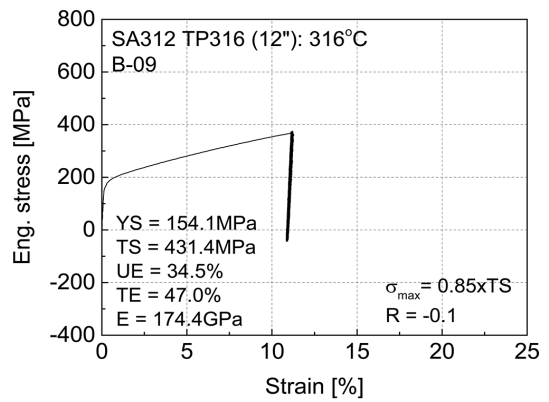
따라서, 원전 운전온도에서 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐에 대한 설계기준초과지진 조건의 거동을 해석적으로 평가할 때, 재료의 반복 응력-변형을 거동으로 식(7)의 응력-변형을 곡선식을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 단일하중 조건과 반복하중 조건에서 응력-변형을 거동의 차이가 크지 않으므로, 단일하중에서 주어진 응력-변형을 곡선을 평가에 적용할지라도 적절한 수준의 보수성을 가지고 반복하중 조건에서 노즐의 거동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 상온에서는 단일하중에서 주어진 응력-변형을 곡선을 해석적 평가에 적용하는 것은 반복하중 조건에서 노즐의 거동을 비보수적으로 평가할 수 있다. 따라서, 단일하중에서 파악된 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 재료의 응력-변형 거동을 적용하는 경우에는 신중한 고려가 요구된다.

3.3 라체팅 변형 특성

상온과 316°C 조건에서 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 라체팅 변형 거동을 파악하기 위해서, 일정 하중진폭 조건에서 반복 응력-변형을 시험을 수행하였다. Fig. 6은 시험에서 주어진 Hysteresis loop을 나타낸 것이다. 상온 시험은 303 cycles, 316°C에서는 1,000 cycles까지 반복하중이 작용되었다. Fig. 6(a)에서 알 수 있는 바와 같이 상온에서는 303 cycles의 반복하중이 작용됨에 따라 누적 변형률이 약 5% 정도 증가하였다. 그러나, 반복하중이 작용됨에 따라 변형률의 진폭은 서서히 감소하는 경향을 보였다. 즉, 상온에서 SA312 TP316 스테인리스강 배관재는 주어진 반복 하중조건에서 라체팅 변형이 발생하지 않고 Shakedown되는 것으로 확인되었다. 316°C에서는 Fig. 6(b)에 나타낸 것과 같이 $\sigma_{max} = 0.85 \times TS$ 에 해당하는 최대하중이 1,000 cycles 작용되었음에도 불구하고 누적 변형률의 증가는 무시할 정도였으며, 반복하중에 따른 변형률진폭의 변화도 거의 관찰되지 않았다. 따라서, SA312 TP316 스테인리스강 배관재는 상온뿐 아니라 316°C에서도 시험에 적용된 하중 조건에서는 라체팅 변형이 발생하지 않는 것으로 확인되었다.



(a) RT



(b) 316°C

Fig. 6 Stress-strain curve of SA312 TP316 stainless steel under cyclic load with constant load amplitude

한편, Fig. 7은 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재를 대상으로 인장강도의 85%에 해당하는 최대하중과 $R = -0.1$ 인 하중 조건에서 수행된 반복 응력-변형 시험의 Hysteresis loop을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 알 수 있는 바와 같이 상온에서 300 cycles의 반복하중이 작용되는 동안 0.3% 정도의 변형률이 누적되었으며, 반복하중이 작용됨에 따라 변형률의 진폭이 서서히 감소하는 경향을 보였다. 316°C에서는 앞서 SA312 TP316 스테인리스강 배관재와 유사하게 1,000 cycles까지 반복하중이 작용되었음에도 불구하고 누적 변형률의 증가는 무시할 정도였으며, 반복하중에 따른 변형률진폭의 변화도 거의 없었다 (Fig. 7(b)). 따라서, SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 경우에도 상온과 원전 운전온도에서 모두 인장강도의 85%에 해당하는 최대하중을 갖는 $R = -0.1$ 인 반복하중이 작용될지라도 라체팅 변형은 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

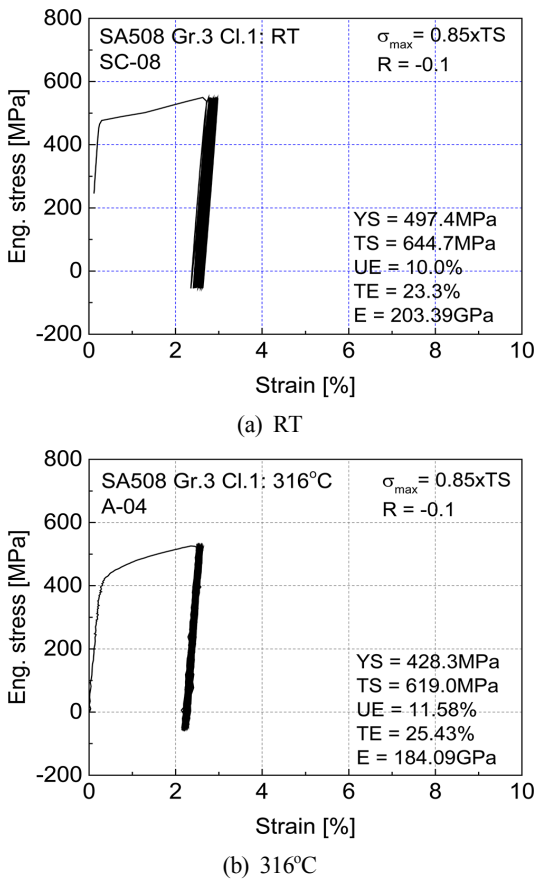


Fig. 7 Stress-strain curve of SA508 Gr.3 Cl.1 low-alloy steel under cyclic load with constant load amplitude

4. 결 론

본 논문에서는 일정 변형률진폭과 일정 하중진폭 조건에서 반복 응력-변형률 시험을 수행하여, SA312 TP316 스테인리스강 배관재와 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 변형 거동에 미치는 반복하중의 영향을 살펴보았다. 시험 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) SA312 TP316 스테인리스강 배관재는 반복하중이 작용됨에 따라 반복 경화/연화 현상에 의한 응력진폭의 증가와 감소가 뚜렷하게 관찰되었다. 반복 경화/연화 현상은 변형률진폭이 클수록 더욱 뚜렷하였으며, 상온에 비해 316°C에서 반복 경화/연화에 의한 응력진폭의 변화가 더욱 크게 관찰되었다.

2) 시험 온도에 관계없이 SA312 TP316 스테인리스강 배관재는 단일하중에 비해 반복하중 조건에서

뚜렷이 높은 응력-변형률 거동을 보였으며, 반복 응력-변형률 거동은 TP316NG 스테인리스강에 대한 기존의 반복 응력-변형률 곡선식과 거의 일치하는 것을 확인하였다.

3) SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재는 작용되는 변형률진폭에 관계없이 초기 수 cycle을 제외하면 최종 파단시까지 반복 연화에 의한 지속적인 응력진폭의 감소를 보였다. 316°C에서는 상온에 비해 반복 연화에 의한 응력진폭의 감소 현상이 작았다.

4) SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강 노즐재의 경우, 상온에서는 단일하중에 비해 반복하중 조건에서 더 낮은 응력-변형률 거동을 보인 반면, 316°C에서는 단일하중에 비해 반복하중 조건에서 더 높은 응력-변형률 거동을 보였다.

5) 재료 종류에 관계없이 상온과 316°C에서 모두 인장강도의 85%에 해당하는 최대하중을 갖는 하중비가 $R = -0.1$ 인 일정 하중진폭의 반복하중 조건에서 라체팅 변형이 발생하지 않았다.

후 기

본 논문은 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(20141520100860)의 결과입니다.

참고문헌

- (1) Saji, G., 2014, "Safety goals for seismic and tsunami risks: Lessons learned from the Fukushima Daiichi disaster," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 280, pp. 449-463.
- (2) Stevenson, J.D., 2014, "Summary of the historical development of seismic design of nuclear power plants in Japan and the U.S.," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 269, pp. 160-164.
- (3) Nakamura, I. and Kasahara, N., 2015, "Excitation tests on elbow pipe specimens to investigate failure behavior under excessive seismic loads," *Proc. of ASME PVP2015 Conference*, PVP2015-45711.
- (4) Donavin, P.R., 2016, "Technical Basis for Proposed ASME Section XI Code Case on Beyond Design Bases Earthquake," *Proc. of ASME PVP2016 Conference*, PVP2016-63827.
- (5) ASME, 2009, "Rules for construction of nuclear facility components," *ASME B&PV Sec. III*.

- (6) Paul, S.K., Sivaprasad, S., Dhar, S., and Tarafder, S., 2011, "Key issues in cyclic plastic deformation: Experimentation," *Mech. of Mater.*, Vol. 43, pp. 705-720.
- (7) OECD/NEA, 2015, "Interim Report on Metallic Components Margins under High Seismic Loads," *NEA/CSNI/R(2015)8*.
- (8) ASTM, 1998, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, *ASTM E606-92* (Reapproved 1998).
- (9) Kim, I.S. and Kang, S.S., 1995, "Dynamic strain aging in SA508-class 3 pressure vessel steel," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 62, pp.123-129.
- (10) Dieter, G.E., 2011, *Mechanical Metallurgy*, 3rd Edition, McGraw-Hill.
- (11) Murty, K.L. and Charit, I., 2013, *An Introduction to Nuclear Materials*, Wiley-VCH.
- (12) USNRC, 1999, "Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Design Curves of Austenitic Stainless Steels," *NUREG/CR-5704*.
- (13) USNRC, 1998, "Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Design Curves of Carbon and Low-Alloy Steels," *NUREG/CR-6583*.