

<연구논문>

냉간가공을 통한 중성자조사된 오스테나이트 스테인리스강의 기계적물성 모사 타당성 분석

김진원^{†*}·김윤재^{**}

Feasibility Analysis of Simulation on the Mechanical Properties of Neutron Irradiated Austenitic Stainless Steels by Cold-working

Jin Weon Kim^{†*} and Yun Jae Kim^{**}

(Received 4 June 2019, Revised 31 August 2019, Accepted 3 November 2019)

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the feasibility of simulating the mechanical properties of irradiated austenitic stainless steels by cold-working. In this study, the tensile properties, cyclic hardening behaviors and fracture toughness of cold-worked TP316L stainless steel were compared with those of austenitic stainless steels irradiated by neutrons. It showed that cold-working can properly simulate the increase in strength and the decrease in ductility and fracture resistance of austenitic stainless steels by neutron irradiation, even though it could not perfectly simulate the microstructures of irradiated austenitic stainless steels. Also, cold-working can appropriately simulate the hardening behaviors of neutron irradiated austenitic stainless steels under monotonic and cyclic loading conditions.

Key Words : Cold-working (냉간가공), Mechanical Properties (기계적 성질), Austenitic Stainless Steels (오스테나이트 스테인리스강), Neutron Irradiation (중성자조사), Simulated Materials (모사 재료)

1. 서 론

원자력발전소(이하 원전)의 기기와 설비는 장시간 운전에 의해 기계적 또는 재료적 원인으로 경년 열화될 수 있다.⁽¹⁾ 특히, 원자로 주위에 설치된 기기와 설비들은 운전 중 고에너지 중성자에 노출됨에 따라 중성자 조사에 의한 경년열화가 발생된다.⁽¹⁻⁴⁾ 즉, 중성자 조사에 의해 재료의 강도가 증가하고 연성과 인성이 감소하는 등 기계적물성이 변화된다.⁽²⁻⁴⁾ 뿐만 아니라 중성자 조사로 인해 결정립계의 석출물 생성과 불순물 편석 등 미세조직적인

변화가 발생되며, 미세조직 변화는 기기 및 설비의 부식 거동과 응력부식균열 (IASSC, Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking) 민감도에 영향을 미친다.^(2,3) 또한, 중성자 조사량이 높은 경우에는 조사 크립 (Creep)과 팽윤 (Swelling) 등에 의해 형상이 변화하고 이로 인한 응력상태의 변화도 나타날 수 있다.⁽⁵⁾ 따라서, 이들 기기와 설비에 대한 신뢰성 있는 구조건전성 평가를 위해서는 중성자 조사에 따른 재료의 물성 변화, 손상거동 변화, 그리고 응력 변화 등을 정확히 파악하고, 이를 평가시 적절하게 반영하는 것이 중요하다. 따라서, EPRI 등⁽⁶⁾은 원전의 주요 재료에 대한 중성자 조사량에 따른 인장물성, 파괴인성, 조사 크립과 팽윤, 그리고 IASCC 생성 및 성장 등과 같은 재료물성 데이터를 제공하고 있으며, 이들 데이터는 장기 가동 원전에서 주요 기기와 설비의 구조건전성 평가

† 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과

E-mail : jwkim@chosun.ac.kr

TEL: (062)230-7109 FAX: (062)232-9218

* 조선대학교 원자력공학과

** 고려대학교 기계공학과

시 입력으로 적용되고 있다.

그러나, 이들 시험데이터는 단순하중 조건에서 시험된 재료의 기초 물성만을 제공하고 있다. 따라서, 최근 이슈가 되고 있는 설계초과지진과 같은 큰 반복하중과 복잡한 응력상태 하에서 중성자 조사된 기기와 설비의 변형 및 손상 거동을 파악하고 구조건전성 평가 결과를 검증하기 위해서는 다양한 하중 형태와 응력 상태가 반영된 데이터 확보가 필요하다. 그러나, 실제 중성자 조사된 시편을 이용하여 직접 시험을 수행하기에는 재료 확보, 시편 취급, 시험장비 및 시설 확보 등에서 많은 제약이 따른다. 또한, 양성자 조사나 이온 조사된 시편은 조사 깊이의 제한으로 인해 기계적물성을 평가하는데 적용의 한계가 있다. 따라서, 최근에는 중성자 조사된 시편을 이용한 시험 대신에 중성자조사 효과를 모사한 시편을 사용한 대체 시험 방법들이 제안되고 있다. Jitsukawa et al.⁽⁷⁾와 Kamaya 등⁽⁸⁾은 냉간압연을 통해 중성자 조사에 의한 재료의 항복강도 증가,

연신률과 파괴인성 감소 등의 모사 가능성을 확인하였다. 또한, 일부 연구에서는 중성자 조사에 의한 결정립계의 석출물 생성과 불순물 편석을 모사하기 위한 방법으로 열간압연을 제안한 바 있다.⁽⁹⁾

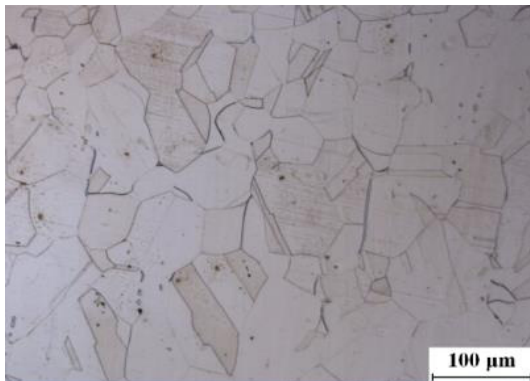
따라서, 본 논문의 선행연구에서는 냉간압연된 TP316L 스테인리스강에 대한 인장시험, J-R 파괴인성시험, 그리고 반복 응력-변형을 시험을 수행하고, 냉간압연에 따른 인장물성, 파괴인성, 그리고 반복 변형거동의 변화를 살펴보았다.^(10,11) 본 논문에서는 이들 시험 결과와 참고문헌^(4,12-15)에서 제시하고 있는 중성자 조사에 따른 오스테나이트 스테인리스강의 기계적물성 변화를 비교함으로써 냉간가공을 통해 중성자 조사된 스테인리스강의 기계적물성 변화를 모사할 수 있는지 그 타당성을 검토하였다.

2. 시험 재료 및 방법

2.1 시험 재료

시험에는 원자로내부구조물 등에 사용되는 TP316L 스테인리스강이 사용되었다. 시험에 사용된 TP316L 스테인리스강은 두께가 22 mm인 판재로 화학조성은 Table 1과 같다. 중성자 조사에 의한 기계적물성 변화를 모사하기 위해서 TP316L 스테인리스강을 33% 냉간압연하였다. Fig. 1은 냉간압연 전·후의 미세조직을 나타낸 것으로, 냉간압연 전의 TP316L 스테인리스강은 결정립 크기가 50~100 μm 인 등방성의 오스테나이트 구조를 보였다. 냉간압연된 TP316L 스테인리스강은 압연 방향으로 결정립이 변형되어 있으며, 일부 결정립에서는 변형에 의해 생성된 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. 33%의 압연율은 냉간압연된 TP316 스테인리스강⁽⁸⁾과 중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강의 인장물성치^(13,14) 비교를 통해 오스테나이트 스테인리스강에서 중성자 조사에 따른 재료물성의 변화가 포화되는 조사선량에서 결정되었다. 즉, 33%의 압연율은 10 dpa 이상의 중성자 조사에 의한 재료물성치 변화를 기대할 수 있는 조건에서 결정되었다.

표준 인장시험에는 ASTM E8/E8M 기준⁽¹⁶⁾에 따라 설계된 직경이 5 mm이고 평형부 길이가 32 mm인 봉상시편이 사용되었으며, J-R 파괴인성시험에는 ASTM E1820 기준⁽¹⁷⁾에 따라 설계된 두께가 12.7 mm이고 폭이 25.4 mm인 0.5T-CT 시편이 사용되었다. 반복



(a) As-received



(b) 33% Cold-worked

Fig. 1 Microstructures of as-received and cold-worked TP316L stainless steels

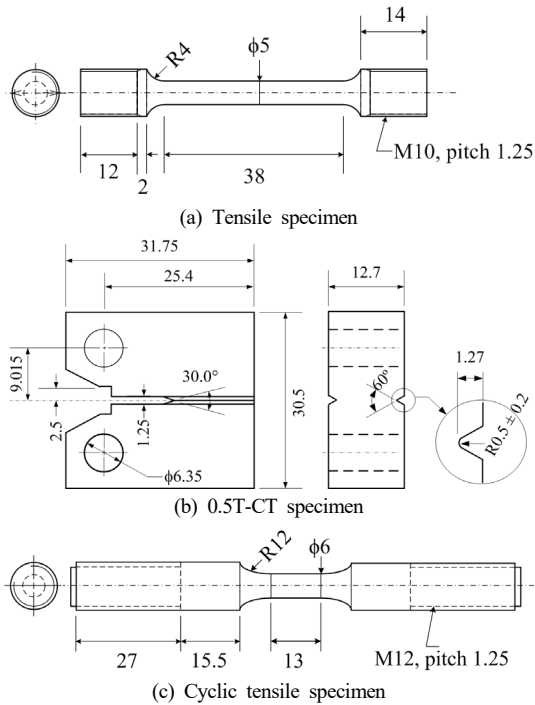


Fig. 2 Specimens used for the experiments

Table 1 Chemical composition of TP316L stainless steel used for experiment

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mn	N
0.021	0.96	0.029	0.002	0.48	10.08	16.72	0.04	0.042

응력-변형률 시험에는 ASTM E606 기준⁽¹⁸⁾에 따라 설계된 직경이 6 mm이고 평형부길이가 13 mm인 봉상시편이 사용되었다. Fig. 2는 각 시편의 형상을 나타낸 것이다.

2.2 시험 조건 및 방법

2.2.1 표준 인장시험

표준 인장시험은 상온과 원전 운전온도인 316 °C에서 수행되었으며, 각 조건 별로 2~3회씩 준정적 시험속도 ($\dot{\epsilon} = 5.21 \times 10^{-4} s^{-1}$)로 진행되었다. 고온 시험에서는 시편의 양끝 단에서 시편의 온도를 측정하였으며, 측정된 온도가 설정 온도의 ± 1.0 °C 이내에서 20 분 이상 유지 후 시험을 시작하였다. 시험에는 50 kN의 로드 셀이 부착된 기계식만능시험기가 사용되었으며, 시편의 변위 측정에는 게이지길이가 25 mm이고 측정 능력이 +50 %, -10 %인 고온용 신률계가 사용되었다.

2.2.2 J-R 파괴인성시험

냉간압연 전·후의 TP316L 스테인리스강에 대한 J-R 파괴인성시험 역시 상온과 316 °C에서 준정적 시험속도(하중선 변위속도(V_{LL})=0.45 mm/min)로 수행되었다. 시험은 각 조건 별로 2~3회씩 수행되었으며, J-R 파괴인성시험에서 균열진전길이는 ASTM E1820의 부록⁽¹⁷⁾에 제시된 정규화법을 적용하여 결정하였다. 모든 시험에는 100 kN 용량의 로드 셀이 부착된 유압식만능시험기가 적용되었으며, 시편의 하중선변위는 게이지길이가 6 mm이고 측정 능력이 10 mm인 COD (Crack Opening Displacement) 게이지를 이용하여 측정하였다.

2.2.3 반복 응력-변형률 시험

반복 응력-변형률 시험은 반복하중 조건에서 재료의 변형거동을 파악하기 위해 수행되었으며, 냉간압연 전·후의 TP316L 스테인리스강을 대상으로 상온에서 진행되었다. 시험은 일정한 변형률진폭 (ϵ_a) 조건에서 변형률제어 모드로 수행되었다. 시험에는 평균변형률이 영(0)이고 변형률진폭이 $\epsilon_a = 0.4, 0.8, 1.2$ %인 3 가지 조건이 고려되었다. 시험은 각 변형률 진폭 별로 시편에서 균열이 생성되어 응력진폭이 감소할 때까지 진행하였다. 시험에는 100 kN 용량의 로드 셀이 부착된 유압식만능시험기가 사용되었으며, 시편의 변형률 측정에는 게이지길이가 12.5 mm이고 측정 능력이 ± 15 %인 동적 신률계가 사용되었다.

3. 시험 결과 정리

냉간압연 전·후의 TP316L 스테인리스강에 대한 인장시험, J-R 파괴인성시험, 그리고 반복 응력-변형률 시험 결과를 정리하면 다음과 같다.

3.1 인장시험

Fig. 3은 상온과 316 °C에서 냉간압연 전·후의 TP316L 스테인리스강에 대한 공칭 응력-변형률 곡선을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 냉간압연 전과 비교하여 냉간압연된 TP316L 스테인리스강에서 강도가 크게 증가하였으며, 연신률이 크게 감소하였다. 특히 인장강도 (TS, Tensile Strength)에 비해 항복강도 (YS, Yield Strength)의 증가 현상이 뚜렷하였으며, 총연신률 (TE, Total Elongation)에 비해

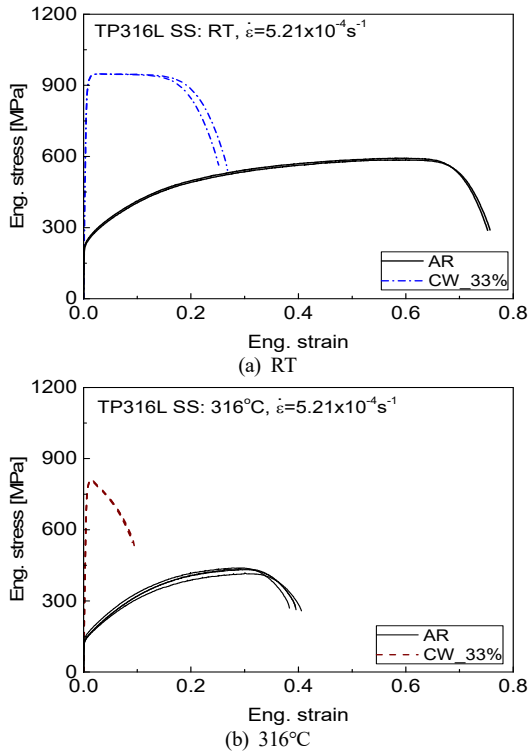


Fig. 3 Comparison of engineering stress vs. strain curves of as-received and cold-worked TP316L stainless steels⁽¹¹⁾

균일연신률 (UE, Uniform Elongation)이 큰 감소를 보였다. TP316L 스테인리스강에서 냉간압연에 따른 인장물성의 변화는 상온에 비해 316 °C에서 더욱 큰 것으로 관찰되었다. Table 2는 인장물성치의 평균값을 정리한 것으로 33 % 냉간압연에 의해 항복강도는 상온에서 약 3.7배, 316 °C에서 약 5.4 배 증가하였으며, 인장강도는 상온과 316 °C에서 각각 1.6 배와 1.9 배 정도 증가하였다. 균일연신률은 상온과 316 °C에서 모두 냉간압연 전에 비해 약 95 % 감소하였으며, 총연신률은 상온에서 약 65 %, 316 °C에서 약 76 % 감소한 것을 알 수 있다.

Fig. 3에서 냉간압연 전·후에 공칭 응력-변형률 곡선의 형태를 살펴보면, 시험온도에 관계없이 냉간압연에 의해 변형 거동이 크게 변화된 것을 알 수 있다. 즉, 냉간압연 전에는 네킹에 앞서 큰 소성 변형과 변형경화를 보이지만, 냉간압연된 TP316L 스테인리스강에서는 탄성변형 이후 바로 네킹이 발생하였다. 즉, 균일 소성변형과 변형경화 현상이 거의 나타나지 않았다.

Table 2 Tensile properties of as-received and cold-worked TP316L stainless steels

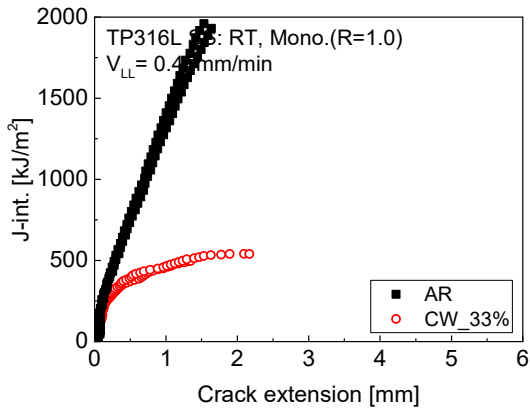
<RT>					
	YS [MPa]	TS [MPa]	UE [%]	TE [%]	RA [%]
AR	227.8	589.3	56.4	75.5	83.3
CW (33%)	853.7	948.1	2.9	26.0	77.4
CW/AR	3.748	1.609	0.051	0.344	0.929
<316°C>					
	YS [MPa]	TS [MPa]	UE [%]	TE [%]	RA [%]
AR	135.0	431.0	28.9	39.5	73.8
CW (33%)	741.4	808.9	1.44	9.2	60.4
CW/AR	5.393	1.877	0.050	0.232	0.817

3.2 J-R 파괴인성시험

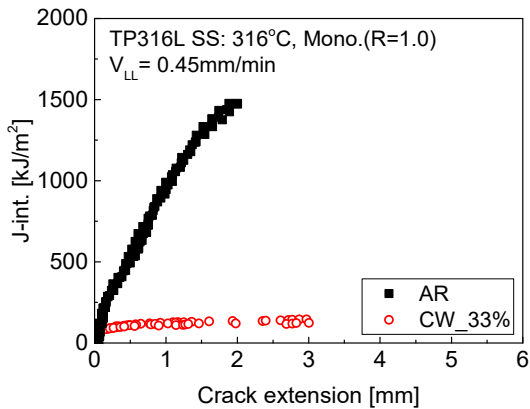
Fig. 4는 상온과 316 °C에서 시험된 냉간압연 전·후의 TP316L 스테인리스강에 대한 J-R 파괴인성곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험온도에 관계없이 냉간압연 전에 비해 냉간압연된 J-R 파괴인성곡선의 기울기가 크게 감소하였다. 즉, 냉간압연에 의해 TP316L 스테인리스강의 파괴인성이 크게 감소하였다. 또한, 상온에 비해 316 °C에서 J-R 파괴인성곡선의 감소가 더욱 크게 나타났다. Table 3은 냉간압연에 따른 파괴인성의 변화를 정량적으로 살펴보기 위해서, Fig. 4의 J-R 파괴인성곡선에서 균열개시시점의 J-적분값 (J_Q or J_{IC})과 균열이 1.0 mm 진전했을 때의 J-적분값 ($J_{1.0mm}$)을 비교한 것이다. Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 상온에서는 냉간압연에 의해 J_Q (or J_{IC})와 $J_{1.0mm}$ 가 각각 약 60 %와 65 % 감소하였으며, 316 °C에서는 J_Q (or J_{IC})와 $J_{1.0mm}$ 가

Table 3 J_Q (or J_{IC}) and $J_{1.0mm}$ values of as-received and cold-worked TP316L stainless steels

	RT		316°C	
	JIC or JQ [kJ/m ²]	J1.0mm [kJ/m ²]	JIC or JQ [kJ/m ²]	J1.0mm [kJ/m ²]
AR	877.9	1346.6	621.8	932.6
CW(33%)	366.6	469.1	101.4	123.5
CW/AR	0.418	0.348	0.163	0.132



(a) RT

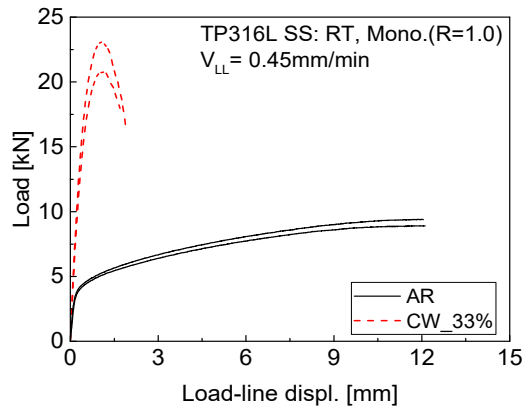


(b) 316°C

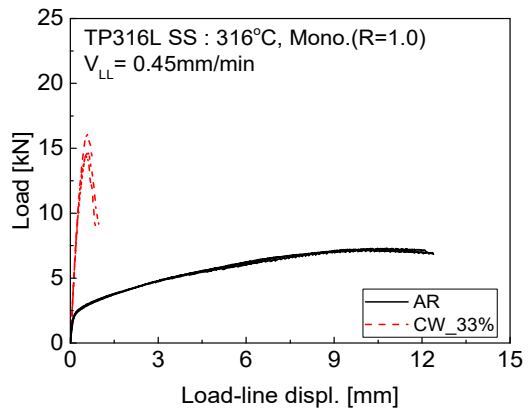
Fig. 4 Comparison of J-R curves of as-received and cold-worked TP316L stainless steels⁽¹¹⁾

각각 84 %와 87 % 정도 감소하였다. 따라서, 33%의 냉간압연은 TP316L 스테인리스강의 파괴 인성을 크게 감소시켰으며, 인장시험 결과와 유사하게 상온에 비해 316 °C에서 냉간압연에 따른 파괴인성의 변화가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 파괴인성시험에서 주어진 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험온도에 관계없이 냉간압연 후 하중-변위 곡선에서 최대하중이 크게 증가하고 최대하중에 도달하는 변위는 크게 감소하였다. 이것은 인장시험 결과에서 냉간압연에 의한 TP316L 스테인리스강의 강도 증가 및 연성 감소 현상과 일치하는 것으로, 냉간압연에 의한 파괴인성 감소가 냉간압연에 의한 강도 증가 및 연성 감소에 기인하는 것을 보여주고 있다.



(a) RT



(b) 316°C

Fig. 5 Comparison of load-displacement curves of as-received and cold-worked TP316L stainless steels⁽¹¹⁾

3.3 반복 응력-변형률 시험

Fig. 6은 반복 응력-변형률 시험에서 주어진 냉간압연 전·후의 TP316L 스테인리스강에 대한 반복하중에 따른 응력진폭의 변화를 시편에 가해진 변형률진폭 별로 나타낸 것이다. 냉간압연 전의 TP316L 스테인리스강에서는 초기 20~30 사이클 동안 반복하중에 따라 응력진폭이 증가하는 반복경화 거동을 보였으며, 반복경화 현상은 시편에 작용된 변형률진폭이 클수록 크게 나타났다. 반복경화 이후의 거동은 시편에 작용된 변형률진폭에 따라 다른 거동을 보였다. 즉, 변형률진폭이 작은 경우 ($\epsilon_a = 0.4\%$)에는 반복하중이 작용됨에 따라 응력진폭이 약간씩 감소하는 반복연화 거동을 보이다 일정한 값에 수렴하였다. 반면, 큰 변형률진폭

조건 ($\epsilon_a = 0.8, 1.2\%$)에서는 반복경화 현상이 안정화되다 다시 응력진폭이 증가하는 2차 경화 현상을 보였다. 그러나, 냉간압연된 TP316L 스테인리스강에서는 변형률진폭이 작은 경우 ($\epsilon_a = 0.4\%$)를 제외하면, 초기부터 반복하중에 따라 응력진폭이 감소하는 반복연화 거동을 보였으며, 일정한 사이클의 반복하중이 작용된 이후에 연화 현상이 안정화되는 경향을 보였다.

TP304와 TP316 등 오스테나이트 스테인리스강에서 반복하중이 작용됨에 따라 초기에 나타나는 반복경화 거동은 소성변형에 따른 전위의 밀도 증가에 기인하며, 반복경화 이후 나타나는 연화 거동은 슬립띠 (slip band)의 생성, 교차슬립 (cross slip)의 발생, 그리고 전위의 재배열 등에 기인하는 것으로 알려져 있다.^(19~21) 2차 경화 현상은 일반적으로

변형에 의한 마르텐사이트 조직의 생성 때문으로 알려져 있으나, 일부 연구에서는 마르텐사이트 생성과 무관하게 전위의 재배열에 의해 생성된 서브결정립 (sub-grain)에 기인하는 것으로 설명하고 있다.⁽²¹⁾ 따라서, 냉간압연된 TP316L 스테인리스강에서 반복하중 초기부터 연화 거동을 보이는 것은 냉간압연시 부동전위가 대량으로 생성되므로 반복하중에 따른 전위의 생성 없이 초기부터 슬립띠의 생성, 교차슬립의 발생, 그리고 전위의 재배열이 진행되기 때문으로 판단된다.

4. 중성자조사 오스테나이트 스테인리스강의 기계적물성 모사 타당성 검토

여기서는 앞서 정리된 냉간압연된 TP316L 스테인리스강에 대한 시험 결과와 참고문헌에 제시된 중성자조사 오스테나이트 스테인리스강의 인장물성, 파괴인성, 반복변형 거동 등을 비교함으로써 냉간압연을 통해 중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강의 기계적물성을 모사할 수 있는지 가능성을 살펴보았다.

4.1 인장물성 및 변형거동

Fig. 7은 330 °C에서 시험된 중성자 조사된 TP316 스테인리스강의 공칭 응력-변형률 곡선을 조사량에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 중성자 조사 전에 비해 7 dpa와 19 dpa 조사된 TP316 스테인리스강에서 강도는 크게 증가하고 연성은 크게 감소하였다. 특히 조사되지 않은 TP316 스테인리스강과 달리 7 dpa와 19 dpa 조사된 TP316 스테인리스강에서는 균일 소성변형이 거의 발생되지 않고 탄성변형 후 바로 네킹이 발생하는 변형 거동을 보였다. 중성자 조사에 따른 이러한 공칭 응력-변형률 곡선의 변화는 TP316L 스테인리스강에서 냉간압연에 따른 변화와 매우 흡사한 것을 알 수 있다 (Fig. 3).

일반적으로 조사온도와 조사량에 따라 다소 차이가 있으나, 중성자 조사에 따른 오스테나이트 스테인리스강의 강도 증가와 연성 감소는 300 °C 이하에서는 후점 (점결함집합) 생성과 부동전위의 밀도 증가, 300 °C 이상에서는 부동전위의 밀도 증가와 함께 공공 (bubble)과 기공 (cavity)의 생성이 원인인

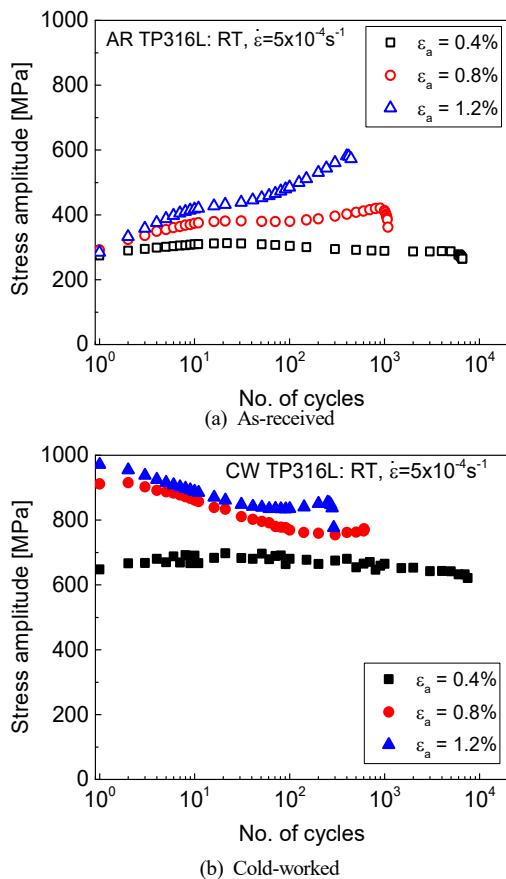


Fig. 6 Comparison of cyclic hardening behaviors of as-received and cold-worked TP316L stainless steels⁽¹⁰⁾

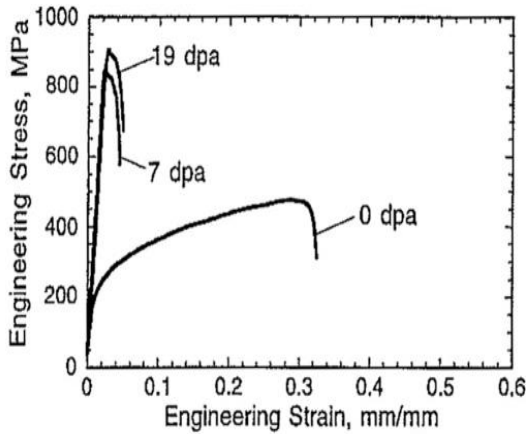
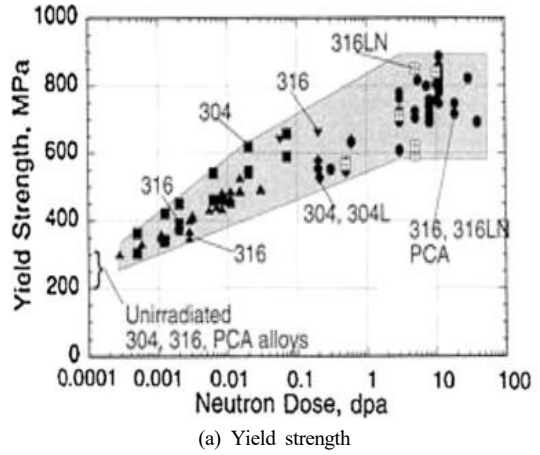


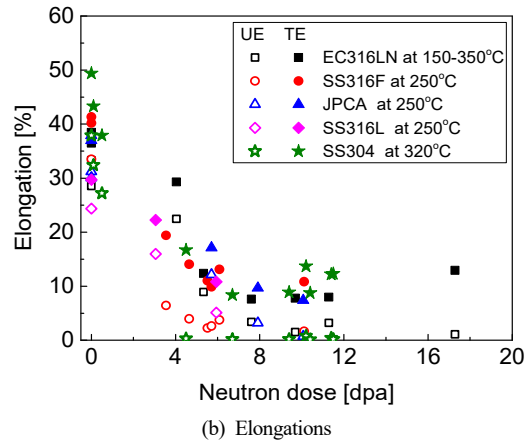
Fig. 7 Engineering stress-strain curves of irradiated 316 stainless steel tested at 330°C⁽¹²⁾

것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾ 반면에 냉간압연에 따른 강도 증가와 연성 감소는 부동전위의 밀도 증가와 변형 유기 마르텐사이트 생성에 기인하는 것으로 분석된다 (Fig. 1). 따라서, 냉간압연과 중성자 조사에 따른 미세조직 변화가 완전히 일치하지는 않는다. 그러나, 냉간압연을 통해 중성자 조사에 따른 오스테나이트 스테인리스강의 거시적인 물성 변화는 적절히 모사하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 300 °C 부근에서 시험된 중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강의 항복강도와 연신률을 조사량에 따라 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에 나타낸 바와 같이 항복강도는 조사량에 따라 증가하다 5~10 dpa 이상에서 수렴하는 경향을 보였으며, 수렴된 상태에서 항복강도는 조사 전에 비해 약 3~4 배 증가된 값을 보였다. 연신률은 조사량이 증가함에 따라 급감하다 5~10 dpa 이상에서 수렴하는 경향을 보였으며, 수렴된 상태에서 균일연신률은 약 0~5 %, 총 연신률은 ~10 % 정도의 값을 보였다. 이는 중성자 조사 전과 비교하여 연신률이 90~95 % 감소된 값이다. 따라서, Table 2에서 냉간압연된 TP316L 스테인리스강의 항복강도와 연신률을 Fig. 8의 중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강의 시험 데이터와 비교하면, 33 % 냉간압연된 TP316L 스테인리스강에서 인장물성의 변화는 5~10 dpa 이상 중성자 조사된 TP316 스테인리스강의 재료물성 변화와 유사한 것으로 판단된다. 그러나, 조사량과 냉간압연율의 관계를 정량적으로 비교하기 위해서는 보다 다양한 냉간압연 조건에서 시험이 필요하다.



(a) Yield strength



(b) Elongations

Fig. 8 Variation in tensile properties of austenitic stainless steels with irradiation dose level^(13,14)

4.2 파괴인성

Fig. 9는 250~320 °C 부근에서 시험된 중성자 조사된 TP304와 TP316 스테인리스강을 포함하는 오스테나이트 스테인리스강에 대한 J-R 파괴인성 시험 결과를 조사량에 따라 정리한 것이다. Fig. 9(a)에 나타낸 것과 같이 조사량이 증가함에 따라 J-R 파괴인성곡선의 기울기가 크게 감소하였다. Fig. 9(b)에서 J_{IC} 값을 살펴보면, 조사량이 증가함에 따라 J_{IC} 값이 급감하다 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다. 또한, J_{IC} 값이 수렴하는 중성자 조사량은 시험 재료의 종류에 따라 다소 차이가 있는데, 인장물성과 유사하게 5~10 dpa 이상에서 J_{IC} 값이 수렴하는 경향을 보였다. 수렴된 J_{IC} 값은 중성자 조사 전에 비해 약 90 % 이상 감소된 값이다. 냉간압연된 TP316L 스테인리스강의 J-R 파괴인성

성곡선 (Fig. 4)을 Fig. 9(a)와 비교하여 살펴보면, 냉간압연에 의한 J-R 파괴인성곡선의 기울기 감소와 중성자 조사에 의한 J-R 파괴인성곡선의 기울기 감소 형태가 거의 유사한 것을 알 수 있다. 일반적으로 오스테나이트 스테인리스강에서 중성자 조사에 따른 파괴인성 감소는 조사 온도와 조사량에 따라 차이를 보이는데, 300 °C 부근에서는 중성자 조사에 따른 항복강도 증가와 연성 감소가 주 원인이고, 500 °C 이상의 고온에서는 He-취성이 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ 따라서, 냉간압연에 따른 TP316L 스테인리스강의 파괴인성 감소가 강도 증가와 연성 감소에 기인하는 것을 고려하면, 중성자 조사된 TP316L 스테인리스강의 파괴인성 감소를 냉간압연을 통해 적절히 모사할 수 있는 것으로 판단된다.

한편, 316 °C 에서 냉간압연에 의한 J_{IC} 값의 감소를 (Table 3)과 Fig. 9(b)를 비교하여 살펴보면, 33 %

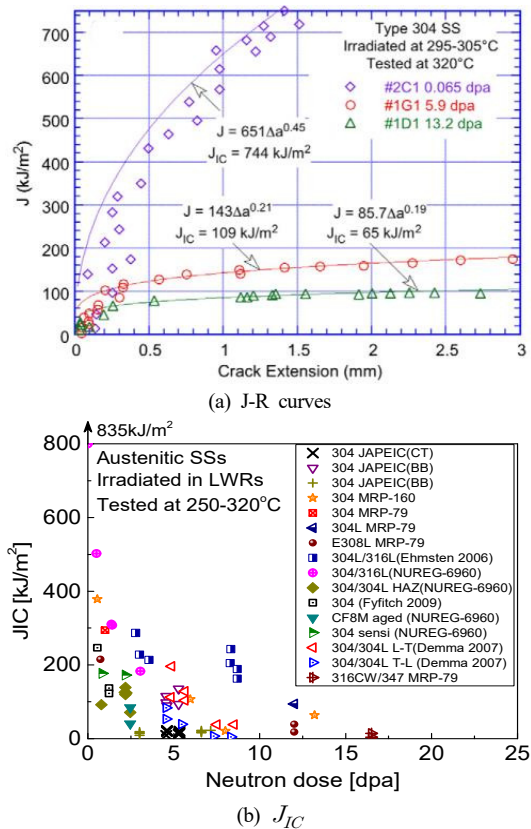


Fig. 9 Variation in fracture toughness of austenitic stainless steels with irradiation dose level⁽⁴⁾

냉간압연에 의한 TP316L 스테인리스강의 파괴인성 감소 정도는 중성자 조사에 의한 파괴인성 감소가 수렴하는 5~10 dpa 이상의 조사량에 해당하는 것을 알 수 있다. 다만, 파괴인성에 미치는 냉간압연율과 중성자 조사량의 상관관계를 구체적으로 제시하기 위해서는 보다 다양한 압연을 조건의 시험이 필요하다.

4.3 반복 변형거동

Fig. 10은 상온에서 중성자 조사된 TP304 스테인리스강에 대한 반복 응력-변형률 시험 결과로, 사이클에 따른 응력진폭의 변화를 조사되지 않은 재료의 시험 결과와 함께 나타낸 것이다. 시험에 사용된 TP304 스테인리스강은 35°C에서 $5 \times 10^{24} n/m^2$ ($E > 0.1 MeV$) 조사된 재료이다. Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 조사되지 않은 TP304 스테인리스강에서는 초기 수직 사이클 동안 반복하중에 따라 응력진폭이 증가하였으며, 시험에 작용된 변형률진폭이 클수록 응력진폭의 증가가 뚜렷하였다. 즉, 초기 수직 사이클 동안은 반복경화 현상을 보였으며, 반복경화 현상은 변형률진폭이 클수록 뚜렷하였다. 이후의 변형 거동은 시험에 작용된 변형률진폭의 크기에 따라 응력진폭이 감소하거나 일정한 값을 유지하였다. 즉, 반복연화 거동을 보이거나 반복경화 현상이 안정화되는 경향을 보였다. 반면, 중성자 조사된 TP304 스테인리스강에서는 시험에 작용된 변형률진폭이 작은 조건($\epsilon_a = 0.3\%$)을 제외하면, 초기부터 반복하중이 작용됨에 따라 응력진폭이 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 즉, 반복하중 초기부터 반복연화 거동을 보였다. $\epsilon_a = 0.3\%$ 에서는 반복하중에 따른 응력진폭의 변화가 거의 관찰되지 않았다.

냉간압연된 TP316L 스테인리스강의 결과 (Fig. 6(b))와 Fig. 10에서 중성자 조사된 TP304 스테인리스강의 시험 결과를 비교하면, 반복하중 조건에서 변형거동이 거의 유사한 것을 알 수 있다. 즉, 냉간압연된 재료와 중성자 조사된 재료에서 모두 반복하중 초기부터 연화거동을 보였다. 앞서 언급한 바와 같이 냉간압연된 오스테나이트 스테인리스강에서 반복연화 거동은 반복하중에 따른 슬립 띠의 생성, 교차슬립의 발생, 그리고 전위의 재배열 등에 기인하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁹⁻²¹⁾ 한편,

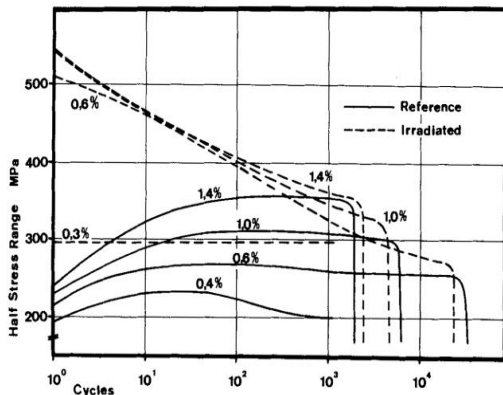


Fig. 10 Stress amplitude vs. number of cycles for irradiated TP304 stainless steel at various strain amplitudes⁽¹⁵⁾

중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강에서 반복하중에 따른 연화 현상은 반복하중에 따른 전위 채널의 생성과 전위의 재배열에 따른 셀 구조의 발달과 관련이 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁵⁾ 따라서, 냉간압연된 재료와 중성자 조사된 재료의 반복변형 거동은 거시적으로 유사할 뿐 아니라 미세조직적으로도 어느 정도 유사성을 갖는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 냉간가공을 통해 중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강의 기계적물성을 모사할 수 있는지를 확인하기 위해서, 33 % 냉간압연된 TP316L 스테인리스강의 표준 인장시험, J-R 파괴인성시험, 그리고 반복 응력-변형률 시험 결과를 중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강의 인장물성, 파괴인성, 그리고 반복변형 거동과 비교하였다. 비교 결과 냉간가공을 통해 중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강의 미세조직을 완벽하게 모사하지는 못하지만, 거시적으로 중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강의 강도 증가, 연성과 파괴인성 감소 현상은 적절히 모사하는 것으로 확인되었다. 또한, 냉간가공된 TP316L 스테인리스강의 반복변형 거동과 중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강의 반복변형 거동이 거의 일치하는 것을 확인하였다. 따라서, 냉간가공된 오스테나이트 스테인리스강을 이용하여 중성자 조사된 오스테나이트 스테인리스강의 변형 및 손상거동 평가

하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 다만, 중성자 조사량과 냉간압연율에 따른 기계적물성의 변화 정도를 정량적으로 비교하기 위해서는 보다 다양한 냉간압연 조건에서 추가 시험이 필요한 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 2018년도 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구과제(2018M2A8A4084016)의 결과입니다.

참고문헌

- (1) Shah, V.N. and Macdonald, P.E., 1993, *Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components*, Elsevier Science Pub., Amsterdam
- (2) IAEA, 1999, "Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: PWR vessel internals," IAEA TECDOC-1119.
- (3) Murty, K.L. and Charit, I., 2012, *Introduction to Nuclear Materials - Fundamentals and Applications*, Wiley-VCH.
- (4) O.K. Chopra and A.S. Rao, 2011, "A review of irradiation effects on LWR core internal materials - Neutron embrittlement," *J. Nucl. Mater.*, Vol.412, pp.195-208. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.02.059>
- (5) Kim, J.S., 2015, "Structural Integrity Analysis of Lower Core Plate in Pressurized Water Reactors Considering Stress Triaxiality," *Procedia Eng.*, Vol.130, pp.1494-1502. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.318>
- (6) EPRI, 2007, "Materials Reliability Program: PWR Internals Age-Related Material Properties, Degradation Mechanisms, Models, and Basis Data-State of Knowledge (MRP-211)," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1015013.
- (7) Jitsukawa, S., Shiba, K., Hishinuma, A., and Alexander, D.J., 1996, "Comparison of elastic-plastic fracture toughness of irradiated and cold-worked JPCA using miniaturized DCT specimens," *J. of Nucl. Mater.*, Vol.233-237, pp.152-155. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(96\)00204-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00204-8)
- (8) Kamaya, M., 2015, "Elastic-plastic failure assessment of cold worked stainless steel pipes," *Int. J. Pres.*

- Ves. Piping*, Vol.131, pp.45-51. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.04.008>
- (9) Choi, K.J., Yoo, S.C., Kim, T., and Kim, J.H., 2015, "Investigation of Warm Rolling and Dissolved Hydrogen on Crack Growth Rate of 316L Austenitic Stainless Steel in Primary Water Condition," *Proc. of KPVP*, Gim Cheon, Korea, Nov. 19-20, pp.21-22.
- (10) Choi, M.R. and Kim, J.W., 2018, "Effect of Aging Degradation on the Cyclic Deformation Behavior of Nuclear Structural Materials," *Trans. of KSME (A)*, Vol.42, pp.239-246. <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2018.42.3.2>
- (11) Kim, J.W., Choi, M.R., and Kim, Y.J., 2018, "J-R fracture toughness of cold-worked TP316L stainless steel under seismic loading conditions," *Int. J. Press. Ves. & Piping*, Vol.171, pp.137-144. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.012>
- (12) Kenik, E.A. and Busby, J.T., 2012, "Radiation-induced degradation of stainless steel light water reactor internals," *Mater. Sci. & Eng. (R)*, Vol.73, pp.67-83. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2012.05.002>
- (13) Pawel, J.E., Rowcliffe, A.F., Lucas, G.E., and Zinkle, S.J., 1996, "Irradiation performance of stainless steels for ITER application," *J. of Nucl. Mater.*, Vol.239, pp.126-131. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(96\)00484-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00484-9)
- (14) Matijasevic, M., Lucon, E., and Almazouzi, A., 2008, "Behavior of ferritic.martensitic steels after n-irradiation at 200 and 300°C," *J. of Nucl. Mater.*, Vol.377, pp.101-108. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.02.063>
- (15) Devries, M.I., Tjoa, G.L., and Elen, J.D., 1979, "Effects of neutron irradiation on low-cycle fatigue and tensile properties of AISI Type 304 stainless steel at 298K," *Fati. of Eng. Mater. & Struct.*, Vol.1, pp.159-171.
- (16) ASTM E8/E8M-09, 2009, "Standard test method for tension testing of metallic materials," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- (17) ASTM E1820-15, 2015, "Standard test method for measurement of fracture toughness," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- (18) ASTM E606-92, 1998, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing (Reapproved 1998), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- (19) Paul, S.K., Sivaprasad, S., Dhar, S., and Tarafder, S., 2011, "Key issues in cyclic plastic deformation: Experimentation," *Mech. of Mater.*, Vol.41, pp.705-720. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2011.07.011>
- (20) Kim, C., 2018, "Nondestructive Evaluation of Strain-Induced Phase Transformation and Damage Accumulation in Austenitic Stainless Steel Subjected to Cyclic Loading," *Metals*, Vol.8, pp.1-14. <https://doi.org/10.3390/met8010014>
- (21) Facheris, G., 2014, *Cyclic plastic material behavior leading to crack initiation in stainless steel under complex fatigue loading conditions*, Mechanical Engineering, Politecnico di Milano, Ph.D thesis.