

원전 고온 1차수 환경에서 응력부식균열의 실시간 마이크로 스케일 관찰 방법 개발

신정호^{1,2} · 이종연¹ · 김성우^{1,†}

¹한국원자력연구원 재료안전기술연구부, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

²연세대학교 신소재공학과, 서울특별시 서대문구 연세로 50

(2023년 4월 15일 접수, 2023년 4월 20일 수정, 2023년 4월 20일 채택)

Development of Method for In-situ Micro-Scale Observation of Stress Corrosion Cracking in High-Temperature Primary Water Environment

Jung-Ho Shin^{1,2}, Jong-Yeon Lee¹, Sung-Woo Kim^{1,†}

¹Materials Safety Technology Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

²Department of Materials Science & Engineering, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, Republic of Korea

(Received April 15, 2023; Revised April 20, 2023; Accepted April 20, 2023)

The aim of this study was to develop a new in-situ observation method and instrument in micro-scale to investigate the mechanism of stress corrosion cracking (SCC) initiation of Ni-base alloys in a high temperature water environment of pressurized water reactors (PWRs). A laser confocal microscope (LCM), an autoclave with diamond window view port, and a slow strain-rate tester with primary water circulation loop system were components of the instrument. Diamond window, one of the core components of the instrument, was selected based on its optical, chemical, and mechanical properties. LCM was used to observe the specimen in micro-scale, considering the experimental condition of a high-temperature primary water environment. Using in-situ method and instrument, it is possible to observe oxidation and deformation of specimen surface in micro-scale through the diamond window in a high-temperature primary water in real-time. The in-situ method and instrument developed in this work can be utilized to investigate effects of various factors on SCC initiation in a high-temperature water environment.

Keywords: Alloy 600, In-situ observation, Laser confocal microscope, Primary water environment, Stress corrosion cracking

1. 서론

가압형 경수로 원전은 크게 1차 계통과 2차 계통으로 나뉘어 있으며, 1차 계통은 원자로와 그 안에서 핵연료의 핵분열 반응으로 열을 발생시키고 고온의 물을 통해서 2차 계통에 증기를 발생시키는 증기발생기 및 가압기, 냉각재 펌프로 구성되어 있다. 2차 계통에는 증기발생기에서 발생된 증기를 이용하여 전기를 발전시키는 설비인 터빈과 발전기, 그리고 증기를 물로 되돌리는 복수기와 2차 계통을 순환시켜주는 각종 설비들이 있다. 여기서 1차 계통의 핵연료에서 핵분열 중에 생성된 핵분열 생성물이 2차 계통

으로의 확산을 방지하기 위해서는 1차 계통의 구조재료 건전성은 원전 안전의 중요한 지표이다.

원자력 발전소 1차 계통 기기 및 부품에는 니켈합금과 스테인리스강 등 다양한 구조재료가 사용되고 있으며, 고온 고압의 1차 계통수 환경에 노출되면 다양한 손상이 발생하는데 그 중에서 응력부식균열(stress corrosion cracking, SCC)에 취약하다는 사실이 잘 알려져 있다 [1]. 이러한 재료의 파손을 야기하는 SCC의 발생 과정은 크게 균열의 개시(initiation or nucleation) 및 전파(propagation)로 나눌 수 있다. 그러나 고온 고압의 1차 계통수 환경에서는 균열 생성 시간 및 위치, 전파방향 및 크기를 실험 중에는 알 수 있는 방법은 없었다. Andresen 및 Zhai는 electrochemical noise 및 direct current potential drop 방법 [2,3]을 통해서 실시간 균열 개시 시간의 분석은 가능하였으나, 균열의 위치 및 전파방향까지 실시간으로 분석할 수는 없었다. Song

[†]Corresponding author: kimsw@kaeri.re.kr

신정호: 박사과정, 이종연: 선임기술원, 김성우: 책임연구원

등은 상온 sodium tetrathionate solution 환경에서 C-ring 시편 표면의 균열개시를 실시간으로 관찰할 수 있는 방법을 개발하여 SCC 발생 기구에 실시간 균열 개시 및 전파를 관찰할 수 있었다 [4]. Jeon 및 Kim은 rupture disk corrosion test를 통해서 과열 시간을 분석하여 실시간으로 균열개시 시간을 분석할 수 있었다 [5,6]. 다양한 방법으로 균열 개시 및 전파방향을 실시간으로 관찰하고 예측하는 방법이 개발되었지만 고온에서 실시간으로 균열개시 및 전파의 분석에는 한계가 있었다. 이에 따라 원자력 발전소 1차 계통 구조재료의 안전성 확보를 위해 기존 실험의 단점을 개선한 실시간 SCC 관찰 장비를 개발이 필요하였다.

현재까지 고온 고압 수환경에서 실시간으로 시편의 표면을 관찰할 수 있도록 개발된 장비는 크게 2 분류로 나눌 수 있는데, 하나는 Slow strain rate tester (SSRT)에 Charge-coupled device (CCD) 카메라를 부착하여 실시간으로 변화하는 표면의 이미지를 관찰하는 방법과 Raman 분광법을 이용하여 실시간으로 표면에 생성되는 산화물 화학조성을 관찰하는 방법이다. Nakano 등은 중성자 조사된 시편의 SCC 개시와 전파 거동을 분석하기 위하여 SSRT와 CCD 카메라를 이용하였다 [7]. 실험 결과 실시간으로 인장 및 파괴 거동을 분석할 수 있었으나, 160 mm의 두꺼운 사파이어 윈도우와 CCD 카메라(2.1 M pixel)의 해상도의 한계로 시편 표면의 SCC 거동을 분석하기에는 부족하였다. 또한 Fukumura 등은 상기 장비에 CCD 카메라의 성능(5.6 M pixel)을 향상시켜 인장 시편 표면의 변형 및 표면의 거동을 분석하였으나 SCC 거동까지는 분석하기에는 해상도가 낮았다 [8].

한편, Kim과 Hwang은 실시간 Raman 분광법을 이용한

부식거동을 연구하기 위한 장비를 개발하여 고온 고압의 1차 계통수 환경에서 수산화크롬(CrOOH) 상을 검출하는데 성공하였다 [9]. 그러나 Raman 분광법으로는 소재 표면의 부식 상태를 고배율 이미지로 관찰할 수 없으므로, 부식생성물 이외에 공식(pitting), 입계부식(intergranular corrosion) 등 국부부식(localized corrosion)의 발생은 관찰할 수 없다는 문제점이 있다. 실제 원전 기기 및 부품의 수명에는 일반부식 보다 국부부식이 큰 문제로 작용하고 있으므로, 이를 실시간으로 연구할 수 있는 이미지 관찰 기술과 장비 개발이 필요하다.

선행된 연구들은 공통적으로 고온 고압의 1차 계통수 환경에서 부식 및 SCC 거동을 관찰하기 위한 것이었다. 그러나, 1차 계통수 환경에서 실시간으로 시편의 표면을 고배율과 고화질로 관찰하여 SCC의 균열 개시 및 전파를 관찰하기에는 미흡하였다. 따라서 선행 연구를 통해 개발된 장비들의 장점을 취합하여 본 연구는 고온 고압의 1차 계통수 환경에서 실시간으로 SCC 균열 개시 및 전파를 관찰할 수 있는 새로운 방법과 장비를 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 고온 1차 계통수 환경에서 실시간 SCC 정밀 관찰 장비 개발

2.1 실시간 SCC 관찰 장비 설계 요건

1차 계통수 환경의 실시간 SCC 관찰 실험을 하기 위해서는 다음과 같은 기능이 설계에 반영되어야 한다. 고온 고압 1차 계통수 환경에 노출된 시편에서 실시간으로 표면 산화물이 형성되고, 하중 인가로 인해 표면에 국부적으로 변형이 발생하고, SCC가 개시되어 전파하는 과정을 마

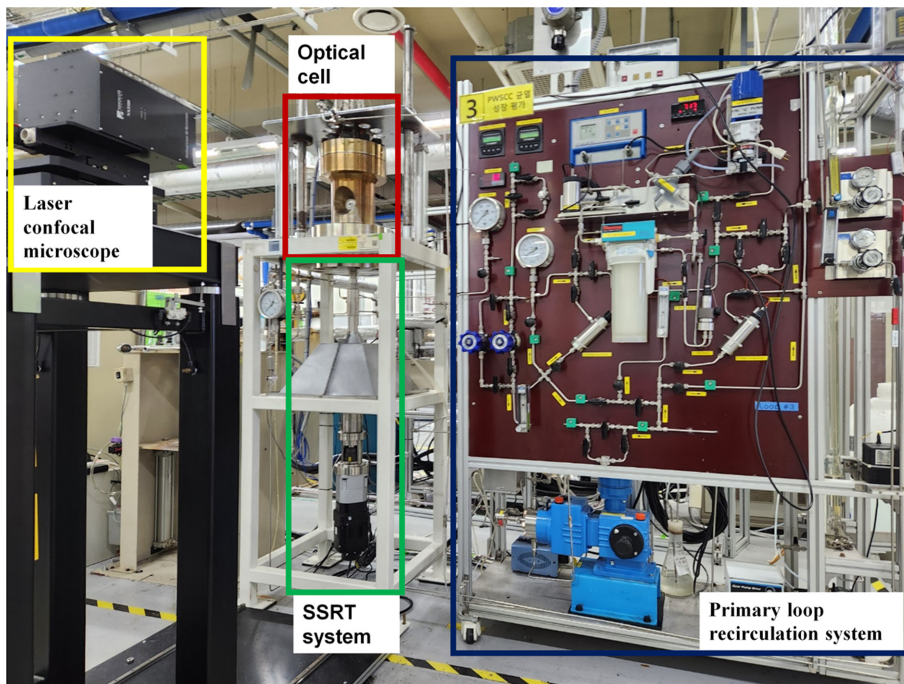


Fig. 1. Photograph of the instrument developed for in-situ observation of SCC under the high-temperature primary water environment

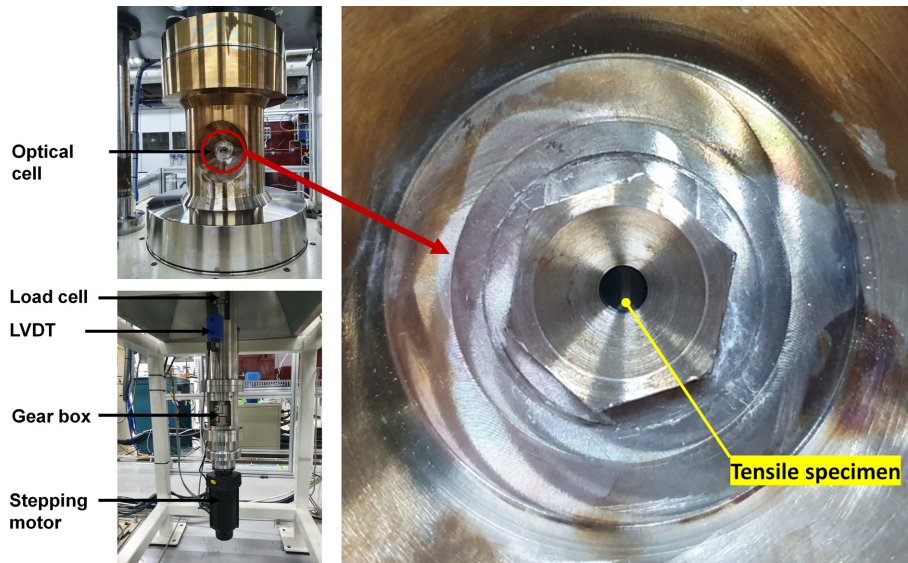


Fig. 2. Photograph of the autoclave with diamond window viewport and slow strain rate tester. The gauge section of tensile specimen is shown through the window in the enlarged photograph

이크로 스케일 이미지로 관찰하기 위해서는, 고온 고압 반응기인 오토클레이브, 내부의 시편 표면을 관찰하는 고배율 현미경, 시편에 응력을 인가하는 SSRT 장비, 1차 계통수를 모사한 시험용액을 순환시키는 장비가 필요하다.

우선, 오토클레이브 내부의 시편을 외부에 장치된 고배율 현미경을 이용하여 실시간으로 관찰하기 위해서는 오토클레이브 몸체에 윈도우(window) 설치가 필요하다. 윈도우는 고온 고압의 1차 계통수에 노출되므로, 실험 환경에서 변형없이 강도를 유지하고 내부식성을 고려하여 재질과 치수가 선정하여야 한다. 고배율 현미경은 윈도우뿐만 아니라 오토클레이브 내부의 고온 고압 1차 계통수를 투과하여 이미지를 관찰할 수 있어야 하므로, 광원에 따른 매질과의 반사율 및 흡수율을 고려해야 한다.

시편에 하중을 인가하기 위하여 SSRT와 같이 하중(load) 및 연신율(strain rate)등을 조절할 수 있고, 시편의 변위를 측정할 수 있는 장치도 필요하다. 또한, 실험 중에 원전 1차 계통수의 수화학 변수인 DH (dissolved hydrogen), DO (dissolved oxygen), pH 및 전도도(conductivity) 등을 실시간으로 모니터 및 제어를 할 수 있어야 하며 실험 중에 1차 계통수의 누출이 없어야 한다.

Fig. 1은 상기 설계 요건을 반영하여 본 연구에서 개발한 SCC 실시간 관찰장비 사진을 보여준다.

Fig. 2는 본 실험에 사용된 실시간 SCC 관찰 장비의 오토클레이브와 SSRT 사진을 제시하였는데, 오른쪽 확대사진에서 오토클레이브 몸체에 설치된 윈도우를 통하여 내부 시편 표면을 확인할 수 있다.

2.2. 고온 1차 계통 환경에서 시편 표면 이미지 관찰방법

고온 고압의 1차 계통수 환경에서 시편의 표면에 발생하는 균열을 실시간으로 관찰하기 위해서는, 오토클레이브 외부에 설치되는 광학현미경 등 이미지 관찰장비와 오토클레이브 내부의 시편 표면 이미지를 볼 수 있는 윈도우

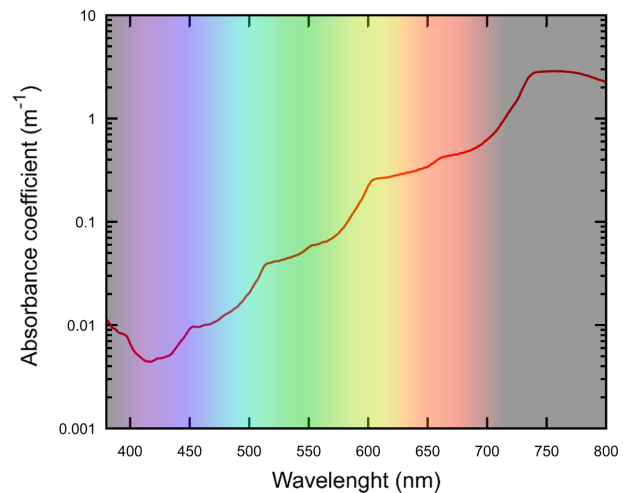


Fig. 3. Absorption coefficient of liquid water as a function of light source wavelength [10]

관찰부 설계가 가장 핵심이라 할 수 있다.

이미지 관찰용 현미경 장비를 선정하기 위해서 1차 계통수인 물의 광학적 특성을 고려하였다. Fig. 3은 가시광선의 파장에 따른 물의 흡수 계수를 나타내었는데 [10], 400 ~ 450 nm일 때 가장 흡수율이 낮은 것을 알 수 있다. 일반적인 광학 현미경에 사용하는 할로겐 램프는 넓은 가시광선대의 파장(350 ~ 3500 nm)을 가지고 있다. 그러나 본 실험에서 사용될 환경에서는 넓은 파장보다는 단파장의 높은 세기를 갖는 광원이 필요하다. 따라서 이러한 요건을 맞추는 광원으로 LD (laser diode)를 고려하였다. LD는 할로겐 램프보다 더 높은 출력, 광원의 직진성 및 좁은 광 파장을 가지므로 본 실험에 적용하기에 적절하다. 이러한 설계를 바탕으로 본 실험에서는 이미지 관찰 장비로서 통상적으로 사용하는 OM (optical microscope)이 아닌, LCM

(laser confocal microscope, NS-3500, 나노스코프시스템즈) 을 사용하였다. LCM에 적용된 LD는 Violet laser, 405 nm 이며 최대 mW 출력을 갖는다.

시편 관찰부는 실험 환경에서 기계적 강도, 내식성 및 투과율 등을 보장하여야 하기 때문에, 윈도우 재료의 열역학적 안정성 및 투과율과 두께 및 직경 등 기계적 강도를 고려한 설계가 필요하다.

Fig. 4는 본 실험에 사용될 LCM의 광원 파장에 따른 윈도우 재료의 투과율을 보여준다 [11]. 광원이 윈도우를 통과할 때 윈도우 속에 굴절 및 반사가 일어난다. 이러한 굴절 및 반사는 윈도우에서 광원이 손실되는 원인 중 하나이다. 따라서 높은 투과율을 갖는 윈도우를 선택하면, 더 많은 광원이 윈도우를 통과하여 선명하고 밝은 시야를 확보할 수 있다. 그림에서 본 실험에 사용될 LCM의 레이저 파장에서 사파이어의 투과율이 가장 높았으며, 그 다음으로 다이아몬드의 투과율이 높았다. 투과율뿐만 아니라 윈도우 재료의 내식성이 중요한데, 두 재료 모두 일반적인

사용 환경에서는 내식성이 뛰어난 재료로 알려져 있다. 그러나 선행 연구 결과에서 사파이어는 1차 계통수 환경에서 시간이 갈수록 표면이 부식되어 관찰이 어렵다는 결과를 나타내었다 [9]. 따라서 본 연구에서는 윈도우 재료로서 다이아몬드를 선정하였다.

고온 고압 1차 계통수 환경에서 시편 관찰부의 기계적 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해서는 윈도우의 두께, 직경, 고정 방식도 중요한 설계 인자이다. 윈도우 치수는 다음 자료들을 참고하여 설계하였다. 선정된 다이아몬드의 물성치는 Klein의 문헌 [12] 및 Esco Optics Inc.의 자료 [13]를 참고하여 계산하였다. 윈도우의 두께 t 를 구하는 공식은 equation (1)에 나타냈으며, 여기서 r 은 윈도우의 반지름, P 는 압력, K 는 상수로서 윈도우의 앞뒤로 체결이 되어 있는 형태이면 0.75로 제시된다. 설계 안전율(Safety factor, SF)은 1.5 ~ 7까지 줄 수 있으며, 본 실험에서는 SF를 7을 적용하여 계산하였고 M 은 윈도우 재료의 파괴 계수이다.

$$t = r \times \sqrt{\frac{P \times K \times SF}{M}} \quad (1)$$

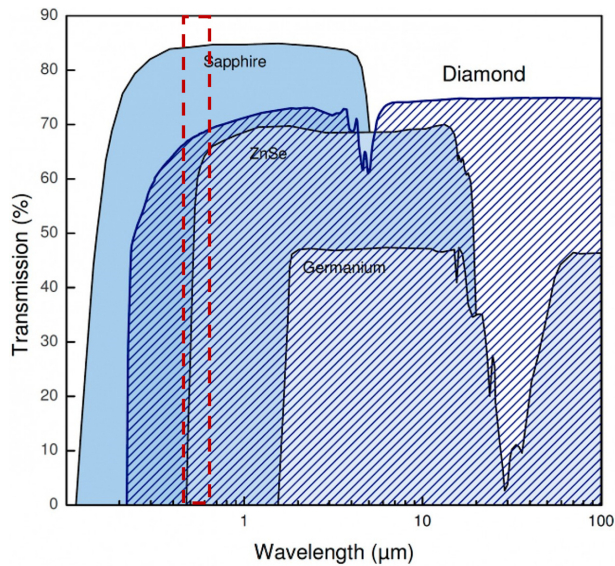


Fig. 4. Transmittance of materials for window as a function of light source wavelength [11]

본 장비에서 사용한 다이아몬드 윈도우의 반지름(5 mm)과 파괴 계수(2600 MPa), 최대 설계 압력(4000 psi)을 적용하여 t 를 계산한 결과 0.08 mm 이상의 두께가 필요하였다. 본 연구에서는 두께 0.7 mm의 상용 다이아몬드 윈도우를 사용하였다. 윈도우 고정 방식은 볼트 체결형의 윈도우 커버를 사용하였고, 체결부의 기밀성을 위하여 가스켓(gasket)의 재질은 금(Au)을 사용하였다. 금은 변형이 쉽게 되어 체결부의 기밀성 유지에 용이하고, 1차 계통수 환경에서 내식성이 뛰어나다. 시편 관찰부의 도면 및 조립도를 Fig. 5에 나타내었다.

2.3. 고온 1차 계통수 환경에서 하중 인가 방법

지속 인장시험을 위해 시편 치구(grip)도 신규 설계 개념을 도입하였다. 고온 고압 실험 환경에서 오토클레이브 시편 관찰부와 윈도우 체결부의 최소 설계 두께를 고려하여, 현미경 렌즈는 초점거리(working distance)가 긴 것을 사용하는 것이 용이하다. 그러나 상용 렌즈의 초점거리가 길어

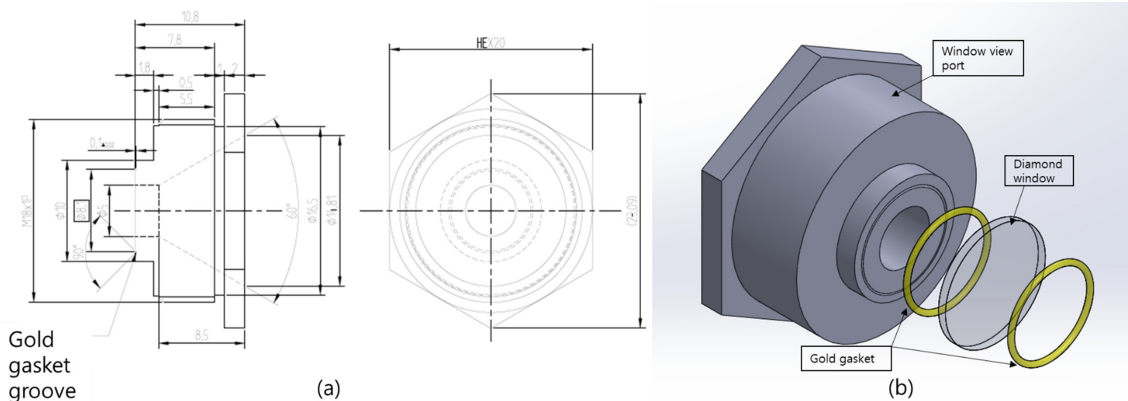


Fig. 5. Drawing of (a) window viewport design and (b) assembly diagram

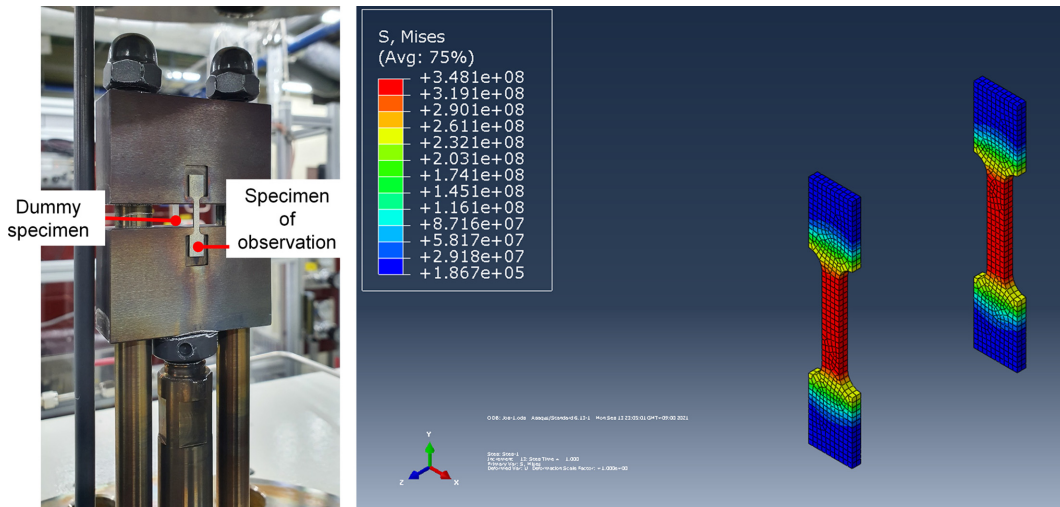


Fig. 6. Photograph of specimen jig for SSRT and stress distribution of the specimen of observation and dummy specimen using finite element analysis

질 수록 최대배율이 낮아지므로, 다이아몬드 윈도우와 시편 표면의 거리는 최적 설계가 필요하다.

본 연구에서 사용한 고배율 렌즈의 초점거리 20 mm를 고려하였을 때, 통상적인 SSRT 시편 장착 방식으로서 1개의 시편을 치구 중앙에 위치하는 것은 불가능하였다. 따라서, 다이아몬드 윈도우와 시편 표면의 거리를 최소화하기 위하여, 치구의 앞뒤로 2개의 시편을 장착하는 것으로 설계하였다. 이러한 치구 설계의 경우, 각 시편의 축 중심과 인장 축 중심이 벗어나므로, 응력이 편중되어 국부변형이 일어날 수가 있다. 이러한 국부변형은 SCC실험시 균열이 특정 부위에 생성 및 성장을 하게 되는 결과를 나타낼 수 있으므로 [14], 시편과 치구의 구조 및 물성을 이용하여 유한요소해석(finite element analysis)을 통해 시편의 SSRT 실험 중 인장 거동을 해석하였다. Fig. 6은 시편 치구에 장착된 관찰 시편(윈도우 인접 위치) 및 보조 시편의 사진, ABAQUS를 이용하여 치구에 장착된 두 시편의 인장 시뮬레이션 분석결과를 도시한 것이다. 그림에서 각 인장 시편의 표점구간에서 응력 및 변형이 균일하게 분포해 있는 것을 확인하였다.

오토클레이브의 재질은 기계적 성능이 우수하고 내식성이 강한 type 316 stainless steel로 제작이 되어있으며, 시편 관찰부가 존재하기 때문에 일반적인 외부를 감싸는 세라믹 히터 대신에 삽입형 카트리지 히터를 사용하였다. 또한 현미경으로 시편을 관찰할 때 렌즈와 시편 표면과의 초점거리를 고려하여 렌즈의 접근이 용이하도록 오토클레이브의 외벽에 경사 홈을 가공하였다. 인장봉, 카트리지 히터 및 렌즈와 시편 관찰부 설계를 반영한 오토클레이브의 도면을 Fig. 7에 표시하였다.

하중전달 장치의 기본 구성으로서 외부에는 하중을 측정하는 로드셀(load cell)과 변위를 측정하는 LVDT (linear variable differential transformer)를 장착하고 있으며 저속인장시험, 정하중시험 및 시간과 속도에 변화를 주는 프로그램 실험 등 다양한 실험모드를 선택할 수 있으며 이는 프

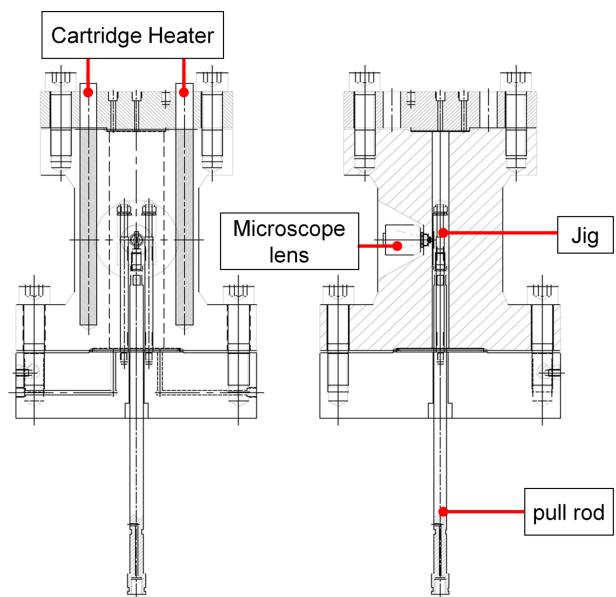


Fig. 7. Drawing of autoclave, specimen jig and pull rod for SSRT

로그래밍으로 제어된다.

1차 계통수 실험환경을 모사하기 위한 수화학 순환 시스템은 실험시 안전을 위하여 압력이 제한수치를 넘어 갔을 때 물리적으로 손상이 되는 안전 파열판과 히터 컨트롤러의 온도 상한치 설정 및 초과시에 작동이 중단되도록 설계하였다. 각종 수화학 계측기와 고온 고압 밸브 등을 실험 장비 전면부에 배치하여 수리 및 유지보수를 용이하게 구성하였다. 실험 중 수화학 환경의 변화와 압력 및 온도의 변화를 프로그래밍된 디지털 데이터 기록기를 이용하여 기록한다. 고온 고압부에서 사용하는 모든 부품 및 장비는 온도 350 °C, 압력 3200 psi (220 bar)의 실험 환경에서 견딜 수 있도록 설계되었다.

Table 1. The elemental composition (weight%) and mechanical properties of alloy 600 used in the present work

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
0.062	0.34	0.26	0.005	0.001	16.11	Bal.	0.02	8.83
0.2% offset stress, Mpa			Tensile strength, Mpa			Elongation, %		
259			643			48.6		

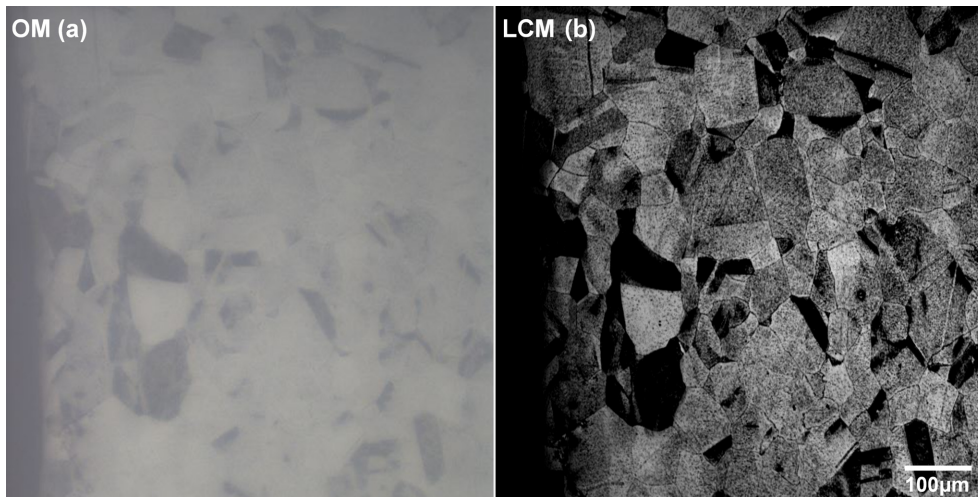


Fig. 8. Optical microscope(a) and laser confocal microscope(b) images of the surface of the tensile specimen exposed to the primary water at 300 °C and 15MPa for 30 days

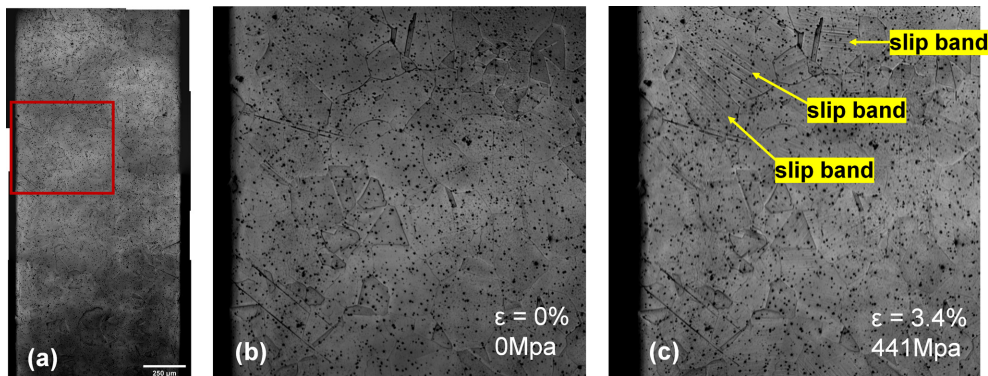


Fig. 9. LCM images of (a) entire surface of specimen in gauge section, and enlarged images taken at (b) elongation = 0% and applied stress of 0 MPa, (c) elongation = 3.4% and applied stress of 441 MPa

3. 고온 1차 계통수 환경 실시간 SCC 정밀 관찰 시험 결과

본 연구에서 개발한 신규 관찰 방법 및 장비를 이용하여 고온 고압 1차 계통수 환경에서 실시간 SCC 관찰 실험을 수행하였다. 1차 계통수 환경에서 표면 산화 거동 및 SCC 특성이 잘 알려진 Alloy 600 (Heat No. 49318, solution annealed 950 °C) 재료를 사용하였고, 재료의 성분 및 기계적 물성치는 Table 1에 제시하였다. 실험장치의 윈도우 관찰부의 크기가 지름이 5 mm 이므로 변형부의 균열관찰을 용이하게 하기 위하여 시편의 표점거리가 3 mm인 시편을

제작하였다.

실증실험은 300 °C 2200 psi의 1차 계통수 환경에서 수행되었으며, 시편에 인가하는 하중은 90 kgf까지 인가하여 실험을 진행하였다. 인장 실험은 시편의 탄성 영역 및 소성영역 일부까지 진행하였으며, 시편의 표면상태 및 길이의 변화는 인장실험 도중 잠시 정지하여 분석하였다.

고압의 1차 계통수 환경에서 누수나 다이아몬드 윈도우의 파손 없이 실험이 완료되었으며, Fig. 8은 관찰 광원의 차이를 보여주는 사진으로서 동일한 위치를 할로겐 램프 및 LCM을 사용하여 촬영한 이미지이다. OM을 사용한 이미지(a)는 표면을 관찰하기에는 선명도가 부족하였으나,

LCM 이미지(b)는 SCC 균열 개시 관찰을 위한 시편 표면의 입계(grain boundary) 및 시편 표면의 산화물 형성을 보다 선명하게 관찰할 수 있었다.

시편의 표면을 마이크로 스케일로 관찰하기 위하여 200 배 배율로 실시간으로 관찰을 수행하였다. Fig. 9a는 윈도우를 통해 관찰한 시편의 표점부 전체의 모습이다. (a)에서 빨간색 사각형 부위를 (b), (c)에 확대하여 나타내었다. (b)는 인장 실험을 하기 전 시편의 표면을 관찰한 결과를 나타내며, (c)는 항복강도(259 MPa)보다 높은 441 MPa 하중을 인가했을 때 표면을 관찰한 결과이다. 항복강도보다 높은 소성영역에서 시편의 표면에 노란색 화살표로 표시한 영역에서 슬립밴드가 나타난 것을 선명하게 관찰할 수 있었다. 다결정재료는 단결정의 집합체로서 결정립마다 결정 방향이 다르기 때문에 결정립 각각의 성질이 다른 특징이 있다. 하나의 결정에서 입계 분해 전단 응력에 도달했어도 주변의 결정립들이 다른 결정방위를 가지고 있으면 부분적으로 소성변형의 차이가 나타날 수 있으므로, 인장 방향과 슬립면의 방위관계에 따라 소성변형이 국부적으로 나타남을 확인할 수 있었다.

SCC는 응력 및 부식환경에서 발생하는 파괴기구이다. 본 장비를 이용한 실험결과에서 재료의 국부변형에 의한 입계간의 변형 정도를 분석할 수 있었다. 인장시험 전에 시편 표면의 EBSD (electron backscatter diffraction)분석을 수행하여 재료의 결정방위 및 입계특성 등을 비교하면 SCC 기구를 더 정밀히 규명할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결론

고온 고압의 원전 1차 계통수 환경에서 시편 표면의 변형 거동을 실시간으로 관찰할 수 있는 방법과 장비를 새롭게 개발하였다. 본 장비의 핵심 부품인 다이아몬드 윈도우는 광학적, 화학적 및 기계적 특성을 바탕으로 선택이 되었으며, 시편의 이미지 관찰 장비로는 실험 환경 및 광원의 특성을 고려하여 LCM 현미경을 이용하였다. 완성된 실시간 관찰 장비를 이용하여 고온의 1차 계통수 환경에서 Alloy 600 시편의 표지부를 관찰할 수 있었으며, 시편 표면의 산화 및 변형을 실시간으로 관찰할 수 있었다. 본 연구를 통해 개발된 장비를 활용하여 원자로 1차측 구조물 재료의 SCC 거동 및 기구에 대한 이해를 높일 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 과기부 연구개발사업(2021M2E4A1037979, RS-2022-00143718)의 지원을 받아 수행되었다.

References

1. D. Feron, R. W. Staehle, Stress Corrosion Cracking of Nickel Based Alloys in Water-cooled Nuclear Reactors:

The Coriou Effect, 1st ed., pp. 3 - 24, Woodhead Publishing (2016).

2. P. L. Andresen, P. W. Emigh, D. F. Taylor, and J. Hickling, Detection of SCC initiation in BWR environment by electrochemical noise. In 8th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems—Water Reactors, Sawston Cambridge (1998).
3. Z. Zhai, M. B. Toloczko, M. J. Olszta, and S. M. Brummer, Stress corrosion crack initiation of alloy 600 in PWR primary water, *Corrosion Science*, **123**, 76, (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.04.013>
4. D. B. Song, S. W. Kim, S. S. Hwang, D. J. Kim, and C. H. Lee, In situ investigation of intergranular stress corrosion cracking initiation and coalescence and effects of geometric and microstructural characteristics, *Corrosion*, **74**, 1385, (2018). Doi: <https://doi.org/10.5006/2872>
5. G. W. Jeon, S. W. Kim, D. J. Kim, and C. Y. Jeong, New test method for real-time measurement of SCC initiation of thin disk specimen in high-temperature primary water environment, *Nuclear Engineering and Technology*, **54**, 4481 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.07.025>
6. T. Y. Kim, S. W. Kim, D. J. Kim, and S. T. Kim, Finite Element Analysis of Stress and Strain Distribution on Thin Disk Specimen for SCC Initiation Test in High Temperature and Pressure Environment, *Corrosion Science and Technology*, **22**, 44, (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.07.025>
7. J. Nakano, T. Kohya, S. Endo, H. Ugachi, H. Tsuji, and T. Tsukada, SSRT facility for in-situ observation of irradiated materials in high temperature water (2003). <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20469999>
8. T. Fukumura, N. Nakajima, N. Totsuka, and M. Okada, Development of an autoclave with zirconia windows for in-situ observation of sample surface under the primary water conditions of pressurized water reactors, *Journal of nuclear science and technology*, **39**, 276, (2002). Doi: <https://doi.org/10.1080/18811248.2002.9715186>
9. J. H. Kim, and I. S. Hwang, Development of an in situ Raman spectroscopic system for surface oxide films on metals and alloys in high temperature water, *Nuclear Engineering and Design*, **235**, 1029, (2005). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2004.12.002>
10. R. M. Pope, and E. S. Fry, Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements, *Applied optics*, **36**, 8710 (1997). Doi: <https://doi.org/10.1364/AO.36.008710>

11. Diamond Materials GmbH Inc. <https://www.diamond-materials.com/en/cvd-diamond/optical/>
12. C. A. Klein, and G. F. Cardinale, Young's modulus and Poisson's ratio of CVD diamond, *Diamond and Related Materials*, **2**, 918, (1993). Doi: [https://doi.org/10.1016/0925-9635\(93\)90250-6](https://doi.org/10.1016/0925-9635(93)90250-6)
13. Esco Optics Inc. <https://escooptics.com/blogs/news/pressure-window-design>
14. M. Dhondt, I. Aubert, N. Saintier, and J. M. Olive, Characterization of intergranular stress corrosion cracking behavior of a FSW Al-Cu-Li 2050 nugget, *Mechanics & Industry*, **16**, 401 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1051/meca/2015012>