

고온 고압 응력부식균열 개시 시험용 디스크 시편의 응력과 변형에 대한 유한요소 해석

김태영^{1,2} · 김성우^{1,†} · 김동진¹ · 김상태²

¹한국원자력연구원 재료안전기술개발부, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길-111

²한양대학교 원자력공학과, 서울광역시 성동구 왕십리로 222

(2022년 7월 15일 접수, 2022년 10월 19일 수정, 2022년 11월 17일 채택)

Finite Element Analysis of Stress and Strain Distribution on Thin Disk Specimen for SCC Initiation Test in High Temperature and Pressure Environment

Tae-Young Kim^{1,2}, Sung-Woo Kim^{1†}, Dong-Jin Kim¹, and Sang-Tae Kim²

¹Materials Safety Technology Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeok-dearo, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

²Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, Korea

(Received July 15, 2022; Revised October 19, 2022; Accepted November 17, 2022)

The rupture disk corrosion test (RDCT) method was recently developed to evaluate stress corrosion cracking (SCC) and was found to have great potential for the real-time detection of SCC initiation in a high temperature and pressure environment, simulating the primary water coolant of pressurized water reactors. However, it is difficult to directly measure the stress applied to a disk specimen, which is an essential factor in SCC initiation. In this work, finite element analysis (FEA) was performed using ABAQUSTM to calculate the stress and deformation of a disk specimen. To determine the best mesh design for a thin disk specimen, hexahedron, hex-dominated, and tetrahedron models were used in FEA. All models revealed similar dome-shaped deformation behavior of the disk specimen. However, there was a considerable difference in stress distribution in the disk specimens. In the hex-dominated model, the applied stress was calculated to be the maximum at the dome center, whereas the stress was calculated to be the maximum at the dome edge in the hexahedron and tetrahedron models. From a comparison of the FEA results with deformation behavior and SCC location on the disk specimen after RDCT, the most proper FE model was found to be the tetrahedron model.

Keywords: Alloy 600, Finite element analysis, Primary water stress corrosion cracking, Rupture disk corrosion test, SCC initiation

1. 서론

원자력발전소에서 많이 사용되는 Ni 합금은 고온 내식성과 고온 강도가 우수하여, 증기발생기 전열관, 압력용기 관통관 및 노즐, 배관 이중금속용접부의 용접재 등 다양한 주요 기기에 사용된다. 그러나 내식성이 우수함에도 불구하고, 가압 경수로(PWR, pressurized water reactor) 운전환경에서 장기 가동할 경우, 주요 부식손상

기구로서 응력부식균열(SCC, stress corrosion cracking)이 발생한다고 보고되었다 [1-4]. 특히, 가압 경수로 1차 계통 기기에서 발생하는 응력부식균열(PWSCC, primary water stress corrosion cracking)은 냉각수 누출 사고(LOCA, loss Of coolant accident)와 같은 중대사고를 야기할 수 있다. 따라서 PWSCC 개시를 예측할 수 있는 모델을 개발하고, 발전소 구조물과 냉각 계통 기기의 수명을 예측하여 사전에 관리하는 것이 매우 중요하다. PWSCC 개시모델을 개발하기 위해서는 주요 변수인 응력 조건에 따라 균열이 개시되는 시간을 정확하게 측정할 수 있는 실험자료가 필요하므로 다양한 실험방법들이

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

김태영: 석사과정, 김성우: 책임연구원, 김동진: 책임연구원, 김상태: 교수

사용되고 있다.

일반적으로 SCC 개시특성을 평가하기 위한 대표적인 실험방법으로, bent-beam, U-bend, C-ring 방법들이 주로 사용되었다 [5-11]. Bent-beam 실험은 평평한 금속 시편의 양단을 고정하고 중심부를 눌러서 시편에 인장 응력을 인가한 후, 부식환경에 노출시켜서 SCC를 발생시키는 방법이다 [5] U-bend 실험은 평평한 금속 시편을 U자 형태로 구부린 후 양단을 볼트로 체결하여 시편에 인장 응력을 인가한 후, 부식환경에 노출시켜 SCC를 발생시키는 방법이다 [6]. C-ring 실험은 튜브형의 시편을 C자 형태로 만들고 시편의 중심을 관통하는 볼트를 체결하여 곡면 중심부에 인장 응력을 인가한 후, 부식환경에 노출시켜 SCC를 발생시키는 방법이다 [7]. 상기 실험방법들은 모두 시편의 형상이 단순하고 특정 위치에 인장 응력을 발생시키기 쉽다는 장점이 있다. 그러나, 고온 고압 부식환경에서 SCC 개시 실험을 수행할 경우, 오토클레이브 등 압력용기 내에서 이루어지므로 주기적으로 실험을 중단하고 압력용기를 열어서 시편 표면의 SCC 개시 여부를 관찰하여야 한다. 따라서 수 개월 이상 장기 기간이 소요되는 실험에서는 실험 중단 횟수가 증가하고, 실험 주기를 길게 할 경우 SCC가 개시되는 시기를 정확하게 특정하기가 어렵다는 문제점이 있다.

최근 이러한 문제를 해결하기 위해 실시간으로 SCC 개시 시간을 측정할 수 있는 실험법으로 direct current potential drop (DCPD) 방법이 개발되었다 [8,9]. 이 실험방법은 인장 시편을 부식 환경에 노출시키고, 시편에 전류를 인가하면서 특정 부위의 전압을 실시간으로 측정한다. 특정 부위에서 균열이 발생되면 전압의 변화를 감지하여 균열 개시 시점을 탐지할 수 있다. 그러나 DCPD 방법은 고온 고압 오토클레이브 내부에 시편을 넣고, 응력을 인가하는 인장시험기와, 전류를 인가하고 전압을 측정하는 DCPD 장비를 외부에 설치하여야 하므로, 압력경계에서 시편과 장비의 절연 문제, 시험 용액의 누수 문제 등 여러 개의 시편을 동시에 실험하기 어려운 단점이 있다.

이러한 기존 실험방법들의 단점을 보완하기 위하여 rupture disk corrosion test (RDCT) 방법이 최근 개발된 바 있다 [10,11]. RDCT 실험방법은 고압용기의 안전을 위해 일반적으로 설치하는 파열판 (rupture disk) 장치의 개념을 도입하여 설계되었다. 고온 고압의 1차 계통수 환경에 얇은 디스크 시편의 한쪽 면을 노출시키는 동시에 다른 면은 저압 분위기에 노출시켜, 시편에 인장 응력을 인가한다. 이후, PWR 1차 계통수 환경에 노출된 시편의 표면에서 인장 응력에 의해 PWSCC가 개시되면, 압력차에 의해 시편이 파열되거나, 균열을 통해 저

압 측으로 1차 계통수의 누수가 발생하게 된다. 이때 저압 측에 연결된 압력계로 실시간으로 압력 변화를 감지하여 균열 개시 시간을 정확하게 측정한다. Alloy 600 재료에 대해 RDCT 방법을 적용한 결과 기존 실험방법에 비해 PWSCC 개시 시간을 보다 정확하게 측정할 수 있음을 확인하였다 [10,11]. 그러나 RDCT 실험에서는 시편에 인가되는 응력을 직접 측정할 수 없고 계산을 통해 얻어야 하는 단점이 있다. 시편 표면의 균열 개시부에 인가되는 응력을 정확하게 계산하기 위해서는 유한요소해석법과 같은 최신 기법을 적용해야 한다.

본 연구에서는 RDCT 시험에 사용되는 디스크 시편에 걸리는 응력과 변형을 정확하게 계산하고자, 여러가지 유한요소해석 모델을 비교하고 적용성을 비교 평가하고자 하였다. 두께가 얇은 디스크 형태의 시편을 해석하기 위해서, 대표적인 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS™를 사용하였다. 3차원 유한요소해석 모델 3종을 적용하여 디스크 시편을 디자인하였고, RDCT 실험에서 시편에 걸리는 압력조건과 경계조건을 동일하게 대입하여 해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과와 고온 고압의 1차 계통수 환경에서 수행한 RDCT 실험 결과를 비교하여 적합한 해석모델을 찾고자 하였다.

2. 실험 및 해석방법

2.1 RDCT를 이용한 부식균열 개시시험 방법

PWSCC 개시 시점을 실시간으로 측정하기 위해서 개발된 RDCT 방법의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1a는 시편이 고정 장치에 장착된 상태로 고온 고압의 환경에 노출되기 전이다. Fig. 1b는 시편의 고압 측에 1차 계통수가 주입되어, 시편이 변형된 상태를 보여준다. Fig. 1c는 고온 고압의 1차 계통수 환경에서 시편이 장시간 노출되어 표면에 PWSCC가 개시된 상태를 나타낸 것이다. Fig. 1d는 SCC 개시로 인해 시편이 파열되거나, 균열을 통해 1차 계통수가 누수 되는 상태이다. 이때 저압 측에 연결된 압력계로 실시간으로 압력 변화를 감지하여 균열 관통 또는 파단 시점을 정확하게 측정한다. PWSCC의 경우 통상 1개 ~ 2개의 입계에서 균열이 발생할 경우 균열 개시로 탐지가 가능하므로, 본 연구에서 RDCT에 사용되는 디스크 시편의 두께를 0.1 mm 내외로 제작할 경우, 균열 개시 직후 두께 방향으로 성장하여 관통하거나 파단되므로, 압력 변화가 감지된 시점을 균열 개시 시점으로 정의한다. 그림에서 d1은 디스크 시편의 저압 측 노출면의 직경, d2는 디스크 시편의 고압 측 노출면의 직경, D는 시편의 직경, t는 시편의 두께이다. P1은 저압 측 압력, P2는 고압 측 압력이다.

Fig. 2는 RDCT 실험에서 시편이 장착되는 고정 장치의 단면도를 상세하게 나타낸 것이다. 디스크 시편의 저압 측 노출면의 직경(d1)은 5 mm, 고압 측 노출면의 직경(d2)은 8 mm, 시편의 직경(D)은 12 mm로 설계하였다. 시편의 두께(t)는 0.1 mm 내외에서 다양하게 제작하여, P1과 P2의 압력 차이에 의한 인가 응력을 조절할 수 있도록 하였다. 시편의 두께(t)를 고정하고 압력 차이를 변경하여 인가 응력을 조절할 수도 있다. 그림에서 디스크 시편의 저압 측과 접하는 상부 고정 장치의 코너 곡률 반경(R)은 0.5 mm로 설계하였다. 시편의 치수는 1차 계통수 주입에 의한 압력 차이에 의해서 시편의 물리적 파열은 발생하지 않되, 부식환경에 장기간 노출되는 시

편 표면에 PWSCC 개시가 발생하도록, 기존 문헌에서 보고된 응력 문턱값(threshold stress)인 약 450 MPa [12] 보다 높은 응력이 인가되도록 설계하고자 하였다. 시편을 RDCT 시험장치에 고정하기 위한 상하부 고정장치는 나사산으로 체결하도록 설계하였기 때문에, 고정장치를 회전하여 체결할 때 마찰에 의해 시편 표면에 토크가 인가되는 것을 방지하면서 고온 고압에서 밀봉을 유지하기 위하여 Ni 가스켓을 사용하였다.

본 연구에서는 RDCT 실험과 유한요소해석에서, PWSCC 특성이 잘 알려진 원전 구조재로서 Alloy 600 재료를 선정하였다. ABAQUS™ 프로그램에서 소성변형 해석을 위하여, Fig. 5와 같이 Alloy 600 재료의 진응력

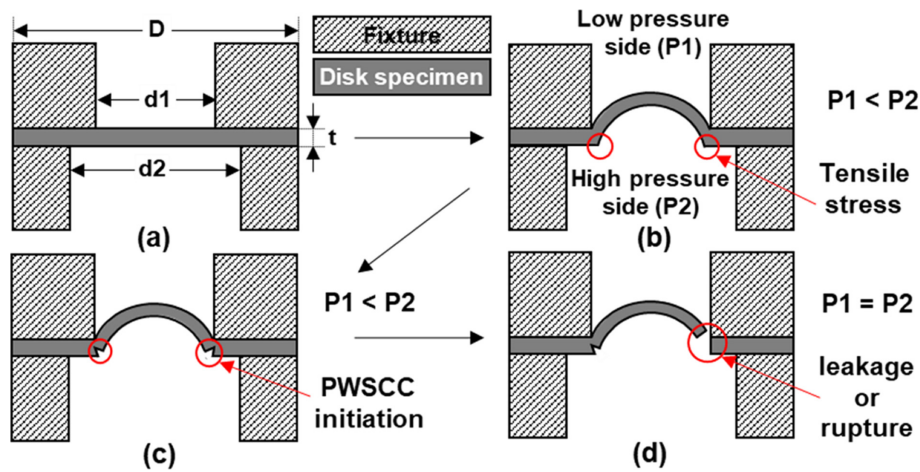


Fig. 1. Schematic diagram of real-time detection of PWSCC initiation from disk specimen for RDCT method, (a) flat disk specimen hold in fixture before pressurization, (b) specimen deformed by exposure to primary water, (c) PWSCC initiation on specimen, (d) leakage of primary water or rupture of specimen [10]

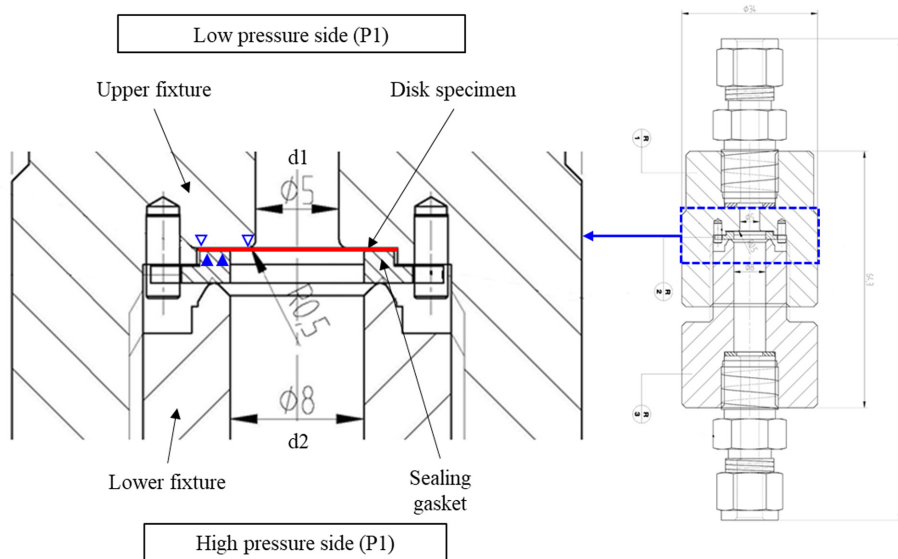


Fig. 2. Cross-sectional drawing of disk specimen and RDCT device

(true stress)-진변형률(true strain) 특성 그래프를 실제 인장실험을 통해서 구하였다. 인장실험에 사용한 시편은 판상 인장시편으로 표점거리(gauge length)는 10 mm, 표점 거리내 인장부 단면은 폭 2 mm, 두께 2 mm이다. 인장실험의 조건으로 인장속도는 0.1 mm/s, 시험온도는 350 °C, 공기 중에서 수행하였다. Fig. 5에서 소성데이터는 붉은 점으로 표시한 진변형률 값에서 진응력에 대응하는 탄성변형률을 뺀 값을 소성변형률로 ABAQUS에 입력하였다 [13].

유한요소해석 결과를 검증하기 위하여 Alloy 600 재질의 디스크 시편의 변형 거동과 PWSCC 개시 특성을 고온 고압의 1차 계통수 환경에서 RDCT 시험을 통해 얻었다. 1차 계통수로서 순수에 1,200 ppm의 B과 2.2 ppm의 Li를 함유하는 실험 용액을 제조하여 사용하였고, 용액 순환 루프를 사용하여 상온 pH, 전기 전도도, 용존 산소, 용존 수소는 각각 6.4, 23 μ S/cm, 5 ppb 이하, 22 cc/kg가 유지하도록 제어하였다. PWSCC 시험 온도와 압력은 각각 360 °C와 20 MPa (P2)로 유지하였고, 저압측 압력(P1)은 0.1 MPa로 유지하였다 [10,11]. 압력 측정값의 오차 범위를 고려하여 저압측 압력이 0.2 MPa 이상이 되면, RDCT 시험을 종료하고 시편을 인출하여 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 시편 표면의 부식균열 개시를 관찰하였다.

2.2 디스크 시편의 유한요소해석 방법

Fig. 3은 RDCT 시험에서 디스크 시편의 응력과 변형을 해석하기 위하여 수행한 3차원 유한요소해석 프로그램의 하중과 경계조건을 나타낸 그림이다. 하중 값은 시편의 양면에 인가되는 압력값으로서, P1 = 0.1 MPa, P2 = 20 MPa로 설정하였다. Fig. 1b와 Fig. 2에 도시한 바와 같이 RDCT 시험장치에서 고온 고압의 1차 계통수에 노출될 때 디스크 시편은 상부 고정 장치와 가스켓

에 접하여 고정되어 있으므로, Fig. 3a와 3b에서 디스크 시편의 고압과 저압 측 표면 중 A 영역(디스크 직경 방향으로 d2 에서 D까지)은 모든 방향으로 변형이 없다는 가정하에 유한요소해석을 수행하였다. 또한, Fig. 3b에서 디스크 시편의 저압 측 표면 중 B 영역(디스크 직경 방향으로 (d1 + 2R) 에서 d2 까지)은 x와 y 방향으로 변형하지만, z 방향으로 고정되는 것으로 가정하였다. ABAQUS™ 프로그램에서는 디스크 시편의 저압과 고압 측 표면 중 A 영역은 ENCASTRE 경계조건 ($U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$)을 설정하였고, 디스크 시편의 저압 측 표면 중 B 영역의 경계조건은 $U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ 를 설정하였다 [14,15]. 여기서 U_1, U_2, U_3 는 각각 x, y, z 축으로의 변형 자유도를 말하며 UR_1, UR_2, UR_3 는 각각 xy, yz, zx의 회전 자유도를 말한다.

3차원 유한요소해석에서 정확도와 계산속도를 최적화하기 위해서는 디스크 시편의 유한요소모델과 요소(element), 요소망 생성방식(mesh generation)의 선정이 매우 중요하다. 일반적으로 육면체 요소는 탄성체의 해석에 있어서 복잡하지 않은 모양의 물체에 적용하고, 복잡한 모양과 물리적 상황에서는 사면체 요소를 주로 사용한다. 이는 요소망을 구성하는 각 요소의 절점은 모두 연결되어야 하므로, 복잡한 형상의 물체에 대해 절점을 유지하면서 형상을 3차원으로 구현할 때에는 사면체 요소가 육면체 요소에 비해 용이할 수 있기 때문이다 [16].

Fig. 4는 본 연구에서 육면체 요소와 사면체 요소로 구현한 디스크 시편의 3차원 유한요소모델 3종을 도시한 것으로, ABAQUS™ 프로그램의 Hexahedron, Hex-dominated, Tetrahedron 모델을 사용하였다. Fig. 4a는 디스크 시편의 Hexahedron 모델로서, 육면체 요소를 방사형으로 구성하다가 시편의 중심부에 가까워지면 격자형

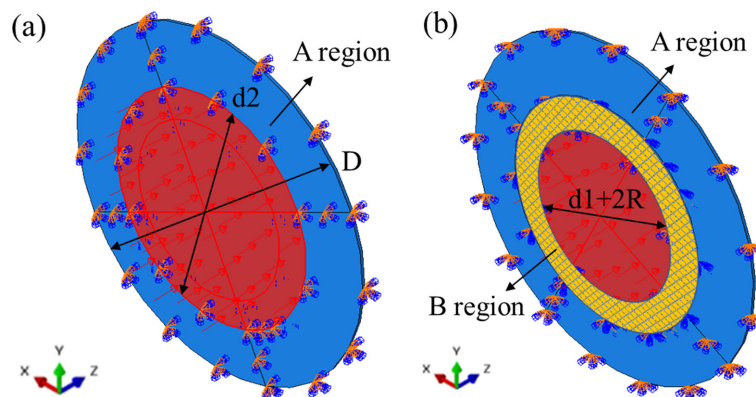


Fig. 3. Load and boundary condition of disk specimen (a) in high pressure side and (b) in low pressure side for finite element analysis

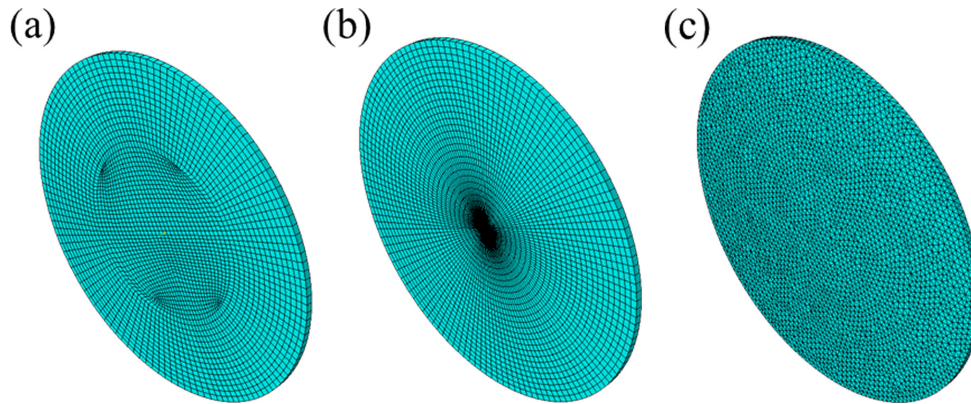


Fig. 4. 3D finite element model of disk specimen; (a) hexahedron, (b) hex-dominated, (c) tetrahedron

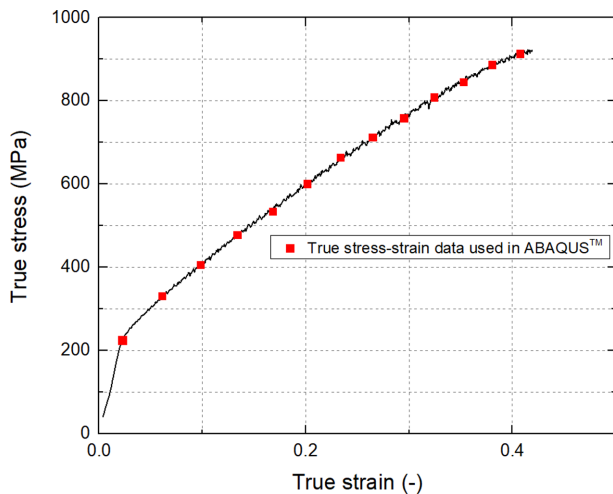


Fig. 5. Typical true stress-strain curve of Alloy 600

으로 구성을 변경한 것이다. 이는 3차원 육면체 요소의 절점 연결이 용이하고 요소의 크기가 유사하도록 ABAQUS™ 프로그램에서 주로 사용하는 방식이다. Fig. 4b는 Hex-dominated 모델로서, 육면체 요소를 사용하여 디스크 전체를 동일하게 방사형으로 구성한 것으로, 중심부로 갈수록 요소의 크기가 매우 작아진다. Fig. 4c는 Tetrahedron 모델로서, 사면체 요소를 사용하여 디스크 시편을 구성한 것이다.

각 해석모델의 민감도 및 응력분포를 분석하여 RDCT 시편을 모사하는 최적의 모델을 선정하고자 해석을 진행하였으며, Table 1에 해석조건을 명시하였다. 본 연구에서 사용한 요소의 종류는 C3D10, C3D20, C3D8R로서, C3D10은 절점수 10개, 적분점수 4개인 사면체 요소로 Tetrahedron 모델에서 사용하였다. C3D20은 절점수 20개, 적분점수 27개인 육면체 요소로 Hexahedron 및 Hex-dominated 모델에서 사용하였다. C3D8R은 절점수 8개, 적분점수 1개인 육면체 요소로 Hex-dominated

Table. 1 Finite Element analysis condition of Tetrahedron, Hexahedron, Hex-dominated model

Model	Tetrahedron	Hexahedron	Hex-dominated
	C3D10	C3D8R C3D20	C3D8R C3D20
Thickness (mm)	0.1 0.15 0.2		
Seed size (mm)	0.05 0.1 0.15 0.2		

및 Hexahedron 모델에서 사용하였다. 각 요소의 종류별로 디스크의 두께 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm 및 seed의 크기 0.05 mm, 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm 조건에서 해석하였다. 이때 seed의 크기는 요소밀도의 영향을 보기 위한 것으로, seed의 크기가 줄어들수록 요소밀도는 증가하게 된다.

본 연구에서 유한요소해석을 수행하는데 있어, 기존 문헌에서 보고된 파열판 안전장치 및 소형편치시험법 (small punch test)의 유한요소해석 자료들을 참고하였다 [14,15,17-22].

3. 실험결과와 유한요소해석결과 비교 분석

Fig. 6는 고온 고압의 1차 계통수 환경에서 RDCT 실험을 수행한 후 Alloy 600 디스크 시편의 단면을 절단하여 OM으로 관찰한 사진이다. Fig. 1 및 2에서 설계한 바와 같이 RDCT 실험 이후 저압 측으로 불록한 뚫 형태로 변형된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 고온 고압의 1차 계통수 환경에서 RDCT 실험 수행 중 899 시간에 PWSCC 개시가 탐지되어 인출한 Alloy 600 디스크 시편(두께 0.132 mm)의 고압 측 표면을 SEM으로 관찰한 사진이다. 시편 표면에서 입계 균열들이 발견되었으며, 이는 Alloy 600의 전형적인 PWSCC 특징이다. 특히, 뚫 중심부에서 디스크 반경 방향으로 약 2.5 mm - 3 mm 부근, 즉, 뚫 가장자리에서 입계 균열이 대부분 분포하고 있었다. 따라서, PWSCC

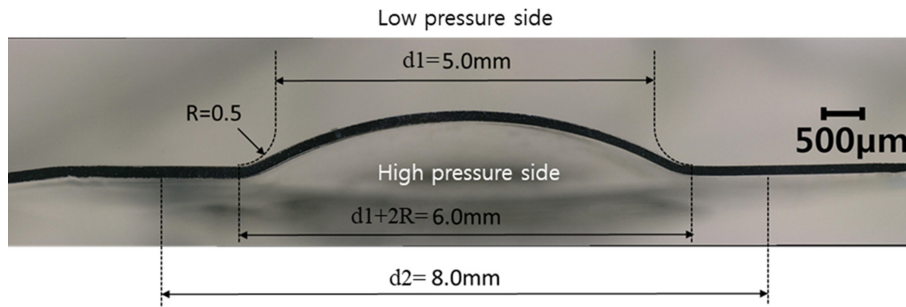


Fig. 6. Cross-section of deformed disk specimen after RDCT

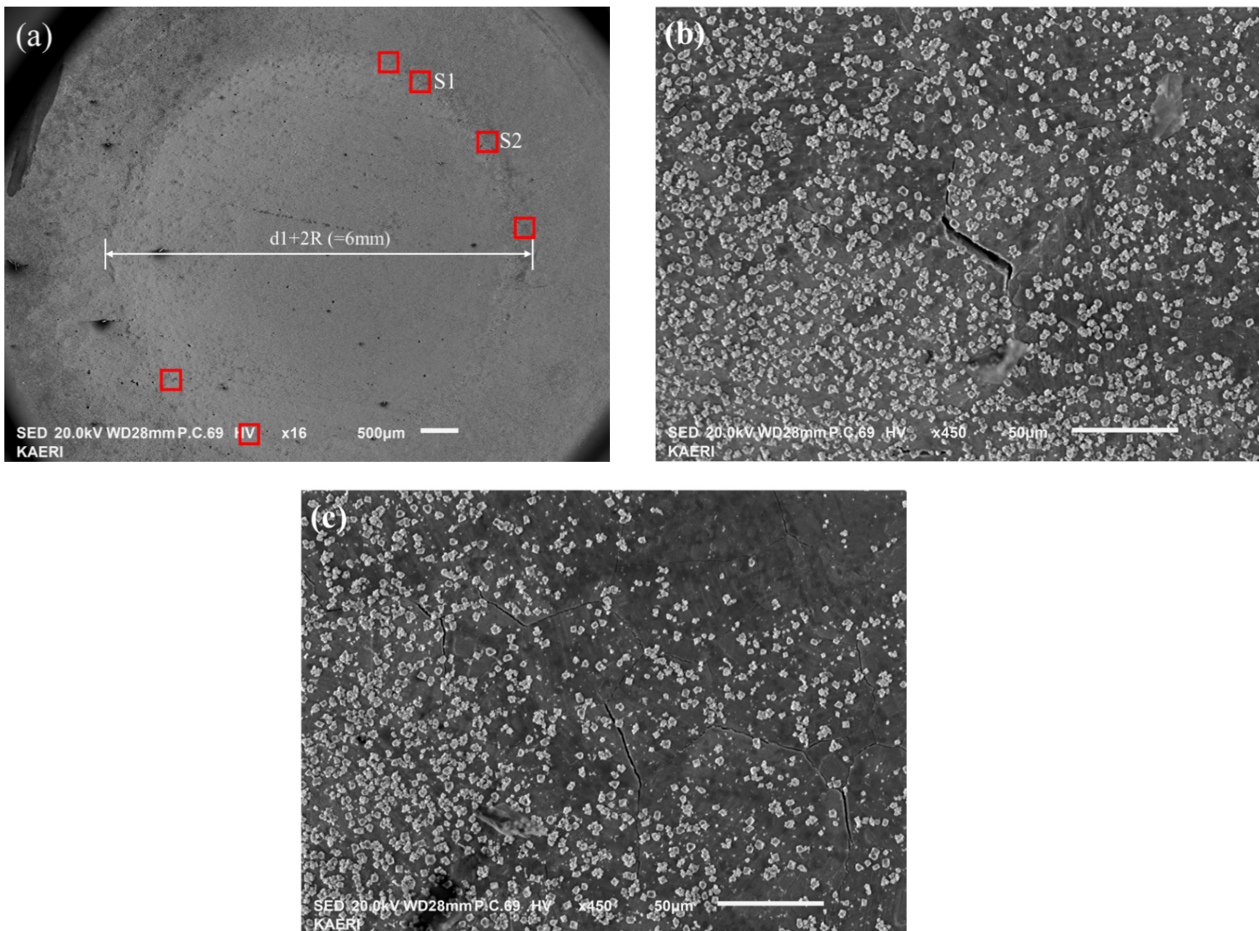


Fig. 7. SEM image of (a) PWSCC initiated on the disk specimen in high pressure side after RDCT, and more magnified images of (b) crack S1 and (c) crack S2

개시의 주요 인자인 인장 응력이 돔의 가장자리에서 가장 높게 인가되었다고 판단되었다.

상기 RDCT 실험에서 디스크 시편의 변형 거동과 응력 분포를 분석하기 위하여 Table 1에 제시한 다양한 유한요소해석 조건에서 얻어진 결과 중 대표적인 것을 Fig. 8, 9, 10에 도시하였다. Fig. 8a와 8b는 C3D8R 요소로 구성된 Hexahedron 모델에서 디스크 두께 0.1 mm, seed 크기 0.1 mm의 해석결과로서, 디스크 단면과 고압

측 표면의 Von Mises 응력 분포를 각각 도시한 것이다. Fig. 8a의 디스크 단면도와 같이 1차 계통수에 노출된 시편이 압력 차이로 인해 저압 측으로 볼록한 돔 형태로 변형되었다. Fig. 8b에서 도시한 시편의 고압 측 표면의 응력 분포를 보면, 돔의 중심부 뿐만 아니라 돔의 가장자리에서도 높은 인장 응력이 걸리는 것을 알 수 있다. 한편, 돔의 가장자리에서 응력 분포를 자세히 관찰하면, Hexahedron 모델의 요소망 구성 방식이 방사형

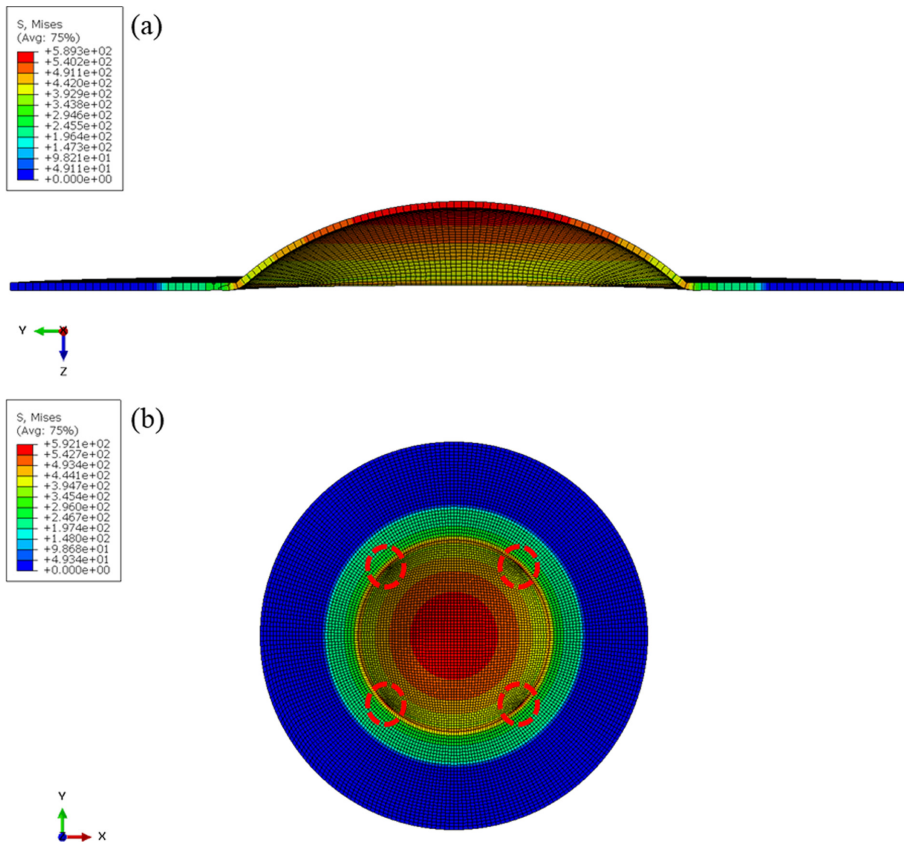


Fig. 8. Von-mises stress of deformed disk specimen with hexahedron model (C3D8R with seed size of 0.1 mm) simulated by ABAQUS™; (a) in cross-section of disk, (b) on disk surface in high pressure side

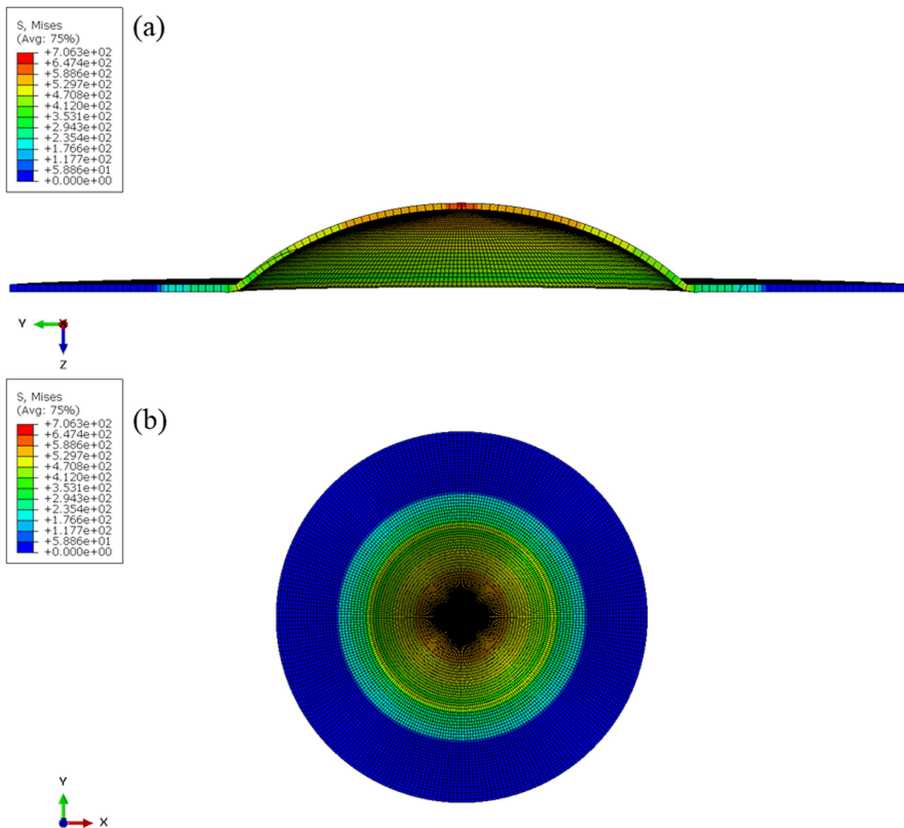


Fig. 9. Von-mises stress of deformed disk specimen with hex-dominated model (C3D8R with seed size of 0.1 mm) simulated by ABAQUS™; (a) in cross-section of disk, (b) on disk surface in high pressure side

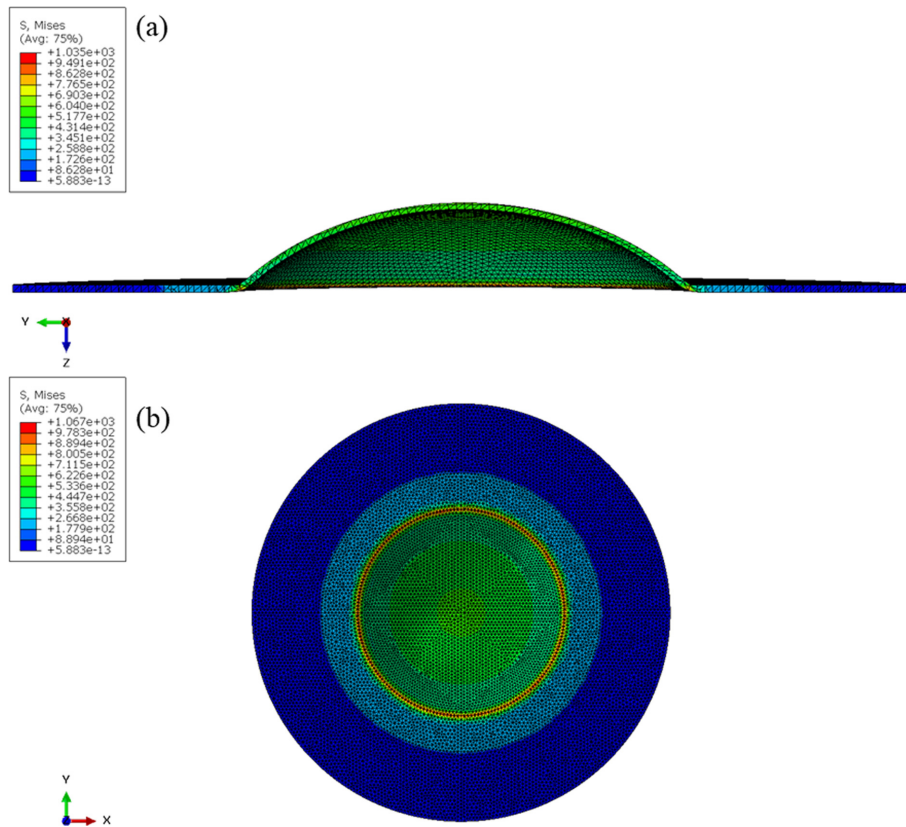


Fig. 10. Von-mises stress of deformed disk specimen with tetrahedron model (C3D10 with seed size of 0.1 mm) simulated by ABAQUS™; (a) in cross-section of disk, (b) on disk surface in high pressure side

에서 격자형으로 변경되는 절점 연결 부 4군데(동근 점선)에서 인장 응력이 주변 보다 특히 높게 관찰되었다. 이는 요소망 구성 방식의 변경에 의해 해당 부위의 해석 값이 왜곡된 것으로, 실제 시편의 응력값과는 다를 것으로 추정되었다.

Fig. 9은 C3D8R 요소로 구성된 Hex-dominated 모델에서 디스크 두께 0.1 mm, seed 크기 0.1 mm의 해석결과를 도시한 것이다. Fig. 9a와 같이 디스크 시편은 저압 측으로 볼록한 돔 형태로 변형되는 것으로 나타났으며, 이는 Hexahedron 모델의 해석결과(Fig. 8a)와 유사하다. Fig. 9b를 보면, 디스크 시편의 고압 측 표면의 인장 응력은 돔의 가장자리 보다 중심부에 높게 나타났다. Fig. 10은 C3D10 요소로 구성된 Tetrahedron 모델의 디스크 두께 0.1 mm, seed 크기 0.1 mm의 해석결과를 나타낸 것이다. Fig. 10a에서 디스크 시편은 저압 측으로 돔 형태로 변형되는 것으로 나타났으며, 이는 다른 모델들의 변형 거동과 유사하다. Fig. 10b와 같이 디스크 시편의 고압 측 표면에서 인장 응력은 돔의 중심부에 비해 가장자리에서 매우 높게 관찰되었다.

유한요소해석 모델에 대해 요소의 종류, 요소망 구성

방식, 요소수(요소밀도) 및 디스크 시편의 두께에 따른 해석결과의 영향을 분석하기 위해, 디스크 돔의 높이(h), 돔의 가장자리에서 최대응력값(부식환경에 노출되는 디스크 면)을 정량적으로 비교하여 민감도 분석을 수행하였다.

Fig. 11a는 요소밀도의 영향을 분석하기 위하여 seed 크기에 따라 유한요소해석을 수행한 결과에서 돔의 높이(h)를 도시한 것이다. 그림과 같이 seed 크기가 감소함에 따라, 즉, 요소밀도가 증가함에 따라 각 해석모델에서 계산된 h 값이 거의 유사하게 수렴함을 알 수 있다. 특히, C3D10 요소로 구성된 Tetrahedron 모델의 경우 seed 크기가 0.15 mm 이하에서 수렴하는데, 요소밀도가 증가함에 따라 계산시간이 길어지는 점을 감안하면 적절한 seed 크기 선정이 필요함을 알 수 있다. Fig. 11b는 디스크 시편 두께의 변화에 따라 유한요소해석을 수행한 결과에서 돔의 높이를 도시한 것이다. 해석 결과를 검증하기 위해서 두께 약 0.1 mm 및 약 0.15 mm 인 디스크 시편 4개에 대해 고온 고압 1차계통수 환경에서 RDCT 실험 후 측정된 h 값을 함께 도시하였다. 디스크 시편 두께가 증가함에 따라 돔의 높이는 감소하

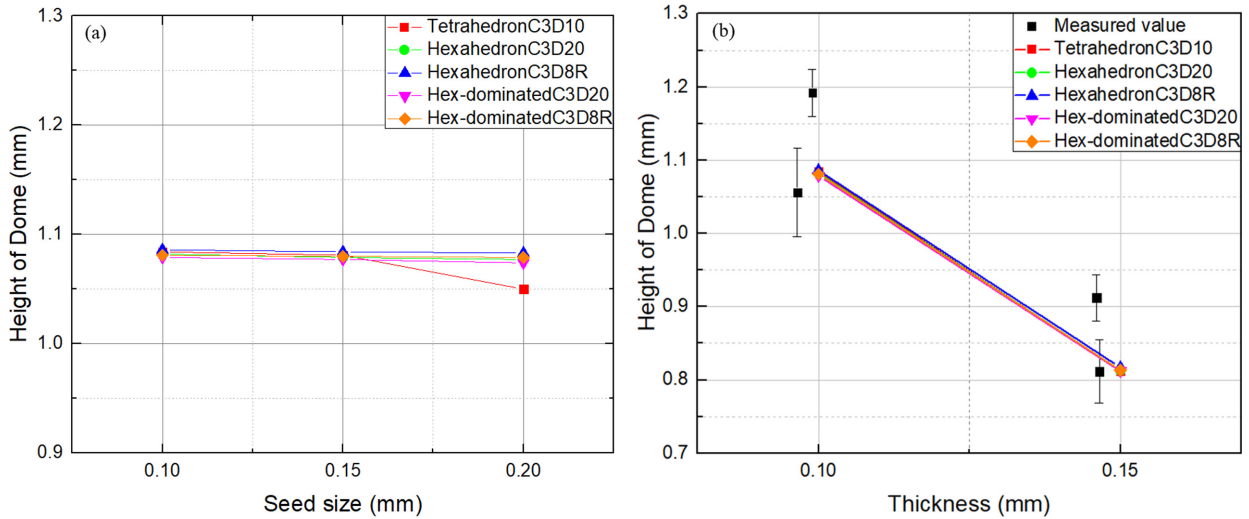


Fig. 11. Height of dome of disk (a) with 0.1 mm thickness calculated from various finite element models as a function of seed size, and (b) height of dome calculated as a function of disk thickness with seed size of 0.1 mm. The measured value of disk specimens after RDCT were also plotted

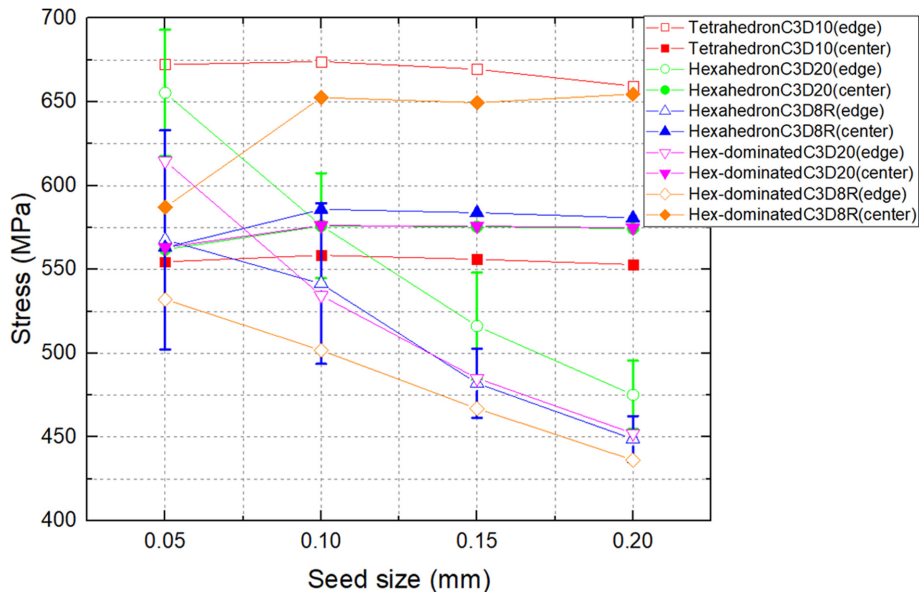


Fig. 12. Von-mises stress on high pressure side of dome edge and center of disk calculated from various finite element models as a function of seed size

는 경향이 모든 모델에서 유사하게 나타났고, RDCT 실험 시편에서 측정된 h 값과도 유사했다.

Fig. 12은 두께 0.1 mm인 디스크 시편에 대해, seed 크기를 변수로 고압측 표면에서 돔의 가장자리(edge)와 중심부(center)의 응력을 도시한 것이다. 그림과 같이 모든 모델에서 seed 크기가 작아질수록, 즉 요소밀도가 증가할수록 고압 측 표면의 돔 가장자리와 돔 중심부에서 응력은 유사한 값으로 수렴하는 경향이 나타났다. Tetrahedron 모델의 경우 seed 크기가 0.15 mm 이하에서 응력값이 유사하게 나타났고, 돔의 가장자리에서 최

대 응력값은 약 675 MPa로서 원주 방향으로 균일하게 분포하였고, 돔의 중심부의 최대 응력값(약 555 MPa) 보다 높게 나타났다.

Hexahedron 모델의 경우 seed 크기가 0.05 mm 이하에서 tetrahedron 모델의 계산값과 유사하게 수렴하였다. 특히 C3D8R이 C3D20에 비해 상대적으로 seed의 크기가 작아야 응력값이 유사하게 수렴하는 경향을 보였으며, C3D8R의 해석시간이 상대적으로 짧다는 효율성을 감안하여 적절한 요소 종류와 seed 크기 선정이 필요하였다. 한편, hexahedron 모델의 경우 seed 크기와 무관

하게 돔 가장자리에서 요소 배열 방식이 변경되는 4군데 위치에서 응력 최대값이 계산되었으며, 그림에서 오차 막대로 표시한 바와 같이 원주 방향으로 응력의 편차가 크게 나타났다.

한편 Hex-dominated 모델의 경우 본 연구에서 설정한 seed 크기 범위에서는 다른 모델들과는 달리 돔의 중심부의 응력값이 가장자리보다 높게 나타났다. 그러나, seed 크기가 0.05 mm로 감소하면서 다른 모델들과 유사한 값으로 수렴하는 추세가 나타나므로, seed 크기를 더 낮게 설정할 경우 다른 모델과 해석결과가 유사하게 수렴할 것으로 추정되었다.

상기 유한요소해석 결과를 종합하면, Hexahedron, Hex-dominated, Tetrahedron 모델에서 요소밀도가 증가하고 절점수 및 적분점수가 증가하면, 응력값이 유사하게 수렴하는 것으로 나타났다. 그러나, 본 연구의 디스크 시편 형상을 구현함에 있어서 Hexahedron 모델의 경우 요소 배열 방식이 변경되는 위치에서 원주방향으로 응력 분포 편차가 커지므로, 돔의 가장자리가 아닌 다른 위치로 설정할 필요가 있다. Hex-dominated의 경우 seed 크기를 0.05 mm 이하로 줄여야 하므로 계산 시간을 고려할 때, 본 연구의 디스크 시편 형상을 구현함에 있어서 적합하지 않다고 판단된다. Tetrahedron 모델의 경우 seed 크기가 0.15 mm 이하에서는 다른 모델들에 비해 응력값 계산결과가 해석 조건에 민감하게 영향을 받지 않았고, 요소망 생성의 용이성, 계산 시간 등 해석 효율성을 고려하면 본 연구의 디스크 시편 형상 구현에 가장 적합하다고 판단된다.

한편 유한요소해석 결과, 돔 가장자리에서 응력값은 약 675 MPa로 수렴하였고, 돔의 중심부에서 응력값은 약 555 MPa로 수렴하였다. PWSCC 개시 응력 문턱값인 450 MPa [12] 보다 높으므로 돔의 가장자리와 중심부에 비해 응력값이 20% 이상 높게 인가되는 가장자리에서 먼저 발생할 가능성이 크며, 이는 RDCT 실험 결과(Fig. 7)에서 디스크 표면의 입계 균열이 대부분 돔의 가장자리에서 관찰된 것과 잘 일치하였다.

본 연구에서는 유한요소해석시 디스크 시편의 물리적 환경을 모사하기 위해 압력과 경계조건을 단순화하여 설정하였으나, 실제 RDCT 실험에서 디스크 시편은 보다 복잡한 환경에 놓인다. 예로, 상하부 고정 장치와 가스켓 사이에 체결에 의한 압축력에 의해 응력 분포가 변할 수 있고, 돔 형태로 변형할 때 고정 장치 표면과 시편 표면의 접촉으로 마찰력에 의한 응력 분포 변화도 발생 가능하다. 본 연구를 통해 가장 적합한 것으로 판단된 tetrahedron 모델을 활용하여, 디스크 시편의 두께, 고정 장치의 형상, 표면 조도 등 다양한 설계 변수 조

건에서 디스크 시편의 응력과 변형에 대한 유한요소해석을 추가 수행하여 정확한 응력 계산을 수행할 계획이다.

4. 결론

본 연구에서는 PWSCC 개시를 실시간으로 탐지하기 위해 개발된 RDCT 방법에서 디스크 시편의 응력을 계산하기 위하여, 3종의 유한요소해석 모델들에 대해 디스크 시편의 두께, 요소의 종류, seed 크기(요소밀도)의 조건을 달리하여 해석을 수행하였고, 실제 실험 결과와 비교 분석하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 3차원 유한요소해석 결과에서 Hexahedron, Hex-dominated, Tetrahedron 모델을 적용한 디스크 시편이 모두 돔 형태로 유사하게 변형되는 것으로 나타났다. 디스크 시편의 두께가 증가함에 따라 돔의 최대 높이는 감소하는 것으로 계산되었고, 실제 고온 고압 1차 계통 수 환경에서 수행한 RDCT 실험 후 디스크 시편에서 측정된 돔 높이와 유사하였다.
2. 디스크 시편의 응력분포의 경우, 모델별로 해석 조건에 따라 다른 계산 결과가 나타났으나, 적절한 해석 조건을 설정할 경우 유사한 응력값으로 수렴함을 알 수 있었다. 특히 돔의 중심부 보다 가장자리에서 높은 응력이 분포하였고, 실제 RDCT 실험 후 디스크 시편에서 입계 균열이 대부분 돔의 가장자리에 관찰된 결과와 잘 일치하였다.
3. RDCT 실험 결과와 유한요소해석 결과에서 디스크 시편의 변형과 응력 분포의 유사성, 해석 용이성 및 효율성을 감안하였을 때, Tetrahedron 모델이 가장 적합한 것으로 판단되었다.

감사의 글

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

References

1. D. Feron, J.M. Olive (Eds.), Corrosion issues in light water reactors - stress corrosion cracking, Woodhead Publishing Ltd., New York (2007).
2. Y. S. Kim, H. S. Kim, Y. H. Kwon, S. W. Kim, H. P. Kim, H. Y. Chang, Relationship between the initiation and propagation of SCC and the electrochemical noise of Alloy 600 for the steam generator tubing of nuclear power plants, *Corrosion Science and Technology*, **9**, 57 (2010).

- https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=C00090200057
3. Y. J. Lee, S. W. Kim, H. P. Kim, S. S. Hwang, Study on localized corrosion cracking of Alloy 600 using EN-DCPD technique, *Corrosion Science and Technology*, **12**, 93 (2013). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2013.12.2.093>
 4. S. S. Hwang, M. J. Choi, S. W. Kim, D. J. Kim, Review of factors affecting IASCC initiation of stainless steels in PWRs, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 210 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.4.210>
 5. ASTM G39-99 (2016). Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens, ASTM Standards, West Conshohocken, PA (2016).
 6. ASTM G30 (2016). Standard Practice for Making and Using U-Bend Stress-Corrosion Test Specimens. ASTM Book of Standards. ASTM West Conshohocken, PA (2016).
 7. ASTM G-38 (2013). Standard Practice for Making and Using C-Ring Stress-Corrosion Test Specimens. ASTM Standards. West Conshohocken, PA (2013).
 8. Z. Zhai, M. B. Toloczko, M. J. Olszta, S. M. Bruemmer, 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>
 9. P. J. Meadows, P. L. Andresen, M. B. Toloczko, W.-J. Kuang, S. Ritter, M. Bjurman, L. Zhang, M. Ernestova, A. Toivonen, F. Perosanz-Lopez, J.W. Stairmand, K.J. Mottershead, International round-robin on stress corrosion crack initiation of Alloy 600 material in pressurized water reactor primary water, *Corrosion*, **76**, 719 (2020). Doi: <https://doi.org/10.5006/3532>
 10. S. W. Kim, G. W. Jeon, D. J. Kim, *Proc. Korean Nuclear Society 2021 Spring Meeting*, Virtual, Korea (2021).
 11. G. Y. Jeon, S. W. Kim, D. J. Kim, 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>
 12. Y. Garud, Validation of stress corrosion cracking initiation model for stainless steel and nickel alloys: Effects of Cold Work, EPRI, Palo Alto, CA (2012).
 13. M. Smith ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp (2009).
 14. H. Zhu, W. Xu, Z. Luo, H. Zheng, Finite element analysis on the temperature-dependent burst behavior of domed 316l austenitic stainless steel rupture disc, *Metals*, **10**, 1 (2020). Doi: <https://doi.org/10.3390/met10020232>
 15. J. Y. Jeong, S. B. Lee, W. S. Jo, H. S. Kim, S. H. Baek, Structural Analysis on the Superficial Grooving Stainless-Steel Thin-Plate Rupture Discs: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **15**, 1035 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0433-7>
 16. T. Schneider, Y. Hu, X. Gao, J. Dumas, D. Zorin, D. Panozzo, A Large Scale Comparison of Tetrahedral and Hexahedral Elements for Solving Elliptic PDEs with the Finite Element Method: *ACM Transactions on Graphics*, **41**, 3 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1145/3508372>
 17. I. Simonovski, S. Holmstroem, M. Bruchhausen, Small punch tensile testing of curved specimens: Finite element analysis and experiment, *International Journal of Mechanical Science*, **120**, 204 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.029>
 18. R.W. Werne, Stress analysis of a rupture disk, UCID-16761, University of California (1975).
 19. X. Kong, J. Zhang, X. Li, Z. Jin, H. Zhong, Y. Zhan, F. Han, Experimental and Finite Element Optimization Analysis on Hydroforming Process of Rupture Disc, *Procedia Manufacturing*, **15**, 892 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.408>
 20. K. F. Nilsson, D. Baraldi, S. Holmström, I. Simonovski, A Numerical and Experimental Assessment of the Small Punch Creep Test for 316L(N) Stainless Steels, *Metals*, **11**, 1609 (2021). Doi: <https://doi.org/10.3390/met11101609>
 21. V. Brown, Finite Element Modelling of the Small Punch Test for Structure Critical Design, PhD Thesis, University of Sheffield (2020).
 22. J. Petruška, J. Hůlka, K. Hůlka, Computational Simulation of Small Punch Test: In Applied Mechanics and Materials, *Trans Tech Publications*, **232**, 497 (2012). Doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.232.497_