

수압시험 및 정상운전 하중을 고려한 원자로 배관 이종금속 맞대기 용접부 응력부식균열 성장 해석

이휘승* · 허남수*† · 이승건** · 박흥배** · 이성호***

*서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, **KEPCO E&C, ***한국수력원자력(주) 중앙연구원

Crack Growth Analysis due to PWSCC in Dissimilar Metal Butt Weld for Reactor Piping Considering Hydrostatic and Normal Operating Conditions

Hwee-Sueng Lee*, Nam-Su Huh*†, Seung-Gun Lee**, Heung-Bae Park** and Sung-Ho Lee***

* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology, ** KEPCO Engineering & Construction Company, *** KHNP Central Research Institute,

(Received August 2, 2012 ; Revised August 30, 2012 ; Accepted September 3, 2012)

Key Words: Dissimilar Metal Butt Weld(이종금속 맞대기 용접), Hydrostatic Testing(수압시험), Normal Operating Condition(정상운전조건), Welding Residual Stress(용접잔류응력), Primary Water Stress Corrosion Cracking(일차수응력부식균열)

초록: 본 논문에서는 Alloy 82/182를 용접재로 이용한 원자로 배관 이종금속 맞대기 용접부(Dissimilar Metal Butt Weld)에서의 PWSCC에 의한 균열성장 거동을 평가하였다. 이를 위해 먼저 유한요소 응력해석을 수행하여 이종금속용접부에서의 응력분포를 결정하였으며, 이때 이종금속용접 및 동종금속용접에 의한 용접잔류응력 외에 수압시험과 정상운전 조건도 고려하여 기계적 하중에 의한 응력 재분배를 고려하였다. 최종적으로 이와 같이 구한 응력 분포를 바탕으로 PWSCC에 의한 축방향 및 원주방향 가상 균열의 균열성장 거동을 평가하여 PWSCC 균열 성장량을 계산하였다. 본 논문의 결과는 향후 PWSCC에 의한 원자로 배관 이종금속 맞대기 용접부의 균열성장 거동 예측에 적용될 수 있다.

Abstract: This study investigates the crack growth behavior due to primary water stress corrosion cracking (PWSCC) in the dissimilar metal butt weld of a reactor piping using Alloy 82/182. First, detailed finite element stress analyses were performed to predict the stress distribution of the dissimilar metal butt weld in which the hydrostatic and the normal operating loads as well as the weld residual stresses were considered to evaluate the stress redistribution due to mechanical loadings. Based on the stress distributions along the wall thickness of the dissimilar metal butt weld, the crack growth behavior of the postulated axial and circumferential cracks were predicted, from which the crack growth diagram due to PWSCC was proposed. The present results can be applied to predict the crack growth rate in the dissimilar metal butt weld of reactor piping due to PWSCC.

1. 서론

지난 2000년 이후 세계 각국에서 운전중인 가압 경수로형 원자력발전소의 Alloy 82/182 이종금속용접부(Dissimilar Metal Weld, DMW)에서 일차수응력

부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC)에 의한 균열 발생 사례⁽¹⁾가 수 차례 보고 되었다. PWSCC에 의한 균열은 원자로압력용기 관통노즐, 원자로압력용기 입/출구 노즐 맞대기 용접부, 가압기 노즐 등 Alloy 82/182가 적용된 다수의 DMW에서 발생하였다. 이에 따라 미국, 한국을 비롯한 세계 각국의 원자력 산업계에서는 오버레이 용접 등을 이용하여 Alloy 82/182 DMW에 대한 예방 정비⁽²⁻⁵⁾를 수행하거나, 강화가동중검사를 통

† Corresponding Author, nam-su.huh@seoultech.ac.kr
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

해 PWSCC에 의한 손상을 사전에 예방하고 있다.

만약 강화가동중검사 결과로 PWSCC에 의한 균열이 발견된다면 ASME Boiler and Pressure Vessel Code (ASME B&PV Code), Section XI⁽⁶⁾에 따라 균열 건전성평가를 수행하여 보수 또는 다음 주기까지의 재가동 여부를 결정해야 한다.

이와 같은 Alloy 82/182를 이용한 DMW의 PWSCC에 의한 균열 건전성평가를 위해서는 먼저 용접부에 발생하는 응력(stress)을 정확하게 결정해야 한다. DMW의 응력 분포를 예측하기 위한 기존의 연구⁽⁷⁻⁹⁾에서는 대부분 맞대기 용접부를 포함한 다양한 원자력발전소 DMW 형상에 대하여 DMW나 보수 용접에 의한 용접잔류응력 분포를 정확하게 예측하기 위한 해석이 다수 진행된 바 있다. 이를 통해 표준 노즐 형상에 대한 용접잔류응력 분포식 제시 등을 위한 시도가 진행된 바 있다.

그러나 DMW에는 용접 과정 동안 발생하는 용접잔류응력 외에 시험 하중, 운전 하중과 같은 기계적 하중에 의한 응력도 발생하게 된다. 따라서 균열 건전성평가를 위해서는 용접잔류응력과 기계적 하중을 모두 고려하여야 한다. 일반적으로 용접잔류응력 혹은 열응력은 기계적 하중이 작용할 경우 재분배(redistribution)되는 특성을 보이기 때문에 이를 정확히 평가하기 위해서는 상세 유한요소 응력해석이 수행되어야 한다.

그리고 최종적으로 이와 같이 결정된 응력 결과를 이용하여 균열성장 해석을 수행하여 허용균열 크기와 비교하여 보수 혹은 재가동 여부를 평가하게 된다. 이를 위해서는 신속하게 균열성장 거동을 평가할 수 있는 체계를 개발하는 것이 매우 중요하다.

따라서 본 논문에서는 국내 가동 중인 원자력발전소의 원자로 배관 이중금속 맞대기 용접부를 대상으로 PWSCC에 의한 균열성장 거동을 평가하였다. 이를 위해 용접부에 발생하는 응력을 상세 유한요소해석을 이용하여 결정하였으며, 이때에는 용접잔류응력 외에 수압시험 및 정상운전하중과 같은 배관에 작용하는 기계적 하중도 고려하여 기계적 하중 조건에 따른 용접잔류응력 재분배 거동도 평가하였다. 또한 결정된 최종 배관 용접부 응력을 기반으로 PWSCC에 의한 시간에 따른 균열성장 거동 평가를 수행하였다. 특히 이때에는 같은 DMW 위치 내에서 경로에 따른 상대적인 PWSCC 위험도를 평가하였다. 해석 시에는 구조물 형상에 의한 영향을 고려하기 위해 두 가지의

노즐-배관 맞대기 용접부 형상을 고려하였다.

2. 해석 대상

본 논문에서는 국내 가동 중인 원자력발전소의 원자로 배관 이중금속 맞대기 용접부 중 원자로 입구 노즐(inlet nozzle)과 안전주입 노즐(safety-injection nozzle)을 대상으로 해석을 수행하였으며, 대략적인 형상을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 입구 노즐 맞대기 용접부 형상을 나타낸 것이며, Fig. 1(b)는 안전주입 노즐 맞대기 용접부 형상을 나타낸 것이다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 두 용접부는 DMW와 동종금속용접부(Similar Metal Weld, SMW) 사이의 안전단(safe-end) 형상이 다르며, 노즐의 형상도 다르다. 또한 안전주입 노즐의 경우에는 버터링(buttering) 부분이 존재하지 않는다.

Table 1은 부위별 재료를 정리하여 나타낸 것이다. 또한 수압시험과 정상운전 시 배관에 작용하는 온도와 압력 조건은 Table 2에 나타내었으며, 입구노즐과 안전주입 노즐에 같은 조건이 부가되었다.

Table 1 List of materials employed in the present study

Part	Material
Cladding	TP316 stainless steel
DMW / Buttering	Alloy 82/182
Nozzle	SA508 Cl.2
Safe-end	TP316 (inlet nozzle) Alloy 600 (safety-injection nozzle)
SMW	ER316L
Pipe	TP316 stainless steel

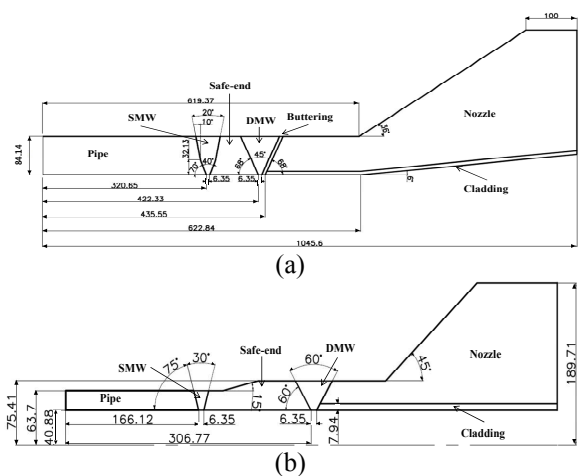


Fig. 1 Geometries of dissimilar metal butt welds considered in the present study; (a) inlet nozzle and (b) safety-injection nozzle (Unit: mm)

Table 2 Hydrostatic test and normal operating conditions

	Hydrostatic test	Normal operating conditions
Pressure (MPa)	21.42	15.51
Temperature (°C)	21.11	286.11

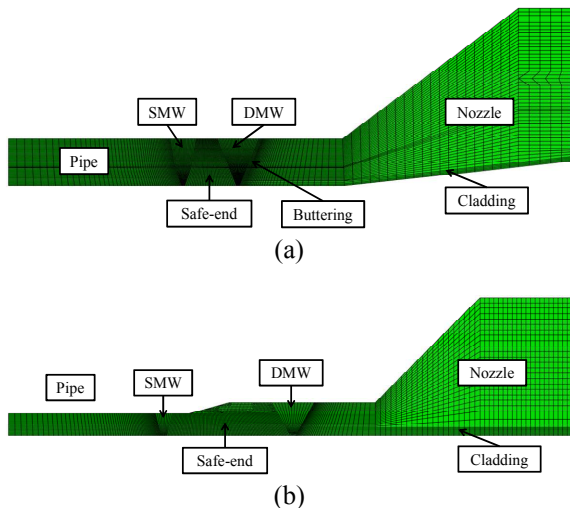


Fig. 2 Finite element meshes employed in the present study; (a) inlet nozzle and (b) safety-injection nozzle

3. 유한요소 응력해석

본 논문에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁰⁾를 사용하여 응력 해석을 수행하였으며, 2차원 축대칭 모델을 적용하였다. 해석 시 적용된 요소는 4절점 축대칭 요소(4-node axisymmetric element, DCAX4 for temperature analysis and CAX4 for stress analysis in ABAQUS element library)이다. Fig. 2(a)는 입구 노즐에 대한 유한요소모델로 절점수는 9,250개이며 요소의 수는 9,016개이다. Fig. 2(b)는 안전주입 노즐에 대한 요소망으로 6,377개의 절점과 6,123개의 요소가 사용되었다.

전체 해석 과정은 3단계로 수행되었는데, 먼저 DMW와 SMW에 의한 용접잔류응력을 구하고, 이어서 Table 2에 주어진 수압시험과 정상운전 조건을 고려하여 이에 의한 응력 재분배를 고려한 최종 용접부 응력분포를 결정하였다.

DMW와 SMW에 의한 용접잔류응력 해석 시에는 기존 연구를 통해 정립된 온도 경계조건을 이용한 용접 해석 방법이 적용되었으며, 이때 용융점 이상 온도까지의 온도 의존적 재료물성치가 모두 고려되었다. 용접잔류응력 해석에 대한 보다 자세한 내용은 참고 문헌 (11)과 (12)에 기술되어 있다.

DMW 위치에 따른 균열성장거동을 평가하기

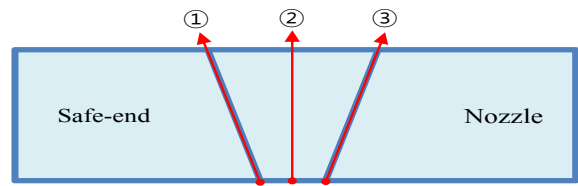


Fig. 3 Crack growth paths along the wall thickness in the dissimilar metal butt weld

위해서 Fig. 3에 나타난 바와 같이 유한요소해석 결과를 바탕으로 DMW내의 3개의 경로를 따라 두께 방향 응력 분포를 도출하였다(①: 안전단/DMW 경계(safe-end side), ②: DMW 중앙(DMW center), ③: DMW/노즐 경계(nozzle side)).

수압시험 및 정상운전 조건의 경우에는 배관 내압 적용 시 end-cap 효과를 고려하여 배관 끝단에 등가인장하중을 적용시켰다.

4. 해석 결과

4.1 응력해석 결과

Fig. 2에 나타난 입구 노즐과 안전주입 노즐에 대한 응력해석 결과로부터 배관 내면을 따른 응력 분포와 Fig. 3에 나타난 DMW의 세 경로에서의 두께를 따른 응력을 결정하였다. Fig. 4는 입구노즐에 대하여 배관 내면을 따른 원주방향 응력과 축방향 응력을 나타낸 것이며, Fig. 5~Fig. 6은 Fig. 3에 나타난 세 경로를 따른 원주방향과 축방향 응력 성분을 나타낸 것이다. 그림에서 “WELD”는 용접 공정이 끝난 후의 용접잔류응력 분포를 의미하며 “HYD”는 용접 공정과 수압 시험을 고려한 경우의 응력분포, 그리고 “NOP”는 여기에 정상운전하중 조건까지 고려한 후의 최종 응력분포를 의미한다.

Fig. 4에는 용접공정 및 수압시험, 정상운전 조건을 순차적으로 고려한 경우의 배관 내면에서의 원주방향과 축방향 응력분포의 변화를 나타내었다. 먼저 용접잔류응력이 존재하는 상태에서 수압시험 조건을 적용하면 응력분포는 크게 변화하지 않았다. 그러나 정상운전 조건을 추가로 고려하면 전반적으로 응력 재분배가 크게 발생하여 배관 내면에서의 응력분포가 크게 변화하였다. 특히 PWSCC 측면에서 중요한 DMW에서는 응력값이 감소하였으며 축방향 응력의 경우에 효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 정상운전 조건 온도에서의 재료 강도가 수압시험 온도에서의 강도에 비해 작기 때문에 정상운전 조건에서 특히 응력 재분배 효과가 큰 것으로 생각된다. 또한 원주방향 응력 성분의 경우는 압축응력이 발생하여 PWSCC에 의한 균열 발생 가능성이 작은 것으로 나

타났으며, 축방향 응력 성분의 경우에는 인장응력이 나타났으나 정상운전 조건까지 고려할 경우에는 인장응력값이 크게 감소하여 정상운전조건에 의해 PWSCC에 의한 균열 발생 가능성이 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 5와 Fig. 6은 전술한 바와 같이 DMW의 세 경로를 따른 원주방향과 축방향 응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 5와 Fig. 6에 나타난 바와 같이 벽두께 방향을 따른 응력분포의 경우에도 수압시험은 용접잔류응력의 재분배에 영향을 미치지 않았으나 정상운전 조건을 고려하면 DMW의 두께 방향 응력 분포가 크게 변화하였다. 특히 그 영향은 축방향 응력 분포에서 크게 나타났으며 PWSCC 측면에서 중요한 배관 내면에서의 축방향 응력이 정상운전 조건에 의해 크게 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 6 참고).

또한 PWSCC에 의한 균열성장 위험도를 세 가지 경로에 따라 구분하면 Fig. 5(a)의 “안전단/DMW 경계” 쪽은 벽두께 방향을 따라 대부분 인장응력이기에 PWSCC에 의한 균열성장량이 클 것으로 판단된다. Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)에 나타난 바와 같이 “DMW 중앙 (Fig. 3의 ②번 경로)”과

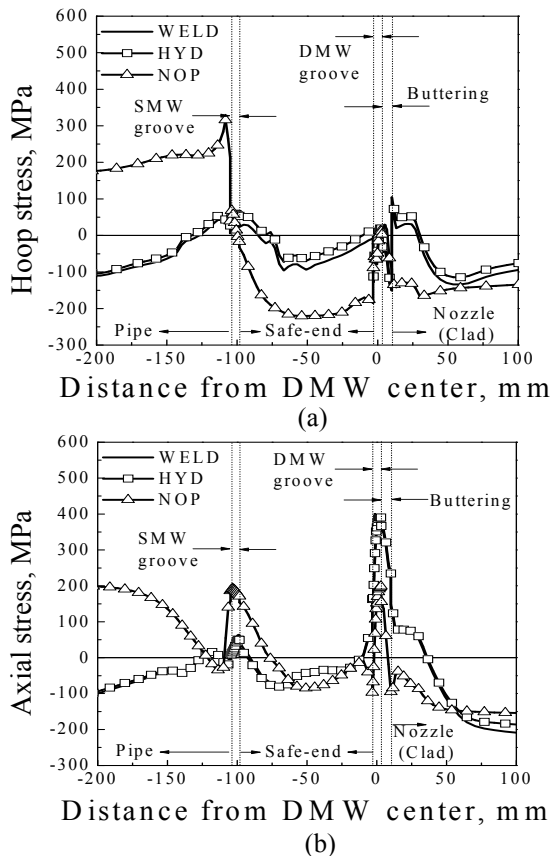


Fig. 4 Stress distributions at inner surface for inlet nozzle; (a) hoop stress and (b) axial stress

“DMW/노즐 경계 (Fig. 3의 ③번 경로)” 쪽은 압축 응력이 작용하는 영역이 각각 두께 방향으로 배관 내면으로부터 두께의 22%와 35% 정도로 나타났다. 따라서 “DMW/노즐 경계” 쪽이 “DMW 중앙”에 비해 압축 영역이 크기에 PWSCC 측면에서 균열성장량이 더 적을 것으로 생각된다. 그리고 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)의 축방향 응력의 경우는 “DMW

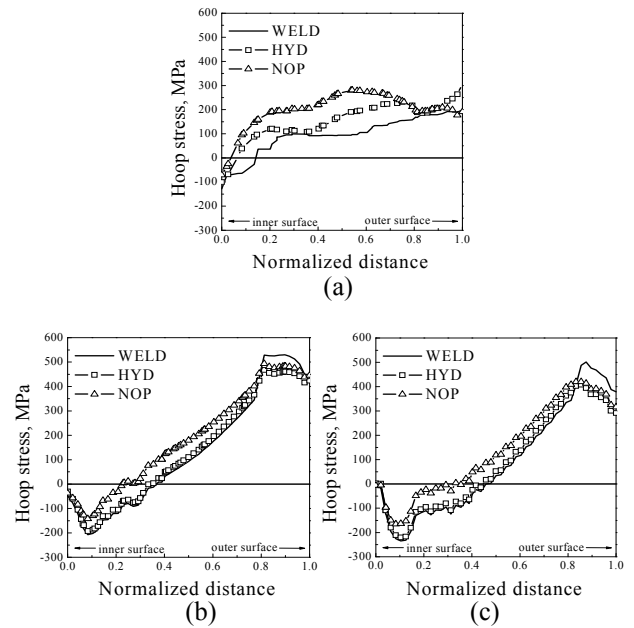


Fig. 5 Hoop stress distributions along the (a) safe-end side, (b) DMW center and (c) nozzle side for inlet nozzle

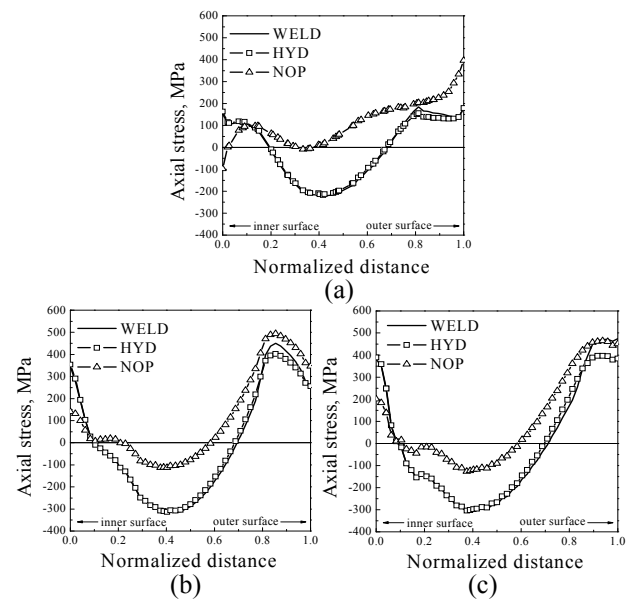


Fig. 6 Axial stress distributions along the (a) safe-end side, (b) DMW center and (c) nozzle side for inlet nozzle

중양 (Fig. 3의 ②번 경로)”과 “DMW/노즐 경계 (Fig. 3의 ③번 경로)” 쪽에서 압축 응력이 나타나는 영역은 내면으로부터 배관 두께의 58% 정도까지로 유사하였으나 배관 내면 근처에서 인장응력이 나타나는 영역이 “DMW 중양”에서는 두께의 22% 정도까지였으나 “DMW/노즐 경계” 쪽에서는 두께의 11% 정도까지였다. 따라서 축방향 응력의 경우는 “DMW/노즐 경계” 쪽의 내면 인장응력 영역이 작기에 역시 상대적으로 다른 경로에 비해 PWSCC 균열성장량이 더 적을 것으로 예상되었다.

Fig. 7~Fig. 9는 안전주입 노즐에 대한 응력해석 결과를 나타낸 것으로 Fig. 7은 배관 내면을 따른 원주방향과 축방향 응력분포의 변화를 각 하중 조건에 대해 나타낸 것이다. Fig. 8~Fig. 9는 Fig. 3에 나타낸 DMW의 세 경로를 따른 원주방향과 축방향 응력분포의 변화를 나타낸 것이다. 안전주입 노즐의 경우도 비록 형상은 다르지만 용접공정, 수압시험, 정상운전 조건에 따른 응력분포 변화 거동이 입구 노즐의 경우와 유사하였다. 먼저 Fig. 7에 나타낸 배관 내면에서의 응력분포의 경우 수

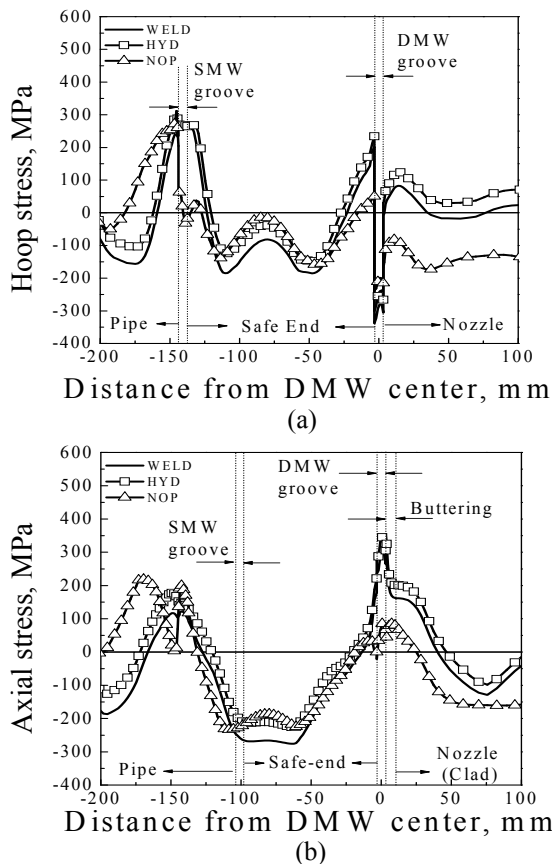


Fig. 7 Stress distributions at inner surface for safety-injection nozzle; (a) hoop stress and (b) axial stress

압시험은 응력 재분배에 크게 영향을 미치지 않았으나 정상운전 조건에 의해서는 응력분포가 크게 변화였으며 특히 DMW에서의 축방향 응력은 크게 감소하였다.

또한 Fig. 8과 Fig. 9에 나타낸 DMW의 세 가지 경로를 따른 응력분포도 입구 노즐의 경우와 유사하였으며, Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)에 나타난 바와 같이 “DMW 중양”과 “DMW/노즐 경계” 쪽은 압축응력

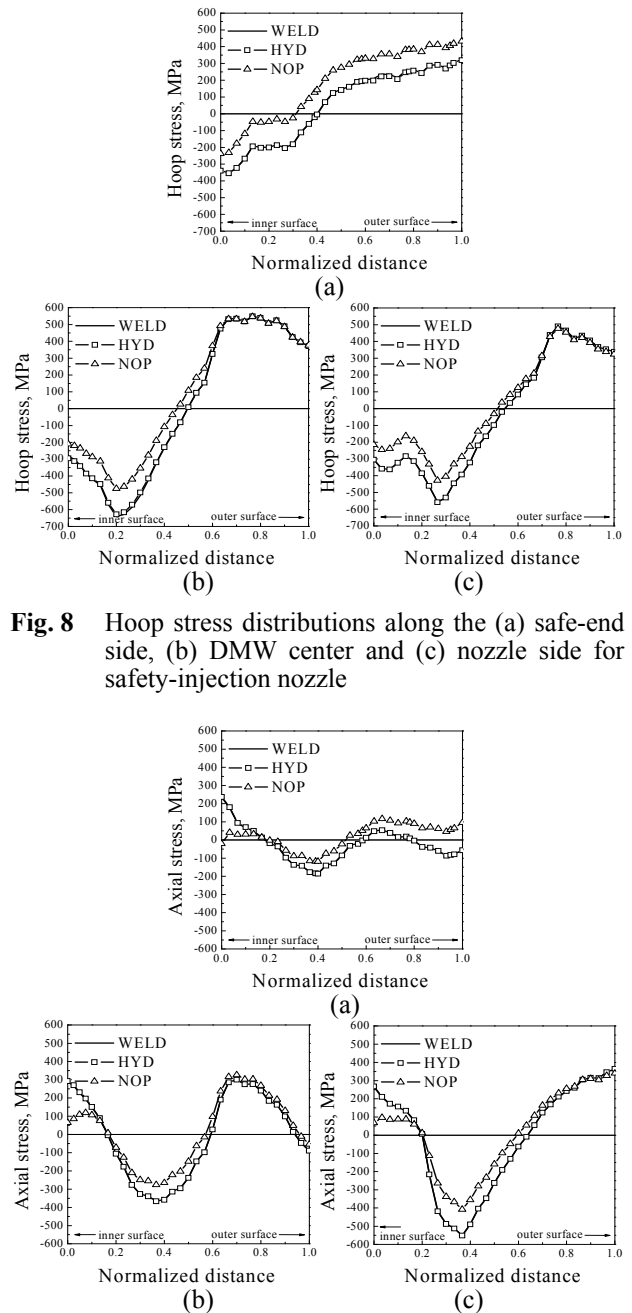


Fig. 8 Hoop stress distributions along the (a) safe-end side, (b) DMW center and (c) nozzle side for safety-injection nozzle

Fig. 9 Axial stress distributions along the (a) safe-end side, (b) DMW center and (c) nozzle side for safety-injection nozzle

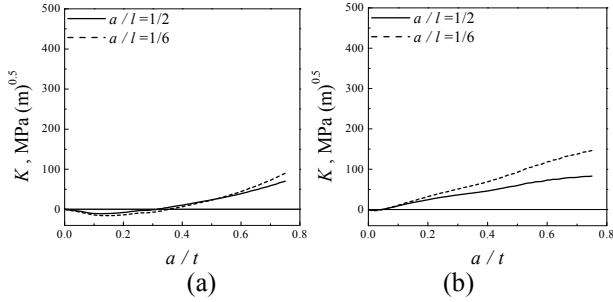


Fig. 10 Stress intensity factors along (a) DMW center and (b) safe-end side for inlet nozzle due to hoop stress

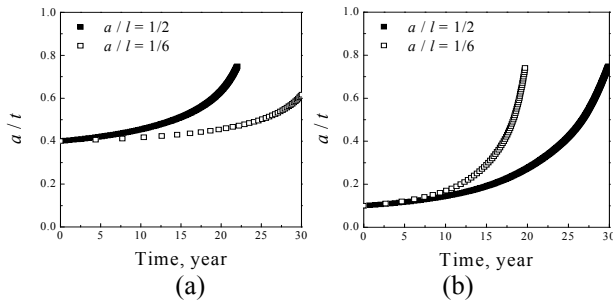


Fig. 11 Crack growth behavior of postulated axial surface crack along (a) DMW center and (b) safe-end side for inlet nozzle

이 작용하는 영역이 각각 배관 내면으로부터 두께 방향으로 두께의 43%와 47%정도까지였다. 즉, 이 경우도 “DMW/노즐 경계” 쪽의 압축 영역이 더 크기에 PWSCC에 의한 균열성장량이 다른 경로보다 작을 것으로 예측되었다. 또한 Fig. 9(b)와 Fig. 9(c)에 나타난 축방향 응력의 경우도 전반적인 응력 분포는 비슷하였으나 내면에서 인장응력의 크기가 “DMW 중앙”이 “DMW/노즐 경계”보다 큰 것으로 나타나 “DMW/노즐 경계” 쪽의 균열성장량이 더 적을 것으로 예상되었다.

4.2 PWSCC에 의한 균열성장 평가 결과

본 논문에서는 수압시험과 정상운전 조건까지 고려하여 구한 최종 DMW 응력분포 결과를 바탕으로 PWSCC에 의한 균열성장 거동을 예측하였다. 이를 위해 ASME B&PV Code, Sec. XI, App. A와 App. C에 입각하여 탄성응력확대계수(K) 및 PWSCC에 의한 균열성장 해석을 수행하였다.⁽⁶⁾

ASME B&PV Code, Sec. XI, App. A에 입각한 탄성 응력확대계수는 아래와 같이 구하며 원주방향 균열 평가 시에는 축방향 응력성분을 적용하며 축방향 균열 평가 시에는 원주방향 응력성분을 고려한다.

$$K = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \sqrt{\pi \cdot a/Q} \quad (1)$$

여기서, a는 균열 깊이, A_i, G_i (i=0,1,2,3)는 상수 및 보정계수, Q는 형상계수를 나타낸다.

PWSCC에 의한 균열성장량은 아래와 같이 ASME B&PV Code, Sec. XI, App. C에 입각하여 계산하였다. 또한 계산에 필요한 재료 상수는 본 DMW의 재료인 Alloy 182에 대해 주어진 값을 사용하였다.⁽⁶⁾

$$\dot{a} = \exp \left[-\frac{Q_g}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \alpha (K - K_{th})^\beta \quad (2)$$

여기서,

- \dot{a} = crack growth rate at temperature T in m/s
- Q_g = thermal activation energy for crack growth = 130kJ/mole
- R = universal constant = 8.314 × 10⁻³ kJ/mole · K
- T = absolute operating temperature at location crack, K
- T_{ref} = absolute operating temperature used to normalize data = 598.15K
- α = crack growth rate coefficient = 1.5 × 10⁻¹² 325 °C for \dot{a} in units of m/s and K in units of MPa√m
- K = crack tip stress intensity factor, MPa√m
- K_{th} = threshold stress intensity factor for SCC, MPa√m = 0 (for Alloy 82/182)
- β = exponent = 1.6

또한 ASME B&PV Code, Sec. XI에서는 최대허용 균열깊이로 두께(t)의 75%를 규정하고 있기에 이 한계값까지만 균열성장량을 평가하였으며, 균열형상비(a/l, l=균열길이의 1/2)로는 1/2과 1/6을 설정하여 평가를 수행하였다.

4.1절에 기술한 바와 같이 세 가지 두께 방향 경로에 대해 응력분포를 평가한 결과 “DMW/노즐 경계 (Fig. 3의 ③번 경로)” 쪽이 다른 두 경로에 비해 균열성장량이 작을 것으로 예측되어 이 경로를 제외한 나머지 두 경로에 대해 균열성장량을 평가하였다. 특히 “안전단/DMW 경계” 쪽에 대해 균열성장량을 계산하는 경우에는 경사진 ①번 경로를 따른 응력성분(축방향 균열인 경우 원주방향 응력, 원주방향 균열인 경우 축방향 응력)이 모두 균열성장에 기여한다고 가정하여 보수적으로 평가하였다.

Fig. 10은 입구노즐에 축방향 균열을 가정하여 구한 “DMW 중앙”과 “안전단/DMW 경계” 쪽 경

로를 따른 탄성응력확대계수의 변화를 각각 나타낸 것이다. Fig. 5(a)와 (b)에 나타난 바와 같이 두 경로의 두께방향으로 배관 내벽 근처에서 압축응력을 나타내기에 응력확대계수도 음의 값을 나타냈다. 그러나 두께 방향을 따라 인장응력이 됨에 따라 응력확대계수도 양의 값을 보였다. Fig. 11은 Fig. 10의 응력확대계수 결과 및 식 (2)를 이용한 PWSCC 균열성장 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 응력확대계수가 내벽 근처에서 음의 값을 보이기에 만약 초기 균열깊이(a/l) 값이 너무 작으면 균열이 성장되지 않는다. 따라서 본 논문에서는 균열성장 선도를 작성하기 위해 모든 경우에 대해 균열성장이 발생하기 시작하는 임계 크기로 초기 균열깊이를 가정하였다. 이를 통해 만약 PWSCC에 의해 균열 성장이 발생한다면 신속하게 균열성장거동을 평가할 수 있도록 하였다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 DMW부 중앙에 초기 균열깊이가 0.4인 균열이 발생한다면 균열형상비(a/l)가 1/2인 경우에는 균열이 21년 후에 모두 최대균열깊이까지 성장하였고, 1/6인 경우에는 31년 후에 최대균열깊이까지 성장하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 11(b)에 나타난 바와 같이 안전단/DMW 경계에서 초기 균열깊이가 0.1인 균열이

존재한다면 균열형상비(a/l)가 1/2인 경우에는 29년 후 최대균열깊이까지 성장하였고, 1/6인 경우 19년 후 최대균열깊이까지 성장하였다.

Fig. 12와 Fig. 13은 안전주입 노즐에 원주방향 표면균열을 가정한 경우의 탄성응력확대계수 및 PWSCC에 의한 균열성장 예측 결과를 각각 나타낸 것이다. 이 경우에도 전술한 바와 같이 DMW의 세 가지 경로 가운데 균열성장량이 상대적으로 클 것으로 예상된 “DMW 중앙”과 “안전단/DMW 경계”에 대해서만 평가하였다. 이 경우에는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 압축응력 영역이 크기 때문에 Fig. 12의 결과처럼 탄성응력확대계수값이 음의 값을 나타내거나 매우 작아졌다. 이에 따라 Fig. 13에 나타난 바와 같이 균열성장이 발생하는 임계 초기 균열깊이를 가정하여도 두께의 18%~27% 정도까지만 성장하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 Alloy 82/182를 용접재로 이용한 원자로 배관 이중금속 맞대기 용접부의 PWSCC에 의한 균열성장 거동을 평가하였다. 이를 위해 먼저 응력해석을 수행하여 두께 방향을 따른 DMW의 응력분포를 결정하였다. 이때에는 DMW 및 SMW에 의한 용접잔류응력뿐만 아니라 수압시험 및 정상운전 조건까지 고려하여 기계적 하중에 의한 응력 재분배까지 고려하여 최종 배관 응력분포를 결정하였다. 본 논문에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 응력해석 결과, 수압시험 조건은 용접잔류응력 재분배에 크게 영향을 미치지 않았으나 정상운전조건을 고려하면 응력 재분배가 크게 나타났으며 이는 정상운전조건 온도에서의 재료 강도가 수압시험 조건에 비해 작기 때문에 정상운전 조건에서 응력 재분배 효과가 큰 것으로 생각된다. 특히 PWSCC 측면에서 중요한 DMW에서 응력이 정상운전조건에 의해 크게 감소되었다. 응력 감소폭은 축방향 응력의 경우에 크게 나타났으며, 이러한 현상은 입구 노즐과 안전주입 노즐 모두에서 유사하게 나타났다.

(2) DMW에서 세 가지 경로를 따른 두께 방향 응력 분포를 평가한 결과 “DMW 중앙” 및 “안전단/DMW 경계”에서 PWSCC에 의한 균열성장량이 클 것으로 예측되었다.

(3) 수압시험 및 정상운전 조건까지 고려된 DMW부의 최종 두께 방향 응력분포를 바탕으로 PWSCC에 의한 균열성장량을 평가하였으며 초기

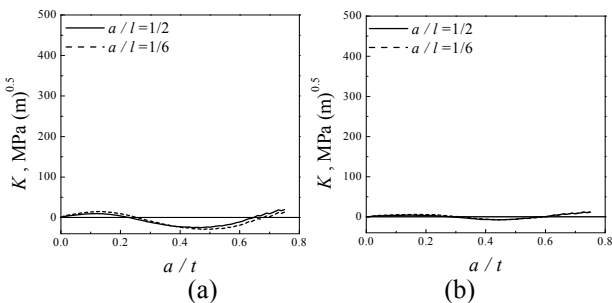


Fig. 12 Stress intensity factors along (a) DMW center and (b) safe-end side for safety-injection nozzle due to axial stress

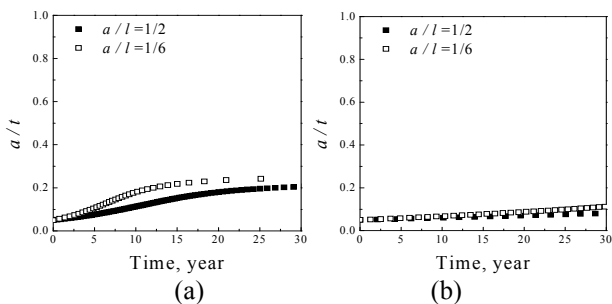


Fig. 13 Crack growth behavior of postulated circumferential surface crack along (a) DMW center and (b) safe-end side for safety-injection nozzle

균열형상비(a/l)로 1/2인 경우와 1/6인 경우 2가지를 고려하였다. 대부분의 경우에서 두께방향을 따라 압축응력의 영향이 지배적이기에 초기 균열깊이가 너무 작으면 균열성장이 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

(4) PWSCC에 의한 균열성장이 발생하는 임계 초기 균열깊이를 가정하여 PWSCC에 의한 균열성장량 선도를 작성하였으며 본 선도는 원자로 배관 이중금속 맞대기 용접부의 PWSCC 균열성장 거동 평가에 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국수력원자력(주) 중앙연구원의 지원을 받아 수행한 결과입니다.

참고문헌

- (1) EPRI, Materials Reliability Program, 2004, "Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106)," *EPRI report*.
- (2) ASME, 2006, "Alternative Rules for Repair of Classes 1, 2, and 3 Austenitic Steel Piping, Section XI, Division 1," ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI, Code Case N-504-4, *The American Society of Mechanical Engineers*.
- (3) ASME, 2008, "Full Structural Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair or Mitigation of Class 1, 2, and 3 Items, Section XI, Division 1," ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI, Code Case N-740-2, *The American Society of Mechanical Engineers*.
- (4) Huang, C.-C. and Liu, R.-F., 2012, "Structural Integrity Analyses for Preemptive Weld Overlay on the Dissimilar Metal Weld of a Pressurizer Nozzle," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 90~91, pp. 77~83.
- (5) Lee, S.G., Oh, C.K., Park, H.B. and Jin, T.E., 2010, "Analysis of Overlay Weld Effect on Preventing PWSCC in Dissimilar Metal Weld," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, pp. 97~101.
- (6) ASME, 2011, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI, *The American Society of Mechanical Engineers*.
- (7) Kim, J.S., Kim, J.H., Bae, H.Y., Oh, C.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Song, T.K., 2012, "Welding Residual Stress Distributions for Dissimilar Metal Nozzle Butt Welds in Pressurized Water Reactors," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, pp. 137~148.
- (8) Song, T.K., Chun, Y.B., Oh, C.Y., Bae, H.Y., Kim, Y.J., Lee, S.H., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2009, "Effects of Similar Metal Weld on Residual Stress in Dissimilar Metal Weld According to Safe End Length," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, pp. 664~672.
- (9) Song, T.K., Bae, H.Y., Chun, Y.B., Oh, C.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2008, "Effect of Preemptive Weld Overlay on Residual Stress Mitigation for Dissimilar Metal Weld of Nuclear Power Plant Pressurizer," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, pp. 873~881.
- (10) "ABAQUS/Standard User's Manual," ABAQUS Version 6.11-1, Simulia Corp.
- (11) Soh, N.H., Oh, G.J., Huh, N.S., Lee, S.H., Park, H.B., Lee, S.G., Kim, J.S. and Kim, Y.J., 2012, "Effects of Finite Element Analysis Parameters on Weld Residual Stress of Dissimilar Metal Weld in Nuclear Reactor Piping Nozzles," *Trans. of the KPVP*, Vol. 8, pp. 8~18.
- (12) Song, T.K., Bae, H.Y., Chun, Y.B., Oh, C.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2008, "Estimation of Residual Stress Distribution for Pressurizer Nozzle of Kori Nuclear Power Plant Considering Safe End," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, pp. 668~677.