

원전설비 이종금속 용접부 건전성 평가 연구

김종성 · 진태은 · 김윤재 · 장창희

A Study on the Structural Integrity Assessment of Dissimilar Welds on Nuclear Power Plant

Jong-Sung Kim, Tae-Eun Jin, Yun-Jae Kim and Chang-Heui Jang

1. 서 론

응력부식균열(SCC : stress corrosion crack)이 발생하기 위한 필요조건은 세가지 주요인자들 (인장응력, 민감한 재질, 부식 환경)이 동시에 만족하는 경우이다¹⁾. 원자로 CRDM 관통노즐 용접부, 가압기 분무노즐-안전단 용접부 등과 같이 경수로 원자력 발전소의 1차측 원전설비에 다수 존재한다²⁾. 이러한 이종금속 용접부는 SCC에 민감한 Alloy 600 계열 재질로 제작되어 있고 용접 후열처리 미실시에 따라 인장 잔류응력이 존재할 뿐만 아니라 고온고압 수화학 부식환경 하에서 운전되고 있으므로 상기 필요조건을 만족한다. 이러한 특성에 기인하여 일차수 응력부식 균열(PWSCC : primary water stress corrosion cracking)의 발생 잠재성이 높을 뿐만 아니라 실제 몇몇 이종금속 용접부에서 PWSCC이 발생되고 있다³⁾. 설계수명 또는 계속운전 동안 이종금속 용접부를 가지는 원전설비의 신뢰성을 보장하기 위해서는 PWSCC 측면에서 구조 건전성, 즉 PWSCC 발생 민감도와 성장속도를 평가하여야 한다. 특히, PWSCC 발생 민감도와 성장속도를 효율적으로 평가하기 위해서는 잔류응력 및 파괴역학 매개변수의 평가를 포함하는 공학적 평가 시스템이 필요하다. 그러나, 기존의 공학적 평가 시스템은 공학적 잔류응력 분포식의 부재, 이종금속 용접부 특성을 적절히 반영하지 못한 파괴역학 매개변수식 등 원전설비 이종금속 용접부에 대해 충분하지 못하다.

따라서 본 연구의 목적은 PWSCC 측면에서 이종금속 용접부의 건전성을 평가하는 공학적 평가 시스템을 개발하는데 있다. 특히, 유한요소 해석을 통해 원전설비 이종금속 용접부의 잔류응력 분포와 파괴역학 매개변수에 대한 신뢰성 있는 공학적 평가식을 개발하는데 중점을 둘 것이다. 이러한 연구 목적 달성을 위해 첫 번째로, 인장시험을 통해 이종금속 용접부의 국부 물성이 측정된다⁴⁾. 두 번째, 탄소성 유한요소 parametric study를

통해 공학적 잔류응력 분포식을 도출한다⁵⁾. 마지막으로 파괴역학 매개 변수에 대한 공학적 평가 식이 탄소성 유한요소 parametric study를 통해 개발된다⁶⁾.

2. 공학적 평가 시스템의 체계

Fig. 1은 본 연구를 통해 개발한 원전설비 이종금속 용접부에 대한 공학적 평가 시스템의 체계를 보여주고 있다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이, 크게 4가지 부분으로 구성된다. 첫 번째 부분은 국내 경수로 원전 1차측 설비의 이종금속 용접부의 설계 사양을 확인하고 인장시험을 통해 설계 사양별 용접부의 국부 인장물성을 확보하여 최종적으로 국부 물성 DB를 구축하는 것이다. 두 번째 부분은 탄소성 유한요소 parametric study를 수행하여 잔류응력에 미치는 기하학적 변수와 강도 불일치의 효과를 고찰하고 이를 근거로 공학적 잔류응력 분포식을 개발하는 것이다. 세 번째 부분은 균열거동에 미치는 강도 불일치와 잔류응력의 효과를 고찰하기 위해 파괴역학 매개변수에 대한 공학적 평가식을 탄소성 유한요소 parametric study를 통해 개발하는 것이다. 네 번째는 통합적인 부분으로서 국부 물성 DB, 잔류응력 분포식, 파괴역학 매개변수식과 기존 설계/가동중 기술기준을 이용하여 PWSCC 발생 민감도, 성장속도,

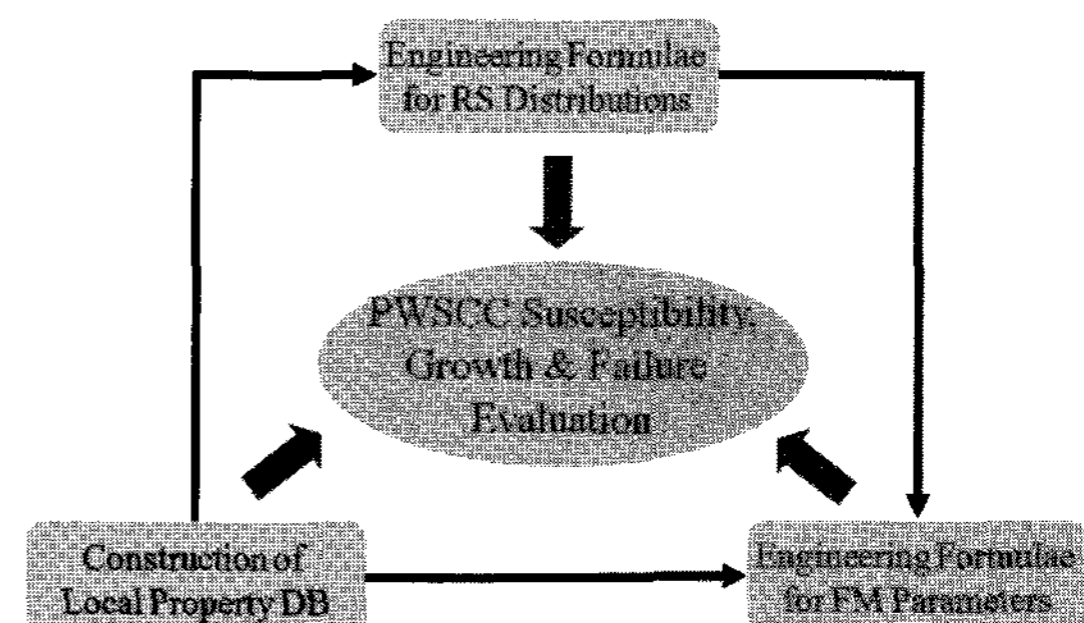


Fig. 1 Engineering assessment system for dissimilar welds of nuclear components

균열 파손 여부 등을 평가하여 최종적으로 이중금속 용접부의 건전성을 평가하는 부분이다. 국부 재료물성은 공학적 잔류응력 분포식 개발, 파괴역학 매개변수 개발 및 PWSCC 측면에서의 건전성 평가시 입력자료로서 이용된다. 잔류응력 분포식은 파괴역학 매개변수 개발 및 PWSCC 건전성 평가시 입력 및 참조자료로 활용된다. 파괴역학 매개변수식은 PWSCC 건전성 평가시 파괴역학 매개변수를 결정하는데 활용된다. 본 논문에서는 네 번째 부분을 제외하고 1~3번째 부분에 대해 제시하고자 한다.

3. 국부 인장물성 평가

3.1 재료 및 용접절차

이중금속 용접부를 구성하는 모재들은 저합금강 SA508 Gr.3와 오스테나이트 스테인리스 강 TP316이다. 두 재료 모두 ASME B&PV Code, Sec.II에 정해진 사양에 따라 용접 이전에 단조와 열처리되어지며 40mm 두께의 판재로 공급된다. 판재는 실제 원전설비 노즐의 이중금속 용접부에 적용되는 용접절차사양서 (WPS : welding procedure specification)에 따라 수동으로 용접된다. 용접부 형상은 Fig. 2에 제시되고 있다. 그림에서 보듯이, SA508 Gr.3 판재의 가공면을 2패스의 버터링(buttering) 용접한 후, 615°C에서 용접 후열처리된다. V-그루브(groove)의 초층 2-3패스는 Alloy 82 용접 와이어를 이용하여 GTAW 용접되며 나머지 패스들은 Alloy 182 용접봉으로 SMAW로 용착된다.

3.2 인장시험 및 인장물성의 변이

용접 판재로부터 가공된 소형 라운드 바(round bar) 인장시편과 미소(mini-sized) 판재 인장시편이 Fig. 3에 제시되고 있다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 시편들은 SA508 저합금강 영역, Alloy 82/182 용접금속 영

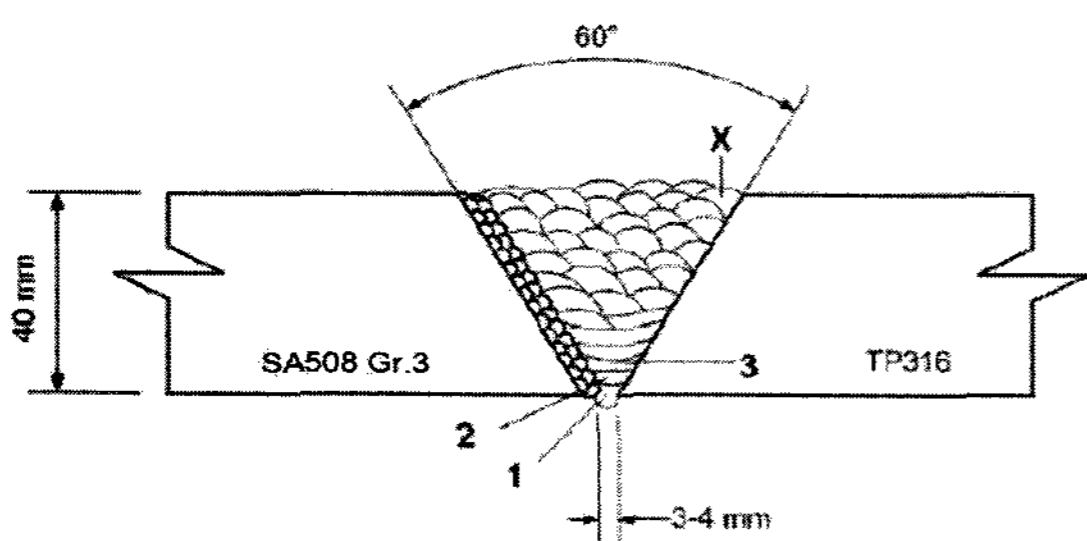
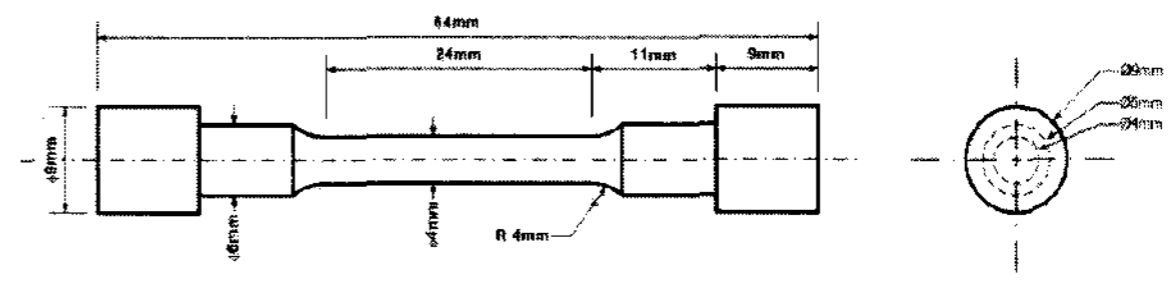
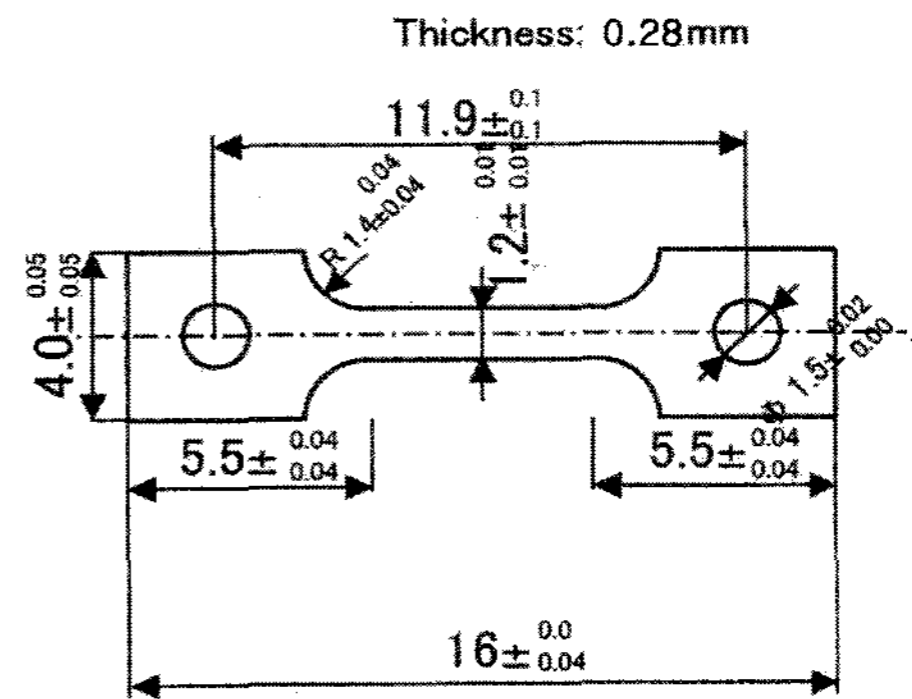


Fig. 2 Schematics of the dissimilar weld with single V-Groove design

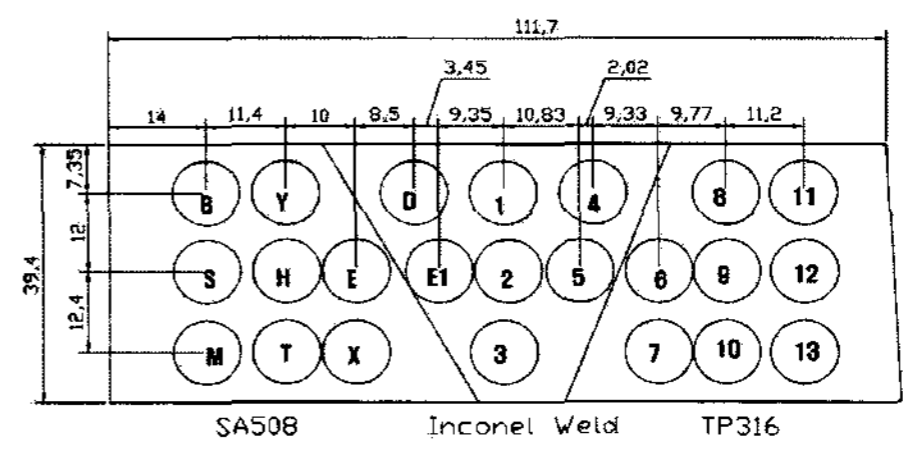


(a) small-size specimen

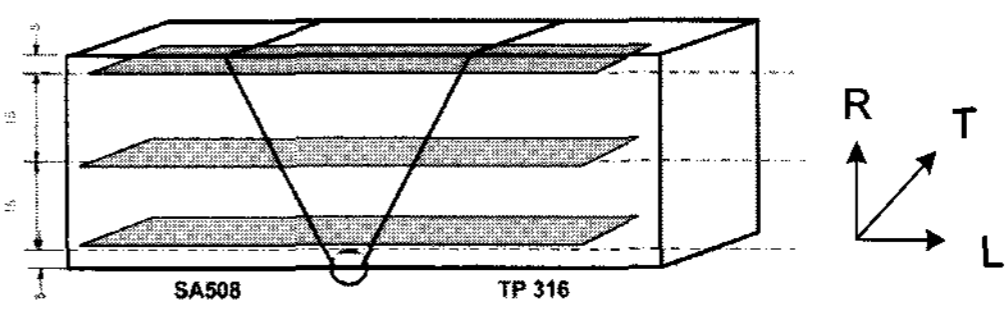


(b) mini-size specimen

Fig. 3 Tensile test specimens



(a) small-size specimen



(b) mini-size specimen

Fig. 4 Locations of the tensile specimens taken from the dissimilar weld

역과 오스테나이트 스테인리스 강 영역에서 용접 방향에 따라 채취된다. 부가적으로 6개의 소형 인장시편들이 용접 방향에 수직인 횡방향으로 채취된다. 시편들은 변형률 속도 5×10^{-4} /sec로 상온에서 ASTM Standard에 따라 시험된다.

Fig. 5는 시편 채취 위치와 방향에 따라 약간 다른 물성치를 보이는 소형 인장시편 시험결과를 제시하고 있다. 전체적으로 SA508 모재는 Alloy 82/182와 TP316 보다 높은 항복강도를 보여준다. 평균적으로, SA508의 항복강도는 약 450MPa, Alloy 82/182의 항복강도는 350MPa이다. 그러나, Alloy 82/182의

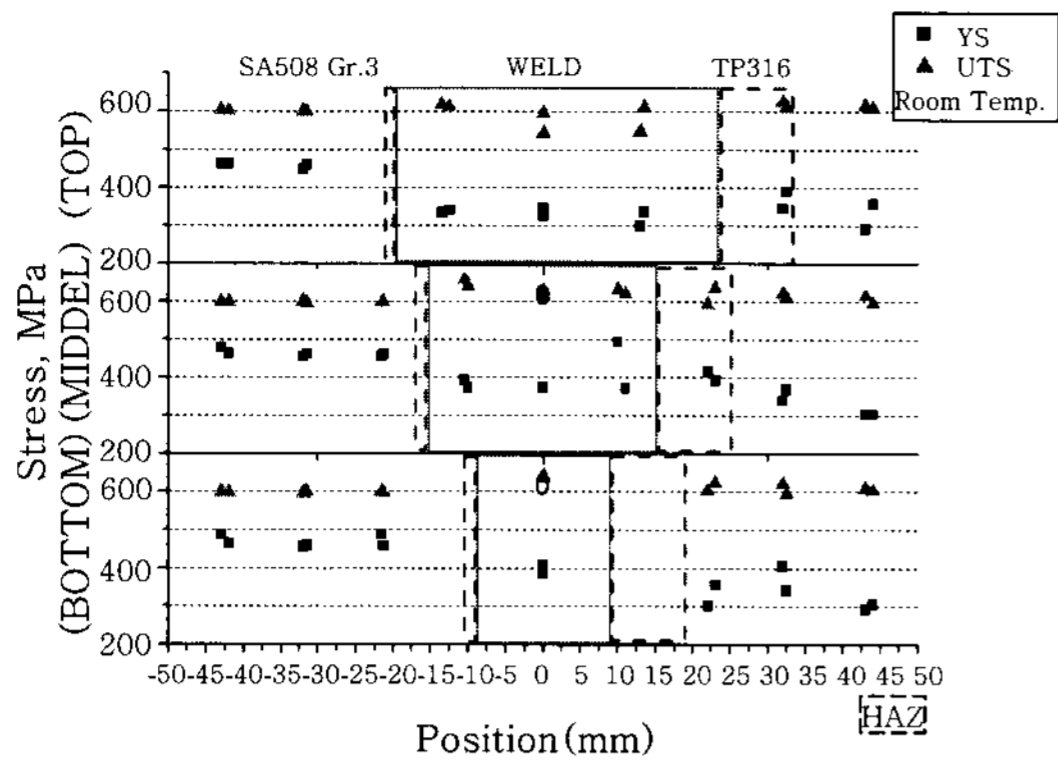


Fig. 5 Variation of tensile properties across the dissimilar weld using small size specimens

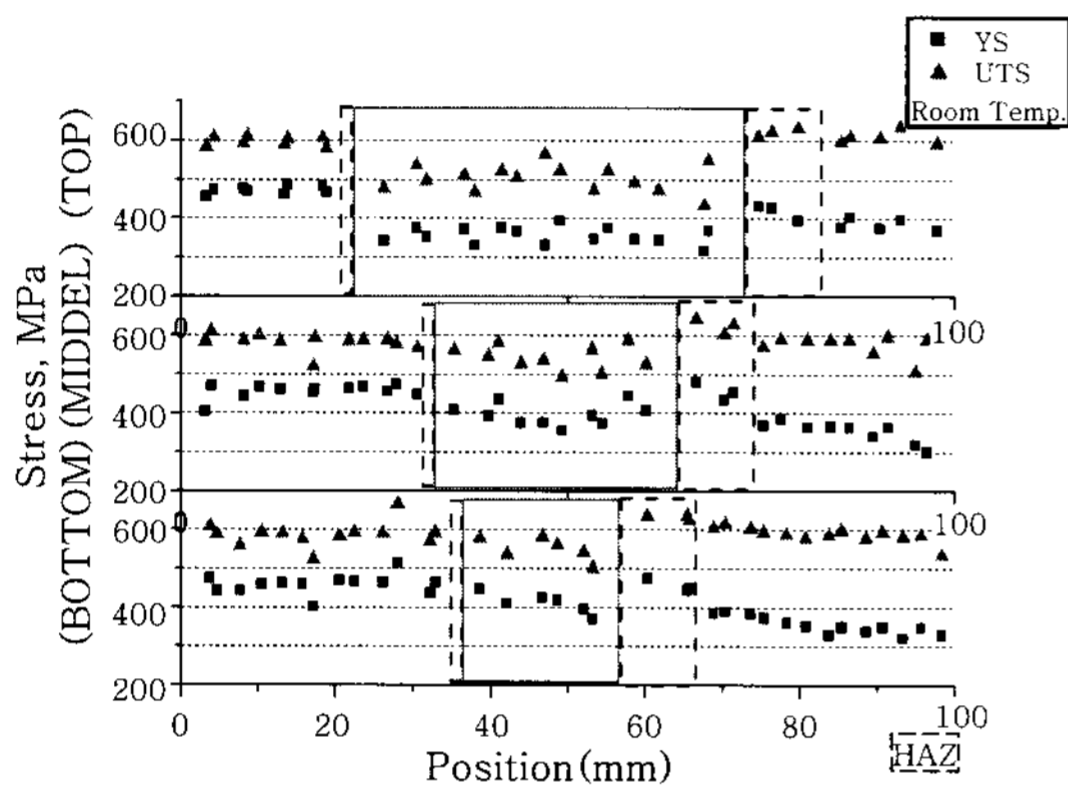


Fig. 6 Variation of tensile properties across the dissimilar weld using mini-size specimens

인장강도는 SA508과 TP316 모재의 인장강도와 유사하다.

Fig. 6은 미소 판재 인장시험의 시험결과이다. 그림에서 보이는 바와 같이 미소 판재 시험으로부터 측정된 인장물성의 전체적인 값들은 소형 라운드 바 인장시험을 이용한 시험결과와 유사함을 알 수 있다. 또한, SA508, Alloy 82/182, TP316 사이의 인장강도 차이는 용접부의 상단부에서 보다 크며 용접 루트부(하단부)에서 작게 됨을 알 수 있다.

4. 공학적 잔류응력 분포식

4.1 잔류응력 해석

원전 1차측 설비 이중금속 용접부들 중 가장 대표적인 가압기 분무노즐 이중금속 용접부에 대한 유한요소 (FE : finite element) 모델을 Fig. 7에 나타내고 있다. 가압기 분무노즐 이중금속 용접부는 SA508 Gr.3, SA541 Gr.3, SA182 F316/TP316, Alloy 82/182로 구성된다. Fig. 7에 제시된 유한요소 모델의 요소수와 절점수는 각각 1530과 1687이다. 온도와 잔류응력

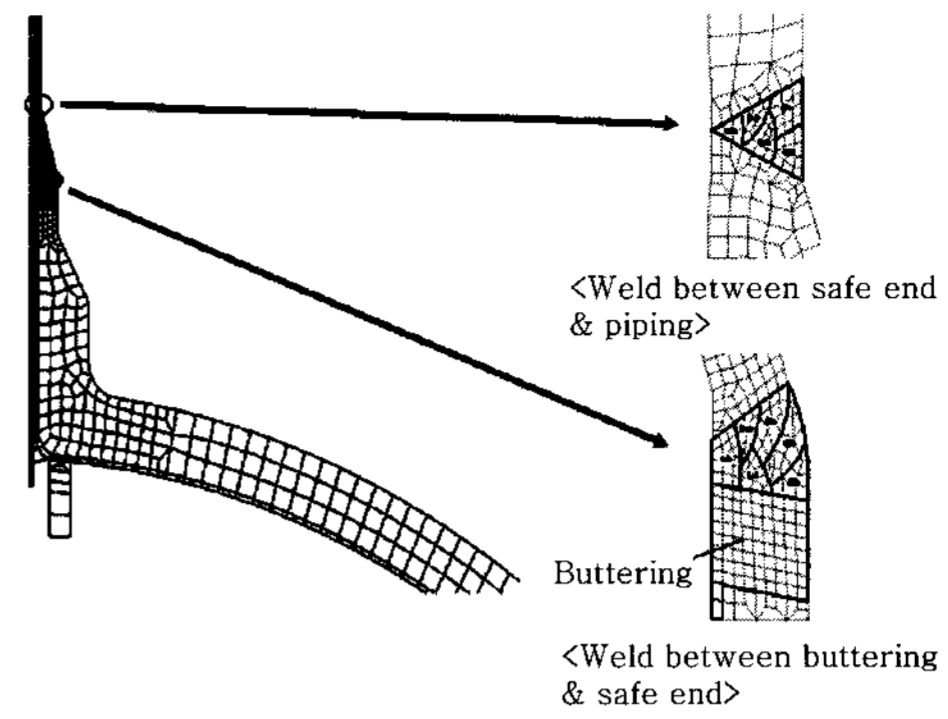
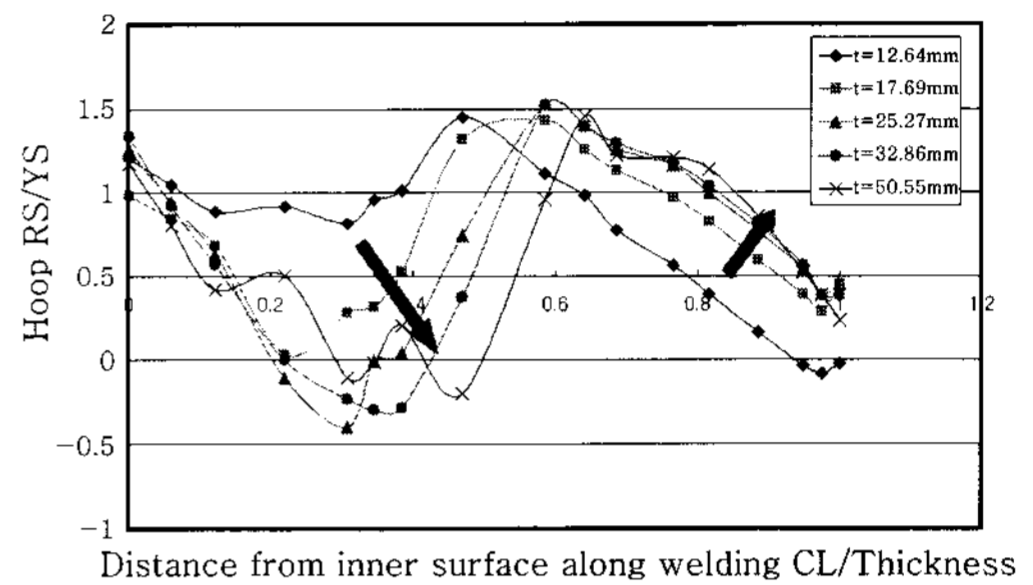
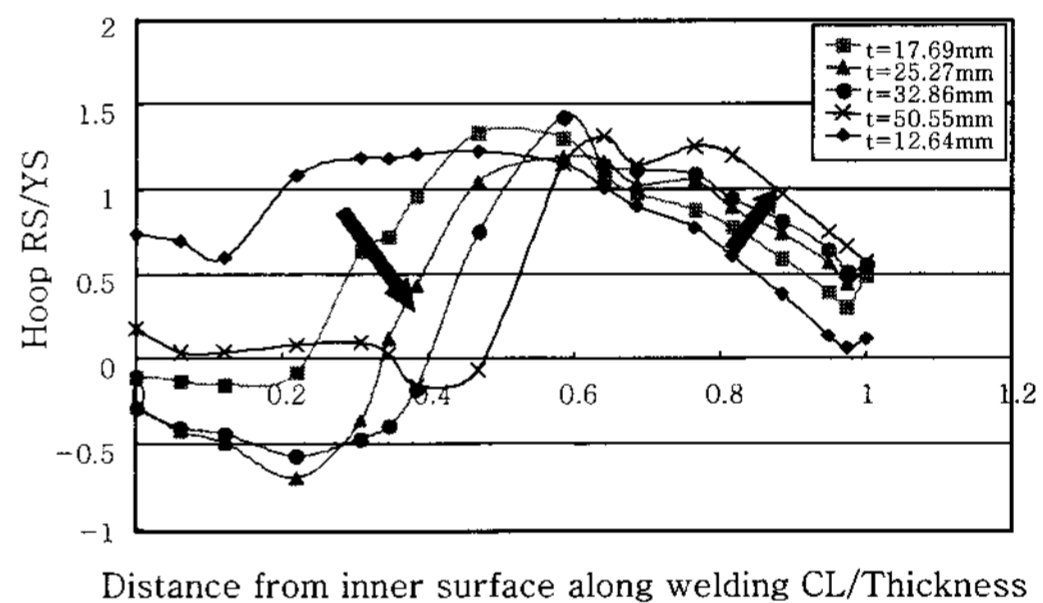


Fig. 7 Finite element model for FE analysis



(a) axial residual stress

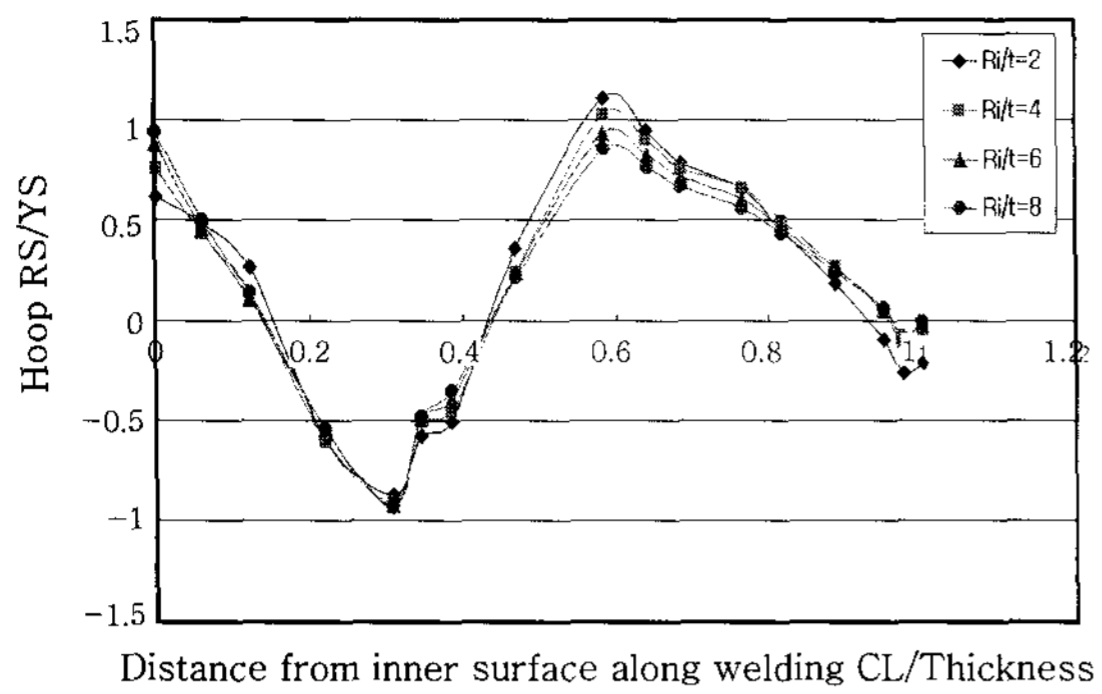


(b) hoop residual stress

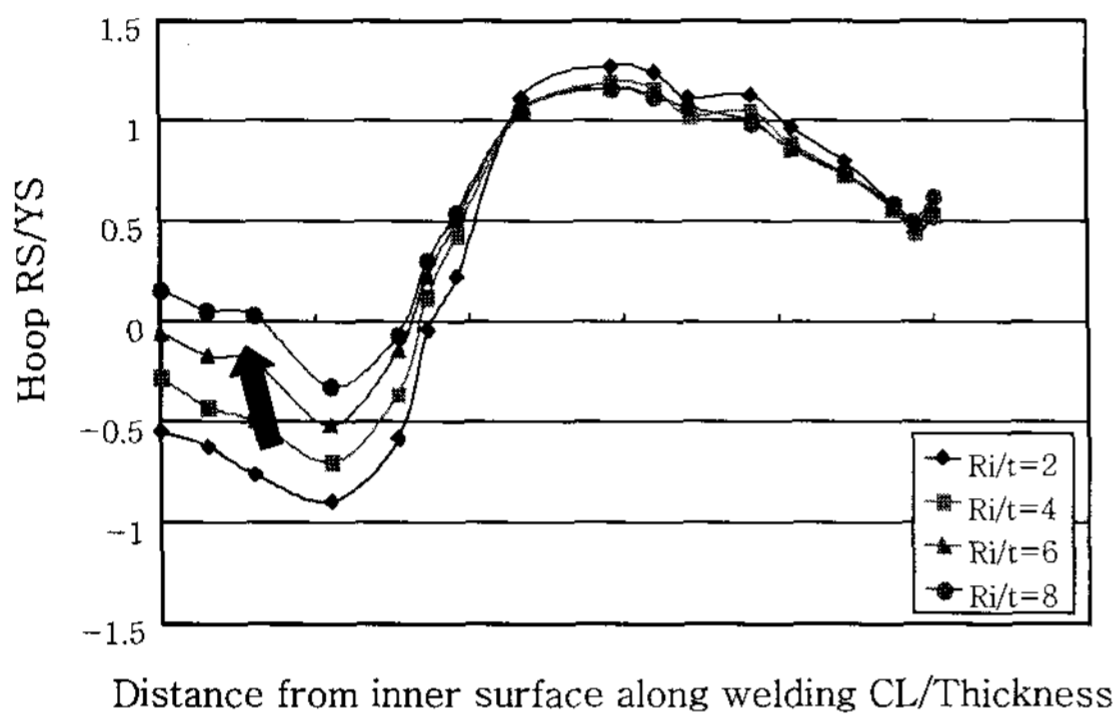
Fig. 8 Variation of residual stress distributions with thickness increase

해석을 위해 8절점 축대칭 요소가 사용된다.

Fig. 8은 일정 두께비($R_i/t=4$) 하에서 두께 증가에 따른 무차원화된 잔류응력 응력분포의 변화를 제시하고 있다. 여기서 무차원화된 잔류응력 분포는 Alloy 82/182 용접 중앙선을 따른 잔류응력 분포를 Alloy 82/182 용접금속의 항복강도로 무차원화한 것이다. 그림에 제시된 바와 같이 축방향 잔류응력 분포는 두께 증가에 따라 전체 굽힘 형태에서 국부 굽힘 형태⁷⁾로 변화된다. 내부와 외부 표면에서의 원환 잔류응력은 두께 증가시 각각 더 작아지고 커진다. Fig. 9는 고정된 두께($t=25.27\text{mm}$)에서 두께비 증가에 따른 무차원화된 잔류응력 분포의 변화를 제시하고 있다. Fig. 9에 보이는 바와 같이, 내부와 외부 표면에서의 축방향 잔류응력은 두께비 증가에 따라 증가한다. 또한, 내표면 근처의 원환 잔류응력은 두께비 증가시 상당히 증가한다.

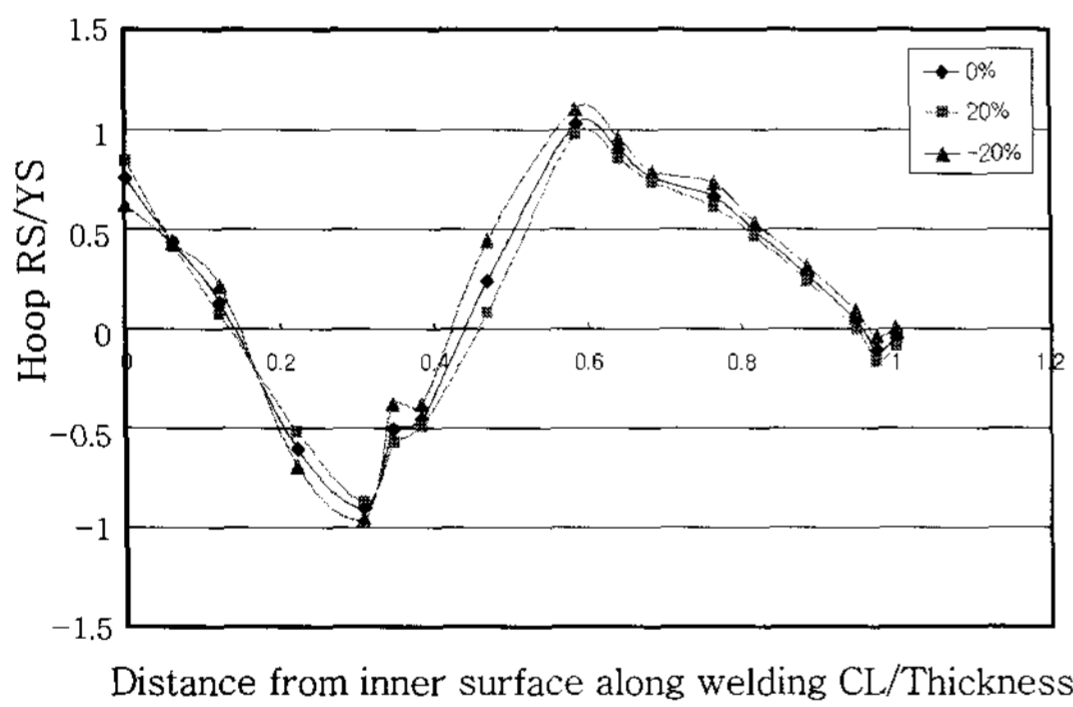


(a) axial residual stress

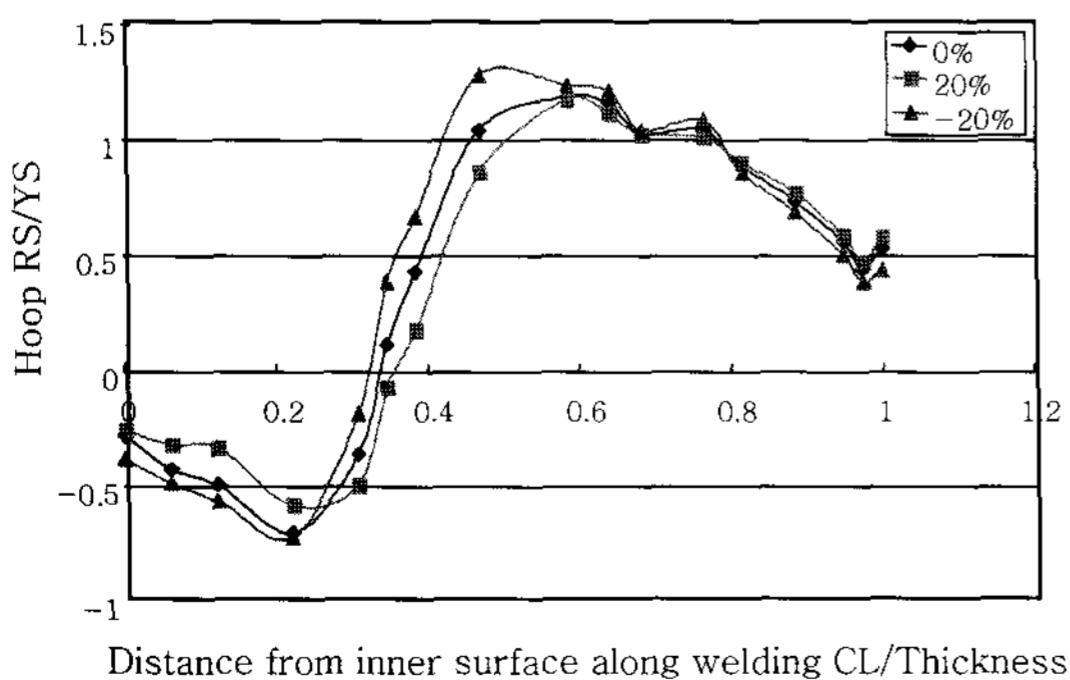


(b) hoop residual stress

Fig. 9 Variation of residual stress distributions with thickness ratio increase



(a) axial residual stress



(b) hoop residual stress

Fig. 10 Variation of residual stress distributions with weld metal yield strength

Fig. 10은 용접금속의 항복강도 증가에 따른 무차원화된 잔류응력 분포를 제시하고 있다. 그림에 제시한 바와 같이 항복강도에 따라 잔류응력 분포는 변화하나 그 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 또한, 잔류응력 분포는 용접금속의 항복강도에 선형적으로 비례하지 않음을 확인할 수 있다. 잔류응력이 용접금속의 항복강도에 비례하지 않는 이유는 저합금강과 오스테나이트 스테인리스강 모재 사이의 강도 불일치에 기인한다고 추측된다.

4.2 공식화 및 타당성 검증

Parametric study 결과를 활용하고 막, 굽힘 및 자기평형 성분으로 잔류응력을 분해하여 다음과 같이 Alloy 82/182 용접 중앙선에 따른 축방향 잔류응력 분포식을 도출하였다.

$$\sigma^r \left(\frac{x}{t} \right) = \sigma_m^r + \sigma_b^r \left\{ 1 - 2 \left(\frac{x}{t} \right) \right\} + \sum_{i=0}^6 A_i \left(\frac{x}{t} \right)^i, \quad (1)$$

$$\sigma_m^r = \left\{ -0.0003 \left(\frac{R_i}{t} \right)^2 - 0.0017 \left(\frac{R_i}{t} \right) + 0.1981 \right\} F_m \left(\frac{t}{t_0} \right) F_{YSm} \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ys0}} \right),$$

$$\left(1.5 \leq \frac{R_i}{t} \leq 10 \right), \quad (2)$$

$$\sigma_b^r = \left\{ -0.002 \left(\frac{R_i}{t} \right)^3 + 0.0372 \left(\frac{R_i}{t} \right)^2 - 0.2008 \left(\frac{R_i}{t} \right) + 0.0064 \right\} F_b \left(\frac{t}{t_0} \right) F_{Ysb},$$

$$\left(1.5 \leq \frac{R_i}{t} \leq 10 \right), \quad (3)$$

$$A_0 = \left\{ 0.0017 \left(\frac{R_i}{t} \right)^3 - 0.0367 \left(\frac{R_i}{t} \right)^2 + 0.2857 \left(\frac{R_i}{t} \right) + 0.1936 \right\} F_{A0} \left(\frac{t}{t_0} \right), \quad (4)$$

$$A_1 = \left\{ -0.0385 \left(\frac{R_i}{t} \right)^3 + 0.9458 \left(\frac{R_i}{t} \right)^2 - 7.9052 \left(\frac{R_i}{t} \right) + 23.2601 \right\} F_{A1} \left(\frac{t}{t_0} \right), \quad (5)$$

$$A_2 = \left\{ 0.3488 \left(\frac{R_i}{t} \right)^3 - 8.3658 \left(\frac{R_i}{t} \right)^2 + 67.915 \left(\frac{R_i}{t} \right) - 315.18 \right\} F_{A2} \left(\frac{t}{t_0} \right), \quad (6)$$

$$A_3 = \left\{ -1.4222 \left(\frac{R_i}{t} \right)^3 + 32.255 \left(\frac{R_i}{t} \right)^2 - 248.081 \left(\frac{R_i}{t} \right) + 1260.8 \right\} F_{A3} \left(\frac{t}{t_0} \right), \quad (7)$$

$$A_4 = \left\{ 2.7218 \left(\frac{R_i}{t} \right)^3 - 58.914 \left(\frac{R_i}{t} \right)^2 + 430.48 \left(\frac{R_i}{t} \right) - 2166.1 \right\} F_{A4} \left(\frac{t}{t_0} \right), \quad (8)$$

$$A_5 = \left\{ -2.4114 \left(\frac{R_i}{t} \right)^3 + 50.398 \left(\frac{R_i}{t} \right)^2 - 352.55 \left(\frac{R_i}{t} \right) + 1696.3 \right\} F_{A5} \left(\frac{t}{t_0} \right), \quad (9)$$

$$A_6 = \left\{ 0.8006 \left(\frac{R_i}{t} \right)^3 - 16.297 \left(\frac{R_i}{t} \right)^2 + 109.98 \left(\frac{R_i}{t} \right) - 500.1 \right\} F_{A6} \left(\frac{t}{t_0} \right), \quad (10)$$

여기서 σ_m^r 는 배관 끝단이 고정된 조건 하에서의 막응력 성분, σ_b^r 는 굽힘응력 성분, σ_{ys} 는 용접금속의 항복강도, σ_{ys0} 는 참조 항복 강도(=393.6931 MPa), t_0 는 참조 두께(=25.27 mm), F_m , F_b 와 F_{Ai} 는 t/t_0 의 특정 함수, F_{YSm} 와 F_{Ysb} 는 σ_{ys}/σ_{ys0} 의 특정 함수, x 는

내표면으로부터 두께 방향으로의 거리이다.

최종적으로, PVRC JIP⁸⁾과 API 579⁹⁾와 같은 기존 연구결과들과 비교하여 개발된 공학식의 타당성을 검증한다. Fig. 11은 기존 연구들의 적용 결과와 비교한 결과를 제시하고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이, 본 연구를 통해 개발한 공학적 평가식은 원전설비 이중금속 용접부의 용접 중앙선을 따른 축방향 잔류응력 분포를 평가하는 유효하고 이용 가능한 수단임을 알 수 있다.

5. 공학적 파괴역학 매개변수식

5.1 J-적분에 대한 강도 불일치 효과

Fig. 12는 이중금속 용접부 중앙에 원주방향 관통균열이 존재하는 이중금속 용접 배관이 1차 하중 하에 놓여 있는 경우에 대한 탄소성 유한요소 파괴역학 해석결과이다. Fig. 12에 제시된 바와 같이, J-적분에 미치는 항복강도 불일치의 효과는 over-mismatch인 경우에 대해 5% 이내이다. 강도 불일치 효과를 고찰한 탄소성 파괴역학 해석결과로부터 다음과 같은 J-적분과 COD 평가식이 도출된다.

$$\frac{J}{J_e} = \frac{COD}{COD_e} = \frac{E\epsilon_{ref}}{L_r\sigma_{YS}} + \frac{1}{2}L_r^3 \frac{\sigma_{YS}}{E\epsilon_{ref}}, \quad (11)$$

$$L_r = M/M_{OR}, \quad (12)$$

$$M_{OR} = \gamma(\theta/\pi)M_L, \quad (13)$$

$$\gamma(\theta/\pi) = 0.82 + 0.75(\theta/\pi) + 0.42(\theta/\pi)^2. \quad (14)$$

5.2 J-적분에 대한 이차응력 효과

Fig. 13과 14는 이중금속 용접부 중앙에 원주방향 관통균열이 존재하는 이중금속 용접 배관이 1차 하중 및 2차 하중(열응력, 잔류응력 등) 하에 놓여있는 경우

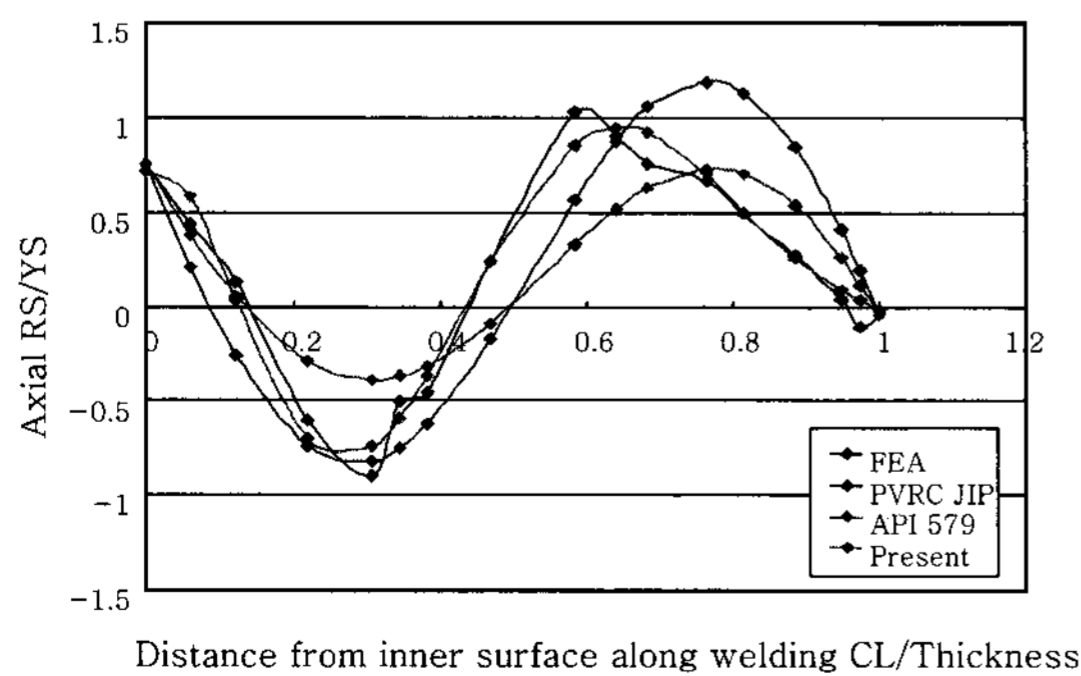
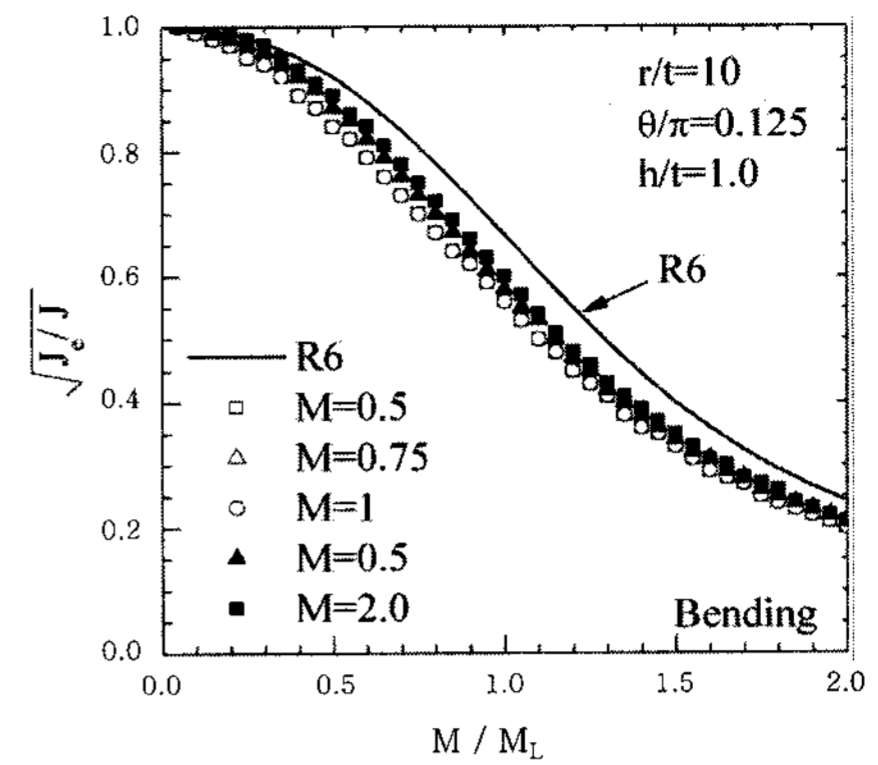
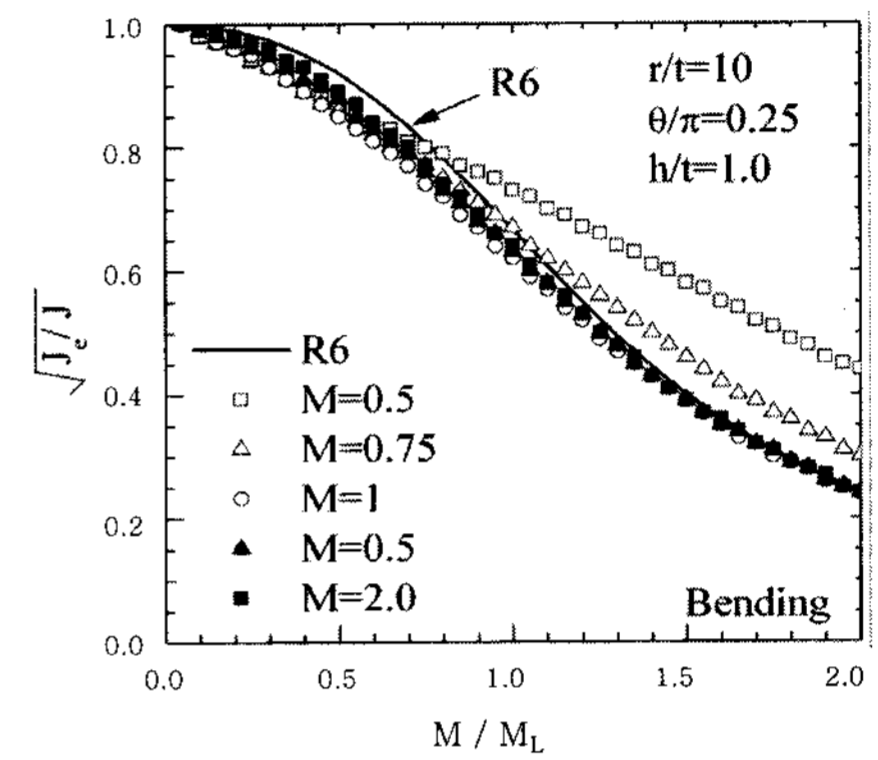


Fig. 11 Comparison with the previous results (R_i/t=4, t=25.27mm)



(a) $\theta/\pi=0.125$



(b) $\theta/\pi=0.25$

Fig. 12 J-Integral values for the dissimilar pipe with through wall crack on weld center

에 대한 탄소성 유한요소 파괴역학 해석결과이다. 여기서 L_r 은 한계하중에 대한 일차응력의 비이다. Ψ 는 한계하중에 대한 이차응력의 비이다. V 는 탄소성 파괴에 대한 이차응력의 효과를 정량화하는 변수이다. V_0 는 이차하중만이 작용하는 경우의 V 값이다. Fig. 13과 14에서 보이는 바와 같이, J-적분에 대한 이차응력의 효과는 일차응력 감소에 따라 증가한다. V/V_0 는 $L_r=0.8$ 에서 최대값이 되며 L_r 이 1.5보다 크다면 영 근처로 접근한다. 이러한 해석결과로부터 J-적분과 COD 평가식이 이차응력 효과를 고려하여 다음과 같이 도출된다.

$$\frac{J^{p+s}}{J_e^p} = \frac{COD^{p+s}}{COD_e^p} = (1+V\frac{K^s}{K^p})^2 (\frac{E\epsilon_{ref}}{L_r\sigma_{YS}} + \frac{1}{2}L_r^3 \frac{\sigma_{YS}}{E\epsilon_{ref}}), \quad (15)$$

$$\frac{V}{V_0} = 1 + 0.2L_r + (1 + 2L_r)(0.02 \frac{K_p^s}{K^p/L_r}), \quad (\text{lower } L_r),$$

$$\frac{V}{V_0} = 3.1 - 2L_r, \quad (L_r < 1.35), \quad (16)$$

$$\frac{V}{V_0} = 0.4, \quad (L_r > 1.35),$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{J^s}{J_e^s}}, \quad (17)$$

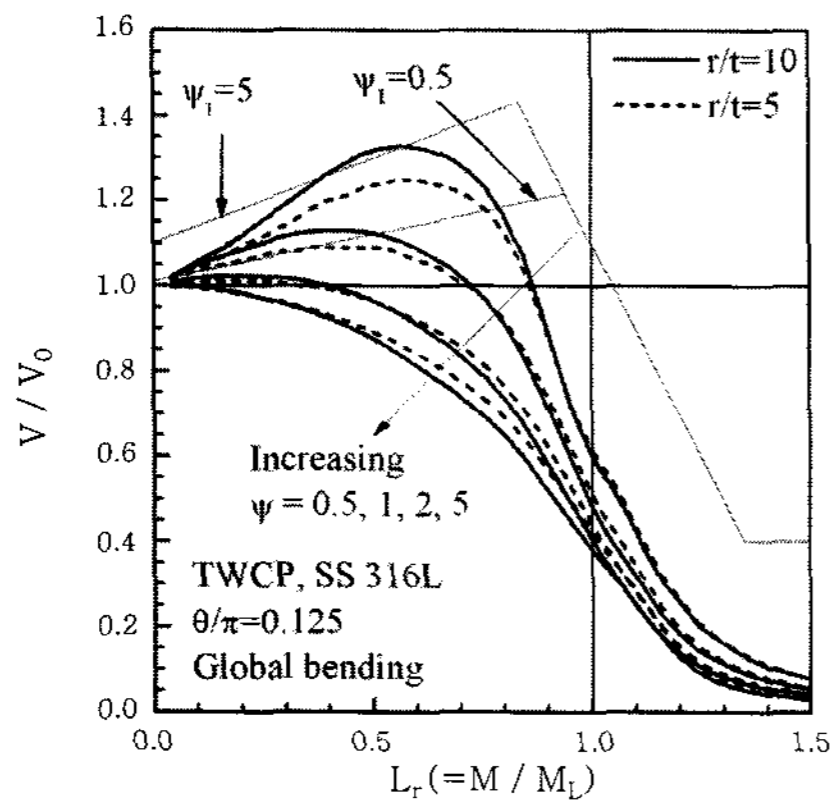


Fig. 13 Variations of V/V_0 vs. L_r for the dissimilar pipe with center crack (global bending)

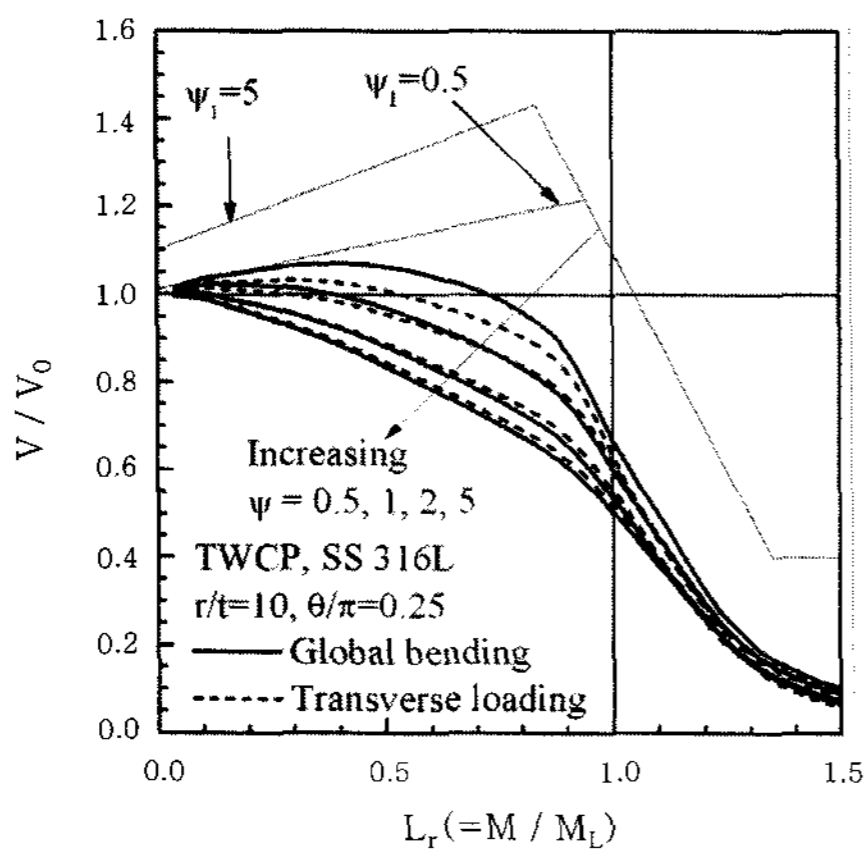


Fig. 14 Variations of V/V_0 vs. L_r for the dissimilar pipe with center crack (global bending/transverse loading)

$$\Psi = \frac{K^S}{K^P / L_r} \quad (18)$$

6. 결 론

원전설비 이종금속 용접부의 구조 건전성 평가와 관련된 연구가 인장 시험과 유한요소 해석을 통해 수행되었다. 본 연구로부터 다음과 같은 주요한 결론을 도출하였다.

1) SA508 모재는 Alloy 82/182 용접금속과 TP316 보다 높은 항복강도를 가지는 반면 Alloy 82/182의 인장강도는 SA508과 TP316 모재의 인장강도와 유사함

2) 공학적 축방향 잔류응력 분포식이 parametric study 결과를 토대로 개발되었고 원전설비 이종금속 용접부 중앙선을 따른 잔류응력 분포를 평가하는 유효하고 이용 가능한 수단임을 확인함

3) J-적분과 COD 평가식이 parametric study 결과를 토대로 강도 불일치와 이차응력 효과를 고려하여 도출됨

참 고 문 헌

1. http://www.metal.or.kr/college/m_surface/corrosion/m_corrosion7.html
2. EPRI : MRP-126, Generic Guidance for Alloy 600 Management Program, 2004
3. USNRC : NUREG-1823, U.S. Plant Experience with Alloy 600 Cracking and Boric Acid Corrosion of Light-Water Reactor Pressure Vessel Materials, 2005
4. J.H. Lee, C.H. Jang, J.S. Kim, and T.E. Jin : Spatial Variation of Mechanical Properties in Alloy 82/182 Dissimilar Metal Welds, Proceedings of ASINCO 6, 2006
5. J.S. Kim and T.E. Jin : Development of Engineering Formula for Welding Residual Stress Distributions of Dissimilar Welds on Nozzle in Nuclear Component, Proceedings of ASME PVP 2007, 2007
6. C.K. Oho, T.K. Song, Y.J. Kim, J.S. Kim, and T.E. Jin : Development of Design and Lifetime Evaluation Technologies for Dissimilar Welds on Nuclear Piping, the 2nd Year Report, 2007
7. Battelle : Critical Assessment, Validation, and Recommendations on Residual Stress Estimates for Fitness for Service Assessment, PVRC Residual Stress and Local PWHT JIP, Task 0 Report, 2001
8. Battelle : Investigation of Welding Residual Stresses and Local Post-Weld Heat Treatment, Final PVRC Residual Stress and Local PWHT JIP, Final Report, 2002
9. P. Dong and Z. Cao : Mechanics Basis of Residual Stress Profiles for New API 579 Appendix E, Proceedings of ASME PVP 2006, 2006



- 김종성(金種聖)
- 1968년생
- 순천대학교 기계우주항공공학부
- 용접부 손상평가, 구조해석, 피로파괴
- e-mail : kimjsbat@sunchon.ac.kr



- 진태은(陳泰殷)
- 1957년생
- 한전기술 재료기술연구그룹
- 수명연장, 주기적안전성평가
- email : jinte@kopec.co.kr



- 김윤재
- 1961년생
- 고려대학교 기계공학과
- 탄소성 파괴역학
- email : kimy0308@korea.ac.kr



- 장창희
- 1964년생
- KAIST 원자력 및 양자공학과
- 물성 평가, 경년열화 평가
- email : chjang@kaist.ac.kr