

가압경수로 노즐 맞대기 이종금속용접부의 용접잔류응력 예측

김지수* · 김주희* · 배홍열* · 오창영* · 김운재*† · 이경수** · 송태광***

* 고려대학교, ** 한국수력원자력(주), ***한국원자력안전기술원

Welding Residual Stress Distributions for Dissimilar Metal Nozzle Butt Welds in Pressurized Water Reactors

Ji Soo Kim*, Ju Hee Kim*, Hong Yeol Bae*, Chang Young Oh*, Yun-Jae Kim*†, Kyung soo Lee** and Tae Kwang Song***

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ., ** Korea Electric Power Research Institute, *** Korea Institute of Nuclear Safety

(Received December 13, 2010; Revised December 9, 2011; Accepted December 14, 2011)

Key Words : Dissimilar Metal Weld(DMW 이종금속용접부), Primary Water Reactors(PWR 가압경수로), Welding Residual Stress Distribution(용접 잔류응력분포), Finite Element Method(FEM 유한요소해석), Primary Water Stress Corrosion Crack(PWSCC 일차수응력부식균열)

초록: 가압경수로의 많은 관통관 중에서 니켈 기저 합금인 Inconel alloy 600 계열의 이종금속용접부는 일차수응력부식균열에 민감하며, 이를 평가하기 위하여 용접부에 작용하는 잔류응력분포를 정확히 예측하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 노즐 맞대기 이종금속용접부에 작용하는 일반적인 잔류응력분포를 예측하였다. 이를 위해 노즐 맞대기 이종금속용접부의 형상을 단순화하여 특정한 형상 변수에 따른 용접부 잔류응력분포를 확인하였으며, 이를 토대로 기존 문헌에 제시된 오스테나이트계 배관 맞대기 용접부 잔류응력 분포식을 수정하여 가압경수로 노즐 맞대기 이종금속용접부에 작용하는 일반적인 잔류응력분포 예측식을 제시하였다.

Abstract: In pressurized water nuclear reactors, dissimilar metal welds are susceptible to primary water stress corrosion cracking. To access this problem, accurate estimation of welding residual stresses is important. This paper provides general welding residual stress profiles in dissimilar metal nozzle butt welds using finite element analysis. By introducing a simplified shape for dissimilar metal nozzle butt welds, changes in the welding residual stress distribution can be seen using a geometry variable. Based on the results, a welding residual stress profile for dissimilar metal nozzle butt welds is proposed that modifies the existing welding residual stress profile for austenitic pipe butt welds.

- 기호설명 -

1. 서론

- A : 용접 비드 단면적(Area of weld bead)
- E : 단위 길이당 입열에너지(Energy per unit length)
- Q : 단위 체적당 입열량(Energy rate per unit volume)
- r_i : 노즐 내경(Nozzle inter radius)
- t_{SE} : 노즐 두께(Nozzle thickness)
- w_{SE} : 안전단 길이(Width of the safe-end)
- η : 용접 효율(welding efficiency)

최근 유럽과 미국 등 세계의 여러 가압경수로(Pressurized Water Reactor)에서는 니켈 기조 합금인 인코넬 alloy 600 계열의 노즐 맞대기 이종금속용접부에서 발생한 균열로 인해 냉각수가 누출되는 사고가 발생하고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이 균열들의 특징을 살펴보면 운전기간이 20년 이상 된 노후화된 가압경수로의 이종금속용접부(Dissimilar Metal Weld)에서 발생한다는 공통점이 있다. 국내에서도 1980년대부터 가동중인 가압경수로들이 노후화 됨에 따라 일차수응력부식균열 평가가 중요 안전 현안으로 부각되고 있다.

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

일차수응력부식균열을 평가하는데 있어 용접부에 작용하는 용접잔류응력(Weld Residual Stress)을 정확히 예측하는 것이 중요하다.⁽¹⁻⁴⁾ 이와 유사한 예로 1980년대 비등경수로(Boiling Water Reactor)에 발생하는 입계 응력부식균열(Inter Granular Stress Corrosion Cracking)을 평가하기 위해서 여러 연구기관에서는 실험과 유한요소해석을 통해 오스테나이트계 배관 맞대기 용접부(Butt Weld)의 잔류응력 분포에 대한 연구를 수행하였다. 이에 대한 결과물로 여러 상용코드에서는 배관 맞대기 용접부에 작용하는 잔류응력분포에 대한 식을 제시하고 있다.⁽⁶⁻¹²⁾

위와 같이 선행된 배관 맞대기 용접부의 잔류응력에 대한 연구결과는 유용하나 이를 가압경수로의 노즐 맞대기 이중금속용접부에 그대로 적용하기에는 형상적 차이로 인한 한계가 있다.

이러한 이유로 기존 배관 맞대기 용접부의 결과를 이중금속용접부에 적용하기에는 한계가 있다. 또한 노즐 맞대기 이중금속용접부의 형상의 복잡성 때문에 기존 이중금속용접부의 잔류응력의 연구는 특정 형상에 한정되어 수행되어 왔다.^(13,14)

따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 사용하여 가압경수로 노즐 맞대기 이중금속용접부의 작용하는 일반적인 잔류응력 분포를 제시하고자 한다. 이를 위해 몇 가지 형상변수를 도입하여 노즐 맞대기 이중금속용접부의 단순화 형상을 제시하고 형상변수의 변화에 따른 이중금속용접부의 잔류응력분포의 변화를 관찰하였다.

2. 형상 및 재료

2.1 형상

배관 맞대기 용접은 Fig. 1(a)와 같이 오스테나이트계 배관들과 이를 이어주는 동종금속용접(Similar Metal Weld)으로 구성되어 있어 단일 재료로 이루어져 있다.

반면 노즐 맞대기 용접부는 Fig. 1(b)와 같이 노즐과 안전단(Safe End)을 이어주는 이중금속용접부와 안전단과 배관을 이어주는 동종금속용접부로 구성되어 있으며 각각의 구성부에는 다른 특성의 재료가 사용된다. 최근 연구 결과, 동종금속용접이 이중금속용접부의 잔류응력분포에 영향을 미치며 안전단의 길이 변화에 따라서 이중금속용접부 내면의 잔류응력이 변하는 것으로 알려져 있다.⁽¹³⁻¹⁶⁾ 또한 동일한 외경과 내경을 가지는 배관 맞대기 용접부와 달리 노즐 맞대기 용접부는 노즐부가 경

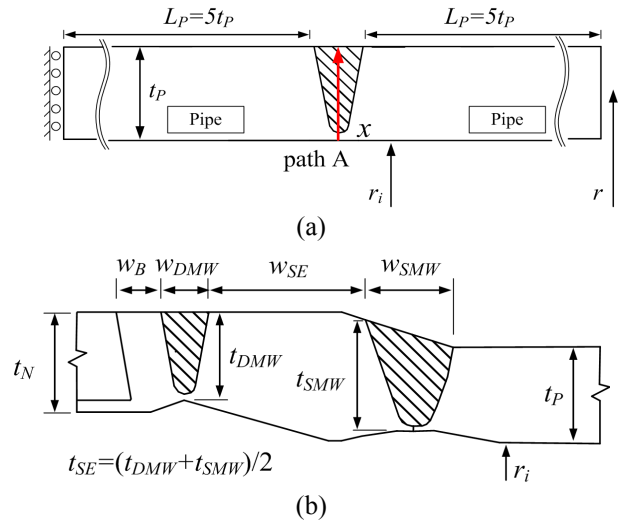


Fig. 1 Schematic diagram of (a) an austenitic pipe butt weld (b) detailed shape of a surge nozzle in pressurized water reactors

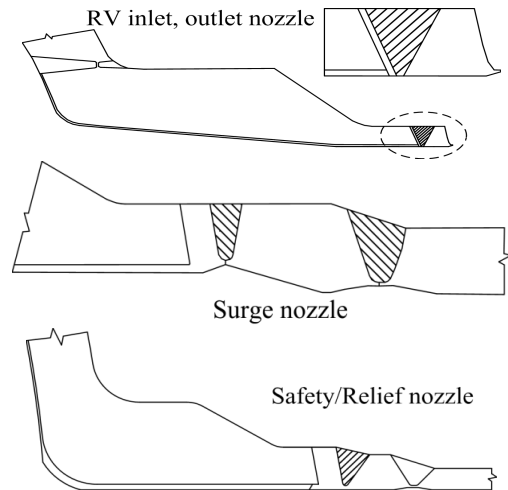


Fig. 2 Schematic diagrams of nozzles in pressurized water reactors

사져 있고 이용목적, 사용위치, 제작사에 따라 다양한 형태를 갖는다. 마지막으로 이중금속용접부의 용접잔류응력분포는 재료물성의 불일치에 대한 영향을 받는다.^(13,14,17)

Fig. 2는 가압경수로에 있는 여러 노즐 맞대기 이중금속용접부의 축 대칭 단면도이다. 노즐 맞대기 이중금속용접부는 그 형상과 크기가 다양하기 때문에 이를 수치적으로 정량화를 하기 위하여 형상변수를 내경(r_i), 안전단의 두께(t_{SE}), 안전단의 길이(w_{SE})으로 지정하고 Table 1에 정리하였다.

본 연구에서는 가압경수로의 여러 노즐 맞대기 이중금속용접부에 일반적으로 적용할 수 있는 잔류응력 분포도를 제시하기 위하여 Fig. 1(b)의 복잡

Table 1 Dimensions for various nozzles

nozzle type	t_{SE}	r_i/t_{SE}	w_{SE}/t_{SE}
Inlet / Outlet	82.6	4.2	0.4
Safety / injection	19.6	2.2	7.0
Safety / Relief	29.7	2.2	0.6
Spray	20.1	2.3	1.7
Surge	40.2	3.5	1.5
Surge	33.3	3.7	1.1

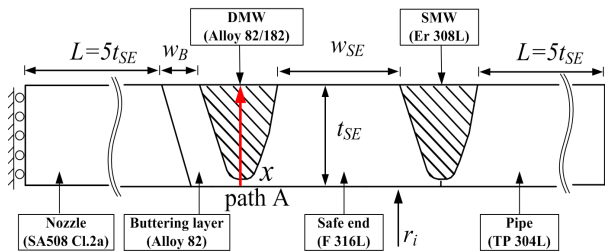


Fig. 3 Schematic diagram of a nozzle component simplified geometry and materials

한 노즐 용접부 형상을 Fig. 3 과 같이 배관 용접부 형상으로 단순화하였다. 이 때, 다양한 종류의 노즐을 고려하기 위해 안전단의 두께(t_{SE})는 20, 40, 80mm 를 고려하였으며, 반경 비(r_i/t_{SE})는 1, 5 를 고려하였다. 안전단 길이에 대한 영향을 살펴보기 위해 $w_{SE}/t_{SE}=0.5, 1.0, 2.0$ 및 4.0 을 고려하였다.

2.2 재료

가압경수로 노즐 맞대기 용접부는 몇 가지 재료로 구성된다. 노즐부는 저합금강(low alloy steel)인 SA508 재료로 구성되며, 버터링 용접부(buttering weld)와 이중금속용접부는 니켈 기저합금(Ni-based alloy)인 Alloy 82/182 용접재로 구성되어있다. 또한 배관과 안전단 그리고 동중금속용접부는 오스테나이트(austenitic) stainless steels 계열인 TP304 또는 F316 재료로 구성되어 있다. 제작사에 따라 각 부위에 사용된 재료는 미소하게 다르지만 같은 계열의 재료가 사용된다. 따라서 본 연구에서는 각 부위에 사용되는 재료를 Fig. 3 과 같이 지정하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석절차

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 를 사용하여 용접잔류응력 해석을 수행

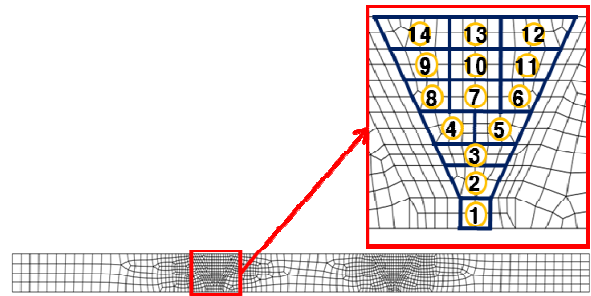


Fig. 4 A typical FE mesh for the simplified nozzle with $t_{SE}=20$ mm. The number in the circle indicates the order of deposit in sequential beads

하였다.⁽⁵⁾ 용접잔류응력 해석은 열 해석과 응력 해석으로 나누어 수행하였다. 먼저 열 해석을 통해 각 절점에서의 시간에 따른 온도이력을 구하고, 여기서 얻어진 과도 온도 데이터를 바탕으로 응력 해석을 수행한다. 이때 각 절점에서의 얻어진 온도 구배에 의해 열응력이 발생하게 된다. 각 해석에 사용된 변수와 세부사항은 아래와 같다.

3.2 열 해석

Fig. 4 는 용접잔류응력 해석에서 사용된 유한요소모델이다. 2D 축 대칭 모델을 사용하였으며, 요소는 1 차 열 전달 요소인 DCAX4 를 사용하였다. 실제 용접과정을 모사하기 위해 ABAQUS 에서 제공하는 “MODEL CHANGE” 옵션을 사용하여 용접 비드에 해당하는 요소들을 비활성화한 수 순차적으로 비드를 생성시켰다. 용접비드(weld bead)는 지그재그(zigzag)로 생성시켜 생성순서에 대한 영향을 최소화하였다.

용접에 따른 입열량은 체적 열 유속(body flux)을 통해 구현하였다. 최적 열유속 $Q(W/m^3)$ 은 다음 식을 통해 산출할 수 있다.

$$Q = \eta \frac{E}{A\Delta t} \tag{1}$$

여기서 η 는 용접효율로서 SMAW(shielding metal arc welding) 용접인 경우 $\eta=0.7$ 값을 가진다.⁽¹¹⁻¹²⁾ 또한 단위 길이당 입열 에너지, E 는 용접절차시방서(welding procedure specification)를 참조하였으며, 해석 사용된 값은 $E=1.714J/mm$ 이다. 참고 문헌에 따르면 용접 비드 단면적, A 와 입열 에너지, E 값은 비례하며, 본 해석에서 사용된 용접 비드 단면적은 $A=18mm^2$ 이다.⁽⁹⁾

냉각조건은 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation) 열 전달이 고려되었으며, 본 연구에 사용된 열 전달 계수(coefficient of heat convection)

$h(W/m^2 \cdot ^\circ C)$ 값은 다음과 같이 고려되었다.⁽⁶⁾

$$h = \begin{cases} 0.0668 \cdot T & \text{for } 0 \leq T \leq 500^\circ C \\ 0.231 \cdot T - 82.1 & \text{for } T \geq 500^\circ C \end{cases} \quad (2)$$

냉각 시간은 용접절차서방서(WPS)에서 제시하는 최대 층간 온도(Maximum inter-pass temperature)를 넘지 않도록 설정하였다.

3.3 응력 해석

응력 해석은 열 해석을 통해 구해진 각 절점의 온도이력을 입력 값으로 사용하여 열 응력을 계산하였다. 응력 해석 시 재료경화모델은 등방성 경화 모델(isotropic hardening model)을 사용하였으며, 상 변태를 고려하지 않음으로써 인장잔류응력을 보수적으로 구하였다.⁽¹⁸⁾

경계조건은 Fig. 3 과 같이 노즐부에만 롤러 구속조건을 부여하였다. 용접 공정 방식에 따라 노즐 및 안전단의 경계조건이 변하며 이에 따라 잔류응력 분포 역시 근소하게 변하게 된다. 본 연구에서는 이종/동종금속용접 시 노즐부의 롤러 구속조건 이외에 안전단과 배관을 자유롭게 풀어주는 것이 실제 용접조건과 가장 유사하다고 보고 위와 같이 구속조건을 부여하였다.

4. 유한요소해석 결과 검증

본 연구에서 수행한 유한요소해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 두 단계의 검증절차를 통해 신뢰성을 확인하였다. 먼저 기존 문헌에서 제시하고 있는 유한요소 해석 결과와 이를 단순화한 모델의 유한요소해석 결과를 비교하였으며, 두 번째로 이종금속용접부를 포함한 서지 노즐(surge nozzle)에 대한 실제 형상과 단순화 형상의 유한요소해석 결과를 비교하였다. 이는 유한요소해석의 타당성과 함께 모델 단순화의 유용성을 동시에 검증하기 위함이다.

4.1 유한요소해석 검증

유한요소해석 결과 비교를 위해 Fig. 5(a)와 같이 문헌⁽¹⁾의 오스테나이트계 배관 맞대기 용접부에 대한 형상을 Fig. 5(b)와 같이 단순화 하였다. 노즐 내경 $r_f=127mm$, 파이프 두께 $t_p=42mm$ 인 맞대기 용접부에서 노즐부의 형상만 직선으로 단순화 하였다.

먼저 맞대기 용접부의 열 해석에 사용된 입열 변수의 타당성을 확인하기 위해 용접에 의한 열

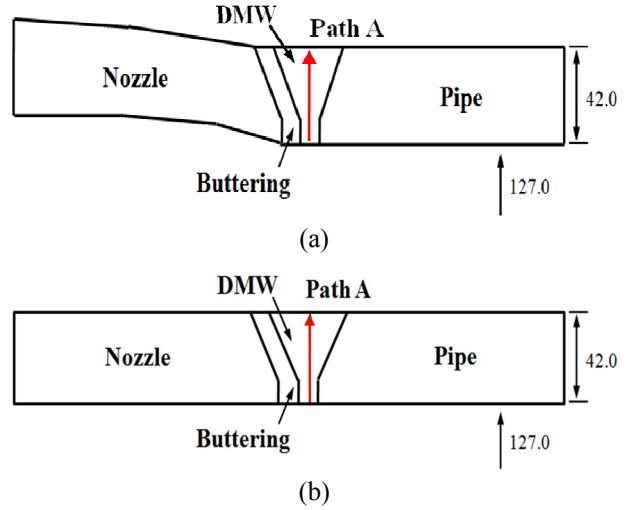


Fig. 5 The geometry and materials of (a) an austenitic pipe butt weld in Ref.[1] and (b) simplified austenitic pipe butt weld(units : mm)

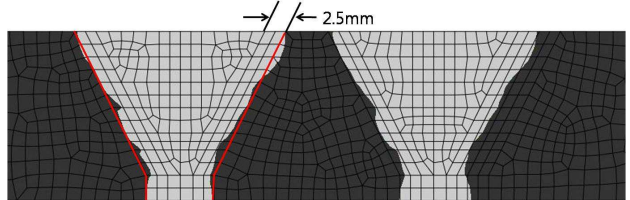
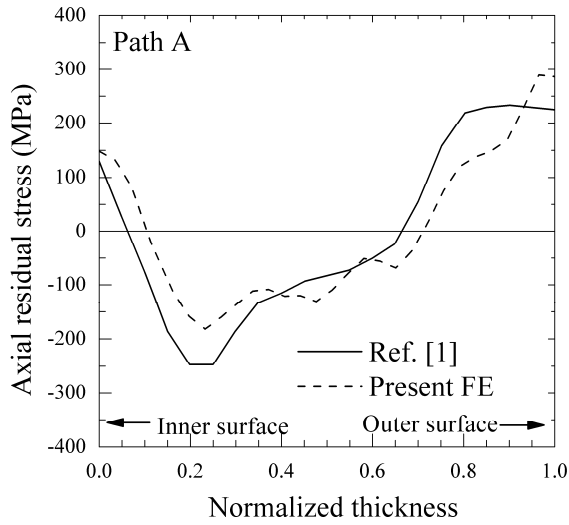


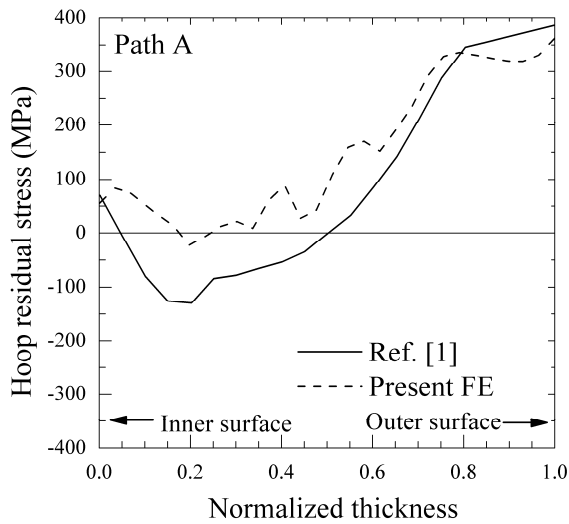
Fig. 6 Temperature contours showing HAZ. In contours, brighter regions indicate the region with temperature above 900°C

영향부(heat affected zone, HAZ) 크기를 확인하였다. 참고문헌^(6,7)에 따르면 이종금속용접부 주위의 열 영향부 크기는 일반적으로 용접부에서 2~3mm 만큼 떨어져 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 해석 대상인 맞대기 용접부의 경우 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 열 영향부를 평균 2.5mm 부근에서 확인할 수 있으므로 적절한 입열이 모사되었음을 알 수 있다.

열 해석을 통해 얻어진 온도해석 결과를 바탕으로 동일한 형상에 대해 응력 해석을 수행하였다. 이를 통해 얻어진 용접부 잔류응력 결과를 기존 연구결과와 비교를 통해 해석결과의 타당성을 확인하였다. 문헌에서 제시하고 있는 이종금속용접부 중심에서 두께방향으로(Fig. 5(a)) 측정된 잔류응력과 단순화 형상 Fig. 5(b)에서 구한 잔류응력을 비교하였다. Fig. 7은 pate A 에서 추출한 축 방향 응력과 원주 방향 응력 분포를 비교한 결과 근소한 차이는 있으나 경향이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행된 유한요소해석은 맞대기 용접을 적절히 모사함을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 7 Comparisons of residual stresses with Ref.: (a) axial residual stress and (b) hoop residual stress

4.2 이상화 모델 검증

본 연구에서는 Fig. 2 와 같이 형상과 크기가 다양한 노즐 맞대기 이중금속용접부에 대한 일반화된 잔류응력분포 경향을 분석하기 위해 이상화 모델 형상을 Fig. 3 과 같이 제시하였다. 이상화한 모델 형상이 실제 형상의 용접잔류응력을 잘 예측하고 있는지 확인하기 위해 Fig. 8 과 같이 실제 서지 노즐 용접부에서의 용접잔류응력을 비교해 보았다.

앞 절과 마찬가지로 이중금속용접부 내면에서 외면까지(path A)의 축 방향/원주 방향 잔류응력분포를 비교하였으며 그 결과는 Fig. 9 에 나타내었다. 결과를 살펴보면 이중금속용접부 내면에서 근소한 차이는 있지만 보수적이며 전체적인 경향이

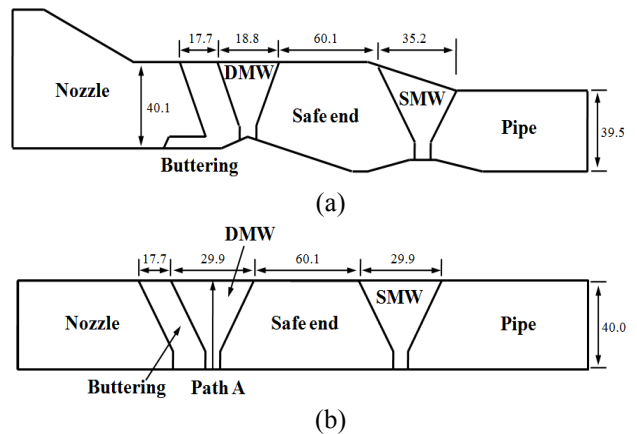
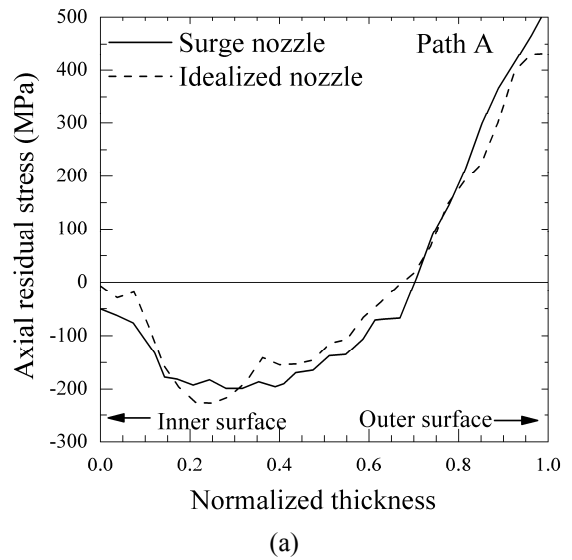
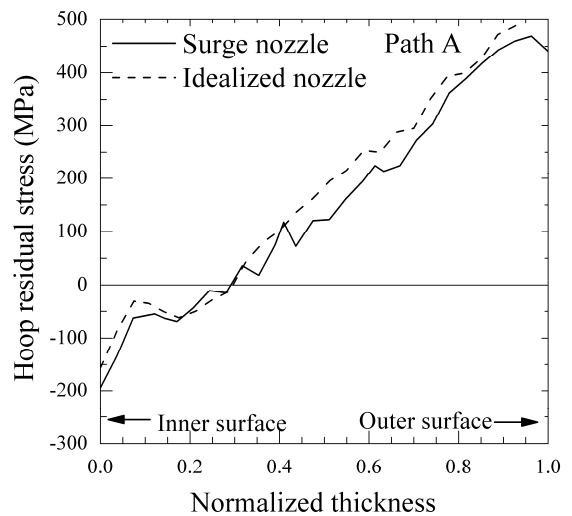


Fig. 8 (a) Geometry of a surge nozzle, and (b) simplified geometry, units (mm)



(a)



(b)

Fig. 9 Comparisons of residual stresses for real nozzle with those for simplified geometry: (a) axial residual stress and (b) hoop residual stress

연구에서 제시한 이상화 형상에 대한 용접잔류응력은 실제 가압경수로 이중금속용접부에 적용할 수 있음을 확인하였다.

5. 유한요소해석 결과

5.1 설계 및 평가 코드 기준 비교

ASME Sec. XI, API 579, R6 에서는 austenitic stainless steel 계열의 배관 맞대기 용접부(pipe butt weld)에 작용하는 용접잔류응력 분포 식을 제시하고 있다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 위 세 개의 상용 코드들은 두께 방향에 대하여 몇 가지 형상변수에 따른 축 방향 잔류응력(axial residual stress)과 원주 방향 잔류응력(hoop residual stress)의 분포 식을 제시하였다. 세 가지 상용코드 모두 배관 두께(t_p)를 변수로 삼고 있으며, R6 level3 에서는 입열양(E)을 변수로 지정하여 식을 제시하였다. 각 상용 코드들과 유한요소해석을 통해 얻은 배관 맞대기 용접부(Fig. 1)의 용접부 잔류응력분포를 Fig. 10 에 나타내었다. 그래프의 y 축을 살펴보면 축 방향 잔류응력은 모재(parent material)의 1.0% 항복강도(proof strength), $\sigma_{1.0p}$ 로 정규화(normalizing)를 하였고, 원주 방향 잔류응력은 용접재(weld material)의 1.0% 항복강도, $\sigma_{1.0w}$ 로 정규화를 하였다. 이 때 모재의 항복강도는 $\sigma_{1.0p}=328.9\text{MPa}$ 이며, 용접재의 항복강도는 $\sigma_{1.0w}=460.5\text{MPa}$ 이다. 축 방향 잔류응력의 경우 용접재보다 모재의 항복응력이 작기 때문에 $\sigma_{1.0p}$ 로 정규화를 하였으며, 원주 방향 잔류응력의 경우 용접부 내에서의 항복응력을 고려해야 하므로 $\sigma_{1.0w}$ 를 통해 정규화를 하였다.

Fig. 10 을 살펴보면 ASME Sec XI, API 579, R6 level2 는 해석결과와 비교해 볼 때 높은 보수성을 띄고 있는 것을 알 수 있다. 반면 R6 level3 는 유한요소해석 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이를 근거로 이중 및 동종금속용접부가 존재하는 가압경수로 노즐 맞대기 용접부에서의 유한요소해석결과를 R6 level3 식과 비교하여 5.2 절에서 논하고자 한다. 또한 R6 level3 식을 수정하여 가압경수로 노즐 맞대기 이중금속용접부에 적용이 가능한 일반적인 용접부 잔류응력분포 식을 5.3 절에 제시하였다.

5.2 이중금속용접 후 잔류응력분포

Fig. 11 과 Fig. 12 는 노즐용접부의 단순화 형상(Fig. 3)에서 이중금속용접이 끝난 후, 즉 안전 단까지 용접이 됐을 때 이중금속용접부의 path A 에서 잔류응력 분포를 나타낸 그래프이다. 왼쪽은 축

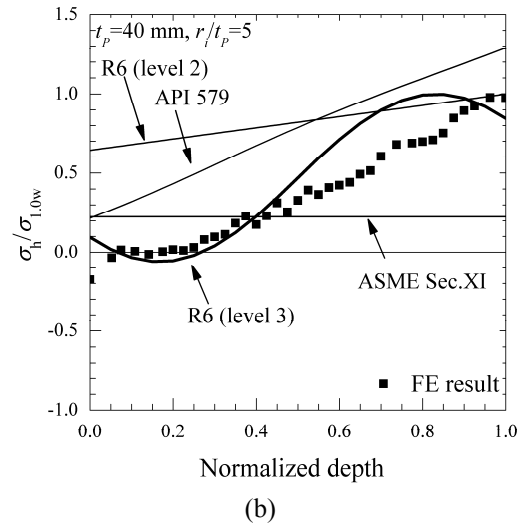
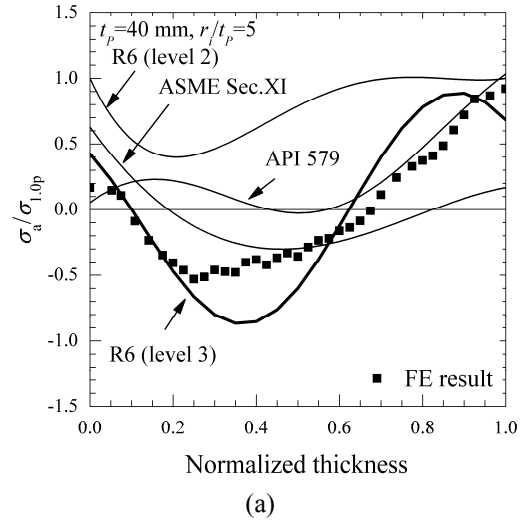


Fig. 10 Comparison of FE results with existing residual stress profiles for austenitic pipe butt weld with for $t_p=40\text{ mm}$, $r_i/t_p=5$: (a) axial residual stress and (b) hoop residual stress

방향 잔류응력 분포이며, 오른쪽은 원주 방향 잔류응력 분포를 나타낸다. 각각 $r_i/t_{SE}=5$, $t_{SE}=20, 40, 80\text{mm}$ 인 형상에 대한 결과이며, 그래프 내에서 심볼은 $w_{SE}/t_{SE}=0.4\sim 4.0$ 범위에 대한 결과를 나타낸다. 마찬가지로 Fig. 12 는 $r_i/t_{SE}=1$ 인 경우의 축 방향 및 원주 방향 잔류응력 결과를 나타낸다. 그래프에서 점선은 R6 level 3 에서 제시하는 분포식에 의한 잔류응력을 나타낸다.

일반적으로 축 방향 잔류응력의 경우 사인(sine) 곡선의 형태를 하고 있으며, 용접부 내면에서는 약한 인장 또는 압축잔류응력이 작용하며, 두께 중심에서는 압축잔류응력이 최대로 작용하다가 외면에서는 강한 인장 잔류응력이 작용하고 있다. 원주방향의 잔류응력의 경우 내면에서 약한 압축

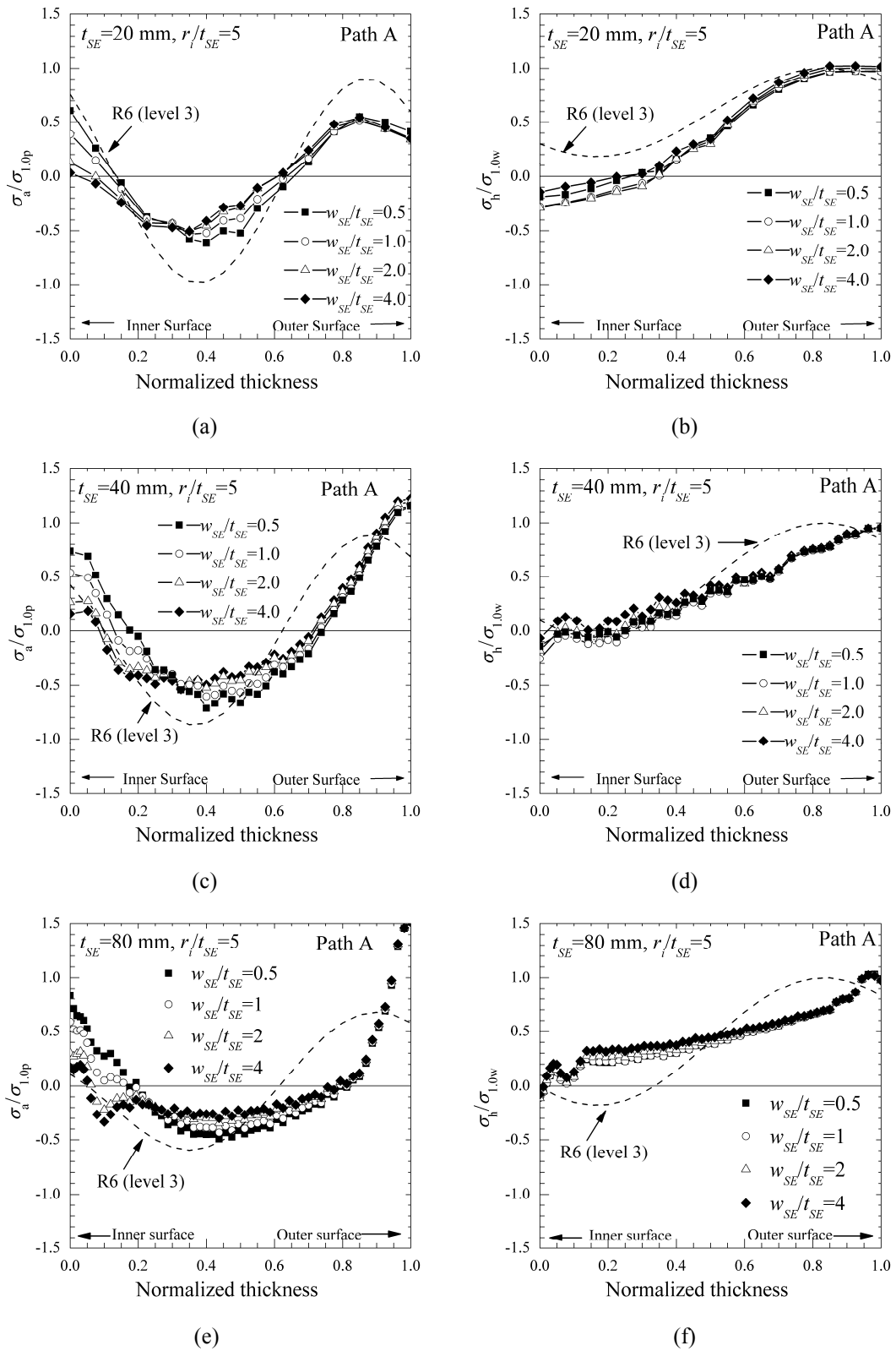


Fig. 11 Residual stresses distribution for the nozzle with $r_i/t_{SE}=5$ after dissimilar metal welding: (a)-(b) for $t_{SE}=20$ mm, (c)-(d) for $t_{SE}=40$ mm and (e)-(f) for $t_{SE}=80$ mm

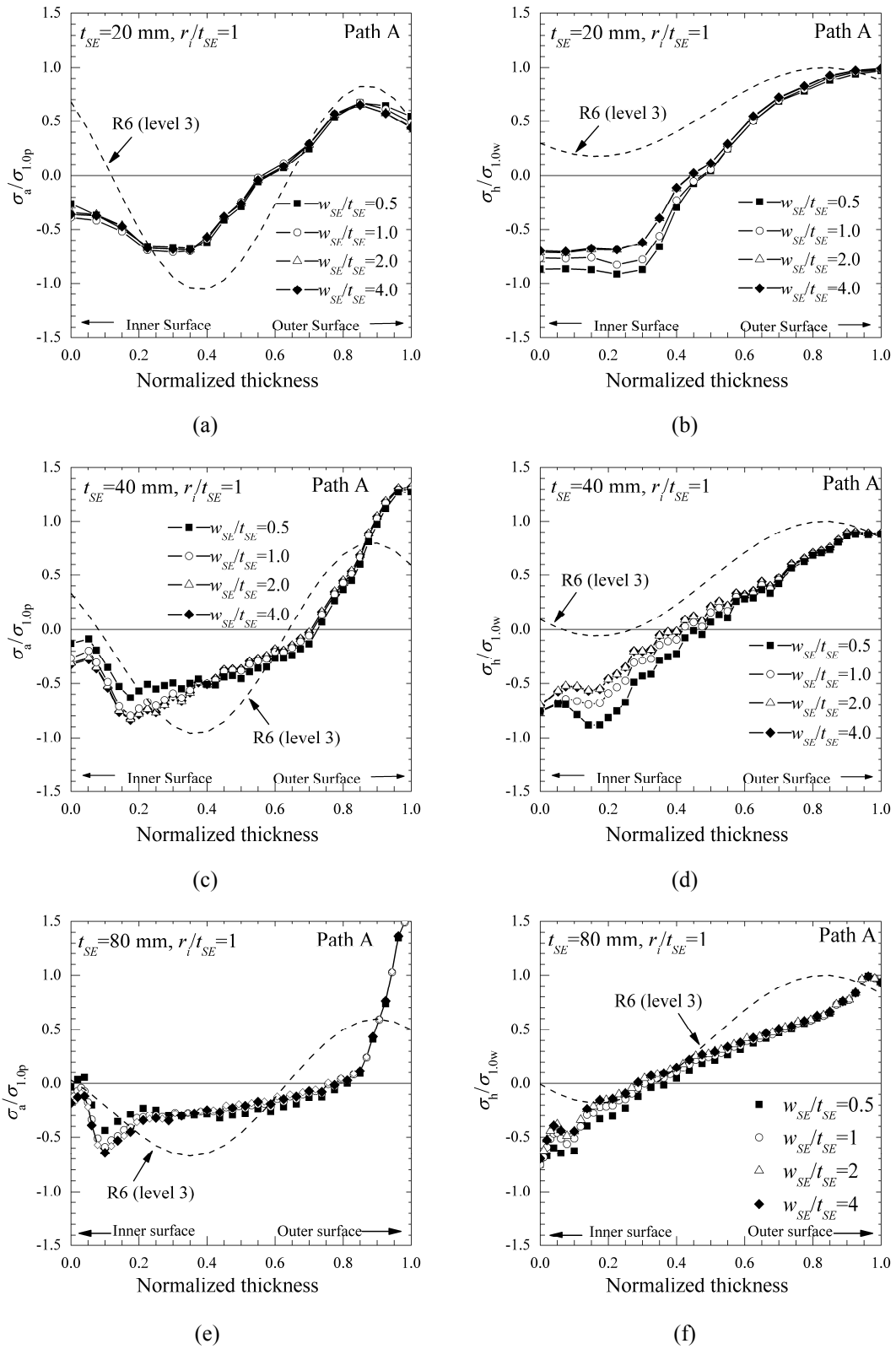


Fig. 12 Residual stresses distribution for the nozzle with $r_i/t_{SE}=1$ after dissimilar metal welding: (a)-(b) for $t_{SE}=20$ mm, (c)-(d) for $t_{SE}=40$ mm and (e)-(f) for $t_{SE}=80$ mm

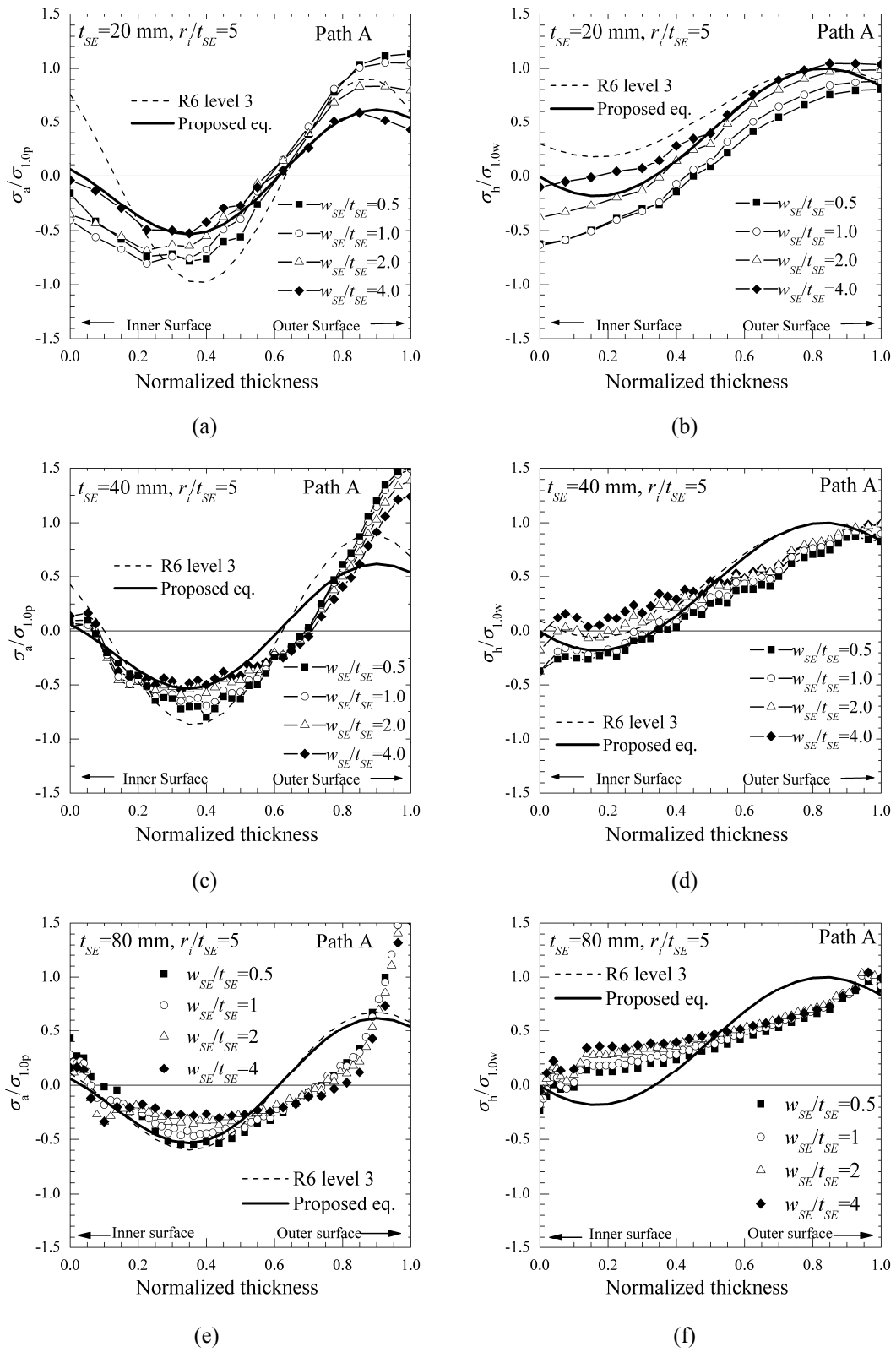


Fig. 13 Residual stresses distribution for the nozzle with $r_i/t_{SE}=5$ after similar metal welding: (a)-(b) for $t_{SE}=20\text{ mm}$, (c)-(d) for $t_{SE}=40\text{ mm}$ and (e)-(f) for $t_{SE}=80\text{ mm}$

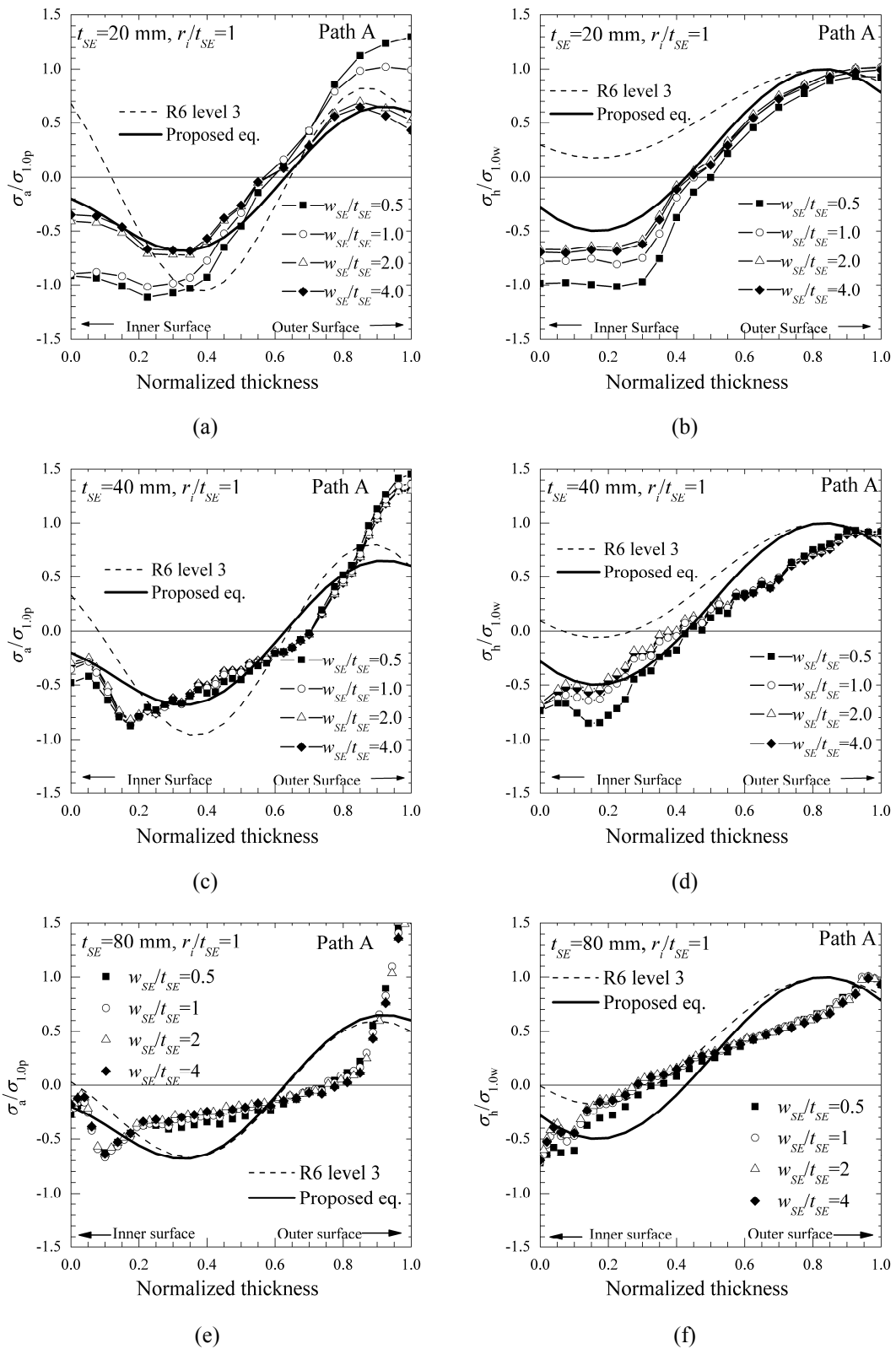


Fig. 14 Residual stresses distribution for the nozzle with $r_i/t_{SE}=1$ after similar metal welding: (a)-(b) for $t_{SE}=20$ mm, (c)-(d) for $t_{SE}=40$ mm and (e)-(f) for $t_{SE}=80$ mm

또는 인장 잔류응력이 작용하고 점차 증가하여 외면에서는 인장 잔류응력이 작용한다.

안전단의 두께(t_{SE})에 대한 영향을 살펴보면 $t_{SE}=20, 40, 80\text{mm}$ 에 따른 축 방향 및 원주 방향 잔류응력 변화가 미미한 것을 알 수 있다. 단지 축 방향 잔류응력의 경우 노즐 외면에서 인장응력이 증가하는 경향을 보인다. R6 level 3는 두께에 대한 영향을 고려하고 있지만 현재 연구 범위인 $20\text{mm} \leq t_{SE} \leq 80\text{mm}$ 에서는 두께 영향은 작다.

또한, 안전단의 길이(w_{SE})가 잔류응력에 미치는 영향은 두께에 비해 매우 작음을 알 수 있다. 하지만 안전단 길이가 짧을수록 노즐 내면에서 축 방향 응력이 인장방향으로 증가함을 알 수 있다. 이에 반해 원주방향 잔류응력은 안전단의 길이와 무관하게 거의 일정함을 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 11 과 Fig. 12 의 결과에서 반경비(r_i/t_{SE})에 따른 잔류응력 변화를 살펴보면 두께에 관계없이 반경비가 작아질수록($r_i/t_{SE}=5 \rightarrow 1$) 내면에서의 축 방향 및 원주 방향 잔류응력은 모두 감소하였다.

5.3 동종금속용접 후 잔류응력분포

Fig. 13 과 Fig. 14 는 동종금속용접이 끝난 후 즉 모든 용접이 끝난 후의 이중금속용접부의 잔류응력분포를 나타낸 그래프이다. 제시한 결과는 앞절과 동일하며 R6 level 3 에 대한 개선식을 함께 나타내었다.

먼저 Fig. 13 은 $r_i/t_{SE}=5$ 의 경우, 이중금속용접 후의 잔류응력 결과를 나타낸다. Fig. 11 의 결과와 비교해 볼 때 축 방향 잔류응력은 내면에서 감소하였으며, 원주 방향 응력은 큰 차이 없이 거의 비슷하지만 전체적으로 감소하는 경향을 확인하였다. 두께 및 안전단 길이에 대한 잔류응력 변화도 크지 않음을 확인하였다. Fig. 14 의 $r_i/t_{SE}=1$ 역시 Fig. 12 와 비교하여 볼 때 동일한 경향을 보이지만 $t_{SE}=20$ 을 제외하고 $r_i/t_{SE}=5$ 에 비하여 변화 폭이 작음을 확인하였다.

여기서 기존 R6 level 3 에서 제시하는 잔류응력 분포식은 동종금속용접의 영향을 고려하지 않았으며, r_i/t_{SE} 변화를 반영하지 않아 다소 차이가 발생함을 알 수 있다. 또한 $20\text{mm} \leq t_{SE} \leq 80\text{mm}$ 에서는 두께의 변화에 따른 잔류응력의 변화가 적기 때문에 기존 R6 level3 식을 개선하여 가압경수로 이중금속용접부에 일반적으로 적용할 수 있는 식을 제시하였다. 제시하는 식은 유한요소해석결과에 보수적으로 적용할 수 있게 개선하였으며 축 방향

잔류응력 식은 다음과 같다.

$$\sigma_a = \sigma_{1.0p} \left\{ \begin{array}{l} \phi_M \left(1 - 2 \frac{x}{t_{SE}} \right) + \theta_M \sin \left[\frac{\pi}{4} \left(1 - 8 \frac{x}{t_{SE}} \right) \right] \\ - \frac{t_{SE}}{r_i} \left[\frac{\sqrt{2}}{4\pi} \theta_N - \frac{\phi_N}{6} \right] \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$\phi_M = -0.2 \left(1 + \frac{t_{SE}}{r_i} \right)$$

$$\theta_M = 0.45$$

여기서, ϕ_M 은 굽힘에 대한 항이며, r_i/t_{SE} 가 증가함에 따라 증가하는 량으로 반경비에 대한 영향을 나타내었다. θ_M 은 사인함수의 진폭에 대한 항이며 상수로 고정하였다. Fig. 13 과 Fig. 14 를 살펴보면 개선된 축 방향 잔류응력식이 내면과 중간 두께에서의 잔류응력 분포를 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

개선된 원주 방향 잔류응력 식은 다음과 같다.

$$\sigma_h = \sigma_{1.0w} \left\{ \begin{array}{l} (0.65 - \delta_M) \sin \left[\frac{3\pi}{2} \left(\frac{7}{6} - \frac{x}{t_{SE}} \right) \right] \\ + (0.35 + \delta_M) \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$\delta_M = 0.1 \left(1 - 2 \frac{t_{SE}}{r_i} \right)$$

여기서 δ_M 굽힘에 대한 항이며, r_i/t_{SE} 에 대한 영향을 고려하였다. Fig. 13 과 Fig. 14 를 살펴보면 개선된 식이 기존 식에 비해 잔류응력 분포를 잘 예측하고 있으며, 특히 $r_i/t_{SE}=1$ 에서의 원주방향 잔류응력 분포를 더욱 잘 예측하고 있다.

6. 결론

본 논문에서는 유한요소해석을 통하여 일반적으로 적용할 수 있는 가압경수로 이중금속용접부의 용접부 잔류응력 분포식을 제시하였다. 복잡한 노즐 용접부 형상을 단순화하여 두께, 반경, 안전단의 길이에 변화에 따른 잔류응력분포 변화를 살펴 보았으며 기존 배관 맞대기 용접부 잔류응력 예측식과의 결과를 비교하고 개선된 식을 제시하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 이중금속용접부의 축 방향 잔류응력분포는 사인 곡선의 형태이며, 내면에서 약한 인장잔류응력 또는 압축잔류응력이 작용하며 외면으로 갈수록

록 강한 인장잔류응력이 발생한다. 원주 방향 잔류응력의 경우 내면에서 약한 인장잔류응력 또는 압축잔류응력이 작용하고 외면으로 갈수록 서서히 증가한다.

(2) 두께 변화에 따른 잔류응력 변화는 미미하다. 반면, 안전단의 길이는 용접부 내면 잔류응력 분포에 영향을 미치며, 길이가 짧을수록 내면의 잔류응력이 증가한다. 반경비 감소에 따라 노즐 내면의 잔류응력은 감소하였다.

(3) 유한요소해석 결과는 R6 level 3 와 그 경향이 잘 일치한다. 하지만 이는 동종금속용접의 영향과 반경비를 고려하지 않은 결과이다. 본 연구에서는 이러한 부분을 반영하여 R6 level 3 식을 수정, 가압경수로 이종금속용접부에 작용하는 잔류응력 분포 개선식을 제시하였다.

후 기

본 연구는 한국수력원자력(주) 재원으로 한수원중앙연구원의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) EPRI, 2004, "Materials Reliability Program: Welding Residual and Operation Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106), EPRI Report
- (2) Moffat, G., Bamford, W. H. and Seeger, D., 2001, "Development of the Technical Basis for Plant Startup for the V.C Summer Nuclear Plant," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP-Vol. 427, pp.33~39
- (3) Kim, J.S., Jin, T.E., Dong, P. and Prager, M., 2003, "Development of Residual Stress Analysis Procedure for Fitness-For-Service "Assessment of Welded Structure," *Trans of the KSME(A)*, Vol. 27, pp.713~723
- (4) Brust, F.W. and Scott, P. M., 2007, "Weld Residual Stresses and Primary Water Stress Corrosion Cracking in Bimetal Nuclear Pipe Welds," *Proc. ASME PVP*, PVP2007-26297.
- (5) ABAQUS (2007) ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.7. Dassault Systemes Inc.
- (6) Brickstad, B. and Josefson, B. L., 1998, "A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 11~25.
- (7) Yaghi, A., Gyde, T. H., Becker, A. A., Sun, W. and Williams, J. A., 2006, "Residual Stress Simulation in Thin and Thick-Walled Stainless Steel Pipe Welds Including Pipe Diameter Effects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, pp. 864~874.
- (8) Dong, P. and Zhang, J., 1999, "Residual Stresses in Strength-Mismatched Welds and Implications on Fracture Behavior," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 64, pp. 485~505.
- (9) Bouchard, P. J., 2008, "Validated Residual Stress Profiles for Fracture Assessments of Stainless Steel Pipe Girth Welds," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 84, pp. 195~222.
- (10) R6, Revision 4: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, 2006, British Energy Generation Ltd, Gloucester, UK.
- (11) API 579-1/ASME FFS-1, 2007, "Fitness-for-Service for Pressure Vessels, Piping and Storage Tanks," *American Petroleum Institute/American Society of Mechanical Engineers*.
- (12) ASME Sec. XI Task Group for Piping Flaw Evaluation, 1986, "Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping," *Journal of Pressure Vessel Technology*, 108(3), pp.352~366
- (13) Rudland, D., Zhang, T., Wilkowski, G. and Csontos, A., 2008, "Welding Residual Stress Solutions for Dissimilar Metal Surge Line Nozzles Welds," *Proc ASME PVP*, PVP2008-61285.
- (14) Ogawa, N., Muroya, I., Iwamoto, Y., Hojo, K., Ogawa, K., Kinston, E. and Smith, D. J., 2009, "Residual Stress Evaluation of Dissimilar Weld Joint Using Reactor Vessel Outlet Nozzle Mock-up Model (report-2)," *Proc ASME PVP*, PVP2009-77269.
- (15) 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 of the KSME(A)*, Vol. 32, pp. 668~677.
- (16) Song, T.K., Chun, Y.B., Oh, C.Y., Bae, H.Y., Kim, Y.J., Lee, S.H., Lee, K.S., Park, C.Y., 2009, "Effect of Similar Metal Weld on Residual Stress in Dissimilar Metal Weld According to Safe End Length," *Trans of the KSME(A)*, Vol. 33, pp. 664~672.
- (17) Cofie, N. G., Dijamco, D. G., Limpus, C. R., Cirilli, J. J., Malikowski, H. M. and Roberts, A. T., 2006, "Residual Stress Analysis of a Bimetallic Weld Subjected to Stress Improvement and Weld Overlay Repair," *Proc. ASME PVP*, PVP2006-ICPVT-11-93455.
- (18) Dennis, R. J., Leggatt, N. A. and Gregg, A., 2006, "Optimization of Weld Modeling Techniques-Bead-on-Plate Analysis," *Proc. ASME PVP*, PVP2006-ICPVT-11-93907.