

원전 노즐 용접부 잔류응력 예측을 위한 Round Robin 해석 결과 분석

송태광* · 배홍열* · 김윤재† · 이경수** · 박치용** · 양준석** · 허남수*** · 김종욱*** · 박준수**** · 송민섭**** · 이승건**** · 김종성***** · 유승천***** · 장윤석*****
(2008년 9월 11일 접수, 2008년 11월 23일 수정, 2008년 11월 26일 심사완료)

Assessment of Round Robin Analyses Results on Welding Residual Stress Prediction in a Nuclear Power Plant Nozzle

Tae-Kwang Song, Hong-Yeol Bae, Yun-Jae Kim, Kyoung-Soo Lee, Chi-Yong Park, Jun-Seog Yang, Nam-Su Huh, Jong-Wook Kim, June-Soo Park, Min-Sup Song, Seung-Gun Lee, Jong-Sung Kim, Seung-Cheon Yu and Yoon-Suk Chang

Key Words : Welding Residual Stress(용접 잔류응력), Round Robin(라운드 로빈), PWSCC(일차수 응력부식균열), Safety/Relief Nozzle(안전/방출 노즐)

Abstract

This paper provides simulational round robin test results for welding residual stress prediction of safety/relief nozzle. To quantify the welding variables and define the recommendation for prediction and determination of welding residual stress, 6 partners in 5 institutes participated in round robin test. It is concluded that compressive axial and hoop residual stress occurs in dissimilar metal weld and pre-existing residual stress distribution in dissimilar metal weld was affected by similar metal weld due to short length of safe end. Although the reason for the deviation among the results was not pursued further, the effect of several key elements of FE analyses on welding residual stress was investigated in this paper.

기호설명

- PWR : 가압경수로(Pressurized Water Reactor)
- PWSCC : 일차수응력부식균열
(Primary Water Stress Corrosion Cracking)
- WPS : 용접절차규격서
(Welding Procedure Specification)
- PWHT : 용접후열처리 (Post Weld Heat Treatment)

1. 서론

용접 잔류응력은 용접 시 발생하는 국부적 온도 구배, 재료 물성 불일치 및 구속 경계 조건 등의 다양한 변수의 상호 작용에 의해 발생한다.⁽¹⁾ 이로 인해 용접 잔류응력 예측을 위한 유한요소 해석 결과는 해석자에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있다. 따라서 용접 잔류응력 해석 결과에 영향을 미치는 변수에 대한 정량화 및 해석 지침 제공을 위해 국내외적으로 다양한 노력이 시도되고 있다. 이러한 노력에는 IIW(International Institute of Welding), PVRC(Pressure Vessel Research Council) 및 EU(European Union)에서 수행된 국제 공동 연구 및 국내 용접학회(KWS, Korea Welding Society)에서 수행한 용접부 온도 예측 round robin 이 있다.⁽²⁻⁴⁾

IIW 는 배관 원주방향 맞대기 용접부 잔류응력 및

† 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)929-1718

* 고려대학교 기계공학과

** 한전 전력연구원

*** 한국원자력연구원

**** 한국전력기술(주)

***** 순천대학교 기계우주항공공학부

***** 성균관대학교 기계공학부

온도 예측을 위한 round robin 해석을 1997년부터 수행하였다. 그러나 참가자들의 온도 및 응력 해석 결과는 상호간에 큰 차이를 나타냈으며 IIW는 원인 분석을 위해 상대적으로 단순한 평판 맞대기 용접을 대상으로 2002년부터 2차 round robin 해석을 수행하였다.⁽³⁾ 그 결과 1차(phase I) round robin 결과에 비해 2차(phase II) round robin 해석 결과의 편차는 줄어들었으나 단순한 평판에 대한 결과라는 제약이 있다.

그리고 국내 대한용접학회 용접강도연구위원회에서는 2003년부터 평판 맞대기 아크 용접부의 온도 분포 예측 round robin을 수행하였다.⁽⁴⁾ 그 결과 참가자들의 온도 예측 유한요소해석 결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하였으나 용접부 잔류응력에 대한 추가적인 해석은 수행되지 않았다.

이 밖에 미국의 PVRC 및 EU 연구에서도 용접부 잔류응력 해석을 위한 다양한 연구가 시도되었으나 대부분의 연구가 비교적 단순한 평판 맞대기 용접을 대상으로 하였다. 그러나 원전 용접부는 대부분 배관 맞대기 용접부로 이루어져 있으며 최근 가압경수로(PWR) 이중금속용접부에서 일차수응력부식균열(PWSCC)이 발생한 점을 감안한다면 배관 이중금속 용접부 잔류응력해석에 대한 연구가 필요하다.^(5,6)

이러한 취지로 국내에서는 5개 연구 기관이 참가하여 고리 원전 3,4호기 안전/방출 노즐 이중금속용접부를 대상으로 유한요소 잔류응력 해석 round robin을 수행하였다. 해석은 2007년 8월부터 1년 동안 두 차례에 걸쳐 수행하였으며 고려대, 한전 전력연구원, 한전 기술(주), 한국원자력연구원, 성균관대학교 등의 5개 기관에서 6팀이 참가하였다. 본 논문에서는 두 차례에 걸쳐 수행한 round robin 해석 결과를 정리하였다.

2. 유한요소 잔류응력 해석 관련 변수

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 고리 원전 가압기 안전/방출 노즐을 나타낸다. 그림에서와 같이 노즐 및 안전단(Safe end)은 이중금속용접으로, 안전단 및 배관은 동종금속용접으로 연결된다. 각 구성품에 대한 재료는 그림에서와 같이 노즐은 SA508 Cl.2, 안전단은 F-316L, 배관은 TP304L, 버터링 및 이중금속 용접부는 Alloy 82/182, 동종금속용접부는 ER-308L로 이루어져 있다.

Table 1은 노즐 제작 시 적용된 용접절차규격서(WPS)를 나타낸다. 표에서와 같이 노즐/안전단 사이의 이중금속용접부는 16개의 패스로, 안전단/배관 사이의 동종금속용접부는 11개의 패스로 이루어졌다. WPS에서 알 수 있는 용접속도(v), 아크 전류,

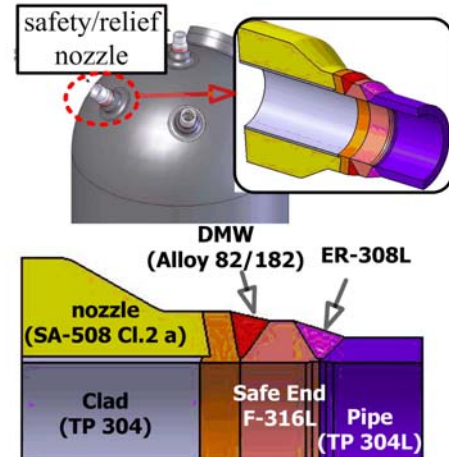
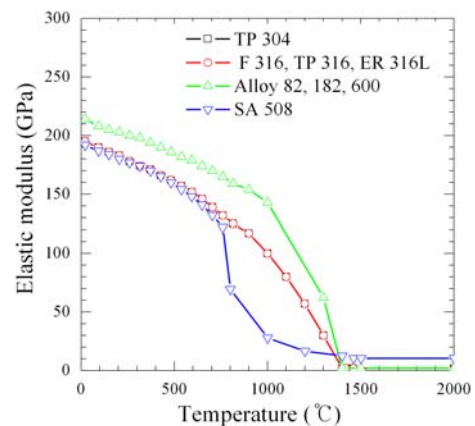
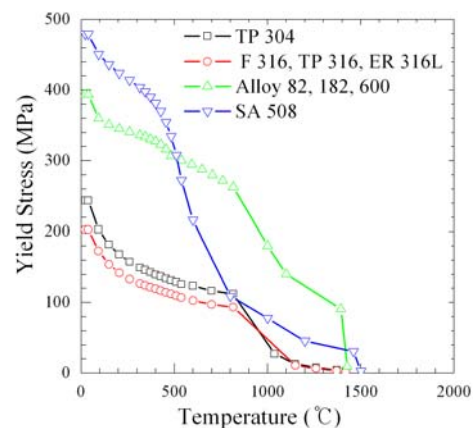


Fig. 1 Safety/Relief nozzle considered in this work



(a)



(b)

Fig. 2 Material properties with varying temperature. (a) Elastic modulus and (b) yield stress

전압 및 용접방법 등은 ASME⁽⁷⁾ 및 R6⁽⁸⁾ 코드에서 제시하는 일반적인 용접 변수에 해당한다. 그러나 유한요소 잔류응력 해석 시에는 추가적인 변수가 발생하며, 이러한 변수는 다양하므로 열 해석 및 응력 해석 관련 변수로 나누어서 생각할 수 있다.⁽⁹⁾

Table 1 Welding procedure specification for safety/relief nozzle

	Pass Name (Pass No.)	Process	Size (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Trv. Speed (cm/min)
DMW	Buttering (1~11)	SMAW	φ 3.2	125	25	5~10
	Root (1~3)	GTAW	φ 2.4	140	12	5~10
	Groove (4~16)	SMAW	φ 3.2	135	25	5~10
SMW	Root (1~3)	GTAW	φ 2.4	140	12	5~10
	Groove (4~11)	SMAW	φ 3.2	105	27	5~10

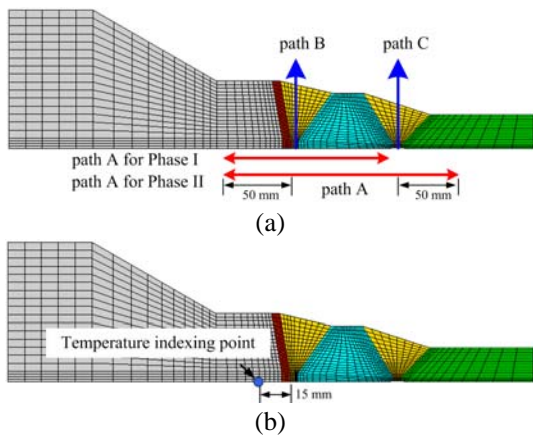


Fig. 3 (a) Path for residual stress index and (b) position for temperature history

열 해석 관련 변수로는 용접 입열량, 용접 비드 초기 온도, 입열 시간, 냉각 시간 및 냉각 조건이 있다. 응력 해석 관련 변수로는 경계 조건, 소성 경화 모델, 요소 종류, 응력 풀림 효과 고려 유/무, 비드 수 단순화 사용 유/무, 용접 순서, 상 변태 고려 유/무, 비선형 기하 형상 고려 유/무 등이 있다. 이 밖에 해석과 관련된 추가적인 변수로는 2 차원 및 3 차원 해석 결과의 차이를 들 수 있다. 다양한 변수에 대한 구체적 설명은 4 장에서 언급하였다.

3. Round robin 해석 결과

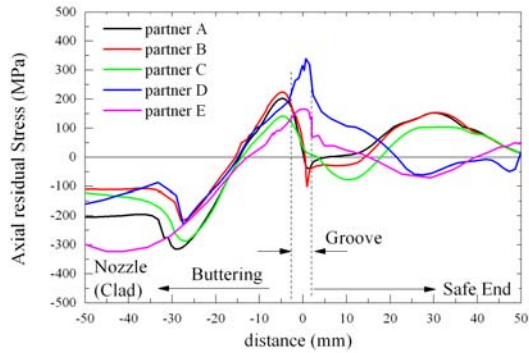
Round robin 해석은 두 차례로 나누어 수행되었다. 1 차 해석에서는 노즐/안전단 사이의 이중금속용접에 대해서만 잔류응력 해석을 수행하였으며 2 차 해석에서는 안전단/배관 사이의 동종금속용접이 추가로 수행될 때에 대해서 잔류응력 해석을 수행하였다. 각 단계에 대한 구체적 설명 및 결과는 3.1 및 3.2 절과 같다.

3.1 1 차 해석 결과

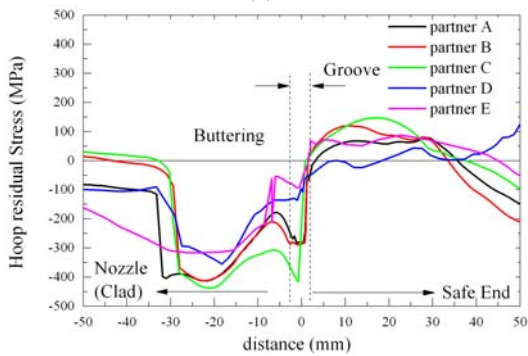
1 차 round robin 해석 시 모든 참가자에게는 안전/방출 노즐 도면, 용접절차시방서 및 재료 물성이 제공되었다. 이 밖에 해석과 관련된 2 장에서 언급한 용접 변수들은 참가자들의 자율에 맡겨졌다. Fig. 2 는 모든 참가자들이 공통으로 사용한 온도에 따른 재료 물성을 나타내며 이 밖에 용접 해석에 필요한 탄성계수, 밀도, 열전도 계수 등의 재료 물성이 주어졌다. 재료 물성은 재료 제작자의 실험자료,⁽¹⁰⁾ 설계 코드⁽¹¹⁾ 및 문헌⁽¹²⁾에서 얻을 수 있었다.

Fig. 3 은 1 차 round robin 해석 시 참가자 E 의 유한 요소 모델을 나타낸다. 잔류응력 해석 결과는 노즐 내면, 용접부 두께 방향에서 공통적으로 산출하여 비교하였다. 그림에서 path A 는 내면 잔류응력 검출 경로를, path B 는 이중금속용접부 두께 방향 잔류응력 검출 경로를, path C 는 동종금속용접부 두께 방향 잔류응력 검출 경로를 나타낸다. 1 차 해석의 경우 동종 금속용접부 및 배관은 없는 상태이며 따라서 path A 및 B 에서의 잔류응력 결과를 비교하였다. 또한 열 해석에 대한 상호 비교를 위해 Fig. 3(b)에서와 같이 이중금속용접부 용융선(Fusion line)에서 노즐 방향으로 15mm 지점에서의 온도 이력을 비교하였다.

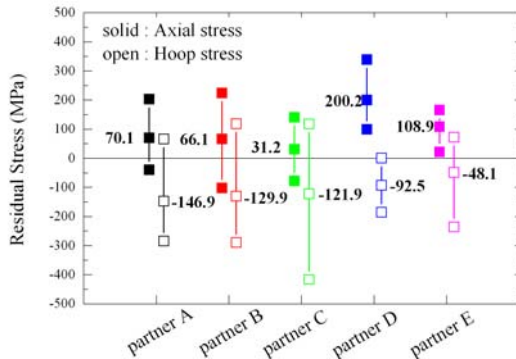
Fig. 4(a) 및 (b)는 이중금속용접 후 내면에서의 축 방향 및 원주방향 잔류응력을 나타낸다. 그림에서와 같이 참가자들간의 해석 결과는 정성적인 분포는 일치하지만 정량적으로는 많은 차이를 나타낸다. 노즐 내면 축 방향의 경우 버터링 용접부 및 용접부에서는 인장 잔류응력이 그리고 노즐에서는 압축 잔류응력이 발생한다. 원주 방향 잔류응력의 경우 버터링 용접부 및 용접부 내면에서 압축 잔류응력이 발생한다. 그러나 이러한 잔류응력 분포는 상호간의 비교가 힘들기 때문에 본 연구에서는 용접부 중앙±10mm 를 PWSCC 에 민감한 관심영역으로 선정하였다. Fig. 4(c)는 관심영역에서의 최대, 최소 및 평균 잔류응력값을 나타낸다.



(a)



(b)

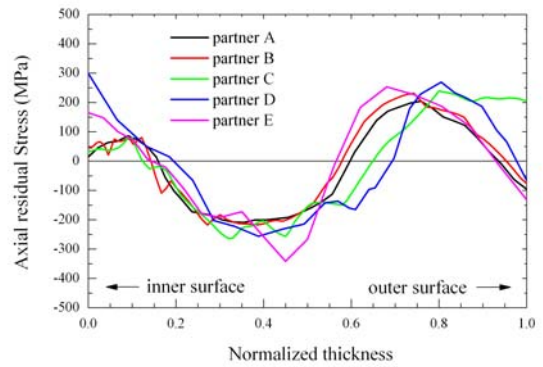


(c)

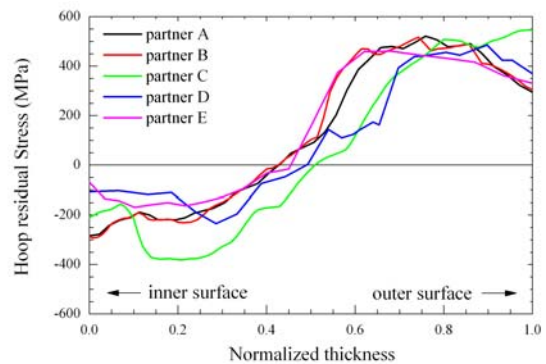
Fig. 4 Residual stress distribution at the inner surface. (a) Axial, (b) hoop and (c) quantitative value within PWSCC susceptible region

그림에서 축 방향 잔류응력의 참가자 각각의 평균값은 31~200MPa 범위의 인장을 나타내며 각각의 평균값에 대한 전체 평균은 95.3 MPa, 표준편차는 64.8MPa 를 나타낸다. 원주 방향 잔류응력의 경우 -147~ -48 MPa 범위의 압축을 나타내며 각 참가자의 평균값에 대한 전체 평균은 -108MPa, 표준편차는 38.8MPa 를 나타낸다.

Fig. 5 는 path B 에서의 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 축 방향 잔류응력의 경우 내면에서 인장을 나타내며 외면 방향으로 압축, 인장 분포를 나타낸다. 또한 원주 방향 잔류응력은



(a)



(b)

Fig. 5 Residual stress distribution along the weld thickness. (a) Axial and (b) hoop residual stress

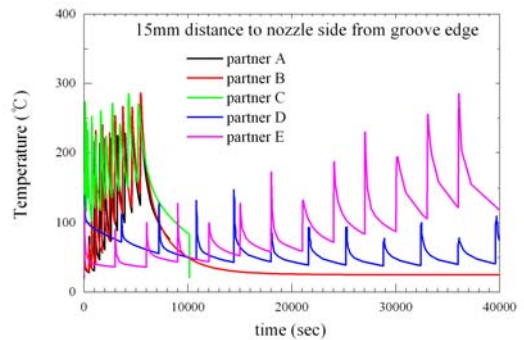
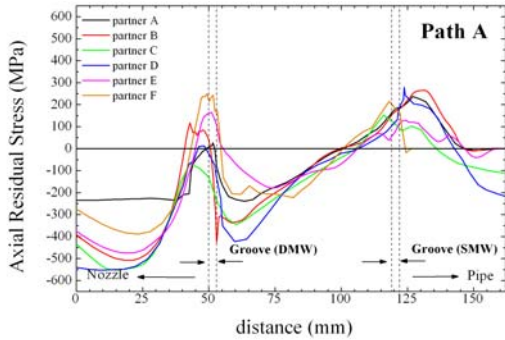


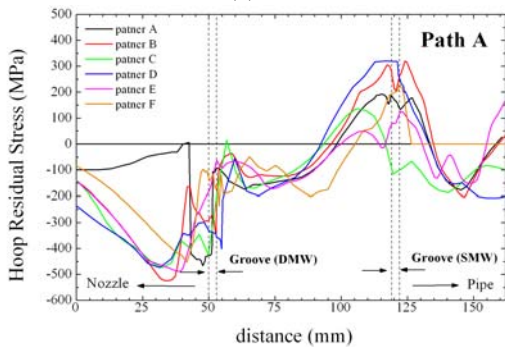
Fig. 6 Temperature history at the specific point where the thermocouple is placed

내면에서 압축 잔류응력을 나타내며 외면 방향으로 갈수록 강한 인장 잔류응력을 공통적으로 나타내고 있다.

Fig. 6 은 온도 측정 지점에서의 온도 이력을 나타낸다. 온도 예측 지점은 이중금속용접부 용융선에서 노즐 방향 15mm 지점이며 그림에 모두 나타내지는 않았지만 전체 용접 시간은 참가자 A 의 8,000 초에서 참가자 E 의 80,000 초까지 다양한 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.



(a)



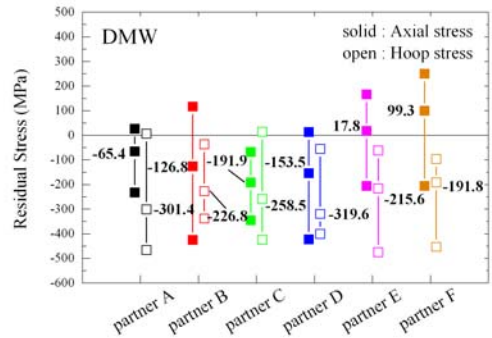
(b)

Fig. 7 Residual stress distribution at the inner surface. (a) Axial and (b) hoop

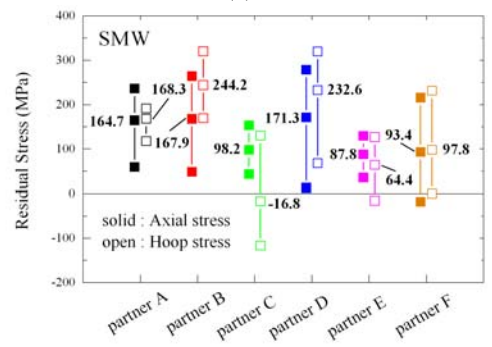
3.2 2차 해석 결과

Round robin 1 차 해석에서는 노즐 도면을 바탕으로 잔류응력 해석을 수행하였다. 이 때, 일부 참가자의 경우 클래딩(cladding)등의 영향이 미미하다고 판단하여 이를 고려하지 않았다. 따라서 형상의 차이가 잔류응력에 미치는 영향을 제거하기 위해 2 차 해석에서는 모든 참가자들이 동일한 형상을 사용하였다. 즉 모든 참가자들이 클래딩을 고려하지 않았으며 버터링 용접부의 두께는 4mm 로 통일하였다. 또한 버터링 용접부는 용접후열처리(PWHT)를 통해 잔류응력이 완화되었다고 판단하여 형상 및 재료물성 만을 고려하였다. 이 밖에 해석 조건은 1 차 해석과 동일하다.

Fig. 7(a) 및 (b)는 노즐 내면(path A)에서의 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 축 방향 잔류응력의 경우 이중금속용접부 및 동종금속용접부 내면에서 인장 잔류응력이 발생하며 원주 방향 잔류응력의 경우 이중금속용접부에서 강한 압축 잔류응력이, 동종금속용접부에서는 인장잔류응력이 발생한다. Fig. 8(a) 및 (b)는 정량적인 비교를 위해 Fig. 4(c)에서와 같이 관심영역에서의 잔류응력 값을 나타낸다. 그림에서와 같이 이중금속용접



(a)

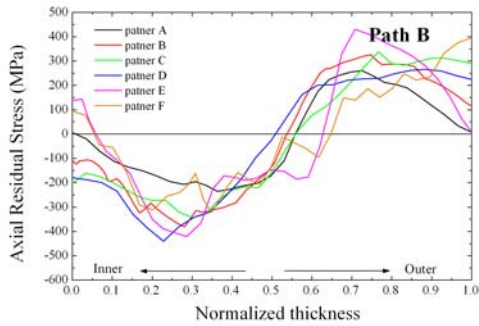


(b)

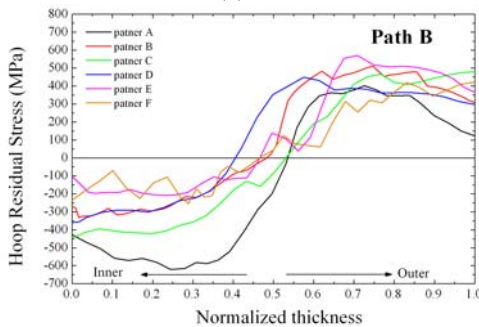
Fig. 8 Quantitative values within PSWSS susceptible region. (a) At dissimilar metal weld and (b) similar metal weld

부에서의 축 방향 잔류응력의 평균값은 -191.9 ~99.3 MPa 범위의 압축 또는 낮은 인장을 나타내며 각각의 평균값에 대한 전체 평균은 -70.1 MPa, 표준편차는 110.9 MPa 를 나타낸다. 원주 방향 잔류응력의 경우 -301.4 ~ -191.8 MPa 범위의 압축을 나타내며 각 참가자의 평균값에 대한 전체 평균은 -252.3 MPa, 표준편차는 50.2 MPa 를 나타낸다. 동종금속용접부의 경우 축 방향 잔류응력의 평균값은 87.7~171.3 MPa 범위의 인장을 나타내며 각각의 평균값에 대한 전체 평균은 130.5 MPa, 표준편차는 41.2 MPa 를 나타낸다. 원주 방향 잔류응력의 경우 -16.8 ~ 244.2 MPa 범위를 나타내며 각 참가자의 평균값에 대한 전체 평균은 131.7 MPa, 표준편차는 101.9 MPa 를 나타낸다. 이와 같은 결과는 1 차 해석 결과와 비교할 때 동종금속용접을 수행함으로써 이중금속용접부 내면 축 방향 및 원주 방향 잔류응력이 압축방향으로 줄어드는 것을 보여준다.⁽¹³⁾ 또한 해석 범위가 늘면서 각 참가자들의 결과값의 분산도가 커짐을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 path B에서의 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 이중금속용접부의 잔류응력 분포는 내면을 제외하면 동종금속용접 전과 경향 및 값이 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

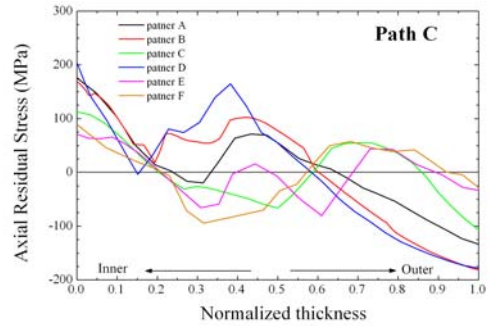


(a)

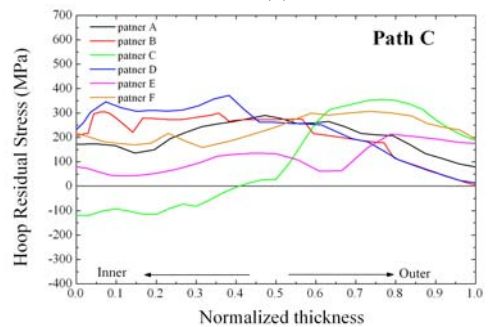


(b)

Fig. 9 Residual stress distribution along the dissimilar metal weld thickness. (a) Axial and (b) hoop residual stress



(a)



(b)

Fig. 10 Residual stress distribution along the similar metal weld thickness. (a) Axial and (b) hoop residual stress

Fig. 10은 path C에서의 잔류응력 분포를 나타낸다. 동종금속용접부의 잔류응력 분포는 동종금속용접 전 안전단에 남아있는 잔류응력으로 인해 이종금속용접부와 전혀 다른 분포를 나타내게 된다. 또한 이종금속용접 및 동종금속용접 해석 시 적용된 경계조건의 차이로 인해 이와 같은 차이가 발생하게 된다. 각 용접에서 적용한 경계조건은 4.3절에서 구체적으로 확인할 수 있다. 그리고 동종금속용접재는 일차수응력부식균열에 민감한 재료가 아니므로 잔류응력관점에서 관심영역이 아니다. 따라서 동종금속용접부 잔류응력 분포에 대한 구체적인 분석은 본 논문에서 생략하였다.

4. Round robin 해석 결과 분석

3장에서 살펴본 바와 같이 두 차례에 걸쳐 수행한 round robin 해석 결과 각 참가자들의 해석 결과는 경향성 면에서 잘 일치하였다. 즉 이종금속용접만 수행하였을 때에는 용접부 내면에 축 방향으로 인장 잔류응력이, 원주 방향으로 압축 잔류응력이 발생하였으며 동종금속용접을 수행하게 되면 이종금속용접부 내면에 추가적으로 압축 잔류응력이 발생하였다. 그러나 일차수응력부식균열에 민감한 영역에서 참가자

결과 중 최대 및 최소값의 차이는 291.3 MPa, 원주 방향으로 127.7 MPa가 발생하여 분산이 크을 알 수 있다. 따라서 본 장에서는 이러한 차이가 발생하는 원인을 분석하기 위해 해석 결과에 영향을 미칠 수 있는 변수를 모델링 관련 변수, 열 해석 관련 변수 및 응력 해석 관련 변수로 나누어 살펴보겠다.

4.1 모델링 관련 변수 영향

Table 2는 각 참가자들이 사용한 해석코드, 요소 종류 및 비드 수를 나타낸다. 표에서와 같이 참가자들은 범용 해석프로그램을 사용하였으며 1차 또는 2차 요소를 사용하였다. 또한 해석 시 모든 참가자는 비드 수 단순화(lumping bead method)방법을 사용하였으며 Table 2에서 각 참가자들이 사용한 비드 수를 확인할 수 있다. Fig. 11은 2차 round robin 해석 시 각 참가자들이 사용한 유한요소 모델을 보여준다. 그림에서와 같이 참가자 A 및 C는 실제 비드형상과 비슷한 타원형 비드 형상을, 참가자 B, D, E, F는 사각형 비드 형상을 사용하였다. 또한 1개의 층에 1개의 비드를 사용하는 경우와(A, B) 여러 개의 비드를 사용하는 경우(C, D, E, F)가 있었으며 적층 순서는 참가자에 따라 임의적이었다.

Table 2 Variables for modeling

Partner		A	B	C	D	E	F
Analysis code		ABAQUS(2D)	ABAQUS(2D)	ANSYS(2D)	ABAQUS(2D)	ABAQUS(2D)	ABAQUS(2D)
Element type		DCAX4 (linear)	DCAX4 (linear)	PLANE 55 (linear)	DCAX8 (quadratic)	DCAX4 (linear)	DCAX8 (quadratic)
		CAX4 (linear)	CAX4 (linear)	PLANE 182 (linear)	CAX8R (reduced quadratic)	CAX4 (linear)	CAX8R (reduced quadratic)
No. of bead considered	DMW	8(8 layer)	10(10 layer)	12	14	13	13
	SMW	6(6 layer)	7 (7 layer)	10	10	9	11

ABAQUS, ANSYS 및 SYSWELD 등의 범용 해석프로그램들은 용접잔류응력 해석에 오랫동안 사용되어왔으며 충분히 검증은 거쳐왔다는 점에서 해석 프로그램의 차이가 잔류응력에 미치는 영향은 미미하다고 할 수 있다.

요소 종류가 잔류응력에 미치는 영향에 대해서는 자체 민감도 해석을 수행하였다. 그 결과 요소 종류(1 차 요소 및 2 차 요소)에 따라 관심영역에서의 잔류응력 차이는 축 방향으로 최대 10MPa, 원주 방향으로 최대 50MPa 발생하였다.⁽⁹⁾

Fig. 4 에서는 참가자 E 를 제외한 다른 참가자의 노즐 쪽 잔류응력 값이 불연속적인 것을 확인할 수 있다. 이는 참가자 E 가 다른 참가자와 달리 클래딩을 고려하지 않았기 때문이며 참가자 E 가 클래딩을 고려한 자체 재해석 결과 클래딩을 고려할 때 다른 참가자들과 유사한 경향이 발생함을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 7 에서와 같이 모든 참가자가 클래딩을 고려하지 않았을 때 클래딩 위치에서 참가자 A 의 결과가 급격히 변하는 현상에 대해서는 뚜렷한 원인을 찾지 못하였다.

MRP(Material Reliability Program) 보고서에서는 용접 비드의 형상 및 용접 순서의 영향을 줄이기 위해 층 형상의 비드 사용을 권장하지만 적절한 비드 수에 대한 기준은 제시되지 않고 있다.⁽¹⁴⁾ 반면 개별 비드를 사용한 참가자 E 의 자체 민감도 해석 결과에서는 16 개의 비드에 대해 10 개 이상의 단순화에 대해서는 비드 수 단순화의 영향이 미미함을 확인하였다.⁽⁹⁾ 그러나 이러한 결과는 참가자 E 의 비드 형상 및 적층 순서에 한정된 것이므로 참가자 A 및 B 의 층 형상 비드 또는 참가자 A 및 C 의 둥근 형상 비드에 대해 적용할 때에는 주의가 필요하다.

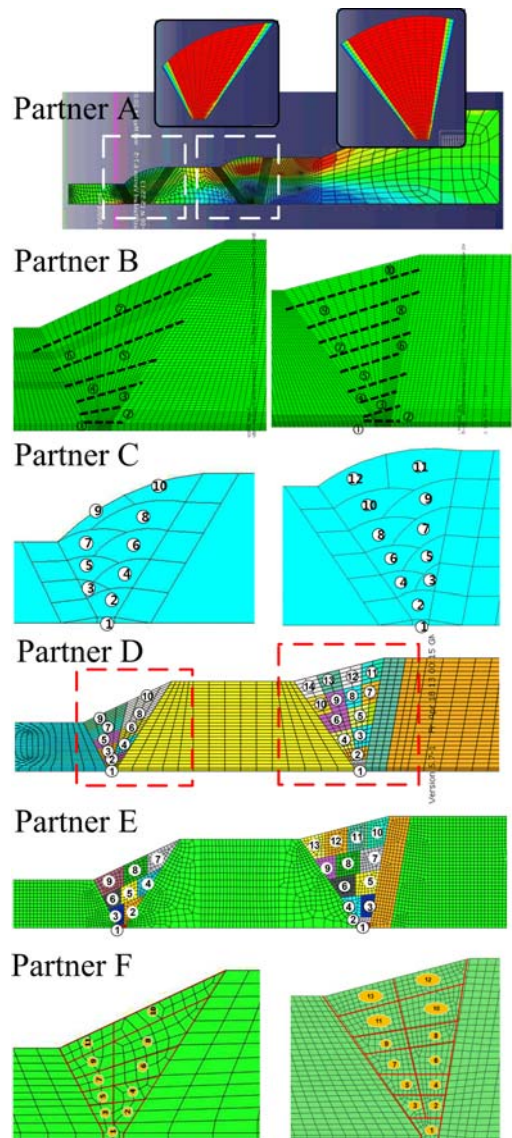


Fig. 11 FE models of each partner for round robin phase II

Table 3 Variables for thermal analyses

	A	B	C	D	E	F
Heating method	B.F.	B.F.	B.F. + S.F. (10:1)	B.F. + S.F. (7:3)	B.F.	B.F. + S.F.
Initial temp. of molten bead	1800 °C	1700 °C	T_m+200 °C	2000 °C	T_m+10 °C	1800 °C
Heating time	v^{-1} (0.5s)	v^{-1}	N/A	v^{-1}	v^{-1}	v^{-1}
Cooling time	N/A	D/v	N/A	3600 sec.	2400 sec.	3000 sec.
Cooling condition ($[h]=W/m^2K$)	Natural convection ($h=28.4$)	Natural convection ($h=28.4$)	Natural convection ($h=15.8$)	Natural convection ($h=10$)	Natural convection ($h=10$)	Natural convection ($h=10$)

4.2 열 해석 관련 변수 영향

Table 3 은 각 참가자들이 열 해석 시 고려한 변수값을 나타낸다. 용접 시 입열은 해석 프로그램에서 지원하는 방식을 따르거나 사용자 지정함수를 통해 구현할 수 있으며 round robin 해석 참가자들은 모두 해석 프로그램에서 제공하는 체적 플럭스(B.F., Body Flux) 또는 표면 플럭스(S.F., Surface Flux)를 통해 구현하였다. 체적 플럭스는 일반적으로 식 (1)을 통해 구할 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$Q(W/m^3) = \frac{\eta VI}{AV\Delta t} \quad (1)$$

여기서 η 는 용접효율, V 는 아크 전압, I 는 아크 전류, A 는 용접 비드 단면적, v 는 용접속도, Δt 는 용접 시간을 나타낸다. 그러나 모든 참가자들이 식 (1)을 통해 체적 플럭스를 구하였음에도 불구하고 정량적 값에는 차이가 발생하였다. 즉 용접속도를 최고, 최저 또는 평균값을 사용할 수 있으며 비드 단순화를 사용하였으므로 용접 비드 단면적도 다를 수 있다. 또한 참가자 E 를 제외한 모든 참가자는 식 (1)을 통해 각각의 비드에 대한 입열량을 계산하여 적용하였지만 참가자 E 의 경우 평균값을 사용하였다. 또한 참가자 C, D 및 F 의 경우 실제 열전도 현상 및 용접 비드 형상 구현을 위해 표면 플럭스를 사용하였지만 체적 및 표면 플럭스의 비율은 임의적이었다. 그리고 다른 모든 조건들을 고정한 체 체적 플럭스 및 표면 플

럭스의 비율을 7:3 으로 변경한 참가자 E 의 자체 민감도 해석 결과 표면 플럭스 고려가 잔류응력에 미치는 영향은 미미하였다.⁽⁹⁾ 따라서 입열방법 및 입열량의 차이가 잔류응력 round robin 결과에 미치는 영향은 미미하다.

용접 비드의 초기 온도에 대해서는 모든 참가자들이 용접재의 용융점을 기준으로 임의적으로 설정하였다. 각 참가자들이 설정한 용접 비드 초기 온도는 Table 3 과 같다.

모든 참가자들은 2 차원 축 대칭 모델을 사용하였으며 입열시간은 일괄적으로 용접속도의 역수를 사용하였다. 그러나 이 때에도 동일한 용접절차시방서에서 사용한 용접 속도가 참가자 별로 상이하였다. 용접절차시방서에서 제시한 용접속도의 역수는 0.6~1.2 초이지만 참가자 A 의 경우 용접봉 교체 시간을 고려하여 0.5 초를 일괄 적용하였으며 다른 참가자들도 임의의 용접속도를 사용하였다.

각 참가자들이 해석 시 설정한 냉각 시간은 참가자 별로 상이하였으나 최대층간온도(T_{MP} , Maximum Inter-Pass Temperature)를 넘지 않는 조건을 준수하였다.⁽⁷⁾ 용접절차규격서에서 제시한 최대층간온도는 173 °C 이다. 그러나 표에서와 같이 냉각 시간은 참가자 별로 차이가 있었으며 이로 인해 Fig. 6 에서와 같이 전체 용접시간이 최대 10 배까지 발생함을 확인할 수 있다.

또한 냉각조건은 모든 참가자들이 자연 대류 조건을 사용하였다. 그러나 표에서와 같이 구체적인 값은 차이가 있었으나 자체 민감도 해석 결과 그 영향은 미미하였다.⁽⁹⁾

Table 4 Variables for mechanical analyses

			A	B	C	D	E	F
Boundary Condition (constrained)	D M W	N	Axial	Axial	Axial	Axial & Radial	Axial & Radial	Axial & Radial
		S.E	Free D.O.F.	Free D.O.F.	Free D.O.F.	Radial	Axial & Radial	Axial & Radial
	S M W	N	Axial	Axial	Axial	Axial & Radial	Axial	Axial & Radial
		P	Axial	Free D.O.F.	Free D.O.F.	Radial	Free D.O.F.	Axial & Radial
Plastic hardening			Isotropic	Isotropic	Isotropic	Isotropic	Isotropic	Isotropic
Non linear geometry			Not considered	Not considered	Not considered	Not considered	Not considered	Not considered
Annealing temperature			T_m	T_m	Not considered	T_m	T_m	T_m

4.3 응력 해석 관련 변수 영향

Table 4 는 각 참가자들이 응력해석 시 고려한 변수들을 나타낸다. 표에서 N 은 노즐 끝단, S.E 는 이중금속용접 시 안전단 끝단, P 는 동종금속용접 시 배관 끝단을 나타내며 표에서는 해석 시 구속된 자유도를 나타낸다. 표에서와 같이 이중금속용접 시 참가자 A, B 및 C 는 노즐 끝단의 축 방향 자유도를 구속하였으며 안전단 끝단은 자유 경계 조건으로 설정하였다. 이러한 경계조건은 가접 (Tack weld)에서의 경계조건과 유사하다. 반면 참가자 E 및 F 는 이중금속용접 시 노즐 끝단과 안전단 끝단을 구속하였다가 용접이 끝나면 구속조건을 해제하였다. 이러한 경계조건은 공장용접 (Shop weld)에서의 경계조건과 유사하다. 참가자 E 의 조건에서의 자체 민감도 해석 결과 가접과 공장용접조건에서의 경계조건으로 인한 잔류응력 차이는 축 방향으로 30MPa, 원주 방향으로 75MPa 발생하였다.⁽⁹⁾ 따라서 표에서와 같이 다양한 경계조건은 잔류응력값에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

다층 용접부의 경우 용접부는 반복하중을 받게 된다. 따라서 재료의 소성경화모델은 최종 잔류응력분포에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 모든 참가자들은 등방성소성경화모델(Isotropic hardening model)을 사용하였다. 또한 비선형 기하 형상 옵션을 사용하지 않았기 때문에 이러한 변수들의 영향은 발생하지 않았다. 응력풀림 효과(Annealing effect)의 경우 참가자 C 를 제외한 모든 참가자들

이 용융점(T_m)을 응력풀림 온도로 설정하여 응력풀림효과를 고려하였다. 용접해석 시 응력부가 재용융되면 그 동안 재료에 누적된 소성변형율은 “0”이 된다. 따라서 응력풀림효과는 용접해석 시 반드시 고려해주어야 하는 현상이다. 그러나 Fig. 2 에서와 같이 고온에서의 강도가 “0”에 가까운 재료 물성을 사용하기 때문에 응력풀림효과의 고려 유/무가 잔류응력에 미치는 영향은 미미하였다. 이와 같은 결과는 참가자 E 의 자체 민감도 해석을 통해 확인할 수 있었다. 그러나 응력풀림효과 고려 유/무는 용접부에서의 소성변형율에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 탄소성 파괴역학 해석 시에는 중요한 해석 변수가 될 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 원전 이중금속용접노즐을 대상으로 두 차례에 걸쳐 수행한 잔류응력 round robin 해석 결과를 정리 및 분석하였으며 다음과 같다.

(1) 동일한 형상, 재료 물성 및 용접절차규격서를 통해 잔류응력 해석을 수행한 결과 안전/방출 노즐 이중금속 용접부 내면 일차수응력부식균열 민감 영역에서의 축 방향 잔류응력 평균값은 -70 MPa, 원주 방향 잔류응력 평균값은 -252 MPa 가 발생하였다. 각각에 대한 표준편차로는 111 MPa, 50MPa 가 발생하였다.

(2) 안전/방출 노즐에서 동종금속용접을 수행하게 되면 이중금속용접부 내면에는 압축력이 발생

하여 기존 잔류응력이 완화된다. 이러한 현상은 참가자들의 결과에서 공통적으로 확인할 수 있었다.

(3) 참가자간 해석 방법 차이는 모델링, 열 해석 및 응력 해석과 관련하여 다양하게 나타났다. 그러나 용접 잔류응력은 다양한 변수들의 상호 작용으로 발생하므로 참가자간 해석 결과 차이를 특정 변수의 영향으로 판단하기에는 어려움이 있다.

(4) 그러나 자체 민감도 해석 및 분석 결과 본 round robin 에서의 잔류응력 해석 결과 차이는 참가자간의 경계 조건 설정, 비드 수, 비드 형상 및 요소 종류로 인해 발생하였다고 판단된다.

이와 같은 해석 결과는 향후 수행될 용접부 수명평가, 균열 진전 평가 및 2차 응력 평가에 중요한 자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원의 잔류응력해석 모델링 기법 연구(M207AE030001-08A0503-00111) 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Kim, J. S., Park, J. S. and Jin, T. E., 2005, "Review on the International Joint Researches for Evaluation of Welding Residual Stresses," *Journal of KWS*, Vol.23, No.6, pp.504~513.
- (3) Janosch, J. J., 2008, "International Institute of Welding Work on Residual Stress and Its Application to Industry," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol 85, pp.183~190.
- (4) Commission of Design, Analyses and Structural Strength of Welded Structures, 2005, "Standardization

- for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld Using FEA," *Journal of KWS*, Vol.23, No.6, pp.497~503.
- (5) EPRI, 2004, "Materials Reliability Program : Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106), *EPRI Report*.
- (6) Brust, F. W., Scott, P. M., 2007, "Weld Residual Stresses and Primary Water Stress Corrosion Cracking in Bimetal Nuclear Pipe Welds," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2007-26297.
- (7) ASME, 2004, "Welding and Brazing Qualification ," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. IX
- (8) British Energy Generation Ltd., 2004, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," *R6 Rivision 4*.
- (9) Song, T. K., Bae, H. Y., Kim, Y. J., Lee, K. S. and Park, C. Y., 2008, "Sensitivity Analyses of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Welding," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 32, No.9,770~781.
- (10)Special Metals Corporation, 2007, Inconel 600 & 690 information, www.specialmetals.com
- (11)ASME, 2004, Materials-Part D : Properties, *AMSE Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. II
- (12)Elocate, C. D., Dennis, R. J., Bouchard, P. J. and Smith, M. C., 2005, "Three Dimensional Multi-Pass Repair Weld Simulations," *Int. J. of Pres. Ves. & Piping*, Vol.82, pp.244-257.
- (13)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, No. 8.,PP.668~677.
- (14)EPRI, 2007, "Material Reliability Program: Advanced FEA Evaluation of Growth of Postulated Circumferential PWSCC Flaws in Pressurizer Nozzle Dissimilar Metal Welds (MRP-216, Rev. 1): Evaluations Specific to Nine Subject Plants," *ERPI report*, Palo Alto, CA: 2007.1015400.
- (15)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.