

# 원전 노즐 용접부 잔류응력 예측에 대한 유한요소 해석 Round Robin 결과 및 분석

송태광\* · 배홍열\* · 김윤재† · 이경수\*\* · 박치용\*\* · 양준석\*\* · 허남수\*\*\* · 김종욱\*\*\* · 박준수# · 송민섭# · 이승건# · 김종성### · 유승천#### · 장윤석###

Results and analyses for simulational round robin on welding residual stress prediction in 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 (일차수응력부식균열), Safety/Relief nozzle (안전/방출 노즐)

## Abstract

In this paper, results of simulational round robin test on residual stress prediction was provided. Welding residual stress is one of the reasons for primary water stress corrosion cracking in PWR. Therefore, quantifying the welding variables and defining the recommendation for prediction welding residual stress is important. Through the round robin test, it is known 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.

## 1. 서 론

용접 잔류응력은 여러 변수를 포함하므로 용접 잔류응력 예측을 위한 유한요소 해석 결과는 해석자에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있다<sup>[1]</sup>. 따라서 용접 잔류응력 해석 결과에 영향을 미치는 변수에 대한 정량화 및 해석 지침 제공을 위해 국내외적으로 다양한 노력이 시도되고 있다.

이러한 취지로 국내에서는 5 개 연구 기관이 참

가하여 안전/방출 노즐 이중금속용접부를 대상으로 유한요소 잔류응력 해석 round robin 을 수행하였다. 해석은 2007 년 8 월부터 두 차례에 걸쳐 수행하였으며 고려대, 한전 전력연구원, 한전 기술(주), 한국원자력연구원, 성균관대학교 등의 5 개 기관에서 6 팀이 참가하였다. 본 논문에서는 두 차례에 걸쳐 수행한 round robin 해석 결과를 정리하였다.

## 2. 유한요소 잔류응력 해석 관련 변수

Fig. 1 은 본 연구에서 고려한 고려 원전 가압기 안전/방출 노즐을 나타낸다. 노즐 용접부는 노즐/안전단 사이의 이중금속용접부, 안전단/배관 사이의 동종금속용접부로 이루어진다.

Table 1 은 노즐 제작 시 적용된 용접절차규격서(WPS)를 나타낸다. 표에서 확인할 수 있는 용접속도, 비드 수, 용접 전류 및 전압은 용접 잔류응력 해석의 위한 변수가 된다.

† 김윤재, 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

#### 성균관 대학교 기계공학부

**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

### 3. Round robin 해석 결과

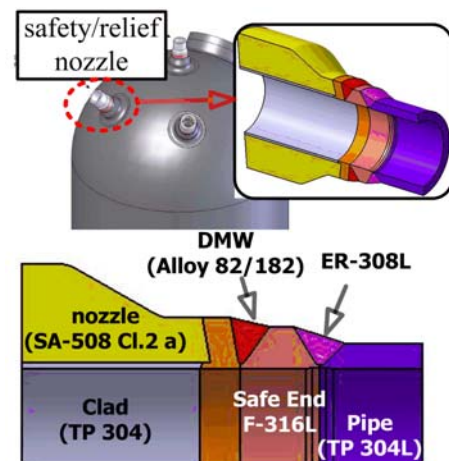
Round robin 해석은 두 차례로 나누어 수행되었다. 1 차 해석에서는 노즐/안전단 사이의 이중금속 용접에 대해서만 잔류응력 해석을 수행하였으며 2 차 해석에서는 안전단/배관 사이의 동종금속용접이 추가로 수행될 때에 대해서 잔류응력 해석을 수행하였다. 각 단계에 대한 구체적 설명 및 결과는 3.1 및 3.2 절과 같다.

#### 3.1 1 차 해석 결과

1 차 round robin 해석 시 모든 참가자에게는 안전/방출 노즐 도면, 용접절차서방서 및 재료 물성이 제공되었다. 재료 물성은 재료 제작자의 실험자료, 설계 코드 및 문헌에서 얻을 수 있었다.

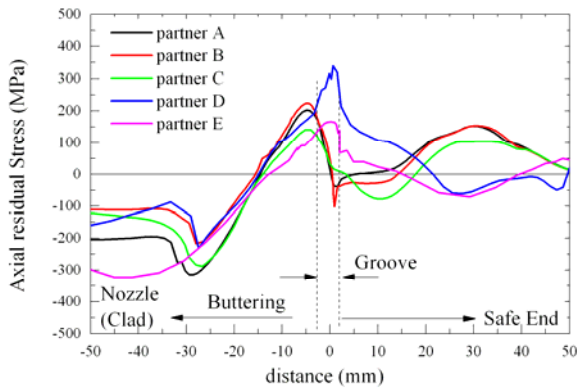
잔류응력 산출 경로는 path A, B 및 C로 설정하였으며 path A는 내면 잔류응력 검출 경로를, path B는 이중금속용접부 두께 방향 잔류응력 검출 경로를, path C는 동종금속용접부 두께 방향 잔류응력 검출 경로를 나타낸다.

Fig. 2(a) 및 (b)는 이중금속용접 후 내면에서의 축 방향 및 원주방향 잔류응력을 나타낸다. 그림에서와 같이 노즐 내면 축 방향의 경우 버터링 용접부 및 용접부에서는 인장 잔류응력이 그리고 노즐에서는 압축 잔류응력이 발생한다.

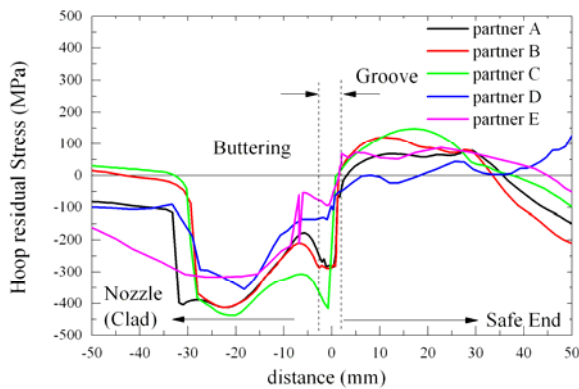
**Fig. 1** Safety/Relief nozzle considered in this work.

원주 방향 잔류응력의 경우 버터링 용접부 및 용접부 내면에서 압축 잔류응력이 발생한다. 그러나 이러한 잔류응력 분포는 상호간의 비교가 힘들기 때문에 본 연구에서는 용접부 중앙±10mm를 PWSCC에 민감한 관심영역으로 선정하였으며 그 결과 축 방향 잔류응력의 참가자 각각의 평균값은 31~200MPa 범위의 인장을 나타낸다.

Fig. 3은 path B에서의 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 축 방향 잔류응력의 경우 내면에서 인장을 나타내며 외면 방향으로 압축, 인장 분포를 나타낸다. 또한 원주 방향 잔류응력은 내면에서 압축 잔류응력을 나타내며 외면 방향으로 갈수록 강한 인장 잔류응력을 공통적으로 나타내고 있다.

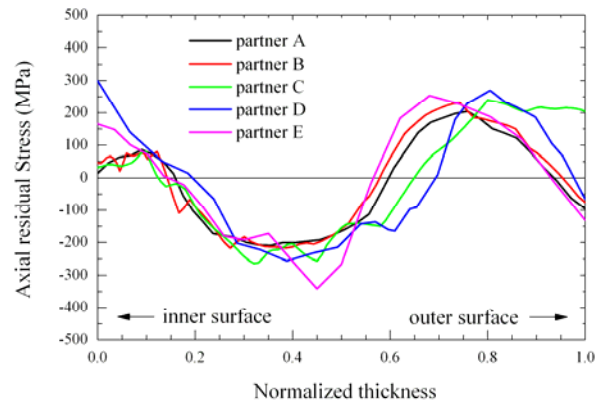


(a)

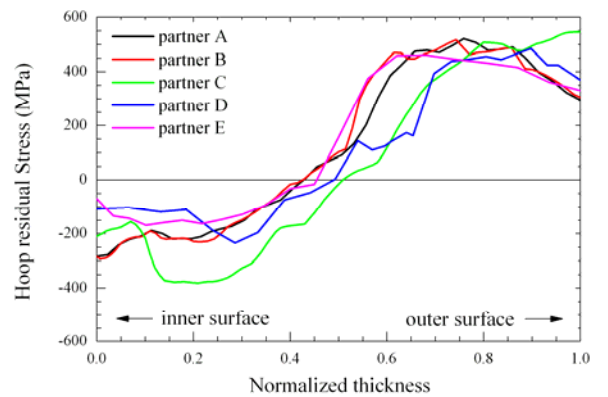


(b)

**Fig. 2** Residual stress distribution at the inner surface (a) Axial and (b) hoop stress



(a)



(b)

**Fig. 3** Residual stress distribution along the weld thickness. (a) Axial and (b) hoop residual stress

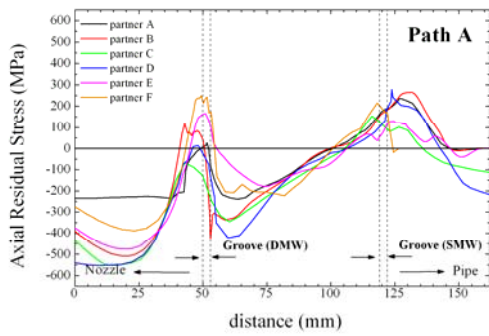
### 3.2 2차 해석 결과

Round robin 1차 해석에서는 참가자들이 고려한 노즐 형상이 일부 차이가 있었으므로 2차 해석에서는 모든 참가자들이 동일한 형상을 사용하였다. 이 밖에 해석 조건은 1차 해석과 동일하다.

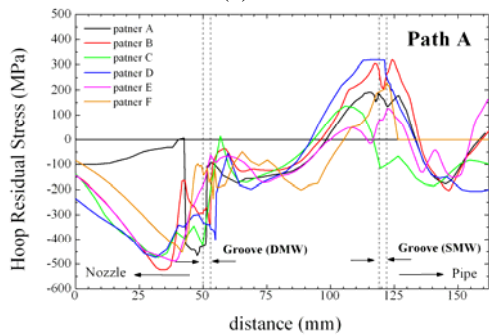
Fig. 4(a) 및 (b)는 노즐 내면(path A)에서의 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 축 방향 잔류응력의 경우 이중금속용접부 및 동종금속용접부 내면에서 인장 잔류응력이 발생하며 원주 방향 잔류응력의 경우 이중금속용접부에서 강한 압축 잔류응력이, 동종금속용접부에서는 인장잔류응력이 발생한다. 이와 같은 결과는 1차 해석 결과와 비교할 때 동종금속용접을 수행함으로써 이중금속용접부 내면 축 방향 및 원주 방향 잔류응력이 압축방향으로 줄어드는 것을 보여준다<sup>[2]</sup>. 또한 해석 범위가 늘면서 각 참가자들의 결과값의 분산도가 커짐을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 path B에서의 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 이중금속용접부의 잔류응력 분포는 내면을 제외하면 동종금속용접 전과 경향 및 값이 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig. 6은 path C에서의 잔류응력 분포를 나타낸다. 동종금속용접부의 잔류응력 분포는 용접 전 안전단에 남아있는 잔류응력 분포로 인해 이중금속용접부와 전혀 다른 잔류응력 분포를 나타내게 된다. 축 방향 잔류응력의 경우 내면에서 인장 잔류응력이 발생하며 외면으로 갈수록 전반적으로 압축력이 발생한다. 원주 방향의 경우 내면에서는 참가자에 따라 인장 또는 압축 잔류응력이 발생하며 외면에서는 인장잔류응력이 발생한다.

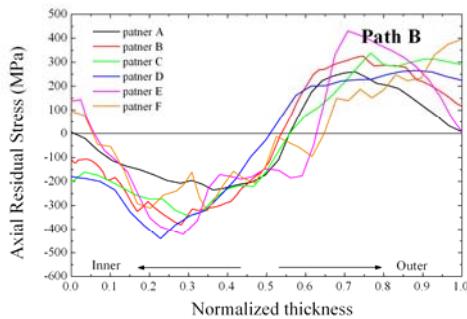


(a)

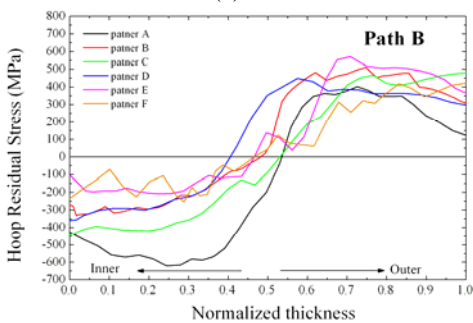


(b)

**Fig. 4** Residual stress distribution at the inner surface. (a) Axial and (b) hoop

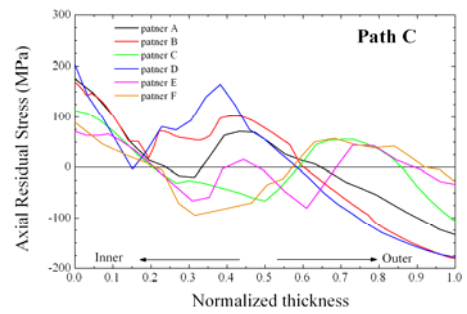


(a)

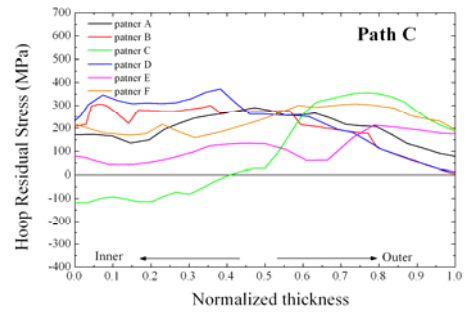


(b)

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



(a)



(b)

**Fig. 6** Residual stress distribution along the similar metal weld thickness. (a) Axial and (b) hoop residual stress

#### 4. 결론

두 차례에 걸쳐 수행한 잔류응력 round robin 해석 결과는 다음과 같다.

1) 잔류응력 해석을 수행한 결과 안전/방출 노즐 이중금속용접부 내면에서는 축 방향 인장 잔류응력이, 원주 방향 압축 잔류응력이 발생하였다.

2) 안전/방출 노즐에서 동종금속용접을 수행하게 되면 이중금속용접부 내면에는 압축력이 발생하여 기존 잔류응력이 완화된다.

3) 모델링, 열 해석 및 응력 해석과 관련한 변수 차이로 해석결과는 편차가 있었다. 그러나 용접잔류응력은 다양한 변수들의 상호 작용으로 발생하므로 참가자간 해석 결과 차이를 특정 변수의 영향으로 판단하기에는 어려움이 있다.

#### 참고문헌

- (1) Kim, J.S., Jin, T.E., Dong, P., 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) Song, T. K., Bae, H. Y., Chun, Y. B., Oh, C. Y., Kim, Y. J., Lee, K. S., 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