

# 노즐 이종용접부 잔류응력에 미치는 동종용접의 영향 평가

유승천\* · 정재욱\* · 장윤석\* · 김영진 †

## Evaluation of Similar Metal Weld Effects on Residual Stress of Nozzle Dissimilar Metal Weld

Seung Cheon Yu, Jae Uk Jeong, Yoon Suk Chang and Young Jin Kim

**Key Words :** Dissimilar/similar metal weld(이종/동종 금속 용접), Numerical method(수치해석), Residual stress(잔류응력), Round robin (다자해석)

### Abstract

Determination of weld-induced residual stress has been an important issue in nuclear power industry because several failures were reported in dissimilar metal weld parts due to primary water stress corrosion cracking. In this context, a couple of remarkable round robin analyses were conducted to quantify the welding simulation variables and to establish optimized numerical analysis process. The purpose of the present research is to introduce welding simulation results for a safety and relief nozzle, which has a dissimilar metal weld part as well as a similar metal weld part. First, finite element analyses are carried out to calculate residual stresses at the inside of nozzle considering only dissimilar metal welding. Subsequently, residual stresses taking into account both the dissimilar and similar metal welding are computed. The similar metal weld effect is evaluated by comparing these analysis results and technical findings derived from the evaluation are fully discussed.

### 1. 서 론

최근 원전 주요기기와 이를 연결하는 배관의 이종금속 용접부에서 일차수응력부식균열(PWSCC; Primary Water Stress Corrosion Cracking)에 의한 손상이 보고되고 있다. PWSCC의 발생원인은 용접잔류응력, 응력부식에 민감한 재료성질과 부식환경의 상호작용 등에 기인한 것으로 알려져 있으며, 용접잔류응력의 영향에 대한 관심이 높아지면서 다수의 관련 연구가 이루어지고 있다. 그러나 용접잔류응력 예측 시 여러 가지 변수를 고려해야 하기 때문에 접근 방법에 따라 그 결과에 차이가 발생하므로, 용접잔류응력 예측을 위한 수치해석에 영향을 주는 변수 파악 및

민감도 및 해석 과정에 대한 가이드라인을 제공하기 위한 연구가 시도된 바 있다. 대표적인 예로 IIW(International Institute of Welding), PVRC(Pressure Vessel Research Council)와 EU(European Union)에서 수행한 국제 공동연구는 비교적 단순한 평판 맞대기 용접에 대한 다자해석(round robin)이었다<sup>[1]</sup>.

한편 원전 주요기기의 연결부는 대부분 배관 맞대기 용접으로 시공되는 이종금속 용접부이기 때문에 이 점을 고려한 연구가 필요하다. 관련 연구의 일환으로 국내 5개 연구기관의 6개 팀이 참여하여 고리 원전 3,4 호기의 안전/방출 노즐의 이종금속 용접부에 대한 유한요소해석 다자해석을 실시하였다. 안전/방출단 모형(mock-up)은 이종금속 용접부 1개와 동종금속 용접부 1개로 총 2개의 용접부를 가지고 있으며, 다자해석은 Phase I에서 이종금속 용접부만을 고려한 해석을 수행하였고 Phase II에서는 이종 및 동종금속 용접부를 모두 고려한 해석을 수행하였다. 본 논문

† 김영진, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim50@skku.edu

TEL : (02)290-7504 FAX : (02)290-5276

\* 성균관대학교 기계공학부

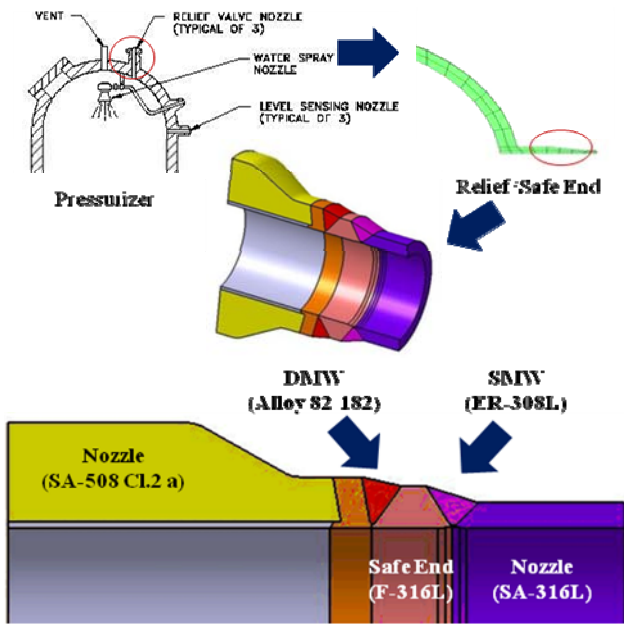


Fig. 1 Schematic drawing of a safety/relief nozzle and each part with corresponding material

문은 다자해석에 참여하여 실시한 용접잔류응력 예측을 위한 수치해석 결과를 소개하고, 이를 토대로 동종금속 용접부가 이종금속 용접부에 미치는 영향을 확인하기 위한 것이다.

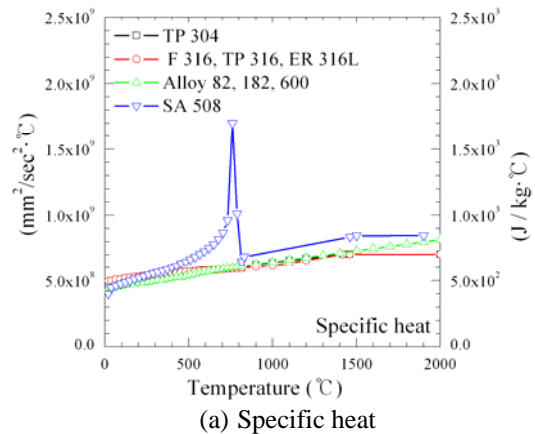
## 2. 해석 조건

### 2.1 해석 대상

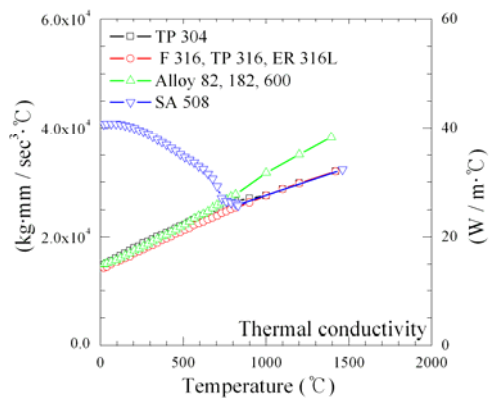
본 연구에서 고려한 해석 대상은 고리 3, 4 호기 원전 가압기 안전/방출 노즐로써, 개략적인 형상은 Fig. 1 과 같다. 안전/방출 노즐은 왼쪽부터 노즐, 이종금속 용접부(DMW; Dissimilar Metal Weld), 안전단(safe end), 동종금속 용접부(SMW; Similar Metal Weld)와 배관의 순서로 구성되어 있다. 각 부분에 대한 용접 특성은 Table 1 에 제시하였다. 이 중 버터링(buttering) 부분은 후열처리를 통해 잔류응력을 감소시켰기 때문에 전체 해석에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단하였다.

### 2.2 재료 물성

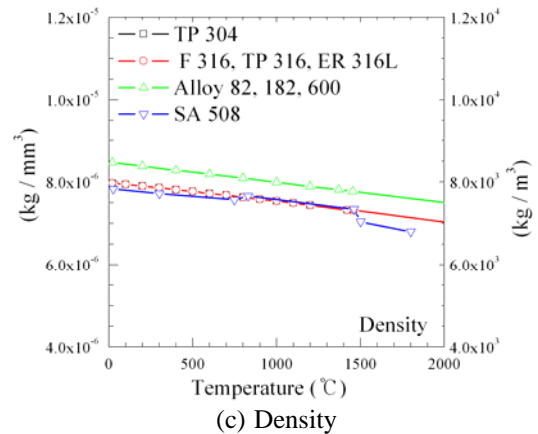
온도에 따른 열적, 기계적 재료 물성은 Fig. 2, 3 및 Table 2 에 제시하였다. 이는 재료 제작자의 실험자료<sup>[2]</sup>, 설계 코드<sup>[3]</sup> 및 문헌<sup>[4]</sup>에서 얻은 것을 다자해석 참가자에게 배포한 것으로, 본 연구에서는 이 자료를 사용하였다.



(a) Specific heat

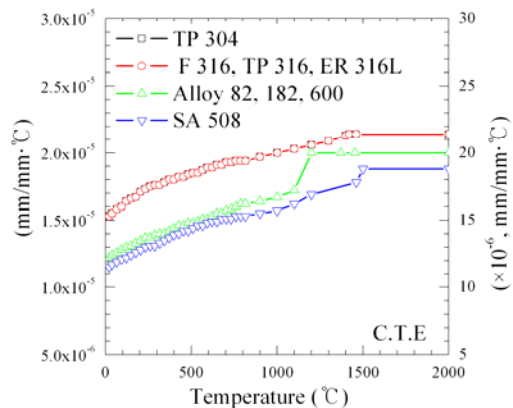


(b) Thermal conductivity

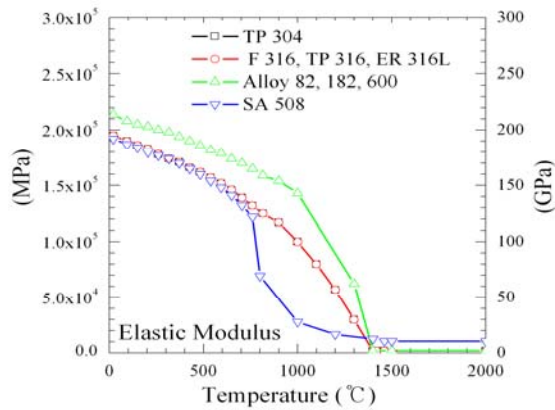


(c) Density

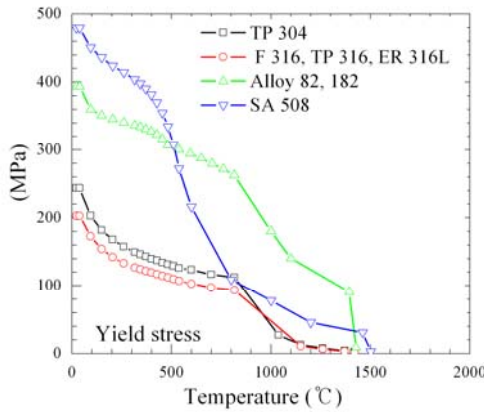
Fig. 2 Thermal properties according to temperature



(a) Coefficient of thermal expansion



(b) Elastic modulus



(c) Yield strength

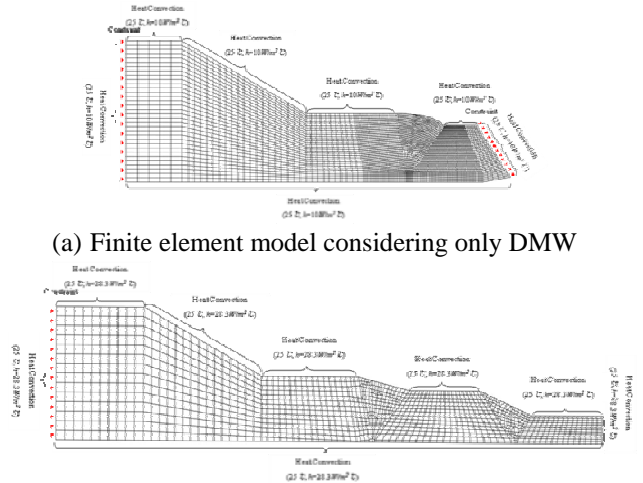
Fig. 3 Thermal properties according to temperature

**Table 1** Welding procedure specification for safety/relief nozzle

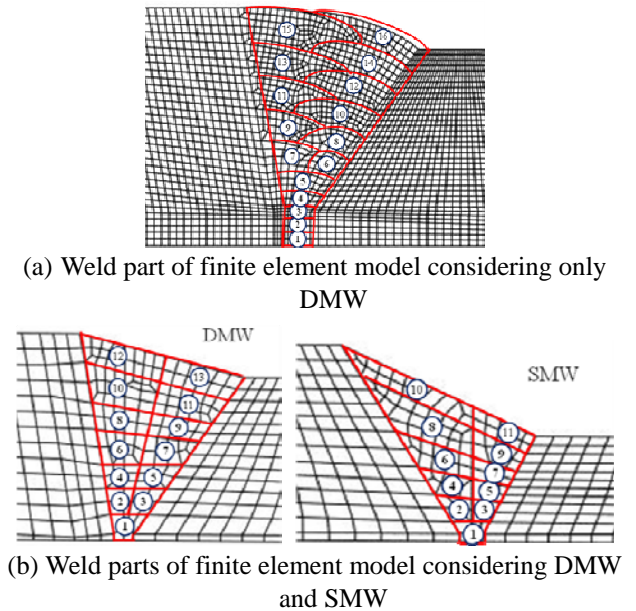
Weld	Size (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Trv. Speed (cm/min)
DMW	Ø 3.2	135	25	5~10
SMW	Ø 3.2	105	27	5~10

**Table 2** Latent heat of materials

Material	Latent Heat (J/kg)	Solidus Temp. (°C)	Liquidus Temp. (°C)
SA-316L	3.00E+05	1420	1460
SA-508 Cl.2	2.39E+05	1461.09	1501.04
Inconel 82/182	6.00E+05	1371	1454



(a) Finite element model considering only DMW  
(b) Finite element model considering DMW and SMW  
Fig. 4 Thermal and mechanical boundary conditions during welding



(a) Weld part of finite element model considering only DMW  
(b) Weld parts of finite element model considering DMW and SMW

Fig. 5 Welding order for welding simulation

### 2.3 열적 경계조건

열전달 해석을 위한 열적 경계 조건은 Fig. 4 와 같다. 용접부는 SMAW(Shield Metal Arc Welding) 과 정으로 용접 비드가 용착되는 동안은 단일과정으로 가정하였다. 용접 비드는 동종용접부만을 고려한 해석에서는 액상온도보다 높은 1800 ℃로 용착된다고 가정하였으나, 동종 및 이종용접부를 모두 고려한 해석에서는 이 보다 높은 2000 ℃로 가정하였다. 이는 다자해석 참가자들 간의 열해석 조건에 대한 해석결과 차이를 살펴보기 위한 것이었다. 이와 함께 대기온도와 열전달계수도 최초 자연 대류 조건인 25 ℃,  $h=10W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 로 가정하였으나 동종 및 이종금속 용접부를 고려한 해석에서는 25 ℃,  $h=28.4W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 로 가정하고 노출된 모든 면에 적용하였다. 입열량은 일반적인 입열량 계산식인

Eq. (1)을 사용하였다. 그리고  $V$  는 아크전압,  $I$  는 아크전류,  $A$  는 용접비드 단면적,  $v$  는 용접속도,  $t$  는 용접시간을 나타낸다. 유한요소 해석에 사용한 상용 코드인 ABAQUS 는 체적 열유속(body flux)과 표면 열유속(surface flux)을 통해 입열과정을 모사한다. 계산된 입열량은 체적 열유속으로 사용하였으며 체적 열유속과 표면 열유속을 9:1 의 비율로 적용하였다.

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

#### 2.4 기계적 경계조건

이중금속 용접과정 중에는 Fig. 4(a)와 같이 해석모델의 양쪽 끝을 구속하였다. 우선 노즐의 끝을 구속하였으며, 안전단의 끝을 용접비드의 용착 중에는 구속하였다가 용접비드가 모두 용착된 후 냉각과정에서는 구속조건을 제거하였다. 동종 및 이종용접부의 용접과정 중에는 Fig. 4(b)와 같이 노즐의 끝만을 용접 시작부터 냉각과정 끝까지 전 과정에 걸쳐 구속하였다.

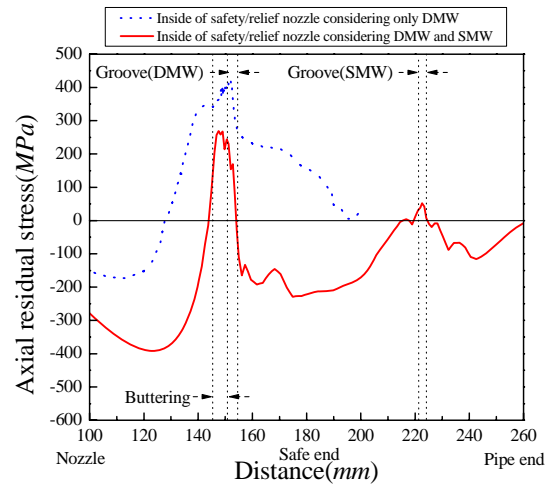
### 3. 유한요소해석

#### 3.1 용접과정 모사

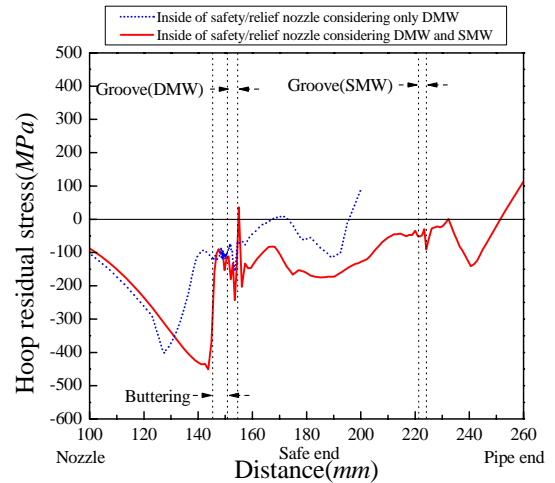
유한요소해석을 위한 모델은 상업 전처리기(pre-processor)인 I-DEAS<sup>[5]</sup>를 이용하여 축대칭 유한요소모델로 작성하였다. 열전달 해석에서는 8 절점 2 차 요소를 사용하였고, 열응력 해석에서는 reduced 2 차 요소를 사용하여 해석결과의 정확성을 높이고자 하였다<sup>[6]</sup>. 용접 비드는 용접절차서(WPS; Welding Procedure Specification) 상의 개수를 그대로 사용하여 이중금속 용접부만을 고려한 경우 16 개, 이종 및 동종금속 용접부를 모두 고려한 경우 각각 13 개와 11 개로 구성하였다. 용접순서는 노즐에서 안전단 방향으로 Fig. 5 와 같이 적용하였다.

#### 3.2 열전달 해석

과도 열전달 해석 후 잔류응력 해석에는 ABAQUS 를 사용하였다. 해석과정 중 용접비드가 용착되는 것을 모사하기 위해 ABAQUS 에서 지원하는 'Model Change' 옵션을 사용하였다<sup>[6]</sup>. 유한요소모델을 모두 작성한 후 용접부의 요소를 제거한 후 용접순서에 맞추어 재생성하여 주는 방법으로 실제 용접과정을 모사해 준다. 입열시간은 축대칭 2 차원 WPS 상의 용접속도의 역수로 하였으며, 냉각시간은 WPS 상에서 제시하는 최대층간온도(maximum inter-pass temperature)인 173 ℃를 넘지 않도록 조정하였다<sup>[7]</sup>.



(a) Axial residual stress



(b) Hoop residual stress distribution

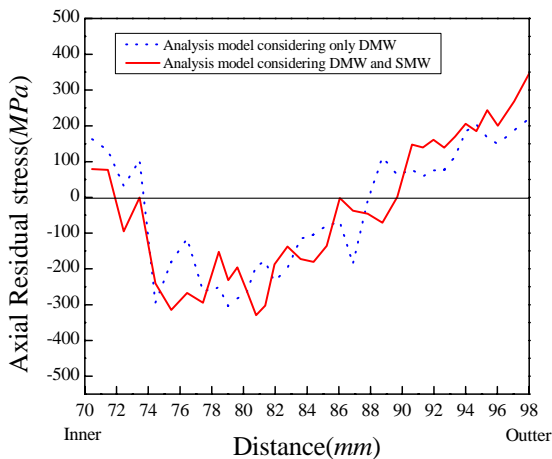
Fig. 6 Residual stress distribution at the inner surface of safety/relief nozzle with 2 analysis models

#### 3.3 열응력 해석

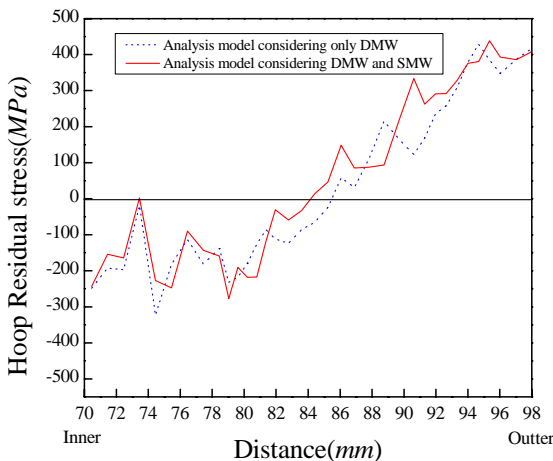
잔류응력 모사를 위해 유한요소 탄소성 응력 해석을 수행하였으며, 이 때 보수적인 해석을 위해 등방경화(isotropic hardening) 재료 거동식을 사용하였다<sup>[8]</sup>. 응력풀림 온도(annealing temperature)를 용융점을 선정하여 응력풀림 효과를 고려하였다. 상변태(phase transformation)를 고려하지 않은 유한요소 잔류응력 해석은 상변태를 고려한 해석에 비해 보수적인 결과값을 제시하므로<sup>[9]</sup> 본 연구에서는 상변태를 고려하지 않았다.

#### 3.4 유한요소 해석결과

유한요소해석의 대상 형상을 살펴보면 이중금속 용접부와 동종금속 용접부 상단부 사이의 거리가 용접 두께의 절반 정도로 가깝다. 순차적인 용접에 의해 상대적으로 먼저 실시된 용접으로 발생된 잔류응력과 변형은 나중에 실시된 용접의 영향을 받게 될 것으로 예상된다.



(a) Axial residual stress distribution



(b) Hoop residual stress distribution

Fig. 7 Residual stress distribution from inner to outer surface of DMW with 2 analysis models

노즐내면의 잔류응력을 보면 Fig. 6 에서와 같이 이중금속 용접 후 용접부 부근에서 축방향으로 인장 잔류응력이, 원주방향으로는 압축 잔류응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

이중금속 용접부 내부의 잔류응력은 Fig. 7 과 같이 이중금속 용접 직후의 잔류응력과 동종금속 용접작업을 한 후의 잔류응력이 거의 유사한 분포를 나타낸다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 가압기 안전/방출 노즐에 대한 다자해석의 일환으로 유한요소해석을 수행하였다. 가압기와 연결된 노즐은 안전단을 사이에 두고 이중금속 용접부와 동종금속 용접부에 의해 연결되어 있기 때문에 이중금속 용접보다 나중에 실시되는 동종금속 용접의 영향을 받게 된다. 이중금속 용접 후 동종금속 용접을 수행하면 이중금속 용접

부 내면의 축방향 및 원주방향으로 압축 잔류응력이 부가되어 전반적으로 잔류응력이 낮아지는 것을 확인하였다. 그러나 동종금속 용접의 영향은 노즐 내면에만 영향을 주며 용접부 내면의 두께방향 잔류응력에는 영향을 주지 못한다. PWSCC 는 주로 용접부에서 발생하기 때문에 용접부 균열 및 피로 수명평가 시 잔류응력 분포는 중요 변수가 된다. 따라서 동종금속 용접부를 고려하지 않으면 상대적으로 보수적인 평가가 이루어질 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) 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
- (2) ASME, 2004, "Materials", *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. II, Part D
- (3) Special Metals Corporation, 2007, "Inconel 600 Information", [www.specialmetals.com](http://www.specialmetals.com)
- (4) Brickstad, B., Josefson, B. L., 1998, "A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes", *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 75, pp. 11~25
- (5) I-DEAS, 2000, "I-Deas Assembly Design", SDRC Korea
- (6) ABAQUS, 2003, "ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.4", Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.
- (7) ASME, 2004, "Welding and Brazing Qualification", *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. IX
- (8) Bate, S. K., Warren, A. P., Watson, C. T., Hurrell, P., Francis, J. A., 2007, "UK research programme on residual stresses – progress to date", *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2007-26337
- (9) Bate, S. K., Warren, A. P., Watson, C. T., Hurrell, P., Francis, J. A., 2007, "UK research programme on residual stresses – progress to date", *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2007-26337