

유한요소법을 사용한 원전 노즐 용접잔류응력의 변수해석

김완재[†] · 이경수^{*} · 김태룡^{*} · 송태광^{**}

Parametric study for Welding Residual Stresses in Nozzle of Nuclear Power Plants using Finite Element Method

Wanjae Kim, Kyoung-Soo Lee, Tae-Ryong Kim and Tae-Kwang Song

Key Words : Welding Residual Stresses(용접잔류응력), Dissimilar Metal Welds(이종금속용접), Nozzle(노즐), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

Distribution of welding residual stresses are mainly characterized by degrees and frequencies of thermal loads applied to materials. However, other effects as component size and clamping condition can also affect stress distributions to a certain extent thus careful manipulation of these parameters based on clear understanding of how they affect residual stresses distributions and why can be additional measure to mitigate residual stresses. This paper discusses aforementioned issues for the case of safety and relief nozzle in nuclear power plant through finite element analysis.

1. 서 론

원전 가압기의 상부 헤드에 위치한 안전 및 방출 노즐(Safety and Relief Nozzles)은 이종 금속 용접(Dissimilar Metal Weld, DMW)과 동종 금속 용접 과정(Similar Metal Weld, SMW)을 거쳐 제작된다. 이종 금속 용접부는 내열 합금강인 인코넬(Inconel) 재질의 버터링(Buttering)부와 스테인레스강 재질의 안전단(Safe End) 사이에 스테인레스강 계열의 용가재(Filler Metal)가 채워져 구성된다. 인코넬 계열의 용접재료는 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking, SCC)에 민감하여 용접 잔류응력이 존재하는 경우 이종 금속 용접부에서 균열이 발생할 가능성이 있으며 실제 이와 같은 사례가 보고된 바 있다^[1-2].

응력부식균열에 대한 예방 및 보수를 위한 대표적 방법인 덧씌움 용접(Weld Over-Lay, WOL)은 용접부 외면 위로 덧씌움 용접을 하여 용접부의 응력 분포 상태를 균열 발생에 민감하지 않도록 재분포시켜 응력부식균열의 가능성을 낮추는 방법이다^[3].

덧씌움 용접 후 잔류응력 분포는 용접 범위 및 두께 등 다양한 용접 변수에 따라 상이한 결과를 보일 수 있으므로 실제 용접을 수행하기 전 전산모사를 통해 다양한 변수가 결과에 미치는 영향을 고찰하게 된다.

본 연구에서는 안전 및 방출 노즐 Mock-up 의 본 용접 후(As-Welded) 상태에 대한 유한요소해석을 바탕으로 노즐의 형상과 구속조건 및 동종용접 및 Buttering 이 이종금속용접부의 응력상태에 미치는 영향과 원인에 대해 고찰하였고 이를 통해 이종금속용접부의 응력 상태를 완화시킬 수 있는 기계적, 기하학적 조건을 제안하였다.

2. 노즐의 유한요소 모델링

Fig. 1a 는 원전 가압기 상부의 안전 및 방출 노즐의 형상 및 재질을 나타낸다. 이종용접부는 가압기 헤드 방향에 위치하고 있으며 동종용접부는 qo 배관 가까이에 위치하고 있다. 노즐의 유한요소모델은 형상의 기하학적 특성을 고려하여 Fig. 1b 와 같이 2 차원 축대칭으로 작성하였고 모델의 상세 치수는 Fig. 1c 에 나타나 있다.

모델 내 용접부는 Buttering 부와 이종용접부 그리고 동종용접부 등 모두 3 곳이다. Fig. 2a 는 용접

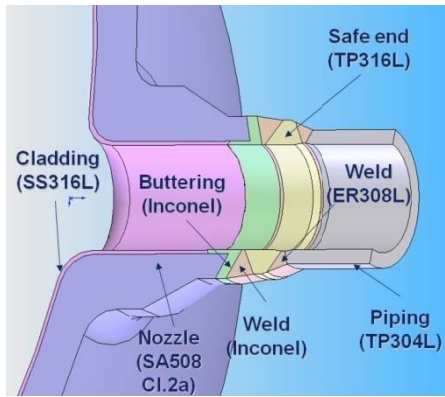
[†] 책임저자, 회원, 한전전력연구원

E-mail : wjkim@kepri.re.kr

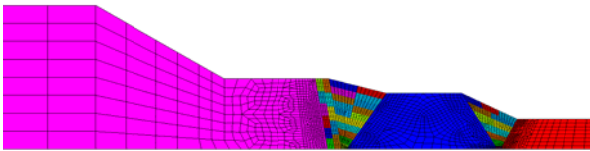
TEL : (042)865-5653 FAX : (042)865-5604

^{*} 회원, 한전전력연구원

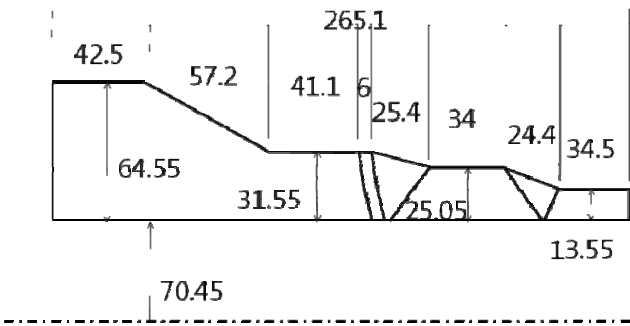
^{**} 회원, 고려대학교 기계공학과 원



a. Safety and Relief nozzle



b. Finite element model



c. Dimensions

Fig. 1 Safety and Relief nozzle: Illustration, FE model and dimensions.

절차사양서(Welding Procedure Specification, WPS)에 기록된 용접부 비드의 형상과 용접 순서이며 이를 바탕으로 Fig. 2b와 같이 유한요소모델을 작성하였다. 유한 요소 모델의 이종용접부는 모두 15 Pass로 실제 16 Pass보다 작지만 이는 결과에 영향을 미치지 않는다^[4].

Table 1은 용접절차사양서에 나타난 이종금속용접부의 용접 조건이다. 비드 별 용접 시간은 비드의 단면적이 동일하다면 대칭축에 가까울수록 감소하고 멀어질수록 증가하게 된다. 이종 및 동종용접부의 경우 Root부 3개 Pass는 용접 품질이 좋은 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)로 나머지는 일반적인 SMAW(Shielded Metal Arc Welding)로 용접하였다.

용접 해석에 사용한 전산 해석 코드인 ABAQUS

에서 요구하는 입열량은 단위시간당 부피당 에너지로서 $[Jt^{-1}L^{-3}]$ 의 단위를 갖으며 식(1)과 같이 구할 수 있다.

(1)

$$Q [J s^{-1} m^{-3}] = \frac{\eta VA}{Vol}$$

용접 효율 η 는 GTAW의 경우 0.5, SMAW의 경우 0.8로 정하였다. V, A는 용접 전류 및 전압을, Vol은 각 용접 Pass가 이루는 부피를 나타낸다. Pass당 용접 시간은 식(2)와 같이 용접 속도 v의 역수로 표현된다.

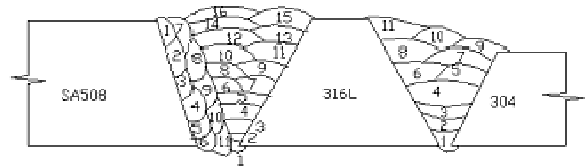
(2)

$$T_{heating} = \frac{1}{v}$$

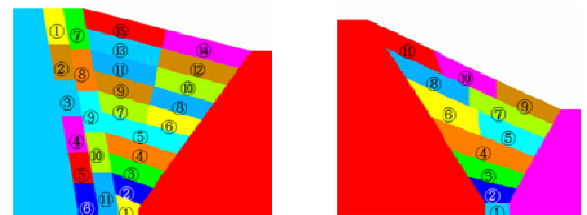
입열량과 입열시간은 비드의 부피와 Pass별 용접 속도에 따라 결정되므로 모두 다른 값을 갖게 된다.

대류(Convection) 및 복사(Radiation)에 의한 열 전달 중 복사에 의해 소실되는 열의 양은 잔류응력의 결과에 거의 영향을 미치지 않으므로 고려하지 않았다. 대류에 의한 열전달을 고려하기 위해 자연대류에 해당하는 열전달계수, $h=10W/m^2K$, 를 사용하였으며 대류면은 Fig. 3과 같이 정하였다.

수치 계산 후 응력 값은 Fig. 4에 나타난 경로를 따라 비교하였다. Path A는 노즐 내면의 Buttering부 하단 파이프 방향 끝에서 노즐 방향으로 62.5mm 지점에서 시작하여 내면의 파이프 끝단을 잇는 경로이다. Path B는 이종금속용접부 Root부 중간에서 Path A에 수직인 방향으로 노즐의 외면까지 이어진 경로이며 Path C는 동종금속용접부의 Root부에서 Path B와 동일한 방향을 따르는 경로이다.



a. Bead shapes and Welding sequence from WPS



b. FE models of Dissimilar and Similar Welds.

Fig. 2 Modeling Dissimilar and Similar Welds.

PASS No.	WELDING CONDITION			PROCESS
	Current (A)	Voltage (V)	Time (min)	
1	120	12	8'17"	GTAW
2	140	12	7'10"	
3	140	12	5'56"	
4	135	25	13'23"	SMAW
5			17'57"	
6			7'46"	
7			9'36"	
8			10'30"	
9			11'07"	
10			11'38"	
11			11'25"	
12			11'43"	
13			10'53"	
14			11'53"	
15			18'09"	
16			13'31"	

Table 1 Welding Conditions for Dissimilar metal weld.

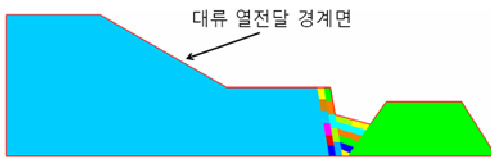


Fig. 3 Heat convection surface

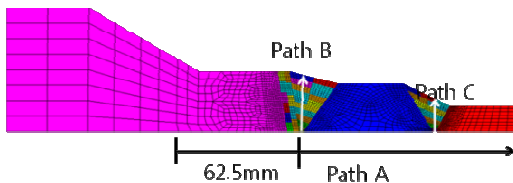


Fig. 4 Paths for residual stress evaluation

해석은 사용된 전산 코드는 범용 상용 유한요소 코드인 ABAQUS 이다. 모델은 2523 개의 Linear Axisymmetric 요소를 사용하여 작성하였으며 응력 해석은 기하학적 비선형성(Geometric Nonlinearity)를 고려한 순차적 비선형 열-탄소성 천이해석으로 수행하였다.

3. Buttering 및 동종금속용접의 영향

서론에서 언급한 바와 같이 안전 및 방출 노즐은 Buttering 과정, 이종용접 과정, 동종용접 과정을 거쳐 제작된다. 관심부인 이종용접부 잔류응력은 일

차적으로 용접 중 작용하는 반복적인 열하중에 의해 발생하나 이종용접 전후에 수행되는 Buttering 및 동종용접에 의한 영향 또한 존재한다. 본 장에서는 Buttering 및 동종용접 과정으로 인한 이종용접부의 잔류응력 분포 변화를 살펴보았다.

3.1 유한요소 모델

Buttering 과 동종용접에 의한 이종용접부의 잔류응력 분포 변화를 알아보기 위해 Fig. 5 와 같이 3 가지 모델에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 5a 는 Buttering 및 이종용접과 동종용접을 모두 고려한 모델이고 Fig. 5b 는 이종용접과 동종용접만을, Fig. 5c 는 이종용접만을 고려한 모델이다.

노즐과 안전단의 용접 전 접합성을 향상시키기 위해 노즐 부에 Buttering 을 시행한다. 이때 Buttering 에 의한 잔류응력은 용접 후 열처리(Post Weld Heat Treatment, PWHT)를 통해 제거하게 된다 [4]. 따라서 노즐의 유한요소 해석 시 많은 경우 Buttering 의 재질과 형상만을 고려하고 Buttering 과정은 생략하게 된다. 다만 본 연구의 해석 대상인 노즐 Mock-up 의 경우 후열처리를 하지 않았으므로 Fig. 5a 에서와 같이 Buttering 과정을 고려하여 해석하였다.



a. Buttering, DMW, SMW



b. DMW, SMW



c. DMW

Fig. 5 FE Models with consideration of welds

3.2 구속조건

본 해석에 적용된 구속조건은 모두 2 가지로 Fig. 6 에 나타난 바와 같이 과도 구속(over-constrained)인 경우와 적은 구속 또는 자유 변형(less-constrained /free expansion mode)인 경우이다. Fig. 6a 는 과도 구속 모드(over-constrained mode)로 용접의

전 과정에서 노즐부와 배관부 외면의 모든 자유도를 구속하고 용접 후 배관부의 구속만을 제거하였다. Fig. 6b 는 적은 구속 또는 자유 변형 모드(less-constrained /free expansion mode)를 나타낸다. 이 모드의 구속조건은 용접의 모든 과정에서 노즐부의 외면 상단부와 하단부만을 구속하고 배관부는 이중금속용접 및 동중금속용접의 첫 Pass 가 진행되는 과정 동안 외면의 하단에서 구속되며 그 이후로는 구속을 하지 않는다. 실제 노즐 제작의 구속조건에 따라 분포되는 잔류응력은 위의 2 가지 구속 조건에 의해 계산된 잔류응력 값에 의해 경계 지워 질(bounded) 수 있다.

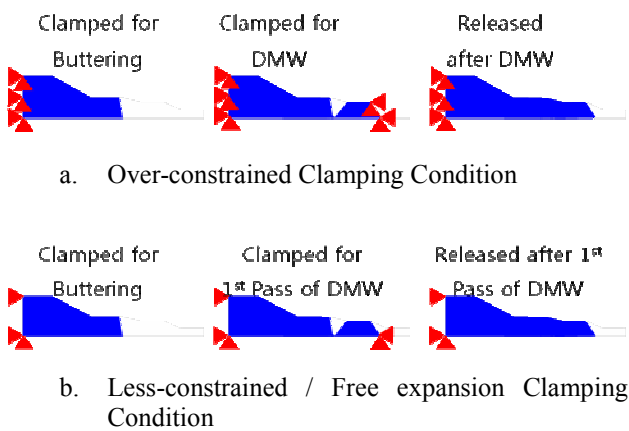


Fig. 6 Clamping conditions for analysis

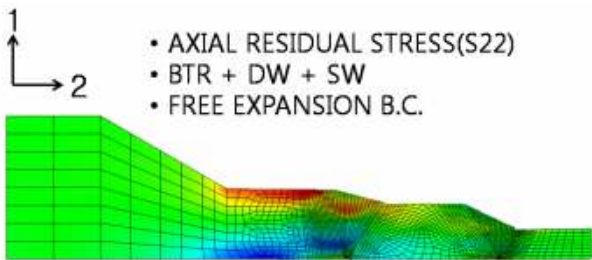


Fig. 7 Residual Stress Distribution in Axial(S22) Direction

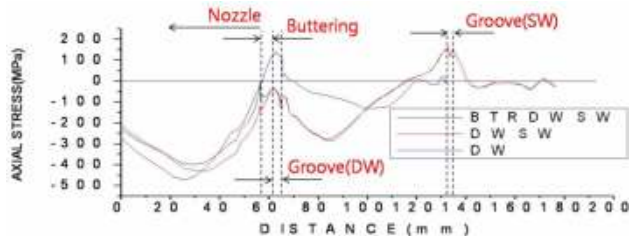


Fig. 8 Stress plots using different models in Fig. 5

3.4 해석결과

Fig. 7 은 노즐의 축방향 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림의 모델은 모든 용접부를 고려한 경우로서 Fig. 6b 의 구속조건을 사용한 결과이다. 잔류응력은 이중용접부 주위에 집중되는 경향을 보이며 외

면 하부에는 인장 잔류응력이, 내면 상부에는 압축 잔류응력이 분포한다. 이중용접부에 잔류응력이 집중되는 주된 원인은 이중용접부 단면적의 크기와 위치에서 찾을 수 있다. 이중용접부는 동중용접부에 비해 부피가 크고 Pass 수가 많으므로 더 크고 반복적인 열하중을 받게 된다. 또한 이중용접부는 노즐의 중심 쪽에 위치하여 배관부에 위치한 동중용접부에 비해 가열 및 냉각 시 주변 재료에 의한 구속을 더 크게 받는다. 따라서 잔류응력은 이중용접부에 집중되게 된다. 노즐 두께 방향을 따른 인장 및 압축 잔류 응력의 분포는 용접 비드를 쌓아 나가는 방향에 기인한다. 노즐의 용접은 Fig. 2 에서 보여지듯이 내부에서 외부로 진행된다. 따라서 마지막 용접 Pass 의 냉각이 끝나는 외면 주위에 인장응력이 분포하게 된다.

3.4.1 Buttering 및 동중용접효과

Fig. 8 은 Fig. 4 에 나타난 경로를 따라 구한 노즐의 용접 잔류응력 값이다. 과도구속 조건을 사용하였으며 BTRDWSW 은 Buttering 및 이중용접, 동중용접을 모두 고려한 모델이다. 동중용접 후 노즐 내면의 축방향 잔류응력은 전반적으로 감소하는 경향을 보인다. 특히 이중용접부 Groove 에서의 잔류응력은 약 140MPa 에서 -60MPa 크게 완화됨을 알 수 있다. Buttering 의 효과는 이중용접부에 국한되어 나타나며 근소한 응력 증가를 발생시키고 동중용접부에는 거의 영향을 주지 않는다. 동중용접에 의한 이중용접부에서의 축방향 잔류응력 완화는 적은 구속조건에서도 동일하게 발생한다.

3.4.2 용접부간 거리에 따른 효과

용접부간 거리에 따른 이중용접부의 잔류응력 변화를 보기 위해 모두 9 개의 모델에 대한 해석을 수행하였다. 모델은 이중용접부와 동중용접부간의 거리 조절을 통해 작성하였으며 실제 거리의 0.5 배에서 5 배의 거리를 갖는다. Fig. 9 에서는 용접부간 거리에 따라 내면에 발생하는 최대 축방향 잔류응력 값의 변화를 나타내었다. 용접부간 거리가 증가함에 따라 잔류응력도 증가하여 용접부간 거리가 실제 거리의 2 배 이상인 경우 동중용접에 의한 응력 완화 효과는 거의 나타나지 않는다.

4. 구속조건의 영향

구속조건에 따른 이중용접부 잔류응력 분포변화를 알아보기 위해 Fig. 6 에 나타난 2 가지 구속조건을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 10 은 Path A 를 따른 축방향 응력값으로 점선은 Fig. 6 의 과도구속 조건을 사용한 결과를 나타내고 실선은 자유변형 구속 조건을 사용한 결과를 나타낸다.

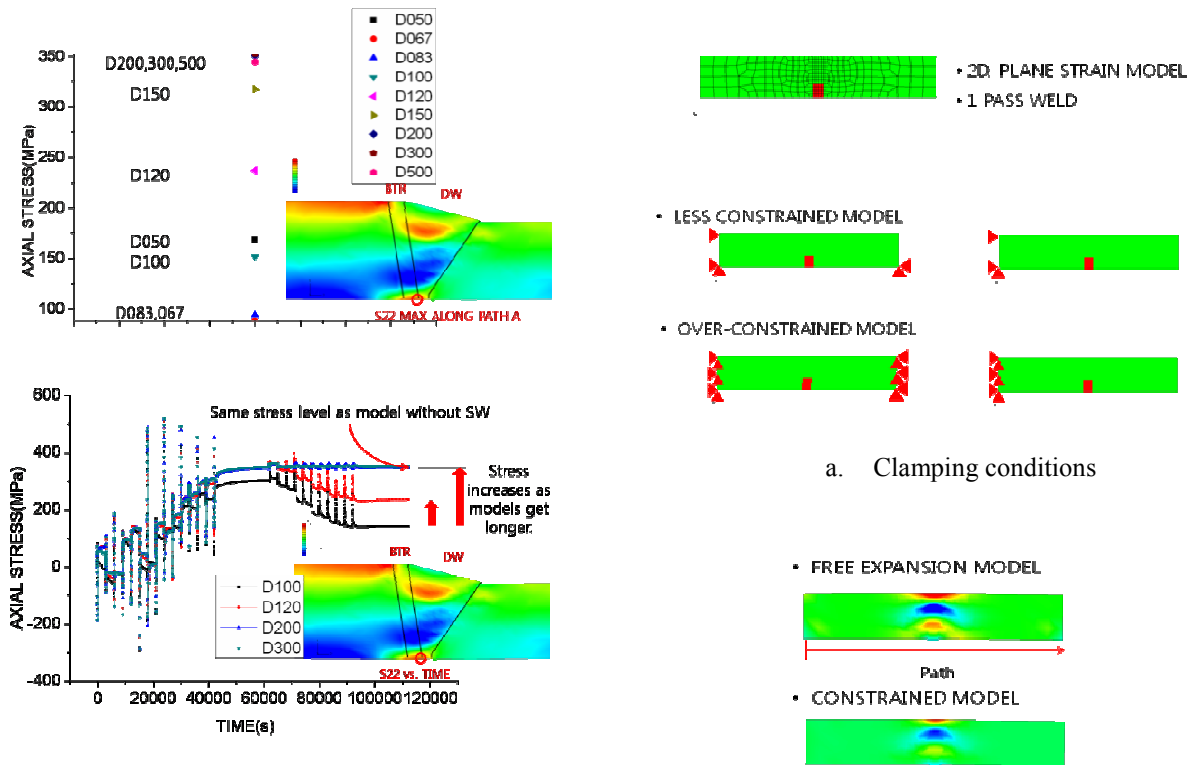
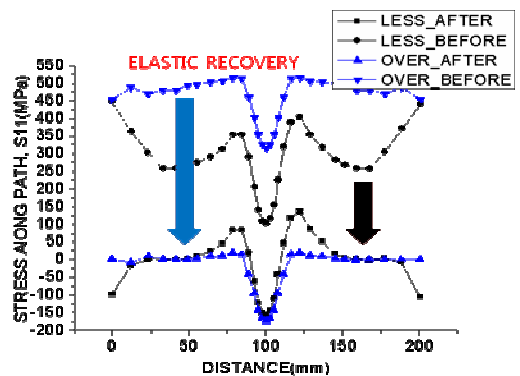


Fig. 9 Changes in distance from DMW to SMW vs. Residual stresses in DMW

적은 구속 조건의 경우 이중용접부에 발생하는 잔류응력의 최대값은 약 230MPa 로 과도 구속 조건에 비해 높다. 구속조건에 따른 잔류응력 값의 변화를 보기 위해 Fig. 11 과 같이 간단한 2 차원 모델을 작성하였다. Fig. 11b 에서 나타나듯이 과도 구속 조건을 사용한 경우 용접 후 구속의 제거에 따른 탄성회복의 크기가 적은 구속 조건을 사용한 경우 보다 크게 나타난다. 따라서 과도구속 조건을 사용한 해석의 경우 적은 구속 조건을 사용한 경우에 비해 낮은 응력 값을 갖게 된다.



b. Elastic recovery after clampings are removed.

Fig. 11 Example for Clamping condition effects

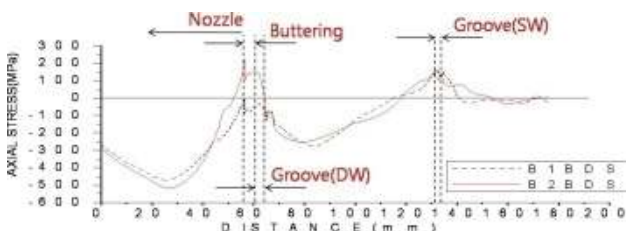
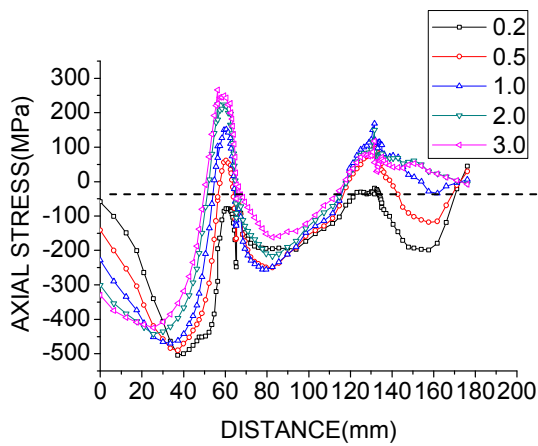


Fig. 10 Effects of Clamping conditions on Residual stresses in DMW

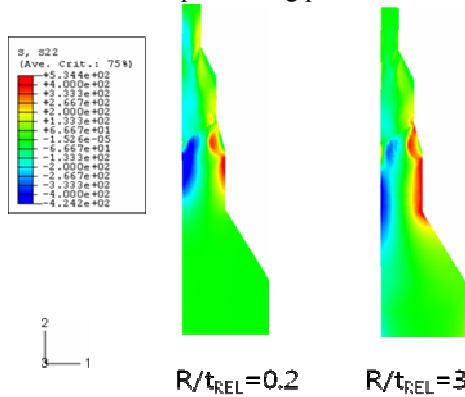
5. 반경 대 두께 비(R/t)의 영향

노즐의 반경 대 두께 비의 영향을 알아보기 위해 다양한 R/t 비를 갖는 유한요소모델을 작성하고 잔류응력을 평가해 보았다. 쉬운 비교를 위해 각 모델의 R/t 값을 실제 노즐의 R/t 값으로 나눈 값 (R/t_{REL})을 사용하였다. Fig. 12a 는 R/t_{REL} 값에 따른 노즐 내면의 축방향 잔류응력 분포이다. R/t_{REL} 값이 증가함에 따라 이중용접부의 잔류응력도 증가함을 알 수 있다. 노즐의 용접 후 축방향 잔류응력은 Fig. 7 에서와 같이 이중용접부 주위에 분포하

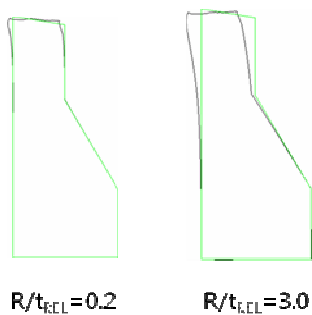
며 내면부에서는 압축잔류응력이, 외면부에서는 인장 잔류응력이 존재한다. 이로 인해 노즐은 부분적인 굽힘 하중 상태에 존재하게 된다. R/t_{REL} 값이 증가하여 상대적으로 얇은 노즐이 되는 경우 동일한 열하중 하에서도 큰 변형과 잔류응력이 발생하게 된다. Fig. 12b 는 $R/t_{REL}=0.2$, $R/t_{REL}=3.0$ 인 경우의 용접 잔류응력의 크기와 분포를 보여준다. 노즐이 얇아질 수록 잔류응력의 크기가 증가하고 분포 영역이 넓어짐을 알 수 있다. Fig. 12c 는 $R/t_{REL}=0.2$, $R/t_{REL}=3.0$ 인 경우에 대해 초기 형상과 변형 후 형상을 비교하여 나타낸 그림이다. R/t_{REL} 값이 증가함에 따라 큰 변형이 발생함을 알 수 있다.



a. Axial stress plots along path A with varying R/t



b. Changes in Stress contour due to R/t change



c. Deformation due to R/t changes(X20)

Fig. 12 Example for Clamping condition effects

6. 결론

본 연구에서는 원전 가압기의 안전 및 방출 노즐의 용접 후 상태에 대한 유한요소해석을 바탕으로 이중용접부의 잔류응력 분포에 영향을 미치는 요소들에 대해 고찰하였다.

- Buttering 및 동중용접의 영향
- 구속조건의 영향
- 용접부간 거리의 영향
- 반경 대 두께 비(R/t)의 영향

동중용접은 구속 조건에 관계없이 이중용접부 내면 전반에서 잔류응력을 완화시키는 효과를 가져온다. 용접부간의 거리가 증가함에 따라 응력완화 효과는 작아지며 실제 거리의 2 배 이상이 되면 효과는 미미하게 된다. Buttering 의 영향은 이중용접부에 국한하여 나타나며 약간의 응력 증가를 가져오나 그 영향은 크지 않다. 과도한 구속 조건에서 용접이 진행 되는 경우 용접 후 구속 제거에 따른 탄성 회복의 양이 크므로 노즐 내면에는 결과적으로 낮은 잔류 응력이 분포하게 된다. 용접 후 잔류응력의 분포로 인하여 노즐은 부분적인 굽힘 하중의 영향을 받게 된다. 이때에 R/t 가 증가하여 얇은 노즐이 될 수록 열하중에 의한 응력 및 변형은 크게 발생하게 된다.

참고문헌

- (1) Tae-Kwang Song et al. 2007, "Sensitivity Analysis of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Weld", KSME fall conference.
- (2) EPRI, 2004, "Material Reliability Program : Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds(MRP-106)", EPRI Report.
- (3) Tae-Kwang Song et al. 2008, "Sensitivity Analyses of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Weldment in Nuclear Power Plant", Trans. of the KSME(A), Vol. 32, pp. 770~781.
- (4) Dong, P. and Burst, F.W.,2000, "Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components : A Millennium Review and Beyond", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.122, pp. 328-338.