

튜브 용접부의 용접변형 및 잔류응력에 관한 연구

진형국^{*†} · 신상범^{*} · 이동주^{*} · 박동환^{**}

^{*}현대중공업 생산기술연구소

^{**}울산대학교 자동차선박대학원

A Study on Welding Distortion and Residual Stress for Tubular Welded Joint

Hyung-Kook Jin^{*†}, Dong-Ju Lee^{*}, Sang-Beom Shin^{*} and Dong-Hwan Park^{**}

^{*}Industrial Technology Institute, Hyundai Heavy Industries Co., LTd., Ulsan 682-792, Korea

^{**}Ulsan University, Institute of E-vehicle Technology, Ulsan 682-192, Korea

[†]Corresponding author : dhpark@ulsan.ac.kr

(Received September 12, 2012 ; Revised October 22, 2012 ; Accepted October 31, 2012)

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the distortion and the residual stress of GTA tubular welds between tube and head. In order to do it, the heat input model for GTA welding process was first developed by experiment and FE analyses. The welding distortion and the residual stress distribution of the tubular welds according to welding pass and various restraint degrees were evaluated by using FEA with the heat input model. From FEA results, it was found that the residual stress and the radial distortion at the weld toe of tube part decrease with a decrease in the number of welding pass. However, the maximum residual stresses in each direction of tubular welds are almost constant regardless of the external restraint degree. It was mainly due to the high internal restraint of the welds.

Key Words : Welding distortion, Residual stress, Restraint degree, Tubular joint

1. 서 론

국제 사회의 환경오염 물질 배출 규제가 점점 강화되고 있음에도 불구하고 에너지 수요의 증가로 인해 지난 10년간 화력발전 플랜트의 수는 지속적으로 증가함에 따라 발전 설비의 효율과 신뢰성을 증가시키기 위한 기술의 발전이 요구되고 있다. 또한 최근에는 지구 온난화 등의 환경 문제로 인하여 배출물이 적은 친환경 발전 설비에 대해 관심이 집중되고 있다. 대표적인 친환경 발전 설비로는 저열량탄이 완전 연소될 때까지 노내에서 지속적으로 순환시키는 순환유동층보일러(CFBC), 가스터빈의 배열을 이용해 증기터빈 구동용 증기를 생성하는 배열회수보일러(HRSG) 등이 있다. 이러한 발전 설비는 400℃, 4.0MPa 이상의 고온, 고압 환경에서 운용되며 열 효율을 증가시키기 위하여 운용 조건은

점점 가혹해지고 있다. 발전 설비에는 수많은 튜브와 헤드 사이의 용접부가 존재하며 일반적으로 한 프로젝트당 15만개의 용접부가 발생한다. 가혹한 운전 조건은 발전 설비의 수 많은 용접부에 존재하는 과도한 1, 2차 응력을 유발하며, 용접변형과 잔류응력 또한 이러한 구조응력에 영향을 미친다. 따라서 발전설비 용접부의 구조 안전성을 확보하기 위해서는 용접부의 변형과 잔류응력을 고려한 구조 안전성 평가가 요구된다.

이에 본 논문에서는 발전설비 튜브와 헤드 간 용접부의 외적 구속도와 용접 패스 수에 따른 용접변형과 잔류응력을 평가하였다. 이를 위하여 대한용접접합학회의 강도위원회가 제안한 해석 규정에 따라 용융지의 형상과 용접부의 온도이력에 대한 해석 및 실험 결과를 비교하여 GTA(Gas Tungsten Arc, 이하 GTA) 펄스 용접 입열 모델을 개발하였다¹⁾. 그리고 개발된 입열 모델을 이용하여 용접부의 외적 구속과 용접 패스 수에

따른 잔류응력 및 변형거동 특성을 평가하고, 이 결과를 토대로 튜브와 헤드 간 용접부에서 잔류응력 및 용접변형을 효과적으로 제어하기 위한 방안을 제안하고자 하였다.

2. 해석 모델 및 방법

Fig. 1은 유한요소해석을 이용한 용접 패스 수 및 구속도에 따른 용접부의 온도 분포, 용접 변형 및 잔류응력 거동 특성 평가를 위해 구성된 요소망을 도시한 것이다. 유한요소해석을 위한 요소망은 해석 모델에서의 기하학적 특성을 고려하여 4절점 축 대칭 요소를 이용하였고 용접 패스 수를 고려하여 구성하였다.

본 논문에서 선정한 해석 변수는 용접 패스 수 및 튜브의 길이 방향의 구속도(K_0)이며, 이를 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 구속도는 용접부에 발생하는 수축에 대한 저항성을 나타내는 지표로써 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$K_0 = \frac{\sigma_0}{\delta} [MPa/mm] \quad (1)$$

여기서, σ_0 는 튜브 용접부에 작용하는 단위응력이며, δ 는 단위응력 σ_0 가 작용할 때 튜브 용접부에 발생하는

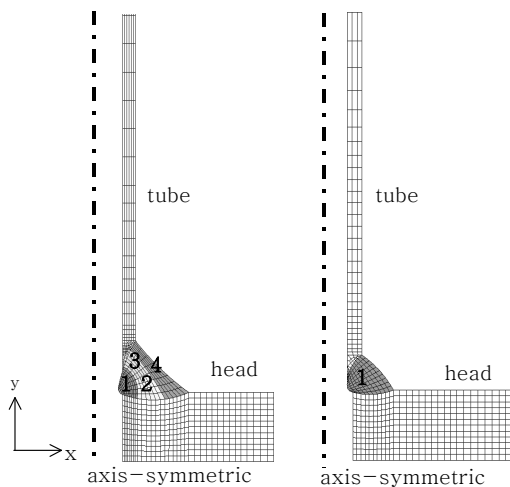


Fig. 1 Schematic configurations of FE analysis models

Table 1 Variables used for FE analyses

Number of welding passes	K_0 (MPa/mm)
1, 4	259, 518, 1034

Table 2 Mechanical properties and dimensions of tube and head part

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Tube	225	415	30
Head	275	485	30
Dimension (mm)			
Tube	Ø38.1mm(O.D) x 2.7mmt		
Head	Ø273.0mm(O.D) x 12.0mmt		

Table 3 Heat input for GTA tubular welds with the number of welding pass (kJ/cm)

Sequence	4 pass	1 pass
1	8.9	31.2
2	24.5	-
3	26.6	-
4	34.4	-

평균 수축량이다²⁾. 이에 본 연구에서는 유한요소해석 시 변위가 구속된 튜브의 길이를 변화시켜 구속도의 변화를 고려하였다. 본 논문에서 사용된 튜브와 헤드 재질의 기계적 물성, 치수 및 용접 패스 수에 따른 용접 입열량은 각각 Table 2와 Table 3과 같다.

각 용접부의 온도 분포는 용접 아크의 이동 속도가 일정하고 용접선의 길이 방향으로 열 손실이 없는 준정상상태 조건을 이용하여 3차원 열전달 문제를 2차원 문제로 축소 가정하고, 대한용접접합학회의 강도위원회가 제안한 아크 용접부의 온도 분포를 위한 해석 규약에 따라 평가하였다¹⁾. 해석 모델에 대한 요소망은 각 용접 패스의 입열에 해당하는 용접부 형상을 고려하여 생성하였으며, 4 패스 용접부의 경우 단계적인 적층을 수행하기 위하여 용접 개선면 내의 모든 요소는 생성 후 최초 해석 모델로부터 제거한 후 각 패스에 해당하는 입열이 가해지는 순간에 순차적으로 재 생성하는 방식을 이용하였다. 용접 아크에 의한 열속(heat flux)의 분포는 용접부의 용착금속 내에 균일하게 분포하는 체적 열원 (uniformly distributed volume heat source)으로 가정하였다. 또한, 용융지 내에서 최고 온도가 용착금속의 기화온도(약 3000°C)를 초과하지 않도록 하기 위하여 유효 열전달 계수를 도입하였으며, 잠열(latent heat)을 이용하여 가열된 용접부의 상 변태(phase transformation)와 상 변화(phase change)를 함께 고려하였다. 용접 및 냉각 과정 중 주변의 대기로 발생하는 열 손실은 Fig. 2와 같이 모든 영역에서 상온(20°C)의 공기와 자연 대류에 의하여 발생하는 것으로 가정하

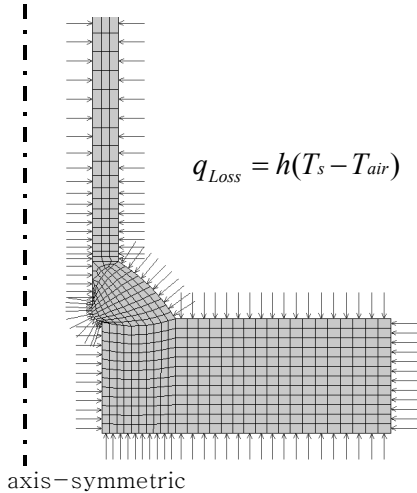


Fig. 2 Convection conditions for temperature distribution analyses(1 pass welding)

였으며, 용접부의 열적 물성은 온도에 의존하는 것으로 가정하였다^{3,4)}.

열 탄소성 해석 시 모재 및 용접부의 온도가 용접 (1450℃) 이상인 경우 용접부에서 발생하는 소성변형률을 리셋팅(resetting)하였으며, 모재 및 용접부의 기계적 물성은 등방성이고, 온도에 의존하는 kinematics strain hardening continuum로 가정하였다. 그리고 항복 개시 조건으로 von-Mises 조건을 적용하였다.

3. 온도, 잔류응력 및 용접변형 해석 결과

3.1 입열 모델과 온도 분포

GTA 펄스 용접 아크를 위한 입열 모델 즉, 균일 분포 체적 열원의 적합성을 평가하고, 입열 효율을 결정하기 위하여 용접부 단면에 대한 2차원 열 전달 해석을 수행하였다. Fig. 3은 입열 효율이 45%인 균일 분포 체적 열원을 이용한 유한요소해석과 실험을 통하여 예측한 용융지(fusion zone)의 형상을 비교하여 도시한 것이다. Fig. 3과 같이 유한요소해석을 통한 용융지 형상은 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 사용한 입열 모델은 GTA 펄스 기법을 적용한 튜브 용접부의 변형과 잔류응력 거동 평가를 위한 입열 모델로 적합함을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 용접 패스 수에 따른 헤드 및 튜브 용접부 토우에서의 온도이력을 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 5와 같이 같이 헤드 및 튜브 용접부 토우에서의 최대 온도는 용접 패스가 용접부 토우에 근접할수록 증가하며 최대 온도는 용접을 약간 상회하는 수준임을 확인할 수 있다.

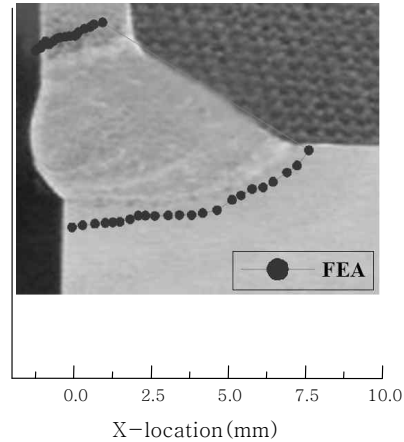


Fig. 3 Verification of heat input model (1 pass)

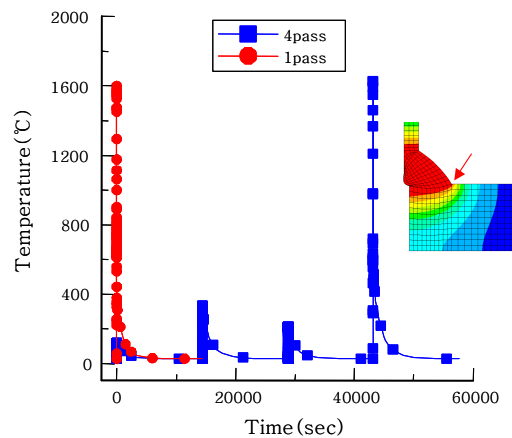


Fig. 4 Temperature histories at head weld toe

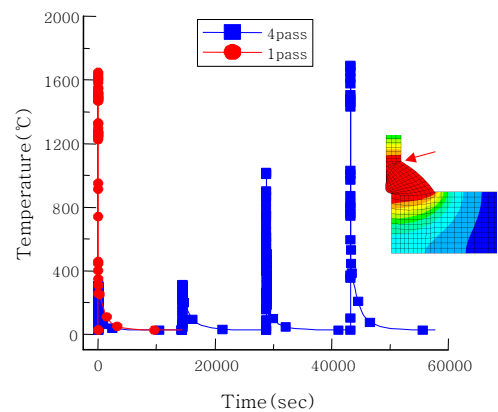


Fig. 5 Temperature histories at tube weld toe

3.2 잔류응력 및 용접변형 해석

3.2.1 용접패스 수에 따른 잔류응력 및 용접변형

용접 패스 수에 따른 튜브 용접부의 잔류응력 분포를 평가하기 위하여 Fig. 1에서 헤드 끝부분의 x방향 변위를 구속하고 1 패스, 4 패스의 경우에 대하여 유한요

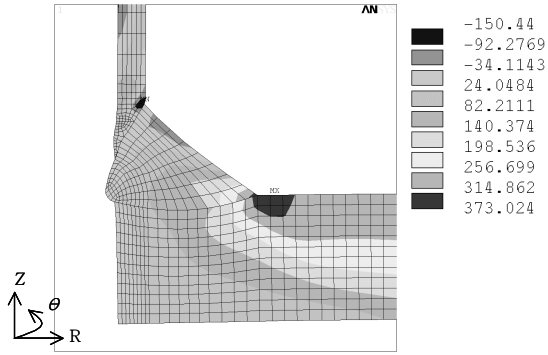


Fig. 6 Contour of residual stress distribution in GTA tubular weld with 1 pass

소해석을 수행하였다. 튜브 용접부에서 취약부위로 판단되는 부분은 튜브이기 때문에 헤드 용접부가 아닌 튜브 용접부에 발생하는 잔류응력 분포 형태를 원통좌표계(R, θ , Z) 기준으로 정리하였으며, 대표적인 잔류응력 분포는 Fig. 6과 같다.

Fig. 7~9는 용접패스에 따른 튜브 용접부의 토우에서 두께 방향의 각 위치에서 원통좌표계의 각 방향으로 작용하는 잔류응력의 분포를 도시한 것이다. Fig. 7과 같이 반경(R) 방향의 잔류응력은 용접 패스 수와 관계없이 루트에 인장 잔류응력이 발생하지만 토우에 근접할수록 압축으로 천이되며, 전반적인 응력 수준은 용접 패스 수가 증가함에 따라 증가한다.

Fig. 8의 θ -방향 잔류응력 분포 양상은 R-방향 잔류응력 분포 결과와 유사한 경향을 나타내지만 루트에서 최대 잔류응력 수준은 용접 패스 수와 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다. Z-방향을 잔류응력 분포 양상 또한 Fig. 9와 같이 R-방향을의 분포 양상과 거의 동일하며, 용접 패스 수가 감소함에 따라 최대 잔류응력 수준 또한 감소한다.

Fig. 10과 Fig. 11은 용접 패스 수에 따른 튜브의

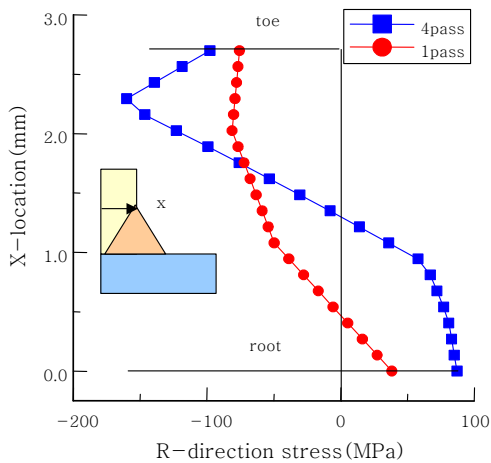


Fig. 7 Distribution of R-direction residual stress

변형을 R-방향과 Z-방향에 대해 도시한 것이며, R-방향을의 변형량 및 Z-방향을의 수축량은 용접 패스 수가 증

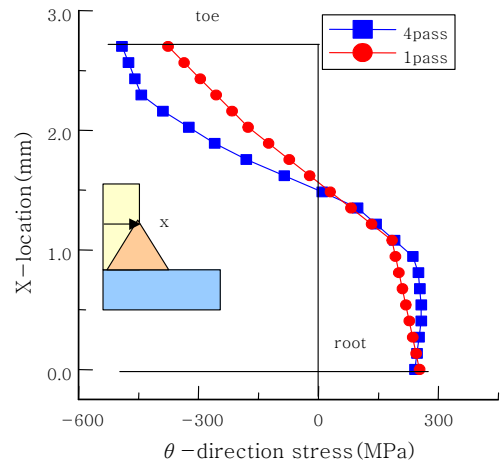


Fig. 8 Distribution of θ -direction residual stress

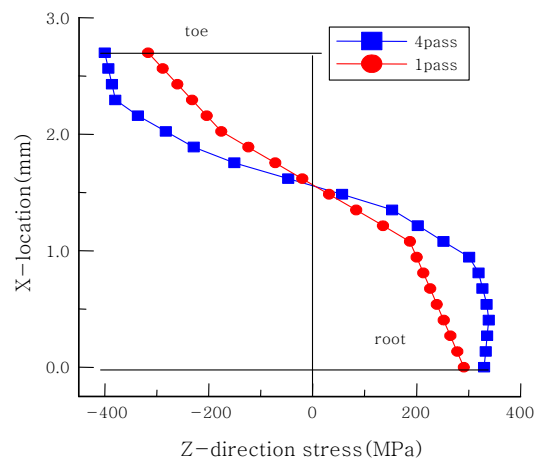


Fig. 9 Distribution of Z-direction residual stress

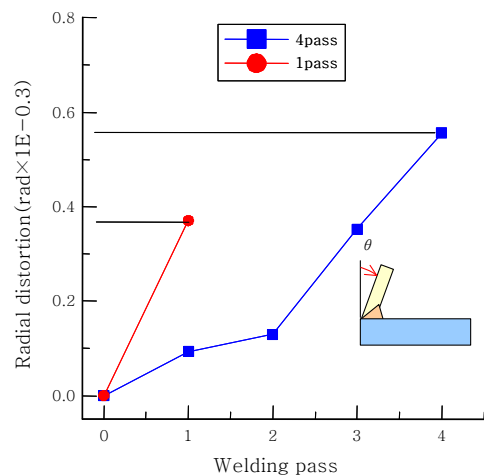


Fig. 10 Radial distortion of tube according to welding pass(es)

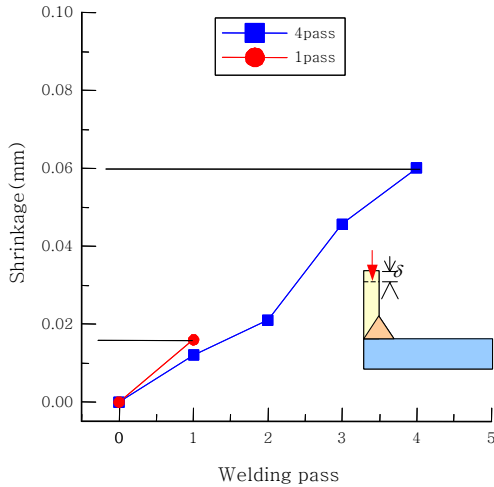


Fig. 11 Shrinkage of tube according to welding pass(es)

Table 4 Radial distortion and shrinkage of tube with the number of welding pass

Type	Radial distortion (rad. x 1E-03)	Shrinkage (mm)
1 pass	0.37	0.016
4 pass	0.56	0.060

가함에 따라 증가한다. 즉, Table 4와 같이 4 패스 용접부의 경우 1 패스 용접부에 비해 R-방향 변형은 1.5 배, 길이 방향 수축량은 3.0배 이상 크다. 따라서 용접 패스 수가 감소하는 경우 용접 변형 제어 측면에서도 유리함을 알 수 있다. 단, R-방향의 변형은 튜브 용접부 루트에서 국부적으로 약 0.56×10^{-3} 의 각변형이 발생하므로 이것이 튜브 전체의 직경 변화를 의미하지는 않는다.

3.2.2 구속도에 따른 잔류응력 및 용접변형

튜브 길이 방향의 구속도 변화가 튜브 용접부의 잔류응력 및 변형에 끼치는 영향을 평가하기 위하여 Table 1에 나타난 3가지 구속도가 튜브에 적용된 경우의 잔류응력 및 변형 거동 특성을 평가하였다.

Fig. 12는 튜브 용접부의 토우에서 용접패스 수와 용접부의 구속도에 따른 최대 잔류응력의 거동을 도시한 것이며, Fig. 13은 튜브 용접부 루트에서 최대 잔류응력을 나타낸 것이다. Fig. 12와 Fig. 13과 같이 튜브의 길이 방향 구속도가 259, 518, 1034MPa/mm로 증가하여도 각 방향의 최대 잔류응력 수준의 변화는 용접패스 수에 따른 최대 잔류 응력의 차이에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작다. 이는 튜브 자체의 높은 내적 구속에 기인하여 본 논문에서 사용한 길이 방향의

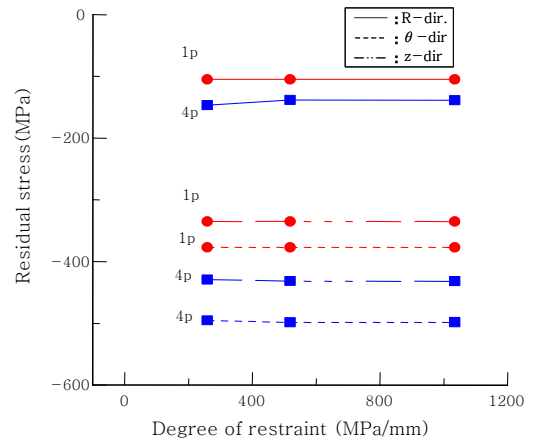


Fig. 12 Residual stress according to restraint degree at toe of tube

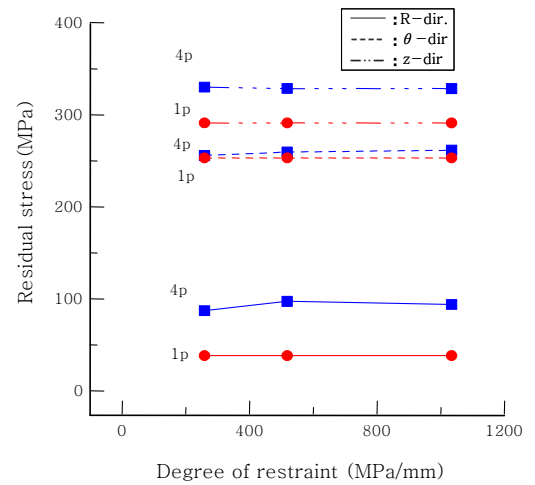


Fig. 13 Residual stress according to restraint degree at root of tube

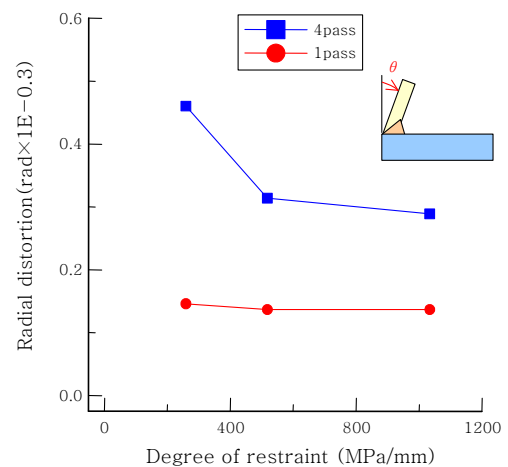


Fig. 14 Radial distortion according to restraint degree of tube

구속도가 튜브 용접부의 토우에 미치는 잔류 응력 영향은 배제할 수 있음을 의미한다.

Fig. 14는 용접 패스 수와 튜브의 길이 방향의 구속도에 따른 튜브의 R-방향의 변형 거동을 도시한 것이다. Fig. 14와 같이 구속도가 증가함에 따라 R-방향 변형량은 감소하며, 변형 감소율은 용접 패스 수가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 그러나 최대 구속 조건하에서도 용접 패스 수가 증가함에 따라 최대 변형량은 더 큰 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

발전 설비의 튜브와 헤드 간 용접부에서 발생하는 변형과 잔류응력의 효과적인 제어를 위하여 용접 패스 수와 용접부의 구속도에 따른 잔류응력 및 변형 특성을 유한요소해석을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 균일 체적 열원을 이용한 유한요소해석과 실험으로 평가된 용융지 형상의 비교를 통하여 평가된 GTA 펄스 용접 아크 효율은 45%이었다.

2) 튜브의 길이 방향의 구속도가 증가할 때 튜브 용접부에 발생하는 최대 잔류응력의 차이는 튜브 자체의 높은 내적 구속으로 인해 용접패스 수와 무관하지만, 다층 용접부의 용접변형은 구속도가 증가함에 따라 감소한다.

참 고 문 헌

1. Commission of design analyses and structural strength of welded structures : Standardization for temperature distribution prediction of the arc weld using FEA, Journal of KWJS, 23-6 (2008), 497-504 (in Korean)
2. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon press, 1980, 562-563
3. D.J. Lee, S.B. Shin, K.K. Kim : A study on the distortion of the I butt SA weldment, Proceedings of the 2003 Autumn Annual Meeting of KWJS, 213-215 (in Korean)
4. H.K. Jin, D.J. Lee, S.B. Shin : Effect of distance and restraint degree between fillet and butt weldment on residual stress redistribution at each weldment, Journal of KWJS, 28-3 (2010), 287-292 (in Korean)