

STS304L 박판 원형 겹치기 GTA 용접부의 용접 변형 예측에 관한 연구

김일호*[†] · 김하근* · 신상범* · 박동환**

*현대중공업 생산기술연구소

**울산대학교 자동차전박대학원

A Study on Welding Distortion of GTA Circular Type Lap Joint in STS304L Thin Plate

Il-Ho Kim*[†], Ha-Geun Kim*, 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 26, 2012 ; Revised October 19, 2012 ; Accepted October 30, 2012)

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the welding distortion of the circular type lap joint in STS304L of 0.7mm thickness by using FEA. In order to do it, a heat input model for GTA welding process with non-consumable electrode was established through comparing the molten pool shapes and temperature distributions obtained by both FEA and experiment. With the heat input model, the welding distortion of the circular type lap joint was evaluated by 3-D FEA. From FEA results, it was found that 3-D FEA with proper heat input model can be used for the evaluation of the excessive distortion of the circular type lap joint of STS304L thin plate. In addition, the root cause of the excessive distortion in the weld was also identified as the excessive compressive residual stress in the tangential direction of the weld.

Key Words : STS 304L, Lap Joint, GTA, Heat input model, Welding, Distortion, Residual stress, Finite element analysis

1. 서 론

용접 아크(arc)에 의한 불 균일한 온도 구배로 인한 열 변형률(thermal strain)의 차이는 용접부에 변형 및 잔류 응력을 유발하며, 이러한 용접부의 변형 및 잔류 응력의 크기와 분포 특성은 용접부의 내외적 구속에 의존한다. 특히, 용접부의 변형에 대한 저항성 즉, 내적 구속이 매우 낮은 박판 용접 구조물의 경우에서는 잔류 응력 보다는 각 변형이나 좌굴 변형과 같은 과다 면의 변형에 의한 구조물의 정도와 관련된 문제가 빈번히 발생함으로써 생산성 향상에 큰 걸림돌로 작용하고 있다¹⁾. 이러한 용접부의 변형 및 잔류 응력의 거동 특성은

용접부의 재질에 따라서도 큰 영향을 받는다. 이는 일반 탄소강에 비하여 높은 열 팽창률과 낮은 열 전도율을 가진 오스테나이트계 스테인리스 강(stainless steel)의 용접시 발생하는 과다한 면의 변형에서 쉽게 이해할 수 있다. 따라서, 효과적인 용접 변형 제어 방안을 제안하기 위하여 용접부의 내외적 구속 그리고 재질에 따른 변형 거동 특성에 대한 이해가 필요하다. 그러나, 이와 관련된 연구는 대부분 해석 모델의 단순화를 통한 해석의 용이함 때문에 주로 맞대기 용접부나 필렛 용접부와 같이 연속 용접부에 제한되어 왔다. 이에 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 오스테나이트계 스테인리스강의 박판 원형 겹치기 제살 GTA (gas tungsten arc) 용접부의 변형을 예측하고자 하였다. 이를 위하여

GTA 겹치기 용접시 용접부의 온도 분포 평가를 위한 입열 모델을 유한요소해석과 실험을 이용하여 개발하였다. 그리고, 개발된 입열 모델을 이용하여 3차원 유한요소해석을 통하여 변형 거동 특성을 평가하고 실험 결과와의 비교를 통하여 해석 기법을 정립하고자 하였다.

2. 용접 입열 모델

2.1 실험 조건

본 연구에서는 제철 GTA 용접 입열 모델을 개발하기 위하여 유한 요소 해석을 이용하여 GTA 용접시 효율에 따른 온도 이력과 용융지 향상의 변화를 평가하고, 이를 실험 결과와 비교하였다. 이때, 사용된 모재는 STS304L이며, 시편의 폭과 길이는 각각 185mm와 100mm이다. 용접부의 온도 이력은 Fig. 2와 같이 겹치기 용접부에서 각각 5mm와 15mm 떨어진 위치에 K type 열전대와 온도 기록계를 이용하여 계측하였다. Fig. 1은 GTA 용접시 온도 이력 계측 장면을 나타낸 것이며, 사용된 용접 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Welding conditions

Current I [A]	Voltage V [V]	Speed v [mm/min]	Heat Input Q [J/mm]
24	8	93	124

Note) $Q=60VI/v$

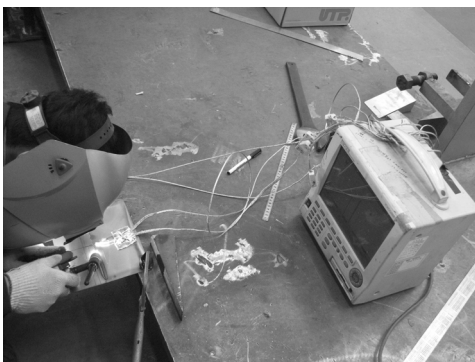


Fig. 1 Temperature measuring equipment

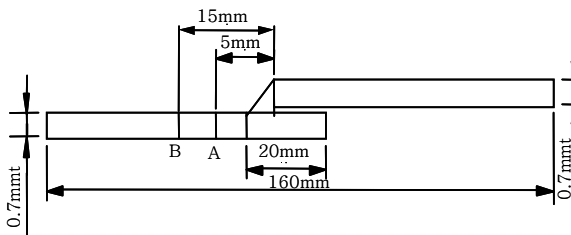


Fig. 2 Dimension of test specimen and locations of thermocouple (A, B)

2.2 해석 모델 및 방법

제철 GTA 용접의 입열 모델을 개발하기 위한 유한요소 해석은 용접 아크에 의한 용접부의 온도 분포를 준 정상 상태(quasi-stationary condition) 즉, 2차원 열 전달 문제로 축소 가정하고 수행하였다. Fig. 3은 입열 모델 개발을 위한 유한 요소 해석시 사용된 요소망과 열 하중 및 경계 조건을 도시한 것이다. 열 전달 해석시 용접 아크에 의한 열속은 균일 분포의 체적 열원을 이용하였으며, ramped ratio를 이용하여 이동 열원의 효과를 고려하였다²⁾. 열 손실은 용접부의 표면에서 자연 대류와 복사에 의한 열 손실이 존재하는 것으로 가정하였으며, GTA 용접 아크가 용접부를 통과하는 영역에서는 보호 가스에 의한 강제 대류의 효과를 함께 고려하였다³⁾. 또한 용융지(molten pool)에서의 온도가 용착 금속의 기화점(vaporization temperature)을 넘지 않도록 하기 위해 유효 열전달 계수를 이용한 stirring 효과를 고려하였으며 상 변화(phase change)는 잠열(latent heat)을 이용하여 고려하였다⁴⁾. Fig. 4는 열전달 해석시 사용된 STS304L의 온도에 따른 열적 물성치의 거동을 나타낸 것이다⁵⁾. 해석시 사용된 유한 요소 해석 프로그램은 ABAQUS이다.

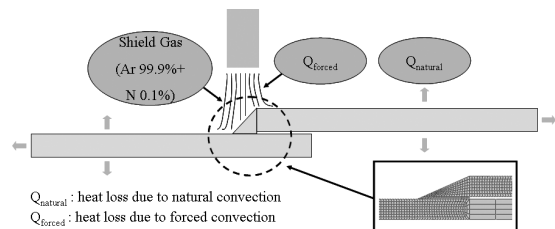


Fig. 3 Mesh design and thermal boundary conditions for heat input model

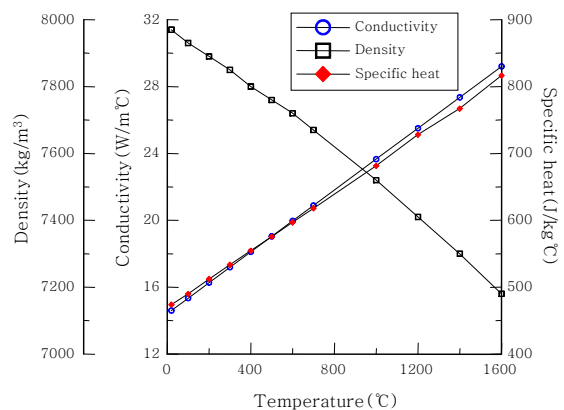


Fig. 4 Thermal properties of STS304L⁵⁾

2.3 해석 결과

Fig. 5는 GTA의 용접 아크의 효율이 36%인 경우 용접부에서 각각 5mm와 15mm 떨어진 곳의 온도 변화에 대한 유한 요소 해석 및 실험 결과를 비교하여 도

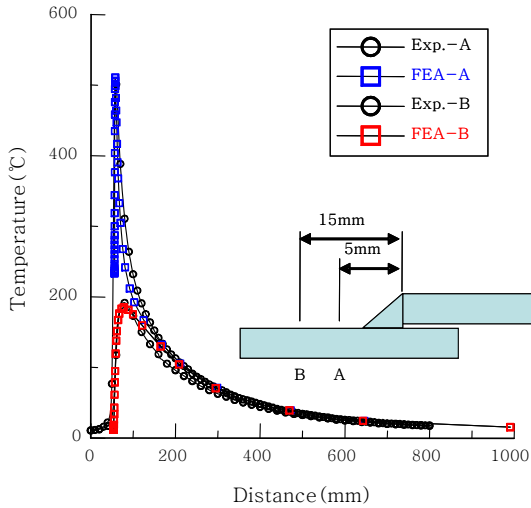


Fig. 5 Comparison results of temperature history by FEA and experiments

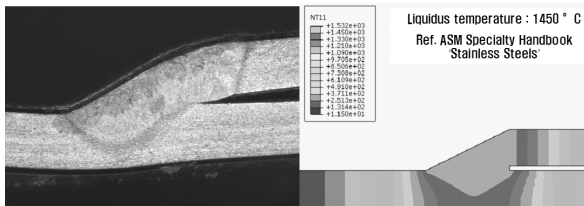


Fig. 6 Comparison results of the molten pool shape by FEA and experiments

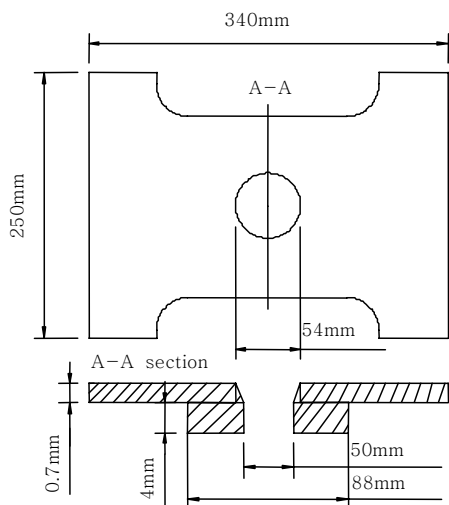


Fig. 7 Specimen shape

시한 것이다. Fig. 5의 결과와 같이 각 위치에서 유한 요소 해석과 예측된 온도 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 6은 Fig. 5와 동일 해석 조건하에서 유한 요소 해석과 실험에 의한 용융지(molten pool) 형상을 비교하여 나타낸 것이다. 이때, 해석시 용융지 형상 결정을 위한 기준 온도는 1450°C이다²⁾. Fig. 6과 같이 해석 및 실험을 통하여 예측된 용융지 형상 또한 매우 유사함을 알 수 있다. 이상의 해석 결과로부터 본 논문에서는 제철 GTA 용접 아크의 효율을 36%로 결정하였으며, 이는 기존의 연구 결과에서 제안된 GTA 용접의 입열 효율 (21%~48%)과도 유사하다⁶⁾.

3. 용접 변형 실험

3.1 실험 조건

Fig. 7은 원형 접치기 GTA 용접부의 변형 거동을 평가하기 위하여 사용된 시험편의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 7과 같이 0.7mm 두께의 시험편 길이와 폭은 각각 340mm와 250mm, 원형 홀의 직경은 54mm, 그리고 백 플레이트(back plate)의 두께와 직경은 각각 4mm와 88mm이다. 시험편의 용접 조건은 Table 1과 같으며, Fig. 8은 시험편의 본 용접시 용접 순서를 나타낸 것이다. Fig. 8과 같이 ①지점에서 용접이 시작되어 ②와 ③의 용접 중단점을 지나 다시 ①지점으로 이동하여 용접이 완료된다. 용접시 용접부는 Fig. 9

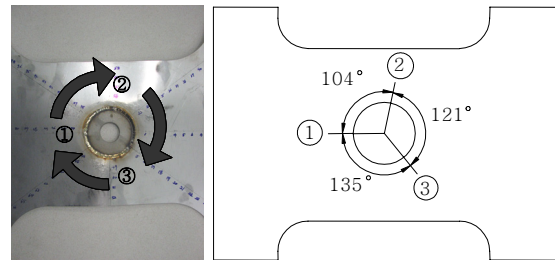


Fig. 8 Welding sequence

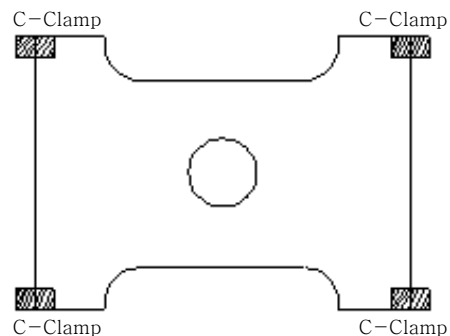


Fig. 9 Restraint conditions for the test specimen during welding and cooling

와 같이 시편의 네 모서리 부분을 C 클램프를 이용하여 구속하고, 용접 직후 이를 제거하였으며 변형량은 용접부가 완전히 상온으로 냉각된 후 3차원 계측기를 이용하여 계측하였다.

3.2 실험 결과

Fig. 10은 STS304L 박판 원형 겹치기 GTA 용접부의 시편의 구속을 제거한 후 계측한 변형 양상을 보여주고 있으며, Fig. 11은 3차원 계측기를 이용하여 백 플레이트의 중앙에서 일정 거리에 위치한 영역에서 계측된 면의 변형의 분포를 도시한 것이다. Fig. 10과 Fig. 11에 도시한 바와 같이 용접부의 변형 양상은 전형적인 좌굴 변형 양상인 웨이브 형의 변형 모드를 보여주고 있으며, Fig. 11과 같이 최대 변형은 상대적으로 내적 구속이 낮은 90°와 270° 영역에서 발생하였다. 일반적으로 용접부의 내적 구속이 낮은 영역에서는 용접부의 수축시 발생하는 인장 잔류 응력의 폭이 상대적으로 작아 수축 하중의 크기 또한 감소한다. 그러나, 용접부의 폭이 충분히 크지 않은 경우에는 압축 잔류 응력의 발생 영역 또한 감소함으로써 압축 잔류 응력이 작용하는 영역에서 평균 압축 잔류 응력의 크기는 오히려 증가할 수 있다. 즉, Fig. 10과 같이 90°와 270°

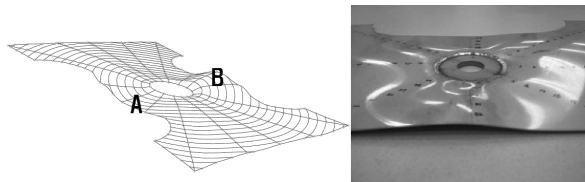


Fig. 10 Deformed shape

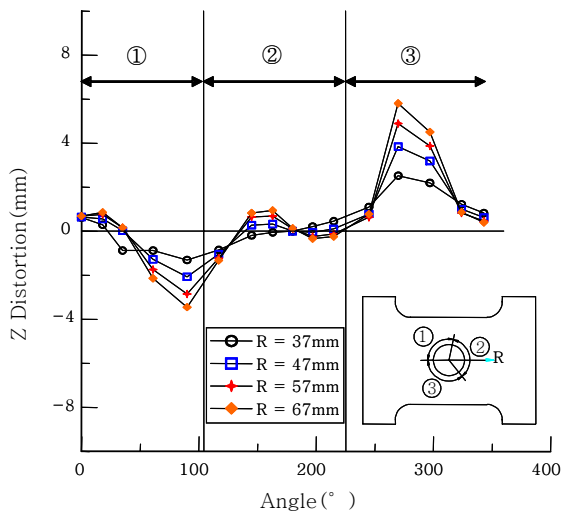


Fig. 11 Distribution of out-of-plane distortion in the test specimen after cooling down to RT

영역에서 과다 변형은 압축 잔류 응력의 증가에 의한 좌굴 변형에 기인한 것으로 판단된다.

4. 용접 변형 해석

4.1 용접 변형 해석 모델 및 조건

박판 원형 겹치기 GTA 용접부의 변형 거동 특성을 평가하기 위하여 비선형 과도 열전달 해석 및 탄소성 해석⁵⁾을 수행하였다. 맞대기나 필렛 등과 같이 용접부가 직선인 경우 용접 변형 해석은 3차원 문제를 2차원 문제로 단순화하여 해석이 가능⁵⁾하지만, 용접 시·종단부의 중첩으로 인해 재가열 영역이 발생하고, 용접부의 구속도가 용접부의 위치에 따라 변하는 경우 용접 아크에 의한 열속의 이동을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행해야 할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 일차적으로 용접 아크에 의한 열속 모델의 적용 방안을 결정하기 위하여 먼저 용접부의 내적 구속이 일정한 원형 겹치기 용접부의 잔류 응력 특성을 평가하였다. Fig. 12는 용접 아크에 의한 열속 모델의 적용 방안을 결정하기 위하여 사용된 모델의 형상을 도시한 것이다. Fig. 12와 같이 용접부는 내적 구속에 의한 영향을 배제하기 위하여 원형 모델로 선정하였다. 그리고 용접의 시·종단부는 서로 일치하는 것으로 가정하였다. Fig. 13은 원형 모델에 대한 잔류 응력 분포에 대한 해석 결과를 도시한 것이다. Fig. 13과 같이 용접 시·종단부와 중앙부에서 용접선과 평행한 방향과 반경 방향으로 작용하는 잔류 응력의 분포는 위치에 따라 상이함을 알 수 있다. 즉, 용접시 시·종단부에 해당하는 용접부 인근에 작용하는 용접선의 접선 방향과 반경 방향의 잔류 응력이 모두 압축인 반면에 용접선의 중앙부에 해당하는 "A"에서는 각 방향의 잔류 응력이 모두 인장으로 작용

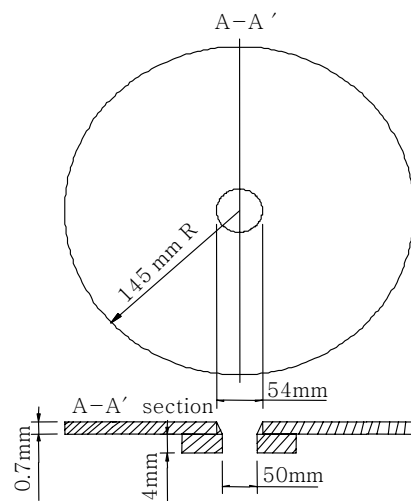
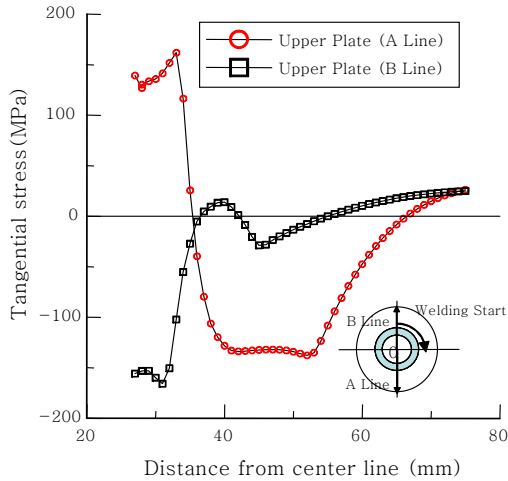
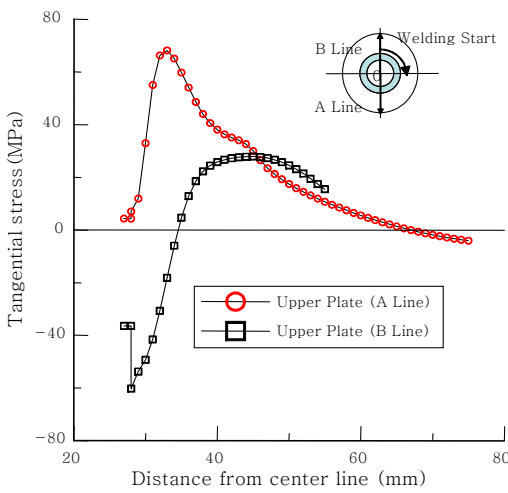


Fig. 12 Circular type analysis model



(a) In tangential direction



(b) In radial direction

Fig. 13 Residual stress distribution in the circular type lap GTA weld

하고 있다. 즉, 원형 겹치기 용접부에서의 잔류응력은 용접부의 열속 분포에 따라 매우 큰 영향을 받을 수 있다. 이에 본 논문에서는 박판 원형 GTA 겹치기 용접부의 변형 거동 특성 평가를 위하여 3차원 유한 요소 해석을 수행하였다.

박판 원형 겹치기 GTA 용접부의 변형 해석시 사용된 요소망은 Fig. 14와 같이 4절점 등매개 셸(shell) 요소를 이용하여 구성하였다. 해석시 사용된 변위 경계 조건은 3절의 용접 변형 실험 조건을 고려하여 Fig. 15의 (a)와 (b) 같이 용접 과정에서 해석 모델의 양 끝단을 모두 구속하였으며, 용접이 완료된 후에는 해석 모델의 모든 구속을 제거하였다. 이때, 용접이 완료된 해석 모델의 구속 제거시 구속 응력의 이완에 따른 강제 운동(rigid body motion) 발생 문제를 방지하기 위하여 모든 구속 조건의 제거와 더불어 백 플레이트

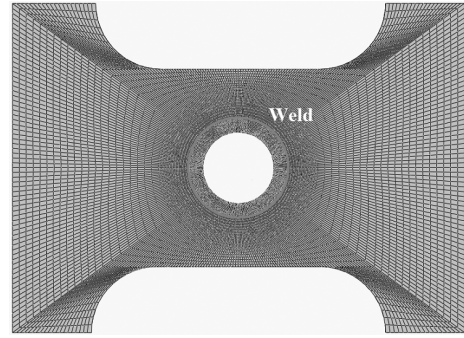
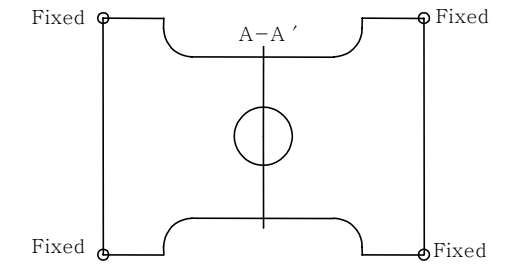
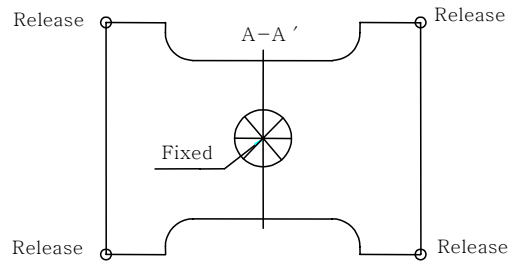


Fig. 14 Mesh design for FEA



(a) During welding



(b) After welding

Fig. 15 Displacement boundary condition for 3D FEA

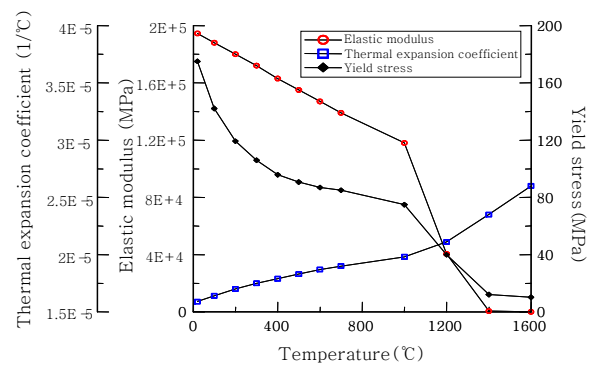


Fig. 16 Temperature dependent properties

중공과 강제 요소(rigid element)로 연결된 중공 중앙의 가상의 절점의 자유도를 모두 구속하였다. 유한요소 해석시 사용된 열적 물성 및 기계적 물성은 각각 Fig. 4와 Fig. 16과 같으며, 용접부의 온도 분포 평가를 위한 열 전달해석시 사용된 용접 순서는 Fig. 8과 같다.

4.2 용접 변형 해석 결과

Fig. 17은 STS304L 박판 원형 겹치기 GTA 용접부의 중심에서 37mm, 57mm 그리고, 67mm 떨어진 위치에서 계측된 면의 방향의 변형에 대한 유한요소해석 및 실험 결과를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 17

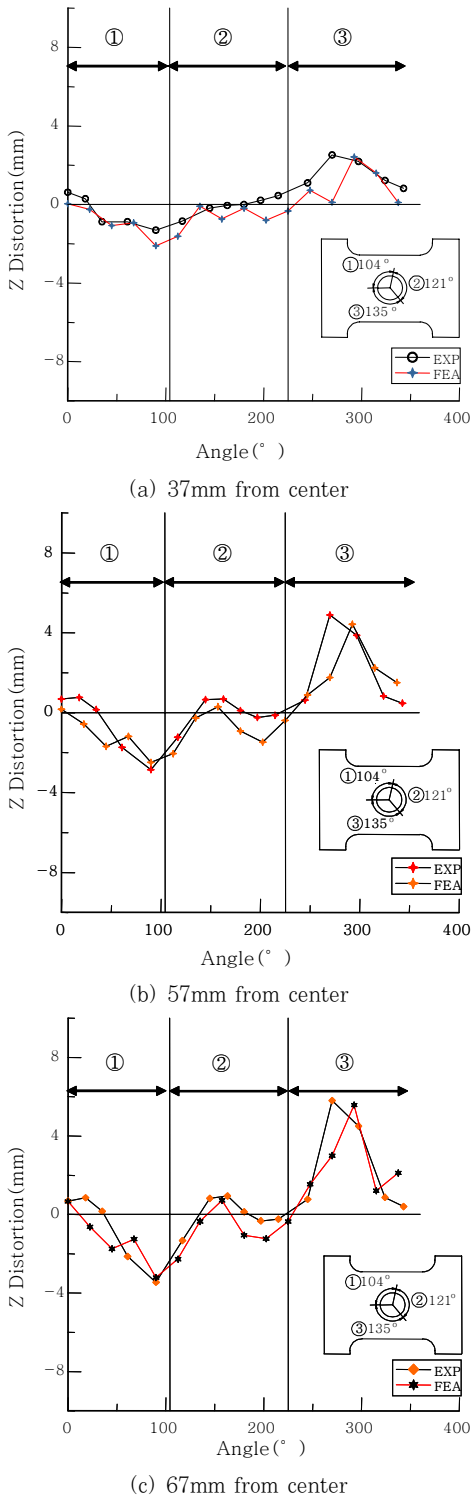


Fig. 17 Distributions of welding distortion obtained by FEA and experiment

과 같이 원형 겹치기 용접부에서 실험 및 유한요소해석을 이용하여 평가된 면의 변형에 대한 계측 및 예측 결과 모두 유사한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 즉, 용접부로부터 거리가 증가함에 따라 면의 변형량은 증가하며, 최대 변형 또한 동일 위치 즉, 90°와 270°영역에서 발생하고 있다. 이러한 변형 거동 특성을 규명하기 위하여 본 연구에서는 0°와 90° 영역에서 용접선의 접선 방향과 반경 방향으로 작용하는 잔류응력 분포를 비교하고 그 결과를 Fig. 18에 나타내었다. Fig. 18과 같이 반경 방향의 잔류 응력은 용접시 용접부의 C 클램프에 의한 외적 구속과 위치에 따른 반경 방향의 크기의 차이에 따른 내적 구속의 차이로 인하여 0°영역에서의 잔류 응력이 큰 반면에 접선 방향의 인장 잔류 응력의 크기는 위치와 상관 없이 거의 유사하다. 그러나, 접선 방향으로 작용하는 평균 압축 응력의 크기는 90°영역에서 훨씬 더 크다. 이는 90°와 270°영역에서 발생한 과다 면의 변형이 압축 잔류 응력에 기인한 좌굴 변형의 모드로 변형이 발생하였음을 나타내는 결과로 이해할 수 있다. Table 2는 STS304L 박판 원형 겹치기 GTA 용접부에서 면의 변형량에 대한 해석 및 실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Table 2와 같이 실험 및 유한요소해석을 통하여 평가된 최대 변형량이 각각 5.57mm와 5.8mm로 두 결과간의 차이는 약 4%의 차이를 보이고 있으며, 변형 양상의 차이 또한 매우 미미하다. 이상의 결과로부터 GTA 박판 원형 겹치기 용접부의 변형 해석시 용접 순서에 따른 이동 열원의 효과와 실 용접부의 내적 및 외적 구속 조건을 적절하게 고려하는 경우 실제 변형 양상을 비교적 정확하게 예측 가능함을 알 수 있다. 그리고, 면의 변형 분포를 고려할 때 적절한 외적 구속을 이용하여 변형 제어가 가능함을 알 수 있다. 그러나, 본 연구에서

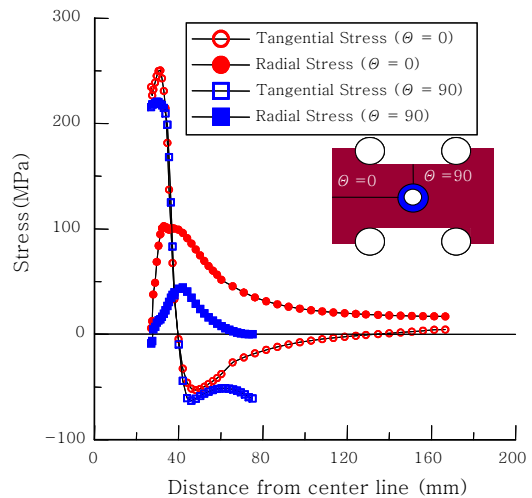


Fig. 18 Residual stress distribution

Table 2 Comparison results of the maximum and the minimum welding distortion obtained by FEA and experiment

	Min.	Max.
FEA (A)	-3.21	5.57
Measured (B)	-3.45	5.8
Error ((B-A)/B)	7%	4%

평가된 시험 및 해석 모델의 경우 변형 모드 측면에서 좌굴 변형 모드를 가지고 있으나 전반적인 변형량이 크지 않으므로, 보편적인 열 탄소성 해석을 통한 평가가 가능하였을 것으로 판단된다.

5. 결 론

실험 및 유한요소해석을 이용하여 STS304L 박판 원형 겹치기 GTA 용접부에 대한 용접 변형 거동 특성을 평가하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1) 유한요소해석과 실험을 통하여 평가된 온도 이력과 용융지 형상을 이용하여 제살 GTA 용접부의 균일 분포 체적 열속 모델의 입열 효율을 0.36으로 정의하였다.

2) 제살 GTA 용접을 위하여 제안된 입열 모델과 3차원 유한요소해석을 통한 해석 결과는 계측된 시험편의 변형량과 변형 양상과 비교적 잘 일치하였다. 그러나, 본 연구에서 평가된 시험 및 해석 모델의 경우 변

형 모드 측면에서 좌굴 변형 모드를 가지고 있으나 전반적인 변형량이 크지 않으므로, 보편적인 열 탄소성 해석을 통한 평가가 가능하였을 것으로 판단된다.

3) GTA 원형 겹치기 용접부에서 발생하는 변형은 용접부의 구속 조건 및 열 하중의 분포에 의존하므로 적절한 외적 구속을 이용하여 변형 제어가 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Kim Ha Geun : A Study on the Control Technology for Global Distortion of the Deck in the Superstructure during Manufacturing Process, Journal of KWJS, **28-5**, 2010 (in Korean)
2. Yong Lae-Shim : Modeling of Welding Heat Input for Residual Stress Analysis, Journal of KWS, **11-3**, Sep., 1993
3. P.Tekriwal and J.Mazumder : Finite Element Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Transfer in GMA Welding, Welding J. **vol. 67**, 150-156, 1988
4. Strength Commission of Welded Structure : Standardization for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld using FEA, Journal of KWS, **23-6** (2005), 497-503 (in Korean)
5. Sang-Beom Shin : Evaluation of Buckling Distortion for the Thin Panel Welded Structure According to Welding Process, Journal of KWJs, **26-3**, June., 2008
6. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980