

인장하중법에 따른 STS 304 다층 맞대기 용접부의 변형 제어 특성에 관한 연구

김 하 근*[†] · 이 동 주* · 신 상 범*

*현대중공업 산업기술연구소

A Study on the Distortion Control Characteristics of the STS 304 Multi-pass Butt Weldment by Tensioning Method

Ha-Geun Kim*[†], Dong-Ju Lee* and Sang-Beom Shin*

*Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Ulsan 682-792, Korea

[†]Corresponding author : hageun@hhi.co.kr

(Received December 21, 2009 ; Revised January 8, 2010 ; Accepted February 17, 2010)

Abstract

The purpose of this study is to develop the control technology of the welding distortion caused by Auto NG-GTA(Narrow Gap-GTA) welding process at the STS 304 multi-pass butt weldment. Heat input model for Auto NG-GTA welding process was established and verified by measuring temperature change and molten pool shape at the bead-on-plate weldment. With the heat input model developed, the effect of tension load on the welding distortion at the STS 304 multi-pass butt weldment was evaluated using the thermo-elasto-plastic FE analysis. In accordance with FEA results, the angular distortion and transverse shrinkage sharply decreased with an increase in tension load. This result indicated that tensioning method was an effective countermeasure against the welding distortion of the STS 304 multi-pass butt weldment.

Key Words : STS 304 Multi-pass butt weldment, Finite element analysis, Tension load, Tensioning method, Distortion control, Angular distortion, Transverse shrinkage

1. 서 론

주로 고온 및 고압 상태 조건에서 사용되는 STS 304강의 경우 열 팽창 계수가 일반 탄소강에 비해 1.5 배 이상 크고, 열 확산 계수는 일반 탄소강의 1/4 정도이다. 이러한 재질적 특성으로 인해 STS 304강을 이용한 진공용기의 제작시 용접부 두께 방향의 온도 차이 증가에 기인하여 용접부 두께 방향을 따라서 수축 하중의 크기 차이도 증가하게 된다. 이는 용접구조물의 제작시 과도한 용접 변형을 초래할 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 특히 일반 용접구조물의 제작시 기 발생한 용접 변형의 교정은 현장 작업성 및 편의성으로 인해 선상 가열(line heating)과 같은 국부 열간교정작업이

보편적으로 적용되고 있다. 그러나 STS 304강을 이용한 진공용기의 제작시 선상 가열은 용접부에서 예민화(sensitization)로 인한 열화(degradation) 현상을 초래할 수 있어 이를 적용하는 것이 매우 어렵다. 그리고 구조물의 제작 단계에서 지그를 이용하여 구속할 경우 구속이 제거된 후 용접부의 수축에 의하여 발생한 변형은 대부분 탄성 복원된다는 점에서 기존의 열적 교정 및 구속을 이용한 변형 제어는 매우 제한적이라고 할 수 있다¹⁾. 따라서 STS 304강을 이용한 이중 곡의 진공용기 제작시 효율적인 변형 제어를 위해서는 용접 공정중에 변형을 적절히 제어하기 위한 방안을 정립하는 것이 매우 중요하다. 이에 본 논문에서는 STS 304강을 이용한 진공용기의 제작시 효율적인 변형 제어를 위한 연구의 일환으로써 STS 304 맞대기 다층 용접부

에서 발생하는 용접 변형을 제어하기 위하여 인장법²⁾의 적용 가능성을 유한요소해석을 이용하여 평가하고자 하였다. 이를 위하여 먼저 Auto NG-GTA(Auto Narrow Gap-Gas Tungsten Arc) 용접의 입열 모델을 개발하고, 유한요소해석을 이용하여 인장하중하에서 다층 용접부의 변형 거동 특성을 평가하였다.

2. 용접 입열 모델

2.1 해석 및 실험 모델과 방법

Auto NG-GTA 용접 입열 모델을 정립하고자 Fig. 1과 같이 비이드 온 플레이트의 단위 용접부에 K형 열전대(K type thermocouple)를 부착하여 용접 및 냉각시 온도 변화를 측정하였다. 그리고 용접부의 냉각이 완료된 후 용접부의 매크로 단면에서 측정한 용융지(weld pool) 형상을 계측하였다. 본 논문에서 사용한 용접 조건과 부재 치수는 Table 1과 같다.

용접 입열 모델 개발을 위한 온도 분포 해석은 대한 용접·접합학회(KWJS) 용접강도위원회에서 제안한 아크 용접부의 온도 분포 해석 규약에 따라 수행하였다³⁾. 즉, 용접 아크에 의한 3차원 열 전달 문제는 용접선을 따라 용접 아크의 속도가 일정하고, 용접선 방향으로의 열 손실이 없다는 가정하에 2차원 열 전달 해석을 이용하여 평가하였다. 해석시 사용된 열원은 균일 분포 체적 열원(uniform body heat flux)과 균일 분포 표면 열원(uniform surface heat flux)이 용접부에 일정 혼합비로 작용하는 혼합 열원(combined heat flux)으로 가정하였다. 용접 및 냉각시 열 손실은 자연 대류에 의해 발생하는 것으로 가정하였으며 용접부와 모재의 열적 물성은 동일하고 Fig. 2와 같이 온도에 의존하는

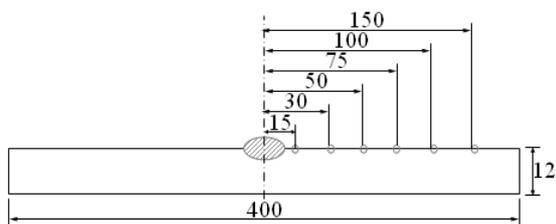


Fig. 1 Locations of K type thermocouple attached to the specimen (unit: mm)

Table 1 Variables used for experiment

Material	Bead-on-plate (W×L×t, mm)	Heat input [kJ/cm]
STS 304	400×600×12	18.4

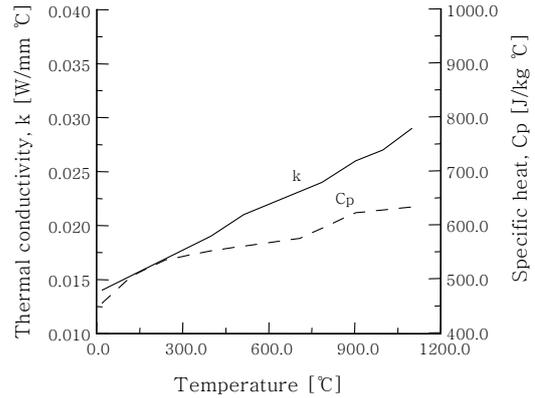


Fig. 2 Thermal properties of STS 304 steel

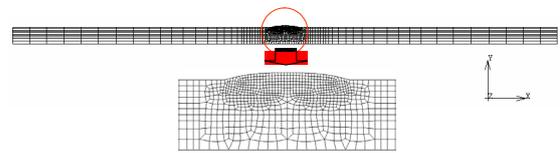


Fig. 3 Mesh design of bead-on-plate weldment

것으로 가정하였다. 그리고 용융지의 최고 온도가 과도하게 상승하는 것을 방지하고, 용융지내에서 스티어링(stirring) 효과를 고려하기 위하여 유효 열 전도 계수를 도입하였으며 용접부의 가열 및 냉각시 상변화에 대한 효과는 잠열(latent heat)을 이용하여 고려하였다. 온도 분포 해석을 위한 유한요소해석시 사용된 요소망은 Fig. 3과 같이 4절점 등매개 요소를 이용하여 구성하였다.

2.2 해석 및 실험 결과

Fig. 4는 용접 아크의 효율이 0.8이고 체적 열원과 표면 열원의 혼합비가 5:5인 경우 용접 및 냉각시 온도 분포에 대한 해석 결과와 열전대를 이용하여 계측된 온도 분포를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 4와 같이 각 위치에서 예측 및 계측된 온도 분포는 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 해석 조건 하에서 용융지에 대한 해석 결과와 용접부의 매크로 단면에서 계측된 용융지를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 4와 같이 용융지 형상에 대한 해석 및 실험 결과는 최대 2mm의 오차를 보이고 있다. 이는 열 전달 해석시 용접부에서 용접(1510°C)을 초과하는 온도 구간에서 용융지의 유동 효과를 고려하기 위하여 열 전도 계수를 50배 정도 증가시킨 유효 열 전도 계수를 사용하고 스티어링 효과를 용융지 형상과 동일한 입열 영역에 적용함으로써 해석 결과에 의한 용융지 형상은 계측 결과를

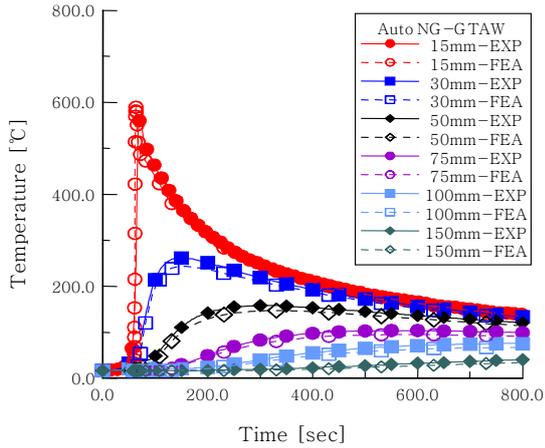


Fig. 4 Comparison results of temperature changes at the bead-on-plate weldment obtained by FEA and experiment

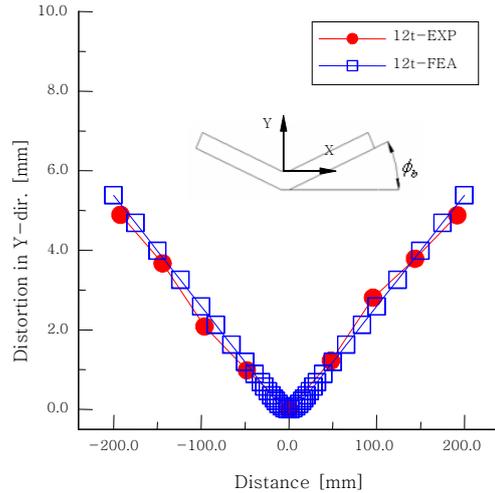


Fig. 6 Distribution of distortion in the Y-dir. of the bead-on-plate weldment obtained by FEA and experiment

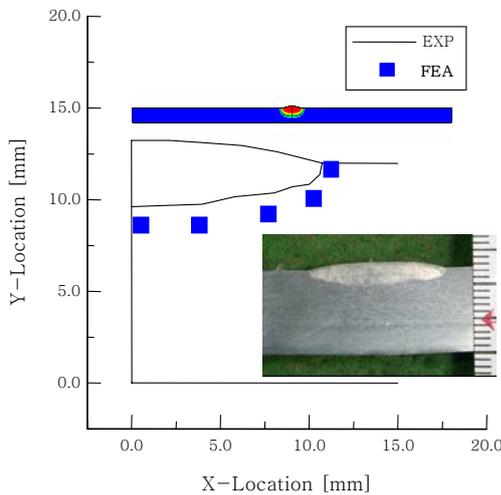


Fig. 5 Comparison results of the shape of molten pool at the bead-on-plate obtained by FEA and experiment

다소 크게 예측하고 있다. 즉, 해석 및 실험에 의한 용융선의 차이는 스테링 효과의 적용 영역 및 크기와 같은 개별 인자들의 상호 작용에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 6은 Auto NG-GTA 용접을 이용한 12mm 두께의 비드 온 플레이트 용접시 Y 방향의 변형 분포에 대한 해석 및 실험 결과를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 6과 같이 해석 및 실험에 의한 각 변형량은 각각 5.1mm와 5.4mm로 해석 결과는 실험 결과와 5.5%의 오차 범위내에서 매우 잘 일치하고 있다. 이를 통해 Auto NG-GTA 용접 기법의 입열 모델 개발시 본 연구에서 적용한 아크 효율 및 용접 열원은 타당함을 알 수 있다. 이상의 Auto NG-GTA 용접부에 대한 온도 해석 및 변형 결과를 토대로 본 연구에서는 STS 304

강의 Auto NG-GTA 용접시 아크 용접 효율을 0.8로 정의하였다.

3. 인장하중법의 변형 제어 특성

3.1 해석 모델 및 방법

인장하중의 유무에 따른 STS 304 다층 용접부 역학 특성 평가를 위하여 먼저 본 논문에서 제안한 용접 입열 모델을 이용하여 다층 용접부의 각 용접 패스에 따른 온도 분포 해석을 수행하였고, 이 결과를 이용하여 열 탄소성 해석을 수행함으로써 용접부의 변형 거동 특성을 평가하였다. Fig. 7은 STS 304 다층 맞대기 용접부에서 인장하중법의 적용시 변형 제어 특성을 평가하기 위하여 사용된 유한요소해석 모델의 요소망과 해석시 사용된 경계조건을 나타낸 것이다. Fig. 7과 같이 해석 모델의 폭과 두께는 각각 800mm와 60mm이며, 요소망 구성시 사용된 요소는 4절점 등매개 요소이다. 인장하중은 용접선에 직각인 방향으로 모재의 양 끝단에서 용접부의 유효 목두께(effective weld throat)에 인장하중에 해당하는 응력을 강제 변위로 환산하여 적용하였다. 이때 해석시 사용된 변위 경계 조건의 경우 다층 맞대기 용접시 용접부의 가열 및 냉각 과정중 모재의 하면부는 Fig. 7의 (b)와 같이 단순 구속을 이용하여 Y 방향의 변위를 제한하였으며 최종 패스의 용접이 완료되고 용접부가 상온으로 냉각된 후 Y 방향의 변위 구속 및 인장하중에 해당하는 강제 변위를 제한하였다. 과도 열 전달 해석 및 열 탄소성 해석시 용접부와 모재의 열적 물성은 동일하고 온도에 의존하는 것으

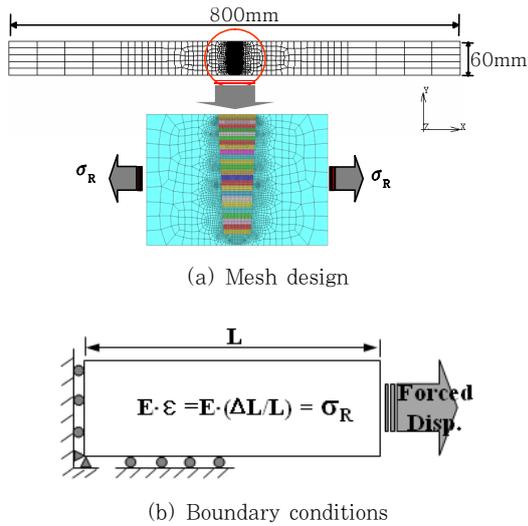


Fig. 7 Mesh design and boundary conditions of analysis model used for STS 304 multi-pass butt weldment

Table 2 Variables used for FEA

Welding Process & Welding Pass		Heat Input [kJ/cm]	Welding Deposit
Auto NG-GTAW	1 st	15.7	
	others	15.9	

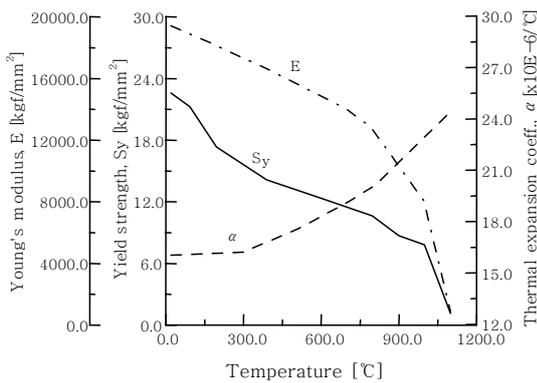


Fig. 8 Mechanical properties of STS 304 steel⁴⁾

로 가정하였다. Table 2는 Auto NG-GTA 용접 조건과 용접부의 개선 형상을 나타낸 것이며, STS 304강의 용접부와 모재의 기계적 물성은 Fig. 8과 같이 온도에 의존하고 등방성으로 가정하였다.

3.2 해석 결과

Fig. 9는 STS 304 다층 맞대기 용접부의 초층 용접부의 하부 표면에서 용접 패스에 따른 가열 및 냉각시 온도 천이 거동을 도시한 것이다. 여기서 다층 맞대기 용접부의 총 적층 용접 패스 수는 26패스이다. Fig. 9와 같이 초층 용접 후 용융지의 최고 온도는 KWJS에서 용접부의 온도 분포 계산시 최고 온도의 기준으로 제한한 기화 온도(3000°C)를 초과하지 않음을 알 수 있다. Fig. 9의 비 선형 과도 열 전달 해석결과를 이용하여 열 탄소성 해석을 수행하고 STS 304 다층 맞대기 용접부의 용접 및 냉각중에 용접선에 직각인 방향으로 발생하는 횡 수축량의 천이 거동을 평가하였다. Fig. 10은 인장응력을 가하지 않은 경우(W/O restraint

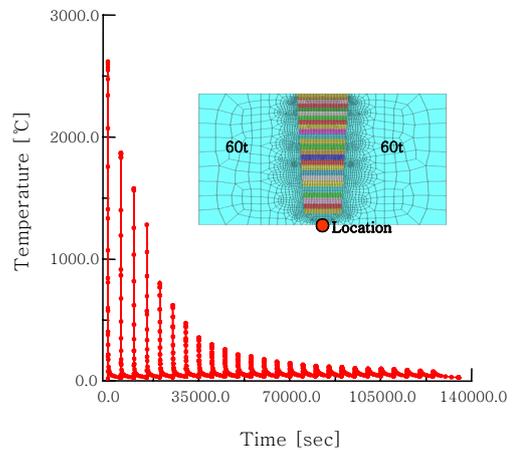


Fig. 9 Transient temperature behavior at the multi-pass butt weldment with deposited welding pass

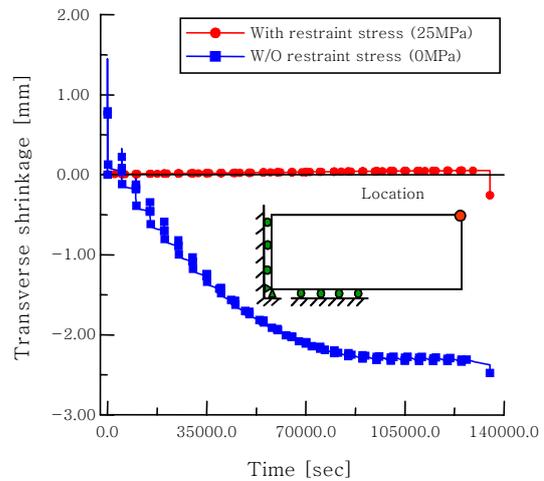


Fig. 10 Transient behavior of transverse shrinkage at the end of top surface of the weldment with and without restraint stress

stress)와 용접 및 냉각중에 용접부의 유효 목두께에 25MPa의 일정한 인장응력을 부가한 후 용접이 완료된 시점에서 인장력을 제거한 경우(With restraint stress)에 시편의 상부 끝단부에서 X 방향의 횡 수축량의 변화에 대한 천이 거동을 비교하여 도시한 것이다. Fig. 10과 같이 인장응력을 가하지 않은 경우 횡 수축량은 용접이 진행됨에 따라 점차 (-) 방향으로 천이되어 증가함으로써 용접이 완료된 시점에서 최종 수축량은 최대 2.5mm로 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 용접부 유효 목 두께에 25MPa의 인장응력이 인가된 경우 용접 및 냉각중에 횡 수축량은 (+) 방향의 인장 상태로 발생하고 초기에 발생한 (+) 방향의 변형이 용접 패스와 더불어 거의 일정하게 증가하다가 하중의 제하와 동시에 대략 0.25mm의 수축이 발생하였다. 이는 인장하중이 작용함에 따라 STS 304 다층 용접부에서 횡 수축량은 (-) 방향의 변형이 (+) 방향의 인장 상태로 천이됨을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10과 동일한 해석 조건하에서 용접이 완료된 후 용접 단면에서 두께 방향으로의 각 위치에서 X 방향의 소성 변형률(ϵ_{xx})의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 11과 같이 용접선에 직각인 방향으로 인장하

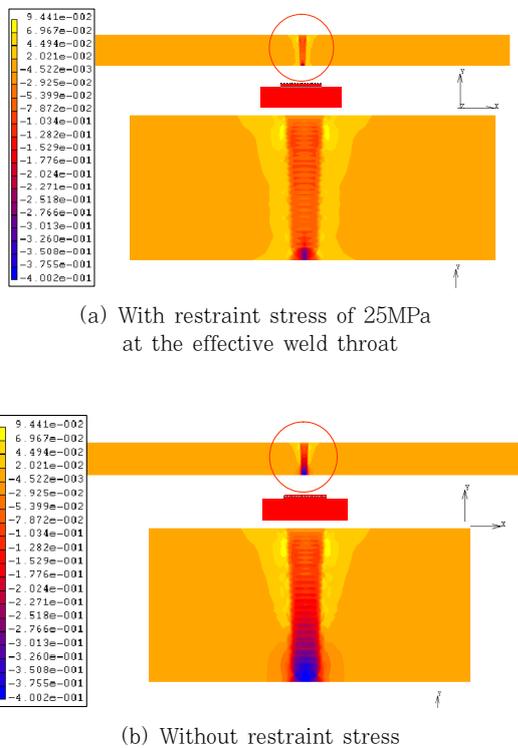


Fig. 11 Comparison results of X-dir. plastic strain(ϵ_{xx}) at the section of normal to the weld line with and without restraint stress

중이 작용할 경우 용접부 근방에서는 횡 방향의 인장 변형률이 용접부 두께 방향으로 균일하게 분포하고 있으며, 폭 방향에서도 인장하중을 가하지 않은 경우와 비교해 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 STS 304 다층 맞대기 용접부에서 인장하중이 작용하는 경우 각 변형 뿐 아니라 횡 수축에 대한 변형 제어 효과가 있음을 알 수 있다. 이에 본 논문에서는 Table 2의 STS 304 용접부의 변형 제어 기법을 선정하기 위해 인장하중의 크기에 따른 변형 거동 특성을 평가하였다.

Fig. 12는 인장하중법이 적용된 편면 다층 맞대기 용접부에서 인장하중의 차이에 따른 횡 수축 및 각 변형량의 거동을 나타낸 것이다. Fig. 12와 같이 횡 수축 및 각 변형량은 모두 인장하중이 증가함에 따라 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 편면 개선 용접부에서 용착 금속의 응고 과정에서 발생하는 수축과 두께 방향의 수축량의

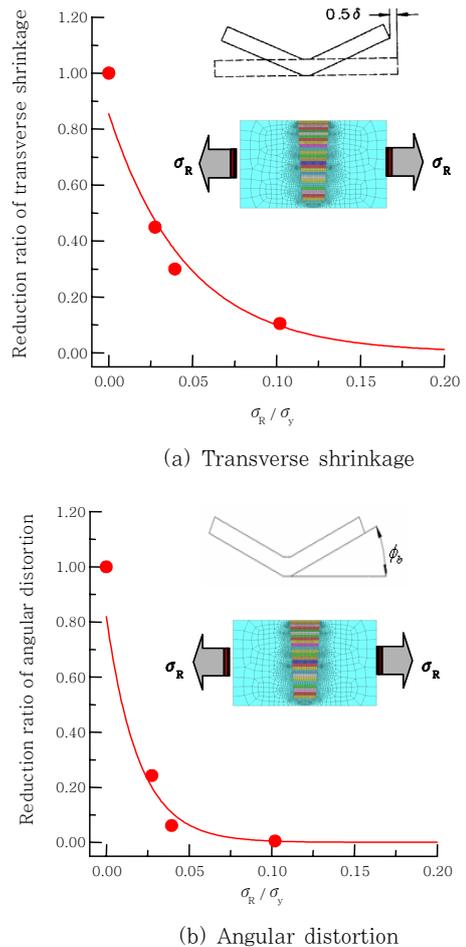


Fig. 12 Changes of welding distortion at the multi-pass STS 304 butt weldment under tension load

차이가 인장하중에 의해 유발된 용착 금속 및 가열된 모재의 팽창에 의하여 상쇄되었기 때문이다. 이상의 결과로부터 본 논문에서는 STS 304 다층 맞대기 용접부에서 발생하는 면내 및 면외 변형의 제어 방안으로써 인장하중법을 적용 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

STS 304 다층 맞대기 용접부에서 인장하중법에 의한 각 변형 및 횡 수축의 변형 제어 특성을 유한요소해석을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Auto NG-GTA 용접 기법을 이용한 STS 304 용접부의 변형 거동 특성을 평가하고자 용접부의 온도 분포 해석을 위해 균일 분포 체적 열원과 표면 열원의 혼합비가 5:5인 혼합 열원을 이용하여 용접 입열 모델을 개발하였다. 개발된 Auto NG-GTA 용접부의 2차원 유한요소해석을 위한 입열 모델의 적정 아크 효율은 0.8 이다.

2) STS 304 다층 맞대기 용접부에서 인장하중이 작용하는 경우 횡 수축 및 각 변형량은 모두 부가된 인장하중이 증가함에 따라 급격히 감소하였으며 매우 낮은 인장하중을 가하는 경우에도 충분한 변형 제어 효과가 있음을 확인하였다.

3) 인장하중법에 의한 다층 맞대기 용접부에서 횡 수축 및 각 변형량의 변형 제어 특성은 용착 금속의 응고 과정에서 발생하는 수축과 두께 방향의 수축량의 차이가 인장하중에 의해 유발된 용착 금속 및 가열된 모재의 팽창에 의하여 상쇄된데 기인한다.

참 고 문 헌

1. Koichi Masubuchi : Analysis of Welded Structure, Pergamon Press, 1980
2. Terai, K. et, al. : Study on Prevention on Welding Deformation in Thin-skin Plate Structures, Kawasaki Technical Report, **61** (1978), 61-66 (in Japanese)
3. 용접강도연구위원회 : 유한요소해석을 이용한 Arc 용접부의 온도 분포 예측 표준화, 대한용접학회지, **23-6**(2005), 497-503 (in Korean)
4. M.F.Rothman : High-Temperature Property Data: Ferrous Alloys, ASM International, 1998