

## 304 스테인리스강 용접부의 용접변형 및 잔류응력의 특성에 관한 연구

### A Study on the Characteristics of Welding Deformation and Residual Stresses of 304 Stainless Steel Weldment

장경복\*, 김하근\*, 강성수\*

\* 부산대학교

#### 1. 서론

구조물의 용접 시에는 용접아크에 의한 고입열로 인해 불균일한 온도분포가 형성되고 이로 인해 열응력이 발생하여 용접 후 비선형 소성변형의 발생으로 용접변형과 잔류응력이 존재하게 된다. 이러한 용접변형과 잔류응력은 구조물의 제작 정밀도, 각종강도, 그리고 미관상 큰 영향을 주기 때문에 이를 정확히 예측하여 제어할 필요가 있다. 그런데, 용접관련 현상에서는 이러한 용접후의 변형과 잔류응력에 대한 대처가 숙련 기술자의 현장에서의 경험에 의해 이루어지고 있어 상당한 비용의 낭비가 이루어지고 있는 실정이다. 또한, 숙련된 기술자마저 감소하고 있는 실정이어서 용접후의 변형과 잔류응력을 정확하게 예측하여 제어할 수 있는 시스템이 요구되고 있는 실정이다.

특히, 일반 구조물의 강재에 대해서는 용접후의 변형 및 잔류응력의 예측에 관한 연구가 많이 이루어지고 있으나 원자력 발전소나 배전설비의 대부분을 차지하는 스테인리스강 용접부의 변형 및 예측에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 스테인리스강은 일반 강에 비해 물리적 성질이 다르기 때문에 특히, 열전도도는 낮은 반면 열팽창 계수는 크기 때문에 용접시 용접변형이 크게 발생하는 등의 문제점이 존재한다. 그러므로, 본 연구에서는 스테인리스강 구조물에 가장 많이 사용되는 304 스테인리스강을 이용해 용접시의 변형 및 잔류응력을 유한요소법으로 예측하여 연강의 경우와 비교 분석하여 스테인리스강의 용접변형 및 잔류응력 특성을 규명하여 용접설계시 기초자료로 이용하고 스테인리스강 용접구조물의 파괴강도 연구시 기본자료로 이용하고자 하였다.

#### 2. 해석모델 및 해석방법

스테인리스강의 용접변형 및 잔류응력 특성을 파악하기 위해 연강과 304 스테인리스강을 이용하여 맞대기 및 필렛 용접부에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. 연강의 경우는 SS41를 스테인리스강은 STS 304를 사용하였으며, 용접은 GTAW로 하였다. Table 1은 상온에서의 SS 41과 STS 304의 기계적, 물리적 성질을 나타낸다.

Table 1. Physical and mechanical properties of base metal

비고	물리적 성질			기계적 성질		
	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	열전도도 (cal/cmK)	열팽창 계수 (10 <sup>-6</sup> /K)	항복강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kg/mm <sup>2</sup> )
STS304	7.9	0.04	17.61	26	60	19600
SS41	7.8	0.17	11.7	31	45	21000

해석을 수행한 맞대기 용접 시험편의 크기는 길이 400mm, 폭 280mm, 두께 8mm로 하였으며 루트 갭은 0, 개섵각은 60°로 하였다. 필렛 용접 시험편은 루트갭이 존재하지 않는 양면 필렛용접을 하기 위해 두께 6mm, 폭 200mm의 K형 Web를 맞대기 용접 시험편과 동일한 크기의 플레이트 위에 구현하였으며 개섵각의 크기는 45°로 하였다.

용접공정 해석에 있어 가장 문제가 되는 것이 용접열원이 이동한다는 것인데 이를 구현하

기 위해 3차원 모델을 구성하여 용접비드를 용접방향으로 형성해 나가는 3차원 해석을 수행함으로써 용접열원의 이동효과를 나타내었다. 요소분활은 아이소 파라미터를 도입하여 8절점 육면체 요소를 사용하였으며 용접부는 고입열에 따른 급열과 용접후 급랭이 이루어지므로 요소분활을 미세하게 하였다. 경계조건은 맞대기의 경우 좌우 대칭성을 고려하여 상표면의 중앙부를 좌우로 구속하고 하표면의 중앙부는 상하좌우로 구속하였으며, 필렛의 경우는 웹의 대칭성을 웹 상단의 좌우를 구속하고 플레이트의 하표면의 중앙부를 상하좌우로 구속하였다. 그리고, 용접시의 열 손실은 자연대류, 열 복사, 그리고 용융 표면에서의 증발의 3가지로 분류하였다.

### 3. 해석결과 및 고찰

Fig.1은 각재료의 맞대기 용접시편의 중앙에서 용융부로부터 4.6mm, 8mm, 11.5mm, 15mm, 27.5mm 떨어진 곳에서의 용접시의 온도이력을 나타낸다. 연강의 온도분포가 스테인리스강보다 다소 높게 나타나고 있는데, 이것은 상온에서는 연강과 스테인리스강의 비열 값이 비슷하나 온도가 올라갈수록 스테인리스강의 비열 값이 연강보다 커지고 또한 연강의 열전도도가 Table 1에 나타나듯이 스테인리스강보다 4배가량이나 크기 때문에 모재쪽으로 열전도가 빨라 요소들이 급격히 가열되고 급격히 냉각되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.2는 맞대기 용접시편의 길이방향의 중앙라인에서의 용접선 방향과 용접선의 직각방향의 수축량을 나타낸다. 스테인리스강의 전체적인 용접 수축량이 크게 나타남을 알 수 있는데 이것은 스테인리스강은 열전도도가 연강에 비해 낮은 반면 열팽창 계수는 다소 크기 때문이다.

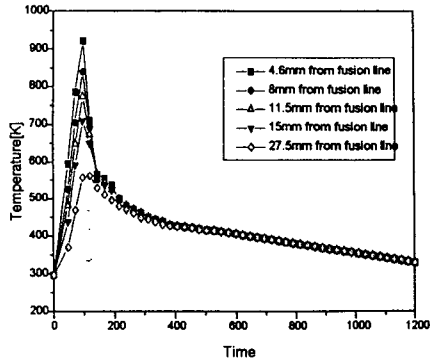
Fig.3은 길이방향의 중앙라인에서 폭 방향으로의 용접후 완전히 냉각이 이루어졌을 때의 잔류하는 폰마이세스 응력을 나타낸다. 연강의 경우는 잔류응력이 용접부위 부근에 큰 잔류응력이 집중되어 나타나는 반면 스테인리스강의 경우는 최대 잔류응력이 분포하는 부분 이후 응력이 서서히 감소하며 최대 잔류응력도 연강보다 다소 낮음을 알 수 있다. 이는 연강의 항복응력이 스테인리스강보다 높고, 열전도도가 커서 용융부에서 모재로의 열손실이 크기 때문에 용융부 근처에 높은 잔류응력이 집중되기 때문이다.

### 4. 결론

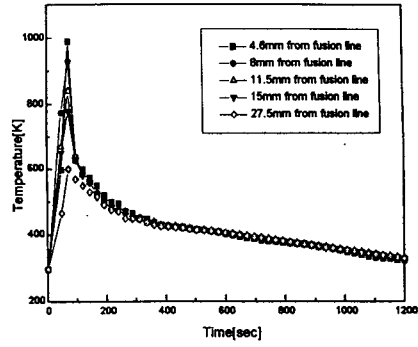
1. 스테인리스강은 연강에 비해 열전도도가 낮아 모재로의 열손실이 연강에 비해 적고 고온영역에서의 비열이 연강보다 크기 때문에 용융부 근처의 온도분포가 다소 낮게 나타났다.
2. 스테인리스강은 열전도도의 값이 연강의 1/4인 수준인 반면 열팽창계수는 연강보다 크기 때문에 용접시의 수축량이 크게 발생함을 알 수 있다.
3. 스테인리스강의 경우 항복응력이 연강보다 다소 낮고 열전도도가 낮아 모재로의 열전달이 느리기 때문에 용접후 잔류하는 응력의 최대값이 연강보다 낮고 응력의 집중 부위가 다소 넓게 나타나며 용융부로부터 멀어질수록 응력의 감소가 서서히 나타났다.

### 5. 참고문헌

- 1) Koichi Masubuchi, "Research Activities Examine Residual Stresses and Distortion in Welded Structures", AWS, Dec., 1991, pp. 41-47.
- 2) Koichi Masubuchi, "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press, 1980.
- 3) P. Tekriwal, J. Mazumder, "Finite Element Analysis of Three Dimensional Transient Heat Transfer in GMA welding", AWS, July, 1988 pp.150s-156s
- 4) 양영수, 이세환, "필렛 용접부의 각변형량 예측에 관한 연구", 대한용접학회지, 제15권, 4호, 1997, pp. 289-295.
- 5) Analysis Research Corporation, MARC User Manual.

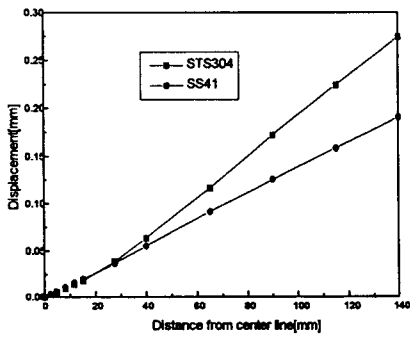


(a) STS304

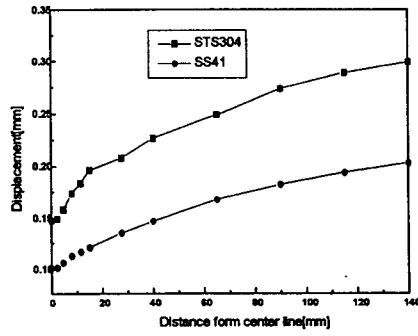


(b) SS41

Fig.1 Thermal cycle at various locations of butt weldment



(a) Transversal shrinkage



(b) Longitudinal shrinkage

Fig.2 Welding shrinkage of butt weldment

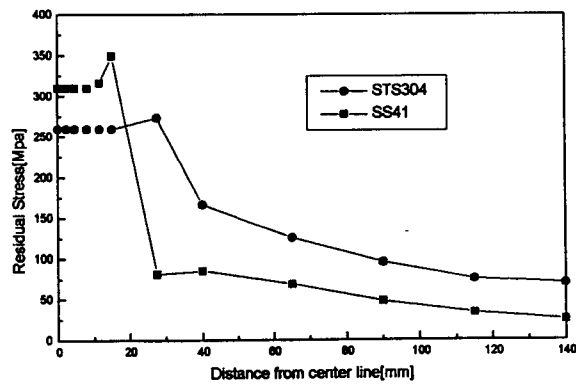


Fig.3 Residual stress distribution of butt weldment