

후판 AA5083합금 용접부의 변형 거동

A Behavior of Welding Distortion at the Thick Weldment of AA5083

신상범*, 이동주

현대중공업 (주), 기술개발본부 산업기술연구소

ABSTRACT The purpose of this study is to establish the predictive equation of welding distortion at the thick AA5083 alloy weldment. In order to do it, the extensive FE analysis was performed to identify the principal factor controlling welding distortion. Based on the results, the predictive equations of transverse shrinkage and angular distortion at the thick AA5083 alloy weldment were formulated as the function of heat intensity (Q), in-plane(Di) and bending(Db) rigidity.

1. 서론

알루미늄 합금은 FCC (Faced Centered Cubic) 구조를 가지고 있어 저온에서 우수한 파괴 인성을 가지고 있을 뿐 아니라 일반 탄소강에 비하여 낮은 노치 민감도(sensitivity)를 가지고 있으므로 다양한 하중 및 극한 환경 조건하의 해양 구조물의 제작시 다양하게 적용되고 있다. 특히, 비 열처리성 AL-Mg계 합금인 AA5000 계열의 경우 내식성, 성형 가공성, 용접성 그리고, 저온 파괴 인성이 매우 우수하기 때문에 극 저온용 구조 부재로서 매우 널리 사용되고 있다. 그러나, 알루미늄 합금의 용접시 용접부의 porosity, 용접 변형 등의 문제는 효율적인 용접부의 설계와 제작시 문제점으로 작용하고 있다. 특히, 알루미늄 합금은 탄소강에 비해 높은 열 전도도와 열 팽창 계수가 매우 높은 반면, 탄성계수는 매우 낮아 과도한 수축(shrinkage)이나 면외 변형(Out-of-plane distortion)을 유발함으로써 제작시 이를 제어 및 교정하는데 많은 노력이 수반된다.

본 연구에서는 LNG(Liquefied Natural Gas) 저장 및 운송용 tank에 사용되고 있는 AA5083 합금의 용접부에 대하여 유한 요소 해석을 이용하여 용접 변형에 대한 변수 해석을 수행함으로써 용접 변형을 지배하는 주 인자를 규명하고자 하였다. 그리고, 이 결과를 통하여 후판의 AA5083 합금의 GMAW(Gas Metal Arc Welding) 용접시 발생하는 변형에 대한 예측 기법을 정립하고자 하였다.

2. 유한 요소 해석

2.1 해석 모델 및 방법

AA5083 합금 용접부의 변형 거동 평가를 위하여 사용된 본 고의 해석 모델은 butt (bead-on과 groove)와 fillet 용접부이며, 해석시 사용된 변수는 Table 1과 같이 용접 입열량과 용접부의 두께이다. 이때, 사용된 용접 기법은 GMAW이며, 사용된 모재(AA5083)의 기계적 물성은 Table 2와 같다.

Table 1 Variables used for FEA

Shape	Thickness [mm]	Welding Heat Input [cal/mm]
Bead-on	7.0 - 169	287 - 584
Groove		
Fillet		

Table 2 Mechanical properties of AA5083 alloy

Elastic Modulus [MPa]	Poission's Ratio	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]
71000	0.33	125	275

용접 변형 해석을 위한 열 전달 해석시 준정상 상태(quasi-stationary state condition) 즉, 용접 arc의 시단부와 끝단부에서 발생하는 효과

를 배제하고 열속이 등속으로 이동한다는 가정하에 8절점 등매개 평면 요소를 이용하여 요소망(mesh design)을 구성하고, 2차원 온도 분포 해석을 수행하였다. 사용된 열 경계 조건은 용접시 대기와 접촉하는 모든 면에서는 상온(20°C)의 공기와 자연 대류에 의한 열 손실이 존재하고, shielding gas와 접촉하는 면에서는 강제 대류에 의한 열 손실이 작용하는 것으로 가정하였다[1]. 그리고, 해석 모델의 대칭면과 용접선 방향으로 열 유동이 없는 즉, 단열된 것으로 가정하였다. 이때, 사용된 입열 모델로 단위 체적당 입열의 크기는 일정한 반 타원 형상의 용융 pool로 이상화된 열원을 이용하였으며, 용접 조건에 따른 용융 pool의 형상 정보는 bead-on 과 fillet 용접 시험 결과를 이용하여 정의하였다. 비선형 열 탄소성 해석시 재료는 등방성이고, 기계적 물성은 온도에 의존하는 것으로 가정하였다. 그리고, 용접선 방향의 변위를 제어하는 generalized plane strain condition을 적용하였으며, 용접 arc의 이동시 용접선 길이 방향의 변형 저항성을 고려하여 가열시 용접부의 팽창에 의하여 유발되는 변형을 제어하였다.

2.2 해석 결과

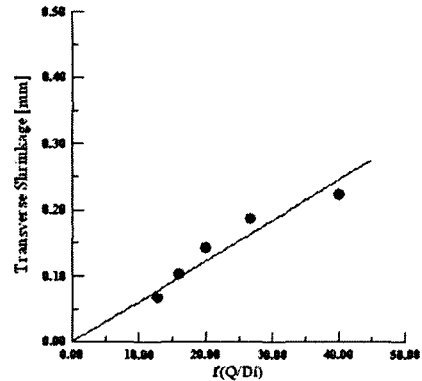
Fig. 1은 AA5083 합금의 butt (bead-on plate 와 groove)와 fillet 용접부에서 용접 입열량(Q) 및 용접부의 면내 강성(Di)의 비에 따른 횡 수축량(δ)의 거동을 도시한 것이다. Fig. 2와 같이 f(Q/Di)가 증가함에 따라 두 용접부의 횡 수축량은 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 횡 수축량(δ)의 거동 특성은 기존의 연구 결과에서 제안된 일반 탄소강의 용접부의 거동 특성과 일치한다.[2] 이상의 결과를 토대로 AA5083 용접부의 식 (1)과 같이 횡 수축량(δ)이 용접 입열량 및 면내 강성의 비에 대한 선형 함수로 정의됨을 알 수 있다.

$$\delta = f\left(\frac{Q}{D_i}\right) \quad (1)$$

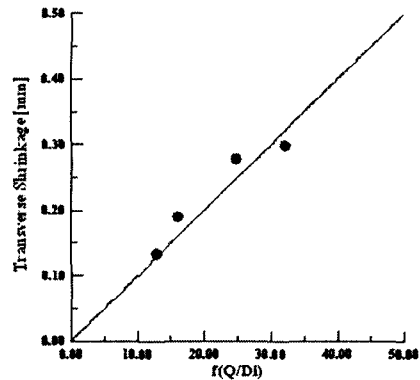
Fig. 2는 AA5083 합금의 butt (bead-on plate 와 groove)와 fillet 용접부에서 용접 입열량(Q)과 용접부의 굽힘 강성(Db)의 비에 따른 각 변형(φ)의 거동을 도시한 것이다. Fig. 2와 같이 AA5083 합금의 butt와 fillet 용접부에서 각 변

형량은 f(Q/Db)가 증가함에 따라 선형적으로 증가하지만, f(Q/Db)가 일정 값에 도달한 후 감소한다. 이는 f(Q/Db)가 증가함에 따라 용접부의 두께 방향으로 용접선에 수축한 방향의 수축 하중의 차이가 증가함에 따라 각 변형량은 증가하지만, f(Q/Db)가 일정 이상 증가하면, 두께 방향으로 수축 하중의 차이가 감소하기 때문이다. 이는 횡 수축량과 마찬가지로 탄소강의 용접부의 거동과 동일하다[2]. 이상의 결과로부터 AA5083의 butt와 fillet 용접부의 각 변형(φ)의 예측 기법을 다음과 같이 용접 입열량 및 용접부의 굽힘 강성의 함수로 정의하였다.

$$\phi = f\left(\frac{Q}{D_b}\right) \quad (2)$$



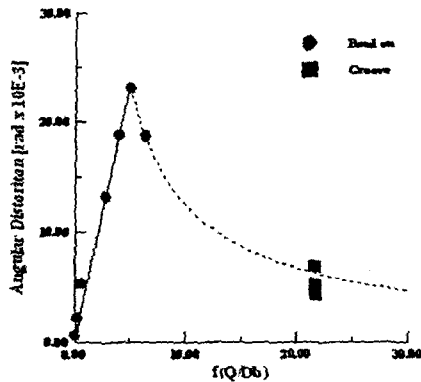
(a) Butt (Groove)



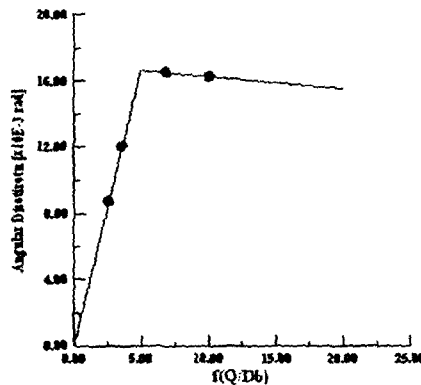
(b) Fillet

Fig. 1 Changes of transverse shrinkage at the butt and fillet weldment of AA5083 with f(Q/Di)

일반적으로 수축에 의한 용접부의 정도와 관련된 문제는 전술한 예측 기법을 이용하여 설계에서 이를 반영하는 경우 효율적인 제어가 가능하며, butt 용접부의 각 변형의 경우에도 기존



(a) Butt (Bead-on and Groove)



(b) Fillet

Fig. 2 Changes of angular distortion at the butt and fillet weldment of AA5083 with $f(Q/Db)$

연구 결과에 의하면 구속에 의한 변형 제어 효과가 매우 클 뿐 아니라, 적정 개선 형상이나, 용접 순서를 이용하면 효율적인 변형 제어가 가능하다 [2]. 그러나, fillet 용접부의 각 변형의 경우 구속에 의한 변형 제어 효과가 매우 미미하므로 이를 제어하기 위한 적정 제어 방안 선정이 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 fillet 용접부의 각 변형을 효율적으로 제어하기 위하여 탄성 역 변형에 의한 변형 제어 효과를 유한 요소 해석을 이용하여 평가하였다. Fig. 3은 AA5083 합금의 fillet 용접부의 상부 표면에 인장의 skin stress (굽힘 응력)가 작용하고, 용접부가 상온으로 완전히 냉각된 후 skin stress가 제거된 후 잔류하는 각 변형을 도시한 것이다. 이때, 용접부의 두께는 20mm이며, 용접 입열량은 Table 1과 같다. Fig. 3과 같이 fillet 용접부에 작용하는 skin stress가 증가함에 따라 용접부의 각 변형은 선형적으로 감소하며, 일정 이상의 skin stress가 작용하는

경우 역 방향의 변형이 유발됨을 알 수 있다. 이는 일정 이하의 skin stress가 작용하는 경우 두께 방향의 수축 하중의 차이가 감소하지만, skin stress가 과도하게 작용하는 경우 용접부 두께 방향의 평균 온도 증가에 따른 강성 저하에 기인하여 소성 역 변형이 발생하기 때문이다.

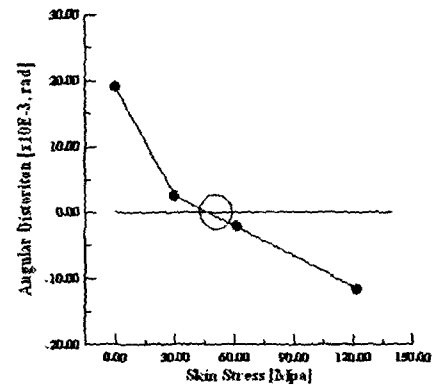


Fig. 3 Changes of angular distortion at the fillet weldment of AA5083 with skin stress ($t=20\text{mm}$, $Q=384\text{cal/mm}$)

4. 결 론

후판 AA5083 합금 용접부의 변형 거동 특성을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AA5083 합금 butt와 fillet 용접부의 횡 수축 및 각 변형은 탄소강의 용접부와 동일하게 용접 입열량 (Q) 및 굽힘(Db) 및 면내 (Di) 강성의 함수로 정의된다.
- 2) AA5083 합금 fillet 용접부의 각 변형은 탄성 역 변형에 의한 skin stress가 증가함에 따라 감소하지만, 입계 하중을 초과하는 경우 역 변형이 유발된다.

참고문헌

1. P. Tekriwal and J. Mazudar, "Finite Element Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Transfer in GMA Welding", Welding Research Supplement, July, 1988, pp. 151-156
2. S. B. Shin and H. G. Kim, "A study on the prediction of welding distortions of the hull in shipbuilding (I)", Proceeding of 11th ICCTW, p.233s-239s.