

내·외적 구속에 의한 구조용강 용접부 변형 거동 특성에 관한 연구

A Study on the Effect of Internal & External Restraint Condition on the Welding Distortion at the Weldment of Structure Steel

신상범*, 윤중근
현대 중공업(주)

1. 서론

용접 arc에 의해 야기되는 용접부의 불 균일한 온도 구배는 용접부에서 열 변형도의 차이를 유발하고, 이로 인해 용접부에 잔류 응력과 변형이 수반된다. 특히, 용접 변형은 기존의 연구자들에 의하여 정식화된 용접 arc에 의해 야기되는 불 균일한 온도 구배에 의한 열 변형도의 차이 및 부재의 굽힘 강성 또는 면내 강성에 의한 변형에 대한 저항 정도의 차이뿐 아니라, 용접 부재의 자중에 의한 내적 구속(internal restraint) 및 용접시 발생하는 과도 변형(transient distortion)의 제어를 위한 목적으로 적용되는 jig(strong back, tab piece)등에 의한 외적 구속(external restraint)에 의해서 매우 큰 영향을 받는다. 이러한 내·외적 구속에 의한 용접 변형 거동의 특성은 실 구조 용접부의 변형 예측시 소형화된 실험 및 해석에 의하여 유도된 용접 변형 예측 기법의 적용이 매우 제한적임을 의미한다.

따라서, 본 연구에서는 실 구조 부재의 용접시 용접 변형을 예측하고, 용접부의 수축 여유 결정 및 변형 제어를 위한 적정 구속 방안을 제안하고자 유한 요소 해석(FEA)을 이용하여 판계 및 fillet 용접부의 내·외적 구속에 따른 용접 변형 거동 특성을 평가하고자 하였다.

2. 해석 모델 및 방법

내·외적 구속에 따른 용접 변형 거동 특성을 평가하기 위한 해석시 사용된 모델은 fillet 및 판계 용접부이며, 해석시 사용된 해석 변수는 Table 1과 2에 도시한 바와 같이 용접 arc에 의한 용접 입열량과 내적 구속에 따른 변형 거동 특성을 평가하기 위한 주판의 판 폭 및 두께이다. 그리고, 용접부의 외적 구속에 따른 변형 거동 특성은 용접부의 양 끝단부를 용접 및 냉각시 구속하고 용접부가 상온으로 완전히 냉각된 후 용접부에서 발생한 잔류 응력이 재 분포함으로써 유발되는 탄성 복원(spring-back) 효과를 평가함으로써 이를 고려하였다. 용접 변형 해석을 위한 비선형 열 탄소성 해석에 앞서 먼저, 열 전달 해석을 수행하였으며, 이때, 열 변형에 의한 열 전달기구에 미치는 영향이 매우 미세하므로 열 전달 및 열 응력이 각각 비 연성된 것으로 가정하고 해석을 수행하였다.

용접 변형 해석을 위한 열 전달 해석시 준 정상 상태 조건(quasi-stationary state condition) 즉, 용접 arc의 시단부와 끝단부에서 발생하는 효과를 배제하고 열속이 등속으로 이동한다고 가정하여 해석을 수행하였다. 따라서, 본 연구에서 사용된 요소망(mesh design)은 8절점 등매개 평면 요소를 이용하여 구성되었으며, 2차원 해석을 수행하였다. 사용된 열 경계 조건은 대기와 접촉하는 모든 면에서는 상온(20°C)의 공기와 자연 대류에 의한 열 손실이 존재하며, 대칭면에 대해서는 대칭면의 수직인 방향으로 열 유동이 없는 즉, 단열된 것으로 가정하였다. 비선형 열 탄소성 해석시 용접선 방향으로의 변위를 제어하는 generalized plane strain condition을 적용하였다. 이때, 용접 부재의 하부 표면은 용접부의 하부의 가열시 역 변위를 spring 요소를 이용하여 구속함으로써 용접 arc에 의한 용접부의 가열시 유발되는 역 방향의 변위를 제어하였다. 이는 실 구조 부재와 같이 용접선이 매우 긴 경우 용접부 및 근방 모재의 팽창이 미 용접된 영역에 의해 구속됨으로써 역 변형이 제어되나, 2차원의 해석이나, lumped heat source의 입열 모델에 의한 3차원 해석의 경우 가열시 상온의 미 용접부의 변형 제어 효과가 고려되지 않아 용접 및 냉각 초기에 가열된 모재의 팽창에 기인한 역 변형에 의하여 용접부의 잔류 각 변형량이 과소 평가되기 때문이다.

Table 1 Variables used For FEA (fillet weldment)

Base Metal	Heat Input [cal/mm]	Flange [mm]			Web [mm]		
		Thickness	Width	Length	Thickness	Height	Length
A grade	224 - 522	12 - 25	500 - 4000	Infinite	12 - 25	250	Infinite

Table 2 Variables used for FEA (butt weldment)

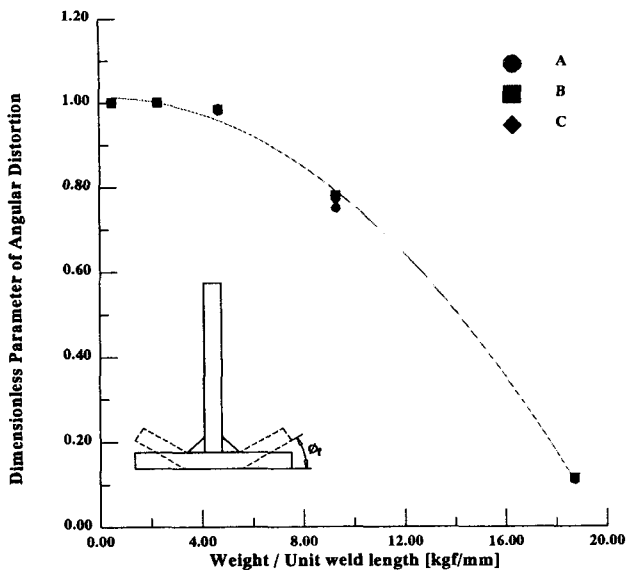
Groove	Base Metal	Heat input [cal/mm]	Thickness [mm]	Length [mm]	Width [mm]
V groove	A grade	463 - 3250	6 - 20	Infinite	700 - 3000

3. 해석 결과 및 고찰

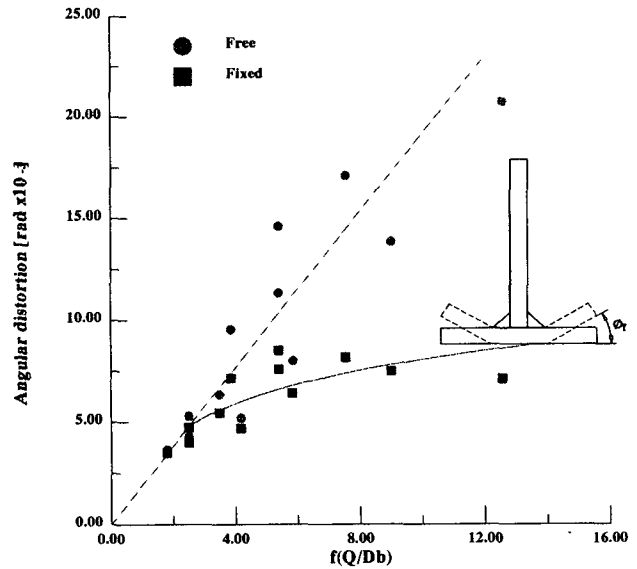
Fillet 용접부 Fig. 1의 (a)는 fillet 용접부의 flange 두께가 12mm이고, 용접 입열량이 224(A), 313(B), 522(C)cal/mm인 경우 용접선 단위 길이당 자중 W_{UL} 에 따라 자중 효과의 적용 유무 즉, 내적 구속 효과에 따른 fillet 용접부 각 변형의 무차원 변수 ξ_f 의 거동을 도시하고 있다. Fig. 1의 (a)와 같이 각 변형 무차원 변수 ξ_f 는 용접선 단위 길이당 자중이 증가함에 따라 감소하며, 용접 입열량과 굽힘 강성의 비와는 거의 무관함을 알 수 있다. Fig. 1의 (b)는 fillet 용접부의 외적 구속 조건에 따른 각 변형량과 용접 입열량 및 굽힘 강성의 비 $f(Q/Db)$ 의 관계를 도시하고 있다. Fig. 1의 (b)와 같이 비 구속(free condition)하의 fillet 용접부의 각 변형량은 $f(Q/Db)$ 가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이나, 구속된 fillet 용접부 각 변형은 $f(Q/Db)$ 가 증가함에 따라 각 변형의 증가율이 감소한다. 이는 $f(Q/Db)$ 가 증가함에 따라 외적 구속에 의하여 가열된 모재의 팽창에 기인하여 잔류 각 변형에 대한 역 변형을 유발하는 굽힘 하중이 증가하기 때문이다. 그러나, 용접 입열량과 굽힘 강성의 비 $f(Q/Db)$ 가 매우 낮은 경우에는 외적 구속에 의한 변형 제어 효과는 거의 없음을 알 수 있다.

판계 용접부 Fig. 2의 (a)는 편면 판계 용접부의 jig 및 jar에 의한 외적 구속의 적용 유무에 따른 각 변형량과 용접 입열량 및 굽힘 강성의 비 $f(Q/Db)$ 의 관계를 도시하고 있다. Fig. 2의 (a)와 같이 판계 용접부의 각 변형은 외적 구속에 의해서 거의 완벽하게 제어됨을 알 수 있다. Fig. 2의 (b)는 판계 용접부의 횡 수축량과 용접 입열량 및 면내 강성의 비 $F(Q/Di)$ 의 관계를 도시하고 있다. Fig. 2의 (b)와 같이 판계 용접부의 횡수축의 경우 jig 및 jar에 의한 외적 구속이 존재하는 경우 용접 입열량과 면내 강성의 비 $F(Q/Di)$ 가 증가함에 따라 변형 제어 효과가 다소 나타나나, 효과는 매우 미미하다.

이상의 결과로부터 jig 및 jar에 의한 단순 외적 구속에 의한 판계 용접 변형 제어 효과는 횡 수축량의 경우 매우 미미하지만, 각 변형 제어 효과는 매우 큼을 알 수 있다. 그러나, 실 구조 부재에 있어서 각 변형 제어 효과는 용접 부재의 구속 위치에 의존할 뿐 아니라 용접 변형 양상이 부재의 크기에 따른 내적 구속에 의존하기 때문에 각 변형 제어 효과 또한 매우 제한적이다. 즉, 용접부와 구속 위치와의 거리가 증가함에 따라 각 구속도의 감소에 기인하여 변형 제어 효과가 감소된다. 따라서, 실 butt 용접부의 변형 양상을 제어하기 위한 적정 외적 구속 방안의 적용을 위해서는 전술한 인자들에 대한 영향을 규명하는 추가적인 연구가 필요하다.

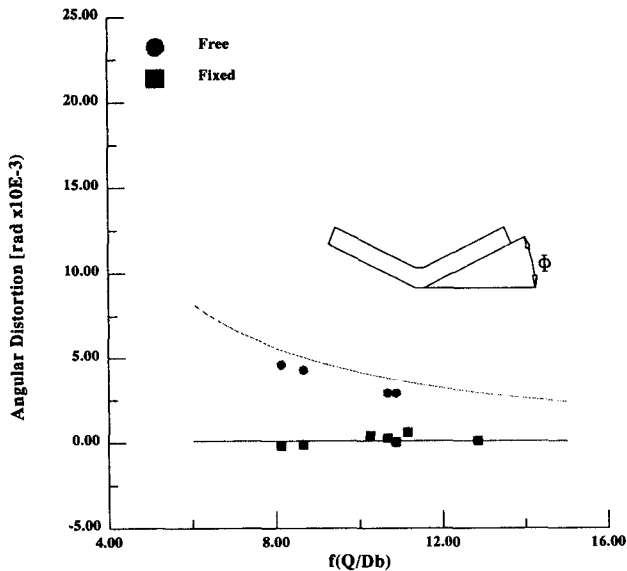


(a) Internal restraint

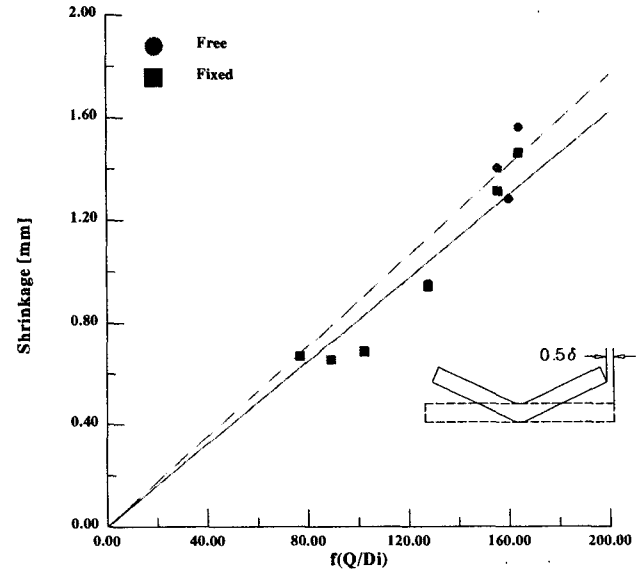


(b) External restraint

Fig. 1 Effects of restraint condition on the welding distortion at the fillet weldment



(a) Angular Distortion



(b) Transverse shrinkage

Fig. 2 Effects of external restraint condition on the welding distortion at the butt weldment

4. 결론

실 구조 부재의 용접시 용접 변형의 거동 특성을 평가하기 위하여 용접부의 내·외적 구속 에 따른 변형 거동 특성을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Fillet 용접부의 각 변형량은 내적 구속이 증가함에 따라 감소하나, 용접 입열량 및 굽힘 강성의 비와는 거의 무관하다. 그리고, 외적 구속의 각 변형 제어 정도는 용접 입열량 및 굽힘 강성의 비가 증가함에 따라 증가한다.
2. 판계 용접부의 외적 구속에 의한 각 변형 제어 효과는 매우 크지만, 수축에 대한 변형 제어 효과는 매우 미미하다. 그러나, 각 변형의 제어 효과 또한 용접부의 각 구속도의 크기에 따라 의존하므로 변형 제어를 위하여 이를 정량화하기 위한 각 구속도에 따른 추가적인 연구가 요구된다.