

평판 맞대기 용접시 변형 발생기구 규명에 관한 기초적 연구

A Fundamental Study on the Welding Deformation Mechanism

김종명*, 박창수**, 방한서***

* 전남도립담양대학 자동차·기계공학부

** 조선대학교 대학원 선박해양공학과

*** 조선대학교 선박해양공학과

1. 서 론

강구조물의 용접시에 접합부의 용융을 위해 열이 가해지고, 이 열로 인하여 필연적으로 용접변형 및 잔류응력이 발생한다. 여기서 잔류응력, 용접변형은 강구조물의 미관, 조립정도에 악영향을 끼치며, 경우에 따라서는 강도의 저하를 가져오는 원인이 되기도 한다. 특히, 용접변형은 강성이 큰 후판 보다는 박판에서 보다 크게 발생되어지며, 용접잔류응력 및 구속응력과 함께 용접균열 등의 용접결함을 발생시키는 경우도 있다.

따라서, 박판의 용접시 발생되어지는 용접변형의 형태 및 그 발생기구(mechanism)에 대하여 고찰할 필요가 있다.

용접변형에 관한 연구는 크게 실험적 방법과 수치해석적 방법으로 대별되는데 실험적 방법은 용접변형에 영향을 미치는 인자들과 용접변형 현상과의 관계를 실험을 통하여 구하고 이를 수식으로 표현하여 변형량을 구하게 되는데 이는 용접변형에 관계하는 다양한 인자들을 정량적으로 표현하는 것이 어렵고 실구조물의 다양한 변형형태를 관계식으로 나타내는데 어느 정도 한계가 있다. 반면에 수치해석적 방법은 다양한 형태 즉, 조건에 적합한 해석을 용이하게 수행할 수 있으므로 실험적 방법의 단점을 보완할 수 있고 상대적으로 효과적인 방법이라 할 수 있으며, 특히 유한요소법을 적용한 컴퓨터 프로그램은 다양한 인자와 환경에 대해 신속적으로 적용하여 해석이 가능한 장점을 가지고 있다. 최근에는 미국, 일본 등의 선진국에서 용접변형에 대한 수치해석적 방법에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있는데 반하여 국내에서는 미비한 실정이며, 대부분 경험적 또는, 실험적 방법에 의존하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 열전도, 열탄소성 및 평판의 이론을 유한요소법으로 정식화하여 수치해석을 통하여 용접시 발생하는 변형현상을 해석하고 그 타당성을 검토하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 해석 이론

용접변형 해석에 필요한 열전도 해석은 자체 개발된 프로그램으로 이동열원 효과를 고려한 2차원 열전도 해석을 수행하여 용접시 발생되어지는 열분포 특성을 해석하였다. 재료가 등방성일 때, 연속체의 비정상 열전도문제의 지배방정식은 $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q}$ 이고, 2차원 비정상 열전도 방정식은

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{Q} \quad (1)$$

이다.

여기서, T : 온도, c : 비열, ρ : 밀도, α : 열전달률, t : 시간, \dot{Q} : 단위 시간당 입열량

Butt 용접시 발생하는 용접변형을 해석하기 위하여 본 연구에서는 변위와 변형률의 관계에서 미소 증분형 형식에 의하여 기하학적 비선형을 정의하는 평판의 대변형 이론을 도입하였으며, 이를 유한

요소법으로 정식화하였다. 평판의 대변형 이론에서 변위성분은 직선변위(u,v,w)와 회전변위(θ_x, θ_y)가 있으며 수직 전단응력에 의한 변형률을 고려(Mindlin의 가정)하였다.

이 변형률을 Von Karman의 가정을 사용하여 정리하면 다음과 같다.

$$[\epsilon] = [\epsilon_p] + [\epsilon_{bs}] + [\epsilon_l] \tag{2}$$

여기서, ϵ_p : 축 변형률, ϵ_{bs} : 굽힘 및 전단변형률, ϵ_l : 대변형 변형률 이다.

그리고, 변형률 Matrix [B]는

$$[B] = [A_M] + [B_M] + [R_M] \tag{3}$$

으로 표현 할 수 있다.

여기서, $[A_M]$: 축 변형률 Matrix, $[B_M]$: 굽힘 및 전단변형률 Matrix

$[R_M]$: 대변형 변형률 Matrix 이다.

또한, 재료비선형 거동 및 항복함수는 Von-Mises조건을 사용하였다.

2.2 해석 모델과 용접조건

해석모델은 Fig. 1과 같이 폭(B) 400mm 길이(L) 500mm로 선정하고 Butt 용접을 CO₂용접으로 1pass 수행하는 것으로 하였으며, 강재는 용접구조용강재(SM490)로 용접조건 및 화학조성은 각각 Table 1, Table 2 와 같다.

경계조건은 수축 및 팽창을 고려하여 평판에서 용접선 시작지점(0, 0)에서 완전 고정을 하였고, 끝지점(500, 0)에서 y, z, θ_x, θ_y 를 고정하였다.

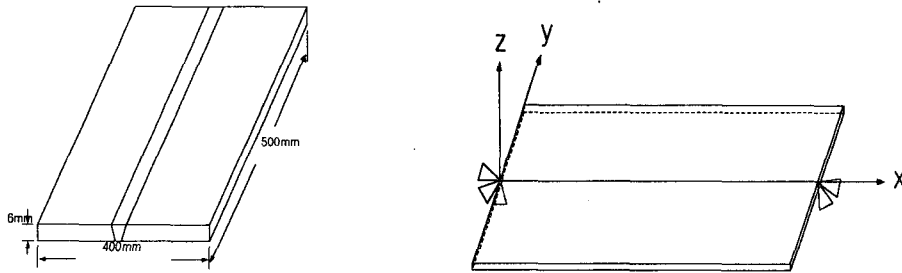


Fig. 1 Test specimen and Boundary condition

Table 1 Welding condition

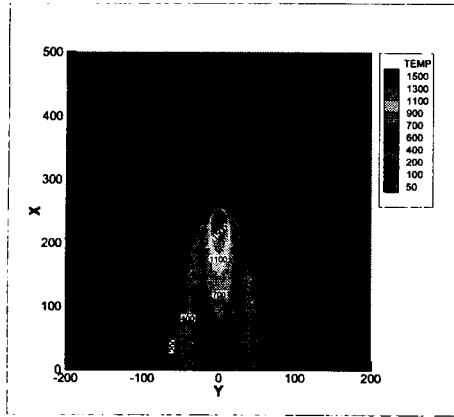
두께(mm)	전류(A)	전압(V)	Speed(cm/min)	효율(η)
6	133	23	30	0.8

Table 2 Chemical composition(wt %)

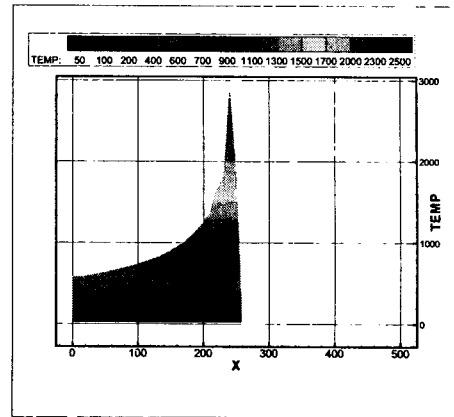
C	Si	Mn	P	S	Cu
<0.99	<0.03	0.03~0.06	<0.03	<0.03	<0.03

2.3 온도 분포

다음 그림은 이동열원 효과를 고려한 열전도 해석을 수행하여 얻은 열분포 특성을 나타낸 것이다. Fig. 2는 시간이 50sec 일 때 (a)는 표면의 온도분포를 (b)는 (a)를 등고선으로 나타낸 온도 분포곡선으로 나타낸 형상이고, Fig. 3은 x축으로 250mm, y축으로 12mm와 40mm 위치에서 시간에 따른 온도 분포를 나타내었다. 용접열원이 측정점에 접근하면서 온도가 상승하고, 그후 시간이 지나면서 판 표면에서 열전달과 내부의 열전도로 인하여 점차 냉각하는 과정을 보여주고 있다.



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 2 Temperature distribution(t=50sec)

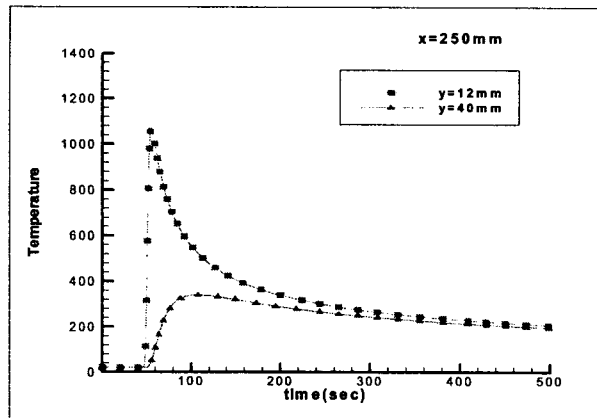


Fig. 3 Temperature distribution

2.4 변형

Fig. 4는 용접체가 실온(20℃)까지 냉각되었을 때의 최종 변위를 도시한 것이며, A-A'단면(x=0mm)에서, B-B'단면(x=250mm)에서 마지막으로 C-C'단면(x=500mm)에서 각변형을 나타내었다. 변위의 형태를 보면 용접선을 중심으로 대칭구조를 나타내고 있으며, 세 부분에서의 형상을 보면 동일하게 나타나고 있다. 이는 역학적 구속상태가 같을 경우 평판의 맞대기 용접에서는 변위, 형태가 동일한 형상을 나타남을 알 수 있다. 이는 맞대기 용접에서의 변형 형태를 잘 반영하고 있다고 할 수 있다.

그리고, Fig. 5는 끝지점(-200mm)에서 변형을 나타내었는데, 변위값을 보면 그 크기가 점진적으로 커짐을 알 수 있다. Fig. 6은 수치해석에 의한 변위값의 타당성을 검증하기 위하여 실험식에 의한 변위값과 비교하였다. 수치해석에 의한 변위값이 실험식에 의한 값보다 다소 크게 나왔지만 정성적으로는 같은 형상을 보이고 있다.

Fig. 7은 시험체 전체에 발생되어진 용접변형을 본 연구에서 사용한 프로그램 해석 결과를 도시한 그림이다.

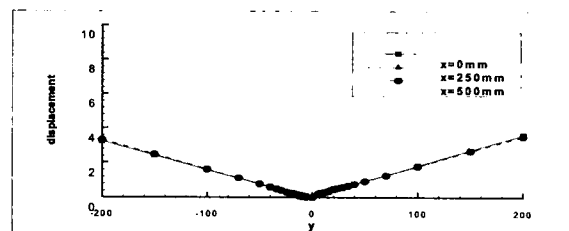
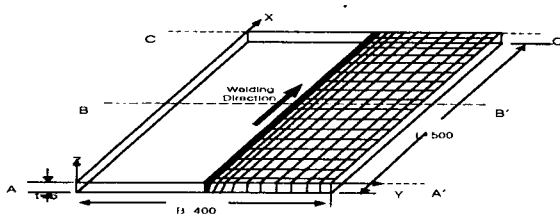


Fig. 3 Position of deformation measurement

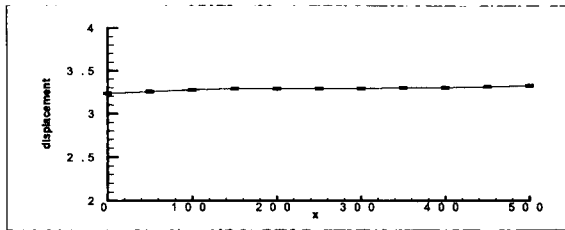


Fig. 5 Displacement

Fig. 4 Deformation of transverse section

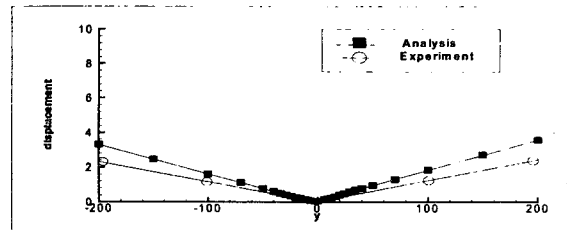


Fig. 6 Comparison of result between finite element analysis and Experiment

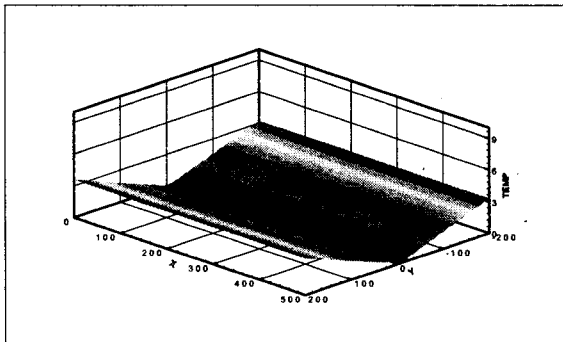


Fig. 7 Deformation of thin plate with butt welding

3. 결 론

용접에 의해서 발생되어지는 변형발생기구에 대해서 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 평판 대변형 이론을 유한요소법으로 정식화한 열탄소성 변형 해석 프로그램을 개발하여 실험식과 비교하였으며, 그 타당성을 보였다.
- (2) 변형 프로그램에서 계산한 결과값과 실험식에 의해 구한 결과 값과 비교하여 보면 값에서는 다소 차이를 보이고 있으나, 변위 형상은 일치함을 보이고 있다.
- (3) 추후 실험을 통하여 이 연구의 타당성을 검증 할 계획이다.

참고문헌

1. 房漢瑞 : '有限要素法에 의한 薄板溶接의 2次元非定常熱傳導解析', 大韓造船學會誌, 第27卷 第4號: 44~50, 1990
2. 房漢瑞 : '平板溶接에 관한 平板變形熱彈塑性 解析, 韓國海洋工學會誌 第 8卷 第1号, PP 33~40, 1994
3. watanabe, M., and Satoh, K. 1959. fundamental study on buckling of thin steel plate due to bead-welding. J. Japan Weld. Soc. 27(6): 13-20.