

고유변형율의 개념을 이용한 열가공공정시 판 변형 예측에 관한 연구

Analysis of plate deformations in thermal processing using the eigenstrain concept

손 광재*, 양 영수**

* 전남대학교 대학원 기계공학과

** 전남대학교 기계시스템공학부

ABSTRACT In this study, a formula for thermal processing induced plate deformations, in terms of process parameters such as heat input and plate thickness, is developed analytically using an infinite laminated plate theory to consider cuboidal inclusion with an eigenstrains. When a plate has arbitrary heating lines, complex deformed shape of plate was calculated by the method estimating plate deformation proposed by this study. To make a curved surface of the ship hull, the line heating method is mainly used. Application in automatization of line heating was deliberate by using proposed method.

1. 서 론

재료에 국부적인 가열을 이용하는 용접이나 절단 등의 열가공공정은 가공후 구조물에 잔류응력과 변형을 유발한다. 특히, 열가공에 의한 잔류변형은 구조물의 외관을 해치고 좌굴강도를 저하시키는 등 심각한 문제를 초래한다. 따라서 잔류변형량을 정확히 예측할 수 있으면 구조물의 강도 저하분 및 변형오차 등을 설계단계에서 적절히 고려할 수 있으므로 구조물의 강도 및 생산성 향상을 도모할 수 있다. 또한 선박을 건조할 때, 복잡한 형상의 선체 외관 가공에 적용되는 선상가열시 발생하는 변형량을 예측할 수 있어 곡면의 형상 계산에도 적용 될 수 있다. 이러한 열가공공정에 의해 발생하는 잔류변형을 예측하기 위하여 Satoh 등은 용접변형에 대한 다양한 실험들을 실시 하였고[1], Ueda 등은 유한요소법이나 경계요소법을 이용하여 열가공시 발생하는 열탄소성 과정을 컴퓨터상에서 모사하였고[2,3], Tsugio 등은 용접부에 남게 되는 소성변형율을 고유변형율로 정의하여 고전탄성 이론을 바탕으로 해석하였다[4,5]. 열가공공정이 적용된 구조물에서 발생하는 잔류변형, 즉 용접 열변형을 일으키는 인자들로써 용접 대상인 모재의 기하학적 형상과 주변의 구속조건, 재료의 열 불성치 등 열 소성변형에 영향을 미치는 요인과 용접 시 외부에서 가해지는 입열량에 영향을 미치는 아크 효율, 용접전류, 용접전압, 용접속도 등을 들 수 있다. 용접 공정은 용접 열원이 이동 열원의 성격을 나타내고 모재내에 매우 복잡한 형태의 온도구배를 나타내므로 다양한 양상의 잔류변형들을 발생시킨다. 본 연구에서는 잔류변형 중 판 두께 방향의 온도분포 불 균일 때문에 발생하는 각 변형량 예측법을 선상가열원이 임의의 일정한 길이를 가지고 이동할 때 판 전체가 가지는 변형량중 열원 이동 방향의 수직방향 및 수평방향의 변형량을 고유변형율을 가진 입방형 개재물을 포함한 적층판의 변형이론[8]을 이용하여 가열 강판의 각 변형량과 굽힘변형을 동시에 계산하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 복합적인 변형량을 예측하는 방법으로 그 변형량들을 중첩하여 가열선이 임의의 위치에 존재하는 경우의 변형량을 예측하였고 또한 중첩의 원리를 이용하여 임의의 위치의 가열선이 여러 가지로 조합 될 때의 판의 다양한 변형양상을 구하였다.

2. 열가공공정에 의해 발생하는 변형

2.1 열가공시 발생하는 소성변형

용접이나 절단공정과 같은 열가공공정 시 발생하는 판 부재의 변형은 국부적인 열의 유입에 의한 판 내부 온도분포의 불균일로 발생하는 소성변형의 결과이고, 용접부나 절단부의 국부적인 가열과 빠른 냉각과정이 주요한 원인이 된다. 열가공시 소성변형은 매우 복잡한 과도 열탄소성 문제이기 때문에 그 크기와 영역을 결정 하기가 힘들뿐만 아니라 소성변형율의 분포 양상 또한 복잡한 형태로 나타난다. 본 연구에서는 소성변형의 발생 영역을 어느 온도(한계온도) 이상까지 이르는 영역으로 가정 하였다. 한계온도 이하의 영역에서도 소성변형이 발생하나 대부분의 소성변형이 한계온도 이상에

시 생성 되므로 한계온도까지 이르는 영역을 소성영역이라 생각 하였다. 일반 철강재료의 물성치들은 온도가 상승함에 따라 변화하는 온도 의존적인 값들이다. 재료가 탄성영역에서 외력에 저항하는 능력인 탄성계수는 온도의 상승에 따라 감소하는 경향을 보이고, 탄성한계를 나타내는 항복강도 또한 비슷한 변화를 보이는데, Fig.1에 나타난 바와 같이 급격히 감소하는 온도영역이 존재한다. 본 연구에서는 재료의 물성치들 중 재료의 소성변형에 주된 영향을 미치는 탄성계수와 항복강도가 급격히 하락하는 온도를 한계온도로 정의하였다. 본 연구에서는 해석적인 방법으로의 변형량 해석을 목적으로 하였기 때문에 한계온도 영역의 결정을 위하여 Rosenthal이 제안한 온도분포의 해를 이용하였다. 유한 두께의 판에 적용되는 준정상상태의 이동 점 열원의 식을 사용하였다.

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{vz}{2\lambda}} \left[\frac{e^{-\frac{vR}{2\lambda}}}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{e^{-\frac{vR_n}{2\lambda}}}{R_n} + \frac{e^{-\frac{vR'_n}{2\lambda}}}{R'_n} \right) \right] \quad (1)$$

위 식을 이용하여 한계온도에 이르는 영역을 찾아 소성변형영역이라고 정의 하였다.

2.2 열가공시 발생하는 판의 변형

고유변형율을 갖는 입방형 개재물의 구성재료와 개재물을 둘러싼 다층평판의 구성재료의 물성치가 같은 경우인 균질재료 문제에 대해 해석하고자 한다. 열고유변형율은 온도에 의해 발생하는 변형으로 개재물의 체적이 변화한다. 열고유변형율의 전형적인 경우에 해당하는 경우 다층평판의 중립면에 대한 탄성장에 대하여 해석하고자 한다. 열고유변형율을 가지는 사각형 개재물을 포함한 다층평판의 변위장은 다음과 같게 된다.[6,7,8]

$$u_i^0 = \frac{1+\nu^A}{2} \varepsilon^0 a_i \tilde{u}_i^0, \quad (i=1,2), \quad u_3 = -\frac{1+\nu^D}{2} \kappa^0 a_i^2 \tilde{w} \\ \tilde{u}_i^0 = \frac{1}{\pi a_i^2} H_i(x_1, x_2), \quad (i=1,2), \quad \tilde{w} = \frac{1}{\pi a_2^2} [H(x_1, x_2) - H(0,0)] \quad (2)$$

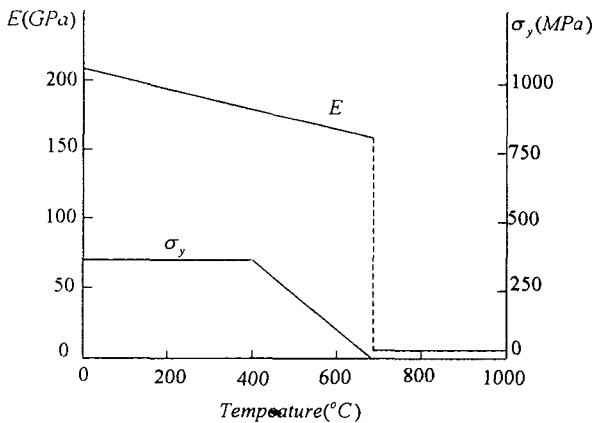


Fig.1 Temperature dependent material properties

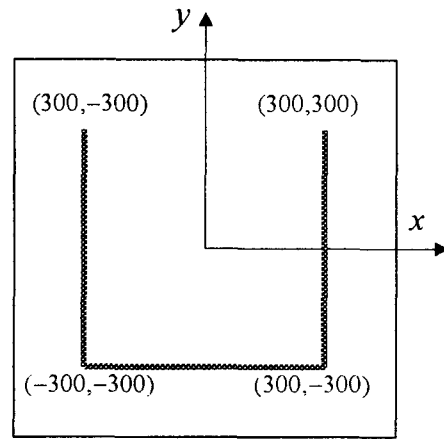
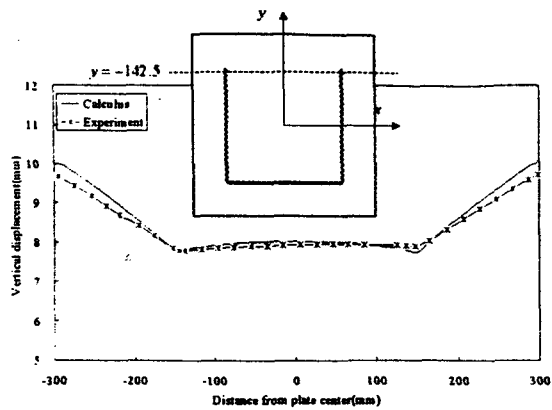


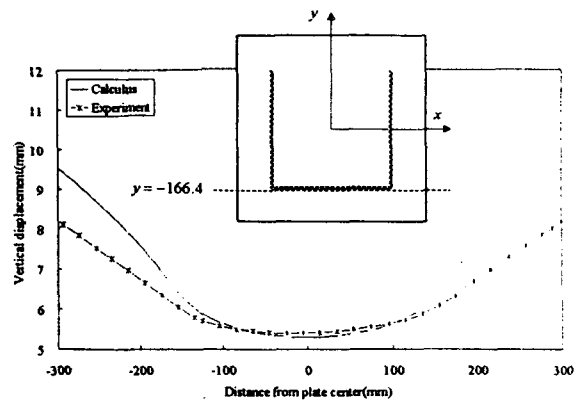
Fig.2 Welding line of plate

3. 결 론

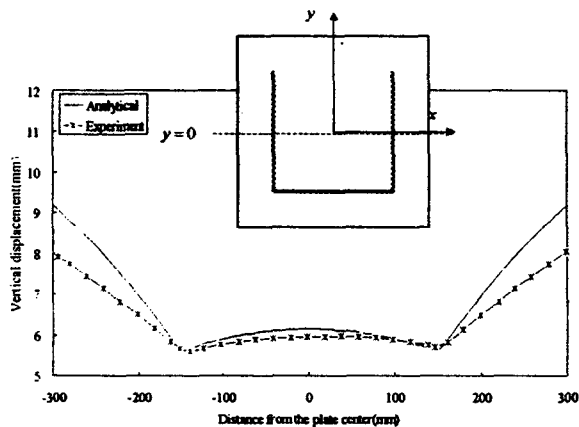
Fig.2에 보인바와 같이 600×600×10인 평판에 ㄷ 형상의 가열선이 있을 때 본연구에서 제안한 방법으로 예측한 결과와 실험값을 비교하였다. 실험은 GTAW를 사용하였으며 용접조건은 이송속도 5mm/s, 전류는 350A, 전압은 40V를 사용하였다. Fig.3에 보인바와 같이 복잡한 판의 변형을 비교적 정확하게 예측함을 볼 수 있다. 열에 의해 소성변형이 발생한 부분을 개재물로 생각하였고 무한판에서의 해를 구하였기 때문에 가열선의 수직인 방향보다 가열선 방향의 변형이 오차를 보임을 알 수 있다. 판의 크기가 가열선에 비하여 비교적 큰 경우의 변형에 본 이론의 적용이 적합함을 알 수 있다.



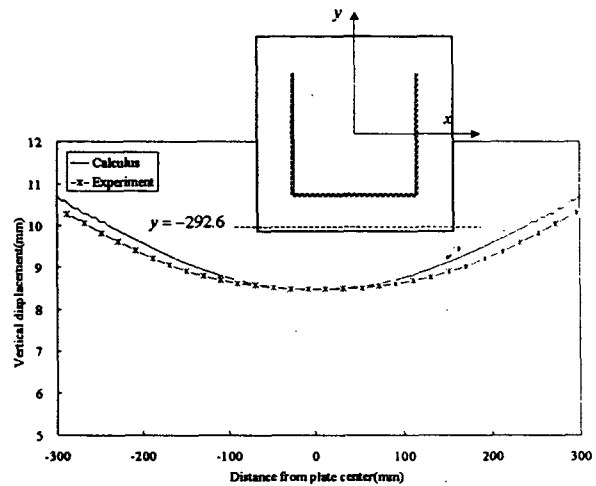
(a) $y = -142.5$



(b) $y = -166.4$



(c) $y = 0$



(d) $y = -292.6$

Fig.3 Results of Experiment and calculation

참고문헌

1. K. Satoh, & T. Terasaki: "Effect of welding conditions on welding deformations in welded structural materials", *Journal of Japanese Welding Society*, Vol.45, No.4(1976), pp302~308
2. Ueda, Y. & Yamakawa, T.: "Analysis of thermal elastic plastic behavior of metals during welding by finite element analysis method" *Transaction of the Japanese Welding Society*, Vol.2,(1971) pp7~60
3. Moshaiiov, A. & Vorus, W. S: "The mechanics of the flame bending process : Theory and Applications", *Journal of Ship Research*, Vol.31, No.4(1987), pp269~281
4. Tsugio Fujimoto: "A method for analysis of residual welding stresses and deformations based on the inherent strain", *Journal of Japanese Welding Society*, Vol.39, No.4(1970), pp236~252
5. Koichi, Masubuchi: "Analysis of welded structures", Pergamon Press(1980)
6. H.G. Beom: "The elastic field of an elliptic cylindrical inclusion in a laminate with multiple isotropic layers", *ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol.66, pp165~171
7. H. G. Beom & Y. Y. Earmme: "Analysis of a plate containing an elliptic inclusion with eigencurvatures", *Archieve of Applied Mechanics*, Vol.68(1998), pp.422~432
8. H. G. Beom & I. B. Kim: "Analysis of a multilayered plate containing a cuboidal inclusion with eigenstrains