

적층판 이론을 이용한 용접부의 각 변형량 해석에 관한 연구
**A Study on the Angular Distortion in Weldments using the Laminated
 Plate Theory**

손 광 재(전남대 대학원), 양 영 수(전남대 기계공학과)

서론

용접은 국부적인 가열을 통한 접합 공정 이므로 모재에 불균일한 온도분포를 유발시킨다. 불균일한 온도분포는 불균일한 열 변형과 열 응력을 발생시키고, 이 열 응력이 소성영역을 넘게 되면 잔류변형이 발생한다. 잔류변형은 구조물의 외관을 해치고 좌굴강도 등을 저하시키며 구조물 제작과정의 공차 등을 유발하여 생산성을 저하시킨다. 따라서 잔류 변형량의 정확한 예측이 필요하다. 용접잔류변형의 인자들로써 용접 대상인 모재의 전체적인 기하학적 형상과 주변의 구속조건 등 열 소성변형에 영향을 미치는 요인과 용접 시 가해지는 입열량에 영향을 미치는 아크 효율, 용접전류, 용접전압, 용접속도 등을 들 수 있다. 잔류변형은, 그 형태에 따라 횡수축, 종수축, 각변형, 좌굴, 굽힘 변형, 회전변형[1] 등으로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 잔류변형 중 주로 판 두께방향의 온도분포의 불균일 때문에 발생하는 각 변형량을 고유변형율을 가진 개재물을 포함한 적층판 이론[2]을 이용하여 예측하는 방법을 제안하고자 한다. 용접 시 발생하는 각 변형의 원인을 용융부의 수축으로 가정하여 그 수축량을 고유변형량으로, 그 영역을 개재물의 크기로 하여 각 변형량을 구하였다. 또 제시된 방법의 신뢰성을 검토하기 위하여 이미 발표된 실험 결과[3]와 비교 하였다.

용접수축의 영역 및 크기

용접 시 발생하는 수축은 온도분포의 불균일로 발생하는 소성변형의 결과이다. 실제 용접에서 소성변형은 매우 복잡한 과도 열탄소성 문제여서 그 크기와 영역을 결정하기가 매우 힘들고 소성변형율의 분포 양상 또한 매우 복잡한 형태로 나타난다. 본 연구에서는 소성변형의 양과 크기를 근사화 한 간단한 모델을 제안 하고자 한다.

수축영역은 소성변형이 발생하는 영역이라 할 수 있으며 어느 온도(한계온도) 이상 까지 이르는 영역의 변형은 모두 소성변형이라 할 수 있다. 한계온도 이하의 영역에서도 소성은 발생하나, 대부분이 한계온도 이상에서 생성되므로 한계온도 영역을 소성영역이라 생각하였다. 한계온도는 재료가 E 값을 상실하는 온도(강의 경우 $870^{\circ}C$)로 하였고[4], 영역은 순간 선 열원(instantaneous line source)의 온도분포를 이용하여 결정하였다.[5]

$$T(r,t) = T_0 + \frac{q}{2\pi kvt} \text{Exp} \left[-\frac{r^2}{4\lambda t} \right] \quad (1)$$

여기서 T_0 상온, k 는 열전도계수, $q = \eta VI$ 는 입열량, v 는 용접속도, $\lambda = k/\rho c$ 로 열확산계수를 말한다. (1)식을 미분하여 최고온도에 이르는 시간 t_{peak} 를 구하여 다시 (1)에 대입하여 r 에 대해 정리하면,

$$r_{peak} = \sqrt{\frac{2\lambda q}{\pi k v e (T_{peak} - T_0)}} \quad (2)$$

가 된다. 최고온도값 T_{peak} 가 한계온도 T_p 에 이르는 소성영역 r_p 는 (2)로부터 다음과 같다.

$$r_p = \sqrt{\frac{2\lambda q}{\pi k v e (T_p - T_0)}} \quad (3)$$

용접 시 발생하는 소성변형량은 한계온도 이상에서 발생하는 열변형량이라 가정하였다. 먼저 그림.1 과 같이 한계온도에 이르는 영역을 용융부를 기준으로 두부분으로 나누어 열변형량을 계산하였다.

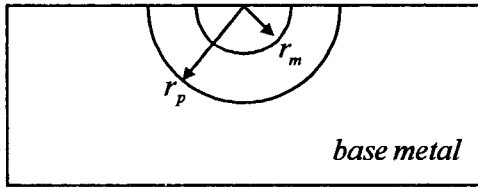


Fig. 1 plastic and molten region

용융부에서 발생하는 열변형율은

$$\varepsilon_m^* = \alpha(T_0 - T_m) \quad (4)$$

이고 용융온도와 한계온도 사이에서 발생하는 열변형율은 다음과 같다.

$$\varepsilon_p^* = \frac{1}{r_p - r_m} \int_{r_m}^{r_p} \alpha(T_0 - T_p) dr \quad (5)$$

(3)을 T_p 에 대해 정리하고 (5)에 대입하여

적분을 수행하면 ε_p^* 는 다음과 같다.

$$\varepsilon_p^* = -\frac{2\alpha q}{\pi \rho c v e r_p r_m} \quad (6)$$

한계온도 영역의 전체에서 발생하는 열변형

율은 (4), (6)의 조합으로부터 구할 수 있다.

$$\varepsilon^* = \left\{ r_m \varepsilon_m^* + (r_p - r_m) \varepsilon_p^* \right\} / r_p \quad (7)$$

고유변형율을 가진 개재물을 포함한 적층판의 변형

등방성(isotropic)인 선형탄성(linear elastic)재료의 얇은 층들로 이루어 지고 두께 h 인 무한평판에 고유변형율 $\varepsilon_{ij}^*(x_3)$ 이 있는 타원형 개재물이 포함되어 있다.(그림.2)

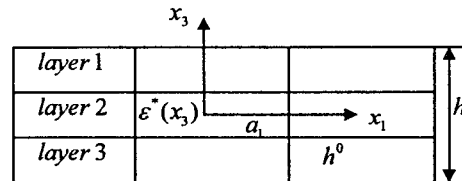
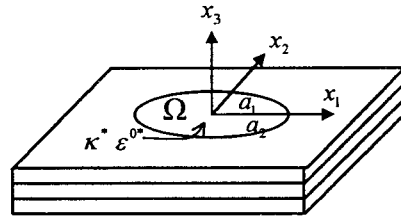


Fig. 2 Infinite plate containing an elliptic cylindrical inclusion with an eigen strain

균질(homogeneous)한 경우의 x_3 방향의 변위 u_3 는 다음과 같다.

$$u_3 = -\frac{1}{4\pi} \left\{ (1 + \nu^D) H \delta_{kl} + (1 - \nu^D) H_{kl} \right\} \kappa_{kl}^* \quad (8)$$

H 와 H_{kl} 값은 부록과 같이 계산된다[2]

(8)의 변위식에서 타원형 개재물의 한쪽 축을 그림. 3과 같이 무한대로 접근 시키면 마치 용접 공정의 형상을 얻을 수 있으며 그 결과식은 다음과 같다. ($a_1 \rightarrow \infty$)

$$u_3 = -\frac{1}{2} a_2 (2|x_2| - a_2) (\kappa_{11}^* + \nu \kappa_{22}^*) \quad (9)$$

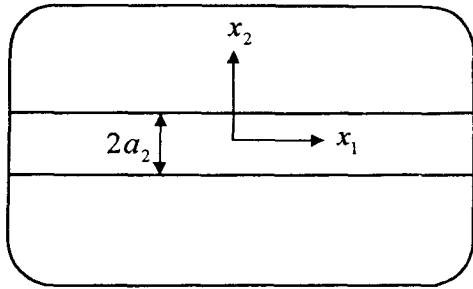


Fig. 3 Infinite plate with a planar band zone

(8),(9)의 변위에 영향을 주는 곡률은 개재물이 갖고 있는 고유변형율이 판의 두께방향의 함수이기 때문에 발생하는 양이다. 본 연구에서는 용접시 발생하는 수축 변형율이 판 두께 방향으로 변하지는 않지만 한계온도 영역까지만 존재 한다고 가정하여 그로 인해 발생하는 고유곡률값을 이용 하였다. 즉 그림. 4 와 같이 고유변형율을 갖는 개재물이 판의 한쪽으로 치우쳐 있을 때 발생하는 고유곡률 값은 다음과 같다.[6]

$$\kappa^* = \frac{C_{11} - C_{12}}{D_{11} + D_{12}} \int_{h^{(2)}-h^0}^{h^{(1)}+h^{(2)}-h^0} \varepsilon^* x_3 dx_3 \quad (10)$$

강성 $C_{11} = E/(1-\nu^2)$, $C_{12} = \nu E/(1-\nu^2)$, 굽힘강성 $D_{ij} = \int_{-h^0}^{h^0} C_{ij} x_3^2 dx_3$, ($ij = 11,12$) 를 나타낸다.

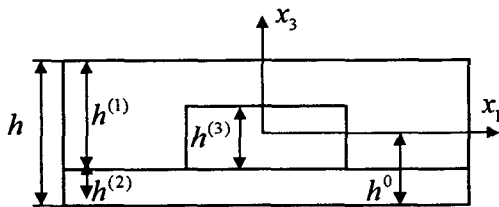


Fig. 4 Eigen strain in one lamina

용접부의 각 변형량

앞 절에서 결정된 용접부의 수축량, 크기

와 (9)의 최종 변위를 이용하여 용접부의 각 변형량을 계산하기 위해 용접 시 수축하는 영역을 그림. 5 와 같이 근사화 하였다. 열전달 방정식으로부터 얻어진 반원형의 영역을 면적이 같은 사각형 영역으로 결정하였다.

판 두께방향의 한계온도 영역 r_p 를 기준으로 개재물의 폭을 결정하였다.

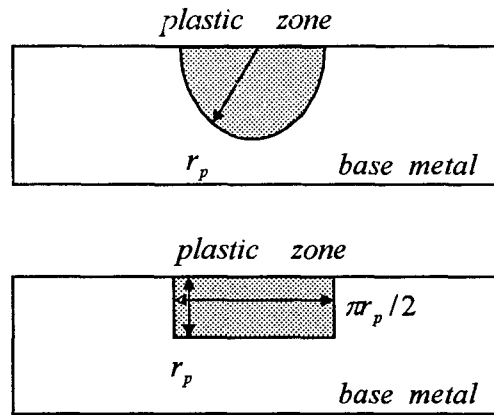


Fig. 5 Approximation of welding plastic zone

따라서 (10)의 고유곡률은 다음과 같다.

$$\kappa^* = \frac{6(1-\nu)}{h^3(1+\nu)} r_p (2h^0 - r_p) \varepsilon^* \quad (11)$$

변위를 나타내는 (9)에 (11)을 대입하면 최종 용접부의 각 변형량을 알 수 있다.

결과 및 고찰

최종 얻어진 결과를 이용하여 용접부의 각 변형량을 계산하였다. 이미 발표된 실험자료 [3]의 용접조건과 동일한 물성치들을 이용하였고 그 계산 값을 실험 값들과 함께 나타냈다.(그림. 6) 실험결과와 마찬가지로 이론해의 결과도 열량의 증가에 따라 변형량도 증가 하지만 어느 한계점에 이르면 다시 감소하는 경향을 보였을 뿐만 아니라 실험값들과 상당히 좋은 일치율을 보였다. 열량 증가

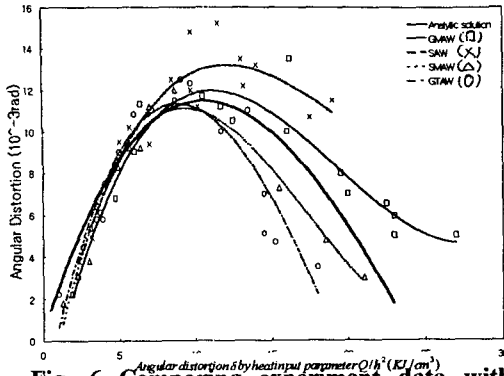


Fig. 6 Comparing experiment data with analytic solution

에 따른 경향은 모재에 전달된 열이 과도할 경우에는 각 변형의 원인이 되는 두께방향의 온도 구배가 작아져서 오히려 그 값이 감소한다고 보여진다.

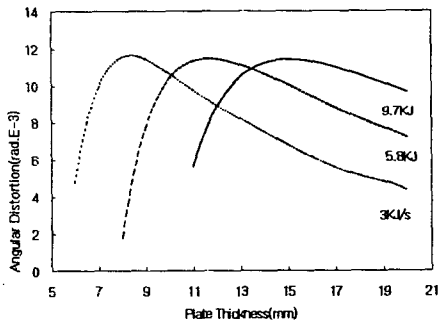


Fig. 7 Angular distortion by plate thickness

그림.7 은 입열량을 일정하게 하고 두께를 변화 시킬 때의 각 변형량을 두께에 대하여 나타낸 값이다. 두께의 증가에 따라 변형량이 급격히 증가하나 어느 임계점에 이르면 더 이상 증가하지 않고 완만하게 감소하는 경향을 볼 수 있다.

결론

각 변형량 예측을 위해 제안된 본 연구의 결과를 바탕으로 용접 공정 변수들을 이용해 간단히 그 양을 예측하여 현장에서의 유용한 이용이 가능 할 것이다.

참고문헌

1. Koichi, Masubuchi : Analysis of welded structures, Pergamon Press, 1980
2. Beom,H.G., : The elastic field of an elliptic cylindrical inclusion in a laminate with multiple isotropic layers, 1997
3. K. Satoh, & T. Terasaki : Effect of welding conditions on welding deformations in welded structural materials, 1976, 45 권 4 호, 일본용접학회지
4. 서승일, 장창두. :용접구조물의 변형 예측에 관한 연구, 1997, 용접학회지, vol.15 no.5
5. Rosenthal, : The theory of moving source of heat and its application to metal treatments, 1945, transaction of ASME.

부록

$$I(\lambda) = -4\pi a_1 a_2 \left\{ \ln \left(\sqrt{a_1^2 + \lambda} + \sqrt{a_2^2 + \lambda} \right) - \ln(a_1 + a_2) \right\}$$

$$I_1(\lambda) = \frac{4\pi a_1 a_2}{a_2^2 - a_1^2} \left\{ \sqrt{\frac{a_2^2 + \lambda}{a_1^2 + \lambda}} - 1 \right\}$$

$$I_1(\lambda) = \frac{4\pi a_1 a_2}{a_1^2 - a_2^2} \left\{ \sqrt{\frac{a_1^2 + \lambda}{a_2^2 + \lambda}} - 1 \right\}$$

$$I_{11}(\lambda) = \frac{4\pi a_1 a_2}{3\Delta(\lambda)} \left[(a_1^2 + \lambda)^{-1} - \left\{ (a_1^2 + \lambda)^{1/2} + (a_2^2 + \lambda)^{1/2} \right\}^{-2} \right]$$

$$I_{22}(\lambda) = \frac{4\pi a_1 a_2}{3\Delta(\lambda)} \left[(a_2^2 + \lambda)^{-1} - \left\{ (a_1^2 + \lambda)^{1/2} + (a_2^2 + \lambda)^{1/2} \right\}^{-2} \right]$$

$$I_{12}(\lambda; a_1, a_2) = \frac{4\pi a_1 a_2}{\left\{ (a_1^2 + \lambda + \Delta(\lambda)) \right\} \left\{ (a_2^2 + \lambda + \Delta(\lambda)) \right\}}$$

$$\Delta(\lambda) = \left\{ (a_1^2 + \lambda)(a_2^2 + \lambda) \right\}^{1/2}$$