

유한요소법에 의한 평판의 용접 변형에 관한 기초적 연구
 A Fundamental Study on the Welding Deformation of Plate by FEM

방한서* 차용훈** 고민성*** 방희선****

* 조선대학교 선박해양공학과 ** 조선대학교 기계공학과

*** 한라중공업 상호조선소

**** 조선대학교 대학원

1. 서론

용접 변형은 열전달과 같은 온도의 변화가 급부적으로 급속하게 상승 및 냉각하므로 발생되어지고 이에 수반하여 금속재료의 비선형 거동과 함께 용접체가 기하학적으로도 비선형 거동 등과 같은 복잡한 역학적 현상을 나타낸다. 근래 미국, 일본 등의 선진국에서 용접 변형에 대한 수치 해석적 방법에 대하여 활발하게 연구하고 있으며, 좋은 연구 결과¹⁾가 발표되고 있다. 그러나, 아직까지 국내에서는 용접 변형에 관한 연구가, 경험적 또는 실험적 방법에 의존하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 평판의 용접 변형을 해석하는 수치 해석용 컴퓨터 프로그램을 개발하기 위한 기초 단계로서, 평판의 대변형 열탄소성을 4절점 아이소파라메트릭(4-Node isoparametric) 요소를 사용하여 유한요소법으로 정식화하였다.

2. 평판의 용접 변형 기초 이론

2.1 평판 대변형 기본식

박판의 용접시, 용접 변형은 기하학적으로 처짐과 같은 대변형 현상을 나타낸다. 이와 같은 대변형은 미소 변형으로는 해석하기에 곤란한 비선형적 거동이므로, 본 연구에서는 변위와 변형들의 관계에서 미소중분형 형식에 의하여, 기하학적 비선형을 정의하는 평판의 대변형(Plate large deflection) 이론²⁾을 도입하였으며, 대변형을 고려한 유한요소법의 정식화는 다음과 같다.

2.1.1 변위와 변형들 관계

평판의 대변형 이론에서 좌표(x,y,z)에서 변위[U,V,W]는 Fig.1의 ㉑와 같이, 평판의 중립면(z=0)에 직선변위 (u,v,w)와 회전변위(θ_x, θ_y)가 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} U &= u(x,y) - z\theta_x(x,y) \\ V &= v(x,y) - z\theta_y(x,y) \\ W &= w(x,y) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 θ_x, θ_y 는 중립면에서 xy면, yz면에 대한 정방향 회전각이다.

또한, Fig.2의 ㉒에서 변형전에 판의 중립면에 수직인 면이 변형후에는 중립면에 수직하지 않으므로, 수직 전달응력에 의한 변형도 고려한다.

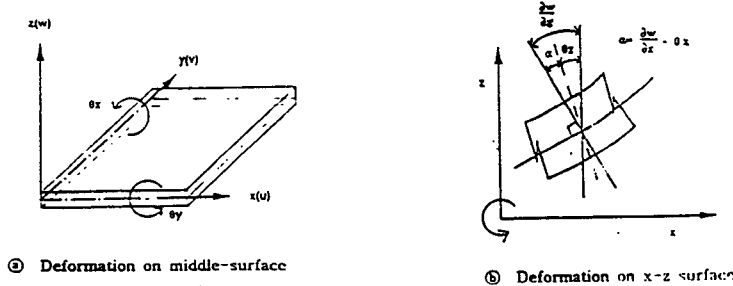


Fig. 1 Deformation coordinate

따라서, 변위와 변형들의 관계식에서 $\partial z=0$ 이고, 면내 변형은 미소하므로, 변위와 변형들은 $\frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}$ 에 의존한 비선형 항에서 고차항을 무시하고 정리하면, 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon'_p \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} z \epsilon'_b \\ \epsilon'_s \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \epsilon^L_p \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 ϵ'_p : 축변형률, ϵ'_s : 굽힘변형률, ϵ'_b : 전단변형률 (선형적)
 ϵ^L_p : 대변형률 (비선형적)

2.1.2 미소변위 증분에 의한 대변형의 영향

요소의 국부 좌표에서 요소중심면을 (h)라하면, (h)는 면내변위성분 (s)와 면외변위성분 (w)으로 나누어진다. 따라서 (h) = (s, w)^T, 여기서 변위 (s), (w)은 각 절점의 면내와 면외 변위성분 (sn), (wn)과 각각의 변위함수 [Np], [Nb]을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(s) = [Np](sn), (w) = [Nb](wn),$$

$$\text{여기서, } (sn) = (u_n, v_n)^T, (wn) = (w_n, (\theta_x)_n, (\theta_y)_n)^T$$

외력의 증분과 함께 변위(h)가 (h+Δh)로 되는 것과 같이, 초기변형률(ε')도 (ε'+Δε)과 같이 된다. 이에 따라 전 변형률은 다음과 같이 된다.

$$(\epsilon) = (\epsilon') + (\Delta \epsilon)$$

따라서, 변형률증분(Δε)을 정리하면, 다음과 같이 된다.

$$(\Delta \epsilon) = (\epsilon) - (\epsilon')$$

$$\{\Delta \epsilon\}_1 = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [B_p] \{\Delta sn\} + [C^*] [B_{n1}] \{\Delta wn\} + \frac{1}{2} [C^*] [B_{n1}] \{\Delta wn\} - z [B_{n2}] \{\Delta wn\} \quad (3)$$

$$\{\Delta \epsilon\}_2 = \begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = [B_s] \{\Delta wn\} \quad (4)$$

여기서 B_p : 축변형 형상메트릭스, B_{n1}, B_{n2} : 굽힘변형 형상메트릭스
 B_s : 전단변형 형상메트릭스, C^* : 대변형 형상메트릭스

위의 (3), (4)식을 중첩시키므로 평판 변형의 비선형거동을 표현 할 수 있다.

2.2 2차원 열탄소성 기본식

박판의 경우 판의 두께가 판폭 및 길이에 비하여 매우 작으므로, 2차원적으로 가정 할 수 있다.³⁾ 따라서, 응접시 발생되어지는 응접 변형 및 잔류응력을 해석하기 위해서는 2차원 열탄소성 이론을 도입하는 것이 타당하다고 생각되어진다. 2차원 열탄소성 해석을 위한 이론의 정식화는 다음과 같다.

$$\{\epsilon\} = [D^e]^{-1} \{\sigma\} - \{\epsilon^T\} \quad (5)$$

여기서 $[D^e]$: 탄성메트릭스, $\{\epsilon^T\} = \{a\}T$: 열변형률
 a : 순간 선팽창계수, T : 순간 온도

식(5)를 증분형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\{ d\sigma \} = [D^e] \{ d\epsilon - d\epsilon^T \} \quad (6)$$

단약 재료의 물리적 성질의 온도 의존성을 고려하고, 응력증분에서의 영향을 일괄하여 $[C]dT$ 라고 하면, 식(6)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{ d\sigma \} = [D] \{ d\epsilon \} - [C]dT \quad (7)$$

3. 수치 해석 결과의 예

이상과 같은 정식화로 구성된 용접 변형 해석용 프로그램의 결과를 검증하기 위하여, 다음과 같은 해석 모델을 선정하여 기존 해석 결과¹⁾와 비교 검토하였다. 해석 모델은 폭 800mm, 길이 600mm, 두께 5mm의 직사각형 판의 연강을 선정하여, 써브머지드용접(Submerged-arc Welding)을 1 Pass 수행하는 것으로 하였으며, 용접 조건은 전류 80(A), 전압 20(V) 및 접속도 20(cm/min)로 하였다.

3.1 온도 분포의 특성

시험편의 온도 분포는 용접 변형을 일으키는 주요한 인자이기 때문에 온도 분포의 특성을 면밀히 고찰하였다.^{4,5)} 해석 결과에 따른 시험편의 온도 분포는 Fig.2에 도시하였다. Fig.2의 ㉔ 및 ㉕는 각각 용접 열원이 용접선의 중앙부($y=300\text{mm}$, $t=90\text{sec}$)에 도달하였을 때와 중단부($y=600\text{mm}$, $t=180\text{spec}$)에 도달하였을 때의 시험편의 x,y평면에서 온도 분포를 도시하였다. Fig.2의 ㉔ 및 ㉕를 고찰하여 보면 용접종료시 보다 용접중에서의 시험편상의 온도 분포 차가 급격함을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는, 열적구속이 용접 종료 때보다는 용접이 진행 중일 때가 더 크다는 것을 보여주고 있다.

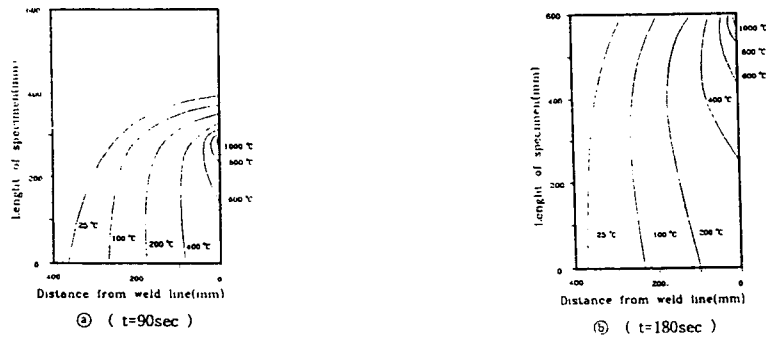


Fig. 2 Temperature distribution on x-y plane

3.2 용접 변형의 특성

Fig.3의 ㉔와 ㉕는 용접 전후에 있어서 용접선 직각 방향의 용접 변형(면의변형)을 각 단면 별로 도시하였다. Fig.3의 ㉔는 용접 열원이 용접선 중앙부($y=300\text{mm}$, $t=90\text{sec}$)에 도달하였을 때 용접 변형을 도시한 것이다. 이들을 분석하여 보면 용접선에 열원이 통과하는 B-B' 횡단면의 변형이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 변형이 폭방향으로 발생하였으며, 이들 주원인은 3.1절에서 고찰된 횡단면의 급격한 온도차에 의하여 발생되었다고 판단되어진다.

Fig.3의 ㉕는 용접이 종료된 후 온도 분포가 상온(20°C)으로 되었을 때 용접 변형을 도시하였다. 열 영향을 심하게 받는 용접선으로부터 $x=170\text{mm}$ 부근에서 변형이 심화되어 전체적인

변형이 이루어짐을 볼 수 있으며, Fig.3의 ㉔와 비교하여 보면 변위값이 무시할 정도로 미소 하지만 변형이 진행되었음을 알 수 있다. 또한 변형의 양상이 대소곡선을 이루고 있다. Fig.4에서는 용접선방향에 대한 중단면의 용접 변형에 관하여 도시하였다. 그림에서 나타나는 것과 같이 용접선 길이방향의 용접 변형은 극히 미소하며 용접 중단부로 갈수록 나타나는 미소한 치짐은 역학적 구속 및 중단면 열분포가 횡단면의 그것보다 매우 완만함에 의한 것으로 생각된다.

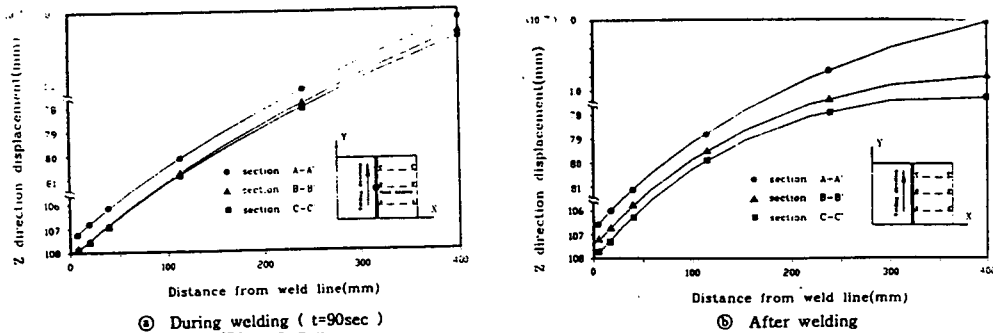


Fig. 3 Welding deformation of transverse section

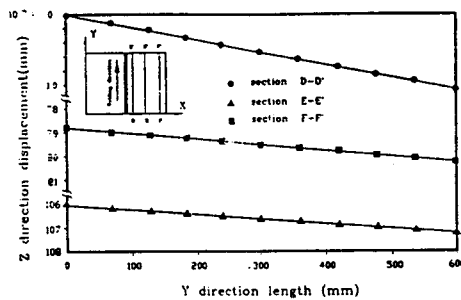


Fig. 4 Welding deformation of longitudinal section

4. 결론

평판 맞대기 용접시 발생되어지는 용접 변형을 수치 해석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 박판의 용접시 발생하는 변형의 주요 지배 인자는 열적구속 및 역학적 구속 조건임을 알 수 있었다.
- 2) 용접선 직각방향의 용접 변형이 용접선 방향의 용접 변형보다 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 용접선 방향보다 용접선 직각방향의 온도상승 및 냉각의 차이가 심하기 때문이라고 생각된다.

參考文獻

1. Yukio Ueda外 4人, "高精度組立のための溶接變形シミュレーション (第三報)", 日本, 日本造船學會論文集第 176號, PP.341~350, 1994.
2. 關谷壯, "薄板構造力學", (株)共立出版, 1968.
3. 房漢瑞, "平板熔接에 관한 平面變形熱彈塑性 解析", 韓國海洋學會誌 第8卷 第1號, PP 33~40, 1994
4. 房漢瑞, "有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元 非正常 熱傳導 解析", 大韓造船學會誌, Vol. 27, No. 2, PP.43~50, 1990.
5. 失川元基外1人, "有限要素法による 熱應力・クリーフ・熱傳導解析", (株)サイエンス, 1985.