

유한요소법에 의한 평판의 용접 변형에 관한 기초적 연구⁺

방 한 서* · 고 민 성** · 방 희 선***

(96년 10월 20일 접수)

A Fundamental Study on the Welding Deformation of Plate by using F.E.M.

Han-Sur Bang* · Min-Seong Go** · Hee-Seon Bang***

Key Words : Heat conduction(열전달), Welding deformation(용접 변형), Large deformation(대변형), Isoparametric element(아이소파라메트릭 요소), Thermal elasticity and plasticity(열탄소성)

Abstract

When structures are constructed by welding, heat conduction brings welding deformation. This is accompanied by complicated mechanical phenomenon such as material nonlinear and geometric nonlinear behavior.

Hitherto, the research of welding deformation has been accomplished by an analytical method and experimental data in Korea.

In this paper, the computer program by F.E.M.(finite element method) which could analyze the deformation of thin plate considering phenomena(both material and geometric nonlinear behavior) has been developed and verified. The production mechanism and characteristics in the welding deformation of plate are studied by the results.

1. 서 론

용접 변형은 용접열의 열전달 효과에 따라 용접체에 국부적으로 급격한 온도차에 의하여 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, 실험치에 근사한 값을 갖는 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 수치해석용 컴퓨터

+ 이 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

* 정희원, 조선대학교 선박해양공학과

** 정희원, 한라중공업 삼호조선소

*** 학생회원, 조선대학교 대학원

프로그램을 개발하기 위한 기초 단계로서, 평판의 대변형 열탄소성을 임의의 적분점에서 즉, 임의의 점에서 구하고자 하는 값을 얻을 수 있는 4절점 아이소파라메트릭(4-node isoparametric) 요소를 사용하여 유한요소법으로 다음과 같이 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 미소변형으로는 해석하기에 곤란한 비선형적 거동이므로, 본 연구에서는 변위와 변형률의 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 변형률 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.

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

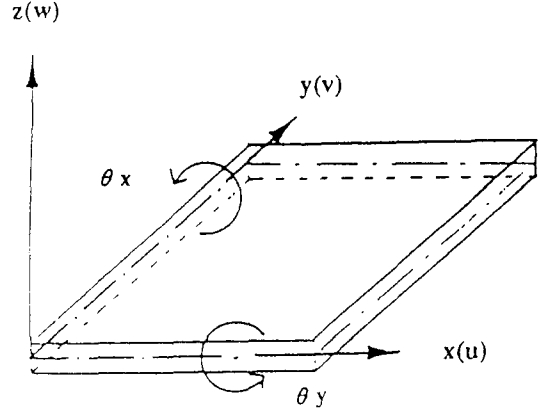
여기서 θ_x, θ_y 는 중립면에서 xy면, yz면에 대한 정방향 회전각이다.

또한, Fig.1의 ㉒에서 변형 전에 판의 중립면에 수직한 면이 변형 후에는 중립면에 수직하지 않으므로, 수직 전단응력에 의한 변형도 고려한다.

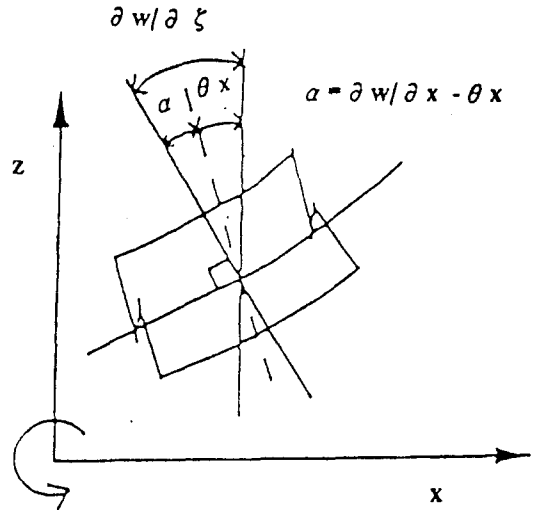
따라서, 변위와 변형률의 관계식에서 $\partial z=0$ 이고 면내 변형은 미소하므로, 변위와 변형률은 $\frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}$ 에 의존한 비선형 항에서 고차항을 무시하고 정리하면, 다음과 같다.

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

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



(a) Deformation on middle surface



(b) Deformation coordinate on x-z surface

Fig.1 Deformation coordinate

2.1.2 미소변위 증분에 의한 대변형의 영향

요소의 국부 좌표에서 요소 중심면을 {h}라 하면, {h}는 면내 변위성분 {s}와 면외 변위성분 {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.

$$\{s\} = [Np]\{sn\}, \{w\} = [Nb]\{wn\},$$

여기서, $\{sn\} = \{un, vn\}^T$,

$$\{wn\} = \{wn, (\theta_x)n, (\theta_y)n\}^T \text{ 이다.}$$

외력의 증분과 함께 변위(h)가 $(h+\Delta h)$ 로 되는 것과 같이, 초기 변형률(ϵ')도 $\{\epsilon' + \Delta \epsilon\}$ 과 같이 된다. 이에 따라 전 변형률은 다음과 같이 된다.

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon'\} + \{\Delta \epsilon\}$$

따라서, 변형률 증분($\Delta \epsilon$)을 정리하면, 다음과 같이 된다.

$$\{\Delta \epsilon\} = \{\epsilon\} - \{\epsilon'\}$$

$$\begin{aligned} \{\Delta \epsilon\}_1 = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} &= [B_p] \{\Delta sn\} \\ &+ [C^*] [B_{b1}] \{\Delta wn\} \\ &+ \frac{1}{2} [C^*] [B_{b1}] \{\Delta wn\} \\ &- z [B_{b2}] \{\Delta wn\} \end{aligned} \quad (3)$$

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

여기서 B_p : 축변형 형상메트릭스,
 B_{b1}, B_{b2} : 굽힘변형 형상메트릭스,
 B_s : 전단변형 형상메트릭스,
 C^* : 대변형 형상메트릭스

위의 (3), (4)식을 중첩시키므로 평판 변형의 비선형 거동을 표현할 수 있다.

2.2 2차원 열탄소성 기본식

용접변형의 기하학적 비선형을 해석하기 위해 필요한 판대변형 이론과 역학적 비선형 거동을 해석하기 위한 열탄소성에 관한 기본적인 이론식을 도입한다.

박판의 경우, 판의 두께가 판폭 및 길이에 비하여 매우 작으므로, 2차원적으로 가정할 수 있다.³⁾ 따라서, 용접시 발생하는 용접 변형 및 잔류응력을 해석하기 위해서는 2차원 열탄소성 이론을 도입하는 것이 타당하다고 생각된다. 2차원 열탄소성 해석을 위한 이론의 정식화는 다음과 같다.

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

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

식(5)를 증분형으로 나타내면 다음과 같다.

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

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

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

이상에서와 같이 박판의 대변형 이론 및 재료의 비선형 거동을 유한요소식으로 정식화하였을 때 이들 각각에 대한 수치해석 프로그램을 개발하였다.

3.1 용접변형 해석용 프로그램 개발 및 고찰

평판 대변형 이론과 2차원 열탄소성 이론을 도입하고 유한요소식으로 정식화하여 개발된 용접변형 수치해석용 프로그램의 전체 흐름도(flow chart)는 Fig.2에 나타내었으며, 프로그램의 기능 및 특징은 다음과 같다.

① 해석에 필요한 자료를 입력하는 부분에서는 크게 나누어 세부분으로 구성되어 있다.

첫째, 분할된 각 절점과 요소를 입력하는 부분에서는 요소의 수, 절점의 수, 각 절점의 좌표 및 경계 조건 등이 입력되며,

둘째, 각 절점의 온도 분포를 입력하는 부분에서는, 2차원 열전도 해석용 프로그램을 사용하여 구한 온도 분포를 입력하게 되며, 각 절점간의 급격한 온도차로 인한 소성변형을 제어하기 위하여 온도차가 큰 절점간에는 입력시 각 절점간의 온도차가 20℃를 넘지 않도록 수반에서 수십번 나누어 반복 계산하도록 하였다.

셋째, 분할요소 중 열원이 있는 요소와 열영향부 요소를 입력하는 부분으로 나누어져 있다.

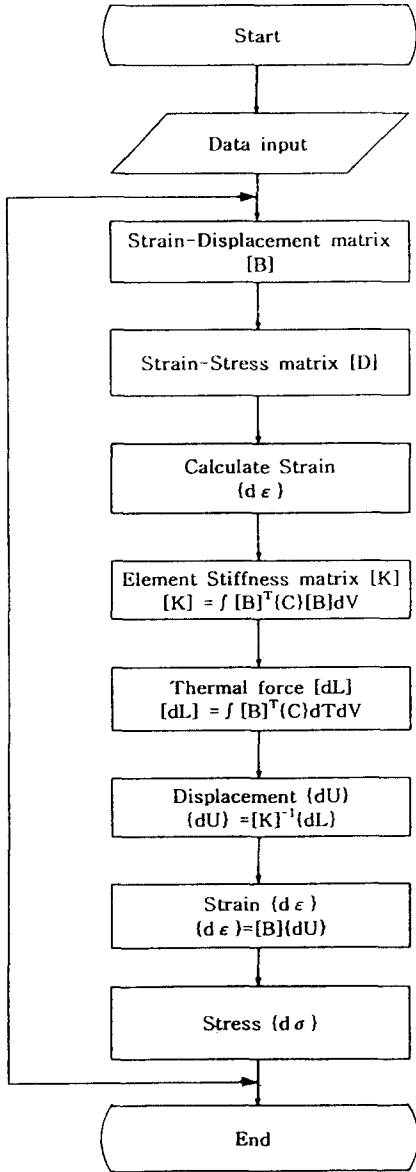


Fig.2 Flow Chart

다음으로 본 프로그램에서는 온도 변화에 따른 재료의 물리적 성질 및 기계적 성질의 변화를 고려하여 각 요소의 온도 변화에 따라 달라지는 재료정수값을 결정할 수 있도록 하였다.

② 변형률 매트릭스[B]를 정의하기 위하여 4절점 아이소파라메트릭(4-node isoparametric)요소를 도입했으며, 다음과 같이 구성된다.

$$[B] = [AM] + [BM] + [RM]$$

여기서, [AM] :축변형률 매트릭스, [BM] :굽힘 변형률 매트릭스, [RM] :대변형률 매트릭스이며, 기하학적 비선형은 대변형률 매트릭스 [RM]에 의하여 해석된다.

③ 온도변화에 따른 탄성 및 소성 응력-변형률 매트릭스 $[D^e]$ 및 $[D^p]$ 를 만든다.

재료의 비선형 거동은 소성 응력-변형률 매트릭스 $[D^p]$ 에 의하여 해석된다.

④ 비선형 거동을 고려한 각 요소의 강성매트릭스를 만든다. 여기에서 구하여진 강성매트릭스를 이용하여 열탄소성이론에서 강성매트릭스와 등가절점력 관계 및 경계조건을 적용시킨 다음, 최종적으로 가우스 소거법을 사용하여 각 절점변위를 계산한다.

또한, 계산시 half bandwidth method를 사용하여 전체 매트릭스 중 계산에 필요한 영역만을 선택함으로써 계산시간 및 계산공간을 크게 줄이므로 계산의 효율성을 높였다.

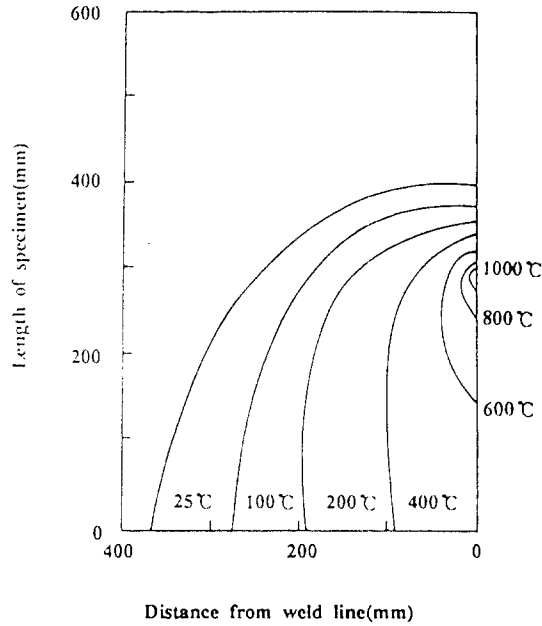
3.2 수치 해석 결과의 예

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, 서브머지드 아크 용접(submerged arc welding)을 1Pass 수행하는 것으로 하였으며, 용접 조건은 전류 80(A), 전압 20(V) 및 용접 속도 20(cm/min)로 하였다.

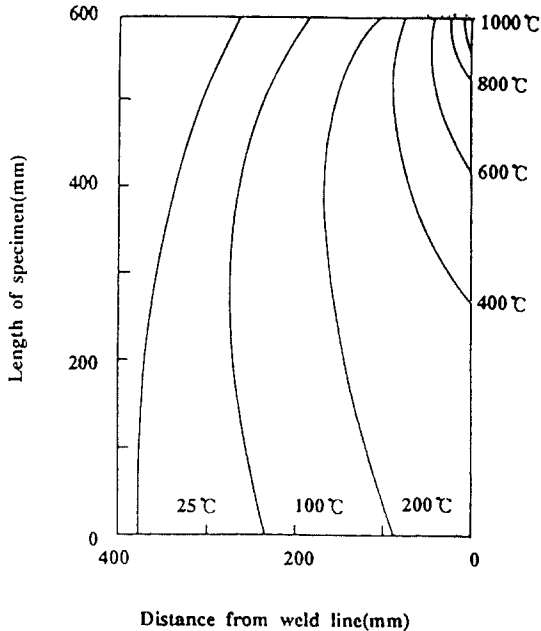
3.2.1 온도 분포의 특성

시험편의 온도 분포는 용접 변형을 일으키는 주요한 인자이기 때문에 온도 분포의 특성을 면밀히 고찰하였다.^{4,5)} 해석 결과에 따른 시험편의 온도 분포는 Fig.3에 도시하였다. Fig.3의 ㉠ 및 ㉡는 각각 용접 열원이 용접선의 중앙부(y=300mm, t=90sec)에 도달하였을 때와, 종단부(y=600mm, t=180sec)에 도달하였을 때의 시험편의 xy평면에서 온도 분포를 도시하였다. Fig.3의 ㉠ 및 ㉡을 고찰하여 보면 용접종료시 보다 용접중에서의 시험편상의 온도 분포 차가 급격함을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 열적 구속이 용접 종료 때보다는 용접이 진행중

일 때가 더 크다는 것을 보여 주고 있다.



(a) $t=99\text{sec}$

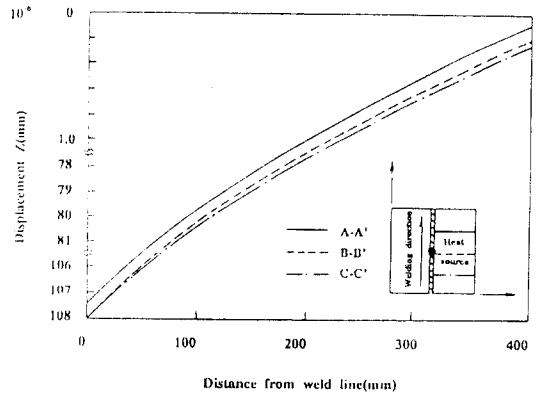


(b) $t=180\text{sec}$

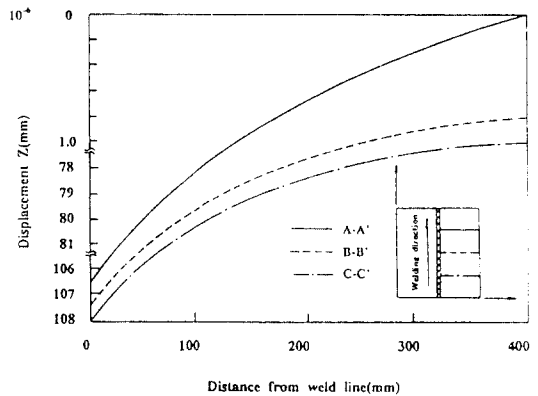
Fig.3 Temperature distribution on x-y plane

3.2.2 용접 변형의 특성

Fig.4의 ㉠과 ㉡는 용접 전후에 있어서 용접선 직각 방향의 용접 변형(면의 변형)을 각 단면별로 도시하였다. Fig.4의 ㉠은 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, 이들의 주원인은 3.1절에서 고찰된 횡단면의 급격한 온도차에 의하여 발생되었다고 판단된다.



(a) During welding ($t=90\text{sec}$)



(b) After welding

Fig.4 Welding deformation of transverse section

Fig.4의 ㉡는 용접이 종료된 후 온도 분포가 상온(20°C)으로 되었을 때 용접 변형을 도시하였다. 열 영향을 심하게 받는 용접선으로부터 $x=170\text{mm}$ 부

근에서 변형이 심화되어 전체적인 변형이 이루어짐을 볼 수 있으며, Fig.4의 ㉔와 비교하여 보면 변위값이 무시할 정도로 미소하지만 변형이 진행되었음을 알 수 있다. 또한, 변형의 양상이 대소곡선을 이루고 있다.

Fig.5에서는 용접선 방향에 대한 종단면의 용접 변형에 관하여 도시하였다. 그림에서 나타나는 것과 같이 용접선 길이방향의 용접 변형은 극히 미소하며, 용접 종단부로 갈수록 나타나는 미소한 처짐은 역학적 구속 및 종단면 열분포가 횡단면의 그것보다 매우 완만함에 의한 것으로 생각된다.

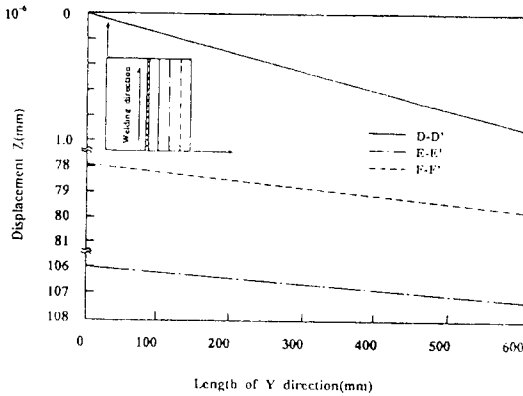


Fig.5 Welding deformation of longitudinal section

3.2.3 수치해석 결과의 검증

개발한 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 본 프로그램의 해석 결과와 기존 해석 결과를 비교·검토하였다.

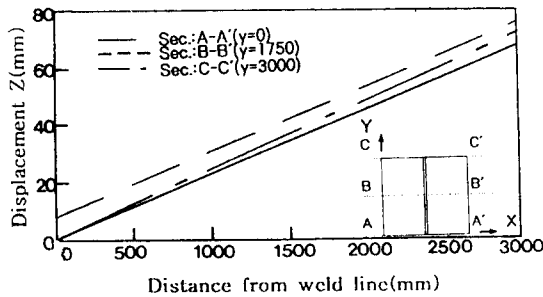


Fig.6 Welding deformation of transverse section

Fig.6은 일본에서의 연구 결과¹⁾로서 해석 모델은 폭 3000mm, 길이 3500mm, 두께 16mm의 연강을 사용하여 용접 속도 53(cm/min)로 하였다. 해석 모델의 크기 및 용접 조건의 차가 있으나 역학적 구속 조건 등 해석에서 고려한 사항이 본 해석과 동일하므로 본 프로그램의 해석 결과와 비교·검토한 결과, 변형량 즉, 정량적인 면에서는 해석 모델의 크기로 인하여 약간 차이가 있으나 정성적인 면에서는 동일한 형상을 나타내고 있다.

4. 결론

평판 맞대기 용접시 발생하는 용접 변형을 수치 해석을 할 수 있는 퍼스널 컴퓨터용 수치해석 프로그램을 개발하였으며 또한, 박판의 용접변형특징은 아래와 같다.

- 1) 박판의 용접시 발생하는 변형의 주요 지배 인자는 열적 구속 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.
- 3) 열전도면의 감소로 용접열이 과도하게 입열되는 용접시단부와 종단부에서 변형이 크게 나타남을 알 수 있었다.

參 考 文 獻

- 1) Yukio Ueda 외 4인, “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 외1인, “有限要素法による熱應力・クリフ・熱傳導解析”, (株)サイエンス, 1985