연구논문

수치시뮬레이션에 의한 박판 용접 변형 예측에 관한 기초적 연구

김종명* · 박창수** · 김영표*** · 방한서****

*전남도립담양대학 자동차공학부
**미래 E & C
***조선대학교 선박해양공학과 대학원
****조선대학교 선박해양공학과

A Fundamental Study on Forecast of the Thin Plate Welding Deformation by Numerical Simulation

Jong Myung Kim*, Chang Soo Park**, Young Pyo Kim*** and Han Sur Bang****

*Dept. of Automobile Eng., Damyang Provincial College, Chonnam 517-800, Korea
**Mirae E & C, Daejeon 305-301, Korea
***Graduate school, Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chosun University, Kwangju 501-759, Korea
****Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

Abstract

For construction of steel structures, thin steel plates have been often used and welding is the main manufacturing process. However, welding processes cause some problems(welding residual stresses, welding deformations, etc.). In these problems, welding deformation is extremely harmful to the safety of structures especially. Therefore, in this study, a numerical analysis program based on large deformation plate theory has been developed to analyze and predict the welding deformation in thin plates.

From the result of numerical analyse, we can find two parameters, thermal cycles and mechanical restraints affecting the welding deformation of structures. It is considered that large difference of thermal cycles and mechanical restraints in the width direction bring about welding deformation.

Results of simulation have the same tendency of deformation distribution in width direction as experimental formulas

(Received December 10, 2001)

Key Words : Large deformation, Welding residual stress, Thin plate, Numerical analysis, Thermal cycle and mechanical restraint

1. 서 론

강구조물의 용접시 접합부의 용융을 위해 열이 가해지고, 이 열로 인해 필연적으로 용접변형 및 잔류응력이 발생한다. 이러한 변형 및 잔류응력은 강구조물의 미관 및 조립정도에 악영향을 미치며, 경우에 따라서는 강도의 저하를 가져오는 원인이 되기도 한다. 후판에서는 용접잔류응력이나 용접균열이 문제가 되고 있고 박판의 경우 용접잔류응력이나 용접균열 문제 보다 변형의 발생이 문제가 되고 있다. 따라서, 박판의 용접시 발생되어지는 용접변형의 형태 및 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 된다. 그러나, 이는 용접변형에 관계되는 다양한 인자들을 정량적으로 표현하는 것이 어렵고 실구조물의 다양한 변형형태를 관계식으로 나타내는데 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 있다. 특히, 유한요소법을 적용한 컴퓨터 프로그램은 다양한 인자와 환경에 대해 신축적으로 적용하여 해석이 가능한 장점을 가지고 있다.

최근에는 미국[1,2], 일본[3-6] 등의 선진국에서 용접변형에 대한 수치해석적 방법에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있는데 비해 국내[7-8]에서는 미비한 실정이며, 대부분 경험적 또는 실험적 방법에 의존하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 열전도, 열탄소성 및 평판의 대변형 이론을 유한요소법으로 정식화하여 수치해석을 통하여 용접시 발생하는 plate 의 각변형 현상을 해석하고 그 타당성을 검토하고자 한다.

2. 용접변형해석 이론 유한요소 정식화

2.1 열전도 해석 이론

용접변형 해석에 필요한 열전도 해석은 자체 개발된 프로그램[10,11]으로 이동열원 효과를 고려한 2차원 열전도 해석을 수행하여, 용접시 발생되어지는 열분포 특성을 해석하였다. 재료가 등방성일 때, 연속체의 비정상 열전도문제의 지배방정식은 $\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\nabla^2 T+\dot{Q}$이고, 2차원 비정상 열전도 방정식은

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

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

2.2 용접변형해석 이론

변위와 변형율의 관계에서 미소증분형 형식에 의하여 기하학적 비선형을 정의하는 평판의 대변형 이론을 도입하였으며, 이를 유한요소법으로 정식화하였다. 변형율의 증분은 다음과 같이 표현된다.

$$[\varepsilon]=[\varepsilon_p]+[\varepsilon_{bs}]+[\varepsilon_l] \quad (2)$$

여기서, $[\varepsilon_p]$: 축변형율,
$[\varepsilon_{bs}]$: 굽힘 및 전단변형율,
$[\varepsilon_l]$: 대변형율 이다.

따라서, 변형율 Matrix [B]는 다음과 같다.

$$[B]=[A_M]+[B_M]+[R_M] \quad (3)$$

여기서, $[A_M]$: 축 변형율 Matrix,
$[B_M]$: 굽힘 및 전단변형율 Matrix
$[R_M]$: 대변형 변형율 Martix 이다.

① 축변형 형상메트릭스 $[A_M]=\begin{bmatrix}\frac{\partial N_p}{\partial x} & 0\\ 0 & \frac{\partial N_p}{\partial y}\\ \frac{\partial N_p}{\partial y} & \frac{\partial N_p}{\partial x}\end{bmatrix}$

② 굽힘변형 형상메트릭스

$$[B_{M1}]=\begin{bmatrix}\frac{\partial N_b}{\partial x}\\ \frac{\partial N_b}{\partial y}\end{bmatrix} \quad [B_{M2}]=\begin{bmatrix}0 & \frac{\partial N_b}{\partial x} & 0\\ 0 & 0 & \frac{\partial N_b}{\partial y}\\ 0 & \frac{\partial N_b}{\partial y} & \frac{\partial N_b}{\partial x}\end{bmatrix}$$

③ 전단변형 형상 메트릭스

$$[B_{M3}]=\begin{bmatrix}\frac{\partial N_b}{\partial x} & -N_b & 0\\ \frac{\partial N_b}{\partial y} & 0 & -N_b\end{bmatrix}$$

④ 대변형 형상 메트릭스

$$[R_M]=\begin{bmatrix}\frac{\partial w}{\partial x} & 0\\ 0 & \frac{\partial w}{\partial y}\\ \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial x}\end{bmatrix} \text{ 이다.}$$

여기서, N_p,N_b : 변형율에 대한 형상함수

2.3 응력-변형율의 관계

응력과 변형율의 증분관계식은 탄성역, 소성역에서 다음과 같이 구해진다.

탄성역에서는 재료가 탄성거동을 할 때 전변형율의 증분은 다음과 같이 탄성 및 열 변형율의 합이 된다.

$$\{d\varepsilon\}=\{d\varepsilon^e\}+\{d\varepsilon^t\} \quad (4)$$

여기서, $\{d\varepsilon^e\}$: 탄성 변형율 증분,
$\{d\varepsilon^t\}$: 열변형율 증분

탄성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식은 다음과 같다.

$$\{d\sigma\}=[D^e]\{d\varepsilon\}-[D^e]\left(\frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}+\{\alpha\}\right)dT \quad (5)$$

여기서, $[D^e]$: 탄성 응력-변형율 메트릭스

소성역에서는 재료가 소성거동할 때 전변형율 증분은 다음과 같이 탄성, 소성 및 열변형율의 합이 된다.

$$\{d\varepsilon\}=\{d\varepsilon^e\}+\{d\varepsilon^p\}+\{d\varepsilon^t\} \quad (6)$$

여기서, $\{d\varepsilon^p\}$: 소성 변형율 증분

소성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식은 다음과 같다.

$$\{d\sigma\}=[D^e]\{d\varepsilon\}-[D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}\lambda-[D^e]\{\alpha\}dT + \frac{d[D^e]}{dT}[D^e]^{-1}\{\sigma\}dT \quad (7)$$

여기서, $\{d\varepsilon^p\}=\lambda\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}$, $\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}$: 편차응력

λ : 양(+)의 스칼라양이다.

3. 해석모델 및 해석방법

본 연구에서 사용한 시험편은 3가지 즉, 4mm, 6mm, 8mm를 선택하였고, 일반적으로 강구조물에서 가장 많이 사용되는 구조용 재료인 연강(SM490)을 사용하였다. 시험편 크기는 용접변형 발생에 적합한 폭 400mm, 길이 500mm인 직사각형 판을 선정하였으며, Fig. 1에 나타내었다. 용접은 CO_2 용접을 1pass 수행하였으며 용접조건은 Table 1에 나타내었다.

먼저, 변형해석을 하기 위하여 이동열원[11]을 고려한 열전도 프로그램을 이용하여 온도 분포 특성을 파악하였으며, 이를 입력데이터로 하여 용접변형 열탄소성 프로그램을 실행하였다.

요소분할은 4절점 아이소파라메터를 도입하여 4절점

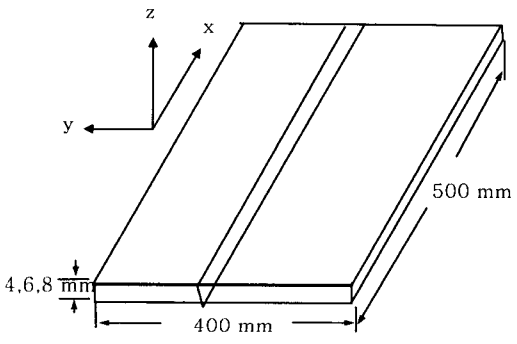


Fig. 1 Test specimen

Table 1 Welding condition

Thickness (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	η (Arc efficiency)
4	125	20	34	0.8
6	130	23	30	0.8
8	140	25	28	0.8

사각형 요소를 사용하였다.

또한, 발산하는 문제를 해결하기 위하여 Newton Raphson법을 사용하였다. 좌표설정에 있어서는 용접선방향을 x축, 용접선 직각방향을 y축, 판두께 방향을 z축으로 하였다. 유한요소해석을 위한 모델의 요소분할을 Fig. 2에 나타내었으며, 총절점수는 1479개, 요소수는 1400개로 하였다.

수치해석 모델의 경계조건은 실 용접현상을 구현하기 위하여 Fig. 3과 같이 적용하였다. 용접선 시단부를 완전 구속을 하였으며, 용접선 종단부에서는 y, z축 방향의 변위를 구속하였다. 따라서, 팽창 및 수축변형은 물론 각변형 또한 자유롭게 변형 될 수 있도록 하였다.

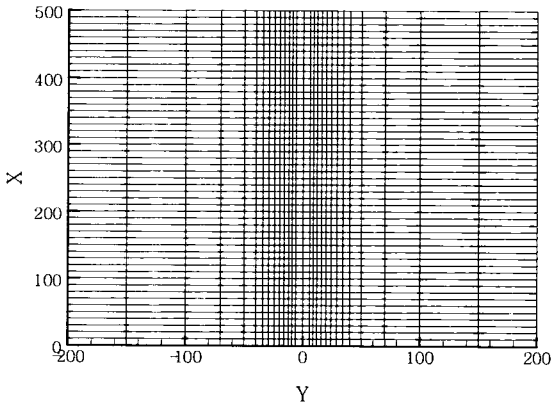


Fig. 2 Finite-element mesh for numerical analysis

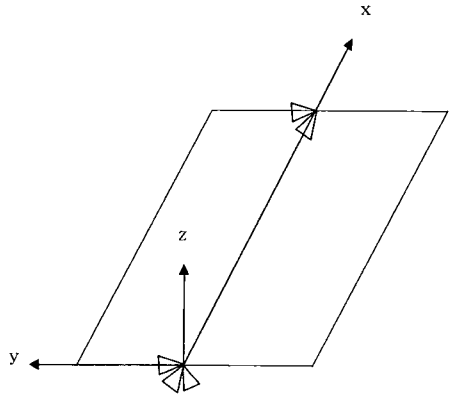


Fig. 3 Boundary condition

4. 해석결과 및 고찰

4.1 온도분포 특성

Fig. 4와 Fig. 5는 두께가 6mm일 때 열분포 형상을 나타낸 것이다. Fig. 4의 a), b), c)는 열원이 중앙부(x=250mm, t=50sec)에 도달하였을 때 용접선 직각방향과 용접선 방향에 각 단면의 온도 분포를 도시한 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 각 요소간의 온도차는 시험편의 종단면보다는 횡단면이 크게 나타나고 있다. 즉, 용접시 야기되는 용접변형의 가장 큰 요인은 요소간의 구속도와 온도이므로, 이중 온도에 따른 분포차를 보면 종변형 보다는 횡변형에서 보다 큰 변형이 발생되리라 여겨진다. Fig. 5는 용접선 방향으로 250mm (용접선의 중앙지점)지점에서 직각방향으로 6mm, 12mm, 40mm지점인 용융금속(weld metal), 열영향부(HAZ), 그리고 모재(base metal)의 위치에서 시간에 따른 온도분포 이력을 나타내었다. 용접열원이 측정점에 접근하면서 온도가 상승하고, 그후 시간이 지나면서 열전도로 인하여 점차 냉각하는 과정을 보여주고 있다.

또한, 고온역에서는 급격한 온도 하강곡선을 나타내고 시간이 지나면서 점차 감소하여 온도구배가 완만해짐을 알 수 있다.

이상과 같이 이동열원을 고려한 열전도 해석 프로그램을 사용하여 온도 분포를 고찰하였고, 4mm와 8mm도 위와 유사한 분포형상을 나타내고 있다.

각각의 열전도 해석 결과를 초기 데이터로 하여 용접변형 해석을 하였다.

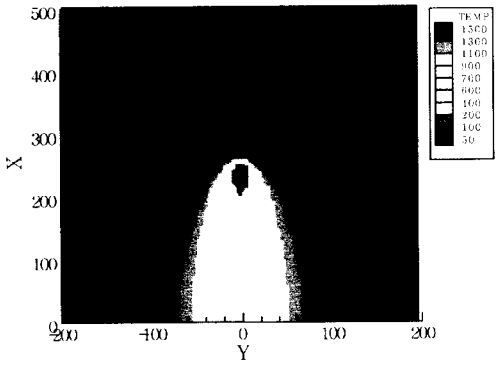


Fig. 4 Temperature distribution(6mm, t=50sec)

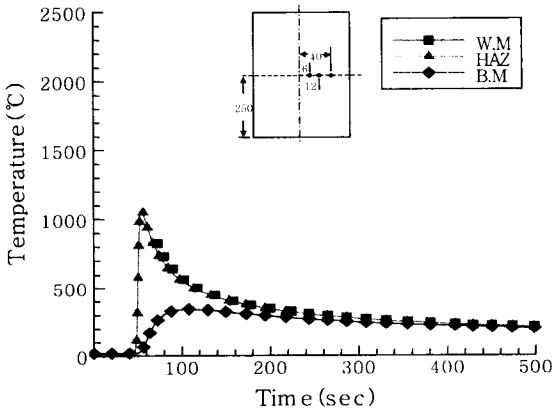


Fig. 5 Temperature history of W.M, HAZ and B.M element with time(6mm)

4.2 용접변형 특성

용접이 완료된 후, 온도가 상온(20℃)으로 되었을 때 변형의 특성을 나타내기 위하여 Fig. 6과 같이 시험편의 3지점 A-A′ (x=0mm), B-B′ (x=250mm), C-C′ (x=500mm)지점의 변형을 측정하였다. 이 세 부분에서 측정한 값을 6mm에 대해서 Fig. 7(a)에 각각 단면별로 도시하였으며, Fig. 7(b)에는 모델 전체에 걸쳐 나타내었다.

변형의 형태는 용접선을 중심으로 대칭구조를 나타내고 있으며, 세 부분에서의 형상을 보면 동일하게 나타

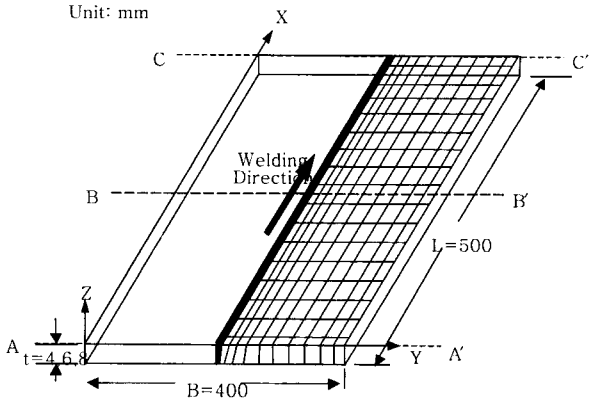
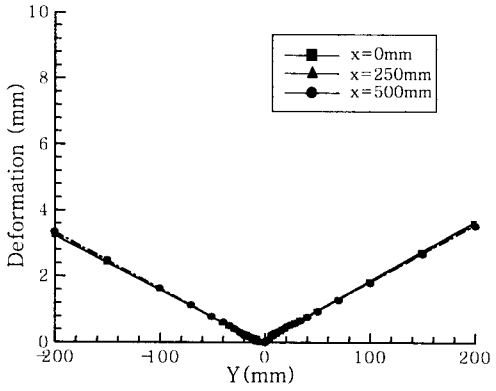
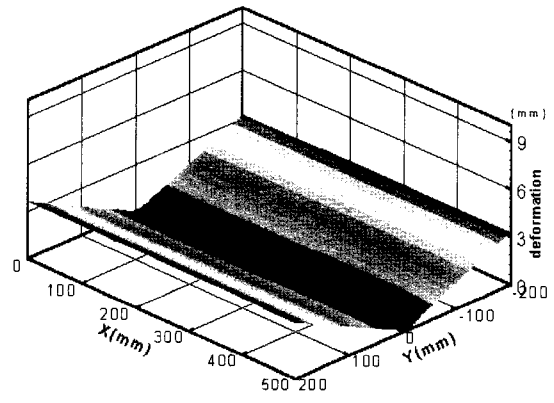


Fig. 6 Position of deformation measurement



(a) Deformation of transverse section



(b) Deformation of full model

Fig. 7 Deformation value

나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 4mm, 6mm, 8mm에 대해서 각각 250mm (용접선방향 중앙)지점에서 변형을 도시한 그림이다. 이 결과에 따르면 두께와 입열량의 변화에 따라 변위가 증가 함을 보이고 있으며, 3가지 모델의 해석결과가 같

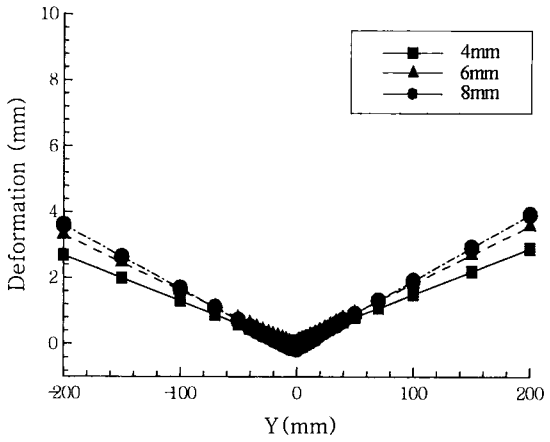


Fig. 8 Deformation value

은 형상을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 역학적 구속상태가 같을 경우, 평판의 맞대기 용접에서의 변형 형태는 동일한 형상을 나타남을 알 수 있다.

수치시뮬레이션 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 입열량과 두께의 변화에 따른 각변형발생 실험식[12,13]과 해석결과를 Fig. 9에 비교하여 나타내었다.

두 결과를 비교하여 보면 수치해석에 의한 변형값이 실험식에 의한 값보다 다소 크게 나타났으나, 변형 분포 양상은 동일한 형상을 보이고 있음을 알 수 있다.

또한, 두께가 두꺼워 질수록 수치해석 결과와 실험식의 결과에서 모두 각변형의 발생량이 증가함을 보였으며, 두 결과의 편차는 감소함을 보였다.

이 결과를 통하여 본 연구에서 개발된 용접변형 해석 프로그램의 타당성은 입증되었다고 사료된다.

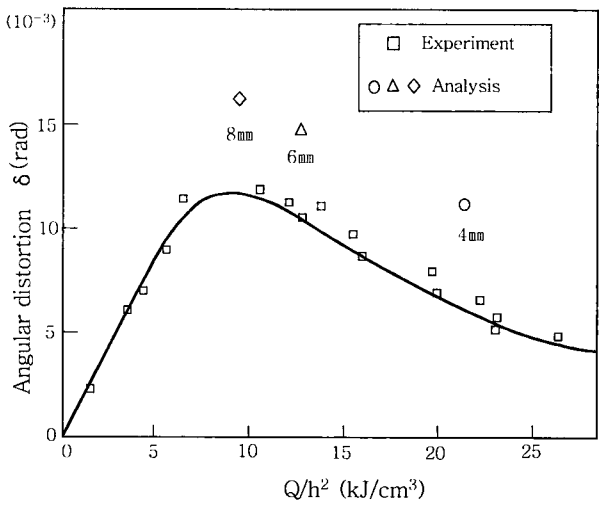


Fig. 9 Relationship between angular distortion and Q/h^2

5. 결 론

본 연구에서는 평판 대변형 및 재료 비선형 거동을 고려하여 유한요소법에 의한 평판의 용접변형 해석용 열탄소성 프로그램을 개발하였으며, 수치해석을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

1) 용접선 직각방향의 변형 발생요인은 용접선 방향보다 용접선 직각방향의 온도상승 및 냉각의 차이가 심하기 때문이라고 사료된다.

2) 3가지 모델의 해석 값을 비교해보면 두께와 입열량의 증가에 따라 용접변형이 증가함을 알 수 있었다.

3) 평판해석의 실험식에 의한 결과와 수치 시뮬레이션에 의한 결과를 비교하여 보면, 다소 차이를 보이고 있으나, 그 경향은 일치함을 보였다.

참 고 문 헌

1. P. Michaleris, and A.Debiccari : Prediction of Welding Distortion, Welding Journal, 4(1997), 172~181
2. C. L. TSAI, S. C. PARK and W. T. CHENG : Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure, Welding Journal, **5**(1999), 156~165
3. M. Watanabe, and K. Satoh : Fundamental Study on Buckling of Thin Steel Plate due to Bead-welding, T. of JWRI, **27-6**(1959), 13-20 (in Japanese)
4. Satoh, K., and Terasaki, T. : Effect of Welding Conditions on Residual Stress Distribution and Welding Deformation in Welded Structures Materials, T. of JWRI, **45-1**(1976), 42-53 (in Japanese)
5. Shigetomo Matsui : Weld Distortion and Its Prevention, T. of JWRI, **52-5**(1983), 458~466 (in Japanese)
6. Takafumi Miyata : Weld Distortion and Its Prevention, T. of JWRI, **52-7**(1983), 606~614 (in Japanese)
7. Han Sur Bang : The Plane-deformation Thermal Elasto-plastic Analysis during Welding of Plate, Journal of Ocean Resources and Engineering, 8-1(1994), 33~40 (in Korean)
8. K. Y. Bae and H. J. Kim : Behavior of Angular Distortion in Butt Joint Welding of Thin Plate Structure, Journal of The Korean Welding Society, **6-3** (1988), 21-26 (in Korean)
9. Seung Il Seo and Chang Doo Jang : A Study on the Prediction of Deformation of Welded Structures, Journal of the Korean Welding Society, **15-5**(1997), 64-73 (in Korean)
10. Han Sur Bang : Analysis on the Two Dimensional Unstationary Heat Conduction Sheet Plate, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **27-4** (1990),44~50 (in Korean)
11. Han Sur bang : Analysis on the Three-Dimensional Unstationary Heat Conduction on the Welding of Thick Plate by F.E.M., Journal of the Korean Welding Society, **9-2**(1991), 37~43 (in Korean)
12. 豊田政男, 溶接工學, 理工學社, 1985, 1~90 (in Japanese)
13. Koichi Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pregamon Press, 1980, 1~327