

## 잔류응력 및 변형을 고려한 용접평판부재의 최종강도 해석

김 병 일\*

The Ultimate Strength Analysis of the Welded Plate Elements having Residual Stresses and Strains

*B. I. Kim*

**Key Words** : 잔류응력 및 변형(residual stresses and strains), 열탄소성해석(thermal elasto-plastic analysis), 최종강도해석(ultimate strength analysis)

### Abstract

For the rational and economic design of the structural elements of ships which is built using welding, the ultimate strength analyses of the plates having initial imperfections, such as welding residual stresses and strains, are needful.

The welding deformation usually relied on approximative equations or based on expert's experience. But in this paper, for the thermal elasto-plastic analysis of plates, the finite element analysis was performed, based on initial strain method. In formulating the incremental analysis, unbalanced force terms were included. In the plastic domain during the incremental process, the 2nd order terms of stress increment and yield stress increment were considered, so that time increment could be controlled for a more stable solution.

The ultimate strength analysis program of the plates having initial imperfections was made. The ultimate strength analysis was carried out based on the results of the welding deformations of this paper. In the ultimate strength analysis the Rayleigh-Ritz method based on the minimum potential theory was used.

---

\* 정회원, 목포해양대학교 조교수

## 1. 서 론

용접으로 조립되는 선체 구조 재료의 합리적인 고 경제적인 설계를 위해서는 초기 결함을 갖는 평판 특히 용접에 의한 잔류 응력과 변형이 존재하는 평판에 대한 최종 강도의 정확한 해석이 필요하다.

대개의 경우는 용접 변형을 근사식 또는 숙련자의 경험에 의존하고 있으나 본 연구에서는 2-D 열전도 문제를 해결하고, 초기 변형도법을 사용하여 열탄소성 해석을 하였다. 또한 증분형 해석수법의 정식화에서는 불평형력을 고려하고 소성 구역에서는 응력 증분 및 항복 응력 증분의 2차항까지 고려하였다.

초기 결함을 갖는 평판에 대해서 최종 강도 해석 프로그램을 완성하고 앞의 용접 변형 결과를 이용하여 일관된 최종 강도 해석을 수행하였다. 최종 강도 해석에 있어서는 면외 변위 증분을 기지의 일 반화 좌표로 전개하여 최소 포텐셜 이론을 적용하는 Rayleigh-Ritz 법을 적용하여 효율적으로 계산하였다.

## 2. 용접후 열전도 해석

본 논문에서 열전도 해석에 대한 연구로는 해석적인 방법과 수치적인 방법을 함께 검토하였다. 해석적인 방법은 Rosenthal의 해를 기초로하여 경상법(mirror image method)을 이용하였으며, 수치적인 방법은 유한차분법중 교호방향법(Alternating Directionn Implicit Method)을 이용하였다. 해석적인 해는 정확성과 경제성이 우수하지만 적용범위가 제한된다는 약점이 있고 수치적인 방법은 적용범위가 광범위하지만 경제성이 떨어진다는 단점이 있는데, 열탄소성 해석에 필요한 열전도 해석방법은 경제성이 있으면서도 적용 대상이 넓어야함으로 해석적인 방법과 수치적인 방법을 함께 검토하였다.

열전도 방정식과 초기 온도 조건은 다음과 같다.

$$\frac{1}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$T(y, z, 0) = \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_0, & |y - oby| \leq bs \text{ \& } |z - obz| \leq cs \\ 0, & |y - oby| > bs \text{ or } |z - obz| > cs \end{cases}$$

$$Q = c\rho BHT_0 \quad (3)$$

위 식에서 Y는 비드(bead)에 수직방향(폭방향), Z는 판두께방향, k는 확산률, oby, obz는 비드 단면의 중심좌표값, bs, cs는 비드 단면의 반폭이다. 이때 입열량 Q는 (3) 식으로부터 초기온도  $T_0$ 의 순간 선상열원으로 바뀌지며,  $c\rho$ 는 비열과 밀도, B는 입열폭, H는 입열깊이이다.

### 2.1 해석적인 방법에 의한 열전도 해석

(1) 식의 해는

$$T(y, z, t) = \frac{T}{4} \quad (4)$$

$$\times (\Phi(\frac{y - oby + bs}{2\sqrt{kt}}) - \Phi(\frac{y - oby - bs}{2\sqrt{kt}}))$$

$$\times (\Phi(\frac{z - obz + cs}{2\sqrt{kt}}) - \Phi(\frac{z - obz - cs}{2\sqrt{kt}}))$$

유한 평판의 온도 분포를 구하기 위한 방법으로는 (4) 식과 같은 무한 평판에 대한 해를 유한 평판의 경계가 단열되었다고 생각하고 경상법을 사용한다. 경상법은 경계에 놓여진 거울에 온도 분포가 반사되어 경계안으로 들어오는 것으로 생각하는 근사적인 방법이며 경계가 단열되어 있다고 가정할 수 있을때 유효한 방법이다.

### 2.2 유한차분법에 의한 열전도 해석

수치적인 열전도 해석 방법으로는 (1) 식과 같은

2 차원 열전도 문제를 유한차분법중 교호방향법을 이용하여 해를 구한다. 이 방법은 유한차분법중 양적 근사법의 단점인 해의 안정성에 대한 제한 조건을 갖지 않으며, 음적 근사법의 단점인 5 중 대각 행렬을 피하고 3 중 대각 행렬을 가지므로 계산 효율을 높이고 있다.

(1) 식에 대하여 미소 간격  $h_y, h_z$  그리고 미소 시간  $\Delta t$  를 사용하여 먼저 Y 축 방향으로 다음 단계에 Z 축 방향으로 음적 근사시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & -\beta_y f_{p+1rs+1} + (1+2\beta_y)f_{prs+1} - \beta_y f_{p-1rs+1} \\
 & = \beta_z f_{pr+1s} + (1-2\beta_z)f_{prs} + \beta_z f_{pr-1s} \\
 & -\beta_z f_{pr+1s+2} + (1+2\beta_z)f_{prs+2} - \beta_z f_{pr-1s+2} \quad (5) \\
 & = \beta_y f_{p+1rs+1} + (1-2\beta_y)f_{prs+1} + \beta_y f_{p-1rs+1} \\
 & f_{prs} = T(y_p, z_r, t_s), \quad \beta_y = \frac{k\Delta t}{h_y^2}, \quad \beta_z = \frac{k\Delta t}{h_z^2}
 \end{aligned}$$

### 3. 구조부재의 열탄소성 해석

#### 3.1 증분형 해석방법의 정식화

증분 구간에 대해 가상일의 원리를 적용하면 다음과 같다.

$$\int_v (\sigma_{ij} + \Delta\sigma_{ij}) \delta(\epsilon_{ij} + \Delta\epsilon_{ij}) dV = 0 \quad (6)$$

$$\int_v \Delta\sigma_{ij} \delta\Delta\epsilon_{ij} dV + \int_v \sigma_{ij} \delta\Delta\epsilon_{ij} dV = 0 \quad (7)$$

이제 초기변형도법에 의한 유한요소법을 정식화 하기 위해 증분 구간중에 생기는 소성 변형도 증분과 열 변형도 증분의 합을  $\Delta\epsilon^*$  로 표시하면 다음과 같이 된다. 또한 응력 증분은 (9) 식과 같이 된다.

$$\Delta\epsilon^e = \Delta\epsilon - \Delta\epsilon^*, \quad \Delta\epsilon^* = \Delta\epsilon^p + \Delta\epsilon^t \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_{ij} = E_{ijkl} \Delta\epsilon_{kl}^e + \Delta E_{ijkl} \epsilon_{kl}^e + \Delta E_{ijk} \Delta\epsilon_{kl}^e \quad (9)$$

위 식을 행렬형식으로 고치면 다음과 같다.

$$\{\Delta\epsilon\} = \{B\} \{\Delta v\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 \{\Delta\sigma\} &= \{D + \Delta D\} (\{\Delta\epsilon\} - \{\Delta\epsilon^*\}) \\
 &+ \{\Delta D\} \{\epsilon^e\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

(7) 식에 (10), (11) 식을 대입하면

$$\{K\} \{\Delta v\} = \{\Delta F\}_e - \{F\}_{nq} \quad (12)$$

$$\{K\} = \int_v \{B\}^T \{D + \Delta D\} \{B\} dV$$

$$\{\Delta F\}_e = \int_v \{B\}^T \{D + \Delta D\} \{\Delta\epsilon^*\} dV$$

$$- \int_v \{B\}^T \{\Delta D\} \{\epsilon^e\} dV \quad : \text{등가절점력}$$

$$\{F\}_{nq} = \int_v \{B\}^T \{\sigma\} dV \quad : \text{불평형력}$$

일정구간에서  $\{\Delta D\}$ 은 미소하므로 구조물의 강성은 항상 일정하게 취급할 수 있고, 부적합 변형도의 영향은 등가인 외력항으로 치환될 수 있다.

#### 3.2 소성 변형도 증분의 결정

시각  $t$  에서 항복이었던 요소가 시각  $t + \Delta t$ 에서도 계속 항복일 조건은

$$\begin{aligned}
 & \{\bar{\sigma}(t + \Delta t)\}^2 - \{\bar{\sigma}(t)\}^2 = \\
 & \{Y(t + \Delta t)\}^2 - \{Y(t)\}^2 \quad (13)
 \end{aligned}$$

$Y$  가 온도  $T$  만의 함수이고 구간별로 직선이라 가정하면

$$\begin{aligned}
 & \{\bar{\sigma}(t + \Delta t)\}^2 = \{\bar{\sigma}(t)\}^2 \\
 & + \frac{3}{2} (2S_{ij} \Delta S_{ij} + \Delta S_{ij} \Delta S_{ij}) \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$Y(t + \Delta t) = Y(t) + \left(-\frac{\Delta Y}{\Delta T}\right) \Delta T \quad (15)$$

Y는 재료의 항복응력이며  $S_{ij}$ 는 편차응력이다.

(14), (15) 식으로부터 (13) 식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{3}{2}(2S_{ij}\Delta S_{ij} + \Delta S_{ij}\Delta S_{ij}) = 2Y\left(\frac{\Delta Y}{\Delta T}\right)\Delta T + \left\{\left(\frac{\Delta Y}{\Delta T}\right)\Delta T\right\}^2 \quad (16)$$

소성 구역에서 전 변형도 증분은 (17) 식과 같이 탄성 성분, 소성 성분, 열성분의 합으로 이루어 진다.

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^e + \Delta \varepsilon_{ij}^p + \Delta \varepsilon_{ij}^t \quad (17)$$

$$\Delta \varepsilon_{ij}^t = (\alpha \Delta T + \Delta \alpha T) \delta_{ij} \quad (18)$$

여기서  $\alpha(T)$ 는 선팽창계수이다.

(17) 식을 편차 변형도 형식으로 고치면 다음과 같다.

$$\Delta e_{ij} = \Delta e_{ij}^e + \Delta e_{ij}^p \quad (19)$$

$$\Delta e_{ij}^e = \frac{\Delta S_{ij}}{2G}, \quad \Delta e_{ij}^p = \Delta \varepsilon_{ij}^p$$

$$\Delta S_{ij} = 2G(\Delta e_{ij} - d\lambda S_{ij}) \quad (20)$$

따라서 (16) 식으로부터 다음과 같이  $\Delta \lambda$ 에 관한 2차 방정식을 구할 수 있다.

$$GS_{ij}S_{ij}\Delta \lambda^2 - (S_{ij}S_{ij} + 2GS_{ij}\Delta e_{ij})\Delta \lambda + \{S_{ij}\Delta e_{ij} + G\Delta e_{ij}\Delta e_{ij} - Y_D\} = 0 \quad (21)$$

여기서  $Y_D = \Delta Y(Y + \Delta Y/2) / 3G$

위 식의 판별식을 생각하면

$$D = \{(S_{ij}S_{ij}) + \frac{2}{3}Y\Delta Y\}^2 + 4G^2K \quad (22)$$

$$K = \{S_{ij}\Delta e_{ij}\}^2 - (S_{ij}S_{ij})(\Delta e_{kl}\Delta e_{kl}) \quad (23)$$

여기서  $\frac{\Delta e_{ij}}{S_{ij}} = \Delta \lambda + \frac{\Delta S_{ij}}{2GS_{ij}}$  인데

하중 증분 곧 시간 증분이 작을 때  $\Delta S_{ij}/S_{ij}$ 는 방향에 따라 큰 차이가 없을 것이고 이 경우  $K$ 는 작은 음값을 갖게 되고, 판별식  $D$ 는 양의 값을 갖게 되어 결국 (21) 식이 실근을 갖게 된다. 그러나 판별식이 음이 될 경우 시간 증분이 과도한 것으로 판단해서 그 증분을 작게 해야한다. 결국 이 판별식으로부터 시간 증분을 안정적으로 제어할 수 있게 된다.

시간 증분이 작은 경우( $K \approx 0$ )에 (21) 식의 해는

$$\Delta \lambda = \frac{S_{ij}\Delta e_{ij} + Y\Delta Y/(3G)}{S_{ij}S_{ij}} + \frac{1}{G} \quad (24)$$

$$\text{or } \frac{S_{ij}\Delta e_{ij} - Y\Delta Y/(3G)}{S_{ij}S_{ij}} \quad (25)$$

두 근 중  $\Delta \lambda$ 에 대한 일차 방정식의 근이 되는 작은 근이 물리적으로 타당하므로 작은 근을 써서 소성 변형도를 구한다. 이때 만약  $\Delta \lambda$ 가 음수면 그 요소는 소성 상태에서 탄성 상태로 되돌아간다.

#### 4. 최종 강도 해석

본 연구에서는 면외 변위 증분을 기저의 일반화 좌표 함수로 전개하여 최소 포텐셜에너지 원리를 이용하여 일반화 좌표의 계수를 결정하는 방법을 이용하였다.

##### 4.1 기초 이론

판의 전 포텐셜 에너지 증분은

$$\Delta \Pi = \Delta U + \Delta W \quad (26)$$

$$\Delta U = \frac{1}{2} \int_V [E_{ijkl}(\Delta \varepsilon_{ij} - \Delta \varepsilon_{ij}^*)](\Delta \varepsilon_{kl} - \Delta \varepsilon_{kl}^*) + \sigma_{ij}\Delta W_{,j}dV \quad (27)$$

$$- \Delta \varepsilon_{kl}^*) + \sigma_{ij}\Delta W_{,j}dV$$

$$\Delta W = \int_{C_r} (\Delta F_i + \bar{F}_i)\Delta U_i dC +$$

$$\int_{S_v} [(\Delta P + \bar{P})\Delta W + \bar{X}_i \Delta U_i] dS \quad (28)$$

여기서  $\sigma_{ij}$  는 상태  $\Omega(n)$  에 있어서 응력 분포이며  $\bar{F}_i, \bar{P}, \bar{X}_i$  등은 불평형력이다. 이들을 구체적으로 표시하면

$$\bar{F}_i = F_i - N_{ij} * n_j \quad (29)$$

$$\bar{P} = P + [N_{ij} W_{,i} + M_{ij, j}], \quad (30)$$

$$\bar{X}_i = N_{ij, j} \quad (31)$$

이제 변분을 행하면

$$\Delta N_{ij, j} + \bar{X}_i = 0 \quad (32)$$

$$[\Delta N_{ij}(W + \Delta W)_{,i} + N_{ij} \Delta W_{,i}], \quad (33)$$

$$+ \Delta M_{ij, j} - (\Delta P + \bar{P}) = 0$$

$$\Delta N_{ij} * n_j - (\Delta F_i + \bar{F}_i) = 0 \quad (34)$$

$$\Delta M_{ij} * n_j = 0 \quad (35)$$

이 된다. (32), (33) 식은 각각 면내, 면외 방향의 평형 방정식, (34) 식은 면내 역학적 경계조건, (35) 식은 주변 모멘트 자유인 조건이 된다.

#### 4.2 처짐 증분의 함수 전개

Rayleigh-Ritz 방법에 따라  $\Delta U_i, \Delta W_i$  를 기하학적 경계조건을 만족하는 함수로 전개하여 각각의 전개 함수의 계수를 최소 포텐셜 에너지 원리에 의하여 어느 정도 근사해를 얻을 수 있다. 그러나 판의 일부에 소성역이 발생하는 경우 처짐의 함수는 비교적 간단한 함수로 표현하여도 정도가 좋은 결과를 얻지만 면내 변위 분포는 상당히 복잡하게 되어 특별한 취급이 필요하게 된다.

전 포텐셜 에너지 증분식인 (26) 식에서  $\Delta U_i$  에 관계되는 부분  $\Delta \Pi'$  의 변분을 생각하면

$$\Delta \Pi' = \Delta U' + \Delta W' \quad (36)$$

$$\Delta U' = \frac{1}{2} \int_v E_{ijk} \left( \frac{\Delta U_{i,j} + \Delta U_{j,i}}{2} - \Delta \varepsilon^*_{ij} \right) \times \left( \frac{\Delta U_{k,l} + \Delta U_{l,k}}{2} - \Delta \varepsilon^*_{kl} \right) dV \quad (37)$$

$$\Delta W' = \int_{C_F} (\Delta F_i + \bar{F}_i) \Delta U_i dC + \int_{S_v} \bar{X}_i \Delta U_i dS \quad (38)$$

$$\Delta \varepsilon^o_{ij} = -\Delta \varepsilon^g_{ij} - \Delta \varepsilon^h_{ij} - \Delta \varepsilon^b_{ij} \quad (39)$$

$$\Delta \varepsilon^g_{ij} = \frac{1}{2} (W_{,i} \Delta W_{,j} + W_{,j} \Delta W_{,i}) \quad (40)$$

$$\Delta \varepsilon^h_{ij} = \frac{1}{2} (\Delta W_{,i} + \Delta W_{,j}) \quad (41)$$

$$\Delta \varepsilon^b_{ij} = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \Delta \varepsilon^b_{ij} dz \quad (42)$$

그런데  $\Delta \varepsilon^o_{ij}$  는 아직 미지량의  $\Delta W$  를 포함하고 있기 때문에 아직은 여하간 결정할 수 없다. 그래서  $\Delta W$  를 일반화 좌표로 표시하여 자유도를 대폭 감소시켰다. 즉 면외의 기하학적 경계조건을 만족하는 함수열  $W_k(x, y)$  로 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\Delta W(x, y) = \sum_k \Delta C_k W_k(x, y) \quad (43)$$

따라서

$$\Delta \varepsilon^g_{ij} = \frac{1}{2} \sum_k \Delta C_k (W_{,i} W_{k,j} + W_{,j} W_{k,i}) \quad (44)$$

$$\Delta \varepsilon^h_{ij} = \frac{1}{2} \sum_k \sum_l \Delta C_k \Delta C_l W_{k,i} W_{l,j} \quad (45)$$

(43), (44), (45) 식을 이용하면  $\Delta U_i$  는 다음과 같은 형태로 미정계수를 포함하여 이산화시킬 수 있다.

$$\Delta U_i = \Delta U_{1i} + \sum_k \Delta C_k U_{2ki} + \sum_k \sum_l \Delta C_k \Delta C_l U_{3kli} \quad (46)$$

여기서  $\Delta U_{1i}$ ,  $U_{2ki}$ ,  $U_{3kli}$  은 다음과 같은 조건을 취해 풀은 평면 문제 해가 된다.

Table 1 Boundary conditions

	초기변형도	역학경계	기하학경계
$\Delta U_{1i}$	$\Delta \epsilon_{ij}^p$	만 족	만 족
$U_{2ki}$	$-\Delta \epsilon_{ij}^e$	free	fix
$U_{3kli}$	$-\Delta \epsilon_{ij}^h$	free	fix

이들의 해는 유한요소법의 초기 변형도법을 이용하면 정도 좋게 구하는 것이 가능하다. 초기 변형도법을 이용하기 때문에 평면 문제의 강성행렬이 일정하게 되므로 계산 초기 단계에서 역행렬을 구해 놓으면 증분구간에서 계속 이용할 수 있다.

4.3  $\Delta C_k$  의 결정

마정 계수  $\Delta C_k$  를 구하기 위해 (26) 식에서 주어진 포텐셜 에너지에 최소 포텐셜 에너지 원리를 이용한다.

최소 포텐셜 에너지 원리에 의해  $\Delta \Pi$  는  $\Delta C_k$  에 대해 정류치를 갖기 때문에 다음 식이 성립된다.

$$\frac{\partial \Delta \Pi}{\partial \Delta C_k} = 0 \quad (k=1 \sim k) \quad (47)$$

이때  $\Delta \Pi$  는  $\Delta C_k$  에 대해 2차식으로 표현되기 때문에 식 (31) 는 실제 k 원 일차연립 방정식이 되 어지며 이것을 풀면  $\Delta C_k$  가 결정되며, 이때  $\Delta U_i$ ,  $\Delta W_i$  가 함께 결정된다.

4.4 용접에 의한 초기 처짐

용접에 의한 판의 처짐은 각변형과 잔류응력에

의한 영향으로 나누어 생각할 수 있다. 비교적 후판의 경우는 전자가 지배적이며 반대로 박판인 경우는 후자의 영향이 크다. 각변형에 의한 처짐은 우리의 범위가 아니므로 Satoh 의 제안식[11]을 이용하여 구하고, 잔류응력에 의한 영향은 앞장의 용접판의 해석으로부터 얻는다.

용접시 각변형은

$$Q/t_z < 2500 \text{ (cal/cm) 일 때} \\ \delta_f = 6 \times 10^{-6} \times Q/t_z \quad (48)$$

$$Q/t_z > 2500 \text{ (cal/cm) 일 때} \\ \delta_f = -2.4 \times 10^{-6} \times Q/t_z + 0.021 \quad (49)$$

로 나타난다.

중양부의 초기 처짐  $W_0$  은 식 (50) 과 같이 표현 된다.

$$W_0 = \frac{3}{8} \delta_o b \quad (50)$$

$$\delta_o = 2\delta_f / (1 + \beta C) \quad (51)$$

$$C = 1.5 + 1.975(a/b)_z + 0.927(a/b) \quad (52)$$

정방형 평판에 대해서는  $a = b$  이므로

$$W_0 = \frac{3b_z \delta_f}{4(b + 165)} \quad (53)$$

이 된다.

5. 수치 계산 결과 및 고찰

이상과 같은 이론에 기초하여 열탄소성 해석 알고리즘을 개발하고 수치 계산을 수행하였다.

수치계산은 Nomoto등[8]의 경우와 비교 하였는데 수치계산 시에는 대칭성을 고려하여 평판의 1/4 을 해석하였다. 요소는 25요소, 36절점의 사각형 판 요소를 사용하였으며, 두께방향으로는 6층으로 나

누어 적분하였다. 또한 경계조건은 평판의 두변은 자유, 다른 두변은 대칭경계조건을 이용하였다.

재료의 온도에 따른 물성치는 항복응력, 탄성계수,

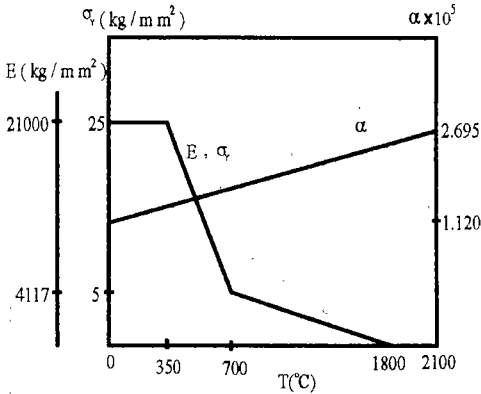


Fig. 1 Temperature dependency of material properties

Table 2 Experimental conditions

	Voltage (V)	Current (A)	Speed (cm/s)	Heat input (cal/cm)
1	280	70	0.667	7,056
2	267	70	0.667	6,728

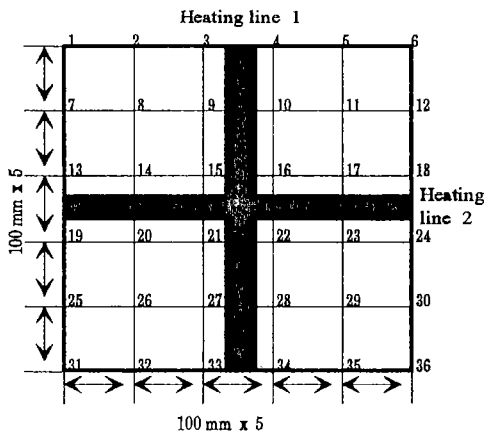


Fig. 2 Numbers of measuring nodes

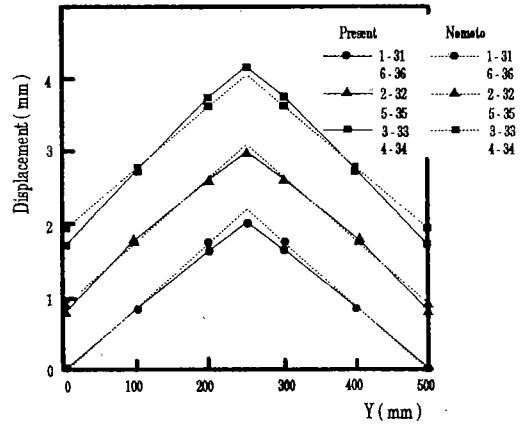


Fig. 3 Comparison of calculated displacements

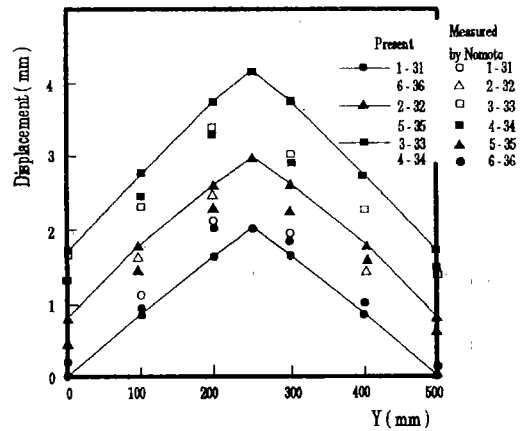


Fig. 4 Comparison of calculated and measured displacements

선팽창계수를 고려하였으며 그 변화값은 Fig. 1에 나타내었다. 가열 조건은 Table 2에 나타내었으며 가열 위치와 계측 위치는 Fig. 2에 표시된 바와 같다. 이러한 조건에 대한 결과는 Fig. 3과 Fig. 4에서 보여주고 있는데 Fig. 3에 나타난 바와 같이 해석결과와 Nomoto의 결과와 잘 일치하고 있고, Fig. 4에 보인 실험 결과와도 비교적 일치된 값을 보이고 있다는 것을 확인 할 수 있다.

최종강도 해석에 관한 것은 사변 단순 지지된 정

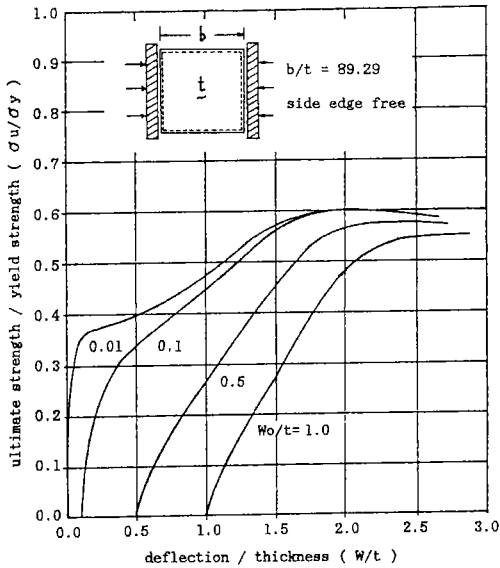


Fig. 5 Effect of initial deformation ( $b/t=89.29$ )

사각형 평판에 대하여 수행하였는데 종횡비  $b/t=100$ , 초기처짐  $W_0/t=0.1$  을 갖는 경우에 대한 해석을 수행하여 하중과 처짐에 대해 검증하였고, 이와 같은 결과를 바탕으로 초기 처짐이 최종강도에 미치는 영향을 조사해 보기 위해 일정  $b/t$  에 대하여 초기처짐을 0.1 에서 1.0 까지 바꿔가면서 해석하였는데 그 결과는  $b/t = 89.29$  경우에 Fig. 5 에  $b/t = 45.45$  인 경우에 Fig. 6에 잘 나타나 있다. 이것은 satoh[10]의 결과와 같다.

또한 종횡비  $b/t$  가 최종 강도에 미치는 영향을 조사하기 위해  $b/t$  를 14.29 부터 147.6 까지 바꿔가면서 반복 수행한 결과를 Fig. 7에 실었는데 이는 우리의 예상과도 잘 일치하며 이로써  $b/t$  가 작은 평판 즉 후판에 있어서는 초기 처짐이 최종강도에 큰 영향을 미침을 알 수 있으며 반대로  $b/t$  가 큰 박판에 있어서는 초기 처짐이 최종강도에 별로 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

이제 용접판의 최종강도를 해석하기 위해 양단에 비드가 있는 평판에 대하여 수치해석을 수행하였는데 그 결과는 Fig. 8, Fig. 9에 나타내었다. 일정한

$b/t$  에서 용접 입열량을 변화시키면서 그 결과를 고찰해 보면 초기 입열이 많을수록 초기 처짐이 커지고 따라서 강도도 약해짐을 알 수 있다. 특히 Fig. 8, Fig. 9 등에서 보여 주듯이 용접에 의한 초기변형이 좌굴강도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

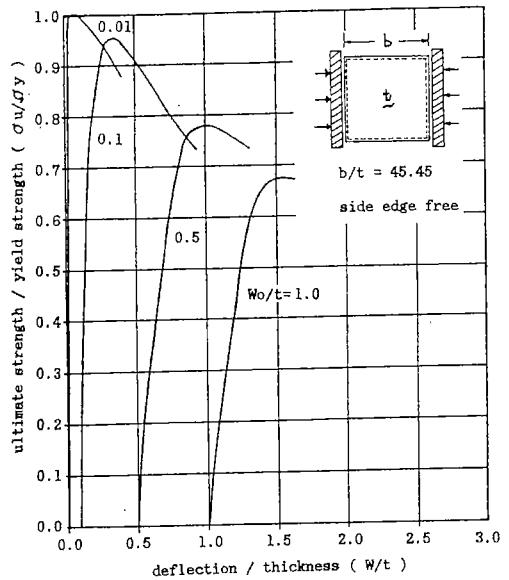


Fig. 6 Effect of initial deformation ( $b/t=45.45$ )

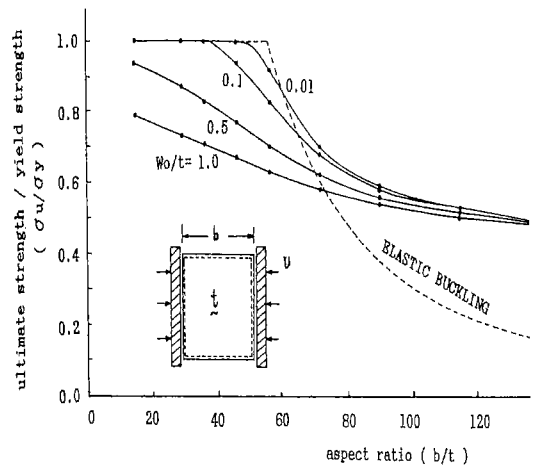


Fig. 7 Ultimate strength of plates



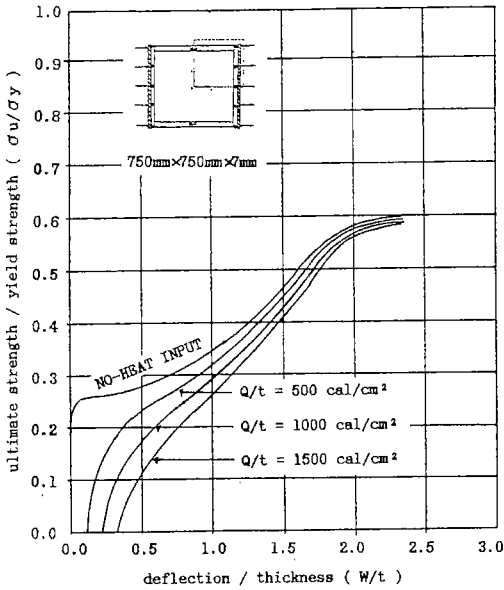


Fig. 8 Effect of welding heat input(b/t=108.57)

## 6. 결론

이상에서와 같이 본 연구에서는 용접판의 잔류 응력 및 변형 등에 대해서 알아보고 이를 이용한 최종 강도 해석을 수행하였다.

본 연구의 결과로써 평판의 잔류 응력 및 변형에 대해서 해석이 가능하며 이의 결과는 다른 결과와 비교적 잘 일치한다.

일정량의 초기 변형을 갖는 평판의 최종 강도 해석을 반복 수행함으로써 이들이 최종 강도에 미치는 영향을 조사하였으며, 이를 이용 용접 초기 변형이 있는 경우에 대해서 최종강도 해석을 수행하였다. 또한 이러한 연구의 결과로써 용접 초기 변형과 잔류 응력이 최종 강도에 미치는 영향을 알 수 있게 되었다. 특히 좌굴강도에 큰 영향을 미친다.

## 참고문헌

- 1) 장창두, 김병일, "선상가열에 의한 판굽힘 변형에 관한 연구", 대한조선학회 춘계연구발표회 논문집, 1993. pp. 188-194.
- 2) 김병일, 장창두, "판구조물의 열탄소성 해석", 대한조선학회 논문집 제34권 1호, 1997. pp. 68-76.
- 3) C. L. Tsai, S. C. Park and W. T. Cheng, "Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure", Welding Research Supplement, 1999. pp. 156-165.
- 4) Fujita, Y. and Nomoto, T., "Studies on Thermal Elasto-Plastic Problems(1st Report)", *Jour. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 130, 1972, pp. 183-191(in Japanese).
- 5) Satoh, K., "A Note on Heat Conduction by Moving Heat Source", *Jour. of the Japanese Welding Society*, Vol. 36, No. 2, 1967(in

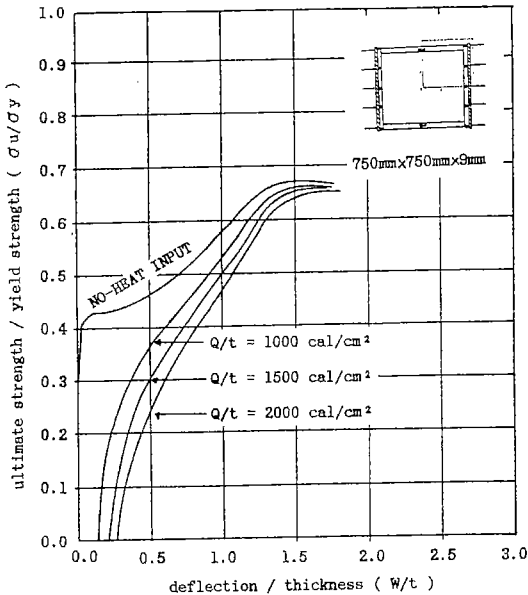


Fig. 9 Effect of welding heat input(b/t=84.44)

- Japanese).
- 6) Fujita, Y., Nomoto, T. and Hasegawa, H., "Studies on Thermal Elastic - Plastic Problems (3rd Report)", *Jour. of the Society of Naval Architects of Japan*, No. 144, 1978(in Japanese).
  - 7) Tall, L., "Residual Stresses in Welded Plates - A Theoretical Study", *Welding Jour.* Vol. 43, 1964, pp. 10-23.
  - 8) Nomoto, T., Ohmori, T., Satoh, T., Enosawa, M., Aoyama, K. and Saitoh, M., "Development of Simulator for Plate Bending by Line-Heating", *Jour. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 168, 1990, pp. 527-535(in Japanese).
  - 9) Ueda, Y., Nakacho, K. and Yuan, M., "Application of FEM to Theoretical Analysis, Measurement and Prediction of Welding Residual Stresses", *Trans. of the Japanese Welding Research Institute*, Vol. 20, No. 1, Welding Research Institute of Osaka University, 1991.
  - 10) 佐藤和男, 平板の溶接變形およびその壓縮強度に関する研究, 東京大學修士學位論文, 1978.
  - 11) 佐藤, 寺崎, "構造用 材料の 溶接變形におよぼす 溶接諸條件の 影響に 關する 研究, 溶接學會誌 45-1, 1976.
  - 12) Press, W. H. and Flannery, B. P., *Numerical Recipes - The Art of Scientific Computing*, Cambridge, 1986.