

研究論文

大韓熔接學會誌  
第11卷第4號 1993年12月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.11. No.4, Dec., 1993

## 厚板熔接部の 應力除去 熱處理時の 力學的 舉動에 關한 研究

방 한 서\*

### A Study on the Mechanical Behavior of Welded Parts in Thick Plate during Post Welding Heat Treatment

H. S. Bang\*

**Key Words** : Three-dimensional Thermal-Elasto-Plasto-Creep(3차원 열탄소성크립), Post Welding Heat Treatment(용접후열처리), Reheating Crack(재열균열), Creep Strain Accumulation(크립변형도 누적), Stress Relief Annealing(응력제거 열처리), Mechanical Behavior(역학적 거동), Welding Residual Stress(용접잔류응력)

#### Abstract

Recently, several high-tensile steels(e.g. 80kg and above,  $2^{1/4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ ) having good quality to high temperature and pressure-resistance are widely used to construct petroleum-plant and pressure vessel of heat or nuclear-power plant.

However, in the steels, reheating crack at grain boundaries of the heat affected zone (HAZ) occurs during post welding heat treatment(PWHT) to remove welding residual stress.

In order to study theoretically the characteristics of reheating crack created by PWHT, the computer program of three-dimensional thermal-elasto-plasto-creep analysis based on finite element method are developed, and then the mechanical behavior(history of creep strain accumulation and stress relaxation, etc)of welded joint in thick plate during PWHT is clarified by the numerical results.

\* 정희원, 조선대학교 공대 선박해양공학과

\*\* 이 논문은 1992년도 교육부지원 학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

### 1. 서론

보통, 용접부에서의 용접잔류응력의 輕減 및 除去와 용접부의 材質의 軟化를 目的으로 여러종류의 熱處理가 行하여진다. 그중에서도 용접부의 일부 또는 機器全體를 高溫으로 加熱 및 保持(Holding)에 의하여 殘留應力을 緩和하는 소위 熔接後熱處理(PWHT: Post Welding Heat Treatment)가 광범위하게 사용되어지고 있다. 내열 및 내부식성에 뛰어난 Cr-Mo강이 석유정제용 플랜트 및 壓力容器材料로서 널리 사용되어진다. 그러나, 이 Cr-Mo鋼의 경우에 있어서의 용접후열처리는 용접부의 性能을 높이는 것이 목적임에도 불구하고, 이 후열처리에 의하여 균열(Crack) 즉, 再熱균열(Reheat crack)이 발생되어지는 경우가 있다<sup>1-3)</sup>. 이와같은 문제에 대하여 力學的 觀點에서 再熱균열이 발생하는가 하지않는가를 判定하기 위하여서는 크립변형도(Creep Strain) 累積履歷과 용접잔류응력의 緩和履歷등의 力學的 舉動을 아는것이 매우 중요하다.

이상의 역학적특성을 究明하기위하여 3次元 熱彈塑性 Creep解析理論을 有限要素法에 필요한 式으로 定式化<sup>4)</sup>함을 도모함과 아울러 컴퓨터 프로그램을 완성하였다. 따라서, 本 研究에서는 먼저 3次元 熱彈塑性 解析에서 구하여진 熔接殘留應力을 初期應力으로하여 3次元 熱彈塑性 크립(Creep)解析을 수행하였다. 解析결과로부터 PWHT 時 力學的 舉動을 밝히고자한다. 더우기 PWHT 後의 殘留應力을 간단히 推定하는것을 目的으로 만들어진 1軸의 近似推定法<sup>5)</sup>에 의하여 구하여진 結果 및 2次元 平面變形 熱彈塑性 크립해석 결과와 3次元 解析結果를 비교 연구하여 이들(1次元 및 2次元) 結果가 가지고 있는 역학적의의를 3次元 解析結果를 基本으로하여 분명히 하였다. 또한, 3次元 解析結果로부터 크립변형도(Creep strain)의 累積 및 용접후열처리 後의 殘留應力分布의 特徵을 밝히고자 한다. 또한 크립변형도의 累積과 應力완화특성, 나아가서 母材의 크립특성이 應力완화에 미치는 影響등을 究明하고자 한다.

### 2. 解析모델 및 크립速度

해석모델은 Fig.1에 나타난 것처럼 길이 L=600

mm, 寬이 B=300mm, 두께 t=90mm 이고 모델의 윗 表面中央部에 길이 l=100mm, 寬이 b=8mm, 깊이 d=5mm의 홈에다 서브머지드 아크용접을 길이방향으로 1패스 수행하는것으로 하였다. 입열량 Q=34 kJ/cm, 열효율 η=0.9, 용접속도 v=33 cm/min으로 하였다.

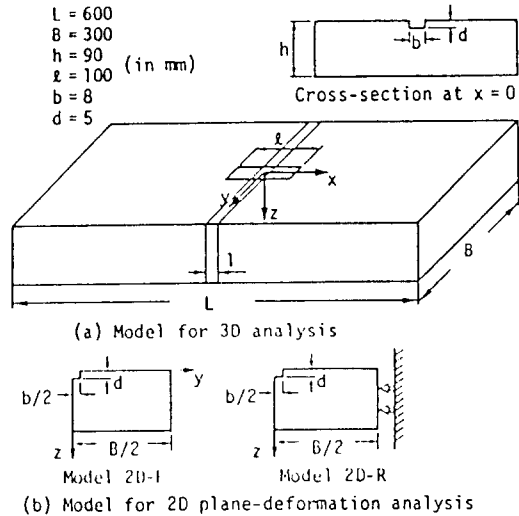


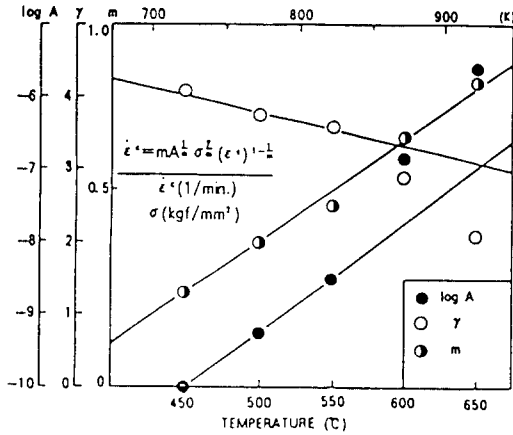
Fig.1 Model for Analysis

용접후열처리 조건은 용접후열처리 중에는 새로운 열응력이 발생되지 않도록 試驗體全體가 일정하게 온도가 上昇하도록 昇溫速度를 100°C/h로 하였다. 또한 保持溫度는 600°C로 하고 保持時間은 1시간 및 3시간 두가지의 경우로 하였다. 재료는 2<sup>14</sup> Cr-1 Mo鋼을 사용하였으며, 강재의 물리정수 및 기계적 諸성질의 온도의존성 및 熱彈塑性 크립해석에서 사용한 크립정수를 Fig.2에 나타내었다. 또한, 3차원 熱彈塑性 크립해석에서 사용한 크립法則은 遷移크립速度가 定常크립速度보다 클 경우에는 아래식에서 나타낸 變形度硬化法則(遷移크립法則)을 이용하였다.

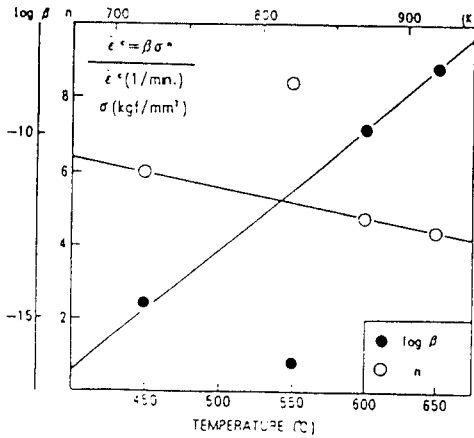
(1) 천이 크립法則

$$\{\dot{\epsilon}^c\} = 3/2m A^{1/m} \bar{\sigma}^{n/m} (\bar{\epsilon}^c) \{\sigma^c\} \quad (1)$$

또한, 천이크립속도가 정상크립속도보다 작게된 後는 다음식의 정상크립法則을 사용하였다.



a) Strain-hardening creep law



b) Power creep law

Fig.2 Creep Coefficient of 2<sup>1/4</sup>Cr-1Mo Steel

(2) 정상 크립法則

$$\{\dot{\epsilon}^0\} = 3/2 \beta \sigma^n \{\sigma'\} \quad (2)$$

여기서,  $\{\dot{\epsilon}^0\}$  : 크립변형도속도,  $\bar{\epsilon}^0$  : 상당크립변형도,  $\{\sigma'\}$  : 편차응력,  $\bar{\sigma}$  : 재료의 상당 응력이며 A, m,  $\gamma$ ,  $\beta$ , n은 물리적 정수이다. (Fig.2 참조) 또한, 400°C 이하의 온도역에서는 크립 변형도 (Creep Strain)가 너무나 적어서 400°C 이하에서는 크립변형도가 발생하지 않는것으로하였다. 더우기 용접금속, 열영향부 및 모재의 크립속도는 전부 동일하게 취급하였다. 또한, 일련의 해석은 有限要素法을 사용하였다.

3. 3次元 熱彈塑性 및 3次元 熱彈塑性 크립해석 結果

3.1 3次元 熱彈塑性 해석 結果

3차원 열탄소성 해석에 의하여 구해진 용접금속 (y=3, z=8mm)의 용접線을 따른(x방향) 용접잔류응력 및 잔류소성변형도의 分布를 Fig.3에 나타내었다. 또한 중앙횡단면(x=0, yz면의 y=3mm에서의 판두께에 따른 용접잔류응력분포 및 잔류 소성변형도분포를 Fig.4에 나타내었다. Fig.3 및 Fig.4의 용접잔류응력을 初期 熔接殘應力으로하여 용접후열처리 (일명, 응력제거열처리)를 하는것으로 하였다.

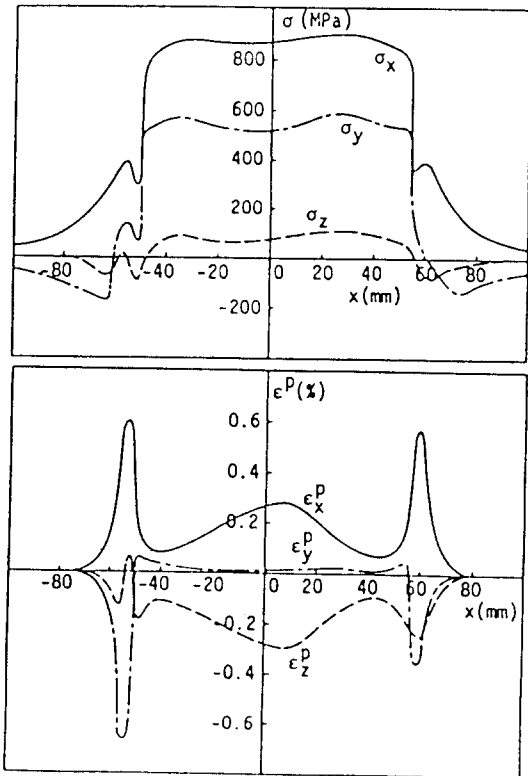


Fig.3 Distribution of Welding Residual Stress and Plastic Strain along the Weld Line

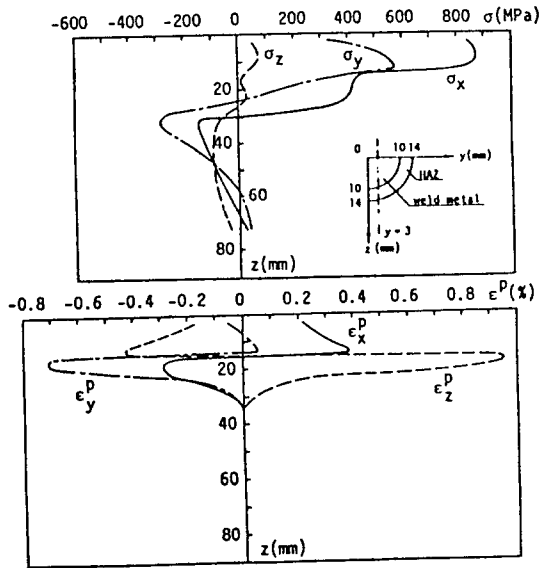


Fig.4 Distribution of Welding Residual Stress and Plastic Strain on Z-axis

### 3.2 3次元 熱彈塑性 크립해석 結果

3次元 熱彈塑性 크립해석에 의하여 얻어진 용접 후열처리 後의 殘留應力 및 殘留크립변형도의 용접선에 따른 분포를 Fig.5에 나타내었다. 累積크립변

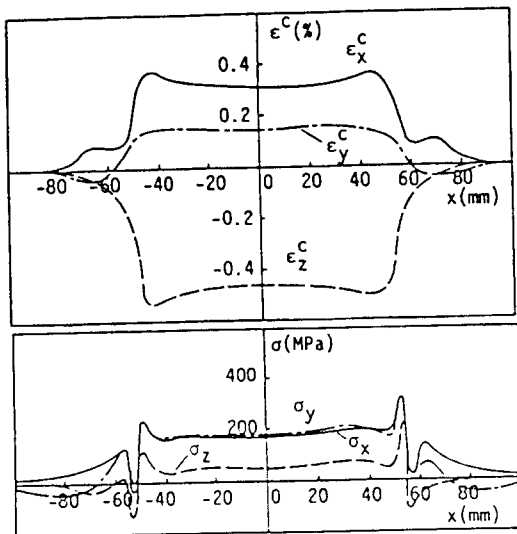


Fig.5 Distribution of Creep Strain and Stress along Weld Line after PWHT

형도 성분중에서 용접선방향  $\epsilon_x^c$ , 용접선직각방향  $\epsilon_y^c$  및 판두께방향  $\epsilon_z^c$ 의 용접선에 따른 분포는 용접선에 걸쳐 거의 일정하게 나타난다.

우선 크립변형도성분  $\epsilon_x^c$  및  $\epsilon_y^c$ 에 주목하면 이들은 어느것이나 양의 값이므로 용접후열처리에 의하여 용접선방향응력성분  $\sigma_x$ , 용접선직각방향응력성분  $\sigma_y$ 는 크게 완화되어진다. 이것에 반하여 판두께방향 크립변형도성분  $\epsilon_z^c$ 는 매우 큰 음의 값인데도 불구하고 잔류응력성분  $\sigma_z$ 은 매우 조금 완화하고 있다. 이 현상으로부터  $\epsilon_z^c$ 가 매우 큰 음의값이 나타난 이유를 생각하여보면 크립변형도는 비압축성으로서 취급되어 있기 때문이다. 즉, 체적일정의 조건을 만족시키기 위하여 역학적구속도가 가장 약한 판두께 방향에 큰 음의 값이 발생되어진다.

PWHT에 의하여 발생된 중앙횡단면( $x=0, yz$ 面)에서의  $y=3mm$ 의 판두께에 걸친 상당크립변형도  $\bar{\epsilon}^c$ , 각 크립변형도성분의 과도 및 累積값을 Fig.6에 나타내었다. 또한 PWHT중의 판두께에 따른 상당응력  $\bar{\sigma}$ , 각응력성분의 過渡 및 PWHT 後의 잔류응력분포를 Fig.7에 나타내었다.

여기서 Fig.7에 나타난 과도응력분포이지만 보통 온도상승에 따른 탄성계수  $E$ 는 저하한다. 이때문에 크립변형도는 생성되지 않아도 응력은 작아진다. 그러나 여기에서는 크립변형도의 累積에 따른 응력완화이력을 보다 鮮明하게 하기위하여 室溫에서의 탄성계수  $E_R$ 을 이용하여 아래식에서 표현한것처럼 온도  $T$ 에서의 응력  $\sigma_T$ 을 수정하였다.

$$\{\sigma\} = (E_R/E_T) \{\sigma_T\} \quad (3)$$

여기서,  $E_R$  : 실온에서의 탄성계수

$E_T$  : 온도  $T$ 에서의 탄성계수

本 研究에서는  $400^\circ\text{C}$ 이하에서는 크립변형도가 발생되지 않은것으로 하였으며  $400^\circ\text{C}$ 에서의 응력분포는 용접잔류응력과 동일하다고 간주하였다. 이하에서는 해석결과에 주목하여 용접후열처리중에서 응력완화특성 및 상당크립변형도의 累積特性을 고찰하였다.

### 3.3 크립변형도의 累積과 應力緩和特性

本 절에서는 Fig.6 및 Fig.7에 의거하여 크립변형도의 누적 및 응력완화특성에 대하여 고찰하고자한

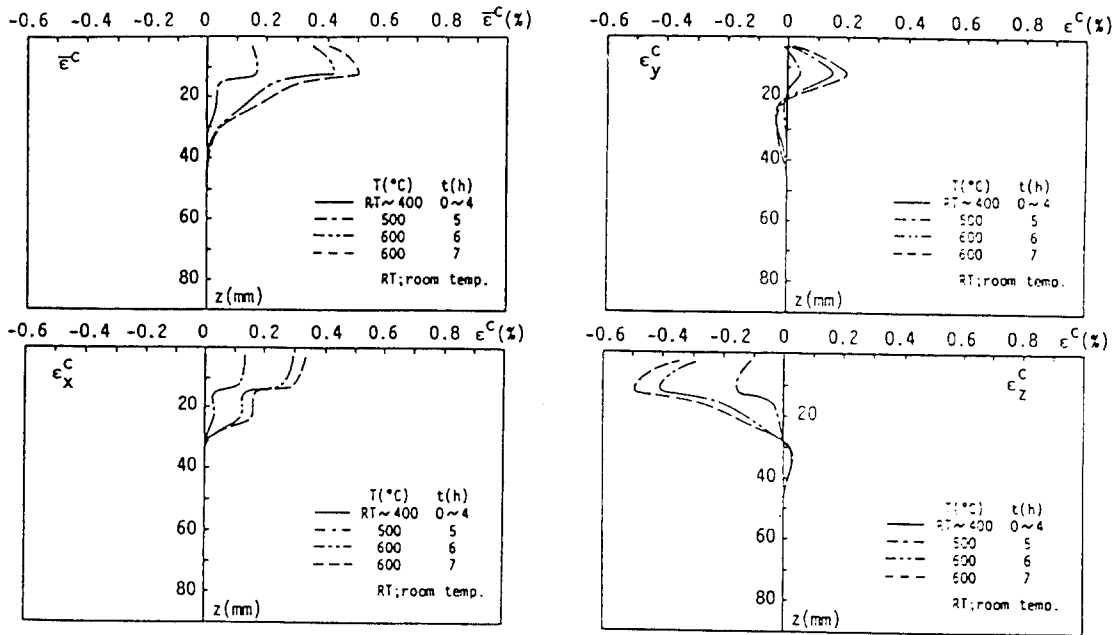


Fig.6 Distribution of Creep Strain along Z-axis during PWHT(at middle section)

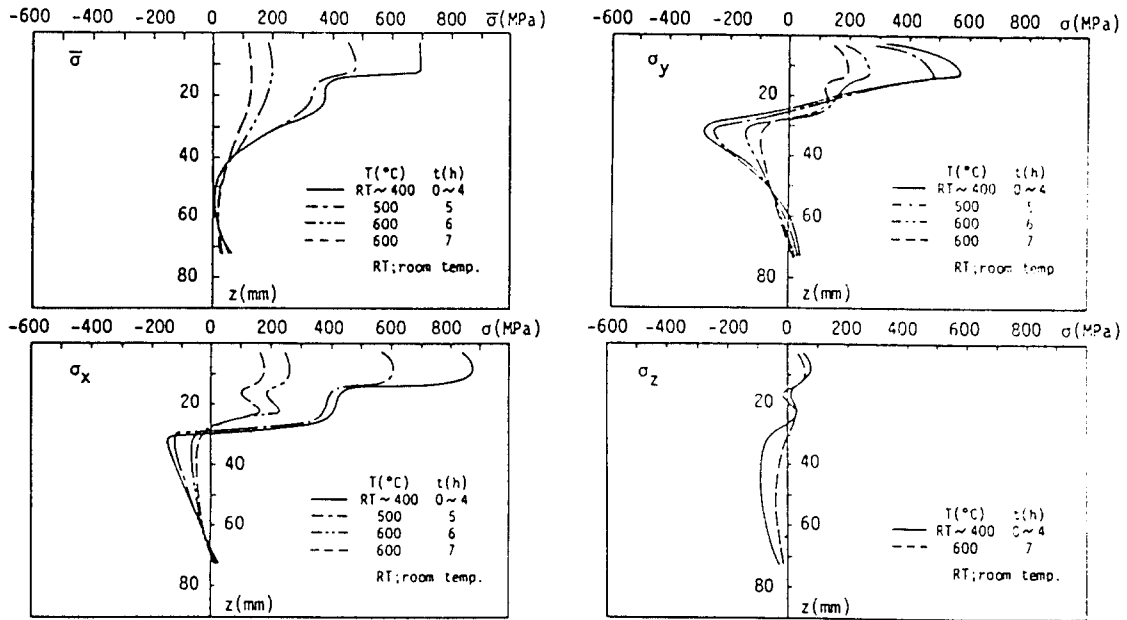


Fig.7 Distribution of each Stress on Z-axis during PWHT(at middle section)

다.

먼저 상당크립변형도  $\bar{\epsilon}^c$  및 상당응력  $\bar{\sigma}$ 의 過渡分布에 주목한다. 3次元 熱彈塑性 해석 결과에 의하면 용접잔류상당응력  $\bar{\sigma}$ 는 용접금속 및 열영향부에서 700MPa, 열영향부에 인접한 모재에서 380 MPa(어느 것이나 재료의 항복응력과 같다)이다. 한편 크립속도  $\bar{\epsilon}^c$ 는 상당응력  $\bar{\sigma}$ 의 4-6승에 비례한다.(Fig.2 참조) 따라서, 모재에 발생하는 크립변형도는 용접금속 및 열영향부의 것보다 1/10 이하로 된다.

이때문에 PWHT의 초기에서의 응력완화는 용접금속 및 열영향부에서 현저하게 나타나며 드디어 용접금속 및 열영향부와 모재와의 응력차가 없어진 이후는 전체적으로 응력완화가 이루어진다.

다음으로 各成分에 관해서 주목한다.

크립변형도 증분( $\Delta \epsilon^c$ )은 偏差應力 $\{\sigma\}$ 에 비례함을 알 수 있다. 즉 각각의 크립변형도성분의 증분은 다음식처럼 된다.

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_x^c &\propto 2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z \\ \Delta \epsilon_y^c &\propto 2\sigma_y - \sigma_x - \sigma_z \\ \Delta \epsilon_z^c &\propto 2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y \end{aligned} \quad (4)$$

熱彈塑性 해석결과에 의하면 용접금속 및 열영향부에 발생하는 용접잔류응력성분  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 의 크기는  $\sigma_x > \sigma_y, \sigma_z \approx 0$ 의 순서이다.(Fig.3, Fig.4) 따라서, 크립의 초기(Fig.6 : 昇溫 過程  $T=400-500^\circ\text{C}$ )에서 크립변형도 성분의 증분  $\Delta \epsilon^c$ 는 식(4)로부터 용접선방향성분  $\Delta \epsilon_x^c > 0$ , 용접선직각방향성분  $\Delta \epsilon_y^c \approx 0$ , 판두께방향성분  $\Delta \epsilon_z^c < 0$ 으로 된다. 따라서  $\Delta \epsilon_x^c$ 의 누적값  $\Delta \epsilon_x^c$ 는 양의 값으로 증가되어지며 결론적으로 용접선방향응력성분  $\sigma_x$ 는 아주크게 완화되어진다.(Fig.2.7) 한편  $\Delta \epsilon_y^c$ 의 누적값  $\Delta \epsilon_y^c$ 는 거의 증가하지 않기(Fig.6)때문에 용접선직각방향응력성분  $\sigma_y$ 는 그다지 완화가 일어나지 않고 있다.(Fig.7)

다음으로  $T=500^\circ\text{C}$ 에서는  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 와의 차이가 없어지고(Fig.7)  $T=500-600^\circ\text{C}$ 에서는 크립변형도 증분이  $\Delta \epsilon_x^c > 0, \Delta \epsilon_y^c > 0$ 으로 된다.  $\sigma_x$  및  $\sigma_y$ 는 매우크게 완화되어진다.(Fig.6)

한편 昇溫 및 保持過程에 관계없이  $\Delta \epsilon_z^c$ 의 누적값  $\epsilon_z^c$ 는 매우 큰 음의값을 나타낸다.(Fig.6) 전향에서 언급하였지만 큰 음의값을 갖는  $\epsilon_z^c$ 가 발생되어지는 理由는 역학적拘束度가 가장 약한 판두께 방향으로

體積一定의 조건을 만족하기 위하여 발생되어진 것이다. 이때문에 큰 음의값을 가지는  $\epsilon_z^c$ 가 발생됨에도 불구하고 판두께 방향의 응력성분  $\sigma_z$ 가 크게 완화되지 않았다고 사료된다.

그런데 용접금속 및 열영향부에 발생하는 용접잔류응력성분중에서 용접선방향성분  $\sigma_x$ 의 완화정도에 비하여 용접선직각방향성분  $\sigma_y$ 의 응력완화는 그다지 크지 않다. 앞에서 언급한 용접금속 및 열영향부에 크립변형도의 누적이 현저하게 나타난 이유는  $\sigma_y$ 가 완화되기 어렵기 때문에 일어난 것이라고 생각된다.

또한 昇溫 및 保持過程에 관계없이 응력의 분포 현상은 변화하지 않은 상태로 응력완화가 이루어진다. 또한 熱彈塑性 크립해석에서는 PWHT중 소성 변형도는 생성되지 않았다.

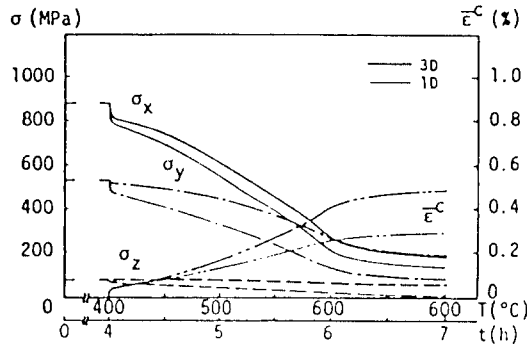
이상에서처럼 PWHT 時의 역학적거동 즉 크립변형도의 누적 및 응력완화는 용접잔류 상당응력  $\bar{\sigma}$ , 용접잔류편차응력  $\{\sigma\}$ 의 크기(多軸效果)의 영향을 크게 받으며 응력은 自己平衡을 하기때문에 모재의 응력완화특성에도 주목할 필요가 있다. 그 현상에 관하여서는 다음절에서 상세히 논하겠다.

## 4. 고찰

本 研究에서는 3次元 해석결과를 기본으로하여 1軸의 근사식 및 2次元平面變形解析結果를 비교하여 응력완화 및 크립변형도의 累積에 영향을 미치는 力學的特性 및 力學的相連點에 관하여 고찰하고자 한다. 또한 앞에서 언급한 결과로부터 용접금속과 열영향부에서의 용접후 열처리시 역학적 거동에 관하여서는 i) 용접잔류상당응력의 크기, ii) 용접잔류응력의 性分比 즉 多軸效果, iii) 응력의 평형(모재의 응력완화특성) 이상의 3개항이 커다란 영향을 가지고 있으므로 이와같은 관점을 염두에 두고 고찰을 수행하고자 한다.

### 4.1 3次元 結果와 1軸 近似結果와의 比較

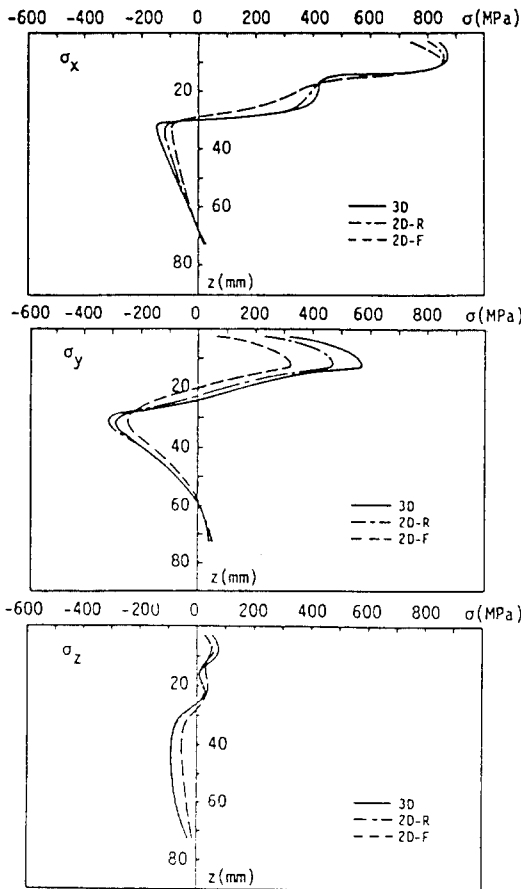
3次元 熱彈塑性 크립해석에 의하여 구하여진 용접금속( $y=3, z=8\text{mm}$ )에서의 응력완화이력을 實線으로 Fig.8에 도시하였다. 또한 용접금속의 용접잔류상당응력(700MPa)을 초기응력하여 變溫응력제거시



**Fig.8** Comparison of One-Dimensional Analysis (1D) with Three-Dimensional one(3D) on Stress and Equivalent Creep Strain in Weld Metal(at  $y=3, z=8\text{mm}$ ) during PWHT

험을 행한 결과로부터 3次元 해석에 의하여 구하여진 용접잔류응력의 성분비에 따라 용접후열처리중에서 各應力成分을 구하였다. 이와 같이하여 구하여진 1軸근사식의 결과를 그림에 나타내었다. 각 용접잔류 응력성분중에서 가장 큰 용접선방향성분  $\sigma_x$ 의 응력 완화이력은 잘 일치하고 있지만 용접선직각방향응력  $\sigma_y$  및 상당크립변형도  $\epsilon_c$ 는 1軸근사식으로는 精度가 나쁘다는것을 알수있다. 그러나 용접후열처리조건의 選定 즉 승온과정 및 保持時間등을 결정할때는 1軸의 近似式은 유효하다고 생각되어진다.

#### 4.2 3次元 結果와 平面變形 解析結果 와의 比較

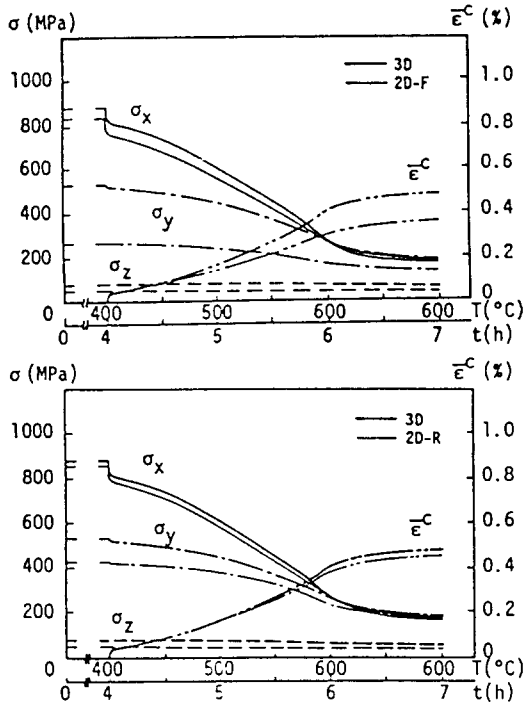


**Fig.9** Comparison of Plane Deformation Analysis (2D) with Three-Dimensional one (3D) on Welding Residual Stress on Z-axis(at middle section)

3次元 해석모델의 중앙( $x=0$ ) 횡단면( $yz$ 면)에 대하여(Fig.1(b); 모델 2D-F) 우선 2次元 平面變形 熱彈塑性 해석을 하였다. 판두께에 따른 용접잔류응력 성분을 破線으로 Fig.9에 나타내었다. 이것을 초기응력으로 하여 2次元 平面變形 熱彈塑性크립해석을 하였다.

용접금속( $y=3, z=8\text{mm}$ )에 대한 용접후열처리 중에서의 응력완화이력을 細線으로 Fig.10(a)에 도시하였다. 또한 그림속의 굵은선은 3차원 해석결과이다. 전항의 1軸 근사추정법과 같이 해석모델 2D-F에 대한 平面變形 熱彈塑性 크립해석 결과에 의하면 상당크립변형도  $\epsilon_c$  및 용접후열처리 後의 잔류응력 성분중에서 용접선직각방향성분  $\sigma_y$ 의 推定精度가 떨어진다. 이  $\sigma_y$ 의 추정정도가 나쁜 이유는 열원의 이동효과를 고려한 3차원 문제에서는 주목점 후방의 기용접부가 주목점의 收縮을 구속하지만 모델 2D-F에서는 기용접부의 효과가 고려되지 않는다. 이것이 기인하여 용접잔류응력성분  $\sigma_y$ 가 3차원 해석결과와 비교하여 작아짐(Fig.9)을 알수있다. 따라서 Fig.1(b)의 모델 2D-F에 나타난것처럼 기용접부가 용접금속부의 수축을 구속하는 효과를 간단히 具現할 목적으로 端部에서  $y$ 方向의 變位를 구속한 모델에 대한 平面變形 熱彈塑性 크립해석을 수행하였다. 판두께에 따른 용접잔류응력 분포를 Fig.9에 一点鎖線으로 표시하였다. 또한 이것을 초기응력으로하여 平面變形 熱彈塑性 크립해석을 수행하였다. 구하여진 용접금속( $y=3, z=8\text{mm}$ )에 대한 용접후열처리중에서의 응력완화이력을 細線으로 Fig.10(b)에 나타내었다. 그림속에서의 굵은선은 3차원해석결과이다.

3차원문제를 2차원문제로서 취급할경우는 3차원



**Fig.10** Comparison of Plane Deformation Analysis (2D) with Three-Dimensional one(3D) on Stress and Equivalent Creep Strain in Weld Metal(at  $y=3$ ,  $z=8$ mm) during PWHT

문제의 역학적구속도를 어떻게 精度 좋게 具現할수 있는가가 결과의 신뢰성을 결정한다. 따라서 3차원 해석에서 구하여진 용접잔류응력의 具現精度가 높은 모델 2D-R(Fig.9)에서는 용접후열처리에 수반되는 응력완화이력, PWHT후의 잔류응력 더우기 상당크립변형도의 累積  $\bar{\epsilon}_c$  등 平面變形 크립해석으로부터 程度 좋게 추정할수있다.

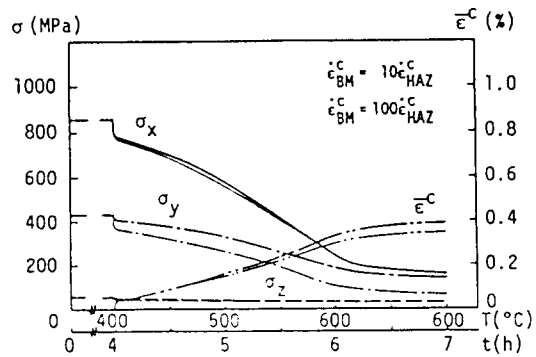
이상의 결과로부터 PWHT중의 역학적거동 및 PWHT후의 크립변형도의 누적 및 잔류 응력등을 2차원 평면변형해석으로 추정할 경우 3차원문제에서 용접잔류응력을 어떻게 충실히 표현할수있는가가 정도를 결정하는 인자이다. 왜냐하면 용접잔류응력의 분포와 크기가 3차원문제의 역학적구속도를 나타내는 하나의 力學的指標로 되어있기 때문이다.

### 4.3 모재의 응력완화 특성의 影響

크립변형도의 누적 및 응력완화를 고려할 경우

외적 구속이 없는 용접부에 발생하는 용접잔류응력 및 PWHT중에서의 응력은 自己平衡을 유지하면서 變化한다. 이와같은 현상때문에 모재의 크립특성에도 주목할 필요가 있다.

여기서는 3차원 해석 결과를 程度 좋게 표현한 2차원 모델 2D-R을 사용하여 용접금속과 열영향부의 크립속도는 동일하게( $\epsilon_c WM = \epsilon_c HAZ$ )하고 모재의 크립속도  $\epsilon_c BM$ 을  $\epsilon_c HAZ$ 의 10배 또는 100배로 변화시켜 평면변형 열탄소성크립해석을 수행하였다. 상당크립변형도  $\bar{\epsilon}_c$  및 各應力成分  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  및  $\sigma_z$ 의 응력완화이력을 Fig.11에 나타내었다. 해석결과에 의하면 모재의 크립특성이 좋으면  $\bar{\epsilon}_c$ 의 누적은 작고 또한 용접선직 각방향응력성분  $\sigma_y$ 의 완화는 현저하게 나타난다. 다시말하면 모재의 크립특성이 나쁘면 용접금속 및 열영향부에 크립변형도의 누적이 현저하게 발생한다는 것이 증명된다.



**Fig.11** History of Stress Relaxation and Accumulation of Equivalent Creep Strain(at  $y=3$ ,  $z=8$ mm)

## 5 결론

本 研究에서 얻어진 주요한 결과는 아래와 같다. 3次元 解析結果에 의하면

- 1) 昇溫 및 保持過程에 관계없이 응력의 분포형상은 변하지 않은 상태에서 응력은 완화 되어진다.
- 2) 응력제거 후열처리 初期에서의 응력완화는 용접금속 및 열영향부에서 현저하게 커지고, 드디어 용접금속 및 열영향부와 모재와의 응력의 차가 없어진 후에는 전체적으로 일정하게 응력이 완화된다.
- 3) 용접금속 및 열영향부는 모재보다 相當크립변형도(Creep Strain)  $\epsilon_c$ 의 累積이 현저하게 크다.



3次元 解析結果와 1軸 近似推定法 및 2次元 平面 變形解析結果를 비교 검토한 결과에 의하면

4) PWHT 조건의 선정 즉, 昇溫速度, 保持溫度 및 保持時間등을 일축近似結果로부터 예측할수 있다.

5) 3次元 크립해석에서는 용접선직각방향성분  $\sigma_y$ 의 응력완화가 적었다. 이 때문에 PWHT 중의 상당응력  $\sigma$ 는 그 자체가 크기가 작아지지 않는반면 상당크립 변형도  $\bar{\epsilon}_c$ 가 누적되기 쉬웠다.

6) 모재의 응력완화 특성이 나쁘면 용접금속 및 열영향부의 상당크립변형도가 누적되기 쉽다.

따라서 PWHT 중의 역학적거동 및 PWHT 후의 잔류응력 및 잔류크립변형도를 평면변형해석 등으로부터 예측하는 경우에는 용접에 의한 잔류응력을 어떻게 충실히 표현할수 있는가가 精度를 결정한다.

### 참 고 문 헌

1) T.Naiki, Y.Yamazaki, Y.Manago, H.Okabayas : Stress Relief Cracking in Heat-Affected Zone(I), Journal of Japan Welding Society, 33권 9호(1964),

710~717

2) S.Kanazawa, K.Yamato, T.Takeda, K.Hasimoto : Study of Reheat Cracking in Weldment(I), Journal of Japan Welding Society, 44-10(1975), 791~798

3) R.A.Swift : The Mechanism of Stress Relief Cracking in  $2^{1/4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  Steel, Weld.J, Vol.50,5 (1971), 195~201

4) Y. Ueda, K.Fakada : Application of Finite Element Method for Analysis on Process of Stress Relief Annealing, Journal of J.W.S, 44-11(1975), 902~908

5) Y.Ueda, K.Nakacho : An Estimating Method of Reduction of Welding Residual Stress Relief Annealing(I), 1-2(1983), 174~182

6) 房漢瑞, 金裕哲 : 有限要素法에 의한 厚板熔接時의 3次元 非定常 熱傳導解析, 大韓熔接學會誌, 9-2(1991), 37~43

7) 房漢瑞 : 厚板熔接部의 力學的 特性, 大韓熔接學會誌, 10-4(1992), 250~258