

厚板 熔接部の 力學的 舉動에 關한 研究

- 有限要素法에 의한 3次元 熱彈塑性 解析 -

Study on The Mechanical Behavior of Welded part in thick Plate

- Three-dimensional Thermal Elasto-Plastic Analysis Based on F.E.M -

조선대학교 방 한서

1. 개 요

最近 石油精製를 위시한 壓力容器, 産業機器 등의 大型 鎔接 構造物의 增大에 따라 材料의 高品質化 및 厚板化가 急速히 擴大되고 있는 實情이다. 構造物의 熔接時 必然的으로 發生되어지고 熔接殘留應力은 低溫Crack의 原因이 됨과 동시에 취성 파괴, 부식 파손 및 靱性강도 등의 樣相을 變化시켜 구조물의 安全性을 현격하게 손상시킨다.

따라서 용접 수행전에 厚板 熔接部에 發生하는 복잡한 3차원적 殘留應力을 精度중 高 度 地 예측할 必要가 있다. 이 殘留應力을 이론적으로 구하기위해서는 재료의 機械的 性質의 溫度 依存性을 고려하고 온도 분포의 變化에 따른 應力 및 變形履歷을 체계적으로 추적 할 수 있는 3차원 熱彈塑性 解析이 必要하다.

지금까지, 實熔接 構造物의 殘留應力을 예측하기 위하여 많은 實驗的 研究가 보고 되고 있지만, 실험에서 계속되어지는 변형(Strain)중에는 應力에 무관계한 자유 팽창 변형과 응력 발생의 원인이되는 기계적 변형이 포함되어 있으므로 각기 분리할 必要가 있다. 그러나 熔接에서처럼 高溫度로 加熱된 경우에는 자유팽창 변형이 기계적 변형보

다 크게 될 경우도 있으므로 이와 같은 경우에는信頼할 수 있는 답을 얻기가困難하다. 또한 단순화한 해석적인 방법이나 2次元的 數值解法으로서는 厚板과 같은 3次元的 現象을 보다 精密하게 究明할 수 없다.

따라서, 厚板 熔接部の 過度的 舉動을 포함한 彈塑性 舉動을 파악하기 위하여서 위에서 말한 실험적 方法이나, 2次元的 數值解法으로는 不可能하므로 有限要素法에 의한 3次元 熱彈塑性 해석을 하여야 할 필요가 있다.

本 論文에서는, 材料의 機械的 性質(항복응력, 탄성계수, 선팽창계수)의 溫度 依存性을 고려한 3次元 熱彈塑性 해석의 理論 및 有限要素法에 必要한 式을 定式化 하였고 아울러 Computer Program을 개발 하였다.

또한 熱源의 移動效果를 고려한 3次元 非正常熱傳導 解析을 수행하고, 연이어 3次元 熱彈塑性 解析을 수행하였다. 이들 해석 결과로부터 厚板 熔接部에 발생되어지는 3次元 殘留應力과 塑性變形 分布의 特徵 및 이들의 生成 Mechanism을 밝히어 力學的 現象을 究明하고자 한다.

2. 解析 Model 및 溫度分布

해석 Model은 길이, $L = 600\text{mm}$; 넓이, $B = 300\text{mm}$; 두께, $t = 90\text{mm}$ 이고, Model의 윗表面中央部에 길이 $l = 100\text{mm}$, 넓이 $b = 8\text{mm}$, 깊이 $d = 5\text{mm}$ 의 홈에다 Submerged Arc熔接(SAW)을 길이 방향으로 1pass을 수행하는것으로 하였다. 入熱量 $Q=34000 \text{ J/cm}$ 熱效率 $\eta = 0.9$, 鎔接速度 $v = 33 \text{ cm/min}$ 로 하였다. 또한 解析 Model의 力學條件은 無限板으로 고려 될수있는 크기로 가정하였다. 材料는 軟鋼을 선택하였으며, 熱傳導 및 應力解析은 板 넓이 方向의 對稱性을 고려하여 해석 모델의 1/2에 대하여 계산을 수행하였다.

3. 有限要素法에 의한 熱彈塑性 解析의 理論

1) 彈性域

$$\{d\epsilon\} = [B]\{dw\}$$

$$\text{Total Strain의 増分 : } \{d\epsilon\} = \{d\epsilon^*\} + \{d\epsilon^T\}$$

여기서, $\{d\epsilon^e\}$: 탄성변형
 $\{d\epsilon^T\}$: 열변형

應力과 變形의 關係式

$$\{d\sigma\} = [D^e_d]\{d\epsilon\} + \left(\frac{E_d - E}{T} \frac{1}{E} \{\sigma\} - [D^e_d] \{\alpha\} \right) dT$$

2) 塑性域

Total Strain의 増分

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^P\} + \{d\epsilon^T\}$$

여기서, $\{d\epsilon^P\} = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}$: 소성변형

應力과 變形의 實係式

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} = & \left([D^e_d] - \frac{[D^e_d] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e_d]}{S} \right) \{d\epsilon\} \\ & - \frac{[D^e_d] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \left([D^e_d] \{\alpha\} - \frac{d[D^e]}{dT} [D^e]^{-1} \{\sigma\} \right) dT - \frac{\partial f_0}{\partial T} dT}{S} \\ & - [D^e_d] \{\alpha\} dT + \frac{d[D^e]}{dT} [D^e]^{-1} \{\sigma\} dT \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } S = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e_d] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} + \left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \epsilon^P} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}$$

4. 결론

本 論文은 厚板 熔接部의 力學的 特徵을 研究할 目的으로 熱彈塑性 理論에 따라 有限要素法에 의한 計算機用 3次元 Program을 개발하여 數值解析을 수행하였다. 計算 결과에 의하여 厚板熔接에 의하여 발생되어지는 3次元 殘留應力 및 塑性變形 分布의 特徵과 이들의 生成 Mechanism을 考察 하였다. 主要한 結果를 要約하면 아래와 같다.

1) 3次元 非正常熱傳導 해석에 의하면, Model의 平面 및 縱斷面에서의 온도 분포 원으로 된다. 橫斷面에서는 同心圓이되고, 각 횡단면의 板넓이 및 板두께는 溫度 上昇 및 冷却 過程에서 똑같은 溫度 履歴을 경험한다.

2) 용접급속, 열영향부(HAZ)에 발생하는 殘留應力 성분은 전체가 引張成分이며, 그 크기는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 順으로 나타났다. 또한 殘留應力의 最大값은 시험체 外表面에서 가장멀리 떨어진 HAZ에서 발생된다.

3) 彈性 및 塑性域에 관계없이, 彈塑性 暴動에서 발생하는 應力成分의 크기는 각 應力方向에서의 力學的 拘束度의 세기에 따라 判別할수있다.

4) 母材에 발생하는 應力 및 變形은 溫度 上昇 過程영향을 크게 받는다. 이 현상은 HAZ부근의 모재에서 현저하게 나타나며, 잔류응력은 온도 상승 과정에서 生成되어지는 壓縮의 等方應力의 영향을 받고, 殘留塑性變形(Rasidual Plastic Strain)은 온도 상승 과정에서 발생되어지는 壓縮의 소성변형의 영향을 크게 받는다. 이 현상이 溫度上昇過程이 存在하지 않는 熔接金屬과 크게 다른점이다.

5) 소성변형은 非壓縮性으로 假定하였으므로, 發生하는 Plastic Strain의 부호는 應力이 가장큰(力學的 拘束度가 가장큰) 方向과 應力이 가장 작은(力學的 拘束度가 가장 작은) 方向과 反對로 된다. 따라서 應力과 塑性變形的 부호는 일치하지 않는다.