

## 용접잔류 응력과 용접변형의 발생機構와 그 대책

金 永 植\*

### 1. 序 言

一般的으로 용접현상은 국부적으로 급열, 급냉 과정을 동반하기 때문에 용접施工時, 용접變形, 용접殘留應力の發生은 피할 수 없다. 용접變形과 용接殘留應力은 서로 상반되는 효과를 나타내어, 용接時의 拘束狀態가 작으면 용接殘留應力은 작게 되나 용接變形은 크게 된다. 반면, 용接金屬이 자유롭게 수축될 수 없을 정도로 構造物의 拘束狀態가 크게 되면, 용接變形은 작게 되나 용接殘留應力은 크게 된다고 할 수 있다.

용접에 이와 같이 발생하는 용接殘留應力과 變形은 용접구조물의 제작시 여러가지 障害를 誘發할 뿐만 아니고 그 構造物의 使用中에 있어서도 破壞의 發生 또는 破壞의 傳播에 直·間接的으로 기여하여 惡影響을 끼치게 된다. 용接殘留應力은 용接構造物의 疲勞強度를 低下시키거나, 脆性균열 및 應力腐蝕균열의 進展을 용이하게 하며 용接變形은 構造物의 外觀을 해치거나 局部的으로 스트레인集中을 초래하여 이 역시 脆性破壞의 原因으로 作用하여 構造物의 破壞事故를 유발할 위험성을 내포하고 있다.

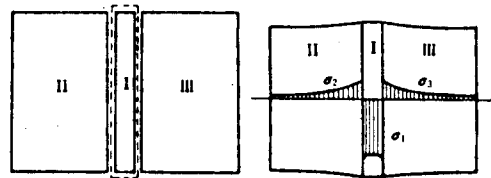
따라서 용接變形과 殘留應力을 極小化하기 위한 대책은 용接技術者로서 용接施工時 유의해야 할 가장 큰 사항의 하나라고 할 수 있다.

本稿에서는 이러한 용接變形과 殘留應力현상에 대해 그 發生機構를 金屬學的 側面에서 고찰하고 그 輕減대책에 對해서는 構造物의 形狀이나 種類에 따라 각각별개의 대책이 수립되어야 하나 여기서는 보편적인 경우에 限해 解説하고자 한다.

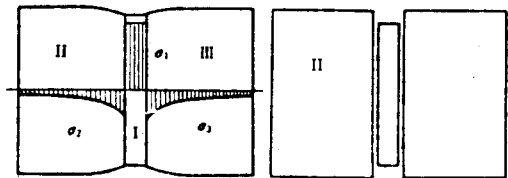
### 2. 잔류응력과 용접변형의 分類

용接殘留應力의 發生 Model을 理解하기 위해

그림 1에 表示하는 바와 같은 3個의 部材 I, II, III으로 되어 있는 構造要素를 생각한다. (a)는 이들 各 部材가 각기 別個로 分離된 상태이다. 이때 中央의 部材 I을 一定溫度까지 均一하게 加熱한다고 하면, 部材 I은 自由로 팽창하여 그 크기가 약간 크게 될 것이다. 다른 部材에 의해 구속을 받지않기 때문에 응력은 전혀 발생치 않는다. 그런데 部材 I, II, III,이 그 측면에 따라서 결합되어 있어 部材 I이 자유롭게 팽창될 수 없는 경우에는 그 構造要素에 發生하는 熱應力은 同



(a) 各 部材가 自由인 場合 (b) 各 部材를 結合하여 I만을 加熱했을 경우



(c) 冷却후의 상태 (d) 냉각후 各 部材를 分離했을 때 그림 1. 불균일한 열싸이클을 받았을 때 열응력과 잔류응력

圖(b)와 같이 部材 I에는 壓縮應力  $\sigma_1$ 이 발생하며, 部材 II와 III에는  $\sigma_1$ 과 均衡을 이루는 引長應力  $\sigma_2$ 가 發生한다. 이것은 部材 II와 III이 部材 I을 拘束하기 때문에 發生하는 현상으로 그 결과 各 部材에는 그림에는 誇張해서 표시되어 있으나 그림과 같은 變형을 수반한다.

그림 1(c)는 部材 I을 加熱 및 냉각한 후 構造要素에 發生된 應力과 變形의 狀態를 나타 낸 것이다. 應力分布는 (b)와 正反對의 형태로 되어

\* 韓國海洋大學

部材 I에 引長應力이, 部材 II와 III에는 압축應력이 잔류한다. 한편 이들 部材를 切斷分離하여 自由상태로 만들면 部材 II와 III은 원래의 상태로 되돌아 오지만 部材 I은 수축한 상태로 남는다.

熔接殘留應力の 발생은 上述한 model에서 보는 바와 같이 熔接部의 가열과 냉각에 수반하는 熱應力の 最終狀態로서 理解할 수 있다.

이때 應力の 發生에 必要한 조건으로서 構造部材間에 어떤 형태로든 拘束이 존재하지 않으면 안 된다. 이 部材에 대한 拘束에는 外部로부터 주어지는 것과 加熱, 冷却時 部材 자신, 혹은 部材 相互間에 자연적으로 생기는 것이 있다.

실제의 용접이음부에 있어서는 대부분의 경우, 外部로부터 주어지는 拘束이 있고 또한 熔接에 의한 열싸이클도 局部的이며 不均一하기 때문에 自然的으로 생기는 內的拘束이 또한 存在한다. 따라서 일반적으로 熔接部에 형성되는 잔류應력은 이러한 要因에 의해 發生하는 內的 및 外的 拘束에 의한 應力の 合成値라고 생각할 수 있다.

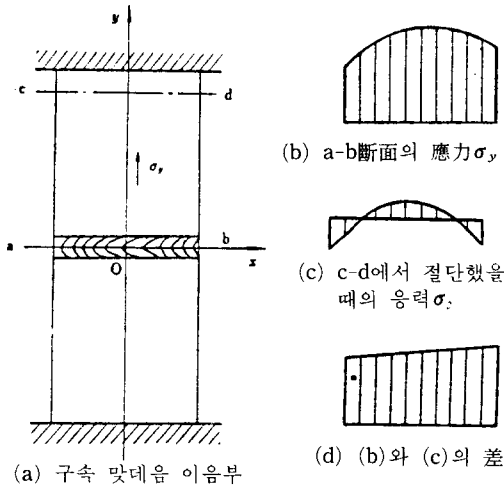


그림 2. 맞대기 용접부의 잔류응력

예를들면 그림2(a)와 같이 兩端이 拘束된 2개의 鋼板을 맞대기 용접한 경우의 殘留應力分布를 생각해보자. 간단히 하기위해 y方向의 應力  $\sigma_y$ 의 版두께에 대한 平均値에 대해서만 注目한다. x軸上에 있어서  $\sigma_y$ 의 分布는 그림 2(b)에 表示된 分布를 하고 있다.

여기서 鋼板의 벽에 고정되어 있는 부분을 절단하여 外的拘束을 除去하면, x軸上的 殘留應力은 完全히 消失되지 않고 그림 2(c)와 같은 分布가 殘留한다. 그래서 (b)에서 (c)를 뺀 나머지가

(d)로 되며 이것은 外的拘束이 存在하기 때문에 생기는 殘留應力 成分이기 때문에 이것을 外的拘束에 의한 殘留應力 成分이라고 할 수 있다.

용접부에는 殘留應力과 더불어 熔接變形이 생긴다. 實際의 熔接構造物에 생기는 熔接變形은 매우 복잡하여 간단히 區分하기는 어려우나 기본적으로 다음과 같이 分類한다. (그림 3)

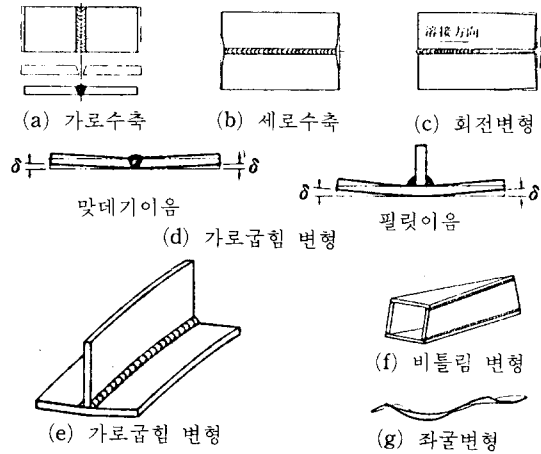


그림 3. 용접변형의 형태

- (1) 面內變形
  - (a) 가로수축
  - (b) 세로수축
  - (c) 回轉變形
- (2) 面外變形
  - (a) 가로굽힘 變形
  - (b) 세로굽힘 變形
  - (c) 비틀림 變形
  - (d) 座屈 變形

### 3. 收縮應力の 發生機構

前節에서 가열된 금속이 拘束된 상태에서 熱收縮時, 應력이 발생한다는 것을 알았으나 그 收縮應力の 發生形態는 熔接構造物의 形狀이나 冷却속도 등 各種의 조건에 의해 여러가지로 變化한다. 또한 金屬에는 變態하는 金屬과 變態를하지 않는 金屬이 있으나, 收縮應力을 고려할 경우에는 收縮率이나 彈性率, 또는 材料強度와 더불어 變態를 하는가, 하지않는가, 혹은 그 變態溫度가 높은가, 낮은가도 重要한 요소로 된다.

Austenite系 Stainless鋼이나 Al合金 등 變態하지 않는 金屬의 兩端을 그림 4와 같이 拘束하되나

용접잔류 응력과 용접변형의 발생 機構와 그 대책

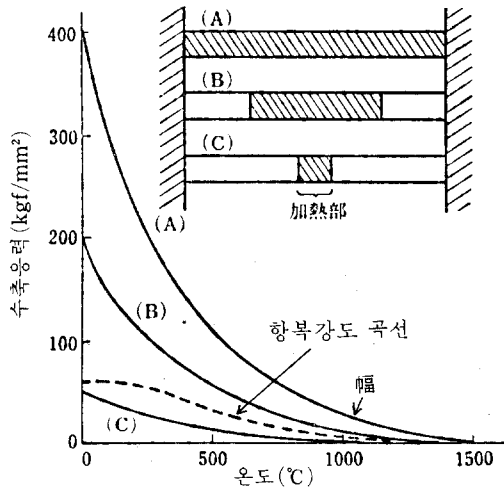


그림 4. 加熱 幅과 계산상의 수축응력곡선

서 試料의 一部 또는 全部를 融點가까이 까지 순간적으로 加熱하여, 이 냉각도중의 收縮應力에 對하여 생각해 본다.

(A)와 같이 拘束試驗片 전체가 加熱된 경우는 冷却時에도 試驗片 全體가 收縮하기 때문에, 收縮量은 커지고, 따라서 큰 收縮應力이 發生한다. 이에 대해, (B), (C)와 같이 一部分이 加熱된 경우는 加熱된 部分의 收縮率은 같다고 하더라도 加熱되지 않는 部分을 포함한 試驗片 全體의 平均收縮率은 작아지기 때문에 收縮應力도 작게되어 겉보기 상의 應力을 계산하면 그림 4와 같이 나타날 것이다. 이에 의하면 常溫에서 最高 400Kg/mm<sup>2</sup>의 應力이 發生하는 것으로 나타나 있으나, 實際로는 이와같은 應力은 發生하지 않는다. 왜냐하면 보통의 材料는 이와같은 高應力이 되기 前에 降伏이 일어나 버리기 때문이다.

지금 이 材料의 冷却途中的 降伏強度 曲線이 그림의 破線으로 表示된 바와같이 나타난다고 하면 아무리 收縮하여도 이 破線보다 높은 應力은 發生할 수 없기 때문에, 이 경우에는 A도 B도 破線에 따라 收縮應力曲線이 그려지게 된다.

以上은 變態하지 않는 材料의 경우이나 冷却中에 α鐵로부터 γ鐵로 變態하며, 그림 5와 같이 變態膨長하는 鋼의 경우는 상당히 複雜하게 된다.

그림 5의 上圖와 같이, 拘束되어 있는 試驗片의 全部 또는 一部分 融點가까이 까지 加熱되어 冷却하는 경우에 發生하는 應力은 下側의 Graph와 같이 된다.

試驗片은 加熱에 의해 팽창하지만 시험편의 兩

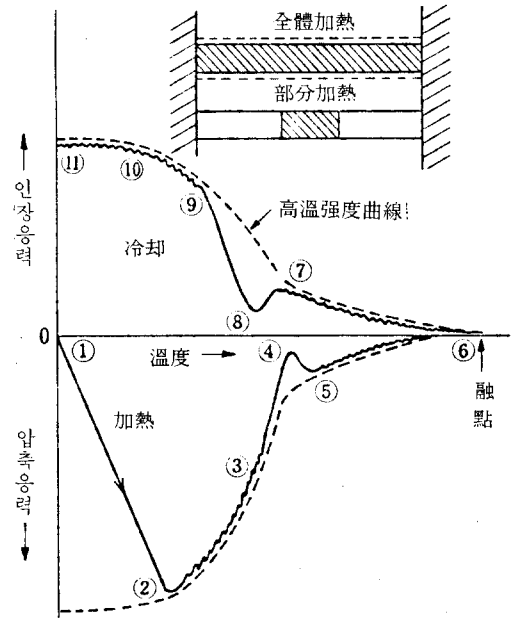


그림 5. 구속시험에 의한 압축 및 인장응력

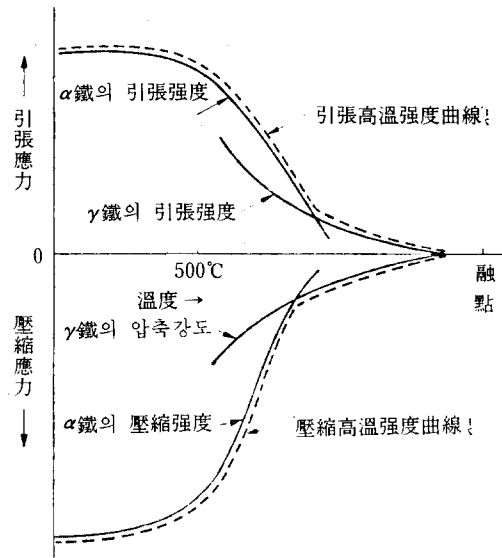


그림 6. 加熱 및 冷却中の 鋼의 強度

端은 고정되어 있기때문에 실제로는 늘어날 수가 없다. 따라서 膨張分의 伸張은 試驗片의 内部에서 壓縮스트레인으로 作用하여, 試驗片에는 壓縮應力이 發生한다.

한편 鋼의 α鐵 및 γ鐵의 強度는 그림 6의 實線과 같이 各種 다른 形態의 強度曲線을 갖고 있

다. 즉  $\alpha$  철은 500°C 이상에서 급속히 강도가 저하하는데 비해  $\gamma$  철은 고온영역에서 강도가 높고, 온도상승에 대한 강도저하의 비률도 완만하게 되는 경향이 있다. 때문에 강을 연속적으로加熱했을 때의 고온강도곡선은 그림과 같이  $\alpha$  철로부터  $\gamma$  철로 변하는 점에서 변곡점을 갖는 곡선으로 된다.

이상과 같은 고온강도곡선의特徵으로 인해 그림 5의拘束試驗片을加熱冷却時,壓縮 및膨脹스트레인에 의한 응력變化는 그림 5에表示된 바와 같이 고온강도 곡선을 따라 나타나게 될 것이다. 그림 中의 破線은 그림 6의 고온강도곡선을 나타내며 實線의 지그자그部는試驗片이壓縮, 또는引張應力에 의해塑性變形하고 있다는 것을 의미한다. 그림에서 ③-④區間은加熱時의變態開始時期로鋼이收縮하기 때문에應力이 잠시緩和되는 과정이며, ④-⑤區間은變態後의熱膨脹에 의해壓縮應力이 다시上昇하기始作하나 곧 이鋼의壓縮降伏強度에達하여 다시降伏이始作되는 과정이다.

또한 ⑦-⑧ 과정은冷却時의變態膨脹에 의해 응력이緩和되는 과정이며 ⑧-⑨區間은變態後의熱收縮에 의해 다시應力이上昇하는區間이다.

이상과 같이變態하는金屬은變態하지 않는金屬과比較하면收縮應力の發生機構가 조금 복잡하게 되나,變態時의特殊한變形을除外하면變態하지 않는金屬의 경우와 같게 생각해도 무방하다.

4. 용접잔류응력에 영향을 미치는 因子

熔接部는 그強度에比하여熱收縮量이 크기 때문에,冷却中의 상당히 많은溫度區間을 소성변형하면서收縮하고 있다는 것을前節에서 알았다. 따라서 그收縮應力の 크기는各溫度域의降伏強度에 크게依存하는 것은 당연하나高溫時의強度 또는變態中의強度는意外로複雜하다.

(1) 高溫時의 強度

그림 7은高張力鋼으로부터軟鋼까지의 5種의鋼의高溫強度를實測한 것으로變曲點을 경계로하여  $\alpha$  철과  $\gamma$  철의高溫強度의傾向의差가 확실히 나타나 있는 것을 볼 수 있다.

이러한高溫強度는스트레인速度에 의해 달라

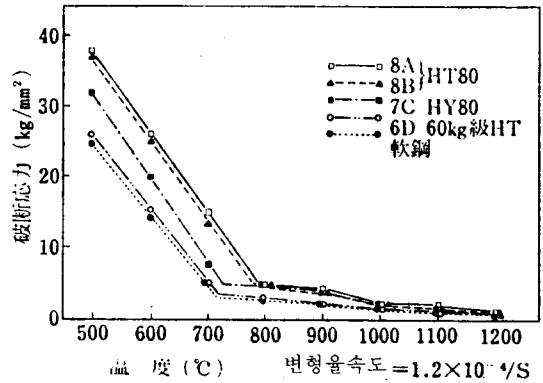
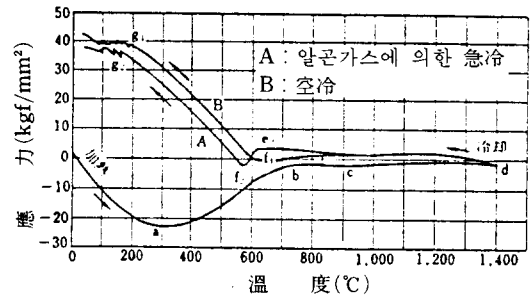


그림 7. 各種鋼의 냉각도중의 高溫強度

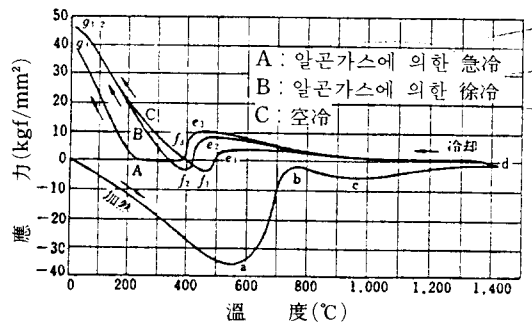
지나, 이러한 差異는 常溫에서의 殘留應力에 거의 영향을 미치지 않을 것이기 때문에變態溫度以下の低溫에서의 거동이 중요하게 된다.

(2) 相變態變動

變態時에는變態膨脹外에變態超塑性現象에 의해 일시적으로 응력이 저하하는 현상이 나타나나, 이 현상은熔接殘留應力이나, 용접변형에 크게 영향을 끼친다.



(a) 軟鋼



(b) HT 80

그림 8. 구속된軟鋼과 HT80고장력강棒에 생긴熱應力

表 1. 鋼의 殘留應力에 미치는 相變態의 영향

材 料	降 伏 應 力	殘 留 應 力	冷角中の 相變態特性*	
	Kg/mm <sup>2</sup>	Kg/mm <sup>2</sup>	變態溫度범위	변태에 의한 팽창스트레인(%)
軟鋼	34.8	38.2	780~540	0.46
HT70	60.5	47.1	550~275	0.67
HT80	77.0	43.1	520~250	0.72
9%Ni鋼	78.8	19.0	400~180	0.75

\* Dilatometer에 의한 測定, 最高加熱溫度 1,350°C, 800°C~500°C間的 冷却時間 6 sec

그림 8 (a), (b)는 軟鋼 및 高張力鋼(HT80)의 棒을 拘束상태에서 최고온도 1,400°C로 加熱하여, 다시 室溫까지 冷却한 경우에 發生하는 拘束應力을 測定한 結果이다. 溫度의 上昇과정에 있어서 열응력의 발생상태는 두 鋼種에서 큰 差異는 볼수 없고, 또한 냉각과정에 있어서도, 相變態를 일으키는 溫度가 되기 까지는 完만하게 剛性을 回復해 가사, 熱應力은 크게 되지 않는다. 그러나 高張力 鋼에 있어서의 冷却時의 變態溫度는 冷却速度가 빠른경우는 軟鋼보다 훨씬 낮게 된다. 또한 相變態에 의한 膨脹量은 軟鋼에 비해 크기때문에 應力은 變態溫度부근에서 급격히 저하하여 一時的으로는 壓縮應力으로 바뀌어 지는 경우까지 있다.

軟鋼의 경우는 溫度에 對應하는 降伏應力을 따라 室溫에 도달하며, 殘留應力은 스트레인 硬化때문에 室溫의 降伏應力보다 다소 높은 값이 되나, 高張力鋼의 경우는 냉각에 동반되는 引張應力은 매우 낮은 溫度로 된 다음부터 發生한다. 그후 急速히 增大하나 溫度가 室溫이 되어도, 殘留應力은 室溫에 있어서의 降伏應力보다도 상당히 낮은 값에 머물러 있다.

表 1은 軟鋼 및 各種 高張力鋼의 殘留應力과 이들 材料의 冷却中에 생기는 相變態에 의한 膨脹스트레인의 차이를 나타낸 것이다.

以上の 表 1의 結果에 의하면 變態溫度가 낮은 鋼일수록 變태에 의한 팽창스트레인 증대하며, 이것이 最終인 殘留應力의 크기에 影響을 주어, 高强度일수록 殘留應力의 크기가 크다고는 할수 없다.

5. 용접변형의 發生機構

용접변형의 種類에 對해서는 2節에서 說明하였으나 이들의 基本이 되는 變形은 가로방향收縮과 가로방향굽힘 變形이다.

5.1 熔接에 의한 가로방향收縮 變形的 發生過程

가장 基本的인 熔接變形으로 생각되는 맞데음 熔接部의 初屬熔接에 있어서의 수축과정의 특성을 이해하기 위해 행한 實驗結果에 對해서 說明한다.

그림 9는 板 두께 20mm, 熔接길이 30mm의 軟鋼板의 맞데음 熔接時 생긴 收縮課程의 測定結果이다. 熔接은 4mmφ 일메나이트熔接棒을 使用하고, 熔接入熱은 16,000J/cm로 한 결과이다.

그림 9에 나타난 수축과정을 보면 맞데음 용접부 의 수축과정을 다음의 3단계로 나눌수 있다. 먼저 初期의 AB사이에서는 급격히 가로방향收縮이 增加하며, 다음의 BC사이에서는 일단 가로방향收縮이 停滯하며, 그後 CD사이에서는 다시 가로방향收縮이 增加하여 最終值에 達하는 3段階로 區分이 可能하다. 또한 最終段階後의 가로방향收縮量은 橫點距離 l에 關係없이 一定하게 됨을 보이고 있다. 여기서 가로방향收縮이 일단 停滯하는 第2段階의 初期인 B點은 약700°C임을 보이고 있으며, 相變態溫度임을 알수 있다. 따라서 第2段階에서 가로방향收縮의 일시적인 停滯는 變態膨脹에 起因함을 알수 있다.

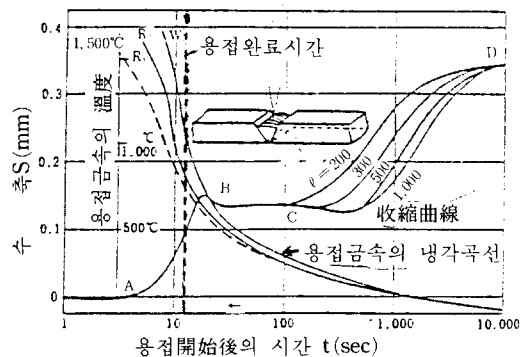


그림 9. 냉각과정에서 標點거리의 변화 (판두께 20mm, 入열량 1.6kJ/cm)

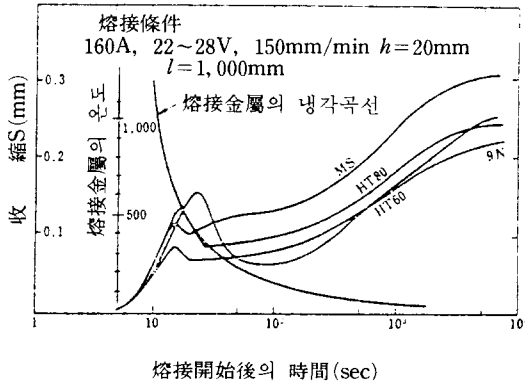


그림 10. 수축과정에 미치는 냉각중의 변태의 영향

그림 10은 수축과정에 미치는 상변태의 영향을 밝히기 위해 軟鋼(MS), 60Kg/mm<sup>2</sup>級 高張力鋼(HT60), 80Kg/mm<sup>2</sup>級 高張力鋼(HT80) 및 9% Ni鋼(9N)의 4種의 鋼材에 對해 實驗한 結果를 보인 것이다. 이에 依하면, 全體의 特性으로서 熔接開始後 약5초정도에서부터 급격히 가로방향收縮이 增加하며, 熔接金屬의 溫度는 700~400℃로 되나, 이 溫度에서 MS, HT60, HT80, 및 9N의 順으로 가로방향收縮이 일단 增加하고나서 級激히 감소하여, 그후, 다시 增加하여 最終적으로 MS, HT60, HT80, 9N 順의 수축량이 占유하는 것으로 나타나 있다.

收縮過程의 도중에 變態膨脹이 나타나는 온도범위는 MS, HT60, HT80, 9N의 順序로 低溫側으로 이동하고 있으며 겉보기상의 相變態에 依한 膨脹量은 變態膨脹이 低溫에서 일어나는 鋼材일수록 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 最終 橫收縮量은 相變態에 依한 膨脹量이 클수록 작아지며, MS의 경우를 1이라고 하면, HT60, HT80, 및 9N의 경우는 各種 0.90, 0.86, 및 0.77程度로 되어 있다.

熔接部의 最終 가로收縮量  $S_{t=\infty}$ 는 熔接金屬自體의 수축 및 熔接熱의 母材로의 傳導에 基因하는 成分과의 合  $S_{thermal}$ 과 冷却中の 相變態에 依한 膨脹量  $\delta_{tr}$ 을 增積한 것이기 때문에

$$S_{t=\infty} = S_{thermal} - \delta_{tr} \dots \dots \dots (1)$$

로 주어진다.

여기서  $S_{thermal}$ 은 溶接熱傳導의 見地에서 解析한 結果 다음과 같은 結論이 얻어졌다. (용접금속의 體積은 無事)

① 母材의 板두께  $h$ 가 다음式으로 주어지는 限界

板두께  $h_c$ 보다 큰가 작은가에 의해 收縮過程의 特徵이 달라진다.

$$h_c = \sqrt{Q/c\rho\theta_{ws}} \dots \dots \dots (2)$$

但,  $Q$ : 單位 溶接길이 당의 入熱(J/cm)

$C$ : 比熱(J/g·℃)

$\rho$ : 密度(g/cm<sup>3</sup>)

$\theta_{ws}$ : 가로收縮開始時에 있어서 熔着金屬의 溫度(熔接金屬의 凝固溫度와 같음)℃

限界板두께  $h_c$ 는 熔接入熱의 平方根에 비례하며, 鋼의 피복아크 熔接에 있어서 通常의 熔接條件(16 KJ/cm~20KJ/cm)에서는 1.43~1.6cm 정도이다. ②  $h > h_c$ 의 경우는 最終 가로收縮量  $S_{thermal}$ 은 板두께에 關係없이 一定하며, 限界板두께  $h_c$ (혹은  $Q$ )에 比例하여,

$$S_{thermal} = \alpha\theta_{ws}h_c \dots \dots \dots (3)$$

但,  $\alpha$ 는 線膨脹係數(℃<sup>-1</sup>)이다.

③  $h < h_c$ 의 경우는 最終가로收縮量은 板두께  $h$ 에 反비례하며,  $h_c^2$ (혹은  $Q$ )에 比例하여,

$$S_{thermal} = \alpha\theta_{ws}h_c \cdot \left(\frac{h_c}{h}\right) \dots \dots \dots (4)$$

로 주어진다.

그림 11은 MS, HT60, HT80, 9N 鋼의 最終 가로收縮量  $S_{t=\infty}$ 값과 그 相變態에 依한 膨脹量  $\delta_{tr}$ 의 關係를 나타낸 것으로 熔接熱傳導의 見地에서 구한  $S_{thermal}$ 값은 4鋼種에 있어 거의 同一하다라도 相變態에 依한 膨脹量의 영향때문에 最終가로收縮量  $S_{t=\infty}$ 값은 MS, HT60, HT80, 9N 鋼 順으로 작아지고 있음을 보이고 있다.

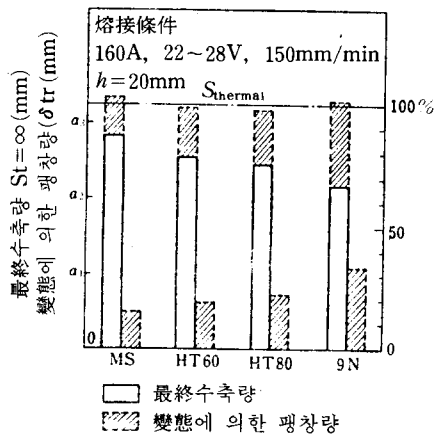


그림 11. 최종수축량과 相變態에 依한 膨脹량

5.2 용접에 의한 가로 굽힘 변형의 발생過程

용접後 시험편에 발생하는 굽힘 변형의 발생過程을 實驗한 結果에 의하면 그림 12와 같다. 初期에는 加熱域이 膨張하기 때문에 帶板은 上方으로 凸의 變形을 하기때문에 굽힘 변형은 負(-)로 되지만 시간의 경과와 더불어 냉각이 진행함에 따라 이 變形은 減少하여 上方으로 凹의 變형으로 바뀌어 最終적인 變형으로 남는다. 이 結果에 依하면 용접길이 10mm인 경우는 용접후 약 10초 후에는 거의 一定한 變형량으로 된다는 것을 알 수 있다.

그림 13은 용접길이 變化할 때 생기는 變形량의 最大값(最終 角變形)과 最小값의 計測結果를 정리한 것이다. 이에 依하면 용접 길이가 增加함에 따라 加熱側의 表面이 上方으로 부풀어 오르는 負의 變形이 차츰 減少하여, 용접길이 150mm 以上이 되면 初期의 負의 變形은 없어지게 된다. 또한 용접길이 200mm 以上으로 되면 최종잔류 變형량은 거의 一定한 값으로 됨을 보이고 있다.

그림 14는 變態溫度가 다른 4種의 鋼板(SUS 304 스테인레스鋼, SM41軟鋼, HT80高張力鋼, 9%Ni, 鋼)에 對해 각각 거기에 맞는 용접棒을 사용하여 필렛용접하였을 때 용접패스數와 角變形에 對해 나타낸 것이다. 이 結果에 의하면 變態溫度가 낮은 鋼일수록 작은 角變形을 나타내고 있으며 變態를 하지 않는 SUS304스테인레스 鋼材의 경

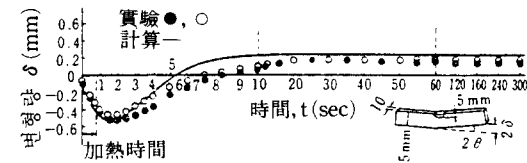


그림 12. 굽힘 변형의 생성과정

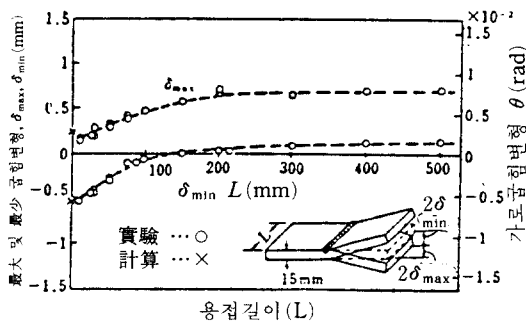
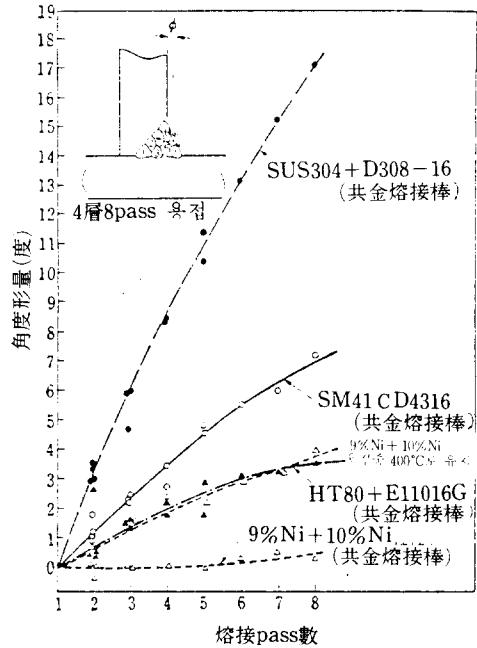


그림 13. 용접길이와 굽힘 변형량



(a) 변태온도가 다른 각종 鋼의 용접 角變形과 용접 Pass수와의 관계(예열 층간 온도 100°C)



그림 14. 各種 鋼의 T形 試驗片의 용접角變形

우가 가장 큰 角變形을 보이고 있다. 變態溫度가 낮은 鋼일 수록 角變形이 작은 경향은 前節의 가로收縮에서 설명한 理由에서와 같다.

6. 용접殘留應力の緩和와 용접변형의 교정법

용접施工時 殘留應力과 變形을 고려할 경우에는 대상으로 하고 있는 구조물의 크기, 特히 板 두께에 의해 그 방법이 현저히 달라져야 한다는 것에 주의하여야 한다. 薄板의 경우는 변형의 防止에 重點이 놓이고 殘留應力은 별로 신경 쓰지 않아도 되며, 厚板의 構造物에 있어서는 拘束을 크게하면 용접균열이 發生할 위험이 있으며, 殘留應力의 發生에 의해 용접構造物에 脆性破壞의 위험성이 높아진다. 또한 厚板의 용접時는 일단 發生한 용접變形은 교정이 어렵기 때문에 이 경우에는 교정보다는 防止에 努力해야 한다.

용접잔류응력 및 용접변형에 대한 대책은 먼저

설계단계에서 충분히 고려해야 하나, 이것을 輕減시키는 施工上의 주의점을 들면 다음과 같다.

- a) 熔着金屬의 量을 可能하는 限 작게 할 것
- b) 溶接부의 拘束을 작게하고 適當한 溶接方法과 溶接順序를 선택할 것.
- c) Positioner Jig를 有效하게 活用할 것
- d) 適當한 豫熱을 행하여 구조물전체의 溫度가 均형을 이루도록 할 것

6.1 溶接殘留應力 緩和의 原理

그림 15에 殘留應力의 緩和機構를 模型的으로 表示하고 있다. 그림 20(a)는 溶接部에 해당하는 C部材에 溶接熱에 의한 수축 스트레인 때문에 引張殘留應力이 形成되고, A 및 B材는 그보다 떨어진 母材 部分을 나타낸 것으로 여기에는 압축 殘留應力이 존재하고 있는 상태를 보인 것이다.

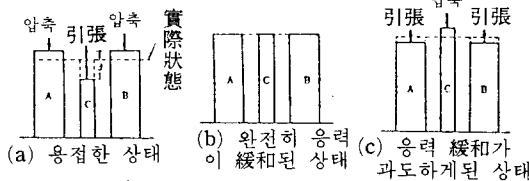


그림 15. 용접 殘留應力의 緩和 機構

이 殘留應力을 緩和시키기 위해서는 C材와 A, B兩材와의 사이의 相對치수차 Δ를 작게하면 된다. 거기에는 다음의 3개의 方法이 생각된다.

- ① 溶接部에 존재하는 수축하려고 하는 부분에 永久的인 伸張變形을 준다.
- ② 溶接部에서 떨어진 母材部에 永久的인 압축 變形을 준다.
- ③ 溶接部에 伸張變形을 줌과 同時에 母材部에 압축 變形을 준다.

그림 20에 있어서 (b)는 應力이 完全히 緩和된 상태 (c)는 應力緩和處理가 不適切하기 때문에 溶接部가 과도하게 伸張되어 C材에는 압축應力이 發生하고, A, B兩材에는 引張應力이 發生하게 되어버린 경우를 나타내고 있다.

殘留應力의 緩和法으로서 보통 행하여 지고 있는 방법은 다음과 같은 것이 있다.

- ① 應力緩和 熱處理
- ② 低溫應力 緩和法
- ③ 기계적 應力緩和法

(1) 應力緩和 熱處理方法

後熱處理에 의해 殘留應力이 緩和되는 것은 ① 溫度의 上昇에 따른 材料의 降伏應力이 低下되는

현상. ② 高溫度에서 材料의 Creep가 일어나 應力이 弛緩되는 현상. ③ 高溫度에서 金屬의 內部 스트레인이 回復되어 再結晶이 생기는 현상 등의 3가지 要因때문이다.

이 방법은 爐內應力除去方法과 局部加熱應力除去方法의 두 방법으로 規格化되어 있다.

(A) 爐內應力緩和 熱處理

이 방법은 構造物 全體를 爐內에 넣어야 되지만 어쩔수 없는 경우에는 2回 以上 나누어 行할 수도 있다. 分割法을 適用하는 경우에는 被加熱部의 중첩은 1.5m以上으로 하고 爐外에 나와 있는 部分의 溫度句配가 급격하게 되지 않도록 注意한다. 또한 構造物을 爐에서 꺼내는 溫度는 300℃를 넘어서는 안된다. 加熱 또는 冷却 時的 속도 R(℃/hr)는

$$R < 200 \times \frac{25}{t} (\text{℃/hr}) \dots\dots\dots (5)$$

여기서 t는 板 두께(mm)

즉 25mm에 대해 200℃/hr보다도 빨리 加熱하거나 冷却하지 않도록 한다. 또한 爐內에서의 加熱中の 構造物 溫度差는 50℃以內로 한다.

溫度는 600℃가 標準이나 600℃까지 올릴 수 없는 경우에는 表 2에 表示된 바와 같이 時間의 延長이 一般的으로 行하여 지고 있다. 後熱處理時는 S.R균열이 發生치 않도록 構造不連續部인 필렛 溶接部等에 對해서는 충분한 管理가 필요하다.

表 2. 炭素鋼材의 應力緩和 熱處理의 溫度와 時間

溫 度(℃)	두께25mm당의 유지시간
600	1
570	2
540	3
510	4

(B) 局部 加熱應力緩和 熱處理

큰 構造物의 경우는 爐內 後熱處理가 곤란하기 때문에 溶接部 近傍에 對해서 局部加熱에 의해 後熱處理가 行하여진다. 이 경우에는 溶接線을 中心으로 約 250mm의 範圍 또는 溶接部의 板두께의 12倍以上, 但 管의 圓주이음부에서는 Bead幅의 3倍以上의 범위를 가열한다. 가열온도, 유지시간, 加熱冷却의 속도 등은 前述한 爐內後熱處理와 똑 같다.

局部 加熱 後熱處理를 위한 熱源으로는 電氣, 가스, 重油 등이 이용되고 있으나 加熱部의 溫度는 可能하는 限 均一하게 되는 構造로 하지 않음



용접잔류 응력과 용접변형의 발생 機構와 그 대책 면 안된다.

(2) 低溫응력 緩和法

熔接線으로부터 100mm 정도 떨어진 兩側부분 (용접선 방향으로 압축잔류응력이 存在하는 부분) 을 가스로 150~200°C로 加熱후 그 즉시 水冷하여, 熔接部에 存在하는 熔接線 方向의 인장잔류응력을 除去하는 方法이다(그림 16). 이 方法을 考案한 회사의 이름을 따서 Linde's method 라고도 한다. 應力緩和의 機構는 熔接線 양측의 압축응력을 받고 있는 部分을 加熱하면, 용접부에 인장응력이 생겨, 이것이 殘留引張應력과 겹쳐 용접부에 인장 塑性變形을 생기게 하기 때문에 熔接部의 응력이 감소하는것으로 생각된다. 따라서 이 방법은 熔接線方向의 殘留應力은 效果가 있으나 熔接線에 直角方向의 殘留應力에는 效果가 없다.

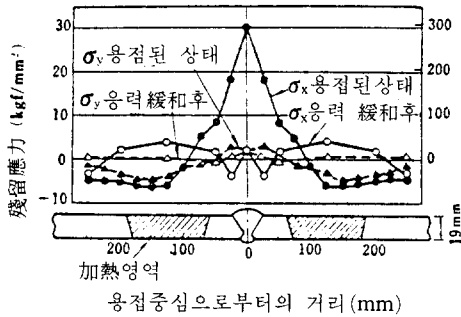


그림 16. 低溫 응력 완화 효과

(3) 機械的 應力緩和法

그림17은 機械的 方法에 依해 殘留應力이 緩和되는 機構를 설명한 것이다. (a)에 表示한 바와 같은 多層 맞대음 熔接한 平板의 경우 길이 方向 殘留應力은 그림 (b)의 A曲線과 같이 된다. 軟鋼 熔接部의 熔接金屬의 降伏應力은 一般적으로 母材 보다 높기때문에 熔接部 中央의 殘留應力은 約32 Kg/mm<sup>2</sup>로 되어 있다. 이 平板의 熔接線과 平行하게 外力을 加하여 인장했을때의 應力은 曲線 B<sub>1</sub> 및 B<sub>2</sub>와 같이 된다. 그림과 같이 殘留應力과 荷重의 疊이 항복應력 이하의 部分은 應力은 荷重에 더불어 상승하지만, 兩者의 疊이 降伏應力에 達하면 材料의 항복應력 이상으로는 되지 않는다. 板中의 塑性 領域이 확대 되어감에 따라 板 전체의 平均應力과 스트레인의 關係는 除荷後 그림의 大韓熔接學會誌, 第7卷1號, 1989年 3月

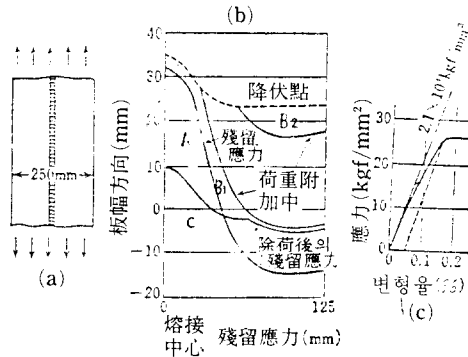


그림 17. 機械的 應力緩和機構

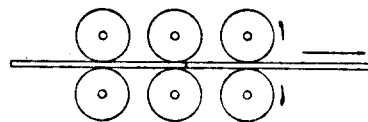
c 曲線과 같이 경사가 완만하게 되어 殘留應力이 緩和된다.

용접된 容器를 水壓試驗하거나, 용접구조물에 荷重試驗을 行하거나 하면 上記의 原理에 依해 용접부 부근의 길이 方向 殘留應力은 緩和된다. 이러한 試驗을 行하면 應力緩和를 위한 作業을 따로 行하지 않더라도 結果의으로는 緩和 처리가 行하여진 것과 마찬가지로 된다.

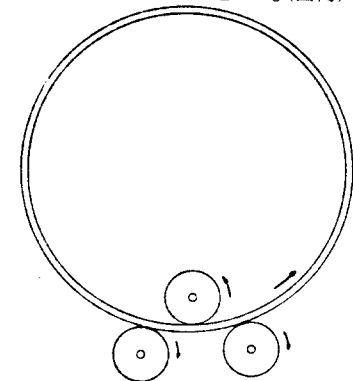
6.2 용접변형 교정法の 종류

용접변형을 교정하는 方法을 여러가지가 있으나 大別하면 다음과 같다.

- ① 冷間加壓法 { a 타격법, 물러법  
                  b 피이닝법
- ② 加熱法 { c 국부加熱냉각법  
              d 加熱加壓법



(b) 굽힘롤러에 의한 교정(圓筒)



(a) 변형교정 롤러에 의한 방법(平板)

그림 18. 롤러에 의한 변형의 교정

① 冷間加壓法

이 방법은 室溫에서 機械的인 힘을 가하여 변형을 교정하는 방법으로 일반적으로 판두께가 비교적 얇은 경우에 적용된다. 이 방법中 로라법의 原理를 그림 18에 보인다.

피이닝법은 殘留應力緩和를 위해서는 효과가 비교적 작고 오히려 결함의 誘起 및 脆性遷移溫度의 上昇 等의 原因이 된다. 이에 대해서 가로굽힘 變形의 防止를 目的으로하여 熔接中, 各層마다 피이닝을 행하여 발생하는 가로굽힘변형을 소멸시킬 수 있다.

② 국부 加熱냉각법

변형이 생긴 용접구조部材를 국부적으로 加熱하여 그 즉시 冷却시켜 수축에 따르는 引張應力을 발생시켜 이 張力을 利用하여 굽힘변형을 교정하는 방법이다. 그림 19에 나타낸 바와 같이, 上方으로 굽힘變形이 생긴 部材의 凸部를 국부적으로 急熱하면 部材는 온도상승에 따라 팽창하려고 하나 주위의 차거운 部分의 剛性때문에 拘束되어 자유로운 팽창이 허용되지 않고 압축應력이 發生하여 塑性變形한다. 여기에 加熱部를 물을뿜어 급냉하면 部材는 수축하여 加熱部에는 引張應力이 생겨, 끌어당김으로서 굽힘변형이 교정된다. 이것은 가장 일반적인 방법이나 Quenching되기 쉬운 鋼種의 경우는 急冷을 피하고 自然 냉각시키는 것이 좋다.

局部加熱冷却法에는 線 加熱法과 點 加熱法이 있다. 線 加熱法은 그림 20에 나타낸 바와 같이

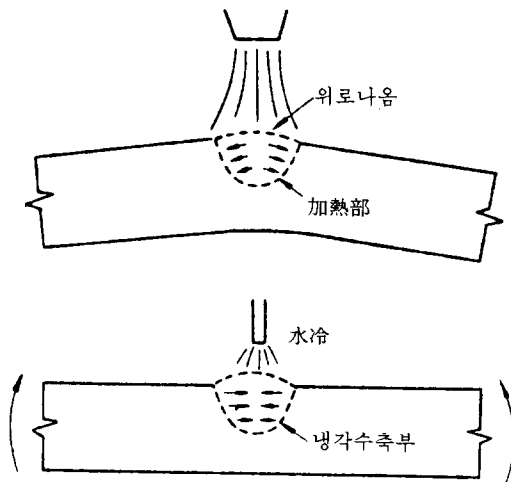


그림 19. 국부 加熱에 의한 변형의 교정

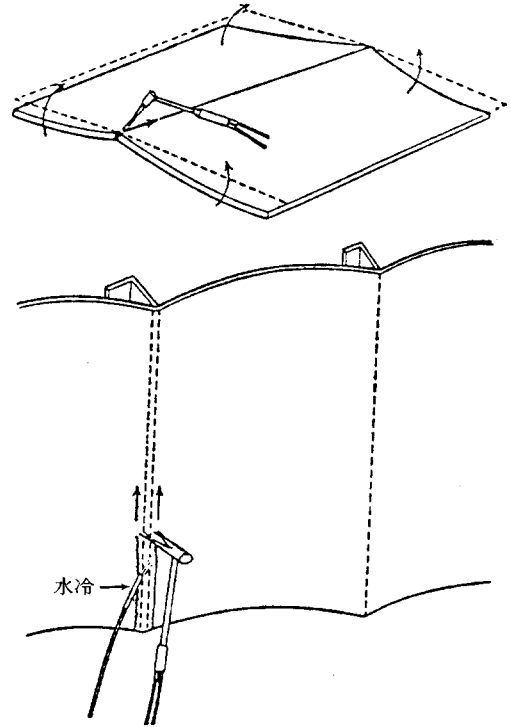


그림 20. 線加熱법에 의한 변형의 교정

加熱Burner를 移動시켜, 線상으로 가열하는 방법으로, 비교적 두꺼운 板의 경우에 加熱部의 表面과 裏面に 온도차를 만들어, 表面側に 압축 塑性 스트레인을 발생시켜, 加熱後 急冷한다.

한편 板두께가 6mm이하의 비교적 얇은 鋼板의 용접에 의해 생긴 變形을 제거하기 위해서는 點 加熱法이 利用된다. 薄板의 경우는 加熱과 冷却의 조작을 가능하는 限 빨리하지 않으면 효과가 적다.

③ 加熱加壓法

이 방법은 變形이 생긴 部分을 加熱하여, 熱間加工溫度로 하여 압력을 가하여 변형을 교정하는 방법이다. 이 경우의 加熱溫度는 재료의 종류에 따라 다르지만 軟鋼의 경우는 500°C~600°C 정도가 適當하며, 250~300°C 부근에서는 鋼材의 靑熱脆性 때문에 脆弱하게 되어, 加壓時 균열이 發生되는 경우가 있기 때문에 피하는 것이 좋다.

④ 薄板의 좌굴변형 防止法

薄板구조물의 용접施工에 있어서, 板에 생기는 面外 좌굴變形은 基本的으로 熔接時 形成되는 압

용접잔류 응력과 용접변형의 발생 機構와 그 대책

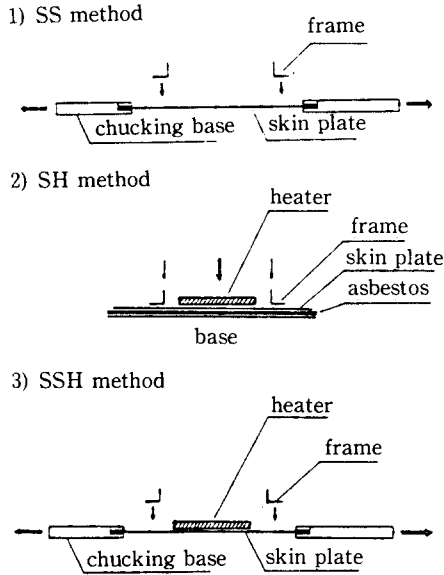


그림 21. 薄板의 좌굴 변형 방지법

축 殘留應力에 基因하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 용접중 어떠한 방법으로든 板 内部에 생기는 압축 殘留應力을 제어함으로서 板 두께, 骨材간격, 용접入熱등을 변경시키지 않고도 변형을 防止할 수 있다. 즉 板 内部에 생기는 용접잔류응력을 輕減시키든가, 적극적으로 板에 인장잔류응력이 생기도록 해 주면 좌굴변형을 방지할 수 있다.

이상의 觀點에서 母板만에 引張拘束應力을 주어 引張 상태 그대로 Frame과 용접함으로서 용접변형을 방지하는 應力法과 母板만을 加熱하여 열팽창을 일으킨 상태에서 Frame과 용접함으로서 용접변형을 방지하는 加熱法 등이 있다. 구체적으로

SS法, SH法, SSH法 등으로 명명되어 있는 方法이 開發되어 있는데 이들 方法의 概要를 그림 21에 보인다.

7. 맺 음 말

지금까지 熔接殘留應力과 변형에 대해 그 發生 機構를 解説하고 一般的인 輕減대책에 대해 記述하였다. 殘留應力과 變形에 관한 문제는 오래 前부터 용접공학上의 중요한 문제점으로 취급되어 많은 실험적 研究가 行하여져 왔고 最近들어 해석적 方法에 의해 이를 예측, 설계단계에서 이를 考慮하도록 하는 方法이 開發되어 가고 있다.

끝으로 이 分野의 實務나 研究에 도움이 되도록 참고문헌을 소개한다.

참고문헌

- 1) 佐藤, 上田, 藤本: 溶接變形, 殘留應力, 産報出版(1979).
- 2) Kouich Masubuchi: Analysis of Welded Structures, Residual Stress, Distortion, and their Consequence, Pergamon Press(1980).
- 3) Kenneth Easterling: Introduction to the Physical Metallurgy of welding, Butterworths(1983).
- 4) (日本)溶接學會: 溶接變形の發生とその防止, (日本)溶接學會誌, Vol. 52, No. 4, 5, 7, 8, 9(1983), Vol 53, No.1(1984).
- 5) 日本高壓力技術協會: 應力燒なまし基準とその解説. 日刊工業新聞社, (1982).