

論 文

大韓熔接學會誌  
第3卷第1號 1985年5月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 3, No. 1, May, 1985

**50 kg/mm<sup>2</sup> 級 高張力 鋼板의 線狀加熱에 따른 板狀變形과 材質變化**

鄭南湖\* · 崔炳吉\*\* · 朴鍾殷\*\*\*

**Distortion and Transformation of High Tensile Strength Steel plate of  
50kg/mm<sup>2</sup>Grade Due to Line Heating**

by

N. H. Chung\*, B. K. Choi\*\*, J. E. Park\*\*\*

**Abstract**

The line heating is a thermoplastic working technique which is used in bending work of steel plate and in correcting the distortion of welded structure. This method is considerably effective when the water-cooling is followed.

In this study, an investigation was accomplished to find the effects on the change of material properties when the line heating was applied on the high tensile steel plate of 50kg/mm<sup>2</sup> grade.

Some steel plates were heated to various temperatures and then cooled with water or in the air. In this study, the author measured the angular distortion continuously during line heating to find out the relation between the bending efficiency and heating or water-cooling temperature. Furthermore, its material properties were examined by the V-notch Charpy impact test, the microscopic observation and the Vickers hardness test. As results, the followings were clarified.

- (1) The amount of angular distortion increases as the heating temperature or the water-cooling temperature rises.
- (2) When the steel plate is heated between 700°C and 900°C, and then is water-cooled over 700°C, some brittle structure is observed. But if the temperature of water-cooling is below 700°C, no brittle one is found.
- (3) when the steel plate is heated over 800°C and is cooled in the air, there is no unfavorable effect.

\* 서울대학교 공과대학 대학원, 정회원, 현대정공 창원 제 2 공장

\*\* 한국기계연구소, 선임연구원, 정회원

\*\*\* 서울대학교 공과대학 조선공학과 교수, (1985. 5. 11. 작고)

## 1. 序 論

線狀加熱法는 鋼板을 線狀으로 가열한 후 水冷하여, 加熱冷却部의 靑힘을 誘發시키는 熱塑性 加工法이다.

鋼板을 가스버너를 이용하여 가열하면 가열부는 膨脹하게 되며, 이 膨脹部位가 冷却되면서 收縮한다. 이 때 두께 방향으로 收縮量의 차이에 의하여 强판은 靑혀지게 된다. 이때 가열 후 水冷과 같은 방법으로 急冷시키면, 이 靑힘 정도는 靑씬 增大되며 加工效率을 높일 수 있다. 조선소와 같이 廣幅 重厚板의 曲面加工이 많은 작업현장에서 線狀加熱法은 효과적인 鋼板加工法으로 사용되고 있다. 또한 이러한 加熱加工原理를 이용, 構造物의 熔接變形을 修正하는 데에도 사용하고 있는데, 이 때는 선상가열, 점가열 또는 피치형 가열 등의 여러 방법들이 이용된다.

선상가열법은 중공업 초기부터 사용되기는 하였으나 선상가열법은 중공업 현장에서 주로 현장 작업자의 경험에 의해 작업이 이루어졌다. 초기단계의 선상가열에 관한 연구는 주로 선상가열 가공법 및 선상가열 條件選定 등에 관한 것이었다.<sup>1-3)</sup> 그러나 선상가열법이 加工效果는 우수하나 高張力 强판에 적용할 경우 靑性이 低下될 수 있다. 이에 대해 1970년 Fusao Koshig<sup>4)</sup>와 Masaaki Ando<sup>5)</sup>는 50 kg/mm<sup>2</sup>급 고장력强판에 대한 선상가열사의 靑性을 평가하였다.

1972년 日本造船研究協會 第111研究部會에서는 船體用 强판의 인성에 미치는 冷間加工과 용접의 重疊效果, 가스가열가공조건의 영향 및 局所的 靑性劣化<sup>6)</sup>에 대해 연구하였다.

이상과 같은 연구를 토대로 본 연구에서는 현장 작업시 材質에 큰 영향을 미치지 않는 범위에서 최대의 加工效率을 얻을 수 있는 작업 조건을 구하고자 선상가열시의 加熱, 冷却條件에 따른 變形效果和 强판의 材質變化 여부를 상호 관련지어 분석하였다. 이를 위해 가열시 가열부위의 精確한 온도 및 연속적인 變形計測에 역점을 두었으며, 각각 다른 조건으로 强판을 가열시켜 가열선 부위의 재질 변화를 조사하였다.

## 2. 實 驗

### 2.1 實驗裝置

선상가열 실험을 하기 위해서는 加熱裝置 및 强판을 支持할 수 있는 固定裝置가 필요하다. 본 실험에서는 일정한 가열속도를 얻을 수 있는 장치가 요구되어 자동가스절단장치를 改造 사용하였으며, 절단장치의 台

車에 절단 토오치와 水冷 nozzle을 장치하였다. 다음으로 가열强판을 지지하기 위하여, 强판을 固定할 수 있고 높 낮이를 자유로이 조절할 수 있는 jig를 제작하였다. Photo 1은 强판고정 jig의 설치 상태를 보여주고 있다.

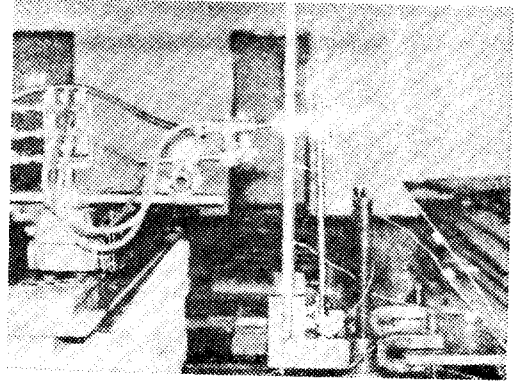


Photo 1. The carriage with heating torch and the jig for fixing plate.

加熱線部位의 온도를 實測하기 위하여 가열强판의 加熱裏面에 직경 6mm의 구멍을 加熱面 밑 1mm 위치까지 드릴로 뚫고, 이곳에 Chromel-Alumel 타입의 ANSI 表示 type K 열전대를 挿入 熔接하였다. 열전대를 强판에 용접하는 때는 Capacitor discharge type spot welder를 사용하였다.

이상과 같은 선상가열시의 溫度測定 裝置構成은 Fig. 1에 表示하는 바와 같다.

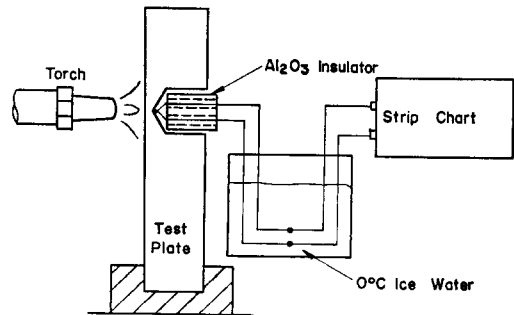


Fig. 1. Schematic diagram of the temperature measuring device during line heating

선상가열시의 變形量을 측정하기 위하여 strain gauge를 이용한 連續變形 測定裝置를 靑안하였다. strain gauge를 이용한 變形測定에는 Fig. 2와 같은 displacement transducer를 사용하였다. 이 displacement transducer의 원리는 외팔보의 自由端에 힘 P를 가하면 외팔보는 휘어지는데, 이 때에 自由端으로부터 L

-a 떨어진 곳에서의 모우멘트 M은,

$$M = P(L-a) \dots\dots\dots (1)$$

힘 P를 받을 때 自由端의 처짐 δ는,

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \dots\dots\dots (2)$$

식 (1)과 (2)로부터

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{L^3}{3EI} \cdot \frac{M}{L-a} \\ &= \frac{L^3}{3(L-a)} \cdot \frac{M \left(\frac{t}{2}\right)}{EI \left(\frac{t}{2}\right)} \\ &= \frac{2L^3}{3(L-a)t} \varepsilon_g \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

여기서,

E: 탄성계수

I: 2차 관성 모우멘트

L: 외팔보의 길이

t: 외팔보의 두께

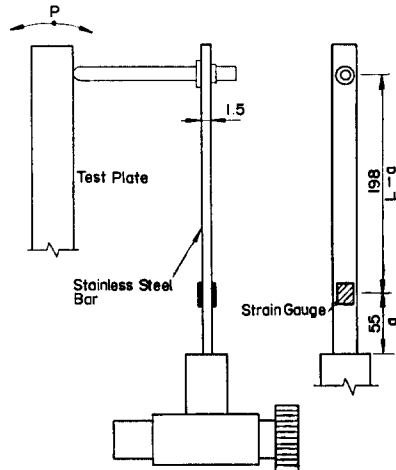


Fig. 2. Displacement transducer

식 (3)은 외팔보 自由端의 처짐 δ와 自由端에서 L-a 떨어진 외팔보의 表面에서의 스트레인 ε<sub>g</sub>와의 관계를 나타낸다.

$$\varepsilon_g = \frac{3}{2} \cdot \frac{(L-a)t}{L^3} \delta$$

여기서 L=253mm, a=55mm, t=1.5mm라 하면,

$$\varepsilon_g = \frac{3}{2} \cdot \frac{198 \times 1.5}{253^3} \delta = 27.5 \delta \times 10^{-6}$$

위 관계식은 displacement transducer 自由端에서의 처짐 δ와 自由端으로부터 198mm 떨어진 곳의 strain 과의 이론적 관계를 나타내고 있다. 한편, 마이크로 미터를 이용하여 自由端의 처짐을 測定하고 이 때의 strain을 計測한 결과 다음과 같은 關係를 얻었다.

$$\varepsilon_g / \delta = 30 \sim 31 \times 10^{-6} / mm$$

위 calibration은 δ=15mm까지 실시하였으며, loading과 unloading을 되풀이 하였을 때 같은 결과를 얻

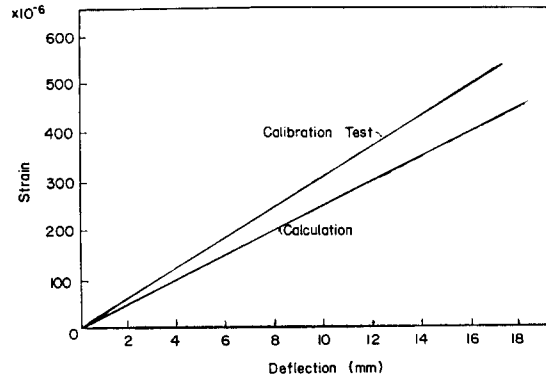


Fig. 3. Calibration test of the displacement transducer and calculation

었다. 따라서 본 실험을 위하여 제작된 displacement transducer는 3%의 誤差範圍에서 충분한 linearity를 가지고 있다. Fig. 3에 이론치와 calibration 실험치를 表示하였는데, 실험치가 약 8% 정도 높다. 이것은 외팔보 단면의 不均一과 외팔보를 지주에 연결한 곳의 이음 특징에 기인하는 것으로 믿어진다.

### 2.2 시험재료

본 線狀加熱實驗에 사용한 강판은 熔接構造用 50kg/mm<sup>2</sup>級 高張力 鋼板이며, 이 강판의 化學成分 및 機械的 性質은 Table 1과 같다.

### 2.3 實驗方法

강판에 대한 本 加熱을 하기 전에 加熱線 주위의 溫度分布 및 台車의 速度와 가열온도와의 關係를 구하기 위하여, 별도의 강판에 가열선 밀도로 1.0mm, 2.0mm 위치까지 구멍을 뚫었으며, 또한 가열선 주위의 10mm

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of the test plate

Standard (JIS)	Heat Treatment	Thickness (mm)	Chemical Compositions (Max.) (%)						Mechanical Properties (Min.)		
			C	Si	Mn	Mo	P	S	Yield point (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elong. (%)
SM 50 A	Normalized	22	0.18	0.27	1.54	0.01	0.017	0.007	38	67	34

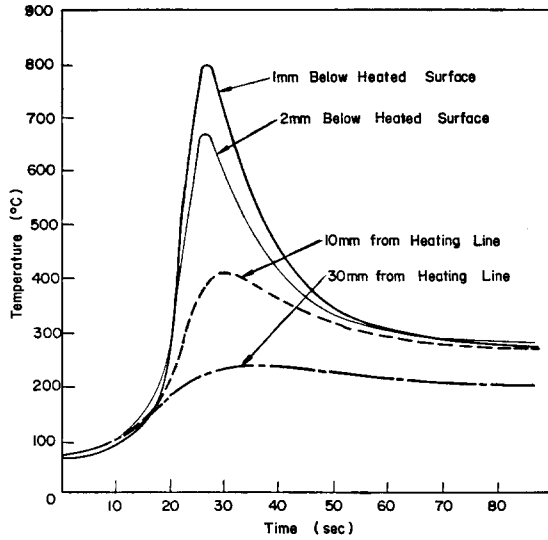


Fig. 4. Thermal cycle

및 30mm 위치에 가열표면에서 1.0mm 깊이까지 구멍을 뚫어 열전대를 강판에 점용접하였다. Fig. 4는 가열선 부근에서 강판내의 온도분포를 나타낸다.

온도測定用 강판에 각각 다른 台車의 速度로 가열한 후, 台車의 速度와 가열온도와의 관계를 구하여 Fig. 5에 나타내었으며, 이 關係圖表를 이용하여 요구하는 온도에 대한 台車의 速度를 구하였다.

線狀加熱法에는 버너를 直線으로 移動시키는 straight line heating과 버너를 圓弧를 그리며 移動시키는 wea-

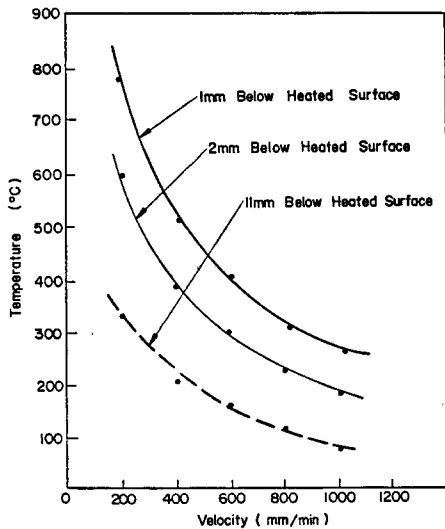


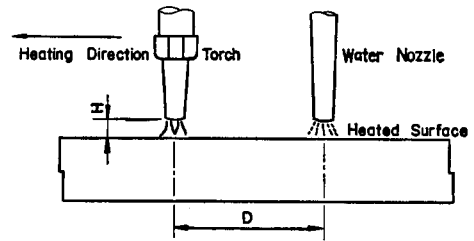
Fig. 5. relation between the velocity of the carriage and the heating temperature

ving line heating이 있는데, 본 실험에서는 straight line heating을 사용하였다.

한편, 加熱 토오치로서는 切斷 토오치를 사용하고, Table 2와 같이 가급적 아세틸렌가스의 壓力을 높여 최대의 加熱效果를 얻도록 하였으며, 一定한 使用壓力下에서 불꽃을 中性으로 조절하여 사용하였다.

Table 2. Line heating conditions

ITEMS	CONDITION
Type of tip	Cutting tip #3
Oxygen pressure	7.0kg/cm <sup>2</sup>
Acetylene pressure	0.7kg/cm <sup>2</sup>
Height of gas torch (H)	20mm
Distance between torch and water cooling nozzle (D)	min. 50mm
Water flow	2.1 liter/min



가열 후 冷却方法으로는 공기중에서 徐冷시키는 空冷(AC로 표시함)과 물로써 急冷시키는 水冷(WC로 표시함)이 있고, 水冷에는 곧바로 水冷시키는 同時水冷과 加熱後 잠시 空冷한 後 水冷시키는 途中水冷이 있다. 이와 같은 水冷時期는 토오치와 수냉노즐의 간격 및 가열속도로 조절하였다.

이상과 같은 방법으로 선상가열된 加熱線 중 현장에서 선상가열시 주로 사용되고 있는 온도範圍 즉, 400°C 이상 900°C 이하에서 各 온도 區域別로 적절한 온도條件인 11個의 가열선을 선정하여 이 가열선 부위에 대해 分析하였다. 선정된 11個의 가열선에 대한 記號 및 加熱冷却條件은 Table 3에 表示된 바와 같다. 이와 같은 각 가열선의 온도는 加熱表面에서 1mm 깊이에 熔接시킨 열전대에 의해 측정된 것으로서 加熱表面의 온도는 아니다. 水冷開始溫度는 strip chart에 기록된 열전대 전위차(mV)를 읽음으로서 알아낼 수 있다.

**Table 3.** Line heating conditions of heated lines

L/H Condition		Description			
850 AC		Heating up to 850°C then AC to RT			
720 AC		"	720°C	"	
630 AC		"	630°C	"	
450 AC		"	450°C	"	
930 AC	780 WC	Heating up to 930°C and starting WC at 780°C			
880 AC	620 WC	"	880°C	"	620°C
810 AC	720 WC	"	810°C	"	720°C
870 AC	460 WC	"	870°C	"	460°C
690 AC	680 WC	"	690°C	"	680°C
690 AC	450 WC	"	690°C	"	450°C
510 AC	500 WC	"	510°C	"	500°C

AC : Air Cooling, WC : Water Cooling  
 RT : Room Temperature L/H : Line Heating

**3. 實驗結果 및 檢討**

**3.1 變形量**

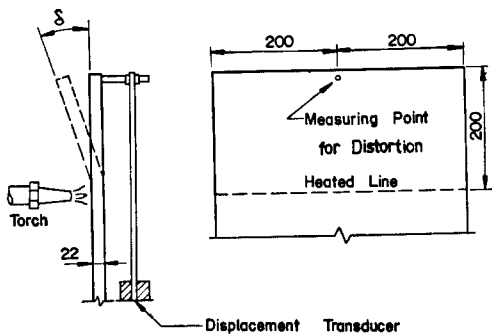
2.1절에서 기술한 變形計測裝置를 이용하여, 선상가열 중 연속적으로 變形을 측정하였다. Fig. 6과 같이 變形測定位置는 폭 400mm 강판의 板中央部 끝端이며, 가열선은 이곳에서 200mm 떨어진 위치이다. displacement transducer는 미리 逆變形을 주어 설치하였으며, 가열 후 변형이 진행됨에 따라 逆變形이 回復

되는 量을 측정하여 가열강판의 變形量을 구하였다. 鋼板의 변형이 displacement transducer에 傳達됨에 따라 이 displacement transducer에 附屬된 스트레인 게이지에 의해 전위차로서 測定된다. 이 전위차는 strain indicator와 strip chart를 통해 연속적인 變位로 記錄된다.

線狀加熱 中 강판의 角變形은 Fig. 7에 보인 바와 같다. 이 圖表는 880 AC 620 WC, 870 AC 460 WC, 690 AC 450 WC의 條件으로 선상가열을 하였을 경우 강판의 角變形을 displacement transducer를 이용, 연속적으로 측정된 曲線들이다. 이 곡선들은 선상가열 중의 典型的인 角變形을 나타내고 있다. 각 가열시의 加熱條件은 Table 4와 같다.

Fig. 6의 강판에 대해 가열을 開始하면 처음 얼마동안은 加熱面側의 反對方向으로 角變形이 일어난다. 이것은 加熱初期에는 加熱部位에 熱膨脹이 일어나서 순간적으로 角變形을 일으키기 때문이다. 그러나 강판에 대한 가열이 어느정도 진행되면 앞서 가열되었다가 냉각될 때의 收縮應力 때문에 角變形은 陽의 方向, 즉 가열면측의 方向으로 변하게 된다.

강판에 대한 가열이 완료된 후에도 변형은 계속 진행하며 加熱部位에 대한 水冷이 끝나는 時點에서 최대



**Fig. 6.** angular distortion of the test plate due to line heating

**Table 4.** Line heating conditions applied for measuring the angular distortion continuously

Line Heating Condition	D (mm)	Heating Time (sec)	Travelling Speed (mm/min)
880 AC 620 WC	35	127	170
870 AC 460 WC	50	125	200
690 AC 450 WC	30	64	350

D: Distance between heating torch and cooling water nozzle

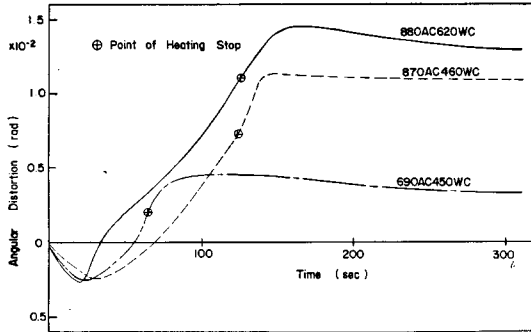


Fig. 7. Continuous distortion value during line heating

의 角變形을 이루다가 아주 완만하게 變形이 줄어들어, 시간이 지나 가열부위가 완전 塑性狀態로 되면 어떤 일정한 殘留變形을 이루게 된다. 이처럼 變形이 최대치에 달한 후 극히 완만하게 줄어드는 것은 가열선 부근에 집중되었던 熱이 가열선으로부터 먼쪽으로 傳達되기 때문이다. 즉, 加熱線의 바깥쪽 온도가 上昇함에 따라 인장응력이 작용하여 변형을 줄이게 된다. 그러나, 이 온도상승은 그리 높지 않기 때문에 변형을 줄이는 정도는 극히 적다.

Fig. 7의 變形曲線에서 880 AC 620 WC와 870 AC 460 WC의 경우, 最高 加熱溫度는 같으나 水冷開始溫度가 높은 880 AC 620 WC의 條件으로 선상가열하였을 때가 훨씬 큰 殘留變形을 얻었다. 그리고 870 AC 460 WC와 690 AC 450 WC의 경우는 두 가열선이 水冷開始溫度는 거의 같았으나 最高加熱溫度가 높은 870 AC 460 WC의 경우가 더 큰 殘留變形을 얻었다.

이와 같이 선상가열에 의한 角變形量은 最高加熱溫度와 水冷開始溫度가 높을수록 큰 것을 알 수 있었다.

### 3.2 組織變化和 溫度分布

線狀加熱은 加熱과 冷却過程을 통해서 강판에 급히 가공을 하는 方法으로 加工效率를 높이기 위하여 加熱溫度를 높이고 곧바로 수냉하게 된다.

이러한 일련의 加工過程은 材料의 組織을 변화시키므로 線狀加熱部位에 대해 현미경 조직 및 硬度分布를 조사하였다. 시험편은 Fig. 8과 같은 요령으로 採取하여 가열 표면 밑으로 0.5, 1.0mm 깊이의 조직을 관찰하였으며, 역시 가열 표면 밑 0.5mm 깊이에서 熱影響部 전체에 대한 硬度를 조사하였다. 또한 표면에서 1, 2, 3, 4mm 및 11mm 깊이에서의 경도분포도 조사하였다.

組織觀察에는 광학 현미경을 이용하여 600배로 관찰

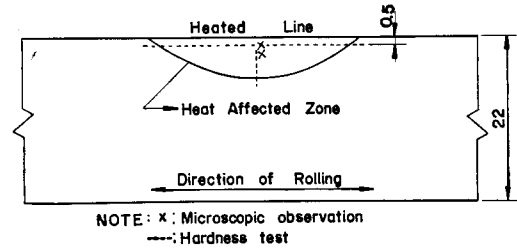


Fig. 8. Method of sampling test piece for microscopic observation and hardness test

하였으며, 硬度測定은 digital micro Vickers hardness tester를 사용하여 0.5kg의 荷重으로 시험하였다. 각 선상가열 조건에 따른 가열단면부의 현미경 조직을 Fig. 9~Fig. 10에 나타내었으며 가열부의 硬度分布는 Fig. 11~Fig. 13에 表示하였다.

선상가열은 移動熱源에 의해 강재의 板 두께 方向으로 各局部에 다른 熱 cycle을 주어 이것에 의해 생기는 熱變形을 利用, 일정한 角變形을 일으키는 方法이다. 따라서 鋼材의 局部的인 材質變化는 이 部分의 최고 가열온도와 加熱 및 冷却過程에 의해 差異가 난다. 특히 水冷하는 경우는 水冷開始에 의해 急激한 冷却이 이루어져 空冷의 경우에 비해서 水冷을 개시하였던 溫度를 境界로 冷却速度가 급격히 변화한다. 그러므로 水冷을 하는 경우에는 최고 가열온도와 함께 水冷開始溫度가 이 部分의 組織 및 硬度와 나아가서는 靱性を 결정하는 큰 要因이 되며, 또한 가열표면에 가까울수록 이의 영향을 더욱 많이 받게 된다. 그러므로 이러한 각 가열부위에 대한 가열 및 냉각개시온도를 측정하여 이 加熱溫度 및 冷却開始溫度와 가열선 밑의 組織變化 및 機械的 性質變化를 檢討해야 한다.

선상가열에 의해 加熱表層部는 Fig. 4와 같은 溫度分布 및 최고 가열온도에 의한 熱 Cycle을 받는다. 이 경우 加熱表層部는 加熱冷却過程에 따라 材質變化和 局部的인 加熱冷却으로 생기는 内部變形에 의한 재질의 변화 때문에 일반적으로 脆化한다. 이 脆化現象은 가열 후 水冷한 경우에 특히 현저한데, 이 원인은 다음과 같이 생각된다.

일반적으로  $A_{c1}$  變態點 이하로 가열된 領域은 가열 중 austenite 變態가 생기지 않으므로 현미경 조직의 변화는 관찰되지 않는다. 그러나  $A_{c1}$  變態點 바로 위의 700~800°C 온도 범위로 가열된 영역은 Pearlite의 부분적 분해에 의해 不安定 조직으로 되어 그것이 700°C 이상에서 急冷됨으로 인해 高炭素 martensite가 생성됨으로 해서 현저히 脆化를 일으킨다. 그리고 이 온도보다 높은 온도로 가열되면 脆化되는 程度는 더욱

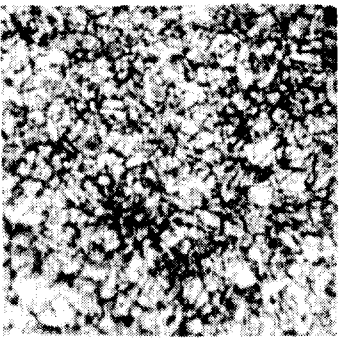
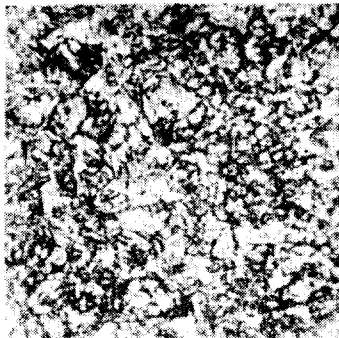

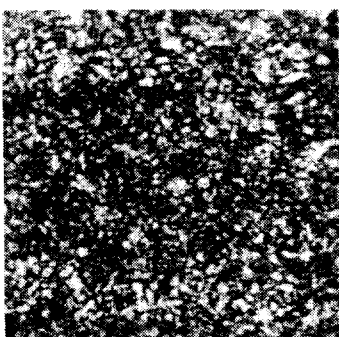
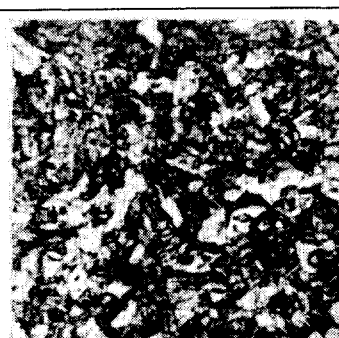
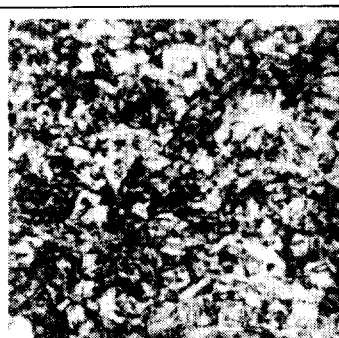


L/H Condition	Microstructure	
	0.5mm	1.0mm
Original Plate		
850 AC		
690 AC 450 WC		
690 AC 680 WC		

Fig. 9. Microstructures of line-heated zone (0.5 and 1.0mm underneath the heated surface)




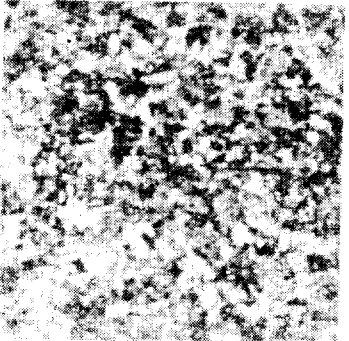

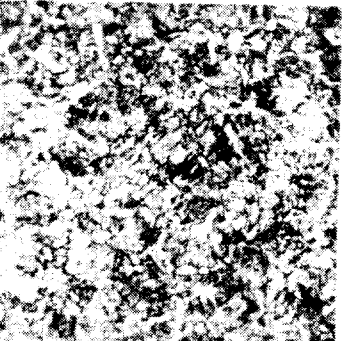

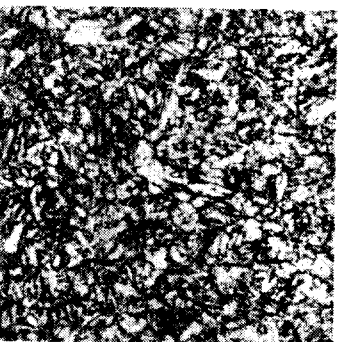
L/H Condition	Microstructure	
	0.5mm	1.0mm
930 AC 780 WC		
810 AC 720 WC		
880 AC 620 WC		
870 AC 460 WC		

Fig. 10. Microstructures of line-heated zone (0.5 and 1.0mm underneath the heated surface)



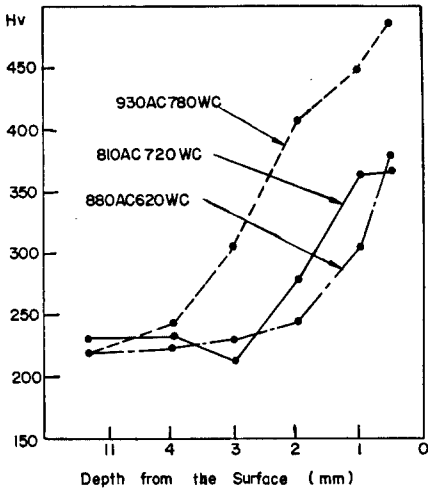


Fig. 11. Hardness distribution

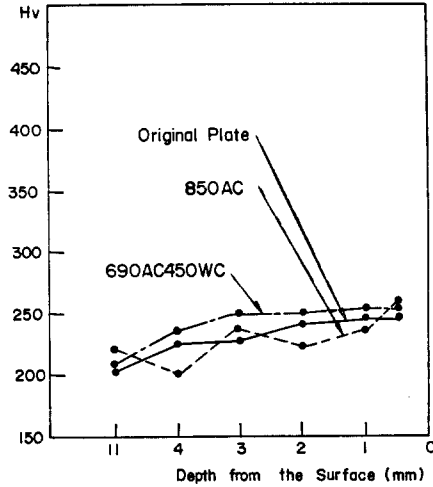


Fig. 12. Hardness distribution

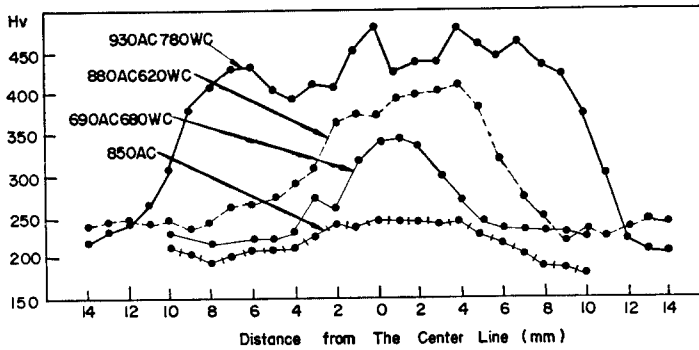


Fig. 13. Hardness distribution at 0.5mm from the surface

크게 된다. 930 AC 780 WC 가열선의 硬度分布 및 현미경 조직을 관찰하면 이 脆化現象이 분명한을 알 수 있다. 그러나 이 領域도 空冷하였을 경우 냉각속도가 완만하여 martensite의 생성이 미흡하기 때문에 큰 脆化는 생기지 않게 된다. 加熱溫度가 800°C 이상이나 水冷開始가 600°C 이하인 경우 martensite의 생성은 없으나 水冷으로 인해 경도는 약간 증가한다. 최고 가열온도가 700°C 이하이고 水冷開始溫度가 500°C 이하인 경우는 가열 후 空冷時와 같이 粒相의 ferrite와 pearlite의 混合組織을 보이고 있다.

이상과 같은 組織의 변화에 따른 加熱部의 硬度分布를 보면, 가열 후 空冷한 것은 별로 硬化되지 않았으나 가열 후 水冷한 경우는 수냉개시온도가 600°C 이상이었을 경우 상당히 硬化되었으며, 최고 가열온도 및 수냉개시온도가 모두 700°C 이상이었던 경우는 硬化部

의 폭과 깊이가 현저히 증가되었고, 最高硬度 역시 급격히 높아졌음을 볼 수 있어 선상가열의 영향이 컸음을 알 수 있었다. 이와는 반대로 가열 후 水冷한 경우 중에서 수냉개시온도가 500°C 이하일 경우는 가열 후 空冷한 경우와 마찬가지로 별로 硬化되지 않았다.

### 3.3 衝擊值

線狀加熱部의 靱性を 評價하기 위하여 V-notch Charpy 衝擊試驗을 실시하였다. 衝擊試驗片은 Fig. 14에서와 같이 정확한 加熱線 中心, 즉 HAZ의 中心을 파악하기 위하여 試驗片 block의 左右 斷面을 etching시켜 가열선 중심을 표시하였다. V-notch Charpy 충격 시험편은 가열 표면을 0.5mm 機械加工한 다음 가열선의 中心에 notch가 위치하도록 하고, notch의 방향은 加熱線 方向이 되도록 하였다.

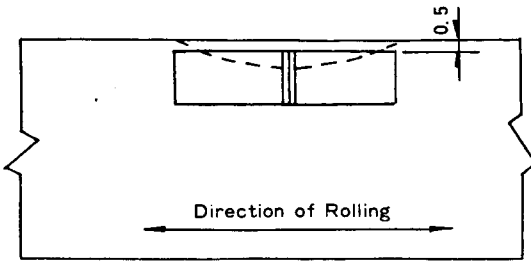


Fig. 14. Method of sampling V-notch Charpy impact test piece

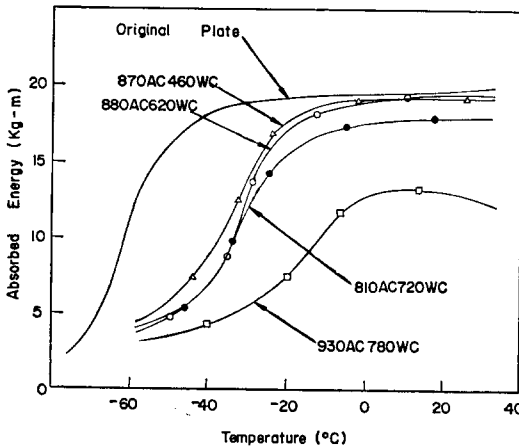


Fig. 15. Charpy V-notch transient curves of line-heated zones, heated to over 800°C and water-cooled from various temperatures

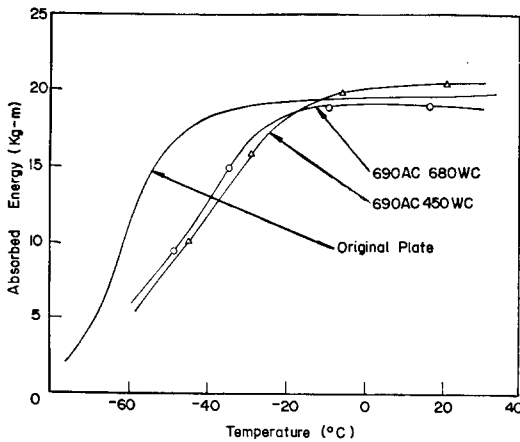


Fig. 16. Charpy V-notch transient curves of line-heated zones, heated to 700°C and water-cooled from various temperatures

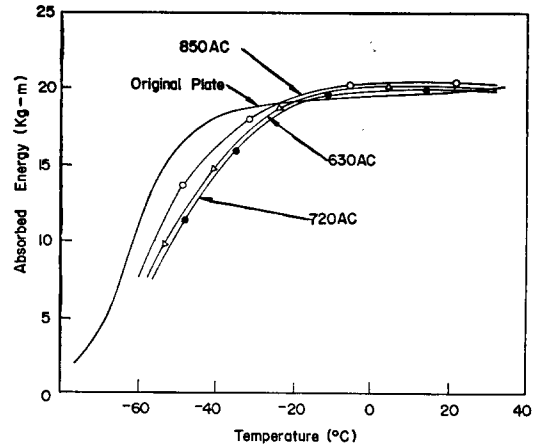


Fig. 17. Charpy V-notch transient curves of line-heated zones, heated to various max. temperatures and air-cooled

Table 3의 加熱條件으로 加工된 강판에 대하여 상기 요령으로 衝擊試驗片을 採取, -40, -20, 0, 20°C에서 V-notch Charpy 충격시험을 실시하여 이의 결과를 Fig. 15~Fig. 17에 나타내었다.

各 線狀加熱에 대한 V-notch Charpy 衝擊試驗 結果를 보면, 加熱溫度가 800~900°C 정도 되더라도 空冷의 경우는 靱性の 低下는 보이지 않는다. 그러나, 시험편을 소정의 최고 온도까지 가열하여 수냉할 경우는 水冷開始가 700°C 이상이면 급격히 脆化現象이 나타난다. 이와는 대조적으로 가열 후 途中水冷할 경우라도 水冷開始가 600°C 이하이면 靱性の 低下는 크게 줄어든다.

이상에서 보면 선상가열부의 靱性は 가열온도 및 冷却開始溫度에 크게 左右되며, 수냉의 경우는 靱성이 떨어짐이 분명하다. 이와 같은 現象은 시험온도가 낮아짐에 따라 더욱 두드러지게 나타난다.

#### 4. 結 論

熔接構造用 50kg/mm<sup>2</sup>級 高張力鋼(SM 50 A)에 대하여 線狀加熱에 의한 變形効果와 材質의 脆化 與否를 연구하여 이에 대해 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 線狀加熱에 의한 角變形量은 最高加熱溫度가 높을수록, 같은 最高 加熱溫度라도 水冷開始溫度가 높을수록 크다.

(2) 700~900°C로 加熱後 空冷하였을 경우, 靱性 低下는 거의 없다.

(3) 700~900°C로 加熱後 700°C 이상에서 途中水冷

하였을 때는 현저히脆化된다.

(4) 700~900°C로 加熱後 水冷開始溫度를 600°C 이하로 制限하면 靱性 低下는 크게 줄어든다.

以上の結論에 의하면 線狀加熱에 의한 角變形 效果를 높이기 위해서는 加熱溫度와 水冷開始溫度를 높여야 되겠지만 그렇게 할 경우 材質이 상당히脆化되므로 가장 理想的인 線狀加熱條件으로는, 700°C 이상 加熱後 600°C 이하에서 水冷을 開始하는 것이 좋다.

#### 參 考 文 獻

1. Toshiro Suhara, *Studies on Thermo-Plastic Working*(1), 日本造船協會 論文集 第103號, 1958
2. Toshiro Suhara, *Studies on Thermo-Plastic Working*(2), 日本造船協會 論文集 第103號, 1958
3. Toshiro Hashimoto, Yoshinori Fujishiro, *An Experiment of Line Heating designed with the Table Orthogonal Array L 32 (2<sup>31</sup>)*, 日本造船協會 論文集 第104號, pp. 201~213, 1958
4. Kunihiro Satoh, Shigetomo Matsui, Kiyoshi Terai, Yoshinari Iwamura, *Water-Cooling Effect on Angular Distortion caused by the Process of Line Heating in Steel Plates*. 日本造船協會 論文集 第126號, pp. 445~458, 1969
5. Fusao Koshiga, Masaaki Ando, *A proposed Method on Notch Toughness Evaluation for Hull Structural Steel plate subjected of Line Heating Process*, 日本造船協會 論文集 第128號, pp. 369~375, 1970
6. 船體用 鋼板의 靱性におよぼす寸間加工と 熔接の 重疊效果およびガス加熱加工 條件の 影響に関する 研究, 日本造船研究協會 第111研究部會, 1972
7. Richard E. Holt, *Primary Concepts for Flame Bending*, *Welding Journal*, Vol. 50, No. 6, pp. 416~424, 1971
8. E. H. Lee, *Control of Welding Distortion*, *Welding and Metal Fabrication*, Vol. 27, No. 3, pp. 104~108, March 1959
9. Masaki Horioka, Masaaki Ando, *On Angular Distortion of Hull Plates by Line Heating Methods*, 日本造船協會 論文集 第133號, pp. 343~348, 1973
10. Hiroshi Kihara, Jiro Suhara, Shigeo Kataoka, Masaki Nakajima, *Effect of Fabricating Method at Assembly Stage on Notch Toughness of Steel Plates* (No. 3), 日本造船協會 論文集 第133號, pp. 331~342, 1973.
11. Toyoo Maeda, *Shrinkage due to Local Heating on a Carbon Steel Plate* (No. 2), 石川島播磨技報, 第2卷, 第6號, 1962
12. Y. natsuyama, T. Hashimoto, *Effect on Brittle Fracture of Forming by Line Heating Method*, 日本造船協會 論文集 第109號, pp. 477~484, 1961
13. 橋本敏郎, 線狀加熱 加工法, 石川島技報, 1960
14. 橋本敏郎, 柏史, 線狀加熱 板曲法に関する研究, 石川島技報, 第13卷, 第40號, pp. 70~76, 1956
15. 崔炳吉, 殘留應力 計測法 開發에 關한 研究, 韓國機械研究所 研究報告書, 1982
16. Richard E. Holt, *Elimination and Correction of Warpage in Weldments*, pp. 46~61, published by ASM, November 1976
17. Z. Philip Saperstein, *Control of Distortion and Residual Stress in Weldments*, ASM, 1976