

〈論 文〉

AISI 4130강의 용접잔류응력에 미치는 열처리의 영향

양영수* · 나석주* · 김원훈** · 조원만**

(1991년 7월 13일 접수)

Effect of Heat Treatments on Welding Residual Stresses of AISI 4130 Steel

Y.S. Yang, S.J. Na, W.H. Kim and W.M. Cho

Key Words : Residual Stress(잔류응력), Pre-Heating(예열), Post-Heating(후열), AISI 4130 Steel(AISI 4130강), GTAW(가스 텅스텐 아크용접)

Abstract

The effect of heat treatments were considered on the residual stress fields of AISI 4130 weldments. In experiments, various heat treatments such as preheating, postheating, stress relieve annealing and hardening treatment were carried out for the GTA weldments and the residual stress was measured by using the hole drilling method. The post weld heat treatment at 230°C, which aimed mainly to prevent the possible weld cracking, was found to have only a negligible effect on the welding residual stress distribution, while the annealing treatment at 600°C almost completely removes the residual stress. It was also revealed that the hardening treatment causes no further residual stresses in weldments.

1. 서 론

아크를 이용하여 공작물에 열을 가하면 국부적인 가열에 의해 불균일한 온도분포를 갖게되어 모재에 열응력이 발생한다. 모재가 열을 받으면 항복응력이 저하하기 때문에 발생한 열응력은 항복응력을 초과하여 소성변형을 일으키고 냉각, 수축후 최후에 재료내부에 잔류응력을 생성시켜 균열발생, 피로강도저하 등 많은 문제점을 야기시킨다. 위와 같은 현상은 용접공정에서 일반적으로 나타나는 것으

로 많은 연구가 되어왔다^(1~4). 특히 고강도 강이나 후판용접에서는 열변형에 저항할 수 있는 강도가 크기 때문에 열변형이 적고 큰 잔류응력이 발생한다.

AISI 4130 강은 대부분 열처리후에 사용되는 고강도강으로 용접시 발생하는 높은 잔류응력 분포를 제거 또는 감소시키기 위해서 여러가지 방법이 사용된다. 잔류응력 제거는 용접후 풀림처리를 하면 잔류응력이 제거된다. 그러나 풀림처리 하기전에 용접부에 높은 잔류응력에 의해 균열이 생성될 수 있으므로 용접시 높은 잔류응력이 생성되지 않도록 예열 및 후열처리를 필요로한다. 그러므로 본 연구에서는 예열 및 후열이 잔류응력 분포에 어떠한 영향을 주는가를 실험적인 방법에 의해 연구하였다.

*정회원, 한국과학기술원 생산공학과

**정회원, 국방과학연구소

2. 잔류응력 측정법

2.1 Hole Drilling 방법에 의한 잔류응력 측정원리

잔류응력이 존재하는 평판에 구멍을 내면 (Fig. 1), 점 P에서 변형률 변화량은 σ_x, σ_y 의 크기, 구멍으로부터의 거리, 응력상태등에 따라 다르다. Fig. 1에서 σ_x 만 작용할때 r 방향의 변형률은 Kirsch 해에 의해 다음과 같이 나타난다⁽⁵⁾.

$$\epsilon_r = -\sigma_x \frac{1+\nu}{E} \left\{ \frac{1}{r^2} - \frac{1}{r^4} \cos 2a \right. \\ \left. + \left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} \cos 2a \right\} \quad (1)$$

$$\epsilon_\theta = -\sigma_x \frac{1+\nu}{2E} \left\{ -\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2a \right. \\ \left. - \left(\frac{4\nu}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} \cos 2a \right\} \quad (2)$$

$\epsilon_r, \epsilon_\theta$: 점 P에서 이완된 반지름방향과 접선방향의 수직변형률

σ_x, σ_y : 주응력

$r=R/R_o$: 구멍으로부터 점 P까지의 무차원 반경
 E, ν : 탄성계수와 프와송비

식 (1), (2)는 일반적인 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2a) \quad (3)$$

$$\epsilon_\theta = \sigma_y (-A + C \cos 2a) \quad (4)$$

여기서

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right)$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left\{ \left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right\}$$

$$C = -\frac{1+\nu}{2E} \left\{ -\left(\frac{4\nu}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \right\}$$

만약 σ_x, σ_y 응력이 동시에 작용하면 식 (1)은 다음과 같다.

$$\epsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2a) \\ + \sigma_y (A + B \cos (2a + \pi)) \quad (5)$$

수식 (5)의 A, B는 이론적인 전개에 의해 직접 계산이 가능하다. 그러나 실제 적용에 있어서는 이론 전개시 가정들을 보상할 수 있는 \bar{A}, \bar{B} 를 사용한다. 특히, 후판시 사용하는 blind hole drilling 방법에는 적절한 \bar{A}, \bar{B} 가 요구된다.

Fig. 2에서 스트레인 게이지 1, 2, 3에서의 반지름 방향 변형률을 ϵ_r 이라 하여 Fig. 1과 비교하면,

$$a = \beta_x \text{인 경우 } \epsilon_r = \epsilon_1$$

$$a = \beta_x + \pi/4 \text{인 경우 } \epsilon_r = \epsilon_2$$

$$a = \beta_x + \pi/2 \text{인 경우 } \epsilon_r = \epsilon_3$$

이 되므로 주응력 σ_x, σ_y 와 주응력 방향 β 는 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 를 이용하여 다음과 같은 수식으로 얻을 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4\bar{A}} + \frac{\sqrt{2}}{4\bar{B}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4\bar{A}} - \frac{\sqrt{2}}{4\bar{B}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (7)$$

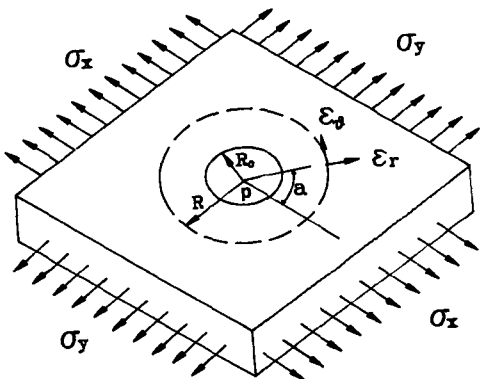


Fig. 1 Strain relaxation at point P due to the introduction of a hole

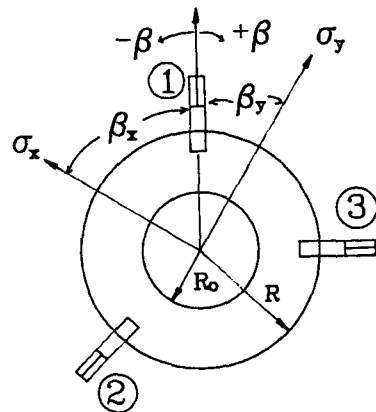


Fig. 2 Strain gage rosette arrangement for determining residual stresses

$$\tan 2\beta = \frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_3 - \epsilon_1} \quad (8)$$

$(\epsilon_1 + \epsilon_3)/2 < \epsilon_1$ 인 경우 $\beta = \beta_x$

$(\epsilon_1 + \epsilon_3)/2 > \epsilon_1$ 인 경우 $\beta = \beta_y$

$\epsilon_1 = \epsilon_3$ 인 경우 $\beta = \pi/4$

실제 실험에서 사용하는 \bar{A} , \bar{B} 는 스트레인 게이지 제작회사의 데이터로 주어진다.

2.2 잔류응력 측정실험

용접 비이드를 줄(file)로 제거하여 모재와 평형을 이루도록하고 사포 #100~#400을 차례로 사용하

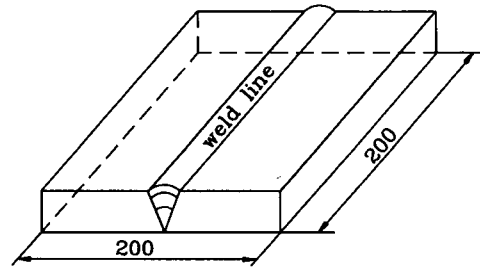
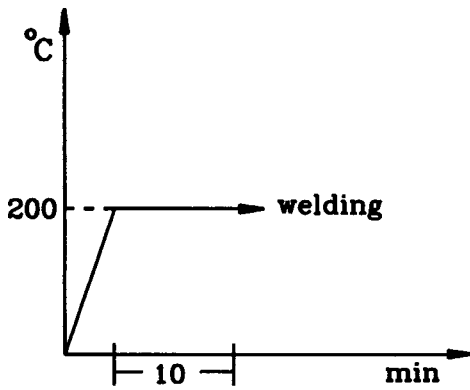
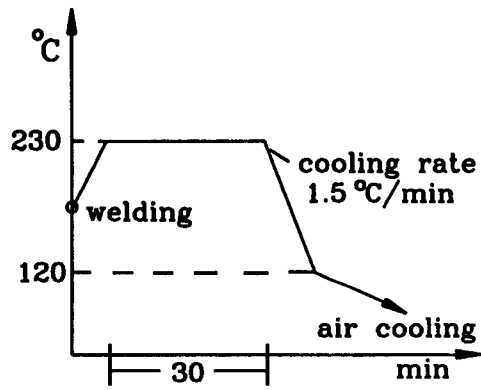


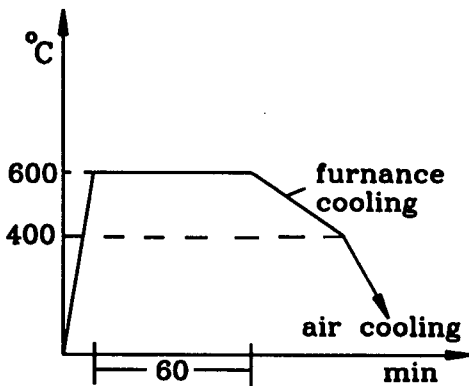
Fig. 3 Size and shape of weld specimen



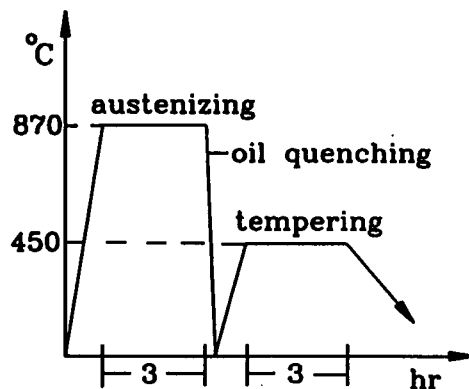
(a) Pre-heating



(b) Post-heating



(c) S.R.A.



(d) H.T.

Fig. 4 Pre-heating and Post-heating conditions

여 표면을 연삭하였다. 이때 줄작업에 의해 응력이 생성되지 않도록 손작업으로 천천히 연삭하는 세심한 주의를 필요로 한다. 측정 하고자 하는 시편의 표면에 잔류응력 측정용으로 제작된 스트레인 게이지 로제트(strain gage rosette)을 부착한다. 스트레인 게이지를 붙인 후 안내장치(guide apparatus)를 설치하고 현미경으로 구멍중심을 맞춘다. 이때 사용한 스트레인 게이지에는 구멍을 뚫을때 중심이 일치하도록 원주위에 4방향으로 표시가 있으므로 현미경을 회전시키며 정확히 맞춘다. 구멍 뚫기는 air abrasive jet machine을 사용하였으며 구멍을 뚫을때 발생하는 변형률의 변화값은 switch and balance unit와 변형률 지시계를 이용하여 측정하였다.

2.3 실험시편

길이 200mm, 폭 100mm AISI 4130 평판에 V

그루브(groove)를 만들고 용접하여 Fig. 3과 같은 형상의 폭이 200mm인 실험 시편을 제작하였다. 시편두께는 4.06mm, 6.35mm 두가지 종류이고, 용접공정은 GTAW법을 사용하였으며 용접시 용가재를 공급하였다. 용접조건은 전류 300A, 전압 10V, 용접속도 20cm/min, 용접층(welding pass)수는 두께에 따라 2 혹은 3 층을 사용하였으며 예열 및 후열처리 조건은 Fig. 4와 같다. 예열 및 후열조건은 실제 현장에서 사용되고 있는 조건을 선정하였다. 또한 AISI 4130 용접부의 일반적인 잔류응력 형태를 알기위해 두께 3mm 평판에 GTAW bead-on-plate 용접을 전류 100A, 전압 12V, 용접속도 2mm/sec 조건에서 실시한후 잔류응력을 측정하였다. AISI 4130 강 및 용가재의 화학적 성분을 Table 1에 나타내었는데 탄소량이 0.3% 정도로 상당량 포함되어 있음을 알 수 있다. Table 2에는 실험에 채택된 열처리조건들이 나타나 있다.

Table 1 Chemical composition of AISI 4130 steel and filler wire

(wt %)

	thickness [mm]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
base metal	4.06	0.31	0.32	0.61	0.007	0.016	1.06	0.25
	6.35	0.29	0.25	0.52	0.007	0.017	0.93	0.21
filler wire	Ø1.58	0.31	0.28	0.52	0.010	0.023	0.99	0.16

Table 2 Conditions of experimental heat treatments

Material	Process	Thickness	Specimen Condition	Remarks	
AISI 4130	GTAW	3mm	Bead-on-plate Welding		
			6.35mm (0.25")	Pre-heating + Welding	GW (6.35t)
				Pre-heating + Welding + Post-heating	GP (6.35t)
				Pre-heating + welding + Post-heating + S.R.A.	GS (6.35t)
		Pre-heating + Welding + Post-heating + S.R.A. + H.T.		GH (6.35t)	
		4.06mm (0.16")	Pre-heating + Welding	GW (4.06t)	
			Pre-heating + Welding + Post-heating	GP (4.06t)	
			Pre-heating + Welding + Post-heating + S.R.A	GS (4.06t)	
			Pre-heating + Welding + Post-heating + S.R.A. + H.T.	GH (4.06t)	

3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 두께 3mm AISI 4130 강에 대해 bead-on-plate 용접후 잔류응력을 측정된 값으로 AISI 4130 재료의 용접후 잔류응력 분포가 일반적으로 어떤 형태로 나타나는지 관찰하기 위해 실험한 결과이다. 용접에서 발생한 열응력 및 잔류응력은 길이방향 (x -dir.) 응력이 가장 크게 작용하기 때문에 길이방향 응력을 고찰의 대상으로 선택하였다. 용접토치가 주어진 임의의 단면을 지나갈 때 온도가 최대치를 이루어 열원주위에서는 온도변화가 급격하고 압축항복응력에 의해 소성변형이 발생한다. 이때 까지는 가열과정만 거치므로 용접부 주위에서는 압축응력이 나타나고 힘의 자체평형을 만족하기 위해 중앙에서 멀어진 영역에서는 인장응력이 나타난다. 온도가 계속 상승함에 따라 항복응력이 저하하여 압축응력은 감소하나 계속 가열하고 있기 때문에 압축응력 영역은 늘어난다. 냉각이 진행됨에 따라 수축이 일어나므로 열원주위에서부터 인장응력이 나타나서 값이 커진다. 일반 저탄소강 용접에서는 잔류응력분포가 용접부 주위에서 항복응력 정도의 인장잔류응력으로 나타나나 AISI 4130 강에서는 Fig. 5와 같이 용접부 주위에서 적은량의 압축잔류응력이 나타난다. 특히 열영향부에

서도 비교적 작은 크기의 인장잔류응력이 작용되고 있다. 이와같은 현상은 냉각시 마르텐사이트 상변태(martensite phase transformation)가 발생할때 나타나는데, 그 원인은 오스테나이트(austenite)나 페라이트(ferrite)에 비해서 마르텐사이트의 밀도가 낮아서 부피가 팽창되기 때문이다⁽⁶⁾. 이와같이 용접부에 압축응력, 열영향부에 낮은 인장응력이 발생한 것은 용접부의 큰 문제점 중의 하나인 용접균열문제를 감소시켜 줄 수 있을 것으로 여겨진다. 즉, 용접부의 열영향부는 용접후 재료가 경(brittle)하여 지기 때문에 높은 인장잔류응력에 의해 균열(crack) 등이 발생하기 쉽다. 따라서 AISI 4130 강에서는 열영향부에서 적은량의 인장잔류응력이 작용하므로 균열발생의 위험이 줄어들었다고 생각할 수 있다. 그러나 잔류응력이란 언제나 힘의 평형을 만족하기 때문에 열영향부 주위의 모재에서 높은 인장잔류응력이 나타난다. 모재에서 약 55 kg/mm²정도의 최대 인장잔류응력이 나타나므로 용접전 모재가 경(brittle)하지 않도록 적절한 용접전 열처리를 하여야 할 것으로 사료된다.

Fig. 6은 두께 6.35mm AISI 4130 강의 예열+GTA용접한 시편의 잔류응력 값을 나타내고 있다. 이때 최대 인장잔류응력은 약 30kg/mm²으로서 모재의 항복강도나 bead-on-plate 용접시의 최대 인장잔류응력보다 낮게 나타나고 있다. 이것은 예열

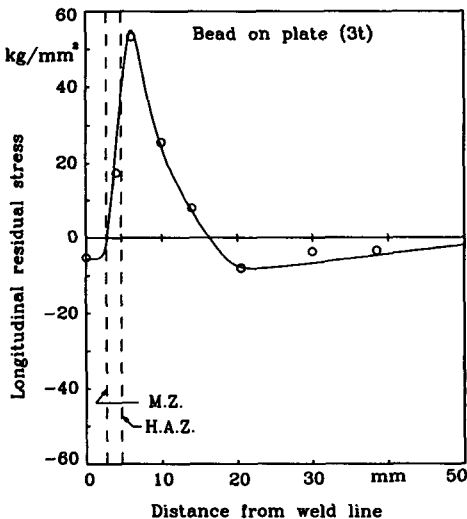


Fig. 5 Longitudinal residual stress on upper surface of 3mm thickness AISI 4130 (bead-on-plate welding)

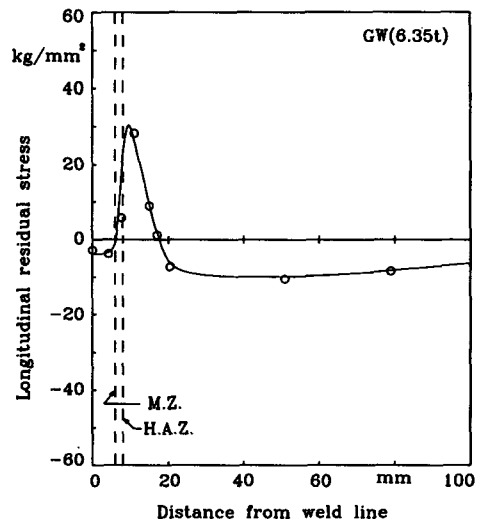


Fig. 6 Longitudinal residual stress on upper surface of 6.35mm thickness AISI 4130 (Pre-Heating+GTA welding)

시 시편의 전체 온도를 200°C로 가열하여 열응력의 근본 원인인 온도의 불균일한 분포가 예열하지 않은 것 보다 덜 심하기 때문이라 사료된다. 즉 온도 구배가 크지 않기 때문에 적은량의 열응력이 발생하고, 가열후 냉각할때 200°C가 되면 시편의 전체 영역의 온도가 균일하게 되기 때문에 열응력과는 무관하게 상온으로 냉각되므로 마지막의 잔류응력도 적은값으로 나타날 것이다.

Fig. 7은 두께 4.06mm AISI 4130 강의 예열 + GTA 용접한 시편으로, 6.35mm의 경우에 비하여 인장과 압축의 경우에 모두 약간 적은량의 잔류응력이 나타난다. 이것은 두께가 얇기 때문에 열응력에 저항하는 강도가 상대적으로 낮으므로 6.35mm의 판재보다 많은 변형을 하여 잔류응력이 적게 나타난 것으로 사료된다. 그러나 전반적인 잔류응력 분포는 6.35mm 판재의 경우와 유사하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8은 AISI 4130 강 6.35mm 두께의 시편에 대해 예열 + GTA 용접 + 후열처리 한후의 잔류응력을 측정 한 결과인데 Fig. 6과 비교할 때 거의 차이가 나타나지 않고 있다. 이들 그림으로부터 용접후 생성된 잔류응력은 230°C에서 30분간 후열처리를 하여도 잔류응력이 전혀 감소하지 않음을 알 수 있다. 즉, 230°C에서의 후열처리는 용접잔류응력의 형성에 결정적인 용접부의 온도구배와 냉각속도등

에 영향이 거의 없음을 대변한다. 이것은 용접이 완료된후 수십초후까지는 용접잔류응력의 생성이 거의 완료되어 230°C의 후열처리효과가 200°C의 예열처리효과에 가리어져 독자적인 영향을 나타내지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 4.06mm 두께의 판재에 대해서도 6.35mm의 경우와 유사하여 후열처리후의 잔류응력분포에는 거의 변화가 없었다.

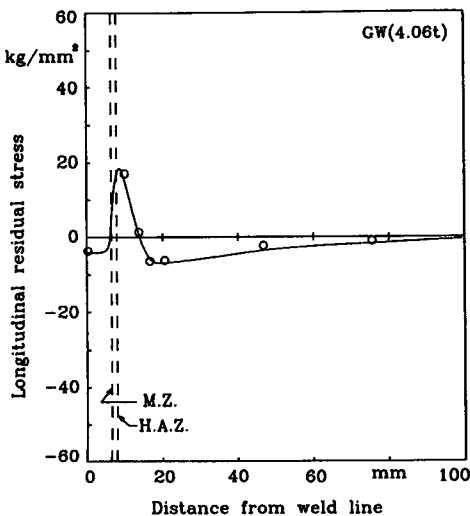


Fig. 7 Longitudinal residual stress on upper surface of 4.06mm thickness AISI4130 (Pre-heating + GTA welding)

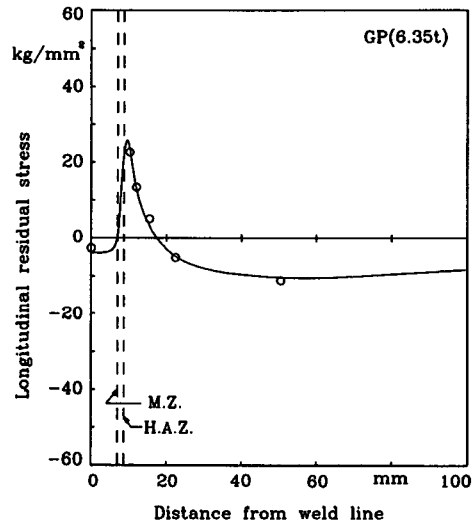


Fig. 8 Longitudinal residual stress on upper surface of 6.35mm thickness AISI 4130 (Pre-heating + GTA welding + Post-heating)

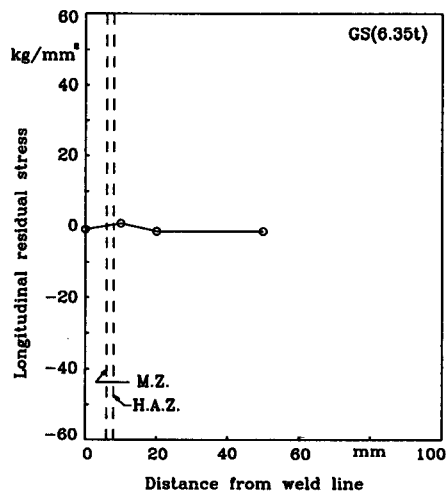


Fig. 9 Longitudinal residual stress on upper surface of 6.35mm thickness AISI 4130 (Pre-heating + GTA welding + Post-heating + Stress relieving)

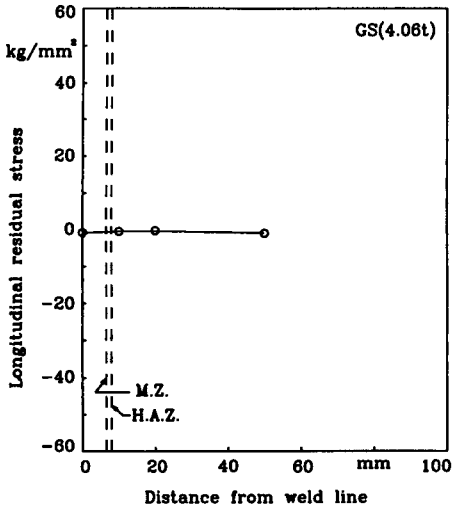


Fig. 10 Longitudinal residual stress on upper surface of 4.06mm thickness AISI 4130 (Pre-heating + GTA welding + Post-heating + Stress relieving)

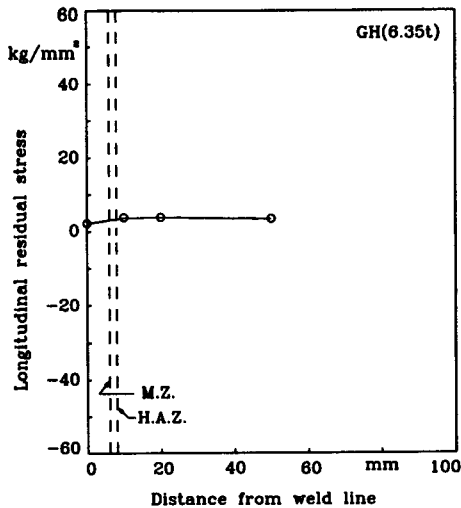


Fig. 11 Longitudinal residual stress on upper surface of 6.35mm thickness AISI 4130 (Pre-heating + GTA welding + Post-heating + Stress relieving + Hardening treatment)

Fig. 9와 10은 AISI 4130 강 6.35mm, 4.06mm 두께의 각 시편 대해 예열+GTA 용접+후열+풀림처리 공정후 잔류응력을 측정된 것으로 용접잔류응력이 제거되어 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 이것은 600°C에서 1시간 동안 풀림처리하는

동안 비교적 고온인 이 온도에서는 재료의 항복강도가 낮아져서 잔류응력하에서도 소성변형이 발생하고 또한 고온 크립(creep)현상이 발생하기 때문에 잔류응력이 거의 완전하게 제거되었다고 사료된다.

Fig. 11은 AISI 4130 강 6.35mm 두께와 시편에 대해 예열+GTA 용접+후열+풀림처리+경화처리 공정후 잔류응력을 측정된 것으로, 풀림에 의해 잔류응력이 완전히 제거된 후에 경화처리에 의해서는 새로운 잔류응력이 생성되지 않았음을 알 수 있다. 이때 경화처리는 870°C에서 3시간 고온화처리후 기름 담글질(oil quenching)하고, 다시 450°C에서 뜨임(tempering)처리 하였다. 또한 4.06mm 두께의 판재에 대해서도 이와 유사하여 경화처리에 의해서는 새로운 잔류응력이 생성되지 않음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

AISI 4130강의 GTA용접시 예열 및 후열처리가 용접잔류응력에 미치는 영향을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) AISI 4130 재료의 bead-on-plate 용접에서 최대 인장잔류응력은 항복점 정도의 크기를 나타내는 반면, 예열+용접한 시편의 최대 인장잔류응력 값은 bead-on-plate 용접 경우의 반(1/2) 이하로 감소한다. 이것은 예열에 의해 열응력의 근본원인인 온도구배가 감소하였기 때문이다.

(2) AISI 4130 강은 저탄소강의 용접부에서 일반적으로 나타나는 잔류응력 분포와 다르게 용접부에서 압축잔류응력이 나타난다.

(3) AISI 4130 강 용접후 예열온도와 유사한 온도에서의 후열처리에 의해서는 용접시 생성된 잔류응력값이 거의 변화하지 않는다.

(4) AISI 4130 강 풀림처리에 의해서 용접시 생성된 잔류응력이 거의 완전히 제거된다.

(5) AISI 4130강 풀림처리후 경화처리에 의해서는 새로운 잔류응력이 생성되지 않는다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었다. 이에 국방과학연구소의 관계자 여러분에게 감사드린다.

참고문헌

- (1) Friedman, E., 1975, "Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method," Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, Vol. 97, pp.206~213.
- (2) Andersson, B.A.B., 1978, "Thermal Stresses in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformations," Journal of Engineering Materials and Technology, Transaction of the ASME, Vol. 100, pp. 356~362.
- (3) Snyder, M.K. and Bathe, K.J., 1981, "A Solution Procedure for Thermo-Elastic-Plastic and Creep Problems," Nuclear Engineering and Design, Vol.64, pp.49~80.
- (4) Papazoglou, V.J. and Masubuchi, K., 1982, "Numerical Analysis of Thermal Stresses during Welding Including Phase Transformation Effects," Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, Vol. 104, pp.198~203.
- (5) Measurements Group, 1985, "Measurement of Residual Stresses by Hole-Drilling Strain-Gage Method," TECH NOTE TN-503-1, U.S.A.
- (6) Yang, Y.S., and Na, S.J., 1990, "A Study on the Thermal and Residual Stress by Welding and Laser Surface Hardening Using a New Two-Dimensional Finite Element Model," Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.204, pp.167~173.