

서클러 패치 용접으로 인한 잔류응력의 측정과 해석

함원국

수송시스템공학부

<요 약>

circular patch welding 과정에서 발생하는 잔류응력의 크기를, 철판의 두께와 구멍의 직경의 변화에 따라 어떤 양상을 보이는지, 계측하고 그 결과를 해석하며 이로 인한 균열을 방지하는데 필요한 지침을 얻고자한다. 판 두께는 6mm/9mm로 구멍의 직경은 150 ϕ /200 ϕ /250 ϕ /300 ϕ 하여 CO₂ 용접을 하고 Strain gage를 부착하여 천공하여 잔류응력 값을 계측하였다. 이 연구의 결과는 아래와 같다. ;

- 1) 반경방향과 원주방향의 인장 잔류응력 값이 직경이 작아질수록, 판의 두께가 증가할수록 큰 값으로 나타났다.
- 2) 잔류응력의 값은 용접선에 근접할수록 더 큰 값을 나타내었다.
- 3) 균열 방지를 위하여, 비석법/후퇴법등의 용접순서를 사용하고 cover plate를 oval 형으로 굽힘을 주어 부착함이 유효함을 알게되었다.

Effect and Measurement of Residual Stresses due to Circular Patch Welding

Ham, won-kuk

School of Transportation System Engineering

<Abstract>

This experimental study has been carried out in order to measure the magnitude of residual stresses and to analyse the effect of residual stresses on the vicinity of weld line according to CO₂ welding. The result of this study can be summarized as follows :

1) Residual stresses of axial and circumferential direction increase in accordance with the increment of plate thickness and decrement of diameter of circular patch.

2) The value of residual stress on the vicinity of weld line is higher than the value of any other point

3) In order to avoid the crack, keep the weld sequence and initial slightly curvature of inner cover plate.

1.서론

용접구조물의 초기형상 결함과 잔류응력은 정도의 차이는 있지만 대부분의 구조물에 존재한다. 따라서 어떤 부재의 용접 시, 그 부재에 대한 용접부의 잔류응력의 분포 상황과 그 크기를 알고 이를 최종강도의 해석과정에 반영하여야 한다.

이 보고서는 서클러 패치(Circular Patch)용접으로 인한 잔류응력의 변화를 Circular Patch Plate의 반경의 크기와 판의 두께를 달리하면서 용접선의 원주방향과 축 방향의 잔류응력을 측정하고 해석한 것이다. 이 실험의 목적은 용접 잔류응력이 최대가 되는 Circular Patch Plate의 반경의 크기와 이로 인한 균열방지 대책을 강구하고자 한다.

2. 잔류응력 측정 이론

잔류응력 측정방법에는 파괴 또는 비파괴 응력 측정법이 있으며, 여기서는 비파괴 응력 측정법중 비교적 간편하고 정확한 Blind-hole Drilling Method를 이용하고자 한다. Hole Drilling 기법은 Mather가 최초로 제안하였으며 Bush와 Kromer가 Hole Drilling 기법으로 잔류응력을 간단히 측정할 수 있는 장치를 개발하였다. 본 실험에서는 Blind-hole Drilling Method를 이용하였다.

잔류응력이 걸려 있는 부위에 반경 R_0 인 작은 구멍을 뚫을 때, 구멍 중심에서 R만큼 떨어진 점 P에서 이완되는 변형도와 크기 및 방향은 국부 주응력을 σ_1 , 측정된 변형률을 ϵ_r , ϵ_θ 및 $\gamma_{r\theta}$ 라 할 때, 아래 식으로 표현한다.

$$\epsilon_r = -\sigma_1 \frac{1+\nu}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} \cos 2\alpha \right] \quad (1a)$$

$$\epsilon_\theta = -\sigma_1 \frac{1+\nu}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \left(\frac{4\nu}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} \cos 2\alpha \right] \quad (1b)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{\sigma_1}{2G} \left(-\frac{3}{r^4} - \frac{2}{r^2} \sin 2\alpha \right) \quad (1c)$$

$$\epsilon_r - \epsilon_\theta = -\sigma_1 \frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{2}{r^2} - \frac{6}{r^4} + \frac{4}{r^2} \cos 2\alpha \right) \quad (1d)$$

여기서 ϵ_r : 임의 점 P에서 이완된 반경방향 변형률
 ϵ_θ : 점 p에서 이완된 접선 방향 변형률
 $\gamma_{r\theta}$: 점 P에서 이완된 전단변형률
 $r = R_1 / R_0$

식 (1a), (1b), (1c)를 일반적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\epsilon_r = \sigma_1 (A + B \cos 2\alpha) \tag{2}$$

$$\epsilon_\theta = \sigma_1 (-A + C \cos 2\alpha)$$

여기서 A, B, C는 다음과 같다.

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

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

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

σ_1 , σ_2 의 2축 인장응력이 작용할 때, 반경방향 변형도와 접선방향 변형도가 같고 반경 R_0 의 구멍을 뚫었을 때, 점 P에서 이완된 변형률(ϵ)은 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$\epsilon = \sigma_1 (A + B \cos 2\alpha) + \sigma_2 [A + B \cos 2(\alpha + 90^\circ)] \tag{3}$$

$$\gamma_{r\theta} = 0$$

3. 잔류응력 측정실험

3.1 실험 재료

시중에서 구입이 가능한 KS 규격 SS41 탄소강판(탄소함량 0.08~0.12%이내)으로, 항복강도 265~343 N/mm²으로 Strain을 측정한다. 사용할 재료의 내역은 다음과 같다.

(1) 강판의 화학 조성

성분	C	Mn	Si	P	S	Al
함량 (Wt%)	0.075~0.12	0.45~0.52	0.008~0.013	0.010~0.018	0.010~0.015	0.015~0.030

(2) 강판의 기계적 성질

Tensile strength (N/mm^2)	Yield strength (N/mm^2)	Rupture strain (%)
382~432	265~343	36~43

3.2 모형의 용접조건

(1) 시편

실험에 사용된 Circular Patch Plate의 모형은 2가지 종류로 각각의 특성은 다음과 같다.

A- group : 두께가 6mm인 유공판의 Circular Patch Welding에 대한 접선과 법선 방향의 잔류응력의 크기를 측정한다. 구멍 반경이 150mm, 200mm, 250mm, 300mm 인 시편

B-group : 구멍반경이 150mm, 200mm, 250mm, 300mm인 두께 9mm의 시편

(2) 용접조건

폐쇄용접 조건은 Table. 1과 같으며, 스트레인 게이지의 부착위치는 Fig. 6, 7과 같다.

Table 1. Welding conditions for models

Model	아크전압 (V)	아크전류 (A)	용접입열 (KJ/cm)	용접속도 (cm/min)	용접조건
A150-1	20	150	4.4	37	두께에 따라 입열량 일정, 용접순서 일정
A150-2	20	150	4.4	37	
B150-1	22	180	5.3	37	
B150-2	22	180	5.3	37	
A200-1	20	150	4.4	37	
A200-2	20	150	4.4	37	
B200-1	22	180	5.3	37	
B200-2	22	180	5.3	37	
A250-1	20	150	4.4	37	
A250-2	20	150	4.4	37	
B250-1	22	180	5.3	37	
B250-2	22	180	5.3	37	
A300-1	20	150	4.4	37	
A300-2	20	150	4.4	37	
B300-1	22	180	5.3	37	
B300-2	22	180	5.3	37	

<notes> $Q = \eta \frac{60IV}{v}$, net heat input(KJ/cm)

η : thermal efficiency

I : Ampere
 V : voltage
 v : welding speed(cm/min)
 CO_2 gas flow rate : 12 l/min
 wire dia : 0.9 ϕ

Table. 2 A150,200 B150,200 시편의 잔류응력 측정결과

Gage No.	Gage position (mm)	A150	B150	A200	B200	Gage position (mm)
		σ	σ	σ	σ	
A	0	8.1	15.3	7.12	9.8	0
		4.65	6.4	4.82	7.2	
B	40	9.56	16.5	8.65	12.78	65
		6.87	9.5	5.76	8.2	
C	70	13.53	19.8	10.65	15.7	95
		8.97	14.3	6.64	8.77	
D	80	13.19	19.7	6.4	10.76	105
		8.14	14.8	5.23	6.8	
E	110	4.26	13.4	3.27	5.7	135
		3.13	7.4	4.2	5.12	
F	150	-2.5	6.2	1.23	-1.25	200
		1.35	2.6	3.3	1.27	

(주) $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$

잔류응력 σ : kg/mm^2

hoop/axial

Table. 3 A250, 300 B250, 300 시편의 잔류응력 측정결과

Gage No.	Gage position (mm)	A250	B250	A300	B300	Gage position (mm)
		σ	σ	σ	σ	
A	0	3.85	6.67	0.48	1.89	0
		3.78	5.58	0.44	1.25	
B	90	4.47	6.57	0.78	3.08	115
		4.12	5.85	0.84	2.19	
C	120	6.39	11.3	1.76	5.57	145
		4.45	6.46	1.54	2.84	
D	130	6.48	11.57	1.79	5.38	155
		4.47	6.89	1.43	1.84	
E	160	1.45	1.13	0.22	1.06	185
		1.22	2.46	0.51	0.81	
F	250	0.98	1.16	-0.13	-1.04	300
		0.57	1.11	0.12	0.14	

$$\text{주) } E = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{잔류응력 } \sigma : \text{kg/mm}^2$$

hoop/axial

3.3 잔류응력의 측정

(1) 실험장치의 구성

본 실험의 잔류응력 측정은 ASTM E837 규정에 따르며, M-M사 제품인 RS-200 Drilling Milling Guide와 변형률 계측장치로 System-4000을 사용하였다. Fig. 6, 7과 같이 평판에 스트레인 게이지를 지정된 위치에 부착한다.

그리고 스트레인 게이지를 접착부에 부착시키고 난 후, 스트레인 게이지에 리드 선을 연결하여 테스터를 사용하여 부착 성공 여부를 확인 후, System-4000의 단자에 연결한다. Fig. 8, 9는 스트레인 게이지의 부착과 리드선의 연결 작업을 보여준다.

잔류응력 측정 Drilling mill을 스트레인 게이지의 중앙 교차점에 정확히 맞춘 뒤 Hand drill로 1.2~2D(구멍직경) 정도 천공하여 이완되는 잔류응력의 크기를 측정하여 용접으로 인한 평판의 잔류응력 분포상태를 파악하고자 한다. 측정장비의 설치는 Fig. 10, 11, 12와 같다.

(2) Strain의 측정

상기 Model에서 판 두께와 구멍직경의 변화에 따른 잔류응력의 변화를 조사하고 잔류응력의 최대치가 존재하는 한계를 알고자 한다. Table. 1에서 볼 수 있는 것과 같이 용접 입열량의 변화는 판 두께에 따라 일정하게 하였다. 스트레인 게이지의 부착 위치는 시편의 정해진 위치에서 원주방향(σ_θ)과 반지름 방향(σ_r)으로 Fig. 6, 7과 같이 Table 2, 3의 Gage position 간격으로 부착하여 측정한다.

(3) 잔류응력의 측정

Strain gage의 부착 위치와 잔류응력의 측정 결과를 정리하였다. 시편 A-group과 B-group의 부착 위치와 잔류응력 값은 Table. 2 그리고 Table. 3에 정리하였다. Table. 2와 그리고 Table. 3을 근거로 하여 CO_2 용접으로 인한 접선방향과 법선 방향의 응력의 변화량을 알 수 있었다.

4. 잔류응력 측정 실험결과의 고찰

두께 6mm 판과 9mm 판의 Circular Patch의 지름에 따른 잔류응력의 변화량을 측정한 것을 Table 2, 3에 정리한 것인데, 이를 도시한 것이 Fig 1(a),(b), 2(a), (b), 3(a), (b) 4(a), (b) 이다. 여기서 두 부재의 측정값들을 분석하면 다음과 같다.

A-group : 6mm 두께를 가지는 유공 판의 Circular Patch Welding에서 용접 선으로부터 멀어질수록 잔류응력 측정값이 작아지고 Circular Patch의 지름이 커질수록 용접선

방향과 원주방향의 잔류응력의 측정값이 작아짐을 볼 수 있다.

B-group : 9mm 두께를 가지는 유공 판의 Circular Patch Welding Line 주위의 잔류응력 측정 결과는 6mm의 시편 결과와 같은 양상을 보였다. 하지만, 같은 Circular Patch 반경을 가지는 6mm 시편보다 잔류응력의 측정값이 크게 나타 났다.

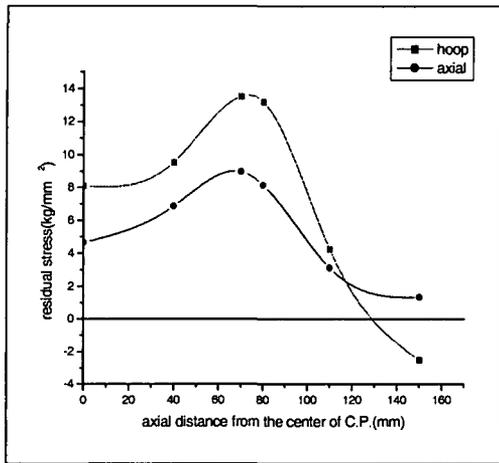


Fig.1(a) 유공판(t=6, d=150)의 CO₂ 용접으로 인한 잔류응력의 분포

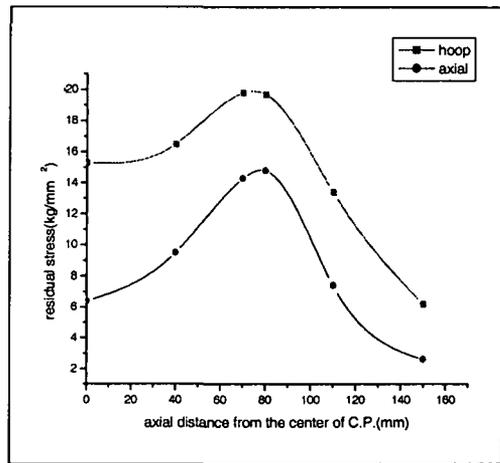


Fig.1(b) 유공판(t=9, d=150)의 CO₂ 용접으로 인한 잔류응력의 분포

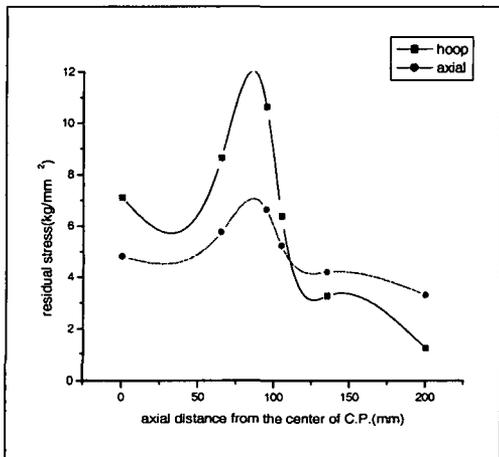


Fig.2(a) 유공판(t=6, d=200)의 CO₂ 용접으로 인한 잔류응력의 분포

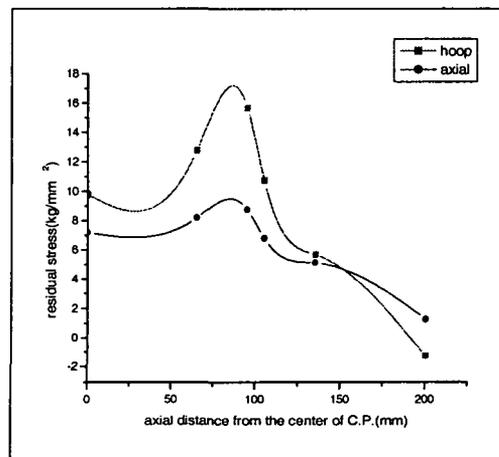


Fig.2(b) 유공판(t=9, d=200)의 CO₂ 용접으로 인한 잔류응력의 분포

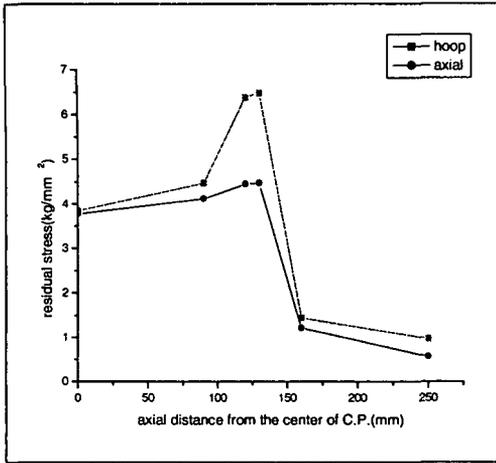


Fig.3(a) 유공판(t=6,d=250)의 CO₂ 용접으로 인한 잔류응력의 분포

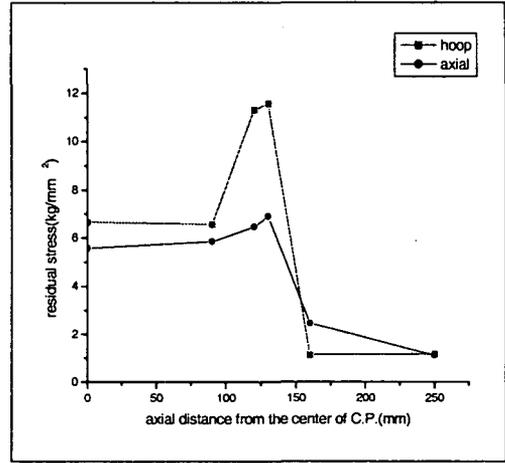


Fig.3(b) 유공판(t=9,d=250)의 CO₂ 용접으로 인한 잔류응력의 분포

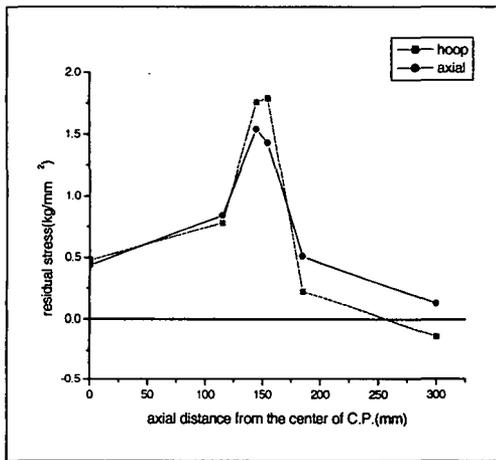


Fig.4(a) 유공판(t=6,d=300)의 CO₂ 용접으로 인한 잔류응력의 분포

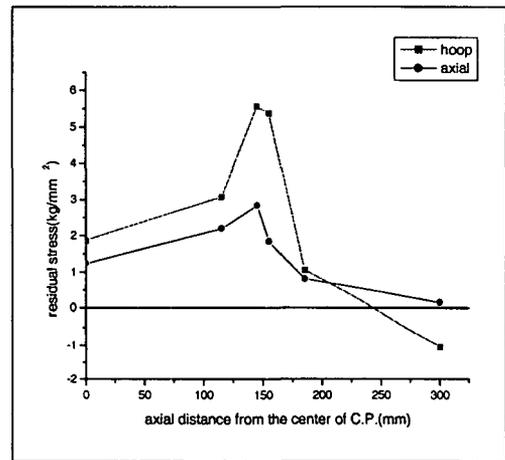


Fig.4(b) 유공판(t=9,d=300)의 CO₂ 용접으로 인한 잔류응력의 분포

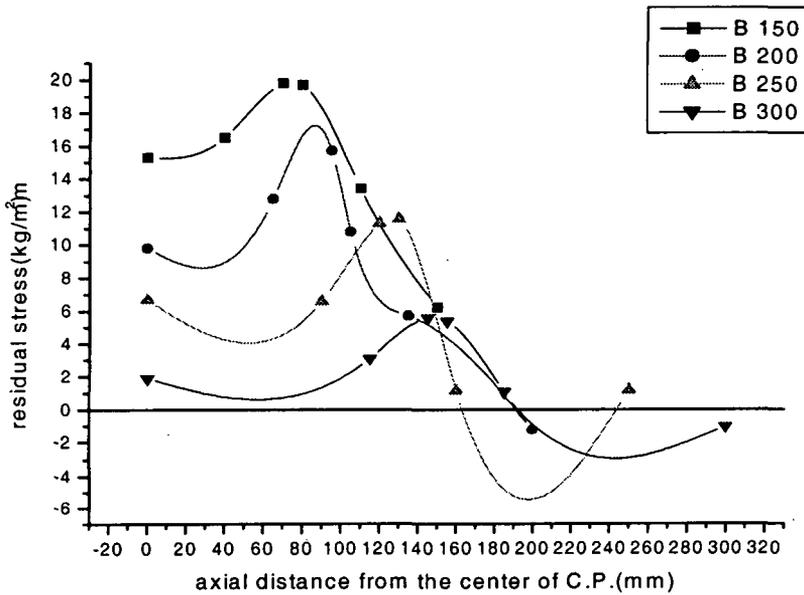
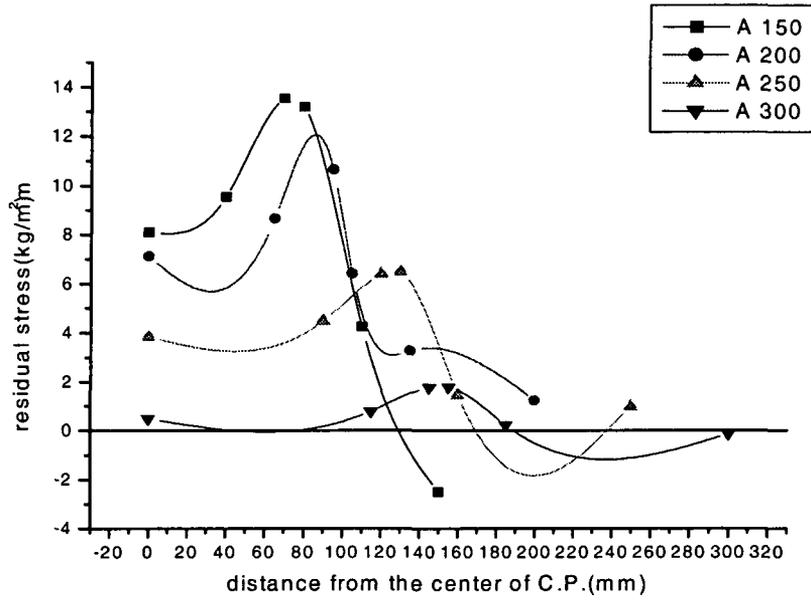


Fig. 5 Effect of patch dia. on residual stresses

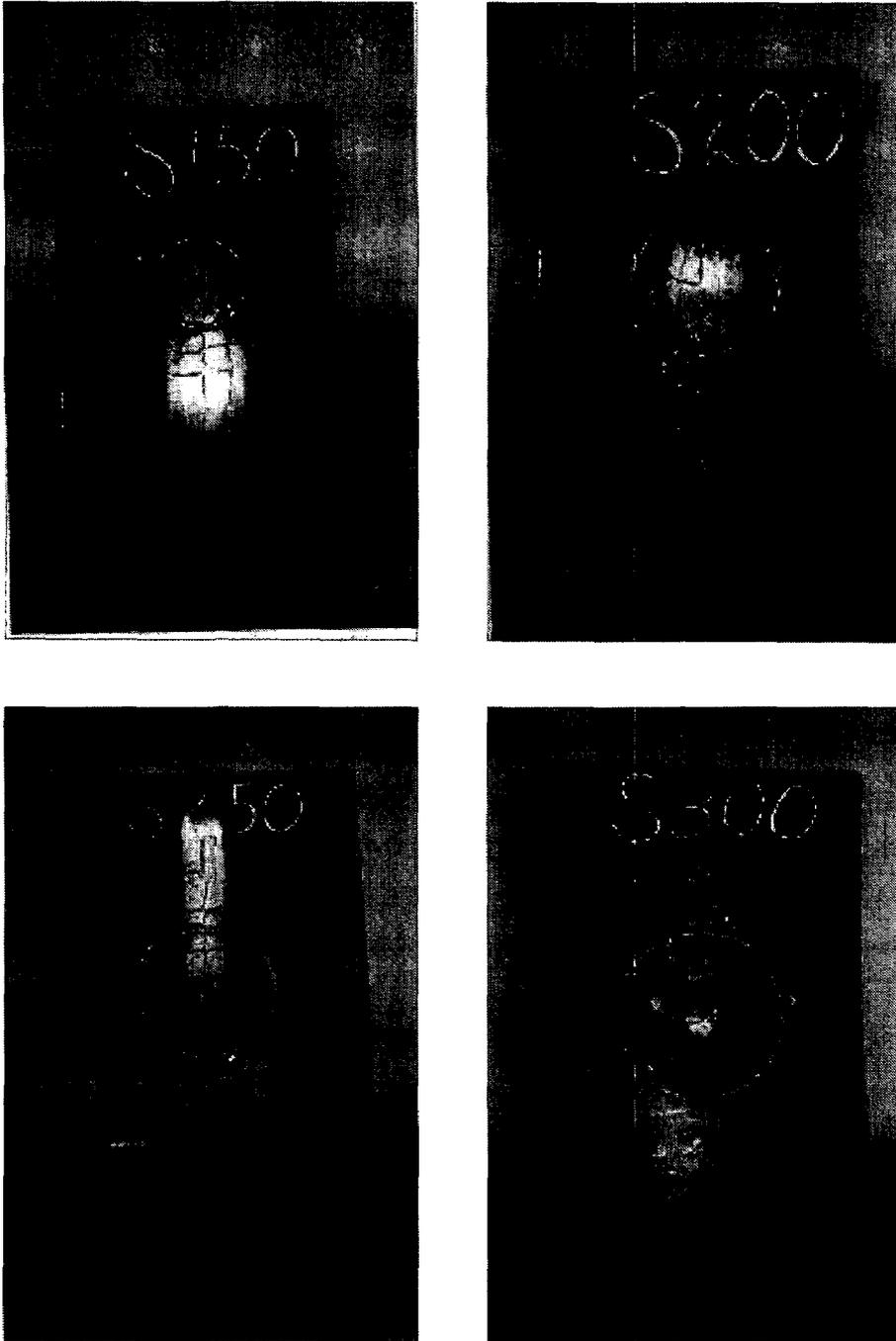


Fig. 6. A-group 부재들

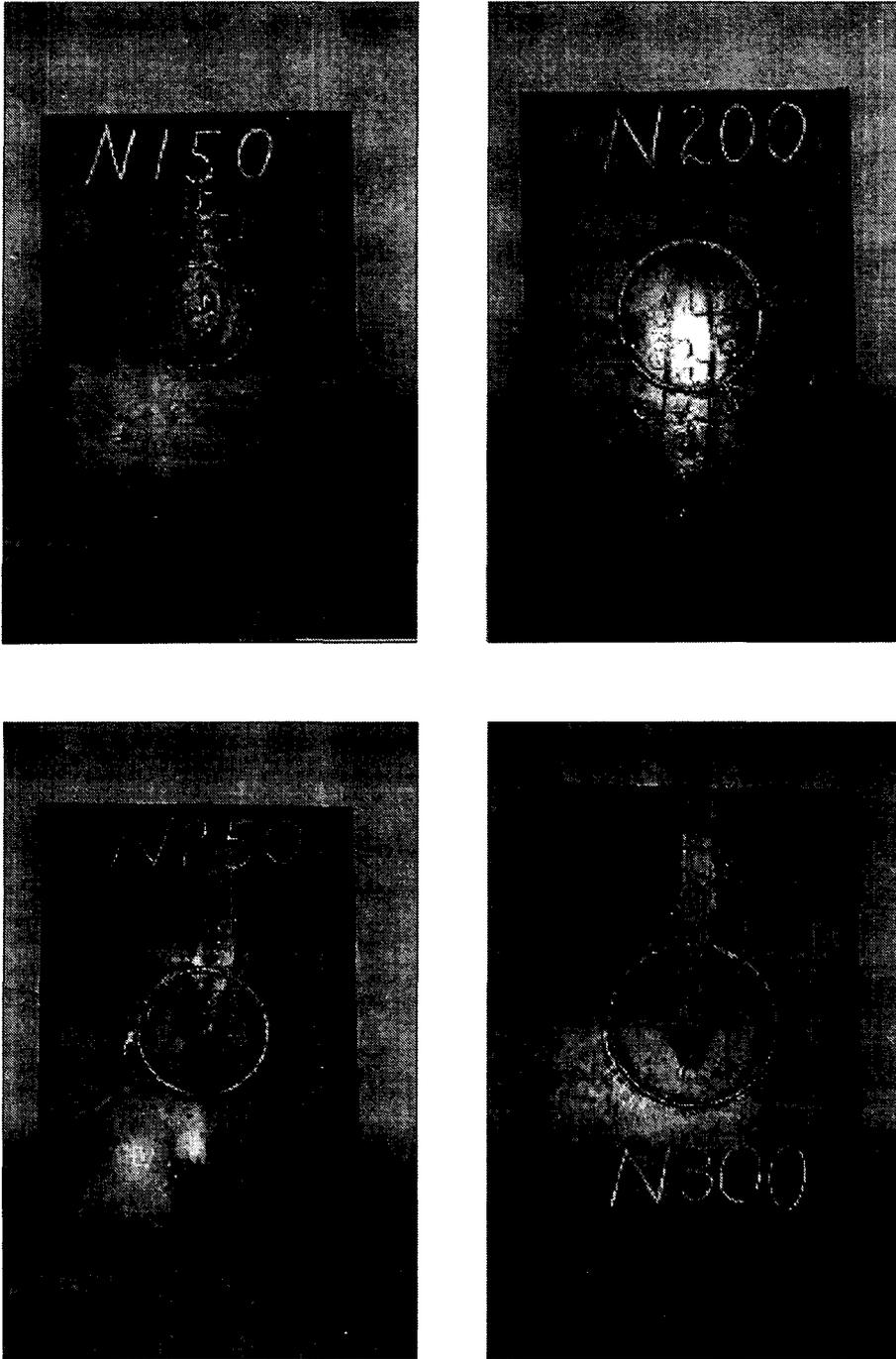


Fig. 7. B-group 부재들



Fig. 8 게이저 부착

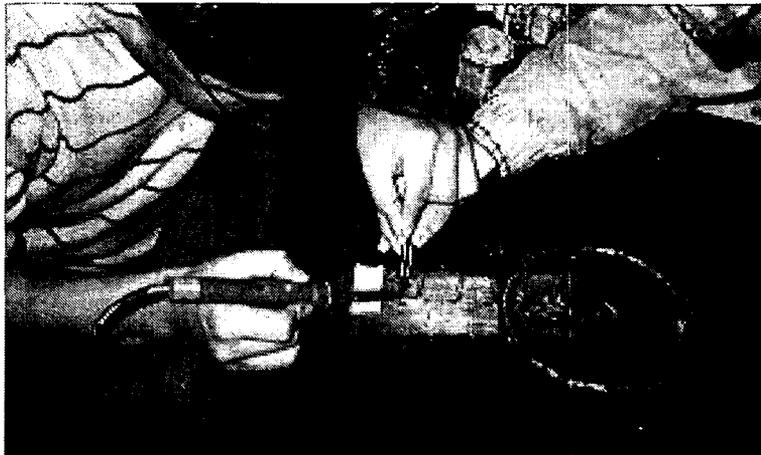


Fig. 9 납땜 모습

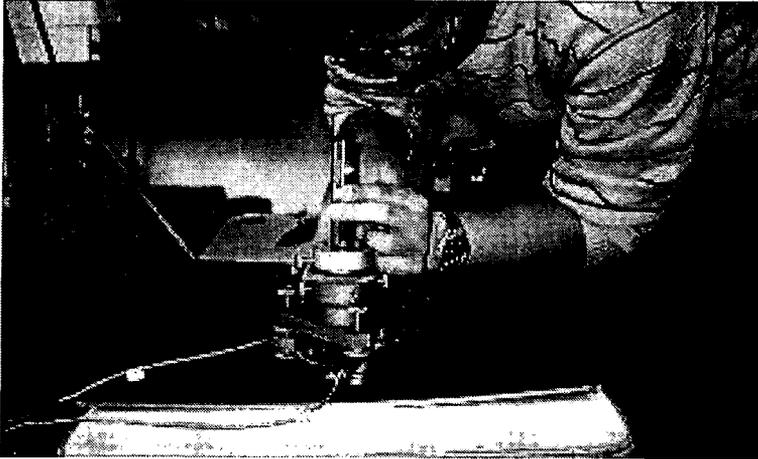


Fig. 10 드릴링 위치 선정

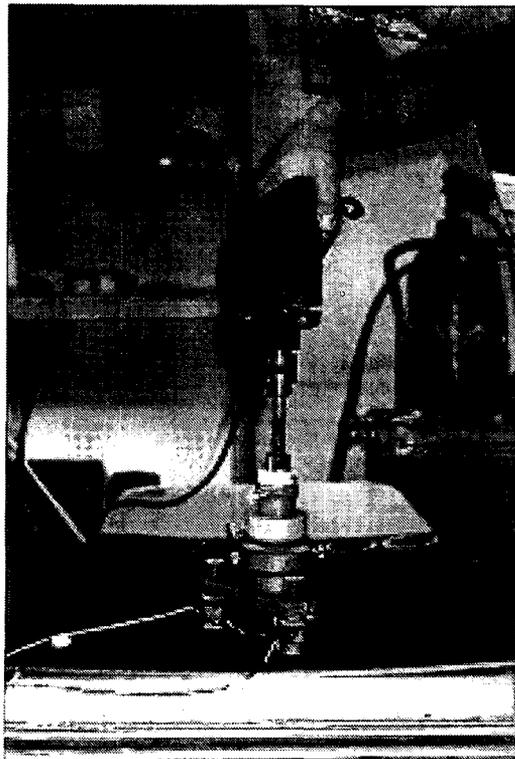


Fig.11 드릴링 장면

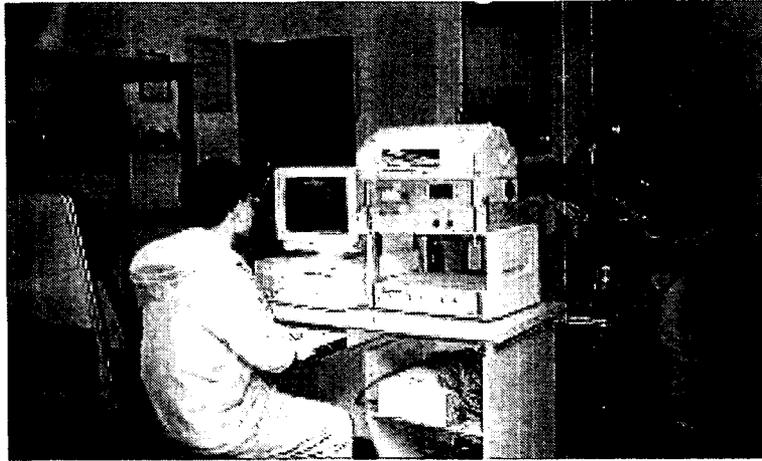


Fig.12 실험 장면

5. 결 론

Circular Patch Welding 실험을 통하여 얻어진 자료를 정리하고 해석하여 아래와 같은 결론에 도달하였다. 실험 목적은 잔류응력의 최대치와 구멍의 크기와의 관계를 알고자 하였으나 장비의 미비로 그 한계 치를 찾는 데는 만족할 수 없었다. 장비를 보완하여 계속 연구가 필요하다.

1) 용접 선에 가까울수록 원주방향과 반지름 방향의 잔류응력의 측정값이 최대가 되고 용접 선에서 멀어질수록 잔류응력의 측정값이 감소한다.

2) Circular Patch Plate의 지름이 커질수록 반지름방향과 원주방향의 잔류응력의 값이 감소한다. 이는 용접 후 냉각될 때 Circular Patch의 크기가 커질수록 구속도가 감소 하므로 잔류응력도 감소하게 된다.

3) 같은 크기의 Circular Patch를 가지는 부재라도 두께가 두꺼워질수록 큰 잔류응력 값을 보였다. 이는 두꺼운 판일수록 용착량이 증가하고 수축 응력이 증가하는 때문이라 생각된다.

4) Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 구멍의 직경이 작아질수록 잔류응력 값이 증가함을 알 수 있다. 본 실험실에 보유된 장비로는 직경 150mm 이하로는 천공할 수 없어 구멍의 직경에 따른 잔류응력의 한계 값을 찾을 수 없었다. 이를 위한 연구를 더 계속 할 필요가 있다.

5) Circular Patch Welding에 의한 잔류응력으로 인한 균열을 방지하기 위한 완화 조치로는 Circular Patch Plate에 역 변형을 주거나 용접 또는 용착(16mm 이상의 후 판) 순서를 지킴으로 최소화 할 수 있다. 또는 판 중심부에 작은 구멍을 뚫어 용접을 완료한 후, 복구하는 방법도 가능하다.

6. 참고문헌

1. Mather, J, "Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilling hole." Trans. ASME. Vol. 56, 1934, pp. 249-254.
2. Bush, A. J. and Kromer, F, J. "Simplification of the hole-drilling method of residual stress measurement." ISA Trans. Vol. 12, No. 3, pp. 249-259, 1973.
3. ASTM Standard E 837-92 "Standard test method for determining residual stress by the hole-drilling strain gauge method." Reprinted from the annual Book of ASTM Standards, Part 10 and 41, pp. 753-759, Published November, 1981.
4. Measurement Group TN-503-5 "Measurement of residual stresses by the hole-drilling strain gauge method." Technical Note, U.S.A , 1993.
5. Rendler, N. J. and Vigness, I., "Hole-drilling strain gauge method of measuring residual stresses." Proc. SESA XXIII, no. 2, pp. 577-586, 1981.
6. Masubush, K, "Analysis of welded structures." First Edition, New York, Pergamon Press, 1980.
7. Y. Fujita, T. Nomoto and H. Hasegawa, "Studies on thermal elasto-plastic problem (4th report)-welding deformations and residual stresses due to circumferential weld in cylindrical shell." Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 146, pp. 383-92, November 1979.
8. K. Satoh, M. Toyoda, K. Nahara, Y. Suita, M. Tanaka and T. Hrano, "Residual stresses and deformations in thin cylindrical shells due to circumferential welds." Journal of the Japanese Welding Society, Vol. 52, No. 2, pp. 15-21, 1983.
9. K. Matsuoka and T. Naoi. "An analysis method on residual stresses due to circumferential welds of pipes." Journal of the Japanese Welding Society, Vol. 51, No. 2, pp. 65-71, 1982.