

용접으로 인한 보강 및 비보강 원통관의 잔류응력과 변형 측정 실험연구

함원국
수송시스템공학부

<요 약>

용접으로 제작되는 구조물은 용접열에 의한 초기 형상결합과 잔류응력이 존재하게 된다. 초기 형상결합과 잔류응력은 정도의 차이는 있으나 대부분 구조물의 거동에 영향을 미치게 된다. 따라서 잠수체의 최종강도를 정확히 추정하기 위하여는 용접으로 인한 잔류응력의 분포와 크기는 물론 변형의 경향을 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 우선, 호칭경 300A 강관을 사용하였고, 보강 및 비보강 원통의 용접변형과 표면의 잔류응력만을 측정하여 그 결과를 해석하였다. 용접 입열량의 증가에 따라 변형과 잔류응력이 증가하였으며 축방향의 치짐변형은 심각하였다. 용접선 근처와 보강재가 위치한 곳에서 최대 잔류응력이 발생했으며 모재의 항복응력 보다 큰값으로 나타났다. 또한 축방향의 용접선 길이가 증가함에 따라 잔류응력 값도 증가됨을 볼 수 있었다.

A Study on the Measurement of Residual Stresses and Deformation of Cylindrical Tube According to Welding

Ham, won-kuk
School of Transportation System Engineering

<Abstract>

The experimental study has been carried out in order to measure the magnitude of residual stresses(axial and circumferential) and deformation of cylindrical tube according to CO₂ welding. The effect of seam, butt joint and ring stiffening on the residual

stresses and deformations was also investigated. The results of this study can be summarized as follows :

A. Deformation

1) In case of butt joint (stiffened and unstiffened tube) ;

Deformation rate of tube diameter increases progressively in accordance with heat input of welding. Maximum deflection is negligible in comparison with wall thickness. But in case of submerged body, such initial defects can cause serious problems.

2) In case of seam welding ;

Maximum deformation in way of the weld line is about 1.0 mm as in butt joint. Circumferential deformation does not occur beyond 300 mm distance from the seam weld line. But the maximum deflection of weld line is 4.0 mm, which may greatly reduce the axial strength.

B. Residual stresses

1) In case of seam weld ;

- Residual stresses of axial and circumferential direction increase in accordance with the increment of seam weld length and is higher than the value of the yield stress of base metal in way of the weld line.
- Compressive and tensile components of residual stress diminish fluctuating like damped vibration from the weld line. The residual stress is vanished over 100mm off the weld line.

2) In case of butt weld (stiffened and unstiffened) ;

- Residual stresses both in axial and hoop direction are higher than the yield stress of base metal at the weld line and stiffened position for tow cases.
- Axial load may cause stiffener buckling and radial pressure may cause inter-stiffener shell buckling.

1. 서 론

용접으로 제작되는 구조물은 용접열에 의한 초기 형상결함과 잔류응력이 존재하게 된다. 초기 형상결함과 잔류응력은 정도의 차이는 있지만 대부분의 구조물의 거동에 영향을 미치게 된다. 따라서 원환보강원통의 최종강도를 정확하게 추정하기 위해서는 용접으로 인해 발생하는 잔류응력의 분포형상과 그 크기를 알고 이를 최종강도의 해석과정에 반영하여야 한다. 원통관에 대한 용접으로 인한 연구동향은 대부분 원주 방향의 용접에 대한 것이 대부분이며 비보강 원통의 경우가 대부분이다.[7-10] 따라서 본 연구에서는 Fig.3에 제시된 것과 같이 보강 또는 비보강 원통의 원주방향은 물론 축방향의 용접과 이들이 서로 교차된 경우도 검토하고자 하였다. 우선 전체 파제의 일부로 비보강원통과 원환보강원통의 변형과 서로 용접선이 교차된 것을 제외한 시편의 외면 용접 잔류응력만을 1차 대상으로 실험연구를 수행하였다.

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 Mather[1]가 최초로 제안하였으며 Bush와 Kromer가 Hole Drilling 기법으로 잔류응력을 간단히 측정할 수 있는 장치를 개발하였다[2]. 본 실험에서는 Blind-hole Drilling Method를 이용하였다[3-6].

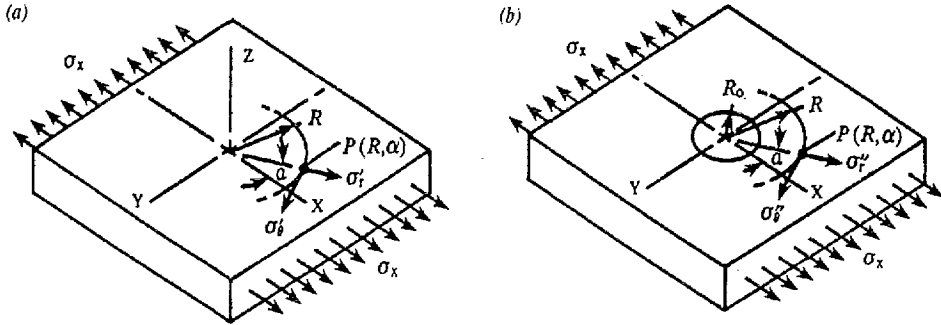


Fig. 1. Stress states at $P(R, \alpha)$, before and after the introduction of a hole

Fig. 1과 같이 잔류응력이 걸려 있는 부위에 반경 R_0 인 작은 구멍을 뚫을 때, 구멍 중심에서 R 만큼 떨어진 점 P 에서 이완되는 변형도와 크기 및 방향은 국부 주응력을 σ_1 , 측정된 변형률을 ϵ_r , ϵ_θ 및 $\gamma_{r\theta}$ 라 할 때, 아래 식으로 표현된다.

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

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

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

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

여기서 ϵ_r : 임의점 P 에서 이완된 반경방향 변형률

ϵ_θ : 점 P 에서 이완된 접선방향 변형률

$\gamma_{r\theta}$: 점 P 에서 이완된 전단변형률

$$r = R_1 / R_0$$

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

$$\epsilon_r = \sigma_1 (A + B \cos 2\alpha) \quad (2)$$

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

여기서, A, B, C는 다음과 같다.

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \epsilon &= \sigma_1 (A + B \cos 2\alpha) + \sigma_2 [A + B \cos 2(\alpha + 90^\circ)] \\ \gamma_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

3. Rosette Gage를 이용한 잔류응력의 측정

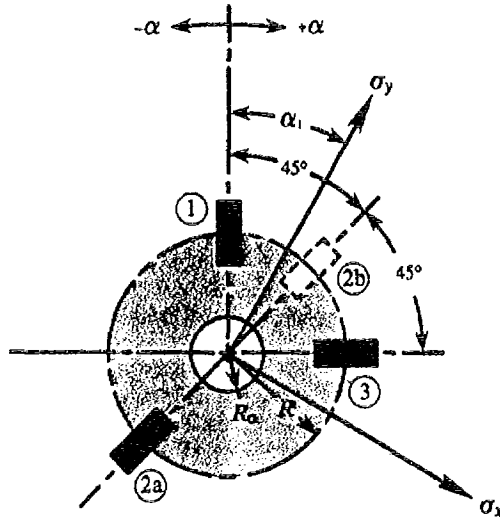


Fig. 2. Strain gage rosette arrangement for determining residual stress

Fig. 2와 같이 3개의 스트레인 게이지가 방사형으로 배치된 것으로 절삭구멍 반경 R_0

를 구멍중심으로부터 저항선 선단과 끝단까지의 거리 $R_1 \sim R_2$ 로 정의하고, 주응력 σ_1 과 게이지 3이 이루는 각을 β (β 는 임의로 정할 수 있다)라 하고, 식(3)에 $\alpha_3 = \beta, \alpha_2 = \beta + 45^\circ, \alpha_1 = \beta + 90^\circ$ 를 대입하면, 측정된 변형률 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 는 주응력 σ_1, σ_2 의 크기, 주응력의 교차각 β 를 이용하여 식 (4a), (4b), (4c)를 얻을 수 있다.

$$A \varepsilon_1 = \sigma_1 (A - B \cos 2\beta) + \sigma_2 (A + B \cos 2\beta) \quad (4a)$$

$$\varepsilon_2 = \sigma_1 (A - B \sin 2\beta) + \sigma_2 (A + B \sin 2\beta) \quad (4b)$$

$$\varepsilon_3 = \sigma_1 (A + B \cos 2\beta) + \sigma_2 (A - B \cos 2\beta) \quad (4c)$$

식(4a)에서 σ_2 를 유도해내면 식(5)를 얻는다.

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_1 - \sigma_1 (A - B \cos 2\beta)}{A + B \cos 2\beta} \quad (5)$$

식(4c)에 식(5)를 대입하여 식(6)을 얻는다.

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_3 (A + B \cos 2\beta) - \varepsilon_1 (A - B \cos 2\beta)}{4AB \cos 2\beta} \quad (6)$$

같은 방법으로 주응력 σ_2 와 게이지 3과의 교차각은 식(7a), (7b)로 유도된다.

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_1 (A + B \cos 2\beta) - \varepsilon_3 (A - B \cos 2\beta)}{4AB \cos 2\beta} \quad (7a)$$

$$\tan 2\beta = \frac{\varepsilon_3 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (7b)$$

직각을 이루는 게이지 3과 1이 주응력 방향과 근접할 때는 σ_1, σ_2 는 가장 정확한 값을 갖게 된다. 하지만 방향이 크게 다른 경우, 주응력 계산은 큰 오차가 발생된다. 이를 피하기 위하여 게이지 2와 1에서 측정된 변형률을 이용한다. 식(8a), (8b)는 그 관계식이다.

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_3 (A + B \sin 2\beta) - \varepsilon_2 (A - B \cos 2\beta)}{2AB (\sin 2\beta + \cos 2\beta)} \quad (8a)$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_2 (A + B \cos 2\beta) - \varepsilon_3 (A - B \sin 2\beta)}{2AB (\sin 2\beta + \cos 2\beta)} \quad (8b)$$

여기서 A, B의 값은 재료특성, Rosette Gage의 크기 및 특성을 더 고려해야 한다. 따라서 식 (2)와는 약간 다르게 된다. 게이지 특성과 탄소강의 물리적 성질을 고려하면 식 (9)

와 같다.

$$A = -\left[\frac{1+\nu}{2E}\right] \cdot \bar{a} \quad (9)$$

$$B = -\frac{1}{2E} \cdot \bar{b}$$

여기서 \bar{a} , \bar{b} 는 Rosette Gage의 크기 및 특성을 고려한 계수로서 아래와 같다.

$$\bar{a} = \frac{(2 R_0)^2}{2GW(R_2 - R_1)} (\theta_1 - \theta_2) \quad (9a)$$

$$\bar{b} = \frac{(2 R_0)^2}{2GW(R_2 - R_1)} \left[\frac{2}{1} (1-\nu)(\theta_1 - \theta_2) + (1-\nu)(\sin 2 \theta_1 + \sin 2 \theta_2) \right. \\ \left. - \frac{(1+\nu)(2 R_0)^2}{32} \left(\frac{2 \sin 2 \theta_1 + \sin 4 \theta_1}{R_1^2} - \frac{2 \sin 2 \theta_2 + \sin 4 \theta_2}{R_2^2} \right) \right] \quad (9b)$$

평면응력 상태의 σ_x , σ_y , τ_{xy} 와 주응력 σ_1 , σ_2 의 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 & \tau_{12} \\ \tau_{12} & \sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

주응력과 X-Y 축이 일치하면 $\tau_{xy}=0$ 이다.

이때, $\sigma_1 = \sigma_x$ 혹은 $\sigma_1 = \sigma_y$ 또는 $\sigma_2 = \sigma_y$ 혹은 $\sigma_2 = \sigma_x$ 이다

Blind-hole Drilling Method의 경우, 구멍의 깊이 Z와 게이지원 직경 D의 비가 0.4 정도로 하고 적절한 계수를 고려하면 비교적 정확한 근사값을 얻을 수 있다. $Z/D_0 (=2R_0)$ 가 1.0~1.2정도면 표면의 잔류응력은 완전히 해소되는 것으로 알려져 있다.(ASTM E837 참조)

4. 잔류응력 측정실험

가. 실험 재료

시중 구입이 가능한 KS 규격 Grade SPHT-II 탄소강관(탄소함량 0.08~0.12%이내)으로, 항복강도 265~343 N/mm², 공칭직경은 300mm로 Strain은 외면만을 측정한다. 사용할 재료의 내역은 아래와 같다.

(1) 강관의 화학 조성

성분	C	Mn	Si	P	S	Al
함량 (Wt%)	0.075~0.12	0.45~0.52	0.008~0.013	0.011~0.018	0.010~0.015	0.015~0.030

(2) 강관의 기계적 성질

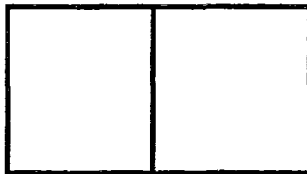
Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Rupture strain (%)
382~432	265~343	36~43

나. 모형의 용접조건

(1) 비보강 원통관

비보강 원통 실험 모형은 3가지 종류로 각각의 특징은 다음과 같다.

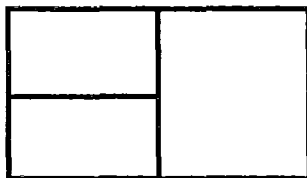
- NS group: 원통관의 맞대기 용접부에 대한 원통관 축 방향의 잔류응력의 크기는, 시편의 길이 150mm 2개를 접합하여 총 길이 300mm로, 용접 입열량의 변화에 따른 잔류응력과 용접 변형을 조사하고자 한다.
- NS-LS group: seam용접선의 잔류응력을 측정하기 위한 시편은 원통관의 길이를 250, 300, 400, 500, 600mm 등 5개로 하고, 동일한 용접조건과 개선각 하에서, 용접선의 길이 변화에 따른 잔류응력의 변화를 확인하고자 한다.
- NS-LS-C group: Seam과 Butt가 서로 교차하고 Seam과 Butt의 교차각이 0도, 90도 180도로 시편의 총 길이가 300mm일 때, 동일한 용접조건 하에서의 잔류응력의 변화를 조사하고자 한다.



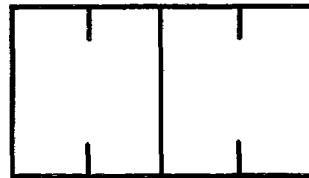
(NS group)



(NS-LS group)



(NS-LS-C group)



(RS group)

Fig. 3 Welding line of groups

Fig. 3은 이상의 내용을 간략하게 스케치한 것이다.

(2) 보강원통관

비보강 원통관의 경우와 동일하나 Butt joint의 경우는 용접선으로부터 100mm 간격으로 30×5t 의 Ring stiffener를 부착하여 용접한다. 시험편의 총 길이는 400mm이다. Model의 도식은 아래와 같고 용접 조건은 Table 1에 따른다.

다. 용접변형의 측정

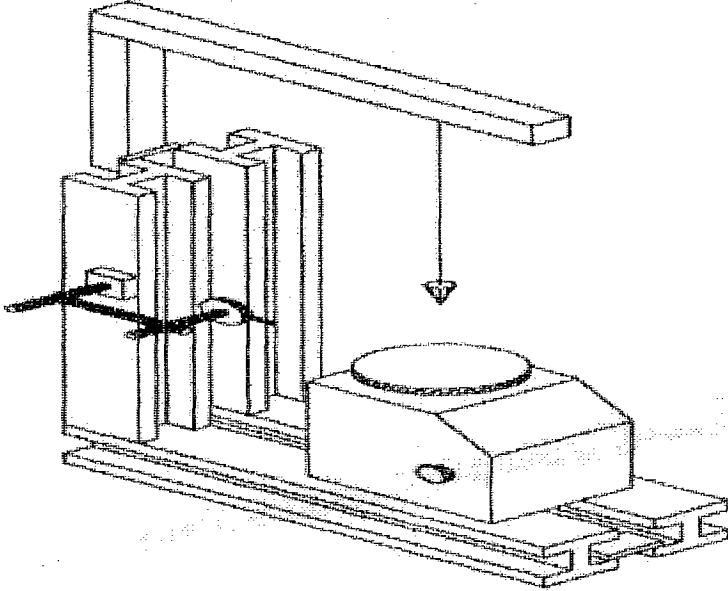


Fig. 4 Deformation measurement JIG

Fig. 4와 같이 Turning welding jig나 Bench type drill을 사용하여 가용접 후 원주의 기준선을 정하고 기준선에서 각 1센티미터 간격으로 각 위치에서 길이방향과 원주방향의 초기 값을 Dial gage로 측정, 표면의 형상을 계측하고 동일한 기준 하에 용접 후에도 Dial gage로 정밀 계측한다. Butt 용접과 Seam용접으로 인한 원통관의 변형을 확인한다.

(1) 변형측정 결과

용접변형은 일반적으로 용접선 근처에서 주로 발생함으로 용접선을 중심으로 4분원 범위를 계측하였다. 용접선을 중심으로 대칭으로 간주하였다. Table 2(a)에는 Model NS300과 RS300에 대한 측정 결과가 정리되어 있고 Table 2(b)에는 Model NS300-LS(250, 400)의 원주방향의 변형 측정 결과를, 그리고 Table 2(c)에는 Model NS300-LS(600)의 용접선 길이 방향의 변형을 측정한 결과가 정리되어 있고 Fig. 5-8에 이를 도시하였다.

(2) 용접변형의 형상

용접변형량 계측 결과(Table 2)를 근거로 용접선으로부터의 거리에 따른 변형을 도시한 것이다. Fig. 5-8을 검토해 보면 원환보강재의 유무에 따라 변형은 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

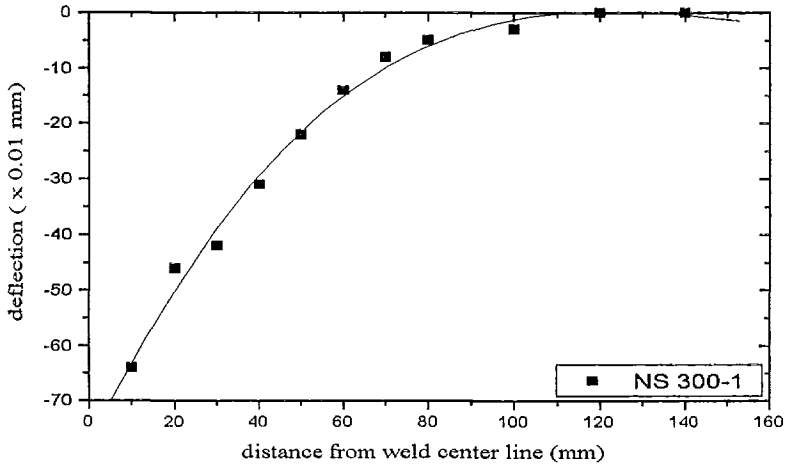


Fig. 5(a). Welding deformation measurement results :
Model NS 300-1

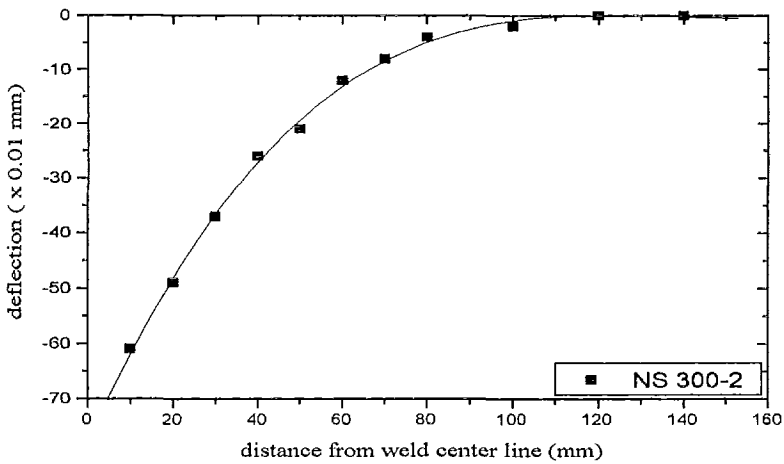


Fig. 5(b). Welding deformation measurement results :
Model NS 300-2

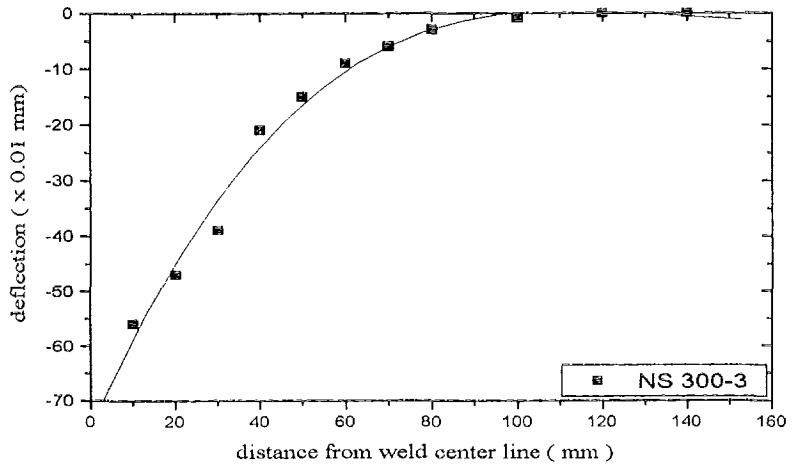


Fig. 5(c). Welding deformation measurement results :
Model NS 300-3

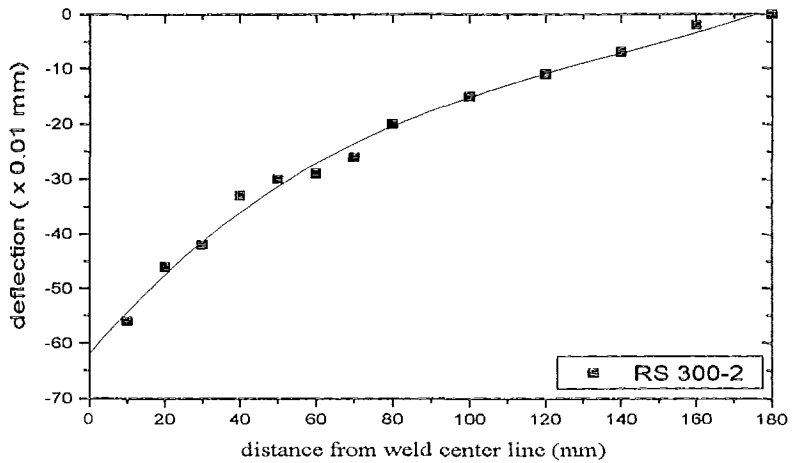


Fig. 6(a). Welding deformation measurement results :
Model RS 300-2

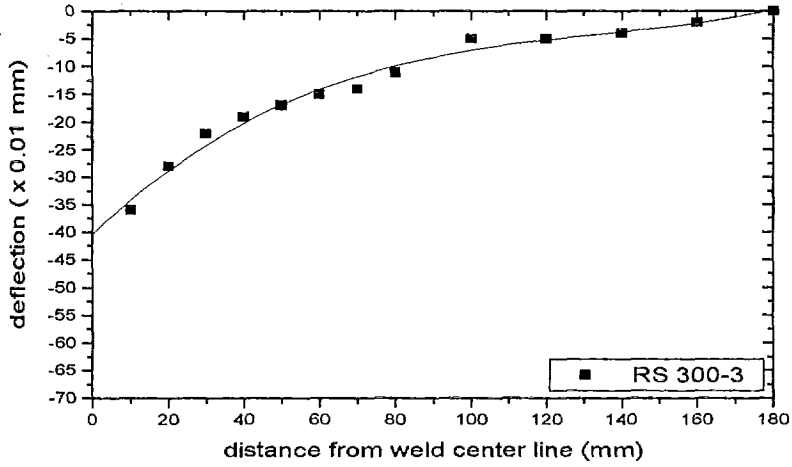


Fig. 6(b). Welding deformation measurement results :
Model RS 300-3

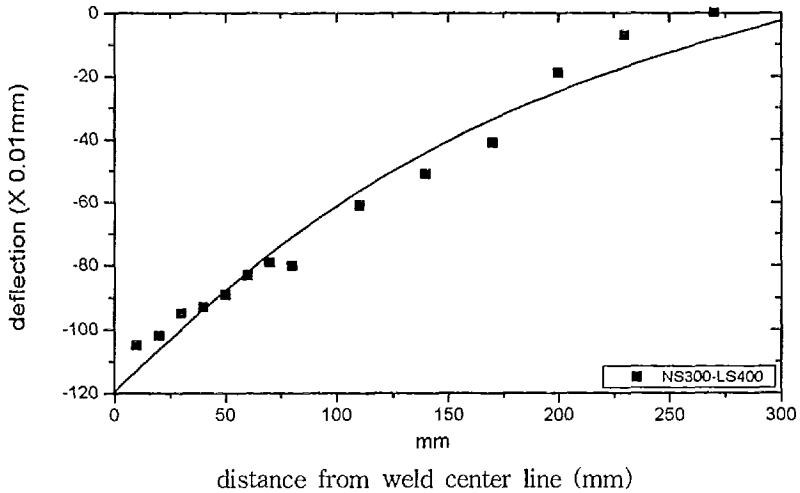


Fig. 7. Circumferential deflection due to seam weld
NS300-LS400

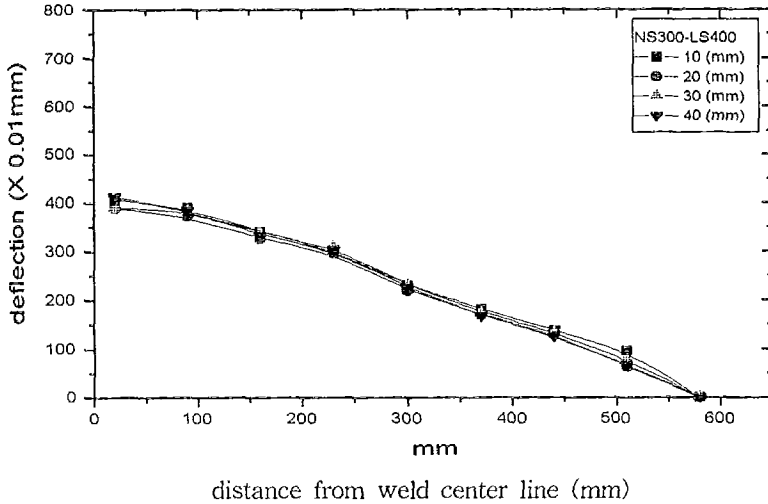


Fig. 8. Radial deflection due to seam weld
NS300-LS600

라. 잔류응력의 측정

(1) 실험장치의 구성

본 실험의 잔류응력 측정은 ASTM E837 규정에 따르며, 측정장치의 구성은 Fig. 12과 같이 M-M사 제품인 RS-200 Drilling Milling Guide와 변형률 계측장치로 System 4000을 사용하였다(Fig. 12, 13 참조). 본 실험에서는 천공 장비의 설치가 어려워 내부의 잔류응력 측정은 생략한다.

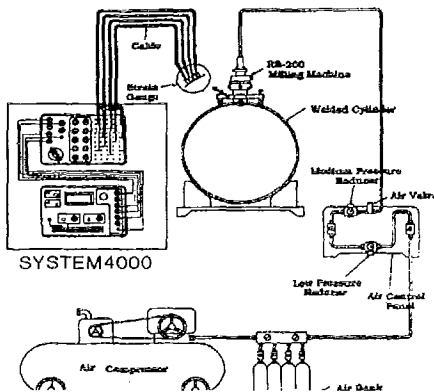


Fig. 12. Configuration of instruments for residual strain measurement

ll Drilling Setup

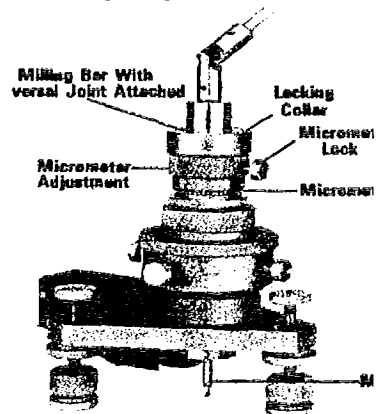


Fig. 13. RS-200 Milling Guide, user for machining a precisely located flat-bottom hole

(2) NS group과 RS group

Fig. 14와 같이 원통관의 표면에 Strain gage, Rosette type, EA-06-62RE-120과 용접선 가까이에는 CEA-06-62RE-120형을 지정된 위치에 부착한다. 부착위치는 충분히 녹을 제거하고 Measurement Group사의 추천에 준하여 시행하고 테스트를 사용하여 부착 성공여부를 확인후 System 4000의 단자에 연결한다.

잔류응력 측정 Drilling jig를 각 Rosette gage의 Gage 원에 정확히 맞춘 뒤 Turbor drill로 1.0D~1.1D (구멍직경) 정도 천공하여 이완되는 잔류응력의 크기를 측정하여 용접으로 인한 구조물의 잔류응력 분포상태를 파악하고자 한다. 각 Rosette gage 부착 위치는 Fig. 14에 도시한 바와 같다. 상기 Model들은 용접 입열량의 차이가 잔류응력에 어떤 영향을 끼치는지 알기위한 실험이다.

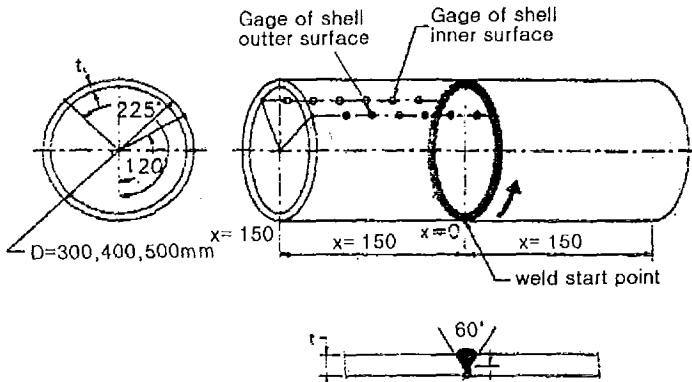


Fig. 14. Installation of rosette gauge on the inner and outer surface of cylinder

(3) NS-LS group

상기 Model은 용접선의 길이와 잔류응력의 변화를 조사하고 잔류응력의 최대치가 존재하는 한계를 알고자 한다. Table 1에서 볼 수 있는 것과 같이 용접 입열량의 변화는 주지 않는다. Strain gage의 부착 위치는 시편의 중앙위치의 원주와를 따라 용접선에 인접한 위치로부터 표면부에 일정한 간격으로 부착하여 측정한다.

Table 1. Welding conditions for models

Model	아크전압 (V)	아크전류 (A)	용접입열 (KJ/cm)	용접속도 (cm/min.)	용접시간 (min.)	용접조건	
NS300-1	18	125	11.0	11.0	8분24초	입열량 변화, 용접순서 일정	
NS300-2	19	140	9.0	16.0	5분50초		
NS300-3	19	140	9.0	16.0	5분48초		
RS 300-2	RS	23	188	29.0	8.0	11분39초	입열량 일정, 연속용접, RS, Butt Joint 용접순서 변화
	Butt	19	140	8.0	18.0	5분18초	
RS 300-3	RS	23	188	24.0	9.6	9분49초	
	Butt	19	140	8.0	18.0	5분12초	
NS250LS	19	145	2.0	75.0	1분14초	입열량 일정, 용접순서 일정	
NS300LS			2.2	67.0	1분25초		
NS400LS			3.5	43.0	2분13초		
NS500LS			3.8	39.0	2분27초		
NS600LS			5.0	30.0	3분5초		
NS300-C00	19	140	12.0	12.0	7분41초		
NS300-C60			12.5	11.5	8분10초		
NS300-C180			12.0	12.0	7분40초		

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

η : thermal efficiency

I : Ampare

V : voltaqge

v : welding speed(cm/s)

CO2 gas flow rate: 20-25l/min

wire dia.: 1.2 ϕ

Table 2(a). Results of welding deformation measurements

Model		10	20	30	40	50	60	70	80	100	120	140	160	180
NS 300-1	100	-32	-28	-28	-21	-17	-13	-9	-7	-4	0	0		
	150	-60	-47	-42	-32	-25	-14	-10	-8	-4	0	0		
	200	-72	-41	-34	-28	-22	-13	-6	-3	-3	-1	0		
	250	-90	-67	-65	-42	-24	-14	-8	-3	0	0	0		
	mean	-64	-46	-42	-31	-22	-14	-8	-5	-3	-0	0		
NS 300-2	100	-24	-18	-12	-7	-2	-1	-0	0	0	0	0		
	150	-59	-48	-37	-24	-18	-10	-5	-2	-1	0	0		
	200	-76	-64	-49	-35	-30	-17	-10	-6	-2	0	0		
	250	-84	-65	-51	-39	-31	-21	-16	-8	-3	0	0		
	mean	-61	-49	-37	-26	-21	-12	-8	-4	-2	0	0		
NS 300-3	100	-48	-35	-29	-19	-11	-7	-5	-3	-1	0	0		
	150	-72	-59	-48	-35	-22	-15	-10	-5	-3	0	0		
	200	-70	-65	-56	-25	-18	-9	-6	-3	0	0	0		
	250	-33	-30	-20	-12	-9	-5	-3	-1	0	0	0		
	mean	-56	-47	-39	-21	-15	-9	-6	-3	-1	0	0		
RS 300-2	100	-21	-16	-14	-6	-5	-6	-6	-5	-4	-5	-3	-1	0
	150	-52	-43	-40	-33	-30	-30	-26	-21	-16	-12	-10	-4	0
	200	-79	-66	-61	-51	-48	-45	-42	-34	-27	-17	-10	-3	0
	250	-72	-58	-51	-41	-36	-34	-30	-19	-12	-8	-6	-1	0
	mean	-56	-46	-42	-33	-30	-29	-26	-20	-15	-11	-7	-2	0
RS 300-3	100	-27	-16	-12	-8	-7	-5	-3	-4	-2	-1	0	0	0
	150	-36	-27	-23	-23	-20	-19	-16	-8	-0	-1	-1	0	0
	200	-25	-19	-14	-11	-11	-8	-8	-4	1	-6	-4	-1	0
	250	-55	-50	-40	-33	-30	-28	-28	-26	-19	-13	-8	-6	0
	mean	-36	-28	-22	-19	-17	-15	-14	-11	-5	-5	-4	-2	0

Table 2(b). Circumferential deflection due to seam weld

(Unit : 0.001mm)

Specimen	10	20	30	40	50	60	70	80	110	140	170	200	230	270	
NS300	50	-59	-55	-53	-59	-51	-51	-53	-47	-36	-30	-19	-22	-9	0
	100	-68	-65	-65	-63	-61	-58	-56	-52	-47	-41	-32	-23	-13	0
LS250	150	-102	-104	-103	-99	-86	-92	-87	-82	-73	-59	-44	-32	-17	0
	200	-106	-104	-104	-99	-97	-96	-94	-90	-82	-69	-55	-62	-37	0
M	-84	-82	-81	-80	-74	-74	-73	-68	-60	-50	-38	-35	-19	0	

Specimen	10	20	30	40	50	60	70	80	110	140	170	200	230	270	
NS300	50	-157	-153	-146	-139	-127	-120	-110	-101	-82	-50	-36	-19	-10	0
	100	-97	-106	-92	-89	-85	-83	-81	-77	-65	-89	-84	-15	-8	0
	150	-99	-94	-89	-85	-83	-79	-76	-73	-66	-52	-36	-23	-7	0
	200	-96	-90	-84	-81	-75	-73	-71	-70	-61	-54	-39	-27	-10	0
LS400	250	-98	-91	-98	-90	-81	-79	-78	-74	-63	-51	-49	-27	-12	0
	300	-86	-80	-59	-74	-74	-69	-64	-69	-46	-34	-23	-13	-5	0
	350	-99	-97	-94	-90	-96	-77	-73	-98	-44	-29	-19	-9	2	0
M	-105	-102	-95	-93	-89	-83	-79	-80	-61	-51	-41	-19	-7	0	

Table 2(c). Radial deflection due to seam weld

(Unit : 0.001mm)

Specimen	10	20	30	40	50	60	70	80	110	140	170	200	230	270
NS300-LS600	20	407	389	390	412									
	90	390	373	385	385									
	160	341	326	338	334									
	230	302	296	309	302									
	300	230	219	230	225									
	370	181	169	174	167									
	440	137	129	133	126									
	510	96	63	77	66									
	580	0	0	0	0									

(4) 잔류응력의 측정결과

Rosette gage의 부착 위치와 잔류응력의 측정 결과를 정리하였다. 시편 NS300-LS group의 Rosette gage 부착 위치는 Table 3(a)에 정리하였고, 잔류응력 값은 Table 3(b)에 정리하였다. 그리고 NS300, RS300 group의 Gage 위치와 잔류응력의 크기와 방향을 측정하여 정리한 것이 Table 4(a)와 4(b)이다. 적색으로 처리된 Gage No. E의 위치가 RS300 group의 원환 보강재가 있는 위치이다. 그리고 Table 3, 4에 근거하여 잔류응력 값을 도시하였고 Seam 용접으로 인한 축 방향과 원주방향의 응력 값을 도시한 것이 Fig. 9(a)와 9(b)이다. 비보강 원통관의 Butt 용접으로 인한 잔류응력 값은 Fig. 10(a)와 10(b)에 그리고 Fig. 11(a)와 11(b)는 원환 보강재가 부착된 경우의 잔류응력 값을 나타낸다

Table 3(a) NS300-LS250/600 시편의 Rosette gage의 위치

Gage No.	250LS		300LS		400LS		500LS		600LS	
	mm	d/R	mm	d/R	mm	d/R	mm	d/R	mm	d/R
A	12.5	0.079	18.0	0.113	18.0	0.113	16.5	0.104	16.0	0.101
B	30.5	0.192	35.0	0.220	36.5	0.230	34.0	0.214	33.0	0.208
C	51.5	0.324	55.0	0.346	56.5	0.355	54.0	0.340	54.0	0.340
D	71.5	0.450	76.0	0.478	77.0	0.484	73.5	0.462	74.5	0.469
E	88.0	0.553	94.0	0.591	96.0	0.604	91.0	0.572	93.0	0.585
A'	7.5	0.047	7.5	0.047	7.5	0.047	7.5	0.047	7.5	0.047
B'	0.0	0.000	0.0	0.000	0.0	0.000	0.0	0.000	0.0	0.000

(주) d : distance from weld center line

R : radius of outdia.

Table 3(b) NS300-LS250-600 시편의 잔류응력 측정결과

(단위: mm, Kg/mm²)

Gage No.	250LS			300LS			400LS			500LS			600LS		
	hoop axial	σ_A	σ_A/σ_Y	hoop axial	σ_A	σ_A/σ_Y	hoop axial	σ_A	σ_A/σ_Y	hoop axial	σ_A	σ_A/σ_Y	hoop axial	σ_A	σ_A/σ_Y
A	-348	-7.31	-0.26	-240	-5.04	-0.18	-173	-3.64	-0.13	-84	-1.76	-.063	-102	-2.14	-.076
	467	9.80	0.35	333	7.00	0.25	360	7.56	0.27	28	0.59	.021	69	1.45	.052
B	20	.420	.015	-35	-0.73	-.026	-3	-0.06	-.023	7	0.15	.005	-88	-1.85	-.066
	32	0.67	.024	-15	-0.32	-.011	20	0.42	.015	17	0.36	.013	32	0.67	.024
C	-48	-1.01	-.036	-17	-0.36	-.013	-53	-1.12	-.040	-31	-0.65	-.023	-46	-0.97	-.035
	17	0.36	.013	-14	-0.29	-.010	-62	-1.30	-.046	17	0.36	.013	29	0.61	.022
D	-86	-1.81	-.065	-25	-0.53	-.020	-25	-0.53	-.019	-28	-0.59	-.021	-36	-0.76	-.027
	3	.063	.002	-21	-0.44	-.016	-62	-1.30	-.046	10	0.21	.008	30	0.63	.023
E	-40	-0.84	-.030	-32	-0.67	-.024	-27	-0.56	-.020	-38	-0.80	-.029	-55	-1.16	-.041
	-6	-0.13	-.005	-20	-0.42	-.015	-106	-2.23	-.080	12	0.25	.009	-9	-0.19	-.007
A'	-427	-8.96	-.320	-480	-10.1	-.360	507	10.64	-.380	-533	-11.2	-.400	-480	-10.1	-.360
	533	11.20	.400	667	14.00	.500	507	10.64	.380	427	8.96	.320	640	13.44	.480
B'	-640	13.44	-.480	-707	-14.8	-.530	800	16.80	-.600	-867	-18.2	-.665	-987	-20.7	-.740
	747	15.68	.560	760	15.96	.570	960	20.16	.720	1107	23.24	.830	1267	26.60	.950

Table 4(a). NS300-1/3, RS300-2/3 시편의 Rosette gage의 위치

(단위: distance from weld center :mm)

Gage No.	NS300-1		NS300-2		NS300-3		RS300-2		RS300-3	
	mm	d/L ₁	mm	d/L ₁	mm	d/L ₁	mm	d/L ₂	mm	d/L ₂
A	16.0	0.107	16.0	0.107	15.5	0.103	22.0	0.220	20.5	0.205
B	33.0	0.220	34.0	0.227	33.5	0.223	39.0	0.390	41.0	0.410
C	54.0	0.360	54.0	0.360	53.5	0.357	60.0	0.600	61.0	0.610
D	74.0	0.493	74.0	0.493	73.5	0.490	80.0	0.800	81.0	0.810
E	94.0	0.627	94.0	0.627	93.5	0.623	92.5	0.925	93.0	0.980
F	112.5	0.750	114.0	0.760	113.5	0.757	114.0	1.140	115.0	1.150
G	128.0	0.853	131.0	0.873	129.0	0.860	133.0	1.330	133.0	1.330
H							153.0	1.530	155.0	1.550
I							174.0	1.740	174.0	1.740
A'			7.5	0.05	7.5	0.05	7.5	0.075	7.5	0.075
B'			0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.000	0.0	0.000

(주) L₁ : 시험편의 길이/2(150mm)

L₂ : 용접선으로부터 Ring stiffener까지의 길이(100mm)

Table 4(b). NS300-1/3, RS300-2/3 시편의 잔류응력 측정결과

(단위:mm, Kg/mm²)

Gage No.	NS300-1			NS300-2			NS300-3			RS300-2			RS300-3		
	hoop axial	σ_A	σ_A/σ_Y	hoop axial	σ_A	σ_A/σ_Y	hoop axial	σ_A	σ_A/σ_Y	hoop axial	σ_A	σ_A/σ_Y	hoop axial	σ_A	σ_A/σ_Y
A				-833	-17.5	-.625	-595	-12.5	-.446	570	12.0	.430	330	6.90	.250
				395	8.30	.296	325	6.83	.244	643	13.5	.482	-314	-6.60	-.236
B				20	0.42	.015	90	1.90	.068	820	17.2	.610	980	20.6	.740
				-406	-8.53	-.305	-248	-5.20	-.186	-810	-17.0	-.607	-957	-20.1	-.718
C				381	8.00	.286	338	7.10	.254	1180	24.8	.890	890	18.7	.670
				152	3.19	.114	202	4.24	.151	-1214	-25.5	-.911	-1330	-27.9	-1.00
D				138	2.90	.104	18	0.38	.014	940	19.7	.700	700	14.7	.530
				93	1.95	.070	148	3.11	.111	590	12.4	.440	1290	27.1	.970
E				88	1.85	.066	-8	-0.17	-.006	1100	23.1	.830	1350	28.4	1.00
				10	0.22	.008	-90	-1.89	-.068	1571	33.0	1.18	1380	29.0	1.04
F				-92	-1.93	-.069	-4	-0.08	-.003	660	13.9	.500	910	19.1	.680
				29	0.60	.021	-6	-0.13	-.005	960	20.2	.720	1290	27.1	.968
G				-19	-0.40	-.014	-2	-0.05	-.002	790	16.6	.590	670	14.1	.500
				-4	-0.08	-.003	-4	-0.09	-.003	-900	-18.9	-.675	-790	-16.6	-.590
H				-1095	-23.0	-.821	-762	-16.0	-.571	410	8.60	.310	490	10.3	.370
				10	0.20	.007	10	0.20	.007	-867	-18.2	-.673	-1005	-21.1	-.768
I				-1262	-26.5	-.946	-848	-17.8	-.636	-300	-6.30	-.230	-170	-3.60	-.130
				-481	-10.1	-.361	-371	-7.80	-.279	-405	-8.50	-.304	-450	-9.50	-.340
A'				-1095	-23.0	-.821	-762	-16.0	-.571						
				10	0.20	.007	10	0.20	.007						
B'				-1262	-26.5	-.946	-848	-17.8	-.636						
				-481	-10.1	-.361	-371	-7.80	-.279						

(주) 탄선계수 E : 2.1×10⁴Kg/mm²

항복응력 σ_Y : 28Kg/mm²

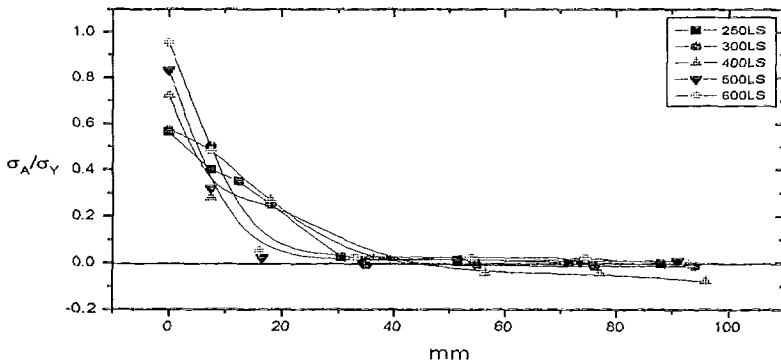


Fig. 9(a). Axial residual stress due to seam weld

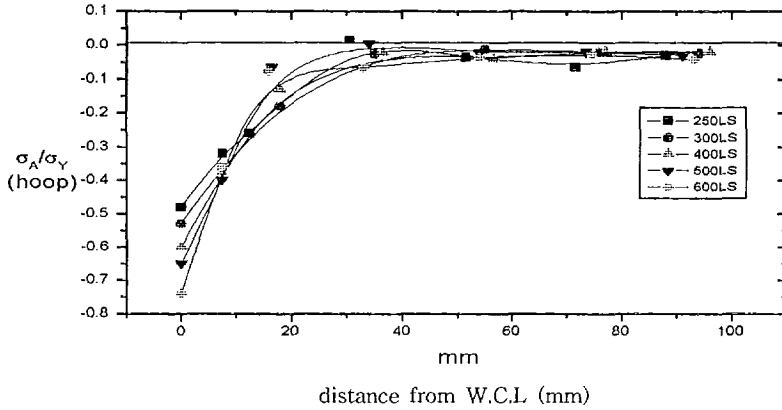


Fig. 9(b). Hoop residual stress due to seam weld

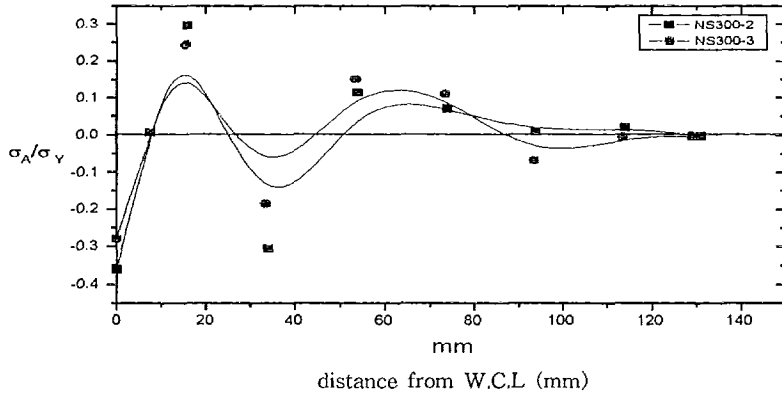


Fig. 10(a). Axial residual stress due to butt weld

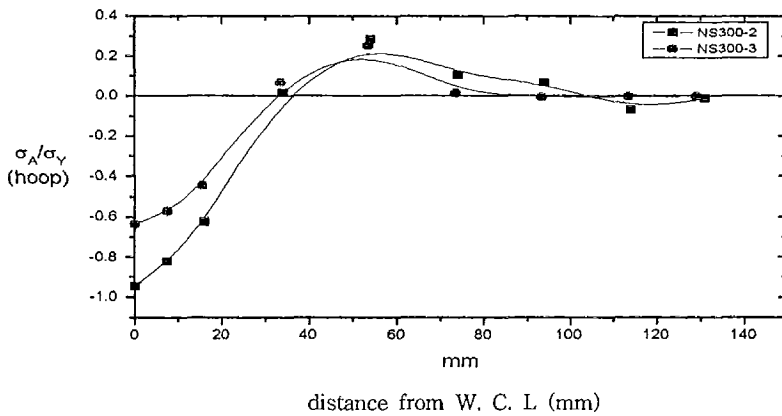


Fig. 10(b). Hoop residual stress due to butt weld

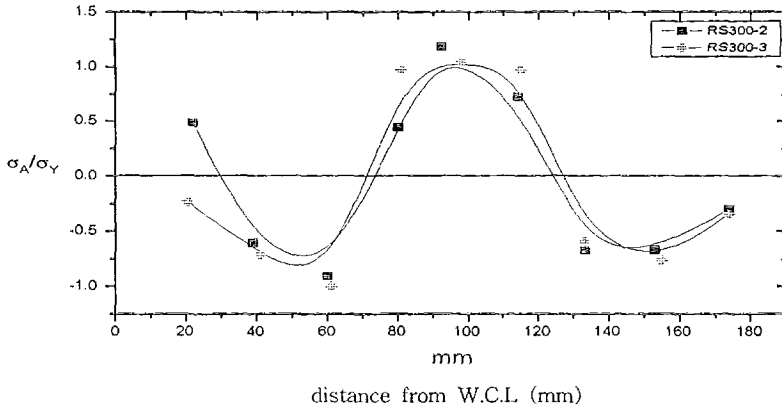


Fig. 11(a). Hoop residual stress due to butt weld and Ring stiffener

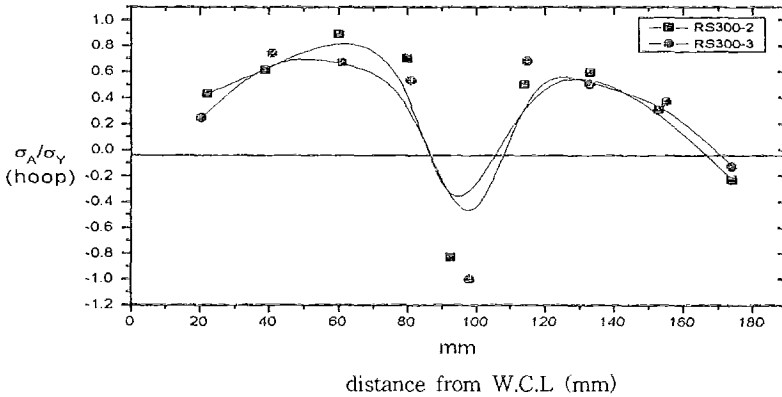


Fig. 11(b). Axial residual stress due to butt weld and Ring stiffener

5. 잔류응력 측정 실험결과와 고찰

본 실험은 용접으로 인한 변형과 잔류응력의 값을 측정하였다. 호칭경 300인 원통관의 벽두께는 6.9-7.2mm이다.

가. 용접변형

- NS300 group : Butt joint의 경우, Fig. 5(a)와 5(b,c)에서 나타난 값을 통해 용접 입열량의 증가에 따라 변형도 증가됨을 알 수 있다. 하지만 용접선 인접부의 변형정도는 약 1.0mm 내외로 이것은 육상 구조물의 경우 벽두께 대비 1/7로 무시될 정도이나 수압을 받는 잠수체의 초기 결합으로는 심각한 영향을 미칠 수도 있다.

- RS300 group : Fig. 6(a)와 6(b)에서 알 수 있는 바와 같이 용접 입열량의 증가에 따라 변형도 증가함을 알 수 있으나 비보강 원통관의 경우보다 변형이 적으며 보강재가 부착된 위치에서의 원주길이의 수축이 일어남을 알 수 있다.
- NS300-LS group : Fig. 7을 통하여 seam 용접으로 인한 변형도 1.0mm 내외로 Butt 용접의 경우와 유사하다. 용접선에 인접한 부분이 최대치를 나타내며 용접선에서 원주방향으로 300mm 이상 떨어지면 거의 변형을 일으키지 않음을 알 수 있다.

NS300-LS600은 용접선 길이 방향의 변형을 조사한 것으로 중앙부의 반경 방향의 처짐이 4.0mmwjd도였다. 이것은 Butt joint의 경우보다 더 심각한 것으로 더 연구될 필요가 있다고 본다.

나. 잔류응력

Table 3(a)와 3(b) 그리고 4(a)와 4(b)를 도시한 것이 Fig. 9-11이다. 측정 값들을 분석하면 아래와 같다.

- NS300-LS group :

- 1) Seam 용접선의 길이가 길어질수록 용접선 방향과 원주방향의 잔류응력 값이 증가됨을 볼 수 있다. 그리고 용접선의 인접부에서의 값은 재료의 항복응력보다도 큰 값을 가지며 이것은 용접으로 인한 조직의 변화로 다소 모재의 기계적 성질보다 큰 항복을 갖기 때문이다.
- 2) 용접선으로부터 20mm 정도 위치에서부터는 감소파형으로 인장과 압축이 반복적으로 진동하며 100mm 정도 위치에서 소멸됨을 나타낸다. 그러나 축 방향과 원주방향의 응력은 인장과 압축이다.

- NS300 group :

- 1) 비보강 Butt 용접인 경우, 축방향과 원주방향의 잔류응력이 용접선에 인접한 부분에서 거의 항복응력에 가까운 압축응력이 발생됨을 알 수 있다. 그러나 점차 진동을 하며 130mm 위치에서 소멸됨을 볼 수 있다. 그러나 원주방향 잔류응력이 축방향보다 크게 나타난다.
- 2) 내면의 잔류응력을 확인하지 못하여 단언키 어려우나 Butt 용접부의 처짐과 잔류응력 상태로보아 잠수체가 받게되는 수압에는 불리한 상태라 사료된다.

- RS300 group :

용접순서로 발생하는 정도는 무시될 수 있으나 Fig. 11(a)와 11(b)에서 알 수 있는바 원환 보강재가 부착된 위치에서 축방향과 원주방향 공히 항복응력보다 큰 잔류응력 값을 나타내고 있다. 이 것은 축방향 하중에 대하여는 보강부분에, 반경방향의 수압에 대하여는 보강재와 보강재 사이가 쉽게 좌굴을 일으킬 수 있음을 나타낸다. 이것은 용접선 부근에서는 극부적으로 잔류응력 값이 모재의 항복 값보다도 크기 때문에 용접 전후에 철저한 잔류응력 정감 및 완화 조치가 뒤따라야 할 것이다.

보다 확실한 기초자료와 결론을 이끌어내기 위하여는 여러 가지 관경의 시편으로 시험해야하며 내면과 벽두께 방향의 잔류응력도 계측할 필요가 있다. 이같은 실험은 많은 시간과 비용이 드는 것으로 새로운 더 쉬운 방법이 개발되어야 하겠다.

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 X X III, No. 2, pp. 577-586, 1981.
- [6] Masubuchi, 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. Hirano, "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.
- [10] 류기열, "원통관의 용접잔류응력 및 변형예측과 강도에 미치는 영향에 관한 연구". 부산대학교 조선공학과 박사학위 논문, 1998