

**研究論文**

## 圓筒管의 圓周熔接時 發生되는 殘留應力에 관한 實驗的 研究

嚴 東 錫\* · 柳 基 烈\*\*

### The Experimental Studies on Residual Stresses due to Circumferential Welds in thin Steel Cylinder

D. S. Um\* and K. Y. Yoo\*\*

**Key Words** : Welding Residual Stresses(용접 잔류응력), Blind Hole Drilling Method(미관  
통 구멍뚫기 기법), Stress Relaxation Method(응력이완기법), Heat Input(입  
열량), Welding Condition(용접조건), Rosette Gage(로제트 게이지)

#### Abstract

The residual stresses produced by a circumferential weld between axisymmetric cylinders are one of the most important problems concerning buckling strength, fatigue strength, stress corrosion cracking in shell structures, and are quite different from those due to a butt weld between flat plates. This paper presents experimental studies on weld cylinder models of various heat inputs and thin cylinder diameters by blind hole drilling method.

As a result, it is certified that weld residual stress(axial stress and hoop stress) is larger, as heat input and shell cylinder diameter are larger, and that experimental results show good agreement with the result of preceding researchers.

#### 1. 序 論

원주용접된 원통관은 폐쇄된 형상으로되지만 평판의 버트용접시는 끝단이 개방되어져서 원통관과 평판의 원주용접잔류응력 발생은 서로 다른 특

성으로 나타나게 된다. 원통관의 원주용접시 발생되는 잔류응력의 크기, 분포, 방향등은 피로강도, 취성파괴, 좌굴강도, 응력부식균열등 구조물의 최종강도에 상당한 영향을 미치게 될 경우 잔류응력이완 혹은 해소를 시켜야한다.

원통관의 설계 및 용접시공시에 원통관에 존재

\* 정희원, 부산대학교 공과대학(부산대학교 기계기술 연구소)

\*\* 정희원, 국방과학연구소

하는 용접 잔류응력의 크기 및 방향등의 분포를 예측할 필요가 있으며 용접잔류응력의 예측 방법으로는 실험적 방법과 열 탄소성해석 방법으로 구분된다. 평판의 용접잔류응력에 대한 실험적 연구가 많은 학자에 의해서 수행되었으나 원통관의 용접 잔류응력에 관한 실험적 연구는 비교적 적었다.

Sato<sup>1)</sup> 등은 원통관을 원주용접하여 원통관 셀 내외부표면의 용접선근방에 발생하는 용접잔류응력과 고유스트레인 분포를 실험적으로 연구하였다. 그리고 Y. Fujita, T. Nomoto, H. Hasegawa<sup>2,3)</sup> 는 직경300mm 정도의 얇은 원통관을 1패스 원주용접하여 용접선근방의 셀 내외부표면에 발생하는 축 잔류응력과 원환잔류응력의 크기 및 분포를 실험적으로 연구하였고 K. Iwai, E. Takahashi<sup>4)</sup> 등은 기존의 2차원 측정방법에다 두께방향을 고려한 3차원 잔류응력 측정방법을 제안하였으며 이를 이용하여 원주용접된 직경100mm, 두께32, 49mm의 두꺼운 관에 대해 3차원 잔류응력 측정법을 연구하였다.

국내의 연구실적으로서 김 등<sup>5)</sup>은 배관 보수용접시의 온도분포와 잔류응력에 대한 연구를 수행하였고, 나 등<sup>10)</sup>은 평판-관 구조물용접시 발생하는 응력 및 변형률에 관한 연구를 수행한 바가 있다.

본 연구에서는 원통관 원주용접시 분포되는 잔류응력을 측정하기 위하여 응력이완법의 일종인 Blind Hole Drilling Method를 적용했으며, 이때의 잔류응력은 원주용접시의 입열량에 의해 발생되어진다. 원통관의 구속도 및 강도를 좌우하는 요소인 직경 및 두께등의 제원을 나타내는 계수와 용접 입열량, 용접온도는 용접잔류응력에 큰 영향을 미칠 가능성이 있으므로 이들을 잔류응력의 지배 파라미터로 정하고, 지배 파라미터를 변화시킬 때 용접잔류응력의 크기 및 분포등을 정성적, 정량적으로 고찰하였다.

## 2. 實驗方法

### 2.1 圓筒管 製作

본 연구에 사용된 원통관의 재질은 KS-D3562 사양을 만족하는 재질로서 0.25% C, 0.35% Si를 함유하고 항복강도 25 Kg/mm<sup>2</sup>, 인장강도 42 Kg/mm<sup>2</sup>인 탄소강관이다.

Table. 1은 3종류의 원통관의 제작 사양을 나타낸 것이다.

Table. 1 Configuration of Cylinder

Diameter (mm)	Thickness (mm)	Length (mm)	Thickness/Diameter
200	8.2	300	0.041
300	7.0	300	0.025
400	7.6	300	0.018

원통관 제작시 절단에 의한 열영향을 피하기 위하여 길이150mm단위로 선반에서 절단하였고 절단시 고정방법은 찌그러지지 않도록 원통관내부를 치구로 고정했으며 V형 용접 홈으로서 홈 각도는 60°, 루트면의 폭을 3mm, 루트간격은 3mm로 선반가공하였다.

용접은 2개의 원통관을 90°간격으로 4점 가용접한 후 저속회전이 가능한 모터가 부착된 원통관용접 전용치구에 고정하고, CO<sub>2</sub>용접기로 1.2mm 직경의 아크전극과 1.2mm용접봉을 사용하여 1패스 용접후, 예열 및 후열처리는 하지 않고 공냉시켰다. 원통관은 두께와 직경등의 제원과 입열량크기에 따른 용접잔류응력을 알기위하여 Table. 2와 같은 용접조건과 입열량으로 원통관 9개를 제작하였다.

### 2.2 實驗方法

본 시험의 잔류응력 측정은 응력이완기법의 일종인 구멍뚫기기법으로 하였으며 상세한 과정은 ASTM규정<sup>6)</sup>에 따랐다. 구멍뚫기기법에 의한 잔류응력 측정장치는 Fig. 1과같이 M-M사 제품인 RS-200 드릴링머신 셋트, 스트레인 계측장치인 M-M사 제품인 P-3500 스트레인 인디케이터와 SB-10 밸런스 유닛, M-M사 제품인 062RE와 125RE 두가지 타입의 로제트 게이지와 전선으로 구성하였다.

드릴링 머신셋트는 마이크로스코프, 드릴, 밀링 가이드 등으로 구성되며 뚫을 구멍의 중심을 마이크로스코프로 맞추고 원통관의 셀 외부표면에 부착된 로제트 게이지는 드릴직경 4mm인 핸드드릴

Table. 2 Welding Condition

No. of Spec.	Arc Voltage (V)	Current (A)	Heat Input (KJ/cm)	Welding Speed (cm/min)	Welding Time (min)	Remarks
20-1	30	235	11	39	1.37	o Wire Diameter: 1.2mm o CO <sub>2</sub> gas : 20-25 l /min o Q = 60VI/v (KJ/cm)
20-2	32		18	25	2.38	
20-3	30		24	17	3.40	
30-1	30	235	11	39	2.23	
30-2	32	235	18	25	3.51	
30-3	32	250	24	20	4.40	
40-1	30	235	11	39	3.15	
40-2		260	18	27	4.40	
40-3		235	8	52	2.23	

로, 원통관의 쉘 내부는 핸드드릴이 들어갈 공간이 없으므로 3기압의 압축공기에 의해서 드릴이 회전되는 직경 2mm인 압축공기 터빈드릴로 로제트 게이지의 구멍을 절삭하였다. 스트레인 인디케이터는 영점 조정후 게이지반경이 2.5mm, 1.2mm인 2종류의 로제트 게이지에 구멍을 내고 구멍의 깊이는 게이지 반경이상으로 하였으며 구멍을 뚫기 전후의 스트레인 변화량을 측정하고 로제

트 게이지 특성 및 제원, 뚫는 구멍의 직경 및 깊이, 재료정수등을 고려한 계수를 곱하여 잔류응력을 계산했다.

Fig. 2와 같이 쉘 내외부표면의 용접잔류응력을 측정하기 위한 원통관의 쉘 외부표면위의 게이지 부착은 잔류응력측정 게이지의 절삭구멍직경이 5.13mm로서 3축 120Ω저항선인 로제트 게이지를 용접시작점에서 부터 225°위치에, 쉘 내부표면위의

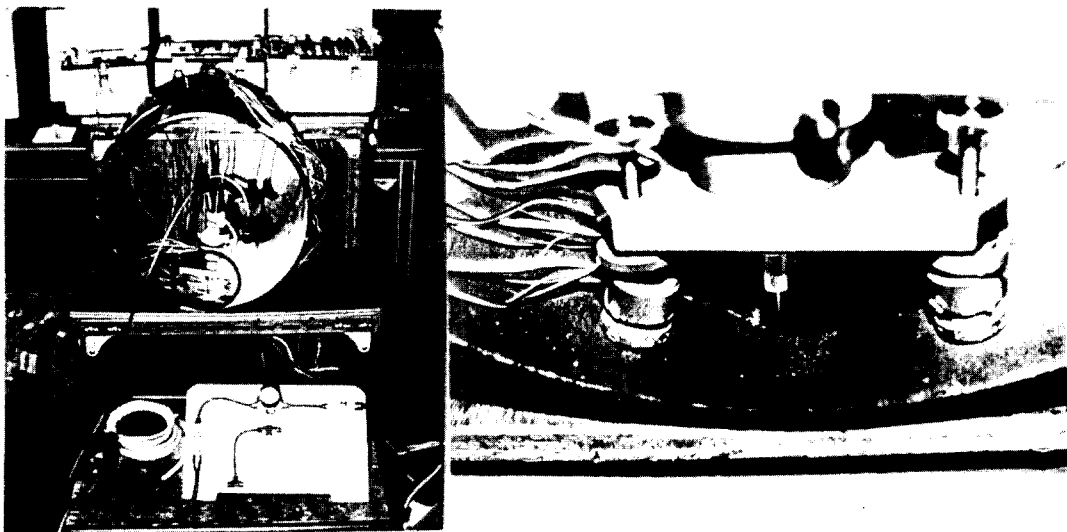


Fig. 1 Configuration of Instrument on Residual Strain Measurement

게이지부착은 절삭구멍직경 2.57mm인 잔류응력 측정 게이지를 용접시작점에서 부터 120°위치에 부착하였다. 원통관은 원주용접선을 기준으로 좌우대칭이므로 길이방향의 한쪽에만 게이지를 부착하였다.

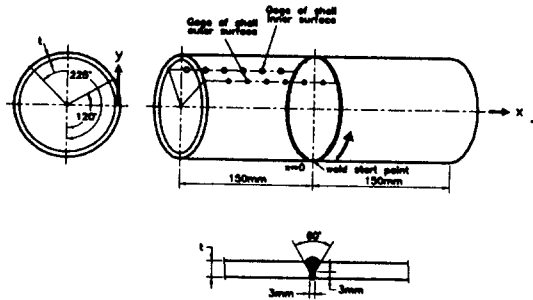


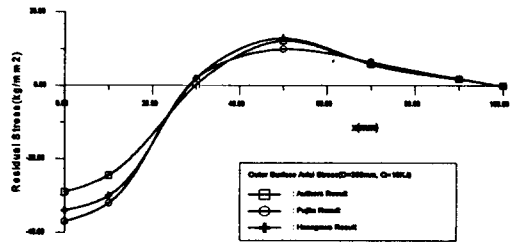
Fig. 2 Shape of Cylinder and Installation of Rosette Gage

### 3. 實驗結果 및 考察

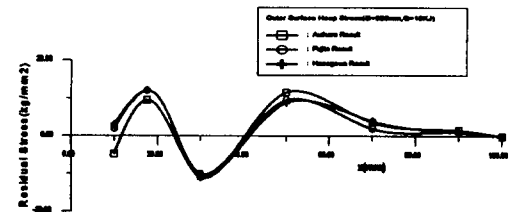
Table. 2에서 보인 것과 같이 입열량과 원통의 재원이 각각 다른 박판의 원통관을 원주용접하여 제작한 총 9개의 원통관에 대하여 쉘 내외부표면 잔류응력측정실험의 타당성을 확인하기 위하여 우선 Fujita와 Hasegawa의 실험결과<sup>2,3)</sup>와 본 연구결과를 비교검토하였다. 이 결과를 토대로 본 실험방법, 실험결과와 타당성을 확인하고 Table. 2에서 보인 제작조건으로 원주용접한 원통관의 실험결과를 고찰하였다.

#### 3.1 殘留應力實驗結果 妥當性 確認

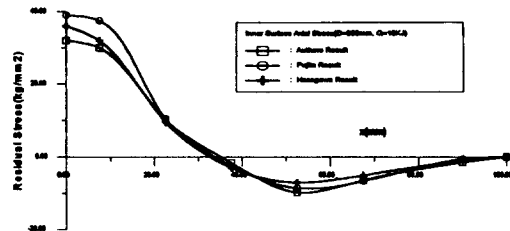
본 연구의 타당성을 확인하기 위하여 Fujita와 Hasegawa 실험결과<sup>2,3)</sup>와 본 연구결과를 비교검토하였으며, 비교실험모델은 입열량 18KJ, 내경 300mm, 길이 300mm, 1패스용접등 동일하게 제작된 원통관을 사용하였다. 단지 Fujita는 수동아크 용접, Hasegawa와 본 연구에서는 일정한 입열량유지 및 원통관 원주용접의 특수성을 고려하고 일정한 용접조건을 유지하기 위해서 CO<sub>2</sub>반자동용접으로 원통관을 제작하였으며 Fujita는 절단기법, 본 실험에서는 Blind Hole Drilling Method로 잔류응력



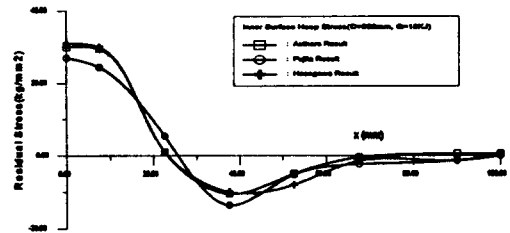
(a) Axial Residual Stress of Shell Outer Surface



(b) Hoop Residual Stress of Shell Outer Surface



(c) Axial Residual Stress of Shell Inner Surface



(d) Hoop Residual Stress of Shell Inner Surface

Fig. 3 Review of Generated Residual Stresses by Circumferential Weld of Cylinder

을 측정하였다.

Fig. 3 (a), (b), (c), (d)는 원통관 쉘 내외부 표면의 축잔류응력( $\sigma_x$ )과 원환잔류응력( $\sigma_\theta$ )등, 본 실험에서 측정된 총 4종류 잔류응력의 타당성을 확인하기 위하여 Fujita 와 Hasegawa의 실험결과와 비교한 도표로서 종축은 잔류응력의 크기를 표시하고 횡축은 원주용접선에서 부터의 거리를 나타낸다.

(a)는 쉘 외부표면의 축 방향 잔류응력( $\sigma_x$ )으로서 원주용접선 근방에서는 압축잔류응력이고,  $x = 30\text{mm}$ 근처에서 응력이 영이 된 후 인장잔류응력이 점차 감소되어  $x = 100\text{mm}$ 근처에서 잔류응력이 영에 접근하고 있어서 Fujita와 Hasegawa의 실험결과와 본 연구결과의 잔류응력크기 및 분포가 유사하다. 다만 원주용접선 근방에서  $5\sim 6\text{Kg/mm}^2$ ,  $x = 50\text{mm}$ 근방에서  $2\sim 3\text{Kg/mm}^2$ 의 작은 응력차이만을 보이고 있다.

(b)는 쉘 외부표면의 원환 잔류응력( $\sigma_\theta$ )으로서  $10\sim 15\text{Kg/mm}^2$ 의 인장 및 압축잔류응력이 번갈아가며 복잡한 형상으로 나타나며, Fig. 5의 (a), (c), (d)에서 나타난 잔류응력크기의 절반정도이고  $x = 100\text{mm}$ 근처에서 응력이 영이다. 그리고 3곡선에서  $x = 10\text{mm}$ 근방의 잔류응력이 차이를 보이지만 전체적인 잔류응력분포 경향은 잘 일치한다.

(c)는 쉘 내부표면의 축 방향 잔류응력( $\sigma_x$ )으로서 원주용접선 근방에서는 약  $37\text{Kg/mm}^2$ 정도의 인장 잔류응력이 분포되고  $x = 32\text{mm}$ 근방에서 압축잔류응력으로 바뀌어진다.  $x = 100\text{mm}$ 근처에서 응력이 영에 접근하고 있으며 3곡선은 유사한 경향을 보이고 있다.

(d)는 쉘 내부표면의 원환 잔류응력( $\sigma_\theta$ )으로 용접선근방에서는 약  $28\text{Kg/mm}^2$ 의 인장잔류응력이 분포되어지고  $x = 25\text{mm}$ 근방에서 압축잔류응력으로 바뀌게되어  $x = 100\text{mm}$ 근처에서 응력이 영에 접근하고 있다.

본 실험과 Fujita와 Hasegawa의 실험결과를 비교 검토한 결과, Fig. 3에서 보인 것과 같이 원통관 원주용접시 발생된 잔류응력의 분포경향은 유사하며 발생하는 잔류응력의 크기도 최대  $5\sim 6\text{Kg/mm}^2$  정도의 응력차이만을 보이고 있다. 이러한 응력차이는 잔류측정방법의 오차와 용접방법 및 절차, 용접속도 등에 의해서 발생되어진 것으로 판단되며 원통관의 원주용접시 발생하는 용접잔류응력측정에 Blind Drilling Hole Method의 적용 가능

성과 그 측정결과와의 타당성을 확인하였다.

### 3.2 熔接 入熱量의 影響

Fig. 4 (a), (b), (c), (d)는 직경 300mm의 원통관에 11, 18, 24KJ의 용접입열량을 투입한 경우에 입열량이 잔류응력발생에 미치는 영향을 고찰하기 위한 그림이다. 종축은 용접잔류응력과 원통관재료의 항복강도 응력비( $\sigma_{x, \text{or } \theta} / \sigma_v$ )로 잡고 “-”는 압축잔류응력, “+”는 인장잔류응력이며 횡축은 원주용접선( $x=0$ )에서 부터의 거리를 나타냈다.

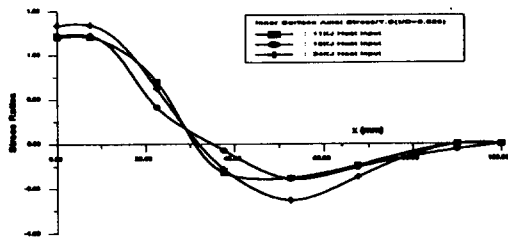
(a)는 쉘 내부표면의 축 잔류응력비( $\sigma_x / \sigma_v$ )를 나타낸 것으로서 용접선근방에서는 입열량Q의 크기에 따라 항복강도( $\sigma_v$ )보다 +1.2~+1.4배 큰 최대 인장잔류응력이 분포되고  $x = 30\text{mm}$ 근방에서 압축잔류응력으로 바뀐다. 최대 압축잔류응력은  $x = 50\text{mm}$ 근방에서 입열량의 크기에 따라  $\sigma_v$ 의 -0.4~-0.7배 정도이고 점차 감소되어  $x = 100\text{mm}$ 에서 영에 접근한다.

(b)는 쉘 외부표면의 축 잔류응력비( $\sigma_x / \sigma_v$ )를 나타낸 것으로서 용접선근방에서는 투입된 입열량의 크기에 따라  $\sigma_v$ 의 -0.8 ~ -1.2배 정도의 최대 압축잔류응력이 발생되고  $x = 30\text{mm}$ 근방에서 인장잔류응력으로 바뀌며  $x = 50\text{mm}$ 근방에서는 입열량의 크기에 따라  $\sigma_v$ 의 +0.4 ~ +0.7배의 최대 인장잔류응력이 발생된다.

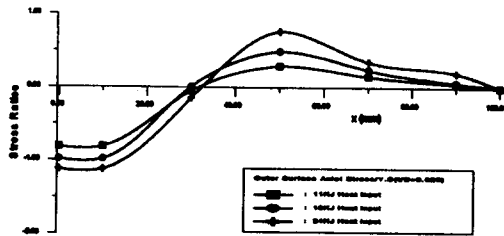
(a), (b)에서 보인 것과 같이 원통관제작시 투입된 용접입열량 크기가 최대( $\sigma_x$ )와 ( $\sigma_\theta$ )의 크기 및 분포에 비교적 큰 영향을 미치고 있으며, ( $\sigma_x$ )와 ( $\sigma_\theta$ )는 서로 대칭되는 형태로 분포되고 있음을 보여주고 있다.

(c)는 쉘 내부표면에 발생하는 원환잔류응력과 항복강도의 응력비( $\sigma_\theta / \sigma_v$ )를 표시한 것으로서 용접선근방에서는 투입된 입열량의 크기에 따라  $\sigma_v$ 의 +0.8~+0.95배 정도의 인장 원환잔류응력이 분포되며  $x = 25\text{mm}$ 근처에서 압축 원환잔류응력으로 바뀐다. 투입된 입열량의 크기에 따라  $x = 40\text{mm}$ 근처에서  $\sigma_v$ 의 -0.3~-0.4배 정도의 응력이 분포되고  $x = 100\text{mm}$ 근처에서는 잔류응력이 거의 발생하지 않는다.

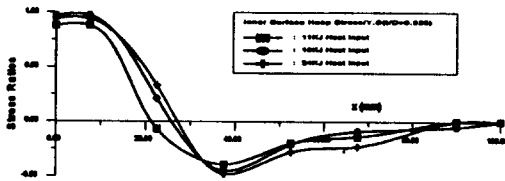
(d)는 쉘 외부표면에 발생하는 원환잔류응력비( $\sigma_\theta / \sigma_v$ )를 표시한 것으로서 투입된 입열량크기에 따라  $\sigma_v$ 의 +0.2~+0.45배 정도의 최대 인장원환



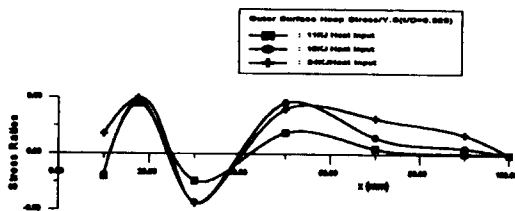
(a) The Magnitude and Distribution of Inner Surface Axial Stress (Effect of Heat Input)



(b) The Magnitude and Distribution of Outer Surface Axial Stress (Effect of Heat Input)



(c) The Magnitude and Distribution of Inner Surface Hoop Stress (Effect of Heat Input)



(d) The Magnitude and Distribution of Outer Surface Hoop Stress (Effect of Heat Input)

Fig. 4 Effect of Heat Input on the Magnitude and Distribution of Residual Stresses

잔류응력과  $\sigma_r$ 의  $-0.2 \sim -0.4$ 배 정도의 최대 압축원 환잔류응력이 나타나므로 발생하는 잔류응력의 크기는 상당히 작고 분포는 복잡한 형상으로 나타난다.

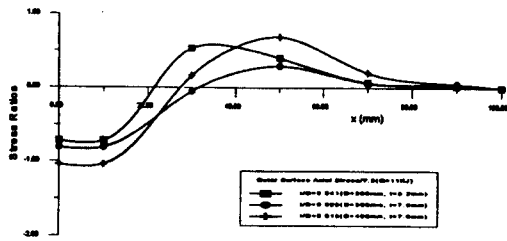
투입된 입열량 크기에 따라 셸 내외부에 발생되는 4종의 잔류응력을 검토한 결과, 용접선근방에서의 입열량 변화는  $(\sigma_x)$ 와  $(\sigma_r)$ 의 분포 및 크기에 가장 큰 영향을 미치고  $x = 30\text{mm}$  근처에서 잔류응력의 작용부호 정·부가 바뀌며,  $x = 100\text{mm}$ 에서 응력이 영에 접근함을 알았다. 그리고 두 잔류응력들은 서로 대칭적으로 균형을 이루고있었으며, 분포된 최대 잔류응력크기는 원통관재료의 항복응력과 동일한 수준이었다. 셸 내외부표면에 발생되는 원환잔류응력  $(\sigma_\theta)$ 와  $(\sigma_r)$ 의 크기 및 분포는 투입된 입열량크기에 비교적 적은 영향을 받고있으며 특히  $(\sigma_r)$ 의 크기는 그 영향이 상당히 적다.

### 3.3 圓筒管제원(t/D)의 影響

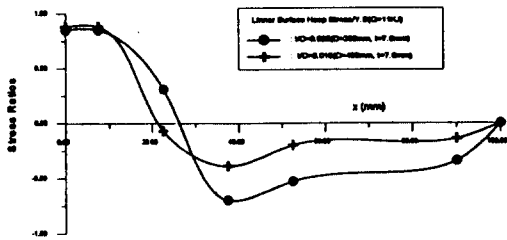
Fig. 5 (a), (b), (c), (d)는 원통관의 제원 t/D가 용접잔류응력분포 및 크기에 미치는 영향을 고찰하기 위한 그림으로서 종축은 용접잔류응력과 원통관재료의 항복강도 응력비율, 횡축은 원주용접선에서부터의 거리를 나타낸다. t/D는 원통관의 강도에 직접적인 영향을 미치는 무차원 계수로서 t/D가 커지면 원통관의 강도는 강해지고 작아지면 강도가 약해지는 특성을 가지며 본 실험에서는 t/D가 0.018, 0.025, 0.041인 원통관의 잔류응력을 고찰하였다.

(a), (b), (c)에서 보인 것과같이 원통관 셸 내부 표면에서의 축 잔류응력과 원환잔류응력은 용접선근방에서 t/D크기에 따라  $\sigma_r$ 의 0.8~1.1배 정도의 최대인장 혹은 최대 압축잔류응력이 분포되며  $x = 20 \sim 30\text{mm}$  근처에서 응력부호가 바뀐다. 그리고 t/D가 작아지면 원통관 길이방향으로 더 먼 거리까지 더 큰 잔류응력이 분포되고 t/D가 커지면 반대현상이 생기고있어서 t/D는 잔류응력 분포 범위와 발생하는 잔류응력의 총량에 주로 영향을 미치고있다.

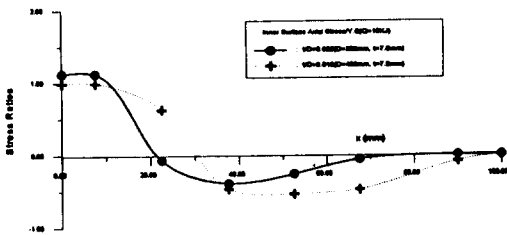
(d)는 t/D크기가 셸 외부표면의 원환잔류응력  $(\sigma_r)$ 에는 큰 영향을 미치지 못함을 보여주고있다.



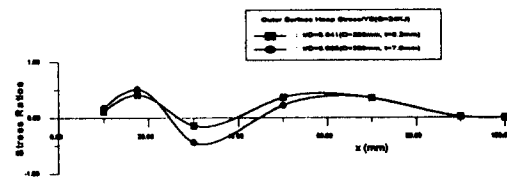
(a) The Magnitude and Distribution of Outer Surface Axial Stress (Effect of t/D)



(b) The Magnitude and Distribution of Outer Surface Hoop Stress (Effect of t/D)



(c) The Magnitude and Distribution of Inner Surface Axial Stress (Effect of t/D)



(d) The Magnitude and Distribution of Outer Surface Hoop Stress (Effect of t/D)

Fig. 5 Effect of Size Parameter t/D on the Magnitude and Distribution of Residual Stresses

### 3.4 支配 参数 HT의 影響

Stoh<sup>1)</sup> 등은 용접온도가 잔류응력과 용접변형에 미치는 효과를 검토하기 위하여 새롭게 도입한  $H_T$ 를  $Qc\rho t\sqrt{Rt}$ 로 표시하고 단위는  $^{\circ}\text{C}$ 이다. 여기에서 Q는 열량, c는 비열,  $\rho$ 는 밀도이고 원통관 판두께 및 직경은 t, R이다.<sup>1,6)</sup>

Fig. 6은 원주용접온도  $H_T$ 가 원통관에 발생하는 잔류응력의 크기 및 분포에 미치는 영향을 검토하기 위한 그림으로서 원주용접선(x=0)에서부터 7.5mm떨어진 지점의 원통관 쉘 내부에 분포된 잔류응력과 원통관재료의 항복강도 응력비 ( $\sigma_x$ )<sub>i</sub> / ( $\sigma_y$ ) 및 ( $\sigma_y$ )<sub>i</sub> / ( $\sigma_y$ )를 종축으로 잡았다.

용접입열량 및 원통관제원을 고려한 지배 파라미터  $H_T$ 를 횡축으로 잡았으며  $H_T$ 가 상승함에 따라 쉘 내부표면에 발생하는 축 인장잔류응력 ( $\sigma_x$ )<sub>i</sub>은 계속 커져서  $H_T$  1300 $^{\circ}\text{C}$ 근처에서 최대 1.31 $\sigma_y$ 정도로 된 후 점차 감소되어지고, 원환인장 잔류응력 ( $\sigma_y$ )<sub>i</sub>은 1300 $^{\circ}\text{C}$ 근처에서 최대 1.02 $\sigma_y$ 크기정도 발생된 후 점차 감소되고 있다.

Fig. 6에서와 같이 원통관 쉘 내부표면의 축 인장잔류응력과 원환 인장잔류응력은  $H_T$  1300 $^{\circ}\text{C}$ 근처에서 최대이고 더 높은 용접온도가 되더라도 발생하는 잔류응력은 거의 변화가 없었으며 축 인장잔류응력 크기가 원환 인장잔류응력보다 1.3배정도록 커서 원주용접열에 의해 원통관 길이방향의 굽힘 응력이 크게 발생함을 알 수 있었다.

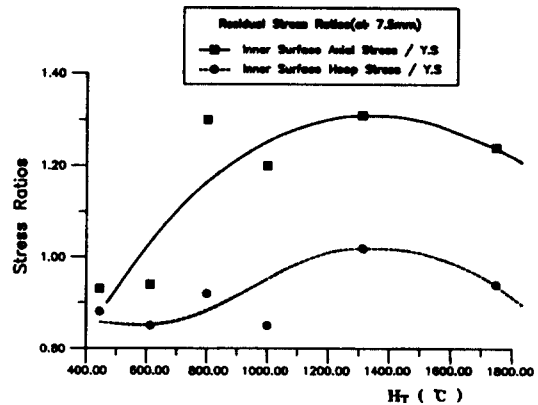


Fig. 6 Effect of Weld Temperature Parameter HT on the Magnitude and Distribution of Residual Stresses

#### 4. 結 論

본 연구는  $t/D$ 가 0.018, 0.025, 0.041이고, 입열량이 8, 11, 18, 24KJ로 용접제작된 얇은 원통관셀 내외부표면에 발생하는 잔류응력을 실험적 방법에 의하여 고찰하였고, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 원통관의 원주용접시 투입되는 입열량크기는 원환잔류응력보다 축 잔류응력분포에 더 큰 영향을 미치고, 원주용접선근처에 발생하는 잔류응력 크기에도 비교적 큰 영향을 미친다. 그리고 용접선근처에서 원통관의 재료항복강도정도의 최대잔류응력이 발생되고 용접선에서부터 약 25mm근방에서 응력작용방향의 정·부가 바뀌며, 100mm근방에서 잔류응력이 거의 발생하지 않았다.

둘째, 원통관 제원을 나타내는 계수인  $t/D$ 크기는 잔류응력이 분포되어지는 범위에 큰 영향을 미치게되어  $t/D$ 가 작아지면 용접선에서부터 먼 곳까지 더 많은 축 잔류응력이 분포되지만, 원환잔류응력 분포에는  $t/D$ 의 영향이 비교적 적었다.

셋째, 용접온도가 잔류응력에 미치는 영향을 검토하기 위하여 도입된  $H_T$ 가 증가하면 분포되어지는 잔류응력 크기도 커져서 약 1300  $H_T$ 에서 최대의 잔류응력이 발생되지만, 그 이상이 되더라도 발생하는 잔류응력크기는 거의 변화가 없었다.

끝으로 본 연구를 통하여 곡물을 가지는 원통관의 잔류응력 측정에 Blind Hole Drilling Method가 유용함을 확인하였고, 실험결과에서 얻어진 용접 잔류응력에 관한 자료는 내외압을 받는 원통관구조물 설계 및 시공시 잔류응력 영향에 대한 평가를 할 때 유용하리라 생각된다. 그리고 향후 본 실험 결과를 기초로 한 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 용접잔류응력을 해석적인 기법으로 추정될 수 있도록 연구가 기대된다.

#### 參 考 文 獻

1. K. Satoh, M. Toyoda Etc : Controlling

Parameters of Residual Stresses and Deformations in welded thin Cylindrical Shells, 日本溶接學會論文集 제 2 권 제 3 호, (1984) pp 135-140

2. 長谷川 : 構造物の 溶接變形ならびに残留應力に關する研究, 博士論文(東 大), 79 - 12.
3. Y. Fujita, T. Nomoto, H. Hasegawa : Studies on Thermal Elastic-Plastic Problem ( 4th Report ) - Welding Deformations and Residual Stresses due to Circumferential Welds in Cylindrical Shells-, 日本造船學會論文 Vol. 146 ( 79 - 12) pp 383 - 392
4. K. Iwai, E. Takahashi : A new Measuring Method for Axisymmetrical residual Stress Distributions in a thick-wall Pipe, 日本溶接學會論文集 제 4 권 제 1 호, (1986) pp 143 - 147
5. ASTM E 837-92 : Standard Test Method for Determining residual stress by the Hole-Drilling Strain gage Method, pp 753 - 759
6. K. Matsuoka, T. Naoi : An Analytical Method on Residual Stresses due to Circumferential Welds of Pipes, 日本溶接學會誌 제 51 권 제2호, (1982) pp 64 - 71
7. W. Soete : Measurement and Relaxation of Residual Stresses, Welding Research Supplement, (1949) pp 354 - 364
8. A. J. Bush and F. J. Kromer : Simplification of the Hole-Drilling Method of Residual Stress Measurement, ISA Transactions Vol. 12, No. 3, (1973), pp 249 - 259
9. 김 영표, 김 형식, 김 우식, 홍 성호, 방 인환, 오 규환 : 슬리브 덮개를 이용한 배관 보수용접시 온도분포와 잔류응력에 관한 연구, 대한용접학회지 제 14 권 제 5 호, (1996), pp 316 - 326
10. 나 석주, 김 형완 : 평판-관 구조물용접시 발생하는 응력 및 변형률에 관한 연구, 대한용접학회지 제 4권 제 2호, (1986), pp 30 - 39