

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 35 卷 第 4 號 1998年 11月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 35, No. 4, November 1998

## 원통의 용접변형 및 잔류응력에 대한 연구

류기열\*, 엄동석\*\*

### A Study on the Welding Deformations and Residual Stresses for Circumferential Welded Cylinders

by

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

#### 요 약

본 연구에서는 구멍뚫기 기법을 사용하여 여러 입열량과 두께대 직경을 가진 원통에서 원주용접에 의해 발생하는 잔류응력과 용접변형을 측정하였다. 그 결과, 입열량과 원통 두께대 직경이 커짐에 따라 축 및 원주 잔류응력은 커지게됨을 확인하였으며 이것은 Fujita 등의 결과와 잘 일치하였다.

원통 원주용접 시의 지배 파라미터인 입열량과 두께 대 직경비는 축 및 원주방향의 잔류응력과 용접변형의 분포 및 크기에 영향을 미치고 있음을 확인하였으며, 다중회귀분석법을 적용하여 실험 결과의 범위내에 있는 원주용접된 원통에 대한 잔류응력과 용접변형을 예측할 수 있는 근사식을 도출하였다.

#### Abstract

Using blind hole drilling method, the residual stresses and welding deflections are measured for the cylindrical shell with various heat inputs and cylinder diameters. As a result, it is verified that the axial and hoop residual stresses which are generated near the weld part of cylinders are increased, as the heat inputs and cylinder diameters are increased. And experimental results show good agreements with those of precedent researchers.

In this paper, it is validated that dominant parameters, heat input  $Q$  and the dimension of cylinder  $h/D$  have some effects on the magnitude and distribution of axial and hoop residual stresses and welding deflections. The empirical equations of residual stresses and welding deflections are made by using multiple linear regression with experimental results.

---

접수일자 : 1998년 2월 13일, 재접수일자 : 1998년 8월 24일

\*정회원, 국방과학연구소

\*\*정회원, 부산대학교 공과대학(부산대학교 기계기술 연구소)

## 1. 서론

용접제작되고 있는 압력용기, 잠수함/정 내압선체, 해양구조물, 배관구조물 등의 내·외압을 받는 원통 구조물은 용접중의 국부적인 가열과 냉각과 정으로 원통 용접부 근방에 불균일한 팽창과 수축을 유발하고, 이러한 현상에 의해 평판구조물과 다른 형상의 용접변형과 잔류응력이 발생된다. 원통 내·외부 표면의 원주 잔류응력 및 용접선에 수직방향으로 발생하는 축 잔류응력과 용접변형은 원주용접된 원통의 폐쇄되는 형상적 특성과 용접 입열량과 에너지평형을 이루면서 복잡하게 분포된다.

외관상 나타나지 않고 구조물의 내부에 존재하는 잔류응력은 원통에 작용하는 외부하중에 의해서 생기는 응력과 중첩되어 응력집중현상을 야기시킬 수 있고, 구조물의 초기결함 형태로 존재하는 용접변형은 외부하중에 의한 좌굴강도 저하를 발생시킨다. 또한 잔류응력은 파괴강도 저하와 응력부식을 야기시키고 구조물의 좌굴강도, 피로강도 및 최종강도 등을 저하시켜 원통 구조물의 수명단축, 중대한 구조적 손상, 성능저하 등을 초래할 수 있다. 원통의 용접제작 과정중 과도하게 발생된 잔류응력과 용접변형을 감소하거나 해소가 필요한 경우에는 제작공정 및 기간에 차질이 생길 뿐만 아니라 제작경비도 증가하게 되므로, 원통의 설계 및 용접시공 이전에 원통에 존재하는 용접 잔류응력의 크기, 방향과 용접변형 등을 충분히 검토할 필요가 있다.

이 분야에 대한 연구로서 Fujita 등[1]은 박판원통의 원주용접 시의 용접변형 및 잔류응력의 열탄소성 근사해석법을 개발하고 파이프 치수와 용접 입열량 등이 용접변형과 잔류응력에 미치는 영향을 연구하여 용접변형 및 잔류응력의 추정차트를 제안하였다. 그리고 Satoh 등[3]은 원통 치수파라미터와 용접 입열량 파라미터가 두께가 얇은 원통 원주용접 시 발생하는 굽힘변형과 잔류응력에 미치는 영향을 실험적 방법으로 연구하여 지배 파라미터는 잔류응력 및 용접변형과 함수관계에 있음을 확인하였다.

국내에서도 많은 원통 구조물이 용접제작되고 있으나 파괴의 근원이 될 수 있고 강도저하에 영향을 미치는 잔류응력과 용접변형에 대한 연구가 초보적인 단계에 불과하다[8-13]. 따라서 원통 용접 구조물의 용접변형 및 잔류응력에 대해 정성적, 정량적인 예측 뿐만 아니라 평가를 위한 체계적 연구가 필요하다.

본 연구에서는 원주용접된 원통에 발생하는 잔류응력과 용접변형의 발생 경향을 분석하고 원통 구조물의 설계 및 용접제작 시 적용할 수 있는 추정식을 도출하기 위하여 실험과 회기분석을 수행하였다. 구멍뚫기 기법 등의 실험장치를 구성하여 여러 입열량과 두께대 직경비를 가진 파이프용 용접제작된 시험용 원통구조물에서 일어나는 변형과 용접변형을 측정하였다. 그 측정결과 지배 파라미터인 용접입열량 크기  $Q$ 와 원통두께대 직경비의 크기  $h/D$ 변화가 축 및 원주방향의 잔류응력과 용접변형의 크기, 분포경향 등에 영향을 미치고 있음을 확인하였으며, 다중회귀분석법을 적용하여 실험결과 범위내에 있는 원주용접된 원통 구조물에 대한 잔류응력과 용접변형을 예측할 수 있는 근사식을 도출하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험용 원통제작

본 연구에 사용된 원통은 0.25% C를 함유하고 항복강도  $29\text{kg/mm}^2$ 이고 원통두께대 직경비가 Table 1과 같으며 두께 7.0, 7.6, 8.0mm인 3종류의 탄소강 파이프를 사용하였다. 실험용 원통제작 시 원통 재료의 절단에 의한 열영향을 피하기 위하여 길이를 150mm 단위로 선반에서 절단하였고, 절단 변형의 최소화를 위해 원통내부를 지그로 구속하였다. 또한 Fig. 1과 같이 용접홈 각도  $60^\circ$ , 루트면의 깊이 3mm, 루트간격 3mm인 Y형 용접홈으로 선반가공하였다.

원통재료의 용접은  $90^\circ$ 간격으로 4점을 가용접한 후 저속모터가 부착되어 저속회전이 가능한 원통용접 전용지그에 고정하여 실시하였다. 그리고 원통의 두께와 직경 등의 체원과 입열량크기에 따

른 용접 잔류응력의 크기 및 분포를 측정하기 위하여 Table 1과 같은 용접조건과 입열량으로 실험용 원통 9개를 용접제작하였다. 직경 1.2mm의 아크전극과 1.2mm용접봉을 사용하는 CO<sub>2</sub>가스용접기로 1패스용접하였으며, 예열 및 후열처리는 하지 않고 공냉시켰다. 용접 시 20~25 l/min.의 CO<sub>2</sub>가스로 용접부를 대기와 차단하였고, 결함을 최소화하기 위하여 수평 및 하향으로 용접하였으며, CO<sub>2</sub>가스용접으로 원통의 원주용접속도를 일정하게 유지하였다. 입열량 Q = 60ηVI/v로 계산하였으며, 여기에서 η = 0.9, 원주용접을 완료하는 데 소요된 총 시간은 90sec~280sec, 용접속도 v는 17~52cm/min.이며, V와 I는 측정된 용접아크전압과 전류이다.

Table 1 The welding condition

Specimen No.	Arc Voltage (V)	Current (I) (A)	Heat Input (kJ/cm)	Welding Speed (cm/min.)	Welding Time (min.)	h/D
201	30	235	11	39	1.37	0.041
202	32		18	25	2.38	
203	30		24	17	3.40	
301	30	235	11	39	2.23	0.025
302	32	235	18	25	3.51	
303	32	250	24	20	4.40	
401	30	235	11	39	3.15	0.018
402		260	18	27	4.40	
403		235	8	52	2.23	

2.2 실험장치 구성 및 실험방법

Fig. 1과 같이 실험용 원통의 외부표면 위에는 게이지반경이 5.13mm, 저항선이 120Ω인 3축 로제트 게이지를 원주용접 시작점에서부터 225°이고 x = 7.5, 22.5, 37.5, 52.5, 67.5, 90mm위치에 부착하였다. 원통 내부표면 위에는 게이지반경이 2.57mm인 잔류응력측정 게이지를 원주용접 시작점에서부터 120°이고 x = 10, 30, 50, 70, 90mm위치에 부착하였다. 원통은 원주용접부를 기준으로 좌우대칭이므로 길이방향의 한쪽만 게이지를 부착하였다.

본 실험은 실험체에 작은 구멍만 뚫어도 잔류응

력계산이 가능하고 대형구조물에도 쉽게 적용할 수 있는 구멍뚫기 기법으로 수행하였으며 상세한 과정은 ASTM 규정 [4]에 따랐다. 구멍뚫기 기법에 의한 잔류응력 측정장치는 Fig. 2와 같이 RS-200 드릴링 머신셋트, 변형을 계측장치인 P-3500 변형을 인디케이터와 SB-10 밸런스 유니트, 062RE와 125RE 두가지 타입의 로제트 게이지와 전선, 압축공기 생성 및 제어장치, 실험용 원통으로 구성하였다.

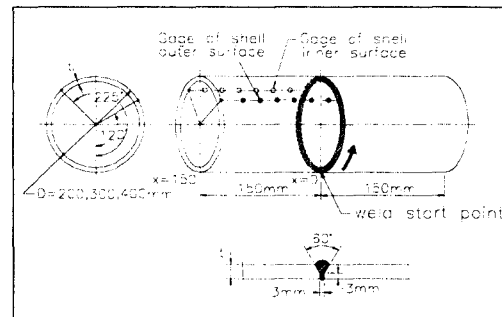


Fig. 1 Installation of rosette gage on the inner and outer shell surfaces of cylinder

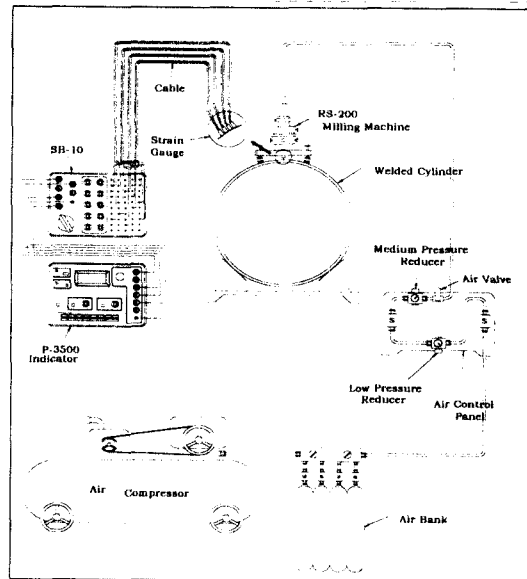


Fig. 2 The configuration of measured instrument for residual strain measurement

드릴링 머신세트는 마이크로스코프, 드릴, 밀링 가이드 등으로 구성되며 뚫을 구멍의 중심을 마이크로스코프로 맞추고 원통의 외부표면은 드릴직경 4mm인 핸드드릴로, 원통의 내부는 핸드드릴이 들어갈 공간이 없으므로 직경 2mm인 3기압의 압축 공기 터빈드릴로 로제트 게이지의 구멍을 절삭하는 장면을 Fig. 3에 나타냈다. 변형을 인디케이터는 영점조정 후, 게이지 반경이 2.5mm, 1.2mm인 2종류의 로제트 게이지에 구멍직경 2mm, 1mm와 깊이 2mm, 1mm로 절삭하였다. 오차최소화를 위하여 실험이전에 구멍뚫기 방법을 충분히 숙달시켰으며 구멍을 뚫기 전후의 변형을 변화량을 측정하고 로제트 게이지 특성 및 제원, 뚫는 구멍의 직경 및 깊이, 재료정수 등에 대해 ASTM규정의 오차보정계수를 고려하였다.

Fig. 4는 원주용접된 실험용 원통의 변형을 측정하기 위한 용접변형 측정장치로서 선반에 설치된 레일을 따라 움직일 수 있는 다이얼 게이지로 원통의 용접변형 측정이 가능하다. 그리고 원통을 회전할 수 있도록 기어와 베어링, 모터를 부착하였고 원통을 고정할 수 있도록 지그를 부착하였다.

실험용 원통의 용접 굽힘변형은 원주용접부에서 가장 먼 곳 150mm에서 원통 직경방향 변형량을 영으로 잡고 원주 용접부에서부터 10mm 간격으로 10개점의 상대변형을 측정하였으며, 용접오류 및 측정오차를 감안하여 용접시작점으로부터 90°, 180°, 270°선 위의 3점을 측정하여 평균하였다.

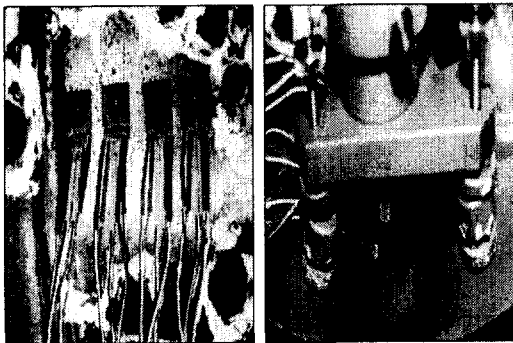


Fig. 3 Photos of installed rosette gage and drilling on shell surface of cylinder

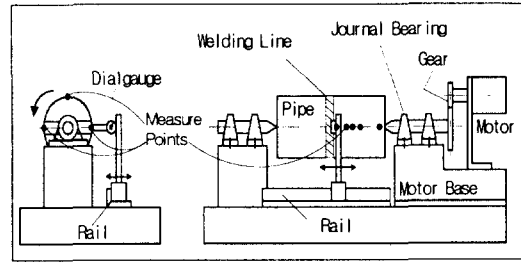


Fig. 4 Measuring apparatus for generated welding deflection by circumferential weld of cylinders

### 3. 실험결과 고찰

#### 3.1 잔류응력에 영향을 미치는 지배파라미터 고찰

##### 1) 용접 입열량의 영향

원통에 11, 18, 24kJ/cm의 입열량으로 용접할 때 입열량이 잔류응력 발생에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 종축은 용접 잔류응력대 원통 재료의 항복강도 응력비( $\sigma_x$  or  $\sigma_y$ )<sub>1</sub> or  $\sigma/(\sigma_{YS})$ 로 무차원화시키고 횡축은 원주 용접부 ( $x=0$ )에서부터의 거리를 나타내었으며, “-”는 압축잔류응력, “+”는 인장 잔류응력이다.

Fig. 5a, Fig. 5b에서 보인 것과 같이 원통 제작 시 투입된 용접입열량 크기가 축 잔류응력 ( $\sigma_x$ )<sub>1</sub> 와 ( $\sigma_x$ )<sub>0</sub>의 최대크기 및 분포에 비교적 큰 영향을 미치고 있으며, ( $\sigma_x$ )<sub>1</sub>와 ( $\sigma_x$ )<sub>0</sub>는 x축에 대해 대칭형상으로 분포되고 있다. 또한 ( $\sigma_x$ )<sub>1</sub>와 ( $\sigma_x$ )<sub>0</sub>의 잔류응력 측정치 크기가 항복응력보다 1.15배 크게 나타난 것은 계측오차로 생각된다[5].

Fig. 5c와 같이 원주 잔류응력 응력비 ( $\sigma_y$ )<sub>1</sub>/ $(\sigma_{YS})$ 는 용접부 근방에서 투입된 입열량의 크기에 따라  $\sigma_{YS}$  의 + 0.8~+ 0.95배 정도의 인장 원주 잔류응력이 분포되며,  $x = 40$ mm 근처에서  $\sigma_{YS}$ 의 - 0.3~- 0.4배 정도의 응력이 분포되고  $x = 100$ mm 근처에서는 잔류응력이 거의 발생하지 않는다. Fig.5d와 같이 원주 잔류응력비 ( $\sigma_y$ )<sub>0</sub>/ $(\sigma_{YS})$ 는 용접입열량 크기에 따라  $\sigma_{YS}$ 의  $\pm 0.2 \sim \pm 0.45$ 배 정도의 최대인장 축 및 원주 잔류응력이 발생되어 잔류응력의 크기는 상당히 작고 복잡한

형상으로 분포된다.

입열량 크기에 따라 원통의 내·외부 표면용접부 근방에서의 입열량 변화는  $(\sigma_x)_i$ 와  $(\sigma_x)_o$ 의 분포 및 최대크기에 가장 큰 영향을 미치고  $x = 30\text{mm}$  근처에서 잔류응력 작용방향이 바뀌며, 두 잔류응력들은 서로 대칭적으로 균형을 이룬다.

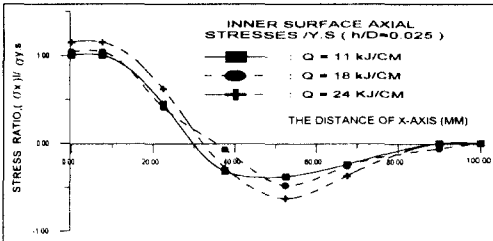


Fig. 5a The magnitude and distribution of axial residual stress on the inner surface due to effect of heat input

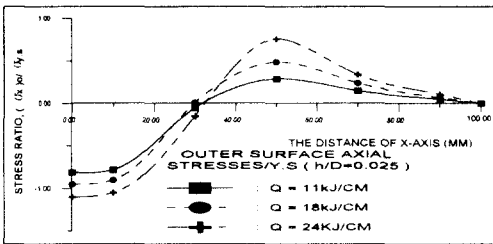


Fig. 5b The magnitude and distribution of axial residual stress on outer surface due to effect of heat input

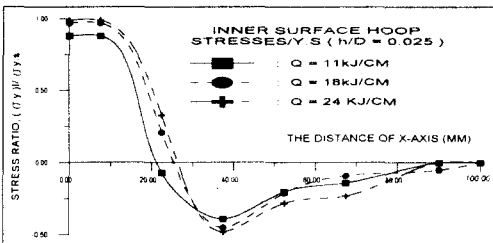


Fig 5c The magnitude and distribution of hoop residual stress on inner surface due to effect of heat input

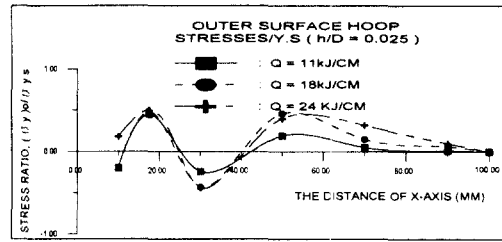


Fig. 5d The magnitude and distribution of hoop residual stress on outer surface due to effect of heat input

원통의 내·외부 표면에 발생하는 원주 잔류응력  $(\sigma_y)_i$ 와  $(\sigma_y)_o$ 의 크기 및 분포는 투입된 입열량 크기에 적은 영향을 받고 있으며, 특히  $(\sigma_y)_o$ 의 크기는 다른 잔류응력과 비교할 때 그 영향이 상당히 적다. 이러한 잔류응력분포는 원주용접에 의한 면외압축응력과 수축력에 의한 면내응력이 복합되어 나타나고 탄성 변형을, 소성 변형을, 열 변형율이 생긴다. 분포된 최대 잔류응력 크기는 원통 재료의 항복응력  $29\text{kg/mm}^2$ 과 동일한 수준이다.

2) 원통 제원의 영향

원통의 제원  $h/D$ 가 용접 잔류응력 분포 및 크기에 미치는 영향을 고찰하기 위해 종축은 용접 잔류응력과 원통 재료의 항복강도 응력비를, 횡축은 원주 용접부에서부터의 길이를 나타냈으며, 본 연구에서는  $h/D$ 의 범위가 0.018, 0.025, 0.041인 원통에서 발생하는 잔류응력을 고찰하였다.

Fig. 6a~Fig. 6c에서 보인 것과 같이 원통의 내·외부 표면에서의 축 및 원주 잔류응력은 용접부 근방에서  $h/D$ 크기에 따라  $\sigma_{y,s}$ 의  $\pm 0.8 \sim \pm 1.1$ 배 정도의 최대인장 혹은 최대압축 잔류응력이 분포되며  $x = 20 \sim 30\text{mm}$  근처에서 응력작용방향이 바뀐다. 그리고  $h/D$ 가 작아지면 원통 길이방향인  $x$ 축방향으로 더 먼 거리까지 더 큰 잔류응력이 분포되고,  $h/D$ 가 커지면 반대현상이 생기고 있어서  $h/D$ 는 잔류응력 분포범위와 발생하는 잔류응력의 총량에 주로 영향을 미치고 있으므로 일반적으로  $h/D$ 가 커지면 원통의 좌굴 및 피로강도 등은 강해지고, 작아지면 강도가 약해지는 특성을 잘 반영하고 있다.

Fig. 6d는  $h/D$ 크기가 작아지면 원통의 외부표면에 발생하는 원주 잔류응력 ( $\sigma_y$ )<sub>0</sub>는 커지는 경향을 가지지만, 크기는  $\sigma_{YS}$ 의 + 0.5~ - 0.5배 정도로서 큰 영향을 미치지 못함을 보여주고 있다.

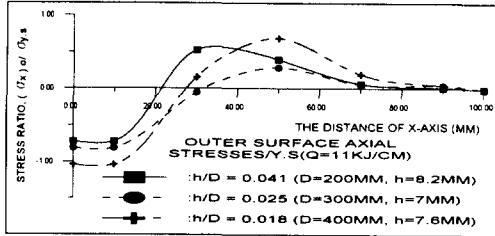


Fig. 6a The magnitude and distribution of axial residual stress on outer surface due to effect of  $h/D$

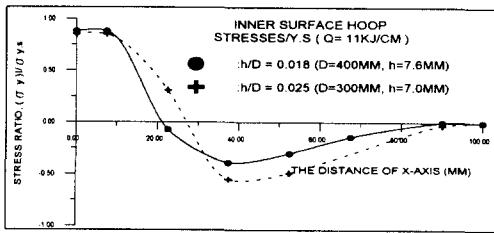


Fig. 6b The magnitude and distribution of hoop residual stress on inner surface due to effect of  $h/D$

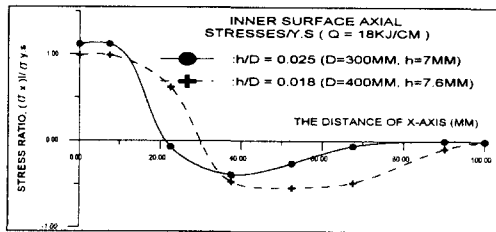


Fig. 6c The magnitude and distribution of axial residual stress on inner surface due to effect of  $h/D$

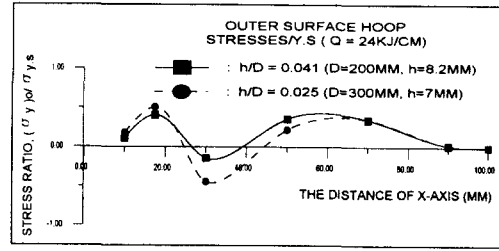


Fig. 6d The magnitude and distribution of hoop residual stress on outer surface due to effect of  $h/D$

### 3.2 용접변형에 영향을 미치는 지배파라메터 고찰

#### 1) 용접 입열량의 영향

지배 파라메터인 원주용접 입열량  $Q$ 와 원통 제원  $h/D$ 가 용접변형에 미치는 영향을 고찰하기 위하여  $h/D$  0.041, 0.025, 0.018일 때의 원주용접 입열량의 크기에 따라 발생하는 용접변형대 원통 반경비  $w/R$ 를 취하였다. Fig. 7a~Fig. 7b에서와 같이 원주용접부에서 원통 중심방향으로 가장 큰 용접변형이 발생하며 용접부에서 멀어지면 점차로 감소하고 있다. 또한 용접 입열량이 커지면 용접변형은 점차적으로 커지며 증가되는 양상은 용접 입열량의 크기에 따라서 거의 비례적으로 증가하고 있음을 보이고 있다.

#### 2) 원통 제원의 영향

Fig. 8a~Fig. 8b는 원주용접 입열량의 크기 11, 18, 24kJ/cm일 때의  $h/D$ 의 크기에 따라 발생하는 용접변형대 원통 반경비를  $w/R$ 로 표시한 것이다.

용접변형은 원통 중심방향으로 용접부에서 가장 크며 용접부에서 멀어지면 점차적으로 감소하고 있다. 용접부에서부터  $x = 10\text{mm}$ 에서는  $h/D$ 가 커지더라도  $w/R$ 의 증가는 매우 작지만  $x = 10\text{mm}$  이상에서는 크게 증가하고 있다. 원통 제원  $h/D$ 크기는 원주 용접부 근처의 용접변형에 영향이 적지만,  $x = 10\sim 70\text{mm}$ 에서는 상당히 큰 영향을 미친다.  $h/D$ 가 크면 원주 용접부 근처에서 큰 용접변형이 발생하고 원주 용접부에서 멀어지면 용접변형의 크기가 급격히 작아지는 경향이 있다.

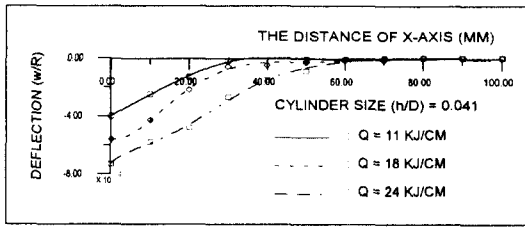


Fig. 7a Review of welding deflection due to the effect of Q(h/D=0.041)

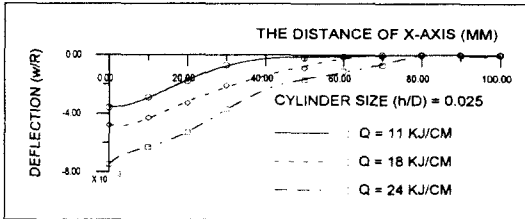


Fig. 7b Review of welding deflection due to the effect of Q(h/D=0.025)

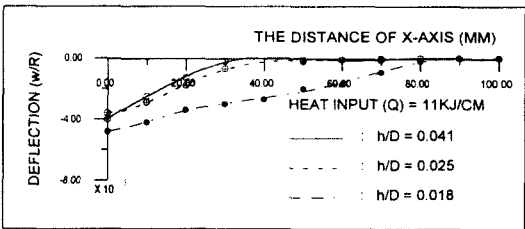


Fig. 8a Review of welding deflection due to the effect of h/D (Q=11kJ/cm)

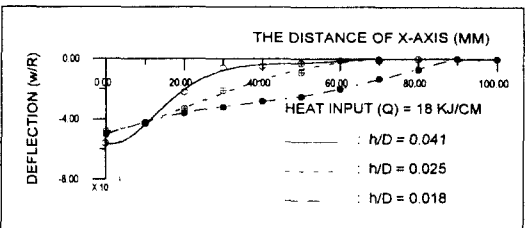


Fig. 8b Review of welding deflection due to the effect of h/D (Q=18kJ/cm)

#### 4. 용접변형 및 잔류응력 예측

원통 원주용접 시에 발생하는 잔류응력과 용접 변형의 추정방법은 실험과 수치해석 결과 등을 통하여 Satoh와 Fujita가 제안하였다. Satoh 등 [6]은 입열량 파라미터  $H_0[Q/c\rho h(Rh)^{\frac{1}{2}}]$ 와 치수 파라미터  $\beta_0[L/(Rh)^{\frac{1}{2}}]$ 가 잔류응력과 용접변형에 직접적인 함수관계가 있음을 확인하였지만 구체적인 추정식은 도출하지 못하였으며, Fujita 등 [2]은 수치해석 결과를 토대로 지배 파라미터  $(Q/h) \cdot \beta$ 의 크기에 따라 발생하는 잔류응력 분포를 추정할 수 있는 차트를 작성하였다.

본 논문에서는 원통 원주용접 시에 발생하는 4종의 잔류응력과 용접변형에 대한 크기 및 분포에 영향을 미치는 지배 파라미터에 대한 분석결과를 토대로 회귀분석기법을 이용하여 추정식을 도출하였다. 이러한 회귀분석 (Regression Analysis)은 변수들간의 관련성을 규명하기 위하여 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 분석방법으로서 어떤 종속변수의 변화가 여러 독립변수에 의해 영향을 받을 때, 측정된 독립변수들의 데이터를 이용하여 추정식을 유도한다. 여기서 종속변수를 용접변형과 잔류응력으로, 독립변수를 원통 체원 h/D, 용접 입열량 Q, 열원으로부터의 거리를 x로 잡았다. 종속변수  $y_j$ 의 변화를 설명하기 위하여 k개의 독립변수  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 가 사용될 때, 각 독립변수에 대해 관심이 있는 좁은 범위의 흥미영역에서 종속변수와와의 관계를 선형적으로 가정하는 회귀모형을 중선형 회귀모형 (Multiple Linear Regression Model)이라고 하며 n개의 측정데이터로 표현되어진다.

종속변수와 독립변수의 관계가 직선보다는 곡선 관계가 더 적절하다고 판단될 때에는 2차 이상의 다중회귀모형 (Polynomial Regression Model)을 적용하는 것이 바람직하며 본 연구에서는 식(1)과 같은 3차 회귀모형을 적용하였다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=1}^m \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \beta_{im} x_i x_m + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

여기서, 오차는  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ 이고,  $i = 1, 2, \dots, k$ 의 독립변수,  $j = 1, 2, \dots, m$ 의 측정데이터,  $\beta_{0, 1, \dots, k}$ 는 미지수이다.

이렇게 추정된 회귀식은 어느 정도 믿을 만하며, 주어진 데이터들을 어느 정도 잘 설명하여 주고 있으며 추정식으로서 적절한가에 대한 검토가 필요하다.

일반적으로 회귀식의 정도 (Precision)를 측정하는 방법은 결정계수 (Coefficient of Determination:  $R^2$ )와 분산분석 (Analysis of Variance)에 의한 F-검정으로 가능하다.

특정치  $y_j$ 와  $y_j$ 들의 평균  $\bar{y}$ 와의 차이를 총편차라고 하면, 회귀식에 의하여 설명되지 않는 편차 ( $y_j - \hat{y}_j$ )와 설명되는 편차 ( $\hat{y}_j - \bar{y}$ )로 구분할 수 있고 총편차의 제곱합  $\sum (y_j - \bar{y})^2$ 은 총변동 (Total Variation)이라칭하며 다음의 두 변동으로 구성된다.

$$SST = SSE + SSR \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3)$$

여기서 SSE는 회귀식에 의해 설명이 안되는 변동이고, SSR은 회귀식에 의해 설명이 되는 변동이며 SST는 총변동이다.  $R^2$ 은  $0 \leq R^2 \leq 1$ 의 범위에 있고, 1에 가까울수록 추정된 회귀식은 높은 정도를 갖는다. 추정된 회귀식의 유의 (Significant) 여부를 판정하기 위한 F-검정은 Table 2와 같은 분산분석표의 검토를 통하여 수행되어진다.

Table 2에서 MSR은 회귀식에 의하여 얻어지는 평균제곱 (Mean of Squares due to Regression)이며, SSR을 자유도 k로 나누어서 얻어지는 값이다. MSE는 잔차로 인한 평균제곱 (Mean of Squares due to Residual Errors)이며, SSE를 자

유도  $n-k-1$ 로 나누어서 얻어지는 값이다.

$F_0 = \frac{MSR}{MSE}$ 는 F-검정을 위한 검정 통계량으로 회귀식의 정도를 판단할 수 있는 수식으로  $F_0 > F(\alpha)$ 일 때 회귀식은 신뢰성이 있다.

본 연구에서는 얇은 두께의 원통 원주용접 시 투입된 입열량에 의해서 발생하는 4종의 잔류응력과 용접변형을 종속변수로 하였다. 이들에 크게 영향을 미치는 파라미터인 두께대 직경비  $h/D$ , 용접 입열량  $Q$ , 용접부에 직각방향인 원통 길이방향의 길이  $x$ 를 독립변수로 하고 3차 회귀모형으로 추정식을 구하였다. 이 때 사용되어진 독립변수들은 측정데이터를 사용하였으며, 회귀식 추정에는 현재 사회과학 및 공학분야에서 많이 사용되어지고 있는 범용통계 패키지프로그램 SAS (Statistical Analysis System)의 PC버전의 다중회귀모형 계산 모듈을 사용하였다[7]. SAS에서 사용하는 분산분석표는 Table 2와 같으며, 일반적인 중회귀 분산분석표의  $F(\alpha)$  대신에 회귀식이 유의할 수 있는 즉  $F_0 > F(\alpha)$ 가 되는 유의수준  $\alpha$ 의 최대치를 포함하고 있다.

Table 2 The analysis of variance for SAS

Source	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean of Squares	F <sub>0</sub>	Pr > F <sub>0</sub>
Regression	k	SSR	MSR	MSR/MSE	$\alpha$
Error	n-k-1	SSE	MSE		
Total	n-1	SST			

유의수준  $\alpha = 0.0000$ 은 종속변수  $y_j$ 와 독립변수  $x_i$  사이에 함수관계가 없다고 오판할 확률 즉 제1종의 과오 (Type I Error)를 범할 확률이 0.0000으로서 추정된 회귀식이 신뢰성이 있음을 말한다.

측정데이터를 사용하여 도출한 잔류응력 및 용접변형 추정식은 식(4)~(9)와 같고, 회귀식의 정도를 보여주는 결정계수  $R^2$ 과 F-검정은 Table 3과 같다.  $R^2$ 은 0.9이상으로 추정된 회귀식이 측정데이터의 특성을 잘 대변하고 있고 회귀식의 최대 유의수준  $\alpha$ 는 거의 영이며 종속변수인 잔류응력



및 용접변형과 독립변수인  $h/D$ ,  $Q$ ,  $x$ 는 함수관계에 있음이 검증되었으므로 추정된 회귀식들은 충분한 가치가 있음을 알 수 있다.

$$(\sigma_x)_0 = (-1.975 + 84.59(h/D) - 0.076Q + 0.419x - 1.354(h/D) \cdot x + 0.0014Q \cdot x - 0.007x^2 + 357E - 7x^3)^2 - 30 \quad (4)$$

$$(\sigma_x)_1 = -23.97 + 857.7(h/D) + 0.295Q - 2.195x - 0.009Q \cdot x + 0.0293x^2 - 0.00011x^3 \quad (5)$$

$$(\sigma_y)_1 = (3586 + 17868(h/D) + 8.798Q - 205.0x + 3.517x^2 - 0.018x^3)^{\frac{1}{2}} - 30 \quad (6)$$

원통의 외부표면에서 발생하는 원주방향의 응력  $(\sigma_y)_0$ 은 곡선의 변화가 매우 심하여  $0 < x < 40\text{mm}$ 일 경우와  $40 < x < 100\text{mm}$ 일 경우로 나누어 각각에 대해 추정식을 다음과 같이 구하였다.

1)  $0 < x < 40\text{mm}$ 일 경우

$$(\sigma_y)_0 = -271.7 + 14734(h/D) - 0.367Q + 21.47x - 1007(h/D) \cdot x - 208000(h/D)^2 - 0.219x^2 + 3.403(h/D) \cdot x^2 + 13425(h/D)^2 \cdot x + 0.879(h/D) \cdot Q \cdot x \quad (7)$$

2)  $40 < x < 100\text{mm}$ 일 경우

$$(\sigma_y)_0 = 95.3 - 2685(h/D) - 4.638Q - 1.608x + 164.4(h/D) \cdot Q + 0.0846Q \cdot x + 44537(h/D)^2 + 0.0104x^2 - 2734(h/D)^2 \cdot Q - 0.00062Q \cdot x^2 \quad (8)$$

$$w = 1.47 - 83.96(h/D) + 0.0567Q - 0.016x - 0.661(h/D) \cdot Q + 0.231(h/D) \cdot x - 0.0004Q \cdot x + 1170(h/D)^2 + 0.0001x^2 \quad (9)$$

### 5. 결론

본 논문에서는 원주용접된 박판의 원통 내·외부표면에 발생하는 잔류응력 및 용접변형을 계측

하고 열 탄소성 해석기법으로 수치해석 결과와 실험결과를 비교검토하여 검증하였으며 주요 지배 파라미터가 용접변형과 잔류응력에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 이러한 계측 및 분석결과를 활용하고 회귀분석기법을 적용하여 잔류응력 과 용접변형을 추정할 수 있는 근사식을 개발한 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 구멍뚫기기법으로  $h/D$ 가 0.018, 0.025, 0.041인 원통에 8, 11, 18, 24kJ/cm의 입열량으로 용접 제작된 원통의 실험결과, 용접 입열량은 잔류응력의 최대크기 및 분포에 영향을 크게 미친다. 그리고 원통의 원주용접 시에 투입되는 입열량 크기는 원주 잔류응력보다 축 잔류응력 분포에 더 크게 영향을 미치고, 원주용접부 근처에 발생하는 잔류응력 크기에도 비교적 크게 영향을 미친다.

2)  $h/D$  크기는 잔류응력이 분포되어지는 범위에 크게 영향을 미치게 되어  $h/D$ 가 작아지면 용접부에서부터 먼 곳까지 더 많은 축 잔류응력과 원주 잔류응력이 분포되었다.

3) 용접변형은 용접 입열량 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있지만  $h/D$ 의 증가 시에는 용접부 근처에서 거의 증가하지 않고 용접부에서부터 멀어지면 용접변형이 선형적으로 증가되는 특성을 보였다.

4) 3차 회귀분석 모형을 적용하여 원통의 내·외부표면에 생기는 잔류응력과 용접변형에 대한 추정식을 도출하였다. 이 추정식은 한정된 실험데이터를 이용하였지만 정도가 높았으며, 지배 파라미터 값만 알고 있으면 보다 쉽게 추정할 수 있는 장점이 있다. 또한 이 추정식은 제원과 입열량의 범위가  $0.018 \leq h/D \leq 0.041$ ,  $8 \leq Q \leq 24\text{kJ/cm}$ 인 원통의 설계 및 제작 시 잔류응력 및 용접변형을 근사적으로 추정하는데 유용할 것이다.

### 참 고 문 헌

[1] Y. Fujita, T. Nomoto and H. Hasegawa, "Studies on Thermal Elasto-Plastic Problem(4th Report)-Welding Deformations and Residual Stresses due to Circumferential Welds in Cylindrical Shell", Journal of the

- Society of Naval Architects of Japan, Vol. 146, pp. 383-392, Nov. 1979.
- [2] K. Matsuoka and T. Naoi, "An Analytical Method on Residual Stresses, due to Circumferential Welds of Pipes", Journal of the Japanese Welding Society, Vol. 51, No. 2, pp. 65-71, 1982.
- [3] K. Satoh, M. Toyoda, Y. Suita, M. Tanaka and T. Hirano, "Controlling Parameters of Residual Stresses and Deformations in welded thin Cylindrical Shells", Journal of the Japanese Welding Society, Vol. 2, No. 3, pp. 135-140, 1984.
- [4] ASTM Standard E 837-92, "Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole-Drilling Strain gage Method", Book of ASTM Standards, pp. 753-759, Published Nov. 1981.
- [5] Leonard P. Connor Editor, "Welding Handbook, Eighth Edition Vol.1, American Welding Society, pp. 89-264, 1987.
- [6] 佐藤 邦彦, "溶接構造要覽, 第 2 編 溶接殘應力と溶接變形", 大阪大學, pp. 95-167, 1987.
- [7] "Doing More with SAS/Assist Software, Version 6, First Edition", SAS Institute Inc, Cary, Nc, USA, 1996.
- [8] 柳 基烈, 嚴 東錫, "熱 彈塑性 解析에 의한 圓周 熔接된 圓筒管의 殘留應力 豫測과 그 影響에 대한 研究", 大韓熔接學會誌, 第15卷 第5號, pp. 115-123, 1997.
- [9] 柳 基烈, "圓筒管의 熔接殘留應力 및 熔接變形豫測과 強度에 미치는 影響에 관한 研究", 釜山大學校 大學院 博士學位論文, 1998.
- [10] 전석희, 최경식, "간이 數值解析에 의한 熱彈塑性 보의 殘留應力 및 應力分布 豫測", 大韓造船學會 論文集, 제33권 제3호, pp. 22-34, 1996.
- [11] 서승일, 장창두, "적층보 理論을 利用한 1次元 熱彈塑性解析", 大韓造船學會誌, 제27권 제4호, pp. 51-57, 1990.
- [12] 房 漢瑞, "有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元 非正常 熱傳導解析", 大韓造船學會誌, 제27권 제4호, pp. 43-50, 1990.
- [13] 嚴 東錫, 康 聖原, "두꺼운 軟鋼板 필릿熔接이음 부의 殘留應力分布에 대한 研究", 大韓造船學會誌, 第20卷 第4號, pp. 17-24, 1983.