

파이프 원주방향 용접부의 잔류응력분포  
특성에 관한 실험적 연구

남궁 재관\*, 홍 재학\*\*

An Experimental Study on the Residual Stress  
Distribution at Circumferential Welds in Pipes

C. K. Namkoong\* and J. H. Hong\*\*

Key words : Circumferential butt welding of pipe(원주방향 파이프 맞대기용접), Residual stress(잔류 응력), Hole drilling strain gage method(천공스트레인 게이지법), Longitudinal stress(길이방향 응력).

Abstract

A knowledge of the residual stress distribution at circumferential weldments can normally increase the accuracy of a fracture assessment in pipe line.

In this paper, we present the measurements about the residual stress distributions at three kinds of circumferential butt welded pipes using the hole drilling strain gage method.

By this experiment, we have obtained the following characteristics. At the inner surface of the pipe region near the center line of welding is under high tensile residual stress. However, as the distance from the center line of welding increases, the tensile component decreases and finally becomes compressive residual stress at region far away from the center line of welding. The longitudinal residual stress at the outer surface is compressive regardless of the diameter of pipe and the circumferential stress is changed from compressive to tensile as pipe diameter increases. The results also demonstrate that the residual stress is mainly caused by self-restraint bending force in the pipe welding.

\* 서울산업대학 기계설계학과 교수

\*\* 단국대학교 공과대학 기계공학과 교수

## 1. 서 론

플랜트의 배관설비 또는 해양구조물이나 원자로배관계(系)등에 있어서는 원통형부재의 사용이 필수적이며 이들 구조요소들 사이의 결합수단으로서 가장 널리 사용되는 방법중의 하나는 파이프의 원주방향 용접이다.

이러한 원통형 부재들은 보통 매우 큰 압력 하중하에서 사용되거나 부식환경하에서 반복하중 또는 고온의 열사이클을 받는 것들이 대부분이기 때문에 기초 설계기술 이외에도 용접부식 크랙, 취성 및 피로파괴, 결합크기의 결정 등 안전에 관련된 문제들의 해결이 더욱 시급히 요구되고 있다.

지금까지 밝혀진 사실들[1-7]에 의하면 일반적으로 파이프의 원주방향 용접시 발생하는 잔류응력은 평판이나 각주형 용접물 또는 파이프의 길이방향 용접중의 경우보다 매우 복잡한 양상을 나타내고 있는데, 이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 원통구조는 그 형상적 특성에 의해 원주방향의 수축을 일으키게 하고 이로 인해 외표면에 변위를 일으키며 원주방향에 Hoop응력을 발생시킨다.
- (2) 용접선과 직각방향으로 굽힘 잔류응력이 발생한다.
- (3) 파이프 축에 대해 비틀림변형이 생긴다.
- (4) 원통면의 외표면과 내표면에서 잔류응력이 서로 다르게 작용한다.

파이프의 원주방향 용접시 발생하는 잔류응력에 관한 연구는 그 발전역사와 병행하여 실험적 연구[1, 2], 근사적 탄소성해석[3, 4, 5], 유한요소법에 의한 비정상 및 비선형해석[6, 7]등의 순서로 변천되었다.

Watanabe[1]는 원자로 스테인레스 파이프의 저온 응력 완화법을 고안하기 위해, 그리고 Burdekin[2]은 열처리에 의한 응력의 완화법을 개발하기 위해 잔류응력의 측정에 의한 실험적 연구를 실시하였다.

그후 Vaidyanathan et al. [3]은 무한 원통관의 원형단면에 가하는 외압 에너지와 원주방향 면내의 수직력에 의한 에너지가 등가함을 이용하여 잔류응력의 근사적 해법을 위한 기초를 세웠으며, Fujita et al.[4], Satoh et al.[5],는 Vaidyanathan 등이 사용한 변위함수를 다항식의 근사함수로 변형하여 Rayleig

h-Ritz법에 의한 열탄소성의 해를 구하기도 하였다.

그리고 1978년 이후에는 유한요소법에 의해 소성역에서의 비선형거동을 반영하려는 시도가 이루어지기 시작하였는데, Rybicki et al. [6], Ueda et al. [7]등은 Girth-butt 다층용접에 대해 비선형 응력·변형을 관계, 변형에 의한 기하변동등을 고려한 유한요소 해석의 모델을 고려함으로써 실험결과에 보다 접근된 예측모델을 제시하기도 하였다.

그러나 이같은 많은 시도에도 불구하고 지금까지의 연구결과들은 그 예측오차가 매우 클 뿐만 아니라 파이프의 재질 또는 두께에 따른 그 특성도 분명하게 규명되어 있지 못한 실정이다.

그 이유로서는 우선 열탄소성역에서 재료의 온도의존성이나 상변태 이력들이 고려되고 있지 못하고 있기 때문이며, 열응력장의 입력조건인 용접부 온도분포에 있어서도 정확한 예측이 실시되고 있지 못하기 때문이다. 그러므로 앞으로의 연구들에 있어서는 이와같은 인자들을 유한요소 해석과정에서 적당한 모델로써 반영하는 시도들이 이루어져야 할 것이며, 이를 위해서는 무엇보다도 광범위한 모델들에 대해 풍부한 실험적 결과들이 선행되어야 할 것이다.

따라서 본 연구는 이같은 연구를 위한 기초로서 재료의 미세조직이 불연속적으로 변하거나 정밀도가 극히 높은 측정이 요구되는 경우에 적합한 천공 스트레인 게이지법(Hole Drilling Strain Gage Method)을 이용하여 파이프의 외경과 두께 및 재질이 다른 3종류의 파이프를 대상으로 하여 용접부의 잔류응력 분포를 실험적으로 측정하였고, 이를 통해 용접부 잔류응력의 변화특성과 인자들에 따른 영향들을 검토함으로써 장차 진보된 유한요소 모델의 구축을 위한 기초자료로 제공될 수 있게 하였다.

## 2. 천공법에 의한 잔류응력의 측정실험

### 2-1. 실험조건 및 장치

본 실험의 목적은 파이프의 원주용접시에 발생하는 잔류응력이 파이프의 직경, 두께, 재질에 따라 변화하는 그 특성과 영향을 검토하는데 있다. 이를 위해 사용된 실험재료는 외경과 두께 및 재질이 다른 3종류의 파이프를 대상으로 하였으며 사용된 3가지 종류의 파이프 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of pipes

	C	Si	Mn	P	S	outer dia. (mm)	thickness (mm)	yield stress (kg/mm <sup>2</sup> )	tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	elongation (%)
Pipe A	0.027	0.024	0.38	0.015	0.015	102	4	27	36.9	38.4
Pipe B	0.12	0.12	0.72	0.015	0.008	150	4	37.4	47.2	30
Pipe C	0.38	0.24	1.65	0.023	0.002	510	10	45.3	72.2	28

먼저 이들 파이프는 용접을 실시하기 전에 300mm로 절단하여 650°C로 가열하고 1시간 유지한 후 노냉을 실시하여 파이프의 초기 내부 잔류응력을 제거하였다.

용접부의 치수는 Figure 1과 같으며, 이음부 형상은 Figure 2에 제시한 바와 같이 V형으로 하였고 각도는 45°로 하였다.

· 용접 작업은 3가지 종류 모두 피복아크 용접(Shield metal arc welding)으로 실시하였는데, 실용접을 실

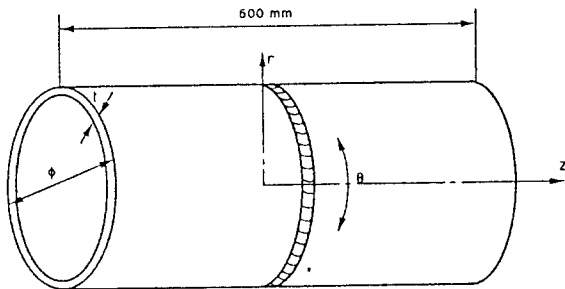


Fig.1 Schematic illustration of pipes used in this study

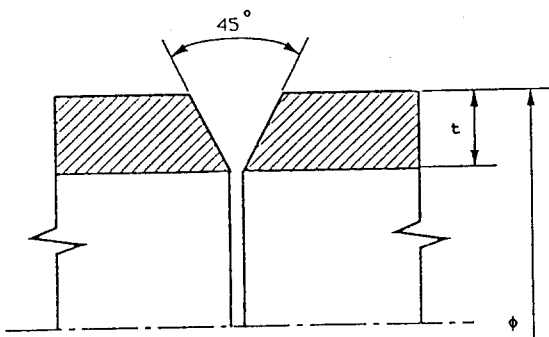


Fig.2 Weld joint geometry for girth-butt weld.

시하기 전에 0° 90° 180° 270° 방향에 가용접을 행한 후 본용접을 실시하였다.

그리고 이때 사용된 용접봉은 350°C에서 1시간 동안 건조시킨 후에 사용하였으며, 용접조건은 Table 2와 같다. 또 Figure 3은 용접된 단면형상의 일례를 보여 주고 있다.

한편 용접작업이 완료된 후 충분한 시간이 경과한 후에는 천공 스트레인 게이지법을 이용하여 파이프 외면과 내면에 있어서의 잔류응력 분포의 측정실험을 하였다. 이때 사용된 실험장치는 미국의 Measurement Group Inc. 에서 SYSTEM 4000의 모델로 제공하는 천공 스트레인 게이지법에 의한 잔류응력의 측정시스템으로서 Figure 4에서 보는 바와 같이 스트레인 게이지 로켓과 드릴링 Set up 장비 및 스트레인 측정기

	method of welding	current (A)	voltage (V)	welding velocity (cm/min.)	diameter of electrode (mm)	No. of pass
Pipe A	SMAW	100	25	15	2.6	2
Pipe B	SMAW	100	25	15	2.6	2
Pipe C	SMAW	150	32	15	4.0	2

Table 2. Welding conditions of each pipe

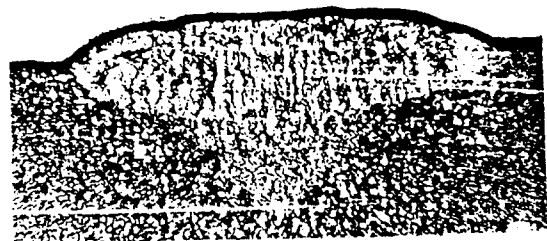


Fig.3 Cross-sectional view of weldment

등의 주변장비와 실험데이터의 프로세싱을 위한 마이크로 컴퓨터 본체로 구성되어 있으며, 컴퓨터에서는 잔류응력의 계산을 위해 RESTRESS 소프트웨어 프로그램이 사용되었다.

그리고 스트레인 게이지 로켓은 Figure 5에 보이는 것과 같이 Rendler(8)가 고안한 유형의 EA-06-062RK-120 모델을 사용하였는데 그 체원은 Table 3과 같다. 또한 천공작업은 압축공기를 이용한 고속공기터빈 천공법으로 실시하였는데, 이때 사용된 드릴링 Set up 장비로는 평저공의 가공에 적당하도록 Figure 6과 같은 END-MILL Type을 이용하였다.

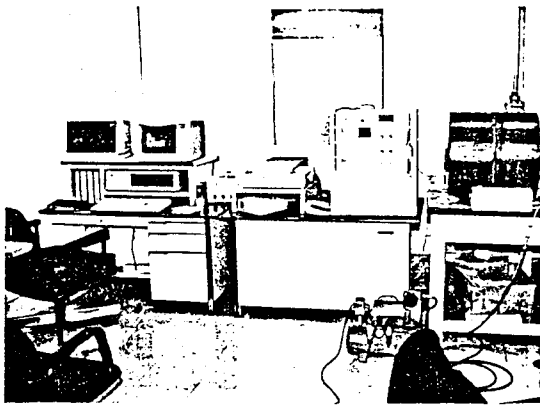


Fig. 4 Residual stress measuring system

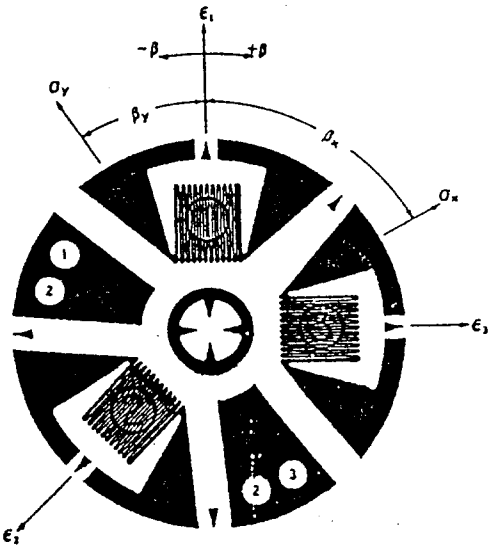


Fig. 5 Strain gage rosette

Table 3. Residual stress rosette

Resistance in Ohm		120 + 0.4 %
Gage length (mm)		1.57
Grid inner line dia.(mm)		5.13
Typical Hole diameter (mm)	Min.	1.5
	Max.	2.0
Matrix (mm)	Length	15.2
	Width	15.2

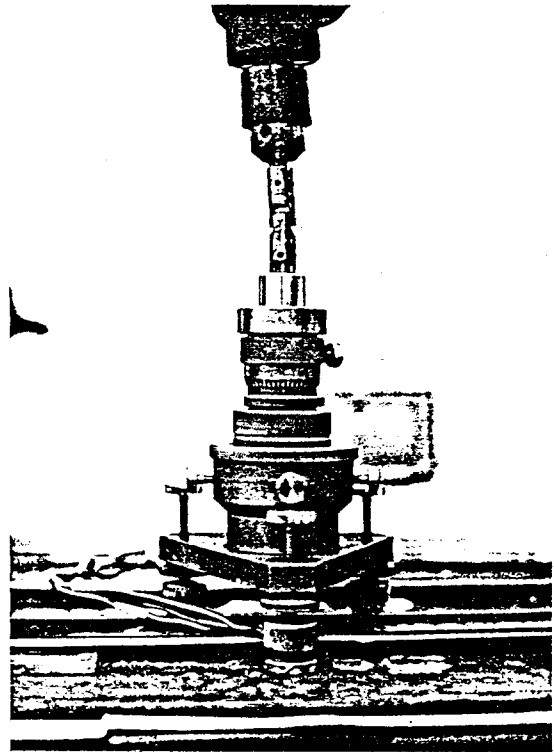


Fig. 6 Hole drilling set-up by high speed air turbine method

### 2-2. 실험방법

천공 스트레인 게이지법(Hole Drilling Strain Gage Method)은 Mather(9)에 의해 처음 소개된 이후 Rendle(8)에 의해 그 이론적 기초 및 응용기술이 확립되었고, 표준화된 그 측정과정이 ASTM E837 [10]에 규정사항으로 정리되었으며, 최근에는 더욱 세련된 측정기술로 온라인 컴퓨터화 되어 데이터 정리가 수행될 뿐 아니라 천공구멍의 직경과 깊이도 점점 작게 할 수 있는 기술로 개발되어 "반파괴(Semi-destructive)법"으로 일컬을 정도로 정밀 측정기술로 발전되었다.

이와 같은 HDM의 정밀도는 주로 다음의 네가지 인자가 중요시 된다. 우선 올바른 스트레인 게이지의 선택과 설치를 해야 하고, 스트레인 측정장치의 교정을 올바르게 해야 하며, 정확하게 천공위치를 잡고 보오령해야 할 뿐 아니라 시험재료의 기계적 성질에

대한 충분한 이해를 필요로 한다. 이같은 관점에서 본 연구에서는 기존 연구들에서 사용된 실험방법들(11, 12, 13)을 충분히 고찰한 후 앞절에서와 같은 스트레인 게이지 로켓과 천공장비를 결정하였으며, 실험과정을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

먼저 스트레인 게이지 로켓을 설치하는데 있어서 는 외경이 큰 파이프 C에는 제약없이 적용할 수 있기 때문에 절단하지 않고 직접 외표면 및 내표면에 설치 하였으나, 직경이 작은 파이프 A와 B에서는 내표면에 의 설치시에 간섭이 생기기 때문에 외표면의 잔류응력 측정이 끝난후 길이 방향으로 폭을 50mm 이상으로 절 단하여 폭의 중심부에서 내표면의 측정을 실시하였다.

설치위치는 응력의 변화가 크다고 생각되는 용접중 심선 부근에 부착하였고, 외표면 및 내표면에 부착한 형상은 Figure 7에서 보는 것과 같으며, Table 4에 그 부착위치를 나타내었다.

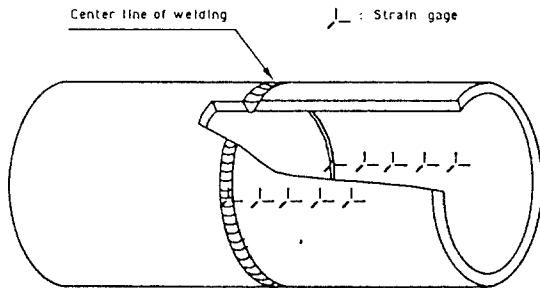


Fig. 7 Schematic drawing of pipe showing the strain gage attached positions

Table 4. Location of gages

	Location	Distance from the center line of welding (mm)
Pipe A	I. D.	7, 8, 9, 11, 20, 30, 34, 40, 50, 60
	O. D.	10, 12, 13, 20, 30, 40, 50
Pipe B	I. D.	8, 9, 11, 20, 30, 34, 42
	O. D.	10, 12, 20, 30, 42
Pipe C	I. D.	0, 8, 10, 20, 22, 30, 34, 40, 50
	O. D.	0, 4, 8, 12, 20, 30, 40, 50, 70

스트레인 게이지 로켓이 부착된 후에는 각각의 로켓 Grid요소를 스트레인 측정장비에 연결하였고 영점조정 및 교정을 실시하였다. 그 다음에는 게이지 로켓의

중앙부에 정확히 위치하도록 천공장비를 설치하고 공 구현미경을 통해 일치 여부를 확인한 후 미동나사를 써서 세팅을 실시하였다.

천공장비의 설치가 끝난 후에는 스트레인 측정장비의 출력을 컴퓨터 본체의 인터페이스 입력단자에 연결 한 후, RESTRESS 소프트웨어 프로그램을 실행시켜 데이터를 받을 준비를 시켰다. 이것이 완료된 후에는 소요의 깊이 만큼의 드릴링 작업을 실시하고, 그때 이완된 변형률값을 저장시켰다.

이와 같은 과정을 반복하여 전체의 측정점에 대한 스트레인의 측정이 완료된 후에는 SYSTEM 4000의 RESTRESS 프로그램의 데이터 정리기능을 실행시켜 잔류응력값들을 산출하고 이를 도표로 플로팅하였다.

이때의 잔류응력은 각 위치에서의 주응력으로 표시 되는데, 본 연구에서는 주응력을 원주 및 축방향의 값으로 하였으며, 이는 측정된 3개의 스트레인  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  가 다음의 관계식을 통해 계산된 것이다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \\ \sigma_y &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (1) \\ \tan 2\beta &= \frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_3 - \epsilon_1} \end{aligned}$$

여기서

$$A = \frac{\epsilon_{c1} + \epsilon_{c3}}{2\sigma_c}, \quad B = \frac{\epsilon_{c1} - \epsilon_{c3}}{2\sigma_c} \quad (2)$$

이다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 잔류응력의 측정실험에 앞서 용접부로부터 충분히 떨어진 위치에서 잔류응력의 두께방향에 따른 변화를 살펴보기 위하여 깊이방향에 따른 스트레인의 이완율을 검토하여 보았다.

Figure 8은 천공직경을 1로 보았을 때 구멍의 깊이 에 따른 변형율의 이완율을 표시한 것으로서, 여기서 나타나는 결과를 앞의 식(1)에 근거하여 살펴보면 천공깊이가 증가하여도  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 의 값은 거의 같은 크기로 증가하고 있기 때문에 두께방향으로의 잔류응 력의 변화는 매우 작게 일어나고 있음을 알 수 있다. 따라서 파이프 모재에 있어서는 내표면과 외표면 및

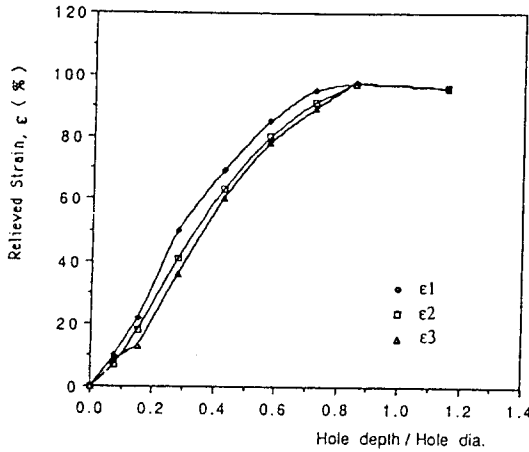


Fig. 8 Relations of relieved strain versus radial depth

재료내부에 있어서의 잔류응력이 거의 동일하게 작용하고 그 크기도 비교적 작기 때문에 용접부에서의 잔류응력 측정을 위한 모재의 구비조건을 만족하고 있는 것으로 볼 수 있다.

잔류응력의 측정 실험결과들 중 Figure 9와 Figure

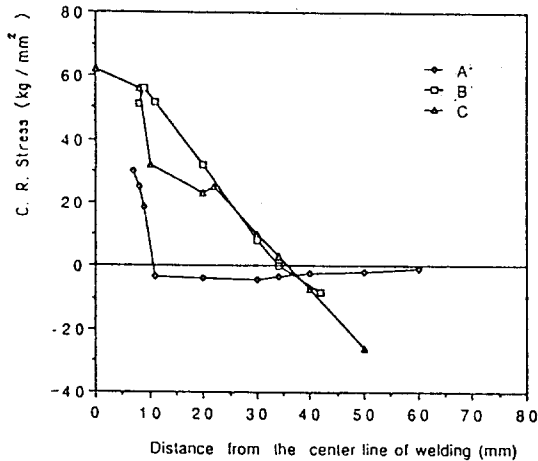


Fig. 9 Circumferential residual stress distribution at the inner surface

10은 파이프 내표면에서의 잔류응력이 용접부에서 길이방향으로 떨어질수록 변화하는 추세로서 각각 원주방향의 잔류응력과 축방향의 잔류응력을 나타내 주

고 있다 파이프 A의 경우는 원주방향 및 축방향에 있어서 모두 용접부 근처에서는 큰 인장응력으로 작용하다가 그 값이 점점 줄어들어 축방향으로 약 10mm 떨어진 위치에서 응력반전이 일어나고 10mm 이상 떨어진 위치들에 있어서는 작은 압축응력으로서 일정하게 유지하고 있다.

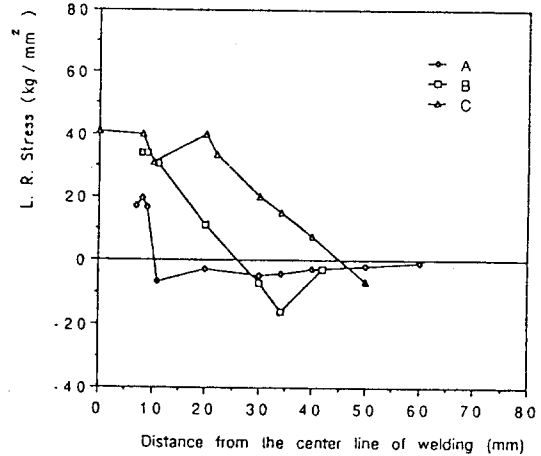


Fig. 10 Longitudinal residual stress distribution at the inner surface

한편 파이프 B와 C에 있어서는 용접부 근처에서의 잔류응력이 파이프 A의 경우보다 더욱 크게 나타나고 있으며 그 감소추세도 비례적으로 일어나고 있다. 그러나 전체적으로 볼 때 축방향의 잔류응력인 경우에는 원주방향의 것에 비해 인장응력이 작게 나타나고 있고, 응력반전도 더욱 멀리 떨어진 위치에서 발생하고 있는 특징이 있다.

이와 같이 파이프 B가 파이프 C의 경우에 더 흡사한 경향을 보이고 있는 것은 파이프의 두께에 대한 직경의 비가 파이프 B의 경우에는 37.5, 파이프 C의 경우 51, 파이프 A의 경우 25.5가 되는 기하학적 차이와 더불어 재료의 탄소 함유량과 인장강도 및 항복응력등의 기계적 성질등이 복합적으로 상사되기 때문으로 생각된다.

한편 용접 중심부에 가까운 부분에서는 잔류응력에 대한 측정값들이 불규칙적으로 작은 인장응력값을 나타내는 경향이 있는데, 이는 피이드 폭이 10mm 정도인 점을 감안할 때 용접 중심부에서 5mm까지 떨어진

영역에서는 용접봉의 재질에 가까운 기계적 특성을 가지며 이에 인접해 있는 부분에서도 열영향이 심화되어 모재의 변질이 생겼기 때문으로 생각된다. 이때에 재질의 조직이 변태되거나 천이 되고 있는 모양도 사진촬영을 통해 실험하였는데, 파이프 C의 경우에 대한 그 일례가 Figure 11이다.

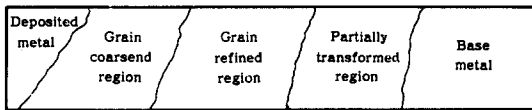


Fig. 11 Microscopic structure of heat affected zone by phase transformations

그리고 Figure 12와 Figure 13은 외표면에 있어서의 원주방향 잔류응력 및 축방향 잔류응력을 나타낸 것이다.

이들 결과들은 일반적으로 내표면의 경우와는 아주 판이한 양상을 나타내고 있다. 먼저 원주방향의 잔류응력에 있어서는 파이프 B와 C의 경우에는 파이프 A의 경우보다 큰 10kg/mm<sup>2</sup> 정도의 인장응력이 축방향의 길이에 대해 거의 일정하게 발생하고 있고 파이프 A의 경우에는 거의 0에 가까운 값을 나타내고 있다. 또 축방향의 잔류응력에 있어서는 내표면의 경우와는 달리 용접 중심부 근처에서 큰 압축응력으로 반전되고 있는데, 그 변화추세는 비례적으로 일어나고 있으며 이는 파이프 A, B, C 모두에 공통적으로 비슷한 값의 크기 및 양상을 갖는다.

이와같은 용접 중심부 근처에서 축방향 잔류응력이 외표면에서는 압축응력으로, 그리고 내표면에서는 그와 반대로 인장응력의 형태로 나타나는 것은 용접중심부에서 일어나는 Hoop변형에 의한 굽힘응력의 영향인 것으로 고찰된다.

한편, 이상의 결과들은 기존 연구의 이론 또는 실험 결과들과 그 변화추세를 통해 비교해 보면, 본 연구의

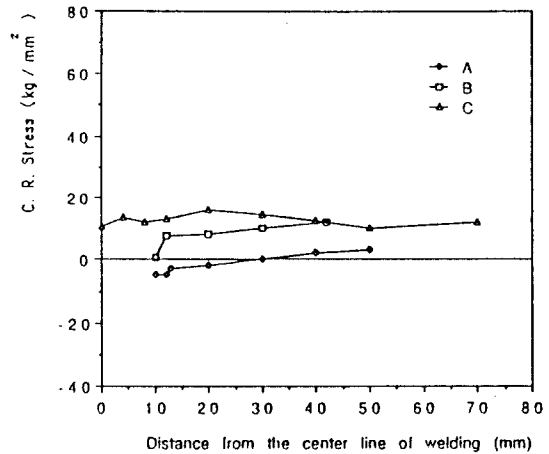


Fig. 12 Circumferential residual stress distribution at the outer surface

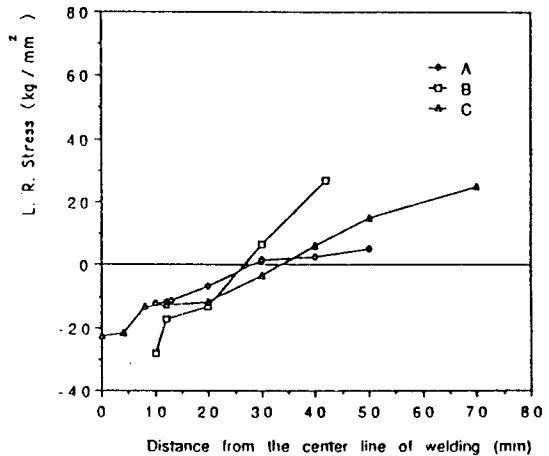


Fig. 13 Longitudinal residual stress distribution at the outer surface

파이프 A의 실험모델의 경우에는 Vaidyanathan, Fujita, Rybicki 등(3, 4, 6)의 결과에 가까운 변화추세를 나타내고, 파이프 B와 C의 실험모델의 경우에는 Watanabe, White, Ueda 등(1, 5, 7)의 결과에 가까운 경향을 나타내고 있으며, 이를 파이프 두께에 대한 직경비를 기준으로 본다면 후자의 경우가 그 비가 크기 때문에 Tendon force에 의한 영향이 더 크게 작용하고 있기 때문으로 고찰된다.

또한 잔류응력의 값이 크게 나타내는 경우를 살펴보면, 파이프 A의 경우에는 재료의 항복강도의 크기 정

도로 밖에는 커지고 있지 않지만 파이프 B와 C의 경우에는 항복강도보다 높은 값을 나타내고 있다. 즉 용접 중심부 부근에서 파이프 B와 C의 잔류응력값은 각각 모재의 항복응력인 37.4kg/mm<sup>2</sup>, 47.2kg/mm<sup>2</sup>보다 높은 56kg/mm<sup>2</sup>, 60kg/mm<sup>2</sup>을 보이고 있다.

이와 같이 잔류응력값이 항복응력보다 높은 값을 보이는 원인을 살펴보기 위해서 본 연구에서는 또한 잔류응력의 측정실험이 끝난 후 용접부를 절단하여 경도를 측정하였다.

용접부 경도시험을 위한 시편은 0.05μm 정도의 입자크기를 갖는 알루미늄 파우더를 이용하여 래핑한 후 2% Nital로 부식시켰고, 경도시험은 Micro Vickers 시험으로 500g 하중을 주고 초층용접부에 대하여 내외 표면과 평행하게 1mm 간격으로 측정하였다. 이때 얻은 결과는 Figure 14에서 나타낸 것과 같다.

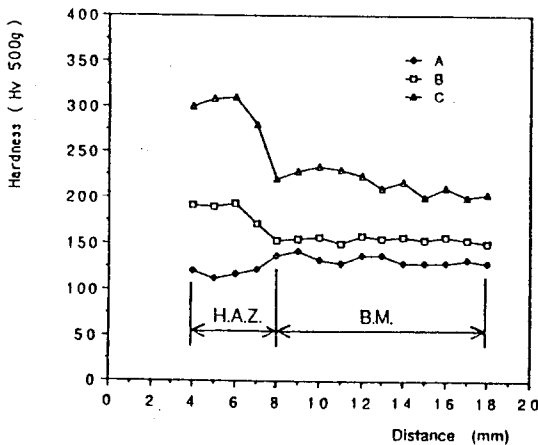


Fig. 14 Hardness distribution across the 1st pass weld

파이프 A는 열영향부(H. A. Z; Heat affected zone)의 경우가 115로 모재의 경도 130보다 낮은 경도값을 나타내고 있는데, 이는 파이프 A의 재질이 극저 탄소강으로서 경화성이 낮기 때문으로 사료된다.

그러나 파이프 B와 C는 열영향부에서 경도값이 각각 195와 310으로 모재에서의 150과 220보다 경도가 높게 나오고 있다. Cahoon[14]의 경도 V. S. 항복응력의 관계식에 따르면 경도가 증가할 때에 항복응력은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_y = \frac{H}{3} (0.1)^{(m-2)} \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $\sigma_y$ 와 H는 항복응력 및 경도값이며, m은 재료상수이다.

이 식에 따르면 파이프 B와 C에서는 각각 항복강도가 53kg/mm<sup>2</sup>, 62kg/mm<sup>2</sup>로 증가하고 있기 때문에 앞의 경도 실험결과와 타당성이 입증되고 있고, 파이프 B와 C의 경우에 잔류응력이 모재의 항복응력 이상으로 발생하는 것은 재료가 열영향부에서 변태 또는 천이과정을 거치기 때문에 경도의 증가와 더불어 항복응력이 상승하였기 때문으로 고찰된다. 그리고 이같은 사실은 앞에서의 잔류응력 변화추세에서 파이프 B의 경우가 파이프 A의 경우보다 파이프 C의 경우에 더 가까운 양상을 띠고 있었던 이유도 밝혀주고 있는 것으로 고찰된다.

일반적으로 파이프 내면에서의 응력부식에 의한 균열이 생길 때에는 보통 용접선에서 약간 떨어진 열영향부의 열화조직에서 많이 발생하고 있는 것으로 보고 되고 있는데[15, 16], 이를 고려할 때에 열영향부에서의 잔류응력상태를 정확하게 제시할 수 있는 것은 매우 중요한 의미를 가지며, 이를 본 연구에서는 기존의 연구들에 비해 비교적 잘 예견해주고 있는 것으로 고찰된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 파이프의 원주방향 용접시 발생하는 잔류응력의 그 분포특성을 규명하기 위하여 천공 스트레인 게이지법에 의한 잔류응력의 측정실험을 하였고, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 저탄소강의 파이프와 고탄소강의 파이프는 열영향부에서의 경화특성이 달라서 잔류응력의 분포특성도 다르게 됨을 밝혔으며, 고탄소강의 경우에는 잔류응력이 모재의 항복응력보다 크게 발생하고 있음을 알았다.
- (2) 본 연구에서의 실험결과는 잔류응력의 변화양상으로 볼 때에 Hoop변형에 의한 Tendon force의 영향과 굽힘응력의 효과를 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다.
- (3) 파이프의 내표면에서는 원주방향 및 축방향의 잔류응력 모두가 용접선 부근에서 인장 잔류응력으로 발생하고 있으나 거리가 멀어지면 압축 잔류응력으로 반전되고 있음을 알 수 있었다.



- (4) 파이프 외표면 축방향의 잔류응력은 인장 잔류응력으로 일정하게 발생되나, 원주방향의 잔류응력은 내표면의 경우와 반대로 용접선 부근에서는 압축 잔류응력으로 반전되며, 이는 굽힘응력의 영향으로 고찰될 수 있었다.

**참고문헌**

1. Watanabe, M. and Satoh, K., "Effect of Welding Conditions on the Shrinkage Distortion in Welded Structures", Japan Welding Society Journal, Vol. 8, pp. 377-384, 1961.
2. Burdekin, F. M., "Local Stress Relief of Circumferential Butt Welds in Cylinders", British Welding Journal, Vol. 6, pp. 483-490, Sep. 1963.
3. Vaidyanathan, S., Todaro, A. F. and Finnie, I., "Residual Stresses due to Circumferential Welds", Trans. of ASME, J. of Eng. Mat. and Tech., pp. 233-237, Oct. 1973.
4. Fujita, Y., Nomoto, T. and Hasegawa, H., "Welding Deformations and Residual Stresses due to Circumferential Welds in Cylindrical Shells", J. of JSSB, No. 146, pp. 386-392, 1979.
5. Satoh, K. et al., "Residual stresses and Deformations in Thin Cylindrical Shells due to Circumferential Welds", Japan Welding Society Journal, Vol. 52, No. 2, pp. 83-89, 1983.
6. Rybicki, E. F. et al., "A Finite Element Model for Residual Stresses and Deflections in Girth-Butt Welded Pipes", Trans. of ASME, J. of Pressure Vessel Tech., Vol. 100, pp. 256-262, Aug. 1978.
7. Ueda, Y. et al., "Residual Stresses and Their Mechanisms of Production at Circumferential Weld by Heat-Sink Welding", Japan Welding Society Journal, Vol. 52, No. 2, pp. 90-96, 1983.
8. Rendler, N. J. and Vigness, I., "Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Stresses", Proc., SESA, Vol. 23, No. 2, pp. 577-586, 1966.
9. Mather, J., "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes", Trans. of ASME, Vol. 56, No. 4, pp. 249-254, 1954.
10. ASTM Standard E837-85: "Standard Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method".
11. Measurements Group Tech. Notes, "Residual Stress Measurement", TN-503-2, 1988.
12. Procter, E. and Beaney, E. M., "Recent Developments in Centre-Hole Technique for Residual-Stress Measurement", Experimental Techniques, Vol. 6, pp. 10-15, 1982.
13. 이택순, 최병길, 전상윤, "AJM을 이용한 HDM에 의한 잔류응력 계측에 관한 연구", 대한용접학회지, Vol. 6, No. 3, pp. 37-42, 1988.
14. Cahoon, J. R., Broughton, W. H. and Kutzak, A. R., "The Determination of Yield Strength from Hardness Measurements", Metallurgical Trans., Vol. 2, pp. 1979-1983, JULY 1971.