

〈技術論文〉

파이프 원주방향 용접부의 잔류응력 연구

남궁 재관* · 홍 재 학**

(1990년 7월 27일 접수)

A Study on the Residual Stresses in Circumferential Welds of the Pipes

C.K. Nam Koong and J.H. Hong

Key Words : Residual Stress(잔류 응력), Circumferential Butt Welding of Pipe(원주방향 파이프 용접), Hole Drilling Strain Gage Method(천공 스트레인 게이지법), Finite Element Method(유한 요소법)

Abstract

The existence of residual stress in the circumferential butt welded pipes is one of the most important problems concerning stress corrosion cracking in service. In this paper, the residual stress distributions in three kinds of circumferential butt welded pipes were measured by the hole drilling strain gage method and calculation using finite element method is performed and its results are compared with the experiments. 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.

1. 서 론

해양구조물이나 플랜트 또는 원자로등의 배관계에 있어서 원통형부재들 사이의 결합 수단으로 널리 사용되는 방법중의 하나는 파이프의 원주방향용접이다. 그리고 이들 원통형부재들은 보통 매우 큰 압력이나 부식환경하에서 반복하중 또는 고온의 열 사이클을 받는 것들이 대부분이기 때문에 응력부식 크랙, 취성 및 피로파괴, 결합크기의 결정등 안전에 관련된 문제들의 해결이 시급히 요구되고 있으며, 이를 위해서는 파이프용접부에서의 잔류응력분

포특성과 응력완화법에 대한 기초적 연구가 선행되어야 한다.

일반적으로 파이프의 원주방향용접시 발생하는 잔류응력은 평판이나 각 주형 용접물 또는 파이프의 길이방향용접등의 경우보다 매우 복잡한 양상을 나타내고 있는데, 그 특징을 살펴보면 우선 항상적 특성에 의해 원주방향의 수축변형과 Hoop응력을 발생하는 점, 용접선과 직각방향으로 굽힘잔류응력이 발생하는 점, 파이프축에 대해 비틀림변형도 생기고 원통면의 외표면과 내표면에서의 잔류응력이 서로 다르게 작용하는 점등을 들 수 있다.

이에 관한 연구는 그 발전역사와 병행하여 실험적 연구^(1,2), 근사적 탄소성해석⁽³⁻⁵⁾, 그리고 유한요소법에 의한 비선형해석^(6,7) 등의 순서로 변천되었

* 정회원, 단국대학교 대학원

** 정회원, 단국대학교 공과대학 기계공학과

다.

Watanabe⁽¹⁾는 원자로 스테인리스 파이프의 저온응력완화법을 고안하기 위해, 그리고 Burdekin⁽²⁾은 열처리에 의한 응력의 완화법을 개발하기 위해 잔류응력의 측정에 의한 실험적 연구를 실시하였다. 그 후 Vaidyanathan 등⁽³⁾은 무한원통관의 원형단면에 가하는 외압에너지와 원주방향면내의 수직력에 의한 에너지의 증가함을 이용하여 잔류응력의 근사적해법을 위한 기초를 세웠으며, Fujita⁽⁴⁾과 Satoh 등⁽⁵⁾은 Vaidyanathan등이 사용한 변위함수를 다항식의 근사함수로 변형하여 Rayleigh-Ritz법에 의한 열탄소성의 해를 구하기도 하였다.

그리고 1978년 이후에는 유한요소법에 의한 소성역에서의 비선형거동을 반영하려는 시도가 이루어지기 시작하였는데, Rybicki 등⁽⁶⁾과 Ueda 등⁽⁷⁾은 Girth-butt 다층용접에 대해 비선형 응력-변형률관계, 변형에 따른 기하변동등을 고려한 유한요소해석의 모델을 고려함으로써 보다 접근된 예측모델을 제시하기도 하였다.

그러나 이같은 많은 시도에도 불구하고 지금까지의 연구결과들은 그 예측요차가 아직 클 뿐 아니라 파이프의 재질 또는 두께에 따른 그 특성도 분명하게 규명되어 있지 못한 실정이다.

그 이유로는 우선 열탄소성역에서 재료의 온도의존성이나 상변태이력들이 충분히 고려되고 있지 못하기 때문이며, 열응력장의 입력조건인 용접부 온도분포에 있어서도 정확한 예측이 실시되고 있지 못하기 때문이다. 그러므로 앞으로의 연구들에 있어서는 이와 같은 인자들을 유한요소해석과정에서 적당한 모델로서 반영하려는 시도들이 이루어져야 할 것이며, 이를 위해서는 또한 광범위한 모델들에 대해 풍부한 실험적 결과들이 제공되어야 할 것이다.

따라서 본 연구는 이같은 문제해결을 위한 기초

연구로서 재료의 미세조직이 불연속적으로 변하거나 정밀도가 높은 측정이 요구되는 경우에 적합한 천공스트레인게이지법(hole drilling strain gage method)을 이용하여 파이프의 외경과 두께 및 재질이 다른 3종류의 파이프를 대상으로 용접부의 잔류응력분포를 실험적으로 측정하였고, 이를 통해 파이프의 길이방향, 두께방향, 원주방향등의 기하학적 인자들과 용접조건 및 모재의 변태특성들에 따른 잔류응력의 분포특성들을 검토하였다. 또한 원주방향수축에 의한 굽힘응력의 크기 및 분포양상에 대해 고찰해 보기 위하여 Leggatt⁽⁸⁾와 Vaidyanathan⁽³⁾등이 사용한 용접변형량을 초기조건으로 하는 유한요소해석모델을 설정하여 잔류응력분포의 근사적 수치계산법을 개선하였으며, 그 결과를 실험결과와 비교 검토하여 봄으로써 장차 진보된 비정상 및 비선형 열탄소성문제의 유한요소모델을 구축하기 위한 기초자료의 제시를 도모하였다.

2. 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.

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

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

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of pipes

	C	Si	Mn	P	S	Outer dia. (mm)	Thickness (mm)	Yield stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	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

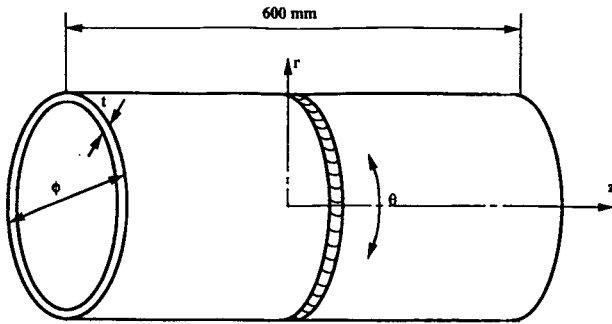


Fig. 1 Schematic illustration of pipes used in this study

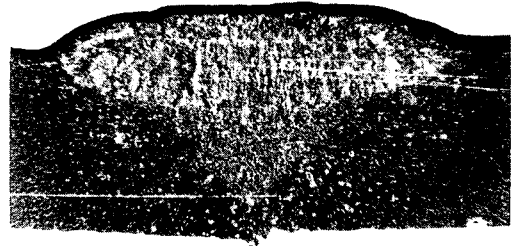


Fig. 3 Cross-sectional view of weldment

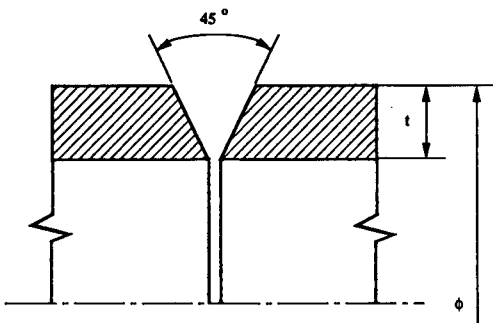


Fig. 2 Weld joint geometry for girth-butt weld

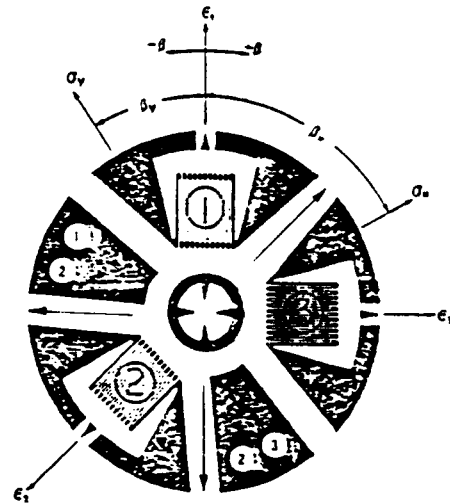


Fig. 4 Strain gage rosette

용접 작업은 3가지 종류 모두 피복아크 용접 (shield metal arc welding)으로 실시하였는데, 실 용접을 실시하기 전에 0°, 90°, 180°, 270° 방향에 가용접을 행한 후 본 용접을 실시하였다.

그리고 이때 사용된 용접봉은 350°C에서 1시간 동안 건조시킨후에 사용하였으며, 용접조건은 Table 2와 같다. 또 Fig. 3은 용접된 단면형상의 일례를 보여주고 있다.

한편 용접작업이 완료된 후 충분한 시간이 경과 한 후에는 천공 스트레인 게이지법을 이용하여 파이프 외면과 내면에 있어서의 잔류응력 분포의 측

정실험을 하였다. 이때 사용된 실험장치는 미국의 Measurement Group Inc.에서 SYSTEM 4000의 모델로 제공하는 천공스트레인게이지법에 의한 잔류응력의 측정 시스템으로서 스트레인게이지 로켓과 드릴링 set up 장비 및 스트레인 측정기 등의 주변장치와 실험데이터의 프로세싱을 위한 마이크로컴퓨터 본체로 구성되어 있으며, 컴퓨터에서는

Table 2 Welding conditions of each pipe

	Method of welding	Current (A)	Voltage (V)	Welding velocity (cm/min)	Diameter of electrode (mm)	No. of pass	Specific heat input, 60VA/v (J/cm)
Pipe A	SMAW	100	25	15	2.6	2	10000
Pipe B	SMAW	100	25	15	2.6	2	10000
Pipe C	SMAW	150	32	15	4.0	2	19200

Table 3 Residual stress rosette

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

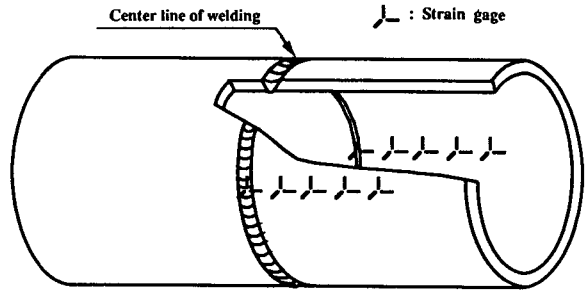


Fig. 5 Schematic drawing of pipe showing the strain gage attached positions

잔류응력의 계산을 위해 RESTRESS 소프트웨어 프로그램이 사용되었다.

그리고 스트레인 게이지 로셋은 Fig. 4에 보이는 것과 같이 Rendler⁽⁸⁾가 고안한 유형의 EA-06-062 RK-120 모델을 사용하였는데 그 제원은 Table 3과 같다. 또한 천공작업은 압축공기를 이용한 고속공기터빈 천공법으로 실시하였는데, 이때 사용된 드릴링 set up 장비로는 평저공의 가공에 적당하도록 END-MILL type을 이용하였다.

3. 실험방법 및 유한요소해석

3.1 잔류응력의 측정방법

천공스트레인 게이지법(hole drilling strain gage method)은 Mather⁽⁹⁾에 의해 처음 소개된 이후 Rendler⁽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 데이터정리가 수행될 뿐 아니라 천공구멍의 직경과 깊이도 점점 작게 할 수 있는 정밀 계측기술로 발

전되었다.

이와 같은 HDM의 정밀도는 주로 다음의 네가지 인자가 중요시된다. 우선 올바른 스트레인 게이지의 선택과 설치를 해야 하고, 스트레인 측정장치의 교정을 올바르게 해야하며, 정확하게 천공위치를 잡고 보오링해야 할 뿐 아니라 시험재료의 기계적 성질에 대한 충분한 이해를 필요로 한다. 이같은 관점에서 본 연구에서는 기존 연구들에서 사용된 실험방법들^(11~13)을 충분히 고찰한 후 앞절에서와 같은 스트레인 게이지 로셋과 천공장비를 결정하였으며, 실험과정을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

먼저 스트레인게이지 로셋을 설치하는데에 있어서는 외경이 큰 파이프 C에는 제약없이 적용할 수 있기 때문에 절단하지 않고 직접 외표면 및 내표면에 설치하였으나, 직경이 작은 파이프 A와 B에서는 내표면에의 설치시에 간섭이 생기기 때문에 외표면의 잔류응력 측정이 끝난 후 길이 방향으로 폭을 50mm 이상으로 절단하여 폭의 중심부에서 내표면의 측정을 실시하였다.

설치위치는 응력의 변화가 크다고 생각되는 용접

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

중심선 부근에 부착하였고, 외표면 및 내표면에 부착한 모양은 Fig. 5에서 보는 것과 같으며, Table 4에 그 부착위치를 나타내었다.

스트레인게이지 로켓이 부착된 후에는 각각의 로켓 격자 요소를 스트레인 측정장비에 연결하였고 영점조정 및 교정을 실시하였다. 그 다음에는 게이지 로켓의 중앙부에 정확히 위치하도록 천공장비를 설치하고 공구현미경을 통해 일치 여부를 확인한 후 미동나사를 써서 세팅을 실시하였다.

천공장비의 설치가 끝난 후에는 스트레인 측정장비의 출력을 컴퓨터 본체의 인터페이스 입력단자에 연결한 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 플로팅 하였다.

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.

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

여기서,

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

3.2 유한요소법에 의한 수치계산

파이프 원주용접의 해석방법은 오래전부터 평면응력 또는 평면변형의 문제에 1차원열류를 가정하여 시작되어서이나 점차 선열원의 이동에 의한 2차원열류의 연구로 발전되었고 Fujita 등⁽⁴⁾의 연구이후에는 Tendon force의 개념을 도입하여 Hoop stress에 대한 보다 접근된 해석적방법으로 발전되었으며, 최근에는 유한요소법에 의해 비선형방정식의 취급이 가능해 짐으로써 재료의 열의존성을 해석 과정에 반영할 수 있음은 물론 다층용접에 대한

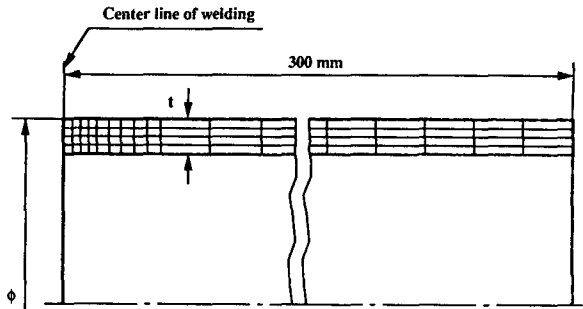


Fig. 6 Finite element model

발전된 모델들⁽⁵⁻⁷⁾이 시도되고 있다.

그러나 재료의 기계적 성질들에 대한 온도의존성을 반영하는 비선형 및 비정상적 열탄소성해석은 해석상의 복잡성과 계산상의 반대함 때문에 실용적으로 과대한 노력을 필요로한다. 한편 본 연구에 있어서는 장치의 이와같은 진보된 유한요소모델의 구축을 위한 기초자료의 축적을 대상으로 하기 때문에, 여기서는 우선 실험적으로 측정된 잔류응력 분포특성의 검증과 유한요소법에 의한 근사적 수치계산법의 구축을 목적으로 하였다.

따라서 본 연구는 Leggatt⁽¹⁵⁾ 및 Vaidyanathan⁽⁹⁾ 등이 사용한 용착금속의 수축 변형률을 초기조건으로 하는 탄성모델의 유한요소해석을 실시하였는데, 용접부주변의 변위는 0.001mm의 감도를 갖는 플런지형 전기마이크로미터를 사용하여 축방향으로 5mm의 간격으로 측정하였다. 한편 이들 측정은 파이프원주방향의 90°, 구간마다 4부분에 대한 측정을 수행한 평균치를 초기변위의 입력데이터로 사용하였다. 유한요소분할은 Fig. 6과 같이 용접중심선에서 대칭으로 된 형상으로 4각형요소로 하였으며 Hoop변형이 발생하는 용접선근처에서는 한 요소의 크기를 1mm로 하고 용접부에서 거리가 멀어질수록 요소의 크기를 크게 분할하였는데, 요소수는 190, 절점수는 232로 하였다.

그리고 본 유한요소해석의 계산을 위한 응용소프트웨어는 영국의 PAFEC 회사에서 제공되는 PAFEC-FE 패키지이며 하아드웨어는 Appollo Workstation을 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 측정결과 및 고찰

본 연구에서는 잔류응력의 측정실험에 앞서 용접

부로부터 충분히 떨어진 위치에서 잔류응력의 두께 방향에 따른 변화를 살펴보기 위하여 깊이방향에 따른 스트레인의 이완률을 검토하여 보았다.

Fig. 7은 천공직경을 1로 보았을때 구멍의 깊이에 따른 변형률의 이완률을 표시한 것으로서, 여기서 나타나는 결과를 앞의 식 (1)에서 근거하여 살펴보면 천공깊이가 증가하여도 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 의 값은 거의 같은 크기로 증가하고 있기 때문에 두께방향으로는 잔류응력의 변화는 매우 작게 일어나고 있음을 알 수 있다. 따라서 파이프 모재에 있어서는 내표면과 외표면 및 재료내부에 있어서의 잔류응력이 거의 동일하게 작용하고 그 크기도 비교적 작기 때문에 용접부에서의 잔류응력 측정을 위한 모재의 구비조건을 만족하고 있는 것으로 볼 수 있다.

잔류응력의 측정실험결과들 중 Fig. 8과 Fig. 9는 파이프 외표면에서의 잔류 응력이 용접부에서 길이

방향으로 떨어질수록 변화하는 추세로서 각각 원주 방향의 잔류응력과 축방향의 잔류응력을 나타내주고 있다. 파이프 A의 경우는 언주 방향 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.

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

이와 같이 파이프 B가 파이프 C의 경우에 더 흡사한 경향을 보이고 있는 것은 파이프의 두께에 대

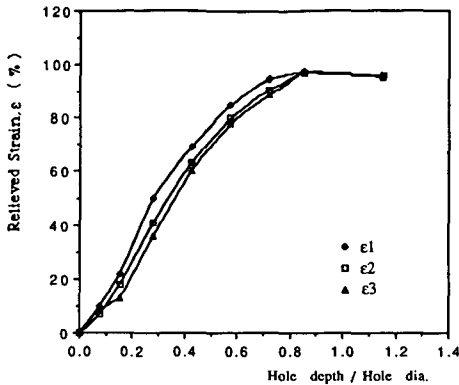


Fig. 7 Typical plot of relieved strain versus depth

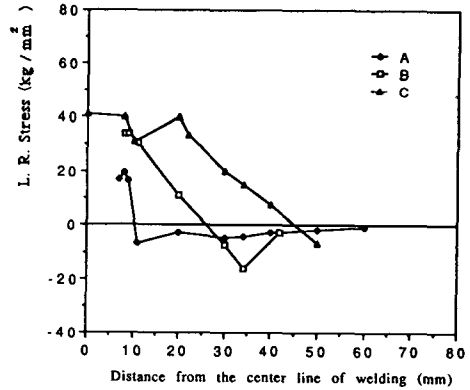


Fig. 9 Longitudinal residual stress distribution at the inner surface

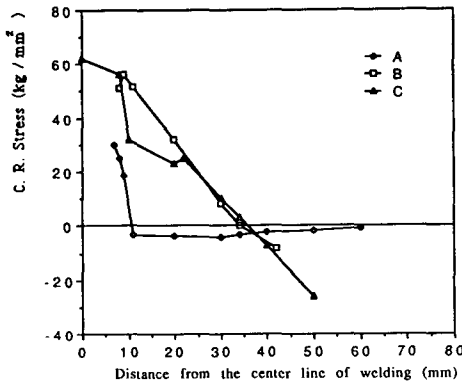


Fig. 8 Circumferential residual stress distribution at the inner surface

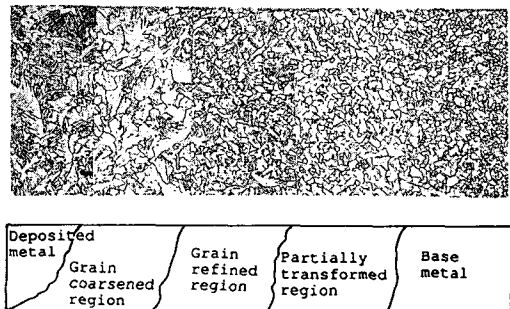


Fig. 10 Microscopic structure of heat affected zone by phase transformations

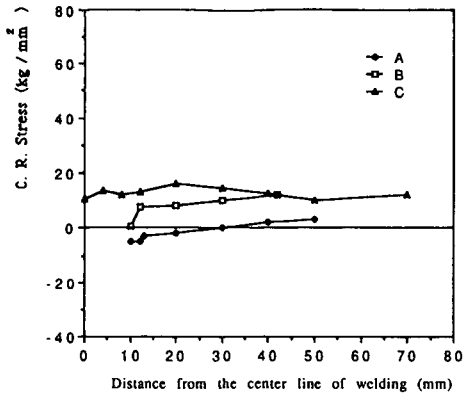


Fig. 11 Circumferential residual stress distribution at the outer surface

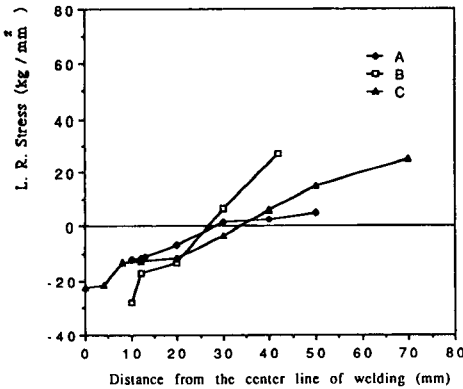


Fig. 12 Longitudinal residual stress distribution at the outer surface

한 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 인장을겨값을 나타내는 경향이 있는데, 이는 피이드 폭이 10 mm 정도인 점을 감안할때에 용접 중심부에서 5 mm까지 떨어진 영역에서는 용접봉의 재질에 가까운 기계적 특성을 가지며 이에 인접해 있는 부분에서도 열영향이 심화되어 모재의 변질이 생겼기 때문으로 생각된다. 이때 재질의 조직이 변태되거나 천이되고 있는 모양도 사진촬영을 통해 실험하였는데, 파이프 C의 경우에 대한 그 일례가 Fig.

10이다. 그리고 Fig. 11과 Fig. 12는 외표면에 있어서의 원주방향잔류응력 및 축방향잔류응력을 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^2 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.

이와같이 용접 중심부 근처에서 축방향 잔류응력이 외표면에서는 압축응력으로, 그리고 내표면에서는 그와 반대로 인장응력의 형태로 나타나는 것은 용접중심부에서 이어나는 Hoop 변형에 의한 굽힘응력의 영향인 것으로 고찰된다.

한편, 이상의 결과들을 기존 연구의 이론 또는 실험결과들과 그 변화추세를 통해 비교해 보면, 본 연구는 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 정도로 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^2 , 47.2kg/mm^2 보다 높은 56kg/mm^2 , 60kg/mm^2 을 보이고 있다.

이와 같이 잔류응력값이 항복응력보다 높은 값을 보이는 원인을 살펴보기 위해서 본 연구에서는 또한 잔류응력의 측정실험이 끝난후 용접부를 절단하여 정도를 측정하였다.

용접부 경도시험을 위한 시편은 $0.05\mu\text{m}$ 정도의

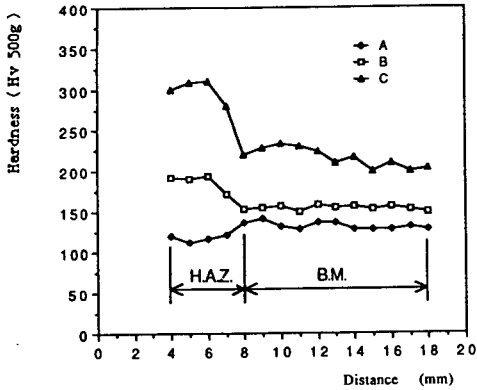


Fig. 13 Hardness distribution across the 1st pass weld

입자크기를 갖는 알루미늄파우더를 이용하여 래핑한 후 2% Nital로 부식시켰고, 경도시험은 Micro Vickers 시험으로 500g하중을 주고 초층용접부에 대하여 내외 표면과 평행하게 1mm 간격으로 측정하였다. 이때 얻은 결과는 Fig. 13에서 나타난 것과 같다.

파이프 A는 열영향부(H.A.Z ; heat affected zone)의 경우가 115로 모재의 경도 130보다 낮은 경도값을 나타내고 있는데, 이는 파이프 A의 재질이 저탄소강으로서 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.

$$\sigma_r = \frac{H}{3} (0.1)^{(m-2)} \quad (3)$$

여기서 σ_r 와 H 는 항복응력 및 경도값이며, m 은 재료상수이다.

이 식에 따르면 파이프 B와 C에서는 각각 항복강도가 53kg/mm², 62kg/mm²로 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 고찰 된다.

4.2 유한요소해석 결과와의 비교 및 검토

용접후 마이크로미터에 의해 축방향으로 측정된 변형량을 초기변형조건으로 하는 탄성유한요소해석을 실시함으로써 용접선방향의 수축에 의해 파이프 직경이 작아지면서 나타나는 2차압힘 잔류응력요소가 용접부의 잔류응력에 얼마만큼의 영향을 주며, 그 영향을 가장 크게 받는 부분이 어느 부분인가를 파악하여 볼 수 있었다.

Fig. 14와 Fig. 15 및 Fig. 16은 각각 파이프 A, B와 C에 있어서의 변형치를 초기 조건으로 하는 수치계산결과를 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다.

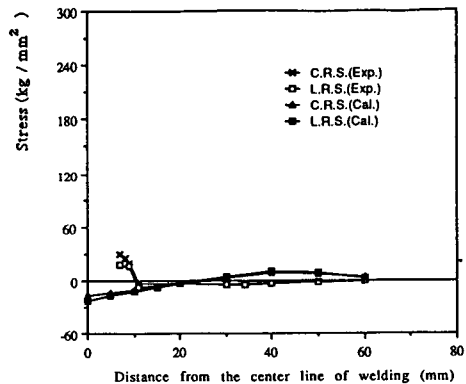


Fig. 14(a) Comparison of calculated and experimentally determined residual stresses for inner surface of pipe A

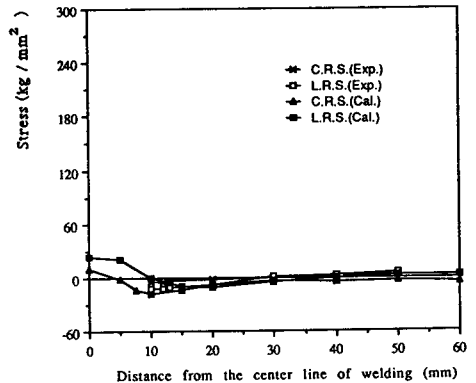


Fig. 14(b) Comparison of calculated and experimentally determined residual stresses for outer surface of pipe A

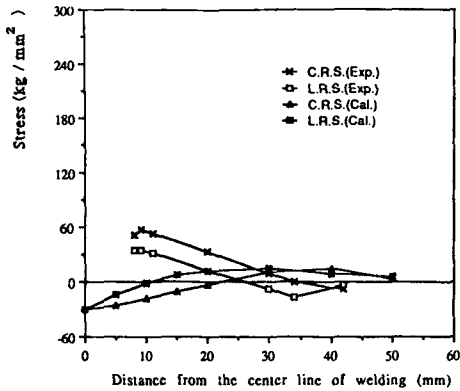


Fig. 15(a) Comparison of calculated and experimentally determined residual stresses for inner surface of pipe B

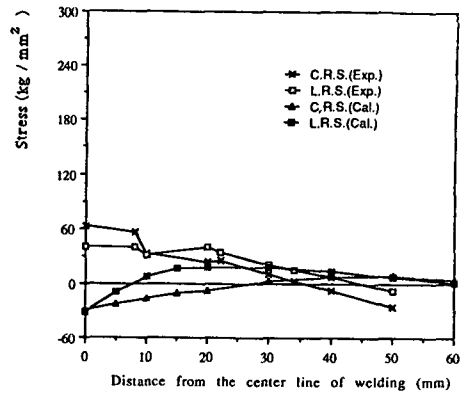


Fig. 16(a) Comparison of calculated and experimentally determined residual stresses for inner surface of pipe C

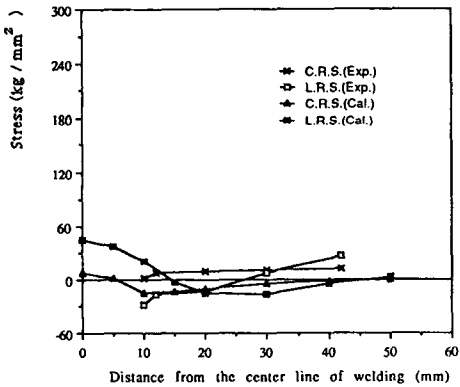


Fig. 15(b) Comparison of calculated and experimentally determined residual stresses for outer surface of pipe B

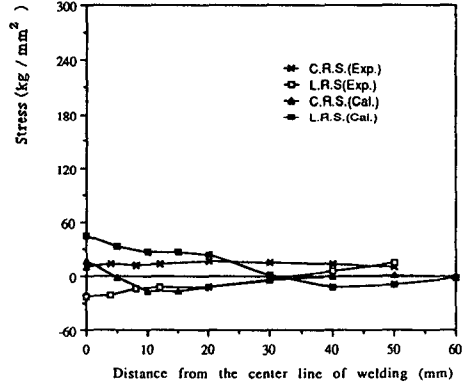


Fig. 16(b) Comparison of calculated and experimentally determined residual stresses for outer surface of pipe C

파이프 A 및 파이프 B에 있어서는 용접선부근에서의 잔류응력을 측정하지는 못하였지만 일반적으로 파이프 A, B, C 모두의 경우에 있어서 용접부에서 축방향으로 10mm 떨어진 위치부근에서는 비교적 그 오차가 크게 발생되고 있음을 알 수 있는데 이는 유한요소모델에서 비이드와 모재사이의 경계에 대한 구속조건이 고려되지 못하고 있고 유한요소분할에 있어서도 그 메쉬크기가 갑자기 변하는 데에서 기인되었다고 생각한다.

한편 전체적으로 볼 때에 용접선에서 멀리 떨어진 부분들에 있어서는 내표면과 외표면의 잔류응력 값이 서로 거의 같게되고 있는데 이는 용접선에서 멀리 떨어진 부분에서는 굽힘잔류응력이 주를 일고 있기 때문이다. 또한 파이프 B에 있어서는 40mm

정도 떨어진 위치에서 다시 실험값과의 오차가 커지고 있음을 볼 수 있는데, 이는 파이프 A 및 C에서는 볼 수 없는 현상이기 때문에 잔류응력 측정실험의 우연오차에서 비롯된 것이라 고찰된다.

일반적으로 파이프 내면에서의 응력부식에 의한 균열이 생길때에는 보통 용접선에서 약간 떨어진 열영향부의 열화조직에서 많이 발생하고 있는 것으로 보고되고 있기 때문에, 열영향부에서의 잔류응력상태를 정확하게 예측하는 해석적 접근방법이 매우 필요시되고 있으나, 본 연구의 탄성유한요소해석결과를 이 부근에서 가장 큰 오차를 갖고 있다. 따라서 장차 진보된 해석모델을 위해서는 3차원열류에 보다 접근된 해석을 추구하여야 함은 물론 재료의 열적성질과 온도의존에 따른 비선형성을 해석

과정에 반영하는데에 보다 더 노력하여야 할 것이며 Hoop변형에 의한 Tendon force의 영향과 굽힘 응력의 효과를 보다 잘 반영해 줄 수 있는 모델이 필요한 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 파이프의 원주방향용접시 발생하는 잔류응력의 그 분포특성을 규명하기 위하여 천공스트레인게이지법에 의한 잔류응력의 측정실험을 하였고, 파이프의 수축변위를 초기조건으로 탄성유한요소해석을 수행한 결과 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 연구에서는 실험결과는 잔류응력의 변화양상으로 볼때에 Hoop 변형에 의한 Tendon force의 영향과 굽힘응력의 효과를 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.

(5) 용접후의 수축변위를 초기조건으로 하는 탄성모델의 유한요소해석을 실시하여도 용접중심선에서 약 10mm 이상 떨어진 부분에서는 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있는데, 이는 용접선에서 멀리 떨어질수록 Hoop변형에 의한 굽힘잔류응력이 주를 이루고 있음을 고찰할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Watanabe, M. and Satoh, K., 1961, "Effect of Welding Conditions on the Shrinkage Distortion in Welded Structures", Japan Welding Society Journal, Vol. 8, pp. 377~384.
- (2) Burdekin, F.M., "Local Stress Relief of Circumferential butt Welds in Cylinders", British Welding Journal, Vol. 6, pp. 483~490.
- (3) Vaidyanathan, S., Todaro, A.F. and Finnie, I., 1973, "Residual Stresses due to Circumferential Welds", Trans. of ASME, J. of Eng. Mat. and Tech., pp. 233~237.
- (4) Fujita, Y., Momoto, T. and Hasegawa, H., 1979, "Welding Deformations and Residual Stresses due to Circumferential Welds in Cylindrical Shells", J. of JSSB, No. 146, pp. 386~392.
- (5) Satoh, K. et al., 1983, "Residual Stresses and Deformations in Thin Cylindrical Shells due to Circumferential Welds", Japan Welding Society Journal, Vol. 52, No. 2, pp. 83~89.
- (6) Rybicki, E.F. et al., 1978, "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.
- (7) Ueda, Y. et al., 1983, "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.
- (8) Rendler, N.J. and Vigness, I., 1966, "Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Stresses", Proc., SESA, Vol. 23, No. 2, pp. 577~586.
- (9) Mather, J., 1954, "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes", Trans. of ASME, Vol. 56, No. 4, pp. 249~254.
- (10) ASTM Standard E837-85; "Standard Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method".
- (11) Measurements Group Tech. Notes, 1988, "Residual Stress Measurement", TN-503-2.
- (12) Procter, E. and Beaney, E.M., 1982, "Recent Developments in Centre-Hole Technique for Residual-Stress Measurement", Experimental Techniques, Vol. 6, pp. 10~15.
- (13) 이택순, 최병길, 전상운, 1988, "AJM을 이용한 HDM에 의한 잔류응력 계측에 관한 연구", 대한 용접학회지, Vol. 6, No. 3, pp. 37~42.
- (14) Cahoon, J. R., Broughton, W.H. and Kutzak, A.R., 1971, "The Determination of Yield Strength from Hardness Measurements", Metallurgical Trans., Vol. 2, pp. 1979~1983.
- (15) Leggatt, R.H., 1982, "Residual Stresses at Circumferential Welds in Pipes", Weld. Inst. Res. Bull, Vol. 23, pp. 181~188.