

# 용접부의 천공 측정법에 의한 잔류 응력에 관한 연구

남궁재관\*

(논문접수일 2008. 4. 3, 심사완료일 2008. 5. 28)

## A Study on the Residual Stresses by the Hole Drilling Measuring in the WeldZone

Chai-Kwan Namkoong\*

### Abstract

A knowledge of the residual stress distribution at circumferential welds can increase the prediction accuracy of a fracture assessment in pipe lines. In this study, in order to predict the residual stress distribution in the circumferential butt-welded pipes were measured, using the hole-drilling strain gauge method. Their practical applications were performed in to two kinds of pipes. As the results, the following characteristics were found. On the inner surface of pipes, the circumferential and axial residual stresses were both tensile near the center line of welding and both of them changed from tensile to compressive as the distance from the center line increased. On the outer surface, however, the circumferential residual stress was shown to be tensile while the axial residual stress was compressive near the center line of welding, and later they were reversed at the region far away from the centerline.

**Key Words** : Residual Stress(잔류응력), Butt-Weld(맞대기용접), Hole-Drilling(천공법), WeldZone(용접부), Circumferential Weld(원주방향용접)

## 1. 서론

플랜트 배관설비 또는 해양구조물이나 원자로 배관 등에 있어서 원주(원둘레)방향 용접을 하는데, 용접부에 발생하는 잔류응력은 균열등의 위험요소를 내포하고있다. 또한 파이프 원주방향 용접에서 발생하는 잔류응력은 평탄이나 각주

형 용접물 또는 파이프의 축방향 용접보다 매우 복잡한 양상을 띄고 있다<sup>(1)</sup>.

따라서 본연구는 기하형상 및 재질의 변화에 따른 잔류응력의 분포특성을 규명하고자 최첨단의 천공법으로 실험적 연구를 하였다.

본 실험에 사용된 천공 스트레인게이지법(Hole Drilling-

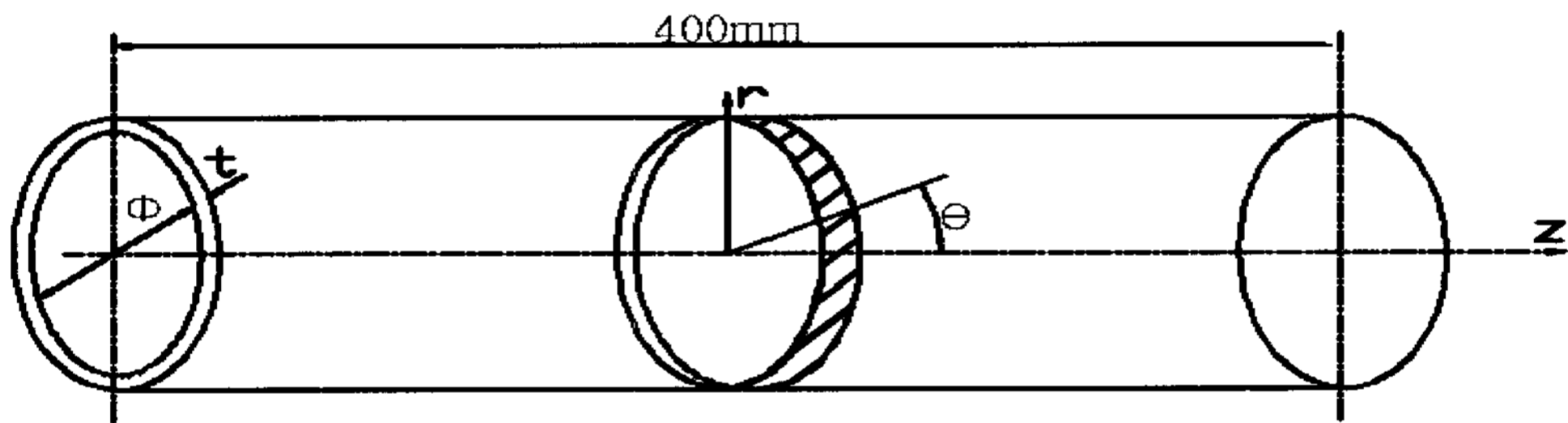
\* 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 (namkoong@snut.ac.kr)  
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

**Table 1 Chemical composition and mechanical properties of pipes**

| Pipe | C (%) | Si (%) | Mn (%) | P (%) | S (%) | inner dia. (mm) | thickness (mm) | yield stress (kg/mm <sup>2</sup> ) | tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> ) | elongation (%) |
|------|-------|--------|--------|-------|-------|-----------------|----------------|------------------------------------|--|----------------|
| A    | 0.027 | 0.024  | 0.38   | 0.015 | 0.015 | 94              | 4              | 27                                 | 36.9                                   | 38.4           |
| B    | 0.12  | 0.12   | 0.72   | 0.015 | 0.008 | 142             | 4              | 37.4                               | 47.2                                   | 30             |

**Table 2 Welding conditions of each pipe**

| Pipe | current (A) | voltage (V) | welding velocity (cm/min) | diameter of electrode (mm) | No. of pass | specific heat input (J/cm) |
|------|-------------|-------------|---------------------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
| A    | 100         | 25          | 15                        | 2.6                        | 2           | 10000                      |
| B    | 100         | 25          | 15                        | 2.6                        | 2           | 10000                      |



**Fig. 1 Schematic illustration of pipes used in this study**

Strain Gage Method)은 Mather에 의해처음 소개된 이후 Rendler<sup>(3)</sup>에 의해 그이론적 기초 및 응용기술이 확립되었고, 표준화된 그 측정과정이 ASTM E837에 규정사항으로 정리되었으며, 최근에는 더욱 세련된 측정기술로 온라인컴퓨터화 되어 데이터정리가 수행될 뿐 아니라 천공구멍의 직경과 깊이도 점점 작게 할 수 있는 기술로 개발되어 미세조직이 불연속적으로 변하거나 정밀도가 높은 측정이 요구되는 경우에 가장 널리 사용된다. 이와 같은 천공법의 정밀도는 주로 다음의 네가지 인자가 중요시 된다. 우선 올바른 스트레인게이지의 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<sup>(4)</sup>을 충분히 고찰한 후 앞절에서와 같은 스트레인게이지 로켓과 천공장비를 결정하였다.

## 2. 실험조건 및 장치

실험재료는 강파이프로서 같은두께의 내경과 재질이 다른 2종류의 파이프를 대상으로 하였으며 사용된 2가지 종류의 파이프 특성은 Table 1과 같다.

먼저 이들 파이프는 용접을 실시하기 전에 200mm로 절단하여 650°C로 가열하고 1시간 유지한 후 노냉을 실시하여 파이프의 초기 내부잔류응력을 제거하였다.

용접부의 치수는 Fig. 1과 같으며, 이음부형상은 V 형으로 하였고 각도는 45°로 하였다.

용접작업은 2가지 종류 모두 불구속 자동회전식 아크용접(Shield metal arc welding)으로 실시하였는데, 실용접을 실시하기 전에 0°, 90°, 180°, 270° 방향에 가용접을 행한후 용접을 실시하였다.

그리고 이때 용접을 Arc 길이 2.6mm로 개선부가 모재표면보다 낮지 않은 상태로 Slag를 제거하는 조건에서 용접을 완료하였다.

한편 용접작업이 완료된 후 충분한 시간이 경과한 후에는 천

공 스트레인게이지법을 이용하여 파이프 외면과 내면에있어서의 잔류응력분포의 측정실험을 하였다. 이때 사용된 실험장치는 Fig. 2와 Fig. 3에서 보는바와같이 미국의 Measurement Group Inc.에서 SYSTEM 4000의 모델로 제공하는 천공 스트레인게이지법에 의한 잔류 응력의 측정시스템으로서 스트레인게이지 로젯과 천공장비 및 스트레인 측정기 등의 주변장비와 실험데이터의 프로세싱을 위한 마이크로컴

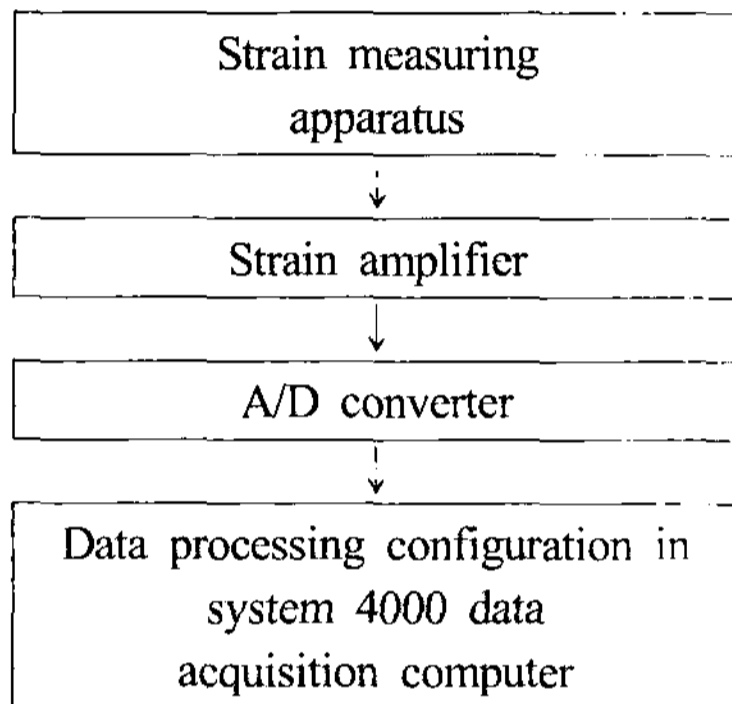


Fig. 2 Measuring and Data Processing Flow Chart

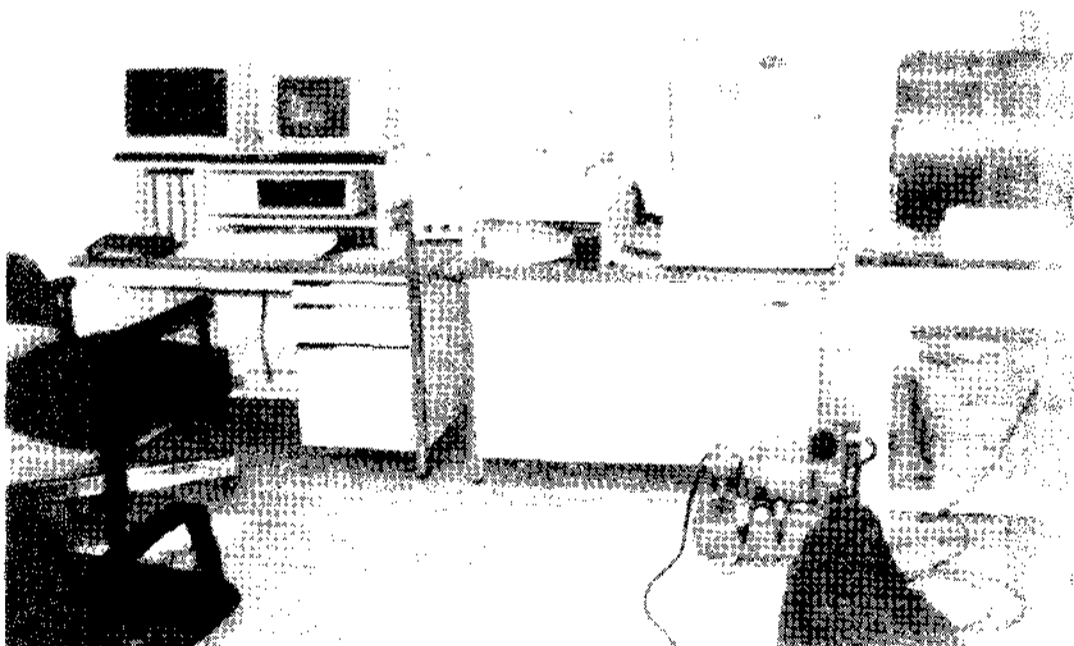


Fig. 3 Photo. of SYSTEM 4000 by which residual stresses are measured and data processed

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       |

퓨터 본체로 구성되어 있으며, 컴퓨터에서는 잔류응력의 계산을 위해 RESTRESS 소프트웨어 프로그램이 사용되었다.

그리고 스트레인게이지 로젯은 Rendler<sup>(3)</sup>가 고안한 유형의 EA-06-062RK-120 모델을 사용하였는데 그 제원은 Table 3과 같다. 또한 천공작업은 압축공기를 이용한 고속공기터빈 천공법으로 실시하였는데, 이때 사용된 천공장비로는 평저공의 가공에 적합하도록 평저형을 이용하였다.

### 3. 실험방법

스트레인게이지 로젯을 설치하는데 있어서, 내표면의 설치시에 간섭이 생기기 때문에 외표면의 잔류응력 측정이 끝난후 길이 방향으로 폭을 50mm이상으로 절단하여 폭의 중심부에서 내표면의 측정을 실시하였다.

설치위치는 응력의 변화가 크다고 생각되는 용접중심선 부근에 부착하였고, 외표면 및 내표면에 부착한 그부착위치는 Table 4에 나타내었다.

스트레인게이지 로젯이 부착된 후에는 각각의 로젯 Grid 요소를 스트레인 측정장비에 연결하였고 영점조정 및 교정을 실시하였다. 그 다음에는 게이지 로젯의 중앙부에 정확히 위치하도록 천공장비를 설치하고 공구현미경을 통해 일치여부를 확인한 후 미동나사를 써서 세팅을 실시하였다.

천공장비의 설치가 끝난 후에는 스트레인 측정장비의 출력을 컴퓨터 본체의 인터페이스 입력단자에 연결한 후, 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.

Table 4 Location of gages

| Pipe | Location      | Distance from the center line of welding (mm) |
|------|---------------|---|
| A    | Inner surface | 10, 20, 30, 40                                |
|      | Outer surface | 10, 20, 30, 40                                |
| B    | Inner surface | 10, 20, 30, 40                                |
|      | Outer surface | 10, 20, 30, 40                                |

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

여기서,

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

$\epsilon_{c1}, \epsilon_{c3}$  : 보정변형률성분(Calibration strain component)  
 $\sigma_c$  : 보정인장응력(Calibration tensile stress)  
 $\sigma_x, \sigma_y$  : 주응력 성분(Principal stress component)  
 이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

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

Fig. 4는 천공직경을 1로 보았을때 구멍의 길이에 따른 변형율의 이완율을 표시한 것으로서, 여기서 나타나는 결과를 식 (1)에 의하여 천공깊이가 증가하여도  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 의 값은 거의 같은 크기로 증가하고 있기 때문에 두께방향으로의 잔류응력의 변화는 매우 작게 일어나고 있음을 알 수 있다. 따라

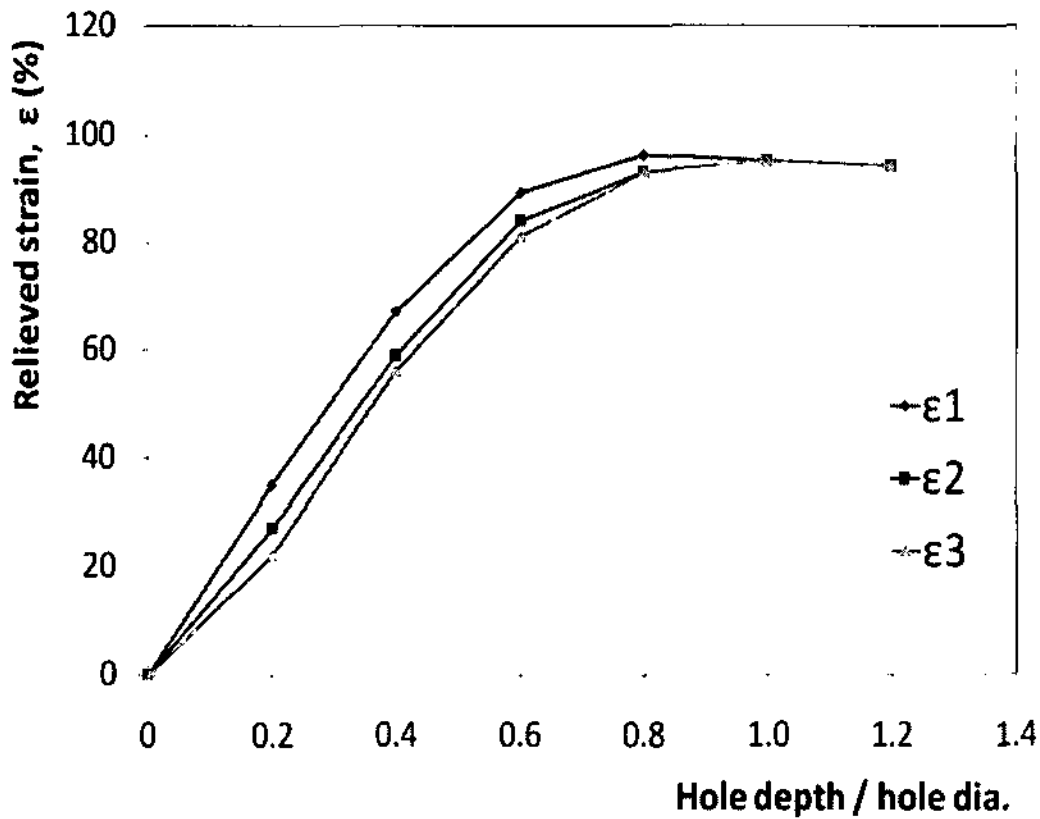


Fig. 4 Relation of relieved strain versus hole depth

서 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 측정 실험결과들 중 Fig. 5와 Fig. 6는 파이프 내표면에서의 잔류응력이, 용접부에서 축방향으로 멀어질수록 변화하는 경향으로 각각 원주방향의 잔류응력과 축방향의 잔류응력을 나타내 주고 있다. 파이프 A의 경우는 원주방향 및 축방향면에 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

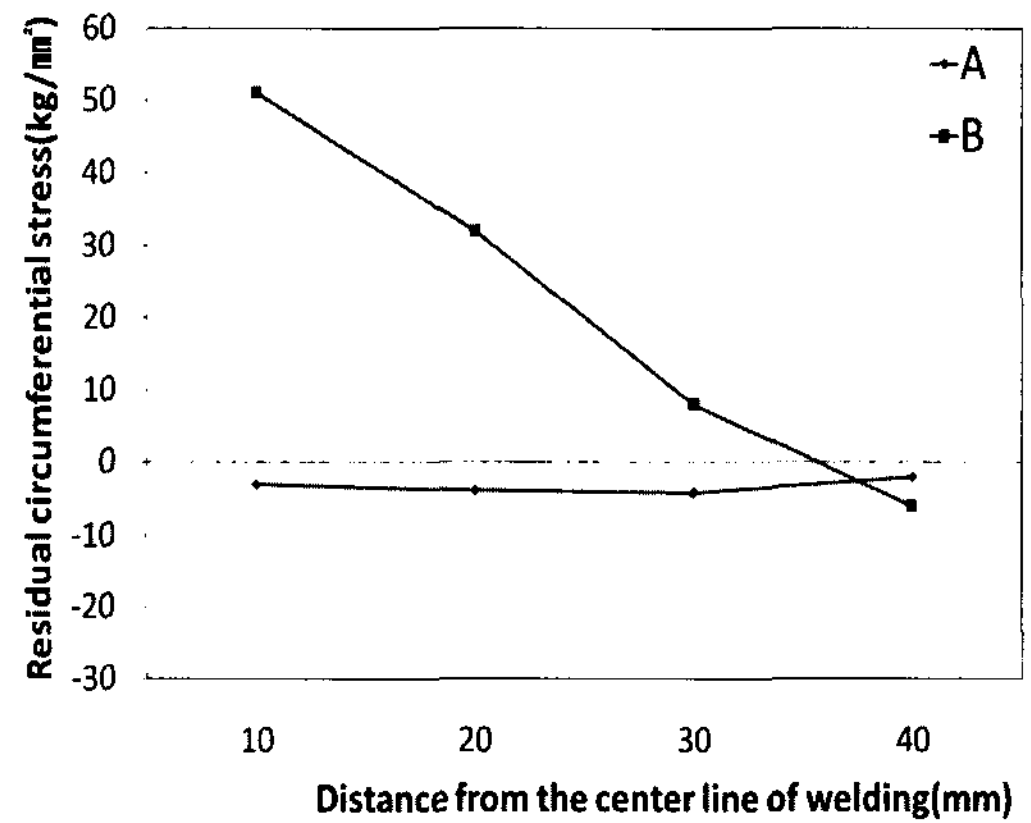


Fig. 5 Residual circumferential stress distribution on the inner surface

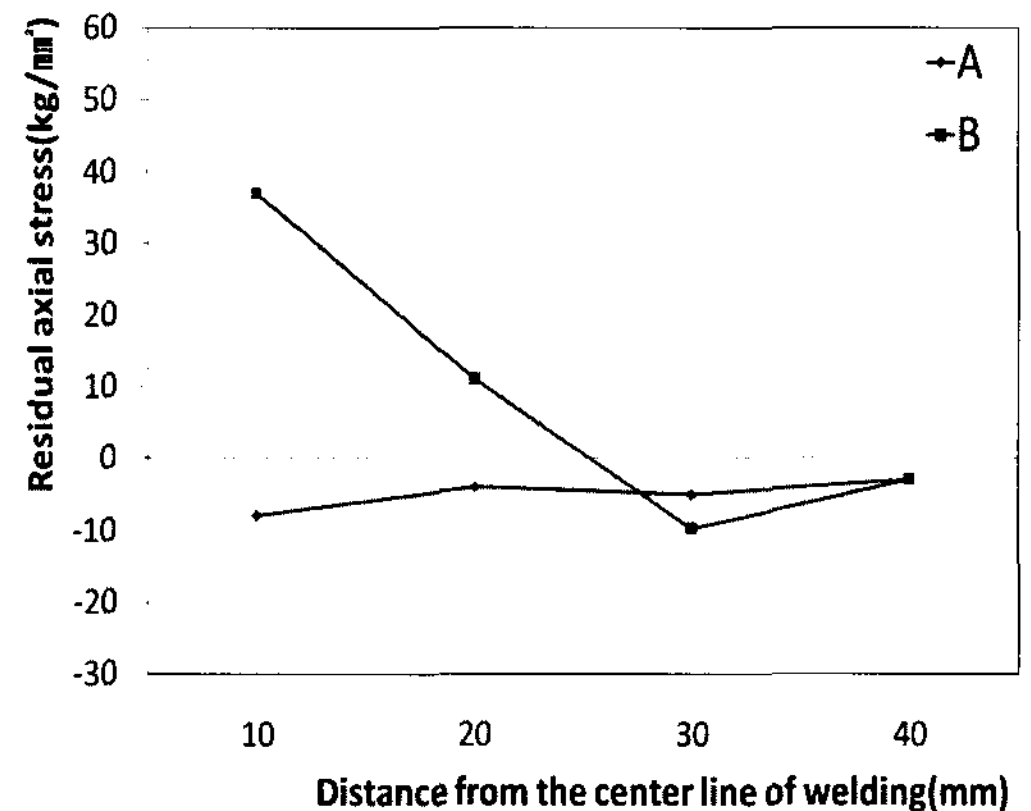


Fig. 6 Residual axial stress distribution on the inner surface

유지하고 있다.

한편 파이프 B는 용접부근처에서의 잔류응력이 파이프 A의 경우보다 더욱 크게 나타나고 있으며 그 감소추세도 비례적으로 일어나고 있다. 그러나, 전체적으로 볼 때에 축방향의 잔류응력인 경우에는 원주방향의 것에 비해 인장응력이 작게 나타나고 있고, 응력반전도 더욱 멀리 떨어진 위치에서 발생하고 있는 특징이 있다.

이와 같은 경향을 보이고 있는 것은 파이프의 두께에 대한 직경의 비가 파이프 A의 경우 25.5 파이프 B의 경우에는 37.5가 되는 기하학적 차이와 더불어 재료의 탄소함유량과 인장강도 및 항복응력등의 기계적 성질등이 복합적으로 상사되기 때문으로 생각된다.

한편 용접중심부에 가까운 부분에서는 잔류응력에 대한 측정값들이 불규칙적으로 작은 인장응력값을 나타내는 경향이 있는데, 이는 비이드 폭이 10mm 정도인 점을 감안할때에 용접중심부에서 5mm 까지 떨어진 영역에서는 용접봉의 재질에 가까운 기계적 특성을 가지며 이에 인접해 있는 부분에서도 열영향이 심화되어 모재의 변질이 생겼기 때문으로 보인다.

그리고 Fig. 7과 Fig. 8은 외표면에 있어서의 원주방향 잔류응력 및 축방향 잔류응력을 나타낸 것이다.

이들 결과들은 일반적으로 내표면의 경우와는 아주 판이한 양상을 나타내고 있다. 먼저 원주방향의 잔류응력에 있어서는 내표면의 경우와는 달리 용접 중심부 근처에서 큰 압축응력으로 반전되고 있는데, 그 변화추세는 비례적으로 일어나고 있으며 이는 파이프 A, B 모두에 공통적으로 비슷한 값의 크기 및 양상을 갖는다. 또 축방향의 잔류응력에 있어서

는 파이프 B의 경우에는 파이프 A의 경우보다 큰  $10\text{kg/mm}^2$  정도의 인장응력이 축방향의 길이에 대해 거의 일정하게 발생하고 있고 파이프 A의 경우에는 거의 0에 가까운 값을 나타내고 있다.

이와 같이 용접중심부 근처에서 축방향 잔류응력이 외표면에서는 낮은 인장응력으로, 그리고 내표면에서는 비교적 높은 인장응력의 형태로 나타나는 것은 용접중심부에서 일어나는 후프변형에 의한 굽힘응력의 영향인 것으로 고찰된다.

한편, 이상의 결과들을 기존 연구의 이론 또는 실험결과들과 그 변화 추세를 통해 비교해 보면, 파이프 A의 실험모델의 경우에는 Rybicki, Vaidyanathan, Leggatt 등<sup>(7-9)</sup>의 결과에 가까운 변화추세를 나타내고, 파이프 B의 실험모델의 경우에는 Ueda, Josefson, Satoh 등<sup>(10-12)</sup>의 결과에 가까운 경향을 나타내고 있으며, 이를 파이프 두께에 대한 직경비를 기준으로 본다면 후자의 경우가 그 비가 크기 때문에 원주내면수축력에 의한 영향이 더 크게 작용하고 있기 때문으로 고찰된다.

또한 잔류응력의 값이 크게 나타내는 경우를 살펴볼 때에, 파이프 A의 경우에는 재료의 항복강도의 크기 정도로 밖에는 커지고 있지 않지만 파이프 B의 경우에는 항복강도보다 높은 값을 나타내고 있다. 즉 용접중심부 부근에서 파이프 B의 잔류응력값은 모재의 항복응력인  $37.4\text{kg/mm}^2$  보다 높은  $56\text{kg/mm}^2$ 을 보이고 있다.

이와 같이 잔류응력 값이 항복응력보다 높은 값을 보이는 원인을 살펴보기 위해서 잔류응력의 측정실험이 끝난후 용접부를 절단하여 경도를 측정하였다.

용접부경도시험을 위한 시편은  $0.05\mu\text{m}$  정도의 입자크기

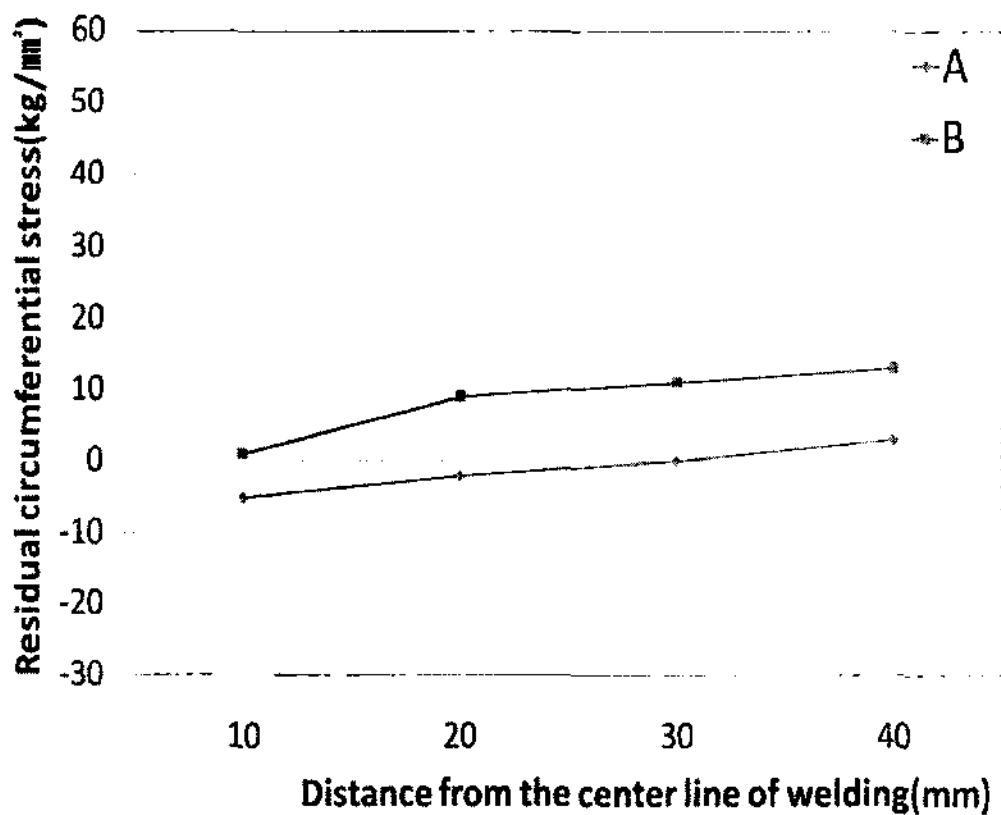


Fig. 7 Residual circumferential stress distribution on the outer surface

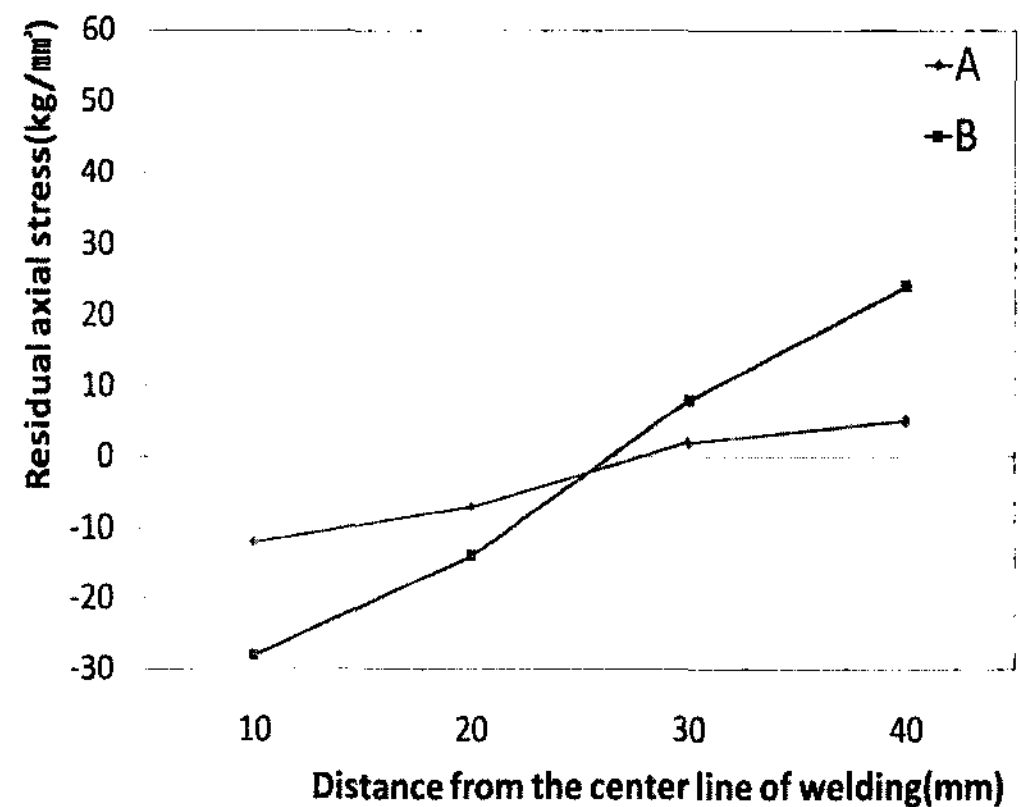


Fig. 8 Residual axial stress distribution on the outer surface

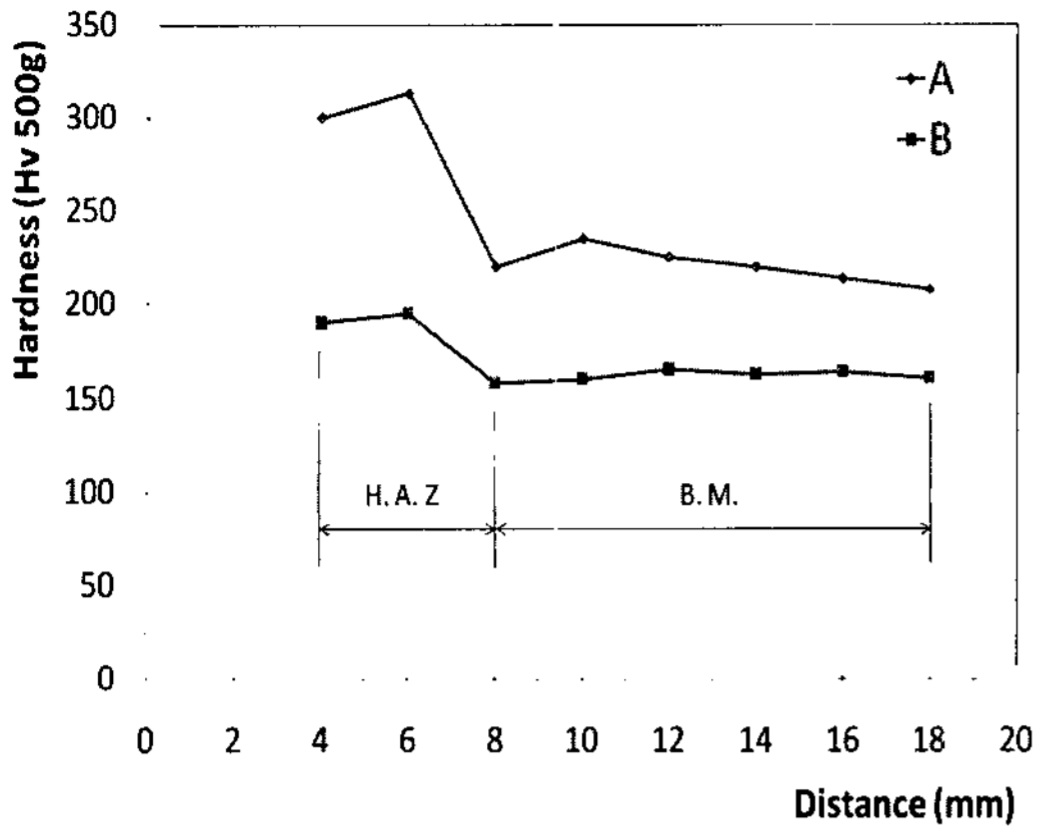


Fig. 9 Hardness distribution across the 1st pass weld

를 갖는 알루미나 파우더를 이용하여 래핑한후 2% Nital로 부식시켰고, 경도시험은 Micro Vickers 시험으로 500g 하중을 주고 초층용접부에 대하여 내외 표면과 평행하게 1mm 간격으로 측정하였다. 이때 얻은 결과는 Fig. 8에서 타나낸 것과 같다.

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

그러나 파이프 B는 열영향부에서 경도값이 각각 Hv 195 로 모재에서의 Hv 150 보다 경도가 높게 나오고 있다. Cahoon의 경도와 항복응력과의 관계식에 따르면 경도가 증가할 때에 항복응력은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서,  $\sigma_y$  와 H(=Hv) 는 항복응력 및 경도값이며, m은 재료상수로서 파이프 B의 경우는 2.09 이다.

이 식에 따르면 파이프 B에서는 항복강도가 53kg/mm<sup>2</sup> 만큼씩 증가하고 있기 때문에 앞의 경도 실험결과와 타당성이 입증되고 있고, 파이프 B의 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 변화 추세에서 파이프 B의 경우가 파이프 A의 경우보다 잔류응력이 모재의 항복응력 이상으로 발생하는 것은 재료가 열영향부에서 변태 또는 천이과

정을 거치기 때문에 경도의 증가와 더불어 항복응력이 상승하였기 때문으로 고찰된다.

### 5. 결론

용접부의 천공측정법에 의해 잔류응력을 실험적으로 연구한 결론은 다음과 같다.

- (1) 용접중심부 근처에서 축방향잔류응력이 외표면에서는 낮은 인장응력으로, 그리고 내표면에서는 비교적 높은 인장응력의 형태로 나타나는 것은 용접중심부에서 일어나는 후프변형에 의한 굽힘응력의 영향이다.
- (2) 파이프두께에 대한 직경비를 기준으로 잔류응력변화 추세를 본다면 파이프 B 쪽이 A쪽보다 그 비가 크기 때문에 원주내면수축력에 의한 영향이 더크게 작용한다.
- (3) 파이프 B 가 A보다 잔류응력이 모재의 항복응력 이상으로 발생하는 것은 열영향부에서 변태 또는 천이과정을 거쳐 경도의 증가와 더불어 항복응력이 상승하기 때문이다.

### 참고 문헌

- (1) Watanabe, M., Minehisa, S., and Onoe, H., 1955, "Some Experimental Studies to the Residual Stresses of the Welded Pipes," *Japan Welding Society Journal*, Vol. 24, No. 2-3, pp. 84~89.
- (2) Lee, K. M., Lee, C. K, 2008, "An Effect of Harmful Materials During Welding Work," *Trans. of the KSMTE*, Vol. 17, No. 1, pp. 43~49.
- (3) Rendler, N. J. and Vigness, I., 1966, "Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses," *Journal of Experimental Mechanics*, U.S.A., pp. 577~586.
- (4) Bynum, J. E., 1981, "Modification to the Hole Drilling Technique of Measuring Residual Stresses for Improved Accuracy and Reproducibility," *Journal of Experimental Mechanics*, U.S.A., Vol. 21, No. 1.
- (5) NamKoong, C. K., 2003, "An Experimental Study on Detection of Defects in Weldzone," *Trans. of KSMTE*, Vol. 12, No. 6, pp. 56~63.
- (6) Vaidyanathan, S., Todaro, A. F., and Finnie, I., 1973, "Residual Stresses due to Circumferential

- Welds," *Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, pp. 233~237.
- (7) Vaidyanathan, S., Weiss, H., and Finnie, I., 1973, "A Further Study of Residual Stresses in Circumferential Welds," *Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, pp. 238~242.
- (8) Leggatt, R. H., 1982, "Residual Stresses at Circumferential Welds in Pipes," *The Welding Institute Research Bulletin, England*, pp. 181~188.
- (9) Rybicki, E. F. and Stonesifer, R. b., 1979, "Computation of Residual Stresses due to Multipass Welds in Piping Systems," *Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 101, pp. 149~154
- (10) Satoh, K., Toyoda, M., Suita, Y., Tanaka, M., and Hirano, T., 1983, "Controlling Parameters of Residual Stresses and Deformations in Welded Thin Cylindrical Shells," *Transactions of the Japan Welding Society*, Vol. 17, No. 1, pp. 13~19.
- (11) Ueda, Y., Nakacho, K., Shimizu, T., and Ohkubo, K., 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.
- (12) Jonsson, M. and Josefson, B. L., 1988, "Experimentally Determined Transient and Residual Stresses in a Butt-Welded Pipe," *Journal of Strain Analysis*, England, Vol. 23, No. 1, pp. 25~31.