

# 상수도용 도복장강관의 용접 및 외부하중에 의한 응력 특성에 관한 연구(I)

- 후열처리에 의한 용접부의 잔류응력 특성 -

윤석환\* · 이승기\* · 나석주\* · 고명환\*\*

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*한국수자원공사 품질관리실

## A Study on the Stress Distribution of Steel Water Pipes(I) - Characteristics of Residual Stress Distribution by PWHT -

Suk-Hwan Yoon\*, Seung-Key Lee\*, Suck-Joo Na\* and Myong-Hwan Goh\*\*

\*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

\*\*Construction Quality Management Department, KOWACO, Daejeon 306-711, Korea

### Abstract

Large steel water pipes are joined prevalently by the bell end method, and are welded both at inside and outside of lapped parts. In practice, welded joints of water pipes are very critical, because in most cases failure of pipes causing leakage occurs at the welded joint. Therefore some methods have been developed to ensure the soundness of welded joints of water pipes, like leakage tests and nondestructive tests(NDTs). But one of the major characteristics that affects the soundness of welded joints is the stress distribution caused by welding and external forces. Some studies have been carried out on the residual stress of steel water pipes, but complex stress distributions by welding and external forces are rarely studied.

In this study, temperature and stress distributions in steel water pipes produced by welding are predicted by a three-dimensional finite element method(FEM). Also, stress values are measured from real steel water pipes by the hole-drilling methods, and compared with predicted ones. The influence of some typical post weld treatments on residual stress distribution was also investigated by residual stress measurements.

(Received December 12, 2000)

Key Words : Steel water pipe, Residual stress, Finite element method(FEM), Hole-drilling method

## 1. 서 론

최근 인구 증가 및 물 사용량 증가 등으로 인하여 원활한 물 공급 및 누수율 감소를 위한 수도관의 품질관리에 대한 관심이 높아지고 있다. 수도 강관의 파손 및 누수는 주로 용접부에서 발생한다는 것은 이미 잘 알려진 사실이며, 이에 따라 현장에서는 용접을 실시한 후 산소 압축 시험이나 비파괴검사 등과 같은 수도 강

관 용접부의 건전성을 평가하는 여러 방법들이 시행되고 있다.

일반적으로 용접공정은 필수적으로 재료에 불균일한 온도분포를 야기하고, 이러한 온도분포는 재료의 각 위치에서 열팽창이 다르기 때문에 열응력과 열변형을 발생시키며, 열응력이 항복응력 이상이 되어 최후에 잔류응력과 용접 변형이 남게 된다. 특히 수도 강관과 같은 후판 용접에서는 열변형에 저항할 수 있는 강도가 크기 때문에 열변형이 작고 잔류응력은 크게 발생

한다. 발생한 잔류응력은 균열생성, 강도저하 등 많은 문제점들을 야기하므로 잔류응력을 제거 또는 감소시키기 위한 연구를 필요로 한다<sup>1,2)</sup>.

또한 참고 문헌으로부터, 국내 강관의 사고원인은 용접 불량에 의한 사고가 가장 큰 비중인 약 46%를 차지하고 있으며, 또한 이 용접부 사고의 직접적인 원인은 대부분 온도변화에 의한 신축작용, 수압차, 지상의 중차량 등으로 구성되어 있으므로, 실제로는 대부분이 잔류응력 및 외부응력에 의한 용접부 파손임을 알 수 있다<sup>3)</sup>.

따라서 용접부의 잔류응력은 시공 후에 용접부의 성능에 큰 영향을 미치는 요소임을 알 수 있으므로, 강관의 용접부에 대한 잔류응력의 측정 및 외부 요인에 의한 응력 변화를 파악하여 적절한 시공 및 감독 기준을 확립하는 것이 무엇보다 중요한 일이라고 할 수 있다. 그러나 수도 강관의 경우 잔류응력의 측정이 복잡하고, 또한 실제 땅속에서 작동중인 수도 강관에 작용하는 용접 잔류응력 및 복합적인 외부 응력의 측정은 대단히 어렵기 때문에 이에 대한 연구는 거의 이루어져 있지 않다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 3차원 열탄소성 해석으로 수도 강관의 잔류응력을 예측하고, 이를 실제 측정결과와 비교하였다. 나아가서, 땅속에 매설된 수도 강관에 용접시의 잔류응력 및 토압과 지상의 하중 그리고 온도 변화에 의한 열팽창 및 수축 등으로 인하여 형성되는 복합적인 응력상태를 용접시의 외기온도 변화에 따라 해석하고, 또한 잔류응력 제거방법으로 널리 알려져 있는 후열처리가 저탄소강인 수도 강관의 잔류응력 완화에도 실효성을 가지는지의 여부를 조사하고자 하였다.

본보에서는 용접에 의해 야기되는 수도 강관의 온도 분포 및 잔류응력을 용접시의 외기온도의 변화 및 후열처리 유무에 따라 3차원 열탄소성 및 점소성 유한요소 해석을 실시하여 수도 강관의 용접부에 분포하는 복합적인 잔류 응력 상태를 예측하였다.

## 2. 수도 강관의 온도 및 잔류응력 분포 해석

### 2.1 강관의 용접부에 대한 열해석(thermal analysis)

강관의 용접부에 대한 유한요소 열해석을 실시하기 위하여, 재료의 잠열(latent heat)과 상변태를 고려한 열전도 방정식을 이용하여 해를 구하였다. 먼저,  $L_{ij}(\theta)$ 를 온도  $\theta$ 에서  $i$ 에서  $j$ 로의 상변태가 일어날 때의 잠열이라 하고,  $A_{ij}$ 를 단위 시간에서 상  $j$ 로 변태한 상

$i$ 의 비율이라 하면, 상변태를 고려한 열전도 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla \theta) - \sum_{ij} L_{ij} A_{ij} \quad (1)$$

이 때 비열( $c$ )과 열전도도( $\lambda$ )는 다음 식과 같이 재료 내부의 여러 상들의 비율( $P_i$ )에 따라 조정된다.

$$c = \sum_i P_i c_i \quad (2a)$$

$$\lambda = \sum_i P_i \lambda_i \quad (2b)$$

여기서 각 상의 비열  $c_i$ 와 상변태 시의 잠열  $L_{ij}$ 는 각 상의 엔탈피  $H_i$ 의 함수로 계산된다.

$$c_i = \frac{dH_i}{d\theta} \quad (3a)$$

$$L_{ij} = H_j - H_i \quad (3b)$$

한편, 용접에 사용한 아크 열원은 다음과 같은 분포를 가진다고 가정하였다.

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi r^2} \exp \left\{ -3 \left( \frac{r}{\bar{r}} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

여기서  $q(r)$ 은 아크 중심으로부터 거리  $r$  지점에서 열속(heat flux)이고,  $\bar{r}$ 은 아크의 유효반경이며,  $Q$ 는 용접부로 전달되는 열량을 나타낸다.

### 2.2 강관의 용접부에 대한 기계적 해석 (mechanical calculation)

일반적으로 재료에 온도변화에 의한 변형율이 존재할 경우, 응력( $\sigma$ )과 변형율( $\epsilon$ )은 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\{\sigma\} = [D] \{ \{\epsilon\} - \{\epsilon^th\} \} \quad (5)$$

여기서  $\epsilon^th = \alpha \cdot \Delta T$ 이고  $D$ 는 응력과 변형율과의 관계를 나타내는 행렬이다.

물체 외부의 하중에 의한 일의 가상적 변화와 내부의 변형에너지의 가상적 변화가 동일하다고 가정하면, 내부에너지 변화  $\delta U$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta U = \int_V \{ \delta \epsilon \}^T \{ \sigma \} dV \quad (6)$$

또한, 재료에 외부하중으로 인한 압력이 작용하는 경우, 이에 따른 에너지 변화 ( $\delta V$ )는 다음과 같이 나타

낼 수 있다.

$$\delta V = \int_{A_p} \{\delta \omega\}^T \{p\} dA_p \quad (7)$$

여기서  $\{\omega\}$ 는 변위벡터,  $\{p\}$ 는 압력벡터,  $A_p$ 는 압력 작용 면적을 의미한다.

가상일의 원리에서 (6)식과 (7)식은 같은 값을 가지므로, 정리하면 한 요소에 관한 평형방정식을 의미하는 다음식과 같은 유한요소 방정식을 얻는다.

$$[K_e]\{u\} - \{F_e^{th}\} = \{F_e^{pr}\} \quad (8)$$

여기서  $[K_e]$ ,  $\{F_e^{th}\}$ ,  $\{F_e^{pr}\}$ 은 각각 요소 강성 행렬, 요소 열 벡터, 요소 압력 벡터로서 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$[K_e] = \int [B]^T [D][B] dV \quad (8a)$$

$$\{F_e^{th}\} = \int [B]^T [D]\{\epsilon^{th}\} dV \quad (8b)$$

$$\{F_e^{pr}\} = \int_{A_p} [A]^T \{p\} dA_p \quad (8c)$$

따라서, (8)식을 이용하면 제반 하중 하에서의 구조물의 변위와 응력분포를 구할 수 있다.

한편, 후열처리 효과를 표현하기 위해서 기존의 탄성 변형률(elastic strain), 소성 변형률(plastic strain) 및 열 변형률(thermal strain) 외에 크립 변형률(creep strain)을 다음과 같은 식으로서 적용하였다.

$$\dot{\epsilon} = K \left( \sigma - \frac{3}{2} \alpha \right)^n \quad (9a)$$

$$\dot{\alpha} = H \dot{\epsilon} - \left( \frac{3}{2} \right)^{p-1} \cdot C \alpha^p \quad (9b)$$

여기서  $\dot{\epsilon}$ 은 시간에 따른 변형률,  $\alpha$ 는 동적 가공경화 변수(kinematic strain-hardening variable)이고, (9b)식의 첫번째 항은 가공경화(strain hardening) 효과를, 두번째 항은 점성 회복(viscous recovery) 효과를 나타내며, K, n, H, C, P는 재료의 크립 특성을 나타내는 상수이다.

### 2.3 해석 조건

본 연구에서 사용한 해석 영역을 Fig. 1에 나타내었다. 보통의 경우 대형 수도 강관은 관의 한쪽 끝단을 강제적으로 확장하여 겹치기 용접을 실시하므로, 이와 같은 형상과 치수를 가진 겹치기 용접부를 모델링하였다. 강관의 외경은 2,200mm, 길이 500mm, 두께는

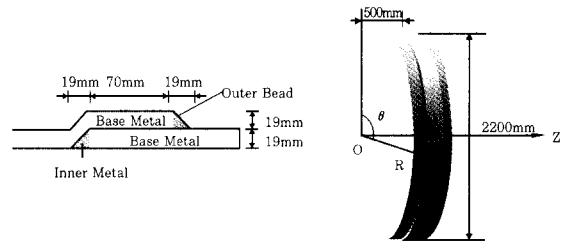


Fig. 1 Modeled structure and dimensions of a steel water pipe

19mm로 하였으며 모재는 저탄소강인 SS400을 사용하였다. 모재의 열전도도, 비열, 밀도, 탄성 계수 및 항복 응력은 온도에 따라 비교적 크게 변화하는 값이므로 이에 따라 해석 시에도 온도의 함수로 가정하였으며, 온도에 따른 수치는 다음의 Fig. 2에서부터 Fig. 4까지 나타내었다. 용접 방법은 수도 강관의 현장 용접에서 널리 쓰이고 있는 수용접 방법인 피복 아크 용접(SMAW)으로 가정하였다. 용접 순서는 내부 용접을 실시한 후 냉각시킨 뒤 외부 용접을 실시하였다고 가정하였고, 용접 전류는 210A, 용접 전압은 24V, 용접 속도는 5mm/sec로 지정하였다. 모재가 후판이므로 내외부 용접 모두 각각 3 패스로 가정하였

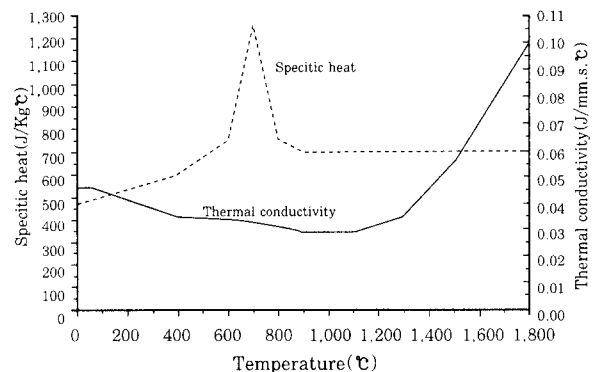


Fig. 2 Thermal conductivity and specific heat of the base metal

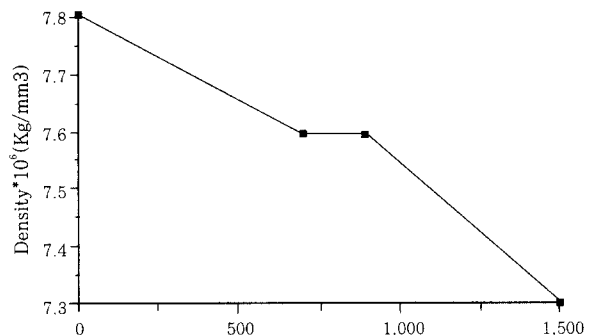


Fig. 3 Density of the base metal according to temperature variation

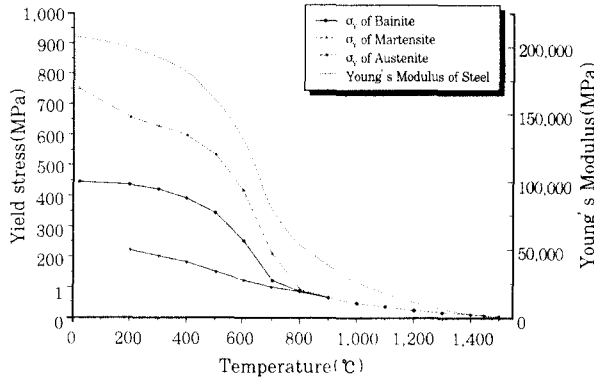


Fig. 4 Yield stresses and Young's modulus

는데, 이는 둘레 방향의 용접부에 열원을 세 번 통과시키는 방법으로 표현하였다. 또한 용접의 진행 방향은 강관 둘레의 하부에서 상부로 진행되는 상진 방향을 택하였다. 그 밖의 해석 변수로는 용접시의 외기온도를 각각 20℃, 0℃, -15℃로 구분하고 각각에 대한 후열처리 유무에 따라 열탄소성 해석을 진행하였다. 본래 후열처리는 용접균열의 감수성이 높은 합금강이나 고장력강에 통상적으로 실시하는 것이 원칙이나, 본 연구에서는 수도 강관의 용접에서 후열처리의 실효성을 조사하기 위하여 이를 변수로서 해석에 첨가하였다. 후열처리 조건은 생산성 및 작업시간을 고려하여 JIS Z3700 및 ASME Sec. VIII 규격을 만족시키는 최소의 조건인 용접부 전체를 650℃로 균일하게 가열하여 15분 경과 후 공기 중에서 천천히 냉각시키는 것으로 처리하였다.

해석 패키지는 용접부 유한요소 해석을 위해 개발되어 상용화된 패키지인 SYSWELD+ 패키지를 사용하였다.

### 3. 잔류응력 측정

유한요소법을 이용한 열탄소성 해석의 용접부 잔류응력 결과와 비교하기 위하여 실제 수도 강관 용접부 시편으로부터 직접 잔류응력을 측정하였다. 먼저 여러 가지 후열처리와 피이닝(peening) 방법에 따라 잔류응력이 어떤 특징을 가지는지를 알아보았다. 사용된 후처리 방법으로는 용접 후에 토치 및 전열선을 사용하여 용접부를 가열하는 방법과 저온으로 후열한 뒤 급냉 처리하는 방법을 적용하였고, 기계적인 후처리 방법으로서 압력 및 시간을 변화시켜 가면서 피이닝 방법을 사용하였다. 용접 조건 및 기타 조건은 해석 시에 가정한 조건과 동일하게 하였으며, 잔류응력의 측정에는 여러 가지 기계적 방법과 방사선을 이용한 측정법 등이 있으나<sup>4)</sup> 그 중 스트레인 게이지를 이용, 표면을

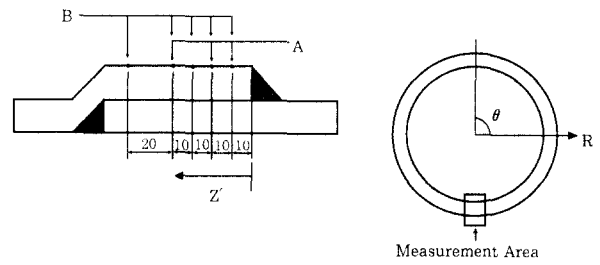


Fig. 5 Measurement points of the residual stress

드릴링한 후 잔류응력의 이완량을 측정하는 홀 드릴링 방법(hole-drilling method)을 사용하였다<sup>5,6,7,8)</sup>. 측정부위는 후열처리 및 피이닝을 적용한 시편에서는 Fig. 5의 A지점과 같이 외부 용접부로부터 Z' 방향으로 10, 20, 40mm의 세 지점을 선정하여 측정하였고, 해석과 비교를 위한 수도 강관의 용접 시편은 B지점과 같이 외부 용접부로부터 Z' 방향으로 10, 20, 30, 40, 60mm 거리의 다섯 지점을 선정하여 측정하였다. 이상의 후처리 방법을 Table 1에 정리하였으며, 이와 같은 후처리 방법에 따른 잔류 응력의 분포는 Fig. 6에 나타내었다.

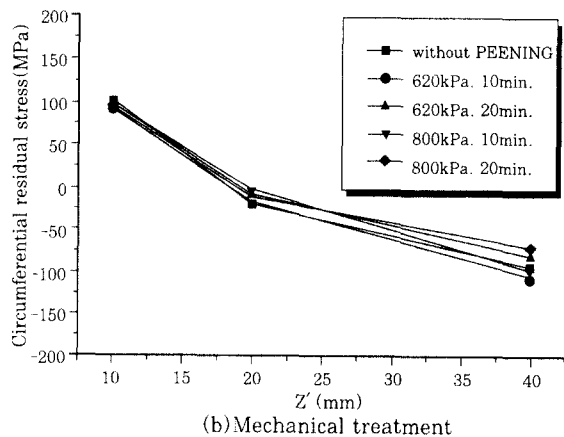
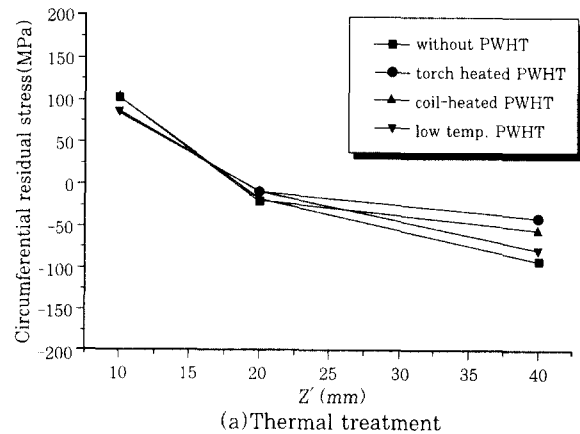


Fig. 6 Measured residual stresses of welded joint treated by various post weld treatment methods

Table 1 Applied post weld treatments

Thermal treatment	Torch heating	650°C - 15min. heating using gas torch heating width 200mm
	Coil heating	650°C - 15min. heating using heating coil band heating width 400mm
	Low temperature heating	200°C - 15min. heating using gas torch heating width 300mm
Mechanical treatment	Peening	620 and 800kPa pressure application with steel balls (13mm diameter)

측정 결과 후열처리 및 기계적 후처리 방법 모두 잔류응력의 분포는 크게 변하지 않았다. 다만, 피이닝을 실시한 시편의 경우 극히 얇은 표면 근처에서만 압축 잔류응력이 생성되므로, 홀 드릴링 방법으로는 검출이 어려울 수 있으며, 이를 정확히 측정하기 위해서는 방사선을 이용한 방법 등이 필요할 것으로 보인다.

4. 결과 및 고찰

해석에 의하여 강관에 분포하는 잔류응력을 예측하기 위해서는 우선 강관 용접부의 온도 분포 이력 (thermal history)에 대한 해석이 선행되어야 한다. Fig. 7은 해석을 위해 생성된 3차원 요소를 나타내고, Fig. 8은 온도분포 해석 결과의 한 예로서, 용접시의 외기온도 20°C에서 외부용접이 완료된 직후의 온도분포를 나타낸다. 용접 직후의 최대온도는 조건에 따라 대략 1710°C - 1790°C 정도의 온도를 나타내었으며, 용접시의 외기온도가 낮을수록 최대온도도 근소한 폭으로 낮아지는 현상을 나타내었다.

온도분포 해석을 완료한 후 이 결과를 기반으로 잔류응력에 대한 해석을 실시하였으며, 잔류응력의 여러

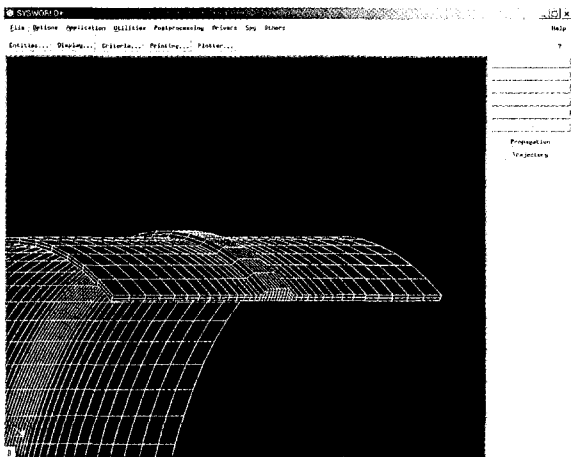


Fig. 7 Generated solid elements for FEM analysis

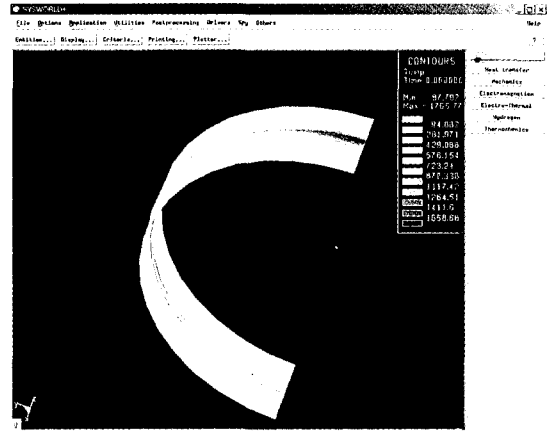
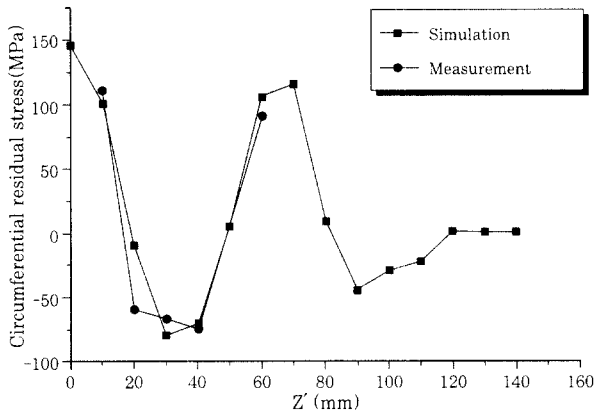


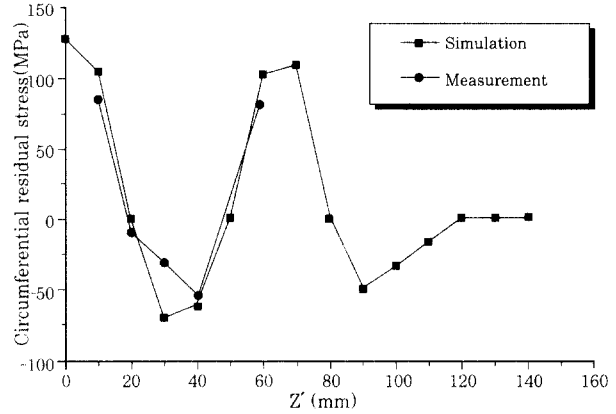
Fig. 8 Temperature distribution of the welded joint

성분 중 그 크기가 가장 큰 강관의 원주 방향 잔류응력을 위주로 하여 분석하였다. 해석 지점은 Fig. 5와 같이 강관의 아래쪽 대칭면의 용접부로 하였으며, 이를 동일 지점에 대한 잔류응력 측정치와 비교하였다.

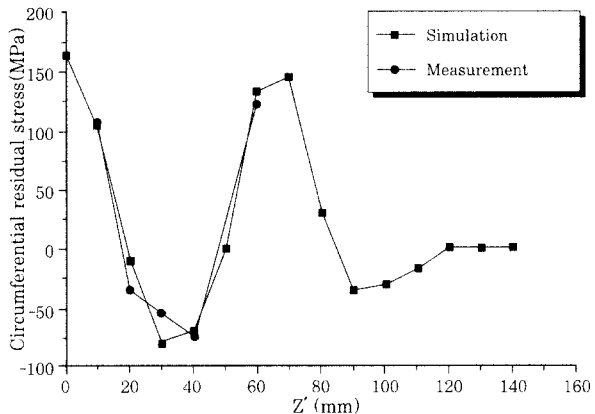
Fig. 9,10은 후열처리 유무에 따른 잔류응력의 해석 결과와 측정 결과를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 해석 결과와 측정 결과는 각 지점에서 응력값이 거의 일치하고 있으며, 외부 용접부와 내부 용접부 지점에서의 인장응력이 분포하고, 그리고 양쪽 용접부 근처에서의 압축 응력이 분포하는 경향 또한 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다. 해석 결과와 측정 결과 모두 외부 및 내부 용접부(0mm 및 70mm 지점)에서 각각 인장 응력의 최대치가 발생하고 있으며, 양쪽 용접부와 근접한 부분에서는 압축 응력이 발생하였다. 해석에서 내부용접 완료 후 외부용접을 실시하였다고 가정하였으므로 외부용접부의 인장응력이 내부용접부의 인장응력보다 크게 나타났다. 이는 내부 용접부 근처에 잔류하고 있던 응력이 외부 용접부를 용접함에 따라 온도가 동반 상승되어 어닐링(annealing) 효과에 의해 응력값이 감소한 것으로 파악된다. Fig. 9에서 Fig. 10까지 나타나듯이 용접부 인장응력의 최대치는 후열처리를 하지 않았을 경우 용접시의 외기온도가 20°C일 때 150MPa, -15°C일 때 165MPa 정도의 분포를 나타내고 있으며, 후열처리를 하였을 경우 각각 130MPa, 150MPa 정도의 분포를 보이고 있다. 즉, 용접시의 외기온도가 낮을수록 인장응력의 최대치가 증가하고, 후열처리를 실시한 경우가 실시하지 않은 경우보다 인장 응력이 소폭 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 용접시의 외기온도가 낮을수록 용접부와 모재간의 온도차이가 증가하므로, 이에 따라 발생한 열팽창 및 수축에 의해 응력값의 크기가 커지고, 또한 냉각속도도 보다 빨라지는 영향으로 사료된다.



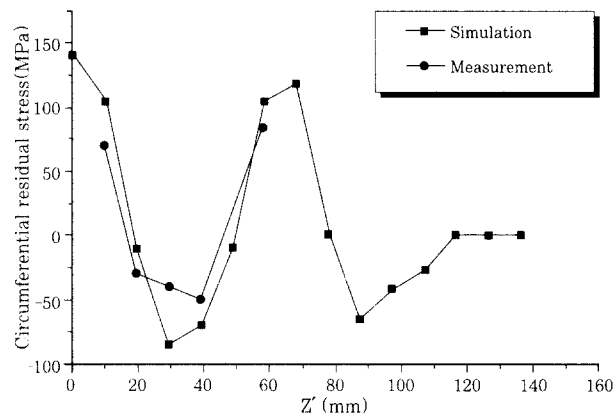
(a)Welded at 20°C atmosphere



(a)Welded at 20°C atmosphere



(b)Welded at 15°C atmosphere



(b)Welded at 15°C atmosphere

Fig. 9 Circumferential stress of welded joint without PWHT

Fig. 10 Circumferential stress of welded joint with PWHT

또한 후열처리를 실시한 경우 모재와 용접부 사이의 온도 차이를 감소시키므로, 인장응력의 최대치가 감소한다고 유추할 수 있다. 그러나 수도 강관에 사용한 모재인 SS400의 항복 강도가 약 300MPa, 파괴 강도가 약 400MPa이고, 해석 및 측정오차가 존재할 수 있음을 고려할 때 후열처리는 수도 강관의 용접 잔류응력의 변화에 큰 영향을 끼치지 않음을 유추할 수 있다.

### 5. 결 론

상수도용 수도 강관의 용접부에 대하여 3차원 열탄소성 유한요소해석을 이용한 온도 분포 및 잔류응력 분포를 예측하고 이를 실제 측정결과와 비교하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 수도 강관의 용접부에 대하여 3차원 유한요소해석을 이용한 응력 분포 해석 결과와 응력 측정을 병행하여 이를 비교한 결과 실제 측정치와 거의 일치하는 용접부 응력 분포 결과를 얻을 수 있었으며, 이로서 3차원 열탄소성 유한요소해석을 이용한 응력 분포 예측 결과에 대한 타당성을 검증할 수 있었다.

2) 원주방향 잔류응력의 해석결과와 측정결과 모두 내외부의 용접부에서 인장 잔류응력을, 용접부 근처에서 압축 잔류응력이 분포하는 것으로 나타났으며, 용접부의 강도 및 균열 특성에 악영향을 미치는 인장 잔류응력의 크기는 외기온도 및 후열처리 유무에 따라 약 130MPa에서 165MPa 정도의 분포를 나타내었다.

3) 수도 강관의 용접부에 후열처리를 실시한 경우 인장 잔류응력이 소폭 감소하였으나, 모재의 항복강도와 파괴강도와 비교하여 볼 때 후열처리는 큰 효과를 거두지 못하는 것으로 나타났다.

### 후 기

본 연구는 한국수자원공사의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 배강열, 나석주 : 수도용 대형 강관의 용접부 설계 개선에 관한 연구, 대한용접학회지, 9-4(1991), 50-59
2. 김성도, 배강열, 나석주 : 수도용 대형 강관 용접부의 응력분포에

- 미치는 각장의 영향, 대한용접학회지, 10-3(1992), 54-62
3. 수도관 개량을 위한 의사결정시스템 개발, 연구보고서(1995), 한국수자원공사
4. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press(1980), 112-145
5. N. J. Rendler and I. Vigness : Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses, Experimental Mechanics, Dec.(1966), 577-586
6. H. V. Cordiano and V. L. Salerno : Study of Residual Stresses in Linearly Varying Biaxial-Stress Fields, Experimental Mechanics, Jan.(1969), 17-24
7. H. P. Wang : The Alignment Error of the Hole-drilling Method, Experimental Mechanics, Jan.(1979), 23-27
8. S. Matsubashi, M. Sakano, Y. Fujisaki and T. Nishimura : Measurement of Residual Stresses by the Blind Hole Drilling Method, Technical Report, Tokyo Institute of Technology, No. 26(1980), 21-37