

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

- 복합외부하중 및 후열처리에 따른 용접부의 응력분포 특성 -

윤석환\* · 이승기\* · 나석주\* · 고명환\*\*

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*한국수자원공사 품질관리실

### A Study on the Stress Distribution of Steel Water Pipes(II) - Characteristics of Stress Distribution by External Forces and 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

One of the major characteristics that affects the life of welded steel water pipes 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 the results on the stress distributions by welding and complex external forces are rare, because real water pipes operate under the ground and many kinds of external forces act simultaneously on the joints. To understand the complex stress distributions of welded joints, therefore predictions by numerical or analytic methods are required.

In this study, temperature and stress distributions in steel water pipes produced by welding are predicted by a three-dimensional finite element method(FEM). Based on these results, stress distributions by welding and complex external forces are evaluated by adopting the same numerical method. The influence of some post weld heat treatments on residual stress distributions is also investigated.

(Received December 12, 2000)

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

#### 1. 서 론

통상적으로 시공되고 있는 대형 수도 강관의 접합은 주로 관의 한쪽 끝단에 강제적으로 소성변형을 일으켜 확장시킨 후 다른 관을 끼워 맞추고 내부와 외부 용접부에 필릿 용접을 실시하게 된다<sup>1)</sup>. 이러한 공정을 거쳐 땅 속에서 실제 작동하는 수도 강관의 용접부에는 일반적으로 용접시 생성된 잔류응력 외에도 각종 외부 하중들, 즉 토압, 수압, 지상에 정지하고 있는 가옥이

나 차량의 하중 등과 같은 여러 힘이 작용하게 된다. 따라서 수도 강관의 용접부에는 이러한 외부 하중들이 작용하여 생기는 응력과 용접시에 생성된 잔류응력이 합쳐져 복합적인 응력 분포가 생성된다.

잔류응력과 외부 하중들이 합쳐진 이러한 복합적 응력 상태는 용접부 및 열영향부에 균열 생성, 강도 저하 등 많은 문제점들을 야기하므로 용접시 잔류응력을 제거 또는 감소시키기 위한 연구와 함께 잔류응력 및 복합적인 외부하중에 의한 응력 분포 상태를 정확히 파악하여 용접부에 미치는 영향을 조사하는 등의 연구가

필요하다. 그러나 수도 강관의 경우 잔류응력의 측정이 복잡하고, 또한 실제 땅속에서 외부 하중들이 동시에 작용하는 수도 강관에 나타나는 용접 잔류응력 및 복합적인 응력의 측정은 대단히 어렵기 때문에 이에 대한 연구는 거의 이루어져 있지 않고, 주로 강관의 용접시에 발생하는 잔류응력에 대해서 그 연구 범위가 국한되어져 왔다<sup>2,3)</sup>.

본 연구에서는 선행 연구에 의해 그 타당성이 검증된 유한요소 모델을 이용한 3차원 열탄소성 및 점소성 해석으로 땅속에 매설된 수도 강관에 용접시의 잔류응력 및 토압과 수압, 지상의 하중, 그리고 용접시의 외기 온도에 의한 열팽창 및 수축 등으로 인하여 형성되는 복합적인 응력상태를 해석하고, 또한 잔류응력 제거방법으로 널리 알려져 있는 후열처리 유무에 따라 해석을 실시하여 수도 강관에서의 종합적인 응력 분포 특징을 연구하였다<sup>4)</sup>. 또한, 일반적인 3축 응력 하에서 구조물의 안정성을 판단할 때 사용되는 미세스의 항복조건(von Mises yield criterion)을 이용한 최대 상당 응력(maximum equivalent stress)을 각 조건에서 계산하여 이를 모재의 항복응력과 비교함으로써 하중상태 하에서의 수도 강관의 안전성을 조사하였다<sup>5)</sup>.

## 2. 수도 강관의 응력 분포 해석

### 2.1 해석 영역 및 해석 조건

강관의 용접부에 분포하는 응력 상태를 해석하기 위하여, Fig. 1과 같은 강관의 모델을 해석 영역으로 선정하였다. 해석 영역은 좌우 대칭이므로 한쪽 부분을 취하였으며, 접합부의 세부 치수는 실제 시공되는 수도 강관의 접합부와 동일하게 모델링하였다. 강관의 외경은 2200mm, 길이 500mm, 두께는 19mm로 하였으며 모재는 저탄소강인 SS400을 사용하였다. SS400의 화학 성분 및 기계적 성질을 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. 용접 방법은 수도 강관의 현장 용접에서 널리 쓰이고 있는 수용접 방법인 피복 아크 용접(SMAW)으로 가정하였다.

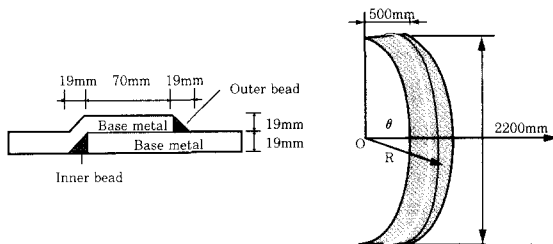


Fig. 1 Modeled structure and dimensions of a steel water pipe

Table 1 Chemical composition of SS400(wt%)

	C	Si	Mn	P	S
SS400	0.15	0.25	0.58	0.012	0.01

Table 2 Mechanical properties of SS400

	Tensile strength	Yield strength	% Elongation (in 50mm.)
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
SS400	402	300	18

용접 순서는 내부 용접을 실시한 후 냉각시킨 뒤 외부 용접을 실시하였다고 가정하였고, 모재가 후판이므로 내외부 용접 모두 각각 3 패스로 하였으며, 3 패스의 표현은 용접부 비드를 따라 열원을 세 번 이동시키는 것으로 표현하였다. 용접 전류는 210A, 용접전압은 24V, 용접 속도는 5mm/sec로 지정하였다. 또한 용접의 진행 방향은 강관 둘레의 밑에서부터 위로 진행하는 상진 방향을 택하였다. 그밖에 용접시의 외기 온도를 각각 20°C, 0°C, -15°C로 구분하고 각각에 대한 후열처리 유무에 따라 열탄소성 해석을 진행하였다. 후열 처리는 용접부 전체를 650°C로 균일하게 가열하여 15분 경과 후 공기 중에서 천천히 냉각시키는 것으로 가정하였다.

모재인 SS400의 열전도도, 비열 및 밀도는 온도의 함수로 표현하였으며, 온도에 따른 변화값은 제 1보의 내용과 동일하다. 그 밖에 용접시 열원은 다음과 같은 정규 분포를 가지는 열원으로 표현하였다.

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi \bar{r}^2} \exp \left\{ -3 \left( \frac{r}{\bar{r}} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

여기서 q(r)은 아크 중심으로부터 거리 r 지점에서의 열속(heat flux)이고,  $\bar{r}$ 는 아크의 유효반경이며, Q는 용접부로 전달되는 열량을 나타낸다. 위의 조건을 이용한 3차원 유한요소 해석은 해석 패키지인 SYSWELD+를 사용하였다.

### 2.2 외부 하중

2.1절에서 고려한 용접시의 조건 외에 경계조건으로 고려된 수도 강관의 내외면에 가해지는 하중들을 정리하여 보면, 관의 외부표면의 윗부분에서는 토압과 지상의 하중에 의한 힘이 작용하고 있으며, 관 내부에서는 수압과 같은 내부 압력이 작용한다. 그리고 강관의 자중 또한 고려되어야 하며, 관의 밑부분에서는 이러한 하중 하에서 발생할 수 있는 반력이 고려되어야 하

는데, 이 때 반력은 힘의 평형 조건식으로부터 얻을 수 있다. 수도 강관에 작용하는 힘들을 좀 더 상세히 고찰해 보면 다음과 같다.

2.2.1 토압

Fig. 2(a)와 같이 수도 강관 위를 덮고 있는 토양에 의한 압력, 즉 토압은 다음 식으로 나타낼 수 있다<sup>6)</sup>.

$$P_e = \gamma_e h \tag{2}$$

여기서,  $\gamma_e$ 는 토양의 비중량으로서 일반적으로  $16.5\text{kN/m}^3$ 으로 볼 수 있다.

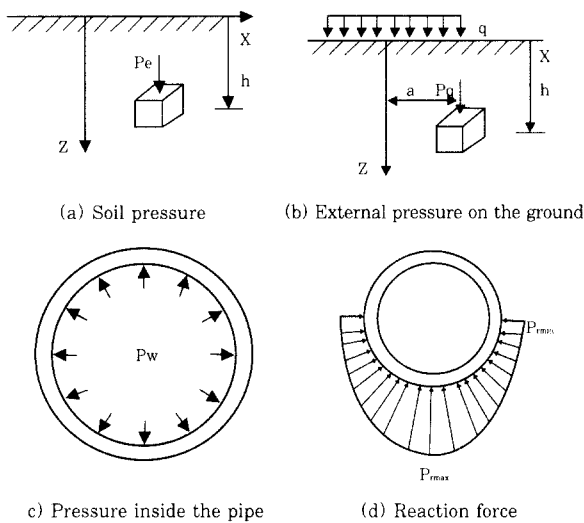


Fig. 2 Various forces acting on a pipe

2.2.2 균일분포하중에 의한 압력

수도 강관이 매설되어 있는 곳의 지상에는 가옥이나 차량, 혹은 기타 하중을 지닌 물체가 존재하는 것이 보통이며, 이 효과를 고려하기 위하여 대형 차량이나 철근과 같은 1차원 하중을 가정하였다<sup>3)</sup>. Fig. 2(b)와 같이 길이가 10m이며, 하중이 20ton인 물체가 강관의 방향과 직각 방향으로 지상에서 정지하고 있다면  $q = 2 \text{ ton/m}$  이다. 그리고, 이러한 균일분포하중에 의해 강관의 표면에 가해지는 압력은 다음과 같다.

$$P_q = \frac{2qh^3}{\pi(a^2+h^2)^2} \tag{3}$$

2.2.3 송수관 내부압력

실제 작동하고 있는 수도 강관의 내부에는 항상 수압이 작용하게 된다. 그러나, 수압은 장소 및 시간에 따라 수시로 변하는 값이므로, 본 연구에서는 용접이 끝난 후 강관 용접부의 기밀성을 확인하기 위하여 관내

에 산소를 주입하여 시행하는 산소 압축 시험의 압력인 15kPa의 압력을 Fig. 2(c)와 같이 강관 내부의 압력으로서 고려하였다.

2.2.4 반력

반력의 분포를 Fig. 2(d)와 같이 가정하였는데, 이 때 반력의 크기는 앞에서 언급한 토압, 지상의 하중 그리고 자중에 의한 힘의 합력과의 평형을 고려하여 다음과 같이 계산하였다. 최소 반력은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_{r\text{MIN}} = K(P_e + P_q) \tag{4}$$

여기서, 사질토의 경우,  $K = 1 - \sin\phi$ ,  $\phi \cong 30^\circ \sim 38^\circ$ 로 알려져 있는데, 본 연구에서는  $\phi = 30^\circ$ 로 선정하였다<sup>6)</sup>.

힘의 평형관계에서 강관에 작용하는 압력과 반력의 관계는 다음 (5)식과 같다.

$$\int P_r dA = (P_e + P_q)RL \tag{5}$$

여기서 dA는 반력이 작용하는 면적, R은 강관의 반경, L은 강관의 길이이다. 반력분포는 그 분포가 선형적이라고 가정하면 임의의 깊이 r에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = (P_{r\text{MIN}} - P_{r\text{MAX}}) r/R + P_{r\text{MAX}} \tag{6}$$

(6)식을 (5)식에 대입하면 다음 (7)식의 관계를 얻을 수 있다.

$$(P_{r\text{MIN}} + P_{r\text{MAX}})R \cdot \frac{L}{2} = (P_e + P_q)R \cdot L \tag{7}$$

(7)식에서 최대 반력을 구하면 (8)식과 같이 표현된다.

$$P_{r\text{MAX}} = \frac{3}{2} (P_e + P_q) \tag{8}$$

따라서 (8)식을 이용하면 (6),(7)식을 이용하여 임의의 위치 r에서의 반력을 구할 수 있다.

2.3 후열 처리 및 기타 해석조건

후열 처리는 용접부의 잔류 응력을 완화시키기 위하여 실시되는 보편적인 방법으로 알려져 있다. 후열은 용접부의 냉각속도를 완만히 하며 확산성 수소를 외부에 발산시켜 균열의 발생을 방지한다. 또한 온도분포

의 차이를 줄여 잔류응력 분포를 평탄하게 한다. 또한 용접부 및 열영향부의 금속조직, 기계적 성질을 모재에 가깝게 하는 효과가 있으며, 경도의 저하, 연성 및 인성의 향상, 조직의 안정성 향상을 통하여 저응력 파괴, 내식성, 크리프 성능의 향상을 꾀할 수 있는 방법이다<sup>7)</sup>.

후열처리는 용접균열의 감수성이 높은 고장력강이나 합금강에 주로 적용하는 것이 보통이나, 본 연구에서는 저탄소강의 용접 후 후열처리에 따라 복합 하중 하에서의 응력감소에 대한 실효성을 조사하기 위하여 후열처리의 유무를 해석 변수에 포함하여 해석을 시도하였다. 사용한 후열 조건은 강관 용접부 전체를 650°C로 15분에 걸쳐 균일하게 가열하여 650°C를 유지하면서 15분 경과 후 대기 중에서 천천히 냉각시키는 것으로 가정하였다.

미시적 관점에서 전위의 재분포에 의한 풀림에 따른 후열 효과를 고려하기 위하여, 다음과 같은 크립 변형률(creep strain)을 고려하였다.

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

$$\dot{\alpha} = H\dot{\epsilon} - (\frac{3}{2})^{P-1} C\alpha^P \tag{9b}$$

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.

마지막으로, 용접 품질 및 응력 분포에 영향을 미치는 인자 중 하나인 용접시의 외기온도를 해석 변수에 포함하였다. 용접을 실시함에 있어서 외기온도는 결과에 큰 영향을 미치지 않는다고 알려져 있으나 외기온도가 지나치게 낮을 경우 용접시에 큰 온도차가 발생하고 냉각속도가 빨라지는 등의 단점이 있어 대부분의 국내 및 해외 용접 시공 규격에는 일정 온도 이하에서의 용접을 금지하거나 예열 및 후열처리의 조건 하에 부분적으로 허용하고 있다. 따라서, 용접시의 외기 온도가 응력 분포에 미치는 영향을 조사하기 위하여 본 연구에서는 용접시의 외기 온도를 20°C, 0°C, -15°C로 구분하여 해석을 실시하여 수치를 비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구는 내외부에 복합 하중이 작용하고 있는 수도

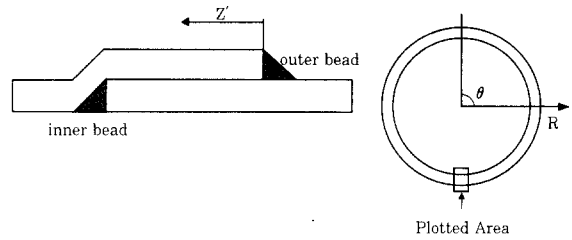


Fig. 3 Selected regions for simulation

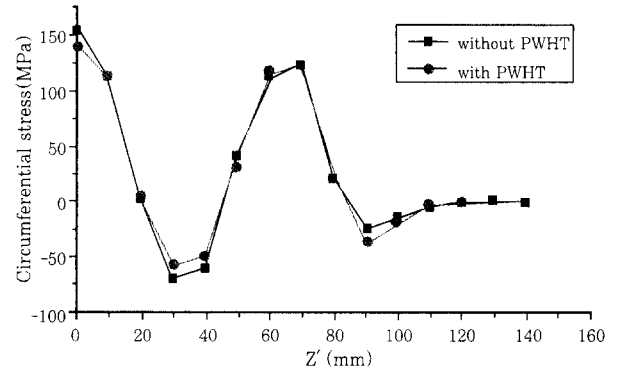


Fig. 4 Simulated circumferential stresses welded at 20°C considering external force

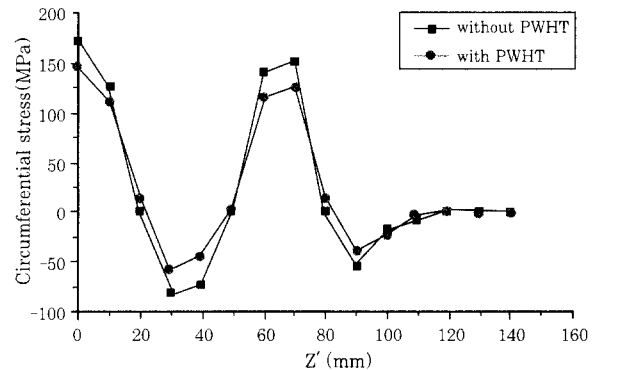


Fig. 5 Simulated circumferential stresses welded at 0°C considering external force

강관의 응력 분포를 수치해석을 통하여 예측하는데 그 목적이 있다. 먼저, Fig. 4에서 Fig. 6까지는 용접시의 외기온도가 각각 20°C, 0°C, -15°C일 때의 후열처리 유무에 따른 용접부의 응력분포 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3과 같이 강관의 아래쪽 대칭면 용접부를 선정하여 Z'축을 따라 응력 분포를 계산하였다. 해석 결과 외부 및 내부 용접부(0mm 및 70mm 지점)에서 각각 인장 응력의 최대치가 발생하고 있으며, 양쪽 용접부와 근접한 부분에서는 압축 응력이 발생하였다. 전체적인 인장응력과 압축응력의 분포 곡선은 외부 하중이 작용하고 있지 않을 때의 분포와 유사한 것을 알 수 있으며, 이는 외부 하중에 따라 용접부의 응력 분포 양상이 크게 변화하지 않는 것을 의미한다.

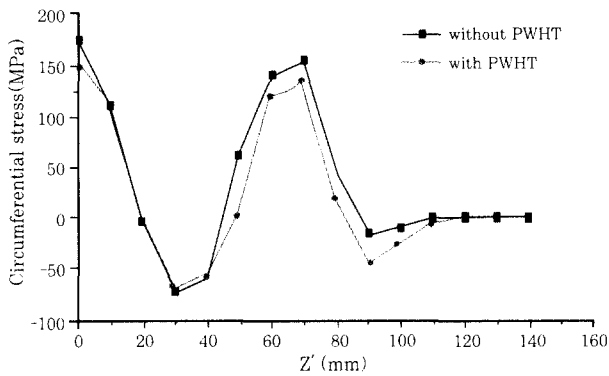


Fig. 6 Simulated circumferential stresses welded at 15°C considering external force

그림에서 알 수 있듯이 용접부 인장응력의 최대치는 후열처리를 하였을 경우 용접시의 외기온도가 20°C일 때 140MPa, 0°C일 때 145MPa, -15°C일 때 150MPa 정도의 분포를 나타내고 있으며, 후열처리를 하지 않았을 경우 각각 160MPa, 170MPa, 175MPa 정도의 분포를 보이고 있다. 즉, 후열처리를 실시할 경우 최대 인장 응력이 모두 소폭 감소한 것으로 나타났다. 또한 후열처리를 실시하면 인장응력과 함께 압축응력도 함께 감소하여 용접부에서의 최대응력과 최소응력의 차이가 감소하고 있다. 이는 용접시의 외기온도가 낮을수록 용접부와 모재간의 온도차이가 증가하므로, 이에 따라 발생한 열팽창 및 수축에 의해 응력값의 크기가 커지는 것으로 설명할 수 있으며, 후열처리를 실시한 경우 모재와 용접부 사이의 온도차이를 감소시키므로 인장응력의 최대치가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 용접시의 외기온도와 후열처리 유무에 따른 최대 인장응력의 변화를 비교하여 나타낸 그림이다. 용접시의 외기온도가 20°C일 때 후열처리를 실시함으로써 약 20MPa 정도의 응력 감소 효과가 나타났으나, 외기온도가 0°C 및 -15°C일 때는 후열처리에 의해 약 25MPa 정도의 응력 감소 효과가 나타났다.

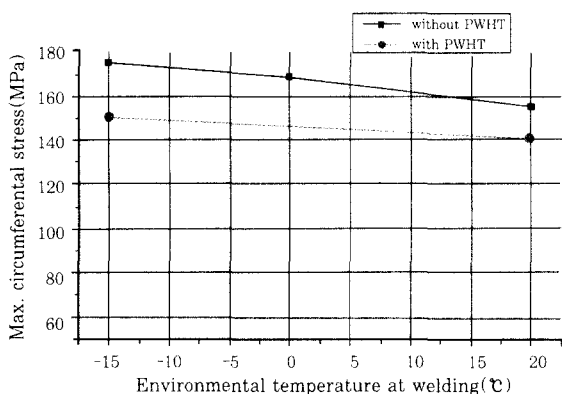


Fig. 7 Predicted maximum circumferential stress

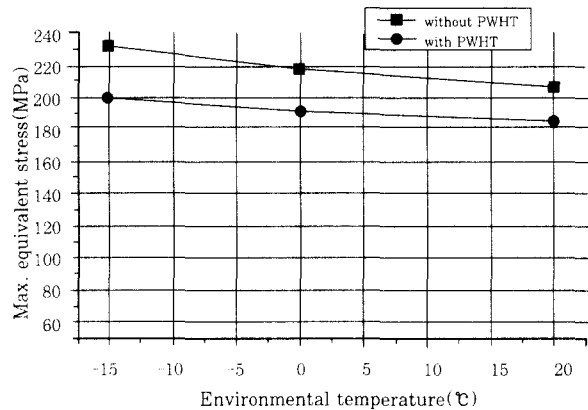


Fig. 8 Predicted maximum equivalent stress

이는 후열처리의 효과가 용접시의 외기온도가 낮을수록 더 크게 나타나는 것을 의미하며, 후열처리가 용접 후에 모재의 온도차이 및 냉각속도를 감소시키고 있음을 의미하는 결과이다.

Fig. 8은 해석을 수행한 각 경우에 대하여 계산된 최대 상당응력(maximum equivalent stress)의 크기를 나타낸 것이다. 최대 상당응력이란 von Mises의 항복조건식, 즉

$$(\sigma^1 - \sigma^2)^2 + (\sigma^2 - \sigma^3)^2 + (\sigma^3 - \sigma^1)^2 = 2\bar{\sigma}^2 \quad (9)$$

에서의 상당응력  $\bar{\sigma}$ 의 최대치를 의미한다. Fig. 8에서 보듯이 후열을 실시하지 않은 경우 용접시의 외기온도 20°C, 0°C, -15°C에서 최대 상당응력은 각각 205MPa, 220MPa, 230MPa 정도이고, 후열을 실시하였을 경우에는 각각 185MPa, 190MPa, 200MPa 정도의 분포를 나타내었다. 용접시의 외기온도가 낮을수록, 그리고 후열을 실시하지 않았을 때 최대 상당응력이 커지는 경향은 Fig.6의 용접부 인장응력의 경향과 일치한다. 해석을 통해 구해진 von Mises 조건에 의한 최대 상당응력은 외기온도 및 후열 유무의 조건에 따라 185MPa에서 230MPa 정도의 값을 가지며 이는 모재인 SS400의 항복강도인 300MPa 및 파괴강도인 400MPa에는 크게 못 미치는 수치임을 알 수 있다. 따라서, 후열 자체는 용접부의 잔류응력을 소폭 완화시키는 것으로 확인되었지만 모재가 저탄소강이라는 점과, 응력 상태에 의한 구조물의 안전성 측면에서 판단해 볼 때 결정적인 역할을 하지 않는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

강관에 미치는 복합적인 외부 하중들을 고려하여 강관의 3차원 응력 분포를 최종적으로 예측하였으며, 용접부에 대한 후열실시 유무와 용접시의 외기온도에 따

라 해석 조건을 변화시켜 가면서 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 복합적인 외부 하중이 가해지는 수도 강관의 용접부에 대하여 3차원 유한요소해석을 수행하여 용접부의 잔류응력 분포 결과를 얻을 수 있었으며, 인장 잔류응력의 크기는 용접시의 외기온도 및 후열처리 유무에 따라 약 140MPa에서 175MPa 정도의 분포를 나타내었다. 외부 하중이 가해짐에 따라 인장 잔류응력 크기도 조금씩 증가하지만 전체적인 응력 분포 양상은 변화하지 않았다.

2) Von Mises 조건에 의한 최대 상당응력은 각 조건에 따라 185MPa에서 230MPa의 분포를 나타내었다. 최대 상당응력 역시 용접부의 인장 잔류응력과 마찬가지로 용접시의 외기온도가 낮을수록, 그리고 후열을 하지 않았을 경우에 보다 큰 값이 나타남을 알 수 있었다. 그러나 위와 같은 최대 상당응력값은 모재인 SS400의 인장강도(400MPa)와 항복강도(300MPa)와 비교해 볼 때 작은 값으로서 후열처리는 실제 용접부의 안전성에 결정적인 영향을 미치지 않는다고 결론지을 수 있다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

1. 상수도공사 표준시방서, 한국수도협회, 1998
2. 배강열, 나석주 : 수도용 대형 강관의 용접부 설계 개선에 관한 연구, 대한용접학회지, 9-4(1991), 50-59
3. 김성도, 배강열, 나석주 : 수도용 대형 강관 용접부의 응력분포에 미치는 각장의 영향, 대한용접학회지, 10-3(1992), 54-62
4. 윤석환, 이승기, 나석주, 고명환 : 상수도용 도복장강관의 용접 및 외부하중에 의한 응력 특성에 관한 연구(I), 대한용접학회지, 투고중
5. A.P. Boresi, R.J. Schmidt and O.M. Sidebottom : Advanced Mechanics of Materials, John Willey & Sons, 5th Ed., 1992, 133-140
6. 박성재 : 토질 역학, 샤론 출판사, 1987
7. 용접·접합 편람, 대한용접학회, 1998, 403-409