

## 원주 용접된 압력 매설강관의 거동 분석

# Behavior of girth-welded buried steel pipes under external pressure

Juntai Jeon<sup>a,\*</sup>, Chinhyung Lee<sup>b,1</sup>, Kyongho Chang<sup>c,2</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil & Environmental Engineering, Inha Technical College, 100, Inharo, Nam-Gu, Incheon 402-752, Republic of Korea

<sup>b</sup> The Graduate School of Construction Engineering, Chung-Ang University, 84, Huksuk-ro, Dongjak-ku, Seoul 156-756, Republic of Korea

<sup>c</sup> Department of Civil and Environmental & Plant Engineering, Chung-Ang University, 84, Huksuk-ro, Dongjak-ku, Seoul 156-756, Republic of Korea

### ABSTRACT

This paper presents finite element (FE) analyses to clarify the effects of external pressure on the residual stresses in a girth-welded steel pipe. At first, FE simulation of the girth welding process is carried out to obtain the weld-induced residual stresses employing sequentially coupled three-dimensional (3-D) thermo-mechanical FE formulation. Then, 3-D elastic-plastic FE analyses incorporating the residual stresses and plastic strains obtained from the preceding FE simulation are performed to investigate the residual stress behavior in the girth-welded pipe under external pressure. The FE analysis results show that the hoop compressive stresses induced by the external pressure significantly alter the hoop residual stresses in the course of the mechanical loading.

### KEYWORDS

Girth-welded steel pipe  
Weld-induced residual stresses  
Residual stress behavior  
External pressure  
Three-dimensional finite element analysis

본 연구에서는 토압 등의 외압이 원주 용접된 매설 강관의 잔류응력에 미치는 영향을 유한 요소 해석을 통하여 명확히 하였다. 먼저 3차원 열탄소성 해석을 통하여 원주 용접된 강관의 잔류응력을 구하였으며, 이를 초기조건으로 설정하여 3차원 탄소성 해석을 수행함으로써 외압이 작용하는 경우 잔류응력 거동을 조사하였다. 해석결과 외압에 의해 원주 용접부에 발생하는 원주방향 압축응력 때문에 원주방향 잔류응력이 압축 측으로 상당히 많이 이동함을 알 수 있었고, 축방향 잔류응력은 작용하는 외압에 의해 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

원주 용접 강관  
잔류응력  
외압  
잔류응력 거동  
3차원 유한요소  
해석

© 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

\* Corresponding author. Tel. 82-32-870-2235. Fax. 82-32-870-2510.

Email. jtjeon@inhac.ac.kr

1 Tel. 82-2-820-6878. Email. ifinder@cau.ac.kr

2 Tel. 82-2-820-5337. Email. changkor@cau.ac.kr

### ARTICLE HISTORY

Received Nov. 10, 2014

Revised Nov. 13, 2014

Accepted Dec. 02, 2014

## 1. 서론

플랜트의 배관설비, 도시 상하수도, 기초 말뚝 등 강관 부재는 그 쓰임새가 다양하며 지중 구조물의 많은 부분을 차지하고 있다. 강관부재는 두께나 관경에 비해 상대적으로 길이가 긴 구조물이므로, 강관의 접합은 반드시 필요하다. 강관의 접합은 대부분 용접에 의해 이루어지며 용접 시에는 필연적으로 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력은 구조물의 거동에 악영향을 미칠 수 있는데, 특히 용접부 인근에 발생하는 인장 잔류응력은 응력집중, 피로손상 및 취성과 파괴 등을 야기시킬 수 있다 (Withers, 2007). 또한, 용접잔류응력은 사용하중과 결합하여 강관의 강성 및 내하력 저하를 일으킬 수 있다 (장경호 등, 2002). 실제로 지반에 매설된 강관은 흙의 자중, 교통하중, land sliding, 지진, 충격하중 등으로 인하여 파손과 손상이 일어나서 문제가 되기도 하는데, 공통적으로 접합부에서 대부분이 발생하고 있다. 따라서 강관 용접부의 잔류응력 및 외압과 같은 외력이 작용하는 경우 잔류응력의 거동을 파악하는 것은 대단히 중요하다. 하지만 용접 공정 중에 수반되는 국부 가열, 조직학상의 상변태, 재료 정수의 온도의존성, 이동열원 등과 같은 복잡성으로 인해 용접부의 잔류응력을 정확히 예측하기는 매우 힘들다. 따라서 유한요소법과 같은 수치해석 방법이 잔류응력의 크기 및 분포 특성 그리고 생성 메커니즘을 규명하는데 많이 사용되어 왔다 (Goldak et al., 2005; Lindgren, 2001).

현재까지 원주 용접된 강관에 발생하는 잔류응력 예측에 관한 연구는 상당히 많이 이루어져 왔다 (Brickstad and Josefson, 1998; Mochizuki et al., 2000; Yaghi et al., 2006). 하지만 이 연구의 대부분이 해석상의 제약 등으로 인해 축대칭 요소를 사용하여 잔류응력을 구하였다. 축대칭 요소는 본질적으로 원주 용접을 시뮬레이션 하기에는 부적절하다. 따라서 실제 원주 용접을 모사할 수 있는 3차원 유한요소 해석이 반드시 필요하다. 그러나 3차원 유한요소 해석을 이용한 강관 용접부의 잔류응력 규명에 관한 연구는 해석상의 어려움 등으로 인해 드물게 수행되어 왔으며 (양성철, 2002; 장경호 등, 2001; Deng and Murakawa, 2006; Duranton et al., 2004), 잔류응력이 존재하는 강관에 외력이 작용하는 경우 잔류응력의 거동에 관한 연구는 극히 미미하다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용한 3차원 열탄소성 해석을 수행하여 원주 용접된 강관에 발생하는 잔류응력을 파악하였고, 잔류응력이 작용하는 강관에 토압과 같은 외압이 작용하는 경우 강관의 잔류응력 거동을 조사하였다.

## 2. 원주 용접된 강관의 잔류응력 해석

용접에 의한 잔류응력을 정확히 해석하기 위해서는 온도 분포를 시간에 대한 함수로 구할 수 있는 열 해석과 열 해석으로부터 구한 온도이력을 이용하여 응력을 구할 수 있는 역학적 해석이 필요하다. 온도 영역은 응력장에 큰 영향을 미치지만 응력장은 온도 이력에 미미한 영향을 주므로 순차적인 연계해석이 이용된다. 따라서 본 연구에서는 열 해석에서 응력 해석으로 순차적으로 연계된 3차원 열탄소성 유한요소 해석을 수행하여 원주 용접된 강관의 잔류응력을 모사하였다.

### 2.1 열전달 및 응력 해석

용접시 용접부의 가열과 냉각에 의해 발생하는 온도 분포 및 이력은 이동열원을 고려한 3차원 비정상 열전달 해석을 수행하여 구할 수 있으며 그 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 온도,  $K$ 는 열전도율,  $c$ 는 비열,  $\rho$ 는 밀도이고  $Q$ 는 단위 체적당 이동 입열량이다. 입열은 표면입열과 체적입열을 동시에 고려하였으며 (Deng et al., 2007), 재료가 가지는 물리상수의 온도의존성을 고려하였다. 경계조건은 온도 의존성을 가지는 열전달 계수를 이용하여 대류 및 복사 등을 구현하였다 (Abid and Siddique, 2005).

열전달 해석으로부터 계산된 온도이력을 온도하중으로 도입하여 탄소성 유한요소 해석을 수행하여 잔류응력을 구하였다. 본 연구에 사용된 강관과 같은 마일드 탄소강의 경우에는 용접시 발생하는 상변태에 의한 영향을 무시할 수 있으

므로 다음과 같이 변형률 증분을 표시할 수 있다.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + d\epsilon_{ij}^{th} \tag{2}$$

탄성 변형률 증분은 후크의 법칙을 이용하여 구하였으며, 열 변형률 증분은 선팽창 계수를 이용하여 계산하였다. 소성 변형률 증분 계산을 위해서 미세스 항복 이론 및 온도 의존성을 가지는 기계적 제성질과 선형 변형률 경화를 이용하여 구성식을 마련하였다. 응력-변형률 관계식은 증분형으로 다음 식처럼 쓸 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D_d]\{d\epsilon\} - \{c_t\}dT \tag{3}$$

여기서  $[D_d]$ 는 응력-변형률 매트릭스로서 탄성의 경우에는  $[D_d^e]$ , 소성의 경우에는  $[D_d^p]$ 로 분리된다.  $\{c_t\}$ 는 재료의 물리적 제성질의 온도의존성을 고려한 응력증분에서의 영향을 나타낸다.

### 2.2 해석방법의 타당성 검증

본 연구에서 사용된 해석기법의 타당성을 검증하기 위해서 기존의 실험결과 (엄동석 등, 1997)와 해석결과를 비교하였다. 기존의 실험은 300mm (외경) × 300mm (길이) × 7mm (두께)의 원통형 강관을 1 패스 용접했을 경우 발생하는 잔류응력 측정에 관한 것이다. 실험결과와의 직접적인 비교를 위해 똑같은 형상 및 용접조건을 상정하여 전술된 열탄소성 해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 결과는 용접시작점으로부터 120° 떨어진 위치의 내측에 작용하는 원주방향 잔류응력과 축방향 잔류응력을 나타낸 것이다. 결과를 보면 수치해석에 의한 축방향 및 원주방향 잔류응력의 크기와 분포가 측정치와 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 해석기법은 강관의 원주용접시 발생하는 잔류응력을 해석하는데 적절하다고 사료된다.

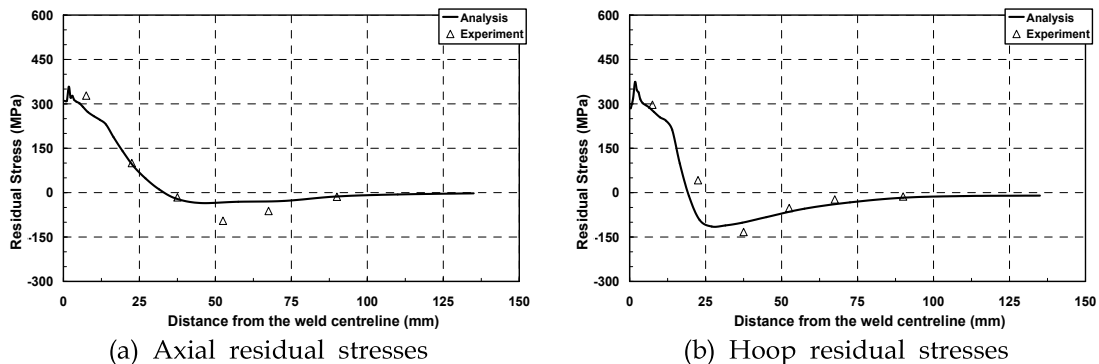


Fig. 1. Comparisons of the FE analysis results with the experiment

### 2.3 해석모델

본 연구에서 사용된 해석모델은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 180mm (외경) × 180mm (길이) × 6mm (두께)의 두 강관을 FCA (Flux Cored Arc) 용접방법으로 1 패스 용접하는 것으로 상정하였다. 용접은 그림에서 화살표로 나타낸 것처럼  $\theta = 0^\circ$  에서 시작해서 같은 지점에서 끝나게 된다. 용접조건은 실제 용접조건을 반영하여 전압 30V, 전류 240A, 용접속도 5 mm/s로 정하였다. 유한요소 모델은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 아이소 파라메타를 이용한 3차원 8절점 육면체 요소를 사용하였으며 용접부는 고입열에 따른 급열과 용접후 급랭에 의한 높은 온도 및 응력차를 고려하여 요소분할을 세밀하게 하였다. 용접선에 대하여 대칭성을 이용하여 반모델로 해석하였으며 응력해석시의 경계조건 역시 Fig. 3에 화살표로 나타내었다. 해석시 사용된 재료는 KS 시방을 따르는 탄소 강관(KS SPSS 420)이며 실험데이터의 부족으로 본 재료의 물

리정수 및 기계적 제성질은 동일한 강도를 가지는 탄소강과 같다고 가정하였다. Fig. 4에 재료의 물리정수 및 기계적 제성질의 온도 의존성을 나타내었다. 그리고 모재와 용접부는 물리적, 기계적 성질이 동일한 재료로 가정하였다.

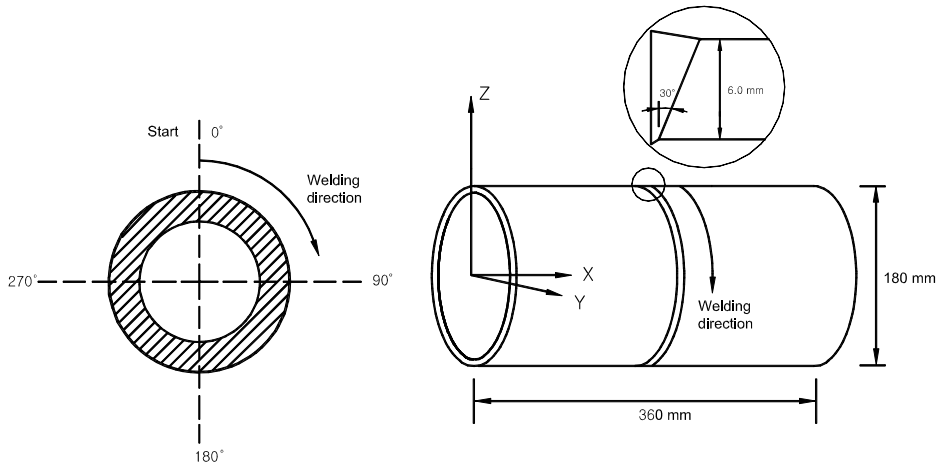


Fig. 2. Dimensions of the analysis model and the welding direction

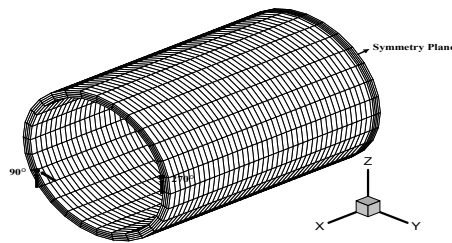


Fig. 3. 3-D FE model

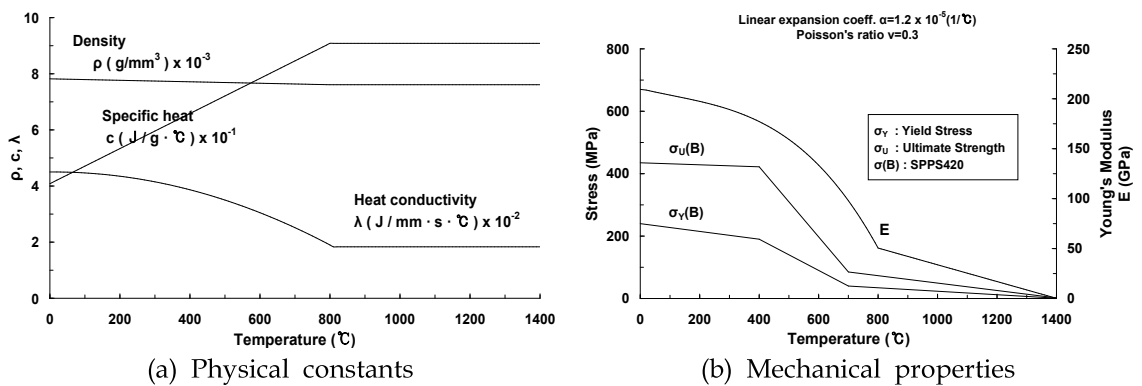


Fig. 4. Temperature-dependent thermal and mechanical properties of the material

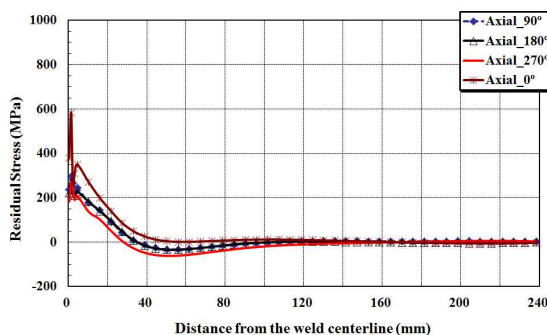
## 2.4 해석결과

원주 용접된 강관에 발생하는 잔류응력의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 원주방향으로의 잔류응력의 변화를 알아보기 위하여 용접 시작점 및 끝점에서 용접방향으로 0°, 90°, 180° 그리고 270° 되는 지점에서의 잔류응력의 분포를 나타내었다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에 내측 및 외측에서의 축방향 잔류응력의 결과를 나타내었다. 결과를 보면 용접부 인근에서 축방향 잔류응력은 내측에서 인장, 외측에서 압축을 보임을 알 수 있다. 박판 강관의 경우에는 용접에 의한 온도분포가 두께 방향으로 동일하므로 열응력을 발생시키는 유일한 변형은 입열시 급격한 팽창 및 냉각시 수축에 의한 원주방향으로의 변형을 뿐이다. 이처럼 냉각시 원주방향으로의 수축은 용접부 인근에서 내부로 오목한 굽힘 변형을 일으키게 되는데, 이 변형으로 인한 휨 모멘트의 발생으로 용접부 근방에서 내측 축방향 잔류응력은 인장이 되고 외측 축방향 잔류응력은 압축이 되는 것이다. 용접부에서 멀리 떨어진 위치에서는 힘의 평형으로 인해 내측에서는 축방향 압축 잔류응력이 발생하고 외측에서는 축방향 인장 잔류응력이 발생하게 된다. 또한, 결과를 보면 원주방향으로의 축방향 잔류응력의 분포가 동일하지 않고 어느 정도 상이함을 알 수 있는데 이것은 원주방향으로의 용접에 의한 내부 구속의 변화 및 용접부 시작점 및 끝점에서의 겹침 효과에 의한 것이다. 원주방향의 잔류응력의 결과를 보면 원주방향의 잔류응력의 크기는 축방향 잔류응력에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그리고 축방향 잔류응력의 결과와 마찬가지로 원주방향으로의 잔류응력의 분포가 동일하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 원주 용접된 강관의 잔류응력을 정확하게 예측하기 위해서는 3차원 유한요소 모델의 적용이 필요하다는 것을 알 수 있다.

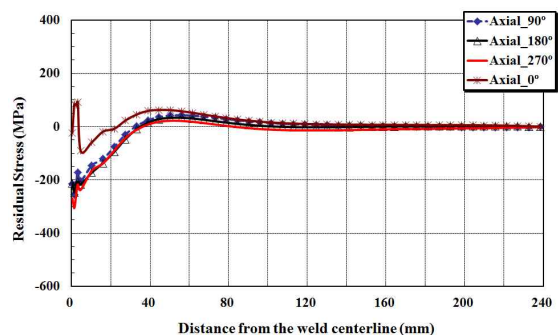
## 3. 외압이 작용하는 원주 용접된 강관의 잔류응력 거동

### 3.1 해석모델

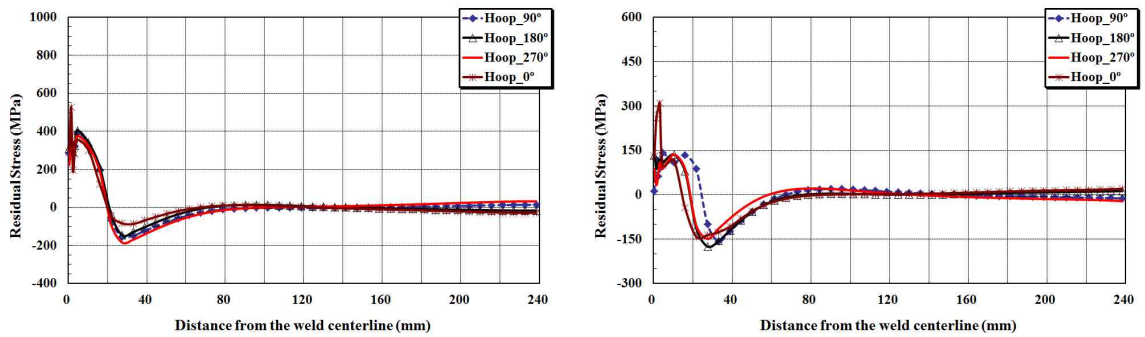
도입과 같은 외압이 작용하는 경우 원주 용접된 강관의 잔류응력 거동을 조사하기 위해서 3차원 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 해석은 기하학적 비선형성과 재료학적 비선형성을 고려하였으며, 잔류응력 해석과 동일한 재료와 해석 모델 및 유한요소 모델을 사용하였다. 잔류응력 해석에서 구한 잔류응력과 소성변형률을 초기치로 유한요소 모델에 투영(mapping)한 후 도입을 가하였다. 도입은 등분포하중의 형태로 원주 용접된 강관의 외부 표면에 작용 하는 것으로 설정하였으며, 최대 크기가  $\sigma_h / \sigma_0 = 0.5$  가 될 때까지 증분형으로 재하 하였다. 여기서  $\sigma_h$ 는 외압에 의해 발생하는 원주방향 응력을 나타내며 그 크기는  $\sigma_h = PD/2t$  이다. 이때  $P$ 는 외압의 크기,  $D$ 는 강관의 직경,  $t$ 는 두께이고  $\sigma_0$ 는 재료의 항복응력이다. 앞서 언급한 바와 같이 모재와 용접부는 물리적, 기계적 성질이 동일한 재료로 가정되었으므로 본 연구에서 사용된 원주 용접된 강관의 거동은 하나의 구성식으로 나타내어 질 수 있다. 강관의 구성식을 위해서 이선형(bilinear) 응력-변형률 관계식을 사용하였다.



(a) Axial residual stresses (inside surface)



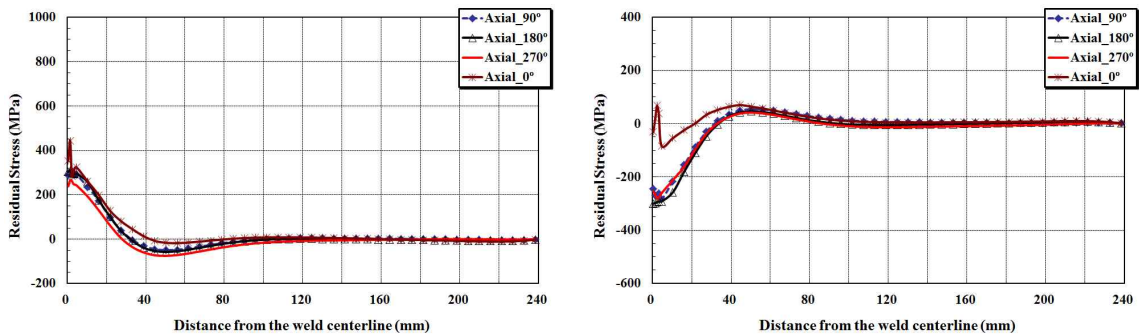
(b) Axial residual stresses (outside surface)



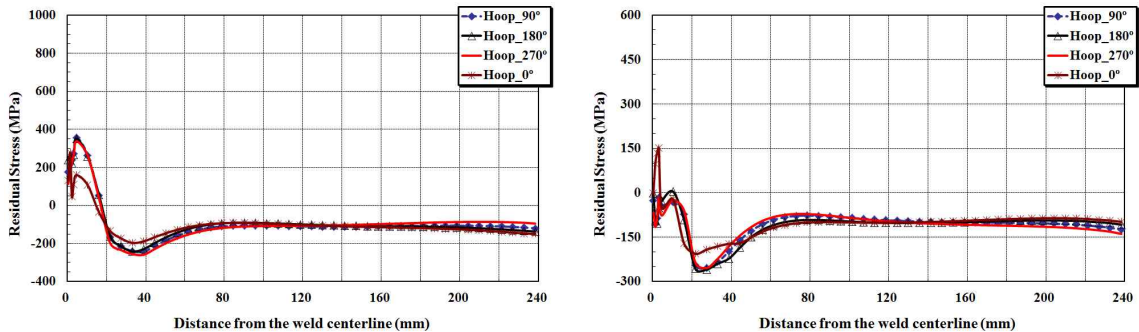
(c) Hoop residual stresses (inside surface) (d) Hoop residual stresses (outside surface)  
 Fig. 5. Residual stresses at the four locations

### 3.2 해석결과

외압이 작용하는 경우 원주 용접된 강관의 잔류응력의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 용접 잔류응력의 결과와 마찬가지로 서로 다른 원주방향으로의 위치에서 축방향과 원주방향의 내측 및 외측에서의 응력을 표시하였다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에 전술한 외압이 작용하는 경우 내측 및 외측에서 축방향 잔류응력의 변화를 나타내었다. 결과에서 용접부 인근 내측의 인장 잔류응력과 외측의 압축 잔류응력 모두 외압의 영향으로 그 크기가 어느 정도 영향을 받지만 용접부에서 멀어질수록 외압에 의한 잔류응력의 변화는 없어짐을 알 수 있다. 따라서 외압은 축방향 잔류응력의 변화에 거의 영향을 주지 않는다고 할 수 있다. 원주 용접된 강관에 외압이 작용할 경우 내측 및 외측에서의 원주방향의 잔류응력의 변화를 Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)에 나타내었다. 축방향 잔류응력의 거동과는 달리 강관의 내측 및 외측 모두 외압에 의한 원주방향으로의 압축 응력에 의해 잔류응력이 압축 측으로 상당히 많이 이동함을 알 수 있다.



(a) Axial stresses (inside surface) (b) Axial stresses (outside surface)



(c) Hoop stresses (inside surface) (d) Hoop stresses (outside surface)

Fig. 6. Evolution of the residual stresses under the superimposed external pressure

#### 4. 결론

본 연구에서는 유한요소 해석을 통하여 토압 등의 외압이 원주 용접된 매설 강관의 잔류응력에 미치는 영향을 명확히 하였다. 먼저 3차원 열탄소성 해석을 통하여 원주 용접된 강관의 잔류응력을 구하였으며, 이를 초기조건으로 설정하여 3차원 탄소성 해석을 수행함으로써 외압이 작용하는 경우 잔류응력의 변화를 조사하였다. 조사 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 원형 강관의 원주 용접에서는 용접 후 냉각시 원주방향으로의 수축에 의해 용접부 인근에서 내부로 오목한 굽힘 변형이 발생하며, 이 굽힘 변형에 의한 휨모멘트의 영향으로 용접부 근방의 내측에서는 축방향 인장 잔류응력이 발생하고 외측에서는 축방향 압축 잔류응력이 발생한다. 그리고 원주방향의 잔류응력의 크기는 축방향 잔류응력의 영향을 받는다.

(2) 축방향 잔류응력 및 원주방향 잔류응력 모두 원주방향에 대해서 그 분포가 동일하지 않다. 이것은 원주방향으로의 용접에 의한 내부 구속의 변화 및 용접부 시작점 및 끝점에서의 결침 효과 때문이다. 따라서, 원주 용접된 강관의 잔류응력을 정확하게 예측하기 위해서는 3차원 유한요소 모델의 적용이 반드시 필요하다.

(3) 원주 용접된 강관에 토압 등의 외압이 작용하는 경우 축방향 잔류응력은 용접부 인근에서 어느 정도 크기가 변하지만 그 영향은 제한적이며 용접부에서 멀어지면 외압에 의한 영향은 사라진다.

(4) 원주 용접된 강관의 원주방향 잔류응력은 토압과 같은 외압이 작용할 경우 외압에 의한 원주방향으로의 압축에 의해 내측 및 외측 모두 압축 축으로 상당히 많이 이동한다.

#### 감사의 글

이 논문은 2013학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

#### References

- Abid, M., Siddique, M. (2005). "Numerical simulation to study the effect of tack welds and root gap on welding deformations and residual stresses of a pipe-flange joint." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, pp.860-871.
- Brickstad, B., Josefson, B.L. (1998). "A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.75, pp.11-25.
- Deng, D., Murakawa, H. (2006). "Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements." *Computational Materials Science*, Vol. 37, pp.269-277.
- Deng, D., Liang, W., Murakawa, H. (2007). "Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, pp.219-225.
- Duranton, P., Devaux, J., Robin, V., Gilles, P., Bergheau, J.M. (2004). "3D modeling of multipass welding of a 316L stainless steel pipe." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 457-463.
- Goldak, J., Akhlagi, M. (2005). *Computational welding mechanics*, Springer.
- Lindgren, L-E. (2001). "Finite element modelling and simulation of welding, Part 2 Improved material modeling." *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 24, pp.195-231.
- Mochizuki, M., Hayashi, M., Hattori, T. (2000). "Residual stress distribution depending on welding sequence in multi-pass welded joints with X-shaped groove." *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, pp.27-32.

- Withers, P.J. (2007). "Residual stress and its role in failure." Reports on Progress in Physics, Vol. 70, pp.2211-2264.
- Yaghi, A., Hyde, T.H., Becker, A.A., Sun, W., Williams, J.A. (2006). "Residual stress simulation in thin and thick-walled stainless steel pipe welds including pipe diameter effects." International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 83, pp.864-874.
- Yang, S.C. (2002). "The behavior of stress and deformation in steel pipe welding joint under load." Ms. Thesis, Chung-Ang University.
- Um, D.S., Yoo, K.Y. (1997). "The experimental studies on residual stresses due to circumferential welds in thin steel cylinder." Journal of Korean Welding Society, Vol. 15, pp.107-113.
- Chang, K.H., Yang, S.C., Kang, J.H. (2001). "Production mechanism of residual stress generated by multi-pass welding of the steel pipe." Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 13, pp.327-335.
- Chang, K.H., Lee, C.H. (2002). "Analysis of residual stress in welds composed by dissimilar steels under tensile loads." Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 22, pp.201-210.