

## 유도 가열 굽힘된 316 계열 오스테나이트 스테인리스 강 배관의 잔류응력 분포 고찰<sup>§</sup>

김종성<sup>\*†</sup> · 김경수<sup>\*\*</sup> · 오영진<sup>\*\*</sup> · 장현영<sup>\*\*</sup> · 박흥배<sup>\*\*</sup>

\* 순천대학교 기계우주항공공학부, \*\* 한국전력기술(주)

### Investigation of Residual Stress Distributions of Induction Heating Bended Austenitic Stainless Steel (316 Series) Piping

Jong Sung Kim<sup>\*†</sup>, Kyoung Soo Kim<sup>\*\*</sup>, Young Jin Oh<sup>\*\*</sup>, Hyun Young Chang<sup>\*\*</sup>,  
and Heung Bae Park<sup>\*\*</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Suncheon Nat'l Univ.,

\*\* KEPCO E&C, Co.

(Received February 24, 2014 ; Revised April 21, 2014 ; Accepted May 9, 2014)

**Key Words:** Induction Heating Bending Process(유도 가열 굽힘 공정), Austenitic Stainless Steel (316) Piping(316 오스테나이트 스테인리스 강 배관), Residual Stress(잔류응력), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

**초록:** 최근들어 원자력 발전소에 유도 가열 공정으로 굽힌 배관을 적용하려는 동향이 있다. 이러한 유도 가열 굽힘 공정 동안의 열-기계적 메커니즘에 의해 잔류응력이 발생할 수 있다. 잔류응력은 균열 발생과 성장에 중요한 영향을 미치는 균열 구동력들 중의 하나이다. 그러나, 기존 연구들은 두께 변화, 타원도와 같은 기하학적 형상 변이에 집중하고 있는 반면 공정 변수가 잔류응력에 미치는 영향과 관련된 연구는 찾아보기 힘들다. 본 연구에서는 316 오스테나이트 스테인리스 강으로 제작된 유도 가열 굽힘 배관의 잔류응력 분포에 미치는 공정 변수의 영향을 유한요소 변수 해석을 통해 고찰하였다. 고찰 결과, 굽힘 모멘트와 굽힘 각도는 잔류응력에 미치는 영향이 미미한 반면 유도 가열률과 이송 속도는 잔류응력에 상당한 영향을 미침을 확인하였다.

**Abstract:** The induction heating bending process, which has been recently applied to nuclear piping, can generate residual stresses due to thermomechanical mechanism during the process. This residual stress is one of the crack driving forces that have important effects on crack initiation and propagation. However, previous studies have focused only on geometric shape variations such as the change in thickness and ovality. Moreover, very few studies are available on the effects of process variables on residual stresses. This study investigated the effects of process variables on the residual stress distributions of induction heating bended austenitic stainless steel (316 series) piping using parametric finite element analysis. The results indicated that the heat generation rate and feed velocity have significant effects on the residual stresses whereas the moment and bending angle have insignificant effects.

#### 1. 서 론

최근들어 원자력 발전소에 유도 가열 공정에

의해 굽힘 가공된 배관을 적용하려는 동향이 있다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 유도 가열 굽힘 공정 동안 열적-기계적 메커니즘에 의해 배관에 잔류응력이 발생할 수 있다. 잔류응력은 원전 기기의 균열 발생과 전파에 중요한 영향을 미치는 균열 구동력들 중의 하나로서 고려되고 있다.<sup>(3)</sup> 따라서 유도 가열 굽힘 공정에 의해 제작된 원전 배관의 구조 건전성이 유지됨을 보장하기 위해서는 유도 가열 굽힘 공정

§ 이 논문은 대한기계학회 2013년도 학술대회(2013. 12. 18.-20., 강원랜드) 발표논문임

† Corresponding Author, kimjsbat@suncheon.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

에 의해 발생한 잔류응력을 평가하여야 한다. 그러나, 기존의 연구들<sup>(4-6)</sup>은 두께 변화, 타원도와 같은 기하학적 형상 변이에 집중되고 있는 반면 유도 가열 굽힘 공정 변수들이 잔류응력에 미치는 영향을 고찰한 연구들은 찾아보기 힘들다.

본 연구는 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS<sup>(7)</sup>을 이용한 변수 유한요소 해석을 통해 316계열 오스테나이트 스테인리스 강으로 제작된 유도 가열 굽힘 배관의 잔류응력에 미치는 공정 변수의 영향을 고찰하였다. 첫번째, 316계열 오스테나이트 스테인리스 강으로 제작된 유도 가열 굽힘 배관의 잔류응력 분포를 유한요소 해석을 통해 도출하였다. 두번째, 두께 측정 결과와의 비교를 통해 유한요소 해석의 타당성을 확인하였다. 최종적으로 타당성이 입증된 유한요소 해석 절차를 적용하여 변수 해석을 수행하여 잔류응력에 미치는 공정 변수의 영향을 고찰하였다.

## 2. 잔류응력 해석

### 2.1 해석 모델

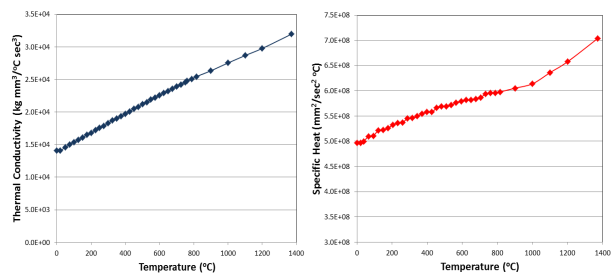
굽힘 배관은 SA-312 TP 316 오스테나이트 스테인리스 강으로 제작되었다. 굽힘 배관의 외반경과 두께는 제각기 161.0417mm와 34.2472mm이다. 또한, 굽힘 반경과 각도는 각각 583mm와 45도이다. Table 1은 굽힘 공정 변수들의 실측치를 제시하고 있다.<sup>(8)</sup>

Fig. 1은 온도에 따른 TP 316 오스테나이트 스테인리스 강의 열적-물리적 재료물성치 변화를 제시하고 있다.<sup>(9,10)</sup> 밀도는 온도에 무관하게 7966kg/m<sup>3</sup>의 일정한 값이라고 가정하였다. 밀도의 온도 중

속성은 온도에 따른 비열의 변화에 반영하였다. 푸아송 비도 온도에 무관하게 일정한 값 0.31로 설정하였다.<sup>(9)</sup> Fig. 2는 온도에 따른 TP 316 오스테나이트 스테인리스 강의 공칭 항복강도 변화와 공칭 인장강도 변화를 보여주고 있다.<sup>(9-11)</sup> 연구 대상이 대변형 문제이므로 진 응력-공칭 응력 관계, 진 변형률-공칭 변형률 관계를 이용하여 공칭응력-변형률 선도는 진 응력-변형률 선도로 변환되었다. 배관은 1000°C 이상의 고온에서 영구 소성 변형을 수반하면서 굽힘 가공되어지기 때문에 굽힘 공정 동안의 가공 경화 거동은 변형률 속도에 민감할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 정적인 상태로 가정할 수 있는 느린 변형률 속도에서의 기계적 강도에 대한 빠른 변형률 속도에서의 기계적 강도의 비를 이용하여 변형률 속도가 증가시 기계적 강도가 증가하는 변형률 속도의 영향을 고려하였다.<sup>(12)</sup> Fig. 3은 변형률 속도에 따른 TP 316 오스테나이트 스테인리스 강의 온도별 기계적 강도 비 변화를 제시하고 있다. 316계열 오스테나이트 스테인리스 강의 경우 1038~1149°C의 온도 범위에서 어닐링 된다고 알려져 있다.<sup>(13)</sup> 본 연구에서는 소성변형률이 소멸되는 온도인 어닐링 온도를 1040°C로 설정하였다.

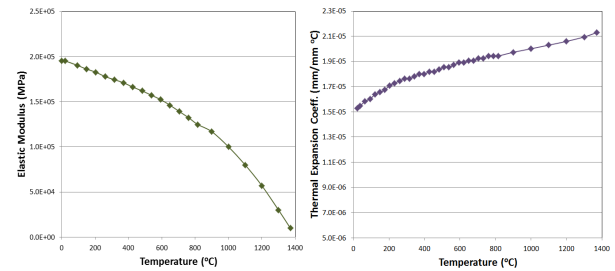
**Table 1** Actual measurement values of the bending process

| Item                   | Measurement value |
|------------------------|-------------------|
| Bending temperature    | 1000~1240 °C      |
| Feeding rate           | 20mm/min          |
| Minimum wall thickness | 29.10~30.32mm     |
| Ovality                | 0.62~0.93%        |
| Bending angle          | 45°               |
| Bending radius         | 583mm             |



(a) Thermal conductivity

(b) Specific heat



(c) Elastic modulus

(d) Thermal expansion coefficient

**Fig. 1** Variations of thermal-physical material properties with temperature

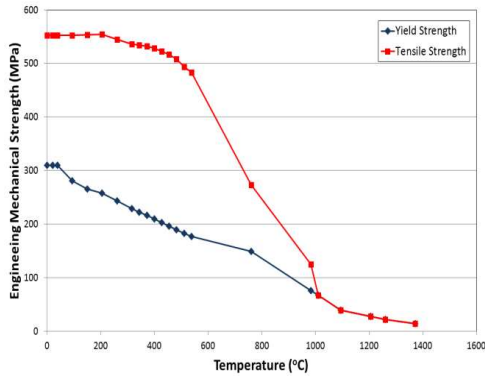


Fig. 2 Variations of engineering mechanical strengths with temperature

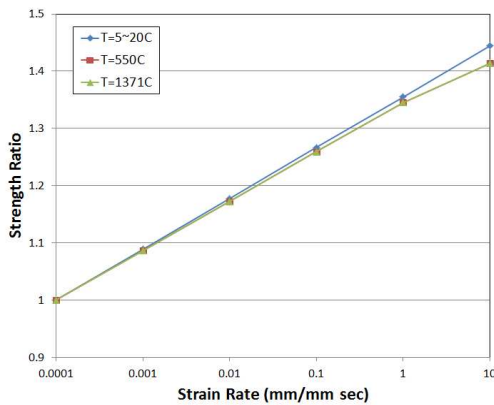


Fig. 3 Variations of the mechanical strength ratio with the strain rate

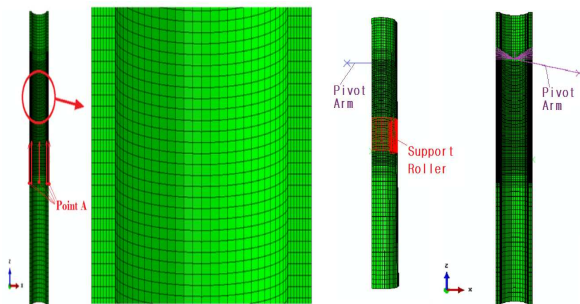


Fig. 4 Finite element model of the induction heating bended piping

2.2 유한 요소 모델

Fig. 4는 유도 가열 굽힘 배관의 유한요소 모델을 보여주고 있다. 기하학적 형상과 경계조건에 대한 대칭성 때문에 1/2 모델로 모델링하였다. 3차원 선형 연속체 육면체 유한요소를 이용하였는데 요소 수와 절점 수는 각각 36,152개와 42,944개이다. 그림 상의 보라색 요소들은 굽힘 지그 역할을 수행하는 피벗 암 (pivot arm)을 모사하는 강체 요소들이며 빨간색 요소들은 배관 지지 롤러를 모사하는

강체 요소들이다.

온도해석을 위한 열적 경계조건은 다음과 같이 설정되었다.

- 두께 방향의 발열률 분포는 고주파 유도전류의 표면 효과를 고려한 분포식 (1)<sup>(14)</sup> 이용

$$q'(d) = q'_s e^{-2d/\delta} \tag{1}$$

여기서  $q'(d)$ 는 배관 외표면으로부터 두께 방향 깊이  $d$ 에 따른 발열률 분포,  $q'_s$ 는 표면 발열률,  $\delta$  유도 전류 침투 정도를 대표하는 특성 깊이로서 추정 평균온도 450°C에서의 배관 재질 자기 유전률  $\mu$ , 전기저항  $\rho$ 와 유도 전류 주파수  $\omega$ 를 식 (2)에 대입하여 13.7mm로 결정

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \tag{2}$$

- 유도 가열 장비 제작사인 피에스텍의 유도 가열 발열분포 해석 결과<sup>(15)</sup>를 참고하고 피크온도 측정값을 기준으로 시행착오법을 통해 축방향 표면 발열률 분포를 Fig. 5와 같이 도출 (여기서  $q'_p$ 는 피크 표면 발열률임)
- 상용 유한요소 온도해석을 수행하고 시간에 따른 표면 온도 변화를 측정치와 비교하고 반복하여 오차를 최소화하는 과정을 통해 축방향 표면 발열률 최대값을 118MW/m<sup>3</sup>으로 결정
- 초기 가열 시간은 80sec로 가정하였고 벤딩 시작전 160sec 동안 0.25mm/sec의 속도로 가열기가 이동, 배관은 고정 상태
- 벤딩 동안에는 가열기는 고정되고 배관이 20 mm/min의 속도로 이송
- 물을 배관 외표면과 내표면에 분사시키는 노즐들은 각각 가열기 후단 50mm 지점과 55mm 지점에 위치함
- 외면의 열전달계수  $h_{out-water}$ 는 철강 연속주조의 2차 냉각에 적용되는 식 (3)<sup>(16)</sup>을 적용하는데 시행착오법(유한요소 온도해석과 측정치 비교 및 보정)을 통해 물의 양  $W$ 를 498.1884/m<sup>2</sup>sec로 결정

$$h_{out-water} = 70.6W^{0.628}/T_{surf}^{0.136} \tag{3}$$

여기서  $h_{out-water}$ 의 단위는 W/m<sup>2</sup>°C이며  $T_{surf}$ 는 배관의 외표면 온도(°C)를 의미한다.

- 물에 의한 열전달계수의 배관 축방향 분포는 Fig. 6과 같이 변화한다고 가정

- 물의 온도는 40°C로, 물과 접촉하지 않는 표면은 5°C의 공기에 의한 냉각으로 가정

기계적 경계조건은 다음과 같이 설정하였다.

- 배관을 굽힘 가공하기 위해 한쪽 끝단을 구속하는 지그 강체요소의 회전 중심 절점은 고정하되 굽힘 방향으로 회전 가능
- 배관을 지지하는 롤러의 역할을 수행하는 강체 요소와 배관 외표면에 접촉 조건 부가
- 유도 가열 굽힘 공정 동안 굽힘 배관에 작용하는 굽힘 모멘트를 도출하는 다음 수식<sup>(6)</sup>에 측정된 압축응력  $\sigma_s=53\text{kgf/cm}^2$ <sup>(8)</sup>를 대입하여 지그에 작용 하는 모멘트  $M_c$  계산

$$M_c = 1.58\sigma_s D_m^2 t \quad (4)$$

여기서  $\sigma_s$  는 두께 감소율 9%를 만족하기 위한 압축력,  $D_m$ 은 평균 직경,  $t$ 는 두께임

- 배관이 일정한 속도(20mm/min)로 이송되도록 배관 끝단면 절점들에 배관 축방향 변위 부가

2.3 유한요소 해석 및 타당성 검증

ABAQUS 를 이용하여 연속적인 온도-탄소성

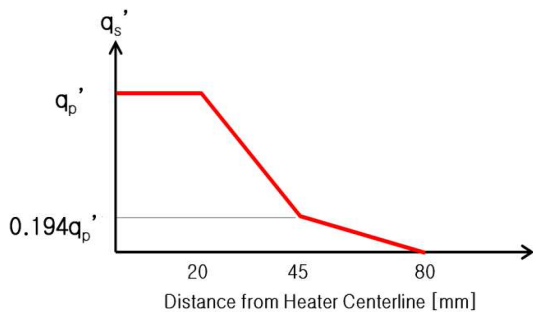


Fig. 5 Surface heat generation rate distribution along piping axial by spray water

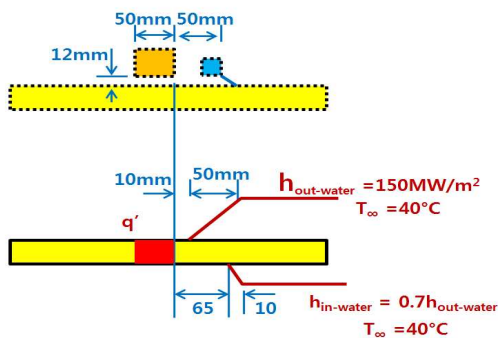


Fig. 6 Forced heat convection coefficient distributions along piping axis

응력 연성해석을 수행하였다. 탄소성 응력해석은 대변형을 고려하였다.

Fig. 7 은 측정된 외표면 온도와 유한요소 해석을 통해 도출한 외표면 온도를 비교 제시하고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이, 최대 온도와 최대 온도 시점 이전 및 직후의 온도 변화 관점에서 유한요소 해석은 측정과 좋은 일치를 보임을 알 수 있다. 그러나 최대 온도 시점 이후 시간 경과에 따라 온도 차이가 커지는데 이는 물 분사가 지속됨에 따라 배관 외표면에 점 용접 설치된 열전대로 측정된 온도가 배관 표면 온도를 대표하기 보다는 물 온도의 영향을 지배적으로 받기 때문으로 판단된다.

Fig. 8 은 외호부/내호부/측면의 두께를 측정 한 값들과 유한요소 해석으로부터 도출한 값들을 비교 제시하고 있다. 여기서 지점 A 는 Fig. 4 상에 제시되고 있다. 내호부의 굽힘 시작 점 근처에서 10% 이상의 차이를 보이나 다른 영역에서는 크지 않는 차이를 보임을 알 수 있다. 이러한 온도 및 두께 비교 결과로부터 유한요소 해석은 굽힘 배관의 변형 상태를 적절히 유도할 수 있음을 확인하였다.

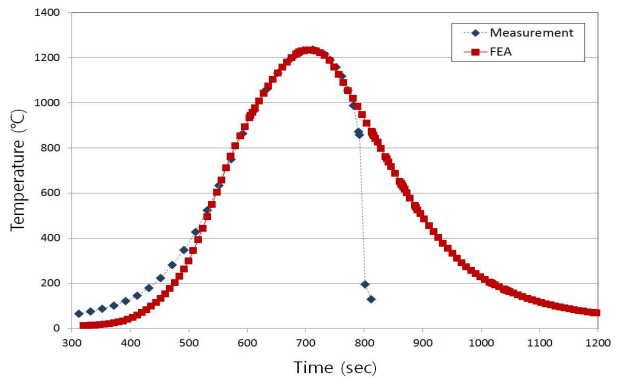


Fig. 7 Comparison of outer surface temperature between the measurement and the finite element analysis

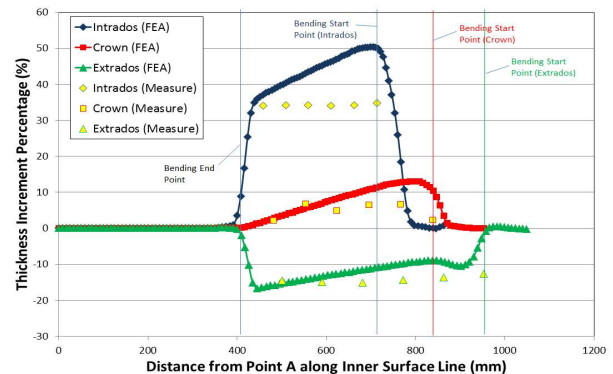


Fig. 8 Comparison results of extrados/intrados/crown thickness between the measurement and the finite element analysis

Fig. 9 는 유한요소 해석으로부터 도출된 유도 가열 굽힘 배관의 등가 소성변형률 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 굽힘 시작 지점 근처의 내호부 내표면 영역에서 상당한 크기의 소성 변형이 국부적으로 발생함을 알 수 있다.

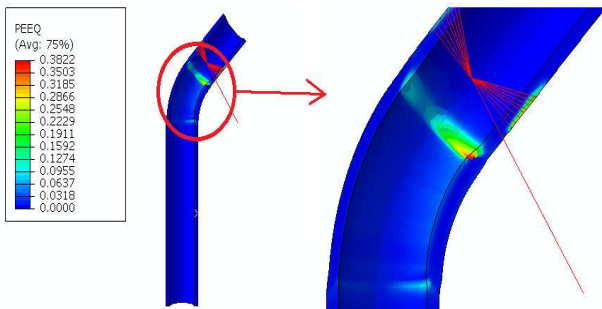
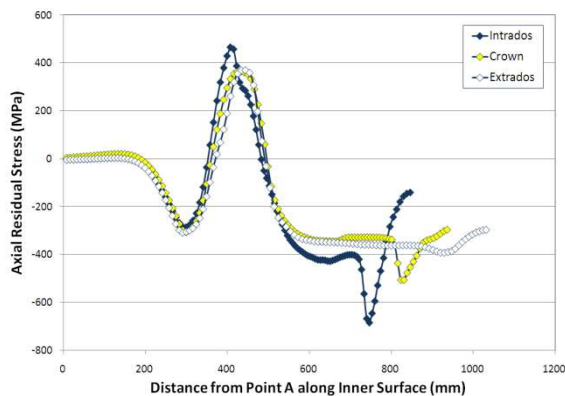
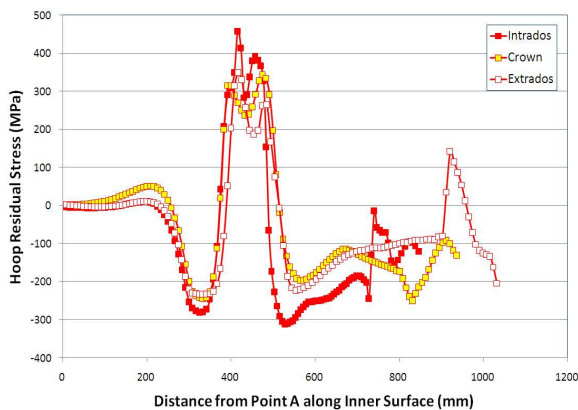


Fig. 9 Equivalent plastic strain distribution of the bended piping derived from the finite element analysis



(a) Axial



(b) Hoop

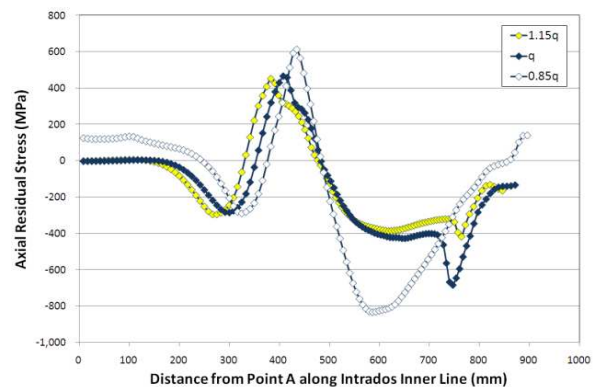
Fig. 10 Residual stress distributions along the piping axis located on inner surfaces of the extradados/intradados/crown

Fig. 10 은 외호부/내호부/측면의 내표면에 위치 한 배관축을 따른 잔류응력 분포를 제시하고 있다. 그림으로부터 내호부 내표면 상의 최대 응력값은 외호부와 측면의 최대응력값 보다 크며 축방향 및 원환 잔류응력 모두 굽힘 종료 지점 근처의 내표면 영역에서 최대값이 발생함을 알 수 있다.

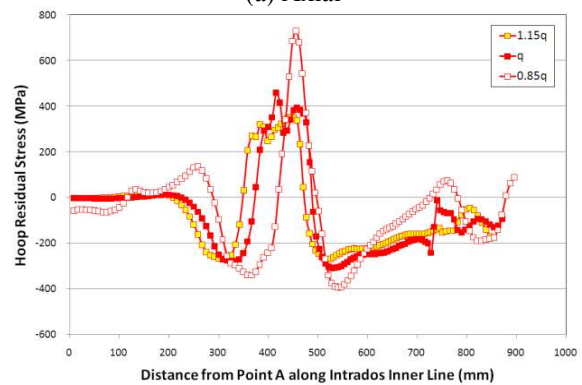
### 3. 변수 해석 및 영향 고찰

변수해석을 위한 공정 변수로써 유도 가열률, 이송 속도, 압축 굽힘 모멘트 및 굽힘 각도를 설정하였다. 본 논문에서는 다른 부위보다 높은 내표면 잔류응력 최대값이 발생하는 내호부 내표면 잔류응력 분포에 대해서만 변수의 영향을 고찰하고자 한다.

Fig. 11은 외호부 내표면에 위치 한 배관 축 상의 잔류응력 분포 변화를 유도 가열률 변화에 따라 제시하고 있다. 내표면에서의 잔류 응력 최대값들은 유도 가열률이 감소할수록 상당히 증가함을 알 수 있다. 이는 유도 가열률이 낮을수록



(a) Axial



(b) Hoop

Fig. 11 Variations of residual stress distributions along the piping axis on inner surfaces of the intrados with the heat generation rate



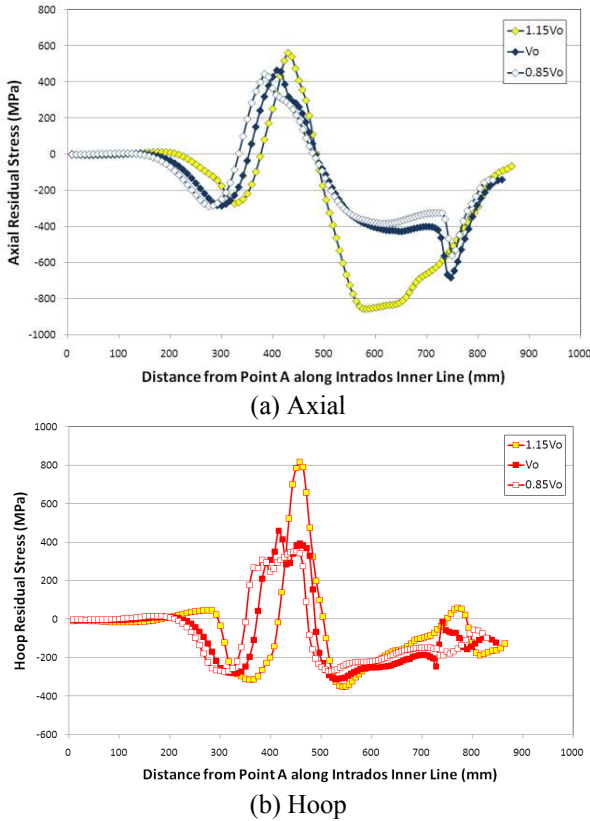


Fig. 12 Variations of residual stress distributions along the piping axis on inner surfaces of the intrados with the feeding velocity

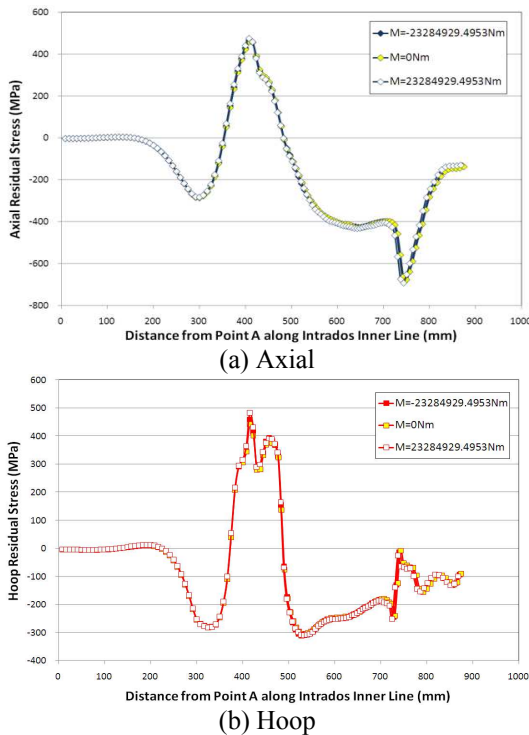


Fig. 13 Variations of residual stress distributions along the piping axis on inner surfaces of the intrados with the compressive bending moment

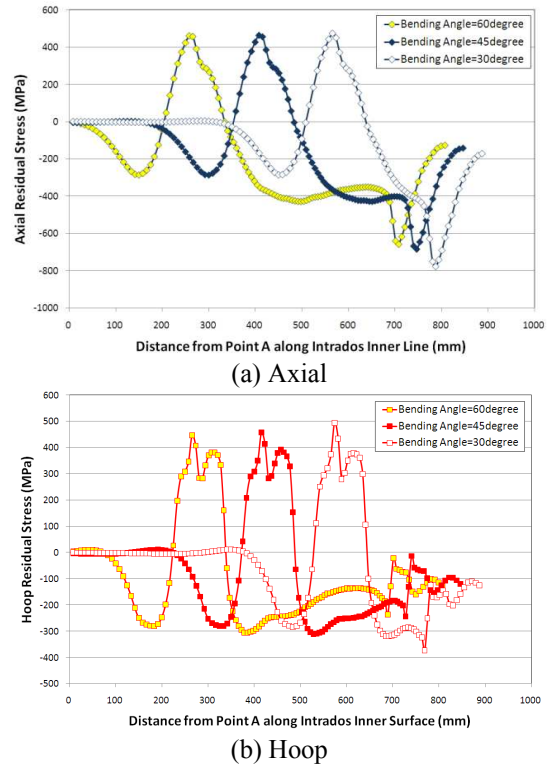


Fig. 14 Variations of residual stress distributions along the piping axis on inner surfaces of the intrados with the bending angle

내표면의 온도가 낮아져서 어닐링에 의한 소성 변형률 소멸이 덜 발생하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 12는 내호부 내표면에 위치 한 배관 축상의 잔류응력 분포 변화를 이송 속도 변화에 따라 제시하고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이, 내표면에서의 잔류응력 최대값들은 이송 속도가 증가할수록 상당히 증가함을 알 수 있다.

Fig. 13은 내호부 내표면에 위치 한 배관 축상의 잔류응력 분포 변화를 압축 굽힘 모멘트의 변화에 따라 제시하고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 압축 굽힘 모멘트가 잔류응력에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다.

Fig. 14는 내호부 내표면에 위치 한 배관 축상의 잔류응력 분포 변화를 굽힘 각도의 변화에 따라 제시하고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 굽힘 각도는 내호부 내표면 상의 축방향 잔류응력에 미미한 영향을 미치며 내호부 내표면 상의 원환 잔류응력의 최대값은 굽힘 각도가 증가함에 따라 약간 감소함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

유도 가열 굽힘 배관의 잔류응력에 미치는 공정 변수의 영향을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을

도출하였다.

- 내호부 내표면 최대 잔류응력값은 외호부와 측면의 내표면 최대 잔류응력값 보다 크며 축방향 및 원환 잔류응력 모두 굽힘 종료 지점 근처의 내표면 영역에서 최대값이 발생함
- 내호부 내표면 상의 잔류응력 최대값들은 유도 가열률 감소에 따라 상당히 증가함(기준 대비 가열률 15% 감소시 최대 59.2% 증가)
- 내호부 내표면 상의 잔류응력 최대값들은 이송 속도 증가에 따라 상당히 증가함(기준 대비 이송속도 15% 증가시 최대 78.3% 증가)
- 압축 굽힘 모멘트와 굽힘 각도가 잔류응력에 미치는 영향은 미미함(압축 굽힘 모멘트 경우 기준 대비 최대값 -3.4~5.3% 변화. 굽힘 각도 경우 기준 대비 최대값 -2.2~8.1% 변화)

#### 참고문헌 (References)

- (1) ASME B&PV Code Committee, Draft Code Case XXX, 2013.
- (2) Sung Il SIM Co., Ltd., 2013, *Development of Applicable Induction Heating Bend and Reliability Verification Technology for Safety Related Piping (Class 1,2,3)*, Research Plan.
- (3) USNRC, 2010, *Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report*, NUREG-1801, Rev.2.
- (4) Collie, G.C., Higgins, R.J., and Black, I., 2010, "Modelling and Predicting the Deformed Geometry of Thick-Walled Pipes Subjected to Induction Bending," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: J. of Materials Design and Applications*, Vol.224, pp.177~189.
- (5) Hu, Z. and Li, L.Q., 1999, "Computer Simulation of Pipe-Bending Processes with Small Bending Radius Using Local Induction Heating," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 91, pp.75~79.
- (6) Lee, H.W., 2010, *An Optimum Design of Pipe Bending Process Using High Frequency Induction Heating and Dynamic Reverse Moment*, M.S. Thesis, Pusan Univ..
- (7) Dassault Systems, 2012, *Simulia, User's Manuals for ABAQUS*, Ver.6.12.
- (8) Sung Il SIM Co., Ltd., 2013, *Qualification Documents for Bending Manufacturing (SA312 TP316 12" Piping)*.
- (9) ASME B&PV Code Committee, 2007, ASME B&PV Code, Sec.II. Part D, *Properties, Materials*.
- (10) JRC, 2004, *Protocol for NET Residual Stress Round Robin*.
- (11) Sikka, V.K., 1978, *Elevated Temperature Ductility of Types 304 and 316 Stainless Steel*, ORNL/TM-6608.
- (12) Lawrence Livermore National Laboratory, 1998, *High Temperature Properties of Alloys Being Considered for Design of a Concentric Canister Launcher*, UCRL-ID-130924.
- (13) AK Steel, *Product Data Bulletin, 316/316L Stainless Steel*, 316/316L-B- 08-01-07.
- (14) [http://en.wikipedia.org/wiki/Skin\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect)
- (15) PS Tech, 2013, *Analysis Results for Heat Generation Rate by Induction Heating*.
- (16) POSCO, Co., Ltd., 2003, *Continuous Casting*.