

## 작은 곡률반경 파이프 벤딩을 위한 열간 파이프 벤딩공정 해석 및 설계

류경희\* · 김동진\*\* · 김병민\*\* · 이동주\*\*\*

(2001년 3월 30일 접수)

### Analysis and Process Design of Hot Pipe Bending Process With Small Bending Radius

K. H. Ryu, D. J. Kim, B. M. Kim and D. J. Lee

#### Abstract

The finite element simulation model and the program to calculate the reverse moment have been developed to analyse the stress state and deformation of pipe bending using local induction heating with small bending radius in this study. The reverse moment that is to be applied on the bending arm to control the wall thinning ratio of the bending outside to within a particular value. Even though the demand of pipes with small bending radius is increasing in power plants and ship buildings, the welded elbows are still widely used. The bending process with or without a reverse moment acting on the bending arm has been simulated. The reverse moments calculated from the developed program are in good agreement with the finite element simulations and the experiments.

**Key Words** : Pipe Bending, Induction Heating, Wall Thickness Reduction, Process Design, Reverse Moment, Temperature Gradient, FE Analysis

#### 1. 서론

고주파 유도가열을 이용한 열간 파이프 벤딩 공정은 금형 제작 없이 작은 벤딩 곡률을 가지는 벤드 및 대형 관의 벤드 제작에 널리 사용되는 공법으로 현재 발전설비, 조선, 플랜트 등의 산업분야에서 널리 적용되고 있는 공법이다.<sup>(1~3)</sup> 특히 기존의 용접이나 금형을 통한 파이프 벤드 제품의 생산에 비해 리드 타임 및 단가 감소, 양호

한 기계적 성질의 벤드 제품생산 등의 장점이 있다. 그러나 고주파 유도가열을 이용한 파이프 벤딩 공정의 광범위한 적용 범위와 장점에도 불구하고 현재 국내에서의 고주파를 이용한 열간 파이프 벤딩 공정은 현장 작업자의 경험이나 시행착오에 의존하고 있기 때문에 열간 파이프 제품의 단가 상승 및 생산성 저하를 초래하는 어려움이 있다. 따라서 파이프 벤딩 공정의 해석 및 설계 기술개발이 필요한 실정이다.<sup>(4)</sup>

\* 부산대학교 정밀기계공학과  
\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소  
\*\*\* (주)현대중공업

일반적으로 고주파 유도가열을 이용한 파이프 벤딩 공정 중에 벤딩 외측은 인장응력으로 인해 두께가 감소하고 내측은 압축응력에 의해 두께가 증가하는 경향을 가진다. 그러나 파이프 벤딩제품이 주로 높은 온도와 압력을 가지는 유체의 수송에 사용되어짐을 감안하여 공학적 설계요건은 최대 두께 감소율을 12.5% 이내로 제한하고 있다.<sup>(6)</sup> 따라서 기존의 고주파를 이용한 파이프 벤딩 공정은 벤딩 곡률이 3.5D(outer diameter of pipe) 이상에서만 행하여졌으나 본 연구에서는 최소 2.0D의 벤딩 곡률을 가지는 파이프 벤딩 제품에 대하여 생산성 향상과 최대 두께 감소율이 12.5%이하로 하는 설계조건을 만족하는 고주파 유도가열을 이용한 벤딩 공정의 해석 및 공정설계를 목표로 한다.

파이프의 두께 감소율을 최소화 하고 벤딩 곡률을 작게 하기 위해서는 기존의 열간 벤딩 공정으로는 불가능하기 때문에 반력모멘트를 성형 중에 작용시켜 파이프의 변형영역에서 인장응력이 작용하는 영역을 줄여야 하거나 고주파 유도가열 공정에서 파이프에 온도구배를 부여하여 인장축의 유동응력을 증가시켜야 한다.<sup>(6-7)</sup>

본 연구에서는 생산성 향상과 설계조건을 만족하는 최적의 파이프 벤딩 공정설계를 위해 먼저 파이프 벤딩 메커니즘을 이론적으로 규명하여 각 공정 변수들이 공정에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 벤딩곡률 2D에 대한 유한요소 해석을 통해 각각의 공정변수, 반력모멘트 및 온도구배가 두께감소에 미치는 영향을 파악하였다. 이론 해석 및 유한요소 해석의 타당성 검증을 위해 동일한 조건하에서 파이프 벤딩 실험을 수행하였다.

2. 파이프 벤딩 메커니즘과 이론적 접근

2.1 열간 파이프 벤딩공정 및 벤딩 메커니즘

고주파유도가열을 이용한 열간 파이프 벤딩 공정은 크게 고주파 유도가열 장치, 파이프 이송(feeding) 장치, 클램프(clamp) 장치로 구성된다. Fig. 1은 파이프 열간 파이프 벤딩 공정의 개략도를 나타낸다. 그림에서처럼 파이프의 한쪽 끝은 클램프에 고정되어 있고 반대쪽에서 파이프 이송장치에 의해 파이프에 벤딩력을 가하면 고주파유도가열에 의해 국부 가열된 영역에 벤딩 모멘트가 발생한다. 여기서 피벗(pivot)을 중심으로 벤딩 압이 회

전을 하기 때문에 파이프는 벤딩 압의 길이에 의해 결정되는 곡률반경으로 벤딩이 된다. 이때 고주파 유도가열에 의해 국부 가열영역에는 벤딩력과 피벗을 중심으로 한 벤딩 압의 회전 효과로 발생된 벤딩 모멘트에 의해 변형이 발생하게 되고 변형영역은 중립면을 기준으로 하여 인장응력과 압축응력이 작용하는 영역으로 나뉘어지게 되고 인장응력에 의해 벤딩외측은 두께가 감소하게 된다. 이러한 현상은 곡률반경이 감소함에 따라 증가하는데 일반적으로 곡률 반경이 3.5D까지가 기존의 벤딩 기술로 벤딩할 수 있는 임계치이다.<sup>(8)</sup> 곡률 반경이 감소함에 따라 Fig. 2에서처럼 두께 감소율이 증가하게된다. 따라서 3.5D 이하의 곡률반경의 파이프 벤딩에 있어서 설계조건을 만족하기 위해서는 기존의 공정으로는 불가능하기 때문에 벤딩 공정동안 기계적으로 반력모멘트를 부가하거나 고주파유도가열을 통해 온도구배를 부여하여야 한다.

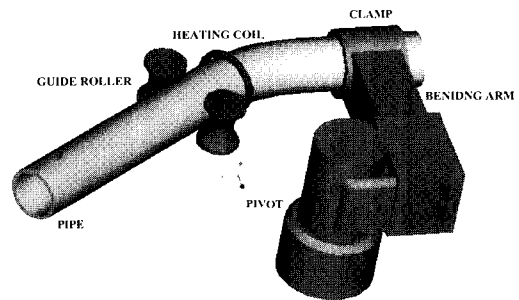


Fig. 1 Schematic of the hot pipe bending process using induction heating

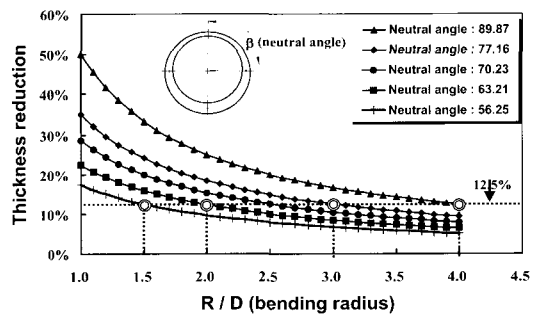


Fig. 2 Reduction of wall thickness according to the bending radius and neutral angle

$$M_c = 2\sigma_s r_m^2 t_0 \left[ (\pi - 2\beta) + \frac{2\sin\beta + (\pi - 2\beta)\cos\beta}{R/r_m + \cos\beta} \right] R/r_m - [2\sin\beta + (\pi - 2\beta)\cos\beta + \frac{(\pi - 2\beta)(1 + 2\cos^2\beta) + 3\sin 2\beta}{2(R/r_m + \cos\beta)}] \tag{1}$$

$$\beta = \cos^{-1} \left[ \frac{4-R/D}{4.5} \right] \quad (2)$$

먼저 파이프 제원 및 공정변수에 따른 적절한 반력모멘트를 구하기 위해 파이프 재질은 강완전소성체이고, 파이프 단면의 형상변화는 없다는 가정하에서 반력모멘트 계산식을 유도하였다(식 (1)). 또한 파이프 곡률반경 2.0D에 대해 설계조건인 두께 감소율 12.5%이하를 만족하기 위한 중립축의 위치  $\beta$ 를 식(2)로부터 구하였다. 계산결과 중립축의 위치는 63.21°가 됨을 알 수 있었다. 이것은 결론적으로 벤딩모멘트가 작용하지 않는 경우와 비교하여 2.0D에 대해서 설계조건을 만족하기 위해서는 반력모멘트를 작용시켜 중립축의 위치를 이동시켜야 한다는 것을 의미한다. Fig. 2에 각 중립축의 위치에 따른 두께 감소율과 곡률반경에 따라 설계조건을 만족하기 위한 중립축의 위치를 나타낸다.

다음으로 곡률반경 2.0D에서 중립축의 위치를 63.21°로 하기 위하여 필요한 반력모멘트의 양을 식(1)으로부터 구하였다. 계산결과  $1.525 \sigma_s D^2 t_0$ 가 필요함을 알 수 있었으며 이 값은 파이프의 평균유동응력 및 파이프의 제원이 결정되면 이론적으로 계산되어지는 값이다.

## 2.2 열간 물성치 실험

파이프 재질에 대하여 온도에 따른 변형 특성을 평가하기 위해 25ton 동적 재료 시험기(MTS)를 이용하여 고온 인장실험을 수행하였다. 실험에 사용된 재료는 SPPS 42이며 KS규격 B0801의 관형 전용규격인 12C 시험편을 사용하여 실험을 수행하였다. 시험 온도는 상온과 일반적으로 고주파 유도가열 영역인 800°C에서 950°C까지의 4가지 경우의 온도에 대하여 실험을 수행하였으며 파이프 벤딩공정에서 최대 파이프 이송속도인 40 mm/min으로부터 변형률 속도는  $0.004 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.012 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.020 \text{ s}^{-1}$ 의 세 가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다.

Fig. 3은 각각의 실험온도에서의 변형률 속도에 따른 변형률과 응력의 관계로서 시험편의 가열온도가 감소하고 변형률 속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하는 경향을 알 수 있다. 또한 실험 결과로부터 상온에서의 유동응력이 800°C이상의 고온에서의 유동응력에 비해 약 10배 이상 크게 나타남을 알 수 있었다. 실험으로부터 구한 온도 및 변형률 속도에 따른 변형률과 응력의 데이터를 반력모멘트 계산 및 유한요소해석의 물성치로 사용하였다.

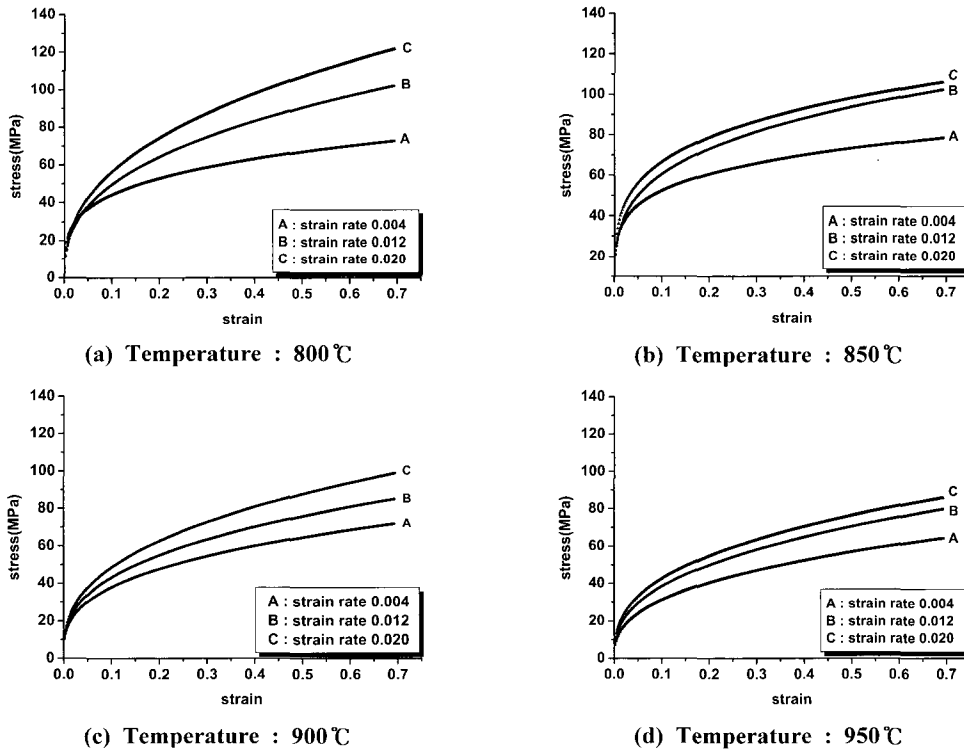


Fig. 3 Stress and strain relationship according to the temperature and strain rate

### 3. 유한요소 해석 및 결과

#### 3.1 유한요소 해석 모델

유도가열 온도 분포 및 이송속도, 파이프의 제원, 밴딩 곡률 등의 공정 변수에 따른 두께 감소의 영향을 평가하기 위한 유한요소 해석 모델을 설정하였다. 본 연구의 대상인 파이프 재료(SPPS 42)의 경우 열간에서의 유동 응력과 상온에서의 유동응력이 10배 이상 차이가 나고 변형은 가열부에서만 발생하기 때문에 국부가열 영역외인 상온의 파이프영역은 강체의 역할을 하게된다. 밴딩 압의 회전 중심인 피봇은 강체로 모델링하였다. 유한요소 해석은 원주방향에 대해서 대칭이므로 해석의 시간을 단축하기 위해 1/2단면만 모델링하여 해석을 수행하였다. 또한 유한요소 격자는 변형부(유도 가열 영역)에 세분화하여 계산의 정확성을 높게 하였다. 해석은 밴딩각도 90° 만큼 수행하여 밴딩각도에 따른 밴딩특성, 각각의 공정변수에 따른 밴딩특성을 평가하였으며 반력모멘트와 온도구배가 두께 감소율에 미치는 영향을 평가하였다. Fig. 4는 유한요소 해석 모델을 나타낸다.

고주파유도 가열장치에 의한 국부 가열효과는 온도 경계조건으로 처리하였다. 즉, 시간에 따른 가열 온도를 요소 절점에 입력함으로써 파이프의 이송속도에 대한 파이프의 온도변화를 모델링하였다. Fig. 5는 파이프 이송속도가 30mm/min일 때의 한 절점의 경계조건에 의한 온도변화를 나타낸다. 그림에 나타낸 바와 같이 파이프온도 변화를 크게 변형영역인 국부유도가열영역과 유도가열영역에서의 전도효과에 의한 예비가열 영역 그리고 변형완료 후 가열링에 장치된 냉각수에 의한 냉각영역으로 나누어지게 경계조건을 부여하였다.

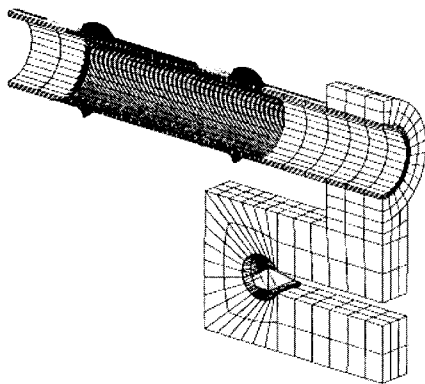


Fig. 4 Finite element analysis model

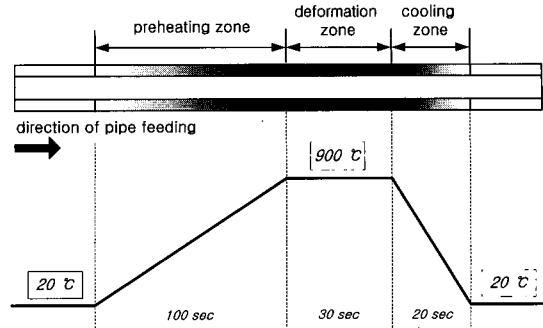


Fig. 5 Variation of temperature according to the heating time for each section

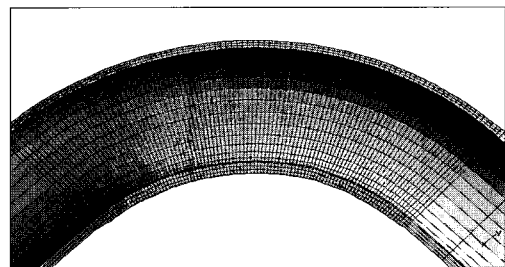
#### 3.2 유한요소 해석 결과

##### 3.2.1 공정변수에 따른 파이프 밴딩특성

유한요소 해석을 통하여 각각의 공정 변수에 따른 밴딩 특성을 평가하였다. Table 1은 유한요소 해석에 적용된 파이프 제원을 나타내는 것으로 검증을 위해 실제 현장에서 생산에 적용되는 파이프 제원을 사용하였다. Fig. 6(a)는 유한요소 해석에 의한 파이프의 변형양상을 나타내며 Fig. 6(b)는 실제 파이프 밴딩공정에 의한 파이프 밴드를 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있듯이 유한요소 해석 결과와 실제 공정에서의 파이프의 변형양상이 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 7은 유한요소 해석 시 밴딩 각도에 따른 파이프의 변형형태를 나타낸다.

Table 1 Process parameters for the FE analysis of pipe bending process

pipe outer diameter (mm)	pipe thickness (mm)	average diameter (mm)	bending radius (mm)	feeding velocity (mm/s)
170	12	158	340	0.5



(a) Deformation of bended pipe by F.E.A.



(b) Photograph of bended pipe

Fig. 6 Comparison of deformed shapes between F.E.A. and experiment

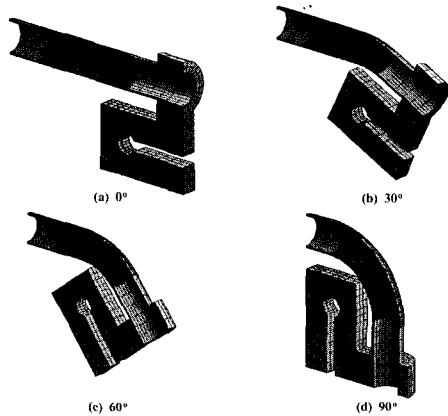


Fig. 7 Deformation modes according to bending angles

먼저 유한요소 해석을 통하여 반력모멘트가 부가되지 않은 경우에 대하여 벤딩각도 90° 까지 벤딩이 진행됨에 따라 중립축의 변화를 평가하였다. 해석 결과 벤딩이 진행됨에 따라 중립축은 약 89~91° 까지 거의 변화가 없음을 알 수가 있었다. 이것은 벤딩각도에 따라 반력모멘트의 부가량을 변화시킬 필요가 없음을 나타내며 벤딩각도의 변화에 따라 파이프의 두께 감소율도 변화하지 않음을 의미한다. Fig. 8에 벤딩각도에 따른 중립축의 변화와 벤딩외측에서의 최대 두께감소율의 변화를 나타낸다.

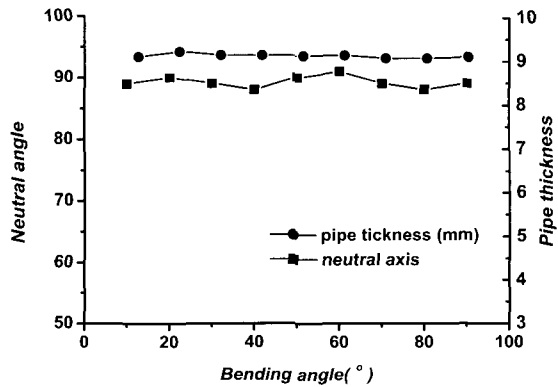


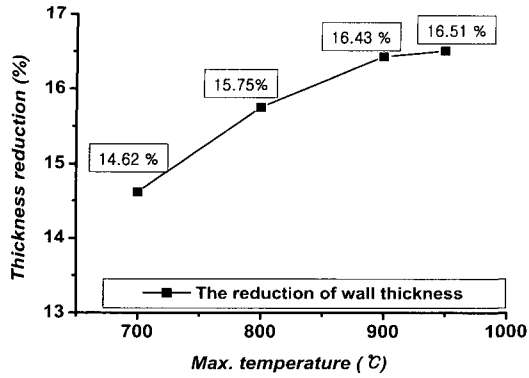
Fig. 8 Variation of neutral angle and pipe thickness according to bending angles

Table 2 Constant process variables for FE analysis

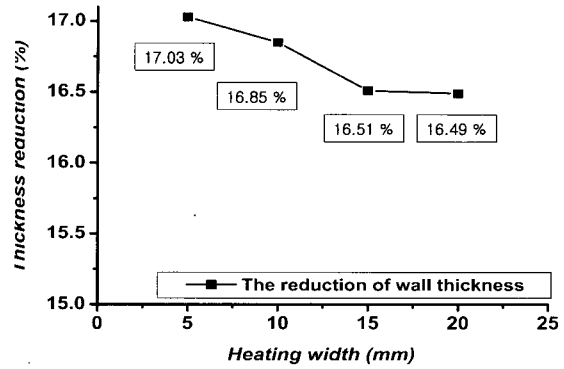
Process variables	Simulation conditions
Used material	SPPS42
Bending radius	2D
Pipe outer diameter (mm)	170
Pipe thickness (mm)	12
Bending angle (°)	90

Table 3 Process variables for FE analysis

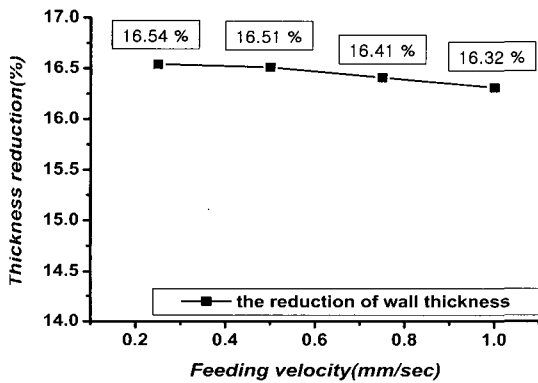
Process variables		Case1	Case2	Case3	Case4	
Heating temperature (°C)	A	800	850	900	950	
Heating width (mm)	B	5	10	15	20	
Feeding velocity (mm/sec)	C	0.25	0.5	0.75	1.0	
		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Cooling time (sec)	D	10	15	20	25	30
Reverse moment (Kg·m)	E	0	10320	20641	28898	41282
Temperature gradient (°C)	F	0	100	150	200	250



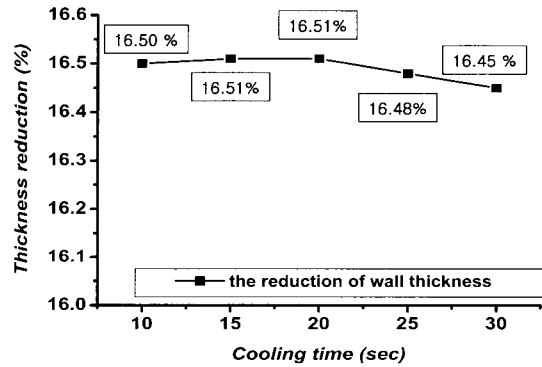
(a) Thickness reduction according to the variation of max. temperature



(b) Thickness reduction according to the variation of heating width



(c) Thickness reduction according to the variation of feeding velocity



(d) Thickness reduction according to the variation of cooling time

Fig. 9 FE analysis results

Table 2와 3에 해석에 적용된 공정변수들을 나타낸다. 각각의 공정변수들은 실제 현장데이터로 활용 가능한 범위로 선정하였다. 먼저 가열온도에 따른 벤딩 특성을 평가하였다. 동일한 파이프 제원, 파이프 이송속도 및 냉각속도에 대하여 최대 가열온도만 변화시켜 각각의 두께 감소율의 변화를 해석을 통하여 평가하였다. Table 2 및 Table 3의 A에 해석조건을 나타낸다. 해석결과 파이프의 두께 감소율은 파이프의 가열 온도가 낮을수록 두께 감소율은 작아짐을 알 수 있었다.(Fig. 9(a)) 그러나 가열온도가 낮아지게 되면 벤딩 하중이 증가하게 되고 또한 벤드제품의 진원도 불량도 높아지기 때문에 최적의 가열온도는 약 800°C~900°C 정도가 적합함을 알 수 있었다.

동일한 파이프 제원 및 가열온도, 파이프 이송속도에 대하여 가열폭만 Table 3의 B조건으로 변화시켜 각각의 두께 감소율의 변화를 해석을 통하여 평가하였다. Fig. 9(b)에 해석 결과로부터 구한 두께감소율을 나타낸다. 유한요소 해석 결과 가열폭이 넓어짐에 따라 두께감소율은 감소함을 알 수 있다. 그러나 최대 값과 최소 값의 차이가 0.52%로 가열폭에 비해 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 가열폭이 넓으면 넥킹, 주름 및 진원도 불량도 나타나기 때문에 일반적으로 가열폭은 파이프 두께의 2배까지로 제한하고 있음<sup>(9)</sup>을 감안하면 최적의 가열폭은 20mm임을 알 수 있다. 다음으로 파이프의 이송속도가 파이프의 두께 감소에 미치는 영향을 평가하였다. 일반적으로 파이프 이송속도에 따라 고주파 유도가

열 시간이 결정됨으로 온도의 영향까지 병행하여 고려해야하나 본 연구에서는 온도는 일정하다는 가정하에서 Table 2와 Table 3의 C조건으로 해석을 수행하여 이송속도가 두께 감소율에 미치는 영향을 평가하였다.

Fig. 9(c)에 파이프 이송속도에 따른 최대 두께감소율의 변화를 나타낸다. 파이프의 이송속도가 증가함에 따라 두께감소율은 감소함을 알 수 있다. 그러나 이송속도의 영향 역시 두께 감소율에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 특히, 이송속도에 따라 파이프 벤드의 생산성이 결정되기 때문에 이송속도가 빠른 경우가 바람직하나 이송속도가 증가하면 상대적으로 짧은 가열시간으로 인해 균일한 온도분포와 규정의 온도까지 가열하는 것이 곤란하기 때문에 고주파 유도가열 특성과 연관해 이송속도를 결정하는 것이 필요하다.

고주파 유도가열을 이용한 벤딩 공정의 경우 가열영역에서 변형이 발생된 이후 냉각수에 의해 급냉된다. 특히, 냉각시간에 따라 파이프 벤드의 금속학적 성질이 크게 좌우된다. 따라서 냉각시간이 파이프 두께 감소에 미치는 영향을 파악하였다. 해석조건은 Table 2와 Table 3의 D조건과 같으며 냉각시간은 벤딩 직후 파이프가 20℃까지 감소하는데 걸리는 시간으로 정의하였다. Fig. 9(d)는 해석결과를 나타내는데 냉각시간에 따라서는 두께 감소는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

### 3.2.2 반력모멘트 및 온도구배에 따른 벤딩특성

파이프 벤딩 공정에서 설계조건을 만족하기 위해서는 반력모멘트를 부가하여 중립축의 위치를 피복을 중심으로 하여 파이프 외측으로 강제 이동시켜야 한다. 따라서 유한요소 해석을 통하여 반력모멘트 부가 시 중립축의 위치 변화와 두께감소율의 변화를 평가하였다. 해석조건은 Table 2와 Table 3의 E조건과 같다. 반력모멘트의 부가량은 이론 해석을 근거로 하여 계산하였다.

Table 4 Results of F.E. A. according to reverse moment

Reverse moment (Kgr · m)	0	20,641	28,898	41,282
Neutral angle (°)	89	76	65	58.3
Max. thickness reduction (%)	16.51	13.27	12.02	7.64
Max. thickness expansion (%)	31.36	36.82	40.91	43.64

반력모멘트를 부가함에 따라 중립축의 위치가 파이프 외측으로 이동함을 알 수 있었으며 반력모멘트 부가량이

증가함에 따라 중립축의 파이프 외측으로의 이동량 또한 증가함을 알 수 있었다.

Table 4는 반력모멘트에 따른 최대 두께 감소율과 최대 두께 증가율의 변화와 중립축의 위치를 나타내는 것으로서 이론 해석에서 두께 감소율 12.5%로 하기 위한 반력모멘트 값인 28,898 Kgr · m에서의 두께감소율이 12.02 %로 이론결과와 잘 일치하였다. Fig. 10에 반력모멘트에 따른 최대 파이프 두께 감소율을 나타낸다.

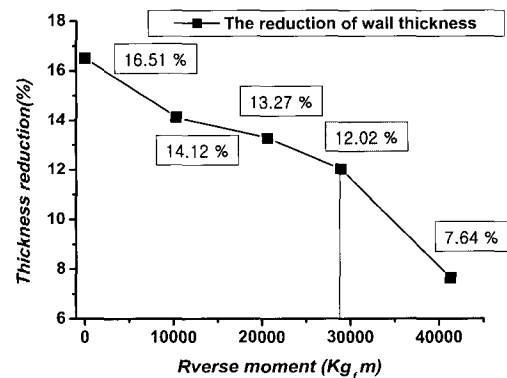


Fig. 10 Reduction of wall thickness according to the reverse moment

파이프 벤딩 공정에서 설계조건을 만족하기 위해서는 반력모멘트를 부가하는 방법 외에 가열영역에 온도구배를 부가함으로써 파이프 외측 측 인장 축의 변형 저항을 증가시켜 두께감소율을 상대적으로 줄이는 방법이 있다. 따라서 유한요소 해석을 통하여 온도구배 부여 시 두께 감소율의 변화를 평가하였다. 적용된 해석조건은 Table 2와 Table 3의 F조건과 같다. 온도구배는 벤딩의 외측과 벤딩 내측의 온도차이로 정의하였다. 여기서 벤딩외측은 내측에 비해 상대적으로 높은 온도분포를 가진다.

Fig. 11은 해석결과를 나타내는 것으로서 온도구배가 증가함에 따라 파이프의 최대 두께 감소율이 감소함을 알 수 있다. 특히 온도구배가 250℃인 경우 즉, 벤딩 내측이 벤딩 외측보다 250℃ 높은 경우에서는 최대 두께감소율이 11.8%로 반력모멘트 부가가 없이도 설계조건을 만족하는 값을 가짐을 알 수 있었다. 이러한 현상은 파이프 가열 영역에서 압축응력을 받는 부분은 온도가 높고 반대로 인장을 받는 부분에서는 온도가 낮아 상대적으로 인장 축의 변형저항이 압축 축보다 크게 되어 변형이 적게 일어나 두께 감소율이 감소하게 되어 나타나는 현상이다. 그러나 높은 온도구배는 상대적으로 벤딩외측의 낮은 온도분포로 인해 파이프의 변형저항을 증가시켜 벤딩력을 상승시키기 때문에 적용에 한계가 있다.

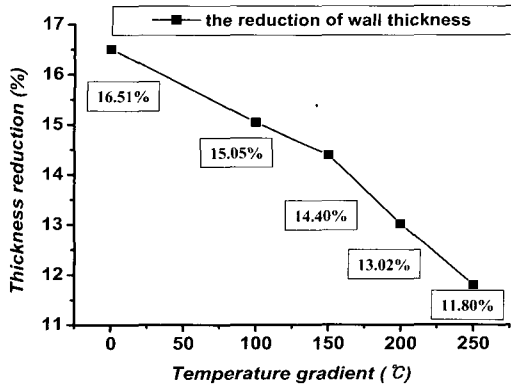


Fig. 11 The reduction of wall thickness according to the temperature gradient

#### 4. 파이프 벤딩 실험

##### 4.1 실험장치 및 실험 조건

유한요소 해석으로부터 평가된 반력모멘트에 따른 두께감소율의 변화를 검증하기 위해 파이프 벤딩 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 소재 및 파이프 제원은 유한요소해석과 동일하게 하였다. 고주파 유도가열조건은 파이프 이송속도는 0.5mm/s, 가열폭 20mm로 실험을 수행하였으며 가열온도는 900°C로 제어하였다. Fig. 12는 벤딩실험에 사용된 장비를 나타낸다. 반력모멘트 부가량은 유한요소 해석에서 설계조건을 만족하는 값인 28,898 Kg·m을 부가하여 반력모멘트를 부가하지 않은 경우와 비교하였다.

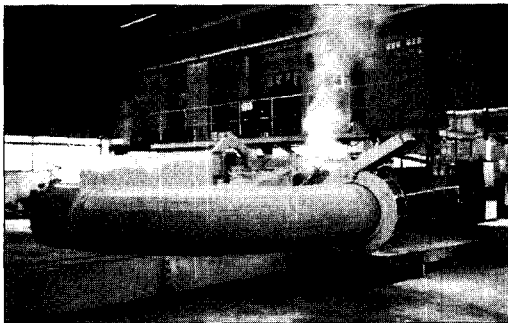


Fig. 12 Apparatus for pipe bending experiment

#### 4.2 실험 결과

반력모멘트를 가하지 않은 경우에 벤딩각도에 따른 두께 감소율의 변화의 이론 및 유한요소 해석결과 및 실험결과를 Fig. 13에 나타낸다. 유한요소 해석결과와 마찬가지로 실험결과 역시 벤딩 각도에 따라 두께 감소율이 크게 변화하지 않음을 알 수 있으며 실험결과와 유한요소 해석 결과가 대체적으로 잘 일치함을 확인 할 수 있다. Fig. 14에 반력모멘트를 가하지 않은 경우와 두께 감소율 12.5%로 하기 위한 반력모멘트를 가한 경우에 대한 벤딩각도에 따른 최대 두께감소율의 변화에 대한 실험결과를 나타낸다. 반력모멘트를 가한 경우가 반력모멘트를 가하지 않은 경우에 비해 전체적으로 두께 감소율이 설계조건을 만족하는 범위에 존재하는데 이 결과 역시 유한요소 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

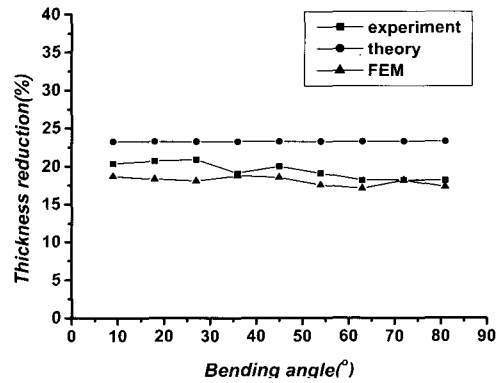


Fig. 13 Comparison of the theoretical, FE and experimental analysis results

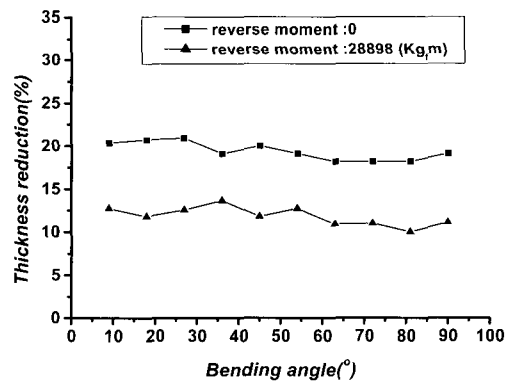


Fig. 14 Effect of the reverse moment in the pipe bending experiment



## 5. 결론

본 연구에서는 설계조건을 만족하고 작은 곡률 반경을 가지는 파이프 밴드제품의 제작을 위한 고주파유도가열을 이용한 파이프 벤딩 공정설계를 위해 먼저 파이프 벤딩 메커니즘을 이론적으로 규명하여 각 공정 변수들이 공정에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 유한요소 해석을 통해 각각의 공정변수, 반력모멘트 및 온도구배가 두께감소에 미치는 영향을 파악하였다. 이론 해석 및 유한요소 해석의 타당성 검증을 위해 동일한 조건하에서 파이프 벤딩 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 파이프 두께 감소에 대한 설계조건을 만족하기 위해서는 반력모멘트를 부가하여 파이프 변형단면에서의 중립축을 벤딩 외측으로 이동, 즉 변형시 인장응력을 받는 영역을 압축력을 가함으로서 줄이는 방법 또는 가열 영역에 온도구배를 부여함으로써 가능하다.

(2) 유한요소 해석을 통해 벤딩각도에 따라 중립축의 위치가 89~91°로 변화가 없으므로 벤딩 각도의 변화에 따라 파이프의 두께 감소율도 변화하지 않으므로 설계조건을 만족하기 위한 반력모멘트 부가량도 일정함을 알 수 있었다.

(3) 파이프 벤딩 공정의 중요 공정변수는 가열온도, 가열폭, 파이프 이송속도, 냉각속도로서 가열온도는 낮을수록 가열폭은 넓을 수록 이송속도는 빠를 수록 최대 두께 감소율은 감소함을 알 수 있었다.

(4) 이론으로부터 계산된 반력모멘트를 실제 유한요소 해석과 실험을 통하여 검증한 결과 잘 일치함을 알 수 있었으며 유한요소해석 결과 온도구배의 경우 벤딩 외측과 내측의 온도 차이가 250℃가 되면 반력모멘트 부가 없이도 설계조건을 만족하는 제품을 생산할 수 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀 정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 참 고 문 헌

- (1) T. behne, 1983, "A new bending technique for large diameter pipe", IAMI, Vol. 1, p.34.
- (2) W. OKeefe, 1977, "Inductive bending machine seeks to reduce number of welds in nuclear piping system", Power, Vol. 1, pp.74~75.
- (3) H. Blume, W. E. Speth, K. Bredenbruch, et al., 1983, "The production of pipe bends for power stations by the induction heating", Energy Dev., Vol. 12, pp.9~15.
- (4) S. Kuriyama, T. Aida, 1993, "Theoretical analysis of bending of tube having ununiform distribution of temperature by high frequency induction heating", Proc. 4th Adv. Technol. of Plasticity, pp. 464~469.
- (5) W. Zutang, Hu Zhong, 1990, "Theory of pipe bending to a small bend radius using induction heating", J. Mater. Process. Technol., Vol. 21, pp.275~284.
- (6) H. Asao, K. Okada, M. Wananabe, H. matsumoto, et al, 1983. "Analysis in workability of pipe bending using high frequency induction heating", Proc. 24th Int. Mach. Tool. Des. Res. Conf., pp.7~104.
- (7) H. Asao, K. Okada et al., 1992, "Prevention of reduction of Wall Thickness in Tube Bending Using High Frequency Induction Heating", J. JSTP, Vol. 33, No. 372, pp.49~55.
- (8) Z. Hu, J. Q. Li, 1999, "Computer simulation of pipe-bending processes with small bending radius using local induction heating", J. Mat. Process. Technol., Vol. 91, pp.75~79.
- (9) H. Asao, K. Okada et al., 1987, "Numerical analysis of bending force in tube bending using frequency induction heating-investigation of metal forming local heating", J. JSTP, Vol. 28, No. 313, pp.150~157.