

고주파 유도가열을 이용한 열간 파이프 벤딩 공정 설계

류경희*, 이동주*, 김동진**, 김병민**, 김광호***

Process Design of the Hot Pipe Bending Process Using High Frequency Induction Heating

Keong Hye Ryu*, Dong Ju Lee*, Dong Jin Kim**, Byung Min Kim**, Kwang Ho Kim***

ABSTRACT

During hot pipe bending using induction heating, the wall of bending outside is thinned by tensile stress. In design requirement, the reduction of wall thickness is not allowed to exceed 12.5%. So in this study, two methods of bending, one is loading of reverse moment and the other is loading of temperature gradient, have been investigated to design pipe bending process that satisfy design requirements. For this purpose, finite element analysis with a bending radius $2D_0$ (outer diameter of pipe) has been performed to calculate proper reverse moment and temperature gradient to be applied. Induction heating process has been analyzed to estimate influence of heating process parameters on heating characteristic by finite difference method. Then pipe bending experiments have been performed for verification of finite element and finite difference analysis results. Experimental results are in good agreement with the results of simulations.

Key Words : Hot pipe bending(열간 파이프벤딩), High frequency induction heating(고주파 유도가열), Wall thickness reduction(두께감소), Reverse moment(반력모멘트), Temperature gradient(온도구배), FE analysis(유한요소해석), Finite difference method(유한차분법)

기호설명

f = Induction frequency
 F_0 = Fourier number
h = Heat transfer coefficient
 I_0 = Induced surface current density
 I_x = Current density at arbitrary depth of pipe
k = Thermal conductivity

α = thermal diffusivity
 β_i = Biot number
 ϵ = Emissivity
 δ = Penetration depth
 μ = Relative permeability of workpiece
 ρ = density
 ρ_r = Relative resistivity of workpiece
 σ = Stefan-Voltzmann constant

2001년 3월 13일 접수
* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소
*** 부산대학교 무기재료공학과

1. 서론

고주파 유도가열을 이용한 열간 파이프 밴딩 공정은 금형제작 없이 작은 밴딩 곡률을 가지는 밴드 및 대형 관의 밴드 제작에 널리 사용되는 공법으로 현재 발전설비, 조선, 플랜트 등의 산업분야에서 널리 적용되고 있는 공법이다.^[1-3] 특히 기존의 용접이나 금형을 통한 파이프 밴드제품의 생산에 비해 생산성 향상과 단가 감소, 양호한 기계적 성질의 밴드 제품생산 등의 장점이 있다.^[4] 그러나 파이프 밴딩 공정은 열간 밴딩공정과 고주파 유도가열을 이용한 가열공정이 복합적으로 고려되어야 하기 때문에 매우 복잡하다. 현재 국내에서의 고주파 가열을 이용한 파이프 밴딩 공정은 광범위한 적용 범위와 장점에도 불구하고 현장 작업자의 경험이나 시행착오에 의존하고 있기 때문에 열간 파이프 밴드제품의 단가상승 및 생산성저하를 초래하는 어려움이 있다.

일반적으로 고주파 유도가열을 이용한 파이프 밴딩 공정 중에 밴딩 외측은 인장응력으로 인해 두께가 감소하고 내측은 압축응력에 의해 두께가 증가하는 경향을 가진다. 그러나 파이프 밴드제품이 주로 높은 온도와 압력을 가지는 유체의 수송에 사용되어짐을 감안하여 공학적 설계요건은 최대 두께 감소율을 12.5% 이내로 제한하고있다.^[5] 특히, 열간 파이프 밴딩 공정에 의한 파이프 밴드의 생산에 있어 계속적으로 요구되는 작은 곡률을 가지는 파이프 밴드제품의 수요를 고려할 때 설계요건을 만족하는 고주파 유도가열을 이용한 열간 밴딩기술의 개발이 요구되고 있다. 그러나 고주파 유도가열을 이용한 열간 밴딩공정의 경우 공정 자체가 고주파를 이용한 유도가열 공정과 가열영역에서의 소성변형 공정이 복합적으로 발생하므로 매우 복잡하여 두께 감소를 줄이기 위한 밴딩기술 개발이 미흡한 실정이다.

파이프의 두께 감소율을 최소화 하고 밴딩 곡률 반경을 작게 하기 위해서는 기존의 열간 밴딩공정으로는 불가능하기 때문에 반력모멘트를 성형 중에 작용시켜 인장응력이 작용하는 영역을 상대적으로 줄이거나 고주파 유도가열 공정에서 파이프의 온도 구배를 부여하여 인장응력이 작용하는 밴딩 외측의 유동응력을 증가시켜야 한다.^[6-8] 따라서 본 연구에서는 먼저 설계조건을 만족하는 최적의 파이프 밴딩 공정설계를 위해 유한요소 해석을 통해 반력모

멘트 및 온도구배가 두께감소에 미치는 영향을 파악하여 설계 조건을 만족하기 위해 필요한 반력모멘트의 양과 온도 구배량을 결정하였다. 또한 고주파 유도가열공정에서 각각의 공정변수들이 온도 분포에 미치는 영향을 파악하기 위해 유한차분법을 이용하여 유도가열 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 통하여 균일한 온도분포 및 적절한 온도구배를 위한 가열조건을 선정하였으며 해석의 타당성 검증을 위해 동일한 조건하에서 파이프 밴딩 실험을 수행하였다.

2. 고주파 유도가열을 이용한 파이프 밴딩

2.1 열간 파이프밴딩공정 및 밴딩 메커니즘

고주파유도가열을 이용한 열간 파이프 밴딩공정은 크게 고주파 유도가열 장치, 파이프 이송(feeding)장치, 클램프(clamp)장치로 구성된다. Fig.1은 파이프 열간 파이프 밴딩공정의 개략도를 나타낸다. Fig. 1에서처럼 파이프의 한쪽 끝은 클램프에 고정되어 있고 반대쪽에서 파이프 이송장치에 의해 파이프에 밴딩력을 가하면 고주파유도가열에 의해 국부 가열된 영역에 밴딩 모멘트가 발생한다. 여기서 피봇(pivot)을 중심으로 밴딩 압이 회전을 하기 때문에 파이프는 밴딩 압의 길이에 의해 결정되는 곡률반경으로 밴딩 된다. 이때 고주파 유도가열에 의해 국부 가열영역에는 밴딩력과 피봇을 중심으로 한 밴딩압의 회전 효과로 발생된 밴딩 모멘트에 의해 변형이 발생하게 된다. 변형영역은 중립면을 기준으로 하여 인장응력과 압축응력이 작용하는 영역으로 나뉘어지게 되고 인장응력에 의해 밴딩외측은

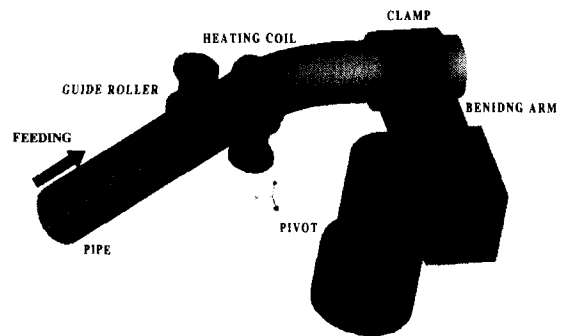


Fig. 1 Schematic of the hot pipe bending process using induction heating

두께가 감소하게 된다. 이러한 현상은 곡률반경이 감소함에 따라 증가하는데 일반적으로 곡률 반경이 $3.5D_0$ (outer diameter of pipe)까지가 기존의 벤딩 기술로 벤딩할 수 있는 임계치이다.¹⁹⁾ 따라서 두께 감소를 줄이기 위해 새로운 공정이 필요하다.

2.2 고주파 유도가열 및 해석 프로그램 개발

열간 파이프 벤딩공정은 고주파 유도가열을 이용한 국부 가열공정을 포함하고 있다. 고주파 유도가열은 가열 코일에 교류전류를 흐르게 하면 전자 자기 유도작용에 의해 피가열재 내에 유도전류가 발생하고 이 유도전류에 의해 열이 발생되어 피가열재가 가열된다. 이때 발생하는 유도전류(I_x)는 가열재의 표면(I_0)에 집중되고 표면으로부터 거리(x)가 멀어질수록 다음 식에 의해 지수적으로 감소한다.

$$I_x = I_0 \times \exp(-x/\delta) \quad (1)$$

여기서 δ 는 침투깊이(penetration depth)로 식(2)와 같이 표현된다.

$$\delta = 5.03 \times \sqrt{\frac{\rho_r}{\mu \cdot f}} \quad (2)$$

여기서 f 는 유도주파수, ρ_r 는 피가열재의 비저항이며 μ 는 비투자율이다. 따라서 소재내부에서 유도전류에 의해 발생하는 열은 다음 식으로 계산되어질 수 있다.¹⁰⁾

$$H_x = I_x^2 \cdot \rho \quad (3)$$

본 연구에서는 위의 식(1-3)으로부터 유도전류에 의해 내부에 발생하는 열량을 구하였다.

일반적으로 임의의 순간에 대한 에너지 보존의 법칙은 다음 식으로 표현된다

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{st}}{dt} = \dot{E}_{st} \quad (4)$$

여기서 \dot{E}_{in} 는 검사체적(control volume) 내로 유입되는 에너지 율이며 \dot{E}_{out} 는 검사체적을 빠져나가는 에너지 율이다. \dot{E}_g 는 다른 에너지 형태로부터 열에너지로 변환되어 검사체적 내에 유입되는 에너지를 나타내는 항으로서 고주파 유도가열의 경우 유도전류에 의한 내부 열 발생을 나타낸다. 따라서 유도전류에 의한 발생열량을 검사체적에서의 발생열량으로 하여 주위와의 열전달 즉, 대류 및 복사를 고려한 에너지 평형 방정식을 유도한 다음 유한차분식으로 이산화하였다. 특히, 유도가열에 의한 가열공정은 온도분포가 시간 종속적인 과도과정(transient process)이기 때문에 유한차분 형식 중 현시적 방법(implicit method)에 기인하여 이산화하여 수치 해석적으로 온도분포를 구할 수 있는 유도가열 프로그램을 개발하였다.

식(5-1,2,3)은 유한차분법에 의해 이산화된 열전달 방정식으로 각각 내부, 외부, 외부 코너부 절점에서의 유한차분 열방정식을 나타낸다. 식(5)에서 β_i 와 F_0 는 각각 Biot수와 Fourier수로서 다음 식으로 정의되며 수치해석시 안정성 판정기준이 된다.¹¹⁾

$$\beta_i = \frac{h\Delta x}{k} \quad (6)$$

$$F_0 = \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (7)$$

특히, 개발된 프로그램은 유도가열 해석뿐만 아니라 냉각공정까지 고려를 할 수 있게 하였다. 일반적으로 파이프 벤딩공정에서의 냉각법은 국부가열영역에서 벤딩 모멘트에 의해 변형이 발생한 직

$$T^{p+1}_{m,n} = F_0 (T^p_{m+1,n} + T^p_{m-1,n} + T^p_{m,n+1} + T^p_{m,n-1}) + (1-4F_0) T^p_{m,n} + \frac{\alpha \cdot \Delta t}{k} \dot{q} \quad (5-1)$$

$$T^{p+1}_{m,n} = F_0 (2T^p_{m-1,n} + T^p_{m,n+1} + T^p_{m,n-1} + 2\beta_i T_\infty + \frac{2\varepsilon\sigma\beta_i}{h} T_\infty^4) + (1-4F_0 - 2F_0\beta_i) T^p_{m,n} - \frac{2\varepsilon\sigma F_0\beta_i}{h} T^{p^*}_{m,n} + \frac{2q\Delta t}{\rho c A \Delta x} \quad (5-2)$$

$$T^{p+1}_{m,n} = 2F_0 (T^p_{m-1,n} + T^p_{m,n-1} + 2\beta_i T_\infty + \frac{2\varepsilon\sigma\beta_i}{h} T_\infty^4) + (1-4F_0 - 4F_0\beta_i) T^p_{m,n} - \frac{4\varepsilon\sigma F_0\beta_i}{h} T^{p^*}_{m,n} + \frac{4q\Delta t}{\rho c A \Delta x} \quad (5-3)$$

후 가열링으로부터 직접 냉각수가 분사되어 급냉하는 구조로 되어 있다. 따라서 프로그램에서 가열링에서의 냉각수 분사각도를 고려하여 냉각수가 직접적으로 분사되는 영역을 계산하고 이 영역에서의 대류 열전달 계수(h_c)를 변화시켜 냉각효과를 고려하였다. Fig. 2는 파이프 벤딩공정에서의 유도 가열과 냉각공정의 개략도를 나타낸다.

열간 파이프 벤딩공정에서 파이프 이송속도, 가열온도와 가열폭등은 좌굴(buckling), 주름(wrinkling) 그리고 두께 감소에 큰 영향을 미치므로 개발된 프로그램을 이용하여 각각의 가열 공정변수에 따른 가열 특성을 파악하였다. 특히, 파이프 이송속도는 밴드제품의 생산성뿐만 아니라 파이프의 가열시간을 결정하는 인자이므로 동일 가열조건하에서 생산성과 파이프의 가열온도를 동시에 고려하여 적정 이송속도를 구하였다.

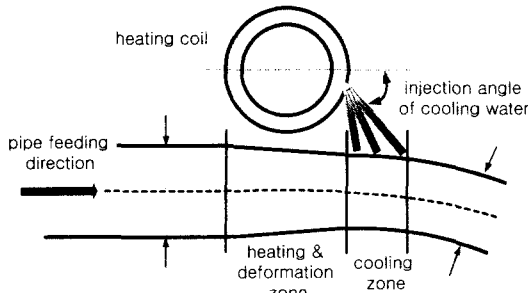


Fig. 2 Schematic of induction heating and cooling process

3. 유한요소 해석 및 결과

3.1 유한요소 해석 모델

유도가열 온도분포 및 이송속도, 파이프의 제원, 벤딩 곡률 등의 공정 변수에 따른 두께감소의 영향을 평가하기 위한 유한요소 해석 모델을 개발하였다.

유한요소 해석에 사용된 소재는 SPPS 42로서 고온 인장실험을 통해 온도와 변형속도에 대한 물성치를 구하여 해석의 데이터로 이용하였다. 본 연구의 대상인 파이프 재료의 경우 열간에서의 유동응력과 상온에서의 유동응력이 10배 이상 차이가

나고 변형은 가열부에서만 발생하기 때문에 가열영역 외의 상온의 온도분포를 가지는 파이프 및 벤딩암은 강체로서의 역할을 한다. 또한 벤딩암의 회전 중심인 피봇은 강체로 모델링하여 해석을 수행하였다. 유한요소 해석은 원주방향에 대해서 대칭이므로 해석의 시간을 단축하기 위해 1/2단면만 모델링하여 해석을 수행하였으며 유한요소 격자는 변형부(국부가열 영역)에 세분화하여 계산의 정확성을 높게 하였다. 해석은 벤딩각도 90° 만큼 수행하여 벤딩각도에 따라 반력모멘트와 온도구배가 두께 감소율에 미치는 영향을 평가하였으며 설계조건을 만족하기 위해 필요한 반력모멘트량과 온도구배량을 계산하였다. 고주파유도 가열장치에 의한 국부 가열 효과는 온도 경계조건으로 처리하였다. 즉, 시간에 따른 가열 온도를 요소 절점에 입력함으로써 파이프의 이송속도에 대한 파이프의 온도변화를 모델링하였다. 또한 온도구배를 부여하기 위한 경계조건은 파이프 단면을 90° 단위로 네 영역으로 나누고 각 영역마다 온도분포를 달리하도록 하여 부여하였다(Fig.3). Fig. 3은 파이프의 이송속도가 30mm/min, 파이프 단면의 온도구배가 200℃일 때 각 절점들의 온도 경계조건에 의한 온도변화를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 파이프온도 변화를 크게 변형영역인 국부유도가열영역과 유도가열영역에서의 진도효과에 의한 예비가열 영역 그리고 변형완료 후 가열링에 장치된 냉각수에 의한 냉각영역으로 나누어지게 경계조건을 부여하였다. 또한 온도구배는 파이프 단면의 최대 가열온도를 벤딩 외측인 A 영역에는 750℃, 중간영역인 B 영역에는 850℃, 벤딩 내측인 C영역에는 950℃로 하여 최대 온도차이가 벤딩 외측과 내측에서 200℃가 나도록 하였다.

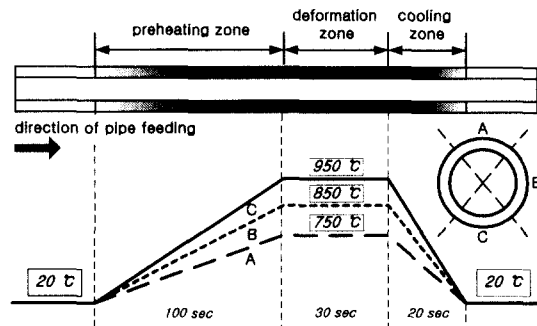


Fig. 3 Variation of temperature according to the heating time for each mode

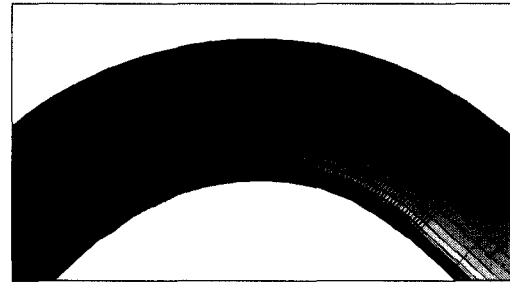
3.2 유한요소 해석 결과

설계조건을 만족하기 위해 필요한 반력모멘트량과 온도구배량을 구하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. Table 1은 유한요소 해석에 적용된 파이프 재원을 나타내는 것으로 검증에 위해 실제 현장에서 생산에 사용되는 것을 사용하여 해석을 수행하였다.

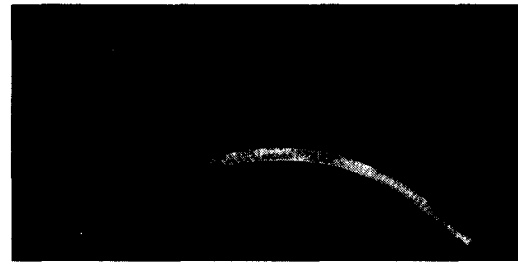
Fig. 4(a)는 90° 벤딩시 유한요소 해석에 의한 파이프의 변형양상을 나타내며 Fig. 4(b)는 실제 파이프 벤딩공정에 의한 파이프벤드 제품을 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있듯이 유한요소해석 결과와 실제 벤딩공정에서의 벤딩외측과 벤딩내측에서의 두께 분포와 변형 양상이 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

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 mode by FE analysis result



(b) Photograph of pipe bending product

Fig. 4 Comparison of deformed shapes between experiment and FE analysis

Table 2 Process parameters of FE analyses

Process parameters	Simulation conditions				
Used material	SPPS42				
Bending radius	2D _o				
Pipe outer diameter (mm)	170				
Pipe thickness (mm)	12				
Bending angle (°)	90				
Heating temperature (°C)	900				
Heating width (mm)	15				
Feeding velocity (mm/sec)	0.5				
Cooling time (sec)	20				
Reverse moment (N · m)	0	2106.2	2948.8	4212.4	
Temperature gradient (°C)	0	100	150	200	250

3.2.1 반력모멘트량 결정

파이프 벤딩공정에서 설계조건을 만족하기 위해서는 반력모멘트를 부가하여 중립축의 위치를 피봇을 중심으로 하여 파이프 외측으로 강제 이동시켜야 한다. 따라서 유한요소 해석을 통하여 반력모멘트 부가시 중립축의 위치변화와 두께감소율의 변화를 평가하였다. 해석조건은 Table 2와 같다.

반력모멘트를 부가함에 따라 중립축의 위치가 파이프 외측으로 이동함을 알 수 있었으며 반력모멘트 부가량이 증가함에 따라 중립축의 파이프 외측으로의 이동량 또한 증가함을 알 수 있었다. 결과적으로 벤딩외측으로 중립축의 이동은 상대적으로 인장응력이 작용하는 영역을 줄임으로써 두께감소율을 감소시키는 효과를 가져온다. Table 3은 반력모멘트에 따른 최대 두께 감소율과 최대 두께 증가율의 변화와 중립축의 위치변화를 나타내는 것으로서 반력모멘트량이 2948.8 N·m에서의 평균 최대 두께감소율이 12.02 %로 설계조건을 만족함을 알 수 있었다. Fig. 5에 반력모멘트량과 벤딩각도에 따른 최대 파이프 두께 감소율을 나타낸다.

Table 3 Analysis results according to reverse moment

Reverse moment (N·m)	0	2106.2	2948.8	4212.4
Neutral angle (°)	89	76	65	58.3
Max. thickness reduction rate (%)	16.51	13.27	12.02	8.19
Max. thickness expansion rate (%)	31.36	36.82	40.91	43.64

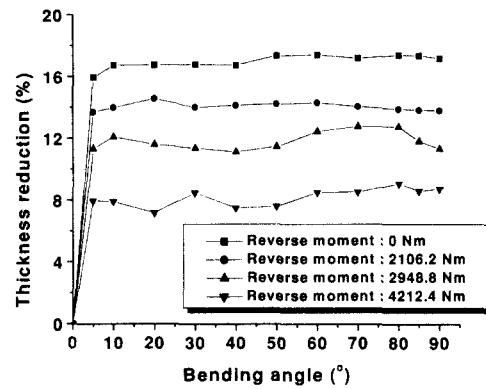


Fig. 5 Reduction of wall thickness versus the variation of the reverse moment

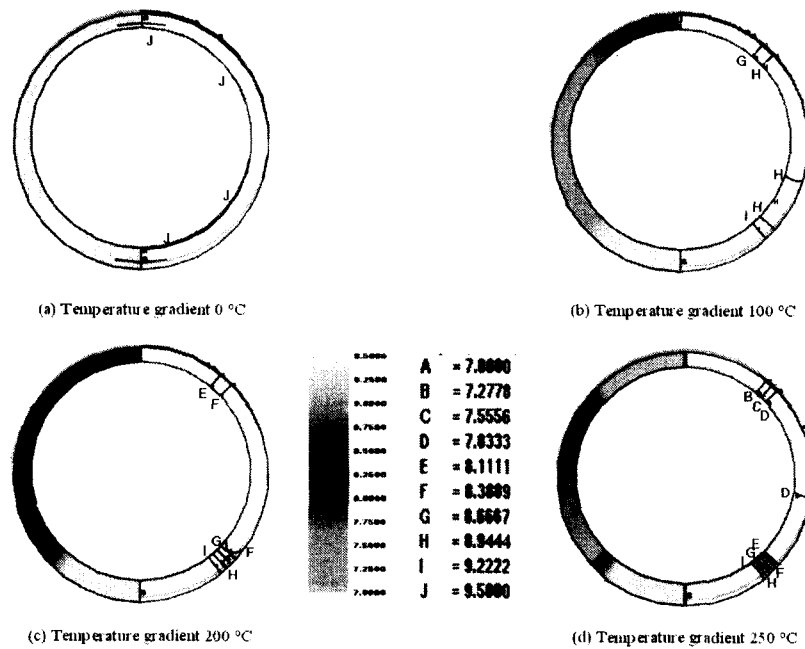


Fig. 6 Temperature distribution of the pipe section for temperature gradient

3.2.2 온도구배량 결정

파이프 벤딩공정에서 설계조건을 만족하기 위해서는 반력모멘트를 부가하는 방법 외에 가열영역에 온도구배를 부가함으로써 파이프 외측 측, 인장측의 유동응력을 증가시켜 두께감소율을 상대적으로 줄이는 방법이 있다. 따라서 유한요소 해석을 통하여 온도구배 부여 시 두께감소율의 변화를 평가하였다. 적용된 해석조건은 Table 2와 같다. 온도구배는 벤딩의 외측과 벤딩 내측의 온도차이로 정의하였다. 여기서 벤딩내측은 외측에 비해 상대적으로 높은 온도분포를 가진다. Fig. 6은 각각의 온도구배 부여 시 파이프 단면의 온도분포를 나타낸다.

Fig. 7은 해석결과를 나타내는 것으로서 온도구배가 증가함에 따라 파이프의 최대 두께 감소율이

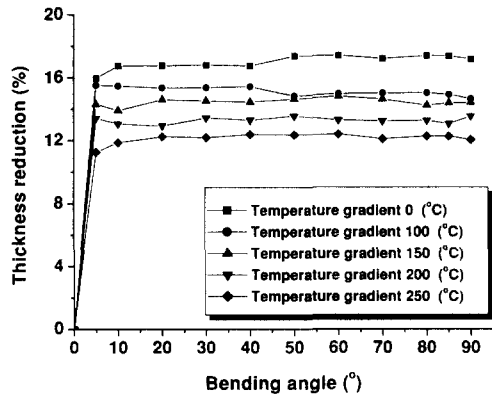


Fig. 7 Reduction of wall thickness according to the temperature gradient

감소함을 알 수 있다. 특히 온도구배가 250°C인 경우에는 평균 최대두께감소율이 11.8%로 반력모멘트를 부가하지 않아도 설계조건을 만족하는 값을 가짐을 알 수 있었다. 이러한 현상은 파이프 가열영역에서 압축응력을 받는 부분은 온도가 높고 반대로 인장을 받는 부분에서는 온도가 낮아 상대적으로 인장측의 유동응력이 압축 측보다 크게 되어 변형저항이 증가하여 두께 감소율이 감소하게 되어 나타나는 현상이다.

4. 유도가열 해석 및 결과

4.1 해석 모델 및 조건

고주파유도가열 공정에서 온도에 가장 많은 영향을 미치는 공정변수는 가열 주파수, 파이프 이송속도와 냉각속도이다. 가열 주파수의 경우 식(2)로부터 침투깊이를 결정함으로써 파이프의 두께 방향으로의 온도 분포에 큰 영향을 미치며 파이프 이송속도는 파이프의 가열시간을 결정한다. 그리고 벤딩 후 냉각수에 의한 냉각 또한 파이프의 온도분포에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 가열 주파수, 파이프 이송속도 및 냉각속도에 따른 가열 특성을 평가하였다. 해석에 고려된 냉각속도는 일반적으로 냉각수에 의한 강제 냉각시 냉각수의 대류 열전달계수인 50~20,000 $J/s \cdot m^2 \cdot K$ 의 범위에서 고려하였다.

Table 4에 유도가열 해석조건을 나타낸다. 일반적으로 파이프 벤딩공정에서의 고주파유도가열은

Table 4 Process parameters of induction heating analyses

Process parameters	Simulation conditions		
Coil diameter (mm)	170		
Outer diameter of coil section (mm)	15		
Inner diameter of coil section (mm)	12.8		
Initial temperature of pipe (°C)	20		
Temperature of surrounding medium (°C)	20		
Induction current density (A/mm^2)	0.5		
Induction frequency (kHz)	1.0	2.5	5.0
Feeding velocity of pipe (mm/sec)	5000	10000	20000
Heat transfer coefficient of cooling water ($J/s \cdot m \cdot K$)	0.25	0.5	1.0

단일 가열링으로 국부가열을 수행한다. 따라서 해석은 $\Phi 15.0\text{mm}$ 의 원형 코일에 대하여 해석을 수행하였으며 해석에 사용된 파이프 재원은 유한요소 해석에 사용된 재원과 동일하게 하여 해석을 수행하였다. Table 5에 해석에 사용된 소재의 물성치를 나타낸다.

Table 5 Material properties for the induction heating analysis

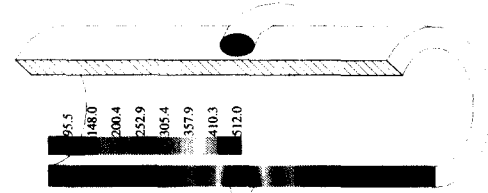
Used material	SPPS 42
Heat transfer coeffi. ($J/s \cdot m^2 \cdot K$)	20
Thermal conductivity ($J/s \cdot m \cdot K$)	40
Relative permeability	1
Relative resistivity (Ωm)	100
Specific heat ($J/kg \cdot K$)	685
Density (Kg/m^3)	7830

4.2 해석 결과

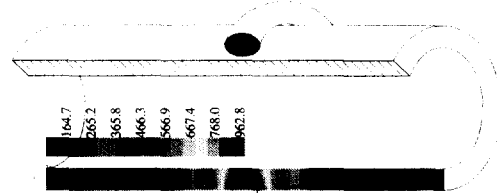
4.2.1 가열 주파수에 따른 가열 특성

파이프 이송과 냉각이 없다는 가정하에서 가열 주파수만 1kHz, 2.5kHz, 5kHz로 변화시켜 가열 특성을 평가하였다. 가열시간은 50초로 하여 해석을 수행하였다. 해석 결과 최대 온도는 가열코일의 중앙에 가장 근접한 절점에서 나타났으며 파이프 내부로 갈 수록 온도는 감소함을 알 수가 있었다. 또한 식(2)로부터 주파수가 1kHz, 2.5kHz, 5kHz일 때의 침투깊이는 각각 15.9mm, 10.06mm, 7.11mm으로 주파수가 높아짐에 따라 침투깊이는 감소하기 때문에 두께 방향으로 불균일 한 온도분포가 증가함을 알 수 있었다. 따라서 파이프 두께방향으로 균일한 온도로 가열하기 위해서는 파이프의 두께보다 침투깊이가 더 큰 주파수를 선정해야함을 알 수 있었다. 그러나 주파수가 1kHz일 경우에는 침투깊이가 파이프 두께 보다 크지만 상대적으로 파이프에 발생하는 전류밀도가 낮아져 최대 온도가 512 $^{\circ}\text{C}$ 로 비교적 낮은 온도분포가 나타남을 알 수 있었다. 결론적으로 유도주파수가 증가함에 따라 단위시간당 발생열량이 증가하여 파이프의 가열율은 높아지지만 침투깊이가 작아져 파이프의 불균일 가열을 초래하기 때문에 전류밀도 0.5A/mm², 파이프 두께 11mm인 경우에는 2.5kHz가 적정한 가열 주파수임

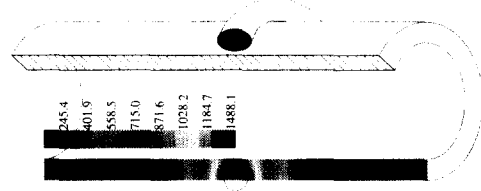
을 알 수 있었다. Fig. 8에 주파수에 따른 파이프의 온도분포를 나타낸다.



(a) Induction frequency : 1.0 kHz



(b) Induction frequency : 2.5 kHz

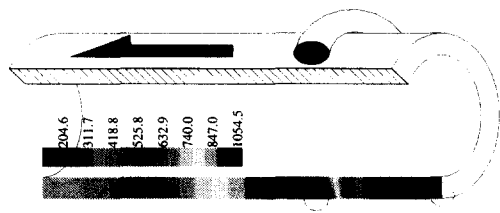


(c) Induction frequency : 5.0 kHz

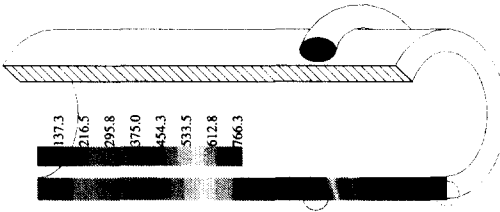
Fig. 8 Temperature distribution according to induction frequency

4.2.2 파이프 이송속도에 따른 가열 특성

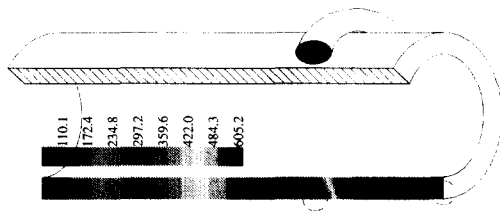
가열주파수 2.5kHz로하고 냉각은 없다는 가정하에서 파이프의 이송속도를 각각 0.5mm/sec, 0.75mm/sec, 1.0mm/sec로 변화시켜 이송속도에 따른 가열특성을 평가하였다. Fig. 9에 해석결과를 나타낸다. 유도가열이 가열링의 아래에서만 가열된다고 가정하면 가열영역이 15mm이기 때문에 각 절점의 가열시간은 이송속도 0.5mm/sec, 0.75mm/sec, 1.0mm/sec에서 각각 30sec, 20sec, 15sec가 된다. 따라서 이송 속도가 증가함에 따라 가열온도가 감소할 뿐만 아니라 파이프 두께방향으로 불균일 온도 분포가 증가됨을 알 수 있었다. 특히, 이송속도가 증가에 따른 파이프의 낮은 가열온도는 상대적으로 파이프의 변형영역에서의 유도응력을 증가시켜 벤딩력을 증가시키는 결과를 가져온다. 그러나 낮은



(a) Feeding velocity : 0.5 mm/sec



(b) Feeding velocity : 0.75 mm/sec



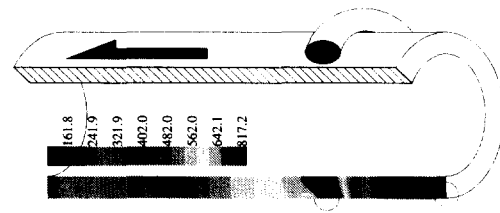
(c) Feeding velocity : 1.0 mm/sec

Fig. 9 Temperature distribution according to feeding velocity of pipe

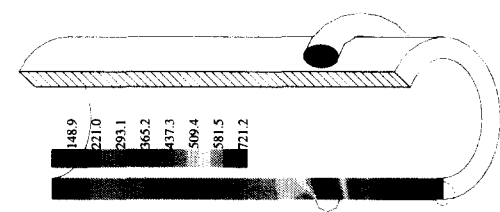
이송속도는 생산성을 저하시키기 때문에 유도 가열기의 가열용량에 따라 최대 이송속도를 선정하는 것은 중요하다. 파이프 이송 속도 0.5mm/sec일 경우에는 벤딩부의 온도가 1054℃, 파이프 이송 속도 0.75mm/sec일 경우에는 벤딩부의 온도가 766℃, 파이프 이송 속도 1.0mm/sec일 경우에는 벤딩부의 온도가 605℃이다(Fig.9). 따라서 벤딩이후 냉각과 일반적인 열간 벤딩공정에서 탄소강의 가열온도가 800~900℃임을 감안하면^[12]파이프 이송 속도는 0.5mm/sec인 경우가 벤딩력 관점에서 적절함을 알 수 있다.

4.2.3 냉각특성에 따른 가열특성

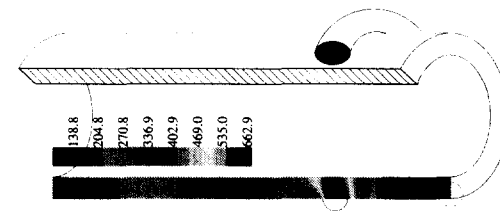
설계조건을 만족하기 위해 적절한 온도구배를 부여하기 위해서는 고주파유도가열 공정뿐만 아니라 냉각공정까지 고려하여야 한다. 따라서 가열



(a) Heat transfer coefficient : 5000 $J/s \cdot m^2 \cdot K$



(b) Heat transfer coefficient : 10000 $J/s \cdot m^2 \cdot K$



(c) Heat transfer coefficient : 20000 $J/s \cdot m^2 \cdot K$

Fig. 10 Temperature distribution according to heat transfer coefficient of cooling water

주파수 2.5kHz, 파이프 이송속도 0.5mm/sec로 하고 벤딩 후 냉각영역에서의 냉각수와 파이프와의 대류 열전달계수를 각각 5000 $J/s \cdot m^2 \cdot K$, 10000 $J/s \cdot m^2 \cdot K$, 20000 $J/s \cdot m^2 \cdot K$ 로 변화시켜 냉각특성에 따른 온도분포를 해석하였다. 해석에 사용된 냉각수의 대류 열전달계수는 일반적인 물의 강제대류시의 대류 계수 범위에서 실험에서 구한 온도분포를 고려하여 선정하였다. Fig. 10에 해석 결과를 나타낸다. 해석 결과 냉각수의 대류열전달 계수가 증가할수록 높은 냉각속도로 인해 전반적으로 파이프의 온도분포는 낮아지는 반면 파이프두께 방향의 온도 편차량은 감소함을 알 수 있었다. 특히 동일조건하에서 냉각을 하지 않은 경우와 비교하여 열전달 계수가 5000 $J/s \cdot m^2 \cdot K$, 10000 $J/s \cdot m^2 \cdot K$ 인 경우에 대하여 최대 가열온도의 차이가 각각 237.3℃, 333.3℃로 나타남을 알 수 있었으며 냉각조건 변화로 온도구배 부

여가 가능함을 알 수 있었다.

5. 파이프 벤딩 실험

5.1 실험장치 및 실험 조건

유한요소 해석으로부터 평가된 반력모멘트 및 온도구배 효과를 검증하기 위해 파이프 벤딩 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 소재 및 파이프 제원은 유한요소해석과 동일하게 하였다. 고주파 유도가열조건은 해석결과로부터 파이프 이송속도는 0.5mm/s, 가열폭 15mm, 유도 주파수 2.5kHz, 전류 밀도 0.5A/mm²로 하여 실험을 수행하였다. Fig. 11은 벤딩실험에 사용된 장비를 나타내며 Fig. 12는 실험 시 사용된 고주파 유도가열 공정을 나타낸다. 반력모멘트 부가량은 유한요소 해석에서 설계조건을 만족하는 값인 2948.8 N·m을 부가하여 반력모멘트를 부가하지 않은 경우와 비교하였으며 온도구배는 벤딩 외측과 내측의 냉각수 분사각도, 파이프와 코일의 간극 및 냉각수 분사유무를 조정함으로써 부여하였다. 온도구배 부여를 위해 Fig. 13과 같이 가열링을 재 설계하여 실험을 수행하였다.



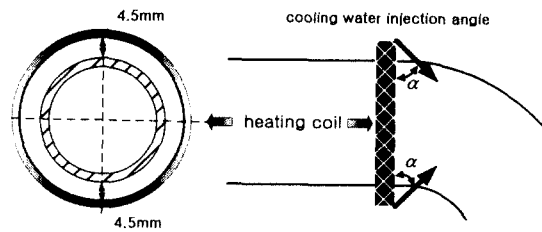
Fig. 11 Apparatus for pipe bending experiment

Fig. 13(a)은 기존의 열간벤딩공정에서 사용되던 가열 코일로서 벤딩외측과 내측에서의 코일과 파이프의 간극이 4.5mm로 일정하며 냉각수는 파이프 변형이후에 전체적으로 분사각 α 로 분사되어 균일한 냉각을 함으로써 온도구배가 없는 경우의 가열링이다(type A). Fig. 13(b)은 온도구배부여를 위한 가열링의 형태로서 벤딩 외측과 벤딩내측의 파이프와 코일사이의 간극을 12mm에서 5mm까지 순차적으로 줄였으며 냉각수 분사각도를 벤딩 내측에서는

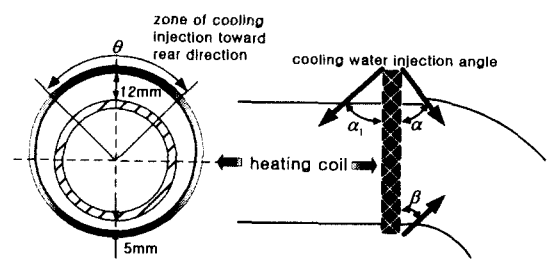
β , 벤딩외측에서는 α_1 로 다르게 조정함으로써 차등 냉각을 통해 온도구배를 부여하였다(type B). 또한 큰 온도구배를 위해 파이프의 변형이전 영역에서도 파이프 단면의 θ 영역에서 냉각수를 분사하였다(type C).



Fig. 12 Photograph of high frequency induction heating process for hot pipe bending



(a) Conventional heating coil (type A)



(b) Newly designed heating coil for temperature gradient (type B, C)

Fig. 13 Induction heating coil for experiment

5.2 실험 결과

먼저 유한요소 해석으로부터 평가된 반력모멘트의 영향을 검증하기 위해 벤딩 실험을 수행하였다. Fig. 14에 반력모멘트를 가하지 않은 경우와 두께 감소율 12.5%로 하기 위한 반력모멘트인 28,898 kg·m를 가한 경우에 대한 벤딩각도에 따른 최대 두께감소율의 변화에 대한 실험결과를 나타낸다. 실험결과 반력모멘트를 가한 경우가 반력모멘트를 가하지 않은 경우에 비해 전체적으로 두께 감소율이 설계조건을 만족하는 범위에 존재하며 평균 최대 두께감소율이 11.83%로 유한요소해석결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 다음으로 유한요소 해석으로부터 평가된 온도구배에 따른 두께감소율을 실험을 통해 검증하였다. 실험은 반력모멘트를 부여한 경우와 반력모멘트와 온도구배를 동시에 부가한 경우에 대해 수행하였다. 온도측정 결과 가열링 type B를 사용한 경우의 온도구배는 약 150℃이었으며, 가열링 type C를 사용한 경우에는 약 200℃의 온도구배를 나타냈다. Fig. 15에 실험결과를 나타낸다. 실험결과 온도구배가 150℃인 경우의 평균 최대 두께감소율은 7.91%이었으며 온도구배가 200℃인 경우에는 평균 최대 두께감소율이 6.55%이었다. 이 값은 설계조건인 12.5%보다 훨씬 작은 값으로 온도구배와 반력모멘트를 동시에 가한 효과임을 알 수 있었다. 특히 온도구배가 증가함에 따라 두께감소율은 유한요소해석과 마찬가지로 감소하였는데 두께 감소율을 최소로 하기 위해서는 반력모멘트와 온도구배를 동시에 부여하는 방법이 적절함을 알 수 있었다.

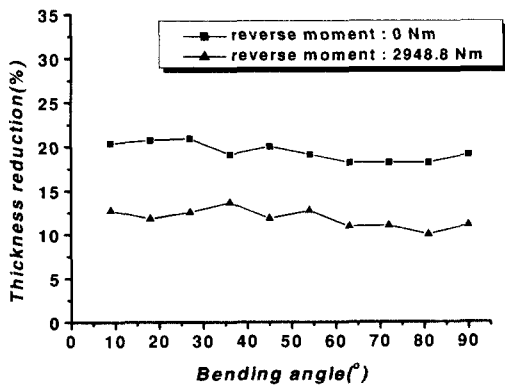


Fig. 14 Effect of the reverse moment in the pipe bending experiment

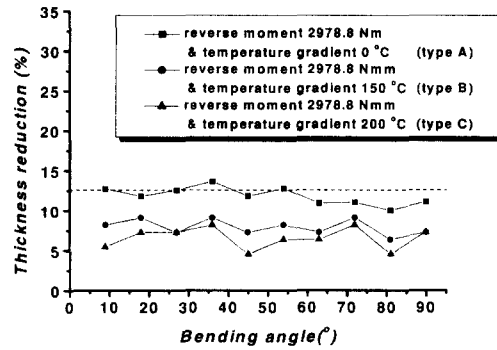


Fig. 15 Experiment results for each bending method

6. 결론

본 논문에서는 설계조건을 만족하고 작은 곡률 반경을 가지는 파이프 벤드제품의 제작을 위해 고주파유도가열을 이용한 파이프 벤딩 공정설계에 대해 연구하였다. 곡률반경 2D₀ 파이프 벤딩공정에 대한 유한요소 해석을 통해 반력모멘트 및 온도구배가 두께감소에 미치는 영향을 파악하여 설계 조건을 만족하기 위해 필요한 반력모멘트의 양과 온도 구배량을 결정하였다. 또한 고주파 유도가열공정에서 각각의 공정변수들이 온도 분포에 미치는 영향을 파악하기 위해 유한차분법을 이용하여 유도가열 프로그램을 개발하고 개발된 프로그램을 통하여 균일한 온도분포 및 적절한 온도구배를 위한 가열조건을 선정하였다. 그리고 수치 해석의 타당성 검증을 위해 동일한 조건하에서 파이프 벤딩 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 설계조건을 만족하기 위해서는 반력모멘트를 부가하여 파이프 변형단면에서의 중립축을 벤딩 외측으로 이동, 즉 변형시 인장응력을 받는 영역을 압축력을 가함으로서 줄이는 방법 또는 가열영역에 온도구배를 부여하여 인장축의 유동응력을 증가시키는 방법으로 가능하다.
- 2) 유한요소해석결과 반력모멘트가 2948.8 N·m 이상이 되면 설계조건을 만족하는 파이프 벤드 제품이 생산이 가능함을 알 수 있었으며 온도구배의 경우 벤딩 외측과 내측의 온도 차이가 250℃가 되면 반력모멘트 부가 없이도 설계조건을 만족하는

제품을 생산할 수 있음을 알 수 있었다.

3) 유도가열 해석결과 가열주파수는 두께 방향의 온도분포와 최대가열온도에 큰 영향을 미쳤으며 균일가열을 위해 주파수는 침투깊이가 파이프 두께보다 깊은 범위의 주파수를 사용해야함을 알 수 있었다. 또한 파이프의 이송속도는 증가할 수록 가열시간이 짧아져 낮은 온도분포와 불균일 가열이 발생하였으며 냉각률은 높을 수록 낮은 온도분포와 균일한 온도분포를 가짐을 알 수 있었다.

4) 실험결과 반력모멘트 2948.8 N·m와 온도구배 200℃를 동시에 가하였을 때 평균 최대 두께 감소율은 6.55%으로 유한요소 해석결과와 잘 일치하였다. 또한 이 결과로부터 두께 감소를 최소화하는 공정은 반력모멘트와 온도구배를 동시에 부여하는 공정임을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

1. T. behne, "A new bending technique for large diameter pipe," IAMI, Vol. 1, pp. 34, 1983.
2. W. OKeefe, "Inductive bending machine seeks to reduce number of welds in nuclear piping system," Power, Vol. 1, pp. 74-75, 1977.
3. H. Blume, W. E. Speth, K. Bredenbruch, et al., "The production of pipe bends for power stations by the induction heating," Energy Dev., Vol. 12, pp. 9-15, 1983.
4. S. Kuriyama, T. Aida, "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, 1993.
5. W. T. Wang, Z. Hu, "Theory of pipe bending to a small bend radius using induction heating," J. Mater. Process. Technol., Vol. 21, pp. 275-284, 1990.
6. H. Asao, K. Okada, M. Wananabe, H. matsumoto, et al, "Analysis in workability of pipe bending

using high frequency induction heating," Proc. 24th Int. Mach. Tool. Des. Res. Conf., pp. 97-104, 1983.

7. K. Kobatake, Th. Ichise, et al., " Dieless bending of non-circular pipes," J. JSTP, Vol 28, No.313, pp. 158-165, 1987.
8. H. Asao, K. Okada et al., "Prevention of reduction of Wall Thickness in Tube Bending Using High Frequency Induction Heating," J. JSTP, Vol. 33, No. 372, pp. 49-55, 1992.
9. Z. Hu, J. Q. Li, "Computer simulation of pipe-bending processes with small bending radius using local induction heating," J. Mat. Process. Technol., Vol. 91, pp. 75-79, 1999.
10. Y. Oki, Y. Yoshida, et al., " Analysis of temperature distribution in a billet by induction heating," J. JSTP, Vol. 40, No. 7, pp. 533-537, 1990.
11. F. P. Incopera, D. P. Dewitt, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
12. H. Asao, K. Okada et al., "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, 1987.