

대구경 곡관 두께감소율 제어를 위한 온도점프 벤딩 공정의 최적화에 관한 연구

허철수*, 김래성**, 전정환***, 양용균*, 최효규****, 류성기*,#
*경상대학교 기계항공공학부(공학연구원), **경상대학교 창의적항공IT기계융합사업단,
경상대학교 산업시스템공학부(공학연구원), *(주)제이에이치

Study on Optimization of Temperature Jump-Bending Process for Reducing Thickness Attenuation of Large-Diameter Steel Pipe

Zhe-Zhu Xu*, Lae-Sung Kim**, Jeong-Hwan Jeon***, Long-Jun Liang*, Hyo-Gyu Choi****, Sung-Ki Lyu*#

*School of Mechanical & Aerospace Engineering(ERI), Gyeongsang National University,

**Creative Aero-IT-Mech Convergence Eng. Education Program, Gyeongsang National University,

Department of Industrial & Systems Eng.(ERI), Gyeongsang National Univ., *JH LTD.

(Received 5 August 2015; received in revised form 10 August 2015; accepted 13 August 2015)

ABSTRACT

Induction bending is a method that allows the bending of any material that conducts electricity. This technology applies a bending force to a material that has been locally heated by an eddy current induced by a fluctuating electromagnetic field. Induction bending uses an inductor to locally heat steel through induction. This results in a narrow heat band in the shape to be bent. In general, the reduction of thickness attenuation of a large-diameter steel pipe is not allowed to exceed 12.5%. In this paper, in order to meet the standard of thickness attenuation reduction, a non-uniform heating temperature jump-bending process was investigated. As a result, the developed bending technique meets the requirements of thickness attenuation reduction for large-diameter steel pipes.

Key Words : Thickness Attenuation(두께감소율), Bending(벤딩), High Frequency Heating(고주파 가열), Large Diameter Steel Pipe(대구경 강관), Optimization(최적화)

1. 서 론

벤딩가공 부품은 건물, 다리 및 기차 레일과 같은 구조물에 널리 사용되고 있다. 또한 벤딩가공 부품은 중공업의 기초가 되고 있으며, 플랜트와 산업 구조물 발전정도를 나타낼 수 있는 중요한 기술로

평가되고 있다.

현재 파이프와 같은 구조강의 벤딩기술은 대부분 유도가열방식에 의존하고 있다. 유도가열방식에서는 국부적으로 가열된 관의 낮아진 소성유동 능력에 의존하며 관구조의 내측은 주로 압축변형이 발생하므로 변형 후 두께가 두꺼워지지만 외측은 반대로 인장변형을 받기 때문에 얇아진다. 이런 원인으로 강도가 떨어지는 문제점이 있으므로 해양플랜트와 같이 고강도 강관을 사용하는 업종에서는 두께의 감소량을 규격(12.5%이하)으로

Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

정하여 관리하고 있다. 기존 고압용 곡관의 벤딩은 주로 엘보를 이용한 접합 방식은 품질과 가격 측면에서 경쟁력이 높지 않기 때문에 많이 사용되지 않고 있다. 그리고 기존 압축 벤딩 방식은 제품의 요구사양인 두께 감소 허용량을 만족시키기 위하여 압축력을 가하는 방식으로 생산성이 일반 벤딩 방식에 비하여 60% 이하로 떨어지며, 가격 경쟁력 측면에서 불리하다. 그리고 전용장비가 필요한데, 크기가 일반장비의 2배 규모이고 가격은 5배 정도 비싸다.

기존 연구자들은 반력모멘트^[1-4]를 성형중에 작용시켜 인장응력이 작용하는 영역을 상대적으로 줄이거나 고주파 유도가열 공정에서 파이프의 온도구배를 부여하여 인장응력이 작용하는 벤딩외측의 유동응력을 증가시키는 방식으로 곡관의 두께 감소를 제어물 진행하고 있으며 많은 연구논문을 찾아볼 수 있다.^[5-9]

본 논문에서는 기존의 일반 고주파가열 벤딩에서 나타나는 두께 감소 문제를 해결하기 위하여 금속의 고온 유동특성을 이용하여 일반 균일 가열과 다른 축방향 및 원주방향의 국부적인 온도 비균일 분포 차별화 방식으로 가열하여 벤딩하는 기술로 두께 감소물 문제를 해결하였다.

2. 곡관벤딩 공법

2.1 곡관벤딩 메커니즘

벤딩과정에서 두께감소율을 계산하기 위하여 파이프의 소재를 강성 소성체라고, 파이프 단면의 평균 직경은 굽힘 후에도 변하지 않는다고 가정할 때 두께감소율은 아래와 같이 나타낼 수 있다.^[1]

$$\frac{\Delta t}{t_0} = \frac{1 - \cos\beta}{R/r_m + \cos\beta} \quad (1)$$

유도가열은 변압기의 2차 코일 대신 피가열 재료를 사용하여 전자기유도(電磁氣誘導)에 의해 2차전류가 피가열 재료를 흐르는 경우에 발생하는 줄열(Joule's heat)을 이용하여 가열하는 방식이다.

유도가열 벤딩시 발생하는 유도전류(I_x)는 가열재의 표면(I_0)에 집중되고 표면으로부터 거리(x)가 멀어질수록 다음 식에 의해 지수적으로 감소한다.^[10]

$$I_x = I_0 \times \exp(-x/\delta) \quad (2)$$

여기서 δ 는 침투깊이로서 아래식과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta = 5.03 \times \sqrt{\frac{\rho_r}{\mu \cdot f}} \quad (3)$$

여기서 f 는 유도주파수, ρ_r 는 치가열재의 비저항, μ 는 비투자율이다.^[10] 따라서 소재내부에 유도전류에 의하여 생기는 열은 다음 식에서와 같이 나타낼 수 있다.^[10]

$$H_x = I_x^2 \cdot \rho \quad (4)$$

2.2 곡관벤딩 공정

일반적으로 곡관 벤딩장치는 가열 및 냉각장치, 파이프 이송장치, 클램프 장치 등으로 구성되었다. Fig. 1은 파이프 벤딩공정의 개략도이며, 곡관 벤딩공정의 장비개략도를 나타냈다. 곡관 벤딩시에는 곡관 한쪽 끝부분을 회전하는 암에 구속하고 반대쪽에서 이송장치에 의해 곡관에 벤딩 힘을 가하면서 고주파 유도가열하면서 굽히는 과정이다. 동시에 곡관이 벤딩 되면서 가열부 주위에 냉각수로 냉각을 시킨다.

2.3 신공법 원리

벤딩가공 부품은 많은 구조물에 널리 사용되고 있다. Fig. 2에서와 같이 일반적인 유도가열 방식은 국부적으로 가열된 관의 낮아진 소성유동응력에 의존하며 관구조의 내측은 주로 압축변형이 발생하므로 변형 후 두께가 두꺼워지지만 외측은 반대로 인장변형을 받기 때문에 얇아진다.

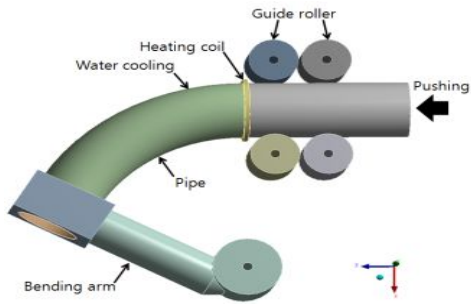


Fig. 1 Schematic of pipe bending process

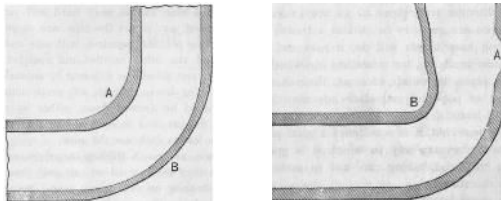
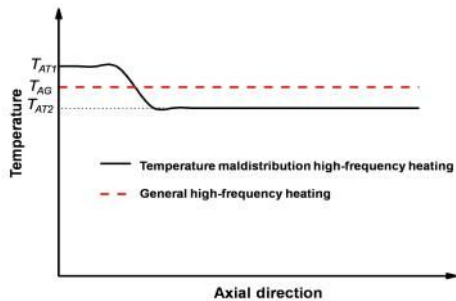
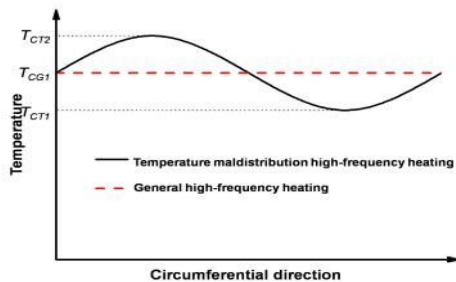


Fig. 2 Possible errors of pipe bending



(a) Axial Direction



(b) Circumferential direction

Fig. 3 Ideal temperature distribution

일반 고주파 벤딩의 경우 축방향과 원주방향 모두 일정한 온도로 설정하고 벤딩을 하는데 이러한 방식은 변형부분의 소성유동응력 변화가 똑같으므로 압축/인장 변형이 생길 수 있다. 축방향 온도 분포의 경우 Fig. 3(a)에서와 같이 비균일 고주파 가열은 초기 벤딩 부분의 온도를 높게하고 그 뒷부분의 온도를 낮게 설정함으로 벤딩초기의 갑작스런 응력집중으로 인한 두께감소를 방지한다. 원주방향 온도분포의 경우 Fig. 3(b)에서와 같이 비균일 고주파 가열은 원주방향의 가열 온도 T_{CT1} , T_{CT2} 를 최적온도로 설정하여 가열 및 냉각부분의 비균일 온도분포로 부위별 소성유동응력의 변화로 압축/인장 변형을 최소화 한다.

3. 벤딩장비

3.1 신공법 벤딩 가열 및 냉각장치

일반적으로 고급 고강도 강관을 사용하는 업종에서는 두께의 감소량을 규격(고압 곡관의 경우 12.5% 이하)으로 정하여 관리하고 있다. 본 논문에서는 일반 고주파가열 벤딩에서 나타나는 두께 감소 문제를 해결하기 위하여 금속의 고온 유동특성을 이용하여 일반 균일 가열과 다른 축방향 및 원주방향의 국부적인 온도 비균일 분포 차별화 가열을 진행하여 벤딩을 함으로써 두께 감소율 문제를 해결한다. Fig. 4는 신공법의 벤딩장비 핵심부인 가열 및 냉각부의 개발과정이다. Fig. 4에서와 같이 벤딩 공정 요구에 따라 조절편 D1~D7을 조절 하면 코일 내부 각 부분의 압력(P1~P8)에 따라 변화되면서 냉각액 분사량(V1~V8)이 변화되는 비균일 가열 고주파 벤딩이 가능해진다. 또한 이 그림에서와 같이 고주파 가열 코일, 코일자체 냉각 및 벤딩곡관 냉각수 분사 기능이 일체화된 코일 A와 냉각수 분사 방향을 잡아주는 공기 분사 코일 C로 구성되었다. 코일 A는 냉각수를 분사하는데 고주파 벤딩의 공정 수요로 이러한 냉각수는 한 방향으로만 흘러야 한다. C부분에서와 같이 냉각수 분사 코일과 공기분사 코일을 조합하면 D부분과 같이 냉각수가 한 방향으로만 분사된다.

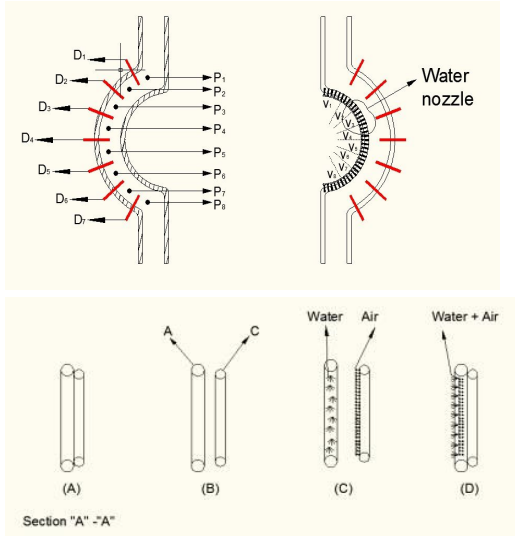


Fig. 4 Coil design of asymmetry heating bending



Fig. 5 Coil of asymmetry heating bending

이러한 공기/액체 냉각 일체형 비균일 가열 고주파 벤딩 코일로 비균일 가열이 가능하며 고주파 가열 코일 자체 냉각, 벤딩곡관 냉각수 분사량 및 방향 조절이 가능하다.

3.2 신공법 벤딩 장비

본 논문에서는 개발한, 비균일 가열이 가능하며 고주파 가열 코일 자체 냉각, 벤딩곡관 냉각수 분사량 및 방향 조절이 가능한 가열/냉각부를 기존의 고주파 벤딩장비에 활용하여 전용 온도점프 유도 가열 벤딩 가공 장비를 개발하였다. Fig. 6에 곡관 벤딩장비의 사진을 나타냈다.



Fig. 6 Equipment of asymmetry heating bending

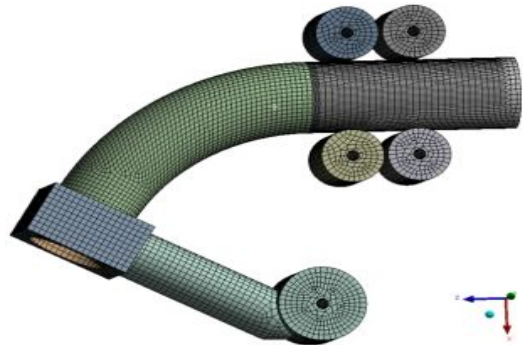


Fig. 7 Finite element model of pipe bending apparatus for thermal-structural analysis

4. 최적의 벤딩공정 결정

4.1 벤딩의 모델링 및 해석조건

곡관의 최적 벤딩공정을 결정하기 위하여 ANSYS Design Modeler에서 파이프 벤딩 장치를 Fig. 7과 같이 모델링 및 메쉬 생성작업을 수행하였다. 기존의 일반 벤딩 공정을 기초로 온도, 굽힘힘, 벤딩속도 등을 변화시켜 최적의 공정조건을 구하였다. 한편, 열전달해석 과정에서 수냉식 냉각 방식을 모사하기 위하여 열전달계수를 적절하게 설정하여야 한다. 높은 압력의 냉각유체인 경우 $21 \sim 25 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ 의 열전달계수를 적용하고 있으며, 본 연구에서는 낮은 압력의 냉각유체가 적용된 것으로 간주하여 $4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ 의 열전달계수를 적용하였다.

4.2 벤딩 해석결과

여러 가지 곡관 벤딩과정의 공정 조건중에서 응력 및 변형이 최적상태인 공정조건으로 해석한 유한요소해석 결과들을 아래와 같이 나타냈다. 곡관 벤딩 과정에 대한 열-구조 연성해석의 열전달해석 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 최적공정하에서의 고온부의 최고 온도는 870℃까지 상승하고 있으며, 수냉식 냉각효과에 의해서 곡관의 나머지 부분은 급격히 냉각되어 상온에 가까운 온도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 9에서는 곡관 벤딩 과정에서 발생하고 있는 응력분포를 보여주고 있다. 최적의 벤딩공정에서 최대 응력은 약 92 MPa로 고온부에서 발생하고 있는데, 이는 곡관 끝단의 강제이송과 Bending arm에 의한 고온부에서의 소성변형에 따른 소성응력으로 간주할 수 있다. Fig. 10은 곡관 벤딩에 의해 발생하고 있는 소성변형률을 표시하고 있다. 최대 소성 변형률은 곡관의 소성변형이 일어나고 있는 고온부의 위부분에서 0.029 mm/mm가 형성되고 있다. Fig. 11은 최적 공정하에서의 곡관 벤딩 과정에서 발생하는 전체 변형량을 나타내고 있다. 당초 60°까지 곡관 벤딩된 상태에서 1° 더 벤딩되었을 때의 전체 변형량을 표시하고 있는데, 최대 변형량 23.5 mm는 곡관 상부 또는 곡관 외곽 부분에서 발생하고 있다. 그러나 이는 곡관 우측 끝단의 강제이송과 Bending arm에 의한 벤딩에 따른 변위를 포함하고 있는 수치이며, 실제로는 고온부의 소성변형에 따른 변형량 21.4 mm가 곡관 벤딩에 따른 변형량이라고 간주되어야 할 것이다.

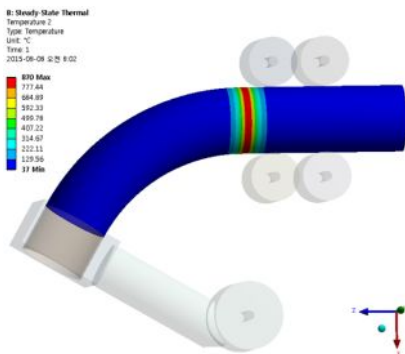


Fig. 8 Temperature distribution on the pipe

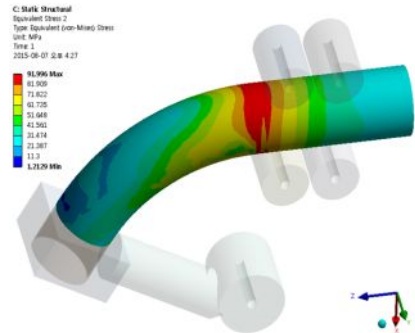


Fig. 9 Equivalent stress distribution on the pipe

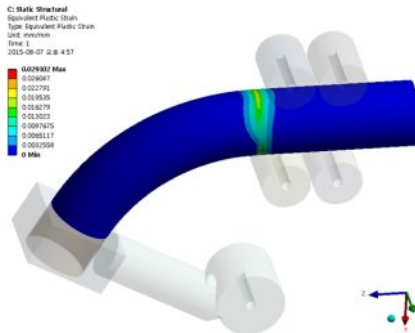


Fig. 10 Equivalent plastic strain on the pipe

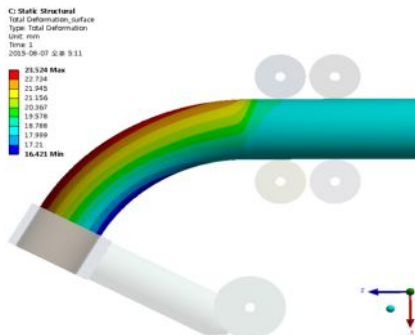


Fig. 11 Total deformation on the pipe

4.3 최적 공정변수

기존의 일반 벤딩 공정을 기초로 공정조건을 변화시켜 최적의 공정조건을 구한결과를 Table 1에 나타냈다. 가열 온도 T_{CT1} , T_{CT2} , T_{AT1} , T_{AT2} 는 각각 930, 870℃, 880℃~940℃, 860℃~920℃에서 최적의 열 소성 및 열 변형 특성을 나타냈고 이송속도는 0.65 mm/sec이 제일 적당한 해석 결과를 얻었다.

Table 1 Optimized bending process parameters

Process Parameters	T _{AT1}	T _{AT2}	T _{CT1}	T _{CT2}	Feed Speed
Optimized Condition	930℃	870℃	880℃~940℃	860℃~920℃	0.65 mm/sec

5. 실험결과 및 고찰

본 논문에서는 대구경 곡관 두께감소율 제어를 위한 온도점프 벤딩 공정의 최적화에 관한 연구를 통하여 최적화된 벤딩 공정을 통한 대구경 곡관 두께감소율을 측정하여 기존의 일반 벤딩공정과 비교하였다.

5.1 시험편

본 논문에는 대구경 곡관을 연구목표로 설정하였기 때문에 기존 산업에서 많이 쓰이는 곡관의 직경이 350 mm, 400 mm, 450 mm인 대구경 파이프를 시험편으로 사용하였다. Fig. 12는 대구경 파이프 시험편 사진이다.

5.2 측정방법

벤딩 곡관의 두께감소율은 벤딩으로 인한 인장부분의 두께를 측정하여 벤딩하지 않은 부분과 비교하여 어느 정도 감소되었는가를 평가하는 값이다. 본 논문에서는 직경이 350 mm, 400 mm, 450 mm, 두께가 각각 9t, 12t, 12t인 벤딩 곡관 인장부분을 부위별로 5번 측정하여 평균값을 구하였다.

5.3 측정결과

본 논문에서는 직경이 350 mm, 400 mm, 450 mm, 두께가 각각 9t, 12t, 12t인 파이프를 일반 벤딩법과 본 논문에서 개발한 온도점프 벤딩 공법으로 벤딩을 수행하여 벤딩 곡관 인장부분을 각각 부위별로 5번 측정한 결과를 Table 2와 Table 3에 나타냈다. Table 2와 Table 3에서 알 수 있듯이 일반 벤딩법에서 350 mm, 400 mm, 450 mm 직경 곡관의 두께 감소율을 측정한 결과 각각 13.99%, 15.03%, 15.66%로 나타났다.



Fig. 12 Test pieces

Table 2 Thickness results of normal bending process

No.	350 mm(9t)		400 mm(12t)		450 mm(12t)	
	Mesu. Thick.	Reduction Ratio	Mesu. Thick.	Reduction Ratio	Mesu. Thick.	Reduction Ratio
#1	7.63 mm	15.26 %	10.23 mm	14.78 %	10.31 mm	14.1 0%
#2	7.79 mm	13.40 %	10.36 mm	13.63 %	10.12 mm	15.6 8%
#3	7.74 mm	14.05 %	10.15 mm	15.40 %	10.13 mm	15.5 5%
#4	7.85 mm	12.83 %	10.14 mm	15.46 %	10.01 mm	16.6 0%
#5	7.70 mm	14.40 %	10.09 mm	15.88 %	10.03 mm	16.3 8%
Ave	7.74 mm	13.99 %	10.20 mm	15.03 %	10.12 mm	15.6 6%

Table 3 Thickness results of developed bending process

No.	350 mm(9t)		400 mm(12t)		450 mm(12t)	
	Mesu. Thick.	Reduction Ratio	Mesu. Thick.	Reduction Ratio	Mesu. Thick.	Reduction Ratio
#1	7.95 mm	11.7 %	10.56 mm	12.02 5%	10.55 mm	12.05 %
#2	8.00 mm	11.15 %	10.57 mm	11.87 5%	10.59 mm	11.78 %
#3	7.98 mm	11.35 %	10.60 mm	11.65 %	10.58 mm	11.8%
#4	8.00 mm	11.1 %	10.58 mm	11.82 5%	10.61 mm	11.6%
#5	7.95 mm	11.7 %	10.56 mm	12%	10.56 mm	11.98 %
Ave	7.97 mm	11.40 %	10.57 mm	11.88 %	10.58 mm	11.84 %

그리고 본 연구에서 개발한 온도점프 벤딩 공법에서 350 mm, 400 mm, 450 mm 직경 곡관의 두께 감소율을 측정한 결과는 각각 11.40%, 11.88%, 11.84%로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 대구경 곡관 두께감소율 제어를 위한 온도점프 벤딩 공정의 최적화에 관한 연구를 통하여 최적화된 벤딩 공정을 통한 대구경 곡관 두께감소율을 측정하여 기존의 일반 벤딩공정과 비교하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 새로운 가열/냉각부 구조(공/액 냉각 일체형 비균일 가열 고주파 벤딩 코일)로 비균일 가열이 가능하며 고주파 가열 코일 자체 냉각, 벤딩곡관 냉각수 분사량 및 방향 조절이 가능하였다.
2. 기존의 일반 벤딩 공정을 기초로 공정조건을 변화시켜 최적의 공정조건을 구한 결과, 가열 온도 T_{CT1} , T_{CT2} , T_{AT1} , T_{AT2} 는 각각 930, 870℃, 880~940℃, 860~920℃에서 최적의 열 소성 및 열 변형 특성을 나타냈고 이송속도는 0.65 mm/sec일 때 제일 적당한 해석 결과를 얻었다.
3. 일반 벤딩법에서 350 mm, 400 mm, 450 mm 직경 곡관의 두께 감소율을 측정한 결과 각각 13.99%, 15.03%, 15.66%로 나타났고 개발한 온도점프 벤딩 공법에서 350 mm, 400 mm, 450 mm 직경 곡관의 두께 감소율을 측정한 결과 각각 11.40%, 11.88%, 11.84%로 나타났다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 지역특화산업육성사업과 중소기업청 산학연협력 기술개발사업 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Lee, H. W., Jung, S. Y., Woo, T. K., Kim, C., "An Optimum Design of Pipe Bending Process

- Using High Frequency Induction Heating and Dynamic Reverse Moment", Transactions of Materials Processing, Vol. 19, No. 2, pp. 79-87, 2010.
2. Wang, Z.T., Hu, Z., "Theory of pipe bending to a small bend radius using induction heating", J. Mater Process Technol., Vol. 21, No.3, pp. 275-284, 1990.
3. Hu, Z., Li, J.Q., "Computer simulation of pipebending processes with small bending radius using local induction heating", J. Mater Process Technol., Vol. 91, No.1-3, pp. 75-79. 1999.
4. Hu, Z., "Elasto-plastic solutions for spring-back angle of pipe bending using local induction heating", J. Mater Process Technol., Vol. 102, No.1-3, pp. 103-108, 2000.
5. Asao, H., Okada, K., Wananabe, M., Matsumoto, H., "Analysis in workability of pipe bending using high frequency induction heating", Proc. 24th Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., pp. 97-104, 1983.
6. Kobatake, K. et al., "Dieless bending of non-circular pipes", J. JSTP, Vol. 28, No. 313, pp. 158-165, 1987.
7. Asao, H., 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.
8. Go. D. L., Jeong D. W., "Optimal Blank Design using Virtual Try-Out Method", J. KSMPE, Vol. 7, No. 4, pp. 31-36, 2008.
9. Kim D. Y., Lee I. B., Liang Long-jun, Lyu S. K., "A Study on Components Load of 5MW Wind Turbine Pitch Drive", J. KSMPE, Vol. 13, No. 1, pp. 115-120, 2014.
10. Ryu, K.H., Lee, D. J., Kim, D. J., Kim, B. M. Kim, K. H., "Process Design of the Hot Pipe Bending Process Using High Frequency Induction Heating", J. KSPE, Vol. 18, No. 9, pp. 110-121, 2001.