

고주파 유도가열을 이용한 파이프 벤딩(1.5DR) 공정의 해석 Process Analysis of the Pipe Bending(1.5DR) Using High Frequency Induction Heating

*이현우¹, 정성윤², #김철², 한승무³, 조해용⁴

*H. W. Lee¹, S. Y. Jung², #C. Kim (chulki@pusan.ac.kr)², S. M. Han³, H. Y. Cho⁴

¹ 부산대학교 창의공학시스템 협동과정, ² 부산대학교 기계기술연구원, ³ 경희대학교 동서의료공학과, ⁴ 충북대학교 기계공학부

Key words : Pipe bending, High frequency induction heating, Wall thickness, FEM analysis, Design of Experiment

1. 서론

고주파 유도가열을 이용한 파이프 벤딩(1.5DR) 공정은 금형제작 없이 작은 벤딩 곡률을 가지는 벤드 및 대형 관의 벤드 제작에 널리 사용되는 공법으로 현재 발전설비, 조선, 플랜트 등의 산업분야에서 널리 적용되고 있는 공법이다.^[1-3] 특히 기존의 용접이나 금형을 통한 파이프 벤드 제품의 생산에 비해 생산성 향상과 단가 감소, 양호한 기계적 성질의 벤드 제품생산등 장점이 있다.^[4]

일반적으로 고주파 유도가열을 이용한 파이프 벤딩 공정 중에 벤딩 외측은 인장응력으로 인해 두께가 감소하고 내측은 압축응력에 의해 두께가 증가하는 경향을 가진다. 그러나 파이프 벤드제품이 주로 높은 온도와 압력을 가지는 유체의 수송에 사용되어짐을 감안하여 공학적 설계요건은 최대 두께 감소율을 12.5% 이내로 제한하고 있다.^[5]

파이프의 두께 감소율을 최소로 하고 벤딩 곡률 반경을 작게 하기 위해서는 기존의 열간 벤딩공정으로는 불가능하기 때문에 반력모멘트를 성형 중에 작용시켜 인장응력이 작용하는 영역을 상대적으로 줄이거나 고주파 유도가열 공정에서 파이프의 온도구배를 부여하여 인장응력이 작용하는 벤딩 외측의 유동응력을 증가시켜야 한다.^[6-8] 따라서 본 연구에서는 설계조건을 만족하는 최적의 파이프 벤딩 공정설계를 하기위해 각각의 인자가 파이프 두께감소율에 미치는 영향을 파악하고자 다구짜 실험계획법을 사용하였고, 두께감소율이 최소가 되는 인자 값을 제시하였다.

2. 파이프 벤딩의 설계

고주파 유도가열을 이용한 파이프 벤딩 공정은 크게 고주파 유도가열 장치, 파이프 이송장치, 클램프장치로 구성된다. Fig. 1 은 파이프 벤딩 공정의 개략도를 나타낸다. 그림에서처럼 파이프의 한쪽 끝은 클램프에 고정되어 있고 반대쪽은 파이프 이송장치에 의해 파이프에 벤딩력을 가하면 고주파 유도가열에 의해 국부 가열된 영역에 벤딩 모멘트가 발생한다. 여기서 피봇을 중심으로 벤딩 압이 회전을 하기 때문에 파이프는 벤딩 압의 길이에 의해 결정되는 곡률반경으로 벤딩이 된다. 이때 고주파 유도가열에 의해 국부 가열영역에는 벤딩력과 피봇을 중심으로한 벤딩압의 회전효과로 발생된 벤딩 모멘트에 의해 변형이 발생된다.^[9]

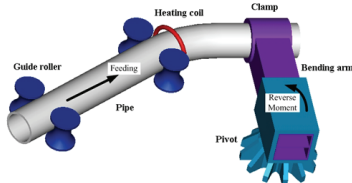


Fig. 1 Schematic of the hot pipe bending process using induction heating

2-1. 파이프 벤딩의 최적설계를 위한 설계변수

파이프 벤딩의 설계조건을 만족하기 위해서 다음의 공

정변수가 필요하고, 유한요소 해석을 통하여 평가하였다.

1. 가열폭 : 5, 10, 15mm
2. 가열최고온도 : 980℃, 1015℃, 1050℃
3. 가열온도구배 : 50℃, 75℃, 100℃
4. 반력모멘트 : 10MPa, 15MPa, 20MPa
5. 이송속도 : 1.0mm/s, 1.5mm/s, 2.0mm/s

2-2. 파이프 벤딩의 이론적 접근

파이프 제원 및 공정변수에 따른 적절한 반력모멘트를 구하기 위해 파이프 재료는 강완전소성체이고, 파이프 단면의 형상변화는 없다는 가정하에서 반력모멘트 계산식을 유도하였다(식(1)).

$$M_c = 2\sigma_s t_0 r_m^2 \left\{ (\pi - 2\beta) + \frac{(\pi - 2\beta)\cos\beta + 2\sin\beta}{2(R/r_m + \cos\beta)} \right\} \frac{R}{r_m} - 2\sin\beta - \frac{(\pi - 2\beta) + \sin 2\beta}{4(R/r_m + \cos\beta)} \quad (1)$$

$\Delta t / t_0 = 0.125$, $R / D_m = 1.5$ 일때, $\beta = 56.25^\circ$ 의 조건을 통하여 반력모멘트 양을 식(1)으로부터 구하였다. 계산결과 $M_c = 1.353\sigma_s D_m^2 t_0$ 가 필요함을 알 수 있었으며 이 값은 파이프의 제원이 결정되면 계산되어진다.^[10]

3. 실험계획법을 이용한 최적설계

실험계획법(Design of experiments)은 제품의 특성에 영향을 미치는 여러가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위함과 제품의 최적 제조조건을 경제적으로 찾아내는 기법이다. 이에 본 논문에서는 실험계획법과 FEM 시뮬레이션을 병행 사용하는 방법을 통하여 해석해야 할 설계모델들의 개수를 최대한 줄이면서 목적하고자 하는 파이프 두께감소율 12.5%이하 목표치를 갖는 최적의 인자와 범위를 찾는 방법을 제안한다.

3-1. 유한요소 해석 및 결과

각 인자에 따른 파이프의 두께 감소율을 알아보기 위해 FEM(Finite Element Method)을 이용하여 공정을 분석할 수 있는 시뮬레이션 프로그램으로서, 현재 널리 사용되고 있는 상용 소프트웨어인 Deform 3D 를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 적용된 소재의 물성치는 A106 B grade 를 사용하였다. Table 1 은 유한요소 해석에 적용된 파이프 제원을 나타낸것으로 검증을 위해 실제 현장에서 생산에 적용되는 파이프 제원을 사용하였다. Fig. 2 는 벤딩각도에 따른 파이프의 변형형태를 나타낸다.

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

R/D	Out diameter (mm)	Bending radius (mm)	Thickness (mm)	Bending angle (°)
1.5	318.5	477.75	6.9	90

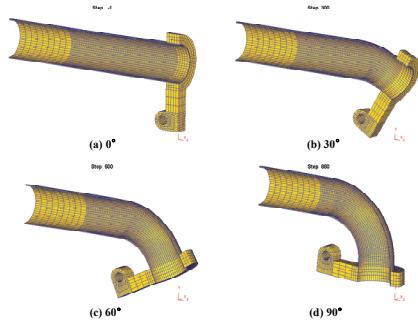


Fig. 2 Deformation modes according to bending angles by F.E.A

3-2. 요인설계

Table 2 에서와 같이 L9 행렬을 이용하였다. 총 9 번의 실험을 통하여 결과 값을 얻고 그 중에서 최적조합을 찾는 것은 현재 범용으로 널리 쓰이고 있는 통계프로그램인 Minitab 을 사용하였다.

Table 2 Orthogonal arrays of L9

Experiment NO.	Max. Temperature(℃)	Tempgradient (℃)	Reverse Moment(MPa)	Feeding Velocity(mm/s)
1	980	50	10	1
2	980	75	15	1.5
3	980	100	20	2
4	1015	50	15	2
5	1015	75	20	1
6	1015	100	10	1.5
7	1050	50	20	1.5
8	1050	75	10	2
9	1050	100	15	1

3-3. 최적설계 및 분석

Fig. 3 은 각 인자의 두께감소율에 대한 주 효과를 나타내고 Table 3 은 SN 비 결과를 수치화하여 두께감소율에 영향을 미치는 인자들의 순위를 나타내었다. 이 표로부터 두께감소율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 반력모멘트와 온도구배가 됨을 알 수 있다. 그리고 Minitab 에서 제시한 최적 인자의 조건은 Table 4 에 나타내었다. 이 조건으로 FEM 시뮬레이션 한 결과 파이프 두께감소율이 9.2%로 가장 안전한 결과를 얻을수 있었다.

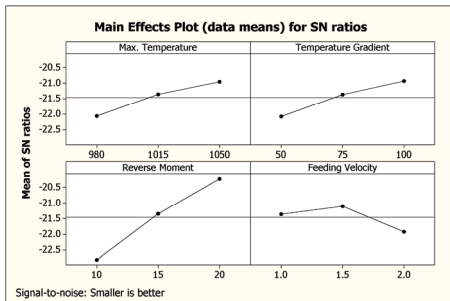


Fig. 3 Main effects plot for SN ratios

Table 3 Response Table for Signal to Noise Ratios

Level	Max. Temperature(℃)	Tempgradient (℃)	Reverse Moment(MPa)	Feeding Velocity(mm/s)
1	-22.07	-22.08	-22.81	-21.36
2	-21.36	-21.37	-21.35	-21.10
3	-20.96	-20.93	-20.22	-21.92
Delta	1.1	1.15	2.59	0.82
Rank	3	2	1	4

Table 4 Optimum design values of pipe bending

	Max. Temperature(℃)	Tempgradient (℃)	Reverse Moment(MPa)	Feeding Velocity(mm/s)
Optimum design values	1050	100	20	1.5

4. 결론

본 연구는 고주파 유도가열을 이용한 1.5D 파이프 공정을 실험계획법을 이용하여 최적화하는 연구를 수행하였다.

실험계획법과 FEM 시뮬레이션을 병행 사용하여 파이프 두께감소율에 큰 영향을 미치는 중요설계변수가 반력모멘트와 온도구배임을 알 수 있었다. Minitab 결과를 바탕으로 최적의 인자값을 제시하였고, 두께감소율 9.2%로 가장 안전한 값을 얻을수 있었다..

공정에서 중요설계변수인 반력모멘트와 온도구배는 그 크기가 클수록 두께감소율이 작아짐을 확인할 수 있었다. 하지만 실제 현장에서 반력모멘트가 파이프 이송장치의 힘보다 더 커질 때 이송이 안되어 문제가 생길 수 있으므로 반력모멘트는 이송장치 힘에 60%까지로 제한한다. 그리고 온도구배는 현재 고주파 유도가열 장치로 온도구배 부가가 어렵기 때문에 이점을 잘 보완 하여 더 큰 온도구배를 줄 수 있다면 파이프 두께 감소율에 큰 도움을 줄것으로 사료 된다.

후기

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 지원사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. T. behne, "A new bending technique for large diameter pipe," IAMI, Vol. 1, 34, 1983
2. W. OKeeffe, "Inductive bending machine seeks to reduce number of welds in nuclear piping system," Power, Vol. 1, 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, 9-15, 1983.
4. S. Kuriyama, T. Aida, "Theoretical analysis of bending of tube having uniform distribution of temperature by high frequency induction heating," Proc. 4th Adv. Technol. Of Plasticity, 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, 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., 97-104, 1983
7. K. Kobatake, Th. Ichise, et al., "Dieless bending of non-circular pipes," J. JSTP, Vol 28, No.313, 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, 49-55, 1992
9. 류경희, 이동주, 김동진, 김병민, 김광호, "고주파 유도가열을 이용한 열간 파이프 벤딩 공정 설계," 한국정밀공학회지, Vol. 18, No. 9, 110-121, 2001
10. W. Zutang, Hu Zhong, "Theory of pipe bending to a small bend radius using induction heating", J. Mater. Process. Technol., Vol. 21, 275-284, 1990