

CAD/CAE를 이용한 알루미늄 7001 소재 파이프의 교정을 위한 롤러교정기의 설계

이형욱* · 허 훈** · 허진혁***

Design of Tube/Pipe Straightener for Aluminum 7001 Pipes with CAD and CAE Methods

H.W. Lee, H. Huh and J.H. Heo

Abstract

This paper is concerned with the design of roller profiles in tube/pipe straightener with both methods of Computer Aided Design and Computer Aided Engineering. Design analysis is carried out from two point of view. The one is the research in the minimization of tube pitch which was very important factor in levelling process. In order to minimize tube pitch, profiles of the roller were calculated so that the contact region between roller and tube was maximized. The other is determination of an optimum amount of intermesh for the proper progress without a jam in levelling process. Generally the jamming trouble was caused by excessive amount of intermesh in levelling process. The optimum amount of intermesh was determined through the finite element analysis.

Key Words : Tube/Pipe Straightener, Levelling Process, Finite Element Method, Curvature, Pitch, Intermesh, Incline Angle

1. 서론

파이프 및 튜브의 생산 공정에서는 열처리나 인발 등의 공정 후 파이프의 직진도(straightness) 및 진원도(roundness)를 만족시키기 위해 교정 작업이 요구된다. 파이프 및 튜브와 같은 원형 단면을 가진 구조재료의 교정 작업에는 여러 개의 회전하는 롤러 사이에 파이프를 통과시킴으로써 파이프에 탄소성 경계영역의 반복적인

굽힘 하중을 가하여 곡률을 제거하는 롤러를 이용한 롤러 교정기가 많이 사용되고 있다.^(1~4)

롤러 교정기는 롤러의 형상 및 배치, 하중의 작용방식에 따라 크게 두 롤러(two-roller), 여섯 롤러(six-roller), 다중교차 롤러(multi-staggered roller), 클러스터 롤러(cluster roller) 교정기의 네 가지로 분류될 수 있다.^(1~2) 여기서 일반적으로 다중교차 롤러는 롤러의 배치가 지그재그 형태로 되어 있으며, 여섯 롤러는 롤러가 서로 마

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원
** 한국과학기술원 기계공학과
*** 현대자동차(주)

주보게 되어있다. 파이프의 두께 및 재료의 성질에 따라 롤러의 배치를 결정하게 된다. 알루미늄 소재의 파이프의 경우 철강재질의 파이프보다 취성이 높기 때문에 교정작업에 어려움이 있다.⁽⁵⁾

롤러 교정기에 관한 기술의 대부분은 일본, 독일, 미국 등의 선진 기업들에 집중되어 있는 실정이며, 현재까지의 롤러 교정기의 기구 분석 및 공정 설계는 실험과 현장에서의 경험에 의존하고 있거나 간단한 고체역학의 이론해의 근사로 이루어지고 있어 파이프의 재질과 치수의 변화에 유연하게 대처할 수 없는 실정이다. 롤러 교정기의 기초 기구에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해서 수행되어 왔다. Talukder 등^(1~2)은 여러 종류의 교차 롤러 교정기에 대하여 길이 방향의 잔류 곡률을 제거하기 위한 동적 하중을 해석적으로 제안하고, 직진도에 대한 평가 기준, 설계 방향을 제시하였고, 가장 중요한 설계 변수가 피치임을 보였다. Li 등⁽³⁾은 envelope theory에 의한 롤러 형상의 수학적 모델을 제시하여 롤러와 파이프의 최적 선 접촉 조건을 만족시키는 공구의 경로를 제안하였다. Wu 등⁽⁴⁾은 교정 공정 중 봉재 내의 잔류 곡률에 대한 수학적 모델을 제안하고 교정 후의 봉재의 진원도에 대한 정량적 모델을 제시한 후 실험적 접근을 통하여 이를 뒷받침했다. Heo 등⁽⁵⁾은 유한요소법과 다구찌 방법을 이용하여 지그재그 형 롤러 교정기의 공정변수 최적화를 수행하였다. 그러나 교정기의 설계 시 기본요소인 피치를 줄이는 방법과 파이프의 원활한 진행을 위한 연구는 부족한 현실이다.

본 논문에서는 마주보는 형태의 롤러 교정기의 설계를 두 가지 관점에서 CAD/CAE 기법을 이용하여 수행하였다. 첫째는 롤러의 형상설계를 통하여 롤러와 파이프의 최대 접촉을 유도하여 피치를 최소로 줄이는 기법에 대한 연구이고, 둘째는 일반적으로 마주보는 롤러의 경우 압하량에 따라 파이프의 진행이 원활하지 않는 문제가 발생하는데, 이를 해결하면서 동시에 탄소성 경계영역의 굽힘을 줄 수 있는 압하량을 결정하는 연구이다. 롤러 곡면의 모델링은 AutoCAD를 사용하였고, 압하량을 결정하기 위한 해석은 LS-DYNA 3D⁽⁶⁾를 사용하였다.

2. 롤러의 곡면설계

2.1 롤러의 곡률반경

Fig. 1에 본 논문에서 사용되는 롤러 교정기를 도시하였다. 이러한 롤러 교정기의 구동방법은 서로 마주 보는 롤러가 회전하면서 파이프를 진행시키는 것이다. 이때 가장 중요한 설계인자는 파이프가 한번 회전할 때 파이프

프가 진행되는 거리인 피치이다. 파이프는 롤러와 부분적으로 접촉을 하며 진행하게 된다. 피치를 최소화 시키려면 롤러와 파이프의 접촉면을 최대로 늘려 롤러의 표면에 파이프가 계속 닿아서 진행되도록 하면된다.

롤러 곡면의 설계는 직선과 곡선의 파이프를 3차원으로 회전시켜 나타나는 곡면의 형상을 이용하여 수행되었다. Fig. 2에 도시한 그림은 AutoCAD 프로그램을 이용하여 곡선 파이프를 30도의 경사각으로 회전시켜 생성한 곡면으로 회전 방향으로 유일한 곡률반경을 가짐을 알 수 있다. 직선 파이프를 이용하여 추출한 곡률반경은

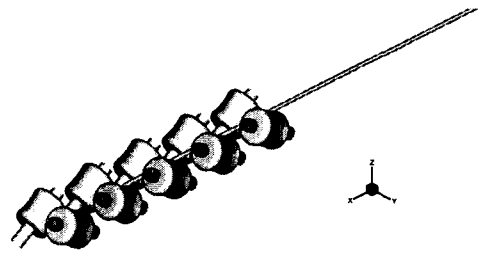


Fig. 1 Tube/pipe straightener with five roller sets

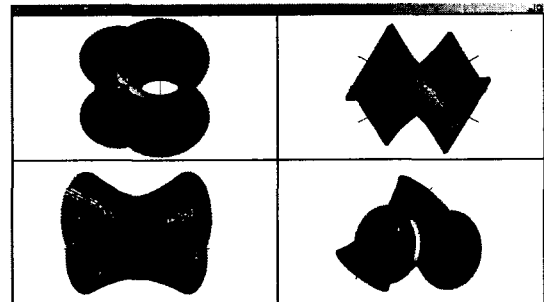


Fig. 2 Generation of the roller surface with AutoCAD

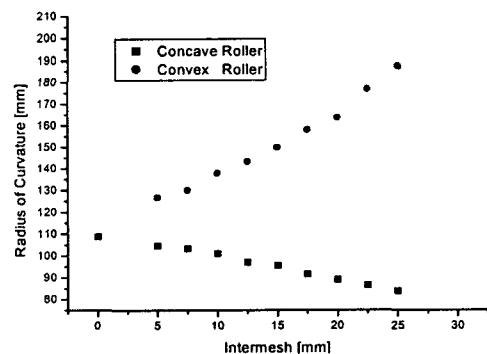


Fig. 3 Radius of curvature for incline angle 30 degrees with respect to the height of curved tube

마주보는 곡면이 동일한 값을 가지게 되고, 곡선 파이프를 이용하여 추출 곡률반경은 서로 다른 두 개의 값을 가짐을 알 수 있다. 파이프의 길이는 250mm로 하였고, 곡선 파이프의 높이는 직선일때의 0mm로부터 25mm까지 설정하였다. 추출된 곡률반경을 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 3의 그림에서 곡선파이프의 높이에 따라 곡률반경은 선형으로 변환을 알 수 있다. 이 분포를 직선으로 근사하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다. 곡선파이프의

$$\text{Radius}_{\text{Concave}} = -0.96 \times \text{Height} + 108.82$$

$$\text{Radius}_{\text{Convex}} = 2.93 \times \text{Height} + 108.82$$

앞으로의 모델링에서는 곡선파이프의 높이가 25mm가 넘는 경우는 위의 식에서 계산된 값을 사용하도록 한다.

2.2 롤러의 형상결정

계산된 여러 롤러 중 파이프의 진행을 원활히 할 수 있는 롤러를 결정하였다. Fig. 1에서 마주보는 롤러를 각 높이에서 결정된 롤러를 사용하여 해석을 수행하였다. 롤러는 파이프가 전진하도록 회전방향을 잡았으며, 롤러와 파이프간의 마찰계수는 0.15를 사용하였고, 파이프의 재질은 알루미늄 7001재료로 하였다.⁽⁵⁾ 파이프가 롤러를 지나 다음 롤러의 입구에 위치할 때의 y, z 방향의 처짐량을 계산하였다. 여기서 y방향이 압하량이 주어지는 방향이다. 해석은 LS-DYNA 3D로 수행하였으며, BWC 요소를 사용하였다.

해석된 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 곡선의 높이가 높아짐에 따라 다음 롤러의 입구에서 처짐량이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 롤러의 형상설계로 파이프의 진행방향을 바꿀수 있는 것을 의미하며, 압하량이 주어진 롤러에 걸리지 않고 쉽게 통과할 수 있음을 의미한

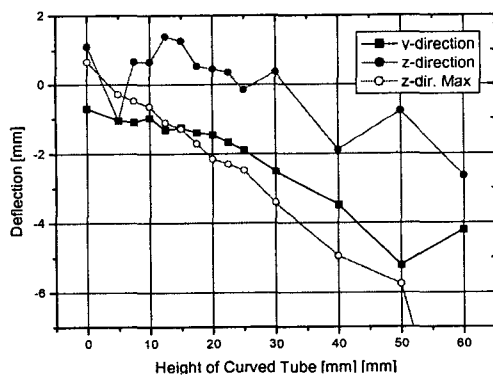


Fig. 4 Deflection of the tube-end at the entrance of the next roller

다. 따라서, 원활한 진행을 위한 롤러의 형상은 높이가 50mm 보다는 작은 한도내에서 클수록 좋은 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 높이 30mm 모델(H300)과 40mm 모델(H400)을 가능성이 있는 모델로 설정하였다.

3. 롤러 교정공정의 유한요소해석

3.1 압하량에 따른 해석

앞장에서 결정된 모델을 이용하여 압하량에 따른 롤러 교정공정의 유한요소해석을 수행하였다. 교정공정이 이루어지기 위해서는 소성변형상태로 들어가야 하기 때문에 해석결과는 파이프의 진행의 원활성과 소성변형률의 발생을 기준으로 평가하였다. 해석 모델은 Fig. 5와 같으며, 롤러는 H300모델과 H400모델을 사용하였다. 롤러의 배열은 Fig. 5에서와 같이 곡선파이프로부터 추출된 롤러의 배열을 엇갈리게 하여 파이프의 진행방향을 수정할 수 있도록 하였다.

변형 형상은 Fig. 6과 같으며 파이프가 롤러를 따라 원활히 진행되며 압하량에 따라 파이프가 변형하여 소성 변형률이 발생됨을 예측할 수 있다. H300 모델과 H400 모델에 대하여 해석된 결과를 Table 1과 Table 2에 각각 정리하였다.

Table 1에서 H300 모델의 경우 8mm에서 9mm의 압하량에서만 교정공정이 가능함을 알 수 있다. 이것은 교정기의 가용범위가 매우 작음을 알 수 있어 실제 적용할

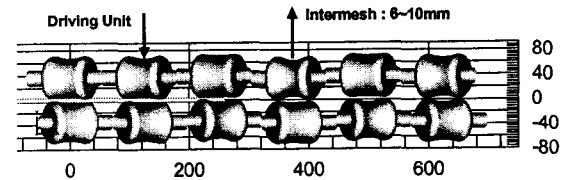


Fig. 5 Analysis model with driving unit and intermesh roller unit

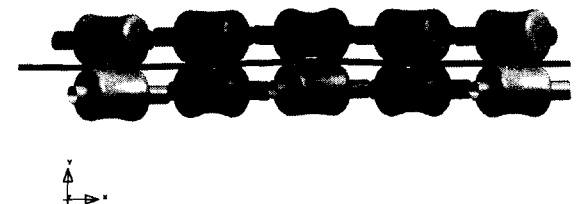


Fig. 6 Deformed shape of tube with roller intermesh

Table 1 Analysis results of the model H300

Roller Intermesh	Tube Progression	State	Pitch	Remarks
8.0mm	Success	Elastic	15.79mm	
8.5mm	Success	Plastic	15.56mm	Feasible
9.0mm	Fail	-	15.48mm	

Table 2 Analysis results of the model H400

Roller Intermesh	Tube Progression	State (Plastic Strain)	Pitch	Remarks
6.0mm	Success	Plastic 0.00171	14.63mm	Feasible
7.0mm	Success	Plastic 0.00251	14.90mm	Feasible
8.0mm	Success	Plastic 0.00314	15.45mm	Feasible
9.0mm	Success	Plastic 0.00415	15.40mm	Feasible
10.0mm	Success/ Fail	Plastic 0.00583	15.47mm	

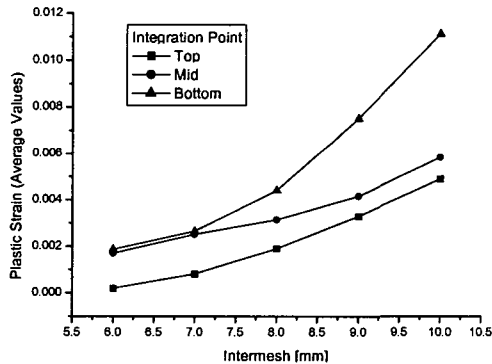


Fig. 7 Averaged plastic strain with respect to the roller intermesh for the model of H400

때 많은 어려움이 있음을 예측할 수 있다. Table 2에서 H400 모델의 경우는 압하량 10mm까지 파이프의 진행이 가능하며 6mm에서도 소성변형률이 나타나 가용범위가 넓어 H400 모델이 교정기에 더 적합하다는 것을 알 수 있다. 또한 두 모델 모두 파이프의 피치가 15mm 내외로 지그재그형의 교정기에서 나타난 20.6mm에 비해 아주 양호한 결과를 내고 있음을 확인할 수 있다.

H400 모델의 소성변형률의 평균값을 도표로 나타내어 Fig. 7에 도시하였다. 압하량에 따라 2차식 형태로 소성 변형률이 발생하는 것을 알 수 있으며, 압하량 5mm 정도에서는 탄성영역에 있을 것임을 예측할 수 있다. 이

도표는 교정공정에서 압하량을 결정하는 데 많은 정보를 제공할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 마주보는 형태의 롤러 교정기의 설계를 CAD/CAE 기법을 이용하여 수행하였다. 교정기의 설계는 교정공정 시 파이프의 원활한 진행을 위한 롤러의 곡률반경을 결정하는 것에 중점을 두었고, 피치를 최소화 할 수 있는 형상을 곡선 파이프로부터 추출하였다. 롤러의 곡률에 따라 파이프의 진행방향을 수정할 수 있음을 이용하여 최적의 곡률을 구하였다. 구하여진 롤러 형상 대해 교정공정시 활용가능한 압하량의 범위를 하였다. 롤러의 최적 곡률반경은 226mm, 70.3mm이며 이때 압하량의 가용범위는 6mm에서 10mm까지 이다.

후 기

본 연구는 동아알루미늄(주)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Das Talukder, N. K., Singh, A. N., 1991, "Mechanics of bar straightening, Part 1: General analysis of straightening process", Trans. ASME, Vol. 113, pp. 224~227.
- (2) Das Talukder, N. K., Singh, A. N., 1991, "Mechanics of bar straightening, Part 2: Straightening in cross-roll straighteners", Trans. ASME, Vol. 113, pp. 228~232.
- (3) Li, K. Y., Chen, C. K. Yang, S. C., 1999, "Profile determination of a tube-straightening roller by envelope theory", J. Mater. Process Tech., Vol. 94, pp. 157~166.
- (4) Wu, B. J., Chan, T. C., Lee, T. C., Ao, L. W., 2000, "A study on the precision modeling of the bars produced in two cross-roll straightening", J. Mater. Process Tech., Vol. 99, pp. 202~206.
- (5) 허진혁, 2002, 유한요소법과 다구찌 방법을 이용한 Al 7001 T9 파이프의 롤러교정 공정 최적화, 한국과학기술원 석사학위 논문.
- (6) Hallquist, J. O., 1999, LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation.