

# 유한요소해석과 다구찌 방법을 이용한 알루미늄 7001 소재 파이프의 Roller Levelling 공정 최적화

허진혁\* · 이형욱\* · 허 훈\*

## Optimization of Roller Levelling Process for Aluminum 7001 Pipes with Finite Element Method and Taguchi Method

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

### Abstract

Process parameters of roller levelling process are intermesh of each roller, roller angle, roller arrangement and shape of rollers. Experimental optimization of these process parameters is very troublesome because of difficulties in evaluating the straightness of pipes to be levelled quantitatively. Finite element method can be a very efficient way to evaluate the straightness of the pipes and therefore to optimize the process. This paper is concerned with simulation and optimization of a roller levelling process. Process parameters of a 14-roller leveller for aluminum T9 pipes are optimized with finite element method and Taguchi method. Parameters of significance in roller levelling process and their optimum are obtained.

**Key Words** : Optimization, Pipe Levelling, Roller Levelling, Finite Element Method, Taguchi Method, Orthogonal Table, SN Ratio, Noise Factor

### 1. 서론

생산기술의 비약적인 발전에 의한 파이프 생산 공정의 높은 정밀도에도 불구하고, 요구되는 직진도(Straightness)와 진원도(Roundness)에 부합하지 못한 제품에 대한 교정 작업(Levelling Process)은 항상 요구된다.

텐트의 폴로 사용되는 파이프와 같이 원형 단면을 가진 파이프의 교정에는 여러 개의 회전하는 롤러 사이에

파이프를 통과시킴으로써 파이프에 탄소성 경계영역의 연속적인 Bending/Unbending을 가하여 곡률을 제거하는 롤러 교정기가 널리 사용된다. 현재 세계 텐트 폴 시장에서는 보다 가볍고, 강도가 높은 제품에 대한 요구가 커지고 있으며, 이에 따라 각 업 체간에는 기존에 사용되던 알루미늄 7001 T6 재료보다 강도가 한층 향상된 알루미늄 7001 T9 재료로 제작된 제품에 대한 개발 경쟁이 가속되고 있다. 그러나, 알루미늄 7001 T9 재료의

\* 한국과학기술원 기계공학과

높은 강도와 낮은 연신률로 인하여 국내외 세계 유수의 업체들은 T9 파이프의 교정에 많은 어려움을 겪고 있으며 강건하고 높은 생산성을 보장하는 교정기술의 확보가 곧 세계 시장에서의 경쟁력으로 직결된다고 할 수 있다.

롤러 교정기에 대한 기술의 대부분은 일본, 독일 등지의 선진 기업들에 집중되어 있는 실정이며, 현재까지의 롤러 교정기의 기구 분석 및 공정 설계는 실험과 현장에서의 경험에 의존하고 있거나, 간단한 고체역학 이론을 이용한 근사해가 대부분이어서 재료와 형상의 변화에 효율적으로 대처할 수 없는 실정이다.

롤러 교정기에 관해서 여러 연구자들이 해석적 연구 및, 수치적인 연구와 분석을 수행하였다. Talukder<sup>(1-2)</sup>은 여러 개의 교차 롤러 교정기를 이용한 교정 작업에서 파이프의 초기 곡률을 제거하기 위한 하중, 교정 후 파이프의 직진도의 평가 기준, 교정 속도를 증가시킬 수 있는 설계 방향을 제안하였다. Li<sup>(3)</sup>은 Envelope Theory에 의한 롤러와 파이프의 최적 접촉 조건을 만족시키기 위한 롤러 형상의 수학적 모델과 이 롤러의 제작을 위한 절삭 공구의 경로를 제안하였다. Wu<sup>(4)</sup>은 교정 공정 동안의 봉재 내의 잔류 곡률에 대한 모델을 제안하고 교정후의 봉재의 진원도에 대한 정량적 모델을 제시하였다. Dvorkin<sup>(5)</sup>은 이음매 없는 강관의 교정 공정 해석을 위한 단순 유한요소모델을 제안하였다.

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 알루미늄 7001 T9 파이프의 롤러 교정 공정의 주요 공정변수인 롤러의 각도, 압하량에 관한 영향을 분석하기 위한 해석을 수행하였다. 각 설계변수의 영향을 효율적으로 파악하고 해석 결과의 실제 현장에서의 재현성을 높이기 위하여 다구저 방법을 도입하여 해석 및 분석을 수행하였으며 공정 변수의 최적치를 도출하였다.

## 2. 유한요소 해석 모델

### 2.1 유한요소 전체 모델

본 논문에서 해석에 사용된 롤러 교정기는 Fig. 1과 같이 14개의 롤러로 구성되어 있다. 롤러의 재료는 강체로

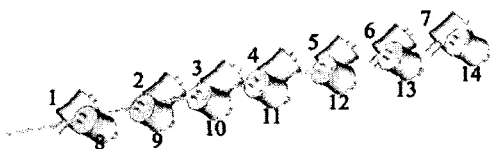


Fig. 1 Full finite element model of roller leveller

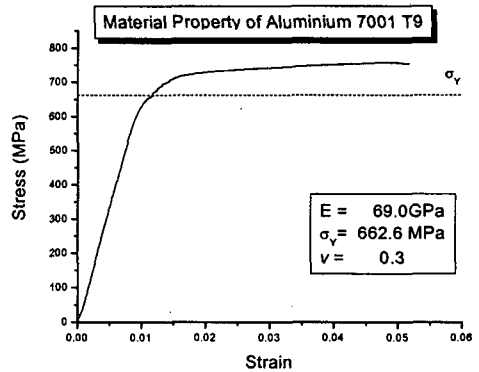


Fig. 2 Material properties of Al 7001 T9 pipes

가정하였고, 파이프의 재료는 알루미늄 7001 T9이며 물성치는 Fig. 2와 같다. 유한요소 해석에 전체 14개의 롤러를 모두 고려하는 데는 과도한 계산시간이 필요하므로, 교정 공정에 주요한 영향을 미치는 롤러를 파악하여 해석 모델을 구성하고, 이 부분 모델을 중심으로 해석을 진행하는 것이 효율적이다.

### 2.2 유한요소 해석모델 설정

실제 공정에 대한 현장 지식을 바탕으로 유한요소 여부 해석을 수행하여 교정 공정에 주요한 영향을 미치는 롤러들을 파악했다. 해석에는 LS-Dyna 3D가 사용되었으며, 파이프는 Belytschko-Wong-Chiang Shell 요소로 모델링 하였다. Fig. 1의 롤러 1과 8은 실제 공정에서는 파이프의 초기 진행을 원활히 하기 위한 가이드의 역할만을 하게 되므로 해석 모델에서 제외했다. 롤러 12의 경우, 가능한 최대 압하량의 크기가 1.2mm 수준으로 교정 공정에 크게 영향을 못 미치는 것으로 나타났다. 롤러 13과 14에 압하량을 가할 경우 파이프에 단면 붕괴현상이 발생하여 파이프의 직진도, 진원도가 크게 나빠지는 현상을 확인할 수 있었다. 이러한 사실을 바탕으로 교정 공정에 주요한 영향을 미치는 7개의 롤러를 중심으로 구성된 유한요소 해석모델은 Fig. 3과 같다.

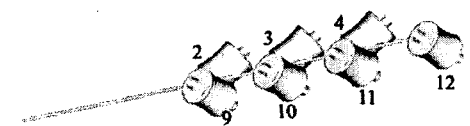


Fig. 3 Fractional finite element model of the roller leveller

### 3. 설계변수의 수준 및 다구찌 방법

#### 3.1 설계 변수 및 설계변수의 유효범위

예비 해석의 결과를 정리하면, 롤러 교정기를 이용한 교정 공정에서의 중요한 공정변수는 Fig 4에 도시된 각 롤러의 경사각과 롤러 10과 11의 압하량이다. 롤러 10과 11의 압하량은 소성 변형 발생을 위하여 3.5mm 이상이 되어야 한다. 또한, 롤러의 경사각이 34도 이하가 되면 파이프가 롤러 사이를 통과하지 못하므로, 롤러의 경사각은 35도 이상이 되어야 한다.



Fig. 4 Design factors

#### 3.2 설계변수의 수준 및 다구찌 직교표

롤러 교정기를 이용한 T9파이프의 교정 공정은 롤러의 압하량과 경사각의 변화에 매우 민감하므로, 롤러 10과 11의 압하량과 롤러 전체의 경사각을 Table 1과 같이 좁은 범위 안에서 설정하여 해석을 수행하도록 한다.

본 논문에서는 세 가지 설계변수의 주 효과만을 고려하기 위하여 Table 2와 같은 다구찌의  $L_9(3^4)$  직교표에 따른 해석을 수행하였다

#### 3.3 잡음인자

실제 공정에서는 장비의 노후화, 부품의 공차등에 의한 잡음인자(Noise Factor)가 존재하게 된다. 롤러 교정 공정에서의 주요한 잡음 인자로서는 교정될 파이프의 초기 잔류곡률, 교정후의 파이프내의 소성 변형률의 산포를 들 수 있다. 교정될 파이프의 초기 잔류 곡률은 실제 현장에서 채집한 파이프 샘플들의 곡률을 측정해 본 결과, 최대 0.04139/m, 최소 0.01582/m 사이에서 산포하고 있었고, 평균 0.02337/m를 나타내었다. 본 논문에서는 곡률의 산포를 최대치와 평균치를 고려하여 2 수준의 잡음

Table 1 Level of Process Parameters

level \ factor	1	2	3
Intermesh of Roller 10	3.5mm	4.0mm	4.5mm
Intermesh of Roller 11	3.5mm	4.0mm	4.5mm
Roller Angle	35 °	36 °	37 °

Table 2  $L_9(3^4)$  orthogonal table

factor No.	Intermesh of Roller 10	Intermesh of Roller 11	Roller Angle	Error
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Table 3 Orthogonal table for noise factors and level of noise factors

Initial Curvature of pipes	1 ( $\chi=0.02337/m$ )		2 ( $\chi=0.04139/m$ )
	Data Acquisition Point		
	1 (Front)	2 (Mid)	3 (Rear)

인자로 해석에 포함시켰다. 또한, 교정후 파이프 내의 소성 변형률의 산포를 고려하기 위하여 소성변형률의 측정 위치를 파이프의 진행방향 끝단으로부터 전, 중, 후 세 부분으로 나누어 3 수준의 잡음인자로 해석에 포함시켰다. 잡음 인자를 정리하면 Table 3와 같다.

#### 3.4 특성치의 평가방법

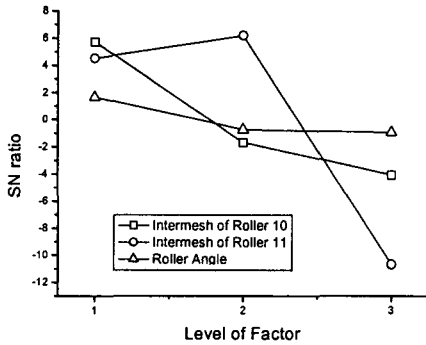
유한요소해석시 파이프는 잡음 인자의 수준에 따라 0.02337/m, 0.04139/m의 초기 곡률을 갖는 모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 이러한 초기 곡률을 제거하기 위하여 필요한 파이프의 길이방향 소성 변형률은 각각  $1.0635 \times 10^{-4}$ ,  $1.88327 \times 10^{-4}$  이며, 이 값은 각 공정의 목표치가 된다. 그러므로, 특성치는 교정 후 파이프내에 발생하는 소성 변형과 위의 두 목표치를 비교하여 산출해 내야하며, 이를 위해서는 분석 조건에 따른 적절한 데이터의 변환이 필요하다.

### 4. 해석결과

유한요소 해석으로부터 얻어진 데이터를 Table 4와 같이 목표치와의 절대 차이의 정규화 변환을 통하여 망소특성으로 분석을 하였다. 변환된 데이터에 대한 SN비를 바탕으로 요인 효과도를 작성하면 Fig. 5과 같다.

**Table 4 Data transformation equation for each level**

Level of Noise factor (Initial Curvature)	Data Transformation Eq.
1	$\frac{ 1.0635 \times 10^{-4} - \text{Raw data} }{1.0635 \times 10^{-4}} \times 100$
2	$\frac{ 1.88327 \times 10^{-4} - \text{Raw data} }{1.88327 \times 10^{-4}} \times 100$



**Fig. 5 Average factor effect**

SN비에 대한 분산 분석 결과는 Table 5와 같다. SN비에 유의한 영향을 미치는 인자는 롤러 11의 압하량이며 최적치는 4.0mm이다. 롤러 10과 롤러의 경사각은 SN비를 최대로 하는 3.5mm와 35도이다. 이 경우에 관한 확인 해석을 한 결과는 Table 6과 같다. Table 6에서 알 수 있듯이, 최적 조건에 대한 SN비는 다른 해석 조건에 비하여 높게 나옴을 알 수 있다.

**Table 5 ANOVA Table for SN**

Factor	SS	DOF	V	F0
Intermesh of Roller 10	156.4766	2	78.2383	1.0304
Intermesh of Roller 11	518.1007	2	259.0504	<b>3.4117</b>
Roller Angle	12.7089	2	6.3544	0.0837
Error	151.8593	2	75.9296	
Total	839.1454	8		

**Table 6 SN ratio of optimum design**

	Intermesh of roller 10	Intermesh of roller 11	Roller angle	SN ratio
1	1	1	1	-29.4473
2	1	2	2	-27.9752
3	1	3	3	-37.6452
4	2	1	3	-29.6617
5	2	2	1	-37.8057
6	2	3	2	-49.8206
7	3	1	2	-39.6156
8	3	2	3	-27.9693
9	3	3	1	-56.8642
Optimal	1	2	1	<b>-26.6726</b>

## 5. 결론

본 논문에서는 유한요소법과 다구찌 방법을 이용하여 알루미늄 7001 T9 파이프의 교정을 위한 롤러 교정기의 최적조건을 도출하였다.

알루미늄 7001 T9 재료의 높은 강도와 낮은 연신률로 인하여 공정변수의 유효범위가 매우 좁고 공정 변수의 변화에 공정 전체가 매우 민감하게 반응한다. 그러므로, 교정 공정의 효율과 생산성을 향상을 위하여 교정기가 설계변수, 공정변수의 허용차와 잡음 조건에 둔감하도록 설계를 개선할 여지가 있다.

## 참고 문헌

- (1) Das Talukder, N. K., Singh, A. N., 1991, "Mechanics of bar straightening, Part 1: General analysis of straightening process" Transactions of 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" Transactions of 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", JMPT 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" JMPT, Vol. 99, pp. 202~206.
- (5) Dvorkin, E. N., Medina, F. M., 1989, "Finite Element Models for Analyzing the straightening of steel seamless tubes", Journal of engineering for industry, Vol. 111, pp. 351~355.