

# Planetary rolling mill을 이용한 동관 압연공정의 유한요소 해석

## Finite Element Analysis of copper tube rolling process using the Planetary rolling mill

\*#조예용<sup>1</sup>, 한기범<sup>2</sup>, 김관우<sup>3</sup>, 김재훈<sup>4</sup>, 이종필<sup>5</sup>, 최종용<sup>6</sup>

\*#H. Y. Cho(hycho@cnu.ac.kr)<sup>1</sup>, K. B. Han<sup>2</sup>, K. W. Kim<sup>3</sup>, J. H. Kim<sup>4</sup>, J. R. Lee<sup>5</sup>, J. W. Choi<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 충북대학교 기계공학부, <sup>2-3</sup> 충북대학원 기계공학과, <sup>4-6</sup> LS산전

Key words : Copper tube, Rolling, Planetary rolling mill, Finite element analysis

### 1. 서론

동은 알루미늄, 아연, 연(납)과 함께 4대 비철금속으로 철강재와 더불어 가장 널리 쓰이는 산업용 재료로써 전기, 전자, 반도체, 통신, 자동차, 플랜트 등 중요산업 각 분야에 걸쳐 많은 수요를 가지고 있는 소재이다.

동관의 제조방법은 기존의 압출 방식과 신공법인 Planetary rolling mill의 압연 방식으로 크게 대별된다. Planetary rolling mill은 3개의 원추형 롤이 각각 120도 각도로 위치하여 이 원추형 롤 사이에 수평연속주조기에 의해 제조된 주조 소재가 투입되어 모관을 제조하는 만네스만(Mannesmann)공법의 압연을 말한다. 예열되지 않은 냉간상태로 투입된 동관이 압연 중에 600~700°C의 가공열이 발생하여 모관의 조직을 균일하게 해주고 재결정을 형성시켜 이후의 공정에서 별도의 열처리과정 없이 동관을 제조하며 90%이상의 단면감소율로 작업공정의 단축과 제조 원가의 절감이라는 장점을 갖고 있다. 하지만 이러한 특징과 장점에도 불구하고 체계적인 분석이 미흡하여 작업조건의 변화에 따른 결과의 예측이 어렵고 그 결과는 실제 공정의 가동을 통해 알 수 있으므로 많은 시간과 비용이 드는 문제점이 있다. 이에 소성이론 및 유한요소해석의 방법을 통한 기초연구가 진행되고 있다<sup>1-8</sup>. 그러나 현재까지 공정조건의 개선과 문제점 해결을 위한 연구는 미비하여 실제 현장에 유용한 관련연구가 요구되는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 기구학적 분석과 다양한 공정변수가 성형에 미치는 영향을 파악하고 예측하여 공정조건의 개선과 현 공정의 문제점 해결을 하고자 하였다.

### 2. 유한요소 해석

Planetary rolling mill의 롤, 맨드릴, 웨건, 초기소재를 3차원 설계 프로그램인 Pro-Engineer를 이용하여 모델링 하였고, 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 공정을 성형 시뮬레이션 하였다. 소재는 강소성체이고 롤, 맨드릴, 웨건은 강체로 해석하였다.

Fig. 1은 각각의 모델링한 것을 어셈블리한 것이다. 해석시간의 단축을 위해 소재의 길이를 축소하였고 전면부에는 모따기를 하였다.

Fig. 2는 롤의 기울림각( $\alpha$ )과 비틀림각( $\beta$ )을 나타낸 것이다. 기울림각은 측면에서 보았을 때 롤의 중심축과 소재의 중심축 사이의 기울어진 각도이고 현장과 같은 40°로 고정하여 해석하였다. 비틀림각은 정면에서 보았을 때 롤의 중심축과 소재의 중심축 사이의 비틀어진 각도로 8°~14°까지 변화를 주어 해석 하였다. 이것은 공정변수에 따른 결과 비교를 위한 것으로 롤의 자전속도

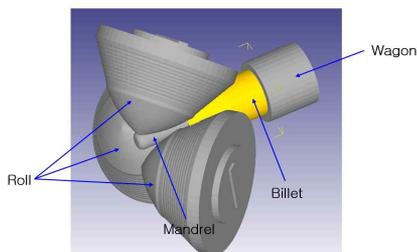
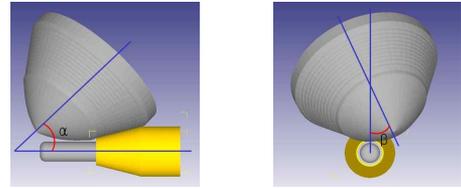


Fig. 1 Assembly of Planetary rolling mill



(a) tilting angle (b) twist angle  
Fig. 2 Tilting angle( $\alpha$ ) and twist angle( $\beta$ ) of Roll

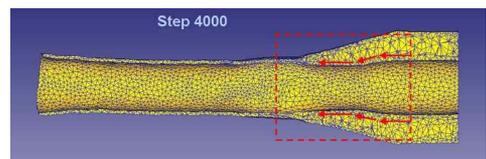
Table 1 Analysis conditions and material properties

Analysis condition	Copper tube thickness(mm)	30
	Tilting angle(°)	40
	Twist angle(°)	8~14
	Revolution speed of Roll(rpm)	230~380
	Rotation speed of Roll(rpm)	60~160
	Wagon speed(mm/s)	20
Material Property	Mandrel diameter(mm)	26
	Simulation steps(step)	4000
	Material	CDA 110
	Hardness(HRF)	40
	Modulus of elasticity(GPa)	115
	Yield strength(MPa)	69
Ultimate tensile strength(MPa)	220	
Poisson's ratio	0.33	

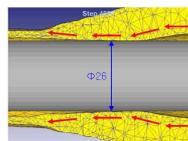
및 공전속도, 롤의 종류 등도 변화를 주어 해석하였고 이 해석조건과 소재의 물성을 Table 1에 나타내었다. 3개의 롤은 시계방향으로 자전과 공전을 하여 소재를 성형하며 맨드릴 직경의 크기에 따라 최종 소재의 두께가 결정된다.

### 3. 해석결과

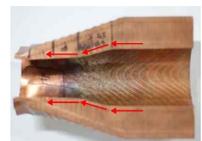
성형 중 소재의 직경, 두께가 감소하는 메커니즘을 Fig. 3에 나타내었다. 소재는 롤에 의한 압축으로 맨드릴에 밀착된 후 맨드릴과의 밀착부, 롤과 마찰되는 표면부의 소재유동 방향과 속도 차에 의해 다시 확관 되었다.



(a) forming process of billet



(b) inside of formed billet by simulation



(c) inside of practical formed billet

Fig. 3 Forming mechanism of Billet

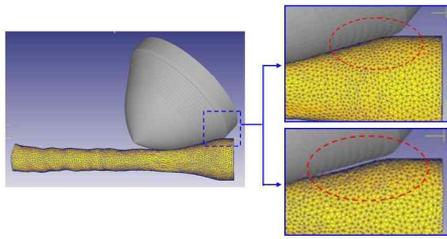
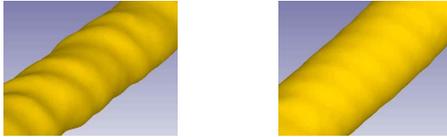


Fig. 4 Vibration by eccentric of roll



(a) existence of eccentric (b) nonexistence of eccentric

Fig. 5 Roll mark of billet by existence and nonexistence of eccentric

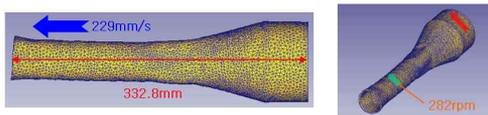
Fig. 4는 성형 중 롤의 편축에 의한 떨림을 나타낸 것이다. 롤의 편축으로 인해 롤의 회전 시 떨림이 발생할 수 있으며 그 결과로 Fig. 5(a)와 같이 성형 후 소재의 직경과 롤 마크의 간격 및 높이가 불규칙하게 나타남을 확인 할 수 있었다.

Fig. 6은 성형 시 롤의 자전과 공전에 따른 영향을 나타낸 것이다. 롤은 시계방향으로 자전과 공전을 하게 되는데 소재는 롤의 자전에 의해 성형이 되고 공전은 성형과는 무관하며 성형 후 소재의 회전을 막아줄을 알 수 있었다.

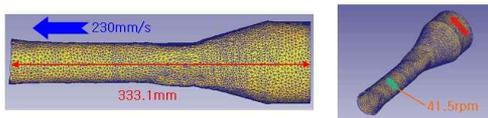
롤의 비틀림각 변화에 따른 소재의 성형 차이를 비교하여 Table 2에 정리하였다. 롤의 비틀림각이 8° 일 때에는 성형이 거의 이루어지지 않았다. 소재는 롤의 비틀림각에 의해 전진하는 벡터가 생겨 성형이 이루어지므로 비틀림각이 8° 이하에서는 성형이 이루어지지 않을 것으로 생각된다.

Table 3은 롤의 자전속도 변화에 따른 영향을 비교한 것으로 롤의 자전속도와 소재의 성형속도가 비례하는 것을 알 수 있지만 자전속도가 약 160rpm 이후로는 수렴하였다.

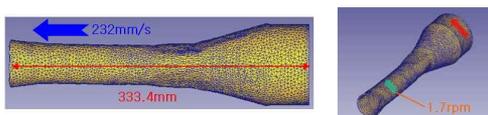
롤의 형상 중 단의 유무에 따른 성형의 차이 비교를 Table 4에 정리하였다. 롤 마크의 간격과 높이는 롤에 단이 있는 롤에 의한 성형에서는 규칙적인 반면에 단이 없는 롤에 의한 성형에서는 불규칙 하였다. 롤의 단은 성형 시 소재유동을 안정화 시키는 역할을 하는 것으로 생각된다.



(a) rotation : 110rpm, revolution : 0rpm



(b) rotation : 110rpm, revolution : 280rpm



(c) rotation : 110rpm, revolution : 310rpm

Fig. 6 Forming speed of billet by revolution speed of roll

Table 2 Results of billet by twist angle of roll

$\beta$	14°	11.6°	9.2°	8°
forming speed	240mm/s	237mm/s	229mm/s	-
temperature of billet	784℃	752.5℃	653.5℃	-
stress of billet	223MPa	252.5MPa	282MPa	-
strain of billet	25.35	20.35	18.3	-

Table 3 Results of billet by rotation of roll

rotation speed	160rpm	110rpm	60rpm
forming speed	231mm/s	229mm/s	180mm/s
temperature of billet	735℃	653.5℃	622.5℃
stress of billet	262MPa	282MPa	300MPa
strain of billet	20.75	18.3	12.55

Table 4 Results of billet by existence and nonexistence of step in roll

step in roll	existence	nonexistence
forming speed	229mm/s	221mm/s
temperature of billet	653.5℃	704.5℃
stress of billet	282MPa	273.5MPa
strain of billet	18.3	22.8

#### 4. 결론

본 논문은 Planetary rolling mill을 이용한 동관 압연공정을 유한요소해석 하였다. 시뮬레이션을 통한 해석과 가공변수에 따른 시뮬레이션 결과를 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 3개의 롤에 의한 동관 압연성형에서 소재의 가공은 롤의 자전에 의해 이루어지며 공전은 성형 후 소재의 회전을방지하기 위한 것임을 해석을 통하여 규명 하였다.
- 성형 중 롤의 작은 편축 정도가 롤의 회전 시 떨림을 발생하며 이것은 소재의 성형불량과 직결됨으로써 현장에서는 롤의 형상과 편축에 대한 엄격한 관리가 필요하다.
- 롤의 비틀림각이 커질수록 성형성이 좋아지며 응력이 감소하고 온도가 증가한다는 것을 예측 할 수 있으나 슬립의 발생 가능성이 있을 것으로 판단된다.
- 롤의 자전속도가 증가할수록 성형성이 좋아지며 롤 마크의 간격과 높이가 작아진다. 소재의 성형속도는 롤의 자전속도에 비례하지만, 약 160rpm부터 수렴하기 때문에 그 이상으로 롤의 자전속도가 증가하는 것은 성형성, 생산성 측면에서 그 영향도가 작을 것이다.
- 롤의 크기와 형상 및 단은 소재의 성형성에 큰 영향을 미치며 소재와 롤 사이의 마찰 증가를 위해 롤에 단이 필요할 것으로 판단된다.

#### 후기

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

#### 참고문헌

- K. Aoyagi, K. Ohta, "Material deformation, rolling load and torque in three-roll planetary mill", J. Jpn. Soc. Technol. Plasticity 24, pp.1039-1047, 1983
- W. J. Ammerling, H. Brauer, "Application of 3-roll technology for rolling specialty rod and bar products", Iron Steel Eng. 65, pp.22-27, 1988
- T. Nishio, T. Noma, S. Karashige, H. Hino, T. Tsuta and K. Kadota, "Development of three-roll planetary mill(PSW)", Kawasaki Steel Tech. Rep. 84, pp.81-90, 1995
- R. J. Montecinos, E. S. Arauco, "An investigation into rolling process of copper tubes", Journal of Materials Processing Technology 95, pp.139-144, 1999
- C. K. Shih, C. Hung and R. Q. Hsu, "The finite element analysis on planetary rolling process", Journal of Materials Processing Technology 113, pp.115-123, 2001
- S. J. Wu, Y. M. Hwang and M. H. Chang, "A three-dimensional finite element analysis of the three-roll planetary mill", Journal of Materials Processing Technology 123, pp.336-345, 2002