

## 유성압연기를 사용한 스테인리스 강관 압연공정의 유한요소해석 이정길<sup>1</sup> · 김관우<sup>2</sup> · 조해용<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2010년 12월 10일, 원고수정일 : 2011년 2월 7일, 심사완료일 : 2011년 2월 21일)

### FEA of Pipe Rolling Process Using Planetary Rolling Mill for Stainless Steel Jung-Kil Lee<sup>1</sup> · Kwan-Woo Kim<sup>2</sup> · Hae-Yong Cho<sup>†</sup>

**요 약 :** 유한요소법을 통하여 유성압연기에 의한 스테인리스 강관 압연공정을 연구하였다. 3개의 롤에 의한 만네스만 공법을 압연공정에 적용하였다. 보통 유성압연은 냉간가공으로 시작하여 열간가공으로 종료되며, 기존의 압출공정에 비해 공정단축과 생산비절감의 장점을 갖고 있다. 압연공정은 다양하고 복잡한 공정변수를 가지고 있으며, 각각의 변수들은 성형결과에 영향을 미친다. 따라서 유성압연의 다양한 공정변수가 해석에 고려되어야 한다. 본 연구에서는 스테인리스 강관성형의 가능성과 생산성을 검토하였고, 소재예열 및 자전속도, 제품두께 변화를 해석에 반영하였다. 스테인리스 강관 압연공정은 성공적으로 시뮬레이션 되었고 최적의 압연조건을 결정하는데 유용할 것이다.

**주제어 :** 스테인리스 강, 압연, 유성압연기, 유한요소해석

**Abstract:** Pipe rolling process using the planetary rolling mill for AISI 304 stainless steel has been studied by using finite element method. Mannesmann method using three-roll is applied to this rolling process. Commonly, rolling process has started from the cold working and finished to the hot working. This rolling process has more advantage that make reduction of process and cost than existing extrusion process. This process includes various and complex process parameters. Each of the process parameters affects forming result. Therefore, all of the process parameters should be considered in FEA. In this study, possibility and productivity of forming pipe for AISI 304 stainless steel had been investigated. Also, preheating process and variations of rotation velocity and product thickness were considered in FEA. Rolling process for AISI 304 stainless steel pipe was successfully simulated and it should be useful to determine optimal rolling condition.

**Key words:** Stainless steel, Rolling, Planetary rolling mill, Finite element analysis

### 1. 서 론

다양한 재질의 무계목관은 접합관에 비해 고압, 고온, 저온 등의 사용 환경에 보다 적합한 고품질, 고부가가치 자재로서 널리 이용되고 있다. 그 중 내식성이 우수한 스테인리스 강관은 배관 및 구조 용 등으로 활용범위가 매우 넓다.

일반적인 무계목관의 제조는 연속주조에 의한 빌렛가공, 빌렛절단, 압출, 다단 인발, 치수절단 등의 공정 순으로 이루어진다. 중간 성형체 가공을 위한 기존의 압출공정은 소재예열 시간소요, 압출기 크기에 따른 성형품 길이제한 및 설비 공간확보 등의 문제점을 가지고 있다. 이를 신공법인 유성압연으

<sup>†</sup> 교신저자(충북대학교 기계공학부/중전기 미래기술개발 연구센터, E-mail:hycho@cbnu.ac.kr, Tel: 043-261-2464)

<sup>1</sup> 한국기술교육대학교 기계정보공학부

<sup>2</sup> 충북대학교 기계공학부

로 대체 시 제조 공정의 단축과 제조원가 절감의 효과를 얻을 수 있기 때문에 현재 동관 제조에 일부 활용되고 있지만, 다양한 재질의 관제품 제조에 확산적용은 거의 전무한 실정이다.

유성압연공정은 3개의 원추형 롤이 각각 120° 각도로 위치하고 이 원추형 롤 사이에 연속주조에 의해 가공된 빌렛이 투입되어 모관을 제조하는 만네스만공법의 압연을 말한다. 공정변수는 롤의 형상, 기울임각, 비틀림각, 자전속도, 공전속도 등 매우 다양하고, 상호 복합적인 관계를 갖고 있다. 압연 과정과 원리 규명, 공정변수 파악 및 영향분석 등을 위한 연구들이 진행되고 있다. [1]은 소성점토를 이용한 실험을 통해 유성압연의 특성에 관한 연구를 하였고, [2]은 원추형 롤을 이용한 중실봉재의 유성압연에 대한 속도장상을 가정하여 이론해를 구하였으며, [3]은 유성압연공정에 의한 동관의 결정조직에 대해서 재결정과 경도변화를 연구하였다. [4]과 [5]은 스테인리스 강 중실봉재의 유성압연공정에 대해 연구하였고 소성점토를 사용한 실험과 해석 결과를 비교분석하였으며, [6]은 동관제조에 대한 설계변수들을 최적화한 유한요소해석 결과와 실험결과가 일치함을 규명하였다. 그러나 현재까지 무게목관의 다양한 재질에 대한 압연공정 적용 가능성 및 효과 검토에 대한 연구는 미진하여 공정개선에 유용한 관련연구가 요구되는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 동관 유성압연의 선행연구 [6]를 토대로 해석적 방법을 통해 AISI 304 스테인리스 강관제조에 대한 유성압연공정 적용 가능성 및 생산성 검토를 하였고, 공정변수들이 성형성에 미치는 영향 파악과 상호관계를 규명하고자 하였다.

## 2. 유한요소해석

강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 3개 원추형 롤이 적용된 유성압연기에 의한 스테인리스 강관 압연공정을 시뮬레이션 하였다.

### 2.1 유성압연 해석 모델링

유성압연기는 공정 모니터링 및 유지보수가 용이한 개방형 구조의 연속가공시스템이다. 빌렛의 길이 제한이 거의 없는 구조이고, 예열공정이 필요한

경우 압연 직전에 유도가열장치를 설치, 열 손실 없이 소재유입이 가능한 공정 특징을 갖는다. 자전하는 원추형의 롤러헤드 부, 롤러헤드를 자전방향의 반대로 회전하여 공전시키는 로터 부가 주요장치이다.

Figure 1은 Pro-Engineer를 이용하여 유성압연 시스템을 3차원 형상모델링 한 것으로 해석 시에는 롤-헤드 부와 맨드릴, 빌렛, 왜건 모델이 사용된다. 사면체로 요소분할 된 빌렛을 제외한 롤, 맨드릴, 왜건은 강체로 해석에 적용된다.

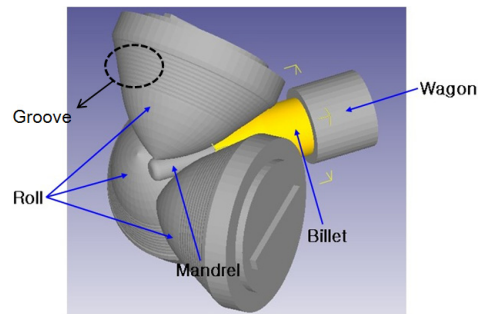


Figure 1: Analysis model for planetary rolling

### 2.2 유성압연 해석조건

유성압연 해석에 고려되어야 할 중요 공정변수는 롤의 형상, 자전 및 공전 속도, 왜건 속도, 압연 후 단면감소율, 초기 소재온도 등이 있다.

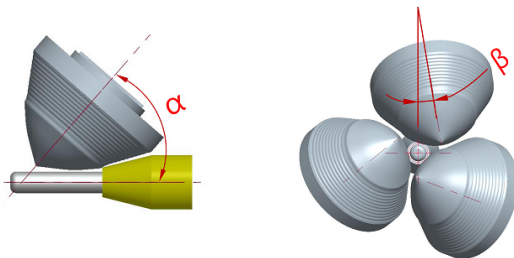
롤의 크기 및 표면형상은 동관 압연의 선행연구 [6]결과를 토대로 하였고, 압연 시 빌렛과의 마찰력 증가를 위한 그루브가 표면에 Figure 1에서와 같이 가공되어 있다.

Figure 2는 유성압연기에서 롤의 기울임각( $\alpha$ )과 비틀림각( $\beta$ )을 나타낸 것으로 동관의 성형성 및 가공속도에 큰 영향을 미치는 공정변수들이고, Table 1에서와 같이 기울임각( $\alpha$ ) 43°~50°, 비틀림각( $\beta$ ) 4°~9° 범위를 해석에 고려하였다. 압연 롤의 자전속도는 80~230 rpm 범위이고, 공전은 관의 회전을 억제하는 역할이며 성형성에 영향이 없는 것[6]으로 해석조건에서 제외하였다.

실제 압연과정 중 롤과 빌렛 사이의 마찰계수는 접촉위치에 따라 다르고 그 값의 측정은 거의 불가능하기 때문에 유한요소해석에서는 일정마찰을 가

정하여 상수로 적용되는 것이 일반적이다. 따라서 빌렛과 3개 롤 사이의 마찰계수를 0.4~1.0의 상수로 가정하고 해석적 검토를 통해 그 적정 값을 찾고자 했다. 또한 왜건 속도, 성형관 두께, 소재에 열 여부 등의 공정변수에 대한 성형성, 생산성 등의 해석결과를 비교분석 하였다.

가공 전 빌렛의 단면 크기는 외경 100mm, 내경 50mm이고, 맨드릴 직경은 40mm로 가정하였다. 빌렛의 물성은 AISI 304 스테인리스 강에 대한 DEFORM-3D의 내부 물성데이터를 이용하였고,



(a) tilting angle( $\alpha$ ) (b) twist angle( $\beta$ )

Figure 2: Tilting angle and twist angle of roll

Table 1: Analysis conditions of planetary rolling for AISI 304

Friction factor	0.4~1.0
Rotation speed(rpm)	80~230
Revolution speed(rpm)	0
Wagon speed(mm/s)	5~10
Tilting angle	43°~50°
Twist angle	4°~9°
Forming thickness(mm)	2.5~10
Area reduction ratio(%)	73.3~94.3
Pre-heating temp.(°C)	850

Table 2: Environment condition of simulation control for rolling analysis[7]

Initial temperature (°C)	20
Convection coefficient (W/m <sup>2</sup> · °C)	0.02
Radiation constant (W/m <sup>2</sup> · °C <sup>4</sup> )	5.669×10 <sup>-8</sup>
Heat transfer coefficient with inter-object (W/m <sup>2</sup> · °C)	5

Table 2는 해석에 적용된 시뮬레이션제어의 환경 조건을 정리한 것이다.

### 2.3 압연소재

Figure 3은 재료에 따른 변형속도민감도지수와 성형온도/녹는점온도의 비에 대한 관계[8]로서, 온도  $T/T_m$ 의 비가 0.6이상에서 변형속도민감도지수가 급격히 상승하는 추세이며 재결정온도에 가까워 질수록 변형속도가 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 특히, 온도  $T/T_m$ 의 비가 0.5이상에서 민감도 지수가 나타나는 AISI 304 스테인리스 강, 일반강 및 타이타늄 등은 열간가공에 의해 성형이 가능함을 알 수 있다. 따라서 유성압연을 통한 스테인리스 강관제조가 가능함을 알 수 있고 열간가공을 위한 소재예열 공정이 필요할 수도 있음을 시사해 준다.

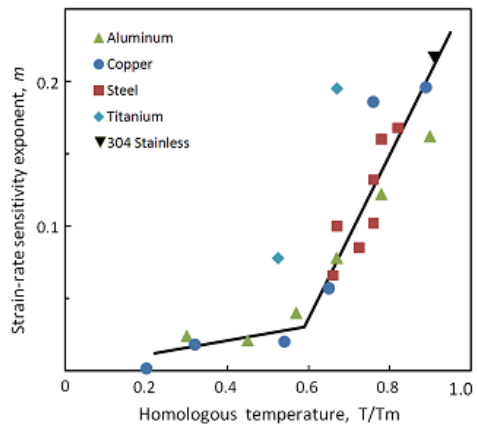
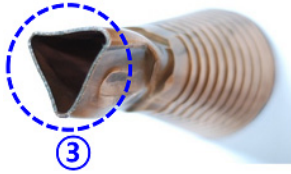


Figure 3: Relation between the strain-rate exponent and temperature[8]

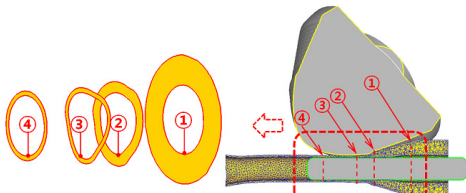
### 3. 유한요소해석 결과

Figure 4는 유성압연기에 의한 무게목관 성형 과정에 대해 실험[6]과 해석 결과를 비교한 것으로 소재의 직경 및 두께가 감소하는 성형 메커니즘을 볼 수 있다. Figure 4(a)는 실제 실험을 통해 성형된 동관의 결과[6]이고 Figure 4(b)는 AISI 304 스테인리스 강관 압연 해석결과이다. 성형 중 빌렛은 롤의 표면 형상 궤적을 따라 외경이 감소하

고, 원형소재는 3개 롤의 중앙을 통과하는 과정에서 큰 단면감소율로 성형되며 삼각형의 단면형상에서 원형의 성형체로 제조됨을 알 수 있다.



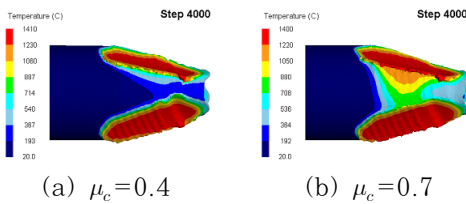
(a) experiment(6)



(b) simulation

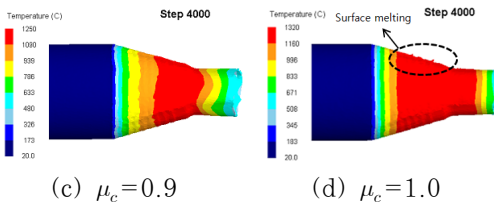
Figure 4: Deformation process of planetary rolling

해석에 고려한 Table 1의 공정변수 범위는 동관 유성압연 연구결과(6)를 토대로 설정하였고, 조건에 따른 다수의 AISI 304 스테인리스 강관의 성형해석결과를 비교분석한 결과, 비틀림 각( $\beta$ )은  $7.5^\circ$ , 왜건 속도( $V_p$ )는 8mm/s의 적정 값을 결정할 수 있었다.



(a)  $\mu_c=0.4$

(b)  $\mu_c=0.7$

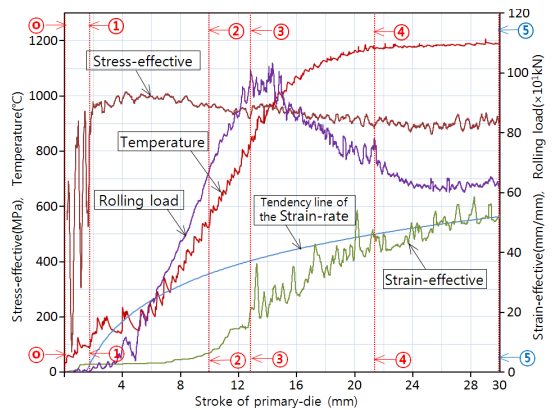


(c)  $\mu_c=0.9$

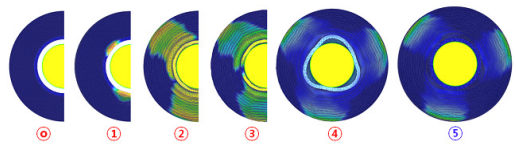
(d)  $\mu_c=1.0$

Figure 5: Analyzed results with variations of friction constant( $t=2.5\text{mm}$ ,  $\alpha=50^\circ$ ,  $\beta=7.5^\circ$ ,  $T_i=20^\circ\text{C}$ )

Figure 5는 가공 전 빌렛 초기온도( $T_i$ )가  $20^\circ\text{C}$ 일 때 마찰계수( $\mu_c$ )에 따른 성형결과를 비교하여 나타낸 것이다. Table 1의 비틀림각, 자전속도 등의 공정변수 변화에 대하여 마찰계수 값 0.7이하에서는 롤과 빌렛 사이에 슬립발생, 1.0에서는 표면용융의 문제가 발생되었고 약 0.9가 적정함을 해석적으로 검토할 수 있었다. 마찰은 유성압연을 가능하게 하는 중요인자이다. 따라서 현장적용을 위해서 적정 마찰력을 발생시킬 수 있는 롤의 형상설계가 매우 중요할 것이다.



(a) analyzed results

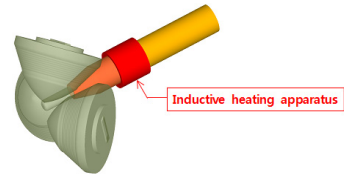


(b) deformation for each step

Figure 6: Analyzed results with stroke of wagon during planetary rolling( $t=2.5\text{mm}$ ,  $\mu_c=0.9$ ,  $\alpha=50^\circ$ ,  $\beta=7.5^\circ$ ,  $\omega_r=130\text{rpm}$ ,  $V_p=8\text{mm/s}$ ,  $T_i=20^\circ\text{C}$ )

Figure 6은 Figure 1의 왜건변위에 따른 유효 변형률, 유효 응력, 성형 온도, 롤 하중 변화의 해석결과를 조합하여 나타낸 것이다. 왜건은 빌렛을 일정압력으로 롤 갭에 밀어 넣어주고 압연 초기에 빌렛이 후방으로 밀리지 않도록 유지시키는 역할을 하며 해석에서 그 변위는 정압의 속도상수로 설정된다. 성형해석의 초기단계에서 왜건은 빌렛과 '붙었다-떨어졌다'를 반복하는 접촉상태에 있지만

성형하중이 점차 증가하여 정상상태가 되면 일정압력으로의 접촉을 유지하는 거동특성을 갖는다는 것을 알 수 있었다. **Figure 6**의 ①단계는 빌렛과 롤의 접촉면적이 점차 증가하여 최대가 되었을 때로서 성형온도가 급격히 상승하고 상당응력이 균일하게 나타남을 볼 수 있다. ②단계는 냉간에서 소성변형이 진행되고 재료의 연화 및 변형저항이 감소하는 등 열적활성기구들의 속도가 빨라지는 단계이다. ③단계를 기준으로 성형하중은 최대가 되고 주기적인 반복하중에 의해 재결정이 발생된다. 결정립계의 슬립이 확산되면서 전 영역의 변형률이 급격히 상승되며, 압연하중은 감소하여 안정적으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. ④단계는 균질의 열간가공이 진행되는 단계로서 상당응력, 성형온도 및 압연하중이 정상상태에 도달함을 볼 수 있다.

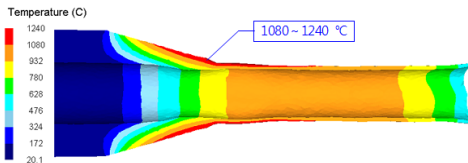


**Figure 8:** Inductive heating apparatus

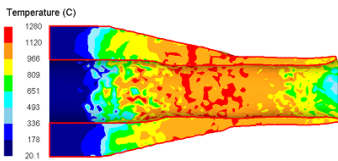
최고온도 분포를 형성하며 대변형이 진행되는 단계이다. ⑤는 집중변형구간을 지나서 성형이 완료되는 단계로서 중심부 맨드릴의 원주경계와 무게목관의 내경 윤곽이 일치함을 확인 할 수 있다. 이상으로부터 유성압연은 마찰에 의한 발생 열로 인해 조직이 연화되고, 변형저항이 감소되어, 조직 내 열적활성기구들의 속도가 빨라지면서 성형온도의 상승과 반복하중에 의한 결정립계의 슬립이 활성화되어 재결정이 진행되는 변형기구를 가지고 있음을 해석적으로 규명할 수 있었다.

**Figure 7**은 가공 전 빌렛 초기온도가 20℃일 때 성형두께에 따른 종단면 온도분포 결과를 나타낸 것이다. **Figure 7(a)**의 성형두께 2.5mm를 제외한 5~10 mm의 경우는 롤과 빌렛 사이에 슬립이 발생되면서 정상적으로 성형되지 못하였다. 이는 AISI 304 스테인리스강이 열간가공에 적합한 재료이기 때문으로 **Figure 8**에서와 같은 유도 가열장치로 빌렛을 예열하는 공정이 필요할 것으로 판단된다. 또한, **Figure 7(a)~Figure 7(d)**에서의 성형성을 극대화 하기 위해서는 성형 중 롤과 빌렛의 접촉면적을 최대한 확보하여 마찰력을 증대시키는 것이 중요하므로 실제 공정설계 시 롤의 적정 기울기 설정이 반드시 필요할 것이다. 해석과정에서는 롤의 기울임에 대한 빌렛과의 접촉면적을 분석하여 각각의 두께에 적합한 각도를 설정하였다.

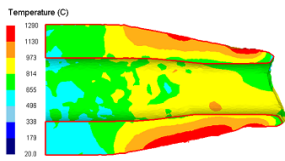
**Figure 9**는 가공 전 예열을 통한 빌렛 초기온도가 850℃일 때 성형두께에 따른 해석에서 종단면 온도분포 결과를 나타낸 것이다. **Figure 8**의 유도 가열장치를 통해 850℃까지 예열한 경우로 **Figure 7**의 상온에서 압연 시 발생하는 슬립현상을 방지할 수 있었다. 이는 가공 전 빌렛을 열간가공 온도의 약 70% 정도로 예열함으로써 압연 중 내외부의 온도차를 줄였기 때문에 균질한 변형이 된 것으로 생각된다. **Figure 9(a)**에서의 성형두



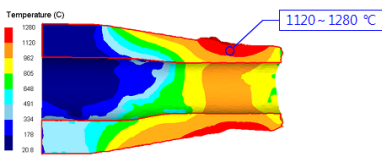
(a)  $t=2.5\text{mm}$ ,  $\alpha=50^\circ$ ,  $A_r=94.3\%$



(b)  $t=5\text{mm}$ ,  $\alpha=47^\circ$ ,  $A_r=88.0\%$



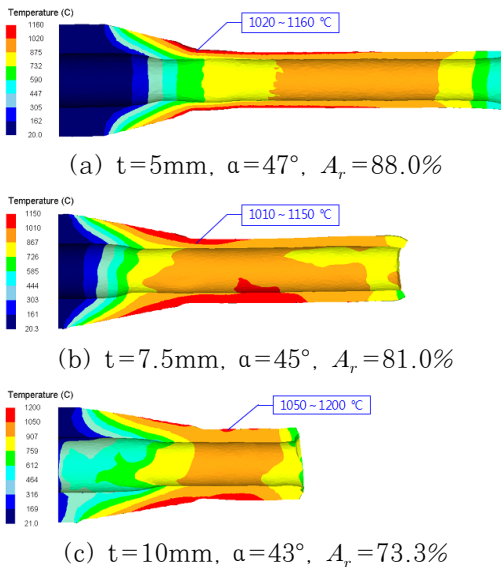
(c)  $t=7.5\text{mm}$ ,  $\alpha=45^\circ$ ,  $A_r=81.0\%$



(d)  $t=10\text{mm}$ ,  $\alpha=43^\circ$ ,  $A_r=73.3\%$

**Figure 7:** Temperature distributions according to tube forming thickness for 20℃ initial temperature( $\mu_c=0.9$ ,  $\beta=7.5^\circ$ ,  $\omega_r=130\text{rpm}$ ,  $V_p=8\text{mm/s}$ )

께 5mm인 경우 스테인리스 강관 생산속도는 동일한 가공시간에 대한 **Figure 7(a)**의 2.5mm인 경우 보다도 향상되었음을 볼 수 있다. 소재예열을 통해 두께 약 7.5mm까지 81%의 단면감소율로 압연가공이 가능할 것이고, 유성압연을 통한 AISI 304 스테인리스 강관의 제조에는 유도가열장치를 통한 예열공정이 추가적으로 고려되어야 할 것으로 생각된다. 빌렛의 연속된 유입과정에 포함되는 예열공정은 생산속도에는 영향을 미치지 않기 때문에 스테인리스 강관제조의 압출공정을 유성압연공정으로 대체 시 성형성 및 생산성 향상 통한 제조원가 절감의 효과가 기대된다. 또한, AISI 304 스테인리스강의 용융점은 1455℃이고, 열간가공의 적정 온도범위는 1150~1250℃이며, **Figure 9(a)~Figure 9(c)**의 성형두께 5~10mm에 대한 성형온도는 약 1000~1200℃로서 열간가공의 적정 범위를 만족함을 확인할 수 있다. 따라서 유도가열장치를 통한 예열공정에서 850℃로의 가열온도가 적합함을 알 수 있다.



**Figure 9:** Temperature distributions according to tube forming thickness for 850°C initial temperature ( $\mu_c=0.9, \beta=7.5^\circ, \omega_r=130\text{rpm}, V_p=8\text{mm/s}$ )

**Table 3**은 가공 전 예열을 통한 빌렛 초기온도가 850℃일 때 성형두께에 따른 단면감소율과 가

공 정상상태에서의 압연하중을 정리하여 나타낸 것이다. 가공 단면감소율이 클수록 즉, 성형두께가 얇을수록 압연하중은 감소하는 것으로 볼 수 있다. 이는 내외부 온도차가 거의 없게 성형온도가 균일하게 지속되므로 소재유동이 원활하게 되어 균질변형을 유도한 것으로 판단된다. 반면에 단면감소율이 낮은 경우는 성형두께가 크므로 균일한 온도분포유지가 어렵고, 성형온도의 강하로 인한 변형저항이 커지게 되므로 단면감소율이 작아짐에도 불구하고 압연하중이 증가하는 것으로 생각된다.

**Table 3:** Rolling load according to the area reduction ratio for 850°C initial temperature( $\mu_c=0.9, \beta=7.5^\circ, \omega_r=130\text{rpm}, V_p=8\text{mm/s}$ )

Forming thick. (mm)	Area reduction ratio(%)	Rolling load (kN)
5	88.0	661.9
7.5	81.0	789.4
10	73.3	980.7

**Table 4**는 가공 전 소재예열을 통한 빌렛 초기온도가 20℃일 때 자전속도에 따른 유성압연 해석 결과를 나타낸 것이다. 압연 톨의 자전속도는 성형에 미치는 영향이 큰 공정변수이다. 그 값이 적정 수준 보다 낮은 경우 변형률속도가 감소하고, 그로 인한 열축적은 소재를 고온으로 가열시키며, 소재 내부에 결정립이 성장되어 적열취성 등의 결함을 발생시킨다. 또한, 자전속도가 과다하게 큰 경우는

**Table 4:** Analyzed results with variations of rotational speed( $t=2.5\text{mm}, \mu_c=0.9, \beta=7.5^\circ, V_p=8\text{mm/s}, T_i=20^\circ\text{C}$ )

State variable	Rotational speed $\omega_r$ (rpm)			
	80	130	180	230
Max. temperature(°C)	1240	1190	1230	1250
Rolling load(kN)	913	641	520	359
Rolling torque(kN·m)	15.5	10.8	9.18	4.57
Strain-effective	36.1	66.9	51.6	67.6
Stress-effective(MPa)	869	947	918	794
Rolling speed(mm/s)	64.7	82.4	56.9	66.3

마찰접촉부의 큰 온도상승으로 롤과 빌렛 간의 점성유동이 증가하여 슬립 및 층 분리 현상이 발생된다. 이에 대한 주원인은 표면과 내면 사이의 과도한 소재유동 속도차이 및 롤과 빌렛의 접촉부 선속도 차이에서 기인된 것으로 판단된다. 따라서 성형성 및 생산성 측면에서의 적정 자전속도 결정이 매우 중요할 것이다. 동관 유성압연에서 롤의 자전속도와 성형 중 소재온도는 비례관계[6]를 갖는데 반해 AISI 304 스테인리스강의 경우는 130rpm의 자전속도 조건에서 비례관계의 기복이 있음을 볼 수 있다. 이는 특정 조건에 대한 가공 중 소재가 취성의 성질을 갖게 됨이 주된 원인으로 생각되며 실제 AISI 304 스테인리스 강관의 유성압연공정 조건설정에 있어 이를 고려해야 할 것이다.

#### 4. 결 론

유성압연에 의한 AISI 304 스테인리스 강관의 성형에 대하여 강소성 유한요소해석을 하였고 그 결과들을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유성압연은 마찰에 의한 발생 열로 인해 조직이 연화되고 변형저항이 감소되어 조직 내 열적활성기구들의 속도가 빨라지면서 성형온도의 상승과 반복하중에 의한 결정립계의 슬립이 활성화되어 재결정이 진행되는 변형기구를 가지고 있음을 해석적으로 규명할 수 있었다.

(2) 소재예열을 통해 두께 약 7.5mm까지 81% 이상의 단면감소율로 AISI 304 스테인리스 강관의 압연가공이 가능함을 해석적으로 검토할 할 수 있었고 유성압연을 통한 AISI 304 스테인리스 강관의 제조에는 유도가열장치를 통한 예열공정이 필요하다.

(3) 스테인리스 강과 같이 변형속도민감도지수가 높은 재료의 압연 시에는 유도가열장치에 의해 초기성형온도를 높임으로서 성형성을 크게 향상시킬 수 있고 AISI 304 스테인리스 강 경우 적정 예열온도는 약 850℃일 것이다.

(4) 외경 100mm, 두께 25mm인 초기 소재를 두께 약 7.5mm까지 81% 이상 단면감소율로의 유성압연은 마찰계수 0.9, 롤의 자전속도 130rpm, 기울임각 73.3~94.3°, 비틀림각 7.5°, 왜건속도

8mm/s, 예열온도 850℃의 조건으로 가능할 것이다.

#### 후 기

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] 青柳幸四郎, 水沼晋, 太田國照, 中島浩衛, “3롤·브라네타리·미ルの壓延特性”, 鐵と鋼 '80-S949, vol. 66, no. 11, pp. 348, 1980.
- [2] Y. M. Hwang, H. H. Hsu and G. Y. Tzou, “A Study of PSW rolling process using stream functions”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 80-81, pp. 341-344, 1998.
- [3] S. H. Zhang, B. Li, G. L. Zhang and H. Q. Zhang, “Prediction of 3-D temperature field of TP2 copper tubes in three-roll planetary rolling process”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 205, pp. 370-375, 2008.
- [4] 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, vol. 123, no. 3, pp. 336-345, 2002.
- [5] C. Hung and C. K. Shih, “Experimental and numerical analyses on three-roll planetary rolling process”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 142, no. 3, pp. 702-709, 2003.
- [6] J. K. Lee, K. B. Han, K. W. Kim, J. W. Cho, J. H. Kim and H. Y. Cho, “FEA of copper tube rolling process using the planetary rolling mill”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 2, pp. 303-309, 2010.
- [7] DEFORM 3D Version 6.1 User's

Manual, Scientific Forming Technologies Corporation, 2007.

- [8] William F. Hosford, "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy", Prentice-Hall Inc., 1983.

## 저 자 소 개



### 이정길(李廷吉)

1966년생, 1992년도 울산대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2000년 한국기술교육대학교 기계공학과 졸업(공학석사), 2011년 충북대학교 대학원 정밀기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기술교육대학교 기계정보공학부 기술연구원



### 김관우(金寬佑)

1974년생, 1997년도 충북대학교 공과대학 정밀기계공학과 졸업(공학사), 2001년 충북대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2010년 충북대학교 대학원 정밀기계공학과 졸업(공학박사)



### 조해웅(趙海龍)

1957년생, 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1985년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학석사), 1991년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학박사), 1993~현재 충북대학교 기계공학부 교수, 2007~현재 중전기 미래 기술 개발 연구센터 연구센터장(산업자원부지정)