

CAD/CAE를 이용한 세션 성형용 필거밀 공정의 최적설계

정용수*, 박훈재**, 김승수**, 나경환***, 이형욱***, 한창수****

Optimum design of a pilger mill process for wire forming using CAD/CAE

Y.S. Jung, H.J. Park, S.S. Kim, K.H. Na, H.W. Lee, and C.S. Han

Abstract

In this paper, The optimum design of a die shape has been carried out the FEM analysis of a pilger mill process considering various factors. The pilger mill forming process consists of a pair of rotating die which has appropriate surface shape. The important design parameters of the pilger mill are the feed rate and the profile of grooved die. Optimum design procedure was performed in order to investigated effects on the forming load and the deformed shape of material depending on the die radius profile. Profile of the die surface for the optimum design were suggested with the linear, the cosine and the quadratic curve considering a physical forming process. The surface of each die was modeled using the 3DAutoCAD and the analysis of pilger forming process was performed using the LS-DYNA3D. The optimum profile of the die shape for the pilger mill was determined to the quadratic profile. Since the analysis results provide that the model of the quadratic profile gives the lowest forming load and a proper deformed shape.

Key Words : Pilger Mill, Optimum Design, Wire Forming, Quadratic Profile, Finite Element Method

1. 서 론

니켈기 합금을 비롯한 특수금속합금들은 대체로 변형 저항이 매우 크고, 연신율이 작아 일반적인 공정으로는 선재화가 매우 어렵다. 이에 적절한 가공온도와 변형률 속도(Strain rate)에서 변형저항을 낮추고, 소성변형구역에 점진적인 하중을 작용시켜 연신율을 높일 수 있다면, 일회 공정으로 가공소재가 파괴됨이 없이 매우 큰 단면감소를 얻을 수 있다. 이를 이용하여 유리봉착용합금, 초내열합금, 고품위 금속저항 발열체 등의 고부가가치 합금들을 쉽게 선재화 할 수 있다. 이에 소량 다품종 수요특성의 경쟁력을 가지는 가장 적합한 공정으로서 봉재의 열간 필거밀(Pilger mill) 압연 공정을 들 수 있다.

필거밀 압연 공정의 원리는 Mannesmann 형제에 의

해 고안되었고, 주로 냉간가공으로 강관제조에 이용되고 있다. 필거밀 성형은 원주방향으로 타원형의 홈을 갖는 한 쌍의 롤(Roll)금형으로 성형이 이루어지는데 금형의 타원형 홈은 그 형상에 따라 물림부, 다듬질부, 및 길들기부로 구성된다. 이 홈을 갖는 한 쌍의 롤이 서로 반대 방향으로 약 반 바퀴씩 정·역으로 회전하면 가공재가 단속적으로 전진과 후진을 반복하게 되는데 가공시 롤의 회전에 의해 가공재는 Feed 방향과 반대방향으로 축력을 받아 가공재에 압축응력을 유발시킨다. 또한, 일회의 압연이 진행되면 가공소재는 일정각도로 회전하여 진원으로 성형된다. 이러한 점진성형적인 특성과 축력에 의한 압축응력은 가공소재의 연신율을 높이는데 기여하며, 한 번의 공정으로도 일반 강관의 경우 약 90%까지의 단면감소를 얻을 수 있다.

* 한양대학교 대학원
** 생산기술연구원 마이크로성형팀
*** 생산기술연구원 디지털생산공정팀
**** 한양대학교 기계정보경영학부

본 논문에서는 이러한 필거밀 압연공정을 봉형상의 세 선 성형에 적용하기 위하여 압연롤의 최적형상을 설계하였다. 가공하중의 최적 조건을 도출하기 위해 CAD/CAE를 이용하여 3차원 성형해석을 시도하였고, 압축응력을 받는 급형의 타원형 홈의 모델은 설계변수를 고려하여, 물리적인 의미를 가지는 3가지 형상으로 구현하였다.

2. 압연롤의 설계

필거밀(Pilger Mill) 압연기 설계의 핵심은 압연롤의 표면형상 설계에 있다. 압연롤의 표면형상에 따라 파이프나 봉재의 단면감소율이 결정되고, 또한 압연기에 가해지는 하중이 결정되며, 성형의 정도와 최대 피이딩량이 결정된다. Fig. 1는 필거밀 압연기의 기구학적 구조를 단순화하여 압연롤의 기본 개념 설계도이고, Fig. 2는 필거밀 압연 공정의 원리를 나타낸 그림이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 휠의 회전 θ 에 따라 크랭크 축의 연결을 통하여 압연롤이 병진운동을 하고, 압연롤은 피니언과 랙기어를 통해 회전운동이 동시에 일어난다. 설계된 필거밀의 수치는 각각 $\rho = 299.2mm$, $l = 1998.4mm$, $e = 90mm$, $R = 186mm$ 이고, 휠의 회전에 의한 압연롤의 변위는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$x = \sqrt{l^2 - y^2} + \rho \cos \theta \quad (1)$$

이때, $y = e + \rho \sin \theta$ 이다. 또한, 압연롤의 회전각은 압연롤의 변위에 따라 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{dx}{R} \quad (2)$$

본 논문에서는, 봉의 크기를 초기 직경 $D_o = 50mm$, 최종 직경 $D_f = 20mm$ 로 설정하였다. 이 경우 압연롤의 성형구간은 0° 에서부터 180° 이므로 피이딩의 정도를 고려하여 압연롤에서 실제의 성형구간을 결정하여야 하는데 휠의 토크를 고려하여 휠의 회전이 45° 일 때부터 성형이 시작되고, 휠의 회전이 120° 일 때 성형이 끝나는 것으로 설정하였다.

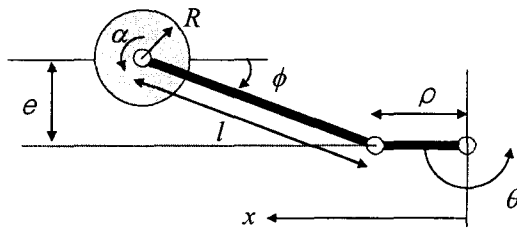


Fig. 1 Schematic diagram for a pilger mill machine

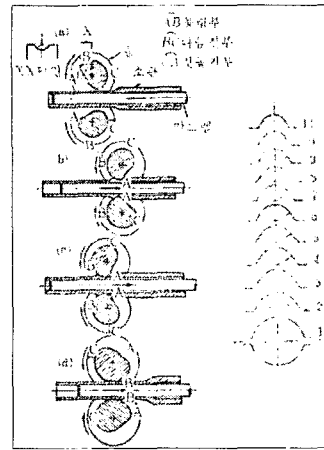


Fig. 2 Principle of a pilger mill process

따라서 휠의 회전각에 따른 압연롤의 성형 시작 각도는 $\alpha_o = 33.4^\circ$ 가 되고, 성형이 끝나는 각도는 $\alpha_f = 147.1^\circ$ 가 된다. 두 각도를 제외한 나머지 부분은 랜딩부가 되도록 설계하였다.

3. 설계변수에 따른 압연롤 표면형상의 모델링

압축응력을 받는 필거밀 압연롤의 설계변수는 위의 두 각도 사이의 압축응력을 받는 압연롤의 표면형상과 피이딩량이다. 여기서 피이딩량은 $5mm$ 로 고정을 하였고, 압연롤의 표면형상은 물리적으로 성형공정이 가능하도록 세가지의 형상을 설정하여 모델링하였다. 첫째 초기부터 동일한 비율로 봉의 직경을 감소시키도록 두 각도 사이의 표면 반원의 반지름이 선형인 경우, 둘째 초기에 많은 양의 감소를 유도하고 후반에 적은 양의 직경 감소를 부과하는 2차 곡선인 경우, 마지막으로 초기와 후반의 감소는 적으며 중간부에서 적절한 감소를 일으키는 Cosine 곡선을 따르는 경우로 설정하였다.

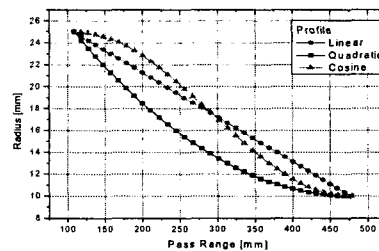


Fig. 3 Shape of the die surface with respect to the die profile

Fig.3 은 위의 세 가지 경우에 대하여 압연롤의 병진 운동 거리에 따른 휠 중심에서 표면까지의 반경의 분포를 비교하여 아래에 도시하였다. 실제로 필거밀 압연공정을 수행할 경우 봉의 중간형상이 가장 중요함을 예상할 수 있다. 초기부터 33.4도까지 회전할 경우 랜딩부로 반경 25mm가 유지되고 147.1도 이후에서는 반경 10mm로 유지되어 적절한 피이딩량을 부과할 수 있음을 알 수 있고, 압축응력을 가장 많이 받는 중간형상이 물리적인 의미를 가지는 세가지 형상으로 조절될 수 있음을 알 수 있다. 압연롤의 전체 병진운동거리는 584mm이고, 성형 공정 중의 압연롤의 병진운동거리는 369mm이다. 랜딩부는 각각 초반부 108.5mm, 후반부 106.8mm이다. 한편, 위에서 언급한 세가지 모델의 단면형상을 모델링하기 위하여 압연롤의 각도를 56개로 분할하였다. 또한 랜딩부를 각각 10개씩 분할하여 각각 동일한 반경으로 모델링하였고, 성형구간은 36개로 분할하여 각 곡선의 특성에 맞게 계산하여 모델링하였다.

4. CAE를 이용한 성형공정의 유한요소 해석

필거밀 성형공정의 유한요소 해석을 통하여 성형 하중과 성형장치를 구성하는 부품에 가해지는 하중을 예측하고, 형상의 변화와 소성변형률, 응력 분포를 예측하여 최적 설계에 적용하였다. 유한요소 해석에 사용된 재료는 냉간 상태의 OFHC (Oxygen Free High Conductivity) Copper 재료를 이용하여 필거밀 압연공정을 해석하였다. 사용된 구리의 밀도는 8960kg/m³이고, 탄성계수는 120GPa, 포와송비는 0.33, 초기 항복응력은 90MPa이다. 한편, 필거밀의 실제 성형공정은 압연롤이 동일한 구역을 두 번 왕복하게 된다. 여기서 두 번째 왕복할 때에는 90° 회전을 주어 완전한 진원형상의 성형을 가능하게 하였고, 플래쉬 등의 결함을 동시에 제거하도록 하였다.

본 연구의 해석에서는 해석의 시간적 경제성과 최적의 성형 조건을 도출하기 위하여 우선적으로 세 가지 형상에 대하여 1/4 모델링을 수행하여 동일한 구역에서 한번의 왕복을 수행하는 조건을 사용하였다. 그리고 최종 도출된 조건하에서는 두 번의 왕복 조건을 모두 적용하여 최종의 결과를 얻는 방식으로 하였다. 유한 요소 해석에 사용될 각각의 모델은 3차원 연속체요소를 사용하였고, 강제로 가정한 압연롤은 424개의 쉘요소와 486개의 절점으로 모델링하였다. 초기 봉재의 길이는 350mm이며, 해석은 LS-DYNA 3D를 사용하였다. 압연롤의 병진운동 속도는 초당 1회의 왕복운동으로 설정하였으며, 물과 봉재의 마찰계수는 0.3을 사용하여 세 가지 모델의 유한요소 해석을

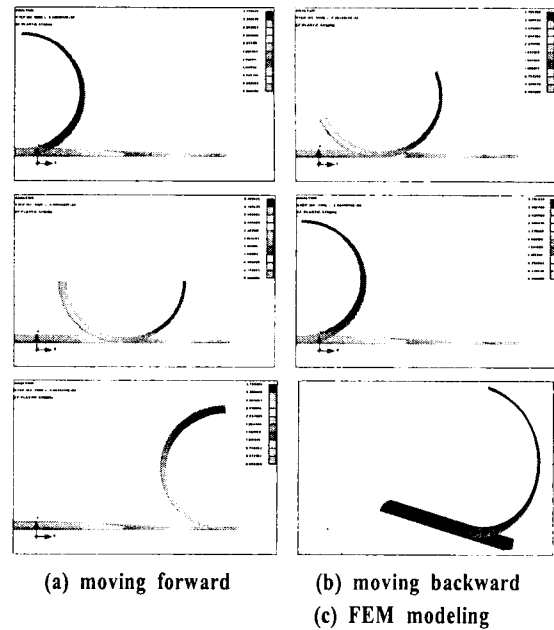


Fig. 4 Effective plastic strain distribution from the analysis of the linear modeling during the pilger mill process

시도하였다.

Fig.4는 필거밀 성형시 (a) 전진성형 공정과 (b)후진 공정의 유한요소성변형률 분포를 순차적으로 보여주고 있다. 또한, 압연롤의 병진운동과 회전운동을 하고 있는 형상을 나타내고 있으며, 1° 회전 후 반경 10mm의 봉재가 점차적으로 계속 나오는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4의 (c)는 Linear profile의 유한요소 모델링이다.

5. 필거밀 압연공정의 최적설계

세 가지 표면 형상에 대해 유한요소 해석을 모두 수행한 결과 이차곡선의 경우 28회의 왕복과정 이후 반경 10mm의 최종 봉재가 성형된다. 총 36회 중 8회에 해당하는 정상상태(steady state)의 봉재가 성형되어, 길이 40mm의 반경 25mm의 봉재가 길이 250mm(6.25×40mm)의 반경 10mm의 봉재로 성형되는데, 이것은 초기상태와 최종상태의 부피비가 6.25배인 것으로 정상상태 도달 후 1mm의 피이딩에서 6.25mm의 봉재가 생산되는 것을 의미한다. Cosine 곡선에서는 48회, 선형의 경우 38회의 왕복 후 정상상태에 도달하여 이차곡선이 선형과 Cosine 곡선보다 빠른 결과를 얻을 수 있다.

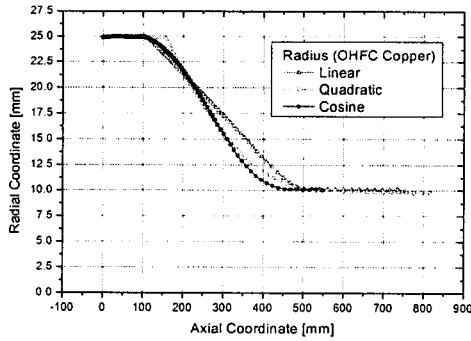


Fig. 6 Outer lines of formed rods

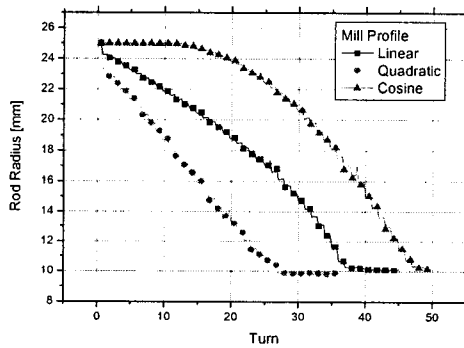


Fig. 7 Traces of the end of point of rod with respect to the die profile

Fig. 6은 성형 후 봉재의 외곽선 형상을 도시한 그림으로 각각의 경계조건에서 성형이 끝났을 때의 봉재의 최종 외곽선 형상이 처음 모델링한 표면 형상대로 성형부의 형상이 나타나는 것을 알 수 있으며, 이는 압출의 형태가 아니라 재료를 점진적으로 밀어서 최종형상을 만드는 필거밀의 성형공정을 고려하면, 이차곡선이 물리적으로 가장 근접한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 필거밀 성형 시 봉재의 반경이 줄어드는 과정을 도시한 그림이다. 이차곡선의 경우 반경의 변화가 거의 선형으로 나타나는 것을 알 수 있다. 선형 모델링의 경우 초기와 말기의 기울기가 많이 차이나 후반부에 많은 하중이 걸리는 것을 예측할 수 있다. Cosine의 경우 초기와 중기의 기울기가 차이가 나고 있으며, 중기에서 말기까지는 거의 동일한 기울기를 가지고 성형이 되는 것을 알 수 있어 선형의 경우보다는 하중이 적을 것을 예측할 수 있다. 이상의 결과를 분석한 결과 필거밀 성형 공정에서 성형하중, 정상상태까지의 도달 속도, 형상의

변화 등을 고려할 때 동일 재료를 사용 시 이차곡선으로 압연롤의 표면형상을 구성할 경우가 가장 좋은 결과를 나타내고 있다.

정상상태에서의 압연 하중 값은 선형의 경우 표면형상에 따른 정상적으로 타당한 결과를 얻을 수 있었으나, Cosine과 이차 곡선 모델링의 경우 비슷한 양상을 보이고 있지만 정상상태에는 조금 못 미치는 해석 결과를 나타내었다. 또한 90° 회전성형이 들어가지 않은 상태로 플래시가 생성되는 현상과, 선형보다 거칠게 구현되어진 압연롤의 표면 모델링으로 인한 오차가 발생하여 보다 정확한 정량적인 해석의 수행이 필요하게 되었다. 따라서 물리적인 의미를 가지는 세 가지 표면형상 중 가장 최적 설계안에 가까운 이차곡선에 대하여 90° 회전 해석을 수행하였다.

실제의 필거밀 성형공정은 동일영역을 재료의 90° 회전을 통하여 두 번 왕복 성형하는 것이다. 하지만 이러한 공정은 계산시간의 증가와 경계조건의 복잡성을 증가시키므로, Fig. 8에 보는 바와 같이 90° 회전을 압연롤의 90° 방향에 추가시키는 것으로 최종 조건을 대체하였다. Fig. 8에 따라 순차적으로 압연롤 1, 2가 동시에 180° 회전한 후 되돌아오고, 압연롤 3, 4가 180° 회전을 한 후 3과 4가 되돌아 온 다음에 Roll 1~ 4가 동시에 피이딩되면서 실제 공정에 가까운 해석을 구현하였다. 그 결과 최적 설계안에 가까운 이차곡선 모델링의 압연하중은 초기 성형 해석에서 60tonf 정도의 압연하중을 나타내었는데, 90° 회전을 고려한 최종 성형 해석에서는 40tonf의 성형하중을 나타내고 있다. 이는 Cosine 모델의 60% 정도의 요구하중만으로도 세션 성형을 할 수 있음을 의미하며 이차곡선이 Cosine 모델보다 우수한 설계가 됨을 증명하는 것이다.

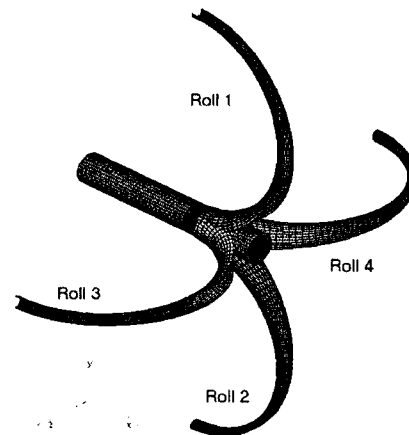


Fig. 8 FEM model of 90° rotary process

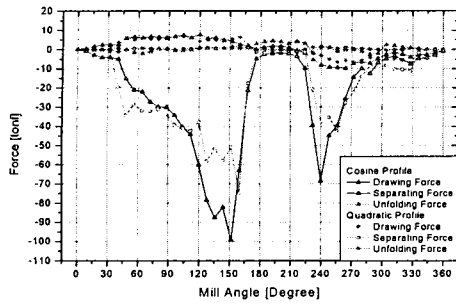


Fig. 9 Load-curve by pilger roll rotary on steady state

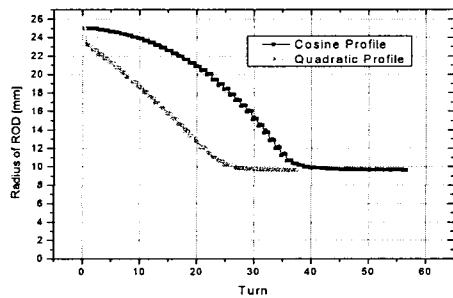


Fig. 10 Transformation of formed pipe radius

정상상태를 나타낼 때의 1회전 시 압연하중을 Fig. 9 에 도시하였다. Cosine 모델링과 이차곡선 모델링을 비교하면 Cosine 모델링 시의 최대 75%의 하중으로 이차곡선 모델링을 한 압연롤로 성형을 할 수 있는 것을 알 수 있으며 이차곡선 모델링이 초기부분에 하중을 좀더 부과하여 전체적인 최대하중을 줄일 수 있을 것이다. 또한 봉재의 반경의 변화선도를 Fig. 10에 도시하였다. 이차곡선의 경우 반경이 선형으로 줄어들고 있는 것을 확인할 수 있고, Cosine 곡선의 모델링의 경우 후반부에서 더 많은 성형 힘이 필요하다는 것을 예측할 수 있다. 이러한 형태를 볼 때, 반경의 변화를 보다 오목하게 설계하였을 때 후반부에서의 성형하중이 더 떨어질 것으로 예상할 수 있다. 즉 본 해석에서 제안된 이차곡선보다 좀더 초기에 기울기가 큰 곡선으로 모델링 할 경우 더 좋은 설계가 될 것으로 예상된다.

6. 결론

본 논문은 필거밀의 세선성형 공정을 CAD/CAE를 이용하여 해석적으로 접근하였고, 성형 공정에 미치는 여러 인자들을 고려하여 필거밀 성형공정의 최적설계를 수행하였다. 우선적으로 압출 공정에서 물리적으로 의미를 가지

는 세 가지 표면형상을 가지고, 유한요소해석 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 필거밀의 최적설계는 최대한 적은 압축 하중으로 보다 정밀한 세선을 성형하는 것으로, 필거밀의 성형공정의 특성상 압연롤의 표면 형상설계가 전체적인 하중, 형상 등에 큰 영향을 주는 변수임을 확인 할 수 있었다. 우선적으로 제시된 세 가지의 모델 중에서 반경의 변화가 2차 곡선을 따르는 표면형상이 가장 최적의 설계임이 입증되었다.

(2) 필거밀에 걸리는 성형 하중은 압연롤의 형상에 직접적인 영향을 받는 것을 확인할 수 있었으며, 이차 곡선과 같이 설계시 초기에 성형이 많이 일어나는 표면형상이 전체 하중에 보다 좋은 결과를 줄 수 있음을 알 수 있다.

(3) 유한요소 해석을 통하여 실제 압연롤을 제작하기 전에 경제적, 시간적 효율성을 최대한 높일 수 있고, 시행오차를 많이 줄일 수 있음을 확인하였다.

향후 실험계획법을 이용하여 이차곡선보다 정밀한 최적 설계를 수행하여야 할 것이며, 실험과 비교, 검증하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업기술개발사업 중 공통핵심기술개발사업의 일환으로 산업자원부의 지원을 받아 수행된 것으로서 모든 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) W. L. Roberts., Hot Rolling of Steel, Marcel Dekker, Inc, New York, 1983
- (2) B. Avitzur, Handbook of Metal-Forming Processes, Wiley-Interscience Publication, New York, 1983
- (3) P. Huml and R. Fogelholm, "Simulation model of cold pilgering, Journal of Materials Processing Technology, vol 42, Issue 2, April 1994, pp167-173
- (4) G. Stapleton. "An evaluation of two cold pilger die designs", <http://www.thefabricator.com> May,30,2001.
- (5) T. Altan., S. I. Oh., and H. L. Geel 1983, Metal Forming Fundamentals and Applications, American Society for Metals, Metals Park,
- (6) W. L. Dobrucki, R. Gregorczyk, A. swiatoniowski and S. T. Zawada., "Investigation of dynamic phenomena in the drive of a pilger mill for the hot rolling of tube." Journal of Mechanical Technology, vol 10, Issue 1, June 1984, pp3-27.