

언더레일 성형을 위한 성형 롤의 설계 및 형상예측

Design of Forming Roll and Shape Prediction for Forming Under Rail

*정상화¹, #이상희²

* . . eong¹ h eong chosun.ac. r, # . . ee²
¹조선대학교 기계공학과, ²조선대학교 대학원 기계공학과

Key words : Roll Forming Process, Flow Stress Equation, Residual Strain, Camber, Bow

1. 서론

슬라이드 레일(slide rail)은 보통 2개 또는 3개의 멤버(member)로 구성되며 스틸볼(steel ball)을 삽입하여 정밀한 직선왕복 운동을 가능하게 하는 기구이다. 이러한 슬라이드 레일은 프레스 공법에 의해 성형되지만, 형상이 복잡하거나 정밀도를 요구하는 제품은 롤 포밍(roll forming)으로 성형된다. 롤 포밍은 연속된 금속의 띠판이 다단의 롤을 통과하면서 단면의 형상이 일정하고 길이가 긴 제품을 효율적으로 생산하는 공법이다. 롤 포밍 공정은 압축과 인장이 복합적으로 나타나기 때문에 각각의 패스(pass)를 통과하는 형상의 예측이 어렵다. 또한 제품을 휘게 하거나 뒤틀리게 하는 버클링현상은 소재의 유동응력(flow stress), 소재의 두께, 롤간 거리, 굽힘각 등 많은 인자에 영향을 받기 때문에 정확한 예측이 어렵다. 일본 동경대의 M.Kiuchi 교수는 판재의 형상을 정현함수(sine function)화 하여 속도 장을 계산한후, 에너지 소모를 최소화하도록 매개변수를 결정 하는 방법과 같은 공정의 최적화 알고리즘을 제안하였다^{1,2}. Jimma와 Ona는 롤 포밍 성형시에 판재가 굽혀지는 부분인 플랜지(flange)의 굽힘 각과 패스 수를 연관시켜 롤 설계 시에 필요한 패스 수를 설정하는 경험식을 개발하였다^{3,4}.

본 논문에서는 식기세척기용 언더레일 중에서 상위 멤버를 설계하고 강소성 유한 요소법을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 해석에 사용된 소재는 냉간압연강판(SCP-1)이고, 인장 시험을 통해 소재의 물성치를 파악하였다. 인장시험 결과로부터 유동응력 방정식(flow stress equation)을 유도하였다. 상위 멤버의 설계는 호의 길이를 일정하게 성형하는 방법과 굽힘 반지름을 일정하게 성형하는 방법으로 각각 설계하였고, 시뮬레이션한 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 결과의 비교는 마지막 패스에서의 단면에 대한 잔류 변형률과 캠버(camber)와 보우(bow)의 수치적 크기를 비교하였다.

2. 언더레일 설계

2.1 유동응력 방정식

식기세척기용 언더레일에 사용될 소재는 냉간압연 강판이다. 냉간압연강판의 물성치 분석을 위해 KS D 3512(냉간압연강판 및 강대 규격)에 의해 KS B 0801(금속재료인장시험편 규격)을 참고하여 표준 시험편 5호로 제작후 인장시험 하였다. 인장시험 결과를 Table 1에 나타내었다. 항복 이후의 소성 변형에서는 연속되는 항복응력에 해당하는 재료상수를 항복응력 대신 유동응력으로 나타내며, 유동응력은 탄성변형시의 탄성계수처럼 재료가 가지고 있는 특성이다. 이러한 유동응력을 수식으로 나타내는 방법은 아래와 같다.

- n계급 경화형, $\sigma_f = K\bar{\epsilon}^n$ (1)
- Ludwick형, $\sigma_f = Y + K\bar{\epsilon}^n$ (2)
- Swift형, $\sigma_f = K(\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon})^n$ (3)

여기서 K 는 재료의 강도에 관계되는 비례계수로 강성계수(stiffness coefficient)라고 하고, $\bar{\epsilon}_0$ 는 초기 변위(initial strain) 그리고 n 은 가공경화지수(work-hardening exponent)이다. 본 논문에서는 수치적 해석에 최적화된 유동응력 방정식을 구하기 위해 식 (3)의 Swift식을 이용하였다. 냉간압연 강판의 인장시험으로부터 얻어진 S-S선도로부터 근사곡선화 시켜 다음 식(4)와 같은 유동응력 방정식을 얻었다.

$$\sigma_f = 1840(0.00254 + \bar{\epsilon})^{0.39657} \quad (4)$$

Table 1 Material Properties of SCP-1

Material	SCP-1
Young's Modulus	210 GPa
Yield Strength	158.12 MPa
Ultimate Tensile Stress	480.40 MPa
Poisson's Ratio	0.3

2.2 성형 롤 설계

언더레일은 멤버의 지름이 4mm인 스틸볼을 삽입시켜 진동은 최소화하면서 부드러운 작동이 가능 하도록 하였다. 상위 멤버는 반지름이 2mm인 굽힘 부가 3개 있으며, 각각의 굽힘 부를 연결하는 직선부의 길이는 7.2mm이다. 하위 멤버는 세 개의 멤버 중에 가장 많은 하중을 받을 것으로 예상되므로 하위 멤버에 주름(corrugation)을 주어 강도를 강화할 수 있게 설계하였다. 롤과 롤의 거리는 현재 제작 가능한 성형기의 성능을 고려하여 1패스부터 6패스까지는 330mm로 설정하고, 많은 변형이 예상되는 7패스부터 9패스까지는 신장량을 줄이기 위해 660mm로 설정하였다. 또한 전체 공정 수는 9개의 공정으로 설정하였다. 식 (5)는 성형 공정 중에 굽힘부가 받는 응력을 나타낸 식이다⁵.

$$\sigma = \frac{e^2 \times E \times (1 - \cos \alpha)}{l^2} \quad (5)$$

여기서 σ 는 굽힘 부가 받는 응력을 나타내고, e 는 다리부의 길이(leg height), E 는 영률, l 은 전체 공정의 수평거리, α 는 굽힘 각을 나타낸다. 플라워 패턴이란 성형롤을 설계하기 위해 가장 먼저 하는 설계로서, 제품의 최종 형상으로부터 최초의 평평한 소재 사이에 있는 각각의 단면을 겹쳐놓은 형상을 말한다. 플라워 패턴 설계 시에 큰 성형각의 변화를 "Jump"현상이라고 하고, 이러한 현상은 식 (5)에서 알 수 있듯이 제품에 높은 응력을 발생시켜 제품의 직진도를 좋지 못하게 한다. 따라서 본 논문에서는 Jump현상의 발생을 최소화하기 위해 다리부의 길이가 같은 패스는 굽힘 각을 같게 하고, 다리부의 길이가 긴 패스는 굽힘 각을 감소시켰다(I: 15° 증가, II, III: 10° 증가, IV: 30° 증가). 일반적인 U-Channel의 방법으로 설계 시에 양 옆의 굽힘 부에서의 굽힘 모멘트 발생으로 인해 중앙의 평행부에 크로스보우 현상(cross-bow)이 발생했다. 이러한 현상을 최소화 중앙의 굽힘부가 원점(flower point)이 되도록 Fig. 1와 같이 설계하였다. 또한 호의 길이를 일정하게 설계한 방법(Type A)과 굽힘 반지름을 일정하게 설계한 방법(Type B)의 두 가지 형태로 설계하였다.

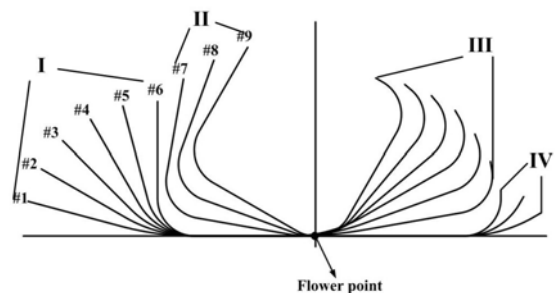


Fig. 1 Flower pattern of upper member

3. 유한요소 해석 결과

유한요소 해석에 사용된 입력 조건은 Table 2와 같다. 공정해석에 사용된 메쉬는 사각격자 메쉬를 사용하였고, 마찰계수 0.1 μ 이외의 마찰인자를 배제하여 롤 포밍 공정중에 마찰로인해 소재의 중심부가 휘어지는 현상을 방지하였다. 또한 두 개의 롤 모두 구동물로 설정하여 롤들의 회전속도의 차이로 인한 내부 응력의 증가를 줄이고자 하였다.

롤 포밍 공정에 대한 해석은 두 타입에 대한 성형성을 판단하기 위해 마지막 패스의 단면에 대한 길이 방향 변형률을 예측 하였고, 직진도를 예측하기 위해 캠버(camber)와 보우(bow)의 크기에 대해 예측 하였다. 롤 포밍 공정시에 압축과 인장의 복합적인 작용으로 인해 소재에는 잔류 변형률(residual strain)이 남게되고, 버클링을 발생하게 하거나, 제품의 직진도에 영향을 미치게 된다. 잔류 변형률은 다음의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다⁶.

$$\epsilon^{residual} = \epsilon^{max} - \epsilon^{exit} \quad (6)$$

여기서 ϵ^{max} 는 최대 길이방향 변형률, ϵ^{exit} 는 롤 출구에서의 길이방향 변형률을 나타낸다. 제품의 직진도를 결정하는 주요변수는 캠버와 보우이다. 캠버는 성형된 제품이 수평면상에서 직선으로 얼마 정도 차이가 있는가의 정도이고, 보우는 성형된 제품이 수직면상에서 직선으로 얼마 정도의 차이가 있는가를 나타낸다. Fig. 2에는 시뮬레이션 결과 예측된 상위 멤버의 형상이다. Fig. 3는 Fig. 2에서 왼쪽 가장자리에 대한 길이방향 변형률을 나타낸다. Type A의 잔류 변형률은 0.001%였고, Type B의 잔류 변형률은 0.002%로 예측되었다. 잔류 변형률은 Type B가 Type A보다 더 많이 소재에 남을 것으로 예측되었다. 잔류 변형률은 공정 과정에서 작용하여 주름이 되거나 모든 공정이 끝난 후에 소재를 휘어지게 하므로 Type B의 경우가 Type A에 비해 휨현상이 크게 나타날 것으로 예측된다. 두 타입의 캠버와 보우의 크기를 비교하여 Fig. 4에 나타냈다. 캠버의 크기는 Type A에서 11.416이 나타났고, 잔류 변형률이 크게 나타났던 Type B의 경우 20.713으로서 위에서 예측 했던 것과 같이 더 크게 나타났다. 보우의 크기 또한 캠버와 유사한 경향을 나타냈는데, Type A의 경우 19.828, Type B의 경우 22.759로써 Type B에서 보우의 크기가 더 크게 나타날 것으로 예측 되었다. 이상의 결과에서 언더레일의 상위멤버는 굽힘 반지름을 일정하게 설계한 방법(Type B)보다는 호의 길이를 일정하게 설계하는 방법으로 성형 했을 때 더 좋은 형상의 제품이 성형될 것으로 기대된다.

Table 2 Material Properties of SCP-1

Horizontal Distance to the Previous Roll Stand (mm)	330
Number of Elements in Rolling Direction	20
Number of Elements in Width Direction	53
Number of Elements in Thickness Direction	3
Width(mm)	87
Thickness(mm)	1.6
Friction Condition(μ)	0.1
Specify Self-Contact Penalty Constant	1000000

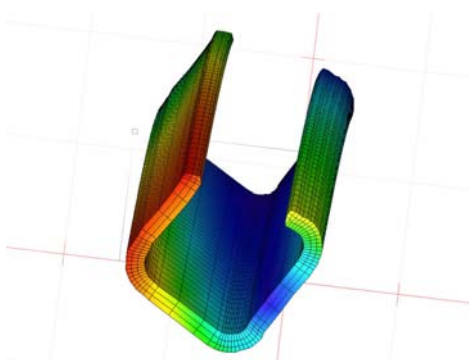


Fig. 3 Simulation Results for Lower Member

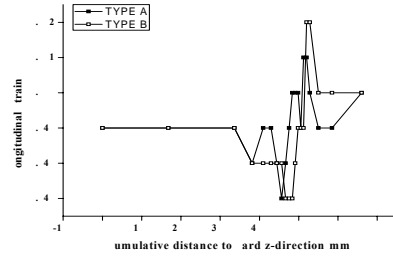
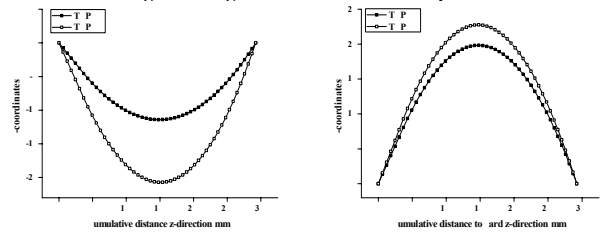


Fig. 4 ongitudinal strain in last pass



(a) Camber

(b) Bow

Fig. 5 Comparison of camber and bow between two type

4. 결론

본 논문에서는 언더레일을 설계하고, 강소성 유한요소법을 이용하여 상위멤버를 시뮬레이션 하였다. 유한요소 해석에 사용된 재료는 냉간압연강판이고, 인장시험을 통해 재료의 특성을 파악하였다. 냉간압연강판(SCP-1)의 수치적 해석을 위해 Swift식을 이용하여 유동응력 방정식을 구하였다. 상위 멤버의 굽힘각은 "Jump"현상을 최소화 하기위해 균등하게 설정하였다. 플라워 형태는 크로스 보우현상을 방지하고자 굽힘 부가 원점이 되도록 설계하였다. 또한 호의 길이를 일정하게 설계하는 방법(Type A)과 굽힘 반지름을 일정하게 설계하는 방법(Type B)의 두 가지 타입으로 설계하여 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 비교 결과, 잔류 변형률은 Type B의 경우가 Type A의 경우보다 적게 나왔고, 이러한 영향으로 인해 직진도 역시 Type A가 우수하였다. 이상의 결과로 언더레일의 굽힘 부의 설계는 호의 길이를 일정하게 설계할 경우가 더 좋은 형상이 나올 것으로 기대 된다.

참고문헌

1. Kiuchi, M., "Analysis Study on Cold Roll Forming Process," Report of the Inst. of Ind. Sci, Vol. 23, pp. 1-23, 1973
2. Kiuchi, M. and Koudobashi, T., "Automated Design System of Optimum Roll Profiles for Cold Roll Forming Proc," 3rd Int Conf. on Rotary Metal Working Process, pp. 423-427, 1984
3. Ona, H. and Jimma, T., "Experiments into the cold forming of straight asymmetrical channels," Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 8, pp. 273-291, 1983
4. Ona, H., Jimma, T. and Kozono, H., "A computer aided design system for cold roll forming," Advanced Technology of Plastic, Vol. 1, pp. 508-513, 1984
5. Halmos, G. T., "Roll Forming Handbook," CRC Taylor & Francis, Chapter 5, 2005
6. Kim, Y. Y., "Buckling Analysis and Buckling Limit of Strain on Roll Forming Process," Thesis of Degree of M.Sc Sogang Univ, pp. 1-30, 2002