

후방유동성형에서 기하학적 정의를 이용한 성형력 계산

Calculation of the Forming Force using the Geometrical Definition in the Backward Flow Forming

*남경오¹, 염성호², 이종호², 장승용², #우호길³

*K. O. Nam¹, S. H. Yeom², J. H. Lee³, S. Y. Jang², #H. K. Yoo(hkwoo@cnu.ac.kr)³

¹한국원자력연구원, ²충남대학교 기계공학과, ³충남대학교 기계공학과 BK21 메카트로닉스 사업단

Key words : Backward Flow Forming, Forming Force, Geometrical Definition, Spinning, Build-up, Rigid-plastic Finite Element Analysis

1. 서론

유동성형(flow forming)은 압출과 압연의 복합공정으로 롤러와 소재의 국부적인 접촉면에 축 및 원주방향으로 연속적 변형을 주어 소재의 두께를 감소시키고 동시에 길이를 증가시키는 공정이다. 기계적 성질과 치수정밀도가 우수한 얇은 튜브 형상의 부품을 제작하기 위한 여러 공정 중에서 가장 효율적인 공정으로 알려지고 있다. 가공이나 성형공정 중 칩의 발생이 없고 롤러와 소재의 접촉 면적이 작아 비교적 작은 성형력으로도 성형이 가능하며, 성형기계도 비교적 간단한 구조를 가진다. 이러한 특징으로 인해 고품질의 다품종 소량생산에 적합한 공정에 적용되고 있으며, 자동차, 항공우주, 원자력, 화학, 철도, 방위산업 등과 같은 분야에 적용되고 있다. 특히 자동차, 원자력 분야에서 사용되는 각종 고압튜브 및 항공우주, 방위산업 등에서 사용되는 연소관과 같은 구조적 강도, 높은 치수정밀도 그리고 경량화를 위해 부품의 두께에 제한을 받는 부품생산에 이용되고 있다. 유동성형은 원통형의 튜브가 맨드릴(mandrel)에 테일 스톡(tail stock)으로 고정되어 함께 회전하고 새들(saddle)에 고정된 1-3개의 롤러가 축방향으로 이동하면서 튜브의 두께를 감소시키고 동시에 길이가 늘어나도록 하는 공정이다. Kobayashi^[1] 등에 의해 스피ن 포징(spin forging)이라는 이름으로 초등해법과 슬립선장법(slip line method)을 이용한 해석적 연구가 수행되었다. M. Hayama^[2]는 접촉상태의 이상화, 평면변형, 강-소성 및 마찰전단계수를 가정한 초등해석을 수행하고 실험과 비교하였다. Gur^[3] 등은 불안정 소성유동 해석을 상계해법을 이용하여 해석하였다. C. C. Wong^[4] 등은 납 재질의 중실 봉재 유동성형시험과 해석을 수행하여 축방향과 반경방향의 성형력을 계산하였다. Y. Xu^[5] 등은 3차원 강-소성 유한요소법을 이용해 유동성형에서의 소재에 대한 응력과 변형률 분포를 해석하였다. M. I. Rotarescu^[6] 등은 원형 볼을 이용한 튜브 스피닝에 대한 이론적 해석을 수행하였다. 유동성형에 대한 연구들이 대부분 2차원적인 해석에 그치고, 산업현장에서는 아직 많은 시행착오를 거치면서 공정이 설계되고 있다. 본 논문에서는 유동성형 기기 제작에 있어 선형변수인 롤러의 성형각도, 두께감소율, 이송률에 따른 각 방향의 성형력 계산을 위해 기하학적 방법을 제안하여 정밀한 접촉면적을 계산하고 이를 통해 각 방향의 성형력을 계산하였다. 기하학적 방법을 이용한 방법은 삼각형 속도장을 이용한 상계해법, DEFORM 3D를 이용한 강-소성 유한해석결과와 비교해 해석적 측면에서 검토하였다.

2. 유동성형의 기하학적 정의

기하학적 방법을 이용한 접촉면적 계산을 위해서는 Fig. 1에서 정의된 바와 같이 롤러의 중심점에서 롤러와 소재의 접촉점에 대한 각을 정의해야 한다. 롤러의 중심점과 B점을 연결하는 직선과 Z축과의 각 α_x 와 C점을 연결하는 직선과 Z축과의 각 α_y 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

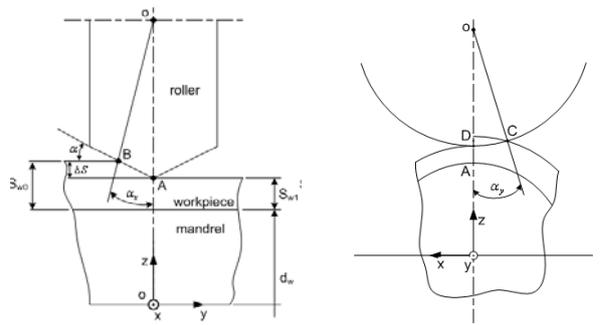
$$\alpha_x = \tan^{-1} \left\{ \frac{\Delta s}{(\rho - \Delta s) \tan \alpha} \right\}$$

$$\alpha_y = \sin^{-1} \left\{ \frac{2\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}}{ab} \right\}$$

여기에서

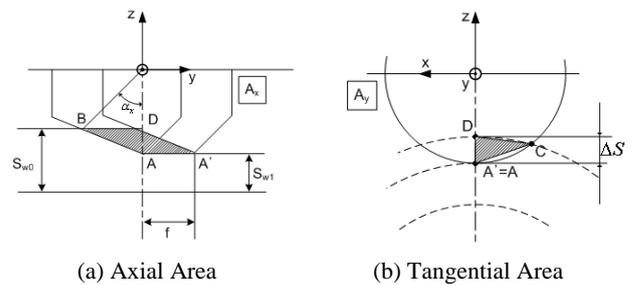
$$a = \rho, \quad b = \rho + d_w + s_{w1}, \quad c = d_w + s_{w0}, \quad s = \frac{1}{2}(a + b + c)$$

여기에서 ρ 는 롤러의 반경, s_{w0} 는 성형 전 소재의 두께, s_{w1} 은 성형 후 소재의 두께 그리고 d_w 는 소재의 내경을 나타낸다.

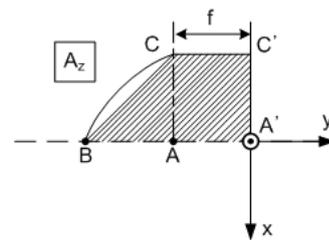


(a) Tangential Direction (b) Axial Direction
Fig. 1 Contact Geometry in the Flow Forming

Fig. 2는 소재가 한 바퀴 회전하는 동안 롤러가 축방향으로 진행됨에 따라 소재와 접촉되는 면적을 나타내고 있다. 각각의 면적은 두께감소율과 이송률로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 소재의 빌드업에 의한 접촉면적 증가 영향이 성형력에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단되어 빌드업 영향을 고려하지 않았다.



(a) Axial Area (b) Tangential Area



(c) Radial Area

Fig. 2 Contact Area between Roller and Workpiece in the Flow Forming

Fig. 2에서 각 방향의 접촉면적은 두께감소율과 롤러의 이송률 f 를 적용하여 다음과 정의할 수 있다.

$$A_x = f(s_{w0} - s_{w1})$$

$$A_y = \frac{1}{2} \Delta s \rho \sin \alpha_y$$

$$A_z = \frac{1}{2} (\rho - \Delta s) \tan \alpha_x \rho \sin \alpha_y + f \rho \sin \alpha_y$$

(c)에서 반경방향의 접촉면적 A_z 의 경우 실제 롤러의 전방부분과 소재가 접촉하는 곡선 BC를 정의하기 어렵고 곡선 부분이 접촉면적 변화에 미치는 영향이 적기 때문에 직선으로 단순화하였다. Rotarescu^[6]는 접촉면적에 작용하는 압력 p 를 다음과 같이 정의하고 각 방향에 동일하게 작용한다고 가정하였다. 본 연구에서도 각 방향의 접촉면적에 작용하는 압력을 동일하다고 가정하였다.

$$p = k(2 + \frac{\pi}{2} + m)$$

$$k = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}}$$

여기에서 k 는 재료의 전단응력, m 은 전단마찰계수 그리고 σ_Y 는 재료의 인장강도를 나타낸다.

3. 결 과

Fig. 3은 롤러 성형각도 10° , 두께감소율 10% 및 이송률 2.5 mm/rev인 조건 그리고 Fig. 4는 성형각도 15° , 두께감소율 20% 및 이송률 3.33 mm/rev인 조건에 상계해법과 제안된 기하학적 방법 그리고 강-소성 유한요소해석을 통한 각 방향의 성형력을 보여주고 있다. Fig. 3에서 원주방향의 성형력은 3가지 해석 모두 유사한 성형력 결과를 보였다. 축방향의 성형력 비교에서도 큰 차이를 보이지는 않았지만 상계해법보다 기하학적 해법을 이용한 성형력 계산이 유한요소해석과 비슷한 경향을 보였다. 그러나 반경방향의 성형력은 상계해법을 이용한 해석결과가 가장 큰 결과를 보였고 기하학적 방법을 이용한 해석이 상계해법보다 작은 결과를 보이면서 유한요소해석 결과와 더 근사한 결과를 보였다. 이는 롤러 성형각도, 두께감소율 그리고 이송률이 다른 조건에서의 해석결과인 Fig. 4에서도 비슷한 경향을 보였다.

4. 결 론

본 논문에서는 유동성형 기기설계의 가장 중요한 요소로 각 방향의 성형력을 계산하기 위해 기하학적 방법을 제안하고 상계해법, 강-소성 유한요소해석과의 비교를 통해 롤러의 성형각도, 두께감소율, 이송률의 변화에 따른 성형력 변화를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 후방 유동성형에서 성형력에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 롤러의 성형각도, 두께감소율, 이송률의 변화가 고려된 접촉면적과 성형력 계산식을 제안하였다. 둘째, 기하학적 방법의 해석적 검토를 위해 상계해법과 DEFORM-3D를 이용한 강-소성 유한요소해석을 수행하여 비교하였다. 셋째, 두께감소율의 변화는 축방향과 반경방향의 성형력에 이송률은 원주방향의 성형력에 그리고 롤러의 성형각도는 반경방향의 성형력에 각각 지배적으로 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 넷째, 기하학적 방법의 비교결과에서 축방향과 반경방향의 성형력 결과는 모두 근사한 결과를 보였으나 원주방향의 성형력은 큰 차이를 보였다. 다섯째, 유동성형 기기의 개념설계단계에서 각 방향의 성형력을 계산하기 위한 수치적 방법으로 제안된 기하학적 방법은 비교적 간단한 입력데이터만으로도 기하학적 정의와 수치해석을 통해 정밀한 접촉면적과 성형력을 계산할 수 있었고, 이를 통해 설계자에게 근사적으로 각 방향의 성형력을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

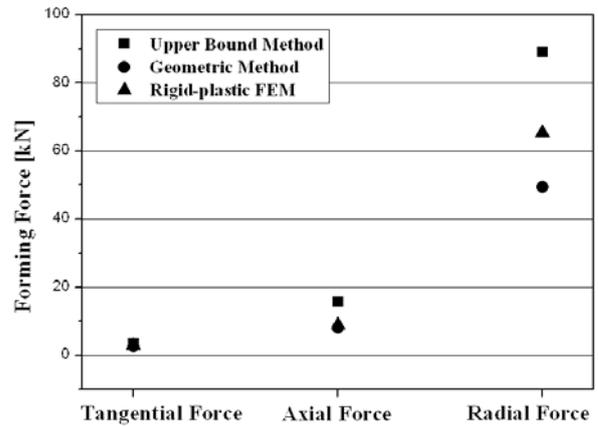


Fig. 3 Comparison of the Forming Force using Upper Bound Method, Geometric Method and Rigid-plastic FEM at Lead Angle 10° , Thickness Reduction Ratio 10%, Feed Rate 2.5 mm/rev

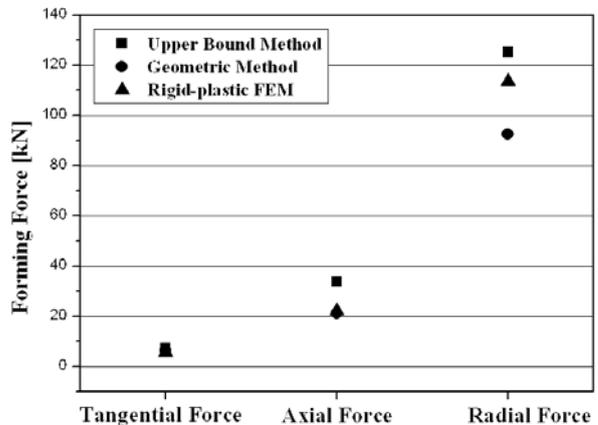


Fig. 4 Comparison of the Forming Force using Upper Bound Method, Geometric Method and Rigid-plastic FEM at Lead Angle 15° , Thickness Reduction Ratio 20%, Feed Rate 3.33 mm/rev

참고문헌

1. S. Kobayashi and E. G. Thomsen, "Theory of Spin Forging," Annals of the CIRP, 2, 114-123, 1961.
2. M. Hayama, "Theoretical Study of Tube Spinning," Bulletin of the Faculty of Engineering, Vol. 15, 33-48, 1966.
3. M. Gur and J. Tiroch, "Plastic Flow Instability under Compressive Loading during Shear Spinning Process," J. of Engineering for Industry, Vol. 104, No.1, 17-22, 1982.
4. C. C. Wong, T. A. Dean and J. Lin, "Incremental Forming of Slod Cylindrical Components using Flow forming Principles," J. of Materials Processing Technology, Vol. 153, Vol. 15, 60-66, 2004.
5. Y. Xu, S. H. Zhang, P. Li, K. Yang, D. B. Shan and U. Lu, "3D Rigid-plastic FEM numerical Simulation on tube spinning," J. of Materials Processing Technology, Vol. 113, 710-713, 2001.
6. M. I. Rotarescu, "A Theoretical Analysis of Tube Spinning using Balls," J. of Materials Processing Technology, Vol. 54, 224-229, 1995.