

Lead Screw 전조 정밀도 향상을 위한 성형인자의 특성평가

김광호*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 김동환(부산대 정밀정형 및 금형가공 연구소),
고대철(양산대 메카트로닉스과), 김병민(부산대 기계공학부)

Characteristics Evaluation of Process Parameters for Improvement the Precision of Thread Rolling in Lead Screw

K. H. Kim(Precision Mechanical Engineering, Pusan National University), D. H. Kim(ERC/NSDM, Pusan
National University), D. C. Ko(Yangsan College), B. M. Kim(ERC. NSDM., Pusan National University)

ABSTRACT

This paper summarizes the results of a numerical study conducted to analyze the effect of selected process parameters on material flow and thread profile in thread rolling of large diameter blanks. Based on the previous work where a plane strain mode was found to provide a reasonable approximation of the thread rolling process, the effect of varying thread form, friction factor, flow stress, and blank diameter on effective strain and thread height was analyzed using the finite element code DEFORM. This study show that effective strain for flank angle, that blank diameter had important effect on the as-rolled thread while flow stress, friction factor, and crest round of dies had significant impact on effective strain at the thread root and crest and load of thread rolling. While the rate of strain hardening was found to have an effect on the crest profile, the results indicate that it is the primary factor responsible for seam formation in rolled threads.

Key Words : Lead screw (리이드 스크류), Thread rolling (전조), Blank diameter (소재경), Roll dies (롤다이스),
Flank angle (프랭크 각도), Crest round of dies (다이스 이끝라운드), Strain hardening (가공경화)

1. 서론

전조란 금속의 소성변형을 이용하여 2 개 또는 여러개의 다이스 사이에 소재를 굴려서 점진적으로 나사산을 성형시키는 방법이다. 이 방법은 정도가 우수하고 균일한 나사산의 생산이 가능하기 때문에 현재 대부분의 나사성형에 이용되고 있다. 최근 각종 전자, 통신 부품의 소형화 및 집적화에 따라 미세 정밀 전조부품이 여러 부분에서 필요로 하고 있다. 미세 부품인 경우 치수의 정도 유지가 어렵고 나사산 성형에도 어려움이 있다.

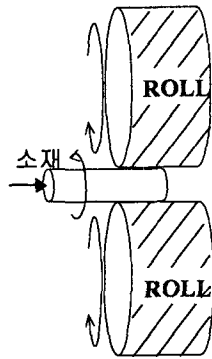
전조시 치수 정밀도를 향상하기 위해서 제일 중요한 성형인자로는 초기 소재경을 선정하는 문제이다. 초기 소재경은 제품의 형상에 따라서 약간의 차이가 있다. 초기 소재경이 적절하지 않을 경우 전조중에 소재의 이송현상(feeding)이 발생한다. 전조중에 소재의 이송현상이 발생하면 누적피치 오차가 생길 수 있으며 요구 되어지는 제품외경에도 영향을 줄 수 있다. A. Yamamoto⁽¹⁾, M. Masuda⁽²⁾ 등은 단

순 나사형태에 대한 초기 소재경 계산방법을 연구하였다. 또한, Yoshimoto⁽³⁾은 초기 소재경을 결정하기 위해 전조시 소재의 밀도변화 및 소재의 축방향으로의 연신이 없는 체적일정 조건으로 가정하여 ISO 미터나사산에 적용했다. 초기 소재경 선정 이외에도 전조시 영향을 줄 수 있는 성형인자들에는 전조력, 마찰계수, 다이스 치형끝단부의 라운드, 프랭크 각도(flank angle), 소재의 가공경화지수 등이 있다. 전조력이 너무 작으면 나사산이 제대로 성형되지 않으며 너무 클때는 소재 중앙부분에 크랙이 발생 할 수 있다. 따라서, 초기 소재경과 전조력이 전조시 치수 정밀도에 가장 직접적인 영향을 미친다고 할 수 있다.

지금까지 전조에 관한 연구결과 발표는 거의 없는 실정이며 현장 전문가들의 경험에 의존하고 있다. 제품개발시 시행착오법으로 제품을 생산하므로 시간과 비용이 상당히 많이 소요된다. 그리고 리이드 스크류(lead screw) 같은 경우에는 형상이 복잡하기 때문에 시행착오법으로 제품을 개발하는 것에는



Fig. 1 Thread rolling process through roll dies



한계가 있다.

본 연구에서는 전조시 영향을 줄 수 있는 성형인자들의 특성을 파악하고 상용유한요소 코드인 DEFORM-2D 를 이용해 성형인자에 대한 성형특성을 파악하고 초기 소재경은 3D 로 해석을 수행하여 구하였다. 또한, 해석결과를 분석하여 고정밀도 리이드 스크류 생산을 위한 최적공정설계를 제시하고자 한다.

2. 리이드 스크류의 특성

2.1 리이드 스크류 재료의 특성

각종 기계 및 구조물의 이송운동에 사용 되어지는 리이드 스크류 재료는 탄소강, 합금강 및 스테인리스강이 많이 사용된다. 리이드 스크류 부품은 선재료부터 일정한 크기로 절단한 다음 양단을 곡물 성형시킨 후 전조기에 의해 치형이 성형된다.

전조는 일반적으로 냉간상태에서 제조되지만 특수한 경우에는 온간 또는 열간 가공에 의해 제조되는 경우도 있다. 전조가 행하여 지기 전에 적절한 경도를 맞추어야 하므로 많은 경우 전조중 또는 전조후 열처리 공정에 의해 경도를 조절한다. 일반적으로 리이드 스크류 소재는 S 첨가로 쾌삭성이 양호하며 내소착성이 우수한 SUS 303 이 사용되는데

Table 1 Mechanical properties of SUS 303

Material	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Hardness (HRC)
SUS 303	24.6	62.3	24-31

Table 2 Chemical composition of SUS 303 (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.20	≥0.15	8.00-10.00	17.00-19.00

, 소재의 기계적 성질 및 화학적 조성은 Table 1 과 Table 2 와 같다.

2.2 FEM 해석 방법

FEM 해석에 사용된 재료는 SUS303 이며, 유동응력식은 인장시험을 통해 식(1)과 같이 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 94.86\epsilon^{-0.0984} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

다이스 치형끝단부의 라운드, 프랭크 각도, 마찰계수, 소재의 가공경화지수등의 공정변수 변화에 따른 성형특성을 파악하기 위해 상용유한요소 코드인 DEFORM 을 이용하였으며 2D Plane strain 문제로 가정하였다. 성형인자 평가를 2D Plane strain 으로 가정한 것은 F. Feng 논문⁽⁴⁾ 을 참고하였다. 그러나, 리이드 스크류 생산시 치형 끝단부의 가운데가 움푹하기⁽⁵⁾ 때문에 2D 해석으로는 똑같은 치형형상을 얻을 수 없으므로 초기 소재경을 결정하기 위해서는 DEFORM-3D 로 해석 하였다.

3. 전조시 성형인자에 대한 특성평가

3.1 다이스 치형끝단부의 라운드

Fig. 2 은 각각의 다이스 치형끝단부 라운드에 따른 유효변형률을 나타낸 해석 결과이다. 다이스 치형끝단부 라운드가 작으면 리이드 스크류의 골부분(root)의 유효변형률은 작아지고 반면, 리이드 스크류의 이끝부분(crest)의 유효변형률은 다이스 치형끝단부의 라운드가 0.2~0.3 일때 가장 크다. Fig. 3 에서 리이드 스크류의 이끝부분의 유효변형률은 다이스 끝단부의 라운드가 0.2~0.3 부분에서 가장 높게 나타났으며 리이드 스크류의 이뿌리부분은 라운드가 0.2~0.3 부분에서 가장 작게 나타나므로 리이드 스크류의 강도측면에서 볼 때 다이스 치형끝단부의 라운드가 0.2~0.3 일때 이끝부분과 이뿌리부분의 유효변형률의 차이가 가장 작게 나타났다. 그러나, Fig. 3 에서 다이스 치형끝단부 라운드와 전조력을 비교해 볼 때 다이스 끝단부 라운드가 클수록 전조력은 작게 나타났다.

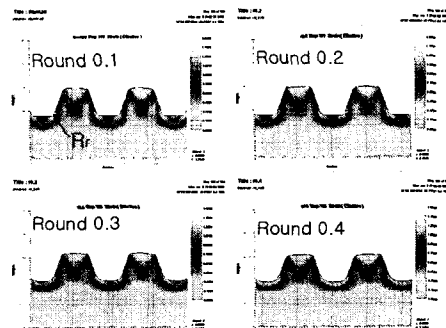


Fig. 2 Effective strain for dies round

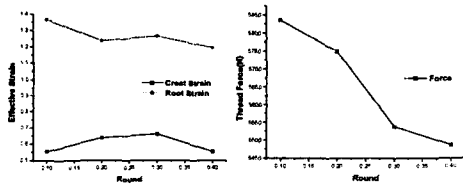


Fig. 3 Effective strain and thread force for dies round

따라서, 리이드 스크류의 이빨 및 이뿌리 유효변형률과 전조력을 비교해 볼 때 다이스 끝단부의 라운드가 0.3 일때가 가장 전조에 유리함을 알 수 있다.

3.2 프랭크 각도

Fig. 4 은 프랭크 각도에 따른 유효변형률을 나타낸 해석 결과이다. 다이스의 프랭크 각도가 클수록 리이드 스크류의 이빨 유효변형률은 커지고 이뿌리 유효변형률은 10°~20° 사이에서 제일 낮게 나타난다. Fig. 5 는 프랭크 각도에 따른 전조력을 표시하였다. 프랭크 각도가 커짐에 따라 전조력도 증가한다. 따라서 유효변형률과 전조력을 고려할 때 프랭크 각도가 10°~20° 사이일 때 가장 전조에 유리하다.

3.3 마찰계수

Fig. 6 는 다이스 치형끝단부 라운드는 0.2 로 하고 프랭크 각도는 20°로 하여 마찰계수(m)를 0.1~1.0 일때 유효변형률과 전조력을 나타내었다.

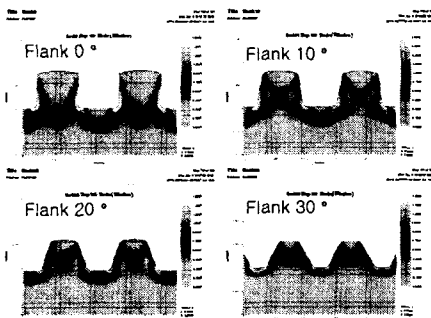


Fig. 4 Effective strain for flank angle

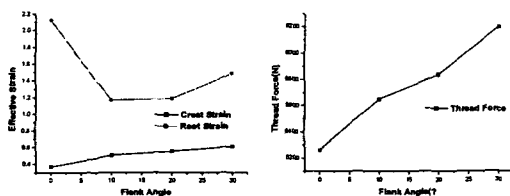


Fig. 5 Effective strain and thread force for flank angle

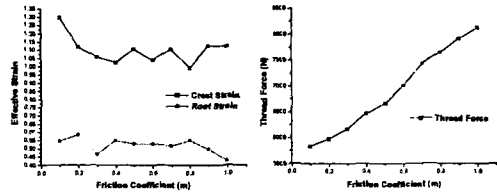


Fig. 6 Effective strain and thread force for friction factor

마찰계수가 증가하면 전조력이 계속 증가하므로 불리하다. 그리고, 치형의 외경은 마찰계수와는 관계가 없는 것을 알 수 있었다. 마찰계수가 0.3~0.4 일때 리이드 스크류의 이빨과 이뿌리 유효변형률 차가 가장 작게 나타나므로 전조시 유리하다.

3.4 소재의 가공경화지수

SUS303의 유동응력식 $\bar{\sigma} = 94.86\epsilon^n$ 을 사용해서 가공경화지수(n) 값을 0.1~0.5 까지 해석을 하였다. Fig. 7 는 가공경화지수에 따른 유효변형률을 나타내었으며 가공경화지수가 증가함에 따라서 이빨형상이 불룩하게 됨을 알 수 있다. Fig. 8 는 가공경화지수에 따른 유효변형률과 유효응력을 표시하였다. 가공경화지수가 증가함에 따라 이빨과 이뿌리 유효변형률은 감소하며 이빨의 유효응력은 감소하나 이뿌리 유효응력은 변화가 없다. 그리고, Fig. 9 는 가공경화지수에 따른 전조력을 나타내었다. 따라서, 리이드 스크류의 강도 측면에서 볼 때 가공경화지수가 높은 것이 유리함을 알 수 있다.

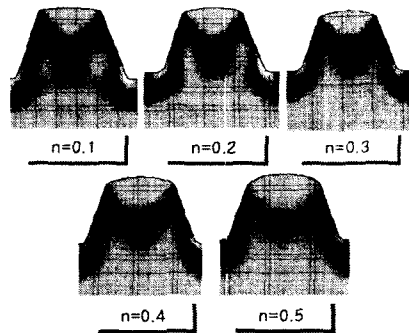


Fig. 7 Effective strain for strain hardening coefficient, n

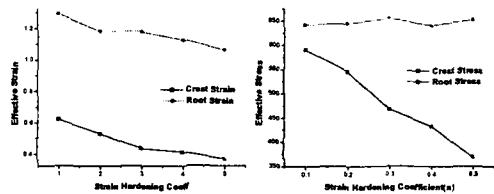


Fig. 8 Effective strain and thread force for strain hardening coefficient, n

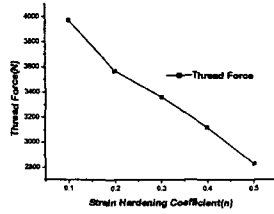


Fig. 9 Thread force strain hardening coefficient, n

3.5 초기 소재경

리이드 스크류 전조시 초기 소재경은 성형되는 리이드 스크류 치수정밀도와 치형의 표면결함에 직접적인 영향을 주기 때문에 초기 소재경의 결정은 리이드 스크류 전조 중에서 매우 중요하다. 전조가 공시 초기 소재경이 작으면 전조 치형의 높이가 낮게 되고 소재경이 크면 전조시 소재 내부에 인장응력을 많이 받게 되므로 치형부 내부에 크랙이 발생한다. 초기 소재경 계산식은 다음과 같다.

$$d_k = \sqrt{(d_c)^2 + 2d_c \left(\int u dz / P \right) + \left(\int u^2 dz / P \right)} \quad (2)$$

여기서,

$$\int u dz / P = (n_b^2 - n_a^2) \frac{\cot \alpha}{4} P$$

$$\int u^2 dz / P = \left\{ \frac{1}{48} - \frac{1}{8}(n_a^2 + n_b^2) + \frac{1}{6}(n_a^3 + n_b^3) \right\} P^2 \cot^2 \alpha$$

리이드 스크류의 외경이 $\varnothing 3.0\text{mm}$ 인 제품 초기 소재경을 식(2)을 이용하면 2.77mm 으로 계산되어 지고 실제 실험에서도 검증되었다⁽⁵⁾. Fig. 10 은 FEM 해석에 의한 유동형상이며 Fig. 11 은 동일조건에서 실험된 사진을 나타내고 있다. 해석에 의한 유동형상이며 실험에서의 치형처럼 가운데 부분이 움푹 들어가 있다. 이러한 현상은 리이드 스크류 전조에서는 반드시 나타나는 현상이다.

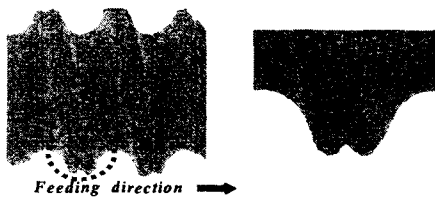


Fig. 10 Deformation mode by FEM analysis

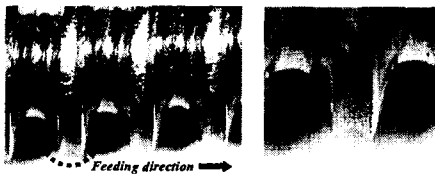


Fig. 11 Photograph of a lead screw

4. 결론

본 연구에서는 리이드 스크류 전조시 영향을 줄 수 있는 성형인자에 대하여 특성을 평가하였다. 성형인자로써는 다이스 치형끝단부 라운드, 프랭크 각도, 마찰계수, 소재의 가공경화지수, 초기소재경 등을 선정하였다. 이를 정리하면 최적의 전조조건을 결정하면 다음과 같다.

- (1) 전조시 다이스가 전진하면서 다이스 벽면을 따라서 소재가 유동하므로 2D 로도 성형인자 평가가 유용함을 알 수 있었다.
- (2) 다이스 치형끝단부 라운드는 $r0.3$, 프랭크 각도는 $10^\circ \sim 20^\circ$, 마찰계수 $m=0.3 \sim 0.4$ 일때 유효변형률과 전조력을 비교해서 볼 때 전조에 가장 유리함을 알 수 있었다.
- (3) 소재의 가공경화지수가 증가함에 따라서 유효변형률과 유효응력이 감소하므로 가공경화지수가 낮은 것이 전조에 유리함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소의 지원에 의하여 수행 되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. A. Yamamoto, Tokyo technical university, No. 1 , 1957, 1
2. M. Masuda, the precision machinery, 19-4 , 1953, 143
3. Yoshimoto, 同上, 30-12, 1964, 930
4. P. Domblesky, F. Feng., 2002 "A parametric study of process parameters in external thread rolling", Journal of Materials Processing Technology 121, pp. 341 ~ 349
5. K.H. Kim, D.H. Kim, and B.M. Kim "Determination of optimal blank diameter for the high precision of spindle screw", in press.
6. Tokyo, corona, 1990, "Rotary metalworking processes, Thread rolling and Spinning, JSTP, pp. 12 ~ 21, p. 72
7. Masuziro Hayama, 1981 "Rotary metalworking processes", Tokyo, pp. 128 ~ 149
8. Bishop, J. F. W. and Watkins, M. T., 1958, "The effect of specimen diameter on the straining of a cylindrical load-cell", MERL Plasticity Report Nos. 105 and 109; Brit. J. appl. Phys. pp. 38 ~ 40
9. V. Ivanov, V Kirov., 1997 "Rolling of internal threads: Part 1", Journal of Materials Processing Technology 72, pp. 214 ~ 220