

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.11.971>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

나사산 형상에 따른 초소형 나사 전조공정의 성형특성 고찰

이지은* · 김종봉** · 박 근† · 나승우***

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, ** 서울과학기술대학교 기계자동차공학과,
*** (주)서울금속 기술연구소

Investigation into Thread Rolling Characteristics of Subminiature Screws According to Thread Shapes

Ji Eun Lee*, Jong Bong Kim**, Keun Park† and Seung Woo Ra***

* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,
** Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,
*** Research Center, Seoul Metal Co. Ltd.

(Received May 31, 2016 ; Revised July 5, 2016 ; Accepted July 29, 2016)

Key Words: Thread Rolling(나사 전조), Subminiature Screw(초소형 나사), Asymmetric Screw(비대칭 나사), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 최근 전자제품의 소형화 및 경량화 추세에 따라 초소형 체결제품의 개발 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 이동통신기기 적용을 위한 초소형 나사(외경 1.0 mm 피치 0.25 mm)의 전조공정에 대한 연구를 수행하였으며, 특히 대칭 나사산과 비대칭 나사산의 성형을 위한 전조공정의 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통해 전조금형의 수평방향 간격, 수직방향 간격, 이동 거리 등의 공정변수가 성형된 나사산의 형상정밀도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 대칭 나사산과 비대칭 나사산에서 발생하는 재료 유동의 차이를 비교하고, 그에 따른 공정변수의 영향을 분석하였다. 상기 해석 결과로부터 도출된 공정변수를 실제 전조공정에 적용한 결과 대칭 나사산과 비대칭 나사산 모두 원하는 형상정밀도 내에서 성공적으로 성형될 수 있음을 확인하였다.

Abstract: Recent trends in miniaturization and lightness in portable electronics parts have driven developments in subminiature screws. This study aims to investigate the thread rolling process of a subminiature screw with an outer diameter and pitch of 1.0 and 0.25 mm, respectively. Finite element (FE) analyses were performed for the thread rolling process of symmetric and asymmetric screw threads. Through FE analyses, various process parameters, such as the horizontal and vertical die gap and the rolling stroke, were investigated in terms of the forming accuracy. The material flow characteristics in the thread rolling process of the symmetric and asymmetric screws were also discussed, and the relevant process parameters were determined accordingly. These simulation results were then reflected on real thread rolling processes, from which the symmetric and asymmetric screws could be formed successfully with allowable dimensional accuracy.

1. 서 론

최근 이동통신기기의 소형화 및 경량화 추세에 따라 나사 등의 체결부품 또한 크기와 개수를 줄여야 하는 수요에 직면하고 있으며, 이를 위해 직

경 1 mm 내외의 초소형 나사(Subminiature screw)에 대한 수요가 증가하고 있다.⁽¹⁾ 나사의 크기가 감소될 경우 체결되는 나사산의 개수 및 체결부의 접촉 면적이 감소하게 되어 체결특성이 저하될 것으로 예상되는데, 이러한 문제점을 해결하기 위해 종래 표준 나사산 형태로 사용된 정삼각형 형태의 대칭 나사산을 비대칭 형상으로 변경하여 나사의 체결력을 향상시키기 위한 연구가 진행되었다.⁽²⁾

† Corresponding Author, kpark@seoultech.ac.kr
© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

나사를 제조하는 공정은 나사의 머리부를 성형하는 단조(Forging) 공정과 나사산을 성형하는 전조(Thread rolling) 공정으로 구분할 수 있다.⁽³⁾ 전조 공정은 원기둥 형태의 소재를 나사산 형태의 패턴이 형성된 전조금형 사이에 삽입하여 소성변형을 유발시켜 나사산을 제조하는 공정이다.

나사산 전조공정에 대한 선행연구로는 공정 변수가 치형형상과 소재유동에 미치는 영향에 관한 연구,⁽⁴⁾ 전조공정시 마찰계수 분석에 관한 연구,⁽⁵⁾ 소형 나사(M1.4)의 성형하중 및 접촉조건에 따른 치형충진정도에 관한 연구^(6,7)가 있다. 또한 장축 볼트의 단조-전조 연계 성형해석을 실시한 연구,⁽⁸⁾ 리드스크류의 전조공정시 결함 발생을 예측하기 위한 연구,⁽⁹⁾ 나사 전조성형시 금형 간격에 따른 성형특성 연구,⁽¹⁰⁾ 경사각 나사못(Taper-tipped screw)의 전조성형 공정 전산모사를 수행한 연구⁽¹¹⁾가 있으며, 썸기형 전조금형을 사용한 나사산 전조성형 연구,⁽¹²⁾ 마그네슘 합금을 사용한 소형(M2.0) 나사의 전조공정 해석을 통한 유동 패턴의 고찰에 관한 연구 등이 발표되었다.⁽¹³⁾

상기 연구에서는 모두 표준 대칭나사산을 적용한 전조공정에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 외경 1.0 mm, 피치 0.25 mm인 초소형 나사(M1.0) 전조공정의 유한요소해석을 실시하였으며, 특히 체결력을 높이기 위한 비대칭 나사산의 전조 공정 해석을 통해 기존의 대칭 나사산 성형공정과 비교하고자 한다. 해석을 통해 전조공정에서 발생할 수 있는 다양한 성형불량을 방지하면서 KS나사 외경규격(0.9625±0.0225 mm)⁽¹⁴⁾에 만족하는 성형조건을 제시하고자 한다. 또한 도출된 전조공정 조건을 적용하여 실제 실험을 수행하고 결과를 고찰하고자 한다.

2. 초소형나사 전조공정 개요

2.1 나사산의 형상 설계

본 연구에서 개발하고자 하는 나사는 외경 1.0 mm, 피치 0.25 mm의 초소형 나사(M1.0×0.25)이며, 총 5 mm의 길이에 나사산이 형성되는 것으로 설계하였다. Fig. 1의 (a)와 (b)에 각각 대칭 나사산과 비대칭 나사산의 상세도면을 도시하였다. 대칭나사의 경우 나사산의 각도는 60°이며 중심축을 기준으로 좌우 30°씩 대칭형 형태를 이루고 있다. 반면 비대칭 나사의 경우 본 연구자의 선행 연구에 기반하여 외경과 피치는 동일하게 유지한 상태에서 20°의 편심각을 부여(중심축 기준 좌측 10°, 우측 50°) 하여 형상을 설계하였다.⁽²⁾

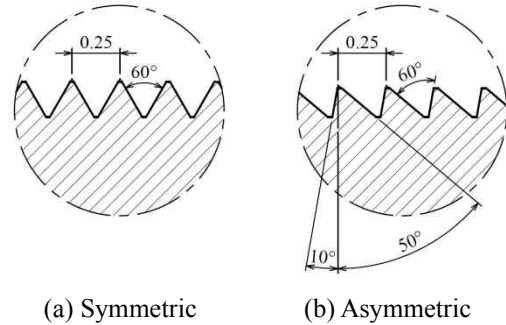


Fig. 1 Configurations of subminiature screw threads

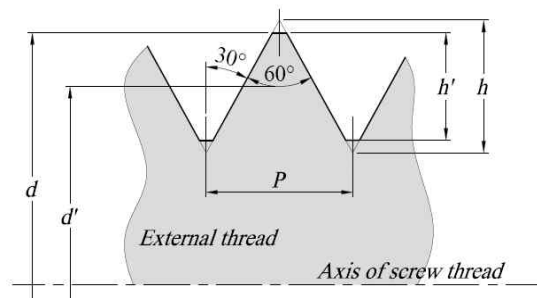


Fig. 2 Standard design parameters of screw threads⁽¹⁵⁾

2.2 초소형 나사 전조공정

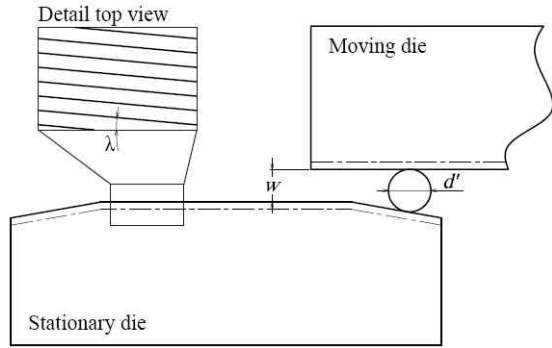
나사산 전조공정은 나사산 모양의 홈이 형성된 고정부 금형(Stationary die)과 이동부 금형(Movable die) 사이에 원통형 소재를 삽입하여 왕복운동을 반복시켜 소성변형에 의해 나사산을 성형하는 공법이다. 이때 성형 후 원하는 치수의 외경을 얻기 위해서는 적절한 초기소재 직경과 금형간격의 설정이 필요하다.

나사 성형시 초기소재 직경은 일반적으로 나사의 유효경(Effective diameter, d')을 기준으로 설정한다. Fig. 2에 ISO 표준에 의거한 미터 보통나사의 규격을 도시하였으며, 이를 기준으로 식 (1)을 사용하여 나사의 유효경을 계산할 수 있다.⁽¹⁵⁾

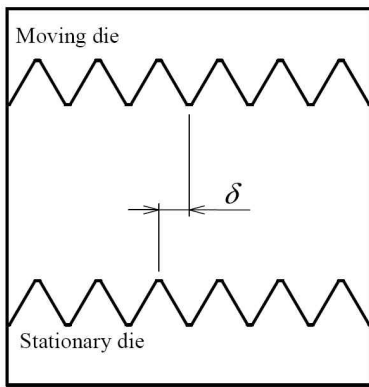
$$d' = d - 2 \times \frac{3}{8} \times h = d - 0.6495P \quad (1)$$

여기서 d 는 나사산의 외경, h 는 나사산의 높이, P 는 나사산의 피치이다. M1.0×0.25 나사의 사양을 식 (1)에 대입한 결과 유효경 값이 0.8226 mm로 계산되었으며, 이를 기초로 초기소재의 직경을 0.82 mm로 결정하였다.

금형간격은 고정부/이동부 금형간의 수직방향 간격(Vertical gap, w)과 수평방향 간격(Horizontal gap, δ)으로 구분하여 생각할 수 있다. 수직방향 간격은 Fig. 3(a)에 도시한 바와 같이 고정부/이동부 전조금형의 돌출부 사이의 거리로 정의되며, 나사산



(a) Vertical gap (w)



(b) Horizontal gap (δ)

Fig. 3 Definition of gaps between the thread rolling dies

이 완벽하게 성형된 경우 골부분의 내경에 해당하는 값을 갖는다. 수직방향 간격을 계산하기 위해서는 우선 실제 나사산의 높이(h)를 계산해야 하며, 이는 나사산 및 골에서의 모따기 크기(c_1, c_2)를 고려하여 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$h' = h - (c_1 + c_2) = \frac{\sqrt{3}}{2}P - (c_1 + c_2) \quad (2)$$

수직 금형간격의 범위는 식 (1)의 유효경과 식 (2)의 나사산 높이를 이용한 기하학적인 계산을 바탕으로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$d - 2h' \leq w \leq d' - h' \quad (3)$$

본 연구에서 사용한 금형은 나사산/골부분의 모따기 값(c_1, c_2)을 모두 0.027 mm로 제작하였으며, 이에 따른 나사산 높이(h)는 식 (2)로부터 0.1625 mm로 계산되었고, 이에 따른 수직 금형간격의 범위는 나사의 외경(d)을 KS 최소 허용규격(0.94 mm)⁽¹⁴⁾으로 적용한 경우 0.615 mm와 0.6575 mm의 사이로 계산되었다.

반면 수평 금형간격(δ)은 성형된 치형부의 위치

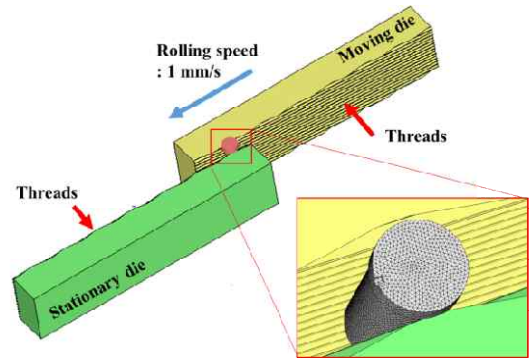


Fig. 4 FE analysis model with boundary conditions

정밀도에 영향을 미치는 인자로 Fig. 3(b)에 도시한 바와 같이 고정부/이동부 금형의 나사산 돌출부간의 수평 거리로 정의된다. 고정부와 이동부 금형은 Fig. 3(a)에 확대도시한 바와 같이 일정한 리드각(Lead angle, λ)을 가진 쉘기형태의 홈이 가공되어 있으며, 각각의 쉘기부간의 상대거리를 수평 금형간격으로 정의하였다.

3. 대칭 나사산 전조공정 유한요소해석

금형의 수평/수직 간격에 따른 대칭 나사산의 성형특성을 고찰하기 위해 유한요소해석을 진행하였다. 해석은 소성가공 공정의 유한요소해석 프로그램인 AFDEX 3D를 사용하여 진행하였다. 초기 소재는 직경 0.82 mm인 SWCH18A 선재를 사용하였고, 해당 소재의 응력-변형을 관계식은 선형연구 결과를 사용하였다.⁽³⁾ 해석시간을 단축하기 위해 나사길이를 1.5 mm로 한정하였고, 금형면과 소재와의 마찰조건은 접촉점의 수가 매우 적은 관계로 접촉조건(Sticking)을 적용하였다.⁽⁸⁾ 금형은 강체로 가정하여 해석을 수행하였고, 이동금형의 속도는 1 mm/s로 부여하였고, 이동거리를 11 mm까지 증가시켜가며 해석을 진행하였다. Fig. 4에 전조공정의 및 경계조건을 도시하였다.

3.1 금형 수평간격에 따른 성형특성 고찰

전조금형 수평간격(δ)에 따른 성형성을 분석하기 위해 고정부와 이동부 금형간의 나사산열이 일치하는 경우($\delta = 0$ mm), 수평간격이 $P/4$ 인 경우($\delta = 0.0625$ mm), $P/2$ 인 경우($\delta = 0.125$ mm)를 적용하여 해석을 실행하였다. 해석시 금형간의 수직간격(w)은 0.65 mm로 설정하였고, 이동금형의 이동거리는 소재의 1바퀴 회전에 해당하는 2.6 mm로 설정하였다.

Fig. 5에 각각의 경우에 대한 해석결과를 비교하

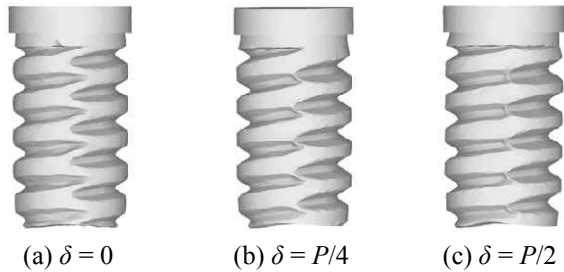


Fig. 5 Deformed shapes according to the horizontal gap

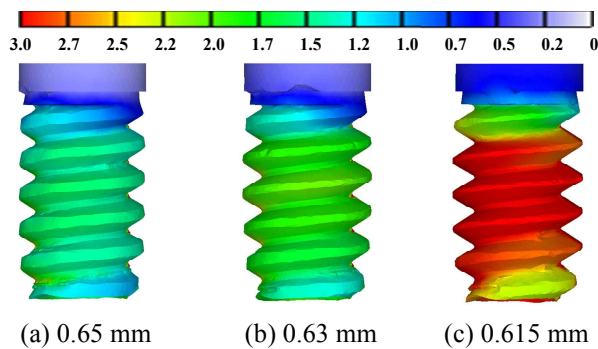


Fig. 6 Deformed shapes and effective strain distribution according to the vertical gap (symmetric)

였다. Fig. 5(c)에 도시한 바와 같이 간격이 $P/2$ 인 경우 나사산열이 서로 만나 정상적인 나사형태로 성형되는 반면 간격이 0인 경우[Fig. 5(a)]와 $P/4$ 인 경우[Fig. 5(b)]에는 1바퀴 회전시 나사산열이 서로 만나지 않아 성형불량이 발생됨을 알 수 있다. 상기 결과로부터 정상적인 나사산 성형을 위해서는 금형간의 수평간격을 나사산 피치의 $1/2$ 로 맞추어 성형해야 함을 확인하였다.

3.2 금형 수직간격에 따른 성형특성 고찰

앞절의 결과로부터 금형의 수평간격을 $P/2$ 로 설정한 상태에서 수직간격을 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 수직간격은 2.2절에서 언급한 결과 (0.615 ~ 0.6575 mm)를 토대로 0.65, 0.63, 0.615 mm로 설정하여 해석을 진행하였다.

Fig. 6에 이동거리 11 mm일 경우 금형 수직간격에 따른 나사산의 형상 및 유효변형을 분포를 비교하였다. 각각의 결과를 비교하면 간격이 작아질수록 나사산이 뾰족하게 성형되며 유효변형률이 증가함을 알 수 있다. 이는 금형간격이 감소함에 따라 금형의 압하량이 증가되어 결과적으로 소재의 유동성이 향상되기 때문으로 판단된다.

Fig. 7에 3가지 금형 수직간격에 대해 금형의 이동거리에 따른 나사산 외경의 변화를 그래프로 비교하였다. 나사산 외경이 KS 규격 최소치(0.94 mm)를 만족하는 이동거리를 살펴보면 금형간격이

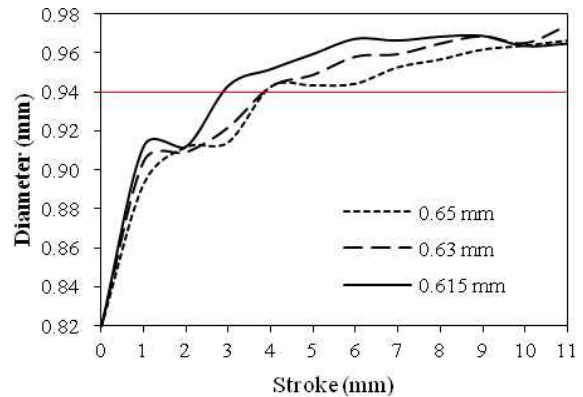


Fig. 7 Change of outer screw diameter with an increase of the rolling stroke (symmetric)

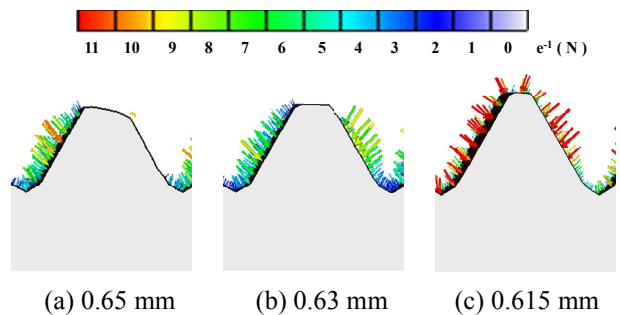


Fig. 8 Nodal force distributions on the thread surfaces according to the vertical gap (symmetric)

0.615 mm인 경우 2.9 mm 이상일 때, 금형간격이 0.63, 0.65 mm의 경우 이동거리가 3.9 mm 이상일 때에 해당함을 확인하였다. 그러나 금형간격 0.615 mm의 경우 이동거리 9 mm를 기점으로 다소 감소하는 경향을 보이는 반면, 금형간격 0.63 mm의 경우 서서히 증가하는 경향을 보여 이동거리 10 mm 이상에서는 금형간격 0.63 mm의 경우가 외경이 더 크게 나타남을 확인하였다. 이는 0.615 mm의 경우 최소 금형간격에 해당되어 소재가 전조금형의 나사산부를 대부분 채우더라도 외경 증가에 한계가 있기 때문으로 분석된다.

Fig. 8에 금형 수직간격별 나사산 표면에서의 절점력 분포를 비교하였다. 수직간격 0.65 mm인 경우[Fig. 8(a) 참조] 나사산이 불완전하게 성형되며 형상 역시 좌우 비대칭임을 알 수 있다. 또한 절점력이 나사산 좌측에만 작용하고 우측면에는 작용하지 않음을 알 수 있는데, 이는 금형면과의 접촉이 완전하게 이루어지지 않았음을 의미한다. 반면 금형간격이 감소된 경우(0.63, 0.615 mm)는 나사산이 대칭적으로 형성되며 절점력도 좌우면간 균형있게 분포하여 금형과의 접촉이 정상적으로 이루어지며 나사산이 성형됨을 확인할 수 있다. 따

Table 1 Comparison of screw diameter at various locations (symmetric)

Screw number	Experiment (mm)	Simulation (mm)	Error Ratio (%)
1	0.932	0.935	0.331
2	0.958	0.956	0.220
3	0.963	0.963	0.041
4	0.969	0.968	0.062
5	0.953	0.945	0.836
6	0.942	0.928	1.552
7	0.894	0.899	0.556

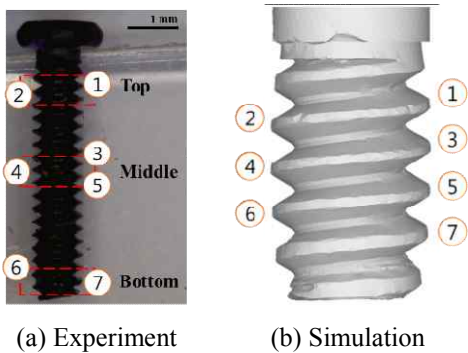


Fig. 9 Experimental results with measurement locations

라서 본 연구에서는 상기 결과를 종합적으로 고려하여 가장 좋은 외경증가 특성을 보인 0.63 mm로 금형간의 수직간격을 설정하였다.

3.3 실험적 검증

상기 결과를 바탕으로 금형 수직간격 0.63 mm를 적용하여 실제 전조실험을 수행하였다. Fig. 9(a)에 전조실험을 통해 성형된 나사의 사진을 도시하였으며, 나사산의 상부(Top), 중간부(Middle), 하부(Bottom)로 구분하여 Fig. 9(b)의 해석결과와 비교하였다. 해석의 효율성을 위해 나사의 길이를 1.5 mm로 축소하여 해석을 수행하였으며, 이에 상응하는 실험결과와의 비교를 위해 총 7개의 나사산을 3개의 영역(상부1-2번, 중부3-5번, 하부6-7)으로 구분하여 각각의 외경치수를 비교하였다.

Table 1에 실험과 해석결과로부터 얻어진 나사산 외경을 위치별로 비교하였다. 나사 외경은 머리 방향부터 서서히 증가하다 중간지점부터 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 이는 나사가 성형될 때 축방향으로의 소재 유동이 함께 발생하여 상대적으로 나사산의 성형성이 저하되는 것으로 예측된다. 이러한 경향이 해석과 실험 모두 유사하게 나타나고 오차율도 낮게 측정되어 본 연구에서 수행된 유한요소해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

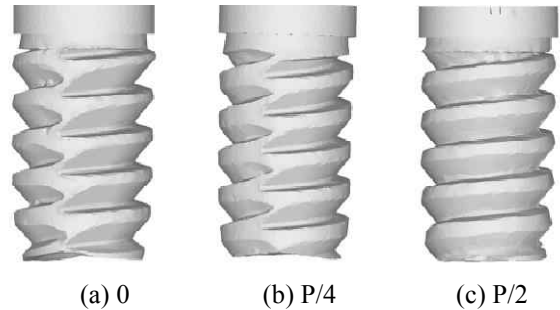


Fig. 10 Deformed thread shape according to thread gap(δ)

또한 상/하부를 제외한 중간부(3-5번 나사산)에서 모두 기준치수(0.94 mm) 이상의 외경을 보여 나사산이 규격에 맞게 성형되었음을 확인할 수 있었다.

4. 비대칭 나사 전조공정 유한요소해석

비대칭 나사산의 전조공정 해석도 전반적인 해석조건은 대칭 나사산 전조공정 해석과 동일하게 설정하였다. 금형은 Fig. 1(b)에 도시된 형상대로 3차원 모델을 생성하여 해석을 수행하였고, Fig. 6의 결과로부터 이동금형의 최대 이동거리를 5 mm로 설정하여 유한요소해석을 진행하였다.

4.1 금형 수평간격에 따른 성형특성 고찰

3.1절과 마찬가지로 고정부와 이동부 금형간의 수평간격이 각각 0, P/4, P/2인 경우를 적용하여 해석을 실행하였다. Fig. 10에 각각의 경우에 대한 해석결과를 비교하였으며, 간격 0의 경우[Fig. 10(a) 참조]와 P/4의 경우[Fig. 10(b) 참조] 모두 1바퀴 회전시 나사산열이 서로 만나지 않아 성형불량이 발생됨을 알 수 있다. 반면 P/2인 경우[Fig. 10(c) 참조] 나사산열이 서로 만나 정상적인 나사형태로 성형됨을 알 수 있었으며, 이러한 결과로부터 3.1절에 기술된 대칭나사의 결과와 마찬가지로 금형 수평간격을 나사산 피치의 1/2로 맞추어 성형해야 함을 알 수 있다.

4.2 금형 수직간격에 따른 성형특성 고찰

앞절의 결과로부터 금형의 수평간격을 P/2로 설정한 상태에서 수직간격을 0.65, 0.63, 0.615 mm로 변화시키며 해석을 진행하였다. Fig. 11에 이동거리 5 mm일 경우 금형 수직간격에 따른 나사산의 형상 및 유효변형을 분포를 비교하였다. 3.2절에 기술한 대칭 나사산의 결과와 유사하게 간격이 작아질수록 나사산이 뾰족하게 성형되며 유효변형률이 증가함을 알 수 있다. 반면 유효변형률의 분포는

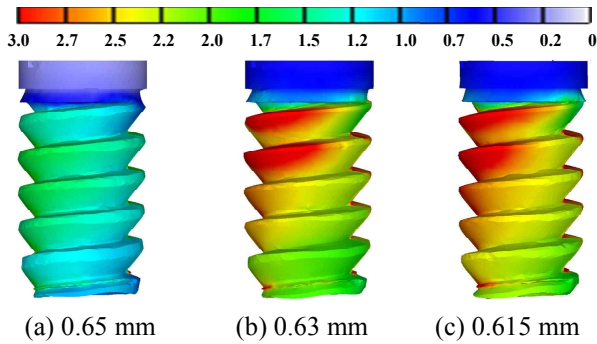


Fig. 11 Deformed shapes and effective strain distribution according to the vertical gap (asymmetric)

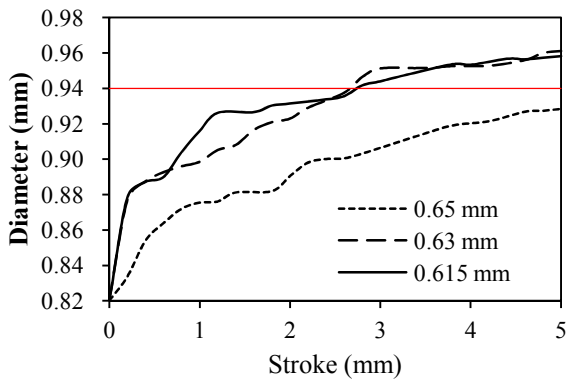


Fig. 12 Change of outer screw diameter with an increase of the rolling stroke (asymmetric)

Fig. 6의 대칭나사와 다소 차이를 보이는데, 대칭 나사는 전체적으로 균일한 분포를 보인 반면 비대칭 나사는 머리부쪽의 유효변형율이 상대적으로 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 소재가 성형될 때 비대칭적인 나사산의 형상으로 인해 머리부 영역에서 상대적으로 높은 변형률이 나타났기 때문으로 판단된다.

Fig. 12에 금형의 이동거리에 따른 나사산 외경의 변화를 그래프로 비교하였다. 금형간격이 0.63 mm, 0.615 mm인 경우는 이동거리가 2.7 mm 이상일 때 나사산의 외경이 KS 규격 최소치(0.94 mm)를 초과함을 알 수 있다. 반면 금형간격이 0.65 mm일 경우에는 이동거리 5 mm인 경우에도 외경 치수가 규격을 만족하지 못해 대칭 나사의 경우보다 성형성이 저하됨을 확인하였다. 이러한 성형성 저하는 비대칭적인 나사산 형상에 따라 축방향으로 유동이 증가되어 상대적으로 나사산 방향으로 유입되는 소재의 비율이 감소하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 13에 금형간격에 따른 나사산의 절점력 분포를 비교하였다. 비대칭 나사의 경우 Fig. 8에 도시한 대칭나사의 경우와 달리 금형간격과 관계 없

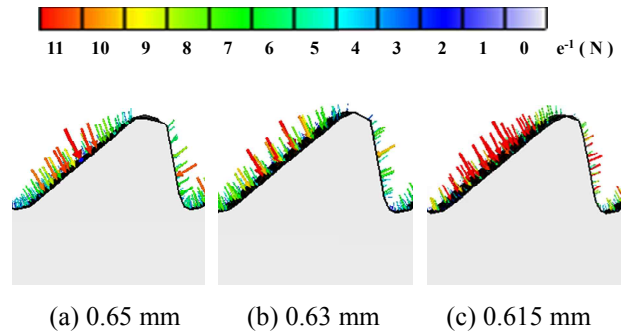


Fig. 13 Nodal force distributions on the thread surfaces according to the vertical gap (asymmetric)

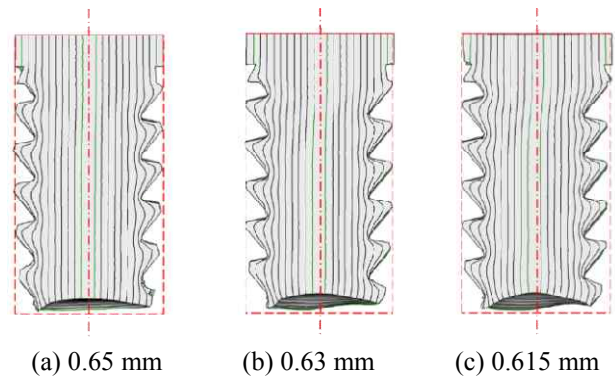


Fig. 14 Comparison of flow lines of asymmetric screws according to the vertical gap

이 비대칭적인 절점력 분포를 보임을 알 수 있으며, 이는 역시 비대칭적인 소재의 유동에 기인한 것으로 판단된다.

전술한 결과와 같이 비대칭 나사 전조성형시 비대칭적인 소재의 유동이 발생하는데, 이러한 현상을 고찰하기 위해 Fig. 14에 금형간격에 따른 유동곡선(Flow line)을 비교하였다. 각각의 경우 비대칭성을 비교하기 위해 중심선을 함께 표시하였으며, 중심부 첫번째 유동곡선(녹색 표시)이 중심선에서 벗어난 정도로 유동의 비대칭성을 판단하였다. 결과를 보면 금형간격이 감소할수록 비대칭성이 증가함을 알 수 있으며, 특히 금형간격 0.615 mm인 경우는 육안으로도 확인이 가능할 정도로 큰 편차가 발생함을 알 수 있다[Fig. 14(c) 참조]. 이러한 비대칭성은 금형간격이 감소할수록 소재와 금형간의 접촉면적이 증가하고 결과적으로 접촉력이 증가하게 되어 소재의 유동이 편향이 더욱 심해지기 때문으로 분석된다.

상기 해석결과를 종합적으로 고려할 때 비대칭 나사의 경우에도 수직방향 금형간격이 0.63 mm인 경우가 나사산의 외경치수 규격을 만족하면서도 편심이 발생되지 않는 가장 좋은 결과를 보임을 확인하였다.

Table 2 Comparison of screw diameter at various locations (asymmetric)

Screw number	Experiment (mm)	Simulation (mm)	Error Ratio (%)
1	0.944	0.945	0.106
2	0.954	0.951	0.315
3	0.964	0.965	0.104
4	0.963	0.965	0.207
5	0.961	0.958	0.313
6	0.947	0.945	0.212
7	0.922	0.924	0.216

4.3 실험적 검증

상기 결과를 바탕으로 비대칭 나사에 대해 금형 수직간격 0.63 mm를 적용하여 전조실험을 수행하였고, 3.3절과 동일한 방법(Fig. 9 참조)으로 나사산의 상부, 중간부, 하부로 구분하여 7개의 나사산에서의 외경을 비교하였다. Table 2에 실험과 해석결과로부터 얻어진 나사산 외경 치수를 위치별로 비교하였다. 대칭 나사의 경우와 유사하게 외경이 증가하다 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 이러한 경향이 해석과 실험 모두 유사하게 나타나고 오차율도 적게 나타남을 확인하였다. 또한 상/하부를 제외한 중간부(3-5번 나사산에서 모두 기준치수(0.94 mm) 이상의 외경을 보여 비대칭 나사의 경우에도 나사산이 규격에 맞게 성형되었음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 초소형 나사 전조공정의 유한요소해석을 실시하였으며, 특히 대칭 나사산과 비대칭 나사산의 성형특성을 비교하였다. 상기 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 외경 1.0 mm, 피치 0.25 mm의 초소형 나사나사산 성형을 위한 대칭/비대칭 전조금형을 설계하였고, 금형의 수평간격(δ)과 수직간격(w)을 설계변수로 설정하였다.

(2) 금형의 수평간격에 따른 전조공정 해석을 실시한 결과 수평간격이 잘못 설정된 경우 나사산 열이 어긋나는 성형불량이 발생함을 확인하였고, 대칭 나사산과 비대칭 나사산의 경우 모두 금형의 수평간격을 나사산 피치의 1/2로 설정한 경우 성형불량이 발생하지 않고 나사산이 연속적으로 성형됨을 알 수 있었다.

(3) 금형의 수직간격에 따른 전조공정 해석을 실시한 결과 수직간격의 설정에 따라 성형되는 나사산의 외경에 영향을 미침을 확인하였다. 수직간

격이 0.63 mm인 경우 대칭 나사산과 비대칭 나사산의 경우 모두 가장 좋은 성형성을 보였고, 특히 비대칭 나사산의 경우 외경치수를 만족하면서도 편심이 발생하지 않음을 확인하였다.

(4) 도출된 최적조건(수평간격 $P/2$, 수직간격 0.63 mm)을 적용하여 실험을 실시한 결과 설계규격을 만족하는 초소형 나사를 성형할 수 있었으며, 해석 결과와의 유사성도 확인할 수 있었다.

상기 결과로부터 초소형 나사의 성공적인 성형을 위해서는 전조금형 설치시 수평/수직간격을 수십 마이크로미터 수준의 정밀도를 유지하여 조절 해주어야 함을 확인할 수 있었으며, 이러한 사항을 실제 성형공정에 반영하였다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부 산업기술혁신사업(우수기술연구센터사업 ATC)의 지원으로 수행되었음(과제번호: 10045724).

참고문헌

(References)

- (1) Ra, S. W. and Park, K., 2015, "Recent Trends in Developing Subminiature Screw Parts," *Proc. KSPE Spring Conf.*, pp. 1224.
- (2) Min, K. B., Kim, J. B., Park, K. and Ra, S. W., 2014, "Evaluation of Clamping Characteristics for Subminiature Screws According to Thread Angle Variation," *J. Korean. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 9, pp. 839~846.
- (3) Lee, J. E., Kim, J. B. and Park, K., 2015, "Finite Element Analysis for Improvement of Folding Defects in the Forging Process of Subminiature Screws," *J. Korean. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 32, No. 6, pp. 509~515.
- (4) Domblesky, J. P. and Feng, F., 2002, "A Parametric Study of Process Parameters in External Thread Rolling," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 121, No. 2-3, pp. 341~349.
- (5) Park, K. D., Song, J. H., Lee, G. A., Lee, N. K., Lee, H. W. and Ra, S. W., 2009, "Simulation Based Process Design of Flat Die Thread Rolling for Micro Screw," *Trans. Mater. Process*, pp. 62~65.
- (6) Song, J. H., Lee, J., Lee, H. J., Lee, G. A., Park, K. D., Ra, S. W. and Lee, H. W., 2011, "Analysis and Experiments on the Thread Rolling Process for Micro-Sized Screws (Part I: Process Parameter Analysis by Finite-Element Simulation)," *Trans. Mater. Process*, Vol. 20, No. 8, pp. 581~587.
- (7) Song, J. H., Lee, J., Lee, H. J., Lee, G. A., Park, K. D.,

- Ra, S. W. and Lee, H. W., 2012, "Numerical Analysis and Experimental Study of Thread Rolling Process for Micro-sized Screw (Part II: Application to a Micro-screw with Diameter of 800 μm)," *Trans. Mater. Process*, Vol. 21, No. 3, pp. 179~185.
- (8) Jang, S. J., Lee, M. C., Shim, S. H., Son, Y. H., Yoon, D. J. and Joun, M. S., 2010, "Finite Element Analysis of Manufacturing Process of 12 Point Flange Head Bolt with Emphasis on Thread Rolling Process," *Trans. Mater. Process*, Vol. 19, No. 4, pp. 248~252.
- (9) Shin, M. S., Cha, S. H. and Kim, J. B., 2010, "Prediction of Crack Initiation and Its Application to the Design of Lead Screw Thread Rolling Process," *Trans. Mater. Process*, Vol. 19, No. 3, pp. 160~166.
- (10) Lee, H. W., Song, J. H., Lee, G. A., Lee, H. J., Park, K. D. and Bae, S. M., 2011, "Thread Forming of a Micro Screw for Storage Device using Finite Element Analysis," *Adv. Mater. Research*, Vol. 264, pp. 1613~1618.
- (11) Kao, Y. C., Cheng, H. Y. and She, C. H., 2006, "Development of an Integrated CAD/CAE/CAM System on Taper-tipped Thread-rolling Die-plates," *J. Mater. Process. Technol*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 98~103.
- (12) Peter, Z., Gontarz, A. and Weronki, W., 2004, "New Method of Thread Rolling," *J. Mater. Process. Technol*, Vol. 153~154, pp. 722~728.
- (13) Hwang, Y. M., Hwang, K. N. and Chang, C. Y., 2013, "Study on Heading and Thread-rolling Processes of Magnesium Alloy Screws," *Key Engineering Materials*, Vol. 535-536, pp. 322~325.
- (14) KS B 0211, *Limits of Sizes and Tolerances for Metric Coarse Screw Threads*, 2012
- (15) ISO, 1984, *ISO Standards Handbook 18 Fasteners and Screw Threads*, ISO, Switzerland, pp. 72~76.