

마이크로 체결부품 전조성형공정에 관한 해석 및 실험적 고찰(Part I: 유한요소 해석기반 공정변수 영향분석)

송정환¹, 이종섭¹, 이혜진¹, 이근안¹, 박기동¹, 나승우², 이형욱[#]

Analysis and Experiments on the Thread Rolling Process for Micro-Sized Screws Part I: Process Parameter Analysis by Finite-Element Simulation

J. H. Song, J. Lee, H. J. Lee, G. A. Lee, K.D. Park, S. W. Ra, H. W. Lee

(Received October 24, 2011 / Revised November 9, 2011 / Accepted November 10, 2011)

Abstract

The production of high-precision micro-sized screws, used to fasten parts of micro devices, generally utilizes a cold thread-rolling process and two flat dies to create the teeth. The process is fairly complex, involving parameters such as die shape, die alignment, and other process variables. Thus, up-front finite-element(FE) simulation is often used in the system design procedure. The final goal of this paper is to produce high-precision screw with a diameter of 800 μ m and a thread pitch of 200 μ m (M0.8 \times P0.2) by a cold thread rolling process. Part I is a first-stage effort, in which FE simulation is used to establish process parameters for thread rolling to produce micro-sized screws with M1.4 \times P0.3, which is larger than the ultimate target screw. The material hardening model was first determined through mechanical testing. Numerical simulations were then performed to find the effects of such process parameters as friction between work piece and dies, alignment between dies and material. The final shape and dimensions predicted by simulation were compared with experimental observation.

Key Words : Micro-sized Screw, Flat Type Thread Rolling, Finite Element Analysis, Shear Friction Factor, Parametric Study

1. 서론

스크류는 각종 기계 및 통신, 전자제품 결합에 사용되는 대표적인 체결용 기계요소다. 대형 스크류와 특정목적용 갖는 스크류를 제외하면, 제품의 우수한 기계적 특성 때문에, 일반적으로 전조가공을 통해 생산되고 있다. 전조가공에 의해 생산된 스크류의 표면은 소성변형에 의해 가공 경화되고 결정이 미세화되어 미려한 품질을 갖게 되며, 결

정의 미세화로 인해 절삭가공 대비 인장강도와 피로강도가 크게 향상된다[1].

최근 제품의 소형화, 경량화, 정밀화에 대한 요구가 높아짐에 따라 마이크로 부품산업에 대한 관심이 증가하고 있다. 우수한 품질의 마이크로 제품을 개발하기 위해서는 체결요소부품의 미세화 및 정밀화가 필수적이거나, 국내의 경우 단조 및 전조성형기술과 금형기술의 한계로 미세 체결부품의 대량생산에 큰 어려움이 있는 실정이다. 수

1. 한국생산기술연구원

2. (주) 서울금속

교신저자: 충주대학교 에너지시스템공학과, hwlee@cju.ac.kr

백 μm 의 직경을 갖는 마이크로 스크류의 경우, 일본 등에서는 전조성형기술을 적용하여 800 μm 의 직경과 200 μm 의 피치를 갖는 제품(M0.8×P0.2)까지 상용화 되어 있으나[2], 국내의 경우 직경 1400 μm , 피치 300 μm 급(M1.4×P0.3)에 머물고 있으며, 이 역시 대부분의 불량원인에 대한 정성적인 평가가 부족하여 현장 작업자의 경험에 의존하여 공정 중 불량이 발생할 경우 작업자의 판단 아래 전조공정을 변화시키는 방법으로 각종문제를 해결하며 생산하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 M0.8×P0.2 급 마이크로 스크류의 전조성형 공정기술 개발을 목적으로 한다. 기존 시행착오법이 아닌 해석기반의 공정기술 개발을 위하여 먼저 Part I에서는 실험과의 비교 등을 위하여 현 양산가능 수준인 M1.4×P0.3 제품을 기준으로 판형전조공정 설계를 위한 해석기술을 확보하고 주요 공정변수의 영향을 분석하였으며, Part II에서는 이를 M0.8×P0.2 급 마이크로 스크류 전조성형공정에 적용하였다.

기존 전조성형해석과 관련하여 Domblesky 등[3~4]은 2 차원 전조성형해석을 통해 나사 치형의 변형형상 및 마찰계수와 유효변형률과의 관계를 분석하였으며, 실험적으로 스크류 성형 정도에 따른 경도 측정비교를 실시하였다. 또한 Kao 등[5]은 평균형을 이용해 생산중인 스크류에 유한요소 해석을 적용하여 전조성형을 실시하였으며 특히, 테이퍼 부의 소재제거 양상을 시험과 비교하였다. 이외에도 Kim[6]은 기어금형을 이용한 전조성형해석을 통하여 초기소재에 따른 형상변화 및 치수 정밀도 평가를 실시하였으며, Kamouneh 등[7~8]은 헬리컬 기어의 형상대조를 통해 실험-해석간의 비교방법을 제시하였고, 헬리컬 기어의 마이크로 경도 값을 유효변형률로 치환하여 실험 및 해석결과를 비교하였다.

그러나, 기존에 연구된 스크류 성형공정의 경우 소재직경이 2mm 이상의 전조성형을 대상으로 하고 있으며, 생산된 스크류의 품질확인을 위한 공정해석 위주로 연구 되어왔다. 본 논문에서는 마이크로 스크류의 공정설계를 위한 판형 전조공정의 유한요소해석기법을 확립하는 것을 목적으로 소재의 기계적 물성평가를 수행하고, 소재의 가공경화 근사모델을 결정하였으며, M1.4×P0.3 스크류를 기준으로 전조성형 공정해석 및 실험을 통하여 주요 공정변수인 마찰계수, 평균형 간격 등을 정

Table 1 Chemical composition of STS410 (wt, %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Etc.
0.15	1.0	1.0	0.04	0.03	-	11.5~13.0	-	-



Fig. 1 Specimens before and after deformation

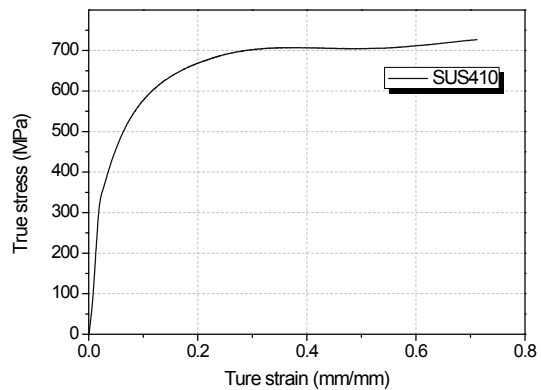


Fig. 2 True stress-strain curve of STS410

량화 하였다. 최종적으로 성형품과 해석결과의 비교를 통하여 제안된 성형해석기법의 유효성을 확인하였다.

2. 소재 물성 평가 및 가공경화 모델 선정

M1.4×P0.3 마이크로 스크류의 소재는 STS410 (AISI410)으로 그 조성은 Table 1 과 같다. STS410 강의 경우, Cr 이 강 표면에 매우 얇은 Cr₂O₃ 피막을 형성해 내식성, 내산화성 및 내열성이 뛰어나 추가적인 도금과정이 필요 없는 특징을 갖는다.

STS410의 물성평가를 위해 압축시험을 수행하였다. 실제 스크류 제조에 사용되는 초기직경 1.17mm의 신선된 STS410 소재를 높이 2.0mm의 원기둥 형태로 압축 면의 평평도 유지 및 버 제거 등에 최대한 주의를 기울여 가공하였다. 압축시험은 Instron 5583을 이용하여, 무윤활 조건으로 75%의 압하량을 0.01mm/s의 압축속도를 부과하여 수행하였다. 시험 전·후의 시편형상 과 진응력-진변형률 곡선을 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 도시하였다.

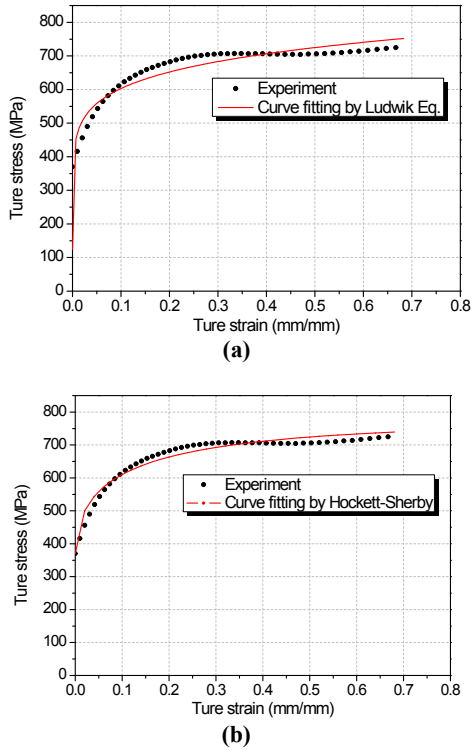


Fig. 3 Interpolation of the flow stress curve using: (a) Ludwik model; (b) Hockett-Sherby model

전조성형공정의 경우, 일반적으로 소재의 변형이 큰 편이다. 압축시험의 응력-변형률 선도에서 유효한 변형률 구간은 0.7 이하이므로 전조성형해석에 적용을 위해서는 응력-변형률 선도의 외삽(extrapolation)이 필요하다.

본 논문에서는 소재의 변형경화거동을 정밀하게 모사하기 위해 먼저 일반적으로 사용되는 식(1)의 Ludwik 모델을 이용하여 Fig. 3(a)와 같이 유동응력곡선을 근사하였다.

$$\bar{\sigma} = A + B\bar{\epsilon}_p^n \quad (1)$$

여기서 A, B, n 은 각각 항복응력, 강도계수, 변형률 경화지수를 나타낸다. Fig. 3(a)에 도시한 바와 같이, 시험에 사용된 STS410 소재는 유효소성변형률 0.3 이상에서는 변형률경화가 크게 발생하지 않기 때문에, Ludwik 모델을 사용하면 유효소성변형률이 큰 영역에서는 유동응력을 실제보다 과도하게 예측하게 된다.

이에 본 논문에서는 식(2)로 표현되는 Hockett - Sherby 모델[9]을 이용하여 STS410 소재의 유동

Table 2 Comparison of measured hardness values by experiment and FE analysis

Experiment	Hockett-Sherby model	Ludwik model
175.6 Hv	178.0 Hv	187.8 Hv

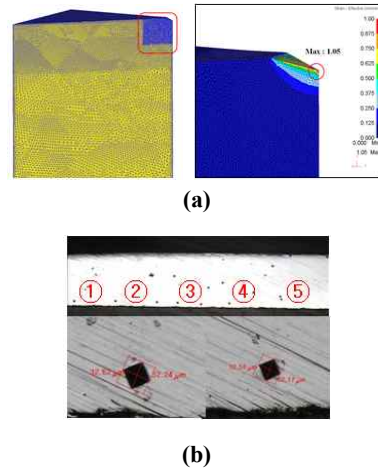


Fig. 4 Results of Vickers hardness tests: (a) simulation; (b) experiment

응력 곡선을 근사하였다.

$$\bar{\sigma} = C - (C - D)e^{-m\bar{\epsilon}_p^p} \quad (2)$$

여기서 $C-D$ 는 등방성경화범위(isotropic hardening range)이며, m 은 포화속도(saturation speed), D 는 항복응력이다.

Fig. 3(b)에 도시한 바와 같이 Hockett-Sherby 모델을 사용하여 유동응력 곡선을 모사할 경우 압축시험결과와 유사하게 소재의 경화거동 표현이 가능함을 확인할 수 있다.

Hockett-Sherby 모델을 사용하여 근사한 유동응력을 전조 성형공정의 유한요소해석에 적용하기에 앞서 물성치의 타당성 검증을 위하여 마이크로 비커스 경도측정[10] 모사해석을 수행하였다. 해석은 상용 소프트웨어인 DEFORM-3D를 사용하였으며[11], 형상대칭성을 고려하여 1/8 모델에 대하여 다이아몬드 압자의 압하속도를 1.0mm/sec로 부과하였다. 모사 해석 및 실험 결과를 Fig. 4에 도시하였으며, 실험 및 해석을 통하여 측정된 경도 값을 Table 2에 정리하였다.

Ludwik 모델을 사용하는 경우에 소재의 유동응력을 실제보다 과도하게 예측하여 경도값이 실

제보다 크게 예측되는 결과를 보이니, Hockett - Sherby 모델은 실제 실험에서의 경도값과 유사한 결과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 Hockett - Sherby 모델을 유동응력 근사에 사용하여 전조성형 해석에 적용하였다.

3. 전조성형공정의 유한요소해석을 위한 주요 변수 영양분석

3.1 유한요소 해석조건

본 연구에서는 마이크로 스크류 관형전조공정 설계를 위한 최적의 해석기술을 확보하고자 현 양산가능 수준인 M1.4×P0.3 제품을 기준으로 해석 및 실험과의 비교를 통하여 마찰상수, 금형 사이의 간격 등 공정변수가 성형품의 형상 등에 미치는 영향을 분석하였다. M1.4×P0.3 스크류 전조공정의 유한요소해석은 상용 프로그램인 DEFORM-3D를 사용하였다. 소재는 앞에서 기술한 STS410의 물성치를 사용하였으며, 헤딩공정 후 전조공정에 적용되는 초기소재의 형상은 Fig. 5와 같다. 소재는 4 절점 테트라(Tetra) 요소로 구성하였다. 전조성형해석 시 해석시간의 감소를 위해 전조성형이 이루어지지 않는 나사 머리부의 치수는 작게 설계하였다. 전조성형공정 해석모델을 Fig. 6에 도시하였다. 편의상 x, y, z 는 각각 금형의 횡방향, 축방향, 높이방향으로 설정하였으며, 전조속도는 x축방향으로 245mm/s 이다.

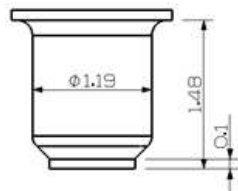


Fig. 5 Initial dimension of work piece

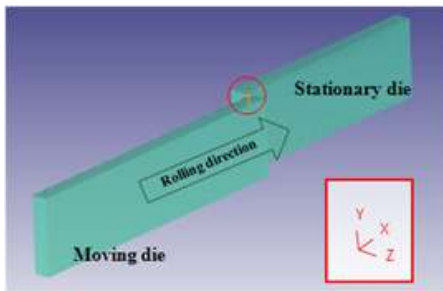


Fig. 6 Analysis model of the thread rolling process

3.2 마찰상수의 영향분석

일반적으로 냉간 단조공정 해석 시 원활한 성형을 위해 마찰상수(shear friction factor, m)는 약 0.1로 낮게 부여하나, 냉간전조성형과 같이 윤활처리를 수행하는 저 마찰조건에서는 초기 진입구간에서 미끄럼이 발생되어 성형불량으로 이어진다. 따라서 수치해석에서도 초기 진입 시 미끄럼이 발생되지 않는 전단마찰상수의 결정이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 마찰상수를 0.25, 0.5, 0.75, 1.0으로 변화시킨 해석을 수행하고, 소재가 금형 내부로 진입되는 이동 및 변형양상을 분석하였다.

마찰상수 변화에 따른 공정 초기의 금형과 소재의 형상을 Fig. 7에 도시하였다. 마찰상수가 0.25인 경우 소재가 금형의 내부진입 시 미끄럼이 발생되어 소재의 틀어짐 현상이 발생되며, 마찰상수가 0.5인 경우 초기진입은 안정적이거나 치형 생성 시 소재가 틀어지는 현상이 발생된다. 마찰상수가 0.75 이상인 경우 소재는 초기진입구간에서 안정적으로 자리잡게 되며, 양호한 치형을 생성한다. 따라서 원활한 전조성형해석을 위한 마찰상수는 0.75 이상이어야 한다. 본 논문에서는 상기의 해석결과와 타 연구자의 결과 등[12,13]을 참고하여 0.9로 선정하였다.

실제 마찰조건이 제품성형에 미치는 영향 분석을 위하여 윤활조건에서 M1.4×P0.3 제품의 전조공정실험을 수행한 결과 Fig. 8과 같이 금형 내 소재

m	deformed shape			
0.25				
0.5				
0.75				
1				
Stroke	0.6mm	0.65mm	0.7mm	1mm

Fig. 7 Comparison of deformed shapes according to variation of shear friction factor

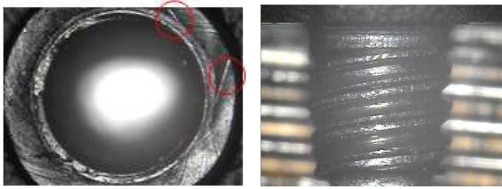


Fig. 8 Defect of screw due to low friction in thread rolling process

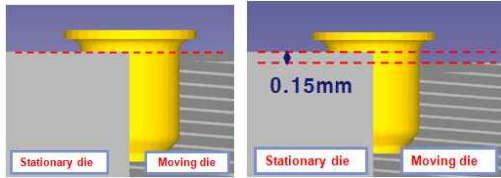


Fig. 9 Schematic description of the alignment between moving and stationary dies

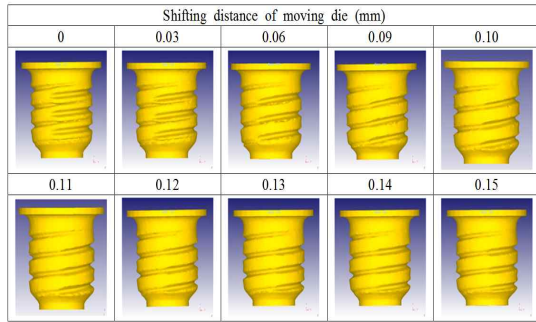


Fig.10 Comparison of the deformed shape with respect to the shifting distance of moving die

상하 이탈현상이 발생되어 스크류의 머리 하단부가 금형과 접촉되어 소재의 치형이 휘어지는 불량이나, 표면의 미끄러짐으로 인한 소재의 기울어짐으로 치형불량이 발생되었다. 생산현장에서는 피막처리를 실시하고, 압하하중을 변경하는 등의 마찰력 향상을 통하여 불량을 억제하고 있다.

3.3 금형 축 방향 배치의 영향 분석

관형 전조성형공정에서 고정부와 동작부 금형의 배치는 성형품질에 영향을 미치는 중요한 인자로서 현장에서는 숙련자가 동작부 금형을 임의로 이동시킨 후 시행착오 과정을 거쳐 제품을 생산한다. 불량을 야기시키는 전조금형 배치에 관한 공정변수를 정량적으로 분석하고 적합한 설계 가이드라인 확보를 위하여 유한요소해석을 이용한 변수연구를 실시하였다.

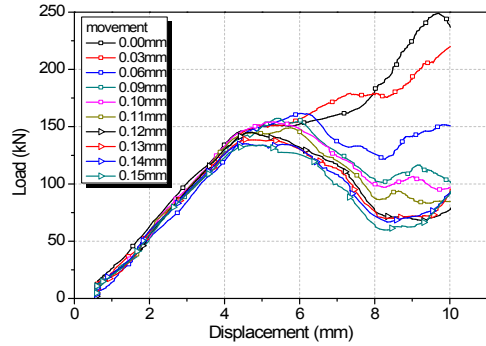


Fig. 11 Comparison of the forming loads with respect to the shifting distance of moving die

적합한 치형형성이 가능한 동작부 금형의 축 방향 이동거리의 범위를 구하기 위하여, 금형의 축 방향 배치를 변화하여 치형 성형성 분석을 위한 유한요소해석을 실시하였다. Fig. 9 와 같이 동작부 금형을 고정부 금형과 동일하게 위치한 경우를 기준으로 동작부 금형을 시편 축 방향으로 치형 피치의 1/2 인 0.15mm 까지 달리하여 배치하고, 해석을 수행하여 생성된 치형의 설계기준 만족여부를 확인하였다.

전조성형공정 중 금형의 축 방향 배치 간격에 따른 스크류 치형의 형상을 Fig. 10 에 도시하였다. 금형을 0.00mm~0.09mm 로 이동시킬 경우 불연속 치형 또는 낮은 연속성을 갖는 치형이 생성되었으며, 0.10mm 이상 이동시킬 경우 연속성을 갖는 치형이 생성됨을 확인하였다.

성형하중을 분석하면 연속적인 치형성형이 가능한 이동거리를 예측할 수 있다. 축 방향 배치 간격에 따라 금형에 부과되는 성형하중을 Fig. 11 에 정리하였다. 이동거리가 피치의 1/2에 해당되는 0.15mm에 근접하게 배치할 경우, 연속성을 갖는 치형이 생성되어 성형하중은 점차 감소하였고, 0.12mm 이상 배치한 경우에서 0.15mm와 유사한 성형하중을 가짐을 확인하였다. 즉, 양호한 치형성형을 위한 동작부 금형의 축 방향 이동거리는 0.12mm~0.15mm이며, 피치의 10%인 0.03mm의 허용범위를 가지는 것을 확인하였다.

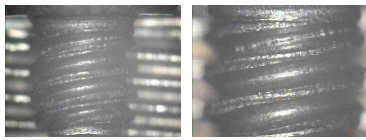
Fig. 12에 실제 M1.4×P0.3제품에 대하여 동작부 금형과 고정부 금형 사이의 간격을 동일하게 배치한 경우에 발생한 치형불량을 도시하였다. 유한요소 해석과 동일하게 실험에서도 전조성형과정에서 소재의 회전에 따라 상대 치형과의 간격이 발생하여 불연속적인 치형이 성형됨을 확인할 수 있다.

3.3 전조공정해석의 검증

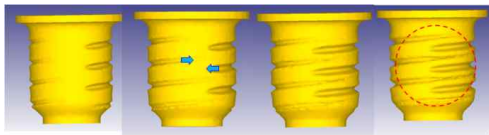
지금까지 분석한 소재의 유동응력 모델, 금형과 소재 간 마찰상수, 고정부 및 동작부 금형의 축방향 배치 등의 해석조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 해석결과와 실제 M1.4×P0.3 성형품과의 비교를 통하여 본 논문에서 정립한 스크류 전조성형공정해석의 유효성을 검증하였다.

M1.4×P0.3 스크류의 전조성형 과정에서 소재의 변형형상을 Fig. 13에 나타내었다. 동작부 금형의 행정이 3mm 일 때 소재는 전조금형과의 접촉에 의해 소재의 솟아오름 현상이 시작된다.

금형행정이 7mm 일 때 소재의 최초 1회전 성형이 완료되며, 서서히 금형 나사산 안쪽으로 소재가 유동되는 것을 알 수 있다. 동작부 금형 행정이 60mm 일 때, 나사산 성형 현상이 확연히 나타나며, 행정이 90mm 진행 후 최종성형이 완료되었다. 최종성형 후 소재의 충전정도를 Fig. 14에



(a)



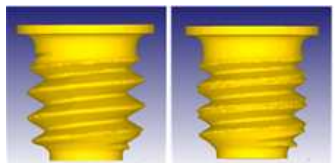
(b)

Fig.12 Discontinuous thread due to the alignment of dies: (a) experiment; (b) simulation



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig.13 Deformed shapes during the process: (a) 3mm; (b) 7mm; (c) 60mm; (d) 90mm

도시하였다. 블록으로 표시한 부분이 금형과 소재 사이의 접촉이 발생된 부분이며, 소재 치형이 금형 나사산과 균일하게 접촉되어 원활한 소재충진이 이루어짐을 확인할 수 있다. 금형 이송거리에 따른 고정부 금형과 동작부 금형에 부과되는 반력은 Fig. 15와 같다. 전조공정의 특성상 동작부 및 고정부 금형에 최대 250kN 정도의 유사한 반력이 부과됨을 확인할 수 있다.

성형된 스크류의 주요 평가사양으로는 형상만족도, 치수정밀도, 사용목적에 따른 나사 체결력 등이 있다. 이 중에서 스크류의 치수정밀도가 가장 중요한 조건으로 본 논문에서는 해석 결과 검증을 위해 M1.4×P0.3 성형품과 형상 및 치수

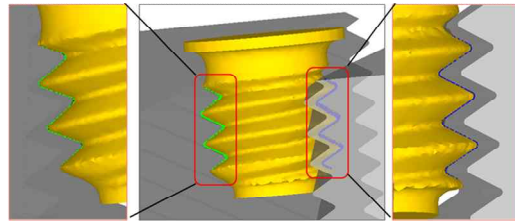


Fig.14 Contact between the dies and the work piece at the end of thread rolling process

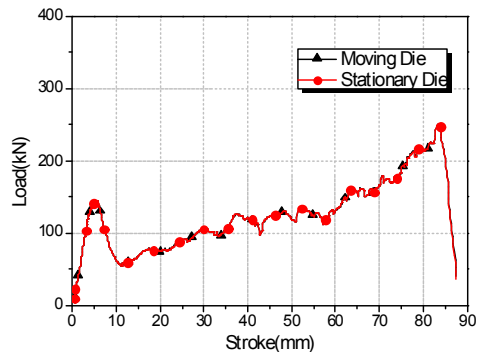


Fig.15 Forming load of the stationary and moving dies during the thread rolling process

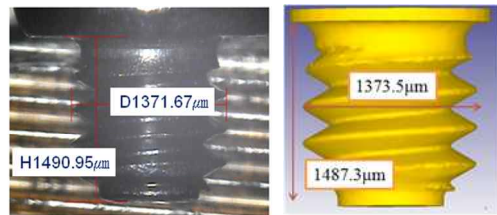


Fig.16 Comparison of screw dimensions between FE analysis and experiment

정도를 비교하였다. Fig. 16 에 비교한 바와 같이 M1.4×P0.3 성형품의 외경은 1371.67 μ m 이고 길이는 1490.95 μ m 이다. 성형해석에서 얻은 스크류의 외경 및 길이는 각각 1373.5 μ m, 1487.3 μ m 로 실험 대비 치수 오차는 0.2% 내 이다. 이상의 치수 및 성형형상 비교를 통해 본 논문에서 분석한 공정변수를 토대로 성형해석을 수행할 경우에 정밀하게 성형공정을 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 M0.8×P0.2 급 마이크로 스크류의 전조성형 공정기술 개발을 목적으로 현 양산가능 수준인 M1.4×P0.3 제품을 기준으로 관형전조공정 설계를 위한 해석기술을 확보하고 공정해석 및 성형실험을 통하여 주요 공정변수인 마찰상수, 평균형 간격 등을 정량화 하였다.

스크류 성형소재의 물성실험 및 비커스 경도해석을 토대로 Hockett-Sherby 모델을 이용한 유동응력 근사의 신뢰성을 확인하였다. 전조성형공정상의 설계변수로서 마찰조건의 경우, 소재의 초기 미끄러짐을 방지하기 위하여 해석상에서는 0.9 정도의 마찰상수 부가가 필요하며, 실제 공정에서는 금형의 피막처리 및 압하하중을 부가하는 등 마찰력을 증가하도록 하여야 한다. 금형의 축 방향 간격배치의 경우, 불연속적인 치형형성을 방지하기 위해서는 고정부와 동작부 금형이 약 10% 허용범위 내에서 피치의 1/2 만큼의 간격으로 배치하여야 한다.

최종적으로 성형해석 및 공정분석 결과의 유효성을 확인하기 위하여 M1.4×P0.3 성형품과 해석결과의 비교를 수행한 결과 0.2% 내 오차범위의 유사한 치수 정밀도를 보임을 확인하였다. 이상의 본 논문에서 확보한 성형해석 및 공정변수 분석결과를 M0.8×P0.2 급 마이크로 스크류의 전조성형을 위한 공정설계에 적용하고자 한다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 생산기반분야의 “마이크로 금속소재 기능성 요소부품 점진성형기술개발” 사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Tschaetsch, 2006, Metal Forming Practice, Springer-Verlag, Berlin, pp. 56~76.
- [2] Japanese screws, 2009, Micro screws, <http://www.japanesescrews.com>.
- [3] J. P. Domblesky, F. Feng, 2002, A Parametric Study of Process Parameters in External Thread Rolling, J. Mater. Process. Technol., Vol. 121, No. 2-3, pp. 341~349.
- [4] J. L. Dotson, C. R. Henrey, J. P. Domblesky, 2002, Experimental Investigation of External Thread Rolling, Wire J. Int., Vol. 35, No. 11, pp. 64~68.
- [5] Y. Kao, H. Cheng, C. She, 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.
- [6] K. H. Kim, 2003, M. A. Thesis, Pusan University, Pusan, pp. 13~20.
- [7] A. A. Kamouneh, J. Ni, D. Stephenson, R. Vriesen, G. DeGrace, 2007, Diagnosis of Involutometric Issues in Flat Rolling of External Helical Gears through the Use of Finite-element Models, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 47, No. 7-8, pp. 1257~1262.
- [8] A. A. Kamouneh, J. Ni, D. Stephenson, R. Vriesen, 2007, Investigation of Work Hardening of Flat-rolled Helical-involute Gears through Grain-flow Analysis, FE-modeling, and Strain Signature Models, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 47, No. 7-8, pp. 1285~1291.
- [9] R. Greze, H. Laurent, P. Y. Manach, 2008, Proc. NUMISHEET 2008(ed. P. Hora), ETH Zurich, Interlaken, Switzerland, pp. 491~496.
- [10] KS B 0811, 2008, Metallic Materials-Vickers Hardness Test - Part1: Test Method.
- [11] SFTC, 2007, DEFORM-3D v6.1 User's Manual, Scientific Forming Technologies Corp., Ohio, U.S.A.
- [12] H. W. Lee, G. A. Lee, S. Choi, D. J. Yoon, S. J. Lim, Y. S. Lee, 2006, Analysis and Optimization of Design Parameters in a Cold Cross Rolling Process using a Response Surface Method, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 8, pp. 550~555.
- [13] Z. Pater, A. Gontarz, W. Weroński, 2004, New Method of Thread Rolling, J. Mater. Process. Technol., Vol. 153-154, pp. 722~728.