

◆ 특집 ◆ 초소형 체결부품의 설계 및 생산기술

초소형 나사 단조시 접힘결함 향상을 위한 유한요소해석

Finite Element Analysis for Improvement of Folding Defects in the Forging Process of Subminiature Screws

이지은¹, 김종봉², 박근^{1,*}
Ji Eun Lee¹, Jong Bong Kim², and Keun Park^{1,*}

1 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System and Design Engineering,
Seoul National University of Science and Technology)

2 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering,
Seoul National University of Science and Technology)

* Corresponding author: kpark@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6358

Manuscript received: 2015.5.18. / Revised: 2015.5.21. / Accepted: 2015.5.26.

Recent trends to reduce the size of mobile electronics products have driven miniaturization of various components, including screw parts for assembling components. Considering that the size reduction of screws may degenerate their joining capabilities, the size reduction should not be limited to the thread region but should be extended to its head region. The screw head is usually manufactured by forging in which a profiled punch presses a billet so that plastic deformation occurs to form the desired shape. In this study, finite element (FE) analysis was performed to simulate the forging process of a subminiature screw; a screw head of 1.7 mm diameter is formed out of a 0.82 mm diameter billet. The FE analysis result indicates that this severe forging condition leads to a generation of folding defects. FE analyses were further performed to find appropriate punch design parameters that minimize the amount of folding defects.

KEYWORDS: Finite element analysis (유한요소해석), Subminiature screw (초소형나사), Forging (단조), Folding (접힘)

1. 서론

최근 휴대폰을 비롯한 이동통신기기의 경량화 및 슬림화 추세에 부응하기 위해 기존 부품의 소형화 개발이 진행되고 있으며, 각종 부품들을 체결하는 나사에 대해서도 크기를 지속적으로 줄여야 하는 요구에 직면하고 있다.¹ 나사는 나사산부에서의 접촉력을 바탕으로 부품간의 체결을 유지

시키는 부품으로, 나사부의 길이를 감소시키면 나사산 접촉부위의 면적이 감소되어 결과적으로 체결력이 감소하게 된다.² 따라서 슬림화 설계를 위해서는 나사부의 길이뿐 아니라 머리부의 두께를 함께 감소시켜야 하는데, 이를 위해서는 나사의 머리부를 성형하는 단조(Forging) 공정에 대한 검토가 필요하다.

단조 공정은 금속소재에 소성변형을 인가하여

금형 내부를 채움으로써 원하는 형상을 성형하는 공정이다. 단조 공정에서 발생되는 소성변형에 의한 성형품의 형상변화를 예측하기 위해서 유한요소해석을 적용한 연구가 활발히 진행되었다.³⁻⁷ 또한 소형 체결부품의 소성가공 공정을 대상으로 유한요소해석을 적용한 연구도 진행되었는데, 소형 나사의 단조 공정^{8,9} 및 전조 공정^{10,11}의 해석에 관한 연구가 진행되었다.

본 연구에서는 외경 1.0 mm 초소형 나사의 단조 공정에 대한 연구를 진행하였다. 특히 박형 머리부 성형을 위한 편치금형을 설계하고, 성형시 발생되는 결함을 방지하기 위한 금형설계 및 성형조건의 영향을 고찰하고자 한다. 이를 위해 유한요소해석을 적용하여 다양한 조건에서의 단조 공정의 전산모사를 수행하고, 해석 결과를 바탕으로 결함을 최소화하기 위한 금형을 설계하고자 한다. 또한 최적화된 금형을 적용한 실험적 검증을 통해 머리부 접힘결함의 개선을 고찰하고자 한다.

2. 초소형 나사 단조공정의 유한요소해석

2.1 초소형 나사 단조공정 개요

금속나사의 성형공정은 일반적으로 머리부를 성형하는 단조(Forging) 공정과 나사산을 성형하는 전조(Thread rolling) 공정으로 구분된다. 초기 소재는 원형 봉재를 사용하며, 초소형 나사의 경우 선재(Wire)에 가까운 소재를 절단하여 사용한다. 머리부 단조공정은 통상적으로 나사머리를 성형하는 1차 업셋팅(Upsetting) 공정과 비트부를 형성하는 2차 성형공정으로 구분하여 수행된다.⁹ 그러나 초소형 나사의 경우는 초기소재의 직경이 매우 작은 관계로 생산공정시 이송을 최소화하기 위해 가능하면 단일 공정으로 성형되는 것이 바람직하며, 이를 위한 적절한 금형설계가 필요하다.

Fig. 1에 본 연구에서 개발하고자 하는 외경 1.0 mm, 피치 0.25 mm의 초소형 나사(M1.0x0.25p)의 주요 치수를 도시하였다. 초기 소재로는 직경 0.82 mm의 선재를 절단하여 사용하며, 이를 사용하여 머리부 외경을 1.7 mm로 초기 소재의 직경 대비 2 배 이상으로 성형해야 한다. 또한 머리부의 두께는 0.5 mm 이하로 높은 단조비가 요구되어 결함이 발생할 소지가 높다.

Fig. 2(a)에 초소형 나사의 머리부를 성형하기 위한 편치의 3차원 형상을 도시하였으며, Fig. 2(b)에 주요 설계인자를 도시하였다. 편치는 등근머리

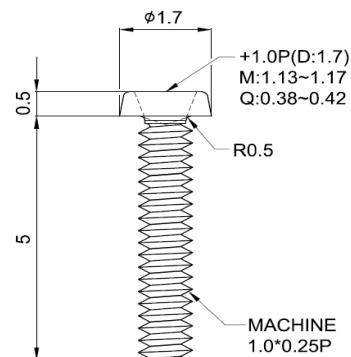


Fig. 1 Dimensional configuration of subminiature screw

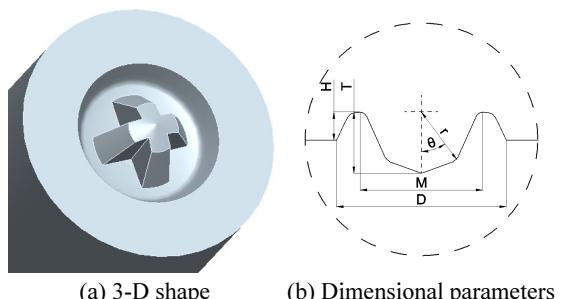


Fig. 2 Configuration of the forging punch

Table 1 Dimensions for initial punch design (unit: mm)

H	T	D	M	r	θ
0.3	0.62	1.7	1.16	0.55	36

나사의 업세팅과 비트부 성형을 동시에 진행하기 위해 오목한 형상에 십(+)자형 비트를 포함하도록 설계하였다. Table 1에 편치의 주요 설계인자에 대한 초기설계 치수를 요약하였다.

2.2 단조공정의 유한요소해석

초소형 나사 단조공정의 성형특성을 예측하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 소성가공 공정 해석 프로그램인 AFDEX 3D®를 사용하여 수행하였다. 소재는 직경 0.82 mm SWCH18A 선재를 사용하였으며, 마이크로 인장시험을 통해 소성 영역에서의 응력-변형율 관계를 고찰하였다. Fig. 3에 도출된 응력-변형율 곡선을 도시하였으며, 이를 적용하여 단조해석을 수행하였다. 편치의 하강속도는 1.0 mm/s로 부여하였으며, 나사머리 성형부의 체적을 고려하여 금형 밖으로 1.5 mm의 선재가 돌출된 상태로 해석영역을 구성하였다. 해석시 유한

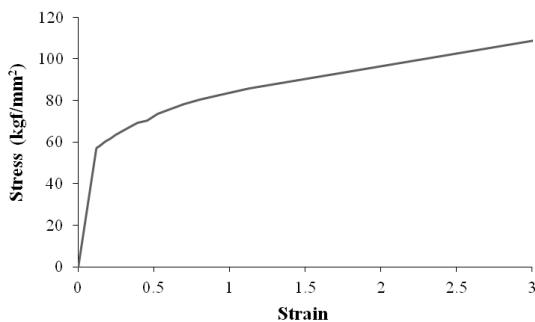


Fig. 3 Stress-strain curve for the SWCH18A wire

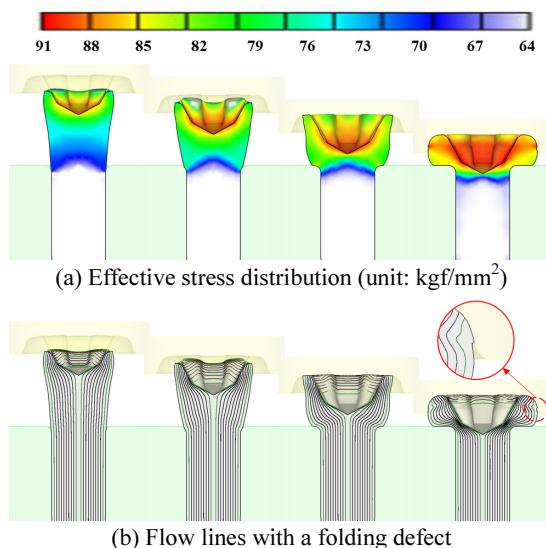


Fig. 4 Simulation results for the head forging process

요소는 10절점 사면체 요소를 사용하였으며, AFDEX 3D®의 자동격자재구성 기능을 사용하였다. 마찰계수(Coulomb friction coefficient)는 냉간단조의 윤활조건을 고려하여 0.05로 적용하였다.¹¹

Fig. 4에 압하량 변화에 따른 유한요소해석 결과를 도시하였다. Fig. 4(a)에 단계별 유효응력분포를 도시하였으며, 비트부 끝단에서 높은 응력이 발생함을 확인할 수 있다. 특히 최종 공정에서 머리부 외곽에서 응력이 집중되는 현상을 발견할 수 있는데, 이러한 원인을 분석하기 위해 단계별 유통선도(Flow line)의 변화를 Fig. 4(b)에 비교하였다. 유통선도를 보면 성형 초기에 비트부 압입의 영향으로 머리부 상측이 하측에 비해 넓게 퍼져나가게 되고, 이러한 소재의 유통이 편치 외곽의 경사부를 타고 내려오다 마지막 순간에 하단부분과 겹치

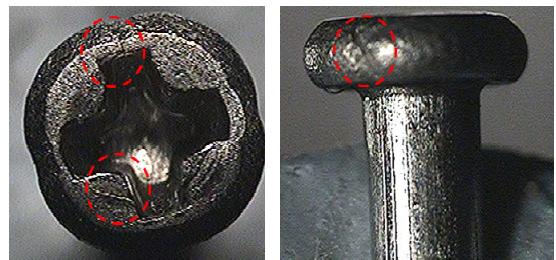


Fig. 5 Example of the folding defects in head forging

는 현상(folding)이 발생함을 알 수 있다. 상기 이유로 인해 Fig. 4(b)에 확대도시한 바와 같이 머리부 외곽면에 접힘 결함(Folding defect)이 발생함이 확인되었고, 결과적으로 Fig. 4(a)에 도시된 바와 같이 해당 부위에 응력이 집중됨을 알 수 있다.

Fig. 5에 머리부 단조시 발생된 접힘결함의 사진을 도시하였다. 머리부 상면을 보면 비트부의 형상에 의해 소재의 유동이 비대칭적으로 퍼져나감을 알 수 있으며, 특히 비트부 끝단의 유동이 국부적으로 증가하여 머리부 외측면에서 소재가 접히면서 접힘결함이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 상기 결함을 해소하기 위해서 비트부의 설계변경을 통해 소재의 유동특성을 변화시켜야 하는데, Fig. 2(b)에 도시한 설계사양중 비트부 각도(θ)와 반경(r)을 변화시켜가며 성형해석을 수행하였다.

3. 금형설계 수정에 따른 성형특성 고찰

3.1 비트부 각도(θ)에 따른 성형특성 고찰

편치금형 설계변수중 비트부의 각도(θ) 변경에 따른 유한요소해석을 수행하고, 해석 결과를 통해 성형부의 유동특성 및 결함발생 여부를 고찰하였다. 비트부의 반경(r)은 0.58 mm로 고정한 상태에서 각도를 35°에서 40°까지 증가시켜가며 유한요소해석을 진행하였다.

Fig. 6에 편치부 각도변경에 따른 성형형상 및 유동곡선을 도시하였다. 결과를 비교하면 편치각도가 증가할수록 머리부 외측 유동곡선의 상/하부간 단차가 감소하여 접힘결함이 완화됨을 알 수 있으며, 특히 각도 39° 이상인 경우 완전히 해소됨을 확인할 수 있다. 반면 비트부가 성형되는 내측 경사부는 각도 35°인 경우 거의 직선에 가깝게 나타난 반면, 각도가 증가할수록 점차적으로 오목한 부분이 발생하여 내측에서의 접힘결함이 발생하는 것으로 나타났다. 상기 현상을 분석하기 위해 편

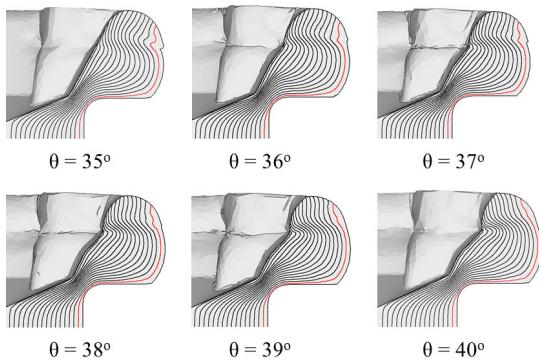


Fig. 6 Flow lines with a variation in the bit angle

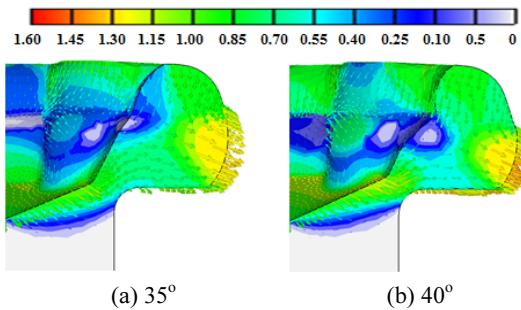


Fig. 7 Nodal velocity distributions according to the bit angle (unit: mm/s)

치각도가 각각 35° , 40° 일 때의 절점속도 분포를 Fig. 7에 비교하였다. 각도증가에 따라 절점속도가 하단부 외측으로 집중되면서 상/하부간의 유동차이가 감소되어 외측에서의 접힘결함이 완화된 반면, 내측 하단의 소재가 외부로 빠져나가며 내측에서의 접힘결함이 발생되는 것으로 분석되었다.

3.2 비트부 거리(r)에 따른 성형특성 고찰

앞절의 결과에 연계하여 비트부의 반경(r) 변화에 따른 유한요소해석을 수행하고, 성형부의 유동특성 및 결함발생 여부를 고찰하였다. 비트부의 각도는 37° 로 고정한 상태에서 반경을 0.55 mm에서 0.60 mm까지 증가시켜가며 유한요소해석을 진행하였다.

Fig. 8에 편치부 반경 변화에 따른 성형형상 및 유동곡선을 도시하였다. 결과를 비교하면 비트부 반경의 변화에 따라 외부 접힘결함의 발생위치는 변경이 되나 크게 왘화되지는 않음을 알 수 있다. 반면 비트부 내측 접힘결함은 반경이 증가할수록 심하게 발생하는 현상을 확인할 수 있었다. 상기

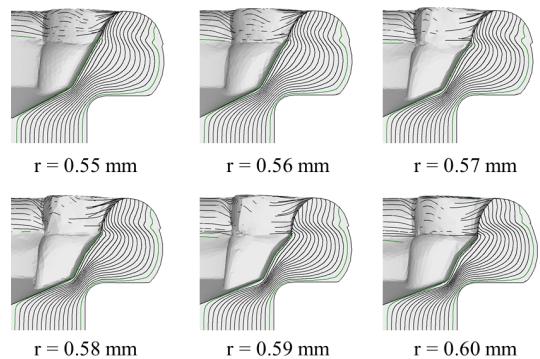


Fig. 8 Flow lines with a variation in the bit radius

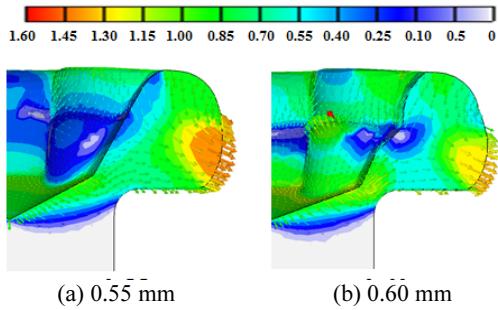


Fig. 9 Nodal velocity distributions according to the bit radius (unit: mm/s)

현상을 분석하기 위해 비트부 반경이 각각 0.55 , 0.60 mm일 때의 절점속도 분포를 Fig. 9에 비교하였는데, 반경이 0.60 mm인 경우 비트부 접촉면 상부에서 반경방향의 속도분포가 증가하여 오목한 형태로의 변형이 발생하고, 결과적으로 접힘결함이 발생하는 것으로 분석되었다.

3.3 접힘량의 정량적 고찰

앞절에서 기술한 비트부 내부의 접힘결함과 머리 외곽부의 접힘결함을 정량적으로 비교하기 위해 Fig. 10과 같이 내/외부 접힘결함의 크기를 정량적으로 정의하였다. 내부결함(Internal defect)의 크기는 편치 비트부 경사와 접힘결함 사이의 수직거리로 정의하였고, 외부결함(External defect)의 크기는 외각으로 발생한 접힘 발생부의 단차를 수직거리로 정의하였다.

Fig. 11(a)와 (b)에 각각 비트부 각도와 반경의 변화에 따른 내부결함과 외부결함의 크기변화를 그래프로 도시하였다. 내부결함의 경우 전반적으로 비트각도와 반경이 커질수록 증가하는 것을 알

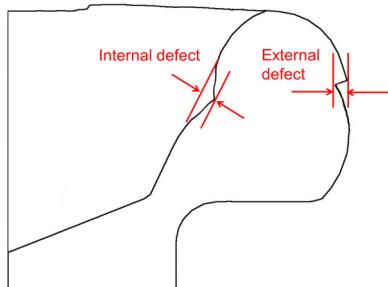


Fig. 10 Definition of the internal and external defects

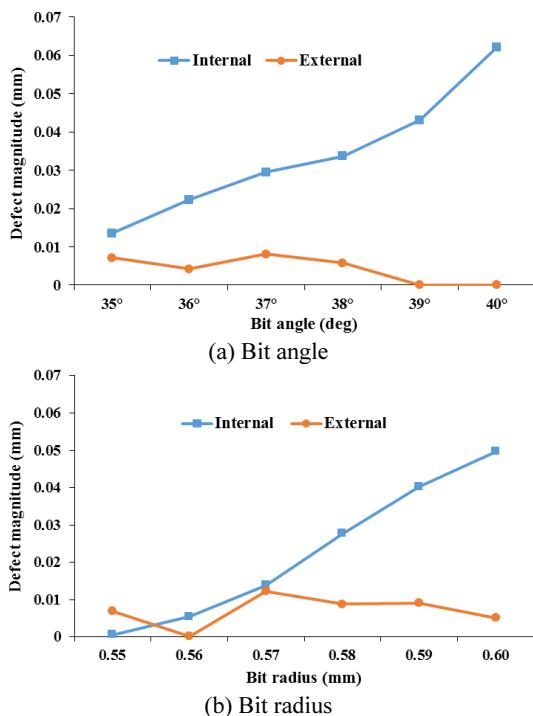


Fig. 11 Changes of the internal and external defects with variations in bit design parameters

수 있다. 외부결함은 비트부 각도가 커질수록 감소하는 경우를 보이는 반면 비트부 반경의 변화에는 비선형적인 경향을 보임을 알 수 있다. 또한 내부결함과 외부결함이 다른 경향을 보여 2가지 결함을 종합적으로 고려하여 최소화하는 방안으로 설계가 개선되어야 할 것으로 판단된다.

4. 접힘결함 개선을 위한 편치설계 최적화

4.1 반응표면분석을 사용한 편치설계 최적화

Table 2 Comparison of the total defects for various combinations in bit design parameters (unit: mm)

$\theta \backslash r$	0.55	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60
35°	0.021	0.024	0.015	0.019	0.031	0.043
36°	0.012	0.008	0.022	0.025	0.042	0.057
37°	0.008	0.006	0.026	0.036	0.049	0.055
38°	0.008	0.022	0.035	0.045	0.047	0.061
39°	0.017	0.027	0.042	0.049	0.059	0.077
40°	0.025	0.041	0.044	0.052	0.068	0.082

편치 설계변수에 따른 내부와 외부결함량의 최적화를 도출하기 위해 설계변수 비트부 각도를 35 ~ 40°, 반경을 0.55 ~ 0.60 mm 사이에서 증가시켜가며 편치모델을 변경하였다. 각각의 설계변수에 대해 6가지씩의 변화를 부여하여 총 36가지 조합에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 최적화를 위한 반응변수로는 내측 결함의 크기와 외측 결함의 크기를 더한 총 결함량(Total defect, δ_{total})으로 설정하였다. Table 2에 36가지 설계안에 대한 총 결함량의 크기를 비교하였으며, 비트부 각도 37°, 반경 0.56 mm인 경우가 총 결함량이 0.006 mm로 가장 작게 나타나 가장 좋은 조합으로 판단된다. 상기 결과는 초기설계(각도 36°, 반경 0.55 mm)에서의 총 결함량(0.012 mm)의 1/2 수준에 해당한다.

상기 결과를 토대로 다변수 최적화를 위한 반응표면 분석을 실시하였다. 반응표면은 2변수 2차 다항식으로 아래와 같이 도출되었으며, 회귀식의 상관계수는 93.7%로 계산되어 신뢰성 있는 회귀분석이 가능한 것으로 판단된다.

$$\delta_{total} = 7.622r^2 + 0.0008734\theta^2 - 12.03r - 0.1245\theta + 0.1119r\theta + 5.452 \quad (1)$$

Fig. 12에 도출된 반응표면을 등고선도로 도시하였다. 전반적으로 비트부의 각도와 반경이 감소 할수록 총 결함량이 감소하는 것으로 나타났고, 2 가지 인자중 각도보다는 반경이 민감도가 높은 것으로 분석되었다. 상기 반응표면을 사용하여 최적 설계 인자를 각각 각도 37°, 반경 0.555 mm로 결정하였고, 해당 결과를 적용하여 추가적인 성형해석을 진행하였다. 최적조건 적용 결과 결함량의 총 합이 0.004 mm로 예측되어 36가지의 조합중 결함이 가장 작았던 경우(0.008 mm, 각도 37°, 반경 0.56 mm)의 2/3 수준으로 감소됨을 확인하였다.

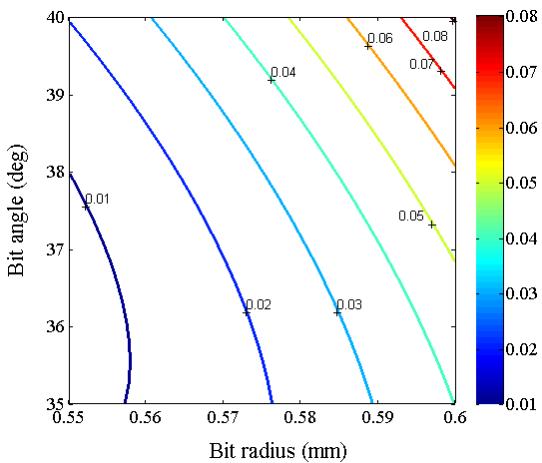


Fig. 12 Contour plot for the response surface

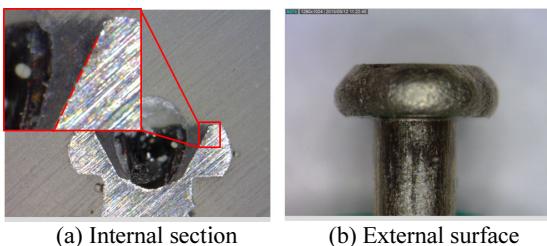


Fig. 13 Experimental investigation of the forged parts

4.2 실험적 검증

상기 해석결과를 적용하여 편치를 제작하여 단조 성형실험을 수행하였다. Fig. 13(a)와 (b)에 각각 성형된 시제품의 비트부 내부와 머리 외부면의 사진을 도시하였다. 실험결과를 보면 내부 접힘결함과 외부 접힘결함이 모두 해소되어 성공적으로 제품이 성형되었음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 외경 1.0 mm의 초소형 나사 머리부 성형을 위한 단조공정에 관한 연구를 수행하였으며, 유한요소해석을 적용하여 단조공정시 발생되는 결함을 예측하고 개선방안을 도출하였다. 이러한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 직경 0.82 mm의 선재에 십자형 비트를 포함한 둥근머리 형태의 성형을 목적으로 금형을 설계하고 유한요소해석을 실시하였다. 해석 결과 외측에서의 접힘결함이 발생하는 것으로 예측 되었고, 실험을 통해 유사한 형태의 결함이 발

생됨을 확인하였다.

- (2) 접힘결함의 완화를 위해 편치 비트부의 설계변수(각도, 반경)를 변화시켜가며 해석을 수행하였고, 각도가 38° 이상일 경우 외측결함이 완전히 해소되는 것을 확인하였으나, 대신 내측에서의 접힘결함이 발생하는 현상을 확인하였다.
- (3) 외부결함과 내부결함을 모두 최소화하기 위해 유한요소해석 결과로부터 반응표면분석을 실시하여 최적의 설계변수(각도 37° , 반경 0.555 mm)를 도출하였고, 최적의 결과를 적용하여 추가해석을 실시한 결과 총 결함량이 초기설계안 대비 1/3 수준으로 감소함을 확인하였다.
- (4) 도출된 최적의 설계조건을 적용하여 금형을 제작하고 단조성형 실험을 실시한 결과 외부결함과 내부결함이 모두 발생하지 않는 양호한 성형품을 제작할 수 있었다.

후기

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업(우수기술연구센터사업, 과제번호: 10045724)의 지원으로 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Min, K. B., Kim, J. B., Park, K., and Ra, S. W., "Evaluation of Clamping Characteristics for Subminiature Screws according to Thread Angle Variation," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 9, pp. 839-846, 2014.
2. Drean, M., Habraken, A. M., Bouchair, A., and Muzeau, J. P., "Swaged Bolts: Modelling of the Installation Process and Numerical Analysis of the Mechanical Behavior," Computer & Structure, Vol. 80, No. 27-30, pp. 2361-2373, 2002.
3. Altan, T. and Vazquez, V., "Numerical Process Simulation for Tool and Process Design in Bulk Metal Forming," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 45, No. 2, pp. 599-615, 1996.
4. Lee, Y. K., Lee, S. R., Lee, C. H., and Yang, D. Y., "Process Modification of Bevel Gear Forging using Three-dimensional Finite Element Analysis," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, No. 1, pp. 59-63, 2001.
5. Petrov, P., Perfilov, V., and Stebunov, S., "Prevention

- of Lap Formation in Near Net Shape Isothermal Forging Technology of Part of Irregular Shape Made of Aluminum Alloy A92618,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, No. 1-3, pp. 218-223, 2006.
- 6. Lee, M. C., Park, R. H., Jun, B. Y., and Joun, M. S., “Adaptive Finite Element Analysis of an Enclosed Die Forging Process of a Bevel Gear and Its Experimental Verification,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 23, No. 4, pp. 37-43, 2006.
 - 7. Ku, T. W. and Kang, B. S., “Tool Design and Experimental Verification for Multi-stage Cold Forging Process of the Outer Race,” Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 15, No. 9, pp. 1995-2004, 2014.
 - 8. Seo, W. S., Min, B. W., Park, K., Ra, S. W., Lee, S. H., et al., “Design of Cold Heading Process of a Screw for Storage Parts,” Transactions of Materials Processing, Vol. 20, No. 1, pp. 48-53, 2011.
 - 9. Kim, J. B., Seo, W. S., and Park, K., “Damage Prediction in the Multistep Forging Process of Subminiature Screws,” Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 13, No. 9, pp. 1619-1624, 2012.
 - 10. Song, J. H., Lee, J., Lee, H. J., Lee, G. A., Park, K. D., et al., “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),” Transactions of Materials Processing, Vol. 21, No. 3, pp. 179-185, 2012.
 - 11. Jang, S. J., Lee, M. C., Shim, S. H., Son., Y. H., Yoon, D. J., et al., “Finite Element Analysis of Manufacturing Process of a 12 Point Flange Head Bolt with Emphasis on Thread Rolling Process,” Transactions of Materials Processing, Vol. 19, No. 4, pp. 248-252, 2010.