

마찰저감을 위한 슬라이딩 금형을 적용한 알루미늄 파이프 요크 냉간 단조공정에 관한 연구

이성민^{1,2} · 이인규³ · 이성윤³ · 황선광⁴ · 박재욱⁵ · 황원석⁶ · 문영훈⁷ · 이상곤^{8,*}

Study on the Cold Forging Process of Aluminum Pipe Yoke using Sliding Die for Reducing Friction

S. M. Lee, I. K. Lee, S. Y. Lee, J. W. Park, W. S. Hwang, Y. H. Moon, S. K. Lee

(Received December 7, 2022 / Revised December 27, 2022 / Accepted December 27, 2022)

Abstract

The aim of this study is to manufacture an aluminum pipe yoke of automotive steering system for lightweight. In a multistage cold forging process for aluminum pipe yoke, the surface defects frequently occur due to excessive deformation or friction during extrusion process for forming hollow pipe part. It is important to reduce the friction between the material and the forging die. This study investigated a multistage forging process with sliding die to reduce friction for aluminum pipe yoke. After evaluating by FE analysis, the forging experiment with the sliding die was carried out. As a result, it was possible to manufacture a sound aluminum pipe yoke.

Keywords: Cold Forging Process Design, Aluminum Pipe Yoke, Sliding Die

1. 서 론

자동차 조향장치 모듈은 차량의 방향전환을 위한 시스템으로 Fig. 1 과 같이 다양한 부품들로 구성되어 있다[1]. 다양한 부품들 중에서 파이프 요크(pipe yoke)는 핸들에서 전달된 회전력을 조향장치 하부 모듈로 전달하는 동력전달 부품으로 일반적으로 소성가공 공정으로 제조되고 있다[2~5].

최근까지 기존 내연기관 자동차뿐만 아니라 친환경 자동차의 에너지 효율 향상을 위한 경량화를 위

해 많은 연구들이 수행되고 있다[6,7]. 파이프 요크의 경우 주로 철계 소재가 적용되고 있었으나, 최근 차량 경량화를 위해 경량합금을 적용한 파이프 요크 개발이 진행되고 있다[8]. 따라서, 본 연구에서는 기존 스틸 소재가 적용되고 있는 조향장치 파이프 요크를 알루미늄 합금으로 대체하기 위해 알루미늄 합금 파이프 요크 다단 단조공정을 설계하였다. 이를 위해, 적용되는 알루미늄 합금소재의 기계적 물성치를 평가하였으며, 단순압축시험과 성형해석을 이용하여 마찰상수를 평가하였다. 파이프 요크의 경우 하단 파이프부 성형 시 성형량이 매우 높고 과도한 마찰에 의해 공정 중 불량발생 가능성이 높다[9]. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 슬라이딩 금형을 적용하여 성형소재와 금형 접촉면의 마찰을 감소시켜 성형성을 향상시켰다. 마지막으로, 슬라이딩 금형을 적용한 현장 테스트를 통해 시제품을 제조하고, 시제품 품질을 평가하여 슬라이딩 금형 적용 타당성을 평가하였다.

1. 한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹, 학생연구원

2. 부산대학교 기계공학부, 박사과정

3. 한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹, 선임연구원

4. 한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹, 수석연구원

5. 대한메탈 주식회사, 기술연구소, 과장

6. 대한메탈 주식회사, 기술연구소, 부장

7. 부산대학교 기계공학부, 교수

8. 한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹, 수석연구원

Corresponding Author: Smart Manufacturing Technology R&D Group,

Korea Institute of Industrial Technology, E-mail: sklee@kitech.re.kr.

ORCID: 0000-0003-4901-8132

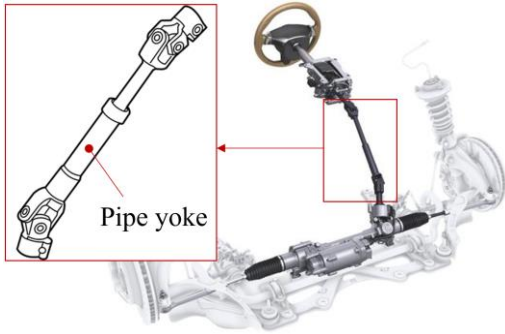


Fig. 1 Steering system of automobile

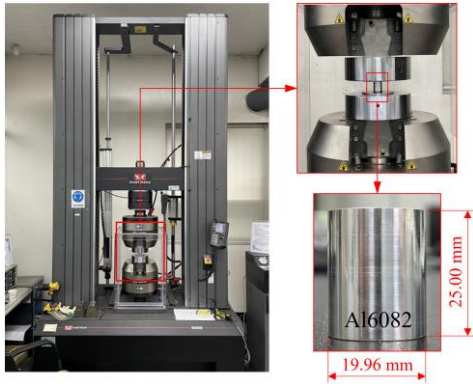


Fig. 2 Compression test

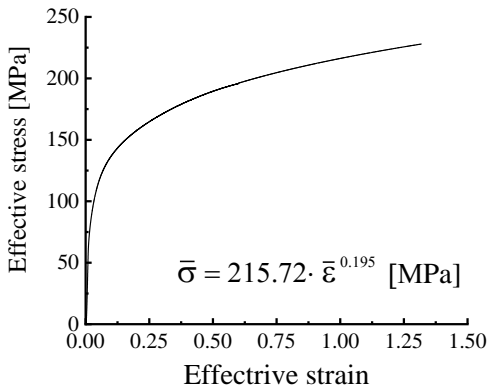


Fig. 3 Flow stress of Al6082

2. 기초물성 평가

2.1 압축시험을 통한 유동응력평가

본 연구에서 적용된 소재는 Al6082 로 먼저 단순 압축시험을 통해 유동응력을 평가하였다. 압축시험은 만능재료시험기(INSTRON5988)로 수행되었으며, Fig. 2 에 시험장비를 나타내었다. 압축시험을 통해 확보된 소재 유동응력과 Hollomon 식은 Fig. 3 에 나타내었다.

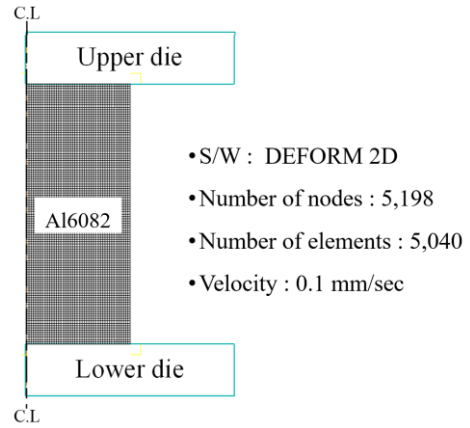


Fig. 4 Analysis model and condition for compress test

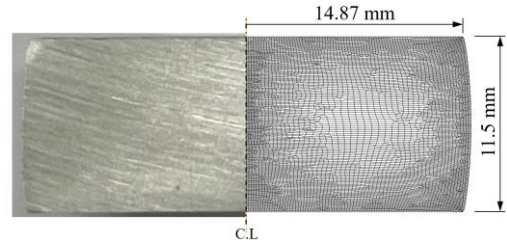


Fig. 5 Comparison of experiment and FE analysis of Compression test

2.2 압축시험을 통한 마찰특성 평가

알루미늄 냉간단조 시 마찰저감을 위해 윤활유가 적용되며, 윤활특성 평가가 매우 중요하다. 일반적으로 링 압축시험 등을 통해 마찰특성을 평가하지만[10,11], 본 연구에서는 압축시험과 성형해석을 이용하여 적용된 윤활유의 마찰상수를 평가하였다[12]. 윤활유가 적용된 압축시험에 대하여 동일한 조건의 성형해석을 수행한 후 압축시편과 성형해석결과 시편 형상을 비교하여 마찰상수를 평가하였다. 압축시험 해석은 DEFORM 2D[13]로 수행되었으며, 해석모델과 해석조건은 Fig. 4 에 나타내었다.

압축시험 및 성형해석결과 Fig. 5 에서 보듯이 마찰상수(m)가 0.075 일 때 시편의 반경과 높이가 거의 동일한 값을 나타내었다. 따라서, 적용된 윤활유의 마찰상수는 0.075 로 설정하였다.

3. 파이프 요크 단조공정 설계

3.1 알루미늄 파이프 요크

Fig. 6 에 본 연구에서 제조하고자 하는 파이프 요크를 나타내었다. 파이프 요크는 요크 헤드부와 내

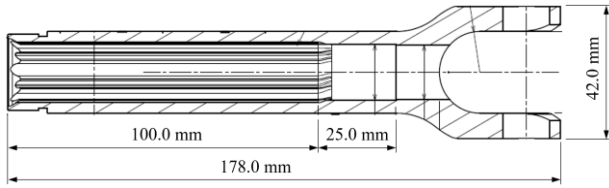


Fig. 6 Aluminum pipe yoke

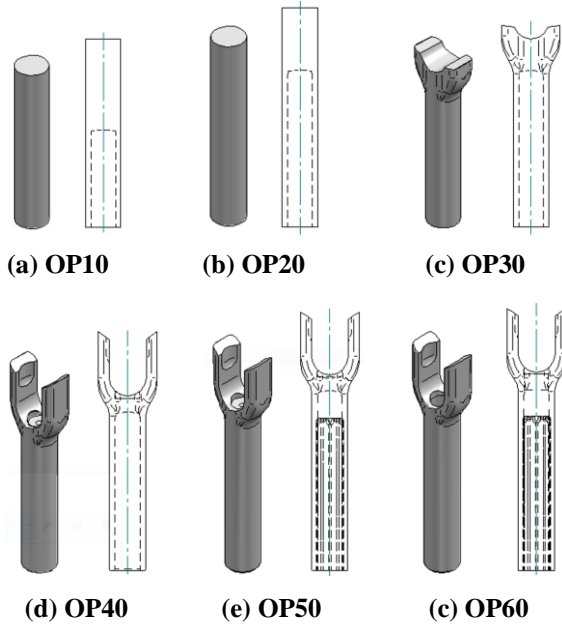


Fig. 7 Multi-stage cold forging process

경부에 치형이 있는 전방 압출부로 이루어져 있다.

3.2 냉간 다단 단조공정 설계

알루미늄 파이프 요크는 초기 원형 중실소재가 적용되어 제조되며, 헤드부와 특히 전방 압출부의 성형량이 매우 높기 때문에 다단 단조공정으로 성형된다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 7 과 같이 초기 직경과 길이가 각각 24.6 mm 와 102.0 mm 인 중실봉재를 이용하여 총 6 공정의 냉간 다단 단조공정을 적용하였다. OP10 과 OP20 은 전방압출공정으로 요크 파이프 부 깊이가 매우 깊기 때문에 2 단계의 전방압출공정을 적용하였다. OP30 의 경우 요크 헤드부 1 차 성형공정으로 상단부 단조를 통해 헤드부 일부를 성형하게 된다. OP40 은 헤드부가 성형되는 공정이며, OP50 은 파이프 내측부에 치형이 성형되는 공정이다. 마지막으로 OP60 은 OP50 에서 성형된 치형의 치수정도를 향상시키는 사이징 공정이다.

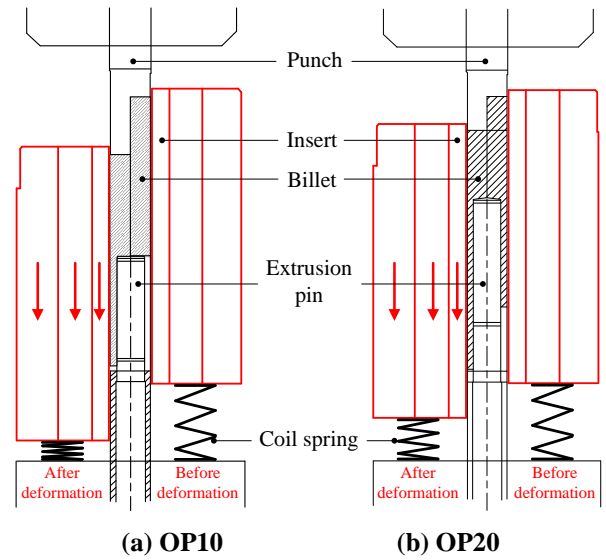


Fig. 8 Forging processes of OP10 and OP20

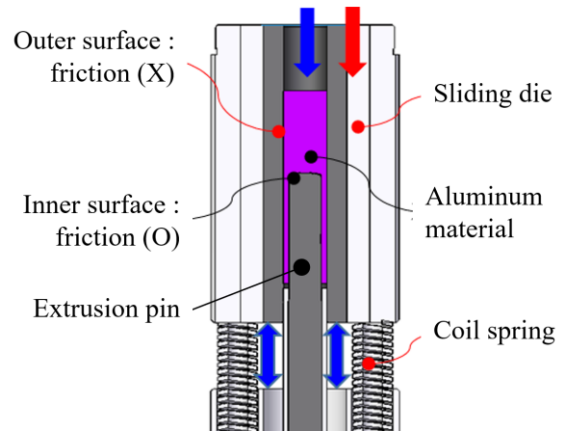


Fig. 9 Sliding extrusion die

3.3 슬라이딩 금형 적용

Fig. 7 의 공정도에서 알 수 있듯이 OP10 과 OP20 의 전방압출공정 시 압출 깊이가 깊어 성형량이 많을 뿐만 아니라 파이프 내/외측 금형과의 직접적인 접촉으로 인하여 마찰면적이 매우 넓다. 이는 성형성을 저하시킬 뿐만 아니라 소재 결핍, 소착 등의 결함발생 원인이 된다. 따라서, 본 연구에서의 표면 마찰영향을 최소화시키기 위해 OP10 과 OP20 의 전방압출공정에 슬라이딩 금형을 적용하였다. Fig. 8 과 Fig. 9 에 슬라이딩 금형이 적용된 두 공정의 개략도와 슬라이딩 금형의 구조를 나타내었다. 금형의 구조에서 알 수 있듯이 압출이 진행되면 변형소재와 금형 인서트 접촉면의 면압 증가로 인하여 소재의 유동방향으로 슬라이딩 금형도 함께 이동되며, 이로

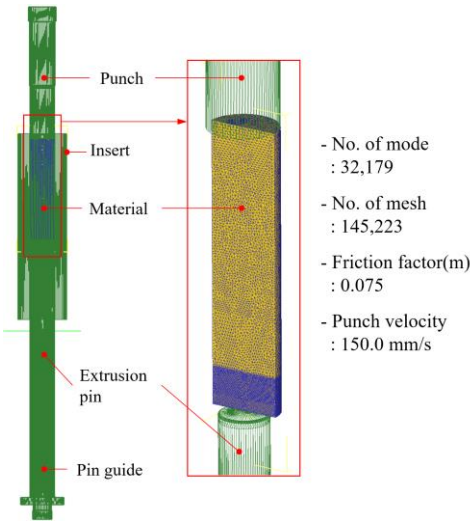


Fig. 10 Initial FE analysis model

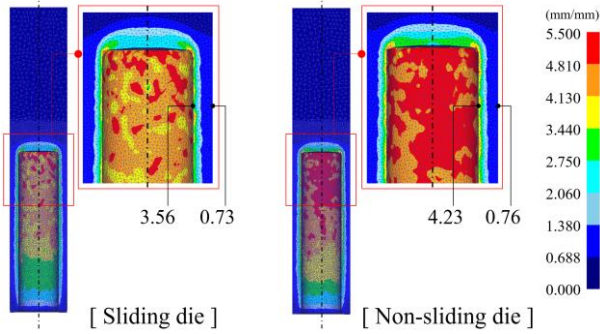


Fig. 11 Distribution of effective strain of OP10

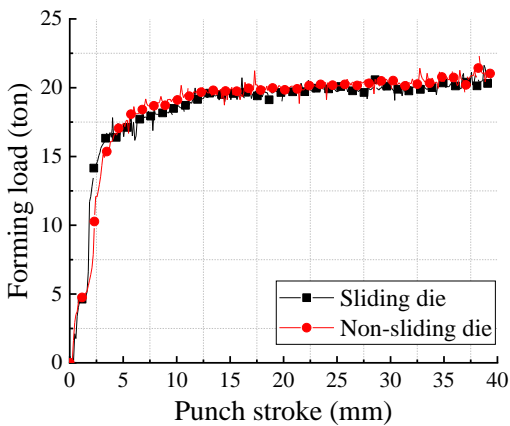


Fig. 12 Forming load of OP10

인해 변형소재와 금형 인서트 사이의 마찰 영향이 최소화되어 성형성이 향상된다.

4. 단조공정 유한요소해석

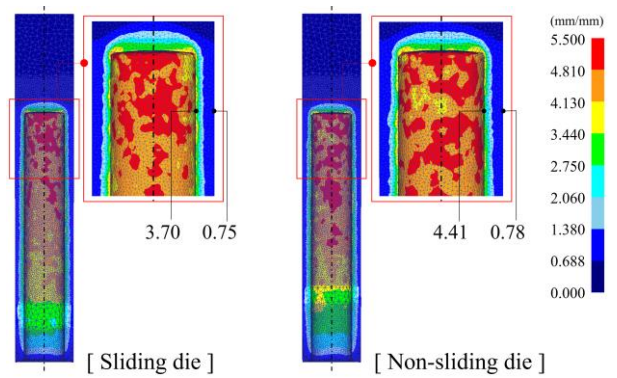


Fig. 13 Distribution of effective strain of OP20

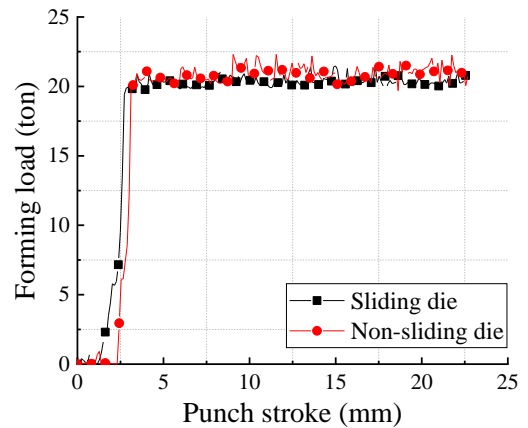


Fig. 14 Forming load of OP20

4.1 해석모델 및 조건

본 연구에서는 파이프 요크 성형공정에 대한 유한요소해석을 수행하여 공정 분석을 수행하였다. 유한요소해석은 DEFORM 3D로 최종 제품의 대칭성을 고려하여 1/2 단면 모델을 적용하였으며, Fig. 10에 초기 해석모델과 해석 조건을 나타내었다.

4.2 해석결과 및 고찰

성형해석을 통해 슬라이딩 금형과 고정형 금형이 적용된 공정을 비교하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 성형해석결과 OP10 후 소재의 유효변형률 분포와 성형하중을 나타낸 것이다. 해석결과 슬라이딩 금형이 적용된 경우 마찰저감으로 인해 유효변형률이 상대적으로 낮았으며, 성형하중도 약 21.5 ton에서 20.3 ton으로 약 6% 감소하였다.

Fig. 13과 Fig. 14는 OP20 후 유효변형률 분포와 성형하중을 나타낸 것이다. OP10과 동일하게 슬라이딩 금형 적용 시 유효변형률이 상대적으로 낮았으며, 성형하중도 약 22.0 ton에서 20.0 ton으로 약

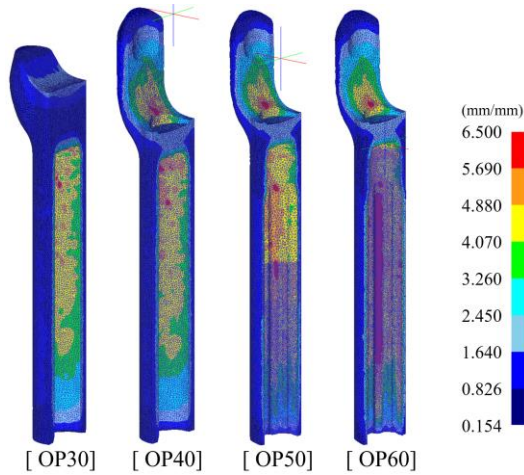


Fig. 15 Distribution of effective strain at each stage

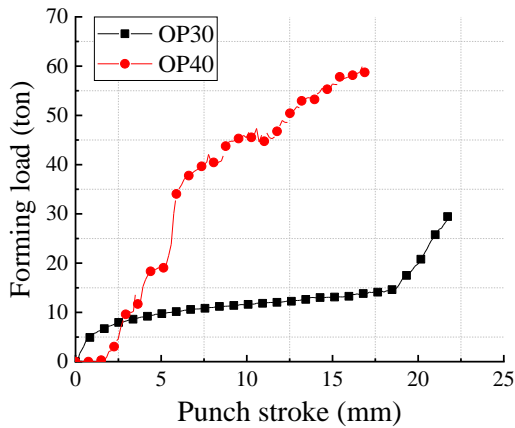


Fig. 16 Forming load of OP30 and OP40

9% 감소하였다. 이를 통해 슬라이딩 금형 적용 시 성형성 향상 및 성형하중 감소가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 15는 슬라이딩 금형 적용 후 OP30 ~ OP60 공정의 각 단계별 유효 변형률 분포를 나타낸 것이다. OP30 과 OP40 에서는 요크 헤드부가 성형됨에 따라 헤드부의 변형률이 증가함을 알 수 있다. OP50 은 하단 파이프 내측에 치형을 성형하는 공정으로 치형 성형으로 내측부 변형률이 높아진다. 이후 최종 사이징 공정인 OP60 으로 최종 형상이 성형된다.

각 공정별 성형하중은 Fig. 16 과 Fig. 17 에 나타내었다. OP30 의 경우 헤드부 1 차 성형을 위한 단조공정으로 성형하중은 약 30 ton 이었으며, OP40 의 경우 헤드부 최종 성형을 위한 후방압출 공정으로 성형량이 상대적으로 많아 성형하중은 약 60 ton 이었다. 파이프 내부 치형이 성형되는 OP50 은 상대적으로

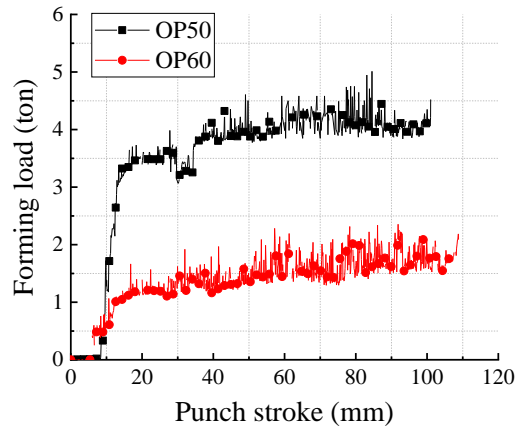


Fig. 17 Forming load of OP50 and OP60

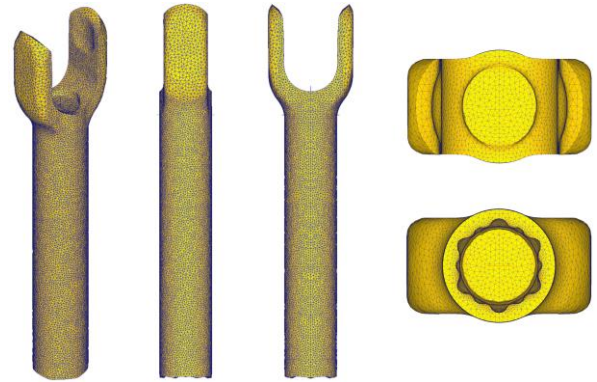


Fig. 18 Final shape after OP60

성형량이 작기 때문에 하중은 약 4 ton 이었으며, 마지막 OP60 의 경우 사이징 공정으로 가장 낮은 약 1.8 ton 이었다.

Fig. 18 은 OP60 이후 최종 형상을 나타낸 것이다. 성형해석결과 미성형이나 소재 결핍 등의 결함발생 없이 건전한 제품이 성형됨을 알 수 있다.

5. 단조공정 실험 및 결과

슬라이딩 금형이 적용된 전체 다단 단조공정에 대한 현장실험을 수행하여 그 타당성을 검토하였다.

실험은 압조력 1,000 ton 다단 포머(former)로 수행되었으며, Fig. 19 에 성형장비를 나타내었다.

Fig. 20 은 슬라이딩 금형과 기존 고정형 금형을 적용하여 성형된 파이프 요크를 나타낸 것이다. Fig. 20(a)로부터 슬라이딩 금형이 적용된 OP10 과 OP20 의 전방압출공정을 통해 결함없이 파이프부 성형이 가능하였으며, 파이프 내측 치형도 우수하게 성형되

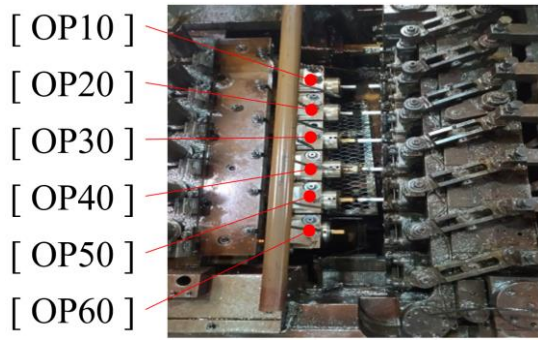


Fig. 19 Forging experiment

단조공정을 적용하여 성형량이 많은 알루미늄 파이프 요크를 결함없이 성공적으로 성형할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 성형량이 많은 알루미늄 파이프 요크 성형을 위한 다단 단조공정에 관한 연구를 수행하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 파이프 요크 성형을 위해 요크 하단 파이프부 전방압출, 헤드부 후방압출, 그리고 성형된 파이프 내측부의 치형을 고려하여 6 단 다단 단조공정을 적용하였다.

(2) 깊이가 깊은 중공형 파이프가 성형되는 OP10 과 OP20 의 외측부 마찰저감을 통한 성형성 향상을 위해 슬라이딩 금형을 적용하였다.

(3) 성형해석을 통해 기존 고정 금형과 슬라이딩 금형을 적용한 공정을 비교한 결과, 슬라이딩 금형을 적용한 경우 외측부 마찰영향 감소로 인해 파이프 성형부의 유효 변형률이 상대적으로 낮았다. 또한, 성형하중도 약 6 ~ 9% 정도 감소함을 알 수 있었다.

(4) 슬라이딩 금형을 적용한 공정에 대한 현장 실험결과 요크의 파이프부, 헤드부, 그리고 표면상태 모두가 우수한 품질을 가진 파이프 요크 성형이 가능하였으며, 향후 다양한 알루미늄 다단 단조품 성형에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업소재핵심기술개발사업(사업명: HV650 급 알루미늄 고경도 양극산화피막기술을 적용한 자동차 조향장치용 일체형 스티어링 샤프트볼 요크 모듈 개발, No: 20006979)의 지원으로 수행되었음.

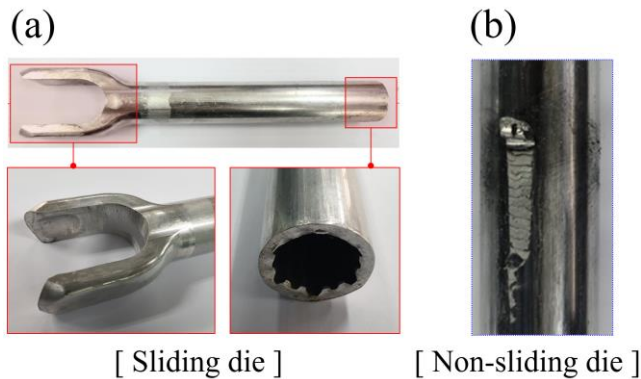


Fig. 20 Comparison of pipe yoke

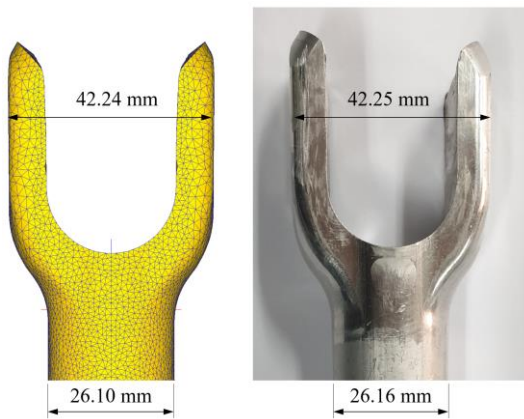


Fig. 21 Comparison of FE analysis and experiment

있음을 알 수 있다. 또한, 요크 헤드부도 결함없이 성형이 되었으며, Fig. 20(b)와 같이 고정형 금형 적용 시 빈번히 발생되었던 표면결함도 발생되지 않았다.

Fig. 21 은 성형해석결과와 실험결과 파이프 요크 헤드부 형상을 비교한 것으로, 치수가 거의 유사함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 슬라이딩 금형이 적용된 다단

REFERENCES

[1] P. E. Pfeffer, M. Harrer, D. N. Johnston, 2002, Interaction of Vehicle and Steering Ssystem Rregarding On-centre Handling, Veh. Sys. Dyn, Vol. 46, No. 5, pp. 413~428, <https://doi.org/10.1080/00423110701416519>.
 [2] H. M. Kim, Y. K. Kim, Y. B. Park, 2012, Development of a Torsion Joint Yoke for Motor-Driven Power Steering System using Double-Action Extrusion

- Process, *Tans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 8, pp. 473~478.
- [3] K. M. Kim, M. C. Kim, T. M. Hwang, S. H. Chung, M. S. Joun, 2019, Numerical and Experimental Study on Spring Back in Automatic Multi-Stage Precision Cold Forging Process of a Steering Yoke, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 28, No. 3, pp. 115~122.
- [4] J. D. Yoo, T. M. Hwang, M. S. Joun, 2020, Finite Element Prediction of Temperature Variation of Material and Dies in Aluminum Forging, *Key Eng. Mater.*, Vol. 830, pp. 93~100, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.830.93>.
- [5] S. G. Seong, K. H. Kim, Y. S. Lee, S. Y. Lee, E. Y. Yoon, 2022, Die Stress Reduction Design and Mechanical Properties Analysis of Warm Forging Process for the Application of Warm-Closed Forging of Automotive Steering Unit Yoke, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 31, No. 2, pp. 51~56, <http://data.doi.or.kr/10.5228/KSTP.2022.31.2.51>.
- [6] B. S. Han, S. H. Kim, J. H. Sin, J. P. Kim, D. O. Kim, S. Y. Seong, 2022, Automotive Technology Trends and Lightweight Technologies, *J. Kor. Foundry Soc.*, Vol. 42, No. 2, pp. 97~104.
- [7] J. C. Ryu, J. H. Kim, D. H. Kam, D. C. Ko, 2022, Feasibility of One-shot Forming for Manufacturing of Steel/CFRP Hybrid B-pillar, *Mater. Manuf. Processes*, Vol. 37, No. 14, pp. 1~15, <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2039693>.
- [8] K. M. Kim, J. D. Yoo, M. S. Jeong, 2018, Non-isothermal Analysis of an Aluminum Forging Process for Yoke in Room Temperature, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 150~151.
- [9] C. I. Pruncu, T. T. Pham, A. Dubois, M. Dubar, L. Dubar, 2018, Morphology of Surface Integrity as Effect of Cold Forging of Aluminum Alloy, *Tribol. Trans.*, Vol. 61, No. 4, pp. 632~639, <https://doi.org/10.1080/10402004.2017.1386339>.
- [10] H. Sofuoglu, H. Gidikli, J. Rasty, 2001, Determination of Friction Coefficient by Employing the Ring Compression Test, *ASME J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 123, No. 3, pp. 338~348, <https://doi.org/10.1115/1.1369601>.
- [11] K. H. Ann, J. H. Kang, S. J. Heo, T. S. Shin, H. Y. Cho, 2020, Multistage Cold Forging Process Design of Al6082 Considering Forming Limit, *J. Kor. Soc. Manuf. Process Eng.*, Vol. 19, No. 9, pp. 93~99, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.09.093>.
- [12] S. K. Lee, I. K. Lee, S. Y. Lee, S. M. Lee, M. S. Jeong, 2020, Evaluation of Flow Stress of Metal up to High Strain, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 29, No. 6, pp. 316~322, <https://doi.org/10.5228/KSTP.2020.29.6.316>.
- [13] Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, OH, USA, 1992.