

## 자동변속기용 언더드라이브 브레이크 피스톤의 판 단조공정 개선 방안

전효원<sup>1</sup> · 윤종현<sup>#</sup> · 이정환<sup>1</sup> · 김병민<sup>2</sup>

### Plate Forging Process Design for an Under-drive Brake Piston in Automatic Transmission

H. W. Jeon, J. H. Yoon, J. H. Lee, B. M. Kim

(Received October 31, 2013 / Revised November 26, 2013 / Accepted November 29, 2013)

#### Abstract

The under-drive brake piston is an essential part in the automatic transmissions of automobiles. This component is manufactured by forging after blanking from S55C plate with a thickness of 6mm. It is difficult to design the plate forging process using a thick plate approach since there will be limited material flow as well as large press loads. Furthermore, the under-drive brake piston has a complex shape with a right angle step, which often results in die unfill and abrupt increase in press load. To overcome these obstacles, a separate die for filling material sufficiently to the corner of the right angle step is proposed. However, this approach induces an uncontrolled workpiece surface between the dies, resulting in flash. This excess flash degrades the tool life in the final machining after cold forging as well as increases the cycle time to obtain the net-shape of the part. In the current study, we propose an optimum process design using a conventional die shaped with the benefit of finite element analysis. This approach enhanced the process efficiency without sacrificing the dimensional accuracy in the forged part. As the result, the optimum plate forging process was done with a two stage die, which reduces weight of by 6% compared with previous process for the under-drive brake piston.

**Key Words:** Automatic Transmission, Under-drive Brake Piston, Plate Forging, Finite Element Analysis

#### 1. 서 론

우리나라 주요 수출 제조품 중 하나인 자동차 및 자동차 부품은 내부적으로 30% 이상의 소성 가공품을 갖는다. 특히 엔진 및 자동변속기 부품의 주요 부품은 단조(forging) 공정을 통하여 제조된다. 자동변속기의 주요 부품 중 엔진(engine)의 동력을 챔버에서 허브로 전달하는 언더 드라이브 브레이크 피스톤(under-drive brake piston)은 S55C 탄소강을 사용하여 열간 단조 후 기계가공으로 제조되어왔다. 언더 드라이브 브레이크 피스톤과 같이 복잡한 형상

을 갖는 부품의 단조 성형은 소재의 유동성을 상승시키기 위하여 재결정 온도( $1150 \pm 50^\circ\text{C}$ )까지 승온한 후, 성형이 이루어진다. 이와 같이 높은 온도에서 성형이 이루어지는 열간 단조 공정에서는 소재를 높은 온도로 가열하기 위한 승온 장비가 필요하기 때문에 에너지 소모가 높은 단점을 갖는다. 또한 열간 단조품은 냉간 단조품에 비하여 치수 정밀도가 낮기 때문에 상대적으로 소재 투입 중량이 많으며, 단조공정 후에 수행하는 기계 가공 시, 가공량이 많아 가공 톨의 소모가 빠른 단점을 갖는다. 이러한 열간 단조의 단점을 개선하기 위하여 열간 단조를

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. 부산대학교 기계공학부

# Corresponding Author : KIMS, E-mail: jhyoon@kims.re.kr

이용하여 생산하는 제품을 냉간 단조 공정으로 변경하여 생산하는 추세이다. 그러나, 언더 드라이브 브레이크 피스톤과 같이 판재 형태의 초기 소재를 이용하는 냉간 단조의 경우, 낮은 소재의 유동성을 극복하기 위하여 다단계 예비 성형 공정을 거치게 된다. Altan and Knoerr[1]은 유한요소 해석 프로그램 DEFORM-2D를 이용하여 베벨기어 냉간 단조 성형 시, 예비 성형 형상을 예측하고 이를 실제 냉간 단조에 적용하였다. Yeo et al.[2]은 냉간 단조를 이용하여 자동차용 솔레노이드 밸브 성형 시, DOE(Design Of Experiment)기법을 이용하여 예비 성형 형상을 예측하였으며, DOE기법으로 예측한 예비성형 공정 형상을 이용하여 최종 제품 형상을 만들었다. 이와 같이 실제 제품을 성형하기 앞서 다양한 방법으로 예비성형 형상을 예측하여 실제 성형에 적용하였다. Fusikawa et al.[3]은 CAD 및 CAM, CAE를 이용하여 복잡한 형상을 가지는 자동차 부품의 냉간 성형에 대하여 제시하였다. Dean [4]은 벌크 (bulk) 소재를 이용하여 베벨기어 및 자동차 기어류 등을 정밀 냉간 단조를 적용하여 성형 후 추가적으로 기계 가공 없이 사용하고자 하였다. Mogiguchi [5]는 자동차 부품 성형 시 상, 하부 성형 펀치가 동시에 하중을 가하는 방식을 이용하여 성형 해석을 실시하였으며, 실제 실험을 통하여 해석 형상과 실제 실험 형상을 비교하였다. 벌크 소재를 이용한 냉간 단조 성형 방식은 많은 연구와 함께 발전을 이루었다. 하지만 자동 변속기의 기어류와 같이 면적에 비하여 두께가 얇은 부품의 경우 냉간 단조 시 벌크 소재를 적용하기는 큰 어려움이 있다. Merklein et al. [6, 7]는 자동차 변속기 부품 및 기어류 성형 시 판재를 이용하여 다양한 방법의 냉간 단조 성형 방법에 대하여 제시하였다. 제시한 방안을 이용하여 유한요소 해석 및 실제 성형을 실시하여 비교하였다. Yoon et al.[8]은 두께 4.0mm의 SCM415 판재를 이용하여 총 3공정의 파인 블랭킹으로 생산되는 자동차 시트용 리클라이너 부품을 총 2공정의 판 단조 (plate forging)를 적용하여 성형 해석 및 실험을 실시하였다.

본 논문에서는 두께 6mm를 갖는 S55C 판재를 이용하여 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 판 단조를 시도하였으며, 기존 성형 공정을 개선하기 위하여 유한요소 해석을 이용하여 최적 공정설계를 수행하였다.

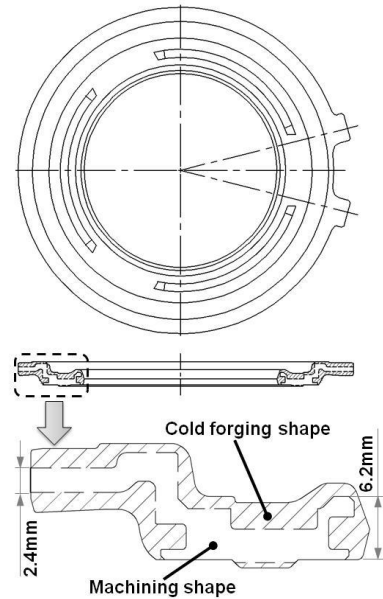


Fig. 1 Schematic design of under drive brake piston

## 2. 분할 금형을 이용한 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 단조성형

언더 드라이브 브레이크 피스톤은 6mm의 판재를 이용하여 단조 성형한 뒤, 기계 가공을 통하여 Fig. 1과 같이 생산된다. 언더 드라이브 브레이크 피스톤은 Fig. 1에서 점선으로 표시한 바와 같이 제품의 상부와 하부에 직각의 단차를 가지고 있으며, 각 부위 별로 두께 차이가 최대 2배까지 발생하는 고난이도 성형 제품이다. 이와 같이 복잡한 형상을 갖는 언더 드라이브 브레이크 피스톤은 두께 6mm를 갖는 S55C 후판을 이용하여  $\varnothing 76.5\text{mm}$ 로 내부 원형을 피어싱 한 뒤, Fig. 1과 같이 외곽 라인을 따라 블랭킹한 판재를 냉간 단조에 적용한다. 기존의 개발된 냉간 단조 공정은 Fig. 2에서 제시된 바와 같이 사선으로 움직이는 분할 금형을 이용하여 총 3단계로 구성되어 있다. 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 단조 공정 시, 공정 1단계에서는 직각 단차부로의 소재 충진율을 높이기 위하여 분할 금형을 적용하였으며 분할 금형의 형상은 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 총 8개의 금형으로 이루어 진다. 8개의 분할 금형은 가이드 금형을 따라 사선으로 운동하여 소재의 유동을 반경 방향으로 유도하는 예비 성형체를 만들게 된다. 2, 3단계 단조 공정은 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 축대칭(axisymmetric) 형상의 일반적인 일체형 금형을 이용하여 수직 운동으로 성형을 실시

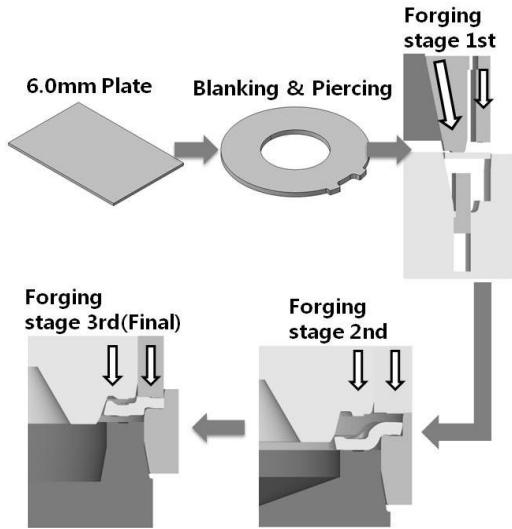


Fig. 2 Plate forging process for under drive brake piston

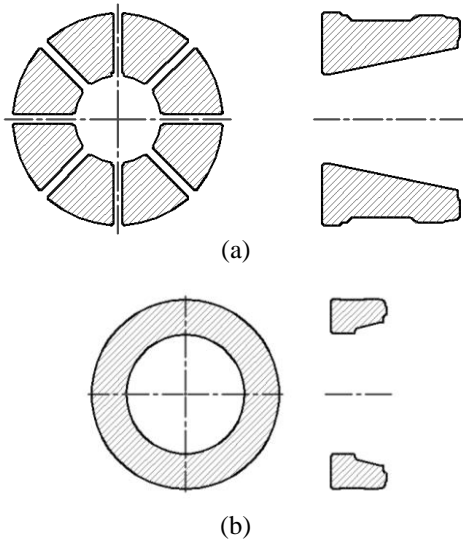


Fig. 3 Comparison of upper die design: (a) separate die; (b) general die

한다. 그러나 이와 같이 분할 금형을 적용하여 냉간 단조를 수행할 경우, 금형과 소재가 접촉하지 않는 구간이 발생하여 국부적으로 소재 유동을 제어할 수 없는 단점을 갖는다. 분리형 금형의 사용으로 인한 금형간 미접촉 구간은 불필요한 소재 플래쉬(flesh)를 발생시켜 후속 공정 시에 성형 하중이 급격히 증가되거나 최종 제품을 위한 기계 가공 공정의 효율을 떨어뜨리는 단점을 갖는다. 분리형 금형을 이용한 냉간 단조 공정의 특징을 정량적으로 분석하기 위하여 유한요소 해석을 이용하여 각 단계별 공정을 해석하고자 하였다.

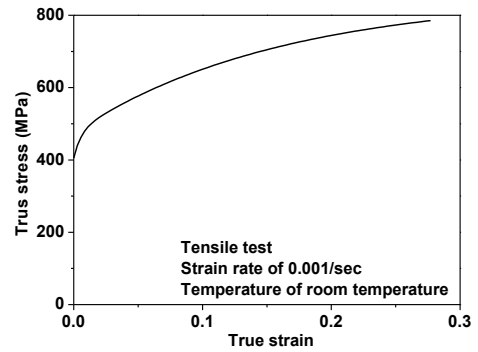


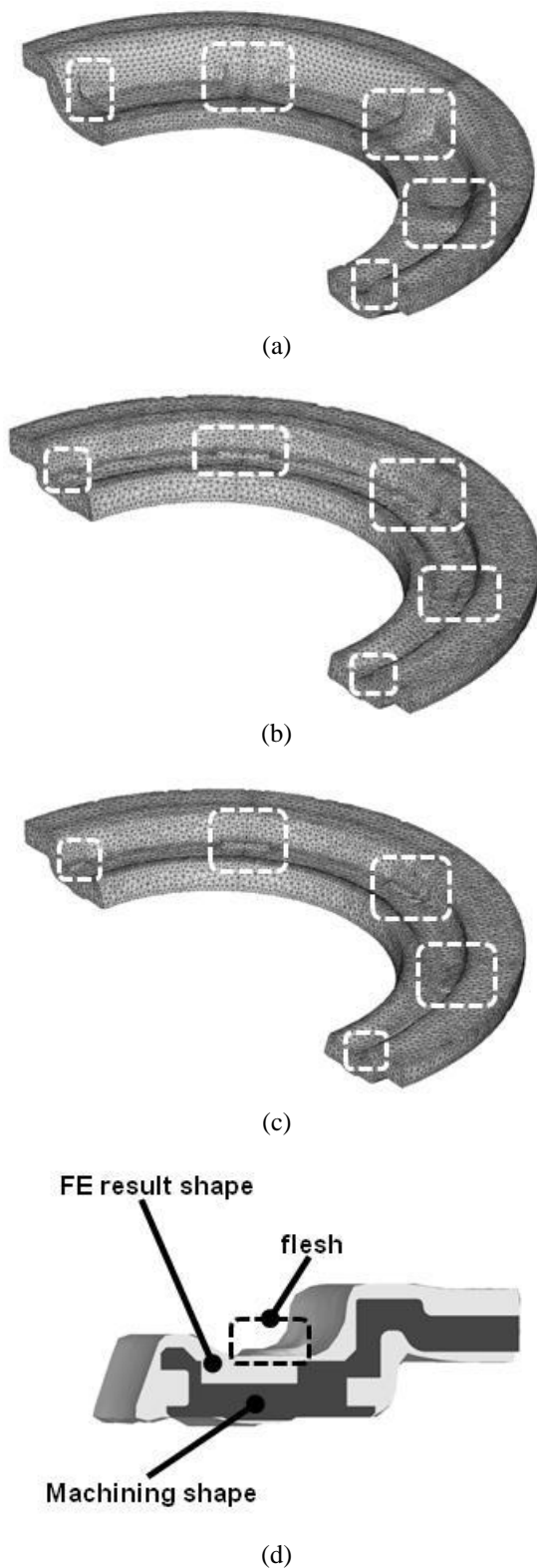
Fig. 4 True stress-strain curve for FE analysis

### 2.1 성형 해석 조건

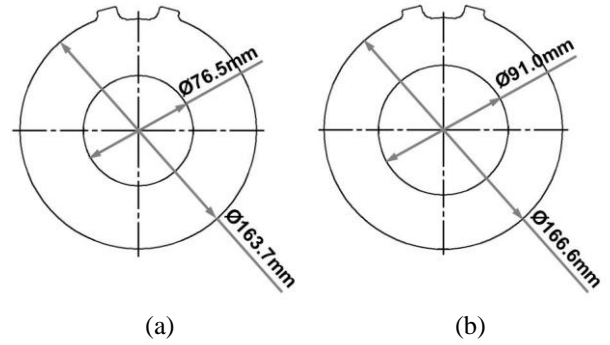
분할형 금형을 이용한 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 유한요소 해석을 실시함에 있어 피어싱 및 블랭킹으로 인한 초기 판재의 표면 조도가 두께 방향으로 균일하다고 가정하고 해석을 진행하였다. 유한요소 해석에 사용된 프로그램은 DEFORM-3D를 이용하였으며, S55C 후판의 기계적 물성을 얻기 위하여 상온에서 준정적 인장실험을 실시하였다. 준정적 인장실험 시편은 ASTM A370-10에 따라 기계 가공 하였다. 실험장비는 INSTRON 4485를 이용하였으며, 변형률은 50mm 신장계(Extensometer)를 설치하여 측정하였다. 변형률 속도 0.001/sec의 준정적 인장 실험을 실시하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이 진변형률-진응력 곡선을 얻었다. 해석 효율을 높이기 위하여 1/8 모델을 수행하였으며 40,000개의 사면체 요소(Tetrahedron mesh)를 생성하여 유한요소 해석을 수행하였다. 금형과 블랭크 사이의 마찰계수는 0.12를 적용하였다.

### 2.2 성형 해석 결과

각 냉간 단조 성형 공정에 따른 성형해석 형상은 Fig. 5 와 같다. Fig. 5(a)에서 제시된 바와 같이, 분할 금형을 이용하여 1단계 냉간 단조 성형 공정을 수행할 경우, 분리 금형의 수에 따라 불필요한 돌기 형태의 플래쉬가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 직사각형의 점선으로 표시된 플래쉬는 분할 금형으로 성형 시 소재에 성형 하중을 가해지지 않는 구간으로 발생하였다. 분할 금형으로 생성된 돌기는 축대칭 형상의 일체형 금형으로 성형을 수행하는 2, 3단계 단조 공정을 진행함에 따라 Fig. 5(b), (c)에서 제시된 바와 같이 플래쉬가 제거되지 않고 잔존하는



**Fig. 5** FE results with respect to each stage; (a) 1-stage; (b) 2-stage; (c) 3-stage; (d) comparison of deformed shape in FE result with machining line



**Fig. 6** Comparison of blanking and piercing shape: (a) initial; (b) modification of design

것을 확인할 수 있었다. 잔존하는 플래쉬가 최종 기계 가공품의 형상에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Fig. 5(d)에서 제시된 바와 같이, 최종 성형 해석 형상과 기계 가공품 형상을 비교하였다. 기계 가공 공정이 진행됨에 따라 잔존하는 플래쉬는 제거되며, 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 제품 형상에는 영향을 미치지 않을 것으로 보여진다. 하지만 잔존하는 플래쉬는 기계 가공 시 가공 틀에 불규칙적인 하중을 가하여, 후속 공정에 악영향을 미치는 요소이다. 또한 Fig. 5(d)에서 제시된 바와 같이, 성형 공정 시 투입 소재량이 과다하여 불필요한 가공 여유가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

불필요한 가공 여유는 후속 공정에서 공정 시간을 증가시키며, 가공 틀의 소모를 증가시켜 제조 효율을 저하시키는 단점을 가지고 있다. 이와 같이 성형 공정에서 분할 금형을 이용하였을 때 발생한 단점이 후속 공정에 악영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 문제를 해결하고자 유한요소 해석을 이용하여 공정 해석을 수행하였다. 언더 드라이브 브레이크 피스톤 성형 시 축대칭 형상의 일체형 금형 형상을 이용하였으며, 소재 투입 중량을 감소하여 해석을 실시하였다. 또한, 냉간 단조 효율을 증가시키기 위하여 기존 3공정으로 진행되는 것을 총 2공정으로 축소하였다.

### 3. 유한요소 해석을 이용한 판 단조공정 설계

분할 금형을 이용한 언더드라이브 브레이크 피스톤 성형 시 발생한 문제점을 개선하기 위하여 유한요소 해석을 이용한 공정 해석을 수행하였다. 성형 해석의 효율을 높이기 위하여 DEFORM-2D를 이용하여 축대칭 형상을 적용하였다. 그 외의 성형 해석

조건은 2.1장과 동일하게 적용하였다.

분할 금형에서 발생한 플래쉬를 제거하기 위하여 일반적인 축대칭 일체형 금형 형상을 이용하였으며, 가공 여유를 감소하기 위하여 Fig. 6에서 제시된 바와 같이, 피어싱 및 블랭킹 치수를 수정하였다. 분할 금형을 적용하였을 때 블랭킹 및 피어싱 치수는 Fig. 6(a)에서 제시된 바와 같이 외경 163.7mm, 내경 76.5mm이며, 축대칭 형상의 일체형 금형을 적용하였을 때는 Fig. 6(b)에서 제시된 바와 같이 외경 166.6mm, 내경 91.0mm으로 블랭킹 및 피어싱 치수를 적용하였다. Fig. 6(b)에서 제시된 소재를 이용하여 일반적인 축대칭 일체형 금형 형상을 이용하여 공정 해석을 수행하였다. 총 2단계의 성형 공정 중 1단계는 내경부 성형 및 직각 단차부 성형을 위한 예비 성형 단계이다. 직각 단차부 성형을 위하여 Fig. 7(a)에서 제시된 바와 같이 상부 금형(punch)이 소재(workpiece)에 성형 하중을 가하였을 때 하부 금형(die)에 구배를 설계하여 직각 단차부로 소재 유동이 원활히 발생하도록 하였다. 또한, 마찰에 의하여 소재 유동이 방해받지 않도록 하부 금형 하부 단차부에 금형과 소재가 접촉하지 않도록 설계하였다. 언더 드라이브 브레이크 피스톤 예비 성형 결과는 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이, 내경부와 외경부 성형은 원활히 이루어졌으나 직각 단차부의 소재 충전이 미흡한 것으로 나타났다. 직각 단차부의 미흡한 소재 충전 및 엠보싱(embossing)부의 성형은 최종 성형 단계인 2단계 성형에서 이루어지도록 하였다. 2단계 성형의 금형 형상은 Fig. 7(c)에서 제시된 바와 같이 상, 하 직각 단차부에 소재 유동을 원활히 발생시키기 위하여 상부 금형과 하부 금형 링(die-ring)부에 예비 성형체와 마찰이 발생하지 않도록 하였다. 또한, 상부 금형 링에 성형 하중을 집중하기 위하여 엠보싱 성형을 위한 스트로크를 최소화하여 상부 금형에 작용하는 성형 하중을 최소화 하였다. 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 최종 성형 해석 결과는 Fig. 7(d)에 나타난 바와 같이 직각 단차부로 소재 유동이 원활히 발생한 것을 확인할 수 있었다. 직각의 단차부 및 기계 가공에 있어 적합한 형상인지 확인하기 위하여 Fig. 8에서 제시된 바와 같이, 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 성형 해석 형상과 최종 기계 가공품 형상을 비교하였다. 점선으로 표시된 형상이 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 최종 가공 형상으로 실선으로 표시된 성형 해석 형상 내부에 위치해 있는 것으로 나타났다.

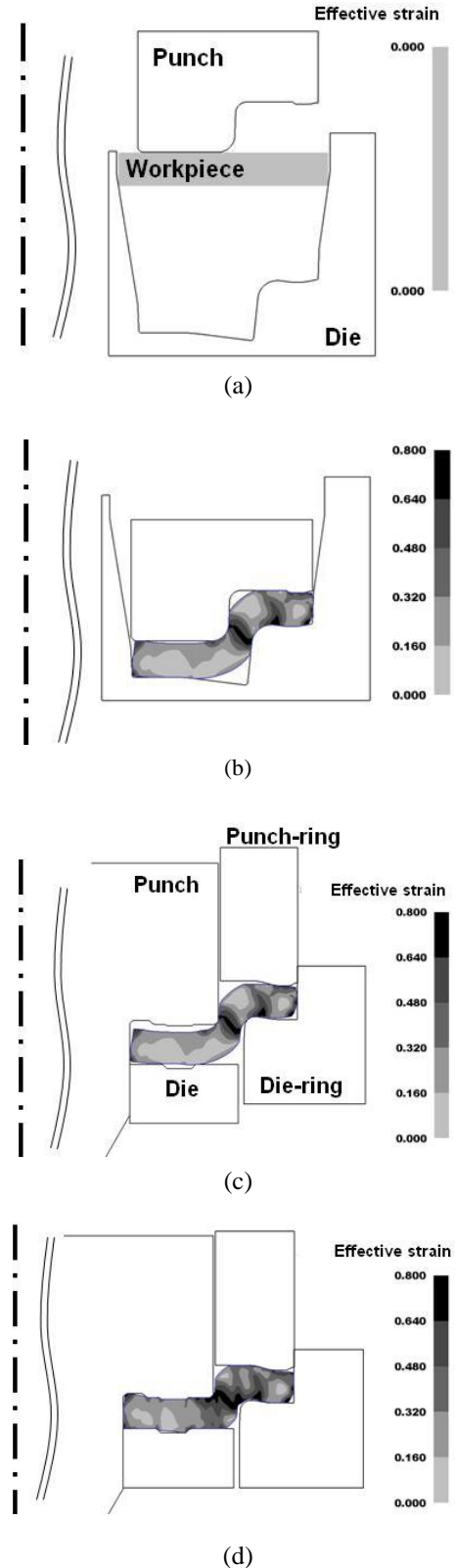


Fig. 7 FE result with respect to each stage in proposed die: (a) initial set-up; (b) 1-stage; (c) 2-stage; (d) final shape at 2-stage

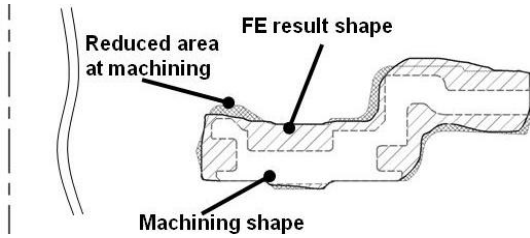


Fig. 8 Comparison of forged shape with machining line in FE analysis

Table 1 Analysis result for punch load

Process	Load (tons)	
	conventional process	proposed process
Stage 1	880	875
Stage 2	840	902
Stage 3	870	-

분할 금형을 이용한 언더 드라이브 브레이크 성형 해석 시 Table 2에서 제시된 바와 같이 1000ton 미만의 하중을 보였으며, 실제 성형에 사용되는 장비는 1000ton 너클 프레스(knuckle press)이다. 축대칭형상의 일체형 금형 형상을 이용한 성형 해석 시 최대 성형 예상 하중은 약 905ton으로 측정되었으며, 실제 성형 시 1000ton 너클 프레스에 적용이 가능할 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

본 논문은 분할 금형을 이용하여 언더 드라이브 브레이크 피스톤 냉간 성형 시 발생하는 단점에 대하여 분석하였다. 이러한 단점들을 개선하여 냉간 단조 및 후속 공정의 효율을 증가시키고자 하였다. 냉간 단조 공정 개선을 위하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 해석 프로그램은 DEFORM-2D와 3D를 이용하였다.

(1) 분할 금형을 이용하여 언더 드라이브 브레이크 피스톤 성형 시 분리된 금형 사이의 간격으로 인하여 플래쉬가 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 플래쉬는 최종 기계 가공 형상에는 영향을 미치지 않으나, 불필요한 성형 하중을 발생시키고, 후속 공정의 효율을 저하시키는 단점이 있다.

(2) 언더 드라이브 브레이크 피스톤 성형 시 냉간

단조 효율을 증가시키기 위하여 일체형 금형을 이용하여 성형 해석을 수행하였으며, 총 3단계로 수행되는 성형을 총 2단계로 축소하여 성형 해석을 진행하였다. 일체형 금형을 사용하여 플래쉬가 생성되지 않았으며, 실제 냉간 단조에서 제안된 성형 해석 공정과 동일하게 실시할 경우 공정 감소로 인하여 언더 드라이브 브레이크 냉간 단조 생산성이 향상될 것으로 예상된다.

(3) 제안된 성형 해석 공정으로 실제 성형을 실시하였다고 가정하였을 때, 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 블랭킹 및 피어싱 후 성형을 위한 투입 중량은 약 6%(765g→720g)감소한다. 투입 중량이 감소됨에 따라 Fig. 8에서 제시된 바와 같이 기계가공시 가공 여유가 감소하는 영역(Reduced area of machining)이 발생시켜, 후속 공정의 효율을 증가시키고자 하였다.

(4) 일체형 금형을 적용하였을 때 사용 가능한 장비를 검토하기 위하여 해석 하중을 분석하였다. 기존 분할 금형을 적용한 실제 성형은 1000ton 너클 프레스(Knuckle Press)에 적용되고 있다. 공정 개선을 위하여 제안한 일체형 금형의 성형 해석 예상 하중은 약 902ton 미만으로 측정되어 기존 장비에 적용 가능할 것으로 분석된다.

#### REFERENCES

- [1] T. Altan, M. Knoerr, 1992, Application of the 2D Finite Element Method to Simulation of Cold-forging Processes, J. Mater. Process. Technol., Vol. 35, No. 3, pp. 275~302.
- [2] H. Yeo, K. Park, K. Hur, 2006, Evaluation of the Forging Process by the Application of Optimization Technology, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 3, pp. 225~231.
- [3] S. Fusikawa, H. Yoshioka, S. Shimamura, 1992, Cold- and Warm-forging Applications in the Automotive Industry, J. Mater. Process. Technol., Vol. 35, No. 3, pp. 317~342.
- [4] T. Dean, 2000, The net-shape Forming of Gears, Mater. Design, Vol. 21, No. 4, pp. 271~278.
- [5] I. Moriguchi, 1992, Cold Forging of Gears and Other Complex Shapes, J. Mater. Process. Technol., Vol. 35, No. 3, pp. 439~450.

- [6] M. Merklein, J. Allowood, B. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, A. Tekkaya, A. Weckenmann, 2012, Bulk Forming of Sheet Metal, CIRP Ann.-Manuf. Technol., Vol. 61, No. 2, pp. 725~745.
- [7] M. Merklein, J. Koch, S. Opel, T. Schneider, 2011, Fundamental Investigations on the Material Flow at Combined and Bulk Metal Forming Processes, CIRP Ann.-Manuf. Technol., Vol. 60, No. 1, pp. 283~286.
- [8] J. Yoon, H. Jeon, J. Lee, 2013, Process Design of Cold Forging with Thick Plate for Seat Recliner Parts, Mater. Design, Vol. 49, pp. 449~455.