

# 변속기용 허브 부품 제조를 위한 열간 및 냉간 복합단조 공정 개발

조아라<sup>1,2</sup> · 정명식<sup>1</sup> · 이상곤<sup>1</sup> · 조용재<sup>1</sup> · 황선광<sup>1,#</sup>

## Development of Hot and Cold Forging Process for Manufacturing a Hub of Dual Clutch Transmission

A. R. Jo, M. S. Jeong, S. K. Lee, Y. J. Cho, S. K. Hwang

(Received August 27, 2019 / Revised November 25, 2019 / Accepted November 25, 2019)

### Abstract

In this study, a hot and cold forging process was investigated to produce a complex-shaped hub of dual clutch transmission with low material loss and high productivity. The process was designed by the commercial finite element (FE) analysis program, DEFORM-2D (hot forging) and 3D (cold forging). And, the material flow and ductile fracture characteristics were studied to check the surface crack initiation of the specimen. The simulation results indicated that the proposed process could manufacture the complex-shaped hub with no surface crack and high-efficiency compared to the conventional machining process. For verification the numerical results, the hub of the SCM440 was fabricated by the proposed process and the mechanical properties and microstructure evolution were studied. It was demonstrated that the suggested hot and cold forging process might be useful in producing the key components of the automobile industry as a high-efficiency and environmentally friendly process.

**Key Words** : Hot and Cold Forging, Dual Clutch Transmission, Ductile Fracture, SCM440, Microstructure

### 1. 서론

차세대 변속기로 각광받고 있는 듀얼 클러치 변속기(DCT)는 2개의 클러치를 교대로 사용함으로써 빠른 변속이 가능하며 동력손실을 최소화할 수 있는 특징이 있다. 또한 수동변속기의 연비효율과 자동변속기의 운전편의성 등의 장점을 합친 변속기로 최근에는 고성능 차량뿐만 아니라 일반 차량에도 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2].

DCT의 주요 부품 중의 하나인 허브(Hub)는 고온, 고압, 일정 토크에 견딜 수 있는 기계적 물성치 및 형상이 요구되며, 일반적으로 열간단조로 예비성형 후 CNC 가공으로 제조되어 왔다. 최근에는 부품의

소형화 및 박육화 흐름에 따라 여러 부품들과의 상호 결합성을 높이기 위해 두께 범위가 넓고 복잡한 형상의 허브 제조가 요구된다. Kim 등[3]은 원 웨이 클러치 이너 레이스를 다단 열간단조 후 CNC 공정으로 제조하는 공정을 제안하였으며 기계가공 공정을 최소화할 수 있는 정밀성형 공정을 연구하였다. 하지만, 높은 강도가 요구되는 제품 특성으로 인해 추가 Q/T 및 고주파 열처리 공정이 진행되어 공정상의 제조비용 상승 및 생산성 저하가 예상된다. 이를 개선하기 위해 냉간단조 공정이 응용된 복합단조 공정이 개발되었지만, 대부분 두께 7 mm 이상의 제품 제조에 적용되어 소형화 및 박육화 요구를 만족시키는데 한계가 있다[4,5].

따라서 본 연구에서는 복합단조 공정 개발을 통해 두께 범위 약 1.8~25 mm의 자동차용 DCT 허브 제품

1. 한국생산기술연구원 극한가공기술그룹

2. 부산대학교 기계공학부

# Corresponding Author : Extreme Fabrication Technology Group, Korea Institute of Industrial Technology, E-mail: skhwang@kitech.re.kr, ORCID : 0000-0001-6388-3400

을 제조하고자 한다. 이를 위해 열간단조(예비성형체 제조) 및 냉간단조(정밀성형 및 높은 기계적 물성치 확보) 공정이 결합된 복합단조 공정을 개발하고자 한다. 제안된 공정의 타당성을 얻기 위해 상용 유한요소해석 프로그램을 통한 복합단조 공정 설계 및 성형해석을 수행하였으며, 제조된 시제품의 평가를 위해 미세조직 및 기계적 물성치 분석을 실시하였다.

### 2. 기계적 물성치 분석

공정설계 해석을 위한 기계적 물성치 확보 및 성형성 평가를 위해 가이드 포스트가 설치된 만능재료 시험기(ZWICK Z250)로 압축시험을 수행하였다. 시험속도는 0.05 mm/s이며 시편 표면에 구리스를 도포하였다. 소재는 합금강인 SCM440으로 구상화 열처리 효과를 알아보기 위해 열처리 전/후 소재를 사용하였으며 구상화 열처리 조건은 Fig. 1과 같다.

Fig. 2(a)의 압축시험 데이터를 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D의 기본 물성으로 활용하였으며, 공정설계 시 제품의 성형성 평가를 위해 연성 파괴식(Normalized Cockcroft-Latham)을 적용하였다 [6,7]. Fig. 2(b)에 도시된 열처리 전/후 소재의 압축시험과 연성파괴 해석의 비교로부터 임계손상지수를 도출하였다. 구상화 열처리 소재의 임계손상지수는 0.682로 초기 소재(0.288)에 비해 크게 증가하였다. 따라서 본 연구에서는 성형성이 우수한 구상화 열처리된 소재를 공정해석에 이용하고자 하며, 임계손상지수가 0.682를 넘지 않도록 복합단조 공정 설계를 고려하였다.

### 3. 복합단조 공정 유한요소 해석

Fig. 3에 도시된 최종 제품 형상의 허브를 제조하기 위해, 복합단조 공정을 DEFORM-2D/3D를 활용하

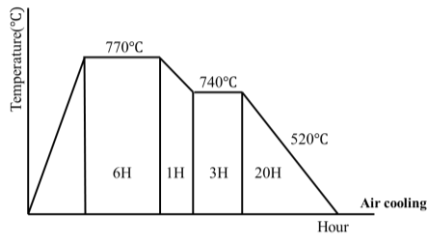
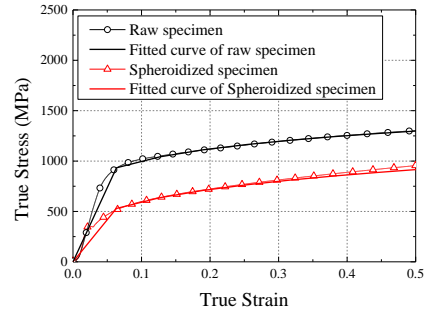
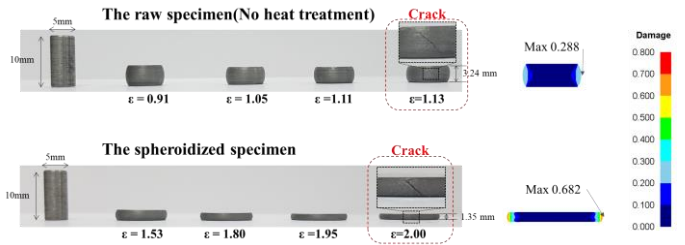


Fig. 1 Spheroidizing heat treatment history



(a) Flow stress curves



(b) Ductile fracture analysis

Fig. 2 Compression test results

여 설계하였다. 최종 제품에 가까운 예비성형체 제조를 위해 열간단조 공정(DEFORM-2D)을 우선 진행하고, 정밀성형 및 기계적 물성치 확보를 위한 냉간단조 공정(DEFORM-2D-3D, 1/16모델)을 진행하였다.

#### 3.1 열간단조 공정 해석

열간단조에 사용된 소재물성치는 DEFORM-2D의 DB중 SCM440을 사용하였으며, 해석조건은 실제 조건과 유사하도록 프레스 속도 0.3 mm/s, 전단마찰계수 0.3, 열전달 계수 5 N/sec/mm/C, 금형온도 400 °C, 소재온도 1,200 °C로 적용하였다. 초기소재를 3단계 열간단조 성형을 수행하였으며, 각 단계에서의 하중 분포와 변형률 분포를 Fig. 4에 도시하였다. 3단계 공정에 있어서 하중 편차가 크지 않게 설계가 이루어진 것을 확인할 수 있으며, 최대 하중 값은 3단계 피어싱 공정에서 1,580톤으로 파악된다.

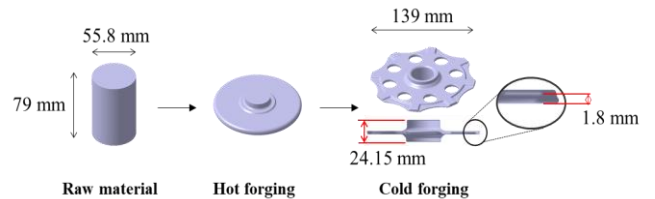
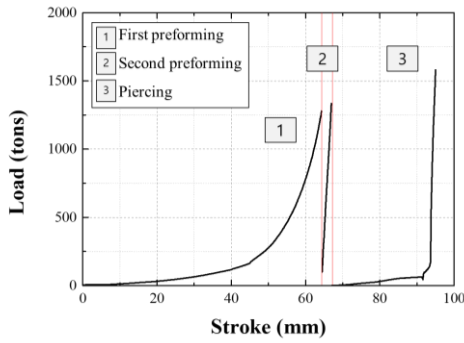
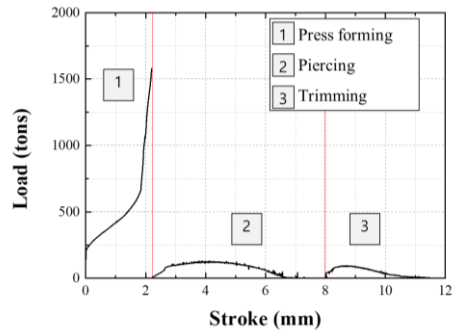


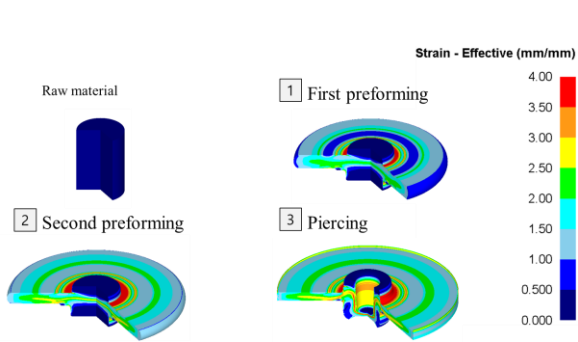
Fig. 3 Proposed manufacturing procedure of hub



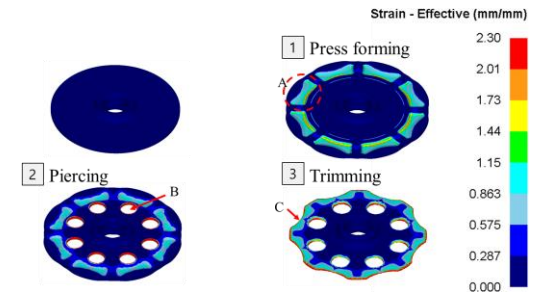
(a) Load-stroke curve



(a) Load-stroke curve



(b) Effective strain distribution



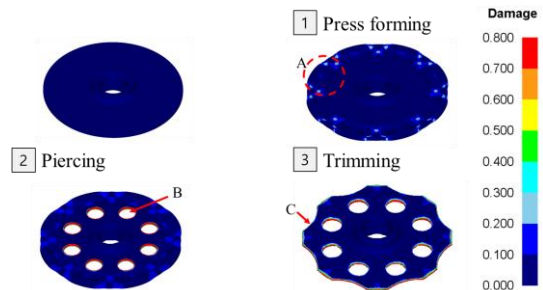
(b) Effective strain distribution

Fig. 4 Numerical results of hot forging process

해당 열간단조 시 적절한 성형하중 확보를 위해서는 1,600톤 이상의 프레스 장비 사용이 필요하며, 빌렛 사이즈 제어와 금형응력 해석 등을 통한 파손 예측이 필요하다. Fig. 4(b)의 유효변형률 분포에 따르면, 공정이 진행됨에 따라 성형이력 누적으로 인한 유효변형률이 증가하는 경향을 확인 할 수 있다. 최대 유효변형률은 3단계 피어싱 공정에서 나타나며, 후속 냉간단조 공정 시 해당 열간단조 성형이력의 영향을 최소화하기 위해 열처리를 진행하고자 한다.

### 3.2 냉간단조 공정 해석

열간단조 후 예비성형체를 냉간단조 공정의 초기 소재로 적용하였다. 열간단조의 성형이력은 열처리 적용으로 인해 무시하였으며, Fig. 2(a)의 구상화 열처리 소재 물성을 해석에 사용하였다. 냉간단조 성형 공정은 프레스 속도 10 mm/s, 주변 및 금형온도 20 °C, 전단마찰계수 0.1로 설정하였다. 프레스 성형(Press forming), 피어싱(Piercing), 트리밍(Trimming) 공정의 3단계로 진행하였으며, 연성파괴식과 요소제거법(Element removal method)을 적용하였다.



(c) Ductile fracture analysis

Fig. 5 Numerical results of cold forging process

Fig. 5는 냉간단조 공정의 성형해석 결과로, 1단계 공정인 프레스 성형 시 Fig. 5(b), (c) A영역의 최소 두께 1.8 mm 파트 제조로 인해 가장 높은 하중 값을 나타냈다. 또한, 그림에서부터 해당 영역의 유효 변형률 및 임계손상지수가 가장 높음을 확인할 수 있으나, 구상화 열처리 소재의 임계손상지수(0.682) 보다 낮은 0.532로 예측이 되어 공정 중 제품 결함을 피할 수 있을 것으로 판단하였다. 피어싱(B영역) 및 트리밍(C영역) 공정에서는 소재 이탈에 의한 임계손상지수 초과로, 실제 목표 형상에 맞게 소재가 제거되는 것을 확인하였다. 그 외의 파트에서는 임계손상지수를 넘지 않아 냉간 성형 시 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

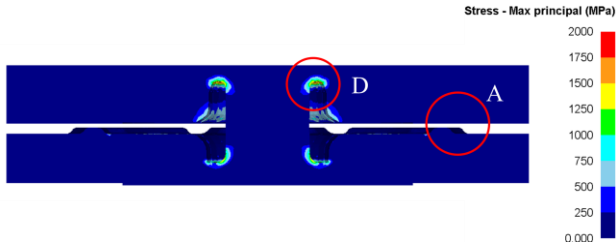


Fig. 6 Maximum principal stress distributions of die stress analysis

### 3.3 금형응력 해석

냉간단조 공정의 금형 설계 타당성을 평가하기 위해 성형하중이 가장 높은 1단계 프레스 성형 공정을 금형응력 해석에 적용하였다. 금형파손은 주로 반복적인 인장응력에 의해 발생하기 때문에 최대 주응력을 비교 분석하였다[8-11]. 금형소재는 일반적인 냉간 금형강인 SKD-11로, 해석 시 DEFORM-3D의 DB를 사용하였다.

Fig. 6의 해석결과로부터 A영역의 두께 1.8 mm 파트 제조 부분에서 최대 주응력 855 MPa, D영역의 두께 24.15 mm 파트 제조 부분에서 최대 주응력 1,580 MPa이 파악된다. 이는 SKD-11의 최대 인장강도인 2,150 MPa보다 낮은 값으로, 해당 금형 및 공정 설계는 적절하다고 판단된다.

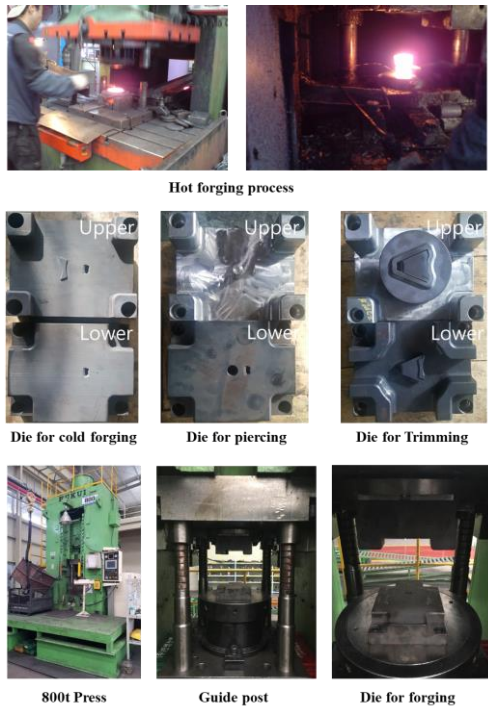


Fig. 7 Experimental set-up of hot and cold forging processes

## 4. 복합단조 공정 실험

### 4.1 냉간단조 금형 및 시제품 제작

앞선 유한요소해석 결과를 토대로 금형 제작 및 시제품 제조를 수행하였다. 실험에는 제품의 형상 대칭을 활용하여 소재와 금형은 1/8 조각으로 분할 제작하였으며, 해석과 동일하게 각각 SCM440, SKD-11을 사용하였다.

Fig. 7은 열간단조 및 냉간단조 공정의 금형과 프레스 장비를 나타내며, 해당 장비를 활용하여 Fig. 8과 같은 공정 순서도에 따라 복합단조 공정으로 시제품을 제조하였다.

초기소재에서 최종 제품에 이르기까지, 단계별 공정 진행 중 표면 결함 및 금형 파손 등의 문제점은 발견되지 않았다. Fig. 9의 최종 제품 형상 비교에서 기존 CNC 가공품과 동일한 형태의 DCT 허브를 성공적으로 제작할 수 있었다.

### 4.2 내부결함 관찰 및 경도 측정

Fig. 10에 열간단조 및 냉간단조 공정을 거친 시제품의 단면 형상 및 경도 측정값을 도시하였다.

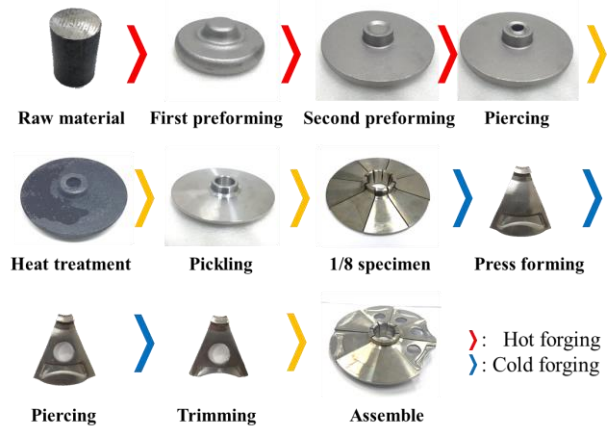


Fig. 8 Manufacturing procedure of hub

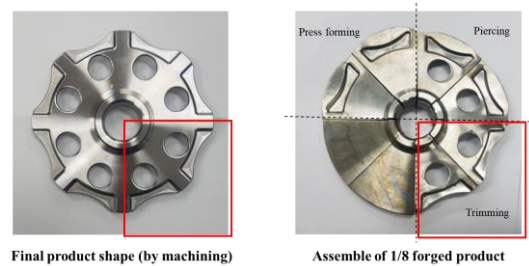
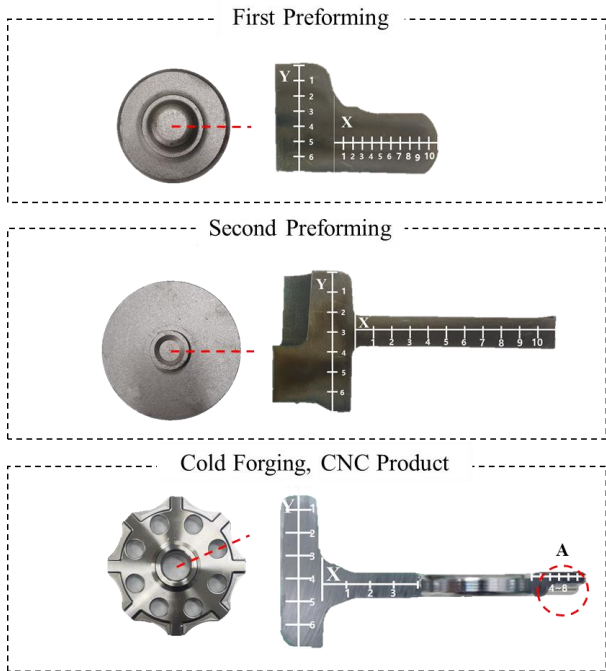
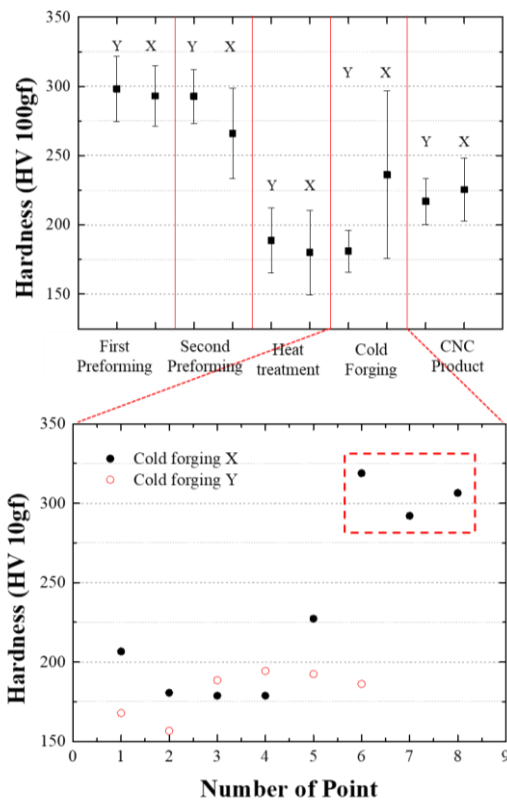


Fig. 9 Comparison of final product shape





(a) Cross-section of hub and location of hardness measurement



(b) Results of measurement

Fig. 10 Vickers micro-hardness results of the hub

단면 관찰로부터 내부 결함이 없는 제품을 성공적으로 제조할 수 있음을 확인하였다.

경도측정을 위해 마이크로 비커스 장비(AMT-X7FS Type B)를 사용하였으며, 압입하중 100 gf과 유지시간 10초를 적용하였다. 허브 제품의 형상 특성에 따라 제품의 중심에서 끝단까지 세로(Y) 6 포인트, 가로(X) 8~10 포인트를 각각 측정하였다.

측정 결과, 열간단조 후 소재는 추가 열처리 공정을 거치면서 약 185 HV로 경도값이 낮아 졌으며, 냉간단조 공정 후 가장 높은 경도값을 필요로 하는 A 영역(X 6~8번)의 평균 경도값이 약 300 HV로 162% 증가하였다. 또한, 해당 값은 기존 원소재를 CNC 가공한 시제품의 동일 위치에서의 경도값 225 HV보다 약 133% 높아 냉간단조 공정을 통해 향상된 기계적 물성치를 확보할 수 있음을 확인하였다.

### 4.3 미세조직 관찰

미세조직 변화를 관찰하기 위해 폴리싱 및 에칭(Nital 10%) 처리한 시편을 광학현미경(1,000 배율)으로 Fig. 11과 같이 관찰하였다. 초기 및 열간단조 시편의 경우 봉재 제조와 고온 성형 시, 소재가 약 900~1,200 °C에서 성형된 후 냉각이 이루어져 저온 변태 조직이 확인된다. 구상화 열처리된 소재는 Ferrite와 Cementite의 Pearlite 조직을 나타내며, 냉간단조 시편의 경우 해당 열처리 소재를 활용하였기

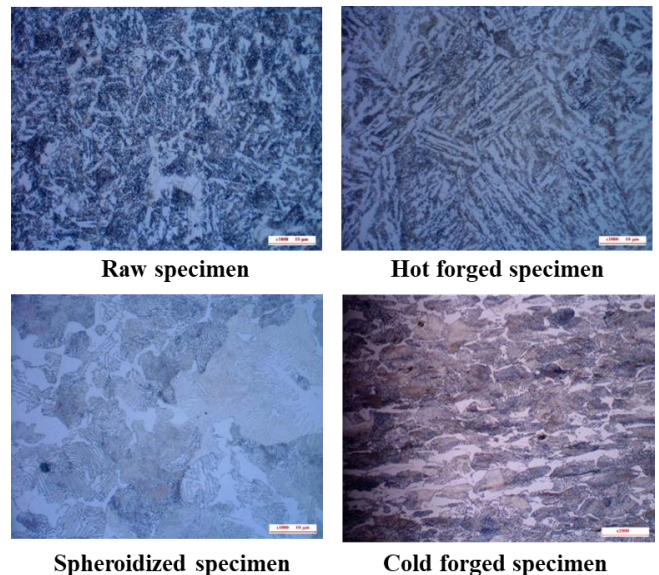


Fig. 11 Comparison of microstructure evolution during the process

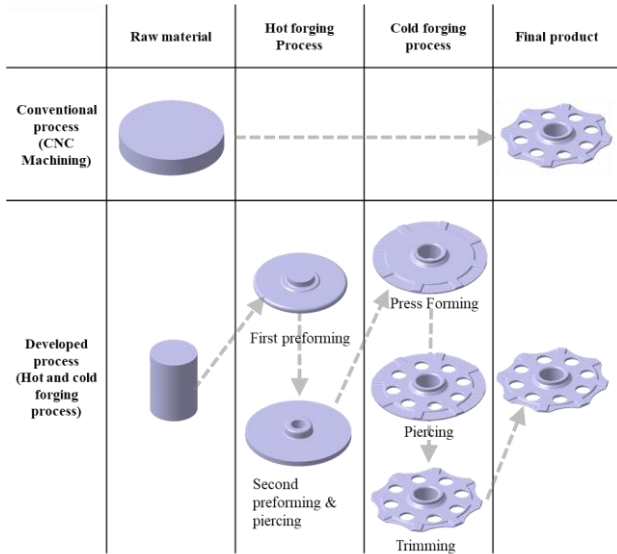


Fig. 12 Manufacturing procedure comparison

Table 1 The comparison of material recovery rate

	Conventional process	Developed process
Final product volume (mm <sup>3</sup> )	5.097 X 10 <sup>4</sup>	
Raw material volume (mm <sup>3</sup> )	3.8484 X 10 <sup>5</sup>	1.9319 X 10 <sup>5</sup>
Material recovery rate (%)	13.24	26.38

에 가공방향에 따라 결정립이 연신되며 미세화되는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 결정립의 미세화는 앞 4.2절의 경도 변화의 원인으로 파악된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 Fig. 12와 같이 열간 및 냉간단조를 순차적으로 수행하는 복합단조 공정을 개발하였다. 해당 공정을 통해 두께 범위 약 1.8~25 mm의 자동차용 DCT 허브 제품을 성공적으로 제조할 수 있었으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 열간 및 냉간단조의 순차적 복합단조 개발을 위해 연성과괴식 및 요소제거법이 적용된 유한요소 해석을 사용하였으며, 공정 및 금형 설계안을 도출

하였다.

(2) 도출된 설계안을 토대로 열간 및 냉간단조용 금형을 제작하였으며, 프레스 장비를 활용하여 시제품을 제조하였다.

(3) 시제품의 단면 관찰 및 경도 측정을 통해 내부 결함 없이 우수한 기계적 물성치를 가지는 자동차용 DCT용 허브를 평가하였다.

(4) 미세조직 관찰을 통해 초기 및 열간 성형 소재의 저온변태 조직을 확인하였으며, 구상화 열처리된 소재의 냉간 성형 후 결정립의 미세화 및 가공 방향으로 연신됨을 확인하였다.

(5) Table 1의 소재회수율 비교를 통해 원소재를 CNC 가공하는 기존 공정대비 제안된 복합단조 공정을 통해 소재 회수율을 약 2배(26.38%) 향상시켰음을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 한국생산기술연구원에서 수행하게 된 연구입니다.

### REFERENCES

- [1] T. A. Dean, 2000, The Net-Shape Forming of Gears, Mater. Des. Vol. 21, No. 4, pp. 271~278.
- [2] M. S. Kang, M. S. Jeon, J. U. Kim, S. M. Kang, B. R. Jeon, 2003, Development of a Sequence of Compound Forging Processes for Small Pulleys by the Forging Simulation Technique, Trans. Mater. Process. Vol. 12, No. 1, pp. 66~71.
- [3] H. J. Kim, C. K. Jin, 2018, Process Design Molding with Precision Hot Forging of One-Way Clutch Inner Race, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. Vol. 17, No.4, pp. 83~90.
- [4] K. O. Lee, J. M. Kim, J. S. Je, S. S. Kang, 2006, Development of Precise Clutch Gear for Automobile Transmission by Compound Forging Process, J. Kor. Soc. Precis. Eng. Vol. 23, No. 1, pp. 185~192.
- [5] Behrens, B. -A., E. Doege, 2004, Cold Sizing of Cold- and Hot Formed Gears, Annals of the CIRP, Vol. 53, No. 1, pp. 239~242.
- [6] M. S. Joun, H. K. Moon, M. C. Lee, D. Y. Suh, 1996,

- Finite Element Analysis of Compound Forging Processes, J. Kor. Soc. Precis. Eng., pp. 546~550.
- [7] C. McCormack and J. Monaghan, 2001, A Finite Element Analysis of Cold-Forging Dies Using Two- and Three-Dimensional Models, J. Mater. Process. Technol. Vol. 118, No. 1, pp. 286~292.
- [8] D. C. Ko, B. M. Kim, 2000, The Prediction of Central Burst Defects in Extrusion and Wire Drawing, J. Mater. Process. Technol. Vol. 102, No. 1, pp. 19~24.
- [9] B. M. Kim, H. S. Choi, M. J. Chang, J. H. Bae, S. B. Lee, D. C. Ko, 2008, Development of High Precision Plate Holder in Automotive Seat Recliner by Mechanical Press( I ) -Application of FCF Method, J. Kor. Soc. Precis. Eng. Vol. 25, No. 7, pp. 55~63.
- [10] K. S. Lee, G. Y Kim, Y. S. Ahn, 2018, Study on the Optimum Design of the Insert Ring and Shrunk Ring of the Cold Forging Die for an Automotive Wheel Nut, Trans. Mater. Process. Vol. 27, No. 3, pp. 165~170.
- [11] M. C. Lee, M. S. John, 2008, Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Multi-Stage Automatic Cold Forging Processes by Combined Analyses of Two-Dimensional and Three-Dimensional Approaches, Trans. Mater. Process. Vol. 17, No.3, p. 155~160.