

자동차 허브 베어링용 씰 금속부품의 판재성형 및 판단조의 복합성형 공정 개발

박기근¹ · 문호근² · 오상균³ · 전만수[#]

Development of Combined Sheet Metal Forming and Plate Forging of a Metal Seal Part of Hub Bearing for an Automobile

K. G. Park, H. K. Moon, S. K. Oh, M. S. Joun

(Received May 12, 2020 / Revised June 1, 2020 / Accepted June 11, 2020)

Abstract

In this paper, experimental and numerical study on a combined sheet metal forming and plate forging of a seal part of a passenger car's hub bearing is conducted to develop the new process of which target is to remove machining process by plate forging and to achieve near-net shape manufacturing. The previous process of a sheet metal forming inevitably needed a machining process for making stepped sheet after conventional sheet metal forming in a progressive way. The stepped sheet is intended to be formed by plate forging in this study. Through the systematic way of developing the combined forming process using solid elements based-elastoplastic finite element method (FEM), several conceptual designs are made and an optimized process design in terms of geometric dimensioning and tolerance of straightness of the thin part is found, which is exposed to bending in metal forming of axisymmetric part. The predicted straightness measured by the slope angle of the tilted thin region is compared with the experimental straightness, showing that they are in a good agreement with each other. Through this study, a systematic approach to optimal process design, based on elastoplastic FEM with solid elements, is established, which will contribute to innovating the conventional small-scaled sheet metal forming processes which can be dealt with by solid elements.

Key Words: Bearing Seal, Plate Forging, Press Stamping, Progressive, Cold Forging, Hybrid Mold

1. 서 론

최근 자동차산업은 친환경의 시대적 요구로 전통의 화석연료에서 전기와 연료전지 등으로 연료원이 대체되고 있다. 그리고 자동차부품산업 분야에서는 연비 향상을 위한 경량화, 전자장치가 부가된 모듈화, 내구성 향상을 위한 성능강화 등이 핵심 쟁점으로 부각되고 있다[1]. 기존의 체적 소성가공에 의존하는 부품들도 이러한 시대적 요구에 대응하기 위하여 진화하고 있다. 최근 들어 무게를 줄이기 위하

여 중실축이 중공축으로 대체되고 있고, 다양한 분야에서 판단조 기술이 적용되고 있다[2].

판단조는 가격과 품질 양면에서 유리한 부분이 많다. 판단조는 유연한 소재의 재배치, 즉 판재성형에서 단조 기술의 접목, 판재의 두께 변경, 굽힘 변형 등을 특징으로 한다. 뿐만 아니라, 판재의 고강도화를 통한 경량화 및 절삭가공 최소화를 위해 판단조 기술이 자동차 부품에 적용되고 있다[3]. 판단조 공정에 대한 해석 기술이 연구자들의 큰 관심사가 되고 있다. Joun 등[4]은 체적소성가공 공정 해석 기술을 판재성형가공 해석 문제에 적용하는데 발생하는 문제점을 제시하고, 솔리드 요소를 이용한 유

1. ㈜태진다이텍 기술연구소, 연구소장

2. ㈜엠에프알씨 기술연구소, 연구소장

3. (재)대구기계부품연구원 금형기술연구팀, 팀장

Corresponding Author: School of Mechanical Engineering /Engineering Research Institute, Gyeongsang National University,

Email:msjoun@gnu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-1678-5415

한요소해석[5]을 통하여 판단조 공정 해석 기술에 필요한 요소기술을 소개하였다.

판재-체적 복합 소성가공 및 판단조 기술은 소성가공 장비 기술이 발전한 독일과 일본에서 널리 발전하였다. 이것은 관련 기술들이 새로운 장비 기술에 의존적이기 때문에 사료된다[6]. Merklein 등[7]은 새롭게 부상하는 판재-체적 복합 소성가공 공정(sheet-bulk metal forming process)에 관하여 요약하였으며, Mori 등[8]과 Nakano [9]는 일본의 판단조 기술과 판재성형에 관하여 요약하였다.

경량화를 목적으로 튜브재 및 후판재의 적용이 점증하면서 판단조 기술의 발전이 가속되고 있다. 특히 일본 등지를 중심으로 이 기술은 매우 활발하게 연구되어 왔으며, Nishino 등[10]은 일체형 폴리피스톤에 대해 두께 균일화 및 고강도화와 판단조 기술을 적용한 국부 두께증가방법에 대한 기초기술을 소개하였다. Merklein 등[11]은 업세팅과 측면 압출 및 딥 드로잉과 업세팅의 판재-체적 복합 소성가공 공정에 관한 실험적 연구를 통하여 기존의 기술과의 차이를 확인하였으며, 판재-체적 복합 소성가공 기술의 발전 방향에 관하여 논하였다. Mori 등[12]은 사각 딥드로잉 공정에서 두께가 다른 소재(tailored blank)를 사용한 판단조 공법이 하부의 모서리에서 소재의 두께와 최대 높이 양면에서 균일 두께 소재에 비하여 효과적임을 실험적으로 밝혔다.

국내에서도 판재성형 분야에서 활발한 연구가 진행되었으며, Yoon 등[13]은 파인블랭킹에 의존하던 시트 리클라이너 부품(seat recliner parts)에 냉간단조 기술을 적용함으로써 중량, 재료의 강성, 표면거칠기 등에서 우수한 결과를 얻었다. Kim 등[14]은 SPCC(cold rolled steel sheet) 소재의 원통컵 드로잉 공정에서의 초음파 진동효과를 분석하기 위한 실험 및 유한요소해석을 수행하고 초음파가진 특성을 마찰계수의 변화로 표현함으로써 이를 정량화하고자 하였다. Kim 등[15]은 판단조 공법을 활용하여 재료의 낭비와 제조시간을 최소화하는 방법을 제시하였으며, 노트북 케이스 금형을 제작하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. Jung 등[16]은 차체 양산부품을 대상으로 340~780MPa급 고강도 강판의 판재성형 공정의 해석결과와 실험결과를 성형성과 스프링백 관점에서 정량적으로 비교함으로써 CAE의 예측 정확도를 고찰하였다.

이 연구에서는 균일 두께의 금속판재로부터 두께

변화가 뚜렷한 허브 베어링 셸(seal)의 외판(outer plate)을 제조하는 방법으로 프로그레시브 공법과 트랜스퍼 공법으로 이루어진 하이브리드 공법을 제시한다.

2. 판재성형 및 판단조 복합공정의 설계

2.1 연구대상의 정의

이 연구에서 개발하고자 하는 대상은 판단조의 공법과 복합성형 기술이 적용되는 자동차 부품의 일부인 허브 베어링 셸의 외판이다. 이 연구에서 대상으로 삼은 셸 부품이 장착되는 허브 베어링[17,18]은 자동차 구동장치의 핵심부품 중에 하나이다. Fig. 1의 허브 유니트 베어링 셸 부품은 고무 재질의 립(Lip)과 금속 재질(SUS430/SPCC)의 외판(outer plate/insert)과 내판(inner plate/flinger)이 결합된 구조로 허브 베어링으로 유입되는 이물질을 막고 그리스 누설을 방지함으로써 원활한 주행과 구동 효율의 극대화를 목적으로 한다.

기존의 허브 베어링 셸 부품 외판(outer plate)의 제조공법은 하중에 의한 의도적 두께 변화가 배제된 단발복합금형(compound)에 의한 프로그레시브 판재성형(progressive sheet metal forming)과 절삭가공으로 이루어져 있다. 이 공법은 절삭가공 때문에 가격 경쟁력이 떨어진다. 이 문제를 개선시키기 위해 성형 과정에서 두께의 변화가 가능한 판단조를 적용함으로써 절삭가공 공정을 제거하고자 한다. Fig. 2에 기존 제조공정과 개선된 제조공정을 비교하였다.

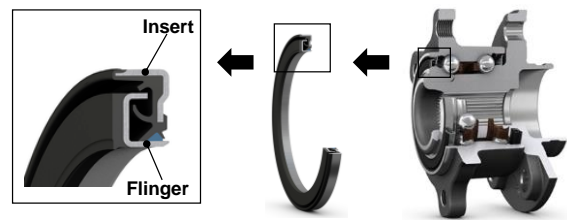


Fig. 1 Hub unit bearing with emphasis on the seal
(Source: SKF_catalog)

허브 베어링 셸 부품 외판에서 굽힘 성형부에 고무 몰딩이 형성됨으로 굽힘 성형부의 형상은 셸 립(seal lip)의 위치 정밀도에 큰 영향을 미친다. 따라서 허브 베어링 셸 부품 외판은 베어링 셸 부품의 품질을 결정하는 중요 부품이다.

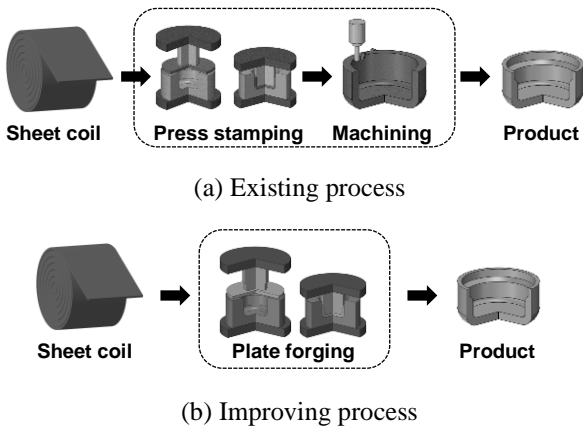


Fig. 2 Comparison between conventional and new processes

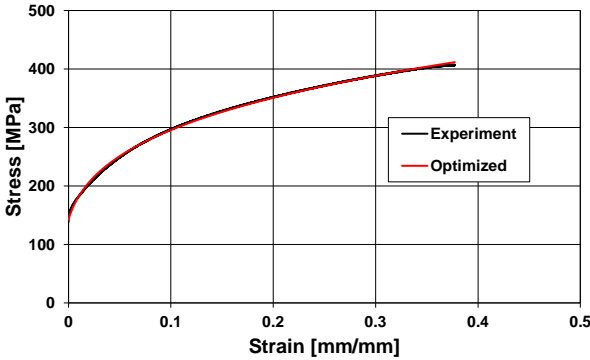


Fig. 3 Comparison of optimized flow stress curve with experimental curve

허브 베어링 쉘 부품 외관의 소재는 JIS G3141 SPCC-S이다. 이 재료의 유동응력 특성을 파악하기 위하여 성형에 투입되기 직전의 소재(두께 0.6mm)를 인장시험을 하였다. 소재의 유동응력 곡선은 Swift 모델로 표현되었으며, 인장시험으로 획득된 하중-변위 곡선[19]과 이 모델로 예측된 유동응력 곡선의 차이를 최소화시키는 방식으로 Swift 모델의 재료상수 $Y_0=143.8\text{MPa}$, $b=0.0068$, $n=0.26$ 등을 결정하였다. Fig. 3에서 실험결과와 비교하고 있으며, 최대 오차는 0.03%이다.

2.2 복합공정의 설계

프로그레시브 판재성형 공정은 생산성 측면에서 유리하지만 소재의 성형 측면에서 한계가 있다. 반면, 트랜스퍼 공정은 성형 한계 측면에서 강점이 있지만, 프로그레시브 공법의 장점을 극복하는 데는

한계가 있다. 따라서 프로그레시브 공법의 장점과 트랜스퍼 공법의 장점을 융합한 판재-체적 복합 소성가공 공법이 제품에 따라서 유리할 수가 있다. 특히 이 논문의 연구 대상인 허브 베어링 쉘 부품 외관은, Fig. 4의 공정 개념도에서 보는 바와 같이, 4단의 프로그레시브 공정과 2 단의 트랜스퍼 공정으로 이루어져 있다. 전반부의 4단까지는 초기형상의 제조를 목적으로 하며, 그 정밀도가 최종 제품에 크게 영향을 미치지 않는다. 반면 5단에서 판재의 두께 변화를 초래하며, 변화된 두께의 영향으로 6단에서 형상변화가 발생하며, 그 양이 설계에 민감하게 영향을 미친다.

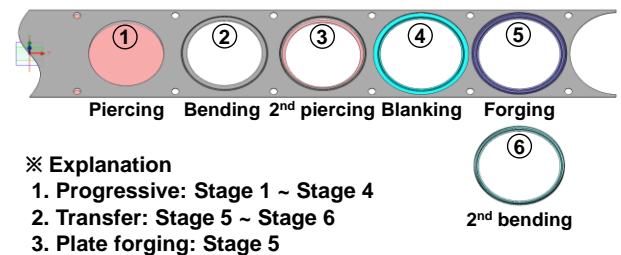


Fig. 4 Conceptual lay-out of a hybrid forming process

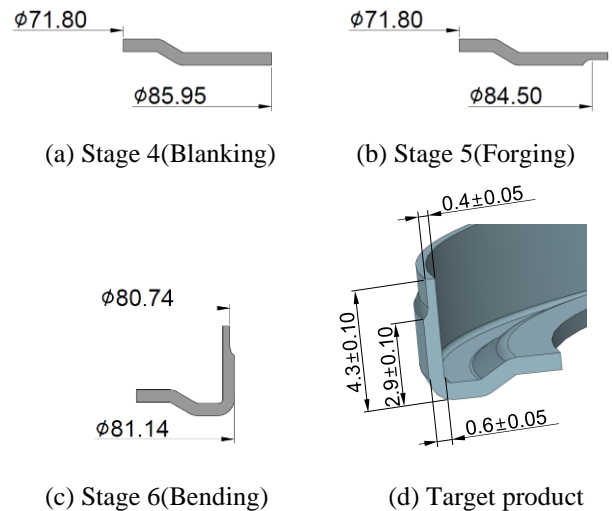


Fig. 5 Conceptual drawings of the hybrid forming process

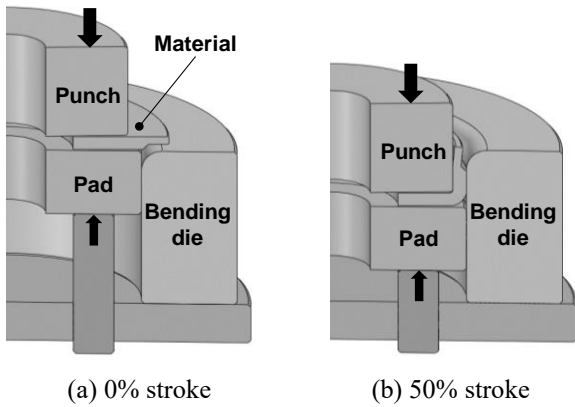
Fig. 5의 (a)는 4단 블랭킹 공정의 내경(70.0mm) 및 외경(86.0mm)이며, (b)는 5단 종료 시의 판단조품 단면의 치수이다. (c)는 6단 종료 시의 굽힘 공정의 치수이며, (d)는 최종제품의 주요 치수를 나타낸다.

Fig. 6은 트랜스퍼 공정인 굽힘 공정의 금형구조도이다. 이 공정의 특징은 5단에서 판단조를 실시하여 부분적으로 판재의 두께를 변화시키며, 이것을 6단에서 굽힘 가공을 실시함으로써 기존의 절삭가공을 배제하는 것이다. 문제는 Fig. 6의 (d)에서 보는 바와 같이 제6단의 굽힘 공정에서 불균일한 두께로 인하여 과도한 형상변화 및 스프링백이 초래될 수 있다는 점이다. 이 문제는 판재-체적 복합 소성가공 공정 개발을 어렵게 만드는 주요 요인이다. 그러므로 판단조 공정의 최적화가 필수적이다.

이 판단조 공정을 시행오차범으로 개발하는 것은 많은 시간과 비용이 소요되므로 유한요소법을 이용한 예측기술이 유용하다. 굽힘 성형에 의해 원하는 형상으로 설계 치수를 만족하기 위해서는 판단조 형태에 따라 다양한 형태의 설계가 요구된다.

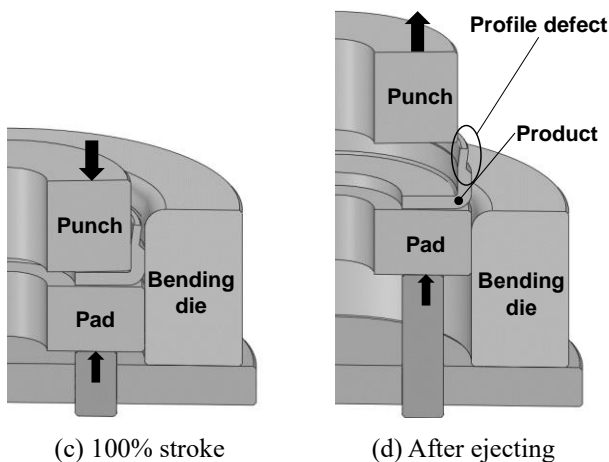
Fig. 7은 공정의 최적설계를 위한 3 가지의 예비성

형체이다. 체적요소를 근거한 소성가공 시뮬레이션 기술을 활용함으로써 이 중에서 최적의 공정설계를 선택하고, Fig. 8에서 정의된 굽힘 금형(bending die)의 모서리 반경(R_c), 즉 선택된 설계변수의 최적 결정을 위하여 매개변수 연구를 실시하였다.



(a) 0% stroke

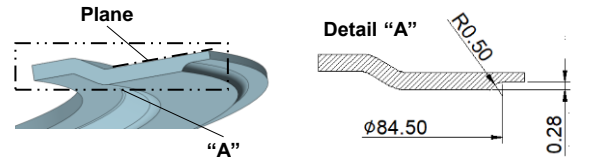
(b) 50% stroke



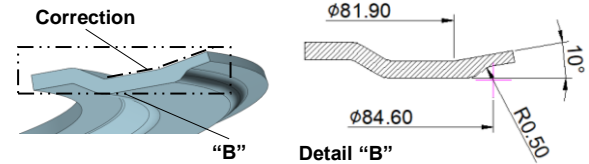
(c) 100% stroke

(d) After ejecting

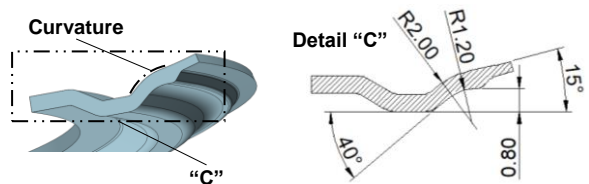
Fig. 6 Conceptual design of a bending process with emphasis on punch and die motion



(a) Case 1- Plane PF case



(b) Case 2-Correction PF case



(c) Case 3-Curvature PF case

Fig. 7 Three test process designs of Stage 5

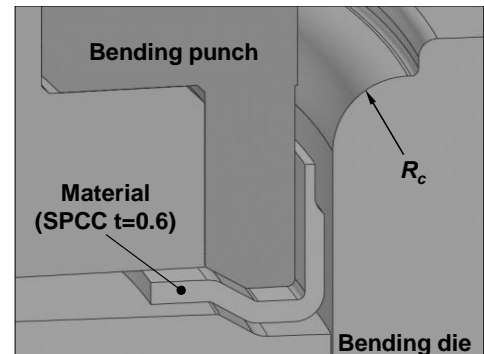


Fig. 8 Details of the bending die

2.3 복합공정 성형해석 및 결과

이 공정에서 스프링백이 중요하므로 체적 요소인 사각형요소[4] 및 탄소성 유한요소법[20]을 사용하였

다. 재료의 유동응력은 Swift 모델로 표현되었고(Fig. 3), 탄성 재료상수를 Table 1에 요약하였다. 재료의 초기온도를 25°C로 가정하였으며, 공정 해석 중 온도의 영향을 무시하였다. 금형을 장체로 간주하였다. 재료와 금형 사이의 마찰현상을 쿨롱마찰법칙으로 수식화하였으며, 마찰계수를 Table 1에 제시하였다. 속도의존성을 무시하였으므로 금형의 속도를 1mm/s로 가정하였다. 주 해석 대상 공정의 개념설계는 Fig. 9에서 보는 바와 같다.

Table 1 Material properties and process conditions

Young's modulus (E)	210 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.3
Flow stress ($\bar{\sigma}$)	$143.8(1+\bar{\epsilon}/0.0068)^{0.26}$ MPa
Coefficient of Coulomb friction (μ)	0.05 [21]
Initial temperature of material (T)	25°C
Die velocity (v)	-1.0 mm/s

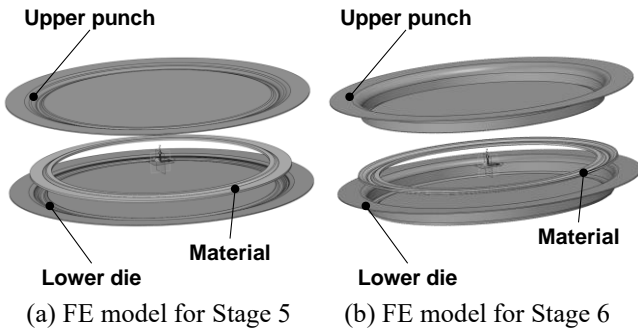


Fig. 9 Conceptual process designs of Stages 5 and 6

Fig. 10은 세 가지 공정 설계에 대한 해석 결과이다. 최종적으로 확인하고자 하는 꺾임 현상을 조사하기 위한 반경($R_a, R_b = 40.39 \pm 0.08$ mm) 및 각도($\alpha = 1^\circ \pm 2.2^\circ$)의 측정 부위를 Fig. 10(d)에 표시하였으며, 예측 결과를 Table 2에 정리하였다. Case 1 ($R_a = 40.51$ mm, $R_b = 40.37$ mm)의 경우, 경사 각도가 7.12°로 예측되었으며, Case 2 ($R_a = 40.55$ mm, $R_b = 40.44$ mm)의 경우, 경사 각도가 5.32°로 예측되었다. 그리고 Case 3 ($R_a = 40.45$ mm, $R_b = 40.39$ mm)의 경우는 경사 각도가 2.78°로 예측되었다. 해석결과로부터 Case 3의 경우가 꺾

임 현상에 대해 가장 양호한 결과를 보였다.

경사 각도가 2.78°로 예측된 Case3에서 굽힘 금형의 매개변수 모서리 반경(R_c)은 2.0mm이다. 매개변수의 최적 결정을 위하여 모서리 반경 1.0mm 일 경우와 3.0mm 일 경우에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 11은 모서리 반경 1.0mm 일 경우의 해석 결과이며, (a)는 초기형상, (b)는 30% 성형후의 변형형상, (c)는 70% 성형후의 변형 형상을 보여주고 있다. 그리고 (d)는 최종 성형완료후의 변형 형상이다.

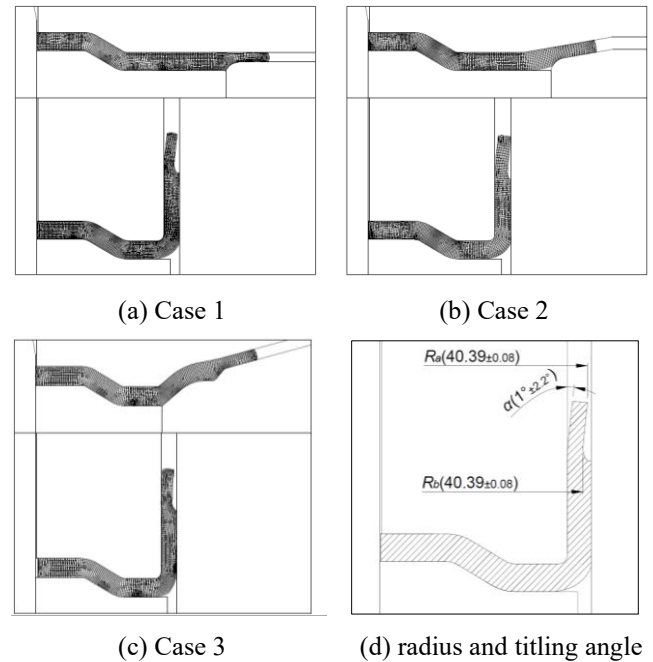


Fig. 10 Predicted shapes at the final stroke of Cases 1, 2 and 3

Table 2 Predictions of radii and tilting angles for Cases 1, 2 and 3

Variable	Case 1	Case 2	Case 3
R_a (mm)	40.51	40.55	40.45
R_b (mm)	40.37	40.44	40.39
$R_a - R_b$ (mm)	0.14	0.11	0.06
Angle (α)	7.12	5.32	2.78
Evaluation	Bad	Bad	Good

* R_a and R_b : Radii at the measuring points

Fig. 12는 각 모서리 반경에 대한 Case3의 해석결과이다. 해석결과로부터 Fig.10(d)에서 정의한 반경과 각도를 측정하였다. Fig. 12(a)의 경우($R_a=40.44\text{mm}$, $R_b=40.39\text{mm}$), 경사 각도가 0.87° 로 예측되었으며, (c)의 경우($R_a=40.45\text{mm}$, $R_b=40.39\text{mm}$)는 경사 각도가 3.13° 로 예측되었다. 해석결과로부터 모서리 반경이 1.0mm일 경우가 꺾임의 크기가 가장 작은 것을 확인할 수 있었다. 전술한 반경 및 경사 각도 예측 값을 Table 3에 정리하였다.

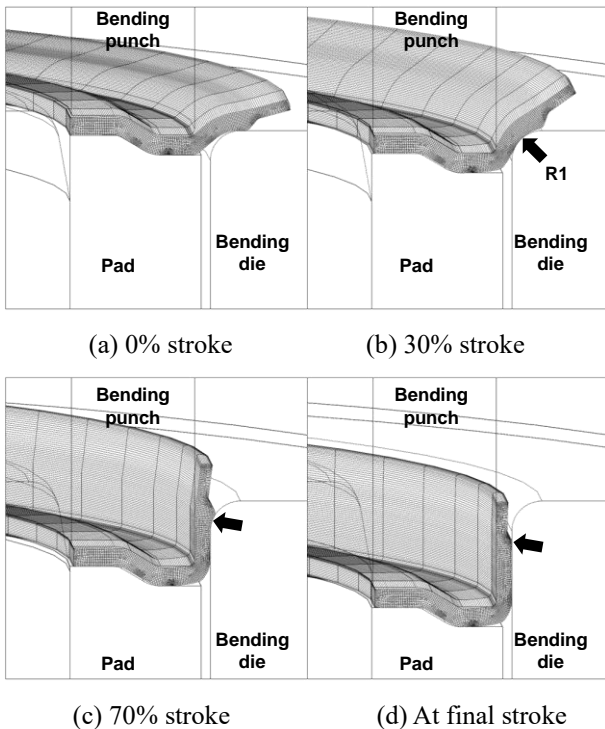


Fig. 11 Predicted deformed shape of radius =1.0mm

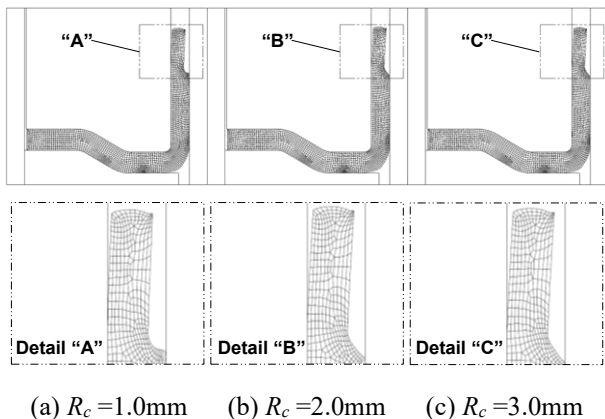


Fig. 12 Simulation results of Case3 for $R_c=1.0, 2.0$ and 3.0mm

Table 3 Predictions of radii and tilting angles of Case 3 for $R_c=1.0, 2.0$ and 3.0mm

Variable	$R_c=1.0$	$R_c=2.0$	$R_c=3.0$
R_a (mm)	40.44	40.45	40.46
R_b (mm)	40.39	40.39	40.39
$R_a - R_b$ (mm)	0.05	0.06	0.07
Angle (α , degree)	0.87	2.78	3.13

예측결과로부터 예비성형체 Case 3와 모서리 반경 (R_c)을 1.0mm로 결정하였을 때 경사 각도가 0.87° 로써 가장 좋은 결과임을 확인할 수 있었다.

3. 실험 및 토의

3.1 복합성형 공정 금형 및 시제품 제작

전술한 예비성형체(Case 1~3)와 모서리 반경을 적용하여 금형 제작 및 시제품 제작을 수행하였다. 프로그레시브 공정은 1단의 내경 피어싱 공정, 2단의 내측 굽힘 성형 공정, 3단의 내측 치수 결정 피어싱 공정, 4단의 외측 트리밍 공정 등이고, 트랜스퍼 공정은 5단 판단조 공정과 6단 외측 굽힘 성형 공정으로 이루어진다. Fig. 13은 실험에 사용된 판재-체적 복합 소성가공 공정의 조립금형이다.

소재는 두께 0.6mm의 스트립(JIS G3141 SPCC-S)이며, 사용된 프레스의 용량은 250ton이다. 실험은 프로그레시브 공정인 1~4단 공정, 트랜스퍼 공정인 5단 공정의 판단조 공정과 6단의 굽힘 공정으로 진행되었다.

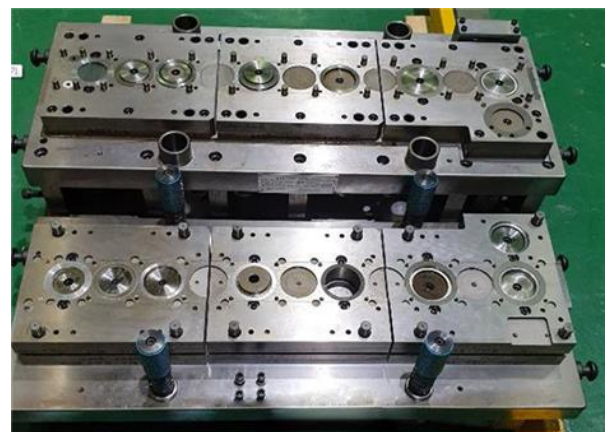


Fig. 13 Dies and tools of the hybrid forming process

3.2 시제품 제작 결과

판단조의 실험공정에서 제품 편심을 방지하기 위하여 프레스의 좌·우측에 동일한 하중이 적용되도록 스마트로드 모니터를 설치함으로써 편심이 발생하는 것을 방지하였다. Fig. 14는 제작된 시제품 및 주요 형상이다.

시험된 시제품의 판단조된 형상을 3차원 측정기, 형상측정기, 공구현미경 등의 정밀 측정 장비를 활용하여 측정하였으며, 측정결과와 해석결과를 비교하였다. Fig. 15는 유형별 정밀측정을 위해 절단된 시제품의 단면이다.

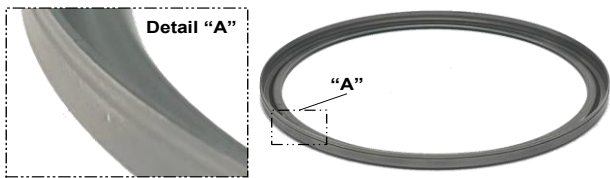
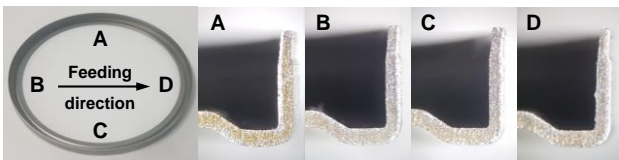
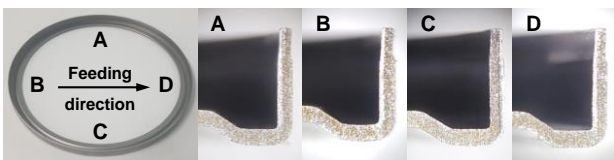


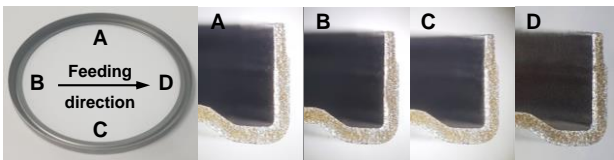
Fig. 14 Experiments of the outer plate



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

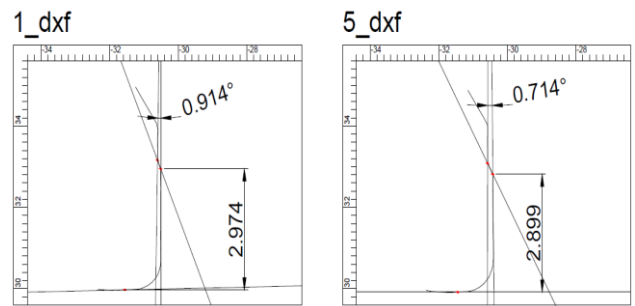
Fig. 15 Cross-sectional view

3.3 해석 및 실험결과 비교

Case 3과 모서리 반경(R_c) 1.0mm을 적용한 최종 시제품에 대하여 형상 측정기로 꺾임 각도를 측정하였다. 4개의 시험 물체를 대상으로 Fig. 15의 A, B, C, D의 위치에서 총 16번을 측정하였다. 꺾임 각도 측

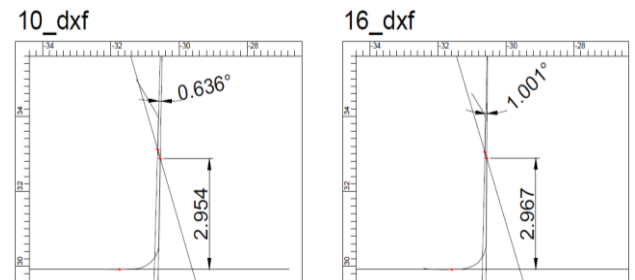
정결과, 시제품 1은 0.76~0.91°의 꺾임 각도를, 시제품 2는 0.71~0.95°의 꺾임 각도를, 시제품 3은 0.64~0.96°의 꺾임 각도를, 시제품 4는 0.71~1.00°의 꺾임 각도 분포를 보였다.

Fig. 16에서 (a)와 (b)는 각각 시편 1과 시편 2의 A 방향에 대한 측정 결과이며, (c)는 시편 3의 B 방향의 측정결과를 의미한다. (d)는 시편 4의 D 방향의 측정결과이다. 측정 결과, 꺾임 각도는 0.64°에서 1.00°까지 분포하였으며, 평균값은 0.85°로 나타났다. 이것은 Case 3일 때 모서리 반경이 1.0mm인 경우의 해석결과(0.87°)와 유사한 것이다. Table 4는 각 샘플 점에서의 측정값과 평균값을 정리하고 있다.



(a) Specimen 1

(b) Specimen 2



(c) Specimen 3

(d) Specimen 4

Fig. 16 Measured profiles of the test specimens

Table 4 Measured data of the test specimens

Part	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
A	0.91	0.71	0.96	0.91
B	0.76	0.89	0.64	0.71
C	0.79	0.95	0.89	0.79
D	0.83	0.93	0.93	1.00
Average	0.82	0.87	0.86	0.85

4. 결론

이 논문은 판재-체적 복합 소성가공 공법을 이용하여 자동차 허브 베어링용 금속 부품인 외판의 공정 개발에 관한 실험적 및 수치적 연구 내용과 결과를 담고 있다.

판재-체적 복합 소성가공 공법은 품질과 제조원가 양면에서 장점을 가진 것으로 알려져 있지만, 공정 중 단조 또는 판단조로 달라진 두께의 변화는 후속 공정, 즉 굽힘 가공 공정 또는 딥 드로잉 공정에서 기존 공정과 상이한 변형 특성을 야기시키며 최종 제품의 형상 결함 문제로 연결된다. 이것이 판재-체적 복합 소성가공 공정 개발상의 핵심 사안임을 적용 예제를 통하여 강조하였다. 이 문제는 판재-체적 복합 소성가공 공법의 적용성을 감소시키는 요체이다. 이 문제를 해결하기 위하여 장비 기술과 공정설계 기술이 다양하게 연구되어 왔으며, 판재-체적 복합 소성가공 공정은 그 특성으로 인하여 매우 다양한 종류가 존재한다. 이 논문에서 적용한 제품은 기존의 장비를 활용하면서 유한요소법을 이용한 최적화된 공정설계 및 금형설계를 통하여 원하는 형상 공차를 만족시킬 수 있는 사례를, 체계적이고 과학적인 접근 방법을 강조하여, 제시하였다.

적용 예제는 기존 공정에서 제조원가를 좌우하던 절삭공정을 프로그레시브 공정과 연계된 단조기술로 대체하는 사례이다. 공정 개발의 성공으로 기존의 7개의 공정(단 포함) 수에서 6개의 공정 수로 감소하였으며, 소재수율 향상과 절삭공정을 삭제함으로써 제조원가를 20% 이상 감소시키는 효과를 보았다. 뿐만 아니라, 절삭 가공에서 발생하는 버(burr) 및 칩에 의한 문제점을 고려할 필요가 없게 되어 품질 개선 효과가 나타났다.

기술적으로는 단조 분야에서 일반화된 공정 예측 기술이 판재-체적 복합 소성가공 공정의 설계에도 매우 유용함이 입증되었다. 이 기술이 다양한 인자간의 세부적인 영향도를 규명하는데 효과적으로 활용되었다. 가령, 제시된 예제에서 굽힘 성형에서 금형의 모서리 반경이 작을수록 성형 형상이 우수하다는 결론에 도달하였다. 이것은 일반적 상식과는 다소 차이가 있는 사실이다.

판재-체적 복합 소성가공 기술은 장치기술이 발전한 독일과 일본 중심으로 발전해 왔다. 이를 위하여 서보 프레스 및 진동부과 성형 기술 등이 발전하였

다. 이 논문에서 적용한 사례는 기존의 장비를 사용하되, 금형 및 다이세트 설계를 단조 시뮬레이션 기술로 최적화함으로써 최소의 시행착오로 개발에 성공한 것으로 국내의 장비 기술의 현실을 감안할 때 유의미한 사례이다.

판재-체적 복합 소성가공 공정의 개발에서 요구되는 공정 예측기술은 고난이도의 이론적 배경과 소프트웨어 개발의 정교함을 요구한다. 해석 기술은 이 제조 기술의 발전과 함께 지속적으로 발전될 전망이다. 스프링백의 예측, 금형의 탄성변형의 영향, 이방성의 고려, 성형 중 온도 및 변형률속도의 영향 등이 그 대표적인 사례이다.

후 기

이 연구는 중소벤처기업부의 재원으로 구매조건부 신제품개발 사업(과제명: 자동차 허브 베어링용 쉘 금속부품의 하이브리드 성형기술 개발)으로 수행되었다.

REFERENCES

- [1] G. H. Kim, Y. M. Yoo, J. S. Lim, 2002, A Study on the Durability Evaluation and Analysis Techniques of Wheel Bearing Hub Unit for Passenger Car, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 10, No. 9, pp. 166~173.
- [2] D. C. Ko, 2014, A Method for Manufacturing a Connector Shell for a Mobile Phone using a Determination Tank and a Burring Method, Registration Number No. 10-1365493, Pusan National University, Ind. Acad. Cooper. Group.
- [3] H. W. Jeon, J. H. Yoon, J. H. Lee, B. M. Kim, 2014, Plate Forging Process Design for an Under-drive Brake Piston in Automatic Transmission, Trans. Mater. Process., Vol. 23, No. 2, pp. 88~94. <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2014.23.2.88>
- [4] M. S. Joun, J. G. Eom, W. J. Chung, 2014, Finite Element Analysis of Springback Phenomenon and Residual Stress in Plate Forging, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Yeosu, Korea, pp. 182~185.
- [5] W. J. Chung, B. S. Kim, S. W. Lee, H. Y. Ryu, M. S. Joun, 2014, Finite Element Simulation of Plate or Sheet

- Metal Forming Processes using Tetrahedral MINI-elements, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 28, pp. 237~243. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0959-0>.
- [6] K. Osakada, K. Mori, T. Altan, P. Groche, 2011, Mechanical Servo Press Technology for Metal Forming, *CIRP Ann.-Manuf. Technol.*, Vol. 60(2), pp. 651~672. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.007>.
- [7] M. Merklein, J. M. Allwood, B. -A. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, A. E. Tekkaya, A. Weckenmann, 2012, Bulk Forming of Sheet Metal, *CIRP Ann.-Manuf. Technol.*, Vol. 61(2), pp. 725~745. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.007>.
- [8] K. Mori, T. Nakano, 2016, State-of-the-art of Plate Forging in Japan, *Prod. Eng.*, Vol. 10, pp. 81~91. <https://doi.org/10.1007/s11740-015-0648-1>.
- [9] T. Nakano, 2001, Compound Technology of Sheet Metal Forming and Forging, *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, Vol. 42(484), pp. 388~392. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7840-5>.
- [10] O. Nishino, K. Ohya, Y. Yuzawa, 2010, Plate Forging Technology by Press Forming, *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, Vol. 51(594), pp. 642~646. <https://doi.org/10.9773/sosei.51.642>.
- [11] M. Merklein, J. Koch, S. Opel, T. Schneider, 2011, Fundamental Investigations on the Material Flow at Combined Sheet and Bulk Metal Forming Processes, *CIRP Ann.-Manuf. Technol.*, Vol. 60(1), pp. 283~286. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.146>.
- [12] K. Mori, Y. Abe, K. Osakada, S. Hiramatsu, 2011, Plate Forging of Tailored Blanks having Local Thickness for Deep Drawing of Square Cups, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 211(10), pp. 1569~1574. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.010>.
- [13] J. H. Yoon, H. W. Jeon, J. H. Lee, 2013, Process Design of Cold Forging with Thick Plate for Seat Recliner Parts, *Mater. Des.*, Vol. 49, pp. 449~455. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.048>
- [14] S. W. Kim, Y. G. Son, Y. S. Lee, 2014, FEA and Experiment Investigation on the Friction Reduction for Ultrasonic Vibration Assisted Deep Drawing, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No.7, pp. 413~418. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2014.23.7.413>.
- [15] J. H. Kim, S. M. Hong, 2015, Process and Die Design of Square Cup Drawing for Wall Thickening, *J. Kor. Acad.-Ind. Cooper. Soc.*, Vol. 16, No. 9, pp. 5789~ 5794. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.9.5789>.
- [16] D. G. Jung, S. H. Kim, J. D. Rho, 2014, Investigation of the Prediction Accuracy for the Stamping CAE of Thin-walled Automotive Products, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No. 7, pp. 446~452. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2014.23.7.446>.
- [17] K. Kajihara, 2005, Improvement of Simulation Technology for Analysis of Hub Unit Bearing, *Koyo Eng. J. No. 167E*, pp. 35~39.
- [18] H. K. Moon, M. C. Lee, M. S. Joun, 2007, An Approximate Efficient Finite Element Approach to Simulating a Rotary Forming Process and its Application to a Wheel-bearing Assembly, *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 44, No. 1-2, pp. 17~23. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2007.08.003>.
- [19] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, 2008, A New Method of Acquiring True Stress-Strain Curves over a Large Range of Strains using a Tensile Test and Finite Element Method, *Mech. Mater.*, Vol. 40, No. 7, pp. 586~593. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2007.11.006>.
- [20] K. M. Kim, M. C. Kim, T. M. Hwang, S. H. Chung, W. J. Chung, M. S. Joun, 2019, Numerical and Experimental Study on Springback in Automatic Multi-Stage Precision Cold Forging Process of a Steering Yoke, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 28, No. 3, pp. 115~122. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2019.28.3.115>.
- [21] M. S. Joun, H. K. Moon, I. S. Choi, M. C. Lee, B. Y. Jun, 2009, Effects of Friction Laws on Metal Forming Processes, *Tri. Int.*, Vol. 42, No. 2, pp. 311~319. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.06.012>