

자동변속기 이너레이스 스플라인 치형의 정밀열간단조 공정에 관한 연구

김현수¹ · 이정환² · 김현필³ · 김용조⁴ · 강성훈^{† 2}
¹(주)마이스코, ²재료연구소, ³ 한국폴리텍 VII 대학, ⁴ 경남대학교

A study on the precision hot forging process for spline teeth of inner-race in auto-transmission

Hyun-Soo Kim¹ · Jung-Hwan Lee² · Hyun-Pil Kim³, Yong-Jo Kim⁴ · Seong-Hoon Kang^{† 2}
¹Mysco, ²Korea Institute of Materials Science, ³Korea Polytechnic VII, ⁴Kyungnam Universtiy

Abstract : In this study, the hot forging technology for precision forming of spline teeth of the inner race in the auto-transmission was developed in order to minimize its finishing allowance. Several blocker and finisher shapes for the precision hot forging process of the inner race were proposed and the forging processes were analyzed using the three-dimensional finite element method. The optimum hot forging process was obtained considering some parameters such as metal flow patterns, forging defects and forming load. Blocker and finisher dies for the hot forging process were designed by selecting the most suitable shapes obtained from the finite element analysis. Experimental works were also performed in order to verify the optimum design of hot forging process.

Key Words : inner-race, precision hot forging, spine teeth, preform, process design

1. 서 론

자동변속기의 이너레이스는 제품의 두께가 얇고 스플라인 치형의 수가 많아 열간단조에서 치형을 성형하기가 곤란하므로, 무치형 형상으로 열간 단조 후 절삭가공에 의해 최종 형상을 얻고 있다. 이로 인해 제거되는 소재량이 많고, 기계가공에 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 이너레이스 치형부의 정밀 단조를 통해 기계가공량을 현저히 줄일 수 있는 열간단조 기술의 개발이 필요하다.

이러한 자동변속기 이너레이스의 형상이 복잡하고, 높은 치수 정밀도를 요구하기 때문에 3차원 전산모사를 통한 공정설계의 최적화가 필요하며, 소재의 변형 양상과 단조품의 결함 등을 미리 예측하고

나아가서 소재 및 금형의 열팽창율에 따른 체적 수축을 고려하여야 한다.

본 연구에서는 이너레이스 기계가공 여유를 최소화하고, 스플라인 치형부의 정밀 성형을 위한 열간 단조기술을 개발하고자 하였다. 이를 위해 이너레이스 치형 열간단조품을 설계하고 다양한 형태의 블로커 형상을 제시하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 시뮬레이션 결과로부터 가장 적합하다고 판단되는 블로커, 피니셔 형상을 선택하여 금형설계를 수행하고 제작하였으며, 열간단조 실험을 수행하였다.

2. 이너레이스 열간단조 공정설계

본 연구에서 개발하고자 하는 자동변속기의 이너레이스 제조 공정은 열간단조, Q/T 처리, 황삭/정삭 가공, 고주파 표면 열처리 및 치형부 정밀 가공의

[†] To whom correspondence should be addressed.
kangsh@kims.re.kr
접수 : 2012. 05. 23. 채택 : 2012. 10. 19.

공정으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 열간 단조 공정에 대한 연구만 수행하였으며, 최종 단조품의 형상 정밀도를 향상시킬 수 있는 공정을 찾고자 하였다.

개발하고자 하는 이너레이스 스플라인 치형의 사양과 모델을 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 피니셔 단조품을 제조하기 위해 Table 2에 제시된 바와 같이 5가지의 공정을 고려하여 최적의 금형 형상과 공정조건을 도출하고자 하였다. 특히 업세팅 후 블로커를 성형하지 않고 피니셔를 성형하는 경우와 블로커 성형 후 피니셔를 성형하는 경우에 대해 소재의 변형양상과 성형하중 등에 대해 분석하였다. 블로커를 성형하는 경우에 대해 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 형상의 4가지 경우의 블로커 형상을 제시하였다. 또한 Fig. 4의 피니셔 공정에서 플래시가 없는 밀폐단조와 플래시가 있는 밀폐단조로 성형하는 경우에 대해 연구하였다. 이러한 경우들을 조합한 해석을 수행하여 최적의 성형공정을 찾고자 하였다.

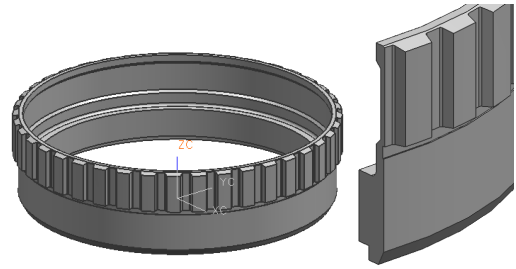


Fig. 1. Inner-ace of auto- transmission

열간단조공정 시의 금형 마모를 예측하기 위해 다음과 같은 Archard 마모 모델을 적용하여 금형의 마모수명을 예측하였다.

$$W = \int K \frac{P^a v^b}{H^c} dt \quad (1)$$

3. 성형공정 해석

3.1. 성형해석 조건

자동변속기용 이너레이스 개발을 위해 DEFORM-3D를 이용하여 성형 공정 해석과 금형의 탄성변형 해석, 응력해석 및 마모해석을 수행하고, 해석 결과로부터 최종 단조품의 품질 특성을 향상시킬 수 있는 성형 공정을 개발하였다. 이너레이스 열간단조 공정해석 조건을 Table 3에 나타내었다. 이너레이스 재료는 SCR420HB 소재로서 고온압축시험을 통해 유동응력선도를 도출하였다. 시험온도 800 °C, 1,000 °C, 1,200 °C의 조건하에서 변형율 속도 0.01mm/s, 0.1 mm/s, 1.0mm/s, 10.0mm/s를 적용하여 고온압축시험을 수행하였으며, 대표적으로 800 °C에서 도출된 유동응력을 Fig. 5에 나타내었다.

Table 1. Spline Specifications for the inner-ace

Tooth profile	straight
Space profile angle	40°
Number of teeth	36
Module	2.0
Pitch circle Dia.	Φ154.5
Circular pitch width on P.C.D	7.519

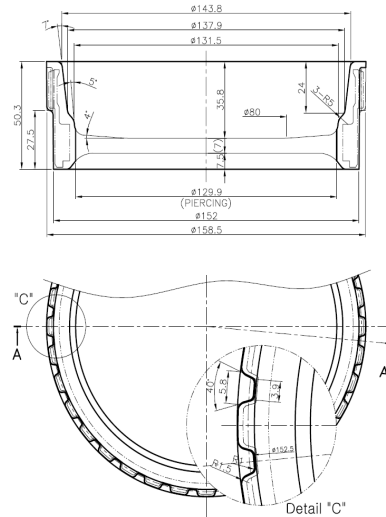


Fig. 2. Drawing of the forged inner-ace

Table 2. Various process designs for hot forging of inner-ace

Case	Process		
	upsetting	blocker	finisher
Case-1	○	×	closed die forging without flash Fig. 4(a)
Case-2	○	○	
Case-3	○	○	
Case-4	○	○	closed die forging without flash Fig. 4(b)
Case-5	○	○	closed die forging with flash Fig. 4(c)

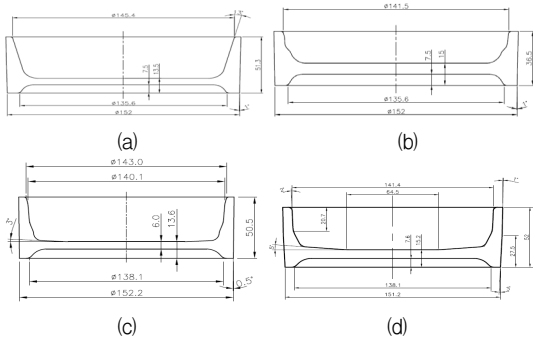


Fig. 3. Blocker designs: (a) case-2, (b) case-3, (c) case-4, and (d) case-5

여기에서 P, v, H, W는 경계면의 압력, 미끄러짐 속도, 금형의 경도, 마모량을 나타내며, 지수 a, b, c, 및 마모계수 K는 실험적으로 계산된 계수로서 본 연구에서는 a, b, c의 값으로 각각 1, 1, 2를 사용하였다. 또한 금형강 STD 61의 경도(H)와 마모계수 K 참고문헌에서 발췌한 값을 사용하였다¹⁾.

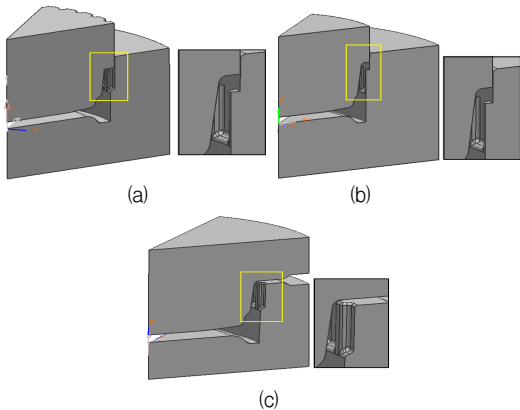


Fig. 4. Dies used in finisher process: (a) case-1, 2, 3, (b) case-4, (c) case-5

Table 3. Simulation conditions

Process		Upset	Blocker	Finisher
Forging temp.	Material(°C)	1150	901~1165	839~1187
	Die(°C)	300		
	Atmosphere(°C)	25		
Initial billet(mm)		φ60×h120		
Punch movement (mm/s)		100		
Heat transfer coefficient		11		
Friction factor		0.3		

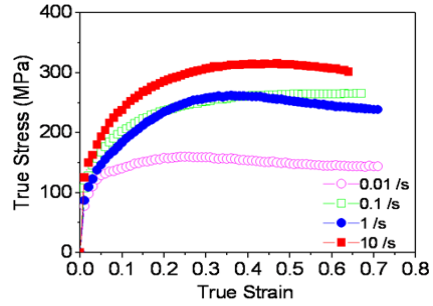


Fig. 5. Flow stress curves obtained from compression test at 800°C under the various strain-rate conditions

3.2. 해석결과

Case-1의 업셋팅 및 피니셔 공정으로 이너레이스를 열간단조하는 경우에 대한 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 피니셔 공정에서 펀치의 스트로크가 증가할수록 소재가 후방압출되면서 치형 캐비티 내에 소재가 충전되고 있다. 미충진 및 소재 겹침 등의 단조결함이 발생하지 않는다. 업셋팅 공정에서의 변형 하중은 크지 않으나, 최종 치형이 성형되는 피니셔 단계에서는 밀폐단조의 특성상 성형하중이 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다.

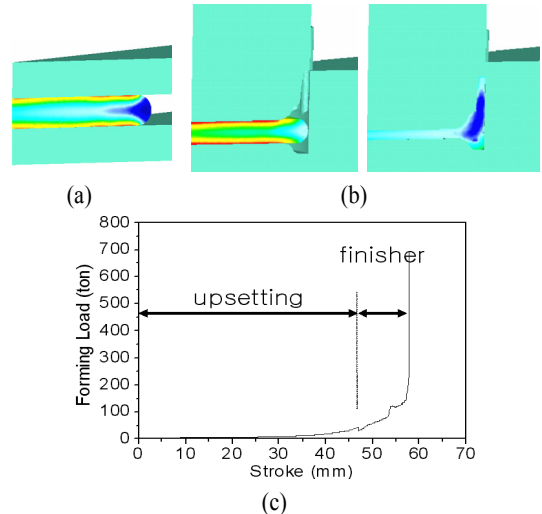


Fig. 6. Simulation results of the Case-1: (a) upsetting and (b) finisher process and (c) forging load

Fig. 3(a)에 나타난 블로커 형상을 사용하여 밀폐 단조로 이너레이스를 성형할 경우에 대한 Case-2의 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 블로커 공정의 해석결과는 Case-1과 동일하므로 나타내지

않았다. 그림에서 알 수 있듯이 Case-2의 경우 피니셔 성형단계에서 펀치 스트로크가 증가함에 따라 단조결함(소재접침)이 발생하여 블로커의 형상 변경이 요구된다. 이에 따라 Case-3의 블로커의 형상을 Fig. 4(b)와 같이 펀치와 접촉하는 부위의 빼기구 배가 6° 인 계단형상으로 수정하였다.

Fig. 8은 Case-3에 대한 해석 결과로 업셋팅, 블로커, 피니셔 공정에서의 변형형상을 연성과피지수 분포와 성형 하중을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Case-2의 피니셔 공정에서 발생하였던 소재 접침과 같은 단조결함은 나타나지 않고 치형이 완전하게 성형되고 있다. 요구되는 성형하중은 치형성형이 완료된 시점에서 약 577톤으로 Case-1에 비하여 약 16.4%정도 낮게 예측되었다. 그러나 Case-1과 3의 피니셔 금형 형상을 적용할 경우, 상형펀치와 하형금형의 치형부위가 정확히 일치하지 않으면 Fig. 9 (a)에 나타난 바와 같이 금형이 파손될 위험성이 매우 높은 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 9(b)와 같이 치형 없는 밀폐 단조를 적용하여 Case-4에 적용하였다.

Fig. 10은 Case-4의 해석 결과를 나타낸 것으로, Case-3의 블로커 형상을 개선한 Fig. 3(c)의 형상을 채택하고 피니셔 밀폐구간 형상을 Fig. 9(b)와 같이 적용한 경우이다. 피니셔 공정에서 결속, 접침 등의 단조결함 없이 치형부의 충진이 완전히 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 피니셔 공정에서 소재가 금형 내에 완전 충만되는 시점을 기준으로 성형하중이 급속히 증가하므로 금형파손 발생확률이 높아질 뿐만 아니라 피니셔 금형의 마모량이 증가할 것으로 예측된다.

Fig. 11은 Case-5의 해석결과를 나타낸 것이다. 피니셔 공정에서 약간의 플래쉬를 발생시키고 완전한 성형이 이루어지는 것을 확인할 수 있으며, 트리밍 공정을 통해 플래쉬를 제거한 후 최종 단조품을 얻을 수 있다. Case-5의 단조하중은 Case-4의 경우에 비해 20%이상 현저히 낮게 예측되고 있다. 이러한 성형하중의 차이는 플래쉬를 형성시킴으로서 연속적인 소재유동이 발생하였기 때문이며, 플래쉬를 형성하는 밀폐단조방식이 금형의 마모뿐만 아니라 파손방지 측면에서 유리하다고 판단되어진다.

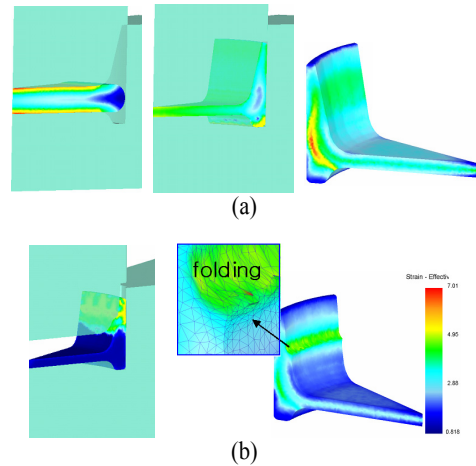
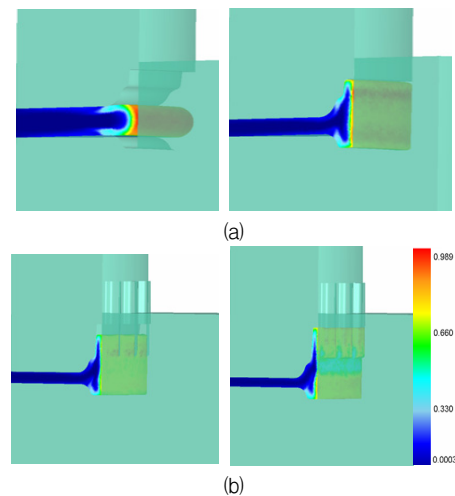


Fig. 7. Simulation results of the Case-2: (a) blocker and (b) finisher processes

피니셔 공정 동안 형성된 두께 3.2mm의 플래쉬를 제거하기 위한 트리밍 공정의 펀치와 다이의 클리어런스는 0.7mm로 적용하였다. 이너레이스 단조품에 형성된 플래쉬는 펀치 반대방향으로 변형되며, 일정 스트로크부터는 플래쉬의 변형은 더 이상 진행되지 않고 제거된다. 스트로크가 약 8 mm에서 완전한 트리밍이 발생하는 것으로 예측되고 있다. 또한 피어싱 공정에서는 펀치의 가압에 의해 이너레



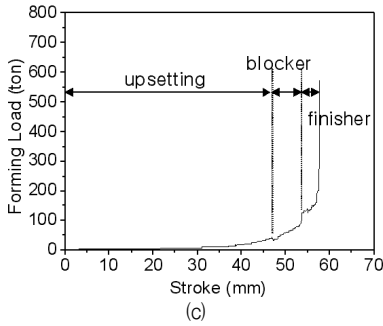


Fig. 8. Simulation results of the Case-3; (a) blocker and (b) finisher processes and (c) forging load

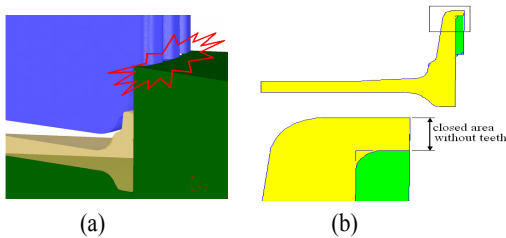
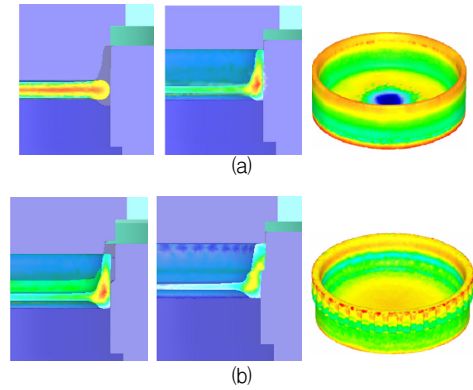


Fig. 9. (a) Possibility of the fracture generation of the dies due to teeth mismatch during finisher process and (b) modified shaped of the blocker

이스의 중간부가 아래로 오목하게 변형되는 것을 확인할 수 있다.

Case-5의 성형이 완료된 후 피니셔 금형의 탄성 해석결과를 Fig. 12에 나타내었다. 응력해석 결과에서 금형의 주응력은 약 1100 MPa로 금형소재인 SKD61소재의 항복강도 보다 낮은 값으로 예측되어 성형 중의 파단 발생 가능성은 낮게 예측되었으나, 치형부의 하단에서 큰 인장응력이 걸려 피니셔 공정의 타발수가 많아질수록 이 부분에서 파단 가능성이 높을 것으로 판단되어진다. Fig. 12(b) 및 (c)의 치형부의 탄성변형 결과에서, 이끝과 이뿌리에서의 최대 탄성변형량은 약 0.2mm이며, 치형 끝단의 탄성변형량은 약 0.3mm로 예측되었다. 예측된 변형량을 금형 설계에 반영하여 최종 단조품의 치수정밀도를 향상시킬 수 있도록 하였다.

금형과 소재 접촉면에서의 전단마찰상수가 0.3일 때의 1회 형타시의 금형마멸 해석 결과를 Fig. 13에 도시하였다. 편치마모량은 최대 0.0045mm, 하부인서트 코어는 0.0036mm, 하형 치형부는 0.0049mm로 나타났으며, 편치의 경우 평탄부 및 곡률부, 하부인서트코어에서는 평탄부, 하형에서는 치형 바로 밑

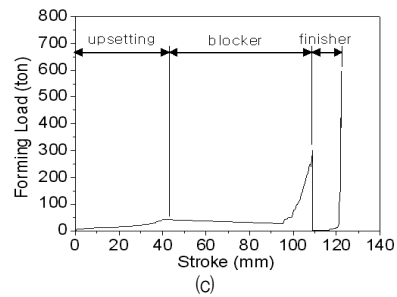


Fig. 10. Deformed shapes obtained from simulations of the Case-4: (a) blocker and (b) finisher processes and (c) forging load

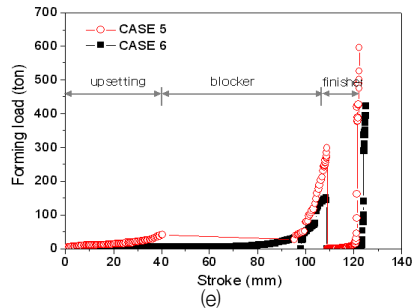
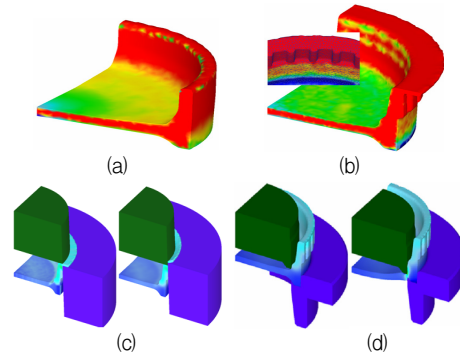


Fig. 11. Deformed shapes obtained from simulations of the Case-5: (a) blocker and (b) finisher process and (c) forging load

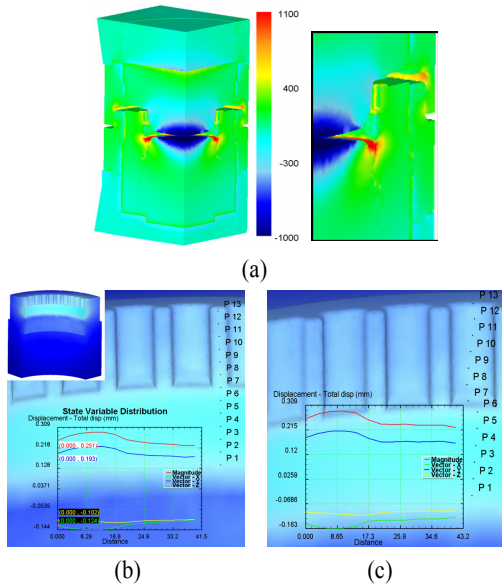


Fig. 12. Elastic analysis of the dies in Case-5, (a) Max. principal stress(MPa) (b) elastic deformation at the addendum of tooth, and (c) elastic deformation at the root of tooth

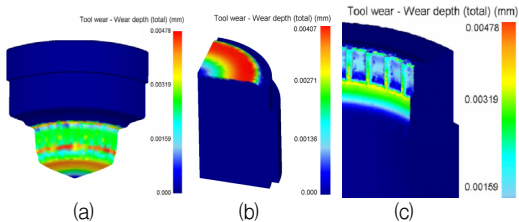


Fig. 13. Wear depth of the dies in case-5 (a) punch, (b) lower insert core, and (c) lower die

영역에서 마모량이 크게 발생할 것으로 예측되고 있다.

4. 이너레이스 단조실험

해석결과로부터 얻어진 이너레이스의 블로커 피니셔 형상을 금형설계에 반영하고 금형을 제작하였으며, 제작된 금형을 활용하여 단조실험을 수행하였다. 이너레이스의 열간단조 실험은 해석 결과에서 가장 적절한 경우인 Case-4 및 Case-5에 대해서만 수행하였다. 단조 실험은 SCR420HB 소재를 고주파 가열로에서 적정 가열 온도인 1,250 °C까지 가열한 후 업셋, 블로커, 피니셔 공정을 통해 수행하였다. 이때 금형의 가열 온도는 300°C 까지 가열 후 금형 표면에 윤활제를 도포하여 주었다.

Fig. 14는 Case-4의 경우에 대한 각 공정별 단조품의 사진을 나타낸 것이다. 초기 소재를 적정 높이까지 업셋팅 후 블로커 공정에서 예비 성형하고 피니셔 공정에서 최종 형상을 완성하였다. 그러나 업셋팅된 소재가 블로커 금형 내에서 한 쪽으로 약간 편심되어 지기 때문에 후방압출 되는 소재의 높이는 일정치 못하게 되며, 피니셔 공정에서 편심된 쪽의 버가 더 많이 발생하게 된다.

Fig. 15는 Case-5의 경우에 대한 각 공정별 단조품의 사진을 나타낸 것이다. Case-4의 경우와 마찬가지로 업셋팅 소재가 블로커 금형 내에서 편심되어 완전한 축대칭 형상의 블로커 성형이 되지 않으며,

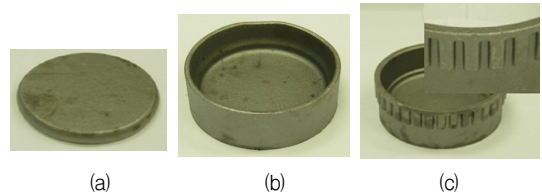


Fig. 14. Deformed shape of the Case-4: (a) upsetting, (b) blocker and (c) finisher

이로 인해 피니셔 공정에서 불균일한 플래쉬가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 트리밍을 통해 완전히 해소할 수 있으며, 트리밍 후 Fig. 15(d)에 나타낸 바와 같은 완전한 형태의 스플라인 치형을 얻을 수 있었다.

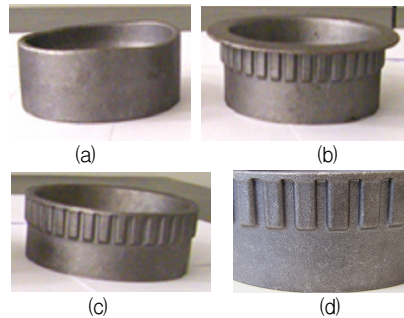


Fig. 15. Deformed shape of the Case-5: (a) blocker, (b) finisher, (c) trimming, and (d) detail view of teeth

5. 결론

본 연구에서는 승용차용 자동변속기의 이너레이스 스플라인 치형의 정밀단조 기술에 관해 연구하였으며, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 이너레이스 정밀 열간단조를 위해 다양한 블로커 형상 및 피니셔 형상을 제안하고, 3차원 단조공정 해석을 통해 소재의 유동형상, 단조결합, 성형하중 등의 변수를 고려하여 최적의 공정을 도출하였다.

2) 최적 공정에서의 금형의 탄성해석을 수행하여 금형의 응력분포 및 열탄성 변형량을 예측하였다. 또한, 피니셔 공정에서 금형의 마멸량을 분석하였다.

3) 해석 결과로부터 얻어진 최적의 공정에 대해 금형설계, 제작하고 이너레이스 정밀열간단조 시험을 수행하고, 시험 단조품에 대해 미세조직분석을 수행하였다.

참고문헌

- 1) Lee, R. S. and Jou, J. L. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, pp. 43-48, 2003.