

기어 치형의 미성형 구간 최소화를 위한 배압 냉간 단조 성형 해석

이용우¹, 김장훈¹, 권종호^{2*}

¹에스톡 컨설팅그룹, ²신한대학교 자동차공학과

Back-pressure cold forging analysis to minimize non-forming area of gear teeth

Yongwoo Lee¹, Janghoon Kim¹, Jongho Kwon^{2*}

¹ESTOC Consulting Group, ²Department of Automotive Engineering, Shinhan University

요약 본 연구에서는 자동차 자동변속기의 핵심 부품인 아웃풋 허브 및 리액션 허브의 치형 미성형 구간의 최소화를 위한 배압 냉간 단조 성형 공법에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 변위제어해석으로 펀치 하중 및 슬리브 배압력을 도출하였고, 도출된 하중 및 배압력을 이용한 하중제어해석을 수행하여 상호 검증을 하였다. 변위제어해석과 하중제어해석이 유사한 경향을 보였으며, 아웃풋 허브와 리액션 허브의 미성형 구간을 기준 이하로 만족시키기 위한 펀치 하중과 슬리브 배압력을 구하였다. 리액션 허브의 펀치 하중이 아웃풋 허브 보다 큰 이유는 상부 치형 가공 시 리액션 허브의 단면감소율이 아웃풋 허브 보다 크기 때문인 것으로 판단되며, 슬리브 배압력이 아웃풋허브와 리액션 허브에서 차이가 나는 것 또한 슬리브 단면적의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 배압 냉간 단조 성형 해석 과정과 결과를 적용한 실제 치형 가공의 미성형 구간 결과와 비교하여 검증 평가하였으며, 치형 제품의 품질 개선 및 생산성 향상을 위해 요구되는 성형가공 조건을 도출하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

Abstract This study performed the back-pressure cold forging analysis to minimize the non-forming area of gear teeth for the output hub and reaction hub in automatic transmission. Two important factors of the back-pressure cold forging process, the load of the punch and the backup force applied to the sleeve, were determined through displacement control analysis. The non-forming area of the gear teeth was compared with both cases of the displacement control analysis and load control analysis, and their solution is similar to the measuring result of a real workpiece. The results show that the load of the punch is dependent on the reduction area of the workpiece, and the backup force applied to the sleeve is determined with regard to the cross-section-area of sleeve. This analysis procedure can be useful and effective in determining the manufacturing condition of the back-pressure cold forging process to minimize the non-forming area.

Keywords : Back-pressure cold forging, Non-forming area, Gear teeth, Displacement control analysis, Load control analysis

1. 서론

자동변속기에 사용되는 주요 부품인 아웃풋 허브(output hub), 리액션 허브(reaction hub), 허브 클러치

(hub clutch) 등의 치형 제품들은 대부분 셰이빙(shaving), 호빙(hobbing)과 같은 절삭가공과 전조(threading), 단조(forging) 등의 소성가공을 병행하여 제조되고 있다. 절삭가공 치형의 경우 제품의 단류선 파괴로 인한 강도 저

본 논문은 중소기업기술개발 지원사업 위탁연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jongho Kwon (Shinhan Univ.)

Tel: +82-31-870-3686 email: jkwon@shinhan.ac.kr

Received April 11, 2016

Revised May 25, 2016

Accepted July 7, 2016

Published July 31, 2016

하가 일어나는 반면에, 단조 성형된 치형은 소재가 연속적으로 형성되기 때문에 강도적인 측면에서 절삭가공보다 장점이 있다. 또한 판재를 이용하는 Roll(Flow) Forming 방법은 일체형으로 가공하기가 어려워져 제조 원가가 상승하게 된다.

이와 같은 이유로 인해 제품의 정밀성과 대량 생산화를 지향하는 추세에 따라 소성가공에 의한 새로운 성형 방법 개발과 함께 성형 공정의 단점에 대한 문제를 해석적인 방법으로 해결하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Wang 등[1]은 중공축 내접 스플라인을 성형하기 위한 냉간 압출공정에서 금형과 소재와의 접촉 부분의 길이를 다르게 하는 두 가지 공정을 제시하여 성형 하중 및 최종 형상을 비교하였으며, Cho 등[2]은 비축대칭 와서 캠 볼트 제작을 위하여 다단계의 예비형상을 거치게 하는 4단 냉간 단조 공정을 Deform-3D로 해석하여 실험 결과와 비교하였다. 또한 Lee 등[3]은 냉간 단조에 의한 스피어 기어 단조 시 금형의 치수 정밀도를 변화시킨 실험을 수행하여 단조기어의 정밀도와 금형의 치수 정밀도와의 상관관계를 규명하고자 하였다. 이 외에도 단조품의 성형성 및 치수 정밀도를 향상시키기 위한 연구[4,5]가 이루어지고 있으나, 배압을 이용하여 치형 제품의 성형 정밀도를 향상시키려는 연구는 아직까지 활발하게 보고되지 않고 있다.

변속기 치형 부품을 제작할 때 열간 단조로 제품을 성형한 후 냉간 단조로 치형을 생성하는 과정에서 소재의 흐름이 일정하지 않기 때문에 소재의 미충진 문제가 자주 나타나게 된다. 이로 인해 발생하는 미성형 구간(non-forming area)이 많은 경우, 가공 공정에서 단속 가공이 추가로 필요하게 되어 생산성과 제품 정밀도가 떨어지게 된다.

본 연구에서는 변속기용 허브 단조품을 생산하기 위한 배압 냉간 단조(back-pressure cold forging) 성형기법에 대한 연구를 수행하였다. Deform-3D를 이용한 냉간 단조 성형 유한요소해석을 통해 1.0mm 이하의 미성형 구간 제품을 성형하기 위한 Punch 하중과 Sleeve 배압력 조건을 설정하는 방법을 도출하고 실제 적용 결과와 비교 평가하여, 본 연구의 해석 결과가 치형 제품의 품질 개선 및 생산성 향상에 유용하게 활용될 수 있음을 검증하였다.

2. 변속기용 허브 공정 해석

2.1 배압 냉간 단조 원리

Fig. 1은 배압 냉간 단조 기술의 원리를 나타낸 것으로 상부 치형의 성형 시 하부로부터 배압력을 가하여 화살표 부분의 금형이 아래쪽으로 밀리지 않을 정도의 힘을 발생시켜서 성형 초기에 발생하는 미충진을 최소화시키고, 하부 치형 성형 시 미성형 구간을 최소화시키기 위한 방법이다.

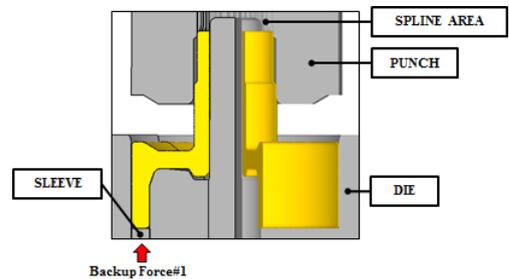


Fig. 1. Back-pressure cold forging

2.2 Output Hub 및 Reaction Hub

Fig. 2와 Fig. 3은 자동변속기의 핵심부품인 Output Hub와 Reaction Hub를 나타낸 것이며, Input Shaft의 동력을 각각 Clutch Assembly와 Drive Transfer Gear로 전달하는 중요한 역할을 한다. 이러한 치형 제품들은 차량의 소음 및 진동에 직접적인 영향을 미치기 때문에 공차 최소화 및 균일한 제품 생산을 통한 진동의 저감이 매우 중요한 품질 개선 요소이다.



Fig. 2. Output hub of automatic transmission



Fig. 3. Reaction hub of automatic transmission

2.3 배압 냉간 단조 공정

Fig. 4는 배압 냉간 단조 공정을 나타낸 것이다.

성형 개시 전 Sleeve는 Die의 치형 끝단부까지 상승하고, 이 Sleeve를 배압장치가 유압을 이용하여 설정된 일정한 배압력으로 지지하게 된다. 성형이 시작되면 Punch가 아래쪽으로 내려오면서 Punch 내측에 있는 상부 치형이 먼저 성형되고, Punch는 소재 표면과 닿을 때까지 하강한다. 소재가 Sleeve와 닿게 되면 치형이 성형되지 않은 모서리 부위로 소재가 채워지게 되고, 이 과정이 치형의 미성형 구간을 최소화시키는 핵심 구간이다. 설정된 압력에 이르면 Sleeve의 배압력이 해제되고 Punch와 소재가 하강하면서 하부 치형 성형이 진행된다.

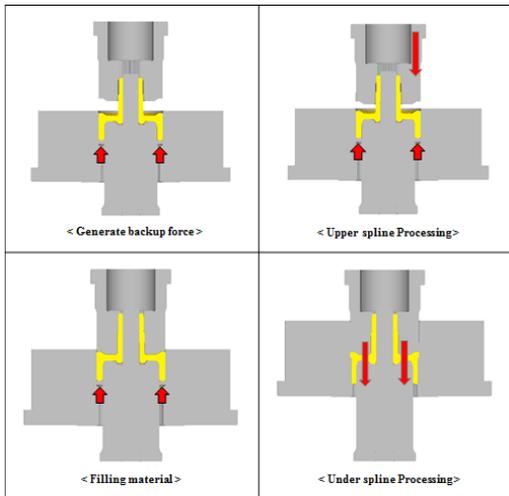


Fig. 4. Process of back-pressure cold forging

2.4 배압 냉간 단조 유한요소해석

단조품의 소재는 상온(20°C)의 SCM430을 사용하였고, 금형은 SKD11이며 재료의 물성은 Table 1에 나타나 있다.

Fig. 5에는 CATIA V5를 사용하여 모델링한 Die, Punch 및 소재(workpiece)를 나타내었으며, 대칭성을 고려하여 해석시간 단축을 위해 1/12 모델을 적용하였고 Deform-3D로 단조해석을 수행하였다[6].

Table 2에 나타낸 바와 같이 정확한 해석 결과를 얻기 위하여 10만 개 이상의 요소를 사용하였고, 냉간 단조 공정에서 Steel Die는 0.12의 마찰계수를 설정하였으며, 속도 0.67stroke/sec, 최대 스트로크 220mm를 사용하였다.

Table 1. Material properties [7]

Material	Yield Strength	Density	Poisson's Rate
SCM430	435 MPa	7.85 g/cm ³	0.29
SKD11	1,200 MPa	7.70 g/cm ³	0.30

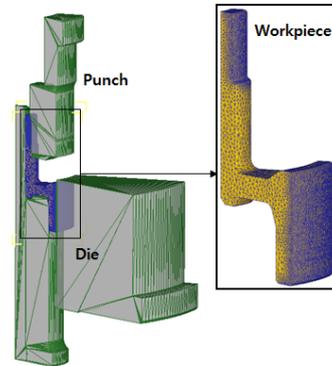


Fig. 5. Finite element model

Table 2. Forging conditions for finite element analysis

	Output Hub	Reaction Hub
Number of element	142,917	111,865
Friction coefficient	0.12	0.12
Stroke/sec	0.67	0.67
Total stroke (mm)	220	220

유한요소해석을 통해 Punch의 하중(Surge압력)과 Sleeve 배압력의 적정 수치를 구하기 위해 강제적으로 변위 조건을 부여하는 정역학적 해석을 수행하였다. 정역학적 해석은 기본적으로 내부 힘의 평형(Static equilibrium)을 기본 법칙으로 하기 때문에, Punch의 변위를 제어하는 정적 해석에서 도출된 Punch와 Sleeve의 반력을 각각 하중과 배압력으로 설정하였다. 이러한 하중과 배압력 조건을 이용하여 변위제어해석과 같은 공정으로 하중 제어해석을 수행하여 결과를 비교하였다.

2.5 Output Hub 해석 결과

Output Hub의 치형 미성형 구간의 해석을 위하여 Punch에 1mm/s의 강제 변위를 주는 변위제어해석을 통해 Punch와 Sleeve에 걸리는 반력을 Fig. 6과 같이 도출하였다.

치형이 성형될 때 미성형 구간의 길이는 소재의 충진 정도에 영향을 받고, 충진 정도에 따라 Punch와 Sleeve에 걸리는 반력의 거동이 달라지므로, Fig. 6에 나타나는 변곡점을 충진 시 소재 거동이 달라지는 특이점(singularity)으로 가정할 수 있다.

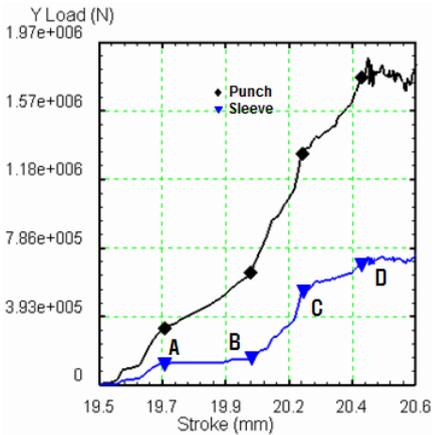


Fig. 6. Load-stroke curve of output hub

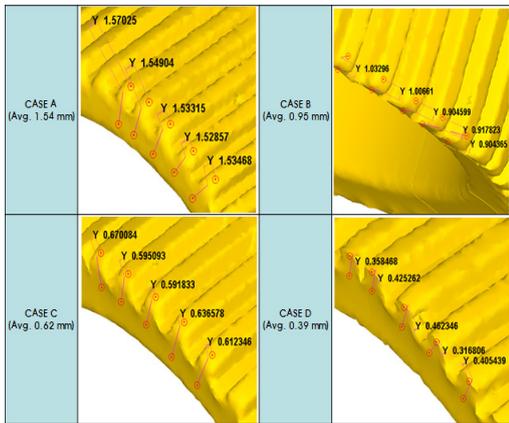


Fig. 7. Displacement control analysis of output hub

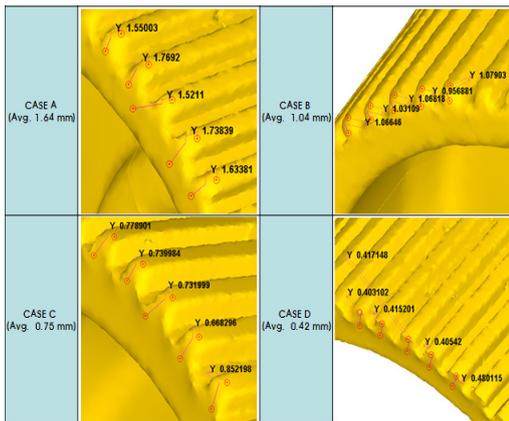


Fig. 8. Load control analysis of output hub

Fig. 7은 4개 변곡점에서의 변위제어해석 결과이며, 하중과 배압력이 증가하여 모서리의 충진 정도가 많아질

수록 치형 가공 시 미성형 구간의 길이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

변위제어해석 결과를 토대로 하여 변곡점에서의 하중 및 배압력을 부여하여 하중제어해석을 수행하였으며, Fig. 8에 나타낸 바와 같이 변위제어해석 결과와 마찬가지로 하중과 배압력이 증가할수록 미성형 구간의 길이가 감소하였다.

본 연구의 대상인 Output Hub는 30° Symmetric model로 치형이 약 5개 정도 포함되어 있기 때문에 인접해 있는 5개 치형 표본의 미성형 구간 길이의 평균값을 측정하였으며, Table 3에 정리한 바와 같이 변위제어해석과 하중제어해석 결과는 약 0.1mm 정도의 차이로 유사한 경향을 가짐을 확인할 수 있다.

Table 3. Non-forming size of output hub

Case	Reaction force (kN)		Non-forming area (mm)	
	Punch	Sleeve	Displacement control	Load control
A	343	121	1.54	1.64
B	647	203	0.95	1.04
C	1,360	557	0.62	0.75
D	1,760	690	0.39	0.42

Fig. 9에 나타난 치형 성형 해석 결과의 경향을 분석한 결과 Output Hub의 미성형 구간을 1.0mm 이하로 만족시키기 위해서 Punch의 하중은 699kN 이상, Sleeve 배압력은 163kN 이상을 부여해야만 하는 것을 알 수 있다.

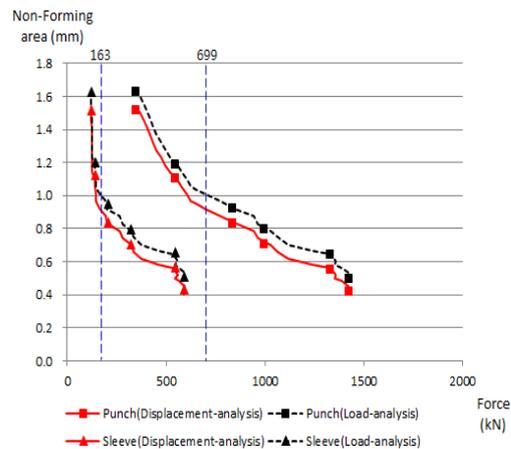


Fig. 9. Non-forming area vs. reaction force of output hub

2.6 Reaction Hub 해석 결과

Output Hub와 마찬가지로 Reaction Hub의 치형 미성형 구간의 해석을 위하여 Punch에 1mm/s의 강제 변위를 주는 변위제어해석을 통해 Punch와 Sleeve에 걸리는 반력을 Fig. 10과 같이 도출하였다.

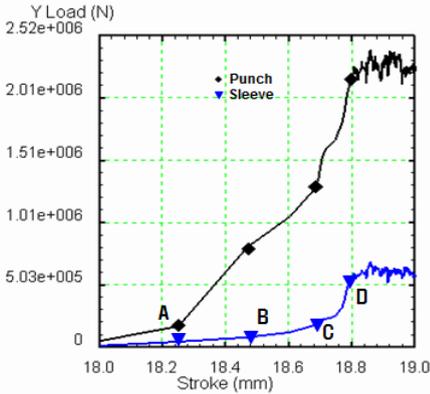


Fig. 10. Load-stroke curve of reaction hub

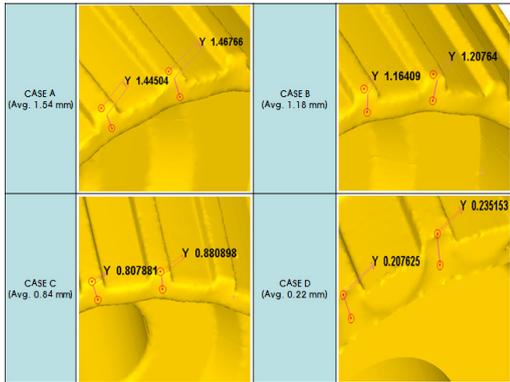


Fig. 11. Displacement control analysis of reaction hub



Fig. 12. Load control analysis of reaction hub

Reaction Hub에 대한 변위제어해석과 하중제어해석의 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타내었으며, 본 연구의 대상인 Reaction Hub의 30° Symmetric model은 치형이 2개가 포함되어 있기 때문에 인접해 있는 2개 치형 표본의 미성형 구간의 길이의 평균값을 Table 4와 같이 측정하였다.

Output Hub의 경우와 마찬가지로 하중과 배압이 증가할수록 미성형 구간의 길이가 감소하였고, 반력이 증가할수록 변위제어해석과 하중제어해석의 미성형 구간의 길이 차이가 줄어들어 거의 유사한 수치를 나타내었다.

Table 4. Non-forming size of reaction hub

Case	Reaction force (kN)		Non-forming size (mm)	
	Punch	Sleeve	Displacement control	Load control
A	183	52	1.54	1.41
B	805	77	1.18	1.12
C	1,350	194	0.84	0.83
D	2,040	480	0.22	0.22

Fig. 13에 나타난 바와 같이 Reaction Hub의 미성형 구간을 1.0mm 이하로 만족시키기 위해서 Punch의 하중은 1,030kN 이상, Sleeve 배압력은 152kN 이상을 부여해야만 하는 것을 알 수 있다.

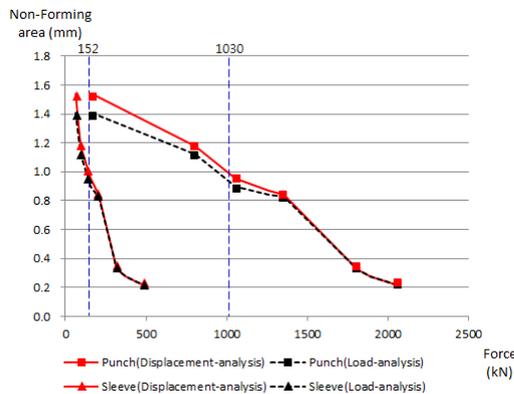


Fig. 13. Non-forming area vs. reaction force of reaction hub

2.7 해석 결과 분석

변위제어해석과 하중제어해석 결과를 살펴보면, 상부 치형 가공에 필요한 Reaction Hub의 Punch 하중 (1,080kN)이 Output Hub의 Punch 하중(699kN) 보다 크게 나타났으며, 이는 치형 가공에 따른 변형 경화에 의한

것으로 판단된다.

Fig. 14는 치형 가공 후의 면압(Normal Pressure)을 나타내고 있으며, 변형 경화에 의해 Reaction Hub의 면압이 Output Hub에 비하여 상대적으로 높게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 변형 경화는 소성 변형량이 많을수록 높게 나타나며, 이는 단면감소율이 높을수록 Punch 하중이 크게 나타나는 원인이 된다.

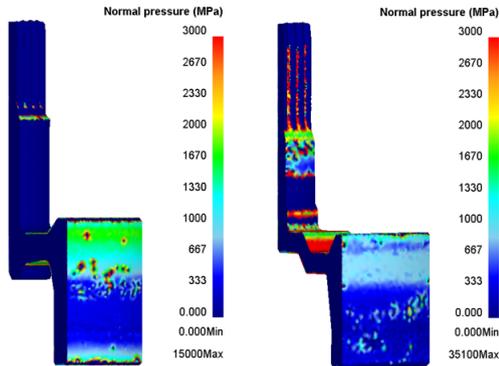
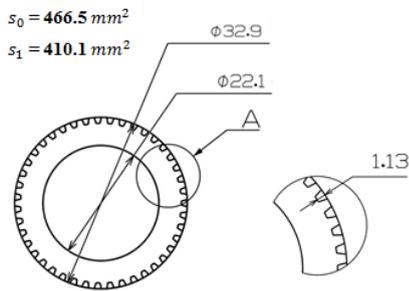
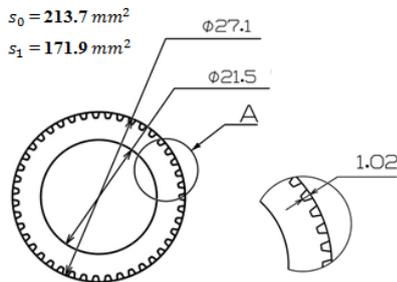


Fig. 14. Normal pressure of output hub & reaction hub



$$\text{Reduction Area(Output Hub)} = 1 - \frac{s_1}{s_0} = 0.12$$



$$\text{Reduction Area(Reaction Hub)} = 1 - \frac{s_1}{s_0} = 0.19$$

Fig. 15. Reduction area of output hub and reaction hub

Fig. 15에서 치형 가공 전후의 단면적을 s_0 , s_1 으로 하여 단면감소율을 계산한 결과, Output Hub의 경우는 0.12, Reaction Hub는 0.19로 결정됨에 따라 Reaction Hub의 Punch 하중이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향은 Lee[8]의 중공축을 이용한 전후방 가공 공정에 의한 변형 특성 연구에서도 유사한 결과를 확인할 수 있다.

또한, 미성형 구간을 1.0mm 이하로 만족하기 위한 Sleeve의 배압력은 Output Hub와 Reaction Hub가 각각 163kN, 152kN로 차이가 나는 것 역시 Sleeve의 단면적 차이에 의한 영향 때문이며, Output Hub의 상형을 위한 Sleeve 단면적(2,060mm²)이 Reaction Hub의 Sleeve 단면적(1,735mm²)보다 크기 때문에 배압력 또한 크게 나타남을 볼 수 있다.

본 연구에서 얻은 하중 및 배압력 조건을 이용하여 Fig. 16에 나타낸 것과 같이 Output Hub와 Reaction Hub를 가공한 후 미성형 구간 길이의 최대값을 측정할 결과, Output Hub의 경우는 1.16mm, Reaction Hub의 경우는 1.04mm로 측정되어서 본 연구의 해석 결과가 유용하게 활용될 수 있음을 검증하였다.

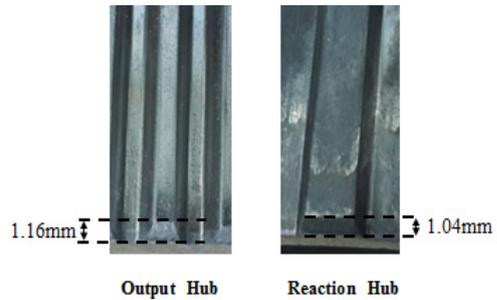


Fig. 16. Measurement of non-forming area

3. 결론

본 연구에서는 자동차 자동변속기의 핵심 부품인 Output Hub 및 Reaction Hub의 치형 미성형 구간의 최소화를 위한 배압 냉간 단조 성형 공법에 대한 유한요소 해석을 수행하여 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) Sleeve 배압력 설정 → 상부 치형 성형 → 소재 하부 모서리 충전 → 하부 치형 성형의 4 공정으로 해석을 수행하였다.

- (2) 변위제어해석으로 Punch 하중 및 Sleeve 배압력을 도출하였고, 도출된 하중 및 배압력을 이용한 하중제어해석을 수행하여 상호 검증하였다.
- (3) 변위제어해석과 하중제어해석이 유사한 경향을 보였으며, Output Hub와 Reaction Hub의 미성형 구간을 1.0mm 이하로 만족시키기 위한 Punch 하중과 Sleeve 배압력을 구하였다.
- (4) Reaction Hub의 Punch 하중이 Output Hub 보다 큰 이유는 상부 치형 가공 시 Reaction Hub의 단면감소율이 Output Hub 보다 크기 때문인 것으로 판단되며, Sleeve 배압력이 Output Hub와 Reaction Hub에서 차이가 나는 것 또한 Sleeve 단면적의 차이에 기인한 것으로 판단된다.
- (5) 본 연구에서 제시한 배압 냉간 단조 성형 해석 과정과 결과를 실제 적용 결과와 비교 검증하였으며, 치형 제품의 품질 개선 및 생산성 향상을 위해 요구되는 성형가공 조건을 도출하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] C. B. Wang, S. J. Lim and Y. B. Park, "Effect of the design parameter for internal spline forming using the tube", *Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity*, Vol. 15, No. 7, pp. 512-517, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5228/KSP.2006.15.7.512>
- [2] H. Y. Cho, Y. T. Kim, K. W. Kim and W. J. Kim, "Finite Element Analysis for Multi-stage Forging Process Design of bolt with Non-axisymmetric Washer Cam", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 32, No. 4, pp. 585-595, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2008.32.4.585>
- [3] J. H. Lee, Y. S. Lee and J. J. Park, "Dimensional Accuracies of cold-forged spur gear", *Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity*, Vol 5, No. 2, pp. 115-121, 1996.
- [4] G. J. Kang, J. Kim, B. S. Kang, "Numerical and Experimental Evaluation for Elastic Deformation of a Cold Forging Tool and Workpiece for a Sleeve Cam of an Automobile Start Motor", *J. Eng. Manuf.*, Vol. 222, No. 2, pp. 217-224, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM929>
- [5] Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee, T. Ishikawa, "Experimental and Finite Element Analysis to Predict the Dimensional Changes of a Cold-Forged Spur Gear", *Proc. IMechE.*, Vol. 220, pp. 1051-1057, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM295>
- [6] Deform-3D, *Deform-3D Tutorial*, SFTC Inc., 2010.
- [7] <http://www.matweb.com/>

- [8] J. H. Lee, "A study on the Deformation Characteristics of Forward and Backward Can Extrusion Process Using a Hollow-Shaft", *Master's Thesis*, Inha University, Graduate School of Education, Incheon, Republic of Korea, pp. 30-37, 2005.

이 용 우(Yongwoo Lee)

[정회원]



- 2005년 8월 : 연세대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사수료)
- 2007년 1월 ~ 현재 : 에스텍 컨설팅그룹 기술이사

<관심분야>
기계, 자동차, 재료

김 장 훈(Janghoon Kim)

[정회원]



- 2010년 8월 : 서울대학교 에너지자원공학과 (공학사)
- 2013년 12월 ~ 현재 : 에스텍 컨설팅그룹 선임연구원

<관심분야>
기계, 자동차, 재료

권 종 호(Jongho Kwon)

[정회원]



- 1992년 8월 : 연세대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1992년 7월 ~ 1997년 11월 : 기아 자동차 기술센터 선임연구원
- 2002년 9월 ~ 현재 : 신한대학교 자동차공학과 교수

<관심분야>
기계, 자동차, 재료