다단 미세 치형 허브 기어의 프레스 성형기술개발

김동환*(진주국제대학교 자동차공학과), 이정민, 이상호, 변현상(부산대학교 정밀기계공학과), 김병민(부산대학교 기계공학부)

Development of Press Forming Technology for the Multistage Fine Tooth Hub Gear

D. H. Kim(Automotive Eng. Dept. JIU), J. M. Lee, S. H. Lee, H. S. Byun(Precision Eng. Dept., PNU), B. M. Kim(Mechanical Eng., Dept. PNU)

ABSTRACT

This paper deals with the aspects of die design for the multistage fine tooth hub gear in the cold forging process. In order to manufacture the cold forged product for the precision hub gear used as the ARD 370 system of bicycle, it examines the influences of different designs on the metal flow through experiments and FE-simulation. To find the combination of design parameters which minimize the damage value, the low gear length, upper gear length and inner diameter as design parameters are considered. An orthogonal fraction factorial experiment is employed to study the influence of each parameter on the objective function or characteristics. The optimal punch shape of fine tooth hub gear is designed using the results of FE-simulation and the artificial neural network. To verify the optimal punch shape, the experiments of the cold forging of the hub gear are executed.

Key Words : Hub gear (허브 기어), Cold forging (냉간 단조), Formability (성형성), FE-simulation (유한요소해석),

1. 서론

고도의 경제성장에 따라 생활 및 건강 유지의 수단으로 일반자전거 뿐만 아니라 Health 용 자전거의 보급률이 증가하고, 남녀노소 구별 없는 운전계층의 확산으로 운전이 용이하고 신체적으로 피로가 덜한 이상적인 자동 자전거 튜브 공기압 유지 및 정 구동 및 정·역 구동 등의 고품격 자전거의 보급이 급격히 높아지고 있는 추세이다. 이에 일반자전거(Bicycle), Health 용 자전거(Exercise Bike), 휠체어(Wheel Chair) 및 각종 재활 기구 등의 구동 장치에 기존 제품의 변형 없이 장착할 수 있는 정 구동 허브(Hub) 내장 다단 변속기 및 정· 역 구동 전진주행장치(Bi-Directional Pedaling System : BDP system)등이 국내업체에 의해 개발되었으나, 장치의 핵심 부품인 다단 미세 치형 허브 기어의 무절삭 프레스 성형기술이 부족하여 양산 적용을 못하고 있는 실정이다.

현재, 금형을 이용한 프레스 가공에 의한 치형부 성형기술은 개발 초기 상태이며, 특히 금형설계 기술이 체계화되어 있지 않다. 또한 국내 치형 부품의 냉간단조 분야는 부가가치가 낮은 노동 집약적 가공에 의존하고 있으며 핵심부품의 제조기술이 낙후하여 수입의존도가 높고, 국내 자동 변속기용 클러치류는 치형 전단계의 제품을 수입한 후 그로브 전조방식이나 호빙 및 치핑으로 치형을 성형하고 있는데 이는 프레스 가공법에 비해 생산성이 크게 떨어지며 그로빙 머신이나 호빙머신 등의 전용장비의 도입으로 인한 막대한 초기투자비용이 소요된다. 따라서 내장형 다단 변속 미세 허브 기어에 대한 내측 치형부 냉간단조 공정을 개발하여 작업능률 및 생산성을 획기적으로 향상시키고, 제품의 고정도화를 실현하여 경쟁력을 높일 필요가 있다.

프레스를 이용한 냉간단조공법은 가공능률이 높아 대량생산 및 고강도 기어류 제품 제작이 가능하나, 복잡한 형상을 지닌 다단 미세 치형 허브 기어에 대하여 초기소재의 결정, 성형가능성 및 최적 예비성형공정에 대한 연구가 미비하여 고정밀도 성형기술개발이 절실히 필요하다. [1] 기어류의 냉간단조 시에 가장 중요한 기술은 제품의 정도를 좌우하

는 핵심기술인 성형기술, 정밀 금형의 설계 및 제작기술로서 국내의 경우 기술이 미흡하여 품질이 저하되고 부가가치가 낮아 내수 및 수출시장에서 외국제품과의 경쟁력이 떨어지는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 내장형 다단 변속 기어 허브의 치형부 성형해석 기법 개발 및 적용을 통하여 생산현장의 치형부 냉간단조 시에 발생하는 치형 단부의 결함 발생 분석 및 설계 인자들의 영향 파악을 통한 제품 불량 발생을 최소화함으로써 품질 안정화 및 생산성 향상기술을 제시하고자 한다.

2. 허브 기어 성형 공정 및 결함

2.1 다단 허브 기어 성형 공정

내장형 다단 변속 기어(ARD 370)의 구조 및 허브 기어의 조립도를 Fig. 1 에 나타내었다. 기존 기어의 성형공정은 초기소재결정, 압출공정, 절삭공정(방전가공)으로 최종 부품을 생산하지만, 본 연구에서는 초기소재결정, 열간압출, 선삭, 치형부 프레스 성형으로 최종 부품을 성형하고자 한다. ARD 370 허브 기어의 치형부 도면을 Fig. 2 에 나타내었다. 치형의 형상은 2 개의 기어단을 가지고 있으며 아래의 미세 치형 형상은 모듈(M)이 0.8, 잇수가 69 개, 압력각이 25° 그리고 어덴덤 높이가 1.0M, 디덴덤 높이가 1.25M 인 치형이다.

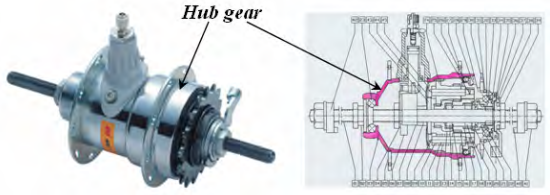


Fig. 1 ARD 370 and the assembly of hub gear

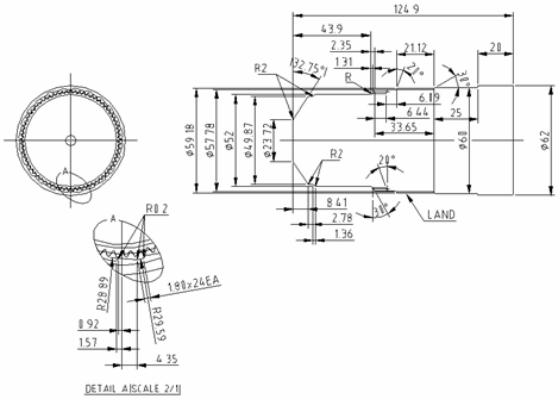
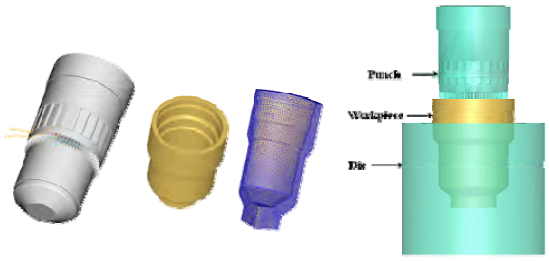


Fig. 2 The drawing of ARD 370 hub punch in cold forging process

2.2 치형부 냉간단조 공정해석 및 결함

본 연구에서는 현장 경험을 토대로 냉간단조공정과 사이징 공정이 결합된 단조공정의 치형 생성 타당성을 평가하고자 해석을 수행하였다. 내장형 다단 변속 허브 기어의 치형부 성형을 위해서는 먼저 금형의 형상이 정의가 되어야 하며, 이를 위하여 Fig. 2 의 펀치 및 하부 금형 다이를 Pro-E 의 치형 생성 프로그램을 이용하여 금형 형상을 정의하였다(Fig. 3). 사용된 소재는 S20C 이며 인장시험으로부터 응력-변형률 관계식 ($\sigma = 745\varepsilon^{0.2}$) 을 획득하였다. 금형과 소재의 마찰조건은 일반적인 냉간단조 공정으로 하여 m=0.12 로 하였고, 해석 시간을 고려하여 1/4 단면으로 상용유한요소코드인 DEFORM 을 이용하여 해석을 수행하였다(Fig. 4).



(a)Punch (b)Mesh shape (c)Forging condition

Fig. 3 Punch and workpiece shape for FE-simulation

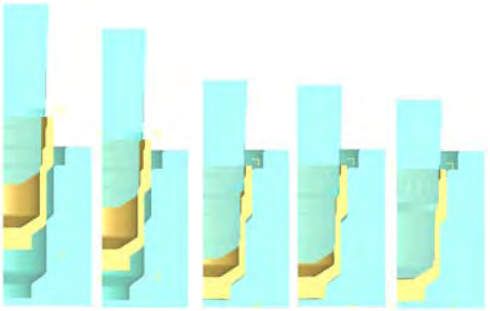
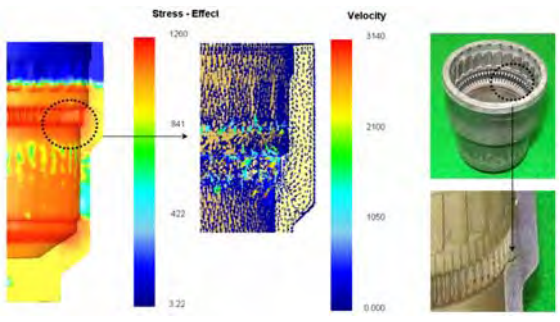


Fig. 4 The sequence of gear forging with sizing process



(a) (b)

Fig. 5 (a) The results of FE-simulation and (b) defects in cold forging process

치형부 냉간단조 공정의 성형해석 결과로부터 Fig. 5 에 나타난 바와 같이 치형 성형에 있어서 금속 유동이 불 균일하게 발생하고 특히 미세 치형부를 중심으로 전·후방 금속 유동이 동시에 발생됨을 알 수 있었다. 이것은 치 끊어짐 발생의 문제시되는 현장의 결과(Fig. 5(b))를 그대로 반영하는 단적인 예가 되며, 따라서 이 공정을 개선하기 위한 예비성형체 형상의 재설계가 필수적이고, 형상의 재설계를 통하여 정량적인 damage 값의 최소화, 미세 치형부의 folding angle 의 최소화 그리고 치형부의 집중 응력의 저감 및 비교적 균일한 변형률을 갖는 성형공정설계가 되어야 할 것이다.

3. 다단 미세 치형 공정설계

3.1 설계변수의 선정

현장의 경험으로 제시된 내장형 허브 기어 공정에 대한 성형해석 결과로부터 미세 치형부 금속 유동의 불 균일 및 연성 파괴 값이 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 이 공정으로 성형된 내장형 다단 변속 허브 기어 부품은 미세 치형 단 부에서의 크랙이 발생하여 제품에 치명적인 결함이 되고 있으며 양산되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 냉간단조공정의 예비성형체 설계 방안을 제시하기 위하여 Fig. 6 의 설계변수를 고려하였다. 먼저 ❶의 Low gear 부분은 미세 치형이 성형되는 길이이며, ❷의 Upper gear 부분은 상단 치형이 성형되는 길이이다. 또한 ❸의 Low diameter 부분은 미세 치형부가 성형되는 내경으로 미세 치형의 산 높이에 해당된다. 본 연구에서 이 세 가지를 설계변수로 설정한 것은 먼저 현장에서의 예비성형체 형상변경이 용이하며, 현장의 경험으로부터 이 세 가지 치수변화로 제품의 성형특성이 크게 변하여 본 연구에서는 현장 경험을 토대로 세 가지 변수를 주 설계변수로 설정하였다. 설계변수의 치수 범위는 Fig. 6 에 나타난 바와 같이 Low gear 부분은 6~12mm, Upper gear 는 20 ~ 26mm 그리고 Low diameter(inner diameter: ID) 치수는 53.4~53.8mm 까지 고려하였다.

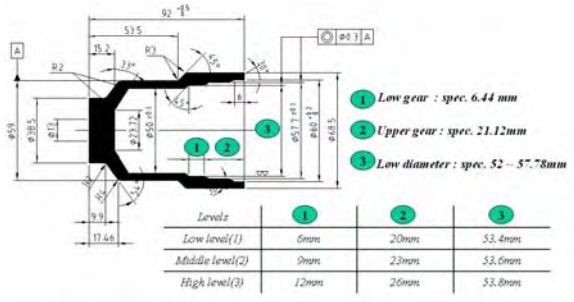


Fig. 6 Design variable for hub gear forging process

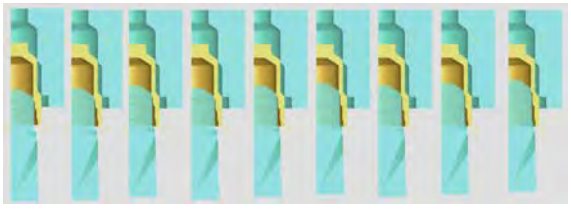
3.2 설계변수조합에 따른 성형해석

설계변수에 따른 설계변수조합을 Table 1 에 나타내었다. 이 표의 형식은 실험계획법의 직교배열표에 따른 것으로 실험 및 해석의 회수를 최소로 하여 변수 범위내의 모든 가능한 조합에 대한 영향을 모두 얻을 수 있는 장점을 가진다. 본 연구에서는 설계변수조합에 따른 목적함수로 파단 및 크랙 발생 예측에 정량적인 값으로 평가할 수 있는 damage 값으로 하여 Table 1 의 설계변수조합에 따른 유한요소해석을 수행하였다. 설계변수조합의 변화에 따라 예비성형체 체적은 Table 1 에 나타난 바와 같이 차이가 발생한다. 이 범위는 최종 제품 체적 범위내의 허용범위에 속하나 부위별 체적에 의한 금속유동특성 차이는 발생하리라 생각된다.

성형해석의 전 단계 공정에서 소재에 소재물성을 입력하고, 금형과 소재의 경계조건을 입력한 다음, 해석 수행 직전의 금형의 위치를 각 공정별로 나타낸 그림을 Fig. 7 에 나타내었다. 다이의 형상은 모두 동일하나, 펀치의 위치는 각 공정별로 차이가 있다. 금형과 소재의 접촉 위치는 각 공정의 설계변수조건에 따라 접촉지점의 차이가 발생하게 된다. 직교배열표의 9 가지 경우에 대한 damage 예측값을 토대로 미 해석설계변수조건에 대한 damage 값을 예측하기 위하여 신경망을 적용하였다.[2] 적용된 신경망은 입력값은 Table 1 의 각 공정의 설계변수값들이며 학습값은 각 공정의 damage 값으로 한다. 신경망 학습 후 미 해석 설계변수 조합에 대한 예측된 damage 값을 Fig. 8 에 나타내었다.

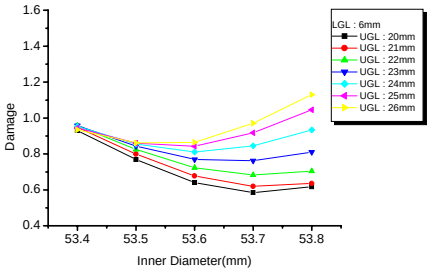
Table 1 Orthogonal array and results of FE-simulations

No.	Design variables (mm)			Error	Volume	Object functions
	❶	❷	❸	E		Damage
1-work	6	20	53.4	1	2.6259xE4(mm^3)	0.93
2-work	6	23	53.6	2	2.5716xE4(mm^3)	0.77
3-work	6	26	53.8	3	2.5173xE4(mm^3)	1.13
4- work	9	20	53.6	3	2.5985xE4(mm^3)	0.61
5- work	9	23	53.8	1	2.5430xE4(mm^3)	0.59
6- work	9	26	53.4	2	2.5075xE4(mm^3)	0.96
7- work	12	20	53.8	2	2.5685xE4(mm^3)	1.54
8- work	12	23	53.4	3	2.5356xE4(mm^3)	0.81
9- work	12	26	53.6	1	2.4789xE4(mm^3)	0.69

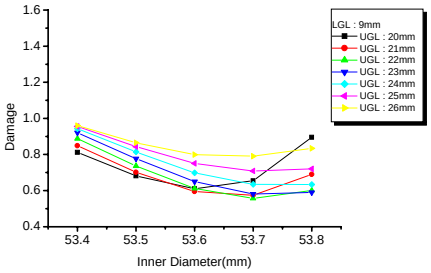


(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9)

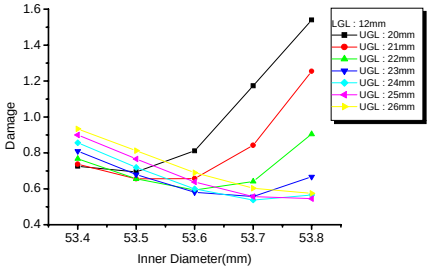
Fig. 7 Position of punch depending on design parameters (matching the No. in Table 1)



(a) Low gear length (LGL): 6mm

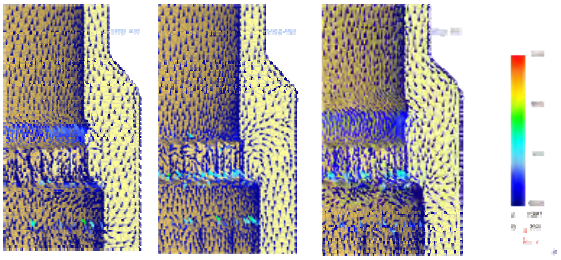


(b) Low gear length (LGL): 9mm



(c) Low gear length (LGL): 12mm

Fig. 8 Predicted damage value using ANN for combination of design parameters



(a) 6mm (b) 9mm (c) 12mm

Fig. 9 Characteristics of metal flow according to LGL

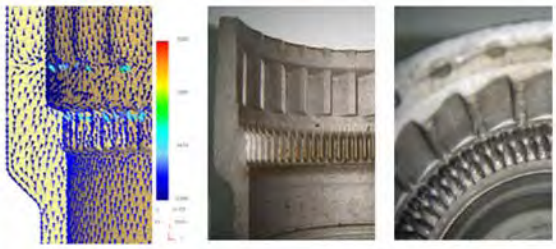


Fig. 10 Metal flow for selected condition

해석결과로부터 최소의 damage 값을 가지는 설계변수조합은 LGL=12mm, UGL=24mm, ID=53.7mm 임을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 9 에 나타낸 바와 같이 LGL 길이가 미세 치형 성형부 길이와 유사한 경우(6mm)와 약 2 배인 경우(12mm)에는 치형이 완전히 성형되는 시점에서 접힘(folding) 결함이 나타났고, 이것은 최종 제품 형상에 결함이 없다고 하더라도 접힘에 의한 강도 저하, 크랙 발생 등의 문제점을 유발하는 원인이 된다. 본 연구결과로부터 미세 치형 성형부의 길이는 기어 치수의 약 1.5 배(9mm)가 치형부 유동이 균일함을 알 수 있고, 따라서 LGL 길이가 9mm 이며 최소 damage 를 가지는 UGL=23mm, ID=53.7mm 인 설계변수조합이 치 끊어짐 등의 결함이 발생되지 않는 최적조건이라고 생각되며, 검증해석 결과 치형부 금속 유동이 균일함을 알 수 있었다(Fig. 10). 또한, 예측된 설계변수조건으로 금형을 가공하고 양산적용 (1,400EA) 결과 Fig. 10 에 나타낸 바와 같이 치 접힘, 치 끊어짐 등의 결함 없이 성형이 매우 양호함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 내장형 다단 변속 기어 허브의 무결함 프레스 성형기법을 개발하기 위하여 설계변수선정, 유한요소해석 및 신경망을 적용하였다. 그 결과 최적설계변수조합을 선정하였고, 양산적용으로 성형성이 우수함을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 개발된 다단 변속 기어 허브 냉간 단조공정의 CAE 해석기법은 향후, 설계 인자가 제품 특성에 미치는 상호 영향도를 이용한 최적 설계변소조합의 선정 및 예비성형체 설계에 활용 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 2004 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2004-002-D00030), 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Cai, J., Dean, T. A., and Hu, Z. M, "Alternative Die Designs in Net-shape Forging of Gears," J. of MPT, Vol. 150, pp. 48 - 55, 2004.
2. Kim, D. H, Ko, D. C, and Kim, B. M, "Application of Artificial Neural Network and Taguchi Method to Preform Design in Metal Forming Considering Workability," Int. J. of Mach. Tools and Manufact., Vol. 39, pp. 771 - 785, 1999.