

정밀 베벨기어 폐쇄단조 공정의 해석적 및 실험적 연구

엄재근¹, 이진혁¹, 박정휘², 이민철³, 전병윤², 조광제¹, 전만수[#]

Experimental and Numerical Study on Enclosed Die Forging of a Precision Bevel Gear

J. G. Eom, J. H. Lee, J. H. Park, M. C. Lee, B. Y. Jun, K. J. Cho, M. S. Joun

ABSTRACT

In this paper, we present a systematical procedure to develop a precision enclosed die forging process for a bevel gear of a passengers' car. The detailed procedure involves bear gear CAD modeling, process design and CAE simulation, CAM and die making, material preparation, and prototype manufacturing using both the technologies and machines accumulated and equipped in the technology innovation center(TIC) of Gyeongsang National University. It is demonstrated that the presented approach guarantees bevel gears with the second KS grade quality, which can be used for the differential gear of the passengers' car.

Key Words : Bevel Gear, Enclosed Die Forging, Finite Element Method

1. 서론

단조산업은 한 국가의 산업 발전을 좌우하는 중요한 기간산업이다. 특히 대량 생산을 업의 특성으로 하는 자동차산업과 전자산업 등에서 단조는 가격과 품질을 동시에 만족시킬 수 있는 장점이 있기 때문에 많은 주목을 끌어 왔다. 우리나라의 경우, 자동차산업과 전자산업의 급성장으로 단조가 양과 질 양면에서 큰 발전을 이룩하였다.

그러나 아직 선진국과는 여전히 수년 또는 10년 이상의 격차를 보이고 있는 분야, 가령 단조장비와 정밀금형 등의 분야가 존재하며, 젊고 유능한 인력의 확보가 매우 어렵고, 산업적인 관점에서 볼 때 질적으로 국제적인 수준에 이르지 못한 상태에서 사향산업의 전조가 나타나고 있으며, 산업 현장에서 중국의 추격이 가시권에 온 것으로 느끼고 있는 점 등이 위기의 징표가 되고 있는 것이 작금의 현실이다. 환율의 영향 탓도 있기는

하지만, 벌써 일부의 단조품은 일본 제품에 비하여 가격 경쟁력이 떨어지는 것으로 이야기되고 있다. 대량생산을 근간으로 하는 승용차 부품의 경우, 규모의 경제의 영향을 받을 수밖에 없기 때문이다. 고급 단조 금형의 경우, 선진국에 비하여 상대적으로 영세한 우리나라 금형회사의 품질 보증 능력의 한계와 자동차회사 등의 대형 고객이 국내의 기업과 제품을 신뢰하지 않는 문제 등으로 인하여 기술발전에 한계를 노출하고 있다. 이러한 상황이 보다 더 현실화될 경우, 향후 10년 간의 우리나라의 단조산업은 과거 10년과는 전혀 다른 양상이 될 것이다.

이러한 인식을 바탕으로 볼 때, 우리나라가 단조 분야에서 지속적인 발전을 구가하기 위해서는 단조 관련 기업의 특화 발전 추구, 금형 회사를 포함한 단조 외곽의 지원 조직 간의 협력 및 협업, M&A를 통한 대형화 및 전문화, 단조품 소비자들의 자발적 부품 공용화 참여 등이 살 길이다.

1. (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터

2. 경상대학교 대학원 기계공학과

3. 경상대학교 2단계 BK21

교신저자: 경상대학교 기계공학과,

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

(사)경상대 수송기계부품기술혁신센터(이하 (사)경상대 TIC 로 함)는 이러한 취지에 입각하여 설립한 전국 유일의 단조 특화 TIC(Technology Innovation Center)이다. (사)경상대 TIC 는 현재 특히 베벨기어의 냉간단조 분야를 특화 육성하고 있다. 베벨기어 냉간단조[1-8]는 1970 년경에 시작되었으며, 우리나라는 1990 년경에 시작한 것으로 추정되고 있다. 이 기술은 이미 국내에서 십 수년간 활용되어 왔지만, 아직 선진업체에 요소기술을 의존하고 있는 실정이다. 우리나라에서 승용차용 베벨기어는 대부분 절삭가공되고 있는 반면, 일본에서는 단조로 생산되고 있다. 국내에서 생산중인 일부의 승용차용 베벨기어도 금형 등의 요소기술을 대부분 해외의 선진업체에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 점을 감안한다면, 우리나라는 이 분야에서 기회의 땅이기도 하며, 그러한 연장선상에 (사)경상대 TIC 가 존재하는 것이다. 문제는 승용차용 베벨기어의 경우, 공정 기술과 금형의 완전 자립은 그렇게 밝지만은 않다는데 있다. 장기 불황을 극복한 일본의 선진 업체들의 공세가 만만치 않을 것이라는 점과 특히 자동차산업이 극심한 가격 경쟁에 돌입하는 시점에서 중국과 인도 등 후발국의 맹추격이 예상된다는 점도 비관적 견해를 갖게 하는 여러 요인 중의 하나이다.

이러한 인식을 바탕으로 (사)경상대 TIC 는 베벨기어를 하나의 특화 분야로 하여 역량을 결집하고 있으며, 본 연구에서는 그간에 쌓은 경험을 바탕으로 정밀 베벨기어 관련 기술을 논하고자 한다.

2. 베벨기어의 폐쇄단조 공정 개발

2.1 대상 제품의 설명

실험에 적용된 제품은 중동지역에 수출하는 수송기계의 차동장치(Differential gear)에 장착되는 베벨기어로 Fig. 1 에서 보는 바와 같다. 요구된 베벨기어의 등급은 2 급이다. 제조공정은 2 단 냉간단조 공정이며, 본 연구에서는 마지막의 사이징 공정(일반 형단조 공정임)을 제외한 폐쇄단조 공정만 논의 대상으로 삼았다.

2.2 베벨기어의 모델링

베벨기어의 모델링은 CAD 시스템의 능숙한 사용과 베벨기어에 관한 전문 지식이 있어야 가능한 베벨기어 엔지니어링의 필수적 기술이다. 모델링 기법에 대하여 간단히 소개하면, 먼저 베벨기어의

원추거리와 피치원추각을 스케치하고, 그 후 (사)경상대 TIC 에서 개발한 이두께 계산 프로그램과 인벌류트곡선 생성 프로그램을 이용하여 치형을 생성하고, 이를 이용하여 베벨기어의 CAD 모델을 완성한다. 베벨기어 CAD 모델링은 CAM 작업을 위해서 반드시 필요하며, 성형해석을 위해서도 필수적이다. Fig. 1 은 본 연구에서 개발 대상으로 삼고 있는 베벨기어의 금형가공과 성형해석에 사용된 베벨기어의 CAD 모델을 나타내고 있다.

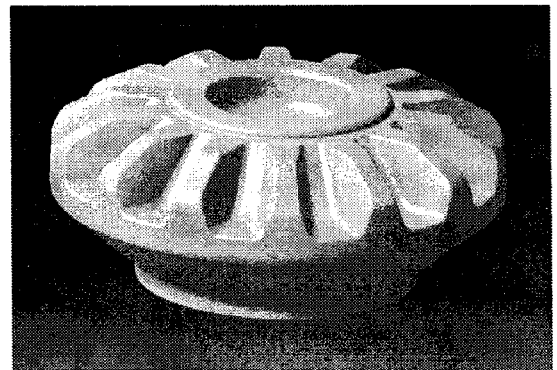


Fig. 1 A bevel gear CAD model to be developed

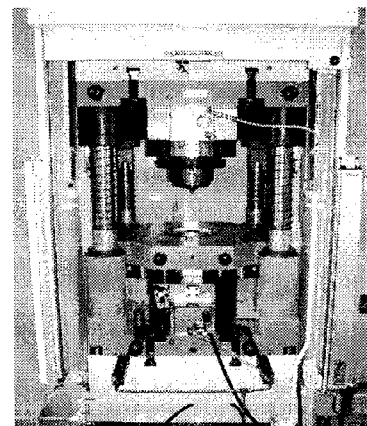


Fig. 2 A double-action link-type hydraulic enclosed forging die set, used in this study

2.3 폐쇄단조 시 금형의 운동 분석

본 연구에서 개발 대상으로 삼고 있는 소형 베벨기어(Fig. 1)의 생산을 폐쇄단조 공법으로 실시하면, 품질과 가격 양면에서 유리하다. 이유는 공정이 줄어들고, 원재료가 절감되기 때문이다. 그리고 분류단조로 인하여 성형성이 우수하고 금형 수명이 길어지는 효과도 있다. 폐쇄단조와 일반단조의 차이는 다이세트에 있으며, Fig. 2 에 본 연구에 사용된 (사)경상대 TIC 의 폐쇄다이세트(설계: NICHIDAI, 제작: 나라 M&D)를 나타내었다.

전병윤[9] 등은 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 복동

링크유압식 폐쇄다이세트의 작동 모드를 세 가지로 구분하였다. 즉, 모드 1은 상판이 링크시스템에 접촉하지 않은 상태이며, 모드 2는 링크시스템에 하중이 부과되었으나 폐쇄가 되지 않은 상태이고, 모드 3은 링크시스템에 하중이 부과되면서 동시에 폐쇄가 일어난 상태이다. 한 공정에서 전술한 세 가지의 모드가 모두 발생할 수도 있고 일부의 모드만 발생할 수 있다. 가령, 제품에 따라 폐쇄가 일어나기 직전부터 성형이 시작되는 것이 있고, 폐쇄가 되고 난 이후부터 성형이 시작되는 것이 있다. 본 연구에서 개발 대상으로 삼은 Fig. 1의 베벨기어는 폐쇄가 되고 난 직후부터 성형이 시작되는 경우이다. 따라서 설계시에 모드 3만을 고려하면 된다. Fig. 1의 베벨기어를 생산하기 위한 폐쇄단조의 공정설계를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 개발한 폐쇄단조 공정은 두 개의 펀치와 두 개의 금형으로 이루어져 있다.

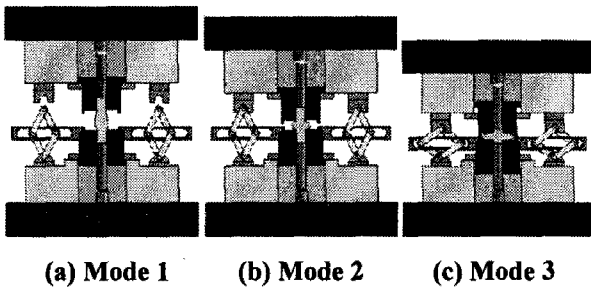


Fig. 3 Three different modes of the enclosed forging die set

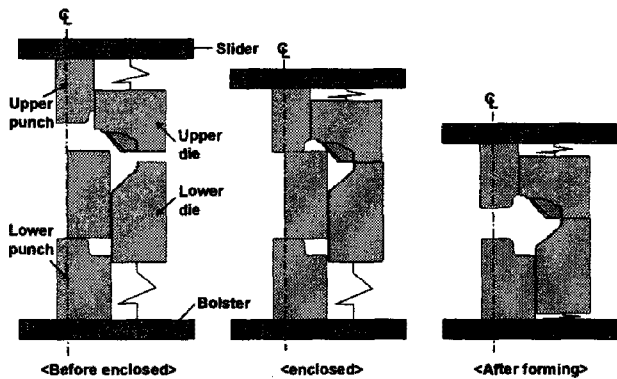


Fig. 4 Schematic description of the enclosed die forging process

2.4 CAM 및 금형가공

기존의 베벨기어 금형가공법에서는 대개 방전가공(Electric discharge machining)후 랩핑(Lapping)으로 금형을 완성하였다. 하지만 이 방전가공법은 방전

면 조도가 좋지 않으므로 랩핑 시 많은 시간이 소요된다. 게다가 정도를 검증하기가 어렵다. (사)경상대 TIC에서는 베벨기어의 설계를 바탕으로 모델링을 실시한 후, CAM(Computer aided manufacturing)과 고속가공기로 금형을 직접 제작한다. Fig. 5는 고속가공기로 제작된 금형과 펀치를 나타내고 있다.

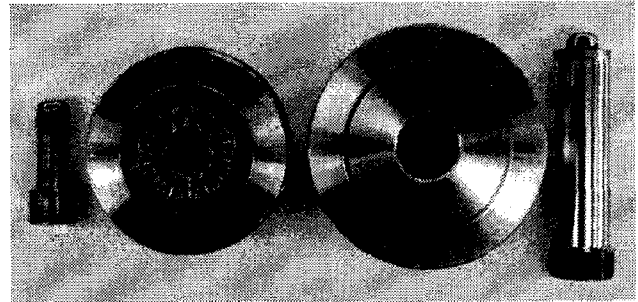


Fig. 5 Dies and punches for the enclosed die forging of a bevel gear

2.5 재료의 준비

폐쇄단조에 사용하는 원소재는 단조시에 형상의 변화가 심하므로 구상화 풀림(Spheroidizing annealing)으로 재료를 연화시킨다. 풀림(Annealing)온도 조건이 맞지 않을 경우 폐쇄단조품에 크랙이 발생하게 된다. 풀림이 완료된 원소재는 0.4 ~ 1 mm 정도의 강구로 쇼트피닝(Shot peening)을 한다. 쇼트피닝으로 원소재의 스케일과 탈탄층 및 표면의 이물질을 제거한다. 그리고 인산염 피막으로 원소재 표면에 부식생성물층을 만들어서 윤활성을 향상시킨다. 인산염 피막만으로는 마찰계수가 높고 가공에 필요한 미끄럼성도 충분히 부여할 수가 없는 경우가 있다. 그럴 경우 원소재와 금형이 소착이 발생하고 표면이 깨끗하지 못하므로 보다 강력한 윤활처리가 필요하다. 본 연구에서는 베벨기어 폐쇄단조가 심한 형상변화를 동반하므로 일반 윤활보다는 윤활성이 뛰어난 이황화몰리브덴(MoS₂) 윤활을 사용하였다.

2.6 시험생산 장비 준비

시험생산에 사용된 장비는 (사)경상대 TIC의 보유장비인 Fig. 6의 유압 프레스와 Fig. 2의 폐쇄다이세트이다. 유압 프레스는 가압능력 10,000 kN, 행정길이 600 mm 등의 사양을 지니고 있다. Fig. 6에 실험에 사용된 유압프레스를 나타내었다.



Fig. 6 Hydraulic press of TIC of Gyeongsang National University, used in this study

2.7 실험 결과

Fig. 6의 유압프레스, Fig. 2의 폐쇄다이세트, Fig. 5의 금형 및 펀치를 사용하여 실험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 육안검사 결과 윤활막의 불량, 성형상태의 결육 및 겹침, 크랙, 버(Burr)가 발생하지 않았다.

베벨기어 치형테스터기를 사용하여 단일피치 오차, 인접피치 오차, 누적피치 오차, 이흠의 흔들림을 체크한 결과 2급의 결과를 얻었다.

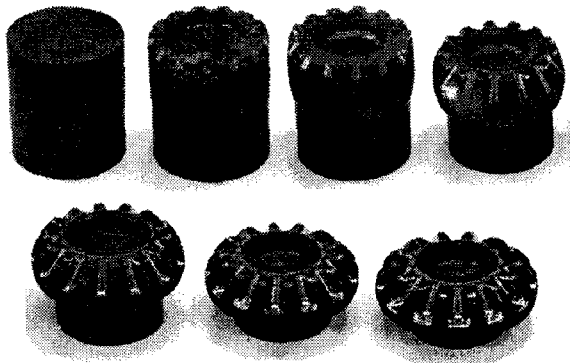


Fig. 7 Experimental results

3. 베벨기어 단조 공정 해석 및 검증

3.1 재료의 물성치 및 해석조건

재료의 종류는 SCM420H이며, 절단된 원형 봉재 (반경 17.5 mm × 높이 39.0 mm)를 단조 공정의 해석에 사용하였다. 시뮬레이션을 위한 공정 및 해석 정보는 다음과 같다.

- 단조 시뮬레이터: AFDEX/3D

- 소재의 변형저항식: $\bar{\sigma} = 750.0\bar{\epsilon}^{0.2}$ MPa
- 금형과 소재의 접촉한계치: 0.05 mm
- 요소망: 지능형 사면체요소망

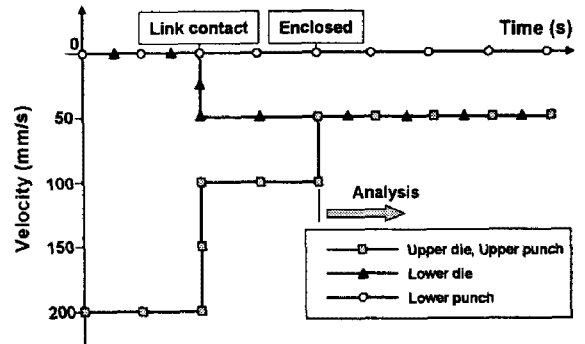


Fig. 8 Velocity profile

3.2 마찰조건

해석에 사용된 마찰조건으로 일정전단응력마찰을 사용하였으며, 치형을 생성시키는 상금형의 마찰계수는 0.2 이고 나머지 금형은 0.1로 가정을 하였다. 치형이 조각된 금형은 상대적으로 많은 변형을 야기시키므로 다른 금형에 비하여 마찰이 크게 작용할 것으로 판단하였다.

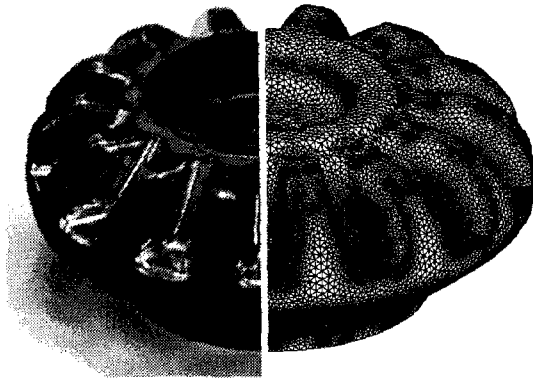
3.3 해석결과 및 토의

Fig. 9에 실험결과와 비교 목적으로 해석결과를 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 9로부터 실험결과와 해석결과가 매우 유사함을 알 수가 있다. 즉, 상·하펀치의 스트로크 거리에 따라 비교한 결과, 소재가 차 들어가는 형상과 치형이 생성되는 모습이 매우 유사한 결과를 보였으며, 특히 마지막 결과에서 금형과 소재의 미접촉 영역이 정확하게 일치하는 것을 Fig. 10에서 확인할 수 있다



Fig. 9 Analysis results

참 고 문 헌



(a) Experiment (b) Prediction
Fig. 10 Comparison of contact regions

4. 결 론

본 연구에서는 폐쇄단조의 개발 과정을 확립하였으며, 폐쇄단조를 이용한 정밀 베벨기어 제조 기술에 대한 실험적 및 해석적 연구가 소개되었다. 베벨기어의 모델링에서 시작하여 시험생산에 이르는 전 과정을 요소기술을 강조하여 설명하였다. 그리고 베벨기어의 개발과정에서 하나의 과정으로 정착한 베벨기어 단조 공정의 해석시뮬레이션 기술을 적용의 관점에서 상세하게 설명하였다.

(사)경상대 TIC 는 본 논문에서 제시된 각종 H/W 와 S/W 기반을 구심점으로 하여 확보한 요소 기술을 바탕으로 베벨기어를 주요 특화 품목으로 하여 발전하고 있다. 앞으로도 (사)경상대 TIC 는 우리나라의 단조산업 발전에 조금이나마 보탬이 되고자 부단히 노력할 것이다.

후 기

본 연구는 (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터의 정밀냉간단조평가시스템을 사용하여 이루어졌으며, 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 지원으로 실시된 연구 결과의 일부임.

- [1] 박종진, 이정환, 이영선, 1996, 베벨기어 폐쇄단조의 유한요소해석, 대한기계학회 논문집 A권, 제20권, 제8호, pp. 2458~2467.
- [2] 김동환, 정구섭, 김병민, 2004, 자동차용 차동 베벨기어의 최적 예비성형채 설계, 한국자동차공학회논문집, 제12권, 제1호, pp. 184~189.
- [3] 김용조, 박성대, 2003, 베벨기어의 밀폐단조 공정설계를 위한 유한요소해석, 한국기계가공학회지, 제2권, 제1호, pp. 92~99.
- [4] Y. K. Lee, S. R. Lee, C. H. Lee, D. Y. Yang, 2001, Process modification of bevel gear forging using three-dimension finite element analysis, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 113, No. 1-3, pp. 59~63.
- [5] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, A. K. Baldoukas, 1996, Simulation of the precision forging of bevel gears using implicit and explicit FE technique, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 57, No. 1-2, pp. 164~171.
- [6] M. Fu, B. Shang, 1995, Stress analysis of the precision forging die for a bevel gear and its optimal design using the boundary-element method, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 53, No. 3-4, pp. 511~520.
- [7] M. Meidert, M. Knoerr, K. Westphal, T. Altan, 1992, Numerical and physical modelling of cold forging of bevel gears, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 33, No. 1-2, 75~93.
- [8] J. H. Yoon, D. Y. Yang, 1990, A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of bevel gear forging by using a remeshing technique, Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, No. 4, pp. 277~291.
- [9] 최상호, 전병윤, 이민철, 박래훈, 임재근, 전만수, 2006, 폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트의 개발, 한국소성가공학회지, 제15권, 제5호, pp. 373~381.