

3 차원 유한요소법을 이용한 Upsetting Type Spur Gear 냉간 단조 공정 해석

천세환* · 이영선** · 권용남** · 이정환**

Analysis of the upsetting type process for spur gear cold forging using 3D-FEM

S.H.Chun*, Y.S.Lee**, Y.N.Kwon**, J.H.Lee**

Abstract

Since the upsetting type is superior to an extrusion type to get the dimensional accuracy of cold forged spur gear, the upsetting type process for spur gear cold forging has been studied. FE analysis of upsetting type process for spur gear cold forging was performed to investigate about flow pattern of workpiece and die stress. To analyze the elastic characteristics of die, both rigid and elastic material model were used during loading stage.

Under-filled defects were detected in lower portions of spur gear forged by upsetting type in experimental. When the elastic material model for die was used, the under-filled defects could be predicted. On the other hand, if the material model of die was rigid, the defects could not be presented because the die deflection was not considered.

Key Words: Elastic Die, Upsetting Type, Cold Forging, Spur Gear, 3D-FEM

1. 서 론

냉간 단조 기술의 발전과 더불어 기계 부품의 대표인 기어를 단조로 제조하고자 노력한 것은 그 역사가 깊으며, 그 적용 또한 오랜 시간이 경과되고 있으나 정밀도를 향상시키고자 하는 노력은 지금도 계속되고 있다. 자동차용 기어류의 경우는 KS 규격으로 최소 3~4 급 이상의 높은 수준을 요구하고 있기 때문에 형상 부여의 기술 수준으로는 대응이 곤란하다. 실제로 승용차용 기어류의 경우 KS 4 급 이상을 만족시키기 위해서는 대부분이 10~20 μ m 의 치수정밀도를 요구하고 있기 때문에 금형 제작과 시제품 제조, 측정을 통한 요구 치수 정밀도 확보는 현실 불가능하다고 해도

과언이 아니다.

기어의 대표 주자인 평 기어(Spur Gear)는 가공 방법 및 역사면에서 가장 먼저 개발되고 적용되었을 것으로 예측되지만, 최근까지도 많은 연구가 진행되고 있을 정도로 정밀도와 양산성을 모두 만족시키는 기술 개발이 어려운 대상이다.

평 기어의 정밀 단조는 다양한 이론적 배경 UBET⁽¹⁾과, 2D-FEM⁽²⁾, 그리고 실험⁽³⁾에 의하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 이러한 연구 결과들은 기어의 치수적인 측면에 대해서 고려하지 않고 형상의 변화에 중점을 두었다. 치수적인 정밀도 측면에서 평 기어를 냉간에서 성형하는 기술은 압출 형태의 금형을 이용하는 압출형(Extrusion type)과 밀폐 금형을 이용하는 업세팅

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 한국기계연구원 소성응용그룹

(Upsetting type) 형태의 2 가지로 구분할 수 있다. 압출형은 적은 하중으로 연속적인 성형이 가능하기 때문에 금형 수명에 유리하지만, 압출 시 발생하는 굽힘 응력으로 인하여 기어의 리드 정밀도(Lead Error)를 요구 한계까지 향상시키는데 많은 어려움이 존재한다. 반면에 업세팅 형태는 금형의 탄성 변형이 과도하기 때문에 치수 변형을 제어하는 것과 금형 수명 확보에 어려움이 존재하였기 때문에 실 적용이 곤란하였으나 변형체의 유동을 역으로 이용하여 성형 하중과 금형 응력을 감소시키는 공정을 개발함으로써 실현 가능성이 높아졌다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 압출형 연구⁽⁵⁾에서 얻은 치수 정밀도 향상 방안에 대한 결과를 이용하고 보다 우수한 치수 정밀도를 확보하기 위해 업세팅 단조 형태를 이용하여 실험과 유한요소해석을 수행하였다.

2. 압출형 단조와 업세팅 형태 비교

2.1 단조품 형상 비교

두 모델의 형상은 Fig.1 에서 보는 바와 같이 압출형은 금형의 랜드(Land)부를 통과하지 않는 부위가 존재하기 때문에 플랜지부가 존재하고 압출 시작 부위에 미성형 부위가 존재한다. 이 부위들은 열처리 후 추가 기계가공이 필요한 부분이다. 반면에 업세팅 형태 보다 정형(Net-Shape)으로 제조가 가능하다.

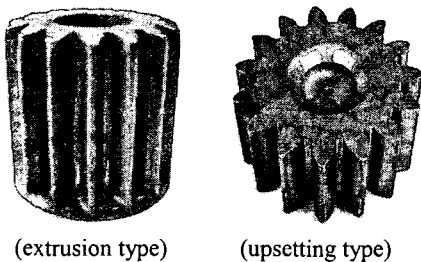


Fig. 1 Comparisons of spur gear forged by extrusion type and upsetting type, respectively

2.2 리드 정밀도 비교

Fig.2 는 2 가지 형태로 제조된 시제품에서 측정된 리드 정밀도로서, 삼차원 접촉식 측정기를 이용하여 측정한 결과이다. 기어의 밀면을 측정

기준으로 설정한 후 윗면으로 25mm 부위까지 측정하였다. 압출형은 압출이 시작되는 부분부터 압출이 끝나는 부분까지 일정한 방향으로 기어의 리드가 0.025 mm 비틀림을 알 수 있다. 반면에 업세팅 형태는 리드 정밀도가 0.005 mm 이내(KS1 급 수준)로 일정하게 나타내고 있다.

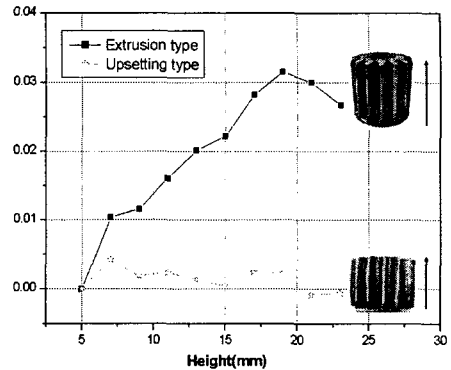


Fig. 2 Lead errors of spur gear forged by extrusion type and upsetting type, respectively

3. 업세팅 형태 냉간 성형 실험 및 유한요소 해석

3.1 강도 부족으로 인한 금형 파손

업세팅형 공정으로 평기어를 냉간 성형하기 위하여 초경 인서트와 금형강으로 보강된 금형을 제작하여 실험을 수행하였다. 실험결과 Fig.3 에서와 같이 최종 성형이 이루어지기 이전에 금형이 파손되었다. 파손 금형의 외관은 금형의 강도 부족으로 인해 발생하는 형태이었으며, 역시 업세팅 형태로 단조할 때의 문제점을 재 확인하였다. 금형 파손에 대한 정량적인 원인 분석을 위해 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM-3D 이용하여 성형 해석과 금형 응력해석을 수행하였다. 금형의 응력해석이 주 목적인 만큼 소재는 강소성체로, 금형은 강성체 재료 모델을 이용하여 변형 소재의 소성 유동을 분석한 후 금형의 응력을 계산 하였다. 그 결과 금형의 응력은 Fig.4 에 나타나 있는 바와 같이 최대 3,950Mpa 의 최대 인장 주응력이 집중되고 있어 파손의 원인이 되었다. 이때의 마찰계수(bondelite-Bondelube 윤활 처리)는 전단마찰계수로 0.15 를 사용하였다.

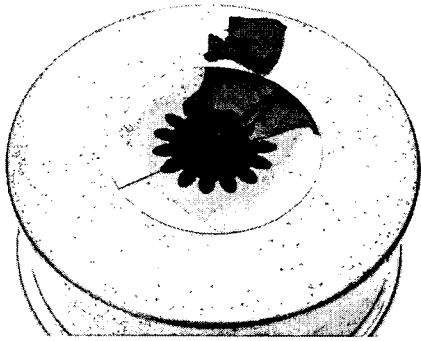


Fig. 3 Fracture of cold forging die for spur gear (upsetting type)

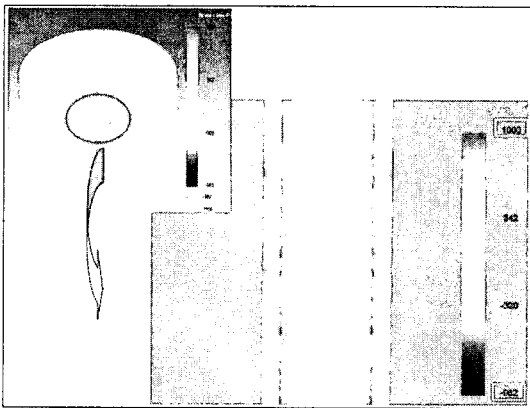


Fig. 4 Stress distribution of cold forging die for spur gear (upsetting type)

이와 같은 금형의 강도 부족은 Fig.5 에 나타나 있는 바와 같이 단조품에 미성형 부위 형성의 원인 되고 있다.

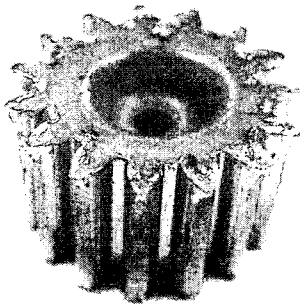


Fig. 5 Under-filled defects occurred in lower portions of spur gear (upsetting type)

3.2 탄성체 금형을 이용한 유한요소 해석
금형 강도 부족과 함께 냉간 성형품의 미성형이 발생되어 유한요소해석으로 미성형 발생의 원인을 분석하고자 하였다. 그러나, Fig.6 에서 알 수 있듯이 금형을 강체로 해석한 결과에서는 실제와는 달리, 단조품에 미성형 부위 발생 없는 양호한 단조품 제조가 가능한 것으로 분석되었다. 따라서, 소재의 변형 양상을 보다 실제와 동일시 하기 위해 본 연구에서는 금형의 탄성 변형에 의한 영향을 고려하여 분석하였다. 그 결과 실제와 동일한 양상으로 단조품 하단에 미성형이 발생됨을 예측할 수 있었다.

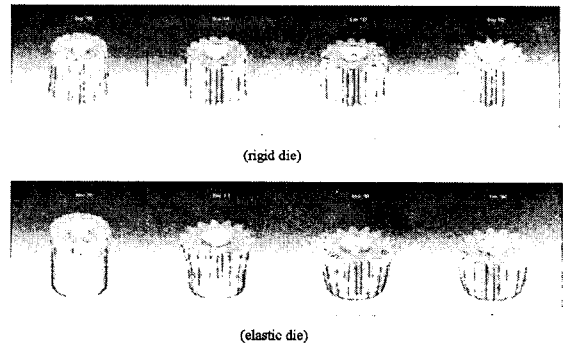


Fig. 6 Predicted flow patterns for the cases of rigid die and elastic die on loading stage

따라서, 금형의 탄성 변형이 극심할 경우는 단조품의 유동 분석을 위한 해석 시에도 성형 해석 시 금형의 탄성변형을 동시에 해석해야 하며, 이를위해 금형을 탄성체 모델로 가정해야 함을 알 수 있다. Fig.7 은 성형 해석 시 발생하는 금형의 탄성 변형이 극심함을 확인할 수 있는 유한요소 해석 결과를 나타내고 있다.

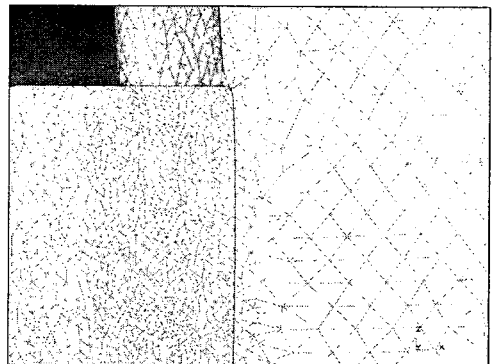


Fig. 7 Die deflection of upsetting type spur gear

3.3 치수 정밀도

미성형 발생 원인에 대한 유한요소해석 결과로 마찰계수의 저감과 금형 강도의 증가가 단조품의 결함을 제거하고 건전한 제품을 제조할 수 있는 방안을 확인하였다. Fig.8 은 결함 발생 없이 제조한 시제품의 사진과 해석결과로부터 얻은 부위별 유효응력 분포를 보여주고 있다. 리드 정밀도 또한, 5mm 이내로 우수한 결과를 나타내고 있어 자동차용 기어 제조에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Fig.9 는 업세팅형태로 단조된 스피어 기어의 치형 변화를 나타낸 것이다. 초기 Wire-EDM 을 시작으로 최대 수 μm 에서 최소 수십 μm 까지 변화를 나타내고 있다. 압출형 치형 변화⁽⁵⁾와는 달리 치형 곡선이 균일하게 변화하고 있으며, 이는 역시 업세팅 공정이 금형 가공시에 고려해야 하는 보정 작업도 압출형 공정에 비해 유리할 것임을 말해주고 있다.

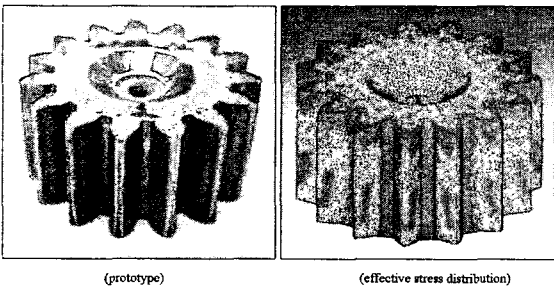


Fig. 8 Prototype and its stress distribution of upsetting type spur gear

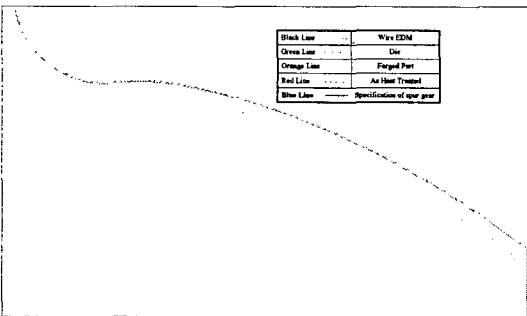


Fig. 9 Involute curve for upsetting type spur gear at each step

초기 Wire-EDM 데이터에서 실제 금형의 치수 차이는 금형의 래핑 공정에 의한 것이며, 실제 금형과 단조품 차이, 그리고 열처리 공정 후 또한

현저하게 치형의 변화가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구 계획

압출형에 비해 정밀 단조 기어 제조에 유리할 수 있는 업세팅 공정에 대한 분석을 위해 실험과 유한요소 해석을 수행하였다. 실험을 통해서 단조품의 미성형 부위없이 정형으로 단조할 수 있는 공정인자의 영향을 분석하였으며, 유한요소해석을 통해서 금형의 파손 원인 분석과 미성형 발생 원인 제거를 위한 공정의 영향을 분석하였다. 또한 업세팅 형태의 단조 기어가 정밀도 향상을 위한 치형 곡선 보정에도 유리함을 알 수 있었다..

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(무절삭 정밀단조연구실)사업으로 진행된 결과로서 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Hung-Hsiou Hsu, 2002, A study on precision forging of spur gear forms and spline by the upper bound method, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 44, Pages 1543-1588.
- (2) J. C. Choi and Y. Chio, 1999, Precision forging of spur gear with inside relief, International Journal of Mechine Tools and Manufacture, 39, 10, pp1575-1588
- (3) N.R.chitkara and M.A.Bhutta, 2001, Shape heading of splines and solid spur gear forms: an analysis and some experiments, Int. J. of Mechanical Sciences, 43, 4, pp1073-1106
- (4) K. Ohga, F. Murakoshi, H. Ando, K. Miyoshi and K. Kondo, 2000, Net shape forging of toothed products utilizing divided flow method, J. of JSTP, 41, 477, pp1021-1025
- (5) 천세환, 이영선, 이정환, 배원병, "냉간 단조 시 인블류트 곡선 변화 예측을 위한 유한요소 해석," 2003 추계 한국소성가공학회 논문집, pp. 34~38.