

## 3차원 유한요소법을 적용한 냉간단조 기어 성형 해석 및 설계

송종호\* · 김수영\*\* · 임용택\*\*\*

### Forming Analysis and Design of Cold Gear Forging using 3D Finite Element Method

J.H. Song, S.Y. Kim and Y.T. Im

#### Abstract

It is important to predict forming procedure for minimizing trial-and-error in the application of cold forging of gears. In this study, 3-dimensional simulations of cold forging processes of spur and bevel gear were carried out using finite element method to investigate the characteristics of the processes. From the simulation result, it was found that incomplete teeth forming of spur gear was occurred with increase of teeth number in forging by forward extrusion. It can be reduced through division of material flows at the initial forming state using forward/backward combined extrusion.

**Key Words** : Cold Gear Forging, Finite Element Method, Forward Extrusion, Combined Extrusion

#### 1. 서 론

기어는 절삭을 통하여 가공이 이루어지는 대표적인 기계요소로서, 절삭가공 시 정밀한 성형의 장점을 지닌 반면 소재유실 및 절삭 시간 등은 생산 효율을 저하시키는 문제점으로 지적되고 있다. 최근 성형공정의 경제성이 중요한 이슈로 부각되면서 대표적인 경제적 성형공정인 단조 공정의 적용이 증대되고 있으며, 기어 성형에서도 단조 공정으로 대체하려는 노력들이 진행되고 있다. 기어 성형 시 치형의 정밀성 여부는 품질과 직결된 중요한 요소로서, 단조 성형을 적용하기 위해서는 소재의 유동,

응력, 하중 및 금형의 탄성변형 등 성형 요소들에 대한 정밀한 해석을 통한 금형 설계가 요구된다. 이러한 단조 공정에서의 성형 예측을 위하여 유한요소해석기법이 널리 적용되어 왔으며<sup>(1)</sup>, 컴퓨터의 발달과 함께 3차원 성형 해석을 적용하여 다양한 단조 공정 및 기어 공정에 대한 성형을 예측하려는 노력들이 수행되고 있다<sup>(2-4)</sup>.

따라서 본 연구에서는 강열점소성 유한요소법을 적용하여 스피(Spur) 및 베벨(Bevel) 기어의 냉간단조 성형 공정들에 대한 3차원 성형해석을 CAMPform3D<sup>(5)</sup>를 사용하여 수행하고, 해석 결과를 통해 기어 성형 양상을 고찰하여 보았다.

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
\*\* 한국과학기술원 기계기술연구소  
\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과

또한, 성형해석 결과를 통하여 스퍼기어 전방압출 공정 시 기어 잇수의 증가에 따른 불안전 성형 발생 여부를 검토하고, 전/후방 복합압출을 적용하여 초기 성형 개시 시에 소재의 유동을 상하로 분배시킴으로써 이러한 결함 발생 위험을 감소시킬 수 있는 지를 알아보고자 한다.

### 2. 3차원 기어 냉간단조 유한요소해석

기어는 부분적으로 비대칭적인 기하학적 형상 특성을 가지고 있어 냉간단조 성형의 정밀한 예측을 위해서는 3차원 유한요소해석이 요구된다. 그러므로 본 연구에서는 스퍼 및 베벨기어에 대한 성형공정을 분류하여 성형해석을 진행하였다.

스퍼기어의 성형공정은 전방압출, 형금형 압출 및 업세팅 성형 등으로 분류할 수 있으며, 기어 잇수에 따라 잇수가 적을 경우 압출 공정을, 잇수가 많을 경우에는 업세팅 공정을 수행한다<sup>(6,7)</sup>. 따라서 본 연구에서는 잇수 7, 압력각 20도, 모듈 5인 스퍼기어의 전방압출 해석을 진행하였다.

해석 수행 시 기어 이의 좌우 대칭성 및 일정 각도에 따른 대칭성을 고려하여 부분모델에 대한 해석을 통하여 해석 시간 효율을 증대하였으며, IBM PC 및 슈퍼컴퓨터인 CRAY T3E 환경에서 작업을 진행하였다.

Fig. 1은 상용 프로그램인 I-DEAS를 사용하여 금형 모델링 및 삼각형 요소격자 생성을 수행한 전방압출 전체 금형의 일부분을 나타낸 것으로 원추형 안내부의 각도는 45도로 설계하였다.

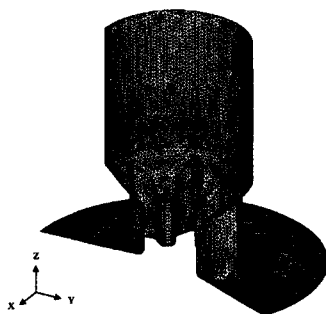


Fig. 1 Created triangular meshes of die surface for forward extrusion

냉간단조 해석을 위하여 마찰계수는 0.1로, 유동응력식은 아래의 식을 적용하였으며<sup>(8)</sup>, 육면체 격자를 사용하여 비정상상태 해석을 진행하였다.

$$\bar{\sigma} = 900 \bar{\epsilon}^{0.18} \text{ (KN/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

Fig. 2는 성형 하중 및 유동이 일정한 정상상태에 도달할 때까지 전방압출 성형해석을 수행하였을 때 소재의 변형형상을 나타낸 것으로, 성형 시 이 끝단에서는 이 부위의 높은 마찰로 인하여 불안전 성형이 이루어지지만 일정 변위에 이르면 형상의 결함이 없이 성형이 진행되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3은 최종 성형단계에서의 유효응력을 나타낸 것으로, 치형 부위에서 높은 응력이 발생되어 금형의 탄성 변형으로 인한 치형 오차가 발생될 수 있음을 알 수 있었다.

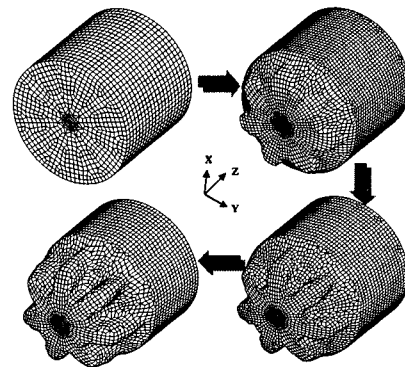


Fig. 2 Intermediate deformations of the workpiece in forward extrusion of spur gear with 7 teeth

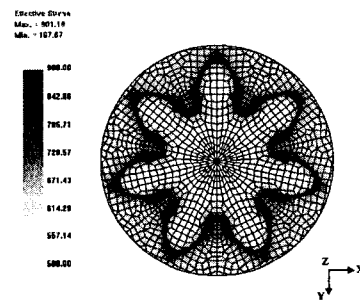


Fig. 3 Effective stress distribution of the final state

기어 잇수를 증가시킬 경우 기어 이의 크기는 고정된 반면, 전체 직경은 잇수에 비례하여 증가하게 된다. 따라서, 기어 잇수의 변화에 따른 전방압출 성형 시의 변화를 살펴보기 위하여 기어 잇수를 19개로 증가하여 증공형 전방압출 해석을 수행하여 보았다.

Fig. 4는 전체의 성형과정을 나타낸 것으로 앞의 해석 결과와는 대조적으로 기어의 성형 상태가 불안전하며,

일정한 변형이 진행된 후에도 불완전 성형이 지속되는 것을 알 수 있었다.

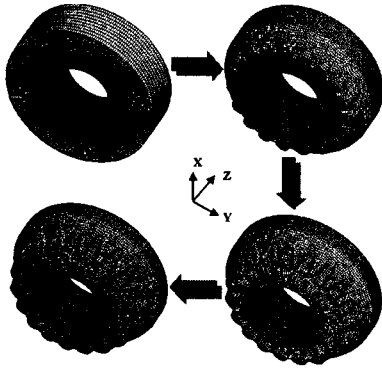


Fig. 4 Intermediate deformations of the workpiece in forward extrusion of gear with 19 teeth

이러한 잇수가 많은 기어에 대한 성형을 위하여 업세팅형 단조성형을 수행하여 보았다. 밀폐형 냉간단조 성형은 전방압출에 비하여 고른 이 형상을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있는 반면, 최종 성형 단계에서 펀치 압력의 급격한 상승 유발 및 금형의 탄성변형으로 인한 치형 변형을 초래할 수 있으므로 정확한 펀치의 변위 조절이 요구된다. 본 연구에서는 Fig. 4와 동일한 기어 사양에 대하여 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 상하 대칭인 밀폐형 금형을 설계하고 해석을 수행하였다.

Fig. 6은 해석 성형과정을 나타낸 것으로 고른 이 형상을 얻음으로써 전방압출 시 성형결함을 피할 수 있음을 알 수 있었다.

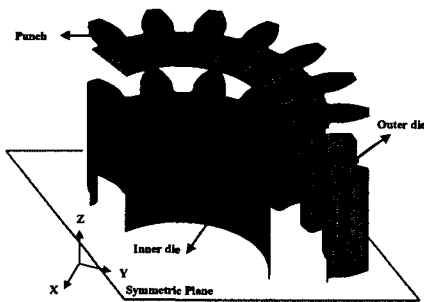


Fig. 5 Created triangular meshes of die surface for closed die forging

본 연구에서는 스퍼기어의 성형해석과 함께, 베벨 기어의 업세팅 공정에 대한 성형해석 또한 수행하였다. 이

를 위하여 잇수 13, 모듈 2, 압력각 20도인 베벨기어를 대상으로 Fig. 7에 나타낸 바와 같은 금형을 설계하였다.

Fig. 8은 이의 성형과정을 나타낸 것으로 초기 예비성형체의 원통형 소재 부위가 펀치 압력을 통하여 금형 안으로 유동되어 원활한 기어성형이 이루어짐을 알 수 있었다.

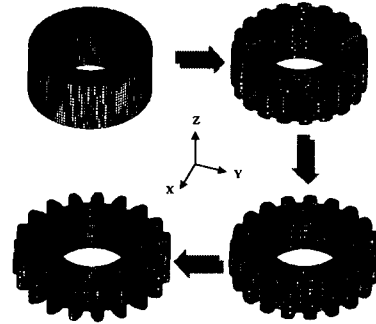


Fig. 6 Intermediate deformations of the workpiece in closed die forging of gear with the same specification as Fig. 4

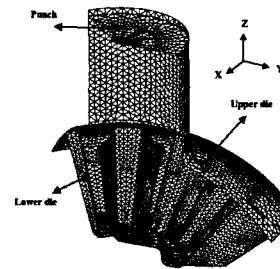


Fig. 7 Created triangular meshes of die surface for bevel gear forging

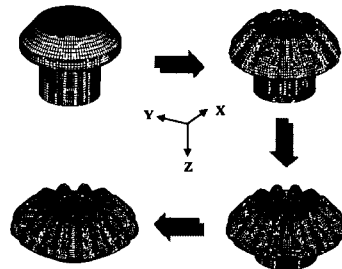


Fig. 8 Intermediate deformations of preform workpiece in bevel gear forging

### 3. 전/후방 복합압출 성형

앞에서 진술한 바와 같이 기어의 전방압출 시 기어의 불완전 성형 위험이 증대됨을 알 수 있었다. 이러한 주요 원인은 원추형 금형 형상을 따라 발생하는 소재 유동이 기어를 성형하기 위한 소재 유동을 방해하기 때문이다. 따라서 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 전/후방 복합압출을 수행하여 원추형 금형 면의 소재의 유동 속도를 감소시킴으로써 불완전 성형의 위험성을 감소시킬 수 있을 것으로 여겨진다. 또한 일정 성형이 진행된 후 전방 압출 양상으로 유동이 진행되면 이미 성형된 소재 부위가 출구에서 소재의 미끄러짐을 저지함으로써 결함이 없는 기어 형상을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

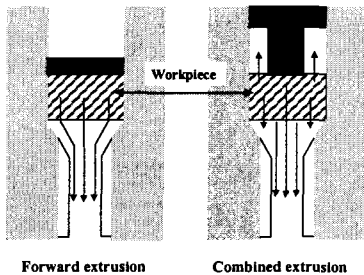


Fig. 9 Material flow lines of forward and combined extrusion

Fig. 10은 Fig. 4의 전방 압출 성형을 복합압출 성형으로 수행한 성형 형상을 나타내고 있으며, Fig. 11은 Fig. 4의 전방압출 성형결과와 비교하여 금형 출구 및 측면에서의 성형 양상을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 전방압출에서 발생하는 미충만 결함이 복합압출을 수행할 경우 없어지는 것을 알 수 있었다.

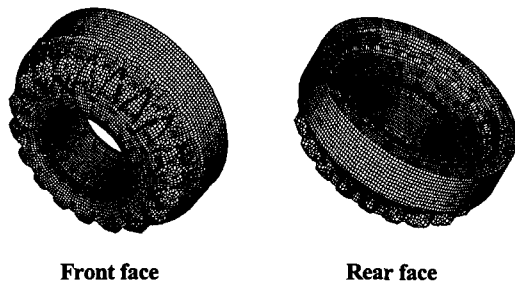


Fig. 10 Deformation results of combined extrusion of the same gear as shown in Fig. 4

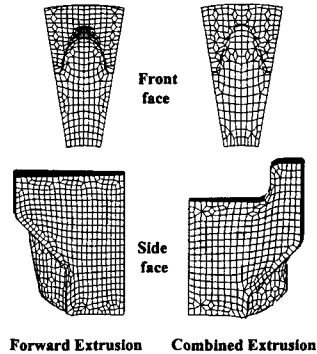


Fig. 11 Comparison of deformations between forward and combined extrusion in one section of gear tooth

### 4. 결론

본 연구에서는 스피 및 베벨기어에 대하여 3차원 냉간 단조 성형해석을 수행하고 성형 양상을 파악하였다. 이로부터, 전방압출 시 기어 잇수가 증가할수록 이 형상의 미충만 결함이 발생하는 것을 알 수 있었으며, 전/후방 복합 압출 성형을 수행하여 압출 초기에 소재의 유동을 분배함으로써 기어 이의 성형에 수반되는 결함을 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

- (1) Kobayashi, S., Oh, S. I., and Altan, T., 1989, Oxford University Press.
- (2) Kim, S. Y. and Im, Y. T., 2000, Int. Journal of Forming Processes, Vol. 3, No. 3-4, pp. 253~278.
- (3) Mamalis, A.G., Manolakos, D. E., and Baldoukas, A. K., 1996, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 57, pp. 164~171.
- (4) Lee, Y. K., Lee, S. R., Lee, C. H., and Yang, D. Y., 2001, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 113, pp. 59~63.
- (5) [Http://camp.kaist.ac.kr](http://camp.kaist.ac.kr).
- (6) Dean, T. A., 2000, Materials and Design., Vol. 21, pp. 271~278.
- (7) Townsend, D. P., 1992, "Dudley's Gear Handbook", McGraw-Hill.
- (8) I. C. F. G., 1996, "Cold Forgeable Steels", International Cold Forging Group.