

# 파이프형 요소밀도 제어 함수를 이용한 롤캠 단조공정의 시뮬레이션 및 결과의 검증

## Simulation of Roll Cam Forging Process Using a Pipe-Type Mesh Density Control Function and Its Verification

\*이민철<sup>1</sup>, 최인수<sup>2</sup>, #전만수<sup>3</sup>

\*M. C. Lee<sup>1</sup>, I. S. Choi<sup>2</sup>, #M. S. Joun(msjoun@gnu.ac.kr)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 기계공학과 박사후 과정, <sup>2</sup>경상대학교 기계공학과 대학원, <sup>3</sup>경상대학교 기계항공공학부

Key words : Pipe-type density function, Mesh density control, Forging simulation, Roll CAM forging process

### 1. 서론

단조 시뮬레이션 기술은 축대칭을 포함한 2 차원 기술과 3 차원 기술로 구분된다. 실제 많은 응용 소프트웨어들이 2 차원 단조 시뮬레이터와 3 차원 단조 시뮬레이터를 구분하고 있으며, 부분적으로 연결고리를 만들어 두고 있다 [1-2]. 2 차원 단조 시뮬레이션 기술은 이미 실공정 적용을 통하여 신뢰성이 높으면서 기업체에서 필요로 하는 정도의 정확도를 가진 결과를 일반 단조 공정 설계 기술자들에게 제공하고 있다[3-4]. 물론 지금으로부터 10 년 전만 하더라도 개인용 컴퓨터가 일정 수준에 미치지 못하였기 때문에 2 차원 단조 시뮬레이션 기술은 일부의 연구기관에서 보유하고 있는 정도였다. 최근 10 년간의 개인용 컴퓨터의 눈부신 발전으로 이제 2 차원 단조 시뮬레이션 기술은 손쉽게 활용할 수 있게 되었다. 그러나 아직 3 차원 단조 시뮬레이션 기술의 활용에는 여러 가지 문제가 있다. 비록 최신의 컴퓨터를 사용하더라도 계산시간과 이에 따른 결과의 정확도 문제는 여전히 남는다. 물론 3 차원 단조 시뮬레이션 기술도 시간의 문제라고 판단된다. 개인용 컴퓨터의 지속적 발전은 가까운 장래에 3 차원 단조 시뮬레이션 기술의 보편화를 선도할 것으로 기대된다.

현재로서는 3 차원 단조 시뮬레이션에서는 정도의 개선 문제와 함께 계산시간의 문제가 병목점이 되고 있다. 이러한 현실적 문제를 타개하는 방법으로 실제의 3 차원 공정을 2 차원으로 가정하는 방법을 들 수 있다[5]. 이 방법은 매우 광범위하게 사용되고 있으며 많은 경우 유용한 공학적 및 기술적 정보를 얻게 해주므로 매우 실용적인 방법이다. 그러나 경우에 따라서 기어와 같은 모양을 일부의 비대칭 요소로 인하여 전체 또는 상당히 큰 영역을 해석 대상으로 하여 단조 시뮬레이션을 실시해야 하는 경우가 있다. 이러한 경우에는 기어 치형의 복잡한 형상과 치형 주위에 집중된 주 변형영역으로 인하여 요소의 수가 과도하게 되어 해석의 정도를 떨어뜨리게 된다. 특히 주요 소성 변형 영역이 두 개 이상일 경우 요소밀도의 제어는 매우 어렵게 된다. 이러한 문제의 해결을 위하여 즉, 현재의 컴퓨터 성능으로 신뢰성이 높은 결과를 얻기 위하여 많은 연구자들에 의하여 실용적 관점에서 요소밀도의 제어 기술에 관하여 연구되어 왔다[6-9]. 최근에 Lee 와 Joun 은 지능적 요소밀도 및 요소망생성 기법에 바탕을 둔 지능적 단조 시뮬레이션 기술을 개발하였다[7-9].

본 연구에서는, 스퍼기어나 롤캠과 같이 원통의 국부적인 영역에서 주 변형을 일으키는 단조 공정의 시뮬레이션을 위하여, 원통형 구간의 조밀요소 제어에 적합한 파이프형 요소밀도 제어 함수를 제안하고, 이를 기 개발한 지능적 요소밀도 및 요소망생성 기법과 연계하여 롤캠 단조 공정의 시뮬레이션에 적용함으로써 제안된 기법의 유용성을 검증하고자 한다.

### 2. 파이프형 요소밀도 제어 함수

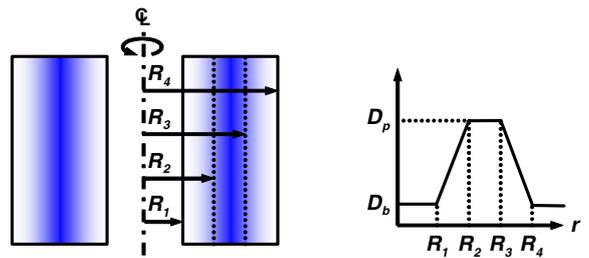


Fig. 1 Pipe-type density function

요소밀도 제어 함수는 국부적인 요소밀도를 제어하는 역할을 한다. 기존 연구들을 살펴보면, 요소망 재구성 이전의 소재의 형상과 상태변수들을 이용하여 요소망 제어를 실시한 후, 추가적으로 박스형 등의 사용자 정의의 밀도함수를 이용하여 일정 구간에 대하여 조밀하게 요소망을 생성하는 기법이 주로 사용되고 있다[2]. 그러나 전술한 방법은 요소밀도 제어가 불필요한 영역까지 과도하게 조밀한 요소망을 생성하는 단점이 있다.

### 3. 적용 예제

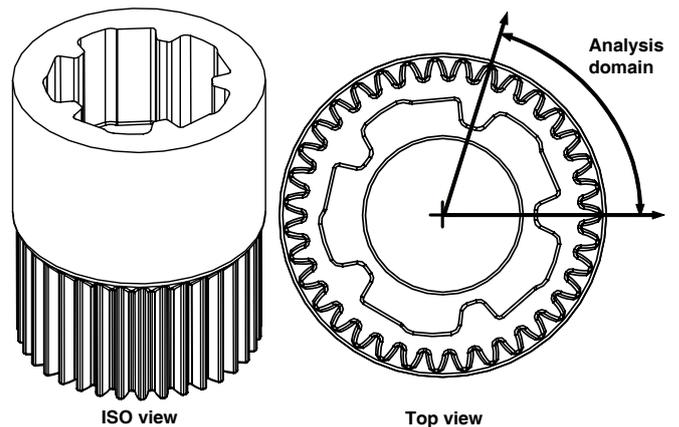


Fig. 2 Schematic diagram of the process

Fig. 2 는 적용 예제로 선정한 롤캠의 형상을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 외부의 하단에는 평기어가 있으며, 상부 내부는 캠 형상이다. Fig. 3 은 실제의 성형 제품을 나타내고 있다.

외부의 기어 관점에서 보면 대칭면이 35 개이지만 캠의 관점에서 보았을 때는 대칭면이 없다. 따라서 이 공정은 엄밀히 말하면 대칭면이 없는 공정이다. 이와 유사한 공정의 해석에서는 캠부를 반경이 일정한 원통으로 가정하여 하부 기어 치형의 반만을 해석하였다[10]. 본 연구에서는 제안한 파이프형 요소밀도 제어 함수의 효과를 검증하기 위하여 전체해석 영역의 1/5 을 해석하였다. 이렇게 해석한

결과는 전체 해석 영역에 대한 해석 결과에 매우 유사할 것으로 판단된다. 만약 전체를 해석 영역으로 잡을 경우, 요소 수의 과다로 현재의 컴퓨터 성능으로 볼 때 현실적인 방법은 아니다.

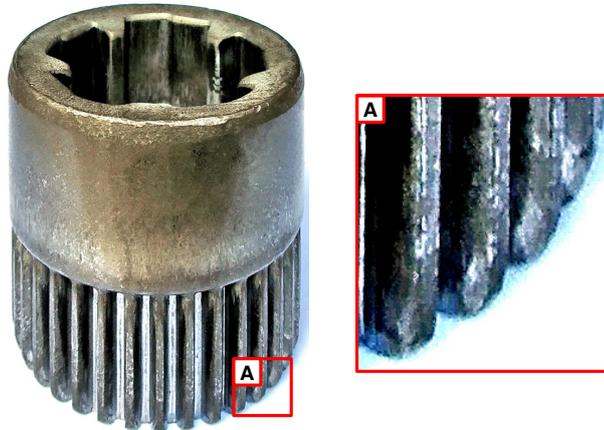


Fig. 3 Deformed shape of the workpiece

본 연구에서 사용한 시뮬레이션 조건을 다음과 같다.

- Flow stress:  $\bar{\sigma} = 617.0 \bar{\epsilon}^{0.25}$  (MPa)
- Friction factor: 0.1
- Velocity of upper die: -1.0 (mm/sec)

시뮬레이션에 사용한 단조 시뮬레이터는 AFDEX 3D 이며, 이는 강소성 유한요소법에 바탕을 둔 3 차원 단조 시뮬레이터이다. AFDEX 3D 의 사면체 요소망 기능을 사용하였으며, 전체 사면체 요소 수가 150000 개 내외가 되도록 제어하였다. 해석에 사용한 컴퓨터는 2Gb RAM 를 장착한 P4 3.0 GHz 이며, 약 150 시간의 계산시간이 소요되었다.

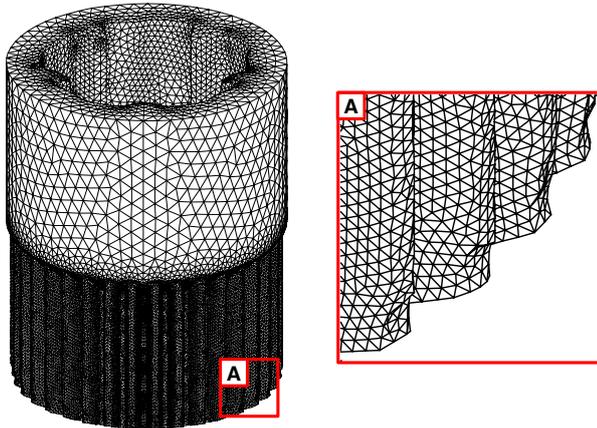


Fig. 4 Simulation results of the workpiece

Fig. 4 에 해석결과를 정리하였다. 기어의 치형 부분은 비교적 미세한 사면체요소로 이루어져 있으며, 캠 성형부에서도 적절한 분포의 사면체요소가 형성되어 있다. 특히 캠 성형부에서 테두리의 윤곽이 매우 잘 표현되었다. 이는 기 개발된 지능형 요소망 자동생성 기능의 영향이다. 기어 치형 부위에서 주목할 점은 치형의 하단 부가 다소 미성형되었음을 알 수 있다. 이점은 Fig. 3 의 시험생산 제품에서도 육안으로 확인이 가능하다. 그리고 Fig. 4 의 해석결과에서 보는 바와 같이 캠 부의 외곽 윤곽이 선명함을 알 수 있다. 이는 적은 요소망으로도 지능화된 기능에 의하여, 즉 특성경계 주위에서 요소의 스와핑 등의 기능을 이용하여 요소망의 품질을 개선시킨 결과이다.

### 3. 결론

본 연구에서는 스퍼기어 단조 공정과 같이 주 변형구간이 파이프와 같은 특수 단조 공정의 해석에 적합한 파이프형 요소밀도 제어 함수를 제안하였다. 이 함수와 기 개발된 지능화된 요소망생성 기법의 접목을 통하여 스퍼기어나 롤캠과 같은 단조 공정의 시뮬레이션에 적합한 기능을 확보하였으며, 이를 롤캠의 단조공정 시뮬레이션에 적용하였다.

적용 예제에 대한 요소밀도의 조사 결과, 매우 양호한 결과를 얻었다. 즉, 기어 치형의 형상을 비교적 작은 요소의 수로 비교적 정교하게 표현할 수 있었으며, 특히 주 변형 구간이 두 군데 이상인 경우에도 요소망의 제어가 매우 양호하게 이루어졌음을 확인하였다. 적용 예제는 실 공정결과와 비교되었으며, 그 결과, 예측 결과는 실험결과와 성형 형상의 측면에서 매우 유사하게 나타났다.

결론적으로 제안한 기법은 목적인 바와 같이 스퍼기어와 같이 축방향으로 변형이 발생하는 단조품을 성형할 때 발생하는 소성변형을 매우 잘 표현하고 있다. 또한 기 확보된 요소망 제어 기법과 매우 잘 조화를 이루는 것으로 나타났다.

### 후기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었으며, (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터의 장비를 활용하여 실시되었다.

### 참고문헌

1. A. Behrens, H. Schafstall, 2D and 3D simulation of complex multistage forging processes by use of adaptive friction coefficient, J. Mater. Process. Technol.1998;80-81(1):298-303.
2. C. MacCormack, J. Monaghan, 2D and 3D finite element analysis of a three stage forging sequence, J. Mater. Process. Technol.2002;127(1):48-56.
3. M.S. Joun, H.K. Moon, R. Shivpuri, Automatic simulation of a sequence of hot- former forging processes by a rigid thermoviscoplastic finite element method, J. Eng. Mater. Technol.-Trans. ASME 1998;120(4):291-296.
4. M.S. Joun, M.C. Lee, Quadrilateral finite-element generation and mesh quality control for metal forming simulation, Int. J. Numer. Methods Eng.1998;40(21):4059-4075.
5. M. S. Joun, J. H. Chung, R. Shivpuri, An axisymmetric forging approach to preform design in ring rolling using a rigid-viscoplastic finite element method, International Journal of Machine Tools and Manufacture 1998;38(10-11):1183-1191.
6. R. Boussetta, T. Coupeze, L. Fourment, Adaptive remeshing based on a posteriori error estimation for forging simulation, Comput. Meth. Appl. Mech. Eng. 2006;195(48-49):6626-6645.
7. M.C. Lee, M.S. Joun, Adaptive triangular element generation and optimization-based smoothing, Part 1: On the plane, Adv. Eng. Softw.2008;39(1):25-34.
8. M.C. Lee, M.S. Joun, Adaptive triangular element generation and optimization-based smoothing: Part 2. On the surface, Adv. Eng. Softw.2008;39(1):35-46.
9. M.C. Lee, M.S. Joun, June K. Lee, Adaptive tetrahedral element generation and refinement to improve the quality of bulk metal forming simulation, Finite Elem. Anal. Des. 2007;43(10):788-802.
10. G.J. Kang, W.J. Song, J. Kim, B.S. Kang, H.J. Park, Numerical approach to forging process of a gear with inner CAM profile using FEM, J. Mater. Process. Technol.2005;164-165(1):1212-1217.