한국소성가공학회 2005년도 춘계학술대회 논문집 pp. 209~214

지능형 사면체 요소망 자동생성기법을 이용한 삼차원 소성가공 공정 시뮬레이션

이민철[1] · 전만수#

THREE-DIMENSIONAL METAL FORMING SIMULATION WITH AUTOMATED ADAPTIVE TETRAHEDRAL ELEMENT GENERATION

M. C. Lee and M. S. Joun

Abstract

In this paper, finite element simulation of three-dimensional bulk metal forming processes is performed by an automated adaptive tetrahedral mesh generation scheme. A dynamic data exchange scheme is employed between tetrahedral mesh generator and forging simulator to minimize user intervention. Both number of elements and density distributions are controlled by the octree technique. The presented approach is applied to automatic forging simulation in order to evaluate the efficiency of the developed schemes and the simulation results are compared with DEFORM ™.

Key Words : Mesh Generation, Metal Forming Simulation, Automatic Remeshing

1. 서 론

최근에 컴퓨터 하드웨어의 급속한 발전으로 인하여 기계공학 전반에 걸쳐 설계상의 시행착오를 경감할 수 있는 효과적인 도구로써 유한요소법(finite element method)이 사용되고 있다[1-3]. 특히 전용 프로그램의 필요성이 부각되면서 숙련된 사용자가 아니더라도 손쉽게 사용할 수 있는 지능화된 해석 프로그램의 개발이 연구업무의 경쟁력을 좌우하는 환경으로 바뀌어 가고 있다[4-7].

소성가공 공정의 유한요소해석은 요소망의 형태에 따라 비압축성 조건 처리에 특별한 주의가 요구된다. 육면체 요소망은 수치적 관점에서 우수하지만 아직까지 자동생성 문제가 해결되어 있지 않고 있다. 반면에 자동생성이 가능한 사면체 요소망은 비압축성 조건 처리시에 발생하는 과구속 문제 또는 로킹(locking) 현상으로 인하여 연구의 기피 대상이 되어 왔다[8-9].

공학해석의 경제성과 응용 관점에서 비록 사면체 요소는 육면체 요소에 비하여 해의 신뢰도는 떨어지지만, 사면체 요소를 이용한 소성가공 공정해석기법의 개발은 반드시 필요한 기술이다. 본 논문의 저자는 공동연구[10]를 통하여 Arnold 등에 의해서 제안된 MINI-요소[8,11]를 이용한 소성가공 공정해석을 실시한 바 있으며[10], 최근에 선행연구를 통하여 지능화된 사면체 요소망 자동생성기법을 개발하였다[12,13].

본 논문에서는 선행연구를 통하여 개발된 지능형 사면체 요소망 자동생성기법을 이용한 소성가공 공정해석을 실시함으로써 개발된 요소망 자동생성기법의 성능을 평가하고자 한다.

1. 경상대학교 항공기부품기술연구센터
교신저자: 경상대학교 기계항공공학부
E-mail: msjoun@gsnu.ac.kr

2. 유한요소 수식화

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역 V 와 경계영역 S 로 나누어지며 경계 S 는 표면력(traction)이 $t_i = \overline{t}_i$ 로 주어진 S_{t_i}, 속도가 $v_i = \overline{v}_i$ 로 주어진 S_{v_i}, 금형과 소재의 접촉면을 표현하는 S_c 등으로 세분화될 수 있다. 금형-소재 접촉면에서 압축력이 작용하면, 금형과 소재의 법선속도는 동일하다. 즉 S_c 에서 $v_n = \overline{v}_n$ 이다. 소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화(isotropic hardening)의 성질을 가지고 있고, von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따르며, 접촉면에서 Coulomb 마찰법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 자중 및 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

소성가공 공정의 유동해석 문제는 소재의 속도장 v_i 와 압력분포 p 를 구하자는 것이며, 다음의 약형으로 수식화된다.

$$\int_V \dot{\sigma}_{ij}\omega_{ij}\,dV - \int_V p\omega_{ii}\,dV - \int_V f_i\omega_i\,dV - \int_V v_{i,i}q\,dV - \sum \int_{S_{t_i}} \overline{t}_i\omega_i\,dS - \int_{S_c} \sigma_t\omega_t\,dS = 0 \tag{1}$$

여기서 가중함수 ω_i 는 경계 S_{v_i} 에서 0 의 값을 갖는 임의의 함수이고, 가중함수는 전 해석영역에서 임의의 함수이다. 약형에서

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2}(\omega_{i,j} + \omega_{j,i}) \tag{2}$$

이며, ω_t 는 ω_i 의 접선성분을 나타낸다.

식 (1)에서 텐서량의 상첨자 프라임(')은 편차성분(deviatoric component)를 나타내며, 하첨자가 두 번 반복되는 것은 덧셈에 관한 규약을 따른 것이며, 콤마(,)뒤의 첨자는 편미분을 의미한다.

따라서 전술한 경계치 문제를 푸는 것은, 임의의 가중함수 ω_i 와 q 에 대하여 약형을 항상 만족시키는 속도장 v_i 와 압력장 p 를 구하는 문제로 수식화된다. 물론, 속도장은 S_{v_i} 와 S_c 의 필수경계조건을 만족해야 한다. 약형에는 속도장 v_i 와 압력장 p, 가중함수 ω_i 와 q 등이 바탕을 형성하고 있다. 그 이외의 것은 이들로부터 파생된 것이다. 따라서 이 네 개의 함수를 보간하여 속도와 압력이 미지수인 비선형연립방정식을 얻을 수 있다.

3. 공정해석

기어-캐리어(gear-carrior) 단조공정은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이, 업세팅(upsetting)한 소재를 전방압출(forward extrusion)함으로써 최종제품을 성형하는 공정이다. 이 공정은 압출방향으로 6 개의 대칭면이 존재하므로, 1/12 만을 해석영역으로 취하였다.

상용모델러인 CATIA 를 이용하여, 소재와 펀치(punch) 및 금형의 초기형상을 모델링하였으며, STL 파일을 통하여 데이타 교환을 실시하였다.

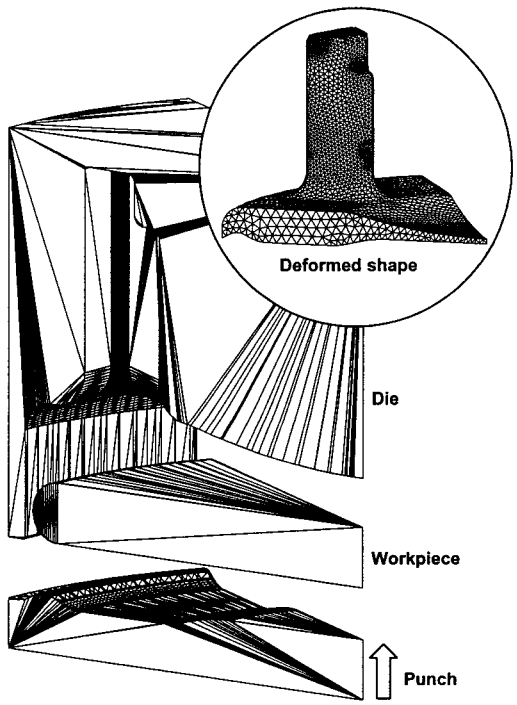


Fig. 1 Schematic description of forging simulation

Fig. 1 에서 소재는 746 개의 절점과 1,488 개의 삼각형 조각으로 이루어져 있으며, 펀치는 1,618 개의 절점과 3,232 개의 삼각형 조각으로 이루어져 있다. 금형은 4,931 개의 절점과 9,858 개의 삼각형 조각으로 이루어져 있다.

요소망 재생성을 통하여 약 40,000 개의 사면체 요소가 생성되도록 제어하였으며, 전체 해석과정 동안 총 17 번의 요소망 재생성을 실시하였다.

4. 해석결과

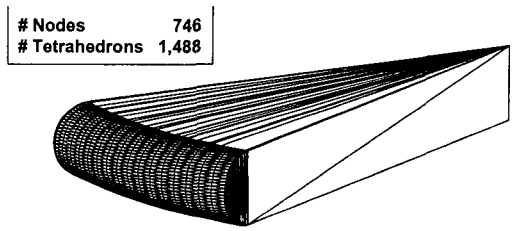
Fig. 2 는 초기 소재형상에 대하여 요소망을 생성한 결과이다. Fig. 2(a)는 입력으로 취한 746 개의 절점과 1,488 개의 삼각형 요소로 이루어진 소재형상이다. Fig. 2(b)는 본 논문에서 제안한 기법을 이용하여 생성한, 7,803 개의 절점과 38,875 개의 사면체 요소로 이루어진 소재형상을 나타내고 있다. 입력된 삼각형 요소망의 형상비가 매우 큰 경우임에도 불구하고, 고품질의 요소망이 생성되었다.

Fig. 3 은 펀치-스트로크(punch-stroke)가 50%일 때의 변형된 소재형상이다. Fig. 3(a)는 9,149 개의 절점과 44,929 개의 사면체 요소로 이루어진 요소망 재생성 이전의 소재형상을 나타내고 있다. Fig. 3(b)는 8,537 개의 절점과 41,754 개의 절점으로 이루어진 요소망 재생성 이후의 소재형상을 나타내고 있다. 입력으로 취한 희망 요소수를 만족하기 위하여 유효변형률이 큰 영역과 작은 영역의 요소밀도를 제어함으로써 희망 요소수를 만족하는 고품질의 요소망을 생성하였다.

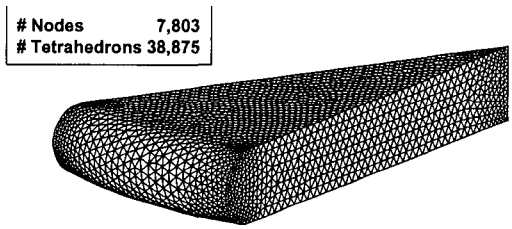
Fig. 4 는 펀치-스트로크가 80%일 때의 변형된 소재형상이다. Fig. 4(a)는 8,400 개의 절점과 41,080 개의 사면체 요소로 이루어진 요소망 재생성 이전의 소재형상을 나타내고 있다. Fig. 4(b)는 7,787 개의 절점과 38,976 개의 사면체 요소로 이루어진 요소망 재성성 이후의 소재형상을 나타내고 있다. Fig. 4(a)에서는 요소영향(element effect)으로 인하여, 플래시(flash)가 생성되는 영역에서 국부적으로 왜곡된 요소가 생성되었다. 그럼에도 불구하고, Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 전체 영역에서 요소의 천이가 매우 부드럽고, 우수한 품질의 요소망이 생성되었다.

Fig. 5 는 펀치-스트로크가 95%일 때의 변형된 소재형상이다. Fig. 5(a)는 8,773 개의 절점과 41,829 개의 사면체 요소로 이루어진 요소망 재생성 이전의 소재형상을 나타내고 있다. Fig. 5(b)는 9,032 개의 절점과 43,498 개의 사면체 요소로 이루어진 요소망 재생성 이후의 소재형상을 나타내고 있다. Fig. 4 에서 나타났던 요소영향이 제거되었으며, 유효변형률의 값이 높은 소재의 내부영역과 유효변형률속도가 지배적인 표면영역에서 요소밀도가 높게 생성되었다.

Fig. 6 은 펀치-스트로크가 100%일 때의 변형된 소재형상이다. Fig. 6(a)는 7,838 개의 절점과 36,824 개의 사면체 요소로 이루어진 요소망 재생성 이전의 소재형상을 나타내고 있다. Fig. 6(b)는 8,029 개의 절점과 37,762 개의 사면체 요소로 이루어진 요소망 재생성 이후의 소재형상을 나타내고 있다. Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이, 압출된 소재의 끝단에서는 유효변형률보다 유효변형률속도의 영향으로 인하여, 요소밀도가 높게 생성되었다.

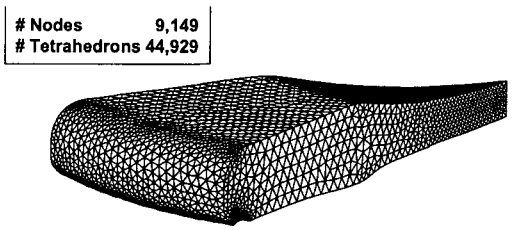


(a) Before remeshing

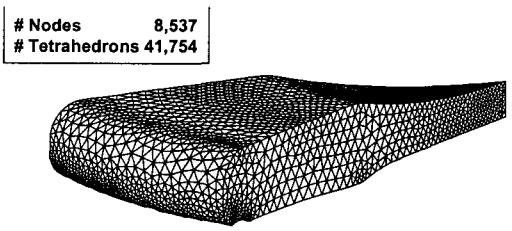


(b) After remeshing

Fig. 2 Initial workpiece at 0% of punch-stroke

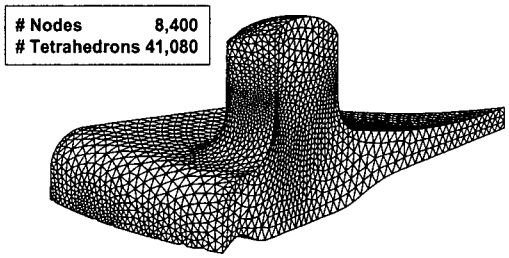


(a) Before remeshing

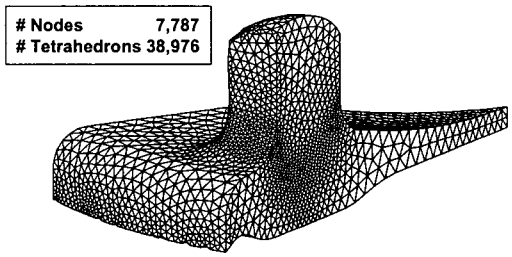


(b) After remeshing

Fig. 3 Deformed workpiece at 50% of punch-stroke

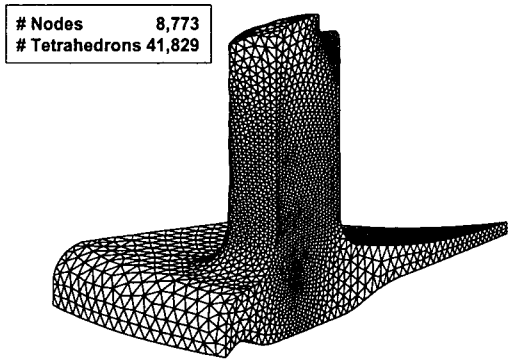


(a) Before remeshing

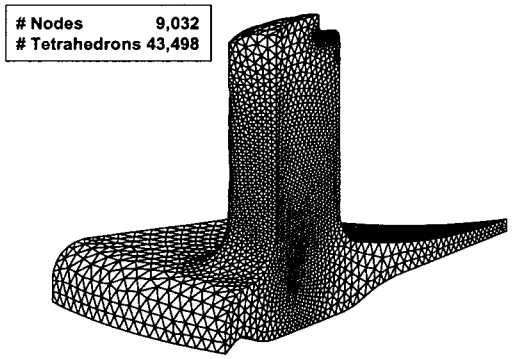


(b) After remeshing

Fig. 4 Deformed workpiece at 80% of punch-stroke

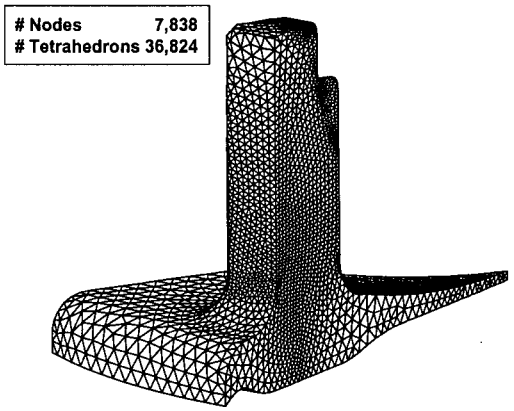


(a) Before remeshing

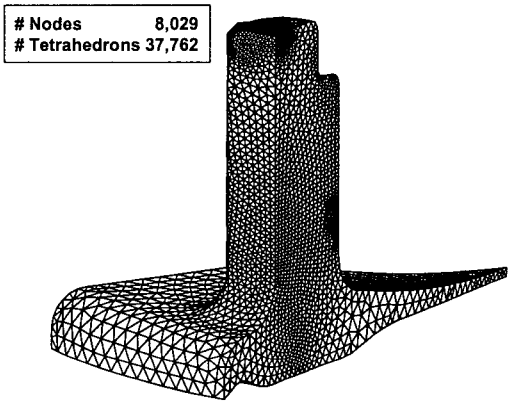


(b) After remeshing

Fig. 5 Deformed workpiece at 95% of punch-stroke



(a) Before remeshing



(b) After remeshing

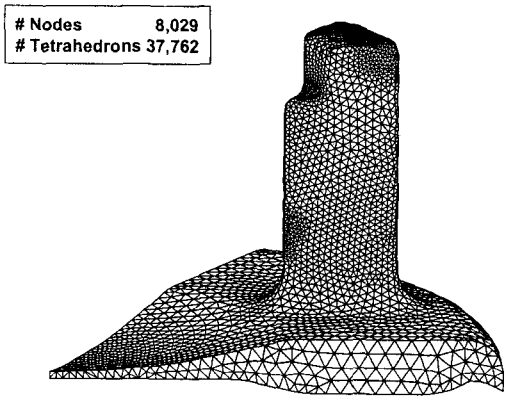
Fig. 6 Deformed workpiece at 100% of punch-stroke

5. 성능평가

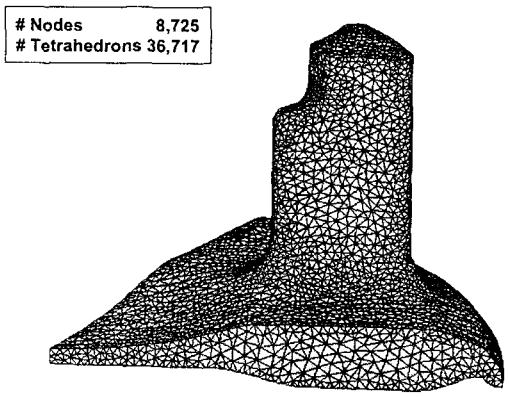
본 논문에서 사용한 요소망 자동생성기법을 평가하기 위하여, 본 논문에서 해석한 기어-캐리지 모델과 유사한 모델을 해석한 결과를 관련문헌[**]에서 발굴하여 비교하였다.

Fig. 7(a)는 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 해석한 결과이며, Fig. 7(b)는 상용 소성유동해석 프로그램인 DEFORM^{TM} 를 이용하여 해석한 결과이다. 본 논문과 DEFORM^{TM} 에서 입력으로 취한 공정조건이 동일하지 않으므로, 소재의 최종형상은 각각 다르게 예측되었다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 예측한 최종형상과 실제 단조형상간의 일치 여부에 관한 논의는 다루지 않는다. 다만, 해석을 통하여 예측한 소재의 최종형상에 대하여 요소망의 품질만을 정성적으로 비

교하고자 한다. 본 논문에서 제안한 방법으로 해석한 결과인 Fig. 7(a)는 천이영역뿐만 아니라, 변형이 큰 영역에 이르기까지 요소밀도가 자유롭게 제어되고 있으며, 생성된 요소망의 품질이 매우 우수하다. 그러나, Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 DEFORM^{TM} 의 결과에서는 요소밀도 제어가 제대로 되지 않고 있으며, 생성된 요소망의 품질 또한 양호하지 못하다.



(a) Presented method



(b) DEFORM^{TM}

Fig. 7 Comparison of presented method with DEFORM^{TM}

6. 결 론

본 논문에서는 선행연구를 통하여 개발된 사면체 요소망 자동생성기법을 이용하여 삼차원 단조공정을 시뮬레이션하였다. 사면체 요소망 자동생성기법과 단조 시뮬레이터간의 연계를 통하여 요소망 재생성 과정을 자동화하였다. 국부적 요소밀도 제어, 요소수 예측 등의 기능을 지능화함으로써 요소망 재생성으로 인한 요소수의 증감을 제어하였다. 적용예제 및 DEFORM ^{TM}의 해석결과를 비교함으로써 그 성능을 평가하였다.

전술한 결과들로부터 선행연구를 통하여 개발된 사면체 요소망 자동생성기법은 성능이 매우 우수함을 알 수 있다. 또한 단조공정 시뮬레이터의 핵심 모듈로써 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 NURI, BK21, 산업자원부 지방기술혁신사업[RT104-01-03], 경남지역 메카노 21 사업의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] S. Kobayashi, S.I. Oh, T. Altan, 1989, Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press, Oxford.

[2] O.C. Zienkiewicz, J. Rojek, R.L. Taylor, M. Pastor, 1998, Triangles and Tetrahedral in Explicit Dynamic Codes for Solids, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 43, pp. 565-583.

[3] Radovitzky R. and Ortiz M., 2000, Tetrahedral Mesh Generation Based on Node Insertion in Crystal Lattice Arrangements and Advancing-front-Delaunay Triangulation, Comput. Meth. Appl. Mech. Engng., Vol. 187, No.3-4, pp. 543-569.

[4] G. Li, J.T. Jinn, W.T. Wu, S.I. Oh, 2001, Recent Development and Applications of Three-dimensional Finite Element Modeling in Bulk Forming Process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 40-45.

[5] A. Behrens and H. Just, 2002, Extension of the Forming Limits in Cold and Warm Forging by the FE Based Fracture Analysis with the Integrated Damage Model of Effective Stresses, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125-126, No. 9 pp. 235-241.

[6] M. S. Joun and M. C. Lee, 1997, Quadrilateral Finite-

Element Generation and Mesh Quality Control for Metal Forming Simulation, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 40, No. 21, pp. 4059-4075.

[7] 문호근, 이민철, 정재헌, 전만수, 2005, "베어링 제조공정중 궤도단조공정의 유한요소해석," 한국소성가공학회지, 제 14 권, 제 1 호, pp. 29-36.

[8] Perchat, E., 2000, Mini-élément et Factorization Incomplètes pour la Parallélisation d'un Solveur de Stokes 2D. Application au Forgeage, thèses de Doctoral en Sciences et Génie des Matéiaux, ENSMP.

[9] Bertrand, F. H., Gadbois, M. R., and Tanguy, P. A., 1992, Tetrahedral Elements for Fluid Flow, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 33, pp. 1251-1267.

[10] 전만수, 이민철, 정석환, 권영삼, 2004, MINI-요소를 이용한 소성가공 공정 시뮬레이션 결과에 관한 고찰, 대한기계학회 논문집 A 권, 제 28 권 제 10 호, pp. 1475-1482.

[11] Arnold, D. N., Brezzi, F., and Fortin, M., 1984, A stable finite element for Stokes equations, Calcolo, Vol. 21, pp. 337-344.

[12] 이민철, 전만수, 2005, 삼차원 소성가공 공정 시뮬레이션을 위한 지능형 사면체 요소망 자동 생성, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집.

[13] M. C. Lee, M. S. Joun, 2005, Automated Adaptive Mesh Generation for Three-dimensional Metal Forming Simulation, 8th International Conference on Technology of Plasticity.

[14] Jie Wan and Mark S. Shephard, 2004, Comparison on Remeshing and Mesh Enrichment Based Forming Simulations, Scientific Computation Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.