

베벨기어 폐쇄냉간단조 공정의 지능형 유한요소해석과 결과의 검증

이민철*, 박래훈**, 전병윤***, 전만수#

Adaptive Finite Element Analysis of an Enclosed Die Forging Process of a Bevel Gear and its Experimental Verification

Min Cheal Lee*, Rae Hun Park**, Byoung Yoon Jun*** and Man Soo Joun#

ABSTRACT

In this paper, an approach to adaptive finite element analysis of three-dimensional forging processes is presented with emphasis on remeshing. In the approach, an optimal tetrahedral element generation technique is employed and the mesh density is specified by the combination of the weighted normalized effective strain and the normalized effective strain rate as well as the weighted normalized curvature. The approach is applied to computer simulation of an enclosed die forging process of a bevel gear and its results are compared with its related experiments. It has been shown that the analyzed results are in good agreement with the experimental ones.

Key Words : Bevel gear(베벨기어), Enclosed die forging(폐쇄단조), Tetrahedral mesh generation(사면체 요소망 생성), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서론

최근 20 년간 공학해석 분야의 눈부신 발전으로 소성가공, 사출성형 등 생산기술 분야와 유체역학 분야 등에서 유한요소법을 이용한 공학해석 기술의 응용이 가속화되고 있다. 공학해석 기술의 발전은 산업 현장의 일대 혁신을 불러일으키고 있다. 공학해석 기술의 보편화가 진행된 배경에는 요소망 자동생성 관련 분야의 기술 발전이 자리잡고 있다. 특히 전용 프로그램의 필요성과 공학 연구의 적용성이 부각되면서

숙련된 사용자가 아니더라도 손쉽게 사용할 수 있는 지능화된 요소망 자동생성 프로그램의 자체 확보 여부가 연구업무의 경쟁력을 좌우하는 요소가 되고 있다. 그리고 요소망 자동생성 기술은 공학해석 및 응용설계 업무의 생산성과 직결되어 있다.

유한요소법을 이용한 삼차원 해석기술의 활용을 위해서는 해석대상 물체를 유한 개의 육면체 또는 사면체 요소로 분할한 요소망 정보가 필요하다. 일반적으로 육면체 요소망은 사면체 요소망보다 수치적 측면과 해석시 필요한 저장공간의 측면에서 효율적

☞ 접수일: 2005 년 9 월 8 일; 게재승인일: 2006 년 2 월 10 일

* 경상대학교 항공기부품기술연구센터

** 경상대학교 기계공학과 대학원

*** 진 ENG

교신저자: 경상대학교 기계공학과

E-mail msjoun@gsnu.ac.kr Tel. (055) 751-5316

이다. 그러나 육면체 요소망의 생성 과정을 자동화하기가 어려워 요소망 재생성이 필수적인 소성가공 분야에서는 해석기술의 활용 및 확산에 큰 걸림돌이 되고 있다. 반면, 일반적인 요소망 자동생성 기술이 개발된 사면체 요소망은 비압축성 조건 처리시 발생하는 과구속의 문제 또는 로킹(locking) 문제로 인하여 제한적으로 적용되어 왔다. 그러나 1984년 로킹 문제의 해결에 효과적인 MINI-요소¹가 개발됨으로써 요소망 자동생성을 필요로 하는 다수의 응용 연구가 사면체 요소를 이용하는 환경으로 바뀌어 가고 있다.

사면체 요소망 자동생성 목적으로 표면상의 삼각형 요소망을 생성한 후 내부의 요소망을 생성하는 방법이 주로 사용되고 있다^{2,5}. 그러나 기존의 연구는 요소망 생성 방법에 초점을 두고 있어 요소밀도 제어나 요소 품질에 관한 연구를 찾아보기 어렵다. 특히 소성가공 공정 해석과 같이 정교한 해석을 수행하기 위해서는 국부 영역에서 품질이 우수한 조밀한 요소망이 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 국부영역에서 요소밀도 제어가 가능한, 즉 소성가공 공정 해석에 적합한 고품질의 요소망 생성법을 제안하며, 이 기술을 지능형 단조 시뮬레이션에 적용하고 실험적으로 그 결과를 검증함으로써 제안된 방법의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 단조공정의 지능형 유한요소해석을 위한 요소망 생성 기술

본 논문에서 사용한 요소망 생성법은 Lee 등^{6,7}이 개발한 최적 곡면 삼각형 요소망 생성 기법과 최적 사면체 요소망 생성 기법⁸에 기초하고 있으며, 기본 절차를 아래에 정리하였다.

- 1 단계: 표면의 삼각형 요소망과 요소밀도 정보 추출
- 2 단계: 특성경계(characteristic edge) 추출 및 곡선보간, 곡면보간
- 3 단계: 곡률의 요소밀도 반영
- 4 단계: 표면상의 삼각형 요소망 재생성
- 5 단계: 삼각형 요소망의 절점위치 재배치 및 최적화(optimal smoothing)
- 6 단계: 사면체 요소망 생성
- 7 단계: 사면체 요소망의 절점위치 재배치 및 최적화

본 논문에서는 요소망생성 기법에 관한 구체적인 사항은 참고문헌^{6,7,8}로 대신하고 단조 시뮬레이션 시 해석결과에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 요소밀도 정보, 부피 최소화 방안, 요소 품질 최적화 등을 중점적으로 설명하고자 한다.

2.1 요소밀도의 부여

본 논문에서 사용한 요소밀도 부여 방법과 요소밀도 계산 방식은 Lee 등⁶에 의하여 제시된 최적 삼각형 생성 기법에 사용된 방법과 동일하다. 입력으로 취한 요소밀도 정보의 생성을 위하여 기본밀도(base mesh density)와 요소밀도 지정 구(mesh density specifying sphere)에 의하여 정의된 요소밀도함수의 중첩 기법을 이용하였으며, 대상 영역의 요소밀도를 기본밀도(D_b)로 초기화한 후, 밀도제어가 필요한 영역에 구로 정의된 밀도함수를 중첩함으로써 요소밀도를 부여하였다. 반경이 R 인 구로 정의되는 밀도 분포 함수를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 D_b 는 기본밀도를 의미하며 D_r 은 구의 중심에서의 요소밀도를 의미한다.

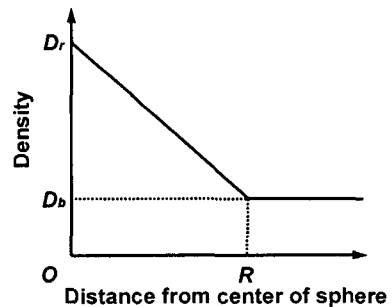


Fig. 1 Definition of a mesh density function

요소망재구성시 지능적 요소밀도 분포를 얻기 위하여 유효변형률과 유효변형률속도를 이용한다.⁹ 본 논문에서는 유효변형률과 유효변형률속도의 최대값이 각각 1이 되도록 정규화한 후, 가중치 1/2를 곱하여 더한 값을 희망 요소밀도로 취하였다. 즉, 요소밀도 분포의 상대적인 크기는 다음 식에 의하여 계산되었다.

$$\phi = \frac{1}{2} \frac{(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{\min})}{(\bar{\epsilon}_{\max} - \bar{\epsilon}_{\min})} + \frac{1}{2} \frac{(\dot{\bar{\epsilon}} - \dot{\bar{\epsilon}}_{\min})}{(\dot{\bar{\epsilon}}_{\max} - \dot{\bar{\epsilon}}_{\min})} \quad (1)$$

그리고 국부적으로 곡률이 큰 영역에 대하여 입력으로 취한 요소밀도에다 추가적으로 요소밀도를 반영함으로써 형상 오차의 극소화를 꾀하였다.

2.2 부피 변화의 극소화

부피 변화는 곡률이 큰 부분을 이산화하는 과정에서 발생한다. 전술한 바와 같이, 곡률이 큰 부위에 대해서는 요소밀도를 조절함으로써 형상오차의 극소화를 추구하였다.

한편, 요소망 재구성시 삼각형으로 이산화된 표면을 다른 삼각형으로 만드는 과정에서 부분적인 치수 오차와 이에 따른 부피 변화는 불가피하다. 따라서 이를 최소화시키기 위한 적절한 방안이 필수적이다. 본 논문에서는 요소망 재구성 이전의 표면의 삼각형 요소망을 양 3 차 Bezier 패치(bi-cubic Bezier patch)^{10,11}로 보간하였으며, 전체의 형상에 큰 영향을 미칠 수 있는 특성경계를 추출하여 3 차 현길이 스플라인(chord-length spline)¹⁰으로 보간하였다.

2.3 표면상의 삼각형 요소망 재생성 및 최적화

본 논문에서는 표면상의 삼각형 요소망 재생성을 위하여 Rivara¹²가 제안한 이차원 평면상의 LEPP(Longest Edge Propagation Path) 기법을 삼차원 공간으로 확장함으로써 표면상의 삼각형 요소망의 내각을 증가시키고 삼각형 요소망의 모서리를 반복적으로 분할함으로써 요소밀도를 근사적으로 만족시켰다. 이렇게 생성된 요소망의 품질은 일반적으로 양호하지 못하며, 대부분 나쁜 편에 속한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Bossen¹³이 제안한 절점위치 재배치기법을 삼차원으로 확장하여 적용하였다. 절점위치 재배치와 연계하여 모서리 분할(edge splitting), 모서리 제거(edge collapsing)를 실시하였으며, 최종적으로 부분적인 절점위치 최적화를 통하여 최적 요소망을 생성하였다⁵.

모서리 분할로 새롭게 생성된 절점과 절점위치 재배치 및 최적화로 인하여 이동하는 절점이 특성경계상의 절점인 경우에는 특성경계 절점을 보간한 현길이 곡선을 따라 이동시켰으며, 그 이외의 절점은 양 3 차 Bezier 패치로 보간한 곡면상으로 투영하였다⁶.

전술한 방법의 적용 예제를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2는 구의 표면에 요구된 요소밀도를 만족하는 삼각형 요소망을 생성한 것이다. 이 결과를 얻기 위하여 표면에 중심을 두고 반경이 요소망

생성 대상 구보다 1.5 배 큰 요소밀도 지정 구(mesh density specifying sphere)를 사용하여 요소밀도를 지정하였다. 그림으로부터 비교적 요소밀도의 차이가 크에도 불구하고 입력된 밀도분포를 만족하는 양질의 요소망이 생성되었음을 확인할 수 있다.

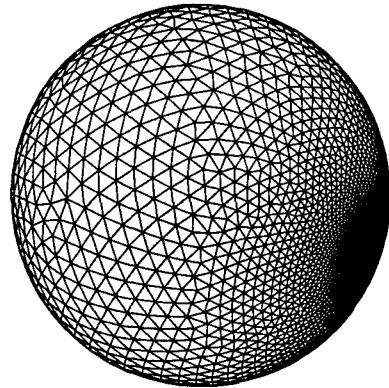


Fig. 2 Surface meshing with mesh density distribution considered

2.4 사면체 요소망의 자동 생성

본 논문에서는 사면체 요소의 생성을 위한 후보절점 생성을 위하여 옥트리 분할법¹⁴을 사용하였다. 옥트리 분할로 생성한 옥면체의 각 꼭지점과 무게 중심에 위치한 절점을 후보절점으로 취하였다¹⁵. Fig. 2의 삼각형 요소망을 입력으로 취하여 전술한 희망 밀도분포를 만족하도록 옥트리 분할한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

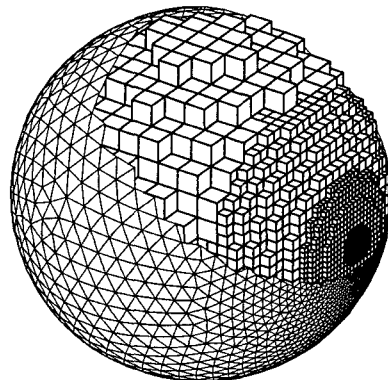


Fig. 3 Octree decomposition

생성된 후보절점들을 Radovitzky¹⁵가 제안한 방법에 따라 전진삼각형(advancing triangle)과 연결함으로써 사면체 요소망을 생성하였다. 생성된 사면체 요소망의 품질 향상을 위하여 Bossen¹³이 제안한 절점위치 재배치 기법을 삼차원으로 확장하였다. 절점위치 재배치와 연계하여 모서리 분할, 모서리 제거를 실시하였다^{8,15,16}. 분할 또는 제거되는 모서리의 양 끝점 중에서 하나의 절점을 공유하는 모든 모서리는 모서리 교환 및 면 교환(face swapping)을 실시하였다.

일반적으로 요소망을 생성할 대상영역에서 요소 밀도의 천이가 극심할 경우에는 요소망의 품질을 제어하기가 용이하지 않다. 특히 본 논문에서 내부절점 생성을 위하여 사용한 옥트리 분할법은 천이영역에서 요소밀도 제어가 어려울 뿐만 아니라 생성한 요소망의 품질이 급변하는 특성을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 기 제안한 요소망 생성기법의 강건성 평가를 위하여 Fig. 4의 요소망을 생성하였다. Fig. 4는 총 18,228 개의 절점과 101,842 개의 사면체 요소로 이루어진 구의 단면을 나타내고 있다.

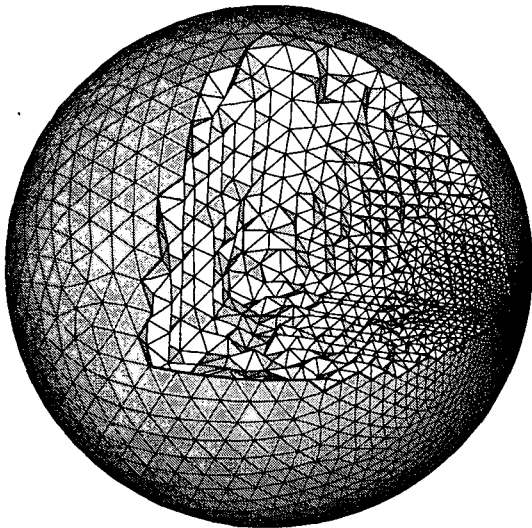


Fig. 4 Cross-sectional view of the generated mesh system

Fig. 4로부터 천이영역이 지배적인 경우임에도 불구하고 생성한 요소망의 품질이 전반적으로 양호함을 확인할 수 있다. 그 이유는 본 논문에서 품질향상을 위하여 개발한 절점위치 재배치 및 최적화 기법의 우수성이 반영되었기 때문이다.

3. 베벨기어 폐쇄단조 공정의 해석과 결과의 검증

본 장에서는 본 논문에서 제시한 요소망 생성 기법을 실제 단조공정에 적용함으로써 제안한 방법의 유용성을 검증하였다.

시험 목적으로 선정된 단조공정의 해석에 사용된 금형과 소재의 초기형상은 Fig. 5에서 보는 바와 같으며, 14 개의 대칭면이 존재하므로 1/28 만을 해석 대상 영역으로 모델링하였다. 해석에 사용된 요소망은 전술한 사면체요소망 자동생성기법으로 생성하였으며, 비압축성조건외의 처리시에 사면체요소망이 안고 있는 과구속 문제의 해결을 위하여 MINI-요소^{1,17}를 사용하였다.

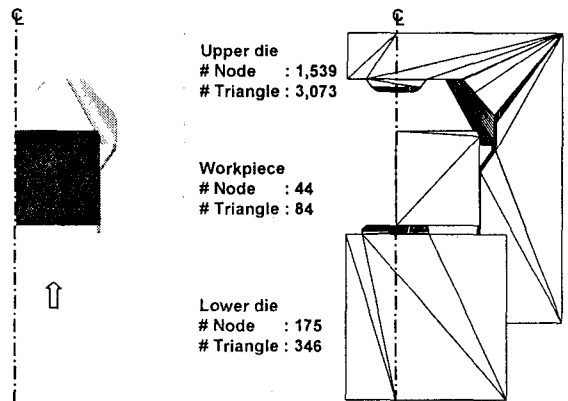
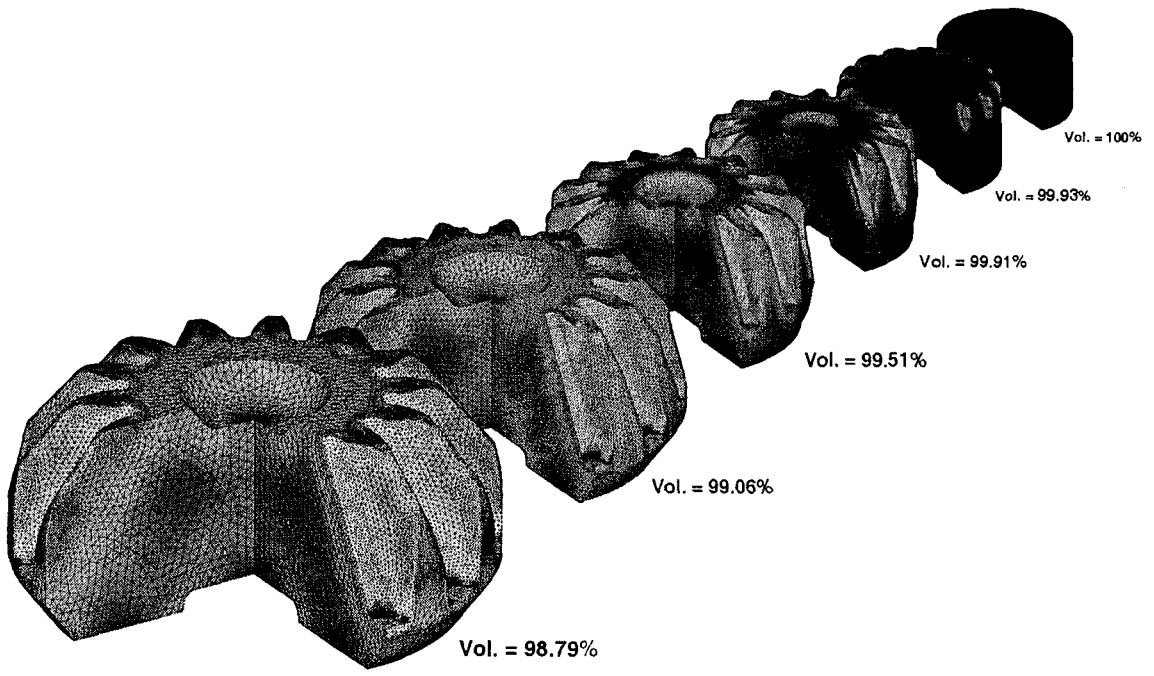


Fig. 5 Schematic description of punch, die and workpiece for forging simulation

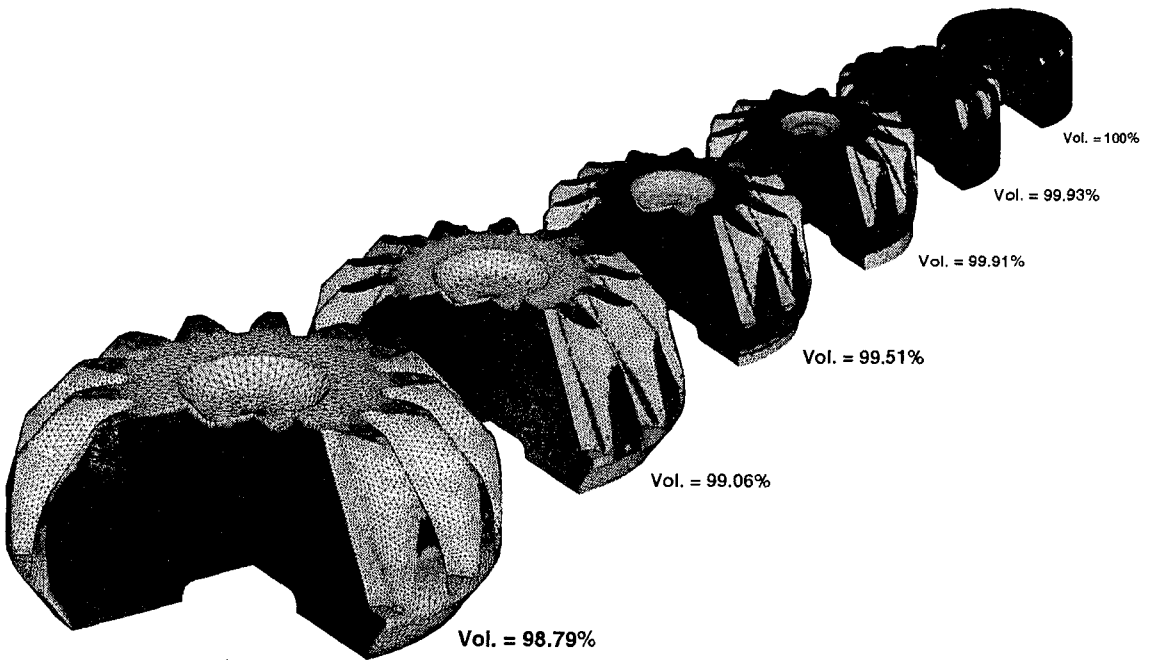
해석을 완료하기까지 총 21 회의 요소망재구성이 실시되었다. 요소망 생성과 해석 과정에서 전체적으로 약 1.2%의 부피 변화가 발생하였다.

주요 해석결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서는 유효변형률의 변화를 나타내었고, Fig. 6(b)에서는 접촉영역의 변화를 나타내었다.

Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에 요소망재구성을 위한 유효변형률과 유효변형률속도 분포를 각각 나타내었으며, Fig. 7(c)에 요소밀도분포를 나타내었다. Fig. 7(a), 7(b), 7(c)를 비교해 보면, 유효변형률과 유효변형률속도가 요소밀도 분포에 적절히 반영되었고, Fig. 8(b)의 요소망 생성 결과로부터 Fig. 7(c)의 요소밀도가 전반적으로 잘 반영되었음을 알 수 있다.

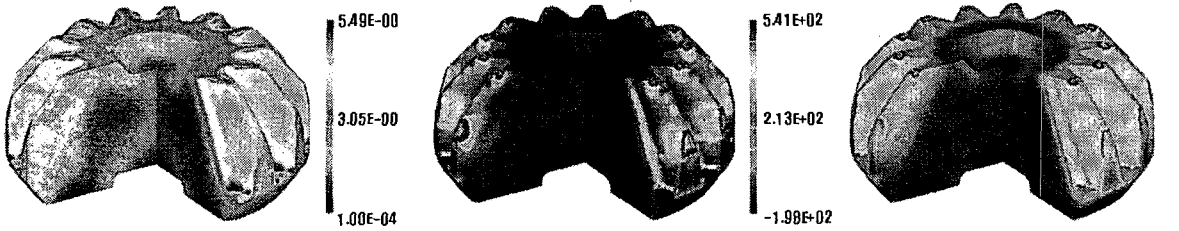


(a) Effective strain



(b) Contact region

Fig. 6 Simulation results

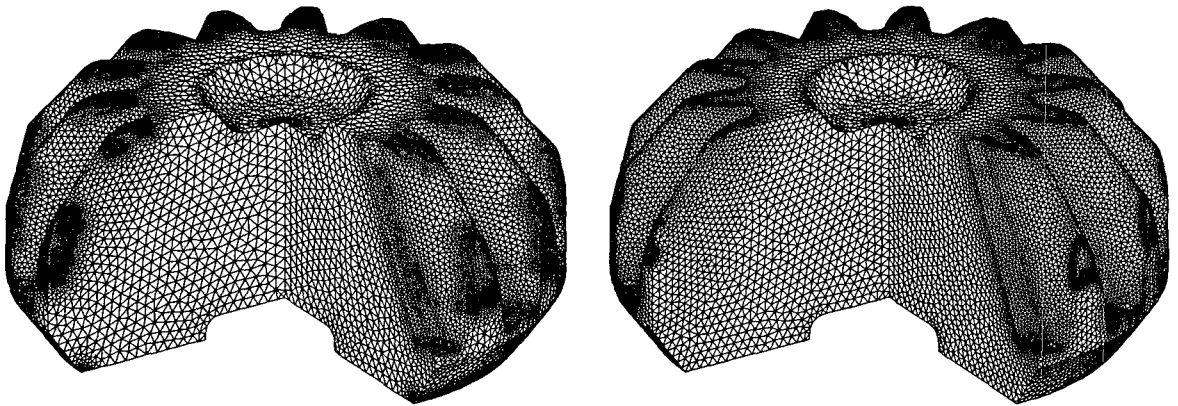


(a) Effective strain

(b) Effective strain rate

(c) Desired mesh density distribution

Fig. 7 Calculation of mesh density distribution



(a) Before remeshing

(b) After remeshing

Fig. 8 Meshes before and mesh generation considering the mesh density distribution in Fig. 7(c)

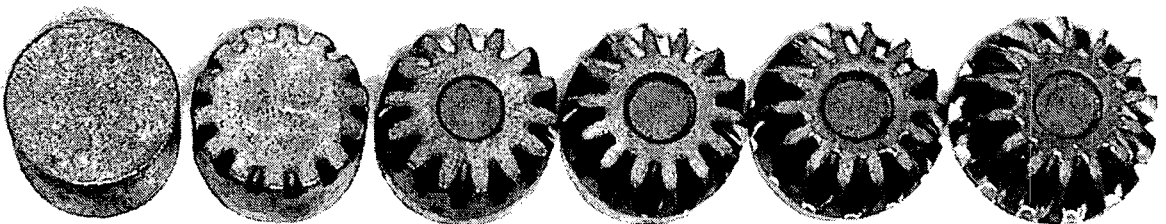


Fig. 9 Experimental results

해석결과와 타당성 조사를 위하여 시제품을 제작하였으며, Fig. 9 에 실공정 결과를 나타내었다. 이 시제품은 (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터의 보유장비인 유압 프레스와 폐쇄다이셋트를 이용하여 제작되었다. Fig. 6(b)와 Fig. 9 를 비교하면, 소재가 금형의 빈 공간에 차 들어가는 형상이 서로 유사함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 소성가공 공정 해석에 적합한 사면체 요소망 생성기법을 이용한 단조공정의 지능형 자동해석 기술이 제시되었다. 요소의 품질을 최적화하기 위한 각종 기법들이 소개되었으며, 해석 결과의 정확도를 향상시키기 위하여 변형률과 변형률 속도 분포를 요소망 밀도에 반영하였다.

제시된 지능형 유한요소법을 이용하여 베벨기어 폐쇄단조 공정을 해석하였으며, 실공정 결과와 비교하였다. 비교 결과 실험 결과와 해석 결과가 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Arnold, D. N., Brezzi, F. and Fortin, M., "A stable finite element for Stokes equations," *Calcolo*, Vol. 21, pp. 337-344, 1984.
- Shephard, M. S. and Georges, M. K., "Automatic Three Dimensional Mesh Generation by the Finite Octree Technique," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 32, pp. 709-749, 1991.
- Rassineux, A., "Generation and Optimization of Tetrahedral Meshes by Advancing Front Technique," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 41, No. 4, pp. 651-674, 1998.
- Radovitzky, R. and Ortiz, M., "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, 2000.
- Lee, J. S., Yoshimura, S., Yagawa, G. and Shibaike, N., "A CAE System for Micromachines: Its Application to Electrostatic Micro Wobble Actuator," *Sensors and Actuators, Ser. A*, No. 50, pp. 209-221, 1995.
- Lee, M. C. and Joun, M. S., "Optimal triangular mesh generation using input geometry of triangular meshes: part 1. on the plane," Submitted to *Advances in Engineering Software*, 2005.
- Lee, M. C. and Joun, M. S., "Optimal triangular mesh generation using input geometry of triangular meshes: part 1. on the surface," Submitted to *Advances in Engineering Software*, 2005.
- Lee, M. C., "A Study on the Automatic Mesh Generation for Three-Dimensional Metal Forming Simulation," PhD Thesis, Gyeongsang National University, 2005.
- Thomas, R., Kopp, R., Debye, J., Lausberg, L., Schneiders, R. and Oberschelp, W., "Optimization of Metal Forming Processes, Refinement and Optimization of Quadrilateral Element Meshes," *NUMIFORM '92*, pp. 307-312, 1992.
- Choi, B. K., "Surface Modeling for CAD/CAM," Elsevier, Netherlands, 1991.
- Vlachos, A., Peters, J., Boyd, C. and Mitchell, J. L., "Curved PN Triangles," *Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*, pp. 159-166, 2001.
- Rivara, M.-C., Hitschfeld, N. and Simpson, B., "Terminal-edges Delaunay (small-angle based) Algorithm for the Quality Triangulation Problem," *Computer-Aided Design*, Vol. 33, No. 3, pp. 263-277, 2001.
- Bossen, F. J., "Anisotropic Mesh Generation with Particles," Master's Thesis, Carnegie Mellon University, 1996.
- Shephard, M. S. and Georges, M. K., "Automatic Three Dimensional Mesh Generation by the Finite Octree Technique," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 32, pp. 709-749, 1991.
- Radovitzky, R. and Ortiz, M., "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, 2000.
- Frey, P. J. and George, P. L., "Mesh Generation-application to finite elements," HERMES Science Publishing, United-Kingdom, 2000.
- Joun, M. S., Lee, M. C., Chung, S. H. and Kwon, Y. S., "Consideration of the results of metal forming simulation based on mini-elements," *KSME (A)*, Vol. 28, No. 10, pp. 1475-1482, 2004.