

삼차원 단조공정의 지능적 시뮬레이션

이민철¹, 전만수[#]

Intelligent Simulation of Three-Dimensional Forging Process

M. C. Lee, M. S. Joun

Abstract

We conduct intelligent simulation of three-dimensional forging processes in this paper. A new remeshing technique is employed for this purpose. Not only the state variables including strain and strain-rate but also the geometrical features including die-material contact conditions and the characteristic lines or surfaces are taken into account during remeshing. The presented approach is applied to the Baden-Baden benchmark test example and its influence on the simulated results is discussed particularly in terms of the deformed shape with emphasis on the characteristic line.

Key Words : Intelligent Simulation (지능적 시뮬레이션), Characteristic line (특성경계), State variable (상태변수), Geometrical feature (기하학적 특성), Remeshing (요소망 재구성)

1. 서론

단조 공정 시뮬레이션 기술은 유한요소법[1]과 유한체적법[2]에 의하여 발전되어 왔다. 유한요소법은 유한체적법에 비하여 결과의 정확도와 신뢰성이 높다는 장점이 있다. 반면, 유한체적법은 복잡한 문제와 계산 시간 측면에서 유리한 것이 현재로서는 장점이다. 계산 시간 문제는 컴퓨터의 발전으로 머지않아 해결될 것으로 전망된다.

복잡한 단조 공정에 대한 유한요소해석 가능여부는 요소망 자동생성 기술에 좌우될 수밖에 없다. 유한요소법의 장점인 결과의 정확성도 요소망의 품질에 좌우된다. 유한요소해석의 생산성도 요소망의 생성 기술과 직결되어 있다. 따라서 유한요소법에 바탕을 둔 단조 시뮬레이션 기술은 요소망의 자동생성 기술에 종속되어 있다고 해도 과언은 아니다.

이러한 까닭으로 많은 연구자들이 적응적 요소망 자동생성 기술에 관한 연구를 실시하였다[3-7]. 최근, 저자들에 의하여 특성경계를 살리는 표면요소

망 생성 기법[8,9]과 금형과 소재 사이의 간섭을 고려한 적응적 요소망 재생성 기술[10]이 개발되었다.

본 연구에서는 전술한 두 기법에 근거하여 개발된 요소망 자동생성 기법을 기초로 하여 단조 시뮬레이션 중 변화하는 경계조건을 추가적으로 고려함으로써 요소망 자동생성의 지능화 정도를 제고시키고, 그 효과를 적용 예제를 통하여 검증하고자 한다.

2. 지능적 요소망 자동생성

본 장에서는 기 개발된 적응적 사면체 요소망 생성 기법[10]을 이용하여 유효변형률, 유효변형률 속도, 곡률, 간섭량 등을 고려한 요소망 생성기법을 소개한다. 이미 적응적 요소망 생성 및 재생성 기법과 관련된 배경격자(background grid), 이산된 밀도구를 이용한 요소밀도 제어 방법, 요소망 생성 기법, 모서리 강조 간섭제거 기법, 모서리기준 분할 기법 등은 관련 논문[8-10]을 통하여 소개되었으므로 상세한 설명은 문헌으로 대신한다.

1. 경상대학교 기계항공공학부

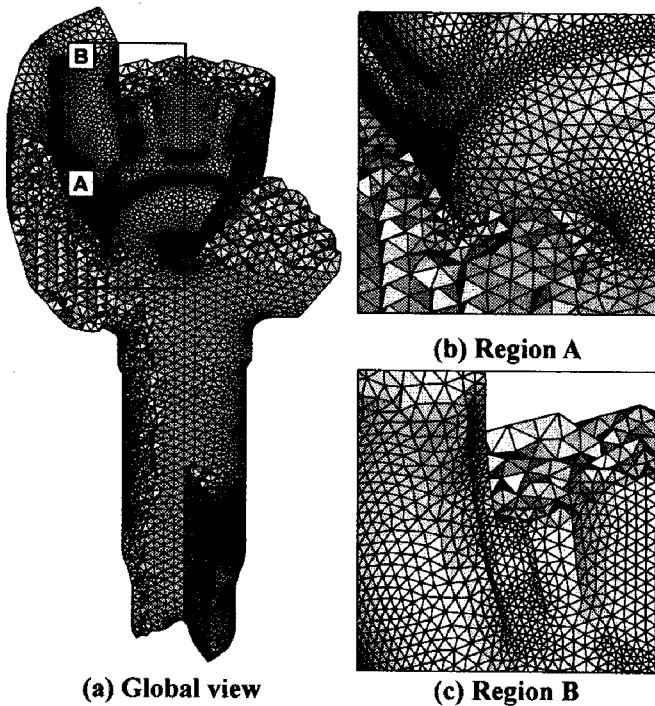
교신저자: 경상대학교 기계항공공학부

E-mail: msjoun@gsnu.ac.kr

체적소성가공 공정의 해석은 과도한 변형으로 인하여 요소망 재구성이 불가피할 하며, 정교한 해석 결과를 얻기 위해서는 재구성한 요소망의 밀도 조절기능이 필수적이다. 일반적으로 소성가공 공정 해석 중 요소망 재생성 시의 요소밀도는 주로 상태변수(field variables)의 분포로부터 계산되고 있다[7,9,11,12]. 이 경우, 소재의 곡률과 소재와 금형 간의 간섭량 등을 표현하는데 한계가 있으며, 이로 인하여 3 차원 단조 시뮬레이션 시에 다소 비현실적인 결과를 얻는 경우가 자주 발생한다. 이러한 문제를 해소하기 위하여 저자들은 변형률 $\bar{\epsilon}$, 변형률속도 $\dot{\bar{\epsilon}}$, 곡률 e , 간섭량 c 등을 반영한 다음의 요소밀도함수 $\phi = f(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, e, c)$ 를 사용하여 요소밀도를 결정하였다.

$$\phi = \max\{w_1 \langle \bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{\min} \rangle, w_2 \langle \dot{\bar{\epsilon}} - \dot{\bar{\epsilon}}_{\min} \rangle, w_3 \langle e - e_{\min} \rangle, w_4 \langle c - c_{\min} \rangle\} \quad (1)$$

여기서 $\langle x \rangle$ 는 $x \leq 0$ 이면 0 의 값을 가지며, $x > 0$ 이면 x 의 값을 가지는 특이함수이고, 하첨자 min 은 그 값에 대한 최소값을 의미한다. 그리고 w_i 는 가중상수이며, 본 연구에서는 식 (1) 각 항의 최대값이 1 이 되도록 결정하였다[7].



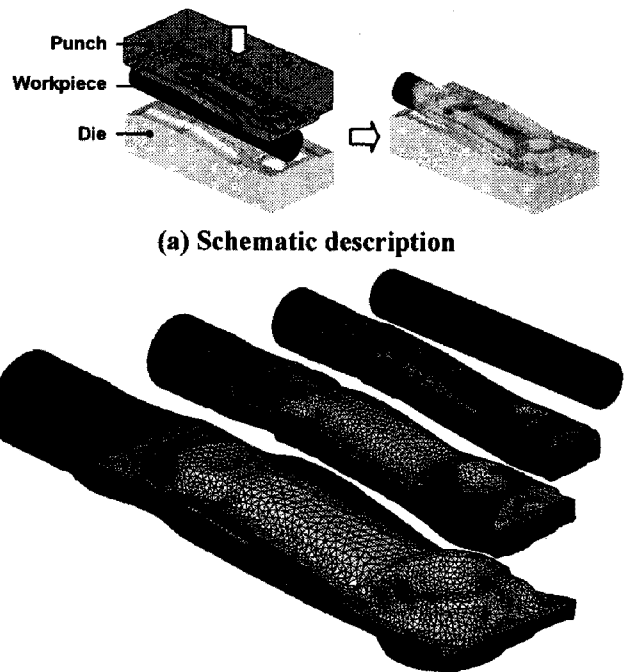
(a) Global view (b) Region A (c) Region B
Fig. 1 The generated tetrahedral mesh

Fig. 1 에 전술한 요소밀도함수를 이용하여 구한 요소망을 나타내고 있다.

Fig. 1(a)의 영역 A 와 영역 B 를 확대한 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)에서 보는 바와 같이 날카로운 모서리 영역과 홈 영역 모두에서 우수한 삼각형 요소망이 생성되었음을 알 수 있다.

한편 3 차원 단조 시뮬레이션 시에 금형-소재의 경계를 적절히 표현하는 것은 매우 중요하다. 2 차원과 3 차원 단조 시뮬레이션의 근본적인 차이는 바로 이 점에 있다. 따라서 경계 또는 금형-소재 접촉면을 고려한 요소망의 생성은 지능적 요소망 생성 시에 필수적이다. 그러나 대부분의 기존연구 결과에서는 전술한 점들이 고려되지 않고 있다.

본 연구에서는 요소밀도 계산 시에 금형-소재의 접촉조건을 고려한 요소망 생성 기술을 개발하였으며, 이를 강소성 유한요소법과 접목시킴으로써 AFDEX 3D 의 사면체 모듈을 개발하였다. Fig. 2 에 AFDEX3D 가 단조 공정 중 자동 생성된 요소망을 나타내었다. 이 요소망에서 보는 바와 같이 개발된 요소망 생성 프로그램은 단조중의 금형-소재 접촉 조건을 잘 반영함을 확인할 수 있다.



(a) Schematic description (b) Deformation history with contacting nodes
Fig. 2 Adaptive tetrahedral mesh generation in the simulation of a connecting rod forging process

3. 적용 예제

Baden-Baden 벤치마크 테스트 문제는 많은 연구자들에 의하여 연구되었다[13-19]. 이 문제는 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 2 단 냉간단조 공정이며, 외관상으로 보면 단순한 공정이지만, 해석 기술자의 관점에서는 다소 까다로운 문제에 속한다. 제 1 단에서 하단부의 모서리 부분이 점진적으로 뭉개지고, 제 2 단의 시작시에 상부 금형이 소재의 상부에 동시에 접촉하기 때문에 요소망의 품질 통제가 쉽지 않다. 이러한 이유로 대부분의 연구자들[16-19]에 의한 연구결과가 좌우의 높이가 실험 결과와 큰 차이를 보였으며, 내부의 특성경계가 심하게 뭉개지는 결과가 초래되었다.

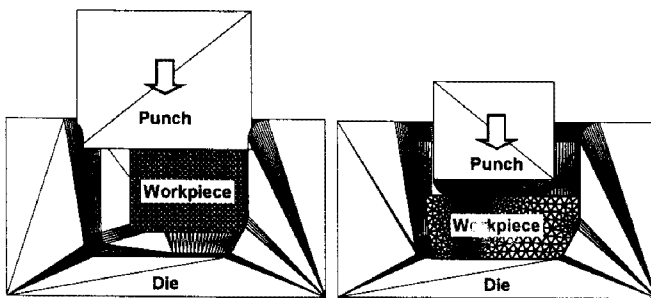
본 연구에서 사용한 소재 및 공정 정보를 Table 1 에 요약하였다. 요소의 수는 타 연구자의 연구 결과와의 비교를 목적으로 15000 개 내외로 잡았다.

Figs. 4-10 에 걸쳐 해석 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 특히 제 1 단에서 요소밀

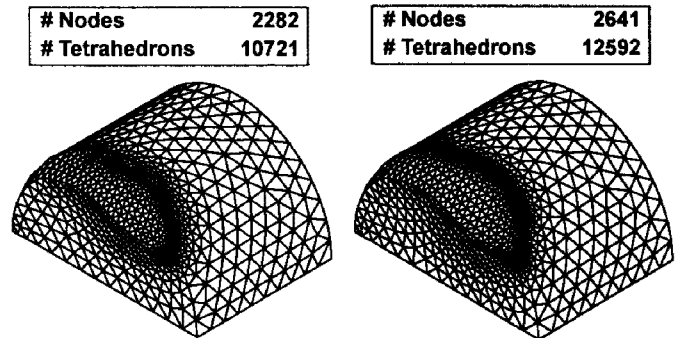
도가 금형-소재 경계를 매우 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 제 2 단에서도 식 (1)의 조건 이외에도 금형과 소재의 경계가 요소밀도에 잘 반영되어 있으며, 이는 결과적으로 Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 내부의 상측 경계, 즉 특성경계[7-9,15-17]를 매우 잘 표현하는 효과로 나타났다. 한편, Fig. 10(b)에서 정의하고 있는 좌우의 길이 비율을 계산해 보면, 약 20.0%가 나온다. 이 수치는 비교적 실험 결과에 근접한 것으로 판단된다[16-17].

Table 1 Material properties and process conditions

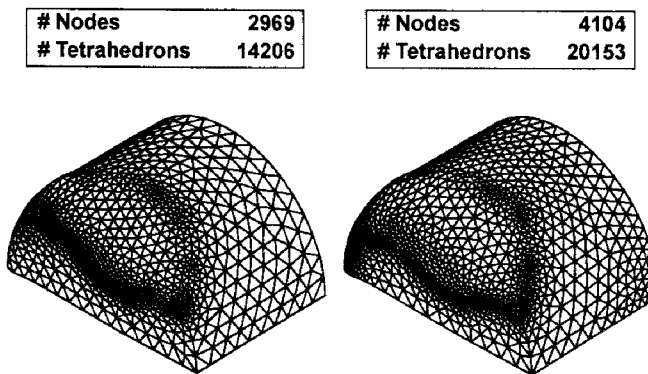
	1 st stage	2 nd stage
Total relative stroke (mm)	11.0	10.3
Frictional factor m		0.06
Flow stress $\bar{\sigma}$ (MPa)		$763.10 \bar{\epsilon}^{0.245}$
Temperature (°C)		20
Punch velocity (mm)		1.0



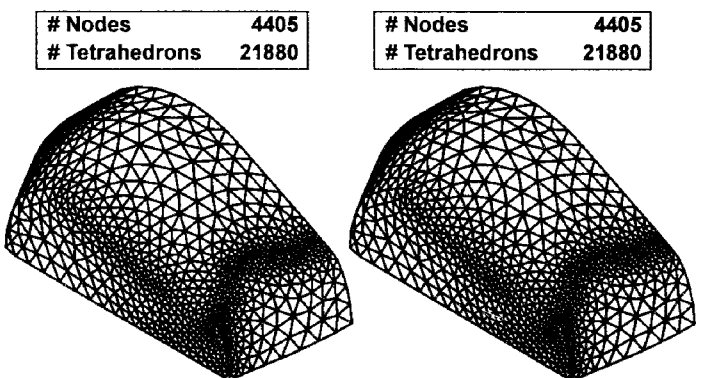
(a) 1st stage (b) 2nd stage
Fig. 3 Schematic description of forging process [16]



(a) Before remeshing (b) After remeshing
Fig. 4 Deformed workpiece at 30% stroke (1st stage)



(a) Before remeshing (b) After remeshing
Fig. 5 Deformed workpiece at 60% stroke (1st stage)



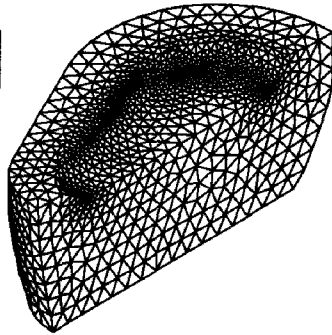
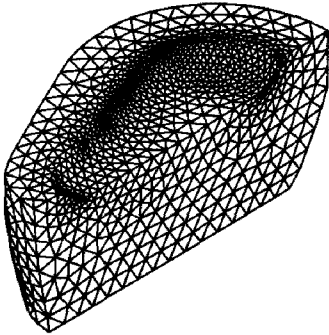
(a) Before remeshing (b) After remeshing
Fig. 6 Deformed workpiece at 100% stroke (1st stage)

# Nodes	2921
# Tetrahedrons	13769

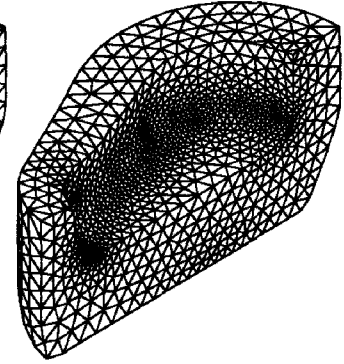
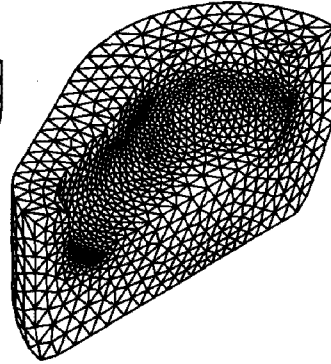
# Nodes	3114
# Tetrahedrons	14732

# Nodes	3193
# Tetrahedrons	15127

# Nodes	3417
# Tetrahedrons	16201



(a) Before remeshing (b) After remeshing
Fig. 7 Deformed workpiece at 30% stroke (2nd stage)

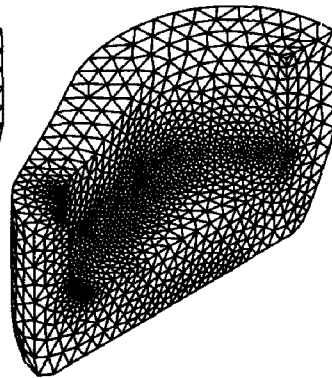
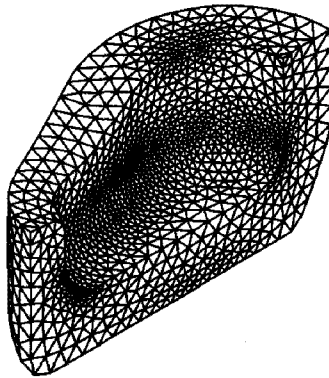


(a) Before remeshing (b) After remeshing
Fig. 8 Deformed workpiece at 60% stroke (2nd stage)

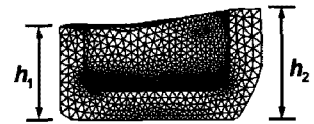
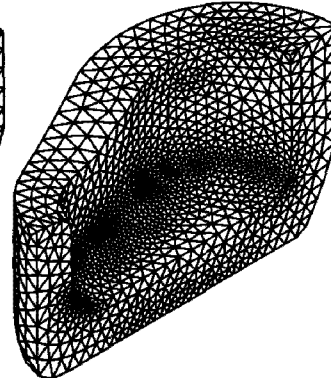
# Nodes	3585
# Tetrahedrons	16807

# Nodes	3828
# Tetrahedrons	17953

# Nodes	4183
# Tetrahedrons	19670



(a) Before remeshing (b) After remeshing
Fig. 9 Deformed workpiece at 90% stroke (2nd stage)



length ratio:

$$\Delta t = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100\%$$

(a) Deformed shape (b) Length ratio
Fig. 10 Deformed workpiece at 100% stroke (2nd stage)

4. 결론

후기

본 논문에서는 지능적 단조 시뮬레이션 기법과 관련 예제가 제시되었다. 이 기법에서는 기존의 상태변수를 사용한 요소밀도 부여 방법에다 금형의 정보를 추가적으로 반영하여 요소밀도를 계산하였으며, 특히 금형과 소재의 접촉 정보를 활용함으로써 기존의 방법이 안고 있던 단조 시뮬레이션 중 특성경계의 소멸 문제를 해결하였다.

Baden-Baden 벤치마크 테스트 예제의 적용을 통하여 제시된 방법의 타당성을 검증하였다. 제안된 지능적 요소망 재생성 기법은 소성가공 공정의 정교한 해석에 이바지할 것으로 기대된다.

본 논문은 2 단계 BK21 사업 및 산업자원부 지역혁신 인력양성사업에 의해 지원되었음.

참고 문헌

- [1] C. H. Lee and S. Kobayashi, 1973, New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method, Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 95, pp. 865-873.
- [2] J. Che, 1999, 3-D forging process by finite volume method, Proc. of KSME '99 fall annual meeting, Pusan national university, Pusan, November 5, Vol. A, pp. 413~417.

- [3] H. Borouchaki, P. Laug, A. Cherouat, K. Saanouni, 2005, Adaptive remeshing in large plastic strain with damage. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 63, No. 1, pp. 1-36.
- [4] J. Zhu, M. Gotoh, 1999, Automatic remeshing of 2D quadrilateral elements and its application to continuous deformation simulation: Part I. Remeshing algorithm. *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 87, No. 1-3, pp. 165-178.
- [5] D-Y Kwak, J-S Cheon, Y-T Im, 2002, Remeshing for metal forming simulating - Part I: Two-dimensional quadrilateral remeshing. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 53, No. 11, pp. 2463-2500.
- [6] J. Wan, S. Kocak, M.S. Shephard, 2005, Automated adaptive 3D forming simulation processes. *Eng. Comput.*, Vol. 21, No. 1, pp. 47-75.
- [7] M.C. Lee, M.S. Joun, J.K. Lee, 2006, Adaptive tetrahedral element generation and refinement to improve the quality of bulk metal forming simulation, *Finite Elem. Anal. Des.*, on publishing.
- [8] M.C. Lee, M.S. Joun, 2007, Adaptive triangular element generation and optimization-based smoothing, Part 1- On the plane. *Adv. Eng. Softw.*, doi:10.1016/j.advengsoft.2006.11.004.
- [9] M.C. Lee, M.S. Joun, 2007, Adaptive triangular element generation and optimization-based smoothing, Part 2- On the surface. *Adv. Eng. Softw.*, doi:10.1016/j.advengsoft.2006.11.005.
- [10] M.C. Lee, M.S. Joun, J.K. Lee, 2006, Advancing front method for tetrahedral mesh generation and application to remeshing in forging. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, under review.
- [11] R. Thomas, R. Kopp, J. Debye, L. Lausberg, R. Schneiders and W. Oberschelp, 1992, Optimization of metal forming processes, refinement and optimization of quadrilateral element meshes, *NUMIFORM '92*, pp. 307-312.
- [12] J.T. Hong, S.R. Lee, C.H. Park, D.Y. Yang, 2004, Adaptive Delaunay mesh generation technique based on a posteriori error estimation and a node density map, *Trans. Materials Processing*, Vol. 13, No. 4, pp. 334-341.
- [13] International Conference on Numerical Methods for Metal Forming in Industry, Baden-Baden, Germany, 1994.
- [14] N. Biba, S. Stebounov, A. Lishiny, 2001, Cost effective implementation of forging simulation, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 113, No. 1-3, pp. 34-39.
- [15] R. Schneiders, 1996, A grid-based algorithm for the generation of hexahedral element meshes, *Eng. Comput.*, Vol. 12, No. 3-4, pp. 168-177.
- [16] Y-K Lee, 1998, Three-dimensional automatic mesh generation for remeshing in finite element analysis of metal forming processes, PhD thesis, KAIST, Republic of Korea.
- [17] Y.K. Lee, D.Y. Yang, 1999, Development of a grid-based mesh generation technique and its application to remeshing during the finite element simulation of a metal forming process, *Eng. Comput.*, Vol. 16, No. 3, pp. 316-336.
- [18] D-Y Kwak, 2001, Localized mesh refinement based on modified Laplacian smoothing technique for finite element forging simulations, PhD thesis, KAIST, Republic of Korea.
- [19] D-Y Kwak, Y-T Im, 2002, Remeshing for metal forming simulating - Part II: Two-dimensional quadrilateral remeshing. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 53, No. 11, pp. 2501-2528.