

## 지능적 단조 시뮬레이션 기술과 AFDEX

전만수<sup>1,\*</sup>, 이민철<sup>2</sup>

# Intelligent Forging Simulation Techniques and AFDEX

M. S. Joun, M. C. Lee

### Abstract

We present an intelligent forging simulator AFDEX. The intelligent forging simulator is determined by the adaptive and optimal mesh generation technique and many intelligent application-oriented special functions which minimize the user-intervention during forging simulation. Of course, the solution accuracy should be optimized in the intelligent simulation. We have developed AFDEX to meet the requirement on intelligent simulation. Its characteristics are introduced with the help of typical application examples.

**Key Words :** Intelligent Forging Simulation (지능적 단조 시뮬레이션), Adaptive and Optimal Mesh Generation (적응적 및 최적 요소망 생성), User-Friendliness (사용자 편리성)

### 1. 서론

최근 단조 시뮬레이션 기술의 활용이 급속도로 확산되고 있다. 이미 국내에서도 약 80여 개의 기업이 상용으로 개발된 단조 시뮬레이터[1-6]를 공식적으로 사용하는 것으로 판단된다. 단조 시뮬레이션 기술은 단조 공정 설계와 엔지니어링 업무에 혁신을 불러 일으켜 왔으며, 개발 원가절감과 생산성 향상을 넘어 이제는 품질의 관리 영역에까지 이르고 있다. 조만간 단조품의 사용자가 제조자에게 단조 시뮬레이션 결과의 제시를 요구할 것으로 판단된다.

그러나 단조 시뮬레이션 기술은 수요자의 요구에 비하여 발전속도가 빠르지 않다. 오히려 발전이 점진적으로 감속되는 추세이다. 단조 시뮬레이터 자체가 매우 복잡한 소프트웨어이기 때문에 프로그램을 개발하거나 개선하는데 상당한 어려움이 따르고, 과거 70-80년대에 시작한 제1세대의 개발 주체들은 고령화된 반면 신진인력의 유입이 격감하고 있기 때문에 앞으로도 도약적 발

전을 기대하기가 쉽지 않다.

단조 시뮬레이터의 사용자라면 사용하고 있는 소프트웨어에 대한 불만을 가지지 않은 사람이 없다고 해도 과언이 아닐 것이다. 그 원인은 계산 시간 문제, 요소망의 품질, 예상치 못한 프로그램의 중단, 해석결과와 실제현상과의 불일치 등으로 요약된다. 이 중에서도 요소망의 품질은 결과의 정확도와 직결되므로 가장 중요한 개선 희망 요소중의 하나이다. 요소망의 품질은 실제 계산시간에도 직접적인 영향을 미치고 있다. 특히 요소망의 품질은 경계요소의 품질에 크게 좌우된다. 표면에서 사각형요소망의 직각도는 해석 결과의 수치적 문제와 직결되어 있는 것으로 밝혀진 바 있다[7]. 따라서 표면 요소망의 품질 향상에 세심한 주의가 필요하다. Lee 등[8-10]은 표면요소의 품질이 탁월한 사면체요소망 자동생성 기법을 개발하였으며, 그것을 단조 시뮬레이터 AFDEX 3D에 성공적으로 적용하였다[1].

본 논문에서는 지능적 단조 시뮬레이터인 AFDEX의 주요 특징을 적용 예제를 통하여 제시하고자 한다.

1. 경상대학교 기계항공공학부/항공기부품기술연구소  
2. 경상대학교 기계공학과 박사후 과정  
\* E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

## 2. 지능적 단조 시뮬레이션 기술과 AFDEX

지능적 단조 시뮬레이션은 사용자의 개입을 최소화시키고 그림에도 불구하고 최적의 해를 얻는 것으로 정의된다. 지능적 단조 시뮬레이션이 갖추어야 할 조건을 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 결과의 정확도가 높아야 한다.
- (2) 지능화된 요소망 생성 기술을 통하여 요소망 재구성으로 인한 결과에 대한 정확도 손실이 최소화되어야 한다.
- (3) 최적의 요소망 밀도 분포가 이루어져야 하고, 복잡한 형상에 대한 요소망생성 능력이 뒷받침되어야 한다.
- (4) 단조에서 중시하는 특성 경계와 소재-금형 접촉 경계가 뚜렷하게 표현되어야 한다.
- (5) 다단 공정의 자동 해석이 가능해야 한다. 이를 통하여 단과 단 사이에 사용자의 개입을 회피함으로써 실질적인 계산시간의 최소화가 가능해야 한다.
- (6) 사용의 편리성이 보장되어야 한다.

저자들은 전술한 지능적 단조 시뮬레이션 기술의 조건에 대한 인식을 바탕으로 단조 시뮬레이터 AFDEX를 개발하였다.

먼저 AFDEX의 결과의 정확성에 관하여 논하고자 한다. Fig. 1은 인장시험으로 획득된 실험결과와 인장시험 결과로부터 AFDEX/MAT[11]를 이

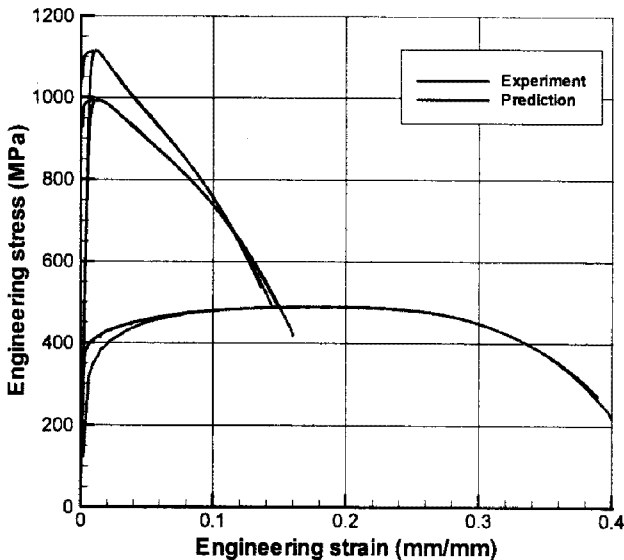


Fig. 1 Comparison of experiments with predictions of three tensile tests

용하여 획득된 유동응력 정보를 이용하여 인장시험에 대한 시뮬레이션을 실시하여 얻은 해석결과를 비교하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 AFDEX를 이용하여 공학적으로 정확한 인장시험의 해석이 가능하다는 것이다. 이러한 결과는 금속의 거시적 특성의 파악 및 유동응력 정보의 획득과 금속의 파괴거동 특성 등의 연구에 크게 기여할 것으로 기대된다.

그리고 Fig. 2는 열간단조 중에서 형성된 소성유동선도에 관한 실험결과와 해석결과를 비교하고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 AFDEX는 매우 정확하게 열간단조 중 소성유동선도를 예측하게 해 주고 있다.

Fig. 3과 Fig. 4에 AFDEX에서 사용중인 사각형 요소망과 사면체요소망을 나타내고 있다. 사각형 요소망에서 보는 바와 같이 천이 영역의 최소화가 이루어졌고 최적화 기법을 통하여 경계와 내부에서 요소의 직각도가 최적화되어 있다[7]. 그리고 Fig. 4에서 보는 바와 같이 생성된 사각형요소망은 회망 사각형요소망의 밀도를 크게 벗어나지 않고 있다. 이는 AFDEX에서 사용하는 사면체요소망의 최적화 정도를 암시하는 결과이다.

Fig. 5는 AFDEX 3D에서 사용중인 요소망생성기법을 이용하여 생성한 요소망의 분포를 나타내고 있다[10]. 이 예제들은 요소망 밀도제어의 성능을 보여 주는 것이다. 그리고 Fig. 6은 지능적 단조 시뮬레이션 기술이 갖추어야 할 요소망생성에서의 견실함을 보여주기 위한 것이다.

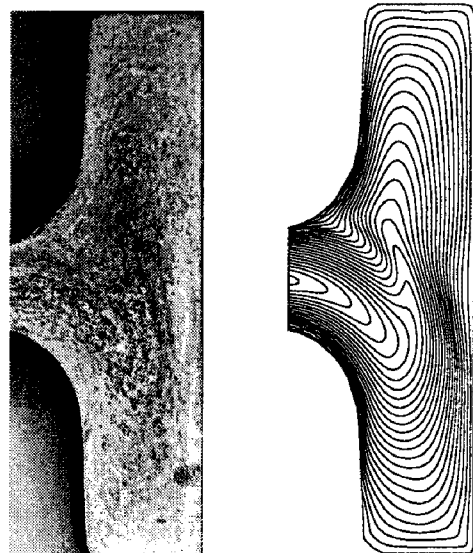


Fig. 2 Comparison of experiment with prediction of metal flow lines of a hot forging

Fig. 7은 냉간단조 중에 생성된 모서리를 나타내고 있고, Fig. 8은 자유표면과 금형의 접촉으로 형성된 특성경계를 나타낸다. 이러한 특성경계의 정확한 표현은 정밀 단조시뮬레이션의 전제 조건이다.

Fig. 9와 Fig.10은 AFDEX의 2차원 자동해석 기능과 3차원 자동해석 기능을 이용하여 단조 시뮬레이션을 실시한 결과를 비교하고 있다. 자동해석

기능은 사용자의 궁극적 시간 개입을 최소화할 수 있으므로 결과를 얻는데 소요되는 시간을 전체적으로 줄여주는 효과가 있다.

사용의 편리성의 보장은 지능적 단조 시뮬레이션 기술의 주요 요구조건 중에 하나이다. AFDEX는 기업체에 대한 근접 지원 경험을 바탕으로 가장 편리한 사용자 인터페이스 개념을 적용하였다.

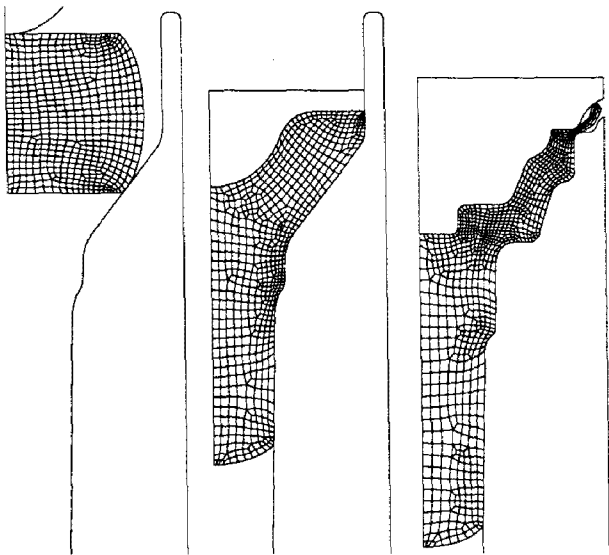


Fig. 3 Optimized quadrilateral element

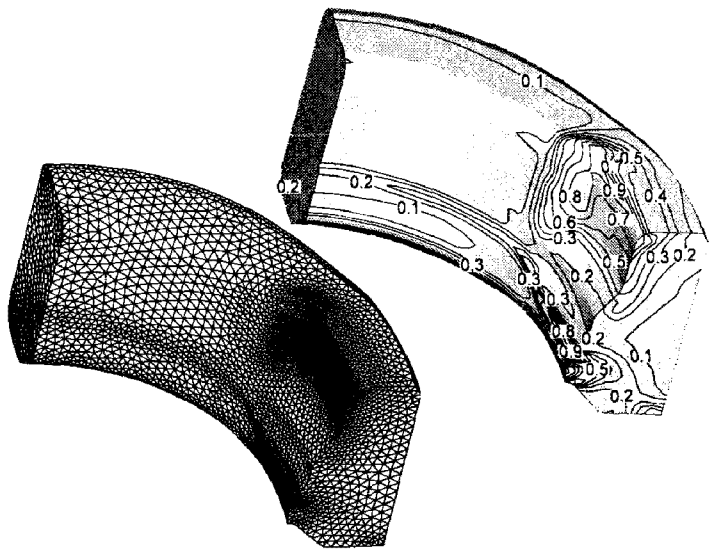


Fig. 4 Optimized tetrahedral element

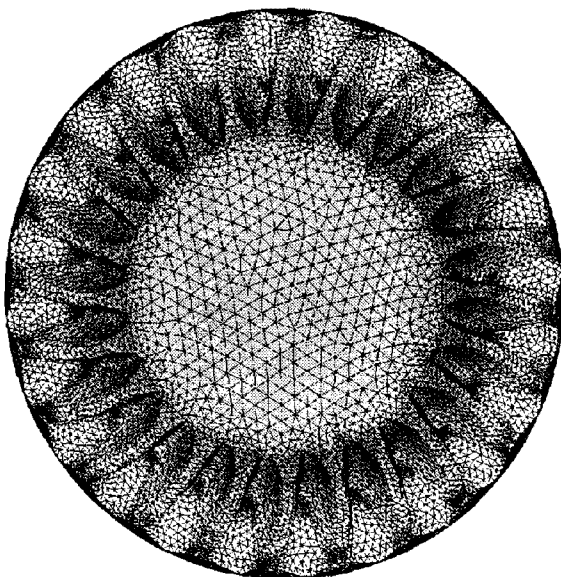


Fig. 5 Intelligent remeshing of tetrahedral elements

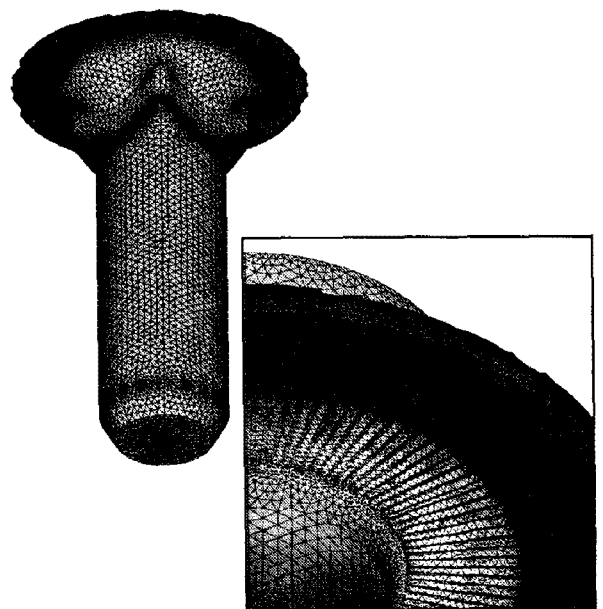


Fig. 6 Robustness of remeshing

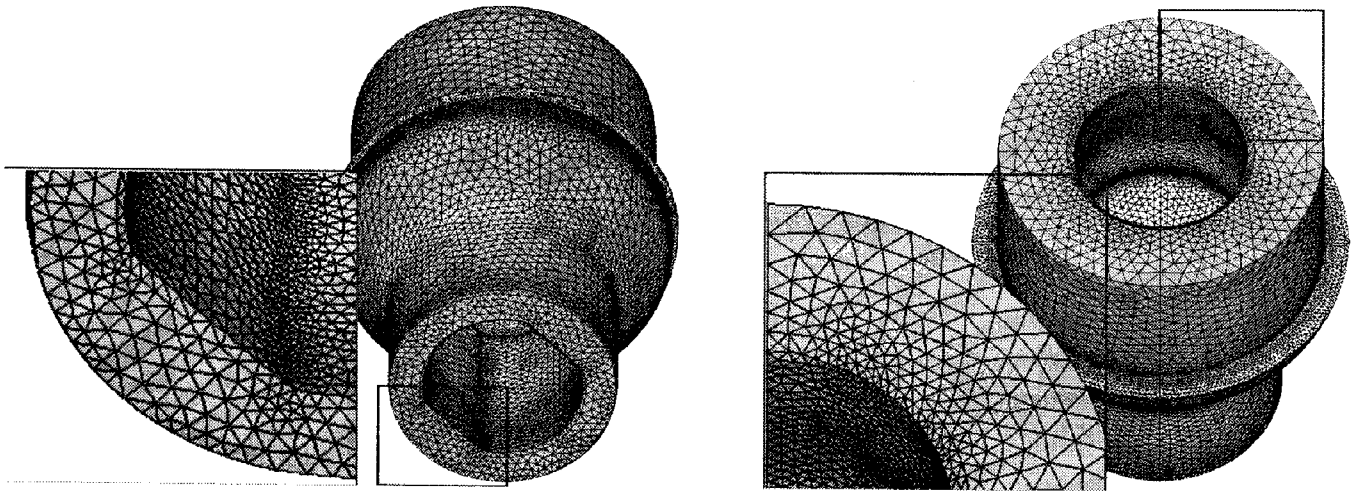


Fig. 7 Edges generated by the material-die contact

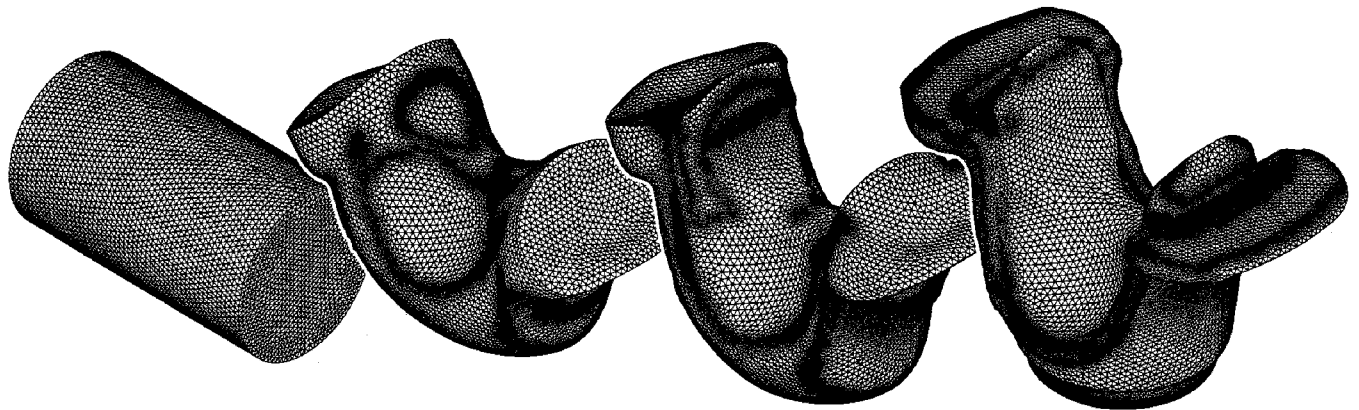


Fig. 8 Characteristic lines generated along the die-free free-surface interface

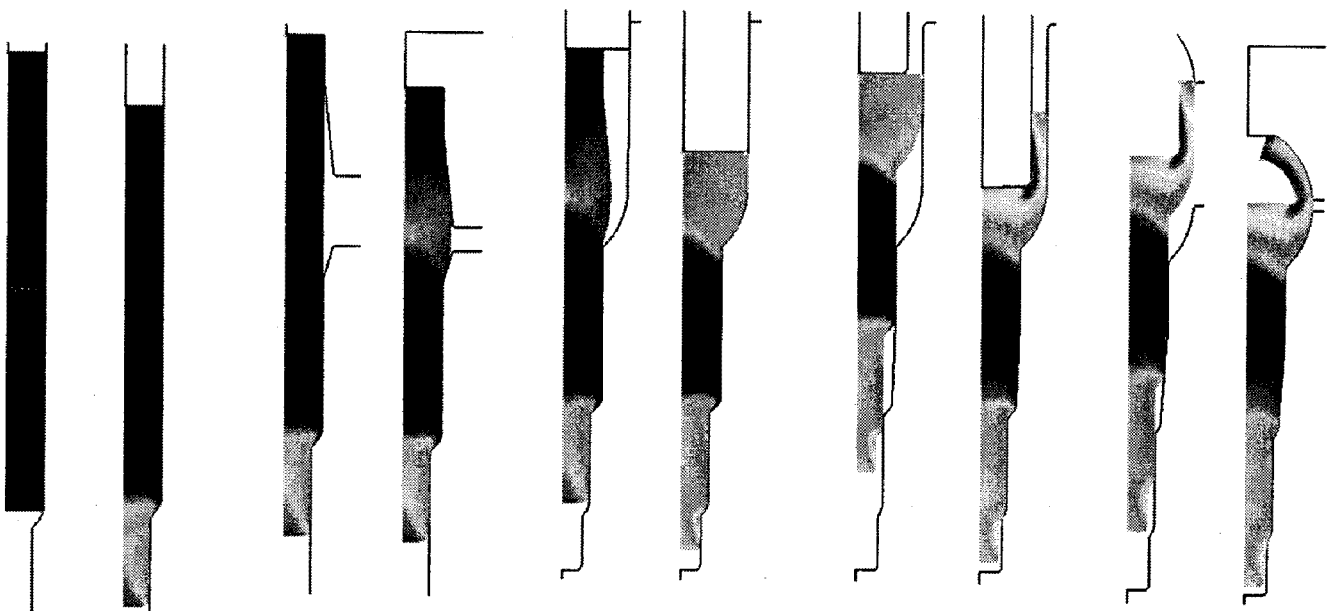


Fig. 9 2D simulation results obtained by the automatic simulation capability

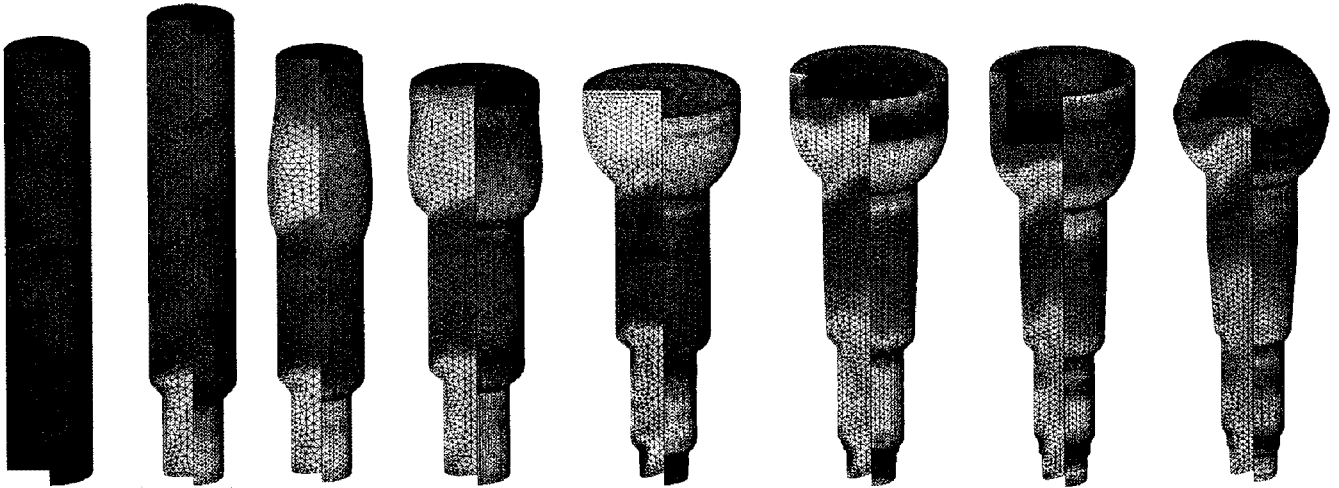


Fig. 10 3D simulation results obtained by the automatic simulation capability

### 3. 결 론

단조 시뮬레이션 기술은 이제 장식에서 벗어나 설계 과정에서 거쳐야 할 필수 관문이 되고 있다. 그리고 컴퓨터의 발전으로 계산 시간 문제 중심에서 정확도 중심으로 사용자의 인식 전환이 이루어지고 있다. 10년전에 AFDEX 2D로 3시간 이상 소요되던 문제가 이제 3분 이하로 줄어들었다. 더 이상의 시간은 문제가 되지 않는 것이 현실이다. 고급 PC를 사용한다면 이제 30초 이면 가능한 문제가 된 것이다. 이러한 컴퓨터와 관련된 환경 변화로 사용자의 요구는 계산시간에서 정확도와 편리성으로 급변할 것으로 예상된다. 즉 지능적 단조 시뮬레이터를 선호하게 될 것이다.

본 논문에서는 지능적 단조 시뮬레이터가 갖추어야 할 조건을 제시하였으며, 이러한 조건의 충족을 전제로 하여 개발한 AFDEX를 특징적인 적용예제를 중심으로 소개하였다.

### 후 기

본 논문은 2단계 BK21사업 및 산업자원부 지역 혁신 인력양성사업에 의해 지원되었음.

### 참 고 문 헌

1. AFDEX, <http://engine.gsnu.ac.kr/~msjoun/afdex.htm>
2. EESY-2-FORM, <http://www.cpmgmbh.de>
3. DEFORM, <http://www.deform.com>
4. FORGE, <http://www.transvalor.com>
5. Superforge, Superform, <http://www.mssoftware.com>
6. QForm, <http://www.quantor.com>
7. Joun, M.S. and Lee, M.C., 1997, Quadrilateral finite-element generation and mesh quality control for metal forming simulation, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 40, No. 21, pp. 4059-4075.
8. M. C. Lee, M. S. Joun, 2007, Adaptive triangular element generation and optimization-based smoothing, Part 1-On the plane, *Adv. Eng. Softw.*, Vol. 39, No. 1, pp. 25-34.
9. M. C. Lee, M. S. Joun, 2007, Adaptive triangular element generation and optimization-based smoothing, Part 2-On the surface, *Adv. Eng. Softw.*, Vol. 39, No. 1, pp. 35-46.
10. M.C. Lee, M.S. Joun, J. K. Lee, 2007, Adaptive tetrahedral element generation and refinement to improve the quality of bulk metal forming simulation, *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 42, No. 10, pp. 788~802.
11. M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, A new method for acquiring true stress-strain curves over a large range of strains using a tensile test and finite element method, *Mech. Mater.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat>, in Press, Corrected Proof, 27-Feb-2008