

# 국부 요소망재구성 기법을 이용한 정밀 단조시물레이션

류찬호\*, 박재민\*, 전만수\*\*

## Precise Forging Simulation by a Local Remeshing Technique

Chan Ho Ryu\*, Jae Min Park\*, and Man Soo Joun\*\*

### ABSTRACT

In this paper, a local remeshing technique assisted by flexible user-interface capabilities is presented for precise forging simulation. The rigid-plastic finite element formulation is introduced and the detailed approach to the new local remeshing technique is given. A piercing process in cold forging is simulated by the presented technique and the simulated results are compared with those obtained by the technique and the simulated results are compared with those obtained by the conventional approach and experiments. A typical application example is also given, which emphasizes the capability of the local remeshing technique in forging simulation.

**Key Words** : Precise Forging Simulation (정밀 단조시물레이션), Cold Forging (냉간단조), Piercing Process (피어싱공정), Local Remeshing Technique (국부 요소망재구성 기법)

### 1. 서론

단조시물레이션의 자동화는 실공정 적용 측면에서 그 중요성이 강조되어 왔다. 최근의 20년간 요소망재구성 등<sup>(1-6)</sup> 단조공정의 자동 시물레이션에 관한 연구들이 다양하게 시도되었다. 그 결과, 종래에 사용이 용이하지 않던 단조시물레이션 기술이 대기업은 물론 중소기업체의 공정 설계기술자가 편안하게 사용할 수 있도록 되었으며, 관련 산업의 생산성을 높이는 데 크게 기여하고 있다.

그런데 단조공정 그 자체가 매우 창의적이기 때문에 모든 경우의 수를 고려한다는 것은 불가능하며, 자동 시물레이션에 사용된 원칙에 따라 그 결과가 다소 차이가 날 수 있다. 경험적으로 볼 때 대부분의 경우는 일반적인 원칙에 의하여 양호

한 결과를 얻을 수 있으나, 피어싱 등과 같이 국부적인 변형에 의하여 요소망재구성이 빈번하게 실시되는 특별한 경우에는 일반적 기준<sup>(6)</sup>에 의한 자동시물레이션은 부적절하다. 요소망재구성에서 불가피한 이력의존 상태변수의 순화(smoothing)와 경계의 인위적 변화 등이 예측결과에 무시할 수 없을 정도의 영향을 주기 때문이다. 이석원 등<sup>(7)</sup>은 단조시물레이션 결과가 요소망재구성에 따른 유효변형률의 순화로 인하여 다소 영향을 받을 수 있다는 점을 피어싱 공정의 컴퓨터 시물레이션과 실험을 통하여 지적하였다. 이 연구에서 요소망재구성은 유효변형률 분포 등의 순화를 동반하여 성형하중 결과에 비교적 큰 영향을 주는 것으로 밝혀졌다.

최근 PC를 바탕으로 하는 사용자 개입 기술의 발전은 일정한 범칙에 의한 완전 자동 단조시물레

\* 경상대 기계공학과 대학원  
\*\* 경상대 수송기계공학부, 항공기부품기술연구소

이선의 결점을 보완하기에 충분할 정도로 발전하였다. 따라서 정밀 단조시물레이션을 위하여 사용자 개입 기술과 기존의 자동 단조시물레이션 기술과의 상호보완 필요성이 부각되고 있다. 일부의 연구자들이 사용자 개입에 의한 요소망재구성 기법에 관하여 연구하였으나, 사용자 개입에 의하여 전공정을 해석하겠다는 점에 주안점이 맞추어졌기 때문에 관련 연구 결과가 실공정 적용으로 연결되지 못하였다고 판단된다.

본 논문에서는 자동 단조시물레이션 기법의 단점을 보완하기 위하여 강화된 사용자 개입 기능을 바탕으로 사용자 개입에 의한 국부 요소망재구성 기법을 제시하며, 적용예제를 통하여 국부 요소망재구성 기법의 필요성을 강조하고자 한다.

## 2. 유동해석 문제의 수식화

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역  $V$ 와 경계  $S$ 로 나누어지며, 경계  $S$ 는 표면력(traction)이  $t_i = \bar{t}_i$ 로 주어진  $S_{t_i}$ , 속도가  $v_i = \bar{v}_i$ 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  $v_n = \bar{v}_n$ 이다. 소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화(isotropic hardening) 등의 성질을 가지고 있으며 von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

소성가공 공정의 유동해석 문제는 소재의 속도장  $v_i$ 를 구하자는 것이며, 다음의 약형으로 수식화된다.

$$\int_V \sigma_{ij}' \omega_{ij} dV + \int_V K \epsilon_{ii} \omega_{ii} dV - \int_V f_i \omega_i dV \quad (1)$$

$$- \sum \int_{S_{t_i}} \bar{t}_i \omega_i dS - \int_{S_c} \sigma_t \omega_t dS = 0$$

여기서 가중함수  $\omega_i$ 는 경계  $S_{v_i}$ 에서 영의 값을 갖는 임의의 함수이고,

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

이며,  $\omega_n$ 과  $\omega_t$ 는 각각  $\omega_i$ 의 법선성분과 접선성분을 나타낸다. 벌칙기법에서, 벌칙상수  $K$ 는

$$K \epsilon_{ii} = \sigma_{ij} / 3 = -p \quad (3)$$

의 의미를 갖는다. 따라서 벌칙기법을 사용할 경우, 압력분포는 속도장 해석결과로부터 자동적으로 구해진다.

따라서 전술한 경계치 문제를 푸는 것은 임의의 가중함수  $\omega_i$ 에 대하여 약형을 항상 만족시키는 속도장  $v_i$ 를 구하는 문제로 수식화된다. 물론, 속도장은  $S_{v_i}$ 와  $S_c$ 의 필수경계조건을 만족해야 한다.

약형에는 속도장  $v_i$ 와 가중함수  $\omega_i$ 가 바탕을 형성하고 있다. 그 이외의 것은 이들로부터 파생된 것이다. 따라서 이 네 개의 함수를 보간하여 속도와 압력이 미지수인 비선형연립방정식을 얻을 수 있다. 유한요소방정식의 유도 및 해법에 관한 내용은 참고문헌<sup>(8)</sup>으로 대신한다.

## 3. 국부 요소망재구성 기법

Fig. 1과 Fig. 2는 전체 단조시물레이션을 흐름을 나타내고 있다. 단조시물레이션 중 요소망의 찌그러짐이 과도하거나, 소재가 금형에 과도하게 침투하였을 경우 해석이 중지되고 요소망재구성을 실시해야 한다. 이 때, 사용자가 화면상의 그림을 바탕으로 요소망재구성 방법을 선택한다.

국부 요소망재구성 방법이 선택되면, 사용자 개입에 의하여 요소망재구성을 실시하게 된다. 요소망 생성은 회로법<sup>(6)</sup>에 바탕을 두고 있다. 따라서 요소망의 밀도는 회로상의 절점밀도로 제어된다.

Fig. 3은 Fig. 2의 국부 요소망재구성의 과정을 가시화하고 있다. 먼저 요소망의 찌그러짐 정도와 금형침투 등의 정보를 바탕으로 요소망재구성 대상 영역을 모두 선택한 후 각 영역별로 루프, 즉 외부루프를 만든다. 초기의 외부루프는 기존 요소망의

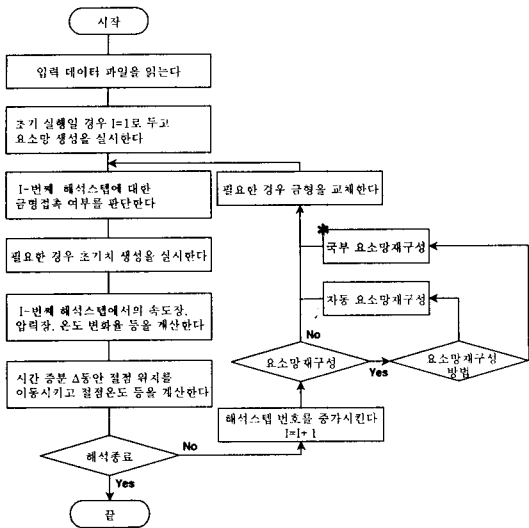


Fig. 1 Procedure of the forging simulation

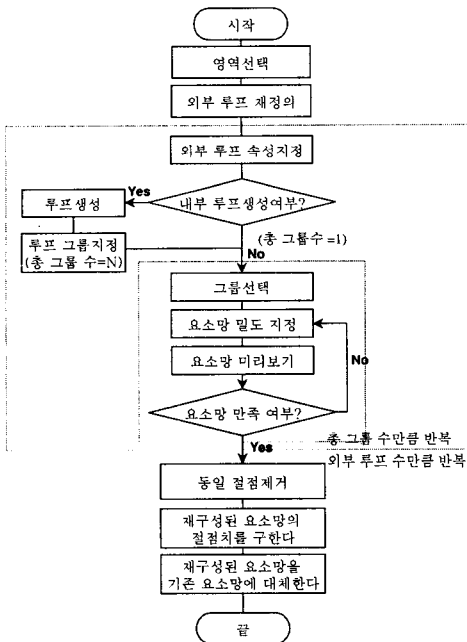


Fig. 2 Detailed local remeshing procedure

절점들의 연결로 구성된다. 요소망의 밀도제어를 위하여 내부루프가 필요하다고 판단될 경우 내부루프를 입력한다. 생성된 루프에 경계절점을 부여한다. 이 때 잔류 요소망이 사용하고 있는 절점에 의

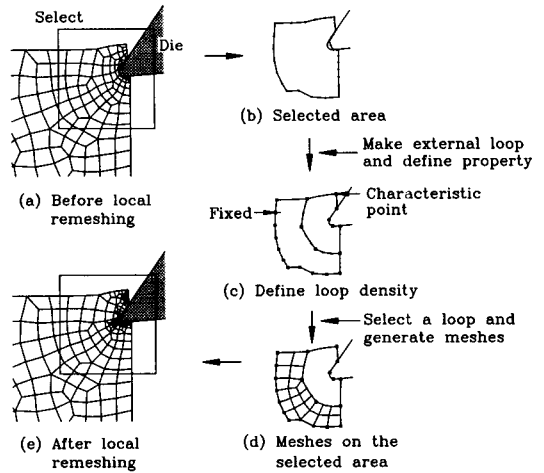


Fig. 3 Conceptual diagram of the presented local remeshing technique

하여 정의된 경계의 경계절점을 변경시키지 않는다. 경계절점의 정보로부터 회로법을 이용하여 각 루프별로 요소망을 생성한 후 절점순화를 실시한다. 외부루프 상의 절점 중에서 해석경계 상의 절점은 절점순화(nodal smoothing) 과정에서 고정되며, 그 이외의 절점은 부분적으로 수정될 수 있다. 미리보기의 기능을 통하여 요소망의 품질을 평가한 후 필요하다고 판단되는 일부의 영역을 재분할한다. 최종적으로 희망하는 요소망이 생성되었을 경우, 새로 생성된 요소와 절점에 해당 상태값을 부여하는 것으로 요소망재구성 작업이 종료된다.

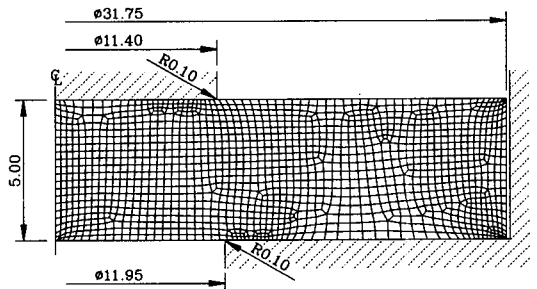


Fig. 4 Details of the test piercing process

구체적인 설명을 위하여 Fig. 4의 피어싱 공정을 선택하였다. 이 예제는 이석원 등<sup>(7)</sup>에 의하여 실험결과와 기존의 자동 요소망재구성 기능을 이용

한 단조시물레이션 결과의 비교에 이용된 바 있다. 이들의 연구결과에 의하면, 요소망재구성으로 인한 유효변형률의 순화가 해석 결과에 비교적 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 이 문제는 일부의 전단 영역에서 소성변형이 발생하는 문제이므로 국부 요

소망재구성이 필요한 대표적인 예이다. 해석에 사용된 공정조건은 참고문헌6에 제시되어 있다.

Fig. 5는 해석과정 중 요소망의 변화과정을 보여주고 있다. 해석결과를 얻는데 총 8번의 요소망재구성이 실시되었다. 그림상의 원은 요소망재구성된 영역을 나타내고 있다. Fig. 6은 성형하중을, Fig. 7은 유효변형률을 비교하고 있다. Fig. 6으로부터 하중과 피어싱되는 시점 모두 국부 요소망재구성을 실시하면 결과가 크게 개선되는 것으로 나타나고 있다. Fig. 7에서 자동 요소망재구성 기능을 이용할 경우 네 번의 요소망재구성이 실시되었음에도 불구하고 상태변수의 순화와 국부적 변형률속도 분포 등으로 인하여 국부 요소망재구성 기법의 결과와 상대적으로 큰 차이를 보이고 있다.

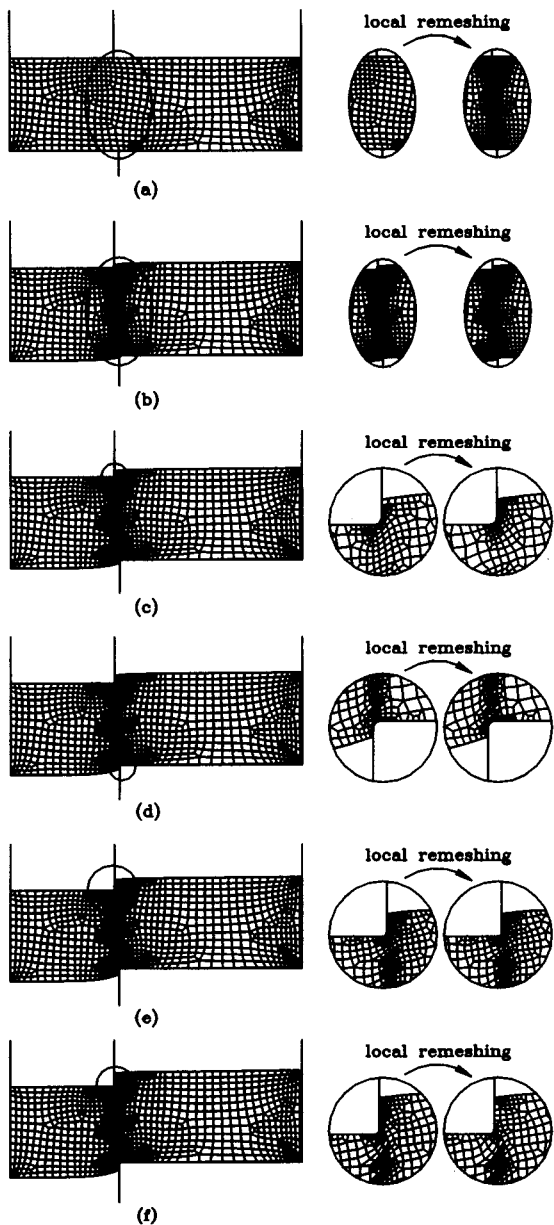


Fig. 5 Finite element meshes during simulation of the piercing process

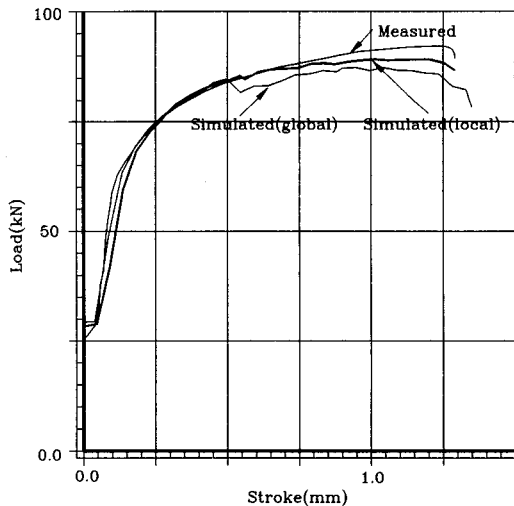
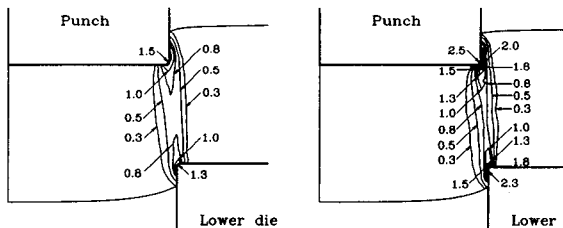


Fig. 6 Comparison of forming loads, measured and predicted



a) By global remeshing b) By local remeshing

Fig. 7 Effective strain distributions

#### 4. 적용예제

Fig. 8은 적용예제로 선정된 3단냉간단조 공정의 흐름도를 보여주고 있다. 두 번째 공정에서 후방압출을 해석할 때 국부적인 요소망의 퇴화에 의해 요소망재구성이 빈번히 발생한다. 이 공정의 경우 Fig. 9에서 보는 바와 같이 상태변수의 순화뿐만

아니라 요소망밀도를 조절하기 위해 경계절점이 갱신되는 과정에서 경계가 변화한다. 이런 현상을 해결하기 위해 국부 요소망재구성 기법을 이용하여 소성변형이 극심한 부분에서 요소망을 섬세하게 만들고 경계절점은 그대로 유지시켜 나가면서 해석을 실시하였다.

시뮬레이션에 사용된 공정조건과 소재의 변형 저항식은 다음과 같다.

· 쿨롱마찰계수:  $\mu = 0.05$

· 변형저항식:  $\bar{\sigma} = 324.0 \left( 1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.052} \right)^{0.29}$

MPa

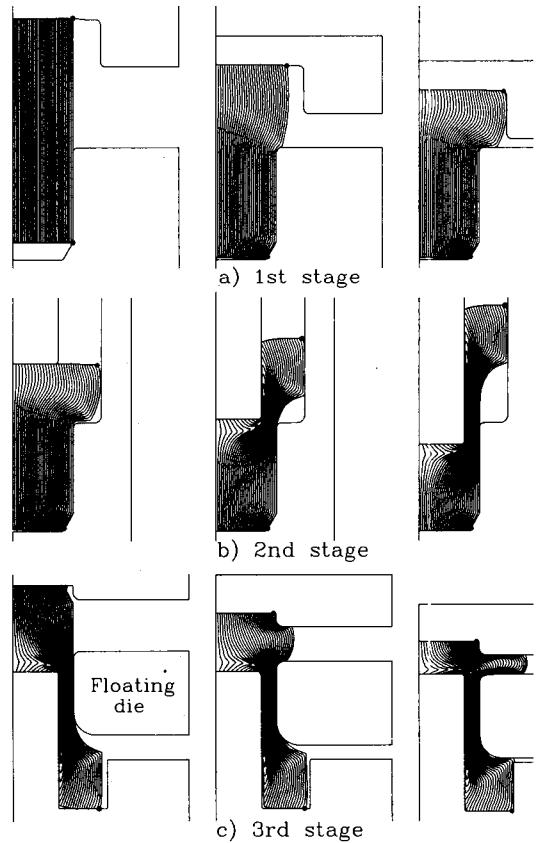


Fig. 10 Variation of metal flow lines

Fig. 10에 소성유동선도를 나타내었다. Fig. 11 (a)에서 보는 바와 같이 자동 요소망재구성에 의한 해석결과에서는 경계절점이 비교적 많이 순화되어

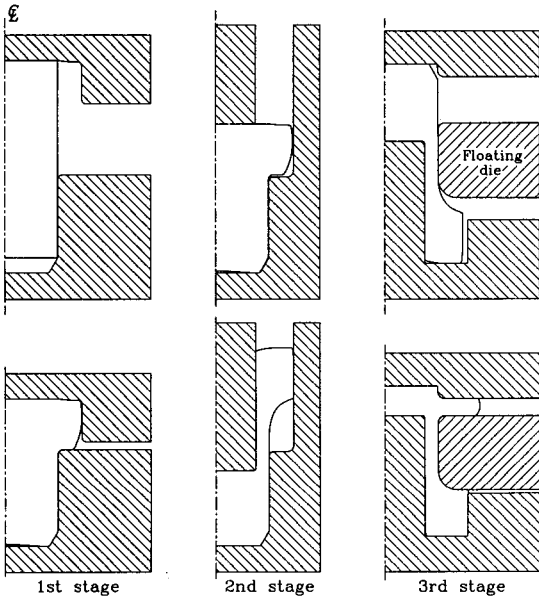


Fig. 8 Sequence of a cold forging process having a floating die

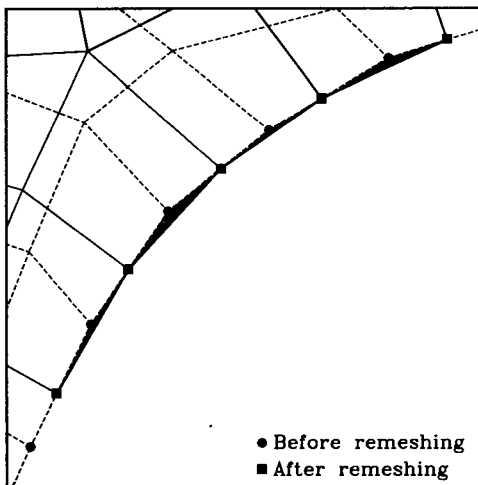


Fig. 9 Boundary change due to remeshing

평탄해졌음을 확인할 수 있다. 반면, 국부 요소망 재구성에 의한 해석결과인 Fig. 11(b)는 Fig. 11(a)와 좋은 대조를 보이고 있다.

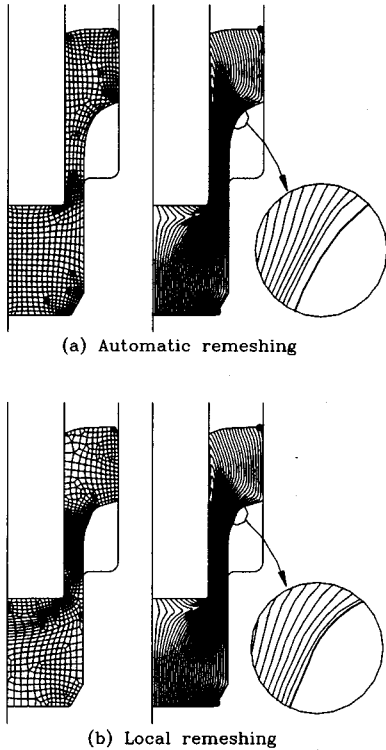


Fig. 11 Comparison of metal flow lines between automatic and local remeshings

### 5. 결론

본 논문에서는 국부 요소망재구성 기법에 의한 정밀 단조시뮬레이션 기법을 제시하였다. 이 방법을 이용함으로써 요소망재구성으로 인하여 발생하는 이력의존 상태변수의 순화 문제와 경계의 인위적 변화 문제를 해결하였다.

제안된 기법을 피어싱 공정 시뮬레이션에 적용한 결과, 기존의 전체 영역을 해석 대상으로 하는 자동 요소망재구성 기법에 비하여 상대적으로 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 경계의 인위적 변화를 최소화시킴으로써 정교한 단조시뮬레이션 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

### 참고문헌

1. Liu, Z. J. Luo and M. X. Gu, "The Algorithm of Automatic Local Mesh Subdivision and its Application to Finite-Element Analysis of a Large Deformation Forming Process," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 83, pp. 164-169, 1998.
2. K. Roll and T. H. Neitzert, "On the Application of Different Numerical Methods to Cold Forming Process," J.F.T.Pittman et al.(eds), *Num Meth. Ind. Form. Proc.*, Prineridge Press, Swansea, U.K., pp. 97-107, 1982.
3. C. J. M. Gleten and A. W. A Konter, "Application of Mesh-Rezoning in the Updated Lagrangian Method to Metal Forming Analysis," J.F.T.Pittman et al.(eds), *Num. Meth. Ind. Form. Proc.*, Prineridge Press, Swansea, U.K., pp. 511-521, 1982.
4. S. I. Oh, J. P. Tang and A. Badawy, "Finite Element Mesh Rezoning and its Applications to Metal Forming and its Applications to Metal Forming Analysis," *Advd. Tech. Plasticity*, Vol. 2, pp. 1051-1058, 1984.
5. 이영규, 이낙규, 윤정호, 양동렬, "새로운 격자 재구성기법과 2차원 강소성 유한요소해석에의 응용," 대한기계학회 '93년도 춘계학술대회 논문집, pp. 779-782, 1993.
6. M. S. Joun and M. C. Lee, "Quadrilateral Finite-Element Generation and Mesh Quality Control for Metal Forming Simulation," *Int. J. Num. Methods Eng.*, Vol. 40, pp. 4059-4075, 1998.
7. 이석원, 최대영, 전만수, "다단 단조공정의 자동 시뮬레이션 중 피어싱 공정의 강점소성 유한요소해석," 한국소성가공학회, 제8권, pp. 216-221, 1999.
8. 전만수, 이형일, 연속체역학에서 유한요소법까지, Pearson Education Korea Ltd., 2000.