

# 격자압축법을 이용한 3차원 단조공정해석

홍진태\*·양동열\*\*

## 3-D Analysis of Hot Forging Processes using the Mesh Compression Method

J. T. Hong and D. Y. Yang

**Key Words:** rigid-plastic FEM (강소성 유한요소해석), hot forging processes (열간단조공정), the Mesh Compression Method (격자압축법)

### Abstract

In the finite element analysis of metal forming processes using general Lagrangian formulation, element nodes in the mesh move and elements are distorted as the material is deformed. The excessive degeneracy of mesh interrupts finite element analysis and thus increases the error of plastic deformation energy. In this study, a remeshing scheme using so-called mesh compression method is proposed to effectively analyze the flash which is generated usually in hot forging processes. In order to verify the effectiveness of the method, several examples are tested in two-dimensional and three-dimensional problems.

### 1. 서론

열간단조공정에서는 소재의 소성 변형 과정에서 플래시가 생성되도록 유도함으로써 압축하중을 줄이거나 소재의 흐름을 개선할 수 있다. 유한요소해석에서 플래시가 발생하면 격자의 질(mesh quality)이 나빠져서 더 이상 해석을 수행할 수 없으므로, 격자재구성과정을 수행하게 되는데, 이때 플래시의 해석을 위해서 격자의 크기가 작아지면 계산량이 급증하므로 너무 시간 소모적이라 대부분 플래시의 해석을 배제해 왔었다. 하지만 플래시부분을 해석범위에 넣지 않았을 때 하중 및 재료 유동 등에 대한 해석이 실제와 상당한 오차가 있으므로 보다 완전한 해석을 위해서

는 플래시까지를 모두 해석하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 새로운 격자재구성 기법을 제안하여 육면체 요소로 플래시가 있는 3차원 단조공정해석이 가능하도록 하고자 한다. 이 방법은 플래시를 고려하기 때문에 기존의 방법보다 하중과 재료 유동을 더 정확하게 해석하면서도 시간이 절감되는 장점이 있다. 본 연구에서 제안된 방법으로 실제 열간단조제품 해석에 적용하여 보고, 기존방법으로 해석한 결과와 비교해 봄으로써 그 효용성을 검증하도록 한다.

### 2. 격자압축법

#### 2.1 격자압축법의 개요

본 논문에서 제안하고자하는 격자압축법은 플래시가 있는 형상의 격자 재구성 시 Fig.1과 같은 과정을 거친다. 즉, 격자압축법은 격자재구성시 경계면의 기하형상(boundary geometry)을 확장해서 표현한 후에 마스터격자(master grid)를 대입 하고 본래의 형상으로 압축 함으로써, 작고 세밀한 부분의 기술

\* 한국과학기술원

\*\* 한국과학기술원

을 위해 전체적인 격자의 크기를 작게 나누어 해석하여, 정밀한 해석이 필요없는 부위까지 많은 수의 요소를 이용하여 계산해야 하는 기존의 정규격자에 의한 격자재구성 방법의 단점을 해결할 수 있다.

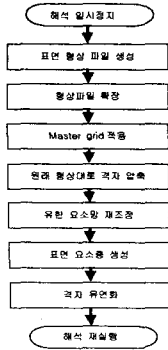


Fig.1 Algorithm for mesh compression

## 2.2 격자압축법 과정

### 2.2.1 표면형상파일(patch file)생성 및 확장

강소성 유한요소해석도중 소성변형에너지 오차를 이용한 격자재구성 판별 기준[1,2]에 의해 해석이 일시 중지되었을 때, 격자재구성을 위하여 그 상태의 재료의 표면형상을 구해야 할 필요가 있다. 여기서, 변형된 격자를 사각형 표면으로 기술하기는 어려우므로 사각형에 대각선을 연결해서 삼각형으로 만들어 소재표면을 정의하는데 사용한다. 본 논문에서는 8절점 요소(8-node element)를 사용하고 있으므로, Fig.2와 같이 재료의 표면을 구하여 그 표면을 z축의 양의 방향으로 확장하는 방법을 선택하였다.

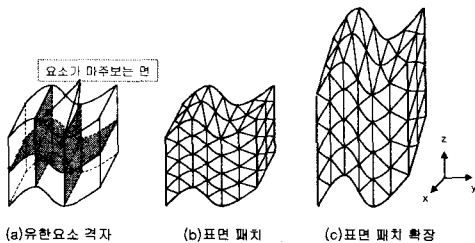


Fig.2 Description of boundary geometry

### 2.2.2 격자구성 및 형상압축

확장된 소재의 표면형상에 마스터그리드방법[3]을 이용하여 격자를 구성한 후, 표면형상을 확장한 높이(Lexp)만큼 다시 압축하고 내부 절점들의 위치를 식(1)을 이용하여 재조정하면, Fig.3과 같이 플래시부분에 높은 밀도의 격자가 구성된다.

$$z_{top} = \min((x_{ib} - x_i)^2 + (y_{ib} - y_i)^2)$$

$$z_{base} = \min((x_{ib} - x_i)^2 + (y_{ib} - y_i)^2) \quad (1)$$

$$z' = z_{base} + \frac{(z - z_{base}) * (z_{top} - z_{base} - L_{exp})}{z_{top} - z_{base}}$$

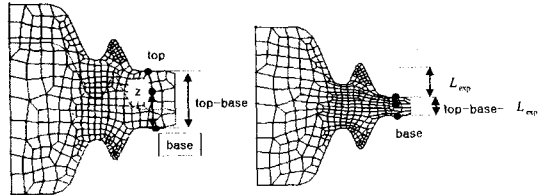


Fig.3 Mesh Compression

### 2.2.3 유한요소망재조정 및 격자유연화

실제 소성가공공정에서는 집중적인 변형이 재료의 표면에서 빈번하게 발생하기 때문에, 표면요소의 모양과 질(quality)이 유한요소해석 정확도에 매우 큰 영향을 준다. 이러한 이유로 본 연구에서는 격자압축법으로 인하여 심하게 찌그러진 표면의 요소들을 내부영역으로 넣고, 이 형상경계면에 두께가 없는 요소층(zero-thickness SEL)을 만들어[4], 격자재조정을 하여 요소의 모양을 향상시킨 후, 기존의 물리값을 새로운 격자계로 전환시켜주는 격자 유연화 과정을 거쳐 중단 상태의 해석을 계속 진행하게 된다.

## 3. 격자압축법을 이용한 격자재구성 결과

### 3.1 3차원 축대칭형상 예제

본격적인 실제 단조제품의 해석을 하기 전에, 3차원 격자재구성에서 격자압축법이 제대로 이루어지는지 판단하기 위하여 Fig.4와 같은 축대칭형상의 예제를 설계하였다. 정육면체의 마스터격자를 구성하여 형상에 적용시키면 격자압축법 시행 시, 플래시부분의 격자가 납작해지므로 식(2)를 사용하여 플래시부분 마스터격자의 밀면적을 작게 나누었다.

$$N_x = \frac{\lambda \eta}{\lambda} = \frac{5 \cdot 6}{3} = 10 \quad (2)$$

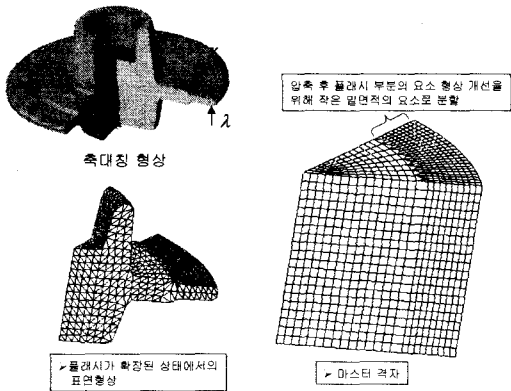


Fig.4 Design 3-D remeshing example

테스트는 전체형상의 1/8부위만 하였으며 결과는 Fig.5와 같다.

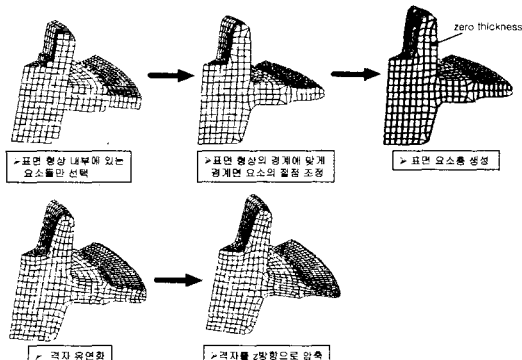


Fig.5 remeshing example

위의 결과에서 보이는 바와 같이 플래시부위에 높은 밀도의 격자가 구성되어 소재의 유동과 응력분포를 잘 파악할 수 있게됨으로써, 해석시간을 고려하여 플래시에 격자를 구성하지 않는 기존의 방법보다 해석의 정확도가 획기적으로 향상될 수 있음을 예측할 수 있다.

### 3.2 십자축 제품의 열간단조공정해석

3차원 축대칭형상 격자재구성에서 예측한 결과를 검증하기 위하여 부품들을 결합시킬 때 쓰이는 십자축(Cross-shaft)이라는 단조제품의 금속유동을 육면체요소를 이용하여 강소성 유한요소법으로 해석하기로 한다. 소재는 열간단조에 쓰

이는 AISI 1025를 사용하였고, 마찰계수는 0.3, 초기소재의 온도는 1200°C에서 등온과정으로 해석하였다. 해석프로그램은 실험실에서 개발한 단조해석프로그램인 Formsys3D를 사용하였고, Cray90을 이용하여 해석하였다. 위 예제의 빠른 해석을 위해 가장 효율적인 해석을 하는 것으로 알려져 있는 희소행렬해법(sparse matrix solver)을 사용하였고, 금형의 압하속도는 10mm/sec로 하였다. 십자축의 단조공정해석을 하기 위한 금형은 Fig.6-a, 초기소재는 1차공정을 거친 형상 [5]으로, 금형이 8분의 1 대칭이므로 Fig.6-b와 같이 표현하였다.

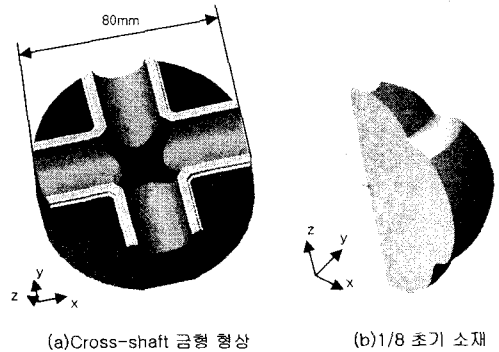


Fig.6 die and initial material of a cross-shaft

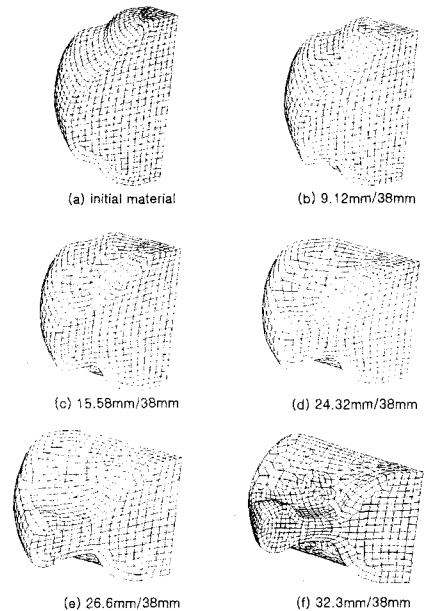


Fig.7 rigid-plastic FEM of a cross-shaft

소재를 금형 위에 놓고, 금형의 압하가 진행됨에 따라서 소재의 형상은 Fig.7과 같이 변형을 한다. 전체 압하량 38mm를 100단계로 나누어 한 번에 0.38mm씩 압하하면서 해석하였으며, 36.1mm의 압하가 진행되었을 때, 에너지오차에 의해 격자재구성 판별기준을 만족하고, 플래시의 두께(3.9mm)가 마스터격자의 한 요소의 모서리길이(4.0mm)보다 얇아서 격자압축법을 이용한 격자재구성 판별 기준을 만족한다. 따라서, 축대칭 형상에서 격자를 재구성한 것과 같은 방법으로 Fig.8과 같이 격자압축법을 이용한 격자재구성을 하게 된다.

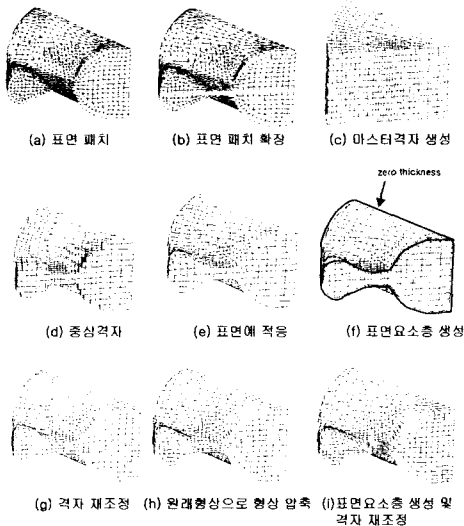


Fig.8 remeshing with mesh compression method at the stroke of 36.1/38mm

이와같이 얻어진 격자를 이용하여 해석을 계속 진행하면, 압하량 37.24mm에서 에너지 오차에 의한 격자재구성 판별기준을 만족하게 되어 Fig.8과 같은 방법으로 다시 한번 격자압축법을 이용한 격자재구성을 하였다. 격자압축법을 이용한 격자재구성방법으로 만들어진 격자로 해석을 계속 진행하여 38mm 압하를 모두 마친 결과는 Fig.9-a와 같다. 또, 격자압축법의 효용성을 검증하기 위해서 격자압축법을 이용하지 않고 전체격자를 작게하여 재구성한 격자로 해석을 수행, 비교하여 보았으며 그 결과는 Fig.9-b와 같다. 여기서, 격자압축법을 이용하여 해석한 격자는 총 4447개의 요소로 이루어져 있으며, 세밀한 마스터격자를 이용하여 해석한 격자는 총 5895개의

요소로 이루어져 있다. Fig.9에서 보는바과 같이 격자압축법을 이용하여 해석을 완료한 결과에서는 최대 2.85, 최소 0.05의 유효변형률 분포를 보였으며, 세밀한 마스터격자를 이용하여 해석을 완료한 결과에서는 최대 2.84, 최소 0.0466의 유효변형률 분포를 보였다. 이는 두 결과가 매우 비슷한 유효변형률 분포를 보임으로써 격자압축법을 이용한 해석도 세밀한 마스터 격자를 이용한 해석만큼 정확도가 높은 해석을 하였음을 알 수 있다.

다음으로, 격자압축법을 이용하여 격자를 재구성한 방법과 기존의 방법과의 해의 수렴을 위한 반복계산회수(iteration)를 비교한 결과는 Table 1과 같으며, 표에서 보듯이 격자압축법의 경우는 격자가 효율적으로 구성되어 있으므로 해의 수렴이 빠르며, 전체적으로 세밀한 마스터격자를 이용하여 해석하는 기존의 방법은 많은 계산이 불필요한 영역까지 계산을 하므로 해의 수렴이 늦어짐을 알 수 있다.

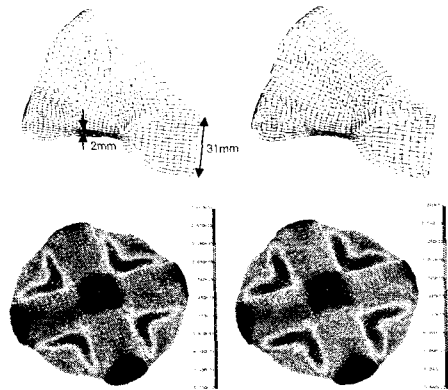


Fig.9 rigid-plastic FEM using mesh compression and fine mesh

Table 1 Comparison the number of iterations

압하량	격자압축법(회)	세밀한 격자(회)
36.48mm	16	16
36.86mm	12	13
37.24mm	8	14
37.62mm	12	13
38mm	9	8

또, 해석시간을 비교해본 결과는 Table 2와 같

다. 0~36.1mm 압하까지는 같은 격자로 해석하여 20677.6초의 해석시간을 소모하였고, 그 이후의 해석에서 격자압축법의 경우 2338.7초, 세밀한 마스터격자를 이용한 해석의 경우 3700초가 소모되었다. 즉, 36.1mm 압하 이후에 격자압축법으로 해석을 진행한 결과는 기존해석방법에 비해 36.79%의 해석시간이 절감되었다.

Table 2 Comparison of computation time

압하량	격자압축법	세밀한 격자
0~3.8mm	2000 sec	
7.6mm	2057.1 sec	
11.4mm	2122.6 sec	
15.2mm	2135.4 sec	
19mm	1840.5 sec	
22.8mm	1479.3 sec	
26.6mm	1817.8 sec	
30.4mm	2544.7 sec	
34.2mm	2670.8 sec	
36.1mm	2009.4 sec	
37.24mm	1403.2 sec	2220 sec
28mm	935.5 sec	1480 sec

마지막으로, 유효변형률값이 0.01의 편차를 보임으로써 해석오차를 비교해 보아야 할 필요가 있다. 해석오차는 Zienkiewicz[1]의 소성변형에너지 방법을 이용하여 식(3)으로 표현된다.

$$W_{real} = \int_{\Omega} \hat{\sigma}' : \hat{\epsilon} d\Omega$$

$$error = \frac{\|e\|_{ele}}{W_{real}} \times 100 \geq C_e \quad (3)$$

$C_e$  값은 공정특성에 따라 결정되는 상수이다. 오차의 범위에 따른 요소의 개수는 Table 3과 같다.

두 방법의 해석에 이용된 요소의 개수가 서로 다르므로 각각의 오차 그래프는 전체요소 개수에 대한 오차 범위에 있는 요소의 개수 분포로 표현하여 Fig.10과 같이 나타나고 그래프에서 보는 바와 같이 두 방법은 오차분포가 거의 비슷하며, 높은 해석 정확도를 갖는다. 즉, 격자압축법을 이용한 격자재구성 방법으로 해석한 결과가 마스터격자를 세밀하게 만들어서 재구성한 격자로 해석한 결과만큼 높은 정확도를 갖는 결과를

얻었음을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of energy error

에너지 오차	격자압축법	세밀한 격자
0 ~ 0.003	4351 (97.84%)	5758 (97.68%)
0.003 ~ 0.006	45 (1.01%)	88 (1.49%)
0.006 ~ 0.009	24 (0.5%)	21 (0.36%)
0.009 ~ 0.012	11 (0.25%)	12 (0.2%)
0.012 ~ 0.015	3 (0.07%)	6 (0.1%)
0.015 ~ 0.018	3 (0.07%)	2 (0.03%)
0.018 ~ 0.021	1 (0.02%)	4 (0.07%)
0.021 ~ 0.024	3 (0.07%)	3 (0.05%)
0.024 ~ 0.027	3 (0.07%)	0 (0.0%)
0.027 ~ 0.03	3 (0.07%)	1 (0.02%)
전체요소 수	4447	5895

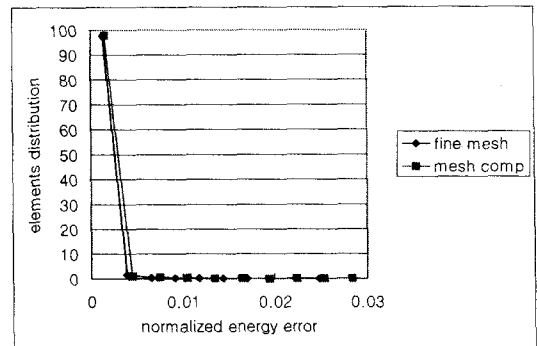


Fig.10 Comparison of energy error

#### 4. 결론

본 연구의 목적은 새로운 격자세분화 기법인 격자압축법을 제한함으로써 열간단조의 강소성 유한요소해석시 발생하는 플래시를 효과적으로 해석할 수 있도록 하여, 하중과 재료유동을 더 정확하게 해석하면서도 해석시간을 단축시키는데 있다. 지금까지의 연구로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 격자를 압축하여 부분적으로 격자의 밀도를 급격히 증가시키는 격자압축법을 이용한 격자재구성기법을 제시하였다.
- (2) 플래시가 있는 2차원, 3차원 단조 형상에 격자압축법을 적용하여 보고 플래시의 효과적인 해석가능성을 확인하였다.

- (3) 실제 열간단조제품의 해석에 격자압축법을 이용한 격자재구성기법을 적용하여 그 효용성을 검증하였다.

향후과제로는 격자압축시에 격자를 z축으로만 이동시킨 후 유연화를 시키는 방법 대신, 각각의 절점들이 Fig.11과 같이 서로 스프링으로 연결되었다고 설정하여 격자압축법의 절점재배치에 적용하면 압축된 상태에서 이상적인 격자구조를 가질 것인지 테스트하여 보고 장단점을 비교해 볼 것이다. 또, 앞으로 여러 가지 열간단조공정 해석에 격자압축법을 이용한 격자재구성기법을 적용하여 보아야 한다.

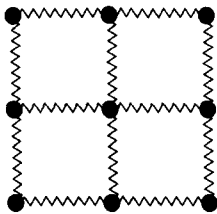


Fig.11 mesh structure connected with spring

## 참고문헌

- (1) O.C.Zienkiewicz and J.Z.Zhu, 1987, A simple error estimate and adaptive procedure for practical engineering analysis, *Int. j. numer. methods eng.*, vol.24, pp. 337~357.
- (2) 박근, 양동열, 1996, 강소성유한요소해석에서의 오차 추정 및 적응적 격자세분화에의 적용, *대한기계학회 추계학술대회*, pp. 385~390.
- (3) Y.K.Lee, N.K.Lee and D.Y.Yang, 1993, An automatic remeshing technique for finite element analysis of metal forming process, *Comp. Eng.*, pp. 441~446.
- (4) Y. K. Lee and D.Y. Yang, 1999, Development of a grid-based mesh generation technique and its application to remeshing during the finite element simulation of metal forming processes, *Eng. Computation*, vol.16, pp. 316~336.
- (5) Xu Zuo, Yuanping Wei, Jun Chen, Lingshou Zeng, Xueyu Ruan, 1999, 3D FEM simulation

of multi-stage forging process using solid modeling of forging tools, *J. Mater. Process. Tech.*, vol.91, pp. 191~195.