

## 유한체적법에 근거한 단조공정 시뮬레이터를 이용한 난형상 열간단조 공정의 컴퓨터 시뮬레이션

김홍태<sup>1</sup>· 엄재근<sup>1</sup>· 최인수<sup>1</sup>· 이민철<sup>2</sup>· 박성용<sup>3</sup>· 전만수<sup>#</sup>

### Computer Simulation of Complex Hot Forging Processes by a Forging Simulator Based on Finite Volume Method

H. T. Kim, J. G. Eom, I. S. Choi, M. C. Lee, S. Y. Park, M. S. Joun

(Received January 20, 2007)

#### Abstract

The finite volume method for forging simulation is examined to reveal its possibility as well as its problem in this paper. For this study, the finite volume method based MSC/SuperForge and the finite element method based AFDEX are employed. The simulated results of the homogeneous compression obtained by the two softwares are compared to indicate the problems of the finite volume method while several application examples are given to show the possibility of the finite volume method for simulation of complex hot forging processes. It is shown that the finite volume method can not predict the exact solution of the homogeneous compression especially in terms of forming load and deformed shape but that it is helpful to simulate very complex forging processes which can hardly be simulated by the conventional finite element method.

**Key Words** : Finite Volume Method, Finite Element Method, Forging, Homogeneous Compression

#### 1. 서 론

실 공정 적용 목적의 단조 시뮬레이션 기술은 전통적인 강소성 유한요소법[1~4]과 최근에 소개된 유한체적법[5]에 의하여 발전되어 왔다. 1970년대 초부터 연구되어온 강소성 유한요소법은 해석 결과 측면에서 유리하지만, 계산 시간과 특히 3차원 문제의 요소망재구성의 난제로 인하여 1990년대 중반에 와서 비로소 2차원 기능을 중심으로 산업체에서 본격적으로 활용되기 시작하였다. 강소성 유한요소법에 근거한 3차원 단조 시뮬레이션 기술은 여전히 많은 문제를 안고 있다. 육면체

요소망은 수치적 문제를 야기시키지 않지만, 요소망재구성 문제가 여전히 해결되어야 할 숙제로 남아 있는 반면, 최근의 사면체요소망 사용 추세로 말미암아 해결의 원동력을 상실해 가고 있는 상태이다. 그러나 사면체요소망을 사용할 경우, 이론적 불확실성에 기인하는 수치적 문제에 노출될 수밖에 없으며, 이로 인하여 고정도의 해를 획득하는 것은 용이하지 않다[6].

한편, 강소성 유한요소법에 바탕을 둔 3차원 단조시뮬레이션 기술의 문제점인 해의 획득 실패 문제와 계산시간이 많이 소요되는 문제는 여전히 큰 숙제로 남아 있다. 이러한 강소성 유한요소법

1. 경상대 대학원 기계공학과  
2. 경상대 2단계 BK21 첨단기계항공고급인력양성사업단  
3. 거성단조㈜  
# 교신저자: 경상대 기계항공공학부  
E-mail: msJoun@gsnu.ac.kr

이 안고 있는 3차원 단조시물레이션 시의 문제점으로 많은 응용 연구자와 기술자들이 유한체적법[5]에 큰 관심을 보이고 있다. 유한체적법은 전산 유체와 열전달 목적으로 주로 사용되던 해석 방법이다. 이 방법은 공간에 고정된 오일러리안 요소망(Eulerian mesh)을 이용한다는 측면에서 물질과 요소망이 같이 움직이는 전통적인 유한요소법과 근본적으로 차이가 있다. 이 방법은 요소망의 뒤틀림으로 발생하는 해석상의 문제로부터 자유롭다는 장점이 있다. 그리고 Xianghong 등[7]이 유한체적법에 근거한 MSC/SuperForge[8]를 이용하여 밝힌 바와 같이 기존의 유한요소법에 비하여 유한체적법이 계산시간 면에서 훨씬 유리하다.

Xianghong 등의 연구결과에 따르면, 일부의 문제에 대하여 비교한 결과, 해석결과의 측면에서도 전통적인 유한요소법에 근거한 상용 S/W인 DEFORM3D에 비하여 손색이 없다고 보고하였다. 그러나 유한체적법에 바탕을 둔 단조 시물레이션 결과, 특히 하중 등의 결과가 다소 문제가 있음에도 불구하고 결과의 정확성에 관한 체계적인 연구가 이루어지지 않았으므로 Xianghong 등의 주장은 논란의 여지가 충분히 많은 연구 결과라고 사료된다. 실제 해석 결과의 정확도 측면에서 볼 때, 유한체적법은 많은 문제점을 내포하고 있다. 경험적으로 보면, 유한체적법의 정확도는 강소성 유한요소법에 비하여 다소 떨어지는 것이 사실이다.

한편, 산업계에서는 특히 복잡한 3차원 형상의 단조품을 생산하는 기업체를 중심으로 유한체적법에 근거한 MSC/SuperForge가 비교적 널리 사용되고 있는 반면, 학계에서의 학술적 관점에서의 응용 연구는 별무한 실정이다. 우리나라의 경우, 제정신[8,9]이 MSC/SuperForge를 최초로 소개한 이후 일부의 연구자에 의하여 응용연구가 이루어졌다[10,11,12]. 전만수와 고병호[10]는 피스톤의 단조공정의 시물레이션과 시험결과(3장 참조)의 비교를 통하여 MSC/SuperForge가 복잡한 열간단조공정의 시물레이션 목적에 응용될 수 있는 가능성을 확인한 바 있다. 그리고 Lee[11]와 Kim[12] 등이 MSC/SuperForge를 이용한 단조공정의 설계 및 공정변수의 영향을 조사하였으나, 비교적 단순한 형상을 대상으로 적용연구를 실시함으로써 유한체적법의 장점을 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 유한체적법에 근거한 MSC/SuperForge를 이용하여 유한체적법의 문제점을 분석하고, 아울러 복잡한 형상의 제품에 적용해 봄으로써 이

술의 장점과 적용 가능성에 관하여 고찰하고자 한다.

## 2. 유한체적법의 문제점 분석

유한체적법의 문제점을 분석하기 위하여, 냉간 실린더 압축 문제를 동일한 조건하에서 유한체적법에 근거한 MSC/SuperForge와 강소성 유한요소법에 근거한 AFDEX[13]로 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 선택된 공정은 원통 소재의 균일압축 문제(Homogeneous compression)이다. 즉, 선택된 공정은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 상하대칭인 축대칭 문제이며, 소재와 금형 간에 마찰이 작용하지 않는다. 따라서 이 문제의 정답은 수계산으로도 얻을 수 있는 문제이다. 주요 공정조건은 다음과 같다.

- 원소재의 크기: 반경 10mm, 높이 50mm
- 압축률: 80%
- 마찰조건: 마찰계수 = 0.0
- 소재의 변형저항식:  

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \text{ MPa} \quad (K = 785 \text{ MPa}, n = 0.1)$$

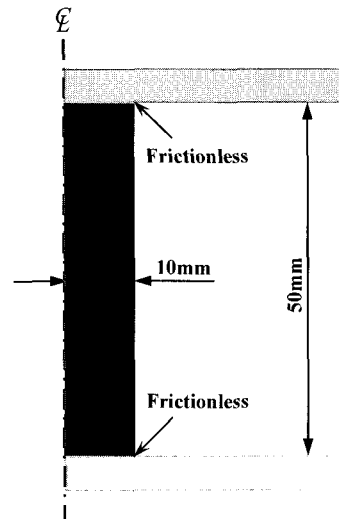


Fig. 1 Problem description

Fig. 2에 축대칭 공정으로 가정하여 강소성 유한요소법으로 예측한 소재의 형상 변화 결과를 나타내었으며, Fig. 3에 유한체적법으로 예측한 소재의 형상 변화 결과를 나타내었다. 강소성 유한요소법은 상하 대칭 및 무마찰의 조건을 만족하는, 즉 정답과 일치하는 결과를 예측한 반면, 유한체적법으로 예측한 결과는 상하대칭 조건과 무마찰의 조건

이 만족되지 않는다. 유한체적법이 강소성 유한요소법과 비교할 때 변형 형상 측면에서 전반적으로 유사한 결과를 낳지만, 유한체적법은 다소 정확도가 떨어질 수밖에 없음을 이 결과로부터 확인할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 4에서 비교하고 있는 바와 같이 3차원 해석에서도 마찬가지로 나타나고 있다. 한편, 두 방법이 예측한 하중-스트로크 곡선을 비교해 보면, Fig. 5에서 보는 바와 같이 유한체적법이 유한요소법에 비하여 큰 성형하중을 예측하고 있음을 알 수 있다. 성형 하중 자체만을 보면, 유한요소법은 정답( $F = (\ln(h_0/h))^n A_0 h_0 K/h$ ,  $F$  = 성형 하중,  $h_0=50\text{mm}$ ,  $h$ =현재의 높이,  $A_0$ =초기단면적)과 일치하는 반면, 유한체적법은 정답에 비하여 약 15%의 매우 큰 오차를 발생시키고 있다. 이러한 차이는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 3차원 해석에서도 마찬가지로 나타났다.

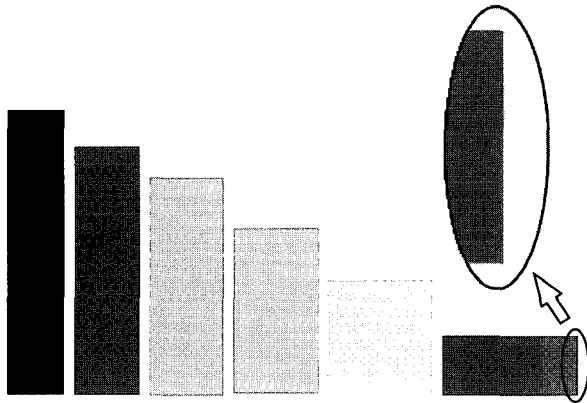


Fig. 2 Shape change predicted by finite element method

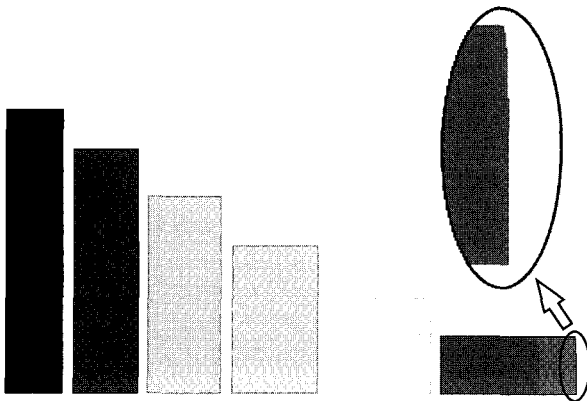
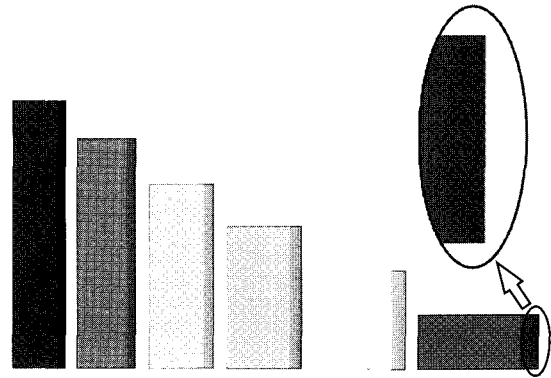
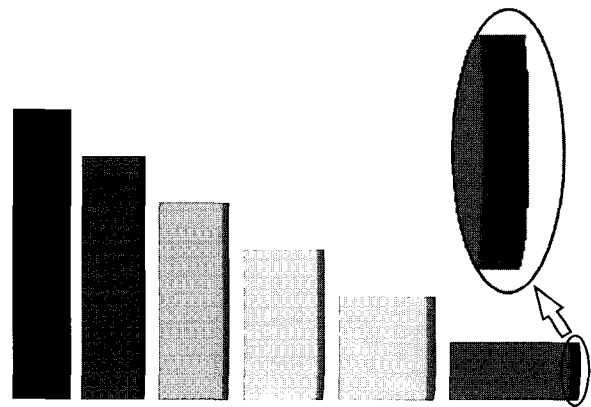


Fig. 3 Shape change predicted by finite volume method



(a) Finite element method



(b) Finite volume method

Fig. 4 Results of three-dimension analyses

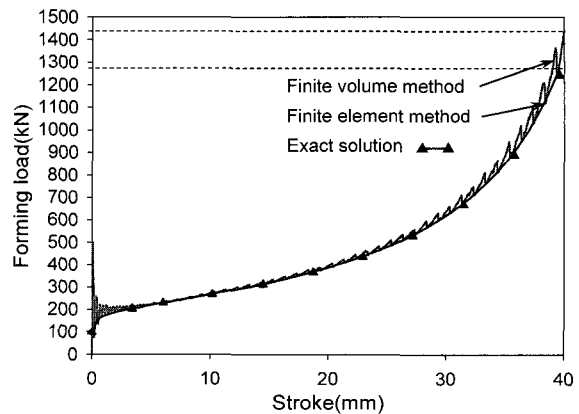


Fig. 5 Load-stroke curve obtained by the two dimensional analyses

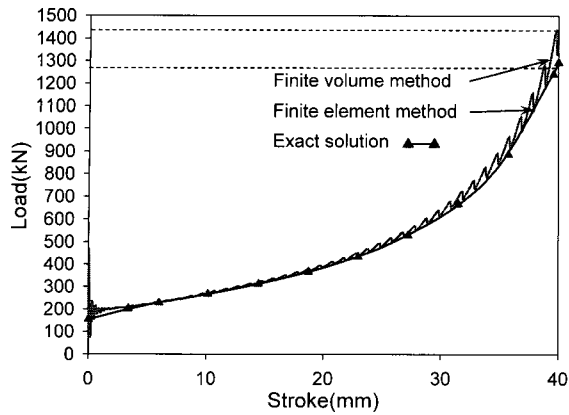


Fig. 6 Load-stroke curve obtained by the three dimensional analyses

### 3. 유한체적법의 강점 및 적용성

열간단조 공정의 개발 시, 소재가 어떤 과정으로 금형의 빈공간에 채워지는지를 아는 것 자체가 매우 중요하다. 금형에 하중이 얼마가 걸리는 것과 상관없이 소재가 채워지는 과정을 어느 정도 이상의 정확도로 예측된다면, 때로는 매우 값진 정보가 될 수 있다. 이러한 측면에서 유한체적법의 적용성을 검토하기 위하여 강소성 유한요소법으로는 해석이 현실적으로 불가능한 문제, 즉 형상이 매우 복잡한 문제에 대한 적용 사례를 소개하고자 한다.

먼저 소성가공 CAE 기술 Workshop 2001에서 발표된 바 있는 연구결과[10]를 소개하고자 한다. 선택된 공정은 피스톤의 열간 단조 공정을 시뮬레이션한 것이다. Fig. 7에 유한체적법으로 시뮬레이션한 결과와 실험 결과를 나타내었다. 이 결과를 비교해 보면, 공학적 관점에서 유한체적법의 예측 결과가 매우 유용함을 확인할 수 있다.

이 시뮬레이션을 위하여 격자를 0.001m로 하였다. 이 해석을 수행하는데 사용된 컴퓨터의 주요 사양은 CPU AMD Athlon 64 X2 Dual Core Processor 3800+, RAM 2Gbyte이며 총 400분이 소요되었다.

이 결과를 얻는데 있어, 무엇보다 중요한 것은 계산시간의 예측이 가능하다는 점을 들 수 있다. 그리고 금형의 3차원 모델링만 이루어진다면 요소망재구성 등의 문제가 없으므로 비전문가도 비교적 손쉽게 사용할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 유한체적법의 적용성을 시험할

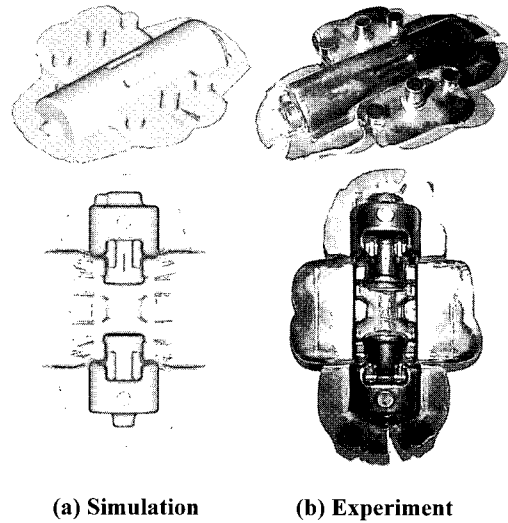


Fig. 7 Comparison of the predicted shape with the forged shape

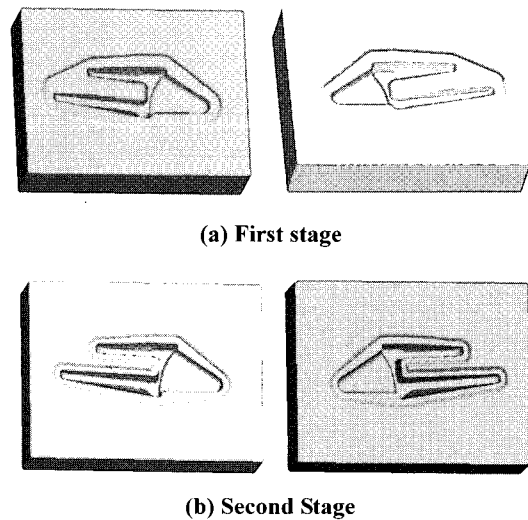


Fig. 8 Shapes of die

목적으로 유한체적법에 근거한 MSC/SuperForge를 중장비용 버킷투스어댑터(Bucket tooth adapter) 열간단조 공정의 개발 목적에 적용하였다. 이 공정을 선택한 이유는 이 공정의 형상이 비교적 복잡하기 때문이다. 이 공정은 2단으로 이루어져 있다. Fig. 8에 소재와 금형의 형상을 나타내었다. 공정 중 온도의 영향은 무시되었으며 주요 공정조건은 다음과 같다.

- 원소재의 크기:  
반경 42.5mm, 높이 212.6mm
- 초기온도: 1250℃
- 마찰조건: 마찰상수 = 0.6
- 소재의 변형저항식:  
 $\bar{\sigma} = C\bar{\epsilon}^m$  MPa ( $C = 75.6$ MPa,  $m = 0.21$ )

시뮬레이터를 이용하여 획득한 결과를 Fig. 9(a)에 나타내었다. Fig. 9(b)는 실험 결과로 얻은 단조품을 나타내고 있다. 이 두 결과를 비교해 보면, 예측결과로부터 공정설계에 유용한 설계정보를 획득할 수 있다는 기대를 갖게 한다. 이 시뮬레이션을 위하여 격자를 0.01m로 하였다. 시뮬레이션에 소요된 시간은 컴퓨터 CPU AMD Athlon 64 X2 Dual Core Processor 3800+, RAM 2Gbyte의 사양에서 총 120분이 소요되었다.

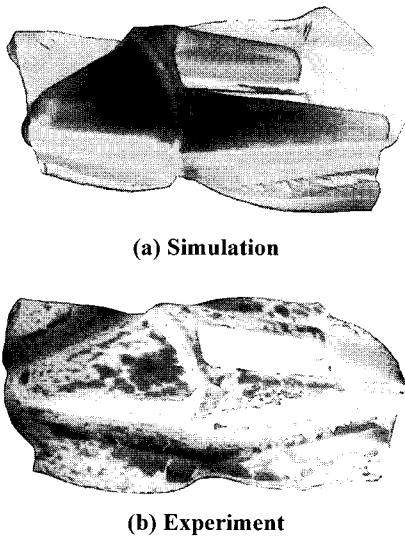


Fig. 9 Comparison of the predicted shape with the forged shape in hot forging of an excavator tooth adapter

#### 4. 결론

본 연구에서는 유한체적법에 근거한 단조 시뮬레이션 기술의 문제점과 적용 가능성을 제시하였다. 실린더 압축 공정을 동일한 조건하에서 전통적인 강소성 유한요소법과 유한체적법을 이용하여 시뮬레이션 하여 그 결과를 비교한 결과, 압하율이 증가할수록 두 방법의 예측 결과의 차이가 증가하였으며, 특히 하중 예측 결과는 매우 큰 차

이를 보였다. 이미 2차원 강소성 유한요소법은 다양한 방법으로 결과의 타당성이 검증되어 있으므로 이 결과는 유한체적법의 문제점으로 지적되었다.

한편, 강소성 유한요소법의 적용이 사실상 불가능한 복잡한 형상의 단조공정에 유한체적법을 적용한 결과, 비교적 손쉽게 성공적으로 해석 결과를 얻을 수 있었다. 예측 결과와 실험 결과를 비교한 결과, 유사한 변형 형상을 나타내었으며, 관점에 따라서는 유용한 공정개발 정보를 손쉽게 획득할 수 있다는 기대를 갖게 하였다. 실제 산업 현장 측면에서 볼 때, 형상이 매우 복잡한 3차원 형상의 열간단조공정의 해석, 특히 유동특성을 조사하고자 할 경우, 유한체적법이 현실적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

물론 2차원 단조 공정과 비교적 간단한 3차원 형상의 단조 공정의 해석 목적으로는 전통적인 강소성 유한요소법의 적용이 바람직하다고 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었으며, (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터의 장비를 활용하여 실시되었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] C. H. Lee, S. Kobayashi, 1973, New Solutions to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method, ASME Trans., J. Eng for Ind., Vol. 95, pp.865-873.
- [2] S. I. Oh, 1982, Finite Element Analysis of Metal Forming Processes with Arbitrary Shaped Dies, Int. J. Mech. Sci., Vol. 24, pp. 479-493.
- [3] J. H. Yoon, D. Y. Yang, 1990, A Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Bevel Gear Forging by Using a Remeshing Technique, Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, No. 4, pp. 277-291.
- [4] M. S. Joun, M. C. Lee, 1997, Quadrilateral Finite-Element Generation and Mesh Quality Control for Metal Forming Simulation, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 40, No. 21, pp. 4059-4075. SCI.
- [5] H. Versteeg, 1995, An Introduction to Computational

- Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Longman Scientific and Technical, New York.
- [6] 전만수, 이민철, 정석환, 권영삼, 2004, MINI-요소를 이용한 소성가공 공정 시뮬레이션 결과에 관한 고찰, 대한기계학회논문집(A), 28권, 10호, pp. 1475~1482.
- [7] W. Xianghong, Z. Guoqun, L. Yiguo, M. Xinwu, 2006, Numerical Simulation and Die Structure Optimization of an Aluminum Rectangular Hollow Pipe Extrusion Process, Mater. Sci. Eng., Vol. 435-436, pp. 266~274.
- [8] 제정신, 1999, 유한체적법에 의한 3차원 단조가공해석, 대한기계학회 추계학술대회논문집(A), pp. 413~417.
- [9] 제정신, 2000, Recent Case Studies in the Impact of Simulation on the Forging Industry, 소성가공 CAE 기술 Workshop, 경상대학교, pp. 47~86.
- [10] 전만수, 고병호, 2001, SuperForge 사용 사례, 소성가공 CAE 기술 Workshop, 경상대학교, pp. 157~167.
- [11] B. K. Lee, H. H. Kwon, H. Y. Cho, 2002, A Study on the Automated Process Planning System for Cold Forging of Non-Axisymmetric Parts Using FVM Simulation, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 130-131, pp. 524~531.
- [12] S. H. Kim, S. W. Chung, S. Padmanaban, 2006, Investigation of Lubrication Effect on the Backward Extrusion of Thin-Walled Rectangular Aluminum Case with Large Aspect Ratio, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 180, pp. 185~192.
- [13] AFDEX2D, AFEDX3D, 경상대학교 소성가공 실험실.