

## 자유단조에서 업세팅 공정 중 기공 압착 과정의 유한요소 시뮬레이션

\*이민철<sup>1</sup>, 조주현<sup>2</sup>, 최인수<sup>3</sup>, 장성민<sup>4</sup>, 전만수<sup>#</sup>

### Finite Element Simulation of a Pore Closing Process during Upsetting in Open Die Forging

M. C. Lee<sup>1</sup>, J. H. Cho<sup>2</sup>, I. S. Choi<sup>2</sup>, S. M. Jang<sup>2</sup> and M. S. Joun<sup>#</sup>

#### Abstract

We carry out three-dimensional simulation of pore closing processes during upsetting in open die forging. Several pores on a plane section of a cylindrical material are traced at the same time and the results of hydrostatic pressure and effective strain are discussed to reveal the parameters affecting pore closing phenomena. Five different sizes of pores are also investigated by simulation to reveal the pore size effect in pore closing during upsetting. AFDEX 3D is employed for this study.

**Key words :** Finite Element Simulation, Pore Closing, Upsetting, Open Die Forging

#### 1. 서 론

선박용 엔진 부품이나 풍력발전용 대형 부품은 자유단조에 의하여 생산되고 있으며, 단강품으로 분류되고 있다. 우리나라는 최근의 조선산업의 활성화로 대형 자유단조업의 기반을 구축하였고, 풍력발전 부품산업의 호황으로 도약의 전기를 맞고 있다. 단강품은 자유단조의 기본 요소인 업세팅과 코킹 공정을 통하여 반복적으로 주조로 제작된 소재를 타격함으로써 원하는 형상으로 제조되고 있다. 자유단조의 목적에는 소재를 절약하는 것도 있지만, 품질의 개선도 매우 중요한 목적 중의 하나이다. 일반적으로 대형 인고트 내부, 특히 중심 부근에는 수많은 기공과 결함이 존재하기 때문이다. 따라서 자유단조 중 기공의 압착이 연구자들의 주요 관심사가 되어 왔다. 그러나 그 중요성에

비하면, 연구 결과들이 충분하지 못한 것이 사실이다. 실험적인 방법[1,2,3,4]과 해석적 방법[5-14] 모두 한계가 있기 때문이다.

Tomlinson과 Stringer[1]와 Kopp과 Ambaum[2]는 기공 압착 현상에 관한 실험적 연구를 실시하였다. Erman 등[3,4]은 자유단조 공정 중 유동현상의 실험을 위한 물리적 모델링에 관하여 연구하였으나, 실용적 관점에서 크기효과 등의 한계점을 노출하였다. Tanaka 등[5]은 코킹공정에서 기공단합에 관한 해석을 실시하였으며, 압착조건을 제안하였다. Stahlberg 등[6]은 상계해법을 이용하여 사각형 기공의 압착에 관한 연구를 실시하였고, 해석결과를 실험과 비교하였다. 1980년대 후반에 이르러 유한요소법이 자유단조 공정의 해석 및 기공 압착 과정의 해석에 응용되기 시작하였다[7-14]. Shah 등[7]은 3차원 유한요소법을 자유단조 공정의 시뮬

1. 경상대학교 기계공학과 박사후 과정  
2. 동은단조(주) 기술연구소  
3. 대명산업(주) 기술연구소  
4. 경상대학교 기계공학과 대학원  
#. 교신저자: 경상대학교 기계공학부/항공기부품기술연구소  
Email: msjoun@gnu.ac.kr

레이션에 이용하였다. 그러나 적용 초기에는 대부분 2차원 해석 중심으로 연구되었으며 [8,10,11,12], 기공은 긴 파이프 또는 환상으로 간주되었다. 최근에는 3차원 유한요소법을 이용한 기공 압착에 관한 연구가 주류를 형성하고 있다 [9,13,14]. 그러나 유한요소법을 이용한 자유단조 중 기공 압착에 관한 많은 연구들이 실행되었지만, 아직 실물 크기의 작은 구형상의 기공의 압착과정을 시뮬레이션한 연구 사례는 없다. 그 원인은 요소망생성 및 재구성 기술의 발전이 뒷받침되지 않은 것에 기인한다. 최근 이민철과 전만수[15]는 지능적 요소망재구성 기법을 개발하여 단조 시뮬레이터 AFDEX 3D[16]에 활용한다. 본 연구에서는 업세팅 중 기공 압착의 과정을 3차원 단조 시뮬레이터 AFDEX 3D를 이용하여 규명하고자 한다

## 2. 해석 대상 공정의 정의

Fig. 1 에서 보는 바와 같이 해석 대상의 원소재는 실린더 형상이며, 치수는 직경이 300 mm 이고 높이가 300 mm 이다. 기공은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 대칭면을 포함한 단면에 총 10 개를 위치시켰으며, 원주방향으로 매 30° 마다 동일한 기공이 존재하는 것으로 간주하였다. 따라서 대칭성을 이용하여 실린더의 1/24 즉, 15° 을 해석 대상 영역으로 선택하였다. 기공의 형상은 구이며, 구의 직경으로 2.5 mm, 5.0 mm, 7.5 mm,

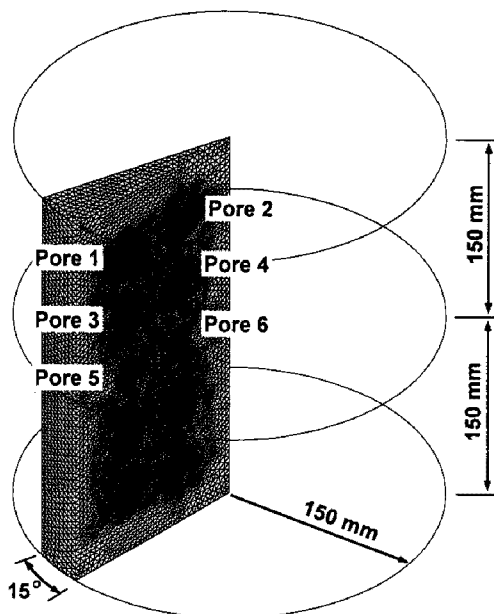


Fig. 1 Schematic description of workpiece

10.0 mm, 12.5 mm, 15.0 mm 등의 여섯 가지를 선택하였다.

업세팅 중 온도의 변화는 크지 않다는 가정하에 등온해석을 실시하였으며, 시뮬레이션에 사용된 유동응력, 마찰조건, 금형의 속도는 다음과 같다.

- 유동응력:  $\bar{\sigma} = 64.4k^{\&0.2}$  MPa
- 마찰상수: 0.6
- 금형의 속도: 300 mm/sec

## 3. 해석 결과

강소성 유한요소법과 사면체 MINI-요소에 근거한 AFDEX 3D [16] 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 유한요소 시뮬레이션 중에 요소의 수는 40000 개 이내로 통제하였으나, 기공은 관찰의 용이함을 위하여 대칭면에 위치시켰으며, 그 반대면에는 기공을 삽입하지 않았다. 요소망재구성 시에 소재 표면의 곡률 등을 요소밀도 계산 과정에서 고려함으로써 기공의 적절한 표현에 문제가 없도록 하였다. 즉, 자유표면상의 점이 반대 편의 소재를 파고들어 가면 압착이 발생하는 것으로 간주하였다. 일반적으로 구형상의 압착이 접히는 부분에서 발생하므로 서로 접히는 부분을 요소망재구성 시에 압착된 것으로 간주하였다. 요소망재구성은 AFDEX3D 의 자동 일반 모드를 사용하여 이루어졌다. 즉, 사용자 개입 또는 요소밀도 통제를 배제하였다.

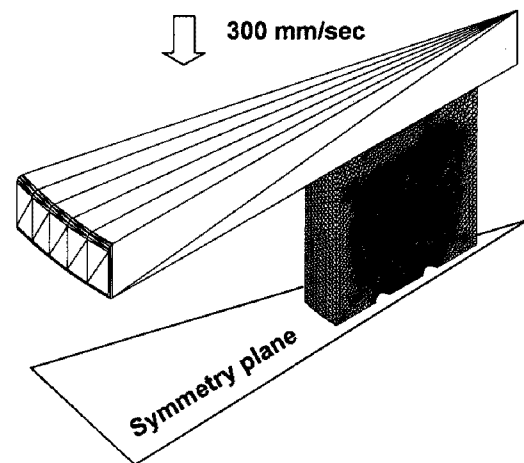


Fig. 2 Schematic description of the process

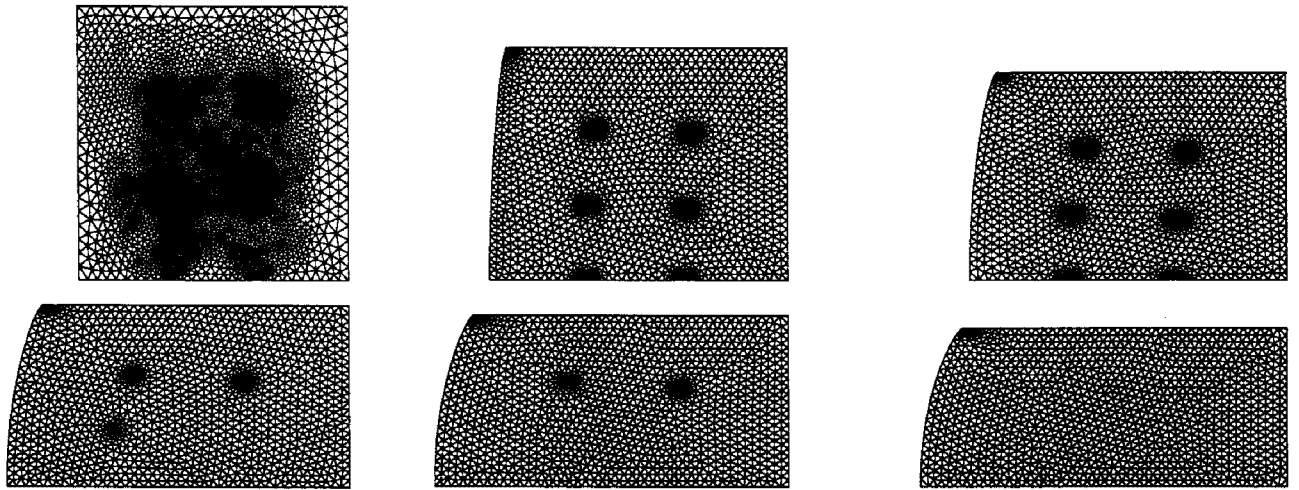


Fig. 3 A pore closing pattern ( $\phi = 5.0$  mm)

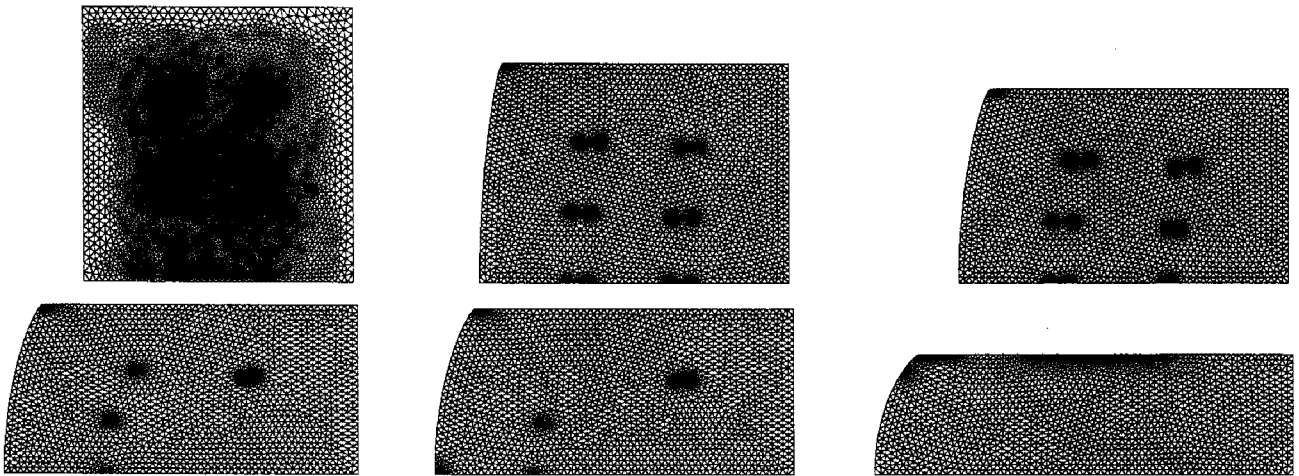


Fig. 4 A pore closing pattern ( $\phi = 10.0$  mm)

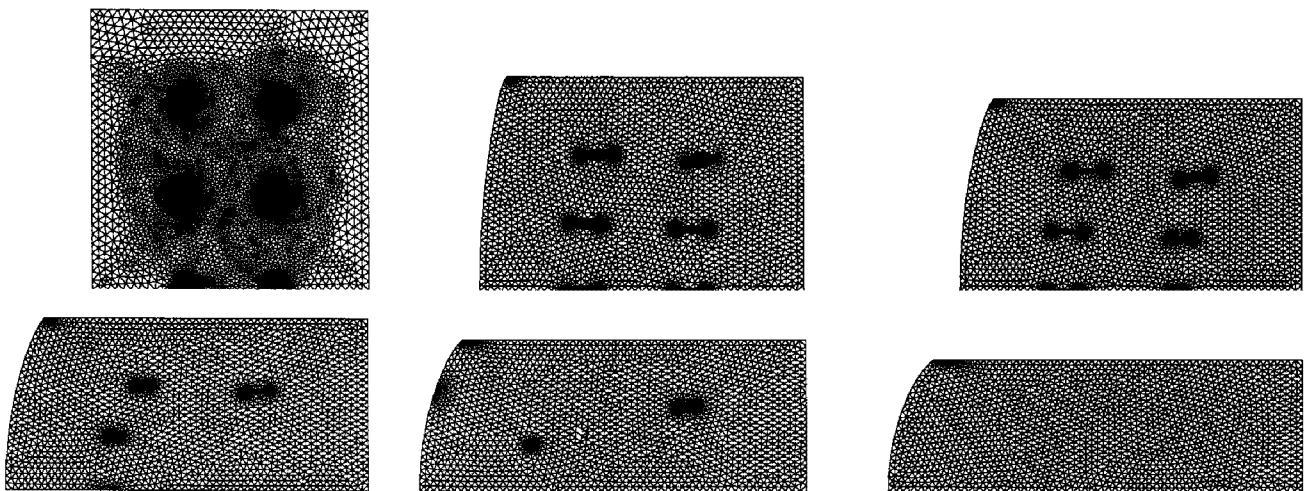


Fig. 5 A pore closing pattern ( $\phi = 15.0$  mm)

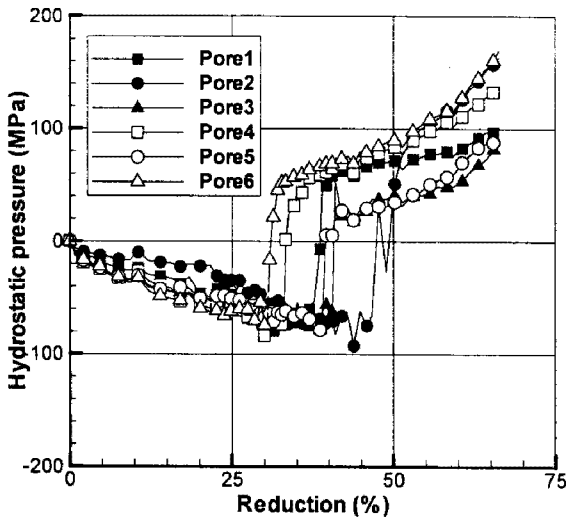


Fig 6 The history of hydrostatic pressure ( $\phi = 15.0$  mm)

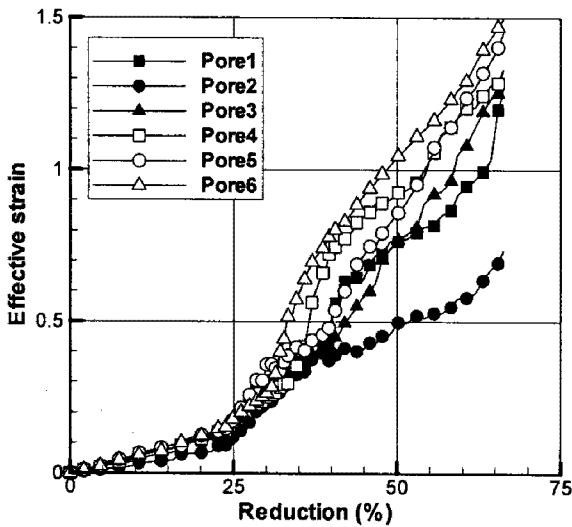


Fig 7. The history of effective strain ( $\phi = 15.0$ mm)

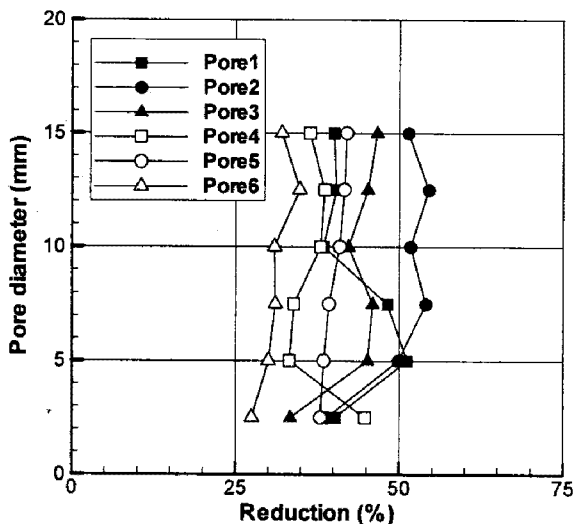


Fig 8. The closing patterns for each diameter

Fig. 3-5에 기공의 크기에 따른 기공의 압착 및 소멸 과정을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 기공 주위의 요소망 밀도가 높게 나타나고 있으며, 매우 작은 크기의 기공일지라도 요소망재구성 과정에서 사라지지 않았다. Fig. 3의 해석 결과를 얻는데 총 65번의 요소망재구성이 실시되었다.

Fig. 6과 Fig. 7에 기공의 크기가 15.0 mm인 경우에 대하여 기공이 위치한 지점에서의 정수압과 유효변형률의 변화 과정을 각각 나타내었고, Fig. 8은 각 기공들의 사라지는 압하율을 나타내었다. Fig. 6으로부터 기공이 사라지는 지점에서 정수압이 음수에서 양수로 급격하게 변하고 있음을 알 수 있다. 압착이 발생하기 이전의 한 순간, 즉 어떤 압하율에서 기공의 위치에 따른 정수압이 압착이 발생한 이후의 어떤 압하율에 대한 정수압에 비하여 그 분포가 약 50% 좁게 나타남을 알 수 있다. 그리고 압착이 발생하는 구간에서의 압하율이 비교적 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 즉, 정수압이 0인 영역이 압하율 31%-49%에 걸쳐 있음을 알 수 있다. 이 점은 Fig. 8의 압착되는 시점 기준에서의 압하율, 즉 33%-51%에서도 확인할 수 있다.

Fig. 7의 기공에서의 변형률 변화 곡선과 Fig. 8의 15.0 mm 기공의 압착 순간의 압하량에서 보는 바와 같이 변형률과 기공 압착은 가장 밀접한 연관 관계를 맺고 있음을 알 수 있다. Fig. 7에 표시되어 있는 바와 같이 위치에 상관없이 즉, 정수압 등과는 크게 상관없이 0.4-0.6 사이의 변형률에서 기공이 압착되는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 3 차원 유한요소해석 기술을 이용하여 자유단조의 압세팅 공정에서 소재 내부에 위치한 구형상의 기공이 압착되는 과정을 시뮬레이션하였다. 기공압착 공정의 3 차원 시뮬레이션을 실현하는데 요소기술인 기공형상의 정확한 표현에 적합한 요소밀도 제어기술과 요소망재구성 기술이 확보되었으며, 비교적 작은 크기의 기공의 압착 과정 해석이 성공적으로 이루어졌다. 시뮬레이션 결과는 기공압착 현상을 이해하고 최적의 공정 조건을 찾는 데 유용함을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 2 단계 BK21 사업 및 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 일환으로 실시된 연구 결과의 일부임.

## 참 고 문 헌

- [1] A. Tomlinson and J. D. Stringer, 1958, The closing of internal cavities in forgings by upsetting, *J. Iron Steel Inst.*, March, pp. 209-217.
- [2] R. Kopp and E. Ambaum, 1976, Behavior of internal hollows in forging during open-die forging, *Stahl und Eisen*, Vol. 96, pp. 1004-1009.
- [3] E. Erman, N. M. Medei, A. R. Roesch and D. C. Shah, 1989, Physical modeling of blocking processes in open-die press forging, *J. Mech. Working Tech.*, Vol. 19, pp. 165-194.
- [4] E. Erman, N. M. Medei, A. R. Roesch and D. C. Shah, 1989, Physical modeling of upsetting processes in open-die press forging, *J. Mech. Working Tech.*, Vol. 19, pp. 195-210.
- [5] M. Tanaka, S. Ono, M. Tsuneno and T. Iwadate, 1987, An analysis of void crushing during flat die free forging, *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Adv. Tech. Plast.*, Stuttgart, Vol. 2, pp. 1035-1042.
- [6] U. Stahlberg, H. Keife, M. Lundberg and A. Melander, 1980, A study of void closure during plastic deformation, *J. Mech. Working Tech.*, Vol. 4, pp. 51-63.
- [7] K. N. Shah, B. V. Kiefer and J. J. Gavigan, 1986, Finite element simulation of internal void closure in open-die forging, *Adv. Manuf. Proc.*, Vol. 1, pp. 501-516.
- [8] S. P. Dudra and Y. T. Im, 1990, Investigation of metal flow in open-die forging with different die and billet geometries, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 21, pp. 143-154.
- [9] B. V. Kiefer and K. N. Shah, 1991, Three-dimensional simulation of open-die press forging, *ASME Trans., J. Eng. Mat. and Tech.*, Vol. 112, pp. 477-485.
- [10] 박치용, 조종래, 양동열, 김동진, 박일수, 1992, 대형강괴 업셋팅공정의 기공압착 해석, *대한기계학회논문집*, 제16권, 제10호, pp. 1877-1889.
- [11] 조종래, 김동권, 김영득, 이부윤, 1996, 열간 판재단조시 강괴 내부의 기공폐쇄에 관한 연구, *한국소성가공학회*, 제5권, 제1호, pp. 18-26.
- [12] 박치용, 양동열, 1996, 대형단조에서의 미세 기공 압착해석을 위한 유한요소법의 Global/Local 기법, *한국정밀공학회지 '96년도 춘계 학술대회논문집*, pp. 819-823,
- [13] 천명식, 류중수, 문영훈, 2004, 사각 빌렛 자유단조시 내부기공폐쇄거동 유한요소해석, *한국소성가공학회*, 제13권, 제2호, pp. 148-153.
- [14] 권용철, 이정환, 이승욱, 정용수, 김남수, 이영선, 2007, 열간 자유단조 공정시 내부 공극 압착 거동에 관한 연구, *한국소성가공학회지*, 제16권, 제4호, pp. 293-298.
- [15] M. C. Lee, M. S. Joun and June K. Lee, 2007, Adaptive tetrahedral element generation and refinement to improve the quality of bulk metal forming simulation, *Finite Elem. Anal. Des.* Vol. 43, No. 10, pp. 788-802.
- [16] <http://www.afdex.com>