일반자유단조 프레스와 방사형 단조 프레스의 기공 압착에 관한 비교 연구

김성현¹. 이민철². 장성민³. 엄재근³. 전만수[#]

Comparative Study on Pore Closing in Open Die Forging by Conventional Forging Press and Radial Forging Machine

S. H. Kim, M. C. Lee, S. M. Jang, J. G. Eom, M. S. Joun

(Received August 10, 2010 / Revised September 7, 2010 / Accepted September 14, 2010)

Abstract

We propose an analysis model for simulating the detailed procedure of pore closing in open die forging of shafts. In the analysis model, an artificial symmetric plane is used, on which initial pores are located to be traced. The analysis model is employed to carry out three-dimensional simulation of pore closing in shaft free forging by both conventional free forging press and radial forging machine. With this result, two typical types of free forging equipment for manufacture of shafts are compared in detail. It has shown that the radial forging machine is much superior to the conventional open die forging press especially in pore closing under high hydrostatic pressure with sound strain.

Key Words : Finite Element Simulation, Pore Closing, Radial Forging, Open Die Forging

1. 서 론

선박용 엔진 부품이나 풍력발전용 대형 부품은 자유단조에 의하여 생산되고 있으며, 단강품으로 분류되고 있다. 우리나라는 최근 20년간의 조선산업의 눈부신 발전으로 대형 자유단조업의 기반을 구축하였고, 최근의 풍력발전 부품산업의 호황으로 도약의 전기를 맞고 있다. 단강품은 자유단조의 기본요소인 업셋팅과 코킹 공정을 통하여 주조로 제작된 소재를 반복적으로 타격함으로써 원하는 형상으로 제조하고 있다.

자유단조의 목적에는 소재를 절약하는 것도 있지만, 품질의 개선도 매우 중요한 목적 중의 하나이다. 일반적으로 대형 인고트 내부, 특히 중심 부근에 기공과 결함이 존재할 가능성이 크기 때

문이다. 따라서 자유단조 중 기공의 압착이 연구자들의 주요 관심사가 되어 왔다. 그러나 그 중요성에 비하면, 연구결과들이 충분하지 못한 것이 사실이다. 실험적인 방법[1~4]과 해석적 방법[5~14] 모두 한계가 있기 때문이다.

Tomlinson과 Stringer[1], Kopp와 Ambaum[2]은 기공 압착 현상에 관한 실험적 연구를 실시하였다. Erman 등[3, 4]은 자유단조과정 중 유동현상의 실험을 위한 물리적 모델링에 관하여 연구하였으나, 실용적 관점에서 크기효과 등의 한계점을 노출하였다. Tanaka 등[5]은 코킹 공정에서 기공 닫힘에 관한 해석을 실시하였으며, 압착 조건을 제안하였다. Stahlberg 등[6]은 상계해법을 이용하여 사각형 기공의 압착에 관한 연구를 실시하였고, 해석결과를 실험결과와 비교하였다.

1. 경상대학교 대학원 기계공학과

2. 경상대학교 연구교수

3. (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터

교신저자: 경상대학교 기계항공공학부/항공기부품기술연구소

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

1980년대 후반에 이르러 유한요소법이 자유단조공정의 해석에 응용되기 시작하였다[7~14]. Shah 등[7]은 3차원 유한요소법을 자유단조공정의 시뮬레이션에 이용하였다. 그러나 적용 초기에는 대부분 2차원 해석 중심으로 연구되었으며[8, 10~12], 기공이 긴 파이프 또는 환상으로 간주되었다. 최근에는 3차원 유한요소법을 이용한 기공 압착에 관한 연구가 주류를 이루고 있다[9, 13, 14]. 그러나 유한요소법을 이용한 자유단조 중 기공 압착에 관한 많은 연구들이 실행되었지만, 아직 실물 크기의 작은 구형상의 기공 압착 과정을 시뮬레이션한 연구 사례는 찾아 볼 수 없다. 그 원인은 적절한 해석모델의 개발과 요소망 생성 및 재구성 기술의 발전이 뒷받침되지 않은 것에 기인한다. 최근 Lee와 Joun[15]은 지능적 요소망재구성 기법을 개발하여 단조 시뮬레이터 AFDEX 3D[16]에 활용하였으며, 업셋팅 중 기공 압착의 과정을 3차원 단조 시뮬레이터 AFDEX 3D를 이용하여 규명하였다.

본 연구에서는 대형 축의 제조 목적으로 활용되고 있는 축의 자유단조 시에 발생하는 기공의 압착 과정의 해석모델을 제안하고, 이를 이용하여 축의 자유단조 시 기공 압착 관점에서 일반자유단조 프레스와 방사형 단조기를 비교한다.

2. 해석모델의 선정

축의 자유단조공정 해석 목적으로 기공을 초기 소재의 내부에 위치시키는 것은 어려운 작업이 아니지만, 압착 과정에서 불가피한 요소망 재구성은 용이하지 않다. 불가능한 것은 아니지만, 연구의

Fig. 1 Proposed analysis model

투자 효과가 크지 않다. 또한 해석 결과의 정보화 측면에서도 효과적이지 않다. 따라서 적합한 해석 모델이 요구되며, 그 해석모델은 실 공정에 가까우면서도 실용성이 있어야 한다.

본 논문에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 축의 길이 방향에 수직한 대칭면을 가진 해석모델을 제안한다. 대칭면에 기공을 적절한 위치에 분포시켜 이를 추적함으로써 기공의 소멸 과정을 효과적으로 해석하고 관찰할 수 있다.

그런데 대칭조건으로부터 문제가 발생한다. 편치가 대칭면을 벗어나면 소재가 대칭면 방향으로 이동하는 문제가 그것이다. 이것은 기공의 관점에서 볼 때 큰 영향을 미치지만 실제 현상과는 다소 차이가 나기 때문이다. 그리고 기공의 소멸 과정은 필연적으로 요소망재구성이 수반된다. 요소망재구성은 이산화된 형상을 재이산화하는 과정이므로 인위적인 형상변화를 동반한다. 이것은 기공 소멸 과정의 시뮬레이션 측면에서는 매우 치명적인 것이다.

따라서 전술한 소재 유동을 유도하기 위하여 성형 해석 중 대칭면은 항상 금형에 접촉해야 한다. 그리고 최종적인 성형 형상이 대칭면에서 일정 거리만큼 떨어져 있는 지점에서 인위적으로 경사지도록 하는 것이 바람직하다.

이러한 점을 고려하여 해석모델에서 축방향으로 편치의 치수를 실제보다 크게 하였으며, 성형 단의 증가와 함께 금형을 대칭면이 위치한 방향으로 이동시켜 실제 소재와 편치가 닫는 부위가 점진적으로 감소하도록 하였다. 소재의 초기 길이는 해석 결과를 바탕으로 대칭면 주위의 소성유동에 영향을 받지 않는 최소의 길이로 결정하였다.

(a) Conventional (b) Radial
Fig. 2 Definition of problem

Fig. 3 Pore disappearance before and after remeshings

Fig. 4 Comparison of pore disappearance

3. 적용 예제

Fig. 2는 실제 기공 소멸 과정의 예측에 사용된 소재 및 금형의 형상을 나타내고 있다. 소재의 길이는 200mm(대칭 조건 고려 시 400mm)이고, 직경은 300mm이다. 소재의 유동응력은 $\bar{\sigma} = 74.1\bar{\epsilon}^{0.19}$ MPa로 간주하였다. 기공 소멸 과정에서 온도의 영향은 고려하지 않았다. 요소 수의 제약으로 일정 이하 크기의 기공을 표현하는데 어려움이 따르며 결과의 가시화, 즉 해석모델의 설명 등의 측면에서도 적절한 크기의 기공이 유리하므로 초기 기공의 직경을 20mm로 선정하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 중심에 하나의 기공을 위치시켰으며, 네 개의 방향으로 3개씩의 기공을 등간격으로 위치시켰다.

한편, 축의 자유단조 시의 기공압착 현상과 같이 기공의 단면이 타원 또는 원형 형태를 유지하면서 압착이 일어날 경우, 기공 압착이 물리적으로 이루어지는 순간까지 추적하는 것은 요소망의 재구성 기법 등에 관한 연구가 병행되지 않으면 용이한 일이 아니다. 본 논문이 해석모델의 제시에 초점이 맞추어져 있으므로 기공이 적절한 크기에 이르면 압착이 발생한 것으로 간주할 수밖에 없다. 따라서 해석 중에 기공 상의 임의의 두 점 사이의 거리의 최대값이 4mm 이하에 이르면 기공이 닫힌 것으로 가정하였다. 전술한 바와 같이 이 가정은 요소 수 또는 요소망생성 기술의 문제이지, 해석모델이 갖고 있는 근본적인 문제는 아니다.

AFDEX 3D[16]의 자유단조 해석 모듈을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 유한요소 시뮬레이션 중에 요소의 수를 200000개 내외로 통제하였다. 요소망재구성으로 인한 상태변수의 순화와 기공 형상의 변화를 줄이기 위하여 해석 중 요소망재구성을 최소화시켰다.

일반자유단조와 방사형 단조공정을 해석하는 동안 각각 17회와 26회의 요소망재구성이 이루어졌다. 요소망재구성은 필연적으로 소재의 외곽형상 변화를 초래하며, 경우에 따라서 부적절한 요소망재구성으로 신뢰할 수 없는 결과를 얻을 수도 있다. 따라서 요소망생성 전후의 상황을 점검할 필요가 있다.

Fig. 3은 요소망재구성 전후에서 절점의 대칭면 접촉여부를 나타내고 있다. 방사형 단조의 경우, Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 네 개의 기공이 거

Fig. 5 Comparison of hydrostatic pressure between conventional free forging and radial forging

Fig. 6 Comparison of effective strain between conventional free forging and radial forging

의 동시에 사라졌으며, 이 점은 모든 절점이 대칭면에 동시에 접촉하는 것으로부터 확인하였다. Fig. 3(a)의 일반자유단조의 경우, 해석 중에 발생한 공정의 비대칭성으로 인하여 네 개의 기공 중에서 좌상부의 기공을 제외한 세 개의 기공이 동시에 사라졌다. 일반자유단조는 근본적으로 비대칭성에 노출되어 있으며, 그 결과로 인하여 Fig. 3(a)의 결과가 예측된 것이다.

Fig. 4에 시뮬레이션 결과로 획득한 일반자유단조 프레스(Fig. 4(a), Fig. 4(c))와 방사형 단조기(Fig. 4(b), Fig. 4(d))에 의한 기공 소멸 과정을 나타내고

있다. 그리고 Fig. 1에 표시된 점 A와 B에서 정수압의 변화를 Fig. 5에 나타내었고, 유효변형률의 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

이 두 그림에서 보는 바와 같이 방사형 단조기는 조사된 두 위치에서 정수압의 차이가 거의 동일하며, 그 값이 일반자유단조기보다 2배 정도 크게 나타나고 있다. 물론 기공 소멸 시점에서의 단면감소율 관점에서도 방사형 단조기가 유리하다. 그러나 일반자유단조기의 유효변형률이 동일 단면감소율의 조건하에서 약 2배 크게 나타나고 있다. 하지만 일반자유단조기의 경우에는 변형이 상대적으로 불균일하거나 방향성을 달리하는 변형이 반복되기 때문에 기공 소멸 과정을 근거로 판단할 때 기공 압착 등에 미치는 변형률의 효용성은 상대적으로 떨어지는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 3차원 유한요소해석 기술을 이용하여 대형 축 제품의 자유단조공정에서 소재 내부에 위치한 구형상의 기공이 압착되는 과정을 시뮬레이션하였다. 해석모델이 제시되었고, 기공 소멸 관점에서 일반자유단조프레스와 방사형 단조기의 비교 연구가 이루어졌다.

방사형 단조는 상대적으로 높은 정수압 상태에서 성형이 가능하기 때문에 일반자유단조에 비하여 축류 제품의 단조 시에 기공 소멸 관점에서 우수한 성능을 지닌 것으로 나타났다. 본 논문에서 예제로 선택한 문제의 경우, 방사형 단조는 일반자유단조에 비하여 정수압은 약 2배인 반면, 최대변형률은 약 40%로 나타났다.

후 기

2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0017012).

참 고 문 헌

[1] A. Tomlinson, J. D. Stringer, 1958, The Closing of Internal Cavities in Forgings by Upsetting, J. Iron. Steel Res. Int., March, pp. 209~217.
[2] R. Kopp, E. Ambaum, 1976, Analysis of Void Closure in Open-Die Forging, Int. J. Mach. Tools

Manuf., Vol. 30, pp. 65~75.
[3] E. Erman, N. M. Medei, A. R. Roesch, D. C. Shah, 1989, Physical Modeling of Blocking Processes in Open-Die Press Forging, J. Mech. Working Technol., Vol. 19, pp. 165~194.
[4] E. Erman, N. M. Medei, A. R. Roesch, D. C. Shah, 1989, Physical Modeling of Upsetting Processes in Open-Die Press Forging, J. Mech. Working Technol., Vol. 19, pp. 195~210.
[5] M. Tanaka, S. Ono, M. Tsuneno, T. Iwadate, 1987, An Analysis of Void Crushing during Flat Die Free Forging, Adv. Technol. Plast., Vol. 11, pp. 1035~1042.
[6] U. Stahlberg, H. Keife, M. Lundberg, A. Melander, 1980, A Study of Void Closure during Plastic Deformation, J. Mech. Working Technol., Vol. 4, pp. 51~63.
[7] K. N. Shah, B. V. Kiefer, J. J. Gavigan, 1986, Finite Element Simulation of Internal Void Closure in Open-Die Forging, Mater. Manuf. Processes, Vol. 1, pp. 501~516.
[8] S. P. Dudra, Y. T. Im, 1990, Investigation of Metal Flow in Open-Die Forging with Different Die and Billet Geometries, J. Mater. Process. Technol., Vol. 21, pp. 143~154.
[9] B. V. Kiefer, K. N. Shah, 1991, Three-Dimensional Simulation of Open-Die Press Forging, J. Eng. Mater. Technol., Vol. 112, pp. 477~485.
[10] C. Y. Park, J. R. Cho, D. Y. Yang, D. J. Kim, I. S. Park, 1992, Analysis of Void Closure in the Upsetting Process of Large-Ingot, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 16, No. 10, pp. 1877~1889.
[11] J. R. Cho, D. K. Kim, Y. D. Kim, B. Y. Lee, 1996, Study of Internal Void Closure in Slab Ingot during Hot Plate Forging, Tran. Mater. Process., Vol. 5, No. 1, pp. 18~26.
[12] C. Y. Park, D. Y. Yang, 1996, Large Pores in Forging a Finite Element Analysis of squeezed GLOBAL/LOCAL Scheme, Proc. Kor. Soc. Precision Eng., pp. 819~823,
[13] M. S. Chun, J. S. Ryu, Y. H. Moon, 2004, FEM Analysis of Void Closure Behavior during Open Die Forging of Rectangular Billets, Trans. Mater. Process., Vol. 13, No. 2, pp. 148~153.
[14] Y. C. Kwon, J. H. Lee, S. W. Lee, Y. S. Jung, N. S.

Kim, Y. S. Lee, 2007, A Study on Cavity Closure Behavior during Hot Open Forging Process, Trans. Mater. Process, Vol. 16, No. 4, pp. 293~298.

improve the quality of bulk metal forming simulation, Finite Elem. Anal. Des. Vol. 43, No. 10, pp. 788~802.

[15] M. C. Lee, M. S. Joun, J. K. Lee, 2007, Adaptive tetrahedral element generation and refinement to

[16] <http://www.afdex.com>