

# 유한요소법을 이용한 해머단조 공정에서 타격 횟수의 결정

장성민<sup>1</sup>, 김성현<sup>1</sup>, 이민철<sup>2</sup>, 조범제<sup>3</sup>, 전만수<sup>#</sup>

## Determination of Number of Blows in Hammer Forging by Finite Element Method

S. M. Jang, S. H. Kim, M. C. Lee, B. J. Cho, M. S. Joun

### Abstract

In this paper, three-dimensional finite element approach to determining the number of blows in hammer forging is presented. Energy efficiency which is a major factor affecting the number of blows in hammer forging is assumed to decrease linearly as die-material contact area increases. The approach is applied to predicting the number of blows in counterblow hammer forging of large crank shaft for medium sized ship engine.

**Key Words :** Hammer Forging(해머단조), Finite Element Method(유한요소법), Impact Forging(타격단조)

### 1. 서 론

해머단조(hammer forging) 또는 고속 타격단조(impact forging)는 소음 등의 환경적 요인으로 위축된 면도 있으나, 대형 단조품의 지속적인 개발과 고에너지 성형의 장점으로 그 영역을 확대하기 위한 노력이 지속되고 있다.

해머단조에 관한 연구는 1960년대 들어와서 본격화되었으며, 시험적 및 해석적 방법이 주를 이루다가 1990년부터 수치적 해법의 적용 연구가 이루어졌다[1]. 1960년대의 연구로 Watermann[[2]은 해머단조에 관한 실험을 통하여 다양한 실험식을 제시하였고, Lippmann[3]은 고속단조에 관한 해석적 연구를 실시하였으며, Organ[4]은 장비 용량 산정법을 제시하였다. 1970년대와 1980년대는 Tirosh와 Kobayashi[5], Sturgess와 Jones[6], Benuzzi와 Travis[10], Y. H. Yoo 등[1] 등의 실험적 연구가 이어졌다. 1990년대 이후에는 수치적 접근방법이 연구되었고, 실험적 연구 및 해석적 연구도 계속되었다. Yang과 Yoo[12]는 외연적 시간적분 유한요소법을

이용하여 해머단조 공정을 해석하였고, Yoo와 Yang[13]은 외연적 시간적분 유한요소법을 이용하여 편심부하 상태의 고속 해머단조에서 타격력 및 효율과 변형 특성에 관하여 연구하였다. Lee 등[14]은 유한요소법을 이용하여 단조해머의 타격 효율에 관하여 연구하였으며, Hallström [15]는 유한요소해석과 연계하여 마찰에 관하여 연구하였다. Li 등[16]은 타격력(blow force)을 해석적으로 결정하는 공식을 제시하였으며, Bodurov와 Penchev[17]는 산업용 로켓엔진 구동 해머단조기를 연구하였다. Irisarri와 Pelayo[18]는 대형 드롭해머의 파괴에 관한 연구를 실시하였다.

일반 프레스 단조에 추가하여 해머단조에서 결정해야 할 주요 설계변수는 타격횟수이다. 타격 횟수는 제품의 제조원가 뿐만 아니라 해머단조장비의 용량에 비하여 중량이 큰 단조품의 경우에는 단조 가능 여부 및 재료의 온도 유지 방안 등의 결정에 매우 큰 영향을 미치는 설계변수이다. 특히 대형 제품을 해머단조로 생산하고자 할 경우, 타격 횟수의 예측은 매우 중요하다. 본 논문에서는 해머

1. 경상대학교 기계공학과 대학원  
2. 경상대학교 공학연구원  
3. 대창단조㈜  
#. 경상대학교 기계항공공학부/항공기부품기술연구소  
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

단조 공정의 시뮬레이션을 위한 접근방법을 소개하고 적용예제를 통하여 그 타당성을 점검하고자 한다.

## 2. 해머단조와 유한요소법

해머단조의 에너지 원은 소재의 초기접촉 시의 해머의 운동에너지와 소재 초기 접촉 이후에 부과되는 에너지, 즉 해머의 자중과 프레스 등에 의하여 가해진 외력에 의하여 발생하는 에너지로 구성되어 있다. 물론 소재의 초기접촉 시의 해머의 운동에너지는 해머에 가해진 외력, 즉 자중과 프레스 등에 의하여 가해진 외력이 행한 일이다. 소재의 초기접촉 이후의 해머의 행정은 그 이전의 행정, 즉 해머의 운동에너지를 증가시키기 위한 행정에 비하여 짧다. 그러므로 대부분의 에너지를 소재의 초기접촉 시의 해머 운동에너지에 의존하고 있다. 따라서 초기의 속도는 프레스 단조에 비하여 매우 크다[16]. 해머단조 중의 에너지는 소재의 소성변형 뿐만 아니라 소음, 구조진동, 마찰 등의 형태로 소산된다. 전체 소요 에너지와 소성변형의 기본 목적으로 사용된 에너지의 비를 에너지 효율  $\eta$ 로 정의한다. Lee 등[14]의 연구결과에 의하면, 에너지 효율은 주로 접촉면적에 크게 영향을 받으며, 에너지 효율은 접촉면적이 증가함에 따라 거의 직선적으로 감소하고, 해머단조의 용량에 따라서 에너지 효율이 0이 되는 단조한계 접촉면적  $A_{cr}$ 이 존재한다. 따라서 접촉면적을  $A$ 라고 하였을 때, 에너지 효율은 다음 식으로 표현된다.

$$\eta = 1.0 - A/A_{cr} \quad (1)$$

일반 프레스 단조에 비하여 해머단조에서 접촉 초기의 속도가 10배[14, 16] 정도로 크기 때문에 가속도의 영향과 변형률속도 의존 특성이 다소 다를 수도 있다. 단조공정 시뮬레이션의 경험을 근거로 판단할 때, 해석 대상 공정의 최대 유효변형률속도가 약 3.0/s이므로 기존의 프레스 단조와 마찬가지로 가속도의 영향은 무시가능하다. 이 경우, 등온 조건하에서 강소성 유한요소법으로 수식화하면 다음과 같은 약형이 구해진다[19].

$$\int_V \sigma'_{ij} \omega_{ij} dV - \int_V p \epsilon \omega_{ii} dV - \int_V f_i \omega_i dV - \int_V v_{i,j} q dV - \int_{S_{ij}} \bar{t}_i \omega_i dS + \int_{S_{q1}} \sigma_i \omega_i dS = 0 \quad (2)$$

문제는 해머의 속도의 결정에 있다. 해머가 가진 초기 에너지  $E_0$ 는

$$E_0 = (CH \times mg + pA)h \quad (3)$$

이고, 이것이 모두 운동에너지로 바뀌었다는 조건하에서 초기속도는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$v_0 = \sqrt{2(CH \times mg + pA)h/m} \quad (4)$$

여기서  $h$ 는 해머의 행정을 의미하고,  $m$ ,  $g$ ,  $p$ ,  $A$ 는 각각 중량, 지구중력가속도, 실린더 압력, 실린더 면적을 의미한다. 그리고 카운터블로해머단조기의 경우는  $CH$ 값은 0이고, 일반 해머단조기에서  $CH$ 값은 1이다.

해석 중의  $i$ 번째 해석스텝에서의 해머가 가진 에너지  $E_i$ 와 속도  $v_i$ 는 다음식으로부터 구해진다.

$$E_i = E_{i-1} - \Delta E_{i-1} / \eta_i \quad (5)$$

$$v_i = \sqrt{2E_i/m} \quad (6)$$

여기서  $\Delta E_{i-1}$ 은  $i$ 번째 해석스텝 직전의 공정해석에서 소비된 에너지에서 자중과 유공압에 의하여 가해진 에너지를 뺀 양이며,  $\eta_i$ 는  $i$ -번째 해석스텝에서의 효율이다.

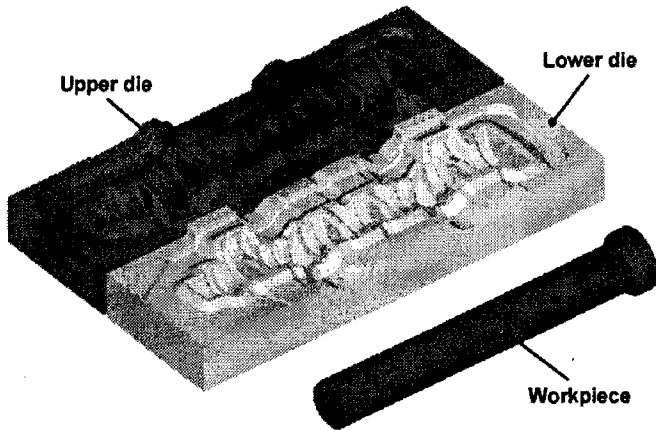
## 3. 적용 예제

적용예제로 Fig. 1에서 보는 바와 같은 중형선박 엔진용 크랭크샤프트 단조 공정을 선정하였다. 사용된 단조기는 40톤 카운터블로해머단조기[20]이며, 주요 제원은 Table 1에서 보는 바와 같다. 카운터블로해머단조기는 기본적으로 두 개의 상하 금형의 동시 운동에 의하여 많은 에너지를 소재에 가하도록 한 장치이다. 이 카운터블로해머단조기의 에너지원은 공압이다. 즉, 공압으로 접촉 초기의 속도를 부여하며, 금형과 소재의 접촉 이후에도 지속적으로 공압을 실린더에 가하여 성형 에너지를 금형에 부여한다.

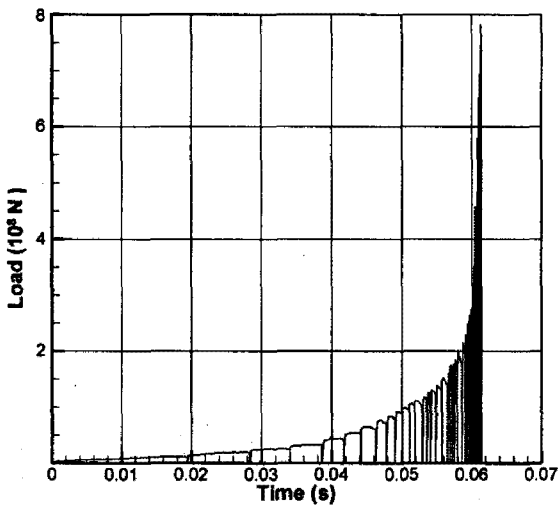
한편 두 개의 움직이는 금형으로 소재를 성형하는 것은 해석상의 관점에서 볼 때 해의 수렴성 측면에서 다소 불리하다. 즉, 축차적인 수치해석 과정에서 속도의 진동을 야기시킬 수 있다. 가속도의 영향을 무시할 경우, 하나의 금형을 고정시키고 대신 다른 금형의 속도를 그만큼 증가시켜 상대속도를 동일하게 함으로써 동일한 결과를 얻을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 수식에 의하여 계산한 속도의 2배를 해머, 즉 상형의 속도로 부과한 대신

**Table 1 Principal index of the C/B hammer machine**

Cylinder pressure	Cylinder diameter	Mass of upper hammer	Initial blow energy
MPa	∅	kg	kJ
0.6	1500	56500	795.2



**Fig. 1 Test process information**

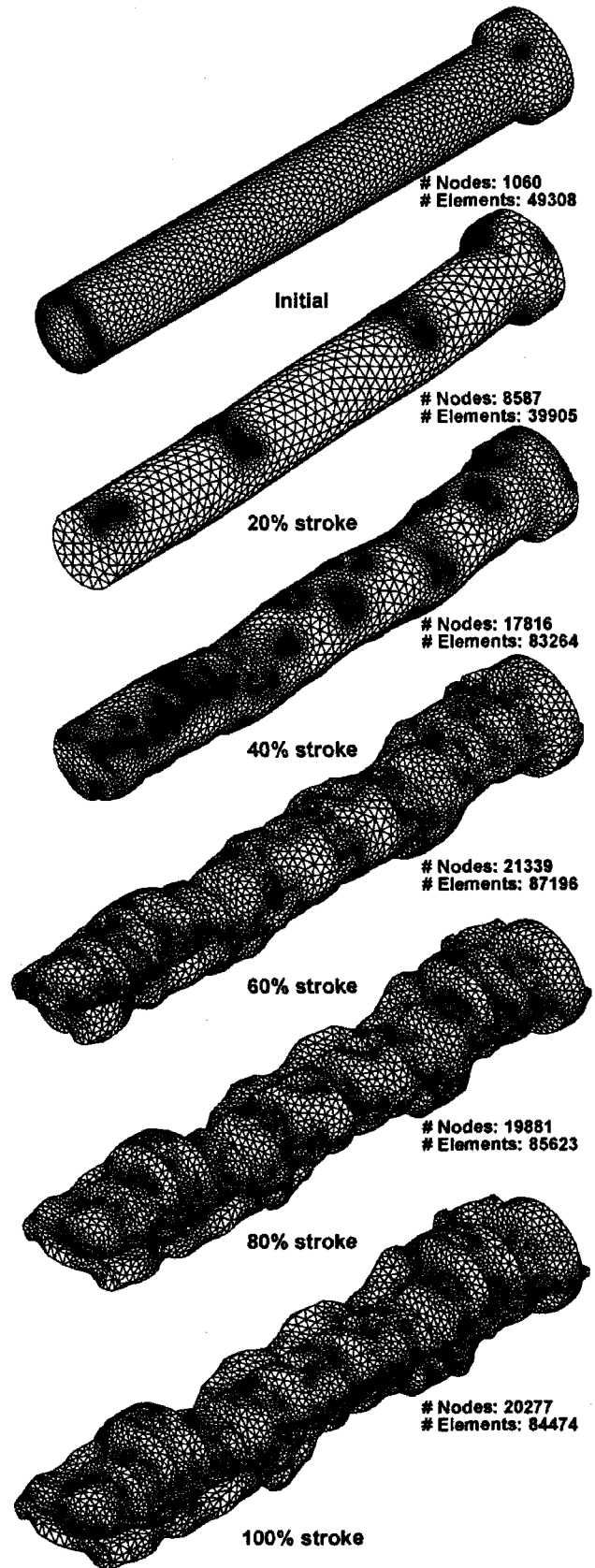


**Fig. 2 Forming load-stroke curve**

하형의 속도는 0으로 간주하였다.

성형 중 소재의 온도는 평균적으로 1150℃로 가정하였으며, 소재의 유동응력  $\bar{\sigma} = 55.75\bar{\epsilon}^{0.17}$  MPa은 고온 압축실험으로 구하였다. 단조한계 접촉면적을 1,100,000mm<sup>2</sup> 로 하였고, 쿨롱마찰법칙을 사용하였으며 마찰계수는 0.3으로 하였다. 실린더의 압력  $p$  는 0.6MPa이다.

범용 소성가공 시뮬레이터 AFDEX 3D[21]를 이용하였다. 해석 결과, 총 46번의 타격이 필요한 것으로 예측되었다. Fig. 2는 성형 하중을 나타내고 있



**Fig. 3 History of a crankshaft**

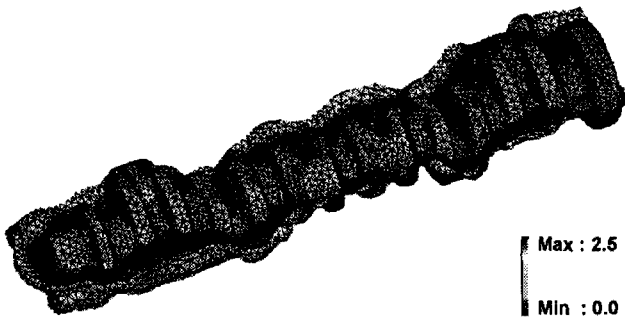


Fig. 4 Final shape and distribution of effective strain

으며, 타격 개시 및 종료 시점을 성형하중 불연속으로부터 확인할 수 있다. Fig. 3에 변형의 이력을 나타내었으며, Fig. 4에 변형 형상 및 유효 변형률 분포를 나타내었다.

### 3. 결론

본 논문에서는 해머단조 공정의 해석을 위한 단조 시뮬레이션 기술과 연계한 체계적인 접근 방법이 제시되었다. 초대형 형단조품의 해머단조 공정 설계 시 증시되는 단조 시간을 예측하는데 필수적인 타격 횟수의 결정에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다.

타격 횟수에 영향을 주는 인자 중에서 에너지 효율이 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Lee 등[14]의 결과에 의하면, 에너지 효율과 접촉면적은 직선적으로 변하며, 그 변화의 특성은 단조한계 접촉면적에 좌우된다. 단조한계 접촉면적은 장비의 고유값에 속하는 것이지만, 실제의 변화 특성의 비선형성, 제품 및 금형 형상의 복잡성, 대형 부품인 경우에 발생하는 성형압력의 감소와 소재의 과냉 등을 감안하여 단조한계 접촉면적의 조정이 경험적으로 필요하다고 사료된다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부의 지역산업기술개발사업 및 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0066590).

### 참 고 문 헌

- [1] Y. H. Yoo, D. Y. Yang, 1997, *KMSE*, Vol. 21, No. 10, pp. 1589 ~ 1597.
- [2] H. D. Watermann, 1963, *Industrie-Anzeiger*, Vol. 77, pp. 1727 ~ 1738.
- [3] H. Lippmann, 1966, *Proc. 7th Int. M.T.D.R. Conf. Birmingham*, Vol. 1, pp. 53 ~ 66.
- [4] A. J. Organ, 1967, *Int. J. Mach. Too Des. Res.*, Vol. 7, No. 4, pp. 325 ~ 349.
- [5] J. Tirosch, S. Kobayashi, 1976, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, pp. 314 ~ 318.
- [6] C. E. N Sturgess, M. G. Jones, 1971 *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 13, No. 4, pp. 309 ~ 322.
- [7] E. Benuzzi, F. Soavi, 1985, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 107, No. 3, pp. 266 ~ 274.
- [8] S. Vajpayee, M. M. Sadek, S. A. Tobias, 1979 *Int. J. Mach. Too Des. Res.*, Vol. 19, No. 4, pp. 237 ~ 252.
- [9] H. W. Haller, 1983, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 105, No. 4, pp. 270 ~ 275.
- [10] S. Biswas, F. W. Travis, 1971, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 11, No. 3, pp. 235 ~ 249.
- [11] Y. H. Yoo, S. H. Hong, J. S. Lee, 1987, *KSME, The proceedings of fall annual meeting*, pp. 45 ~ 49.
- [12] D. Y. Yang, Y. H. Yoo, 1997, *Annals of the CIRP*, Vol. 46, No. 1, pp. 191 ~ 194.
- [13] Y. H. Yoo, D. Y. Yang, 1997, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 63, pp. No. 1 ~ 3, pp. 718 ~ 723.
- [14] S. H. Lee, N. C. Cho, S. S. Hong, J. S. Lee, 1995, *KSME*, Vol. 19, No. 6, pp. 1539 ~ 1544.
- [15] J. Hallström, 2000, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 108, pp. 21 ~ 25.
- [16] Y. Li, K. Yang, Z. Ni, 1997, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 71, No. 3, pp. 414 ~ 417.
- [17] P. Bodurov, T. Penchev, 2005, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 161, No. 3, pp. 504 ~ 508.
- [18] A. M. Irisarri, A. Pelayo, 2009, *Eng. Fail. Ana.*, Vol. 16, No. 5, pp. 1727 ~ 1733.
- [19] M. S. Joun, 2009, *Applies Solid Mechanics and Finite Element Method*, Jinsaem Media.
- [20] J. H. Park, M. C. Lee, T. H. Park, B. J. Cho, M. S. Joun, 2008, *KSTP fall annual meeting*, pp. 297 ~ 300.
- [21] [www.afdex.com](http://www.afdex.com)