

〈技術論文〉

# 단조해머의 타격효율 결정

이성호\* · 조남춘\*\* · 홍성석\* · 이종수\*\*

(1993년 8월 23일 접수)

## Determination of Blow Efficiency of the Forging Hammer

Sung-Ho Lee, Nam-Choon Cho, Sung-Suk Hong and Jong-Soo Lee

**Key Words :** Forging Hammer (단조해머), Blow Efficiency (타격효율), Copper Blow Test (구리 타격시험), Physical Modeling (물리적 모의실험), Finite Element Analysis (유한요소해석)

### Abstract

Copper blow test to measure the forging capability of 35 ton counterblow hammer and upset of plasticine on the model hammer to investigate the change of the blow efficiency during the forging process have been performed together with finite element analyses of these experiments. The blow efficiency of the hammer has been found to be dependent on the friction and on the contact area between the die and the workpiece. The effects of the volume and the aspect ratio of the billet have not been found. Inferring from the experimental results and Schey's empirical formula on the forging load, we expect that the efficiency also varies with the flow stress of the workpiece material and with the shape complexity of the forging product.

## 1. 서론

해머, 프레스 등과 같은 단조장비를 효과적으로 이용하기 위해서는 각 장비의 단조능력을 정확히 알아야 한다. 일반적으로 하중 제한장비인 기계 프레스(mechanical press), 유압프레스의 단조능력은 최대 하중으로, 에너지 제한장비인 스크류 프레스, 해머의 단조능력은 최대 에너지로 주어지나 이들 단조능력은 공정용량으로서 실제 작업시 장비가 발휘하는 능력과는 차이가 있으며 이러한 차이는 단조장비의 탄성변형, 마찰손실 등에 기인한다.

단조해머의 경우, 소재를 변형시키는데 쓰이는 유효 에너지는 단조공정이 진행됨에 따라 감소한다. 한편 해머의 타격효율은 해머의 유효에너지와 공정

에너지의 비로 정의되며 이처럼 유효에너지는 타격 효율과 직접적으로 관계되기 때문에 단조 공정 중에 타격효율이 어떻게 변화하는가를 아는 것이 중요하다.

본 연구에서는 구리압축시험을 통하여 35 ton 카운터블로우해머(counterblow hammer)의 실제 단조능력을 측정하였고 물리적 모의실험을 이용하여 단조공정 중의 타격효율의 변화를 살펴보았는데, 이때 상용 강소성 유한요소 프로그램인 DEFORM<sup>(1)</sup>을 이용한 수치해석을 함께 행하였다.

## 2. 실험 및 유한요소해석

### 2.1 실험

#### 2.1.1 구리압축시험

원리: 원통형 시편을 균일 압축시킬 때 소요되는

\*정회원, 국방과학연구소

\*\*국방과학연구소

변형에너지  $E_D$ 는 식(1)과 같이 주어진다.

$$E_D = \int_0^s P ds \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 하중이고  $s$ 는 변위이다.

한편 적절한 형상비(높이/지름)를 갖는 전해동 시편을 500°C에서 1시간 동안 어닐링한 후 표면거칠기가 500 μm 이하로 연마된 금형을 이용하여 균일 압축시험을 하면 식(1)에 의한 변형에너지는 동일 장비에 대해 매우 편차가 작은 값이 얻어지고 또 전해동의 유동응력이 변형률속도에 둔감하기 때문에 압축속도에 관계없이 거의 일정한 값이 얻어진다.<sup>(2,3)</sup>

따라서 전해동 시편을 실제 단조장비에서 균일 압축시킨 후 수치적 방법으로 소성변형에 사용된 에너지를 계산하면 그 장비의 실제 단조능력을 비교적 정확히 평가할 수 있다.

압축시험: 35 ton 카운터블로우해머에서의 압축시험에 사용된 전해동 시편의 지름은 80 mm, 높이는 120 mm였으며 Fig. 1과 같이 시편 표면에 격자(grid)를 새긴 후 변형전후의 격자간격을 측정하여서 변형양상을 조사하였다. 전해동의 유동응력은 윗 절에 나타난 조건으로 제작된 금형과 지름 14 mm, 높이 21mm인 시편을 이용하여 압축시험으로부터 구하였으며 식(2)와 같다.

$$\bar{\sigma}(\text{MPa}) = 61.005(1 + \bar{\epsilon}/0.00388)^{0.336} \quad (2)$$

본 연구에서 사용된 장비는 삼미금속이 보유한 것으로서 최대 공칭용량이 350 kJ인 유압커플링방식 카운터블로우해머이다. 전해동 시편 2개를 400

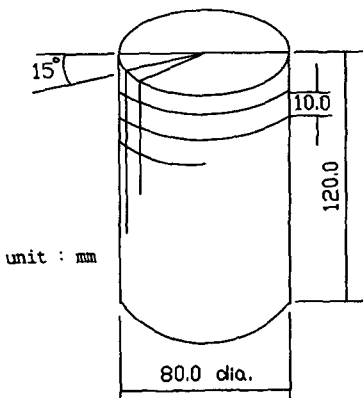


Fig. 1 Cylindrical copper specimen for upset test under 35 ton counterblow hammer

mm 간격으로 하부 금형에 위치시키고 상하 금형 사이의 거리가 1400 mm가 되도록 한 후 공기압이 7.5 bar인 상태에서 1회 타격함으로써 압축시험을 행하였으며 마찰의 효과를 알아보기 위해 무윤활 및 MoS<sub>2</sub> 윤활의 두 가지 경우에 대해 실험하였다. 실험에 사용된 윤활제의 마찰상수,  $m$ 은 MoS<sub>2</sub> 윤활의 경우 0.09, 무윤활인 경우 0.59이다.<sup>(4)</sup> 실험에 쓰인 금형과 시편의 배치를 Fig. 2에 나타내었다.

2.1.2 물리적 모의실험

단조공정 동안의 타격효율의 변화를 조사하기 위하여 모델해머를 이용한 플라스틱신의 업셋단조를 행하였다. 1200°C 등온에서 350 kJ 해머를 이용한 4130강의 단조공정을 모사할 수 있도록 모델해머를 제작하였으며 단조품의 축척은 1/12로 하였다.<sup>(5)</sup> 실험에 쓰인 플라스틱신의 유동응력은 식(3)과 같다.

$$\bar{\sigma}(\text{MPa}) = 0.375 \bar{\epsilon}^{0.13} \text{ at } 21^\circ\text{C} \quad (3)$$

플라스틱신 빌렛의 크기를 Table 1에 나타내었으며 부피의 영향과 형상비의 영향을 조사하였다. 각 시편은 최종 압하율이 50% 정도 되도록 연속타격으로 변형되었으며 매 타격마다 시편의 형상을 측정하여 유한요소해석 결과와 비교할 수 있도록

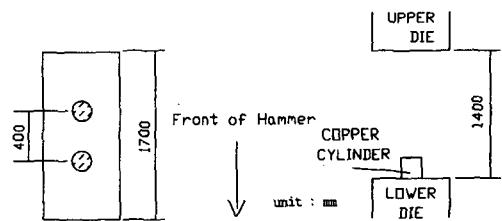


Fig. 2 Configuration of upset test specimens

Table 1 Dimensions of plasticine billets used in experiments

Volume	2.12 × 10 <sup>4</sup> mm <sup>3</sup>	4.08 × 10 <sup>4</sup> mm <sup>3</sup>
Dimension (mm)	D30 × H30	D48.4 × H22.2
	D36 × H20.8	D30 × H49.9
	D48.4 × H11.5	
	D26 × H40	

**Table 2** Characteristics of 35 ton counterblow hammer and the model hammer

Hammer	35t counterblow hammer	Model anvil hammer
Blow energy of hammer	350,000 joule (175,000)	1.1 joule
Mass of upper ram/die	45.4 ton (22.7)	3 kg
Mass of lower ram/die	47.6 ton (23.8)	

하였다. 윤활제로는 휴지를 이용하였는데 플라스틱 신의 단조시 이를 사용하면 실제 열간단조에서의 마찰상수인 0.3을 얻을 수 있다고 알려져 있다.<sup>(6)</sup>

2.2 유한요소해석

2.2.1 해머단조공정 해석

해머의 타격효율을 결정하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM을 이용하였다. DEFORM에서의 해머단조공정 모사는 다음과 같은 과정으로 수행된다.<sup>(7)</sup>

해머의 에너지용량을  $E_T$ 라 할 때 시간증분  $\Delta t$  동안의 소성변형에너지는 카운터블로우해머인 경우

$$\Delta E_D = 2L_T \Delta S \tag{4}$$

로 주어지며 따라서  $\Delta t$  이후 해머가 가지고 있는 에너지는

$$E_T(t + \Delta t) = E_T(t) - \Delta E_D / \eta \tag{5}$$

로 된다. 여기서,  $L_T$ 는 하중,  $\Delta S$ 는  $\Delta t$  동안 상부램이 움직이는 거리,  $\eta$ 는 타격효율이다. 이상과 같은 과정을  $E_T=0$ 일 때까지 반복계산하며 이 때 해머가 처음에 가지고 있던 에너지중  $\eta E_T$ 만큼이 변형에 쓰이게 된다.

2.2.2 유한요소해석에 의한 타격효율의 결정

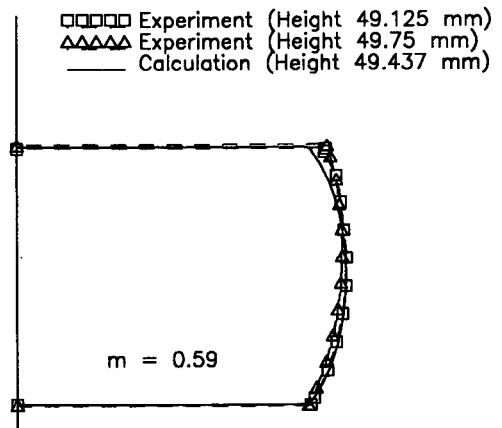
타격효율을 결정하기 위하여 사용된 카운터블로우해머와 모델해머의 제원을 Table 2에 나타내었다. 구리압축시험의 경우 전해동 시편 1개만을 해석 대상으로 하였기 때문에 실제 단조장비에 해당하는 값의 1/2인 값을 사용하였다(Table 2에서 괄호 안의 값). 또한 축대칭 형상이므로 중심축을 기준으로 1/2 영역만을 해석하였으며 실험에서 시편이 변형된 높이까지 계산 상에서도 변형이 되도록 타격효율을 변화시키면서 계산을 수행하여 두 높이가 같아지는 때의 타격효율을 그 타격 단계에서의

효율로 결정하였다.

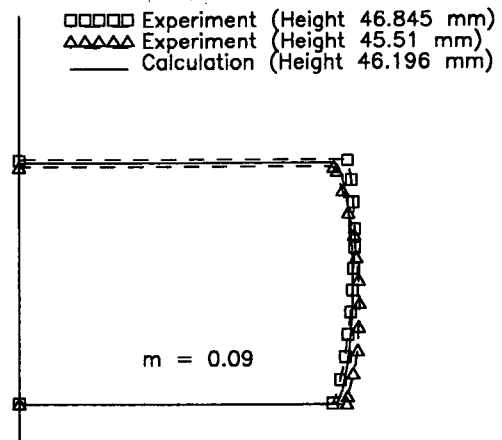
3. 결과 및 고찰

3.1 35 ton 카운터블로우해머의 단조능력

Fig. 3은 전해동 시편의 변형후 형상을 나타낸



(a) No lubrication (m=0.59)



(b) Lubricated with MoS<sub>2</sub> (m=0.09)

**Fig. 3** Deformed profile of copper specimens

**Table 3** Comparison of simulation conditions in previous<sup>(6)</sup> and present analysis

	Previous work <sup>(6)</sup>	Present work
Number of elements	48	102
Reduction in height for each calculation step	2.08% (m=0.59) 4.17% (m=0.09) of initial height	1% (m=0.09, 0.59) of initial height
Type of simulation	Press forging	Hammer forging
Remarks	Analysis condition A in this work	Analysis condition B in this work

**Table 4** Deformation energy calculated with different analysis conditions

Friction constant	m=0.59	m=0.09
DEFORM simulation with condition B	313,950 joule	338,800 joule
DEFORM simulation with condition A	296,940 joule	318,540 joule
Previous work <sup>(6)</sup>	288,000 joule	320,000 joule

것이며 계산된 시편의 형상과 실험에서 얻은 형상은 잘 일치하고 있다. 변형이 끝난 시편의 높이에 대한 계산값과 실험값(두 시편에 대한 평균값)이 같도록 타격효율을 결정하였으며 그 결과 무윤활인 경우의 타격효율은 0.897, MoS<sub>2</sub> 윤활인 경우는 0.968로서 비교적 큰 값을 나타내었다. 이것은 시편과 금형과의 접촉면적이 작고 금형의 형상도 평면이어서 시편과 금형 사이의 마찰이 큰 작용을 하지 못한 때문으로 여겨진다. 해머에서 변형된 무윤활 시편의 경우 두 개의 시편 모두 상부 금형과 접촉한 부분의 반경이 하부 금형과 접촉한 부분의 반경보다 크게 나타나고 MoS<sub>2</sub> 윤활시편의 경우에는 그 경향이 서로 반대로 나타나고 있다. 이와 같은 상하 비대칭의 원인으로서의 상하면에서의 윤활조건 차이, 금형의 편평도 등이 있을 수 있으나 이 연구의 범위에서는 그 원인을 찾을 수 없었다.

타격효율을 이용하여 변형에너지를 계산하면 무윤활인 경우 313,950 joule, MoS<sub>2</sub> 윤활인 경우 338,800 joule이며 이것이 공칭용량 350,000 joule인 카운터블로우해머의 실제 작업시 가용한 유효에너지이다. 이전의 연구<sup>(6)</sup>에서 계산된 변형에너지의 값은 각각 288,000 joule, 320,000 joule로서 본 연구에서 계산된 변형에너지보다 약 6~9% 정도 작다. 이것은 해석에 쓰인 요소망의 수, 시간 증분의 크

기 등이 다르기 때문이다. (Table 3) Table 4는 Table 3에 나타난 해석조건을 이용하여 본 연구에서 다시 계산한 변형에너지이며 참고문헌<sup>(6)</sup>의 조건으로 계산한 변형에너지의 값이 본 연구에서 계산된 값보다 작게 나타나고 있다. 이로부터 요소망의 수, 시간증분의 크기가 변형에너지의 계산에 중요한 영향을 끼침을 알 수 있다. 한편 마찰이 증가할수록 유효에너지가 감소하므로 유효에너지를 증가시키려면 단조시 금형과 소재 사이의 윤활상태를 좋게 하고, 금형과 소재 사이의 접촉 면적을 감소시키는 것이 바람직하다.

Fig. 4는 계산에 의한 하중-변위선도이다. 카운터블로우해머의 상부 램에 대해서만 변위가 표시되었기 때문에 전체 변위는 Fig. 4에 나타난 최종 변위의 2배이다.<sup>(7)</sup> 무윤활인 경우가 하중이 약간 크게 작용함을 알 수 있다.

### 3.2 단조공정 동안의 타격효율 변화

물리적 모의실험으로부터 구한 단조공정 중의 타격효율의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 금형과 소재 사이의 접촉면적이 증가함에 따라 효율은 직선적으로 감소한다. 빌렛의 형상비와 부피의 영향은 나타나지 않았으며 이들의 영향은 접촉면적의 영향 안에 흡수된 것으로 여겨진다. Fig. 5 중에 표시된

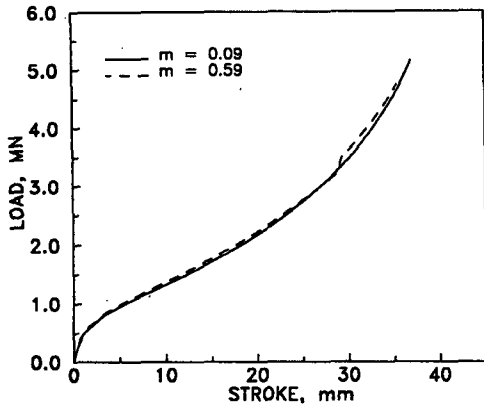


Fig. 4 Calculated load-stroke curve in copper upset test under 35 ton counterblow hammer. (Calculated load is a half of real one because only one specimen is considered in the FE analysis)

단조한계(forging limit)는 다음과 같이 계산하였다. 350 kJ 해머의 단조능력은 식(6)에 의하면 14,000 ton 유압프레스의 단조능력과 같다.<sup>(9)</sup>

$$L(\text{ton}) = 0.4E(\text{kg} \cdot \text{m}) \quad (6)$$

여기서,  $L$ 은 유압프레스의 최대 단조하중,  $E$ 는 해머의 공칭에너지이다. 한편 Schey<sup>(10)</sup>는 소재의 유동응력  $\sigma$ 와 단조품의 투영면적  $A$ 를 이용하여 단조하중  $L$ 을 예측할 수 있는 다음과 같은 경험식을 발표하였다.

$$L = CA\sigma \quad (7)$$

여기서,  $C$ 는 단조품의 형상 난이도로서 Table 5에 주어진 바와 같다.

4130강을 업셋 단조하는 경우,  $\sigma = 93.1 \text{ MPa}$ ,  $C = 2.5$  and  $L = 14,000 \text{ ton}$ 이라 하면 위의 식으로부터 최대 단조 가능면적  $5.89 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 를 얻을 수 있다. 모델에서의 축척이 1/12이므로 플라스틱신에 대한 최대 단조 가능면적은  $4093 \text{ mm}^2$ 이 되고 이것이 Fig. 5에 표시된 단조한계이다. 이 값은 실험으로부터 얻은 효율이 0이 되는 지점과 일치하며 더 이상의 단조가 불가능함을 의미한다. 식(7)에 의한 최대 단조 가능면적과 실험에서 얻은 최대 단조 가능면적이 잘 일치하므로 식(7)로부터 타격효율은 소재의 유동응력과 단조품의 형상 난이도에 의존할 것이라는 것을 추론할 수 있다. 즉, 재료가 연할수록 타격효율 직선 또는 곡선은 오른쪽으로 움

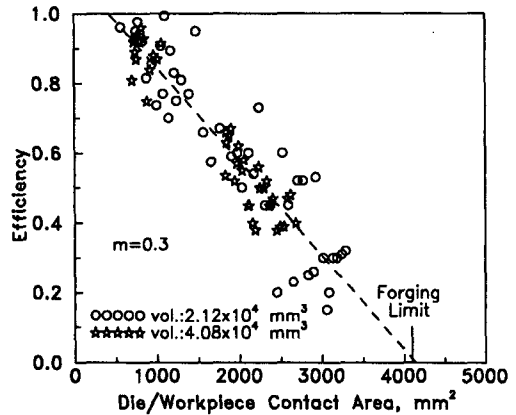


Fig. 5 The characteristic curve for the blow efficiency of the hammer

Table 5 Shape complexity factor for the estimation of the forging load

Process	Shapes	Value of C
Upsetting		1.2~2.5
Closed-die forging	Simple shapes without flash	3~5
	Complex shapes with flash	8~12

직여 단조 가능면적이 증가할 것이다. 마찬가지로 동일한 재료에 대해서 단조품 형상이 복잡해지면 효율은 급격히 감소하여 단조 가능면적이 줄어든 것이다.

#### 4. 결 론

해머의 타격효율이 단조공정 동안에 어떻게 변하는가를 알아보기 위하여 35 ton 카운터블로우해머에서 구리업셋시험을 행하고 모델해머에서 플라스틱신의 업셋단조를 행하였으며 이러한 공정을 유한요소해석함으로써 타격효율을 결정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 35 ton 카운터블로우해머의 타격효율은 마찰상수가 0.09인 경우 0.968, 0.59인 경우 0.897로서 금형과 소재 사이의 마찰이 증가하면 해머의 유효에너지는 감소하였다.

(2) 물리적 모의실험 결과, 타격효율은 일정한 마찰조건에서는 금형과 소재 사이의 접촉면적이 증가할수록 감소하였으며 소재의 부피나 형상비의 영향은 나타나지 않았다.

(3) Schey의 경험식에 의한 단조한계와 물리적 모의실험에서 얻은 단조한계는 서로 잘 일치하였으며 이 경험식으로부터 타격효율은 재료의 유동응력과 단조품의 형상 난이도에 의해서도 영향을 받을 수 있다.

(4) 해머의 타격효율을 향상시키기 위해서는 금형과 소재 사이의 윤활상태를 좋게 하고 금형과 소재 사이의 접촉 면적을 감소시켜 마찰에너지 손실을 최소화하는 것이 바람직하다.

### 참고문헌

- (1) DEFORM System User's Manual, 1990, Ver. 2.0, Battelle Columbus Division.
- (2) Watermann, D., 1962, "Bestimmung des Arbeitsvermögens von Hämmer und Pressen mit Kupferzylindern," *Werkstattstechnik*, Vol. 52, pp. 95~101.
- (3) Altan, T., Nichols, D.E. and Henning, H. J., 1970, "Use of Standardized Copper Cylinders for Determining Load and Energy in Forging Equipment," *A Study of the Mechanics of Closed-Die Forging*, Report No. AMMRC CR 70-18, Battelle Memorial Inst., Chap. 9.
- (4) 이종수, 홍성석, 이규준, 1985, "링 압축시험시 중립반경 측정에 의한 마찰계수 추정방법," '85년도 대학기계학회, 추계학술대회 초록집, pp. 114~117.
- (5) 조남춘, 이성호, 홍성석, 이종수, 1993, "예비성형체 설계에 의한 축대칭 대형 단조품 성형," 한국소성가공학회지, 제2권, 제3호, pp. 15~26.
- (6) 이근안, 임용택, 이종수, 홍성석, 1992, "모델 재료를 이용한 축대칭형 돔형상의 폐쇄 단조 성형 연구," 대한기계학회논문집, 제16권, 제11호, pp. 2082~2089.
- (7) *Hammer Forging Simulation*, 1992, DEFORM System Technical Note, No. 1, Scientific Forming Technologies Corp.
- (8) 유요한, 홍성석, 이종수, 1987, "실험 및 수치 해석에 의한 C/B Hammer의 용량 추정," '87년도 한국정밀공학회, 추계학술대회 초록집, pp. 45~49.
- (9) Choi, S. H. and Dean, T. A., 1984, "Computer Aids to Data Preparation for Cost Estimation," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 24, pp. 105~119.
- (10) Schey, J. A., 1977, *Introduction to Manufacturing Processes*, McGraw-Hill, p. 124.