

〈논 문〉

고속 타격단조시 발생하는 편심부하의 유한요소해석

유 요 한* · 양 동 열*

(1996년 12월 23일 접수)

Finite Element Analysis of Eccentric Loading in High-Velocity Impact Forging

Yo-Han Yoo and Dong-Yol Yang

Key Words : High-Velocity Impact Forging(고속 타격단조), Eccentric Loading(편심부하), Finite Element Analysis(유한요소해석), Blow Efficiency(타격효율)

Abstract

The high-velocity impact forging process with eccentric loading condition is analyzed using the explicit time integration finite element method. In order to consider the strain hardening, strain rate hardening and thermal softening effects, which are frequently observed in high-velocity deformation phenomena, the Johnson-Cook constitutive model is applied to model the workpiece. It is assumed that the material response of the dies is elastic in the study. As a result of the eccentric loading simulation, it is found that the increase of the eccentric ratio and the allowable tilting angle cause the decrease of the maximum forging load and the blow efficiency, and it is also found that the forging load and the blow efficiency generated in the high-velocity impact forging process with three-dimensional geometry can be obtained efficiently.

1. 서 론

단조해머와 같은 에너지 제약형 장비(energy-restricted machine)를 사용한 고속 타격단조공정(high-velocity impact forging process)은 오랫동안 사용되어 온 기본적인 소성가공방법이지만 지금도 열간단조분야에서는 중요한 위치를 차지하고 있다.⁽¹⁾ 그러나 고속 타격단조시 발생하는 금형과 단조품 사이의 접촉 및 분리현상 등 복잡한 물리적 현상의 특성상 정량적 해석이 어렵기 때문에 관련 연구가 최근까지 미진한 상태에 놓여 있다.^(2~13) 해머단조공정 해석과 관련된 기존의 주요 연구결과를 살펴보면 다음과 같다.

1960년대 중반 Watermann⁽²⁾은 단조해머를 이용한 다양한 실험을 통하여 타격단조에서 발생하는 여러 공정변수의 영향을 조사하였다. 특히 타격단조공정의 특성을 나타내는 주요 인자로 타격 효율을 선정하여 이 분야의 규명에 많은 노력을 집중하였다. 그 결과 타격단조시 타격효율 추정에 사용되는 몇 개의 실험식을 제시하였다. 또한 Lippmann⁽³⁾은 고속 단조시 발생하는 현상에 대한 이론적 해석을 시도하였다.

Organ⁽⁴⁾은 타격단조공정에 사용되는 장비의 용량을 산정하는 방법을 체계적으로 정리하였으며, 여기서 제시된 장비용량 산정법이 현재까지도 실험방법의 기준이 되고 있다. Sturgess와 Jones⁽⁵⁾는 슬랩방법(slab method)을 사용하여 축대칭 문제와 평면변형(plane strain) 문제의 고속 압축시 발생하는 관성효과에 대하여 연구하였으며, 관성효과가

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

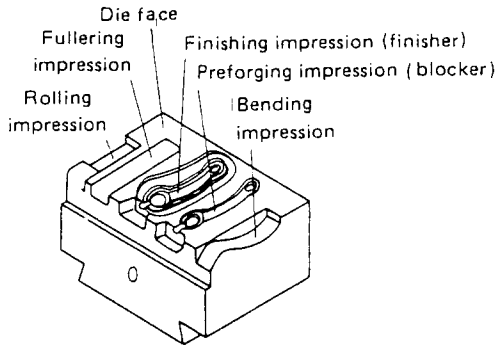


Fig. 1 Multistage hammer die

영향을 미치기 시작하는 영역을 무차원 단조하중의 형태로 추정하였다. Biswas와 Travis⁽⁶⁾는 실험용 고속 타격장비를 사용한 링(ring) 형상 시편의 고속 압축실험을 수행하여 정적 압축실험 결과와 비교하였다. Tirosh와 Kobayashi⁽⁷⁾ 그리고 Tirosh와 Iddan⁽⁸⁾은 상계해방법(upper bound method)과 하계해방법(lower bound method)을 이용하여 고속 단조와 압출시 발생하는 동적거동에 대하여 해석하였다.

Benuzzi와 Soavi⁽⁹⁾는 금형을 단상체로 가정하고 시편을 완전 강소성체(rigid perfectly plastic material)로 가정한 후 슬랩방법을 사용하여 해석을 수행한 후 타격속도와 마찰조건 그리고 시편의 세장비 등이 공정에 미치는 영향을 조사하였다. 해석시 금형의 거동을 무시한 Sturgess의 해석결과, Tirosh의 해석결과와는 달리 Benuzzi와 Soavi의 연구 결과는 금형의 변형 및 감속을 고려하였다는 점에서 실제 타격단조공정에 가깝다고 볼 수 있으나 해석방법이 슬랩방법에 한정되어 있고 해석시 많은 가정이 도입되는 등의 문제점때문에 실제 타격단조공정 해석에 적용되기는 어렵다.

1970년대 중반 이후 Tobias 등은 고속 타격단조공정에 대한 일련의 실험적인 연구들^(10,11)을 통하여 타격시 발생하는 진동, 소음의 세기가 최대 하중과 타격효율에 미치는 영향에 대하여 밝히는 등 고속 타격단조시 발생하는 기본적 물리현상에 대한 이해를 도모하였다. 특히 1979년 발표된 Vajpayee와 Tobias의 연구결과⁽¹²⁾에서 고속 타격단조공정을 진동문제로 수식화하여 입력에너지의 크기, 타격속도의 영향 등에 따른 타격효율의 변화를 해석하였다. 그러나 해석의 편의를 위하여 시간에 따른 하중의 변화를 선형적으로 미리 가정하였고, 단조품의 형

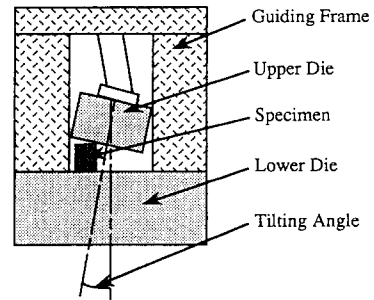


Fig. 2 Schematic diagram of eccentric loading

상도 실린더 형상으로 제한되어 있는 등 해석결과를 실제 공정 해석에 적용하기에는 많은 제약이 있었다.

1983년 Haller⁽¹³⁾는 단조해머의 타격현상을 몇 개의 특징적인 시기로 분류한 후, 각 시기에 대한 기하학적 적합조건과 에너지 평형을 고려한 반복계산(iteration)을 통하여 최대 하중을 계산하였다. 그러나 해석의 특성상 이 방법도 단조품의 형상이 실린더 형상으로 제한되어 있고 수식전개를 위하여 과도한 가정이 도입되어 있는 등의 문제때문에 실제 공정의 정밀해석에는 적용키 어렵다고 보여진다.

이와 같이 고속 타격단조분야의 현재까지 연구결과를 살펴보면 해석대상이 실린더와 같은 2차원 형상에 한정되어 있는 등 연구결과를 실제 공정 해석에 적용하기에 매우 부족하다는 것을 알 수 있으며 타격시 발생하는 최대 하중과 타격효율을 동시에 구하는 체계적인 연구결과가 필요하다는 것을 알 수 있다.

최근 저자들은 외연적 시간적분 유한요소법(implicit time integration finite element method)을 이용하여 타격효율과 타격력을 동시에 구할 수 있는 프로그램을 개발하여 3차원 형상의 다타격단조공정(multi-blow forging process) 해석에 적용하여 입력운동에너지, 마찰조건, 단조품 형상 등 공정변수의 변화가 타격단조 특성에 미치는 영향에 대하여 연구한 바 있다.^(14,15)

복잡한 형상의 열간 타격단조시 원하는 형상을 한번의 타격을 통하여 성형하기 곤란하므로 여러 차례의 체적배분과정(bending, rolling, fullering → blocker)을 거쳐 최종 타격(finisher)을 수행한다. 이때 가장 큰 타격력이 발생하는 finisher를 금형의 중앙에 위치시키고 나머지 체적배분과정을 금형의

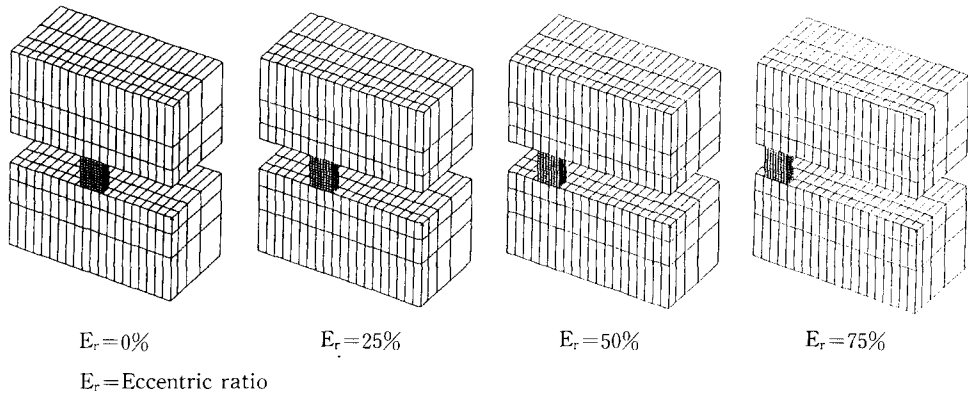


Fig. 3 Initial mesh for eccentric loading simulation

양쪽측면 부위에 배치시킨다. Fig. 1은 이러한 금형설계의 대표적 예이다.⁽¹⁾ 이때 금형내 타격 위치의 변화에 따라 편심부하(eccentric loading)의 정도가 달라지며, 타격 특성도 변한다. 편심량이 큰 경우 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 타격시 금형이 안내면(guide frame)으로부터 기울어져 큰 기울어짐각(tilting angle)을 발생시킬 수 있다.

본 논문에서는 고속 단조공정에서 발생하는 편심부하문제에 대한 특성 규명을 위하여 기울어짐각의 변화에 따른 타격력과 타격효율 그리고 변형 특성의 변화를 살펴보기 위하여 외연적 시간적분 유한요소법을 이용한 수치해석을 수행한 후 해석결과를 분석하여 보고자 한다.

2. 프로그램의 구조 및 구성방정식

외연적 시간적분 유한요소법^(16,17)은 운동방정식을 직접적으로 적분하여 시간에 따른 물체의 거동을 해석한다. 일반적으로 많이 사용되는 내연적 시간적분 유한요소법(implicit time integration finite element method)^(18,19)에서는 강성행렬을 사용하여 전체 계(global system)의 거동을 해석하지만 외연적 시간적분 유한요소법에서는 전체 강성행렬을 계산에 사용하지 않고 매시간 단계마다 요소응력으로 부터 각절점의 집중질량(lumped mass)에 대한 운동학적 구속조건(kinematic constraint)을 만족하는 가속도를 구하고 외연적 시간적분을 통하여 다음시간 단계의 각 절점에서의 속도와 변위를 직접 계산한다. 이 값들로부터 각 요소들의 변형구배(deformation gradient)와 속도구배(velocity gradient)를 구하고 이것을 이용하여 주어진 구성방정식(con-

stitutive equation)으로부터 각 요소에 대한 응력을 구하게 된다. 이상에서 구한 해를 바탕으로 각 절점에 대한 가속도를 구하면 다시 다음 시간 단계로 넘어가게 된다.

본 논문에서는 금속계열 재료의 고속 변형시 재료의 거동에 영향을 미치는 세가지 주요 인자인 변형률 경화효과(strain hardening effect), 변형률속도 경화효과(strain rate hardening effect), 열적 연화효과(thermal softening effect) 등을 가장 효과적으로 반영할 수 있는 Johnson-Cook 모델⁽²⁰⁾을 구성방정식으로 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n] \cdot \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}\right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m \right] \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 항복응력(yield stress), $\bar{\epsilon}$ 는 등가 소성변형률(equivalent plastic strain), $\dot{\bar{\epsilon}}$ 는 등가 소성변형률속도(equivalent plastic strain rate), $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 는 기준 변형률속도 그리고 A, B, C, n, m 은 재료 상수이다.

한편 열전도(heat conduction)를 무시하고 단열 과정으로 가정할 때 재료내 온도의 변화 ΔT 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta T = \int_0^t x \rho C_p \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} dt \quad (2)$$

여기서, x 는 소성변형에 의한 에너지가 열로 변환되는 정도를 나타내는 상수이고, C_p 는 재료의 비열(specific heat)이다.

Table 1 Material constants for eccentric loading simulation

	Material model	Material constants
Specimen (4340 steel)	Elastic-Viscoplastic temperature dependent material model	Shear modulus $G=81.6$ GPa
		Poisson's ratio $\nu=0.3$
		Density $\rho=7.83$ g/cm ³
		Strain hardening properties $A=792.0$ MPa $B=510.0$ MPa $n=0.26$
		Strain rate hardening properties $C=0.014$ $\dot{\epsilon}=10^{-6}$ μsec^{-1}
		Temperature softening properties $m=1.03$ $T_{\text{melt}}=1520^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{room}}10^{\circ}\text{C}$ $\chi=0.9$ $C_p=477.0$ J/kg $^{\circ}\text{C}$
Die (Tool steel)	Elastic material model	Young's modulus $E=211.4$ GPa
		Poisson's ratio $\nu=0.3$
		Density (Upper die) $\rho=7.83(\times 10)$ g/cm ³
		Density (Lower die) $\rho=7.83(\times 200)$ g/cm ³

3. 수치해석 모델링

고속 타격단조시 편심부하의 영향을 규명하기 위하여 시편을 편심정도가 다르게 금형 위에 위치시킨 후 외연적 시간적분 유한요소법으로 해석하였다. 금형의 중심으로부터 시편이 놓여진 위치까지의 편심정도를 표시하기 위하여 편심비율(eccentric ratio, E_r)을 금형의 중심으로부터 금형 모서리까지의 최소 거리(L_d)에 대한 금형의 중심으로부터 시편의 중심까지의 거리(L_s)의 비로 다음과 같이 정의하였다.

$$E_r(\%) = L_s L_d \times 100 \quad (3)$$

편심정도에 따른 타격의 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 3에 나타난 4가지 편심비율에 대하여 계산을 수행하였다. 이 때 금형과 시편의 크기는 모두 동일하게 모델링하였고, 시편의 위치만을 변화시켰다. 시편과 금형의 형상은 직육면체로 모델링하였으며 시편의 크기는 48 mm×48 mm×높이 72 mm 이고, 금형의 크기는 상하 모두 360 mm×360 mm×높이 191.6 mm이다. 계산조건이 좌우대칭이므로 절반만 모델링하여 계산에 사용하였다. 금형과 시편 사이의 마찰은 열간단조에서의 그라파이트(gra-

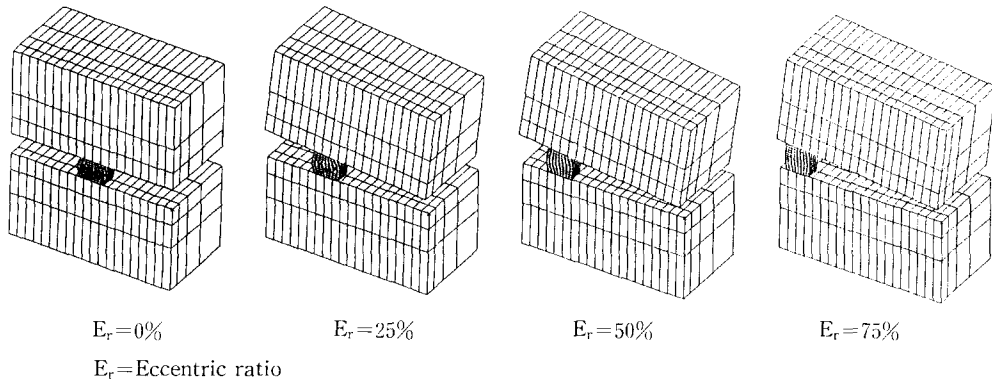


Fig. 4 Comparison of final deformed configurations in eccentric loading simulation (in the case of no constraint condition in allowable tilting angle)

phite) 율활조건을 가정하여 미찰계수(coefficient of friction) $\mu=0.2$ 로 설정하였다.⁽²¹⁾

실제 공정에서 안내때문에 편심타격에 의한 금형의 기울어짐현상이 제약을 받으므로 허용 기울어짐각(allowable tilting angle, ATA)을 설정하여 이 각도에 도달하면 상부 금형이 안내면과 충돌하여 원위치로 되돌아가면서 낙하되도록 모델링하였다. 4가지 편심비율(0%, 25%, 50%, 75%)과 4가지 허용 기울어짐각(0° , 0.9° , 1.8° , 비구속조건)을 조합하여 16가지 계산조건에 대하여 해석을 수행하였다.

해석 절차를 살펴보면 상부 금형을 정지해 있는 하부 금형과 시편에 6 m/s의 초기 속도로 낙하시켜 타격을 가한 후 입력에너지를 모두 소실하고 완전히 분리될 때까지 계산을 수행한다. 이 때 초기 운동에너지가 35 kJ이 되도록 상부 금형의 밀도를 10배 증가시켜 사용하였으며, 상부 금형에 대한 하부 금형의 무게비가 실제 장비에서와 마찬가지로 20배가 되도록 하부 금형의 밀도는 200배 증가시켜 사용하였다.

시편의 재료는 AISI 4340 강을 사용하였으며 열간 단조를 가정하여 초기 온도는 950°C 로 설정하였다.⁽¹⁾ AISI 4340 강의 재료물성은 참고문헌⁽²⁰⁾의 실험데이터를 사용하였으며, 계산에 사용된 재료상수 값들은 Table 1에 정리하였다.

4. 수치해석 결과 및 고찰

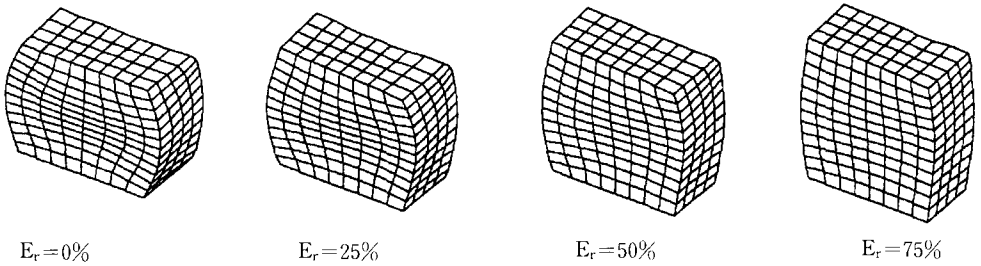
상부 금형의 기울어짐을 자유롭게 허용한 경우, 일회 타격을 수행한 후 상부 금형이 시편으로부터

완전히 분리되어 얻어진 최종 변형형상은 Fig. 4와 같다. 편심의 영향이 없는 경우 좌우대칭의 변형형상을 얻을 수 있으나 편심부하가 가해지는 경우 상부 금형이 기울어지면서 좌우비대칭 변형을 이루는 것을 관찰할 수 있다. 이 때 하부 금형은 상부 금형에 비하여 상당히 무겁기 때문에 타격에 대하여 매우 둔감한 반응을 보인다.

시편의 변형형상을 자세히 살펴보기 위하여 시편 부분만을 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5를 살펴보면 편심비율이 커짐에 따라 시편의 최종 높이가 높아져 시편이 유효 변형에너지를 덜 흡수했음을 알 수 있다. 즉, 편심비율이 커짐에 따라 타격효율이 감소한다는 사실을 짐작할 수 있다.

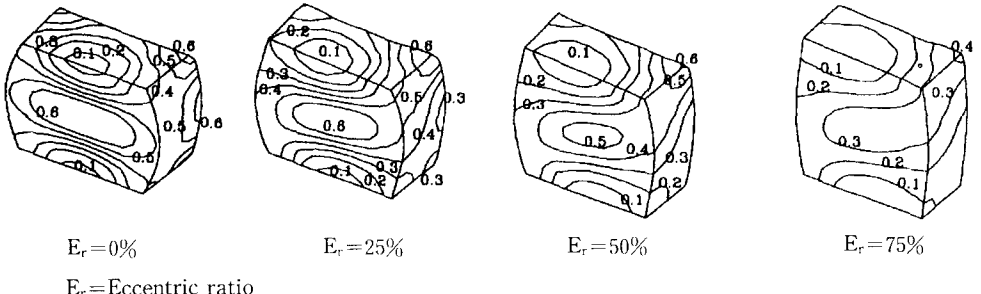
그러나 Fig. 5에서 편심타격에 의한 비대칭 변형을 눈으로 확인하기 어렵다. 시편의 비대칭 변형을 상세히 살펴보기 위하여 등가 소성변형률 분포를 Fig. 6에 도시하였다. 편심의 영향이 없는 경우 등가 소성변형률 분포가 완전한 좌우대칭형태를 나타내는데 비하여 편심부하가 가해지는 경우 시편이 비대칭 변형형태를 보이는 것을 관찰할 수 있다.

상부 금형의 기울어짐을 자유롭게 허용한 경우 접촉시간에 따른 타격력과 소성변형에너지 그리고 운동에너지의 변화를 각각 Fig. 7과 Fig. 8 그리고 Fig. 9에 도시하였다. 타격력과 소성변형에너지 그리고 운동에너지 모두 2 ms 정도까지는 편심비율에 상관없이 같은 거동을 보이다가 이후 각각 다른 특성을 보였으며 편심의 영향이 없는 경우가 타격력과 소성변형에너지 모두 가장 크게 나타났다. 대체적으로 편심비율이 커짐에 따라 타격력, 소성변형에너지 그리고 접촉시간이 모두 감소하는 경향을



$E_r=0\%$ $E_r=25\%$ $E_r=50\%$ $E_r=75\%$

Fig. 5 Comparison of final deformed configurations of the workpiece in eccentric loading simulation (in the case of no constraint condition in allowable tilting angle)



$E_r=0\%$ $E_r=25\%$ $E_r=50\%$ $E_r=75\%$
 E_r =Eccentric ratio

Fig. 6 Comparison of distributions of final equivalent plastic strain of the workpiece in eccentric loading simulation (in the case of no constraint condition in allowable tilting angle)

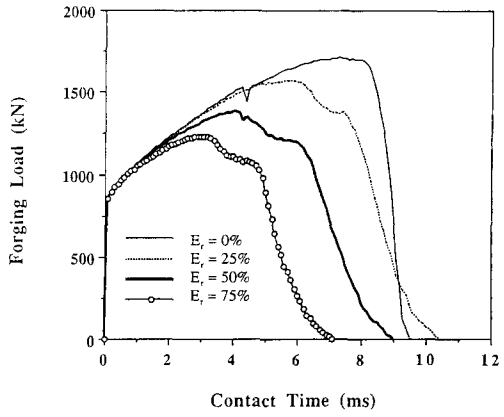


Fig. 7 Time history of forging load in eccentric loading simulation (in the case of no constraint condition in allowable tilting angle)

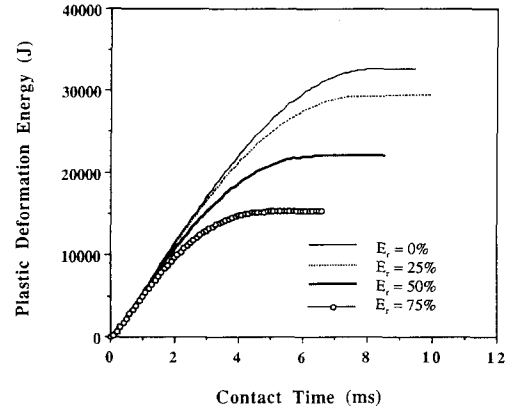


Fig. 8 Time history of plastic deformation energy in eccentric loading simulation (in the case of no constraint condition in allowable tilting angle)

보이고 있다. 그러나 편심비율이 25%일 때의 접촉 시간이 편심의 영향이 없는 경우의 접촉 시간보다 길게 나타났으나 타격력이 더 낮아 결과적으로 소성변형에너지는 더 낮게 나타났다. 편심이 없는 경우 최대 타격력은 1,700 kN으로 대략 170톤 유압 프레스의 최대 성형력에 해당되는 것으로 나타났다. 그리고 소성변형에너지가 증가함에 따라 운동

에너지가 지속적으로 감소하며, 이로부터 고속 타격단조과정을 통하여 초기의 운동에너지가 소성변형에너지로 전환된다는 사실을 Fig. 8과 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 해석결과 얻어진 편심비율과 허용 기울어짐각에 따른 타격효율의 변화를 Fig. 10에 도시하였다. 허용 기울어짐각이 영일 때, 즉 금형과 안내면 사이

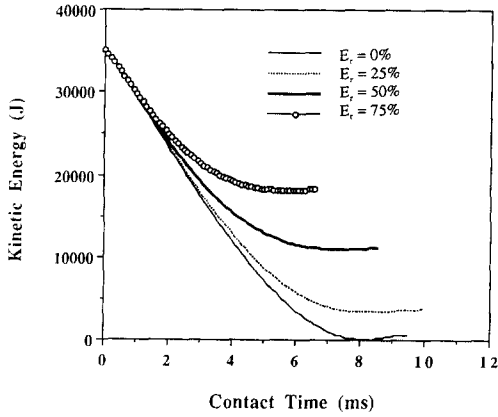


Fig. 9 Time history of kinetic energy in eccentric loading simulation (in the case of no constraint condition in allowable tilting angle)

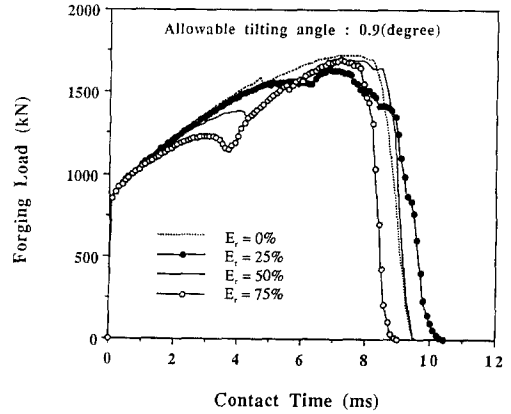


Fig. 11(a) Time history of forging load in eccentric loading simulation in the case of allowable tilting angle of 0.9 degree

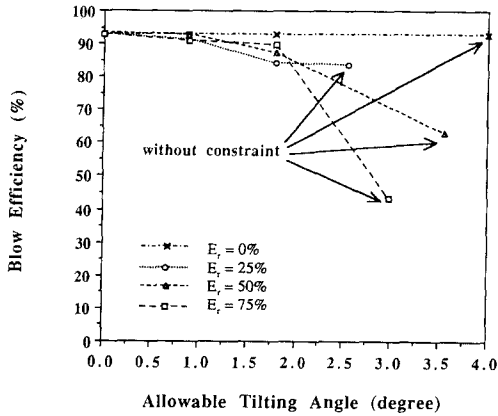


Fig. 10 Change of blow efficiency according to variation of eccentric ratios and allowable tilting angles in eccentric loading simulation

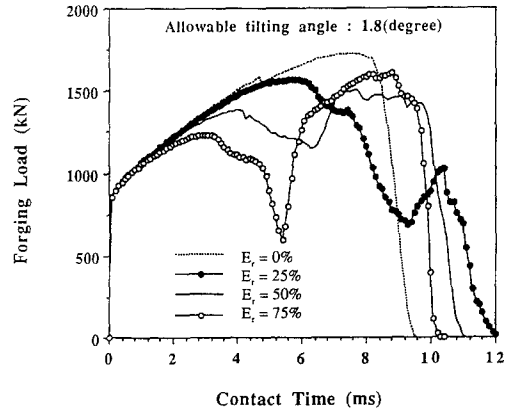


Fig. 11(b) Time history of forging load in eccentric loading simulation in the case of allowable tilting angle of 1.8 degree

의 간극(clearance)이 전혀없이 완벽하게 금형이 안내된다면 편심비율에 상관없이 일정한 타격효율을 보인다. 그러나 이것은 이상적인 경우이며 실제로 장비에 따라 다소간 허용 기울어짐각이 존재하므로 편심비율에 따라 타격효율이 감소하게 된다. Fig. 10을 살펴보면 편심비율과 허용 기울어짐각이 커질수록 타격효율이 감소하는 경향을 보인다. 그러므로 타격효율을 증가시키기 위해서는 금형설계시 편심비율을 가능한 줄이도록 하고 장비 자체의 허용 기울어짐각이 작아지도록 조치하여야 한다는 것을 알 수 있다.

허용 기울어짐각이 존재하는 경우의 타격 특성을 알아보기 위하여 허용 기울어짐각이 0.9°와 1.8°일

때 접촉시간에 따른 타격력의 변화를 Fig. 11의 (a)와 (b)에 도시하였다. Fig. 11을 살펴보면 접촉시간이 증가함에 따라 하중이 증가하다가 갑자기 감소되었다가 다시 증가하는 점프시점이 존재한다. 이것은 편심부하에 의하여 상부 금형이 기울어지면서 타격력이 감소하다가 허용 기울어짐각에 도달하여 안내면에 충돌한 후, 다시 상부 금형이 기울어지기 이전의 제 위치로 되돌아오면서 시편에 가해지는 타격력이 증가되기 때문에 발생하는 현상이다. 전반적으로 편심비율이 클수록 점프현상이 빨리 발생되며 더 크게 나타난다. 그리고 허용 기울어짐각이 클 때 다소 늦게 발생되나 하중의 감소량은 더 큰 것을 알 수 있다. 편심타격시 이 점프위

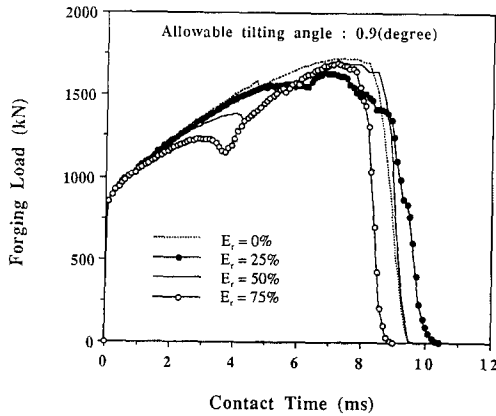


Fig. 12 Time history of forging load for various allowable tilting angles in the case of eccentric ratio of 50%

치에서의 하중 감소현상이 시편에 전달되는 유효 소성변형에너지를 감소시켜 결과적으로 Fig. 10에 나타난 타격효율의 감소를 초래하는 주요 원인으로 생각된다. 또한 이 접촉시점에서 유효 가공력은 감소하는 대신 상부 금형이 안내면에 가하는 측면력 (lateral force)은 증가하여 장비 구조물에 손상을 줄 것으로 판단되므로 편심비하에 의한 유효 가공력의 감소는 여러 가지 측면에서 바람직하지 못하다.

편심비율이 50%일 때 허용 기울어짐각의 변화에 따른 타격력의 변화를 Fig. 12에 도시하였다. 허용 기울어짐각이 3.6°일 때 상부 금형이 안내면과 충돌하지 않으므로 기울어짐각에 대한 제한이 없는 경우에 해당되며 현저한 점프현상은 발생되지 않는다. 허용 기울어짐각이 0°일 때 기울어짐각에 대한 제한이 없는 경우에 비하여 타격력과 접촉시간이 모두 증가하므로 유효 소성변형에너지가 증가하여 Fig. 10에서 보는 바와 같이 타격효율이 높아지게 된다. 허용 기울어짐각이 0.9°인 경우 타격 초기에는 기울어짐각에 대한 제한이 없는 경우의 하중곡선을 따라 가지만 4 ms 이후에는 그 하중곡선에서 벗어나 허용 기울어짐각이 0°인 경우의 하중곡선쪽으로 접근하는 현상을 보인다. 이 경향은 허용 기울어짐 각이 1.8°인 경우에도 동일하게 발생되지만 기울어짐각에 대한 제한이 없는 경우의 하중 곡선으로부터 벗어나는 시점이 6 ms로 더 늦고 허용 기울어짐각이 0°인 하중곡선에 완전히 접근하지 못하고 접촉시간이 다소 증가하는 경향을 보인다.

5. 결 론

외연적 시간적분 유한요소법을 이용하여 편심 비율과 허용 기울어짐각을 변화시켜가며 고속 타격단조공정을 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 편심비율과 허용 기울어짐각을 고려하면서 3차원 고속 타격단조공정을 성공적으로 해석하여 짧은 시간동안에 발생하는 복잡한 물리적 현상들을 체계적으로 분석할 수 있는 가능성을 제시하였다.

둘째, 외연적 시간적분 유한요소법을 이용한 수치해석을 통하여 타격효율과 타격력을 동시에 계산할 수 있다는 사실을 보였다.

셋째, 편심비율과 허용 기울어짐각이 증가할수록 타격효율이 감소하므로 타격시 유효 소성변형에너지를 증가시키기 위해서는 금형설계시 편심부하를 최소화시켜야 한다.

넷째, 편심비율과 허용 기울어짐각이 증가할수록 유효 가공력은 감소하고, 안내면 충돌에 의한 측면력은 증가하여 제품 성형성과 장비유지 보수측면에서 바람직하지 않다.

참고문헌

- (1) Lange, K., 1985, *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill.
- (2) Watermann, H. D., 1963, "Der Schlagwirkungsgrad in Hammern und Schwungradspindelpresen," *Industrie-Anzeiger*, Vol. 77, Sept. 24, pp. 1727~1738.
- (3) Lippmann, H., 1966, "On the Dynamics of Forging," *Proc. 7th Int. M. T. D. R. Conf.*, Birmingham, Vol. 1, pp. 53~66.
- (4) Organ, A. J., 1967, "The Calibration of High Energy-Rate Impact Forming Machines," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 7, pp. 325~349.
- (5) Sturgess, C. E. N. and Jones, M. G., 1971, "Estimation of Dynamic Forces in High Speed Compression Using a Free Flight Impact Forging Device," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 13, pp. 309~322.
- (6) Biswas, S. and Travis, F. W., 1971, "Deformation Patterns of Annular Rings of Varying

- Geometry Subject to Static and Dynamic Axial Compression," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 11, pp. 235~249.
- (7) Tirosch, J. and Kobayashi, S., 1976, "Kinetic Dynamic Effects on the Upper Bound Loads in Metal Forming Processes," *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, Vol., pp. 314~318.
- (8) Tirosch, J. and Iddan, D., 1994, "The Dynamics of Fast Metal Forming Processes," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 42, No. 4, pp. 611~628.
- (9) Benuzzi, E. and Soavi, F., 1985, "A Theoretical Investigation for High Speed Cold Forging of Short Metal Cylinders between Two Large Elastic Tools," *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 107, pp. 266~274.
- (10) Gregorian, V., Sadek, M. M. and Tobias, S. A., 1976, "Noise Generated by a Laboratory Drop Hammer and Its Interrelation with the Structural Dynamics and Process Parameters," *Int. J. Mach. Tool des. Res.*, Vol. 16, pp. 301~318.
- (11) Vajpayee, S., Sadek, M. M. and Tobias, S. A., 1982, "Prediction of Linear Noise - Load Relationship for Impact Forming Machines," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 22, No. 1, pp. 1~6.
- (12) Vajpayee, S., Sadek, M. M. and Tobias, S. A., 1979, "The Efficiency and Clash Load of Impact Forming Machines to the Second Order of Approximation," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 19, pp. 237~252.
- (13) Haller, H. W., 1983, "The Force in a Die Forging Hammer," *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 105, pp. 270~275.
- (14) Yoo, Y. H. and Yang, D. Y., 1997, "Finite Element Modelling of High-Velocity Impact Forging Process by the Explicit Time Integration Method," *J. Mater. Process Technol.*, Vol. 63, pp. 718~723.
- (15) Yoo, Y. H., Yang, D. Y. and Chung, D. T., 1996, "Numerical Simulation of Multi-Blow Forging Processes Using the Explicit Time Integration Finite Element Method," *Engineering Computations*, Accepted for publication.
- (16) 유요한, 정동택, 1991, "엑스플리시트 시간적분 유한요소법을 이용한 고속 성형해석 (I) : 마찰 및 관성효과," 대한기계학회논문집, 제15권, 제1호, pp. 1~10.
- (17) 유요한, 정동택, 1991, "엑스플리시트 시간적분 유한요소법을 이용한 고속 성형해석 (II) : 고속 압연해석," 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, pp. 1552~1562.
- (18) Bathe, K. J., 1982, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (19) 유요한, 박 근, 양동열, 1996, "관성효과가 고려된 강소성 유한요소법을 이용한 고속변형해석," 대한기계학회논문집 (A), 제20권, 제5호, pp. 1562~1572.
- (20) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1983, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain Rates and High Temperature," *Proc. of 7th Int. Symp. on Ballistics*, pp. 541~547.
- (21) Schey, J. A., 1983, *Tribology in Metalworking : Friction, Lubrication and Wear*, Metals Park, OH, American Society of Metals.