

에어-드롭 해머와 카운터블로 해머 프레스 단조공정의 기계진동 비교해석 Comparative Analysis of Mechanical Vibrations of an Air-Drop Hammer and a Counterblow Hammer in Forging Process

김수태^{1*} · 최영휴¹ · 주경진²

S. T. Kim, Y. H. Choi, G. J. Ju.

Received: 28 Jul 2022, Revised: 30 Aug 2022, Accepted: 12 Oct 2022

Key Words : Air-Drop Hammer(에어-드롭 해머), Counterblow Hammer(카운터블로 해머), Forging Efficiency(단조 효율), Mass Ratio(질량비), Momentum Ratio(운동량비)

Abstract: Air-drop hammer press and counterblow hammer press are widely used power-drop forging hammers employing different forging blow mechanisms. It is important and necessary to analyze mechanical vibrations of these two different hammers in their forging processes in order to develop high performance forging hammers. In this study, these two forging hammers were mathematically modelled as mass-spring-damper systems. For these two different types of forging hammers, the forging efficiency and mechanical vibrations due to hammer forging blow were theoretically analyzed and compared. The force transmitted to the ground was also determined and compared. Especially, effects of mass ratio and restitution coefficient on forging efficiency were investigated.

1. 서 론

드롭 해머 단조기는 중력이나 동력에 의해 낙하하는 해머가 앤빌(Anvil)에 고정된 금형을 타격하는 충격에너지에 의하여 단조가공이 이루어진다. 드롭-해머 단조기는 기본적으로 중력-드롭 해머(Gravity-drop hammers)와 동력-드롭 해머(Power-drop hammers)의 두 가지 형태가 있다^[1].

드롭 해머 단조기는 램이 앤빌을 직접 타격하므로 진동과 소음이 크게 발생 된다. 이러한 드롭 해머 프레스의 단점을 개선한 것이 상부 램과 하부 램의 충격에너지에 의하여 단조가공이 이루어지는 카운터블로 해머 프레스이다. 본 연구에서 해석하고자 하는

에어-드롭 해머 프레스와 카운터블로 해머 프레스의 구성 부품을 포함한 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 에어-드롭 해머 프레스는 기계본체, 앤빌(Anvil), 금형이 장착된 램, 그리고 스프링과 감쇠기로 된 마운팅 유니트로 구성된다. 에어-드롭 해머는 상부의 실린더에 압력 공기가 유입되면 램은 공기 압력과 중력에 의하여 낙하하여 앤빌에 장착된 금형에 충돌하고 이 타격력에 의하여 단조가공이 이루어진다. 카운터블로 해머 프레스는 상부 및 하부 램과 기계 본체, 앤빌, 마운트 유닛, 그리고 상부 및 하부 램을 상승 또는 하강시키는 유공압 시스템으로 구성된다. 공기실린더(Air cylinder) 유입구의 모션 밸브(Motion valve)가 열리면 압축공기가 공기실린더로 유입되면서 상부 램(Upper ram and die)이 하강하고, 이때 상부 램의 양쪽에 연결된 커플링 로드(Coupling rods)도 하강하면서 유압실린더 압력이 증가되고 하부 램(Lower ram and die)이 상승하게 된다. 이에 따라 상부 램과 하부 램이 충돌하면서 단조가공이 이루어진다. 단조 타격 후에 공기실린더의 배출구 모션 밸브가 열리며 공기가 배출구로 빠져나가면서 상부 램은 상승하고, 하부 램은 하강하여 원래 위치로 복귀하게 된다. 단조 타

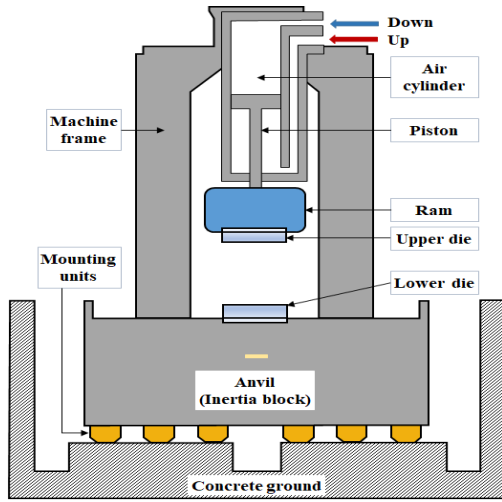
* Corresponding author: stkim@changwon.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, 51140, Korea

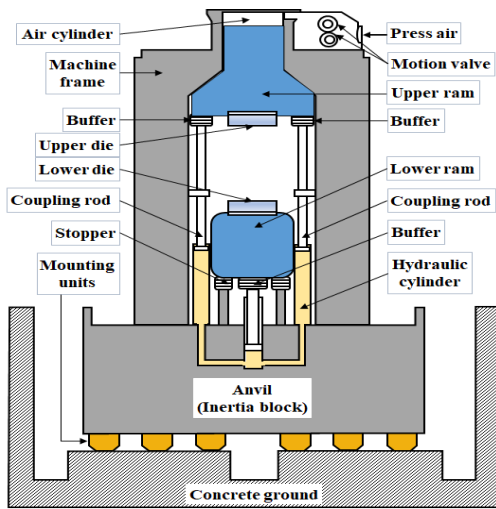
2 Mechanical Engineering Research Center, Changwon National University, 51140, Korea

Copyright © 2022, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



(a) Drop hammer press



(b) Counterblow hammer press

Fig. 1 Schematic of forging hammers

격에 의한 해머 프레스의 진동응답 특성을 해석하는 것은 단조성능이 우수한 해머 단조기를 설계하기 위해서 필요하고도 중요한 일이다. 또한 단조과정에서 발생하는 큰 충격력과 진동이 기초에 전달되는 것을 저감시키기 위하여 방진시스템을 적합하게 설계하는 것도 중요하다. 특히 앤빌과 기초의 진동은 단조품의 품질은 물론 작업 시간 단축 등에 영향을 미치므로 적절한 수준으로 제한되어야 한다. Fulan^[1]은 앤빌과 기초의 진폭을 동시에 적정 수준으로 유지해야 한다는 조건으로부터 앤빌과 기초의 질량비(Mass ratio)의 최적 값을 결정하였다. Gupta^[2]는 해머 단조기를 스프링에 지지된 질량에 탄성봉이 충돌하는 것으로 모델링하고 단조기의 설계변수와 충격지속시간 등이 최대충격력에 미치는 영향을 해석하였다. Raju와 B. Annesh^[3]은 앤빌은 탄성중합체(Elastomer)로 지지되고

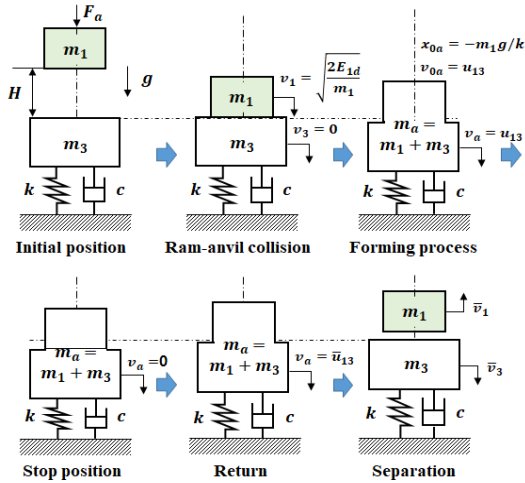
기초는 스프링과 감쇠기로 지지된 해머 단조기의 진동을 해석적인 방법과 유한요소법(FEM)으로 해석하고 방진효과를 검토하였다. Wang과 Dong^[4]은 방진마운트에 지지된 해머 단조기를 2-자유도 진동계로 모델링하고 기초에 전달되는 충격력 전달율을 최소화하기 위하여 담금질 기법(Simulated Annealing)을 이용하여 방진마운트의 강성과 감쇠 및 기초블록 질량을 최적설계 하였다. Saberi, 등^[5]은 중력-드롭 해머 단조기의 진동을 해석하고 램과 앤빌의 질량비와 반발계수(Coefficient of restitution)가 단조효율(Forging efficiency)에 미치는 영향을 해석하였다. 본 연구에서는 에어-드롭 해머 프레스와 카운터블로 해머 프레스의 단조공정에서 단조 타격에 의한 기계적 진동응답을 해석하고, 프레스의 설계파라미터들이 단조효율과 기초에 전달되는 힘에 미치는 영향을 비교 분석하고자 한다.

2. 프레스 단조공정 진동해석

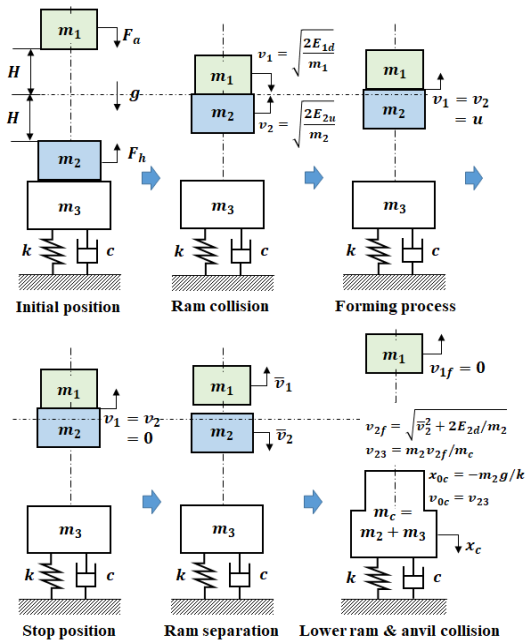
2.1 프레스 단조공정의 수학적 모델링

에어-드롭 해머 프레스와 카운터블로 해머 프레스에 대한 단조공정의 기계적 진동을 해석하기 위하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 각각의 해머 프레스를 기초에 지지된 질량-스프링-감쇠기로 모델링하였다. Fig. 2 (a)의 에어-드롭 해머 프레스 단조공정 진동모델에서 $m_1, m_3, k, c, H, F_a, g$ 는 각각 램 질량, 기계 본체를 포함한 앤빌 질량, 방진 마운트의 스프링상수, 방진 마운트의 감쇠상수, 램의 하강 행정(Stroke), 공기실린더에 의해 램에 작용하는 힘, 중력가속도이다. 그리고 $v_1, v_3, u_{13}, \bar{v}_1, \bar{v}_3, E_{1d}$ 는 각각 충돌직전 램의 초기속도, 충돌직전 앤빌의 초기속도, 충돌 순간 램과 앤빌이 함께 움직이는 공통속도, 단조 타격이후 램의 분리속도와 앤빌의 분리속도, 램 하강시의 기계적 에너지이다. Fig. 2 (b)의 카운터블로 해머 프레스 단조공정 진동모델에서 $m_1, m_2, m_3, k, c, H, F_a, F_h$ 는 각각 상부 램 질량, 하부 램 질량, 기계 본체를 포함한 앤빌 질량, 방진 마운트의 스프링상수, 방진 마운트의 감쇠상수, 램의 하강 또는 상승행정, 공기실린더에 의해 상부 램에 작용하는 힘, 유압 실린더에 의해 하부 램에 작용하는 힘이다. 그리고 $v_1, v_2, u_{12}, \bar{v}_1, \bar{v}_2, v_{1f}, v_{2f}, E_{1d}, E_{2d}, E_{2u}$ 는 각각 충돌직전 상부 램의 초기속도, 충돌직전 하부 램의 초기속도, 충돌 순간 상부 램과 하부 램이 함께 움직이는 공통속도, 충돌 직후 상부 램의 분리속도와 하

부 램의 분리속도, 상부 램이 원위치로 상승한 순간의 최종속도, 하부 램이 원위치로 하강한 순간의 최종속도, 상부 램 하강 시의 기계적 에너지, 하부 램 하강 시의 기계적 에너지, 하부 램 상승 시의 기계적 에너지이다.



(a) Air-drop hammer forging process



(b) Counterblow hammer forging process

Fig. 2 Mechanical vibration models of an air-drop hammer and a counterblow hammer press forging processes

2.2 단조공정 진동 해석 이론

1) 에어-드롭 해머 프레스 진동

Fig. 2 (a)의 에어-드롭 해머 프레스 모델에서 램 질량 m_1 이 H 만큼 하강하여 앤빌 질량 m_3 을 타격한

다음 분리되기까지의 단조과정은 충돌에너지의 일부가 공작물의 변형에 사용되므로 비탄성충돌(Inelastic collision)이다. 비탄성충돌의 경우 운동량은 보존되나 운동에너지는 보존되지 않는다^[6]. 정지상태인 앤빌의 속도는 $v_3=0$ 이고, 램이 공기실린더 작용력 F_a 을 받아 H 만큼 낙하하여 앤빌에 충돌할 때 에너지보존 원리로부터 램 질량 m_1 의 충돌직전 속도 v_1 는 다음과 같이 구해진다.

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(m_1g + F_a)H}{m_1}} = \sqrt{\frac{2(m_1g + A_a p_a)H}{m_1}} \quad (1)$$

여기서 A_a , p_a 는 각각 공기실린더의 단면적과 압력이다. 충돌 직전 앤빌의 속도는 $v_3=0$ 이므로 램과 앤빌의 충돌에 운동량보존의 원리를 적용하면 충돌 직후 램과 앤빌이 분리되기 전까지의 공통속도 u_{13} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_{13} = \frac{m_1 v_1 + m_3 v_3}{m_1 + m_3} = \frac{v_1 + Q_{13} v_3}{1 + Q_{13}} = \frac{v_1}{1 + Q_{13}} \quad (2)$$

여기서 질량비(Mass ratio) $Q_{13} = m_3/m_1$ 는 램 질량 m_1 에 대한 앤빌 질량 m_3 의 비율이다. 반발계수는 충돌직전 상대속도에 대한 충돌직후 상대속도의 비율로 정의된다^[6]. 그러므로 질량 m_1 과 m_3 이 충돌하여 공통속도 u_{12} 에서 분리속도를 각각 \bar{v}_1 , \bar{v}_3 라고 하면 램과 앤빌에 장착된 금형의 반발계수는 e_{13} 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{13} \equiv \frac{\bar{v}_1 - u_{13}}{u_{13} - v_1} = \frac{\bar{v}_3 - u_{13}}{u_{13} - v_3} \quad (3)$$

램과 앤빌 재료의 반발계수 e_{13} 가 주어진다면 식 (2)과 식(3)으로부터 질량 m_1 과 m_3 의 충돌 후 분리속도 \bar{v}_1 , \bar{v}_3 는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{v}_1 = \frac{(1 - Q_{13}e_{13})v_1}{1 + Q_{13}} \quad (4)$$

$$\bar{v}_3 = \frac{(1 + e_{13})v_1}{1 + Q_{13}} \quad (5)$$

램과 앤빌의 충돌이 비탄성충돌이고 충돌과정에서 열, 소음, 마찰 등으로 변환되는 에너지는 공작물의 변형에너지, 즉 단조가공 에너지에 비하여 무시할 수

있을 정도로 작다고 가정하면 에어 드롭 해머 프레스의 단조효율(Forging efficiency) η_a 은 램과 앤빌의 충돌 전 운동에너지에 대한 충돌 후 손실된 운동에너지의 비율로 정의할 수 있다.

$$\eta_a \equiv \frac{E_{k0} - E_{kf}}{E_{k0}} = 1 - \frac{1 + e_{13}^2 Q_{13}}{1 + Q_{13}} \quad (6)$$

여기서 $E_{k0} = (m_1 v_1^2 + m_3 v_3^2)/2$ 는 램과 앤빌의 충돌 전 운동에너지, $E_{kf} = (m_1 \bar{v}_1^2 + m_2 \bar{v}_3^2)/2$ 는 램과 앤빌의 충돌 후 운동에너지이고, $(E_{k0} - E_{kf})$ 는 손실된 운동에너지로서 단조공정에서 공작물의 변형에너지에 해당된다. Fig. 2 (a)의 에어-드롭 해머 단조공정 모델의 두 번째 단계 직후부터 램과 앤빌이 분리되기 직전까지 앤빌은 램의 타격에 의하여 진동하게 되는데 앤빌의 진동응답 $x_a(t)$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_a(t) = X_a e^{-\zeta_{13}\omega_{n13}t} \sin(\omega_{d13}t + \phi_0) \quad (7)$$

여기서 진폭 X_a 와 위상 ϕ_0 는 각각 다음과 같다.

$$X_a = \sqrt{x_{0a}^2 + \left(\frac{v_{0c} + \zeta_{13}\omega_{na} x_{0a}}{\omega_{da}} \right)^2} \quad (8)$$

$$\phi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_{da} x_{0a}}{v_{0c} + \zeta_a \omega_{na} x_{0a}} \right) \quad (9)$$

여기서 $x_{0a} = -m_1 g/k$ 는 초기변위, $v_{0a} = u_{13}$ 는 초기 속도이고, $\omega_{na} = \sqrt{\frac{k}{m_1 + m_3}} = \sqrt{\frac{k}{m_a}}$ 은 고유진동수, $\zeta_a = c \cdot \omega_{na}/(2k)$ 은 감쇠비, ω_{da} 는 감쇠고유진동수로서 $\omega_{da} = \sqrt{1 - \zeta_a^2} \omega_{na}$ 이다. 그리고 에어-드롭 해머 프레스의 진동으로 인하여 기초에 전달되는 힘 $f_{Ta}(t)$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$f_{Ta}(t) = F_{Ta} e^{-\zeta_a \omega_{na} t} \sin(\omega_{da} t + \phi_0 + \phi_1) \quad (10)$$

여기서 전달력 진폭 F_{Ta} 과 위상 ϕ_1 은 각각 다음과 같이 구해진다.

$$F_{Ta} = \sqrt{(k - c\zeta_a \omega_{na})^2 + (c\omega_{da})^2} X_a = k X_a \quad (11)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{c\omega_{da}}{k - c\zeta_a \omega_{na}} \right) \quad (12)$$

2) 카운터블로 해머 프레스 진동

Fig. 2 (b)의 카운터블로 해머 프레스 단조공정 모델에서 상부 램이 공기압을 받아 가속되면서 하강하고 동시에 하부 램이 유압력을 받아 상승하여 충돌할 때 에너지의 일부가 공작물 변형에 쓰이므로 상부 램의 충돌은 비탄성충돌이다. 상부 램이 공기실린더 작용력 F_a 을 받아서 거리 H 만큼 낙하할 때 에너지보존 원리로부터 질량 m_1 의 충돌직전 속도 v_1 는 위의 식(1)과 같다. 한편 하부 램이 유압실린더 작용력 F_h 을 받아서 H 만큼 상승할 때 에너지보존 원리로부터 질량 m_2 의 상승시의 기계적 에너지 $E_{2u} = (F_h - m_2 g)H = m_2 v_2^2/2$ 이므로, 질량 m_2 의 충돌직전 속도 v_2 는 다음과 같이 구해진다.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(A_h p_h - m_2 g)H}{m_2}} \quad (13)$$

여기서 A_h , p_h 는 각각 유압실린더의 단면적과 압력이다. 상부 램과 하부 램의 충돌에서 운동량보존의 원리를 적용하면 충돌 직후 상부 램과 하부 램의 공통속도 u_{12} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_{12} = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = \frac{v_1 + Q_{12} v_2}{1 + Q_{12}} \quad (14)$$

여기서 질량비 $Q_{12} = m_2/m_1$ 는 상부 램 질량 m_1 에 대한 하부 램 질량 m_2 의 비율이다. 질량 m_1 과 m_2 이 충돌하여 공통속도 u_{12} 에서 충돌직후 분리되는 순간의 속도를 각각 \bar{v}_1 , \bar{v}_2 라고 하면 반발계수 e_{12} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{12} = \frac{\bar{v}_1 - u_{12}}{u_{12} - v_1} = \frac{\bar{v}_2 - u_{12}}{u_{12} - v_2} \quad (15)$$

식(14)의 u_{12} 을 식(15)에 대입하면 질량 m_1 , m_2 의 충돌후 분리속도 \bar{v}_1 , \bar{v}_2 는 다음과 같이 구해진다.

$$\bar{v}_1 = \frac{(v_1 + Q_{12} v_2) - e_{12} Q_{12} (v_1 - v_2)}{1 + Q_{12}} \quad (16)$$

$$\bar{v}_2 = \frac{(v_1 + Q_{12} v_2) + e_{12} (v_1 - v_2)}{1 + Q_{12}} \quad (17)$$

상부 램과 하부 램의 충돌과정에서 열, 소음, 마찰 등으로 변환되는 에너지는 공작물의 변형에너지에

비하여 매우 적다고 가정하면 카운터블로 해머 프레스의 단조효율 η_c 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_c = 1 - \frac{Q_{12}(1+P_{12})^2 + e_{12}^2(Q_{12}-P_{12})^2}{(1+Q_{12})(Q_{12}+P_{12}^2)} \quad (18)$$

여기서 P_{12} 는 $P_{12} \equiv \frac{P_2}{P_1} = \frac{m_2 v_2}{m_1 v_1} = Q_{12} \frac{v_2}{v_1}$ 로 정의되는 운동량비(Momentum ratio)로서 상부 램 운동량 P_1 에 대한 하부 램 운동량 P_2 의 비율이다. 카운터블로 해머 프레스 단조공정에서는 상부 램이 양의 속도($v_1 > 0$)로 하강하고, 하부 램은 음의 속도($v_2 < 0$)로 상승하므로 운동량비 P_{12} 의 부호는 음이다. Fig. 2 (b)의 단조공정 모델에서 하부 램의 상승위치와 충돌직후 상부 램의 분리위치의 거리 차는 램의 상승거리 H 에 비하여 무시할 수 있을 정도이므로 상·하부 램 충돌 직후 하부 램은 분리위치에서 초기속도 \bar{v}_2 로 거리 H 만큼 하강하여 앤빌과 충돌한다고 볼 수 있다. 하부 램이 초기속도 \bar{v}_2 로 H 만큼 하강하여 앤빌과 충돌할 때 에너지보존원리를 적용하면 하부 램 하강 시의 기계적 손실에너지를 제외한 위치에너지가 충돌 순간 운동에너지로 변환되므로 다음 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} & \{(m_2 + \rho_h H)g - A_h p_s\}H - \frac{1}{2} c_h (\bar{v}_2 - v_{2f})^2 \\ &= \frac{1}{2} m_2 (v_{2f}^2 - \bar{v}_2^2) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 $m_2 g H$ 는 하부 램의 위치에너지, $A_h p_s H$ 는 유압실린더 저항력 $F_{hs} = A_h p_s$ 에 의한 손실에너지, $\rho_h g H$ 는 실린더 내의 유체질량의 위치에너지, 그리고 $c_h (\bar{v}_2 - v_{2f})^2 / 2$ 는 유압실린더에 의한 감쇠에너지이다. 위에서 ρ_h , c_h 는 각각 유압실린더 단위길이 당 작동유의 질량과 유압실린더의 점성감쇠계수이다. 그런데 카운터블로 해머의 경우 $m_2 \gg \rho_h H$, $m_2 g - A_h p_s = 0$ 로 간주할 수 있으므로 위 식(19)로부터 앤빌에 충돌하기 직전 하부 램 속도 v_{2f} 는 다음과 같이 구해진다.

$$v_{2f} = \frac{(c_h - m_2) \bar{v}_2}{c_h + m_2} \quad (20)$$

Fig. 2(b)의 카운터블로 해머 프레스에서 단조공정 모델의 마지막 단계에서 보듯이 하부 램 m_2 과 앤빌 m_3 이 충돌 후 합체되어 움직인다고 가정하면 운동량 보존 원리로부터 충돌 직후 램과 합체된 앤빌의 속

도 v_{23} 는 다음과 같이 구해진다.

$$v_{23} = \frac{m_2 v_{2f}}{m_2 + m_3} = \frac{v_{2f}}{1 + Q_{23}} \quad (21)$$

여기서 질량비 $Q_{23} = m_3/m_2$ 는 하부 램 질량 m_2 에 대한 앤빌 질량 m_3 의 비율이다. 상·하 램의 분리위치로부터 하부 램이 하강하여 앤빌과 충돌할 때 충격으로 인하여 카운터블로 프레스는 진동하게 되는데 앤빌의 진동응답 $x_c(t)$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_c(t) = X_c e^{-\zeta_c \omega_{nc} t} \sin(\omega_{dc} t + \phi_2) \quad (22)$$

여기서 진폭 X_c 과 위상 ϕ_2 는 각각 다음과 같다.

$$X_c = \sqrt{x_{0c}^2 + \left(\frac{v_{0c} + \zeta_c \omega_{nc} x_{0c}}{\omega_{dc}} \right)^2} \quad (23)$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_{dc} x_{0c}}{v_{0c} + \zeta_c \omega_{nc} x_{0c}} \right) \quad (24)$$

여기서 $x_{0c} = -m_2 g/k$ 는 초기변위, $v_{0c} = v_{23}$ 는 초기속도이고, $\omega_{nc} = \sqrt{\frac{k}{m_2 + m_3}} = \sqrt{\frac{k}{m_c}}$ 은 진동계의 고유진동수, $\zeta_c = c \cdot \omega_{nc} / (2k)$ 은 감쇠비, ω_{dc} 은 감쇠고유진동수로서 $\omega_{dc} = \sqrt{1 - \zeta_c^2} \omega_{nc}$ 이다. 그리고 카운터블로 프레스의 진동으로 인하여 기초에 전달되는 힘 $f_{Tc}(t)$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$f_{Tc}(t) = F_{Tc} e^{-\zeta_c \omega_{nc} t} \sin(\omega_{dc} t + \phi_2 + \phi_3) \quad (25)$$

여기서의 F_{Tc} 과 ϕ_3 는 전달력 진폭과 위상으로서 각각 다음 식과 같이 구해진다.

$$F_{Tc} = \sqrt{(k - c \zeta_c \omega_{nc})^2 + (c \omega_{dc})^2} X_{3c} = k X_{3c} \quad (26)$$

$$\phi_3 = \tan^{-1} \left(\frac{c \omega_{dc}}{k - c \zeta_c \omega_{nc}} \right) \quad (27)$$

2.3 단조공정 진동 해석 결과

앞 절에서 유도한 단조공정 진동해석 이론에서 프레스의 단조효율을 무차원화 변수인 질량비와 운동량비 및 반발계수의 함수로 유도하였다. 여기서는 Table 1에 나타낸 프레스 제원을 이용하여 에어-드롭 해머 프레스와 카운터블로 해머 프레스의 단조효율을 해석하여 비교하고, 아울러 램의 단조타격에 따른 각각의 프레스 진동응답과 지반에 전달되는 힘을 해석하였다.

1) 프레스의 단조 효율

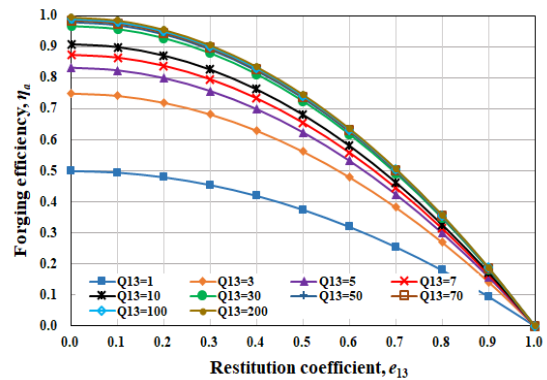
Fig. 3 (a), (b)에 에어-드롭 해머 프레스와 카운터블로 해머 프레스의 단조효율을, 모든 범위의 질량비에 대하여 반발계수의 함수로 나타내었다. Fig. 3 (a)에서 모든 범위의 램과 앤빌의 질량비 Q_{13} 에 대하여 에어-드롭 해머의 단조효율 η_a 은 램과 앤빌의 반발계수 e_{13} 가 클수록 감소한다. Fig. 3 (b)에서 모든 범위의 상·하 램의 질량비 Q_{12} 에 대하여 카운터블로 프레스의 단조효율 η_c 은 상·하 램의 반발계수 e_{12} 가 클수록 감소한다. 단조효율 η_c 이 반발계수 e_{12} 에만 관계되는 이유는 운동량비 $P_{12} = -1$ 인 경우 식(18)에서 단조효율은 $\eta_c = 1 - e_{12}^2$ 이 되기 때문이다. Fig. 4 (a), (b)에는 모든 범위의 반발계수에 대하여 에어-드롭 해머 프레스와 카운터블로 해머 프레스의 단조효율을 질량비의 함수로 나타내었다. Fig. 4 (a)에서 모든 범위의 반발계수 e_{13} 에 대하여 에어-드롭 해머의 단조효율 η_a 은 램과 앤빌의 질량비 Q_{13} 가 클수록 증가하다가 질량비가 $Q_{13} \geq 55$ 이면 일정한 값으로 수렴됨을 알 수 있다. Fig. 4 (b)도 Fig. 3(b)와 마찬가지로 운동량비 $P_{12} = -1$ 인 경우에 카운터블로 프레스의 단조효율 η_c 은 상·하 램 질량비 Q_{12} 와는 무관하며 단지 상·하

램의 반발계수 e_{12} 의 함수임을 알 수 있다. Fig. 5에 는 카운터블로 해머 프레스의 단조효율 η_c 을 상·하 램의 반발계수 e_{12} 의 함수로 나타내었다. Fig. 5에서 모든 상·하 램의 운동량비 P_{12} 의 범위에 대하여 카운터블로 해머 프레스의 단조효율 η_c 램과 상·하 램의 반발계수 e_{12} 가 클수록 감소한다. Fig. 6에는 카운터블로 해머 프레스의 단조효율 η_c 을 상·하 램의 운동량비 P_{12} 의 함수로 나타내었다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 카운터블로 해머 프레스의 단조효율 η_c 은 에어-드롭 해머 프레스와는 달리 램과 앤빌의 질량비 Q_{13} 와는 무관하며 상·하 램의 반발계수 e_{12} 와 운동량비 P_{12} 의 함수임을 알 수 있다. 여기서 상·하 램의 운동량비 P_{12} 는 음의 값을 가진다.

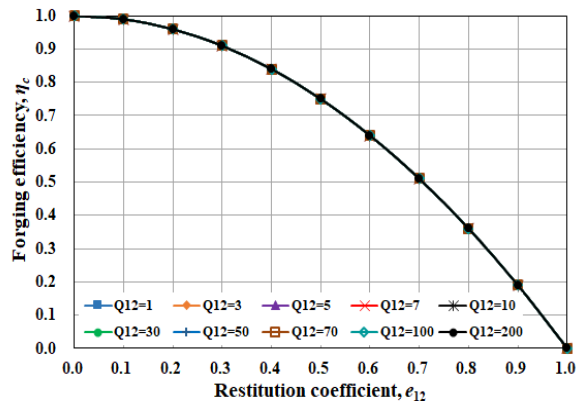
카운터블로 프레스의 단조효율 η_c 은 모든 범위의 상·하 램의 반발계수 e_{12} 에 대하여 운동량비 P_{12} 가 감소할수록 감소하며 운동량비가 $P_{12} = -1$ 일 때 최대가 된다. 또한 Fig. 6에서 확인할 수 있듯이, 대부분의

Table 1 System data of the forging hammers

Parameter	Symbol	Unit	Data
Upper ram mass	m_1	ton	45
Lower ram mass	m_2	ton	45
Anvil mass	m_3	ton	700
Stiffness of the mount	k	MN/m	150
Damping of the mount	c	MN·s/m	10
Cross-section area of the air cylinder	A_a	m ²	1.767
Cross-section area of hydraulic cylinder	A_h	m ²	0.05
Air cylinder pressure	p_a	kPa	600
Hydraulic cylinder static pressure	p_s	kPa	8,829
Hydraulic cylinder pressure in up-stroke	p_h	kPa	38,858
Ram stroke	H	m	0.7
Damping of hydraulic cylinder	c_h	kN·s/m	55



(a) Air-drop hammer press



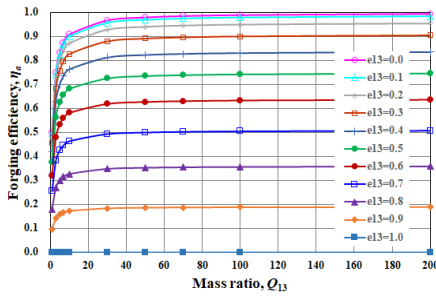
(b) Counterblow press with unit momentum ratio
Fig. 3 Forging efficiency η versus the restitution coefficient e curve for different mass ratios Q

프레스에 사용되는 금형과 램의 소재 반발계수가 $e = 0.6$ 정도임을 고려하면, 상·하 램의 운동량비율 $P_{12} = -1$ 로 하면 상·하 램의 질량비 Q_{12} 에 상관없이 카운터블로 해머 프레스의 단조효율 η_c 을 최대 0.64 정도 달성할 수 있다.

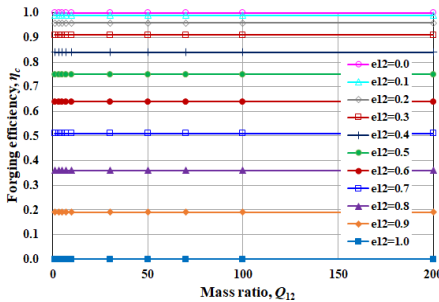
2) 프레스의 진동응답과 지반에 전달되는 힘

Fig. 2에 나타낸 에어-드롭 해머 프레스와 카운터블로 해머 프레스의 단조공정 진동모델에 대하여 램의 단조타격에 의한 앤빌의 진동응답과 지반에 전달되는 힘을 해석하였다. Fig. 7에는 에어-드롭 해머 프레스와 카운터블로 해머 프레스의 앤빌의 진동응답을 비교하여 나타내었다. Fig. 7 (a), (b), (c)에서 보듯이, 두 프레스의 앤빌 질량과 단조타격에 사용되는 램의 질량이 서로 동일 함에도 불구하고 에어-드롭 해머 프레스의 앤빌의 진동응답이 카운터블로 해머 프레스 앤빌의 진동응답에 비하여 매우 크게 발생됨을 확인할 수 있다. 에어-드롭 해머 프레스 앤빌의 최대 변위, 속도, 가속도 응답이 각각 15mm, 350m/s, 500cm/s^2 인데 비하여 카운터블로 해머 프레스 앤빌의 최대 변위, 속도, 가속도 응답은 각각 1mm, 24m/s, 58gal 정도이다. Fig. 8에는 지반에 전달되는 힘을 비교하여 나타내었다. 에어-드롭 해머 프레스의 경우 단조타격으로 지반에 전달되는 최대 전달력이

3578kN 정도인데 비하여 카운터블로 해머 프레스의 경우 지반에 전달되는 최대 전달력이 242kN 정도로서 매우 작다. 단조타격에 의한 프레스의 진동응답과 지반에 전달되는 힘, 그리고 단조효율은 해머 프레스의 역학적 설계에서 매우 중요한 성능지표와 제한조건이므로 본 연구결과는 해머 프레스 설계에 매우 유용한 정보를 제공할 수 있다.



(a) Air-drop hammer press



(b) Counterblow press with unit momentum ratio

Fig. 4 Forging efficiency η versus the mass ratio Q curve for different restitution coefficients e

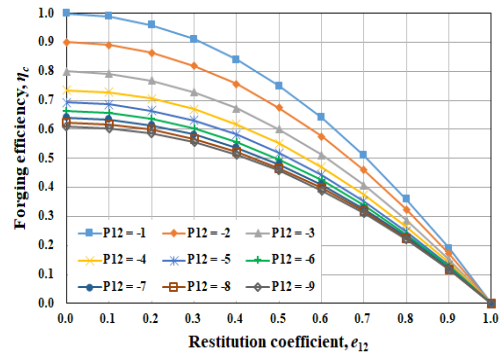


Fig. 5 Counterblow press forging efficiency η_c versus the restitution coefficient e_{12} curve for different momentum ratios P_{12}

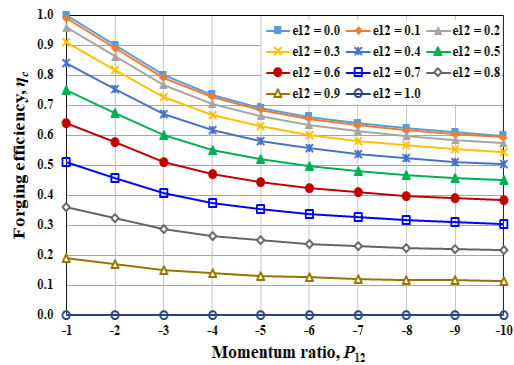
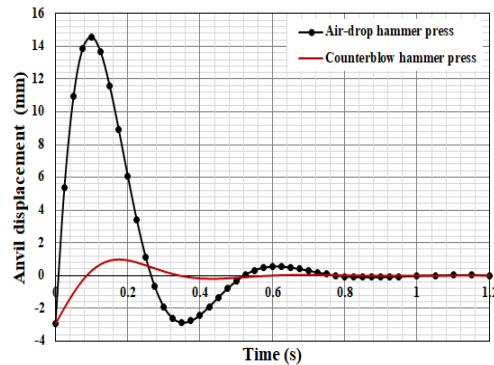
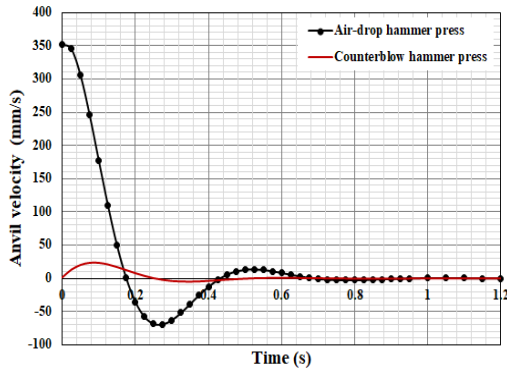


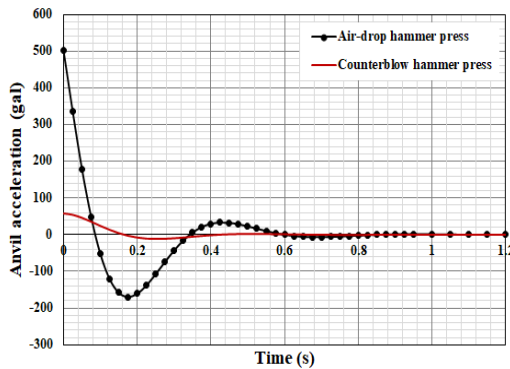
Fig. 6 Counterblow press forging efficiency η_c versus the momentum ratio P_{12} curve for different restitution coefficients e_{12}



(a) Displacement



(b) Velocity



(c) Acceleration

Fig. 7 Comparison of anvil vibration responses due to ram blow impact with restitution coefficients $e_{13} = e_{12} = 0.6$

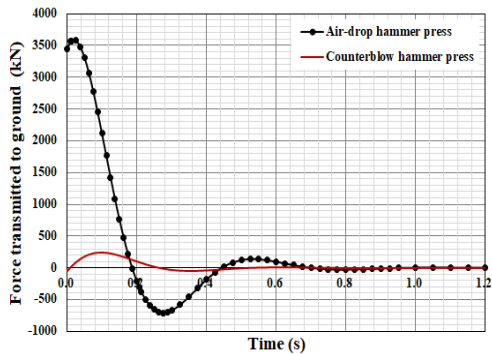


Fig. 8 Comparison of force $f_T(t)$ transmitted to the ground

3. 결 론

본 연구에서는 단조 가공에 많이 사용되는 에어-드롭 해머 프레스와 카운터블로 해머 프레스를 질량-스프링-감쇠기 진동계로 모델링하고 단조공정의 진동을 이론적으로 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 에어-드롭 해머 프레스의 단조효율은 모든 범위의 램과 앤빌 반발계수에 대하여 램과 앤빌의 질량비가 클수록 증가하며 질량비가 55보다 크면 단조효율이 일정한 값으로 수렴한다.

2. 에어-드롭 해머 프레스의 단조효율이 램과 앤빌의 질량비의 함수인 것에 반하여, 카운터블로 프레스의 단조효율은 램과 앤빌의 질량비나 상·하 램의 질량비와 무관하며 상·하 램의 반발계수와 운동량비의 함수이다.

3. 카운터블로 프레스의 단조효율은 모든 범위의 반발계수 값에 대하여 상·하 램의 운동량비가 작을수록 감소하며 운동량비가 -1일 때 최대이다.

4. 카운터블로 해머 프레스의 단조 타격에 의한 앤빌의 진동응답과 지반에 전달되는 힘은 동급 재료의 에어-드롭 해머 프레스에 비하여 무시할 수 있을 정도로 매우 낮은 수준이다.

5. 본 연구의 프레스의 단조공정 진동해석 결과는 단조효율 향상을 위한 카운터블로 프레스 설계에 유용하게 활용될 수 있다.

후 기

“이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임”

References

1. P. Fulan, “Theory and experiment of hammer foundation vibration,” Proc. of International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 27, pp. 743-748, Jun. 1988.
2. R. B. Gupta, “On optimum hammers and anvils,” J. of Sound and Vibration, Vol. 80, No. 2, pp. 223-231, 1982, DOI: 10.1016/0022-460X(82)90192-4
3. K. Rama Raju and B. Annessh, “Analysis and design of foundation systems to control the vibrations due to forging impact hammer,” Journal of Structural Engineering, Vol. 44, No. 5, pp. 404-413, Dec. 2017 - Jan. 2018.
4. Wang, G. and Dong, Z., “Design optimization of low impact transmission foundation for forging

- hammers,” *Engineering Computations*, Vol. 23, No. 2, pp. 166-186, Feb. 2006, ISSN: 0264-4401, DOI: 10.1108/02644400610644531.
5. S. Saberi, J. Fischer, M. Stockinger, R. Tikal and R. Afsharnia, “Theoretical and experimental investigations of mechanical vibrations of hot forging,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 114, Issue 9-10, pp. 3037-3045, 2021. ISSN: 0268-3768, DOI: 10.1007/s00170-021-07061-y.
6. William Moebs, Samuel J. Ling, Jeff Sanny, *University physics: volume 1*,” Chapter 9, 2016, ISBN-10: 168092043X, ISBN-13: 978-1680920437.