

맥동과 전자해머 구동시스템의 개발

안동준¹, 남현도^{2*}

¹아주자동차대학 자동차계열, ²단국대학교 전자전기공학부

Development of Pulsating Type Electromagnetic Hammer Drive Systems

Dong-Jun Ahn¹, Hyun-Do Nam^{2*}

¹Department of Automotive Engineering, Ajou Motor College

²Department of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University

요약 본 연구는 호퍼와 같은 공정에서 필연적으로 발생하는 스케일 또는 막힘 현상을 방지하기 위해 적용할 수 있는 저주파 전자해머 구동 시스템의 개발에 관한 것이다. 전자기계식 hammering 구동 방식은 진동과 충격량을 동시에 발생시키는 방식으로, 본 논문에서는 전자해머의 특성을 고찰하기 위하여 전자해머에 장착된 직/병렬 스프링 상수 해석을 하였고 발생 에너지는 E코어에 부착된 스프링 상수가 모두 같을 경우에 계산된 등가 스프링 상수와 E코어와 I코어 사이의 동작 변위의 곱으로 계산할 수 있음을 보였다. 또한 전자해머의 충격량을 최대화하기 위하여 맥동과 구동 알고리즘을 적용하였으며, 이 알고리즘은 논리 AND 연산과 마이크로 콘트롤러(atmega128)의 타이머 인터럽트와 PWM 기능을 사용하여 구현하였다. 전자해머의 구동회로는 IGBT로 구성된 H-브리지 방식으로 설계하였고, 가속도계 측정법으로 개발한 전자해머 시스템의 성능을 검증하였다. 실험 결과 제안한 시스템이 기계적 에너지를 양호하게 발생시킬 수 있으며, 호퍼와 같은 공정에 적용할 수 있음을 보였다.

Abstract This paper proposes the development of a low frequency electronic hammer drive system that is used to prevent scaling or clogging in the hopper process. The electro-mechanical hammering driving method involves the generation of vibration and impact energy. The operation principles of the electromagnetic hammer were considered by parallel/series spring coefficient analysis and the amount of kinetic energy generated was calculated from the product of the equivalent spring constant, which is coupled with the E core and the gap of between the E core and I core. In addition, the Pulsation Driving algorithm was applied to the proposed electromagnetic hammer to obtain the maximizing kinetic energy. This algorithm was then implemented by a logical AND operation process and micro-controller (atmega128) built in functions with a timer interrupt and PWM generation function. The driving circuit of the electromagnetic hammer was designed using the H-bridge type IGBT circuit. The experimental test was performed by usefulness of the developed electromagnetic hammer systems with the acceleration measurement method. The experimental result showed that the proposed system has good kinetic energy generation performance and can be applied to the hopper process.

Keywords : Electromagnetic Hammer, EI core structure, Spring Coefficient analysis, Pulsation driving algorithm

1. 서론

생산 공정 이송 설비에 사용되는 분말 또는 입자상의

분체로 된 여러 가지의 용해 또는 연소물질을 저장, 공급하는 슈트, 호퍼, 이송라인은 분체가 배출구 주변이나 이송라인의 관로 내부에 흡착되어 응고되는 통로가 좁아지

*Corresponding Author : Hyun-Do Nam(Dankook Univ.)

Tel: +82-31-8005-3603 email: hdnam@dankook.ac.kr

Received March 31, 2016

Revised (1st April 26, 2016, 2nd April 29, 2016, 3rd May 2, 2016)

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

거나 막히는 현상이 자주 발생한다.

이러한 현상을 방지하기 위해서는 분체의 유동성을 안정적이며 지속적으로 유지시켜 분체의 배출과 공급을 원활하게 하여야 한다. 즉, 이송 배관 설비내부에 이송되는 분체를 파쇄, 분산시켜 줌으로써 분체를 이송라인으로 원활하게 공급할 수 있도록 하는 장치가 반드시 필요하다[1,2].

이러한 현상을 방지하기 위해 국내의 제철소 및 석유화학 생산현장에서 다양한 바이브레이터들이 사용되어 왔으나, 성능에 대한 효과와 내구성의 부족으로 인하여 공정의 설비가 막히는 현상을 초래하고 있다. 이 때문에 정기적인 정비 외에도, 비정기적 정비가 발생할 수밖에 없으며, 제품 생산 중단에 따른 막대한 손실이 발생하고 있다.

전자 해머 구동시스템은 H-Bridge 구동방식[3]에 기초한 전자기계식 Hammering 구동으로 기존의 단순한 타격이나 진동이 아닌 기계진동과 충격력을 동시에 발생시켜 효과를 증폭시키는 방식이다[4].

이 방식은 디지털 방식으로 진동과 충격량을 자유자재로 조절이 가능하여 재료의 물성에 큰 관계없이 원료 이송과 정량 공급을 원활하게 하고 특히 미분의 Cake, Bridge 현상을 방지하고 제거하여 분체 이송 공정이 최상의 효율 유지하게 하며 설비에는 충격에 의한 피해가 없도록 고안되었다.

본 연구는 이러한 개념 특허를 기반으로 하여 “전자해머 구동 시스템 개발”을 하고자 하였으며 1) 물리적 충격량을 만들어 내는 전자 해머 액츄에이터의 설계, 2) 맥동과 구동 알고리즘 구현, 3) 전자해머 구동 시스템의 구현 등으로 연구를 진행하였다.

2. 전자해머 구동계의 설계

2.1 전자해머의 구동원리

전자 해머의 구동 원리는 식(1)과 같이 자기유도 현상을 이용한 플레밍의 왼손 법칙을 근간으로 하고 있으며, 전동기의 회전력이 발생하는 원리이기도 하다.

$$F = B i l \quad (1)$$

여기서, F는 힘(단위: N), B는 자속밀도(단위: Wb/m^2), I는 전류(단위: A), L은 유효도체 길이(단위: m)이다.

식(1)에서 자속을 발생하기 위해 Fig. 1과 같이 단권

변압기의 구조로 얇은 강판을 적층한 다음 권선을 감고 전류를 인가하면 식(2)와 같은 자속이 발생한다[4].

$$\Phi = \frac{N}{LI} \quad (2)$$

여기서, Φ 는 자속(단위: Wb), L은 자기인덕턴스(단위: H), N는 권선 수이다.

단권 변압기의 구조를 Fig. 2와 같이 “E형 코어”와 “I형 코어”를 일반적인 간극보다 더 떨어뜨려 놓고 E형 코어에 감긴 도선에 전류를 교번하여 흐르게 하면 식(2)에 따른 자속이 발생하게 된다[5].

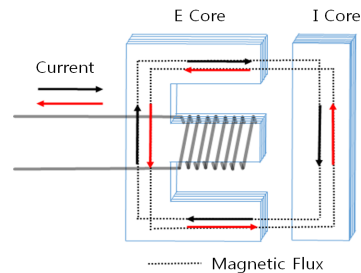


Fig. 1. EI Core Type Electromagnetic Hammer Vibrator

이때 발생한 자속은 적층한 강판들을 자화시키게 되고 물리적으로 “E형 코어”와 “I형 코어” 사이를 떨어뜨려 두었기 때문에 “E형 코어”는 식(1)의 전자기력으로 “I형 코어”를 흡인하게 된다. 만일 Fig. 1에서 교번하는 전류의 흐름을 단속하게 된다면 “E형 코어”와 “I형 코어”는 흡인과 분리를 반복하게 될 것이다.

이러한 전자기력 현상을 기계적 에너지로 변환시키기 위하여 Fig. 1의 “E형 코어”를 Fig. 2와 같이 탄성계수 $k_1 \sim k_4$ 인 강철 스프링에 고정하고 “I형 코어”를 k_3, k_4 강철 스프링 밑에 고정한다.

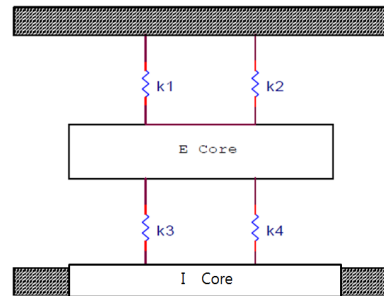


Fig. 2. Parallel-Series Spring Connections of Electromagnetic Hammer Actuator

Fig. 2와 같은 조건하에 식(2)의 자속이 발생하면 강철 스프링의 장력을 전자기력이 이기고 흡인되는 과정 및 스프링이 복귀하는 과정에서 물리적인 진동이 발생할 수 있다[6].

물리적 진동의 충격량 환산은 다음과 같은 과정으로 해석할 수 있다. Fig. 2에서 적용한 강철 스프링의 단위 변형을 일으키는 스프링 상수는 식(3)과 같고,

$$k = \frac{\partial P}{\partial \delta} \quad (3)$$

여기서, ∂P 는 외력의 변화량, $\partial \delta$ 는 변형량의 변화량이다.

식(3)으로부터 선형 스프링인 경우의 스프링 상수는 식 (4)와 같다.

$$k = \frac{P}{\delta} \quad (4)$$

만일 2개의 선형 스프링이 Fig. 3(a)와 같이 병렬로 연결되어 있을 경우 각 선형 스프링에 작용하는 각각의 외력(P_1, P_2)의 합은

$$P = P_1 + P_2 = k_1 x + k_2 x = k_{eq} x \quad (5)$$

여기서 k_1, k_2 는 각 스프링 상수, x_1, x_2 는 각 스프링의 변형길이이다.

만일 각 스프링의 변형길이가 같다면 등가 스프링 상수는

$$k_{eq} = k_1 + k_2 \quad (6)$$

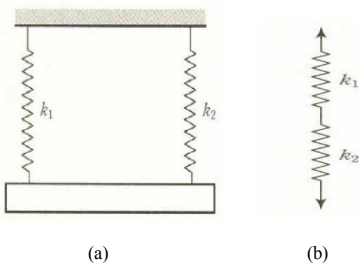


Fig. 3. Connections of Linear Springs (a) Parallel case (b) Series case

그리고 2개의 선형 스프링이 Fig. 4(b)와 같이 직렬로

연결되어 있을 경우 각 선형 스프링에 작용하는 외력의 합은

$$\frac{P}{k_{eq}} = \frac{P_1}{k_1} + \frac{P_2}{k_2} \quad (7)$$

병렬의 경우와 같이 스프링 상수가 같다면, 병렬 스프링 상수는

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (8)$$

식(6)~(9) 과정을 거쳐 등가 스프링 상수를 계산하면 식(9)와 같고

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_{eq1}} + \frac{1}{k_{eq2}} = \frac{1}{k_1 + k_2} + \frac{1}{k_3 + k_4} \quad (9)$$

여기서 4개의 스프링 상수가 모두 같다면,

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{2k} + \frac{1}{2k} = \frac{1}{k} \quad (10)$$

결국 전자해머 액튜에이터가 발생시킬 수 있는 충격량은 식 (11)과 같이 스프링 상수와 변형길이의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$F = k_{eq} \delta \quad (11)$$

2.2 맥동파 알고리즘의 구현

Fig. 2로 구성된 전자해머 액튜에이터의 물리적인 충격량은 “E형 코어”의 권선에 주기적으로 전기에너지를 단속하여 공급함으로써 얻을 수 있다. 그러나 적절한 구동 알고리즘을 적용하지 않으면 “EI 결합코어”의 과전류 문제가 발생하고 효율적인 운동에너지를 얻기 어렵다 [5]. Fig. 4.는 이 같은 문제를 해결하기 위하여 제시되었던 맥동파 구동 알고리즘[6]이다.

Fig. 4(a)에서 파형 S는 전자해머 구동 펄스 원 파형이고, (b)파형은 특정 구간만 동작시키기 위한 간헐 동작 파형이다. (a)와 (b)파형을 논리 AND 연산을 취하면 (c) 파형의 결과를 얻는다. 즉, (b)파형의 “D” 구간만 구동

파형이 존재하고, 나머지 구간 “T”에는 존재하지 않으므로 전자 해머 입장에서 전기에너지의 간헐 공급에 의한 맥동 운동에너지가 발생하고, 펄스 파형이 공급되는 구간에서는 진동에너지가 발생하게 된다.

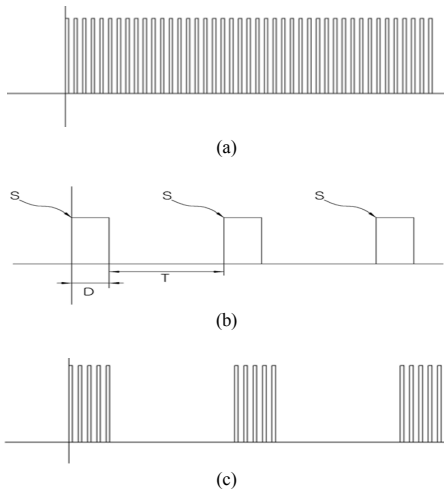


Fig. 4. Pulsating Activation Algorithms of Electromagnetic Hammer Actuator (a) original drive waveform (b) pulsating waveform (c) AND logic result waveform from (a),(b) (d) electric circuit for pulsating algorithm

Fig. 4(a)의 파형은 마이크로 컨트롤러의 PWM 발생 기능으로 구현할 수 있으며, Fig. 4(b)의 파형은 타이머 인터럽트에 의한 출력 포트 제어방식으로 구현가능하다. 본 연구에서는 Fig. 4(a), (b)의 주파수 및 시간 구간을 사용자 인터페이스에 의하여 가변할 수 있도록 구현하였다.

2.3 전자 해머 구동 시스템 설계

2.1절과 2.2절에서 언급한 전자해머 구동 시스템을 구현하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 5와 같은 개념을 반영한 구동시스템을 설계하였다.

Fig. 5의 블록 다이어그램에서, Power Supply는 일반적인 단상 교류 전원(AC 220[V])을 전파 정류하여 직류 311[V]급 전원을 만든다. Electro Magnetic Hammer Controller는 마이크로 컨트롤러(Atmel사의 atmega128을 적용)와 맥동과 구동 알고리즘, 사용자 인터페이스, 펄스 발생부 등으로 구성되어 있다.

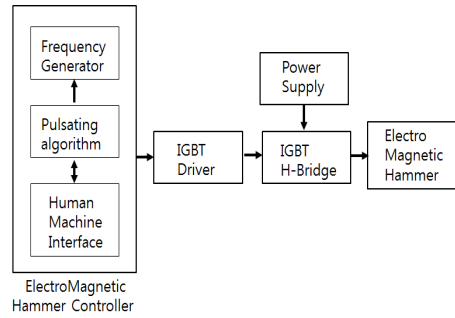


Fig. 5. Block Diagram of Electromagnetic Hammer Drive System

Fig. 6은 Fig. 5의 IGBT H-Bridge를 설계한 것으로 전자 해머를 구동시키는 역할을 수행한다.

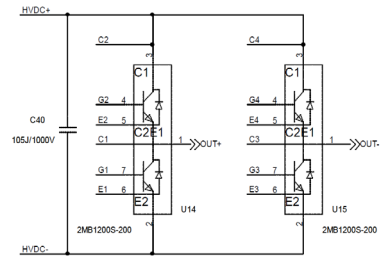


Fig. 6. IGBT H-Bridge Circuit

Fig. 7은 Fig. 5의 전자해머 구동시스템을 구현한 것으로 Fig. 6의 IGBT들을 같이 실장하고 있다.

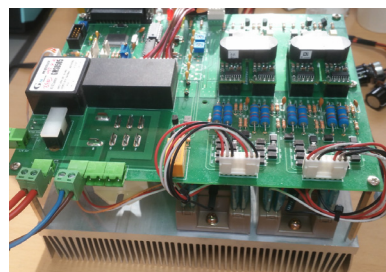


Fig. 7. Electromagnetic Hammer Drive System

4. 전자해머 구동시스템 성능시험

본 장에서는 설계된 전자해머 구동 시스템의 성능을 검증하기 위하여 다음과 같은 조건 하에 성능 시험을 실시하였다.

1) 전자해머의 스프링 상수는 25.02[kgf/mm], 이격변위 4[mm]로 설정하였다. 2)전자해머 시작품 질량은 25[kg]이다. 3)전자해머 중앙에 3축 가속도계(B&K 3525B, 최대범위 400m/s²)를 부착하여 가진 방향인 z축 방향으로 측정하였다. 4)측정된 진동 가속도를 시간 및 주파수 영역에서 분석하여 가진된 진폭 및 주파수를 분석(B&K PULSE 3560B[7])하였다. 5)측정된 신호에서 진폭의 최저점을 측정해서 가속도 진폭을 측정하고 질량을 곱하여 전자해머의 충격 발생량을 계산하였다.

Fig. 8은 전자 해머에 맥동과 구동 펄스를 공급한 전자 해머 양단의 전압 파형으로서 맥동과 구동 알고리즘을 반영하여 설계 구간에만 구동 펄스를 공급하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9는 전자해머의 동작주파수가 52[Hz]인 경우, Fig. 10은 동작주파수가 55[Hz]인 경우의 가속도 측정 결과이다.(동작 구간은 2[sec]로 설정)

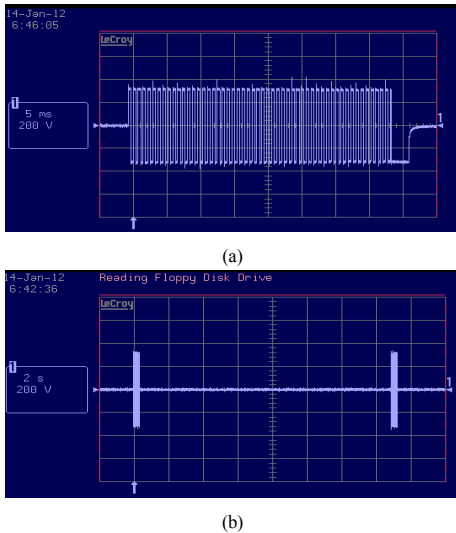
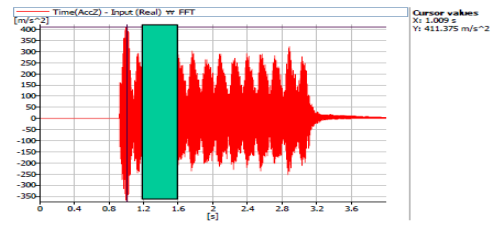
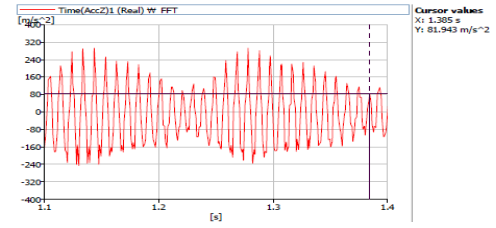


Fig. 8. ElectroMagnetic Hammer Drive waveform
(a) 5[ms] time scale (b) 2[s] extend time scale

Fig. 9, 10에서 알 수 있듯이 주파수가 낮을수록 가속도(충격량)가 증가함을 알 수 있으며, 이는 전자해머에 전류 공급 시간이 동작 주파수가 낮을수록 증가하기 때문으로 판단된다. 시험 제작한 전자해머 시스템의 동작 주파수는 최대 40~55[Hz]까지 동작이 가능하게 되어 있으나, 가속도계의 측정 범위를 벗어나는 관계로 측정 범위를 52~55[Hz]까지로 국한하여 시험하였다.

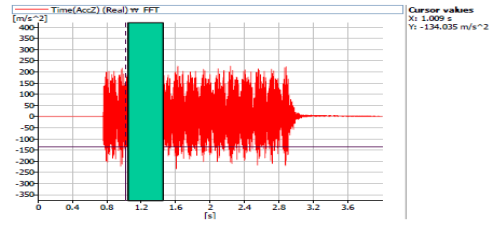


(a)

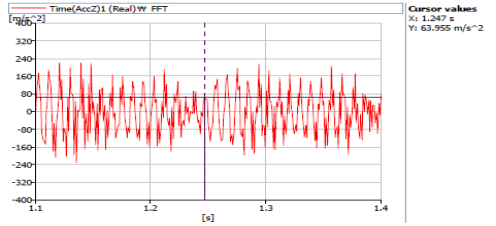


(b)

Fig. 9. Measurement Result I (52[Hz] case) (a) 2[sec] interval (b) 1.1~1.4[sec] interval



(a)



(b)

Fig. 10. Measurement Result II (55[Hz] case) (a) 2[sec] interval (b) 1.1~1.4[sec] interval

Table 2는 측정결과를 정리한 것으로 순간 가진 가속도는 63.96[m/s²]이상으로 측정되었으며, 이 때의 가진력은 가속도 값과 전자해머의 자체 중량을 곱한 1,599[N](163[kgf])으로 계산되어 맥동 충격량이 자체 중량에 비해 매우 양호하게 발생하고 있음을 보여주고 있다.

Table 2. Measurement result Summary

Mesurement Item	Standard value	Measure Value
Vibration Accelaeration Speed[m/s ²]	39.24	63.96
Vibration Accelaeration Power(Calculated)[N]	981	1,599

3. 결론

본 연구에서 제안한 맥동과 전자 해머는 H-Bridge 구동원리에 기초한 전자 기계식 Hammering 구동 방식으로 기존의 단순한 타격이나 진동이 아닌 기계진동과 충격력을 동시에 발생시키는 방식이다. 전자 해머의 물리적 충격량을 만들어 내는 EI 코어 구조의 전자 해머 액츄에이터의 설계를 설계하였으며, 충격량을 크게 하기 위한 맥동과 구동 알고리즘을 적용하였다. 제안한 전자 해머 시스템의 유용성을 검증하기 위하여 진동 가속도 측정 기법을 통하여 제안한 시스템의 유용성을 보였다.

References

- [1] Automation Devices, "Electric Vibrators" [cited 2016 Mar 20], Available From: <http://www.autodev.com/products/industrial-vibrators/electric/>(accessed Mar. 30, 2016)
- [2] Star Trace Pvt. Ltd., "Electro Magnetic Vibrators", [cited 2016 Mar 20], Available From: <https://www.startraceld.com/electro-magnetic-vibrators.html>(accessed Mar. 30, 2016)
- [3] B.K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, Inc., 1986.
- [4] D.J. Ahn, "Electro-magnetic vibrators", R.O.K. Patent 1015233520000, 2014.
- [5] P. Wood, Switching Power Convertors, Litton Educational Publishing, INC, 1981.
- [6] D.J. Ahn et al, "High and low frequency vibration generating system", R.O.K. Patent 101239270000, 2012.
- [7] B&K, "PULSE 3560B", [cited 2016 Mar 20], Available From: <http://www.bksv.jp/doc/bu0228.pdf>(accessed Mar. 30, 2016)

안 동 준(Dong-Jun Ahn)

[정회원]



- 1988년 2월 : 단국대학교 대학원 전기공학과 (전기공학석사)
- 1995년 2월 : 단국대학교 대학원 전기공학과 (전기공학박사)
- 2008년 3월 ~ 2009년 8월 : 아주자동차 대학 취업 센터장
- 1995년 3월 ~ 현재 : 아주자동차 대학 자동차계열 교수

<관심분야>

디지털 및 아날로그 신호처리, 임베디드 콘트롤러

남 현 도(Hyun-Do Nam)

[정회원]



- 1979년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
- 1986년 8월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2010년 6월 ~ 현재 : 단국대학교 산업기술연구소장
- 1982년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 전자전기공학부 교수

<관심분야>

디지털 신호처리, 능동소음제어, 적응신호처리