

## 진동 시험용 소형 전자식 가진기 제작에 관한 연구

주강우 · 이재경 · 이봉건 · 윤혜준 · 김광선<sup>†</sup>

<sup>†</sup>한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

### Study on the Manufacturing of Compact Electronic Shaker for Vibration Test

Kangwo Joo, Jaegyong Lee, Bonggun Lee, Hyejun Yoon and Kwang sun Kim<sup>†</sup>

<sup>†</sup>KOREATECH School of Mechatronics Engineering

#### Abstract

This paper is on the design and manufacturing of vibration tester (shaker) for experiments about effects on the performance of semiconductor chips and Li-ion batteries by vibration. Shaker in the market are quite expensive, it is difficult for basic researchers to contact. In this study, in order to improve this, we designed and manufactured with an entry-level into mass production possible approaches in terms of performance required to a minimum. The shaker system is operated by Matlab and LabView. The target performances are 200Hz frequency and 5% error, and these were satisfied.

**Key Words** : Li-Ion Battery, Vibrator, Electronic Shaker

#### 1. 서 론

최근 반도체 칩의 소형화 및 사용범위의 확대 등으로 인하여 휴대하는 반도체 칩의 유형이 증가하는 추세이다. 특히 휴대하는 경우에 직결되는 문제가 전원인데, 이에 부합하여 리튬 이온 배터리의 사용 또한 증가하게 되었다. 기존에는 반도체 칩 및 리튬 이온 배터리의 경우 열적인 문제에 초점을 두었으나, 최근에는 외부에서 가해지는 진동이 칩이나 배터리의 성능에 영향을 줄 수 있다는 논문이 발표되면서 관련된 연구가 진행되고 있다. 진동의 영향을 평가하기 위하여 사용되는 진동시험기의 경우는 구성이 매우 복잡하고 설계가 까다로워서 가격이 고가이기 때문에 기초연구자들이 다소 접하기 어렵다는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 다양한 조건에서 연구가 가능하도록 필요한 조건을 적용 가능한 진동시험기(이하 가진기)를 설계 및 제작한다. 기본적으로 모터 설계 방법에 초점을 두었으며, 시뮬링크, 매트랩, 랩뷰 등을 이용하여 제어를 설계하였다. 본 연구에서 목표로 하는 가진기의 성능은 주파수의 경우 리튬 이온 배터리의 표준 실험 진

동인 55 Hz의 약 4배인 200 Hz, 오차는 5% 내이다.

#### 2. 가진 시스템

본 연구에서 제작한 가진 시스템은 컴퓨터, 컨트롤러, 증폭기, 가속도계, 진동기로 구성된다.

##### 2.1. 작동의 개요

사용자가 시험하고자 하는 항목에 대한 정보를 컴퓨터에 입력한다. 컴퓨터로부터의 정보가 제어기를 통해 전기적 신호로 출력되고 증폭기를 통해 가진기를 동작시킨다. 최종적으로 가진기에 부착된 가속도계에서 측정된 정보를 제어기로 피드백 시켜 신호의 일치 여부를 확인한다.

##### 2.2. 관련 이론

###### 2.3.1. 기본 원리

본 연구에서 제작한 가진기는 원통형 자석의 원리를 기본으로 하고 있으며 Fig. 1-2에 나타내었다. Fig. 1을 보면 본 프레임(Born frame)으로 이음쇠(Yoke)위에 환형 영구자석이 올라와 있다. 영구자석에 의해 중심축과 플레이트 사이에 있는 공극에 균일한 자장이 생성되고,

<sup>†</sup>E-mail : kskim@koreatech.ac.kr

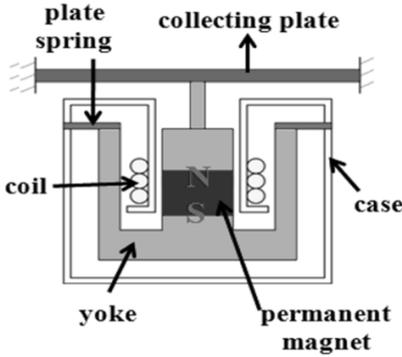


Fig. 1. Parts in shaker.

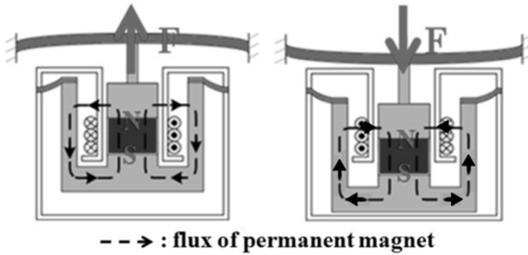


Fig. 2. Principle of shaker.

코일에 전류를 흘려주면 플레밍의 왼손 법칙에 따라 가진력이 발생한다. 이때 발생하는 가진력은 식 (1)과 같이 계산된다[1-3].

$$F_c(t) = L_c B_g I(t) \tag{1}$$

여기서,  $L_c$ : 감긴 코일의 길이  
 $B_g$ : 공극자속밀도(Gap flux density)  
 $I(t)$ : 코일의 전류

2.3.2. 정량의 함수화[1,2]

가진기에서 가장 중요한 개념은 공극 자속밀도( $B_g$ )로써, 함수화를 통하여 제어를 설계할 수 있다. 공극자속밀도( $B_g$ )는 영구자석의 고유특성인  $B_m H_m$ , 체적  $A_m L_m$ , 공극의 투자율  $u = B_g / H_g$ 와 체적  $A_g L_g$ , 자기저항계수  $f$ 와 자속누설계수  $F$ 를 이용하여 식 (2)와 같이 표현할 수 있다[4].

$$B_g = \sqrt{\frac{u A_m L_m H_m}{\pi L_g (D_p + L_g) T_p f F}} \tag{2}$$

여기서 자속누설계수  $F$ 는 자로(磁路)의 기하학적 형상에 관계되는 양으로서, 식 (3)으로 주어진다[5].

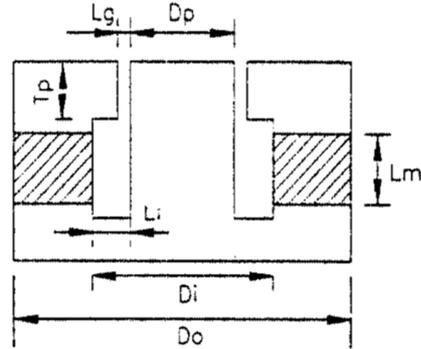


Fig. 3. Section of Shaker.

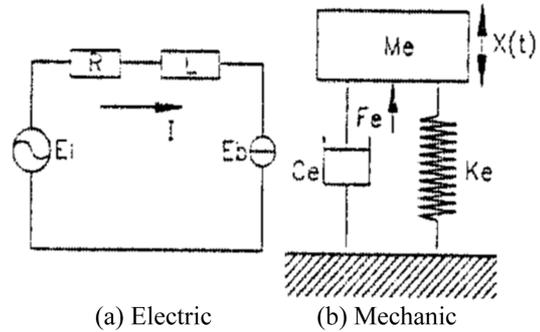


Fig. 4. System modeling.

$$F = 1 + 5 \frac{L_g D_0}{T_p D_p} \tag{3}$$

자석과 플레이트사이의 접촉이 완전하지 못하거나 자로단면적이 갑자기 줄어들 때, 혹은 플레이트의 투자율이 작아서 높지 않은 자속밀도에서 쉽게 포화되는 경우 등을 고려하기 위한 자기저항계수  $f$ 의 값은 일반적으로 1.2 ~ 1.5인 것으로 알려져 있는데, 본 연구에서는 1.5를 택하였다.

Fig. 3에 보인 것과 같은 형상의 자석과 자로의 경우 공극의 단면적  $A$ 대신 중심축의 직경  $D_g$ 와 공극높이  $T_p$ 를 이용하면 식 (4)와 같이 표현된다[6].

$$B_g = \sqrt{\frac{u A_m L_m B_m H_m}{\pi L_g (D_p + L_g) T_p f F}} \tag{4}$$

구동부와 구동부 지지대는 Fig. 4와 같이 전기회로부와 기계회로부로 나누어 모델링 할 수 있다. Fig. 4(a)는 전기 회로부를 나타내는데,  $E_i$ 는 입력전압,  $R$ 과  $L$ 은 각각 코일의 저항과 인덕턴스,  $E_b$ 는 코일부의 운동에

의한 역기전력을 나타낸다. Fig. 4(b)는 기계 회로부를 나타내는데,  $M_e$ 는 구동부의 전체질량을 나타내며,  $C_e$ 와  $K_e$ 는 각각 구동부지지대의 감쇠 및 강성계수를 나타낸다.

공극자속밀도가 일정하다고 가정할 때, 역기전력상수  $K_b$ 는 코일길이  $L_e$ 와 공극자속밀도  $B_g$ 의 곱으로써 식 (5)와 같이 표현된다. 역기전력은 식 (6), 전기회로의 지배방정식은 식 (7)과 같이 표현된다[7-9].

$$K_b = L_e B_g \quad (5)$$

$$E_b(t) = K_b V(t) = K_b \frac{dx(t)}{dt} \quad (6)$$

$$E_r(t) = E_b(t) + RI(t) = L \frac{dx(t)}{dt} \quad (7)$$

기계회로부에서 구동부지지대강성이 선형이며 점성 감쇠를 내포하고, 구동부는 강체라고 가정하면(엄밀하게는 구동부 자체도 탄성구조물로서 이 부분의 축방향 공진주파수에 의해 가진기의 고주파공진부가 결정됨), 기계회로부의 운동방정식은 식 (8)과 같다[10].

$$M_e \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + C_e \frac{dx(t)}{dt} + K_e x(t) = F_e(t) \quad (8)$$

위 식을 종합하여 입력전압에 대한 출력가속도의 전달함수를 라플라스 변환자를 이용하여 표현하면 식 (9)와 같다[11].

$$\frac{X(s)s^2}{E_i(s)} = \frac{\frac{K_b}{M_e} S^2}{(s + \omega_1)(s^2 + 2\zeta_e \omega_e s + \omega_e^2)} \quad (9)$$

여기서,  $\omega_1$ ,  $\omega_e$ ,  $\zeta_e$ 는 식(10)과 같이 주어진다[12].

$$\omega_1 = \frac{K_e R}{K_b^2}, \quad \omega_e = \frac{K_b}{\sqrt{M_e L}}, \quad \zeta_e = \frac{R}{2K_b} \sqrt{\frac{M_e}{L}} \quad (10)$$

$\omega_e$ ,  $\zeta_e$ 는 각각 전기적 공진주파수 및 전기적 감쇠율을 나타낸다. 또한 입력 전류에 대한 출력가속도의 전달함수는 식 (11)과 같이 표현된다[13].

$$\frac{X(s)s^2}{I(s)} = \frac{K_b s^2}{M_e s^2 + C_e + K_e} = \frac{\left(\frac{K_b}{M_e} s^2\right)}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (11)$$

여기서,  $\omega_n$ ,  $\zeta_n$ 는 식 (12)와 같이 주어진다[14].

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_e}{M_e}}, \quad \zeta_n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_e^2}{K_e M_e}} \quad (12)$$

$\omega_n$ ,  $\zeta_n$ 는 각각 저주파 공진주파수 및 기계부 감쇠율을 나타낸다. 구동중인 가진기의 코일부 온도를 예측하는 것은 가진기의 최대출력을 산출하기 위해 필수적 사항이다. 영구자석형 진동식가진기는 흔히 자연공기 냉각상태에서 사용되기 때문에 본 연구에서는 이 상태에서의 온도상승을 열전도만을 고려하여 예측하였다.

### 3. 기구 설계

#### 3.1. 부품의 명칭 및 재질

본 연구에서 제작한 가진기의 부품 명칭을 Fig. 5에 나타내었다.

#### 3.2. 각 부품의 도면

3.1절에서 언급한 부품들의 세부 도면 및 제원을 Fig. 6 과 Table 1에 나타내었다.

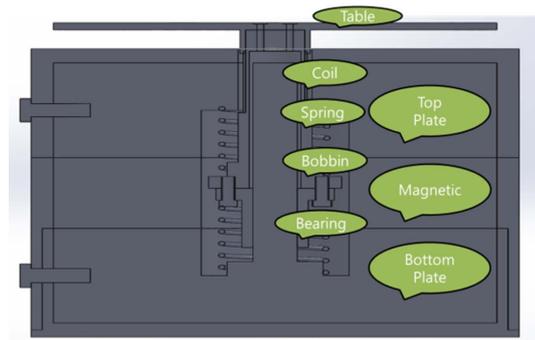


Fig. 5. Naming of parts.

Table 1. Specification of parts.

| Parts        | Material             | Density (kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------|----------------------|------------------------------|
| Magnetic     | Ferrite              | 7400                         |
| Top plate    | SM45C                | 8000                         |
| Bottom plate |                      |                              |
| Bobbin       | ALDC2 (Al-Si-Mg)     | 2700                         |
| Spring       | Stainless steel      | 8000                         |
| Coil         | Copper Clad Aluminum | 2800                         |
| Table        | Aluminum             | 2700                         |
| Bolts        | SCM535               | 8000                         |
|              | SUS304               | 8000                         |
| Case         | Aluminum             | 2700                         |

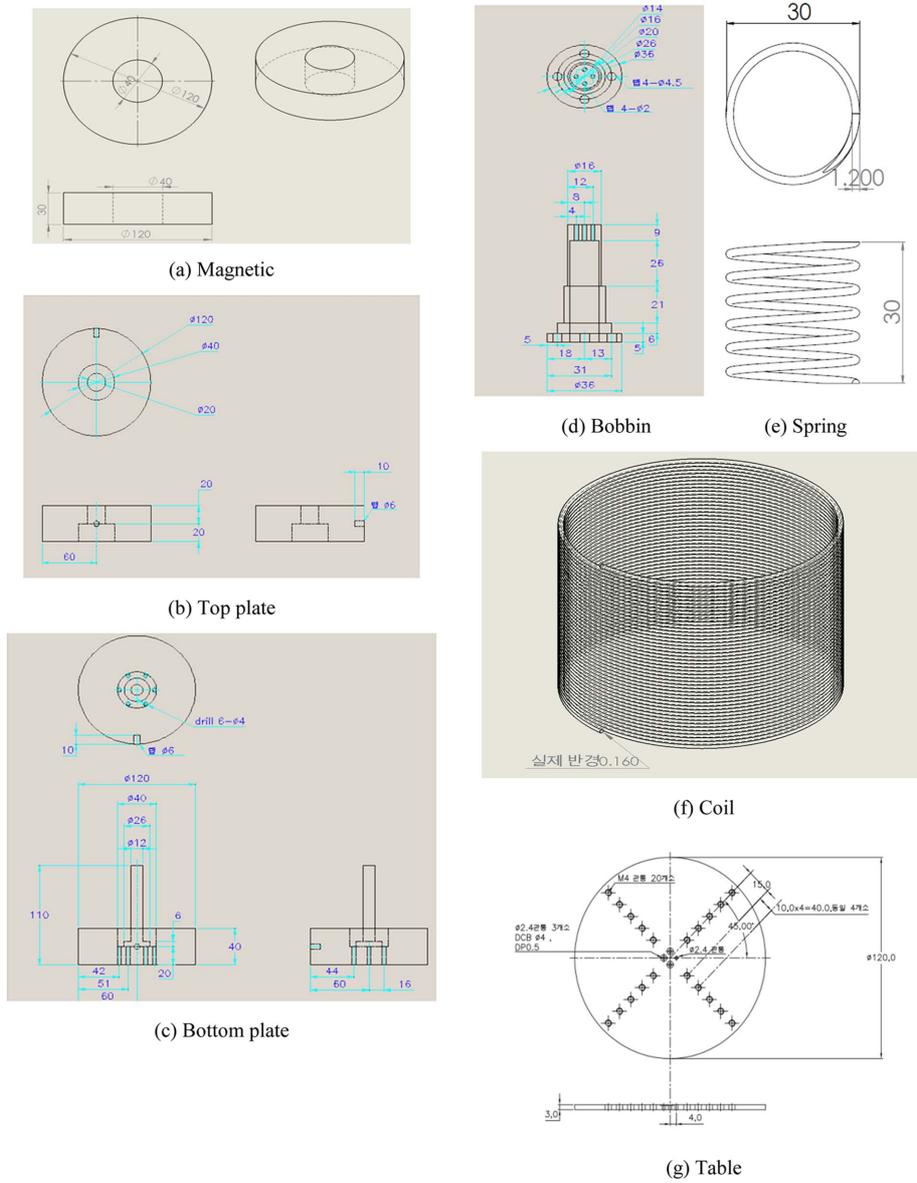


Fig. 6. Drawings of parts.

3.3. 조립

앞에서 설계된 내용을 바탕으로 Fig. 7에 나타난 것과 같이 조립하였다. 최종 완성된 가진기는 Fig. 8에 나타내었다.

4. 제어 설계

본 연구에 제작한 가진 시스템은 Fig. 9에 나타난 개

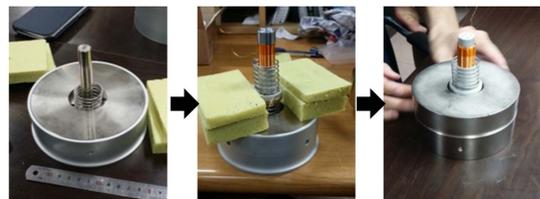


Fig. 7. Assembly process.



Fig. 8. Assembled shaker.

략도와 같이 제어경로를 갖는다.

#### 4.1. 하드웨어의 전달함수

하드웨어의 전달함수를 식 (13)에 나타내었다[15].  $\omega_1$ ,  $\omega_e$ ,  $\zeta_e$ 는 식(10)에 표현되어 있다[12].

$$\begin{aligned} \frac{F(s)}{E_i(s)} &= \frac{M_e K_b s^2}{M_e L s^3 + (M_e R + C_e L) s^2 + (K_b^2 + C_e R + K_e L) + K_e R} \\ &= \frac{K_b L}{(s + \omega_1)(s^2 + 2\zeta_e \omega_e s + \omega_e^2)} \end{aligned} \quad (13)$$

#### 4.2. 제어기 설계

기본적 원리와 구동의 방식에서 모터제어와 같은 방식을 적용한 설계를 하였다. 기본적인 방법으로는 모델 기반의 PID 계수조정법[15]과 적분누적방지법[15]을 사용하여 하드웨어의 전달함수에 가속도제어, 속도제어, 위치제어를 설계하였고, 최종적으로 5% 오차범위 내에서 설정하였다.

##### 4.2.1. 가속도 제어기

$$a(s) = \frac{\frac{K_p s + K_i}{L} a^*(s)}{s^2 + \frac{K_p + R}{L} s + \frac{K_i}{L}} \rightarrow \frac{a(s)}{a^*(s)} = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \quad (14)$$

$\omega_{cc} = 1000$  Hz로 가정한다.

##### 4.2.2. 속도 제어기

가속도 제어기의 이득이 1이 되면, 그 전체를 한 제어계로 볼 수 있고 식 (15)와 같이 설계가 용이해진다.

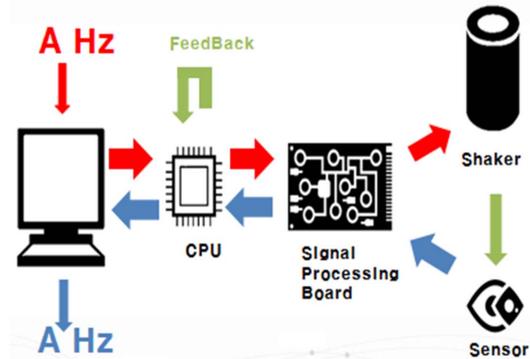


Fig. 9. Signal flow chart.

$$\begin{aligned} |G_c(s)| &= \left| \frac{s}{s + \omega_{cc}} \right| \cong 1 \\ G_c(s) &= K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \cong K_{sp} \end{aligned} \quad (15)$$

일반적으로  $\omega_{sc}$ ,  $\omega_{pi}$ 의 값을  $\omega_{cc}$ 의 1/10, 1/100으로 설정하고, 식 (16)과 같이 표현된다.

$$K_{sp} = \omega_{sc}, \quad K_{si} = K_{sp} \omega_{pi} \quad (16)$$

##### 4.2.3. 위치 제어기

위치 제어기의 경우 제어계 자체에 적분인자가 포함되어 있을 경우 비례적분이 적합하므로 이를 이용한다. 위치 제어기도 속도 제어기와 같은 방법으로 이득을 1로 가정함으로써 식 (17)과 같이 용이한 설계가 가능하다.

$$G_c(s) = |K_p| \cong \omega_{pc} \quad (17)$$

$\omega_{pc}$ 는 일반적인 경우  $\omega_{sc}$ 의 1/10 ~ 1/5로 설정한다.

#### 4.3. 시뮬레이션

가진기의 목표 주파수에 따른 가속도의 식을 계산하면 식 (18)과 같이 표현되고,

$$A(t) = 4\pi^2 f^2 \sin(2\pi ft) \quad (18)$$

이에 따라 시뮬레이션에서의 신호는 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{signal} = A_0 \sin(2\pi ft), \quad A_0 = \frac{G}{4\pi^2 f^2} \quad (19)$$

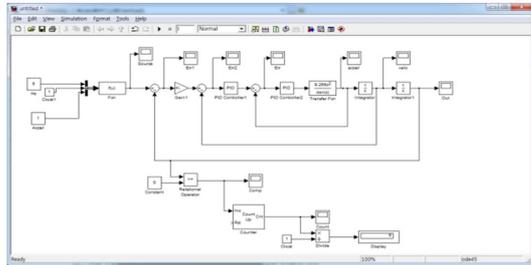


Fig. 10. Block diagram.

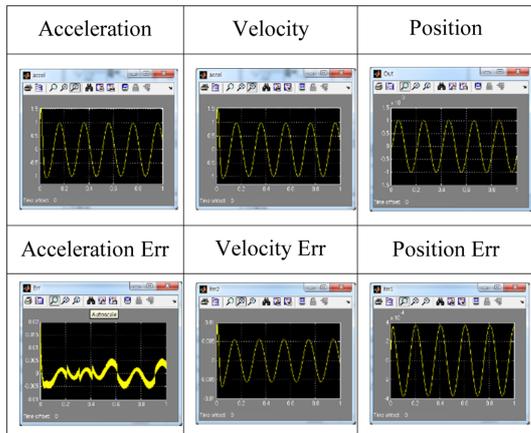


Fig. 11. Simulation results.

G는 목표가속도이다. 시뮬레이션의 블록 다이어그램 및 결과를 Figs. 10-11에 나타내었다.

오차 및 검출되는 주파수가 목표 내에서 확인되었고, 최종적으로 랩뷰를 이용하여 구현하였다.

4.4. 제어기 구현

Fig. 12에 랩뷰 구성도를, Fig. 13에 가진기의 하드웨어 회로를 나타내었다.

구현 및 실험 결과 센서의 계측속도 및 시간, 연산속도의 정밀성 문제가 발견되어 이를 보완하기 위해 전류의 측정 및 처리를 통한 회로를 추가하였다. 최종 완성된 랩뷰 회로는 Fig. 14에 나타나 있다.

정상작동 확인을 위한 프론트 패널을 작성하였으며, Fig. 15에 나타내었다. 원하는 주파수, 출력되는 주파수가 표시되고, 이때 요구되는 전압 및 전류 신호를 출력한다.

5. 결 론

반도체 칩 및 리튬 이온 배터리의 진동 시험을 위한

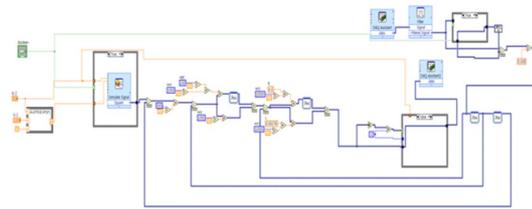


Fig. 12. Modeling in LabView.

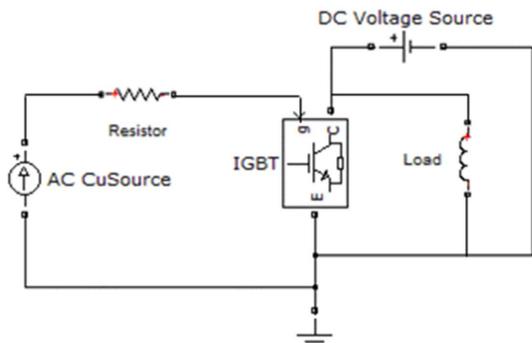


Fig. 13. Hardware of shaker.

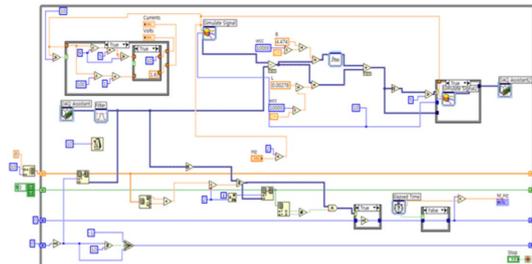


Fig. 14. Final modeling in LabView.



Fig. 15. Front panel for control.

가진기를 제작 및 설계하였으며, 원하는 성능인 200 Hz의 주파수, 5%의 오차범위를 만족시키는 성과를 얻었다. 이는 1차적으로 가진 시스템 구현에는 성과를 이루었고, 추후 연구에서 지그 제작 및 다축 시스템 구현이 이루어진다면 해당 분야에서 많은 연구 성과를 얻을 수 있을 것으로 전망된다.

### 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2013R1A2A1A01013835)입니다. 본 저자 외에 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부의 고경식, 정상순, 최종영이 연구에 참여하였습니다.

### 참고문헌

1. Lee, H. C., and Kim K. J., "Design, Manufacture and Performance Test of an Electrodynamical Exciter", *Trans. Korean Soc. Mech. Engineers - A*, 20(1), pp. 222-231, (1991).
2. Kim, U.Y., "Desing and application of active damper using electrodynamic actuator(ME-Theses \_Master)", *KAIST*, (2001).
3. Park, T.I., "Desing and manufacture of an electrodynamic exciter based on dynamic analysis(ME-Theses \_Master)", *KAIST*, (1990).
4. Lee, H.C., "Design, Manufacture and Performance Test of an Electrodynamical Exciter(ME-Theses \_Master)", *KAIST*, (1991).
5. Ratz, A.Z., and Barlett, F.R., "Vibration Simulation Using Electrodynamic Exciter", *ASME/AMD-12*, pp.61-99(presented at ASME/DED Vibrations Conference), (1975).
6. Fink, D.G., and Carroll, J.M., *Standard Handbook for Electrical Engineers*, Tenth Edition, McGraw-Hill, (1968).
7. Cheon, H.Y., *Standard Electric Machine*, Cheong Moon Gak Press, (1990).
8. Makino Noboru, *Permanent Magnet*, AGUNE Ltd., (1985)
9. Crangle, J., "The Magnetic Properties of Solids", Edware Arnold Publishers Limited, London, (1997).
10. Olsen, N.S., "Using And Understanding Electrodynamic Shakers in Modal Applications", *Proceedings of the IMAC*, pp 1160-1167, (1986).
11. M, N. Ozisk, *Basic Heat Transfer*, McGraw-Hill, (1977).
12. Tomlinson, G.R., "Force distribution in resonance testing of structures with electrodynamic vibration exciters", *Journal of Sound and Vibration*, 63(3), pp.337-350, (1979).
13. *Spike*, Kanam press, (1989).
14. Boast, W.B., "*Vector Field*", Harper and Row Publishers Incorporated, New York, (1964).
15. Kwon, U.H., Kwon, O.K., Hong, K.S., and Lee, J.H., *Engineering of Control System*, Cheong Moon Gak Press, pp332-337, (2013).

접수일: 2015년 2월 27일, 심사일: 2015년 3월 10일,  
2차심사일: 2015년 3월 17일, 게재확정일: 2015년 3월 23일