

VCM의 제어 및 제진 장치 응용에 관한 연구

김진만¹ · 남택근[†]

(원고접수일 : 2012년 10월 8일, 원고수정일 : 2012년 12월 14일, 심사완료일 : 2013년 1월 8일)

Study on the control of VCM and its application to the vibration isolator

Jin-Man Kim¹ · Taek-Kun Nam[†]

요약: 엔진 및 회전기기의 진동은 선체의 피로도를 증가시켜 내구성을 저하시키는 원인이 된다. 이를 방지하기 위하여 엔진 및 회전기와 선체사이에는 댐퍼를 부착하여 진동을 최소화 하고 있다. 일반적으로 선박에 부착하는 댐퍼는 수동형 댐퍼로 중·고주파의 특정 진동영역에 대하여 제진 특성을 갖도록 설계되어있지만 저주파영역에서는 그 효과를 기대하기 힘들다. 이에 본 연구에서는 보다 광대역의 진동신호에 대해 높은 제진특성을 얻기 위하여 VCM을 이용한 능동형 제진 장치를 개발하였다. 제진장치를 제어하기 위해 라우스후리츠 안정조건과 한계감도법을 이용하여 PID제어기를 구성하였고, 제어기 출력은 2상환과 4상환 초퍼회로를 이용하여 VCM을 구동할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션과 실제 실험을 통하여 제어알고리즘과 제어장치의 유용성을 확인하였다.

주제어: 제진장치, 보이스코일모터, 안정조건, PID 제어기, DC초퍼

Abstract: The degradation of durability and increase of fatigue on the ship are mainly caused by vibration of the engine and rotating machineries. The damper to minimize the influence from vibration is usually attached between the machineries and its base. General damper applied on the vessel is passive damper which is designed to attenuate specified frequency signals, i.e, high frequency vibration signals. But it is hard to anticipate its performance for low frequency signals. In this research, active vibration isolator using VCM is developed to suppress wide band vibration signals. Routh-Huritz's stable condition, ultimate sensitivity method and parameter tuning are applied to derive PID parameters and 2 and 4 phase choppers are also adapted to drive VCM. Simulation and experiments are executed to confirm the effectiveness of the proposed control schemes.

Keywords: Vibration isolator, VCM (voice coil motor), Stable condition, PID controller, DC chopper

1. 서론

현대의 많은 기계장치는 화석연료를 이용한 폭발력을 회전력으로 변환하여 동력을 전달하고 있으며 이 과정에서 소음과 진동이 발생하게 된다. 이러한 진동은 기계장치의 내구성에 다양한 형태로 문제를 일으키게 된다. 기계설비에 지속적인 충격을 가함

으로써 설비의 수명을 감소시키게 되고, 고장의 원인이 되어 유지관리에 나쁜 영향을 미치기도 한다.

따라서 대부분의 엔진 또는 모터가 적용되는 장치에는 진동을 최소화하기 위하여 댐퍼를 장착하고 있다. 실제로 자동차, 항공기 등에서는 엔진의 진동이 차체와 기체로 전달되는 것을 막기 위하여 엔

[†] 교신저자: (530-729) 전남 목포시 해양대학로 91,

목포해양대학교 기관시스템공학부, E-mail:tknam@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7225

1 목포해양대학교 대학원, E-mail:papa713@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7225

진 장치부와 몸체사이에 고무 댐퍼를 장착시켜 진동을 저감시킨다. 특히 선박은 장시간 항해를 위해 내부에 추진기와 추진기를 구동시키기 위한 크고 작은 보조기계들을 탑재하고 있으며 많은 댐퍼들이 사용되고 있다. 이러한 댐퍼는 누적된 피로에 따른 선체 파손을 방지하기 위해 진동을 흡수하는 중요한 역할을 수행하게 된다. 하지만 고무댐퍼와 같은 수동형댐퍼는 넓은 주파수 영역에 대해서는 제진특성의 한계를 가지고 있으므로 이러한 단점을 극복하기 위해서는 진동의 강약에 따라 유기적으로 제진 성능을 발휘할 수 있는 능동형 제진 장치의 개발이 필요하다. 제진장치에서 액추에이터는 제진성능을 결정짓는 중요한 요소이며, VCM은 영구자석 선형 전동기로서 기계적 마찰, 백래쉬(Backlash) 등이 거의 없으며 응답특성이 좋은 특징을 갖추고 있다[1].

VCM을 적용한 종래의 연구결과를 살펴보면 실험을 통해 VCM이 가지는 전기적, 기계적인 특성을 분석하고 있다[2]. 한편 Loop-Shaping 기법 및 피드포워드 제어를 사용하여 미소 질량의 가진원에 대한 6자유도 제진장치에 VCM을 적용하고 있다[3]. 하지만 하중이 큰 진동성분에 대해서는 적용이 곤란하고 외란과 상부 플레이트 출력신호와와의 비례 제어 신호를 이용하여 디지털 필터를 적용하는 피드포워드 제어를 사용하고 있어 위치추종 시 정상상태의 오차가 지속적으로 남을 수 있는 문제를 안고 있다.

또한 정밀 자동화 조립공정에서 사용되는 VCM제어를 위하여 위치(P제어)와 속도(PI제어)제어를 직렬로 연결하여 사용하고 있다[4]. 이러한 제어 방식은 속도의 정상상태 오차를 제거하기 위한 적분기로 인해 과도상태에서의 동특성 저하 및 가감속 구간에서 와인드업(Wind-up)에 의한 진동 현상이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 VCM을 적용하여 하부에서 발생하는 진동신호가 상부에 전달되는 것을 차단하는 능동형제진장치를 개발하였다. 개발한 제진장치의 제어를 위해 라우스휴리스츠의 안정조건과 한계감도법 및 파라미터 튜닝을 통한 PID제어를 설계하였고, 시뮬레이션을 통해 제어기의 성능을 확인하였다.

아울러 VCM의 드라이버로써 2상한 초퍼와 4상한 초퍼를 적용하여 제진특성을 비교하였고, 하부로부터 가진 신호가 있는 경우와 없는 경우에 대해 제어알고리즘을 적용하여 제진장치의 제진성능을 살펴보았다.

2. 능동형 제진장치 설계

2.1 능동형 제진장치 개념 설계

현재 가장 보편적으로 쓰이고 있는 제진 장치는 수동형 제진장치이다. 즉, 강성계수와 댐핑계수를 가지는 고무로 표현할 수 있고, 중·고주파의 진동 성분에는 적절한 강성계수와 댐핑계수를 설정하여 진동을 차단할 수 있다. 이러한 수동형 제진장치는 특정 주파수 영역의 진동성분에 대해서는 제진효과를 기대할 수 있으나 그 이외의 영역에서는 제진성능을 기대하기 어려운 단점을 가지고 있다.

하지만 능동형 제진장치는 수동형 제진장치에 액추에이터(actuator)를 추가함으로써 다양한 주파수 영역의 진동신호를 억제할 수 있다.

본 논문에서는 Figure 1과 같이 상부제진판, 하부판, 변위측정용 센서, 제진판 사이에 액추에이터를 장착한 제진장치를 구상하였다[5].

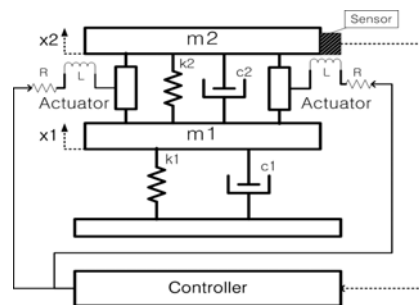


Figure 1: Active vibration isolator

2.2 액추에이터 모델링(VCM)

능동형 제진장치의 성능은 액추에이터에 의해 좌우된다. 본 연구에서는 선형모터로써 고주파수대의 진동영역에서도 응답특성이 뛰어나고 모델링이 간단한 VCM을 액추에이터로 적용하였다.

VCM은 일반적인 전동기와 같이 전기에너지를 물

리적 에너지로 변환하여 이용하고, 물리적 회로 (Figure 2)와 전기 회로(Figure 3)로 분리하여 모델링할 수 있다.

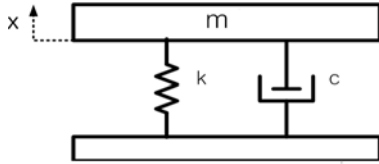


Figure 2: Mechanical circuit of VCM

VCM의 동적모델링은 운동에너지($T = \frac{1}{2}m\dot{x}^2$), 위치에너지 ($V = \frac{1}{2}kx^2$), 마찰에너지 ($D = \frac{1}{2}c\dot{x}^2$)를 라그랑제 운동방정식에 적용하여 다음과 같이 유도할 수 있다[5][6].

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (1)$$

하지만 실질적으로 VCM에 직접적으로 작용하는 강성계수는 없으며, 전류의 와동 또한 미미하여 무시할 수 있고, VCM에서의 마찰력 또한 공기와의 접촉에 의한 현상만 있으므로 무시할 수 있어 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$m\ddot{x} = F \quad (2)$$

또한 VCM은 코일의 인덕턴스 성분과 자체 저항을 고려하여 Figure 3과 같이 나타낼 수 있다.

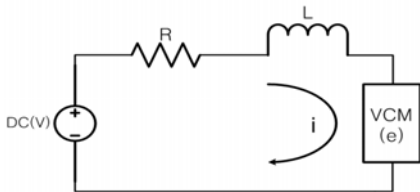


Figure 3: Electrical circuit of VCM

Figure 3에 대해 키르히호프의 제 2법칙을 적용하여 다음과 같은 전압의 관계식을 유도할 수 있다.

$$V - e = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

단, V, i, R, L 은 각각 전압(V), 전류(A), 저항(Ω), 인덕턴스(H)를 나타내고 e 는 역기전력을 의미한다. 여기에서 역기전력은 $e = K_f \dot{x}$ 로 표현가능하며 K_f 는 코일권수, 자속밀도, 도체의 길이에 비례하는 상수항이다.

VCM에서 전류와 기계적인 힘의 관계식 $F = K_f i$ 와 식 (2), 식 (3)으로부터 다음과 같은 전달함수를 얻을 수 있다.

$$G(s) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{K_f}{Lms^3 + Rms^2 + K_f^2s} \quad (4)$$

2.3 제어알고리즘 설계

식 (4)로 표현되는 VCM을 제어하기 위해 지글러니콜스의 한계감도법(ultimate sensitivity method)을 적용하여 PID제어기를 설계하였으며, 계인을 구하기 위한 임계점과 임계주기의 도출에는 라우스휴리츠(Routh-Hurwitz)의 안정화 조건을 이용하였다.

임계점을 구하기 위해 Figure 4 와 같이 비례제어기만을 포함한 시스템의 블록선도를 고려한다 [7]. 이것으로부터 시스템이 안정하기 위한 계인 K 값의 범위를 정할 수 있으며, K 가 최대가 되는 지점이 임계점으로 임계점에 대한 임계 주기를 도출 하여 PID 계인을 구할 수 있다. 단, 식 (4)의 각 계수값 즉, 질량, 역기전력상수, 인덕턴스, 저항값은 $m = 3.5[kg]$, $K_f = 9.6[N/A]$, $L = 0.0046[H]$, $R = 3.6[\Omega]$ 이다.

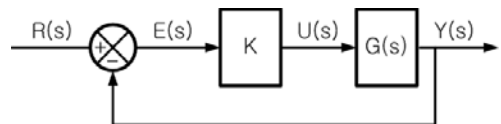


Figure 4: Block diagram considering proportional gain

게인 K 값을 구하기 위해 **Figure 4**의 블록선도를 바탕으로 다음과 같은 **특성방정식 (5)**을 도출하여 라우스 휴리스츠 조건을 적용하였다.

$$0.0161s^3 + 13.65s^2 + 92.16s + 6912K = 0 \quad (5)$$

결과적으로 식 (5)의 특성방정식이 안정하기 위한 K 값을 $0 < K < 11.304$ 과 같이 얻을 수 있었다. VCM의 전달함수 $G(s)$ 가 안정영역에 있기 위한 게인 K 의 범위로부터 11.304는 안정영역과 불안정영역의 경계점으로 이를 임계점, 이 때의 주기를 임계주기로 볼 수 있다. 임계주기는 계단 입력에 대한 출력 그래프를 통해 도출하였다.

최종적으로 도출된 PID제어기의 파라미터 값은 $k_p = 1.1705, k_i = 0.7064, k_d = 0.1726$ 이다¹⁾. 다음의 **Figure 5**는 도출한 PID계인을 적용한 단위계단 입력에 대한 응답 특성을 보여 주고 있다.

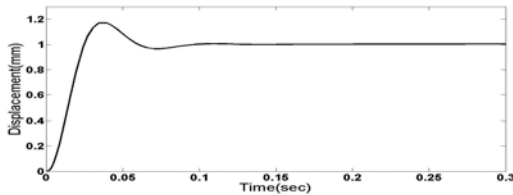


Figure 5: Result of step input

2.4 드라이버의 구성

앞 절에서는 VCM의 모델링과 제어알고리즘을 도출하였고 다음으로는 이러한 VCM을 구동하기 위한 드라이버를 살펴보고자 한다. 본 연구에서는 VCM 구동 드라이버를 초퍼 회로를 이용하여 제작하였다.

Figure 6은 실제 2상한 초퍼회로로 PWM 신호가 on 되었을 때 G1이 VCM에 작동 전압을 인가하고 이에 따라 VCM의 양단에는 항상 단일 극성의 전압이 인가되게 된다. 그리고 PWM신호가 off 되었을 때

G1이 off되고 G2가 on 되면서 모터 코일에서 발생하는 역 기전력 전류를 인가전압과 반대방향으로 내부 순환시키면서 VCM이 회생제동하게 된다.

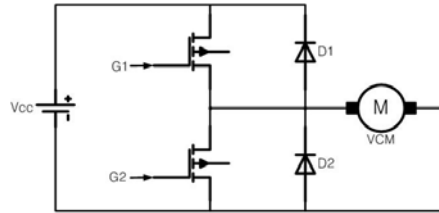


Figure 6: VCM Driver with 2 phase DC chopper

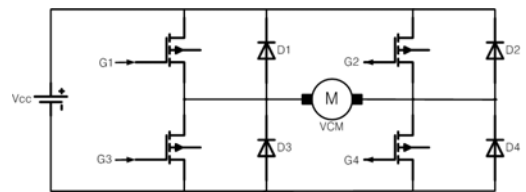


Figure 7: VCM Driver with 4 phase DC chopper

아울러 2상한 초퍼와 비교하기 위하여 **Figure 7**과 같은 4상한 초퍼회로를 적용하였다. 4상한 초퍼회로는 4개의 스위치에 독립적인 신호를 이용하여 전압과 전류의 방향이 독립적으로 반전 가능하게 된다. VCM에 정방향 힘을 인가하기 위하여 정방향 작동 시 G1은 항상 on시키고, G4를 PWM 신호에 따라 스위칭 함으로써 VCM이 작동하게 하고, G2는 G4가 off시에 on시킴으로써 2상한 초퍼회로와 같이 회생 제동이 되도록 스위칭 된다. 또한 VCM에 역방향 전압을 인가하여 VCM의 작동이 반대로 될 때는 G1을 off시키고 G3은 항상 on 시키며, 이 때 G2 스위치를 정방향때의 회생제동용 스위칭으로 사용하지 않고, PWM신호에 따라 스위칭 한다. 그리고 회생제동을 위하여 G2가 off 되었을 때, G4를 on 시키게 한다. 이와 같이 4상한 초퍼 회로는 2상한 초퍼회로에 2개의 스위칭 소자를 추가하여 정·역 방향의 제어가 가능하도록 구성하였다.

2.5 능동형 제진장치의 구성

위에서 살펴본 해석결과를 바탕으로 실제 실험을

1) 한계감도법으로 구한 PID파라미터에 대해 오버슈트 조건을 추가하여 PID계인 튜닝(오버슈트 < 20%, 세트링시간 0.15초)을 하여 얻은 결과값이다.

수행하기 위해 **Figure 8**과 같이 제진장치를 구성하였다. 제진장치는 크게 상부와 하부구조로 되어 있으며 상부에는 하부로부터 발생하는 진동신호를 억제하기 위한 2개의 VCM이 위치하고 있고 하부에는 진동신호를 발생시킬 수 있는 전동기를 장착하였다. 상부판과 하부판의 변위를 계측하기 위해 2개의 레이저변위센서를 사용하였으며, 변위 신호의 획득과 드라이버로의 제어신호는 NI의 cRIO를 이용하였다. 아울러 PC와 cRIO를 연동하여 PC에 제어 상황(변위 및 제어 신호)을 출력하고 값을 저장할 수 있는 UI를 구축하였다[5][8].

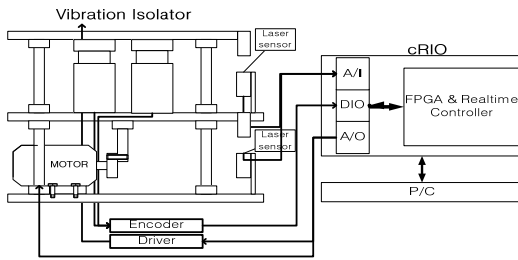


Figure 8: Composition of the system

실험장치에서 사용한 센서 및 부품들의 사양은 다음 **Table 1**과 같다.

Table 1: Specification of system

Components	Description
VCM	<ul style="list-style-type: none"> - Maker: Moticont - Output: 24N(36W) - Stroke: 32mm
Laser sensor	<ul style="list-style-type: none"> - Maker: Sunx - Output: $\pm 5V$ - Resolution: 2mm/V - Range: 20mm
Controller	- NI-9022(RT/FPGA)
AI module	- NI-9205($\pm 10V$)
AO module	- NI-9263($\pm 10V$)
AC motor	<ul style="list-style-type: none"> - Mitsubishi - 200W/3000rpm

Figure 9는 **Figure 1**과 **Figure 8**을 바탕으로 제작한 능동형제진장치와 컨트롤박스를 나타내고 있다.

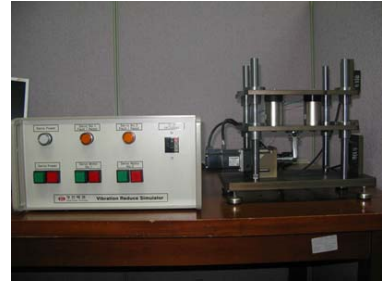


Figure 9: Experimental system

3. 실험

본 연구를 통해 개발된 제진장치의 성능을 확인하기 위하여 제진실험을 행하였다. 실험은 크게 하부판에서 진동이 발생할 때와 없을 때의 두 가지 경우이고 각각의 경우에서 2상한 초퍼와 4상한 초퍼를 적용하여 실험을 수행하였다. 초퍼를 구동하는 PWM신호 주파수는 시행착오를 거쳐 응답특성이 좋은 25 kHz로 설정하였다.

3.1 진동이 없을 때의 제어

제진장치의 하부로부터 진동신호가 없을 경우 즉, 하부의 유도전동기를 고정시킨 상태에서 VCM을 이용하여 상부판을 목표위치에 이동시키는 실험을 행하였다.

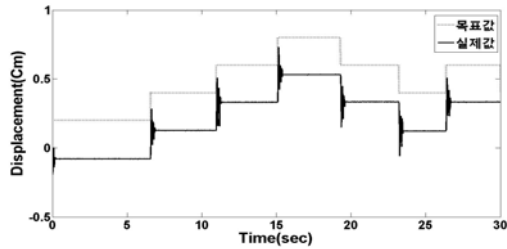
2상한 초퍼와 4상한 초퍼를 이용한 실험결과는 각각 **Figure 10**, **Figure 11**과 같다.

그림에서 점선은 상부판의 목표위치를, 실선은 실제 위치를 의미하고, 일정한 값의 차이를 나타내는 것은 VCM과 상부판의 하중이 오프셋(offset)전압으로 나타나는 것이다. 이 값은 위치에 비례한 오프셋전압을 보정해서 제거할 수 있다.

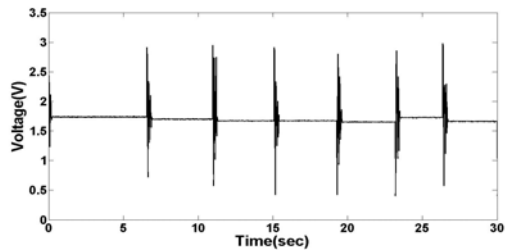
3.1.1 2상한 초퍼 회로

Figure 10의 (a)는 목표치와 실제위치를 나타내고 있고, (b)는 제어량으로 전압값을 의미하며, (c)는 중력에 의한 오프셋을 보정한 오차값(전압)을 나타내고 있다. 전반적으로 목표치에 추종해서

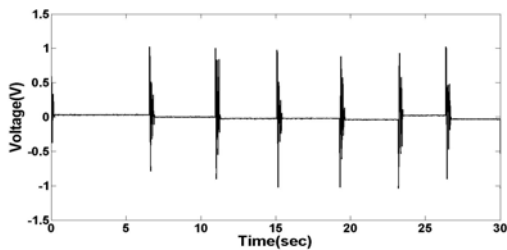
상부판이 움직이고 있으며, 목표치 변화 지점에서 오버슈트가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이 지점들은 VCM이 일정 위치에서 다음 목표지점으로 움직여서 위치를 유지하는 곳으로 중력에 의한 영향을 이겨내기 위한 움직임으로 해석할 수 있다.



(a) Set points and displacement



(b) Control value



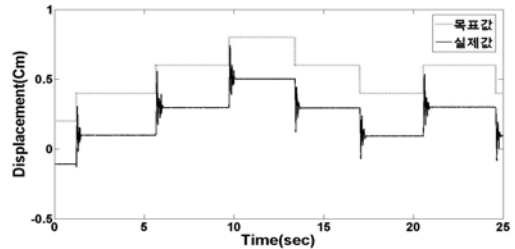
(c) Error value

Figure 10: Experiments with 2 phase chopper

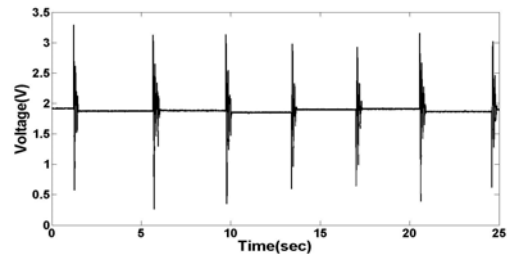
3.1.2 4상한 초퍼 회로

Figure 11은 하부로부터 진동신호가 없는 상태에서 4상한 초퍼 회로를 이용한 상부판의 목표위치, 실제위치 및 제어량을 나타내고 있다. Figure 10의 2상한 초퍼회로의 제어 입력 전압에 비하여 Figure 11의 4상한 초퍼회로의 제어 입력 전압이 약간 높은 것을 볼 수 있다. 입력전압을 기준으로 할 경우, 4상한 초퍼회로의 출력이 2상한 회로의

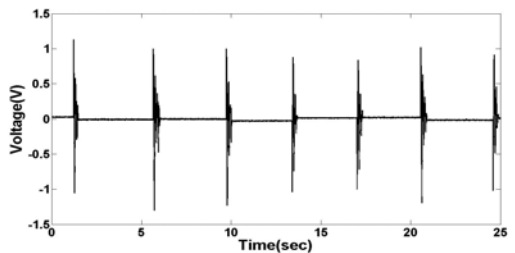
출력에 비하여 약간 낮게 나오는 것은 스위칭소자의 증가 및 PWM 스위칭에 따른 출력손실에 의한 것으로 보여 진다.



(a) Set points and displacement



(b) Control value



(c) Error value

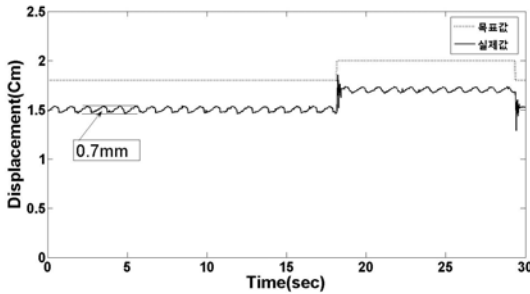
Figure 11: Experiments with 4 phase chopper

하부로부터 진동이 없는 경우 2상한 초퍼와 4상한 초퍼회로를 사용한 실험결과와는 유사한 응답 특성을 보이고 있다.

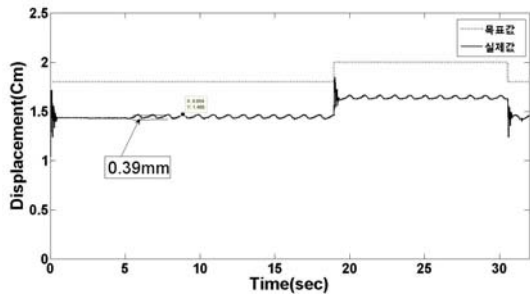
3.2 진동이 있을 때의 제어

3.1절에서는 하부방향으로부터 진동신호가 없는 상태에 대한 실험결과이지만 본 절에서는 Figure 9의 실험 장치에서 하부에 위치한 전동기를 이용하여 상하방향의 진동신호를 발생시켰을 때의 제진특성을 살펴보았다. 즉, 전동기를 이용하여 진폭이

1.5cm, 주파수가 1Hz인 진동신호를 발생시켰을 때의 제진실험을 의미한다. 2상한 초퍼와 4상한 초퍼 회로를 사용한 제진실험결과는 Figure 12와 같다.



(a) Set points and displacement with 2 quadrant chopper



(b) Set points and displacement with 4 quadrant chopper

Figure 12: Experiments with 2 and 4 quadrant chopper

가진원이 있을 경우 실험결과를 살펴보면, 2상한 초퍼를 사용한 (a)의 경우 0.7mm의 리플(peak to peak)이 발생하고 있지만 4상한 초퍼를 이용한 (b)의 실험결과에서는 0.39mm의 리플(peak to peak)을 보이고 있어 4상한 초퍼를 이용한 결과 값이 안정적인 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 하부로부터 발생한 진동이 기기가 설치되는 상부 측에 전달되는 것을 억제할 수 있는 제진장치를 설계하였고, 제어가 용이하고 응답특성이 뛰어난 VCM을 적용하여 제진시스템을 개발하

였다.

레이저변위센서로 제진판의 변위를 계측하고, 리얼타임(real time)과 FPGA기능을 갖춘 컨트롤러를 통해 목적위치로까지 이동하기 위한 제어신호를 발생할 수 있도록 하였다. 제어알고리즘에는 라우스후리츠의 안정조건과 한계감도법을 적용한 PID파라미터에 오버슈트 조건을 부여한 튜닝기법을 적용하였다.

제안한 제어 기법을 제진장치에 적용하여 실험을 행하였고 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다. 실험결과 VCM이 반응하는 최대 속도는 5cm/s로 진폭 1.5cm, 진동주파수 1Hz의 진동을 흡수할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 일반적인 모터가 회전할 때 발생하는 진동특성 영역보다 높은 제진 주기의 진동을 흡수할 수 있어 선박 내의 대표적인 소형 회전장치라고 할 있는 대부분의 모터로부터 발생하는 진동을 억제할 수 있을 것이다.

2상한과 4상한 초퍼 회로는 VCM의 목표 위치 도달 후에는 회생제동이 되어 본 논문의 실험결과와 같이 안정적인 응답을 기대할 수 있다. 전력효율 측면에서는 4상한 초퍼회로보다는 2상한 초퍼회로를 사용하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

한편 VCM을 이용하여 하중을 밀어올리는 경우와 중력에 의하여 떨어지는 힘을 보상해야 할 경우에는 2상한 초퍼 회로를 적용할 수도 있으나 상하방향으로의 응답성과 안정성을 향상시키기 위해서는 4상한 초퍼회로 방식의 VCM 구동드라이버를 사용하는 것이 바람직하다고 생각된다.

위에서 살펴본 바와 같이 본 논문에서는 능동형 제진장치의 설계, 제작을 수행하였고, 제안한 제어 기법의 유용성을 실제 실험을 통해 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2010년 국토해양부소관 연구개발사업 ‘소형선박을 위한 제진기술 개발’로 수행된 연구결과이며 김진만의 석사학위논문("VCM을 이용한 제진장치 개발에 관한 연구")결과를 개선한 것이다.

참고문헌

- [1] Y. B. Bang and T. Higuchi, "Drill breakage detection and measurement of distance to the drilling surface on the micro drilling machine using voice coil motors", International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, vol. 33, no. 1, pp. 15-20, 1999.
- [2] Y. Fujii, K. Maru, and T. Jin, " Method for evaluating the electrical and mechanical characteristics of a voice coil motor", Precision Engineering, vol. 34, no. 4, pp. 802-806, 2010.
- [3] H. G. Gil and K. S. Kim, "Development of a 6-DOF active vibration isolation system using voice coil motor", Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, vol. 20, no. 7, pp. 637-643, 2010 (in Korean).
- [4] S. K. Kim, S. Rajendra, and J. K. Seok, "State feedback-based position controller of VCM for precise automated manufacturing process", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 24, no. 9, pp. 129-135, 2010 (in Korean).
- [5] J. M. Kim, "A Study on the development of vibration isolator using VCM", Master Thesis, Department of Marine Engineering, Mokpo Maritime University, Korea, 2011 (in Korean).
- [6] Norman S. Nise, Control System Engineering, Wiley, 2004.
- [7] Katsuhiko Ogata, MATLAB for Control Engineers, Prentice - Hall international, 2007.
- [8] Gary W. Johnson, LaView Graphical Programming 4/E, Mc Graw Hill, 2006.