

## 스트레인 게이지 변위 추정기를 사용한 유동공진 가진기 개발

### The Development of Vibration Exciter Using Strain Displacement Estimator for Flow Resonance

최재혁\*                      남윤수\*\*  
Choi, Jae-hyuck          Nam, Yoon-su

---

#### Abstract

Heat dissipation technology using flow resonant phenomenon is a kind of new concept in heat transfer area. A vibration exciter is needed to generate air turbulence which has the natural shedding frequency of heat system. A mechanical vibrating device for the air flow oscillation is introduced, which is driven by a moving coil actuator. An analytical dynamic model for this mechanical vibration exciter is presented and its' validity is verified by the comparison with experimental data. Values of some unknown system parameters in the analytic model are estimated through the system identification approach. Based on this mathematical model, the vibration exciter using strain displacement estimator is developed. And in the experiment, the feedback control is used. During the experimental verification phase, it turns out the high modal resonant characteristics of vibrating plate are the major barrier against obtaining a high bandwidth vibration exciter.

키워드: 가진기, 시스템 규명, 공진 억제 제어, 변위 추정기

Keywords: *Vibration Exciter, System Identification, Vibration Suppression Control, Displacement Estimator*

---

#### 1. 서론

음향공명 방열기술은 기존의 열시스템 내부구조를 변화시키지 않고 대류 열전달의 촉진을 위하여 단순히 냉각유체 유동의 자연적인 불안정성을 이용하는 것으로, 냉각유체의 유속을 증가시키거나 냉각유체의 교환 없이 음향을 이용하여 특정주파수의 미소 유동교란을 냉각유체에 가함으로써 유로내 유동에 공명현상을 유발시켜 열전달을 촉진

시키는 혁신적인 방법이라고 할 수 있다. 유로내의 냉각 유체는 고온의 발열 칩(Chip)을 지남에 따라 유동의 박리(Flow Separation)에 의한 전단층(Shear Layer)을 형성하게 되며, 이때 유동의 불안정성에 의해 유동 고유의 주파수를 갖는 와류(Vortices)를 방출하게 된다. 이 주기적인 와류의 주파수가 열 시스템의 고유흐름 주파수(Natural Shedding Frequency)가 된다. 따라서 냉각유체의 유동에 열 시스템의 전단층 불안정성에 기인하는 고유흐름 주파수와 일치하는 유동 교란성분으로 음향을 가함으로써 공명(Resonance) 현상을 일으키므로써 열전달을 혁신적으로 촉진시킬 수 있다 [1-3].

---

\* 강원대학교 대학원 메카트로닉스전공 석사과정

\*\* 강원대학교 기계.메카트로닉스공학부 부교수

위와 같은 유동공진 냉각현상을 가능하게 하기 위하여는 열 시스템으로 고유흐름 주파수를 갖는 유동교란을 외부에서 공급하여야 한다. 즉, 열 시스템의 고유흐름 주파수와 동일한 주파수로 열 시스템 내부의 유체를 교란시키는 가진기(Vibration Exciter)가 필요하다. 본 연구에서 제안된 가진기는 가진 운동판의 무게를 최소화할 수 있는 가동 코일(Moving Coil)형 액추에이터에 의하여 구동되며, 고 대역폭 가진 특성(High Bandwidth Excitation Characteristic)을 얻기 위하여 피드백 제어구조를 갖게 된다. 고 대역폭 가진 시스템 설계를 위한 첫 단계는 가진기의 운동을 표현하는 동적 모델을 정확히 기술하는 것이다. 이를 위하여 가진기 운동판의 고차 진동 모드가 포함되지 않은 단순한 3차의 해석적 모델을 제시하였고, 이 모델에서 사용된 미지의 시스템 상수(Unknown System Parameter) 값들은 시스템 규명(System Identification) 방법에 의하여 추정되었다.

이와 같이 얻어진 해석적 모델에 근거하여 고 대역폭 가진 특성을 갖는 제어기를 설계하였고, 이의 성능이 실험을 통하여 입증되었다. 특히 해석적 모델에서 무시되었던 가진기 운동의 고차 진동 모드들은 고 대역폭 제어 특성을 달성하는데 있어서 주된 제한 요소로 작용하고 있음이 실험적으로 밝혀졌다. 본 연구에서는 저역 통과 필터(Low Pass Filter)가 가미된 노치 필터(Notch Filter)를 사용하여 이 문제를 해결하였지만, 보다 더 근본적인 해결책은 고차 진동모드의 주파수와 그 크기를 유리한 방향으로 설정할 수 있는 가진기 기계구조의 재 설계이다.

## 2. 가진 시스템의 구조 및 해석

고 주파수 대역까지 공기 유동을 발생시킬 수 있는 가진기를 설계하기 위하여는 가진기의 기계적 고유 진동수는 일단 상당히 고 주파수 대역에 위치되어야 한다. 이를 위하여는 가진기의 운동판 무게가 작아야 하고, 또한 가진 운동판의 이동을 제한하는 스프링의 상수 값은 큰 값을 갖도록 설계하여야 한다. 따라서, 운동판의 구동부는 보이스 코일형 액추에이터(Voice Coil Actuator)가 선택된다. 한편, 운동판의 재질로서는 가공성이 우수하고 가벼운 금속에 속하며, 거의 자성을 띠지 않는 알루미늄이 사용되었다. 그림 1은 가진기의 전체적인 구조를 나타낸다. 플라스틱 외부 프레임에 영구

자석이 고정되어 장착되고, 보이스 코일은 가진기의 운동판 중앙에 고정된다.

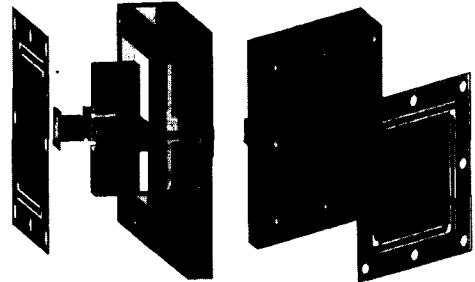


그림 1. 가진기의 기계적 구조

### 2.1 운동판의 구조 및 해석

가진기의 운동판은 그림 2와 같은 형상을 갖는다. 이 판의 들게 부분은 단단하게 가진기 외부 프레임에 구속이 되어 있으며, 보이스 코일이 연결되어 있는 중앙 판만이 운동을 하게 된다. 한편, 이 판의 들레 부분과 중앙 판은 4개의 5mm 폭을 갖는 유연 스프링(Flexural Spring)으로 연결되어 있다.

또한, 운동판의 고차진동 모드와 Shape을 알아보기 위하여 FEM을 이용한 변위 모드해석을 하였다. 결과는 그림 3과 같다.

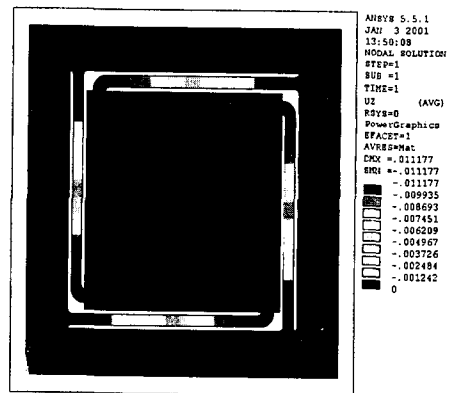


그림 2. 가진기 운동판 (FEM 해석)

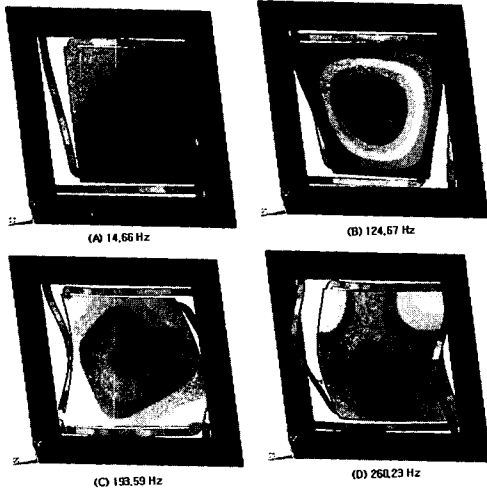


그림 3. 가진기 운동판 FEM 변위 모드해석

### 2.2 보이스 코일 액추에이터의 구조 및 해석

보이스 코일 액추에이터는 그림 4와 같이 십자 (+)형 S45C 코어 내측에 4개의 강자성체 영구자석을 부착한다. 코어중심에 있는 철심이 영구자석의 자기장을 흡수하여 폐경로를 형성하게 된다. 철심과 영구자석 사이의 공극에는 운동판 중심에 부착된 코일이 삽입 되고 코일에 전류를 가하여 운동판을 움직일 수 있는 힘을 생성하게 된다.

또한, 힘 상수(Force Constant)를 알기 위해선 공극에서의 자기밀도( $B_g$ ) 값을 알아야 한다. 이를 알아보기 위해 아래 그림 5와 같이 전자장 해석을 수행하였다. 이 결과 대략 0.3381T 값을 갖는다.

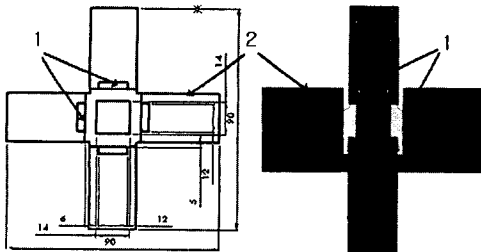


그림 4. 보이스 코일 액추에이터 설계도면 및 구성도  
(1-Permanent Magnets, 2-Cores/Stators)

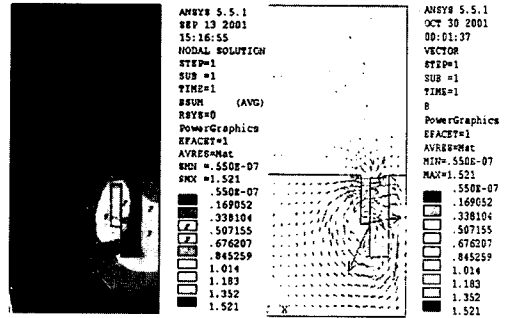


그림 5. 공극에서 자기밀도( $B_g$ ) 해석 결과

### 3. 가진 시스템의 해석적 운동 모델

가진기의 운동을 기술하는 해석적 모델은 가진기 운동판에 대한 Newton 힘 관계식, 그리고 가동 코일회로에 관한 Kirhihoff 전압법칙을 적용하여 얻을 수 있으며, 아래의 식 (1)과 같이 가동 코일 모터 구동앰프 입력전압 ( $V(s)$ )과 가진기 운동판의 변위( $Y(s)$ )에 관한 3차 시스템이 된다 [4].

$$\frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_m K_t}{mLs^3 + (Lc + mR)s^2 + (kL + cR + K_e K_t)s + kR} \quad (1)$$

위 식에서, m, c, k는 가진 운동판의 질량, 댐핑, 스프링 상수를 의미하며, R, L, K<sub>t</sub>, K<sub>e</sub>는 가동코일 모터의 저항, 인덕턴스, 힘 상수(Force Constant), 역 기전력 상수(Back EMF Constant)를 각각 나타낸다. 한편, 가동코일은 National Semiconductor사의 전류 증폭 IC인 LM3886에 의하여 구동되며,

가 그 증폭비를 나타낸다. 위에서 명시된 파라미터의 값들이 표1에 정리되어 있다. 이 표에서 '\*'의 위 첨자를 갖는 파라미터들 중 L, c는 그 값들이 측정이나 해석적인 추정을 통하여 결정될 수 없는 변수들이며, K<sub>t</sub>, K<sub>e</sub>는 해석적인 추정은 가능하나 확인이 요구되는 변수들이다. 다음 절에서 설명될 시스템 규명에 의하여 이들 값들을 추정하였다.

### 4. System Identification에 의한 운동 모델

먼저 간략하게 실험 방법에 관한 소개를 한다. 그림 6의 페루프 구조에서 가진기 운동판의 변위 피드백 루프를 개방시킨 상태에서, 그림 7의 구조

Symbol	Description	Value	Unit
	Mass of moving plate	$14.38 \times 10^{-3}$	Kg
	Damping coefficient of flow vibrator	0.24444	Newton/ (m/s)
	Spring constant of moving plate	89.47	Newton/ m
	Resistance of moving coil	3.13	
	Inductance of moving coil	$1.6405 \times 10^{-2}$	H
	Force constant of moving coil motor	0.9	Newton/ A
	Back EMF constant of moving coil motor	$0.9 \times 10^{-3}$	Newton/ (mm/s)
	Moving coil motor AMP gain	7.5858	Volt/ Volt

표 1. 식 (1)에서 사용된 시스템 파라미터들의 값

에 의하여 생성되는 PRBS(Pseudo Random Binary Sequence) 신호를 가진기의 구동앰프로 입력시킨다. 이 때, 구동 앰프에는 가진 앰프 박스의 DC 입력전압 조정단자(Balance Knob)에 의하여 0.02 Volt가 제공된 조건으로, 가진기 운동판은 중립 위치를 유지하고 있는 상태이다. 그림 7의 SIMULINK 모델은 MATLAB RTW (Real Time Workshop) 기능에 의하여 dSPACE DS1102 보드의 TMS320C31 DSP 제어로 변환/ 다운로드된 후 실시간으로 실행된다. 이와 같이 생성된 PRBS 신호는 DS1102 보드의 채널 2 DAC를 통하여 가진기 운동판을 가진시키고, 이에 의하여 생성된 운동판의 변위는 갭 센서 (Gap Sensor) 에 의하여 측정된 후 채널 1 ADC를 통하여 DSP 보드로 입력된다. 그림 4의 PRBS 신호 생성회로는 시프트 레지스터 역할을 하는 12개의 단위 지연기 (Unit Delay,

)와 모듈로 2 가산기 (Modulo 2 Adder) 인 배타적 OR 논리소자로 구성되어 있으며, PRBS 신호의 on/ off을 위하여 스위치가 사용되고 있다. 또한, PRBS 출력 신호의 크기를 조절할 수 있도록 가변 게인 요소(PRBS Gain Block)가 사용된다.

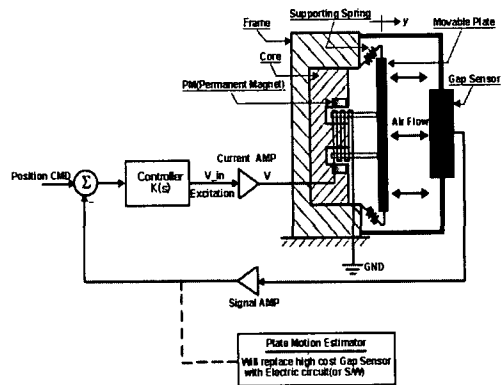


그림 6. 유동공진 가진기의 페루프 구성도

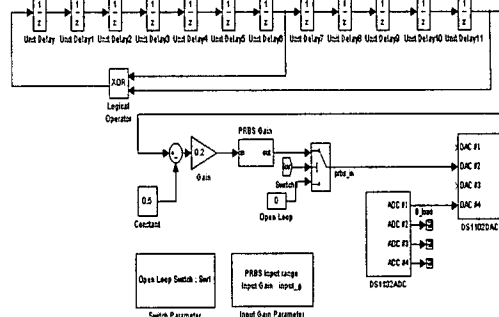


그림 7. SIMULINK를 이용한 PRBS 신호 생성

그림 7의 회로에서 중요한 설계 인자는 단위 지연기에 연동된 샘플링 시간( $\tau$ ), 시프트 레지스터의 개수 ( $n$ ), 그리고 PRBS 신호의 크기이다 [5-6]. 먼저, 샘플링 시간,  $\tau$ 는 샘플링 정리 (Sampling Theorem)에 의하여 결정되며, 본 실험에서는 5 mSec으로 선정 되었다. 또한, PRBS 신호는 다음의 식 (2)로 결정되는 주기를 갖게 되므로, 레지스터의 개수를 12로 정하게 되면 대략 20초마다 PRBS 신호가 반복되게 된다. 이 시간은 가진기 운동판의 정착시간(Settling Time) 보다는 충분히 큰 값이 된다.

$$T = (2^n - 1)\tau \geq \text{부하재현 장치의 정착 시간 (2)}$$

한편, PRBS 신호의 크기는 가진기의 운동판이 선형 작동영역을 벗어나지 않도록 하면서, S/N 비 (Signal to Noise Ratio)가 가능한 한 크게 되도록 선정하여야 한다. 위와 같은 실험 방법으로 얻어진 데이터에 대하여, 최소 자승법 (Least Square Method)에 근거한 추정 모델인 ARX, ARMAX, OE, 그리고 상태 공간식 모델을 사용하여 부하재현 장치에 관한 시스템 규명이 수행되었다 [5-7].

PRBS 신호의 크기를 50 mV하여 총 4초간 얻어진 실험 데이터 중에서 처음 2초 동안의 데이터는 시스템 규명을 위한 데이터로 사용되었으며, 다음 2초 간의 데이터는 시스템 규명 결과를 평가 하는데 사용되었다. 그림 8의 상위 두 Plot은 초기 1초간의 PRBS 신호 입력과 갭 센서로부터 유추된 운동 판의 변위를 보여주고 있다. 아래의 식 (3)은 ARMAX 모델을 적용하여 얻어진 가진기 운동 추정모델이다.

$$\frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{2.894 \times 10^7}{s^3 + 207.8s^2 + 1.29 \times 10^4 s + 1.187 \times 10^6} \quad (3)$$

위의 전달함수 단위는 (mm/ Volt) 이며, 이 식 (3)과 식 (1)로 주어지는 전달함수의 계수를 서로 비교 함으로서 표 1의 시스템 상수 값들을 추정할 수 있다. 또한, 그림 8의 마지막 Plot은 2초부터 4초까지 입력된 PRBS에 의한 운동판의 실제 변위와 동일한 PRBS 입력에 대하여 산출된 모델 출력 신호를 나타낸다. 즉, 동일한 PRBS를 식 (3)의 모델에 인가한 경우, 이동판의 변위가 점선으로 표현되어 있고, 갭 센서로 추정된 이동판의 실제 변위는 실선으로 나타나 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 식 (3)의 추정모델은 실제 가진기의 운동 특성을 상당히 근접하게 표현하고 있음을 볼 수 있다.

이와 같은 근거는 그림 9의 주파수 응답 비교로서 더욱 뒷받침된다. 이 그림에서 1 Hz 부터 800 Hz 주파수 대역에 걸쳐서 그려진 실선은 실험적 주파수 응답을 의미하며, 점선으로 표시된 것은 식 (3)에 대한 주파수 응답을 나타낸다. 180 Hz ~ 250 Hz의 주파수 대역에서 나타나고 있는 가진 운동의 고차 진동 모드를 식 (3)의 모델이 표현하지 못한다는 단점이 있지만, 식 (3)은 DC에서 100 Hz까지의 주파수 범위에서는 실험적 데이터와 잘 일치하고 있다.

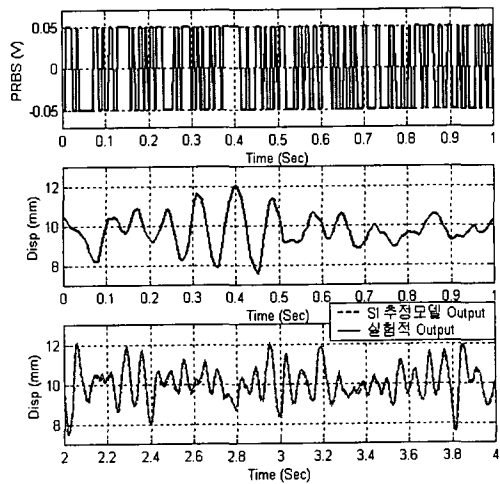


그림 8. PRBS 및 가진기 응답 신호

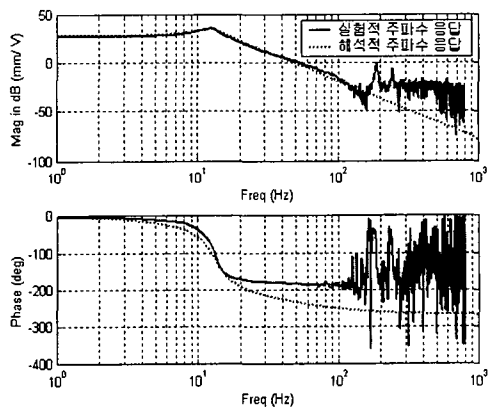


그림 9. 가진기의 개루프 주파수 응답

### 5. Strain 변위 추정기 설계

#### 5.1 Strain Gage 신호 앰프

스트레인 게이지(Strain Gage)를 사용하여 가진기 운동판의 변위를 추정할 수 있다. 그림 2의 가진기 운동판 구조에서, 대각선 상으로 배치된 2개의 유연 스프링(flexural spring) 끝단에 앞면과 뒷면 각각 1개의 스트레인 게이지를 부착하여 Full Bridge를 구성하였다. 운동판 변위에 의한 저항 변화량은 아래의 그림 10의 회로에 의하여 전기적인 신호로 변환 될 수 있다. 사용된 스트레인 게이지의 게이지 상수(Gage Factor)를  $S_g$ , 휘스톤 브리지(Wheatstone Bridge)로 입력되는 DC 전압을  $V_s$ , 그리고 계측 OP AMP 인 AD524 의 이득을  $K_{524}$ 라 할 때, 가진기 운동판의 변위( $y$ ) 와 그림 10의 회로의 출력 전압은 아래의 식 (4)와 같은 관계를 갖는다.

$$V_{out} = \frac{K_{524} V_s S_g kLh}{8 EI} \cdot y \quad (4)$$

위 식에서  $L, h, E$  그리고  $I$ 는 유연스프링의 길이, 두께, Young's Modulus 그리고 단면적 관성 모멘트를 각각 의미한다. 따라서, 식 (4)의 관계에 의하여 가진기 운동판의 변위를 추정할 수 있다.

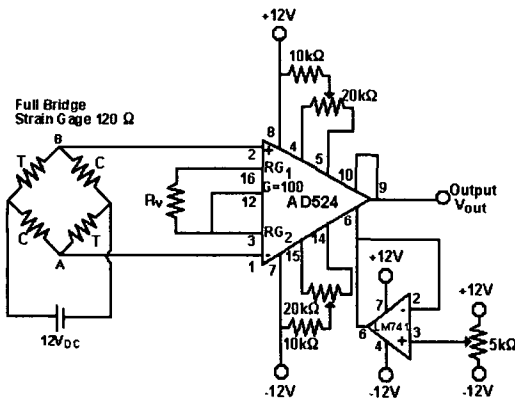


그림 10. Strain Gage 신호 증폭 회로

#### 5.2 스트레인 게이지 Calibration

스트레인 게이지 Calibration 방법으로는 앞서 운동판의 변위를 측정했던 Gap Sensor를 이용하였다.

Gap Sensor의 경우 운동판 변위  $y$ (mm) 와  $V_{out}$ (V) 관계는 식 (5)와 같다.

$$y = 9.9617 \cdot V_{out} \quad (5)$$

아래 그림 11은 Calibration을 위한 Gap Sensor 와 Strain Gage 주파수 응답이다. 그림 11 (a)는 두 센서의 입력전압  $V_{in}$  과 출력전압  $V_{out}$  의 관계를 나타내고, 그림 11 (b)는  $V_{in}$  과 운동판 변위  $y$ (mm) 관계를 나타낸다. 이 결과 스트레인 게이지의 경우 운동판 변위  $y$ (mm) 와  $V_{out}$ (V) 관계는 식 (6)과 같다.

$$y = 2.1798 \cdot V_{out} \quad (6)$$

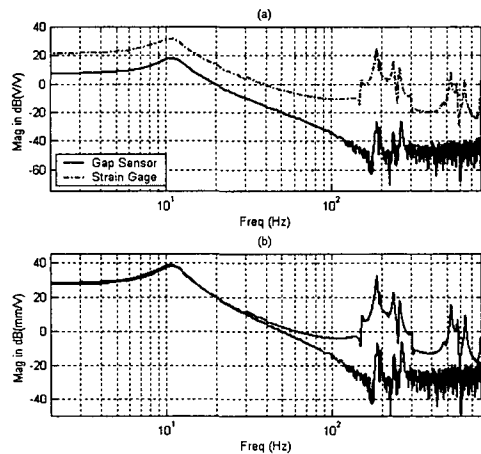


그림 11. Calibration을 위한 Gap Sensor 와 스트레인 게이지 개루프 주파수 응답 비교

#### 5.3 페루프 가진 제어기 설계 및 평가

그림 11 스트레인 게이지 개루프 주파수 응답에서 볼 수 있듯이 150Hz ~ 250Hz 주파수 대역에서 나타나고 있는 가진 운동의 고차 진동 모드들이 더욱 크게 나타나고 있다. 또한, 500Hz ~ 650Hz 주파수 대역에서도 Gap Sensor 주파수 응답에서는 나타나지 않는 고차 진동 모드들이 보여지고 있다. 이는 스트레인 게이지가 가진 운동하고 있는 운동판 스프링에 직접 부착되어 있기 때문에 운동판 및 운동판 스프링의 움직임에 더욱 민감하게 반응하고 있는 것이다.

결국 이러한 고차 진동 모드는 고 대역폭 제어

특성을 달성하는데 있어서 주된 제한 요소로 작용하게 될 것이고, Gap Sensor 대역폭(Bandwidth)인 100Hz 보다 적은 대역폭을 가지게 될 것이다.

이제 50Hz의 대역폭을 갖도록 페루프 가진기를 설계하여 보자. 대역폭 확장을 위하여 일반적으로 선택되는 위상 앞섬 필터(PLF: Phase Lead Filter)와 저 주파수 대역에서 정상상태 응답특성을 개선시키기 위해 Lag Filter 가 사용되었다.

아래의 식 (7)은 Phase Lead/Lag filter를 표현하며, 50Hz 에서 대략 182°의 위상 보상(Phase Compensation)을 할 수 있게 설계되었다.

$$K_1(s) = 0.5418 \frac{0.025165 s + 1}{0.251656 s + 1} \cdot \frac{(0.007797 s + 1)^4}{(0.16667 \times 0.007797 s + 1)^4} \quad (7)$$

그러나, 식 (7)의 Phase Lead/Lag Filter 를 현재의 가진 시스템에 그대로 사용하게 되면, 앞서 언급된 고차의 공진모드 영향으로 설계된 페루프 시스템은 불안정 해진다. 이것은 PLF가 고 주파수 대역에서의 게인을 크게 하기 때문이다. 즉, PLF를 사용하게 되면, 루프 게인 보드 선도(Loop Gain Bode Plot)에서 고차 공진모드의 크기는 0 dB보다 크게 되어 페루프 시스템은 불안정해진다. 이를 해결하기 위하여 아래의 식 (8)과 같이 60Hz의 차단 주파수를 갖는 2차 LPF(Low Pass Filter)와 함께 187Hz, 245Hz, 그리고 520Hz 노치 필터가 사용되었다.

$$K_2(s) = \frac{1}{(s/(60 \times 2\pi))^2 + 3.4s/(60 \times 2\pi) + 1} \cdot \frac{(s/(187 \times 2\pi))^2 + 0.002s/(187 \times 2\pi) + 1}{(s/(187 \times 2\pi))^2 + 3.2s/(187 \times 2\pi) + 1} \cdot \frac{(s/(245 \times 2\pi))^2 + 0.002s/(245 \times 2\pi) + 1}{(s/(245 \times 2\pi))^2 + 2.5s/(245 \times 2\pi) + 1} \cdot \frac{(s/(520 \times 2\pi))^2 + 0.05s/(520 \times 2\pi) + 1}{(s/(520 \times 2\pi))^2 + 0.5s/(520 \times 2\pi) + 1} \quad (8)$$

그림 12는 제어기 특성이 고려된 가진기의 루프 게인 주파수 응답을 의미한다. 이 그림에서 실선은 식 (7)과 식 (8)을 모두 적용한 실험적인 주파수 응답선도이며 함께 그려진 두개의 주파수 응답선도는 실험적인 개루프 주파수 응답에 제어기를 해석적으로 적용하여 본 것이다. 일점 쇄선으로 표현된 것은 PLF, 2차 LPF 그리고 Notch Filter를 적용한 것이고, 점선으로 표현된 것은 앞서 적용된 제어기에 Lag Filter를 적용한 것이다. 저주파수

대역에서 게인을 증가시켜 정상상태 응답특성을 개선시키기 위한 Lag Filter 효과를 볼 수 있다.

그림 12에 나타난 바와 같이 실제적인 페루프 시스템은 50Hz 크로스 오버 주파수(Cross over Frequency)에서 대략 20° 정도의 위상여유(Phase Margin)를 가지고 있음을 의미한다.

식 (7)과 식 (8)을 적용한 페루프 시스템의 시간영역 응답 특성이 그림 13에 정리 되었다. 이 그림에는 1Hz 삼각파, 3Hz 사각파, 10Hz, 30Hz, 40Hz, 그리고 50Hz의 정현파 입력에 대한 페루프 가진기의 응답 특성이 순서대로 그려져 있다.

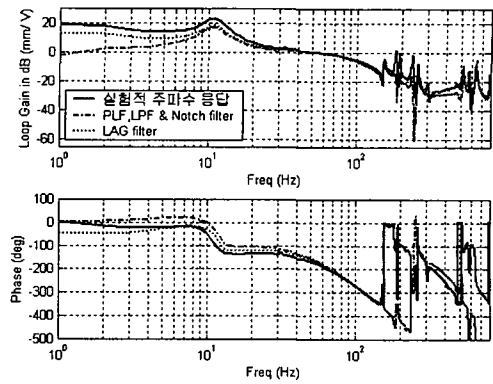


그림 12: 가진기의 루프게인 주파수 응답

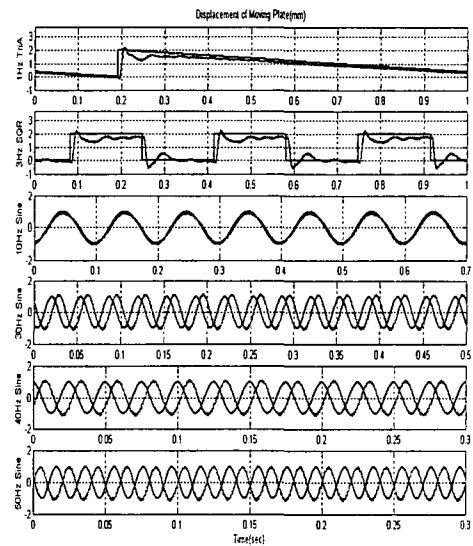


그림 13. 페루프 가진기의 시간영역 응답

그림에서 보듯이 3Hz의 사각파에 대해 정상상태 오차가 10% 정도 나고 있다. 이는 저주파 대역에서 페루프 주파수 응답이 0 dB 아래에 위치하고 있음을 알 수 있다. 신중한 제어기 설계가 요구되는 부분이다. 한편, 설계 대역폭인 50Hz까지의 정현파 입력에 대하여 가진 시스템은 거의 입력 신호를 추종하고 있음을 볼 수 있다.

그림 14는 실험적으로 구한 가진기의 페루프 주파수 응답 선도이다. 대략 50Hz의 대역폭을 갖게 되어 목표한 설계 요구조건을 만족시키고 있음을 알 수 있다.

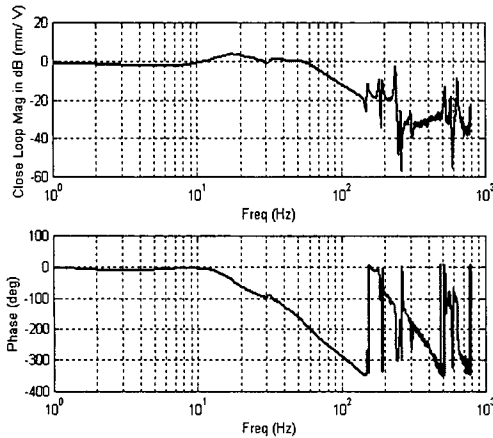


그림 14. 페루프 가진기의 주파수 응답

## 6. 결론

본 연구를 통하여 대략 50Hz 정도의 대역폭을 갖게 되는 유동공진을 위한 가진 시스템이 설계되었다. Stain 변위 추정기는 고가의 Gap Sensor를 대체할 수 있는 가능성을 확인하였다. 그렇지만, Gap Sensor와 마찬가지로 Strain 변위 추정기를 갖게 되는 유동공진을 위한 가진 시스템이 설계되었다. Stain 변위 추정기는 고가의 Gap Sensor를 대체할 수 있는 가능성을 확인하였다. 그렇지만, Gap Sensor와 마찬가지로 Strain 변위 추정기를 사용시에도 가진기의 기계적 구조에 의하여 발생하는 고차 진동모드들이 고 대역폭 가진기 설계의 주요 저해 요인이 됨을 알 수 있었다. 따라서, 보다 큰 대역폭을 갖는 가진기를 설계하기 위해서는 고차 진동모드의 주파수와 그 크기를 유리한 방향으로 설정할 수 있는 가진기 기계구조의 재 설계

가 요구된다.

또한, 앞으로 진행될 연구 분야는 열 시스템의 작동 환경이 Notebook 컴퓨터 내부와 같은 소규모 공간이라면, 지금과 같은 Moving Coil Motor 가진 구조는 적합하지 않은 설계이다. 이와 같은 경우, Piezo Material을 사용한 극소형 Smart Actuation 방식으로 문제를 해결해야 한다.

## 참고 문헌

- [1] Azar K., Enhanced cooling of electric components by flow oscillation, *J. Thermophysics and Heat Transfer* 6, pp. 700-706, 1992
- [2] Greiner, M., An experimental investigation of resonant heat transfer enhancement in grooved channel, *Int. J. of Heat Mass Transfer*, 34, pp. 1383-1391., 1991
- [3] 강병하, 김서영, 유동공진을 이용한 열전달 촉진 기술, *대한기계학회 기계저널*, 제 39권 3호 1999.
- [4] 남윤수, 최재혁, 유동공진을 위한 가진기 설계 및 평가, *한국정밀공학회*, 제 18권 6호, 2001년 6월
- [5] Ljung, L., *System Identification, Theory for the User*, Prentice Hall, 1987
- [6] Brown, R. G., *Introduction to random Signal Analysis and Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, 1983
- [7] Ljung, L., *System Identification Toolbox for Use with MATLAB, MathWorks*, 19