

반복학습제어와 할바흐 자석 배열 스투어트 플랫폼을 이용한 차량 진동 신호 재현

Replication of Automotive Vibration Target Signal Using Iterative Learning Control and Stewart Platform with Halbach Magnet Array

고 병 식† · 강 수 영*

Byeongsik Ko and SooYoung Kang

(Received March 6, 2013 ; Revised April 23, 2013 ; Accepted April 30, 2013)

Key Words : Iterative Learning Control(반복학습제어), Stewart Platform(스튜어트 플랫폼), Electro-magnetic Actuator(전자기식 액추에이터), RMS(Root Mean Square), Auto Power Spectral Density, Halbach Magnet Array(할바흐 배열)

ABSTRACT

This paper presents the replication of a desired vibration response by iterative learning control (ILC) system for a vibration motion replication actuator. The vibration motion replication actuator has parameter uncertainties including system nonlinearity and joint nonlinearity. Vehicle manufacturers worldwide are increasingly relying on road simulation facilities that put simulated loads and stresses on vehicles and subassemblies in order to reduce development time. Road simulation algorithm is the key point of developing road simulation system. With the rapid progress of digital signal processing technology, more complex control algorithms including iterative learning control can be utilized. In this paper, ILC algorithm was utilized to produce simultaneously the six channels of desired responses using the Stewart platform composed of six linear electro-magnetic actuators with Halbach magnet array. The convergence rate and accuracy showed reasonable results to meet the requirement. It shows that the algorithm is acceptable to replicate multi-channel vibration responses.

1. 서 론

내연 기관에 의한 진동 및 노면, 레일 및 공기에 의한 외부 진동을 받는 차량, 철도차량 및 항공기를 포함하는 운송 수단이나 건설기계 같이 운용 중에 내/외부 진동을 받는 제품의 경우 진동에 의한 내구 문제를 포함한 완성 품질 문제가 발생할 수 있다. 이러한 운용 중에 발생하는 진동은 완제품 전체 및

부품의 내구성에 많은 악영향을 끼칠 수 있으므로 높은 신뢰성을 갖는 제품을 개발하기 위해서는 진동에 의한 영향을 파악하여야 한다. 또한 파악한 진동의 영향을 제품 개발 단계에서 사전 검증하기 위해서는 제품 개발 프로세스에서 진동 가진 실험을 통한 6시그마 설계(DFSS, design for six sigma) 같은 설계 검증 단계가 반드시 필요하다. 이러한 진동 재현 실험은 통상적으로 기상 조건과 무관하게 실험이 가능한 실험실 내에서 이루어지며 정확한 실험을 위

† Corresponding Author ; Member, Inha Technical College
E-mail : bsko@inhac.ac.kr
Tel : +82-32-870-2361, Fax : +82-32-870-2505
* Inha Technical College

A part of this paper was presented at the KSNVE 2013 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

해서는 차량의 실제 주행조건에서 야기되는 진동을 가능한 한 정확히 재현해야 한다⁽¹⁾.

이러한 진동 재현을 위한 전체 시스템은 통상적으로 실제 가진을 위한 힘을 발생시키는 구동부의 핵심인 액추에이터(actuator), 제어기(controller) 및 가진 테이블(shaking table)로 구성된다. 또한 액추에이터는 유압(hydraulic) 액추에이터를 이용한 시스템과 전자기식(electro-magnetic) 액추에이터를 이용한 시스템으로 구분된다. 전자기식 액추에이터의 경우 추력이 유압식 액추에이터에 비해 상대적으로 낮은 단점 때문에 과거에는 사용빈도가 저조하였으나 최근에 래틀(rattle) 소음 실험 같은 상대적으로 저소음 환경에서의 진동 재현 실험이 중요시되며 사용빈도가 높아지고 있다. 또한 타이어를 가진하여 차량 전체의 진동을 재현하는 기존 방식 대신 차체를 직접 가진하는 방식인 BME(body mounting excitation) 방식이 10여 년 전부터 적용되기 시작했다^(2,3). 이는 유압식 대비 상대적으로 작은 추력을 가진 전자기식 액추에이터의 사용 범위를 늘리는 계기가 되었다. 또한 과거에는 실제 주행 운용 시에 발생하는 진동 신호 재현을 위해 1축 또는 3축 진동 가진을 통해 주요 방향의 진동에 대해서만 부분적으로 재현하던 방식을 사용하였다. 최근에는 스튜어트 플랫폼을 사용하여 3축 병진 진동과 3축 회전 진동을 동시에 구현하는 방식이 도입되고 있다. 이러한 스튜어트 플랫폼을 구동하기 위한 액추에이터는 큰 추력이 요구되는 경우는 유압 액추에이터를 사용하고 있고 상대적으로 적은 추력이 요구되는 경우는 전자기식 액추에이터를 사용한다. 최근 차실 내의 소음이 저감됨에 따라 BSR(buzz, squeak and rattle) 소음의 중요성이 부각되었다. 진동 가진 실험을 통한 6시그마 설계를 위해 완제품만이 아니라 구성 부품 또는 모듈 개발 단계에서의 BSR 소음 실험을 위해서는 유압식보다 상대적으로 소음이 낮은 전자기식 액추에이터를 사용하는 것이 유리하다. 또한 전자기식 액추에이터의 성능 향상을 위해 영구 자석의 자속 밀도를 증가시키는 것만이 아닌 영구 자석의 배열을 Halbach 배열로 변경하여 액추에이터의 고성능화 및 고효율화를 시도하는 연구도 진행되고 있다. 액추에이터 자체만이 아닌 자기부상열차와 같은 자기 부상계에도 적용되고 있다⁽⁴⁾.

이러한 저소음 환경에서의 소음 실험을 포함한 6

축 방향의 진동 재현을 하기 위한 방식으로서 반복 학습제어(iterative learning control)를 사용하여 원하는 목표 가진 신호(target signal)를 가능한 한 정확하게 재현하고자 한다. 이를 위해 Halbach 배열로 배치된 6개의 전자기식 액추에이터로 구성된 스튜어트 플랫폼을 이용한 다채널 진동 재현 실험을 통하여 반복학습제어의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 전자기 액추에이터를 이용한 스튜어트 플랫폼

2.1 기본 구조

기존의 6축 시뮬레이터는 유압 액추에이터를 이용한 마스트(MAST) 방식으로 가진 주파수가 수십 Hz 정도로 낮고, 설치 및 운용시에 비교적 넓은 작업 공간을 요구한다. 최근에는 MTS 353 시리즈와 같이 가진 가능 주파수가 높고 스튜어트 플랫폼 방식의 6축 시뮬레이터도 개발되어 사용되고 있다. 하지만 유압 방식의 경우 누유에 의한 환경오염의 위험성이 존재하며 유압 시스템에서 필수적으로 요구되는 유압 라인, 가압 펌프와 유압 레저버 탱크(reservoir)의 추가적인 설치가 불가피하다. 또한 다단계로 이루어진 동력전달 메커니즘으로 인하여 저효율 성능의 단점을 가지고 있다.

전자기식 선형 액추에이터로 구성된 스튜어트 플랫폼은 누유에 의한 환경오염의 위험성 없이 고속 응답성 및 정밀한 속도, 위치제어가 가능하다. 그리고 전자기식 구동방식으로 인하여 작동 소음이 거의 없고 소형 경량화가 가능하며 단순한 동력전달 구조로 높은 에너지 효율의 장점을 가진다^(3,5).

2.2 전자기식 액추에이터의 기본 사양

300 Hz까지 가진 가능한 전자기식 액추에이터는 기본적으로 네오뮴계 영구자석을 사용한 운동자와 다층 코일과 코일 절연 분리체로 구성된 고정자로 구성되며 단상의 전원으로 구동된다(Fig. 1). 그리고 15개의 코일은 차례로 3개씩 병렬회로로 연결되어 있고, 다시 5개의 병렬회로로 연결되어 있다. 또한, 자화 방향이 수직 방향인 영구자석 4개가 있고, 영구자석의 사이에는 순철이 삽입되어 자속 집중의 형태를 가지고 있는 구조이다⁽⁵⁾. 또한 전자기식 구동기의 영구 자석 배열을 Halbach 배열 형태로 선택



Fig. 1 Linear electro-magnetic actuator(before assembly)⁽⁵⁾



Fig. 3 Stewart platform with six electro-magnetic actuators⁽⁸⁾

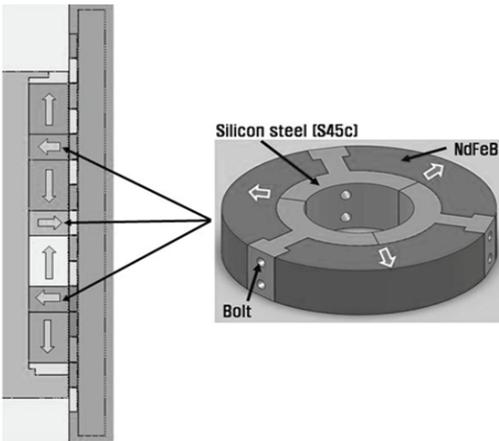


Fig. 2 Halbach array

하여, 구동기의 추력을 향상하였다.

Halbach 배열 형태의 영구 자석 배열은 Fig. 2에 나타나있다. 기존의 영구 자석 사이에 존재하던 금속성 소재를 자력방향과 동일한 원주방향 영구 자석으로 대체하여 배열함으로써 자속 밀도를 높여 추력을 향상시키기 위한 방안이다. Halbach 배열은 일반적인 영구 자석 배열과 비교하여 $\sqrt{2}$ 배의 큰 자계를 형성하고, 원하지 않는 방향으로의 자계 형성을 방지하는 기능을 가진다^(6,7). 또한 일반적인 영구 자석 배열보다 더 안정적인 자계를 생성하므로 제어 성능을 더욱 안정적으로 구현하는데 도움이 된다.

2.3 스튜어트 플랫폼 개발

자동차 부품 및 모듈이 장착되는 상부 가진 테이블(shaking table)과 하부 정반(base plate) 및 6개의

전자기식 액추에이터를 기본으로 구성하였다. 저소음 고주파 진동 가진을 위한 목적에 부합하도록 단상 전원 방식의 전자기식 액추에이터를 채택하였다. 또한 상부 진동 테이블과 액추에이터는 소변위 고주파 진동 재현을 위해 조인트 유격을 최소화한 판스프링 직교 배열 구조의 조인트를 사용하였다. 개발된 스튜어트 플랫폼은 Fig. 3에 나타내었다.

3. 반복학습제어

1984년 Arimoto 등⁽⁹⁾이 반복학습제어기법을 국제학회에 발표한 이후 최근까지 관련된 많은 논문들이 발표되고 있다⁽¹⁰⁻¹²⁾. 반복학습제어는 유한한 시간 구간에 대하여 원하는 목표 신호와 실제 출력 사이에 발생한 오차를 이용하여 다음 이력 단계에서의 입력을 수정해주는 과정을 반복적으로 시행함으로써 시스템의 원하는 목표 신호를 정확히 추종하게 하는 입력을 구해내는 제어 기법이다.

차량 및 해당 부품의 진동 재현을 위해서는 주파수 응답함수(FRF : frequency response function)의 빠르고 정확한 예측이 선행되어야 한다. FRF 예측을 위해서는 입력 신호의 자기 스펙트럼밀도(auto spectral density) 역행렬을 계산해야 하므로 입력 신호의 자기 스펙트럼밀도는 정칙행렬(non-singular matrix)이어야 한다. 이를 위해서는 입력 신호는 모두 비상관성(uncorrelated)을 가져야 한다. 초기 단계에서의 주파수 응답함수는 랜덤 신호로 주어지는 입력 신호와 이에 대한 진동 응답 간의 근사적인 선형관

계로 표현된다. 주파수응답함수는 입력 신호와 측정 응답 간에 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$[H(j\omega)]\{U(j\omega)\} = \{Y(j\omega)\} \quad (1)$$

여기에서 $[H(j\omega)]$ 은 주파수응답 행렬, $\{U(j\omega)\}$ 는 입력 신호, $\{Y(j\omega)\}$ 는 측정된 응답 신호이다.

주파수 응답함수 초기값은 입력신호의 자기 스펙트럼밀도(auto spectral density) 및 입력신호와 응답 신호 간의 상호스펙트럼밀도(cross spectral density)를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$[\hat{H}_0] = [G_{yu}] [G_{uu}]^{-1} \quad (2)$$

여기에서 $[\hat{H}_0]$ 는 주파수응답함수의 초기값, $[G_{yu}]$ 는 백색 잡음 랜덤 입력신호와 응답 신호 간의 상호스펙트럼밀도(cross spectral density), $[G_{uu}]$ 는 백색 잡음 랜덤 입력신호의 자기 스펙트럼밀도(auto spectral density)을 나타낸다.

특이값 분해(SVD, singular value decomposition)를 이용하여 주파수응답함수의 역행렬을 구한 후 다음과 같이 초기 입력 신호를 계산한다.

$$\{U_0(j\omega)\} = [\alpha_0] [\hat{H}_0(j\omega)]^{-1} \{Y_d(j\omega)\} \quad (3)$$

여기에서 $\{Y_d(j\omega)\}$ 는 목표응답신호 $\{y_d(t)\}$ 의 이산 푸리에변환(discrete Fourier transform)이며, $\{u_0(t)\}$ 는 $\{U_0(j\omega)\}$ 를 역 이산 푸리에변환(inverse discrete Fourier transform)하여 구한다. $[\alpha_0]$ 는 0과 1사이의 계인 값으로 구성된 행렬이다. 식 (3)에서 구한 초기 입력신호 $\{u_0(t)\}$ 를 통해 얻어진 응답 $\{y_0(t)\}$ 를 목표응답신호 $\{y_d(t)\}$ 와 비교하여 오차를 계산한다. 이러한 오차를 최소화하기 위해 다음 단계에서의 입력신호를 보정하여야 한다. 따라서 i 번째 입력신호는 다음과 같이 계산된다.

$$\{u\}_{i+1}(t) = \{u\}_i(t) + \{\Delta u\}_i \quad (4)$$

여기에서 $\{\Delta u\}_i$ 는 $\{\Delta U_i(j\omega)\} = [\hat{H}_i(j\omega)]^{-1} \cdot [\alpha_i] \{E_i(j\omega)\}$ 의 역 이산 푸리에변환(inverse discrete

Fourier transform)이며 $\{E_i(j\omega)\} = \{Y_d(j\omega)\} - \{Y_i(j\omega)\}$ 이다. 이러한 과정을 거쳐 목표 신호와 측정응답이 최소화되는 입력 신호를 추출한다.

이러한 오차를 판단하기 위한 판정기준으로서 각 출력 채널에서의 정규화된 RMS(normalized root mean square error) 오차를 다음과 같이 계산한다.

$$RMS\ Error = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_N^2}{r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_N^2}} \quad (5)$$

여기에서

- N : 시간 영역에서의 data 개수,
- r : 목표 신호(reference signal, target signal),
- e : 목표 신호와 출력 신호와의 차이인 오차를 나타낸다.

4. 6축 스텐더트 플랫폼 진동 재현 실험

반복학습제어 알고리즘은 모두 C 언어로 구성하였으며 A/D 컨버터를 포함한 하드웨어와의 인터페이스는 NI DAQmx 드라이버 및 Measurement Studio를 이용하여 구성하였다. 또한 충분한 증폭값(gain)으로 전자기식 액추에이터를 구동하기 위해서 진류 증폭기를 설치하였다. 이를 위한 구성 개념도 및 실험 사진을 Fig. 4와 Fig. 5에 제시하였다.

반복학습제어의 타당성을 검증하기 위해 6축 시뮬레이터인 스텐더트 플랫폼에 대한 목표 신호를 실제 차량으로 벨지안 도로에서 주행한 후 대상 부품인 CD changer의 상단 및 좌측에서 각각 3축 방향으로 측정된 총 6채널의 진동 신호를 목표 신호로 설정하였다. 6채널에 각각 설정한 목표 신호를 동시에 달성하기 위해 반복학습제어 실험을 하며 제어기의 반복학습 횟수와 정규화된 RMS 오차를 추적 분석하였다.

반복학습제어를 이용한 실험을 수행하였을 때 반복 회수에 따른 RMS 오차의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 동시에 측정된 6개의 측정 채널 별로 처음에는 초기 오차가 각 채널 별로 33.8%(upper Y 방향)-82.5%(upper X 방향)였으나 3회에는 6.1%(upper Y 방향)-62.0%(Upper X 방향)로 감소하고 10회에는 8.0%(left Y 방향)-17.1%(left Z 방향)로 감소됨을 알 수 있었다. 이에 따라 6채널의 가속도 신호

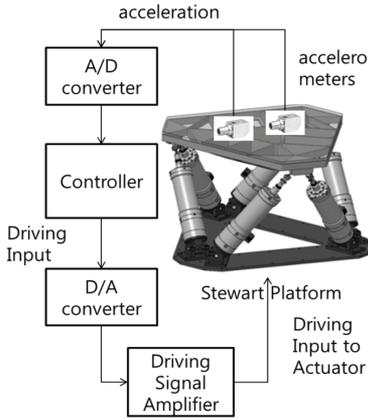


Fig. 4 Experiment scheme for Stewart platform

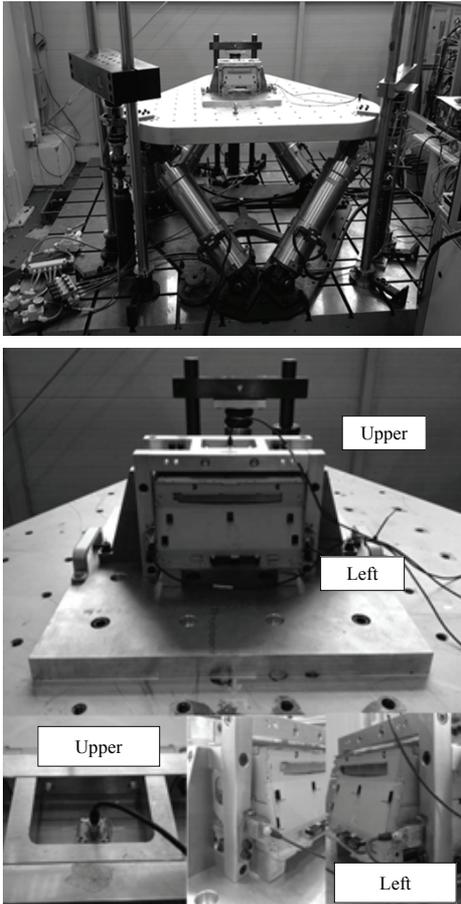


Fig. 5 Experimental apparatus for Stewart platform

재현을 위해 사용된 반복학습제어알고리즘이 정상적으로 작동됨을 알 수 있었다. 6채널의 가속도 출력

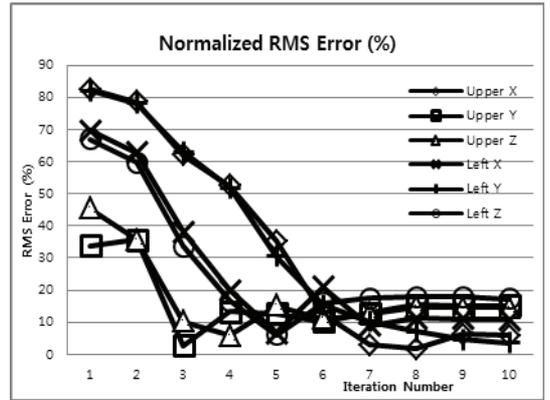


Fig. 6 Normalized RMS error along Iteration number

신호 중에서 RMS오차가 상대적으로 큰 가속도 신호인 left-Z 방향(CD changer 좌측에 부착된 가속도계의 상하 진동 방향) 신호와 이에 직각 방향인 left-Y 방향(CD changer 좌측에 부착된 가속도계의 좌우 진동 방향) 신호만을 시간 영역 및 주파수 영역에서 분석하였다.

학습 반복 회수의 증가에 따른 left-Z 방향과 left-Y 방향 출력 신호의 변화를 목표 신호와 대비하여 시간 영역에서 나타낸 그래프를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

1회 반복을 위한 시간은 18초로 설정하였으며 10회 학습 반복 후에 left-Z 방향, left-Y 방향 모두 목표 신호와 유사한 출력 신호가 나타났음을 알 수 있다. 또한 자세한 비교를 위해 6초에서 7초까지의 1초 간의 시간영역을 확대하여 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 이 역시 10회차 출력 신호의 경우 목표 신호에 근접함을 알 수 있었다.

주파수 영역에서의 비교를 위해 목표 신호와 1차 출력 신호 및 10회차 출력 신호의 auto power spectral density를 Fig. 11과 Fig. 12에서 비교하였다. 주파수 영역에서 분석 시에도 10회차 출력 신호의 경우 목표 신호에 근접함을 알 수 있었다. 따라서 6개의 전자기식 액추에이터로 구성된 스텐트 플랫폼으로 다채널 목표 신호 재현을 위하여 사용된 반복학습제어기는 좋은 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

이러한 결과로부터 피드포워드제어기법의 일종인 반복학습제어기법과 스텐트 플랫폼을 이용하여 동시에 다채널 진동 신호 재현이 가능함을 알 수 있었다.

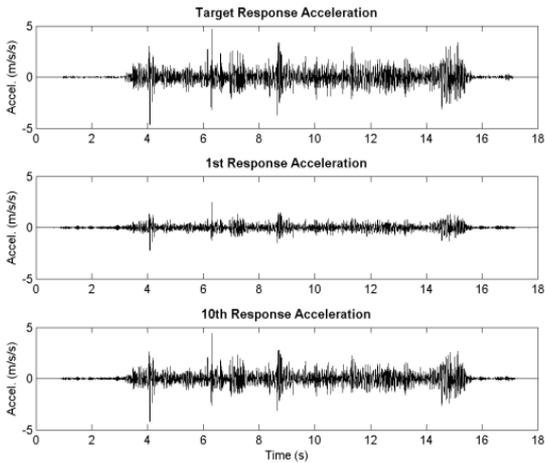


Fig. 7 Target signal and iterative response(time domain), left-Z direction

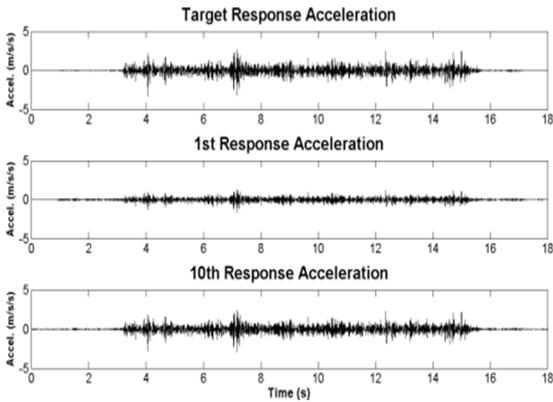


Fig. 8 Target signal and iterative response(time domain), left-Y direction

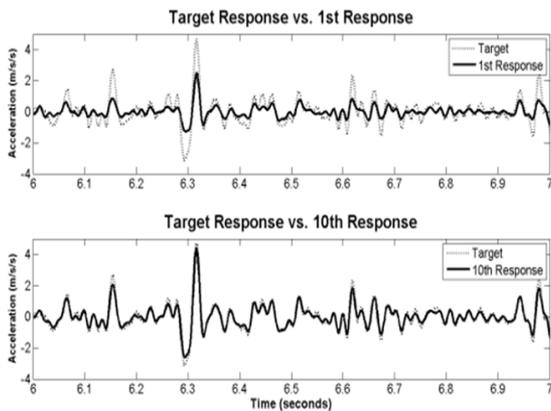


Fig. 9 Target signal and iterative response(6 seconds - 7 seconds), left-Z direction

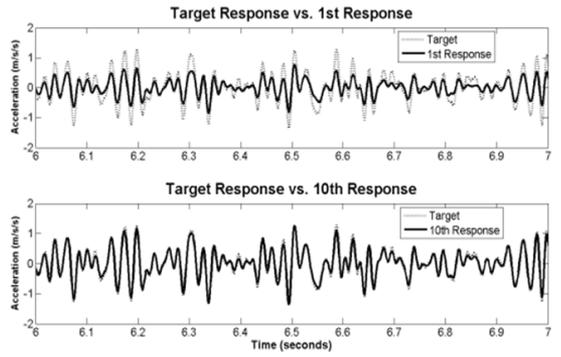


Fig. 10 Target signal and iterative response(6 seconds - 7 seconds), left-Y direction

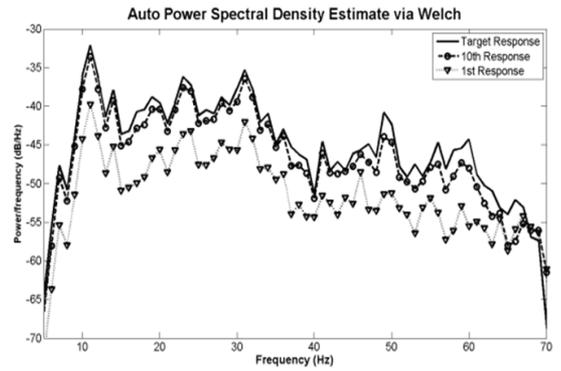


Fig. 11 Auto power spectral density for target and iterative responses, left-Z direction

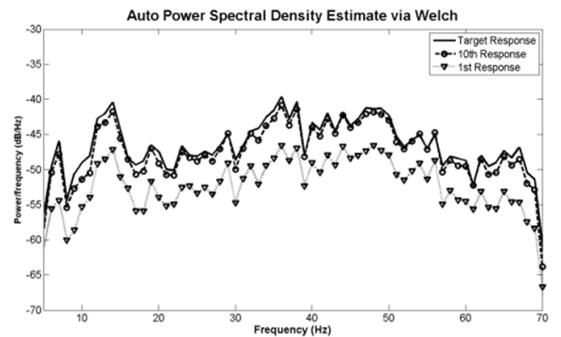


Fig. 12 Auto power spectral density for target and iterative responses, left-Y direction

5. 결 론

이 논문에서는 반복학습제어(iterative learning control)을 사용하여 다채널의 목표 가진 신호

(target signal)를 재현하였다. 진동 가진을 위한 액추에이터로는 추력을 향상시키기 위해 Halbach 영구자석 배열로 이루어진 전자기식 액추에이터를 사용하였다. 진동 재현을 하기 위한 제어 방식은 반복학습제어기법을 이용하였다. C 언어로 구성된 제어 기법의 검증을 위해 스텔트 플랫폼을 이용한 6축 진동 신호 재현 실험을 수행하였다. RMS 오차는 6개의 측정 채널에 따라 1회차에서는 33.8%~82.5%였지만 10회차에서는 8.0%~17.1%로 수렴하였다. 이를 통하여 스텔트 플랫폼과 반복학습제어를 이용한 다채널 진동 신호 재현의 타당성을 입증하였다.

후 기

이 연구는 지식경제부 첨단연구장비 경쟁력향상사업 “다축 진동시스템 평가장비 개발” 과제(No. 10038747)의 연구비 지원과 2010학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

이 실험을 지원해 준 ㈜액트에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) French, M., 2000, Procedural Considerations for Road Simulation, *Experimental Techniques*, Vol. 24, No. 6, pp. 46-47.

(2) Brines, R. S., Weiss, L. G. and Peterson, E. L., 2001, The Application of Direct Body Excitation Toward Developing a Full Vehicle Objective Squeak and Rattle Metric, SAE Technical Paper 2001-01-1554.

(3) Trapp, M. and Peterson, E. L., 2007, A Systematic Approach to Preparing Drive Files for Squeak and Rattle Evaluations of Subsystems or Components, Presented at the Society Automotive Engineers(SAE) Tech. Paper, St. Charles, IL, Paper 2007-01-2269.

(4) Moon, S., Yun, D., Cho, H., Park, S. and Kim, B., 2007, An Analytical Study on the Magnetic Levitation System Using a Halbach Magnet Array, *Transactions of the Korean Society for Noise and*

Vibration Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 1077-1085.

(5) Son, Y. G., 2011, Study of Thrust Optimization of Electro-magnetic Linear Actuator for Fatigue and Durability Test Machine, Master Thesis, Hanyang University.

(6) Ofori-Tenkorang, J. and Lang, J. H., 1995, A Comparative Analysis of Torque Production in Halbach and Conventional Surface-mounted Permanent-magnet Synchronous Motors, IEEE IAS Annual Meeting, pp. 657-663.

(7) Lee, M. G., Lee, S. Q. and Gweon, D. G., 2004, Analysis of Halbach Magnet Array and Its Application to Linear Motor, *Mechatronics*, Vol. 14, No. 1, pp. 115-128.

(8) Kim, J. H., Kim, J. S., Shim, J. H. and Park, T. I., 2010, Development of 6-DOF Simulator using Linear Electro-magnetic Actuators, *Proceedings of the KSNVE, Annual Autumn Conference*, pp. 477-478.

(9) Arimoto, S., Kawamura, S. and Miyazaki, F., 1984, Bettering Operation of Robots by Learning, *Journal of Robotic System*, Vol. 1, No. 2, pp. 123-140.

(10) Bien, Z. and Huh, K. M., 1989, High-order Iterative Learning Control Algorithm, *IEE Proceedings, Part-D*, Vol. 136, No. 3, pp. 105-112.

(11) Furuta, K. and Yamakitai, M., 1986, Iterative Generation of Optimal Input of a Manipulator, *Proceedings of IEEE Robotics and Automation*, pp. 579-583.

(12) Amann, N., Owens, D. H. and Rogers, E., 1996, Iterative Learning Control Using Optimal Feedback and Feedforward Actions, *International Journal of Control*, Vol. 65, No. 2, pp. 277-293.



Byeongsik Ko received the BS degree in Korea Aeronautical University in 1984. Also received MS Degree in KAIST and received PhD Degree in U.C. Berkeley. He is currently a faculty of Inha Technical College.

His research interest are vehicle NVH and noise and vibration control.