유압 서보 구동기의 동특성을 고려한 진동 시험기의 반복 피드포워드 제어

Iterative Feed-forward Control of Shaking Table System Based on FRF of Hydraulic Actuator

이동재† ·박영진*·박윤식*·김형의**·박종원**

Dong-Jae Lee, Youngjin Park, Youn-Sik Park, Hyoung-Eui Kim and Jong-Won Park

Key Words : Hydraulic shaking table system(유압 진동시험기), Iterative feed-forward control(반복 피드포워드 제어), Pressure feedback control(압력 피드백 제어)

ABSTRACT

In this paper, the research results for the improvement of tracking performance of a hydraulic shaking table are presented. A servo-hydraulic shaking table is not only highly nonlinear but also has a lot of time delay. In addition, the shaking table, which consists of multi axial hydraulic actuators, is a MIMO system coupled by kinematics and dynamics of each other's actuators. And it is demanded for the shaking table to track arbitrary trajectories up to high frequency even at the extreme situations such as substantial external loads and large disturbances. For this purpose, an iterative feed-forward control based on the inverse of a measured frequency response function is used for the shaking table. To solve the dynamic coupling, a pressure feedback control as numerical damping is used. It is shown through numerical simulations that the tracking performance of shaking table is improved up to 100Hz.

1. 서 론

자동차나 건설장비와 같은 많은 제품들은 운전 중에 다양한 진동 현상을 겪는다. 이러한 진동 현상은 제품의 내구성에 심각한 손상을 줄 수 있다. 이에 제품의 제작 초기 단계부터 성능 저하를 야기 시킬 수 있는 다양한 진동현상을 진동시험기를 통해 재현하는 진동시험은 제품의 수명 평가 및 신뢰성 향상을 위해 그 중요성이 부각되고 있다.

진동 시험기를 이용한 진동 시험은 제품을 실제 환경과 유사한 조건하에서 실험하는 것이 요구된다. 진동 시험은 제품의 운전 중에 발생하는 가진 신호를 측정하여 이를 진동 시험기로 재현함으로써 시험이 이루어진다. 이 때 진동 시험기는 시험기의 비선형성과 다양한 부하조건과 같은 극도의 상황에서도 특정 가진 상황을 그대로 재현해야 한다. 이 같은 목적을 위해 측정된 주파수 응답 함수(frequency response function)의 역함수를 이용하는 반복 피드포워드 제어(iterative feed-forward control) 방법이 사용된다.[3),(4)] 반복 피드포워드 제어는 시스템의 출력이 기준 신호와 일치하도록 하는 반복 보상과정을 이용한다. 이 방법은 진동 시험기의 추적제어와 같이 반복적인 프로세스에 대하여 제어를 수행하는데 효과적이며, 제어기 구조가 간단하다는 장점을 가진다.

† 책임저자; 박사과정, 한국과학기술원, 기계공학과
E-mail : leedongjae@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3056, Fax : (042) 869-8220

* 교수, 한국과학기술원, 기계공학과

** 한국기계연구원, 신뢰성연구센터

2. 유압 서보 시스템의 모델링

진동 시험기는 다축의 유압 서보 구동기로 이루어진다. 그림 1 은 유압 서보 구동기의 일반적인 동역학 모델을 나타낸다.[6] 유압 서보 구동기는 하위 시스템인 서보 밸브 제어기, 서보 밸브, 그리고 구동기로 구성된다. 서보 밸브 제어기는 작동 간에 기준입력과 피드백 신호를 비교하여 서보 밸브에 스풀 밸브를 구동하기 위한 밸브 명령 신호를 보낸다. 스풀은 구동기 양단의 유압 챔버 안으로의 유체 흐름을 조절한다.

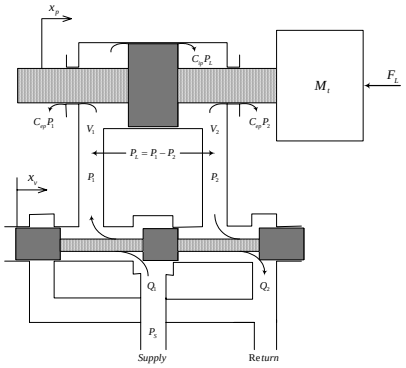


그림 1 유압 서보 구동기

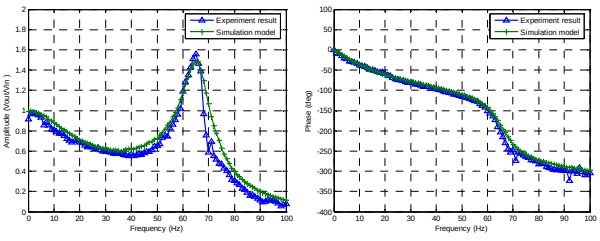
두 챔버의 압력 차는 구동기 피스톤 면적을 곱한 힘을 발생시켜 이를 피스톤 끝과 연결된 상판에 이 힘을 작용시킨다. 여기서 피드백 되는 신호는 LVDT 에 의해 측정된 구동기 피스톤의 변위 신호이다.

2.1 유압 서보 구동기의 동특성 실험

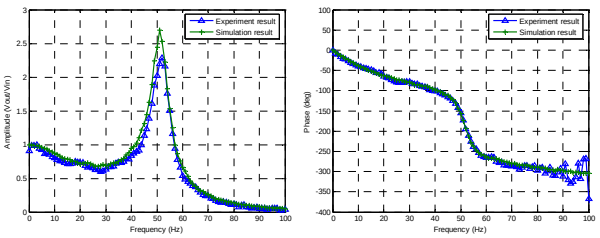
유압 서보 구동기는 유압 공급 장치의 공급 압력, 유압 서보 밸브의 입력 신호 크기 및 부하중량에 따라 동특성이 변화한다. 이 같은 유압 서보 구동기의 동특성을 확인하기 위하여 진동 시험기의 목표 성능인 0~100Hz 영역에 대하여 랜덤 가진 실험을 실시하였다. 실험에서는 유압 서보 제어기의 입력 전압 및 부하중량 변화에 따른 피스톤의 변위 출력 전압을 측정하였다. 그림 2 는 유압 서보 구동기의 실험 결과와 수학적 모델의 모의 실험 결과를 나타낸다. 그림 2(a), (b)의 65Hz 와 50Hz 부근의 피크는 유주공진(oil column resonance)에 의한 현상이다. 유주공진 현상은 피스톤과 부하를 포함하는 질량과 구동기의 두 챔버간 유주 강성의 상호 작용에 의해 발생한다. 식 (1)은 구동기의 유압 고유 진동수를 나타낸다.

$$w_h = 2A_p\sqrt{\frac{\beta_e}{V_t M_t}} \qquad (1)$$

여기서 A_p 는 피스톤의 단면적을 나타내고, β_e 는 유효 체적 탄성율, V_t 는 양 챔버의 총 체적, M_t 는 피스톤과 부하의 총 질량을 나타낸다.



(a) 부하중량 300kg



(b) 부하중량 500kg

그림 2 유압 서보 구동기와 수학적 모델의 비교

2.2 유압 서보 구동기의 압력 피드백 효과

앞 절에서 언급한 것과 같이, 유압 서보 구동기는 제어 목표 주파수 영역인 100Hz 이내의 구간에서 유압 고유 진동수를 가진다. 이는 각 구동기가 동역학적으로 연성되어 있는 진동 시험기를 제어하는데 있어 제어 성능의 저하와 안정성에 심각한 문제를 야기 시킬 수 있다. 공진 피크 현상을 해결하기 위하여 압력 피드백 제어 방법이 적용된다.[(1),(2)] 압력 피드백 제어는 유압 서보 구동기에 수치 감쇠(numerical damping)로 작용하여 공진 피크를 낮추는 효과를 나타낸다. 그림 3 은 압력 피드백 이득에 따른 수치 감쇠 효과의 실험 결과를 나타낸다. 압력 피드백 이득 K_p 이 증가할수록 공진 피크가 감소하는 것을 확인 할 수 있으며, 이 같은 효과는 유압 서보 구동기의 동특성을 선형화한다.

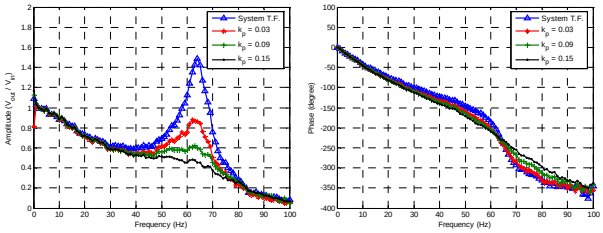


그림 3 압력 피드백 효과

3. 유압 시스템의 반복 피드포워드 제어

진동 시험기의 전형적인 제어 구조는 그림 4 와 같다. 상판에서 정의되는 6 자유도의 기준 신호는 역기구학 해석을 통하여 진동 시험기를 구성하고 있는 각 구동기의 변위 신호로 변환된다. 각 구동기는 이렇게 해석된 신호에 대해 독립적으로 추적 제어를 수행함으로써, 진동 시험기의 기준 신호를 재현하는 구조로 제어를 수행한다.

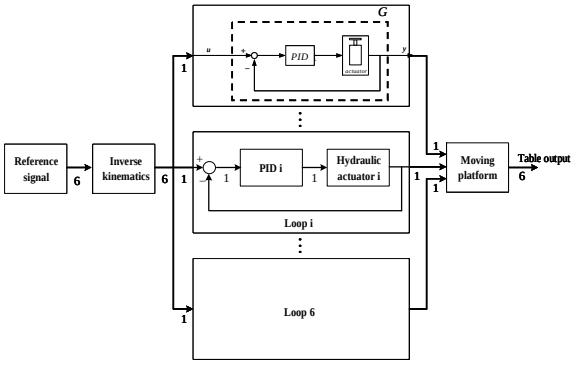


그림 4 진동 시험기의 제어 구조

진동 시험기는 일반적으로 공칭부하에 수 배에 해당하는 다양한 부하 환경하에서 사용된다. 다양한 부하 환경하에서도 진동 시험기는 동일한 추적 성능이 요구된다. 이 같은 문제를 해결하기 위해, 반복 피드포워드 제어 방법이 사용된다. 반복 피드포워드 제어의 목표는 진동 시험기의 출력이 기준 신호와 일치되도록 적절한 입력을 추정하는 것이다. 반복 피드포워드 제어 과정은 다음과 같이 표현된다.

$$u_{ff}^{\ i} = u_{ff}^{\ i-1} + Q^i \hat{G}^{-1}(r - y^{i-1})$$
$$y^i = G(u^i) \qquad (2)$$

여기서 $\hat{G}$ 은 측정된 주파수 응답 함수를 나타내고, r 은 기준 입력, y^{i-1} 은 이전 단계에서 얻어진 시스템의 출력, Q^i 는 반복 이득($0 \le Q^i \le 1$)을 나타낸다.

시스템이 완전한 선형 시스템인 경우에 반복 피드포워드 과정은 시스템의 주파수 응답 함수의 역함수를 이용하여 한번의 반복과정을 통해 기준 신호를 재현하기 위해 필요한 입력을 추정할 수 있다. 실제 문제에서는 유압 서보 시스템은 비선형일 뿐만 아니라 측정된 모델 $\hat{G}$ 의 모델 오차로 인해 반복 피드포워드 제어의 수렴성을 보장하기 위해서 적절한 Q^i 값이 선택되어야 한다.

3.1 단축 유압 서보 구동기의 제어

반복 피드포워드 제어의 성능을 검증하기 위해 진동 시험기에 사용하게 될 단축 유압 서보 구동기 시스템에 대하여 제어 실험을 실시하였다. 그림 5 는 단축 유압 서보 구동기를 나타낸다. 샘플링 시간은 0.5ms 이고, 부하중량은 500kg, 반복 이득 Q^i 는 0.5 를 사용하였다.

그림 5 단축 유압 서보 구동기

그림 6 는 기준 가속도 신호의 파워 스펙트럼 밀도와 보상과정을 통해 얻어진 시스템의 출력 가속도 신호의 파워 스펙트럼 밀도를 나타낸다. 관심 주파수 영역인 100Hz 이내의 영역에서 원하는 성능을 나타내고 있으며, 각 반복 과정간 추적 오차가 수렴해 가는 것을 확인 할 수 있다.

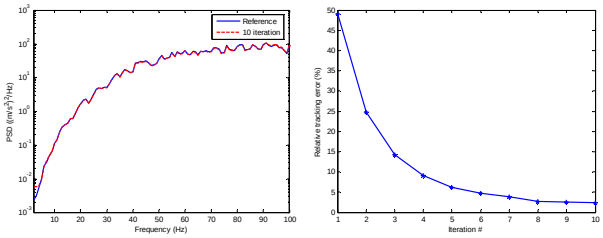


그림 6 단축 유압 서보 구동기의 제어 실험 결과

3.2 진동 시험기의 제어

진동 시험기에 대하여 Matlab/Simulink 환경하에서 반복 피드포워드 제어 모의 실험을 실시하였다. 진동 시험기를 이루는 유압 서보 구동기는 2 절에서 모델된 수치 모델을 사용하였다. 그림 7 은 모의 실험에 사용된 진동 시험기를 나타낸다.

모의 실험은 압력 피드백 제어가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 수행되었고, 샘플링 시간은 0.5ms, 반복 이득 Q^i 는 0.5 를 사용하였고, 공칭부하에 대하여 진동 시험기의 주 가진 방향인 수직 가진 방향에 대해 실시하였다.

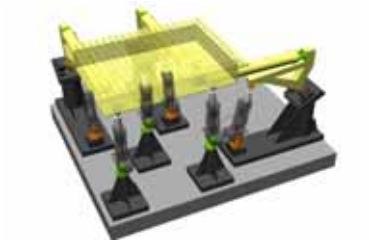
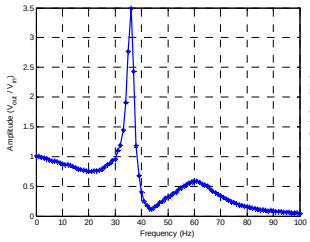
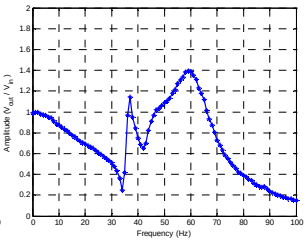


그림 7 6 자유도 진동 시험기

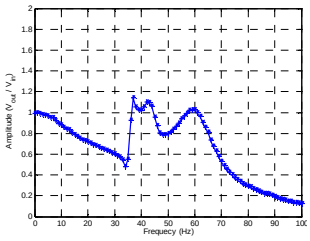
그림 8 은 압력 피드백 루프가 없는 진동시험기의 수직 구동기의 전달함수를 나타낸다. 각 구동기의 전달함수에는 등가 부하에 의해 발생하는 각 구동기의 유압 고유 진동수 이외에 다양한 극점과 영점을 가진다. 이는 동역학적으로 연성된 진동 시험기의 각 구동기의 동특성이 서로의 전달함수에 영향을 주기 때문이다. 이렇게 연성된 전달함수를 이용하여 반복 피드포워드 제어를 수행하면, 각 구동기의 전달함수에 나타나는 원하지 않는 극점과 원점이 보상되는 입력을 필요로 하는 입력과 다르게 왜곡시켜 제어 성능의 수렴성에 심각한 문제를 야기 시킨다.



(a) #1 수직 구동기



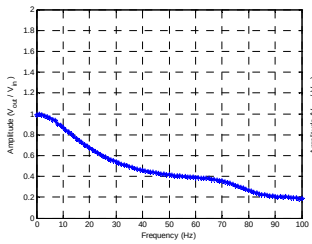
(b) #2 수직 구동기



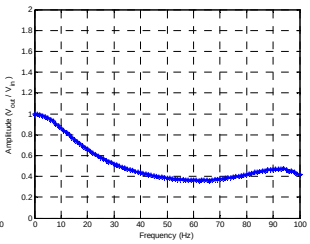
(c) #3 수직 구동기

그림 8 압력 피드백 루프가 없는 진동 시험기의 전달함수

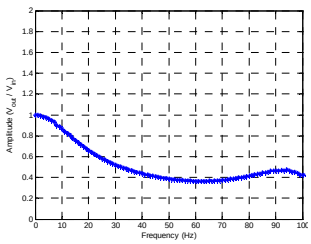
그림 9 은 압력 피드백 루프를 가지는 진동 시험기의 수직 구동기의 전달함수를 나타낸다. 각 구동기는 수치 감쇠 효과를 나타내는 압력 피드백 효과에 의해 공진 피크가 줄어들었으며, 각 구동기의 동특성이 선형화 되었다. 이 같은 효과는 각기 다른 등가 부하에 의해 발생하는 각 구동기의 공진 피크에 의해 구동기간 동역학적으로 연성이 되는 이전 모의 실험 결과와 다르게 각 구동기를 동조화 함으로써, 동역학적 연성을 최소화 하였다.



(a) #1 수직 구동기



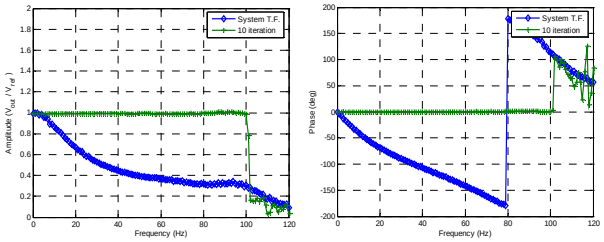
(b) #2 수직 구동기



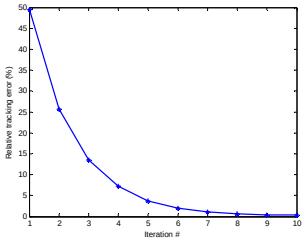
(c) #3 수직 구동기

그림 9 압력 피드백 루프가 있는 진동 시험기의 전달함수

공진 피크가 완화된 전달함수를 기반하여 진동 시험기의 반복 피드포워드 제어 모의 실험을 실시하였다. 그림 10 은 진동 시험기의 전달함수와 반복 과정을 통해 보상된 입력으로 얻어진 진동 시험기의 출력을 나타낸다. 목표 주파수 영역인 100Hz 이내의 영역에서 출력의 크기가 보상되었으며, 주파수 응답 함수의 역함수를 이용하는 반복 피드포워드 제어의 특성상 진동 시험기 출력의 위상이 기준 신호의 위상에 일치되도록 보상된 결과를 확인 할 수 있다. 각 반복 과정간 추적 오차는 진동 시험기 성능의 수렴성을 나타낸다.



(a) 진동 시험기 전달함수와 시스템 출력의 비교



(b) 반복 과정간 추적오차

그림 10 진동 시험기의 반복 피드포워드 제어

4. 결 론

본 논문에서는 진동 시험기에 대하여 반복 피드포워드 제어를 적용하였다. 진동 시험기의 유압 서보 구동기간 유주공진에 의한 동역학적 연성을 확인하였으며, 압력 피드백 효과를 이용하여 유압 서보 구동기의 동특성을 선형화 하였고, 이를 통해 반복 피드포워드 제어의 성능 향상을 확인하였다. 이는 단축 유압 서보 구동기의 실험과 진동 시험기의 모의 실험를 통하여 검증되었다. 추후 과제로 진동 시험기에 대해 압력 피드백 효과와 반복 피드포워드 제어를 적용해 보고자 한다.

후 기

이 논문은 2007 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단의 국가지정 연구실 사업 (M1050000 112-05J0000-1121), 두뇌 한국 21 프로젝트와 한국기계연구원(KIMM) 위탁 과제로 공동 수행된 연구임

참고문헌

(1) J. P. Conte and T. L. Trombetti, “Linear dynamic modeling of a uni-axial servo-hydraulic shaking table system”, Earthquake Engng. Struct. Dyn., 2000, pp. 1375-1404.

(2) T. L. Trombetti and J. P. Conte, “Shaking table dynamics: results from a test-analysis comparison study”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 6, No. 4, 2002, pp. 513-551.

(3) De Cuyper, J., Coppens, D., Liefooghe, C., Swevers, J. and Verhaegen, M., “Advanced drive file development methods for improved service load simulation on multi axial durability test rigs”, Proceeding of the international acoustics and vibration Asia conference, 1998, pp. 339-354.

(4) De Cuyper, J., Verhaegen, M. and Swevers, J., “Off-line feed-forward and H_∞ feedback control for improved tracking on an industrial vibration test rigs”, Journal of Control Engineering Practice, 11, 2003, pp. 129-140

(5) D. Vaes, J. Swevers and P. Sas, “Experimental validation of different MIMO-feedback controller design methods”, Journal of Control Engineering Practice, 13, 2005, pp. 1439-1451.

(6) H. E. Merrit, *Hydraulic Control System*, John Willey & Sons Inc., 1967

(7) D. P. Stoten and E. G. Gomez, “Adaptive control of shaking tables using the minimal control synthesis algorithm,” Phil. Trans. R. Soc. Lond., A 359, pp. 1697-1723, 2001.

(8) J. Zhao, C. French, C. Shield and T. Posbergh, “Consideration for the development of real-time dynamic testing using servo-hydraulic actuation,” Earthquake Engineering and Structure Dynamics.; 32; pp.1773-1794, 2003.