

〈논 문〉

유연 구조물의 능동 반력 제어기 설계 Active Control of Reaction Forces for Flexible Structures

김 주 형*

Joo Hyung Kim

(2000년 8월 7일 접수 ; 2000년 1월 30일 심사완료)

Key Words : Adaptive Feedforward Control(적응 전진 제어), Kalman Filter(칼만 필터), Estimator(추정기), Observer(관측기), Residual Flexibility Matrix(잔류 유연성 행렬)

ABSTRACT

A method for actively controlling dynamic reaction forces in flexible structures subject to persistent excitations is presented. Since reaction forces are not directly measured in flexible structures, reaction forces are estimated by using the Kalman filter. The estimated reaction force is used as an error signal in the adaptive feedforward disturbance cancellation controller. In order to compensate the static effect of the truncated modes in the reaction forces, the residual flexibility matrix is used with the Kalman filter. The paper presents the formulation of the reaction forces in conjunction with the Kalman filter estimator and the adaptive feedforward controller. The results show that the dynamic reaction forces at its supports in a flexible beam test rig are well suppressed.

1. 서 론

새롭고 강력한 계산 기능을 가진 컴퓨터, 정확도가 높아진 감지기(sensor)와 가진기(actuator)가 복잡한 구조물의 진동을 억제하는데 사용되면서 능동제어(active control)에 대한 많은 흥미를 유발하였다. 과거로부터, 이 노력의 대부분이 구조물의 변위를 제어하는데 집중하였고, 진동의 결과로 생기는 동적인 반력(reaction force)은 부가적인 고려의 대상이었다. 반력에 대한 능동제어가 과거로부터 지금까지 관심을 끌지 못하는 이유가 두 가지로 압축 요약될 수 있다. 첫 번째 이유로서 변위는 측정이 가능한 반면에, 반력은 측정이 매우 어렵다는 점이다. 두 번째로는 제어 입력에 대한 최적 위치가 사용 가능하지 않다는 점이다. 최근의 연구에서 변위제어할 때에 변위가 줄어드는 것에 따라서 반력의 크기가 감소하는 것이 아니라 오히려 증가하는 것이 주목 할만 하다⁽¹⁾. 특히 복잡한 구조물에서 특정한 반력을 측정 및 제어하는 것은 매우 어려운 일이다.

이러한 문제 때문에 반력을 추정하는 것이 해법으로 등장하였으나 반력을 추정하는 문제는 변위를 추정하는 것보다 더 많은 모드(mode)를 필요로 한다⁽²⁾

본 연구에서는 연속적인 외란에 의해 동작하고 있는 물체로부터의 변위와 반력, 두 가지 방법의 능동 제어를 나타냈다. 이중 반력 제어중에서 가장 중심이 되는 내용은 반력을 추정하는 것으로 알려진 칼만 필터 추정기(Kalman filter estimator)^(3, 5)이다. 이와 같이 반력에 대한 정보를 가지고 지점(support point)의 반력을 줄이기 위해 적응 전진(adaptive feedforward) 진동제어 기법이 사용되었다. 이 적응 전진 제어 기법에서는 외란과 관계가 있는 것이 기준 신호(reference signal)이다. 이 기준 신호를 적응하는 FIR(finite impulse response) 필터를 통하여 구조물의 반력을 반대로 지우기 위해 제어 입력이 구성되었다. 이 경우에 FIR 필터의 적용사례는 filter-x LMS(least mean square) 알고리즘을 채용하였다.

또한 직접적인 측정으로부터 얻을 수 없는 지점의 반력을 최소화하기 위하여 오차 신호가 필요하다. 이 오차 신호는 칼만 필터 추정기로부터 얻을 수 있는데, 보다 정확히 추정하는 데는 많은 수의 모드가 필요하다. 반력에서 modal truncation으로 고차의 모드는 영향이 작기 때문에

* 정회원, 국민대학교 자동차공학대학원
E-mail : jhkst@kookmin.ac.kr
Tel : (02)910-4834

제거해 버린다. 이 고차 모드가 전체 반력 평가에 미치는 영향을 최소 한도로 줄이기 위해서 반력 평가에 잔류 유연성 행렬(residual flexibility matrix)⁽⁴⁾을 도입하였다.

2. 실험 장치

본 연구에서는 실험 모델로서 한쪽이 외팔 보처럼 나와 있는 오버행(overhanged) 단순지지 보를 사용하였고, 아래 Fig. 1과 같이 예시되어 있다. 이 장치중에 핵심이 되는 모델은 보이며 3.125×25×610 mm의 길이를 가지고 있다. 이에 총 길이의 3/4이 단순 지지 보로, 나머지 총길이의 1/4이 오버행으로 남아있다. 이 실험 장치는 여러 가지 반력 측정과 회전에 따르는 복잡함을 피하기 위하여 회전체의 하나의 평면만을 고려하여 설계되었다.

이 실험체의 처음 3개의 고유 진동수는 실험으로 29.6, 71.2, 167 Hz로 결정되었다. 이 실험 장치에서는 실제 지점의 반력이 Fig. 1에서 본 것과 같이 압전식 로드 셀(piezoelectric load cell, PCB208B)로 측정되었다. 이 측정된 하중이 추정된 반력과 비교되었고, 이 추정된 하중이 제거하는 데 사용되었다. 보의 변위는 유도 감지기(Kamern inductive sensor)에 의해 측정되고, 위치는 지점 1로부터 15, 170, 280, 300, 480, 500 mm에 장착되어 있다. 진동이 나 제어 입력을 주기 위해 전자기식 가진기(Ling dynamic systems model 203 B)를 통하여 힘을 보에 가한다. 모든 압출력과 제어는 National Instruments ATMIO-16F-5 board를 가진 컴퓨터를 사용하였고, 샘플링 비율은 600 Hz를 가진다.

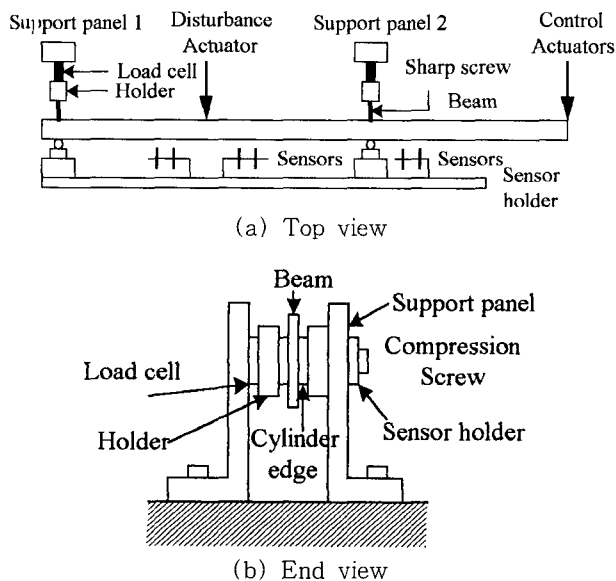


Fig. 1 Schematic of experimental test rig.

3. 모델링과 제어법칙의 유도

3.1 실험 장치 보 모델

본 연구의 실험 장비 보는 유한 요소 법으로 모델링되어 있다. 12개의 Bernoulli-Euler 보 요소들로 병진과 회전 운동변위를 고려하였다.

$$\begin{bmatrix} M & M_{cc}^T \\ M_{cc} & M_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{w} \\ \ddot{w}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & K_{cc}^T \\ K_{cc} & K_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ w_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ F_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 변위 좌표 w 는 계의 유한요소 법에서 절점 변위들을 나타낸 것이고, 벡터 w_c 는 좌표계의 구속좌표를 나타낸 것이다. 또한, F 와 F_c 는 외력으로 가해 준 힘과 그에 따르는 반력으로 각각 정의된다. 식 (1)에서, 질량과 강성 행렬은 자유(free)와 제한된(restrained) 좌표로 나누어진다. 여기서 제한된 좌표는 움직임이 없기 때문에 0으로 간주된다. 주어진 경계 조건에 따라서 식 (1)은 두개의 방정식으로 나누어진다.

$$M\ddot{w} + Kw = F \quad (2)$$

과

$$M_{cc}\ddot{w}_c + K_{cc}w_c = F_c \quad (3)$$

식 (3)에서 F_c 는 지점의 전단력과 모멘트로 주어지고, 식 (2)의 가속도 벡터를 식 (3)에다 치환하면, 식 (3)의 반력은 다음 형태로 주어질 수 있다.

$$\begin{aligned} F_c &= M_{cc}\{M^{-1}(F - Kw)\} + K_{cc}w \\ &= (K_{cc} - M_{cc}M^{-1}K)w + M_{cc}M^{-1}F \end{aligned} \quad (4)$$

이 반력은 변위 벡터 w 의 정확도에 의존한다. 모든 변위의 측정이 어렵고 48개(총 12개요소, 24개 자유변수)의 상태변수 추정기(state estimator)가 실시간으로 계산하기 어렵기 때문에, 모델은 4개의 모드로 감소되어 졌다.

처음으로 운동 방정식을 다음과 같은 진동형 변환을 가진 형태로 전개할 수 있다.

$$w(t) = \Phi q(t) \quad (5)$$

여기서 Φ 는 계의 orthonormal 진동형 행렬이고 $q(t)$ 는 진동형 좌표의 벡터이다. 진동형 벡터 $q(t)$ 는 $[q_r^T \ q_t^T]^T$ 로 표현되는데 여기서 r 과 t 는 유지된(retained) 모드와 제거된(truncated) 모드로 각각 정의된다. 물리적 좌표 벡터는 유지된 모드를 사용하여 반력을 나타내어 질 수 있다.

이러한 표현은 유지된 모드만이 반력에 사용되고 있기 때문에 덜 정확하다. 물론 모드의 숫자를 증가시키는 것이 반력의 정확도를 증가시키는 것이지만은 추정기의 크기를 증가시키는 것은 실시간으로 제어를 불가능하게 만든다.

이에 대한 대안으로서 제거된 모드의 정역학적인 효과를 보충한 잔류 유연성 행렬⁽⁴⁾이 사용되었고, 식 (6)속의 괄호 안에 들어있는 항으로 정의된다.

$$w = (K^{-1} - \Phi_r \Lambda_r^{-1} \Phi_r^T) F + \Phi_r a_r \quad (6)$$

여기서 Λ_r 는 대각선 방향의 요소이다. 식 (6)의 물리적인 해석으로서 오른쪽에 있는 마지막 항은 유지된 모드에 대한 표현이고, 괄호 안에 첫 번째 항은 변위에 대해 전체 모드의 정역학적인 힘의 효과이고, 다음 항은 유지된 모드의 정역학적인 힘의 효과이다. 이 첫 번째 항에서 두 번째 항을 빼면 제거된 모드의 정역학적인 힘의 효과가 나타낼 수 있다. 마지막으로, 더 정확한 반력의 평가를 위해 잔류 유연성 행렬이 포함된 식 (6)을 식 (4)에 치환하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$F_c = (K_{cc} - M_{cc} M^{-1} K) \{ (K^{-1} - \Phi_r \Lambda_r^{-1} \Phi_r^T) F + \Phi_r a_r \} + M_{cc} M^{-1} F \quad (7)$$

3.2 적응전진 제어기

이번 연구의 목적은 식 (7)과 같은 계에서, 조화 함수의 외란을 포함하고 있는 반력을 억제하는 것이다. 그러한 조화 외란 억제 문제는 LMS 적응 전진 제어 알고리즘으로 쉽게 접근되어 진다. 이 알고리즘은 Fig. 2에 진행과정에 대한 설명이 삽화로 표시되어 있다⁽⁶⁾. Fig. 2에서 외란의 주파수가 알려져 있으므로, 조화신호는 function generator에 연결하였다.

주어진 실험에서 제어 입력 u 는 적당한 진폭과 위상을 얻기 위하여, FIR 필터를 통과하며, 실제로 구조물에 전달된다.

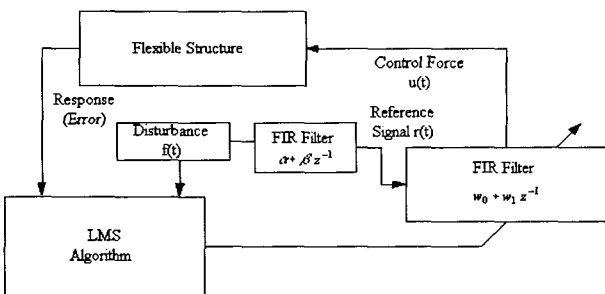


Fig. 2 Schematic of adaptive feedforward control

$$u(t) = (w_0 + w_1 z^{-1}) r(t) \quad (8)$$

여기서 w_0 와 w_1 는 필터 계수이고, z^{-1} 는 단위 시간 지연, 그리고 $r(t)$ 는 다음과 같은 제어 입력 형태를 가지고 있다.

$$r(t) = r_0 \sin(\omega t) \quad (9)$$

LMS 알고리즘은 반복적으로 현재의 계수, 제어 입력, 오차 신호를 기본으로 하여 새로운 계수를 계산하는 알고리즘이다.

$$w_{k+1} = w_k + 2\mu \varepsilon_k r_k \quad (10)$$

여기서 w_k 는 현재 시간 k 에 필터 계수의 벡터이고, r_k (기준신호)는 현재와 바로 전 시간의 제어 입력이고, μ 는 수렴 계수이다. 그 오차 항 ε_k 은 현재 계의 출력 값이다.

본 연구에서는 이 오차값이 계의 변위나 반력 중의 하나이고 반력은 식 (7)에 표시되어 있다. 대부분 응용의 예에서는 이러한 반력의 측정이 가능하지 않다. 그러므로 식 (10)에서 오차 신호를 결정할 수단이 필요하다.

4. 상태 변수 추정기 모델(반력 추정)

식 (2)를 진동형 형태로 다시 쓰면, 실험 장치는 유지되고 있는 모드의 요소로서 표현 될 수 있다.

$$\ddot{q}_r + \Lambda_r q_r = \Phi_r^T \{ F f(t) + F_u u(t) \} \quad (11)$$

이 같은 방식으로 힘을 받고 있는 항은 두 가지, 외란 항 $f(t)$ 과 제어 입력 항 $u(t)$ 로 분리된다. 주어진 상태 벡터 $x = [q_r^T \dot{q}_r^T]^T$ 를 이용하여, 진동 방정식은 상태 방정식 형태로 쓰여진다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Lf(t) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Lambda_r & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_r^T F_u \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_r^T F_f \end{bmatrix} f \\ y &= Cx(t) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 C 는 위치측정, 출력 y 와 관계된 행렬을 나타낸다.

4.1 외란 모델링

식 (12)에 존재하는 외란은 조화 함수로 가정되고, 그 외란은 조화 형태를 지닌 필터를 통해 백색 잡음을 통과시

칙으로서 상태 방정식 형태로 다음과 같이 얻어 질 수 있다.

$$\dot{x}_f = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} f \\ \dot{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_d^2 & 0 \end{bmatrix} x_f + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \eta \quad (13)$$

$$= A_f x_f + B_f \eta$$

여기서 η 는 백색 잡음 입력, A_f 와 B_f 는 외란과 관계된 행렬이고, x_f 는 외란을 나타내는 상태 벡터이다. 상태 변수를 추정하는 식 (12)는 식 (13)와 합쳐서 새로운 식 (14)을 만든다⁽⁵⁾.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & L_f \\ 0 & A_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ B_f \end{bmatrix} \eta \quad (14)$$

$$\dot{x}_a = A_a x_a + B_a u + L_a \eta \quad (15)$$

여기서 $L_f = [L \ 0]$. 식 (15)은 식 (14)을 더 줄인 형태로 나타내는데, $x_a = [x \ x_f]^T$ 는 상태 벡터를 나타내고, A_a, B_a, L_a 은 식 (14)의 대응되는 부분을 설명하고 있다.

4.2 상태변수 추정기와 반력 평가

식 (7)에 주어진 형태의 반력을 얻기 위해서 모든 상태 변수 x_a 가 알려져야 한다. 이들 모든 상태 변수를 추정하기 위해 추정기를 이용한 필요한 상태 변수를 얻을 수 있는 방법은 다음 식과 같다.

$$\hat{x}_a = A_a \hat{x}_a + B_a u + G(y - C \hat{x}_a) \quad (16)$$

여기서, \hat{x}_a 는 상태 변수의 추정치라고 표현되고, y 는 계의 출력, G 는 추정기 게인 상수이다. 식 (16)을 칼만 필터 추정기라고 하고, 추정기 게인 행렬은 추정 오차항 $x_a - \hat{x}_a$ 을 잡음에 관하여 최소화 함으로서 선택될 수 있었다. 이러한 방법을 LQG^(3, 5)(linear quadratic gaussian) 방법이라 부른다. 이에 대하여 감지기의 충분한 숫자와 위치가 계의 가관측성을 확신하기 위하여 요구된다.

반력은 식 (7)로부터 힘항을 외란과 제어항으로 나누어 대입, 정리하면 식 (17)같이 쓰여 질 수 있다.

$$F_c = \left((K_{cc} - M_{cc} M^{-1} K) \Phi_r, \ 0 \right. \\ \left. \{ (K_{cc} - M_{cc} M^{-1} K) (K_{cc} - \Phi_r \Lambda_r^{-1} \Phi_r^T) \right. \\ \left. + M_{cc} M^{-1} \} F_f, \ 0 \right) \begin{bmatrix} \hat{q}_r^T \\ \hat{q}_r^T \\ \hat{f} \\ \hat{f} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$+ \left((K_{cc} - M_{cc} M^{-1} K) (K_{cc} - \Phi_r \Lambda_r^{-1} \Phi_r^T) \right. \\ \left. + M_{cc} M^{-1} \right) F_u u$$

5. 실험 절차와 결과

5.1 실험 절차

3가지 다른 경우가 실험되었으며, (1) 첫 번째 지점에 대한 반력을, (2) 두 번째 지점의 반력을, (3) 마지막으로 이에 대한 비교로서, 변위(첫 번째 지점으로부터 3번째 센서의 위치 변위)를, 목표로 한 제어를 나타내었다. 계의 가해진 외란 모델은 $f(t) = f_0 \sin(\omega t)$, 여기서 $f_0 = 2.1, 1.4, 1.4N$, 주파수 $\omega = 10, 20, 40 \text{ rad/sec}$. Fig.3은 실험 진행 절차를 그림으로 표시한 것이다. 위에 주어진 각각의 운전 각속도는 각각의 진폭과 대응한다.

외란은 외란 가진기에 의해 계에 응용되며, 그 영향으로 보의 진동과 지점의 반력을 생성한다. 변위 감지기는 현재 보의 변위를 측정하고, A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 이에 대한 정보를 제공한다. 컴퓨터는 외란 상태변수를 포함하여 모든 상태변수를 칼만 필터 추정기를 통하여 계산하고, 이 같은 정보를 바탕으로 현재의 반력을 식 (17)으로부터 얻는다. 지점의 반력이 제어될 때, 반력이 오차 신호로서 사용되며, 이에 따르는 FIR 필터의 계수는 새로이 계산된다. 외란으로부터 얻어진 기준 신호는 필터를 통하여 움직이고, 동적 반력을 제거 할 목적으로 컴퓨터로부터 A/D변환기를 통해 제어 가진기로 보내어 진다.

여기서 언급된 필터는 제어기의 filtered-x부분이며, 외란에서 오차에 이르는 모델과 같은 과정이다. 그 필터가 LMS 알고리즘에 적절하게 위상차를 줄여준다. 이 과정은 새로운 변위들이 측정되었을 때 다시 시작한다. 몇 번째 주기 후에는 FIR 필터는 정상 상태의 값에 도착하고, 반력을 가진기의 위치 한계와 전기력 한계에 맞추어서 최소화 한다.

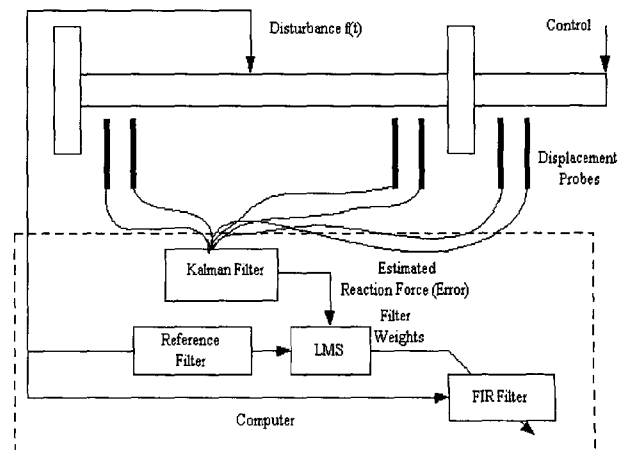


Fig.3 Schematic diagram of experimental procedure for active control of reaction forces

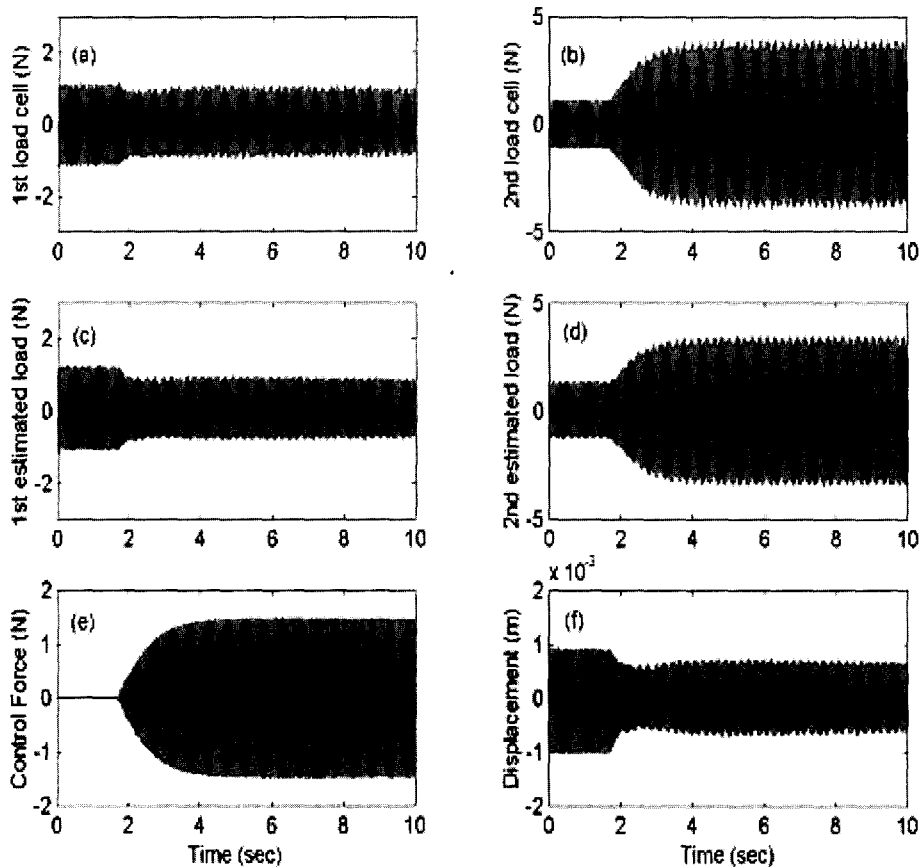


Fig. 4 Control of midspan displacement using the filtered-x LMS algorithm with Kalman estimation, showing (a) measured load in support 1, (b) measured load in support 2, (c) Kalman estimate of load in support 1, (d) Kalman estimate of load in support 2, (e) control input force, (f) the third midspan displacement from support 1

5.2 결과

(1) 20 Hz 실험의 경우

3가지 실험의 경우가 결과로서 Fig. 4~6에 나타나 있다. 각각의 경우에 제를 외란에 대해서 정상 상태에 올려놓기 위하여, filtered-x 부분이 수렴할 수 있도록 60초간 시험기를 운행하였다. 결과에서 보는 것과 같이 1.7초 지난 후에 제어입력을 시작하였다.

각각의 결과는 6개의 작은 그림으로 구성되어 있는데, (a) 측정된 지점 1의 반력, (b) 측정된 지점 2의 반력 (c) 추정된 지점 1의 반력, (d) 추정된 지점 2의 반력, (e) 가해진 제어 입력, (f) 중간 지점의 변위를 나타낸다. 측정된 반력은 로드 셀로부터 측정되고 추정된 하중은 로드 셀에서 얻은 실시간 결과와 비교된다.

첫 번째 실험으로서, 변위를 제어하기 위한 실험이다. Fig. 4(f)는 제어되지 않은 변위보다 제어된 변위는 40% 감소하였으며 이것이 이 실험의 주목적이다. Fig. 4(e)로부

터 제어 입력이 4초가 지난 후로는 수렴함을 알 수 있는데 이것으로부터 필터 계수들이 수렴함을 알 수 있다. Fig. 4(c)에 나타낸 것이 첫 번째 추정된 하중은 33% 감소를 나타냈고, 이에 대한 실제 치(Fig. 4(a))와 비교하면 매우 근접함을 알 수 있다. Fig. 4(b), (d)에서 나타낸 하중은 제어 입력이 가해진 후에 크게 증가하였다. 이에 대한 이유로는 제어입력과 첫 번째 지점의 반력과 위상이 반대이고 두 번째 지점의 반력과 위상이 같기 때문이다.

두 번째 실험으로서, 지점 1의 반력이 제어되었다. Fig. 5(a), (c)는 실제 첫번째 로드 셀로부터의 신호와 추정된 지점 1의 반력을 나타낸 것이다. 이 결과로 깨끗한 30%의 감소를 나타내고 있다. Fig. 5(b), (d)은 지점 1의 반력이 줄어드는 동안, 지점 2의 반력이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 같은 결과가 변위를 목표로 제어를 시도했을 때, Fig. 4에서 나타나는 것을 알 수 있다.

세 번째 실험에서는 지점 2의 반력이 제어되었다. Fig.

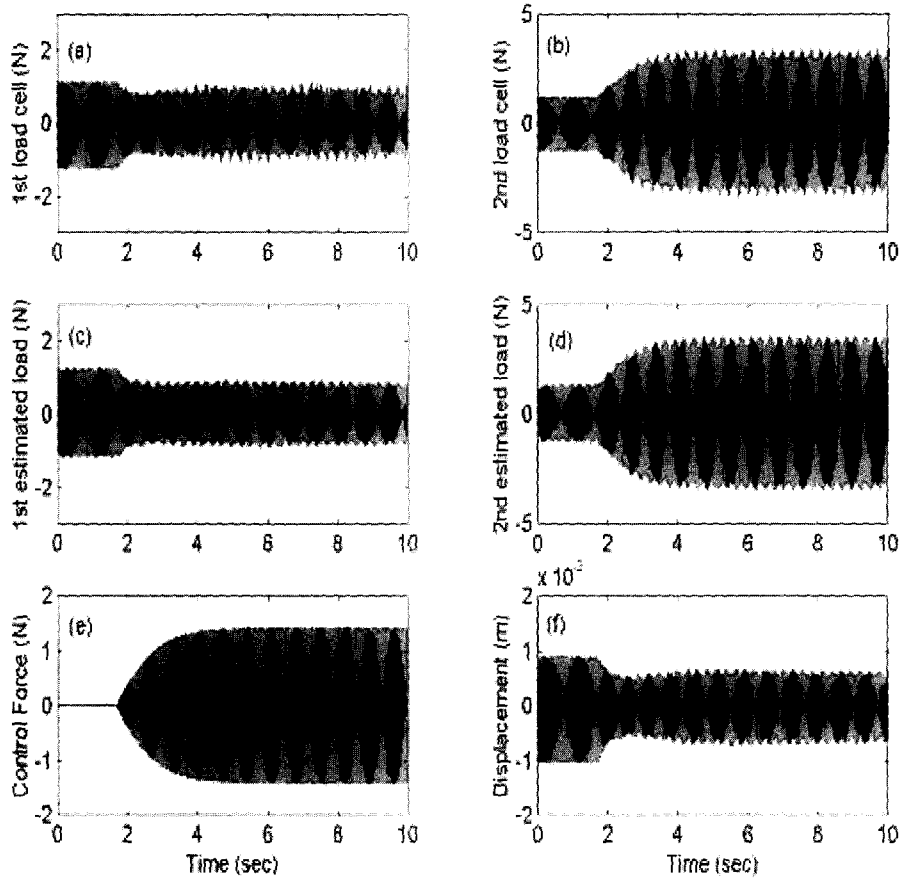


Fig. 5 Control of 1st support using the filtered-x LMS algorithm with Kalman estimation, showing (a) measured load in support 1, (b) measured load in support 2, (c) Kalman estimate of load in support 1, (d) Kalman estimate of load in support 2, (e) control input force, (f) the third midspan displacement from support 1

6(f), (d)는 지점 2의 실제 반력과 추정된 반력을 나타낸 것이다. 제어 입력의 위치 때문에 지점 1의 반력 제어보다 지점 2의 반력을 아주 쉽게 감소할 수 있다. 반력의 65%가 감소하였음을 알 수 있다. 지점 1의 반력 제어 동안에 제어 입력의 40%를 가지고서도 정상 상태에 도착한다 (Fig. 6(e)). Fig. 6(a), (c)는 지점 1의 반력이 약간 증가함을 알 수 있으며, 지점 2의 반력에 비하여 큰 변화가 없다.

지점 1의 반력을 제어하는 동안에 제어 입력 가진기의 위치가 제한되어 있기 때문에 결과가 그리 좋지 못하다고 믿고 있다. 실제의 신호와 추정된 반력의 신호가 10° 차이의 위상 차가 나타내는 것을 알 수 있다. 적응 전진 제어기의 성능을 증진시키기 위해서는 이 위상차가 다름을 극복하는 일이다.

(2) 10 Hz 와 40 Hz 의 실험의 경우

Fig. 7와 8은 다른 외란 주파수의 경우인 10와 40 Hz의

결과를 나타낸 것이다. 특히, 40 Hz의 경우는 첫 번째 고유 주파수를 넘는 운전상태를 표시한 것이다. Fig. 7와 8은 3개의 그림으로 구성되어 있는데, 이 값들은 1개의 개루프와 3개의 제어기에 의한 범위, 첫 번째 지점 반력, 두 번째 지점 반력 결과이다.

Fig. 7과 8중, 모든 제어기의 경우에는 각각의 목적이 되는 변수를 감소시키는 것을 보여주는 데, 목적 변수 외에 다른 변수에는 예기치 않은 결과를 보여준다.

변위제어기는 각 주파수에서는 변위를 잘 제어하는 데 반하여, 10 Hz의 경우에는 두 번째 지점의 반력을 크게 증가시키고, 40 Hz 경우에는 첫 번째와 두 번째 지점 반력의 증가가 눈에 띈다. 이것은 외란, 제어입력의 위치와 모드 형태의 혼합된 효과이다⁽¹⁾. Fig. 7과 8속에서, 측정되고, 평균한 하중사이에 약간의 차이가 나타나, 일반적으로 개루프와 두 번째 반력 제어는 좋은 결과의 일치를 만든다. 여기서 더 중요한 점은 모든 로드 셀 데이터와 평가된 하

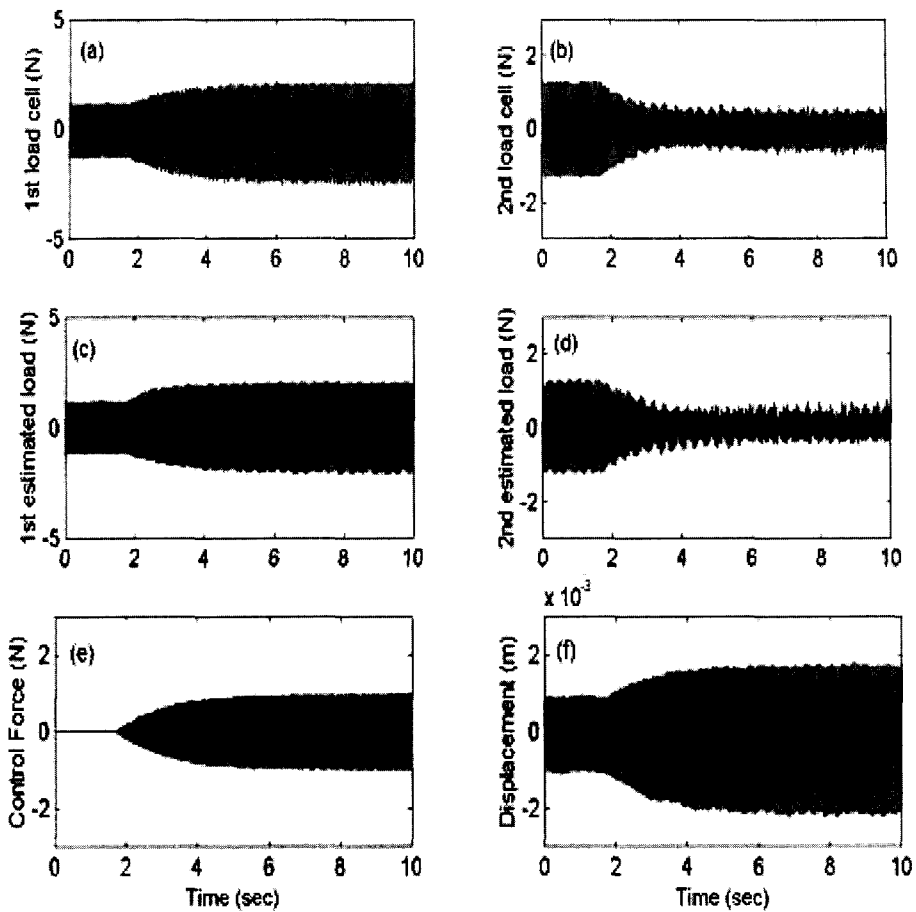


Fig. 6. Control of 2nd support using the filtered-x LMS algorithm with Kalman estimation, showing (a) measured load in support 1, (b) measured load in support 2. (c) Kalman estimate of load in support 1, (d) Kalman estimate of load in support 2, (e) control input force, (f) the third midspan displacement from support 1.

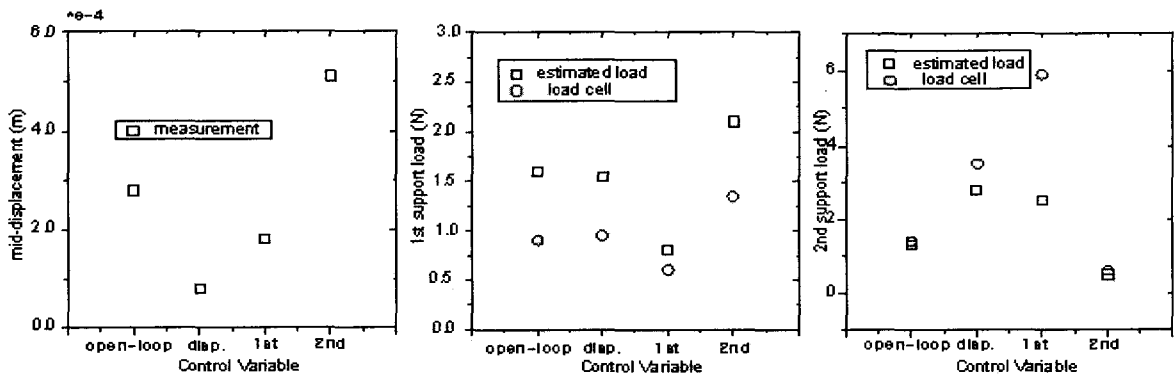


Fig. 7 Results for 10 Hz excitation tests.

중이 모든 제어 수법 속에서 같은 경향을 갖는다.

(3) 일반적인 제어 성능

데이터의 정량적인 분석으로서, Table 1은 서로 다른 종류의 제어기가 응용되었을 때, 중간 변위와 두개의 지점

반력의 감소를 퍼센트로 나타낸 것이다. Table 1에서 직접 측정된 변위 제어와 두 번째 반력 제어는 좋은 결과를 가져왔다. 이와는 반대로 첫 번째 반력 제어의 경우에는 제어 신호는 잘 감소하나, 실제 신호의 제어는 별로 좋지 않

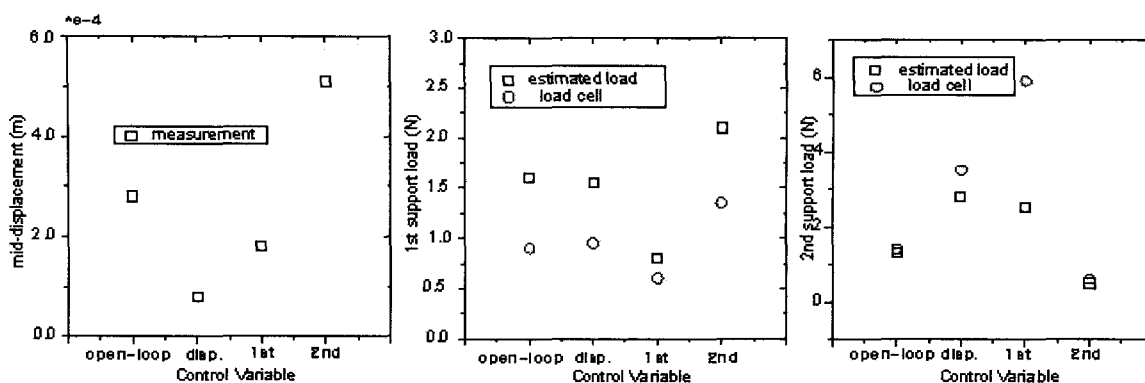


Fig. 8 Results for 40 Hz excitation tests.

Table 1 Peak to peak Reductions(compared to open-loop case) in controlled variables Displacement Control

Operating speed	Mid-displacement reduction(%)
10 Hz	72
20 Hz	54
40 Hz	68

1st Support Load Control

Operating speed	Estimated load reduction(%)	Measured load reduction(%)
10Hz	48	32
20Hz	32	14
40Hz	68	24

2nd Support Load Control

Operating speed	Estimated load reduction(%)	Measured load reduction(%)
10Hz	65	60
20Hz	54	48
40Hz	46	50

다. 정확한 에러 신호가 좋은 제어 성능을 발휘하는 데 결정적인 영향을 미친다.

6. 결 론

본 연구는 측정할 수 없는 동적 반력을 제어하는 일이다. 칼만 필터는 변위를 추정하면서 실시간으로 계의 상태 변수와 외란에 대한 정보를 제공하고, 이에 더하여 동적 반력을 LMS 알고리즘에 오차 신호로 제공한다.

결론으로서 다음과 같은 결과를 얻었다:

- (1) 칼만 필터의 추정치를 실험 장치의 로드 셀 측정치와 검토해 볼 때, 이 논문에서는 추정치가 어느 정도 가깝게 측정치에 접근한다
- (2) 각각의 제어 장치는 변위, 지점 1,2의 반력을 제어하는 데 유효하다.
- (3) 지점 1의 제어 방법과 변위를 제어하는 기법이 유사한 결과를 나타낸다.
- (4) 동적 반력 추정치와 실제 신호사이에 위상차를 감소시키면 동적반력의 추정과 제어는 좀 더 나은 결과를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Clark, W. W., Kim, J. H., and Marangoni, R. D., 1998, Using Residual Flexibility for Improved Observation of Reaction Forces in Flexible Structures, Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 120, No. 2, pp. 401~408, April 1998.
- (2) Hansen, O. E. and Bell, K., 1979, On the Accuracy of Mode Superposition Analysis in Structural Dynamics, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 7, pp. 405~411.
- (3) Kwakernaak, H. and Sivan, R., 1972, Linear Optimal Control Systems, Wiley-Interscience, New York.
- (4) Petyt, M., 1990, Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge Univ. Press, Boston, MA.
- (5) Stengel, R. F., 1986, Stochastic Optimal Control, John Wiley and Sons, New York, NY.
- (6) Widrow, B., and Stearns, S. D., 1985, Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.