

엔진마운트 능동제어용 시스템인식기술 (System Identification with Completely Unknown Periodic Disturbances in Active Engine Mount Control Application)

이 수 철*
(Soo Cheol Lee)

요 약 본 논문은 엔진마운트에서 주기적인 미지의 외란에서 나타나는 시스템의 입출력으로부터의 시스템 동특성을 인식할 수 있는 응용가능성을 보여 주고자 한다. 일반적으로 외란 진동과 파장형태는 확실히 알려져 있지 않고 임의적으로 발생되고 있다. 단지 제어량인 입력과 외란이 섞여 있는 출력측정량만이 시스템인식을 위하여 사용될 뿐이다. 보다 일반화되어 개발된 시스템인식기술 알고리즘은 승용차 능동엔진마운트의 진동제어를 위하여 능동제어에 앞선 미지의 주기적외란을 포함한 동특성시스템에서의 수학적 모의시험을 통하여 시스템인식기술의 완벽성을 나타내고 있다.

Abstract This paper shows that is possible to identify the system's input-output dynamics exactly in the presence of unknown periodic disturbances for the Active Engine Mount Control Application. The disturbance frequencies and waveforms can be completely unknown and arbitrary. Only measurements of a control excitation signal and the disturbance-contaminated response are used for identification. Examples are given to illustrate the method, including the identification and vibration control of active engine mount for automobile.

1. 서 론

자동차의 승차감과 관련하여 우리는 진동과 소음을 생각할 수 있다. 진동의 가장 큰 발생요인은 현가장치와 엔진마운트를 통하여 상쇄시킬 수 있다. 그리고, 소음은 엔진회전속도와 관련한 흡배기장치, 엔진, 냉각팬과 차량속도와 관련한 변속장치와 타이어나부터 발생된다.

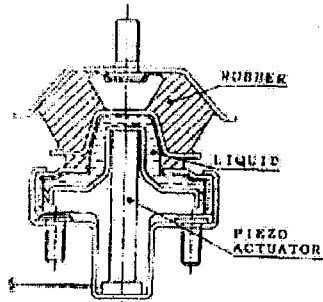
자동차 엔진으로부터 발생하는 소음과 진동을 제거하기 위하여 유압장치와 고무장치가 결합된 완충재가 사용되어 왔으며[Ushijima,1993], 엔진으로부터 발생하는 소음을 제거하기 위하여 스피커를 이용하여 가장 문제시 되는 진동영역을 찾아 내어 상쇄시키는 방법과 승객석에 가까운 차체에 피에조구동체를 장착하여 진

동 및 소음을 상쇄시키는 방법이 연구되어 왔다 [Little,1995,Singh,1992].

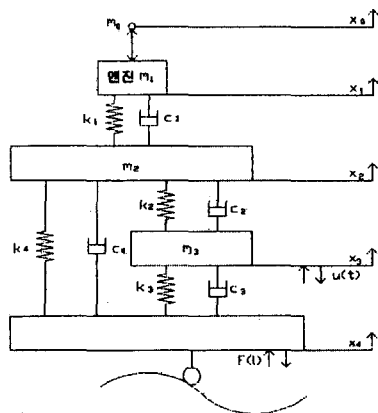
구동력인 입력자료와 측정결과인 출력자료로부터 시스템의 동특성을 정의하기 위하여 전통적인 시스템인식기술[Ljung,1993,Johnson,1988, Keller,1993]과 최근에 개발된 기법[Phan,1992, Juang1993,Phan,1995]을 사용할 수 있다. 이들 방식들은 대부분 알려진 자료를 사용하고 있으며, 알려지지 않은 자료를 이용해야 할 경우, 충분한 자료를 사용함으로써 화이트노이즈효과를 평균화할 수 있다. 이들 기법을 이용하여 통신용 인공위성의 자세제어를 위한 시스템인식에 적용하여 좋은 결과를 보인 알고리즘을 개발하였다[Goodzeit,Jan.1997,Goodzeit,March1997].

본 논문에서는 일정 엔진회전속도를 유지하면서 발생하는 진동을 자동차샤시로 전달되지 않도록 하는 강제제어 시스템을 설계하고, 엔진으로부터 발생하는 진동을 완전 차단시킬 수 있는 시스템인식을 위한 알고리즘을 개발하고자 한다.

† 이 논문은 1997년도 대구대학교 교내연구 지원사업비로 연구되었음.
* 대구대학교 공과대학 자동차·산업공학부



<그림 1> 유압식 엔진마운트 외관도



<그림 2> 역학 분석도

여기서,

m_0 = an equivalent imbalance mass in the engine

m_1 = mass of engine

m_2 = mass of upper cap with conventional mount

m_3 = mass of lower part with main rubber and liquid chamber

K_1 = stiffness of conventional mount

K_2 = stiffness of main rubber in active part

K_3 = stiffness of subrubber in active

C_1 = damping coefficient of conventional part

K_4 = stiffness of liquid chamber mount

C_2 = damping coefficient of main rubber in active part

K_3 = damping coefficient of subrubber in active part

K_4 = damping coefficient of liquid chamber

2. 자동차 유압식 엔진마운트의 모델링

자동차의 전통적인 유압식 엔진마운트는 고무패드와 유압실린더를 결합한 구조를 갖고 있다. 구동력인 입력요소로 piezo-actuator를 갖고 있는 강제 제어 엔진마운트는 Ushijima[1993]가 제시한 <그림 1>을 근거하여 <그림 2>와 같은 힘의 전달계통을 만들어 보았다.

<그림 2>의 역학분석도에서 엔진의 일정 주기회 전력에 의한 변위량 x_0 , 가속도 \ddot{x}_0 , 을 외란으로 설정하고, 도로면의 상태와 현가장치의 결합에 따라 결정되는 변위량, x_4 와 속도 \dot{x}_4 를 또 다른 외란으로 설정하고자 한다. 이 힘의 전달계통을 운동방정식으로 유도하여 표기하면 다음과 같다.

$$(m_0 + m_1)\ddot{x}_1 = -K_1(x_1 - x_2) - C_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - m_0\ddot{x}_0 \quad (1)$$

$$m_2\ddot{x}_2 = K_1(x_1 - x_2) + C_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - K_4(x_2 - x_4) - C_4(\dot{x}_2 - \dot{x}_4) - K_2(x_2 - x_3) - C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) \quad (2)$$

$$m_3\ddot{x}_3 = K_2(x_2 - x_3) + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - K_3(x_3 - x_4) - C_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) - u(t) \quad (3)$$

$$F(t) = K_4(x_2 - x_4) + C_4(\dot{x}_2 - \dot{x}_4) + K_3(x_3 - x_4) + C_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + u(t) \quad (4)$$

3. 수학적 모델링

시스템의 동특성과 제어를 위한 안정성 등을 점검하기 위하여 앞절의 운동방정식을 상태방정식(state-space equation)으로 표현하여야 한다. 이러한 시스템은 다음과 같은 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) + G_c w(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + Hv(t) \quad (5)$$

여기서,

$$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ \dot{x}_1(t) \ \dot{x}_2(t) \ \dot{x}_3(t)]^T,$$

$$w(t) = \dot{x}_0(t), \ v(t) = [x_4(t) \ \dot{x}_4(t)]$$

위 식에 관련한 A_c, B_c, C, D, G_c, H 는 질량인 m_0, m_1, m_2, m_3 과 스프링상수인 K_1, K_2, K_3, K_4 댐핑상수인 C_1, C_2, C_3, C_4 로 구성된 행렬(matrix)로 이루어져 있다. 이는 곧 시스템의

정보와 관련한 사항 들이라 할 수 있다.

본 논문에서 다루려는 운동상태방정식은 Ushijima[1993]가 취급하는 문제보다 더욱 일반화한 문제로서 먼저 수학적 검증이 필요하고, 실제 문제에 적용하기에 앞서 시스템인식기술부문에 확신을 갖는 수학적 모의실험을 거치고자 한다.

우선 이를 일반화하기 위하여 상태변수는 n 차원, 입력은 m 차원, 출력은 q 차원으로 간주하고자 한다. 그리고, 시스템내의 알려지지 않으면서 주기적인 외란입력은 s 차원으로 설정하고자 한다.

이를 불연속시간영역(discrete time domain)에서의 상태방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + d(k) \quad (6)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + Hv(k)$$

여기서, $A = e^{A_c \Delta t}$, $B = \int_0^{\Delta t} e^{A_c(\Delta t-\tau)} B_c d\tau$,

$$d(k) = \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{A_c((k+1)\Delta t-\tau)} G_c w(\tau) d\tau$$

$$= \int_0^{\Delta t} e^{A_c(\Delta t-\tau)} G_c w(k\Delta t + \tau) d\tau$$

연속시간영역에서의 주기적외란함수가

$$w(t) = a\cos(\omega t) + b\sin(\omega t) \text{ 일 때,}$$

불연속시간영역에서의 주기적 외란함수는

$$d(k) = e^{A_c \Delta t} \int_0^{\Delta t} e^{-A_c \tau} G_c [a\cos(\omega k\Delta t + \omega \tau) + b\sin(\omega k\Delta t + \omega \tau)] d\tau$$

$$= \left\{ e^{A_c \Delta t} \int_0^{\Delta t} e^{-A_c \tau} G_c [a\cos(\omega \tau) + b\sin(\omega \tau)] d\tau \right\} \cos(\omega k\Delta t)$$

$$+ \left\{ e^{A_c \Delta t} \int_0^{\Delta t} e^{-A_c \tau} G_c [b\cos(\omega \tau) - a\sin(\omega \tau)] d\tau \right\} \sin(\omega k\Delta t)$$

여기서, k 는 불연속시간대, Δt 는 샘플링시간이다.

4. 시스템인식기술의 전개

자세한 유도과정은 Goozeit[March1997]의 논문을 참고하여 일반화 하였고, 이번 절에서는 중요한 방정식만 소개하고자 한다. 시간영역 1에서 p 까지의 상태방정식을 전개하여 정리하면,

$$x(k+p) = A^p x(k) + \int u_p(k) + \int_d d_p(k)$$

여기서, $\int = [A^{p-1}B, \dots, AB, B]$,

$$\int_d = [A^{p-1}, \dots, A, I]$$

그리고, 출력정보를 시간영역 1에서 p 까지 나타내면,

$$y_p(k) = \theta x(k) + \tau u_p(k) + \tau_d d_p(k) + \tau_v v_p(k) \quad (7)$$

여기서, $u_p(k)$, $d_p(k)$, $v_p(k)$ 은 입력과 시스템의

외란, 출력외란 정보들이다.

$$y_p(k) = \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ \vdots \\ y(k+p-1) \end{bmatrix}, \quad u_p(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+p-1) \end{bmatrix},$$

$$d_p(k) = \begin{bmatrix} d(k) \\ d(k+1) \\ \vdots \\ d(k+p-1) \end{bmatrix}$$

그리고, matrix $\theta, \tau, \tau_d, \tau_v$ 는 다음과 같다.

$$\theta = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{p-2} \\ CA^{p-1} \end{bmatrix},$$

$$\tau = \begin{bmatrix} D & 0 & \dots & \dots & 0 \\ CB & D & \ddots & \ddots & \vdots \\ CAB & CB & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ CA^{p-2}B & \dots & CAB & CB & D \end{bmatrix},$$

$$\tau_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ CB_d & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ CA B_d & C B_d & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ CA^{p-2} B_d & \dots & CA B_d & C B_d & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tau_v = \begin{bmatrix} H & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & H & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & H \end{bmatrix} \quad (8)$$

두 가지 외란의 영향과 상관없이 시스템인식을 시도하기 위해 다음과 같은 임의의 M matrix를 출력정보와 같이 설정하여 최종목표인 시스템의 정보를 잡아낸다.

$$x(k+p) = A^p x(k) + \int u_p(k) + \int_d d_p(k) + M y_p(k) - M y_p(k) \quad (9)$$

출력정보를 정리하여 대입하고 p 만큼 뒤로 시간대를 조정하면, 특정시간대의 출력은

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + Hv(k)$$

$$x(k) = [CA^p + CM\theta]x(k-p) + [C\int + CM\tau]v_p(k-p) + [C\int_d + CM\tau_d]d_p(k-p) + CM\tau_v v_p(k-p) - CM y_p(k-p) + Du(k) + Hv(k) \quad (10)$$

위 식에서 다음과 같이 상태변수항과 외란항들을 제거하기 위하여 다음과 같은 제약을 둔다.

$$CA^p + CM\theta = 0 \quad (11)$$

$$[C\int_v + CM\tau_v]d_p(k-p) + [CM\tau_v, H] \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v(k) \end{bmatrix} = 0; \forall k \quad (12)$$

따라서, 식(10)은 다음과 같다.

$$y(k) = [(C_d + CM\tau), D] \begin{bmatrix} u_p(k-p) \\ u(k) \end{bmatrix} - CMv_p(k-p) \quad (13)$$

식(12)를 분석하여 보면,

$$[(C_d + CM\tau_v), CM\tau_d, H] \begin{bmatrix} d_p(k-p) \\ v_p(k-p) \\ v(k) \end{bmatrix} = 0 \quad \forall k \quad (14)$$

여기서,

$$D = \begin{bmatrix} d_p(1) & d_p(2) & \dots & d_p(N) & d_p(N+1) & \dots \\ v_p(1) & v_p(2) & \dots & v_p(N) & v_p(N+1) & \dots \\ v(p+1) & v(p+2) & \dots & v(N+p) & v(N+p+1) & \dots \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[(C_d + CM\tau_d), CM\tau_v, H] \begin{bmatrix} D^{(d)} \\ D^{(v)} \\ D^{(v)} \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

여기서,

$$\begin{aligned} D^{(d)} &= [d_p(1) \ d_p(2) \ \dots \ d_p(N) \ d_p(N+1) \ \dots] \\ D^{(v)} &= [v_p(1) \ v_p(2) \ \dots \ v_p(N) \ v_p(N+1) \ \dots] \\ D^{(v)} &= [v(p+1) \ v(p+2) \ \dots \ v(p+N) \ v(p+N+1) \ \dots] \end{aligned}$$

충분히 제한된 숫자의 외란행렬을 $D_j^{(d)}, D_j^{(v)}, D_j^{(v)}$ 이라 하면 식(16)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} CC_d D_j^{(d)} + CM\tau_d D_j^{(d)} + CM\tau_v D_j^{(v)} + H D_j^{(v)} &= 0 \\ CM[\tau_d D_j^{(d)} + \tau_v D_j^{(v)}] &= -[C C_d D_j^{(d)} + H D_j^{(v)}] \end{aligned} \quad (17)$$

식(11)과 식(17)를 정리하면

$$CM[\tau_d D_j^{(d)} + \tau_v D_j^{(v)}] = -[CA^p, (CC_d D_j^{(d)} + H D_j^{(v)})] \quad (18)$$

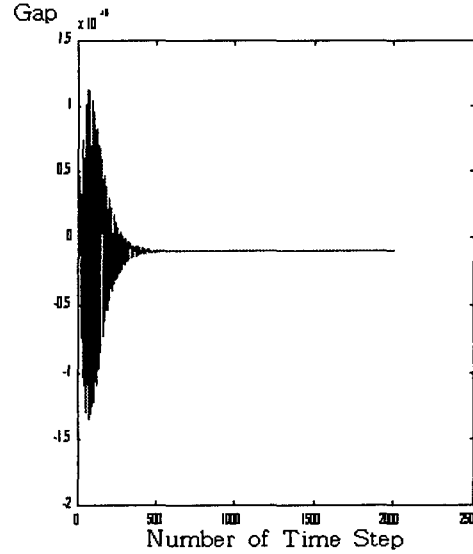
만약, n 을 state 변수의 개수, q 를 출력의 개수, ρ 를 (15)식에서 matrix D 의 rank이라고 하면, 식(13)을 만족하기 위해서는 $qn + q\rho$ 선형방정식에서 $q \times pq = qpq$ 미정계수를 결정하여야 한다. CM 이 존재하기 위해서는 $[\tau_d D_j^{(d)} + \tau_v D_j^{(v)}]$ 이 full (column) rank이고, p 값이 $q^2 p \geq qn + q\rho$ 되도록 하여야 한다. 따라서, p 값은 다음과 같은 진동영역대를 만족하여야 한다,

$$pq \geq n + \rho \rightarrow pq \geq n + 2f + 1 \quad (19)$$

식(14)는 p 값의 a "safe" lower bound를 나타낸다.

5. 모의실험결과

실제 자동차 엔진마운트의 각종 상수를 대입하는 실험을 수행하기 전에 Goodzeit[1997]의 mass-damper-



<그림 3> 시스템 인식을 통한 pulse response $\hat{C}\hat{A}\hat{B}$ 정보와 실제 시스템 정보(CAB)와의 차이

spring시스템 자료를 대입하고자 한다. 시스템과 입출력의 모든 정보를 갖고 있는 A, B, C matrix를 정확히 인식하고자 본 논문에서 개발한 알고리즘을 적용하였다. 시스템인식과정에서 나온 digital pulse response인 Markov parameter($\hat{C}\hat{A}\hat{B}$)값과 실제 시스템 정보의 결합체인 Markov parameter(CAB) 값을 비교할 때 그 차이는 <그림3>과 같이 10^{-10} 영역에서 도출되었다. 물론, 정확한 A, B, C matrix 각각의 값을 재현하고자 할 때는 ERA(Eigensystem Realization Algorithm)이나 ERA/DC(Eigen-system Realization Algorithm with Data Correlation)을 적용하여 Markov parameter의 집합체인 Henkel Matrix로부터 추출하여야 한다 Goodzeit[1997]. 그리고, 이들 모의실험에서 나타나는 시스템인식의 정밀도는 시스템의 controllability와 observability를 결정하는 시스템정보의 적절한 선택과 p 값의 선택이 중요한 변수로 작용하였다.

6. 결 론

본 논문은 양질의 정보를 지상국과 교신할 수 있는 인공위성 자세제어를 위한 시스템인식 및 자동제어기

술을 자동차부품개발에 도입하고자 Goodzeit[1997]의 결과를 보다 일반화된 엔진마운트 능동제어시스템에 적용하고자 하는 기초연구이다. 본 연구를 통하여 보다 복잡한 출력외란을 갖고 있는 시스템에서 CM의 존재성을 이론적으로 입증하였고, 시스템인식기술을 통하여 얻은 시스템정보가 실제의 시스템정보와 근사한 값을 얻어 내었다. 이는 엔진에서 발생하는 주기적인 회전력을 사시로 전달되는 것을 차단할 수 있게 제어할 수 있는 가능성을 가일층 높였다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Ljung, L. and Söderström, T., "Theory and Practice of Recursive Identification", The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1983, pp. 88-96.
- [2] Johnson, C.R, Jr. , "Recursive Least-Squares," Lectures on Adaptive Parameter Estimation , Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988, pp. 24-31.
- [3] Keller, B., "On-Line Physical Parameter Identification and Adaptive Control of a Launch Vehicle," Ph.D. Thesis, Stanford University Dept. of Aeronautics and Astronautics, March 1993, pp. 26-45.
- [4] Phan, M., Horta, L.G., Juang, J.-N., and Longman, R.W., "Linear System Identification Via an Asymptotically Stable Observer," NASA TP 3164, June 1992. Also, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 79, No. 1, Oct. 1993, pp. 59-86.
- [5] Juang, J.-N., Phan, M., Horta, L.G., and Longman, R.W., "Identification of Observer/Kalman Filter Markov Parameters: Theory and Experiments," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 16, No. 2, 1993, pp. 320-329.
- [6] Phan, M., Horta, L.G., Juang, J.-N., and Longman, R.W., "Improvement of Observer/Kalman Filter Identification by Residual Whitening," Journal of Vibrations and Acoustics, Vol. 117, 1995, pp. 232-239.
- [7] Goodzeit, N. and Phan, M., "System and Periodic Disturbance Identification for Feedforward-Feedback Control of Flexible Spacecraft," Proceedings of the 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, January 1997 (Submitted to the Journal of Guidance, Control, and Dynamics).
- [8] Goodzeit, N. and Phan, M., "Exact System Identification in the Presence of Completely Unknown Periodic Disturbances", the Journal of Guidance, Control, and Dynamics, March 1997.
- [9] Ushijima, T. and Kumakawa, S., "Active Engine Mount with Piezo-Actuator for Vibration Control", SAE930201.
- [10] Little, E. and Kashani, R., "Adaptive-Passive and Active Hydraulic Engine Mounts", Advanced Automotive Technologies, DSC-Vol. 56/DE-Vol. 86, ASME 1995, pp. 135-140.
- [11] Singh, R. and Ravindra, P., "Linear Analysis of Automotive Hydro-Mechanical Mount with Emphasis on Decoupler Characteristics", Journal of Sound and Vibration, 1992, pp. 219-243.