

역기전력을 이용한 슬림형 광 픽업의 연성 해석 및 비연성 제어기 설계

Coupling Analysis of Slim Type Optical Pick-up using Back Electromotive Force, and Decoupling Control for It

최진영[†], 이광현*, 이재성*, 김상훈*, 양현석*, 박노철*, 박영필*

Jin-Young Choi[†], Kwang-Hyun Lee*, Jae-Sung Lee*, Sang-Hoon Kim*, Hyun Seok Yang*, No-Cheol park* and Young-Pil Park*

ABSTRACT

A novel method to find interaction dynamics between focusing direction and tracking direction in an optical pick-up is proposed, and the decoupling control to reduce the interaction effect is discussed. First, the basic principle to detect dynamic interaction analysis using back electromotive force is introduced. Second, the interaction analysis between focusing and tracking direction of is analyzed for a commercial slim type optical pick-up. Finally, decoupling control process and its simulation results are shown.

Key Words : 광 디스크(Optical Disk), 광 픽업(Optical Pick-up), 역기전력(Back Electromotive Force), 연성 해석(Coupling Analysis), 비연성 제어기(Decoupling Control)

1. 서 론

광 디스크 드라이브(optical disk drive: ODD)에서 광 픽업은 LD(laser diode)로부터 조사된 빔을 통하여 데이터를 읽거나 기록하는데 사용되며, 회전하는 광 디스크로부터 발생하는 외란을 포커싱(focusing)/트래킹(tracking) 제어를 통하여 허용 오차 범위 이하로 발생하도록 구동하는 장치이다. 일반적인 광 픽업은 포커싱 방향과 트래킹 방향 2축 구동이며, 서로간의 구동 간섭이 없는 것이 바람직하다[1,2]. 그러나 제작 과정 및 조립 과정에서 발생하는 여러 가지 요인에 의하여 구동 간섭은 불가피하며, 고밀도 광 디스크 대응용 광 픽업은 발생하는 구동 간섭을 보다 엄격히 관리하여야 한다. 따라서 광 픽업의 구동 간섭을 측정하고, 이

들이 서보 루프에 미치는 영향을 보다 정성적이고 정량적으로 평가하는 일은 매우 중요하다.

포커싱 방향과 트래킹 방향의 간섭 현상은 비접촉 정밀 속도/변위 계측기인 LDV(laser Doppler vibrometer)를 통하여 광 픽업의 2 지점을 통하여 측정 가능하다, 그 측정이 어려울 뿐만이 아니라 매번 고가의 실험 장비가 필요하다는 단점이 있다. 또한 기존의 많은 연구에서 광 픽업의 구동 간섭, 즉 연성을 유발하는 원인을 분석하고 방지를 위한 제어기를 설계하였지만[2,3], 상용 제품을 평가하고 구체적으로 제어기에 미치는 영향을 상세히 분석한 논문은 없었다.

이러한 문제를 해결하고자 광 픽업 구동시 발생하는 역기전력(back electromagnetic voltage)을 이용하여 광 픽업의 간섭, 즉 광 픽업의 연성 문제를 쉽게 측정할 수 있는 방법을 논문에서 새롭게 제안하고 검증하였다. 제안된 방법을 상용 슬림형(slim type) 광 픽업에 적용/평가하여 연성 문제를 해석하였으며, 구동 간섭을 최소화하기 위한 비연성 제어기를 설계하고 적용 결과를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 액추에이터 다이내믹 연성 문제가 제어 루프에 미치는 영향을 분석하고 고찰하였다.

[†] 연세대학교 정보저장기기연구센터

E-mail : mithra@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4677

* 연세대학교 정보저장기기연구센터
논문접수일 (2005년 10월 10일)

2. 슬림형 광 픽업의 동특성 해석

2.1 슬림형 광 픽업의 구조 및 특성

슬림형 ODD 에서 사용되는 슬림형 광 픽업은 공간적인 제약으로 인하여 데스크 탑(desk top)용 ODD 광 픽업에 비하여 제작 및 조립 과정이 보다 까다롭다. 따라서 상대적으로 제작 공차 및 조립 공차에서 기인한 구동 방향의 연성이 보다 쉽게 발생할 가능성이 증가한다. Fig.1 은 실험에서 사용된 4 축 와이어 지지 방식의 슬림형 광 픽업의 구조를 보여준다. 4 점 지지 방식은 구동 감도가 좋고, 렌즈 중심과 구동 중심의 일치가 상대적으로 수월하므로 현재 가장 많이 사용되고 있다.

2.2 슬림형 광 픽업의 동역학적 해석

슬림형 광 픽업의 단순화 모델링을 위하여, 포커싱 방향과 트래킹 방향의 간섭이 없다고 가정하면, 전압 입력 $V(s)$ 에 대한 광 픽업의 변위 $X(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$G_{math}(s) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{1}{R + Ls} \cdot \frac{Bl n}{ms^2 + cs + k} \quad (1)$$

여기서, R 과 L 은 각각 구동 코일의 저항과 구동 코일의 인덕턴스를, 그리고 m 은 가동부의 질량, c 및 k 는 지지 스프링의 감쇠 계수 및 강성 계수를 의미한다, 또한 B 는 전자기 회로의 자속 밀도, l 은 전자기 회로내의 코일의 유효 길이, n 은 코일의 권선수, 그리고 i 는 구동 전류를 나타낸다. 그러나 실제 모델의 경우, 롤링(rolling), 피칭(pitching), 요잉(yawing) 및 보빈 구조물에서 발생하는 고주파 부공진 등이 발생한다[1]. 특히 서보계 관점에서 문제가 되는 부공진은 레디얼 틸트(radial tilt)를 유발하는 롤링 모드이다.

Fig. 1의 슬림형 광 픽업의 모델의 실험적 해석



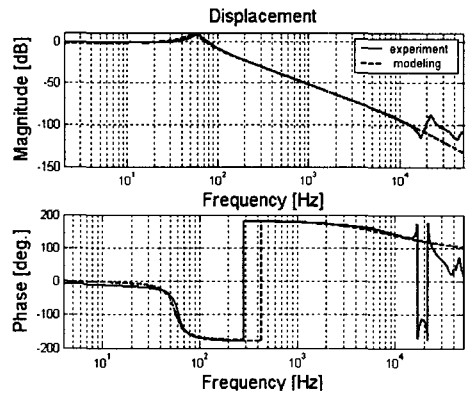
Fig. 1 Slim type actuator: commercial product

을 위하여, LDV 와 동적신호분석기(dynamic signal analyzer, 35670A)를 이용하여 동특성 실험을 하였으며 그 결과를 Fig.2 에 제시하였다. 포커싱 방향의 FRF(frequency response function)는 LDV 로 광 픽업의 대물 렌즈 부위에 붙인 반사 테이프를 부착하여 쉽게 측정할 수 있었으나, 트래킹 방향의 경우 외부 구조물에 의하여 구동부가 가려져 이를 깎아내고 FRF 를 측정하였다. 이때 2 개의 와이어 지지점 근방에 반사 테이프를 부착하여 측정하였는데, 측정 조건이 좋지 못한 관계로 고주파 부분의 정확한 측정이 이루어지지 못하였다.

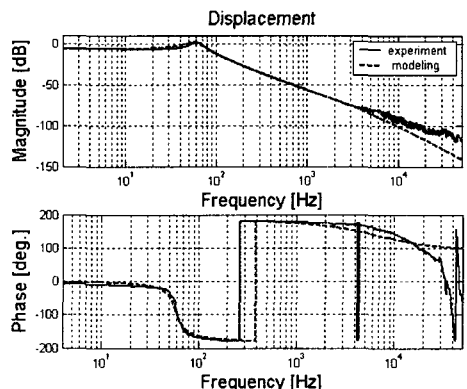
3. 역기전력을 이용한 광 픽업의 연성해석

3.1 광 픽업 속도와 역기전력의 관계

일정한 자기장 내에서 움직이는 코일은 역기전력 전압을 발생한다. 논문에서 사용된 액츄에이터는



(a) FRF for focusing direction



(b) FRF for tracking direction

Fig. 2 Actuator dynamics for each direction

코일 구동형(moving coil type) 이므로, 발생하는 역기전력 e_{BEMF} 는 식 (2)와 같이 광 픽업 렌즈의 속도에 비례한다[4].

$$e_{BEMF} = B \cdot L_{coil} \cdot V_{lens} \quad (2)$$

여기서 B 는 자속 밀도(magnetic flux density), L_{coil} 은 자속 밀도를 가로지르는 코일의 길이, 그리고 V_{lens} 는 자기장 내에서 광 픽업 렌즈의 속도이다. 신호 처리를 거치지 않은 일반적인 e_{BEMF} 의 크기는 매우 작으므로, 신호 증폭을 위하여 증폭비가 100 이고 대역폭이 70kHz 인 광대역 차동 앰프를 제작하였다. 따라서 차동 앰프를 거친 후에 발생하는 역기전력 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$e_{New_BEMF} = K_{EMF} \cdot V_{lens} \quad (3)$$

K_{EMF} 는 증폭 이득 및 $B \cdot L_{coil}$ 의 값을 포함하는 역기전력 상수이며, 실험을 통하여 값을 찾을 수 있다. K_{EMF} 의 값을 찾기 위하여 외력에 의하여 대물 렌즈 부분만을 움직였을 때, 측정되는 LDV의 측정값과 비교하여 그 값을 찾아내었다. Fig.3 은 그 실험 결과를 보여주며, 속도의 측정값은 다르지만 정확하게 대물 렌즈의 속도 프로파일이 일치함을 알 수 있다. 실험에 사용된 LDV 의 속도의 감도는 125 (mm/sec)/Volt 이므로, 이 값과 오실로스코프 상에서 측정되는 LDV 의 출력값과 K_{EMF} 의 비로부터 최종적인 K_{EMF} 의 값을 구하였다. 포커싱 방향과 트래킹 방향의 K_{EMF} 이 다르기 때문에 Fig.3 과 같은 실험을 트래킹 방향에도 진행하였다.

3.2 역기전력을 이용한 광 픽업의 연성해석

이상적인 광 픽업 액추에이터의 특징은 포커싱 및 트래킹 액추에이터가 독립적으로 구동하는 것이다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 제조 및 조

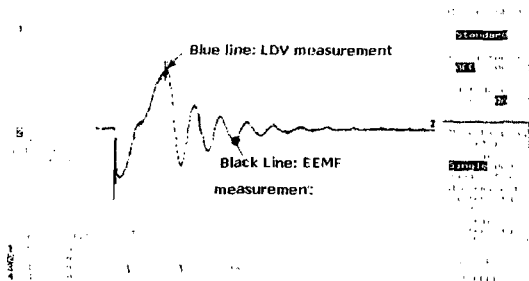


Fig. 3 Velocity detection in focusing direction : LDV vs. Back EMF

립 공차 등에 의하여 발생하는 구동부의 무게 중심과 구동력이 작용하는 작용점과의 불일치, 강성 및 무게의 불균형, 그리고 기하학적인 비대칭 등은 필연적으로 구동 방향의 연성을 유발한다. Fig. 4 는 광 픽업의 단면도를 보여주며, 구동부의 무게 중심점과 구동력 작용점이 일치하지 않는 경우 모멘트(moment)가 발생함을 알 수 있다. 따라서 트래킹 입력이 가해지지 않는 상태에서 포커싱 방향으로 구동하는 경우 트래킹 방향으로의 운동이 발생하며, 또한 역으로 포커싱 입력을 가하지 않고 트래킹 구동을 하여도 포커싱 방향의 운동이 발생한다. 이 관계를 블록 다이어그램으로 그리면 Fig. 5 와 같으며, 연성이 발생하는 경우 시스템은 더 이상 단일 입출력(single input single output: SISO)이 아니라 다중 입출력(multi input multi output: MIMO) 시스템이 된다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 LDV 를 사용하지 않고 앞서 제작한 역기전력 검출용 앰프와 동적 신호분석기를 이용하여, (i) 포커싱 입력시 트래킹 방향의 변위와 (ii) 트래킹 입력시 포커싱 방향의 변위를 각각 측정한 결과이다. 결과들의 크기의 dB 값에서 알 수 있듯이 그 크기는 매우 작음을 알 수 있으며, 실제 상용 광 픽업 시스템에서 연성 문제는 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 고밀도 광 디스크 개발이 진행이 가속화됨에 따라, 이러한 연성 문제를 측정하고 이것이 서보 루프에 미치는 영향을 평가 하는 것은 매우 중요하다.

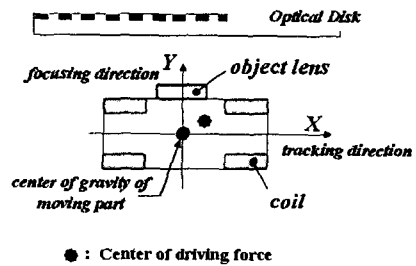


Fig. 4 Side view of an asymmetric actuator

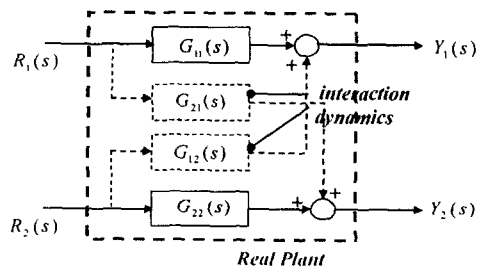


Fig. 5 Diagram for interacting MIMO system

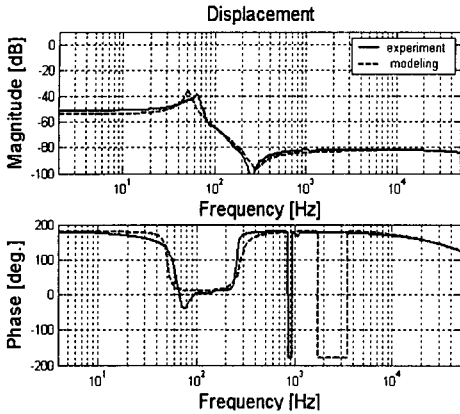


Fig. 6 FRF $G_{12}(s)$ from focusing input to tracking output

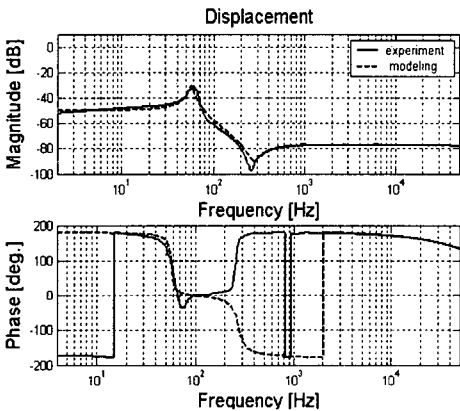


Fig. 7 FRF $G_{21}(s)$ from focusing input to tracking output

4. 비연성 제어기 설계 및 평가

4.1 제어 루프의 연성해석

실생활 시스템에서 많은 제어시스템은 광 픽업과 같이, 제어 루프의 상호 간섭이 어느 정도 있지만 그 영향 정도가 매우 작아 무시할 수 있다. 그러나 ODD 에서 요구하는 제어 정밀도가 수 μm 에서 수 nm 로 매우 작고, 또한 광 픽업의 조립 등에서 보정할 수 있는 정도에 한계가 있기 때문에 차세대 ODD 등을 고려하여 본격적인 연구가 필요하다고 생각한다. 비연성 제어기의 근본 목적은 서로 루프간의 연성을 적절한 제어기 설계로 비연성화 하는데 있다. 이것을 블록으로 표현하면 Fig. 8 과 같다. 먼저 Fig. 5 에 제시한 MIMO 시스템을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(s) \\ R_2(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $G(s)$ 는 식 (5)로 정의되는 전달 행렬이며, $G_{11}(s)$ 와 $G_{22}(s)$ 는 각각 포커싱 입력에 대한 포커싱 변위 그리고 트래킹 입력에 대한 트래킹 변위를 의미한다. 그리고 $G_{12}(s)$ 는 포커싱 입력에 대한 트래킹 방향의 출력을 그리고 $G_{21}(s)$ 는 트래킹 입력에 대한 포커싱 방향의 출력을 나타낸다. 이때 해석에 유의하여야 할 사항은, $G_{12}(s)$ 및 $G_{21}(s)$ 의 전달함수는 광 픽업의 틸트(tilt) 및 중심에서 벗어나는 것을 포함하는 값이라는 점이다. 따라서 단순한 수학값으로 계산하는 경우, CD 용 광 픽업에서 일반적으로 규제하고 있는 탄젠셜(tangential) 틸트 및 레디얼(radial) 틸트 값인 $0^\circ \pm 0.3^\circ$ 의 값보다 큰 값을 가진다. 비연성 제어를 설계하는 여러가지 기법중에서 RGA(relative gain array)를 이용하여 먼저 각 입력과 출력과의 관계를 살펴보았다. Fig.5 와 같이 2 입력 2 출력 관계가 있는 시스템의 전달 행렬을 $G(s)$ 로 정의하면, $G(s)$ 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

이때, RGA 는 식 (6)으로 정의되는 원소 λ_{ij} 를 가지는 전달행렬 Λ 로 정의된다[5].

$$\lambda_{ij} = [G(0)]_{ij} [G(0)^{-1}]_{ji} \quad (6)$$

여기서 λ_{ij} 는 i 번째 입력이 j 번째 출력에 미치는 영향을 미치는 척도이며, 1 이상의 큰 값은 루프간의 연성이 크고 단일 루프로 설계하기 어렵다는 것을 의미한다. 전달행렬 $G(s)$ 에 상응하는 페루프 전달 행렬을 $T(s)$ 라고 할 때, 비연성 행렬 $D(s)$ 를 이용하여 비연성화를 수행한다. 이때 $T(s)$ 는 다음과 같은 대각 구조를 가진다.

$$T(s) = \begin{bmatrix} T_{11}(s) & 0 \\ 0 & T_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

만일 전달 행렬 $G(s)$ 가 역행렬이 가능하면 동적(dynamic) 비연성 전달 행렬 $D(s)$ 를, 그리고 그렇지 못한 경우는 정적(static) 비연성 전달 행렬 $D(0)$ 를 구하며 각 계산법은 다음과 같다 (Fig.7 과 Fig.8 참조).

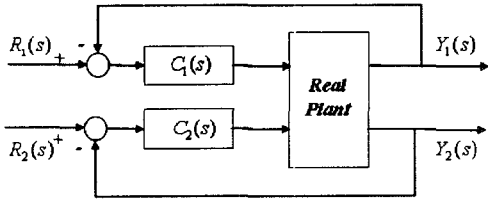


Fig. 8 Closed loop configuration for 2 by 2 system

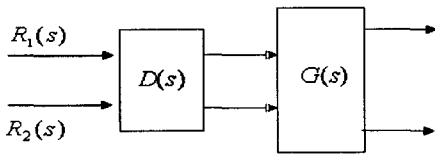


Fig. 9 Pre-compensator for MIMO system

$$D(s) = [G(s)]^{-1} T(s) = \frac{1}{\det(G)} \begin{bmatrix} G_{22}T_{11} & -G_{12}T_{22} \\ -G_{21}T_{11} & G_{11}T_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D(0) = [G(0)]^{-1} T(0) \quad (9)$$

4.2 비연성 제어기의 설계 및 평가

4.1 에서 제시한 방법을 기초로 전달 행렬 $G(s)$ 의 요소를 구하면 각각 다음과 같다. 이때 각 전달 함수는 실험으로부터 얻는 실험데이터를 곡선 적합(curve fitting)하였으며 단위는 [mm/V] 이다.

$$G_{11}(s) = \frac{6546045132.7449}{(s+6.97 \times 10^4)(s^2 + 10.5s + 1.255 \times 10^5)} \quad (10)$$

$$G_{22}(s) = \frac{2602046739.0108}{(s+4.446 \times 10^4)(s^2 + 128.8s + 1.387 \times 10^5)} \quad (11)$$

$$G_{12}(s) = \frac{0.00011831 (s+2.166 \times 10^4)}{(s+3.486 \times 10^5)(s+2.631 \times 10^4)} \cdot \frac{(s-1.187 \times 10^6)(s^2 + 384.4s + 3.053 \times 10^6)}{(s^2 + 37.72s + 1.035 \times 10^5)} \quad (12)$$

$$G_{21}(s) = \frac{0.0003198 (s-1.125 \times 10^6)}{(s+5.173 \times 10^5)} \cdot \frac{(s^2-401.3s + 2.934 \times 10^6)}{(s^2+33.48s + 1.289 \times 10^5)} \quad (13)$$

주어진 전달함수를 관계로 각 입력과 출력의

상관 관계를 나타내는 RGA 전달행렬 Λ 를 계산하면 다음과 같다.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1.0005 & -0.0005 \\ -0.0005 & 1.0005 \end{bmatrix} \quad (14)$$

식(14)로부터, Λ 의 행렬로부터 포커싱 루프를 나타내는 (1,1) 요소와 트래킹 루프를 나타내는 (2,2)요소가 강하게 연성되어 있으며, $G_{12}(s)$ 와 $G_{21}(s)$ 는 서로 다른 루프에 미치는 영향 정도가 같음을 알 수 있다. 이 결과는 $G(s)$ 의 전달행렬 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

개루프 전달행렬 $G(s)$ 에 스텝(step) 응답을 가하는 경우, Fig.10 과 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 F 와 T 는 각각 포커스와 트래킹을 의미하며, Fig.11 의 시뮬레이션에도 동일하게 적용하였다. Fig.10 의 결과에서 알 수 있듯이 각 루프는 서로 연성되어 있어, 각 루프간의 영향이 발생함을 알 수 있다. 이러한 시스템의 경우 비연성 시스템을 가정하여 $G_{11}(s)$ 및 $G_{22}(s)$ 에 알맞은 제어기를 사용 하더라도 연성 효과를 피할 수 없다. 따라서 이들 효과를 저감하기 위하여 비연성 제어기를 설계하였으며, 그 방법은 식 (9)에서 소개한 정적 비연성 제어 방법을 적용하여 그 결과를 Fig.11 에 제시하였다. 시뮬레이션에서 알 수 있듯이 연성된 동적 특성 $G_{12}(s)$ 그리고 $G_{21}(s)$ 에 대한 오실레이션 피크 값도 저감되었을 뿐 아니라, DC offset 에러도 0 으로 되었다. 주어진 시스템의 경우, 우반 평면(right half plane) 영점이 있어, 비연성화가 까다로운 편에 속하지만, 고등 비연성화 기법을 통하여 동적 비연성화를 시킬 수 있다.

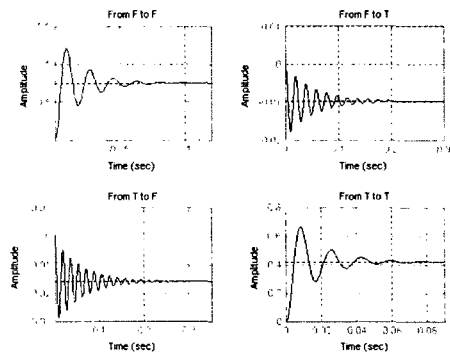


Fig. 10 Step response each transfer function for G(s)

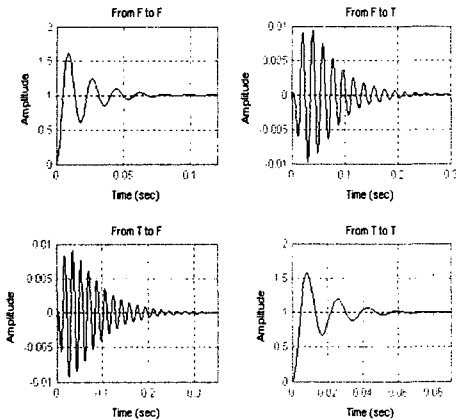


Fig. 11 Step response for decoupled system

5. 결론

역기전력을 이용하여 광 픽업의 포커싱 방향과 트래킹 방향의 연성 문제를 손쉽게 측정할 수 있는 방법을 제안하고, 연성된 루프를 비연성화 하기 위한 비연성 제어기를 설계/검증하였다. 광 픽업 시스템에서 포커싱 루프와 트래킹 루프의 연성 문제는 새로운 고밀도 광 디스크 개발과 더불어 더욱더 큰 문제로 부각될 것이며, 이러한 점을 고려하여 광 픽업의 연성에 대한 해석 및 비연성화 문제는 앞으로 보다 적극적으로 다루어 질 것으로 예상된다.

논문에서 새롭게 제시한 역기전력을 이용한 광 픽업의 연성 해석은, 방법이 간단할 뿐만이 아니라 정확하고 측정이 쉬운 장점이 있다. 또한 연성 해석을 통한 비연성 제어기 설계에 기초 자료를 제공함으로써 관련 연구에 실질적인 도움이 되리라 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단(R11-1997-042-11002-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

[1] S.S.Koh, J.h.Ryoo, G.H.Park, H.S.Jeong, 1998, "Actuating characteristics of an asymmetric optical pick-up fine actuator of a high speed CD-ROM", Journal of KSNVE, Vol.8, No.2, pp. 346-352.

[2] L. Huang, M. Gong and W. Jia, 2002, "Movement Interference Analysis for Objective Lens Actuator in Optical Disk System", Sensor and Actuator A, Vol.102, pp.19-30.
 [3] P. C. -P. Chao, C. -H. Lai and J. -S. Huang, 2003, "Nonlinear Dynamic Analysis and Actuation Strategy for a Three-DOF Four-Ware Type Optical Pick-up", Sensor and Actuator A, Vol.105, pp.171-182.
 [4] S. Imagawa, M. Suzuki, H. Ono and J. Ohya, 2001, "Actuator Control to Suppress Disturbance for 8mm DVD-RAM Video Camera Recorder", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.47, No.3, pp.528-533.
 [5] G. C. Goodwin, S. F. Graebe and M. E. Salgado, 2001, Control System Design, Prentice Hall, U.S.A., pp.851-896.