

강인 검색 제어를 위한 속도 외란 측정

Measurement of Velocity Disturbance for Robust Seek Control

이 문 노[†] · 신 진 호* · 김 성 우**

Moon-Noh Lee, Jin-Ho Shin and Seong-Wo Kim

(2003년 7월 1일 접수 : 2003년 10월 7일 심사완료)

Key Words : Velocity Disturbance (속도 외란), Disturbance Measurement (외란 측정), Robust Seek Control (강인 검색 제어), Loop Gain Adjustment (루프 이득 조정), Optical Disk Drive (광 디스크 드라이브)

ABSTRACT

This paper presents a systematic method measuring a velocity disturbance to design the robust seek loop system of optical disk drives. The velocity disturbance caused by the rotation of a disk has a greater influence on the performance of the seek control loop as the rotational speed increases. Thus, it needs to measure the extent of the velocity disturbance and design the seek control loop based on the measured data. The measurement method of the velocity disturbance is a real-time method using a measurable velocity and a velocity controller output and is a robust method considering actuator uncertainties. The loop gain adjustment algorithm is introduced to compensate for the actuator uncertainties. The proposed method is implemented by an experimental digital system and is evaluated through an experiment.

1. 서 론

광 디스크 드라이브는 디스크를 회전하여 데이터를 기록하고 재생하기 때문에 디스크 회전으로 인한 진동이 드라이브에서 발생하게 된다. 만약, 데이터 전송 속도를 높이기 위해 디스크 회전 속도를 증가시키면 발생하는 진동량의 크기가 더욱 증가하게 된다. 이러한 진동 외란은 광 디스크 드라이브의 모든 시스템에 영향을 주기 때문에 효율적으로 제어되어야 디스크에 정확하게 데이터를 기록하거나 데이터를 재생할 수 있다.

광 디스크 드라이브의 검색 시스템은 광 픽업을 특

정 트랙으로 빠르게 이동하기 위해 구현되는 시스템으로 광 픽업을 안정하게 이동하기 위해 속도 제어를 사용한다. 디스크 회전으로 인해 발생하는 진동은 검색 시스템에서 속도 외란으로 나타나고 속도 제어 루프에 영향을 주게 된다. 일반적으로 디스크의 회전 배속이 증가하면 검색 시간도 짧아져야 하기 때문에 검색 시스템의 목표 속도가 증가한다. 그리고, 배속이 증가하면 발생하는 속도 외란의 크기와 주파수 범위도 증가하기 때문에 성능을 만족하는 검색 시스템을 설계하기가 더욱 어려워진다. 만약, 검색 동작 중에 속도 제어가 정밀하게 이루어지지 않으면 목표 트랙에서 광 픽업의 속도가 트랙킹 제어를 시작할 수 있을 정도의 속도보다 커지게 되어 트랙킹 제어를 안정적으로 시작할 수 없고 이로 인해 광 픽업은 목표 트랙을 벗어나게 된다. 목표 트랙을 벗어나면 추가의 검색 동작을 통해 광 픽업을 목표 트랙으로 이동해야 하기 때문에 전체 검색 시간이 길어지게 된다. 그래서, 최대한 짧은 시간 내에 목표 트랙에 도달하기 위

† 책임저자, 정회원, 동의대학교 컴퓨터공학과

E-mail : mnlee@dongeui.ac.kr

Tel : (051) 890-1713, Fax : (051) 890-1619

* 동의대학교 메카트로닉스공학과

** 동의대학교 소프트웨어공학과

해서는 속도 외란에 대해서 안정적으로 속도 제어를 실행하여야 한다.^(1-3, 5, 6)

기존의 검색 시스템의 속도 제어기는 배속이 증가함에 따라 속도 외란의 크기와 형태에 대한 분석 없이 속도 제어를 설계하였다. 그래서, 발생하는 속도 외란을 정밀하게 제어할 수 없었고 목표 트랙에서 트랙킹 제어를 시작하기가 어려웠다. 이러한 설계 방법은 속도 외란이 적게 발생하는 저배속에서는 문제가 되지 않았지만 속도 외란이 큰 고배속에서는 문제가 되고 있다. 검색 동작 후 안정적으로 트랙 추종을 시작하기 위해서는 배속 변화에 따라 속도 외란이 어떻게 변하는지 대한 추정 데이터가 있어야 한다.⁽¹⁾ 현재까지 정밀 추정 기구를 사용하여 오프라인으로 진동을 측정하는 방법을 여러 차례 시도하였으나 트랙 방향으로 발생하는 속도 외란을 추정하기가 상당히 어려웠고 디스크의 구동 상태에 따라 속도 외란의 크기가 조금 차이가 있기 때문에 속도 외란 추정이 효율적으로 적용될 수 없었다.

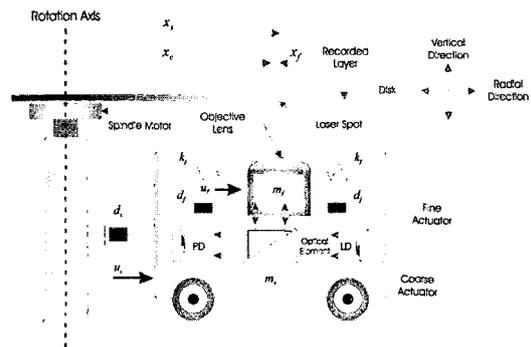
본 논문에서는 안정적인 검색 시스템 구현을 위해 검색 시스템에서 발생하는 속도 외란을 효율적으로 측정할 수 있는 속도 외란 추정 방법을 제안한다. 제안하는 속도 외란 추정 방법은 검색 동작을 실행하고 있는 상태에서 실제 속도와 속도 제어기 출력을 이용하여 실시간으로 속도 외란을 측정하는 실시간 추정 알고리즘이다. 그리고, 액추에이터 불확실성을 속도 외란 추정 알고리즘에서 고려하는 강인 추정 알고리즘이다. 제안되는 속도 추정 알고리즘은 DSP, A/D 변환기, D/A 변환기를 사용하여 간단하게 디지털 측정 시스템으로 구현될 수 있다. 본 논문에서 제안되는 속도 외란 추정 방법은 배속이 변함에 따라 속도 외란 성분이 어떻게 얼마나 달라지는 지에 대한 기본 데이터를 제공할 수 있다. 그리고, 측정된 속도 외란 데이터를 이용하여 속도 외란을 충분히 제어할 수 있는 속도 제어를 최적으로 설계할 수 있다. 그리고, 속도 외란이 최대한 작게 발생하도록 하기 위해 메카 시스템 설계를 위한 설계 데이터로 사용될 수 있다. 제안되는 속도 외란 추정 방법은 DVD 기록 기기에 적용되고 고배속에서 속도 외란을 측정하여 추정 알고리즘의 타당성을 검증한다.

2. 광 디스크 드라이브의 검색 시스템

2.1 검색 시스템에 대한 전반적인 설명

광 디스크 드라이브는 광 픽업을 트랙 방향으로 이동하기 위해 미동 액추에이터와 조동 액추에이터로 구성된 2단 구조의 트랙킹 액추에이터를 사용한다. 미동 액추에이터는 디스크 진동에 대해서 광 픽업이 트랙을 정밀하게 추종하도록 하기 위해 이동 범위는 작지만 대역폭이 크게 설계되고 조동 액추에이터는 대역폭은 작지만 먼 거리를 이동할 수 있도록 설계된다. 최근 대부분의 광 디스크 드라이브에서는 미동 액추에이터로 voice coil 모터를 사용하고 조동 액추에이터로 스텝핑 모터를 사용한다. Fig. 1은 2단 구조의 트랙킹 액추에이터를 포함한 광 디스크 드라이브의 시스템 구성도이다.

광 디스크 드라이브의 검색 시스템은 광 픽업이 이동해야 하는 트랙 수에 따라 미동 검색 시스템과 조동 검색 시스템으로 구분된다. 미동 검색 시스템은 비교적 짧은 트랙을 이동하기 위한 검색 시스템이고 조동 검색 시스템은 비교적 먼 거리를 이동하기 위한 검색 시스템이다. 짧은 거리를 안정적으로 이동하기 위해서는 높은 대역폭의 미동 액추에이터를 안정적으로 제어하여야 하기 때문에 미동 검색 시스템은 미동 액추에이터를 속도 제어하는 제어 구조를 가진다. 반면에, 조동 검색 시스템은 먼 거리를 이동하기 위해 먼 거리 이동에 유리한 조동 액추에이터를 속도 제어하는 구조를 가지게 된다. 대부분의 검색 동작은 이동해야 하는 트랙 수에 따라 한두 번의 조동 검색과 여러 번의 미동 검색으로 이루어진다. 최대한 검색



시간을 줄이기 위해서는 속도 프로파일을 크게 하여 조동 검색 시간을 최대한 줄이거나 미동 검색 시스템의 성능을 개선하여 미동 검색 회수를 최대한 작게 하여야 한다. 광 픽업이 목표 트랙을 벗어나는 경우 짧은 트랙 이동의 미동 검색을 여러 번 반복하기 때문에 미동 검색 시스템의 안정도가 높을수록 반복 회수가 적어져 전체 검색 시간이 감소된다.

조동 액추에이터로 스텝핑 모터를 사용하는 경우 스텝핑 모터는 속도 프로파일에 따라 해당하는 펄스를 입력하는 오픈 루프 제어 구조가 되고 미동 액추에이터는 스텝핑 모터의 이동으로 인한 광축 벗어남을 보정하는 구조로 조동 검색 시스템이 구성된다. 스텝핑 모터를 구동하는 속도 프로파일은 스텝핑 모터의 특성을 고려하여 결정되어야 하고 먼 거리 이동을 위해 macro step 단위로 구성된다. 미동 검색 시스템은 속도 프로파일에 따라 미동 액추에이터를 속도 제어하고 미동 액추에이터의 움직임으로 인한 광축 벗어남을 보정하기 위해 스텝핑 모터를 micro step 단위로 구동하게 된다.

2.2 미동 검색 시스템의 속도 제어

조동 검색 시스템은 스텝핑 모터를 속도 프로파일에 따라 오픈 제어하기 때문에 속도 외란의 영향을 고려할 수 없고 검색 제어 동작에서도 속도 외란의 영향을 받지 않는다. 그러나, 미동 검색 시스템은 미동 액추에이터를 통해 피드백 속도 제어를 하기 때문에 속도 외란에 의해 속도 제어 루프가 영향을 받는다. 그래서, 속도 외란을 속도 제어기에서 효율적으로 제어하여야 안정적으로 검색 동작을 실행할 수 있고 검색 동작 후에 안정적으로 트랙킹 제어를 시작할 수 있다.

본 논문에서는 속도 외란의 영향이 상대적으로 큰 미동 검색 시스템에 대해 속도 제어 루프를 안정적으로 설계하기 위해 속도 외란 측정을 통한 제어기 설계를 고려한다. Fig. 2는 짧은 트랙 이동을 위한 미

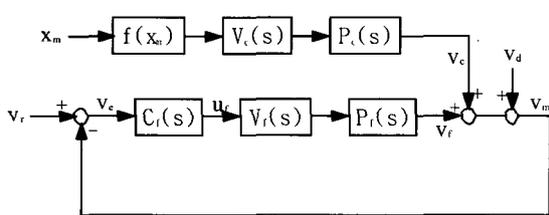


Fig. 2 Block diagram of a fine seek system

동 검색 시스템의 구성도이다. 여기서, $P_f(s)$ 는 미동 액추에이터, $P_c(s)$ 는 조동 액추에이터, $C_f(s)$ 는 속도 제어기, $V_f(s)$ 와 $V_c(s)$ 는 각 액추에이터의 드라이버를 나타낸다. 그리고, v_r , v_f , v_c , v_m , v_d 은 지령 속도, 미동 및 조동 액추에이터의 속도, 실제 속도, 디스크 회전에 의해 발생하는 속도 외란을 각각 나타낸다. 비선형 함수 $f(x_m)$ 은 스텝핑 모터를 구동하는 알고리즘으로 검색 동작 동안 이동한 트랙수가 micro step 구동 거리가 되었을 때 스텝핑 모터를 1 micro step 구동하는 알고리즘이다. 보통 10 트랙 이하의 비교적 짧은 트랙 이동에서는 미동 액추에이터만으로 이동을 하고, 수십 트랙 이상을 이동하는 경우에는 미동 액추에이터 이동에 의한 광축 벗어남을 스텝핑 모터에서 보정하여 트랙 검색 후 트랙킹 제어를 좀 더 안정적으로 시작할 수 있도록 한다. 이와 같이, 미동 검색 시스템에서 스텝핑 모터는 광축 벗어남을 보정하는 역할만을 수행하고 속도 외란에 대하여 실제 속도가 지령 속도를 추종하는 속도 제어는 미동 액추에이터를 통해 이루어진다. 그래서, 미동 검색 시스템의 속도 제어 블록은 단순히 광축 벗어남만을 보정하기 위해 아주 낮은 주파수로 구동하는 스텝핑 모터 부분을 제외하고 Fig. 3과 같이 구성될 수 있다.

Fig. 3에서 속도 제어기는 디스크의 속도 외란에 대해 광 픽업이 지령 속도를 추종하도록 설계되어야 한다. 검색 제어 동안 속도 제어가 정밀하게 이루어지면 검색 동작이 종료될 때 광 픽업의 속도가 작아지고 트랙킹 제어를 안정적으로 시작할 수 있다. 일반적으로 디스크의 회전 배속이 낮을 때는 속도 외란의 크기가 상대적으로 작아 속도 제어에서 속도 외란의 영향을 고려하지 않아도 되지만 배속이 증가하면 속도 외란의 크기와 주파수가 증가하기 때문에 속도 제어 루프는 속도 외란을 효율적으로 제어하여야 한다. Fig. 4는 미동 액추에이터와 조동 액추에이터가 정지되어 있는 상태에서 CD 디스크의 회전 배속

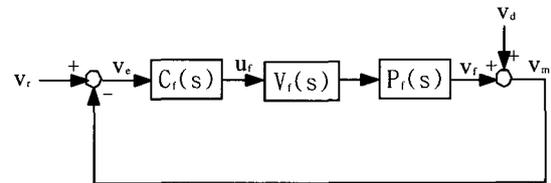


Fig. 3 Block diagram of simplified fine seek system

을 2000 rpm, 3500 rpm, 5000 rpm으로 했을 때 측정된 속도 외란이다.^(2~4)

배속이 증가함에 따라 속도 외란의 크기가 증가함을 알 수 있다. 보통, 목표 트랙에서 디스크와 광 픽업의 상대속도가 10 mm/s 이상이면 안정적으로 트랙킹 제어를 시작할 수 없는데 2000 rpm만 되어도 속도 외란이 10 mm/s 이상이 되기 때문에 검색 시스템에서 속도 외란을 효율적으로 제어하여 목표 트랙에서 디스크와 광 픽업의 상대 속도가 10 mm/s 이하가 되도록 하여야 한다. DVD 디스크의 경우 CD 디스크에 비해 트랙 피치가 2.16배 더 작기 때문에 검색 제어 후 안정적인 트랙킹 제어를 위해 광 픽업의 상대 속도는 5 mm/s 이하이어야 한다.

본 논문에서는 속도 외란에 최적인 속도 제어를 설계하기 위해 실시간으로 속도 외란을 추정하는 알고리즘을 제안하고 배속에 따라 속도 외란을 추정하여 속도 제어기 설계에서 고려함으로써 배속에 최적인 속도 제어를 설계할 수 있도록 한다.

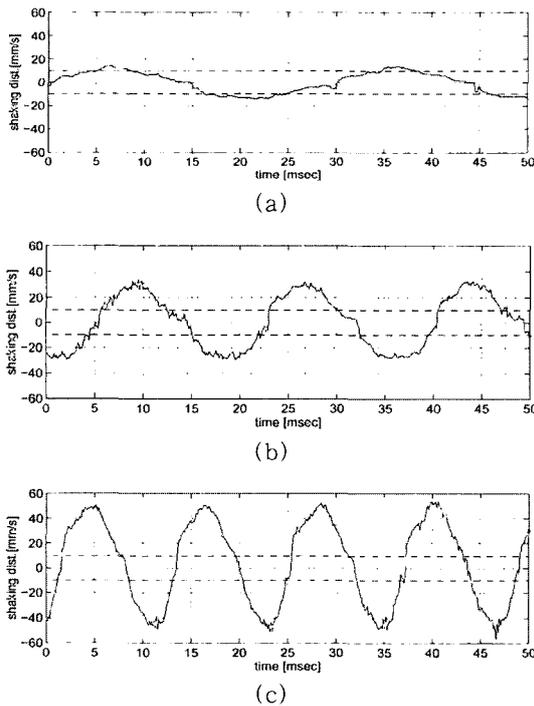


Fig. 4 Velocity disturbance when the CD disk rotated at (a) 2000 rpm, (b) 3500 rpm, (c) 5000 rpm

3. 속도 외란 추정 알고리즘과 외란 추정을 통한 속도 제어기 설계

본 장에서는 Fig. 3에 나타난 미동 검색 시스템의 속도 외란을 실시간으로 추정할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 속도 외란 추정 알고리즘은 속도 외란을 추정하는 부분과 액추에이터의 불확실성을 보상하는 부분으로 구성된다.

3.1 속도 외란 추정 블록도 구성

속도 외란을 추정하는 블록도를 구성하기 전에 먼저 본 연구에서 다루는 미동 액추에이터를 모델링한다. 미동 액추에이터는 voice coil 모터이기 때문에 다음과 같이 2차 선형 시스템으로 모델링될 수 있다.

$$P_f(s) = \frac{k_f s}{s^2 + \alpha_f s + \beta_f} \quad [(m/s)/A] \quad (1)$$

미동 액추에이터 파라미터는 불확실성을 고려하여 다음과 같이 공칭값과 불확실성의 합으로 표현된다.

$$k_f = k_{fn} + \delta k_f, \quad \alpha_f = \alpha_{fn} + \delta \alpha_f \\ \beta_f = \beta_{fn} + \delta \beta_f$$

여기서, k_{fn} , α_{fn} , β_{fn} 는 파라미터의 공칭값을 나타내고 δk_f , $\delta \alpha_f$, $\delta \beta_f$ 는 파라미터의 불확실성을 나타낸다. 미동 액추에이터 파라미터들은 보통 공칭값에서 20% 정도 변하기 때문에 본 논문에서는 불확실성의 크기가 공칭값의 20% 이내라고 가정한다.

속도 외란, 미동 액추에이터의 속도, 실제 속도와와의 관계식으로부터 속도 외란은 실제 속도와 속도 제어기 입력, 미동 액추에이터와 드라이버를 통해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v_m = v_f + v_d \\ v_d = v_m - v_f = v_m - V_f(s)P_f(s)u_f \quad (2)$$

드라이버 $V_f(s)$ 는 전압 형태의 제어기 출력을 전류 형태로 증폭하여 미동 액추에이터에 인가한다. 보통 저주파 필터의 형태이고 저주파 필터의 차단 주파수는 속도 제어 대역보다 커야 한다. 일반적으로 드

라이버의 차단 주파수는 측정하는 속도 외란의 주파수 범위보다 크기 때문에 속도 외란 측정에서는 드라이버 $V_f(s)$ 를 드라이버 이득 K_v 로 근사화할 수 있다. 그러면, 식 (2)의 수식은 다음과 같이 표현될 수 있고 속도 외란 측정 블록은 Fig. 5와 같이 구성될 수 있다.

$$v_d = v_m - K_v P_f(s) u_f \quad (3)$$

Fig. 5에 나타난 속도 외란 측정 블록을 보면 검색 제어 시스템이 동작하는 상태에서 실제 발생하는 속도 외란을 실제 속도와 속도 제어기 출력을 토대로 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 속도 외란 측정 블록도에 사용되는 미동 액추에이터 모델은 불확실성이 없는 공칭 모델이 사용된다. 공칭 미동 액추에이터 모델은 액추에이터 제조업체에서 제공하는 데이터 시트를 토대로 구성된다. 그러나, 실제 미동 액추에이터 특성은 공칭 액추에이터 특성과 20% 정도까지 차이가 날 수 있기 때문에 액추에이터 불확실성을 고려하지 않는다면 실제 발생하는 속도 외란과 측정되는 속도 외란은 차이가 나게 된다. 본 논문에서는 좀 더 정확한 속도 외란을 측정하기 위해 액추에이터 불확실성을 속도 외란 측정 알고리즘에서 고려한다. 이를 위해 속도 외란에 대해서도 미동 검색 시스템의 루프 특성을 항상 일정하게 유지하기 위한 속도 루프 자동 조정 알고리즘을 사용한다.

속도 외란은 디스크 회전 주파수와 회전 주파수의 정수배에 해당하는 주파수 성분이 가장 크기 때문에 회로 부품간의 바이어스 전압 차이로 인한 DC 성분의 존재를 제거해주는 것이 필요하다. 그래서, Fig. 5의 블록에서와 같이 일정 시간 평균한 값을 속도 외란에서 (-)하여 속도 외란에서 DC 성분을 제거한다.

3.2 액추에이터 불확실성을 보상하는 알고리즘

Fig. 5에 나타난 속도 외란 측정 블록에서 액추에이터 모델을 공칭 액추에이터 모델을 사용하면 실제

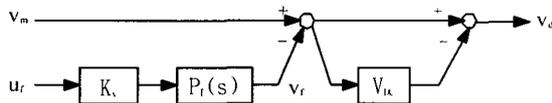


Fig. 5 Block diagram of a velocity disturbance measurement

적용하는 시스템의 액추에이터 불확실성을 속도 외란 측정에서 고려하지 않기 때문에 정확한 속도 외란을 측정할 수 없다. 일반적으로 미동 액추에이터의 불확실성은 속도 제어 대역폭, 위상 마진, 게인 마진 등에 많은 영향을 준다. 특히, 배속이 증가되면 위상 마진을 충분히 확보하기 어렵기 때문에 액추에이터 불확실성에 의한 위상 마진의 감소는 시스템의 성능을 저하할 뿐만 아니라 시스템 안정성에도 영향을 주게 된다. 불확실성을 가진 액추에이터 파라미터들을 모두 정확하게 측정할 수는 없지만 액추에이터 불확실성이 존재하더라도 항상 위상 마진을 일정하게 유지하기 위한 루프 자동 조정 알고리즘을 사용하면 액추에이터 불확실성을 보상하기 위한 보상 이득을 얻을 수 있다. 이러한 보상 이득은 속도 외란 측정 블록에서 좀 더 정확한 속도 외란을 측정하기 위해 반영될 수 있다.

Fig. 3에 나타난 미동 검색 시스템의 루프 전달 함수 $L(s)$ 는 속도 제어기, 드라이버, 미동 액추에이터의 곱인 $C_f(s) V_f(s) P_f(s)$ 로 표현된다. 액추에이터 불확실성이 고려되면 루프 전달 함수 $L(s)$ 는 공칭 루프 전달 함수와 달라지고 미동 검색 시스템의 특성도 달라지게 된다. 속도 외란 측정 블록에서 미동 액추에이터 불확실성을 고려하기 위해 특정 주파수에서의 공칭 루프 위상과 불확실성이 포함된 실제 루프 위상이 같도록 속도 제어기의 게인을 조정하는 속도 루프 자동 조정 알고리즘을 이용하여 미동 액추에이터 불확실성을 속도 외란 측정에서 고려할 수 있다. Fig. 6은 미동 액추에이터 불확실성을 보상하기 위해 고려되는 속도 루프 자동 조정 블록도이다.

미동 액추에이터 불확실성을 고려하기 위해 속도

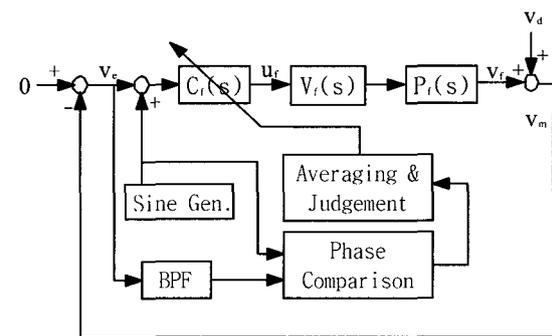


Fig. 6 Block diagram for adjusting the loop gain to compensate for the actuator uncertainties

프로파일 입력에는 0을 입력하고 속도 에러에 특정 주파수의 정현파 입력을 더하여 속도 제어기에 입력한다. 인가되는 정현파의 주파수는 속도 외란의 정수 배에 해당하는 주파수와 관계없고 속도 루프 제어 대역 부근의 주파수를 선택한다. 속도 프로파일 입력이 0이므로 특정 주파수의 정현파 입력에 대해 미동 액추에이터는 속도 제어를 하게 되고 미동 액추에이터의 이동 속도는 실제 속도에서 측정된다. 측정되는 실제 속도 중에서 특정 주파수 성분만을 뽑아내기 위해 BPF를 사용한다.

인가하는 정현파를 $I(t)$, 정현파 주파수를 ω_0 , BPF 출력을 $x(t)$ 라고 할 때 인가되는 정현파와 BPF 출력 사이의 진폭과 위상의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{x(t)}{I(t)} = \frac{L(j\omega_0)}{1+L(j\omega_0)} = \left| \frac{L(j\omega_0)}{1+L(j\omega_0)} \right| \angle \phi \quad (4)$$

BPF 출력은 $|L(j\omega_0)/1+L(j\omega_0)|$ 배 증폭되고 인가한 정현파 입력에 비해 ϕ 만큼 위상이 지연된다. ϕ 는 $L(j\omega_0)$ 위상과 $1+L(j\omega_0)$ 위상의 차이를 구함으로써 계산할 수 있다. 액추에이터 불확실성을 고려하지 않는 경우 루프 위상 $L(j\omega_0)$ 에 불확실성이 없기 때문에 $L(j\omega_0)$ 의 위상을 계산할 수 있고 ϕ 도 공칭 위상차 ϕ_n 이 된다. 그러나, 액추에이터 불확실성이 존재하면 루프 $L(j\omega_0)$ 의 위상이 공칭 루프 위상과 달라지기 때문에 인가한 정현파 입력과 BPF 출력의 위상차가 정확하게 ϕ_n 이 되지 않는다. 인가한 정현파와 BPF 출력의 위상차가 항상 공칭 위상차인 ϕ_n 이 되도록 하기 위해서는 액추에이터 불확실성이 존재하는 만큼 속도 제어기의 이득을 조정하여 항상 속도 루프 특성을 일정하게 유지하여야 한다. 이러한 과정은 한번에 조정될 수 없기 때문에 측정되는 위상차와 공칭 위상차의 차이($\phi - \phi_n$)가 허용 범위안에도달할 때까지 반복된다. 루프 자동 조정 알고리즘은 액추에이터 불확실성이 존재하더라도 속도 루프의 위상 마진을 공칭 마진과 동일하게 유지하도록 속도 제어기의 이득을 변화시킨다. 본 논문에서는 액추에이터 불확실성을 보상하기 위해 조정되는 제어기 이득 변화를 속도 외란 측정 블록에 반영하여 속도 외란 측정에서 액추에이터 불확실성을 고려한다.

액추에이터 불확실성이 시스템에 미치는 영향 만큼

속도 제어기 DC 이득이 변하기 때문에 속도 루프 자동 조정 후 속도 제어기 DC 이득을 체크하면 액추에이터 불확실성의 영향을 알 수 있다. 최종적으로, 액추에이터 불확실성을 보상하기 위해 조정된 속도 제어기 이득 변화는 Fig. 5에 나타난 속도 외란 측정 블록의 공칭 액추에이터 모델의 DC 이득에 반영함으로써 속도 외란 측정시 미동 액추에이터 불확실성을 고려할 수 있다.

3.3 속도 외란 측정 알고리즘의 원성과 구현

미동 액추에이터의 공칭 파라미터를 토대로 불확실성이 없는 미동 액추에이터의 공칭 모델을 구하고 드라이버 이득 K_r 를 구한다. 구한 미동 액추에이터의 공칭 모델과 드라이버 이득을 Fig. 5에 나타난 속도 외란 측정 블록에 대입한다. 액추에이터 불확실성을 고려하기 위해 3.2절의 액추에이터 불확실성을 보상하는 알고리즘을 적용한다. 이를 위해 공칭 위상차 ϕ_n 을 구하여 Fig. 6에 나타난 속도 루프 자동 조정 블록에서 사용한다. 자동 조정된 속도 제어기의 이득 변화를 Fig. 5의 공칭 액추에이터 모델의 DC 이득에 반영한다. 이런 과정을 통해 Fig. 5에 나타난 속도 외란 측정 블록은 완성된다. 검색 시스템의 속도 외란은 검색 시스템이 동작하는 상태에서 속도 에러와 속도 제어기 출력을 Fig. 5에 나타난 속도 외란 측정 블록에 입력하여 실시간으로 측정될 수 있다. 속도 외란 측정을 위해 사용되는 속도 제어기는 검색 시스템의 성능은 보장이 되지 않지만 검색 동작을 완료할 수 있어야 하므로 낮은 차수의 간단한 제어기를 사용한다.

이러한 속도 외란 측정 알고리즘은 여러 배속에 적용되어 회전 배속의 변화에 따른 속도 외란의 변화를 측정할 수 있게 하고 측정된 데이터는 속도 제어기 설계의 기초 데이터가 될 수 있다. Fig. 5에 나타난 속도 외란 측정 블록은 DSP를 사용하여 간단히 디지털로 구현될 수 있고 배속별 속도 외란 측정치를 디지털 데이터로 저장할 수 있다.

3.4 속도 외란 측정을 통한 속도 제어기 설계

본 논문에서 제안한 속도 외란 측정 알고리즘을 사용하면 배속마다 발생하는 속도 외란을 간단하게 측정할 수 있다. 그래서, 배속이 증가함에 따라 속도 외란의 크기와 주파수가 어떻게 변하는지를 정확히 측

정할 수 있고 검색 시스템의 성능이 최적이 되는 속도 제어기를 설계할 수 있다. 일반적으로 제어하여야 하는 속도 외란의 크기와 주파수 범위를 측정할 수 있으면 기존의 속도 프로파일을 추종하기 위해 설계된 루프 특성에 속도 외란을 제어하기 위한 루프 이득을 추가하여 속도 외란을 제거하는 위한 검색 시스템의 루프 특성을 설계할 수 있다. 속도 외란이 상대적으로 크게 발생하는 회전 주파수의 정수배에 해당하는 주파수에서는 상대적으로 높은 루프 이득이 필요하다.

속도 제어기는 이러한 루프 특성을 고려하여 적절한 차수를 가지는 속도 제어기가 설계되어야 한다. 배속별 속도 외란 측정 데이터는 기존의 속도 제어기 설계 과정이나 강인 제어기 설계 이론에서 유용한 데이터로 사용될 수 있다. 예를 들어, 강인 제어에서는 성능을 만족하기 위해 가중 함수를 사용하는데 가중 함수의 설정이 설계자의 직관에 의해 이루어지는 경우가 많다. 그러나, 속도 외란을 측정하게 되면 필요한 루프 이득, 루프 대역 등을 쉽게 알 수 있기 때문에 가중 함수를 현실적으로 설정할 수 있고 좀 더 최적의 강인 제어기를 설계할 수 있게 된다. 그리고, 고전적인 주파수 영역에서의 설계 방법에도 속도 외란 측정 데이터는 효율적으로 사용될 수 있다.

고전적인 속도 제어기는 디스크 회전에 의해 발생하는 속도 외란에 허용되는 최소 속도 에러를 나누어 구한 최소 속도 루프 이득을 이용하여 설계되었다. 속도 제어 루프 이득이 최소 루프 이득보다 크고 게인 마진과 위상 마진이 목표 범위에 포함되도록 속도 제어기는 설계된다. 그러나, 속도 외란의 정보는 1배속에 대한 정보밖에 없기 때문에 고배속에서의 속도 외란 계산치는 정확하게 알 수 없다. 그래서, 속도 제어기는 설계와 실험을 반복하는 과정에 의해 최종적으로 구하게 된다. 이러한 설계 과정은 시간이 많이 걸리기 때문에 효율적이지 못하지만 본 논문에서 제안하는 배속별 속도 외란 측정 데이터를 사용하면 고전적인 제어기 설계 방법에서도 정확한 최소 속도 루프 이득을 구할 수 있기 때문에 최적의 제어기를 쉽게 설계할 수 있다.

4. DVD 기록기에 속도 외란 측정 알고리즘의 적용

본 논문에서 제안한 속도 외란 측정 알고리즘의 타

당성을 검증하기 위해 최근에 상용화되기 시작하고 있는 DVD 기록기에 적용하여 속도 외란을 측정한다. 실험에서는 DVD 재생 디스크를 6배속 (3600 rpm), 12배속(7200 rpm)으로 회전한 후 100 트랙을 이동하는 미동 검색 제어를 실행하여 속도 외란을 측정한다. DVD 디스크는 CD 디스크에 비해 트랙 피치가 작기 때문에 동일한 속도 외란에 대해 시스템에 미치는 영향이 더욱 크다. 그러나, 상대적으로 DVD 디스크는 CD 디스크에 비해 발생하는 속도 외란의 크기가 작다.

미동 액추에이터의 1차 공진주파수, 1차 공진 최대치, DC 감도 등을 이용하여 공칭 미동 액추에이터를 모델링하면 다음과 같다.

$$P_f(s) = \frac{5.74 \times 10^5 s}{s^2 + 420s + 1.79 \times 10^5} \left[\frac{m/s}{A} \right] \quad (5)$$

미동 액추에이터는 식 (5)의 공칭 모델에서 각 파라미터가 20% 까지 변하는 특성을 가지고 있다. 드라이버 이득은 2.5이고 드라이버의 차단 주파수는 50 KHz이기 때문에 속도 외란의 측정 범위를 벗어난다. 미동 액추에이터의 불확실성을 고려하기 위해 Fig. 6에 나타난 속도 루프 자동 조정 알고리즘을 적용한다. 측정을 위해 사용되는 DVD 기록기에 2.76 KHz 주파수의 정현파를 인가한 후 루프 자동 조정을 실행한 결과 속도 제어기의 DC 이득이 1.6배 작아졌다. 이것은 측정하는 DVD 기록기의 미동 액추에이터의 루프 특성이 공칭 모델의 루프 특성보다 1.6배 크기 때문에 동일한 루프 특성을 유지하기 위해 속도 제어기의 DC 이득을 1.6배 감소시켰다는 것을 의미한다. 그래서, 속도 외란을 정확하게 측정하기 위해 액추에이터의 이득을 식 (5)의 공칭 이득에 1.6배 곱하여 속도 외란 측정 블록에서 사용한다. 측정하는 DVD 기록기의 액추에이터 모델과 드라이버 이득을 Fig. 5에 나타난 속도 외란 측정 블록에 대체하면 미동 검색 동작을 실행하면서 발생하는 속도 외란을 측정할 수 있다.

본 논문에서는 6배속, 12배속의 고배속에서 100트랙 미동 검색 제어를 실행한 후 Fig. 5에 나타난 속도 외란 측정 블록에 의해 속도 외란을 측정한 후 속도 외란의 주파수 특성을 구한다. Fig. 7과 Fig. 8은 6배속과 12배속에서 측정된 속도 외란의 주파수 특성을 나타낸 것이다. Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 속도 외

란의 주파수 특성을 보면 디스크 회전 주파수 성분에서 속도 외란이 가장 크고 회전 주파수의 정수배에 해당하는 주파수 성분에서 속도 외란이 상대적으로 크게 발생한다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 속도 외란의 크기는 디스크의 장착 상태, 디스크의 편심 성분의 크기, 디스크에 따라 달라지기 때문에 속도 외란 측정 과정을 여러 디스크에 반복 측정하여 디스크 종류와 회전 배속에 따라 속도 외란의 특성을 데이터베이스화하는 것이 필요하다.

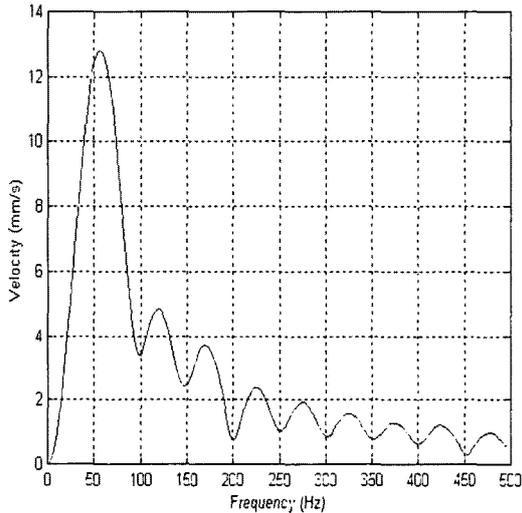


Fig. 7 Frequency response of the measured velocity disturbance(DVD 6X)

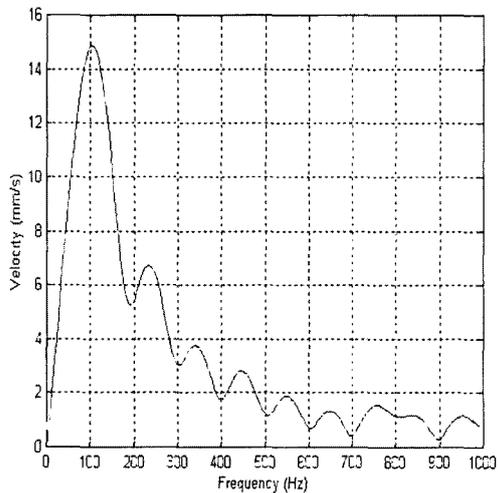


Fig. 8 Frequency response of the measured velocity disturbance(DVD 12X)

디스크별, 회전 배속별 발생하는 속도 외란의 측정 데이터는 속도 제어를 설계하는 과정에서 반영되어 최적의 속도 제어를 설계할 수 있도록 한다.

5. 결론

본 논문에서는 디스크 회전 배속이 증가함에 따라 검색 제어 시스템에 대한 영향이 더욱 증가하는 속도 외란을 효율적으로 제어하기 위해 속도 외란을 효율적으로 측정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 속도 외란 측정 알고리즘에서는 특히 액추에이터 불확실성을 고려하기 위해 루프 자동 알고리즘을 적용하였고 DVD 기록 기기에 적용하여 실험을 통해 알고리즘의 타당성을 보였다. 이러한 진동량 측정 알고리즘은 속도 외란이 최대한 작게 발생하는 메카 시스템 설계를 위한 설계 데이터로 사용될 수 있고 속도 외란을 최적으로 제어하기 위한 여러 제어기 설계 설계 방법에서 설계 기준으로 사용될 수 있다.

참고 문헌

- (1) Choi, J.-Y., Jun, H.-G., Chun, C.-H., Lee, M.-N., Yang, H.-S. and Park, Y.-P. 2002, "Disturbance Measurement of Optical Disc and Servo Loop Design Related to Its Result," International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 326~332.
- (2) Jin, K. B., Doh, T.-Y., Ryoo, J. R. and Chung, M. J., 1998, "Robust Direct Seek Control for High-speed Rotational Optical Disk Drives," IEEE Transactions on Consumer Electronics, pp. 1273~1283.
- (3) Jin, K. B., Lee, H. K. and Chung, M. J., 1998, "Direct Seek Control Scheme for High-speed Rotational Optical Disk Drives," Electronics Letters, pp. 1476~1477.
- (4) Suzuki, M., Tanaka, H. and Miura, Y., 1990, "Pull-in Condition and Method of Tracking Servo in Optical Disk Drive," J. Inst. Television Jpn, pp. 1391~1397.
- (5) 진경복, 이문노, 2003, "광 디스크 드라이브의 진동 제어 기술," 한국소음진동공학회지, 제 13 권, 제 1 호, pp. 48~55.
- (6) Suzuki, M., Tanaka, H., Miura, M., Y. Suzuki, and M. Mori, 1993, "Advanced Direct Seeking System for 5.25," Magneto-optical Disk Drive," J. Appl. Phys., pp. 5371~5375.