

# 최적 트래킹 제어기 설계를 위한 트래킹 진동량 추정

## Estimation of Tracking Vibration Quantity for an Optimal Tracking Controller Design

이 문 노<sup>†</sup> · 진 경 복<sup>\*</sup> · 이 중 극<sup>\*\*</sup>

Moon-Noh Lee, Kyoung Bog Jin, and Jong Keuk Lee

(2005년 3월 4일 접수 : 2005년 4월 27일 심사완료)

**Key Words** : Tracking Vibration Quantity(트래킹 진동량), Tracking Loop Gain Adjustment(트래킹 루프 게인 조정), Minimum Tracking Open-Loop Gain(최소 트래킹 개루프 게인), Maximum Vibration Acceleration(최대 진동 가속도), Weighting Function(가중 함수)

### ABSTRACT

In this paper, we present a schematic method estimating the tracking vibration quantity occurring in the track-following system of an optical recording device. A tracking loop gain adjustment algorithm is introduced to estimate accurately the tracking vibration quantity in spite of the uncertainties of the tracking actuator. Accordingly, the tracking vibration quantity can be estimated from the tracking error, the controller output, the nominal actuator model, and a compensated gain. An optimal tracking controller can be designed from a minimum tracking open-loop gain calculated by the estimated tracking vibration quantity. The proposed vibration quantity estimation and controller design method are applied to the track-following system of an optical recording device and are evaluated through the experimental result.

### 1. 서 론

고배속에서도 높은 기록과 재생 능력을 유지하기 위해서 광 기록기기는 배속이 증가함에 따라 증가하는 트래킹 진동량에 대해 광 픽업이 트랙을 정확하게 추종하도록 설계되어야 한다. 일반적으로 광 디스크에는 편심이 존재하기 때문에 디스크가 회전하면 트래킹 진동이 광 기록기기에 발생한다. 디스크 편심의 크기에 따라 발생하는 최대 진동량이 달라지고 배속에 따라 최대 트래킹 진동 가속도가 달라진다. 이러

한 트래킹 진동은 트랙 추종 시스템의 성능에 많은 영향을 주기 때문에 높은 배속에서도 효율적으로 제어되어야 한다. 그리고, 트랙 추종 성능을 최대한 높이기 위해 트래킹 제어기는 트래킹 진동량의 특성을 충분히 고려하여 설계되어야 한다.

현재 대부분의 광 기록기기의 트래킹 제어기는 트래킹 개루프 게인이 최소 트래킹 개루프 게인보다 크고 목표 게인 여유와 위상 여유를 만족하도록 설계되고 있다. 설계에서 사용되는 최소 트래킹 개루프 게인은 실제 발생하는 트래킹 진동량을 직접 고려하지 않고 디스크 규격에 정해져 있는 최대 트래킹 진동량과 1배속 최대 트래킹 진동 가속도를 사용하여 계산된다. 그러나, 대부분의 실제 트래킹 진동량이 규격으로부터 계산된 진동량보다 훨씬 작기 때문에 계산된 최소 트래킹 개루프 게인과 트래킹 대역폭이 필요 이상으로 크게 되고 트래킹 루프 출력이 쉽게 포화되어

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 동의대학교 컴퓨터공학과  
E-mail : mnlee@deu.ac.kr  
Tel : (051) 890-1713, Fax : (051) 890-1619

<sup>\*</sup> 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

<sup>\*\*</sup> 동의대학교 컴퓨터공학과

트랙킹 루프를 불안정하게 만든다. 더구나, 배속 변화에 따른 최대 진동 가속도의 변화를 측정하지 못하면 최소 트랙킹 개루프 게인은 배속 변화에 따른 트랙킹 진동량의 변화를 전혀 고려할 수 없게 된다.<sup>(1)</sup>

트랙 추종 시스템을 최적으로 설계하기 위해서는 트랙킹 진동량을 정확하게 추정하여야 하고 추정된 트랙킹 진동량으로부터 최소 트랙킹 개루프 게인을 계산하여야 한다.<sup>(1,2)</sup> 모든 회전 배속에서 실제 발생하는 트랙킹 진동량을 정확하게 추정할 수 있다면 배속 변화에도 트랙킹 루프의 대역폭을 정확하게 결정할 수 있고 트랙 추종 시스템을 최적으로 설계할 수 있다.

이 논문에서는 광 기록기에서 발생하는 트랙킹 진동량을 정확하게 추정하는 방법을 제안한다. 트랙킹 루프 게인 조정 알고리즘은 트랙킹 액추에이터의 불확실성에 대해 트랙킹 진동량을 좀 더 정확하게 추정하기 위해 사용된다. 여러 회전 배속에서 트랙킹 진동량이 각각 추정되고 추정된 진동량 데이터를 이용하여 최소 트랙킹 개루프 게인이 계산된다. 제안된 트랙킹 진동량 추정 방법은 광 기록기기의 트랙 추종 시스템에 적용되고 실험을 통해 검증된다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 트랙 추종 시스템과 트랙킹 진동량 추정 방법을 나타내고 3장에서는 추정된 트랙킹 진동량을 토대로 트랙킹 제어기 설계 방법을 나타낸다. 그리고, 4장에서는 제안된 트랙킹 진동량 추정 방법을 광 기록기기에 적용하고 5장에서는 이 논문의 결론을 나타낸다.

## 2. 트랙킹 진동량 추정 알고리즘

Fig. 1은 광 기록기기의 트랙 추종 시스템의 블록도를 나타낸다. 트랙 추종 시스템은 광 위치 센서, 높은 대역폭의 트랙킹 액추에이터, 트랙킹 제어기, 필터와 증폭 회로로 구성된다. 트랙킹 에러  $e(t)$ 는 트랙의 중심과 빔 스팟 사이의 차이를 나타내고 광 소자에 의해 검출되어 트랙킹 에러 생성 방법에 의해 트

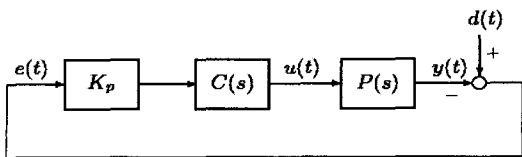


Fig. 1 Block diagram of the track-following system

랙킹 에러가 만들어진 후에 게인  $K_p$ 에 의해 증폭된다. 광 픽업을 디스크의 반경 방향으로 움직이는 트랙킹 액추에이터  $P(s)$ 는 전류 증폭기에 의해 구동되는 voice 코일 모터이며 보통 2차 선형 모델로 모델링된다. 제조 회사에 의해 제공되는 모터 특성 상수들은 공칭값을 기준으로 어떤 범위를 가지기 때문에 트랙킹 액추에이터의 동작은 공칭값에 의해 근사적으로 모델링될 수 있지만 모델링 에러는 항상 존재하게 된다. 그리고, 디스크 반사율 차이와 동작 환경의 변화도 액추에이터의 모델링 불확실성으로 간주될 수 있다. 이러한 불확실성을 고려하여 트랙킹 액추에이터는 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$P(s) = \frac{[b_2^-, b_1^+]}{s^2 + [a_1^-, a_1^+]s + [a_2^-, a_2^+]} \quad (1)$$

트랙킹 제어기  $C(s)$ 는 일반적으로 lead-lag 제어기 형태가 사용되며 트랙킹 진동량 추정을 위해 트랙 추종 시스템을 단지 안정화시키는 간단한 제어기가 사용된다. 트랙킹 제어기는 추정된 트랙킹 진동량을 토대로 최적으로 설계될 수 있다.

디스크 편심으로 인해 디스크가 회전하면 트랙킹 진동  $d(t)$ 이 트랙 추종 시스템에 발생한다. 그러면, 픽업은 발생하는 트랙킹 진동량에 비례하여 목표 트랙에서 최대 수백 트랙을 주기적으로 벗어나게 된다. 따라서, 트랙을 따라 데이터를 정확하게 기록하거나 재생하기 위해서는 픽업이 트랙을 정확하게 추종하여야 하므로 트랙킹 진동을 정확하게 추정하여 트랙킹 제어기를 설계하여야 한다.

트랙킹 진동  $d(t)$ 는 트랙킹 에러와 트랙킹 액추에이터 출력에 의해 다음과 표현될 수 있다. 그리고, 각 주파수  $\omega$ 에서 발생하는 트랙킹 진동 성분  $D(j\omega)$ 는 트랙킹 에러, 트랙킹 제어기 출력, 트랙킹 액추에이터 모델에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} e(t) &= d(t) - y(t), \\ D(j\omega) &= E(j\omega) + Y(j\omega) \\ &= E(j\omega) + P(j\omega)U(j\omega) \end{aligned} \quad (2)$$

트랙킹 액추에이터 모델 (1)은 모델링 불확실성을 포함하고 있기 때문에 각 주파수에서의 트랙킹 진동 성분을 직접적으로 계산할 수 없다. 그래서, 이 논문에서는 공칭 액추에이터 모델  $P_n(j\omega)$ 을 진동량 추정

에 사용한다. 그러면, 추정되는 트래킹 진동량은 액추에이터 불확실성 때문에 무시할 수 없는 정도의 추정에러가 존재하게 된다. 액추에이터 불확실성이 존재하더라도 트래킹 진동량을 좀 더 정확하게 추정하기 위해서는 액추에이터 불확실성이 진동량에 미치는 영향을 고려하는 것이 필요하다. 결론적으로, 공칭 액추에이터 모델과 액추에이터 불확실성의 영향을 고려한 보상 게인  $K_c$ 을 적용하여 각 주파수에서 추정되는 트래킹 진동 성분  $\hat{D}(j\omega)$ 는 다음과 같이 수정될 수 있고 트래킹 진동량을 추정하는 블록도는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{D}(j\omega) = E(j\omega) + K_c P_n(j\omega)U(j\omega) \quad (3)$$

이 논문에서는 액추에이터 불확실성의 영향을 고려하기 위해 액추에이터 불확실성이 존재해도 트래킹 개루프 게인을 항상 일정하게 유지하기 위한 트래킹 루프 게인 조정 알고리즘을 사용한다. Fig. 3은 액추에이터 불확실성의 영향을 추정하기 위한 블록도를 나타낸다. 액추에이터 불확실성의 영향을 추정하기 위해 특정 주파수의 정현파와 입력을 트래킹 에러에 더하고 더해진 출력을 트래킹 제어기에 인가한다. 액추에이터 불확실성이 존재하더라도 위상 여유를 일정하게 유지

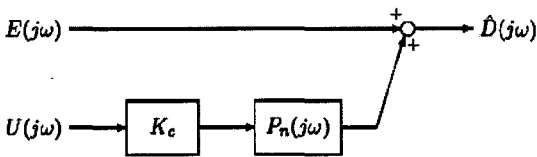


Fig. 2 Block diagram for estimating the tracking vibration

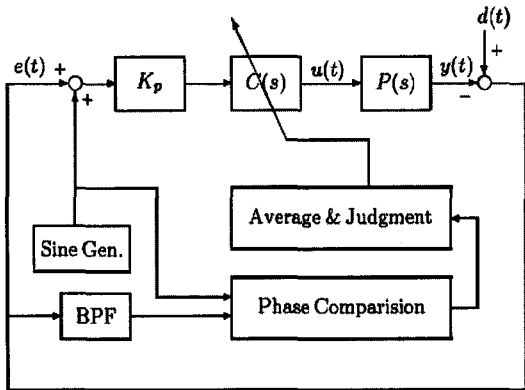


Fig. 3 Block diagram for estimating the effect of the plant uncertainties

하기 위해 위상 여유를 측정하는 트래킹 대역폭 부근의 주파수를 정현파 입력의 주파수로 선택한다.

트래킹 에러에서 정현파 입력의 주파수 성분만 고려하기 위해 band pass 필터를 트래킹 에러에 연결한다. 정현파 입력 주파수  $\omega_0$ 에서 정현파 입력  $I(t)$ 와 band pass 필터 출력  $x(t)$  사이의 관계는  $K_p C(s)P(s)$ 에 의해 표현되는 트래킹 개루프 전달 함수  $L(s)$ 에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

Band pass 필터 출력은  $|L(j\omega_0)/(1+L(j\omega_0))|$ 에 의해 증폭되고 정현파 입력에 비해 위상이  $\phi$ 만큼 지연된다. 위상차  $\phi$ 는  $L(j\omega_0)$ 과  $(1+L(j\omega_0))$ 의 위상차이를 계산하여 얻을 수 있는데 Fig. 3의 phase comparison 블록에서 계산된다. 액추에이터 불확실성이 없다면  $L(j\omega_0)$ 과  $(1+L(j\omega_0))$ 의 위상들은 쉽게 계산될 수 있고 위상차  $\phi$ 는 공칭 위상차  $\phi_n$ 이 된다. 그러나, 액추에이터 불확실성이 존재하면  $L(j\omega_0)$ 과  $(1+L(j\omega_0))$ 의 위상들은 쉽게 계산될 수 없고 위상차  $\phi$ 는 공칭 위상차  $\phi_n$ 와 다르게 된다. 위상차  $\phi$ 와 공칭 위상차  $\phi_n$ 를 같게 만들 수 있다면 액추에이터 불확실성이 존재하더라도 위상 여유는 항상 일정하게 유지될 수 있고 트래킹 루프의 성능도 일정하게 유지될 수 있다. 그래서, average & judgment 블록에서는 위상차  $\phi$ 를 여러 번 계산하고 평균한 후에 위상차의 평균값에 따라 트래킹 제어기의 DC 게인을 얼마로 조정할 것인가를 결정한다. 즉, 액추에이터 불확실성이 트래킹 루프에 미치는 영향만큼 트래킹 제어기의 DC 게인을 역으로 조정한다. 이러한 트래킹 루프 자동 조정 과정은  $\phi - \phi_n$ 의 차이가 허용 범위 내에 도달할 때까지 반복되어 모델링 불확실성이 존재하더라도 트래킹 루프의 위상 여유를 항상 일정하게 유지하게 한다.

트래킹 개루프 게인 조정 후 트래킹 제어기의 DC 게인이 공칭 DC 게인에 비해  $K_\delta$ 배 증가하였다면 실제 액추에이터의 DC 게인은 공칭 액추에이터 DC 게인보다  $1/K_\delta$ 배 작다는 것을 의미한다. 이러한 액추에이터 불확실성의 영향은 트래킹 진동량 추정에 반영되어야 하므로 이 논문에서는 보상 게인  $K_c = 1/K_\delta$ 에 의해 트래킹 진동량 추정 블록에 반

영한다. 결론적으로, 트랙킹 진동량 추정 방법은 액추에이터 불확실성의 영향을 포함하게 되고 트랙킹 진동량은 좀 더 정확하게 추정될 수 있다.

### 3. 트랙킹 진동량 추정을 통한 최적 트랙킹 제어기 설계

광 기록기에서 발생하는 최대 트랙킹 진동량과 1 배속에서의 최대 트랙킹 진동 가속도는 광 디스크의 국제 규격에 미리 정해져 있다. 광 디스크 제조 회사들은 이러한 국제 규격에 맞추어 광 디스크를 제조한다. 그러나, 디스크가 회전할 때 광 기록기에서 실제 발생하는 트랙킹 진동량은 규격에서 정한 최대 트랙킹 진동량과 많은 차이가 있고 디스크의 종류와 제조 회사에 따라서도 차이가 있다. 광 기록기 제조 회사들은 현재까지도 국제 규격에서 정한 최대 트랙킹 진동량과 1 배속의 최대 트랙킹 진동 가속도를 이용하여 아래의 과정을 통해 트랙킹 제어기를 설계하고 있다.<sup>(1)</sup>

광 기록기에서 발생하는 특정 주파수의 트랙킹 진동을 정현파  $d(\omega)$ 에 의해 표현한다면 트랙킹 진동 가속도  $a(\omega)$ 는 다음과 같이  $d(\omega)$ 를 두 번 미분하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} d(\omega) &= d_{\omega} \sin(\omega t) \\ a(\omega) &= a_{\max} \sin(\omega t) = -d_{\omega} \omega^2 \sin(\omega t) \\ d_{\omega} &= \frac{a_{\max}}{\omega^2} \end{aligned} \quad (5)$$

1배속 최대 트랙킹 진동 가속도  $a_{\max}$ 를 사용하여 1배속 각 주파수에서의 트랙킹 진동량  $d_{\omega}$ 는 최대 진동 가속도를 각 주파수의 제곱으로 나누어 얻을 수 있다. 일반적으로 DVD 디스크의 최대 트랙킹 진동량은  $70 \mu\text{m}$ 이고 1배속 최대 트랙킹 진동 가속도는  $1.1 \text{ m/s}^2$ 이다. 그리고, CD 디스크의 최대 트랙킹 진동량은  $300 \mu\text{m}$ 이고 1배속 최대 트랙킹 진동 가속도는  $8 \text{ m/s}^2$ 이다. 각 주파수에서 발생하는 트랙킹 진동량  $d_{\omega}$ 은 (5)를 이용하여 얻을 수 있고 규격에서 정한 최대 트랙킹 진동량  $d_{\max}$ 보다는 작아야 한다. 계산되는 트랙킹 진동량은 트랙킹 제어기 설계를 위해 최소 트랙킹 개루프 게인을 얻기 위해 사용된다. 최소 트랙킹 개루프 게인은 계산된 트랙킹 진동량을 트랙

킹 허용 에러로 나누어 얻을 수 있다. Fig. 4는 트랙 추종 시스템의 최소 트랙킹 개루프 게인을 나타낸다.

저주파 대역의 최소 트랙킹 개루프 게인  $L_0$ 는 최대 트랙킹 진동량  $d_{\max}$ 을 트랙킹 허용 에러로 나누어 얻어지고 고주파 대역의 최소 트랙킹 개루프 게인  $L_1$ 은 각 주파수에서 계산한 진동량  $d_{\omega}$ 을 트랙킹 허용 에러로 나누어 얻어진다. 최종적으로, 트랙킹 제어기는 트랙킹 개루프 게인이 Fig. 4의 최소 트랙킹 개루프 게인보다 크고 목표 위상 여유와 게인 여유가 만족되도록 설계된다. 일반적으로 트랙킹 루프의 대역폭은 트랙킹 진동 성분이 트랙킹 허용 에러와 크기가 동일하게 되는 주파수를 나타내기 때문에 배속 변화에 따라 적절한 트랙킹 대역폭을 가지는 트랙 추종 시스템을 설계하기 위해서는 트랙킹 진동량은 정확하게 추정되어야 한다.

모든 광 디스크가 규격에서 정한 최대 트랙킹 진동량과 최대 진동 가속도를 만족한다고 하더라도 규격은 실제 드라이브에서 발생하는 트랙킹 진동량과는 관계가 없다. 실제 광 기록기에서 발생하는 트랙킹 진동량이 최대 트랙킹 진동량과 최대 진동 가속도에 의해 계산되는 값보다 훨씬 더 작기 때문에 위의 방법을 사용하여 설계되는 트랙킹 루프는 실제 필요한 트랙킹 루프 게인보다 더 큰 루프 게인을 가지게 된다. 그리고, 배속이 증가함에 따라 최대 진동 가속도가 얼마나 증가하는지를 정확하게 모르기 때문에 1배속을 제외한 나머지 배속에서 최소 트랙킹 개루프 게인을 계산할 수 없게 된다. 그래서, 트랙킹 제어기는 목표 성능이 만족될 때까지 설계와 실험을 반복하

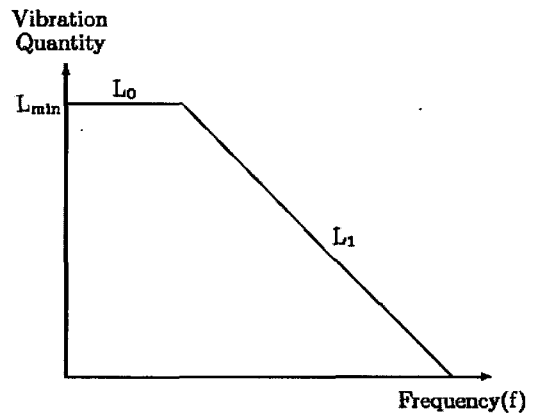


Fig. 4 A minimum tracking open-loop gain of the track-following system

여야 하므로 제어기 설계 시간은 길어지게 되고 광 기록기기가 대응하는 디스크 종류와 배속이 많아질수록 제어기 설계 시간은 더욱 증가하게 된다.

광 기록기에서 발생하는 실제 트래킹 진동량은 배속 변화에 따라 크기가 달라질 뿐만 아니라 동일한 배속일지라도 디스크의 종류에 따라 크기가 달라진다. 그래서, 각 회전 배속에서 발생하는 트래킹 진동량을 이 논문의 트래킹 진동량 추정 방법을 사용하여 정확하게 추정하여야 하고 동일한 배속에서도 여러 디스크에 대해 진동량을 추정하여 평균하여야 한다. 각 회전 배속의 최소 트래킹 개루프 게인은 추정된 트래킹 진동량을 트래킹 허용 에러로 나누어 얻을 수 있고 이로부터 최적인 트래킹 제어기는 설계될 수 있다. 이 논문의 트래킹 진동량 추정 방법은 모든 디스크 회전 배속에 쉽게 적용할 수 있기 때문에 배속이 변할 때마다 적절한 트래킹 대역폭을 가지는 최적인 트래킹 제어기를 설계할 수 있다.

최소 트래킹 개루프 게인을 이용하여 트래킹 제어기를 설계하는 방법 이외에 트래킹 진동량을 다루는 제어 방법 중에 트래킹 진동 모델을 트래킹 제어기에 포함하는 내부 모델 원리를 적용하는 제어 방법들이 있다.<sup>(4,5)</sup> 특히, 반복 학습 제어 방법들은 트래킹 진동량을 제어하기 위해 트래킹 추종 시스템에 많이 적용되었다.<sup>(6-7)</sup> 이러한 제어 방법들은 트래킹 추종 제어가 안정되어 있고 각속도가 일정한 CAV 스피들 제어 모드에서 트래킹 진동을 완벽하게 제어하였다. 그러나, 구현하기에 알고리즘이 다소 복잡하고 트래킹 추종 제어와 트래킹 점프를 반복하는 광 기록기에서 다른 제어 모드로 스위칭한 초기에 불안정한 과도 상태를 제공한다. 그리고, 선속도가 일정한 CLV 스피들 모드를 사용하는 대부분의 기록 제어 모드에서는 적용될 수 없다는 단점이 있다.

강인 제어 방법들도 트래킹 진동량을 효율적으로 제어하기 위해 적용되었다.<sup>(3,8-10)</sup> 대부분의 강인 제어 방법들은 트래킹 진동량을 제어하기 위해 가중 함수를 사용한다. 하지만, 대부분의 가중 함수들은 트래킹 진동량의 추정없이 설계자의 설계 경험이나 직관에 의해 결정되었다.<sup>(11-12)</sup> 이러한 부정확한 가중 함수의 사용은 종종 높은 게인의 실제로 적용할 수 없는 트래킹 제어기를 초래하였다. 광 기록기에서 실제로 발생하는 트래킹 진동량을 추정할 수 있다면 가중 함수는 최적으로 선택될 수 있고 강인 트래킹 제어기는

모델링 불확실성에 강인하고 트래킹 진동량을 최적으로 제어하도록 설계될 수 있다.

#### 4. 실험 결과

제안된 트래킹 진동량 추정 방법의 타당성을 검증하기 위해 이 논문에서는 광 기록기기의 트래킹 추종 시스템에 적용하였다. 트래킹 진동량 추종 방법은 디지털 실험 보드에 의해 구현되었고 트래킹 개루프 게인 조정 알고리즘은 C언어로 구현되었다. 증폭된 트래킹 에러  $K_p e(t)$ 와 트래킹 제어기 출력을 측정하기 위해 12 비트 50 kHz로 동작하는 2개의 A/D 컨버터를 사용하였다. 실험에서 사용한 광 기록기기의 트래킹 액추에이터의 공진 주파수는 53 Hz, 감쇠 상수는 0.28이고 이러한 계수들은 20% 이내에서 변하기 때문에 트래킹 액추에이터는 공칭값과 불확실성을 고려하여 다음과 같이 모델링하였다.

$$P_n(s) = \frac{195.17}{s^2 + 105.3s + 110900} \quad (6)$$

디지털 실험 보드에서 DVD 디스크의 0.37 μm사이의 트래킹 에러는  $K_p$  게인에 의해 2.6 V로 변환되므로  $K_p$ 는  $7.03 \times 10^6 [V/M]$ 이다. 그리고, 0.8 μm사이의 CD 디스크의 트래킹 에러는  $K_p$  게인에 의해 2.6 V로 변환되므로  $K_p$ 는  $3.25 \times 10^6 [V/M]$ 이다. 트래킹 진동량 추정을 위해 트래킹 추종 시스템을 단지 안정화시키는 2차의 간단한 트래킹 제어기를 사용하였다.

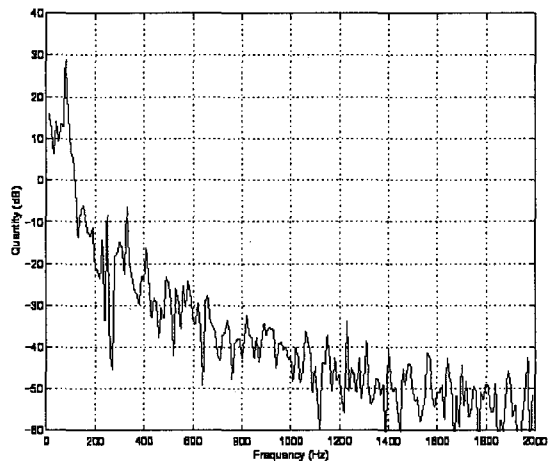


Fig. 5 The tracking vibration quantity estimated at the DVD 8X

트랙킹 루프 게인 조정 알고리즘을 적용한 결과 트랙킹 제어기의 DC 게인은 공칭 DC 게인보다 1/1.2 배 더 감소하였다. 이것은 트랙킹 액추에이터의 실제 게인이 (6)의 공칭 게인보다 1.2배 더 크기 때문에 동일한 트랙킹 위상 여유를 유지하기 위해 트랙킹 제어기의 DC 게인을 1/1.2배로 감소시켰다는 것을 의미한다. 그래서, 트랙킹 진동량 추정에서 액추에이터 불확실성의 영향을 고려하기 위해 (3)의 보상 게인  $K_c$ 를 1.2로 설정하였다.

측정된 A/D 데이터, 액추에이터 공칭 모델, 보상 게인  $K_c$ 를 사용하여 각 회전 배속에서의 트랙킹 진동량을 추정하였고 Bode 선도를 이용하여 각 회전

배속 앞의 공간 제거 트랙킹 진동량의 주파수 특성을 구하였다. Fig. 5와 6은 DVD 8배속과 DVD 12배속에서 추정된 트랙킹 진동량을 나타낸 것이고 Fig. 7은 DVD 16배속에서 추정된 트랙킹 진동량을 나타낸 것이다.

트랙 추종 시스템이 동작하는 동안에 증폭된 트랙킹 에러와 트랙킹 제어기 출력이 측정되기 때문에 광기록기에 발생하는 모든 진동 성분들이 (3)의 진동량 추정에 포함된다. 특히, 디스크 회전 주파수와 그 정수배의 주파수에서 상대적으로 큰 트랙킹 진동 성분들이 발생하였다. 그리고, 각 주파수에서의 트랙킹 진동 성분은 디스크의 회전 배속의 증가에 직접적으

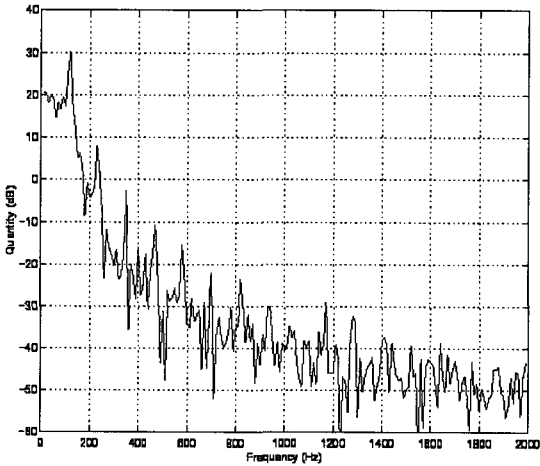


Fig. 6 The tracking vibration quantity estimated at the DVD 12X

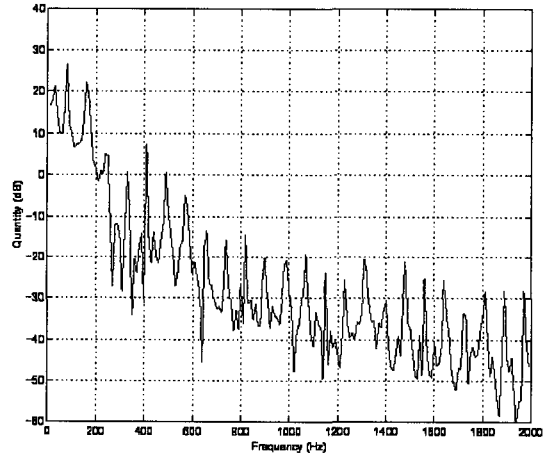


Fig. 8 The tracking vibration quantity estimated at the CD 24X

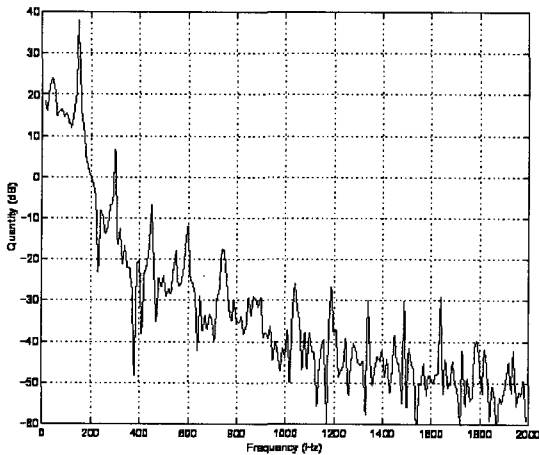


Fig. 7 The tracking vibration quantity estimated at the DVD 16X

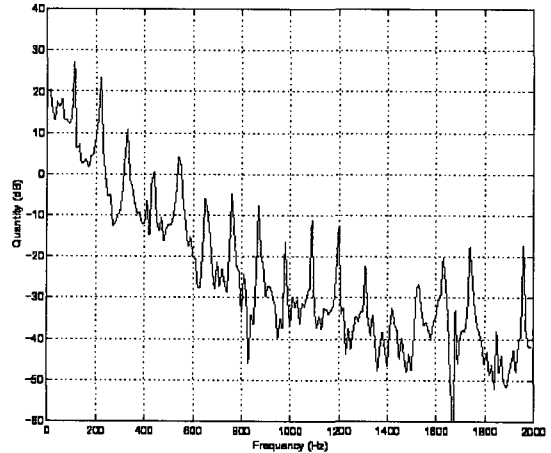


Fig. 9 The tracking vibration quantity estimated at the CD 32X

로 비례하여 증가하지 않는다는 것을 볼 수 있고 최대 진동 가속도도 회전 배속의 제곱에 비례하여 증가하지 않는다는 것을 볼 수 있다. Fig. 8과 9는 CD 24 배속과 CD 32 배속에서 추정된 트랙킹 진동량을 나타낸 것이고 Fig. 10은 CD 40 배속에서 추정된 트랙킹 진동량을 나타낸 것이다.

편심이 크지 않은 일반 CD 디스크를 실험에서 사용하였기 때문에 발생한 최대 트랙킹 진동량은 50 m보다 작은 것을 볼 수 있다. 추정되는 트랙킹 진동량의 신뢰성을 더 높이기 위해 트랙킹 진동량 추정 방법을 동일한 종류의 여러 디스크에 대해 반복하여 실행하고 평균하여야 한다. 편심 디스크의 경우 매우

큰 트랙킹 진동량이 발생하게 되고 기구적인 특성 제한으로 인해 높은 대역폭을 만족하는 트랙킹 제어기를 설계하는 것은 매우 어렵다. 그래서, 재생 배속이나 기록 배속을 줄이게 되는데 이런 경우 발생하는 트랙킹 진동량을 정확하게 추정할 수 있어야 배속 감소와 트랙킹 성능 감소를 최대한 줄일 수 있다.

트랙킹 제어기를 설계하기 위한 최소 트랙킹 개루프 게인은 추정된 트랙킹 진동량을 허용 에러로 나누어 얻을 수 있다. 광 기록기기에서 트랙킹 에러는 광학 시스템, 기계 시스템, 디지털 실험 보드에서 발생하는 에러의 합이기 때문에 트랙킹 루프 설계에서 사용되는 트랙킹 허용 에러는 전체 허용 에러의 1/3이어야 한다.

Fig. 11은 트랙킹 루프 설계의 허용 에러가 0.03 m인 DVD 16배속의 최소 트랙킹 개루프 게인을 나타낸 것이다. 저주파 대역의 최소 트랙킹 개루프 게인은 디스크 회전 주파수에서 가장 크고 70 dB 이하이다. 트랙킹 대역폭은 추정된 트랙킹 진동량이 허용 에러와 크기가 같게 되는 주파수, 즉 최소 개루프 게인이 -3 dB인 주파수를 조사하여 얻을 수 있는데 약 2.5 kHz이다. 그래서, 트랙킹 제어기는 트랙킹 개루프 게인이 Fig. 11의 최소 트랙킹 개루프 게인보다 크고 트랙킹 대역폭이 2.5 kHz보다 크게 설계되어야 하고 목표 위상 여유와 게인 여유가 만족되도록 설계되어야 한다. 일반적으로 목표 위상 여유는 "40~60°"이고 목표 게인 여유는 10~20 dB이다.

지금까지 트랙킹 제어기 설계에서 설계자의 경험과 직관에 의해 결정된 최소 트랙킹 개루프 게인을 사용하였고 이로 인해 설계된 트랙킹 루프는 필요 이상으로 큰 트랙킹 대역폭을 가지게 되었다. 그래서, 트랙킹 루프의 제어 출력들은 쉽게 포화되었고 트랙킹 루프가 불안정하게 되는 경우가 많았다. 만약, 광 기록기기에서 발생하는 트랙킹 진동량이 정확하게 추정된다면 정확한 트랙킹 대역폭은 결정될 수 있고 트랙추종 시스템은 최적으로 설계될 수 있다.

### 5. 결 론

이 논문에서는 광 기록기기의 트랙 추종 시스템을 최적으로 설계하기 위해 트랙킹 진동량 추종 방법을 제안하였다. 액추에이터 불확실성의 영향을 트랙킹 진동량 추정에서 고려하기 위해 트랙킹 루프 게인 조정 알고리즘을 사용하였고 제안된 트랙킹 진동량 추

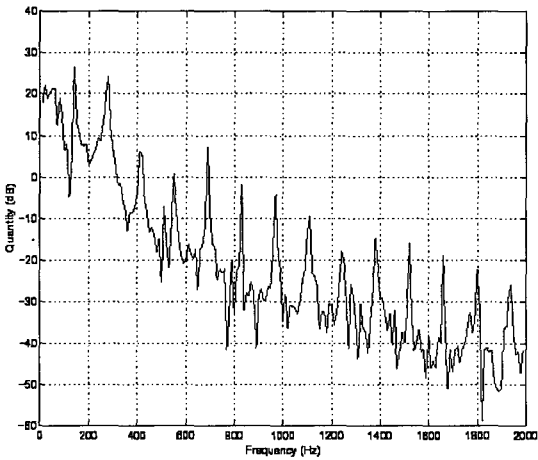


Fig. 10 The tracking vibration quantity estimated at the CD 40X

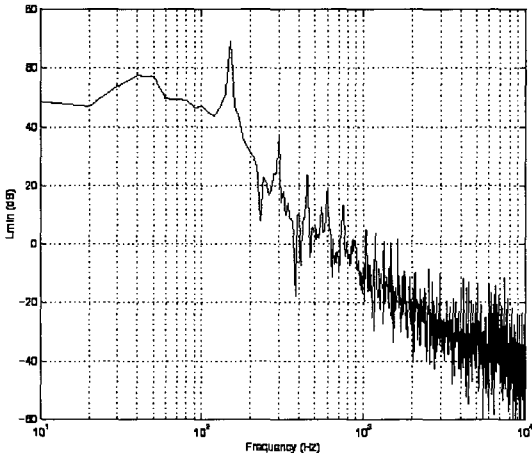


Fig. 11 A minimum tracking open-loop gain at the DVD 16X

정 방법의 타당성을 검증하기 위해 DVD 기록기기의 트랙 추종 시스템에 적용하였다. 여러 회전 배속에서 DVD 디스크와 CD 디스크에 대한 트랙킹 진동량을 추정하였고 추정된 트랙킹 진동량과 트랙킹 허용 에러로부터 최소 트랙킹 개루프 게인을 계산하였다. 최적 트랙킹 제어기는 추정된 트랙킹 진동량에 의해 계산된 최소 트랙킹 개루프 게인을 이용하여 설계될 수 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) Jin, K. B. and Lee, M. -N., 2003, "Vibration Control Technology of an Optical Disk Drive," Transactions of KSNVE, Vol. 13, No. 1, pp. 48~55.
- (2) 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.
- (3) Lee, M. -N., Jin, K. B. and Lee, J. K., 2004, "Design of a Robust Track-following Controller for Optical Disk Drives," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 50, No. 2, pp. 723~731.
- (4) Bengtsson, G., 1977, "Output Regulation and Internal Models-A Frequency Domain Approach," Automatica, Vol. 13, pp. 333~345.
- (5) Francis, B. A. and Wonham, W. M., 1975, "The Internal Model Principle for Linear Multivariable Regulators," Appl. Math. & Optimiz., Vol. 2, No. 2, pp. 170~194.
- (6) Moon, J. -H., Lee, M. -N. and Chung, M. J., 1998, "Repetitive Control for the Track-following Servo System of an Optical Disk Drive," IEEE Trans. Contr. Syst, Vol. 6, No. 5, pp. 663~670.
- (7) Lee, T. H., Low, T. S., Al-Mamum, A. and Tan, C. H., 1995, "Internal Model Control Approach for Designing Disk Drive Servo-controller," IEEE Trans. Indus. Electr., Vol. 42, No. 3, pp. 248~256.
- (8) Teo, Y. T. and Tay, T. T., 1996, "Application of the H<sub>1</sub>-optimal Regulation Strategy to a Hard Disk Servo System," IEEE Trans. Contr. Syst. Tech, Vol. 4, No. 4, pp. 467~472.
- (9) Yen, J. Y., Wang, F. J. and Chen, Y. Y., 1993, "A Fuzzy Scheduling Controller for a Computerdisk File Track Following Servo," IEEE Trans. Indus. Electr., Vol. 40, No. 2, pp. 266~272.
- (10) Steinbuch, M., Schootstra, G. and Bosgra, O. H., 1992, "Robust Control of a Compact Disk Player," in Proc. CDC, pp. 2596~2600.
- (11) Zhou, K., Doyle, J. C. and Glover, K., 1996, Robust and Optimal Control, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- (12) Doyle, J. C., Francis, B. A. and Tannenbaum, A. M., 1992, Feedback Control Theory, New York: Macmillan.