

위상 평면을 이용한 광 디스크 트랙 끌어들이기의 동적 해석 및 영향 인자의 평가[#]

Pull-in Behavior Analysis in Optical Disk Drive Using Phase Plane and Evaluations for Effecting Parameters of it

최진영[†] · 박태욱^{*} · 양현석^{*} · 박노철^{**} · 박영필^{**}

Jin-Young Choi, Tae-Wook, Park, Hyunseok, Yang, No-Cheol Park
and Young-Pil Park

(2004년 7월 28일 접수 ; 2004년 12월 14일 심사완료)

Key Words : Optical Disk Drive(광 디스크), Tracking Servo(트래킹 서보), Dynamic Behavior Analysis(동적 거동 해석), Track Pull-in(트랙 끌어들이기), Phase Plane(위상 평면)

ABSTRACT

The track pull-in behavior analysis in an optical disk drive (ODD) using plane phase and the evaluations for effecting parameters of it are discussed. Track pull-in, track capture procedure to do track following control, is a key factor to increase data transfer rate. First, the relative velocity between the beam spot of an optical pick-up and the target track of an optical disk is analyzed during the track pull-in procedure. In this process, it is showed that the track error signal has nonlinear characteristics which are depending on the time. Second, Runge-Kutta method to solve the nonlinear equation is applied to find the track pull-in behavior, and some optimal parameters to get stable and fast pull-in condition are obtained. Then, the phase plane analysis for track pull-in procedure is presented. Finally, some comments for the simulated results are discussed briefly.

1. 서 론

정보 저장 기기로서의 광 디스크 드라이브의 요구 되는 주요 사항은 대용량의 정보 저장 능력과 빠른 데이터 전송률의 확보로 정리할 수 있다. 또한 고용량의 광 디스크 개발은 미디어 포맷(format)에 대한 개발 및 표준화를 전제로 한다. 따라서, CD(compact

disk)에서 DVD(digital versatile disk)로의 전환, 그리고 차세대 광 디스크로서 HD-DVD(high density DVD) 나 BD(blue-ray disk) 등의 출현은 이러한 맥락에서 해석할 수 있다.

고배속 데이터의 전송률의 확보는 write strategy 나 기록 물질과 관련한 파라미터 등의 요소들을 제외 하였을 때, 다음의 두 가지 요소를 통하여 가능하다. (i) 광 디스크의 회전 속도의 증가와 (ii) 안정적인 탐색 제어(seek control)를 통한 탐색 시간 단축이 그것이다. 그러나 현재 CD 계열의 광 디스크 드라이브 최고 배속이 52배속으로 11,986 rpm에 이르고, DVD 계열의 최고 배속 또한 16배속으로 9,600 rpm에 이르러 더 이상의 속도 증가는 어려운 것으로 인식되고 있다. 이것은 고배속 회전으로 인하여 발생하는 디스크의 진동 및 소음 문제, 그리고 원심력에 의

[†] 책임저자 : 정회원, 연세대학교 대학원 정보저장공학협동과정
E-mail : mithra@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

^{*} 연세대학교 정보저장기기 연구센터(CISD)

^{**} 정회원, 연세대학교 정보저장기기 연구센터(CISD)

[#] 이 논문은 2004 춘계학술대회 우수발표논문으로 추천되었음.

한 물리적 손상이 있는 디스크의 갑작스런 파괴 가능성⁽⁹⁾ 등을 고려한 것이다. 따라서 보다 높은 데이터 전송률의 확보를 위하여, 안정적이고 빠른 탐색 제어의 중요성이 근래에 더욱더 부각되고 있는 실정이다.

탐색 제어의 개선을 위하여 많은 선행 연구들이 진행되었으며, 대표적으로 탐색 후 발생하는 잔류 진동의 저감을 위한 속도 프로파일의 설계,⁽¹⁾ 목표 트랙으로의 정확한 접근(access)을 위하여 횡단 트랙을 계수(count)하는 직접 탐색 제어(direct seek control),⁽⁸⁾ 그리고 브레이크 펄스를 이용한 트랙 끌어들임(track pull-in) 성능 개선⁽²⁾ 등의 연구들이 진행된 바 있다. 그러나 탐색 제어에서 트랙 추종 제어(track following control)로의 전환, 즉 트랙 끌어들임(track pull-in)에 대한 동적 해석이나 트랙 끌어들임의 영향을 미치는 파라미터 등에 대한 연구는 상대적으로 미흡하였다.

. 이에 대한 연구로 Suzuki 등은 수치적인 해석을 통하여 광 디스크 트랙 끌어들임에 영향을 미치는 파라미터를 시간 영역에서 평가하였고,^(5,6) Getreuer 등은 PLL(phase locked loop)의 개념을 도입하여 위상 평면(phase plane)에서 간단히 2차의 광 디스크 서보 루프에 대하여 트랙 끌어들임을 해석한 바 있다.⁽³⁾ 그러나 이들 연구에서 실제 시스템에서 트랙 끌어들임시 트래킹 신호(tracking error signal: TES)가 시간에 따라 주기가 변하는 비선형 신호라는 것을 고려하지 않았고,^(5,6) 실제 광 디스크 제어기 차수에 비하여 이상화된 모델을 이용하여 너무 낮은 차수로 적용함으로써 현실성이 결여되어 있다.⁽³⁾

트랙 끌어들임시 TES가 시간에 따라 주기가 변하는 비선형 신호라는 것을 많은 연구에서 간과한 것은 트랙 끌어들임이 상당히 좁은 구간, 즉, 목표 트랙에서 성공 여부를 판별하므로, 끌어들임이 가능한 빔 스폿과 목표 트랙과의 최대 상대 속도는 단일 주파수의 외란 해석만으로도 가능하기 때문이다. 비록 이

방법을 통하여 트랙 끌어들임이 가능한 빔 스폿과 목표 트랙과의 최대 상대 속도를 계산할 수 있지만, 디스크가 내외주로 진동하는 어느 시점에서 트랙 끌어들임이 가능한가에 대한 답을 주지는 못한다는 단점이 있다. 그리고 일부 문헌에서 시간에 따라 주파수가 변동하는 비선형 TES의 트랙 끌어들임에 대한 연구가 수행된 바 있으나, 트랙 끌어들임에 영향을 미치는 파라미터에 대한 구체적인 평가를 제시하지 않았다.⁽¹⁰⁾

기타 연구로 회전 서보와 관련된 연구 분야에서 주파수 변동이 있는 PLL의 트래킹 성능에 대한 연구가 진행 되었지만, 그 주파수 변동 범위가 광 디스크 트랙 끌어들임시 발생하는 TES의 주파수 변동폭보다 범위가 매우 좁으며 트랙 끌어들임이 가능한 신호 영역이 광 디스크 트랙 끌어들임의 경우와 같이 제한되지 않는다는 점에서 차이가 있다.⁽¹¹⁾ (트랙 끌어들임이 가능한 TES의 영역은 Fig.5 참조) 기타 PLL의 제어 응용 분야에 연구된 문헌이 있으나, 연구 대상이 되는 트랙 끌어들임과는 주파수 변동 폭 및 사용하는 비선형 신호 구간 등에서 많은 차이가 있다.⁽¹²⁾

따라서 이 논문에서는 앞서 시행되었던 연구들을 보완하여, 비선형 TES에 대한 트랙 끌어들임을 PLL개념을 도입하여 위상 평면을 이용하여 해석, 평가 하였다. 먼저 편심 외란과 TES의 상관 관계를 세부적으로 분석하고, 트랙 끌어들임을 행할 때 빔 스폿과 트랙의 상대 속도가 시간에 따라 어떤 변동 범위를 가질 수 있는지 상세히 계산하였다. 계산된 결과를 바탕으로, 트랙 끌어들임이 가능한 최대 속도 및 최적의 트랙 서보 on 위치에 대한 시뮬레이션을 Runge-Kutta 방법을 이용하여 수행 하였다. 대상 모델은 12배속 DVD-ROM 드라이브로, CD-ROM 디스크를 40배속으로 재생한다고 가정하였다. 시뮬레이션의 신뢰성을 높이기 위하여, 실험적으로 측정된 미동 액추에이터(fine actuator)의 모델 및 실제 광 디스크

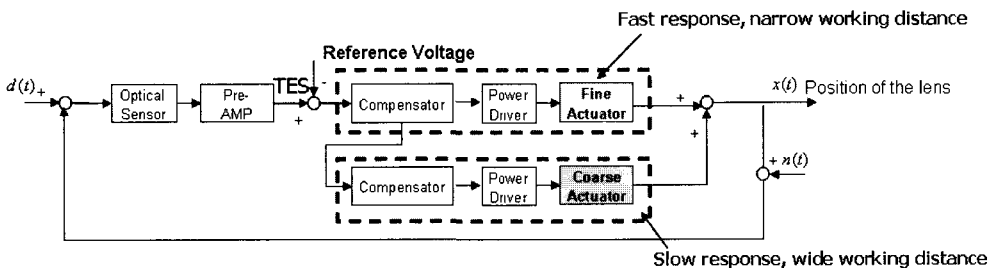


Fig. 1 Schematic diagram of the tracking servo loop

드라이브에 내장된 제어기 루프 특성을 반영하였다.

2. 광 디스크의 트래킹 서보, 탐색 서보

다양한 외란의 존재함에도 불구하고 시스템의 올바른 작동을 위해서는 서보계를 통하여 효율적으로 외란을 제거하여야 한다. 디스크의 수평 방향으로의 진동 및 각종 외란을 담당하는 서보를 트래킹 서보라 하며, 각각의 허용 정밀도는 광 디스크의 종류에 따라 의존하게 된다. 또한 TES형태는 여러 검출 방법에 따라 영향을 받게 되며, 각 광 디스크에 채택되고 있는 대표적인 TES 검출 방법과, 각각의 허용 오차를 Table 1에 정리하였다. 광 픽업을 디스크의 횡방향으로 급격한 움직임을 담당하는 서보를 탐색 서보 (seek servo)라 하며, 일반적으로 미동 액추에이터와 조동 액추에이터(coarse actuator)의 2단 형태로 구성된다. 탐색 제어 서보계의 개략적인 구성을 Fig. 1에 제시하였다.

미동 액추에이터는 대역폭(bandwidth)이 넓으나 작동 범위(moving distance)가 좁은 특징이 있는 반면, 조동 액추에이터는 대역폭이 낮으나 작동 범위가 넓은 특징이 있다. 따라서 빠른 응답이 요구되는 트랙 추종 제어는 미동 액추에이터를 이용하며, 탐색 제어는 조동 액추에이터를 사용한다.

임의 탐색(random access) 및 장거리의 탐색 제어(long distance seek)를 행하는 경우, 탐색 시간을 줄이기 위하여 조동 액추에이터와 미동 액추에이터를 연동하여 사용하기도 한다. 이 때 조동 액추에이터는 마이컴 또는 DSP에 내장되어 있는 거리에 따라 생성된 참조표(loop-up table)를 이용하여, 속도 궤환 제어를 하는 것이 일반적이다. 탐색 제어시 포커스 서보는 on 상태로 작동하며, 목표 트랙 근처에서 미동 액추에이터의 잔류 진동이 어느 정도 진정되면 목표 트랙으로의 끌어들이기 동작을 행하게 된다. 따라서 보다 빠른 데이터 전송률의 구현을 위해서는 안정적인

Table 1 TES method, TES tolerance and TES shape: CD-OM vs. DVD-ROM

	TES method	Servo tolerance & TES shape
CD-ROM	3 Beam method	0.1 μm Sinc wave
DVD-ROM	Differential push pull method	0.022 μm Saw wave

트랙 끌어들이기가 필수적이다. 트랙 끌어들이기에 앞서 외란 특성을 간략하게 정리할 필요가 있으므로, 이 사항은 3절에서 통하여 간략히 정리하였다.

3. 광 디스크의 외란 특성

3.1 광 디스크 외란의 규격

디스크의 호환을 기본적 특징으로 하는 광 디스크 드라이브는 다양한 물리적 특성을 가지는 디스크를 재생하여야 한다. 따라서 디스크의 외란에 대한 규제가 필요하며, 이 수치들은 ISO 규격을 통하여 명시하고 있다.

외란은 물리적인 특징에 따라 기계적/광학적/전기적인 특징으로 분류할 수 있으며, 액추에이터에 의하여 저감해야 할 기계적 외란을 다시 세부적으로 분류하면 편향(deviation), 편심(eccentricity) 그리고 편중심(unbalance)으로 정리할 수 있다. 여기서 편향은 디스크의 상하 방향의 외란 성분을, 편심은 좌우 방향의 외란을, 그리고 편중심은 편심 질량에 의하여 발생하는 외란을 말한다. 그러나 규격집(specification book)에서는 오직 기준 배속에서의 외란량만을 규정하고 있는데, 실제 광 디스크 드라이브는 다양한 속도에서 재생하게 된다. 따라서 디스크의 물리적인 특성 변동에 따른 외란의 정성적/정량적 특징의 이해와, 배속 변화에 따라 외란량 변화 등을 올바르게 파악하여 이를 제어기 루프 설계에 반영하는 것은 효율적이고 안정적인 제어기 설계를 위해 필수적이다.

3.2 편심 성분의 실측 외란

편심의 요인으로는 회전 중심과 디스크의 기하학적

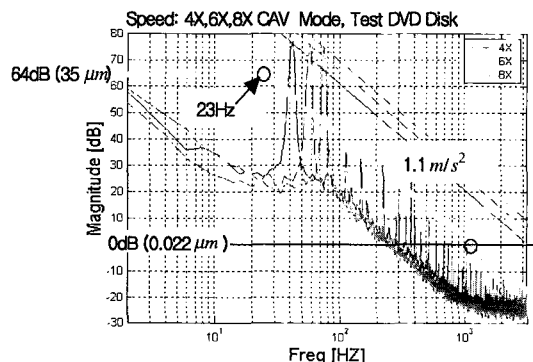


Fig. 2 Regulation disturbance vs. real disturbance values: in tracking direction

중심의 불일치에 기인한 성분이 가장 크며, 이 밖에 스피들 모터와 디스크 자체의 진동, 그리고 트랙 자체의 변동 등 여러 면에서 찾을 수 있다. LDV(laser doppler vibrometer)와 같은 비접촉 정밀 계측기기로 외란을 측정할 수 있는 포커스 방향과 달리, 트래킹 방향의 외란 성분은 디스크의 상하 방향의 큰 진동에 의하여 LDV를 이용할 수 없는 특징이 있다. 또한 DVD 디스크와 같이 정보면이 디스크 표면으로부터 일정 깊이에 존재하는 경우(디스크 표면으로부터 0.6 mm 깊이에 존재), 디스크 표면의 계측을 통한 외란 추정은 더 이상 유효하지 않다. 따라서 이러한 단점을 극복하고자, 액추에이터 동특성과 제어입력 그리고 루프 조정기법을 이용한 공칭 에러를 기반으로 하여 실시간으로 포커스 및 트래킹 방향의 외란을 측정할 수 있는 방법이 근래에 보고된 바 있다.⁽⁷⁾

Fig. 2는 DVD의 기준 배속에서의 외란 규정량과, 편심 150 μm를 가지는 테스트 DVD-ROM 디스크 (Abex inc.)를 이용하여 트래킹 방향의 배속별 발생하는 외란의 실측치를 보여준다.

결과에서 확인하여 볼 수 있듯이 편심 방향의 외란은 디스크 회전 배속의 증가와 더불어 고주파 대역 외란 성분의 증가가 지배적이며, 이를 제어기 루프 설계시 충분히 반영하여야 한다.

4. 광 디스크 트랙 끌어들이

4.1 트랙 끌어들이의 동적 분석

광 디스크의 탐색 제어는 크게 다음의 두 가지로 분류할 수 있다.: (i) 장거리 탐색 제어 (조동 액추에이터만을 사용하거나, 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 연동하여 사용), (ii) 근거리 탐색제어 (미동 액추에이터만을 사용하여 트랙을 카운트하며 이동하

는 트랙 점프, 또는 바로 인접으로 하나하나 트랙 끌어들이를 행하며 목표 트랙으로 이동하는 스텝 점프) 어느 경우든 목표 트랙에서 트랙 끌어들이 동작이 필요하며, 목표 트랙 근방에서 미동 액추에이터의 진동이 어느 정도 진정되면 트랙 끌어들이를 행한다. 그리고 디스크의 정보면으로부터 주소 정보가 인코딩된 Q 코드를 통하여 주소 값을 확인하고, 목표 트랙을 확인한다. 벗어난 정도에 따라 목표 트랙을 기다리거나 스텝 점프 또는 트랙 점프를 재시도 하게 된다. 탐색 제어의 전체적인 과정을 Fig. 3에 제시하였다.

탐색 제어시 소요되는 시간 T_{access} 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 T_{seek} 는 목표 트랙으로 이동하는 시간, T_{lat} 는 잔류 진동이 저감 되도록 기다리는 시간, 그리고 $T_{pull-in}$ 은 트랙 끌어들이에 걸리는 시간을 각각 의미한다.

$$T_{access} = T_{seek} + T_{lat} + T_{pull-in} \quad (1)$$

전체 소요 시간에서 $T_{pull-in}$ 이 차지하는 비중은 작지만, 트랙 끌어들이가 안정적으로 이루어지지 않으면 재차 트랙 끌어들이를 행하여야 한다. 따라서 트랙 끌어들이는 전체 탐색 제어 성능에 중요한 영향을 미치는 요소가 되며, 트랙 끌어들이 동작을 많이 하게 되는 임의 탐색(random access)에 있어 더욱더 중요하게 된다.

4.2 트랙 끌어들이의 파라미터

트랙 끌어들이의 영향을 미치는 파라미터로는 (i) 서보 대역(servo bandwidth), (ii) 위상 여유(phase margin), (iii) 목표 트랙으로부터의 트래킹 서보 on 위치, (iv) 목표 트랙과 빔 스폿의 상대 속도 등이 있다.^(5,6) 광 디스크의 제어기는 미디어의 종류(CD 또는 DVD) 및 배속에 따라 제어기 루프를 선택하는

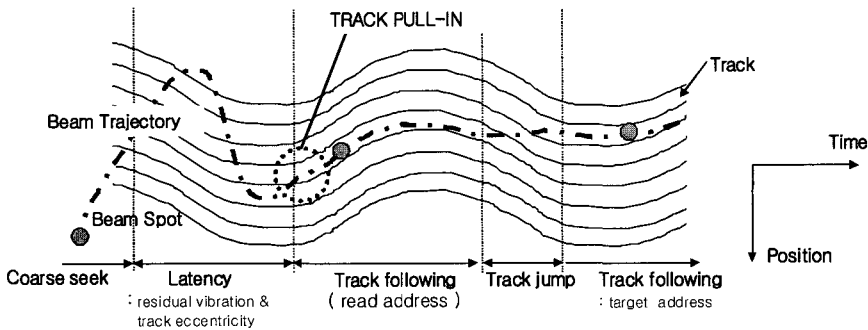


Fig. 3 Beam trajectory during seeking mode

다중 루프 제어기 구조를 가진다. 따라서 트랙 끌어들이시 사용되는 제어기는 트랙 추종 제어기와 동일하므로, 실제 트랙 끌어들이의 영향을 미치는 조정 가능한 파라미터는 (i) 트래킹 서보 on 위치, 그리고 (ii) 목표 트랙과 빔 스폿의 상대 속도로 한정된다.

이들 관계의 올바른 이해를 위해서 TES와 빔 스폿 위치와의 상관 관계를 먼저 정확히 파악할 필요가 있다. Fig. 4는 포커스 서보만을 작동시킨 상태에서 디스크의 편심에 따른 빔 스폿의 트랙에 대한 상대 궤적을 보여주고 있으며, Fig. 5는 CD계열의 대표적인 TES검출 방법인 3빔법(3 beam method)에서 광 스폿의 위치와 목표 트랙간의 상대 위치에 따른 TES의 관계를 보여준다. 따라서 탐색 제어시 빔 스폿이 트랙을 횡단하는 경우, 트랙 1개를 횡단할 때마다 1개의 정현파를 얻을 수 있으며 정현파의 주기를 통하여 트랙을 횡단하는 빔 스폿의 속도를 추정할 수 있다.

탐색 제어시 추가적인 서보 신호가 사용되는데, 트랙 계수 신호(COUT)와 트래킹 서보 on 신호(MIRR)

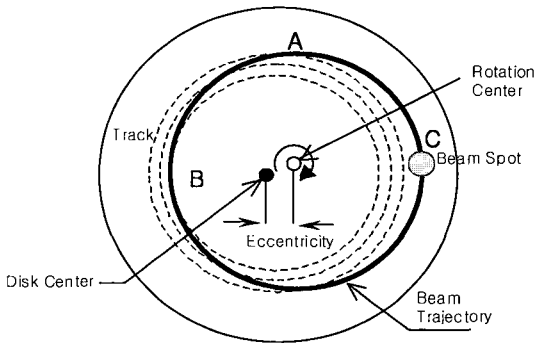


Fig. 4 Relative beam spot trajectory to the tracks: track servo off condition

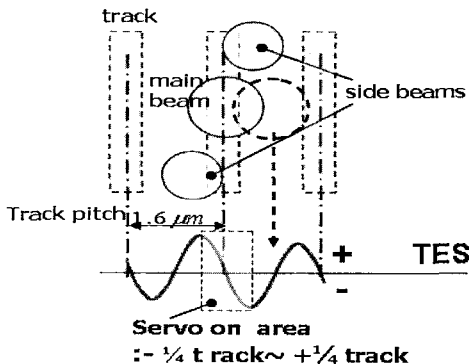


Fig. 5 Beam spot position vs. and TES (3-beams method)

가 대표적이다. 여기서 트래킹 서보 on 신호라 함은 그때 트래킹 서보가 작동하는 것이 아니라, 트래킹 서보를 작동하여 트랙 끌어들이를 할 수 있는 구간임을 말한다. Fig. 6은 등속도로 횡단시 실측한 여러 서보 신호를 보여주고 있다.

일반적으로 대물 렌즈가 정지된 상태에서 트랙 끌어들이 동작이 이루어지므로, 목표 트랙과 빔 스폿의 상대 속도는 시간의 독립변수가 아닌 종속변수가 된다. 즉, 정지하고 있는 빔 스폿과 회전하는 디스크의 상대 속도 V_{rel} 는 디스크의 회전 속도 ω_{rot} 와 디스크의 편심 외란의 크기 X_{dis} 의 영향을 받을 뿐만 아니라, 트랙 끌어들이 시점에 영향을 받는다. 따라서 V_{rel} 는 식 (2)와 같이 디스크의 회전속도 ω_{rot} , 편심 외란의 크기 X_{dis} , 그리고 트랙 끌어들이 시점 t 의 함수로 표현된다.

$$V_{rel} = f(\omega_{rot}, X_{dis}, t) \quad (2)$$

목표 트랙의 근처에서 빔 스폿의 위치를 고정시키면 디스크의 회전으로 인하여 외란이 발생하고, 이로 인하여 Fig. 7과 같은 TES가 검출된다. 여기서 주의해야 할 점은 디스크의 내주 또는 외주로의 움직임에 따라, TES의 경사와 목표 트랙의 움직임 관계가 변화한다는 것이다.

트랙 끌어들이의 시점은 TES의 + 경사를 구간 또는 - 경사 구간이 될 수 있으나, 일반적으로 TES - 경사 구간을 이용하는 부궤환(negative feedback) 영역을 제어하는 것이 일반적이다. 그러나 2층의 정보면을 가지는 DVD-ROM 디스크에서 opposite track

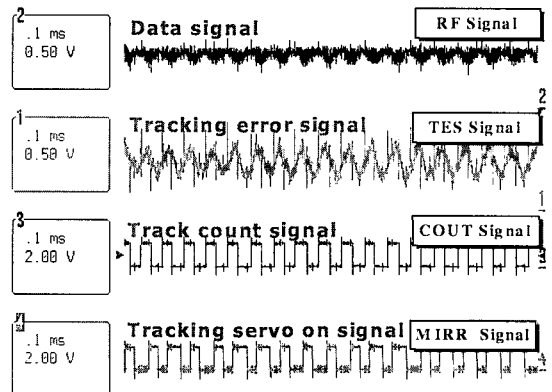


Fig. 6 Various servo signals during seek motion

path 기법을 채택한 경우, 1층 정보면에서 2층 정보면으로 레이어(layer) 점프를 행한 후에, 광 픽업이 시간에 따라 외주에서 내주로 이동하여야 한다. 이것은 일반적으로 광 픽업이 내주에서 외주로 이동하는 방법과 정반대이므로, 이 때는 TES의 + 구간을 사용하던지 아니면 에러 신호의 반전을 주어 사용한다.

5. 위상 평면을 이용한 트랙 끌어들임의 동적분석

5.1 PLL 이론의 트랙 끌어들임의 응용

트랙 끌어들임의 동작에서 트래킹 에러 신호를 생성하는 포토 다이오드(photo diode: PD)를 포함한 에러 검출부를 위상 비교기로 가정하면, 트랙 끌어들임은 PLL의 특수한 경우로 생각할 수 있다. CD-ROM의 트래킹 에러의 신호를 $e(t)$ 라고 하면, 트랙 끌어들임 과정에서의 트래킹 에러 신호는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$e(t)[\text{Volt}] = A \sin \left\{ \frac{2\pi}{q} (X_d(t) - X(t)) \right\} \quad (3)$$

여기서 A 는 에러의 신호의 크기, q 는 트랙 간격(track pitch), $X_d(t)$ 와 $X(t)$ 는 각각 디스크로부터 발생하는 외란의 크기 및 빔 스폿의 위치를 나타낸다. 그리고 트랙 간격 q 는 CD-ROM의 경우 $1.6 \mu\text{m}$

의 값을 가진다. 통신시스템 및 회전 제어계에서 사용되는 PLL의 신호는 일반적으로 주파수 변동 성분은 작는데 비하여, 광 디스크의 경우는 디스크의 편심에 따른 상대 속도의 변동에 의하여 신호의 주파수 변동이 큰 특징이 있다. 또한 디스크가 (i) 내주에서 외주, (ii) 외주에서 내주로 움직이는 방향에 따라 트래킹 서보 on 영역, 즉 트래킹 끌어들임 가능 영역이 제한된다는 점이 앞서 언급한 일반적인 PLL과 다른 점이다.

5.2 위상 평면을 이용한 트랙 끌어들임 시 물레이션

트랙 끌어들임시 사용되는 제어기 루프는 트랙추종 제어기와 동일하므로, 트랙 끌어들임의 영향을 미치는 실제적인 독립 변수는 (i) 목표 트랙(target track) 근처에서 트래킹 서보를 on 하는 위치, 그리고 그 때의 (ii) 목표 트랙과 빔 스폿의 상대 속도가 된다. 이 변수들을 2차원의 평면인 위상 평면으로 표현하면, 트랙 끌어들임시 동적 거동에 대한 직관적인 이해가 가능하므로 본 논문에서는 이 방법을 채택하였다. 여기서 x 축은 변위를, 그리고 y 축은 광 픽업의 대물 렌즈와 트랙의 상대 속도를 나타낸다.

시물레이션에 앞서 위상 평면을 이용한 트래킹 끌어들임 해석을 위하여, 시스템의 단순화가 필요하므로 다음과 같은 사항을 가정하였으며, 시물레이션 결과의 검증은 하드웨어 검증까지 진행한 기존 논문과

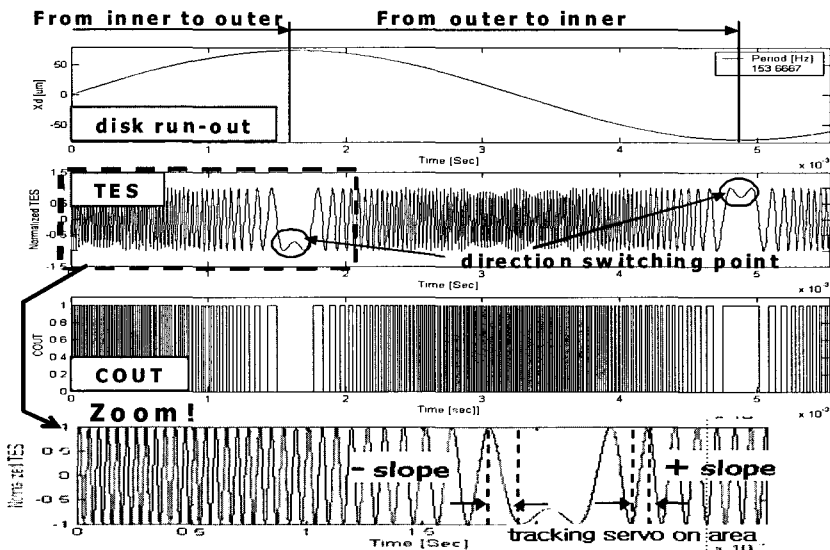


Fig. 7 Disk run-out vs. detected TES (tracking servo off condition)

의 비교를 통하여 간접적으로 증명하였다.^(5,6) 단순화를 위한 가정은 다음과 같다.

(i) 발생 외란은 단일 주파수 성분만 존재하고, 노이즈 등은 존재하지 않는다.

(ii) 트랙 끌어들임이 성공적으로 이루어졌을 때, 즉, 트래킹 서보가 성공적으로 작동하였을 때 빔 스폿과 목표 트랙과의 상대속도는 0인 것으로 가정한다.

먼저 트랙 끌어들임을 분석하기 위해서는 시스템의 전체 개루프(open loop) $L(s)$ 특성을 정확하게 파악할 필요가 있다. 광 디스크 시스템의 개루프는 식 (4)와 같이 표현될 수 있으므로, 각 요소에 대한 사항을 각각 정리하였다.

$$L(s) = K_{opt} \cdot C(s) \cdot K_{VCM} \cdot P(s) \quad (4)$$

- K_{opt} [Volt/mm]: optical gain
- $C(s)$ [Volt/Volt]: controller
- K_{VCM} [Volt/Volt]: drive IC gain
- $P(s)$ [mm/Volt]: optical pick-up

여기서 광학 게인 K_{opt} 는 실험적인 방법을 통하여 얻어낼 수 있으며, 드라이브 IC 게인 K_{VCM} 은 규격서(specification sheet)를 확인하여 이를 루프에 반영하였다. 실제 K_{opt} 나 K_{VCM} 은 고주파 대역에 빠른 극점(fast pole)을 가지는 저주파 통과 필터(low pass filter)의 특성을 보이지만, 제어 대역에 비하여 상당히 높은 대역의 극점을 가지므로 본 논문에서는 상수로 간주하였다.

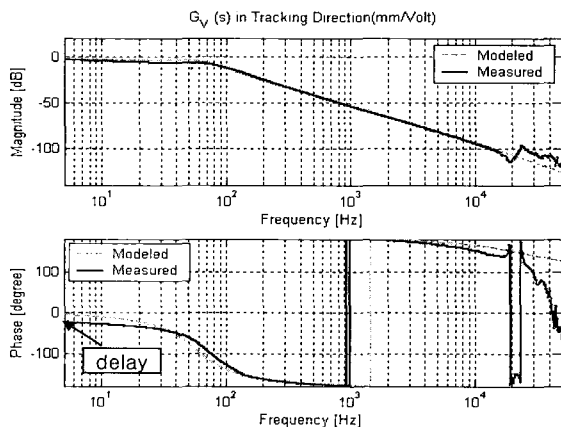


Fig. 8 Frequency response of the optical pick-up: tracking direction

미동 액추에이터의 전달 함수 $P(s)$ 는 광 픽업의 규격서로부터 전달 함수를 얻어낼 수 있으나, 파라미터 변동에 따른 동특성 변동이 상대적으로 크므로 실험적인 방법을 채택 하였다. 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer) HP35670A를 이용하여 저주파에서 고주파로의 정현파 입력을 광 픽업에 인가하고, 그 때 광 픽업의 운동을 비접촉 정밀 계측기인 LDV로 계측하여 실험 데이터를 얻어 내었다. 측정된 실험 데이터를 곡선 적합(curve fitting)을 통하여 식 (5)와 같은 전달 함수를 유도하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 제시하였다.

$$P(s) = \frac{0.6}{3.4e-11s^3 + 7.61e-6s^2 + 0.002825s + 1} [\text{mm/Volt}] \quad (5)$$

마지막으로 제어기의 특성을 반영함에 있어, 시뮬레이션의 타당성 확보를 위하여 모델이 되는 실제 광 디스크 드라이브의 제어기 구조를 그대로 반영하였다. 사용된 제어기는 병렬형 구조로 샘플링 주파수 f_s 는 176.4 kHz이며, 차수는 4차로 구성되어 있다. 40배속의 CD-ROM 트래킹 루프의 서보 대역(servo bandwidth)은 4 kHz, 이득 여유(gain margin)는 12 dB 그리고 42°의 위상 여유를 가진다.

위상 평면을 이용한 트랙 끌어들임 시뮬레이션에서 해석의 단순화를 위해 편심은 디스크 회전주파수 대역에서 $\pm 75 \mu\text{m}$ (CD-ROM 규격에서 정한 1배속 최대 편심방향 외란의 $\pm 70 \mu\text{m}$ 에 $5 \mu\text{m}$ 추가)의 단일 주파수 외란 만을 가지는 것으로 가정하였다. 40배속의 회전 rpm은 9920 rpm이므로 외란은 식 (6)과 같이 표현 된다.

$$d(t) = 75 \sin(2\pi \times 153.7t) \quad (6)$$

식 (6)과 같이 $75 \mu\text{m}$ 의 편심량을 가지고 회전하는 경우, 디스크의 절대 좌표계에서 외란은 Fig. 7의 첫 번째 그림과 같은 궤적을 그리게 된다. 이 때 정지된 빔 스폿이 관측하는 TES는 Fig. 7의 두 번째 그림과 같다. 이때 서보가 가능한 영역, 즉, MIRR 신호가 high인 영역은 디스크와 빔 스폿의 상대 운동에 따라 달라지게 된다. 디스크가 내주에서 외주로 나갈 때는 TES의 기울기가 -일 때 서보가 가능한 영역이며, 외주에서 내주로 들어올 때는 TES의 기울기가 +일 때 서보가 가능한 영역이 된다.

CD-ROM의 트랙 폭(pitch)이 $1.6\mu\text{m}$ 이므로 서보가 가능한 MIRR 구간을 이용하여 빔 스폿과 트랙과의 상대 속도를 수치적으로 얻어낼 수 있다. MIRR이 high인 상태에 대응되는 물리적인 변위는 $1/2$ 트랙, 즉, $0.8\mu\text{m}$ 에 해당되므로, 각각의 MIRR의 시간 간격을 계산하여 빔 스폿과 트랙 간의 상대 속도 V_{rel} 가 얻어진다. 디스크가 내주에서 외주 또는 외주에서 내주로 방향 변환할 때 순간적으로 V_{rel} 는 0이 되지만, 이 때는 서보가 가능하지 않은 영역이 발생할 수 있다. 따라서 TES의 -경사 구간을 기준으로 주어진 조건에서 상대 속도를 계산하여 Fig. 9에 결과를 제시하였다.

이 그림에서 사용된 샘플링 시간은 $T_s = 1/f_s$ 로 f_s 는 시스템의 샘플링 주파수인 176.4kHz 에 해당한다. TES의 실제 신호는 비선형으로 TES의 -경사 영역에서 속도의 변동이 있지만 근사적인 선형으로 간주하여, 구간내의 샘플 수를 통하여 속도를 계산하였다. 구간 내의 샘플 수를 계산하면 최소값이 1이고 최대값이 17이므로 빔 스폿과 트랙의 상대 속도의 범위는 다음과 같이 얻어진다.

$$8.3176 [\text{mm/sec}] V_{rel} \leq 141.1 [\text{mm/sec}] \quad (7)$$

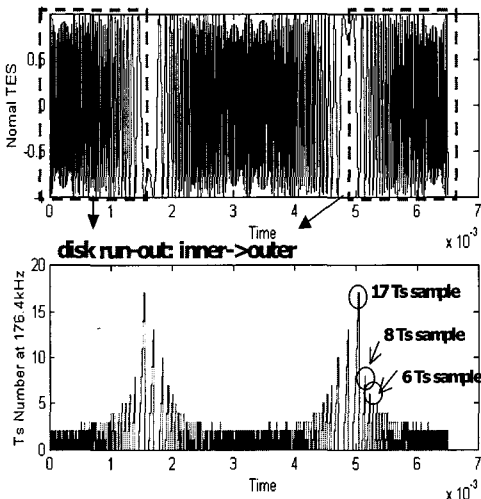


Fig. 9 Relative velocity : tracking servo off condition

상대 속도가 가장 느릴 때는 방향 전환이 이루어진 바로 다음의 서보 on 영역으로, 스위칭 시점에 따라 V_{rel} 의 하한 값의 변동이 있을 수 있다. 주어진 조건에서 트랙 끌어들임이 가능한 상대속도 V_{rel} 의 계산 및 트랙 끌어들임시의 동적 거동 해석을 위하여 Runge-Kutta 방법을 적용하였다. 낮은 서보대역을 가지는 시스템에 대한 시뮬레이션 결과를 위상평면으로 표현하면 Fig. 10과 같다.

Fig. 10의 결과에서 알 수 있듯이, 어느 임계값까지는 트랙 끌어들임을 행하지만 임계값 이상은 트랙이 목표 트랙에서 끌어들임을 행하지 못하고 인접 트랙으로 밀리는 현상(track slipping)을 보임을 알 수 있다.^(5,6) 즉, 목표 트랙에서의 트랙 끌어들임 동작이 실패 하였음을 보여주고 있다. 그리고 시간 영역의 해석을 통하여 과도 진동에 의한 오버 슈트(over shoot) 발생함을 관측할 수 있으며, 이 때 오버 슈트가 $\pm 1/4$ 트랙 이상인 경우 TES의 극성이 바뀌므로, TES파형 변환 등의 추가적인 방법을 사용하지 않는다면 트랙 끌어들임을 행할 수 없다. 다양한 파라미터 수치

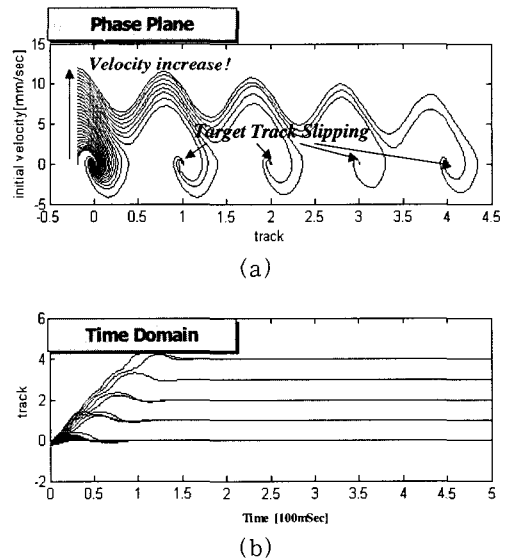


Fig. 10 Track pull-in behavior: (a) phase plane, (b) time domain

Table 2 Various simulation parameter results: in track pull-in procedure

Model	Bandwidth	Gain margin/phase margin	Optimal tracking servo on position	Maximum allowable relative velocity in track pull-in
Paper model	4 kHz	12 dB	-1/8 target track before	12 mm/sec
Suzuki model	3 kHz	Not specified	-1/8 target track before	10 mm/sec

시뮬레이션을 통하여 트랙 끌어들이의 최적 위치는 목표 트랙에서 $-1/8$ 전(前)트랙으로 확인하였고, 끌어들이 가능한 최대 상대 속도는 대략 12 mm/sec 임을 찾아내었다.

5.3 시뮬레이션의 결과 분석 및 고찰

위상 평면을 이용한 시뮬레이션 결과의 타당성 검증은 위하여, 얻어진 결과를 Suzuki 등의 연구 결과와 비교하여 Table 2에 제시하였다. 부가적인 시뮬레이션을 통하여 트랙 끌어들이가 가능한 상대 속도는 이득 여유나 위상 여유를 그대로 가지면서 서보 대역을 $5 \sim 6 \text{ kHz}$ 증가됨에 따라 트랙 끌어들이 가능한 속도가 $13 \sim 16 \text{ mm/sec}$ 까지 증가할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 기존 논문의 실험 경향과 잘 일치하나, 실제 시스템의 적용시 시뮬레이션에서 고려되지 않은 노이즈로 인하여 기대치 만큼 증가하기는 어려운 것으로 판단된다.

최적의 트랙 끌어들이 위치의 경우, 시뮬레이션 결과가 대략적으로 $-1/8$ 목표 트랙 전(前)임을 알 수 있었다. 제어 시스템에서 위상 여유와 오버 샷은 직접적인 관계가 있고, 또한 일반적으로 광 디스크 드라이브의 트래킹 제어계의 위상 여유가 40° 내외인 것을 고려하면, 트랙 끌어들이를 행하기 위한 최적의 트래킹 서보 on 위치가 $-1/8$ 목표 트랙 전후(前後)가 됨을 유추할 수 있다. 또한 이 결과로부터, 고배속에 대응하기 위하여 제어기를 설계하는 경우 일반적으로 위상여유가 점점 줄어들게 되므로, 최적의 트랙 끌어들이 위치는 목표 트랙에서 $-1/8$ 트랙 더 멀리 떨어진 곳으로 이동하여야 함을 유추할 수 있다.

또한 트랙 끌어들이가 가능한 시점을 살펴보면, Fig. 9로부터 디스크의 방향 전환이 있는 직후의 매우 좁은 구간 내에서만 트랙 끌어들이가 가능한 속도 영역이 됨을 확인할 수 있다. 따라서 실제 시스템에서 트랙 끌어들이가 가능한 시점은 디스크가 내/외 주로의 방향 전환이 발생한 직후의 저주파수 대역의 TES - 경사 구간 내에서만 트랙 끌어들이가 가능함을 알 수 있다. 그러나 빔 스폿과 트랙과의 상대 속도가 낮다는 것은 TES 검출 지연에 따른 위상지연을 간접적으로 의미한다. 따라서 위상 지연 효과를 고려할 때 서보 대역의 근방의 주파수로 적절한 것으로 판단되며, 이 요소와 함께 트랙 끌어들이가 가능한 상대 속도의 상한 값과의 관계를 적절히 고려해야

할 것이다.

6. 결 론

이상을 통하여 광 디스크의 트랙 끌어들이에 영향을 미치는 파라미터를 정리하였고 이를 위상평면을 이용하여 해석하였다. 트랙 끌어들이에 사용되는 제어기는 트랙 추종 제어기와 동일하므로, 실제 선택 가능한 요소는 트랙과 빔 스폿의 상대 속도와 트래킹 서보 on 위치가 된다. 위상 평면을 이용한 시뮬레이션을 통하여 제어기 루프의 대역폭이 4 kHz , 위상 여유 43° 일 때, 최적의 트래킹 서보 on 위치는 목표 트랙에서 $-1/8$ 전(前)트랙 그리고 트랙 끌어들이가 가능한 최대 상대 속도는 12 mm/sec 임을 확인하였다. 또한 추가적인 시뮬레이션을 통하여 트랙 끌어들이 가능한 최대 상대 속도는 루프 대역폭을 증가시켜 확보할 수 있음을 시뮬레이션으로 부터 얻어내었다. 그러나 실제 상황에서는 시스템에서 발생하는 노이즈 등에 의하여 개선 가능한 최대 끌어들이 가능 속도는 제한된 것으로 예상된다.

최적의 트랙 끌어들이 위치는 시스템의 오버 샷과 관련된 위상 여유와 직접적으로 관련되고, 일반적으로 광 디스크 제어계의 위상 여유가 40° 내외인 것을 고려할 때, 최적의 트랙 끌어들이 위치는 $-1/8$ 전후(前後)일 것으로 예측되나, 이에 대한 평가는 추가적인 검증이 필요하다. 트랙 끌어들이 기능의 향상을 위하여 브레이크 펄스의 적용이나, 파형 변화등을 이용하여 트랙 끌어들이의 영역이나 끌어들이 가능한 상대 속도를 증가시킬 수 있으며, 이 같은 접근 방법에 대하여서는 앞으로 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 한국과학재단(R11-1997-042-11002-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) 전홍걸, 박영필, 2000, "광픽업 잔류 진동 저감을 위한 이송 속도 분포 해석", 한국소음진동공학회논문집, 제 10 권, 제 2 호, pp. 221 ~ 228.

- (2) Lee, H. -J., Han, C. -S. and Kim, S. H., 2000, "Reduction of Seek Time of Tracking Actuator with Pulsed Excitation in Optical Disk", Japan Journal of Applied Physics, Vol. 39, No. 12A, pp. 6546~6549.
- (3) Getreuer, K. W. and Grassens, L. J. "Chapter 3. Servos and Actuators", in W. McDaniel and R. H. Victora, 1997, "Handbook of Magneto-Optical Data Recording", Noyes Publications, New Jersey.
- (4) Bouwhuis, G. et al., 1986, "Principle of Optical Disk Systems", Adam Hilger Ltd, MA.
- (5) Suzuki, M., Tanaka, H. and Miura, Y., 1990, "Pull-in Condition and Method of Tracking Servo in Optical Disk Drive", The Journal of the Institute of Television Engineers of Japan, Vol. 44, No. 10, pp. 1391~1397.
- (6) Suzuki, M., Tanaka, H., Miura, Y., Suzuki, Y., Mori, M., Takasago, M. and Tomono, Y., 1993, "Advanced Direct Seeking System for Magneto Optical Disk Drive", Japan Journal of Applied Physics, Vol. 32, No. 11B, pp. 5371~5375.
- (7) Choi, J. Y., Jun, H. G., Yang, H. S. and Park, Y. P., 2002, "Disturbance Measurement of an Optical Disk and Servo Loop Design Related to Its Result", 6th International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 326~331.
- (8) 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 Transaction on Consumer Electronics, Vol. 44, No. 4, pp. 1273~1283.
- (9) Jung, J. T. and Kim, W. S., 2002, "Fracture Identification and Prevention of a High-Speed Optical Disk with a Crack", IEEE Transaction on Consumer Electronics, Vol. 48, No. 2, pp. 248~253.
- (10) Akiyama, M. and Ishikawa, J., 1993, "Repetitive Track Seek Algorithm for Optical Disk Drives", Japan Journal of Applied Physics, Vol. 32, No. 11B, pp. 5392~5396.
- (11) Kim, N. G. and Ha, I. J., 1999, "Design of ADPLL for Both Large Lock-In Range and Good Tracking Performance", IEEE Transaction on Circuit and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing, Vol. 46, No. 9, pp. 1192~1204.
- (12) Daniel, A., 2002, "Phase-Locked Loops: a Control Centric Tutorial", American Control Conference, Vol. 1, pp. 1~15.