

위상평면을 이용한 광디스크 트랙 끌어들임의 동적 해석 및 영향인자의 평가

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

최진영* · 박태욱** · 양현석** · 박노철** · 박영필**

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

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

ABSTRACT

In this paper, the track pull-in behavior analyses in an optical disk drive (ODD) using plane phase is treated and the parameters affecting it are discussed. Track pull-in is the track capture procedure to do track following control and it is key factor to increase data transfer rate. Simulation method, Runge-Kutta method to solve nonlinear equation, is used to evaluate the track pull-in conditions, and the real servo loop parameters are applied in this process to get the more real condition. Finally, the comments for the acquired results are discussed briefly.

1. 서 론

정보저장기기로서의 광디스크의 궁극적 목표는 고용량의 저장 용량과 고배속 데이터 전송률의 달성에 있다. 고용량의 광디스크 개발은 미디어 포맷(format)에 대한 개발 및 표준화를 전제로 하며, CD 에서 DVD 로의 전환 그리고 차세대 광디스크로서 AOD 나 BD 등의 출현은 이러한 맥락에서 해석할 수 있다. 그러나 고배속 데이터 전송률의 실현은 광디스크 포맷 내에서 write strategy 나 미디어 기록 특성등에 의한 요소들을 제외하였을 때, 다음의 요소에 의하여 달성될 수 있다. (i) 광디스크의 회전 속도의 증가와, (ii)안정적인 탐색제어(seek control)를 통한 탐색시간 단축이 그것이다. 현재 사용중인 CD 계열 광디스크 최고 배속이 52 배속으로 11,986rpm 에 이르고, DVD 계열의 최고 배속 또한 16 배속으로 9,600rpm 에 이른다. 진동 및 소음 그리고 고배속에서의 디스크의 급작스런 파괴등을 우려하여, 업계에서는 이 수치를 한계 값으로 받아들이고 있다. 따라서 보

다 빠른 데이터 전송률의 달성을 위하여, 탐색 제어의 중요성이 근래에 더욱더 부각되고 있는 실정이다.

탐색 제어의 개선을 위하여 많은 선행 연구들이 위하여 연구 되었으며, 탐색 후 발생하는 잔류 진동의 저감을 위한 연구⁽¹⁾, 목표 트랙으로의 정확한 액세스를 위하여 횡단 트랙을 계수(count) 하는 직접 탐색 제어(direct seek control) 기법⁽²⁾, 브레이크 펄스를 이용한 트랙 끌어들임(track pull-in) 성능의 개선 등이 대표적이다. 그러나 목표 트랙에서 트랙 추종 제어(track following control)를 행하기 위하여 필요한 트랙 끌어들임의 영향을 미치는 파라미터나, 트랙 끌어들임시 발생하는 과도 상태의 거동등에 대한 연구는 상대적으로 미흡했다. Suzuki 등은 수치적인 해석을 통하여 트랙 끌어들임의 영향을 미치는 인자에 대하여 평가하였고^(3,4), Getreuer 등은 위상평면(phase plane)을 이용하여 간략한 2 차의 광디스크 서보 루프의 트랙 끌어들임을 해석한 바 있다.⁽⁵⁾ 그러나 이들 연구에서는 트랙 끌어들임시 발생하는 비선형 신호의 시간에 따른 변동을 고려하지 않았고^(5,6), 실제 광디스크 제어 루프의 차수가 5 차(액츄에이터 2 차, 제어기 3 차) 이상을 감안할 때, 너무 낮은 차수로 해석하여 현실성이 결

*연세대학교 대학원 정보저장공학협동과정
E-mail : mithra@yonsei.ac.kr
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

** 연세대학교 CISD

여되어 있다.⁽³⁾

따라서 본 논문에서는 앞서 시행되었던 연구들을 보완하여, 상용 시스템의 제어기 루프 특성을 반영한 위상평면(phase plane)으로 해석하여 트랙 끌어들이미를 해석하였다. 위상 평면을 이용하면 트랙 인입시 발생하는 과도 특성을 보다 직관적으로 이해할 수 있는 장점이 있다. 대상 모델은 12 배속 DVD-ROM 드라이브로, 트래킹 방향으로 CD 를 40 배속으로 재생한다고 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 신뢰성을 높이기 위하여 다음의 사항을 반영하였다.

-서보 루프의 정확한 구성을 위하여 실험적으로 측정된 광픽업 전달함수 및 실제 제어기 구조의 적용

2. 광디스크의 트래킹 서보, 탐색 서보

다양한 외란의 존재함에도 불구하고 시스템의 올바른 작동을 위해서는 서보계를 통하여 효율적으로 외란을 제거하여야 한다. 수평 방향으로의 디스크의 진동 및 각종 외란을 담당하는 서보를 트래킹 서보라 하며, 그 허용 정밀도는 광디스크의 종류에 의존하게 된다. 또한 트래킹 에러의 신호 형태는 검출 방법에 따라 영향을 받게 되며, 이는 에러 신호의 선형 구간과 관련이 있다. 광디스크의 종류에 따라 사용되는 일반적인 트래킹 에러 검출 방법과 허용 오차를 Table 1 에 정리하였다.

광디스크 드라이브의 트래킹 서보는 일반적으로 미동 액츄에이터(fine actuator)와 조동 액츄에이터(coarse actuator)의 2 단 형태로 구성되며, 전체적인 구성은 Fig.1 에 보여진다. 미동 액츄에이터는 대역폭이 넓으나 가동 범위가 좁은 특징이 있고, 반면에 조동 액츄에이터는 대역폭이 낮은 대신에 가동 범위가 넓은 특징이 있다. 트랙 추종

제어는 미동 액츄에이터의 의하여 행하여지며, 트랙이 나선형 구조이므로 미동 액츄에이터의 입력은 시간에 비례하는 DC 성분을 가진다. 이 DC 성분은 조동 액츄에이터에 의하여 보상되어진다.

임의 탐색(random access) 및 장거리의 탐색 제어(long distance seek)를 행하는 경우, 미동 액츄에이터만으로 작동이 불가능하므로 조동 액츄에이터와 연동하여 사용하게 된다. 이 때 조동 액츄에이터는 마이컴 또는 DSP 에 내장되어 있는 거리에 따라 생성된 참조표(loop-up table)를 이용한다. 탐색 제어시 포커스 서보는 on 상태로 작동하며, 목표 트랙 근처에서 미동 액츄에이터의 잔류 진동이 어느 정도 진정되면 목표 트랙으로의 끌어들이미 동작을 행하게 된다. 따라서 보다 빠른 데이터 전송률의 구현을 위해서는 안정적인 트랙 끌어들이미가 필수적이다. 트랙 끌어들이미에 앞서 외란 특성을 간략하게 정리할 필요가 있으므로, 이 사항은 3 절을 통하여 간략히 정리하였다.

Table 1 Error detection method and error tolerance. : CD vs. DVD

	Detection Method	Error Tolerance & Error Shape
CD	3 Beam Method	0.1 μ m Sine Wave
DVD	Differential Push Pull Method	0.022 μ m Saw Wave

3. 광디스크의 외란 특성

3.1 광디스크의 외란에 대한 규격

디스크의 호환을 기본적 특징으로 하는 광디스크 드라이브는 다양한 물리적 특성을 가지는 디스크를 재생하여야 한다. 따라서 디스크의 외란 혹은 진동량의 규제가 필요하며, 이 수치들은 ISO

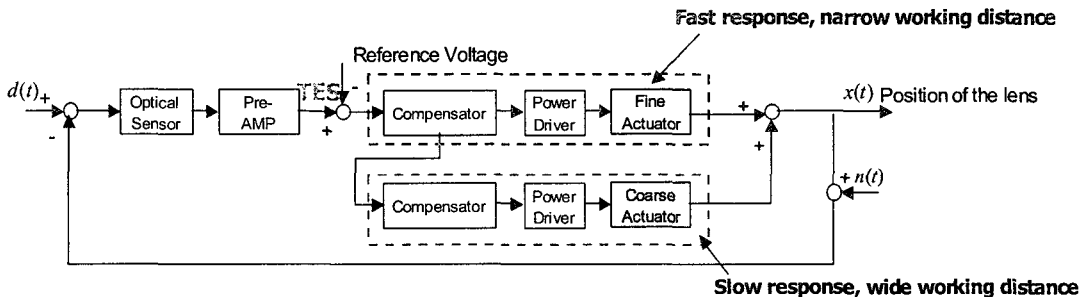


Fig. 1 Schematic diagram of the tracking servo loop

를 통하여 규제하고 있다.

외란은 물리적인 특징에 따라 기계적/광학적/전기적인 특징으로 분류할 수 있으며, 액츄에이터에 의하여 저감해야 할 기계적 외란을 다시 세부적으로 편향(deviation), 편심(eccentricity) 그리고 편중심(unbalance)으로 정리할 수 있다. 여기서 편향은 디스크의 상하 방향의 외란 성분을, 편심은 좌우 방향의 외란을, 그리고 편중심은 편심질량에 의하여 발생하는 외란을 말하게 된다. 그러나 규격집에서는 오직 기준 배속에서의 외란량을 규정하고 있는데, 실제 광디스크 드라이브는 다양한 속도에서 재생하게 된다. 따라서 디스크의 물리적인 변동에 따른 외란의 정성적/정량적 특징의 이해와 배속 변화에 따라 외란량 변화등을 올바르게 파악하는 것은 매우 중요하다.⁽⁷⁾

3.2 편심 성분의 실측 외란

편심의 요인으로는 회전 중심과 디스크의 기하학적 중심의 불일치에 기인한 성분이 가장 크며, 이 밖에 스피들 모터, 디스크 자체의 진동 그리고 트랙 자체의 변동 등 여러 면에서 찾을 수 있다. LDV(laser doppler vibrometer)와 같은 비접촉 정밀측정기로 측정할 수 있는 포커스 방향의 외란 성분과는 달리, 트래킹 방향의 외란 성분은 편향 성분에 외란에 의하여 LDV를 이용할 수 없는 특징이 있다. 또한 DVD와 같이 정보면이 디스크의 표면으로부터 일정 깊이에 존재하는 경우(DVD의 경우, 디스크 표면으로부터 0.6mm 깊이에 존재), 더 이상 디스크 표면의 측정을 통한 외란 추정은 더 이상 유효하지 않다. 따라서 이러한 단점을 극복하고자, 액츄에이터 동특성과 제어 입력 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 μ m를 가지는 테스트

DVD-ROM 디스크(Abex inc.)의 트래킹 방향의 배속별 발생하는 외란의 실측치를 보여준다.

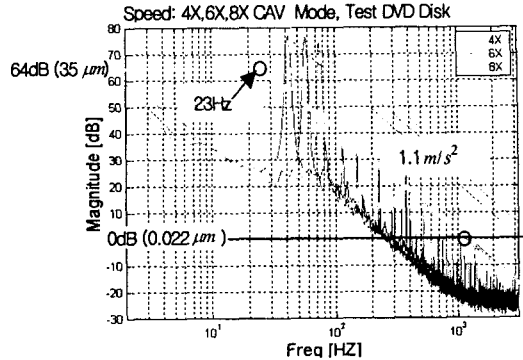


Fig. 2 Regulation value at the reference speed vs. the measured disturbance in tracking direction

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

4. 광디스크 트랙 끌어들이

4.1 트랙 끌어들이의 동적 분석

광디스크의 탐색 제어는 크게 다음의 두 가지로 분류할 수 있다.: (i) 장거리 탐색 제어 (조동 액츄에이터와 미동 액츄에이터를 동시에 사용), (ii) 근거리 탐색제어 (미동 액츄에이터만을 사용하여 트랙 점프) 어느 경우든 목표 트랙에서 트랙 끌어들이 동작이 필요하며, 목표 트랙 근방에서 미동 액츄에이터의 진동이 어느 정도 진정되면 트랙 끌어들이를 행한다. 그리고 디스크의 정보면으로부터 Q 코드를 통하여 주소 값을 읽고 목표 트랙을 확인하게 된다. 벗어난 정도에 따라 목표 트랙을 기다리거나 스텝 점프 또는 트랙 점프를 재시도 하게 된다. 탐색 제어의 전체적인 과정을

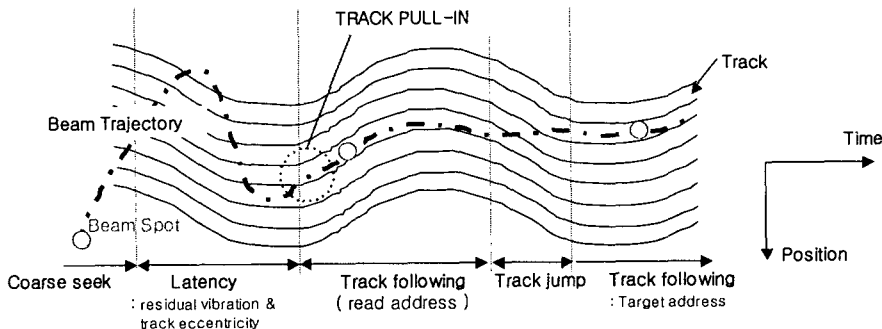


Fig. 3 Beam trajectory during seeking mode

Fig.3 에 제시하였다. 탐색 제어시 소요되는 시간 T_{access} 는 다음과 같이 표현되며, T_{seek} 는 목표트랙으로 이동하는 시간, T_{lat} 는 잔류진동이 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 소요시간에서 $T_{pull-in}$ 이 차지하는 비중은 작지만, 트랙 끌어들이가 안정적으로 이루어지지 않으면 재차 트랙 끌어들이를 행하여야 하므로 전체 탐색 제어 성능에 중요한 영향을 미친다.

4.2 트랙 끌어들이의 파라미터

트랙 끌어들이의 영향을 미치는 파라미터로는 (i) 서보 대역, (ii) 위상 여유, (iii) 목표 트랙으로부터의 트래킹 서보의 작동 위치, (iv) 목표 트랙과 빔스팟의 상대속도 등이 있다.^(5,6) 광디스크의 제어기는 미디어의 종류 (CD/DVD) 및 배속에 따라 제어기 루프를 선택하는 다중루프 제어기 구조를 가진다. 따라서 트랙 인입시 사용되는 제어기는 트랙 추종제어기와 동일하게 사용하므로, 트랙 끌어들이의 영향을 미치는 조정 가능한 파라미터는 트래킹 서보 작동 위치, 그리고 목표 트랙과 빔스팟의 상대속도가 된다. 그러나 일반적으로 미동 액츄에이터의 대물렌즈가 안정화된 상태에서 트래킹 인입 동작이 이루어지므로, 목표 트랙과 빔스팟의 상대속도는 시간의 독립변수가 아닌 종속변수가 된다(Fig. 7 참조). 이러한 현상에 대하여 기존의 연구를 통하여 트랙 끌어들이에 영향을 미치는 파라미터를 심도있게 분석 하였지만, 편심 성분에 의하여 상대 속도가 주기적으로 변화한다는 사실에 대하여서는 주목하지 않았다.

Fig.4 는 포커스 서보만을 작동시킨 상태에서 디스크의 편심에 따른 빔스팟의 궤적을 보여주고 있으며, Fig.5 는 CD 계열의 대표적인 트래킹 에러검출 방법인 3 빔법(3 beam method)에서 광스팟의 위치와 에러 신호와의 관계를 보여준다.

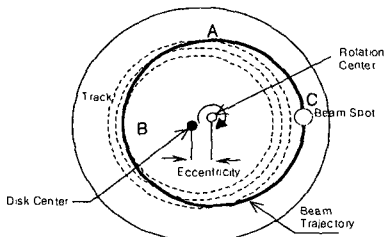


Fig. 4 Disk run-out vs. beam spot trajectory

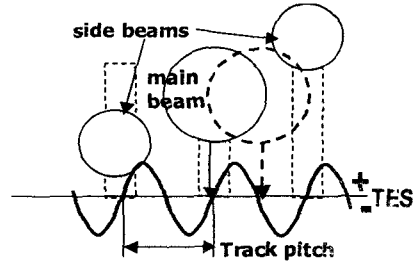


Fig. 5 Beam position vs. TES

또한 탐색 제어시 등속도로 트랙을 횡단할 때 실측한 RF, TES(track error signal), 트랙 계수(track count) 신호, 트래킹 서보 on 신호를, Fig.6 에 제시하였다. 여기서 트래킹 서보 on 신호라 함은 그 때 트래킹 서보가 작동하는 것이 아니라, 트래킹 서보를 작동하여 트랙 끌어들이를 할 수 있는 구간임을 말한다.

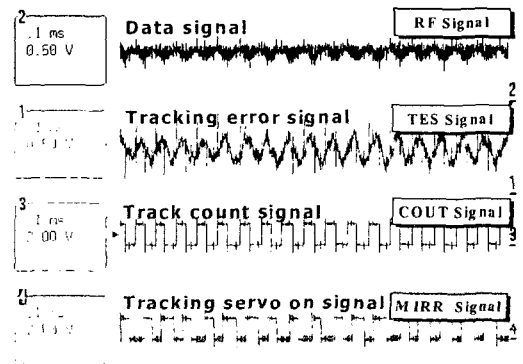


Fig. 6 Servo signals during seek motion

목표 트랙의 근처에서 빔스팟의 위치를 고정시키면, 이로 인하여 Fig.7 과 같은 TES 가 검출된다. 여기서 주의해야 할 점은 디스크의 내주 또는 외주로의 움직임에 따라, TES 와 목표 트랙의 움직임 관계가 변화한다는 것이다. 따라서 트랙 끌어들이의 시점은 TES 의 + 경사를 구간 또는 - 경사 구간이 될 수 있으며, - 경사 구간을 사용할 때는 에러 신호의 반전을 주어야 한다. 기존의 CD 의 경우는 + 경사 구간만을 사용 하였다. 그러나 2 층의 정보면을 가지는 DVD 가 opposite track path 를 채택할 때 층(layer) 레이어 점프를 행한 후에는, - 구간을 사용하던지 아니면 에러 신호의 반전이 이루어 져야 한다.

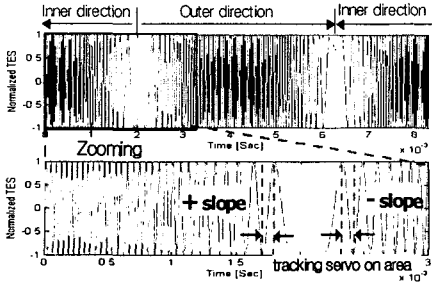


Fig. 7 Detected TES under tracking servo off condition

5. 위상평면을 이용한 트랙 끌어들임의 동적분석

5.1 PLL 이론의 트랙 끌어들임의 응용

트랙 끌어들임의 동작에서 PD로부터 검출되는 트래킹 에러 신호를 위상비교기로 생각하면, 트랙 끌어들임은 PLL(phase locked loop)의 특수한 경우로 생각할 수 있다. CD의 트래킹 에러의 신호를 $e(t)$ 라고 하면, 트랙 끌어들임 과정에서의 트래킹 에러 신호는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 A 는 에러의 신호의 크기, q 는 트랙 피치, $X_d(t)$ 와 $X(t)$ 는 각각 디스크로부터 발생하는 외란 및 빔스폿의 위치를 나타낸다. 그리고 q 는 트랙 간격(track pitch)으로 CD의 경우 $1.6\mu m$ 의 값을 가진다. 일반적으로 PLL에서 검출하는 신호의 시간에 따른 주파수 성분은 작을 때 비하여, 광디스크의 경우는 디스크의 편심에 따른 상대속도의 변동에 의하여 주파수 변동이 큰 특징이 있다. 또한 디스크가 (i) 내주에서 외주, (ii) 외주에서 내주로 움직이는 방향에 따라 트래킹 서보 작동 영역이 달라진다는 점에 유의하여야 한다.

5.2 위상평면을 이용한 트랙 끌어들임 분석

트랙 끌어들임시 사용되는 제어기 루프는 트랙추종 제어기와 동일하므로, 트랙 끌어들임의 영향을 미치는 실제적인 독립 변수는 목표 트랙(target track)에서 트랙 서보를 작동하는 위치 및 그 때의 상대 속도가 된다. 이 변수들을 2차원의 평면인 위상평면으로 표현하면, 트랙 인

입시 동적거동에 대한 직관적인 이해가 가능하므로 본 논문에서는 이 방법을 이용하였다. 여기서 x 축을 변위로, y 축을 핑픽업의 대물 렌즈와 트랙의 상대 속도로 표현하였다. 이 때 사용된 제어기는 상용 시스템의 제어기를 적용하였다. 미동 액추에이터의 전달함수 $P(s)$ 는 LDV와 HP35670A(dynamic signal analyzer)를 이용하여 실험적 방법으로 찾아내었으며, 그 결과는 다음과 같다.

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

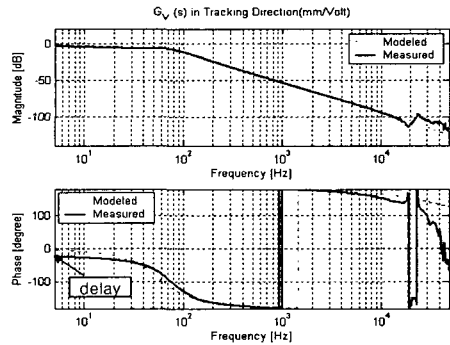


Fig. 8 Frequency response of the optical pick-up: tracking direction

이 때 전체 개루프(open loop) $L(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

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

$C(s)$ [Volt/Volt]: controller

K_{opt} [Volt/mm]: optical gain

K_{VCM} [Volt/Volt]: drive IC gain

실제적으로 K_{opt} 나 K_{opt} 는 고주파 대역에 빠른 극점(fast pole)을 가지는 저주파 통과 필터(low pass filter)이지만, 제어 대역에 비하여 상당히 높은 대역의 극점을 가지므로 상수로 간주할 수 있다. 제어기는 3차의 병렬형 구조로 샘플링 주파수 f_s 는 $176.4 kHz$ 이다. 40X의 CD-ROM 트래킹 루프의 서보 대역(servo bandwidth)은 $3.2 kHz$, 이득 여유(gain margin)는 $12 dB$ 그리고 42° 의 위상 여유(phase margin)를 가진다.

시뮬레이션에 사용된 편심은 해석의 편의를 위하여 회전주파수 대역에서 $\pm 75\mu m$ (CD의 규격에서 최대 편심방향 외란의 크기임)의 외란만을 가

지는 것으로 가정하였다. 40X 의 회전 rpm 은 9920rpm 이므로 외란은 다음과 같이 표현된다.

$$d(t) = 75\sin(2\pi \times 153.7t) \quad (5)$$

트랙 끌어들이시 트랙과 빔스폿의 상대속도는 Fig.7 에서 확인할 수 있듯이, 시간의 독립변수가 아니라 트랙 끌어들이의 시점에 따라 영향을 받게 된다. 따라서 각 배속별 발생할 수 있는 상대 속도는 디스크의 회전 속도 및 외란량의 크기, 그리고 트랙 끌어들이 시점 이 세가지 요소에 의하여 정해진다. 과형 변환 등의 방법을 사용하지 않는 경우, 트랙 끌어들이 가능 영역이 $\pm(1/4)$ 트랙이므로, 주어진 파라미터에 대하여 수치적인 계산을 위해 Runge-Kutta 방법을 적용하였다. 계산된 결과의 한 예를 위상평면을 이용하여 Fig. 9 에 나타내었다.

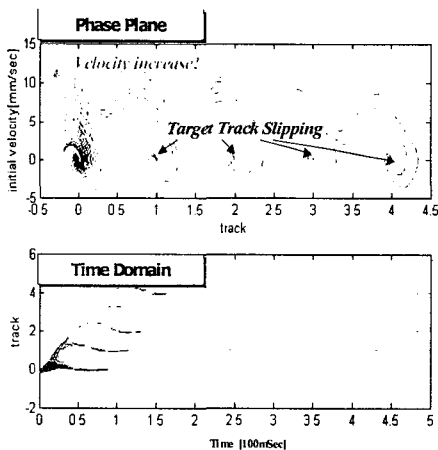


Fig. 9 Relative velocity range vs. pull-in behavior : (a) phase plane, (b) time domain

Fig.9 의 결과에서 알 수 있듯이, 어느 임계값까지는 트랙 끌어들이를 행하지만 임계값 이상은 트랙이 목표 트랙에서 끌어들이를 행하지 못하고 인접 트랙으로 밀리는 현상(track slip)을 보인다. 그리고 시간 영역의 해석을 통하여 과도 진동에 의한 오버슈트(over shoot) 발생함을 관측할 수 있으며, 이 때 오버슈트가 1/4 트랙 이상인 경우 TES 의 극성이 바뀌므로 트랙 끌어들이를 행할 수 없다. 다양한 파라미터 수치 시뮬레이션을 통하여 트랙 끌어들이의 최적 위치는 목표 트랙에서 - 1/8 트랙으로 확인하였고, 끌어들이 가능한 최대 상대 속도는 11mm/sec 임을 찾아내었다. 그리고 트랙 끌어들이시 적당한 주파수는 상대 속도와 상

관된 결과이기는 하지만, TES 의 검출 지연에 따른 위상지연 등을 고려하여 불 때 서보 대역의 근방의 주파수로 판단된다. 그러나 보다 다양한 사항에 대해서는 추가적으로 시뮬레이션 및 실험을 행하여 확인해야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

이상을 통하여 광디스크의 트랙 끌어들이에 영향을 미치는 파라미터를 정리하였고 위상평면을 이용하여 해석하였다. 트랙 끌어들이에 사용되는 제어기는 트랙 추종과 동일하므로, 실제 선택 가능한 요소는 트랙과 빔스폿의 상대속도와 트래킹 서보 작동 위치가 된다. 시뮬레이션을 통하여 각 영향을 평가하였고, 최적의 트래킹 서보 작동 위치는 목표 트랙에서 -1/8 전(前)트랙 그리고 주어진 제어 루프에서 트랙 끌어들이가 가능한 최대 상대속도는 11mm/sec 인 것으로 평가되었다. 트랙 끌어들이 기능의 향상을 위하여 브레이크 펄스의 적용이나 과형 변화들을 이용하여 트랙 끌어들이의 영역이나 끌어들이 가능한 상대속도를 증가시킬 수 있으며, 추가적인 사항에 대하여서는 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 한국과학재단(R11-1997-042-11002-2)지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 전홍걸, 박영필, 2000, "평픽업 잔류 진동 저감을 위한 이송 속도 분포 해석", 한국소음진동공학회지, 제 10 권, 제 2 호, pp. 221~228.
- (2) H.-J. Lee, C.-S. Han and S.H. Kim, 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) T. W. McDaniel and R. H. Victora, 1997, "Handbook of Magneto-Optical Data Recording", Noyes Publications, New Jersey.
- (4) G. Bouwhuis et al., 1986, "Principle of Optical Disk Systems", Adam Hilger Ltd, MA.
- (5) M. Suzuki, H. Tanaka and Y. Miura, 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) M. Suzuki, H. Tanaka, Y. Miura, Y. Suzuki, M. Mori, M. Takasago and Y. Tomono, 1993, "Advanced Direct Seeking System for 5.25" Magneto Optical Disk Drive", Japan Journal of Applied Physics, Vol.32, No. 11B, pp. 5371-5375.
- (7) J. Y. Choi, H.G. Jun, H.S. Yang and Y.P. Park, 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) K.B. Jin, T.Y. Doh, J.R. Ryoo and M.J. Chung, 1998, "Robust Direct Seek Control for High-speed Rotational Optical Disk Drives", IEEE Transaction on Consumer Electronics, Vol. 44, No.4, pp. 1273-1283. (1998)