

포/포탑 구동장치의 모드 스위칭 제어기 설계

Mode Switching Control Design for Gun/Turret Driving System

백승문*, 김지영**, 임정빈***, 유준****
 (Seoung-Mun Baek, Ji-young Kim, Jong-Bin Yim, Joon Lyou)

Abstract - To meet an increasing demand for high performance in gun dynamic plant, both a precise and a fast response positioning are strongly required for the gun servomechanism control. A mode switching control(MSC) system, which includes a fine stabilizing controller, fast positioning one and a switching function, is widely used to meet this requirement. Stabilization is performed through PID controller, while proximate time optimal servo(PTOS) is used for target designation. Because gun dynamic have large damping comparing to acceleration, PTOS algorithm with damping is newly derived. This paper adopts the initial value compensation method that improve the transient response after switching. Some simulation results are given to show the effectiveness of our scheme.

Key Words : Mode Switching, Minimum Time Control(PTOS), Stabilization(PID), GTDS

1. 서 론

일반적으로 포/포탑 구동시스템은 차장과 사수가 독립된 조준경을 가지고 서로 다른 물체를 탐지 및 추적할 수 있는 기능을 갖추고 있으며, 다음 두 가지 조건을 만족 시킬 수 있어야 한다. 먼저 표적을 포착한 후에 포/포탑이 표적을 조준할 수 있도록 빠른 속도로 기준 위치에서 다른 위치로 이동되어야 한다. 즉 단위(step) 위치 명령에 대해 오버슈트 없이 정상상태에 도달해야 한다. 또한 표적을 조준한 뒤 포/포탑이 그 위치를 항상 유지할 수 있어야 한다. 즉, 시스템에 외란이 존재하는 경우에도 정상상태 오차가 작아야 한다. 위와 같은 조건들을 모두 만족하는 하나의 제어기를 설계하기란 어려운 문제이므로, 각 조건을 만족하는 제어기를 각각 설계한 후 모드에 따른 스위칭 방법으로 조건을 만족시키게 된다[9]. 따라서 안정화를 위해서는 PID제어기를 빠른 추종성능을 위해서는 PTOS 제어기를 각각 사용하였다. 하지만 모드 스위칭 제어는 스위칭에 의해 과도적으로 시스템의 입력과 출력에 오버슈트가 발생하게 된다. 이 때문에 플랜트 입력이 불안정해지고 정착시간이 길어지는 현상이 발생하는데, 이러한 점프현상을 개선하기 위한 방법들을 요구된다[2].

이에 본 논문에서는 2장에서 포/포탑 구동장치를 모델링하고, 모델링을 바탕으로 3장에서 제어기를 설계하고, 4장에서 과도응답 개선방법과 모드스위칭 방법을 다룬다. 5장에서 시뮬레이션을 통해 모드스위칭의 효과를 검증하고, 6장에서는 본 논문의 결론으로 주요 결과를 요약한다.

2. 포/포탑 구동장치 모델링

2.1 포/포탑 구동장치 Dynamics

포/포탑 구동장치의 플랜트를 강성을 고려하여 유도하면 (1)과 같은 4차의 전달함수 형태로 나타낼 수 있다. 4차의 전달함수로 제어기를 설계하는 데는 많은 제약이 따른다. 설계상의 편의를 위해 포/포탑 구동장치의 플랜트를 강체로 고려하면, (2)와 같은 2차의 전달함수로 나타낼 수 있는데, 두 전달함수의 스텝응답 및 주파수응답을 그림 1로 나타내었다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1790}{S^4 + 8.6S^3 + 4817.4S^2 + 18412S} \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a}{s(s+b)} = \frac{0.3724}{S(S+3.831)} \quad (2)$$

여기서, v ; 속도, a ; 가속도 상수, b ; damping

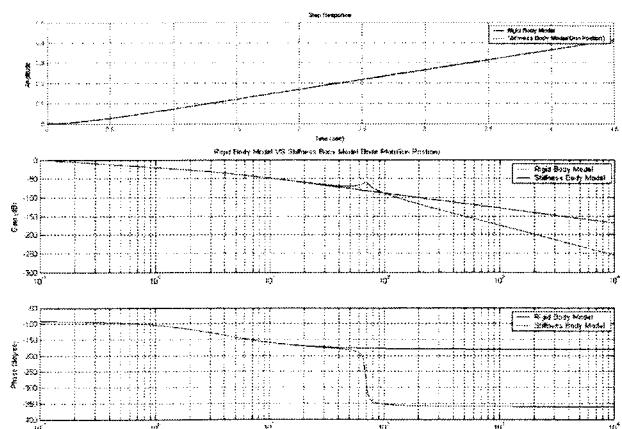


그림 1. 강체모델과 강성모델의 스텝응답과 주파수응답비교

* 準會員：忠南大學 電子工學科 碩士課程

** 準會員：忠南大學 電子工學科 碩士課程

*** 準會員：忠南大學 電子工學科 博士課程

****正會員：忠南大學 電子工學科 教授 · 工博

그림 1의 첫 번째 그림은 두 모델에 Step 입력을 주고 시간 변화에 따른 포의 위치변화를 시간영역에서 나타낸 것으로 거의 일치함을 볼 수 있다. 두 번째와 세 번째는 주파수영역의 이득과 위상을 비교한 것으로 저주파(약 10Hz이하)영역에선 동일한 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 제어기 설계시 모델의 저차 근사화는 많은 장점을 갖는다[19],[20]. 따라서 제어기 설계시는 2차의 강체모델을 활용하고 시뮬레이션을 위해서는 4차의 강성모델을 활용하도록 한다.

3. 제어기 설계

3.1 앞먹임 제어기

포/포탑 구동장치는 차체의 움직임에 의한 외란 때문에 안전성이 저하된다. 외란을 측정할 수 있을 때 앞먹임 제어는 시스템의 출력에 미치는 외란의 영향을 감소시킬 수 있는 유용한 방법이다[16],[17],[18]. 앞먹임 제어는 측정 가능한 외란의 바람직하지 못한 영향이 발생하기 전에 이를 보상함으로써 제어하는 것이다. 되먹임 제어는 발생된 오차를 제어하기 위해 사용되지만 앞먹임 제어는 초기단계에서 발생하려고 하는 오차를 방지하기 위해 사용된다. 그림 2는 동적 앞먹임 제어기의 구조이다.

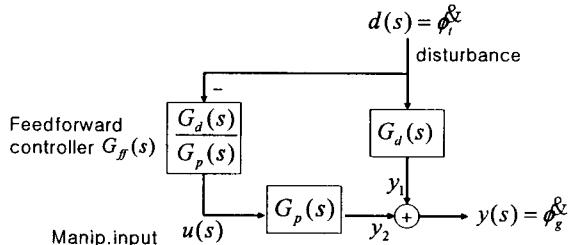


그림 2. 동적 앞먹임 제어기

여기서, $G_p(s)$ 는 플랜트의 입력에 대한 출력의 전달함수이고, $G_d(s)$ 는 외란에 대한 출력의 전달함수이다. 앞먹임 전달함수 $G_{ff}(s)$ 는 (3)식과 같이 $G_p(s)$ 와 $G_d(s)$ 의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$G_d(s) + G_{ff}(s)G_p(s) = 0 \quad (3)$$

이렇게 구해진 앞먹임 제어기 형태는 데드타임(dead time)을 가진 진지상(Lead-Lag) 제어기를 포함한 식으로 표현이 가능하다. 진지상 제어기 풀로 나타낸 전달함수는 (4)와 같다.

$$G_{ff}(s) = \frac{G_d(s)}{G_p(s)} = K_{ff} \frac{T_{ld}s + 1}{T_{lg} + 1} e^{-\theta_{ff}s} \quad (4)$$

여기서, T_{ld} : Lead time, T_{lg} : Lag time, $\theta_{ff}(\geq 0)$: Dead time

그림 3은 동적 앞먹임 제어기 효과를 나타낸 것으로 점선은 제어기가 없는 경우 외란의 영향을 나타낸 것이고, 굵은 실선은 PID만 사용한 경우를 나타낸다. 가는 실선은 앞먹임 제어기와 PID 제어기를 함께 사용한 경우로 PID 단독으로 쓰이는 경우보다 위치오차의 RMS(Root Mean Square)가 50% 가량 감소함을 확인했다[1].

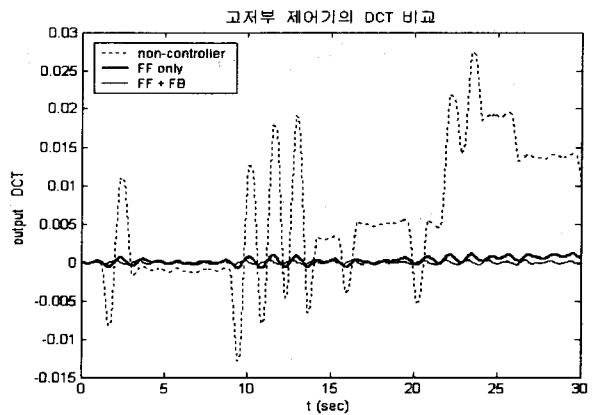


그림 3. 동적 앞먹임 제어기 효과

3.2 정밀 위치/속도 제어(PID)

포/포탑 구동 장치는 1~2km 전방에 나타난 기동표적에 대한 작은 속도명령에도 위치오차가 목표치 아래에 있도록 정밀한 제어가 가능해야 한다. 본 연구에서는 PID 제어기를 사용하여 위치오차를 목표치 아래로 유지하고 작은 속도명령(0.6°/sec)을 추종하는 제어기를 구현하였다.

포/포탑의 관성좌표계에서 속도 측정을 위해 2축 자이로를 포의 중심축에 설치하여 속도 명령에 대한 되먹임 안정화 제어 계통을 구현함으로써 속도 계통의 동적 대역폭을 확장하고 속응성을 개선하여 안정화 성능을 크게 개선할 수가 있다. 되먹임 안정화 제어기는 튜닝값에 따라 정밀한 제어가 가능한 PID 제어기로 구현 하였다[7],[8].

3.3 최단시간 제어(PTOS)

포/포탑 구동장치는 차장과 사수가 독립된 조준경을 가지고 서로 다른 물체를 탐지 및 추적할 수 있는 기능을 갖췄다. 포는 사수 조준경에 종속되어 움직이는데, 차장이 탐지한 표적을 사격하기 위해서는 사수 조준경에 종속된 포 방향을 차장 조준경과 일치시켜주는 과정이 필요하다. 최단시간 제어는 사수 조준경과 차장 조준경의 위치 오차를 '0'으로 만들어 포 방향을 차장 조준경에 최소시간에 일치시켜줄 수 있어야 한다. 이를 위해 기존에는 Bang-Bang 제어기가 사용되어 왔지만[14], Bang-Bang 제어기는 외란이나 플랜트의 변동에 따른 작은 오차에도 최대 입력으로 반응하는 큰 단점을 갖는다. Workman[15]은 제어 성능과 강인성 사이의 관계를 조절 할 수 있는 파라미터를 제안하고, 목표점 부근에서의 선형구간의 도입을 통해 Bang-Bang 제어기가 갖는 목표점 근처에서의 테드존이나 히스테리시스에 의한 채터링(Chattering)을 제거하였다. 일반적인 PTOS 제어식은 (5)과 같다[10-13].

$$f_{ptos}(y) = v(y) = \text{PTOS function}$$

$$f_{ptos}(y) = \begin{cases} -\frac{K_1}{K_2} y & \text{for } |y| > y_t \\ -\text{sgn}(y) \left[\sqrt{2\alpha|y|} - \frac{1}{K_2} \right] & \text{for } |y| \leq y_t \end{cases} \quad (5)$$

여기서 α (acceleration discount factor, $0 < \alpha \leq 1$)의 파라미터를 넣어줌으로써 제어입력의 최대값을 u_{max} 보다

α 의 비율만큼 낮추어서 제어 입력에 대한 플랜트의 포화를 막고, 제어 입력의 포화 상태에서도 플랜트의 제어 가능성의 여지를 남겨줌으로써 강인성을 보장해 준다. 또한 y_l 로 정의된 선형구간 도입을 통해 목표점까지의 위치 오차가 작아질 경우 선형구간 제어로 변환하는 구조를 갖는다. (5)의 PTOS 궤적을 추종하기 위한 제어 규칙은 (6)같은 형태로 결정할 수 있고, 일반적인 PTOS 제어기의 모델은 그림 4와 같다[13].

$$u = u_{\max} \cdot sat \left(\frac{K_2 (f_{ptos}(y) - v)}{u_{\max}} \right) \quad (6)$$

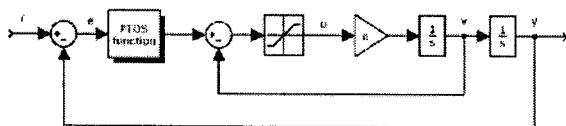


그림 4. PTOS 제어기 구조

일반적인 PTOS 제어에서는 플랜트가 가지는 damping이 없다고 가정하고 제어기를 설계한다. 그러나 실제 시스템에서 damping(b)을 무시할 수 없는 모델이 더 일반적이고, 본 논문에서 다루고자 하는 포/포탑 구동장치의 damping(b)은 가속도(a)에 비해 상대적으로 매우 큰 값이다. 따라서 이를 고려한 PTOS 제어기를 새롭게 유도할 필요가 있다[3]. (7)은 damping 고려해 유도된 PTOS 제어기 수식이다[1].

$$f_{ptos}(y) = \begin{cases} -\frac{K_1}{K_2} y & , \text{for } |y| > y_l \\ -by + \frac{a\alpha}{b} u_{\max} \operatorname{sgn}(y) \ln \left(1 + \frac{b}{au_{\max}} |y| \right) & , \text{for } |y| \leq y_l \\ -\operatorname{sgn}(y) \frac{u_{\max}}{K_2} & \end{cases} \quad (7)$$

K_1, K_2 값은 $y=y_l$ 인 지점에서 두 식의 값이 일치한다는 조건을 이용하여 구할 수 있다[4].

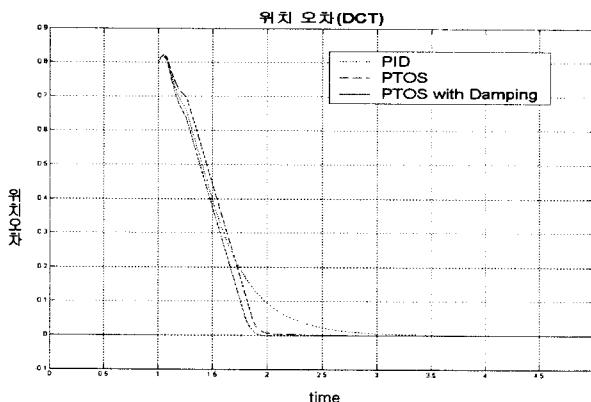


그림 5. 제어기 성능비교

Damping을 고려한 PTOS 제어기의 성능검증을 위해 MATLAB을 이용해 포/포탑 구동장치 시뮬레이션 모델을 구성하고 PID제어기, PTOS 제어기, Damping을 고려한 PTOS 제어기의 각각에 대해 0.785rad(45°)의 위치오차를 주고 성능

을 비교해 그림 5를 얻었다.

그림에서 보는 것처럼 Damping을 고려한 PTOS 제어기를 이용하는 경우 정착시간이 가장 짧아 가장 우수한 제어 성능을 나타낸음을 볼 수 있다.

4. 모드 스위칭

4.1 모드 스위칭 구조

그림 6은 스위칭 제어의 구조를 블록도로 나타낸 것이다. 위치오차에 따라 제어모드를 변경하며, 그에 따라 제어기가 선택된다. 즉, 위치오차가 증가하게 되면 최단시간 제어기로 스위칭 되어 빠른 시간에 위치오차를 줄이고, 위치오차가 감소하여 정해진 범위 내에 들어오면 최소오차 제어기로 스위칭 되어 정밀한 제어가 가능하다.

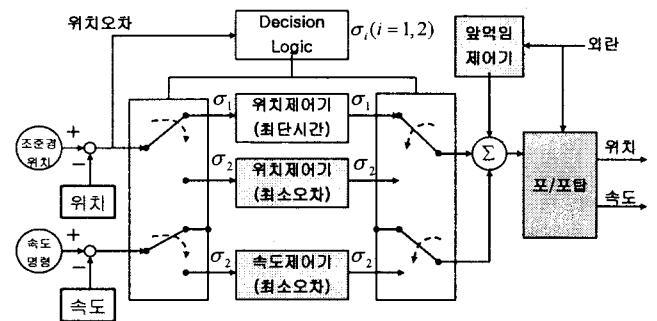


그림 6. 스위칭 제어의 블럭도

위치오차가 0.2rad(약 11.4°)이내일 경우 최소오차 제어모드(PID 제어기)로 스위칭하고, 위치오차가 0.2rad을 초과하는 경우는 최단시간 제어모드(PTOS 제어기)로 스위칭하도록 스위칭 조건을 주었다.

4.2 초기값 보상방법(Initial Value Compensation)

서론에서 언급한 것처럼 최단시간 제어모드(PTOS)에서 안정화 제어모드(PID)로 변경되는 경우 발생하는 과도응답을 개선하기 위한 방법이 필요한데, 이를 위해 Anti-Windup, Bumpless, Conditioned Transfer, 초기값 보상방법등이 쓰인다[5],[6]. 본 논문에서는 포/포탑 구동 시스템에 가장 적합한 초기값 보상 방법을 적용하였다[1],[5],[6].

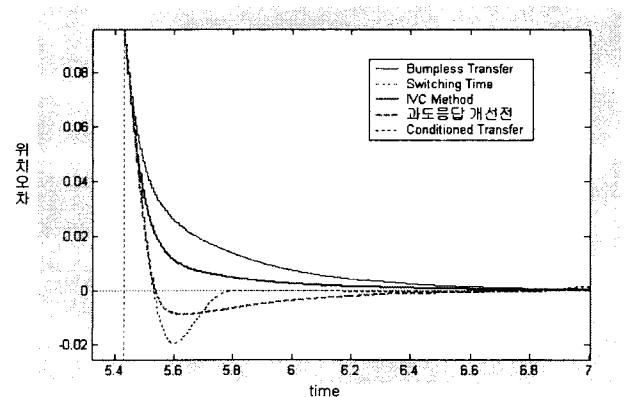


그림 7. 과도응답 개선법 비교

그림7은 스위칭에 의한 과도응답을 개선하는 몇 가지 방법을 비교한 것으로 오버슈트가 없고 정착시간이 비교적 짧은 초기값 보상방법이 포/포탑 구동장치에 가장 적합하다.

초기값 보상방법은 스위칭시 제어기의 상태를 가격함수를 최소로 하는 값으로 초기화 하여 과도응답 특성을 개선한다.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} x(t)^T Q x(t) = \bar{x}(t_0) P \bar{x}(t_0) \quad (8)$$

$$\bar{A}^T P + P \bar{A} = -Q \quad (9)$$

여기서 P 는 Symmetric Positive Definite(SPD)한 가중행렬 Q 에 대해 (9)의 Lyapunov 방정식을 만족하는 유일한 SPD한 해이다.

$$\text{즉, } J = [x_P^T(t_0) \ x_I(t_0)] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p(t_0) \\ x_I(t_0) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$J(>0)$ 이고 quadratic이므로 $x_I(0)$ 에 대한 J 의 최소값은 존재 한다.

$$\frac{dJ}{dx_I(t_0)} = 2P_{11}x_I(t_0) + 2P_{12}x_p(t_0) = 0$$

$$x_I(t_0) = -P_{11}^{-1}P_{12}x_p(t_0) \quad (11)$$

스위칭 순간에 적분제어기의 초기값을 (11)과 같이 지정할 경우 정착시간을 최소화 할 수 있다.

5. 시뮬레이션

지금까지 포/포탑 구동장치 제어를 위한 제어기법과 모드 스위칭 방법에 대해 다루고, 타당성 검토를 위한 시뮬레이션 결과를 그래프로 비교하여 나타내었다. 각각 검증된 제어기와 모드스위칭 방법을 연동하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 8과 9는 포/포탑 구동장치에 입력을 주었을 때 제어 입력과 시스템 출력의 변화를 나타낸 것이다. 점선은 스위칭 신호이고, 실선은 스위칭 신호에 따라 변하는 제어 입력(그림 8)과 시스템 출력(그림 9)이다.

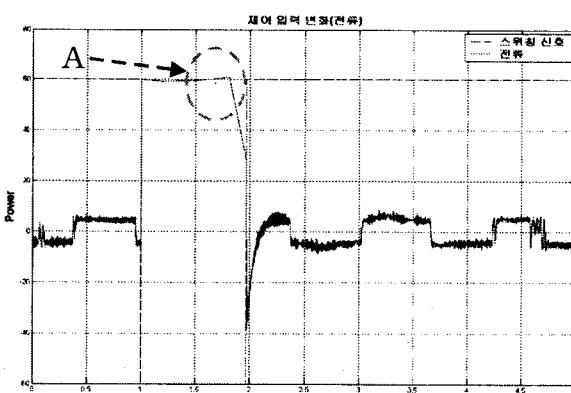


그림 8. 제어 입력의 변화

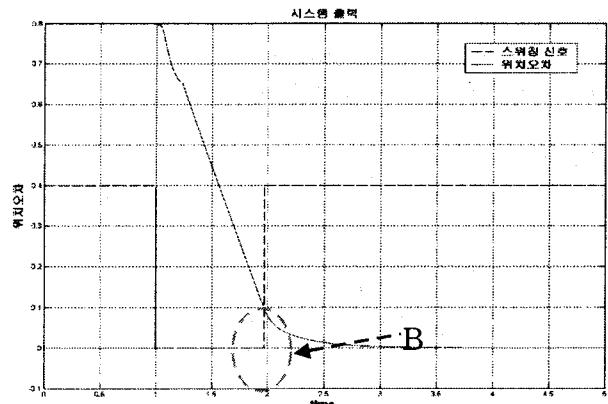


그림 9. 시스템 출력의 변화

시간 1초에서 $0.78\text{rad}(45^\circ)$ 의 위치오차가 입력으로 들어오면 스위칭 신호에 의해 PTOS 제어기로 연결되어 최단시간 제어를 하고, 위치오차가 0.1rad 이하가 되면 그림 8, 9에 나타난 것처럼 스위칭 신호에 의해 PID 제어기로 연결되어 정밀 제어를 한다. A는 PTOS내에서 선형구간으로 연결되는 것을 나타내고, B는 PTOS에서 PID로 스위칭 하는 시점을 나타낸 것으로 초기값 보상방법에 의해 과도응답이 적절히 개선되었음을 보여준다.

6. 결 론

최소오차와 최단시간 제어의 두 요구조건은 포/포탑 구동장치의 성능과 직결되는 문제로 중요한 연구 분야이다. 본 논문에서는 두 요구조건을 동시에 만족시키기 위해 모드 스위칭기법을 사용하였다. 모드 스위칭 기법과 PTOS 제어기는 Disk Drive 제어분야에서 광범위하게 사용되어 왔지만, 포/포탑 구동장치는 Disk Drive와 물리적 특성의 차이를 가지고 있으므로 이를 고려한 PTOS 제어기를 새롭게 설계하였고, 모드 스위칭 방법들을 도출하였으며, 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 추후 본 연구를 바탕으로 제어기를 디지털화하여 실제 시스템에 적용함으로 제어성능의 향상을 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 유준, 강민식, 임선종, 임정빈, 김지영, 백승문, “기동간 사격통제장치 성능/안정성 최적설계”, 국방과학연구소 위탁연구과제 연차보고서, 2004. 01.
- [2] Y.Peng, D.Vrancic, R.Hanus “Anti-Windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques for PID Controller”, IEEE, August.1996.
- [3] M.Sun, Y.Wang, “Design of a HDD Servomechanism with Proximate Time Optimal Sliding Mode”, IEEE, 2002.
- [4] S.Brooke “Design of a proximate time optimal servo for the JCMT chopping secondary”, JCMTElectronics Group Joint Astronomy Centre.
- [5] T.Yamaguchi, K.Shishida, H.Hirai, K.Tsuneta, and M.Sato, “Improvement of servo robustness for digital sector servo system”, IEEE Trans. Magn., vol.

M28-5, pp.2910-2912, Sept. 1992.

- [6] T.Yamaguchi, K.Shishida, H.Hirai, "Mode Switching Control Design with Initial Value Compensation and Its Application to Head Postionsg Control on Magnetic Disk Drives", IEEE Trans. vol. 43, no. 1, pp.65-73, Feb.1996
- [7] B.C Kuo, Automatic Control Systems, John Wiley & Sons, seventh edition, 1995.
- [8] Franklin, Powell, Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, Fourth Edition, Prentice Hall, 2002.
- [9] V.Venkatramanan, B.M.Chen, T.H.Lee and G.Guo, "A new approach to the design of mode swithching control ih hard disk servo systems" Control Enginnering Practice Oct.2002. 935-939
- [10] G. F. Franklin, J.D. Powell, and M.L.Workman, *Digital Control of Dynamics systems 3rd ed,* Addison-Wesley, 1990.
- [11] D.Q.Zhang and G.X.Guo, and V.Venkatramanan, "Discrete-time sliding mode proximate time optimal seek control of hard disk drives", IEE Proc., Control Theory Appl., vol. 147, pp.440-446, Jul.2000.
- [12] B.M.Chen, T.H.Lee, *Hard disk drive servo systems,* Springer. 2002
- [13] S.H.Lee, S.H.Chu and C.C.Chung "Analysis and Design of Servomechanism and Its Application to Disk Drives", IEEE Trans
- [14] J.W.Jang "이산 시변 슬라이딩 모드 제어를 이용한 하드디스크의 탐색 제어" a master's thesis, Hanyang University.
- [15] Workman, M. "Adaptive proximate time-optimal servomechanism", (Ph.D.Dissertation),Stanford Univ.CA,1987.
- [16] K. J. Astrom, Control System Design, Chapter 8, 2002.
- [17] Goodwin, Graebe, Salgado, *Control System Design, Chapter 10,* Prentice Hall, 2001.
- [18] M. Morari, E. Zafiriou, Robust Process Control, Chapter 6, Prentice Hall, 1989.
- [19] E.J.Davision "A Method for Simplifying Linear Dynamic Systems", IEEE, JAN, 1966.
- [20] B.C.Kuo, *Automatic Control Systmems 7th ed,* WILEY, 1995.