

# 램프 로드/언로드 HDD 에서의 향상된 속도 제어

## Improved Velocity Control in Ramp Load/Unload HDD

송연철\*·박성원\*·정준\*\*·박태욱\*\*\*·양현석\*\*\*\*·박영필\*\*\*\*

Yeon-Chul Song, Sung-Won Park, Jun Jeong, Tae-Wook Park, Hyun Seok Yang and Young-Pil Park

**Key Words :** Load/Unload, Velocity Control, BEMF, Feedforward, Disturbance Observer, HDD.

### ABSTRACT

A load/unload mechanism is applied to most small form factor hard disk drives. Loading velocity is one of the most important factors to ensure the reliability of the load/unload operations. Especially, the lower the flying height of the head becomes, the more important the accuracy of the loading velocity control becomes. Because there is no sensor during the load/unload operations, BEMF voltage is used to sense the head velocity. To measure BEMF voltage, a simple circuit is added to the load/unload HDD control system. Overall acceptable results are obtained by using the simple PI controller but the errors from the target velocity occur when the head moves along the ramp and then reaches the disk. Feedforward profile and disturbance observer are used to remove those errors effectively.

### 1. 서 론

하드 디스크 드라이브(HDD)는 가격당 저장용량과 데이터를 읽고 쓰는 속도에서 장점을 보이기 때문에 다른 정보 저장 기기에 비하여 널리 이용되고 있다. 최근에는 노트북이나 mp3 플레이어 등 휴대용 정보기기의 수요가 증가하고 있고 이에 발맞춰 small form factor HDD 에 대한 요구도 증가되고 있다.

데스크톱 컴퓨터에 사용되고 있는 3.5 인치 HDD 는 CSS(Contact Start Stop)방식을, 휴대용 저장 기기에 사용되고 있는 2.5 인치 이하 HDD 는 L/UL(Load/Unload)방식을 채택하고 있다. L/UL 방식은 CSS 방식에 비하여 낮은 헤드의 부상 높이로 인한 먼 기록 밀도의 증가, 소비 전력의 저감, 비동작 시 내 충격성의 증대 등의 장점을 가지고 있다[2]. 그럼에도 불구하고 그 동안은 기계적 단순함 때문에 CSS 방식의 HDD 가 주로 이용되어 왔다. 그러나 최근 휴대용 기기의 수요 증가는 L/UL 방식의 HDD 의 장점을 요구하고 있다.

L/UL 가 이루어 질 때 램프 프로파일, slider burnish, 디스크 회전속도, VCM 속도, 그리고 덤플 예압 등이 영향을 미친다[3]. 특히, 디스크와의 충돌을 방지하기 위해 VCM 의 L/UL 속도를 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 앞으로 헤드의 부상

높이가 더욱 낮아짐에 따라 더욱 더 정확한 L/UL 속도 제어가 필요하게 될 것이다.

헤드가 램프 영역에 있을 때는 디스크 상에 있는 서보 패턴을 이용할 수 없다. 별도의 센서를 이용할 수 있지만 비용이나 공간 문제를 고려했을 때 현실적이지 못하고, VCM 에 일정한 전압 프로파일을 가하는 것은 속도 편차가 크기 때문에 안정적이지 못하다. [1]에서는 VCM 의 역기전력(BEMF)을 측정하는 회로에 적절한 보정 방법을 더해서 속도를 검출하였다. 그것을 이용한 L/UL 속도 제어 결과를 보여주고 있다. 전반적으로 안정적인 속도 제어 결과를 확인할 수 있지만 실제로 로딩이 이루어지는 순간, 즉 헤드가 램프에서 디스크 위로 이동하는 구간에서는 큰 외란으로 인해 목표 속도를 완전히 따르지 못하고 어느 정도의 오차가 남아있는 것을 확인할 수 있다. 본 논문은 그러한 로딩 순간의 속도 오차를 더욱 줄이기 위하여 PI 제어기에 피드 포워드 프로파일과 외란 관측기를 적용하였다.

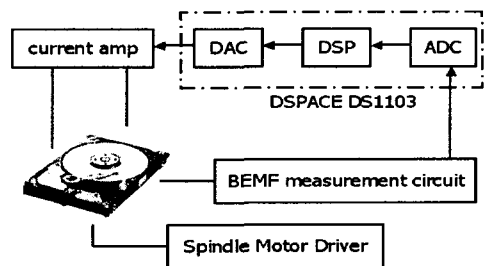


Fig. 1. Load/Unload HDD 속도제어 실험 장치

\* 연세대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : songyc96@hotmail.com  
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

\*\* 삼성전자 스토리지 사업부

\*\*\* 연세대학교 정보저장공학과

\*\*\*\* 연세대학교 기계공학과

## 2. 실험 장치

본 논문에서는 삼성 2.5 인치, 30GB, 5,400rpm 노트북용 HDD 를 실험에 이용하였다. Fig.1 과 같이 실험 장치를 구성하였다. DSP(DSPACE DS1103 PPC Controller Board)와 전류 앰프를 통하여 제어 입력을 가하고 디스크 회전으로 인한 외란 효과를 실제와 같게 하기 위하여 스피들 모터 드라이버로 디스크를 회전시켰다. 속도를 검출하기 위한 방법으로 BEMF 측정 회로가 추가되었다.

### 2.1 시스템 모델링

VCM의 속도를 제어하는 것이 목적이기 때문에 전류 입력에 대한 속도 출력의 전달함수를 찾아야 한다. Digital Signal Analyzer 를 통하여 원하는 주파수 범위로 정현파 입력을 가하고 LDV 로 head 의 움직임을 측정하여 Fig.2 와 같은 VCM 의 주파수 응답 특성을 얻었다. VCM 이 램프 구간에서 작동하기 때문에 그 부분에서 주파수 응답을 얻는 것이 좋지만 래치 자석의 영향이 커서 데이터를 얻는 것이 쉽지 않았기 때문에 램프에서 가까운 디스크 바깥 지름 쪽에서 주파수 응답을 얻었다. 주파수 응답 결과에서 저주파 영역의 크기가 작아지는 것은 피벗 베어링의 마찰력 때문이다. 이렇게 하여 얻은 주파수 응답을 이용하여 아래와 같은 형태의 전달함수  $G_p$  을 얻을 수 있다.

$$G_p(s) = \frac{\Omega(s)}{I(s)} = \frac{\beta}{s + \alpha} = \frac{K_T}{Js + a} \quad (1)$$

여기서, 입력은 전류  $I(s)$ , 출력  $\Omega(s)$  는 VCM 의 속도를 나타낸다.  $\alpha$  는 VCM 의 질량 관성 모멘트와 토크상수에 의해 결정되는 값이고  $\beta$  는 피벗 베어링의 마찰 특성에 의해 결정되는 값이다.

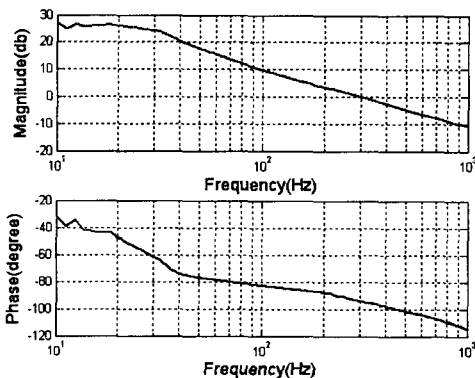


Fig. 2. VCM 의 주파수 응답 특성

### 2.2 속도의 측정

역기전력(BEMF)은 아래 식과 같이 속도에 비례하는 성질을 가지고 있다.

$$V_{BEMF} = K_T \omega \quad (2)$$

여기서,  $K_T$  는 토크 상수를 나타낸다.

따라서, BEMF 와 토크 상수를 알고 있으면 속도 정보를 얻을 수 있게 된다. BEMF 는 Fig.3 과 같은 회로를 추가하면 측정할 수 있다. 그 회로에 대한 분석과 그 결과는 [1]에 설명되어 있다. 여기에서는 그 결과만 수록하도록 하겠다.

$$V_{MEAS} = SI_M + \frac{R_4}{R_3} V_{BEMF} + V_{OFFS} \quad (3)$$

여기서,  $S = \frac{R_4}{R_3} \left( R_M - \frac{R_2}{R_1} R_S \right)$  와

$$V_{OFFS} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{R_4}{R_3} V_{01} + \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) V_{02} + V_{REF}$$

타낸다.

ADC 를 통해 측정된  $V_{MEAS}$  에 [1]에서 소개하는 보정 방법을 더하면 BEMF 전압을 얻을 수 있다.

토크 상수는 LDV 를 통해 측정된 속도와 그 때 Fig.3 의 회로를 통해 얻을 수 있는 BEMF 전압을

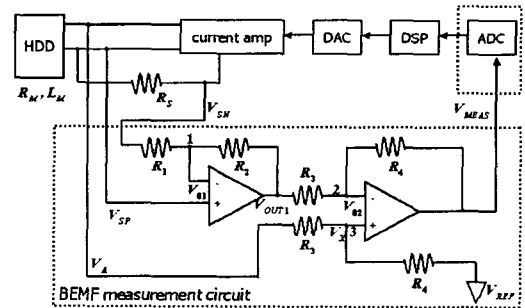


Fig. 3. BEMF 측정 회로

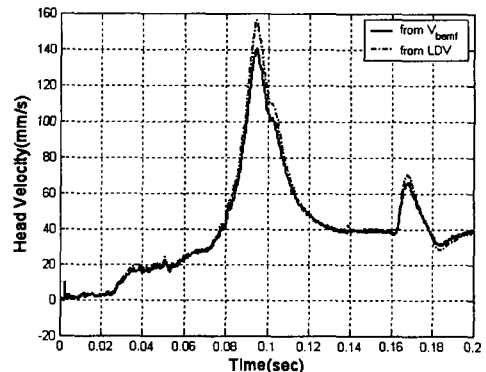


Fig. 4. LDV 에 의한 속도 측정 결과와 BEMF 전압에 의한 속도 측정 결과 비교

비교함으로써 그 값을 추정할 수 있다. Fig.4 는 LDV 를 통해 측정된 속도와 BEMF 전압을 통해 측정된 속도를 비교한 것이다. 속도가 갑자기 변하는 부분에 작은 오차가 존재하는 것 이외에는 전체적으로 같은 모양임을 확인할 수 있다. 이렇게 하여 얻은 토크 상수를 속도 계산에 이용하였다.

### 3. 제어기의 적용

#### 3.1 PI제어기 적용 결과

본 논문에서는 [1]에서의 같이 PI 제어기를 이용하였다. DSP 를 통한 디지털 제어가 이루어지기 때문에 PI 제어기는 아래와 같은 형태가 된다.

$$G_C(z) = \frac{a_0 z + a_1}{z - 1} \quad (4)$$

샘플링 시간과 외란이 시스템에 미치는 결과 등을 고려하여  $a_0, a_1$  을 선정하였다. 목표 속도를  $40 \text{ mm/s}$  으로 한 로딩 과정의 제어 결과는 Fig.5 와 같다.

각 부분에서 속도가 목표 속도를 따르지 못하는 이유는 다음과 같다[1]. ①에서는 강한 마그네틱 래치를 벗어나기 위해 순간적으로 속도가 증가하였다. ②에서는 틱택이 램프의 평탄한 부분으로 진입하는 시점으로 이 때는 서스펜션 예압이 VCM 의 회전방향에 영향을 미치지 않기 때문에 순간적으로 속도가 증가하게 된다. 그리고 진정한 로딩이 이루어지는 ③에서는 서스펜션 예압이 속도가 증가하는 방향으로 작용하여 순간적으로 속도가 증가하였다가 슬라이더와 디스크 사이에 형성되는 음압력이 속도를 줄이는 방향으로 작용하기 때문에 다시 속도가 갑자기 줄어드는 것을 볼 수 있다.

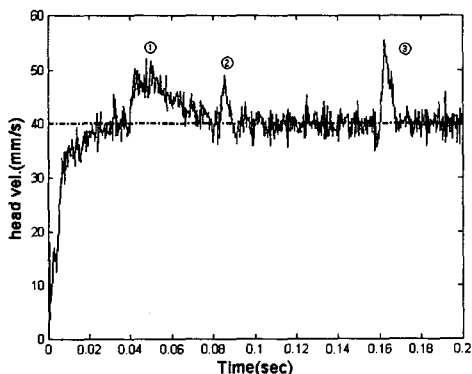


Fig. 5. Loading 시 PI 속도 제어

진정한 로딩이 이루어지는 ③구간에서의 속도의 안정성이 가장 중요한데 그 구간에서의 외란이 크기 때문에 단순 PI 제어기로는 정확한 속도 제어가 힘든 것을 확인할 수 있다. 따라서 다음 절에서는 그 해결책에 대하여 이야기를 하도록 하겠다.

#### 3.2 피드 포워드 프로파일 형성과 적용

③구간에서 작용하는 외란을 분석하고 그 크기에 반대되는 제어 입력을 그 시점에 맞추어서 가해주면 그 외란의 영향을 소거할 수 있게 된다. Fig.6 의 블록 선도를 보자.

출력은 아래와 같은 식으로 결정된다.

$$y = \frac{CP}{1+CP} r + \frac{P}{1+CP} d = G_{ry} r + G_{dy} d \quad (5)$$

여기서  $P$  는 플랜트,  $C$  는 제어기를 나타낸다. 위 식으로부터 외란  $d$  는 아래와 같이 계산된다.

$$d = G_{dy}^{-1} (y - G_{ry} r) \quad (6)$$

이 계산을 수행하기 위해서는  $G_{dy}^{-1}$  을 계산해야 한다. 그것을 위해서 SPZ(Stable Pole Zero cancellation)이나 ZPETC(Zero Phase Error Tracking Controller)의 방법을 이용할 수 있다[4]. 그러나 여기에서는 이 방법들을 사용하는 데 문제가 있다.  $G_{dy}$  식의 특성상 분자에  $B^-(z) = z - 1$  이 들어가게 되는데  $G_{dy}^{-1}$  을 할 때 분모에  $B^-(1)$  이 들어가게 되어 더 이상 계산을 수행할 수 없게 된다. 그것 대신에  $B^-(e^{j\omega T})$  을 대입하여 특정 주파수에 대한 계산만 정확하게 할 수도 있지만 여기서는 전체적으로 정확한 외란을 분석하는 것이 목표이기 때문에 적절한 방법이 아니다. 따라서 본 논문에서는 수치적인 계산 방법을 이용하여 외란을 분석하도록 하겠다.

[5]에서는 선형 계획법(Linear Programming)을 이용하여 VCM 탐색 제어에서 최적화된 피드 포워드 프로파일들을 구성한 바 있다. 그와 유사하게 아래와 같은 비선형 가격함수에 대하여 제한 조건이 있을 때 최적 해를 주는 함수('fmincon' in MATLAB)를 이용하여 수치적인 계산을 하도록 하겠다.

$$\text{가격함수: } \min F(x) \quad (7)$$

$$\text{제한조건: } A_{eq} x = B_{eq}, \quad A_{ineq} x \leq B_{ineq}$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (8)$$

위 식을 적용하기 위해서 convolution 행렬을 도입하도록 한다. Convolution 행렬을 이용하면 시간 영역에서 전달함수를 계산할 수 있게 된다. 아래와 같이, s 영역에서 전달함수와 입력의 곱은 시간 영역에서 convolution 행렬과 시간 순서로 이루어

지는 입력 벡터의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$G(s)U(s) = H_G \times u \quad (9)$$

여기서  $H_G$  는 convolution 행렬로 아래와 같이 된다.

$$H_G = \begin{bmatrix} [h_G] & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ \leftarrow & h_G & 0 & \vdots & 0 \\ \leftarrow & & h_G & \vdots & 0 \\ & & & \vdots & \vdots \\ \leftarrow & & & & h_G \end{bmatrix} \quad (10)$$

$h_G$  는 임펄스 응답,  $u$  는 입력의 시간영역 벡터를 나타낸다.

피드 포워드 항을 추가하여 식 (5)를 다시 쓰면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} y &= \frac{CP}{1+CP}r + \frac{P}{1+CP}(d+f) \\ &= G_{ry}r + G_{dy}f + G_{dy}d \\ &= H_{ry} \times r + H_{dy} \times f + H_{dy} \times d \end{aligned} \quad (11)$$

목표 속도에서 벗어나는 것은 외란에 의한 것이므로 목표 속도  $r$  과 출력  $y$  와의 차이를  $H_{dy} \times d$  라고 한다. 지금 관심을 갖고 있는 ③구간에서만 외란을 고려한다.

이제 식 (7), (8)을 적용하도록 하겠다. 값을 결정해야 할 변수  $x(=f)$  는 피드 포워드 프로파일이 된다. 가격함수는 ③구간에서의 에러로 그것이 최소화 되도록 만들어야 한다. 등식 제한 조건은 식 (11)로부터 아래와 같이 된다.

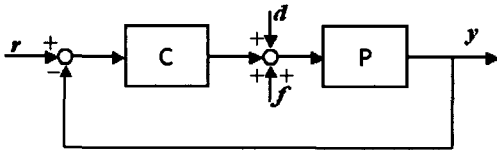


Fig. 6. 시스템 블록선도

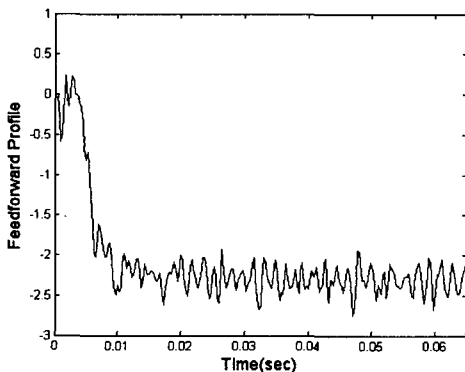


Fig. 7. 피드 포워드 프로파일

$$H_{dy} \times f = y - H_{ry} \times r - H_{dy} \times d \quad (12)$$

그리고 변수  $f$  는 제어 입력 한계만큼 제한된 값을 가져야 한다. 이러한 조건들을 이용하여 비선형 가격함수를 최소화하는 함수를 풀면 Fig.7 과 같은 피드 포워드 프로파일을 얻을 수 있다.

이것을 적용하는 시점을 정해야 한다. 헤드가 파킹되어 있는 지점에서부터 디스크위로 올라가는 지점까지의 거리가 일정하므로 이용 가능한 속도 정보를 적분하여 위치 정보를 얻는다. 그것을 이용하여 일정한 거리가 되면 피드 포워드 프로파일을 제어입력과 함께 가하면 된다.

피드 포워드 프로파일을 적용한 결과는 Fig.8 과 같다. 위쪽 그림은 피드 포워드 프로파일을 적용한 시점이 제대로 맞은 경우이고 아래쪽 그림은 그 시점이 잘 맞지 않은 경우이다. 위쪽의 경우 ③구간을 보았을 때 단순히 PI 제어만을 했을 때보다 목표 속도를 잘 따르고 있지만 아래쪽의 경우는 외란이 제대로 제거되지 못한 모습을 보이고 있다.

이 방법은 비교적 간단한 구조와 방법으로 중요한 부분의 외란을 극복할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 복잡한 계산 없이 단순히 값을 기억하는 것만으로 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 앞의

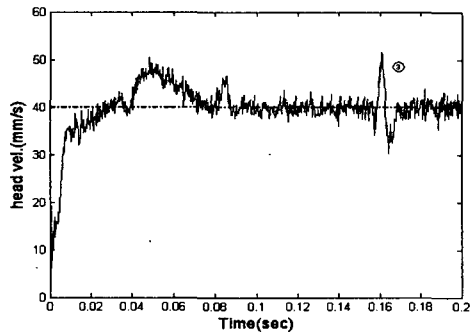
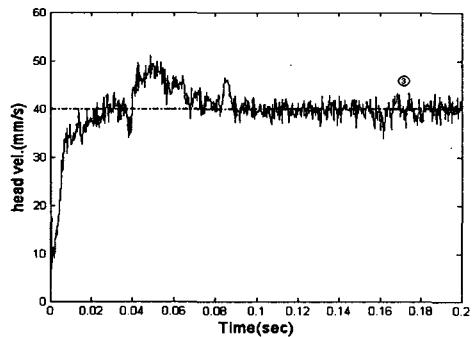


Fig. 8. 피드 포워드 프로파일을 이용한 로딩 속도 제어 결과

경우와 같이 피드 포워드 프로파일을 적용하는 시점에 주의를 기울여야 한다. 적용 시점이 몇 샘플의 오차만 생겨도 피드 포워드 효과는 아주 반감되게 된다. 여기에서는 속도 적분을 통해 얻은 위치 정보를 가지고 적용 시점을 결정하였는데 그것을 보완하기 위한 다른 구속 조건들이 더 필요할 것이다.

### 3.3 외란 관측기

#### 3.3.1 외란 관측기의 구조

외란과 모델링 에러에 의한 효과를 제거하기 위한 방법으로 Fig.9 와 같은 구조의 외란 관측기가 있다. 추가적인 센서의 도움 없이 외란을 제거할 수 있는 아주 효과적인 방법이다[6]. ③구간에 작용하는 외란을 효과적으로 제거하기 위해서 외란 관측기를 이용하도록 하겠다.

Fig.8 에서 출력  $y$  에 대하여 정리하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$y(s) = G_{u^*} u^* + G_{dy} d + G_{ny} n$$

$$G_{u^*} y = \frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q}$$

$$G_{dy} = \frac{PP_n(1-Q)}{P_n + (P - P_n)Q}$$

$$G_{ny} = \frac{-PQ}{P_n + (P - P_n)Q}$$

$Q=1$  이면  $G_{u^*} y \approx P_n, G_{dy} \approx 0, G_{ny} \approx -1$  이 되어 외란이 출력에 나타나지 않게 할 수 있다. 그러나 노이즈의 영향이 커지게 된다.  $Q=0$  이면  $G_{u^*} y \approx P, G_{dy} \approx P, G_{ny} \approx 0$  가 되어 노이즈의 영향은 없어지지만 외란 억제 효과는 얻을 수 없다. 일반적으로 노이즈는 외란이나 제어 입력보다 고주파이므로  $Q$  를 저주파 통과 필터로 설계하면 좋은 외란 제거 효과를 얻을 수 있다.

#### 3.3.2 외란 관측기 적용 결과

외란의 주파수 대역과 노이즈의 영향을 고려하여  $Q$  필터를 설계하였다. 외란 관측기를 ③구간에만 적용하지 않고 전체 구간에 대하여 적용하였다. 그 결과는 Fig.10 과 같다. 과도 응답에서의 overshoot 이후에 ①, ②, ③구간에 작용했던 외란을 모두 제거하고 목표 속도에 비교적 잘 따르고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig.8 과 Fig.10 을 비교해 보면 실제 로딩이 이루어지는 ③구간에서 Fig.10 은 Fig.8 보다 약간의 속도 오차가 더 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그것은 피드백 구조이기 때문에 발생하는 지연과

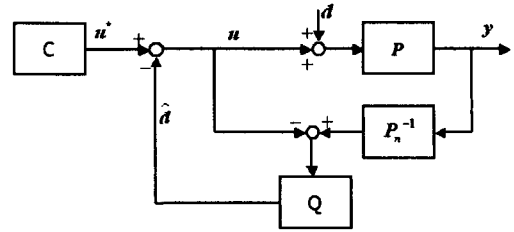


Fig.9. 외란관측기의 구조

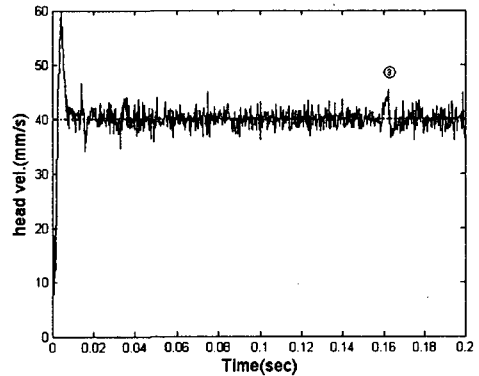


Fig. 10. 외란관측기 적용한 로딩 속도 제어

$Q$  필터의 대역폭으로 인한 것이다. 따라서 성능면에서는 앞의 방법보다 약간 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이 방법은 피드백 구조이기 때문에 적용시점에 크게 주의를 기울이지 않아도 되고 외란 조건이 변하더라도 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

## 4. 결론

로드/언로드 방식의 HDD 는 안정적인 로드/언로드를 위해서 정확한 속도 제어를 필요로 한다. BEMF 전압을 이용하여 서보 패턴이 존재하지 않는 램프 구간에서도 제어를 가능하게 하였다. PI 제어기로는 실제 로딩이 일어나는 순간의 속도 편차를 완전히 줄일 수 없어 피드 포워드 프로파일이나 외란 관측기를 이용하여 그것을 극복하였다. 피드 포워드 프로파일을 이용했을 때는 외란 제거 성능 면에서 보다 만족스러운 결과를 주었지만 적용시점에 많은 주의를 기울여야 했다. 외란 관측기를 이용했을 때는 외란 제거 성능은 앞의 방법보다 조금 떨어졌지만 적용시점의 문제가 없었고 외란의 변화에 대하여 대응할 수 있다는 장점을 가지고 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기연구센터의 지원(R11-1997-042-11000-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

(1) 정준 등, 2004, “램프 로드/언로드 HDD의 역기전력을 이용한 VCM 속도 제어”, 춘계학술대회논문집, pp730~735

(2) T.R. Albrecht and F. Sai, 1999, “Load/Unload Technology for Disk Drives”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35.

(3) Qing-Hua and David B. Bogy, 2000, “Effect of Certain Design Parameters on Load/Unload Performance”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36.

(4) M.Tomizuka, 1987, “Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control”, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, pp.65~68.

(5) Ho Seong LEE, 2003, “Optimization of Position Mode Seek Control For Hard Disk Drives”, JSME-IP/ASME ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment.

(6) Matthew T. White, 2000, “Improved Track Following in Magnetic Disk Drives Using a Disturbance Observer”, IEEE Transactions on Mechatronics, Vol 5.