

HIGH-TPI HDD 구현을 위한 PES ESTIMATION에 관한 연구

A Study on the PES Estimation for Developing High-TPI HDD

⁰고정석*, 강성우**, 한윤식**, 김영훈**, 황태연**

⁰Jeong-Seok Koh*, Seong-Woo Kang**, Yun-Sik Han**, Young-Hoon Kim**, Tae-Yeon Hwang*

Key Words: Hard disk drive(HDD), Position error signal(PES), Torque disturbance, displacement disturbance, Error transfer function

ABSTRACT

A frequency-domain PES estimation and its prediction method are proposed for the tightly-coupled servo/mechanical design of high-TPI HDD system above 100 kTPI. The major two disturbance energies which are related with mechanical vibrations inside of HDD are used to predict the drive-level PES, while considering closed-loop servo dynamics. One is the torque disturbance which mainly comes from aerodynamic excitation of HSA system and the other is the displacement disturbance from disk-spindle dynamics. In order to obtain the accurate error transfer function of closed-loop servo control, the plant model is measured by accurate experiment. The measured PES is compared with predicted one in terms of frequency-domain PES spectrum and its standard variation value. It is proved that the proposed frequency-domain PES estimation/prediction method is capable of predicting drive-level PES of high-TPI hard disk drive.

1. 서론

최근 고기록밀도 HDD(Hard Disk Drive)를 개발하기 위한 Servo-Mechanical Engineering 입장에서, Mechanical Component 설계 성능, 서보제어기 성능 및 Noise 성분에 의한 Head의 PES(Position Error Signal)에 미치는 영향을 미리 추정하여 예측설계하려는 노력이 다각도로 이루어져왔다[1-6]. 그러나 100 kTPI(Track Per Inch)에 가까이 Track 밀도가 급속히 증가한 최근의 HDD 고밀도 설계에 있어서, HDD의 PES로부터 각 Mechanical Vibration 각 성분들의 역할을 역추정하는 방법은 그 추정 정밀도가 급속히 떨어지게 되고, 또한 Mechanical Design 후 Servo 제어를 적용한 이후에야 PES를 알 수 있는 Trial-and-Error 기초의 최적설계에 의존하게 되므로 Mechanical-Servo 동시예측설계 입장에서 매우 불리하다고 할 수 있다. 또한, NRRO PES

예측/기여도 분석에 대하여는 많은 연구가 이루어진 반면, 최근의 100 kTPI 급 HDD에서 큰 문제로 떠오르고 있는 Written-in RRO PES 예측설계방법론에 대하여는 거의 연구가 이루어지지 않은 상태이다.

본 연구에서는, Servo-Mechanical Engineering 입장에서 PES현상에 대한 기본적인 원리를 재조명함으로써 NRRO PES뿐만 아니라 Written-in RRO PES를 주파수영역에서 추정하고 예측하는 방법론과 그 결과를 보이고자 한다.

2. 93kTPI급 HDD의 PES Spectrum

2002년 현재 업계에서 개발 중인 3.5인치 HDD의 기록밀도는 60 Gbits/in² (80GB/platter)이며 이에 해당하는 트랙밀도는 대략 93 kTPI에 해당한다. 트랙 폭은 273 nm로서, 달성해야 하는 위치제어 정밀도는 트랙 폭의 약 8.55 %로 표준편차 기준으로 약 7.8 nm에 해당한다.

Fig. 1과 2는 93 kTPI의 Track 밀도를 갖는 7200 rpm/FDB (Fluid-Dynamic Bearing) 스피들 모터를

* 삼성종합기술원 Storage Lab.

E-mail: jskoh@samsung.com

Tel: (031)280-8046, Fax: (031)280-6955

** 삼성종합기술원 Storage Lab.

갖는 HDD의 NRRO(Non-repeatable Runout) PES와 RRO(Repeatable Runout) PES 예를 보여주고 있다.

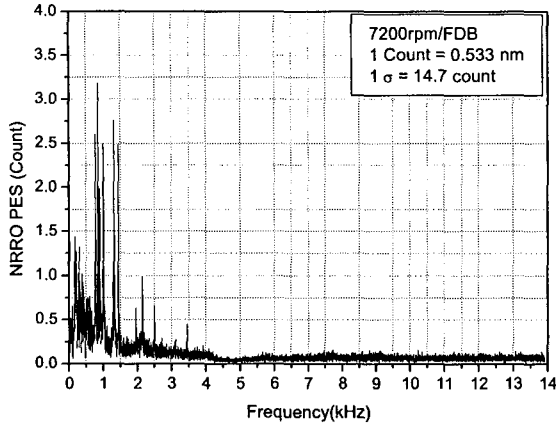


Fig. 1. NRRO PES of 93kTPI/7200rpm FDB-HDD

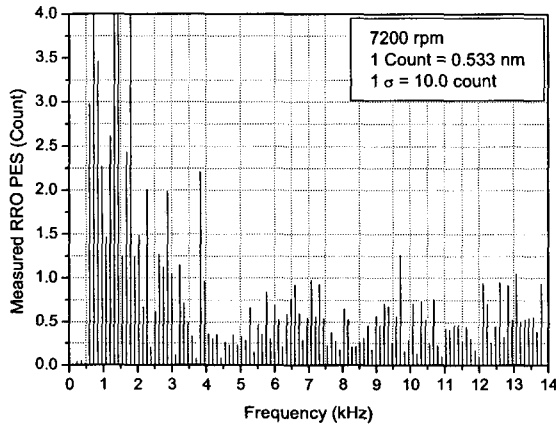


Fig. 2. RRO PES of 93kTPI/7200rpm FDB-HDD

Fig 1의 NRRO PES는 주로 Spindle-Disk 진동과 Fantail, E-Block Arm, Suspension으로 구성되는 HSA(Head-Stack Assembly)의 Vibration 및 PES를 Detection하는 Sensor Dynamics로 총괄되는 Measurement Noise로부터 발생한다. 여기에서 Spindle-Disk 진동은 Servo Controller가 외란을 증폭하는 주파수 대역인 600 Hz - 3 kHz 사이에 밀집됨으로써 이 대역 PES peak의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 반면, HSA 진동은 주로 디스크 회전에 의해 드라이브 내에서 발생하는 Aerodynamic Pressure 에 의해 가진되며 600 Hz이하의 저주파수 PES 에너지와 1.5 kHz 이상의 고주파수 Spectral Floor Line을 형성하게 된다. 또한 PES Measurement Noise는 전 주파수 대역에 걸쳐 Servo Controller 설계특성에 따른 Output-Sensor Noise 민감도를 가지고 광대역 PES Spectral Energy를 갖게 된다.

반면, Fig 2의 RRO PES의 경우 그 Spectrum만으로 각 PES Energy의 물리적 의미를

직접 추정해 내기가 매우 어렵다. 다만, NRRO PES에서와 마찬가지로 약 4 kHz이내의 RRO PES가 주된 Energy를 가짐을 알 수 있음을 직관적으로 알 수 있다. 이와 같이 RRO PES의 물리적 분석 및 추정/예측 설계가 어려운 주된 이유는 HDD 동작 중의 Mechanical-Servo Coupled Dynamics 뿐만 아니라 STW(Servo-Track Writing)시의 Mechanical-Servo Coupled Dynamics에 의한 Mechanical Energy가 Written-in RRO Energy 형태로, STW Speed와 HDD 동작 Speed의 변화에 의한 Frequency Modulation 및 Disk에 기록되는 STW Signal의 Closure-Offset Signal Dynamics에 의해 비선형적으로 전파되기 때문이라고 볼 수 있다.

3. NRRO PES Estimation Process

잘 알려진 바와 같이 PES의 Logic은 Fig. 3과 같이 Plant, Controller, 및 Disturbances로 표현된 하나의 SISO Block Diagram으로 나타낼 수 있다.

Feedback 제어 루프는 제어기(C), 플랜트(P)로 구성되며 외란은 크게 Input Torque Disturbance(w), Output Displacement Disturbance(d) 및 Measurement Noise(n)로 대변할 수 있다. Input Torque Disturbance에는 HDD 내부에서 발생된 Internal Aerodynamic Pressure가진에 의한 HSA 진동, HDD 외부에서 들어오는 External Shock/Vibration에 의한 HSA 진동, Flex Cable Dynamics를 통해 전파되는 HSA 진동, Flex Cable 및 Pivot Bearing 등에 의한 Bias Torque, Power Amp Offset 및 DAC Resolution 등이 있다. Output Displacement Disturbance에는 스피들 모터, 베어링, 디스크가 모두 연성되어 발생하는 Spindle-Disk Vibration, Plant의 입력단(즉, VCM)을 통하지 않고 외란에 의해 가진되는 HSA Vibration 및 Written-in RRO 등을 생각할 수 있다.

Fig. 2로부터 루프 안의 모든 외란을 포함하는 True PES와 Measured PES를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$PES_i(f) = S(f)P(f)W(f) + S(f)D(f) - T(f)N(f) \quad (1)$$

$$PES_m(f) = PES_i(f) + N(f) = S(f)\{P(f)W(f) + D(f) + N(f)\} \quad (2)$$

$$S(f) : \text{Error sensitivity function, } \frac{1}{1 + P(f)C(f)} \quad (3)$$

$$T(f) : \text{Closed-loop TF, } \frac{P(f)C(f)}{1 + P(f)C(f)} \quad (4)$$

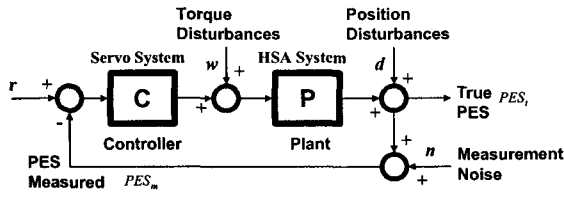


Fig. 3. Block Diagram of HDD Servo-Mechanical Coupled System

본 연구에서는 각 Disturbance Energy 중에서 가장 지배적인 인자들에 의한 PES Estimation을 하고자 하기 때문에 비교적 영향이 적은 Broad-Band Noise를 항목은 무시($N(f) = 0$) 하면, 식 (1)과 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$PES_t(f) = PES_m(f) = S(f)\{P(f)W(f) + D(f)\} \quad (5)$$

식 (5)에 나타난 바와 같이 주파수 영역에서의 위치 오차 신호, $PES_t(f)$ 는 $P(f)W(f)$ 항과 $D(f)$ 항의 합에 의한 외란 Energy에 Servo Controller의 Error Sensitivity Function($S(f)$)을 곱하여 얻어짐을 알 수 있다. Mechanical Vibration 입장에서 전자의 $P(f)W(f)$ 외란의 경우 Radial HSA Vibration이 가장 지배적이며, 후자의 $D(f)$ 외란에서는 Spindle-Disk System의 진동이 가장 주요한 진동성분이라 할 수 있으므로 본 연구에서는 위에서 언급한 두 진동에너지를 사용하여 PES Estimation을 하도록 한다.

4. RRO PES Estimation Process

전술한 바와 같이 Written-in RRO PES를 Estimation하기 위하여는, Fig 3에서 표현한 HDD Operation Speed에서의 PES Mechanism 뿐만 아니라 STW에서의 Servo-Mechanical Dynamics를 동시에 고려할 필요가 있다. Fig. 4는 이러한 목적을 달성하기 위해 Written-in PES 입장에서의 STW Dynamics를 재표현한 Block Diagram이다. Fig. 4에서 STW Controller, STW Plant 및 Pushpin-to-Head Dynamics는 각각 STW의 Servo Controller, Plant와 Pushpin Actuator로부터 Head 위치까지의 Plant를 의미한다. 또한, STW시 한바퀴 회전동안 Servo Writing 된 신호가 연속적으로 반복신호로 바뀔을 표현하기 위하여 Closure-offset Block을 삽입할 필요가 있으며, STW Speed와 HDD 동작 Speed가 다르므로 인한 RRO 주파수 Modulation 현상을 표현하기 위한 Frequency Modulation Block을 고려할 필요가 있다. 이와 같은 비선형 Transform을 통하여 얻어지는 최종출력신호를 Fig

3의 Output Displacement Disturbance로 입력시킴으로서 HDD 동작 중의 Written-in RRO PES를 얻어낼 수 있다.

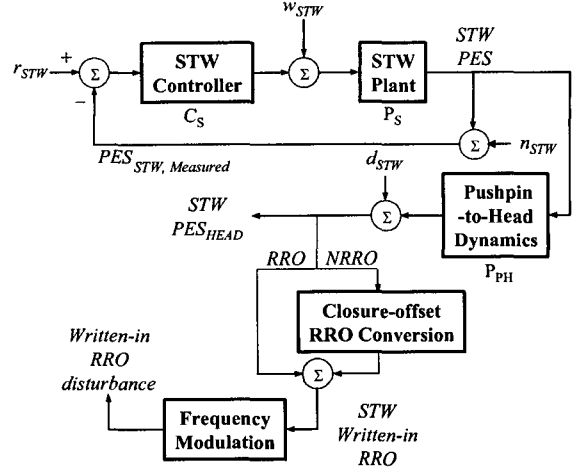


Fig. 4. Block Diagram of STW Servo-Mechanical Coupled System

5. HDD 동작상태 및 STW 상태에서의 Plant, Servo Controller

NRRO PES 및 RRO PES Estimation을 정확하게 하기 위해서는 제어기와 플랜트로 구성되는 오차 감도 함수(Error Sensitivity Function)를 정확하게 얻을 필요가 있다. 일반적으로 플랜트는 실험 Data를 활용하여 다수의 Pole/Zero를 사용하여 근사모델링하여 표현할 수 있다. 그러나 정확한 PES 예측을 위해서는 실제 플랜트 모델을 가급적 정확히 표현할 필요가 있으므로, 본 연구에서는 실험에 의해 플랜트 주파수 응답 함수를 구하도록 한다. 이와 같이 실험을 통해 얻는 Continuous-time Plant 모델은 Servo Sampling 주파수를 고려하여 Nyquist 주파수까지의 Discrete-time Plant로 쉽게 변환할 수 있다. 반면, 제어기는 설계시 수학적으로 사용한 State-Space Domain에서의 모델이 실제실험값에 거의 근사한 특성을 보이므로 실험을 통해 따로 구하지 않고 State-Space Domain에서의 설계모델을 그대로 사용하도록 한다. Fig. 5와 6은 HDD 동작 상태에서 실험에 의해 얻은 플랜트 주파수 응답함수 및 Error Sensitivity Function을 보여주고 있다.

같은 방법에 의해 Servo Writing 상태에서 Pushpin에 의해 Actuating 되고 Potentiometer에 의해 Sensing 되는 STW Plant를 실험적으로 구할 수 있다. 또한, 일반적으로 HDD Servo에 비해 그 Servo Bandwidth가 낮은 STW Servo 역시 실험에 의해 Estimation될 수 있으며, Fig. 7은 이 과정을 통해

얻어진 Servo Writing 상태에서의 Error Sensitivity Function을 보여주고 있다.

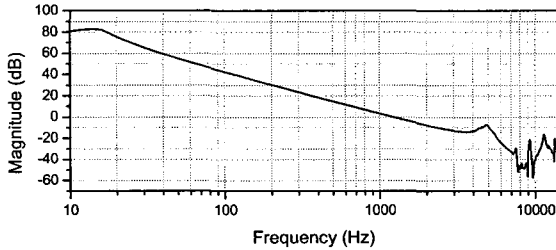


Fig. 5 Frequency Response Function of HDD Plant

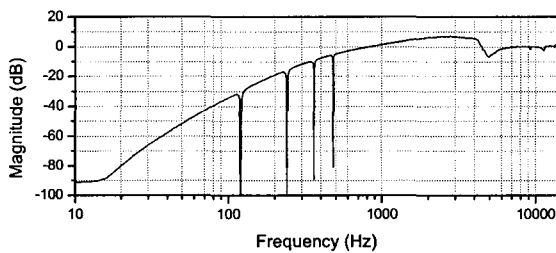


Fig. 6 Error Sensitivity Function of HDD Servo

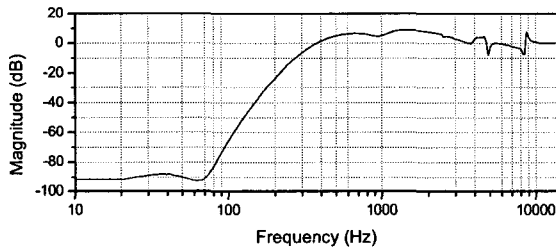


Fig. 7 Error Sensitivity Function of STW Servo

6. Mechanical Disturbance Estimation

Fig. 8은 PES Processing에 필요한 Mechanical Disturbance Estimation을 위하여, HSA Vibration과 Disk Vibration을 측정하기 위한 측정 Setup을 보여주고 있다.

Fig. 2와 식 (5)를 통해 알 수 있는 바와 같이 PES Estimation을 위한 Torque Disturbance Estimation은 Torque Disturbance, $W(f)$ 를 직접 측정하는 것 보다는 식 (2)에 나타난 $P(f)W(f)$ 의 결과를 직접 측정하는 것이 Estimation입장에서 용이하다고 할 수 있다. 위 $P(f)W(f)$ 는 HSA에 가해지는 Torque Disturbance에 의해 발생하는 슬라이더 진동을 나타내는 것으로 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 사용하여 측정할 수 있다. 이 때, 액추에이터가 피드백제어를 가하지 않은 상태에서 디스크 위 임의의 위치에 위치시킬 수 있도록 VCM에 DC-Bias 전류를 가하여 HSA의 Bias Torque와 평형을

유지시킬 필요가 있다. 또한, HDD Enclosure 내의 Aerodynamic Field의 변화를 일으키지 않도록 LDV의 Beam은 HDD의 Side-Wall에 최소크기의 Hole을 만들어 측정정밀도를 높이는 실험주의가 필요하게 된다.

PES Processing을 하기 위한 Spindle-Disk Vibration Estimation을 위하여는, 식 (2)에 나타난 바와 같이 디스크 반경 방향으로의 디스크 진동, $D(f)$ 를 Estimation할 필요가 있다. 본 연구에서는 임의의 위치에서 축 방향 진동과 반경 방향 Off-track 진동의 관계를 이용하여 수직방향 디스크 진동을 측정하여 반경 방향 Off-track Vibration으로 변환하였다. 잘 알려진 바와 같이 Disk Axial Vibration에 의한 Off-track Radial Vibration과의 관계는 Disk Mode별로 각기 다른 값들을 지니게 된다. 그러나 본 연구에서는 각 Disk Mode에 대하여 정밀 FEM 해석 및 실험을 통하여 사전연구하여 본 결과, 다음과 같은 근사식 식 (6)으로 PES 영향권 내의 주요 Disk Mode들에 대하여 현실적으로 큰 오차없이 Disk Vibration에 의한 Off-track Conversion을 설명할 수 있음을 알 수 있었다.

$$ratio = \frac{4(t_d/2 + t_s)}{3r} \alpha \quad (6)$$

여기서, t_d 는 디스크 두께(= 1.27 mm), t_s 는 슬라이더 두께(= 0.3 mm), r 은 디스크 클램프 외경에서 Head 위치까지의 거리, α 는 드라이브의 Scale Factor를 각각 나타낸다. 본 예측에는 사용된 ratio는 0.048이다.

Fig. 9는 Head를 Disk OD(Outer Diameter)에 위치시킨 경우에 대하여 측정된 HSA Vibration과 식 (6)의 관계를 이용하여 얻어진 반경 방향 Spindle-Disk Vibration 스펙트럼을 보여주고 있다.

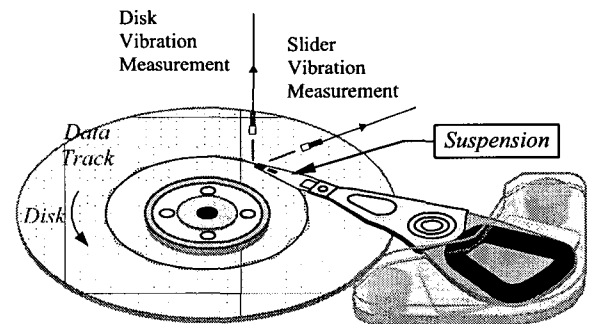


Fig. 8. Experimental Setup for Estimating Mechanical Disturbance Vibration

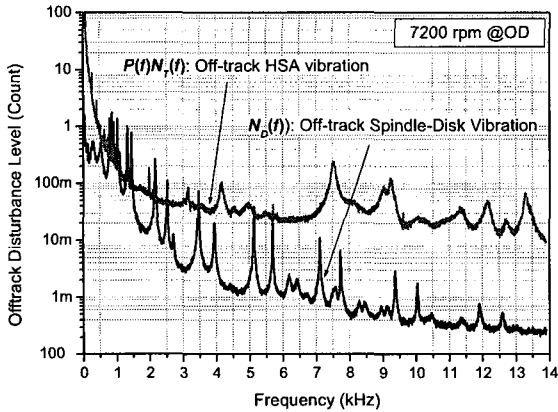


Fig. 9. Off-track Mechanical Vibration Spectra

7. PES Prediction 결과 예

Fig. 10과 11은 전술한 NRRO PES 및 RRO PES Prediction 방법론을 실제 HDD에 대하여 적용하여 얻은, NRRO PES 및 RRO PES의 예측 Spectrum을 보여주고 있다.

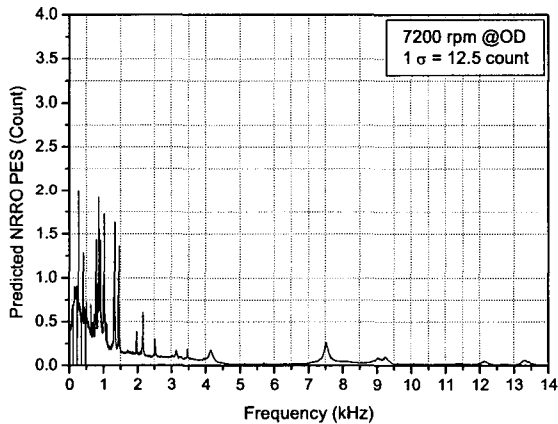


Fig. 10. Predicted NRRO PES Spectrum

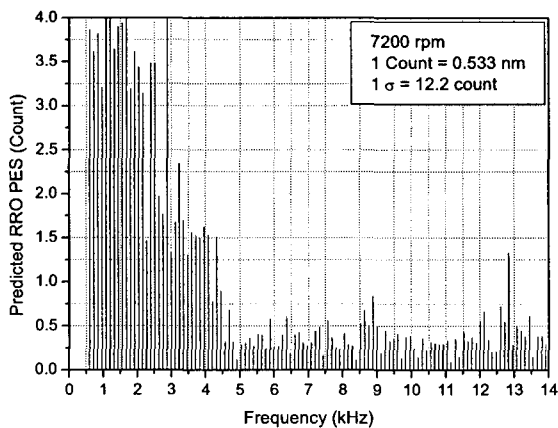


Fig. 11 Predicted Written-in RRO PES Spectrum

PES 예측정밀도를 알아보기 위하여 Fig. 1과 2의 PES 특성을 보이는 HDD에 대하여, STW 및 HDD상태에서의 Mechanical Vibration 정보와 Plant, Servo Controller 정보를 각각 구한 후 2-3절에서의 PES 예측방법에 따라 그 Data들을 연성시켜 PES를 예측하였다.

NRRO PES의 경우, Fig 1과 Fig 10을 비교하여 볼 때 NRRO PES의 각 Peak 성분주파수들과 그 Level이 매우 근접한 값들을 보임을 알 수 있다. 측정/예측한 NRRO PES의 1-Sigma Level은 각각 14.7count, 12.5 count로서 약 15 %이내의 오차를 보이고 있으며, PES Measurement Noise를 고려할 때 본 연구에서 제안한 주파수 영역에서의 PES 예측방법은 비교적 정확하게 PES를 예측한다고 볼 수 있다.

RRO PES의 경우 Fig 2와 Fig 12의 비교를 통해 알 수 있듯이 NRRO PES보다는 전반적으로 그 예측정밀도가 떨어지고 있으며, 이는 NRRO PES Estimation Process에 비하여 STW에서부터 HDD 까지 RRO Energy의 비선형 전과현상에 의한 것으로 보여진다. 그러나 4 kHz를 중심으로 하는 전반적인 Spectrum Pattern이 실제 Spectrum과 유사한 형태를 보이고 있으며, 주요 RRO PES Energy 가 500 Hz - 2 kHz 대역에 집중되는 현상을 그 Spectrum Pattern에 의해 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한, 1-Sigma RRO PES Level 오차면에서 실제값(10.0 count)과 예측 값(12.2 count)이 약 22 % 정도의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

8. 결론

본 연구에서는, Servo Writing Dynamics와 HDD Servo-Mechanical Dynamics를 연성해석을 기초로 하여, Servo-Mechanical Engineering 입장에서 PES 현상에 대한 기본적인 원리를 재고찰함으로써 NRRO PES뿐만 아니라 Written-in RRO PES를 주파수 영역에서 추정하고 예측하는 방법론을 제시하였다. 또한, 이러한 NRRO/RRO PES Estimation 방법을 93 kTPI 급 7200 rpm HDD에 적용하여 그 PES 예측 결과를 보였다.

NRRO PES Estimation의 경우, 약 15 %이내의 예측정밀도를 얻을 수 있었으며, Spectrum 영역에서 각 주파수 성분들이 어떠한 Mechanical 진동에 의해 기인된 것인지, 어느 정도의 기여도를 지니고 있는지를 파악할 수 있는 NRRO PES Estimation Tool의 역할을 할 수 있음을 보였다. 또한 이 Tool을 HDD 설계시 PES Prediction에 사용할 경우, HDD 제작/Servo Control Coding 이전에 NRRO PES 성능을 예측을 통해 얻어냄으로서, TMR (Track - Misregistration) 설계에 있어서 Mechanical Design과 Servo Controller Design을 동시에 수행할 수 있는

유용한 설계 Tool의 역할을 할 수 있을 것으로 보인다.

RRO PES Estimation의 경우, Servo Writing 및 HDD의 Servo-Mechanical 정보들을 연성시켜 예측할 수 있음을 보였고, 7200 rpm HDD에 적용한 결과 약 22 %의 예측오차를 갖는 RRO PES 예측결과를 보였다. 예측된 RRO PES Spectrum 경향과 그 PES Level 입장에서 볼 때 본 연구의 RRO PES 예측방법론은, 정밀예측이나 정밀한 FA(Failure Analysis)에 그대로 사용될 수는 없겠으나, HDD 개발시 Prototype 제작 이전에 HDD 설계변경 및 STW 조건 변화에 따른 개략적인 RRO PES의 상대적인 변화량 Check 등의 개발현장 목적으로는 충분히 사용될 수 있을 것으로 보인다.

향후 100kTPI 이상의 고트랙밀도 HDD 개발/생산에 있어서, 기존방식의 Servo Writing 이후 Clean Room 외부에서 정밀하게 다시 Self-Servo Writing 하는 Partial Self-Servo Writing 방식이나, Full Self-Servo Writing 방식은 곧 보편화될 것으로 보인다. 이러한 Servo Writing 기술변화상황을 고려할 때, HDD의 Servo-Mechanical Engineering 입장에서 NRRO PES 뿐 아니라 Written-in RRO PES 설계를 과학적이면서 신속하게 개발할 수 있는 RRO PES Estimation/ Prediction에 대한 분야는 더욱 집중적으로 연구되어야 할 분야로 보여진다.

감사의 글

연구비를 지원해 주신 삼성전자 스토리지 사업부 관계자 여러분과, 실제 제품개발에 필요한 각종 정보 및 기술적 조언을 아끼지 않은 SISA의 많은 동료 Engineer들에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Hai T. Ho, "Noise Impact on Servo TMR," Proceedings of the American Control Conference, June 1997, pp. 2906-2909.
- [2] D. Abramovitch, T. Hurst, and D. Henze, "An Overview of the PES Pareto Method for Decomposing Baseline Noise Sources in Hard Disk Position Error Signals," IEEE Trans. on Magn., Vol. 34, No. 1, January 1998, pp. 17-23.
- [3] L. Guo, H. S. Lee, A. Hudson, and S. H. Chen, "A Comprehensive Time Domain Simulation Tool for Hard Disk Drive TPI Prediction and Mechanical/Servo Enhancement," IEEE Trans. on Magn., Vol. 35, No. 2, March, 1999, pp. 879-884.
- [4] H. S. Yang, J. Jeong, C. H. Park, and Y. P. Park, "Identification of Contributors to HDD Servo

Errors by Measuring PES Only," IEEE Trans. on Magn., Vol. 37, No. 2, March, 2001, pp. 883-887

- [5] T. Yamaguchi, "Modeling and Control of a Disk File Head-Positioning System," IMechE, Vol. 215, Part 1, 2001, pp. 549-567.
- [6] H. S. Lee, "Controller Optimization for Minimum Position Error Signals of Hard Disk Drives," Industrial Electronics, IEEE Trans. on, Vol. 48, No. 5, 2001, pp. 945-950.