

고밀도 디스크 드라이브를 위한 디스크 두께와 Pemto 슬라이더가 PES 에 미치는 영향

Effects of Disk Thickness and Pemto Slider on Position Error Signal for High TPI Hard Disk Drive

송용한[†], 한윤식^{*}, 이호성^{**}
Yong-Han Song, Yun-Sik Han, and Ho Seong Lee

ABSTRACT

This paper investigates the effects of disk thickness and Pemto slider on PES(position error signal) for high TPI(track per inch) drives above 150kTPI at early stage of their development. In order to reduce the disk flutter which becomes a dominant contributor to the TMR, the thicker disks with both 63 and 69mil have been used. Also, PES of a Pemto slider with thinner thickness than Pico slider has been estimated to decrease the conversion factor of disk motion in axial direction to head off-track motion. A frequency-domain PES estimation and prediction tool has been developed via measurement of disk flutter and HSA(head stack assembly) forced vibration. It has been validated by the measured PES in drive level. Based on the model and measurement of disk flutter, PES of a drive with the thicker disk and Pemto slider is predicted and their impact is investigated.

Key Words : Track Misregistration(TMR), Position Error Signal(PES), Conversion factor, Pemto slider

1. 서 론

최근 정보화 사회로의 급속한 변화와 디지털 미디어 산업의 성장은 HDD 분야의 고속 대용량화를 요구하고 있으며, 이러한 HDD 의 데이터 고밀도화를 달성하기 위해서는 디스크의 반경 방향으로의 저장 밀도를 증가 시키는 TPI(Tracks Per Inch) 증가 기술이 필수적이다. 그러나 드라이브 내에서 스피들-디스크 시스템의 회전으로 인한 공기 유동에 의해 디스크 Flutter 나 HSA 의 Windage 와 같은 기구적 진동이 발생하게 되며, 이러한 외란에 의해 헤드의 오프트랙(off-track)이 발생하게 되어 TPI 를 증가시키는데 큰 걸림돌이 되고 있으며, 이는

회전속도가 증가함에 따라 그 영향은 더욱 커지게 된다. [1-2]

따라서 HDD 개발의 초기 단계에서 기구적 진동과 같은 외란에 의한 헤드와 디스크 트랙 사이의 위치 오차인 PES (Position Error Signal)를 미리 추정하고 예측하여 TMR (Track Misregistration) budget 을 충족시킬 수 있는 가를 결정하는 일은 매우 중요하다. [3-4]

현재 HDD 업계에서는 120kTPI 정도의 HDD 에 대한 개발이 진행 중이며, 동시에 차기 모델인 150kTPI 에 대하여 기존의 Form factor 를 크게 변경하지 않고 TMR budget 을 달성할 수 있을 지에 크게 고심하고 있다.

일반적으로 TMR budget 은 HDD 업계에서 보편적으로 사용하는 트랙폭의 8.8%의 3 sigma 를 고려하므로, 150kTPI 의 경우 만족해야 할 PES 는 TMR budget 의 1 sigma 이므로 트랙폭의 2.9%이며, 5.0nm/15count 정도이다. 이러한 TMR budget 을 만족시키기 위해 지금까지의 경우처럼 기존의 SSA(Single Stage Actuator)로 가능할지, 아니면 새로운

[†] 책임저자 : 삼성전자(주) 스토리지(사) 개발팀

E-mail : yonghan.song@samsung.com

^{*} Samsung Information Systems America

^{**} 삼성전자(주) 스토리지가사업부 개발팀

(논문접수일 : 2005년 4월 6일)

기술인 PZT 나 MEMS 를 이용하여 액츄에이터를 하나 더 추가한 DSA(Dual Stage Actuator)를 적용해야 하는 지가 큰 관심거리이다. 그러나 DSA 의 경우 충분한 신뢰성 검증이 이루어지지 않은 상태이며 아직 해결해야 할 많은 문제점을 갖고 있으므로, 최선의 방법은 기존의 SSA 를 유지하면서 TMR budget 을 달성하는 것이다.

따라서 본 연구는 기존의 SSA 를 유지하면서 차기 HDD 모델의 TMR budget 을 만족시키기 위한 일환으로 디스크의 두께와 슬라이더 두께가 PES 에 미치는 영향을 조사하였다. TMR 의 주요 원인의 하나인 디스크 축방향의 불규칙진동에 의한 헤드의 오프-트랙을 저감 시키기 위해 디스크 두께 50(1.27mm), 63(1.60mm), 69mil(1.75mm)을 검토 하였으며, 축방향 불규칙 진동의 반경 방향으로의 영향을 감소 시키기 위해 현재 Pico 슬라이더보다 두께가 작은 Pemto 슬라이더에 대한 영향을 조사하였다.

주파수 영역에서 스피들-디스크 시스템의 축방향진동과 HAS(Head stack assembly)의 반경 방향 진동 측정을 통하여 PES 예측을 위한 해석 Tool 을 개발하였으며, 실제 드라이브 수준에서 측정된 PES 와의 비교를 통하여 신뢰성을 확보하였으며, 이를 바탕으로 디스크 두께 변화와 Pemto 슬라이더에 대한 PES 를 예측하였다.

2. PES Estimation

2.1 NRRO PES Estimation Process

알려진 바와 같이 헤드의 트랙 추종 상태에서 피드백 제어의 블록도는 Fig.1 과 같이 플랜트, 제어기, 및 외란으로 표현된 SISO 블록도로 나타낼 수 있다. 피드백 제어 루프는 제어기(C), 플랜트(P)로 구성되며 외란은 크게 입력 토크 외란(w), 출력 변위 외란(d) 및 측정 노이즈(n)로 나타낼 수 있다. 입력 토크 외란에는 HDD 내부에서 발생된 유동에 의한 HSA 진동(windage), HDD 외부에서 들어오는 외부 충격/진동에 의한 HSA 진동, Flex cable dynamics 를 통해 전파되는 HSA 진동, Flex cable 및 피벗 베어링 등에 의한 편심 토크, Power amp offset 및 DAC resolution 등이 있다.

출력 변위 외란에는 스피들 모터, 베어링,

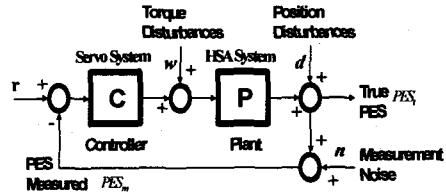


Fig. 1 Block diagram of servo closed-loop system

디스크가 모두 연성되어 발생하는 스피들-디스크 시스템의 진동(disk flutter)을 생각할 수 있다.

Fig.1로부터 루프 안의 모든 외란을 포함하는 실제 PES(True PES)와 측정 PES(Measured PES)를 나타내는 식은 다음과 같다.

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

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

$S(f)$: Error sensitivity function,

$$\frac{1}{1 + P(f)C(f)} \quad (3)$$

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

본 연구에서는 각 외란 에너지 중에서 가장 지배적인 인자들에 의한 PES 추정을 하고자 하기 때문에 비교적 영향이 적은 광대역 노이즈 항목을 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 $P(f)W(f)$ 항 과 $D(f)$ 항의 합에 의한 외란 에너지에 서보 제어기의 ESF(Error Sensitivity Function: $S(f)$)을 곱하여 얻어짐을 알 수 있다. 기구 진동의 입장에서 전자의

$P(f)W(f)$ 외란의 경우 반경 방향의 HSA 진동이 가장 지배적이며, 후자의 $D(f)$ 외란에서는 스핀들-디스크 시스템의 진동이 가장 주요한 진동성분이라 할 수 있으므로 본 연구에서는 위에서 언급한 두 진동에너지를 사용하여 NRRO PES 추정(estimation)을 수행하였다.

2.2 Mechanical disturbance Measurement

앞서 언급한 바와 같이 PES 추정 및 예측을 위해서는 기구 외란을 측정하여야 하므로, Fig. 2 는 HSA 의 진동과 디스크의 진동을 측정하기 위한 실험 개략도를 보여주고 있다.

먼저, PES 추정을 위한 토크 외란 추정은 Fig. 1 과 식 (5)를 통해 알 수 있는 바와 같이 토크 외란, $W(f)$ 를 직접 측정하는 것 보다는 식 (2)에 나타난 $P(f)W(f)$ 의 결과를 직접 측정하는 것이 PES 추정시 용이하다고 할 수 있다.

위 $P(f)W(f)$ 는 HSA 에 가해지는 토크 외란에 의해 발생하는 슬라이더 진동을 나타내는 것으로 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 사용하여 측정할 수 있다. 이때, 액추에이터가 피드백 제어를 가하지 않은 상태에서 디스크 위 임의의 위치에 위치할 수 있도록 VCM 에 DC-Bias 전류를 가하여 HSA 의 편심 토크와 평형을 유지시켜야 한다.

또한, HDD 내부 유동장의 변화를 일으키지 않도록 LDV 의 빔은 HDD 의 측면에 최소 크기의 홀을 만들어 측정정밀

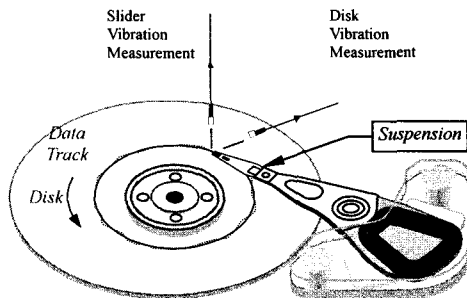


Fig. 2 Experimental setup for mechanical disturbance measurement

도를 높이는 실험주의가 필요하다. 스핀들 디스크 진동에 의한 외란의 추정은 식 (2)에 나타난 바와 같이 디스크 반경 방향으로의 디스크 진동, $D(f)$ 를 예측할 필요가 있다. 본 연구에서는 임의의 위치에서 축 방향 진동과 반경 방향 오프-트랙 진동의 관계를 이용하여 수직방향 디스크 진동을 측정하여 반경 방향 오프-트랙 진동으로 변환하였다.

2.3 Head off-track due to disk vibration

Fig.3 과 4 는 디스크의 축방향 진동에 기인한 헤드의 오프-트랙 발생 과정을 기하학적으로 나타낸 것이다. 정지 상태에서의 헤드 위치(A_0)와 이에 대한 디스크 기록면의 위치(B_0)가 디스크의 축방향 진동에 의해 각각 A_1 , B_1 으로 상대적 변위를 나타내게 되며, 이러한 상대적 변위, 즉 오프-트랙 변위 δ 는 하드 디스크 드라이브의 동작 중 PES 를 유발하여 고밀도용 TMR 설계를 제한하게 된다. 이러한 헤드의 오프-트랙 변위 δ 는 기하학적 관계에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = t_s \cdot \theta + \frac{t_d}{2} \cdot \theta = \left(t_s + \frac{t_d}{2} \right) \cdot \frac{\theta}{v} \quad (6)$$

conversion factor: $K = \left(t_s + \frac{t_d}{2} \right) \cdot \frac{\theta}{v}$

여기서 t_s 는 슬라이더의 두께, t_d 는 디스크의 두께, θ 는 디스크의 굽힘 각도, v 는 디스크의 축방향 변위, δ_1 는 헤드에 의한 변위, δ_2 는 트랙의 변위를 각각 나타낸다. 알려진 바와 같이 디스크 축방향 진동의 오프-트랙으로의 Conversion factor(K)는 디스크 모드별로 각기 다른 값들을 지니게 되지만, 본 연구에서는 식 (6)과 각각의 디스크 모드에 대한 정밀 FEM 해석 및 실험을 통하여 Fig.5 와 같은 관계를 얻었으며, 이를 이용하여 PES 영향 권내의 주요 디스크 모드들에 대하여 현실

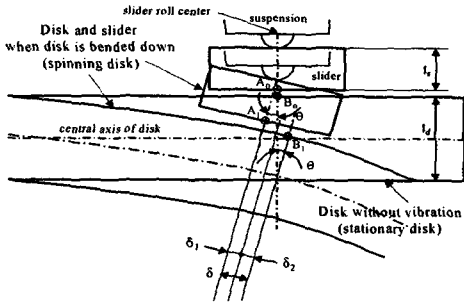


Fig. 3 Head off-track due to disk vibration (when disk is bended down)

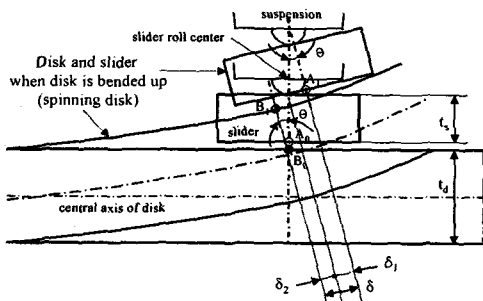


Fig. 4 Head off-track due to disk vibration (when disk is bended up)

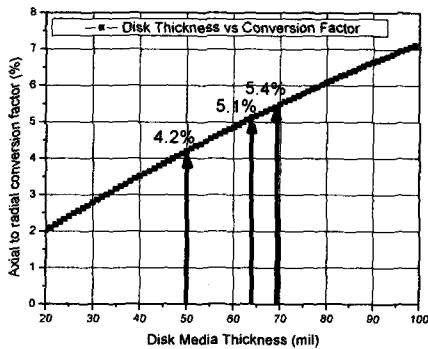


Fig. 5 Axial to radial conversion factor with respect to disk thickness($t_s=0.3\text{mm}$)

적으로 큰 오차 없이 디스크 진동에 의한 헤드의 오프-트랙을 계산할 수 있다.

3. NRRO PES Prediction

3.1 PES Prediction 결과

Fig.6 에서 9 는 전술한 NRRO PES 예측 방법에 의해 기존 120kTPI 의 50mil 디스크 2 장을 갖는 드라이브에 대하여 OD(Outer Diameter) 영역에서 NRRO PES 를 예측한 것이다. 먼저, Fig. 6 은 헤드를 디스크 OD 에 위치시킨 후 측정된 HSA 의 진동과 식

(6)의 관계를 이용하여 얻어진 축방향 디스크 진동에 의한 헤드의 오프-트랙에 대한 스펙트럼을 나타낸 것으로서, 주로 HSA 의 진동에 의한 오프-트랙이 전체적으로 크며, 특히 0~700Hz 까지의 Windage 영향이 크게 나타남을 알 수 있고, 800~3000Hz 에서는 디스크의 고유 진동 모드에 의한 피크들이 나타남을 알 수 있다.

Fig.7 은 각각의 외란에 대한 PES 의 민감도를 나타내는 ESF(Error Sensivity Function)을 나타낸 것으로서, 플랜트의 전달함수를 측정하여 예측한 것과 드라이브 레벨에서 측정된 ESF 가 잘 일치함을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 디스크 진동 모드가 주로 나타나는 800 에서 3000Hz 영역에서는 ESF 가 진동 성분을 증폭시키는 역할을 하므로 디스크 진동 모드의 피크를 저감시키는 것은 PES 를 감소시키는데 효과적임을 알 수 있다.

이상과 같이 각각의 외란과 ESF 를 통하여 예측한 NRRO PES 스펙트럼을 Fig.8 과 9 에 나타내었다. Fig.8 은 예측된 결과와 실제 드라이브 레벨에서 측정된 PES 를 비교한 것으로서, 전체적인 진동모드들과 피크들이

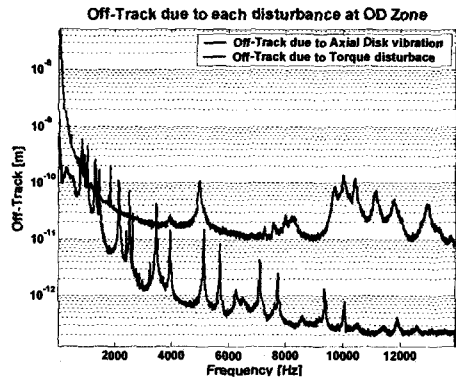


Fig. 6 Off-track due to mechanical disturbance

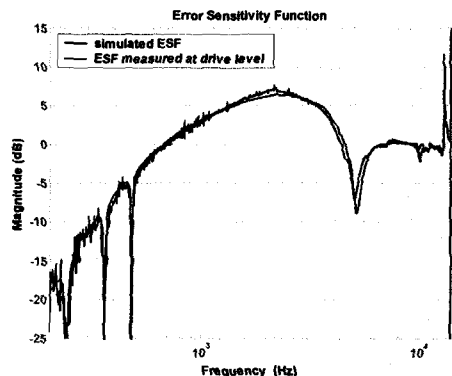


Fig. 7 ESF(Error Sensivity Function) of HDD servo

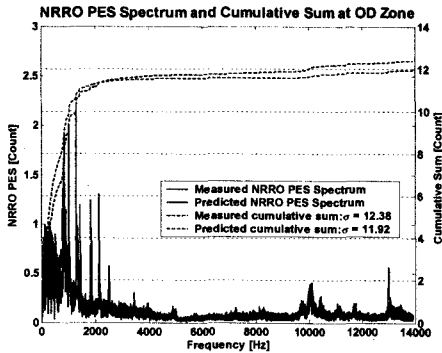


Fig. 8 Comparison between simulation and experiment (1nm=2.42Count)

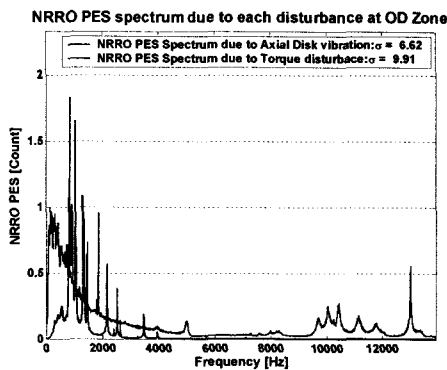


Fig. 9 NRRO PES spectrum due to each disturbance (1nm=2.42Count)

잘 일치함을 알 수 있다. 또한 측정/예측한 NRRO PES 의 1Sigma 수준은 각각 12.4 count, 11.9 count 로서 약 4%이내의 오차를 보이므로, PES 측정 노이즈를 고려할 때 본 연구에서 제한한 주파수 영역에서의 PES 예측방법은 비교적 정확하게 PES 를 예측함을 알 수 있다.

그림에서 보듯이 NRRO PES 는 HSA 의 Windage 영역(~700Hz)과 디스크의 진동 모드(800~3000Hz)들이 나타나는 3000Hz 이내에서 거의 대부분이 발생함을 알 수 있으며, 따라서 이 영역을 얼마나 효과적으로 감소 시키느냐가 TMR 설계의 핵심이라 할 수 있다. Fig.9는 NRRO PES 에 대하여 각각의 외란에 대한 기여도를 나타낸 것으로서, HAS 의 진동 영향이 약 70%정도이고 디스크 모드의 진동 영향이 약 30%정도로 HAS 진동에 의한 NRRO PES 가 보다 큰 부분을 차지함을 알 수 있다. 본 연구에서는 디스크의 진동 모드를 저감시키기 위한 방법으로 디스크 두께와

Pemto 슬라이더의 영향을 고려하였다.

3.2 Effects of disk and slider thickness on PES

먼저 Fig.10 과 Table 1 은 각각 디스크의 두께 변화에 따른 축방향 진동의 스펙트럼과 진동에너지의 양을 나타낸 것으로서, 디스크 두께가 증가함에 따라 고유 진동수가 증가하고 Peak 들이 감소하여, 전체적으로 진동 에너지가 감소함을 알 수 있다. 그러나 디스크 두께가 증가함에 따라 축방향 진동은 크게 감소하는 반면, 반경방향 진동은 적게 감소하는데 이는 디스크 두께가 두꺼워 짐에 따라 Conversion factor 가 증가하기 때문이다.

Table 2 는 Fig.10 의 측정 결과를 바탕으로 HSA 의 진동 부분에 의한 PES 는 일정하다는 가정하에 150kTPI 에서 NRRO PES 를 예측한 것으로서, 디스크가 두꺼워짐에 따라 진동이 감소하여 PES 가 감소함을 알 수 있으며, 69mil 의 경우 기존 대비 7.1%정도 감소 함을 알 수 있다.

Table 3 은 기존의 Pico 슬라이더($t_s=0.3\text{mm}$)와 Pemto 슬라이더($t_s=0.23\text{mm}$)가 PES 에 미치는 영향을 나타낸 것으로서, 슬라이더의 두께가 감소함에 따라 conversion factor 가 감소하여 NRRO PES 가 감소함을 알 수 있으나, 크게 감소하지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 150kTPI 이상의 고기록 밀도 HDD 개발의 초기 단계에서 디스크 진동에 의한 NRRO PES 를 저감시키기 위해 디스크 두께와 슬라이더 두께가 PES 에 미치는 영향을 조사하였다. PES 예측을 위한 해석 Tool 을 개발하였으며, 실제 드라이브 수준에서 측정된 PES 와의 비교를

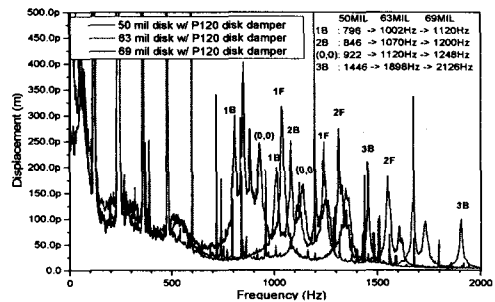


Fig. 10 Axial vibration of 50, 63 and 69mil disk

Table 1 Mechanical disk vibration(RMS frequency band:70~3200Hz)

unit (rms nm)		Mechanical Disk Axial Vibration	Estimated Disk Radial Vibration
Disk Thickness	50 mil	58.8	2.5
	63 mil	44.8 (-24%)	2.3 (-8%)
	69 mil	38.2(-35%)	2.1 (-16%)

Table 2 PES estimation for different disk thickness

Unit: CT 1mm=2.42CT @120kTPI 1mm=3.02CT @150kTPI		Disk portion in NRRO @120kTPI	HSA portion in NRRO @120kTPI	Estimated NRRO @120kTPI	Estimated NRRO @150kTPI	NRRO Difference (%) @150kTPI
Disk Thickness	50 mil	6.7	9.9	11.9	14.9	
	63 mil	5.2	9.9	11.2	14.0	-6.4
	69 mil	5.0	9.9	11.1	13.9	-7.1

Table 3 PES estimation for Pemto slider

Unit: CT 1mm=2.42CT @120kTPI 1mm=3.02CT @150kTPI		Slider	Disk portion in NRRO @120kTPI	HSA portion in NRRO @120kTPI	Estimated NRRO @120kTPI	Estimated NRRO @150kTPI	Total Difference (%)
Disk Thickness	50 mil	Pico	6.7	9.9	11.9	14.9	
	50 mil	Pemto	6.3	9.9	11.7	14.7	-1.7
	63 mil		4.8	9.9	11.0	13.8	-7.8
	69 mil		4.7	9.9	11.0	13.7	-8.2

통하여 신뢰성을 확보하였으며, 이를 바탕으로 현재 120kTPI 드라이브의 경우 NRRO PES 에 대한 각 외란의 기여도는 HSA 진동에 의한 부분이 약 70%이고 디스크 진동에 의한 부분이 약 30%정도임을 알 수 있었다. 디스크의 두께가 PES 에 미치는 영향은 디스크 두께가 증가함에 따라 디스크 진동이 감소하여 PES 가 감소함을 알 수 있었으며, 69mil 디스크의 경우 기존 대비 7.1%정도 감소 함을 알 수 있었다. 또한 Pemto 슬라이더($t_s=0.23\text{mm}$)의 경우 슬라이더의 두께가 감소함에 따라 Conversion factor 가 감소하여 NRRO PES 가 감소함을 알 수 있었으나 크게 감소하지는 않음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 디스크의 진동 저감에 초점을 두었으나 전술한 바와 같이 HSA 의 진동에 의한 PES 의 기여도가 큰 부분을

차지하므로, 유동 기인 진동(Flow induced vibration) 해석을 통해 Windage 영향을 저감시키고 높은 BFM(Butterfly mode)를 갖는 HSA 를 설계한다면 150kTPI 의 TMR budget 은 만족될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] L. Guo and Y. D. Chen, 2001, "Disk Flutter and Its Impact on HDD Servo Performance," IEEE Trans. on Magn., Vol.37, No.2, pp.866-870.

[2] P. Srikrishna and K. Kasetty, 2000, "Predicting Track Misregistration(TMR) From Disk Vibration of Alternate Substrate Materials," IEEE Trans. on Magn., Vol.36, No. 1, pp.171-176.

[3] Jeong-Seok Koh, Seong-Woo Kang, Yun-Sik Han, Young-Hoon Kim, and Tae-Yeon Hwang, 2002, "A Study on the PES Estimation for Developing High-TPI HDD," The Korean Society for Noise and Vibration Engineering 2002 Autumn Annual Conference. pp.140-145

[4] Dong-Ho Oh, Seong-Woo Kang, Yun-Sik Han, Young-Hoon Kim, Jeong-Seok Koh, and Tae-Yeon Hwang, 2002, "A TMR Budget Design for 100kTPI Hard Disk Drives using a Head Gimbal Assembly with Radial Motion Capability," The Korean Society for Noise and Vibration Engineering 2002 Autumn Annual Conference. pp.122-127

[5] Y. B. Chang, D. K. Park, N. C. Park, and Y. P. Park, 2002, "Prediction of Track Misregistration Due to Disk Flutter in Hark Disk Drive," IEEE Trans. on Magn., Vol.38, No.2, pp.1441-1446.

[6] L. Guo, H. S. Lee, A. Hudson, and S. H. Chen, 1999, "A Comprehensive Time Domain Simulation Tool for Hard Disk Drive TPI Prediction and Mechanical/Servo Enhancement," IEEE Trans. on Magn., Vol.35, No.2, pp.879-884.

[7] H. S. Yang, J. Jeong, C. H. Park, and Y. P. Park, 2001, "Identification of Contributors to HDD Servo Errors by Measuring PES Only," IEEE Trans. on Magn., Vol.37, No.2, pp.883-887

[8] H. S. Lee, 2001, "Controller Optimization for Minimum Position Error Signals of Hard Disk Drives," Industrial Electronics, IEEE Trans. On Magn., Vol.48, No.5, pp.945-950.