

100KTPI급 HDD 구현을 위한 DISK DAMPER에 관한 연구

A Study on the Disk Vibration Control by Disk Damper For 100kTPI Hard Disk Drive Design

한윤식*, 강성우*, 오동호*, 황태연*, Greg Tran**

Y. S. Han*, S. W. Kang*, D. H. Oh*, T. Y. Hwang*, and Greg Tran**

Key Words : HDD, TMR(Track Mis-Registration), Disk Vibration, Disk Damper, Squeeze Film Effect

ABSTRACT

A practical implementation method of squeeze-film aeroelastic disk vibration damping and its practical design performance are presented to provide a solution method to meet the tight TMR(Track Mis-Registration) design budget of high-TPI HDDs. Most previous research results are mainly based on the component-level study in the 'open-cover state' which is far from the realistic operation HDD condition. In this study, the squeeze-film disk damping effect is widely investigated under the realistic drive-level condition of 'enclosed-cover state.' It is found that the proper aeroelastic gap(s) between disk(s) and adjacent surface(s) to give significant vibration reduction in the enclosed HDD operating conditions can be achieved not only by classical well-known squeeze-film damping gaps such as very small 0.0x-millimeter level gaps which are not practically implementable in mass-production HDDs, but also by a few 0.x millimeter which is possible for designing realistic HDD design. The various experimental results including drive-level PES are also presented to prove feasibility of the optimal disk damper design for 93kTPI HDDs.

1. 서론

HDD(Hard Disk Drive)는 고용량과 고성능 요구에 대응하는 가장 대표적인 저장 장치로 그 위상을 확고히 하고 있다. 특히 고밀도 HDD 개발을 위해서는 두 가지 방향의 연구가 병행하여 진행되어야 한다. 첫째로는, 데이터가 기록되는 Disk의 원주 방향으로의 저장밀도 증대를 위한 BPI(Bits Per Inch) 증가 기술이고, 또 다른 방향은 반경 방향의 저장 밀도를 증대시키는 기술[1-3]로서 TPI(Tracks Per Inch) 증가기술이다. TPI 증가에 따라 허용 가능한 실제 헤드 위치와 디스크의 Data Track사이의 상대적인 Vibration-Induced Positioning Error인 TMR(Track Misregistration)이 10 Nano-scale 영역 이하로 현저히 줄어 들고 있다. 특히 데이터 Track-following 조건에서 TMR에 영향을 미치는 요인들 중에서 스피들-디스크 시스템 진동이 가장 중요한 TMR 기여도를 나타내 주는 것으로 알려져 있다[4].

디스크 진동을 줄이기 위한 기존 연구를 살펴보면, 첫째로 디스크 재료를 알루미늄에서 다른 재료의 Substrate를 사용하거나 Visco-elastic

Laminated 디스크를 이용한 연구가 있었다[5]. 둘째로는 유동 관점에서 드라이브 내에 Centrifugal 공기 유동이 되도록 스피들 허브 장치를 만들어 디스크 진동을 줄이는 시도를 하였다[6]. 마지막으로 Squeeze-film 댐핑 효과를 디스크에 주기 위하여 디스크 사이에 일정한 간격을 유지하기 위한 판을 삽입하는 형식이 발표되었다[7-8]. 그러나 기존의 연구는 주로 실제 동작 상태의 HDD가 아닌 Component-level의 Open-cover 상태에서의 결과로서 충분한 진동 감소 효과를 얻기 위하여 현실적으로 양산 적용이 어려운 수십 마이크로미터 수준의 간격을 주장하고 있다.

본 논문에서는 실제 Enclosed HDD 작동 상태에서 충분히 Squeeze-film Aero-elastic 감쇠 효과를 줄 수 있는 양산 가능한 수준의 간격을 갖는 디스크 댐퍼(disk damper)를 구현하여 3.5" HDD의 Platter당 80GigaByte 93kTPI TMR 디자인 목표를 충족 시킨 HDD 개발 예제를 보이고자 한다.

2. 93kTPI 설계 조건 및 TMR 설계 Budget

표 1은 7200rpm 회전속도를 갖는 3.5" Disk Drive에 있어서의 40GB/Platter 시스템 기록밀도 설계변수와 80GB/Platter 시스템의 설계 변수들을 보여주고 있다.

*삼성종합기술원 Storage Lab.
(yshan@sisa.samsung.com)

** Samsung Information System America

Table 1. Design Parameters of 80GB/Platter Disk Drive System and Required TMR Budget.

Design Parameters	40 GBytes/P	80 GBytes/P
Disk Speed (rpm)	7200 and 5400	
Capacity (GBytes/3.5" Platter)	38.2	78.4
Areal Density (GBits/sq.in.)	29.5	58.6
TPI (kTPI)	57	93
Percentage Increase of TPI (%)	62	
BPI (kBPI)	517	630
Percentage Increase of BPI (%)	25	
Bit Aspect Ratio (BPI/TPI)	9.1	6.8
Track Pitch (μinch)	17.5	10.8
Track Pitch (μm)	0.45	0.27
TMR Budget (1sigma, nm)	12.7	7.8
TMR Budget (1sigma PES, counts of 512/TP)	14.6	14.6

필요한 TMR설계사양은 주어진 Track Pitch에 대한 Head와 디스크 Track 사이의 TMR정도를 HDD Industry에서 보편적으로 사용하는 9%의 3 sigma 설계예산을 주면 1sigma TMR 설계 Budget을 얻을 수 있다. 그러나, 실제 제품을 설계하는 입장에서 필요한 생산공차, 부품별 특성차이 및 제품생산 수율 등을 고려하여 안전 계수 0.95의 설계마진을 줄 경우, 최종적으로 7.8nm/14.6count의 1sigma TMR 설계 Budget을 얻을 수 있다.

3. FDB 스피들-디스크 시스템 Dynamics

스피들-디스크 시스템의 Track-Following PES(Position Error Signal)에의 영향 요인은 최종적으로 Disk의 Vibration으로 나타나게 된다. 특히, 디스크의 진동레벨이 가장 큰 OD(Outer Diameter)에서의 최종 진동 특성을 보게 되면 전체 스피들-디스크 시스템의 특성을 쉽게 파악할 수 있다. Fig. 1은 1.27mm(50mil) 두께의 알루미늄 디스크 두 장의 Disk Pack으로 구성되는 7200rpm 디스크 드라이브를 상온조건에서 구동시킨 후, Top Disk의 OD 위치에서 LDV(Laser Doppler Vibrometer)로 측정한 Transverse (Axial) Vibration 스펙트럼을 보여주고 있다. 설계에 사용된 스피들 모터는 FDB(Fluid Dynamic Bearing)을 기본으로 하고 있으며, 반경 방향 지지에는 Herringbone Groove의 저널 베어링을 축의 상부와 하부에 두었고, 축 방향 하중 지지에는 Spiral Groove를 사용하는 원판 구조의 트러스트 베어링을 채용하였다[9].

Fig.1에서 나타낸 mF(or B) (m: 정수)의 Vibration Mode들은 각각 (m,0)개의 (Nodal Diameter, Nodal Circle)을 갖는 디스크 모드들을 표현하고 있으며, LDR과 UDR은 스피들 모터와 Disk의 강한 연성에 의해 형성되는 Lower Rocking Mode와 Upper Rocking Mode를 각각 나타내고 있고 유체 베어링의 매우 큰 감쇠 특성으로 인해 Rocking 모드의

절대적인 크기가 매우 작은 수준을 보여준다. 스피들-디스크 시스템의 편심 및 불 균일성 등에 의해 발생하는 회전 주파수의 Harmonics들을 제외하면, 대부분의 디스크 모드 에너지들이 700Hz-1.5kHz 사이에 집중되어 있음을 볼 수 있다. 또한 불 베어링 채용 스피들의 경우에 불과 궤도를 존재하는 결함 성분들로 인한 Harmonic 성분이 전 주파수 영역에 존재하게 되나 유체 베어링을 사용한 경우에는 Fig. 1에 보여 주는 것처럼 이러한 결함 주파수 성분들이 나타나지 않는다. 추가적으로 최종 TMR성능을 지배하는 또 하나의 시스템인 서보 시스템의 전형적인 Error Sensitivity Function를 살펴보면(Fig. 2) Fig. 1과 같이 주요 디스크 진동 에너지 대역과 서보 시스템의 외란 증폭 대역이 상당히 중복되어 있음을 알 수 있다[4]. 결론적으로 유체 베어링이 채용된 스피들-디스크 시스템의 경우에 디스크 모드에 의한 Mechanical Disturbance Energy를 최대한 줄일 수 있는 TMR설계가 필요하게 된다.

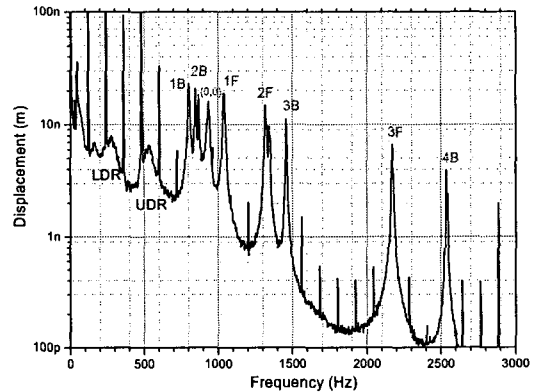


Fig. 1. Disk Vibration Spectrum of 7200rpm Disk Drive Measured on the OD of Top Disk.

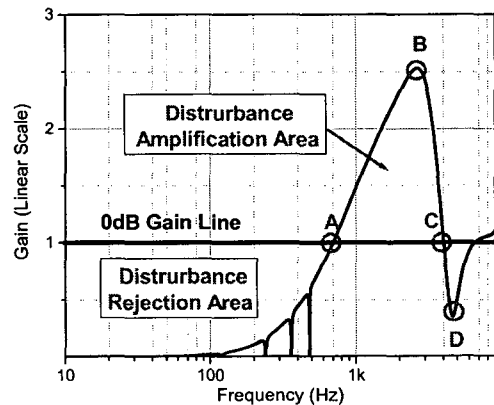


Fig. 2. Typical Error Sensitivity Function of Servo System which has the Bandwidth of 1100Hz.

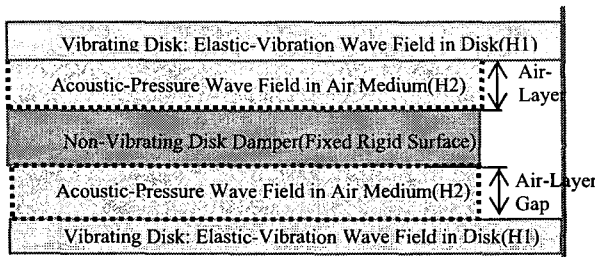


Fig.3. Disk-Vibration Damping by Elasto-Acoustic Coupling.

4. Disk Damper 개념과 구현

디스크 진동을 저감하기 위한 방법으로 Fig. 3에 설명한 바와 같이 Elastic 웨이브 필드인 디스크와 인접한 공기층에 의한 Acoustic Pressure 웨이브 필드 사이에 Elastic-Acoustic 커플링 효과에 의한 감쇠 효과를 줄 수 있다. 이때 공기층의 간격이 적을수록 그리고 디스크 댐퍼의 표면적이 클수록 Coupling 강도는 더 강해지며, Acoustic-pressure 웨이브(H2)는 더 강한 감쇠 작용을 하게 된다. 이런 현상은 소위 말하는 Thin-Film Damping effect 혹은 Squeeze-Film Damping effect라고 불리워진다. 특히 드라이브내의 밀폐된 공간 내에서 디스크 OD(Outer Diameter) 영역은 디스크 회전에 의한 Air Flow가 Dynamic 힘(혹은 압력)으로 디스크를 가진하게 되어 디스크 댐퍼 역할을 할 수 있는 일정한 표면을 가진 판을 삽입하는데 적절한 위치라 할 수 있다.

디스크 댐퍼를 HDD에 구현하기 위한 초기 설계 인자를 파악 하기 위해 디스크와 댐퍼 사이의 간격, 폭, 각도, 그리고 재질에 대한 영향을 살펴 보았다. Fig.4은 7200 rpm으로 회전하고 있는 HDD를 이용하여 디스크와 댐퍼 사이의 간격이 0.2-1.8mm 사이 일 때 디스크 OD 위치에서 측정된 디스크 Transverse 진동의 총합을 RMS (root mean square)레벨로 표시한 것이다. 댐핑에 의한 디스크 진동 저감 효과는 0.6mm이하 간격 조건에서 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 다음으로 Fig.5은 디스크 댐퍼의 간격과 각도를 0.5mm와 200°로 각각 고정하고 댐퍼의 폭을 12.7, 17, 25.4mm로 가공 후에 측정 결과이다. 디스크 댐퍼가 없는 경우에 비해 댐퍼 삽입 후 전체적으로 진동 레벨이 절반 정도로 줄어들었음을 알 수 있고, 또한 폭 증가에 따른 디스크 진동 저감 효과를 보여준다. Fig.6은 간격과 폭을 0.5mm와 25.4mm로 고정 후 각도를 80, 130, 200°로 설정했을 때 진동 측정 결과로써 각도 증가에 따른 진동 저감 효과를 보여 주나 각도가 130° 이상이어야 절반 정도의 진동 저감 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다. 마지막으로 디스크 댐퍼의 재질을 알루미늄, 플라스틱,

스테인레스 스틸 재료로 가공 후 측정 결과는 모든 경우에 대해 동일한 결과를 주었다. 그러나 플라스틱 재료는 조립 후 변형 문제로 제외 되었고, 가격과 Particle 발생 측면 등을 고려하여 알루미늄 재질을 선정하였다.

최종적으로 디스크 댐퍼 설계 인자는 간격/각도/폭이 각각 0.5mm/200°/17mm로 선정 되었다. Fig.7은 드라이브 조립 상태에서의 디스크 댐퍼 형상과 설치 위치를 보여준다.

Fig.8와 Fig.9는 디스크 댐퍼 설치 전후의 Mechanical 진동 측정 결과와 93kTPI인 실제 드라이브로부터 60회전 동안의 연속 PES신호를 측정하여 주파수 분석(분해능 2Hz)을 한 결과이다. 디스크 진동 측정 결과로부터 26%정도 에너지 감소 효과가 있음을 보여 준다. Fig. 9의 PES NRRO 스펙트럼을 볼 때, 700-1.5kHz 이하의 NRRO PES *스펙트럼에서의 대부분의 Peak들은 앞서 전술한 스피들-디스크 Dynamics의 공진 주파수들과 일치하고 있음을 볼 수 있다. 또한 디스크 댐퍼 삽입 후에 사라진 258Hz근처의 강한 Peak는 Actuator를 중심으로 발생된 Vortex-Induced Vibration성분임을 실험적으로 확인하였다. 따라서 디스크 댐퍼를 삽입 후 드라이브 내의 공기 유동 변화가 PES 관점에서 좋은 방향으로 작용하는 것으로 판단 된다. 그리고 500Hz 이하에서의 PES 에너지의 많은 부분은 Flow-Induced Disturbance에 의해 Actuator/Suspension Vibration에 의해 기인하는 것으로 판단되다[10]. Table 2는 헤드 별 평균을 취한 Overall, RRO, 그리고 NRRO PES 값을 보여준다.

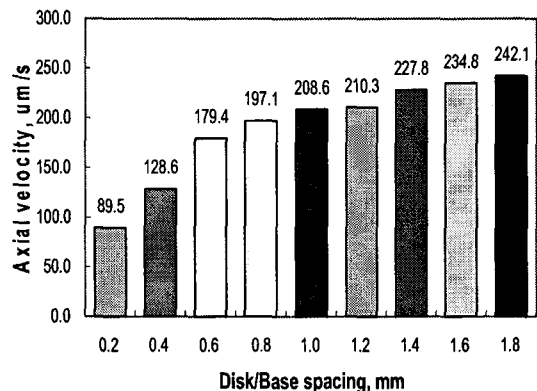


Fig. 4. Disk Axial Vibration on 7200 rpm according to the gap between disk and disk damper.

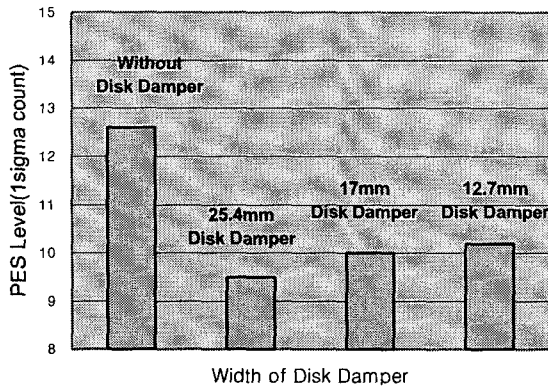


Fig. 5. Disk Axial Vibration on 7200 rpm according to the width of disk damper.

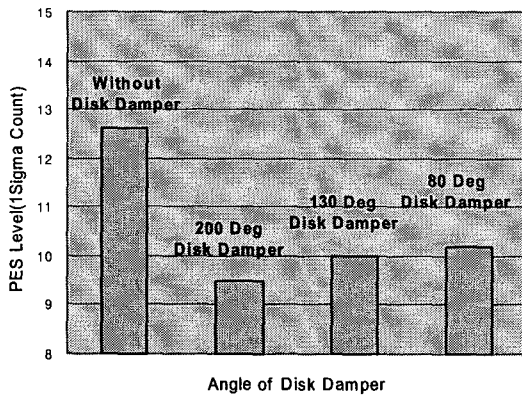


Fig. 6. Disk Axial Vibration on 7200 rpm according to the width of disk damper.

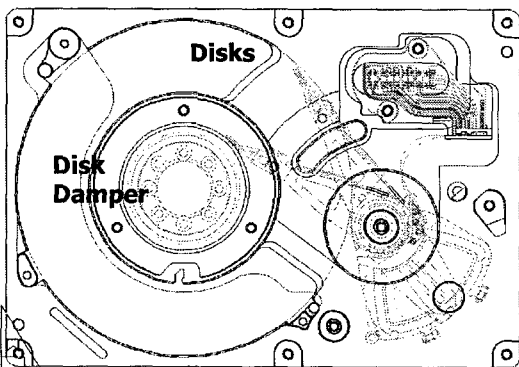


Fig. 7. Layout of Disk Damper and Disk Assembly.

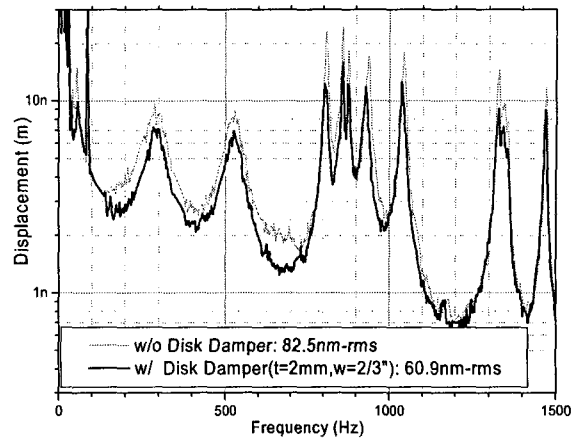


Fig. 8. Disk Vibration Spectrum of 7200rpm Disk Drive Measured on the OD of Top Disk.

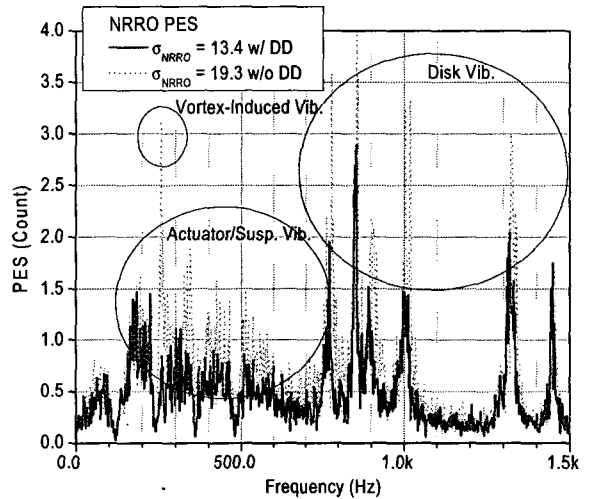


Fig. 9. Decomposed NRRO(Non-Repeatable Run-Out) PES Spectrum of the drives with disk damper and without disk damper in Head #3 of Outer Diameter position.

Table 2 Averaged Overall, RRO, and NRRO PES with disk damper and without disk damper.

Count	w/ Disk Damper			w/o Disk Damper			Difference		
	RRO	NRRO	Total	RRO	NRRO	Total	RRO	NRRO	Total
OD	10.1	13.2	16.6	10.1	18.7	21.3	0.0	-5.5	-4.7
MD	7.5	9.9	12.4	10.0	13.1	16.5	-2.5	-3.2	-4.1
ID	7.1	8.0	10.7	7.8	10.1	12.8	-0.7	-2.1	-2.1

5. 실험 계획법을 이용한 Disk Damper 최적 설계

4절에서 설계된 디스크 댐퍼를 바탕으로 실험 계획법을 통해 최적화된 형태의 디스크 댐퍼를 설계 하고자 하였다. 실험 계획법은 완전 요인 설계(Full Factorial Design)를 실시 하였고, 세계의

주 인자로 각도, 폭, 그리고, 간격을 2 수준으로 잡아 아래와 같이 총 8번의 실험을 하였다.

Angle : 200 deg, 258 deg
 Width : 18 mm, 30 mm
 Gap(Thickness) : 0.5mm(2mm), 0.35mm(2.3 mm)

여기서, 각각의 인자들의 하한(lower Limit)은 현재 디스크 댐퍼의 설계 값을 선정 하였고, 상한(Upper limits)은 최대한 설계 구현 가능한 값을 선정하였다. Table 3은 드라이브로부터 측정된 PES 신호를 바탕으로 전체 평균 RRO, NRRO, Overall PES를 표시한 것이다. 완전요인 설계는 MINITAB 프로그램을 사용하였다. Fig.10은 주 효과들 각각의 인자 별로 나타내 주며, 두께에 의한 효과가 가장 지배적인 인자임을 확인 할 수 있다. 추가적으로 Pareto Chart(Fig.11)는 두께 인자와 함께 교호작용을 나타내는 댐퍼의 면적(각도*폭)과 폭*두께 인자가 PES 저감에 중요한 역할을 한다는 것을 보여 준다. 최종 목표로 잡은 Overall PES 레벨을 현재의 수준보다 1.5CT(count) 줄어든 14.1 CT로 잡았을 때 최적화된 디스크 댐퍼 설계 안은 Fig.12와 같으며, Pilot 테스트 샘플로 측정된 PES 결과 RRO/NRRO/Overall PES가 9.0/10.7/14.0으로 목표로 했던 PES 수준을 만족함을 확인 할 수 있었다.

Table 3 PES Measurement Results for Full Factorial Design

			Current DD(Type 1)			Type 2			Type 3			Type 4		
Width	Angle	Gap	18	200	0.5	30	200	0.5	18	258	0.5	30	258	0.5
RRO	NRRO	Overall	9.6	12.3	15.6	10.9	13.3	17.2	10.0	12.8	16.3	8.5	13.0	15.6
			Type 5			Type 6			Type 7			Type 8		
Width	Angle	Gap	18	200	0.35	30	200	0.35	18	258	0.35	30	258	0.35
RRO	NRRO	Overall	9.1	11.5	14.7	8.6	11.4	14.3	9.8	11.8	15.4	7.9	11.7	14.1

Main Effects Plot (data means) for Total_OD_Ave

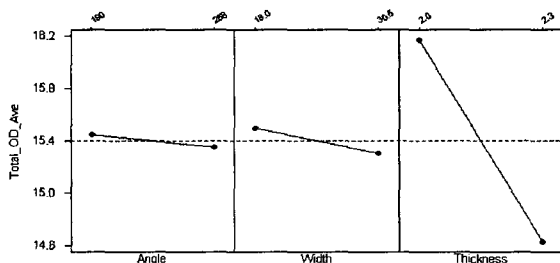


Fig. 10. Main Effect Plot for Full Factorial Design.

Pareto Chart of the Standardized Effects
 (response is Total_OD, Alpha = 10)

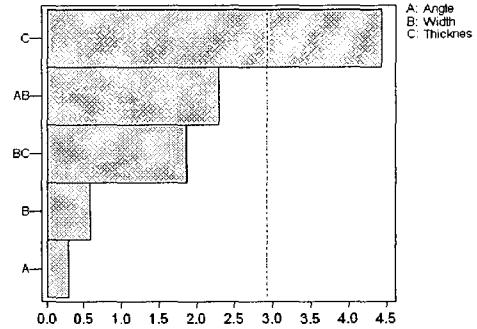


Fig. 11 Pareto Chart of the Reduced Model for Full Factorial Design.

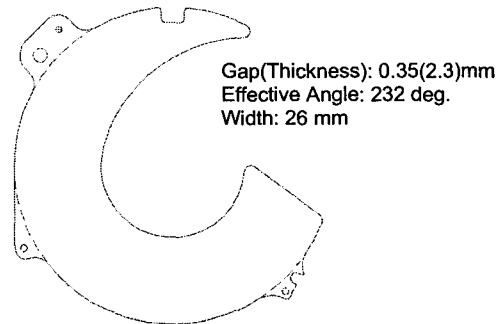


Fig. 12 Optimized Disk Damper by Full Factorial Design.

6. 결론

본 연구에서는 93kTPI 80Gbytes/Platter의 고밀도 HDD를 설계하기 위한 설계 조건과 TMR 설계 Budget를 산정하였다. 이를 바탕으로 TMR에 가장 큰 기여를 하고 있는 스핀들-디스크 시스템 Dynamics와 연성된 Servo 시스템을 동시에 살펴 보았다. 디스크 진동을 저감할 수 있는 Solution 방법으로 디스크 사이에 일정한 간격을 유지 할 수 있는 디스크 댐퍼를 설계하여 구현 하였고, 각각의 설계 인자에 대한 실제 밀폐된 드라이브 공간 내에서 디스크 진동 저감 효과를 분석하였다. 1차 선정된 디스크 댐퍼 설계는 간격/각도/폭이 각각 0.5mm/200°/17mm에서 디스크 댐퍼 설치 전후에 4.7 Count 저감 효과를 얻을 수 있었다. 최종적으로 현재 설계 구현 가능한 범위 내에서 최적 설계된 디스크 댐퍼를 통해 Overall PES 레벨이 14Count인 TMR Budget를 달성할 수 있었다.

감사의 글

연구비를 지원해 주신 삼성전자 스토리지 사업부 관계자 여러분과, 실제 제품 개발에 필요한 각종 정보, 및 기술적 조언을 아끼지 않은 Tho Pham 이하 동료 Engineer 에게 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] T. Yamaguchi, K. Usui, H. Hirai, F. Tomiyama, H. Numasato, Y. Hamada, and K. Shishida, "Modeling and TMR(Track Misregistration) Budget Design for Head-positioning of High Track-Density Drives," *Magnetics, IEEE Trans. on*, Vol. 35 No. 2, 1999, 892-897
- [2] L. Guo, H.S.Lee, A. Hudson, and S. Chen, "A Comprehensive Time Domain Simulation Tool for Hard Disk Drive TPI Prediction and Mechanical/Servo Enhancement," *Magnetics, IEEE Trans. on*, Vol. 35 No. 2, 1999, 879-884
- [3] R. Ehrlich and D. Curran, "Major HDD TMR Sources and Projected Scaling with TPI," *Magnetics, IEEE Trans. on*, Vol. 35 No. 2, 1999, 885-891
- [4] 강성우, 한윤식, 오동호, 황태연, Dan Blick, 김명엽, "80GB/PLATTER 하드 디스크 드라이브계를 위한 스피들-디스크 시스템 진동의 TMR 기여도 분석, 2001년도 추계학술대회 논문집, 2001
- [5] P. Srikrishna and K. Kasetty, "Predicting Track Misregistration (TMR) from Disk Vibration of Alternate Substrate Materials," *Magnetics, IEEE Trans. on*, Vol. 36 No. 1, 2000, 171-176
- [6] S. Imai, T. Okazaki, and K. Mori, "Flutter Reduction by Centrifugal Airflow for high-rotation-Speed Disks," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol9, 1988, 5-17
- [7] S. Deeyiengyang and K. Ono, "Suppression of Resonance Amplitude of Disk Vibration by Squeeze Air Bearing Plate," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol 37, No. 2, March, 2001, 820-825.
- [8] D. J. Jennings, "Squeeze Film Damping for A Hards Disc Drive," US 6239943 B1, May 29, 2001
- [9] 손영, 황태연, 한윤식, 강성우, Frank Morris, "고성능 하드 디스크 드라이브 개발을 위한 유체베어링 스피들 모터의 특성분석", *소음진동공학회*, 2001년도 추계학술대회 논문집, 2001.
- [10] 고정석, 강성우, 한윤식, 김영훈, 황태연, "High-TPI HDD 구현을 위한 PES Estimation에 관한 연구, 2002년도 추계학술대회 논문집, 2002.