

HDD의 DISK 진동감쇠 및 PES 저감을 위한 Disk Damper의 설계와 그 해석

Reduction of Disk Vibration and PES Using a Disk Damper

권 정 민* · 구 자 춘[†] · 강 성 우** · 한 윤 식** · 황 태 연**

J. m., Kwon, J. C. Koo, S. W. Kang, Y. S. Han and T. Y. Hwang

(2003년 8월 20일 접수 ; 2003년 12월 19일 심사완료)

Key Words : Hard Disk Drive(HDD), PES(position error signal ; 위치오류신호), LES(lager eddy simulation), Disk Flutter(디스크 진동), Disk Damper(디스크 댐퍼), Squeeze Air Bearing(공기베어링)

ABSTRACT

High speed rotating airflow inside a HDD chamber causes sub-micron scale disk vibration that could generate significant TMR problems in most of current HDD products. Many publications are presented for the reduction of airflow excitation. One of the most effective methods widely adopted in high-end HDD products is SqueezeAir Bearing Plate (SABP). However, because of its tight assembly clearance between the damper and disk, this method could not be easily implemented in volume production. This article presents a disk damper design that is modified to be feasible for volume production by virtue of a new airflow modeling method.

1. 서 론

최근 사회나 개인이 다루는 정보량이 기하 급수적으로 늘어남에 따라 좀 더 빠르고 안전하며 더 많은 저장용량을 갖춘 정보저장기기가 필요하게 되었다. 그 결과 정보저장기기 중 가장 경제성이 뛰어난 HDD(hard disk drive)가 여러 분야에서 많은 관심과 사용이 늘고 있다. 하지만 사용자가 요구하는 정보저장용량이 계속 높아짐에 HDD도 더욱더 고용량의 정보저장기술을 위한 연구가 필요하다.

HDD의 고용량화는 단위면적당 Data의 기록밀도를

높이는 방법으로 발전되어서 현재 HDD의 디스크 트랙의 밀도는 100 kTPI(track per inch)이고 트랙 폭은 10 μ m에 이른다. 앞으로도 트랙 밀도의 증가는 계속되어 금년에는 트랙밀도가 130 kTPI이고 트랙폭은 약 7.7 in가 예상된다.

트랙밀도의 증가는 미세한 진동에도 트랙을 읽고 쓸때 생기는 오동작인 트랙 비정렬(TMR : track misregistration)을 자주 유발하게 되어 결국 미세진동이 정보저장능력 증가의 제한요소로 작용하게 된다. 따라서 HDD회전체의 진동과 가진원을 억제하는 것이 HDD의 고용량의 정보저장기술에서 저장 용량 증가를 위한 중요한 요소가 된다. 이런 이유로 현재 미세진동저감을 위한 연구가 활발히 진행되고 있고⁽¹⁾ 이미 발표된 연구에서 HDD 미세 진동은 디스크 주변의 공기의 흐름인해 가진된다는 결과가 보고 되었다.^(2,3) 또 HDD내부의 공기 흐름이 PES(position error signal)에 직접적인 영향을 주는 것으로 밝혀졌다.⁽⁴⁾

[†] 책임저자 ; 정희원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : jckoo@me.skku.ac.kr

Tel : (031) 290-7454, Fax : (031) 290-5849

* 정희원, 성균관대학교 대학원 기계공학

** 삼성종합기술원

위와 같은 발표 이후 회전체 진동 중 공기에 의해 발생하는 미세진동을 감소시키는 여러 가지 해결방안이 제시 되었는데 그 중에서 squeeze film damping 효과를 적용한 air-bearing plate를 사용하는 방법(SABP)이 발표되었다.⁽⁴⁾ 이 방법은 디스크와 디스크 위쪽 cover사이의 공간에 디스크로부터 미세한 간격으로 떨어진 air-bearing plate를 설치하여 damping 효과를 얻는 것으로 공기의 흐름으로 인한 디스크 가진을 감소 시키고 air bearing 효과를 증대시켜 디스크가 진동하는 것을 억제하는 방법이다.

그러나 이 방법은 제품 상용화측면에서 plate와 disk사이의 간격이 약150 μm 정도 유지 되어야 하는 정밀도 문제로 실 양산 모델에 적용하는 것은 한계가 있다. 이 문제를 해결하기 위해 우리는 회전하는 두 개의 디스크 사이에 디스크로부터 간격이 수백 μm 정도 떨어진 damper를 설치하는 것을 고안하였고 이것을 장착한 HDD에서 100 kTPI 구현에 어려움이 없었다.

이에 본 논문에서는 damper의 설계를 위한 유동해석의 방법을 소개하고 그로부터 disk에 가해 지는 가진원을 분석하여 적절한 damper형상을 고안하고 이를 장착한 HDD에서 PES가 저감되는 것을 보이고자 한다.

2. 진동 감쇠방안

2.1 Squeeze Air Bearing 효과

HDD에서 디스크 pack이 회전시 복합적인 회전체 진동을 하게 되며 그 원인은 다양하다. 하지만 우리의 관심은 앞에 밝힌 바와 같이 회전하는 disk와 주변공기의 acoustic coupling에 의한 미세진동이며 이전에 발표된 진동 감쇠 방법으로는 Fig.1과 같이 HDD 디스크 중 가장 상위 디스크로부터 plate까지의

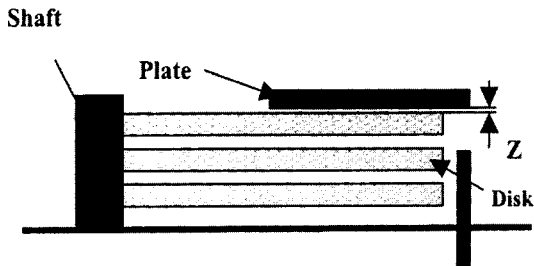


Fig. 1 SABP side view

거리인 Z를 40 μm ~250 μm 정도 떨어지게 설치하여 감소된 진동 패턴을 얻는 것이다. 이때 Z의 간격을 더욱 작게 하여 plate를 디스크에 가깝게 장착할수록 진동감소효과가 더 크고 설치된 plate가 디스크를 덮는 면적에도 영향을 받는다는 결과가 나와 있다.^(4,5)

먼저 본 연구에서는 squeeze air bearing 효과를 얻기 위한 적절한 damper의 형상을 설계하고 회전체 주변 유체의 비정상상태유동 해석방법을 확립하여 공기의 흐름으로 인한 가진력과 plate설치로 인한 감쇠 효과의 관계를 알아 보았다.

2.2 Damper의 설계

진동감쇠 방안으로 제시된 디스크 damper를 기존에 발표된 것처럼 40 μm ~250 μm 정도의 간격으로 설치할 경우 그 효용성이 비용과 제작 측면에서 비경제적이기 때문에 실제 제품에 반영되기 어렵다. 따라서 양산 제품화를 위한 이번 실험에서는 Fig. 2과 같이 두 개의 디스크 사이에 수백 μm 정도의 간격을 두고 반원형인 C자형 damper를 설치 하였다.

Fig. 3은 damper를 위에서 본 모습으로 damper의

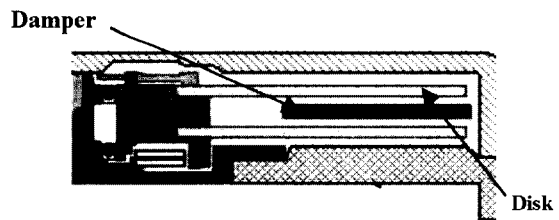


Fig. 2 Damper side view

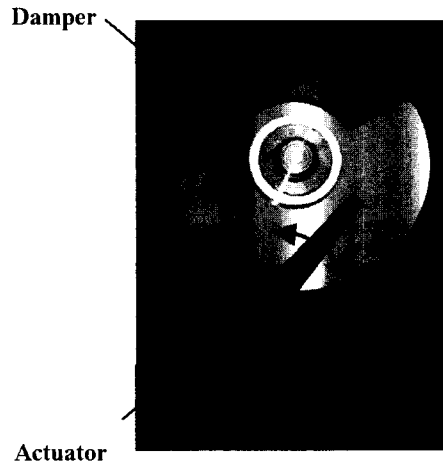


Fig. 3 Damper top view

형상은 actuator가 디스크 위를 움직일 때의 동선을 고려한 것이다. 고안된 damper 효과를 예측하기 위해 먼저 실제 HDD내부의 형상과 공기유동의 해석에 관해 제안된 수치해석 방법들을 검토하여 모델 하였다.^(2,5,6)

3. 유체가진 주파수 해석

3.1 비정상 유체 가진 해석

유체 해석에 적용된 방정식은 연속 방정식과 Navier-stokes 방정식으로 이때 온도 변화는 고려하지 않은 모델(isothermal)로 하였다.

이는 HDD가 열이 쉽게 전도되는 알루미늄으로 구성되어 회전에서 발생하는 열에 의한 온도 상승이 HDD 내부 온도가 거의 70 °C 미만으로 균일 하며 내부 유동에 큰 영향을 주지 않는다고 보았기 때문이다.

Steady-state 상태는 reynolds averaged 난류모델 ($K-\epsilon$)을 사용하였으며 이는 기본 Navier-stokes 방정식으로부터 K 를 난류 에너지, ϵ 을 난류에너지의 소산율로 표현하였다.⁽⁶⁾

Transient-state 해석에 사용된 turbulent model은 LES(lager eddy simulation)모델을 적용하였는데 이것은 기초방정식에 공간적 평균화 조작을 행하고 유동장을 격자로 해상할 수 있는 성분과 그 이하의 작은 성분으로 분리하여 전자는 직접계산 하고 후자는 모델화를 하는 해석 방법이다.^(2,6,7)

먼저 reynolds averaged navier-stokes(RANS)방정식을 유도하기 위해 navier-stokes 방정식에서 시간에 대해 평균 되어진 각 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (1)$$

이때 \bar{u}_i 와 u'_i 는 변화하는 속도를 나타내는 값이며 \bar{u}_i 는 전체시간에 대해 평균화한 값이 되며 u'_i 특정 시간에 대한 그 순간의 속도값으로 압력이나 다른 값의 물리량으로 표현할 수 있다.

식 (1)을 원래의 navier-stokes 방정식에 대입하고 이것을 이용 cartesian 응력으로 나타내면 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k})] \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)과 (3)을 reynolds averaged navier-stokes (RANS)방정식이라 하며 이때 $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ 은 reynold stresses이다.

RANS model이 난류에 의한 변동량을 시간 평균화한 것에 비해 LES는 시간평균을 이용하지 않기 때문에 시간 변동이 빠른 비정상유동에 응용이 용이하다. 따라서 LES모델을 사용하기 위해 다음에 주어진 식 (4)와 같이 공간도메인을 위한 filtering이 필요하다.

$$\bar{p}(x) = \int_{\Omega} p(x')G(x, x')dx' \quad (4)$$

위의 식 (4)에서 Ω 는 유체영역을 나타내며 G 는 시간의 흐름을 공간도메인으로 나타내기 위한 필터 함수이다.

여기서 사용된 유체해석 프로그램에서는 각각의 유체의 유체 볼륨에 대해 식 (5)과 같이 적용하였으며 V 는 계산된 cell의 부피이고 필터함수는 $G(x, x')$ 는 아래 식 (6)와 같이 정의된다.⁽⁷⁾

$$\bar{p}(x) = \frac{1}{V} \int_{\Omega} P(x')dx' \quad x' \in v \quad (5)$$

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V, & x' \in v \\ 0, & x' \text{ otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\tau_{ij} \equiv \rho u_i u_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (8)$$

$$\text{Re} = \frac{H \Omega R}{\nu} \quad (9)$$

식 (5~9)에서 각 항 중 P 는 열역학적 pressure, ρ 는 공기의 밀도를 나타내며 τ_{ij} 는 subgrid-scale stress, ν 는 미소 체적을 나타낸다. 또 R, Ω, H 는 각각 디스크의 반지름, 회전속도, 디스크사이의 간극을 나타내며 ν 는 공기의 동점성 계수를 나타낸다. 여기서 사용된 Subgrid-scale은 Smagorinsky-Lilly Model을 사용하였다.^(8,9)

위의 LES는 reynolds averaged navier-stokes equation의 시간 도메인 대신 공간의 도메인을 filtering을 이용, 유도하였기 때문에 효과적 결과 값을 얻기 위해서는 계산 mesh의 구성이 결과에 절대적 영향을 준다. 따라서 구성하고자 하는 모델의 mesh의 크기와 형상이 매우 중요하다. LES의 연구는 아직 초기단계이지만 고속회전체에 대한 난류해석 simulation에 적절히 쓰일 수 있다는 최근 연구결과가 나와 있다.⁽¹⁰⁾

3.2 해석방법

Damper를 통한 HDD의 PES 감쇠를 예측하기 위해 먼저 finite volume method를 적용한 상용 유체 해석 프로그램을 이용하였다.

이때의 Re(reynolds number)는 식 (9)에서 $\text{Re} = 5.116 \times 10^3$ 으로 회전속도가 7200 RPM인 하드디스크 모델을 처음부터 transient-state로 해석할 경우 해석 시간이 너무 많이 소요되므로 HDD내부의 유동장이 완전히 형성되는 steady-state를 reynolds average ($K-\epsilon$)모델로 해석한 후 그로부터 시간을 증가 시

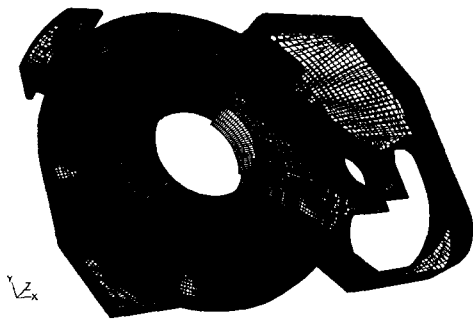


Fig. 4 With damper

켜 원하는 시간까지의 압력의 변화를 해석하여 디스크에 가해지는 가진을 구하였다.

Steady-state 유동장이 형성된 후 transient-state의 turbulent model은 LES(large eddy simulation) 모델로 적용하였다.

이렇게 구한 결과를 바탕으로 실제 HDD의 디스크 진동과 PES를 측정하였으며 이 두개의 결과를 비교하여 해석방법의 타당성을 검증하였다.

3.3 Geometry Setup

우선 양산 HDD모델과 동일한 모델을 구성하기 위해 노력하였고 해석을 효율적으로 하기 위해 HDD전체형상을 형상 단순화를 통해 최적화 시켰으며 damper 유무에 따른 두개의 모델을 구성 하였다.

Fig. 4은 위와 같은 과정으로 얻은 형상 중 damper를 장착한 HDD모델의 외부 grid 형상이다. 해석에 사용된 두 모델은 댐퍼의 유무만 다르고 전체적 구성 mesh 방법은 동일하며 구성 cell수는 약 350,000 개 정도 이고 node수는 약450,000 개 정도이다.

이전에 발표된 LES 해석중에서 road-vehicle의 경우 해석에 사용된 격자의 node 수가 7,915,600개 정도 되는 것에 비해서 이번 해석에 사용된 격자수는 Re수를 고려하더라도 적절한 수치이며 이것은 실험을 통해 HDD 구성품의 중요부위에 cell의 집적도를 높이고 그 외의 부분은 주변 cell의 조밀성을 고려해서 얻은 node수치이다. 또 실험결과를 통해 현 model size의 타당함을 알 수 있었다.⁽¹⁰⁾

3.4 해석내용

위와 같은 HDD 구성모델에서 damper의 유무에 따른 변화만 주고 유체의 변화를 10 msec 간격으로 1.5초까지 해석한 후 1.5초에서부터 시간을 0.2 msec 간격으로 2.1초까지 해석하였다. 이때 측정은 여러 주요지점에서 디스크 상하단과 actuator의 주변에서 dynamic pressure를 계산하였다. 이것은 디스크로 가해지는 가진이 디스크 상하단의 압력차로 인한 힘의 패턴에 따라 나타난다고 보았기 때문이다. 가진력 계산은 측정값의 시간 domain에서 주파수 domain으로 옮겨가는 오차를 최소화 하기 위해 1.4972초부터 2.1초까지 512의 5배인 2560개의 data sampling하였고 이것을 가지고 FFT로 변환하여 각 point에서 공기흐름으로 인한 가진 주파수를 구하였다.

4. 해석결과 검증

4.1 Disk 가진 주파수 분석

앞에서 언급된 바와 같이 5 kHz sampling으로 해석된 결과를 보면 Fig. 5처럼 damper가 없는 경우 160 Hz, 330 Hz, 480 Hz 부근에서 유체에 가진으로 보이는 주파수 pick들이 보였다.

해석결과의 검증을 위해 해석 모델이 되었던 실제 HDD의 디스크 진동을 측정된 결과인 Fig. 6과 비교해 보면 Fig. 5의 해석결과와 매우 유사하게 전체적인 주파수 대역에서 진폭의 감소가 나타나는 것을 발견할 수 있고 특히 160 Hz와 330 Hz대역에서 감소가 두드러지게 나타남 알 수 있다. 이것은 해석에서 진동의 가진력으로 본 유체흐름의 변화가 미세진동 감

쇠에 영향을 준다는 것을 증명한다.

이 결과로 볼 때 실제 제품의 양산성을 고려하여 제안된, 디스크로부터 수백 μm 간격으로 떨어진 damper의 설치로 디스크 미세진동의 가진으로 작용하는 공기의 흐름을 안정화 하였다.

이로 인해 디스크의 진동 중에서 전체가진주파수 대역의 진폭감소와 진폭이 큰 160 Hz와 330 Hz 대의 진동감소를 효과적으로 유도한다는 것을 알 수 있다.

4.2 Actuator 가진주파수 분석

Actuator에 가해지는 유체의 가진을 분석하기 위해 동일한 방법의 계산을 수행하였으며 그 결과 Fig. 7 처럼 simulation에서 나타난 300 Hz에서 500 Hz 사이의 actuator 가진주파수 대역 감소가 Fig. 8의 실제 실험을 통해 측정된 진폭감소 대역과 동일함을 알

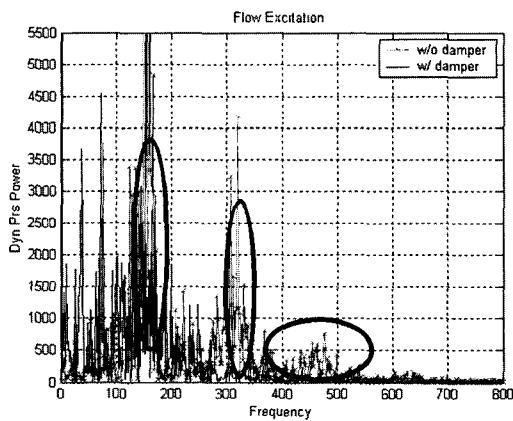


Fig. 5 Air flow excitation on disk

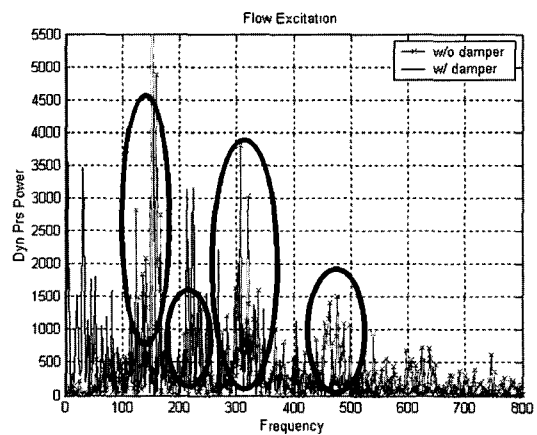


Fig. 7 Air flow excitation on actuator

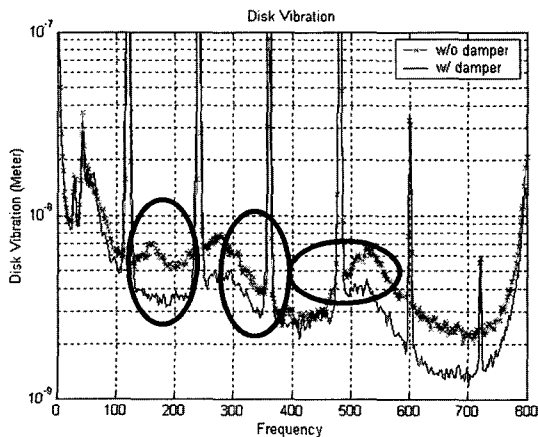


Fig. 6 Disk vibration

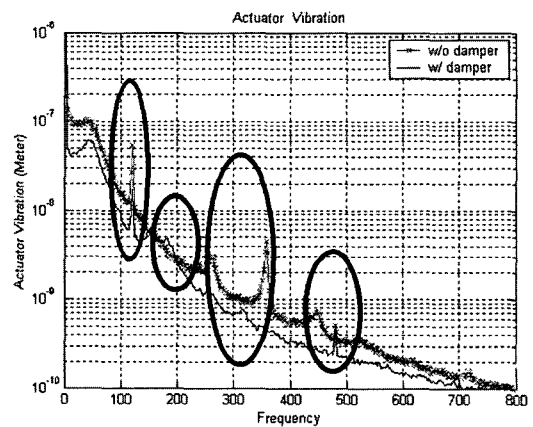


Fig. 8 Actuator vibration

수 있다.

이것은 damper의 설치가 disk의 미세진동의 진폭을 감쇠 하고 actuator의 미세 진동에도 감쇠효과를 나타내었다는 것으로 디스크 및 actuator진동의 진폭 감소를 유도한 것으로 볼 수 있다.

Actuator 가진주파수 분석에서는 디스크에서 보이지 않았던 약 120 Hz부근의 전체적인 vibration 감소 현상이 나타났고 계산과도 일치하게 나타났다. 또 damper 설치후 200 Hz 부근의 증가된 진동효과도 동일하게 나타남을 알 수 있다.

4.3 PES 감소

Damper를 설치 함으로 써 얻은 효과로 디스크와 actuator 미세진동감쇠 현상을 발견할 수 있었다. 하지만 이것은 공기의 가진이 직접적인 HDD내의 미세진동에 영향을 주는것을 확인하는 것 외에 고밀도 정보저장능력향상에 핵심인 PES감소효과에도 직접적인 영향관계를 알 수 없었다. 따라서 우리는 PES와의 관계도 주목하였는데 아래의 Fig. 9를 보면 damper의 영향이 PES 감소에도 효과적임을 발견할 수 있다.

Fig. 9의 PES NRRO(non-repeatable runout)의 감쇠를 분석해보면 여기서 보이는 진동 감쇠는 디스크와 actuator의 진동감쇠가 혼합되어 나타난 것으로 공기의 가진으로 본 주파수 대역인 250 Hz에서 500 Hz까지의 부분이 전체적 감소된 것을 볼 수 있다.

특히 damper를 설치하여 감쇠된 디스크 진동감소 대역인 330 Hz 전후의 부분이 뚜렷이 보이며 actuator의 510 Hz대역의 감소도 보인다. 이것은

HDD에서 발견된 미세진동의 가진원인 공기흐름이 고안된 damper로 인해 감쇠되고 그 결과가 HDD의 NRRO PES 감소로 이어져 고밀도 트랙을 위한 PES저감에 효과적인 방법임을 증명해 준다.

5. 결론

실제 HDD의 진동측정 결과와 model해석 결과 비교에서 알 수 있듯이 고속으로 회전할 때 발생하는 디스크의 진동중 acoustic coupling으로 인한 가진 요소를 직접 확인할 수 있었고, 미세진동 감쇠 제안으로 기존의 SABP의 plate에서 착안한 두개의 디스크 사이에 설치된 damper가 효과적인 진동감쇠 방법임을 확인하였다. 이런 결과를 통해 160 Hz, 330 Hz, 480 Hz 부근에서 유체에 가진으로 보이는 주파수 pick이 가진력으로 작용함을 알 수 있었다.

따라서 HDD에 디스크 미세진동 저감을 목적으로 damper를 장착할 경우 디스크와 actuator의 미세진동 저감은 물론 HDD가 고밀도 트랙으로 고용량화 될 때 문제되었던 PES증가를 감소하는데도 효과적으로 사용될 수 있다는 것을 유체해석과 실제 측정된 결과를 통해 검증하였다.

또 해석에 사용된 HDD내부의 공기해석 기법중 유동유체계산을 위한 내부 유체공간의 cell의 grid 구성 방법과 transient-state 해석을 위해 선행된 steady-state 계산후의 LES 모델적용 방법등은 HDD 고속회전 전체 진동감쇄 설계를 위한 예측기법에 타당함을 보였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 우수연구센터인 성균관대학교 산업설비 안전성평가센터의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Humphrey, J. A. C., Schuler, C. A. and Lgesias, I. 1992, "Analysis of Viscous Dissipation in Disk Storage Systems and Similar Flow Configurations," A4(7), Phys. Fluids, American Institute of Physics.

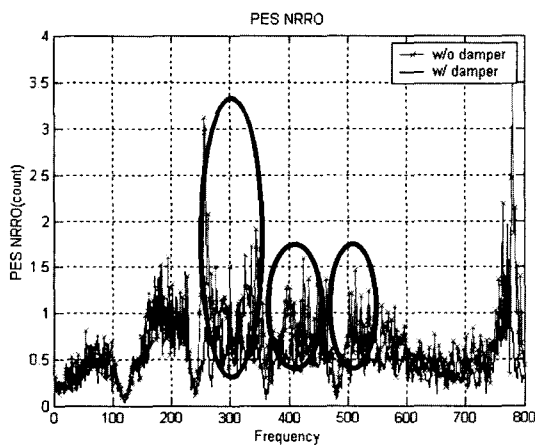


Fig. 9 PES NRRO

- (2) Kyosuke, O. and Eitaro, M. 2000, "Suppression of Disk Flutter by a Squeeze Air Bearing Plate," Vol. 2, pp. 33~40, Journal of Information Storage and Processing Systems.
- (3) Masayuki, T., Naozumi, T. and Tsugito, M. 2001, "An Analysis of Disk Flutter in Hard Disk Drives in Aerodynamic Simulations," March Vol. 37, No. 2, IEEE Transaction on Magnetics.
- (4) Chang, C. J., Schuler, C. A., Humphrey, J. A. C. and Greif, R., 1989, "Flow and Heat Transfer in the Space Between Two Corotating Disks in an Axisymmetric Enclosure," Vol. 111, pp. 625~632, Journal of Heat Transfer, Transactions of ASME.
- (5) Schuler, C. A., Weber, W. U., Humphrey, J. A.C. and Greif, R., 1990, "On the Flow in the Unobstructed Space between Shrouded Corotating Disks," A2(10), pp. 1760~1770, Phys. Fluids, American Institute of Physics.
- (6) 망천충일, 1999, "수치유체공학," pp. 353~369 도서출판 한미.
- (7) "Fluent User's Guide," 2001, Vol. 2, pp. 14~55, fluent Inc.
- (8) Smagorinsky, J. 1963, General Circulation Experiments with the Primitive Equation. I. The Basic Experiment. Month. Wea. Rev., 91:99~164.
- (9) Lilly, D. K., 1966, On the Application of the Eddy Viscosity Concept in the Inertial Subrange of Turbulence. NCAR Manuscript 123.
- (10) Parviz, M., 2002, "Advances in Large Eddy Simulation Methodology for Complex Flow," pp. 710~720, International Journal of Heat and Fluid Flows.