

재배치 시간-주파수 해석을 이용한 슬라이더 공기베어링의 비정상 거동 연구

Study on the Nonstationary Behavior of Slider Air Bearing Using Reassigned Time-frequency Analysis

정 태 건†

Tae-Gun Jeong

(2005년 10월 27일 접수 : 2006년 2월 16일 심사완료)

Key Words : Reassigned Time-frequency Analysis(재배치 시간-주파수 해석), Wigner-Ville Distribution(WVD, 위그너-빌 분포), Short Time Fourier Transform(STFT, 단시간 푸리에 변환), Nonstationary Signal(비정상 신호)

ABSTRACT

Frequency spectrum using the conventional Fourier analysis gives adequate information about the dynamic characteristics of the slider air bearing for the linear and stationary cases. The intermittent contacts for the extremely low flying height, however, generate nonlinear and nonstationary vibration at the instant of contact. Nonlinear dynamic model should be developed to simulate the impulse response of the air bearing during slider-disk contact. Time-frequency analysis is widely used to investigate the nonstationary signal. Several time-frequency analysis methods are employed and compared for the slider vibration signal caused by the impact against an artificially induced scratch on the disk. The representative Wigner-Ville distribution leads to the severe interference problem by cross terms even though it gives good resolution both in time and frequency. The smoothing process improves the interference problem at the expense of resolution. In order to get the results with good resolution and little interference, the reassignment method is proposed. Among others the reassigned Gabor spectrogram shows the best resolution and readability with negligible interference.

1. 서 론

하드 디스크 드라이브(HDD, hard disk drive)의 기록밀도가 계속 높아지면서 슬라이더 공기베어링에 대한 연구가 더욱더 활발히 진행되고 있다. 종래의 슬라이더 공기베어링 연구는 정적해석을 바탕으로 슬라이더 레일 형상의 설계에 초점을 두어 왔다. 정상

레이놀즈 방정식에 기초하여 극히 낮은 부상높이에 적절한 특수 경계조건을 적용하고 주어진 하중조건에 따라 정상 부상상태와 베어링 강성을 계산하는 과정은 레일의 최적형상 설계에 필수적인 부분이다. 슬라이더 공기베어링의 정적해석이 매우 안정적으로 수행됨에 따라 공기베어링 연구의 관심은 여러 운전조건에 부응하는 최적설계기법으로 옮겨가고 있다.^(1,2)

슬라이더 공기베어링 연구의 또 다른 중요한 관심사는 동특성 해석이다. 낮은 부상높이로 슬라이더-디스크 접촉 가능성이 더 높아지면서 안정적인 부상상태를 유지할 수 있는 동특성에 관한 지식이 매우 중요하게 되었다.⁽³⁾ 슬라이더 공기베어링의 동특성 해석

† 책임저자; 정희원, 건국대학교 기계항공공학부
E-mail : tgjeong@konkuk.ac.kr
Tel : (02) 450-3471, Fax : (02) 447-5886

방법의 하나로 비정상 레이놀즈 방정식과 슬라이더 운동방정식을 연계해서 수치계산을 하게 되는데 이것은 매우 복잡하고 시간이 많이 걸리는 작업이기 때문에 직접 수치 시뮬레이션을 하기보다는 적절한 공기베어링 모델을 구해 계산하는 방법을 채택하게 된다.⁽⁴⁾ 이 과정에서 선형 공기베어링 모델을 사용하면 계산은 간단하지만 원래 비선형인 공기베어링 특성을 제대로 나타내지 못하는 문제점이 있다. 특히 HDD의 부상높이가 10 nm 이하로 내려가는 경우에는 수 nm의 부상변동량(flying fluctuation)에도 비선형 효과가 크게 증가하게 되어 선형모델을 사용한 계산결과가 의미를 잃게 된다.⁽⁵⁾

비선형 효과를 고려한 공기베어링 모델을 구하기 위해서는 실제 공기베어링의 비선형성에 대한 정보를 알아야 한다. 공기베어링의 수치 시뮬레이션 계산결과를 이용하여 비선형성을 평가하는 방법도 생각할 수 있으나 실제 슬라이더 공기베어링의 거동을 측정할 실험결과를 이용하여 비선형성을 연구하는 방법도 유용하다.

공기베어링의 동특성에 관한 실험 또는 수치해석 결과를 분석하기 위해 푸리에 변환을 많이 사용해 왔는데 이 방법은 원칙적으로 정상신호에 적용할 때 좋은 결과를 준다. 공기베어링의 동특성 연구에는 주로 임펄스 응답을 사용하게 되는데 이 경우는 전형적인 비정상(nonstationary) 신호이고 게다가 비선형 효과까지 포함되어 있어 단순히 푸리에 변환만으로는 우리가 원하는 정보를 얻을 수 없다.^(6~8)

이 논문에서는 시간-주파수 해석^(9,10)을 통해 슬라이더 공기베어링의 비정상 거동을 자세히 분석했다. 슬라이더를 스크래치 디스크 위에 부상시켜 인위적으로 슬라이더-디스크 접촉을 발생시키고 그 슬라이더의 운동을 레이저 진동계로 측정했다. 가장 기본적인 단시간 푸리에 변환(short time Fourier transform)으로부터 재배치 가보 스펙트로그램(reassigned Gabor spectrogram)에 이르는 일련의 시간-주파수 해석법을 측정된 속도 신호에 적용시킨 결과를 서로 비교함으로써 공기베어링의 비정상 거동을 시간-주파수 평면에 상세하게 나타내 보았다.

2. 슬라이더 공기베어링의 부상 실험

2.1 실험장치 및 방법

실험에 사용된 장치는 시게이트 ST-225를 실험

목적에 맞게 개조한 것으로 슬라이더 착탈과 높이 조정을 할 수 있게 되어 있고, 피동형 공압식 방진 광학테이블(Newport VH3048-OPT, 수직 고유진동수 2 Hz 이하에서 전달률 15 dB 이하)에 설치해서 주변 진동과 절연시킨다(Fig. 1). 칼날을 사용하여 디스크에 흠집을 내고 그 위로 슬라이더를 부상시켜 슬라이더-디스크 접촉을 발생시킨다. 이 접촉으로 슬라이더가 임펄스를 받아 공기베어링이 교란되어 임펄스 응답과 비슷한 거동을 보이게 된다. 이때 슬라이더의 진동을 측정하면 그것이 바로 공기베어링의 응답이 된다. 실험에 사용된 슬라이더의 구조와 제원은 Fig. 2와 같다.

슬라이더 뒷면을 광섬유형 레이저 진동계(polytec)로 측정하고 그 결과를 오실로스코프(tektronix TDS 2002)에 저장시킨 후 컴퓨터를 이용하여 신호처리를 한다. 슬라이더 공기베어링의 임펄스 응답 및 슬라이더 자체의 탄성변형에 따른 진동성분은 디스크 런아웃(runout) 성분에 견주어 매우 높은 주파수 성분을 가지므로 고대역 필터(10 kHz)를 사용하여 디스크 런아웃 성분을 걸러낸다. 실험결과는 1 μ sec의 샘플링 간격으로 1024개의 데이터를 받아 처리한다.

2.2 실험결과

Fig. 3은 슬라이더-디스크 접촉으로 임펄스를 받아 진동하는 슬라이더의 시간 응답을 레이저 진동계로 측정한 결과이다. 공기베어링의 고유진동수에 해당하는 큰 진폭의 진동과 슬라이더의 탄성변형 고유진동수에 해당하는 작은 진폭의 고주파 진동이 1 ms 정도까지 지속되고 있다. 특히 임펄스 직후의 공기베어링 진동은 매우 불규칙하여 선형계의 임펄스 응답과는 많은 차이가 있다. 이것은 부상높이가 급격히 변

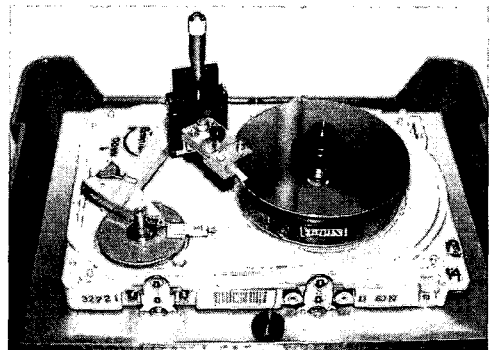


Fig. 1 Modified HDD with slider-head assembly

화하는 순간에 공기베어링 강성이 같이 변화하게 되어 전형적인 비선형계의 특성을 나타내기 때문이다.

신호의 주파수 특성을 분석하기 위해 일반적으로 푸리에 변환을 많이 사용한다. Fig. 3의 임펄스 응답에 대한 주파수 스펙트럼을 구한 결과는 Fig. 4와 같다. 10 ~ 30 kHz 부근의 공기베어링 고유진동 성분과 135 kHz 부근의 슬라이더 탄성진동 성분이 뚜렷이 분리되어 나타나 있다.

슬라이더 탄성진동의 경우는 슬라이더-디스크 접촉에 따른 충격량이 아주 작기 때문에 일반적인 탄성 구조물의 임펄스 응답과 같이 선형진동으로 볼 수 있고 Fig. 4에서도 단일 진동수로 잘 정의되어 나타나

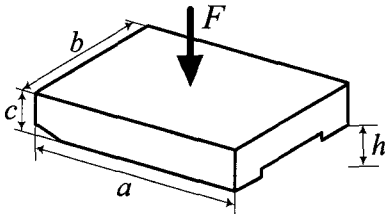


Fig. 2 Mini-winchester slider ($a=4.01$ mm, $b=3.18$ mm, $c=0.86$ mm, $F=0.0932$ N, $m=0.071$ g, $h \cong 100$ nm)

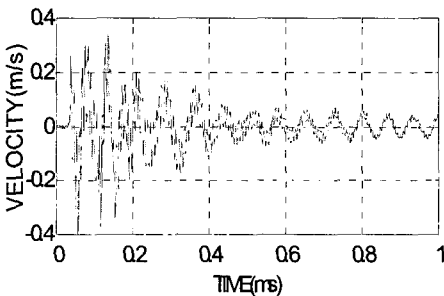


Fig. 3 Slider motion flying over the scratch

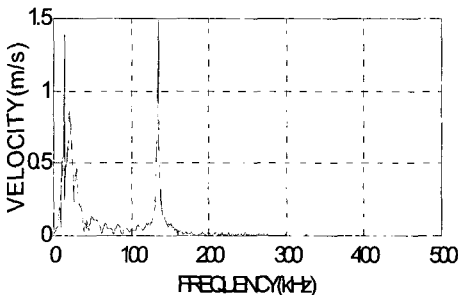


Fig. 4 Frequency spectrum of slider motion

다. 그러나 슬라이더 공기베어링의 강성은 슬라이더의 탄성강성에 견주어 매우 작기 때문에 슬라이더-디스크 접촉에 따른 충격량이 부상높이를 크게 변화시키게 된다. 만일 부상높이의 변화가 선형구간 내에 존재한다면 공기베어링의 모드해석을 실시하여 세 개의 공기베어링 고유진동수(상하, 피치, 롤 모드)를 구할 수 있다. 그러나 부상높이의 변화가 선형구간을 벗어나게 되면 모드해석 결과는 의미를 잃게 되고 공기베어링의 고유진동수는 시간에 따라 변화하게 된다.

Fig. 4는 신호 전체에 걸친 주파수 성분을 나타내기 때문에 여기에 나타난 공기베어링 고유진동수 성분들이 선형구간 내에 있는지에 대한 아무런 정보도 제공하지 못하고 있고 시간에 따른 고유진동수 변화도 알 수 없다. 임펄스 응답의 특성상 이 신호는 비정상(nonstationary) 신호이므로 푸리에 변환의 적용은 더 어려워진다. 공기베어링의 비선형, 비정상 거동을 판별하기 위한 수단으로 여러 종류의 시간-주파수 해석법을 적용하여 가장 적합한 방법을 찾아 그 결과를 분석해 볼 필요가 있다.

3. 비정상 신호의 시간-주파수 해석

3.1 푸리에 해석

푸리에 변환은 시간 영역에서 구한 신호의 주파수 특성을 나타내는 매우 강력한 수단으로 여러 분야에서 사용된다.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

식 (1)을 자세히 살펴보면 신호 $x(t)$ 를 시간에 대해 균일한 무한 파동 $e^{i2\pi ft}$ 의 집합으로 확장해서 얻은 계수들로 표현하고 있다. 이것은 신호 전체에 포함되는 주파수 성분들의 크기와 위상은 나타낼 수 있지만 언제 이 주파수 성분들이 나타나는지를 표시할 수는 없다. 특히 슬라이더 공기베어링의 임펄스 응답과 같은 비선형, 비정상 신호를 해석할 경우에 푸리에 변환만으로는 주파수 특성을 제대로 표현할 수 없으므로 요구되는 정밀도에 따라 여러 종류의 시간-주파수 해석 기법을 사용할 필요가 있다.

3.2 선형 시간-주파수 해석

선형 시간-주파수 해석은 신호를 가중 주파수변조

창함수(weighted frequency modulated window function)로 확장해서 국소 시간 및 주파수 영역에서 신호의 거동을 나타내는 방법이다. 가장 기본적인 단 시간 푸리에 변환(short time Fourier transform, 이하 STFT로 칭함)은 다음과 같다.

$$F_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)h^*(u-t)e^{-i2\pi fu} du \quad (2)$$

여기서 $x(t)$ 는 측정된 신호이고 $h(u-t)$ 는 시간 t 에 중심을 둔 창함수를 나타낸다. STFT의 시간 해상도는 창함수 h 의 유효지속시간에 비례하고, 주파수 해상도는 h 의 유효대역폭에 비례한다. 이 두 가지는 서로 상충되므로 불확정성 원리에 따라 시간 해상도와 주파수 해상도를 동시에 높일 수 없다. 따라서 선형 해석은 교차항 간섭이 없다는 장점이 있는 반면에 해상도가 떨어지는 단점을 가지고 있다.

샘플된 신호에 대한 이산(discrete) STFT는 가보 계수(Gabor coefficient)라 하고 다음과 같이 계산된다.

$$G_x[n, m; h] = \sum_k x[k]h^*[k-n]e^{-i2\pi mk} \quad (3)$$

여기서 n 과 m 은 시간-주파수 평면을 나타낸다. 이 연구에서 사용한 창함수는 해밍(Hamming) 창함수로 다음과 같다.

$$h(n) = 0.54 + 0.46c \left[\left(\frac{2\pi}{N} \right) n \right] \quad (4)$$

3.3 곱선형 시간-주파수 해석

곱선형 해석(bilinear analysis)을 사용하면 신호의 에너지 분포를 나타낼 수 있으므로 여러 측면에서 유리하다. 식 (5)와 같이 단순히 STFT의 제곱을 이용한 스펙트로그램(spectrogram)은 시간과 주파수에 공변(covariant)하는 에너지 분포를 나타내지만 선형 해석과 같은 해상도를 가지게 되므로 STFT를 사용한 결과와 큰 차이가 없다.

$$S_x(t, f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(u)h^*(u-t)e^{-i2\pi fu} du \right|^2 \quad (5)$$

이 스펙트로그램의 제곱 과정에서 복합신호에 대한 교차항이 생길 수 있으나 두 신호성분이 충분히 떨어

져 있으면 간섭은 거의 사라지게 된다.

곱선형 시간-주파수 해석에서 가장 대표적인 위그너-빌 분포(Wigner-Ville distribution, 이하 WVD로 칭함)는 다음 식으로 표현된다.

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau/2)x^*(t-\tau/2)e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

여기서 x^* 는 x 의 켈레복소함수이다. WVD는 최고의 해상도를 나타낼 수 있지만 필연적으로 교차항이 나타나게 된다. 특히 여러 신호가 복합된 경우에는 교차항 간섭 문제가 심각하게 된다. 실제 계산과정 중 $-\infty$ 에서 $+\infty$ 까지 변하는 τ 값에 대해 $x(t+\tau/2)x^*(t-\tau/2)$ 의 값을 정하는 데는 문제점이 있으므로 여기에 창함수를 곱한 꼴을 주로 사용한다. 이것을 유사 위그너-빌 분포(pseudo-WVD)라 하고 다음과 같이 표현한다.

$$PW_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t+\tau/2)x^*(t-\tau/2)e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (7)$$

이것은 주파수 평활화(frequency smoothed) WVD에 해당되므로 진동특성을 갖는 교차항의 고주파 성분이 사라지면서 간섭이 감소되는 효과가 있다. 교차항 간섭을 더 완화시키기 위한 방법으로 식 (8)과 같이 시간과 주파수 영역을 각각 별도로 평활화시킨 효과를 내는 평활화 유사 위그너-빌 분포(smoothed-pseudo-WVD)를 사용하기도 한다. 평활화 유사 WVD는 간섭이 없는 스펙트로그램과 해상도가 최고인 WVD 사이의 최적 절충안을 나타낸다.

$$SPW_x(t, f) = \iint h(\tau)g(s-t)x(s+\tau/2)x^*(s-\tau/2)e^{-i2\pi f\tau} ds d\tau \quad (8)$$

3.4 재배치법

위그너-빌 분포의 교차항 문제를 획기적으로 해결하면서 해상도를 높이는 방법으로 재배치(reassignment) 방법을 사용할 수 있다. 이 방법은 원래 스펙트로그램을 개선하기 위해 제안된 것이다.^(9,10) 스펙트로그램을 WVD의 2차원 컨볼루션으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$S_x(t, f) = \iint W_x(s, \xi) W_h(t-s, f-\xi) ds d\xi \quad (9)$$

이 식에서 $W_x(s, \xi)W_h(t-s, f-\xi)$ 는 시간-주파수 영역을 점 (t, f) 주변으로 한정시키는 작용을 한다. 재배치법의 원리는 신호의 WVD 값을 이 기하 중심 주변에 대칭 분포시킬 것이 아니라 국소 에너지 분포를 더 잘 나타내는 무게중심 주변에 분포되도록 하는 것이다. 시간-주파수 평면의 각 점 (t, f) 에서 계산된 스펙트로그램 값을 신호의 에너지 분포 중심 (\bar{t}, \bar{f}) 으로 이동시키면 교차항 간섭이 줄게 된다.

$$t'(t, f) = \frac{\iint s W_h(t-s, f-\xi) W_x(s, \xi) ds d\xi}{\iint W_h(t-s, f-\xi) W_x(s, \xi) ds d\xi} \quad (10)$$

$$f'(t, f) = \frac{\iint \xi W_h(t-s, f-\xi) W_x(s, \xi) ds d\xi}{\iint W_h(t-s, f-\xi) W_x(s, \xi) ds d\xi} \quad (11)$$

여기서 W_x 는 시간 영역의 WVD이고 W_h 는 주파수 영역의 WVD이다. 이동된 중심을 이용하여 계산한 재배치 스펙트로그램은 다음과 같다.

$$S_x^{(r)}(t, f) = \iint S_x(s, \xi) \delta(t-t'(s, \xi)) \delta(f-f'(s, \xi)) ds d\xi \quad (12)$$

스펙트로그램의 절대값 제곱 특성과 함께 STFT의 위상정보도 같이 유지하는 특징을 가지고 있는 재배치법은 곱셈형은 아니지만 WVD가 가지고 있는 모든 장점을 유지하게 한다. 특히 가보 스펙트로그램 (Gabor spectrogram)이라 부르는 $h(t) = e^{-at^2}$ 인 경우는 재배치 계산이 매우 간편해지는 이점이 있어 많이 사용되고 있고 이 연구에서도 가장 빠르고 우수한 결과를 나타내었다.

재배치법은 다른 모든 시간-주파수 해석법에도 사용될 수 있다. 평활화 유사 위그너-빌 분포의 컨볼루션 표시와 무게중심 계산식은 다음과 같다.

$$SPW_x^{g,h}(t, f) = \iint g(s-t) H(\xi-f) W_x(s, \xi) ds d\xi \quad (13)$$

$$t'(t, f) = t + \frac{SPW_x^{g,th}(t, f)}{SPW_x^{g,h}(t, f)} \quad (14)$$

$$f'(t, f) = f - i \frac{SPW_x^{dg,h}(t, f)}{SPW_x^{g,h}(t, f)} \quad (15)$$

여기서 $th = th(t)$, $dg = g'(t)$ 를 나타낸다.

4. 슬라이더 공기베어링의 시간-주파수 해석

슬라이더 공기베어링의 비선형, 비정상 거동을 분석하기 위해 가장 간단한 STFT부터 적용해 보았다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 200 kHz 이상에 대해서는 유효신호가 거의 없으므로 Fig. 5 이후로 시간-주파수 평면을 200 kHz까지만 나타낸다. 시간-주파수 평면에서 속도성분을 나타내기 위해 같은 크기의 속도성분을 나타내는 등고선 선도를 이용했다. 우선 135 kHz의 슬라이더 탄성변형 성분은 임펄스 초기에 약간 퍼져 있을 뿐 거의 일정함을 볼 수 있고 약 0.7 ms까지 지속됨을 알 수 있다. 50 kHz 이하에서 나타나는 공기베어링 성분은 0.2 ms에 이르기까지는 여러 성분이 혼재되어 변화하다가 0.3 ms 이후로는 14 kHz 성분이 거의 일정하게 나타나면서 1 ms 이후까지 지속되고 있음을 알 수 있다. 50 kHz 부근에도 약간의 진동성분이 있음을 알 수 있으나 해상도가 낮아 정확한 판별은 어렵다.

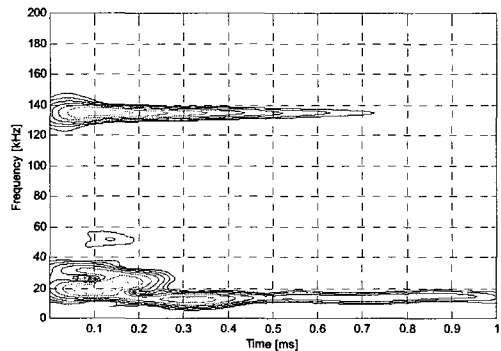


Fig. 5 Short time Fourier transform

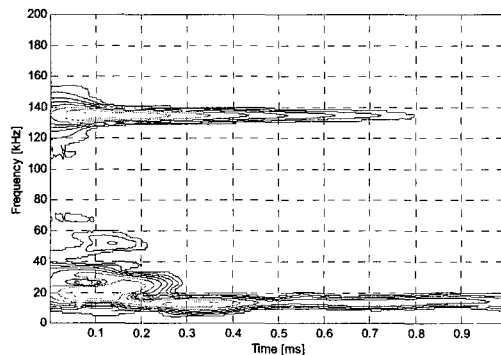


Fig. 6 Spectrogram

Fig. 3을 보면 0.05 ms에서 임펄스가 가해지는데 Fig. 5의 STFT 그래프에서는 이 부분이 분명하지 않다. STFT는 주파수 성분의 대략적인 추세를 보여주지만 해상도가 낮아 자세한 내용을 알기 어렵다. 이것은 STFT의 시간 및 주파수 해상도가 하이젠베르그-가보 부등식에 따라 결정되기 때문이다. 주파수 해상도를 높이기 위해 창함수의 유효 대역폭을 넓히면 다시 시간 해상도가 떨어져 역시 전체 해상도에는 변화가 없다.

STFT를 강조하는 효과가 있는 스펙트로그램(Fig. 6)은 부분적으로 개선된 결과를 보여주지만 STFT와 큰 차이가 없고 오히려 70 kHz 근처에 간섭항이 나타났다.

공기베어링 성분의 비선형성을 판별하기 위해서는 더 높은 시간 및 주파수 해상도가 요구된다. STFT의 해상도를 높이기 위해 곱선형 해석에서 가장 기본적인 위그너-빌 분포(WVD)를 구해보았다. Fig. 7에서 보는 것처럼 20 kHz 부근의 공기베어링 성분과 135 kHz의 탄성진동 성분이 서로 교차하면서 60 kHz 및 78 kHz에서 뚜렷한 간섭성분이 나타나고 그 주위로

간섭성분들이 교차분포되어 있어 실제 운동성분을 인식하기는 거의 불가능하다. Fig. 5의 STFT 결과를 참고하면서 Fig. 7의 WVD 결과를 분석하면 13 kHz 성분과 135 kHz 성분이 언제까지 지속되는지를 정확하게 알 수 있다.

WVD는 단일 신호에 대해서는 매우 해상도가 높은 좋은 결과를 나타내지만 이 경우와 같이 비슷한 수준의 신호가 섞여 있는 경우에는 간섭문제가 심각해진다. WVD의 간섭문제를 완화시키기 위해 시간 평활화 및 주파수 평활화를 동시에 시행하는 평활화 유사 WVD(Fig. 8)를 적용해 보았다. WVD에서 보이던 간섭성분이 많이 사라졌지만 70~80 kHz 부근에 미세한 간섭항이 아직 남아있음을 볼 수 있다. 또 평활화 과정에서 필연적으로 해상도가 감소하게 되어 WVD의 높은 해상도를 많이 상실했다. Fig. 6의 스펙트로그램과 비교하면 0.1~0.2 ms 구간에서 진동성분이 더 잘 분리되어 있으나 아직도 충분한 해상도를 얻지 못했다.

간섭성분을 최대한 억제하면서 해상도를 WVD 수준으로 높이기 위해 재배치법을 사용했다. 기하중

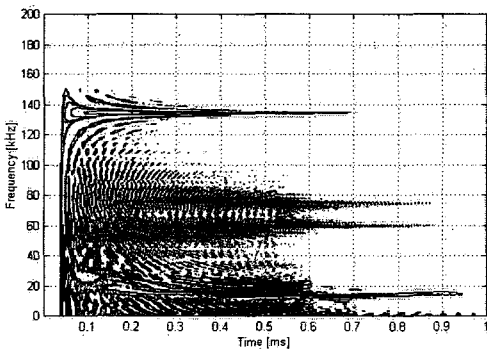


Fig. 7 Wigner-Ville distribution

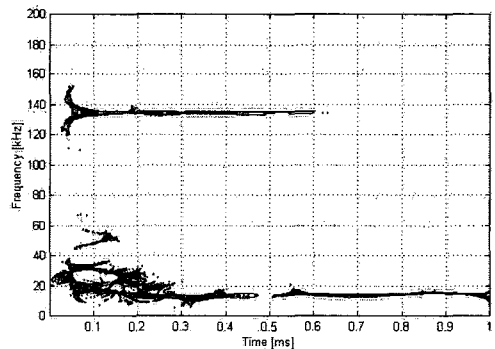


Fig. 9 Reassigned smoothed pseudo WVD

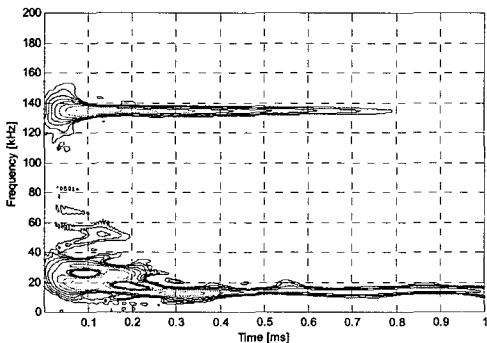


Fig. 8 Smoothed pseudo Wigner-Ville distribution

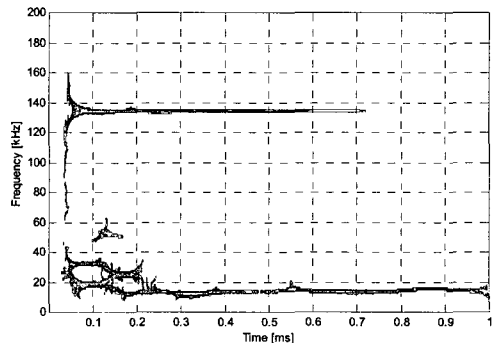


Fig. 10 Reassigned Gabor spectrogram

심에서 에너지 분포 중심으로 WVD 값을 이동시키는 식 (13)에 따라 계산된 재배치 평활화 유사 WVD는 Fig. 9와 같다. 재배치 스펙트로그램 식 (12)에서 특별히 $h(t) = e^{-\alpha t^2}$ 인 경우를 계산한 재배치 가보 스펙트로그램은 Fig. 10과 같다. 두 경우 모두 획기적으로 해상도가 높아졌고 간섭성분이 없어 가독성도 매우 뛰어나다. 두 방법 중 어느 것이 더 좋은 것인지는 원신호의 특성에 따라 다른데 본 실험결과에 대해서는 재배치 가보 스펙트로그램이 신호 시작 부분에서 더 높은 해상도를 보여주고 있고 전체적인 해상도도 더 우수하다.

재배치 가보 스펙트로그램 결과를 바탕으로 슬라이더 공기베어링의 동특성을 살펴보면 임펄스가 가해진 후 0.1 ms까지는 20 kHz 및 32 kHz 성분이 존재하다가 0.15 ~ 0.2 ms 사이에서 13 kHz 및 25 kHz 성분으로 변화해 간다. 0.2 ms 이후에는 13 kHz의 단일성분으로 계속 지속된다. 이 상황은 임펄스 직후에 부상높이가 크게 변화하면서 공기베어링의 강성이 이중(수직 모드와 피치 모드)으로 나타나면서 비선형 효과에 따라 주파수가 변화하다가 0.2 ms를 지나면 단일 고유진동수(수직 모드)의 선형 임펄스 응답으로 변화해 나가는 것을 의미한다. 또 슬라이더 탄성변형 진동성분인 135 kHz 성분은 큰 변화없이 0.7 ms까지 지속된다는 것도 뚜렷이 보인다.

뚜렷하지는 않지만 50 kHz 전후의 성분은 Fig. 9의 재배치 평활화 유사 WVD에서 보는 것처럼 약 0.16 ms 부근에서 사라진다. 이 성분은 슬라이더의 양 레일이 동시에 가진되는 스크래치 가진의 특성상 가진되기 어려운 롤 모드 공기베어링으로 추정된다.

5. 결 론

스크래치 디스크 위로 슬라이더를 부상시켜 인위적인 슬라이더-디스크 접촉이 발생하게 한 후 그 슬라이더의 진동을 레이저 진동계로 측정하여 얻은 공기베어링의 임펄스 응답을 시간-주파수 해석법을 사용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 여러 종류의 시간-주파수 방법들 중에서 간섭문제를 피하면서 가장 높은 해상도로 신호의 분포를 나타내는 재배치법을 공기베어링의 비선형성 해석에 적용했다. 본 논문에서 고려한 슬라이더/디스크 접촉

응답에서는 가우스 창함수를 채택한 재배치 가보 스펙트로그램이 가장 좋은 결과를 나타냈다.

(2) 부상하는 슬라이더가 디스크 면의 스크래치에 부딪쳐 발생하는 공기베어링의 응답을 재배치 가보 스펙트로그램으로 분석하면, 32 kHz 성분은 0.1 ms 사이에 25 kHz 성분으로 떨어지면서 소멸되고, 20 kHz 성분은 13 kHz로 떨어져서 1 ms 이후까지 지속된다.

(3) 향후 과제로 본 논문에서 관찰한 슬라이더 공기베어링의 비선형 거동을 바탕으로 슬라이더 공기베어링의 비선형 강성모델을 제안하고 그 모델의 타당도를 다시 시간-주파수법을 사용하여 검증할 예정이다.

후 기

이 논문은 2003학년도 건국대학교 학술연구비지원에 의한 논문임.

참 고 문 헌

- (1) Yoon, S. J., Kim, D. I., Jeong, T. G. and Choi, D. H., 2002, "Optimizations of Air-lubricated Slider Bearings Using the Reduced-basis Concept," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 5, pp. 2174~2176.
- (2) Yoon, S. J., Kim, S. H., Choi, D. H., Jeong, T. G. and Kim, S. K., 2003, "Optimal Design of Optical Flying Head for Near-field Recording," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 10, pp. 785~790.
- (3) Wang, R. H., Nayak, V., Huang, F.-Y., Tang, W. and Lee, F., 2001, "Head-disk Dynamics in the Flying, Near Contact, and Contact Regimes," ASME Journal of Tribology, Vol. 123, pp. 561~565.
- (4) Sheng, G., Liu, B. and Hua, W., 2000, "A Nonlinear Dynamics Theory for Modeling Slider Air Bearing in Hard Disk Drives," Journal of Applied Physics, Vol. 87, No. 9, pp. 6173~6175.
- (5) Ono, K., Yamane, M. and Yamaura, H.,

2005, "Experimental and Analytical Study of Bouncing Vibrations of a Flying Head Slider in a Near-contact Regime," ASME Journal of Tribology, Vol. 127, pp. 376 ~ 386.

(6) Knigge, B. and Talke, F. E., 2001, "Slider Vibration Analysis at Contact Using Time-frequency Analysis and Wavelet Transforms," ASME Journal of Tribology, Vol. 123, pp. 548 ~ 554.

(7) Thornton, B. H. and Bogy, D. B., 2003, "Nonlinear Aspects of Air-bearing Modeling and Dynamic Spacing Modulation in Sub-5 nm Air

Bearings for Hard Disk Drives," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 2, pp. 722 ~ 728.

(8) Deoras, S. K. and Talke, F. E., 2004, "Time-frequency Analysis of Slider Dynamics and the Effect of Lubricant," ASME Journal of Tribology, Vol. 126, pp. 559 ~ 564.

(9) Papandreou-Suppappola, A., 2003, Applications in Time-frequency Signal Processing, CRC Press.

(10) Qian, S., 2002, Introduction to Time-frequency and Wavelet Transforms, Prentice Hall PTR.