

## HDD용 압전형 마이크로 액츄에이터의 비선형 진동특성

°정덕영\*, 이승엽\*\*, 김철순\*\*\*

### Nonlinear Vibration Characteristics of Piezoelectric Microactuators in Hard Disk Drive Drives

Dukyoung Chong, Seung-Yop Lee, and Chulsoon Kim

#### ABSTRACT

Nonlinear characteristics of piezoelectric-type micro actuator used for hard disk drives are experimentally analyzed using Hutchinson's Magnum actuator. The nonlinear effects include hysteresis, superharmonic resonance, jump phenomenon, and shifting of natural frequencies. The effects of exciting frequency and input voltage on the nonlinear phenomena are investigated. It is shown that the micro actuator has the typical 3 times superharmonic resonances coupled to both 1st torsional and sway modes of the suspension.

#### 1. 서론

IBM에서 개발된 최초의 하드 디스크 드라이브(hard disk drive, HDD)인 RAMAC은 20 TPI(track per inch)를 저장밀도를 갖고 있었으나 매년 급격한 정보용량의 증가로 현재는 약 20,000 TPI의 제품이 생산되고 있으며, 매년 60%의 증가율을 보일 것으로 예측된다. 따라서 2001년까지는 35,000 TPI까지 트랙 밀도가 높아질 것으로 예측된다 [1]. 따라서 현재의 VCM(voice coil moter)만을 이용한 액츄에이터는 주파수 대역폭의 한계로 인해 30,000 TPI까지 밖에 사용할 수 없기 때문에 그 이상의 트랙 밀도에서는 새로운 방법이 연구되

어야한다 [2]. 높은 트랙 밀도를 구현하기 위해서 현재 널리 연구되고 있는 액츄에이터 시스템은 마이크로 구동기를 하나 더 부착하여 정밀한 위치 제어를 하도록 하는 이중 액츄에이터(dual actuator) 시스템이다 [3].

VCM의 서보 주파수 대역폭이 제한 받는 큰 이유는 VCM과 헤드 사이의 거리가 트랙폭에 비해 크기 때문인데 VCM과 헤드의 사이에 위치하는 E 블록, 서스펜션, 슬라이더 내의 여러 기계적 요소를 때문에 서보 주파수 대역폭이 제한을 받아 트랙 밀도를 높일 수 없다. 따라서 VCM과 헤드 사이에 마이크로 액츄에이터를 장치하여 여러 제한 요소를 피해 서보 주파수 대역폭을 높이고 이로 인해 트랙 밀도를 높이게 된다.

이러한 이중 액츄에이터 시스템은 마이크로 액츄에이터의 종류와 구조 위치에 따라 구분할 수

\* 서강대학교 기계공학과 대학원

\*\* 서강대학교 기계공학과, 정회원

\*\*\* 삼성종합기술원, 정회원

있다. 널리 이용되는 마이크로 액츄에이터는 압전형(piezoelectric), 정전기형(electrostatic), 전자기형(electromagnetic) 등이 있다. 또한 구동위치에 대한 분류로는 서스펜션 베이스 부분에 위치하여 서스펜션 전체를 구동하는 방법, 서스펜션과 슬라이더 사이에서 슬라이더를 구동하는 방법, 슬라이더와 헤드 사이에서 헤드를 구동하는 방법 등이 있다. 각기 장단점을 가지고 있어 여러 방법이 각각 연구되고 있으나 본 연구에서는 압전형 마이크로 액츄에이터로 서스펜션 베이스 부분에서 구동하는 방식에 대해 연구하기로 한다.

압전형 액츄에이터는 다른 마이크로 액츄에이터에 비해 구동력이 크고 최대 이동 가능 변위가 크다는 장점을 가지고 있다. 구동력이 크기 때문에 서스펜션 전체를 구동할 수 있는데, 이렇게 서스펜션 베이스 부분에 액츄에이터를 두어 서스펜션 전체를 구동하는 방식을 사용하면 기존의 서스펜션을 거의 그대로 이용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 복잡한 미소가공을 거쳐서 제작되는 다른 방식에 비해서 생산이 용이하며 가격 측면에서 장점을 가지고 있다[3]. 그러나 압전형 액츄에이터의 가장 큰 문제점으로는 고전압을 필요로 한다는 점과 비선형적인 특성이 나타난다는 점이다. 일반적인 압전형 액츄에이터의 구동 전압은 수십 볼트에서 수백 볼트까지 이르고 있다. 다행히 마이크로 액츄에이터로 사용되어 비교적 작은 전압으로도 구동할 수 있으나, 다른 방식에 비해서는 구동 전압이 매우 크다. 또한 압전형 액츄에이터에서 나타나는 비선형적인 동특성이 정밀 위치 제어에 문제가 되고 있다.

본 연구에서는 이러한 압전형 마이크로 액츄에이터에서 발생하는 비선형적 특성을 실험적으로 측정하였으며 이를 서스펜션의 진동 모드와 연관시켜 그 특성을 해석하였다.

## 2. 서스펜션 형상

본 연구에서는 PZT 마이크로 액츄에이터를 서스펜션 베이스부분에 부착한 Hutchinson사의 Magnum series를 사용하였다. Fig. 1에서 보는

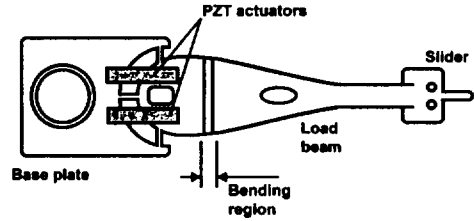


Fig. 1 Suspension with PZT microactuators

바와 같이 베이스플레이트와 로드빔 사이를 얇은 플렉처로 연결하여 연결부분을 중심으로 좌우로 미소 상대운동이 가능하게 하였다. 그 위에 두개의 얇은 PZT 물질을 두어 한쪽 끝은 고정된 베이스플레이트 위에 부착시키고, 다른 한쪽 끝은 움직일 수 있는 로드빔의 끝 부분에 위에 부착하였다. 두개의 마이크로 액츄에이터는 서로 반대로 작용하여 한쪽이 길이가 늘어나면 반대쪽은 줄어들게 되어있다. 따라서 로드빔이 마이크로 액츄에이터를 중심으로 회전하여 슬라이더가 좌우로 미세하게 움직이게 설계되었다. 이에 사용된 PZT 액츄에이터는 길이 3mm 너비 1.232mm 두께 0.2155mm로 두 개가 사용되었다.

서스펜션은 기존의 18mm 서스펜션과 달리 길이가 13mm로 짧아진 서스펜션을 사용하였다. 이로써 응답성능을 향상시켜 주파수 대역폭을 넓혔다. 두께 0.085mm의 로드빔은 굽힘 모드의 강성을 높여 고유진동수를 증가시키고, 그 중간에 두께 0.025mm의 굽힘 영역(bending region)을 두어 디스크 표면을 슬라이더가 잘 따라갈 수 있도록 순응도를 보완하였다.

## 3. 진동 모드 실험

### 3.1 실험방법

압전형 액츄에이터의 비선형 특성을 알아보기 전에 액츄에이터 시스템의 진동 모드를 실험적인 방법으로 구하였다. 유한요소법을 이용하여 모드를 구할 수도 있으나 서스펜션의 모드들은 이미 널리 연구되어 있으므로[4] 본 연구에서는 실험적으로 서스펜션의 여러 점에서 측정된 데이터를 가지고

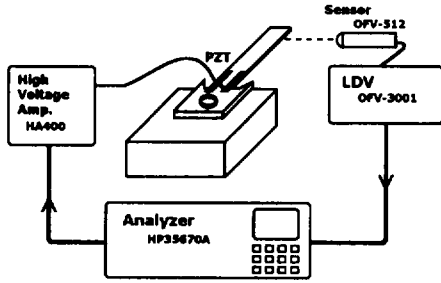


Fig. 2 Schematic of experimental setup

진동 모드와 고유진동수를 해석하였다.

서스펜션의 특징을 자세히 알아보기 위해 Fig. 2와 같이 디스크를 제거한 상태에서 실험을 수행하였다. 이 상태에서 실험하게 되면 슬라이더와 서스펜션이 디스크 사이에서 생기는 공기베어링의 영향을 받지 않게 된다. 따라서 디스크 위에서 측정할 때는 잘 보이지 않는 순운동 모드를 측정할 수 있어서 서스펜션의 특징을 자세히 살펴볼 수 있다.

실험에 이용된 장비로는 신호분석기 (HP35670A), 고전압 증폭기 (Eliezer HA400), LDV (Polytec OFV-3001, OFV-512), 오실로스코프가 사용되었다. 먼저 신호분석기에서 나온 전압을 고전압 증폭기에 의해 PZT에 필요한 만큼의 고전압으로 증폭시키고, 이를 PZT 마이크로 액추에이터에 연결시켜 시스템을 구동시켰다. 서스펜션의 변위는 LDV를 이용하여 비접촉으로 측정하였으며, 이를 다시 신호분석기로 분석하였다.

서스펜션의 응답을 측정하기 위해서 본 실험에서는 특별히 외부 가진기를 사용하지 않고 마이크로 액추에이터를 구동시켜 가진하였다. 이에 대한 서스펜션의 응답은 수직방향으로 7점, 수평방향으로 1점에서 측정하여 모드를 해석하였다. 본 실험에서는 13kHz까지의 주파수 응답함수를 분석하였

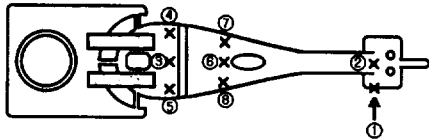


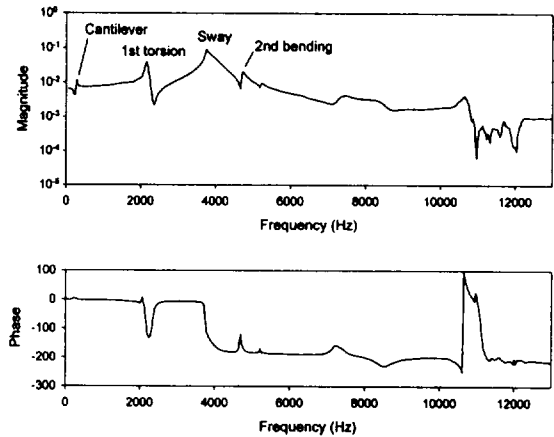
Fig. 3 Measure points

다.

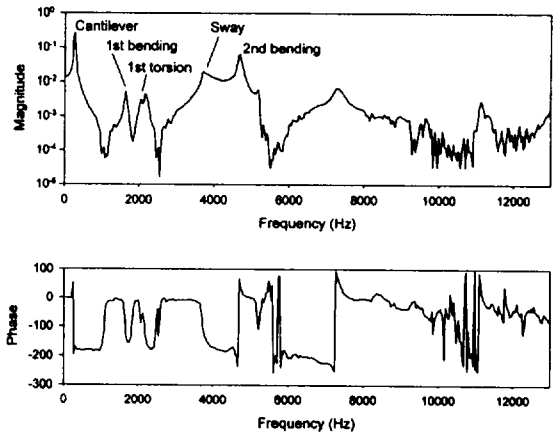
### 3.2 진동 모드 해석

Fig. 3과 같이 수직방향에서 7점, 수평방향에서 1점을 측정하여 주파수 응답함수를 구하고, 그 각각의 결과를 이용하여 모드를 분석하였다. Fig. 4는 슬라이더 부근에서 측정된 수평방향과 수직방향의 주파수 응답함수를 나타낸다.

수평방향의 주파수 응답함수에서는 서스펜션의 굽힘 영역에서 발생하는 외팔보 모드(cantilever mode)와 2차 굽힘모드가 작게 나타난 반면 1차 비



(a) Lateral response



(b) Vertical response

Fig. 4 FRF's of suspension measured at slider

틀림 모드와 스웨이 모드가 크게 나타난다. 수평방향의 운동은 트랙오차에 크게 영향을 미치는 요소들인데 1차 비틀림 모드와 스웨이 모드가 트랙오차를 일으키는 주원인이 됨을 알 수 있다.

수직방향의 주파수 응답함수에서는 수평방향의 주파수 응답함수에서는 거의 보이지 않던 외팔보 모드와 1차 굽힘모드가 크게 나타나고, 2차 굽힘모드 또한 크게 나타남을 볼 수 있다. Table 1에는 각 측정점에서의 주파수 응답함수 모드의 진폭을 나타내었다.

Table 1 Modes and natural frequencies

Hz	280	1640	2160	3700	4700
mode	cantilever	1st bending	1st torsion	sway	2nd bending
1	1.0E-02	no peak	4.0E-02	9.0E-02	2.0E-02
2	2.0E-01	5.0E-03	4.0E-03	2.0E-02	6.0E-02
3	6.0E-03	4.0E-03	1.5E-02	9.0E-03	5.0E-02
4	8.0E-03	4.0E-03	1.5E-02	no peak	4.0E-02
5	1.0E-02	4.0E-03	1.5E-02	2.0E-02	6.0E-02
6	9.0E-02	7.0E-03	2.0E-02	2.0E-02	6.0E-03
7	8.0E-02	7.0E-03	2.0E-02	2.0E-02	2.0E-02
8	7.0E-02	7.0E-03	1.5E-02	3.0E-02	7.0E-03

## 4. 비선형 특성 해석

### 4.1 히스테리시스(Hysteresis)

일반적인 압전형 액추에이터의 특성으로는 히스테리시스 현상을 들 수 있다. Fig. 5는 각 전압에 따른 압전형 액추에이터의 입력과 그에 따른 슬라이더의 조화운동의 변위를 나타낸 것이다. 30V까지는 선형적으로 응답이 나타내지만 30V 이상이 되면 비선형 특성이 나타남을 볼 수 있다.

전압의 크기를 변화시킬 경우와 일정 전압 하에서 조화운동의 주파수를 변화시킬 때에도 히스테리시스가 일어남을 볼 수 있다 (Fig. 6). 압전형 액추에이터의 히스테리시스는 전압의 변화에 따른 것으로 알려져 있다. 그러나 본 실험에서는 압전형 액추에이터가 질량을 갖는 서스펜션에 연결되어 있기 때문에 주파수 응답에서도 다른 변화가 나타나게 되는데 즉 압전형 액추에이터의 비선형성과 서스펜션의 모드가 연관되어 특이한 반응을 보이게 된다. 특히 700Hz와 1200Hz에서는 superharmonic 현상이 크게 나타남을 볼 수 있다.

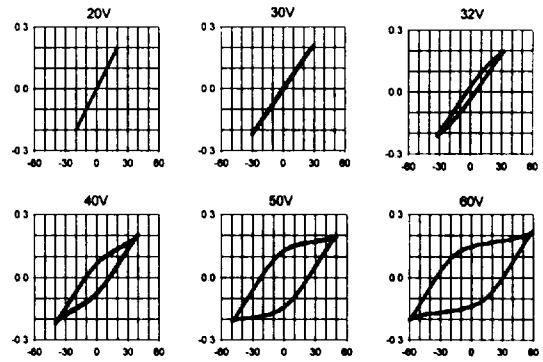


Fig. 5 Hysteresis at various voltages

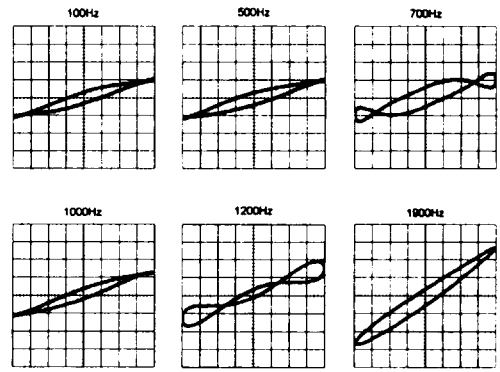
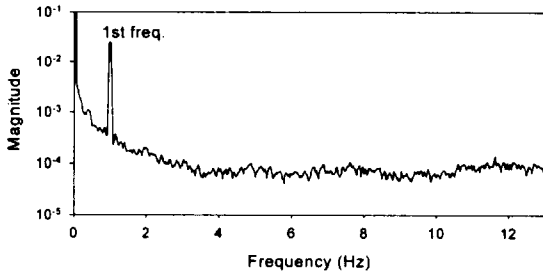


Fig. 6 Hysteresis at 40V with various frequencies

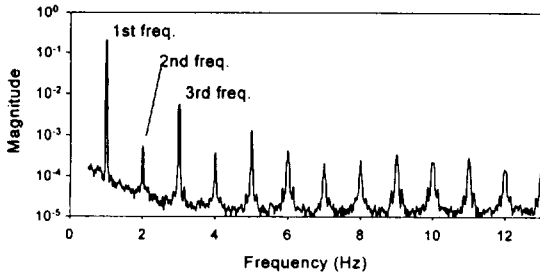
### 4.2 초조화 공진(Superharmonic Resonance)

PZT의 비선형성이 나타나는 30V 이상의 전압에서 시스템을 가동하다보면 700Hz와 1200Hz에서 슈퍼 하모닉 현상이 크게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 PZT 액추에이터 자체에서 일어나는 현상이 아니라, PZT의 비선형성이 서스펜션의 모드와 맞물려 나타나는 현상이다.

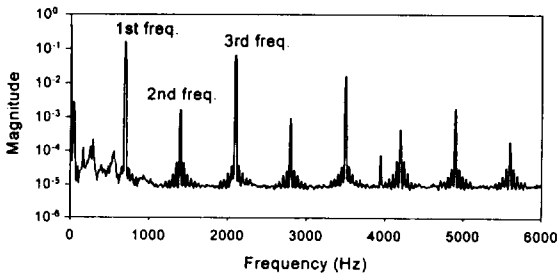
먼저 PZT 액추에이터 자체의 비선형성을 살펴보기로 하자. 서스펜션의 진동 모드의 영향을 적게 받기 위해, 서스펜션에서 처음으로 발견되는 외팔보 모드(280Hz)보다 낮은 저주파인 1Hz로 가진하였다. Fig. 7 (a)와 (b)는 각각 선형성이 유지되는 5V와 비선형성이 나타나는 40V에서 1Hz의 저주파로 PZT를 구동시켜 주파수 응답을 나타낸 것이다. (a)에서는 가진 주파수의 성분만 크게 나타나는 반면, (b)에서는 가진



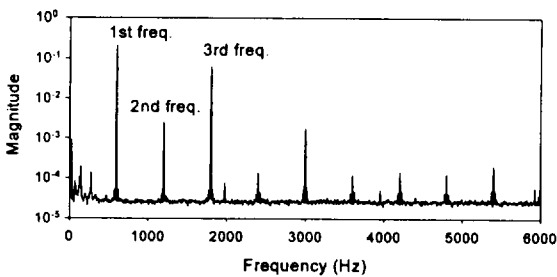
(a) 5V 1Hz



(b) 40V 1Hz



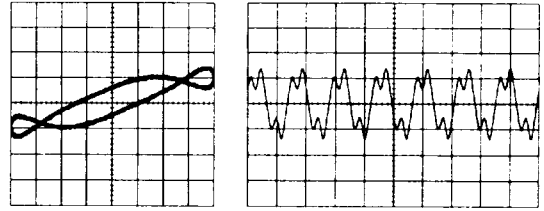
(c) 40V 700Hz



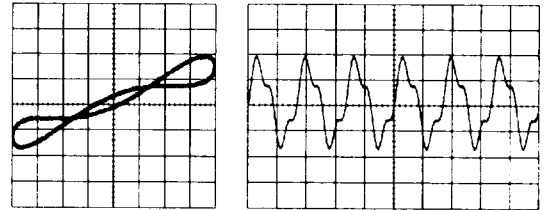
(d) 40V 1200Hz

Fig. 7 Frequency response for various cases

주파수의 배수 성분이 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 3배수 주파수 성분(3Hz)이 크게 나타나는 것이 특



(a) 700Hz



(b) 1200Hz

Fig. 8 Xy response and time response at 40V

징이다. 이는 비선형 스프링이 포함되어있는 계에서 흔히 볼 수 있는 현상으로 Duffing 방정식으로 모델링 할 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + ax^3 = u$$

그러나 서스펜션의 진동 모드를 피해 가진한 1Hz에서는 초조화 현상이 크게 나타나지는 않는다. 이는 3번째 주파수 성분이 많이 커지기는 했지만 1배수 주파수 성분에 비해 약 100배 가까이 차이가 나기 때문이다. 반면 700Hz와 1200Hz에서는 3배수의 초조화 현상이 크게 나타난다.

Fig. 7의 (c)와 (d)는 초조화 현상이 크게 일어나는 40V의 700Hz와 1200Hz로 가진할 때의 주파수 응답을 나타낸 것이다. 40V 1Hz의 응답에서 나타난 3배수 주파수 성분이 증가하여 1배수 주파수 성분과 10배 혹은 그 이하의 차이밖에 보이지 않다. 이로 인해 3배수 주파수 성분이 히스테리시스 응답에 영향을 주어 Fig. 8과 같은 현상이 복잡한 형태의 시간 응답이 일어난다.

3배수 주파수가 크게 나타나는 이유는 그 주파수가 서스펜션의 1차 비틀림 모드와 스웨이 모드에 영향을 주기 때문이다. 40V에서 주파수 응답함수를 보면 2030Hz와 3300Hz에서 1차 비틀림 모드와 스웨이 모드의 공진이 일어난다. 700Hz와 1200Hz로 가진하면

각각의 3배수 주파수인 2100Hz와 3600Hz가 각각 40V의 1차 비틀림 모드와 스웨이 모드 주파수와 가까워져서 공진이 일어나고 이로 인해 3번째 성분이 크게 나타나는 것이다.

이전까지의 서스펜션 설계에서는 주파수 대역폭을 제한하는 요소를 서스펜션의 모드로 보고 이를 피해 대역폭을 정하고 액추에이터를 설계하였으나 압전 액추에이터를 사용할 경우 3배수 주파수 성분이 커지는 초조화 현상을 고려해야 한다. 따라서 마이크로 액추에이터를 사용한 시스템에서는 비선형성의 강도에 따라 위치제어의 주파수 대역폭에 크게 영향을 미칠 수 있다.

#### 4.4 고유 주파수 변화와 점프 현상

본 실험을 통해서 발견된 압전형 액추에이터의 또 다른 비선형 특징은 하나는 비선형성이 증가할수록 고유 주파수가 감소한다는 사실이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 비선형성을 매우 작은 5V에서는 1차 비틀림 모드와 스웨이 모드의 고유 주파수가 2100Hz, 3700Hz인 반면에 전압이 올라갈수록 고유 주파수는 점차 감소하여 40V에서는 2030Hz, 3300Hz를 나타낸다. 이러한 감소는 진폭이 큰 모드에서 더욱 크게 나타난다. 고유 주파수의 감소는 스웨이 모드가 가장 크게 나타나고, 그 다음으로 1차 비틀림 모드의 고유 주파수 감소가 많이 되나 다른 모드는 큰 변화가 없다.

또한 전압의 높아짐에 따라 해당 모드의 진폭이 점점 완만해 지는 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향은

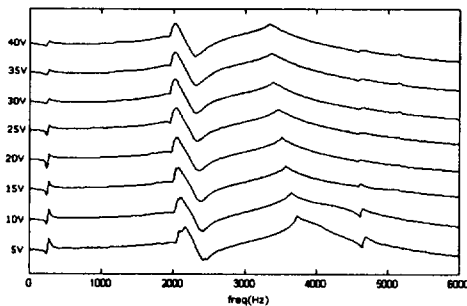


Fig. 9 Frequency shift by changing input votages

특히 스웨이 모드에서 두드러지게 나타나는데, 1차 비틀림 모드와 비교해 볼 때, 5V에서는 스웨이 모드의 진폭이 훨씬 크나, 40V에서는 두 모드의 진폭이 비슷해짐을 알 수 있다.

비선형성이 나타나는 40V에서 주파수 응답함수를 자세히 살펴보면 주파수를 서서히 높여 가며 주파수 응답함수를 구할 때와 낮추어 가며 구할 때의 응답함수가 진폭과 해당되는 고유진동수가 다름을 발견하게 된다. 이러한 현상은 진폭이 가장 큰 스웨이 모드 주위에서 가장 크게 나타난다. 주파수를 높이며 구한 스웨이 모드의 고유진동수 약 3330Hz이지만 낮추어 가며 측정한 고유진동수는 약 3260Hz 정도로 나타난다. 또한 해당되는 진폭의 크기도 차이가 발생한다. 주파수를 높여갈 때 고유진동수 근처에서 진폭이 급격하게 감소하는 점프 현상을 볼 수 있다. 주파수를 높일 경우 약 22%의 감소하며, 주파수를 낮추어 갈 때는 약 6%의 진폭의 감소를 볼 수 있다. 실험에서 발견되는 점프 현상은 이상적인 Duffing 방정식에 의해 나타나는 것과는 약간의 차이가 있는데 이는 압전 액추에이터의 비선형성에서 나타나는 점프현상이 서스펜션 시스템과 연성되어 복잡한 형태로 나타나기 때문이라 할 수 있다.

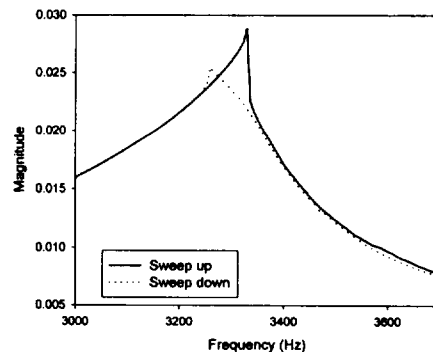


Fig. 10 Jump phenomenon in FRF

## 5. 결론

본 연구를 통해 HDD의 저장 밀도의 증가로 인해 관심이 높아져 가는 PZT 마이크로 액추에이터를 이용한 서스펜션에 대해 알아왔다. 먼저 이전의

서스펜션보다 길이가 작아진 13mm 서스펜션의 모드에 대한 해석을 하였고, PZT 액츄에이터를 이용함에 따라 나타나는 비선형 특성을 알아보았다. 특히 슈퍼 하모닉으로 인한 비선형 특성과 이로 인해 헤드 제어시 주파수 대역폭이 제한 될 수 있음을 알아보았다. 이러한 여러 특성에 대한 자세한 고찰을 통해 PZT 마이크로 액츄에이터를 부착한 서스펜션의 이용을 더욱 원활히 할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 대학부설연구소과제 학술연구비에 의해서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 이승엽, "하드 디스크 드라이브의 개발 동향과 고밀도 구현을 위한 기계적 진동 영향", 대한기계학회지, 37권 4호, pp. 35-42, 1997
- [2] Bill McInerney, "Surveying micro-positioning technology for advanced disk drives," Data Storage, Vol. 7, Aug. 2000
- [3] R. B. Evans, J. S. Griesbach and W. C. Messner, "Piezoelectric microactuator for dual stage control," IEEE Trans. on Mag., Vol. 35, No. 2, pp. 997-982, Mar. 1999
- [4] 김정주, 전정일, 변용규, 노광춘, 정정주, 정태건, "고 트랙밀도 HDD 서스펜션의 동특성 해석," 대한기계학회논문집, 21권 11호, pp1885-1895, 1997
- [5] Kenji Uchino, "Piezoelectric actuators and ultrasonic motors," Kluwer Academy Publishers, 1997
- [6] S. S. Rao, "Mechanical Vibrations," Addison-Wesley, 1995
- [7] A. H. Nayfeh and D. T. Mook, "Nonlinear Oscillations," John Wiley & Sons, 1979