

트라이볼로지 문제를 고려한 하드 디스크 슬라이더-서스펜션의 동특성 해석

김청균 · 차백순

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Tribological Induced Dynamic Characteristics Analysis of HDD Slider-Suspension Assembly

Chung Kyun Kim and Baeg-Soon Cha

Tribology Research Center, Hongik University

Abstracts – This paper presents dynamic responses of disk flutter and bump in HDD slider. The slider is modeled for three degree-of-freedom systems, which are capable of lifting, pitching, and rolling motions. In numerical analysis, loads from air pressure, preload and static moments from the slider, and stiffness and damping coefficients of the suspension are considered for investigating the dynamic characteristics analysis. The numerical results are presented as functions of typical parameters such as a disk velocity, stiffness and damping coefficients of the suspension, and skew angle.

Key words – slider dynamics, flutter response, bump response.

1. 서 론

하드 디스크(HDD)는 정보화 산업이 발달하면서 저장매체로서 그 역할이 나날이 증대되고 있다. HDD는 디스크, 회전축, 베어링, 시일, 슬라이더, 서스펜션 등의 주요 핵심부품으로 구성되어 있다. 디스크와 접촉 및 근사 접촉을 하는 슬라이더는 스프링과 댐퍼의 기능을 가진 서스펜션을 통해 회전축에 연결되어 있다. 서스펜션은 슬라이더의 수직방향의 운동에 대하여 자유도를 가질 수 있도록 유연한 구조로 되어 있으며, 디스크의 선속도 방향으로 발생하는 진동을 방지하기 위해 리브(rib)를 세운 구조를 하고 있다. 프렉서는 슬라이더에게 피치운동과 롤(roll) 운동에 대한 자유도를 허용하기 위해 슬라이더와 로드 빔 사이에 설치된 매우 유연한 구조를 가지고 있다.

디스크가 정지해 있을 때에 슬라이더는 디스크의 표면과 기계적 접촉 상태에 있으며, 정보를 읽거나 혹은 저장하는 동안에는 슬라이더가 고속으로 회전하는 디스크와 근접 혹은 근사 접촉상태에 있다. 정상상태라 불

리는 고속 회전을 하는 경우에 디스크와 슬라이더 사이를 흐르는 공기에 의한 안정된 박막층이 형성된다. 이때 슬라이더는 디스크와 일정한 간극을 유지하는 부상상태를 유지하게 된다. 이 간극이 작을수록 데이터의 저장능력과 신뢰성은 높게 되나 고속으로 회전하는 디스크 위에서 항상 일정한 미소간극을 유지시킨다는 것은 대단히 어려운 문제이다.

하드 디스크의 동적 특성에 관한 연구 분야로는 가스 박막 모델과 슬라이더에 작용하는 반력과 모멘트의 관계를 강성과 댐핑의 형태로 고려하여 디스크의 표면 거칠기가 초박막 가스 필름의 동적 계수에 미치는 영향, 착지 과정에서 발생하는 슬라이더와 디스크의 상호작용, 슬라이더 모델의 동적 접촉 특성 해석, 슬라이더 형상이 동적 특성에 미치는 영향, 원활한 디스크 평면 위에서의 슬라이더의 동적특성에 관한 문제, 마찰에 의한 진동 등의 연구[1~3]가 다양하게 진행되었다. 슬라이더에 미치는 공기압력에 의한 하중을 구하기 위하여 White[4]는 레이놀즈 방정식에 수치해석을 적용하기 위해 다차원적이고, 시간에 종속적인 ADI(Alternating

Direction Implicit) 방법을 개발하였다. Mitsuya[5]는 White가 이용한 미소간극보다 더 미소한 간극에서 발생하는 표면 거칠기의 영향을 조사하기 위하여 볼츠만 수정 레이놀즈 방정식을 해석하기 위해 ADI 방법을 적용하였다. 또한, White[6]와 Hu[7] 등은 시뮬레이션을 통한 슬라이더의 동특성 해석을 위해 ADI를 사용한 수정 레이놀즈 방정식과 슬라이더의 운동방정식에 대한 적분을 동시에 해석하면서 플러터나 범프의 입력에 대한 슬라이더 상태변수의 응답특성을 연구하였다.

그래서 본 연구에서는 정상상태로 회전 중에 있는 디스크에 범프와 플러터 등의 외부 방해요인이 가해졌을 때 슬라이더의 상태를 서술하는 변수들의 응답을 조사함으로써 슬라이더의 동특성 문제를 분석하였다. 즉, 주어진 설계변수를 갖는 슬라이더-서스펜션에 허용되는 범프와 플러터의 진폭과 주파수 등이 조사되었으며, 정해진 범프 및 플러터가 가해졌을 때 서스펜션의 강성계수 및 감쇠계수에 따라 변화되는 응답특성의 흐름을 조사하였다. 또한, 기준값으로 설정된 강성계수와 감쇠계수가 변화될 수 있는 범위에 대하여도 조사를 수행하였다.

2. 사용모델 및 수치해석

Fig. 1은 자력공기윤활 슬라이더(self-acting air-lubricated slider) 모델인 IBM 3370에 대한 기하학적 형상, 작용하고 있는 스프링, 정적 모멘트 등을 보여주고 있다. 이 모델에서 해석에 사용된 댐퍼는 생략되었으며, 앞 모서리는 경사면을 갖는 두 개의 레일로 구성되어 있고, 경사면은 슬라이더로 유입되는 공기 윤활제를 압축시키는 역할을 한다.

Fig. 1에서 $W(t)$ 는 공기 윤활박막에 의하여 슬라이더에 가해지는 압력에 의한 동적하중; F_s, M_α, M_β 는 디스크가 정지상태에 있을 때 서스펜션이 디스크에 가하는 정적하중 및 정적 모멘트; k_z, k_α, k_β 는 서스펜션의 강성계수; c_z, c_α, c_β 는 감쇠계수; U_x 와 U_y 는 각각 디스크의 x -방향과 y -방향의 속도; L 과 B 는 레일 길이와 폭을 각각 표시한다. Table 1은 IBM 3370 슬라이더의 대표적인 치수를 나타내고 있다.

공기윤활 베어링의 자세는 다음의 세 가지 상태변수에 의해 나타낼 수 있다. 즉, 슬라이더 뒷면에 존재하는 최소 윤활막 두께(h_{min}), 자세각(pitch angle, α), 롤각(roll angle, β)이다. 슬라이더가 비행상태에 있을 때

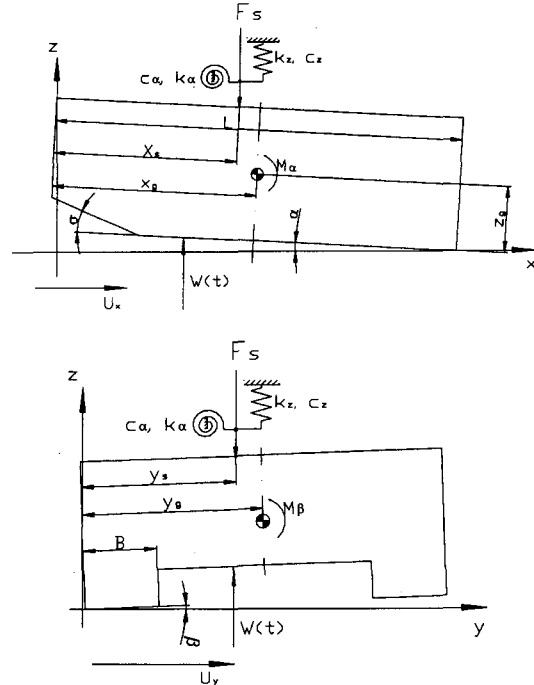


Fig. 1. Physical models of a slider flying on a rigid disk surface.

Table 1. Typical dimensions of the slider 3370

Parameters	Dimension
Length	4.06 mm
Width	3.05 mm
Front taper length	0.38 mm
Front taper angle	10~15 mrad
Height of the taper end	0.39~0.635 mm
External load, F_s	150~95 mN
Mass	ca. 0.07 g
Moment of inertia, I_α	$1.06 \times 10^{-10} \text{Nms}^2$
Moment of inertia, I_β	$0.606 \times 10^{-10} \text{Nms}^2$

상태변수에 영향을 미치는 또 한가지의 변수로는 방향각(skew angel, ϕ)이 있다. 방향각은 슬라이더의 중심선이 디스크의 선속도와 이루는 사이각도를 말하며, 이 각도의 크기에 따라 상태변수는 영향을 받게 된다.

슬라이더와 디스크 사이에서 발생하는 공기막 형성에 의하여 슬라이더에 작용하는 압력분포는 압축성 레이놀즈 방정식을 사용하여 구한다. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ph^3 \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ph^3 \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \right]$$

$$= 6\eta \frac{\partial}{\partial x}(U_x p h) + 6\eta \frac{\partial}{\partial y}(U_y p h) + 12\eta \frac{\partial}{\partial t}(p h) \quad (1)$$

여기서 x 와 y 는 각각 공간좌표를 나타내고, x 는 슬라이딩의 방향을 나타낸다. t 는 시간, p 는 국부압력, h 는 슬라이더와 디스크 사이의 국부적인 간극, η 는 공기의 절대점도를 각각 나타낸다.

공기막의 두께가 작아질수록, 즉 가스분자의 평균 자유 이동거리의 값에 근접할 경우, 상식식 (1)은 비슬립(non-slip) 경계조건을 만족시키지 못하게 된다. 이때에는 미끄럼 운동을 고려하여 레이놀즈 방정식을 수정해야 한다. 이러한 방정식을 해결하기 위해 Burgdorf는 분자효과를 고려한 미끄럼 경계조건을 사용한 수정 레이놀즈 방정식을 제안하였다. 수정 레이놀즈 방정식은 $X = \frac{x}{L}$, $Y = \frac{y}{L}$, $H = \frac{h}{h_m}$, $p = \frac{P}{p_a}$, $T = \omega t$ 등 무차원화 된 변수를 사용하여 수정하면 아래와 같은 형태로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[PH^3 \left(1 + \frac{6\alpha M}{PH} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[PH^3 \left(1 + \frac{6\alpha M}{PH} \right) \frac{\partial P}{\partial Y} \right] = \Lambda_x \frac{\partial}{\partial X}(PH) + \Lambda_y \frac{\partial}{\partial Y}(PH) + S \frac{\partial}{\partial T}(PH) \quad (2)$$

여기서 $\Lambda_x = 6\mu \frac{U_x L}{p_a h_m^2}$, $\Lambda_y = 6\mu \frac{U_y L}{p_a h_m^2}$ 로 정의된 베어링 상수는 x 와 y 방향을 각각 나타내고, 스퀴즈 상수 $S = \frac{12\mu \omega L^2}{p_a h_m^2}$ 로 정의된다.

슬라이더에 대한 동특성 분석을 위해서는 슬라이더의 무게 중심을 기준점으로 하여 자세각, 회전각, 수직방향의 변위량 등 세 개의 상태변수를 사용하여 슬라이더에 대한 운동 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c_z \frac{dz}{dt} + k_z z + mg + F_s = W(t) \quad (3)$$

$$I_\alpha \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + c_\alpha \frac{d\alpha}{dt} + k_\alpha \alpha + M_\alpha + (F_s + k_z z)(x_g - x_s) = (x_g - x_p(t))W(t) \quad (4)$$

$$I_\beta \frac{d^2 \beta}{dt^2} + c_\beta \frac{d\beta}{dt} + k_\beta \beta - M_\beta - (F_s + k_z z)(y_g - y_s) = -(y_g - y_p(t))W(t) \quad (5)$$

여기서 슬라이더의 밑면에 미치는 공기막에 작용하는 압력하중은

$$W(t) = \int_0^b \int_0^l (p - p_a) dx dy \quad (6)$$

으로 나타내고, 이 하중의 작용점은 다음과 같이 된다.

$$x_p(t) = \frac{1}{W(t)} \int_0^b \int_0^l x(p - p_a) dx dy \quad (7)$$

$$y_p(t) = \frac{1}{W(t)} \int_0^b \int_0^l y(p - p_a) dx dy \quad (8)$$

여기서 F_s 는 서스펜션에 의해 슬라이더의 회전점(x_s, y_s)에 작용하는 하중, m 은 슬라이더의 질량, I_α 와 I_β 는 슬라이더의 관성 모멘트, M_α 와 M_β 는 정적 모멘트, x_g 와 y_g 는 슬라이더의 무게중심을 각각 표시한다.

슬라이더의 동특성 문제를 해석하기 위해서는 ADI로 얻어진 제2차 비선형 미분방정식 형태의 수정 레이놀즈 방정식과 운동 방정식을 동시에 해석해야 한다. 운동 방정식의 적분은 제4차 Runge-Kutta 방식을 사용하였다. 수치적 적분은 n 번째 시간 단계로부터 $n+1$ 번째 단계로 다음과 같은 과정을 거쳐 수행된다. 즉, n 단계에서의 압력분포 $p^{(n)}(x, y)$ 를 가지고 슬라이더의 운동 방정식이 n 에서 $n+1$ 단계로 적분이 수행된다. n 단계와 $n+1$ 단계에서의 상태값들을 가지고 레이놀즈 방정식을 풀어서 $n+1$ 단계에서의 압력분포 $p^{(n+1)}$ 을 구한다. n 단계와 $n+1$ 단계에서의 압력값을 고려하여 운동 방정식의 해를 다시 구한다. 이러한 접근방법은 운동 방정식과 레이놀즈 방정식의 연계하면서 발생하는 오차를 줄여준다.

3. 시뮬레이션 및 고찰

슬라이더의 동특성 문제를 해석하기 위해서는 정상상태에 대한 해석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 슬라이더가 위치하고 있는 디스크의 선속도가 60 m/s 인 지점 위에서 방향각 -6° 를 가지고 정상상태에 도달하였을 때에 대한 동특성 문제를 고찰하였다. 정상상태에서의 상태변수 값인 최소간극, 자세각, 롤각의 크기는 각각 $0.618 \mu\text{m}$, $92.9 \mu\text{rad}$, $-4.3 \mu\text{rad}$ 이다.

3-1. 범프 입력에 대한 동적 안정성 해석

시스템의 동적 안정성이란 어느 한 정상상태에 있는 시스템에 외부로부터 방해요소가 가해졌을 때 일정시간의 천이과정을 거쳐 새로운 정상상태로 도달할 수 있는 능력을 말한다. 새로운 시스템의 설계에는 고유운동이 가지고 있는 특성값을 조사하여 안정성 여유

(stability margin)에 대한 엄밀하게 조사되어야 한다. 본 연구에서는 IBM 3370 슬라이더 모델에 대하여 정상상태 하의 슬라이더가 받아들일 수 있는 범프(bump)와 플러터(flutter)의 진폭과 진동수에 대한 조사와 서스펜션의 강성과 댐핑이 동적 안정성에 미치는 영향을 상태변수에 대한 응답을 통하여 조사하였다.

범프에 대한 슬라이더의 동적 안정성을 조사하기 위하여 60 m/s의 디스크 표면속도와 방향각 -6°에 대하여 슬라이더가 정상상태에 있을 때

$-L < (x - V_x t) < 0$ 일 경우:

$$S = \frac{S_{max}}{2} \left(1 - \cos \left[-\frac{2\pi}{L} (x - V_x t) \right] \right)$$

그 이외의 구간 : $S = 0$

으로 기술되는 여현 타입(cosine type)의 범프가 디스크에 가해졌을 때 슬라이더의 상태변수들에 대한 조사를 수행하였다. 여기서 L 은 레일의 길이, S_{max} 는 범프의 진폭(= 0.0762 μm), x 는 레일의 앞 모서리로부터의 거리, t 는 시간, V_x 는 디스크의 x 방향 표면속도를 각각 나타낸다.

같은 형상의 범프가 있는 디스크에 가해졌을 때 방향각 ϕ 가 -6°에서 12°로 증가함에 따라 변화하는 상태변수의 응답을 Fig. 2에 제시하였다. 동일한 범프가 가해질 경우 방향각의 크기가 0°일 때에 간극응답의 진폭이 가장 작으며, 방향각이 음과 양의 방향으로 증가하면 Fig. 2(a)처럼 간극응답의 진폭이 점차 증가하고 있다. 그러나 방향각이 커질 경우 슬라이더가 상하로 움직이는 병진운동이 빨리 감쇠하는 것을 보여주고 있다. 방향각이 0°인 경우는 무차원 시간이 15 정도 지난 후에 간극의 진폭은 감소되었으나, 방향각이 12°인 경우에는 무차원 시간이 10 정도 지난 후에 같은 크기의 진폭으로 감소되었음을 보여주고 있다. 또한, 방향각이 크면 클수록 병진운동이 일정한 시간을 가지고 앞서서 진행하고 있다. 초기 진폭은 방향각이 12°인 경우 0°인 경우에 비하여 약 1.8배 증가한 값을 보여주고 있다. 범프가 가해진 경우 방향각의 크기가 자세각의 응답에 미치는 영향은 Fig. 2(b)에서 보여준 결과처럼 간극의 응답특성과 거의 유사한 경향을 보여주고 있다. 자세각에 미치는 영향은 간극에 미치는 영향보다 약간 작아 방향각이 12°인 경우 약 1.5배 큰 진폭을 가진 병진운동이 발생하고 있다. 방향각의 크기가 회전운동에 미치는 영향은 Fig. 2(c)에서 제시한 것처럼

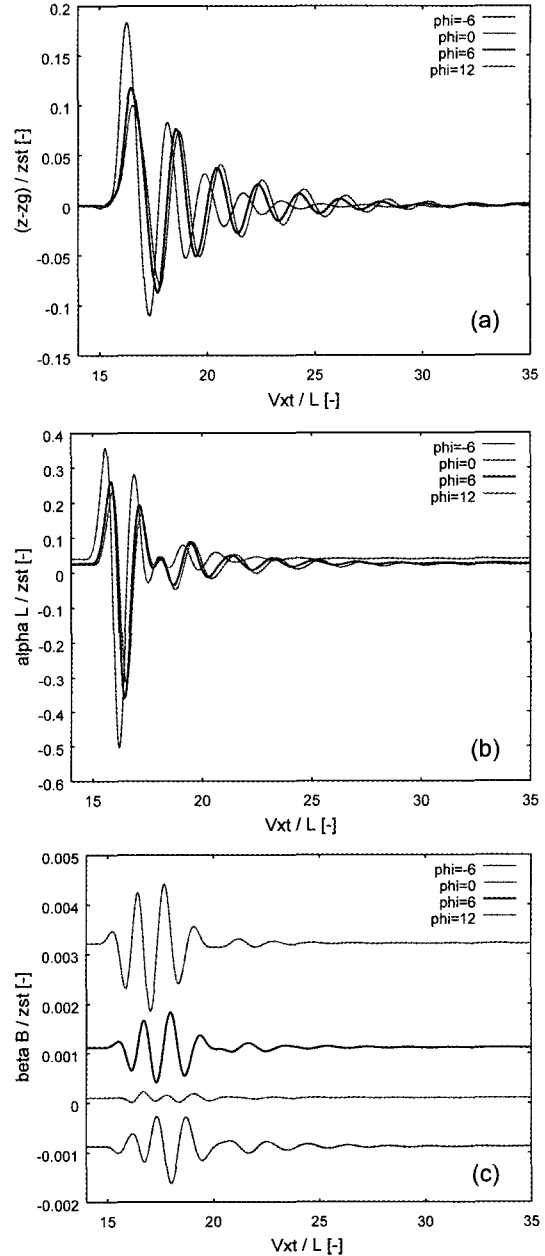


Fig. 2. Dimensionless bump responses of film thickness (a), pitch angle (b), and roll angle (c) with different skew angle ϕ .

처럼 위의 병진운동이나 피치운동보다 훨씬 작게 나타나고 있다. 서로 다른 방향각에 대하여 정상상태를 구했을 경우 회전각의 정상상태 값이 서로 다르므로 범프가 가해지기 전의 무차원화된 초기값이 각각 다르게

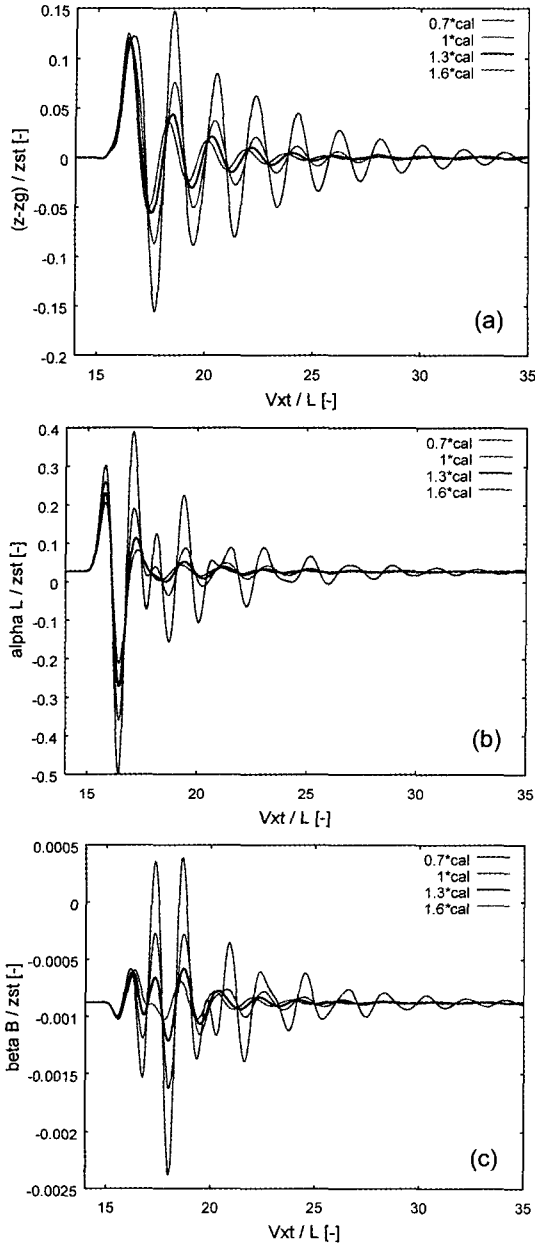


Fig. 3. Dimensionless bump responses of film thickness (a), pitch angle (b), and roll angle (c) with different damping coefficient of c_α .

나타나고 있다. 방향각이 클 경우 회전운동의 진폭 역시 크게 나타나고 있으며, 회전운동이 감쇠되는 시간이 위의 두 가지 운동보다 훨씬 빨라 무차원 시간이 7 정도 경과하면 회전운동은 방향각의 크기에 관계없이 거의 없어졌음을 알 수 있다.

Fig. 3은 디스크에 동일한 범프가 가해졌을 때 피치 운동에 대한 감쇠계수 c_α 가 변화할 때 상태변수의 응답을 보여주고 있다. Fig. 3(a)에서 병진운동은 1/2 사이클까지는 c_α 의 영향을 거의 받지 않다가 그 이후에 c_α 의 크기가 증가함에 따라 작은 진폭을 보여주고 있다. 범프가 가해진 후 무차원 시간이 15 정도 경과하면 병진운동은 c_α 의 값이 기준치에서 1.6배까지의 경우 거의 감쇠된 것을 보여주고 있다. c_α 의 값이 기준치의 0.7배인 경우에는 댐핑이 너무 작기 때문에 발산은 하지 않으나 새로운 정상상태에 도달하는 데에 대단히 오랜 시간이 걸린다.

Fig. 3(b)은 피치운동에 대한 감쇠계수 c_α 가 변화할 때 피치변수의 응답을 보여주고 있다. 피치운동은 무차원 시간이 8 정도가 경과한 후 병진운동보다 빨리 감쇠된 것을 보여주고 있으며, c_α 가 0.7배인 경우에는 병진운동보다는 빠르나 완전히 감쇠가 될 때까지는 오랜 시간이 걸리는 것을 보여주고 있다. Fig. 3(c)은 c_α 의 변화가 회전운동에 미치는 결과를 보여주고 있다. c_α 의 변화에 따른 피치운동의 진폭은 역시 1/2 사이클 후에서 나타나고 있으며 회전운동은 무차원 시간이 10 정도 지난 후에는 거의 감쇠되고 있다. c_α 의 값이 0.7배인 경우에는 회전운동 역시 감쇠되는 데에 오랜 시간이 걸리는 것을 알 수 있다.

3-2. 플러터 입력에 대한 안정성 해석

정상상태로 회전하는 디스크에 플러터가 가해졌을 때 슬라이더의 안정성을 고찰하기 위하여 플러터의 진폭 및 주파수 등의 외부요소, 그리고 서스펜션의 감쇠계수 등의 설계변수들이 상태변수의 응답에 미치는 영향을 조사하였다. 사용된 플러터 모델은

$$S = \alpha \sin\left(\frac{\omega x}{V_x} - \omega t\right) \quad (10)$$

의 방정식으로 기술된다. 여기서 α 는 플러터의 진폭, ω 는 주파수를 나타내며, 기준값으로 사용된 진폭과 주파수의 값은 각각 $0.025 \mu\text{m}$ 와 20 kHz 이다.

Fig. 4는 디스크에 가해지는 플러터의 주파수가 변화할 때 발생하는 상태변수의 응답을 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 플러터 주파수를 기준값(1.0ω)에서 0.6배까지 감소시켰을 때 나타나는 결과를 보여주고 있다. 플러터 주파수가 감소함에 따라 병진운동의 사이클 주기가 점차 증가하여 주파수가 0.6배로 감소하면 주기는 약 10% 증가하는 것을 보여준다. 진폭의 크기가 감소

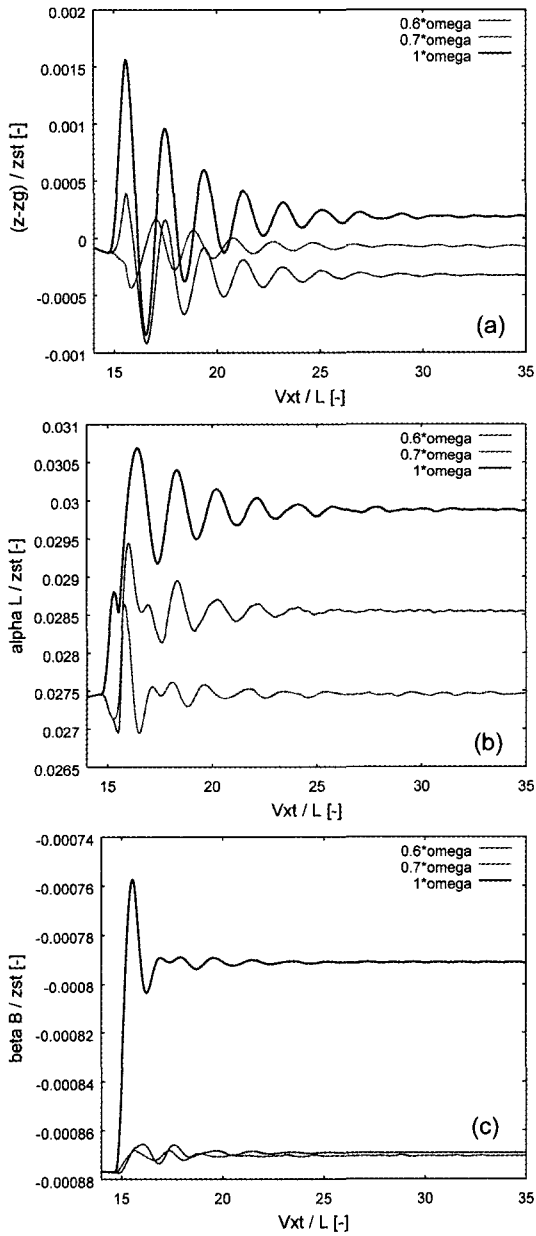


Fig. 4. Dimensionless flutter responses of film thickness (a), pitch angle (b), and roll angle (c) with different frequency of ω

하는 시간은 거의 동일하여 무차원 시간이 10 정도 경과하면 병진운동의 응답 진폭이 초기진폭의 약 10%로 줄어들고 있다. 또한 주파수가 0.6배 감소함에 따라 회전각의 새로운 정상상태 값은 점차 감소하여 2.5배 작은 값을 가지고 있다.

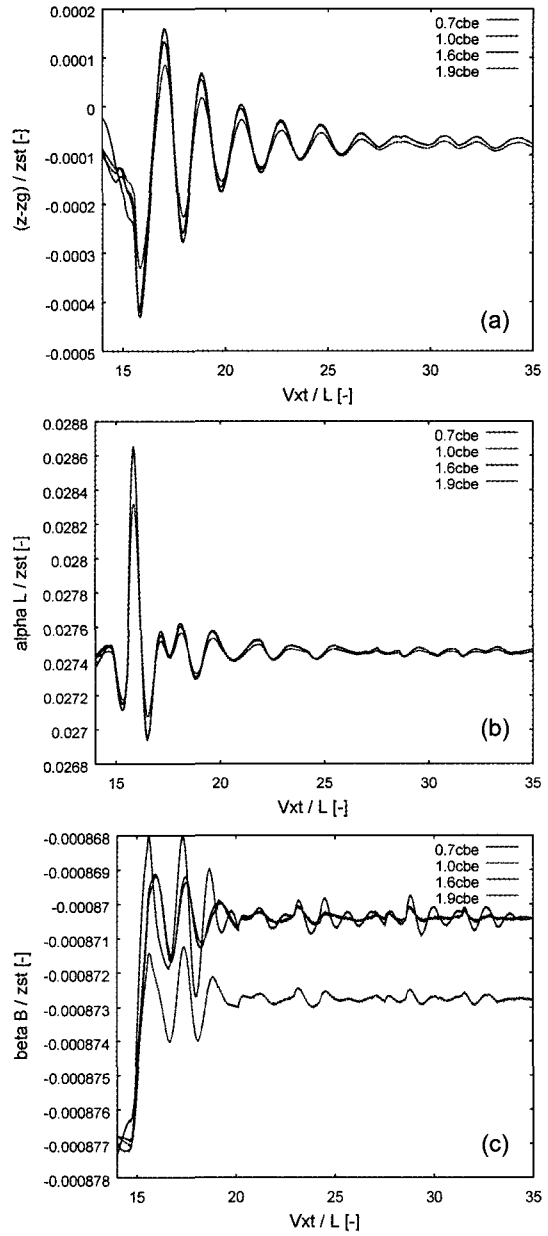


Fig. 5. Dimensionless flutter responses of film thickness (a), pitch angle (b), and roll angle (c) with different damping coefficient of C_{β}

피치운동(Fig. 4(b) 참조)의 응답에서 자세각 진폭이 감소하는 시간이나, 사이클 주기가 증가하는 것은 병진운동에서와 거의 유사한 경향을 보여주고 있다. 주파수가 감소함에 새로운 정상상태의 자세각이 점차 작아지는 경향도 유사하나, 수치적으로는 주파수가 0.6배

감소할 때 자세각이 7.7% 감소한다. 이 값은 병진운동 때 보다 훨씬 작은값으로 나타나고 있다. 롤링운동에서 진폭이 줄어드는 시간은 다른 두 가지의 운동 때 보다 훨씬 작아 무차원 시간이 4 정도가 지나면 진폭의 크기가 초기 진폭의 약 10%로 줄어들고 있다.

디스크 주파수가 0.6~0.7배로 감소한 경우 롤각(roll angle) 응답의 초기진폭과 새로운 정상상태 값은 Fig. 4(c)에서 제시한 것처럼 기준치의 주파수인 경우와는 확연하게 구분된다. 롤각 응답은 플러터 주파수의 기준치 부근에서 매우 민감한 반응을 보여주고 있다. 즉, 롤각은 플러터 주파수가 기준치에서 0.6으로 감소할 경우 약 10% 감소된 값에서 새로운 정상상태를 이루고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 5는 디스크에 플러터가 가해지는 경우 롤링운동에 대한 감쇠계수 c_{β} 가 변화할 때의 상태변수 응답을 보여주고 있다. 범프가 가해진 경우 상태변수의 응답을 조사한 경우에서와 같이 Fig. 5(a)와 (b)는 c_{β} 의 값이 기준치의 0.7배에서 1.9배까지 변화하는 동안에는 간극과 피치각의 응답에 거의 영향을 미치지 못하고 있음을 보여주고 있다. c_{β} 의 값이 0.7인 경우 롤링운동은 플러터가 가해진 후 세 번째 사이클까지는 매우 큰 롤링운동의 진폭을 보여주고 있다(Fig. 5(c) 참조). 그 이후에 발생하는 롤링운동의 진폭은 매우 작아졌으나, 초기진폭의 크기가 10%로 줄어드는 데에는 무차원의 값으로 17 정도가 소요되고 있음을 보여주고 있다.

4. 결 론

시뮬레이션을 통한 슬라이더-서스펜션의 동특성 분석을 위해 공기유향에 의한 압력분포 및 압력이 슬라이더에 작용하는 하중과 모멘트를 구하기 위해 수정 레이놀즈 방정식이 사용되었다. 수정 레이놀즈 방정식의 수치적 계산을 위하여 다차원적이고, 시간에 종속적인 ADI 해석 방법이 사용되었다. 슬라이더의 동역학을 서술하기 위하여 서스펜션에 의해 슬라이더에 가해진 정적하중과 모멘트, 공기 유향막에 의하여 슬라이더의 레일에 작용하는 하중 및 모멘트, 슬라이더의 질량과 관성 모멘트, 서스펜션의 강성계수와 감쇠계수를 고려한 운동방정식이 사용되었다.

슬라이더 동역학의 해석을 위해서는 제2차 비선형 미분방정식 형태로 나타난 수정된 레이놀즈 방정식과 운동방정식을 동시적으로 풀었다. 운동방정식의 적분

은 제4차 Runge-Kutta 방식을 사용하였다.

동일한 범프가 가해진 경우 방향각의 크기는 0°일 때에 간극응답의 진폭이 가장 작으며, 방향각이 음과 양의 방향으로 증가하면 간극응답의 진폭이 점차 증가하였다. 방향각이 변화할 때 자세각의 응답은 미소간극의 응답에서와 거의 유사한 경향을 보여준다. 방향각의 크기가 롤링운동에 미치는 영향은 위의 병진운동이나 피치운동보다 훨씬 작게 나타나고 있다. 피치운동에 대한 감쇠계수가 변화할 때 병진운동과 피치운동은 초기에는 거의 거의 영향을 받지 않다가 일정한 시간이 지난 후부터는 그 영향이 점차로 나타나고 있다. 피치방향의 감쇠계수 값이 기준치의 0.7배인 경우는 슬라이더가 발산하지는 않으나 다시 새로운 정상상태로 되돌아오는 데에는 아주 많은 시간이 소요되고 있다.

디스크에 가해지는 플러터의 주파수가 변화할 때 발생하는 간극과 자세각의 진폭이 감소하는 시간이나, 사이클 주기가 증가하는 것은 서로 매우 흡사한 유형을 보여주고 있다. 롤링운동에서 진폭이 줄어드는 시간은 다른 두 가지 운동을 할 때보다 훨씬 작다. 디스크 주파수가 0.6~0.7배로 감소한 경우 회전각 응답의 초기진폭과 새로운 정상상태 값은 기준치의 주파수인 경우와 확연하게 구분된다.

감쇠계수 c_{β} 는 간극과 피치각의 응답에 거의 영향을 미치지 못하며, c_{β} 의 값이 0.7인 경우의 롤링운동은 플러터가 가해진 후 세 번째 사이클까지 대단히 큰 롤링운동 진폭을 보여준다.

후 기

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 국내 박사후 연구과정 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Mikio Tokuyama, Shinichi Hirose, "Dynamic Flying Characteristics of Magnetic Head Slider With Dust," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 116, No. 1, pp. 95-100, 1994.
2. Leo, H.-L., Chapman, S.R., "Slider/Disk Interaction During the Landing Process," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 117, No. 1, pp. 119-123, 1995.
3. Whal, Michael H., Kwon, Haesung, Talke, Frank E., "Simulation of Asperity Contacts at the Head/Disk Interface of Tri-Pad Sliders During Steady-State Flying," *Tribology Transactions*, Vol. 40, No. 1, Jan.

- 1997.
4. White, J.W., Nigam, A., "A Factored Implicit Scheme for the Numerical Solution of the Reynolds Equation at very Low Spacing," ASME Journal of Lubrication Technology, Vol. 102, pp. 80-85 1980.
 5. Mitsuya, Y., Koumura, T., "Transient Response Solution Applying ADI Scheme to Boltzmann Flow-Modified Reynolds Equation Averaged With Respect to Surface Roughness," ASME Journal of Tribology, Vol. 117, pp. 430-436 1995.
 6. White, J.W., "Dynamic Simulation of the Zero-Load Slider Bearing," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-19, No. 5, Sep. 1983.
 7. Hu, Yong, Bogy, David B., "Dynamic Stability and Spacing Modulation of Sub-25nm Fly Height Sliders," ASME Journal of Tribology, Vol. 119, pp. 646-652, 1997.