하드디스크 슬라이더의 동적수치해석

김도완, 임윤철*
연세대학교 대학원 기계공학과
*연세대학교 기계전자공학부

A Numerical Dynamic Simulation of the Slider in HDD

Do-wan Kim, Yoon-chul Rhim*
Graduate School Yonsei Univ.
*School of Electrical and Mechanical Eng. Yonsei Univ.

ABSTRACT

A numerical dynamic simulation is necessary to investigate the capacity of the HDD. The slider surface become more and more complicated to make the magnetized area smaller and readback signal stronger. So a numerical dynamic simulation must be preceded to develop a new slider in HDD. The dynamic simulations of air-lubricated slider bearing have been performed using FIFD(Factored Implicit Finite Difference) method. The governing equation, Reynolds equation is modified with Fukui and Kaneko model(FK model) which includes the first and the second-order slip. The equations of motion for the slider bearing are solved simultaneously with the modified Reynolds equation for the case of three degrees of freedom. The slider transient response for disk step bump and slider impulse force is given for various case and for iteration algorithm and new algorithm.

key words : air-lubricated slider bearing, FIFD(Factored Implicit Finite Difference), motion equation, Fukui and Kaneko model, disk step bump, slider impulse force.

1. 서론

컴퓨터의 사용이 증대되고 있는 현대 산업사회에서 컴퓨터 산업은 새로운 산업사회를 주도할 중요한 부분으로 성장했다. 특히 컴퓨터 보조 기억 장치로서의 중요성이 더욱 커지고 있는 HDD에 관한 연구는 그 분야가 매우 다양하고 여러 첨단 기술과 직접 관련되어 있어 점점 더 많은 관심을 불러일으키고 있다. HDD의 정보저장능력은 자기 기록 밀도와 데이터 입출력 속도에 의해 결정되어지는데 이러한 정보저장 능력의 향상을 위해 입출력 헤드와 자기 디스크 사이의 간격을 감소시키기 위한 노력은 끊임없이 계속되어 왔다.

HDD의 기술발전에 따라 점점 더 고용량의 기록방식이 사용되면서 헤드와 디스크 사이의 접촉 빈도도 증가하고 있다. 정상상태의 공기베어링 해석뿐만 아니라 슬라이더의 동적거동에 관한 연구의 필요성이 바

로 여기에 있다.

Tang(1971)[1]은 슬라이더 공기베어링 동적 거동해석을 처음 시행한 사람중의 한 사람이다. 반면에 Ono(1975)[2]는 섭동법에 의해 주파수 영역에서의 디스크 진동에 대한 슬라이더 공기베어링 동적 응답을 계산하였다. Kogure et al(1983)[3] 또한 섭동법에 근거로 한 주파수 영역을 사용하여 부압 슬라이더(negative pressure slider)의 동적 거동 해석을 수행하였다. Miu and Bogy(1986)[5]는 White and Nigam(1980)[6]의 FIFD scheme을 사용하여 평면테이퍼 슬라이더의 수치적 거동 해석을 수행하였다. Ruiz and Bogy (1990)[7]는 기존의 레이놀즈 방정식에 FK(Fukui and Kaneko, 1988)[8] 수정을 사용하여 슬립효과를 고려하여 해석하였다. 그들은 헤드-서스펜션(head-suspension assembly) 부품의 유한요소모델을 시뮬레이션 프로그램에 포함시켰으며 스텝범퍼, 트랙탐색, 크래쉬-스탑 동안의 평면 테이퍼 슬라이더 응답을 구하였다.

본 연구에서는 압축성 유체를 사용한 경우, IBM3380 슬라이더 헤드의 3자유도 운동(Bouncing, Pitching, Rolling)에 대한 평형 방정식의 평형조건에 의하여 각각의 위치를 구하고, 구해진 평형 상태에서의 유막압력 분포를 FIFD[6] 방법을 사용하여 구해 슬라이더 공기베어링의 동적 거동을 해석한다.

2. 수치해석

2.1 슬라이더 공기베어링 형상

Fig. 1과 2는 슬라이더 공기베어링의 형상과 좌표를 나타낸다. IBM3380 슬라이더는 Fig. 1과 같이 평면테이퍼를 가진 두 개의 레일과 리세스 영역을 가지는 부분으로 이루어져 있으며 형상치수는 Table1과 같다.

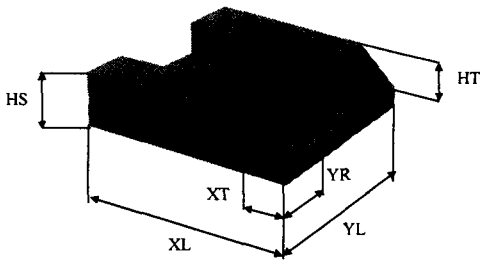

Fig. 1 Geometry of the slider bearing.

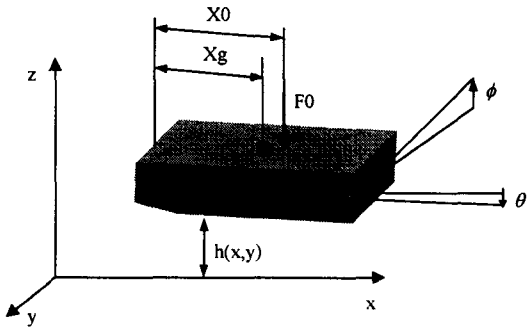

Fig. 2 Slider coordinate and geometry.

Table 1 Slider dimension

HS	0.75E-3	HT	0.5542E-5
XL	0.405E-2	XT	0.381E-3
YL	0.300E-2	YR	0.500E-3
Xg	0.2025E-2	X0	0.2162E-2
F0	15gf		

2.2 슬라이더 공기베어링 해석

HDD의 동적 거동 해석을 위해서는 공기베어링의 지배방정식인 레이놀즈 방정식(Reynolds)에 대한 충분한 이해가 필요하다. 일정한 점성의 압축성 유체에 대한 무차원화된 레이놀즈 방정식을 구하면

$$\frac{\partial}{\partial X}(PH^3Q_p\frac{\partial P}{\partial X})+\frac{\partial}{\partial Y}(PH^3Q_p\frac{\partial P}{\partial Y}) = \Lambda_x\frac{\partial PH}{\partial X}+\Lambda_y\frac{\partial PH}{\partial Y}+\sigma\frac{\partial PH}{\partial T} \quad (1)$$

이 된다. 여기서

$$\Lambda_X=\frac{\partial(PH)}{\partial X},\quad \Lambda_Y=\frac{\partial(PH)}{\partial Y},\quad \sigma=\frac{12\mu\varpi_0L^2}{p_ah_{\min}^2} \quad (2)$$

헤드/디스크 간격이 100 nm 이하의 극소 틈새가 되면 공기 분자의 평균 자유거리(mean free path)의 영향이 상대적으로 커지므로 벽면에서의 벽면 부착 경계조건(no-slip condition)이 더 이상 사용될 수 없다. 이러한 기체의 입자성에 기인하는 불연속 유체로서의 특성이 포와젤리 유동항에 나타나게 되며, 이는 눗센수(Knudsen Number)에 의해 결정된다. 비연속성 효과를 고려하기 위한 슬립 경계 조건 모델은 여러 가지 있으며 아래에 이를 표시한다. 식 (3)은 연속체일 때, 식 (4)은 Burgdorfer [5]가 1차 슬립항까지 고려한 모델이며, 식 (5)은 Hsia와 Domoto[9]가 2차 슬립항까지 고려한 모델이다. 식 (6)는 Fukui와 Kaneko[8]가 선형화된 Boltzmann 방정식에 의거하여 구한 모델이다.

$$Q_p = 1 \qquad \text{continuum} \tag{3}$$

$$Q_p = 1 + 6a\frac{Kn}{PH} \qquad \text{1st order slip model} \tag{4}$$

$$Q_p = 1 + 6\frac{Kn}{PH} + 6(\frac{Kn}{PH})^2 \qquad \text{2nd order slip model} \tag{5}$$

$$Q_p = 1 + 6.820\frac{Kn}{PH} + 8.311(\frac{Kn}{PH})^2 \qquad \text{Fukui-Kaneko model} \tag{6}$$

여기서, $Kn = \frac{\lambda}{h_2}$는 눗센수(Knudsen Number)를 나타내며, λ는 공기분자의 평균 자유 거리로 대기압, 상온하에서 65.21nm이다.

2차원 베어링에 대한 압축성 비정상 레이놀즈 방정식의 차원화된 형태는

$$\frac{\partial}{\partial x}(ph^3Q\frac{\partial p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(ph^3Q\frac{\partial p}{\partial y}) = 6\mu U\frac{\partial ph}{\partial x} + 6\mu V\frac{\partial ph}{\partial y} + 12\mu\frac{\partial ph}{\partial t} \tag{7}$$

$$Q = 1 + 6.820\frac{\lambda_a P_a}{ph} + 8.311(\frac{\lambda_a P_a}{ph})^2 \tag{8}$$

이 되고, 벡터 형태로 쓰면 다음과 같다.

$$\nabla(ph^3\nabla p) + 6.820\lambda_a P_a\nabla(h^2\nabla p) + 8.311(\lambda_a P_a)^2\nabla(\frac{h}{p}\nabla p) = 6\mu\vec{V}\nabla(ph) + 12\mu\frac{\partial ph}{\partial t} \tag{9}$$

2.3 유한차분 수식화

식 (9)에 FIFD 기법을 적용하기 위해 새로운 변수 $z(x, y, t) = ph$를 도입하여 식 (9)의 각 항을 정리하면 다음과 같다.

$$\nabla\{zh\nabla z - z^2\nabla h + 6.820\,\lambda_a P_a(h\nabla z - z\nabla h) + 8.311(\lambda_a P_a)^2(\frac{h}{z}\nabla z - \nabla h)\} = 6\mu\vec{V}\nabla z + 12\mu\frac{\partial z}{\partial t} \tag{10}$$

여기에 x 편미분 항 F와 y 편미분 항 G를 정의하여 식 (10)을 정리하면

$$12\mu\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} \tag{11}$$

$$F = zh\frac{\partial z}{\partial x} - z^2\frac{\partial h}{\partial x} + 6.820\,\lambda_a P_a(h\frac{\partial z}{\partial x} - z\frac{\partial h}{\partial x}) + 8.311(\lambda_a P_a)^2(\frac{h}{z}\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x}) - 6\mu Uz \tag{12}$$

$$G = zh\frac{\partial z}{\partial y} - z^2\frac{\partial h}{\partial y} + 6.820\,\lambda_a P_a(h\frac{\partial z}{\partial y} - z\frac{\partial h}{\partial y}) + 8.311(\lambda_a P_a)^2(\frac{h}{z}\frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\partial h}{\partial y}) - 6\mu Vz \tag{13}$$

Trapezoidal Formula에 의해 z와 z_t를 시간 레벨 n에 대해 적용하면

$$z^{n+1} = z^n + \frac{\Delta t}{2}(z_t^{\,n} + z_t^{\,n+1}) + O(\Delta t^3) \tag{14}$$

식 (11)를 식 (14)에 대입하여 유한차분 형태의 결과를 만들어준다.

$$z^{n+1} = z^n + \frac{\Delta t}{24\mu}(F_x^n + G_y^n + F_x^{n+1} + G_y^{n+1}) + O(\Delta t^3)$$

(15)

F와 G는 z에 대해 비선형 함수이므로 현 시간 레벨에 대해 비선형 함수를 확장함으로써 선형화를 가능하게 할 수 있다.

$$t^n \le t \le t^{n+1}$$

$$F(x,y,t)-F(x,y,t^n)=\frac{\partial F^{(n)}}{\partial h}(h-h^n)+\frac{\partial F^{(n)}}{\partial h_x}(h_x-h_x{}^n)+\frac{\partial F^{(n)}}{\partial z}(z-z^n)+\frac{\partial F^{(n)}}{\partial z_x}(z_x-z_x{}^n)+O(\Delta t^2)$$

$$G(x,y,t)-G(x,y,t^n)=\frac{\partial G^{(n)}}{\partial h}(h-h^n)+\frac{\partial G^{(n)}}{\partial h_y}(h_y-h_y{}^n)+\frac{\partial G^{(n)}}{\partial z}(z-z^n)+\frac{\partial G^{(n)}}{\partial z_y}(z_y-z_y{}^n)+O(\Delta t^2)$$

(16)

식 (16)을 식 (15)에 대입하고 수식의 간편화를 위해 표기법을 사용하여 정리하면

$$z^{n+1}=z^n+\frac{\Delta t}{24\mu}[F_x^n+G_y^n+\frac{\partial}{\partial x}\{F^n+A(h^{n+1}-h^n)+B(h_x^{n+1}-h_x^n)+C(z^{n+1}-z^n)+D(z_x^{n+1}-z_x^n)\}+\frac{\partial}{\partial y}\{G^n+I(h^{n+1}-h^n)+J(h_y^{n+1}-h_y^n)+K(z^{n+1}-z^n)+L(z_y^{n+1}-z_y^n)\}]$$

(17)

$$z^{n+1}-\frac{\Delta t}{24\mu}\{\frac{\partial}{\partial x}(Cz^{n+1})+\frac{\partial}{\partial x}(Dz_x^{n+1})+\frac{\partial}{\partial y}(Kz^{n+1})+\frac{\partial}{\partial y}(Lz_y^{n+1})\}=z^n-\frac{\Delta t}{24\mu}\{\frac{\partial}{\partial x}(Cz^{n+1})+\frac{\partial}{\partial x}(Dz_x^{n+1})+\frac{\partial}{\partial y}(Kz^{n+1})+\frac{\partial}{\partial y}(Lz_y^{n+1})\}+\frac{\Delta t}{24\mu}[2F_x^n+2G_y^n+\frac{\partial}{\partial x}\{A(h^{n+1}-h^n)+B(h_x^{n+1}-h_x^n)\}+\frac{\partial}{\partial y}\{I(h^{n+1}-h^n)+J(h_y^{n+1}-h_y^n)\}]$$

(18)

함수 ϕ와 선형계산자 L_1, L_2를 정의하여 복잡한 수식을 간단히 정리할 수 있다. 2차 시간 정확도를 유지하며 전개시킨 최종 식은 다음과 같다.

$$[1-L_1][1-L_2]\Delta z^n=\phi \quad (19)$$

$$L_1(x)=\frac{\Delta t}{24\mu}\{\frac{\partial}{\partial x}(C)+\frac{\partial}{\partial x}(D\frac{\partial}{\partial x})\}$$

$$L_2(y)=\frac{\Delta t}{24\mu}\{\frac{\partial}{\partial y}(K)+\frac{\partial}{\partial y}(L\frac{\partial}{\partial y})\} \quad (20)$$

ϕ는 식 (18)에서의 L_1, L_2를 제외한 나머지 식을 가리킨다. 식 (19)에서 인수해법은 다음과 같은 절차에 의해서 해를 구할 수 있다.

$$[1-L_1]\Delta z^* = \phi \quad (21)$$

$$[1-L_2]\Delta z^n = \Delta z^* \quad (22)$$

식 (19)의 2차원 문제는 식 (21)과 식 (22) 두 개의 1차원 문제로 변환된다.

2.4 슬라이더의 운동

공기베어링은 HDD 작동 중에 슬라이더를 디스크로부터 분리하는 아주 얇은 공기막이다. Fig. 2는 슬라이더 공기베어링을 나타내고 있으며 슬라이더는 서스펜션으로부터 무게중심과 조금 떨어진 곳에서 F_0의 일정한 스프링 하중을 받고 있다. 본 연구에서는 3가지 운동에 대한 자유도를 구속하기 위해 주어진 서스펜션에 대한 해석을 제외한 공기베어링에 대해 연구하기로 한다. 슬라이더는 공기막에 의해 발생된 압력과 균형을 이루도록 상하 운동인 바운싱 운동과 무게 중심을 중심으로 한 회전 운동인 피칭, 롤링 운동을 하게 된다. 이 때의 3 자유도 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}=\int_A (p-p_a)dxdy-F_0 \quad (23)$$

$$I_\theta\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}=\int_A (p-p_a)(x_g-x)dxdy+F_0(x_0-x_g) \quad (24)$$

$$I_\phi\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}=\int_A (p-p_a)(y-y_g)dxdy \quad (25)$$

여기서,

z, θ, ϕ : 각 방향으로의 위치 변위값

I_θ, I_ϕ : moment of inertia

m : 슬라이더의 질량

2.5 공기베어링과 슬라이더 운동의 연계

슬라이더의 운동은 슬라이더 공기베어링 해석에서 보았던 수정 레이놀즈 방정식과 운동방정식을 동시에 풀어서 구한다. 레이놀즈 방정식은 유한차분법으로 계산하고, 슬라이더 운동방정식은 4'th order Runge-Kutta 알고리즘을 이용하여 수치적분을 한다. 두 방정식에서 다음 시간 단계에서의 공기베어링 압력값과 운동 변수들은 모두 미지수이므로 두 방정식을 동시에 푸는 연계해석에는 특별한 처리가 필요하다. 다음 시간 단계의 슬라이더 위치에 해당하는 공기베어링 압력이 현 단계에서의 공기베어링 압력과 같다고 가정하여 다음 단계의 슬라이더 위치를 구한 후, 그 위치에서의 압력을 계산하고 Runge-Kutta 계산을 다시 반복하여 새로운 위치를 구하는데, 여기서 새롭게 구해진 위치와 앞에서 동일한 압력 가정 하에 구한 위치 차이가 주어진 범위 이내로 작아질 때까지 반복을 계속하는 반복알고리즘으로 두 방정식을 연계한다. 이러한 반복법에 대한 설명은 Miu and Bogy[5]에 간단히 나와 있다. 본 연구에서는 다음 시간 단계의 압력값을 단순히 이전 시간 단계의 압력값으로 가정하지 않고 Runge-Kutta를 푸는데 있어 실제로 $\frac{\Delta t}{2}$와 Δt 이후의 k값을 구할 때 레이놀즈 방정식을 직접 풀어 나온 압력값을 이용하는 새로운 알고리즘을 제시하여 비교해 보고자 한다. 이러한 반복 알고리즘과 새로운 알고리즘은 슬라이더 운동을 정밀하게 해석할 수 있으므로 공기베어링의 외란에 대한 과도응답을 구하는데 있어 적합한 알고리즘이다.

3. 수치해석에 의한 결과

3.1 해석결과의 타당성 검토

수치해석 결과를 검증하기 위하여 Fig. 3에 플레인 쐐기 슬라이더의 정적수치 해석 결과를 나타낸다. 1980년 White and Nigam[6]이 제시한 1차 슬립을 고려한 플레인 쐐기 베어링의 정적압력 분포와 본 논문의 결과를 비교하면 상당히 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 3은 슬라이더의 간극 변화가 없다는 가정 하에 최소간극은 127 nm, 피치각은 100 μrad으로 설정하고 균일그리드로 계산한 결과이다. 여기서 보이는 압력그래프는 끝단에서 급격히 변하는 것을 확인할 수 있고 최대 압력값은 끝단 부분에서 2.5기압으로 두 그래프의 모양이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 1차와 2차를 모두 고려한 FK 모델의 결과는 최대압력이 2.5기압보다 조금 낮게 나오는데 이는 벽면에서의 슬립을 더욱 고려해준 결과로써 타당한 결과임을 알 수 있다.

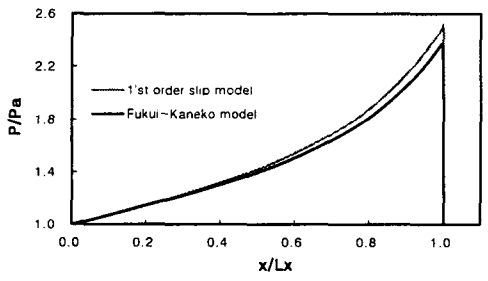

Fig. 3 Steady state pressure distribution along the center line of plane wedge slider bearing.

Fig. 4에 나타난 IBM3380 슬라이더의 동적해석 결과, 초기 높이, 초기 로딩 속도에 관계없이 정상상태의 부상높이는 230 nm, 피치각은 80 μrad, 롤각은 0.01 μrad의 결과를 얻었으며 이러한 결과는 기존의 논문결과와 잘 일치하고 있다.

3.2 IBM3380 슬라이더의 동적 해석 결과

본 연구는 헤드-디스크 간격에 영향을 미치는 헤드-김발 어셈블리의 영향을 무시하고 단순한 스프링 모델을 사용하여 슬라이

더의 운동을 표현한다. 이러한 연구는 공기 베어링 자체의 동특성에 초점을 두어 정적 부상 높이와 외란에 대한 동적 거동을 해석하는데 유용하다.

Fig. 4는 일정한 초기 로딩 속도에서의 여러 가지 초기 로딩 높이에 대한 슬라이더의 동적 거동 해석 결과이다. 정속으로 회전하고 있는 디스크 위에 놓이는 슬라이더는 처음부터 공기베어링 역할을 수행하고 있으며 초기 로딩 높이에 관계없이 짧은 시간내에 일정한 값으로 수렴한다.

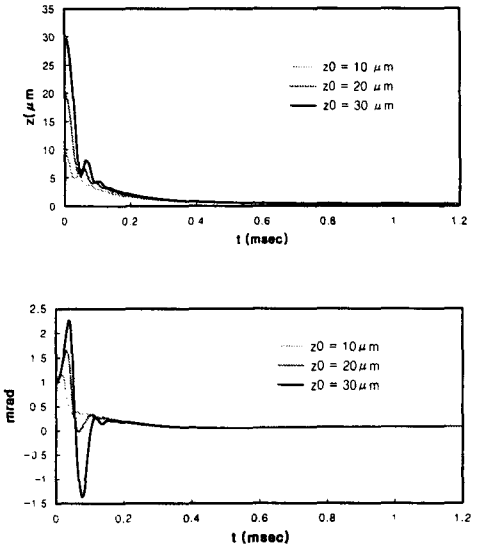

Fig. 4 Center, Pitch motions of the slider for each initial height during dynamic simulation.

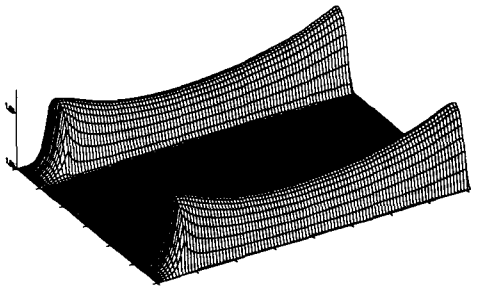

Fig. 5 Steady state pressure plot of the IBM3380 slider.

여기서 우리는 CSS 프로세스의 문제점을 제거하기 위한 로드-언로드 시스템과는 달리 디스크와의 충돌은 발생하지 않음을 알 수 있으며 아주 짧은 시간 내에 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

3.3 스텝범퍼에 대한 슬라이더의 응답해석

디스크 표면에 발생한 스텝범퍼에 대한 슬라이더의 과도응답을 계산한다. Fig. 6은 정상상태에 도달한 슬라이더의 200 *nm*의 일정한 높이를 가진 3가지 길이의 디스크 범퍼를 만났을 때 슬라이더의 응답 결과이다. 결과를 보면 알 수 있듯이 범퍼의 길이가 길면 길수록 슬라이더는 더 크게 진동하고 슬라이더의 불안정한 상태는 오래 지속된다. 그러나 슬라이더의 운동은 공기베어링의 감쇠 기능에 의해 짧은 시간 내에 소멸된다. Fig. 7는 동일한 길이를 가지면서 범퍼 높이를 달리 한 경우에 대한 결과이다. 역시 범퍼의 높이가 높을수록 슬라이더는 크게 진동하고 있음을 결과 그래프를 통해 알 수 있다.

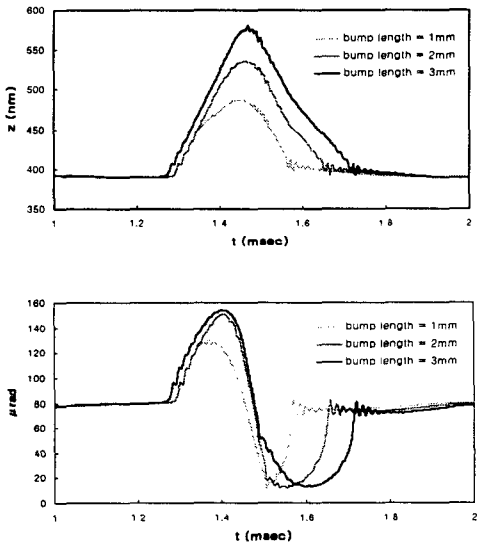

Fig. 6 Center and Pitch motion of the slider due to 200 *nm* height bump

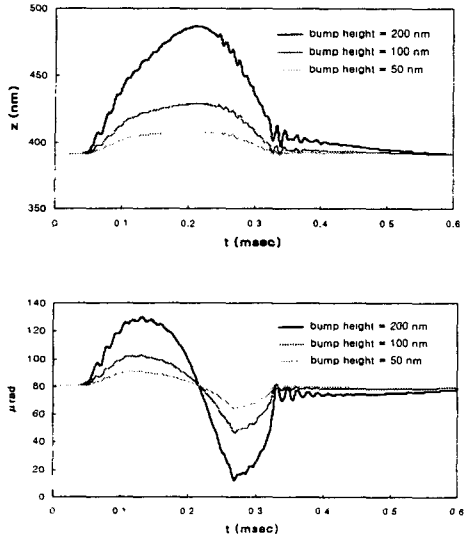

Fig. 7 Center and Pitch motion of the slider due to 1mm step bump.

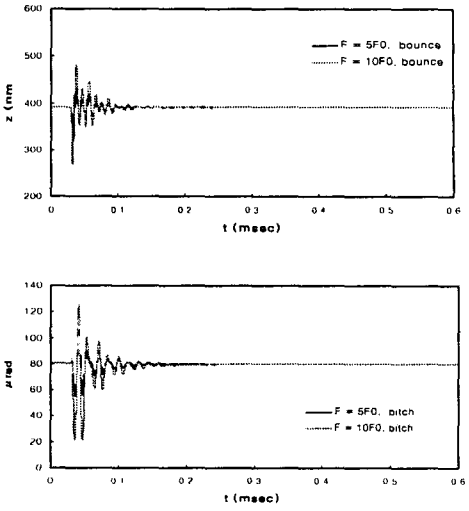

Fig. 8 Center and Pitch motion of the slider due to slider impulse.

3.4 임펄스에 대한 슬라이더의 응답해석

대표적으로 HDD에 가해지는 외부충격으로 서스펜션을 통해 슬라이더를 직접 가진하는 슬라이더 임펄스가 있다. 정상상태에 도달한 슬라이더에 서스펜션에 가해지는 정적하중 외에 임의의 값의 임펄스 하중을 가하고 공기베어링의 응답을 계산함으로써 슬라이더의 거동을 해석한다. Fig. 8을 보면 임펄스의 크기가 클수록 슬라이더는 더욱 큰 진폭을 가지고 진동하고 있음을 알 수 있다. 그러나 공기베어링의 감쇠 기능에 의해 슬라이더의 진동은 짧은 시간 내에 소멸된다.

3.5 반복 알고리즘과 새 알고리즘의 비교

이전 단계의 압력값을 다음 단계의 압력값으로 단순 가정하는 반복법은 외란이 없는 일반적인 상황에서는 압력 가정이 순조로우나 스텝범퍼나 임펄스 등 특별한 상황에서는 한번의 가정으로 다음 단계의 위치를 주어진 오차 이내에서 구할 수 없다. 이러한 여러 번의 가정에 따른 시간상의 제

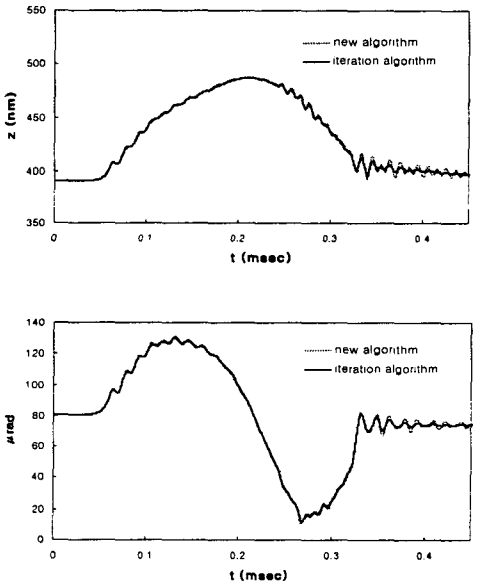

Fig. 9 Center and Pitch displacement of the slider due to 1mm step 200nm bump.

약을 극복하기 위해 특별한 상황에서의 직접적인 연계해석 알고리즘을 소개한다. Fig. 11은 스텝범퍼를 만난 슬라이더의 두 알고리즘에 의한 결과인데 슬라이더의 거동은 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 다만 새 알고리즘에 의한 결과가 조금

큰 진폭을 가지고 진동하고 있음을 알 수 있는데 이는 운동방정식을 풀 때 단순 압력 가정이 아니라 직접 레이놀즈 방정식을 풀어 k값들을 구하여 감쇠효과에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

압축성 유체를 사용한 IBM3380 슬라이더를 유한차분법을 사용하여 동적거동 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. HDD 슬라이더 자기 부상 공기베어링의 동적거동에 관한 연구를 통해 IBM3380 슬라이더의 거동을 예측 할 수 있다.
2. 베어링 영역 내 압축성, 등온 유체에 대한 레이놀즈 방정식과 슬라이더 운동 방정식간의 동시 연계 해석을 위한 새로운 알고리즘을 소개한다. 새로운 알고리즘에 의한 결과는 반복법에 의한 결과 보다 큰 진폭을 가지고 진동하지만 결국 동일한 값으로 수렴하고 있음을 확인할 수 있다.
3. 디스크에 발생한 스텝범퍼에 대한 슬라이더의 과도 응답 해석 결과 스텝의 길이가 길고 높이가 높을수록 슬라이더는 더 큰 진폭을 가지고 진동한다. 그러나 슬라이더 운동은 공기베어링의 감쇠 기능에 의해 짧은 시간 내에 소멸된다.
4. 외부 충격에 의해 가해질 수 있는 슬라이더 임펄스에 대한 과도 응답 해석 결과 임펄스의 크기가 클수록 슬라이더는 더 큰 진폭을 가지고 진동하며, 슬라이더 최소 간극의 거동을 분석하여 슬라이더와 디스크의 충돌을 피하기 위한 최대 임펄스를 예측할 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기연구센터의 지원(과제번호 : 1999G0303)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. Tang, T., 1971, "Dynamics of Air-lubricated Slider Bearings for Noncontact Magnetic Recording," ASME Journal of Lubrication Technology, Vol. 93, pp. 227-278.
2. Ono, K., 1975, "Dynamic Characteristics of Air-Lubricated Slider Bearing for Noncontact Magnetic Recording," ASME Journal of Tribology, Vol. 97, pp. 250-260.
3. Kogure et al, 1983, "Design of Negative Pressure Slider for Magnetic Recording Disks," ASME Journal of Lubrication Technology, Vol. 7, pp. 496-502.
4. Burgdorfer, A., 1959, "The Influence of Molecular Free Mean Path on the Performance of Hydrodynamic Gas-Lubri cated Bearings, " ASME Journal of Basic Engineering, Vol. 81, No. 1, pp. 94-100.
5. Miu, D., and Bogy, D. B., 1986, "Dynamics of Gas-Lubricated Slider Bearings in Magnetic Recording Disk Files," ASME Journal of Tribology, Vol. 108, pp. 584-593.
6. White, J. M., and Nigam, A., 1980, " 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.
7. Ruiz, O. J., and Bogy, D. B., 1990, "A Numerical Simulation of the Head Disk Assembly in Magnetic Hard Disk," ASME Jounal of Tribology, Vol. 112, pp. 593-613.
8. Fukui, S., and Kaneko, R., 1988, "Analysis of Ultra-Thin Gas Film Lubrication Based on Linearized Boltzmann Equation," ASME Journal of Tribology, Vol. 110, pp. 335-341.
9. Hsia, Y. T, Domoto. G. A, 1983, " An Experimental Investigation of Molecular Effects in Gas Lubricated Bearings at Ultra Low Clearances," ASME Journal of Tribology, Vol. 105, pp. 120-130.