

〈論 文〉

# 회전헤드에 대한 주행테이프의 부상특성 ( I ) — 수치해석 —

민 옥 기\* · 김 수 경\*\*  
(1990년 7월 10일 접수)

## Flying Characteristics of Running Tape above Rotating Head ( I ) — Numerical Analysis —

Oakkey Min and Sookyung Kim

**Key Words :** Elasto Hydrodynamic Lubrication(EHL; 탄성 유체 윤활 기구), Finite Difference Method(FDM; 유한차분법), Newton Raphson Method(뉴턴 램슨 방법), Iteration(반복), Running Tape(주행 테이프), Elastic Thin Foil(박막 탄성체), Rotating Head(회전 헤드), Protruding Bump(돌출물), Modified Reynolds Equation(수정 레이놀즈 방정식), Spacing(틈새), Hydrodynamic Pressure(유체 동압), Elastic Deformation(탄성 변형), Flying Characteristics(부상 특성)

### Abstract

This dissertation analyzes the running mechanism of flexible and thin tape above rotating head through the numerical simulation and the experiment. The scope of analysis is confined to the phenomena of two dimensional elasto hydrodynamic lubrication between the protruded bump on a rotating cylinder and the running tape. This model is based on the elastic deformation equation of plate and shell and Reynolds equation. Finite difference method is employed as a numerical technique to calculate (1) the distribution of pressure between the running tape and rotating bump and (2) the vertical deformation of elastic thin tape over the rotating bump under hydrodynamic pressure. In numerical analyses, the effects of bump size on flying characteristics of the tape were evaluated and examined considering the influence of tension and stiffness of tape.

### 1. 서 론

고속으로 회전하는 드럼 원주면 상에 미소하게 돌출된 자기 헤드에 대해 일정한 상대 속도로 주행하는 자기 테이프의 거동에 대한 해석 모델은 회전 헤드형 자기 기록 장치 등에서 정보의 기록/재생시에 필연적으로 직면하게 되는 문제이다. 이러한 자

기 기록 장치에 있어서는 헤드와 기록 매체 간에 상대 속도에 의한 동압이 발생하여 공기 윤활막(lubricated air film)을 형성시킨다. 공기막에 의한 부상 효과는 자기 테이프와 회전 드럼 사이에 미소한 틈새를 갖게하여 마멸을 막아주기도 하지만 헤드와 테이프 사이의 틈새 손실에 의하여 기록/재생 신호의 출력을 감소시키기도 한다. 그러나 자기 기록 장치에서는 고밀도 기록 특성이 크게 요구되어지며 헤드와 기록 매체 간의 밀착성 및 주행 안정성이 매우 중요한 요소로 취급되어 진다. 자기

\* 정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과  
\*\* 정회원, (주) 금성사 AV사업부 설계실

테이프와 같은 박막 탄성체의 주행 부상 특성의 해석에 있어서 테이프와 드럼 사이의 윤활 유체의 압력과 탄성체의 변형은 강한 비선형성으로 인하여 비선형 수치 해석 기법을 사용하여야 한다. 수치 해석에서는 많은 반복 계산을 해야하며 해석 변수의 비선형성에 따라 보다 근사하고 엄밀한 해석 방법이 필요하다.

박막 탄성체의 부상 특성에 관한 연구로서는 1960년대 초 컴퓨터 자기 디스크 장치와 자기 테이프 장치 등을 대상으로 많이 연구되어 왔다. 헤드 및 기록 매체의 손상과 마멸을 방지하는 것을 주목적으로 테이프를 윤활 효과에 의해 헤드로부터 안정하게 부상시키기 위한 연구 등이 이루어져 왔다. 森美郎<sup>(1-4)</sup>, Langlois<sup>(5)</sup>, 堀幸夫<sup>(6)</sup> 등은 박막 탄성체인 테이프를 완전한 유연막(flexible foil)으로 보고, 구면 막 베어링의 관점에서 일반적인 부상 특성에 대한 연구를 하였다. Greenberg<sup>(7)</sup>, Adams<sup>(8)</sup>, Ono<sup>(9)</sup>, Wolf<sup>(10)</sup>, 小野<sup>(11-13)</sup>, 米田<sup>(14)</sup>, Yoneda<sup>(14,19-21)</sup>, Sakai<sup>(15)</sup>, 西田<sup>(16)</sup>, 장인배<sup>(17,18)</sup> 등은 자기 테이프 및 디스크와 헤드를 대상으로 박막 탄성체의 강성을 고려하여 공기막에 대해 부상 특성에 대해 연구하였다.

지금까지 박막 탄성체와 돌출물 간의 주행 특성에 관한 연구로서 자기 테이프나 자기 디스크를 모델로 하여 많은 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 이론적인 접근 방법에 있어서 해석 결과의 정확도에 있어서 제약 조건 및 다소의 문제점을 안고 있었다. 즉, 박막 탄성체의 강성이 충분히 고려되지 못하였거나 무한 폭의 박막 탄성체로 가정하였거나 돌출물의 돌출량을 아주 적게하여 해석하였다. 해석 영역을 돌출물 부위로 한정하여 돌출물 전후에서의 박막 탄성체의 거동을 잘 파악할 수 없거나 실험적인 뒷받침이 없거나 하여 실용적인 측면에서 효과적이지 못한 경우가 많았다.

따라서 본 연구에서는 강성이 고려된 유한 폭의 박막 탄성체와 회전 헤드형 자기 기록 장치에서 실제로 적용되는 돌출량을 가진 돌출 헤드를 대상으로 하여 해석 모델을 작성하고 박막 탄성체의 변형 상태 및 부상량과 압력 분포 등을 해석한다. 박막 탄성체의 거동을 충분히 파악할 수 있도록 돌출물 영역에서 뿐만 아니라 박막 탄성체의 전체 영역에 대하여 해석을 수행한다. 박막 탄성체의 변형 특성에 있어서 탄성체의 초기 장력 및 상대 속도와 강성 등을 주요 변수로 하여 이에 대한 수치 해석 과

정을 제시한다. 박막 탄성체의 변형 방정식에서 변형에 영향을 미치는 박막 탄성체의 장력과 강성의 영향을 파악하고 변형 특성을 검토한다. (수치해석의 실제와의 부합 여부에 대한 검토는 제 2편 실험 해석에서 다름)

## 2. 탄성 유체 윤활 기구

박막 탄성체인 주행 테이프와 회전 실린더 상에 돌출되어 있는 돌출물(protruding bump)인 헤드간의 고속 주행 메카니즘에 의한 탄성 유체 윤활 기구(elasto hydrodynamic lubrication mechanism)를 해석한다. 박막 탄성체가 회전 돌출물에 대해 주행할 때 테이프의 변형은 돌출물의 기하학적 형상과 상대 속도에 의한 유체 윤활 압력 특성에 좌우된다. 이러한 탄성 유체 윤활 기구에서는 테이프의 변형 및 이에 작용하는 압력 분포는 상대 속도를 갖고 주행하는 돌출물과의 틈새(spacing)효과와 서로 연계(coupling)되어있다. 테이프의 변형은 판 및 셸 이론에 근거하여 초기 장력 및 곡률 반경이 고려된 얇은 판의 탄성 변형 방정식으로 해석하고 압력 분포는 유체 윤활 방정식인 레이놀즈 방정식으로 해석한다.

본 연구에서의 해석 모델은 테이프가 장력을 받으면서 양단이 단순 지지된 상태에서 회전 드럼에 돌출된 돌출물과 상대 속도를 갖고 주행하는 모델이며 Fig. 1 및 Fig. 2에 도시하였다. 테이프는 회전 드럼의 원주 방향에 대해서 일정 각도를 갖고 감겨져 있는 모델로서 그림에서 좌표계  $X-Y-Z$ 는 절대 좌표계이며  $x-y-z$ 는 국소 좌표계이다. 본 해석에서는 테이프가 돌출물과 주행시의 거동을 근사하게 해석하기 위하여 돌출물이 있는 부분을 포함하여 테이프의 양단을 지지한 가이드 폴 사이를 해석 영역으로 하였다. 테이프의 변형은 주어진 압력에 대하여 장력의 영향과 굽힘 강성 및 원형 실린더의 곡률에 따라 지배를 받는다. 테이프의 변형방정식은  $x$ 방향,  $y$ 방향의 곡률 반경이 각각  $R$  및  $\infty$ 인 원통형 박막 탄성체에 대해 곡면 좌표계를 도입하고 다음과 같은 가정 조건을 이용하면 식 (1)과 같이 표현된다<sup>(12)</sup>.

- (1) 박막 탄성체의  $z$ 방향 수직 변형  $w$ 는  $x$  및  $y$ 방향의 면내 변형  $u, v$ 에 비해 지배적이다. 즉,  $w$ 에 비해  $u, v$ 는 미소량으로 취급하여 무시한다.
- (2) 윤활 유체의 점성 마찰에 의한 장력 변화는

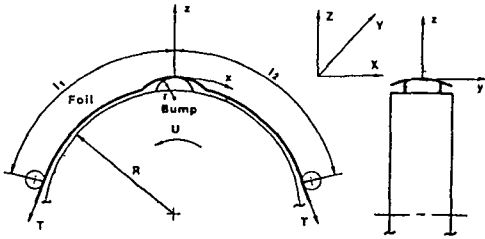


Fig. 1 Schematic view of EHL mechanism with the running tape and rotating bump

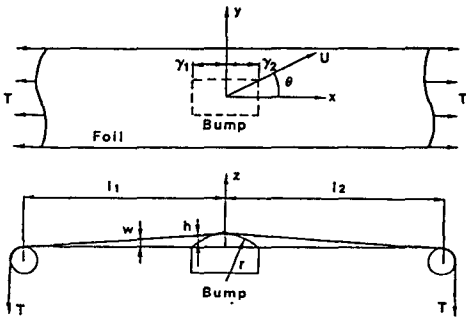


Fig. 2 Schematic view of EHL mechanism with the flat thin foil and running bump

무시한다.

(3) 돌출물에 대한 국소 좌표계를 사용하여 정상 상태로 가정한다.

(4) 박막 탄성체의 변형에 있어 감쇠(damping) 항은 무시한다.

(5) 박막 탄성체 내의 면내 응력 및 기하학적 비선형성은 무시한다.

(6) 접촉에 의한 마찰력은 무시한다.

$$D_1 \nabla^4 w - (T - \rho t U^2) \partial^2 w / \partial x^2 + D_2 w = q(x, y) \quad (1)$$

여기서  $w$ 는 박막 탄성체의  $z$ 방향으로의 수직 변형,  $q(x, y)$ 는 대기압에 대한 상대 압력,  $T$ 는 박막 탄성체에 작용하는  $x$ 방향의 단위폭당 장력,  $\rho$ 는 박막 탄성체의 밀도,  $t$ 는 박막 탄성체의 두께,  $U$ 는 돌출물과 박막 탄성체의 상대 속도,  $D_1$  및  $D_2$ 는 각각 굽힘 강성(bending rigidity) 및 곡률 강성(curvature rigidity)이다. 강성 계수  $D_1$  및  $D_2$ 는

$$D_1 = Et^3 / \{12(1 - \nu^2)\} \\ D_2 = Et / R^2 \quad (2)$$

로 주어지며<sup>(12,13)</sup>  $E$ 는 탄성 계수(Young's

modulus),  $R$ 은 실린더의 곡률 반경,  $\nu$ 는 프와송 비(Poisson's ratio)이다. 식 (1)의 좌변의 첫째 항은 박막 탄성체의 굽힘 강성 효과이며 둘째 항은 박막 탄성체의 장력 및 관성 효과이고 셋째 항은 원통형 실린더의 곡률 반경에 의한 곡률 강성으로서 장력에 대한 저항 효과를 표시한다. 우변의  $q(x, y)$ 는 돌출물 및 실린더에 의해 박막 탄성체에 변형을 일으키는 윤활 유체의 압력으로서 대기압에 대한 상대 압력을 뜻하며  $q(x, y) = p(x, y) - p_a$ 이다.

윤활 틈새 및 압력 분포에 대한 윤활 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도되는 수정된 레이놀즈 방정식(Modified Reynolds equation)으로서 다음과 같은 가정조건을 이용하면 식 (3)과 같이 표현된다<sup>(12)</sup>.

(1) 윤활 틈새 및 압력 분포는 정상 상태이다.

(2) 윤활 유체는 층류이다.

(3) 윤활 유체의 관성 효과는 무시한다.

(4) 윤활 유체의 온도 변화는 무시하며 유체의 점도는 균일하며 일정하다.

(5) 윤활 틈새는 박막 탄성체 면의 법선 방향이며 윤활 틈새로 인한 박막 탄성체의 면내 방향 변형은 무시한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ (ph^3 + 6\lambda_a p_a h^2) \frac{\partial p}{\partial x} \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (ph^3 + 6\lambda_a p_a h^2) \frac{\partial p}{\partial y} \right\} \\ = 6\mu U \left\{ \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} (ph) + \sin \theta \frac{\partial}{\partial y} (ph) \right\} \quad (3)$$

여기서  $U$ 는 박막 탄성체와 돌출물 간의 상대 속도,  $\lambda_a$ 는 표준 상태에서의 공기 분자의 평균 자유 행정(mean free path of air molecule)이며,  $\mu$ 는 유체의 점성 계수,  $p$ 는 압력,  $p_a$ 는 대기압,  $h$ 는 윤활 틈새이다. 윤활 틈새가 미소해짐에 따라 분자의 평균 자유 행정의 크기와 비교되면 점성의 감소와 유사한 효과로서 윤활 유체와 돌출물 사이에는 미끄러짐(slip)현상이 발생하게 된다. 특히 자기 기록 장치의 헤드와 테이프의 윤활 틈새는 서브 미크론(sub-micron)이하의 작은 최소 윤활 틈새가 발생되므로 수정된 레이놀즈 방정식을 사용해야 한다.

공기 윤활 현상에 의해 발생하는 박막 탄성체의 윤활 틈새 효과인 부상량은 박막 탄성체의 변형 및 돌출물의 형상에 의해 결정된다. 임의의 곡률 반경을 갖는 돌출물의 기하학적 형상을 고려하면 부상

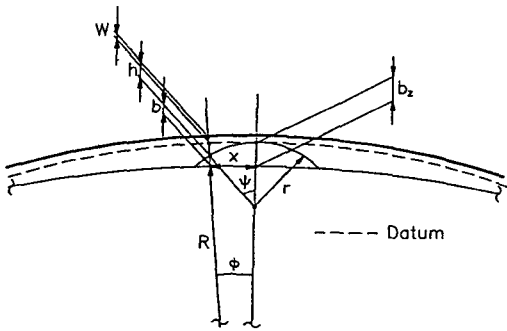


Fig. 3 Definition of the spacing and the shape function of bump on cylinder

량  $h$ 는 테이프의 수직 변형  $w$ 와  $b$ 의 합으로

$$h = w + b, \quad b = b_z - \Phi(x, y) \quad (4)$$

과 같이 표시된다. 여기서  $\Phi(x, y)$ 는 돌출물의 형상 함수이며,  $b_z$ 는 실린더 표면으로부터 돌출물 중앙 정점까지의 최대 높이이다. 형상 함수  $\Phi(x, y)$ 는  $x$ - $y$ 좌표계에서 돌출물의 높이를 표시하는 함수이고, 돌출물의 높이는 실린더의 반경 방향으로의 높이는 나타낸다. 돌출물이 곡률반경  $r$ 인 원호형일 때 Fig. 3에서 다음과 같이 기하학적 관계가

$$b = \{(R + b_z)^2 - (R - r + b_z)x^2/r\}^{1/2} - R \quad (5)$$

성립되며 유힬 틈새  $h$ 는

$$h = w + \{(R + b_z)^2 - (R - r + b_z)x^2/r\}^{1/2} - R \quad (6)$$

으로 표시된다. 해석 모델에 대한 경계 조건으로서

$$\left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] = 0, \quad \text{on } x = -l_1, l_2 \quad (7)$$

$$\left[ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] = 0,$$

$$\left[ \frac{\partial^3 w}{\partial x} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right] = 0 \quad \text{on } y = -b_1, b_2 \quad (8)$$

$$w = 0 \quad \text{on } x = -l_1, l_2 \quad (9)$$

$$q = 0 \text{ (atmosphere pressure) along the boundary} \quad (10)$$

과 같다. 여기서  $l_1$ 과  $l_2$ 는 돌출물의 중앙점에서부터 박막 탄성체의 양단 지지부까지의 길이이며,  $b_1$ 과  $b_2$ 는 돌출물 중앙점에서부터 박막 탄성체의 폭 방향의 길이이다. 즉, 박막 탄성체의 길이 방향 양단 지지부에서는 변형량 및 굽힘 모멘트가 없는 단순 지지 조건(simply supported condition)으로 하고 폭 방향의 양 끝단에서는 굽힘 모멘트와 전단력

이 없는 자유 조건(free edge condition)으로 한다. 박막 탄성체의 변형 방정식 및 유체 유힬 방정식과 경계 조건을 이용하여 돌출물과 주행 부상시에 박막 탄성체의 변형과 유힬 틈새 및 압력 분포를 해석한다. 해석 과정에서 모든 변수들에 대하여 무차원화를 실시하며 다음과 같은 무차원 변수를 도입한다.

$$X = x/R$$

$$Y = y/R$$

$$L = 1/R$$

$$H = h/h_0$$

$$W = w/R$$

$$B_z = b_z/R$$

$$P = pR / (T - \rho t U^2)$$

$$Q = qR / (T - \rho t U^2)$$

$$\overline{D}_1 = Et^3 / \{12(1 - \nu^2)(T - \rho t U^2)R^2\}$$

$$\overline{D}_2 = Et / (T - \rho t U^2)$$

$$\lambda = 6\lambda_a/h_0$$

$$\delta = (T - \rho t U^2) / (Rp_a)$$

$$x = r/R$$

$$A = 6\mu UR / (p_a h_0^2) \quad (11)$$

여기서  $h_0$ 는 돌출물이 없는 상태에서의 초기 부상량으로서 Eshel<sup>(24)</sup>이 제시한 관계식  $h_0 = 0.643R\{6\mu U / (T - \rho t U^2)\}^{2/3}$ 을 이용하였다. 무차원화된 지배 방정식은

$$\overline{D}_1 \left[ \frac{\partial^4 W}{\partial X^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial X^2 \partial Y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial Y^4} \right] - \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \overline{D}_2 W = Q(X, Y) \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[ \{(1 + \delta Q)H^3 + \lambda H^2\} \frac{\partial Q}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[ \{(1 + \delta Q)H^3 + \lambda H^2\} \frac{\partial Q}{\partial Y} \right] = A \cos \theta \frac{\partial}{\partial X} \{(1 + \delta Q)H\}$$

$$+ A \sin \theta \frac{\partial}{\partial Y} \{(1 + \delta Q)H\} \quad (13)$$

$$H = WR/h_0 + BR/h_0 \quad (14)$$

과 같이 표시되며 여기서

$$B = \{(1 + B_z)^2 - (1 - x + B_z)X^2/x\}^{1/2} - 1, \\ -\Gamma_1 \leq X \leq \Gamma_2 \\ = B_z(L_1 + X)/L_1, \quad -L_1 \leq X \leq -\Gamma_1 \\ = B_z(L_2 - X)/L_2, \quad \Gamma_2 < X < L_2$$

이다. 지배 방정식 (12)과 (13)에 유한 차분법과 뉴턴-랩슨 반복 계산법을 적용시키면 행렬 방정식을 얻으며 행렬의 각 요소값 들은 초기에 가정된

압력과 변형 방정식에서 구해진 윤활 틈새로부터 편미분을 취하여 얻어진 계수식이다. 본 연구에서는 변형 방정식에 대해서는 비대칭 대행렬 해법 (asymmetric band solution)을 레이놀즈 방정식에 대해서는 칼럼법 (column method)을 이용하여 풀었다. 돌출물 부위에는 압력이 급격히 변화하므로 반복 계산시 계산 오차가 누적되거나 해가 발산하기 쉽다. 따라서 압력 완화 계수를 도입하여 해가 충분히 수렴할 수 있도록 해준다. 반복 계산에서  $Q^{(n)}_{ij}$ 가  $n$ 번째 계산에서 구해진 압력이고  $Q^{(n-1)}_{ij}$ 가 그 이전 단계에서의 구해진 압력일때 해가 수렴도 범위내에 들어올 때까지 전 해석 영역에 걸쳐 다음과 같이 압력을 완화시켜 준다<sup>(10)</sup>.

$$Q^{(n)}_{ij} = Q^{(n-1)}_{ij} + R_p (Q^{(n)}_{ij} - Q^{(n-1)}_{ij}) \quad (15)$$

여기서  $R_p$ 는 압력 완화 계수 (pressure relaxation parameter)이고  $Q^{(n)}_{ij}$ 는 다음 계산을 위해 입력되는 새로운 압력이다. 해의 수렴성을 판단하는 조건으로서 다음과 같은 수렴성 지수<sup>(23)</sup> (convergence indicator)  $\varepsilon$  은

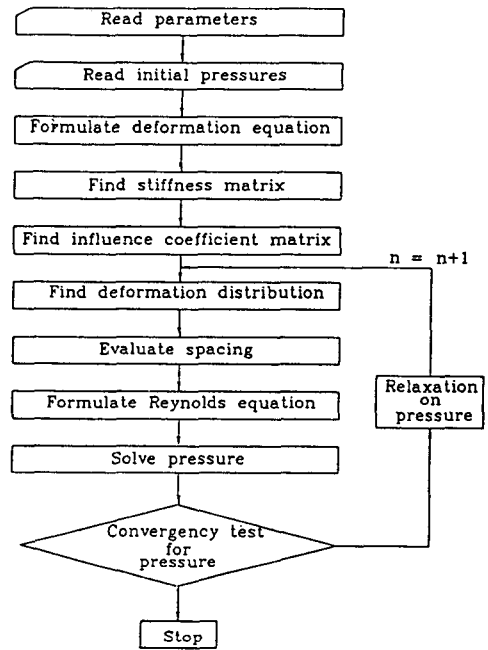


Fig. 4 Flow chart for the numerical analysis of the EHL mechanism

Table 1 Parameters in the numerical model for the running characteristics of elastic thin foil and protruding bump

Nomenclature	Meaning	Numerical value
$T$	Thin foil tension per unit width	10~100N/m
$\rho$	Foil density	5.67kg/m <sup>3</sup>
$t$	Foil thickness	2×10 <sup>-5</sup> m
$U$	Relative velocity	1~10m/sec
$\lambda_a$	Mean free path of air molecule at S.T.P.	6.4×10 <sup>-7</sup> m
$\mu$	Air viscosity	1.809×10 <sup>-5</sup> Pa·sec
$P_a$	Atmospheric pressure	1.01325MPa
$E$	Young's modulus	6.2×10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup>
$\nu$	Poisson's ratio	0.3
$R$	Radius of cylinder	3.1×10 <sup>-5</sup> m
$r$	Radius of bump	6×10 <sup>-6</sup> ~3.1×10 <sup>-5</sup> m
$l_1 + l_2$	Length of foil	1×10 <sup>-2</sup> ~1×10 <sup>-1</sup> m
$b_z$	Protrusion of bump	0~10 <sup>-4</sup> m
$b_1 + b_2$	Width of foil	12.6×10 <sup>-6</sup> m
$\gamma_1 + \gamma_2$	Length of bump	2×10 <sup>-3</sup> ~15×10 <sup>-3</sup> m
$\beta(\gamma_1 + \gamma_2)$	Width of bump	2×10 <sup>-3</sup> ~15×10 <sup>-3</sup> m

$$\epsilon = \sum_{i,j} |Q_i^{(n)} - Q_i^{(n-1)}| / \sum_{i,j} |Q_i^{(n)}| \quad (16)$$

을 사용하여 수렴성 지수가 충분히 작을 때 계산을 멈추도록 하였다. 본 연구에서는 계산 시간을 고려하여  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  이하로 될 때 수렴하는 것으로 판단하였다. 원통형 박막 탄성체를 대상으로 한 2차원 탄성 유체 윤활 기구를 해석하기 위한 프로그램의 순서도는 Fig. 4에 나타내었다. 프로그램 언어로는 MS-Fortran V5.0을 사용하였다. 수치 계산은 i80386 CPU, RAM 4MB Computer에서 수행하였으며 운영 시스템은 OS/2 V1.0이다. 해석 변수의 수치값들은 실험과 비교하기 위하여 실제적인 모델에 해당되는 값들을 사용하였으며 Table 1에 표시하였다<sup>(20,22,30)</sup>.

### 3. 결과 및 고찰

장력이 지배적인 경우와 테이프의 강성이 함께 고려된 모델을 대상으로 박막 탄성체와 돌출물간의 주행 특성에 대하여 박막 탄성체의 변형과 압력 분포 및 윤활 틈새를 검토하였다.

테이프의 강성을 무시한 장력이 지배적인 경우에는 해석 영역을 돌출물 부위로 한정하였다. 이 경우에는 돌출물 이외의 테이프 영역에서는 해석을 수행하지 않고 경계조건으로 돌출물의 경계에서는 대기압의 압력 조건을 부여하였다. 테이프의 굽힘 강성과 곡률 강성이 모두 고려된 경우에는 실제에 가까운 모델로서 해석 영역을 확장하였다. 돌출물을 포함한 드럼과 상면하고 있는 박막 탄성체의 전 영역을 해석 영역으로 하여 돌출물 전후에서도 테이프의 부상 특성을 잘 알 수 있도록 하였다. 윤활 유체가 유입되기 시작하는 위치는 테이프가 드럼에 감겨져 있는 지점으로 가정하여 해석영역의 경계선상에서만 대기압의 압력 조건을 부여하였다.

#### (1) 장력 효과가 지배적인 경우

장력 효과가 지배적인 경우에서의 박막 탄성체의 변형 방정식과 레이놀즈 방정식을 연립하여 해석한다. 이 경우 박막 탄성체는 평면 형상으로 하였고 해석 영역은 돌출물 영역으로 국한하였다. 돌출물 영역에서의 압력 분포 및 변형은 Fig. 5~Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 나타난 압력 분포는 돌출물 중앙 부위에서 압력의 썩기(converging diverging wedge) 효과<sup>(29)</sup>에 의해 정압 및 부압이 발생하는 급격한 변화를 나타낸다. 이와 같은 압력 분포로 인하여 돌출물의 주행 방향을 따라서 윤활 유체의

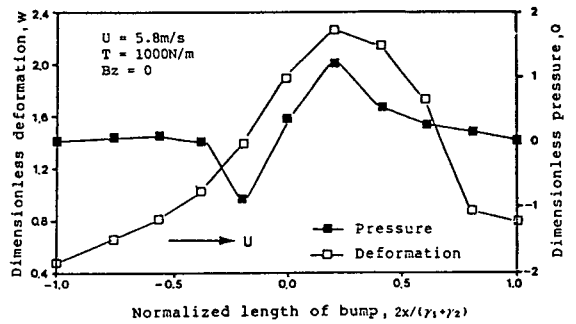


Fig. 5 Dimensionless deformation and pressure distribution along the centerline of the bump in EHL model with dominant tension effect

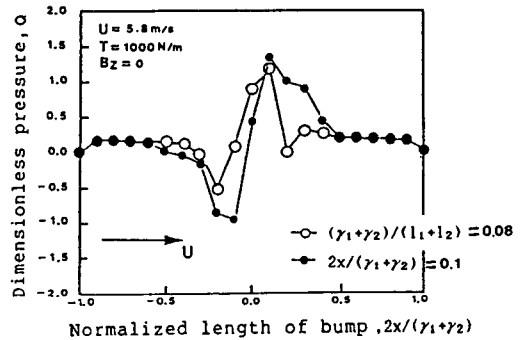


Fig. 6 Dimensionless pressure distribution with respect to the various length of bump and foil

유입 영역에서의 박막 탄성체의 변형이 윤활 유체의 유출 영역에서의 변형보다 큰 것을 보여주고 있다. 또, 돌출물의 크기가 압력의 변화가 커지는 것을 보여 준다. 이러한 경향은 小野<sup>(11)</sup>가 해석한 결과와 잘 일치하고 있다.

#### (2) 강성의 영향

테이프 변형의 크기를 좌우하는 요소로서 굽힘 강성(bending rigidity)과 곡률로 인한 곡률 강성(curvature rigidity) 및 장력이 있다. 본 연구에서 해석 대상으로 하는 테이프는 폭 또는 길이 대 두께의 비가 약 1/650~1/2000 정도로서 전단력의 영향을 받지 않고 순수 굽힘 만을 받는 얇은 판이나 셀로서 해석할 수 있는 범위보다도 훨씬 얇은 박막 테이프이다.

굽힘 강성과 곡률 강성에 대해 각각 보정 계수를 곱하여 강성 계수값에 변화를 주고 변형에 대한 강성의 영향을 검토한다. 중앙에 집중 하중이 작용하는 길이 0.44m, 폭 0.0126m, 곡률 반경 0.031m인

양단이 단순 지지된 박막 탄성체의 변형 특성을 검토한다. 박막 탄성체의 중앙에 단위 집중 하중이 작용할 때 장력의 변화에 따른 중앙점에서의 변형을 Fig. 7에 도시하였다. 그림에서  $D_1$  및  $D_2$ 에 보정 계수를 고려해 주지 않으면 장력이 1 N/m

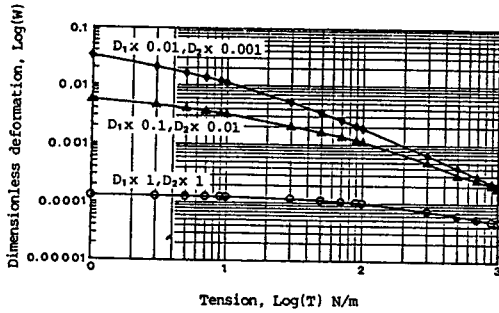


Fig. 7 Effect of tension on the deformation of the foil

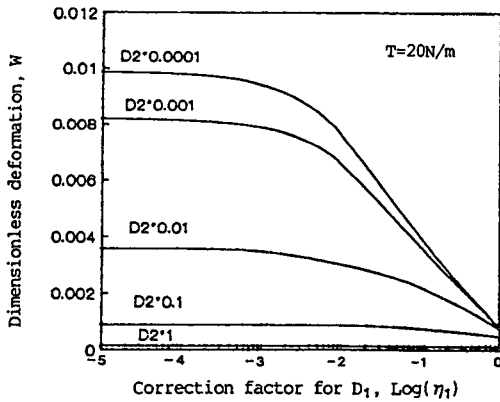


Fig. 8 Effect of correction factor for bending rigidities on the deformation of the foil

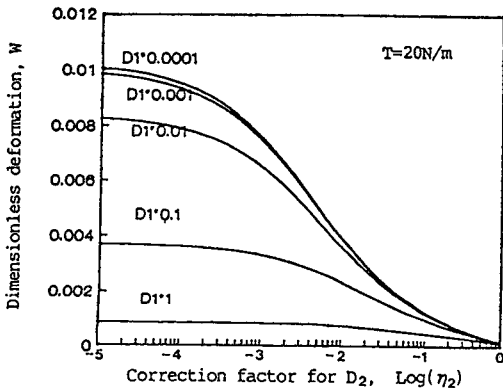


Fig. 9 Effect of correction factor for curvature rigidities on the deformation of the foil

~100N/m범위 내에서는 변형에 대한 장력의 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 상대적으로 강성 계수  $D_1$  및  $D_2$ 의 영향이 장력에 비해 크다는 것을 나타내고 있다. 강성  $D_2$ 가 변할 때 강성  $D_1$ 을 횡축으로 하여 무차원 변형을 Fig. 8에 도시하였고 강성  $D_1$ 이 변할 때 강성  $D_2$ 를 횡축으로 하여 무차원 변형을 Fig. 9에 도시하였다. 그림에서 보면 강성  $D_1$ 이 변할 때 강성  $D_2$ 에 대하여 보정 계수를 곱하지 않고 각각 100% 모두 고려될 때에는 장력의 실제적인 범위인 100N/m이하에서는 장

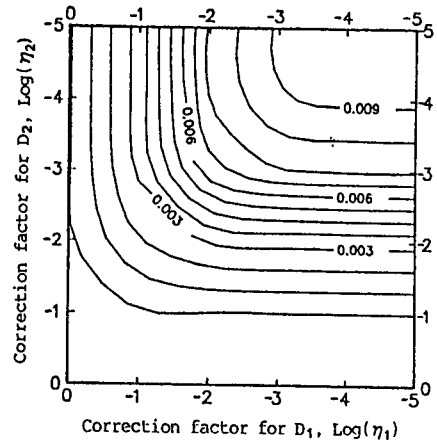
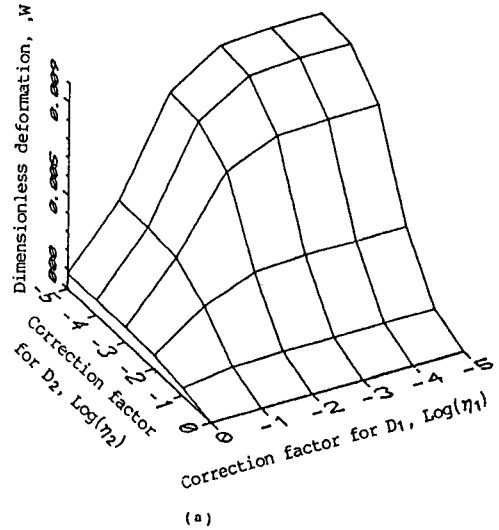


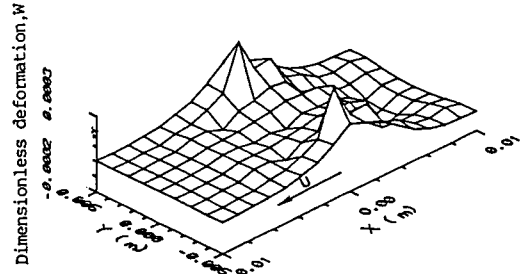
Fig. 10 Effect of correction factor for  $D_1$  and  $D_2$  on the deformation of the foil; (a) Three dimensional view and (b) Contour view

력의 변화가 변형에 거의 영향을 미치지 못하며, 이는 상대적으로 장력에 비해 강성  $D_1$  및  $D_2$ 가 변형에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

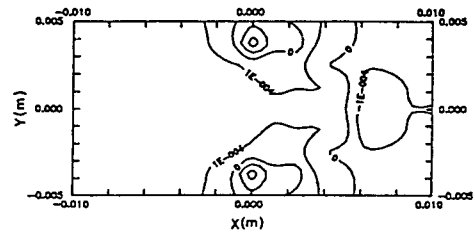
굽힘 강성과 곡률 강성을 각각  $X, Y$ 축으로 하여 테이프의 변형을 Fig.10(a)에, 같은 크기를 갖는 변형의 등고선을 Fig.10(b)에 도시하였다. 굽힘 강성과 곡률 강성이 작아짐에 따라 변형의 크기는 지수 함수적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 굽힘 강성에 대한 보정 계수의 로그 값이  $-1$  이상 이거나, 곡률 강성에 대한 계수의 로그 값이  $-2$  이상인 경우에는 변형의 변화가 매우 완만하다. 즉, 이 영역에서는 굽힘 강성과 곡률 강성은 그 자체가 지배적으로 되어 상호 간의 변화로서는 변형에 큰 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다. Wolf<sup>(10)</sup>, Kato<sup>(23)</sup> 및 Yoneda<sup>(19,20)</sup> 등은 각각 해석 모델에 따라 굽힘 강성과 곡률 강성 중 어느 한쪽을 무시하고 해석할 수 있음을 보여 주었다. 그런데 본 연구에서의 해석 모델은 회전 실린더에 감겨 있는 길이나 폭에 비해 두께가 매우 얇은 자기 테이프이다. 이러한 모델에서는 장력, 굽힘강성, 곡률 강성 모두가 변형에 중요한 요소이다. 특히 막에 가까운 아주 얇은 테이프의 경우에는 변형에 가장 큰 영향을 주는 것은 장력이다. 이 경우 굽힘 강성과 곡률 강성이 변형에 대하여 장력보다 지배적이 되지 않도록 해줄 필요가 있다. 이러한 점에 근거하여 장력의 영향에 비해 굽힘 강성 또는 곡률 강성의 영향이 너무 커지 않도록 각각의 강성에 적절한 보정 계수를 곱하였다. 본 연구에서는 굽힘 강성의 경우 0.1, 곡률 강성의 경우 0.01의 보정 계수를 사용하였다.

(3) 유체 윤활 기구에 대한 특성

돌출물의 길이 및 폭의 크기가  $12.6 \times 12.6$ mm인 경우에 대한 수치 결과를 Fig. 11~Fig. 15에 도시하였다. 박막 탄성체의 변형에 대한 3차원 결과인 Fig. 11에서는 돌출물의 주행 방향의 전방에서는 양의 변형이, 후방에서는 음의 변형이 생긴 것을 나타내 주고 있다. 돌출물 영역에서는 테이프의 변형이 중앙 보다 가장 자리에서 조금 큰 경향을 나타내고 있다. 이는 돌출물이 박막 탄성체의 폭 방향 전체에 걸쳐 있기 때문에 박막 탄성체의 가장자리 근방에서는 가장자리의 대기압 경계에 비해 높은 압력 상승에 기인하는 것이다. (박막 탄성체의 가장자리는 대기압의 경계 조건이나, 가장자리 근방에서는 돌출물로 인한 압력 상승이 있음) 윤활 틈새에 대한 3차원 결과인 Fig. 12에서는 박막 탄

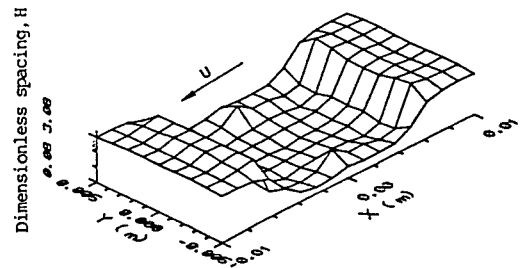


(a) Three dimensional view

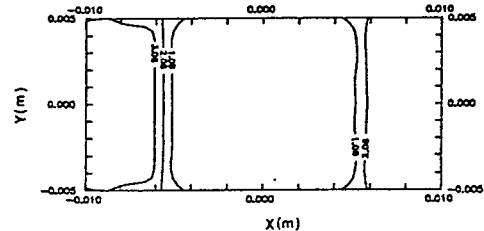


(b) Contour view

Fig. 11 Dimensionless deformation profile of the foil with the running bump (bump size  $12.6 \times 12.6$ mm,  $r = 31$ mm)



(a) Three dimensional view



(b) Contour view

Fig. 12 Dimensionless spacing profile of the foil with the running bump (bump size  $12.6 \times 12.6$ mm,  $r = 31$ mm)



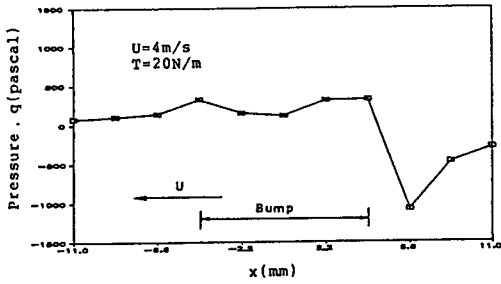


Fig. 13 Pressure distribution on the foil along the centerline of the running bump (bump size 12.6 × 12.6mm,  $r = 31\text{mm}$ )

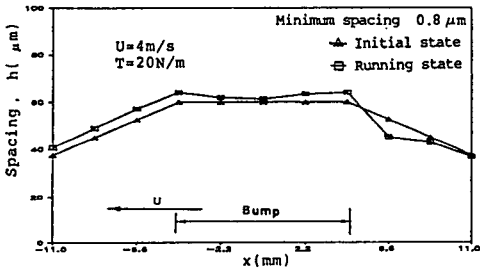


Fig. 14 Spacing distribution of the foil along the centerline of the running bump (bump size 12.6 × 12.6mm,  $r = 31\text{mm}$ )

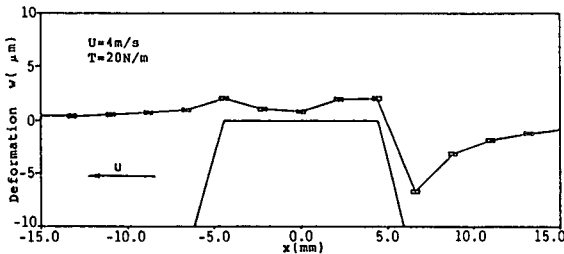
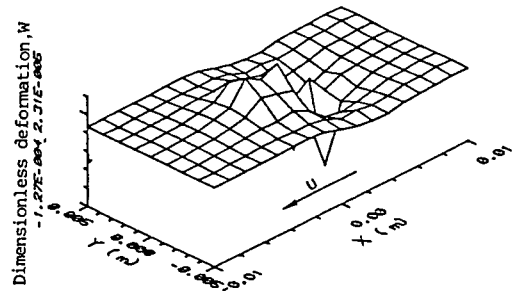


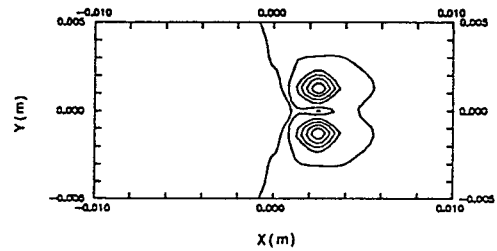
Fig. 15 Deformation distribution on the foil along the centerline of the running bump (bump size 12.6 × 12.6mm,  $r = 31\text{mm}$ )

성체의 폭 방향에 걸쳐 돌출물이 있는 부위에서는 윤활 틈새가 매우 작아진 것을 알 수 있다.

박막 탄성체의 폭 방향의 중심선 ( $y=0$ )을 따라 구해진 압력 분포에 대한 2차원 결과를 Fig. 13에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 돌출물의 전방부에서부터 정압이 발생하다가 후방에서는 급작한 압력 강하로 상대적으로 큰 부압이 작용함을 알 수 있다. 박막 탄성체의 폭 방향의 중심선을 따라 구해진 부상 특성을 Fig. 14에 도시하였다. 이 때,



(a) Three dimensional view

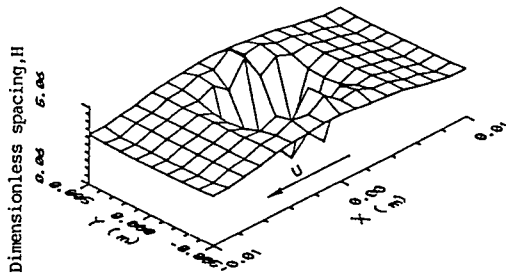


(b) Contour view

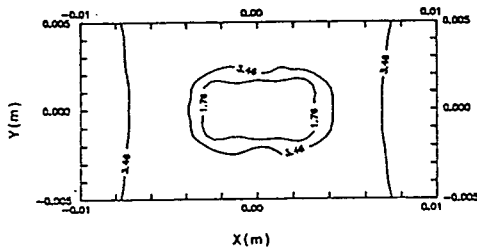
Fig. 16 Dimensionless deformation distribution on the foil along the centerline of the running bump (bump size 5 × 5mm,  $r = 31\text{mm}$ )

최소 윤활 틈새는 약  $0.8\mu\text{m}$ 이며, 그림에서 돌출물의 중앙 부위에서 틈새가 최소가 됨을 알 수 있다. 돌출물의 후방에서는 윤활 틈새가 부압의 영향으로 전방에 비해 약간 감소한 것을 알 수 있다. 박막 탄성체의 폭 방향 중심선에서의 2차원 변형을 나타낸 Fig. 15에서는 압력분포에 대한 2차원 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다. 압력의 영향으로 인하여 돌출물의 전방에서는 양의 변형이 후방에서는 음의 변형이 발생한 것을 알 수 있다.

다음에 돌출물의 길이 및 폭이 앞에서 검토한 모델보다 작은 5 × 5mm인 경우에 대한 수치 결과를 검토한다. 이 결과를 Fig. 16~Fig. 20에 표시하였다. 박막 탄성체의 변형에 대한 3차원 결과를 Fig. 16에 도시하였다. 앞의 결과와 유사한 경향으로 돌출물의 주행 방향의 전방에서는 양의 변형이 나타나고 후방에서는 음의 변형이 나타났음을 알 수 있다. 앞의 모델에 비해 돌출물의 길이와 폭이 작은 관계로 양의 변형과 음의 변형이 발생한 영역이 줄어든 것을 알 수 있다. 윤활 틈새에 대한 3차원 결과인 Fig. 17에서는 돌출물 부위에서 윤활 틈새가 급격히 감소한 것을 알 수 있다. 박막 탄성체의



(a) Three dimensional view



(b) Contour view

Fig. 17 Dimensionless spacing profile of the with the running bump (bump size 5×5mm,  $r=31\text{mm}$ )

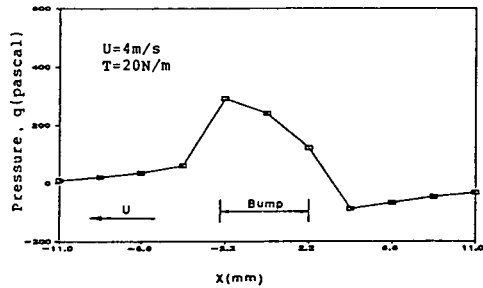


Fig. 18 Pressure distribution on the foil along the centerline of the running bump (bump size 5×5mm,  $r=31\text{mm}$ )

폭방향의 중심선 상에서 구한 압력 분포를 Fig. 18에 도시하였다. 돌출물의 전방에서 정압이 작용하다가 후방에는 부압이 작용하는 것을 알 수 있다. 박막 탄성체의 폭 방향의 중심을 따라 구해진 부상 특성을 Fig. 19에 도시하였다. 최소 윤활 틈새는 약  $0.6\mu\text{m}$ 으로서 최소 틈새가 발생하는 지점은 돌출물 영역에서 주행 방향으로 후방쪽임을 알 수 있다. 이것은 앞의 모델의 결과와 비교하여 윤활 틈새가 최소가 되는 지점이 약간 후방으로 이동하였음을 나타내 주고 있다. 박막 탄성체의 폭 방향

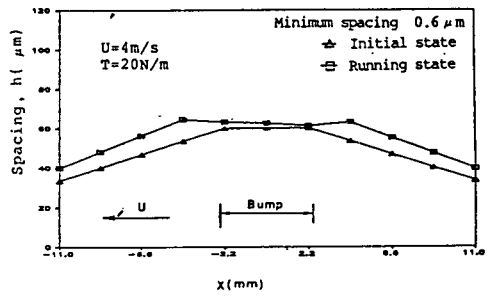


Fig. 19 Spacing distribution on the foil along the centerline of the running bump (bump size 5×5mm,  $r=31\text{mm}$ )

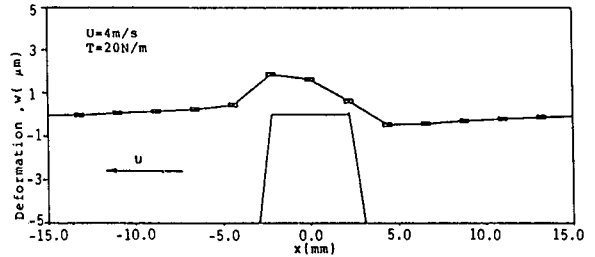
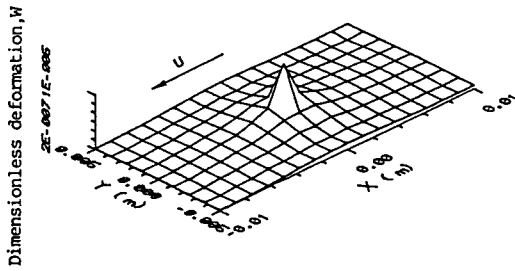


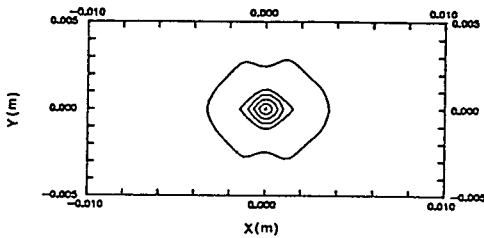
Fig. 20 Deformation distribution on the foil along the centerline of the running bump (bump size 5×5mm,  $r=31\text{mm}$ )

의 중심선 상에서 구한 2차원 변형을 Fig. 20에 도시하였다. 압력 분포에 대한 2차원 결과와 유사한 경향으로서 돌출물의 전방에서는 양의 변형이 후방에서는 음의 변형이 발생한 것을 알 수 있다.

다음에는 돌출물의 길이 및 폭이 앞의 2가지 모델보다도 비교적 작은  $2\times 2\text{mm}$ 인 경우에 대하여 수치 결과를 검토한다. 이 결과는 Fig. 21~Fig. 25에 도시하였다. 박막 탄성체의 변형에 대한 3차원 결과를 Fig. 21에 도시하였다. 상대적으로 돌출물의 길이 및 폭이 큰 모델의 결과와는 달리 음의 변형이 감소하고 양의 변형이 두드러진 것을 알 수 있다. 박막 탄성체의 변형이 발생하는 영역도 앞의 모델에 비해 매우 국소적인 것을 알 수 있다. 윤활 틈새에 대한 3차원 결과인 Fig. 22에서는 돌출물 부위에서 윤활 틈새가 감소한 것을 나타내 주고 있다. 박막 탄성체의 폭 방향의 중심선상에서 구한 압력의 결과인 Fig. 23에서는 변형에 대한 경향과 유사한 결과를 보여주고 있다. 박막 탄성체 폭 방향의 중심선 상에서 구한 부상 특성을 Fig. 24에 도시하였다. 돌출물 부위에서 윤활 틈새가 감소한

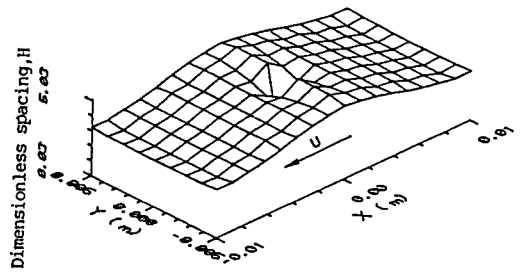


(a) Three dimensional view

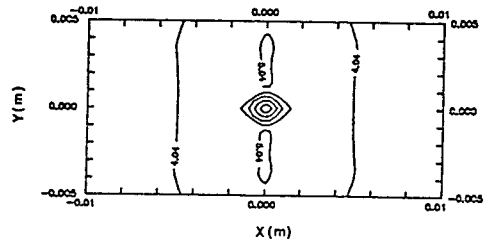


(b) Contour view

Fig. 21 Dimensionless deformation profile of the foil with the running bump (bump size  $2 \times 2$ mm,  $r = 31$ mm)



(a) Three dimensional view



(b) Contour view

Fig. 22 Dimensionless spacing profile of the foil with the running bump (bump size  $2 \times 2$ mm,  $r = 31$ mm)

것을 나타내 주고 있으며 축소 율환 틈새는 약  $0.3 \mu\text{m}$ 이다. 박막 탄성체의 폭 방향의 중심선 상에서 구한 2차원 변형인 Fig. 25에서는 음의 변형이 감소하고 양의 변형만이 생긴 것을 보여 주고 있다.

또 지금까지의 결과에 대해 최소 율환 틈새의 발생점 및 크기를 비교하여 보면 돌출물 영역에서 주행 방향으로 중앙 또는 후방 지점에서 최소 율환 틈새가 되며, 돌출물의 길이 및 폭이 감소할 수록 최소 율환 틈새도 감소한다는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 수치 해석 결과는 돌출물 부위를 포함한 박막 탄성체 전체를 해석 영역으로 한 것이다. 해석 영역의 분할은 박막 탄성체의 길이 방향으로 20등분하고 폭방향으로 10등분하여 격자수  $21 \times 11$ 로 하였다. 해석 영역을 돌출물로 국한한 모델에 비하여 수렴 속도가 늦어 수렴 지수  $\epsilon$ 를  $10^{-3}$ 으로 하였다. 초기 압력 조건으로는 돌출물 형상과 유사한 압력 분포를 주는 것이 수렴 속도가 빨랐다. 압력 완화 계수  $R_p$ 는  $0.03 \sim 0.05$ 로 하였으며, 반복 계산 횟수 약  $340 \sim 600$ 번에서 수렴하였다. 반복 계산 과정에서 round off 오차를 줄여주기 위하여 압력에 대해서 유효 숫자 8자리 까지만 읽어 들이

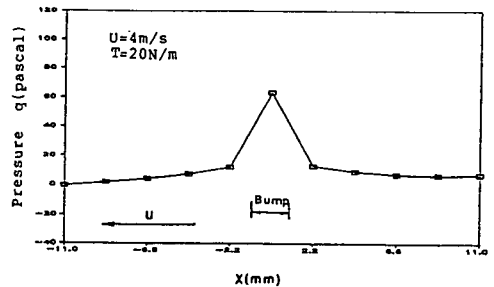


Fig. 23 Pressure distribution on the foil along the centerline of the running bump (bump size  $2 \times 2$ mm,  $r = 31$ mm)

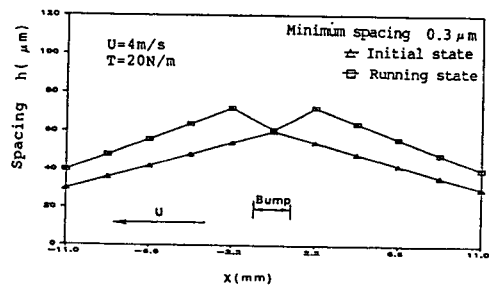


Fig. 24 Spacing distribution on the foil along the centerline of the running bump (bump size  $2 \times 2$ mm,  $r = 31$ mm)

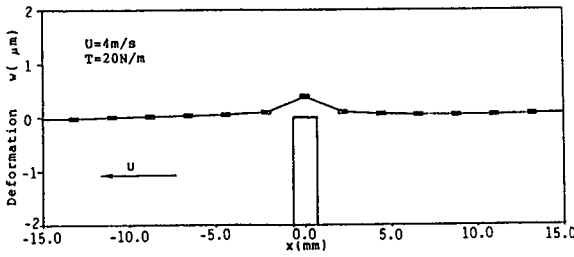


Fig. 25 Deformation distribution of the foil along the centerline of the running bump (bump size  $2 \times 2$  mm,  $r=31$  mm)

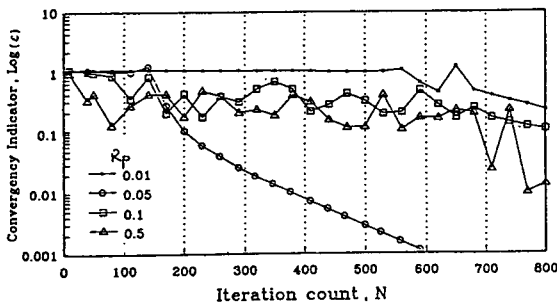


Fig. 26 Effect of the pressure relaxation factor on the convergence indicator along the iteration counts

고, 나머지는 무시하였다. 이 결과, 해석 영역이 대칭 모델인 경우에는 많은 반복 계산에도 불구하고 대칭성이 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

압력 완화 계수와 수렴 지수와의 관계를 알아 본다. 해석 조건은  $T=20$  N/m,  $U=3.2$  m/s,  $R=31$  mm,  $b_z=0$   $\mu$ m으로서, 길이 및 폭이 각각 44 mm, 12.6 mm인 박막 탄성체의 해석 영역을 각각 20, 10 등분하였다. 이때 무차원 격자 간격은  $\Delta X=0.07$ ,  $\Delta Y=0.04$ 이다. 압력 완화 계수와 수렴 지수와의 관계를 Fig. 26에 도시하였다. 압력 완화 계수가 큰 경우에는 초기에는 수렴을 빨리하게 되나 작은 경우에 비하여 반복 계산이 진행됨에 따라 발산하거나 요동을 치는 경우가 많았다. 이러한 해석 조건에서 압력 완화 계수가 0.05일 때 가장 수렴 속도가 빠름을 보여주고 있다. 이와 같이 돌출물의 길이와 종횡비가 같으면서 치수가 다른 여러가지 모델에 비해 검토하여 보았다. 해석 영역을 박막 탄성체 전체 영역으로 확장하여 본 결과 돌출물의 경계선 상에서도 윤활 유체의 압력이 작용한다는

것을 알 수 있었다. 이로 인하여 돌출물 전후에서 박막 탄성체의 변형 및 부상 특성도 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

박막 탄성체인 테이프가 회전하는 드럼에 부착된 자기 헤드와 같은 돌출물에 대하여 주행하면서 갖는 부상 특성에 대하여 2차원 탄성 유체 윤활 현상을 수치적으로 해석하였다. 수치 해석 방법으로는 유한 차분법과 뉴턴-랩슨 방법을 사용하였으며 이를 기본으로 회전하는 드럼 및 돌출물에 의한 테이프 변형 해석 프로그램을 개발하고 테이프 변형 및 테이프와 회전 드럼 사이의 공기막에 대한 압력 분포 특성을 연구하였다. 돌출물의 전후에서도 테이프의 부상 특성을 잘 파악할 수 있게 하기 위해 돌출물을 포함한 드럼과 상면하고 있는 박막 탄성체의 전 영역을 해석 영역으로 하였다. 박막 탄성체의 강성이 무시되고 장력이 지배적인 경우와 굽힘 강성 및 곡률 강성이 함께 고려된 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 회전 드럼에 부착된 돌출물과 주행하는 박막 탄성체의 부상 특성에 대한 수치 해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 해석 영역을 박막 탄성체의 전 영역으로 확대하여 돌출물 전후에서도 박막 탄성체의 변형, 압력 분포 및 부상 특성에 대한 수치 해석이 가능하며

(i) 해석 영역을 격자수  $21 \times 11$ 로 하고 돌출물 영역을 나타내는 격자는 모델에 따라  $6 \times 11$ 에서  $1 \times 1$  사이로 하였을 때, 반복 계산 횟수 340~600번과 압력 완화 계수 0.03~0.05 범위 내에서 수치해는 잘 수렴된다.

(ii) 박막 탄성체의 장력과 강성이 함께 고려될 때 장력에 비하여 굽힘 강성 및 곡률 강성이 변형에 지배적이 되며 장력의 영향이 실용적인 10 N/m~100 N/m의 범위 내에서는 굽힘 강성 및 곡률 강성에 대하여 각각 보정 계수 0.1 및 0.01을 곱해 줄 경우 실제 테이프의 변형 특성을 잘 표현한다.

(2) 돌출물 주위 영역에서 테이프에 작용하는 압력 분포는 돌출물의 주행 전방에서는 정압이 주행 후방에서는 부압이 발생하는 급격한 변화를 보이며 이러한 압력의 영향으로 인해 윤활 유체의 유입 방향에서는 변형이 커지고 유출 방향에서는 변형이

적어진다.

(3) 돌출물의 길이와 폭이 작아짐에 따라 돌출물 후방에 발생하는 부압 및 음의 변형이 줄어들고 최소 윤활 틈새는 돌출물의 중앙 또는 후방 지점에서 발생하고 돌출물의 길이와 폭의 치수에 거의 비례하여 감소한다.

(4) 돌출물의 주행 전방에서 테이프의 양의 변형은 주행 후방에서 음의 변형보다 비교적 크게 나타나며 돌출물의 길이와 폭이 작아질수록 음의 변형은 감소한다.

## 후 기

본 논문은 연세대학교 학술 연구 지원과 과학재단 목적기초연구 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 森美郎, 矢部寛, 林和宏, 1969, “フォイル軸受の二次元 流体潤滑 理論”, 日本機械學會論文集(第3部), 第35卷, 第276號, pp. 1781~1787.
- (2) 森美郎, 林和宏, 横哲介, 1971, “フォイル軸受に関する研究(壓縮性の影響について)”, 日本機械學會論文集(第3部), 第37卷, 第303號, pp. 2229~2235.
- (3) 森美郎, 林和宏, 横哲介, 1972, “フォイル軸受に関する研究(小さな卷角の影響について)”, 日本機械學會論文集(第3部), 第38卷, 第313號, pp. 2414~2422.
- (4) 森美郎, 林和宏, 横哲介, 1975, “フォイル軸受に関する研究(有限幅の影響について)”, 日本機械學會論文集(第3部), 第41卷, 第324號, pp. 586~692.
- (5) 堀辛夫, 蓮池彰, 東義, 長瀬泰郎, 1976, “フォイル軸受に関する研究(磁気テープ記憶装置への應用)”, 日本機械學會論文集(第3部), 第42卷, 第359號, pp. 2215~2222.
- (6) Langlois, W.E., 1975, “Finite Width Foil Bearing with Light Loading”, Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, PP. 274~278.
- (7) Greenberg, H.J., 1979, “Study of Head-Tape Interaction in high Speed Rotating Head Recording”, Journal of Research and Development, IBM Vol.23, No.2, pp. 197~205.
- (8) Adams, G.G., 1980, “Procedure for the Study of the Flexible-Disk to Head Interface”, Journal of Research and Development, IBM, Vol.24, No.4, pp. 512~517.
- (9) Ono, K. Hara, S. and Murata, K., 1979, “Magnetic Tape Deformation under the Concentrated Load”, Transactions of the JSME, Vol.45, No.393, pp. 533~542.
- (10) Wolf, B., Deshpande, N. and Castelli, V., 1983, “The Flight of a Flexible Tape Over a Cylinder with a Protruding Bump”, Journal of Lubrication Technology, Transaction of ASME Vol.105, pp. 138~142.
- (11) 小野京石, 水川眞, 1979, “球面 フォイル軸受の研究(第1報)”, 日本機械學會論文集(C編), 第45卷, 第396號, pp. 919~928.
- (12) 小野京石, 水川眞, 1981, “球面 フォイル軸受の研究(第2報)”, 日本機械學會論文集(C編), 第47卷, 第416號, pp. 449~456.
- (13) 水川眞, 小野京石, 1985, “球面 フォイル軸受の研究(第3報)”, 日本機械學會論文集(C編), 第51卷, 第461號, pp. 95~103.
- (14) 米田弘, 澤田武, 1986, “Simulation of Spacing Between Magnetic Head and Medium on Video Floppy”, 日本應用磁氣學會誌, 第10卷, 第2號, pp. 117~120.
- (15) Sakai, K., Terayama, T., Okamoto, N. and Tamura, T., 1987, “Contact Analysis Between Magnetic Heads and Magnetic Tapes of Video Cassette Recorder”, 日本機械學會論文集(A編), 第53卷, 第461號, pp.1109~1117.
- (16) 西田安秀, 保坂寛, 1986, “ヘッド走査時のテープの動的變形”, 日本機械學會論文集, 第52卷, 第474號, pp. 590~598.
- (17) 장인배, 한동철, 1989, “마그네틱 헤드 슬라이더의 極小空氣膜에 대한 定常狀態 解析, 대한기계학회 논문집, 제13권, 제4호, pp. 764~770.
- (18) 장인배, 한동철, 1989, “마그네틱 헤드 슬라이더의 極小空氣膜에 대한 동특성 해석”, 대한기계학회 추계학술대회초록집, pp. 298~304.
- (19) Yoneda, K. and Sawada, T., 1988, “Simulation of Tape Flying Characteristics above VTR Drum Considering In-Plane Stress”, IEEE Transactions of Magnetism, Vol.24, No.6, pp. 2766~2788.
- (20) Yoneda, K. and Sawada, T., 1989, “Simulation of Tape Flying Characteristics on VTR Drum Considering In-Plane Stress”, IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan, Vol.4, No.2, pp. 128~134.
- (21) Yoneda, K. and Sawada, 1987, “Simulation of Spacing between Magnetic Head and Medium of Video Floppy”, IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan, Vol.TJMJ-2, No.6, pp. 490~496.
- (22) Kato, H. Matsuno, S. and Sahara, K., 1988, “Analysis of the Spacing between a Tape and the Video-Head on a Rotary Head Recording Device”, 日本機械學會論文集(C編), 第54卷, 第504號, pp. 1866~1873.
- (23) Michael, W.A., 1959, “A Gas Film Lubrication

- Study Part II ; Numerical Solution of the Reynolds Equation for Finite Slider Bearings”, Journal of Research and Development, IBM, pp. 256~259.
- (24) Eshel, A. and Elrod, H.G., 1966, “Stiffness Effects on the Infinitely Wide Foil Bearing”, Journal of ASME, Paper 66-Lubs-6, pp. 1~6.
- (25) 민옥기, 김수경, 이종수, 1989, “회전 헤드 자기 기록 장치의 테이프 변형 특성”, 대한기계학회 춘계 학술대회초록집 ( I ), pp. 417~421.
- (26) 민옥기, 김수경, 이광호, 1989, “삼차원 미소 고속 변위 측정 시스템”, 대한기계학회 춘계 학술대회초록집 ( I ), pp. 400~403.
- (27) 민옥기, 김수경, 1989, “비접촉 미소 변위 측정 시스템에 대하여”, 대한기계학회지, 제29권, 제3호, pp. 317~325.
- (28) 민옥기, 김수경, 이종수, 1989, “박막 탄성체와 돌출물의 주행 접촉 해석”, 산업기술연구소 논문집, 연세대학교, 제21집, 제2권, pp.213~219.
- (29) Alstair Cameron, 1981, “Basic Lubrication Theory”, 3rd. ed., Ellis Horwood ser. in Eng. Science
- (30) (株) 金星社 A/V 事業部 内部 資料