

(論 文)

자기기록장치에서의 박막탄성체의 탄성유체윤활현상에 관한 수치해석

권해성* · 민옥기** · 김수경***

(1993년 4월 30일 접수)

Simulation of Elastohydrodynamic Phenomena of Thin Foil in Magnetic Recording Device

Hae-Sung Kwon, Oak-Key Min and Soo-Kyung Kim

Key Words : Elasto Hydrodynamic Lubrication(EHL ; 탄성유체윤활기구), Finite Element Method (FEM ; 유한요소법), Netwon Raphson Method(뉴턴랩슨방법)

Abstract

This paper analyzes the running mechanism of flexible and thin foil above rotating protrusion through a numerical simulation. The scope of analysis is confined to the phenomena of elastohydrodynamic lubrication between the stationary and rotary drums with a running protrusion and thin foil. This mathematical model is based on the modified Reynolds equation and the equation of plate, considering the geometry of protrusion, running direction of protrusion, and the effect of geometric nonlinearity. Finite element method is adopted as a numerical simulation technique to solve the avobe coupled nonlinear equations. In numerical analysis, the effects of the scanning angle in Reynolds equation and the nonlinear term in plate equation are evaluated. Furthermore, the simulation is applied to the situation that thin foil is located in the entire drums (stationary and rotary drums).

1. 서 론

고속으로 회전하는 드럼 원주면 상에 미소하게 돌출된 자기헤드에 대해 일정한 상대속도로 주행하는 자기테이프의 거동은 자기헤드와 테이프와의 적절한 틈새를 양호하게 유지하도록 하는 것이 필수적이다. 이러한 자기기록장치에 있어서는 헤드와 기록 매체간에 상대속도에 의한 동압이 발생하여 공기윤활 틈새를 형성한다. 공기막에 의한 부상효과

는 자기테이프와 회전드럼 사이에 미소한 틈새를 갖게 하여 마멸을 막아주기도 하지만 헤드와 테이프 사이의 틈새 손실을 발생시켜 기록/재생신호의 출력을 감소시키기도 한다. 또한 헤드를 포함한 드럼의 회전부와 테이프의 과도한 접촉은 제의 신뢰성과 내구성면에서 바람직하지 않을 뿐만 아니라, 드럼의 회전변화를 일으켜 재생화면에 악영향을 발생시킨다. 그러므로 테이프/드럼 계를 설계하기 위해서는, 드럼전체에 대한 테이프의 부상특성을 명확히 하는 것이 필요하다.

박막탄성체(thin foil elastomer)의 부상특성에 관한 연구로서는 1960년대 초부터 컴퓨터산업 및 비디오산업의 발전으로 자기디스크장치와 자기테이프

*정회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

**정회원, 연세대학교 기계설계학과

***정회원, (주)금성사 영상미디어 연구소

장치 등을 대상으로 많이 연구되어 왔다. 헤드/드럼 및 기록매체의 손상과 마멸을 방지하는 것을 주목적으로 테이프를 윤활효과에 의해 헤드로부터 안정하게 부상시키기 위한 연구 등이 이루어져 왔다. 森美郎^(1,2)은 감김각이 적은 막베어링 및 유한폭의 막베어링에 대해 부상특성을 이론 및 실험을 통해 연구하였다. 堀幸夫 등⁽³⁾은 박막탄성체인 테이프를 완전한 유연막(flexible foil)으로 보고, 구면 막베어링의 관점에서 일반적인 부상특성에 대해 일차원 유한요소를 도입하여 수치적으로 연구하였다. Greenberg 등⁽⁴⁾은 셸이론에 기초하여 구면형상의 돌출물에 대해 테이프의 부상특성을 연구하였다. 小野 등⁽⁵⁾은 얇은 판에 근거한 이론해에 의한 테이프의 해석과 유한차분법에 의한 공기유회특세의 해석을 함께 사용하여 압력과 변위를 계산하였다. Yoneda^(6,7) 등은 테이프의 비선형성을 고려한 유한요소법을 사용하여 자기디스크와 자기테이프를 해석하였다. 장인배 등⁽⁸⁾은 자기디스크를 대상으로 유한차분법을 응용하여 극소 공기막에 대한 슬라이더의 부상특성을 연구하였다. 민옥기,⁽⁹⁾ 김수경 등⁽¹⁰⁾은 자기테이프를 대상으로 탄성유회현상을 고려하여 공기막에 대한 주행테이프의 부상특성에 대해 유한차분법과 유한요소법을 사용하여 연구하였다.

지금까지 박막탄성체와 돌출물간의 주행 특성에 관한 연구로서 자기테이프나 자기디스크를 모델로 하여 많은 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 이론적인 접근방법에 있어서 해석결과의 정확도에 영향을 미치게 되는 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 첫째, 지배방정식의 단순화로 인한 박막탄성체 강성의 불충분한 고려, 둘째, 수치해석방법의 선정으로 인한 수렴성의 미확보, 셋째, 해석모델이 무한폭의 박막탄성체로의 가정 및 돌출물의 돌출량을 아주 적게하는 등 실제의 상황과 상이함 등이 있다.

따라서 본 논문에서는 테이프의 기하학적 비선형성이 고려된 유한폭의 박막탄성체와 회전헤드형 자기기록장치에서 일정한 돌출량을 가진 자기헤드를 대상으로 하여 해석모델을 작성하고 공기막에서 발생하는 압력분포에 의한 박막탄성체의 변위상태 및 부상량을 해석한다. 박막탄성체의 거동을 충분히 파악할 수 있도록 돌출물영역에서 뿐만 아니라 박막탄성체의 전체영역에 대하여 해석을 수행한다. 박막탄성체의 변위특성에 있어서 박막탄성체의 지배방정식을 선형과 비선형으로 도입하여 비선형성

분의 영향을 고려한다. 또한 선정된 해석모델은 드럼의 반경이 초기 부상량에 비하여 상당히 크고 박막탄성체의 강성이 작으므로 박막 탄성체를 전개한 모델을 도입한다. 박막탄성체와 돌출물이 상대적인 각도를 가지고 주행하는 경우의 해석과 박막탄성체가 회전드럼 및 정지드럼에 동시에 위치하는 경우에 대한 수치해석을 시도한다.

2. 탄성유체유회기구

박막탄성체인 주행테이프와 회전실린더 상에 돌출되어 있는 돌출물(protuberance)인 헤드간의 고속 주행 탄성유체유회기구(elastohydrodynamic lubrication mechanism)를 정의하고자 한다. 돌출물이 박막탄성체에 대해 유회특세를 갖으며 미끄러져 운동할 때 박막탄성체의 변위는 돌출물의 기하학적 형상, 상대속도에 의한 유체유회 압력특성 및 박막탄성체에 작용하는 장력에 의해 좌우되며 돌출물과의 틈새(spacing)와 연성(coupling)되어 있다.

박막탄성체의 변위는 판 및 셸이론에 근거하여 기하학적 비선형성이 고려된 얇은 판의 탄성방정식으로 해석될 수 있고 공기유회층의 압력분포 및 유회특세는 압축성 유체유회방정식인 일반화된 레이놀즈방정식으로 해석될 수 있다. 이상의 두 방정식은 탄성방정식의 수직변위와 유회방정식의 유회특세의 상관관계로 연성된다. 본 연구에서의 해석모델은 박막탄성체가 양끝단에서 일정한 경계조건을 주며, 공기막에는 해석모델에 따라 적절한 경계조건을 부여한다. 또한 박막탄성체에 대하여 돌출물이 개재된 드럼이 일정한 상대속도로 주행하는 정상상태 모델은 Fig. 1과 같다. 탄성체는 회전드럼의 원주방향에 대하여 일정한 각도를 갖고 감겨져 있는 모델로서 그림에서 X-Y-Z는 절대좌표계이며 x-y-z는 국소좌표계이다.

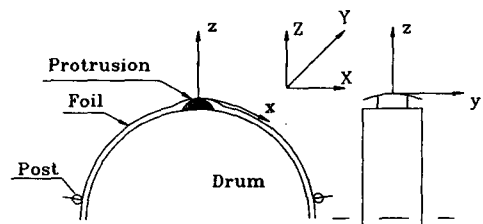


Fig. 1 Schematic view of EHL mechanism with the thin foil and the running protrusion

2.1 탄성방정식

박막탄성체에 대한 탄성방정식은 그의 중립면에서 대변위를 고려하는 비선형 탄성판이론(Von Karman's theory of plate)에 근거한 방정식으로 다음과 같은 가정조건을 도입한다.

첫째, 유행유체의 점성마찰에 의한 장력변화는 무시한다.

둘째, 돌출물에 대한 국소좌표계를 사용하여 정상상태로 가정한다.

셋째, 박막탄성체의 변위에 있어 감쇠(damping)항은 무시한다.

넷째, 박막탄성체의 면내 응력은 기하학적 비선형성을 고려하여 이차항까지 묘사한다.

다섯째, 접촉에 의한 마찰력은 무시한다.

따라서 주행테이프에 대한 탄성 변형방정식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$g_u \equiv \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$g_v \equiv \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \tag{2}$$

$$g_w \equiv D_1 \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} \right) - \left(\sigma_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 2 \sigma_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right) - q(x, y) \tag{3}$$

$$D_1 = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

여기서, W 는 박막탄성체의 z 방향으로의 수직변형, 식(3)의 우변의 $q(x, y)$ 는 돌출물 및 실린더의 회전력에 의해서 발생하는 유체의 압력으로서 대기압(p_a)에 대한 상대압력을 뜻하며 $q(x, y) = p(x, y) - p_a$ 이다. 박막탄성체의 두께는 t , 탄성계수(Young's modulus)는 E , 푸아송비(Poisson's ratio)는 ν 이다. σ_x , σ_y 및 σ_{xy} 는 기하학적 비선형성을 고려한 응력성분으로 식(4)와 같으며,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = D_2 \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{,x} + \frac{1}{2}(W_{,x})^2 \\ V_{,y} + \frac{1}{2}(W_{,y})^2 \\ U_{,y} + V_{,x} + (W_{,x})(W_{,y}) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$D_2 = \frac{Et}{1(1-\nu^2)}$$

여기서, U 는 x 방향의 변형, V 는 y 방향의 변형이며, 박막탄성체의 비선형 변형률성분은 수직변위에 대한 일차 미분량, 즉 회전성분에 의한 항으로

$\frac{1}{2}(W_{,x})^2$, $\frac{1}{2}(W_{,y})^2$ 및 $\frac{1}{2}(W_{,x})(W_{,y})$ 으로 정의된다.

2.2 유행방정식

공기유행특새 및 압력분포에 대한 유행방정식은 Navier-Stokes방정식으로부터 유도되는 일반화 레이놀즈방정식(modified Reynolds equation)으로서, 첫째, 유행특새 및 압력분포는 정상상태이다.

둘째, 유행유체는 층류이다.

셋째, 유행유체의 관성효과는 무시한다.

넷째, 유행유체의 온도변화는 무시하며 유체의 점도는 균일하다.

다섯째, 유행특새는 박막탄성체면의 법선방향이다.

라는 가정을 포함하고 있으며 식(5)와 같이 g_p 로 표현된다.

$$g_p \equiv \text{div}(h^3 \cdot p \cdot \text{grad } p) + 6\lambda_a p_a \text{div}(h^2 \cdot \text{grad } p) - 6\mu_a \text{div}(ph \cdot v) = 0 \tag{5}$$

여기서, v 는 박막탄성체와 돌출물간의 상대 미끄럼속도, λ_a 는 표준상태에서의 공기분자의 평균 자유행정(mean free path of air molecule)이며, μ 는 유체의 점성계수, p 는 압력, p_a 는 대기압, h 는 유행특새이다. 분자의 평균 자유행정의 크기와 비교하여 유행특새가 $1 \mu\text{m}$ 이하로 미소하게 되면 점성의 감소와 유사한 효과로서 유행유체와 접촉물체 사이에는 미끄러짐(slip)현상이 발생하게 된다. 특히 자기기록장치의 헤드와 테이프의 유행특새는 서브미크론(submicron)이하의 작은 최소 유행특새가 형성되므로 유행방정식에서 $6\lambda_a p_a \text{div}(h^2 \cdot \text{grad } p)$ 항이 포함된 수정된 레이놀즈방정식을 사용해야 한다.

2.3 탄성방정식과 유행방정식의 연성

공기유행현상에 의해 발생하는 박막탄성체의 유행특새효과인 부상량 h 는 박막탄성체의 수직변위 W , 돌출물의 형상 L 및 초기특새 h_o 에 의해 식(6)으로 정의되며 그 관계는 Fig. 2에 도시한다.

$$h = h_o + W - L \tag{6}$$

여기서, 초기 공기막 h_o 는 공기의 점성계수, 주행속도, 장력 및 드럼의 반경 R 에 대해 Eshel 등⁽¹¹⁾이 제시한 $h_o = 0.643R(6\mu\nu/T)^{2/3}$ 의 관계가 성립

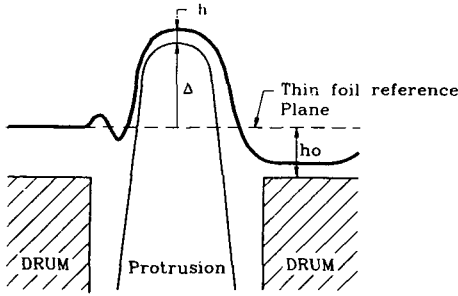


Fig. 2 Typical relation between thin foil, drum and protrusion

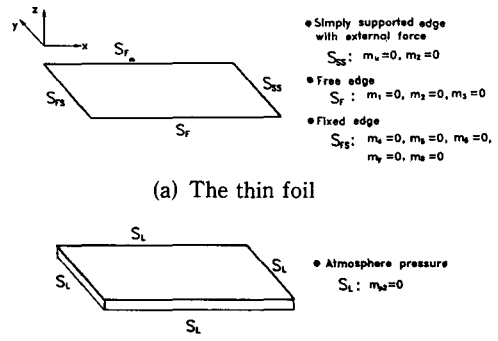


Fig. 3 Descriptions of boundary conditions

한다.

2.4 경계조건

탄성방정식에 적용되는 경계조건은 식(7~12)로 정의되며, 유허방정식에 적용되는 경계조건은 식(13)과 식(14)로 설정된다.

$$m_u \equiv \sigma_x n_x + \sigma_{xy} n_y - F_x = 0 \quad \text{on } S_u \quad (7)$$

$$m_v \equiv \sigma_{xy} n_x + \sigma_y n_y - F_y = 0 \quad \text{on } S_v \quad (8)$$

$$m_1 \equiv \frac{\partial}{\partial S} \left[\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) n_x n_y + (1-\nu) \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} (n_x^2 - n_y^2) - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) n_x n_y \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) n_x + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) n_y = 0 \quad \text{on } S_1 \quad (9)$$

$$m_2 \equiv \left[\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) n_x^2 + 2(1-\nu) \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} n_x n_y + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) n_y^2 \right] = 0 \quad \text{on } S_2 \quad (10)$$

$$m_3 \equiv \left(\sigma_x \frac{\partial W}{\partial x} + \sigma_{xy} \frac{\partial W}{\partial y} \right) n_x + \left(\sigma_y \frac{\partial W}{\partial y} + \sigma_{xy} \frac{\partial W}{\partial x} \right) n_y = 0 \quad \text{on } S_3 \quad (11)$$

$$m_4 \equiv W = 0 \quad \text{on } S_4 \quad (12a)$$

$$m_5 \equiv \theta_x = 0 \quad \text{on } S_4 \quad (12b)$$

$$m_6 \equiv \theta_y = 0 \quad \text{on } S_4 \quad (12c)$$

$$m_7 \equiv U = 0 \quad \text{on } S_4 \quad (12d)$$

$$m_8 \equiv V = 0 \quad \text{on } S_4 \quad (12e)$$

$$m_{p1} \equiv \{ (h^3 p + 6\lambda_a p_a h^2) \cdot \text{grad } p - 6\mu_a (p h \cdot V) \} \cdot n = 0 \quad \text{on } S_{p1} \quad (13)$$

$$m_{p2} \equiv p - p_a = 0 \quad \text{on } S_{p2} \quad (14)$$

여기서, S는 해석모델의 경계를 나타내며, 탄성방정식의 경계조건에서 n_x 및 n_y 는 경계면의 x 및 y 방향여현, θ_x 및 θ_y 는 박막탄성체의 x 및 y방향의 회전성분이다. m_u 는 박막탄성체의 길이방향 단부(S_u)의 하중경계조건, m_v 는 박막탄성체의 폭방향 단부(S_v)의 하중경계조건, m_1 는 박막탄성체의 경계(S_1)에 작용하는 모멘트에 의한 전단력경계조건, m_2 는 박막탄성체의 경계(S_2)에 작용하는 모멘트 하중경계조건, m_3 는 박막탄성체의 경계(S_3)에 작용하는 면내력(inplane force)하중경계조건, m_4 는 박막탄성체의 단부(S_4)의 변위경계조건, m_{p1} 는 박막탄성체의 단부(S_{p1})에 해당하는 공기유허층의 유량경계조건, m_{p2} 는 공기유허층(S_{p2})의 압력경계조건이다. 여기서, 박막탄성체에 대한 경계조건으로는 Fig. 3과 같이 박막탄성체의 끝단에 일정한 장력을 받는 단순경계조건(m_2, m_u), 고정단경계조건(m_4, m_5, m_6, m_7, m_8) 및 자유단경계조건(m_1, m_2, m_3)으로 설정된다.

2.5 유한요소법의 적용

공간영역을 임의의 개수의 유한요소로 나누고, 각 요소는 3개의 결점을 갖는 삼각형요소로 선정한다. 이 때 삼각형요소의 변위벡터 U, V, W 및 압력 P는 다음과 같이 각각 식(15), 식(16), 식(17) 및 식(18)의 $\hat{U}, \hat{V}, \hat{W}$ 및 \hat{P} 로 근사화시킬 수 있다.

$$U(x, y) \cong \hat{U}(x, y) = \sum_{m=1}^3 N_m^u(x, y) u_m \quad (15)$$

$$V(x, y) \cong \hat{V}(x, y) = \sum_{m=1}^3 N_m^v(x, y) v_m \quad (16)$$

$$W(x, y) \cong \widehat{W}(x, y) = \sum_{m=1}^3 N_m^w(x, y) w_m + \sum_{m=4}^6 N_m^w(x, y) \theta x_{m-3} + \sum_{m=7}^9 N_m^w(x, y) \theta y_{m-6} \quad (17)$$

$$p(x, y) \cong \widehat{p}(x, y) = \sum_{m=1}^3 N_m^p(x, y) p_m \quad (18)$$

여기서, N_m^u , N_m^v , N_m^w 및 N_m^p 는 각각 면내변위 U , 면내변위 V , 수직변위 W , 및 압력 P 에 대한 요소의 형상함수이고, u_m , v_m , w_m , θx_{m-3} , θy_{m-6} 및 p_m 은 절점에서의 변위 및 압력성분의 자유도이다. 먼저 지배방정식(g_u, g_v, g_w, g_p)과 경계조건식($m_u, m_v, m_1, m_2, m_3, m_4, m_{p1}, m_{p2}$)에 버브노프-겔러킨(Bubnov-Galerkin)형식의 가중잔류법(weighted residual method)을 적용하면 식(19), 식(20), 식(21) 및 식(22)으로 된다.

$$G_u \equiv \int_R g_u N^u dR + \int_{s_u} m_u N^u dS \quad (19)$$

$$G_v \equiv \int_R g_v N^v dR + \int_{s_v} m_v N^v dS \quad (20)$$

$$G_w \equiv \int_R g_w N^w dR + \int_{s_1} m_1 N^w dS + \int_{s_2} m_2 N^w dS + \int_{s_3} m_3 N^w dS + \int_{s_4} m_4 N^w dS \quad (21)$$

$$G_p \equiv \int_R g_p N^p dR + \int_{s_{p1}} m_{p1} N^p dS + \int_{s_{p2}} m_{p2} N^p dS \quad (22)$$

여기서, R 은 경계를 제외한 해석영역을 의미하여, 가중함수(N^u, N^v, N^w, N^p)는 버브노프-겔러킨형식의 가중잔류법에 따라 변위 및 압력에 대한 형상함수와 같은 함수로 선택한다.

2.6 비선형해법

이상에서 유도한 전체계, G_u, G_v, G_w 및 G_p 는 연립 비선형방정식으로 구성되어 있으며, 유도된 전체계에 대하여 비선형해법인 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson's method)을 적용하면

$$\left[\frac{\partial G}{\partial Q} \right]^n \{\Delta Q\}^n = \{-G\}^n \\ \{Q\}^{n+1} = \{Q\}^n + R_c \{\Delta Q\}^n \\ \{Q\} = \{u_i, v_i, w_i, \theta x_i, \theta y_i, \theta z_i, p_i\} \quad i=1, 2, 3 \quad (23)$$

으로 정리된다. 상첨자 n 은 반복계산 단계를 나타내며, G 는 전체방정식, $\{Q\}$ 는 요소의 절점변위 및 절점압력, R_c 는 완화계수이고 $\{Q\}^{n+1}$ 는 다음 계산

을 위해 새로이 입력되는 완화된 자유도 값이다. $\{\Delta Q\}$ 는 반복계산 단계에서 구해지는 각 자유도의 증분이다. 여기서 전체계를 선형화하기 위한 경사강성행렬(tangent stiffness matrix) $[\partial G/\partial Q]$ 과 잔류벡터(residual vector) 성분 $\{G\}$ 를 구성하면 식(24) 및 식(25)로 정리된다.

$$\left[\frac{\partial G}{\partial Q} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_u}{\partial u_i} & \frac{\partial G_u}{\partial v_i} & \frac{\partial G_u}{\partial w_i} & 0 \\ \frac{\partial G_v}{\partial u_i} & \frac{\partial G_v}{\partial v_i} & \frac{\partial G_v}{\partial w_i} & 0 \\ \frac{\partial G_w}{\partial u_i} & \frac{\partial G_w}{\partial v_i} & \frac{\partial G_w}{\partial w_i} & \frac{\partial G_w}{\partial p_i} \\ 0 & 0 & \frac{\partial G_p}{\partial w_i} & \frac{\partial G_p}{\partial p_i} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\{G\}^T = \{G_u \ G_v \ G_w \ G_p\} \quad (25)$$

이상의 수식화에서 박막탄성체의 비선형항을 고려하지 않으면 식(24)에서 $\partial G_u/\partial w_i$ 및 $\partial G_v/\partial w_i$ 항이 제거된다. 본 연구에서는 식(24) 및 식(25)와 같이 두개의 지배방정식을 연성시켜 비대칭 액티브 컬럼법(asymmetric active column method)을 적용하여 해를 반복계산한다. 전체 절점수(nnp)에 대한 수렴성지수(convergence indicator) ϵ 을 식(26)으로 정의하여

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^{nnp} |\Delta Q_i|}{\sum_{i=1}^{nnp} |Q_i|} \quad (26)$$

수렴성지수가 변위 및 압력 등의 각 자유도에 대해 동시에 충분히 작을 때 계산을 멈추도록 하였다. 본 연구에서는 계산시간을 고려하여 수렴성지수가 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 이하로 될 때 수렴하는 것으로 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 모델

수치해석의 검토에 사용된 모델은 Fig. 4에 도시하며, Fig. 3(a)는 횡단면도, Fig. 3(b)는 박막탄성체의 전개도를 표시한다.

박막탄성체는 Fig. 1의 드럼에 인접하는 양측의 포스트(post) 사이에 놓인 영역만을 해석대상으로 하고 포스트와 박막탄성체가 접촉하는 위치에서 박막탄성체와 공기막에 다음과 같은 적절한 경계조건을 준다. 압력경계조건으로는 박막탄성체 단부($S_p, a-b-c-d$)를 따라 공기막에는 대기압조건으로 하

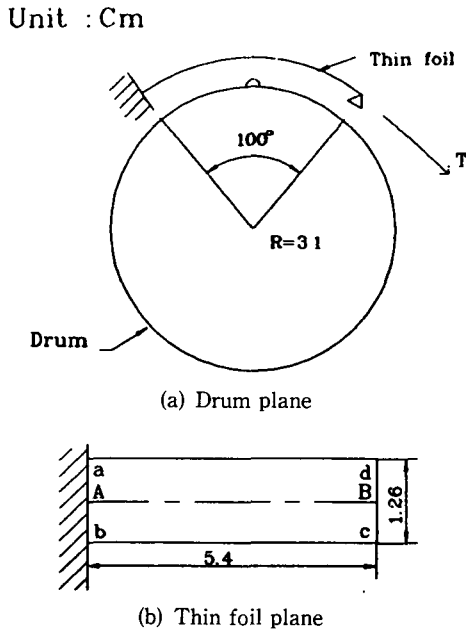


Fig. 4 Numerical model of thin foil, air gap and drum with the boundary conditions

며, 변위 및 하중경계조건으로 박막탄성체단부(S_4 , a-b)는 고정단경계조건, 박막탄성체단부(S_1, S_2, S_3 , b-c, d-a)는 자유단경계조건, 박막탄성체(S_1, S_u, c -d)는 단순지지 경계조건으로 여기에 일정한 장력을 가해준다. 박막탄성체의 초기 형상은 드럼반경에 적당한 부상량을 예상한 반경을 가진 원통면(cylindrical plane)으로 주어지며, 윤활압력의 초기값은 전영역에 걸쳐 대기압으로 한다. 이상의 모델에 대하여 테이프 및 공기막의 유한요소 분할형식은 Fig. 5와 같으며, 선형해석 및 비선형해석의 비교모델과 박막탄성체의 중심선(1-1')에 대해 일정한 주행각도를 갖는 모델의 요소분할은 Fig. 5(a)와 같으며, 모델의 요소수는 1360개 절점수는 725개이며, 전체드럼의 해석을 위한 모델의 요소분할은 Fig. 5(b)와 같으며, 요소수 2400개 절점수 1263개이다.

수치계산은 IBM-RISC 6000에서 AIX-Fortran을 사용하였으며 운영시스템 AIX V3.0하에서 수행되었다. 해석변수의 수치값은 향후 실험값과의 검토를 위해 비교적 실제적인 모델에 해당되는 값을 사용하였으며 Table 1에 제시하였다. 해석모델은 탄성방정식에 대하여 선형 및 비선형 탄성방정식을 적용하여 공기막의 압력분포에 따른 박막탄성체의

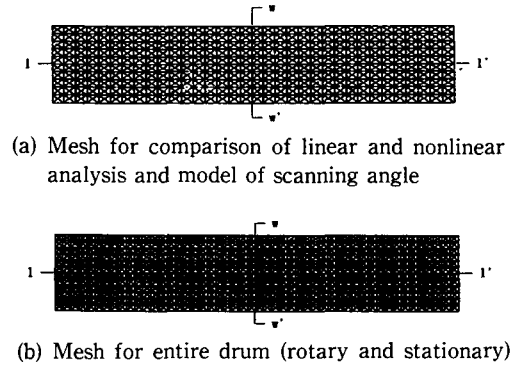


Fig. 5 Finite element mesh for thin foil and air gap discretized with triangular elements

Table 1 Parameters in the analysis models

Parameters	Values/unit
Tension of foil per unit width	10., 20. N/m
Thin foil thickness	18.0 μm
Length of thin foil	54.0 mm
Width of thin foil	12.6 mm
Young's modulus of thin foil	6.2 Gpa
Poisson' ratio of thin foil	0.3
Relative velocity	5.8 m/sec
Mean free path of air molecule	64.0 nm
Air viscosity	18.1 $\mu\text{Pa} \cdot \text{sec}$
Atmospheric pressure	0.101325 MPa
Height of protrusion	21.0, 23.0 μm

변위를 고찰하였다. 또한 돌출물이 박막탄성체의 주행방향에 대해 일정한 각도를 가지고 주행할 때와 회전드럼과 정지드럼으로 구분된 영역에 박막탄성체가 위치하게 될 때의 박막탄성체의 변위를 제시하였다. 이번 해석에서 필요했던 반복계산 회수는 모델링 복잡성에 따라 변화하나 대체로 수렴지수, $\epsilon=10^{-3} \sim 10^{-4}$ 하에서 30번 이내였으며, 계산시간 약 80분이 소요되었다.

3.2 선형해석과 비선형해석의 고찰

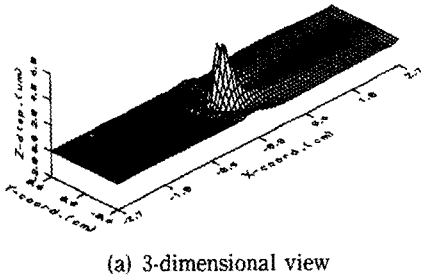
박막탄성체의 지배방정식의 비선형해석 및 선형해석은 식(4)의 응력 및 변형률의 관계에서 탄성체의 비선형 회전성분의 고려 유무에 따라 구분된다.

본 해석의 모델은 높이가 $23\ \mu\text{m}$ 인 점돌출물이 드럼의 표면에 부착되어 있고 박막탄성체의 단부 (Fig. 3, c-d)에 작용하는 장력이 $10\ \text{N/m}$ 이다. 이때 비선형해석에 의한 수직변위의 3차원 결과인 Fig. 6에서는 주행각도 6° 를 가지고 있기 때문에 박막탄성체의 중심선(1-1')에 대하여 6° 방향으로 돌출물 후방으로 음의 변위가 발생함을 알 수 있다. 여기서, Fig. 6(b)의 등변위선 간격은 $0.4\ \mu\text{m}$ 이다. Fig. 4에 표시된 박막탄성체의 길이방향(1-1') 및 폭방향($w-w'$)에 대하여 수직변위를 각각 Fig. 7 및 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 6에 나타난 수직변위는 점돌출물 주변에서 압력의 빼기효과에 따라 발생하게 되는 부압-정압이 교차하면서 복잡한 양상을 나타내지만 선형 및 비선형해석에 따른 차이는 비교적 작음을 알 수 있다. 선형해석에서는 박막탄성체의 수직변위의 일차 미분에 관계하는 회전성분을 고려하지 않으므로 탄성체의 강성이 비선형해석 값에 비하여 작게 평가되어 수직변

위가 작게 계산되었다. 또한 박막탄성체의 폭방향($w-w'$)에 대한 수직변위는 돌출물이 박막탄성체의 중심선(1-1')에 6° 의 주행각도를 가지고 회전하고 있으므로 돌출물의 정점에 비대칭의 변위가 발생하고 있으며 돌출물의 진행방향의 우측영역에 비하여 좌측영역에서 복잡한 변위의 양상이 나타난다. 한편 돌출물이 위치한 점($x=0.0\ \text{cm}$, $y=0.0\ \text{cm}$)근방에서 박막탄성체가 중심선(1-1')쪽으로 수축되는 현상, 즉 면내 횡변위(y -축방향)가 크게 생기는 것을 Fig. 9에서 알 수 있다.

3.3 주행각도에 따른 수직변위의 영향

박막탄성체에 길이방향의 중심선(Fig. 5, 1-1')에 대하여 일정한 각도를 유지하면서 주행할 경우 박막탄성체의 수직변위 양상을 고찰한다. 이하의 고찰에서는 박막탄성체의 강성을 비교적 정확히 묘사하는 비선형항을 고려한 박막탄성체의 방정식에 의한 알고리즘으로 해석한다. 높이가 $23\ \mu\text{m}$ 인 돌



(a) 3-dimensional view



(b) Contour view

Fig. 6 3-dimensional z-displacement of thin foil with the scanning angle of 6° for the nonlinear case

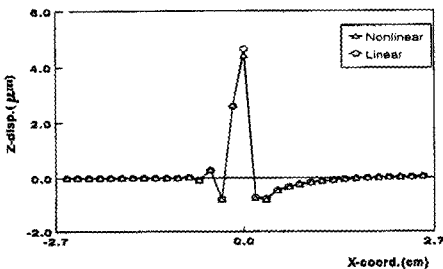


Fig. 7 Comparison of z-displacement of thin foil along $y=0.0$ for the nonlinear and linear cases

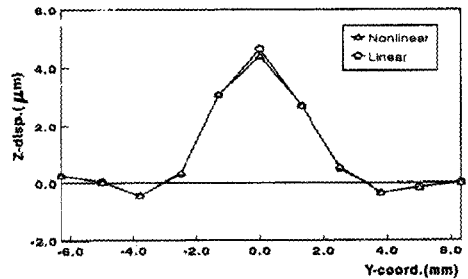


Fig. 8 Comparison of z-displacement of thin foil along $x=0.0$ for the nonlinear and linear cases

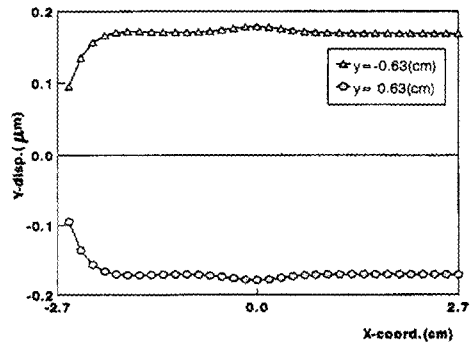


Fig. 9 Inplane displacement(V) in tape width direction (shrinkage) along both the edges ($y = -0.63\ \text{cm}$, $0.63\ \text{cm}$)

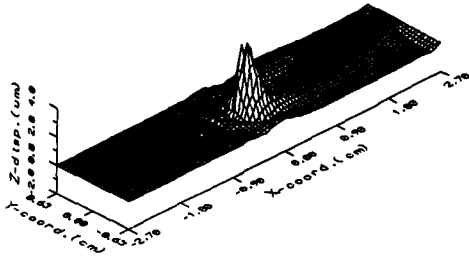


Fig. 10 3-dimensional z-displacement of thin foil with the running protrusion for the scanning angle of 12°

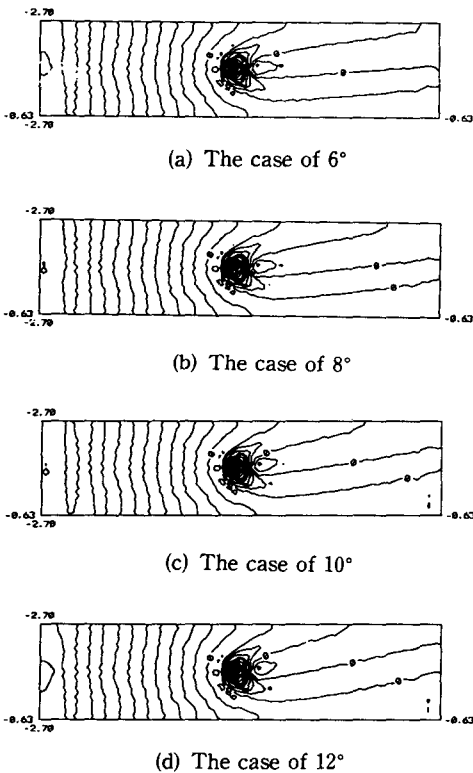


Fig. 11 Contour view of z-displacement for the various scanning angles

출물의 주행각도는 12°이며, 박막탄성체의 단부 (Fig. 4, c-d)에 작용하는 장력이 10 N/m인 경우의 박막탄성체의 3차원 수직변위의 양상은 Fig. 10에, 주행각도(6°, 8°, 10°, 12°)에 따른 등변위선 표현은 Fig. 11에 제시하며, 여기서 등변위선 간격은 0.4 μm이다. Fig. 10에 나타낸 것처럼 주행각도에 따라 돌출물의 후방에서 발생하게 되는 부압에 의

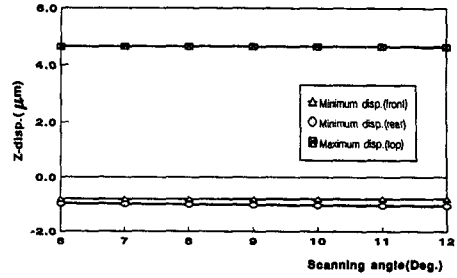
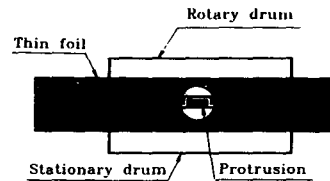
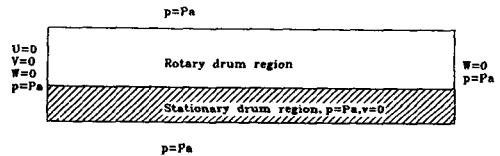


Fig. 12 Maximum and minimum z-displacements according to the various scanning angles



(a) A schematic view of entire drum and thin foil



(b) Boundary conditions

Fig. 13 The model of stationary and rotary drum and thin foil

한 음의 변위가 길게 발생함을 알 수 있었다. 이때 돌출물 정점에서 발생하는 최대변위는 Fig. 12에 제시된 것처럼 주행각도에 따라서는 거의 일정하다. 돌출물의 전후에서 발생하는 최대 음의 변위는 돌출물의 전방에서 주행각에 따라 변화가 없으나, 돌출물의 후방에서는 주행각의 증가에 따라 약간의 증가를 보인다. 따라서 주행각도의 변경은 박막탄성체와 돌출물간의 부상특성에서 비교적 영향이 작은 설계변수라고 예측된다.

3.4 정지드럼과 회전드럼에 위치한 박막탄성체의 수직변위 고찰

박막탄성체가 정지드럼과 회전드럼에 동시에 위치하여 회전하고 있는 경우에는 회전드럼에는 박막탄성체와의 상대속도가 고속인 반면 정지드럼과는 저속의 상대속도를 유지하면서 회전한다. 위와 같은 모델에 대한 현상을 살펴보기 위해 Fig. 13과

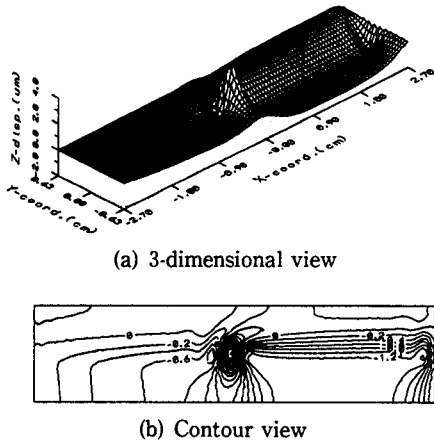


Fig. 14 3-dimensional z-displacement of thin foil located in the rotary and stationary drum with no scanning angle

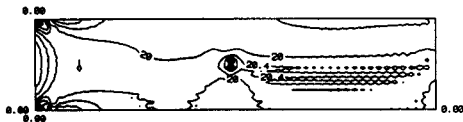


Fig. 15 Countour of Stress(σ_x) distribution of thin foil for the whole drum model

같은 박막탄성체와 공기막에 대한 경계조건을 부여한다. 정지드럼과 박막탄성체사이의 공기막은 대기압경계조건으로 하며, 회전드럼에 비하여 상당히 작은 상대속도를 갖고 주행하므로 상대속도는 없는 것으로 가정한다. 박막탄성체에 대한 구속조건은 배제한다. 회전드럼과 정지드럼을 구분하는 선의 각도는 0° , $y=5\text{ mm}$ 로 하며, 회전드럼과 박막탄성체의 상대속도가 5.8 m/sec , 박막탄성체에 작용하는 장력은 20 N/m , 돌출물의 높이는 $21\text{ }\mu\text{m}$ 이다. 이상의 해석모델에 의한 3차원 변위와 등변위선에 의한 표현은 Fig. 14와 같으며 등변위선 간격은 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 이다. 정지드럼영역에서의 수직변위는 전체적으로 박막탄성체가 정지드럼쪽으로 접근하는, 즉 음의 변위를 보이고 있어 실제 현상에서는 테이프와 정지드럼의 접촉현상이 발생할 수 있음이 수치해석의 결과로 제시되고 있다. 이 때 박막탄성체의 단위길이당 응력 σ_x 의 분포는 Fig. 15에 도시하며 등변위선 간격은 0.4 (N/m) 이며, 박막탄성체에 걸리는 응력은 고정경계조건으로 한 단부(a-b)를 제외하고 돌출물의 정점영역에서 비교적 큰 변화가

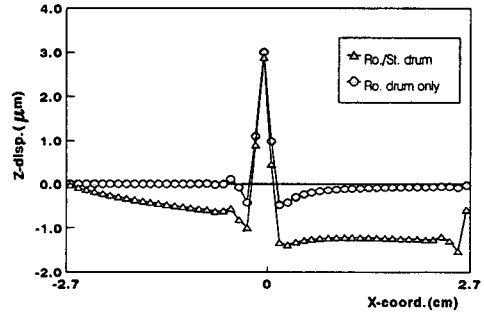


Fig. 16 Comparison of z-displacements of thin foil along $y=0.0$ between the rotary and stationary drums model and the rotary only

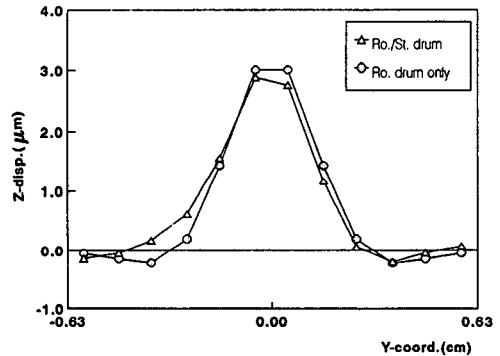


Fig. 17 Comparison of z-displacements of thin foil along the centerline of x-axis of thin between the whole drums model and the rotary drum model

발생한다. 따라서 회전드럼영역에 위치한 돌출물 주변에서의 변위는 박막탄성체가 회전드럼에만 위치할 경우에 비하여 상대적으로 작은 수직변위가 발생함이 Fig. 16 및 Fig. 17으로 파악된다. 본 모델의 해석결과는 실제 정지드럼에서 일어나게 되는 박막탄성체와 드럼사이의 마찰과 회전드럼과 정지드럼의 위에 놓이게 되는 불연속면을 수치적으로 고려하지는 않았으나 박막탄성체와 정지 및 회전드럼이 포함된 정성적인 인터페이스현상의 해석에 도움이 되리라 고려된다. 향후 정지드럼에서 일어나는 현상의 정식화 및 수치화를 통하여 정량적인 고찰이 필요하다.

4. 결 론

박막탄성체로 가정된 테이프와 회전하는 드럼에

부착된 마그네틱헤드와 같은 돌출물과의 사이에서 일어나는 탄성유체운환현상에 의한 박막탄성체의 부상특성에 대하여 수치적으로 연구하였다. 박막탄성체를 지배하는 식은 판에 관한 선형방정식 및 비선형방정식을, 공기막을 지배하는 식은 수정 레이놀즈방정식을 도입하여 수식화한 후 수치해석을 수행하였다. 수치해석방법으로는 버브노프-겔리킨형식의 가중잔류법을 이용한 유한요소법과 뉴튼랩슨법을 사용하여, 돌출물이 개재된 드럼과 박막탄성체의 틈새에서 발생하는 공기압과 박막탄성체에 작용하는 장력에 의한 박막탄성체의 부상특성을 해석하였다. 돌출물이 포함된 드럼의 일부영역에서 탄성체의 부상특성에 관한 전반적인 현상을 규명하기 위해 해석영역은 드럼과 박막탄성체가 상면하게 되는 비교적 넓은 영역으로 하였다. 또한 박막탄성체에 대하여 일정한 각도를 가지고 주행하게 되는 모델과 박막탄성체가 회전드럼과 정지드럼의 두 영역에 걸쳐 주행하는 모델을 해석한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 박막탄성체를 선형 및 비선형방정식에 기초하여 해석한 결과 수직변위의 정성적인 경향은 해석방정식에 관계없이 유사하였다. 돌출물 주변에서는 비선형항의 배제로 인한 박막탄성체 강성의 감소로 수직변위가 작게 계산됨을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 박막탄성체를 선형방정식에 기초한 수식화가 비선형해석에 비하여 단순하며 계산시간에서도 효율적인 알고리즘이 수치해석으로 입증되었다. 회전드럼에 부착된 돌출물과 주행하는 탄성체의 부상특성에 대한 탄성유체운환현상의 정성적인 규명에 도입될 수 있음이 확인되었다.

(2) 돌출물의 주행각도의 변화에 의한 돌출물의 주변에서 박막탄성체의 수직변위에 미치는 영향은 거의 없음이 수치해석 결과로부터 입증되었다.

(3) 박막탄성체가 회전 및 정지드럼에 동시에 위치하게 될 경우의 수직변위는 회전드럼에만 위치하게 될 경우에 비하여 최대 수직변위는 감소하였으며 정지드럼쪽에서 발생하는 수직변위의 분포는 드럼쪽으로 접근하는 양상을 보여 주었다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 목적기초연구비 지원(과제번호: 90-02-00-04)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 森美郎, 矢部貫, 林和宏, 1969, “フオイル軸受の二次元流體潤滑理論,” 日本機械學會論文集(第3部), 35卷, 276號(昭44-8), pp. 1781~1787.
- (2) 森美郎, 林和宏, 橫哲介, 1971, “フオイル軸受に關する研究(壓縮性の影響について),” 日本機械學會論文集(第3部), 37卷, 303號(昭46-11), pp. 2229~2235.
- (3) 堀幸夫, 蓮池彰, 東義, 長瀬素郎, 1976 “フオイル軸受に 關する研究(磁氣テープ記憶裝置への應用),” 日本機械學會論文集(第3部), 42卷, 359號(昭51-7), pp. 2215~2222.
- (4) Greenberg, H. J., 1979, “Study of Head-Tape Interaction in High Dpeed Rotating Head Recording,” *Journal of Research and Development*, IBM Vol. 23, No. 2, pp. 197~205.
- (5) 小野京右, 水川眞, 1979, “球面フオイル軸受の研究(第1報),” 日本機械學會論文集(C編), 45卷, 396號, pp. 919~928.
- (6) 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, 10卷, 2號, pp. 117~120.
- (7) Yoneda, K. and Sawada, T., 1988, “Simulation of Tape Flying Characteristics on VTR Drum Considering In-Plane Stress,” *IEEE Trans. of Magnetics*, Vol. 24, No. 6, pp. 2766~2768.
- (8) 장인배, 한동철, 1989, “마그네틱헤드 슬라이더의 極小空氣膜에 대한 定常狀態解析,” 대한기계학회논문집, 제13권 제4호, pp. 764~770.
- (9) 민욱기, 김수경, 1991, “회전헤드에 대한 주행테이프 부상특성,” 대한기계학회논문집, 제15권 제2호, pp. 523~536.
- (10) Kim Sookyung, Min Oakkey and Kwon Haesung, 1992, “Flying Characteristics of Tape above Rotating Drum with Multiple Heads,” *IEEE Trans. Con. Elect.*, Vol. 38, No. 3, pp. 671~673.
- (11) Eshel, A. and Elord, H. G., “Stiffness Effects on the Infinitely Wide Foil Bearing,” *Journal of ASME*, Paper 66-Lubs-6, pp. 1~6.