

코팅부 균열의 충격특성 해석

An Analysis on the Impact Characteristics in a Layered Half-Space with a Coating Region

이강용(연세대 기계공학과), 권순만(연세대 기계공학과 대학원)

Kang Yong Lee(Dept. Mech. Engng, Yonsei Univ.), Soon Man Kwon(Graduate School, Yonsei Univ.)

Abstract

The purpose of this paper is to consider the disk failure phenomenon based on the second kind Fredholm integral equation and numerical inversion of Laplace transform when the head hit disk asperities at HDI under antiplane impact loading. The model for analysis is a two layered half-space with a circumferential surface edge crack. The optimum design parameters to reduce the disk failure due to impact are presented.

Key Words : coating(코팅), impact(충격), disk(디스크), overcoating(오버코팅), antiplane shear impact stress loading(면외전단 충격하중), HDI(헤드-디스크 인터페이스), Fredholm integral equation(Fredholm 적분방정식), stress intensity factor(응력세기계수)

1. 서론

최근 산업의 발전과 더불어 용도에 맞는 성능 개선을 위해 모재(base materials or substrate)에 코팅(coating)시킨 접합재료의 사용이 많은 분야에 걸쳐 급속히 확대되어 가고 있다. 이는 코팅이 열적, 화학적, 기계적 노출 등에 의한 위험으로부터 모재를 보호하는 유익한 역할을 할 수 있기 때문이다.

특히, 컴퓨터 자기저장 장치(magnetic recording devices)의 디스크(disk)부 자성층(magnetic layer)의 마멸손상을 막기 위한 오버코팅(overcoating)을 한 예로 들 수 있다. 헤드(head)부와 디스크 사이의 틈새(air gap), 즉 부동높이(flying height)는 현재 $0.1\mu\text{m}$ 수준에서 고밀도(high density) 자기저장을 이루기 위해 $0.05\mu\text{m}$ 이하로 낮아지고 있는 추세이고, 이로 인해 헤드-디스크 인터페이스(head disk interface : 이하 HDI)에서의 충돌접촉이 불가피하게 되었다. 따라서 HDI에서의 헤드와 디스크 돌출부(asperities)와의 불가피한 충돌로 인한 디스크 파손 문제의 이해가 자기저장 산업계의 미래를

보장할 수 있는 관건이 되었다.

일반적으로 디스크의 파손은 HDI(특히 디스크의 오버코팅 영역)에서의 충돌로 인하여 마멸입자의 생성, 재침투, 고착 과정을 통하여 이루어진다고 보고되어 있으며, 마멸율(wear rate)은 헤드와 디스크간의 충돌시의 접촉력(contact force)에 직접적으로 비례관계가 있음을 문헌을 통해 알 수 있다. 따라서 HDI에서의 마멸을 줄이거나 막을 수 있는 새로운 오버코팅 방법개발, 또는 헤드에 비해서 디스크 오버코팅층의 경도가 상대적으로 낮기 때문에 고경도 및 저마찰계수를 갖는 DLC (diamond like carbon)등과 같은 오버코팅 소재연구가 활발히 이루어지고 있다. 이들 코팅공정 개발이나 소재 연구에 있어서 참고 데이터로 피드백 되어야 할 사항은 HDI에서의 충돌시 디스크 오버코팅 영역에서의 변형 및 파손해석 데이터이다.

따라서 CSS(contact start stop) 또는 정상 작동중인 슬라이더/디스크 충돌시 디스크의 오버코팅 영역에서의 수 많은 접촉문제(응력해석 및 마멸연구) 연구가 진행되었다. 그러나, 본 연구원의 자료조사로는 이들 연구의 대부분이 디스크의 오버코팅부가 모재에 완전접착되고 내부에 전혀 결함이 없다

는 가정하에서의 해석결과이다. 그렇지만, 실제 코팅 공정시 또는 소재 특성상 내부 균열이 존재할 수 있으므로 내부에 균열을 가진 디스크 오버코팅부의 파괴역학적 해석은 필수 불가결하다.

이에 본 연구에서는 디스크 오버코팅부가 원주방향 표면 가장자리 균열(circumferential surface edge crack)을 갖을 때, 면의 전단 충격하중(antiplane shear impact stress)하의 응력세기계수 및 충격특성을 줄이기 위한 물성치의 변화를 예측하고자 한다.

2. 이론

길이 a 인 표면 가장자리 수직 균열면에 τ_0 의 면의 전단 충격하중을 받는 오버코팅층(두께 h)과 디스크 모재를 Fig.1과 같이 2개의 층으로 이루어진 반평면 문제로 해석하고자 한다.

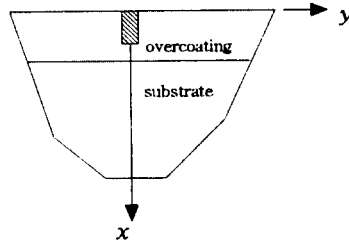


Fig.1 Analysis model

면의전단 충격하중하의 변위 및 응력성분은 다음과 같다.

$$(u_x)_j = (u_y)_j = 0, (u_z)_j = w_j(x, y, t) \quad (1)$$

$$(\tau_{xz})_j = \mu_j \frac{\partial w_j}{\partial x}, (\tau_{yz})_j = \mu_j \frac{\partial w_j}{\partial y} \quad (2)$$

여기서 하첨자 $j=1, 2$ 이며 1은 오버코팅, 2는 디스크 모재부분을 의미한다. 각 층에서의 지배방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 w_i = \frac{1}{c_{2i}^2} \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} \quad (3)$$

$x=h$ 에서의 연속조건은 다음과 같다.

$$w_1^*(h, y, t) = w_2^*(h, y, t) \quad (4)$$

$$(\tau_{xz}^*)_1(h, y, t) = (\tau_{xz}^*)_2(h, y, t) \quad (5)$$

여기서 상첨자 *는 시간에 대한 Laplace 변환영역을 나타내고 변수 p 는 Laplace 변환 매개변수이다. 균열을 갖는 오버코팅층에서의 혼합경계조건은 다음과 같다.

$$(\tau_{yz}^*)_1(x, 0, t) = -\frac{\tau_0}{p}, 0 \leq x < a \quad (6)$$

$$w_1^*(x, 0, t) = 0, a \leq x < h \quad (7)$$

Eq.(6), (7)로부터 다음의 쌍적분방정식을 얻을 수 있다.

$$\int_0^\infty A^{(1)}(s, p) \cos(sx) ds = 0, x \geq a \quad (8)$$

$$\int_0^\infty sF(s, p)A^{(1)}(s, p) \cos(sx) ds = \frac{\pi\tau_0}{2\mu_1 p} + \int_0^\infty sA^{(2)}(s, p) \cosh(\gamma_{21}x) ds, x < a \quad (9)$$

여기서 $F(s, p) = \frac{\gamma_{21}}{s}, \gamma_{ij} = \sqrt{s^2 + \frac{p^2}{c_{ij}^2}}$, 변수 s 는

Fourier 변환 매개변수를 나타낸다.

Copson 방법⁽¹⁾에 의해 유일 미지변수 $A^{(1)}(s, p)$ 를 다음과 같이 가정한다.

$$A^{(1)}(s, p) = -\frac{\pi}{2\mu_1} \int_0^a \xi \varpi^*(\xi, p) J_0(s\xi) d\xi \quad (10)$$

Eq.(10)을 Eq.(9)에 대입하면 다음의 제 2종 Fredholm 적분방정식(integral equation)을 얻을 수 있다.

$$\varpi^*(\xi, p) + \int_0^a \varpi^*(\eta, p) K(\xi, \eta, p) d\eta = \frac{\tau_0}{p} \quad (11)$$

여기서

$$K(\xi, \eta, p) = \eta \int_0^\infty s [F(s, p) - 1] J_0(s\xi) J_0(s\eta) ds - \eta \int_0^\infty \frac{s^2 e^{-\gamma_{21}h}}{\delta} \left(1 - \frac{\mu_2 \gamma_{22}}{\mu_1 \gamma_{21}}\right) J_0(\gamma_{21}\xi) I_0(\gamma_{21}\eta) ds \quad (12)$$

$$\delta(s, p) = \frac{\mu_2}{\mu_1} \gamma_{22} \cosh(\gamma_{21}h_1) + \gamma_{21} \sinh(\gamma_{21}h_1) \quad (13)$$

여기서 $\varpi^*(\xi, p)$ 를 다음과 같이 정의하고

$$\varpi^*(\xi, p) = \frac{\tau_0}{p} \xi^{-\frac{1}{2}} \omega^*(\xi, p) \quad (14)$$

$$\varpi^*(\eta, p) = \frac{\tau_0}{p} \eta^{-\frac{1}{2}} \omega^*(\eta, p) \quad (15)$$

Eq.(11)을 무차원화하기 위해 다음과 같은 무차원 변수를 정의한다.

$$s = \frac{S}{a}, \xi = a\xi, \eta = a\eta, \omega^*(\xi, p) = \sqrt{a} \Omega^*(\xi, p) \quad (16)$$

Eq.(14), (15) 및 (16)을 Eq.(11)에 대입하면 무차원화된 다음의 제 2종 Fredholm 적분방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathcal{Q}^*(\mathcal{E}, p) + \int_0^1 \mathcal{Q}^*(H, p) L(\mathcal{E}, H, p) dH = \sqrt{\mathcal{E}} \quad (17)$$

여기서

$$L(\mathcal{E}, H, p) = \sqrt{\mathcal{E}H} \int_0^\infty S \left(\frac{\Gamma_{21}}{S} - 1 \right) J_0(S\mathcal{E}) J_0(SH) dS \quad (18)$$

$$- \sqrt{\mathcal{E}H} \int_0^\infty \frac{S^2 e^{-\Gamma_{21} \frac{S}{a}}}{\mathcal{A}} \left(1 - \frac{\mu_2 \Gamma_{22}}{\mu_1 \Gamma_{21}} \right) I_0(\Gamma_{21} \mathcal{E}) I_0(\Gamma_{21} H) dS$$

$$\Gamma_{21}(s, p) = \sqrt{S^2 + \left(\frac{pa}{c_{21}} \right)^2} \quad (19)$$

$$\Gamma_{22}(s, p) = \sqrt{S^2 + \left(\frac{pa}{c_{21}} \right)^2 \left(\frac{\rho_2/\rho_1}{\mu_2/\mu_1} \right)} \quad (20)$$

$$\mathcal{A} = \left[\frac{\mu_2}{\mu_1} \Gamma_{22} \cosh \left(\frac{\Gamma_{21}}{a} h \right) + \Gamma_{21} \sinh \left(\frac{\Gamma_{21}}{a} h \right) \right] \quad (21)$$

선형탄성 파괴역학의 중요 파라미터인 mode III 응력세기계수(stress intensity factor)는 다음과 같이 정의된다.

$$k_3(t) = \lim_{r \rightarrow a} \sqrt{2(x-a)} (\tau_{yz})_1(x, 0) \quad (22)$$

Laplace 변환영역에서의 응력세기계수식은 Eq.(22)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_3^*(p) = \lim_{r \rightarrow a} \sqrt{2(x-a)} (\tau_{yz}^*)_1(x, 0, p) \quad (23)$$

Eq.(6)과 Eq.(9)로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$(\tau_{yz}^*)_1(x, 0, p) = -\frac{d}{dx} \int_0^a \frac{\xi \mathcal{Q}^*(\xi, p)}{\sqrt{x^2 - \xi^2}} d\xi - T_2 + T_3 \quad (24)$$

Eq.(24)에서 우변 둘째 및 셋째항 T_2 , T_3 적분은 $x=a$ 에서 singularity를 갖지 않으므로 Eq.(23)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k_3^*(p) = \lim_{r \rightarrow a} \sqrt{2(x-a)} \left[-\frac{d}{dx} \int_0^a \frac{\xi \mathcal{Q}^*(\xi, p)}{\sqrt{x^2 - \xi^2}} d\xi \right] \quad (25)$$

따라서, Eq.(25)를 부분적분하면 Laplace 변환영역에서의 응력세기계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_3^*(p) = \sqrt{a} \mathcal{Q}^*(a, p) = \frac{\tau_0}{p} \omega^*(a, p) \quad (26)$$

Eq.(26)은 Eq.(32)의 관계로부터 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$k_3^*(p) = \frac{\tau_0 \sqrt{a}}{p} \mathcal{Q}^*(1, p) \quad (27)$$

Eq.(27)에 Laplace 역변환을 취하면 우리가 원하는 실시간 영역에서의 응력세기계수를 다음과 같이

얻을 수 있다.

$$k_3(t) = \frac{\tau_0 \sqrt{a}}{2\pi i} \int_{Br} \frac{\mathcal{Q}^*(1, p)}{p} e^{pt} dp \quad (28)$$

또는

$$\overline{k_3}(t) = \frac{k_3(t)}{\tau_0 \sqrt{a}} = \frac{1}{2\pi i} \int_{Br} \frac{\mathcal{Q}^*(1, p)}{p} e^{pt} dt \quad (29)$$

여기서 적분기호내의 Br 은 Bromwich path를 의미한다.

3. 수치해석 및 고찰

동적인 기계적 하중하의 2개층 적층 반무한체의 오버코팅층에 수직방향 균열이 존재할 때, 균열 첨단 거동을 선형탄성 파괴역학 관점에서 검토하고자 한다. Eq.(28), Eq.(29)는 Miller and Guy의 Laplace 역변환 방법⁽²⁾을 적용하여 수치적으로 구할 수 있고, Eq.(28), (29)의 $\mathcal{Q}^*(1, p)$ 는 Eq.(17)을 수치해석하여 구하였다. 즉, Eq.(17)은 Gaussian quadrature 적분방법으로, 또 적분핵 $L(\mathcal{E}, H, p)$ 는 Gauss-Laguerre 적분방법을 이용하였다.

Fig.2는 $a/h=0.4$, $\rho_2/\rho_1=1.0$ 로 고정시키고 횡탄성계수비(shear modulus ratio)를 변화를 변화시켰을 때의 무차원화된 응력세기계수 $\overline{k_3}(t)$ 를 나타내고 있다. 무차원화된 시간 $c_{21}t/a=2.0$ 까지의 응력세기계수값은 횡탄성계수비 변화에 무관하며 $c_{21}t/a > 2.0$, 즉 정적하중 상태에 가까운 충격하중이 작용할 경우에는 횡탄성계수비가 클수록 낮은 응력세기계수 값을 주고 있음을 알 수 있다.

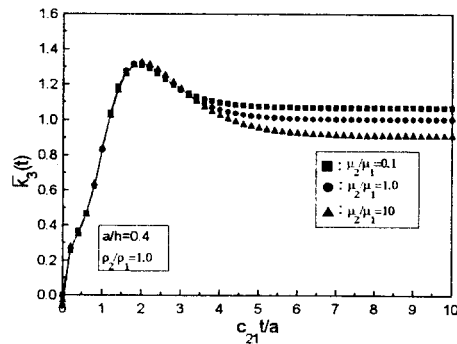


Fig.2 $\overline{k_3}(t)$ versus time for shear modulus effect

Fig.3은 $a/h=0.4$, $\mu_2/\mu_1=2.0$ 로 고정시키고 비중비 (density ratio)를 변화를 변화시켰을 때를 나타낸다. 무차원화된 시간 $c_{21}t/a=2.0$ 까지의 응력세기계수 값은 비중비 변화에 무관하며 $c_{21}t/a>2.0$ 일 경우에는 비중비가 클수록 낮은 응력세기계수 값을 주고 있음을 알 수 있다.

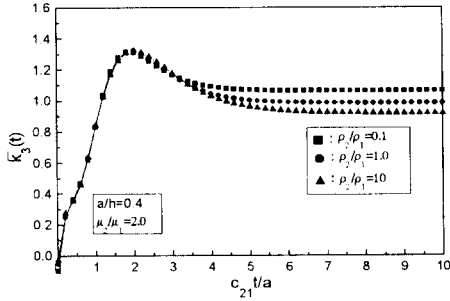


Fig.3 $\overline{k_3}(t)$ versus time for density effect

Fig.4는 $\rho_2/\rho_1=1.0$, $\mu_2/\mu_1=2.0$ 일때 균열길이와 오버코팅층 두께비 (a/h) 변화에 따른 무차원 응력세기계수 값을 나타내고 있다. 무차원 응력세기계수 $\overline{k_3}(t)$ 최대값(peak point)은 a/h 비가 커질수록 낮아지고 있음을 알 수 있고, 무차원 충격시간 ($c_{21}t/a$)이 정적하중 상태로 갈수록 a/h 비가 작아짐에 따라 낮은 응력세기계수 값을 주고 있음을 알 수 있다.

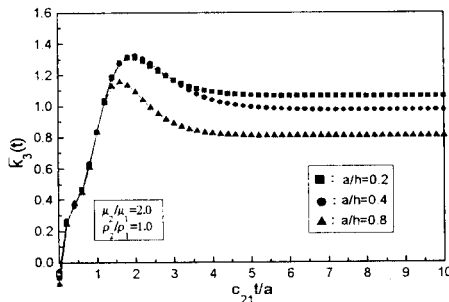


Fig.4 $\overline{k_3}(t)$ versus time for a/h effect

4. 결론

헤드와 디스크사이의 충돌로 인하여 오버코팅층 균열면에서 면외전단 충격하중을 받는 경우에 대하여 동응력세기계수를 수치해석적으로 구하였고, 이에 의해 디스크부 HDI에서의 충격 특성에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

[1] 무차원화된 충격시간 $c_{21}t/a=2.0$ 근방에서 응력세기계수가 최대가 되며 충격시간이 2.0 이하에서는 물성치 변화에 따른 응력상태가 변화가 크지 않았다.

[2] μ_2/μ_1 값이 커질수록 낮은 응력세기계수 값을 갖는다. 따라서, 디스크 모재의 횡탄성계수를 오버코팅층의 횡탄성계수보다 크게 설계하여야 한다.

[3] ρ_2/ρ_1 값이 커질수록 낮은 응력세기계수 값을 갖는다. 따라서, 디스크 모재의 비중이 오버코팅층의 비중보다 크도록 디스크 모재 및 오버코팅 소재를 선정하여야 한다.

[4] $\mu_2/\mu_1 \geq 1.0$ 이고 a/h 값이 클수록 낮은 응력세기계수 값을 갖음을 알 수 있었다. 따라서, 디스크 모재의 횡탄성계수가 오버코팅층의 횡탄성계수보다 클 경우에는 오버코팅층의 두께를 얇게 하는 것이 좋음을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보 저장기기 연구센터의 지원(과제번호 : 97K3-0907-02-02-1)을 받아 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Copson, E.T., *Proceedings of the Glasgow Mathematical Association*, Vol.5, pp.21-24, 1961.
2. Miller, M.K., Guy, W.T., "Numerical Inversion of the Laplace Transform by Use of Jacobi Polynomials," *SIAM J. Numer. Anal.*, Vol.3, pp.624-635, 1966.