

# 헤드와의 접촉에 의한 오버코팅층을 포함한 하드 디스크의 응력 해석

이 강 용\* · 양 지 혁\*\*  
(1999년 6월 21일 접수)

## Stress Analysis of the Hard Disk with Overcoating Layer under the Contact with Head

Kang Yong Lee and Ji Hyuck Yang

**Key Words:** Hard Disk(하드디스크), Stress Analysis(응력해석), Overcoating(오버코팅), Bessel Function(Bessel 함수), Normal Loading(수직하중), Shear Loading(전단하중)

### Abstract

The purposes of the paper are to calculate stresses and strains of the disk with overcoating layer rotating quickly under normal loading and shear loading by contacting with head and to present material properties preventing the delamination between the disk and overcoating layer. The hard disk is modeled as two-layered disk composed with overcoating layer and the rest layers and the loading onto the disk is assumed axisymmetric. Solutions to equilibrium equations and compatibility equations are derived with the form of polynomial and Bessel function and coefficients satisfying boundary conditions are obtained differently for the case of body force, normal force and shear force. The risk of delamination are investigated for us to calculate the differences of strains at the interface between the disk and overcoating layer and the material properties preventing delamination are presented by calculating the differences of strains according to Young's modulus and density of disk.

### 1. 서론

최근 열적, 기계적, 화학적 측면에서의 모재의 보호를 위해 원하는 물성을 가진 물질을 모재에 코팅시킨 재료가 다방면으로 사용되고 있다.

그 대표적인 예로 컴퓨터 자기저장 장치(magnetic recording devices)의 디스크(disk)부 자성층(magnetic layer)에 사용하는 오버코팅(overcoating)을 들 수 있다. 헤드(head)부와 디스크 사이의 틈새, 즉 부동높이(flying height)는 현재 0.1  $\mu\text{m}$  수준에서 고밀도 자기저장을 위해 0.05  $\mu\text{m}$  이하로 낮아지고 있어 이에 따라 헤드-디스크 경계면(head disk interface : 이하 HDI)에서의 예기치

못한 충돌접촉의 위험성이 높아지고 있다.<sup>(1)</sup>

HDI에서의 접촉 문제는 다양한 측면에서 접근되고 있다. Ruiz 등<sup>(2)</sup>은 디스크를 반무한체로 보고 슬라이더(slidebar)의 이동 속도에 따른 접촉현상의 변화를 묘사하였다. Bruyne 등<sup>(3)</sup>은 슬라이더의 형상에 따른 HDI에 작용하는 압력의 변화를 FEM을 이용하여 수치적으로 계산하였다. Cha 등<sup>(4)</sup>은 디스크 표면의 거칠기에 따른 슬라이더와 디스크의 접촉현상을 Hertzian 접촉 모델로 해석하여 접촉력(contact force)을 계산하였다.

위의 연구들은 HDI 접촉에 의해 발생하는 접촉력에 관심을 두고 있다. 그러나 HDI 접촉에 의해 디스크에 발생하는 응력이 오버코팅층을 포함한 여러 층간의 박리현상을 유발시킬 수 있으므로 디스크에 발생하는 응력분포를 파악하는 것은 디스크의 신뢰성 확보를 위해 중요하다. Keremes 등<sup>(5)</sup>은 디스크를 반무한체로 보고 표면의 거칠기로 인해 헤드와 접촉하여 생기는 응력을 탄성학적 방법을 이용하여 구하였다. Leo 등<sup>(6)</sup>은 디스크

\* 회원, 연세대학교 기계전자공학부  
E-mail : fracture@bubble.yonsei.ac.kr  
TEL : (02)361-2813 FAX : (02)312-2159  
\*\* 연세대학교 대학원

의 표면 거칠기에 의해 헤드와 디스크가 여러 점에서 접촉하는 모델에 대해 운동 방정식을 풀어 디스크 표면에 작용하는 최대 하중을 구하였다. Sinclair 등<sup>(7)</sup>은 헤드가 디스크와 접촉할 때 디스크의 접촉점 부근에 발생하는 응력과 온도분포를 계산하였다. 그러나 이런 연구들은 디스크를 모두 반무한체로 가정하였고 응력분포도 디스크의 접촉점 부근의 일부에 대해서만 구하고 있다.

디스크의 전체 영역에 대한 응력 해석은 고전적인 탄성학<sup>(8,9)</sup>에서 몇 가지 단순한 모델에 대해 다루고 있다. 또한, Karpov<sup>(10)</sup>는 디스크의 양면에 같은 두께의 층이 붙어있는 세 개의 층으로 구성된 디스크가 회전할 때 디스크 전체에 발생하는 응력을 탄성학적 방법으로 구하였다. 그러나, 조사된 바로는 디스크의 회전 및 접촉을 모두 고려하여 전체적인 응력을 구한 연구는 없다.

따라서 본 연구에서는 고속으로 회전하는 디스크의 표면에 헤드와의 접촉으로 인한 하중이 가해질 때 디스크 전체에 발생하는 응력을 3차원 탄성학 방법으로 계산하여 접촉력이 디스크 및 오버코팅층에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

### 2. 모델

디스크는 크게 모재, 언더코팅층, 자성층, 오버코팅층의 네 개 층으로 구성되어 있으며, 이들 모든 층을 고려하는 것은 해석이 매우 복잡하며 효율 면에서도 바람직하지 못하므로 오버코팅층 이외의 층들을 평균물성치를 갖는 탄성체로 가정하여 문제를 단순화 시켰다.

또한, 회전하는 디스크의 표면에 접촉력이 가해지는 본 모델에서 하중을 회전력, 표면 수직하중, 표면 전단하중의 세 가지로 나누어 각각의 경우에 대해 탄성학적 응력해석을 실시한 후 중첩하는 방법을 사용하였으며 본 연구의 대상모델은 Fig. 1과 같다.

오버코팅층과 모재의 물성치는 일반적으로 사용되고 있는 IBM 3370 제품의 것<sup>(7,11)</sup>을 사용하였으며 이를 Table 1에 제시하였다.

### 3. 디스크의 회전에 의한 응력해석

먼저, 밀도  $\rho$ , 포와송 비  $\nu$ 를 가진 디스크가  $\omega$ 의 속도로 회전할 때 디스크에 걸리는 응력을

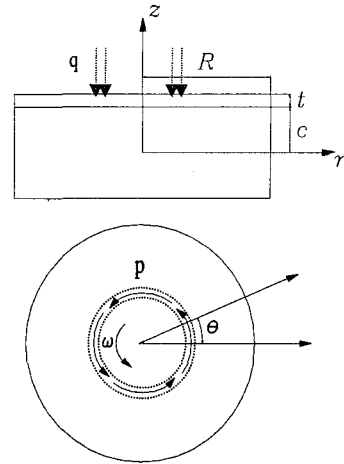


Fig. 1 Model of two-layer disk

Table 1 Specifications of disk and overcoating

	overcoating	disk
Young's modulus(GPa)	280	70
density(kg/m <sup>3</sup> )	8000	2700
Poisson ratio	0.3	0.3
thickness(mm)	3.6 × 10 <sup>-3</sup>	0.95

계산해 보자. 축대칭 문제에서의 평형방정식과 적합방정식은 다음과 같다.<sup>(8)</sup>

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho \omega^2 r = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0$$

$$\nabla^2 \sigma_r - \frac{2}{r^2}(\sigma_r - \sigma_\theta) + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} = -\frac{2\rho\omega^2}{1-\nu}$$

$$\nabla^2 \sigma_\theta + \frac{2}{r^2}(\sigma_r - \sigma_\theta) + \frac{1}{1+\nu} \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} = -\frac{2\rho\omega^2}{1-\nu} \tag{2}$$

$$\nabla^2 \sigma_z + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} = -\frac{2\nu\rho\omega^2}{1-\nu}$$

$$\nabla^2 \tau_{rz} - \frac{1}{r^2} \tau_{rz} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r \partial z} = 0$$

where  $\Theta = \sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z$

오버코팅층에 대해서는 밀도를  $\tilde{\rho}$ , 탄성계수를  $\tilde{E}$ 로 표시하고 응력과 변위성분에  $\tilde{\sim}$ 를 붙이도록 한다.

식 (1),(2)를 만족하는 응력성분은 모재에 대해 식 (3), 오버코팅층에 대해 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{E}{1-\nu} \left\{ \left[ \frac{3-2\nu}{8} \frac{\rho\omega^2}{E} + \frac{\nu B}{4(1+\nu)} \right] r^2 - Bz^2 \right\} \\ &\quad - a_5(180r^2 - 240z^2) + b_5[(36 - 54\nu)r^2 + (6 + 108\nu)z^2] \\ &\quad + [96a_4 + 4(14\nu - 1)b_4]z \\ &\quad + 5(1 + \nu)b_3' + 5(1 + \nu)B_3^* + 5(1 + \nu)B_3' \\ &\quad + (C_1 \sin kz + C_2 \cos kz)k[(1 - 2\nu)I_0(kr) + krI_1(kr)] \\ \sigma_\theta &= -\frac{E}{1-\nu} \left\{ \left[ \frac{1+2\nu}{8} \frac{\rho\omega^2}{E} + \frac{3\nu B}{4(1+\nu)} \right] r^2 - Bz^2 \right\} \\ &\quad + a_5(60r^2 - 240z^2) + b_5[(12 - 54\nu)r^2 + (6 + 108\nu)z^2] \\ &\quad + [96a_4 + 4(14\nu - 1)b_4]z \\ &\quad + 5(1 + \nu)b_3' + 5(1 + \nu)B_3^* + 5(1 + \nu)B_3' \\ &\quad + (C_1 \sin kz + C_2 \cos kz)k[(1 - 2\nu)I_0(kr)] \\ \sigma_z &= -\frac{E}{2(1-\nu^2)} \left[ \nu(1 + \nu)\rho \frac{\omega^2}{E} + 2B \right] r^2 \\ &\quad + a_5(240r^2 - 480z^2) + b_5[(54\nu - 102)r^2 + (96 - 108\nu)z^2] \\ &\quad + [-192a_4 + 4(16 - 14\nu)b_4]z + 10(1 + \nu)b_3 \\ &\quad - (C_1 \sin kz + C_2 \cos kz)k[2(2 - \nu)I_0(kr) + krI_1(kr)] \\ \tau_{rz} &= [480a_5 - (96 - 108\nu)b_5]rz + [96a_4 - 2(16 - 14\nu)b_4]r \\ &\quad + (C_1 \cos kz - C_2 \sin kz)k[2(1 - \nu)I_1(kr) + krI_0(kr)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_r &= -\frac{\tilde{E}}{1-\nu} \left\{ \left[ \frac{3-2\nu}{8} \frac{\tilde{\rho}\omega^2}{\tilde{E}} + \frac{\nu\tilde{B}}{4(1+\nu)} \right] r^2 - \tilde{B}z'^2 \right\} \\ &\quad - \tilde{a}_5(180r^2 - 240z'^2) + \tilde{b}_5[(36 - 54\nu)r^2 + (6 + 108\nu)z'^2] \\ &\quad + [96\tilde{a}_4 + 4(14\nu - 1)\tilde{b}_4]z' + 5(1 + \nu)\tilde{b}_3' \\ &\quad + 5(1 + \nu)B_3^* \frac{\tilde{E}}{E} + 5(1 + \nu)B_3' \frac{\tilde{E}}{E} \\ &\quad + (\tilde{C}_1 \sin kz' + \tilde{C}_2 \cos kz')k[(1 - 2\nu)I_0(kr) + krI_1(kr)] \\ \tilde{\sigma}_\theta &= -\frac{\tilde{E}}{1-\nu} \left\{ \left[ \frac{1+2\nu}{8} \frac{\tilde{\rho}\omega^2}{\tilde{E}} + \frac{3\nu\tilde{B}}{4(1+\nu)} \right] r^2 - \tilde{B}z'^2 \right\} \\ &\quad + \tilde{a}_5(240z'^2 - 60r^2) + \tilde{b}_5[(12 - 54\nu)r^2 + (6 + 108\nu)z'^2] \\ &\quad + [96\tilde{a}_4 + 4(14\nu - 1)\tilde{b}_4]z' + 5(1 + \nu)\tilde{b}_3' \\ &\quad + 5(1 + \nu)B_3^* \frac{\tilde{E}}{E} + 5(1 + \nu)B_3' \frac{\tilde{E}}{E} \\ &\quad + (\tilde{C}_1 \sin kz' + \tilde{C}_2 \cos kz')k(1 - 2\nu)I_0(kr) \\ \tilde{\sigma}_z &= -\frac{\tilde{E}}{2(1-\nu^2)} \left[ \nu(1 + \nu)\tilde{\rho} \frac{\omega^2}{\tilde{E}} + 2\tilde{B} \right] r^2 \\ &\quad + \tilde{a}_5(240r^2 - 480z'^2) + \tilde{b}_5[(54\nu - 102)r^2 + (96 - 108\nu)z'^2] \\ &\quad + [-192\tilde{a}_4 + 4(16 - 14\nu)\tilde{b}_4]z' + 10(1 + \nu)\tilde{b}_3 \\ &\quad - (\tilde{C}_1 \sin kz' + \tilde{C}_2 \cos kz')k[2(2 - \nu)I_0(kr) + krI_1(kr)] \\ \tilde{\tau}_{rz} &= [480\tilde{a}_5 - (96 - 108\nu)\tilde{b}_5]rz' + [96\tilde{a}_4 - 2(16 - 14\nu)\tilde{b}_4]r \\ &\quad + (\tilde{C}_1 \cos kz' - \tilde{C}_2 \sin kz')k[2(1 - \nu)I_1(kr) + krI_0(kr)] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $C_1, C_2, \tilde{C}_1, \tilde{C}_2, B, \tilde{B}, a_5, b_5, \tilde{a}_5, \tilde{b}_5, a_4, b_4, \tilde{a}_4, \tilde{b}_4, b_3, b_3', \tilde{b}_3, \tilde{b}_3', B_3^*, B_3'$ 는 경계조건에 따라 결정 되어야 할 계수들이고 오버코팅층의  $z'$ 은

$$z' = z - \left( c + \frac{t}{2} \right)$$

이다. 이에 따른 변위성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= \left[ -\rho \frac{\omega^2}{8E} \frac{(1-\nu-2\nu^2)}{(1-\nu)} + \frac{\nu}{4(1-\nu)} B \right] r^3 + Brz^2 \\ &\quad + \frac{(1+\nu)}{E} [a_5(-60r^3 + 240rz^2) + b_5(12r^3 + 6rz^2)] \\ &\quad + \frac{(1+\nu)}{E} [96a_4 - 4b_4]rz + \frac{5(1-\nu^2)}{E} b_3' r \\ &\quad - \frac{10\nu(1+\nu)}{E} b_3 r + \frac{5(1-\nu^2)}{E} B_3^* r + \frac{5(1-\nu^2)}{E} B_3' r \\ &\quad + \frac{(1+\nu)}{E} [C_1 \sin kz + C_2 \cos kz] krI_0(kr). \\ w &= -Br^2 z - \frac{2}{3} \frac{\nu}{1-\nu} Bz^3 + \frac{(1+\nu)}{E} \times \\ &\quad \{ a_5(240r^2 z - 160z^3) + b_5[(108\nu - 102)r^2 z + (32 - 72\nu)z^3] \\ &\quad + [-96a_4 + (32 - 56\nu)b_4]z^2 + \frac{1}{2}[96a_4 + (56\nu - 60)b_4]r^2 \\ &\quad + [C_1 \cos kz - C_2 \sin kz][4(1-\nu)I_0(kr) + krI_1(kr)] \\ &\quad + 10b_3 z - 10\nu b_3' z - 10\nu B_3^* z - 10\nu B_3' z \} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= \left[ -\tilde{\rho} \frac{\omega^2}{8\tilde{E}} \frac{(1-\nu-2\nu^2)}{(1-\nu)} + \frac{\nu}{4(1-\nu)} \tilde{B} \right] r^3 + \tilde{B}rz'^2 \\ &\quad + \frac{(1+\nu)}{E} [\tilde{a}_5(-60r^3 + 240rz'^2) + \tilde{b}_5(12r^3 + 6rz'^2)] \\ &\quad + \frac{(1+\nu)}{E} [96\tilde{a}_4 - 4\tilde{b}_4]rz' + \frac{5(1-\nu^2)}{E} \tilde{b}_3' r \\ &\quad - \frac{10\nu(1+\nu)}{E} \tilde{b}_3 r + \frac{5(1-\nu^2)}{E} B_3^* r + \frac{5(1-\nu^2)}{E} B_3' r \\ &\quad + \frac{(1+\nu)}{E} [\tilde{C}_1 \sin kz' + \tilde{C}_2 \cos kz'] krI_0(kr) \\ \tilde{w} &= -\tilde{B}r^2 z' - \frac{2}{3} \frac{\nu}{1-\nu} \tilde{B}z'^3 + \frac{(1+\nu)}{E} \times \\ &\quad \{ \tilde{a}_5(240r^2 z' - 160z'^3) \\ &\quad + \tilde{b}_5[(108\nu - 102)r^2 z' + (32 - 72\nu)z'^3] \\ &\quad + [(32 - 56\nu)\tilde{b}_4 - 96\tilde{a}_4]z'^2 + [48\tilde{a}_4 + (28\nu - 30)\tilde{b}_4]r^2 \\ &\quad + [\tilde{C}_1 \cos kz' - \tilde{C}_2 \sin kz'] [4(1-\nu)I_0(kr) + krI_1(kr)] \\ &\quad + 10\tilde{b}_3 z' - 10\nu\tilde{b}_3' z' - 10\nu \frac{E}{\tilde{E}} B_3^* z' - 10\nu \frac{E}{\tilde{E}} B_3' z' \} \end{aligned} \quad (6)$$

이 문제의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 1) z = c + t & : \tilde{\tau}_{rz} = 0, \tilde{\sigma}_z = 0 \\ 2) z = -c & : \tau_{rz} = 0, \sigma_z = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

3)  $z = c, r = R : \tilde{\tau}_{rz} = 0$

4)  $z = c : \sigma_z = \tilde{\sigma}_z, \tau_{rz} = \tilde{\tau}_{rz}, u = \tilde{u}, w = \tilde{w}$

식 (3)~(6)을 식 (7)에 대입하여 계수들을 결정하여 여러 부위에서의 응력 및 변위를 계산하였다. 이 때  $B_3^*$ 는  $r=R$ 에서의 합력(resultant force)이 0이 되도록 정한다.

디스크와 오버코팅층의 접합면에서의 변형률의 차이를 계산함으로써 층간박리의 가능성을 살펴

보았다. 먼저 디스크의 탄성계수를 변화시키면서 변형률 차이를 계산하였다. 그 결과로서 Fig. 2에서  $r$ 의 변화에 따른  $\epsilon_z$ 의 차이값을, Fig. 3에서  $r$ 의 변화에 따른  $\gamma_{rz}$ 의 차이값을 제시하였다.

이어서 디스크의 밀도를 변화시키면서 같은 해석을 실시하여 Fig. 4에서  $r$ 의 변화에 따른  $\epsilon_z$ 의 차이값을, Fig. 5에서  $r$ 의 변화에 따른  $\gamma_{rz}$ 의 차이값을 제시하였다.

Fig. 2부터 Fig. 5까지의 결과를 보면 디스크와

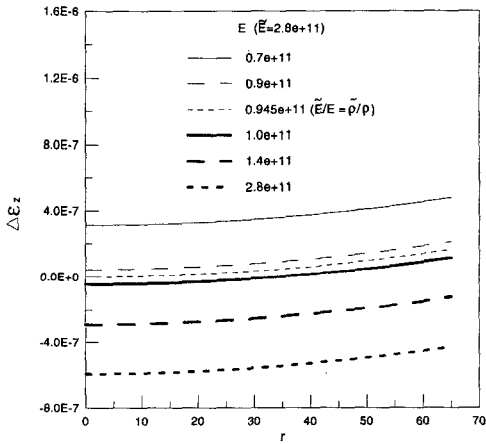


Fig. 2 The differences of normal strains at the interface between layers in rotating disk according to Young's modulus

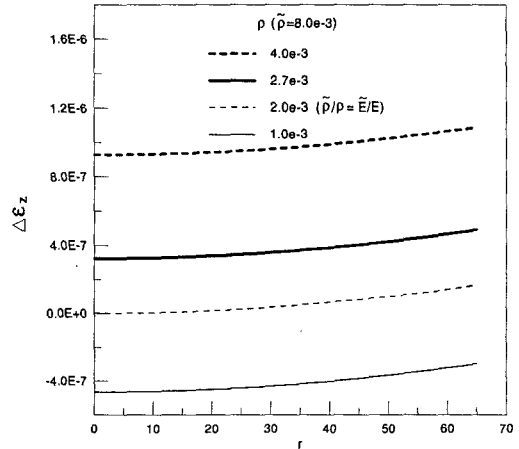


Fig. 4 The differences of normal strains at the interface between layers in rotating disk according to density

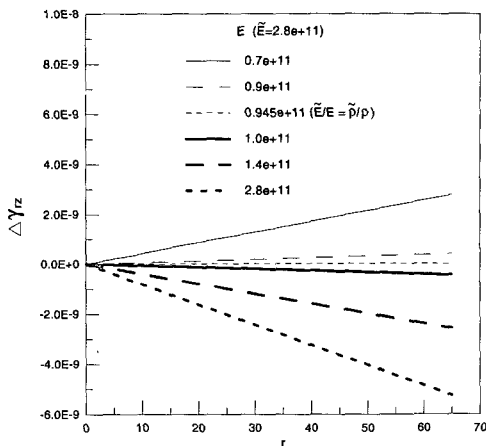


Fig. 3 The differences of shear strains at the interface between layers in rotating disk according to Young's modulus

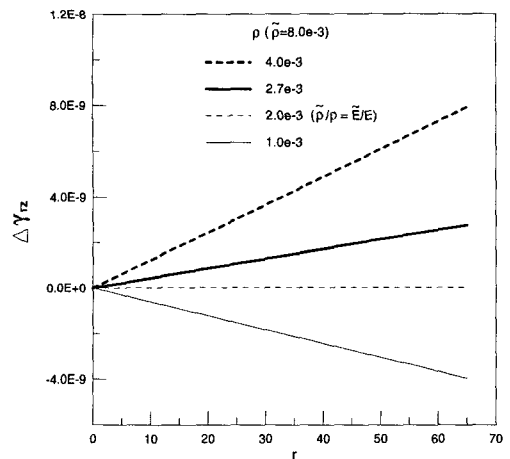


Fig. 5 The differences of shear strains at the interface between layers in rotating disk according to density

오버코팅층의 탄성계수의 비와 밀도의 비가 같게 될 때 층간 변형률의 차이가 가장 적게 되어 층간박리의 가능성을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

한편, 디스크의 회전속도는 점점 높아지고 있어 현재의 5,000rpm에서 10,000rpm 이상의 고속회전이 연구되고 있다. 이런 고속에서는 원심력이 커져 디스크에 걸리는 응력이 더욱 커질 것이므로 회전속도의 영향도 살펴보았다. Fig. 6에서 디스크의 회전속도의 변화에 따른 각 r 위치에서

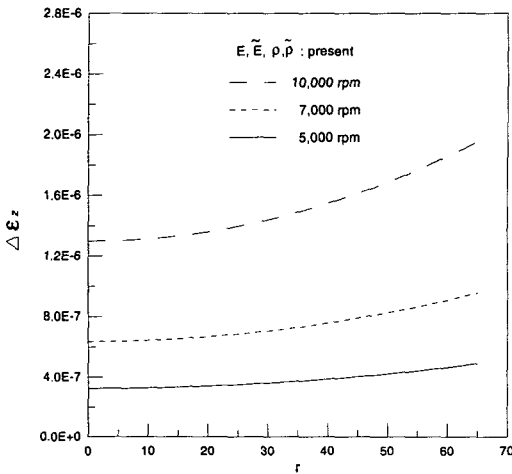


Fig. 6 The differences of normal strains at the interface between layers in rotating disk according to rotating velocity

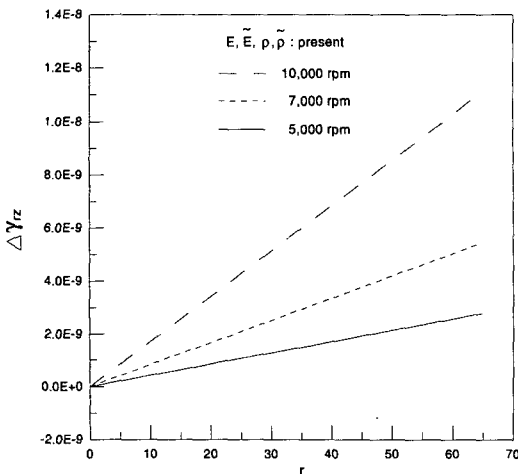


Fig. 7 The differences of shear strains at the interface between layers in rotating disk according to rotating velocity

의  $\epsilon_z$ 의 차이값을, Fig. 7에서  $\gamma_{rz}$ 의 차이값을 제시하였다. 회전속도가 5,000rpm에서 10,000rpm이 되면 변형률 차이값이 5~6배 정도 증가하여 층간박리의 위험성이 증가함을 알 수 있다.

#### 4. 디스크 표면의 하중에 의한 응력해석

디스크 표면의 하중을 간단히 표현하기 위해 Fig. 1에서와 같이 축에서 일정거리 떨어진 부분에서 축대칭의 하중으로 가해진다고 보고 이 성분을 표면에 대해 수직방향과 수평방향으로 나누었다. 이런 축대칭 하중 하에서의 디스크의 평형방정식은 식 (8)과 같으며 적합방정식은 식 (2)에서 우변이 0인 식과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Little<sup>(9)</sup>은 이런 축대칭 하중에 대하여 베셀 함수(Bessel function)의 시리즈(series)를 이용한 응력해석 방법을 제시하였다. 평형방정식과 적합방정식을 만족하는 해로서 응력성분을 적어보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sum_{n=1}^{\infty} \{ k_n^3 [ (A_n \cosh k_n z + B_n \sinh k_n z) \\ &\quad + (1 + 2\nu)(C_n \sinh k_n z + D_n \cosh k_n z) \\ &\quad + k_n z (C_n \cosh k_n z + D_n \sinh k_n z) ] J_0(k_n r) \\ &\quad - k_n^2 [ (A_n \cosh k_n z + B_n \sinh k_n z) \\ &\quad + (C_n \sinh k_n z + D_n \cosh k_n z) \\ &\quad + k_n z (C_n \cosh k_n z + D_n \sinh k_n z) ] J_1(k_n r) / r \} \\ \sigma_\theta &= \sum_{n=1}^{\infty} \{ 2\nu k_n^3 (C_n \sinh k_n z + D_n \cosh k_n z) J_0(k_n r) \\ &\quad + k_n^2 [ (A_n \cosh k_n z + B_n \sinh k_n z) \\ &\quad + (C_n \sinh k_n z + D_n \cosh k_n z) \\ &\quad + k_n z (C_n \cosh k_n z + D_n \sinh k_n z) ] J_1(k_n r) / r \} \\ \sigma_z &= \sum_{n=1}^{\infty} k_n^3 [ - (A_n \cosh k_n z + B_n \sinh k_n z) \\ &\quad + (1 - 2\nu)(C_n \sinh k_n z + D_n \cosh k_n z) \\ &\quad - k_n z (C_n \cosh k_n z + D_n \sinh k_n z) ] J_0(k_n r) \\ \tau_{rz} &= \sum_{n=1}^{\infty} k_n^3 [ (A_n \sinh k_n z + B_n \cosh k_n z) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ 2\nu(C_n \cosh k_n z + D_n \sinh k_n z) \\
 &+ k_n z(C_n \sinh k_n z + D_n \cosh k_n z)]J_1(k_n r)
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{\sigma}_r = \sum_{n=1}^{\infty} \{ &k_n^3 [(\bar{A}_n \cosh k_n z' + \bar{B}_n \sinh k_n z') \\
 &+ (1+2\nu)(\bar{C}_n \sinh k_n z' + \bar{D}_n \cosh k_n z') \\
 &+ k_n z'(\bar{C}_n \cosh k_n z' + \bar{D}_n \sinh k_n z')]J_0(k_n r) \\
 &- k_n^2 [(\bar{A}_n \cosh k_n z' + \bar{B}_n \sinh k_n z') \\
 &+ (\bar{C}_n \sinh k_n z' + \bar{D}_n \cosh k_n z') \\
 &+ k_n z'(\bar{C}_n \cosh k_n z' + \bar{D}_n \sinh k_n z')]J_1(k_n r)/r \}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{\sigma}_\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \{ &2\nu k_n^3 (\bar{C}_n \sinh k_n z' + \bar{D}_n \cosh k_n z')J_0(k_n r) \\
 &+ k_n^2 [(\bar{A}_n \cosh k_n z' + \bar{B}_n \sinh k_n z') \\
 &+ (\bar{C}_n \sinh k_n z' + \bar{D}_n \cosh k_n z') \\
 &+ k_n z'(\bar{C}_n \cosh k_n z' + \bar{D}_n \sinh k_n z')]J_1(k_n r)/r \}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{\sigma}_z = \sum_{n=1}^{\infty} k_n^3 [ &-(\bar{A}_n \cosh k_n z' + \bar{B}_n \sinh k_n z') \\
 &+ (1-2\nu)(\bar{C}_n \sinh k_n z' + \bar{D}_n \cosh k_n z') \\
 &- k_n z'(\bar{C}_n \cosh k_n z' + \bar{D}_n \sinh k_n z')]J_0(k_n r)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{\tau}_{rz} = \sum_{n=1}^{\infty} k_n^3 [ &(\bar{A}_n \sinh k_n z' + \bar{B}_n \cosh k_n z') \\
 &+ 2\nu(\bar{C}_n \cosh k_n z' + \bar{D}_n \sinh k_n z') \\
 &+ k_n z'(\bar{C}_n \sinh k_n z' + \bar{D}_n \cosh k_n z')]J_1(k_n r)
 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서  $A_n, B_n, C_n, D_n, \bar{A}_n, \bar{B}_n, \bar{C}_n, \bar{D}_n, k_n$ 은 경계 조건에 따라 결정되어야 할 계수들이고  $J_0, J_1$ 은 각각 0차, 1차 제1종 베셀 함수(Bessel functions of the first kind of order 0,1)이다.

이에 따른 변위성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u = \sum_{n=1}^{\infty} k_n^2 [ &-(A_n \cosh k_n z + B_n \sinh k_n z) \\
 &- (C_n \sinh k_n z + D_n \cosh k_n z) \\
 &- k_n z(C_n \cosh k_n z + D_n \sinh k_n z)] \frac{(1+\nu)}{E} J_1(k_n r)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w = \sum_{n=1}^{\infty} k_n^3 [ &-(A_n \sinh k_n z + B_n \cosh k_n z) \\
 &+ 2(1-2\nu)(C_n \cosh k_n z + D_n \sinh k_n z) \\
 &- k_n z(C_n \sinh k_n z + D_n \cosh k_n z)] \frac{(1+\nu)}{E} J_0(k_n r)
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\tilde{u} = \sum_{n=1}^{\infty} k_n^2 [ -(\bar{A}_n \cosh k_n z' + \bar{B}_n \sinh k_n z')$$

$$\begin{aligned}
 &-(\bar{C}_n \sinh k_n z' + \bar{D}_n \cosh k_n z') \\
 &- k_n z'(\bar{C}_n \cosh k_n z' + \bar{D}_n \sinh k_n z')] \frac{(1+\nu)}{E} J_1(k_n r)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{w} = \sum_{n=1}^{\infty} k_n^3 [ &-(\bar{A}_n \sinh k_n z' + \bar{B}_n \cosh k_n z') \\
 &+ 2(1-2\nu)(\bar{C}_n \cosh k_n z' + \bar{D}_n \sinh k_n z') \\
 &- k_n z'(\bar{C}_n \sinh k_n z' + \bar{D}_n \cosh k_n z')] \frac{(1+\nu)}{E} J_0(k_n r)
 \end{aligned} \tag{12}$$

이 문제의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 1) z=c+t &: \tilde{\tau}_{rz} = p, \quad \tilde{\sigma}_z = q \quad (r_1 \leq r \leq r_2) \\
 2) z=-c &: \tau_{rz} = 0, \quad \sigma_z = 0 \\
 3) z=c, r=R &: \tilde{\tau}_{rz} = 0 \\
 4) z=c &: \sigma_z = \tilde{\sigma}_z, \quad \tau_{rz} = \tilde{\tau}_{rz}, \quad u = \tilde{u}, \quad w = \tilde{w}
 \end{aligned} \tag{13}$$

식 (9)~(12)을 식 (13)에 대입하여 계수를 결정한다. 먼저  $k_n$ 을  $J_1(k_n R) = 0$ 이 되도록 선택하면  $r = R$ 에서  $\tau_{rz}, \tilde{\tau}_{rz}$ 가 0이 된다.

식 (13)의 첫 번째 경계조건을 사용하면 식 (14)와 (15)의 두 식을 얻는다.

$$\sigma_z^0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n J_0(k_n r) = q(r) \tag{14}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} F_n J_1(k_n r) = p(r) \tag{15}$$

where

$$\sigma_z^0 = \frac{2}{R^2} \int_0^R r q(r) dr \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 G_n = k_n^3 [ &-(\bar{A}_n \cosh \frac{k_n t}{2} + \bar{B}_n \sinh \frac{k_n t}{2}) \\
 &+ (1-2\nu)(\bar{C}_n \sinh \frac{k_n t}{2} + \bar{D}_n \cosh \frac{k_n t}{2}) \\
 &- \frac{k_n t}{2}(\bar{C}_n \cosh \frac{k_n t}{2} + \bar{D}_n \sinh \frac{k_n t}{2})]
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 F_n = k_n^3 [ &(\bar{A}_n \sinh \frac{k_n t}{2} + \bar{B}_n \cosh \frac{k_n t}{2}) \\
 &+ 2\nu(\bar{C}_n \cosh \frac{k_n t}{2} + \bar{D}_n \sinh \frac{k_n t}{2}) \\
 &+ \frac{k_n t}{2}(\bar{C}_n \sinh \frac{k_n t}{2} + \bar{D}_n \cosh \frac{k_n t}{2})]
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$q(r) = q, \quad \text{for } r_1 \leq r \leq r_2$$

$$0, \quad \text{elsewhere}$$

$$p(r) = p, \quad \text{for } r_1 \leq r \leq r_2$$

$$0, \quad \text{elsewhere}$$

식 (14), (15)에서  $G_n, F_n$ 은 다음과 같이 결정된다.

$$G_n = \frac{2a}{k_n R^2 J_0^2(k_n R)} [r_2 J_1(k_n r_2) - r_1 J_1(k_n r_1)] \quad (19)$$

$$F_n = \frac{2b}{k_n R^2 J_0^2(k_n R)} [r_1 J_0(k_n r_1) - r_2 J_0(k_n r_2) + \frac{1}{k_n} \int_{k_n r_1}^{k_n r_2} J_0(x) dx] \quad (20)$$

식 (19),(20)을 이용한 식 (17),(18)과 나머지 경계 조건들을 사용하여  $A_n, B_n, C_n, D_n, \widetilde{A}_n, \widetilde{B}_n, \widetilde{C}_n, \widetilde{D}_n$ 을 결정한다.

한편, 식 (14)의  $\sigma_z^0$ 가 필요하므로 이것은 다음과 같이 다항식(polynomial) 형태의 해를 사용하여 해결한다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= a_6(4z^3 - 9r^2z) + b_6[(16 + 88\nu)z^3 + (63 - 132\nu)r^2z] \\ &\quad - a_5(3r^2 - 4z^2) + b_5[(6 - 9\nu)r^2 + (1 + 18\nu)z^2] \\ &\quad + [a_4 + (14\nu - 1)b_4]z + (1 + \nu)a_3 + (1 + \nu)B_3^* \\ \sigma_\theta &= a_6(4z^3 - 3r^2z) + b_6[(16 + 88\nu)z^3 + (21 - 132\nu)r^2z] \\ &\quad + a_5(-r^2 + 4z^2) + b_5[(2 - 9\nu)r^2 + (1 + 18\nu)z^2] \\ &\quad + [a_4 + (14\nu - 1)b_4]z + (1 + \nu)a_3 + (1 + \nu)B_3^* \\ \sigma_z &= a_6(-8z^3 + 12r^2z) + b_6[(56 - 88\nu)z^3 + (132\nu - 216)r^2z] \\ &\quad + a_5(4r^2 - 8z^2) + b_5[(9\nu - 17)r^2 + (16 - 18\nu)z^2] \\ &\quad + [-2a_4 + (16 - 14\nu)b_4]z + (1 + \nu)b_3 \\ \tau_{rz} &= a_6(12rz^2 - 3r^3) + b_6[(54 - 33\nu)r^3 + (132\nu - 84)rz^2] \\ &\quad + [8a_5 - (16 - 18\nu)b_5]rz + [a_4 - (8 - 7\nu)b_4]r \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{\sigma}_r &= \widetilde{a}_6(4z^3 - 9r^2z') + \widetilde{b}_6[(16 + 88\nu)z'^3 + (63 - 132\nu)r^2z'] \\ &\quad - \widetilde{a}_5(3r^2 - 4z'^2) + \widetilde{b}_5[(6 - 9\nu)r'^2 + (1 + 18\nu)z'^2] \\ &\quad + [\widetilde{a}_4 + (14\nu - 1)\widetilde{b}_4]z' + (1 + \nu)\widetilde{a}_3 + (1 + \nu)\frac{E}{E} B_3^* \\ \widetilde{\sigma}_\theta &= \widetilde{a}_6(4z^3 - 3r^2z') + \widetilde{b}_6[(16 + 88\nu)z'^3 + (21 - 132\nu)r^2z'] \\ &\quad + \widetilde{a}_5(-r^2 + 4z'^2) + \widetilde{b}_5[(2 - 9\nu)r'^2 + (1 + 18\nu)z'^2] \\ &\quad + [\widetilde{a}_4 + (14\nu - 1)\widetilde{b}_4]z' + (1 + \nu)\widetilde{a}_3 + (1 + \nu)\frac{E}{E} B_3^* \\ \widetilde{\sigma}_z &= \widetilde{a}_6(-8z^3 + 12r^2z') + \widetilde{b}_6[(56 - 88\nu)z'^3 + (132\nu - 216)r^2z'] \\ &\quad + \widetilde{a}_5(4r^2 - 8z'^2) + \widetilde{b}_5[(9\nu - 17)r'^2 + (16 - 18\nu)z'^2] \\ &\quad + [-2\widetilde{a}_4 + (16 - 14\nu)\widetilde{b}_4]z' + (1 + \nu)\widetilde{b}_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \widetilde{\tau}_{rz} &= \widetilde{a}_6(12rz'^2 - 3r^3) + \widetilde{b}_6[(54 - 33\nu)r^3 + (132\nu - 84)rz'^2] \\ &\quad + [8\widetilde{a}_5 - (16 - 18\nu)\widetilde{b}_5]rz' + [\widetilde{a}_4 - (8 - 7\nu)\widetilde{b}_4]r \end{aligned} \quad (22)$$

여기서  $a_6, b_6, \widetilde{a}_6, \widetilde{b}_6, a_5, b_5, \widetilde{a}_5, \widetilde{b}_5, a_4, b_4, \widetilde{a}_4, \widetilde{b}_4, a_3, b_3, \widetilde{a}_3, \widetilde{b}_3, B_3^*$ 는 경계조건에 따라 결정되어야 할 계수들이다. 이에 따른 변위성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= \frac{(1 + \nu)}{E} [a_6(-3r^3z + 4rz^3) + b_6(21r^3z + 16rz^3) \\ &\quad + a_5(-r^3 + 4rz^2) + b_5(2r^3 + rz^2) \\ &\quad + (a_4 - b_4)rz + a_3(1 - \nu)r - b_3\nu r + (1 - \nu)B_3^*r] \\ w &= \frac{(1 + \nu)}{E} \left\{ a_6(-2z^4 + 6r^2z^2) + \frac{1}{4}[(87 - 66\nu)b_6 - 3a_6]r^4 \right. \\ &\quad + b_6[(14 - 44\nu)z^4 + (132\nu - 108)r^2z^2] \\ &\quad + b_5[(18\nu - 17)r^2z + (\frac{16}{3} - 12\nu)z^3] \\ &\quad + a_5(4r^2z - \frac{8}{3}z^3) + [-a_4 + (8 - 14\nu)b_4]z^2 \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}[a_4 + (14\nu - 15)b_4]r^2 - 2a_3\nu z + b_3z - 2\nu B_3^*z \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{u} &= \frac{(1 + \nu)}{E} [\widetilde{a}_6(-3r^3z' + 4rz'^3) + \widetilde{b}_6(21r^3z' + 16rz'^3) \\ &\quad + \widetilde{a}_5(-r^3 + 4rz'^2) + \widetilde{b}_5(2r^3 + rz'^2) \\ &\quad + (\widetilde{a}_4 - \widetilde{b}_4)rz' + \widetilde{a}_3(1 - \nu)r - \widetilde{b}_3\nu r + (1 - \nu)\frac{E}{E} B_3^*r] \\ \widetilde{w} &= \frac{(1 + \nu)}{E} \left\{ \widetilde{a}_6(-2z'^4 + 6r^2z'^2) \right. \\ &\quad + \frac{1}{4}[(87 - 66\nu)\widetilde{b}_6 - 3\widetilde{a}_6]r^4 \\ &\quad + \widetilde{b}_6[(14 - 44\nu)z'^4 + (132\nu - 108)r^2z'^2] \\ &\quad + \widetilde{b}_5[(18\nu - 17)r'^2z' + (\frac{16}{3} - 12\nu)z'^3] \\ &\quad + \widetilde{a}_5(4r^2z' - \frac{8}{3}z'^3) + [-\widetilde{a}_4 + (8 - 14\nu)\widetilde{b}_4]z'^2 \\ &\quad + \frac{1}{2}[\widetilde{a}_4 + (14\nu - 15)\widetilde{b}_4]r^2 - 2\widetilde{a}_3\nu z' + \widetilde{b}_3z' \\ &\quad \left. - 2\nu\frac{E}{E} B_3^*z' \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

이 문제의 경계조건은 다음과 같다

$$\begin{aligned} 1) z = c + t &: \widetilde{\tau}_{rz} = 0, \quad \widetilde{\sigma}_z = \sigma_z^0 \\ 2) z = -c &: \tau_{rz} = 0, \quad \sigma_z = 0 \\ 3) z = c, r = R &: \widetilde{\tau}_{rz} = 0 \\ 4) z = c &: \sigma_z = \widetilde{\sigma}_z, \quad \tau_{rz} = \widetilde{\tau}_{rz}, \quad u = \widetilde{u}, \quad w = \widetilde{w} \end{aligned} \quad (25)$$

식 (21)~(24)를 식 (25)에 대입하여 계수들을

정한다. 이렇게 얻은 해와 앞에서 얻은 베셀 함수 형태의 해를 중첩하면 최종적으로 디스크 표면의 하중에 의한 응력 및 변위를 얻게 된다.

여기서는 수직하중과 전단하중의 영향을 알아보기 위해 각각의 경우에 대해 따로 응력과 변위를 구하고 이로부터 오버코팅층과 디스크의 접합면에서의 변형률 차이를 계산하였다. 한편, Sinclair 등<sup>(7)</sup>은 디스크가 슬라이더와 접촉하면서 받는 최대 압력이 98MPa이라고 보고하였으므로

수치해석에서의  $q$ 를 이 값으로 하였다. 또한, Keremes 등<sup>(5)</sup>은 HDI 접촉문제에서 전단하중을 모델링하면서 수직하중에 0.2~0.6의 마찰계수를 곱한 값을 사용하였으므로 본 연구에서의  $p$ 에서도 같은 방법을 사용하였다.

먼저  $r_1$ 과  $r_2$ 사이에  $q$ 의 수직 하중이 작용하는 경우에 디스크의 탄성계수를 변화시키면서 변형률 차이를 계산하였다. 그 결과로서 Fig. 8에

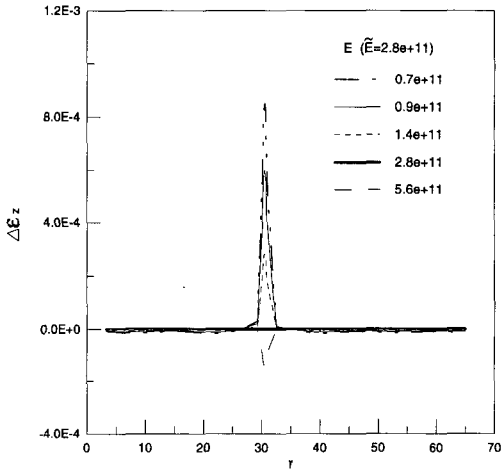


Fig. 8 The differences of normal strains at the interface between layers under partial normal loading  $q$  according to Young's modulus

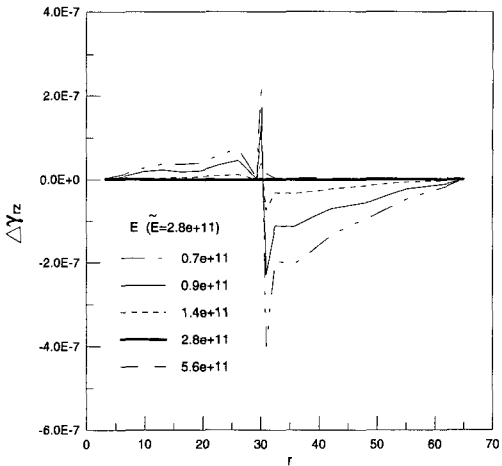


Fig. 9 The differences of shear strains at the interface between layers under partial normal loading  $q$  according to Young's modulus

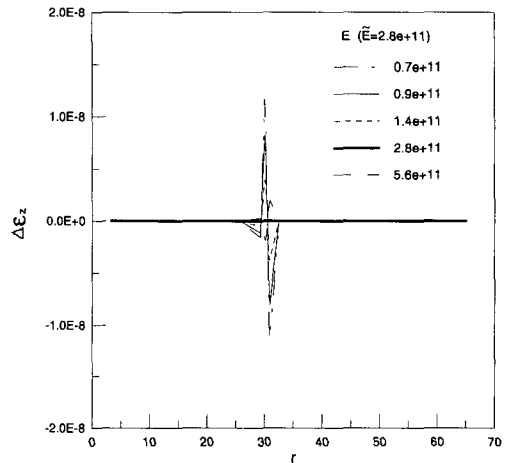


Fig. 10 The differences of normal strains at the interface between layers under partial shear loading  $p$  according to Young's modulus

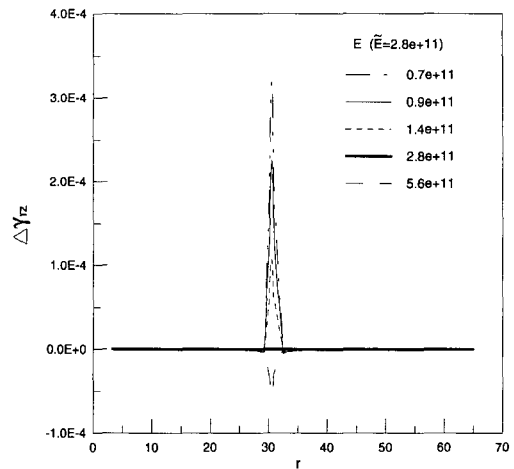


Fig. 11 The differences of shear strains at the interface between layers under partial shear loading  $p$  according to Young's modulus



서  $r$ 의 변화에 따른  $\varepsilon_z$ 의 차이값을, Fig. 9에서  $r$ 의 변화에 따른  $\gamma_{rz}$ 의 차이값을 제시하였다.

다음에  $r_1$ 과  $r_2$ 사이에서  $p$ 의 전단 하중이 작용하는 경우에 디스크의 탄성계수를 변화시키면서 변형률 차이를 계산하여 Fig. 10에서  $r$ 의 변화에 따른  $\varepsilon_z$ 의 차이값을, Fig. 11에서  $r$ 의 변화에 따른  $\gamma_{rz}$ 의 차이값을 제시하였다.

Fig. 8~11을 검토해보면 수직하중에 대해서는  $\varepsilon_z$ 의 차이값이  $\gamma_{rz}$ 의 차이값보다, 전단하중에 대해서는  $\gamma_{rz}$ 의 차이값이  $\varepsilon_z$ 의 차이값이 훨씬 크며 두 경우 모두 디스크와 오버코팅층의 탄성계수 차이가 적을수록 변형률 차이가 적어짐을 알 수 있다.

## 5. 결 론

오버코팅층을 포함한 회전하는 디스크가 헤드와 접촉하면서 발생하는 응력 및 변형률을 3차원적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원심력에 의한 변형률 차이와 접촉 하중에 의한 변형률 차이를 비교하여 볼 때 접촉 하중에 의한 변형률 차이가 훨씬 크므로 원심력은 오버코팅층과 디스크의 층간박리에 거의 영향이 없다고 볼 수 있다.

(2) 오버코팅층과 디스크의 탄성계수 차이가 커질수록 층간박리의 위험성이 높아진다.

(3) 디스크 표면의 임의 위치에서의 축대칭 수직 하중 및 전단하중이 가해지는 문제에 대한 이론적인 응력해석을 통해 프래싱 작업과 같은 유사한 문제에 대한 적용이 가능해졌다.

## 후 기

본 논문은 한국학술진흥재단 두뇌한국 21 사업과 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

## 참고문헌

(1) Bhushan, B., 1993, "Part Two : Mechanics and

Tribology of Magnetic Rigid Disk Drives," Advances in Information Storage System, Vol. 5, pp. 155~157.

(2) Ruiz, O. J., and Bogy, D. B., 1990, "A Numerical Simulation of the Head-Disk Assembly in Magnetic Hard Disk Files: Part I - Component Models," Journal of Tribology, Vol. 112, pp. 593~602.

(3) Bruyne, F. A., and Bogy, D. B., 1994, "Numerical Simulation of the Lubrication of the Head-Disk Interface Using a Non-Newtonian Fluid," Journal of Tribology, Vol. 116, pp. 541~548.

(4) Cha, E., and Bogy, D. B., 1995, "Numerical Simulations of Slider Interaction With Multiple Asperity Using Hertzian Contact Model," Journal of Tribology, Vol. 117, pp. 575~579.

(5) Keremes, J. J., and Sinclair, G. B., 1990, "A Model for the Mechanical Stresses Induced by Head-Disk Contact," International Journal of Solids and Structures, Vol. 26, No. 4, pp. 417~435.

(6) Leo, H. L., and Sinclair, G. B., 1991, "So How Hard Does a Head Hit a Disk?," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 6, pp. 5154~5156.

(7) Sinclair, G. B., Leo, H. L., and Keremes, J. J., 1992, "On the Stresses and Temperatures Induced When a Head Hits a Disk," Advances in Information Storage Systems, Vol. 4, pp. 209~218.

(8) Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., 1951, Theory of Elasticity, McGraw-Hill.

(9) Little, R. W., 1973, Elasticity, Prentice-Hall.

(10) Karpov, A. V., 1983, "Analysis of Isotropic Three-Layer Disc Stress State," Soviet Aeronautics, Vol. 26, No. 2, pp. 106~111.

(11) Bhushan, B., 1990, Tribology and mechanics of magnetic storage devices, Springer-Verlag : New York.