

## 광디스크 드라이브 내부 유동장 해석 A Numerical Study on the Flow Field in an Optical Disc Drive

최 명 렬\*, 성 평 용\*\*, 이 경 호\*\*  
Myung-Ryul Choi\*, Pyong Yong Seong\*\* and Kyoung Ho Lee\*\*

**Key Words :** Optical Disc Drive, Flow, Disc

### ABSTRACT

A flow field around a disc in an optical disc drive is investigated using numerical methods. The high-speed rotating disc induces a strong flow field around the disc, which causes the pressure distribution on the surfaces of the disc. The pressure difference between the upper and the lower surfaces causes the deformation of the disc. In the first part of this study, flow fields around a rotating disc and a stationary wall are investigated using a similarity solution method, in order to identify the effect of the distance between the disc and the wall on the pressure distribution on the surfaces of the disc. In the second part, flow field in a slim-type optical disc drive is studied using a commercial code in order to consider the effect of the vortices generated by the local geometry of the drive.

### 1. 서 론

CD-ROM 이나 DVD-ROM, CD-RW 등과 같은 정보 저장기기는 디스크를 회전시키며, 그 표면에 광학적 정보를 기록하거나 재생할 수 있는 구조로 되어 있다. 이러한 정보 저장기기의 기록 및 재생 속도를 향상시키기 위하여 디스크의 회전 속도를 증가시키고 있다. 이때 디스크로부터 유기된 고속의 유체 유동은 드라이브 내부 간격이나 형상에 따라, 디스크 상면과 하면의 압력의 차이를 유발하게 된다. 하드디스크와 달리 유연한

재질로 만들어진 CD (Compact Disc)의 경우, 디스크의 상면과 하면의 압력 차이는 디스크의 진동이나 변형을 유발하고, 이로 인하여 디스크 표면에 기록된 데이터 재생 불량을 발생시키기도 한다.

이러한 현상에 대한 원인을 규명하기 위하여 압력과 관련된 공기 역학적인 현상에 대한 이해가 필요하다. 지금까지 단일 디스크 주위의 유동장<sup>(1,2,3)</sup> 및 벽 근처에서 회전하는 디스크 주위의 유동장<sup>(3,4,5)</sup>에 대한 많은 연구가 있었다. 그러나 이러한 연구는 내부 유동장에 초점을 두고 있는 반면, 디스크 면압 및 이로 인한 변형은 다소 관심에서 벗어나 있다. 특히 디스크 변형이 실제로 문제가 되는 두께가 얇은 노트북용 슬림형 드라이브의 경우, 활용할 만한 공기 역학적 해석 사례를 찾아 보기 힘들다.

\* 삼성전자 OMS사업부 개발팀

E-mail : mr.choi@samsung.com

Tel: +82-31-200-9199, Fax: +82-31-200-4087

\*\* 삼성전자 OMS사업부 개발팀

따라서 본 연구에서는 슬림형 드라이브에서 디스크 면압에 영향을 주는 유동장을 고찰하고자 한다. 우선 단순화된 형태인 정지된 벽 근처에서 회전하는 디스크 유동장을 해석하고, 이로부터 벽이 디스크의 면압 및 변형에 주는 영향을 살펴본다. 다음으로 실제 슬림형 드라이브에 대한 유동장 해석을 수행하여, 드라이브 내부의 국소 내부 형상으로 인하여 생성된 와동이 디스크 면압에 주는 부차적인 영향을 고찰한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 디스크와 벽 주위의 유동장 및 변형량 해석

Fig. 1과 같은 상부에 위치한 정지된 벽면과 하부에 위치한 회전하는 디스크 사이에서의 속도 분포 및 압력장을 구하였다. 이때 디스크의 회전속도는  $\Omega$ 이며, 좌표계  $(r, \theta, z)$  와 이 방향 속도 성분  $(u, v, w)$ 은 그림에서 나타낸 바와 같다. 정상 상태, 비압축성, 축대칭 좌표계에서 ( $\partial/\partial t = \partial/\partial \theta = 0$ ,  $\rho = \nu = \text{constant}$ ) 연속방정식 및 운동량 방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right) \quad (2)$$

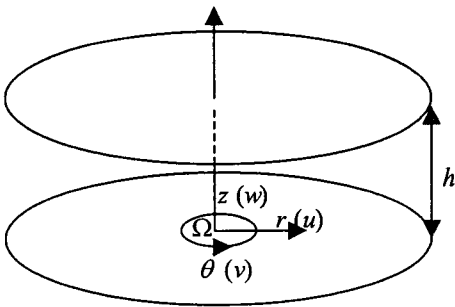


Fig. 1 좌표계 및 속도 성분

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{uv}{r} = \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \frac{v}{r^2} \right) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

중심 즉,  $z=0$ 에서 회전하는 디스크가 있고,  $z=h$ 에 정지된 벽면이 존재하는 경우, 경계조건은 다음과 같다.

$$u=0, v=r\Omega, w=0 \quad \text{at } z=0 \quad (5)$$

$$u=0, v=0, w=0 \quad \text{at } z=h \quad (6)$$

이때  $w$ 가  $z$ 만의 함수라고 가정한다면 ( $w=w(z)$ ), 다음과 같은 상사변수를 구할 수 있다.

$$\zeta = z \sqrt{\frac{\Omega}{\nu}} \quad (7)$$

위와 같은 상사 변수에 대하여 상미분방정식을 구하고 경계조건에 만족하도록 4차 Runge-Kutta 법을 이용하여 속도  $(u, v, w)$ 와 압력  $(p)$ 에 대하여 상사해를 구하였다. 이 때 원판의 크기가 무한하여 디스크 모서리의 영향이 없다고 가정하였다.

한편, 위에서 구한 디스크의 면압을 기초로 디스크 변형을 계산하였다. Fig. 2에서는, 실제 디스크 형상을 고려하여,  $\Omega$ 의 속도로 회전하는 내경  $a$ , 외경  $b$ , 두께가  $d$ 인 디스크를 도식적으로 나타내었다. 이때, 정상 상태, 축대칭 운동에서 ( $\partial/\partial t = \partial/\partial \theta = 0$ ) 지배 방정식은 다음과 같다.

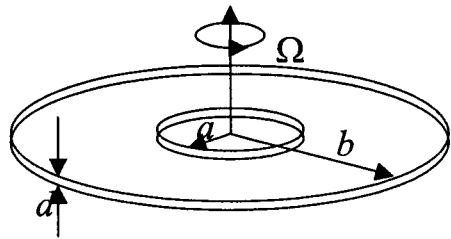


Fig. 2 내경 a, 외경 b, 두께 d인 디스크 도식

$$\frac{D}{d} \nabla^4 \delta - \frac{1}{r} \left[ r \sigma_r \frac{\partial \delta}{\partial r} \right] = \frac{p}{d} \quad (8)$$

$$\sigma_r = \frac{\mu_2}{r^2} (b^2 - r^2) \left( r^2 + \frac{\mu_1}{b^2 \mu_2} \right) \quad (9)$$

$$\mu_1 = \frac{(1-\nu) \bar{m} \Omega^2 a^2 b^2}{8} \left[ \frac{(3+\nu)b^2 - (1+\nu)a^2}{(1+\nu)b^2 - (1-\nu)a^2} \right] \quad (10)$$

$$\mu_2 = \frac{(3+\nu) \bar{m} \Omega^2}{8} \quad (11)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (12)$$

계산에 사용된 물성치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E &= 3 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \\ \nu &= 0.35 \\ \bar{m} &= 1.19 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \\ d &= 0.0012 \text{ m} \\ a &= 0.0075 \text{ m} \\ b &= 0.06 \text{ m} \end{aligned} \quad (13)$$

위의 상미분 방정식을 4차 Runge-Kutta법으로  $r=a$  에서  $r=b$  까지 적분하여 경계조건을 만족시키는 해를 구하였다. 이때 경계 조건은  $r=a$ 에서 단단히 고정되어 있고  $r=b$ 에서 자유 조건일 때 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\delta = 0, \quad \frac{\partial \delta}{\partial r} = 0 \quad \text{at } r = a \quad (14)$$

$$M_r = -D \left[ \frac{\partial^2 \delta}{\partial r^2} + \nu \frac{1}{r} \frac{\partial \delta}{\partial r} \right] = 0,$$

$$V_r = -D \left[ \frac{\partial}{\partial r} (\nabla^2 \delta) \right] = 0 \quad \text{at } r = b \quad (15)$$

식 (8)에서  $p$ 는 디스크 표면 압력으로서 앞에서 구한 상사해를 사용하였다.

## 2.2 드라이브 내부 유동장 해석

사용 코드인 PowerFlow를 이용하여 노트북 컴퓨터에 사용되는 슬림형 광디스크 드라이브의 내부 유동장을 해석하였다. 이때 회로 기관이나 기구적인 세부 형상을 단순화시킨 후, 유동장

계산을 위한 격자를 생성하였다. 도어 근처에서 외부로 누설되는 유동을 고려하기 위하여, 누설 부위 간격과 드라이브를 둘러싸는 외부도 계산 영역에 포함시켰다.

작동 조건은, 가장 문제가 될 수 있는 경우를 설정하여, 최고 회전 속도 근처인 5000rpm으로 하였으며, 데이터를 읽고 쓰는 픽업은 가장 외주에 있는 경우로 하였다.

유동장에 대한 초기치를 가정한 후, 시간에 따라 변화하는 비정상 난류 계산을 수행하였다. 내부 유동장의 변화를 시간에 따라 관찰하였으며, 초기치에 대한 영향이 없다고 판단된 시간 이후의 데이터를 결과로 분석하였다.

## 3. 연구 결과

### 3.1 디스크와 벽 주위의 유동장 및 변형량 해석

디스크 면에서의 양력 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_L = \frac{2F}{0.5 \rho U^2 A} = \frac{4 \int_a^b 2\pi r p dr}{\pi \rho \Omega^2 R^4} = \lambda^2 \quad (16)$$

이때  $A$ 와  $R$ 은 디스크의 면적과 외경을,  $U$ 는 디스크 외경에서 디스크의 원주 방향 속도를 의미한다.

Fig.3에서는 양력 계수  $C_L$  을  $\zeta_h$  에 대하여 나타내었다. 여기서

$$\zeta_h = h \sqrt{\frac{\Omega}{\nu}} \quad (17)$$

이므로, 회전수가 증가하거나, 디스크와 벽과의 거리가 멀어질수록  $\zeta_h$  는 증가한다.

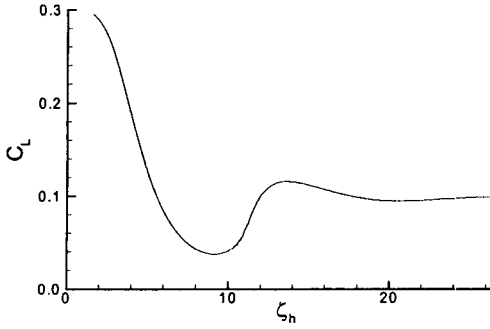


Fig. 3 양력 계수

Fig. 3의 양력 계수를 보면,  $\zeta_h \approx 0$  에서  $\zeta_h \approx 9$  까지 감소하며,  $\zeta_h \approx 14$  까지 증가하며, 그후 일정한 값으로 수렴한다. 이러한 경향은 Mellor, Chappel & Stokes (1967)<sup>(4)</sup>의 결과와 일치하며, 특히 극한값인  $\zeta_h \rightarrow 0$  에서  $C_L = 0.3$ ,  $\zeta_h \rightarrow \infty$  에서  $C_L = 0.1$ 도 같은 경향을 보인다. 한편 등가 회전수  $\Omega_{eq}$ 를 도입하여 디스크 표면의 압력을 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{p}{\rho} = \frac{1}{2} \lambda^2 \Omega^2 r^2 \equiv \frac{1}{2} \Omega_{eq}^2 r^2 \quad (18)$$

이때 양력 계수는 등가 회전수와 디스크 회전수 비의 제곱  $C_L = \lambda^2 = (\Omega_{eq} / \Omega)^2$ 으로 해석될 수 있으며, 등가의 유체 회전 속도는  $\zeta_h$ 에 따라 디스크의 회전 속도의 0.2~0.55배임을 알 수 있다.

위의 계산 결과를 기초로 디스크의 변형량을 계산하였다. 두개의 수평 벽면 사이에 반경 60mm의 디스크가 5000rpm으로 회전하고 있고, 디스크 하면에서 아래 벽까지의 거리가 1.5mm일 때, 디스크의 상면에서 윗 벽까지의 거리를 1.5mm에서

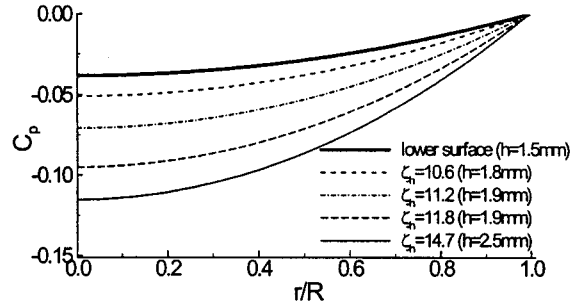


Fig. 4 디스크 면압

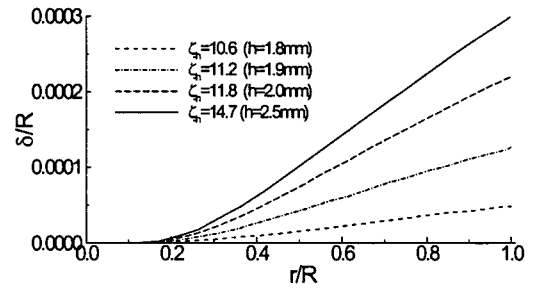


Fig. 5 디스크 변형량

2.5mm까지 변화시키며 계산하였다. 이를 무차원화 했을 때,  $8.86 \leq \zeta_h \leq 14.8$ 에 해당한다.

Fig. 4에서는 디스크 표면에서 압력 계수를 디스크 표면과 벽면과의 거리 ( $h$ )에 대하여 나타내었다. 이때 압력 계수는 다음과 같다.

$$C_p = \frac{2(p - p_\infty)}{\rho U^2} \quad (19)$$

여기서  $p$ 는 디스크 면압,  $p_\infty$ 는 주변 대기압,  $U$ 는 디스크 외경의 원주 속도이다. 검토된  $h$  범위에서는 디스크 하면의 압력 ( $h=1.5\text{mm}$ )이 가장 크며, 디스크 상면의 압력은  $h$ 가 증가함에 따라 감소하고 있다. 따라서 상하면의 압력의 차이가 디스크에 작용하는 순면압으로서 디스크를 부상시키는 방향으로 작용한다.

본 연구에서는 디스크 외주에서 디스크 상면과 하면의 압력이 같다고 가정하였다. 이는 디스크 상면에서 발달된 유동과 디스크 하면에서 발달된 유동이 디스크 외주에서 이차 유동 없이 합류되는 상황을 설정하였기 때문이다. 실제로 상면과 하면의 유동 및 압력의 차이가 심한 경우, 외주 근처에서 이차 유동이 형성되며, 디스크 상면과 하면의 압력 곡선을 위아래로 변화시켜, 결과적으로 디스크 변형을 줄여주는 방향으로 작용할 것으로 판단된다.

위에서 계산한 압력 분포로부터 디스크 변형량 구하여, Fig. 5에 나타내었다. 내주쪽에서 상하면의 압력차이가 많이 발생하지만 디스크가 장착된 경계조건에 의하여 부상량은 크지 않다. 외주쪽에서는 압력차이가 크지 않지만 누적된 압력차이에 의하여 부상량이 가장 크다. 가장 심한 경우를 고려할 때 디스크의 부상량은 디스크 반경을 기준으로 약 0.03%, 각도를 기준으로 약 0.02도임을 알 수 있다. 본 연구에서는 디스크 변형량만을 고려하였다. 그러나 디스크에 작용하는 힘은 디스크가 안착된 틸테이블 자체를 올리는 힘이나 디스크 상면의 벽을 당기는 힘으로도 작용할 수도 있으며, 실제 응용을 위해서는 이에 대한 검토도 필요하다.

### 3.2 드라이브 내부 유동장 해석

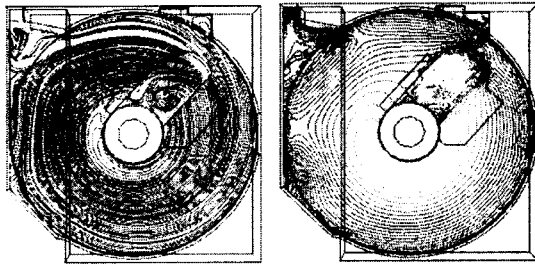
노트북 컴퓨터에 사용되는 슬림형 드라이브에 대한 유동장 및 압력장을 해석하였다. 지름 12cm, 두께 1.2mm의 디스크는 장애물이 없는 상벽(커버)과 광픽업이 움직이는 구멍(윈도우)이 있는 하벽(트레이) 사이에서 시계 방향으로 회전하고 있다. Fig. 6에서는 디스크 하부의 두 단면(하벽 근처와 디스크 근처)과 상부의 두 단면(디스크 근처와 상벽 근처)에서 유동장 및 압력장을 나타내었다. 하벽 근처 (a)에서는 전반적으로 유선이 디스크를 따라 회전하고 있으나, 윈도우 내부와 전면 모서리의 손잡이(테이퍼진 도어) 근처에 와류가 형성되고 있음을 알 수 있다. 또한 등압선은 대체로 디스크 회전축을 중심으로 동심원을 이루

고 있으나, 윈도우 근처에서는 일정한 압력이 유지되고 있으며, 상단부의 테이퍼진 손잡이 근처에 높은 압력장이 형성되고 있다. 이에 대한 자세한 고찰은 Fig. 8과 9에서 다루기로 한다. 디스크와 가까운 곳 (b)에서 유체 유동장은 디스크에 의한 전단 응력이 강하게 작용하여, 원형에 가까운 유선을 형성하고 있다. 그러나 하벽 근처 (a)와는 달리, 유선은 윈도우 및 도어부 형상에 많은 영향을 받지 않는 반면, 압력은 여전히 하벽 근처와 유사하게 나타나고 있다. 디스크 상면 근처 (c)에서 유선은 디스크의 영향을 많이 받기 때문에 디스크 하면 근처 (b)와 유사하게 원형으로 나타나고 있으며, 상면부 장애물이 없기 때문에 압력장도 비교적 원형으로 나타나고 있다. 상벽 근처 (d)에서 유선은 비교적 원형에 가까우나 디스크 근처 (c)에 비하여 곡선이 왜곡되어 있으며, 압력은 디스크 상면 근처 (c)와 유사하다.

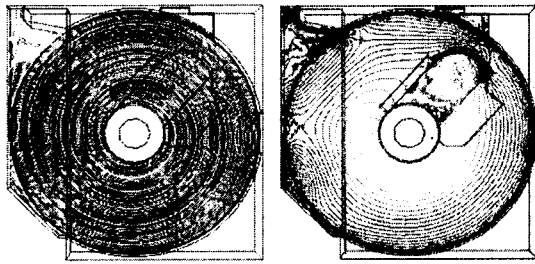
Fig. 7에서는 상면과 하면의 디스크 면압을 나타내었다. 상면에서는 압력이 비교적 동심원에 가까운 반면, 하면에서는 압력이 복잡하게 나타난다 - 윈도우의 영향을 받아 압력이 비교적 일정 영역과, 내주쪽에서 나선 모양의 등압선이 관찰된다. 또한 디스크가 다각형 구조의 내부에서 회전하고 있기 때문에 좌측에 폐곡선 형태의 등압선이 나타나고 있다. 이 지역을 제외하고는 디스크 끝단에서 이차 유동은 심각하게 나타나지 않는 것으로 판단된다.

디스크의 변형은 디스크 면압의 차이에 의해서 발생한다. Fig. 6, 7을 근거로 상면과 하면의 압력차가 심하게 나타나는 위치는 윈도우 부근과 테이퍼진 도어부근으로 판단되며, 이 위치에서 유동 현상을 Fig. 8, 9에서 고찰하였다. Fig. 8은 윈도우 부근의 유선을 나타낸다. 그림의 좌측에서 우측으로 흐르는 유동은 외주 근처에서 윈도우 안으로 유입하여, 내주쪽으로 움직인다. 윈도우 내부에서 시계방향으로 회전하는 와동이 형성되며, 그 일부가 윈도우 밖으로 유출되어, 그림의 우측으로 나간다. 앞에서 고찰한 바와 같이 윈도우 주위의 압

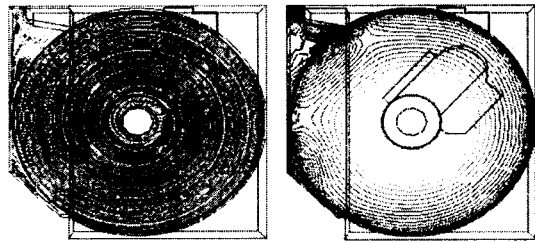
력장이 비교적 균일한 분포로 나타나는 이유는 국부적으로 생성된 와동의 영향을 강하게 받기 때문이다. 즉 디스크 회전축을 중심으로 회전하는 유동의 압력 분포는 주류(main stream)의 곡률에 의하여 영향을 받게 되는데, 국소적으로 형성된 와동이 유선을 변경시켜, 독자적으로 압력장을 형성하고 있음을 알 수 있다.



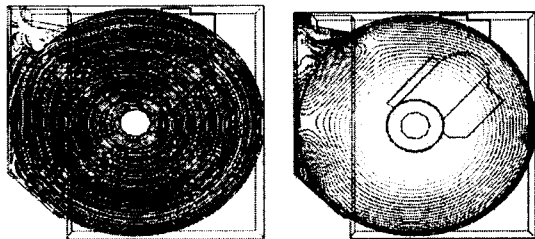
(a) 하벽 근처



(b) 디스크 하면 근처



(c) 디스크 상면 근처



(d) 상벽 근처

Fig. 6 유선 (좌측) 및 등압선 (우측)

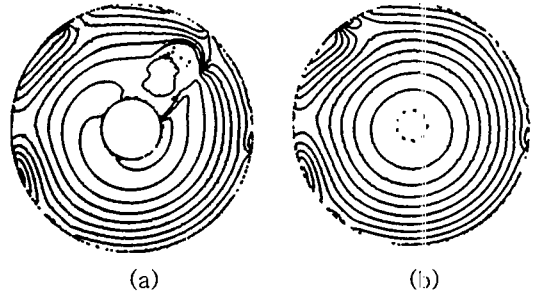


Fig. 7 디스크 면압; (a) 상면, (b) 하면

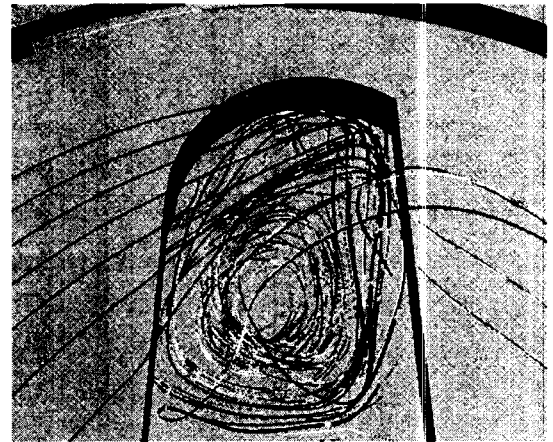


Fig. 8 윈도우 부근의 유선

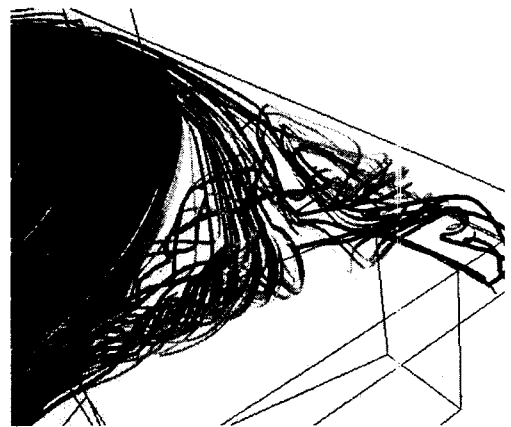


Fig. 9 도어 부분의 유선

Fig. 9에서는 도어 부근의 유선을 나타내었다. 디스크 외주 근처에서 디스크 상면과 하면에서 이탈

된 유동은 넓어진 공간에서 합쳐지며 이 위치에서 와동이 형성된다. 그후 테이퍼진 도어 근처에서 재유입 될 때, 이 부근에서 높은 압력이 형성되며, 유동은 디스크 상면과 하면으로 나뉘어 유입된다. 이때 디스크 근처에서 발생된 와동은 디스크를 들어 올리는 방향으로 회전하고, 이로 인하여 디스크 하면에 높은 압력이 유발된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 디스크 변형과 관련된 디스크 면압을 공기 역학적인 관점에서 수치해석하였다. 우선 상사해 해석을 이용하여, 정지된 벽면이 회전하는 디스크의 면압에 주는 영향을 고찰하였다. 주어진 회전속도에서 디스크와 벽면과의 거리에 따라 디스크가 받는 양력을 계산하였으며, 이로부터 디스크 면압을 구할 수 있었다. 실제 응용 예로 디스크가 두개의 벽 사이에서 회전할 때, 벽과의 거리에 따라 디스크의 상하면의 면압을 계산하고, 이로부터 디스크가 변형되는 양을 계산하였다. 여기서 벽과 디스크 사이의 거리가 디스크 변형에 작용하는 주요 인자 중의 하나임을 알 수 있었다. 다음으로 상용 코드를 이용하여, 노트북 컴퓨터용 슬림형 광디스크 드라이브 내부의 유동장을 계산하였다. 드라이브 내부의 국소 형상에 의해 발생하는 유동 특성을 살펴보고, 이로 인한 디스크 면압 특성을 고찰하였다. 특히 광 픽업이 움직이는 원도우와 테이퍼진 손잡이 부근에서 발생된 와동이 디스크 상하면의 압력차이를 유발하는 요인임을 알 수 있었다.

#### 후 기

디스크 변형과 관련된 조언을 준 삼성전자 윤기원 박사와 PowerFlow 후처리에 도움을 준 Exa의 Dr. Norbert Grün, 서문기술의 김명학 부장께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Kobayashi, R., Kohama, Y. & Takamadate, Ch., 1980, Spiral vortices in boundary layer transition regime on a rotating disk, *Acta Mechanica*, Vol. 35, pp.71~82.
- (2) Jarre, S., Le Gal, P. & Chauve, M. P., 1996, Experimental study of rotating disk instability. I. Natural flow, *Phys. Fluids*, Vol. 8 (2), pp.496~508.
- (3) Schlichting, H., 1979, *Boundary layer theory*, Seventh edition, McGraw-Hill.
- (4) Mellor, G. L., Chapple, P. J. & Stokes, K., 1968, On the flow between a rotating and a stationary disk, *J. Fluid Mech.*, Vol. 31, part 1, pp.95~112.
- (5) Vasiliev, V. I., 2000, On the prediction of axisymmetric rotating flows by a one-equation turbulence model, *Transactions of the ASME*, Vol. 122, pp.264~289.