

슈라우드로 차폐되어진 단일회전디스크 표면의 열전달 특성

류구영* · 원정호* · 조형희**

(1999년 3월 12일 접수)

Heat Transfer Characteristics on a Single Rotating Disk with a Shrouded Cover

Goo Young Ryu, Chung Ho Won and Hyung Hee Cho

Key Words: Rotating Flow(회전 유동), Rotating Disk(회전 원판), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), LDA Measurement(광학속도측정), HDD(하드디스크 드라이버)

Abstract

The present study investigates the local heat/mass transfer characteristics on a rotating disk which is the top disk covered with a shroud in HDD. The naphthalene sublimation technique is employed to determine the local heat/mass transfer coefficients on the rotating disk. Flow field measurements using Laser Doppler Anemometry (LDA) and numerical calculations are performed to analyze the flow patterns induced by the disk rotation. HDD has been developed for compactness and speedy data access, thus the rotating velocity of the disk is increased and the height of a hub is decreased. The experiments are conducted for the various hub heights of 5, 10 and 15 mm, for the rotating Reynolds numbers of 5.5×10^4 to 1.1×10^5 and for the effects of the presence of a read/write head arm. The results show that the heat transfer on the rotating disk is enhanced considerably for the decrease of the hub height and for the increase of the rotating Reynolds number. The head arm inserted in the cavity decreases the heat transfer despite the enhancement of tangential RMS velocity because of the deficit of the momentum in the flow field.

기호설명

<p>a : 슈라우드와 디스크의 반경방향 간격</p> <p>D_{naph} : 공기 중 나프탈렌 확산계수</p> <p>H : 덮개와 디스크 사이 축방향 간격</p> <p>h_m : 물질전달 계수</p> <p>Nu : 국소 Nusselt 수</p> <p>Nu_{∞} : 자유 회전 디스크 평균 Nusselt 수</p>	<p>r : 반경방향 좌표</p> <p>R_1 : 허브 반경</p> <p>R_2 : 디스크 반경</p> <p>Re_{Ω} : 회전 Reynolds 수, $R_2^2 \omega / \nu$</p> <p>Sc : Schmidt 수, ν / D_{naph}</p> <p>Sh : 국소 Sherwood 수, $h_m R_2 / D_{naph}$</p> <p>Sh_{∞} : 자유 회전 디스크 평균 Sherwood 수</p> <p>u_{θ} : 원주방향 속도 성분</p> <p>u_{rms} : 원주방향 섭동 속도 성분</p> <p>z : 축방향 좌표</p> <p>η : 무차원 축방향 좌표, $z / \sqrt{\nu / \omega}$</p> <p>ν : 동점성계수</p> <p>ω : 각속도</p>
---	---

* 연세대학교 대학원

** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2828 FAX : (02)321-2159

1. 서론

회전디스크를 포함하는 장치내부에는 회전하는 불체와 점성 유체사이에 3차원 와류형태의 복잡한 유동 구조를 가지게 된다. 이러한 내부의 복잡한 유동장 해석 및 원판 표면의 열전달 해석은 장치내부의 유동 소음 및 진동, 강제 대류에 의한 내부 온도 분포와 점성에 의한 손실, 전달 동력 등의 예측을 통한 최적 설계를 위한 필수 요소이다. 특히, 컴퓨터 하드디스크(HDD, Hard Disk Drive) 유로(cavity) 내부에서의 유동조건은 헤드의 안정 작동에 심각한 영향을 미치며, 고속 회전에 따른 스피들 베어링의 발열(frictional heat generation) 및 디스크와 헤드 사이에서의 공력가열에 의한 열발생(aerodynamic heat generation)과 구동 모터에서의 열발생은 회전원판의 불균일한 온도분포를 야기한다. 발열에 따른 디스크 자체 온도상승 및 불균일한 온도 분포에 의한 원판의 불균일 열팽창은 수십 나노미터의 거리로 이격되어 디스크와 정보를 주고 받는 헤드암(head arm)의 부정확한 위치제어를 야기하여 정보 전송오류의 원인이 된다. 따라서 HDD에서의 정확한 열전달 해석을 통하여 디스크 내 적정온도 유지 및 균일한 온도 분포를 얻기 위한 냉각방법이 강구되어야 한다.

HDD 내부는 여러장의 자기(磁氣) 회전디스크와 헤드암(read/write head arm)으로 구성되어있고, 이러한 HDD 내부 회전디스크 표면에서의 열전달 및 내부 유로의 유동해석은 최상단의 회전디스크를 단일회전디스크로, 중간단의 회전디스크를 동시회전디스크로의 간단한 모사(modeling)를 통하여 수행될 수 있다. 본 실험은 HDD 최상단 디스크의 모사인 슈라우드와 덮개로 밀폐되어진 단일회전디스크에 의한 내부유동과 그 표면의 열전달 특성 고찰이 목적이다.

최상민 등⁽¹⁾은 동시회전디스크 사이에서의 유동현상에 대하여 유동가시화와 영상처리에 의한 정량화기법을 이용하여 과도기상상태와 정상상태의 유동특성을 연구하였으며, 헤드암이 삽입된 경우 암의 삽입깊이에 따른 유동의 교란 정도 및 후류 영역의 난류교란의 재 층류화를 확인하였다. Abrahamson 등⁽²⁾은 동시회전디스크 내부 유로에서 물을 작동유체로 하여 염료 주입에 의한 유동가시화와 함께 PIV(Particle Image Velocimetry)를

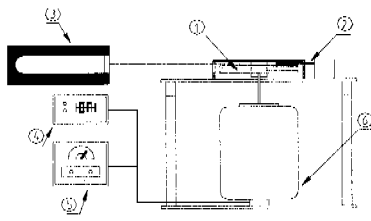
이용하여 다양한 허브 냉각홀과 냉각류의 유입 유량에 따른 내부 유동구조의 변화를 연구하였으며, Humphrey 등⁽³⁾은 LDA(Laser Doppler Anemometry)를 이용하여 동시회전디스크에 헤드암이 있는 경우 다양한 회전 Reynolds 수에 대하여 내부 유동의 변화를 측정하고, 스펙트럼 분석을 통하여 그 외부 와류유동 구조의 주기성을 연구하였다. Chyu와 Bizzak^(4,5)은 HDD내의 회전디스크 표면의 열전달 특성의 파악을 위하여 나프탈렌을 이용한 물질전달 실험을 하였는데, 허브(hub)가 없는 단일회전디스크에 대하여 반경방향(r)으로 회전디스크와 슈라우드와의 간격과 축방향(z)으로 회전디스크와 덮개와의 간격을 각각 변화시키면서 표면의 열전달 변화를 고찰하였으며, 덮개를 통한 축방향의 유입유동이 있을 경우 최상단의 단일회전디스크와 중간단의 동시회전디스크에서의 열전달의 변화를 연구하기도 하였다.

본 연구는 자유회전디스크 기준 임계 회전 Reynolds 수($r^2/R_2^2 \times Re_D$) 2.0×10^5 이하의 완전 층류 유동에서 HDD 내 최상단 회전디스크인 덮개와 슈라우드로 차폐되어진 단일 회전디스크 표면의 열전달 특성해석과 기본 유동구조의 고찰을 위한 것이다. 이를 위하여 (1) 허브의 고정형태, (2) 덮개와 회전디스크와의 축방향(z) 간격변화, (3) 디스크의 회전 Reynolds 수의 변화, (4) 유로 내 헤드암이 삽입되었을 경우에 대하여 물질전달의 실험방법인 나프탈렌 승화법을 통한 디스크 표면의 열전달 특성해석, LDA와 상용 열·유동 해석 프로그램인 FLUENT를 이용한 내부유로(cavity)에서의 유동특성의 파악을 병행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

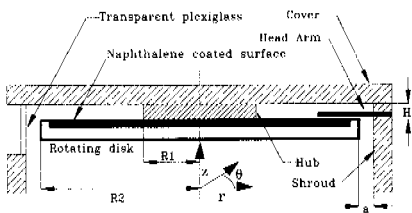
2.1 실험장치

덮개를 포함한 회전디스크의 형상은 현재 상용 HDD (3.5"-5400 rpm, $Re_D = 8.5 \times 10^4$)를 기준으로 수력학적 상사를 통하여, 회전수 1700 rpm에 대하여 $R_2 = 85$ mm, $R_1 = 30$ mm, $a = 8$ mm로 결정하였다. 단일회전디스크 내부 유로에서 간격 H 의 변화는 반경-축(r - z)방향 단면에서의 이차유동의 형태와 강도를 변화시키고, 이것은 회전디스크 표면의 열전달 분포에 상당한 영향을 미치게 된다. 본 실험에서 H 를 각각 5 mm ($H/R_2 = 0.0588$), 10 mm ($H/R_2 = 0.1176$), 15 mm ($H/R_2 =$



① Rotating disk ② Head arm ③ Laser probe ④ Tachometer ⑤ RPM controller ⑥ DC motor

(a) Schematic diagram of the experimental apparatus



(b) Configuration and coordinate of the test disk

Fig. 1 Experimental apparatus

0.1765)로 덮개와 회전디스크사이의 간격을 변화시키면서 회전디스크 표면의 열전달 특성을 연구하였다.

디스크의 회전수는 상용 HDD 회전 Reynolds 수 ($Re_D = 8.5 \times 10^4$)일 때를 기준으로 하여 실험 디스크를 1700 rpm과 1100 rpm ($Re_D = 5.5 \times 10^4$), 2200 rpm ($Re_D = 1.1 \times 10^5$)으로 변화시켰으며, 이것은 실제 3.5" 상용 HDD의 경우 각각 5400, 3600, 7200 rpm의 회전수에 해당된다. 또한 단면 형상 15 mm×3 mm의 장방형의 헤드암은 축방향(z)으로 회전디스크와 1 mm 이격되어 각각 $r = 32, 54, 64$ mm까지 유로 내부로 슈라우드의 슬릿을 통하여 삽입된다.

Fig. 1(a)는 열/물질전달 실험과 LDA를 통한 유동장 측정을 위한 전체 실험장치의 개략도이고 Fig. 1(b)는 덮개를 포함한 단일 회전디스크의 단면도를 각각 나타낸다.

2.2 물질전달 실험

열전달 실험을 대신하여 본 연구에서는 나프탈렌($C_{10}H_8$) 승화법을 이용한 물질전달 실험을 수행하였다. 고체 나프탈렌을 녹는점(80.2°C) 이상 가열하여 완전히 액화시킨 후, 주형틀을 이용하여

알루미늄 회전디스크 표면에 5 mm두께로 균일한 표면을 얻도록 주조하였다. 열/물질전달의 상사성에 의하여 나프탈렌 표면의 증기밀도가 실험 중 일정하므로 물질전달 실험의 경계조건은 이에 상당하는 열전달 실험의 등온조건에 해당된다.

나프탈렌이 코팅된 회전판을 회전수 조절이 가능한 직류 모터에 연결하여 회전시키고, 실험 전·후에 시험시편의 표면고도를 측정하여 그 차로부터 나프탈렌 표면승화량을 얻고, 실험시편의 설치 및 분리시간 동안의 자연대류로 인한 승화량을 보정하여 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수를 구하였다. 나프탈렌 표면고도의 측정은 선형가변차동변환기(LVDT; Linear Variable Differential Transformer)를 통하여 이루어지며, 정밀도는 $0.025 \mu m$, 측정용 팁의 직경은 1.588 mm로 측정 오차는 1%이내이다. 나프탈렌 표면의 증기밀도는 온도변화에 매우 민감하여 국소 Sherwood 수의 정량적 신뢰성을 위하여 나프탈렌 표면의 정확한 온도측정이 요구된다. 본 실험에서는 슈라우드를 통하여 회전디스크의 표면근처에 삽입된 3개의 T형 열전대를 통하여 측정된 온도를 이용하여 나프탈렌 표면의 증기압을 결정하였다. 실험을 통하여 얻은 나프탈렌 승화량을 이용하여 회전디스크 표면의 국소 물질전달계수는 다음 식으로 표현된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(dy/d\tau)}{\rho_{v,w}} \quad (1)$$

여기서 \dot{m} 은 나프탈렌 표면의 단위면적, 단위시간당 승화량이며, $\rho_{v,w}$ 와 $\rho_{v,\infty}$ 는 벽면과 외부유입 공기의 나프탈렌 증기 밀도이다. ($\rho_{v,\infty} = 0$) 그러므로 회전원판 표면의 물질전달계수는 나프탈렌의 승화깊이 즉, 실험 전과 실험 후의 표면 고도차(dy)와 실험시간($d\tau$), 고체나프탈렌의 밀도(ρ_s)와 표면에서 나프탈렌 증기의 밀도($\rho_{v,w}$)에 의해서 결정된다. 위의 국소 물질전달계수로부터 Sherwood 수는 다음과 같이 계산된다.

$$Sh = \frac{h_m R_2}{D_{naph}} \quad (2)$$

D_{naph} 은 공기 중에서의 나프탈렌의 확산계수로서 여기서 사용되는 물성치는 Goldstein과 Cho⁽⁶⁾에 의해 제시되어 있다.

덮개와 슈라우드가 없는 자유회전디스크 표면에서의 평균 Nusselt 수인 Nu_{∞} 는 Kreith 등⁽⁷⁾이 제안한 회전원판 표면의 유동이 층류 ($3.5 \times 10^2 < Re_{\omega} < 7.0 \times 10^5$)이고, 벽이 등온조건일 경우의 평균 Sherwood 수인 Sh_{∞} 의 식으로부터 열/물질전달의 상사성에 의하여 다음과 같다.

$$Sh_{\infty} = 0.4586 Re_{\omega}^{0.5} Sc^{1/3} \quad (3)$$

$$Nu_{\infty} / Sh_{\infty} = (Pr / Sc)^{1/3} \quad (4)$$

$$Nu_{\infty} = 0.4586 Re_{\omega}^{0.5} Pr^{1/3} \quad (5)$$

자유회전 원판표면에서의 이론적 물질전달계수 분포를 통하여 일반적인 회전원판에서의 물질전달계수를 정규화(normalization)하여 Sh/Sh_{∞} 로 나타냈을 경우 직접적으로 Nu/Nu_{∞} 와 비교할 수 있으므로 매우 효과적이다. 본 실험결과 중 일부는 $Sc = 2.28$ 의 Sh_{∞} 로 원판표면의 국소 Sh 를 정규화하여 나타내었다.

실험에서 Sherwood 수의 불확실성은 Kline and McClintock⁽¹¹⁾의 방법에 의하여 95%의 신뢰수준에서 7.1% 이내였다. 본 오차 중 나프탈렌 확산계수의 오차 5.1%와 나프탈렌 증기밀도의 오차 4.7% 등 나프탈렌 물성치에 의한 오차가 많은 부분을 차지한다.

2.3 LDA를 통한 유동 측정

LDA는 유동에 편승한 산란입자에 의한 레이저 입사광의 산란으로 발생한 도플러 주파수 편이(Doppler shift)를 검출하여 이로부터 유체의 속도를 측정하는 장치이다. 레이저 입사광은 슈라우드 벽면의 평면 입사창을 통하여 입사되며(Fig. 1), 허브의 근접 부분과 회전원판 부근의 경계층에서 난반사로 인한 잡음(noise)을 최소화하기 위하여 입사광이 투과되는 투명의 플렉시글라스(Plexiglas)를 제외한 덮개, 슈라우드, 허브는 부광의 검은색 도료로 착색하였다. 또한 데이터 획득률(data rate)은 2000 Hz 이상을 유지하여 원판의 회전수에 대하여 충분한 수의 산란입자를 검출하도록 하였으며, 산란광을 발생시키는 산란입자는 에어로졸을 사용하였다. 본 실험의 LDA는 3차원 이송장치와 신호처리장치인 58G130 FVA, 58N40 FVA를 가진 후방 산란형(back scatter type) DANTEC LDA로 아르곤이온(Argon Ion)레이저의 최대출력은 5 W이다. LDA를 통한 속도

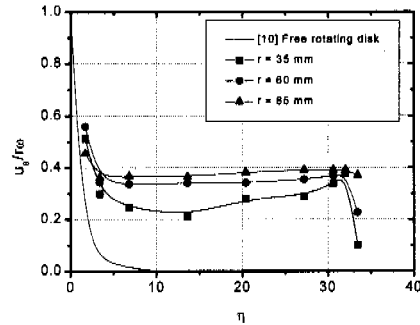


Fig. 2 Dimensionless tangential velocities ($H/R2 = 0.1176$)

측정에서 원주속도는 3%, 접동속도(RMS velocity)와 난류강도는 5%이내의 오차를 가진다.⁽⁸⁾

2.4 수치해석 조건

HDD내 유동 현상을 이해하기 위해 범용 열유동 해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 회전디스크 내부 유동장은 원통좌표계에 대하여 축대칭형상을 이루므로 격자는 r - z 방향으로 각각 93×33 개 규모의 정렬 격자계(structured grid)로 구성하였으며, 와류유동의 정확한 해석을 위하여 RNG $k-\epsilon$ (ReNomalization Group $k-\epsilon$) 난류모델을 적용하였다. 회전디스크 표면과 고정된 덮개에서의 경계층 두께(δ)는 각각 $4\sqrt{\nu/\omega}$ 와 $8\sqrt{\nu/\omega}$ 로 표현되며 y/δ 가 1이하의 영역에서 10개의 조밀격자계를 구성하고 two-layer zonal model을 적용하였다. 회전디스크의 속도는 1700 rpm, 허브 높이는 각각 5, 10, 15 mm, 허브반경 30 mm, 회전디스크반경 85 mm로 수치해석의 형상조건은 실험디스크와 동일하다.

3. 수치해석 및 실험결과

3.1 기본 유동 측정

회전디스크 표면에서 유동은 점착조건(no slip condition)에 의하여 원판의 회전속도와 동일하고, 이러한 원주속도성분은 유체의 점성의 영향으로 축방향(z)으로 Ekman 경계층을 형성하면서 감소한다(Fig. 2). 회전디스크 표면과 고정된 덮개부근에 형성되는 경계층에는 디스크의 회전에 의한 원심력과 압력구배의 영향으로 반경방향(r)의 유출·유입형태의 이차유동이 형성되고, 이러한 이

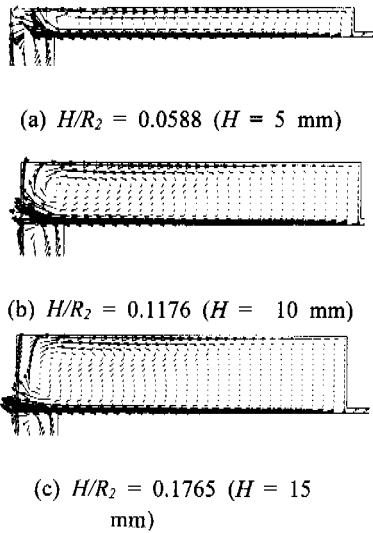


Fig. 3 Calculated flow patterns in a cavity between a rotating disk and a stationary cover(Hub fixed on a cover)

차유동은 그 중심이 회전디스크의 외곽에 위치한 회전하는 유동구조를 형성한다(Fig. 3).

Fig. 2는 $Re_\Omega = 8.50 \times 10^5$, $H = 10$ mm($H/R_2 = 0.1176$)의 경우 반경방향(r)의 세지점 ($r = 35, 60, 85$ mm)에서 축방향(z)으로 미소 이동시키면서 LDA로 측정된 원주방향의 무차원 속도성분을 나타낸다. 세로축의 원주 속도는 각 반경방향의 위치에 대한 디스크의 회전속도($r\omega$)로, 가로축의 축방향 측정위치는 디스크표면에서의 경계층 두께로 각각 부차원하여 도시하였다. 회전디스크 위 경계층 유동이 층류($r^2/R_2^2 \times Re_\Omega < 2.0 \times 10^5$, 자유회전디스크 기준)이고 경계층내에서 유체의 전단 방향이 반경에 무관하게 일정하다면 경계층의 두께(δ)는 $\sqrt{\nu/\omega}$ 에 비례하고 이것을 이용하여 z 를 부차원하면 무차원 축방향 위치(η)는 다음과 같다.

$$\eta = z/\sqrt{\nu/\omega} \quad (6)$$

Fig. 2의 결과에서 회전디스크 표면($\eta = 0$)과 고정된 덮개 표면($\eta = 34.5$)의 경계층 사이에서 반경방향의 유동성분 없이 축방향과 원주방향의 유동성분만 갖고 일정한 원주속도로 회전하는 비점성 유동층인 코어(core)층이 형성된다. 이러한

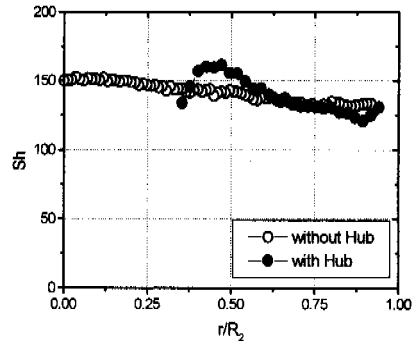


Fig. 4 Local Sherwood number distribution on a rotating disk with and without a hub

코어층은 디스크회전속도의 약 30~40%로 일정함을 알 수 있다.

Fig. 3은 이러한 회전디스크 내부유로에서 허브가 고정된 덮개표면에 고정되었을 경우 1700 rpm의 디스크 회전수에 대하여 H 를 5, 10, 15 mm로 변화시켰을 경우 r - z 단면에 형성되는 이차유동의 수치해석결과이다.

3.2 허브와 슈라우드의 영향

허브는 헤드암이 위치할 수 있도록 회전디스크와 덮개 혹은 회전 디스크간을 이격시키는 역할을 한다. 이러한 허브의 역할은 HDD의 소형화, 데이터처리의 고속화와 함께 그 높이가 감소하거나 고정 덮개의 변형된 형태(convex shape)로 사용되기도 한다. 후자는 허브가 고정된 덮개에 부착되어있는 경우로 모사될 수 있으며, 이러한 허브의 부착형태에 대하여 회전디스크 표면의 열전달 특성에 대하여 실험하였다.

회전디스크가 허브 없이 덮개와 슈라우드로 밀폐되어진 경우, 허브가 덮개에 고정되어 슈라우드로 밀폐되어진 경우, 각각 $Re_\Omega = 8.5 \times 10^5$, $H = 10$ mm ($H/R_2 = 0.1176$)인 회전디스크 표면의 열전달 분포가 Fig. 4에 제시되어 있다. 덮개와 슈라우드가 없는 자유회전디스크에 대한 Chyu⁽⁴⁾의 실험 결과에 의하면, 디스크 표면에 균일한 하강유동의 영향으로 국소열전달계수의 분포는 회전디스크 반경의 내·외부에 관계없이 일정한 값을 가진다. 그러나 본 실험의 덮개와 슈라우드로 밀폐되어진 회전디스크의 경우 유로 내에 형성되는 이차유동 구조의 영향으로 하향유동이

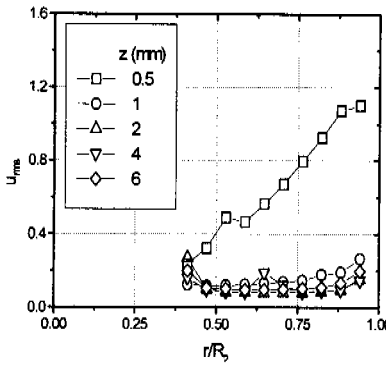


Fig. 5 Tangential RMS velocity in a cavity

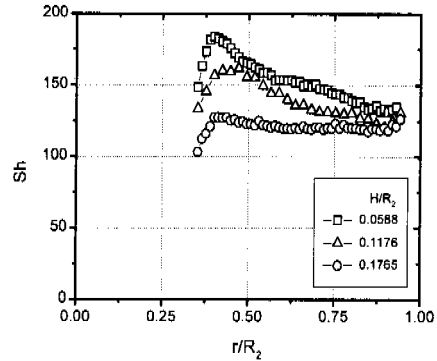
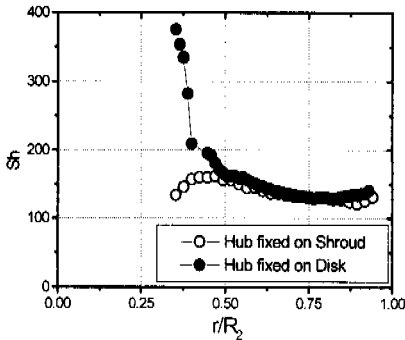


Fig. 7 Local Sherwood number distributions with various hub heights



(a) Local Sherwood number distributions on a disk with a hub fixed on a cover and a disk



(b) Calculated flow pattern

Fig. 6 Local Sh distributions on a disk and a flow pattern in a cavity ($Re_D = 8.5 \times 10^5$, $H = 10$ mm)

발생하는 회전디스크의 중심부에서 상향유동이 발생하는 디스크 외곽으로 갈수록 서서히 Sherwood 수가 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 이차유동 구조는 허브의 영향으로 더욱 강화되는 것을 알 수 있는데, 허브부근의 국소 물질전달계수의 최대값은 하향 이차유동의 강화와 허브에 의한 유동의 섭동성분의 강화로 보이며, 상대적으로 디스크의 외곽에서는 허브가 없는 경우보다 낮은 값을 나타낸다. 그러나, 디스크 모서리 부근에서 다시 증가하게 되는데 이

것은 회전디스크 외곽의 슈라우드에 의한 유동의 교란의 영향으로 허브가 없는 경우와 거의 유사한 값으로 회복됨을 보인다.

LDA로 측정된 원주방향 섭동속도의 분포가 Fig. 5이다. 허브부근과 디스크의 모서리부근에서 각각 유동을 간섭하는 벽의 영향으로 다른 부분보다 높은 값을 보인다. 높은 난류성분은 열전달을 증가시키므로 이러한 섭동성분의 측정결과를 전술한 열전달 결과를 잘 설명해 주고있다.

Fig. 6(a)는 허브가 정지된 덮개와 회전디스크에 각각 고정된 경우 회전디스크 표면의 국소 Sherwood 수의 분포를 나타낸다. Fig. 6(b)를 통하여 회전디스크 표면에 고정된 허브는 유로 내부의 이차유동을 더욱 강화시키고, 디스크 유로 내부로 외부의 공기를 더욱 많이 유입시킴으로써 이차유동 구조가 Fig. 3의 허브가 덮개에 고정되었을 경우보다 더욱 활성화되었음을 보여준다. 이러한 유로 내부의 유동구조의 변화는 허브부근의 디스크 표면에서 매우 높은 국소 열전달 분포를 발생시키게 된다.

3.3 축방향 간격(H) 변화 (덮개와 회전디스크 사이의 간격변화)

HDD의 소형화는 데이터 저장의 고집적화를 통한 자기회전디스크의 크기의 감소와 함께 헤드압의 소형화로 허브높이의 감소가 수반된다. 이러한 축방향(z)의 간격변화는 유로내부의 이차유동 구조를 변형시키게 되고, 결과적으로 회전디스크 표면의 열전달 분포에도 상당한 영향을 미친다. 이러한 영향을 살피기 위하여 본 연구에서 $Re_D = 8.5 \times 10^5$ 의 덮개로 밀폐되어진 단일회전디스크

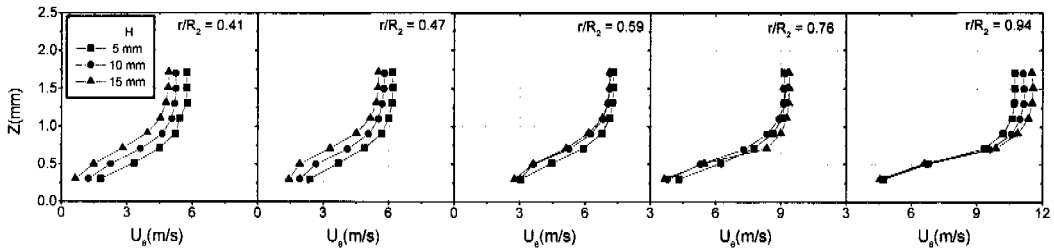


Fig. 8 Measured relative tangential velocity($r\omega - u_\theta$) profiles for various hub heights

에서 $H/R_2 = 0.0588, 0.1176, 0.1765$ 의 세 경우에 대하여 속도 측정과 물질전달 실험을 수행하였다. 열전달과 동일한 조건의 $r-z$ 단면에서의 이차유동에 대한 수치해석 결과가 Fig. 3에 제시되어 있다.

Fig. 7에서 축방향의 간격이 증가할수록 회전디스크 표면에서의 국소 물질전달계수의 분포는 오히려 감소하는데, 이것은 확장된 유로내부 공간은 이차유동의 강도를 약화시키고, 내부 유동을 자유회전디스크에 의해 발생하는 유동으로 근접시키기 때문이다. $H/R_2 = 0.1765$ 의 경우 허브와 슈라우드에 의한 이차유동과 유동 교란의 영향으로 이 부근의 디스크 표면에서 열전달의 미소 증가가 보이나 전체적으로 균일한 결과를 나타낼 수 있다. 상대적으로 작은 축방향의 간격 ($H/R_2 = 0.0588$)에서 강화된 이차유동구조와 함께 덮개와 회전디스크 표면의 경계층의 상호간섭으로 코어(core) 영역의 유체의 상대원주속도가 다른 경우보다 높음을 보이는데(Fig. 8) 이러한 영향으로 디스크표면에는 높은 열전달분포를 보이게 된다.

3.4 회전 Reynolds 수(Re_Ω)의 변화 (디스크의 회전수의 변화)

디스크의 회전수의 증가를 통한 HDD의 정보처리 속도의 향상은 현재 상용 HDD의 발전 양상이며, 이것은 보다 높은 디스크의 회전 Reynolds 수 범위에서 HDD의 작동영역이 형성됨을 의미한다. 이러한 디스크의 회전 Reynolds 수의 변화에 대한 디스크 표면의 열/물질전달 특성 해석을 위하여 현재 상용 HDD 3.5"-5400 rpm ($Re_\Omega = 8.5 \times 10^4$)에 상사하는 1700 rpm을 기준으로 하여 1100 rpm ($Re_\Omega = 5.5 \times 10^4$), 2200 rpm ($Re_\Omega = 1.1 \times 10^5$)

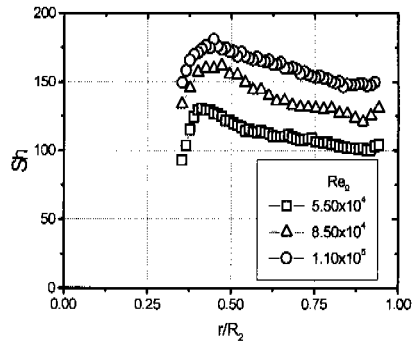


Fig. 9 Local Sherwood number distributions with various rotating Reynolds number, Re_Ω

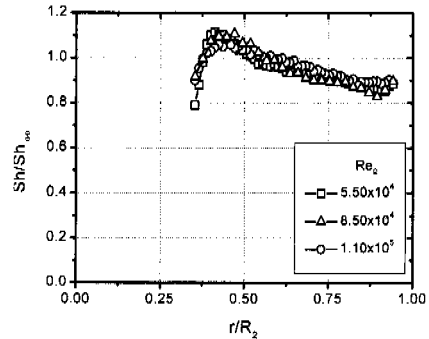


Fig. 10 Distributions of Normalized Local Sherwood numbers(Sh/Sh_∞) with various rotating Reynolds numbers

의 세 경우에 대하여 $H = 10 \text{ mm}$ 으로 고정하고 실험하였다. Fig. 9에서 Re_Ω 의 증가에 대하여 각각의 국소 Sherwood 수의 분포는 정성적인 변화 없이 정량적으로 이동된 형태를 보이는데, 이것은 디스크의 회전수 증가는 내부 유동장에 운동량의 증가를 야기하고 결과적으로 회전디스크

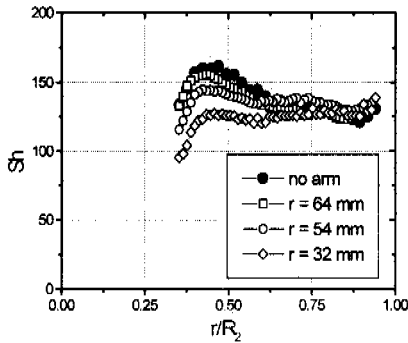


Fig. 11 Local Sherwood number distributions on a disk with a head arm

표면에 열/물질전달의 향상을 발생시키기 때문이다. 즉, Fig. 10의 결과를 통하여 유동장의 유동 정보(Re_D)만을 포함하고있는 자유회전디스크의 평균 열전달 계수로 정규화(normalization)하였을 경우 각 회전수에서의 국소 열/물질전달계수의 분포는 거의 일치하게 된다.

3.5 유로(cavity) 내 삽입된 헤드암의 영향

유동장 내 장애물의 존재는 기본 단일회전디스크에 의한 유로(cavity) 내 유동구조를 상당히 변화시키게 되는데, 이러한 작동조건은 보통의 HDD 내에서 헤드암에 의해 교란되는 일반적인 유동환경이 된다. 헤드암의 삽입 깊이에 따른 회전디스크 표면의 열/물질전달 특성고찰을 위하여 $H/R_2 = 0.1176$, $Re_D = 8.5 \times 10^4$ 의 유동조건하에서 허브와 회전디스크 사이에 $15 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 의 장방향의 헤드암을 $r = 32, 54, 64 \text{ mm}$ 까지 삽입 후 열/물질전달 실험을 수행하였다. 유동장 내 삽입된 헤드암의 영향에 의한 유동장의 원주방향 속도와 섭동속도 성분을 본 열/물질전달 실험과 같은 조건에서 헤드암하류 $45^\circ, 90^\circ$ 지점에서 측정된 결과가 원정호 등⁽⁹⁾에 의하여 제시되었다. 삽입된 헤드암에 의한 운동량의 결손은 장애물의 하류 45° 이후 90° 까지도 상당함을 보이는데 이러한 속도의 감소는 상대적으로 유동장 내의 난동 성분을 증가시켰으며, 헤드암 이후 후류 영역의 유동의 교란은 헤드암 하류 90° 지점에서 축방향 (z) 6 mm 지점에서도 나타남을 보임을 알 수 있다.

유동장의 운동량손실은 r - z 단면의 이차유동의 강도를 약화시키고, 헤드암에 의한 유동장의 교

란에도 불구하고 회전디스크 표면의 상당한 열전달의 감소를 야기하게 된다. 허브 근처의 열/물질전달계수의 극대값이 헤드암의 삽입 깊이에 따라 감소하는 것은 축방향 하향 이차유동 강도의 감소로 인한 결과이다. 즉, 단일회전디스크 내 삽입된 헤드암은 유로 내부유동의 운동량을 감소시키고 이차유동의 강도를 약화시켜서 결국 회전디스크 표면의 열/물질전달계수를 감소시킴을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 자유회전디스크 기준 임계 회전 Reynolds 수 2.0×10^5 이하의 완전 층류유동영역에서 슈라우드와 덮개로 밀폐되어진 단일회전디스크 표면의 열/물질전달 특성을 고찰하였다. 수치해석과 유동측정을 병행한 회전디스크 표면의 열/물질전달 실험의 결론은 다음과 같다.

(1) 자유회전디스크에 의해 발생하는 회전디스크 표면의 전체적인 하향의 유동구조는 덮개와 슈라우드, 허브의 존재에 의하여 r - z 단면에서 순환하는 이차유동 구조로 변하게 되고, 이러한 이차유동의 영향으로 허브 부근의 국소적으로 높은 열/물질전달 계수와 디스크 끝단의 비교적 낮은 열/물질전달 계수를 보이게 된다. 이차유동은 허브가 덮개에 고정되어 있는 경우보다 회전디스크에 고정되었을 경우 더욱 강화되어 디스크 내부 허브부근에서 상당한 열전달의 증가를 야기함을 알 수 있었다.

(2) 회전디스크와 덮개 사이의 축방향 간격 증가는 내부 이차유동의 강도를 약화시키고 이것은 하향 이차유동이 발생하는 디스크 내부의 작은 반경위치에서 상당한 열전달의 감소를 가져온다.

(3) 회전 Reynolds 수 증가에 대하여 디스크표면의 열/물질전달계수는 정규화 된 분포를 통하여 정성적인 변화 없이 $Re_D^{0.5}$ 에 비례하는 형태로 정량적으로 증가하며, 평균 열/물질전달계수는 1100 rpm 기준 1700, 2200 rpm에서 각각 27%, 44% 증가함을 나타낸다.

(4) 헤드암은 유동교란과 함께 상당한 운동량의 감소를 발생하여 유로 내 이차유동을 약화시켜서 회전디스크 표면의 열/물질전달계수의 감소를 야기한다. 헤드암을 $r = 32 \text{ mm}$ 까지 삽입하였을 때 발생하는 평균 열/물질전달계수는 헤드암이 없는 경

우에 비하여 최고 12% 정도의 감소함을 보인다.

후 기

본 연구는 한국과학기술재단지정 정보저장기기연구센터의 지원(과제번호: 1999G0101)을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 최상민, 김진수, 현재민, 1992, "회전하는 원판 사이에서의 유체유동," 대한기계학회논문집, 제 16권, 제2호, pp. 281~289.
- (2) Abrahamson, S. D., Chinang, C., and Eaton, J. K., 1991, "Flow Structure in Head-disk Assemblies and Implications for Design," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 1, pp. 111~132.
- (3) Humphrey, J. A. C., Schuler, C. A., and Iglesias, I., 1992, "Analysis of Viscous Dissipation in Disk Storage Systems and Similar Flow Configurations," *Physics of Fluids*, Vol. 4, pp. 1415~1427.
- (4) Chyu, M. K., and Bizzak, D. J., 1992, "Surface Heat Transfer in a Hubbed Rotor-Stator and a Clamped Corotating Disk Assembly with and without Axial Source Flow," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 4, pp. 393~404.
- (5) Chyu, M. K., and Bizzak, D. J., 1992, "Effects of Axial and Radial-Gap Spacing in the Local Heat Transfer of a Shrouded Rotor-Stator System," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 1051~1054.
- (6) Goldstein, R. J., and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (7) Owen, J. M. and Rogers, R. H., 1989, *Flow and Heat Transfer in Rotating-Disc Systems Rotor-Stator Systems*, JOHN WILEY & SONS INC., pp. 93~124.
- (8) DANTEC, 1996, *Fiber Flow : Installation and User Guide*.
- (9) 원정호, 류구영, 조형희, 1999, "구속된 단일회전원판과 동시회전원판 내부의 유동특성," 대한기계학회논문집(B), 제23권, 제9호, pp. 1192~1200.
- (10) Frank M. White, 1991, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill Inc, pp. 152~168.
- (11) Kline, S. J., and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.