

동시 회전원판 사이의 간격변화에 따른 열전달 특성

류구영* · 원정호* · 조형희**

(1999년 9월 22일 접수)

Effects of Gap Spacing on Heat Transfer Characteristics for Co-Rotating Disks

Goo Young Ryu, Chung Ho Won and Hyung Hee Cho

Key Words: Co-Rotating Disk(동시회전디스크), HDD(하드디스크 드라이버), Heat/Mass Transfer(열/물질전달)

Abstract

Local heat transfer characteristics inside a hard disk driver(HDD) are investigated in this study. The investigation is considered between disks co-rotating in a cylindrical enclosure. The gap spacing, rotating speed and head-arm positions are mainly considered to understand the flow and heat transfer in the co-rotating disks. The naphthalene sublimation technique is used to determine local heat/mass transfer coefficients on the rotating disk. Flow patterns inside the co-rotating disks are investigated using a Laser Doppler Anemometer (LDA) and also analyzed numerically. The results show that the heat transfer coefficients on the disk changed little with the gap spacing between disks. Heat transfer rates in the outer region increases with increasing rotating Reynolds number, but the values normalized by that on a free rotating disk give a similar pattern for the tested cases. The head-arm inserted between the rotating disks destroys the inner region resulting in enhancement of heat transfer in that region.

기호설명

- a : 슈라우드와 원판 사이의 반경방향 간격
- D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌 확산계수
- H : 동시회전원판 사이의 축방향 간격
- K : 무차원 장애물 길이, $l_{arm}/(R_2-R_1+a)$
- l_{arm} : 장애물 길이
- Nu : 국소 Nusselt 수
- Nu_{∞} : 자유 회전 원판의 평균 Nusselt 수
- r : 반경방향 위치
- R_l : 허브 반경

- R_2 : 원판 반경
- Re : 회전 Reynolds 수, $R_2^2 \omega / \nu$
- Sc : Schmidt 수, ν / D_{naph}
- Sh : 국소 Sherwood 수, $h_m R_2 / D_{naph}$
- Sh_{∞} : 자유 회전 원판의 평균 Sherwood 수
- u_{θ} : 원주 방향 속도 성분
- u_{rms} : 원주 방향 섭동속도 성분
- z : 축방향 위치
- ν : 동점성계수
- ω : 각속도

1. 서론

회전원판을 포함하는 장치내에는 회전하는 물체와 점성 유체사이에 발생하는 복잡한 유동 구조를 가지는 3차원 와류 유동형태를 포함하게 되고,

* 연세대학교 대학원

** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2828 FAX : (02)312-2159

이러한 내부의 복잡한 유동장 해석 및 원판 표면의 열전달 해석은 장치 내부의 유동 소음 및 진동, 강제 대류에 의한 내부 온도 분포의 예측과 점성에 의한 손실, 전달 능력의 예측 등을 통한 최적의 기계 설계를 위한 필수 요소이다. 특히, 컴퓨터 하드디스크(HDD, Hard Disk Drive) 유로(cavity) 내부에서의 유동조건은 헤드의 작동안정에 심각한 영향을 미치며, 고속 회전에 따른 스핀들 베어링 및 디스크와 헤드 사이에서의 공력 가열에 의한 열발생(aerodynamic and friction heat generation)과 구동 모터에서의 열 발생은 회전원판의 불균일 열팽창을 야기한다. 발열에 따른 디스크 자체 온도 상승 및 불균일한 온도 분포에 의한 원판의 불균일한 열팽창은 수마이크로의 거리로 이격되어 디스크와 정보를 주고 받는 헤드암(head arm)의 부정확한 위치제어를 야기하여 정보 전송 오류의 원인이 된다. 따라서 HDD에서의 열전달 해석 등을 통하여 디스크 내 적정 온도 유지 및 균일한 온도 분포를 얻기 위한 냉각 방법이 강구되어야 한다.

동시 회전원판 내부의 유동에 대한 대부분의 실험적 연구는 원판의 회전에 의해 야기되는 2차유동에 초점이 맞추어졌었다. Abrahamson 등⁽¹⁾은 동시 회전원판에 대하여 물을 작동 유체로 하여 염료 주입을 통한 유동 가시화를 수행하여 그 유로 내 3차원 유동의 형태를 가시적으로 증명하였다. 동시 회전원판 사이의 속도장은 회전원판 표면의 경계층 유동이 층류일 경우 Szeri 등⁽²⁾에 의해, 난류의 경우 Bakke 등⁽³⁾에 의해 측정되어졌다. Humphrey 등⁽⁴⁾은 LDA (Laser Doppler Anemometer)를 이용하여 동시 회전원판에 장애물이 있는 경우 다양한 회전 Re 에 대하여 내부 유동의 변화를 측정하였으며, 스펙트럼 분석을 통하여 그 외부 유동 구조의 주기성을 연구하기도 하였다. Tzeng and Munce⁽⁵⁾은 동시 회전원판 사이 유동장에 장애물을 경사지게 삽입하여 이 경사각의 변화에 따른 유동 구조의 변화를 연구하기도 하였다. 동시회전원판의 온도장과 유동장에 대한 수치적 연구는 Chang 등,^(6,7) Schule 등,⁽⁸⁾ Humphrey 등^(9,10)에 의해, 장애물이 설치된 경우의 수치적 연구는 Suzuki and Humphrey⁽¹¹⁾에 의해 수행되었다.

기존의 대다수의 연구들은 유로내 유동장의 해석에 관심을 두었으며, Chyu and Bizzak^(12,13)에 의해 원판과 측면 슈라우드의 간격이 변화할 경우 원판 표면의 열전달 분포가 연구된 정도이다.

이와 같이 동시회전원판에서의 유동에 대한 연구는 많으나 내부에서의 열전달 현상과 유동을 유기적으로 연계하여 연구된 자료는 미비하며, 본 연구에서는 회전 Re 와 기하학적 형상의 변화가 원판 표면의 열전달계수의 분포와 유동현상에 미치는 영향을 동시에 연구하여 하드디스크 설계에 기초자료를 제시하고자 한다.

본 실험의 실험 장치는 HDD내부 원판 사이에서의 유동 및 열전달 특성을 고찰하기 위한 것으로 주된 변수는 1) 회전원판 사이의 간격, 3) 회전수의 변화, 3) 헤드암의 깊이 변화로서, 이에 따른 원판 표면의 열전달 특성을 고찰하였다. 내부 유동장은 열·유동 해석 상용프로그램인 FLUENT와 광학 속도 측정 장치(LDA)를 사용하여 해석하였으며, 열전달 실험을 대신한 나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달 실험을 수행하였다. 물질전달 실험방법으로 사용된 나프탈렌 승화법(naphthalene sublimation method)은 열전달 실험에서 발생하는 전도, 복사 오차를 제거할 수 있으며, 국소적인 열전달 계수의 측정이 가능하므로 회전원판 표면의 열전달 특성을 이해하는데 적합한 실험방법이다

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

열/물질전달 및 유동 실험에 사용된 실험장치의 단면도가 Fig. 1에 나타나 있다. 원판 반경(R_2)은 85 mm이며, 슈라우드 내부 반경이 93 mm이고, 허브 반경(R_1)은 30 mm이다. 현재 상용 HDD 3.5" 5400 rpm ($Re = 8.50 \times 10^4$)의 Re 에 대응하는 1700 rpm을 기준으로 1100 rpm ($Re = 5.50 \times 10^4$), 2200 rpm ($Re = 1.10 \times 10^5$)의 3가지 경우에 대하여

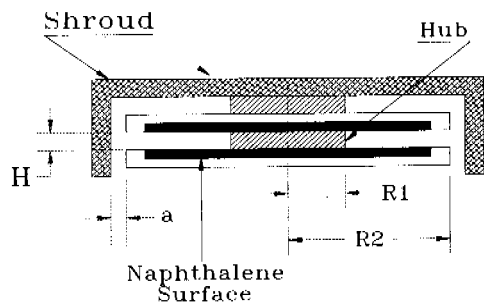


Fig. 1 Schematic diagrams of the co-rotating disks for experiments

실험을 수행하였으며, 두 회전원판 사이의 간격은 허브(hub)에 의하여 $H/R_2 = 0.0471$ ($H = 4$ mm), 0.0706 ($H = 6$ mm), 0.0941 ($H = 8$ mm)의 각각 3경우로 변화게된다. 유동장내 장애물의 삽입은 내부 유동 특성의 변화와 함께 회전원판 표면의 열전달 특성도 상당히 변화시키게 되는데, 단면 15×3 mm의 장방형의 장애물을 각각 동시 회전원판 사이 유로내에 축방향으로 두 회전원판의 사이에, 반경방향으로 허브(32 mm), 원판의 중간(42.5 mm), 원판 끝(85 mm)부분에 고정하여 그 열전달 분포를 측정하였다.

2.2 유동 측정 실험 방법

회전원판 내부 유로의 유동측정은 측정자에 의한 유동장의 교란이 없고 정확한 속도 및 난류 성분의 측정이 가능한 광학 속도 측정 장치 (LDA)를 사용하였다. 유동 측정을 위한 실험장치는 열전달 실험을 위한 실험장치와 동일한 형상이고 측정된 성분은 접선 방향의 평균 속도와 섭동 속도 성분이다.

정확한 원판의 속도 제어는 정량적 데이터의 신뢰성의 향상을 위하여 필수적이므로 회전수 감지 장치가 있는 DC 모터를 사용하여 그 회전수 오차를 $\pm 1\%$ 이내로 유지하였다.

LDA는 유체의 유동에 편승한 산란 입자에 의한 레이저 입사광의 산란으로 발생한 도플러 주파수 편이(Doppler Shift)를 검출하여 이로부터 유체의 속도를 측정하는 장치이다. 허브의 근접부분과 회전원판 부근의 경계층에서 난반사로 인한 잡음을 최소화 하기 위하여 입사광이 투과되는 투명의 플렉시글라스를 제외한 모든 실험 장치는 무광의 검은색 도료로 착색하여 신호대 잡음비(S/N ratio)를 향상하였다. 또한, 데이터 획득률은 2000 Hz 이상을 유지하여 원판의 회전수에 대하여 충분한 수의 산란입자를 검출하도록 하였으며, 본 실험에서 산란입자는 에어졸을 사용하였고, LDA 장치는 3차원 이송장치와 58G130 FVA, 58/N40 FVA 처리 장치를 가진 후방 산란형(back scatter type) DANTEC LDA로 아르곤이온 레이저의 최대출력은 5 W이다. 본 실험의 LDA를 이용한 속도 측정에서 원주방향의 평균 속도 성분은 4%, 섭동 속도 (RMS velocity)성분은 5%이내의 오차를 가진다.

2.3 수치해석 조건

동시 회전원판 내의 유동 현상을 이해하기 위하여 상용 열·유동해석 프로그램인 FLUENT를 이용한 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위한 격자구성으로는 2차원의 축대칭 조건을 적용하여 93×50 개, 154×50 개 규모의 격자계를 형성하였다. 수치해석을 위한 기본 형상은 실험 조건과 동일하여, 회전원판 반경은 85 mm, 허브 반경 30 mm, 슈라우드의 반경 93 mm이며, 이에 대하여 허브의 높이를 4 mm, 6 mm, 8 mm로 각각 변화시켰으며, 회전원판의 회전수는 기본 회전수인 1700 rpm ($Re = 85,000$)로 하여 계산하였다. 계산된 모델을 2차원 비압축성 유동의 정상상태로 가정하였고, 슈라우드 부근에서의 박리 난류유동을 예측하기 위하여 RNG k- ϵ 난류모델링을 사용하였다.

2.4 물질전달 실험 방법

열전달 실험을 대신하여 본 연구에서는 나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달 실험을 수행하였다. 원판 표면에 주조를 통하여 나프탈렌을 코팅하였다. 물질전달 실험의 경계조건은 나프탈렌 표면의 증기밀도가 실험 중 일정하므로 이에 상당하는 열전달 실험의 등온조건에 해당한다.

슈라우드가 없는 자유회전 원판표면에서의 평균 Sh (Sh_∞)는 Kreith 등⁽¹⁴⁾이 제안한 회전 원판 표면의 유동이 완전 층류 ($10^2 < Re_D < 5 \times 10^5$)일 경우의 평균 Nu (Nu_∞)식으로부터 열·물질전달의 유사성에 의하여 아래와 같다.

$$Nu_\infty = 0.86 Re_D^{0.5} Pr^{0.4} \quad (1)$$

$$\frac{Nu_\infty}{Sh_\infty} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n \quad (2)$$

$$Sh_\infty = 0.86 Re_D^{0.5} Sc^{0.4} \quad (3)$$

자유회전 원판표면에서의 이론적 물질전달계수 분포를 통하여 일반적인 회전원판에서의 물질전달 계수를 일반화(Normalization)하였을 경우 직접적으로 Nu/Nu_∞ 와 비교할 수 있으므로 매우 유효하다. 본 실험에서는 $Sc = 2.28$ 로하여 구한 Sh_∞ 로 원판 표면의 국소 Sh 를 일반화하여 나타내었다.

나프탈렌이 코팅된 원판은 실험 중 항상 일정한 속도로 회전하도록 제어되며, 모터나 마찰부로부터의 열전달을 방지하기 위하여 단열판을 삽입하

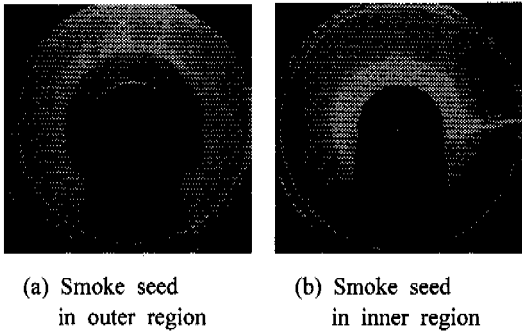


Fig. 2 Flow visualization in co-rotating disks

었다. 원판에 코팅된 나프탈렌의 표면고도를 실험 전·후에 측정하여 그 차로부터 나프탈렌 표면 승화량을 얻고 이로부터 무차원 물질전달계수인 Sh 를 구하였다. 선형가변차동변환기(LVDT; linear variable differential transformer)에 의한 나프탈렌 표면 고도의 측정은 정밀도가 $0.025 \mu\text{m}$ 이며, 측정오차가 1% 이내이다.

실험에서 얻어지는 물질전달 계수는 다음 식으로 표시된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(dy/d\tau)}{\rho_{v,w}} \quad (4)$$

\dot{m} 은 나프탈렌 표면의 단위 면적, 단위시간당 승화량이며, $\rho_{v,w}$ 와 $\rho_{v,\infty}$ 는 나프탈렌 벽면 및 외부유입 공기의 나프탈렌 증기 밀도이다. 그러므로 회전원판 표면의 물질전달계수는 나프탈렌의 승화깊이 즉, 실험 전과 실험 후의 표면 고도차 (dy)와 실험시간($d\tau$), 고체 나프탈렌의 밀도(ρ_s)와 표면에서 나프탈렌 증기의 밀도($\rho_{v,w}$)에 의해서 결정된다.

$$Sh = \frac{h_m R_2}{D_{naph}} \quad (5)$$

D_{naph} 은 공기 중에서의 나프탈렌의 확산계수로서 여기서 사용되는 물성치는 Goldstein과 Cho⁽¹⁵⁾에 의해 제시되어있다.

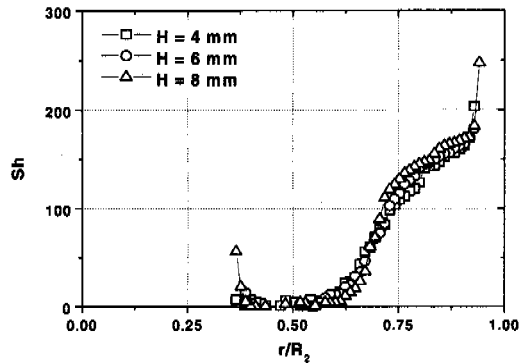


Fig. 3 Heat/mass transfer for various gap distances between co-rotating disks

3. 실험 및 수치해석 결과

3.1 동시 회전원판에서 기본 유동과 열전달 특성

일정 간격을 두고 슈라우드로 차폐되어진 동시 회전원판 사이 유로에서 유동은 원판 안쪽 허브 부근의 외부와의 유동혼합이나 상대 운동이 거의 없이 회전원판과 거의 같은 속도로 강제회전(solid body rotation)을 하는 내부영역(inner region)과 내부영역 외곽에 슈라우드의 영향에 의하여 원판의 회전 방향의 반대 방향으로 회전하며 난류 성분의 증가와 유동의 혼합을 야기하는 와류가 지배적인 외부영역(outer region), 와류와 원판 외곽에서 차폐하고 있는 슈라우드의 영향으로 슈라우드 벽면 가까이에서 상당히 불안정한 유동을 형성하는 슈라우드 경계영역(shroud boundary region)으로 구분될 수 있다. Fig. 2의 가시화 사진은 레이저 시트를 통한 연기 열선법으로 유동을 가시화 한 것으로 동시 회전원판에서 형성되는 유동 특성 특히 내부영역과 외부영역을 잘 구분하여 보여준다. Fig. 2(a)는 외부영역에 유동가시화를 위한 증발 액적을 발생시킨 것으로 이때 발생한 증발 액적은 유동의 교란이 적은 내부의 강제회전 영역으로 침투하지 못하고 그 경계를 형성하며, 외부의 와류 영역에서 순환하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 내부영역에서 증발 액적을 발생시킨 Fig. 2(b)의 경우에도 유사한 결과를 보이나 상대적으로 불안정한 유동영역을 형성하는 외부영역으로 그 경계를 통하여 미소하게 퍼져나감이 보인다. 원정호 등⁽¹⁶⁾에 의하여 제시된 동시회전원판 $H/R_2 = 0.071$,

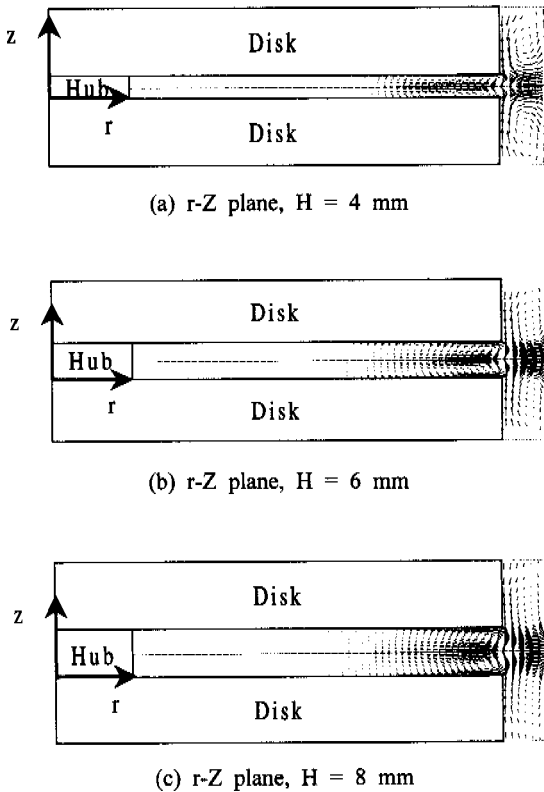


Fig. 4 Flow patterns for various gap spacings

$Re = 8.50 \times 10^4$ 인 경우에 원주방향의 속도 및 난동성분의 분포에 제시된 결과에서 r/R_2 가 약 0.7부근부터 u_θ 의 감소와 함께 난동성분의 급격한 증가를 보이는데 이 부분은 가시화를 통하여 확인된 내·외부 영역의 경계 영역을 의미한다.

회전원판표면의 열전달 특성은 이러한 내부 유로에서의 유동특성에 의하여 강제회전 영역에서는 대류에 의한 열전달은 미비하여 매우 낮은 열전달 결과를 보이고, 외부 영역에서는 유로 외부로부터 공기의 유입과 함께 활발한 유동의 혼합으로 급격한 열전달의 증가를 보이는데, 이것은 Fig. 3의 결과를 통하여 확인할 수 있다.

3.2 회전원판 사이 간격 변화의 영향

HDD크기의 소형화는 필수적으로 동시회전원판 사이의 축방향 간격(H)의 감소를 수반하고 이러한 H 의 변화가 물질전달에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 원판 사이 간격을 4 mm ($H/R_2 = 0.0471$), 6

mm ($H/R_2 = 0.0706$), 8 mm ($H/R_2 = 0.0941$)로 변화시키면서 회전수 1700 rpm ($Re = 8.50 \times 10^4$)에 대하여 실험하였다. Fig. 3의 결과를 통하여 간격의 변화에 대하여 회전원판 표면의 국소 열전달계수의 분포는 정성적, 정략적으로 거의 유사한 결과를 보인다. 위와 동일한 형상에 대한 유동 측정이 원정호 등⁽¹⁶⁾에 의해 수행되었다. 원판표면의 에크만(Ekman) 경계층은 고체표면으로부터 유로의 중심을 향하여 형성되며, 이러한 경계층위의 내부영역의 유체 회전 속도는 원판회전속도의 약 80% 정도이며, $r/R_2=0.77$ 부근의 외부영역의 회전 속도는 약 65%이다. 이러한 유로내부 외부영역의 평균속도는 H/R_2 의 변화에 대하여 본 실험 형상에서 거의 일정한 값을 가지며, 이에 따른 원판 표면의 열전달 특성은 거의 변화가 없는 것으로 사료된다. 수치해석을 통한 위의 세가지 간격변화에 따른 유로 단면에서의 속도장 해석 결과(Fig. 4)에서 허브부근의 원판 안쪽부분의 축방향, 반경방향의 속도성분이 거의 존재하지 않는 내부 영역은 원판 사이의 간격(H)의 변화에 대하여 그 변화가 역시 미비함을 보인다.

3.3 Reynolds수의 변화에 따른 영향

원판의 회전수의 증가를 통한 HDD의 정보처리 속도의 향상은 현재 상용 HDD의 발전 양상이며, 이것은 회전 원판의 회전 레이놀즈수가 보다 높은 영역에서 HDD의 작동 영역이 형성됨을 의미한다. 이러한 원판의 회전 레이놀즈수의 변화에 대한 원판 표면의 열전달 특성의 해석을 위하여 현재 상용화 되어있는 3.5" HDD의 5400 rpm ($Re = 8.50 \times 10^4$)에 대응하는 1700 rpm을 기준으로 하여 1100 rpm ($Re = 5.50 \times 10^4$), 2200 rpm ($Re = 1.10 \times 10^5$)의 세 경우에 대하여 실험을 하였다. Fig. 5의 결과에서 원판의 회전수 증가에 따라 외부영역에 상당하는 원판 표면에서 국소 열전달계수의 증가가 발생하고 내부영역의 원판 표면의 경우 회전수 변화에 대한 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 외부영역의 원판표면의 열전달 계수의 상승은 원판 회전수가 증가함에 따라 발생하는 외부영역의 상대속도증가와 이차유동의 강도 증가에 따른 것으로 원판의 외곽으로 갈수록 이러한 영향은 더욱 증가함을 보인다. 이러한 국소 열전달계수의 분포를 자유 회전원판에서의 평균 열전달계

수로 일반화하여 Fig. 6에 나타내었다. 원판에 대한 형상정보 없이 유동정보만을 내포하고 있는 자

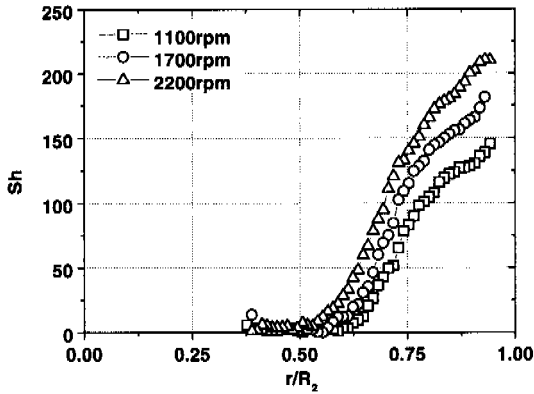


Fig. 5 Effects of various rotating Reynolds numbers

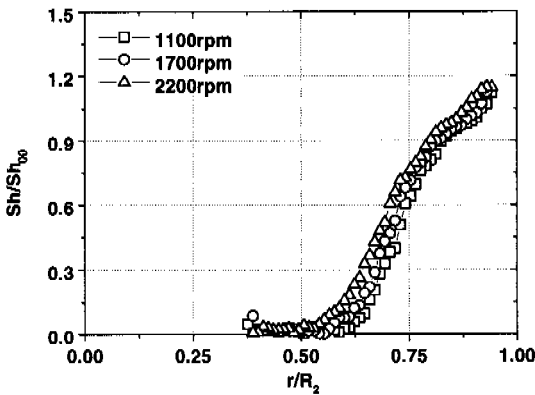


Fig. 6 Normalized heat transfer coefficients for various rotating Reynolds numbers

유 회전원판의 평균 열전달 계수의 식으로 일반화 하였으므로 각각의 레이놀즈수에서 회전원판 표면의 국소 열전달계수의 분포는 거의 일치함을 나타 내고, 다만 내부영역과 외부영역사이 경계영역에서 그 값의 약간의 차를 보인다. 회전수의 증가로 인하여 외부 와류영역의 강도가 증가하고, 슈라우드와 허브의 존재로 인한 형상변화는 이러한 외부영역과 내부영역의 경계에서의 간섭의 영향을 자유 회전원판의 경우보다 더욱 증가시키기 때문 인 것으로 사료된다.

각각의 회전수에 대하여 반경 방향의 몇 개의 지점에서 회전원판 바닥에서부터 축 방향으로 0.1 mm씩 이송시키며 원주방향 속도를 측정하여 회전 원판에 대한 상대속도의 분포로 나타낸 Fig. 7에서 내부 영역의 상대속도는 원판의 회전수의 증가에 대해 거의 일정한 분포를 보이나, 외부영역의 상대속도는 회전원판의 회전속도가 증가함에 따라 증가하는데 이로 인해 외부 영역의 열전달의 증가가 야기된다.

3.4 유동장에 삽입된 장애물의 영향

유동장 내에 장애물의 존재는 기본 동시회전원 판 사이에서의 유동 양태를 상당히 변화시키게 되고 이러한 작동조건은 보통의 HDD내에서 헤드암에 의해 발생하는 일반적인 유동환경이 된다. 헤드암의 삽입 깊이에 따른 회전원판 표면의 열전달 효과를 고찰하기 위하여 $H/R_2 = 0.0706$, $Re = 8.50 \times 10^4$ 인 경우 허브와 회전원판 사이에 장방형의 장애물에 대하여 그 삽입깊이를 장애물의 길이로 무차원한 $K = 1/3$, $K = 1/2$, $K = 1$ 의 3가지로 변화하며 삽입하였을 경우 열/물질전달계수를 측

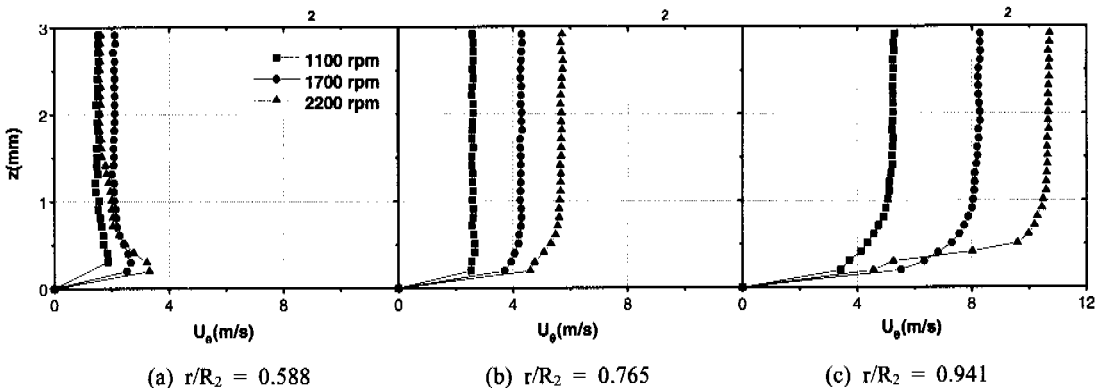


Fig. 7 Relative tangential mean velocity profiles at various rotating Reynolds numbers

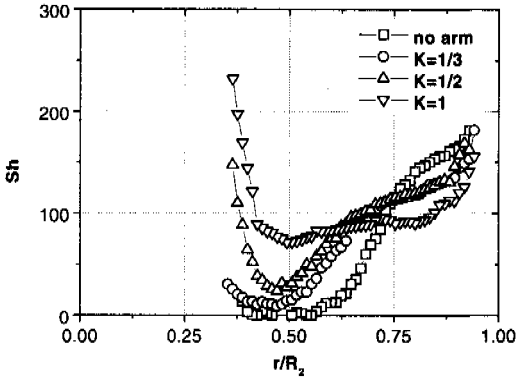


Fig. 8 Effects of various head-arm positions

정하였다. 유동장 내 삽입된 장애물에 의한 원주 방향속도와 난류강도의 변동을 장애물의 하류 $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ 지점에서 측정된 결과가 원정호 등⁽¹⁶⁾에 의해 제시되었는데, $K = 1/3$ 로 삽입된 장애물에 의한 유로내 유동의 교란은 회전원판의 안쪽으로 발달하면서 하류 90° 영역까지도 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 장애물에 의한 후류영역의 영향으로 장애물의 외곽, 허브 근처의 유동속도는 장애물이 없는 경우보다 상대적으로 증가하게 되며, 이러한 장애물의 후류영역에서는 유동 속도의 감소와 함께 상당한 난류성분의 증가가 발생하게 되는데 이러한 유동의 원주방향 운동량 감소는 원판의 회전 선속도가 작은 장애물의 끝 모서리 부분에서 더욱 심해서 반경방향의 원주 속도의 분포는 영문자 M과 같은 형상을 나타내게 된다. 또한 장애물이 없는 경우와 비교해 볼 때 무차원반경 0.7부분까지 존재하던 내부영역이 장애물의 영향으로 그 크기가 상당히 축소되거나 사라지는 것을 보인다.

Fig. 8의 국소 열전달계수의 분포로부터 외부영역의 장애물 존재로 인한 섭동성분의 증가와 운동량의 감소는 유동 혼합의 증가를 야기하나 상대적으로 내부 유동의 강도를 약화시켜서 외기의 유입을 통한 유동의 순환을 저해하여 장애물이 없는 경우보다 낮은 열전달 계수의 분포를 야기하고, 내부영역의 회전원판 표면에서는 반대의 분포 경향을 보인다. 장애물이 없는 경우 내부 영역은 강제회전을 함으로 인해 대류에 의한 열전달이 거의 일어나지 않는 열전달의 정체영역을 형성함을 보이나, 장애물의 존재로 인한 내부 강제유동 영역의 파괴와 유동 교란의 증가는 내부 영역의 원

판 표면에서의 열전달의 증가를 야기한다. 즉, 유로내 장애물의 존재는 회전원판표면에 보다 균일한 열전달 분포형태를 나타나게 한다.

4. 결 론

회전원판 위의 유동이 자유 회전 원판기준 완전 층류유동($r^2/R_2^2 \times Re < 20,000$)인 동시 회전원판에서의 열전달 특성과 유동특성에 대하여 열/물질전달 실험, 유동측정 실험 및 수치해석 결과는 다음과 같다.

(1) 동시 회전원판사이의 간격 변화에 대하여 본 실험조건하 국소 열전달 계수의 분포는 변화가 미비하였으며 이는 간격의 변화가 동시 회전원판사이의 유동형태에 큰 영향을 미치지 않기 때문이다.

(2) 회전 Re 증가에 대하여 내부영역에서 열전달계수는 거의 변화 없으나, 외부영역에서 원판 표면의 국소 열전달계수의 분포는 증가하여 평균적으로 열전달은 1100 rpm의 경우에 비해 1700 rpm이 25%, 2200 rpm이 73% 증가하였다. 하지만 자유 회전원판의 평균 열전달계수로 일반화한 경우 그 분포 형태는 내·외부 영역의 경계에서 미소한 차를 보이거나 거의 일치함을 보인다.

(3) 장애물이 삽입되는 경우, 장애물에 의한 외부 와류구조의 파괴와 함께 유동의 운동량의 감소는 외부 영역의 원판 표면 열전달을 감소시키고, 또한 강제회전 영역의 축소 혹은 붕괴를 통한 유동혼합의 증가는 내부영역 내 회전원판 표면의 국소 열전달 계수 분포의 증가를 야기하여 전체적으로 균일한 열전달계수의 분포를 발생시키게 된다.

위의 결과에서 동시 회전디스크 유로 내부에서 강제 회전 영역의 존재는 취약한 열전달환경 및 순환 유동구조를 형성하고, 이러한 유동구조는 디스크의 회전수의 향상이나 허브의 높이 변화에 대해서도 크게 변화하지 않는 결과를 나타내었다. 보다 취약한 발열조건을 갖는 고속 회전의 HDD내 동시 회전디스크의 경우 내부 정체 영역의 존재는 디스크 표면 불균일 열팽창 및 표면의 온도상승에 따른 자성체 기능의 약화가 발생할 수 있다. 이에 따라 동시 회전디스크 유로 내부의 새로운 순환유동 구조를 형성하여 디스크 표면의 열전달 효과를 향상시킴과 동시에 내부 정체 유동영역을 해소하여 순환 공기의 여과, 냉각 기능의 향상을 위한 연구가 필요하다.

후 기

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

참고 문헌

- (1) Abrahamson, S. D., Chiang, C., and Eaton, J. K., 1990, "Flow Structure in Head-disk Assemblies and Implications for Design," *ASME Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 1, pp. 111~132.
- (2) Szeri, A. Z., Schneider, S. J., Labbe, and F., Kaufman, H. N., 1983, "Flow Between Rotating Disks(Part 1. Basic Flow," *ASME J. Fluid Mechanics*, Vol. 134, pp. 103~132.
- (3) Bakke, E., Kreider, J. F., and Kreith, F., 1973, "Turbulent Source Flow Between Parallel Stationary and Co-rotating disks," *ASME J. Fluid Mechanics*, Vol. 58, pp. 625~632.
- (4) Humphrey, J. A. C., Chang, C. J., Li, H., and Schuler, C. A., 1990, "Unobstructed and Obstructed Rotating Disk Flows: Summary Review Relevant to Information Storage Systems," *ASME Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 1, pp. 79~110.
- (5) Tzeng, H. H., and Munce Jr., A. C., 1992, "Flows between Shrouded Co-rotating Disks with Radial and Oblique Obstructions," *ASME Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 4, pp. 383~392.
- (6) Chang, C. J., Schuler, C. A., Humphrey, J. A. C., and Greif, R., 1989, "Flow and Heat Transfer in the Space between Two Co-rotating Disks in an Axisymmetric Enclosure," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 625~632.
- (7) Chang, C. J., Humphrey, J. A. C., and Greif, R., 1990, "Calculation of Turbulent Convection between Co-rotating Disks in Axisymmetric Enclosures," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 2701~2720.
- (8) Schuler, C. A., Usry, W., Weber, B. Humphrey, J. A. C., and Greif, R., 1990, "On the Flow in the Unobstructed Space between Shrouded Co-rotating Disks," *Physics of Fluids A*, Vol. 2, pp. 1760~1770.
- (9) Humphrey, J. A. C., Schuler, C. A., and Iglesias, I., 1992, "Analysis of Viscous Dissipation in Disk Storage Systems and Related Flow Configurations," *Physics of Fluids A*, Vol. 4, pp. 1415~1427.
- (10) Humphrey, J. A. C., Schuler, C. A., and Weber, D. R., 1995, "Unsteady Laminar Flow Between a Pair of Disks Co-rotating in a Fixed Cylindrical Enclosure," *Physics of Fluids*, vol. 7, pp. 1225~1240.
- (11) Suzuki, H., and Humphrey, J. A. C., 1997, "Flow Past Large Obstructions Between Co-rotating Disks in Fixed Cylindrical Enclosures," *J. Fluids Engineering*, Vol. 119, pp. 499~505.
- (12) Chyu, M. K., and Bizzak, D. J., 1992. "Surface Heat Transfer in a Hubbed Rotor-Stator and a Clamped Co-rotating Disks Assembly with and without Axial Source Flow" *ASME Adv. Info. Storage Syst.* Vol. 4, pp. 393~404.
- (13) 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" *J. Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 1051~1054.
- (14) Mills, A.F., 1995, "Basic Heat and Mass Transfer," *RICHARD D. IRWIN, INC.*, pp. 296~300.
- (15) 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.
- (16) 원정호, 류구영, 조형희, 1999, "구속된 단일 회전원판과 동시 회전원판 내부의 유동특성," 대한기계학회 논문집 B. 제23권 제9호. pp. 1192~1200.