

<論 文>

# 균일 전단류내에 있는 원봉주위의 국소 대류 물질 전달에 관한 실험적 연구

류 명 석\*\* · 성 형 진\* · 정 명 균\*\*

(1989년 1월 23일 접수)

## Experimental Study on Local Convective Mass Transfer From a Circular Cylinder in Uniform Shear Flow

Myung Seok Lyu, Hyung Jin Sung and Myung Kyoong Chung

**Key Words:** Uniform Shear Flow(균일전단유동), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화기법), Shear Parameter(전단계수), Local Mass Transfer Rate(국소물질전달률)

### Abstract

A naphthalene sublimation technique based on the heat/mass transfer analogy is used to investigate the circumferential mass transfer from a circular cylinder in an approaching uniform shear flow. Experiments are performed in a wind tunnel (450×450mm<sup>2</sup>) with a shear flow generator which is specially manufactured for generating variable shear rates ( $S$ ). The effects of an approaching shear flow are correlated with mass transfer coefficients. It is found that the local mass transfer rate on a circular cylinder is characterized with the shear parameter  $K_d$  defined as  $Sd/U_c$ , where  $d$  is the radius of cylinder and  $U_c$  is the approaching velocity at the center of cylinder. The angle on the corresponding to minimum Sherwood number is approximately proportional to the shear parameter on an upper and down circular cylinder ( $0 < K_d < 0.132$ ). Changes on the averaged mass transfer rate are not significant for small  $K_d$ , which are slightly proportional to  $K_d^2$ , but the local mass transfer rates are significantly changed with the approaching shear flow.

### 1. 서 론

원봉은 강제대류에 의한 열 및 물질전달 현상을 연구하는 가장 편리한 모델로서 오랫동안 연구되어 왔다. 원봉주위의 유동현상 그리고 열전달에 대한 연구는 열교환기 설계 등 공학적으로 많이 응용되며, 기초학문연구에 좋은 자료로 이용되고 있다.

이들에 대한 연구는 현재까지 많은 진행이 있었으며, 특히 원봉의 직경을 특성길이로 한 레이놀즈수를 변수로 하여 고찰한 다양한 열전달 실험식들이 있다. 그러나 이 실험식들은 모두 원봉으로의 접근 유동이 평균속도분포가 일정한 균일유동에 대한 가정으로서 실제 공학적인 문제에 있어서는 전단유동인 경우가 많다.

일반적으로 균일한 난류유동은 유동의 떨림속도(fluctuation velocity), 속도의 상관관계 등 난류의 구조들이 위치에 관계없이 일정한 값을 가지는

\*정회원, 한국과학기술대학 기계공학과

\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

난류장을 말한다. 균일속도구배의 난류유동은 위의 성질에 평균속도의 구배가 어느 한 방향으로 일정한 유동이다. 경제층유동, 관유동 그리고 젯트유동과 같은 일반적인 유동에서는 경제조건의 영향 때문에 유동현상이 복잡해져서 해석이 어려워지는데 비해서 간단한 균일전단유동내에서의 유동현상간의 관계는 비교적 간단하지만 이 관계는 난류유동에서 중요한 의미를 가지고 있다. 그것은 전단유동이 난류유동을 생성하는 주된 요인이 되며, 유동전구간에서 난류의 생성이 또한 균일하기 때문에 난류유동의 기본적인 이해에 큰 도움이 되는 기초실험 유동 형태이다.

이러한 균일 전단유동이 실험적으로 처음으로 만들어진 것은 Owen과 Zienkiewicz<sup>(1)</sup>에 의해서이다. 그들은 초기에 균일한 유동이 비균일 그리드를 지나 균일구배의 유동으로 될때 그리드가 가지는 저항계수의 분포를 계산·적용하였다. 이를 바탕으로 Rose<sup>(2)</sup>는 그리드를 설계하여 전단유동을 얻으려고 시도하였는데, 유동의 불안정을 피하기 위하여 solidity를 0.4이하로 줄였는데 이것 때문에 얻을 수 있는 평균속도의 구배는 한정되어진다. 평균속도구배는 전체 닥트의 높이를  $H$ 라고 할 때  $0.1H$ 에서  $0.9H$ 까지 2%이내에서 거의 일정하게 얻어졌고 하류로까지 거의 변하지 않았다. 그는 또한 그리드를 사용치 않고 하니콧을 닥트의 높이에 따라 포물선 모양으로 잘라서 내부저항 대신으로 사용하여 전단유동을 생성시켰다<sup>(3)</sup>. 여기에 균일도를 높이기 위하여 균일스크린(solidity는 0.34)을 하류에 설치하여 균일한 전단유동을 얻었으며, 균일전단유동과 그리드와의 난류 상호관계를 연구하였다. Champagne, Harris와 Corrsin<sup>(4)</sup>은 이 Rose의 실험보다 더 균일전단유동에 가까운 유동을 생성시켰다. 이들은 Rose와 같이 비균일그리드를 사용치 않고 풍동내에 10개의 channel을 만들고, 이

channel전에 스크린 슬롯들(slots)을 달아서 이 스크린의 저항값을 조절함으로써 채널의 출구로부터 풍동닥트의 높이의 약 9배 되는 지점에서 평균속도구배  $12.9\text{sec}^{-1}$ 의 접근균일전단유동을 얻었다. 각 채널에서 길이척도를 한정지어주기 때문에 보다 균일한 전단유동이 생성될 수 있다.

균일한 속도구배를 가진 유동에 관한 연구는 위에 열거된 것 이외에도 난류구조의 특성에 관하여 많이 있다. Table 1에서와 같이 평균구배의 중심선속도( $U_c$ )와 평균속도구배(혹은 전단률,  $S = \partial U / \partial y$ )의 관점에서 정리해보면  $U_c$ 의 변화는 공기에서 대체로 5m/sec에서 15m/sec에 속하며, 평균속도구배는 Mulhearn과 Luxton<sup>(5)</sup>과 같이 구배가  $5.45\text{sec}^{-1}$ 에서 가장 구배가 큰 Tavoularis와 Corrsin<sup>(6)</sup>의  $46.8\text{sec}^{-1}$ 까지 변하고 있다. 하지만 여기서 주목할 것은 각각의 평균속도구배가 어떤 한 정된 값으로 고정되어 있음을 발견할 수 있다.

본 연구에서는 평균속도구배를 용이하게 변화시킬 수 있는 전단유동발생기를 제작하였다. 최고속도구배는  $38\text{sec}^{-1}$ 까지 얻을 수 있으며 최대중심선속도는 15m/sec까지이다. 10개의 채널(두께 2mm인 알루미늄판)로 유동단면을 등분하였으며, 각 채널의 내부저항조절 방법으로 마름모형태의 막대인 knob을 설치하였다.

나프탈렌 승화법을 이용하여 평균속도분포가 일정한 균일유동에 원봉을 설치하여 국소대류물질 전달량을 실험으로 측정하는 연구는 Sogin과 Subramanian<sup>(7)</sup>에 의해 이루어졌다. 레이놀즈수가 122,000, 218,000 그리고 342,000에 대해 실험을 수행하여 기존의 열 및 물질전달 데이터와 비교하여 좋은 일치율을 보였으며, 특히 정체점(stagnation point)에서부터 유동박리가 일어나기까지의 층류유동결과는 근사경제층이론에서 구한 이론적 계산과 잘 맞고 있음을 알아내었다. 이와 비슷한 실험으로

Table 1 Summary of centerline mean velocity( $U_c$ ) and mean strain rate ( $S$ )

	$U_c$ (m/sec)	$S$ ( $\text{sec}^{-1}$ )
Rose(1966)	15.4	13.6
Champagne, Harris & Corrsin(1970)	12.4	12.9
Rose(1970)	15.4	12.2
Mulhearn & Luxton(1975)	4.5	5.5
Ahmad, Luxton & Antonia(1967) <sup>(11)</sup>	5.8	6.0
Tavoularis & Corrsin(1981)	12.4	46.8

Kestin과 Wood<sup>(8)</sup>는 레이놀즈수를 75,100 그리고 125,000에 대하여 원봉주위의 물질전달량을 측정하였는데, 그들은 나프탈렌 대신  $P-C_6H_4Cl_2$ 라는 승화물질을 이용하였다. 난류강도의 변화에 따라 물질전달량을 측정하였는데, 층류경계층영역에서는 난류강도가 증가할수록 물질전달량은 항상 증가하고 있다. 나프탈렌 승화법을 여러 형태의 유동현상에 적용, 실험한 경우는 많이 있으며, 최근 원봉 혹은 사각봉이 벽계층내에 세워져 있을 때 3차원 유동의 물질전달율을 측정한 연구들이 있다<sup>(9,10)</sup>.

본 실험의 주요목적은 크게 두 가지로서 우선 균일전단유동을 생성할 수 있는 장치를 고안, 전단유동의 발달과정과 유동특성을 파악한다. 그리고 나프탈렌 승화법을 이용, 여러 가지로 전단율을 변화시켜감에 따라 원봉주위의 국소물질전달량이 어떻게 변하는가를 측정하여 기존의 물질전달데이터와 비교하려고 한다. 전단율의 변화에 따라 원봉주위의 상하 최소 물질전달점의 변화를 고찰하며 이는 유동박리현상과 밀접한 관계가 있다.

## 2. 열 및 물질전달유추해석

Fick's의 확산법칙에 따라 벽면에서의 국소물질전달율은 나프탈렌의 밀도분포(혹은 승화농도분포)를 알면 구할 수 있다. 그리고 표면에서의 나프탈렌의 대류물질전달을  $\dot{m}$ 은 물질전달 계수  $h_m$ 과 표면에서의 나프탈렌 승화밀도( $\rho_{v,w}$ )로 나타내어진다.

$$\dot{m} = h_m(\rho_{v,w} - \rho_\infty) \quad (1)$$

여기서  $\rho_\infty$ 은 경계층밖의 나프탈렌 농도로서 본 실험에서는 무시할 수 있다. 또한 일정시간( $\Delta t$ ) 유동장내에 노출한 후 나프탈렌 원봉주위에서의 승화량(국소승화깊이  $\Delta r$ )은 나프탈렌의 밀도  $\rho_s$ 와 함께 나프탈렌의 대류물질전달율을 구할 수 있다.

$$\dot{m} = \rho_s \Delta r / \Delta t \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서부터 국소대류물질전달계수는

$$h_m = \frac{\rho_s \Delta r / \Delta t}{\rho_{v,w}} \quad (3)$$

이 되며, 나프탈렌 표면에서의 승화밀도  $\rho_{v,w}$ 는 이상유체로 가정한다.

$$\rho_{v,w} = \frac{P_v}{RT}, \quad P_v = \exp(31.49 - 8673/T) \quad (4)$$

여기서 나프탈렌의 승화압력은 온도의 함수이며<sup>(11)</sup>,  $T$ 는 나프탈렌 표면 가까이에서의 절대온도로서 열전대로 평균하여 구한다.  $R$ 은 이상기체상수이며

물질전달의 무차원수인 Sherwood수( $Sh$ )는 대류 물질전달계수와 나프탈렌의 공기에서의 물질확산계수( $D_f$ )로서 정의되는데, 이는 열전달의 Nusselt수( $Nu$ )에 해당된다.

$$Sh = h_m d_f / D_f \quad (5)$$

## 3. 실험방법 및 장치

### 3.1 풍동 및 전단유동발생기

본 실험을 위하여 제작된 풍동은 개방방출형(open-blower type)으로서 송풍기, 확대노즐, 정류실(settling chamber), 축소(contraction), 측정다트 그리고 출구(exit diffuser)로 구성되어 있다<sup>(13)</sup>. 최대풍속은 33m/sec 정도이고 축소후의 난류강도는 0.5% 미만이며, 송풍기는 소음이 작고 풍량(400m<sup>3</sup>/min)이 많은 원심형 다단(multiblade) 송풍기를 선택하였다. 스크린(3장)과 하니콧의 압력손실, 확대노즐 및 출구에서의 손실 그리고 마찰손실 등을 고려하여 구동모터는 15HP로 하였으며 속도조절을 위하여 교류용 속도변화 조절기를 사용하였다. 확대노즐은 유동박리가 생기지 않도록 경계층을 조절하기 위하여 중간부분에 1장의 스크린을 설치하였으며, 전체 확대각이 5° 이하가 되도록 하였다.  $\beta$ (open-area-ratio)가 0.6 이상인 3장의 스크린과 1장의 하니콧으로써 정류실을 구성하였으며, 전체길이는 2200mm이다. 축소부분의 설계의 중요목적은 출구에서의 일정한 속도를 만들어 주는 것으로 유동박리가 없어야 하며 또한 출구 가까이의 경계층의 두께가 되도록 얇아야 한다. 이를 위해 축소부분의 길이는 1300mm이며, 축소면적비는 8.35로 선택하였으며, 곡면의 모양은 Morel<sup>(14)</sup>의 방법으로 계산하였다.

전단유동을 발생하기 위하여는 닥트를 수직으로 10개의 알루미늄판(두께 2mm, 면적 500mm<sup>2</sup>×500mm)으로 등간격 채널로 나누었다. 이는 각 채널에서 난류의 길이척도를 한정시켜주기 때문에 보다 균일한 전단유동을 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 각 채널에서의 유량조절을 위하여 입구에 마름모형태의 긴 막대(knob)를 설치하였으며, 이 knob을 지난 후 유동의 후류발생 등으로 인한 난류의 이방성(anisotropy)을 줄이기 위하여 언덕을 만들어 유동면적을 축소시켰다. 또한 유동박리를 피하기 위하여 유선모양으로 만들었는데 유동의 길이척도를 줄이고 수평, 균일하게 하기 위한 직경 8mm의 강

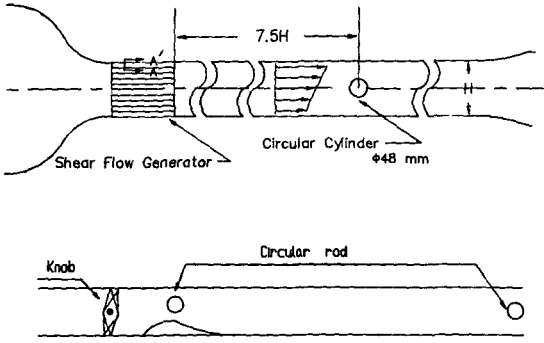


Fig. 1 Arrangement of a shear flow generator in a low speed wind tunnel

봉을 유선모양언덕위와 전단유동발생기 출구에 설치하였다<sup>(15)</sup>. 이와 유사한 전단유동발생기는 Chung과 Kyong<sup>(16)</sup>이 제작하였는데 그들은 15개의 채널로 유동단면을 등분하였다. 그들은 각 채널의 내부저항 조절방법으로 철판두께(1.5mm)을 천공하여 하나는 고정되어 있고 또 하나는 움직이면서 댐퍼의 열려있는 부분의 면적의 전체면적에 대한 비( $\beta$ )를 조절할 수 있도록 하였다. 하지만 이 댐퍼 제작의 어려움과 하나의 균일전단유동을 용이하게 얻을 수 있는 대안으로 마름모형태의 knob을 사용하였으며, 비교적 쉽게 균일전단유동을 얻을 수 있었다. 전단유동발생기의 풍동에서의 설치위치와 자세한 구조는 Fig. 1에 나타나 있다.

3.2 속도측정 및 자료처리

덕트내의 원하는 위치에서의 속도분포를 일괄적으로 구하기 위하여 24개의 피토크관이 일렬로 구성

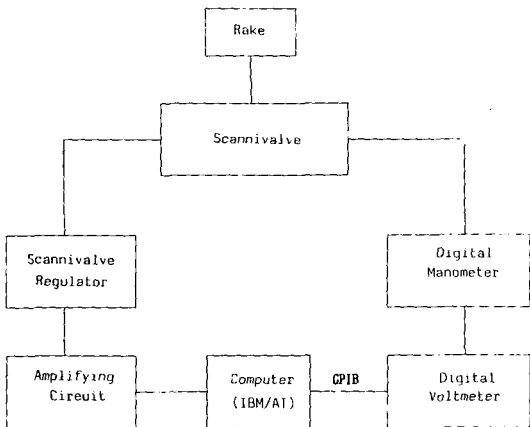


Fig. 2 Schematic diagram of instrumentations

되어 있는 레이크를 설치하였다. 레이크를 통해서 나오는 압력은 전체압력으로서 벽면에서의 정압을 빼면 순수 동압이 되며 이를 Scannivalve(SCANCO)를 통하여 디지털 압력계로 전달된다. Scannivalve는 각각의 피토크관을 순서적으로 레이크와 압력계로 연결시켜 주며, 이의 조절을 위하여는 컴퓨터에서 나오는 입력 신호를 증폭하여(5V에서 12V로) 사용하였다. 원하는 위치에서 균일전단유동을 잘 얻기 위하여는 구하여진 속도분포를 보고 전단유동발생기의 knob을 조절하여 반복적으로 구하였으며, 이를 위해서는 컴퓨터로써 동시에 처리할 수 있도록 하였다. 전체 자료처리를 GPIB로 연결한 구성도가 Fig. 2에 나타나 있다.

3.3 나프탈렌 원봉 모형제작 및 승화량 측정

균일전단유동내에서 실험할 원봉은 나프탈렌 피복부분을 포함해서 설치될 용이하게 하기 위해 3개의 부분으로 나누어서 스테인리스강관(두께 4mm)으로 제작하였다. 원봉의 직경은 전체 전단유동장을 방해하지 않는 범위에서 최대크기로 48mm를 선택하였으며, 길이는 덕트의 수평넓이와 같은 490mm이다. 원봉이 유동방향에 직각방향으로 수평하게 놓이기 때문에 2차원이라 가정하였으며, 원봉의 3개 부분중 중간부분(50mm)에서만 나프탈렌을 피복하여 승화된 양을 측정하였다(Fig. 3). 비대칭전단유동내에 매 실험시 원봉을 설치해야 하므로 정확한 정제점을 찾기 위해 원봉양단에 정밀연결선으로 표시하였으며 측정시 진동이 없게 고정하였다.

중간부분의 나프탈렌 피복을 위하여 스테인리스강관을 표면에서 깊이 2mm, 길이 50mm로 파내었으며, 나프탈렌 피복후의 직경과 나프탈렌이 피복되지 않은 나머지 스테인리스강관의 직경이 정확히

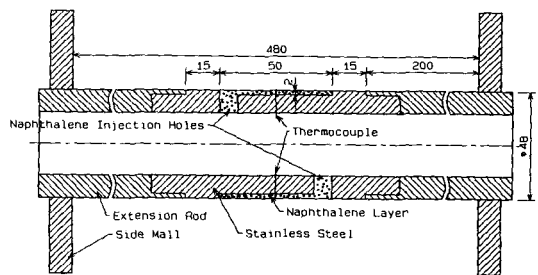


Fig. 3 A schematic view of naphthalene cylinder (dimensions in millimetres)

맞도록 알루미늄 모듈드를 2개의 반원형태로 제작하였다(길이 80mm, 두께 25mm).

깨끗하고 정밀한 나프탈렌 표면가공을 위하여는 주조(casting)가 제일 좋으며, 이 경우 알루미늄 모듈드의 내부표면은 정밀가공하였다. 나프탈렌을 녹여 충분히 주입되게 하기 위하여 나프탈렌 피복강관의 상하내부에 2개의 주입구를 만들었으며, 아래로부터 위로 주입하였다. 실제 상당한 시간동안의 나프탈렌 승화량은 대단히 작아서 (승화깊이는  $8.5 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-4}$  mm/min 정도) 나프탈렌 피복두께 2mm는 충분하며, 온도에 민감한 나프탈렌 표면온도를 정확히 재기 위해 표면에 열전대를 부착시켰다<sup>(9,10)</sup>.

나프탈렌이 주조된 후 모듈드를 분리시킬 때는 알루미늄과 나프탈렌의 열팽창률 차이를 이용하는 데, 알루미늄 모듈드를 76°C ~ 79°C 정도로 급가열시키면 알루미늄의 열팽창률이 크므로 빨리 팽창되며 상하전단력을 이용하여 분리시킨다(구리 모듈드도 동시에 제작하여 알루미늄 모듈드와 같이 사용하였음). 이때 알루미늄 모듈드의 정확한 온도측정을 위하여 열전대를 모듈드내에 설치하였으며 좋은 나프탈렌 주조 표면을 위해서는 상당한 시행착오를 요구한다. 왜냐하면 알루미늄 모듈드가 과열되면 주조된 나프탈렌이 녹으며, 반대로 온도가 낮으면 알루미늄 모듈드가 분리되지 않는다.

유동장내에 일정시간 노출후 나프탈렌의 승화된 양을 정확히 측정하기 위하여는 정밀한 원형도 측정장비가 요구된다. 이를 위하여 원형도 측정장비(Roundness Measuring Instrument, Ronocom 10A)를 사용하였는데 이 장비는 원래 정밀선반가공후 가공된 원형면을 측정하기 위한 고급장비로서 20,000배까지 확대측정이 가능하다. 측정시에는 원봉의 상하좌우 기본선을 정확히 맞춘 후 본래의 피복된 나프탈렌 형태와 실험후 다시 정확한 기본선에 맞추어 승화된 나프탈렌의 형태를 동시에 열선용지에 그려진다. 이 차이가 구하고자하는 나프탈렌의 승화된 양이며, 온도에 민감한 나프탈렌이므로 냉방설비가 된 곳에서 승화깊이를 측정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 균일전단유동장의 특성

풍동의 축소부분을 지난 균일속도유동장이 전단유동발생장치를 지난후 처음에는 상당히 불안정하

지만, 유동이 하류로 진행할수록 안정된 평균속도 분포를 가지게 되며 대체로 닥트높이( $H$ )의 6~7배 정도되는 하류에서 안정된 전단유동장이 형성된다. 평균전단율은  $0.05H$ 에서  $0.88H$ 에서 구한 식으로서 2.5% 이내의 오차범위에 속하며, 속도가 큰 윗부분보다 속도가 작은 아랫부분의 경계층의 두께가 얇음을 알 수 있다. 난류강도측정은 레이저를 이용한 속도계(TSI 9100-3, dual beam mode)를 사용하였으며, 전방산란광(forward scattering beam)을 감지하여 Counter형(TSI 1990C)으로 신호처리 하였다. 산란입자는 평균크기가  $2\mu\text{m}$ 인 MgO(light)로서 fringe 간격이  $3.26\mu\text{m}$ 이므로 적당한 크기이며 원봉이 위치한 곳( $X=7.5H$ )에서의 흐름방향 난류강도분포(평균 3%)는 중심선속도를 기준으로 하여 아랫부분이 윗부분보다 약간 큼을 알 수 있다. 평균속도구배를 용이하게, 비교적 짧은 시간내에 얻을 수 있는 장점이 있지만 난류강

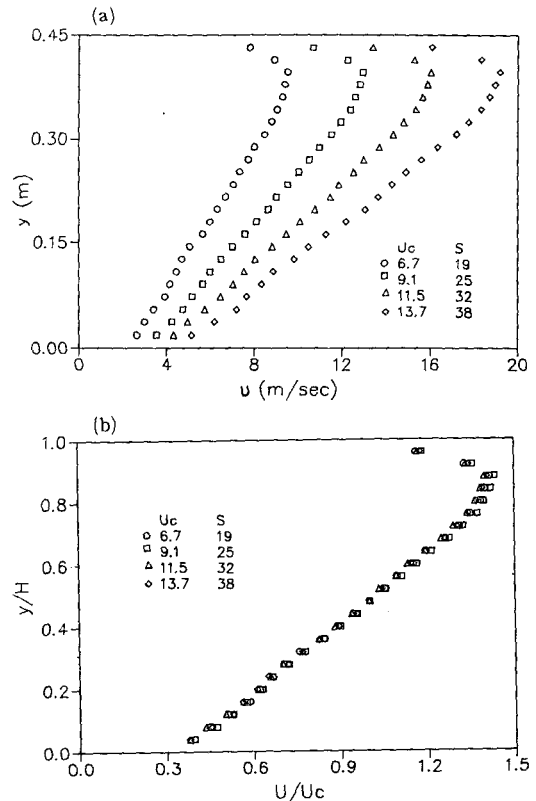


Fig. 4 (a) Velocity profiles of the stream-wise mean shear flow at  $X=7.5H$   
(b) Similarity distribution of mean shear velocity

도의 크기가 상대적으로 큰 것이 본 전단유동발생기의 단점이라고 할 수 있겠다.

다음은 전단유동발생기의 각 채널의 내부저항을 변화시키지 않은 상태에서(즉 knob의 상태를 고정 시킴) 송풍기의 풍량을 조절하여 중심선 속도  $U_c$ 를 변화시킨 것이 Fig. 4의 (a)에 나타나 있다. 처음  $U_c$ 를 9.1m/sec에서 전단율( $S$ )를  $25\text{sec}^{-1}$ 로 얻은 상태에서 이번에는  $U_c$ 를 6.7m/sec, 11.5m/sec 그리고 13.7m/sec로 변화시킬 때, 평균속도구배는  $19\text{sec}^{-1}$ ,  $25\text{sec}^{-1}$ ,  $32\text{sec}^{-1}$  그리고  $38\text{sec}^{-1}$ 로 각각 구하여짐을 보여주고 있다. 처음 상태( $U_c=9.1\text{m/sec}$ ,  $S=25\text{sec}^{-1}$ )보다는 균일도가 떨어지지만 대체로 양호함을 나타내고 있으며,  $U_c$ 가 증가함에 따라  $S$ 의 선형도 영역이 좁아지고 있다. 여기서 균일전단유동에서 얻을 수 있는 중요한 무차원계수를 발견할 수 있는데<sup>(17)</sup>, 평균속도구배와 중심선속도 그리고 덕트의 높이( $H$ )로써 다음과 같이  $K$ 를 정의할 수 있다.

$$K = \frac{SH}{U_c} \quad (7)$$

Fig. 4의 (b)에  $K=1.236$ 에 대한 무차원 평균속도 분포가 거의 일치되게 구하여짐을 알 수 있다.

#### 4.2 균일전단 유동장내의 원봉의 국소 물질 전달

균일전단유동대신 우선 속도구배가 없는 균일유동장내에 있는 가열된 원봉주위의 대류 열전달 과정을 알아보면 대체로 레이놀즈수가 낮은 영역에서는 원봉주위의 유동박리점에서 열전달계수가 최소로 나타난다<sup>(19)</sup>. 이는 원봉의 정체점에서부터 각도  $\theta$ 가 증가함에 따라 원봉 표면의 정압은 감소하고 반면 경계층의 두께는 증가하게 되는데, 이로 인하여 대류열전달은 점차 감소하다가 유동박리점 근방에서 최소가 된다. 유동박리점 이후로는 박리된 유동의 혼합이 증가하여 열전달계수도 계속 증가하게 되며, 만일 레이놀즈수가 높을 경우 원봉을 따라 뒤로 밀린(delayed) 난류경계층의 유동박리점에서 제 2의 대류 열전달 최소점이 나타난다고 알려져 있다.

원봉주위의 국소열전달계수는 유동박리를 수반하기 때문에 레이놀즈수에 따라 유동박리점의 위치가 변하며 유동박리후 복잡한 유동현상으로 인하여 해석적으로 정확히 구하는 것은 불가능하다. 단지 층류영역에서 유동박리가 일어나기전까지 상사변수

(similarity variable)를 사용하여 대략적인 해를 구할 수 있는데<sup>(7)</sup>, 이는 Falkner-Skan 방정식의 일종인 wedge해를 유동장경계층에서 구한 다음 원봉주위의 열경계층계산에 적용한다. 여기서 국소무차원수  $Sh/Re^{1/2}$ 를 원봉의 정체점에서부터 각도  $\theta$ 에 따라 해석적·실험적 방법으로 구한 것이 Fig. 5의 (a)와 (b)에 나타나 있다. 실선은 층류유동에 대한 Frössling의 이론식에서의 열전달률을 열 및 물질전달 사이의 유추식을 사용하여 물질전달률로 환산한 것이며, 이를 본 실험에서의 나프탈렌 원봉에서 구한 물질전달계수와 비교하면 실험치가 이론적 계산보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 여기서 균일유동의 이론식과 전단유동에서의 실험결과와 직접 비교할 수는 없지만, 전단유동의 중심선속도  $U_c$ 를 기본으로 한  $Re_c$ 수를 균일유동속도를 기본으로 한  $Re$ 수와 같다(한 단면에서의 유량은

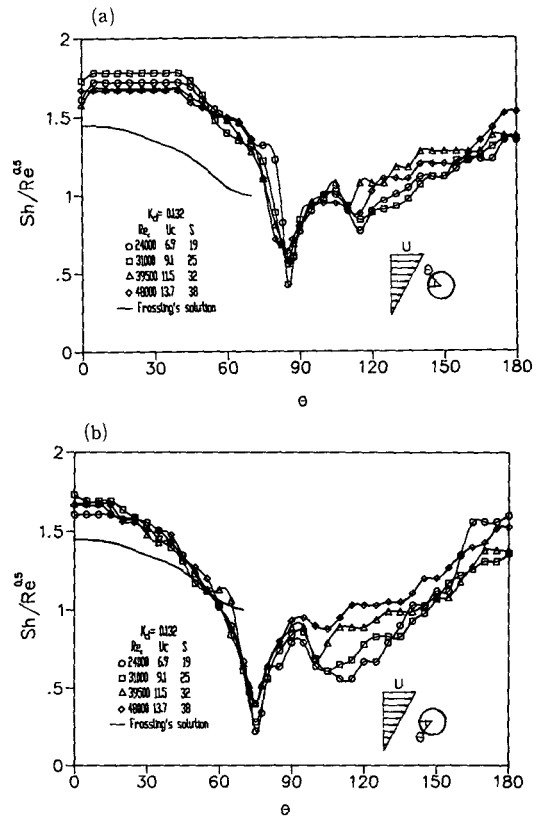


Fig. 5 (a) Comparison between theory and experiment of local rate of mass transfer around an upper circular cylinder  
(b) Around a down circular cylinder. Theory due to Frössling<sup>(7)</sup>

같음)고 가정하였다. Lowery와 Vachon<sup>(18)</sup>에 의하면 자유유선난류(free-stream turbulence)가 원봉주위의 열전달량에 영향을 미친다고 하였으며, 외부난류강도가 증가할수록 원봉주위의 열전달계수는 증가한다고 볼 수 있다.

균일전단유동내의 원봉주위의 국소대류물질전달량을 구하기 위하여 기존의 균일전단유동 무차원수인  $K_d$ 에서 원봉의 직경인  $d$ 를 기본으로 한 무차원수  $K_d$ 를 정의하면  $K_d = Sd/U_c$ 이 된다. Fig. 5에서의  $K_d$ 는 0.132가 되며  $U_c$ 가 변화하면  $U_c$ 를 기본으로 한  $Re$ 수가 변하므로 만일  $S$ ,  $U_c$  그리고 공기의 동점성계수인  $\nu$ 가 주어지면  $K_d$ 와  $Re$ 수는 원봉의 직경  $d$ 에 비례하고 있다.

접근유동이 균일유동이면 ( $K_d=0$ ) 원봉의 상·하가 대칭이 되며  $Re$ 수가  $10^5$ 보다 작은 경우 정체점에서부터  $80^\circ$  부근에서 국소대류 물질전달계수가 최소가 되지만<sup>(7,9)</sup>, 접근유동이 전단유동인 본 나프탈렌을 이용한 실험에서는 상단이 뒤로 연장되어  $85^\circ$  부근, 하단이 앞으로 당겨져  $75^\circ$  부근에서 물질전달계수가 최소로 나타남을 Fig. 6에서 발견할 수 있다. 그리고 상단이 하단보다 열전달계수의 감소율이 완만함을 알 수 있다.

접근유동이 평행되게 균일한 속도로 올 때와 균일전단유동일 때 유동박리점이 바뀌는 것에 대한 해석으로는 우선 원봉상단이 하단보다 속도가 크기 때문에 외부의 자유유선 ( $U_\infty$ )에서와의 압력차이가 상단이 하단보다 크게 되어 원봉상단에서 유동장을 눌러주어 유동박리를 뒤로 지연시킬 것이다. 또 접근전단유동은 유선방향으로 와동(vorticity)이 발생하며 이 경우 정체점은 상단으로 약간 이동할 것으로 예측되며 [Fig. 5(a)] 와동이 원봉을 만났을 때 원봉상단은 유동진행방향과 같은 방향으로 와동이 존재하므로 유동박리를 지연시켜 줄 것이며, 반대로 하단에서는 와동의 방향과 유동진행이 반대로 되어 유동박리를 촉진할 것이다. 본래 경계층의 정의는 경계층 부근의 속도크기가 경계층 외부의 속도크기와 거의 같은 영역을 말하는데, 전단유동인 경우 경계층 외부의 속도가 일정하지 않고 계속 증가(혹은 감소)하기 때문에 정확한 경계층의 판단이 불가능하다. 그러나 경계층 내부의 와동( $\omega$ )이 경계층 외부의 와동( $\omega_\infty$ )과 거의 같다고 정의한다면 본 실험의 닥트 내에서의 유동발달과정에서 나타난 현상처럼 전단유동이 양의 방향인 경우 ( $S>0$ ) 닥트상단의 경계층의 두께가 닥트하단이 두께보다 두

꺼움을 알 수 있다(선형구간은  $0.05H$ 에서  $0.88H$ ). 이 관계를 원봉에 적용하면 접근유동량의 전단유동인 경우 ( $S>0$ ) 원봉상단의 경계층의 두께가 하단보다 얇게 될 것이며, 그러므로 상단에서의 유동박리는 뒤로 지연되고, 경계층의 두께가 두꺼운 하단에서는 유동박리가 앞으로 당겨질 것이다.

전단유동의 속도구배율의 변화에 따라 국소물질전달계수가 어떻게 변화하는가를 알아보기 위하여 Fig. 5의 (a)의 네 가지 경우에 대하여  $Sh$ 수를 측정된 것이 Fig. 6에 나타나 있다. 원봉 상·하단에 대하여 각각 나타내었는데 여기서 중요한 특성은 원봉의 각도에 따라 레이놀즈( $Re_c$ )수와 전단률이 달라도  $Sh$ 수의 전체적인 형상 즉 정성적인 형상이 서로 같다는 것이다. 특히  $Sh$ 수의 최소점이 전단률이 달라도 거의 같은 각도에서 일어나며,  $Sh$ 수

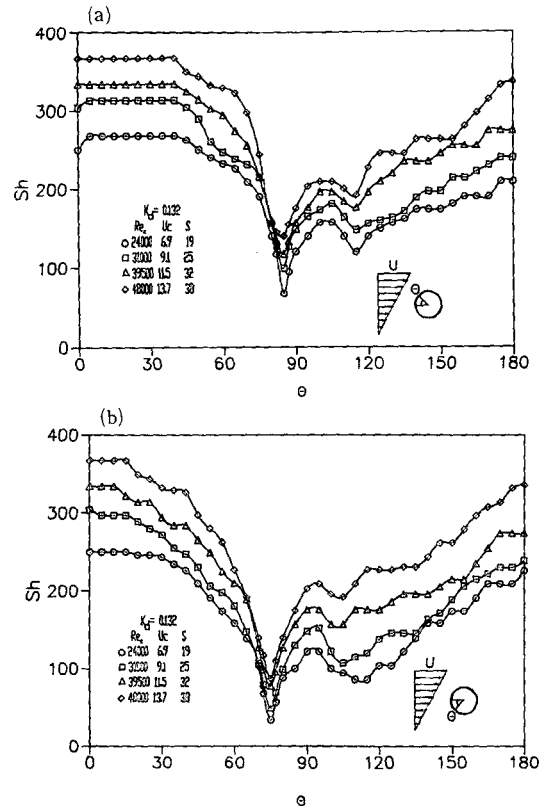


Fig. 6 (a) Local rate of mass transfer around an upper circular cylinder at  $K_d=0.132$   
(b) Around a down circular cylinder at  $K_d=0.132$

의 절대치는  $Re_c$ 수의 함수로서  $Re_c$ 수가 증가하면  $Sh$ 수도 증가한다. 그러므로 Fig. 6의 네 가지 전단유동은  $K_d$ 가 0.132인 같은 경우로서 전단유동내에서 원봉주위 물질전달의 정성적인 성질을 결정하는 중요한 무차원수는  $K_d$ 임을 보여준다. 원봉주위의 상·하 유동박리 이후의  $Sh$ 수의 변화를 관찰하면 점차적으로 진동하면서 증가함을 알 수 있다. 이는  $Re_c$ 수가 48,000 이하인 층류유동에 해당되는 유동으로 경계층 외부유동의 자유유선난류의 영향으로 간주될 수 있는데, Kestin과 Wood<sup>(8)</sup>에 의하면 난류강도가 증가할수록  $Sh$ 수도 증가함을 보여주고 있다.

다음은 같은 중심선 속도( $Re_c=31,000$ )에 대하여 전단무차원수  $K_d$ 를 변화시켜 국소  $Sh$ 수의 변화를 관측하였다(Fig. 7). 원봉상단면에 대하여

$Sh$ 수의 전체적인 형상은 Fig. 6과 비슷하나, 유동박리점인 국소  $Sh$ 수의 최소점이  $K_d$ 가 증가할수록 원봉상단은 점차적으로 증가하고 반면 하단에서는 점차적으로 감소하고 있다. 이는 같은  $Re_c$ 수에서 전단율의 변화에 따른 국소  $Sh$ 수의 변화로서 속도구배가 증가하면 유동박리점이 상단에서는 뒤로 밀리고 반면 하단에서는 앞으로 당겨질 것으로 예측된다. 여기서  $K_d=0$ 은 속도구배가 없는 경우로서  $Sh$ 수의 최소점은  $80^\circ$ 에서 발생되고  $K_d$ 가 증가함에 따라 원봉 상·하단의  $Sh$ 수의 최소점 ( $\theta$ )은  $0 < K_d < 0.132$ 의 범위에서 Fig. 8과 같은 관계가 있다.

전단유동내에서의 원봉주위의 평균  $\overline{Sh}$ 수가 접근유동의 속도( $Re_c$ )에 영향을 알아보기 위해 Fig. 9와 같이 고정된 전단계수( $K_d=0.132$ )에서  $Re_c$ 수를  $2.0 \times 10^4$ 에서  $5.0 \times 10^4$ 까지 변화시켰는데, 평균

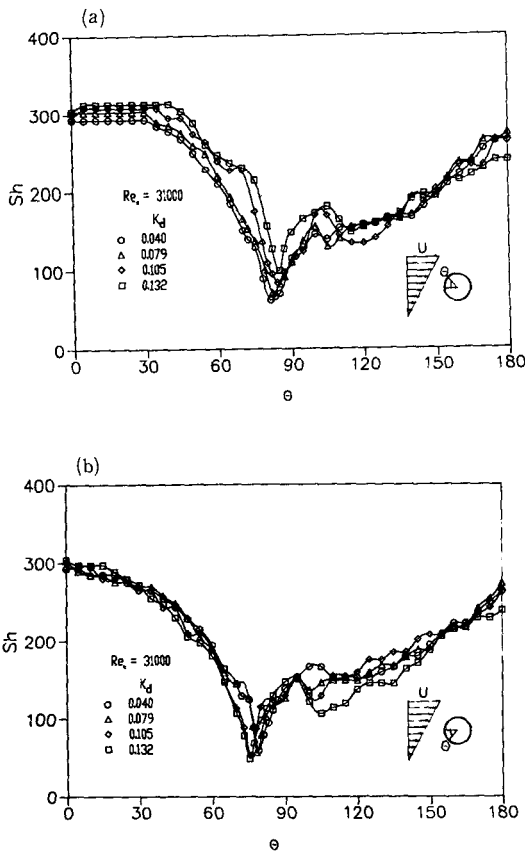


Fig. 7 (a) Local rate of mass transfer ( $Sh$ ) around an upper cylinder at  $Re_c=31,000$   
(b) Around a down circular cylinder at  $Re_c=31,000$

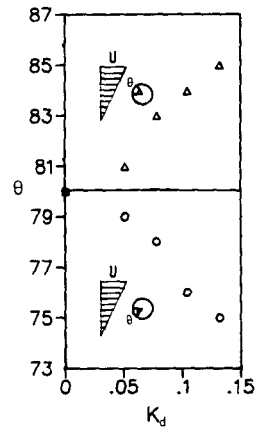


Fig. 8 Variations of the angle corresponding to minimum  $Sh$  number with  $K_d$

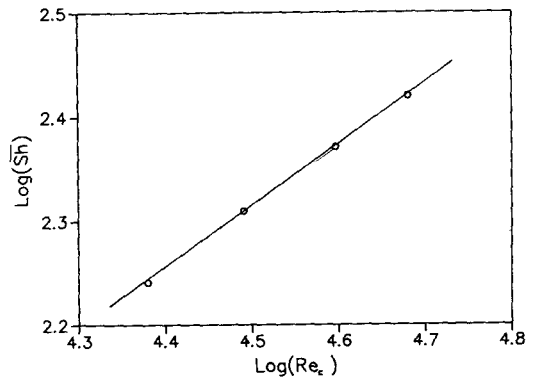


Fig. 9 Averaged mass transfer versus Reynolds number at  $K_d=0.132$



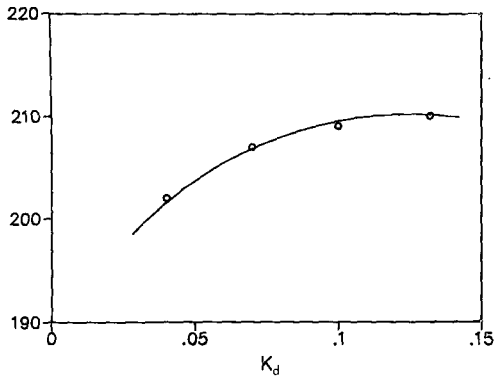


Fig. 10 Averaged mass transfer versus shear parameter at  $Re_c=31,000$

5. 결 론

본 실험에서 얻을 수 있는 잘 발달된 전단유동은 전단유동발생기로부터 닥트 높이의 6~7배 정도되는 곳에서 얻을 수 있으며, 이때 평균전단율의 선형도는 0.05H에서 0.88H의 구간에서 2.5% 이내의 오차 범위에 속한다.

균일전단유동내의 원봉주위의 국소대류물질전달량을 구하므로 새로운 전단무차원수를 원봉의 직경  $d$ 를 기본으로 하여 정의하면  $K_a (=Sd/U_c)$ 가 된다. 여기서 중요한 특성은 접근유동의 레이놀즈수 ( $Re_c$ )가 다르더라도  $K_a$ 가 일정하면 원봉 상·하단의  $Sh$ 수의 최소점은 같은 각도에서 일어나며,  $K_a$ 에 따라  $Sh$ 수의 최소점은 거의 선형적으로 변한다 ( $0 < K_a < 0.132$ ).

접근유동이 균일유동이면 ( $K_a=0$ ) 원봉의 상·하가 대칭으로 비교적 낮은 레이놀즈수에서 정체점으로부터 80° 부근에서  $Sh$ 수의 최소점이 되지만, 접근유동이 전단유동인 경우 ( $K_a=0.132$ ) 원봉의  $Sh$ 수의 최소점은 상단에서는 85° 부근에서 일어나며, 하단에서는 75° 부근으로 앞당겨진다. 이는 원봉의 상단에서의 경계층의 두께가 하단보다 얇게 되어 상단에서는 유동박리가 뒤로 지연되고, 경계층의 두께가 두꺼운 하단에서는 유동박리가 앞으로 당겨질 것이다. 그리고 원주방향의 평균  $\overline{Sh}$ 수는 국소 측정값의 합으로 표시할 수 있으며, 무차원 전단계수  $K_a$ 에 대한 짝수함수로 예측되는데, 즉  $K_a^2$ 에 비례하는 값이 된다. 그러므로  $K_a$ 의 값의 크기에 따라 열 및 물질전달 경험식들을 수정해야 한다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 관계제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Owen, P. R. and Zienkiewicz, H. K., 1957, "The Production of Uniform Shear Flow in a Wind Tunnel", J. Fluid Mech., Vol. 2, pp. 521~531.  
 (2) Rose, W. G., 1966, "Results of an Attempt to Generate a Homogeneous Turbulent Shear Flow", J. Fluid Mech., Vol. 25, pp. 97~121.

$\overline{Sh}$ 수의 정의는 국소  $Sh$ 수의 합으로서 나타내면 다음과 같다.

$$\overline{Sh} = \frac{1}{360^\circ} \sum_{i=1}^n Sh_i \Delta\theta_i \quad (8)$$

여기서  $\Delta\theta_i$ 는 원봉의 측정각도 증분으로 유동박리점 부근에서는 미세한 값을 취하였다. Zukauskas<sup>(12)</sup>에 의하면  $Re_c$ 수의 범위가  $1.0 \times 10^3$ 에서  $2 \times 10^5$ 까지 변할 때 무차원수  $\overline{Sh}/Re_c^m$ 에서  $m=0.6$ 이라고 하였다. 본 실험에서  $m=0.6$ 로 취할 때 Zukauskas의 측정계수보다 9~14% 크게 나타나고 있다. 이는 주어진 전단유동에서 ( $K_a=0.132$ ) 접근유동의 자유유선 난류의 영향으로 간주할 수 있는데<sup>(8,18)</sup> 본 실험에서는 Zukauskas의 난류강도(1% 미만)보다 약간 높다(3%).

평균  $\overline{Sh}$ 수의 전단접근유동의 영향을 알아보기 위해  $Re_c=31,000$ 에 대해  $K_a$ 를 변화시킨 것이 Fig. 10에 나타나 있다.  $Sh$ 수는 무차원 전단계수  $K_a$ 에 대한 짝수함수(even function)임을 예측할 수 있는데 이는  $S$ 의 값이 양·음에 따라 물리적으로 원봉주위의 상·하단만 바뀔뿐 같은 현상을 나타내기 때문이다. 그러므로 전체 평균  $\overline{Sh}$ 수는

$$\frac{\overline{Sh}}{\overline{Sh}_0} = 1 + aK_a^2 + bK_a^4 + \dots \quad (9)$$

로 나타내며, 여기서  $\overline{Sh}_0$ 는  $K_a=0$ 인 접근유동이 균일한 속도분포일 때이며  $a, b$ 는 실험상수( $a=46.6, b=-3788$ )이다. 본 실험에서 나온 결과는  $K_a$ 가 상당히 작은 값으로 실제 공학적인 문제에서는  $K_a$ 의 값의 크기에 따라 기존의 열전달식들을 수정해야 할 것이다.

- (3) Rose, W. G., 1970, "Interaction of Grid Turbulence with a Uniform Shear", *J. Fluid Mech.*, Vol. 44, pp. 767~779.
- (4) Champagne, F. H., Harris, V. G. and Corrsin, S., 1970, "Experiments on Nearly Homogeneous Turbulent Shear Flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 41, pp. 81~139.
- (5) Mulhearn, P. J. and Luxton, R. Z., 1975, "The Development of Turbulence Structure in a Uniform Shear Flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 68, pp. 577~591.
- (6) Tavoularis, S. and Corrsin, S., 1981, "Experiments in Nearly Homogeneous Turbulent Shear Flow with a Uniform Mean Temperature Gradient", Part 1, *J. Fluid Mech.*, Vol. 104, pp. 311~347.
- (7) Sogin, H. H. and Subramanian, V. S., 1961, "Local Mass Transfer from Circular Cylinders in Cross Flow", *ASME, J. Heat Transfer*, pp. 483~492.
- (8) Kestin, J. and Wood, R. T., 1971, "The Influence of Turbulence on Mass Transfer from Cylinders", *ASME, J. Heat Transfer*, pp. 321~327.
- (9) Goldstein, R. J. and Karni, J., 1984, "The Effect of a Wall Boundary Layer on Local Mass Transfer from a Cylinder in Crossflow", *ASME, J. Heat Transfer*, pp. 260~267.
- (10) Goldstein, R. J., Yoo, S. Y. and Chung, M. K., 1989, "Mass Transfer from a Square Cylinder and its End Wall in Crossflow", *I. J. Heat & Mass Transfer*, in press.
- (11) White, F. M., 1988, "Heat and Mass Transfer", Addison-Wesley.
- (12) Zukauskas, A., 1972, "Heat Transfer from Tubes in Corssflow", *Advances in Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 93~160.
- (13) Mehta, R. D. and Bradshaw, P., 1979, "Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels", *Aeronautical J.* Vol. 5, pp. 443~451.
- (14) Morel, T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions", *ASME, J. Fluids Engineering*, pp. 225~233.
- (15) Harris, V. G., Graham, J. A. and Corrsin, S. 1977, "Further Experiments in Nearly Homogeneous Turbulent Shear Flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 81, pp. 657~687.
- (16) Chung, M. K. and Kyong, N. H. 1989, "Measurement of Turbulent Dispersion behind a Fine Cylindrical Heat Source in a Weakly Sheared Flow", *J. Fluid Mech.*, in press.
- (17) Kiya, H., Tamura, H. and Arie, M., 1980, "Vortex Shedding from a Circular Cylinder in Moderate-Reynolds-Number Shear Flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, pp. 721~735.
- (18) Lowery, G. W. and Vachon, R. I., 1975, "The Effect of Turbulence on Heat Transfer from Heated Cylinder", *I. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1229~1242.
- (19) Giedt, W. H., 1949, "Investigation of Variation of Point Unit-Heat-Transfer Coefficient Around a Cylinder Normal to an Air Stream", *ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 71, pp. 375~381.