

〈論 文〉

## 나프탈렌승화법을 이용한 사각관 주위에서의 물질전달에 관한 연구

유 성 연\*

(1990년 5월 11일 접수)

### A Study on the Mass Transfer from a Square Cylinder Using Naphthalene Sublimation Technique

Seong-Yeon Yoo

**Key Words :** Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법), Local Mass Transfer Coefficient(국소물질전달계수), Heat/Mass Transfer Analogy(열전달과 물질전달의 유사성), Square Cylinder(사각관), Angle of Attack(양각)

#### Abstract

Naphthalene sublimation technique is employed to investigate the mass transfer processes from a square cylinder at various Reynolds numbers and various angles of attack. Distribution of the local mass transfer coefficients on each face of the cylinder changes dramatically with the angle of attack. Such variation of local mass transfer rates closely connected with the complex flow phenomena such as stagnation, acceleration, separation, reattachment and vortex shedding. The average Sherwood number has a minimum value at  $\alpha=12^\circ\sim 13^\circ$ , and a maximum value at  $\alpha=20^\circ\sim 25^\circ$ . A comparison of present mass transfer measurement with other heat transfer measurements, using the heat/mass transfer analogy, shows good agreement in average transfer rates, same trend but notable differences in local values. Therefore, naphthalene sublimation technique can be adopted to explore heat transfer processes in the complex flow situations, which is considered to be hardly possible with the conventional heat transfer measurements.

#### 1. 서 론

박리, 재부착, 재순환 등이 일어나는 유동에서의 유체유동특성과 열전달특성을 규명하는 것은 항공기, 각종 열교환기, 가스터빈, 원자로, 전자부품냉각, 연소기 등의 설계에 매우 중요하다. 지금까지 연구대상이 되어온 주요 모델로는 전방계단유동(forward facing step flow), 후방계단유동(back

ward facing step flow), 수직벽유동(fence flow), 평면이나 원판에 흡이나 돌기가 있는 경우, 급확대 또는 급축소관내에서의 유동, 유동중에 장애물(bluff body)이 있는 경우 등이 있다. 본 연구에서는 유동중에 사각관이 놓여있는 경우에 유체유동이 열전달에 미치는 영향을 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험으로 규명하고자 한다. 유동중에 사각관이 수직으로 놓여 있는 경우는 사각관 전면에서의 유동의 정체(stagnation) 및 가속(acceleration), 측면에서의 박리(separation) 및 재부착(reattachment), 후면에서의 와류유출(vortex

\*정회원, 충남대학교 공과대학 기계설계공학과

shedding) 등의 매우 복잡한 유동현상이 생기며, 이와 같은 유동현상은 양각(angle of attack)에 따라서 크게 변화한다<sup>(1)</sup>. 양각이 13°보다 작은 경우에는 측면선단에서 박리된 유동이 측면에 재부착하지 않으며(separation flow type), 양각이 13°보다 크고 35°보다 작은 경우에는 측면에서 재부착이 일어나고(reattachment flow type), 양각이 35°보다 큰 경우에는 wedge유동 형태가 된다(wedge flow type).

유동중에 원관이 놓여있는 경우의 열전달에 대한 실험 및 이론적 연구 논문은 수없이 많이 발표되었으나, 사각관 주위에서의 열전달 연구는 유동의 복잡성과 실험의 어려움 때문에 상대적으로 매우 적다. Reiher<sup>(2)</sup>와 Hilpert<sup>(3)</sup>는 양각이 0°와 45°인 경우에 사각관에서의 평균열전달계수를 구하였으며, 최근에 Igarashi<sup>(4,5)</sup>는 양각이 변하는 경우에 평균 및 국소열전달계수를 열전대를 이용하여 측정하였다. Igarashi가 측정한 평균열전달계수는 대부분의 열전달 교재에서 인용하고 있는 Hilpert의 결과 보다 40%정도 높은 것으로 나타났다.

열전대를 사용한 열전달계수 측정은 열전대 부착의 어려움, 단열의 어려움 때문에 복잡한 유동영역이나 열전달계수가 급격하게 변하는 영역에서는 정확한 데이터를 얻기가 곤란하다. 이러한 난점을 해결하기 위해서 개발된 방법이 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달측정이다. 나프탈렌승화법을 이용한 평균열전달계수 측정은 오래전부터 시도되었으나, 국소열전달계수 측정에 이용한 것은 Goldstein<sup>(6,7)</sup> 등에 의해서 최근에 시작되었다. 특히 기존의 열전달 측정방법으로는 매우 어려운 3차원 유동에서의 열전달 해석에 매우 유용하게 사용될 수 있다는 것이 알려지면서 활발한 연구가 진행되고 있다<sup>(8~10)</sup>. 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험은 나프탈렌을 시편표면에 주조한 다음 풍동에서 일정 시간 유동중에 노출시켜 나프탈렌이 승화한 깊이를 정밀깊이 측정장치로 측정하여 물질전달계수를 구하고 열전달과 물질전달의 유사성을 이용하여 열전달계수로 환산하는 방법이다.

본 연구에서는 양각과 레이놀즈수를 변화시켜 가면서 사각관 각 면에서의 국소물질전달계수를 측정하여, 유동의 정체, 가속, 박리, 재부착, 와류유출 등의 복잡한 유동현상이 물질전달에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 한편 Igarashi<sup>(4,5)</sup>의 열전달 측정 결과와 비교하여 열전달과 물질전달의 유사성을 고찰하고, 복잡한 유동이나 3차원 유동영역에서의 열

전달해석에 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험의 응용 가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 열전달과 물질전달의 유사성

열전달과 물질전달의 유사성은 열전달과 유체마찰의 유사성과 함께 오래전부터 알려져 왔으니 이 유사성을 열전달계수 측정에 이용한 것은 1921년 Thoma<sup>(11)</sup>가 처음이다. Thoma는 휘터 종이로 만든 봉다발에 인산을 적어서 암모니아와 공기의 혼합물중에 노출시켜 봉다발에 흡수된 암모니아의 양을 측정하여 물질전달계수를 구하고, 열전달과 물질전달의 유사성 관계식으로부터 열전달계수를 구하였다. 그 이후로 이종가스분사추출법(foreign gas injection and sampling method), 전기화학법(electro-chemical method), 나프탈렌승화법(naphthalene sublimation method) 등 여러가지 물질전달실험이 개발되었으나 그중에서 가장 광범위하게 사용되는 방법이 나프탈렌승화법이다.

비압축성 유체의 전달현상을 나타내는 지배방정식을 무차원변수로 표시하면 다음과 같다.

연속방정식 ;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(v_i) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식 ;

$$\frac{Dv_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_o} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left(1 + \frac{\epsilon}{\nu}\right) \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

에너지방정식(열전달) ;

$$\frac{Dt}{Dt} = \frac{1}{Re_o Pr} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left(1 + \frac{\epsilon}{\nu} \frac{Pr}{Pr_t}\right) \frac{\partial t}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

물질농도방정식(물질전달) ;

$$\frac{Dw}{Dt} = \frac{1}{Re_o Sc} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left(1 + \frac{\epsilon}{\nu} \frac{Sc}{Sc_t}\right) \frac{\partial w}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

윗 식에서 에너지방정식에서 얻어진 온도분포와 물질농도방정식에서 얻어진 농도분포는 열경계조건과 물질농도 경계조건이 같고, 난류 플란틀수와 난류 Schmidt수가 같거나 ( $Pr_t = Sc_t$ ) 층류유동인 경우는 플란틀수와 Schmidt수를 서로 바꾸면 동일하다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 강제대류열전달에서 열전달계수를 구하는 실험식은 다음과 같은 형태로 주어진다.

$$Nu = CR_e^m Pr^n \quad (5)$$

위에서 열거한 조건들을 만족하면 강제대류물질전달에서 물질전달계수를 구하는 실험식은 플란틀수를 Schmidt수로 바꾸어 다음과 같이 표시할 수 있을 것이다.

$$Sh = CRe^m Sc^n \quad (6)$$

식 (5)를 식 (6)으로 나누면 다음과 같은 열전달과 물질전달의 유사성 관계식이 얻어진다.

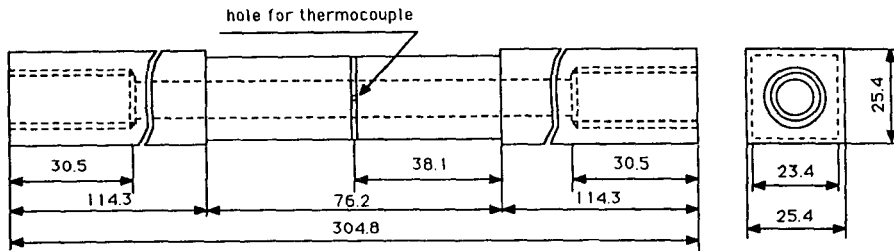
$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^n \quad (7)$$

본 연구에서는 열전달과 물질전달의 유사성 관계식의 효용성을 열전달계수와 물질전달계수를 비교하여 검토하고자 한다.

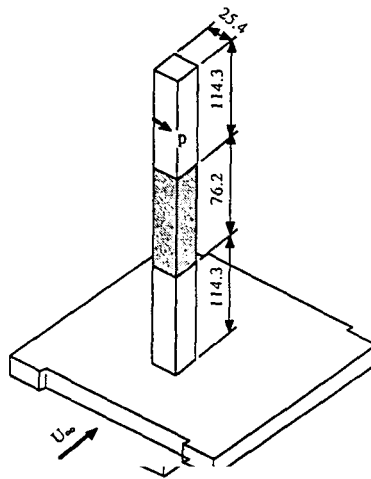
### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3.1 실험장치

본 연구에 사용된 풍동은 개방흡입형(open-suction type)으로 축소면적비는 9이고, 최대속도는 18m/sec, 축소후 자유흐름의 난류강도는 0.6% 미만이다. 시험부 단면의 크기는 폭 610mm 높이 305mm이며 축소부 끝에서 473mm 위치에 사각판 시편을 수직으로 설치하였다. 시편은 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 한변의 길이 25.4mm 정사각형 단면에 높이 304.8mm인 알루미늄으로 만들었으며 중앙의 76.2mm를 1mm 길이로 가공하여 나프탈렌을 주조하였다. 시편은 Fig. 1(b)와 같이 덜린(derlin)으로 만든 지지판에 고정시킨 후 풍동내의 시험부에 설치한다. 풍동 시험부 밑면에는 지지판



(a) square cylinder



(b) mounting plate

Fig. 1 Schematic view of test cylinder and mounting plate

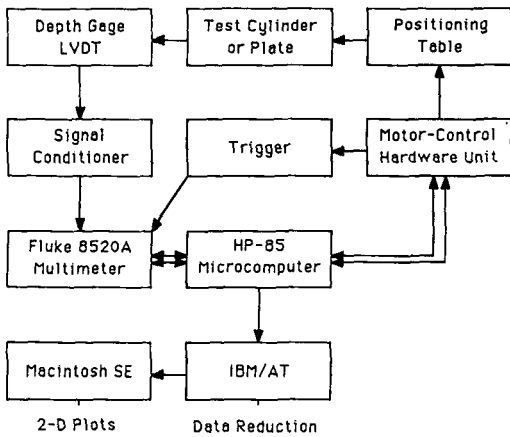


Fig. 2 Block diagram of computer controlled depth measurement system

과 똑같은 모양의 흡이 파여 있으며 그 흡을 통하여 지지판의 상부가 풍동 밀면과 일치하도록 고정한다. 지지판에는 양각을 조절하기 위해서 각도 표시가 되어 있다. 나프탈렌의 표면온도를 측정하기 위해서 0.25mm copper-constantan 열전대를 사각관 각 면의 중앙에 부착하였다.

나프탈렌이 승화한 깊이를 측정하기 위해서 깊이 센서, signal conditioner, 디지털멀티미터, 스텝모터, 마이크로컴퓨터 등으로 구성된 자동이송-정밀 깊이 측정 장치(computer controlled depth measurement system)를 제작하였으며 전체적인 구성은 Fig. 2와 같다. 깊이 센서로는 최대측정깊이 0.5mm 분해능  $2.54 \times 10^{-5}$ mm인 Schaevitz LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 센서를 사용하고 Shaevitz CAS-025 signal conditioner에 연결하여 사용하였다. 실험장치에 대한 자세한 설명은 참고문헌 (8)에 나타나 있다.

### 3.2 실험방법

사각관 각면의 1mm 깊이로 가공한 부분을 정밀하게 연마한 4개의 알루미늄 몰드(mold)로 볼트를 사용하여 고정시킨다. 나프탈렌 분말을 비이커에 담아 열판 위에 올려 놓고 액체상태로 되어 끓기 시작하면 가열을 멈추고 기포가 사라질 때까지 기다렸다가 시편과 몰드 사이에 형성된 공간내에 주입구를 통하여 부어넣는다. 나프탈렌 주조면에 기포가 생기지 않도록 몰드 상부에 공기 유출 구멍을 만들고 용융된 나프탈렌을 몰드 하부 구멍을 통하

여 주입한다. 나프탈렌이 응고한 후 전단력을 가하여 몰드를 떼어내면 유리면처럼 매끈한 나프탈렌 표면을 얻을 수 있다. 나프탈렌은 시편과 몰드의 양쪽 금속면으로부터 응고가 시작되기 때문에 응고가 끝나는 중심 부근에 매우 약한 결합면이 형성되므로 몰드를 분리할 때 세심한 주의가 필요하다.

실험중 나프탈렌 표면온도를 측정하기 위해서 4개의 열전대를 각 면 중앙의 나프탈렌 주조 표면 바로 밑에 설치한다. 주조된 사각관 시편을 깊이 측정 장치에 나프탈렌을 주조한 면이 바닥에 단지 않도록 고정시킨 후 4면을 번갈아 가면서 초기깊이를 측정방향과 둘레방향으로 일정한 간격으로 측정한다. 나프탈렌이 주조되지 않은 측정방향의 양쪽 금속면에 기준점을 잡아 두개의 기준점을 연결한 선으로 기준선을 정하고 각각의 기준선으로부터의 깊이를 계산한다. 초기깊이를 측정된 시편을 풍동내에 고정시켜 1시간 가량 유동 중에 노출시킨 후 다시 꺼내어 앞서와 같은 방법으로 나프탈렌이 승화한 후의 깊이를 재차 측정한 후 변하지 않는 기준선으로부터의 깊이를 계산한다. 풍동내에서 실험하는 동안 나프탈렌의 표면온도, 공기의 온도와 압력, 공기의 평균속도를 측정하여 기록한다.

측정한 데이터로부터 물질전달계수는 다음과 같이 구한다.

$$h_m = \rho_s \Delta t / \rho_{v,w} \Delta \tau \quad (8)$$

여기서  $\rho_s$ 는 나프탈렌 고체의 밀도이고,  $\rho_{v,w}$ 는 시편 표면에서의 승화한 나프탈렌증기의 밀도이고,  $\Delta t$ 는 나프탈렌이 승화한 깊이이고,  $\Delta \tau$ 는 풍동내에서 유동중에 노출한 시간이다. 나프탈렌이 승화한 깊이는 기준선으로부터 계산한 초기깊이와 풍동에서 노출한 후 기준선으로부터 계산한 나중 깊이의 차에서 깊이측정장치에서 측정하는 동안 자연대류에 의하여 승화한 깊이를 뺀 값이다. 측정하는 동안 자연대류에 의해 승화한 양은 본 실험과는 별도로 시편을 측정실에서 10시간 동안 공기중에 노출시킨 후 처음과 나중의 깊이의 차를 측정하여 평균 값으로 구하였다. 나프탈렌이 승화한 깊이는 0.05~0.2mm 정도로 눈으로 보아서는 형상의 차이를 알 수 없을 정도로 미세하다. 나프탈렌의 표면온도로부터 Ambrose<sup>(11)</sup>의 실험식을 써서 나프탈렌의 증기압을 구하고 이상기체의 상태방정식을 써서 표면에서 나프탈렌증기의 밀도를 구한다. 실험 결과는 물질전달계수를 다음과 같이 무차원화 시킨

Sherwood수로 나타내었다.

$$Sh = h_m d / D \quad (9)$$

여기서  $d$ 는 사각관 한변의 길이이고,  $D$ 는 나프탈렌의 공기중의 물질확산계수로서 Mack의 실험데이터를 사용하고 Chen과 Othmer<sup>(12)</sup>의 관계식을 이용하여 온도와 압력변화의 영향을 고려하였다. 본 연구에서 사용한 자동이송 깊이측정장치의 반복성은 매우 우수하고, Kline과 McClintock<sup>(13)</sup>의 불확실성분석(uncertainty analysis)에 의하면 Sherwood 수의 측정오차는 전 측정영역에서 6%이하로 나타났다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 물질전달계수

사각관 주위에서의 유동특성은 Fig. 3에 보인 바와 같이 양각  $\alpha$ 에 따라서 세가지 형태로 나눌 수 있다.  $\alpha < 13^\circ$ 는 Fig. 3(b)와 같이 측면의 선단에서 박리된 전단층이 측면에 재부착하지 않고, Fig. 3(c)의  $13^\circ < \alpha < 35^\circ$ 인 경우는 박리된 전단층이 측

면에 재부착하여 전달현상에 크게 영향을 미치며, Fig. 3(d)의  $35^\circ < \alpha < 45^\circ$ 인 경우는 wedge유동이 되어 원관을 지나는 유동과 비슷한 형태가 된다. 본 연구에서는 이러한 유동특성이 물질전달에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

Fig. 4는 사각관 각 면에서의 국소 Sherwood 수의 분포를 여러가지 레이놀즈 수에 대해서 나타낸 것이다.  $\alpha = 0^\circ$ 인 경우를 살펴보면 전면에서는 정체점으로부터 모서리로 가면서 Sherwood수가 점점 증가하며 이러한 경향은 정체점에서 최대값을 갖고 뒤로 가면서 감소하는 원관의 경우와 대조적이다. 그 이유는 사각관 전면에 정체영역이 형성되어 물질전달을 억제하고 모서리로 가면서 유동이 가속되고 경계층이 얇아져서 물질전달을 촉진하기 때문이다. 측면에서는 선단(leading edge)에서 박리기포(separation bubble)가 형성되는 곳에서 약간 감소하다가 그 이후에는 재순환영역에서의 활발한 난류 eddy들의 운동 때문에 급격하게 증가한다. 측면 후단(trailing edge)부근에서 값이 후면에서보다 큰 이유는 Fig. 3(b)에서 보인 바와 같이 후면에서 역류가 재부착되기 때문으로 생각된다. 박리전단층의

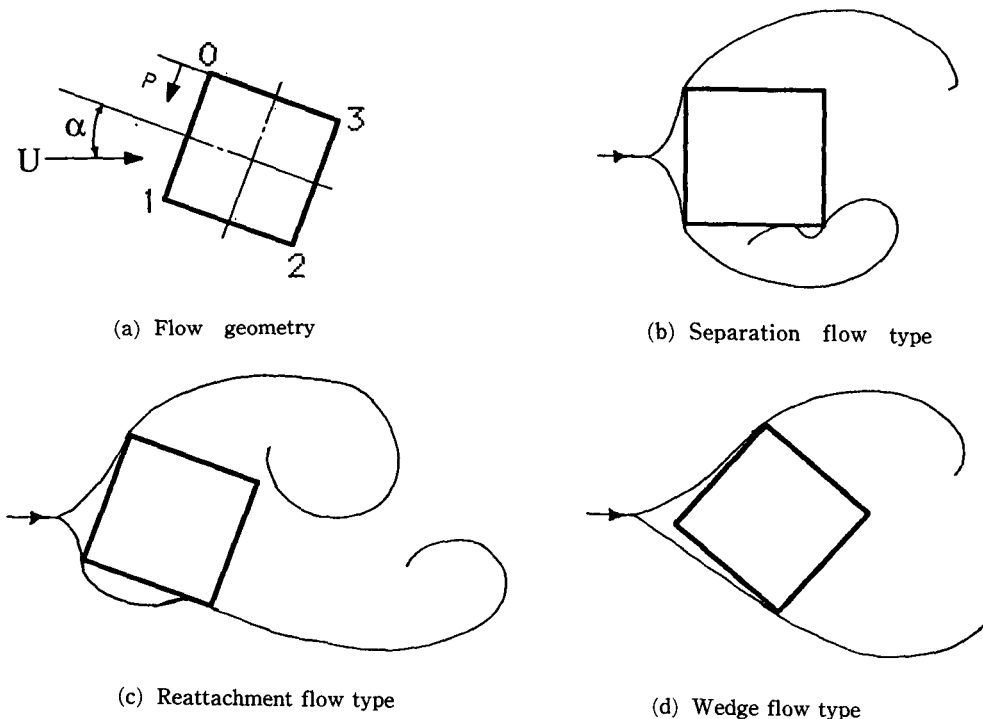


Fig. 3 Flow geometry and typical flow patterns around a square cylinder

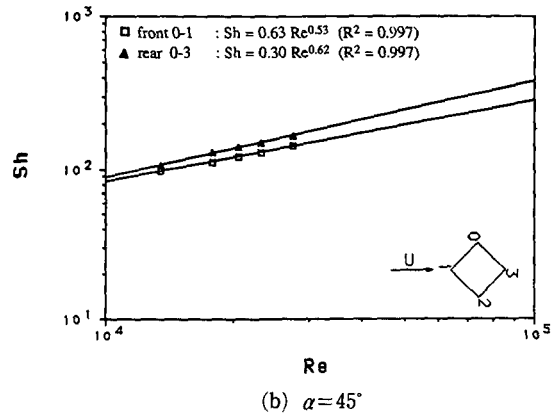
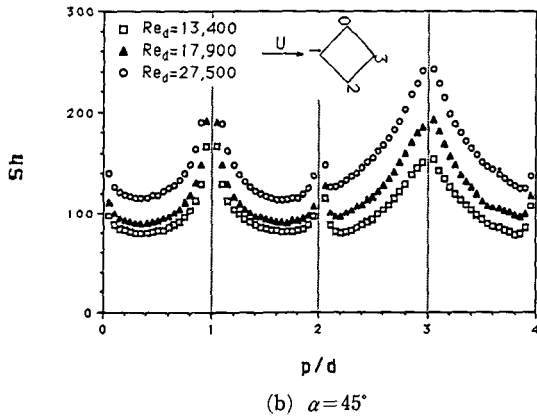
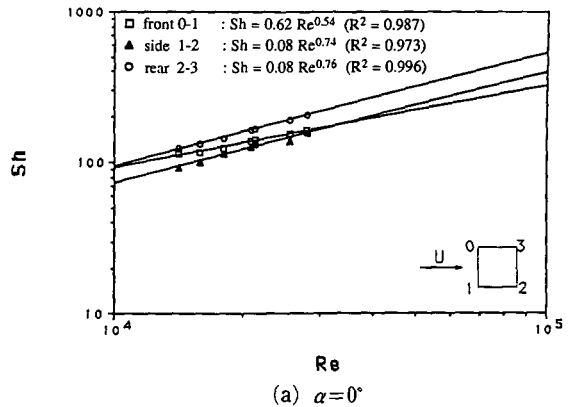
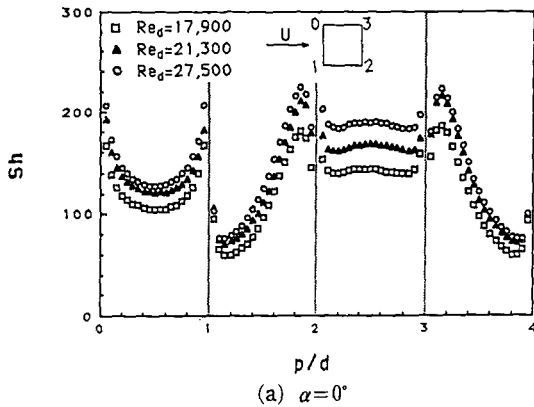


Fig. 4 Distribution of local Sherwood number at different Reynolds number

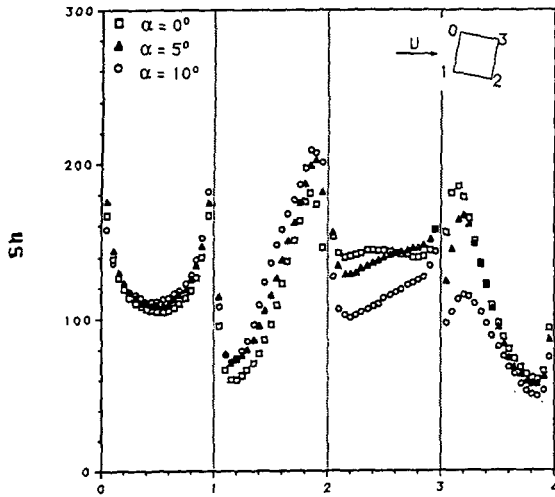
Fig. 5 Dependence of average Sherwood number on Reynolds number

재부착에 기인한 것으로 생각할 수도 있으나 Robertson 등<sup>(14)</sup>과 Igarashi<sup>(15)</sup>의 유동실험에 의하면 양각이  $0^\circ$ 인 정사각관의 경우는 박리전단층이 측면에 재부착하지 않는다. 후면에서의 Sherwood 수는 거의 균일하고 와류유출(vortex shedding) 때문에 전면에서 보다 약간 높게 나타난다. 자세하게 관찰하면 영문자 W형태이며 최소가 되는 부분이 주기적으로 유출되는 와류(vortex)의 중심으로 여겨진다.  $\alpha = 45^\circ$ 인 경우를 살펴보면 국소 Sherwood수의 변화가 원관에서와 매우 비슷한 양상을 보이고 있다. 정체점에서 최대값을 갖고 점점 감소하다가 모서리에서 전단층이 박리하면서 급격하게 증가하며 레이놀즈 수가 클수록 후면에서의 값이 전면보다 훨씬 커진다. 위 두가지 경우 모두 대칭축을 중심으로 실험 데이터가 완벽하게 대칭을 이루고 있음을 볼 수 있고, 이와 같은 결과로부터 나

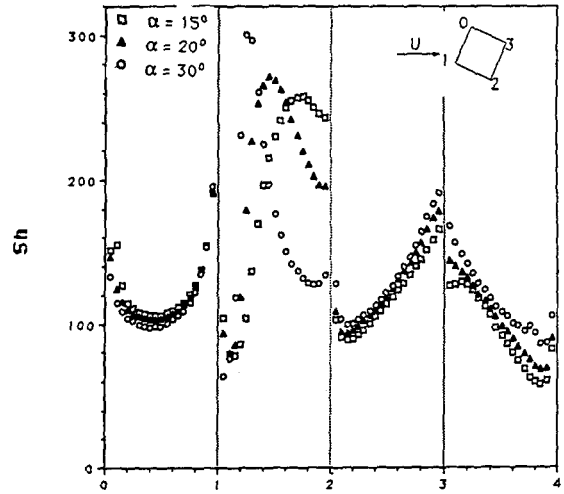
프탈렌승화법을 이용한 물질전달 측정방법의 정밀도가 매우 우수함을 알 수 있다.

Fig. 5는 레이놀즈 수와 사각관 각 면에서 평균 Sherwood 수의 관계를 나타내고 있다. 실험 데이터로부터 최소자승법을 이용하여 관계식을 구하였으며, 다중상관계수(multiple correlation coefficient)  $R^2$ 은 그림에 나타낸 바와 같다. 레이놀즈 수의 지수  $m$ 은 각 면에서 유동형태가 다르기 때문에 각각 다른 수치를 보이고 있으나, 전면에서는 층류 경계층에서의 일반적인 열전달 관계식인  $Nu \propto Re^{1/2}$ 에 가깝고, 측면과 후면에서는 박리유동영역에서의 관계식인  $Nu \propto Re^{2/3}$ 에 가깝다.

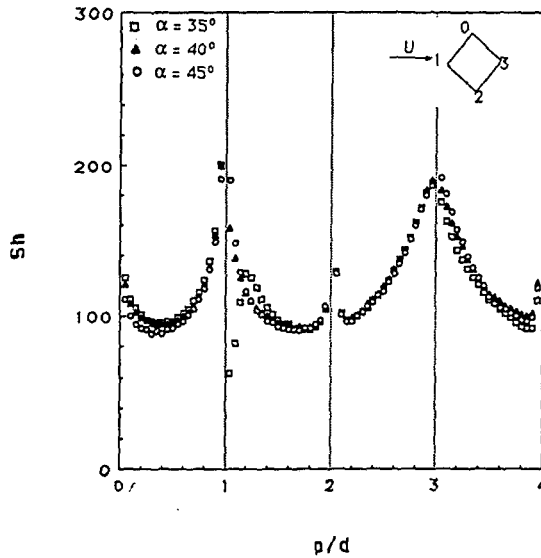
Fig. 6은 양각이 변하는 경우 동일한 레이놀즈 수에서 국소 Sherwood 수의 분포를 나타내고 있다. Fig. 6(a)의  $\alpha < 13^\circ$ 인 경우에는 전면 0-1에서는 양각의 영향이 거의 없고, 측면 1-2에서는 양각



(a)  $\alpha=0^\circ, 5^\circ$  and  $10^\circ$



(b)  $\alpha=15^\circ, 20^\circ$  and  $30^\circ$



(c)  $\alpha=35^\circ, 40^\circ$  and  $45^\circ$

Fig. 6 Distribution of local Sherwood number at various angles of attack

이 증가함에 따라 박리 경계층이 얇아져서 Sherwood 수가 커지고, 측면 0-3에서는 반대로 경계층이 두꺼워져서 물질전달이 감소하며, 후면 2-3에서는 값이 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 유동형태에서는 4면에 대한 평균물 질전달계수가 양각이 증가함에 따라 감소한다.

Fig. 6(b)의  $13^\circ < \alpha < 35^\circ$ 인 경우는 측면 1-2에서 박리된 전단층의 재부착 때문에 Sherwood 수가 급격하게 증가한다. 양각이 증가함에 따라 최대값이 커지며 최대값이 나타나는 위치는 선단쪽으로 이동한다. 다른 면에서는 양각의 영향이 미미하다.  $\alpha > 35^\circ$ 인 경우는 Fig. 6(c)에 보인 바와 같이 모든

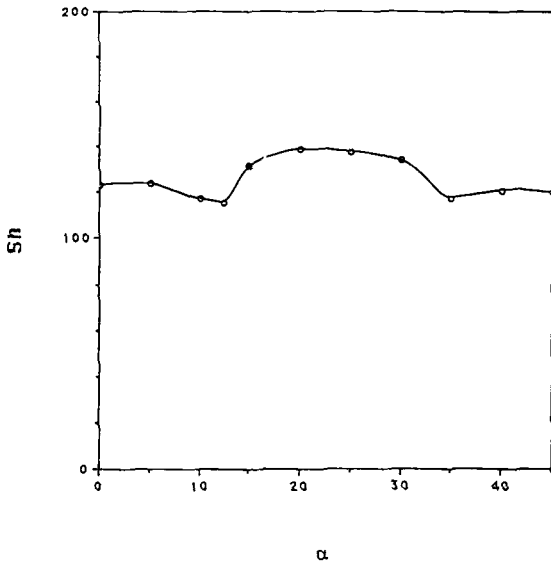


Fig. 7 Variation of average Sherwood number with angle of attack

면에서의 극소물질전달계수의 변화가 양각과 거의 무관함을 알 수 있고, 전면정체점(front stagnation point) 1과 후면정체점(rear stagnation point) 3에서 극대값을 갖는다. 이상에서 살펴본 바와 같이 사각관 각 면에서의 극소물질 전달계수의 변화는 유동의 정체, 가속, 박리, 재부착, 와류유출 등의 유동현상과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 이러한 유동현상이 경계층의 두께를 변화시키고 난류운동을 일으켜서 물질전달에 영향을 미치는 것으로 생각되나 보다 명확한 원인은 앞으로 연구대상이다.

양각의 변화에 따른 평균물질전달계수의 변화가 Fig. 7에 나타나 있다. 평균물질전달계수는 각 면에서의 극소물질전달계수의 평균값을 구한 것이다. 처음에는 양각이 커짐에 따라 평균 Sherwood수가 감소하다가  $\alpha=12^\circ\sim 13^\circ$ 일때 최소가 되고  $\alpha>13^\circ$ 부터는 박리 전단층의 재부착으로 평균 Sherwood수가 증가하여  $\alpha=20^\circ\sim 25^\circ$  부근에서 최대가 되고 그 이후 부터는 다시 감소하다가 wedge유동 영역에서는 거의 일정하다. 이러한 경향은 Igarashi<sup>(4)</sup>에 의해 관찰된 사각관에서의 Strouhal수, 변동압력계수(fluctuating pressure coefficient), 항력계수(drag coefficient), 양력계수(lift coefficient) 등의 변동경향과 매우 흡사하다.

#### 4.2 열전달계수와 비교

본 연구에서 측정된 극소물질전달계수를 Igarashi<sup>(4)</sup>의 극소열전달계수 측정결과와 비교한 것이 Fig. 8에 나타나 있다. Igarashi의 극소열전달계수는 아크릴 사각관에 0.02mm 두께의 스테인리스 박판을 입히고 그 밑에 열전대를 심고 스테인리스 박판을 전기적으로 가열하여 일정열유속(constant heat flux) 조건에서 극소온도분포를 측정하여 얻은 것이다. 본 물질전달실험의 경계조건은 일정온도조건과 유사하며, 일반적으로 일정열유속 조건에서의 열전달계수는 일정온도 조건에서 보다 약간 크게 나타난 것으로 알려져 있으나 큰 차이는 없다. Igarashi의 열전달계수는 식 (7)의 열전달과 물질전달의 유사성 관계식을 이용하여 물질전달계수로 환산하였으며 그때 지수  $n$ 은 Igarashi가 그의 데이터를 식 (5)의 실험식으로 바꿀 때 사용한 1/3을 그대로 사용하였다.

$\alpha=0^\circ$ 인 경우를 살펴보면 열전달계수로부터 환산한 Sherwood수와 물질전달실험에서 측정된 Sherwood수의 변화하는 경향은 매우 흡사하나 값은 약간의 차이를 보이고 있다. 가장 큰 차이점은 변화하는 기울기가 물질전달의 경우가 열전달의 경우에 비해서 훨씬 가파르다는 것이다. 그 이유는 첫째로 물질전달이 열전달에 비해서 유체유동변화에 훨씬 민감하게 영향을 받기 때문으로 생각할 수 있으며, 둘째 물질전달의 경우 유체의 전단력에 의한 나프탈렌 표면의 마멸 때문에 전면 모서리 부근에서와 같이 유체와의 마찰이 큰 부분에서 물질전달계수가 실제보다 크게 나타나며, 셋째 열전달 측정에서는 스테인리스 박판을 통한 옆으로의 열전도 때문에 열전달계수가 평균화(averaging)되는 효과가 나타나기 때문이다. 또 한가지 중요한 이유는 난류 플란틀수와 난류 Schmidt 수가 같다는 가정하에서 유사성 관계식을 사용할 수 있는데 실제 유동의 경우는 이와 같은 가정이 성립되기가 곤란하다. 직접적인 비교는 될 수 없지만 You등<sup>(18)</sup>은 불복하게 굽은 난류경계층에서 Stanton 수와 표면마찰계수(skin friction coefficient)를 측정하여, 난류 플란틀수가 열전달과 유체마찰을 나타내는 위 두가지 무차원수의 관계에 매우 크게 영향을 미친다는 것을 입증하였다. 특히 박리, 재부착, 재순환 등이 일어나는 유동에서는 난류점성계수와 난류확산계수가 전달현상에 크게 영향을 미치므로 열전달과 물질전달의 유사성 관계식에도 난류특성이 고려되어



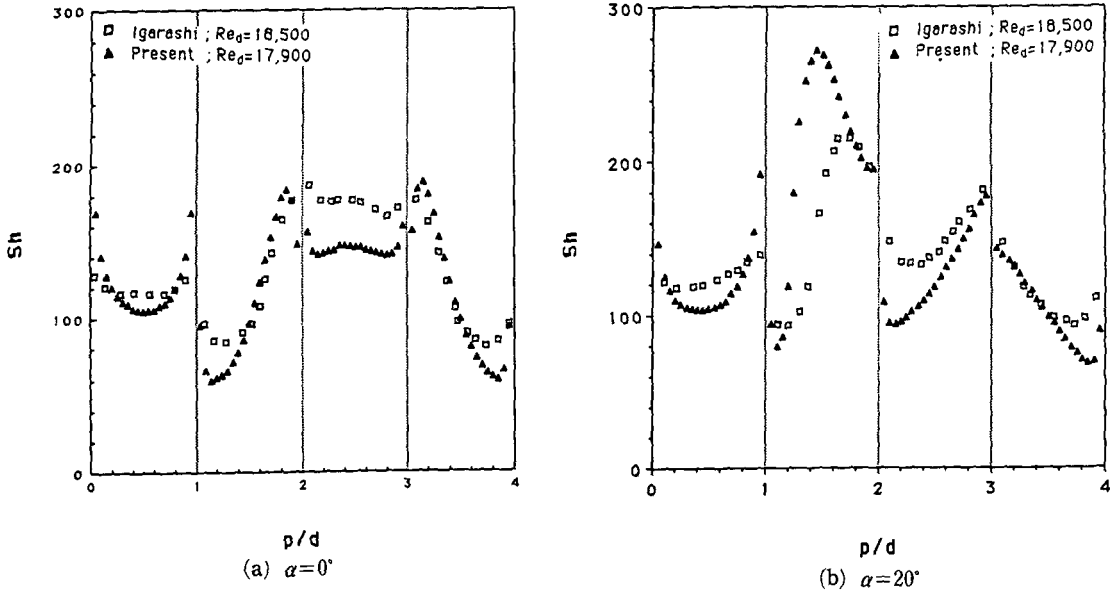


Fig. 8 Comparison of local mass transfer rate with heat transfer measurement using heat/mass transfer analogy

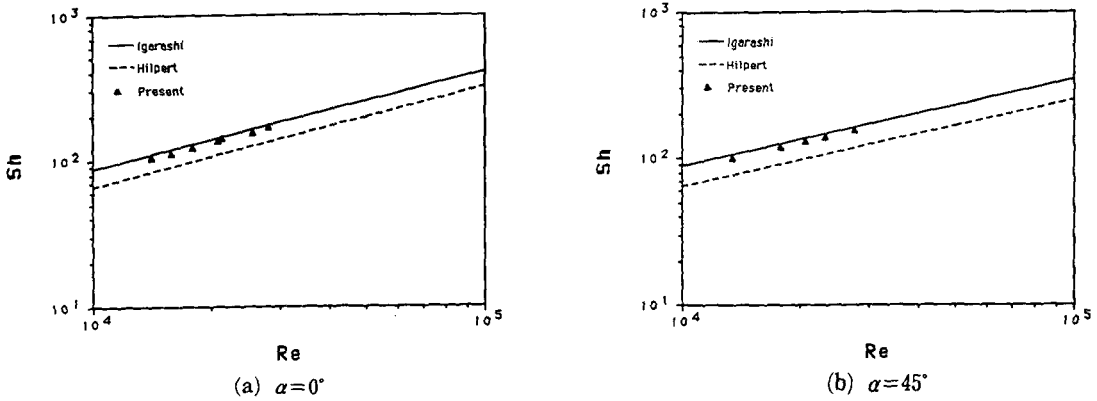


Fig. 9 Comparison of average mass transfer rate with heat transfer measurement using heat/mass transfer analogy

야 한다. 불행하게도 난류 플란틀 수와 난류 Schmidt 수에 대한 실험데이터가 거의 없기 때문에 정량적인 고찰은 현 단계에서는 불가능하다. Fig. 8(b)의  $\alpha=20^\circ$ 인 경우는 재부착이 일어나는 면에서는 상당한 차이를 보이고 있으나, 다른 면에서는  $\alpha=0^\circ$ 일 때 경향과 비슷함을 알 수 있다. 일반적으로 최대 열전달은 재부착점에서 일어나거나<sup>(17)</sup> 재부착점보다 약간 앞에서 일어나는 것으로 여겨지고 있다<sup>(18)</sup>. 이와같은 확설이 맞는다면 최대 물질전달은 재부착점보다 상당히 앞선 위치에서 일

어나고 있다는 것을 알 수 있다. 이것 또한 앞으로의 연구대상이 될 것으로 생각한다. 결론적으로 열전달과 물질전달의 유사성 관계식은 유동형태, 모델의 형상, 난류특성 등을 고려하여 재정립되어야 한다. 앞에서 지적한 인자들을 고려하여 새로운 열전달과 물질전달의 유사성 관계식을 정립하면 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험은 기존의 열전달실험으로는 불가능한 복잡한 유동이나 3차원 유동영역에서의 열전달 현상의 규명에 응용될 수 있을 것이다.

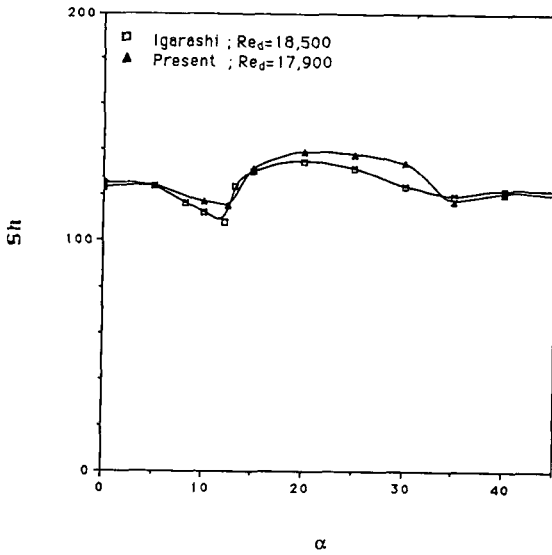


Fig. 10 Comparison of variation of average mass and heat transfer rate under different angles of attack using analogy

그럼에도 불구하고 Fig. 9에 보인 평균열전달계수와 평균물질전달계수는 매우 잘 일치한다. 평균물질전달계수는 각 면에서의 국소물질전달계수의 평균값을 구한 것이며, 평균열전달계수는 등온조건(constant temperature condition)에서 측정된 값이다. 특기할 만한 사실은 위 두 결과가 대부분의 열전달 교재에서 인용하고 있는 Hilpert<sup>(3)</sup>의 결과보다 40%정도 높게 나타나고 있다. Fig. 10은 양각의 변화에 따른 평균열전달계수와 평균물질전달계수의 비교이다. 전체적으로 매우 잘 일치하며 재부착 유동인 경우에 약간의 차이를 보이고 있다. 따라서 열전달과 물질전달의 유사성관계식은 평균전달계수를 구하는 데는 매우 복잡한 유동에서도 유용하게 사용될 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

사각관 주위에서의 국소물질전달계수를 레이놀즈수와 양각을 변화시켜가면서 측정하고, 열전달계수 측정결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 레이놀즈수가 증가함에 따라서 물질전달률이 증가하나, 레이놀즈수에 대한 의존도는 사각관 각 면에서의 유동형태에 따라 다르게 나타난다.
- (2) 양각의 변화에 따라 사각관 각 면에서의 국

소물질전달계수의 분포가 현저하게 달라지며, 이러한 물질전달율의 변화는 유동의 정체, 가속, 박리, 재부착, 와류유출 등의 복잡한 유동현상과 밀접한 관계가 있다.

(3) 평균물질전달계수는  $\alpha=12^\circ\sim 13^\circ$  일때 최소값을 갖고  $\alpha=20^\circ\sim 25^\circ$  부근에서 최대값을 갖는다.

(4) 열전달과 물질전달의 유사성을 이용하여 열전달계수 측정과 비교해 본 결과 평균전달계수는 매우 잘 일치하고 있으나, 국소전달계수는 변화하는 경향은 비슷하나 값은 약간의 차이를 보이고 있으며 특히 박리 전단층이 재부착되는 부근에서는 상당한 차이를 보이고 있다.

전달현상에 영향을 미치는 인자들을 고려한 새로운 열전달과 물질전달의 유사성 관계식이 정립되면 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험은 기존의 열전달실험으로는 매우 어려운 복잡한 유동이나 3차원 유동영역에서의 열전달현상 규명에 응용될 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 1989년도 문교부 학술연구조성비에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Igarashi, T., 1984, "Characteristics of the Flow around a Square Prism", Bulletin of JSME, Vol. 27, No. 231, pp. 1858~1865.
- (2) Reiher, H., 1925, "Der Wärmeübergang von Stromender Luft an Rohrbündel in Kreuzstrom", VDI Forschungsheft, Vol. 269, p. 47.
- (3) Hilpert, R., 1933, "Wärmeabgabe von Geheizten Drähten und Rohrem im Luftstrom", Gebiete Ingenieurw, Vol. 4, pp. 215~224.
- (4) Igarashi, T., 1985, "Heat Transfer from a Square Prism to an Air Stream", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No. 1, pp. 175~181.
- (5) Igarashi, T., 1986, "Local Heat Transfer from a Square Prism to an Air Stream", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, No. 5, pp. 777~784.
- (6) Goldstein, R.J. and Karni, J., 1984, "The Effect of a Wall Boundary Layer on Local Mass Transfer from a Cylinder in Crossflow", J. of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 260~267.

- (7) Goldstein, R.J., Chyu, M.K. and Hain, R.C., 1985, "Measurement of Local Mass Transfer on a Surface in the Region of the Base of a Protruding Cylinder with a Computer Controlled Data Acquisition System", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 5, pp. 977~985.
- (8) Yoo, S.Y., 1989, "A Study on the Mass Transfer from a Square Cylinder and Its Base Plate using Naphthalene Sublimation Technique", Ph. D thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Seoul, Korea.
- (9) Goldstein, R.J., Yoo, S.Y. and Chung, M.K., 1990, "Convective Mass Transfer from a Square Cylinder and Its Base Plate", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 1, pp. 9~18.
- (10) Yoo, S.Y., Goldstein, R.J. and Chung, M.K., 1990, "Effects of Angle of Attack on the Mass Transfer from a Square Cylinder and Its Base Plate", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Submitted.
- (11) Ambrose, D., Lawrenson, I.J. and Sparke, C.H.S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene", *J. Chem. Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (12) Chen, N.H. and Othmer, D.F., 1962, "New Generalized Equation for Gas Diffusion Coefficient", *J. of Chem. Eng. Data*, Vol. 7, No. 1, pp. 37~41.
- (13) Kline, S.J. and McClintock, F.A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments", *Mechanical Eng.*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (14) Robertson, J.M., Wedding, J.B., Peterka, J.A. and Cermak, J.E., 1977, "Wall Pressures of Separation-Reattachment Flow on a Square Prism in Uniform Flow", *J. of Industrial Aerodynamics*, Vol. 2, pp. 345~359.
- (15) Igarashi, T., 1987, "Fluid Flow and Heat Transfer around Rectangular Cylinders (the Case of Width/Height Ratio of a Section of 0.33-1.5)", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 5, pp. 893~901.
- (16) You, S.M., Simon, T.W., and Kim, J., 1986, "Free-Stream Turbulence Effects on Convexly Curved Turbulent Boundary Layer", *Trans. of ASME*, 86-WA/HT-46.
- (17) Ota, T. and Nishiyama, H., 1987, "A Correlation of Maximum Turbulent Heat Transfer Coefficient in Reattachment Flow Region", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 6, pp. 1193~1200.
- (18) Sparrow, E.M., Kang, S.S. and Chuck, W., 1987, "Relation between the Points of Flow Reattachment and Maximum Heat Transfer for Regions of Flow Separation", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 7, pp. 1237~1246.