

〈論 文〉

## 열전달과 물질전달의 유사성에 관한 연구

유성연\* · 노종광\*\* · 정장환\*\* · 정문기\*\*

(1993년 4월 13일 접수)

### A Study on the Analogy between Heat Transfer and Mass Transfer

S. Y. Yoo, J. K. No, C. H. Chung and M. K. Chung

**Key Words :** Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법), Mass Transfer(물질전달), Heat/Mass Transfer Analogy(열전달과 물질전달의 유사성)

#### Abstract

Mass transfer experiment by naphthalene sublimation method has great advantages in measurement of local transfer coefficients in the region of a three dimensional flow or for a model of complex geometry, which is considered to be very difficult with conventional heat transfer measurements. Mass transfer data obtained by naphthalene sublimation technique are converted to the heat transfer data through heat/mass transfer analogy. This analogy is valid for a simple or laminar flow, but new insight is needed when applying to a turbulent flow or complex flow such as separation, reattachment and recirculation. The purpose of this research is to investigate how geometries and flow conditions incorporate heat/mass transfer analogy. Mass transfer experiments are performed using naphthalene sublimation technique for a flat plate, a circular cylinder, and rectangular cylinders. And mass transfer data are compared with earlier heat transfer measurements for the same geometries. Usefulness of analogy relation between heat and mass transfer is examined with these results.

#### 1. 서 론

지금까지의 열전달실험은 대부분 열전대에 의존하고 있으나 열전대 부착의 어려움, 단열의 어려움, 국소열유속측정의 어려움 때문에 정확하고 세밀한 국소열전달계수 측정에는 부적합하다. 그 외에 Mach-Zehnder Interferometer, Schlieren System과 같은 광학적인 방법이 있으나 실험장치 구성의 어려움 때문에 복잡한 형상이나 복잡한 유동을 수반하는 경우는 측정이 어렵고, 적외선 카메라나 Li-

quid Crystal을 이용하는 경우도 있으나 극히 제한된 경우에만 사용되고 있다. 따라서 기존의 열전달 실험으로는 3차원유동이나 복잡한 형상에 대한 국소열전달계수의 측정이 매우 어렵다. 이러한 어려움을 해결하기 위해서 개발된 방법이 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험이다. Reynolds와 Prandtl 등에 의해 운동량전달과 열전달의 유사성이 알려진 이후 열전달과 물질전달의 유사성도 함께 연구되어 왔으나, 이 유사성을 열전달 측정에 직접 이용한 것은 1921년 Thoma<sup>(1)</sup>가 처음이다. 그 이후 물질전달실험은 여러가지 방법이 개발되었으나 나프탈렌승화법이 가장 광범위하게 응용되고 있다. 이 방법을 이용한 평균 열전달계수 측정은 오래전부터 시도되었으나, 열교환기, 가스터빈, 원

\* 정회원, 충남대학교 기계설계공학과

\*\* 충남대학교 기계설계공학과 대학원

\*\*\* 정회원, 한국원자력연구소 열유동시험실

자로, 전자부품 등에서 일어나는 매우 복잡한 열전달현상의 해석을 위한 국소열전달계수 측정에 이용하는 기술은 미네소타대학의 Goldstein<sup>(2-5)</sup> 등에 의해서 최근에 개발되었다.

나프탈렌승화법을 이용하여 측정된 물질전달계수로부터 열전달계수를 환산하기 위해서 열전달과 물질전달의 유사성 관계식을 이용한다. 유사성 관계식은 층류유동이나 비교적 간단한 유동에 대해서는 잘 일치하고 있으나 난류유동이나 3차원유동과 같이 복잡한 유동에 대해서는 상당한 차이를 보이고 있다.<sup>(6)</sup> 이는 이 관계식이 난류유동에서 중요한 영향을 미치는 난류특성(turbulent properties)이나 형상에 대한 정보를 전혀 포함하고 있지 않기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 시편의 형상과 유동특성이 열전달과 물질전달의 유사성에 어떠한 영향을 미치는가를 실험에 의해서 분석하고자 한다. 본 연구에서는 가장 간단한 유동 및 열전달현상 연구모델인 평판과, 장애물주위의 유동 및 열전달 연구에 가장 많이 사용되는 형상인 원관, 박리·재부착·와류유출 등의 복잡한 유동이 일어나는 사각봉을 대상으로 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험을 행하고 기존의 열전달계수 측정데이터 혹은 실험식과 비교 검토하여 열전달과 물질전달의 유사성 관계식의 효용성을 고찰하고자 한다.

열전달과 물질전달의 유사성이 보다 명백하게 판명되면 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험은 지금까지 개발된 열전달실험으로는 상상조차 할 수 없었던 복잡한 열전달장치들의 열전달 현상을 규명할 수 있어서 응용 범위가 매우 다양하다. 원자력발전소의 핵심부분인 원자로에서의 열수력학적 특성에 관한 연구와 국산 핵연료개발을 위한 성능예측, 산업분야에 광범위하게 사용되고 있는 여러가지 형상의 열교환기의 성능개선과 개발을 위한 열전달해석, 항공기 등에 사용되는 가스터빈에서의 열전달 특성규명, 전자부품의 효과적인 냉각을 위한 3차원 열전달해석 등이 그 좋은 예이다.

## 2. 유사성에 관한 이론적 고찰

### 2.1 유사성 관계식

비압축성 유체의 열전달과 물질전달현상을 나타내는 지배방정식을 무차원변수로 표시하면 다음과 같다.

에너지방정식(열전달)

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

물질농도방정식(물질전달)

$$\frac{Dw}{Dr} = \frac{1}{Re Sc} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( 1 + \frac{\epsilon}{\nu} \frac{Sc}{Sc_t} \right) \frac{\partial w}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

여기서 무차원온도  $t = (T - T_\infty) / (T_w - T_\infty)$  이고 무차원농도  $w = (W - W_\infty) / (W_w - W_\infty)$  이다. 에너지방정식에서 얻어진 온도분포와 물질농도방정식에서 얻어진 농도분포는 열경계조건과 물질농도경계조건이 같고, 난류 Prandtl수와 난류 Schmidt수가 같거나 층류유동인 경우에는 Prandtl수와 Schmidt수를 서로 바꾸면 동일하다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 강제대류 열전달에서 열전달계수를 구하는 실험식은 다음과 같은 형태로 주어진다.

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (3)$$

위에서 열거한 조건들을 만족하면 강제대류 물질전달에서 물질전달계수를 구하는 실험식은 Prandtl수를 Schmidt수로 바꾸어 다음과 같이 표시할 수 있을 것이다.

$$Sh = C Re^m Sc^n \quad (4)$$

식(3)을 식(4)로 나누면 다음과 같은 열전달과 물질전달의 유사성 관계식이 얻어진다.

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^n \quad (5)$$

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

### 2.2 유사성 관계식 적용의 문제점

열전달과 물질전달의 유사성을 적용하여 물질전달계수로부터 열전달계수를 구하는 데 다음과 같은 문제점이 있다.

#### (1) 나프탈렌 물성치의 불확실성

나프탈렌의 승화량으로부터 물질전달계수를 구하기 위해서 시편 표면에서의 나프탈렌 증기압을 알아야 한다. 이 증기압은 온도의 함수로 실험식으로 알려져 있으며 온도에 매우 민감하여 온도 1K 변화에 증기압이 10% 정도 변화하며 결과적으로 물질전달계수가 10% 변한다. 따라서 실험하는 동안 온도를 정확하게 측정하여야 하며 온도와 증기압의

관계가 명확하게 판명되어야 하나 나프탈렌 증기압에 대한 실험데이터가 충분하지 않다. 또한 나프탈렌의 공기중에서 확산계수도 유사성에 큰 영향을 미치나 여태까지 Caldwell<sup>(7)</sup>과 Mack<sup>(8)</sup>이 측정된 두개의 데이터가 문헌에 나와 있으며 이 두값 사이에 9%의 오차가 있다.

### (2) 경계조건의 차이

유사성이 성립하기 위해서는 열전달의 경계조건과 물질전달의 경계조건이 같아야 한다. 에너지방정식과 물질농도방정식에 사용되는 속도분포는 운동량방정식을 풀어서 얻는다. 이때 운동량방정식의 경계조건은 열전달의 경우 시편 표면에서 속도가 0 이나 물질전달의 경우는 나프탈렌의 승화로 인해서 시편표면에서의 속도가 0이 아니다. Hartnett와 Eckert<sup>(9)</sup>에 의하면 표면에서의 속도가  $0.25 U_o / R_o^{0.5}$  보다 작은 경우는 영향을 미치지 않는다. 본 실험에서 나프탈렌의 승화속도는 이 값의 1%정도이므로 무시할 수 있다. 또한 물질전달의 경계조건은 열전달의 등온경계조건과 같으며 일정 열유속조건에 대응하는 경계조건을 만들 수 없다.

### (3) 난류특성의 영향

열전달과 물질전달의 유사성은 난류의 영향이 적거나 난류 Prandtl수와 난류 Schmidt수가 같은 경우에 성립한다. 비교적 간단한 유동의 경우는 이 관계가 성립하나 복잡한 유동의 경우는 유동형태 및 위치에 따라 난류 특성이 변화하여 유사성 관계식 적용이 어렵게 된다. 불행하게도 난류 Prandtl수와 난류 Schmidt수에 대한 충분한 실험데이터가 없기 때문에 그들이 열전달과 물질전달의 유사성에 어떠한 영향을 미치는가를 현 단계에서 고찰하는 것이 불가능하다.

### (4) 표면마멸의 영향

물질전달이 일어나는 표면은 유체와의 마찰에 의해서 마멸이 일어난다. 이 마멸 때문에 마찰이 큰 부분에서는 승화량이 실제보다 많이 계산되어 물질전달계수가 크게 나타나며 열전달에는 이러한 현상이 없다.

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

본 연구를 수행하기 위해서 설계제작한 실험장치는 풍동, 승화깊이 측정장치, 시편 등이다. 풍동은 개방송출형(open circuit, blowing type)으로 시편

부 단면의 크기는 폭 300 mm높이 300 mm이며 최대 풍속은 33 m/s이다. 시편은 평판, 원봉 및 사각봉을 제작하여 사용하였으며 자세한 규격과 제작 방법은 물질전달계수를 고찰할 때 설명하였다. 나프탈렌이 승화한 깊이를 측정하기 위해서 깊이센서, Signal Conditioner, 스텝모터, 마이크로컴퓨터 등으로 구성된 자동이송-정밀깊이 측정장치를 설계 제작하여 사용하였다. 깊이센서는 최대 측정깊이 0.254 mm 분해능  $2.54 \times 10^{-5}$  mm 인 Schaevitz LVDT(linear variable differential transformer) 센서를 Schaevitz DTR-451 signal conditioner에 연결하여 사용하였다. 승화깊이 측정장치는 평판과 원봉용 측정장치를 별도로 제작하여 사용하였으며 사각봉은 평판용 측정장치를 사용하여 측정하였다. 평판용 측정장치의 최대 이송거리는  $300 \times 400$  mm 이고 최소 이송간격은 0.0254 mm이며, 원봉용 측정장치의 최대 이송거리는 200 mm, 최소 이송간격은 0.0254 mm, 최소 회전각도는 0.72도이다.

### 3.2 실험방법

나프탈렌 주조를 위해서 시편의 1~1.5 mm깊이로 가공한 부분을 정밀하게 연마한 모울드로 볼트를 사용하여 고정시킨다. 나프탈렌 분말을 비커에 담아 열판 위에 올려 놓고 액체상태로 되어 끓기 시작하면 가열을 멈추고 기포가 사라질 때까지 기다렸다가 시편과 모울드 사이에 형성된 공간내에 주입구를 통하여 부어넣는다. 나프탈렌 주조면에 기포가 생기지 않도록 모울드 상부에 공기유출 구멍을 만들고 용융된 나프탈렌을 모울드 하부 구멍을 통하여 주입한다. 나프탈렌이 응고한 후 전단력을 가하여 모울드를 떼어내면 유리면처럼 매끈한 나프탈렌 표면을 얻을 수 있다. 실험중 나프탈렌 표면온도를 측정하기 위해서 열전대를 나프탈렌 주조 표면 바로 밑에 설치한다. 주조된 시편을 깊이 측정장치에 나프탈렌을 주조한 면이 바닥에 닿지 않도록 고정시킨 후 초기깊이를 일정한 간격으로 측정한다. 초기깊이를 측정한 시편을 풍동내에 고정시켜 1시간 가량 유동중에 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 같

이 구한다.

$$h_m = \rho_s \Delta t / \rho_{v,w} \Delta r \quad (6)$$

여기서  $\rho_s$ 는 나프탈렌 고체의 밀도이고,  $\rho_{v,w}$ 는 시편 표면에서의 승화된 나프탈렌증기의 밀도이며,  $\Delta t$ 는 나프탈렌이 승화한 깊이이고,  $\Delta r$ 는 풍동내에서 유동중에 노출한 시간이다. 나프탈렌이 승화한 깊이는 기준선으로부터 계산한 초기깊이와 풍동에서 노출한 후 기준선으로부터 계산한 나중 깊이의 차에서 깊이 측정장치에서 측정하는 동안 자연 대류에 의해 승화한 깊이를 뺀 값이다. 나프탈렌의 표면온도로부터 Ambrose<sup>(10)</sup>의 실험식을 써서 나프탈렌의 증기압을 구하고 이상기체의 상태방정식을 써서 표면에서 나프탈렌증기의 밀도를 구한다. 실험결과는 물질전달계수를 다음과 같이 무차원화시킨 Sherwood수로 나타내었다.

$$Sh = h_m d / D \quad (7)$$

여기서  $d$ 는 시편의 특성길이로 평판의 경우는 선단으로부터의 거리이고, 원봉은 직경, 직사각봉의 경우는 유동에 수직한 변의 길이이다.  $D$ 는 나프탈렌의 공기중의 물질확산계수로서 Mack<sup>(6)</sup>의 실험데이터를 사용하고 Chen과 Othmer<sup>(11)</sup>의 관계식을 이용하여 온도와 압력변화의 영향을 고려하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 평판에서의 물질전달 및 유사성

물질전달을 측정하기 위해서 사용한 시편은 Fig. 1에 보인 바와 같이 폭 100 mm, 길이 352 mm, 두께 12 mm의 스테인레스강으로 만든 평판이며, 나

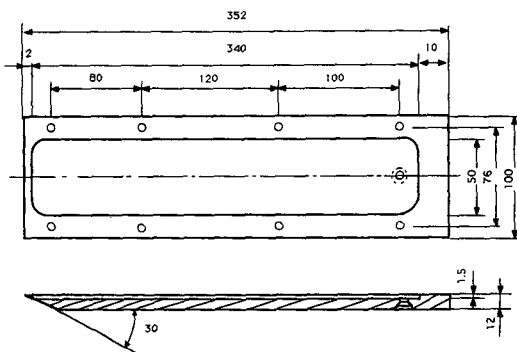


Fig. 1 Schematic diagram of flat plate

프탈렌을 주조하기 위해 폭 50 mm 길이 340 mm 부분을 깊이 1.5 mm로 가공하였다. 평판의 선단은 30도 각도로 뾰족하게 가공하여 평판의 선단이 유동 및 경계층 형성에 미치는 영향을 최소화하였다. 나프탈렌 주조면의 한쪽 끝에 직경 8 mm의 나프탈렌 주입용 구멍을 뚫고 반대 쪽 끝에는 2 mm의 공기구멍을 양쪽에 뚫었다. 모울드는 평판과 같은 크기로 스테인레스강으로 제작하였으며 주조시 시편과 나사로 조립하고 나프탈렌 응고 후 전단력을 가해서 떼어낸다. 시편은 풍동 축소부에서 235 mm 위치에 밀판으로부터 80 mm 위쪽으로 4개의 지지봉으로 지지하여 설치하였다.

Fig. 2는 자유흐름의 속도를 5 m/s에서 30 m/s까지 변화시켜가면서 측정된 평판의 선단에서의 거리에 따른 물질전달계수의 분포이다. 평판의 선단에서 물질전달계수가 감소하다가 3~6 mm지점부터 급격하게 증가한 후 급격하게 감소하며 100 mm보다 하류에서는 매우 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다. 최대점의 위치는 자유흐름의 속도가 증가할수록 약간씩 하류쪽으로 이동한다. 선단에서 감소하는 영역이 층류경계층이고 급격하게 증가한 후 급격하게 감소하는 영역이 천이구역(transition region)으로 생각되며 완만하게 감소하는 영역이 난류경계층으로 생각된다. 문헌<sup>(12,13)</sup>에 따르면 평판 유동의 경우 평판의 선단에서는 층류경계층이, Reynolds수가  $5 \times 10^5$  되는 지점에서 난류경계층이 형성되는 것으로 알려져 있으나 본 연구의 물질전달계수 측정결과에 의하면 층류경계층이 매우 짧고

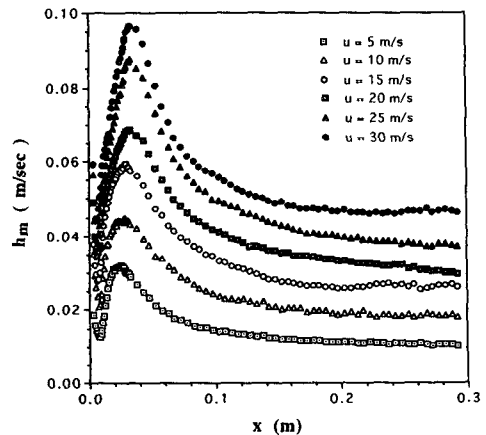


Fig. 2 Distribution of local mass transfer coefficients for flat plate

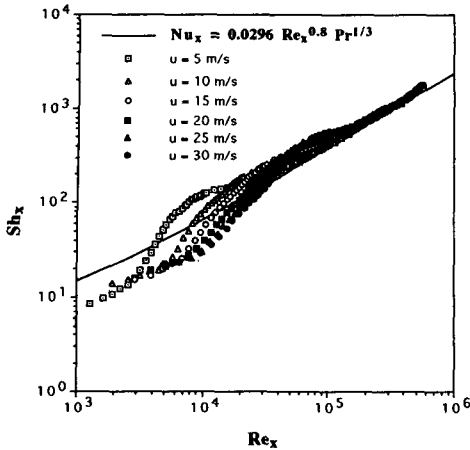


Fig. 3 Comparison of local mass transfer rate with heat transfer measurement for flat plate

평판의 선단 바로 다음부터 천이가 시작되어 하류로 가면서 난류경계층으로 바뀌는 것을 알 수 있다. 그 이유는 높이 300 mm 풍동시험부에 두께 12 mm의 평판이 설치되어 평판이 자유흐름을 방해하여 평판의 선단에서 유동의 박리(separation)가 일어나기 때문으로 생각된다.

물질전달계수를 열전달계수와 비교한 것이 Fig. 3에 나타나 있다. 물질전달계수는 Sherwood수로 무차원화시켰으며, Sherwood수와 Reynolds수를 구할 때의 특성길이는 평판선단에서부터의 거리를 사용하였다. Sherwood수의 Reynolds수에 대한 의존도는 자유흐름의 속도에 상관없이 하나의 선에 모이는 것을 볼 수 있으며, 따라서 실험결과와 신뢰도가 우수함을 알 수 있다. 열전달계수는 등온경계조건에서 난류유동의 실험식,

$$Nu_x = 0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{1/3} \quad (8)$$

을 사용하여 구하였으며 식(5)의 열전달과 물질전달의 유사성 관계식을 이용하여 Sherwood수로 환산하였다. 그림에서 알 수 있듯이 낮은 Reynolds수에서 많은 차이를 보이고 있는 영역이 천이구역이고 난류경계층에서는 나프탈렌승화법으로 측정된 물질전달계수와 난류 열전달실험식으로 구한 열전달계수가 매우 잘 일치하고 있다. 결론적으로 평판 유동과 같이 비교적 간단한 유동에서는 난류경계층에서도 열전달과 물질전달의 유사성을 적용할 수 있음을 알 수 있다. 천이구역에서의 유사성은 열전달 실험데이터를 구할 수 없어서 정량적인 비교는

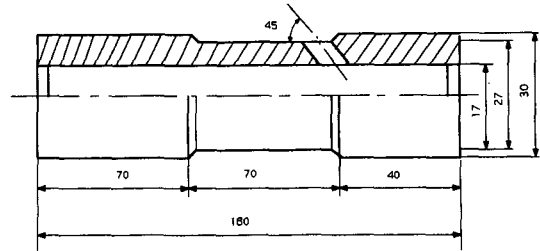


Fig. 4 Schematic diagram of circular cylinder

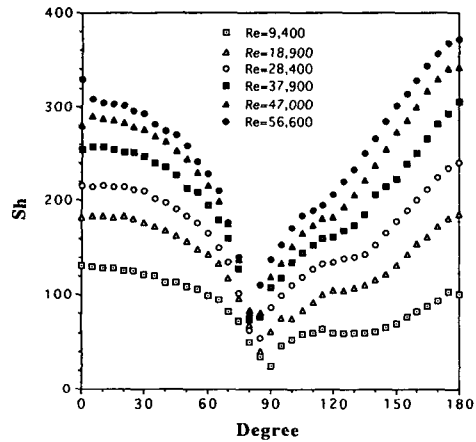


Fig. 5 Distribution of local Sherwood number for circular cylinder

할 수 없으나 변화하는 양상은 매우 흡사하다.

#### 4.2 원봉에서의 물질전달 및 유사성

물질전달 측정에 사용한 시편은 Fig. 4와 같이 내경 17 mm, 외경 30 mm, 길이 180 mm의 스테인레스강으로 제작하였으며 나프탈렌 주조부분은 길이 70 mm 길이 1.5 mm로 가공하였다. 나프탈렌 주입용 구멍은 45° 각도로 뚫어 원봉내면에서 나프탈렌을 주입할 수 있도록 하였다. 모울드는 가공의 편의를 위해서 황동을 사용하였으며 두 조각으로 나누어 제작하여 주조시에 밴드로 고정하였다. 모울드를 시편에서 분리할 때는 뜨거운 공기로 약간 가열한 후 전단력을 가하여 떼어냈으며, 모울드와 모울드가 만나는 곳에 생기는 가는 선은 사포로 문질러서 매끈하게 만들어 주었다. 주조가 끝난 원봉은 원봉용길이 측정장치에 고정하여 스템모터로 회전시켜 가면서 길이를 측정하였다. 길이 측정이 끝난 시편은 양쪽에 길이 75 mm와 45 mm의 보조 원

봉을 주조원봉의 위 아래에 붙여서 300 mm가 되도록 하여 주조부분이 풍동의 중앙에 위치하도록 하였다.

Fig. 5는 원봉주위에서의 국소 Sherwood수의 분포를 여러가지 Reynolds수에 대해서 나타낸 것이다. Sherwood수는 전면 정체점에서부터 점차 감소하다가 80°~90° 근처에서 최소값을 나타내고 그 이후에 후면정체점까지 증가한다. Sherwood수가 최소가 되는 지점이 분리점(separation point)이고 분리점의 위치는 Reynolds수가 증가할 수록 약간씩 앞당겨지며 이와같은 경향은 열전달 측정결과와 잘 일치한다. 120° 근처의 Sherwood수가 거의 변화가 없는 영역이 와류형성(vortex formation)의 중심으로 여겨지며 Reynolds수가 증가할수록 이 영역이 감소한다. Reynolds수가 증가할수록 Sherwood수가 증가하며, 증가하는 정도는 후면이 전면보다 훨씬 크다. 따라서 전면과 후면의 Reynolds수에 대한 의존도가 다르다는 것을 알 수 있다. 또한 Reynolds수가 작을 때는 전면 정체점과 후면 정체점에서의 값이 비슷하나 Reynolds수가 증가함에 따라 후면 정체점에서의 Sherwood수가 전면 정체점보다 커진다.

나프탈렌승화법으로 측정한 국소 Sherwood수와 Frössling의 이론식으로 구한 국소열전달계수로부터 환산한 Sherwood수를 비교한 것이 Fig. 6에 나타나 있다. Frössling<sup>(14)</sup>은 원봉주위의 층류경계층에서 국소열전달계수를 구하는 다음과 같은 근사해를 제안하였다.

$$Nu_x = [0.945 - 0.7696(x/d)^2 - 0.3478(x/d)^4] Re_x^{0.5} \quad (9)$$

여기서  $x$ 는 전면 정체점에서 원주방향으로 거리이며  $d$ 는 원봉의 직경이다. 이 식은 분리가 일어나기 전의 층류경계층에서만 성립한다. 그림에서 보는 바와 같이 열전달계수와 물질전달계수가 분리점 이전까지는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 분리점 이후에서는 국소 열전달계수에 대한 충분한 실험데이터가 문헌에 나와 있지 않아서 자세한 비교를 하지 못했으나, 변화하는 경향은 문헌<sup>(15)</sup>의 결과와 매우 비슷하다.

Fig. 7은 평균전달계수를 비교한 것으로 평균 열전달계수는 다음의 식을 사용하여 구하였으며 비교를 위해 유사성 관계식을 이용하여 Sherwood수로 환산하였다.

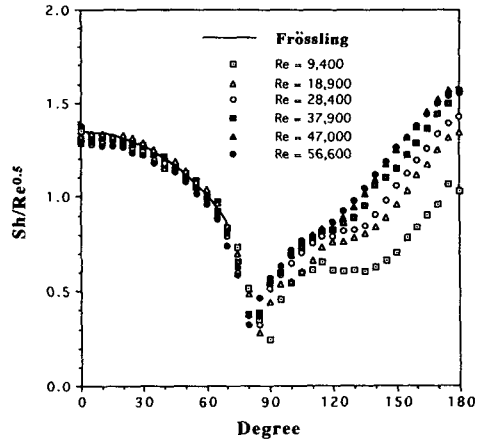


Fig. 6 Comparison of local mass transfer rate with heat transfer measurement for circular cylinder

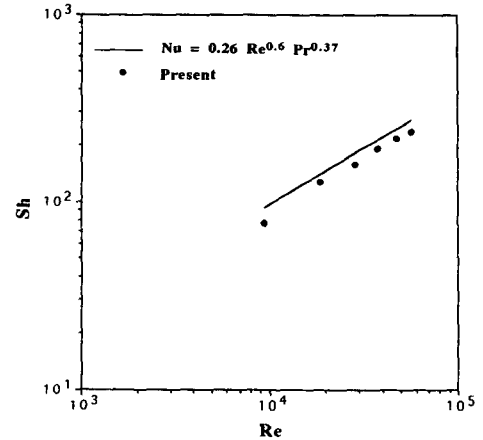


Fig. 7 Comparison of average heat transfer rate with heat transfer measurement for circular cylinder

$$Nu = 0.26 Re^{0.6} Pr^{0.37} \quad (10)$$

그림에서 보는 바와 같이 평균 물질전달계수가 평균 열전달계수보다 약간 작음을 알 수 있다. 그 이유는 국소전달계수의 비교에서 고찰한 바와 같이 층류경계층에서의 값은 비슷하므로 원봉 후면의 분리된 흐름(separated flow)영역에서의 물질전달계수가 열전달계수보다 낮기 때문으로 생각되며 이와 같은 경향은 다음절에서 고찰한 사각봉에서도 나타난다. 그러나 Reynolds수에 대한 의존도는 서로 비슷하다.

4.3 사각봉에서의 물질전달 및 유사성

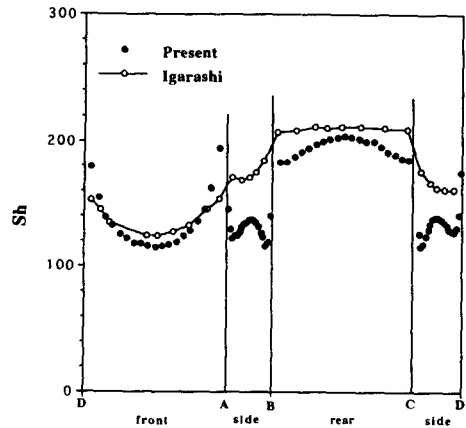
실험에 사용한 시편은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 한변의 길이 30 mm, 높이 300 mm인 탄소강으로 만들었으며, 중앙의 76 mm를 1.5 mm 깊이로 가공하였다. 사각봉 각면의 1.5 mm 깊이로 가공한 부분을 정밀하게 연마한 4개의 모울드로 고정하여 구조하였다. 구조된 시편은 평판측정시와 동일한 승화깊이 측정장치에 고정하여 승화량을 측정하였으며, 사각봉이 풍동내에 설치되는 위치는 원봉과 같이 풍동 축소부로부터 400 mm되는 위치이다. 사각봉의 폭이 10, 20, 30, 40 mm인 4개의 시편을 제작하여 Table 1과 같이 유동에 수직한 면의 길이(d)와 유동에 평행한 면의 길이(c)의 비를 5가지로 변화시켜가면서 물질전달계수를 측정하였다.

Fig. 9는  $c/d=0.33\sim 1.5$ 의 사각봉주위의 국소물질전달계수의 분포를 나타내고 있다. 전체적으로 각 면에서 Sherwood가 변화하는 경향은 매우 유사하다. 전면에서는 정체점으로부터 모서리로 가면서 Sherwood수가 점점 증가하며 이러한 경향은 정체점에서 최대값을 갖고 뒤로 가면서 감소하는 원판의 경우와 대조적이다. 그 이유는 사각봉 전면에서 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. 후면에서의 Sherwood수는 거의 균일하고 와류유출(vortex shedding) 때문에 전면에서보다 약간 높게 나타난다. 자세하게 관찰하면 영문자 W형태이며 최소가 되는 부분이 주기적으로 유출되는 와류(vortex)의 중심으로 여겨

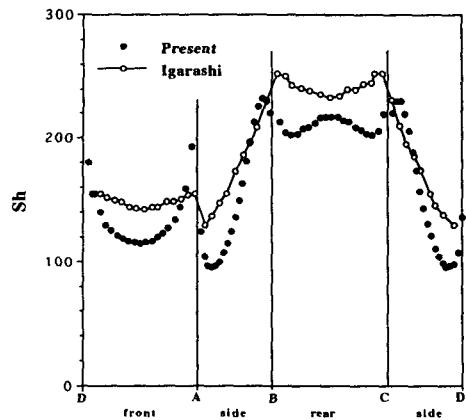
진다. 그러나  $c/d=0.33$ 인 경우는 측면과 후면에서 상당히 다른 양상을 보이고 있다. 측면에서는 선단에서 약간 감소하다가 증가하며 최대점 이후 감소하다가 후단까지 다시 증가한다. 후면에서는 후면 중앙에서 최대값을 나타내고 모서리로 갈수록

Table 1 Dimension of rectangular cylinders

c/d	d-c mm
0.33	30-10
0.67	30-20
1.0	30-30
1.33	30-40
1.50	20-30



(a)  $c/d=0.33$



(b)  $c/d=0.67$

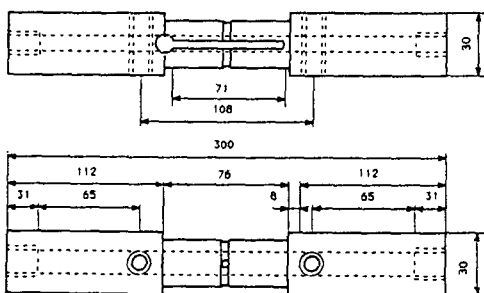
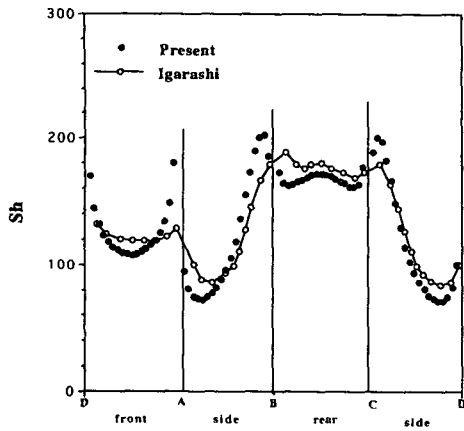
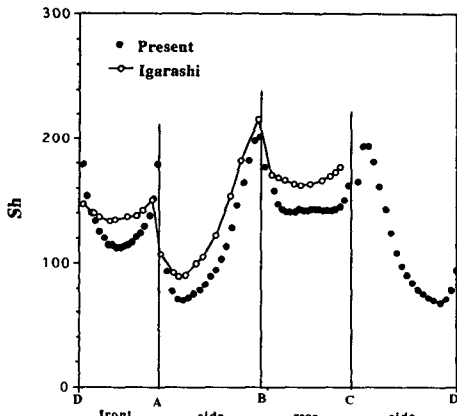


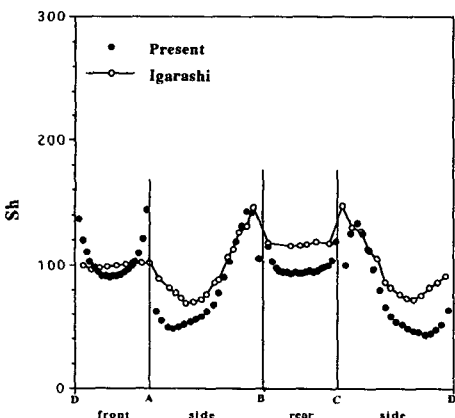
Fig. 8 Schematic diagram of rectangular cylinder



(c)  $c/d=1.00$



(d)  $c/d=1.33$



(e)  $c/d=1.50$

Fig. 9 Comparison of local mass transfer rate with heat transfer measurement for rectangular cylinders

감소한다. 또한  $c/d=0.33$ 인 경우 측면 후단에서의 물질전달계수는 후면의 값보다 작으나  $c/d$ 가 0.67보다 큰 경우는 반대로 된다. 이상의 결과를 종합해 볼때  $c/d=0.67$ 에서 사각봉 각 면에서의 물질전달율의 분포가 달라지며 이러한 경향은  $c/d=0.67$ 에서 유동특성이 크게 변하기 때문이다.<sup>(16)</sup>

Igarashi<sup>(17)</sup>의 국소 열전달계수 측정결과와 비교한 것이 Fig. 9에 같이 표시되어 있다. Igarashi의 국소 열전달계수는 아크릴 사각봉에 0.02 mm 두께의 스테인레스 박판을 입히고 그 밑에 열전대를 심고 스테인레스 박판을 전기적으로 가열하여 일정열유속(constant heat flux) 조건에서 국소온도분포를 측정하여 얻은 것이다. 본 물질전달실험의 경계조건은 일정온도조건과 유사하며, 일반적으로 일정열유속조건에서의 열전달계수는 일정온도조건에서보다 5~10% 정도 높은 것으로 알려져 있다. Igarashi의 열전달계수는 식(5)의 열전달과 물질전달의 유사성 관계식을 이용하여 물질전달계수로 환산하였으며 그때 지수  $n$ 은 Igarashi가 그의 데이터를 식(3)의 실험식으로 바꿀 때 사용한 1/3을 그대로 사용하였다. 열전달계수로부터 환산한 Sherwood수와 물질전달실험에서 측정한 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 마모 때문에 전면 모서리 부근에서와 같이 유체와의 마찰이 큰 부분에서 물질전달계수가 실제로 크게 나타나며, 셋째 열전달 측정에서는 스테인레스 박판을 통한 옆으로의 열전도 때문에 열전달계수가 평균화(averaging)되는 효과가 나타나기 때문이다. 또 한가지 중요한 이유는 난류 Prandtl 수와 난류 Schmidt 수가 같다는 가정하에서 유사성 관계식을 사용할 수 있는데 복잡한 유동의 경우는 이와같은 가정이 성립되기가 곤란하다. 특히 박리, 재부착, 재순환 등이 일어나는 유동에서는 난류점성계수와 난류확산계수가 전달현상에 크게 영향을 미치므로 열전달과 물질전달의 유사성 관계식에도 난류특성이 고려되어야 한다. 불행하게도 난류 Prandtl 수와 난류 Schmidt 수에 대한 실험데이터가 거의 없기 때문에 정량적인 고찰은 현 단계에서



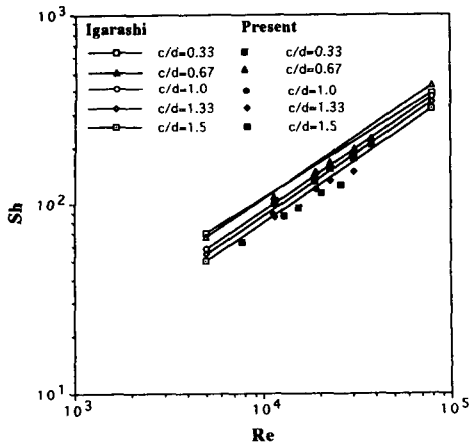


Fig. 10 Comparison of average mass transfer rate with heat transfer measurement for rectangular cylinders

는 불가능하다.

Fig. 10은 평균 물질전달계수와 평균 열전달계수의 변화를 Reynolds수에 따라 나타낸 것으로 유동에 수직한 길이  $d$ 를 특성길이로 사용하여 Reynolds수를 구하였다. 평균 물질전달계수는 각 면에서의 국소 물질전달계수의 평균값을 구한 것이며, 평균 열전달계수는 등온조건(constant temperature condition)에서 측정된 값이다. 원봉에서와 같이 평균물질전달계수가 평균 열전달계수보다 약간 작으나 Reynolds수에 대한 의존도는 서로 비슷하다. 따라서 열전달과 물질전달의 유사성 관계식은 평균 전달계수를 구하는 데는 매우 복잡한 유동에서도 유용하게 사용될 수 있다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

나프탈렌승화법을 이용하여 평판, 원봉 및 사각봉에 대한 물질전달실험을 행하고 시편의 형상이나 유동특성이 물질전달에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 비슷한 유동조건에서 얻어진 열전달계수와 비교하여 열전달과 물질전달의 유사성 관계식의 효용성을 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평판위의 유동과 같이 비교적 간단한 유동에서는 난류경계층에서도 열전달과 물질전달의 측정결과가 매우 잘 일치하고 있으므로 열전달과 물질전달의 유사성 관계식을 적용할 수 있다.

(2) 원봉의 경우 국소 전달계수는 분리점 이전의

충류경계층에서는 물질전달 측정결과와 열전달 근사해가 잘 일치하고 있으며, 분리점 이후는 충분한 국소 열전달 실험데이터가 없어서 정량적인 비교를 하지 못했으나 변화하는 경향은 비슷하다. 평균전달계수는 물질전달계수가 열전달계수보다 약간 낮으며 그 이유는 분리된 흐름 영역에서 물질전달이 열전달보다 활발하지 못하기 때문이다.

(3) 사각봉 각 면에서의 국소 물질전달계수의 분포가 현저하게 다르며, 이러한 물질전달율의 변화는 유동의 정체, 가속, 박리, 재부착, 와류유출 등의 복잡한 유동현상과 밀접한 관계가 있다.

(4) 사각봉 각면에서의 국소 물질전달계수의 변화하는 경향은  $c/d$ 가 0.67보다 큰 경우는 서로 비슷하나 0.67보다 작은 경우는 상당히 다른 양상을 보이고 있으며 이는  $c/d=0.67$ 에서 유동특성이 변화기 때문이다. 열전달 측정값과 비교해 본 결과 국소전달계수와 평균전달계수 모두 변화하는 경향은 비슷하나 값은 물질전달계수가 열전달계수보다 약간 낮게 나타나며, 두 전달계수의 Reynolds수에 대한 의존도는 서로 비슷하다.

## 후 기

본 연구는 1990년도 한국과학재단 연구비지원(과제번호: 901-0901-007-2)에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드리고, 연구시설을 지원하여 준 한국원자력연구소에도 감사의 뜻을 포함한다.

## 참고문헌

- (1) Thoma, H., 1921, "Hochleistungskessel," Julius Springer.
- (2) 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.
- (3) Goldstein, R. J., Chyu, M. K. and Hain, R. C., 1985, "Measurement of Local Mass Transfer on a Surface in the Region of a Protruding Cylinder with a Computer Controlled Data Acquisition system," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 28, pp. 977~985.
- (4) Goldstein, R. J., Yoo, S. Y. and Chung, M. K.,

- 1990, "Convective Mass Transfer from a Square Cylinder and its Base Plate," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, No. 1, pp. 9~18.
- (5) Yoo, S. Y., Goldstein, R. J. and Chung, M. K., 1993, "Effects of Angle of Attack on Mass Transfer from a Square Cylinder and its Base Plate," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 2, pp. 371~381.
- (6) 유성연, 1989, "나프탈렌승화법을 이용한 사각 봉과 직교기판에서의 물질전달에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원.
- (7) Caldwell, L., 1984, "Diffusion Coefficient of Naphthalene in Air and Hydrogen," *J. of Chem. Eng. Data*, Vol. 29, pp. 60~62.
- (8) Mack, E., 1925, "Average Cross-Sectional Areas of Molecules by Gaseous Diffusion Methods," *J. of Am. Chem. Soc.*, Vol. 47, pp. 2468.
- (9) Hartnett, J. P. and Eckert, E. R. G., 1975, "Mass Transfer Cooling in a Laminar Boundary Layer with Constant Fluid Properties," *Trans. of ASME*, Vol. 79, Part 1, pp. 247~253.
- (10) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (11) 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.
- (12) Holman, J. P., 1986, "Heat Transfer," 6th Ed., McGraw Hill.
- (13) Zukauskas, A. and Slanciauskas, A., 1987, "Heat Transfer in Turbulent Fluid Flows," Hemisphere Publishing Co.
- (14) Zukauskas, A., Ziugzda, J., Bagdonaite, E. and Hewitt, G. F., 1985, "Heat Transfer of a Cylinder in Crossflow," Hemisphere Publishing Co.
- (15) Zukauskas, A., 1972, "Heat Transfer from Tubes in Crossflow," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 93~160.
- (16) Igarashi, T., 1985, "Characteristics of the Flow Around Rectangular Cylinders," *Bulletin of JSME*, Vol. 28, No. 242, pp. 1690~1696.
- (17) 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. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 5, pp. 893~901.