

나프탈렌승화법을 이용한 열전달 측정 Heat Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation Technique

유 성 연
S. Y. Yoo
충남대학교 기계설계공학과



- 1953년생
- 3차원 열전달측정, 열전달 측정기술, 원자로연료봉 냉각, 전자칩 냉각, 공기 조화시스템 설계 등에 관심을 가지고 있다.

1. 서 론

최근 에너지소비의 급격한 증가와 석탄, 석유 등 화석연료의 고갈로 에너지 단가가 점차 비싸짐에 따라서 새로운 에너지원의 개발과 에너지의 효율적 이용에 관한 연구 및 기술개발이 매우 활발히 진행되고 있다. 에너지의 효율적 이용을 위해서는 산업분야에 광범위하게 사용되고 있는 열전달장치(여러형상의 열교환기, 가스터어빈, 원자로 등)들의 열수력학적 특성에 관한 광범위한 연구가 절실히 요구된다. 지금까지의 대부분의 유동실험과 열전달실험은 1차원이나 2차원 흐름으로 단순화시켜 행하여져 왔으며, 이러한 장치들의 설계에도 1차원이나 2차원영역에서 얻어진 데이터를 그대로 사용하는 경우가 많다. 그러나 실제 장치에서는 박리, 재부착, 재순환 등의 매우 복잡한 유동을 수반하기 때문에 열전달장치의 성공적인 설계와 정확한 해석을 위해서는 3차원유동에서의 열전달 특성에 관한 정보가 필요하다. 지금까지의 열전달실험은 대부분 열전대에 의존하고 있으나 열전대부착의 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 Liquid Crystal을 이용하는 경우도 있으나 극히 제한된 경우에만 사용되고 있다. 따라서 기존의 열전달실험으로는 3차원유동이나 복잡한 형상에 대한 국소열전달계수의 측정이 매우 어렵다.

이러한 어려움을 해결하기 위해서 개발된 방법이 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달 실험이다. Reynolds와 Prandtl 등에 의해 운동량전달과 열전달의 유사성이 알려진 이후 열전달과 물질전달의 유사성도 함께 연구되어 왔으나, 이 유사성을 열전달 측정에 직접 이용한 것은 1921년 Thoma¹⁾가 처음이다. 그 이후 물질전달실험은 여러가지 방법이 개발되었으나 나프탈렌승화법이 가장 광범위하게 응용되고 있다. 이 방법을 이용한 평균열전달계수 측정은 Sparrow²⁾ 등에 의해 오래전부터 시도 되었으나, 열교환기, 가스터어빈, 원자로, 전자부품 등에서 일어나는 매우 복잡한 열전달현상의 해석을 위한 국소열전달계수 측정에 이용하는 기술은 미네소타 대학의 Goldstein^{3, 4)} 등에 의해서 최근에야 개발

되었다. 이 분야에 지금까지 연구된 과제로는 경계층이 원판과 그 Base주위에서의 물질전달에 미치는 영향⁸⁾, 돌출된 원판이 있는 평면에서의 물질전달⁹⁾, 말굽와류(Horseshoe Vortex)가 열전달이나 물질전달에 미치는 영향⁷⁾, 가스터어빈 날개에서의 물질전달¹⁰⁾, 곡판에서의 물질전달¹¹⁾ 등이 있으며, 국내에서도 이 텍식¹⁰⁾ 등이 막냉각되는 평판에서의 열전달특성을 나프탈렌승화법으로 연구하고 있다.

본 고에서는 가장 간단한 유동 및 열전달현상 연구모델인 평판과, 장애물주위의 유동 및 열전달 연구에 가장 많이 사용되는 형상인 원판, 박리·재부착·와류유출 등의 복잡한 유동이 일어나는 정사각봉을 대상으로 열전달과 물질전달의 유사성을 고찰하고¹¹⁾, 나프탈렌승화법을 3차원 열전달 측정에 응용한 예^{12, 13)}를 서술하고자 한다.

2. 나프탈렌승화법

열전달과 물질전달의 유사성을 열전달계수 측정에 이용한 것은 1921년 Thoma가 처음이다. Thoma는 Filter Paper로 만든 봉다발에 인산을 적셔서 암모니아와 공기의 혼합물 중에 노출시켜 봉다발에 흡수된 암모니아의 양을 측정하여 물질전달계수를 구하고, 열전달과 물질전달의 유사성 관계식으로부터 열전달계수를 구하였다. 그 이후로 이종가스 분사추출법(Foreign Gas Injection and Sampling Method), 전기화학법(Electro-Chemical Method), 나프탈렌승화법(Naphthalene Sublimation Method) 등 여러가지 물질전달실험이 개발되었으나 그 중에서 가장 광범위하게 사용되는 방법이 나프탈렌승화법이다.

나프탈렌승화법은 시편에 주조된 나프탈렌이 공기중에서 일정시간동안 승화한 양을 측정하여 물질전달계수를 구하는 방법이다. 나프탈렌 주조를 위해서 시편의 1~1.5mm 깊이로 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 공간 내에 주입구를 통하여 부어넣는다. 나프탈렌 주조면에 기포가 생기지 않도록 모울드 상부에 공기 유출 구멍을 만들고 용융된 나프탈렌을 모울드 하부 구멍을 통하여 주입한다. 나프탈렌이 응고한 후 전단력을 가하여 모울드를 빼어내면 유리면처럼 매끈한 나프탈렌 표면을 얻을 수 있다. 나프탈렌은 시편과 모울드의 양쪽 금속면으로부터 응고가 시작되기 때문에 응고가 끝나는 중심 부근에 매우 약한 결합면이 형성되므로 모울드를 분리할 때 세심한 주의가 필요하다.

실험중 나프탈렌 표면온도를 측정하기 위해서 열전대를 중앙의 나프탈렌 주조 표면 바로 밑에 설치한다. 주조된 사각판 시편을 깊이측정장치에 나프탈렌을 주조한 면이 바닥에 닿지 않도록 고정시킨 후 초기깊이를 측방향과 둘레방향으로 일정한 간격으로 측정한다. 나프탈렌이 주조되지 않은 측방향의 양쪽 금속면에 기준점을 잡아 두개의 기준점을 연결한 선으로 기준선을 정하고 각각의 기준선으로부터의 깊이를 계산한다. 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 표면 온도, 공기의 온도와 압력, 공기의 평균속도를 측정하여 기록한다.

측정한 데이터로부터 물질전달계수는 다음과 같이 구한다.

$$h_m = \rho_s \Delta t / \rho_{s,w} \Delta \tau \dots\dots\dots (1)$$

여기서 ρ_s 는 나프탈렌 고체의 밀도이고, $\rho_{s,w}$ 는 시편표면에서의 승화한 나프탈렌증기의 밀도이며, Δt 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 깊이

를 뺀 값이다. 측정하는 동안 자연대류에 의해 승화된 양은 본 실험과는 별도로 시편을 측정실에서 10시간 동안 공기중에 노출시킨 후 처음과 나중의 깊이의 차를 측정하여 평균값으로 구하였다. 나프탈렌이 승화된 깊이는 0.05~0.1 mm 정도로 눈으로 보아서는 형상의 차이를 알 수 없을 정도로 미세하다. 나프탈렌의 표면은 도로부터 Ambrose¹⁴⁾의 실험식을 써서 나프탈렌의 증기압을 구하고 이상기체의 상태방정식을 써서 표면에서 나프탈렌증기의 밀도를 구한다. 측정결과는 물질전달계수를 다음과 같이 무차원화 시킨 Sherwood 수로 나타낸다.

$$Sh = h_m d/D \dots\dots\dots (2)$$

여기서, d 는 시편의 특성길이로 평판의 경우는 선단으로 부터의 거리이고, 원봉은 직경, 정사각봉은 한변의 길이이며, 직사각봉의 경우는 유동에 수직한 변의 길이이다. D 는 나프탈렌의 공기중의 물질확산계수로서 Mack¹⁵⁾의 실험데이터를 사용하고 Chen과 Othmer¹⁶⁾의 관계식을 이용하여 온도와 압력변화의 영향을 고려한다.

3. 열전달과 물질전달의 유사성

3.1 유사성 관계식

비압축성 유체의 전달현상을 나타내는 지배방정식을 무차원변수로 표시하면 다음과 같다. 에너지보존방정식(열전달) :

$$\frac{DT}{D\tau} = \frac{1}{Re Pr} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(1 + \frac{\epsilon}{\nu} \frac{Pr}{Pr_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \dots\dots\dots (3)$$

물질보존방정식(물질전달) :

$$\frac{DW}{D\tau} = \frac{1}{Re Sc} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(1 + \frac{\epsilon}{\nu} \frac{Sc}{Sc_i} \right) \frac{\partial W}{\partial x_i} \right] \dots\dots\dots (4)$$

에너지보존방정식에서 얻어진 온도분포와 물질보존방정식에서 얻어진 농도분포는 열경계조

건과 물질농도경계조건이 같고, 난류 Prandtl수와 난류 Schmidt수가 같거나 ($Pr_i = Sc_i$) 층류유동인 경우에는 Prandtl수와 Schmidt 수를 서로 바꾸면 동일 하다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 강제대류열전달에서 열전달계수를 구하는 실험식은 다음과 같은 형태로 주어진다.

$$Nu = C Re^m Pr^n \dots\dots\dots (5)$$

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

$$Sh = C Re^m Sc^n \dots\dots\dots (6)$$

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

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

3.2 평판에서의 유사성

유체가 평판을 흐르는 경우에 평판의 선단에서 부터 점성력의 영향이 미치는 영역이 형성되며 이 영역을 경계층이라고 한다. 평판의 선단에서 시작하여 형성되는 경계층의 흐름은 층류이나 선단에서 충분히 먼 어느 거리에서의 흐름에는 교란이 일어나기 시작한다. 이 교란은 점점 증폭되어 마침내 난류로 바뀌어 지며, 이러한 유동현상의 변화가 전달계수(열전달 혹은 물질전달)에 크게 영향을 미친다. 층류로부터 난류로의 천이가 일어나는 임계 Reynolds수는 보통 5×10^5 이나, 실제적으로 이 임계값은 평판의 표면상태와 자유흐름의 상태에 따라 크게 변하며 자유흐름내에 교란이 존재하면 천이가 빨리 시작된다.¹⁷⁾

평판에서 측정된 물질전달계수를 열전달계수와 비교한 것이 그림 1에 나타나 있다. 물질전달계수는 Sherwood수로 무차원화 시켰으며,

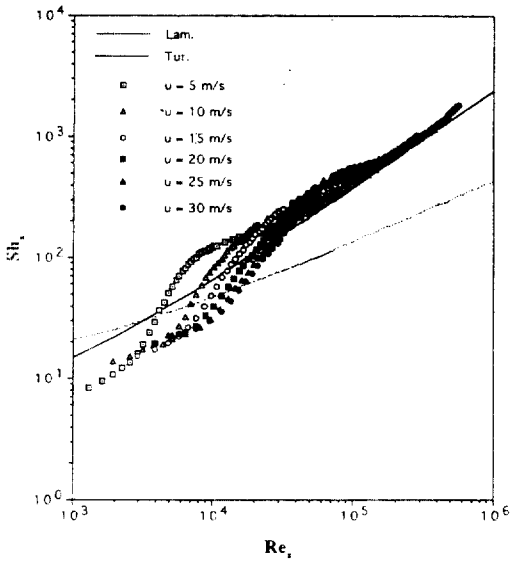


그림 1 평판에서의 열전달계수와 물질전달계수의 비교

Sherwood수를 구할 때의 특성길이는 Reynolds 수와 마찬가지로 평판 선단에서부터의 거리를 사용하였다. 열전달계수는 다음 식을 사용하여 구하였으며 식(7)의 열전달과 물질전달의 유사성 관계식을 이용하여 Sherwood수로 환산하였다.

$$\text{층류: } Nu_x = 0.332 Pr^{1/3} Re_x^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{난류: } Nu_x = 0.0296 Pr^{1/3} Re_x^{0.8} \dots\dots\dots (9)$$

그림에서 보는 바와 같이 물질전달 실험결과가 층류유동 영역에서는 열전달과 상당한 차이를 보이고 있으나 난류유동 영역에서는 열전달 실험식과 매우 잘 일치하고 있다. 평판유동의 경우 평판의 선단에서는 층류경계층이, Reynolds수가 5×10^5 가 되는 지점에서 난류경계층이 형성되는 것으로 알려져 있으나 물질전달계수 측정결과에 의하면 평판의 선단에서부터 천이 시작되어 곧 바로 난류경계층이 형성되는 것처럼 보인다. 이는 평판의 선단에서 유동의 박리가 일어나 선단부근에 박리기포(Separation Bubble)가 형성된 때문으로 추측된다. 정확한 원인을 규명하기 위해서는 레이저유속계나 열선유

속계를 사용하여 경계층에서의 속도분포와 난류강도 등을 측정해야 한다.

3.3 원봉에서의 유사성

직교흐름중에 원봉이 놓여 있을때 그 주위의 유동은 매우 복잡하여 여러가지 유동형태가 존재한다. 원봉의 전면 정체점에서 부터 흐름이 원봉 후면으로 나아가면서 분리 흐름이 형성된다. 흐름이 원봉 전면을 따라 흐를때에는 자유흐름의 속도가 증가하여 압력이 감소하고 원봉 후면에서는 반대로 속도가 감소하여 압력이 증가한다. 원봉 표면에 가까운 유체층의 운동량은 압력의 증가를 이길 만큼 충분히 크지 못하기 때문에 흐름이 경계층에서 분리되고 역류가 생긴다. Reynolds수가 증가하면 층류경계층은 부분적으로 난류경계층으로 바뀐 후 분리가 일어나 분리점이 층류경계층의 경우보다 훨씬 뒤에서 생긴다. 층류경계층의 분리점은 $82^\circ \sim 90^\circ$ 근처에서 생기고 난류경계층은 $120^\circ \sim 150^\circ$ 근처에서 생긴다. 한편 원봉의 후면에서는 와류유출이 주기적으로 일어나며 후면 중앙에 후면정체점이 존재한다. 이러한 유동특성은 전달현상에 직접적인 영향을 미친다. 전달계수는 전면 정체점에서부터 후면으로 갈수록 감소하다가 분리점 근처에서 최소가 된다. 분리된 흐름에서 난류와운동들이 활발하여 원봉 후면에서 전달계수가 후면정체점까지 증가한다.¹⁸⁾

원봉에서 측정된 국소 Sherwood수와 Frössling의 이론식으로 구한 국소열전달계수로부터 환산한 Sherwood수를 비교한 것이 그림 2에 나타나 있다. Frössling은 원봉 주위의 층류경계층에서 국소열전달계수를 구하는 다음과 같은 근사해를 제안하였다.

$$Nu_x = [0.945 - 0.7696(x/D)^2 - 0.3478(x/D)^4] Re^{0.5} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 x 는 전면정체점에서 원주방향으로 거리이며 D 는 원봉의 직경이다. 이 식은 분리가 일어나기 전의 층류경계층에서만 성립한다. 열전달계수와 물질전달계수가 분리점 이전까지는

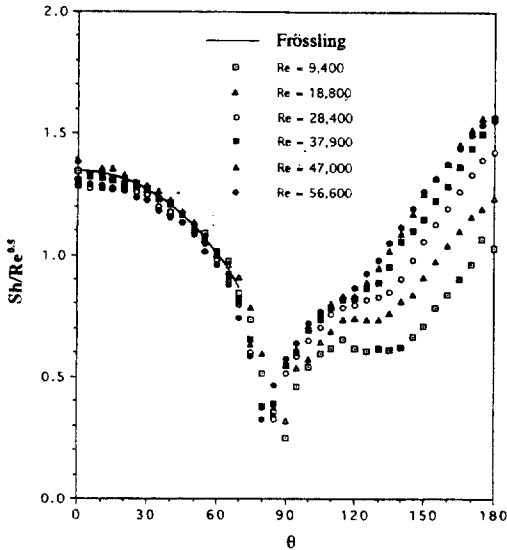


그림 2 원봉에서 국소열전달계수와 국소물질 전달계수의 비교

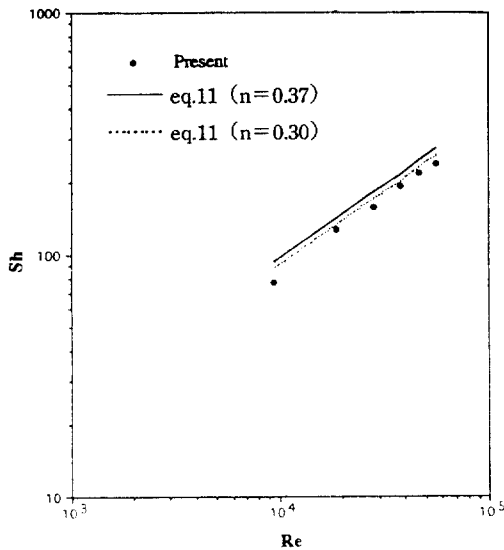


그림 3 원봉에서 평균열전달계수와 평균물질 전달계수의 비교

매우 잘 일치하고 있으나, 물질전달 측정결과가 열전달측정결과 보아 약간 낮음을 볼 수 있으며 Reynolds수가 증가할수록 차이가 커진다. 분리점 이후에서는 국소열전달계수에 대한 충분한 실험데이터가 문헌에 나와있지 않아서 자세한 비

교를 하지 못했으나, 그림에서 보는 바와 같이 변화하는 경향은 매우 비슷하다.

그림 3은 평균전달계수를 비교한 것으로 물질전달계수가 열전달계수보다 상당히 낮음을 알 수 있다. 평균열전달계수는 다음의 식을 사용하여 구하였으며 비교를 위해 유사성 관계식을 이용하여 Sherwood수로 환산하였다.

$$Nu = 0.26 Re^{0.6} Pr^{0.37} \dots\dots\dots (11)$$

그러나 유사성 관계식 $(Sc/Pr)^n$ 의 지수 n 을 0.37에서 0.3으로 낮추면 두 값이 보다 잘 일치한다. 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험은 공기중에서만 할 수 있기 때문에 Sherwood수의 Schmidt수에 대한 의존도(즉 $Sh \propto Sc^n$)를 실험에 의하여 구하는 것이 불가능하다. 따라서 열전달실험에서 얻어진 관계식(즉 $Nu \propto Pr^n$)의 지수 n 을 이용하고 있으나 이 n 값을 물질전달에 그대로 적용할 수 있는지에 대한 연구가 필요하다.

3.4 정사각봉에서의 유사성

유동중에 정사각봉이 수직으로 놓여있는 경우는 사각봉 전면에서의 유동의 정체 및 가속, 측면에서의 박리 및 재부착, 후면에서의 와류 유출 등의 매우 복잡한 유동현상이 생기며, 이와 같은 유동현상은 양각에 따라서 크게 변화한다. 양각이 13°보다 작은 경우에는 측면 선단에서 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 Wedge 유동 형태가 된다(Wedge Flow Type). 이러한 유동형태가 전달현상에 영향을 미친다.^{19, 20)}

$\alpha=0^\circ$ 인 경우를 살펴보면 열전달계수로부터 환산한 Sherwood수와 물질전달실험에서 측정된 Sherwood수의 변화하는 경향은 매우 흡사하나 값은 약간의 차이를 보이고 있다. 가장 큰 차이점은 변화하는 기울기가 물질전달의 경우에 열전달의 경우에 비해서 훨씬 가파르다는 것이다.

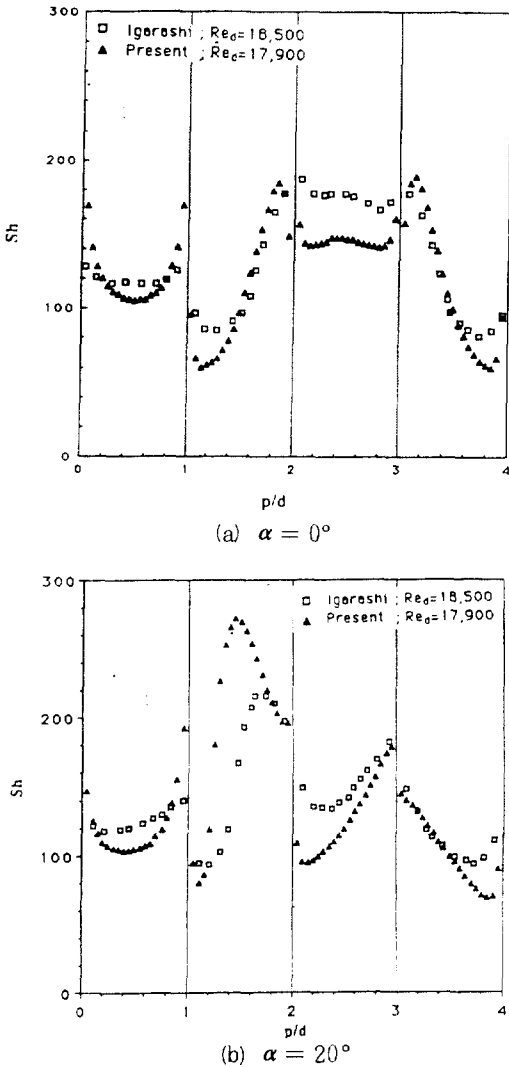


그림 4 사각봉에서 국소열전달계수와 국소물질전달계수의 비교

그 이유는 첫째로 물질전달이 열전달에 비해서 유체유동변화에 훨씬 민감하게 영향을 받기 때문으로 생각할 수 있으며, 둘째 물질전달의 경우 유체의 전달력에 의한 나프탈렌 표면의 마모 때문에 전면 모서리 부근에서와 같이 유체와의 마찰이 큰 부분에서 물질전달계수가 실제보다 크게 나타나며, 셋째 열전달 측정에서는 스테인레스 박판을 통한 옆으로의 열전도 때문에 열전달계수가 평균화되는 효과가 나타나기 때

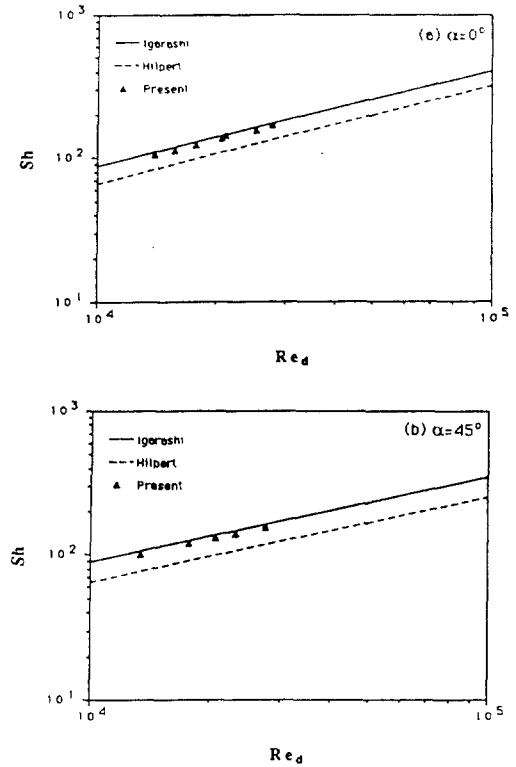


그림 5 사각봉에서 평균열전달계수와 평균물질전달계수의 비교

문이다. 또 한가지 중요한 이유는 난류 Prandtl수와 난류 Schmidt수가 같다는 가정하에서 유사성 관계식을 사용할 수 있는데 실제 유동의 경우는 이와 같은 가정이 성립되기가 곤란하다. 불행하게도 난류 Prandtl수와 난류 Schmidt수에 대한 실험데이터가 거의 없기 때문에 정량적인 고찰은 현 단계에서는 불가능하다. $\alpha = 20^\circ$ 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 재부착점보다 약간 앞에서 일어나는 것으로 여겨지고 있다. 이와같은 학설이 맞는다면 최대물질전달은 재부착점보다 상당히 앞선 위치에서 일어나고 있다는 것을 알 수 있다. 이것 또한 앞으로의 연구대상이 될 것으로 생각한다.

그럼에도 불구하고 그림 5에 보인 평균열전

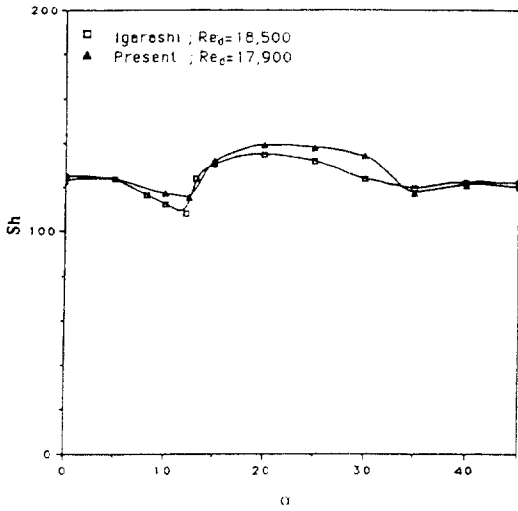


그림 6 사각봉에서 양각의 변화에 따른 평균 열전달계수와 평균물질전달계수의 비교

달계수와 평균물질전달계수는 매우 잘 일치한다. 평균물질전달계수는 각 면에서의 국소물질 전달계수의 평균값을 구한 것이며, 평균열전달 계수는 등온조건에서 측정된 값이다. 특기할 만한 사실은 위 두 결과가 대부분의 열전달 교재에서 인용하고 있는 Hilpert²¹⁾의 결과보다 40% 정도 높게 나타나고 있다. 그림 6은 양각의 변화에 따른 평균열전달계수와 평균물질전달계수의 비교이다. 전체적으로 매우 잘 일치하며 재부착 유동인 경우에 약간의 차이를 보이고 있다. 따라서 열전달과 물질전달의 유사성 관계식은 평균전달계수를 구하는 데는 매우 복잡한 유동에서도 유용하게 사용될 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 3차원 측정 예

유동중에 장애물이 놓여 있는 경우에 열전달 현상을 규명하는 것은 열교환기, 가스터어빈, 원자로 등의 설계에 매우 중요하다. 그림 7과 같이 평판에 부착된 장애물 주위로 유체가 유동할 때 평판과 장애물이 만나는 3차원 유동영역에서는 말굽와류(Horseshoe Vortex)가 형성되어 이 와류가 전달현상(열전달 혹은 물질전

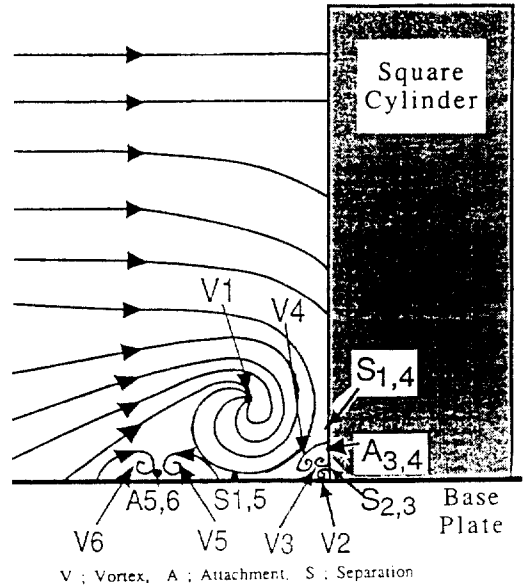


그림 7 사각봉과 직교기판 주위에서 말굽와류의 형성

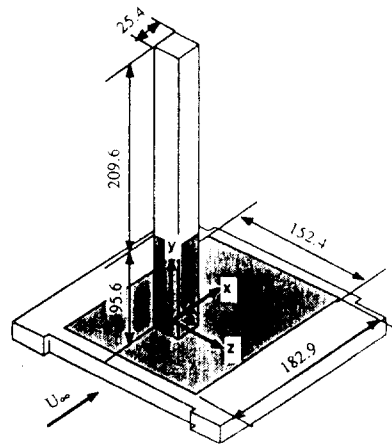


그림 8 나프탈렌이 주조된 사각봉과 직교기판

달)에 크게 영향을 미친다는 것은 잘 알려진 사실이다. 지금까지는 주말굽와류(Main Horseshoe Vortex : V1)가 전달현상에 영향을 미치는 것으로 알려져 왔으나, 나프탈렌승화법을 사용한 본 연구에서는 주말굽와류 밑에 형성된 서로 반대방향으로 회전하는 두쌍의 와류(Counter-rotating Vortex : V3 & V4, V5 & V6)와 모퉁이 와류(Corner Vortex : V2)가 전달현상에 직접적

인 영향을 미치는 것으로 판명되었다. Counter-rotating Vortex나 Corner Vortex는 크기가 매우 작기 때문에 유동장 측정이나 유동가시화 실험으로는 찾아 내기가 매우 어렵다.

그림 8은 말굽와류가 전달현상에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 사용한 모델이다. 사각봉이 풍동의 밑판에 수직으로 놓여 있으며, 사각봉과 밑판의 나프탈렌으로 주조된 영역이 표시되어

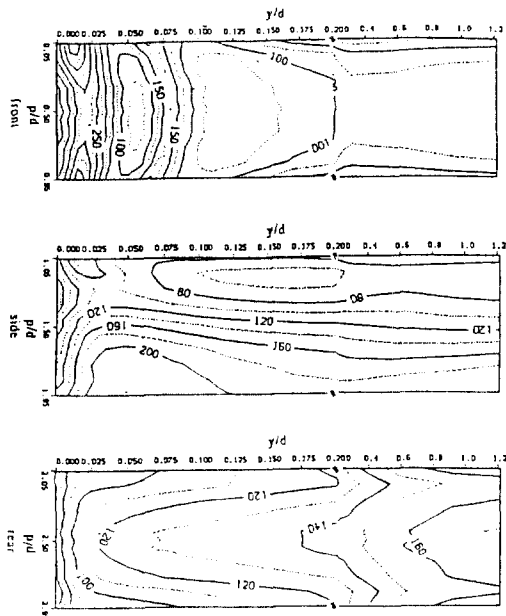


그림 9 사각봉의 3차원 유동영역에서의 물질 전달

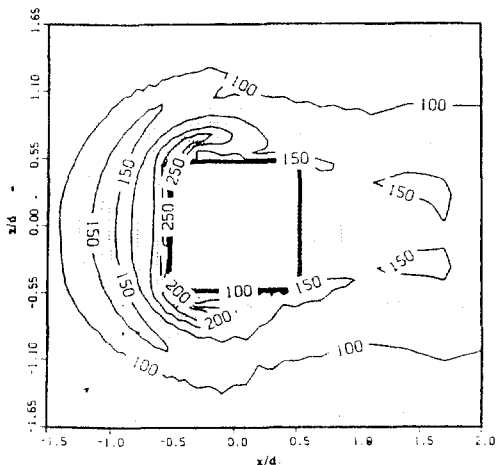


그림 10 직교기판의 3차원 유동영역에서의 물질전달

있다. 이때 그림 7에 보인 6개의 와류가 물질전달에 영향을 미치며 그 중에서 크기가 1~2mm 정도로 가장 작은 모퉁이 와류 V2가 가장 크게 물질 전달을 증가시킨다. 와류들이 사각봉의 각면과 직교기판의 물질전달에 미치는 영향이 그림 9과 그림 10에 나타나 있다. 사각봉의 경우 2.5mm×25mm의 면적에서 한번의 실험으로 500여개의 국소물질전달계수를 얻을 수 있다(열전대로 측정할 경우 동일 면적에서 10여개 정도의 국소열전달계수 밖에 얻을 수 없음). 이와 같이 매우 자세한 실험 데이터를 얻을 수 있다는 것이 나프탈렌승화법의 가장 큰 장점이다.

5. 결 론

나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험은 지금까지 개발된 열전달실험으로는 상상조차 할 수 없었던 복잡한 장치들의 유동현상과 열전달현상을 규명할 수 있어서 그 응용 범위가 매우 다양하다. 박리, 재부착, 재순환 등의 유동이 전달현상에 미치는 영향, 산업분야에 광범위하게 사용되고 있는 여러가지 형상의 열교환기의 성능개선과 개발을 위한 열전달해석, 원자력발전소의 핵심부분인 원자로에서의 열수력학적 특성에 관한 연구와 국산 핵연료 개발을 위한 성능예측, 항공기 등에 사용되는 가스터어빈에서의 열전달 특성 규명, 여러 형상의 연소실에서의 3차원 열전달 해석, 태양열시스템에서의 열전달 해석, 전자부품의 효과적인 냉각을 위한 열유동 해석 등에 응용할 수 있다.

열전달과 물질전달의 유사성 관계식은 층류 유동이나 비교적 간단한 유동에서는 매우 잘 일치하고 있으나 난류유동이나 3차원 유동과 같이 복잡한 유동에 대해서는 약간의 차이를 보인다. 이는 이 관계식이 난류유동에 중요한 영향을 미치는 난류특성이나 형상에 대한 정보를 전혀 포함하고 있지 않기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 전달현상에 영향을 미치는 인자들을 도출하고 이러한 인자들이 열전달과 물질전달에 어떠한 영향을 미치는 가를 분석하여, 새로운 유사성 관계식을 찾아내는 연구가 동시에 진행되어야 할 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

1. Thoma, H., 1921, "Hochleistungskessel", Julius Springer.
2. Sparrow. E.M., Stahl. T.J. and Traub. P., 1984, "Heat Transfer Adjacent to the Attached End of a Cylinder in Crossflow", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 27, pp.233-242.
3. Karni. J., 1985, "Endwall Boundary Layer, Cylinder Diameter, Reynolds Number, and Surface Injection Effects on Local Mass Transfer from a Cylinder in Crossflow", Ph.D thesis, University of Minnesota.
4. Chyu. M.K., 1985, "Influence of Roughness Elements on Local Mass Transfer from a Flat Surface", Ph.D thesis, University of Minnesota
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Chen, P.H. 1988, "Measurement of Local Mass Transfer from a Gas Turbine Blade", Ph.D thesis, University of Minnesota.
9. Dirks, D.J., 1987, "Mass Transfer on the Walls of a Square Duct Upstream and Downstream from a 90 Degree Bend of Strong Curvature", MS thesis, University of Minnesota.
10. 이상우, 신세현, 이택식, 이준식, 1988, "막 냉각되는 평판에서의 열전달특성에 관한 실험적 연구... 분사각도와 분사율의 영향", 대한기계학회 논문집, 제12권, 제6호, pp.14 15-1427.
11. Yoo, S.Y., Chung, C.H. and Chung, M.K., 1992, "A Study on the Analogy Between Heat Transfer and Mass Transfer", Proc. of 2nd JSME-KSME Thermal Eng. Conf., Kitakyushu, Japan.
12. 유성연, 1989, "나프탈렌승화법을 이용한 사각봉과 직교기판에서의 물질전달에 관한 연구" 박사학위논문, 한국과학기술원.
13. Yoo, S.Y., Goldstein, R.J, and Chung, M.K., 1992, "Effects of Angle of Attack on the Mass Transfer from a Square Cylinder and Its Base Plate", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Accepted.
14. Ambrose, D., Lawrenson, I.J. and Sparke, C.H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene", J. Chem. Thermodynamics, Vol.7, pp. 1173-1176.
15. Mack, E., 1925, "Average Cross-Sectional Areas of Molecules by Gaseous Diffusion Methods", J. of Am. Chem. Soc., Vol.47, pp. 2468.
16. 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.
17. Zukauskas, A. and Slanciauskas, A., 1987, "Heat Transfer in Turbulent Fluid Flows", Hemisphere Publishing Co.
18. Zukauskas, A., Ziugzda, J., Bagdonaite, E, and Hewitt, C.F., 1985, "Heat Transfer of a Cylinder in Crossflow", Hemisphere Publishing Co.
19. Igarashi, T., 1985, "Heat Transfer from a Square Prism to an Air Stream", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 28, No.1, pp. 175-181.
20. Igarashi, T., 1986, "Local Heat Transfer from a Square Prism to an Air Stream", Int. J.

of Heat and Mass Transfer, Vol.29, No.5, pp.
777-784.

21. Hilpert, R., 1933, "Wärmeabgabe von Geheizten Drahten und Rohrem im Luftstorm", Gebiete Ingenieurw, Vol.4, pp.215-224.