

## 고정형 Blade 의 기계교반식 박막장치에서의 열전달 특성

이득기 · 최익수

한국동력자원연구소

(1986년 3월 31일 접수, 1986년 11월 17일 채택)

## Heat Transfer Characteristics in the Mechanically Agitated Thin Film Apparatus with Rigidly Fixed Blades

Deuk Ki Lee and Ik Soo Choi

*Korea Institute of Energy and Resources*

(Received 31 March 1986; accepted 17 November 1986)

### 요 약

고정형 blade 의 기계교반식 박막장치에서 미소 열전달 면적의 열류계를 사용하며 축방향의 질량 흐름속도, 회전축의 회전속도, blade 의 수, clearance 및 유체의 점도에서의 변화에 대한 국부 열전달계수를 얻었다.

본 실험에서 blade 의 회전에 의한 국부 열전달계수에서의 변화는 blade 의 수와 회전축의 회전속도와의 곱의 0.5승에 비례함으로써 penetration model 에 의하여 예측되는 변화율과 같은 결과를 보였다. 그러나, 질량흐름속도, blade 의 수, clearance 및 유체의 점도의 변화에 기인되는 것으로 해석되는 액막에서의 난류의 정도에 차이가 있음으로써 penetration model 과 일치하지는 않았다.

본 실험 영역에서의 국부 열전달계수는 penetration model 을 축방향의 Reynolds 수, clearance 및 blade 의 수의 항으로써 보정한 다음과 같은 상관식으로 잘 표현될 수 있었다.

$$Nu = 0.12 (Re_r \cdot Pr)^{0.5} \cdot Ref^{0.164} \cdot \left(\frac{\delta}{R}\right)^{-0.124} \cdot B^{-0.423}$$

**Abstract**—The local heat transfer coefficient was obtained from the experiment using the heat flux meter of infinitesimal heat transfer area in the mechanically agitated thin film apparatus with rigidly fixed blades. The experimental variables were axial mass flow rate, rotational speed of a shaft, number of blades and viscosity of liquid.

It was shown that the heat transfer coefficient was dependent on the product of the number of blade and the rotational speed of a shaft by 0.5th power. This dependence was same as that predicted by penetration model. However, the results did not coincide with the penetration model due to the different degree of turbulence in liquid film, which was affected by the changes in axial mass flow rate, number of blades, clearance and viscosity.

As a result, the heat transfer coefficient could be described as the penetration model in combination with correction factor including the above effects. The dimensionless correlation equation within the experimental range was represented by

$$Nu = 0.12 (Re_r \cdot Pr)^{0.5} \cdot Ref^{0.164} \cdot \left(\frac{\delta}{R}\right)^{-0.124} \cdot B^{-0.423}$$

### 1. 서 론

기계교반식 박막장치는 얇은 액막의 형태로 흐르는 유체에 기계적인 교반을 도입하여 액-액계 및 고-액계 간의 열전달 속도를 향상시킨 것으로서 열에 의한 화학적 변화나 fouling을 일으키기 쉬운 물질 혹은 점도가 매우 높은 물질 등에 대한 분리 공정에 유용하며 건조기 혹은 화학반응기로서 이용되기도 한다 [1-4].

고정형 (rigidly fixed) 혹은 유동형 (floating) blade를 장치의 내벽면과의 간격이 매우 좁게 유지되도록 회전시킴으로써, 이 장치에서의 유체의 흐름은 복잡한 양상을 보이게 된다 [2, 3, 5]. 고정형 blade 장치의 경우에서의 유동은 Fig. 1에 보인 바와 같이 장치의 내벽면에서의 액막 (film) 형태로의 흐름, blade의 회전방향의 전면에 형성되는 액기둥 (bow wave or liquid fillet) 형태로의 흐름 및 clearance에서의 원주방향으로의 흐름으로 구성된다 [6, 7].

이러한 장치에서의 열전달 기구에 대하여 지금까지 많은 연구가 있었다. Kern과 Karakas [6] 및 Lustenader et al. [8]은 고체의 내벽면에서의 얇은 액막을 통한 정상상태 열전도에 의한 열전달 기구를 제시하였으나 Kool [9] 및 Harriott [10]은 회전 blade에 의하여 고체벽면에서의 액막이 갱신됨으로써 비정상상태의 열전도에 의해 열전달이 일어난다고 해석하고 식(1)과 같은 penetration model을 제시하였으나 실험결과와는 많은 차이가 있었다.

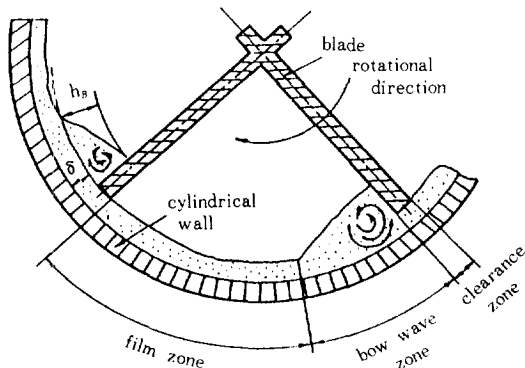


Fig. 1. Fluid flow pattern in a mechanically agitated thin film apparatus with rigidly fixed blades.

$$h = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left( \frac{\rho C_p k}{t_c} \right)^{0.5} \tag{1}$$

위의 식에서  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$ 는 각각 밀도, 비열 및 열전도도이며  $t_c$ 는 접촉시간으로서 회전축의 회전속도,  $N$ 과 blade의 수,  $B$ 와의 곱의 역수로 다음과 같이 주어진다.

$$t_c = \frac{60}{NB} \tag{2}$$

따라서 penetration model에 의한 열전달계수는

$$h = 0.146 (\rho C_p k NB)^{0.5} \tag{3}$$

혹은 무차원화하여

$$Nu = 0.451 (Re_r \cdot Pr)^{0.5} \tag{4}$$

로 표현된다. Azoory와 Bott [11] 및 Miyashita와 Hoffman [12]은 유동형 blade의 장치에서의 실험결과로부터 위의 penetration model을 각각 Prandtl 수 및 축방향의 Reynolds 수로 표현되는 항으로써 보정하여 열전달에 관한 상관식을 제시하였다. 또한 고정형 blade 장치에서 Woshitz [13]는 물질전달 실험으로부터 열전달계수를 구하였으며 Domanski et al. [14]은 난류에서의 전달현상에 관한 경험적 이론을 도입하여 실험을 통한 상관식을 제시하였다. 이외에도 Bott와 Romero [15, 16] 및 Jepson [17] 등이 유동형 blade 장치에서의 열전달에 관해 실험한 바 있다. 열전달에 관한 이러한 연구결과들을 분석하여 보면, 연구자에 따라 실험결과가 각각 다르게 나타나고 있으며 열전달 기구에 대한 해석도 다르다. 또한, 고정형 blade 장치에서의 열전달에 관하여 발표된 실험결과는 매우 부족한 형편이다.

본 실험연구는 고정형 blade의 기계교반식 박막 장치에서 실험유체의 전부를 가열하거나 증발시키지 않고 미소 열전달 면적의 열류계를 사용하여 각 변수에 따른 국부 열전달계수에서의 변화를 보다 세밀하게 실험하여 이 장치에서의 열전달계수에 대한 실험식을 제시하고자 하며, 또한 기존의 penetration model과 비교, 검토하여 이 장치에서의 열전달 특성을 파악코자 한다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2-1. 실험장치

전체 실험장치에 대한 개략도를 Fig. 2에 나타내

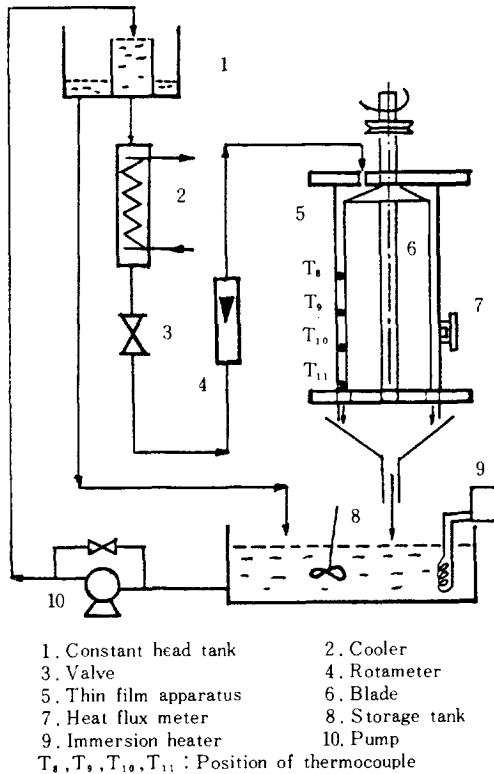


Fig. 2. Schematic diagram for experimental apparatus.

었다. 박막장치의 column은 내면가공한 길이 42cm, 내경 112.1mm, 두께 9.5mm의 acryl 수지를 사용하였다. Blade는 두께 2mm의 aluminum 판으로 제작하였고 clearance 조절이나 blade의 갯수의 변화가 용이하도록 회전축을 설계하였다. 회전축의 회전속도가 높을 경우, viscous dissipation으로 인하여 유체의 온도가 박막장치의 축방향에 따라 상승되므로 [14] 유체가 열유계를 지날 때의 유체의 bulk temperature를 측정할 수 있도록 축방향에 따라 9.5cm의 간격으로 박막장치에 T-type 열전대( $T_8 \sim T_{11}$ )를 설치하였다. 열유계는 entrance effect [12]를 피하기 위하여 박막장치의 위로 부터 약 25cm 아래에 위치하게 하였으며 직류전원을 사용하여 열을 공급하였고 전력의 계산을 위해 전압계 및 전류계를 사용하였다.

Fig. 3은 열유계에 대한 상세도이며 열유속과 열전달벽면의 온도를 동시에 측정할 수 있도록 설계하였다. 열전달에 이용되는 두께 8mm의 구리판은

bakelite에 의해 지지되며 유체와 접촉하는 열전달면적은  $3.5035 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 이다. 누전을 방지하고 구리판 전체에 열을 고루 공급하기 위해 구리판 뒷면에 운모판을 설치하고 또 다른 운모판에 저항이  $30.85 \Omega/\text{m}$ 인 nichrome 선을 균일하게 감아 heater로 사용하였다. 열전대  $T_1$  및  $T_3$ 는 유체와 접촉하는 구리판 표면의 온도를 측정키 위해 사용되었으며, 이들 열전대는 구리판 표면으로부터 1.5mm 뒤에 위치하지만 구리의 열전도도가 높으므로 ( $310.3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) 이러한 거리차이에 의한 영향은 무시할 수 있었다. 열유계의 반경방향 및 축방향으로의 열손실의 계산을 위해 열전대  $T_4$  및  $T_5$ 와  $T_6$ 를 설치하였으며 온도의 기록을 위해 HP 9872A data acquisition system을 이용하였다.

본 실험에서 사용된 유체는 물과 물 및 glycerol의 혼합액이며 Table 1에 물성치를 나타내었다.

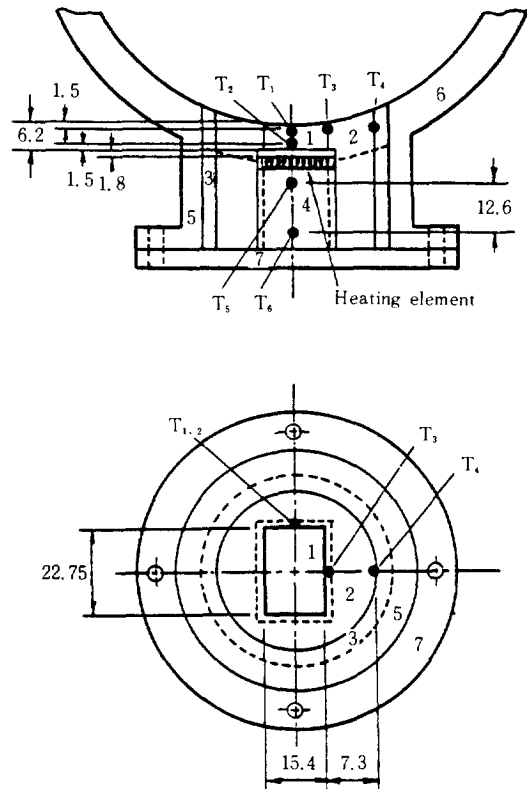


Fig. 3. Details of heat flux meter.

Table 1. Physical properties of test liquids.

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosity (Pa·s)	Thermal conductivity (W/m·°C)	Specific heat (J/kg·°C)	Prandtl number
water (25°C)	997	0.89 × 10 <sup>-3</sup>	0.607	4175.6	6.2
57% glycerol (25°C)	1143	7.4 × 10 <sup>-3</sup>	0.393	3243	61.1
77% glycerol (25°C)	1197.4	34 × 10 <sup>-3</sup>	0.328	2866	297.1
86% glycerol (27.5°C)	1227	79 × 10 <sup>-3</sup>	0.310	2720	693.2

## 2 - 2. 실험방법

Pump를 가동시켜 유체를 순환시키면서 회전축의 회전속도를 1 rpm까지 읽을 수 있는 회전속도계를 사용하여 원하는 속도로 조절하였다. Rotameter와 valve를 사용하여 유량을 조절하면서 immersion heater와 냉각기를 사용하여 열류계를 지나는 지점에서의 유체의 온도( $T_s$  및  $T_{10}$ )가 일정하도록 제어하였으며, 유체의 온도제어가 용이하도록 실온보다 약간 높은 온도(25±0.6°C, 27.5±0.6°C)로 설정하였다. 모든 조작변수가 원하는 실험조건에 도달하면 열류계에 전류를 통하였으며, 열전달면인 구리판면 온도와 제어되는 유체의 온도와의 차이가 약 2~5°C가 되도록 전압을 조절하였다. 열류계 내에서의 온도분포가 정상상태에 도달되기 이전에는 약 2분 간격으로 온도를 기록케 하였으며 정상상태에 도달되면 약 1분 간격으로 기록케 하였고 약 10분 동안 계속하여 앞서 측정된 온도와의 차이가 ±0.2°C 이내에 있으면 실험을 종료시켰다.

이와 같은 과정으로써 각각의 변수에 대하여 실험하였고 각 변수의 실험영역은 Table 2에 나타내었다.

## 2 - 3. 국부 열전달계수의 계산

열전달면인 구리판 벽면에서의 온도,  $T_w$ 는

Table 2. Experimental range of variables.

Variables	Range
Mass flow rate (kg/m·s)	0.027~0.183
Rotational speed (RPM)	350~1500
Number of blades (—)	2, 3, 6
Clearance (mm)	0.6, 1.0, 1.5
Viscosity (cP)	0.89~79

$$T_w = (T_1 + T_2) / 2 \quad (5)$$

로 계산되며 유체의 bulk mean temperature  $T_B$ 는

$$T_B = (T_s + T_{10}) / 2 \quad (6)$$

로써 계산된다. 온도구배  $\Delta T$ 는  $T_w$ 와  $T_B$ 의 차로 계산된다.

$$\Delta T = T_w - T_B \quad (7)$$

유체로 전달되는 열량  $Q$ 는 식(8)과 같이 주어진다.

$$Q = V \cdot I - Q_{loss} \quad (8)$$

식(8)에서  $V$  및  $I$ 는 각각 heater에 가해지는 전압 및 전류이며, 열류계의 열손실  $Q_{loss}$ 는 열전대  $T_s$ 와  $T_0$ 와의 온도차가 거의 모든 실험에서 1.5°C 이하였으므로 반경방향의 열손실을 무시할 수 있으며 축방향의 열손실만을 고려하면 식(8)에서의 열손실은

$$Q_{loss} = \frac{k_b}{X} (\text{area of heater}) \cdot (T_s - T_0) \quad (9)$$

으로 주어진다. 여기에서  $k_b$ 는 bakelite의 열전도도로서

$$k_b = 0.2242 + 4.28 \times 10^{-4} \frac{T_s + T_0}{2}$$

이고(18),  $X$ 는 열전대  $T_s$ 와  $T_0$ 간의 거리로서 0.0128 m이며 heater의 면적은  $5.11 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 이다. 국부 열전달계수  $h$ 는

$$h = \frac{Q}{A \cdot \Delta T}$$

로 정의되므로 열전달면적  $A$  및 (7), (8), (9)식을 대입하여 다음과 같이 계산된다.

$$h = \frac{V \cdot I - Q_{loss}}{(3.5035 \times 10^{-4}) \cdot (T_w - T_B)} \quad (10)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 질량흐름속도에 의한 영향

단위원주당의 질량흐름속도의 증가에 따른 국부 열전달계수에서의 변화를 회전축의 회전속도를 매개변수로 하여 Fig. 4 에 나타내었다.

질량흐름속도가 증가함에 따라 국부 열전달계수는 전체적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 또한 회전축의 회전속도가 비교적 낮은 경우(550 rpm 이하)에서는 그 증가율이 높은 편이지만 회전속도가 높아짐에 따라 점차 감소되고 있다. 이러한 결과는 유동형 blade 의 장치를 사용하여 실험한 Miyashita 와 Hoffman [12] 의 결과와도 같은 경향이다.

고정형 blade 의 기계교반식 박막장치에서 blade 의 회전에 의하여 이루어지는 3 부분의 유동영역 가운데 bow wave 영역 및 clearance 영역 중의 bow wave 에 인접된 영역이 가장 큰 난류특성을 갖는다 [13]. 비교적 낮은 회전속도 하에서 질량흐름속도가 낮은 경우, bow wave 는 그 부피 및 원주방향으로의 폭이 인접된 두 개의 blade 사이의 원주거리에 비하여 작으므로 [11, 13] 이때의 열전달계수는 낮다. 질량흐름속도가 증가함에 따라 각각의 blade 끝부분에 형성되는 bow wave 의 크기는 증가하게 되며, 이러한 경우 bow wave 크기의 증가는 Bott et al.

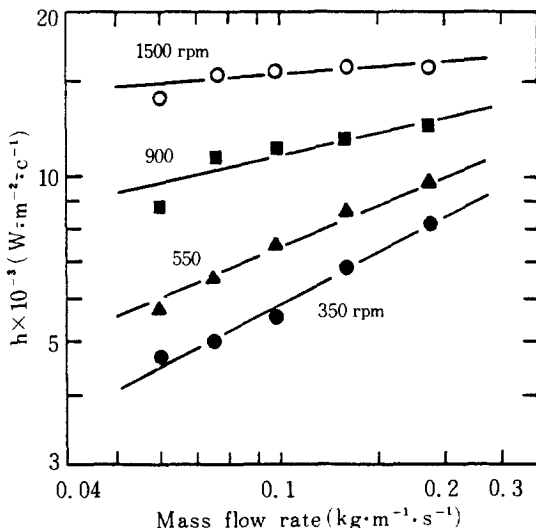


Fig. 4. Effect of mass flow rate per unit perimeter on the local heat transfer coefficient for water at  $\delta=0.6\text{mm}$  and  $B=6$ .

[19]이 유동형 blade 의 장치에서 행한 실험결과에 의하면  $h_b \propto q^{0.66} \mu^{0.3}$ 으로 표현된다. Schweizer [7] 및 Domanskii et al. [20]도 이에 대하여 실험한 바 있다. 이와 같이 증가된 크기의 bow wave 에 대하여 회전하는 blade 에 의해 원심력이 미쳐지게 되므로 그에 대한 반력으로써 bow wave 는 원주방향으로 더욱 커지게 되고 더 빠른 속도로 수직하게 된다 [13]. 따라서 국부 열전달계수는 회전속도가 비교적 낮은 영역하에서는 질량흐름속도의 증가에 따라 높은 증가율을 가진다. 그러나 회전속도가 높은 경우, 질량흐름속도가 bow wave 의 크기에 미치는 영향은 상대적으로 적어지며, 때문에 질량흐름속도의 증가에 의한 열전달계수의 증가율은 둔화된다. 즉 매우 높은 회전속도에 의해 bow wave 에 주어지는 원심력으로 인하여 bow wave 영역이 원주방향으로 보다 크게 확대됨으로써 액막을 형성하는 한도내에서의 질량흐름속도의 증가에 의해 기여될 수 있는 효과가 거의 무시되어 나타난 결과로 생각된다.

#### 3-2. 회전축의 회전속도에 의한 영향

회전축의 회전속도의 증가에 따른 국부 열전달계수에서의 변화를 Fig. 5 에 나타내었다. 단위원주당의 질량흐름속도가 0.183kg/m·s 정도로 큰 경우에는 회전속도의 증가에 따라 국부 열전달계수는 유체의 점도에 관계없이 약 0.5승의 증가율로써 증가하지만, 물 혹은 57% glycerol 수용액과 같이 점도가 높지 않은 유체의 경우에 질량흐름속도가 0.074 kg/m·s 로 적을 때에는 그 증가율은 보다 높은 결과를 보인다. 또한 유체의 점도가 높아짐에 따라 질량흐름속도의 차이에 관계없이 회전속도가 열전달계수에 미치는 영향은 거의 일정해지고 있음을 알 수 있다. 거의 대부분의 문헌에서 회전속도의 증가에 의한 열전달계수에서의 증가율이 0.5~0.6 승으로 보고되어 있으며 [9-14] 본 실험에서도 거의 같은 결과를 보였다.

회전속도의 증가는 원통관의 내벽면에 형성되는 액막의 원주방향으로의 선속도를 증가시키게 되며 이러한 선속도의 증가로 인하여 열전달벽면에 형성되는 액막은 더욱 빠르게 갱신되어 새로운 액막이 형성된다 [2, 12]. 또한 유체 전체에 미쳐지는 원심력이 증대됨으로써 액막 및 bow wave 에서의 난류현

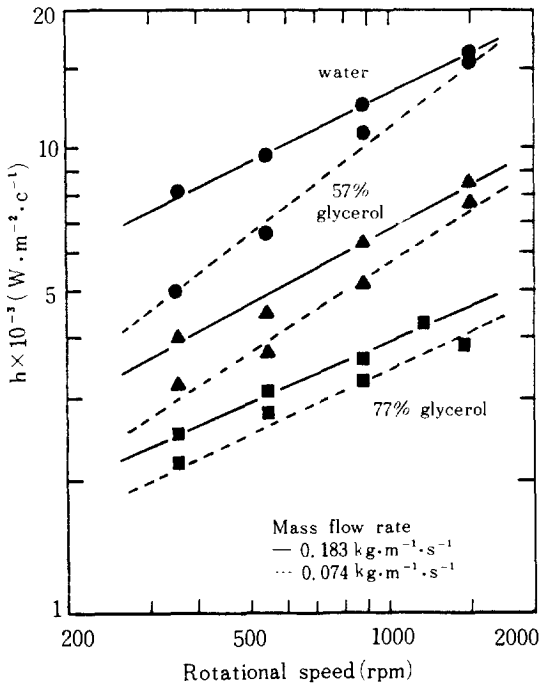


Fig. 5. Effect of rotational speed on the local heat transfer coefficient at  $\delta = 0.6$  mm and  $B = 6$ .

상은 더욱 증대되고 bow wave는 원주방향으로 더욱 넓어지게 되며, 동심의 두 원통관 사이에서 회전되는 유체의 경우에 볼 수 있는 Taylor vortex가 형성되기도 한다[7]. 따라서 회전속도의 증가에 따라 열전달계수는 증가하게 된다. 그러나 blade의 형태, 인접된 2개의 blade 간의 원주거리, 장치의 내경, 유체의 점도 및 질량흐름속도 등에 의하여 회전속도의 증가에 따른 난류성 bow wave의 원주방향으로의 확대 및 선속도의 증가로 인한 열전달면에서의 액막의 갱신율의 증가에는 어떤 한계가 있을 것으로 생각되며, 따라서 질량흐름속도가 큰 경우 혹은 고점도의 유체의 경우에 유동이 완전발달 (fully developed) 됨으로써 회전속도에 의한 열전달계수에서의 증가율은 일정해지고 있는 것으로 사료된다.

3 - 3. Blade수에 의한 영향

Blade 수가 국부 열전달계수에 미치는 영향을 86% glycerol 수용액 및 물의 경우에 대하여 Fig. 6에 나타내었다. 국부 열전달계수는 blade 수가 많아짐

에 따라 증가하는 결과를 보인다. 일정한 유량의 질량흐름속도에서 blade 수가 증가하면 blade의 앞부분에 형성되는 bow wave의 수는 증가된 blade 수만큼 증가하게 되지만 bow wave를 구성하는 유체의 부피는 감소하게 된다[7, 19, 20]. 따라서 동일한 회전속도 하에서 이때의 bow wave에 주어지는 원심력에 의한 하나의 bow wave 영역의 원주방향으로의 확대 및 그에 수반되는 난류효과는 blade 수가 적은 경우보다 더 줄어든다. 그러나 blade 수가 증가되면 열전달면에서의 액막의 갱신속도도 그만큼 증가하게 되며 또한 증가된 수의 bow wave가 차지하는 전체 원주거리가 상대적으로 증가된다. 이로써 난류영역이 확장되어 blade 수의 증가에 따라 국부

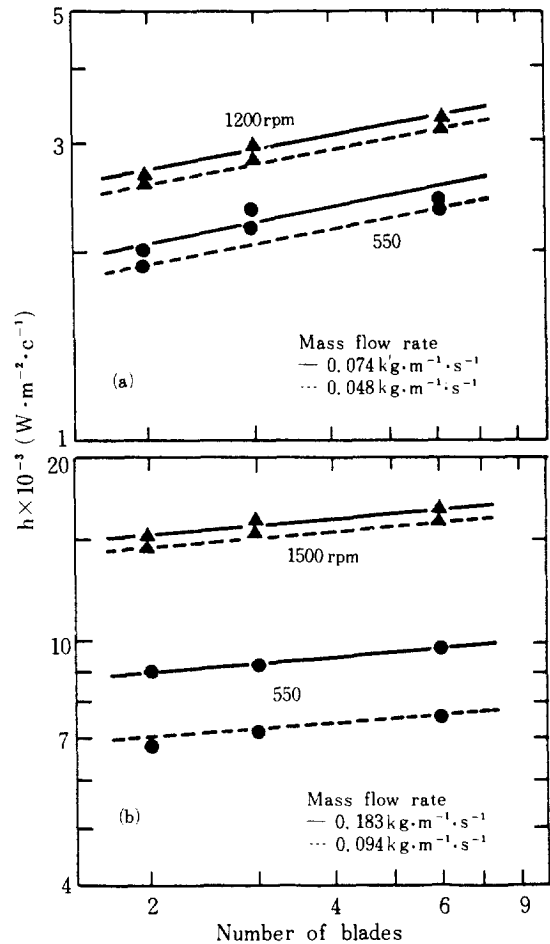


Fig. 6. Effect of the number of blade on the local heat transfer coefficient at  $\delta = 0.6$  mm; (a) 86% glycerol, (b) water.

열전달계수는 증가되는 것으로 사료되며 열전달계수에서의 평균 증가율은 약 0.078 승으로써 Domanskii et al. [14]에 의해 제시된 0.05 승보다 약간 높은 결과를 보이고 있다. 또한 Fig. 6의 (a) 및 (b)에서 보듯이 점도가 높은 유체의 경우 (a)가 저점도의 유체일 경우 (b)에 비하여 약간 더 큰 증가율을 보이고 있다. 이러한 이유는 고점도의 유체의 경우 하나의 blade에 의한 bow wave의 원주방향의 폭은 높은 점도로 인해 저점도의 유체일 경우보다 좁으며 따라서 blade수가 많아지면 각각의 bow wave가 차지하는 전체 원주거리가 상대적으로 더 증가하게 되는데, 이러한 영향이 저점도의 유체의 경우에서 보다 약간 더 크기 때문으로 생각된다.

3 - 4. Clearance에 의한 영향

Blade의 끝과 원통관 내벽면 사이의 간격(clearance)의 변화에 따른 국부 열전달계수에서의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 본 실험영역에서는 clearance가 증가됨에 따라 열전달계수는 낮은 회전속도(550 rpm 이하) 하에서는 최고점이 존재하는 경향을 보이고 있으나, 회전속도가 높은 Fig. 7(a)의 경우 거의 무관하며 점도가 더 높은 (b)의 경우에는 감소하고 있다.

동일한 질량흐름속도 하에서 clearance가 커지면 원통관의 내벽면을 따라 액막형태로 흐르는 유체가 blade에 의하여 각여지는 양이 적어지게 된다. 따라서 blade 앞의 bow wave를 구성하는 유체의 부피가 줄어들게되어 bow wave 영역이 축소되며 그 난류성도 감소됨으로써 열전달계수는 일반적으로 감소된다. 본 실험에서의 이의 평균감소율은 0.124 승으로써 Domanskii et al. [14]의 0.12 승과 거의 일치한다. 그러나 Fig. 7(a)의 900 rpm 이상인 경우는 유체의 점도가 (b)의 경우에 비해 낮으며, 질량흐름속도가 더 큰 관계로 높은 회전속도의 영향이 매우 크게 작용됨으로써 clearance의 변화에도 불구하고 열전달계수는 거의 일정한 것으로 생각된다. 회전속도가 550 rpm 이하로 비교적 낮은 경우, 최고의 열전달계수를 나타내는 경향은 점도가 보다 낮고 질량흐름속도가 큰 경우인 Fig. 7(a)에서 더욱 현저히 나타나고 있다. Clearance가 0.6mm로서 매우 좁을 경우, blade에 의하여 각여지는 유체

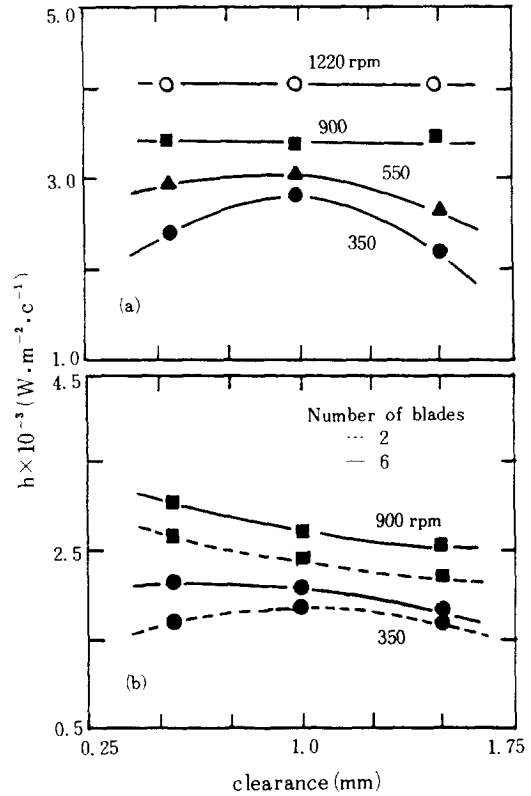


Fig. 7. Effect of clearance on the local heat transfer coefficient.

(a) 77% glycerol,  $\Gamma = 0.183 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ ,  $B = 6$   
 (b) 86% glycerol,  $\Gamma = 0.074 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$

의 양이 많은데 비하여 회전속도가 비교적 낮은 편이므로, 난류성의 bow wave 영역이 원주방향으로 확산되지 못한 상태에서 clearance가 매우 좁기 때문에, clearance 영역 및 film 영역에서의 유체의 유동은 보다 적은 난류성을 가지게 된다. 따라서 열전달계수는 낮은 값을 보이게 되나, clearance가 증가함에 따라 clearance 영역 및 film 영역에서의 난류성의 증가와 더불어 열전달계수는 증가하다가 bow wave를 형성하는 유체의 양이 적어지게 되어 blade 회전의 영향으로 인해 유체에 가해지는 효과가 감소하게 되므로 결국 열전달계수는 다시 감소하게 되는 것으로 생각된다.

이와같은 현상은 Woschitz [13]의 물질전달 실험에서도 확인되었다. Woschitz [13]는 clearance의 변화에 따라 최고의 물질전달계수를 나타내는 이상

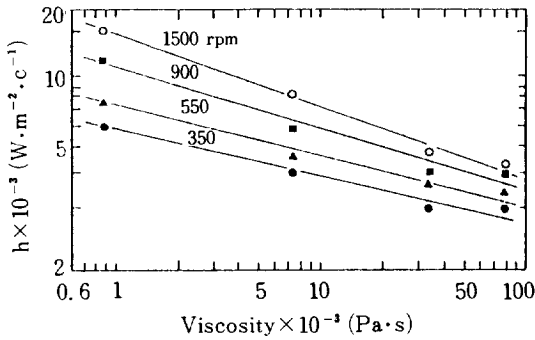


Fig. 8. Effect of viscosity on the local heat transfer coefficient at  $\Gamma=0.074 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ ,  $\delta=0.6\text{mm}$  and  $B=6$ .

적인 크기의 bow wave가 존재하며, 그러한 크기의 bow wave는 질량흐름속도, 회전속도, blade의 수, 박막장치의 길이 및 직경 등의 영향이 복합적으로 작용되어 형성된다고 하였으나, 이에 대해 어떠한 상관관계는 제시하지 못했다. 따라서 이러한 현상을 보다 구체적으로 규명하기 위해 clearance가 거의 없는 유동형 blade를 사용, 실험한 결과와 더불어 bow wave의 난류특성에 대해 보다 면밀한 실험결과가 요구된다.

3 - 5. 점도에 의한 영향

유체의 점도의 변화가 국부 열전달계수에 미치는 영향을 회전축의 회전속도를 매개변수로 하여 Fig. 8에 나타내었다. 유체의 점도가 증가함에 따라 열전달계수는 감소하는 결과를 보이고 있다.

유체의 점도가 증가하게 되면 bow wave를 구성하는 유체의 부피를 비롯하여 액막영역에서 액막의 두께도 증가하게 되므로 [7, 19, 20] bow wave는 원주방향으로 더욱 넓게 확장된다. 그러나 점도가 증가됨으로 인하여 유체의 유동성은 적어지게 되고 열전달벽면에 인접된 곳에 형성되는 층류경계층 (laminar sublayer)의 두께가 증가하게 되어 고-액계간의 열전달저항이 크게 되므로 열전달계수는 감소하게 된다.

3 - 6. Penetration model과의 비교, 검토 및 상관식의 도출

본 실험에서의 결과를 penetration model에 의해서 주어지는 열전달계수와 비교하여 봄으로써 고찰된

각각의 실험변수들에 의한 국부 열전달계수에의 영향을 종합적으로 비교, 검토할 수 있다.

Penetration model과 비교를 위해서 blade 수 (B)와 회전축의 회전속도(N)와의 곱, 즉 blade passage rate ( $N \cdot B$ )에 대하여 Fig. 9와 같이 국부 열전달계수의 변화를 나타내었다. 모든 경우에서 blade passage rate가 증가함에 따라 국부 열전달계수는

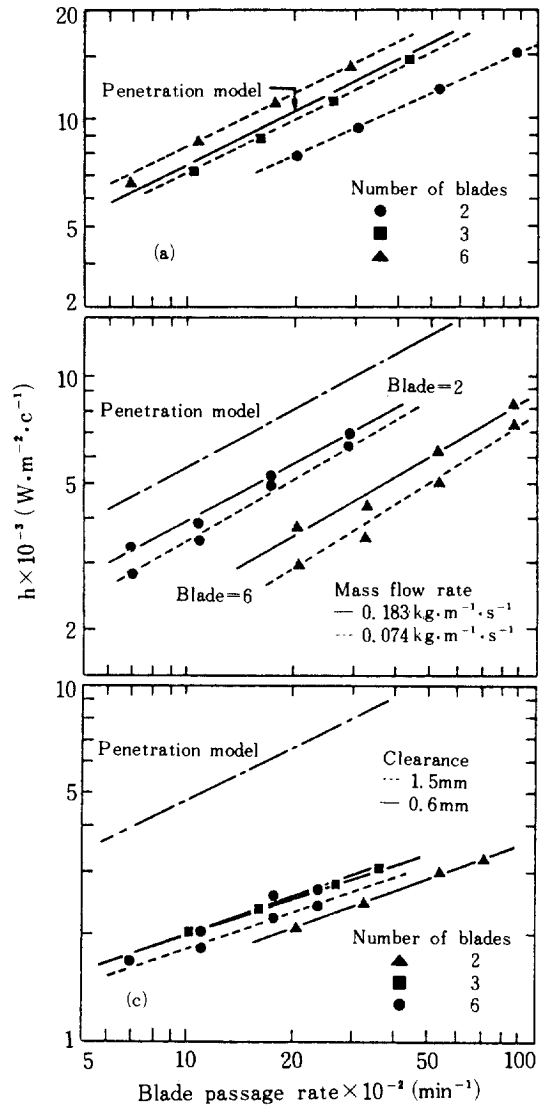


Fig. 9. Effect of the passage rate of a blade on the local heat transfer coefficient. (a) water,  $\Gamma=0.183 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ ,  $\delta=0.6 \text{ mm}$  (b) 57% glycerol,  $\delta=0.6 \text{ mm}$  (c) 86% glycerol,  $\Gamma=0.074 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$

penetration model 에 의하여 주어지는 0.5 승에 거의 비슷한 증가율을 보이고 있으나 저점도의 유체인 물에 대한 실험결과[Fig. 9 (a)]를 제외하고는 그 값에 있어서 큰 차이를 보이고 있으며 유체의 점도가 높아질수록 그 차이는 더욱 커지고 있다. 동일한 blade passage rate 에서도 blade 수가 적은 경우에 많은 경우보다 더 큰 값의 국부 열전달계수를 나타내고 있다. 이는 blade passage rate ( $N \cdot B$ ) 가 같을 경우, blade 의 수 ( $B$ ) 가 적으면 회전속도 ( $N$ ) 가 더욱 빠르므로 bow wave 에 미쳐지는 원심력이 커지게 됨으로써 더욱 증대된 난류영역이 존재하기 때문이며, 이러한 국부 열전달계수치에서의 차이는 도시된 blade passage rate 의 모든 영역에서 거의 일정한 비율의 경향을 보이고 있다. 또한 질량흐름속도 및 clearance 의 변화에 의해서도 국부 열전달계수치에서의 차이가 있음을 알 수 있으며 이러한 현상은 전술한 바와 같이 난류성 bow wave 의 원주방향으로의 넓이 및 그 난류의 정도의 차이에서 기인되는 것으로 생각된다. 따라서 blade 가 회전됨으로써 열전달벽면에서의 액막을 주기적으로 갱신시켜 줌으로써 일어나는 열전달계수에서의 변화는 penetration model 로부터 예측될 수 있으나 penetration model 에 유체의 점도, 질량흐름속도, blade 수 및 clearance 의 변화에 의하여 기인

되는 열전달계수치에서의 차이를 설명해줄 수 있는 항이 없으므로 penetration model 은 보정되어야 한다.

이러한 추론 하에, 식(3) 혹은 식(4)로 표현되는 penetration model 을 기준으로 하여 최소자승법을 사용, 선형 regression 한 결과, 상관계수 0.97 및 표준편차 73.7 로써 다음과 같은 무차원 상관식이 도출되었다.

$$Nu = 0.12 (Rer \cdot Pr)^{0.5} \cdot Ref^{0.164} \cdot \left(\frac{\delta}{R}\right)^{-0.124} \cdot B^{-0.423} \quad (11)$$

Fig. 10에 식(11)에 의한 계산치와 실험치와의 비교를 나타내었다.

#### 4. 결 론

1. 질량흐름속도는 회전속도가 낮을 경우 (550 rpm 이하) 국부 열전달계수에 영향을 미치지만 회전속도가 높은 경우에는 거의 영향을 미치지 못했다.
2. Blade 수가 증가되면 국부 열전달계수도 증가되며 높은 점도의 유체일수록 그 증가율은 컸다.
3. Clearance 가 커짐에 따라 국부 열전달계수는 일부 최대치를 갖기도 하나 일반적으로 감소하는 경향을 보였다.
4. 유체의 점도가 높아짐에 따라 국부 열전달계수는 감소하였다.
5. Blade 의 회전으로 인한 열전달 특성은 penetration model 을 통하여 설명될 수 있으나 점도, 질량흐름속도, blade 수 및 clearance 에서의 변화로 인하여 열전달계수는 penetration model 에 의한 예측치와는 일치하지 않았다.
6. 실험영역 내에서의 상관식은  $Ref$ ,  $\delta/R$  및  $B$  의 향으로써 penetration model 을 보정한 결과로서 다음과 같이 표현할 수 있었다.

$$Nu = 0.12 (Rer \cdot Pr)^{0.5} \cdot Ref^{0.164} \cdot \left(\frac{\delta}{R}\right)^{-0.124} \cdot B^{-0.423}$$

#### NOMENCLATURE

- A : heat transfer area ( $m^2$ )  
 B : number of blades (-)  
 $C_p$  : specific heat of liquid ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )  
 h : local heat transfer coefficient ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

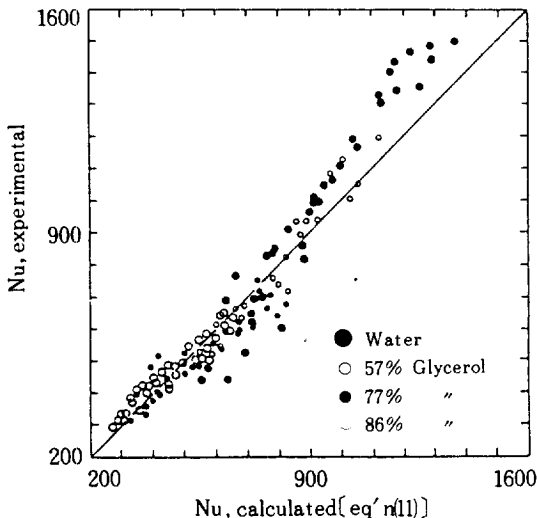


Fig. 10. Experimental values of local heat transfer coefficient against values calculated by correlation equation (11).

- $h_b$  : height of a bow wave (m)  
 $I$  : ampere (A)  
 $k$  : thermal conductivity of liquid (W/m·°C)  
 $k_b$  : thermal conductivity of bakelite (W/m·°C)  
 $N$  : rotational speed of a shaft (rpm)  
 $Nu$  : Nusselt number,  $h \cdot R/k$  (-)  
 $Pr$  : Prandtl number,  $C_p \cdot \mu/k$  (-)  
 $Q$  : heat transfer rate to liquid (W)  
 $Q_{loss}$  : total heat loss rate in heat flux meter (W)  
 $Q_{loss,r}$  : heat loss rate to radial direction in heat flux meter (W)  
 $Q_{loss,z}$  : heat loss rate to axial direction in heat flux meter (W)  
 $R$  : inside radius of agitated thin film apparatus (m)  
 $Re_r$  : tangential Reynolds number,  $R^2 \cdot \omega \cdot B \cdot \rho / \mu$  (-)  
 $Re_f$  : axial Reynolds number,  $4 \Gamma / \mu$  (-)  
 $T$  : temperature (°C)  
 $T_b$  : liquid bulk temperature (°C)  
 $T_w$  : temperature at heat transfer wall (°C)  
 $t_c$  : contact time defined by  $60/B \cdot N$  (S)  
 $V$  : voltage (V)  
 $X$  : distance between thermocouple  $T_5$  and  $T_6$  (m)

### Greek Letters

- $\Gamma$  : axial mass flow rate per unit perimeter (kg/m·s)  
 $\delta$  : clearance (m)  
 $\rho$  : density of liquid (Kg/m<sup>3</sup>)  
 $\mu$  : viscosity of liquid (Pa·s)  
 $\omega$  : angular velocity of shaft,  $\frac{2\pi N}{60}$  (rad/s)

### REFERENCES

1. Angell, C.W., Baird, J.L. and Vivian, J.E.: *Chem. Eng. Prog.*, **79** (5), 52 (1983).
2. Mutzenberg, A.B., Parker, N. and Pisher, R.: *Chem. Eng.*, **13**, 175 (1965).
3. Freeze, H.L. and Glover, W.B.: *Chem. Eng. Prog.*, **75** (1), 52 (1979).
4. 최익수, 이태중, 김종기, 박상도, 김용하, 이득기: "폐윤활유의 재정제에 관한 연구(II)", 한국동력자원연구소 (1984).
5. Nakamura, K.: *Chem. Eng. Commun.*, **18**, 173 (1982).
6. Kern, D.Q. and Karakas, H.J.: *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, **55** (29), 141 (1959).
7. Schweizer, P.: Dissertation, ETH, Nr. 6406, Zürich, (1979).
8. Lustenader, E.L., Richter, R. and Neugebauer, F.J.: *Trans. ASME. J. Heat Transfer*, **81C**, 297 (1959).
9. Kool, J.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **36**, 253 (1958).
10. Harriott, P.: *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, **55** (29), 137 (1959).
11. Azoory, S. and Bott, T.R.: *Can. J. Chem. Eng.*, **48**, 373 (1970).
12. Miyashita, H. and Hoffman, T.W.: *J. Chem. Eng. of Japan*, **11** (6) 444 (1978).
13. Woshitz, D.: Dissertation, ETH, Nr. 6964, Zürich, (1982).
14. Domanskii, I.V., Avdon'kin, A.F. and Sokolov, V.N.: *J. of applied Chem. USSR*, **46** (11), 2641 (1973).
15. Bott, T.R. and Romero, J.J.B.: *Can. J. Chem. Eng.*, **41**, 213 (1963).
16. *ibid*: *ibid*, **44**, 226 (1966).
17. Jepson, C.H.: *Ind. Eng. Chem.*, **45** (5), 992 (1953).
18. Raznjevic, K.: "Handbook of Thermodynamic Tables and Charts", McGraw Hill, Washington, (1976).
19. Bott, T.R., Azoory, S. and Porter, K.E.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **46**, T33 (1968).
20. Domanskii, I.V., Avdon'kin, A.F. and Sokolov, V.N.: *J. of applied Chem. USSR*, **44** (9), 2042 (1971).