

# 충돌제트기류를 이용한 밴드건조기의 건조특성에 관한 연구

김성일<sup>†</sup>·이욱현·전원표·이기우·이계중\*

## Study on the Drying Characteristics of Band Dryer using Impingement Jet Stream

S.I. Kim, W.H. Lee, W.P. Chun, K.W. Lee and K.J. Lee

**Key Words:** Band Dryer(밴드건조기), High Velocity(고속), Impinging Jet Stream(충돌제트기류), Pulp mould(펄프몰드)

### Abstract

The application of high velocity air jets to heat transfer surface has tremendous engineering potential in various industries. The impinging jets are therefore widely used for their enhanced transport characteristics, especially for drying of continuous materials such as sheet, film, carpets, forming materials and pallets. This paper presents the drying characteristics of plate type material and performs the test with the change of operating conditions in conveyer band dryer using the impinging jet nozzles. The factors influencing drying rate were confirmed, also the design data of band dryer using the impinging jet was obtained.

#### 기호설명

A : 평균단면적 ( $m^2$ )  
D : 노즐 직경 (mm)  
H : 노즐과 충돌표면사이 거리 (mm)  
h : 열전달계수 ( $kcal/m^2 \cdot ^\circ C$ )  
k : 열전도계수 ( $kcal/m \cdot ^\circ C$ )  
Nu : Nusselt 수  
P : 압력 ( $kg/m^2$ )  
q : 열용량 ( $kcal/m^2$ )  
Taw : 단열 벽온도 ( $^\circ C$ )  
Tw : 벽온도 ( $^\circ C$ )  
Tj : 제트온도 ( $^\circ C$ )  
 $\Delta T$  : 평균온도차 ( $^\circ C$ )  
Vj : 제트속도(m/sec)

x : 제트 오리피스 거리 (mm)  
z : 노즐끝에서부터의 수직거리 (mm)

### 1. 서 론

산업분야에서 널리 사용되는 건조는 피대상물 질과 건조매체 사이의 효과적인 열 및 물질전달을 통해 에너지효율을 향상시키는데 초점이 맞추어지고 있다.

다양한 건조방식 중에서 충돌제트기류(impingement jet stream)를 이용한 건조는 피건조물에 높은 속도의 제트기류(20-90m/sec)를 충돌시킴으로써 국소적으로 피건조물 표면에서 열 및 물질전달을 크게 만들어 건조속도가 빠르고 장치의 소형화가 가능하며 정밀제어가 용이하다. 충돌제트기류는 피건조물의 두께가 얇은 종이, 사진용 필름, 코팅지, 카페트, 섬유 및 피혁제품과 같은 연속식 쉬트의 건조에 유리하다<sup>(1-2)</sup>.

충돌제트기류를 이용한 건조기의 설계에 있어서 고려되어야 하는 인자는 노즐의 형상과 크기, 열풍속도, 노즐과 피대상물과의 거리, 노즐의 배

---

<sup>†</sup> 김성일, 한국에너지기술연구원  
E-mail : praygod@kier.re.kr  
TEL : (042)860-3168 FAX : (042)860-3133

\* 한국에너지기술연구원

---

열 및 노즐과 노즐사이의 거리 등이다. 노즐의 형상은 오리피스 노즐(orifice nozzle)과 슬롯노즐(slot nozzle)이 주로 이용되고 있으며 노즐의 형상에 따른 충돌제트기류의 열 및 물질전달 특성에 대하여 많은 연구자들에 의해 이론 및 실험적 연구가 수행되었다<sup>(3-9)</sup>.

Gardon과 Akfirat<sup>(10)</sup>는 노즐출구와 피건조물 사이의 거리를 노즐직경의 6~8배를 유지할 때 충돌제트에 의한 평균 열전달값이 가장 크다고 하였으며 Kataoka 등<sup>(11)</sup>의 여러 연구자에 의해 실험적으로 확인되었다.

충돌제트가 시료와 조우 시 정압은 급격히 상승하며 시료의 표면에서의 압력구배는 뚜렷해진다. 이러한 영역의 면적은 슬롯노즐에 관한 실험을 수행한 Gutmark 등<sup>(12)</sup>과 Saad<sup>(13)</sup>의 연구에 의하여 보고된바 있으며 원형노즐의 경우 Obot<sup>(14)</sup>에 의하여 연구가 수행되어졌다.

노즐의 형상의 차이는 노즐출구의 속도와 난류에 영향을 미쳐 충돌표면에서 열 및 물질전달의 프로파일을 다르게 한다. 실험적 연구의 대부분은 슬롯형태의 수축노즐(contraction or contoured nozzle)이 사용되었다<sup>(15-16)</sup>. 이러한 노즐은 수직형태의 노즐보다 제작이나 비용측면에서 불리한 면을 가지고 있기는 하지만, 일정한 노즐출구의 충돌기류를 형성할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

충돌제트기류를 이용한 건조는 다양한 설계변수로 인하여 설계를 복잡하게 만들고 건조특성에 주요하게 영향을 미치는 인자를 찾아내기 어렵다. 또한, 피건조물의 성분을 화학적으로 변질시키지 않는 한계온도의 제약조건을 갖기 때문에 피건조물과 시스템을 동시에 만족시키는 최적화된 설계를 하는 것은 아직도 많은 연구과제로 남아있다.

본 연구에서는 기존의 건조공정에서 사용되는 슬롯노즐(slot nozzle)과 원형노즐(round nozzle)을 이용한 통기밴드건조기의 건조특성 및 에너지효율향상을 비교하였다. 또한, 건조에서의 열풍속도와 온도의 상호의존성을 분석하여 효과적인 건조시스템 모델을 제안하였다.

## 2. 충돌제트의 열전달

일반적으로 충돌제트는 Fig. 1과 같이 자유제트

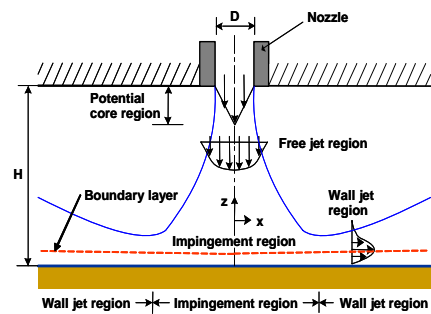


Fig. 1 Flow region for an impinging jet

영역(free jet region), 충돌제트영역(impinging jet region or stagnation jet region), 벽제트영역(wall jet region)으로 구분된다. 여기서 자유제트흐름은 노즐출구의 중앙선에서 속도와 온도가 거의 일정하게 유지되는 potential core zone과 중앙선의 속도와 온도가 다소 감소하고 제트 폭이 증가하는 fully developed zone 등으로 구분할 수 있다. 이러한 자유제트의 끝에서 충돌제트영역에 진입하며 거의 경계층(boundary layer)의 두께가 일정하다<sup>(3)</sup>. 그리고 벽제트는 충돌물체와 평행하게 흐르는 영역이다.

충돌제트에서 국소 대류 열전달계수는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$h = q / (T_w - T_{aw}) \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 대류 열전달계수,  $q$ 는 열용량,  $T_w$ 는 국소 단열 벽온도이다.

열전달계수의 무차원 형태인 Nusselt 수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Nu = hD/k \quad (2)$$

식 (2)에서 국소 Nusselt 수는 흐름영역의 평균값을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Nu' = \frac{h' D}{k} = \frac{D}{k} \int_A h \frac{(T_w - T_{aw}) dA}{A \Delta T} \quad (3)$$

여기서 평균온도차  $\Delta T$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

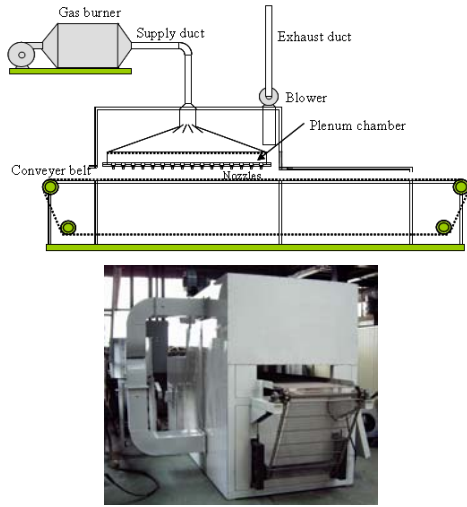


Fig. 2 Schematic diagram and pictures of experimental apparatus

$$\Delta T = \frac{1}{A} \int_A (T_w - T_{av}) dA \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)로부터 Nusselt 수와 평균온도차는 단면적  $A$ 에 영향을 받는다. 따라서 충돌제트에서 열전달에 영향을 미치는 인자는 노즐의 직경, 단면적, 제트속도, 온도, 제트거리, 충돌거리 등에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 충돌제트노즐을 이용한 통기밴드건조기는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 열풍발생부, 건조실, 열풍챔버, 이송장치 및 배기부 등으로 구성되어 있다. 열풍발생기는 20만kcal의 가스히터를 사용하였으며, 건조실의 크기는 폭 600mm 길이 2000mm로 제작하였다. 건조실내의 열풍챔버의 입구에는 분배기를 설치하고 챔버 중간에 다공판을 설치하여 열풍이 고르게 유입되도록 하였다. 노즐은 Fig. 3과 같이 스테인레스 재질의 오리피스 노즐( $\phi 10\text{mm}$ )과 슬롯 노즐( $2 \times 550\text{mm}$ )을 사용하였으며, 노즐의 개구면적비를 1%로 설계하여  $600 \times 1800\text{mm}$  노즐판에 100mm간격으로 102개의 노즐을 삼각배열로 설치하였다.

컨베이어 이송속도는 0.5-3m/min까지 조절할 수 있도록 인버터를 설치하였으며, 연속실험을 위해 컨베이어 벨트가 일정거리를 진행한 후, 역

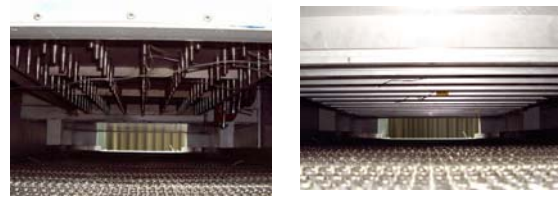


Fig. 3 Round nozzles and slot nozzles

회전할 수 있도록 조절장치를 부착하였다. 배기 방식은 노즐판의 측면에서 배기되는 대칭 배기 방식을 채택하였다.

#### 3.2 실험시료 및 방법

본 연구에서는 상대적으로 두께가 얇은 펄프몰드를 피건조 대상으로 선정하여 실험하였다. 펄프몰드는 신문지 및 폐지 등을 분쇄시켜 물, 잉크제거용 염산제, 왁스, 펄프의 접착 촉진제인 황산알루미늄 등을 혼합한 후, 성형과정을 거친 초기함수율 약 70%의 시료이다. 펄프몰드는 제조과정에서 다량의 물이 함유되므로 건조공정은 필수적이거나 많은 양의 에너지를 필요로 한다.

본 실험에서는 사각형( $200 \times 200 \times 3\text{mm}$ )으로 성형된 펄프몰드의 함수율을 일정하게 유지시켜 사용하였다. 시료와 노즐출구와의 거리는 기존 연구<sup>(10, 11)</sup>에서 언급되어진 노즐직경의 약 10배에 해당하는 거리를 유지하였다. 펄프몰드에 대한 통기밴드건조기의 건조특성 실험을 위한 실험조건은 Table 1과 같다. 사용되어진 노즐의 형상은 기존의 건조기에서 많이 이용되는 슬롯노즐과 삼각배열의 원형노즐을 사용하였다.

실험시료의 이송속도를 조절하기 위해 컨베이어 벨트 속도를 1-2m/min으로 조절하였으며, 역회전장치를 가동하여 컨베이어의 일방향 주행거리를 고려하여 건조실 내부의 체류시간을 조절하면서 실험을 수행하였다. 통기밴드건조기 열풍챔버 내부온도, 노즐출구의 온도, 건조실 내부온도, 배기가스온도 등을 측정하기 위해 k-type 열전대를 설치하였으며, data logger에 의해 온도를 기록하였다. 건조실내에서의 피건조물의 건조속도는 시간의 변화에 따라 주기적으로 피건조물의 무게를 측정하였으며, 최종제품의 함수율은 적외선 수분측정기를 이용하여 측정되었다.

### 4. 실험결과 및 고찰

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Unit	Value
Test material	Component	Pulp
	Thickness	3mm
Nozzle types	Round	
	Slot	
Initial moisture content	wt%	72
Heating temperature	℃	106 ~ 230
Hot air velocity	m/sec	10 ~ 40
Ambient Temp.	℃	16

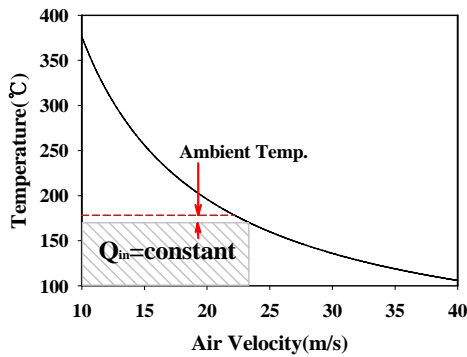


Fig. 4 Dependency of temperature on air velocity for the same input energy

본 연구에서는 슬롯노즐과 원형노즐의 건조특성을 Fig. 4와 같은 동일 유입열량조건에서 비교 실험하였으며 피건조대상물로 펄프를 선정하여 실험하였다.

#### 4.1 슬롯노즐의 건조특성

자유유동에서 난류는  $Re_{nozzle} > 30$ 일 경우<sup>(17)</sup> 발생하며 슬롯노즐에서 가느다란 2차원 형태의 제트 기류를 분출한다고 가정하였을 때, 기류 중심부에서의 속도( $u_c$ )는 축방향(x)을 따라 다음과 같은 속도분포를 갖는다.

$$\frac{\bar{u}_c}{U_0} = \left( \frac{x}{x_0} \right)^{-1/2} \quad (5)$$

여기서,  $U_0$ 는 노즐출구에서의 기류속도이고  $x_0$ 는  $D/D_0 = x/x_0$ 이다.

기류 중심부에서의 거리에 따른 속도는  $x^{-1/2}$ 에 비례하여 작아지며 제트기류의 평균속도는 이와 유사한 함수로 표현할 수 있다.

Fig. 5는 동일열량에 대한 슬롯노즐의 건조실험

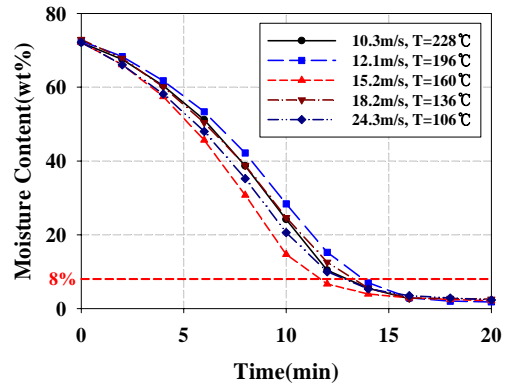


Fig. 5 Moisture content according to the drying time at the same input energy with slot nozzle

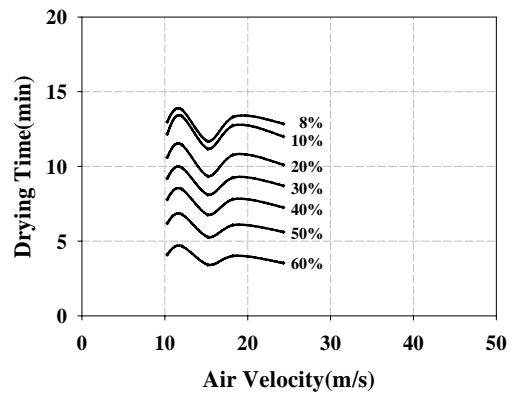


Fig. 6 Drying time according to the hot air velocity based on the same input energy with slot nozzle

결과를 나타낸 것이며 노즐출구속도가 증가함에 따라 출구온도는 낮아진다. 일정한 유입열량조건에서 속도의 변화에 따른 건조속도는 지속적인 증가나 감소의 단일 패턴을 갖지 않고 다양한 형태를 갖는다. 실험결과를 통해 속도 15.2m/s, 온도 160℃에서 건조는 가장 빠르게 나타났다. 일정한 함수율에서 열풍속도에 대한 건조시간을 Fig. 6에 나타내었다. 초기 높은 함수율에서 건조 패턴은 작은 변화율을 갖지만 함수율이 8wt%에 가까워짐에 따라 속도에 의한 건조양상은 비교적 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있다.

충돌제트속도의 증가는 시료표면의 열 및 물질 전달을 향상시키기는 하지만, 수분의 증발온도보다 열풍온도가 낮을 경우 속도증가가 건조속도를 크게 하는데 유리하게 작용하지 못하는 것으로

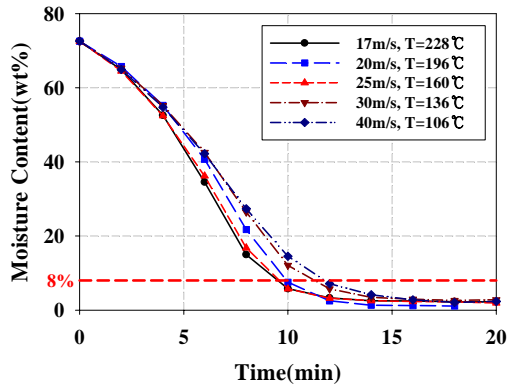


Fig. 7 Moisture content according to the drying time at the same input energy with round nozzle

사료된다. 또한, 열풍의 온도 증가는 수분을 기화 시키는데 유리하게 작용하지만, 상대적으로 낮은 제트속도로 인하여 표면에서 열 및 물질전달이 낮아 건조속도를 증가시키지 못하는 것으로 생각되며 너무 높은 작동온도는 시료를 화학적으로 변질시킨다.

#### 4.2 원형노즐의 건조특성

원형노즐을 통한 제트기류는 층류 원형노즐의 문제와 동일한 방법을 통해 구해질 수 있다<sup>(18,19)</sup>.

$$\frac{u_c}{x} \sim \frac{K^{1/2}}{x} \quad (6)$$

$$K = \frac{\pi}{4} U_0^2 D_0^2 \quad (7)$$

식 (6)에 나타난 바와 같이 기류의 중심부에서 평균 제트기류속도는 축방향의 거리에 반비례한다.

슬롯노즐과 비교하여 원형노즐의 총 단면적은 약 0.61배 정도로 작고 삼각배열을 하고 있으며 슬롯노즐과 원형노즐을 사용한 실험의 유입열량은 동일하다. 속도와 온도의 변화에 따른 실험결과는 Fig. 7와 같다. 조건에 따른 건조속도는 슬롯노즐의 실험결과와 동일한 양상을 띠며 25m/s와 17m/s에서 최대 건조속도를 갖는다. Fig. 8은 원형노즐에서 Fig. 6과 같은 건조시간을 도식화한 것이다. 함수율 사이의 건조속도 증가는 25m/s에서 가장 두드러지는 것을 볼 수 있다.

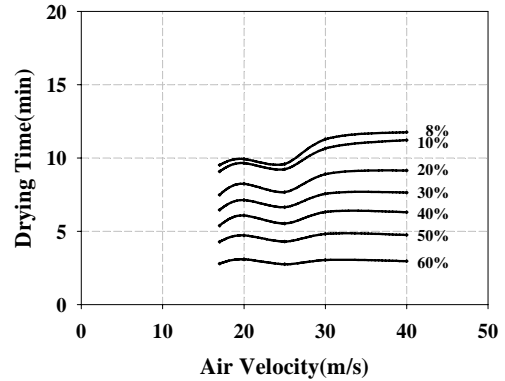


Fig. 8 Drying time according to the hot air velocity based on the same input energy with round nozzle

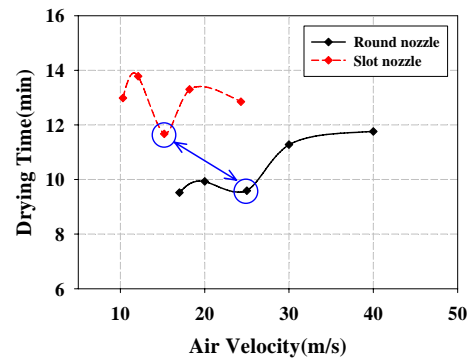


Fig. 9 Drying time according to the hot air velocity based on the same input energy at 8wt%

시료의 함수율이 목표함수율인 8wt%에 도달할 때, 슬롯노즐과 원형노즐의 건조시간에 대한 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 각각의 노즐에 대한 최대 건조속도를 비교하면 원형노즐이 슬롯노즐보다 약 1.2배 정도 빨라지는 것으로 나타난다. 즉, 동일한 풍량에서 열풍속도의 증가는 건조속도를 빠르게 하는데 효과적이며 에너지효율향상에 기여하는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 펄프물드를 피건조물로 하여 슬롯노즐(slot nozzle)과 원형노즐(round nozzle)을 이용한 통기밴드건조기의 건조특성 및 건조속도에 따른 에너지효율을 비교하였다.

일정한 유입열량을 조건으로 한 건조실험결과

를 통해 건조성능은 속도나 온도의 변화에 따른 지속적인 증가나 감소의 단일 패턴을 갖지 않고 다양한 형태를 갖는 것을 보았다. 즉, 건조시스템의 효율적인 설계는 열풍의 속도나 온도의 단일 인자에 의해 결정되어지는 것이 아니라 상호 유기적인 연계 하에 이루어져야 한다. 슬롯노즐과 원형노즐을 이용한 건조실험에서 8wt%의 목표함수율을 기준으로 원형노즐을 사용한 경우가 1.2 배의 건조속도 향상효과를 보았다. 이는 기존에 주로 사용되어지던 슬롯노즐을 원형노즐로 대체함으로써 에너지효율 향상에 기여할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지절약사업인 충돌제트기류를 이용한 통기밴드건조기 개발 사업의 일환으로 이루어졌다.

## 참고문헌

- (1) Arun, S. Mujumdar and Bing Huang, 1995, "Impingement Drying," *Handbook of Industrial Drying*, pp.489-501.
- (2) Polat, S., 1993, "Heat and Mass Transfer in Impinging Drying," *Drying Technology*, Vol 11 No. 6, pp.1147-1176.
- (3) Martin H., 1977, "Heat and Mass Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces," *Adv. Heat Transfer*, Vol. 13, pp.1-60.
- (4) Livingood, J. N. B., and Hrycak, P., 1973, "Impingement Heat Transfer from Turbulent Air Stream Jets to Flat Plate-A Literature Survey," *NASA TM X-2778*.
- (5) Kumada, M., and I. Mabuchi, 1970, "Studies on the Heat Transfer of Impinging Jet," *Bull. of JSME*, Vol. 13, No. 55, pp.77-85.
- (6) Wedel, G. L., 1980, "Air Impingement Heat Transfer," *Tappi*, Vol 63, No. 8, pp.89-92.
- (7) Obot, N. T., 1982, "Effect of Suction on Impingement Heat Transfer," *Proceedings of the 7th Int. Heat Transfer Conference*, Munchen, Vol. 3, pp.389-394.
- (8) Saad, N. R., Polat S., and Douglas, W. J. M., 1992, "Confined Multiple Impinging Slot Jets without Cross Flow Effects," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol 13, No. 1, pp.2-14.
- (9) Viskana, R., 1993, "Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp.111-134.
- (10) Gardon, R. and Akfirat, J.C., 1965, "The Role of Turbulence in Determining the Heat Transfer to a Heated Circular Air Jet Impinging on a Flat Surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8, pp.1261-1272.
- (11) Kataoka, K., Sahara, R., Ase, H. and Harada, T., 1987, "Role of Large-Scale Coherent Structures in Impinging Jet Heat Transfer," *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 20, No. 1, pp. 71-76.
- (12) Gutmark, E., Wolfshtein, M. and Wagnanski, I., 1978, "The Plane Turbulent Impinging Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 88, Part 4, pp. 737-756.
- (13) Saad, N.R., 1981, "Flow and Heat Transfer for Multiple Turbulent Impinging Slot Jets, Ph.D. Thesis," *Chem. Eng. Dept. McGill Uni.*
- (14) Obot, N.T., Mujumdar, A.S. and Douglas, W.J.M., 1980, "Design Correlations for Heat and Mass Transfer Under Various Turbulent Impinging Jet Configurations," *Drying'80, Ed. Mujumdar, A.S., McGraw Hill Book Co.*, Vol. 1, pp. 388-402.
- (15) van Heiningen, A.R.P., 1982, "Heat Transfer under and Impinging Slot Jet," *Ph.D. Thesis, McGill Uni.*
- (16) Polat, S., Mujumdar, A.S. and Douglas, W.J.M., 1991, "Impingement Heat Transfer Under a Confined Slot Jet, Part I:Effect of Surface Through Flow," *CjChE Journal*, Vol. 69, pp. 266-274.
- (17) Reynolds, A.J., 1962, "Observations of a Liquid-into-Liquid Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 14, pp. 552-556.
- (18) Schlichting, H., 1933, "Laminare Strahlauströmung," *Z. Angew. Math. Mech.*, Vol. 13, p. 260.
- (19) Tollmien, W., 1945, "Berechnung Turbulenter Ausbreitungsvorgänge," *Z. Angew. Math. Mech.*, Vol. 6, pp. 468-478.