

분사칼럼식 직접접촉 열교환기의 최적 모델링을 위한 연구

On the Optimum Modelization for a Spray Column Direct Contact Heat Exchanger

윤 석 만* 강 용 혁,** 김 중 보***
S. M. Yoon, Y. H. Kang, C. B. Kim

ABSTRACT

The purpose of this study is to lay groundwork for a complete analysis of two component flow by analyzing a single component flow made of continuous fluid without dispersed phase. In order to achieve uniform velocity distributions which are desirable in designing an optimum spray column direct contact heat exchanger, the influence of injection nozzle orientation has been investigated for axial and radial injections. The results that radial injection ensures more uniform velocity distributions compared to the axial case.

The flow characteristics in a spray column have been investigated with various L/D values and inlet velocities, the most uniform internal velocity distributions have been obtained for the case of L/D=10 and 0.1m/sec.

In the present investigation, it is shown that radial injection method for the continuous flow is advantageous in obtaining desirable uniform velocity distributions in a spray column. It is also found that as the value of L/D increases and the inlet velocity decreases, the flow improves to be better uniform velocity distributions.

기 호 설 명

b : 반경방향 분사에 대한 입구관에서 부터 벽까지의 거리	K : 경계면 마찰계수
C_d : 하강 항력계수	L : 분사칼럼의 길이
D : 분사칼럼의 직경	ℓ : 입구관의 길이
d_c : 연속 유체 분사기의 직경	P : 압 력
d_d : 다공판의 직경	r : 반경방향 좌표
	R_D : 액적의 반경
	Re_D : 칼럼 직경을 특성길이로 한 Reynolds 수

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 한국동력자원연구소

*** 인하대학교 기계공학과

T : 온 도
 U_{in} : 입구 속도
 U_r : 반경방향 속도
 U_x : 축방향 속도
 x : 축방향 좌표

— 회랍문자 —

ε : 연속유체의 체적분율
 μ_c : 연속유체의 점성계수
 μ_d : 확산유체의 점성계수
 ρ_c : 연속유체의 밀도
 ρ_d : 확산유체의 밀도
 ϕ : 확산유체의 체적분율

— 하첨자 —

c : 연속유체
 d : 확산유체
 D : 칼럼 직경
 r : 반경방향 좌표
 x : 축방향 좌표

1. 서 론

직접접촉 과정(Direct Contact Process)은 많은 산업공정에서 일어나는 중요한 현상으로 증기 또는 지하온천수(Geothermal brine)로부터의 폐열 회수와 해양 열에너지 전환(OT-EC, Ocean Thermal Energy Conversion)에 이용되며 열 및 물질전달을 요구하는 응용분야에서 이용되어 왔다.

분사칼럼 직접접촉 열교환기(Spray Column Direct Contact Heat Exchanger)는 Fig.1(a)와 같이 두개의 밀도가 다른 불용해성유체(Immiscible fluid)들을 서로 대향류(Counter-flow)로 유동시키는 원리로서 기기의 내부설치물(Internals)과 팩킹들(Packings)을 제거할 수 있으므로, 가격과 설계에 있어서 현저한 절감과 다량의 처리용량이 가능해지고 증온 또는 저온의 지열을 이용할 수 있다. 그리고 분사칼럼 직접접촉 열교환기는 열전달을 극대화하기 위하여 세척점(Flooding Point) 근처에서 작동되도록 설계하는 것이 필요하다. 세척점을 넘게되면 세척현상을 일으켜 확산 드

럼들이 파괴되고, 열전달율이 매우 저하된다.

1960년대 담수화(Desalination)장치에 대한 분사칼럼의 사용으로¹⁾ 실제의 작동에 필요한 연구가 시작되었으며 Jacobs와 Boehm은²⁾ 특히 고온이 아닌 증온 또는 저온의 지열 사용에 이 원리를 적용시킬 것을 제시하였다. 또한 이들과 다른 연구자들은 미국 에너지성(U. S. Department of Energy)의 지원하에 이 지열이용의 가능성에 대한 조사를 광범위하게 한 바 있다. 이 연구결과로 미국 California주의 East Mesa시에 500kW 출력의 지열 직접접촉 2중사이클(Geothermal Direct Contact Binary Cycle)발전소가 건설되었다.

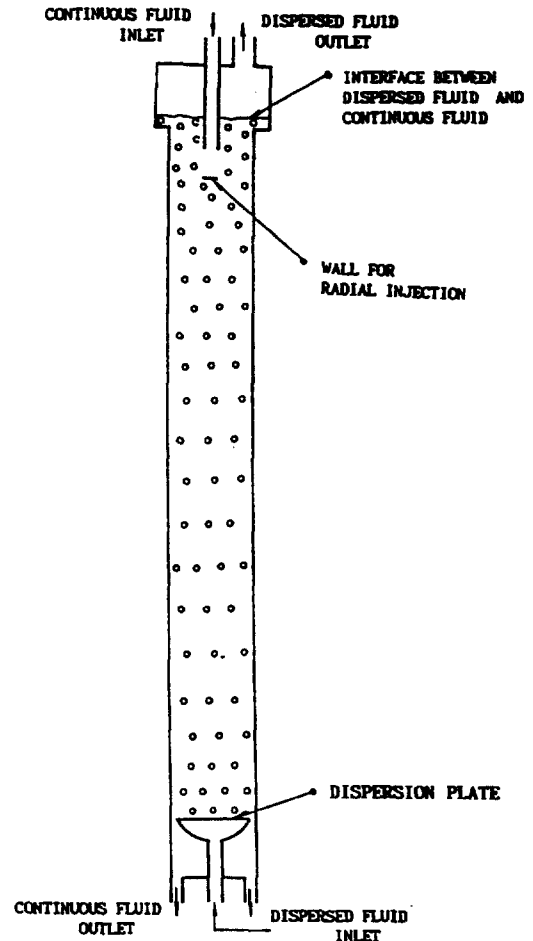


Fig. 1(a) Spray Column Direct Contact Heat Exchanger

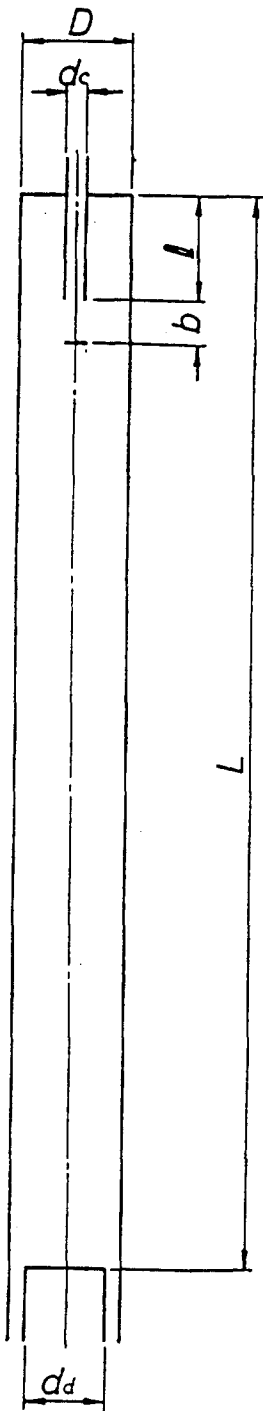


Fig.1(b) The Flowfield being investigated :
 $D=1\text{m}$, $\ell=1\text{m}$, $b=0.4\text{m}$, $d_c=1/12\text{m}$, $d_d=3/4\text{m}$

분사칼럼의 이중유동에 대한 연구에 있어서 초기에는 그 해를 수치적으로 추적할 수 없는 본질적인 난제로 생각해왔다. 그래서 Spalding은³⁾ 다중유동에 대한 주된 미분방정식들을 푸는 문제는 불안정한 특성을 가지고 있다고 보고하였다. 그런데 근래에 와서 다시 Spalding과 Kurosaki에^{4,5)} 의해 이 문제는 사실상 안정된 문제임이 밝혀졌다. 그리고 Jacobs, Golafshani 등은^{6,7)} 1차원 비정상상태의 해석모델들을 사용해서 분사칼럼에 대해 실험치에 크게 의존하여 해석하였다. 또한 Steiner와 Hartland는⁸⁾ 확산유체가 없는 연속유체만의 분사칼럼에 대한 실험을 수행하여 연속유체만의 칼럼내에서 축방향 역류현상을 관찰하였다. 따라서 분사칼럼내의 유동현상을 정확히 예측하고 유동특성을 고찰할 수 있는 방법으로서 이중유동에 대한 수치해석이 요구되고 있다.

본 연구에서는 복잡한 유동특성으로 인하여 이중유동의 해석에 접근하는 일차적인 단계로서 2차원 축대칭 이중유동 모델(2-Dimensional Axisymmetric Two Component Flow Model)을 사용하여 연속유체만의 단일유동(Single Component Flow)에 대하여 수치적으로 해석함으로써 이중유동의 해석을 위한 토대를 마련하고 또한 연속유체가 갖는 분사칼럼내에서의 유동특성에 대한 조사와 균일한 속도분포를 형성시키는 조건을 구하여 세척현상을 방지하고 열전달율을 향상시키는 것을 목적으로 한다. 따라서 본 논문에서는 연속유체의 분사방향에 대한 유동특성을 고찰하기 위하여 축방향 분사와 반경방향 분사를 비교하고자 하며, 또한 칼럼의 길이와 입구속도의 변화에 대한 유동특성을 조사하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 계산영역

본 연구에서는 Fig.1(b)와 같은 분사칼럼 직접접촉 열교환기에 대하여 수치해석을 하였으며 $D=1\text{m}$, $d_c=1/12\text{m}$, $d_d=3/4\text{m}$, $\ell=1$

m, $b = 0.4$ m로 고정하였다.

연속유체의 분사방향이 칼럼내의 속도분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 축방향 분사와 반경방향 분사에 대하여 해석하였으며 칼럼의 길이에 대한 속도분포의 영향을 조사하기 위하여 칼럼의 길이에 대한 속도분포의 영향을 조사하기 위하여 칼럼의 길이와 직경의 비, L/D 을 3, 5, 10으로 변화시켰다. 또한 입구속도의 변화에 대한 속도분포의 영향을 관찰하기 위하여 입구속도를 0.1, 0.3, 0.5 m/sec로 변화시켜 계산을 수행하였다.

2.2 지배방정식

Jacobe 와 Golafshani 에 의한 1 차원 이중 유동 모델^{6,7)} 2 차원 축대칭 이중유동 모델 (2-Dimensional Axisymmetric Two Component Flow Model)로 확장하면 정상상태라는 가정하에 지배방정식은 다음과 같다.

2.2.1 연속방정식

연속유체에 대하여

$$\frac{\partial}{\partial x}(\epsilon \rho_c U_{cx}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\epsilon r \rho_c U_{cr}) = 0 \dots\dots (1)$$

확산유체에 대해서는

$$\frac{\partial}{\partial x}(\phi \rho_d U_{dx}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\phi r \rho_d U_{dr}) = 0 \dots\dots (2)$$

2.2.2 운동량방정식

연속유체에 대하여

x 방향으로

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon \rho_c U_{cx}^2) + \frac{\partial}{\partial r}(\epsilon \rho_c U_{cr} U_{cx}) \\ &= -\epsilon \frac{\partial P}{\partial x} + \mu_c \left(\frac{\partial^2 U_{cx}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_{cx}}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_{cx}}{\partial x^2} \right) \\ & - K_x(U_{cx} + U_{dx}) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

r 방향으로

$$\frac{\partial}{\partial x}(\epsilon \rho_c U_{cx} U_{cr}) + \frac{\partial}{\partial r}(\epsilon \rho_c U_{cr}^2)$$

$$\begin{aligned} &= -\epsilon \frac{\partial P}{\partial r} + \mu_c \left(\frac{\partial^2 U_{cr}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_{cr}}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_{cr}}{\partial x^2} \right) \\ & - K_r(U_{cr} - U_{dr}) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

이고

확산유체에 대해서는

x 방향으로

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\phi \rho_d U_{dx}^2) + \frac{\partial}{\partial r}(\phi \rho_d U_{dr} U_{dx}) \\ &= -\phi \frac{\partial P}{\partial x} + \mu_d \left(\frac{\partial^2 U_{dx}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_{dx}}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_{dx}}{\partial x^2} \right) \\ & - K_x(U_{dx} + U_{cx}) + \phi g(\rho_c - \rho_d) \dots\dots (5) \end{aligned}$$

r 방향으로

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\phi \rho_d U_{dx} U_{dr}) + \frac{\partial}{\partial r}(\phi \rho_d U_{dr}^2) \\ &= -\phi \frac{\partial P}{\partial r} + \mu_d \left(\frac{\partial^2 U_{dr}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_{dr}}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_{dr}}{\partial x^2} \right) \\ & - K_r(U_{dr} - U_{cr}) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

이고 K 는 두 유체간의 마찰계수로서 다음과 같이 주어진다.⁶⁾

$$K = \frac{3}{8} \frac{\phi}{R_d} C_d \rho_c |U_d - U_c| \dots\dots\dots (7)$$

두 유체는 전체 체적을 차지하므로

$$\epsilon + \phi = 1 \dots\dots\dots (8)$$

이 된다.

한편 본 연구에 있어서는 연속유체만의 단일유동 해석에 대한 경우, 즉 식(7)에서 $\epsilon = 1, \phi = 0$ 인 경우이므로 지배방정식은 다음과 같이 정리된다.

연속방정식은 식(1)로부터

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_c U_{cx}) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_c U_{cr}) = 0 \dots\dots\dots (9)$$

이 되고.

운동량방정식은 식(3), (4)로부터
 x 방향으로

$$\frac{\partial(\rho_c U_{cx}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_c U_{cr} U_{cx})}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_c \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U_{cx}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U_{cx}}{\partial x^2} \right] \dots\dots\dots (10)$$

r 방향으로

$$\frac{\partial(\rho_c U_{cx} U_{cr})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_c U_{cr}^2)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu_c \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U_{cr}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U_{cr}}{\partial x^2} \right] \dots\dots\dots (11)$$

이 된다.

2.3 경계조건

본 연구에서 사용된 경계조건으로서 연속유체의 분사에 있어 입구단면에서 축방향으로만 균일한 속도를 갖는다고 가정하였고 벽면에 대해서는 No-slip condition을 적용하였으며 출구부분에서 축방향으로의 속도구배와 반경방향으로의 속도가 없는 유동으로 가정하였다. 또한 칼럼축을 중심으로 대칭인 유동으로 가정하여 대칭축 조건을 적용하였다. 따라서 이상의 경계조건을 정리하면 다음과 같다.

입 구 : $U_{cx} = U_{in}, U_{cr} = 0$

벽 면 : $U_{cx} = U_{cr} = 0$

출 구 : $\frac{\partial U_{cx}}{\partial x} = 0, U_{cr} = 0$

대칭축 : $\frac{\partial U_{cx}}{\partial r} = 0, U_{cr} = 0$

2.4 계산과정

본 연구에서는 유동장을 x 방향으로는 비등간격으로 하고, r 방향으로는 등간격으로 하여 27×14개의 격자를 사용하였으며 격자계로는 Staggered Grid System을 사용하여 U_{cx}, U_{cr} ,

P를 각각 다른 위치에서 계산하였다. 지배방정식에 대한 차분화 과정에서는 유한차분법을 이용하였고 대류항과 확산항에 대한 수치적 Scheme으로는 Hybrid Scheme을⁹⁾ 사용하였다. 각 절점에서의 값들은 line-by-line TD-MA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)를⁹⁾ 이용하여 계산하였으며 유한차분방정식들의 계산과정에 있어서는 SIMPLEC Algorithm을¹⁰⁾ 이용하여 압력보정식과 운동량방정식을 연계시켜 계산하였다. 유동장내의 U_{cx}, U_{cr}, P 에 대한 계산값들의 수렴여부는 유동장 전체에 대한 Residual Source, $\Sigma(R.S)$ 에 의하여 판단되는데 본 연구의 계산수행에 있어서의 수렴조건으로 $\Sigma(R.S)$ 가 0.004 이하가 될 때까지 반복계산하였다. 사용된 Under-relaxation Factor는 0.3~0.5 이고 계산값들은 반복회수 400회 이내에서 수렴되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 조사되는 인자들의 변화에 대하여 분사칼럼내의 속도분포가 변화되는 경향을 고찰하는데 목적을 두고 속도분포의 변화 경향에 대한 난류효과에 대해서는 층류유동 모델로 해석하는 경우와 그 경향이 동일하다고 가정하여 층류유동 모델로 단순화시켜 계산을 수행하였다.

3.1 분사방향에 따른 영향

Fig. 2와 Fig. 3은 연속유체의 분사방향에 따른 속도분포를 나타내며, L/D값은 10이고 각각의 분사방향에 대하여 입구속도는 0.1m/sec이다.

Fig. 2는 연속유체의 축방향 분사(Axial Injection)에 대한 속도분포를 나타내고 있다. 축방향 분사는 칼럼축을 중심으로 하여 강한 제트(Jet) 흐름을 생성하며, 칼럼의 밑면에 수직으로 장치된 다공판까지 미치고 있고 출구부분과 외벽면 근처에서 역류현상을 일으키고 있으며 조사된 입구속도들에 대하여 동일한 경향을 나타낸다. 이러한 성질은 확산드립들을 파괴하고 세척현상을 유발하는 요인이 되

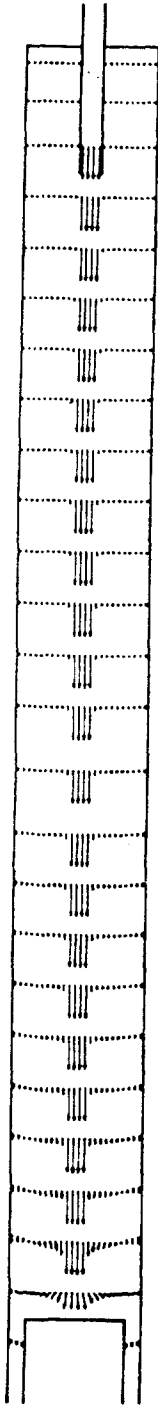


Fig. 2 Velocity distribution for Axial injection with $U_{in} = 0.1$ m/sec, $Re_D = 5800$, $L/D = 10$

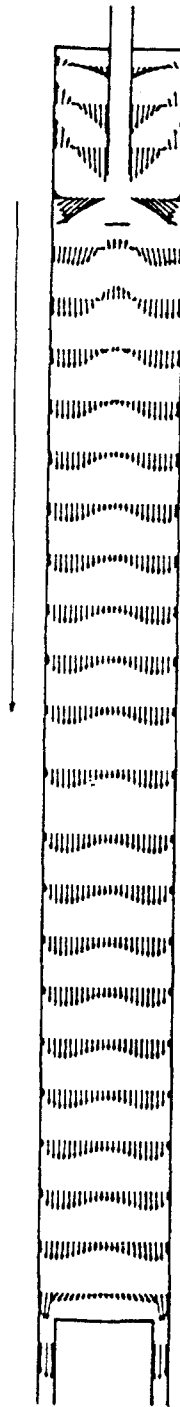


Fig. 3 Velocity distribution for Radial injection with $U_{in} = 0.1$ m/sec, $Re_D = 5800$, $L/D = 10$

어 축방향 분사는 연속유체의 분사방향으로서 바람직하지 않다.

Fig. 3은 연속유체의 반경방향 분사(Radial Injection)에 대한 속도분포를 나타내며 L/D 값은 10이다. 유동이 진행됨에 따라 중심선 부근의 속도가 발달하고 있으며 축방향 분사에 비하여 훨씬 균일한 속도분포를 나타내고 있고 칼럼내의 열전달에 유용한 가용부분에서는 역류현상이 나타나지 않는다.

이러한 이유 때문에 축방향 분사보다는 반경방향 분사가 분사칼럼에서 연속유체를 분사하는 방법으로서 효과적임을 알 수 있다.

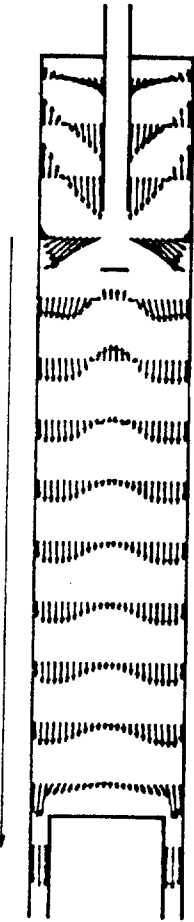


Fig. 4 Velocity distribution for Radial injection with $U_{in}=0.1\text{m/sec}$, $Re_D=5800$, $L/D=5$

3.2 칼럼 길이에 의한 영향

Fig. 3~Fig. 5는 연속유체의 반경방향 분사로 L/D 값이 10, 5, 3으로 변화된 경우의 속도분포를 나타내며 입구속도는 0.1m/sec 이다.

Fig. 3은 $L/D=10$ 에 대한 칼럼내의 속도분포로서 중심선 부근의 속도는 칼럼바닥 근처까지 발달한 상태를 유지하여 가장 균일한 속도분포를 형성하고 있고 열전달에 유용한 가용부분도 가장 길어지므로 열전달에 매우 유리한 조건이 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 $L/D=5, 3$ 에 대한 속도분포이다. 칼럼 길이가 짧아질수록 중심선 부근의 속도가 발달할 여유가 없이 출구로 향하게 되어 중심선 부근의 유동의 발달이 미약해지고 결국 $L/D=3$ 에서는 칼럼축을 중심으로 역류현상을 유발하게 된다.

결과적으로 칼럼길이가 길수록 열전달에 유용한 가용부분이 늘어나게 되고 가용부분에 대하여 균일한 속도분포를 형성시킨다는 것을 알 수 있다.

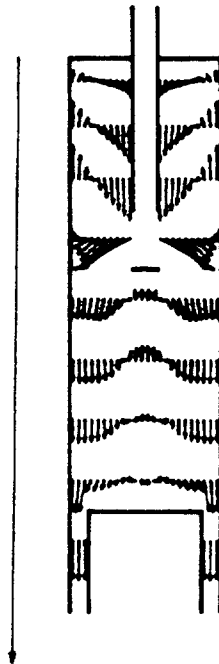


Fig. 5 Velocity distribution for Radial injection with $U_{in}=0.1\text{m/sec}$, $Re_D=5800$, $L/D=3$

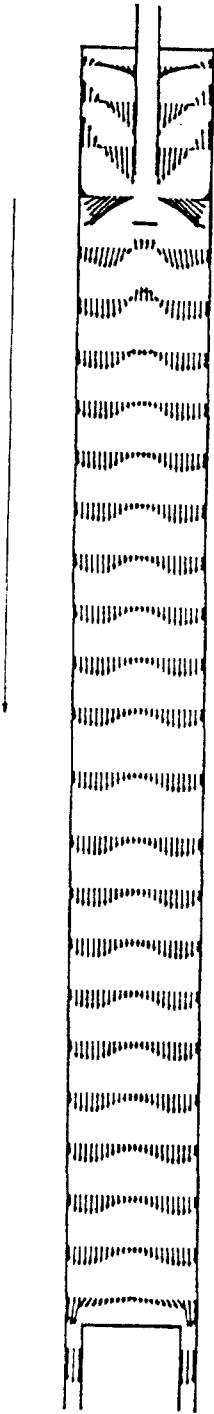


Fig. 6 Velocity distribution for Radial injection with $U_{in} = 0.3$ m/sec, $Re_D = 17000$, $L/D = 10$

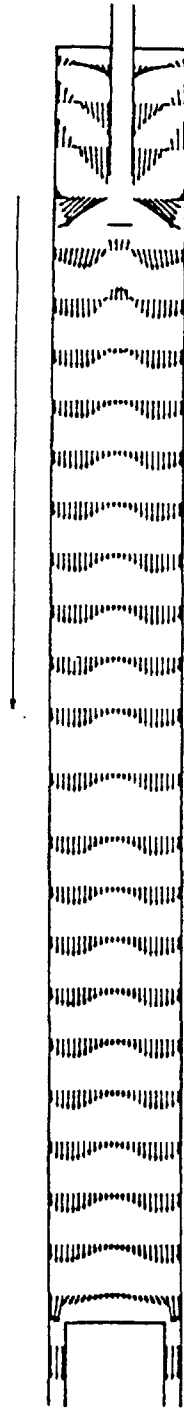


Fig. 7 Velocity distribution for Radial injection with $U_{in} = 0.5$ m/sec, $Re_D = 29000$, $L/D = 10$

3.3 입구속도에 의한 영향

Fig. 3, Fig. 6 과 Fig. 7 은 반경방향 분사방식으로 입구속도가 0.1, 0.3, 0.5m/sec로 변화된 경우의 속도분포를 나타내며 L/D 값은 10이다.

Fig. 3 은 입구속도가 0.1m/sec 인 경우의 속도분포를 나타내며 가장 균일한 속도분포를 형성하고 있다.

Fig. 6 과 Fig. 7 은 입구속도가 각각 0.3, 0.5 m/sec 인 경우에 대한 속도분포로서 입구속도가 증가함에 따라 유동이 벽쪽으로 치우치고 중심선 부근의 속도발달이 약해지며 본 연구에서 추구하는 균일한 속도분포 형성에는 역효과를 가져오게 된다.

결과적으로 입구속도가 작을수록 균일한 속도분포 형성에 유리함을 알 수 있다.

4. 결 론

분사칼럼 직접접촉 열교환기에 있어서 연속유체의 분사방향과 칼럼의 축길이 변화, 입구속도 변화에 따른 유동특성을 수치해석 방법으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연속유체에 대한 반경방향의 분사방식은 축방향 분사방식에 비교하여 분사칼럼내의 훨씬 균일한 속도분포를 형성시킨다. 따라서 연속유체의 분사방식으로서 반경방향의 분사가 바람직하다.

2. 칼럼의 길이에 관계없이 입구와 출구 근처에서의 칼럼직경에 해당되는 영역에서 균일 속도분포를 얻을 수 없으며 이에 따라 칼럼의 길이가 $L/D = 3, 5, 10$ 으로 증가함에 따라 열전달유용 가용부분은 1:3:8로 증가한다. 이는 칼럼의 길이가 직경에 비하여 길수록 그 유용부분이 늘어난다는 것을 의미한다.

3. 입구속도가 커질수록 유동이 벽쪽으로 치우치게 되어 균일한 속도분포 형성에는 역효과를 초래한다. 따라서 입구속도가 작을수록 균일한 속도분포 형성에는 유리하다.

후 기

이 논문은 1990년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Saline Water Conversion Engineering Data Book, 2nd Edition, published by the M.W. Kellogg Company, Piscataway, NJ, for the U.S. Office of Saline Water, Contract No. 14-30-2639 (November 1971).
2. Jacobs, H.R. and Boehm, R.F., "Direct Contact Binary Cycles," Section 4.26, *Sourcebook on the Production of Electricity from Geothermal Brines*, J. Kestin, Editor, Published by U.S. Department of Energy, Washington, D.C., DOE/RA/4051-1, pp. 413-471, (March 1980).
3. Spalding, D.B., "The Calculation of Free Convection Phenomena in Gas-Liquid Mixtures," *Report No. HTS/76/11*, Imperial College, London, 1976.
4. Spalding, D.B., "Numerical Computation of Multi-Phase Fluid Flow and Heat Transfer," *Recent Advances in Numerical Methods in Fluids*, Editors: C. Taylor and K. Morgan, Pineridge Press, Swansea, pp. 139-167(1979).
5. Kurosaki, Y. and Spalding, D.B., "One Dimensional Two-Phase Flows," *2nd Multi-Phase Flow and Heat Transfer Symposium Workshop*, Multi-Phase Transport: Fundamentals, Reactor Safety, Application," Hemisphere Publishing, Washington, D.C., Vols. 1-5(1979).
6. Jacobs, H.R. and Golafshani, M., "A Heuristic Evaluation of the Governing Mode of Heat Transfer in a Liquid-Liquid

- Spray Column," *ASME Paper 85-HT-50*, ASME/AIChE National Heat Transfer Conference, Denver, CO(1985).
7. Golafshani, M. and Jacobs, H.R., "Stability of a Direct Contact Spray Column Heat Exchanger," *ASME Paper 85-HT-51*, ASME/AIChE National Heat Transfer Conference, Denver, CO(1985).
 8. Steiner, L. and Hartland, S., "Hydrodynamics of Liquid-Liquid Spray Columns," Chapter 40, *Handbook of Fluids in Motion*, N.P. Cheremisinoff and R. Gupta, Editors, Ann Arbor Science. (1983).
 9. Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, pp. 52-54, pp. 88-90 McGRAWHILL, (1980).
 10. Van Doormaal, J.P. and Raithby, G.D., "Enhancements of the Simple Method for Predicting Incompressible Fluid Flows," *Numer. Heat Transfer*, 4, pp. 143-163, (1984).