

태양에너지 이용 저압 증발식 해수 담수시스템 이젝터 CFD 해석

황인선*, 주홍진**, 곽희열***

*한국에너지기술연구원(ishwang@kier.re.kr), **인하대학교 기계공학과 대학원(joo@kier.re.kr),
***한국에너지기술연구원(hykwak@kier.re.kr)

Analysis of the ejector for low-pressure evaporative desalination system using solar energy

Hwang, In-Seon* Joo, Hong-Jin** Kwak, Hee-Youl***

*Solar Thermal Research Center, Korea Institute of Energy Research(ishwang@kier.re.kr),
**Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, In-Ha University(joo@kier.re.kr),
***Solar Thermal Research Center, Korea Institute of Energy Research(hykwak@kier.re.kr)

Abstract

In this study, the ejector design was modeled using Fluent 6.3 of FVM(Finite Volume Method) CFD(Computational Fluid Dynamics) techniques to resolve the flow dynamics in the ejector. A vacuum system with the ejector has been widely used because of its simple construction and easy maintenance. Ejector is the main part of the desalination system, of which designs determine the efficiency of system. The effects of the ejector was investigated geometry and the operating conditions in the hydraulic characteristics. The ejector consists mainly of a nozzle, suction chamber, mixing tube (throat), diffuser and draft tube. Liquid is supplied to the ejector nozzle, the fast liquid jet produced by the nozzle entrains and the non condensable gas was sucked into the mixing tube. In the present study, the multiphase CFD modeling was carried out to determine the hydrodynamic characteristics of seawater-air ejector. Two-dimensional geometry was considered with the quadrilateral-meshing scheme. The gas suction rate increases with increasing Motive flow circulating rate.

Keywords : 이젝터(Ejector), 구동 유체(Motive flow), 이차측 유체(Secondary flow), 담수화(Desalination), $k-\epsilon$ 난류모델(K- ϵ model), 이상유동(Two-phase flow)

기 호 설 명

P : 정압, kPa a : 정압, kPa
v : 속도, m/s m : 노즐 입구
g : 중력 가속도 l : 노즐 출구

1. 서 론

일반적으로 이젝터는 구동유체를 고속으로 분사시키는 노즐, 흡입실, 구동유체와, 흡입유체와의 운동량 교환이 이루어지는 목, 속도에

투고일자 : 2010년 9월 29일, 심사일자 : 2010년 10월 10일, 게재확정일자 : 2010년 12월 20일
교신저자 : 곽희열(hykwak@kier.re.kr)

너지의 일부를 압력에너지를 변환함으로써 토출을 가능하게 하는 디퓨저 등의 간단한 구조로 되어 있고 구동 유체와 흡입유체의 종류에 따라 액체-액체⁽¹⁾, 증기-증기⁽²⁾, 액체-가스(불응축)⁽³⁾ 그리고 액체-가스(응축)⁽⁴⁾ 이젝터로 나눌 수 있다. 이와 같은 이젝터의 성능은 노즐과 흡입실의 형상, 노즐 출구와 목과의 면적비, 목의 길이, 디퓨저 상 및 치수들의 기하학적 변수들에 의하여 복잡하게 영향을 받기 때문에, 각 점의 유체역학적 손실을 정확히 예측하기가 어려워 실제 설계에 있어서 실험적 연구와 경험에 의존하고 있는 실정이다.

이젝터는 가동(회전)부분이 전혀 없이 증기 또는 유체가 갖는 에너지(열에너지+압력에너지)를 이용하여 흡입 측을 원하는 진공압력으로 유지한다. 이러한 특성의 이젝터를 사용하는 대표적인 예로 해수담수화 시스템을 들 수 있다. 해수를 담수로 만드는 방법에는 역삼투법, 냉동법 그리고 증발법이 있다. 이 중에서 저압 증발법에 이젝터가 사용되며 저압증발법의 경우 대기압에서 작동하는 담수 장치보다 낮은 온도에서 증발이 일어나므로 증발 속도가 빨라 고성능화를 할 수 있다.⁽⁵⁾

이러한 장점으로 이젝터는 에너지 집약적인 산업으로 불리는 해수담수화 시스템에 널리 사용된다. 그러나 거의 대부분 증발법을 사용하는 해수담수화 시스템의 경우 화석연료로부터 열 및 전기에너지를 충당하고 있으며 이러한 화석연료의 사용으로 인하여 온실가스 배출이 더욱 심화될 것이며, 이에 따른 기후변화는 더 많은 물 부족을 야기 시키는 악순환이 계속된다고 할 수 있다. 따라서 전세계적으로 해수담수화 공정에 사용되는 에너지를 최소화 시키는 방법들에 관한 많은 연구가 진행 중이며 이와 같은 연구 중에 하나로 국내에서도 태양에너지를 이용한 증발식 해수담수화 시스템에 대한 연구가 현재 진행 중에 있다.

그러나 기존의 태양에너지 해수담수화 시

스템에 사용된 증발식 담수기는 선박에서 사용되던 저효율의 1단 담수기를 사용하여 담수 생산량 대비 열효율이 비교적 낮다. 따라서 이러한 저효율의 담수기를 태양에너지 해수담수화 시스템에 사용할 경우 태양에너지 해수담수화 시스템의 설치비용 중 가장 많은 부분을 차지하는 집열기의 설치 요구면적이 증가하여 태양에너지 해수담수화 시스템의 경제성을 떨어뜨리는 요인으로 작용한다.

증발식 담수화 시스템의 경우 특히 담수기 내부의 진공압력은 담수 생산량에 매우 큰 영향을 미치며, 따라서 증발식 담수화 시스템에서 이젝터의 성능은 매우 중요하며, 반드시 운전 조건에 최적화된 설계를 통해 운영되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 태양에너지 증발식 해수담수화 시스템에서 사용되는 이젝터의 운전 조건에 따른 성능 특성에 대한 연구를 FVM(Finite Volume Method) 방식의 상용코드인 FLUENT 6.3을 이용하여 수행하였다.

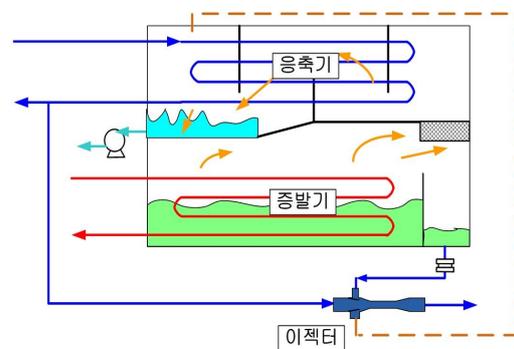


그림 1. Schematic diagram of desalination process

2. 이젝터의 원리

2.1 이젝터의 원리

이젝터는 고압의 제트가 저압의 유체를 동반하는 장치로서 그림 2와 같이 구성된다. 현재 이젝터는 다양한 목적으로 각각의 산업에서 사용되지만 기본적인 작동원리는 다음과 같이 동

일하다. 이젝터는 고압의 구동유체(Motive flow)가 노즐을 통과하면서 고속의 제트흐름(Jet flow)를 만들어줘 이차 측 유체(Secondary flow)와 목(Throat)에서 합류한다. 목에서 합류된 구동유체와 이차 측 유체는 노즐을 통과하면서 얻어진 구동유체의 운동량으로 이차측 유체의 정압 상승으로 변환시키며 Diffuser를 통해 이젝터 외부로 배출된다. 이젝터는 비압축성유체에 의해 운전될 수 있으며 유체가 노즐을 통해 이젝터로 공급되면 노즐에 의해 생성된 빠른 jet가 이차 측 기체를 동반하여 분산시킨다. 일반적으로 연구된 바에 의하면 노즐을 통과한 구동유체의 운동에너지가 이차 측 유체의 압력에너지로 변환되는 효율은 30%이내로 알려져 있다.

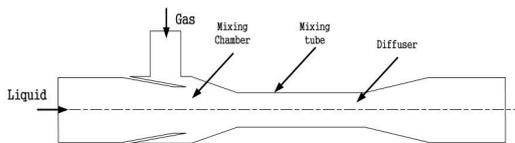


그림 2. Schematic diagram of ejector

2.2 액체-가스 이젝터

흡입유체가 공기인 액체 - 가스에 대한 연구는 오래전부터 많이 연구되어 설계 데이터가 어느 정도 구축이 되어 있는 상태이다. Mitra⁽⁵⁾는 운동량방정식을 이용하여 균일 기포 유동인 경우에 유용한 상관계수를 시스템 전체의 손실계수로 정의하였으며, 질량유량비를 서로 다른 변수들의 함수로 나타낸 실험적 상관식을 제시하였다. 이러한 연구결과 일반적으로 무차원 수들을 이용하여 흡입되는 기체의 속도에 관한 관계식으로 표현되었다. 대부분의 관계식은 지수 값과 적용범위의 차이만 보일 뿐 유사한 형태를 가지고 있다. 액체-기체 이젝터의 경우, 분사 유체가 노즐을 지나 혼합 튜브에 이르게 되면 흡입된 유체와 혼합되면서 운동에너지가 급격히 감소한다. 이때 혼합 튜브의 압력은 급격히 상승하게 되

며 유체의 속도 또한 현저히 줄어드는 Mixing shock 현상이 발생된다.

본 연구에서 다루고자하는 액체-증기 이젝터는 일반 공업용으로 사용하는 것과 달리 증발식 해수담수화 시스템에 사용되는 이젝터는 이차 측 유체가 공기뿐 아니라 해수도 포함되어 있어 유체 해석이 더욱 복잡하다. 이러한 복잡한 유체를 CFD해석을 통해 구동유량 및 노즐 환경에 따른 흡입공기의 속도와 유동패턴을 고찰하고자 한다.

3. 이젝터의 CFD 해석

3.1 유동 해석 이론

CFD는 실제 유체흐름 현상을 수학적으로 모사하여 편미분 방정식을 컴퓨터를 이용하여 해석하는 것으로 유체의 흐름 특성, 물질 전달 등의 유체현상을 시뮬레이션 하는 것이다. 이러한 이유로 노즐을 통과하는 유체의 특성을 파악하여 이젝터 성능 인자를 도출하기 위해서는 CFD 접근이 유용하다.

본 연구는 이상유동 흐름의 수치해석 접근법으로 다상유동 모델을 사용하였다.

Fluent에서 n개의 상을 갖는 경우의 부피분율은 다음의 연속방정식을 통해 계산 된다.

$$\frac{1}{\rho_{rn}} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq}) \quad (1)$$

여기서 ρ_{rn} 는 해석되는 Domain에서 n번째 상의 부피 평균 밀도이다. 각 상에 대한 이식에서 나온 부피 분율의 합은 1이 되며 다음과 같은 운동량 방정식을 갖게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \tau_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} \\ & + \sum_{p=1}^n (K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) + m_{pq} \vec{v}_{pq} - m_{qp} \vec{v}_{qp}) \\ & + (F_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{virt,q}) \end{aligned} \quad (2)$$

τ_q 는 다음과 같이 정의 되는 n번째 상의

Stress-Strain Tensor이다.

$$\tau_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \cdot \vec{v}_q + \nabla \cdot \vec{v}_q^t) + \alpha_q (\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I} \quad (3)$$

그리고 \vec{F}_q 는 External Body Force이며, Lift Force(\vec{F}_{lift}), Virtual Mass Force(\vec{F}_{virt})는 Drew and Lahey(8)에 의해 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\vec{F}_{lift} = -0.5 \rho_q \alpha_p (\vec{v}_q - \vec{v}_p) \times (\nabla \times \vec{v}_q) \quad (4)$$

$$\vec{F}_{virt} = 0.5 \alpha_p \rho_q (\frac{d_q \vec{v}_q}{dt} - \frac{d_p \vec{v}_p}{dt}) \quad (5)$$

식 (5)에서 K_{pq} 는 상사이의 교환계수이며, 유체의 흐름에서 2차상들은 액적 또는 기포로 가정된다. 이러한 가정 하에 K_{pq} 는 다음과 같은 식으로 정의 될 수 있다.

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p}, \quad \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_q} \quad (6)$$

3.2 CFD 모델링

그림 3은 Fluent를 이용한 CFD 해석을 위하여 Gambit 2.3을 이용하여 설계한 이젝터 유체영역의 Geometry와 Mesh를 보여주고 있다. 본 연구에 해석된 Ejector 형상은 현재 조수기(선박에서 사용하는 담수장치)에 상용화되어 있는 것으로 3 m³/day 규모이다. 시간 단축과 유체의 유류 특성을 정확하게 파악하기 위하여 2차원으로 모델링하여 해석하였다. 이젝터의 출구에서의 안정적 유동을 유도하기 위하여 해석 영역을 Diffuser 영역까지 확대 하였다. Mesh는 보다 정확한 해석을 위하여 사각형 격자인 Quad-map을 이용하여 약 80,000개의 격자를 생성하였다. 또한 유속 변화가 예상되는 부위와 기체와 유체의 경계로 예상되는 부위에 조밀하게 격자를 구성하였다.

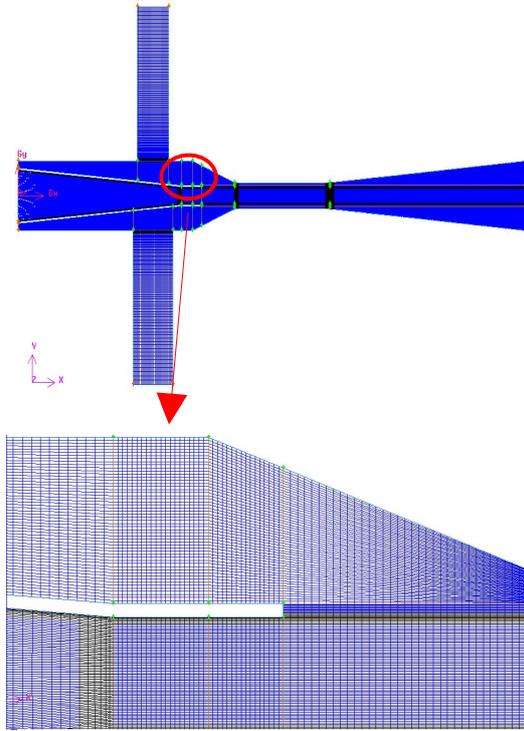


그림 3. Geometry and mesh of the ejector

3.2 Fluent 해석 및 경계 조건

본 연구에서 해석한 이젝터는 액체-가스(불응축) 이젝터로서 구동유체는 물(해수), 흡입 유체는 물(해수)과 공기로 하여 이상유동 모델을 사용하였다. 표 1에서 해석에 필요한 기본 물성치를 정리하였다. 흡입조건은 현재 증발식 해수 담수장치 운전 시 Chamber 압력인 7 kPa로 유지하여 안정화하였다. 일반적으로 이젝터와 같이 노즐이나 오리피스를 통하여 유체를 통과하는 경우 유체의 물성치, 노즐의 크기에 따라 성능이 크게 변화한다. 본 연구에서 사용된 이젝터의 목은 8.5mm, 혼합부는 24mm, 혼합관은 60mm, 디퓨저는 126mm로 모델링하였다. 각 지점에서의 경계 조건은 표 2에 나타내었다. 그림 4는 태양에너지 해수담수화 증발식 담수기에 실제 사용을 위해 개발된 이젝터의 치수를 나타낸 것이다.

표 1. Properties of fluid

Fluid	Density	Viscosity
Air	1.225	1.790*10 ⁻⁵
Water	998.2	1.003*10 ⁻³

표 2. Boundary condition

경계	경계종류	입력값
입구	Mass-flow-inlet	P = 3 bar air부피분율=0
NCG_sution	Pressure inlet	P = 7 kPa air부피분율=1
water_sution	Pressure inlet	P = 7kPa air부피분율=0
출구	Pressure outlet	P = 대기압

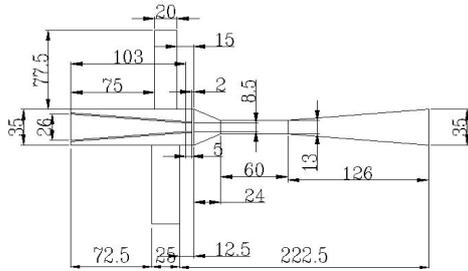


그림 4. Measurement of the ejector

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Fluent 6.3을 이용하여 물-가스(불응축가스) 이젝터를 CFD해석하였다. 그 결과 이젝터 내부 흐름 형태를 확인 할 수 있었다.

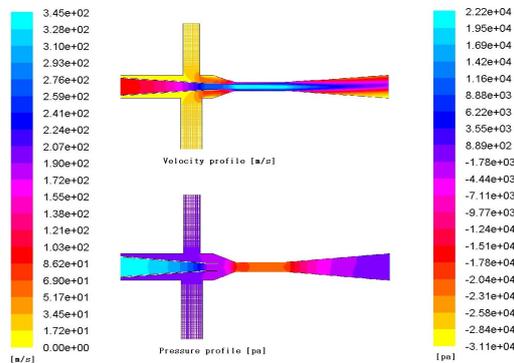


그림 5. Velocity and Pressure profile

그림 5는 구동유체가 100 ℓ/min일 때 이젝터 내부의 유속 분포와 압력 분포 해석결과를 나타내었다. 이젝터에서는 고압으로 분사된 구동 유체가 노즐을 통과하면 압력에너지가 속도 에너지로 변화되어 2차 측 유체(Secondary flow)가 흡입되어 혼합 Chamber를 지나 Diffuser로 빠져 나간다. 또한 압력분포를 보면 이젝터 내부에서 음압이 형성되는데 이 음압에 의해 이차 측 유체가 내부로 유입되는 것을 알 수가 있다.

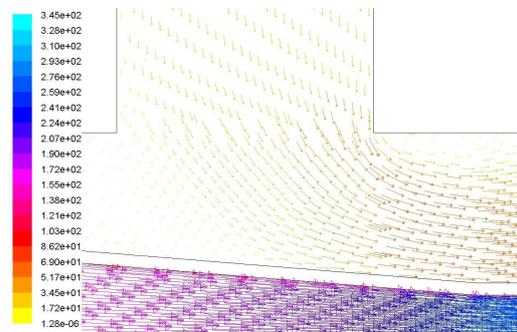


그림 6. Pattern of secondary flow

그림 6은 노즐지름 8.5mm, 혼합부 길이 24mm, 확산부 60mm, 확산부 길이 126mm, 2차 측 유체압력 7 kPa, 구동압력 3 bar, 100 ℓ/min일 때 불응축 가스의 흡입이 일어나는 영역을 확대하여 나타내었다. 속도 벡터는 고압으로 분사되는 구동유체의 운동에너지에 의해 흡입되는 불응축가스의 흐름방향을 보여주고 있다.

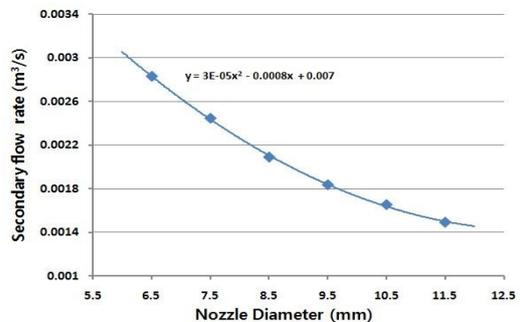


그림 7. Velocity of secondary flow

그림 7은 노즐 직경에 따른 흡입가스의 유량을 나타내었다. 노즐의 직경이 적어지면 베르누이 방정식에 따라 노즐을 통과한 유체의 압력차는 속도 제곱에 비례하기 때문에 흡입기체의 속도 또한 빨라진 것으로 보인다. 하지만 노즐의 직경이 적어지면 압력강하가 많이 일어나기 때문에 펌핑 동력이 많이 들거나 역류의 문제점이 발생할 수 있으므로 설계시 고려해야 한다.

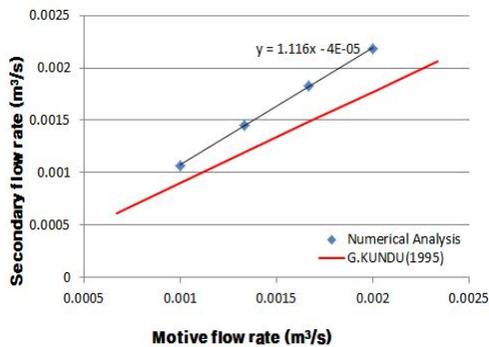


그림 8. Comparison of flow rate

그림 8은 본연구의 수치해석 결과와 실험적 연구를 진행했던 선행연구 G.KUNDU⁽⁸⁾ 상관식과 비교를 하였다. 선행연구의 경우 낮은 유량(10~20 l/min)에서의 실험한 결과식을 이용한 것으로 본 연구(40~120 l/min)와 비교하면 낮은 유량에서는 비교적 일치하지만 높은 유량에서는 약 20%의 오차를 보이는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

이젝터는 노즐, 흡입실, 목, 디퓨저 등의 간단한 구조로 되어 있지만 각 지점에서 유체역학적 손실을 정확히 예측하기가 어려워 실제 설계에 있어서 실험적 연구와 경험에 의존하고 있는 실정이다. 하지만 최근에 컴퓨터의 용량 및 수치해석의 급속한 발달에 힘입어 CFD 기법이 비약적으로 성장하여 실험으로

얻기 어려운 유용한 정보를 바탕으로 이젝터의 최적설계를 바탕으로 그 효율을 증대시키고 있다.

본 연구에서는 태양에너지에 최적화된 담수 시스템을 위해 개발된 3m³/day급 담수장치에서 사용된 액체-가스(불용축가스) 이젝터의 노즐 관경 및 구동유량에 따른 성능을 Fluent 6.3을 이용하여 분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 고압의 구동유체가 노즐을 통과하게 되면 이젝터 내부에서 음압이 형성되는데 이 음압에 의해 이차 측 유체가 내부로 유입된다.
- (2) 노즐 직경에 따른 흡입가스의 유량을 보면 노즐 직경이 적어지면 적어질수록 흡입가스의 유량이 많아지지만 압력강하의 영향으로 펌핑동력이 증가하고 역류의 문제가 발생한다.
- (3) 구동 유체의 유량이 증가하면 이차 측 가스 흡입유량 $m = 1.116m_m - 4 \times 10^{-5}$ 에 따라 선형적으로 증가한다.

액체-가스(불용축) 이젝터의 모델링에서 더 정확한 결과를 얻기 위해서 실험적 연구가 추가적으로 수행되어야 하며 이차 측 유체특성 연구를 위하여 더 많은 변수 해석이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Fluegel, G., 1939, Berechnung von strahlapparaten, VDI Forschungsheft 395 Ausgabe B Band 10.
2. Sun, D.W., and Eames, I.E., 1995 Recent developments in the design theories and applications of ejectors—a review, journal of the Institute of Energy, Vol. 68, pp. 665-679.
3. Witte, J.H., 1965, Efficiency and design of liquid-gas ejector, British chemical

- engineering, Vol. 10, No. 9, pp. 602-607.
4. Daltrophe, N.C. and Jelinek, M., 1993, Heat and mass transfer in a jet ejector for absorption system, Int. Absorption Heat Pump Conference ASME, AES-Vol. 31, pp. 327-332.
 5. Mitra, A. K, 1972, Momentum transfer in a jet ejector for absorption system, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 50, pp. 313-373.
 6. Abu-Jabal, M.S., Kamiya, I., Narasaki, Y., 2001. Proving test for a solar - power desalination system in Gaza - Pales time. Desalination 137,1 - 6.
 7. T, Utomo, Jin, Jeong, H.M., 2006. A CFD Analysis on Hydrodynamics Characteristics of Gas-Liquid Ejector. 한국동력기계 공학회 2006 추계학술대회 논문집. pp. 172 - 176.
 8. Drew, D. A, and R, T, Lahey, 1993, In particulate Two-Phase Flow, Butterworth-Heinemann, Boston.
 9. G,Kundo, Mukherjee, 1995. Experimental studies on a co-current gas-liquid downflow bubble column. Multiphase flow Vol.21, No.5