

수치해석을 이용한 담수장치용 이젝터의 노즐위치 변화에 따른 이젝터 유동특성 연구

주흥진*, 정일영**, 윤상국***, 곽희열****

*인하대학교 기계공학과 대학원(joo@kier.re.kr), **한국해양대학교 냉동공조학과 대학원(ilyoung1404@naver.com),
***한국해양대학교 기계에너지시스템공학부(skyun@hhu.ac.kr)
****한국에너지기술연구원(hykwak@kier.re.kr)

CFD Analysis on the Flow Characteristics of Ejector According to the Position Changes of Driving Nozzle for F.W.G

Joo, Hong-Jin* Jung, Il-Young** Yun, Sang-Kook*** Kwak, Hee-Youl****

*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, In-Ha University(joo@kier.re.kr),
**Dept. of Refrigeration, Air-conditioning Engineering, Graduate School, Korea Maritime
University(ilyoung1404@naver.com),
***Division of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime University(skyun@hhu.ac.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.

The multiphase CFD modeling was carried out to determine the hydrodynamic characteristics of seawater-air ejector. Condition of the simulation was varied in entrance mass flow rate (1kg/s, 1.5kg/s, 2kg/s, 2.5kg/s, 3kg/s), and position of driving nozzle was located from the central axis of the suction at -10mm, 0mm, 10mm, 20mm, 30mm.. As a result, suction flow velocity has the highest value in central axis of the suction.

Keywords : 액체용 이젝터(Liquid Ejector), 가스-액체 이젝터(Gas-Liquid Ejector), 수치해석(Analysis), 유동특성(Flow Characteristics), 담수화(Desalination), 담수장치(F.W.G Fresh Water Generator)

투고일자 : 2011년 4월 18일, 심사일자 : 2011년 4월 18일, 게재확정일자 : 2011년 5월 23일
교신저자 : 곽희열(hykwak@kier.re.kr)

기 호 설 명

A	: 단면적, m^2
V	: 속도, m/s
g	: 중력 가속도, m/s^2
K_{lm}	: 손실 계수
P	: 압력, kPa
Q	: 유량, kg/s
h_{lm}	: 손실

하 첨 자

1	: 혼합부 입구
2	: 혼합부 출구
p	: Primary fluid
s	: Secondary fluid
t	: Third fluid

1. 서 론

일반적으로 이젝터는 유체를 고속으로 분사하는 노즐과 저압의 유체가 들어오는 흡인실, 구동유체와 흡인유체의 운동량 교환이 이루어지는 혼합부, 속도에너지의 일부를 압력 에너지로 변환함으로써 토출을 가능하게 하는 디퓨저로 크게 구성되어 있다. 그리고 이젝터는 분사유체의 종류에 따라 흔히 증기 이젝터, 액체-가스 이젝터와 액체-액체 이젝터로 분류되는데, 증기를 구동으로 하는 이젝터는 여러 산업의 공정과정에서 흡수, 혼합, 진공, 동결건조, 탈수 등의 목적으로 널리 이용되고 있다. 특히 증발식(MED, MSF) 담수화 공정에서는 담수장치의 진공형성을 위한 장치로 널리 사용되고 있다. 이러한 담수 장치에서의 이젝터 성능은 담수화 시스템의 효율에 많은 영향을 미치며 특히 태양열을 이용한 증발식 해수담수화 장치에서 이젝터의 성능 저하는 직접적으로 시스템의 효율을 떨어뜨리며 그에 따라 집열기 면적이 크게 요구되는 문제가 발생될 수 있다.

지금까지 이젝터의 유동 특성 및 성능향상에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었다. Gustav Fluegel¹⁾은 액체-액체 이젝터의 기본방향을 베르누이 방정식과 운동량 방정식을 적용하여 기본적인 해석방법을 제시하였으며, Witte²⁾는 이젝터의 이차목을 가진 이젝터의 해석과 실험적 연구를 수행하여 속도분포, 온도분포 및 이젝터 벽면을 따르는 정압 분포가 이론 해석과 잘 일치하는 결과를 얻었다. 그러나 이러한 장치들에 대한 연구는 압력측정이나 온도, 유량 측정 등을 통한 연구만으로 이젝터의 유동특성을 파악하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 담수장치에 사용되는 이젝터에 대해서 노즐위치가 이젝터의 구동특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상용코드인 Fluent를 이용한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하였으며, 다양한 노즐의 위치에 따른 흡입 유체의 속도와 압력변화에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 이젝터의 원리

그림 1은 이젝터 내부의 유동현상 이해를 위해 본 연구에서 사용된 이젝터를 유동구역별로 나타내었다. 이젝터의 작동원리는 고압의 구동유체(Motive fluid)가 노즐을 통과하면서 속도 에너지를 증가하고 압력 에너지는 감소하게 된다.

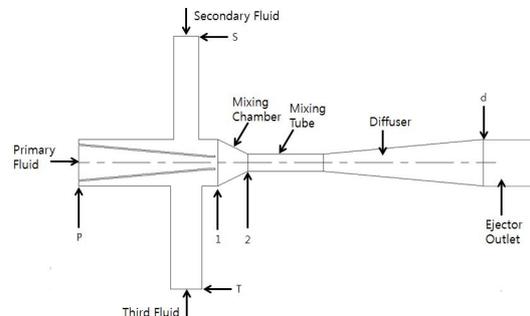


그림 1. Schematic diagram of ejector

액체 이젝터의 경우 노즐부분에서는 압력 에너지, 그리고 증기 이젝터의 경우 압력에너지와 열에너지가 노즐출구에서 거의 대부분 속도에너지로 변환되어 분출된다. 여기서 유체의 에너지가 대부분 속도에너지이므로 분출시 혼합부에서 진공압력이 형성되어 흡입부에서 흡입노즐을 통해 2차 유체를 흡입하게 된다. 이렇게 흡입된 저압의 2, 3차 유체와 노즐을 통해 들어온 제트흐름의 1차 유체가 혼합부에서 혼합되면서 운동량을 교환하게 된다.

혼합과정에서 제트흐름의 운동량이 압력으로 전환되어 혼합 튜브 출구에서 혼합수의 압력을 상승시키고, 이후 디퓨저를 통하여 배출된다. 이때 혼합부에서 운동량에 관한 관계식을 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \rho Q_s V_s + \rho Q_p V_p + \rho Q_t V_t + P_1 A_1 \\ & = \rho(Q_s + Q_p + Q_t) V_2 + P_2 A_2 + \rho g A_2 h_{lm} \quad (1) \end{aligned}$$

여기서 h_{lm} 은 혼합부에서 혼합과정에서 발생하는 손실이다.³⁾ 혼합과정에서 발생하는 손실은 손실계수(Loss of Coefficient)를 이용하여 식 2와 같으며 여기서 손실계수 K_{lm} 은 각 경우에 대해 실험적으로 결정되어야 한다.

$$h_{lm} = K_{lm} \frac{\overline{V^2}}{2} \quad (2)$$

3. 이젝터의 CFD 해석

3.1 유동 해석 이론

CFD는 유체역학과 수치해석을 병합시켜 수학적으로 풀기 어려운 비선형 편미분 방정식들의 근사해를 구하는 학문으로 실제 유체 흐름 현상을 수학적으로 묘사하여 편미분 방정식을 컴퓨터를 이용하여 해석하는 것으로 유체의 흐름 특성, 물질전달 등의 유체현상을

시뮬레이션 하는 것이다. 이러한 이유로 노즐을 통과하는 유체의 특성을 파악하여 이젝터 성능 인자를 도출하기 위해서는 CFD 접근이 유용하다.

본 연구에서 유동은 정상상태 비압축성 유동으로 가정하였고 단열과정으로 외부와의 열교환은 없으며 내부 벽면에서의 마찰은 고려하지 않았다. 난류 모델로서는 $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하였다.

3.2 Geometry 와 mesh 구조

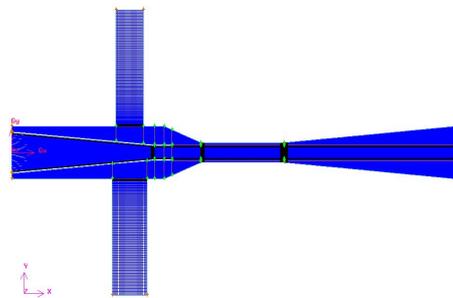


그림 2. Geometry and mesh of the ejector

그림 2는 Fluent를 이용한 CFD 해석을 위하여 Fluent 전처리 프로그램인 Gambit 2.3을 이용하여 설계한 이젝터 유체영역의 기하학적 구조와 격자를 보여주고 있다. 격자는 사각형 격자인 Quad-map을 이용하여 약 80,000~100,000개의 격자를 생성하였고, 유속변화가 예상되는 부위와 기체와 액체의 경계로 예상되는 부위에 조밀하게 격자를 구성하였다. 본 연구에서 사용된 이젝터의 형상은 일일 3m³/day 해수담수화 장치에 실제 사용되는 이젝터이다.

노즐 위치가 이젝터의 성능변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 노즐의 위치를 흡입부(2차, 3차측 유동부) 중심축을 기준으로 -10, 0, 10, 20, 30mm로 노즐끝단의 위치를 변경시켜 각 경우마다 기하학적 구조와 격자를 설정하였다. 그림 3은 각각의 혼합부와 노즐의 위치를 나타낸 것이다.

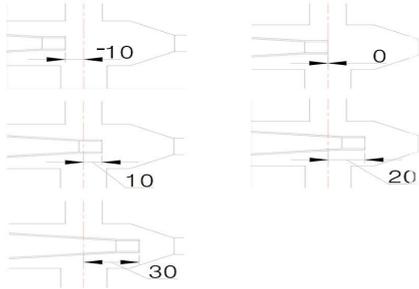


그림 3. Nozzle and Suction position

3.3 Fluent 해석 및 경계 조건

본 연구에서 해석한 이젝터는 액체-가스(불응축) 이젝터로서 구동유체는 물(해수), 흡입 유체는 물(해수)과 공기로 하여 Two-phase 모델을 사용하였다.

표 1은 이젝터의 주요부 치수를 나타낸 것이다. 3m³/day 용량의 담수기에 사용되고 있는 실제 이젝터 치수를 사용하였으며, 흡입부 중심축으로부터 노즐 끝단의 위치를 -10, 0, 10, 20, 30mm로 5가지 타입의 이젝터를 해석 모델로 정하였다.

표 1. Dimensions of the ejector

Parameter	Values(m)
Inlet diameter, D_o	0.026
Nozzle diameter, D_N	0.0085
Throat diameter, D_T	0.013
Throat length, L_T	0.06

표 2, 3은 해석에 필요한 기본 물성치 및 경계조건을 나타낸 것이다. 흡입조건은 대기압으로 설정을 하여 이젝터 구동 시 흡입되는 속도와 압력변화를 해석하였다.

표 2. Properties of fluid

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

표 3. Boundary conditions

경계	경계종류	입력값
Primary	Mass-flow-inlet	P = 3bar air부피분율=0
Secondary_Fluid	Pressure inlet	P = 대기압 air부피분율=1
Third_Fluid	Pressure inlet	P = 대기압 air부피분율=0
출구	Pressure outlet	P = 대기압

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Fluent를 이용하여 담수장치에 사용되는 물-가스 이젝터에 대해 흡입부와 노즐 위치에 따른 이젝터 내의 유동특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다.

그림. 4는 구동유체가 2kg/s, 노즐끝단이 흡입부 중심축에 위치할 때 이젝터 내부의 유속 분포 해석결과를 나타내었다. 이젝터에서는 고압으로 분사된 구동 유체가 노즐을 통과하면

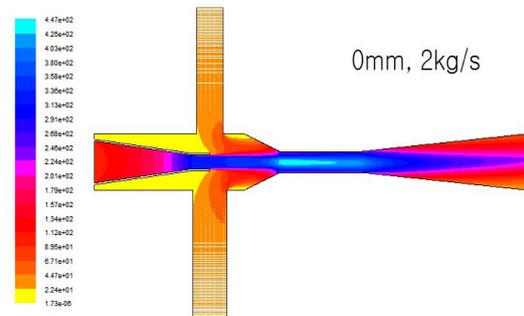


그림 4. Velocity distribution of ejector

압력에너지가 속도에너지로 변화되어 2차 측 유체(secondary fluid)와 3차 측 유체(third fluid)가 흡입되어 혼합부를 지나 디퓨저로 빠져 나간다. 이때 압력분포를 보면 이젝터 내부에서 음압이 형성되는데 이 음압에 의해 이차 측 유체가 내부로 유입되는 것을 알 수가 있다.

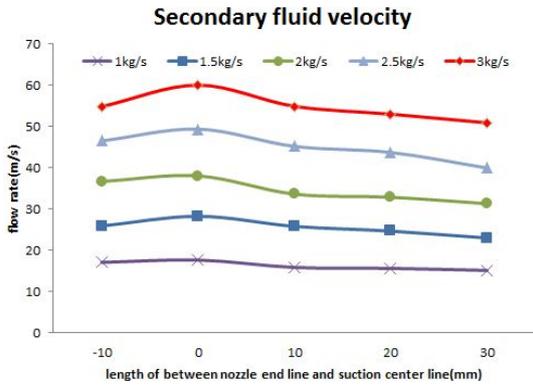


그림 5. Velocity of secondary fluid

그림 5는 흡입부 중심부에서 노즐끝단의 거리에 따른 2차 측 유체의 흡입 속도를 구동 유량에 따라 나타낸 것이다. 2차 측 유체 흡입부의 유속은 노즐의 끝단이 흡입부 중심축에 위치할 경우 구동유량이 3 kg/s 일 때 59.94 m/s로 가장 높게 나타났으며, 노즐의 끝단이 흡입부 중심축으로부터 디퓨저 입구 쪽으로 30mm 이동 할 경우 50.82 m/s로 Secondary fluid 흡입부의 평균 유속이 감소하는 것으로 나타났다. 구동 유체의 유량이 0.5kg/s 만큼 증가할수록 흡입되는 2차 유체의 속도는 약 30% 증가한다. 이러한 값은 기존의 선행연구³⁾에서 제시되었던 구동노즐의 직경비 및 출구 위치가 이젝터 성능에 미치는 연구결과와 유사한 것으로 나타났다.

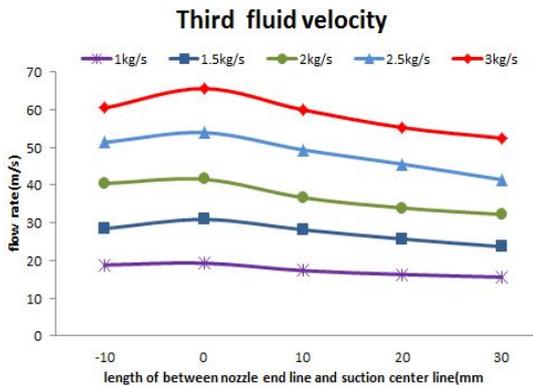


그림 6. Velocity of third fluid

그림 6은 흡입부 중심부에서 노즐끝단의 거리에 따른 3차 측 유체의 평균 유속을 나타낸 것이다. 2차 측 유체의 평균 유속과 마찬가지로 3차 측 유체 흡입부의 유속도 노즐의 위치가 흡입부의 중심축에 위치하면 흡입부의 평균 유속이 증가하는 것으로 나타났다. 흡입부의 중심축에 노즐 끝단이 위치할 때 3차 측 유체 흡입부의 평균 유속은 구동 유체의 유량이 3kg/s 일 때 65.61m/s 으로 가장 높게 나타났으며, 흡입부의 중심축으로부터 디퓨저 입구 쪽으로 30mm에 위치하였을 경우 52.46m/s로 가장 낮게 나타났다.

그림 7은 노즐의 끝단 위치가 흡입부의 중심축과 -10mm에 위치하였을 때 혼합부 내에서의 와류현상이 발생하는 것을 나타낸 것이다. 노즐의 끝단 위치가 흡입부의 중심축과 가까울수록 흡입되는 2, 3차 유체의 유속이 증가하는 것은 구동 유체와 2차 측 흡입 유체의 운동량 교환량⁴⁾이 크기 때문이다. 흡입부 중심에서 노즐의 끝단이 -10mm에 위치하였을 때가 흡입부 중심에서 노즐의 끝단이 10mm에 위치할 때 보다 흡입부의 평균 유속은 증가하는 것으로 나타났으나 이때 혼합부 내에서의 와류현상이 매우 크게 나타났으며 이로 인해 흡입부 쪽으로 역류하는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 역류발생 문제는 실제 이젝터 설계 시 고려되어야 할 중요한 사항 중에 하나이다.

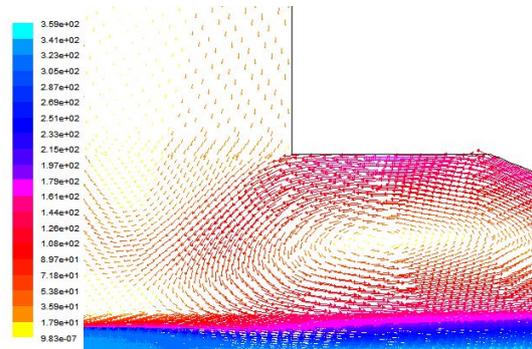


그림 7. Eddy flow in the mixing chamber

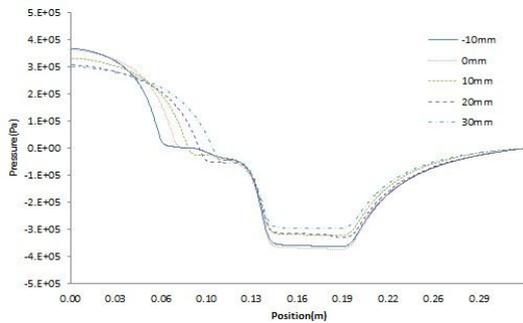


그림 8. Distribution of pressure for different nozzle position

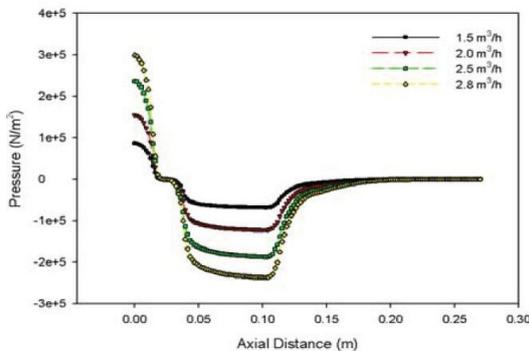


그림 9. Distribution of pressure for different throat ratio[4]

그림 8은 본 연구를 통해 계산된 이젝터 영역의 압력분포를 이젝터의 중심축을 기점으로 거리에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 압력은 노즐을 거치면서 압력이 감소하고 흡입부를 지나 혼합 튜브에서 음압이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 노즐의 위치가 흡입부의 중심축과 가까울수록 음압의 형성은 크게 나타났으며, 이에 따라 흡입되는 2, 3차 유체의 유속이 증가한 것이다.

그림 9는 기액 이젝터의 성능특성에 관한 선행연구로 수치해석 및 실험적 연구를 수행하였던 지명국⁵⁾의 구동유량에 따른 이젝터 내의 압력 분포 그래프를 나타낸 것이다. 본 연구에서 수치해석을 통해 계산된 이젝터 압력분포와 기존 선행 연구에서 수행한 연구결과와 비교하여 매우 유사한 값을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 일일 3m³/day급 담수장치에서 사용되는 액체-가스 이젝터에서 혼합부와 노즐 끝단의 위치에 따른 이젝터의 구동특성 파악을 위해 Fluent를 이용하여 분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 노즐 위치에 따른 흡입 가스의 유속을 보면 노즐 위치가 흡입부 중심에 위치할 때 2차 측 유체의 흡입부 평균 유속은 구동 유체 유량이 3kg/s 일 때 59.94m/s로 가장 크게 나타났고, 3차 측 유체의 흡입부도 65.61m/s로 가장 높게 나타났다.
- (2) 노즐의 끝단이 흡입부 중심축과 가까울수록 고압의 구동유체가 노즐을 통과하면서 만들어지는 음압의 크기는 증가하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Fluegel, G., 1939, Berechnung von strahlapparaten, VDI Forschungsheft 395 Ausgabe B Band 10.
2. Witte, J.H., 1965, Efficiency and design of liquid-gas ejector, British chemical engineering, Vol. 10, No. 9, pp. 602-607.
3. 지명국 외, 2008, 공기구동 이젝터의 노즐형상과 위치 변화에 따른 성능특성, 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 32, No. 4, pp.550-556
4. 황인선, 주홍진, 곽희열, 해수담수시스템 이젝터 CFD 해석, 한국태양에너지학회 논문집, 30권 6호, 2010, pp. 137-143
5. 지명국, 2008, 기액 이젝터의 성능특성에 관한 매개변수적 연구, 경상대학교 박사학위 논문