

중앙구동 이젝터의 설계변수에 따른 유동특성

박 상 규* · 양 희 천*†

* 전남대학교 기계설계공학부

Flow Characteristics of Central-Driven Ejector with Design Parameters

Sang Kyoo Park* and Hei Cheon Yang*†

* School of Mechanical Design Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

(Received July 16, 2014 ; Revised March 6, 2015 ; Accepted June 17, 2015)

Key Words: Central-Driven Ejector(중앙구동 이젝터), Design Parameter(설계변수), Mass Ratio(유량비), Primary Nozzle Area and Distance Ratio(구동노즐 면적 및 거리비), Diffuser Exit Area Ratio(디퓨저 출구면 적비), Mixing Tube Length Ratio(혼합관 길이비)

초록: 본 논문은 중앙구동 이젝터의 유량비에 미치는 설계변수의 영향에 대한 연구를 목적으로 한다. 중앙구동 이젝터의 설계변수는 구동노즐 출구 단면적 및 거리비, 디퓨저 출구 단면적비로 설정하였다. 실험장치는 가변노즐 이젝터, 전동 모터-펌프, 구동유체 저장수조, 제어판넬 그리고 고속 카메라 시스템으로 구성하였다. 유량비는 실험변수에 따라 측정되는 유입 공기량과 구동유체인 물의 유량을 이용하여 도출하였다. 유량비는 구동노즐 거리비와 혼합관 길이비가 커지면 증가하는 반면에, 구동노즐 면적비와 디퓨저 출구 면적비가 커지면 감소하였다.

Abstract: The objective of this study is to experimentally investigate the effect of design parameter on the mass ratio of a central-driven ejector. The design parameters are the primary nozzle area and distance ratios, diffuser exit-area ratio and mixing-tube length ratio. The experimental setup was an open-loop continuous circulation system which has a movable nozzle ejector, an electric motor-pump, a water tank, a control panel and high-speed camera unit. We calculated the mass ratio using the measured primary and suction-flow rates with the experimental parameter of primary water-flow rate or pressure. The results showed that the mass ratio increased with the primary nozzle distance ratio and mixing tube length ratio, while the mass ratio decreased with the primary nozzle-area ratio and diffuser exit-area ratio.

- 기호설명 -

- a : 디퓨저 출구 면적비
- d : 직경(mm)
- L : 길이(mm) 또는 혼합관 길이비
- M : 유량비
- Q : 유량(kg/s)
- R : 구동노즐 면적비
- X : 구동노즐 거리비
- α : 흡입실 축소각(deg)
- β : 디퓨저 확대각(deg)

상· 하첨자

- c : 흡입실
- d : 디퓨저
- m : 혼합관
- n : 구동노즐
- p : 구동부
- s : 흡입부

1. 서론

이젝터는 고압으로 분사되는 유체의 운동에너지를 이용하여 저압의 유체를 유입시키는 장치로, 구조가 단순하고 별도의 구동부가 없기 때문에 설치 및 유지보수비가 저렴하며 반영구적인 장점을 갖고

† Corresponding Author, hecyang@chonnam.ac.kr
© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

있다. 또한 우수한 혼합 및 물질전달 특성으로 인해 산업 전반에 다양하게 활용되고 있다. 고속유체 분사노즐, 저압 유체 흡입부, 혼합부 및 확산부로 구성된 이젝터를 이용하여 기체와 액체의 혼합 및 기체를 용해시키기 위한 공정은 화학공업, 수처리 산업, 양식업 등으로 활용 범위가 지속적으로 확대되고 있으며,⁽¹⁻⁴⁾ 최근에 들어서는 첨단산업과 생명공학 및 미생물산업 분야에서도 활발하게 연구가 수행되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

특히 수처리 산업의 급속한 발전으로 수처리 공정의 부산물인 슬러지의 처리와 산소 공급공정 뿐만 아니라 유해성이 강한 산업 부산물 및 분진의 처리에 이젝터의 활용도가 높아짐에 따라서 성능 최적화를 위한 연구노력이 증대되고 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ Yadav와 Patwardhan⁽¹¹⁾는 이젝터의 설계변수는 아래와 같은 적용목적에 따라 다양화될 수 있다고 보고하였다.

- 부유체의 유입을 증대
- 구동유체와 부유체의 혼합성능 향상
- 저압영역에서 고압영역으로 유체의 펌핑

이젝터의 주요 설계변수는 구동 노즐(primary nozzle) 출구직경, 흡입실(suction chamber) 축소각, 구동노즐 출구에서 혼합관 입구까지의 거리, 혼합관(mixing tube) 직경과 길이, 디퓨저 각도 및 길이 등이다. 이와 같은 설계변수를 고려한 이젝터의 성능검증을 위한 연구들은 구동노즐 면적비,⁽¹²⁻¹⁵⁾ 구동노즐 출구의 거리비,^(5,15-17) 혼합관 길이비^(15,18,19)와 같은 무차원 변수 그리고 디퓨저의 사양^(15,18,20)에 따른 유량비와 효율 등에 대해 다양하게 수행되고 있다. 그러나 이젝터의 설계변수에 대한 다양한 연구결과들은 설계사양, 적용유체 및 실험방법 등에 따라 정량적인 편차가 상당히 나타나는 것으로 알려지고 있기 때문에 설계사양 및 적용목적에 따른 세부적인 성능검증 연구가 반드시 필요하다.^(16,21,22) 이젝터의 설계조건에 따른 성능특성에 대한 연구는 주로 기체를 구동 유체로 기체 및 액체의 유입특성에 대해 수행되고 있다. 반면에 물을 구동 유체로 공기를 유입시켜 수중의 산소 용해도를 높이기 위한 연구는 연직 상 하 방향으로의 거동해석이 대부분이고, 수평방향으로의 용존산소 거동에 대한 연구는 상대적으로 많지 않은 것으로 보고되고 있다.^(4,23,24)

일반적으로 수중 용존산소 거동의 가장 중요한 변수가 공기의 유입을 특성임을 고려하여, 본 연구는 수평방향으로의 수중 용존산소 거동 규명을 위한 1차적인 연구로 중앙구동형 물-공기 이젝터의 설계변수에 따른 유입을 특성 규명을

Table 1 Basic dimensions of central-driven ejector

Dimension	d_p	d_s	d_m	d_c	L_c	L_t	L_d	α
Value[mm]	28	36	30	65	110	36	128	51.6

Table 2 Geometric parameter dimensions of the ejector

Dimension	d_n	L_m	d_d	β	a_d	L
Value[mm]	8.7	130	36	2.7	1.44	
		130	42	5.1	1.96	4.3
	15.2	130	47	7.5	2.45	
		185	42	5.1		6.2
		240	42	5.1		8.0

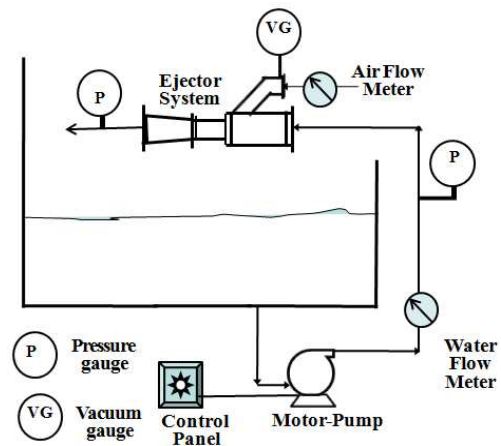


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

목표로 한다. 설계변수는 구동노즐 출구직경, 노즐출구와 혼합관 입구 사이의 거리, 디퓨저 확대각, 혼합관 길이이며, 실험변수는 구동유체의 유량 (또는 압력)으로 설정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1의 개략도에 나타난 실험장치는 순환수조, 전동 모터-펌프, 이젝터 시스템, 제어부 및 측정부 등으로 구성하였다.^(1,3) 순환수조는 0.9m(폭)×1.8m(길이)×0.9m(높이) 사양으로 약 1.46 m³의 용량으로 제작하였다. 전동 모터-펌프(Wilo, 805-1)에 의해서 구동되는 이젝터 시스템의 유량은 유량 제어 밸브로 조절하며, 전자제어 유량계(Kometer, KTM-800)를 이용하여 측정하였다. 이젝터의 부압부를 통해 유입되는 공기량은 오리피스 유량계(Kometer, DPE-S)를 이용하여 측정하였다. 전자제어 유량계와 오리피스 유량계의 정확도는 각각

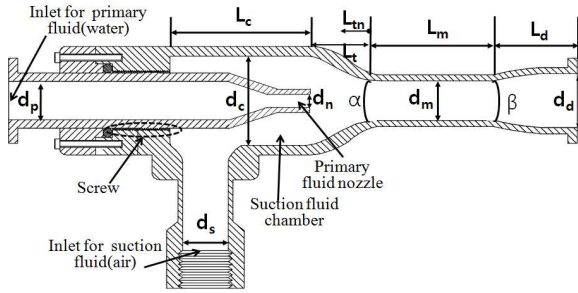


Fig. 2 Schematic dimension of a central-driven ejector with screw

±1.0%와 ±2.0%이다. 제어부에 의해서 작동되는 5 마력 용량의 3 상 유도전동기와 0.8~1.2m³/min 용량의 펌프가 직렬로 조합된 구조의 전동 모터-펌프는 수조의 물을 가압하여 이젝터에 가압력을 제공하고, 가압수가 전체 시스템을 순환하도록 설계하였다.

Fig. 2 는 헤드부의 스크류를 이용하여 구동노즐 출구와 혼합관 입구 사이의 거리를 변화시킬 수 있도록 설계한 중앙구동 이젝터의 개략도를 나타낸다. 이젝터의 헤드부는 스테인레스, 혼합관과 디퓨저는 가시화를 위해 아크릴로 제작하였다. Table 1 은 이젝터에서 일정한 치수를 갖는 각부의 사양을 나타내며, Table 2 는 설계변수에 따른 변동 치수와 식 (1) 및 (2)와 같이 정의되는 디퓨저 출구 면적비(a_d) 및 혼합관 길이비(L)를 나타낸다.⁽³⁾

$$a_d = \frac{d_d^2}{d_m^2} \tag{1}$$

$$L = \frac{L_m}{d_m} \tag{2}$$

이젝터의 구동노즐은 직경을 8.7, 11.4, 15.2mm, 디퓨저의 출구직경을 36, 42, 47mm, 혼합관의 길이는 130, 185, 240mm로 제작하였다. 따라서 혼합관 길이가 130mm 인 3 가지 디퓨저에 대해 식 (1)과 같이 디퓨저 출구 단면적에 대한 혼합관 단면적의 비로 정의되는 디퓨저 출구 면적비는 1.44, 1.96, 2.45 이며, 디퓨저 출구각이 5.1 도인 3 종류의 혼합관에 대해 식 (2)와 같이 혼합관 길이에 대한 혼합관 직경의 비로 정의되는 혼합관 길이비는 4.3, 6.2, 8.0 이다. 또한 식 (3)와 같이 정의되는 구동노즐 출구 단면적에 대한 혼합관 단면적의 비인 구동노즐 면적비(R)는 0.08, 0.14, 0.26 이다.

$$R = \frac{d_n^2}{d_m^2} \tag{3}$$

한편 구동노즐 거리비(X)는 식 (4)와 같이 정의된다. 여기서 L_m 은 구동노즐 출구와 혼합관 입구 사이의 거리를 나타낸다.

$$X = \frac{L_m}{d_m} \tag{4}$$

실험에 사용된 가변노즐 구조의 중앙구동 이젝터는 헤드부의 스크류를 이용하여 피치당 1.5mm 씩 구동노즐의 위치를 역방향으로 이동시킬 수 있도록 제작하였다. 따라서 실험결과 그래프에 나타난 0.35, 0.85, 1.35 의 구동노즐 거리비(X)는 각각 7, 17, 27 피치에 해당한다.

2.2 실험방법

실험은 순환수조에 약 650리터의 수돗물을 채우고, 각각의 피치에서 펌프를 가동시킨 후 정상적인 유동상태에 도달하면 구동유체인 물의 압력 및 유량과 부유체인 공기의 유량을 일정한 간격으로 3회 측정하는 과정으로 이루어지며, 각각의 피치에서 유량조절 밸브로 구동유체의 유량을 변화시키며 반복 실험을 수행하고, 이젝터의 설계변수에 따른 성능실험을 수행하였다.^(3,25)

이젝터의 구동노즐 출구 부근에서 발생하는 부압에 의해서 유입되는 공기량에 대해 구동노즐을 통해 분사되는 구동유체인 물의 유량 비로 정의되는 유량비(mass ratio)는 이젝터의 중요한 성능변수로 아래의 식 (5)와 같다.

$$M = \frac{Q_s}{Q_p} \tag{5}$$

여기서 Q_s 는 유입 공기량, Q_p 는 물의 유량을 나타낸다.

또한 아크릴로 제작된 혼합관과 디퓨저 내의 유동특성에 대한 정성적 거동을 조사하기 위하여 이젝터 출구에서 분출되는 2 상유동의 가시화 이미지를 획득하였다. 정성적 가시화 이미지 획득에는 고속 카메라(Phantom Miro eX2)와 조명장치(ARRI)를 이용하였으며, 초당 120 프레임 (20fps)의 속도로 촬영하였다.^(26,27) 이미지 획득 실험에서는 전동 모터-펌프와 이미지 획득 장치의 트리거(trigger)를 동시에 구동시키면 후(post) 트리거 설정으로 정해진 구간의 이미지 획득이 완료된다. 그리고 Phantom Miro 응용 소프트웨어⁽²⁸⁾의 활성화 모드에서 이미지 분석 과정을 통해 모터-펌프 구동으로 이젝터 노즐로부터 분사가 시작되는 순간(기준시점)부터 획득 이미지를 재저장하게 된다.

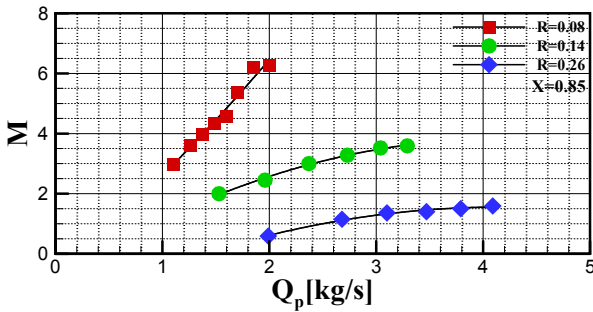


Fig. 3 Effect of primary nozzle area ratio on mass ratio with primary flow rate for primary nozzle distance ratio 0.85

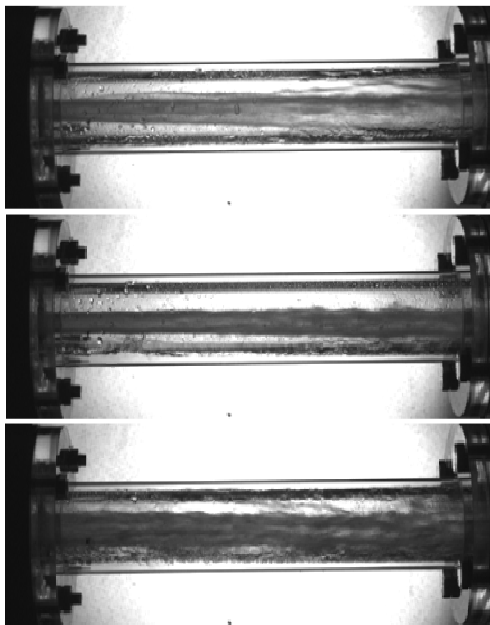


Fig. 4 Typical visualized images with primary nozzle area ratio of 0.08, 0.14 and 0.26 for primary nozzle distance ratio 0.85

3. 결과 및 고찰

Fig. 3 은 이젝터의 구동노즐 면적비에 따른 유량비 특성을 비교한 결과이다. 구동노즐의 면적비가 감소하거나 구동유체의 유량이 증가하면 유량비가 증가하게 된다. 이는 구동노즐의 출구직경이 작아지거나 구동유체의 유량이 많아지면 구동유체의 출구속도가 커져서 공기 유입부의 부압이 증가하며, Fig. 4 의 노즐출구에서 분출된 혼합관내의 가사화 이미지를 통해서 확인할 수 있는 바와 같이 구동유체의 유속이 커지면 2 상의 경계면에서 상호작용이 촉진되어 구동유체로부터 유입공기에 전달되는 운동량의 증가로 공기의 견인력이 커져서 유입 공기량이 많아지기 때문인 것으로 사료된다. 한편 면적비가 0.26 인 경우에는 노즐에서 분출되는 유속은 낮고 확산각이 크기 때문에 혼합관

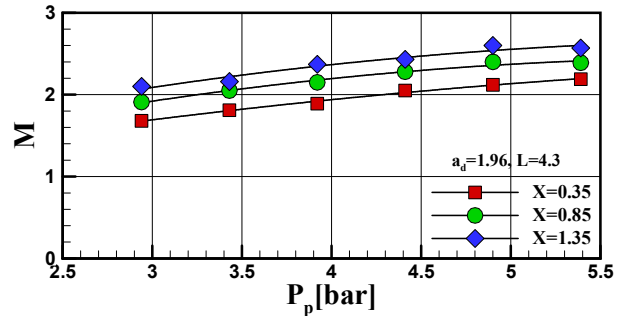


Fig. 5 Effect of primary nozzle distance ratio on mass ratio with primary flow pressure for diffuser exit area ratio 1.96

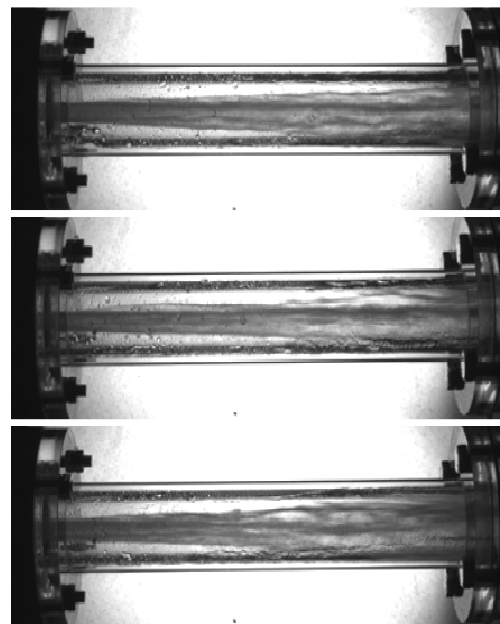


Fig. 6 Typical visualized images with primary nozzle distance ratio of 0.35, 0.85 and 1.35 for primary nozzle area ratio of 0.08

벽에 충돌하는 유량이 많은 것을 알 수 있다. 구동유체의 유량변화에 따른 유량비 증가율은 구동노즐의 면적비가 작을수록 높게 나타나는데, 본 연구의 실험조건에서는 면적비가 0.08 일 때는 구동유체의 유량에 비해서 유입 공기량이 약 3~6 배 정도 증가하였으며, 면적비가 0.26 인 경우에는 약 0.5~1.5 배 정도 유량비가 증가하였다.

Fig. 5 는 구동노즐 면적비가 0.08 이며, 디퓨저 출구 면적비는 1.96 인 이젝터의 구동노즐 거리비가 유량비에 미치는 영향을 비교한 결과이다. 구동노즐 거리비가 증가하면 유량비가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 구동노즐 출구의 거리비가 증가하여도 구동유체의 유량은 거의 변화가 없지만, 구동노즐 출구가 혼합부 입구로부터 멀어질수록 흡입실 축소 경사면과의 충돌손실 감소와 흡입

실 내의 유동면적 증가에 따른 유동저항 감소에 기인하여 유입 공기량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 2 상 유동의 혼합관내 가시화 이미지인 Fig. 6 의 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이, 이러한 흡입실의 손실 및 저항감소 영향으로 혼합관 중심영역의 구동유체와 외주의 유입공기의 경계층에서 전단작용의 영역이 혼합관 하류로부터 중앙부근까지 확대되어 구동유체로부터 유입공기에 전달되는 운동량이 증가하고 공기의 견인력이 커지는 것이 공기 유입량 증대에 영향을 미치게 된다. 한편 구동유체의 압력이 증가하면 구동유체의 출구속도가 커져서 혼합실의 부압이 증가하기 때문에 유량비가 증가한다. 정량적으로 고찰하면, 최대거리비 증가율은 3.9 배이지만 유량비 증가율은 평균적으로 약 22% 정도로 나타났다.

한편 Meakhail 과 Teaima⁽¹⁶⁾는 0~1.0 범위의 구동노즐 거리비 조건에서 거리비가 커지면 유량비가 증가한다는 연구결과를 발표하였으며, Kim 등⁽²²⁾은 공기를 구동유체로 펠릿을 이송하기 위한 연구를 통해 구동노즐의 거리비 1.3~3.57 범위에서 거리비가 커지면 유입 공기량은 감소하지만, 펠릿 이송율은 증가한다는 상반된 결과를 발표하였다. 또한 Eames 등⁽²⁹⁾은 혼합관 입구로부터 거리비가 0.67 배 정도 증가하면 유량비가 약 45% 정도까지 증가하지만, 거리비가 더 증가하면 유량비는 감소한다는 결과를 발표하였다. 이러한 결과들을 고찰하면, 이젝터의 설계사양과 구동 및 유입 물질의 성상에 따라서 성능변수에 대한 정량적 편차가 발생하기 때문에 적용성 및 타당성 검증을 위한 성능특성 연구가 반드시 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 7 은 이젝터의 디퓨저 출구 면적비 변화에 따른 유량비 특성을 나타낸다. 디퓨저의 출구 면적비가 증가하면 유량비는 감소한다. 이는 출구 단면적이 넓어지면, 출구에서 유체의 운동량은 감소하는 반면에 압력 회복율은 증가하여 공기 유입량이 감소하기 때문이다. 또한 출구각이 커지면 디퓨저 확대부에서의 와류혼합에 따른 손실의 증가로 공기의 견인력이 저하되어 유입량이 줄어들기 때문에 유량비가 감소하는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 구동노즐 면적비가 0.14 이고, 구동노즐 거리비가 0.85 인 Fig. 8 의 가시화 결과에서 디퓨저 시작부 하단에 발생하는 와류의 크기가 확대각이 커지면 증가하는 현상으로부터 유추할 수 있다. 한편 정량적으로 고찰하면, 최대 면적비 증가율이 약 70%인 경우에 유량비 감소율은 평균적으로 약 26% 정도로 나타났다.

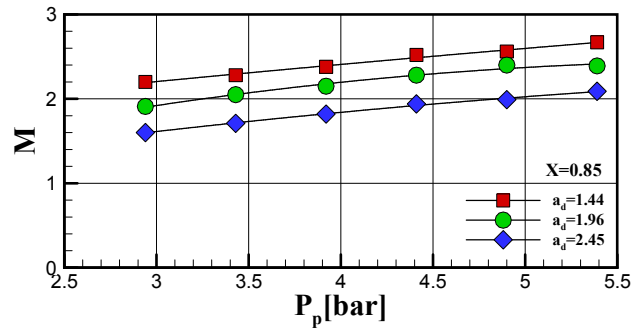


Fig. 7 Effect of diffuser exit area ratio on mass ratio with primary flow pressure for primary nozzle distance ratio 0.85

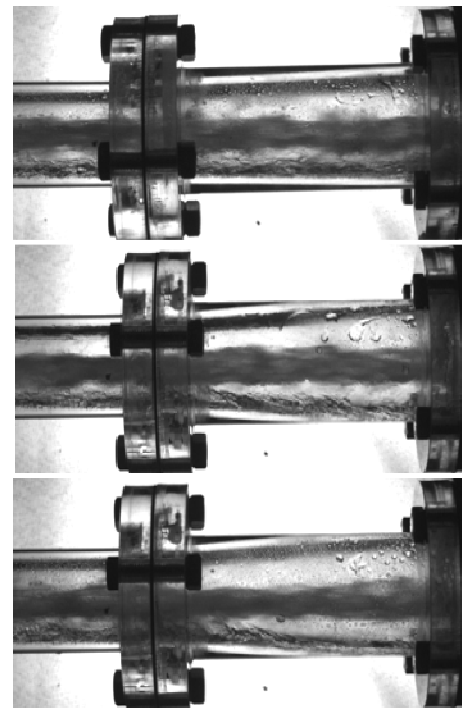


Fig. 8 Typical visualized images with diffuser exit area ratio of 1.44, 1.96 and 2.45 for primary nozzle area ratio 0.14 and distance ratio 0.85

Fig. 9 는 혼합관 길이비 변화에 따른 유량비 특성을 나타낸다. 혼합관의 길이비가 커질수록 유량비가 증가하게 되는데, 이는 혼합관 길이가 증가하면 혼합관 내에서 구동유체와 유입유체의 혼합이 충분하게 이루어지고 디퓨저의 확대부에서 발생하는 와류손실이 감소하여 유입유체의 견인력이 커지기 때문인 것으로 판단된다. 한편 Rahamathullah 등⁽³⁰⁾에 의하면 혼합관 길이가 유량비에 영향을 미치지 않는다는 결과를 제시한 연구결과들도 있으며, Wang⁽³¹⁾에 의하면 혼합관 내에서 완전발달유동 조건을 고려한 연구에서는 최적의 혼합관 길이비로 $L=7\sim 14$ 를 제시한 결과도 있다. 그러나 대부분의 연구들^(15,18,19,31)에서는 최적의 혼합관 길이비

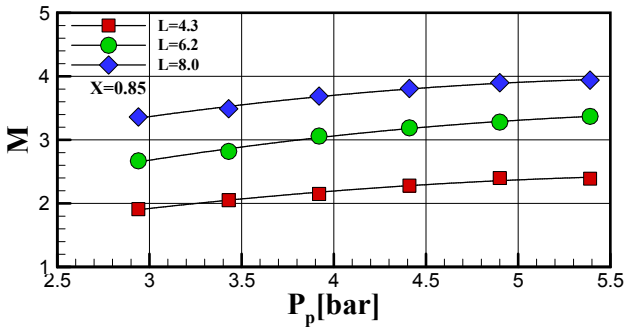


Fig. 9 Effect of mixing tube length ratio on mass ratio with primary flow pressure for primary nozzle distance ratio 0.85

로 $L=6\sim 8$ 의 결과를 제시하고 있으며, 본 연구결과에서도 설정한 길이비 $L=8$ 까지 유량비가 증가하였다.

일반적으로 이젝터에서의 발생하는 가장 큰 손실 요인은 구동유체와 유입유체 사이의 부적절한 혼합에 기인하는 것으로 알려지고 있다. 특히 짧은 혼합관 길이로 인해 혼합관내에서 구동유체와 유입유체의 혼합이 완전히 이뤄지지 못하여 디퓨저 확대부까지 혼합이 지속되는 경우에는 디퓨저 확대부에서 발생하는 와류손실과 더불어 부압을 감소시키는 원인이 되어 유입유체의 견인력이 저하된다. 반면에 혼합관이 너무 길어지면 벽면 마찰손실의 증가에 따른 부압 저하로 유입율이 감소하게 된다.⁽¹⁸⁾

결론적으로 고찰하면, 이젝터는 활용범위가 확대되고 있지만 성능에 영향을 미치는 변수가 많기 때문에 활용목적에 고려하여 구동 및 유입 물질의 종류에 따라 이젝터의 주요 구성 요소인 구동노즐, 흡입실, 혼합관 및 디퓨저의 최적 설계조건 도출을 위한 보다 다양한 검증연구가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

중앙구동 이젝터의 유량비에 미치는 구동노즐 면적비, 구동노즐 거리비, 디퓨저 출구 면적비 및 혼합관 길이비의 영향에 대한 실험적 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

구동유체의 유량이 많아지거나 압력이 증가하면 구동노즐의 출구속도가 커져서 혼합실의 부압이 증가하기 때문에 유량비는 증가한다.

구동노즐의 면적비가 감소하면 구동유체의 노즐 출구속도가 커져서 공기 유입부 부압이 증가하고, 혼합관내 2상 유동의 경계면에서 상호작용 촉진으로 공기의 견인력이 커지기 때문에 유량비는 증가하였다.

구동노즐 거리비가 증가하면 흡입실에서의 충돌손실 및 유동저항 감소와 혼합관 내에서 유입공기에 전달되는 운동량 증가에 기인하여 유량비가 증가하였다.

디퓨저의 출구 면적비가 증가하면 출구에서 유체의 운동량은 감소하고 압력 회복율은 증가하며, 출구각의 확대에 의한 확대부에서의 와류손실 증가에 기인하여 유량비가 감소하였다.

혼합관 길이비가 커지면 구동 및 유입유체의 원활한 혼합과 디퓨저 확대부에서 발생하는 와류손실의 감소에 따른 견인력 증가로 유량비가 증가하였다.

후 기

본 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2013R1A1A4A01010854).

참고문헌 (References)

- (1) Peng, L., Kim, D. J. and Yang, H. C., 2012, "Experimental Study of Flow Characteristics in a Water-Air Ejector," *Proceedings of the KSME 2012 Fall Annual Meeting*, pp. 2932~2937.
- (2) Park, S. K. and Yang, H. C., 2013, "Flow and Oxygen Transfer Characteristics in an Aeration System Using an Annular Nozzle Ejectors," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 52, No. 4, pp. 1756~1763.
- (3) Jang, D. H., Du, H., Kim, D. J. and Yang, H. C., 2013, "Flow Characteristics of Ejector with Design Parameters," *Proceedings of the KSME 2013 Fall Annual Meeting*, pp. 4182~4187.
- (4) Park, S. K. and Yang, H. C., 2013, "Mixed Flow Characteristics of Aeration Process for Recirculation Aquaculture System Using Ejector," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 9, pp. 847~854.
- (5) Kumar, R. S., Kumaraswamy, S. and Mani, A., 2007, "Experimental Investigations on a Two-Phase Jet Pump Used in Desalination Systems," *Desalination*, Vol. 204, pp. 437~447.
- (6) Pestov, V. M., Matveev, G. N., Ipanov, A. S. and Kharin, A. S., 2006, "Water-Jet Stations for Single-Pipe Transport of Oil-Well Production," *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 42, pp. 244~247.
- (7) Yi, J. G., Moon, S. Y., Kim, Y. J., Shin, C. S. and Koo, Y. M., 2007, "Effect of Oxygen Supply on the Production of Interferon α -1 by Recombinant *Escherichia coli* in Fed-Batch Fermentation," *Korean J. Microbiology and Biotechnology*, Vol. 35, No. 3, pp. 226~230.
- (8) Gamisans, X., Sarra, M. and Lafuente, F. J., 2002, "Gas Pollutants Removal in a Single- and Two-Stage Ejector-Venturi Scrubber," *J. Hazardous Materials B*, Vol. 90, pp.

- 251~266.
- (9) Das, S. K. and Biswas, M. N., 2006, "Studies on Ejector-Venturi Fume Scrubber," *Chemical Engineering J.*, Vol. 119, pp. 153~160.
- (10) Bayley, R. W. and Biggs, C. A., 2005, "Evaluation of the Jet Pump Scrubber as a Novel Approach for Soil Remediation," *Trans. IChemE, Part B, Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 83, pp. 381~386.
- (11) Yadav, R. L. and Patwardhan, A. W., 2008, "Design Aspects of Ejectors: Effects of Suction Chamber Geometry," *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, pp. 3886~3897.
- (12) Mashud, M., Rakib, M. H., Karmakar, S. and Islam, M. R., 2012, "Effect of Nominal Diameter and Nozzle to Throat Area Ratios on Suction Lift of Water Jet Pumps," *Int. Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering 2012*, MIE12-089.
- (13) Winoto, S. H., Li, H. and Shah, D. A., 2000, "Efficiency of Jet Pumps," *J. Hydraulic Engineering*, Vol. 126, pp. 150~156.
- (14) EL-Ghandour, M., EL-Sawaf, I. A. and EL-Otla, F. M., 2001, "Solid-Materials-Handling Central-Type Jet Pump," *6th Int. Water Technology Conference*, IWTC 2001, pp. 328~340.
- (15) EL-Sawaf, I. A., Halawa, M. A., Younes, M. A. and Teaima, I. R., 2011, "Study of the Different Parameters That Influence on the Performance of Water Jet Pump," *15th Int. Water Technology Conference*, IWTC 2011, pp. 1~17.
- (16) Meakhail, T. A. and Teaima, I. R., 2013, "A Study of the Effect of Nozzle Spacing and Driving Pressure on the Water Jet Pump Performance," *Int. J. Engineering Science and Innovative Technology*, Vol. 2, No. 5, pp. 373~382.
- (17) Aphornratana, S. and Eames, I. W., 1997, "A Small Capacity Steam-Ejector Refrigerator: Experimental Investigation of a System using Ejector with Movable Primary Nozzle," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 20, No. 5, pp. 352~358.
- (18) Teaima, I. R., Younes, M. A., El-Sawaf, I. A. and Halawa, M. A., 2012, "Experimental Study of the Effect of Mixing Chamber Length and Diffuser Angle on the Performance of Dredging Jet Pumps," *16th Int. Water Technology Conference*, IWTC 2012, pp. 1~14.
- (19) Kim, O. S., Lee, Y. and Lee, D. H., 2009, "Hydrodynamic Characteristics of a Horizontal Flow Ejector in a Rectangular Chamber," *Korean J. Chemical Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 288~294.
- (20) Singh, P., Singh, S. N. and Seshadri, V., 2009, "Experimental Investigations on Non-Circular Ejector Air Diffusers," *39th AIAA Fluid Dynamic Conference*, AIAA 2009-4213.
- (21) Prabkeao, C. and Aoki, K., 2005, "Study on the Optimum Mixing Throat Length for Drive Nozzle Position of the Central Jet Pump," *J. Visualization*, Vol. 8, No. 4, pp. 347~355.
- (22) Kim, K., Kim, E., Kang, S., Lee, J. and Rho, B., 2008, "Effect of Primary Nozzle Configuration on the Flow and Transfer Characteristics in an Ejector System for Pellet Transfer," *Trans. KSAE*, Vol. 16, No. 5, pp. 49~59.
- (23) Socolofsky, S. A. and Adams, E. E., 2002, "Multi-phase Plumes in Uniform and Stratified Crossflow," *J. Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 661~672.
- (24) Lima Neto, I. E., Zhu, D. Z. and Rajaratnam, N., 2008, "Horizontal Injection of Gas-Liquid Mixtures in a Water Tank," *J. Hydraulic Engineering*, Vol. 134, pp. 1722~1731.
- (25) Yang, H. C., Park, S. K., Du, H. and Kim, K. H., 2014, "Flow Characteristics of Central-Driven Ejector with Design Parameters," *Proceedings of the KSME Fluid Engineering Division 2014 Spring Conference*, pp. 315~316.
- (26) Kim, D. J., Peng, L., Park, S. K. and Yang, H. C., 2014, "Mixed Flow and Oxygen Transfer Characteristics of Orifice Ejector," *Proceedings of the KSME Fluid Engineering Division 2014 Spring Conference*, pp. 317~318.
- (27) Kim, D. J., Du, H., Jang, D. H. and Yang, H. C., 2013, "Experimental Investigation on Air Bubble Behavior for Development of Cleaning Technology," *Proceedings of the KSME 2013 Fall Annual Meeting*, pp. 4188~4193.
- (28) Phantom Camera Control Software (Version 2.2.737.0), 2013, Vision Research.
- (29) Eames, I. W., Ablwaifa, A. E. and Petrenko, V., 2007, "Results of an Experimental Study of an Advanced Jet-Pump Refrigerator Operating with R245fa," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 2833~2840.
- (30) Rahamathullah, M. R., Palani, K., Aridass, T., Venkatakrishnan, P., Sathiamourthy, and Palani, S., 2013, "A Review on Historical and Present Developments in Ejector Systems," *Int. J. Engineering Research and Applications*, Vol. 3, No. 2, pp. 10~34.
- (31) Wang, D., 1995, "Analysis and Design of Air-Jet Pumps for Pneumatic Transportation of Bulk Solids in Pipelines," Ph.D. Thesis, Univ. of Wollongong.