기체-액체 이젝터 유동의 가시화와 광섬유 탐침에 의한 기포분율 측정

최성환* · 지호성** · 김정천†

Visualization of Gas/liquid Ejector Flow and Void Fraction Measurement using Fiber Optic Probe

Sung Hwan Choi, Ho Seong Ji and Kyung Chun Kim

Abstract. Gas/liquid two-phase ejector is a device without moving parts, in which liquid is used to drive gas of a low-pressure source. In this paper, the hydrodynamic characteristics of a vertical down type two-phase ejector were studied using an air-water loop system. Entrained air flow rates were measured with inlet and outlet pressures of the ejector with varying water flow rate. Homogeneous bubbly flows in the discharge pipe were confirmed by the high speed flow visualization method. Quantitative measurements of void fraction were made using a newly developed fiber optic probe system.

Key Words: Two-Phase Flow (이상유동), Ejector (이젝터), Flow Visualization (유동가시화), Fiber optic probe(광섬유 탐침), Void fraction(기포분율)

1. 서 론

기체-액체 이상유동 이젝터는 설치가 간편하고, 안정적인 작동 특성으로 인하여 여러 가지 경우의 화학공정 및 플랜트에서 중요하게 사용되는 장치중 하나이다. 이 상유동 이젝터는 액체를 주유동으로 분사시키고, 이젝터의 목 부분에서 형성되는 음압으로 기체를 흡입하여 혼합과정과 이송과정을 동시에 실현시킨다^(1, 2).

이젝터에 관한 선행연구로 Witte(1962)는 다중 오리피스와 상당히 긴 혼합튜브를 이용하여 이젝터의 등온 압축효율이 40%까지 개선될 수 있음을 보고하였다. 이젝터의 성능을 평가하기 위한 최소한의 측정값은 1차 유체 및 2차 유체의 체적 유량과 세 지점의 압력 즉 이젝터 전단 압력 P_s , 흡입압력 P_v , 디퓨저 압력 P_d 이다⁽³⁾.

Conningham등(1974)은 이젝터에 대한 이전의 선행연구를 집대성하여 이젝터의 성능에 관한 식을 정리하였는데 이 식은 배압이 충분히 커서 균일한 기포가 형성되는 유동조건에서만 적용할 수 있는 단점이 있다⁽⁴⁾.

Rahman등(2010)은 기체/액체 이젝터에서 공기흡입량을 증가시키는 방안에 대해 연구하였으며 작은 방출 계수(discharge coefficient)를 가지는 노즐을 사용하였을 때 더 높은 진공을 걸 수 있으며 진공압에 따라서 더 높은 공기유입량을 얻을 수 있다고 보고하였다⁽⁵⁾.

기포분율(void fraction)은 기체와 액체가 공존하는 2상 유동에 대한 연구에 있어 매우 중요한 변수중 하나이다. 기포분율을 측정하는 기법은 여러 가지가 존재하지만 광섬유 탐침을 이용한 기포분율 측정기법은 고정밀 유동측정에 적합하다고 할 수 있다. 현재까지 버블유동에서 광섬유탐침의 정확성을 검증하기 위한 선행연구가 현재 많이 진행되고 있으며, 그 중 고속카메라를 이용한 선행연구로는 Julia 등, Rojas 등의 연구가 있다. Julia 등의 연구에서는 광섬유 탐침과 카메라를 직접적으로 동기화하지 않고 추가적인 광 측정 장치를 트리거로 사용함으로써 측정신호간의 임의의 시간지연이 발생하는 한계가 있었다⁽⁶⁾.

Rojas 등의 논문에서는 Photonetic사의 광섬유 탐침을 이용하여 고속카메라를 외부 트리거에 의해 직접적으로 동기화시켜 기포분율을 측정하여 비교하였으나 버블의 기체/액체 경계면에서의 측정신호와 순간이미지의 정교한 타이밍에 대한 명확한 고찰이 결여되어

†부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr

*부산대학교 일반대학원 기계공학과

**부산대학교 기계공학부

있다⁽⁷⁾.

따라서 본 연구는 이젝터의 후단부에 균일한 기포의 분포가 형성되었는가를 검증하기 위해 고속카메라를 이용한 가시화 실험을 수행하였고, 광섬유 탐침을 이용하여 이젝터 후단부의 기포분율을 정량적으로 측정하여 이젝터의 수력학적 성능데이터를 축적하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 이젝터의 형상은 Fig. 1과 같다. 이젝터 모델에서 액상의 유체가 지나는 배관의 직경은 65 mm이며, 가스가 유입되는 배관의 직경은 16.5 mm, 노즐의 직경은 26 mm이다. 전체적인 실험 장치 구성은 Fig. 2와 같다. 실험에서 구동유체로는 물을, 흡입 유체로는 공기를 사용하였고, 다이얼 조절식 인버터를 사용하여 펌프의 회전수를 조절하여 물 유량을 조절하였다.

펌프를 가동하게 되면 물탱크에서부터 물이 양수되며 이젝터 시스템으로 물이 공급된다. 공급된 물은 물 유량계와, 정류기를 거쳐 이젝터 내부 노즐을 통해 흡입챔버로 분사된다. 빠른 속도로 분사된 제트타입의 물에 의해 흡입챔버 내부에 음압(negative pressure)이 형성되며, 형성된 음압으로 인해 공기가 공기유량계를 통해 흡입챔버 내로 유입된다. 혼합튜브내에서 흡입된 물과 공기가 혼합되며, 혼합된 이상유체(물/공기)는 디퓨저와 가시화구간을 거쳐 탱크내로 흡입된다. 이와 같은 방식으로 이젝터 폐루프 사이클이 완성된다. 실험에 사용한 물유량계와 공기유량계는 독일 KOBOLD사 제품으로서 측정값의 0.3% 오차를 가지는 전자기식 유량계이다. 또한 압력계는 이젝터의 중요한 측정위치 6 지점을 설정하여, 위치별 압력범위를 설정하여 실험하였다.

실험 케이스는 물유량과 배압을 동시에 조절하였고, 탱크 앞의 볼밸브(한국유량계공업, DAF 65A)를 조절하여 배압은 조정하였다. 물유량 390, 415, 440, 465l/min, 이고 배압은 10, 12, 14 kPa으로 조절하여 총 12 케이스를 실험하였다.

광섬유 탐침을 이용한 기포분율 측정 원리는 광의 굴절율이 다른 물질 사이에서 경계면을 광이 통과할 때에 생기는 프레넬 반사(Fresnel reflection)를 응용한 것이다. 광섬유탐침의 끝부분을 광섬유에 정확하게 수직으로 절단하였을 때, 탐침의 절단면에서의 반사계수

Fig. 1. Fabrication of ejectors for experiment.

Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup.

는 각 매질의 굴절률에 의해 달라진다. 굴절률 n 을 가지는 매질 경계면에서의 수직방향으로의 반사율 R 은 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (1)$$

만약 광섬유의 광섬유의 굴절율이 약 1.46이면, 경계면에서의 반사율은 다음과 같다.

$$R_{g-a} = 3.5\% (\text{유리}-\text{공기})$$

$$R_{g-w} = 0.2\% (\text{유리}-\text{물})$$

$$R_{w-a} = 2.0\% (\text{물}-\text{공기})$$

따라서 광섬유탐침의 끝이 물에 닿아 있을 때 보다 공기에 닿아 있을 때가 약 17.5배 높은 반사율을 가지므로 탐침에 닿아있는 매질이 바뀔 때 마다 반사되는 빛의 양이 달라지며, 이로 인해 광검출기(photodetector)에서 검출되는 전압레벨이 달라진다. 이 신호의 차이를 이용하여 기포분율을 측정할 수 있다⁽⁸⁾.

이젝터 후단부에서의 광섬유 탐침을 이용한 기포분율을 측정을 위한 고려사항은 높은 시간적/공간적 해상도와 출력신호의 안정성이라 할 수 있다. 이를 효과적으로 구현하기 위해 Thorlabs사의 연속 광원(1550 nm, S1FC1550)과 광검출기(1.2 GHz DET01CFC/M)를 이용

하였다. 광원에서 나오는 빛과 광섬유 탐침에서 반사되어 나오는 빛을 광검출기로 보내기 위해 서큘레이터(6015-3-FC, Thorlabs)를 이용하였으며, 모든 광 경로는 10 μm 의 코어직경을 가지는 싱글모드 광케이블(P3-SMF28-FC-5)을 이용하여 연결하였다. 광검출기에서는 전압의 형태로 National Instrument사의 9401 제품인 DAQ 보드로 전달하며, 컴퓨터내의 코딩한 LabVIEW 프로그램을 사용하여 DAQ보드의 신호를 저장한다. 광섬유는 외경이 900 μm 인 Single core patch cable로서 코어의 직경은 10 μm 이고, 125 μm 의 크래딩으로 둘러싸여 있다.

Figure 3은 광섬유 탐침을 실제 이젝터 실험에 적용한 위치를 나타내며, 고속카메라를 촬영한 위치에서 약 35 mm 떨어진 위치에서 기포분율을 측정하였다.

Fig. 3. Measurement position of Fiber optic probe.

Fig. 4. Schematic diagram of fiber optic probe measurement.

Figure 4는 직접 설계한 이송 시스템을 이용하여 수평 방향의 기포분율을 측정하기 위한 실험 개략도이다. 측정 간격은 1 mm로 함으로써 측정 위치 정밀도를 높였고, 내경 65 mm인 관내를 5 mm씩 이동하여 총 14 지점에서 기포분율을 측정하였다.

Figure 5는 광섬유 탐침을 통하여 얻은 신호를 필터링하는 알고리즘을 나타낸다. 탐침의 위치가 고정되어 있다 하더라도 기포가 항상 두 개의 탐침의 중심을 지나가지 않기 때문에 기포분율을 계산할 때 큰 오차가 발생한다. 오차를 줄이기 위해서는 신호의 필터링이 매우 중요하므로, 필터링을 하기위해서 Fig. 5과 같이 3가지 신호 필터링 조건을 제시하였다. 또한 노이즈에 의한 측정값 오류를 줄이기 위해 컷오프 레벨을 설정해야 하는데, 본 실험에서는 컷오프 레벨을 1.3 V로 설정하였다. 여기서 1.3 V로 설정된 컷오프 레벨은 여러 실험을 통한 경험 값이며, 신호의 최대전압과 최소전압의 차에서 0.1을 곱한 값으로 설정하였다. 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위해 1초당 1000개의 신호를 60초간 측정하였으며, 총 측정된 데이터는 60000개이다. 이것을 이용하여 기포분율을 측정하였다. Fig. 6은 실험에서 측정된 신호에서 기포분율을 계산하는 계산식을 나타낸다. 위의 필터링조건과 기포분율 계산식을

Filtering condition 1 : $T_{11} < T_{21}$
 T_{11} : Signal rising time of probe 1
 T_{21} : Signal rising time of probe 2
 Filtering condition 2 : $T_{11} + t_{21} < T_{21} + t_{31}$
 t_{11} : $T_{21} - T_{11}$
 t_{21} : Resident time of bubble in probe 1
 Filtering condition 3 : $0.95 < \frac{t_{21}}{0.5(t_{21} + t_{31})} < 1.05$
 t_{31} : Resident time of bubble in probe 2

Fig. 5. Filtering condition to acquire proper bubble signal.

Fig. 6. Algorithm for acquiring void fraction.

Fig. 7. Air volume flow with respect to water flow rate.

이용하여 LabVIEW 프로그램을 코딩하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 7은 물 유량에 따른 공기유입량을 나타낸다. 물 유량과 배압은 펌프에 연결된 인버터의 주파수와 이젝터 후단부에 있는 볼밸브의 개폐정도를 동시에 조절하면서 측정하였다. 물유량이 증가할수록 흡입챔버내 진공도가 높아져 2차 유체인 공기의 유입량이 물유량에 비례하여 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 또한 배압이 10 kPa에서 14 kPa로 증가할 때 공기유입량의 변화가 거의 없었다. 이는 수직하향형 이젝터에서 공기흡입량은 배압의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다. 수평형 이젝터의 경우 배압이 클 경우 이젝터는 고유의 기능을 상실하여 흡입챔버와 연결된 공기배관으로 물이 역류하는 flooding 현상이 나타나지만, 수직하향형 이젝터의 경우 flooding 현상에 매우 안전함을 알 수 있

Fig. 8. Input pressure with respect to water flow rate.

Fig. 9. Suction pressure with respect to water flow rate.

다. Figure 8은 물유량에 따른 수동력(Input power)을 나타낸 그래프이다. 배압에 따른 변화보다는 수동력에 대한 압력증가가 더 중요한 변수임을 알 수 있다. Fig. 9는 물 유량에 따른 흡입압력(Ps)의 변화를 나타낸 그래프이다. 수직하향형 이젝터의 경우 흡입측 압력이 후단부의 물유량이 390 L/min에서 465 L/min까지 변할 때 흡입압력 Ps는 배압에 따라 -5 kPa에서 약 -9 kPa까지 변함을 알 수 있다. 물유량이 증가함에 따라 거의 선형적인 감소를 보이고 있으며, 배압이 증가할 때 흡입압력도 증가하여 진공도가 낮아짐을 알 수 있다.

Figure 10은 이젝터에서의 체적유량비(QG/QL)를 나타낸다. 체적유량비는 0.92~1.05사이의 값을 가지며, 배압의 변화에 따라 미소한 차이를 보인다. 또한 물 유량이 증가할수록 체적유량비는 기울기가 완만하게 증가한다.

Figure 11은 배압 14 kPa일 때 압력계 위치별 정압의 변화를 나타낸다. P_s , P_{m1} , P_{m2} 은 각각 흡입챔버와

Fig. 10. Variation of volumetric flow ratio.

Fig. 11. Axial static pressure variation at $P_{out} = 14$ kPa.

혼합튜브의 정압을 나타내며, P_d 는 디퓨저 출구쪽 압력을, 그리고 P_{out} 은 유동 가시화영역을 지난 마지막 지점에 있는 압력계의 정압을 나타낸다. 압력계의 모든 지점에서 물 유량이 증가함에 따라 모든 지점에서 압력이 감소하는 경향이 나타남을 확인할 수 있다. 이는 혼합튜브 내에서는 제트가 빠른 속도로 지나고 그 주위로 공기가 제트에 비해 느린 속도로 흐르고 있으므로 서로 다른 상간의 경계면에서 마찰력이 발생하고 이로 인해 압력강하가 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 그러므로 혼합튜브의 끝 지점에서 정압은 최소가 되며 디퓨저를 지나면서 압력은 음압에서 양압으로 변화된다. 그러나 본 실험에서는 디퓨저 출구에서도 대기압보다 약 3 kPa 낮은 압력이 측정되었음을 볼 수 있다. 디퓨저를 지난 제트는 아직 완전히 붕괴가 되지 않았지만 파이프에 아래에 요동하고 있는 비교적 낮은 속도의 정체영역과 부딪히면서 동압을 점차적으로 잃게 되는것을 확인하였다.

Figure 12는 유량에 따른 제트펌프의 효율의 변화를 나타낸다. 제트펌프의 효율은 공급되는 수동력에 대한 유용일을 나타내는데 여기서 유용한 일이란, Q_g 의 체적유량으로 흡입챔버를 들어온 공기를 압력 P_s 에서 디퓨저 출구 압력 P_d 로 승압시키는데 사용된 일의 양으로 정의된다. 배압이 증가 할수록 효율이 증가함을 확인하였다. 또한 전 영역에서 4~5% 사이의 비교적 낮은 효율 분포를 보이고 있다. 낮은 효율이 나타나는 이유는 혼합튜브의 길이가 짧아 제트의 붕괴가 이루어지지 않은 채 디퓨저 출구를 나감에 따라 디퓨저 출구 압력 P_d 가 전 영역에서 낮은 값을 가지고, 흡입측 압력도 대기압에 가까운 -3 kPa 대를 유지하고 있기 때문인 것으로 분석된다. 따라서 이와 같은 경우 효율을 높

Fig. 12. Jet pump efficiency with respect to water flow rate.

이기 위해 Cunningham등(1974)의 선행연구에서 제안하고 있는 바와 같이 혼합튜브의 길이의 확장 또는 노즐직경을 증가에 따른 영향을 검토할 것이 요구된다.

유동가시화구간에서의 유동패턴을 관찰하기 위해 초고속 카메라(Photron사의 SA1.1)를 설치한 사진을 나타내며, 약 16 mm 떨어진 위치에 초점을 맞추어 유동가시화 실험을 수행하였다. 측정 단면의 크기는 1024×752 픽셀이며 초당 8000 frame/s ($\Delta t = 0.125$ ms)의 속도로 한 케이스당 3000장의 이미지를 확보하였다.

Figure 13은 유량별 초고속카메라로 순간 촬영된 사진으로, 비교적 유동이 선명하게 보이는 사진을 정리하였다. 가시화 구간의 관 내벽에 이상 유동 및 기포가 가시화를 방해하여, 관내 중심부에는 기포의 유무를 판단하지 못했다. 하지만 초고속카메라로 이젝터 후단

Fig. 13. Instantaneous image.

의 기포유동을 관찰해 본 결과 이젝터 노즐에서 생성된 제트가 깨지지 않아, 물과 공기 2상의 유체의 복잡한 난류 유동이 확인되었다. 또한 이젝터 후단부에 설치된 볼밸브에 부딪혀 역으로 물이 이동되는 현상과 부력효과에 의해 제트의 영향을 받지 않는 구간에서는 기포의 상승현상을 확인하였다. 이는 이젝터 후단부의 유동 길이가 매우 짧음을 의미한다. 이를 해결하기 위해선 혼합튜브의 길이나, 배관의 길이를 더 길게 설정하거나, 제트가 빨리 깨질 수 있도록 하는 스웰과 같은 구조를 설치해야한다.

Figure 14는 0.5초 동안 광섬유 탐침을 이용하여 측정된 신호이다. 고속카메라로 측정되지 않는 파이프의 중심부를 측정해본 결과 0.5초 동안 버블에 의해 약 50개의 피크가 측정되었으며, 측정된 전압의 범위는 약 0.1 V에서 1.4 V로 측정되었다. 측정된 신호를 분석해본 결과 기포가 매우 작고, 빠른 속도로 이동함을 알 수 있다.

Figure 15는 14 kPa의 일정한 배압에서 물 유량을 조절하여 측정한 기포분율을 나타낸다. 기포분율은

Fig. 14. Real data of fiber optic probe.

Fig. 15. Void fraction distribution at different water flow rate.

Fig. 16. Void fraction distribution at back pressure.

0.4에서 0.55 범위내 존재하며, 벽면을 제외한 관내에서는 거의 일정하게 나타난다. Fig. 16은 물 유량을 415 L/min으로 고정하였을 때, 배압의 변화에 따른 길이 방향의 기포분율을 측정한 결과를 나타낸다. 배압에 따른 기포분율변화 역시 차이가 거의 없는 것을 확인하였다. 이와 같은 현상은 흡입되는 공기유량이 변화가 없기 때문에 기포분율 또한 배압에 따라 차이가 거의 없는 것으로 확인하였다.

4. 결 론

수직하향으로 설치된 기체/액체 이젝터를 물공기 유량계와, 압력계를 사용하여 기체유입성능을 측정하였다. 그리고 고속카메라를 사용하여 유동가시화 구간에서의 유동 패턴을 관찰하였고, 처음으로 광섬유 탐침을 이용하여 물-공기 이상 유동에 대한 기포분율을 정량적으로 측정하였다.

수직하향형 이젝터의 경우 흡입되는 공기유량은 물 유량의 변화에 따라 선형적으로 증가하고, 배압 차에 의한 변화는 매우 미소함을 확인하였다. 또한 광섬유 탐침 사용하여 수직하향형 이젝터 후단부의 관 내부 길이방향을 14지점으로 나누어 기포분율을 측정한 결과, 벽면을 제외한 구간에서 약 0.4에서 0.55로 일정하게 기포분율이 분포하였으나, 물 유량과 배압에 따라 변화가 미소하게 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부와 교육과학기술부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원(NO.

20102020100470-32-2-100)과 한국연구재단의 지원 (NO. 2012-0030663)을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- 1) Shonnard, D. R. and Hiew, D. S., 2000, "Comparative Environmental Assessments of VOC Recovery and Recycle Design Alternatives for a Gaseous Waste Stream", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 34, pp. 5222-5228.
- 2) Matros, Y. S. and Bunimovich, G. A., 1995, "Control of Volatile Organic Compounds by the Catalytic Reverse Process", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 34, pp. 1630-1640.
- 3) Witte, J. H. 1969, "Mixing shocks in two-phase flow", *J. Fluid Mech.* 36, pp. 639-655.
- 4) Cunningham, R. G., Dopkin, R. G., 1974, "Jet Breakup and Mixing Throat Lengths for the Liquid Jet Gas Pump", *Transactions of the ASME*, pp. 216-226.
- 5) Rahman, F. Umesh, D. B. Subbarao, D. and Ramasamy, M., 2010, "Enhancement of entrainment rates in liquid-gas ejectors", *Chem. Eng. Processing.*, Vol. 49, pp. 1128-1135.
- 6) Julia, J. E., Harteveld, W. K., Mudde, R.F., Akker, E. A., 2005, "On the accuracy of the void fraction measurements using optical probes in bubbly flows", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 76, 035103.
- 7) Rojas, G. and Loewen, M. R., 2007, "Fiber-optic probe measurements of void fraction and bubble size distributions beneath breaking waves", *Exp. Fluids*, Vol. 43, pp. 895-906.
- 8) Hamed, F. A, and Bruun, H. H, 1997, "An optical probe for measurements in liquid-liquid two-phase flow", *Meas. Sci. & Technol.*, Vol. 8, pp. 1122-1132.