환형 이젝터 루프 내부의 이상유동특성 파악을 위한 수치해석 및 유동가시화 연구

이동엽* · 김윤기* · 김현동* · 김경천†

Numerical Analysis and Flow Visualization Study on Two-phase Flow Characteristics in Annular Ejector Loop

Dong Yeop Lee, Yoon Kee Kim, Hyun Dong Kim and Kyung Chun Kim

Abstract. A water driven ejector loop was designed and constructed for air absorption. The used ejector was horizontally installed in the loop and annular water jet at the throat entrained air through the circular pipe placed at the center of the ejector. Wide range of water flow rate was provided using two kinds of pumps in the loop. The tested range of water flow rate was 100 ℓ/min to 1,000 ℓ/min. Two-phase flow inside the ejector loop was simulated by CFD analysis. Homogeneous particle model was used for void fraction prediction. Water and air flow rates and pressure drop through the ejector were automatically recorded by using the LabView based data acquisition system. Flow characteristics and air bubble velocity field downstream of the ejector were investigated by two-phase flow visualization and PIV measurement based on bubble shadow images. Overall performance of the two-phase ejector predicted by the CFD simulation agrees well with that of the experiment.

Key Words: Annular type ejector (환형 이젝터), CFD (수치해석), Flow Visualization (유동가시화), Two-phase flow (이상유동), Flow rate ratio (유량비)

1. 서 론

Volatile Organic Compounds(VOC)는 일반적으로 상온 상압에서 액체나 고체, 기체 상태로 존재할 수 있는 탄화 수소계, 할로젠 탄화 수소계 또는 황함유 탄화 수소계의 휘발성 유기 화합물을 통칭하는 의미로 사용되며, 차량의 배출가스와 도장, 인쇄, 유기합성공업 등 각종 석유화학 관련 산업 공정 중에 많이 발생하는 것으로 알려져 있다.

유류저장탱크 내부에서 발생하는 VOC 가스를 저감하기 위한 다양한 형태의 VOC 회수 시스템이 개발되었다. Hamworthy 사에서는 유조선 선상에 냉각 타워를 설치하여 유류 저장탱크에 발생하는 VOC 가스를 응축시켜 회수하는 시스템을 제안하였고, Aker Industry

& Services 사에서는 탄소필터(Carbon filter)에 VOC 가스를 흡착시켜 화학적으로 포집/회수하는 장치를 개발하였다⁽¹⁾.

이 두 가지 형태의 능동형 VOC 회수 장치는 100%에 가까운 높은 회수 효율을 보장하지만, 과도한 초기 설치 및 유지/보수비용으로 인해 경제성이 떨어지는 단점이 있다. 이에 대한 대안으로 개발된 수동형 VOC 회수 장치는 벤츄리 효과나 와류 등의 비교적 단순한 유체 역학적 원리를 이용하여 원유의 수송 배관에 저압부를 형성시켜 압력 차이에 의해 VOC 가스를 원유에 혼합되도록 하여 원유 탱크의 기저부로 보냄으로써 VOC 기포가 상승하는 과정에서 자연적으로 재액화 되도록 하는 원리를 이용하였다. 이러한 수동형 VOC 회수 장치는 경제성 뿐 만 아니라 신뢰성, 유지/보수의 편의성 등의 여러 가지 장점을 가지고 있으므로 보다 간단하고 효율적인 방식의 VOC 회수 시스템을 개발하기 위한 연구들이 진행되고 있다⁽²⁻⁴⁾.

이젝터에 관한 초창기 연구는 Bonnington등⁽⁵⁾에 의

†부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

*부산대학교 일반대학원 기계공학과

해 이루어졌다. 이들은 고체가루를 유입시키기 위해 이젝터를 사용하였다. Witte등⁽⁶⁾은 다중제트를 이용한 이젝터 유동을 연구하였으며, 처음으로 액체/기체 경계면 상에서 버블이 발생하는 mixing shock에 대해 언급하였다. Ben Brahim등⁽⁷⁾과 Acharjee등⁽⁸⁾은 수직형 이젝터에서의 운동량 방정식을 이용하여 공기유입량에 대한 정량적 해석을 시도하였다. 기체/액체 이젝터는 구동부가 없으면서 서로 다른 상 간의 물질전달을 극대화 할 수 있는 장치로 가스흡입, 수소반응, 염소처리, 폐수정화공정등 화학 또는 생화학 분야에서 널리 이용되어 왔다⁽⁹⁾.

액체가 노즐을 통해 분사됨으로써 믹싱 챔버 내 진공을 만드는 제트 이젝터와 관련된 연구는 1900년대 중반부터 많은 연구자들에 의해 활발히 연구되어 왔으나 액체가 원형 노즐 주위 환형 형태로 유입되면서 공기를 흡입하는 벤츄리 타입의 이젝터는 거의 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 VOC 회수 시스템 개발을 위한 기초 연구로서 관내 유동에서 벤츄리 부분에서의 진공 현상을 이용하여 상대적으로 고압인 VOC 가스를 유입시켜 원유와 혼합 시킬 수 있는 환형의 액체유동에 의해 Ejector 중심에서 기체가 흡입되는 Annular type ejector 설계 하였다. 그리고 이젝터 내부의 유동 특성과 혼합 현상을 파악하고 성능을 예측하기 위해 전산해석을 수행하였으며, 넓은 유량 범위에 대한 실험을 수행하기 위한 물-공기 이상유동 Loop 설계 및 제작하여 이젝터 내부의 물-공기 이상 유동에 대한 기포의 그림자 영상과 PIV 기법을 이용한 기포 이동속도 외 정량적 측정을 병행하여 전산해석과 실험결과의 비교를 통해 이상 유동 Ejector의 설계 기법을 검증하고자 한다.

2. 이젝터 형상 설계

Fig. 1. Detail specification of ejector mixer unit.

Fig. 1은 본 연구진이 제안한 이젝터 모델의 개략도를 보여 주고 있다. 실제 선박에서 사용되고 있는 원유 펌프의 압력과 유량이 8 bar, 750 m³/h 의 수준인 점을 감안하여, 직경 200 mm의 배관에서 진공을 형성할 수 있도록 벤츄리부의 직경을 80 mm로 결정하였으며, 1/3 축소 모델을 택하여 전산해석 및 가시화 실험을 수행하였다. 축소 이젝터 모델에서 액상의 유체가 지나는 배관의 직경은 65 mm이며, 가스가 유입되는 배관의 직경은 16.5 mm, 벤츄리부에서의 직경은 32 mm이다.

3. 이젝터 내부의 이상유동 전산해석

본 연구에서 제작하는 이젝터 루프의 공기/물 다상 유동을 해석하기 위해 범용 유동해석코드인 ANSYS CFX v12.1을 사용하였다.⁽¹⁰⁾ ANSYS CFX에서 제공하는 공기/물 다상유동 모델에는 다양한 종류의 모델링 방법이 있으나 homogeneous particle model을 이용하여 실험과 가장 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 해석에 사용된 모델은 Fig. 1에 나타난 이젝터 형상을 바탕으로 하였으며, 공기가 유입되는 Inlet_IG, 물이 유입되는 Inlet, 버블/물이 공존하여 배출되는 Outlet에서의 경계조건으로는 실험과 동일하도록 각각의 경계면에 대해 대기압($P_{static} = 0$ Pa), 15 cm높이의 수두압에 해당하는 압력조건($P_{static} = 0.015$ bar)를 부여하였다. 해석에 있어 공기방울(bubble)의 직경은 3 mm로 가정하였고, 난류모델은 유동의 박리를 정확하게 예측한다고 알려져 있는 k- ω based SST(Shear stress transport) 난류모델을 사용하였다.

Fig. 2는 이젝터부에서의 압력장과 공기/물에 대한 속도장을 그림으로 표현한 것이다. 물이 들어오는 입구단에서의 30 kPa 이상의 높은 압력이 벤츄리를 지나면서 -10 kPa 이하의 진공압까지 떨어지는 현상이 관찰되며, 이러한 경향은 유량이 커질수록 더욱 심화되어 국부적 압력이 수증기압 이하로 떨어질 경우 cavitation이 발생할 수도 있음을 예상할 수 있다.

Fig. 3은 고유량 조건(1014 l/min)에서의 이상유동에 대한 압력장과 속도장을 보여준다. 벤츄리목에서 형성된 진공압은 이후 유로가 점차적으로 넓어져 압력이 회복됨에 따라 후단부에서 더 이상 관찰되지 않으나 속도장에서 관찰되는 바와 같이 국부적인 역류현상이 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 물의 국부적 역류 현상은 벤츄리 목에서의 급격한 압력강하에 기인하며

Fig. 2. Pressure and velocity fields in ejector (317 ℓ /min of water flow rate).

이젝터 내부의 작은 원형관으로 들어오는 공기와의 상호마찰작용에 의해 공기방울을 형성하는 것으로 분석된다. 일반적으로 역류현상은 관내유동에서 부정적 영향을 끼치나 이젝터 유동에서는 이러한 국부적 역류가 버블의 미립화에 오히려 긍정적 영향을 끼치는 것으로 사료되며 이에 대한 검토는 자유표면해석을 통해 좀 더 구체적으로 확인해 볼 필요가 있다.

4. 공기유입량 정량화 및 가시화 실험

4.1 실험장치 및 방법

전산 해석을 통해 확인된 이젝터에서의 공기 유입 현상을 비교 검증하기 위해 본 연구에서는 Fig. 4, Fig.

Fig. 3. Pressure and velocity fields in ejector (1014 ℓ /min of water flow rate).

Fig. 4. Schematic diagram of experimental setup for two-phase flow visualization.

5와 같이 실험 장치를 구성하여 이젝터 내부에서의 이상 유동 현상을 가시화 하고공기의 유입 유량을 정량적으로 측정 하였다.

저유량 실험으로 400 ℓ 의 수조에 저장된 물을 순환시키기 위해 펌프(한일, PA 930)를 설치하였다. 펌프의 유량을 제어하기 위해 펌프 출구에 밸브를 설치하였고 밸브의 후류 부분에 면적 유량계(한국유량계공업, DAF 65A)를 설치하여 펌프에 의해 순환되는 물의 유량을 측정할 수 있도록 하였다. 유량계의 후단부에는 관내 균일 유동을 형성하기 위해 strainer를 설치하였고, 벤츨리부와 벤츨리 후류 부분은 아크릴 가공하여 Fig. 6과 같은 측정부를 제작하여 유동가시화가 가능하게 하였다. 공기가 유입되는 배관의 입구에는 공기 유량계(한국 아토셀(주), ALD1-S-2)를 별도로 설치하여 물의 유량을 변화 시켜가면서 유입되는 공기의 유량을 측정하였다. 고유량 실험으로 용량이 확대된 물 펌프(한일, HVP-86115)를 설치하였다. 펌프의 흡입은 입구직경 65 mm, 출구직경은 50 mm 로써 양정은 45 m, 15 마력

Fig. 5. Experimental set-up for annular type ejector.

의 펌프를 채택하였고, 유량을 제어하기 위해 Bypass 라인을 및 밸브 및 물 유량계의 전류 및 후류 부분에 물의 이송이 충분하도록 4D/6D으로 유량의 안정화를 고려하여 면적 유량계(Kobold,D-65179 ,Hofheim)를 설치하였다. 또한 이젝터의 성능 평가를 위하여 3군데의 압력도 같이 측정하도록 설치되었다. 압력계는 PT 1/4인치로 체결홀을 내었고, 파워 서플라이를 통하여 출력은 4~20 mA로 신호를 얻을 수 있도록 제작되었다. 측정위치로는 Strainer 바로 뒷부분과 공기가 흡입되는 부분, 가시화 구간 끝단에서 측정이 가능하게끔 설계되었다. 데이터의 로깅은 공기 유량계에서 추출한 전 기신호를 National instrument 사의 DAQ 보드에 연결하여 컴퓨터로 전송하였고, 사용된 인터페이스는 Labview signal express를 이용하여 공기와 물의 유입량 데이터를 수집하였다. 유동 가시화를 위한 벤츨리부의 후류에는 Fig. 7에서 보여지는 것과 같이 아크릴 원형 배관의 주위로 물이 채워진 부피 50×20×32 cm의 사각 수조를 설치하여 이미지의 왜곡 현상을 최소화 하였다. 이상 유동의 가시화를 위한 광원으로는 12 W 용량의 LED 조명을 사용하였고 고속 카메라(PCO, 1200 hs)를 이용하여 900 fps의 속도로 기포의 그림자

Fig. 6. Pictures of test section.

Fig. 7. The installation of high speed camera and LED light source I.

이미지를 획득하였다. 또한 획득한 이미지를 이용하여 이미지 상호 상관기법을 통해 기포의 유량 변화에 따른 기포의 속도장을 추출하였다.

4.2 실험결과 및 고찰

Fig. 8는 고속 카메라를 이용해 획득한 아크릴 배관 내부의 기포의 그림자 이미지와 각각의 실험조건에 대해 1000장의 이미지를 이용하여 추출한 기포의 평균 속도장을 보여 주고 있다. 물의 유량이 증가 할수록 유입되는 공기 유량이 증가하여 공기 기포의 양이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이미지 처리 기법을 적용하여 구한 기포의 평균 직경은 유량 변화와 관계가 없이 2~3 mm 수준이었다. 전산유체해석 결과와 마찬가지로 이젝터를 통해 유입된 기포는 부력으로 인해 위로 상승하는 현상이 관찰되었다. 물의 유량이 작을수록 파이프 하부의 void fraction 이 낮게 나타났고, 유량이 증가할수록 액체 유동의 속도가 빨라져 큰 관성력에 의해 기포가 관 전체에 균일하게 퍼지는 경향을 보였다.

Fig. 8의 오른쪽 부분에 보이는 기포의 유동방향 평균속도 벡터는 기포 거동의 정량적인 특성을 보여주고 있다. 여기서 구한 속도 벡터는 기포들이 원형 파이프 내에서 이동하고 있을 때 후방 조명에 의한 기포의 회절 영상으로부터 얻어진 속도이므로, 원형단면 전체의 기포 이동속도가 평균된 값으로 간주할 수 있다. 전반적으로 물의 유량이 증가할수록 기포의 속도도 증가하는 경향을 보인다. 파이프의 상하 벽면근처에서는 점착 조건의 영향으로 기포의 이동 속도가 줄어들고 있다. 기포의 최대 이동속도는 약 1.2 m/s로 모든 실험조건에서 거의 동일한 값을 보였다. 주변의 액체유동 속도가 증가하더라도 기포의 이동속도는 임계치를 보이고 있으며 이는 버블의 항력이 속도에 비례하여 증가하기 때문인 것으로 분석된다. 물의 유량이 최소인 경우 Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이 관성력에 비해 중력의 효과가 상대적으로 커져서 기포들은 수직방향으로 상승하면서 이동하므로 관 하부의 기포이동속도는 상부에 비해 낮은 값을 보인다. 반면 물의 유량이 최대인 경우, Fig. 8(d)에서 보이듯이 파이프의 전단면에 걸쳐 매우 균일한 기포이동 속도 분포를 보인다.

Fig. 9는 고유량 운전조건에서 고속카메라로 기포의 그림자 이미지를 1000장의 이미지를 추출하여 기포의 평균 속도장을 보여 주고 있다. 마찬가지로 물의 유량

Fig. 8. Shadow images of air-water two-phase flow and ensemble averaged velocity fields of air bubble (a) 160 ℓ/min (b) 200 ℓ/min (c) 240 ℓ/min (d) 300 ℓ/min .

이 증가할수록 유입되는 공기 유량이 증가하여 공기 기포의 양이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 기포의 이동속도는 약 2.4~2.8 m/s로 실험에서 평균적인 값을 나타냈으며 버블의 양이 이전보다 확연히 많아짐에 따라 버블의 그림자 영상이 명확하지 않아 양호한 속도 벡터를 얻어내지 못하였다. 실험에서 얻어진 기포의 이동속도는 전산해석에서 얻어진 속도에 비해 낮은 값을 보였다. 그 이유는 전산에서의 공기유입량 예측이 실험보다 약간 높게 예측되었기 때문이다. 이 외에도 수치해석상의 공기와 물의 경계면에서 같은 속도를 공유한다고 가정하는 homogeneous model의 자체적 특성에 기인할 수도 있다. 본 연구에서 얻어진 기포이동속도는 기포의 개괄적인 거동을 파악하는데 충분히 유

용한 데이터를 제공하며, 이상 유동에 대한 전산해석 수행 시 기체, 액체 계면조건 등 다상유동 모델을 검증하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

Fig. 10은 전산 해석과 실험을 통해 측정된 이젝터 입구로 유입되는 물의 유량 변화에 따른 공기 유량 변화를 비교한 그래프이다. 공기의 유입유량은 실험은 대기압 상태에서 측정하였으며 공기유량 158 ℓ/min 일 때의 공기의 질량유량은 약 0.0032 kg/s의 수준이었다. 물의 유량이 증가할수록 벤츨리부에서의 정압이 낮아져 유입되는 공기의 유량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 물의 유량이 280~340 ℓ/min 범위에서 유입된 공기의 유량은 110~170 ℓ/min 의 범위로 선형적인 비례관계를 보였다. 전반적으로 전산해석 결과가 실험결과 보다

Fig. 9. Shadow images of air-water two-phase flow and ensemble averaged velocity fields of air bubble (a) 753 ℓ/min (b) 823 ℓ/min (c) 915 ℓ/min (d) 1014 ℓ/min .

공기측 유입량을 다소 높게 예측하였다. 물의 유량이 283 ℓ/min 일 때 유입되는 공기의 유량은 실험 결과와 전산해석결과 사이에 3%정도의 차이를 나타내고 있으며, 유량이 333 ℓ/min 로 증가하면 10% 정도의 차이를 보인다. 물의 유량이 670~1014 ℓ/min 범위에서 유입된 공기의 유량은 200~468 ℓ/min 의 범위로 선형적인 비례관계를 보였다. 물의 유량이 1014 ℓ/min 일 때 유입되는 공기의 유량은 실험 결과와 전산해석결과 사이에 10%정도의 차이를 나타내고 있으며, 유량이 670 ℓ/min 인 경우에는 오차의 범위가 커지는데 이는 고유량

펌프의 저속운전에서 오는 시스템의 불안정화에 기인한다고 생각된다. 전반적으로 기체의 흡입유량에 대한 전산해석 결과와 실험결과를 비교한 결과 10% 오차 범위에서 일치하였고, 이러한 오차는 실제 시스템을 설계할 경우 용인될 수준이라고 판단된다.

5. 결 론

기체 흡입을 위한 환형 이젝터 Loop를 설계 및 제작하였고, 두 종류의 펌프를 사용하여 넓은 유량 범위

Fig. 10. Quantitative comparison between CFD & Experimental results.

에서 기체유입성능을 검증하기 위해 물-공기이상유동에 대한 전산해석과 유동가시화 실험을 수행하였다.

전산해석 및 실험에서 액체의 유량증가에 따른 기체 유입 유량은 선형적 관계를 보였으며, 최대 10% 이내에서 전산해석과 실험 결과가 일치하였다. 전체 유량 조건에 대해 전산해석이 일관성을 가지면서 다소 높은 유입유량을 예측하였으므로, 이상유동 모델의 수정으로 계산과 실험의 차이를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 고속카메라를 이용한 유동가시화 실험으로 기포의 거동, 기포의 크기 및 이동속도를 정량적으로 구하였다. 기포의 최대 이동속도는 액체 유량이 증가할 때 1~3 m/s로 증가하였으나 유량 증가 비율보다는 현저히 낮음을 확인하였다. 실험조건의 범위내에서 기포의 평균직경은 2~3 mm로 일정함을 발견하였다. 하지만 물의 유량이 증가할수록 기포의 밀도가 증가하였고, 이동속도가 파이프 전체에 대해 균일하게 분포되었다. 밀도차에 의한 부력효과는 액상유동의 속도가 낮을 때 전산해석 및 실험에서 모두 현저하게 나타났다. 기포 거동에 대한 보다 엄밀한 해석을 위해서는 광섬유 프로우브에 의한 국소적 기포변화 및 거동 측정 등 추가 실험이 필요하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지

지기술평가원 (KETEP) 의 지원 (No. 2010-2020100470, No. 2011-00017760001)과 2011년도 2단계 두뇌한국 (BK)21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- 1) Lee, S. Q. and Rangaiah, G. P., 2009, "Optimization of Recovery Processes for Multiple Economic and Environmental Objectives", Ind. Eng. Chem. Res., Vol.48, pp.7662~7681.
- 2) Sarshar, M. M. and Beg, N. A., 2000, "The Applications and Performance of Jet Pumps in Oil and Gas Production Handling Multiphase Flow", 2nd North American Conference on Multiphase Technology, Banff, Canada.
- 3) Schmidt, D., Colarossi, M. and Bergander, M.J., 2009, "Multidimensional Modeling of Condensing Two-Phase Ejector Flow", International Seminar on Ejector/Jet Pump Technology and Applications, Paper No. 34.
- 4) Zha, S., Jakobsen, A., Hafner, A. and Neksa, P., 2007, "Design and Parametric Investigation on Ejector for R-744 Transcritical System", International Congress of Refrigeration.
- 5) Bonnington, S. T., 1964, "A Guide to Jet Pump Design", Br. Chem. Eng., Vol. 9, pp.150~154.
- 6) Witte, J. H., 1965, "Efficiency and Design of Liquid Gas Ejectors", Br. Chem. Engng., Vol. 10, pp.602~607.
- 7) Ben Brahim, A., Prevost, M and Bugarel, R., 1984, "Momentum Transfer in a Vertical Down Flow Liquid Jet Ejector: Case of Self Gas Aspiration and Emulsion Flow", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 10, No. 1, pp.79~94.
- 8) Acharjee, D. K., Bhat, P. A., Mitra, A. K and Roy, A. N., 1975, "Studies on Momentum Transfer in Vertical Liquid-jet Ejectors", Ind. J. Technol. Vol. 13, pp.205~210.
- 9) Arunagiri, A., Regupathi, I. and Murugesan, T., 2008 "Gas Holdup and Energy Dissipation in Liquid-Gas Ejectors", J. Chem Technol.Biot.,Vol. 83, pp.1064-1071.
- 10) ANSYS CFX, Release 12.1, www1.ansys.com/customer/content/documentation/121/cfx/xtuttr.pdf