한국가시화정보학회지, 제9권, 제2호, (2011) 54~60
<일반논문> (투고일: 2011.06.07/수정일: 2011.06.27/심사완료일: 2011.06.29)
DOI : 10.5407/JKSV.2011.9.2.054

VOC 회수를 위한 이젝터 시스템에 관한 수치모사 및 실험적 연구

김현동* · 이동엽* · 김윤기* · 정원택* · 안주하** · 김경천†

Numerical Simulation and Experimental Study on an Ejector System for VOC Recovery

Hyun Dong Kim, Dong Yeop Lee, Yoon Kee Kim, Won Taek Jeong,
Joo Ha Ahn and Kyung Chun Kim

Abstract. This paper is a basic study on volatile organic compounds(VOC) recovery system in a crude oil carrier. VOC is easily evaporated in cargo tankers during loading and transportation of crude oil, causes serious environmental contamination and a huge economic loss. An ejector system is designed to mix VOC gas into crude oil flow to reduce VOC concentration. Detail two-phase flow inside the ejector is simulated using a commercial CFD code. To verify the numerical prediction, a scale-down experiment is conducted. Instead of crude oil and VOC, water and air are used as the working fluids. Flow characteristics and main parameters are obtained by two-phase flow visualization and PIV measurements. Air volume flow rate induced by the ejector is compared with respect to the volume flow rate of water using experimental and numerical results. Overall performance of the two-phase ejector predicted by the CFD simulation agrees well with that of the experiment.

Key Words: Two Phase Flow (이상유동), Ejector (이젝터), Flow Visualization (유동가시화), Numerical Simulation (수치해석)

1. 서 론

Volatile Organic Compounds (VOC)는 일반적으로 상온 상압에서 액체나 고체, 기체 상태로 존재할 수 있는 탄화 수소계, 할로겐 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[1~3].

특히 원유운반 과정에서 유조선의 유류 저장탱크 내부에 저장된 원유로부터 발생하는 VOC는 메탄, 에탄, 프로판, 부탄, 펜탄 가스 등이 주를 이루고 있으며, 이러한 VOC는 상온/상압에서 쉽게 기화되어 저장탱크의 압력을 상승시킨다. 통상적인 유조선 원유 저장탱크 내부의 허용 최대 압력은 게이지압으로 20 kPa 수준이며, VOC의 과도한 기화로 인한 폭발의 위험성을 방지하기 위해 안전밸브를 설치하여 내부 압력이 게이지 압력으로 14 kPa 이상 상승할 경우 밸브를 개방하여 대기중으로 VOC 가스를 방출함으로써 저장탱크의 내부 압력을 제어하는 방식을 적용해 왔다.

그런데 최근의 보고에 따르면, 이와 같은 방식으로 방출된 VOC 가스는 심각한 경제적 사회적 문제를 야기하는 것으로 알려져 있다. 원유에서 발생하는 VOC 주성분 중 하나인 메탄에 의한 온실효과는 이산화탄소의 21배 수준인 것으로 보고되고 있으며, 대기 중의 질소 화합물과 반응하여 독성물질인 Ground-level Ozone 및 부유 입자들을 생성하여 인체와 생태계 전반에 치명적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[1].

또한 원유 수송과정에서 대기 중으로 방출하는 VOC 가스의 양은 10만 톤급 유류 운반선을 기준으로 하루에 3900 kg 수준으로 경유로 환산했을 시 4,700리

†부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr
*부산대학교 일반대학원 기계공학과
**탱크테크(주) 기술연구소

터에 해당하는 것으로 보고되고 있으며, 2006년 한 해 동안 전 세계 원유 수송과정에 이와 같은 방식으로 손실된 원유는 2천 5백만 배럴로 대형 유조선 20척에 적재할 수 있는 양과 동일한 양으로 집계되었다. 최근의 에너지 원자재 가격 상승 추세에 비추어 볼 때 유조선에서의 VOC 가스의 대기 방출로 인한 경제적 손실은 천문학적으로 증가 할 것으로 판단된다[2].

이러한 이유로 현재까지 유류저장탱크 내부에 서 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[3].

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 재액화되도록 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[4-6].

2상 이젝터(two-phase ejector)에 관한 선행연구로서 김[7]등은 상용코드인 FLUENT 6.2를 사용하여 가스-액체(gas-liquid) 2상 모델링(two phase modelling)을 시도하였다. 이 연구그룹에서는 Primary 유체인 물의 공급유속과 suction 유체인 공기 입구쪽의 압력을 조절하면서 수치해석을 수행한 결과 실험과 비슷한 결과를 얻었다고 보고한 바 있다. Bulinski[8] 등은 이산화탄소 이젝터(CO_2 ejector) 내부에서 발생하는 증발과 응축 현상을 Rayleigh-Plesset 방정식을 이용하여 수치해석을 수행한 결과를 실험과 비교하였다. Balamurugan[9] 등은 공기/물 2상 이젝터에 대한 실험적 연구를 수행하여 자체적으로 세운 준 경험식과 비교하여 잘 일치하는 결과를 얻었다.

본 연구에서는 이러한 VOC 회수 시스템 개발을 위한 기초 연구로서 관내 유동에서 벤츄리 부분에서의 진공 현상을 이용하여 상대적으로 고압인 VOC 가스를 유입시켜 원유와 혼합 시킬 수 있는 이젝터의 형상을 설계 하였다. 그리고 이젝터 내부의 유동 특성과 혼합 현상을 파악하고 성능을 예측하기 위해 전산해석을 수행하였으며, 이젝터 내부의 이상 유동에 대한 가시화 실험을 병행하여 유량과 압력 변화가 기체-액체 이상 유동 현상에 미치는 영향을 파악하였다.

2. VOC 회수 시스템

Fig. 1은 본 연구에서 제안한 유류저장탱크 내부에서 발생하는 VOC 회수를 위한 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 원유 펌프를 통해 원유 저장탱크의 기저부로부터 나온 원유는 이젝터 모듈을 거치면서 원유 탱크 상부에 모여 있던 고압의 VOC 가스와 혼합 되어 다시 원유 탱크의 기저부로 공급 된다. 이와 같은 방식으로 원유 저장 탱크에 공급된 VOC 기포는 부력에 의해 상승하면서 자연적인 재액화를 통한 회수 방식을 반복하게 된다. 이러한 방식의 VOC 회수 시스템에서 회수 효율을 높이기 위해서는 압력 차이에 의해 유입되는 VOC 가스의 유량을 최대화해야 하며, VOC

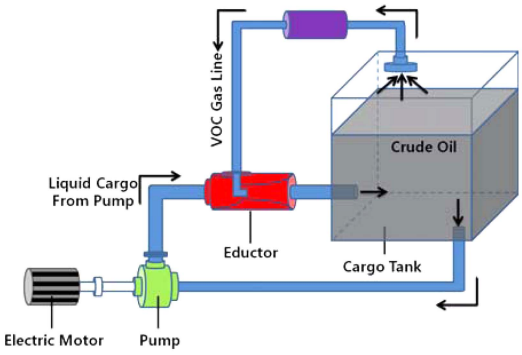


Fig. 1. Schematic diagram of VOC recovery system.

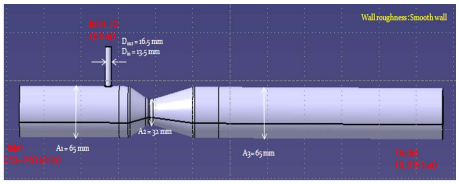


Fig. 2. Detail specification of ejector mixer unit.

기포의 크기를 최소화 하여 기포가 상승하는 동안 모두 재액화 되도록 하여야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위한 시스템에서 가장 핵심이 되는 부분은 이젝터 모듈이라 할 수 있으며 내부의 형상 및 유동 특성에 시스템 특성이 결정된다.

Fig. 2는 본 연구진이 제안한 이젝터 모델의 개략도를 보여 주고 있다. 실제 선박에서 사용되고 있는 원유펌프의 압력과 유량이 8 bar, 750 m^3/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 유동 전산해석

본 연구는 VOC 회수시스템 개발을 위한 기초연구로서 최종 목표는 실제 스케일에서의 가스유입량을 정확히 예측하여 최적의 이젝터 형상을 구현하는데 있다. 이러한 시도는 실제스케일에서의 VOC 회수시스템 개발에 있어 시행착오를 줄임으로써, 시스템 개발에 따른 비용을 절감할 수 있다는 점에 의의가 있다.

본 연구에서 목적으로 하는 공기/물 다상유동을 해석하기 위해 범용 유동해석코드인 ANSYS CFX v12.0을 사용하였다. 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. 2에 나타난 이젝터 형상을 바탕으로 하였으며, 공기가 유입되는 Inlet_IG, 물이 유입되는 Inlet, 버블/물이 공존하여 배출되는 Outlet에서의 경계조건으로는 실험과 동일하도록 각각의 경계면에 대해 대기압($p_{static}=0\ pa$), 질량유량($\dot{m}=5.54\ kg/s$), 15 cm높이의 수두압에 해당하는 압력조건인 $p_{static}=0.015\ bar$을 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. 3은 앞에서 적용한 경계조건을 바탕으로 펌프에서 토출되는 유량이 최대(330 l/min, 5.54 kg/s)일때의 유동해석 결과를 나타낸다. 그림에서 좌측에 있는 원형 덕트로부터 물이 공급되고 있으며, 벤츄리부에 형성되는 진공압력에 의해 공기가 이젝터 가운데 위치해 있는 작은 원형관을 통해 이젝터로 유입됨을 알 수 있다. 이젝터 후단부에서 공기가 차지하는 부피분율(volume fraction)은 약 0.5가 되며, 이젝터에서 멀어질수록 중력의 효과가 서서히 나타나 공기방울들이 중력 반대방향으로 뜨는 현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 4는 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. 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 역류현상은 벤츄리 목에서의 급격한 압력강하에 기인하며 이젝터 내부의 작은 원형관으로 들어오는 공기

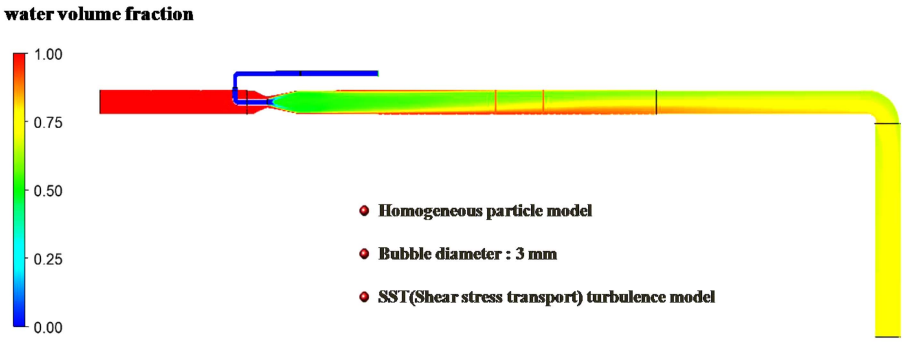


Fig. 3. CFD result(water volume fraction).

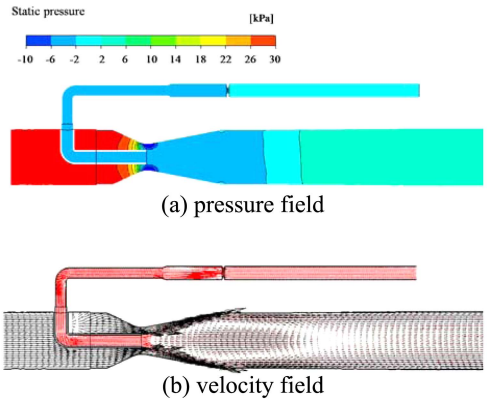


Fig. 4. Pressure and velocity fields in ejector.

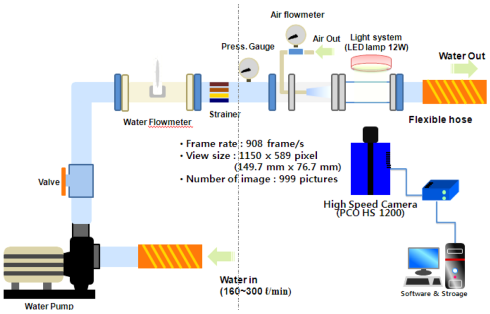
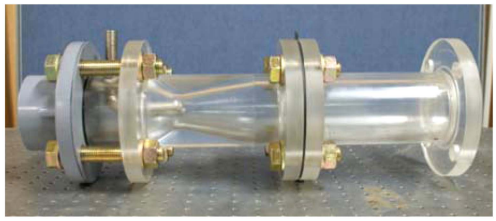


Fig. 5. Schematic diagram of experimental setup for two-phase flow visualization.



(a) side view

(b) front view

Fig. 6. Pictures of test section.

와의 상호마찰작용에 의해 공기방울을 형성하는 것으로 분석된다. 일반적으로 역류현상은 관내유동에서 부정적 영향을 끼치나 이젝터유동에서는 이러한 국부적 역류가 버블의 미립화에 오히려 긍적적 영향을 끼치는 것으로 사료되며 이에 대한 검토는 free surface 해석을 통해 좀 더 구체적으로 확인해 볼 필요가 있다.

4. 공기유입량 정량화 및 가시화 실험

4.1 실험장치 구성

전산 해석을 통해 확인된 이젝터에서의 공기 유입 현상을 비교 검증하기 위해 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 실험 장치를 구성하여 이젝터 내부에서의 이상 유동 현상을 가시화 하고 공기의 유입 유량을 정량적으로 측정 하였다.

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, 벤츄리부와 벤츄리 후류 부분은 아크릴을 가공하여 Fig. 6와 같은 측정부를 제작하여 유동가시화가 가능하게 하였다. 공기가 유입되는 배관의 입구에는 공기 유량계(한국아토셀(주), ALD1-S-2)를 별도로 설치하여 물의 유량을 변화 시켜가면서 유입되는 공기의 유량을 측정하였다.

유동 가시화를 위한 벤츄리부의 후류에는 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, 1200hs)를 이용하여 900 fps의 속도로 기포의 그림자 이미지를 획득하였다. 또한 획득한 이미지를 이용하여 이미지 상호 상관기법을 통해 기포의 유량 변화에 따

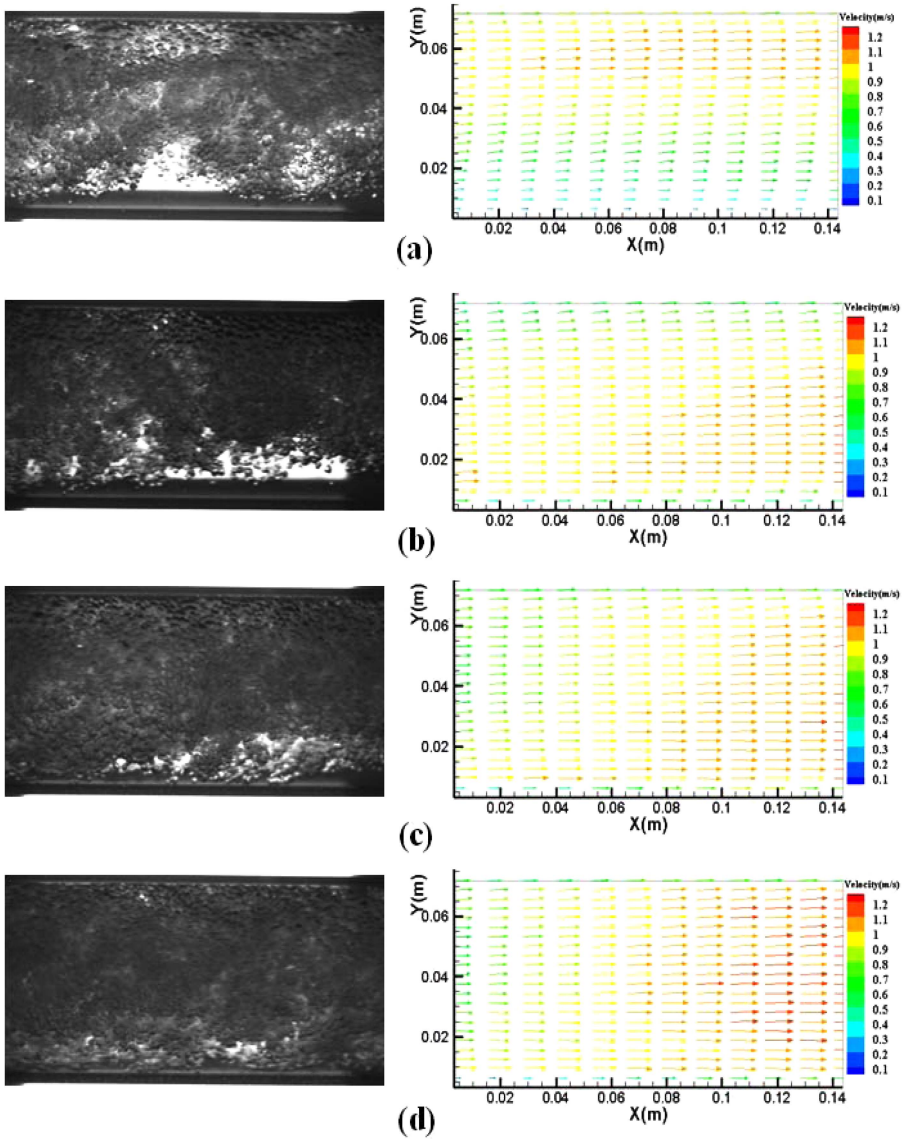


Fig. 7. Shadow images of air-water two-phase flow and ensemble averaged velocity fields of air bubble (a) 160 *l*/min (b) 200 *l*/min (c) 240 *l*/min (d) 300 *l*/min.

른 기포의 속도장을 추출하였다.

4.2 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 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 위쪽으로 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. 7의 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 점착조건의 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. 7(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. 7(d)에서 보이듯이 파이프의 전단면에 걸쳐 매우 균일한 기포이동 속도 분포를 보인다.

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. 보다 정확한 결과는 광섬유 probe 에 의한 국소기포거동 측정을 수행하여 구해야 하며, 현재의 기포이동속도는 기포의 개괄적인 거동을 파악하는데 충분히 유용한 데이터를 제공한다. 현재의 연구 결과는 향후 이상 유동에 대한 전산해석 수행 시 기체, 액체 계면조건 등 다상유동 모델을 검증하기 위한 기초자료로 활용할 계획이다.

Fig. 8은 전산 해석과 실험을 통해 측정된 이젝터 입구로 유입되는 물의 유량 변화에 따른 공기 유량 변화를 비교한 그래프이다. 공기의 유입유량은 실험은 대기압 상태에서 측정하였으며 공기가 최대유량(약 158 *l*/min)일때의 공기의 질량유량은 약 0.0032 kg/s의 수준이었다. 물의 유량이 증가할수록 벤츄리부에서의 정압이 낮아져 유입되는 공기의 유량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 물의 유량이 280~340 *l*/min 범위에서 유입

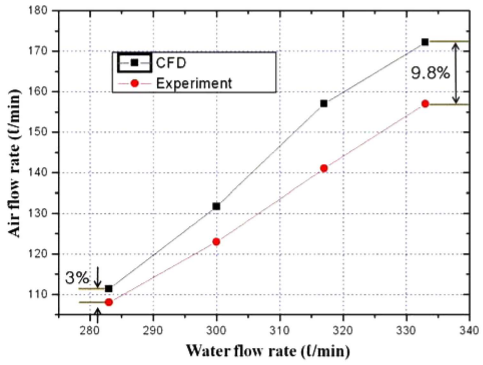


Fig. 8. Quantitative comparison between CFD & Experimental results.

된 공기의 유량은 110~170 *l*/min의 범위로 선형적인 비례관계를 보였다. 전반적으로 전산해석 결과가 실험결과 보다 공기측 유입량을 다소 높게 예측하였다.

물의 유량이 283 *l*/min일 때 유입되는 공기의 유량은 실험 결과와 전산해석결과 사이에 3%정도의 차이를 나타나고 있으며, 유량이 333 *l*/min로 증가하면 10% 정도의 차이를 보이고 있다. 이상 유동 해석의 불확실성을 감안할 때 10% 범위 안에서의 오차는 비교적 정확한 수준의 해석결과라고 생각되며, 나아가 원유를 이용한 실제 스케일에서의 해석 결과의 신뢰성을 보장해 줄 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

원유에서 발생하는 VOC 기체의 회수를 위해 이젝터를 설계하였고, 기체유입성능을 검증하기 위해 물-공기 이상유동에 대한 전산해석과 유동가시화 실험을 수행하였다. 전산해석 및 실험에서 액체의 유량증가에 따른 기체유입 유량은 선형적 관계를 보였으며, 최대 10% 이내에서 전산해석과 실험 결과가 일치하였다. 전체 유량조건에 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. 실험조건의 범위내에서 기포의 평균직경은 2~3 mm로 일정함을 발견하였다. 하지만 물의 유량이 증가할수록 기포의 밀도가 증가하였고, 이동속도가 파이프 전체에 대해 균일하게 분포되었다. 밀도차에 의

한 부력효과는 액상유동의 속도가 낮을 때 전산해석 및 실험에서 모두 현저하게 나타났다. 기포거동에 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 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제임(No. 20102020100470). 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. K20702001648-10E0100-07010)이며 저자중 일부는 BK21 사업의 지원을 받았음.

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) 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
4) 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
5) 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,
6) 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
7) Kim, M. I., Kim, O. S., Lee, D. H., 2007, “Two-Phase Modeling of Gas-Liquid Ejector”, Theories and Applications of Chem. Eng., Vol. 13, No. 1
8) Bulinski, Z., Smolka, J., Fic, A., Banasiak, K., Nowak, A. J., 1010, “A comparison of heterogenous and homogeneous models of two-phase transonic compressible CO2 flow through a heat pump ejector”, Material Science and Engineering, Vol. 10
9) Balamurugan, S., Lad, M. D., Gaikar, V. G., Patwardhad, A. W., 2007, “Hydrodynamics and mass transfer characteristics of gas-liquid ejectors”, Chemical Engineering Journal, Vol. 131, pp. 83-103