

연료 송출용 제트펌프 3차원 전산해석 모델

박다인¹ · 윤진원¹ · 유상석^{2,†}

¹충남대학교 대학원, ²충남대학교 기계공학부

Three Dimensional Simulation Model of Fuel Delivery Jet Pump

DAIN PARK¹, JIN WON YUN¹, SANGSEOK YU^{2,†}

¹Graduate school, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

²School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

†Corresponding author :
sangsgeok@cnu.ac.kr

Received 6 June, 2017

Revised 27 June, 2017

Accepted 30 June, 2017

Abstract >> Jet pump in automotive fuel tank module is used to deliver fuel to fuel pump so that the pump is operated without aeration in suction side. In this study, three dimensional simulation model of jet pump is developed to understand performance variation over design parameters. Performance of jet pump is also investigated experimentally in terms of operating pressures. The experimental data is used to verify the three dimensional simulation model of jet pump. Verification results show that the three dimensional simulation model of jet pump is about 1% error with experiment. The simulations are conducted in terms of throat ratio and primary flow induction angle. As the throat ratio is increased, the flux ratio is trade-off at 3 times of throat diameter. On the other hand, as primary flow induction angle is increased, vapor pressure inside the nozzle is decreased. In summary, the results show that liquid jet pump has to be optimized over design parameters. Additionally, high velocity of induced flow is able to evolve cavitation phenomena inside the jet pump.

Key words : Jet pump(제트펌프), 3D computational analysis(3차원 전산 해석), Flux ratio(유량비), Throat ratio(노즐 목비), Primary flow induction angle(구동부 노즐 유입각), Cavitation(공동현상)

1. 서론

이젝터는 별도의 동력 없이 1차측 유체의 유동으로 2차측 유체를 흡입시킬 수 있는 장치이다. 별도의 구동 장치가 필요 없어 구조가 간단하고, 고장이 적은 반면 전체적인 유동의 최적화가 필수적이며 사용 유체에 따라 다른 물리 현상이 관측된다. 이젝터는 대형 플랜트의 폐증기 활용 산업, 고온 가스 재순환, 제지, 식품, 석유화학 등 다양한

분야에서 외부 구동 장치 없이 유체 유동을 제어해야 하는 부분에 사용되고 있다.

제트펌프는 이젝터의 한종류로 노즐로 분사된 주 유동과, 흡입된 부 유동은 흡입 챔버와 목에서 혼합되고, 디퓨저를 거치면서 속도에너지가 압력 에너지로 환원되어 분출된다¹⁾. 무동력 제트펌프는 항공분야에서 응용되고 있으며, 전산 해석을 통한 설계 최적화 내용들도 보고되고 있다. 하지만 대부분의 전산 해석 모델은 공동현상(cavitation phe-

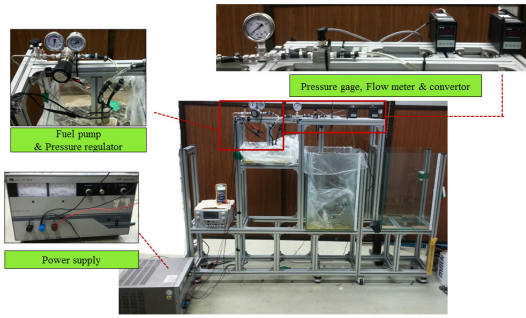


Fig. 1. Experimental apparatus of jet pump performance analysis

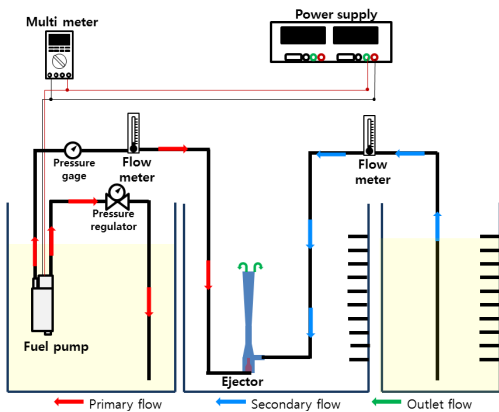


Fig. 2. Schematic of experimental system

nomena)에 대한 고려가 없으며 기하학적 형상변화에 따른 유동 특성 연구가 주로 보고되고 있다²⁾.

가스 형태(기체-액체)의 제트펌프는 오랜 기간 연구가 진행되어 왔으며, 장치의 형상적인 특징으로 인해, 성능 실험과 CFD 해석을 통해 설계 최적화를 하고자 하는 연구가 다수 보고되고 있다³⁻⁸⁾. 액체 제트펌프는 노즐 목으로 고속의 유체가 통과하면서, 압력이 급격히 감소하게 되고, 압력이 증기압보다 낮아지게 되어, 공동 현상이 발생되므로 이에 대한 물리 현상의 이해가 필요하다. Long 등은 액체-액체 이젝터 내에서 공동현상의 세기가 증가하면 한계작동에 이르러, 이 이상에서는 흡입 유량이 출구압력의 감소에 반응하지 않게 되어 이젝터의 작동 범위를 제한하고 이젝터의 효율감소를 야기한다고 보고하였다⁹⁾.

기체 또는 기액 혼합물의 송출 이젝터에 대하여

는 다수의 연구들이 보고되고 있지만, 액체형 제트펌프에 대한 연구는 상대적으로 문헌상 희박하다. 하지만, 전술한 바와 같이 노즐목을 통과하는 고속유체에 의해 공동현상을 유발하게 되고 이는 소음 증가 및 부품 파손으로 연결되기 때문에 설계변수에 따른 성능 특성을 파악하여, 내구성과 소음을 개선하는 연구들이 진행되었다¹⁰⁻¹³⁾.

자동차에서는 연료탱크에 내장된 연료펌프 전단의 액체 유량의 제어가 매우 중요하다. 적정량의 액체가 펌프 흡입측에 공급되어야 공동 현상을 피하고, 펌프의 내구 수명을 보장할 수 있고 또 엔진으로 공급되는 연료 유량의 안정적 공급도 가능하게 된다. 하지만 연료펌프 흡입 측으로의 안정적인 연료 공급을 위해 별도의 펌프를 설치하는 것은 경제성 측면에서 불리하다. 본 연구에서는 차량용 액체연료를 무동력 송출하는 제트펌프의 설계변수에 따른 성능특성을 이해하기 위한 3차원 전산해석 모델을 개발하고자 한다. 문헌 상의 실험결과가 희박하여, 실제 실험을 실시한 후 실험 데이터와의 비교를 통해 모델을 검증하였다. 3차원 해석 모델의 시뮬레이션을 통해 제트펌프의 유량비와 공동현상 특성을 확인하였다.

2. 연료 송출용 제트펌프 성능 실험

2.1 성능 평가 장치의 구성

Fig. 1은 제트펌프 성능 실험의 전체 실험 장치 실험물을 보여주고 있으며 구체적인 모습을 보여주고 있다. 또 Fig. 2는 실험 유체의 흐름과 측정 위치 및 센서 등을 보여주고 있다. 제트펌프 구동을 위해서는 고압의 연료가 주입되어야 하는데, 본 연구에서는 차량용 연료펌프를 사용하여 고압의 유체를 구동노즐로 송출시켰으며, 입구 유로에 압력게이지를 설치하여 구동유체의 압력을 측정하였다. 또, 유속센서를 통해 구동유체의 유량을 측정하였다. 구동유체가 구동부로 분사되면, 흡입구로 2차측 유체가 유입되게 되는데, 여기 흡입유체

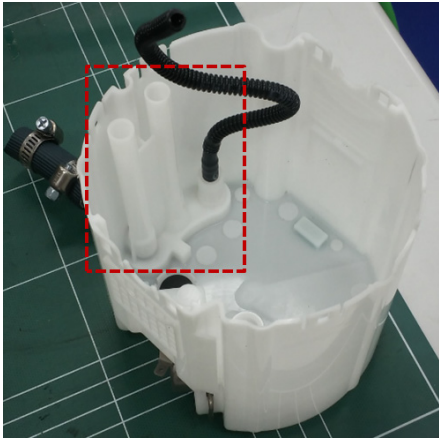


Fig. 3. Jet pump and fuel reservoir

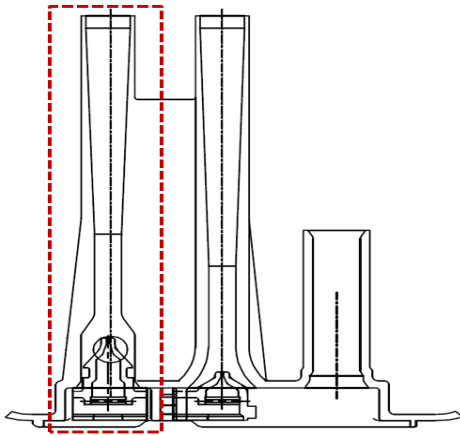


Fig. 4. Fuel ejector tower of CFD analysis (dotted line)

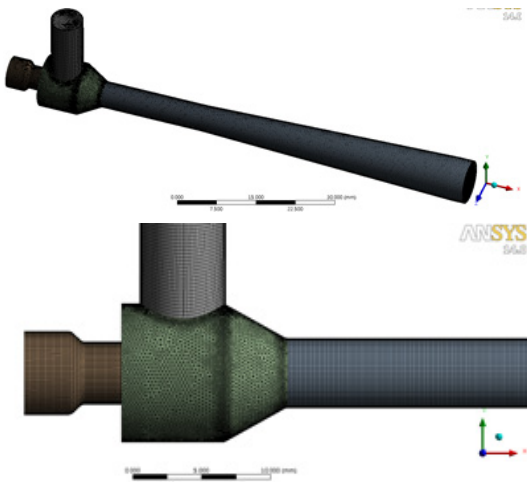


Fig. 5. Grids system of computational model

Table 1. Geometric information of transfer tower¹⁾

Structural parameter	Value	Unit
Primary inlet diameter	6	mm
Secondary inlet diameter	6.2	mm
Throat diameter	5	mm
Outlet diameter	8.3	mm
Total length	91.5	mm

Table 2. Performance of jet pump over variation of pressures

System pressure (kPag)	Jet pressure (kPag)	Primary flux (LPH)	Secondary flux (LPH)	Flux ratio
200	300	20.15	124.95	6.20
300	400	25.00	189.71	7.59
400	500	29.89	296.42	9.91
500	600	34.13	381.25	11.17

의 유로에도 유속센서를 설치하여, 흡입유체의 유량을 측정하였다.

Fig. 1과 2는 실제 실험장치의 구성을 나타낸다. 전원공급기에서 연료펌프로 전원을 공급하고, 제트펌프의 구동유체가 흐르는 유로에 압력계이지와 유속센서를 설치하였다. 또한, 구동유체와 흡입유체의 유속측정을 위해 계측용 컨버터를 설치하였다.

2.2 성능 평가용 제트펌프

Table 1에는 제트펌프의 형상정보를 보여주고 있으며 전체 길이가 91.5 mm로 매우 작은 펌프이다. 제트펌프는 COAVIS 사의 양산품을 사용하였다. 실험에서 사용하는 제트펌프는 두 개의 타워를 사용하고 있으며 Fig. 3에는 성능 실험장치에 사용된 제트펌프와 레저버를 보여주고 있다. 그림의 붉은 점선이 실제 실험 및 해석에 사용된 부분으로, Fig. 4에는 붉은 점선을 이용해 그 해석 대상을 보다 명확히 표시하였다. Fig. 2에 보여지는 제트펌프 성능 측정 실험에서는 제트펌프 압력과 시스템 압력을 구분하였으며, 시스템 압력은 펌프 출구단 송출부 압력을 의미하고, 제트 압력은 펌프 입구단 압력을 의미하며, 제트펌프 통과 연료 유량은 로터

미터를 이용해 측정하였다.

제트펌프의 성능 측정을 위해서는 연료펌프로 인가되는 전압을 12 V로 고정시키고 제트펌프 송출부 쪽의 밸브를 조절하여 압력을 세팅하였으며 실험은 게이지 압력으로 200 kPa에서 500 kPa까지 실시하였다. 제트펌프의 성능 지표는 유량비(flux ratio)로 구동부 유속(primary flux)에 대한 흡입부 유속(secondary flux)의 비를 의미한다. 동일한 조건에서 유량비가 클수록 제트펌프의 성능이 우수한 것으로 볼 수 있다.

3. 연료 송출용 제트펌프 전산해석 모델

3.1 수치 해석용 3차원 격자 및 해석 모델

Fig. 4는 두 개의 타워 중 CFD 해석 범위인 트랜스퍼 타워를 나타낸다. 양산품의 두 개의 타워 중, 옆의 연료탱크에서 끌어오는 트랜스퍼 타워만을 고려하여 본 CFD 해석과 결과 비교를 위한 해석을 진행하였다.

설계 변수에 따라 차이가 있기는 하지만, 격자 수는 1,365,869-1,445,356 사이에서 결정하였으며, 격자는 Quad 형상을 채용하였고, 흡입 챔버의 격자는 형상의 복잡성으로 인해 Tetra 격자를 사용하였다. 격자의 질을 보여주는 Orthogonal quality가 0.93, 평균 skewness가 0.16 등으로 해석 상에는 적절한 격자로 보여진다¹⁴⁾. Fig. 5는 제트펌프의 격자 구조를 보여주고 있다.

연료 송출용 제트펌프 유동해석을 위해 Fluent[®]를 사용하였으며, 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- 1) 유동은 정상상태를 가정하고, 전산 해석을 위한 입출구단 경계조건은 압력조건으로 설정하였다.
- 2) 구동유체 압력은 400 kPa_g, 흡입구와 출구의 압력은 대기압으로 설정하였다.
- 3) 구동유체 흐름에 따른 내부의 유동 특성을 분석하고자 난류 모델인 Realizable k-ε 모델을 적용하였다.
- 4) 공동 현상 모델은 Fluent에서 제공되는 5가지

Table 3. Computational conditions

Variable	Parameters
Primary inlet pressure	400 kPag
Secondary inlet pressure	0 kPag
Outlet pressure	0 kPag
Turbulent model	Realizable k-ε model
Cavitation model	Zwart-Gerber-Belamri model
Running fluid	Gasoline

Table 4. Comparison of CFD model with experimental data (Fluid: gasoline)

	Primary velocity (m/s)	Primary flux (LPH)	Secondary flux (LPH)	Flux ratio
CFD model	0.272	15.48	175.31	11.32
Experiment	0.270	15.41	176.33	11.44
Error (%)	0.45	0.45	0.58	1.08

모델과 실험결과를 비교하여, 가장 오차가 낮은 Z.G.B 공동현상 모델을 적용하였다.

이상의 해석 조건은 Table 3에 표시하였다.

3.2 해석 모델 검증

전산 해석 모델의 정확성 판단을 위해 모델 해석 결과와 실험결과를 비교하였다. 연료로는 가솔린을 사용하였으며, 성능 실험시 구동속도는 0.272 m/s로 설정하여 구동 유량을 15.48 liter/hour (LPH)로 정하였다. 실험의 안정화를 위한 샘플링은 15분 간격으로 획득하여 충분히 정상상태에 도달한 후 데이터 획득이 될 수 있도록 하였다.

Table 4는 성능 실험결과와 동일한 조건에서의 해석결과를 나타내었다. 실험결과와 해석결과를 비교해보면 유속비에서 최대 1.08% 이하의 오차가 발생한다는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 본 해석 모델이 전산해석을 진행하기에 적절한 모델로 판단된다.

3.3 3차원 해석결과

제트펌프는 구동유체를 이용하여 주변의 유체를 다른 곳으로 보내는 것인 만큼, 구동 유량에 비

해 흡입 유량이 많을수록 높은 성능을 가지므로, 유량비는 제트펌프의 성능지표이다. 노즐 목비란 제트펌프 목의 길이를 목의 직경으로 나누어준 값으로 통상 공동 현상이 노즐 목 유입부에서 시작

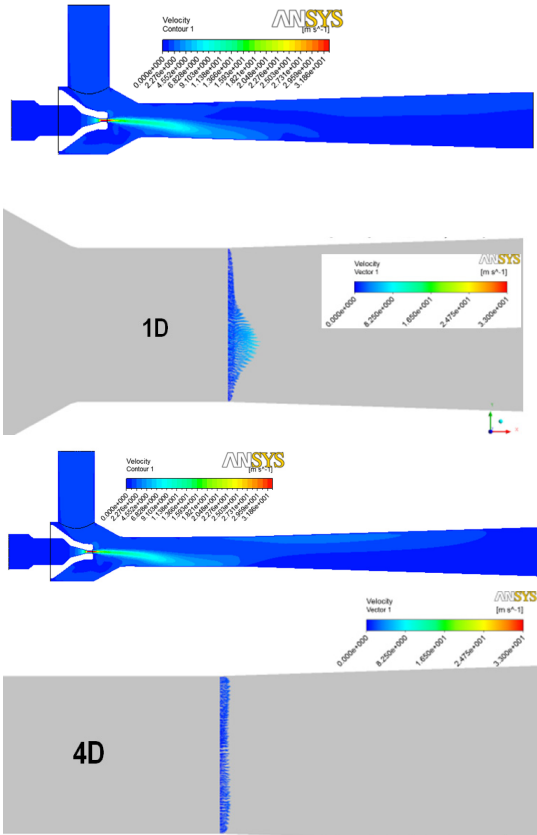


Fig. 6. Overall velocity contour and velocity vector at throat section of jet pump (primary flow = 13.98 LPH)

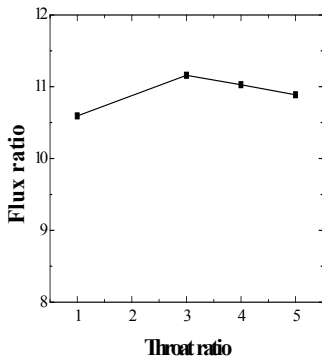


Fig. 7. Flux ratio in terms of throat ratio (primary flow = 13.98 LPH)

되고 전파되기 때문에 목비 변화에 따른 영향을 확인할 필요가 있다. 또, 구동 노즐의 각도에 따라 1차측 유입 유체의 유속과 압력 분포가 결정되기 때문에 이에 대한 영향도 확인하고자 한다.

Fig. 6은 구동부(1차측) 유량을 고정하고 노즐 목비를 지금의 1에서 5배까지 증가시켜 가면서 해석한 결과 중 주요 변인이 발생하는 목비 1D와 4D



Fig. 8. observation section of primary nozzle induction angle

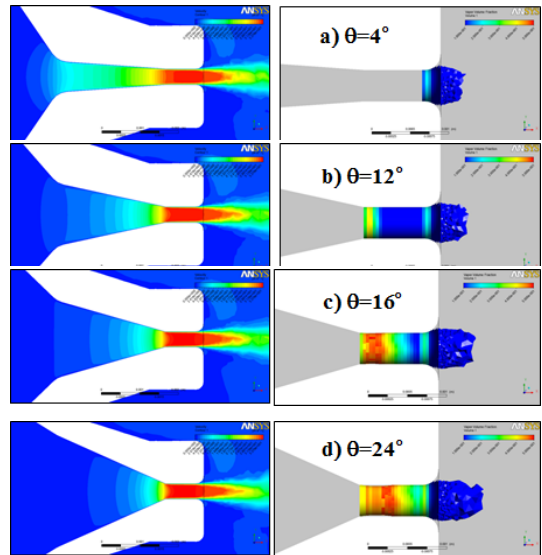


Fig. 9. Cavitation along jet nozzle in terms of induction angle (θ)

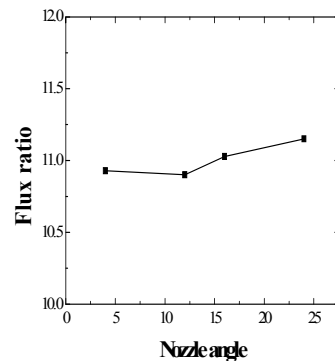


Fig. 10. Flux ratio in terms of nozzle angle (primary flow = 13.98 LPH)

의 노즐 내부의 속도 등고선(파란색, 제트펌프 통합부)과 후류 속도 벡터(회색, 제트펌프 노즐목부)를 비교한 것이다. 목비가 커짐에 따라 전체 타워 길이도 커지게 되며, 속도 등고선은 목비를 1에서 4까지 증가시키는 동안 거의 유사한 분포를 보이고 있다. 하지만 후류 속도 벡터를 비교해 보면, 노즐 목비 1에서는 속도 벡터가 중심부에서만 크게 나타나고 전체적으로 중심부 이외에는 속도가 없는 것으로 보여지지만, 목비 4에서는 유동의 안정화가 진행되어 전체적으로 후류 유속이 중심부부터 반경방향으로 균일하게 분포하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 노즐 목비에 따른 유량비를 보여주고 있다. 목비가 3이 되는 조건에서 유량비가 가장 크고 목비가 더 증가되면서 오히려 유량비는 감소한다. 이것은 이미 Fig. 6에서 보여진 바와 같이 속도 등고선의 목비 변화에 따라 영향을 고려해 볼 때 목비가 작은 구간에서는 유동 균일화에 의한 영향으로 유량비가 증가하지만 목길이가 너무 길어지게 되면 점성 저항에 의한 영향이 커져서 오히려 유량비가 감소되는 것으로 볼 수 있다.

구동부(1차측) 노즐의 유입각은 유량비를 제어하는 중요한 인자이기도 하지만, 공동 현상(cavitation)의 유발에도 영향을 주는 인자이다. Fig. 8에는 제트펌프 노즐 부위를 적색 박스로 표시하였다. 적색 박스 부위는 구동부 노즐이 표시되어 있으며, 전산 해석 결과는 Fig. 9에 보여주고 있다. Fig. 9에는 노즐 유입각에 따른 속도 등고선(좌측)과 증기 체적 분율(우측)을 보여주고 있다.

노즐 각이 커짐에 따라 상대적인 속도 등고선이 짧아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 노즐 각이 증가하게 되면서 가솔린 액체 중 기체 분압이 높아지는 것을 볼 수 있다. 기체 분압은 노즐 유입각이 커지면서 커지게 되고 노즐에서 차지하는 상대적인 부피도 계속 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10에는 노즐 유입각의 증가에 따른 유량비를 보여주고 있다. 유입각 증가에 따른 유량비 증가는 노즐 목비에 따른 유량비 증가보다 완만하며,

유량비는 10.92부터 11.15까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 노즐각에 따른 유량비가 완만하게 증가하는데 비해 Fig. 9에 보이듯이 기체 분율이 노즐에서 차지하는 체적이 큰 폭으로 증가하고, 기체 분율 또한 큰 폭으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 노즐 유입각의 증가는 공동 현상을 심화시킬 것으로 보여진다.

4. 결론

본 연구에서는 차량용 연료펌프 흡입측으로 무동력 연료 공급을 할 수 있는 제트펌프 3차원 수치 해석 모델을 개발하였다.

- 1) 모델 신뢰성 검증 실험을 실시하였으며, 모델 결과는 실험결과와 1% 미만의 오차를 가지는 것으로 확인되었다.
- 2) 유량비를 13.98 LPH로 고정한 경우 노즐 목비를 1D부터 5D까지 변경시킴에 따라, 연료 유량비는 3D에서 4D 사이에 정점을 찍고 다시 감소하는 경향을 보였다. 따라서 설계시 노즐 목비의 최적값에 대한 고려가 필요하다.
- 3) 구동부 노즐 유입각을 4도에서 24도까지 증가시키면 노즐 내부에서 유체의 유속 증가에 따른 압력 감소로 공동 현상이 발생된다. 노즐 유입각이 증가하게 되면 구동 노즐 내부 기체 분율의 증가와 함께 기체가 차지하는 전체 공간도 커지지만 유량비는 12도에서 최소가 되고 유입각 증가에 따라 함께 증가하게 된다.

후 기

이 연구는 충남대학교 자체연구사업으로 수행되었다.

References

1. K. Kwon, J. Yun, I. Sohn, Y. Seo, and S. Yu, "Secondary flow patterns of liquid ejector with computational analysis",

- Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 39, No. 2, 2015, pp. 183-190.
2. C. D. Kong, J. H. Park, and D. J. Han, "Study on preliminary design of fuel transfer jet pump using simulink", Journal of Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 10, No. 1, 2006, pp. 38-43.
 3. B. Kim, D. Kim, J. Lee, S. Lee, J. Kim, S. Kang, and H. Lim, "The Ejector Design and Test for 5kW MCFC System", KHNES, Vol. 20, No. 1, pp. 31-37.
 4. X. Chen, S. Omer, M. Worall, and S. Riffat, "Recent developments in ejector refrigeration technologies", Renewable Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, 2013, pp. 629-651.
 5. R. B. Power, "Steam jet ejectors for the process industries", McGraw-Hill, USA, 1994, pp. 1-498.
 6. H. M. Jeong, T. Utomo, Z. H. Jin, and H. S. Chung, "A CFD Analysis on the Gas-Liquid Ejector", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 12, No. 1, 2008, pp. 28-34.
 7. M. K. Ji, U. M. Tony, G. T. Park, H. M. Jeong, and H. S. Chung, "Study on the performance characteristics of the ejector along the diffuser throat length", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 6, 2008, pp. 575-580.
 8. I. S. Hwang, H. J. Joo, and H. Y. Kwak, "Analysis of the ejector for low-pressure evaporative desalination system using solar energy", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 30, No. 6, 2010, pp. 137-143.
 9. X. Long, H. Yao, and J. Zhao, "Investigation on mechanism of critical cavitating flow in liquid jet pumps under operating limits", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No. 9-10, 2009, pp. 2415-2420.
 10. S. B. Mun, H. K. Choi, J. H. Choi, H. J. Kwon, K. K. Kim, and S. H. Choi, "Experimental Study for the Development of New Type Water Ejector", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 30, No. 6, 2006, pp. 667-684.
 11. E. Lisowski and H. Momeni, "CFD modelling of a jet pump with circumferential nozzles for large flow rates", Archives of Foundry Engineering, Vol. 10, No. Special issue 3, 2010, pp. 69-72.
 12. G. Cruz, E. L. Zapparoli, and C. R. D. Andrade, "CFD adjusted one-dimensional jet pump model", Proceedings of COBEM 2007, 2007, pp. 1-8.
 13. A. A. Saker and H. Z. Hassan, "Study of the different factors that influence jet pump performance", Open Journal of Fluid Dynamics, Vol. 3, 2013, pp. 44-49.
 14. www.ansys.com.