

공기구동 이젝터의 노즐 형상과 위치 변화에 따른 성능 특성

지명국† · 김필환* · 박기태* · 토니우토모* · 정한식** · 정효민**

(원고접수일 : 2008년 2월 11일, 심사완료일 : 2008년 4월 17일)

Performance Characteristics of Air Driven Ejector According to the Position Changes and the Shape of Driving Nozzle

Myoung-Kuk Ji† · Pil-Hwan Kim* · Ki-Tae Park* · Tony Utomo* · Han-Shik Chung* and Hyo-Min Jeong**

Abstract : The aim of this research is to analyze the influence of motive pressure, driving nozzle position and nozzle throat ratio on the performance of ejector. The experiment was conducted in the variation of motive pressure of 0.196, 0.294, 0.392 and 0.490MPa respectively. The position of driving nozzle was varied in difference locations according to mixing tube diameter(0.5d, 1d, 2d, 3d, 4.15d, 5d and 6d). The experimental results show when the nozzle outlet is located at 3d, the flow characteristics change abruptly. It is shown that the suction flow rate and pressure lift ratio of ejector is influenced by the driving nozzle position. At nozzle position location of the 1d of mixing tube diameter the performance of ejector gives the best performance.

Key words : Air driven ejector(공기구동 이젝터), Driving nozzle(구동 노즐), Diffuser(디퓨저), Motive fluid(구동 유체), Suction fluid(흡입 유체)

기호설명

d : 혼합부 직경(mm)
 P : 정압(Pa)
 Q : 유량(m^3/s)
 R_p : 압력상승률
 α : 유량계수
 ϵ : 팽창계수
 ν : 비체적(m^3/kg)

1. 서 론

일반적으로 이젝터(Ejector)는 고압의 유체를 노즐로 분출시켜, 그 분류 주변의 저압기체와 운동량 교환을 통하여 저압의 유체를 보다 높은 압력까지 압축하여 수송하는 장치를 일컫는다. 이젝터는 노즐(Nozzle), 혼합부(Mixing section), 디퓨저(Diffuser) 및 토출부(Discharge)로 구성, 설계되어 있으며, 이젝터 시스템 전체에 어떠한 회전부분이나 활동부분을 가지지 않는 유체기계이므로 고

† 교신저자(경상대학교 대학원 정밀기계공학과, E-mail:mkji73@hotmail.com, Tel: 055)640-3180)

* 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

** 경상대학교 정밀기계공학과, 해양산업연구소

장이 적고 소형임에도 불구하고 대용량의 유체를 압축 또는 수송할 수 있는 특징을 가지고 있다^{[1],[2]}. 이젝터는 19세기 초부터 이용되어 왔는데 높은 공학적 신뢰성으로 현재에는 첨단 전자공업, 철강, 화학, 식품 등의 거의 모든 산업분야에서 사용되고 있다. 특히 기체 이젝터에 관한 연구는 비행기의 추력 증진 등에 관하여 1940년대 말부터 연구가 수행되기 시작하였다.^{[2],[6]} 기체 이젝터의 내부유동 및 성능해석은 매우 복잡하다. 이러한 기체 이젝터에 관한 연구는 다음과 같이 크게 대별할 수 있다. 노즐출구와 디퓨저목간의 면적비에 의한 영향, 구동압력 감소에 대한 흡입압력의 영향, 목에서의 구동기체와 흡입기체의 혼합과정 등의 많은 연구 결과를 확인할 수 있다^{[3]-[10]}. 이에 본 연구에서는 실제 이젝터를 제작, 공기를 구동 유체로 사용하여 이젝터 내부 압력 분포 및 흡입 성능을 구동 노즐의 형상과 축 방향 위치에 따른 특성을 파악하여 향후 선박용 조수기의 이젝터 설계 시 기초 자료로 활용하고 이젝터 시스템 내부 유동에 관한 수치해석의 기본 자료로 활용하고자 한다.

2. 이론 및 연구 배경

Keenan(1950)^[13] 등은 이젝터의 종류를 형태에 따라 constant-pressure mixing ejector (일정 압력 이젝터)와 constant-area mixing ejector(일정 단면적 이젝터)로 분류하여 실험을 진행하여 일정 단면적 이젝터에 비해 일정 압력 이젝터의 성능이 우수하다는 결과를 얻었다. 본 연구에서는 일정 단면적 이젝터를 사용하여 실험을 진행하였다. 이는 제작상의 용이성과 이젝터 자체의 구동 특성을 파악하고자 하였으므로 일정 단면적 이젝터를 사용하여도 성능을 파악함에 있어 충분한 검토가 가능하므로 이를 택하였다.

Fig. 1은 Keenan 등이 제시한 이젝터의 형상 분류를 나타낸다. 본 연구는 실험에 의한 성능 해석이 주된 목적이므로 이젝터의 성능 해석에 필요한 이론식들은 언급하지 않으며, 다음의 식들을 이용하여 본 실험의 대상인 이젝터의 압력상승률과 흡입 공기량을 산출하였다. 압력상승률(R_p)은 다

음의 식(1)^[12]로 구할 수 있고 이젝터의 흡입 공기량의 산출은 노즐 전후의 압력비가 임계 압력비($r_c=0.528$) 또는 이 이하인 경우에는 식(2)^[14]에 의하여 구하고 노즐 전후의 압력비가 임계 압력비 r 이상인 경우에는 식(3)^[14]에 의하여 구하였다.

$$R_p = \frac{\text{static pressure at diffuser exit}}{\text{static pressure at secondary flow}} \quad (1)$$

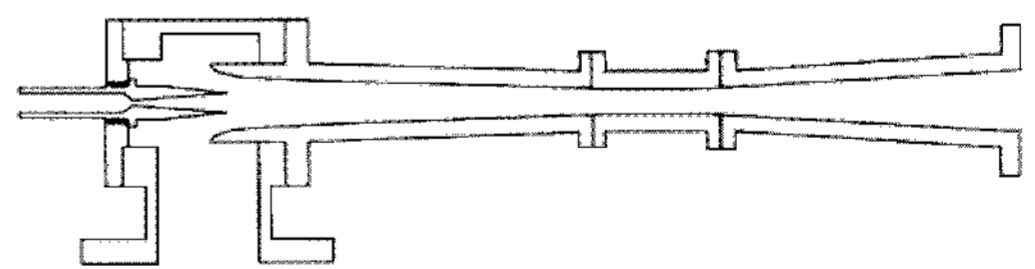
$$Q = 0.606 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{10 \cdot P_1 / \nu_1} \quad (2)$$

$$Q = 1.252 \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot d^2 \sqrt{10 \cdot (P_1 - P_2) / \nu_1} \quad (3)$$

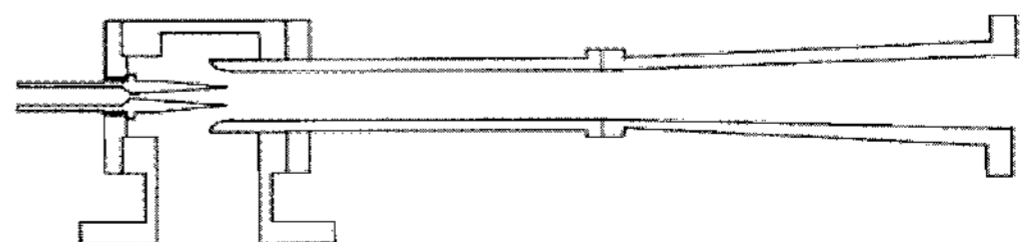
3. 실험 및 결과 고찰

3.1 실험

Fig. 2는 실험 장치의 전체 배치도를 나타내며, 공기구동 이젝터의 구성은 크게 공급부, 실험부로 구분된다. 실험의 진행은 구동유체인 공기를 공기 압축기를 이용하여 저장탱크에 저장을 한 후 구동 노즐에 공급한다. 저장탱크와 구동노즐 사이에는 압력계가 설치되어 구동유체의 압력을 조절하였고 유동의 안정을 위해 충분한 직선구간을 설치하였다. 이젝터 혼합부에는 구동노즐의 축 방향 위치에 의한 이젝터 성능 특성을 파악하기 위하여 구동노즐의 거리를 조절할 수 있도록 제작하였다.



(a) Constant-Pressure Mixing Ejector



(b) Constant-Area Mixing Ejector

Fig. 1 Schematic view of an ejector. (a) Constant - Pressure Mixing Ejector; (b) Constant - Area Mixing Ejector

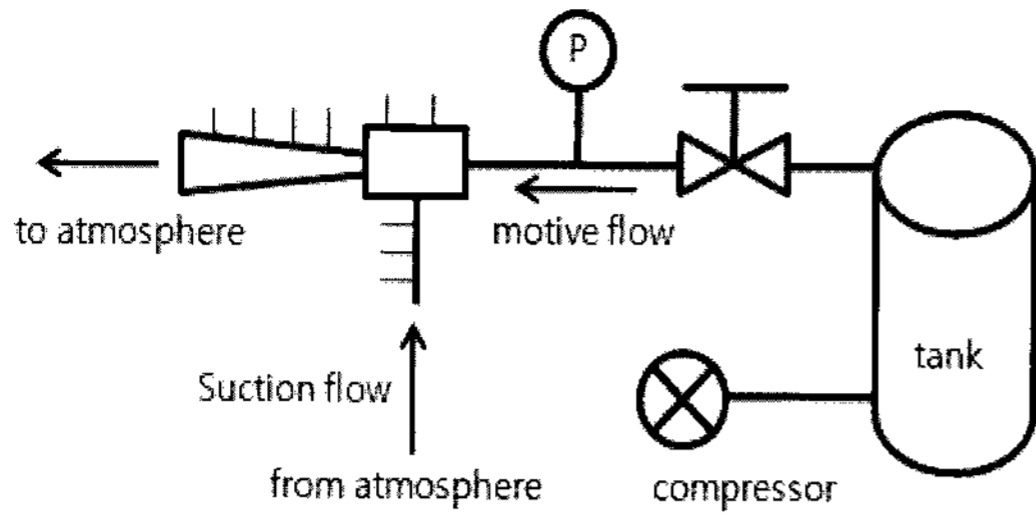


Fig. 2 Schematic diagram of test system

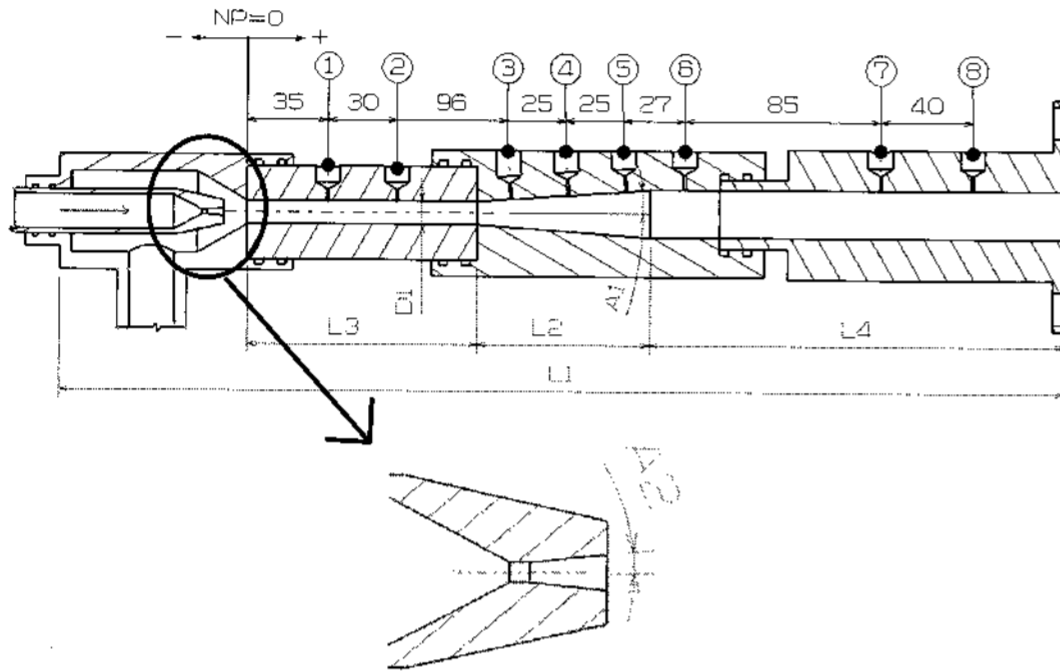


Fig. 3 Schematic diagram of experimental ejector

이젝터의 출구와 흡입부의 전후에는 아무런 기계적 장치를 설치하지 않았다. 이는 이젝터 전후의 장치에 의한 성능저하 또는 과성능으로 이젝터 자체의 성능을 파악함에 있어 변수를 최소화하기 위함이다. 또한 흡입부의 흡입공기량 측정을 위하여 "KS B 6017 증기 분사 공기 이젝터 성능 시험 방법"의 규격에 따른 흡입공기량 측정용 오리피스(B type)를 제작하여 흡입공 입구에 설치하여 흡입공기량을 계산하였다^[13].

Fig. 3은 이젝터의 조립도를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 이젝터의 전장(L1)은 약 436mm이고 디퓨저의 길이(L2)는 약 75mm이다. 혼합부 직경(D1)은 10mm이다. 디퓨저의 확대각(A1)은 8°로 제작하였고 구동노즐의 목 직경(D2)은 노즐 1(2.0mm), 노즐 2(3.5mm)의 2가지이다. 구동노즐 출구 확대각(A2)은 각각 노즐 1은 11°, 노즐 2는 15°로 제작되었고 노즐 목 직경과 출구 직경과의 비는 각각 1.75:1, 1.57:1이다. 실험에 사용된 이젝터에는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 정압 측정공을 일정단면적부 2개소, 디퓨저부 3개소 그리고

출구부 3개소를 길이방향으로 설치하였다. 압력은 압력트랜스듀스를 이용하여 측정하였다.

Photo. 1은 실험장치의 전경을 보여준다. 구동유체를 196kPa~490kPa의 압력 범위 내에서 구동압력별 특성을 알아보기 위해 동일한 간격(196, 294, 392, 490kPa)으로 변화시키면서 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 구동압력의 범위는 구동압력이 고압일 경우 이젝터 자체 성능에 의한 흡입 및 토출 등의 값들을 도출하기보다는 압력에 의한 영향이 커지는 것을 피하기 위하여 위와 같은 범위의 압력을 사용하였다. 또한 구동노즐이 이젝터 축방향에 대한 위치가 이젝터 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 혼합부(Mixing section) 직경 d에 대하여 1~6배에 해당하는 거리에 구동노즐을 위치시켜 각 위치에서의 압력을 측정하였다.

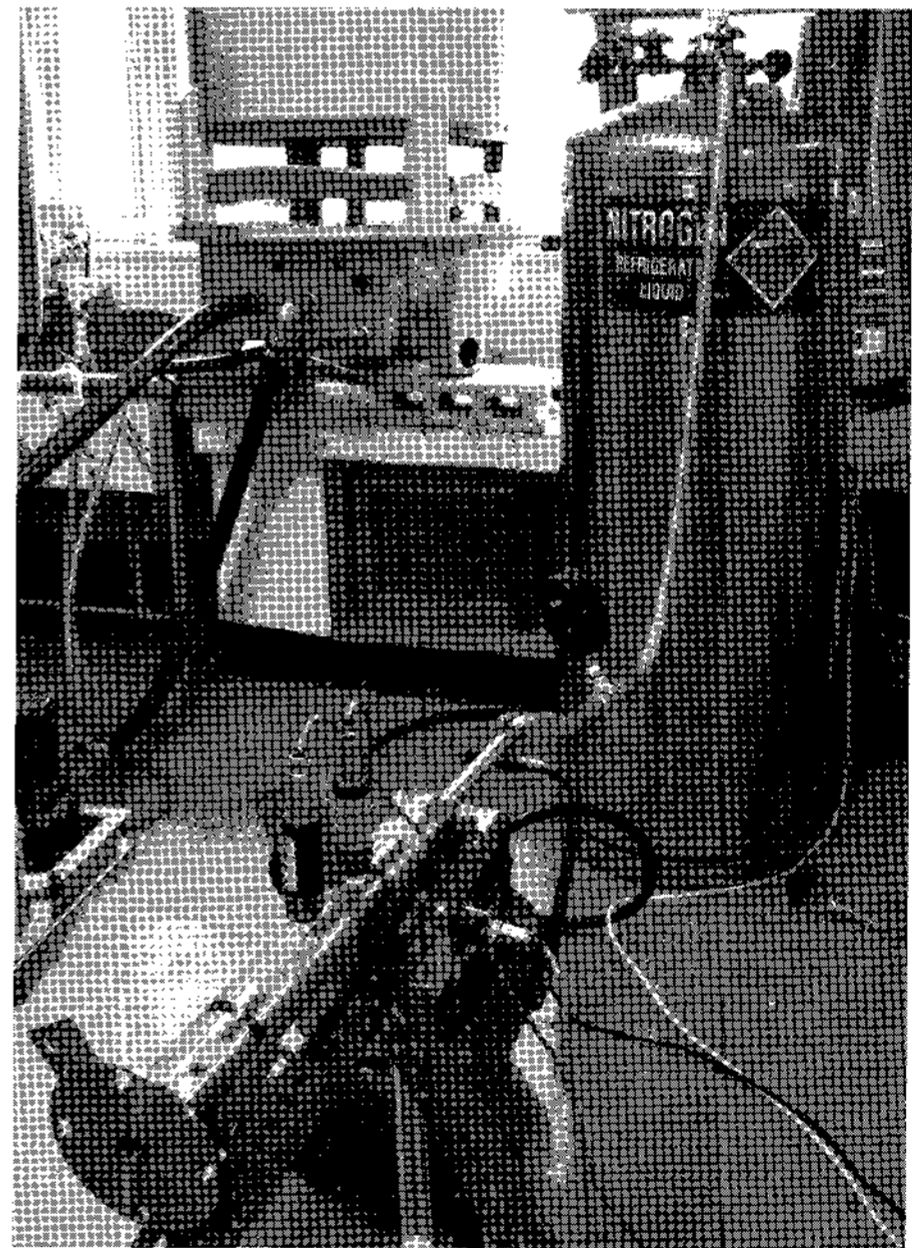


Photo 1 Experimental apparatus set-up

3.2 결과 고찰

3.2.1 구동압력에 따른 이젝터 벽면 압력분포

Fig. 4는 이젝터의 벽면 정압 변화를 나타내었다. 노즐의 출구 위치를 0.5d에 고정시키고 구동압력을 변화시키며 실험한 결과이다. 그림에서 보듯

이 노즐 2의 경우 구동압력이 392kPa과 490kPa의 경우를 제외하고는 모든 조건에서 동일하게 압력이 형성되는 것을 알 수가 있다. 전체적인 유동 패턴이 디퓨저 입구에 도달하기 전에 이미 shock에 의한 압력상승이 일어나고 있다. 이는 구동압력이 실험 대상인 구동노즐에 충분한 압력을 공급하지 못하여 일어나는 것으로 사료되며, 구동노즐의 Effective area가 혼합부의 입구에서부터 형성되어 혼합부 전반에 걸쳐 유지되지 못하고 발생한 지점에서 형태가 파괴되므로 역류가 발생되어 디퓨저까지 유지되지 못하여 일어나는 현상으로 사료된다.

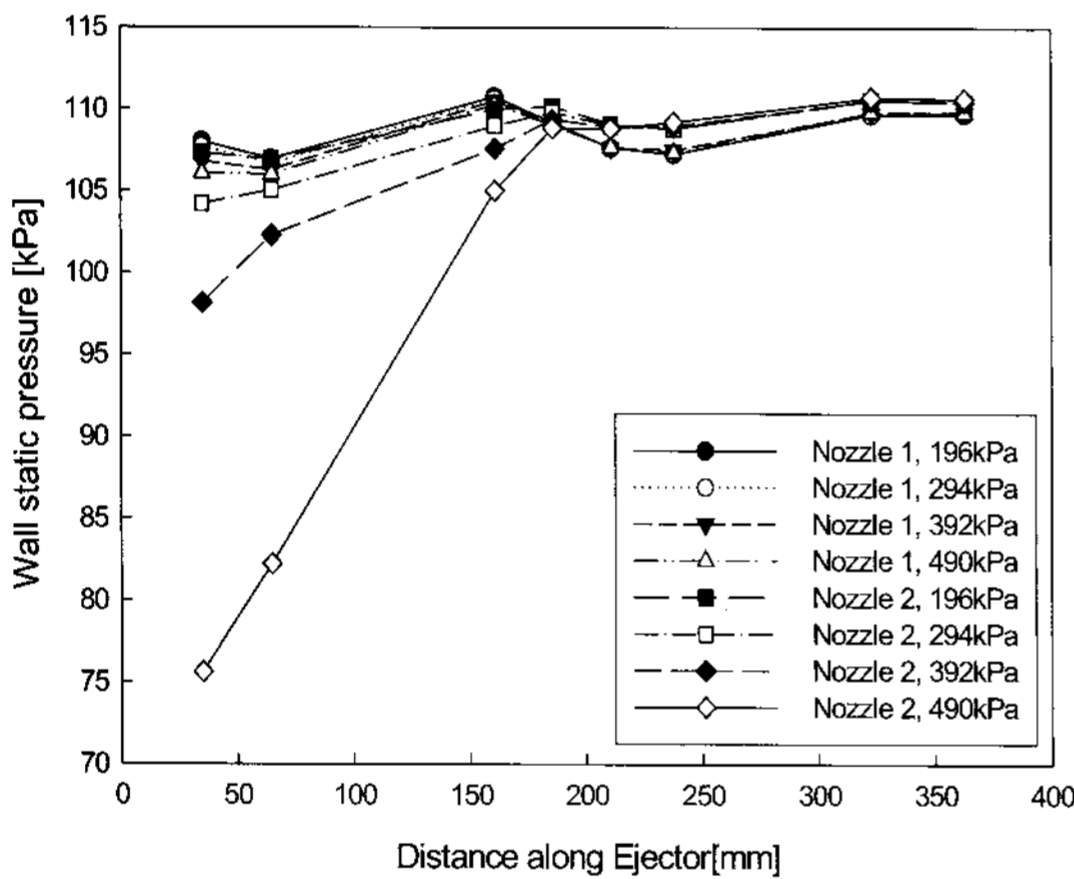


Fig. 4 Wall static pressure profiles along the ejector at $P_{in} = 2$ to 5 kg/cm^2

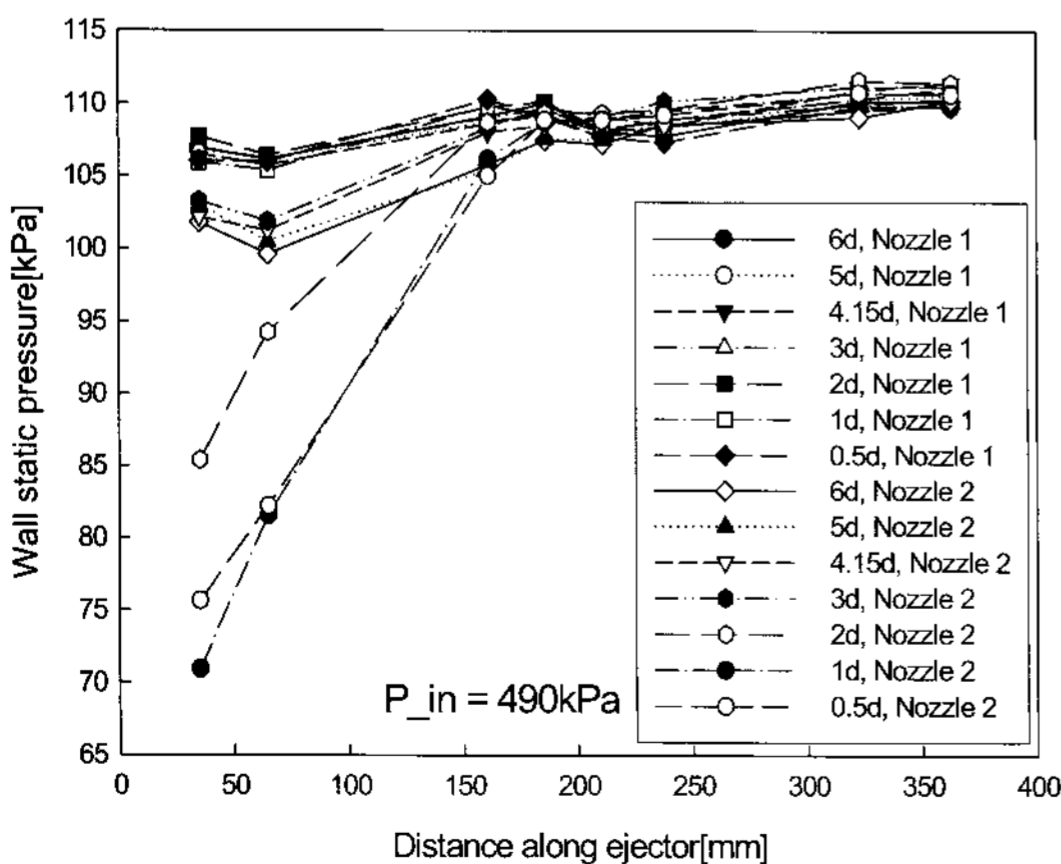
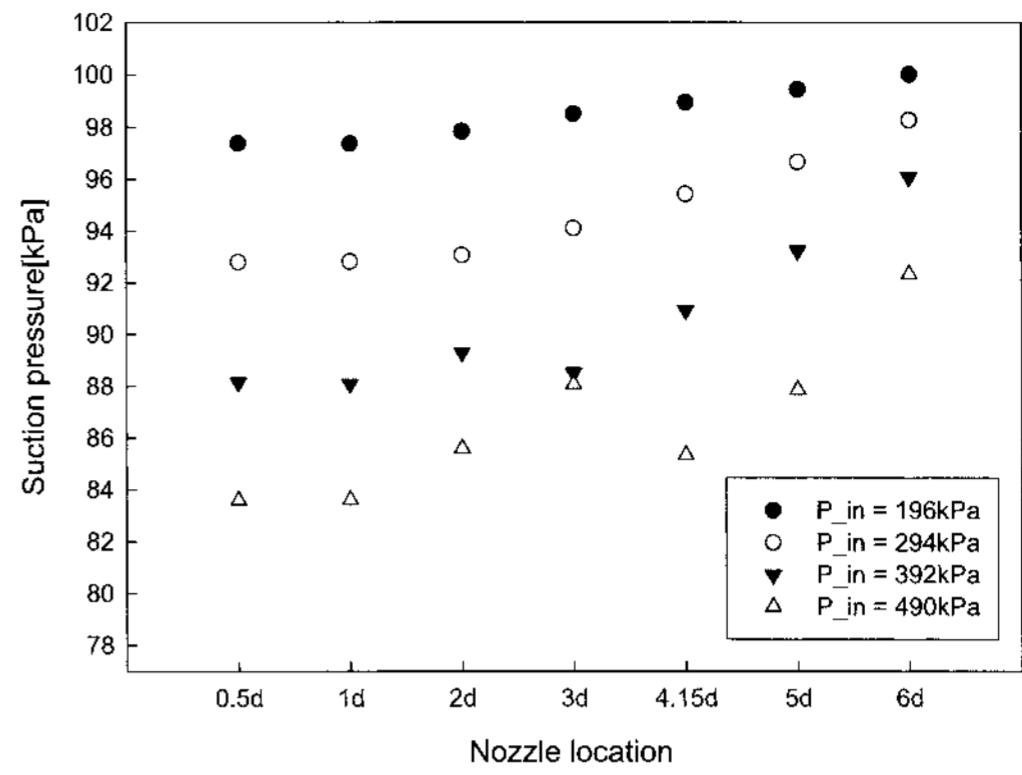
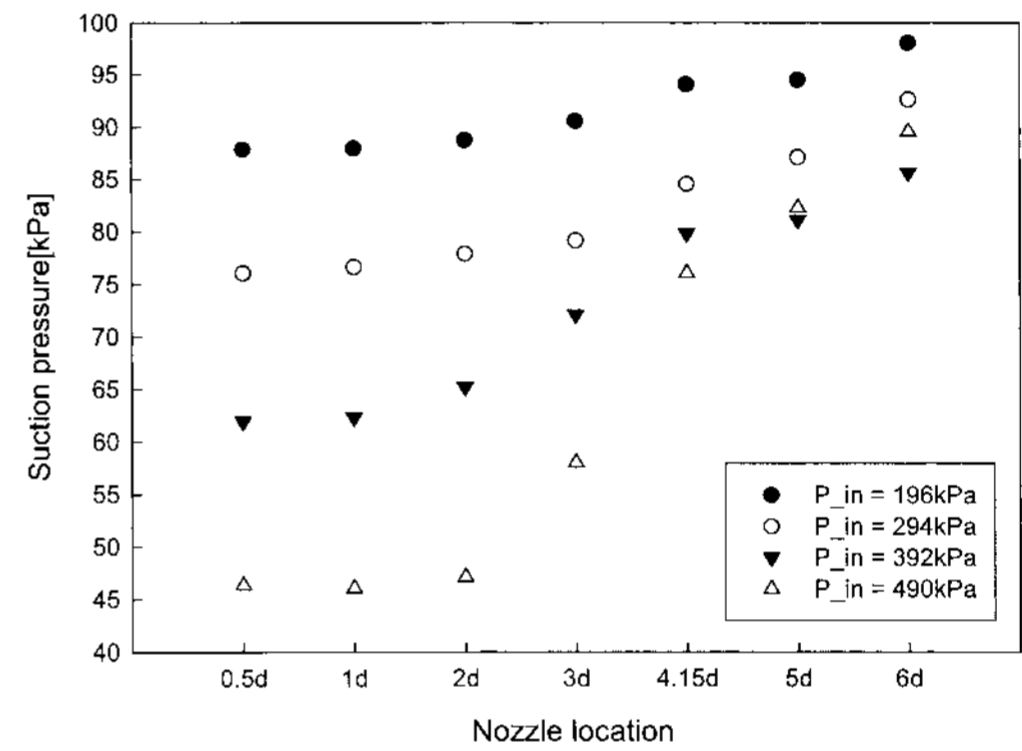


Fig. 5 Wall static pressure profiles along the driving nozzle location



(a) Nozzle 1



(b) Nozzle 2

Fig. 6 Suction pressure along the primary pressure and driving nozzle location

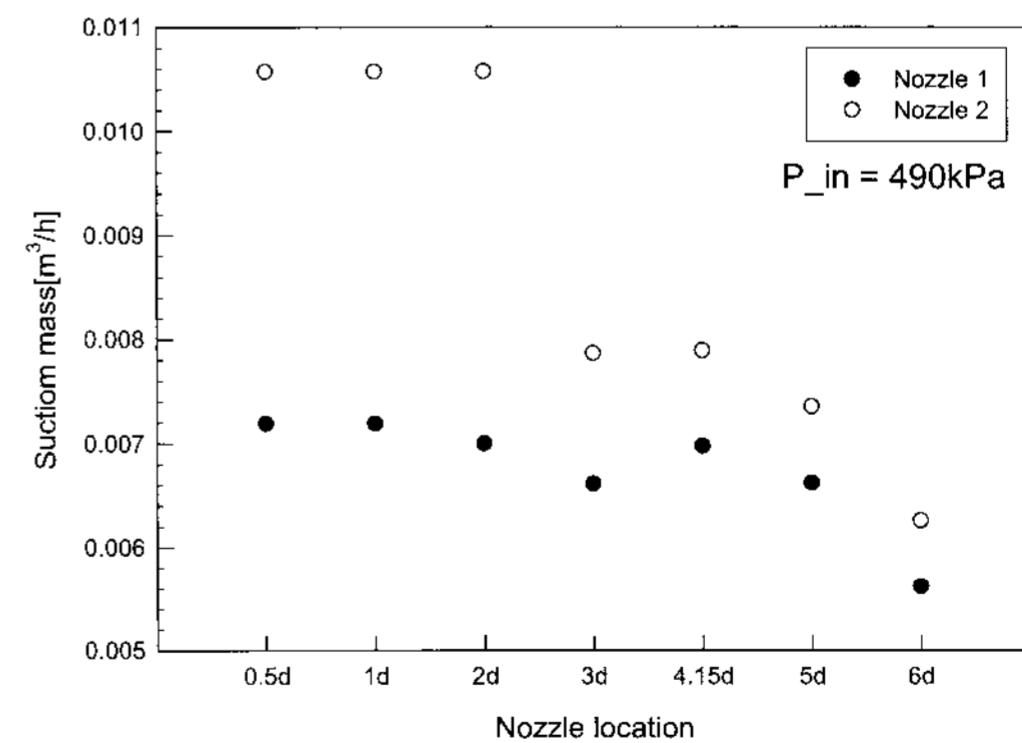


Fig. 7 Suction mass along the driving nozzle location

3.2.2 구동노즐 출구 위치에 따른 영향

구동노즐의 출구 위치가 이젝터 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 혼합부의 직경 d 에 대하여

0.5d~6d 사이에 구동노즐의 출구를 위치시켜 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 노즐 2의 경우는 다른 경우와는 달리 혼합부 입구에서 바로 압력이 상승하는 형태를 보였으며, Fig. 4에서와 동일하게 모든 경우가 노즐출구의 위치가 변화하여도 같은 현상을 보였다.

3.2.4 흡입압력 및 흡입유량

구동노즐 목부직경비와 구동압력, 구동노즐의 위치에 따른 흡입압력 및 흡입공기량에 대한 실험결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. 구동노즐의 위치에 따른 흡입압력 분포를 살펴보면 2개의 노즐 모두 일정한 형태의 압력이 형성되는 것을 볼 수 있으며, 노즐 2의 경우 흡입압력이 490kPa일 때는 그 형태가 달라지는 것이 확인되었다. Fig. 7

의 흡입유량은 구동노즐이 흡입부 중심을 기준으로 전면에 위치할 경우 흡입유량이 급격히 상승하는 것을 볼 수 있으며, 혼합부 입구에 가까워질수록 그 차이는 확연해진다. 또한 구동노즐이 2d 이내로 위치할 경우에는 위치가 변함에 따른 흡입유량의 차이는 거의 없는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

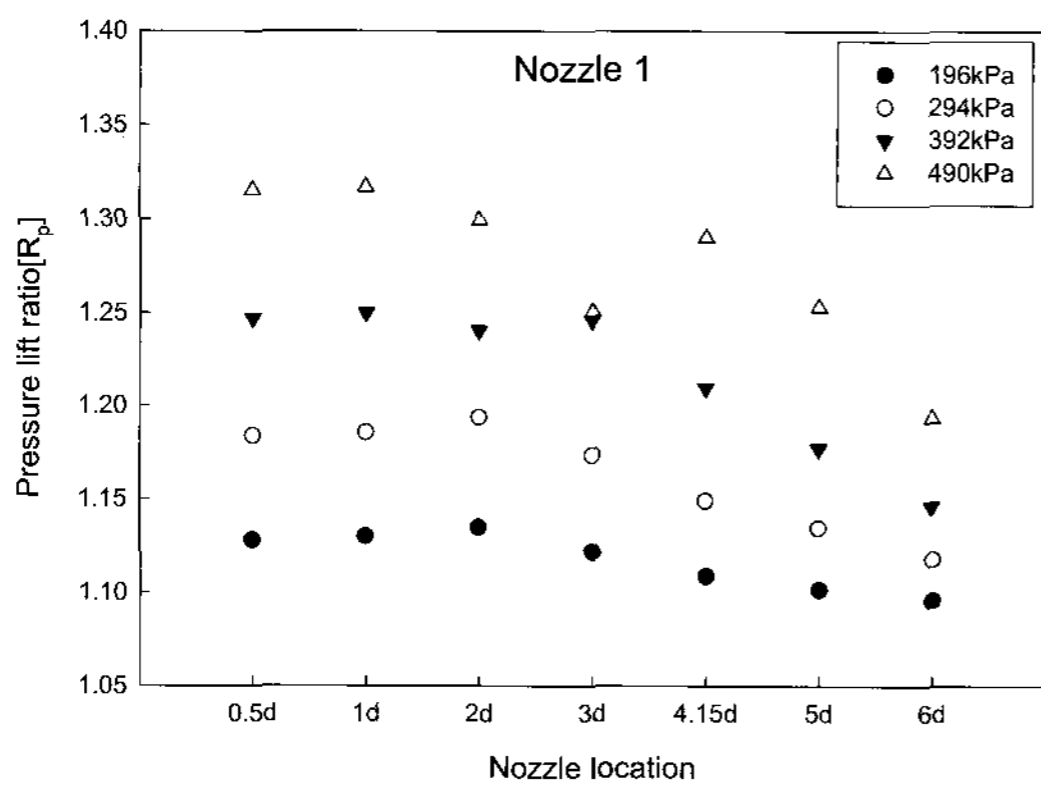
이젝터의 성능을 좌우하는 것은 구동노즐의 형상과 구동노즐 출구 확대각 및 구동노즐 출구의 위치임을 확인하였다. 실험의 대상인 이젝터의 성능 특성은 모든 경우에서 일정한 형태를 가지고 압력 분포가 형성되는 것과는 달리 노즐 2에 있어 구동 압력이 490kPa일 경우 노즐 출구가 3d 이내에 위치할 경우 압력 상승률 및 흡입 압력, 흡입 유량이 급격히 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 노즐의 출구 위치가 2d 이내에 위치할 경우는 그 위치에 따른 흡입 성능은 크게 차이가 나지 않았고 전체적인 이젝터의 성능을 살펴보면 노즐 2가 1d에 위치하였을 경우가 가장 우수한 성능을 보였다. 다만, 노즐 출구 확대각이 15°로 경사가 다소 크고 토출부 길이가 짧아 Effective area가 혼합부 전반에 걸쳐 그 형태를 유지하지 못하고 디퓨저로 전달되어 견인비가 형성되지 않았다.

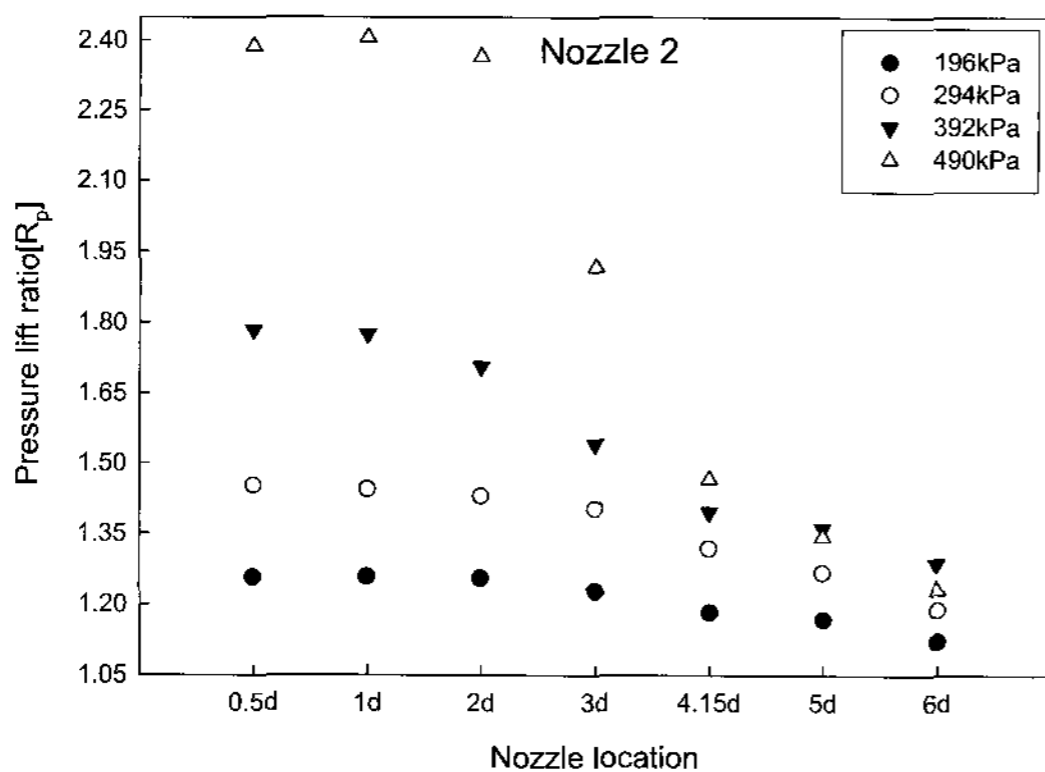
향후 수치해석을 진행할 경우 본 실험을 통한 결과를 토대로 노즐 출구의 위치를 2d 이내로 설정하여 해석의 조건을 줄일 수 있을 것이고 현재 실험은 노즐 출구의 위치가 혼합부 입구를 기준으로 음의 방향(-)에 대한 실험 결과이므로 해석 시 양의 방향(+)에 대한 해석을 진행한다면 두 조건의 비교 해석도 가능 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 중점기술개발사업(과제번호 : 1002433)과 2단계 BK21사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.



(a) Nozzle 1



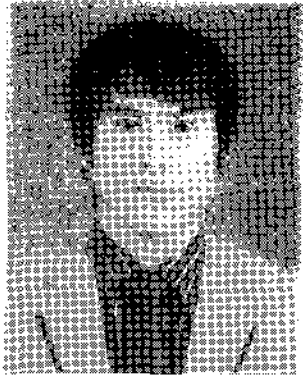
(b) Nozzle 2

Fig. 8 Pressure lift ratio for nozzle 1 and 2

참고문헌

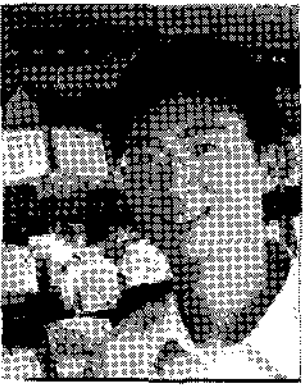
- [1] 홍영표, 윤두호, 김용모, 윤석훈, "공기구동 기체이젝터의 성능특성에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회, 제18권, 제1호, pp. 51-59, 1994.
- [2] E. Rusly, Lu Aye, W. W. s. Charters and A. Ooi, "CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, pp. 1092-1101, 2005.
- [3] G. K. Alexis, "Estimation of ejector's main cross sections in steam-ejector refrigeration system", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 2657-2663, 2004.
- [4] 문수범, 최현규, 최재혁, 권형정, 김경근, 최순호, "신형 수이젝터 개발을 위한 실험연구", 한국마린엔지니어링학회, 제30권, 제6호, pp. 677-684, 2006.
- [5] B. J. Huang and J. M. Chang, "Empirical correlation for ejector design", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 22, pp. 379-388, 1999.
- [6] 김세훈, 진정근, 권세진, "이차목을 갖는 초음속 이젝터 작동압력에 대한 연구", 대한기계학회 논문집 B권, 제29권, 제8호, pp. 934-939, 2005.
- [7] 이준희, 김희동, "가변형 음속/초음속 이젝터 시스템에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집 B권, 제29권, 제5호, pp. 554-560, 2005.
- [8] Kanjanapon Chunnanond and Satha Aphornratana, "An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 311-322, 2004.
- [9] 국립기술품질원, 한국산업규격, KS B 6017, "증기 분사 공기 이젝터 성능 시험 방법", 1998.
- [10] T. Sriveerakul, S. Aphornratana, K. Chunnanond, "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, pp. 812-822, 2007.
- [11] T. Sriveerakul, S. Aphornratana, K. Chunnanond, "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 2. Flow structure of a steam ejector influenced by operating pressures and geometries", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, pp. 823-833, 2007.
- [12] 김진화, 토니 우토모, 이용훈, 지명국, 정한식, 정효민, "이젝터를 사용한 혼합 시스템에서의 기-액 혼합특성에 관한 연구", 대한기계학회 2007년도 추계학술대회 강연집, pp. 7-12, 2007.
- [13] Keenan, J. H., Neumann, E. P. and Lustwerk, F., "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 17, No. 3, pp. 299-309, 1950.
- [14] Kanjanapon Chunnanond, Satha Aphornratana, "Ejectors: applications in refrigeration technology", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, pp.129-155, 2004.
- [15] Chow, W. L. and Addy, A. L., 1961, "Interaction between Primary and Secondary Streams of Supersonic Ejector System and Their Performance Characteristics", *AIAA Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 680-895.

저 자 소 개



지명국(池銘國)

1973년생, 2000년 경상대학교(학사), 2003년 경상대학교 열유체공학(석사), 2005년 경상대학교 열유체공학 수료(박사), 2003~2006년 동환산업(주) 연구소(선임연구원), 현재 경상대학교 기계항공공학부 조교



김필환(金必煥)

1982년생, 2007년 경상대학교 기계항공공학부 졸업(학사), 현 경상대학교 대학원 정밀기계공학과 열유체공학 석사과정



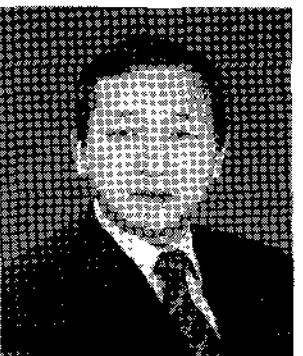
박기태(朴起台)

1981년생, 2007년 경상대학교 기계항공공학부 졸업(학사), 현 경상대학교 대학원 정밀기계공학과 열유체공학 석사과정



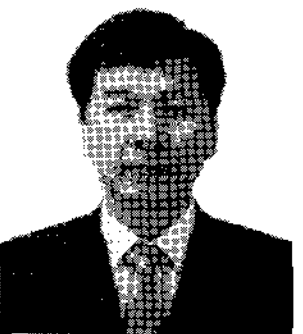
Tony Utomo

1971년생, 1996년 Diponegoro University Indonesia(학사), 2003년 Bandung Institute of Technology, Indonesia(석사), 현재 경상대학교 대학원 정밀기계공학과 열유체공학 박사과정



정한식(鄭漢植)

1954년생, 1981년 동아대학교(학사), 1983년 동아대학교 열유체공학(석사), 1987년 동아대학교 열유체공학(박사), 현재 경상대학교 기계항공공학부 교수



정효민(鄭孝玟)

1958년생, 1982년 부경대학교(학사), 1987년 부경대학교(석사), 1992년 일본 동경대학교 전산유체역학(박사), 현재 경상대학교 기계항공공학부 교수