

## 5kW 용융탄산염 연료전지(MCFC) 이젝터 설계 및 시험

김범주\*<sup>†</sup>, 김도형\*, 이정현\*, 이성운\*, 김진열\*, 강승원\*, 임희천\*

\*한전 전력연구원 신재생에너지 그룹

## The Ejector Design and Test for 5kW MCFC System

BEOMJOO KIM\*<sup>†</sup>, DO HYEONG KIM\*, JUNGHYUN LEE\*, SUNGYOON LEE\*,  
JINYOEL KIM\*, SEUNGWON KANG\*, HEECHUN LIM\*

\*Renewable Energy Research Group, Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

### ABSTRACT

An ejector is a machine utilized for mixing fluid, maintaining a vacuum, and transporting fluid. The Ejector enhances system efficiency, are easily operated, have a mechanically simple structure, and do not require a power supply. Because of these advantages, the ejector has been applied to a variety of industrial fields such as refrigerators, power plants and oil plants. In this work, an ejector was used to safely recycle anode tail gas in a 5 kW Molten Carbonate Fuel Cell system at KEPRI(Korea Electric Power Research Institute). In this system, the ejector is placed at mixing point between the anode tail gas and the cathode tail gas or the fresh air. Commercial ejectors are not designed for the actual operating conditions for our fuel cell system. A new ejector was therefore designed for use beyond conventional operating limits. In this study, the entrainment ratio is measured according to the diametrical ratio of nozzle to throat in the designed ejector. This helps to define important criteria of ejectors for MCFC recycling.

**KEY WORDS** : Ejector(이젝터), Molten carbonate fuel cell(용융탄산염 연료전지), Entrainment ratio(작동 유량과 흡입유량의 비), Hydrogen recirculation(수소 재순환), Pressure coefficient(압력계수), Mach number(마하수), Diffuser(디퓨저), Nozzle(노즐)

### Nomenclature

$E_r$  : entrainment ratio(흡인비)  
 $\dot{m}$  : mass flux [g/s]  
 $M$  : mach number  
 $D$  : diameter [mm]

$L$  : length [mm]  
 $\rho$  : density [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\eta$  : efficiency of ejector  
 $\omega$  : the diametrical ratio of nozzle to throat  
 $\lambda$  : the ratio of diameter to length in throat  
 $\gamma$  : specific heat ratio  
 $V$  : velocity [m/s]  
 $A$  : area [ $\text{m}^2$ ]

<sup>†</sup>Corresponding author : bjkim@kepri.re.kr

## Subscripts

- p : primary (motive)  
 s : secondary (suction)  
 n : nozzle  
 t : throat  
 2 : nozzle throat in Fig. 2

## 1. 서 론

이젝터는 고압의 유체를 노즐에서 고속으로 분출시켜 구동유체가 가지고 있는 압력에너지를 속도에너지로 변화시켜 주변의 저압 유체와 운동량을 교환하여 저압의 유체를 흡입, 수송하는 장치이다. 이젝터는 노즐, 목, 혼합부, 디퓨저 등으로 구성되어 있다. 이젝터는 회전부분 및 전원 연결 부분이 없으므로 고장이 적다.

이젝터는 펌프에서 치명적인 고장을 일으키는 공동현상(cavitation)도 일어나지 않고, 위험을 수반하지 않으므로 유독·위험물질 등을 취급하기에 적당한 유체기기이다. 이젝터 자체의 효율은 낮으나, 전체 시스템으로 보았을 때는 별도의 동력이 추가되지 않았으므로 시스템 전체 효율이 증가하는 특성을 가지고 있다.

이젝터는 구동 유체 및 2차 유체의 마하수(M)에 따라 아음속, 음속, 초음속 이젝터 등으로 나뉘어지고, 노즐과 목의 위치에 따라 constant pressure ejector, constant area ejector 등으로 나뉘기도 한다.

용융탄산염 연료전지는 580~650℃의 온도에서 작동하고 전해질로 용융탄산염을 이용하며, 차세대 분산형 전원으로 상용화에 근접한 연료전지이다. 고온의 수소를 재순환하기 위해서 송풍기와 같은 회전기기를 이용하게 되면 본질 안전 방폭 구조로 만들어야 하여 비용 증가, 제작의 어려움, 위험 요인이 수반되지만, 이젝터를 이용하면 별도의 회전기기 도움이 없으므로 안전하고, 누설의 위험도 줄게 된다<sup>1-5)</sup>.

전력연구원 신재생에너지그룹에서는 지식경제부의 “250kW급 열병합 용융탄산염 연료전지 발전시스템 proto type 개발”과제의 주관기관으로 2009년까

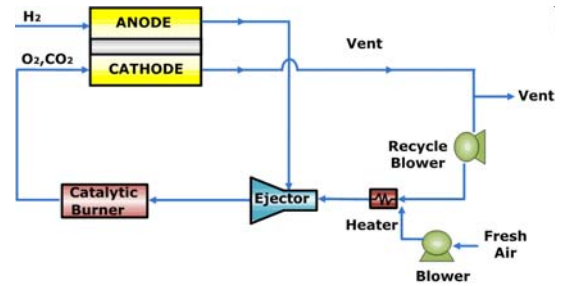


Fig. 1 Schematic of MCFC system

지 250kW급 MCFC system을 만드는데 심혈을 기울이고 있다. 이 시스템을 단순화, 경량화 하기 위해 5kW 시스템용 이젝터를 설계, 시험하였고, 이를 바탕으로 대형화 시스템에도 적용할 방침이다.

## 2. 작동 원리와 구조

### 2.1 5kW 연료전지 시스템의 구조

5kW급 용융탄산염 연료전지 시스템의 구조는 Fig. 1과 같다. 연료전지의 anode극에는 수소가 공급되고, cathode극에 공기와 이산화탄소가 공급되며, cathode의 폐가스는 recycle blower를 통해 상온의 공기와 합류되어 이젝터의 구동 유체(primary flow)로 작용되고, anode의 폐가스(secondary flow)를 흡입, 혼합하여 촉매연소기에서 연소 반응을 거친 후 cathode 입구로 들어가는 과정을 반복하게 된다.

### 2.2 이젝터의 원리 및 해석

#### 2.2.1 원리

이젝터는 고압의 구동유체를 노즐로 분출시켜 속도에너지를 증가시키고 압력에너지를 낮추어서 노즐출구에서 저압의 유체를 흡입하여 이송하는 장치로써 회전 또는 운동하는 부분이 없는 장치이다. Fig. 2와 같이 ①로부터 보내지는 고압의 유체가 노즐로부터 목을 향하여 고속으로 분출시키면 분류의 압력은 저압이 된다. 따라서 ②주위에 있던 흡입관 ⑥내의 유체가 throat로 분출된다. Throat 내에서는 구동 유체와 흡입 유체가 혼합하고, 에너지 교환이 이루어져서 두 유체의 속도는 같게 된

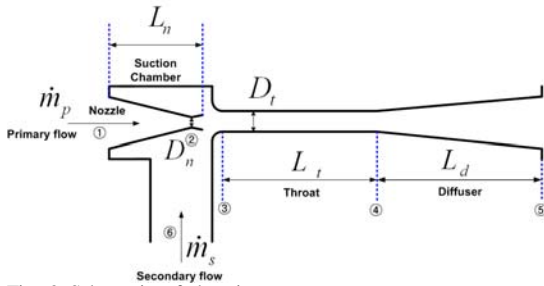


Fig. 2 Schematic of the ejector

다. Throat내의 흐름은 고속이므로 이를 diffuser에서 감속시켜 일부를 압력에너지로 변환시킨 후 ⑤로 송출시킨다<sup>1)</sup>.

### 2.2.2 가정

이젝터를 설계할 때 아래의 가정을 전제로 진행되었다<sup>2)</sup>.

- ① 구동 유체의 노즐에서 팽창과정 및 Throat, Diffuser에서 유체의 압축, 팽창과정은 등엔트로피이다.
- ② 일정한 등엔트로피 팽창 지수를 가지며 이상 기체의 특성을 지닌다.
- ③ 유동은 단열이다.
- ④ 이젝터 흐름은 1차원이고 정상 상태라고 가정한다.

### 2.2.3 Governing Equation

이젝터에 사용되는 압축성 유체역학의 지배방정식들은 다음과 같으며, 구동 유체(primary flow)와 흡입 유체(secondary flow)에 모두 적용된다<sup>3)</sup>.

$$M_{p2}^2 = \frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_{Tp}}{P_{p2}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$T_{p2} = \frac{T_{Tp}}{\left( 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_{p2}^2 \right)} \quad (2)$$

$$\rho_{Tp} = \frac{P_{Tp}}{RT_{Tp}} \quad (3)$$

Table 1 Ejector design conditions

Primary flow	
total pressure [bar]	1.1
static pressure [bar](initially assumed)	0.93
total temperature [K]	289
flow rate [lpm]	277
Secondary flow	
total pressure [bar]	1.01
static pressure [bar](initially assumed)	1
total temperature [K]	290
flow rate [lpm]	152

$$\rho_{p2} = \frac{\rho_{Tp}}{\left( 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_{p2}^2 \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}} \quad (4)$$

$$V_{p2} = M_{p2} \sqrt{\gamma_{p2} R T_{p2}} \quad (5)$$

$$A_{p2} = \frac{\dot{m}_p}{\rho_{p2} V_{p2}} \quad (6)$$

### 2.2.4 경계조건의 설정

Table 1에 5kW 이젝터의 설계조건이 제시되어 있다. Table 1은 5kW 실제 운전 조건을 기준으로 하여 DAE<sup>6)</sup>(dry air equivalent)으로 환산한다. DAE는 온도와 가스의 분자량에 따라 상온에서의 등가 공기로 환산한 양으로, 실험에서는 상온에서 공기로 적용할 수 있는 장점이 있어서 이것을 적용하였다. 이 양을 기준으로 이젝터 설계조건 및 흡인비 등을 산정하였다.

### 2.2.5 흡인비(Entrainment ratio)

흡인비는 이젝터의 성능을 나타내는 가장 중요한 기준으로써 이젝터의 노즐부를 통과 하는 구동 유체와 흡입부를 통과하는 흡입유체의 비에 의해 결정된다.

$$A_{p2} = \frac{\dot{m}_p}{\rho_{p2} V_{p2}} \quad (7)$$

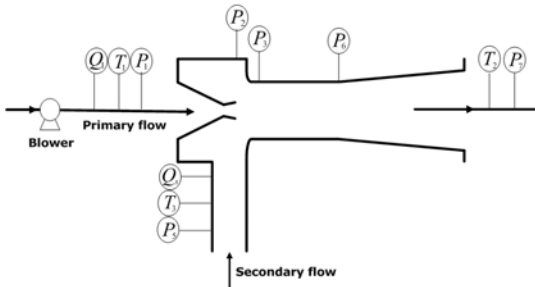


Fig. 3 Schematic of the ejector apparatus

Table 2 Ejector dimension

Nozzle	Throat	
	Dn	$\lambda$
4	15/60	4
5	20/80	
6	25/100	
7	20/0	0
8	20/160	8

### 2.2.6 이젝터의 치수 선정

Table 1의 조건과 지배 방정식을 이용하여 이젝터에서 가장 중요한 nozzle 및 throat의 치수를 결정하였다. 흡인비는 0.55를 목표로 하였다. 이것을 기준으로 계산한 결과 nozzle의 구경은 6mm 과 throat의 구경 치수는 15mm 가 되었다. 즉,  $\omega$ 가 0.4일 때가 이론적으로 최적인 값으로 계산되었다.

### 3. 실험 장치 및 방법

Fig. 3에서와 같은 실험장치를 꾸렸다. Blower의 출력은 10%~90%로 조절하여 공기의 유량을 주입하였으며 이젝터에 따라 입구, 출구에서 압력 (P), 유량(Q), 온도(T)를 측정하였다. 실제 실험장치는 Fig. 4~Fig. 5에 나타나 있다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 노즐을 구경에 따라 4, 5, 6, 7, 8 [mm]로 만들었으며, throat를 길이와 구경에 따라 3종류를 만들었다. 노즐과 throat의 조합에 의해 실험을 진행하였다. 노즐과 throat의 지름비에 따른 entrainment ratio와 throat의 구경과 길이비에 따른 entrainment ratio를 중점으로 각 구간에서 측정한 값을 바탕으로 데이터를 분석하였다<sup>4)</sup>.

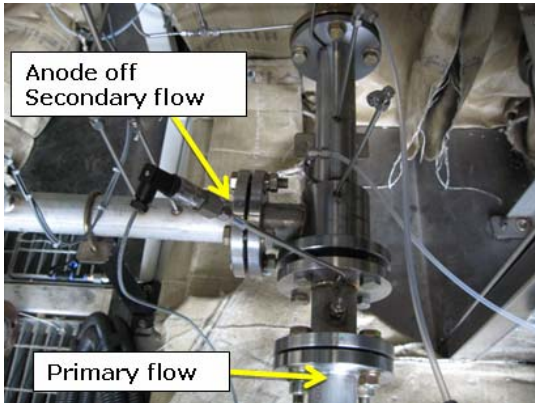


Fig. 4 Ejector apparatus 1

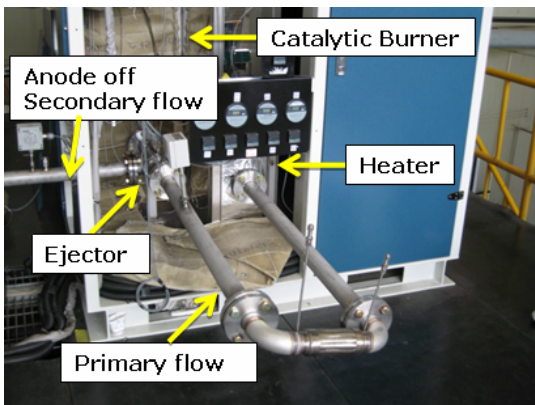


Fig. 5 Ejector apparatus 2

$\dot{m}_s$ 와  $\dot{m}_p$ 는 각각 흡입유체와 구동유체의 질량 유량을 의미한다.

### 4. 결 과

#### 1) $\lambda=4$ 일 때, Dn과 Dt의 변화에 따른 구동 유량과 흡인비의 경향

Fig. 6~Fig. 8은 thorat의 지름(Dt)과 길이(Lt)가 정해져 있을 때, 노즐의 지름별로 motive flow에

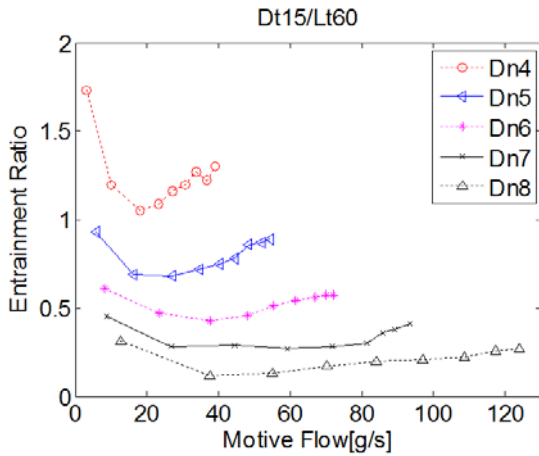


Fig. 6 Motive flow vs. entrainment ratio for Dt15/Lt60 throat

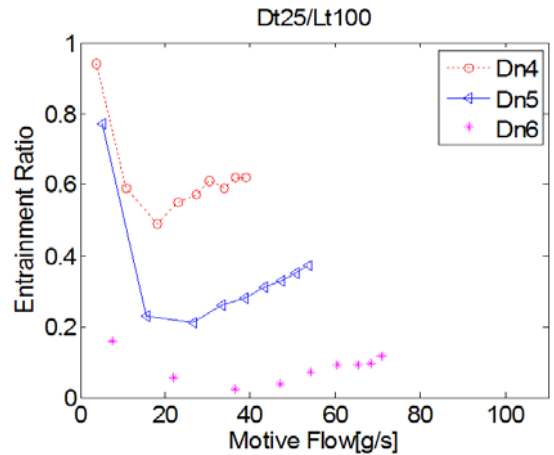


Fig. 8 Motive flow vs. entrainment ratio for Dt20/Lt80 throat

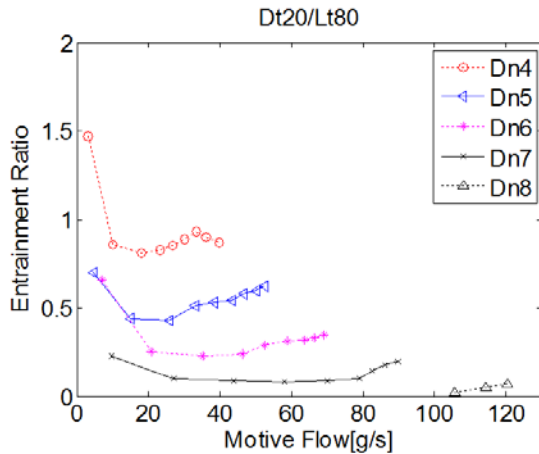


Fig. 7 Motive flow vs. entrainment ratio for Dt20/Lt80 throat

다른 entrainment ratio를 나타낸 것이다.  $\omega$ 가 작을수록 구동 유량이 적어도 흡인비는 크고,  $\omega$ 가 커질수록 구동 유량이 많아도 흡인비 적음을 알 수 있다. 이것은 Dt가 적을수록 흡입 압력이 충분히 형성될 수 있는 공간을 마련해 줄 수 있고, 여기서 Dn이 적을 수록 유체의 구동속도가 빨라져서 증가된 속도에너지만큼 압력이 낮아져서 흡입이 더 잘 되는 분위기가 형성되기 때문이다. 2.2.6에 언급했듯이 5kW 연료전지 시스템에서 최적의 흡인 비에 따른 노즐의 구경이 6 mm이었다. Fig. 6에서 Dn 6의 그래프를 살펴보면 흡인비가 0.5근

처에서 형성되고 있으므로, 이론 결과와 거의 유사함을 알 수 있다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 Dt가 25인 경우에 Dn이 7, 8인 경우에는 흡입이 되지 않았다. Dt의 구경이 커서 suction 압력의 형성이 만족스럽지 못한데다가 구동유량이 적어서 압력변화를 이끌어낼 만큼 구동 유량의 속도가 크지 못해서 생긴 결과이다. 동일한  $\lambda$ 값을 가지더라도 노즐과 목의 구경에 따라 흡인되는 유량의 한계와 그에 따른 압력 변화의 차이가 발생하므로 suction의 차이가 발생하고 노즐과 목의 구경이 커질수록 suction이 발생할 수 있는 밀폐된 공간의 분위기가 형성되기 어려워져서 suction이 어려워지는 현상을 관찰할 수 있었다.

## 2) Dt이 20mm이고 $\lambda=0, 4, 8$ 일 때 구동유량과 흡인비의 경향

Fig. 6, Fig. 9, Fig. 10은 Dt가 20mm으로 고정되었을 때 Lt가 0, 80, 160 [mm]로 변화되었을 때, Dn의 변화에 따른 구동유량과 흡인비의 경향을 살펴본 것이다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 Lt가 0일 때, Dn이 8에서는 흡입이 되지 않았고, 흡인비도 Fig. 6의  $\lambda=4$ 일 때보다도 낮음을 관찰할 수 있었다. 이것은 throat가 너무 짧아서 일정하게 흡입영역을 생성할 수 있는 공간이 부족해서 기인하기 때문으로 볼 수 있다. 그리고, Dn 7일 때 primary 유량이 낮을 때와 Dn 8에서는 primary

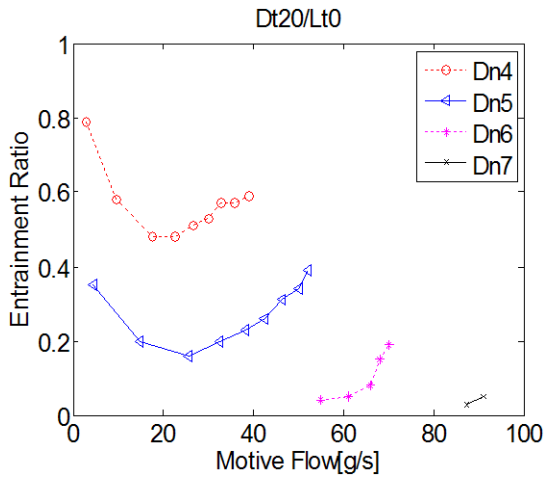


Fig. 9 Motive flow vs. entrainment ratio for Dt20/Lt0 throat

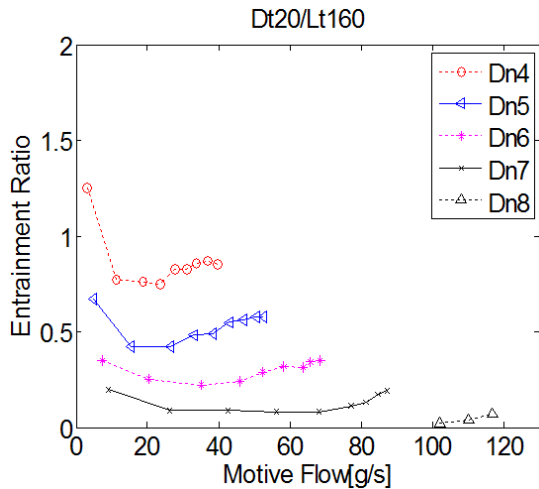


Fig. 10 Motive flow vs. entrainment ratio for Dt20/Lt160 throat

유량이 많이 들어와도 suction이 일어나지 않았다. 오히려 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 Lt가 긴 것이 짧은 때보다 흡인비가 크게 나타남을 알 수 있었다. Dn이 8일 때도 유량이 많은 영역에서는 suction이 발생하였다. Lt가 길게 되면 흐름이 균등하게 분포 되는데 유리한 반면에 압력손실이 크게 나타날 수가 있다. 하지만,  $\lambda=4$ 일 때 가장 큰 흡인비를 나타내는 것으로 보아,  $\lambda$ 값이 흡인비의 중요한 변수임을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서 설계된 이젝터는 전, 후단에 걸리는 압력차이가 크지 않고 절대압이 작으므로 entrainment ratio가 작고 설계의 견실성도 크지 못한 것이 당연하다. 하지만, 유량에 따른 최적의 기하학적인 형상을 찾아낸다면 성능이 좋은 이젝터를 설계할 수도 있다. Cathode의 가스 조성파와 촉매연소기에서 소요되는 수소량을 계산하여, entrainment ratio가 0.55의 값을 가지는 모델이 5kW MCFC에 적합함을 알 수 있었다. Dt가 15mm 일 때, Dn이 6mm가 최적의 형상임을 계산하였고, 그에 따른 이젝터들을 만들어서 실험을 통해, 흡인비에 영향을 미치는 변수들을 찾아내는 실험을 진행하였다.  $\lambda$ 와  $\omega$  모두 흡인비를 결정짓는 중요한 변수임을 확인하였고, 구동유량과 흡입유량이 모두 아음속이므로 최대한  $\omega$ 를 낮게 가져가고  $\lambda$ 는 4 근처에서 이젝터를 만드는 것이 5kW급 MCFC 연료전지에서는 바람직한 모델이라는 것을 알아내었다.

온도 및 가스 조성에 따른 DAE(dry air equivalent)를 찾아서 entrainment ratio 보정 값에 대한 실험을 추가하고, 75kW 및 250kW MCFC급 ejector 설계에 응용하고자 한다. 대용량 이젝터의 설계시에는 기하학, 운동학적, 역학적 상사를 모두 만족시켜서 scale up을 할 수 없으므로 안전율을 충분히 둘 필요성이 있다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 “250kW급 열병합 용융탄산염 연료전지 proto type개발” 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 1) H. El-Dessouky, H.Ettouney, I. Alatiqi, G. Al-Nuwaibit, “Evaluation of steam jet ejectors”, Chemical Engineering and Processing 41 (2002) 551-561.
- 2) Y. Zhu, W. Cai, C. Wen, Y. Li, “Fuel ejector

- design and simulation model for anodic recirculation SOFC system”, *Journal of Power Sources* 173(2007) 437-449.
- 3) 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, 1950, pp. 299-309.
  - 4) M.T.Kandakure, V.G. Gaikar, A.W. Patwardhan, 2005, “Hydrodynamic aspects of ejectors”, *Journal of Chemical Engineering Science* 60 (2005) 6391-6402.
  - 5) R.Yapici, H.K. Ersoy, 2005, “Performance characteristics of the ejector refrigeration system based on the constant area ejector flow model”, *Journal of Energy Conversion & Management* 46 (2005) 3117-3135.
  - 6) Heat Exchanger Institute, Standards for steam jet vacuum systems, 1988, 4<sup>th</sup> edition.