

전산해석을 통한 열증기압축기 설계와 실험적 검증

박일석* · 박상민* · 하지수*

Design of Thermal Vapor Compressor by Numerical Analysis and Experimental Verification

Il-Seouk Park*, Sang-Min Park* and Ji-Soo Ha*

Key Words: Thermal vapor compressor(열증기압축기), Supersonic flow(초음속 유동), Choking(초강), Entrainment ratio(흡입비), Maximum discharge pressure(최대토출압력)

ABSTRACT

A thermal vapor compressor in which the subsonic/supersonic flow appears simultaneously, has been accurately designed through the CFD analysis for the various shape parameters such as the primary nozzle shape, converging duct shape, mixing tube diameter, and so on. The performance of the developed thermal vapor compressor has been experimentally verified to be installed in a Multi Effect Desalination(MED) plant as an important element. In this paper, the effects of each parameter are discussed on the basis of CFD results and the experimental results for various boundary conditions(motive pressure, suction pressure, and discharge pressure) are presented in compared with CFD results. The two results show a good agreement with each other within 2 % accuracy with regard to the entrainment ratio.

1. 서론

열증기압축기(Thermal Vapor Compressor, TVC)는 고압 증기를 이용하여 저압 증기를 중간압으로 이송하는 펌프 역할을 하는 이젝터(ejector)의 일종이다. 회전익을 장착한 일반적인 유체기계들은 회전익이 유체에 작용하는 수직방향 힘을 이용해 유체를 승압 이송시키는 반면 TVC에서는 주노즐(primary nozzle)을 통과하며 형성된 구동증기의 초음속 흐름에 의한 점선방향 힘에 의해 유체가 이송된다. 따라서 터보기계에 비해 에너지 효율이 낮은 단점이 있지만 장치 자체에 구동 부위가 전혀 없으므로 고장률이 매우 낮고 운전 신뢰도가 높으며 반영구적인 사용이 가

능하다. 또한 작동 유체의 상(phase)에 구애받지 않고 적용이 가능하므로 기상 작동유체의 응축이나 액상 작동유체의 공동(cavitation)현상이 문제되지 않는다.

현재까지 TVC 설계를 위하여 1차원 기체역학식들을 조합한 다양한 설계 모델들이 개발되어왔는데⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 이들 설계 모델들은 비점성, 등엔트로피 가정을 도입하고 있으므로 마찰과 혼합에 의한 손실을 보정하기 위하여 다양한 경험 계수들을 도입하여 사용하고 있다. 또한 주유동(primary flow)과 흡입유동(suction flow)이 완벽하게 분리되어 주유동 경계와 TVC 외벽에 의해 형성되는 가상목(hypothetical throat)에서 초강이 발생하는 것으로 가정함으로써 주노즐 출구 영역에서 주유동과 흡입유동간의 혼합과정에 관한 모델이 고려되지 않아 정밀한 TVC 설계에 한계가 있었다.

* (주)현대중공업 산업기술연구소
책임저자 E-mail : einstein@hhi.co.kr

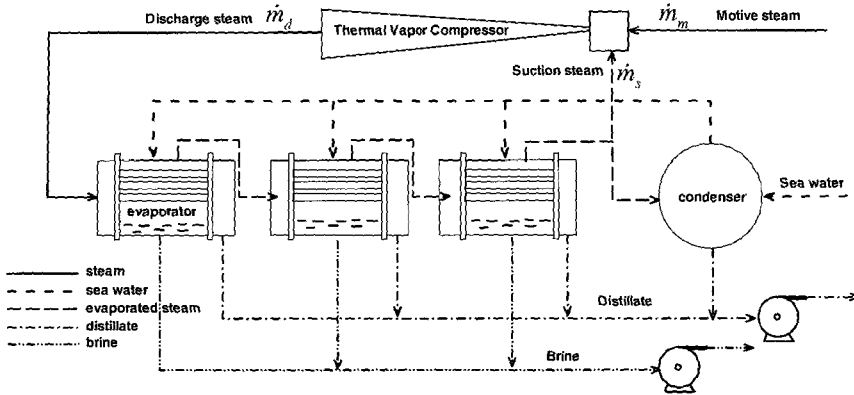


Fig. 1 Schematic view of MED plant

최근에는 TVC 내부의 질량, 운동량, 에너지 보존 식들에 대한 수치해석을 통하여 정밀한 해석을 수행하고 있으며, Riffat⁽⁴⁾ 등은 주노즐의 축방향 위치를 주요 성능 인자로 고려하여, 인자해석(parametric study)을 통해 최적의 주노즐 위치를 밝혀낸 바 있다. TVC 내부 유동에 관한 유한체적해석(finite volume analysis)은 성능을 정밀하게 예측할 수 있게 할 뿐 아니라 내부에서 발생하는 충격/팽창과 및 재순환 영역의 위치, 축방향 압력 분포 등을 확인할 수 있게 하며 이들의 변화에 따라 TVC의 성능 변화를 관찰할 수 있는 장점이 있다.

TVC의 구동증기 에너지는 저압 증기를 흡입, 압축하는데 이용되므로 TVC 성능은 흡입비($\epsilon = \dot{m}_s / \dot{m}_m$, \dot{m}_s = 흡입증기유량, \dot{m}_m = 구동증기유량)와 압축비($\sigma = P_d / P_s$, P_d = 토출증기압, P_s = 흡입증기압)의 곱으로 표현할 수 있으며, 설계 측면에서 이 두 성능비는 서로 상반하는 특성이 있어 어느 하나를 높게 설계하려면 다른 하나의 성능비를 낮게 설계할 수밖에 없다. 반면 운전 측면에서는 임계압축비 이상의 압축비 조건에서는 압축비와 흡입비 사이의 반비례 관계가 성립하지만 그 이하의 압축비 조건에서는 TVC 내부의 쇼킹으로 인하여 운전 압축비에 상관없이 일정한 흡입비로 운전된다(Chen⁽⁵⁾). 잘 설계된 TVC의 운전에서는 설계 조건으로 주어진 압축비보다 조금이라도 높은 압축비 조건에서 흡입비가 급격히 낮아지는데 이는 주어진 압축비 조건에서 흡입비가 최대가 되도록 설계되었음을 의미한다. 본 연구에서는 설계 조건으로 주어진 압축비가 임계압축비가 되도록 TVC의 형상을 조절해 가며 유한체적법에 의한 유동해석을 수행함으로써 손실

을 최소화하고 흡입비를 최대화한 TVC를 설계하였다. 본 논문에서는 하루 평균 약 50 톤의 담수를 생산하는 소형 다중효용증발식(MED) 담수 설비에 적용할 TVC의 압력 조건에 대하여 흡입 성능을 최대화하기 위한 전산해석 설계 방법에 관하여 연구하였다. 전산해석을 통해 설계된 TVC와 Power⁽⁶⁾ 등이 제시했던 이전의 설계 기준을 비교하였으며, 성능 검증을 위해 다양한 압력 조건에서 흡입성능 시험을 실시하여 수치해석 결과와 비교를 통해 실험적 검증을 수행하였다.

2. MED 설비와 열증기압축기

다중효용증발식(MED, multi effect desalination) 담수 설비에서는 Fig. 1과 같이 여러 단의 증발기에 해수가 분사되고 증발기 내부에 수평으로 장착된 증발관의 외벽을 액막의 형태로 흘러내린다. 이 때 증발관 내부의 고온 증기에 의해 해수 액막이 증발하고, 증발한 증기는 다음 증발단의 열원으로 공급되어 다시 해수 액막을 증발시키고 자신은 응축하여 담수로 이용되게 된다. MED 설비의 효율은 식 (1)과 같이 외부에서 공급된 고온 고압 증기 유량에 대한 총 담수 생산량의 비로 나타내어지므로 TVC의 흡입 성능이 전체 설비의 효율에 직접적으로 연관되어 있다.

$$GOR(\text{Gain Output Ratio}) = \frac{\dot{m}_i (\approx n \times \dot{m}_d)}{\dot{m}_m} \quad (1)$$

여기서, \dot{m}_i 는 전체 담수 생산량이고 \dot{m}_d 는 토출증

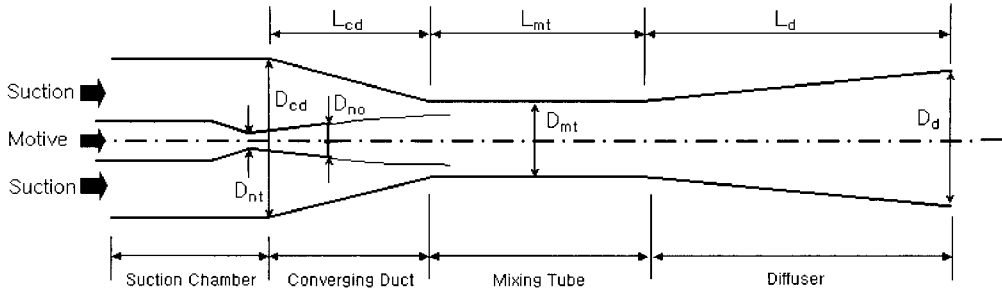


Fig. 2 Shape parameters of thermal vapor compressor

기유량, n 은 MED 설비의 증발기 단수이다. 시스템이 요구하는 담수 생산량을 만족시키면서 GOR을 높이기 위해서는 MED 시스템에서 요구하는 토출증기유량($\dot{m}_d = \dot{m}_m + \dot{m}_s = (1 + \epsilon) \dot{m}_m$)에 대하여 구동증기유량(\dot{m}_m)을 줄이고 흡입증기유량(\dot{m}_s)을 높여 TVC 흡입비($\epsilon = \dot{m}_s / \dot{m}_m$)를 높이는 것이 요구되어진다. 이와 같이 TVC는 MED 설비의 전체 성능에 관여하고 각 부분의 온도, 유량 및 압력을 지배하고 있는 MED의 심장이라 할 수 있으므로 전체 설비의 공정 신뢰도 확보를 위하여 그 성능을 엄밀히 보증할 것과 높은 흡입성능을 가질 것이 요구되어진다.

3. 설계 조건 및 초기 형상 결정

Table 1에 본 연구에서의 TVC 설계 조건이 제시되어 있다. 여기서 P_m 는 구동증기압력이고, 설계상의 요구 조건은 주어진 압력 조건 하에서 흡입비가 최대가 되도록 설계하는 것이다.

Fig. 2에 TVC의 주요 형상 변수 및 각 부분의 명칭을 나타내었다. 유동해석에 의한 설계를 수행하기 위해서는 각 형상 변수들의 초기치수가 필요한데, 본 연구에서는 성능 민감도가 높은 주노즐 목직경(D_{nt}) 및 출구직경(D_{no}), 혼합관(mixing tube) 직경(D_{mt})에 관한 초기 치수를 다음의 절차를 통하여 초기화하였다.

Table 1 Design conditions

P_m [bar a]	P_s [bar a]	P_d [bar a]	\dot{m}_t [ton/day]	ϵ [-]
8	0.1	0.25	340	maximize

우선 주노즐 목직경(D_{nt})은 식 (2)와 같이 구동증기의 유량 및 온도, 압력에 의존한다.

$$\dot{m}_m = \frac{\pi P_m D_{nt}^2}{4\sqrt{T_m}} \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2)$$

구동증기는 포화상태이므로 온도(T_m)는 압력에만 의존적이다. 따라서 구동증기유량이 정해지면 주노즐 목직경이 결정되어진다. 구동증기유량의 결정은 MED 시스템에서 요구하는 토출증기유량 중 구동증기와 흡입증기의 분배를 얼마로 할 것이냐의 문제로 TVC의 구동, 흡입, 토출부의 압력 조건에 의존적이다. Power⁽⁶⁾은 다양한 압력조건들에서 설계 가능한 흡입비를 Fig. 3과 같이 제시하고 있다.

주노즐 출구 직경(D_{no})의 초기 치수는 Chen⁽⁵⁾이 증기이젝터의 경우 최대흡입 조건으로 제시한 주노즐 출구에서 구동증기의 마하수가 4~5가 되도록 결

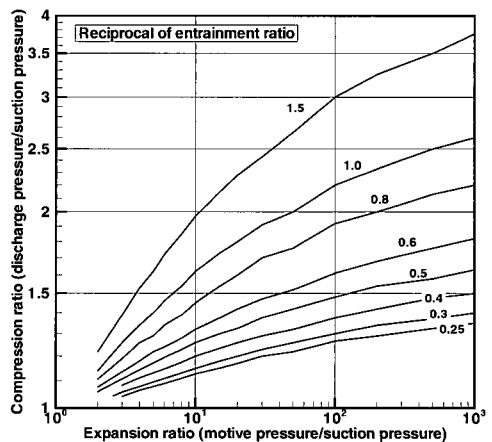
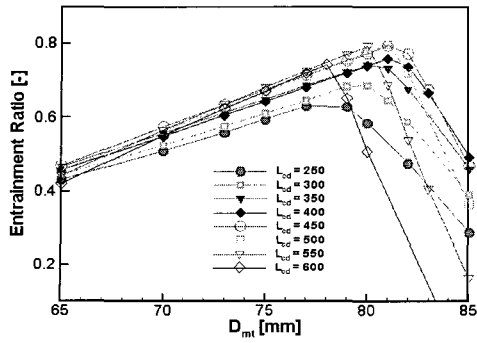
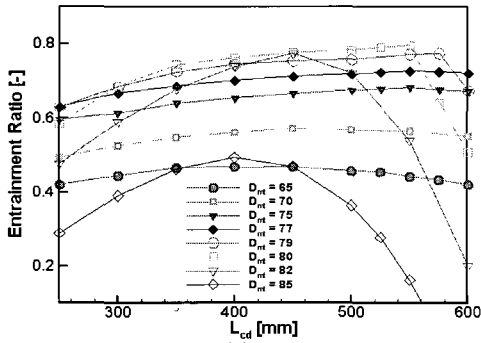


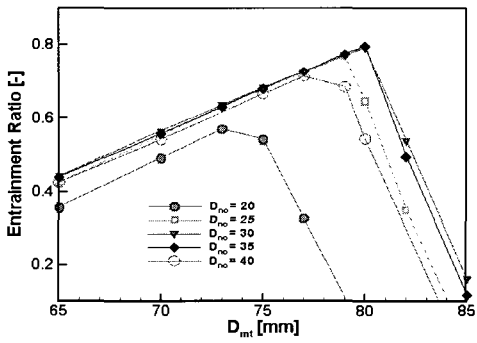
Fig. 3 Steam rate for TVC (Power⁽⁶⁾)



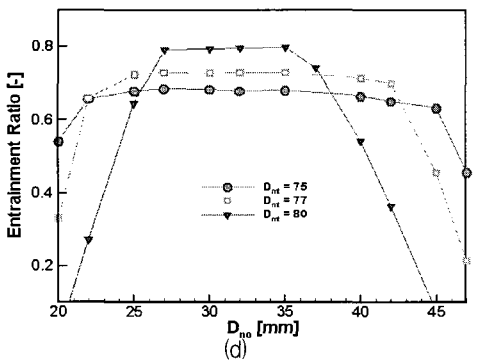
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4 Entrainment ratio of TVC along to dimensional changes of various shape parameters

Table 2 Initialized shape dimension

Unit [mm]			
D_{nt}	10.73	D_d	150
D_{no}	30	L_{cd}	600
D_{cd}	150	L_{mt}	600
D_{mt}	85	L_d	600

정하였으며, 혼합관(mixing tube) 직경 (D_{mt})의 초기 치수는 Huang⁽³⁾ 등이 제시한 가상목 이론을 적용하여 결정하였다.

초기화 단계에서 디퓨저와 축소관(conversing duct)은 모두 3.1°의 확대/축소각을 가지도록 하였으며, 축소관 입구직경은 흡입 증기의 마하수가 약 0.8이 되도록 초기화하였고, 혼합관과 디퓨저의 길이는 축소관과 같은 초기 치수를 가지도록 하였다.

고흡입비의 TVC 형상을 결정하기 위해 본격적으로 TVC의 각 부 치수를 변화시켜가며 유동해석을 실시하기에 앞서 진행된 형상 초기화 과정에서 Table 2에 나타난 초기 형상을 얻었으며 이 결과는 CFD 해석의 초기 조건으로 이용되어진다.

4. 유동해석을 통한 TVC 설계

본 연구에서는 TVC 내부 유동 해석을 위하여 2차원 축대칭 가정을 도입하고 상용 전산해석 코드인 FLUENT를 이용하여 압축성 유동 해석을 실시하였다. 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였으며, 대류항은 2차 정밀도의 선형상류도식(linear up-wind scheme)을 채택하였다.

Table 1의 설계 조건에서 흡입비를 최대화하기 위해 다양한 형상 변수들의 성능 기여도를 평가한 결과 주노즐목직경 및 주노즐출구직경, 혼합관직경, 축소관 길이 (L_{cd}) 등이 민감도가 높은 변수로 판단되었으며, Fig. 4에 주노즐목직경 (D_{nt})이 Table 2의 초기조건과 같이 10.73 mm으로 일정할 때 나머지 변수들의 변화에 따른 흡입비 변화를 나타내었다. Fig. 4 (a)에는 주노즐출구직경 (D_{no})이 30 mm로 일정할 경우에 250~600 mm의 범위에서 축소관길이 (L_{cd})를 변화시키면, 최대흡입성능을 보이는 혼합관직경 (D_{mt})이 축소관길이 (L_{cd})에 따라 동반 증가 후 일정 길이 (약 450 mm) 이상의 축소관에서 감소하고 있다. 또

한 흡입비는 혼합관 직경 변화에 따라 직선적으로 증가한 뒤 다시 직선적으로 감소한다. 증가 추세의 직선 기울기는 여러 축소관길이(L_{cd})의 경우에 비슷한 경향을 보이지만 감소 추세에서는 축소관길이(L_{cd})가 길수록 기울기가 커지고 있다.

Fig. 4 (b)에서도 주노즐출구직경(D_{no})이 30 mm로 일정할 때 축소관길이(L_{cd})의 변화에 따른 흡입비의 변화가 Fig. 4 (a)의 혼합관직경(D_{mt})에 따른 결과에 비해 둔감하지만 특정 범위를 벗어날 경우 급격한 흡입비 감소가 예측됨을 보이고 있다. 또한 어떤 특정 혼합관직경(약 82 mm) 이상에서부터는 축소관길이(L_{cd})에 따른 흡입비 변화가 민감해지기 시작하여 뚜렷한 극대점이 나타나고 있다.

Figs. 4 (c)와 (d)에서는 축소관길이(L_{cd})가 550 mm로 일정한 경우에 주노즐출구직경(D_{no})과 혼합관직경(D_{mt})의 영향을 나타내고 있다. Fig. 4 (d)에서 여러 혼합관직경(D_{mt})에 대하여 최대흡입비를 가지는 주노즐출구직경(D_{no})의 범위가 매우 넓게 나타나고 있고, 그 범위는 혼합관직경(D_{mt})에 따라 좁아지고 있다. 주노즐출구직경(D_{no})이 작을수록 출구에서의 마하수가 상대적으로 작아지고 또한 흡입 증기와의 접촉면적도 줄어들므로 압력차 및 전단력에 의한 흡입 효과가 줄어들게 된다. 또한 주노즐출구직경(D_{no})을 적정 수준 이상으로 키우면, 출구 초음속 제트의 마하수는 크고 접촉 면적은 늘어나지만 흡입 증기의 유로 단면적을 줄이는 효과를 보임으로 흡입 성능이 떨어지게 된다. 흡입비가 거의 일정한 구간이 넓게 나타나는 것은, 증기 흡입량이 흡입증기 측과 주노즐 출구 영역의 압력차 변화에 의해 결정되기보다 주

노즐에서 방사된 구동 증기 흐름과 벽면 사이 가상벽에서의 유동 쇼킹에 의해 지배됨을 의미한다.

Table 1의 설계 조건에 대해 형상 변수들의 초기치수(Table 2)를 조절해가며 TVC 내부유동을 반복하여 해석함으로써 흡입비 0.99의 TVC를 설계하였으며 최종 형상 치수들을 Table 3에 나타내었다. 이는 Fig. 3의 설계 기준에 비해 약 30 % 높은 값이며, 본 연구의 소형 MED 설비의 GOR을 약 14 % 향상시키는 결과이다. Fig. 5에서는 최종 설계된 TVC의 내부 유동장 및 대칭축을 따른 온도, 압력 변화를 나타내었다. 구동증기는 주노즐 출구에서 마하수 4 정도로 방사되어 혼합관에 도달하기까지 충격파와 팽창파가 4~5회 반복적으로 발생하고 있다. 또 혼합관 영역에서 다시 한차례의 충격파를 통과하며 승압되고 디퓨저에서 추가로 압력이 회복된다.

설계된 TVC는 구동증기압, $P_m = 6, 7, 8$ bara 각각에 대하여 흡입증기압을 0.06~0.12 bara 사이의 다양한 운전점에서 성능 테스트가 이뤄졌다. 흡입 증기압은 MED 설비 응축기의 냉각수 유량으로 조절하였으며, 구동증기는 소형 보일러에서 생산하여 압력조정기(regulator)를 통해 일정 압력으로 공급되어졌다. 토출부 압력은 TVC 토출부로 불응축 가스 주입을 통해 조절하였다. Fig. 6에서는, 최종설계에 도

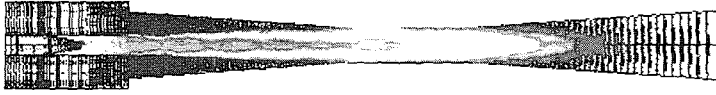
Table 3 Final shape dimension

			Unit [mm]
D_{mt}	9.73	D_d	154
D_{no}	26.83	L_{cd}	550
D_{cd}	150	L_{mt}	300
D_{mt}	80	L_d	580

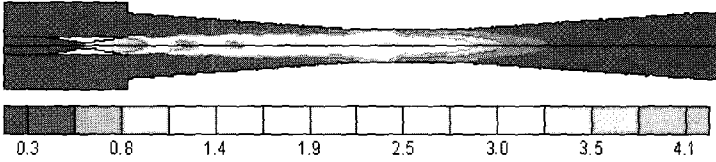
Table 4 Comparison of entrainment ratios between experiment and numerical results

P_m [bara]	P_s [bara]	Motive flow rate [kg/hr]		Suction flow rate [kg/hr]		Discharge flow rate [kg/hr]		Entrainment ratio [-]		error [%]
		experiment	numerical	experiment	numerical	experiment	numerical	experiment	numerical	
8	0.089	308	309	264	267	572	577	0.855	0.864	1.03
8	0.095	308	309	286	285	594	595	0.930	0.922	0.88
8	0.110	308	309	319	326	627	635	1.037	1.053	1.59
7	0.083	272	272	250	249	522	521	0.917	0.915	0.20
7	0.096	272	272	282	283	554	555	1.038	1.040	0.19
7	0.107	271	272	311	316	582	588	1.145	1.162	1.46
6	0.081	234	235	244	241	478	476	1.042	1.028	1.39
6	0.090	235	235	267	266	503	500	1.136	1.132	0.36

(a) Velocity vector



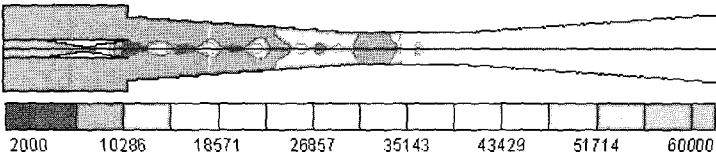
(b) Mach contour



(c) Stream lines



(d) Isobars



(e) Axial pressure & temperature

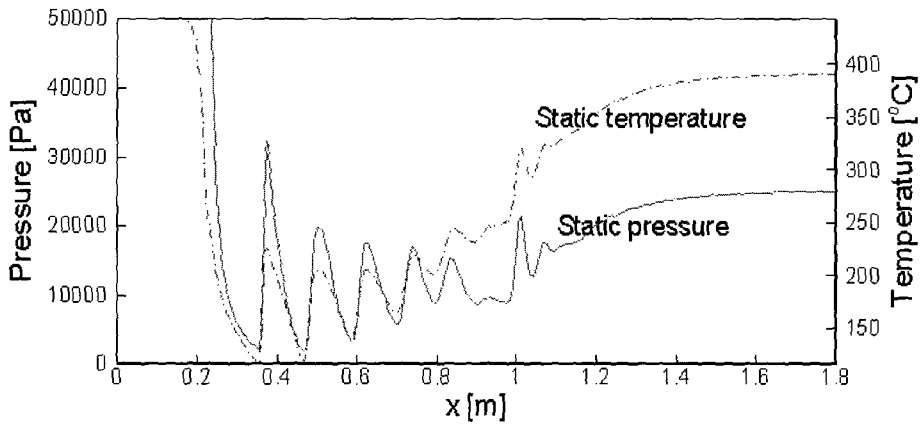


Fig. 5 Flow fields in TVC : (a) velocity vector, (b) Mach number, (c) stream lines, (d) isobars and (e) axial pressure and temperature

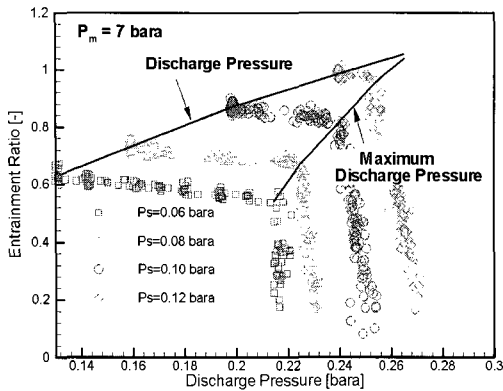


Fig. 6 Experimental results for various operation conditions

달하기 전에, 설계조건에서의 흡입비가 0.8인 TVC에 대하여 구동증기압 7 bara, 흡입증기압 0.06, 0.08, 0.1, 0.12 bara의 경우의 실험 결과이다. 흡입증기압이 높을수록 높은 흡입비가 예측되고 있으며, 특정 토출압 이상의 조건에서 흡입비가 급격히 감소하는 단일 초킹(single choking) 영역으로 천이하고 있다. 그림 좌측의 토출압(discharge pressure) 곡선은 각 운전 조건에서 실제로 TVC 토출부에 형성되는 압력을 나타내며, 우측의 최대토출압(maximum discharge pressure) 곡선은 각 운전 조건에서 TVC 토출부의 압력을 불응축 가스 주입을 통해 인위적으로 증가시켜 흡입비의 현저한 감소가 나타나기 시작하는 토출부 압력을 연결한 선이다. 높은 흡입증기압 조건에서 운전될수록 토출압은 최대 토출압에 근접하고 있다. Table 3에 흡입비가 0.99로 최대화되도록 최종 설계된 TVC에 대해서 구동증기압력과 흡입부 압력을 다양하게 조절하여 TVC 흡입 성능을 시험하였으며, Table 4에 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였는데 모든 경우에 수치해석 결과가 흡입비 2 % 이내로 실험 결과를 정확하게 예측하였다.

6. 결론

수치해석을 통하여 열증기압축기의 다양한 형상 변수 중 성능 민감도가 높은 변수들을 선별하였으며, 각 형상 변수들의 변화에 따른 흡입비 경향을 파악하였다. 또 주요 형상 변수들의 치수를 변화시키며 반복 해석을 수행함으로써 이전 설계 기준에 비해 약 30 % 높은 흡입비의 TVC를 설계하였다. 이로써 MED 설비의 GOR을 약 14 % 향상시킬 수 있었다. 유동

해석을 통하여 설계된 TVC는 소형 MED 설비에 장착하여 성능 실험을 실시하였다. 다양한 운전 압력 조건 하에서 수치해석이 정확히 실험 결과를 예측하고 있음을 확인할 수 있었다. MED와 같이 이젝터나 TVC의 역할이 중요한 장치에서 반복적인 유동해석을 통해 TVC의 설계 및 성능 예측을 수행함으로써 전체 시스템의 신뢰도를 높이고 고성능의 장치를 개발할 수 있었다.

참고문헌

- (1) J. C. Dutton and B. F. Carroll, 1986, "Optimal Supersonic Ejector Designs," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 108, pp. 414~420.
- (2) H. Christensen, 1983, "Application of Gas-Dynamic Functions for Steam Ejector Design," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 4, pp. 83~105.
- (3) B. J. Huang, J. M. Chang, C. P. Wang, and V. A. Petrenko, 1999, "A 1-D Analysis of Ejector Performance," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 22, pp. 354~364.
- (4) S. B. Riffat and S. A. Omer, 2001, "CFD Modelling and Experimental Investigation of an Ejector Refrigeration System using Methanol as the Working Fluid," *International Journal of Energy Research*, Vol. 25, pp. 115~128.
- (5) Y. Chen and C. Sun, 1997, "Experimental Study of the Performance Characteristics of a Steam-Ejector Refrigeration System," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 15, pp. 384~394.
- (6) R. Power, 1994, *Steam Jet Ejectors for the Process Industries*, McGraw-Hill, New York.