

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.12.931

전산해석을 통한 고압열증기압축기 형상변수에 관한 강건 설계

박 일 석[†]

(2008년 7월 24일 접수, 2008년 10월 3일 수정, 2008년 11월 2일 심사완료)

Robust Design for Shape Parameters of High Pressure Thermal Vapor Compressor by Numerical Analysis

Park Il Seouk

Key Words: Thermal Vapor Compressor(열증기압축기), Supersonic Flow(초음속 유동), Choking(초킹), Entrainment Ratio(흡입비), Maximum Discharge Pressure(최대토출압력)

Abstract

A high motive pressure thermal vapor compressor(TVC) for a commercial multi-effect desalination(MED) plant is designed to have a high entraining performance and its robustness is also considered in the respect of operating stability at the abrupt change of the operating pressures like the motive and suction steam pressure which can be easily fluctuated by the external disturbance. The TVC having a good entraining performance of more than entrainment ratio 6.0 is designed through the iterative CFD analysis for the various primary nozzle diameter, mixing tube diameter and mixing tube length. And then for a couple of TVC having a similar entrainment ratio, the changes of the entrainment ratio are checked along the motive and suction pressure change. The system stability is diagnosed through the analyzing the changing pattern of the entrainment ratio.

1. 서 론

열증기압축기(Thermal Vapor Compressor, TVC)는 초음속 주노즐(primary nozzle)과 이를 둘러싼 혼합관(mixing tube), 디퓨저 등으로 구성되어, 고압 증기를 내부 주노즐로 통과시켜 발생하는 초음속 유동에 의해 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 구동증기가 주노즐을 통과하며 형성한 초음속 유동의 접선방향 힘 그리고 흡입증기의 정체압과 이보다 낮게 형성되는 구동증기의 주노즐 출구압 간의

압력차에 의해 유체가 이송된다. 그러므로 이젝터는 터보기계류에 비해 에너지 효율이 낮은 단점이 있지만 장치 자체에 구동 부위가 전혀 없으므로 고장률이 매우 낮고 운전 신뢰도가 높으며 반영구적인 사용이 가능하다. 또한 작동 유체의 상(phase)에 구애받지 않고 적용이 가능하므로 기상(gas phase) 작동유체의 응축이나 액상(liquid phase) 작동유체의 공동(cavitation)현상이 문제되지 않는다. 또한 대용량의 유체를 압축 이송할 수 있기 때문에 V/STOL 항공기의 추력증강, 석유화학 플랜트의 추기설비, 대형 냉동공조기, 해수담수화설비 등에 널리 이용되고 있다.

TVC 관련 초기 연구는 TVC 내부에서 아음속 및 초음속 유동이 공존하고 주노즐을 통과한 후 극저압 상태의 구동증기와 흡입증기가 혼합되는 등의 복잡한 유동특성 때문에 TVC 자체의 설계 기법 개발에 초점이 맞춰졌으나 최근에는 앞서 기술한 TVC의 장점들로 인해 적용 분야가 확대

[†] 회원, 포스코 기술연구소

E-mail : einlucy@yahoo.co.kr

TEL : (054)220-6355 FAX : (054)220-6914

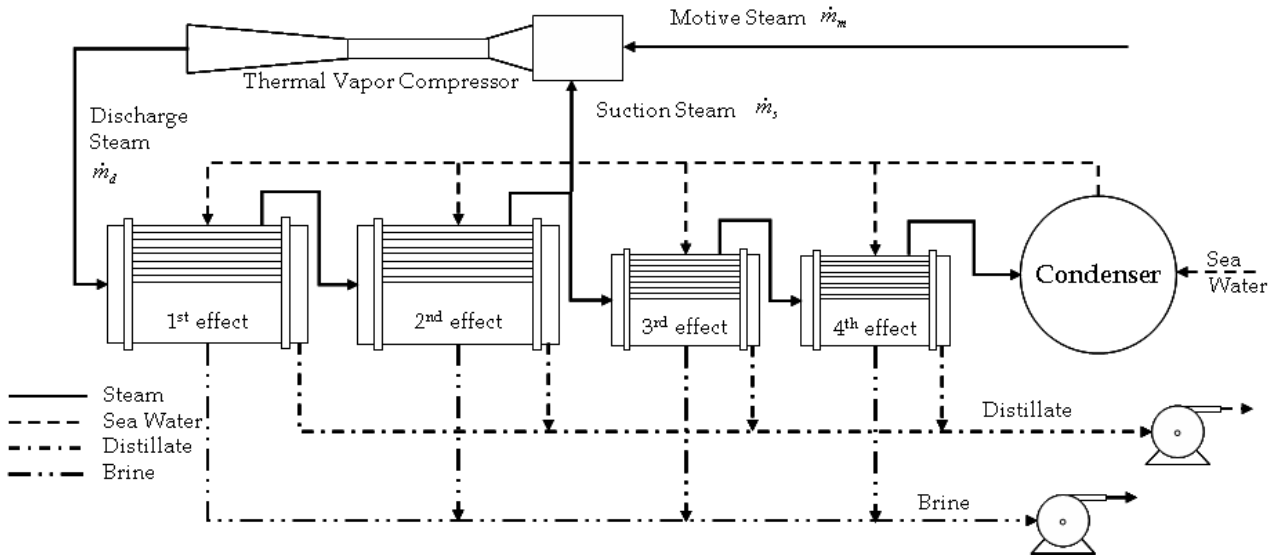


Fig. 1 Schematic view of MED plant

됨에 따라 다양한 산업설비에 TVC의 적용과 이에 따른 모설비의 성능 특성에 대한 연구 사례가 많이 발표되고 있다. 특히 다중효용증발식 담수 설비(MED, Multi-Effect Desalination)에서는 TVC가 전체 공정을 지배하는 중심 역할을 하고 있어 이에 대한 엄밀하고 강건한 설계가 요구되어지고 있다.

Dutton,⁽¹⁾ Christensen,⁽²⁾ Huang⁽³⁾ 등은 1차원 기체역학식들을 조합하여 간편한 설계 및 해석 모델들을 개발하였는데 이들 설계 모델은 비점성, 등엔트로피 가정을 도입하고, 흡입유동(suction flow)이 주유동(primary flow) 경계와 TVC 외벽에 의해 형성되는 가상목(hypothetical throat)에서 초킹(choking)되는 것으로 가정하여 요구되는 흡입 유량이 만족되도록 형상변수들의 치수를 결정하였다. 최근에는 TVC 내부의 질량, 운동량, 에너지 보존식들에 대한 유한체적해석(Finite Volume Analysis)을 통하여 정밀한 해석을 수행하고 있으며, Riffat⁽⁴⁾ 등은 주노즐의 축방향 위치를 주요 성능 인자로 고려하여, 인자 해석(parametric study)을 통해 최적의 주노즐 위치를 찾는 최적설계 연구가 수행된 바 있다.

박일석⁽⁵⁾ 등은 1차원 설계기법에 포함된 많은 가정과 이를 보완하기 위해 사용하고 있는 경험계수들의 불완전성을 해소하기 위해 우선 유한체적법을 이용한 전산유체역학(CFD) 해석을 통하여 TVC 내부의 유동 현상을 파악하였으며 다음으로 다양한 형상 변수들의 영향도 분석을 통해 주요

형상 변수들을 도출하고 이들을 변화시켜가며 CFD해석을 수행함으로써 TVC를 설계하고 실험적으로 검증하였다.

Park⁽⁶⁾ 등은 반복된 전산유체역학 해석을 통해 바닷물을 이용해 매일 50 ton의 담수를 생산할 수 있는 소규모 다중효용증발식 담수설비에 적용할 TVC를 설계하고 실제설비에 적용하여 구동증기압 및 흡입증기압의 변동에 따라 모설비인 소규모 다중효용증발식 담수설비의 성능변화 및 운전안정성에 대해 평가하였다.

본 논문은 TVC가 채택된 다중효용증발식 담수 설비(MED-TVC)에서 TVC의 강건설계(robust design)에 관한 연구 결과를 담고 있다. 박일석⁵ 등이 제시한 주요 형상 변수들인 주노즐 출구 직경과 혼합관 직경의 크기를 변화시킨 여러 형상의 TVC들에서 외란에 의해 쉽게 변동될 수 있는 구동 및 흡입증기압이 변화함에 따라 TVC의 흡입비 변화를 추적함으로써 설계된 여러 형상의 TVC들의 운전영역 변화를 예측하여 각 TVC의 강건성(robustness)을 평가하였다.

2. MED-TVC 시스템

MED 설비에서는 외부로부터 공급되는 증기를 Fig. 1과 같이 직렬로 연결된 증발기들 중 첫 번째 증발단(first effect)의 수평관 내부(tube-side)로 투입시켜 관 외벽을 타고 흘러내리는 해수를 증

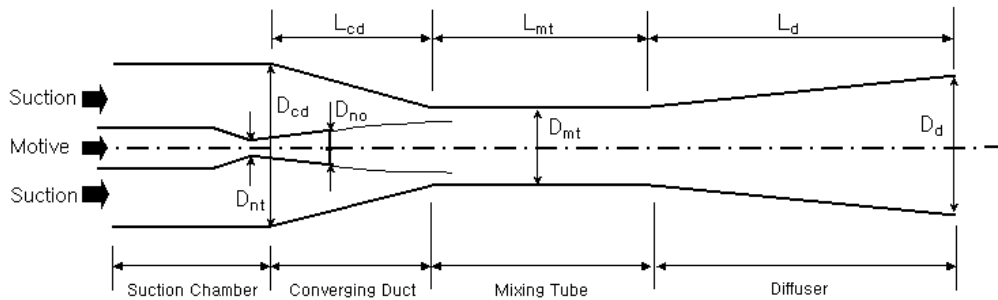


Fig. 2 Shape parameters of thermal vapor compressor

발시킨다. 이 때 관 외부(shell-side)에서 증발한 수증기는 다음 증발단의 관 내부로 투입되어 다시 관 외벽의 해수 액막류(sea water film flow)를 증발시키고 자신은 관 내부에서 응축되어 생산수로 저장된다. 이와 같은 MED 설비의 효율은 식 (1)과 같이 외부에서 공급되는 증기량(\dot{m}_m)에 대한 각 증발단에서 생산되는 생산수량의 총합(총 생산수량, \dot{m}_s)의 비인 GOR(Gained Output Ratio)로 표시한다.

$$GOR(\text{Gained Output Ratio}) = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_m} \quad (1)$$

MED 시스템의 증발기에서는 공급되어진 증기(\dot{m}_d)가 관내에서 완전히 응축하고 관 외부에서 거의 같은 양의 증기를 발생시키므로 증발기 첫 단으로 공급되는 증기량만 동일하다면 전체 증발기를 통해 얻게 되는 총생산수량(\dot{m}_s)도 거의 동일하게 된다.

다만 TVC를 채택한 MED 설비에서는 중간 증발기에서 발생하여 다음 증발기로 보내지는 증기 중 일부 (TVC 흡입유량, \dot{m}_s)를 TVC가 흡입하고 이를 외부에서 공급되는 구동증기(\dot{m}_m)와 혼합하여 증발기 첫 단으로 공급함으로써 실질적으로 외부로부터 공급받는 증기량을 줄일 수 있게 되어 GOR의 향상을 꾀할 수 있다. 따라서 TVC의 흡입성능(흡입비, $\varepsilon = \dot{m}_s/\dot{m}_m$, \dot{m}_s =흡입증기유량, \dot{m}_m =구동증기유량)을 높이는 것은 모설비의 성능을 향상시키는데 직접적으로 기여한다.

이와 같이 TVC는 MED 설비의 전체 성능에 관여하고 각 부분의 온도, 유량 및 압력을 지배하고 있는 MED의 심장이라 할 수 있으므로 모

설비의 효율 향상을 위해 높은 흡입성능 및 전체 설비의 공정 신뢰도 확보를 위하여 그 성능을 엄밀히 보증할 것과 외란에 의해 운전조건이 변동할 경우에도 급격한 성능 변화가 발생하지 않는 강건성을 가질 것이 요구되어진다.

3. TVC의 성능특성

TVC는 Fig. 2와 같이 바깥쪽의 큰 축소 확대 관 내부에 작은 초음속 주노즐(primary nozzle)이 있는 형상을 가지고 있다. 고압의 구동증기(motive steam)가 주노즐을 통과하면 주노즐 출구에서 극저압의 초음속 흐름이 만들어지고 이로 인한 전단력의 작용과 압력차로 저압의 흡입증기(suction steam)가 TVC 내부로 유입된다. 주유동과 흡입유동은 축소관(converging duct)과 혼합관(mixing tube)을 통해 서로 혼합(mixing)되어 디퓨저를 통과한 후 모설비로 배출된다.

TVC의 구동증기 에너지는 저압 증기를 흡입, 압축하는데 이용되므로 TVC 성능은 흡입비와 압축비($\sigma = P_d/P_s$, P_d =토출증기압, P_s =흡입증기압)의 곱으로 표현할 수 있으며, 설계 측면에서 이 두 성능비는 서로 상반되는 특성이 있어 어느 하나를 높게 설계하려면 다른 하나를 낮게 설계할 수밖에 없다. 반면 운전 측면에서는 Fig. 3과 같이 임계압축비(critical compression ratio = P_d^*/P_s , P_d^* = critical discharge pressure, 임계토출압) 이상의 압축비 조건에서는 압축비와 흡입비가 서로 반비례 하는 단일 초킹(single choking) 운전모드가 나타나지만 그 이하에서는 TVC 내부의 초킹 현상으로 인하여 운전 압축비에 상관없이 흡입비가 일정하게 유지되는 이중초

Table 1 Dimensions from initial optimum design
Unit [mm]

D_{nt}	7	D_d	140
D_{no}	30	L_{cd}	100
D_{cd}	150	L_{mt}	800
D_{mt}	75	L_d	800

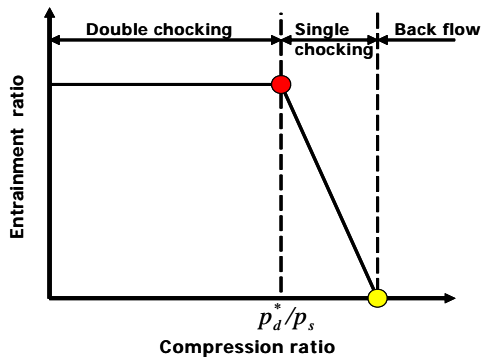


Fig. 3 General performance curve of TVC

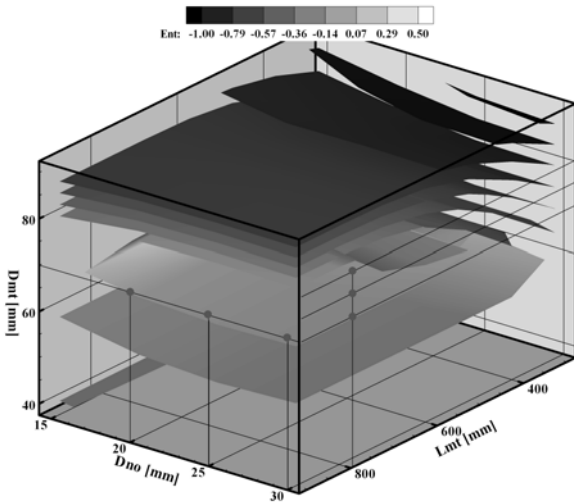


Fig. 4 Isosurfaces of the entrainment ratio for various shape dimensions

킹(double choking) 운전모드가 나타난다(Chen⁽⁷⁾). 일반적인 터보기계는 전체 운전영역에서 압축비와 작동유량이 반비례하며 안정적인(stable) 운전 특성을 보이는 반면 TVC는 임계압축비 이상에서 급격한 흡입 유량 변동 및 불안정한 운전특성이 나타나므로 예상되는 모든 운전 범위에서

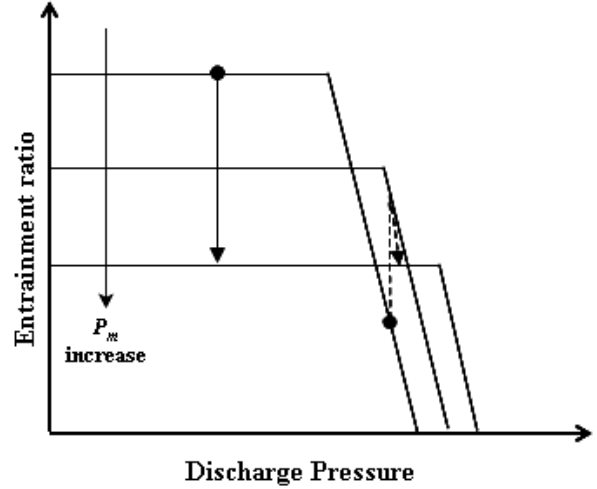


Fig. 5 Performance along P_m at constant P_s ; solid line-double choking, dashed line-single choking

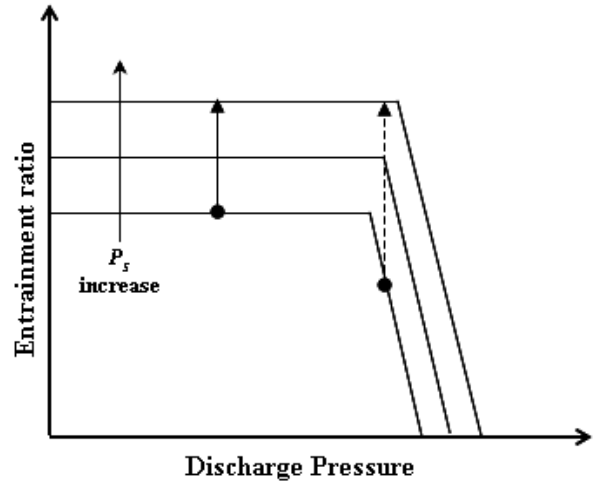


Fig. 6 Performance along P_s at constant P_m ; solid line-double choking, dashed line-single choking

임계압축비를 넘지 않도록 강건하게 설계하는 것이 필요하다.

4. TVC의 최적설계 및 강건설계

본 연구의 TVC 설계 압력 조건은 구동증기압력, P_m 이 15 barA 이고 흡입증기압, P_s 가 0.1 barA , 토출증기압, P_d 는 0.25 barA이다. 설계상의 요구 조건은 주어진 설계 압력 조건 하에서 흡입비가 크면서도 구동증기압, 15 ± 1 barA 및 흡입증기압, 0.1 ± 0.02 barA의 운전 압력 변화 범위에 대해 Fig. 3에서와 같이 흡입비가 급격히 감소

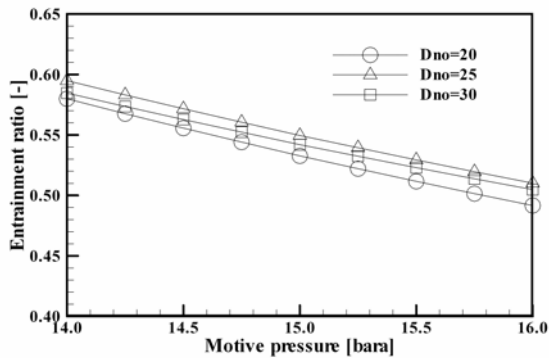


Fig. 7 Performance along P_m at $P_s=0.1 \text{ barA}$ for various primary nozzle exit diameter

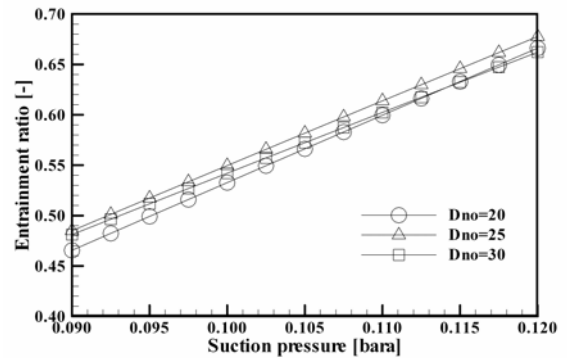


Fig. 9 Performance along P_s at $P_m=15 \text{ barA}$ for various primary nozzle exit diameter

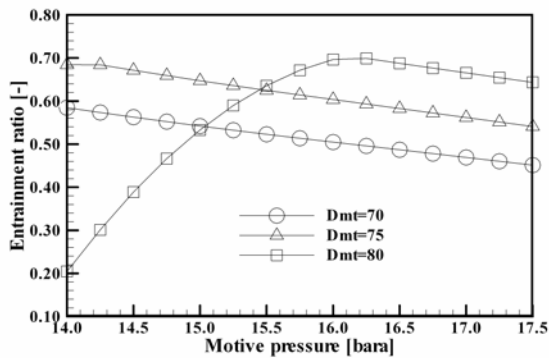


Fig. 8 Performance along P_m at $P_s=0.1 \text{ barA}$ for various mixing tube diameter

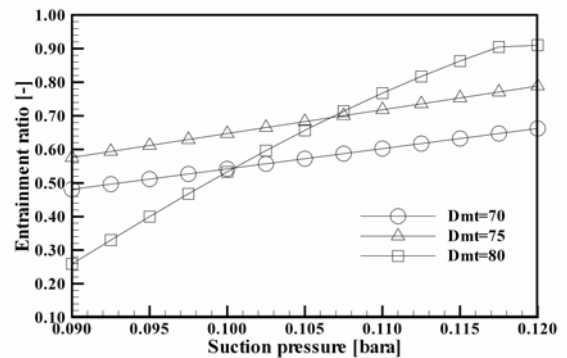


Fig. 10 Performance along P_s at $P_m=15 \text{ barA}$ for various mixing tube diameter

하는 단일쇼킹(single choking) 영역으로의 운전모드 전환이 발생하지 않도록 강건하게 설계하는 것이다.

본 연구에서는 초기최적설계를 위해 박일석⁽⁵⁾ 등이 사용하여 실험결과와의 비교를 통해 정확성이 검증된 반복적인 CFD 해석에 의한 설계를 채택하여 사용하였다. Fig. 4에 주노즐 출구직경(D_{no}), 혼합관 직경(D_{mt}), 혼합관 길이(L_{mt})를 변화시켜가며 CFD 해석을 실시하여 얻은 흡입비 분포를 나타내고 있다. 혼합관직경이 80 mm 이상이 되면 흡입비가 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다. 반면 그 이하에서는 흡입비가 완만하게 변화하고 있다. Table 1에는 반복적인 CFD 해석결과, 최고 흡입비를 나타내는 것으로 나타난 TVC 형상 정보이다. 이때 TVC의 흡입비는 0.614이다.

Park⁽⁶⁾ 등은 소규모 MED 설비에 상용 TVC를 장착하여 일정한 흡입증기압 조건에서 구동증기압을 변화시켰을 때와 일정한 구동증기압 조건에서 흡입증기압을 강제로 변화시켰을 때의 TVC

성능곡선을 실험적으로 찾아 제시하였다. Park⁽⁶⁾ 등의 실험결과에 의하면 Fig. 5~6과 같이 일정한 흡입증기압 조건에서 구동증기압이 증가하면 흡입비는 감소하고 임계토출압은 증가하며, 일정한 구동증기압 조건에서 흡입증기압이 증가하면 흡입비와 임계토출압이 모두 증가한다.

본 연구에서는 설계조건으로부터 흡입비가 최대가 되도록 하는 최적설계 과정에서 도출된 Table 1의 TVC 형상에 대해 추가로 주노즐 출구직경(D_{no})을 20, 25 mm로, 혼합관 직경(D_{mt})을 70, 80 mm로 변경하였을 때 구동증기압(P_m)이 14~16 barA, 흡입증기압(P_s)이 0.09~0.12 barA로 변동할 때 각 형상의 TVC에 대해 CFD 해석을 통하여 흡입비를 예측하고 이를 근거로 각 TVC의 강건성을 검토하였다. 유동해석을 위해서는 Park⁽⁶⁾ 등이 검증하여 사용한 상용 CFD 코드인 FLUENT S/W를 사용하였다. 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였고, 셀 수 20,000개의 사각

정렬 격자계가 사용되었다. 대류항은 2차 상류도식을 적용하였으며 케이스당 계산시간은 코어2듀오 1.8GHz 계산기에서 약 4시간 정도 소요되었다.

Fig. 7에는 혼합관 직경이 70 mm이고 주노즐 출구직경이 20, 25, 30 mm인 경우에 대해 구동증기압을 변화시켰을 때의 흡입비 변화 결과를 나타내었다. 일반적으로 MED 시스템의 공급 증기압은 그 압력이 항상 일정하지는 않으므로 본 연구에서는 설계 압력인 15 barA에서 ± 1 barA 범위에서 구동증기압이 변화할 때의 결과를 해석하였다. 이 때 실제로는 토출증기량의 변화에 의해 토출증기압이 변하게 되지만 본 연구에서는 설계치인 0.25 barA가 유지된다고 가정하였다. 일반적으로 TVC가 이중초킹 모드로 운전된다면 구동증기압이 감소함에 따라 흡입비가 증가하게 된다. Fig. 7에서 전체 구동증기압 범위에서 모든 경우가 구동증기압 감소에 따라 흡입비가 증가하고 있다. 이것은 해당 구동증기압 변동 범위에서 TVC가 모두 이중초킹 운전영역에서 운전되고 있음을 의미한다. Fig. 5의 실선 이동 경로와 같이 구동증기압이 증가하는 범위에서 TVC가 이중초킹 영역에서의 운전을 유지하는 경우에는 구동증기압이 증가함에 따라 흡입비가 감소하고, 반면 점선 이동 경로와 같이 단일초킹 운전영역의 TVC는 구동증기압이 증가함에 따라 단일초킹 운전영역에서는 흡입비가 상승하고 이중초킹 영역으로 천이한 후에는 흡입비가 감소하는 영역이 나타난다.

Fig. 8에서는 주노즐 출구직경(D_{no})이 30 mm로 일정하고 혼합관 직경(D_{mi})이 70, 75, 80 mm인 경우에 구동증기압 변동에 따른 흡입비 변화를 나타내었다. Park⁽⁶⁾ 등이 지적한 바와 같이 혼합관 직경은 매우 민감한 설계 변수로써 그 값의 작은 차이에도 흡입비 차이가 매우 크게 나타나고 있다. 혼합관 직경이 75 mm인 기본 형상의 TVC가 설계 구동증기압인 15 barA에서 가장 큰 흡입비를 가진다. 혼합관 직경이 80 mm인 경우는 설계점에서의 흡입비도 75 mm의 경우에 비해 작고 천이가 16 barA 이상에서 일어나 설계점 자체가 단일초킹 모드에 속해있게 되어 최적설계 및 강건설계 면에서 모두 잘못된 설계가 된다. 혼합관 직경이 70 mm인 경우는 모든 구동증기압 변동범위에서 단일초킹 모드로의 천이는 일어나

지 않지만 설계점에서의 흡입비가 75 mm의 경우보다 작다.

Fig. 9에는 혼합관 직경이 70 mm이고 주노즐 출구직경이 20, 25, 30 mm인 경우에 대해 흡입증기압을 변화시켰을 때의 흡입비 변화 결과를 나타내었다. MED 시스템의 흡입증기압은 응축기에 공급되는 해수유량 및 온도에 의해 변화될 수 있으며 본 연구에서는 0.09 barA에서 0.12 barA의 흡입증기압 변동 범위에서 각 TVC의 흡입비 변화를 검토하였다. 주노즐 출구직경 20, 25, 30 mm의 모든 경우에 전체 흡입증기압 변동 범위 내에서 흡입비와 흡입증기압이 동일한 기울기로 비례하고 있다. Fig. 10에서는 주노즐 출구직경이 30 mm이고 혼합관 직경이 70, 75, 80 mm인 경우에 대한 흡입증기압 변화에 따른 흡입비 변화 결과를 나타내고 있다. 혼합관 직경이 80 mm인 경우의 흡입비에 대한 흡입증기압 변화 기울기가 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 혼합관 직경이 70, 75 mm인 경우에는 TVC가 이중초킹 모드에서 운전되고 있고 80 mm인 경우에는 단일초킹 모드에서 운전되고 있기 때문이다. Fig. 11과 같이 구동증기압이 일정할 때 흡입증기압을 증가시키면 이중초킹(실선) 운전영역에서 보다 단일초킹(점선) 운전영역에서 흡입비 증가 폭이 더 크기 때문이다. Fig. 10의 혼합관 직경이 80 mm인 경우에서 흡입증기압이 0.115 barA 이상에서 다시 기울기가 작아지는 것을 확인할 수 있는데 이것은 Fig. 6의 점선 이동 경로와 같이 TVC가 단일초킹에서 이중초킹으로 천이하는 것을 의미한다.

5. 결론

MED 설비에 있어서 열증기압축기는 모설비의 성능과 전체 공정을 지배하는 중요 부분으로서 다양한 외란 요소의 변동에도 안정적인 운전이 유지되도록 강건한 설계가 필요하다. 본 연구에서는 열증기압축기의 강건설계를 위해 주어진 설계 압력조건에서 다양한 형상 변수들을 바꾸어가며 반복적인 수치해석을 수행하여 흡입비가 최대가 되도록 초기 최적설계 형상을 도출하였다. 기본 최적설계 형상에서 추가로 혼합관 직경과 주노즐 출구직경을 증가/감소시킨 형상의 TVC에

대해 외란에 의하여 쉽게 변동 가능한 구동증기압 및 흡입증기압을 실제 발생 가능한 변동 범위 내에서 변화시켜가며 유동해석을 수행하여 압력변동에 따른 흡입비 변화를 추적하고 이를 통해 정해진 압력변동 범위 내에서 단일초킹 운전영역으로의 천이가 발생하는 지를 판단하여 각 형상의 TVC에 대해 압력변동 외란에 대한 강건성을 평가하였다.

본 연구를 통해 초기 최적설계로부터 유사한 흡입성능을 보이는 여러형상의 열증기압축기에 대해 구동증기압 및 흡입증기압의 변동이 생길 경우에 각 형상의 열증기압축기가 이중초킹 모드를 유지할 것인지를 흡입비 변화 패턴을 관찰하여 평가하였으며, 실제로 설계점에서는 유사한 흡입성능을 가지는 열증기압축기들이 운전압력의 변화에 따라 각기 다른 강건성을 나타내는 것을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Dutton, J. C. and Carroll, B. F., 1986, "Optimal Supersonic Ejector Designs," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 108, pp. 414~420.
- (2) Christensen, H., 1983, "Application of Gas-Dynamic Functions for Steam Ejector Design," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 4, pp. 83~105.
- (3) Huang, B. J., Chang, J. M., Wang, C. P. and Petrenko, V. A., 1999, "A 1-D Analysis of Ejector Performance," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 22, pp. 354~364.
- (4) Riffat, S. B. and Omer, S. A., 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) Park, I. S., Park, S. M. and Ha, J. S., 2005, "Design of Thermal Vapor Compressor by Numerical Analysis and Experimental Verification," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 8. No. 6, pp. 33~39.
- (6) Park, I. S., Park, S. M. and Ha, J. S., 2005, "Design and application of thermal vapor compressor for multi-effect desalination plant," *Desalination*, Vol. 182, pp. 193~202.
- (7) Chen, Y. and Sun, C., 1997, "Experimental Study of the Performance Characteristics of a Steam-Ejector Refrigeration System," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 15, pp. 384~394.