

진공 시스템용 스팀 이젝터 개발

최 석호* · 이 경우** · 천 무환** · 백 민수**

Development of the steam ejector for vacuum system

Seokho Choi*, Kyeongwoo Lee**, Muhwan Chon**, Minsu Paek**

Key Words : Vacuum system(진공시스템), Ejector(이젝터), Steam consumption(스팀 소모량)

ABSTRACT

A vacuum system with ejector has been widely used because of its simple construction and easy maintenance. Ejectors are the main part of the vacuum system, of which designs determine the efficiency of vacuum system. The ejector with the capacity of 1.5ton/hr steam consumption was designed and tested. The results showed that the tested values are satisfied with the designed specifications. Comparing with other ejectors designed by overseas specialist makers, it seems to have a good performance.

1. 서론

대표적인 증발식 담수장치로서, MSF(Multi Stage Flashing), MED(Multi Effect Distillation)설비는 압력을 대기압보다 낮게 유지시켜서 낮은 온도에서도 바닷물이 증발이 이루어지도록 하는 원리를 이용하고 있다. Fig. 1은 MSF process를 나타내고 있으며, 이젝터와 콘덴서로 구성된 진공시스템이 상부에 설치되어 있어 증발기내의 압력을 진공으로 유지시킨다.

일반적인 증발식 담수설비에서는 이젝터 구동을 위해서 스팀을 사용하는데, 스팀을 적게 사용하면서도 흡입 압력은 낮고 흡입유량이 많은 이젝터가 성능이 우수한 제품이다. 콘덴서의 경우도, 작은 전열면적을 가지면서 혼합가스내의 스팀을 잘 응축시켜야 한다.

담수 설비에서의 압력은 물 생산량에 매우 큰 영향을 주므로, 진공시스템은 반드시 운전 조건을 만족시키도록 설계되어야만 한다. 담수 설비에서 이젝터는 설비의 운전 성능에 매우 큰 영향을 주게 되므로 국내외에서 경제적이면서도, 신뢰성이 있고 효율이 좋은 제품을 사용한다.

국내에서의 이젝터 개발은 90년대 중반부터 이루어져 왔으나, 수십년 동안 기술을 축적해 온 국외의 기술과 비교해 볼 때, 아직 이젝터를 구동하는 스팀량이 많아 효율이 떨어지는 경향이 있다. 이러한, 기술적 차이를 극복하려면, 제품에 대한 이론적인 해석뿐만 아니라 경험적인 설계가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 열유체역학적 기본 이론과 MSF 진공시스템의 경험 data를 이용하여 이젝터, 콘덴서, 진공시스템 설계 process를 개발하였고, 파일럿 플랜트를 통한 실험과 전산해석으로 그 성능을 확인하였다.

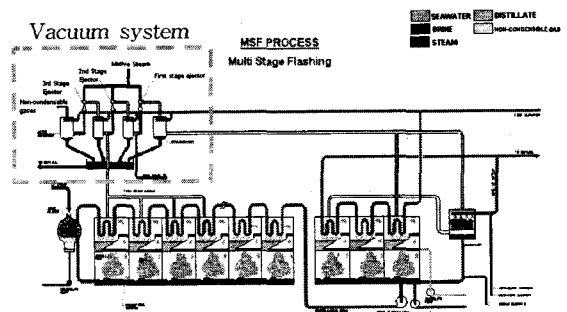


Fig. 1 Vacuum system in MSF Plant

* 두산중공업 기술연구원

** 두산중공업 기술연구원

E-mail : mcsh@doosanheavy.com

2. 이젝터 실험

2.1. 이젝터 설계

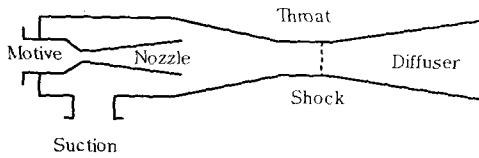


Fig. 2 Basic structure of ejector

이젝터의 구조는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 노즐과 혼합부, 목부, 확장부로 구성된다. 이젝터는 구동부만을 가지는 펌프나 팬과는 달리 기계적인 운동이 없어 노즐로부터 분사되는 구동유체의 유량 및 물성, 그리고 이젝터의 내부형상에 의해 그 성능이 결정된다. 구동유체로는 공기나 물, 증기 등이 사용되며, 이 1차 구동유체가 증기인 경우에는 구동노즐을 통과하면서 증기의 열에너지가 운동에너지로 변환되며, 이에 따라 흡입실내에 진공을 형성시켜 유체를 흡입하게 된다. 이 때 흡입된 기체는 확장부의 입구부에서 구동증기와 속도차에 의한 마찰항력에 의하여 가속되고, 확장부의 축소부를 지나면서 구동증기와 운동량 교환이 이루어져 구동증기는 감속, 흡입기체는 가속되어 확장부 목부에 이르게 된다. 확장부의 목부에서는 양 유체가 완전히 혼합되어 거의 균일한 속도분포를 갖는 흐름으로 안정된 후 유로면적이 점차 커지는 확장부의 확대부를 지나면서 다시 운동에너지의 일부가 압력에너지로 환원됨으로써 흡입기체의 토출이 가능하게 된다.

이러한 유동과정은 각 부의 손실 및 엔탈피의 변화 등을 정확히 해석하기는 불가능하지만, 노즐부에서 등엔트로피, 디퓨저 입구부에서는 등압 조건등을 설정하여 이론적으로 해석이 이루어지도록 하였다. (1),(2),(3)

2.2. 실험장치 및 방법

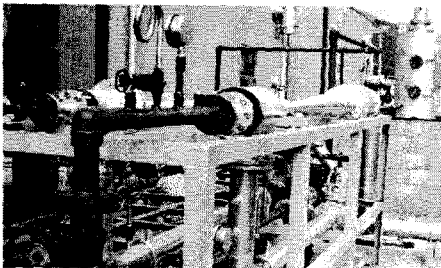


Fig. 3 Experimental set up of ejectors.

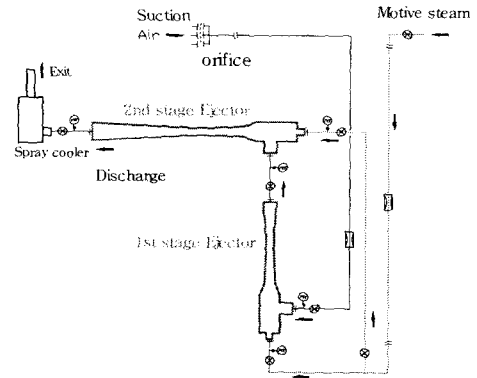


Fig. 4 Simple layout of pilot plant.

Table 1 Design specifications of the ejectors

Condition	Spec.
Motive steam	<ul style="list-style-type: none"> - Flowrate : 2 ton/hr(max.) - Pressure : 9 bara - Temperature : Saturated.
Suction condition	At 2 ejectors operation, <ul style="list-style-type: none"> - Pressure : 0.07bara - Flowrate : 110kg/hr - Temperature : 20°C At 1 ejector operation, <ul style="list-style-type: none"> - Pressure : 0.24bara - Flowrate : 340kg/hr
Discharge condition	<ul style="list-style-type: none"> - Pressure : Atmosphere

이젝터 실험장치는 Fig. 3과 4와 같이 비응축식 시스템 2단으로 구성되어 있는데, 1단 이젝터의 출구는 2단 이젝터의 입구에 연결되어 있다. 각 이젝터는 보일러로부터 스팀이 공급되며 최대 유량이 2ton/hr규모이다. 흡입구에는 최대 3개의 공기 흡입용 오리피스가 부착될 수 있으며 오리피스는 HEI 규격에 따라 설계 유량에 준하는 형상으로 설계하였다. 흡입유량을 변경할 경우에는 오리피스를 적절히 교환함으로써 가능하다. 최종 출구에는 직접 접촉식 응축기가 설치되어 있어, 최종 배출되는 혼합가스(스팀+공기)를 응축시킨 후 배출시킨다.

보일러로부터 공급받은 스팀은 각 이젝터의 노즐을 통과하여 이젝터를 구동시키며, 이젝터를 동시 또는 단독으로 운전될 수 있다. 이젝터가 동시에 구동되면 공기 흡입조건이 압력 0.07bara, 유량 110kg/hr가 될 수 있도록 설계되어 있고, 2단 이젝터만 단독으로 구

동될 경우는 2단 이젝터의 공기 흡입조건이 압력 0.24bara, 유량 340kg/hr가 될 수 있도록 설계되어 있다.

설비 운전은 최종 배출구에 부착된 응축기를 가동 후, 2단 이젝터를 먼저 가동하고, 1단 이젝터를 가동한다.

3. 실험 결과

3.1. 흡입 유량 변화 실험

Fig. 5는 2단 이젝터 단독운전 시, 흡입유량에 따른 흡입압력변화를 나타낸 것이다. 흡입유량이 증가함에 따라 당연히 흡입 압력도 증가하였다. 설계 흡입유량 값인 340kg/hr에서의 흡입압력(Ps)을 측정해 본 결과, 설계값인 0.24bara보다 약간 낮은 수치인 0.23bara값이 측정되어 설계값에 만족하였다. 이것은, 설계 유량인 340kg/hr일때, 0.01bar만큼의 설계 margin이 있음을 뜻한다. 그 이상의 흡입유량인 600kg/hr까지는 흡입압력이 Ref.(design)값보다 낮은 압력값을 나타내므로, 설계 margin이 있다고 할 수 있다.

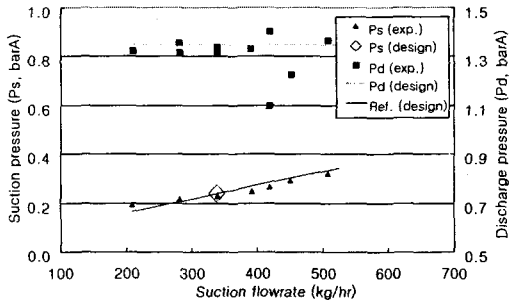


Fig. 5 Suction & discharge pressures according to suction flowrates.

3.2. 구동 증기 압력 변화 실험

Fig. 6는 구동 증기압에 따른 흡입(Ps) 및 토출압력 (Pd) 변화를 나타낸 것이다. 설계 구동 증기압이 9bara인 점을 고려하면, 압력이 낮아지면서 흡입 및 토출압력이 낮아지다가 일정값 이하에서는 압력이 가파르게 상승하였다.

토출압력에 대한 흡입압력 변화를 알아보기 위해서, 구동 증기압을 일정하게 유지하고, 토출압력을 변화시켰으나, 흡입압력은 전혀 영향을 받지 않았다.

노즐과 디퓨저 사이의 관계를 알아보기 위해, nozzle 1은 적절히 설계된 것으로 하고, nozzle 2는 증기량이

5%증가된 것을 사용하여 흡입압력을 비교해 본 결과, 스팀유량이 많은 nozzle 2의 성능이 더 나빴다. 따라서, 노즐과 디퓨저의 설계는 적절히 선택되어야만 최적의 성능이 이루어짐을 알 수 있다.

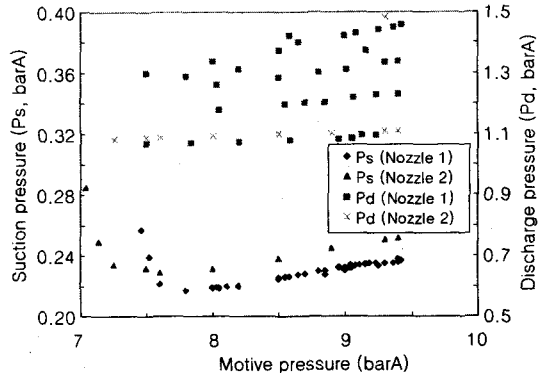


Fig. 6 Suction & discharge pressures according to motive pressure

3.3. 제작사별 이젝터 성능 비교

Fig. 7은 각 이젝터 maker가 제시하는 설계기준(카탈로그, 기술자료)을 가지고, 동일한 설계조건에 따른 계산 결과를 상호 비교한 것이다. 설계조건인 압축비 (C: 토출압력/흡입압력)와 팽창비(E: 구동압력/흡입압력)에 따른 steam 소모량을 그래프로 나타낸 것이다. 제작사 A, B, C는 수십년 동안 이젝터를 제작해 온 회사로서 두산중공업에 담수 설비의 진공설비와 관련하여 이젝터를 납품한 실적이 있는 경쟁력이 있는 제작사들이다. 압축비가 유사할 경우, 팽창비가 높을수록 당사의 이젝터 설계기술은 타사에 비해 경쟁력이 있고, 낮

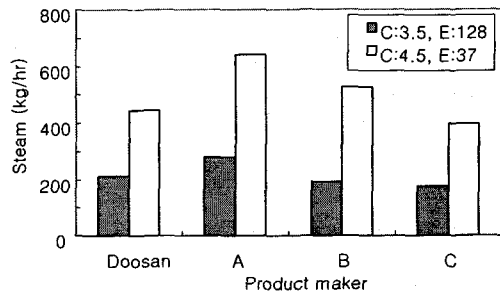


Fig. 7 Comparison of steam consumption according to makers.

올수록 경쟁력이 낮은 것을 알 수 있다.

그러나, 전체적으로 평균값을 보면, 거의 균등함을 알 수 있다. 이러한 특성은 multi stage ejector system을 설계할 때 적용하는 방식이 달라서 나타나는 특성일 수도 있다. 즉, multi stage ejector system인 경우, 후단의 ejector에 더 많은 margin을 줌으로써, 전체 설비의 성능이 더 좋을 수 있다는 의미로도 분석이 가능하다.

설계조건인 압축비와 팽창비를 다양하게 변화시켜 가면서, 설계 특성을 확인하는 일은 비용이 많이 들어가므로, 좀더 합리적이고 쉬운 접근이 필요하다. 대안으로서, 실제 적용할 vacuum 시스템을 설계할 경우, 각 이젝터의 압축비와 팽창비가 결정되면, 테스트가 가능한 축소 이젝터 model를 설계, 제작하여, 성능을 테스트한 후, scale-up하는 것이다.

4. 이젝터 유동 전산해석

이젝터의 효율은 노즐, 혼합실, 디퓨저 효율에 의해 크게 영향을 받는다. 노즐과 관련된 설계 이론들은 문헌에 의해 많이 알려져 있으나, 혼합실, 디퓨저 설계와 관련된 이론은 거의 없고 경험적인 값에 의존하는 실정이다. 이러한 경험적인 값을 먼저 기준으로 정하고, 일부 치수를 변경시켜가면서, Fluent 열유동 전산해석을 수행함으로써, 이젝터의 혼합실 및 디퓨저 효율 증가 여부를 알아보고자 하였다.

전산해석 결과, 계산된 이젝터의 흡입유량은 실험값에 비교하여 10%이내의 오차를 보였다. 특히, 디퓨저 형상에 따른 열유동 특성을 해석한 결과, 실험에서 나타난 경향과 전산해석에서 나타난 경향은 서로 비슷한 특성을 보였다.

디퓨저 형상에 따른 유동분포를 Fluent 2D symmetry로 해석하였는데, k-epsilon 난류 모델을 사용하였고, 입구조건은 pressure inlet, 출구조건은 pressure outlet으로 설정하였다. 해석결과를 Fig. 8에 Mach 수 1~3.1 범위로 나타냈다. (a)는 디퓨저 크기가 작게 설계되었을 때의 유동분포이고 (b)는 정상적으로 설계된 디퓨저에서의 유동분포이다. 디퓨저 목(throat)부에서 유동은 (b)와 같이 완전한 흐름을 보이다가 shock에 의해 소멸되는 경우가 디퓨저 효율이 높았다.

이와 같이, 이론적인 접근이 매우 어려워 경험적인 값에 의존하는 디퓨저 설계방법에 전산해석을 이용함

으로써 효과적으로 디퓨저를 설계할 수 있을 것으로 판단되었다.

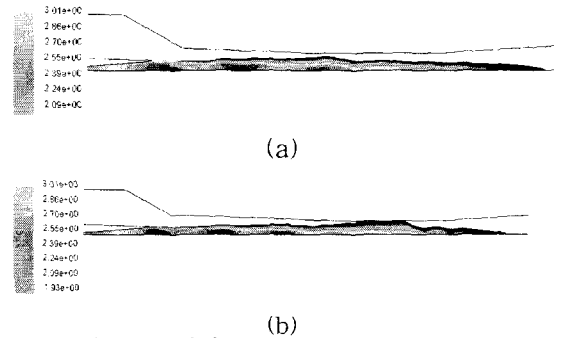


Fig. 8 디퓨저 형상에 따른 Mach수 분포.

5. 결론

자체적으로 설계 프로세스를 확립하여 스팀 소모량 1.5ton/hr규모의 이젝터를 테스트한 결과, 설계값과 상당히 일치하였다. 또한, 자체 설계값을 해외 제작사와 상대적으로 평가한 결과, 일부 설계조건에서는 유리한 설계기준을 갖고 있음을 확인하였다.

실제 담수 진공시스템의 이젝터에 대한 성능을 실험을 통해 확인하는 것은 많은 비용과 시간이 필요하다. 따라서, 실제 적용할 경우, 적용하고자 하는 설계 조건에서 사전에 scale-down된 모델을 테스트함으로써, 실제 규모에서 성능을 예측하고자 한다.

참고문헌

- (1) B.G.Choi, O.S.Kwon, H.D.Kim, "An Experimental Study of Sonic/Supersonic Ejector Flows", KSME 26(5),2002, 640-647
- (2) B.J. Huang, J.M. Chang, C.P. Wang, V.A. Petrenko, "A 1-D analysis of ejector performance", International Journal of Refrigeration 22 (1999) 354-364.
- (3) S.H. Choi, M.H. Chon, K.W. Lee, M.S. Paek, "Operating characteristics of ejector vacuum system" KSME Energy and power engineering division. 2003