

MVR 담수화장비용 터보 증기압축기의 개발

오종식*, 성병일**, 현용익***

Development of Turbo Steam Compressors for MVR System

Jong-Sik Oh*, Beong-Il Sung**, Yong-Ik Hyun***

Key Words : MVR(기계식 증기재압축법), Turbo Steam Compressor(터보증기압축기)

ABSTRACT

A high-efficiency turbo steam compressor has been successfully developed for the MVR desalination system, first one in Korea. The state-of-the-art design methods using real gas properties were applied to get all the aerodynamic design results. Bull and pinion gear trains, tilting-pad bearings and investment cast impellers were developed also to be integrated into the integral gear-driven turbo steam compressor. System tests show highly efficient performance.

1. 서론

해수를 담수화하는 혹은 오염된 폐수를 처리하는 방법중의 하나로서 MVR(Mechanical Vapor Re-compression)법을 이용한 선진장비가 최근에 국내에서 최초로 독자개발에 성공하였다⁽¹⁾. 증기재압축식 방법은 기존의 여러 다른 방법들과는 달리 에너지 효율성이 매우 크고 (COP=15~25), 주기적인 고가의 교체용 부품이 필요하지 않아 운영비가 극히 저렴하며, 완벽한 살균이 가능하여 청정한 물을 얻을 수 있는 등 여러 장점을 가진다. 그러나 가장 핵심이 되는 증기압축기가 기본적으로 oil-free가 되기 위해서는 터보압축기가 되어야 하고, 이는 높은 수준의 정밀기계 부품들의 조합이기에 쉽게 접근할 수 없는 단점이 있어 왔다.

일본의 경우에는 1980년대부터 정부주도하에 Kawasaki 중공업과 Kobe Steel, Kimura Chemical사 등이 공동으로 고효율 터보 증기압축기를 개발하는 데에 성공하였고, 미국 또한 1970년대부터 Exxon Chemical사를 중심으로 MVR 시스템의 개발에 박차를 가해 실용화가 완료되었다. 터보 증기압축기만을 본다면 독일의 Atlas Copco사와 스위스의 Sulzer사가 가장 선두에 위치하고 있다.

국내에서는 한국에너지기술연구원(KIER)을 중심으로 해외에서 수입한 압축기를 이용하여 MVR 시스템에 대한 기초적인 타당성 연구에 머무는 수준에 있었다⁽²⁾. 터보 증기압축기는 3차원 공기역학적 정밀설계와 해석에 근거한 복잡한 구조를 필요로 하지만, 부식과 관련된 재료의 선정과 구조적 검토내용을 제외하고는 원리상 터보 증기압축기 시스템과 비슷한 구조와 부품을 갖고 있다.

2. MVR 시스템

MVR 방법을 이용한 담수화 장비의 시스템 개략도가 Fig.1에, 그리고 실제 개발된 시스템의 모습이 Fig.2에 나타나 있다. 증발용기에 담긴 해수나 폐원수가 가열되면서 증발된 수증기는 압축기로 유입되고, 압축된 고온의 가압 수증기는 다시 증발용기를 거치면서 유입되는 해수나 폐원수와 열교환을 거쳐 응축되어 담수가 되는 원리이다. 유입되는 저온의 해수나 폐원수를 예열하여 고온의 해수나 폐원수로 만들어주는 3중 열교환기 또한 중요한 구성요소라고 볼 수 있다.

섭씨 20도의 해수를 100도의 해수로, 그리고 다시 100도의 포화증기 1kg으로 만드는데 필요한 열량은 각각 약 80kcal와 약 540kcal에 해당한다. 그러나 MVR 설비에서 100도의 포화증기를 107도의 과열증기로 압축하는 데에 필요한 외부동력은 약 35kcal 정도이기

** (주)삼정터빈 유체기계연구소 책임연구원

*** (주)삼정터빈 유체기계연구소 소장

E-mail : ojs@mailgw.kimm.re.kr

때문에, 나머지 약 585kcal의 가열증기가 응축하면서 해수를 증발/농축하는 데에 사용된다. 즉, 통상적인 증발에 소요되는 에너지의 약 7% 정도만 필요로 할 정도로 성적계수가 매우 높다.

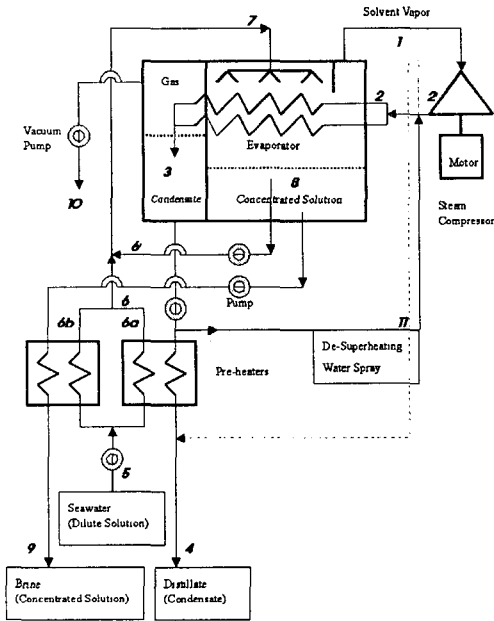


Fig.1 MVR Desalination System Scheme



Fig.2 MVR Desalination System (24tons/day)

3. 터보 증기압축기

3.1 공력설계 및 해석

1일 제조 담수량이 24톤인 담수화설비에 대한 사이클해석을 통하여 얻은 증기압축기의 설계사양은 다음과 같다.

- Mass flow rate of steam 0.2778 kg/s
- Pressure ratio (T-T) 1.3
- Adiabatic efficiency (T-T) 79%
- Rotational speed 25,000 rpm
- Inlet total temperature 372.58 K
- Inlet total pressure 98306 Pa

구조적 안정성 확보를 위해 증속기어의 정격 회전수를 공력적인 측면에서의 최적 회전수만큼 높이질 못했기 때문에, 압축기의 정격 비속도(specific speed)는 약 75로서 낮은 편이다. 따라서 목표 단열효율을 낮은 압력 비임에도 불구하고 79% 수준으로 낮추었다.

터보 증기압축기의 공력설계에 있어서 중요한 점은 작동유체가 공기와 같은 이상기체가 아니라 실제기체라는 점이다. 따라서 평균유선을 따르는 설계와 성능 해석, 그리고 임펠러의 3차원 형상설계 단계에서는 본저자에 의해 개발된 설계방법^{(3),(4)}을 사용하였는데, 과열증기의 열역학적 물성치를 사용하는 실제기체로 취급하였다. Fig.3은 평균유선 성능해석법을 이용하여 예측한 압축기의 성능곡선도를 2가지의 회전수(60/50Hz)에 대해 실선으로 나타낸 그림인데, 나중에 현장시험에서 측정된 결과(기호로 표시)와 비교해 볼때 상당히 정확한 예측을 하고 있음을 알 수 있다.

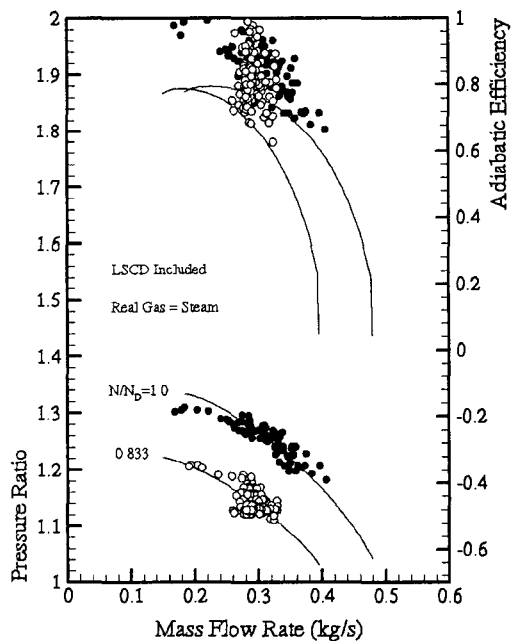


Fig.3 Predicted/ Experimental Performance of Compressor

Fig.4와 Fig.5는 공력설계의 마지막 단계인 3차원 압축성 난류 유동해석(CFD)의 결과 일부를 보여주고 있다. 평균유선 설계단계에서 기대하였던 임펠러의 성능을 성공적으로 재확인할 수 있었으며, 또한 임펠러의 3차원 형상설계에 기대하였던 날개하중 분포도 역시 성공적으로 확인하였다.

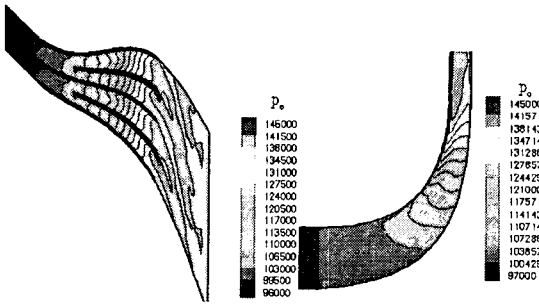


Fig.4 임펠러의 3차원 CFD 결과 (Total Pressure Contours)

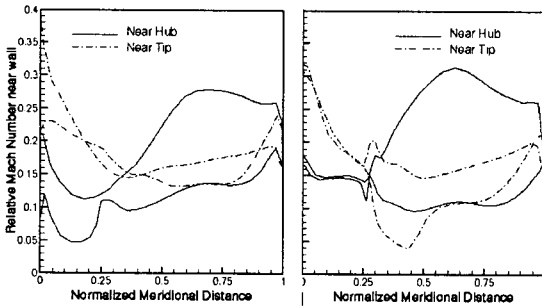


Fig.5 임펠러의 3차원 CFD 결과 (Blade Loadings)

3.2 증기압축기의 제작

임펠러는 backsweep과 splitter를 갖는 복잡한 형상이며, 디퓨저는 고효율과 작동범위 등을 고려하여 LSCD (Low Solidity Cascade Diffuser)를 채택하였다. Fig.6에서 보는 바와 같이 양산성이 좋은 정밀주조법을 사용하여 임펠러를 제작하였고 재료로는 내식성 고장력강으로 알려진 AMS-5355를 사용하였다. 베인디퓨저는 3축 NC가공을 통하여 제작되었다.

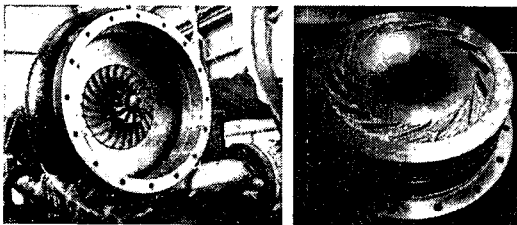


Fig.6 제작된 임펠러/블류트와 베인디퓨저

증속기어는 약 7:1의 기어비로 구성되어 있으며, 기어 이 크기는 DP14(모듈 1.8143), 압력각 25°, 비틀림 각 20°8'24"의 표준치형으로 제작하였다. Fig.7에서 나타낸 바와 같이 단단증속을 이루고 있으며, 재료로는 bull gear측은 SCM440, pinion gear측은 SNCM616을 각각 사용하였다. 불림 열처리의 기초작업과 치들의

가공과 열처리, 그리고 피니언의 침탄열처리 과정을 통하여 자체 제작하였다.

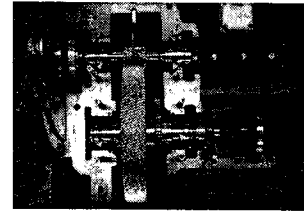


Fig.7 Bull/pinion Gear

베어링으로는 화이트메탈로 제작된 일반 저널베어링 2개가 전동측에, 그리고 tilting-pad 베어링 2개가 피동측에 Fig.8과 같이 각각 적용되었다. 베이스메탈과 원심주조기를 사용하여 화이트메탈이 코팅된 베어링을 성공적으로 제작할 수 있었다. 피니언을 포함한 임펠러 회전체의 balancing 시험은 KS B 0612에 의거하여 시행하였다.

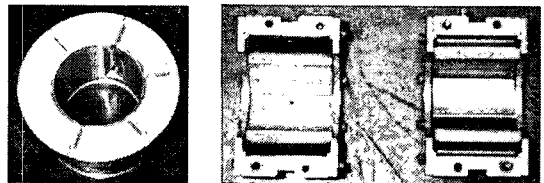


Fig.8 Journal Bearing과 Tilting-Pad Bearing

기타 부품의 제조에 있어서 볼류트는 목형을 제작하여 Fig.6에서 보는 바와 같이 스테인리스 주강재로 제작하였고, 증발농축기는 해수에 의한 내부식성 재료를 적용하여 자체 설계한 후 용접구조물로 제작되었다. Fig.9는 최종 제작되어 조립된 터보 증기압축기의 모습이다.

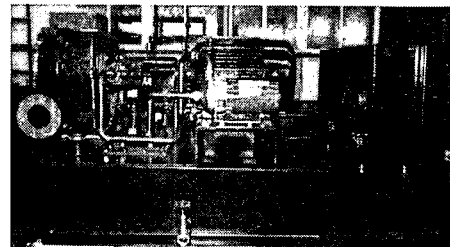


Fig.9 조립된 터보 증기압축기

3.3 운전제어

장비에 부착된 압력과 온도, 유량, 진동 등의 센서들

이 감지하는 물리량 신호는 증폭과 선형화 과정을 거쳐 통신모듈을 갖춘 디스플레이와 AD 보드를 이용하는 PLC에 입력된다. 또한 장비의 주요한 구성요소들의 극한 운전영역을 나타내는 수위와 압력 그리고 전원 등의 한계신호와 제어반의 운전모드 선택키의 신호는 PLC의 2비트 입력장치를 이용하여 PLC에 입력된다. 이와 같이 입력된 신호들을 근거로 PLC내의 장비를 운용하기 위하여 미리 작성해둔 로직 프로그램이 가동되며 결과를 제어반의 여러 운전조건을 나타내기 위한 램프 표시로 나타나고, 또한 장비의 구성요소들을 운용시킨다. Fig.10은 터보 증기압축기를 포함한 전체 장비의 운전제어에 관한 개념도를 나타낸다.

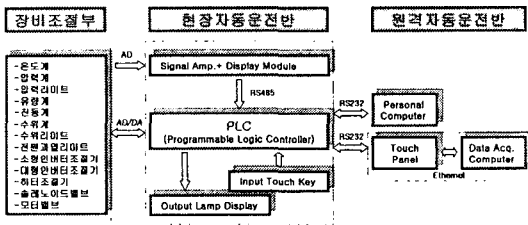


Fig.10 자동화 운전모듈 구조도

4. 시험결과

증발농축기내 폐수원액의 온도를 정상운전 상태까지 증기가 발생하도록 가열하여 증기압축기를 구동하며, 증기발생시 연속운전이 가능하도록 응축수 배출 및 원액 공급 운전을 행하였다. 다음의 Fig.11은 증기압축기를 회전수 25,000 rpm (=60Hz)으로 운전하였을 때 담수화 장비에서 얻어진 응축수량(담수량)을 시험 시각에 대해 나타낸 것이다.

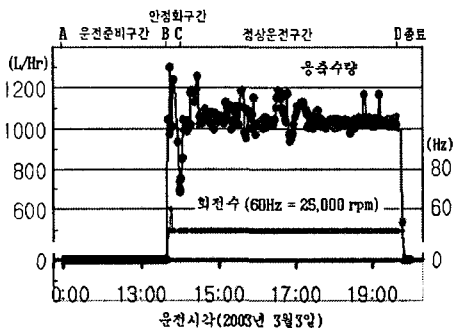


Fig.11 운전시각에 따른 담수량 분포도

초기에 원수를 가열하는 운전준비구간에서 온도가 섭씨 100도가 되면 압축기가 운전에 들어가며, 초기

내부배관들의 열평형 상태가 이루어질 때까지 안정화 구간을 거친 다음, Fig.12에서와 같이 안정적이고 연속적으로 응축수가 생성되고 있음을 알 수 있다.



Fig.12 폐수원수와 담수

증기압축기의 입구와 출구에서 측정된 온도와 압력 그리고 압축기 후방에 설치된 증기전용 오리피스 유량계에서 얻은 유량값등을 이용하여 Fig.3에서 이미 제시된 바와 같이 압축기의 성능곡선 데이터를 얻었다. 언급한 바와 같이 설계시에 예측하였던 곡선과 매우 유사한 값을 얻었으며, 일정한 운전범위내에서만 측정하였기에 비록 전체 유량범위는 아니지만 설계된 터보 증기압축기의 성능을 성공적으로 확인할 수 있었다. 실제로 겨울철에 시험이 이루어진 관계로 압축기 외부에 대한 단열이 완전하지 못하여 측정된 단열효율이 설계치보다 더 높게 나온 것으로 판단된다.

Table 1에서는 증기압축기의 구동동력을 기준으로 했을 경우와 담수화 장비 전체에 소요되는 동력을 기준으로 했을 경우 2가지의 성적계수(COP)를 보여주고 있다. 초기에 개발목표를 설정할 당시 목표 성적계수를 13 수준으로 설정하였으나, 결과로는 현재 23~25에 달하는 높은 성적계수를 달성하게 되어 세계 선진 수준을 보이고 있으며, 이에 따르는 담수 제조단가도 톤당 1,500원 미만 수준을 얻게 되었다.

Table 1 Performance Summary

	60Hz	50Hz
회전수	60Hz	50Hz
담수량	31 ton/day	24 ton/day
압축기 소비전력	35 kW	23 kW
시스템 소비전력	40 kW	28 kW
압축기 COP	26.7	31.3
시스템 COP	23.4	25.7

여기서의 성적계수는 얻은 열량 대비 투입된 열량의 비율로 정의되며, 얻은 열량이란 1기압에서 20℃의 물을 100℃의 포화수증기로 만드는 데에 필요한 열량으로서 540 kcal/kg (= 2,260 kJ/kg)에 해당한다.

5. 결론

국내에서는 처음으로 MVR 담수화 장비용 고효율 터보 증기압축기 개발과 함께 해수담수화 및 폐수처리 장비의 국산화 제품개발이 성공적으로 이루어졌다. 비교적 낮은 비속도로 인해 고효율 달성에 의문이 있었으나 압축기만을 기준으로 한 성적계수가 해외제품 성적계수 15 정도에 비해 본 제품에서는 26 이상의 고효율을 달성할 정도로 성공적인 설계와 개발이 이루어졌다.

후기

본 연구는 “산업기반기술개발사업”으로 2년간 수행한 결과의 일부로서 사업비를 지원한 산업자원부, 경

상남도 및 김해시에 깊은 사의를 보냅니다.

참고문헌

- (1) 현용익 외, 2003, 원심형 증기압축기를 이용한 증발법 해수담수화 장치개발, 산업자원부 보고서
- (2) 이상국 외, 1998, 에너지 부하관리 기술개발, 과학기술부 보고서, KIER-982211
- (3) 오종식, 2003, 원심/사류압축기의 공력설계 프로그램 개발 - 제1부 : 평균유선 설계/성능해석, 유체기계연구발표회
- (4) 오종식, 2003, 원심/사류압축기의 공력설계 프로그램 개발 - 제2부 : 임펠러의 3차원 형상설계, 유체기계연구발표회