

화학공정 내 폐증기를 활용한 MVR 및 TVR 연구

Investigation of MVR and TVR in Chemical Processes by Using Waste Steam

이창민(Chang Min Lee), 임정열(Jeong Yeol Lim), 윤 린(Rin Yun)[†]

한밭대학교 기계공학과

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

(Received October 24, 2014; revision received February 9, 2015; Accepted: February 10, 2015)

Abstract The MVR was theoretically modeled by performing the polytropic process, and the polytropic coefficient was estimated by using the performance curve provided by the manufacturers. The TVR was investigated by applying the conservation equations to the movement of fluids inside the TVR. The size of the nozzle and diffuser was determined. Theoretical MVR and TVR modeling was verified by comparing the results of the model with the available design data. Besides, the effects of multi-staging of the MVR on power consumption, and the effects of suction and primary pressure on the sizing of TVR were investigated.

Key words MVR(기계적 증기 재압축), TVR(열적 증기 재압축), Compressor(압축기), Ejector(이젝터), Recompression(재압축)

[†] Corresponding author, E-mail: yunrin@hanbat.ac.kr

기호설명

h	: 엔탈피 [KJ/kg]
M	: 마흐 수, $v/\sqrt{\gamma RT}$
\dot{m}	: 질량유량 [kg/s]
P	: 압력 [kPa]
q	: 열량 [kJ]
T	: 온도 [°C]
W	: 일 [kW]
x	: 건도

그리스 문자

n	: 효율
ρ	: 밀도 [kg/m ³]
γ	: 비열비 [-]

하첨자

1	: MVR 입구, 노즐 목
2	: MVR 출구, 노즐출구
$diff$: 디퓨저
i	: 입구
n	: 노즐
o	: 출구
p	: 주유동부 입구

1. 서 론

최근 국제유가의 지속적인 상승과 환경오염에 대한 우려로 에너지 절감에 대한 요구가 커지고 있다. 산업 분야에서도 에너지 절감 기기나 공정 개선에 대한 다양한 노력이 이루어지고 있고, 특히 에너지 절감보다는 공정의 신뢰성을 크게 생각하는 화학공정에서도 점차 이와 같은 인식이 확대되고 있다.

산업전반에서 사용되는 증류 및 증발장치 공정에서 발생하는 증기는 낮은 온도 등의 이유로 냉각에 의한 응축을 거쳐 재가열하거나 버려지는 실정이다. 이들 증기의 보유열을 효과적으로 이용하기 위해서는 기상 상태의 증기를 직접 가압하는 MVR(mechanical vapor recompression)이나 TVR(thermal vapor recompression)의 이용이 필수적이다. Fig. 1은 증발 및 농축과정에서의 MVR의 적용을 나타낸다. 주입구(feed, ①)를 통해 들어온 원료는 ②의 증발기(evaporator section)를 통해 기상이 된 후 기액 분리기 ③에 들어가게 된다. 기액 분리기에서의 증기는 저온, 저압의 상태로 대부분은 폐증기로 배출되나 ④의 MVR을 통해 그림과 같이 외부 동력을 이용해 폐증기를 고온 고압 상태로 만들어 증발기에 재사용하게 된다. 이 때 증발에 사용된 스팀은 응축되어 아래 출구로 배출된다. Fig. 2는 동일한 증발 및 농축 공정에 있어서 TVR의 적용을 나타낸다. Fig.

1에 나타낸 ①의 공급부부터 ③의 기액 분리기까지는 MVR의 적용과 동일하다. ③의 기액 분리기에서 회수된 증기는 ④의 TVR에서 구동증기에 의해 온도와 압력이 상승되어 ②의 증발기로 공급된다. TVR의 운전 구조 상 구동 증기(motive steam)가 있고 TVR로 흡입되는 증기의 양은 구동증기의 압력과 유량에 따라 달

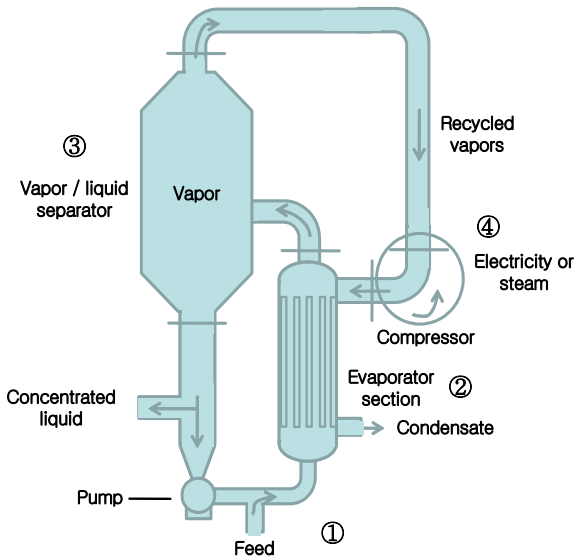


Fig. 1 The MVR application in the evaporation and concentration process.

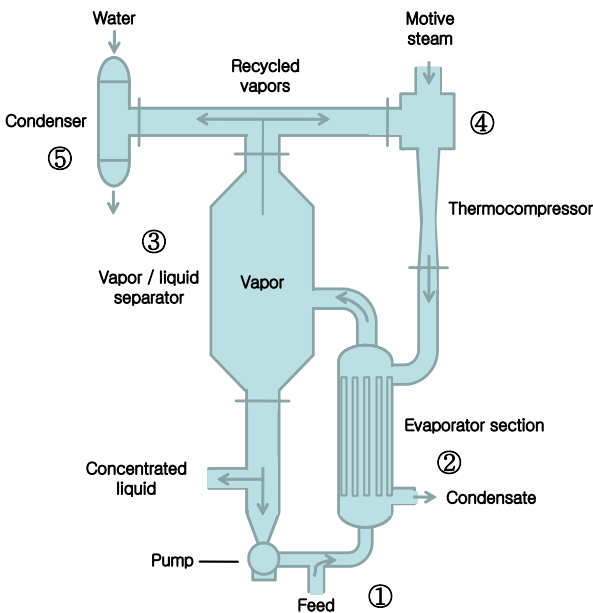


Fig. 2 The TVR application in the evaporation and concentration process.

라지기 때문에 기액분리기에서 나온 증기의 일부는 ⑤의 응축기를 통해 액으로 변환함을 볼 수 있다.

현재 국내의 경우 MVR 및 TVR에 대한 적용기술이나 자체 설치사례가 거의 없어 적용 시 효과가 상당함에도 불구하고 그 보급은 매우 미약한 실정이다. 또한, 특정한 공정에 적용하여 그 효율성이 증명되었다 하더라도, 다양한 스팀공정에 따른 이들 폐열회수 장치를 통한 에너지 절감 효과, 경제성, 공정 운전의 안정성, 장비 선정에 대한 일반적인 결론을 제시할 수 없는 현실이어서 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다고 할 수 있다. 국내 MVR 관련 연구로서 Lee and Park⁽¹⁾은 증발장치의 폐열회수의 일환으로 증발장치의 에너지 효율화를 위한 기술경과, MVR evaporator의 원리, 구성 및 특징과 함께 MVR 시스템의 국내의 응용에 대해서 소개하였다. Park and Hong⁽²⁾은 해수 담수화용도를 위한 MVR 시스템의 기초설계를 통해 타당성 검토를 수행하였고, Oh et al.⁽³⁾은 해수담수화용 터보 스팀 압축기의 개발에 대한 연구를 수행하여 성적계수 26 이상의 고효율에 도달하였다. Winchester and Marsh⁽⁴⁾는 MVR을 적용한 강하막식(falling film) 증발기의 공정제어를 위한 분석과 해석 모델을 제시하였다. TVR에 대한 연구는 크게 두 분야로 나눌 수 있는데 하나는 다양한 공정 시스템에 TVR 시스템의 적용 및 이젝터 설계에 대한 연구이고, 다른 분야는 TVR 시스템의 내부 유동에 대한 유체역학적 부분이라 할 수 있다. 특히 TVR 적용 시스템에 있어서 최근 태양에너지 및 폐열과 연계된 냉동 시스템의 응용에 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 MVR 및 TVR의 이론적 설계 모델링을 수행하였고, 이를 실제 화학공정의 설계 기준 값들과 비교하여 본 모델을 검증하였다. 한편, 본 MVR과 TVR의 제안모델을 특정 스팀유량과 설계 압력상승조건에서 각각의 용량 및 세부설계에 적용하였다. 또한, MVR의 경우 소비동력에 따른 출구압력의 변화를 살펴보고 TVR의 경우 주구동부 압력변화와 출구압력변화가 TVR의 내부 크기에 미치는 영향을 고찰하였다. 향후 이들 설비의 설치를 통한 경제성 평가, 설비의 용량 선정, 그리고 MVR과 TVR 포함한 전체 공정의 최적 운전조건을 제공할 것으로 판단된다.

2. MVR 및 TVR 모델링

2.1 MVR의 모델링

MVR의 이론적인 모델링은 식(1)에 나타낸 바와 같이 일반적인 압축기 모델에 따른다. 1은 입구상태, 2는 출구상태, 그리고 n은 폴리트로픽 계수를 나타낸다. 한편, MVR의 경우 다단압축을 수행하여 원하는 압력까지

지 상승시키게 되는데, 이 때 압축기 효율을 높이기 위해 단과 단 사이의 증기에 물을 인젝션하게 된다. 식(2)는 이 때 필요한 냉각량을 산출하는 식을 나타낸다. 일반적으로 압축기를 모델링하는데 있어 폴리트로픽 계수, n 이 주어지는 경우와 압축기의 성능곡선이 제작사에 의해 제공되는 경우가 있다. 후자의 경우에는 주어진 유량조건에서 압력상승값과 소요동력을 성능곡선을 통해 구하고 이를 통해 폴리트로픽 계수를 산출할 수 있다. 스팀의 출구온도는 식(3)을 이용하여 계산한다.

$$W_p = \frac{p_1 n}{\rho_1 (n-1)} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$Q_{cooling} = \dot{m}_{injection} \times (h_{x=1, p=p_2} - h_{x=0, p=p_2}) \quad (2)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3)$$

2.2 TVR의 모델링

Fig. 3에 나타낸 TVR(thermal vapor recompression)의 이론적 작동원리는 주 유동유체가 축소-확대 노즐을 지나면서 주 유동유체의 압력이 감소하게 되고 흡입구(suction side)로부터 압력을 상승시키고자 하는 대상 유체를 흡입한 후 두 유체가 서로 혼합된 후 쓰로트관 내에서 압력이 상승하고 디퓨저를 통과하면서 흡입유체의 압력보다 높은 압력으로 상승하게 된다. 일반적으로 노즐입구와 출구의 압력차가 2배 이상 나타날 때 스팀의 경우 초음속(supersonic)상태에 도달하게 된다. 이와 같은 초음속상태의 경우 노즐 내 혹은 쓰로트 관내에서의 유동은 압축성이 되어 마흐수(mach number)가 중요한 무차원 변수로서 작용한다. 유체의 유동 중에 밀도가 크게 변하는 요소에 보존 법칙을 적용한 주요 식은 다음과 같다. 식(4)는 노즐 출구에서의 마흐수를 나타내고, 식(5)는 디퓨저 출구와 이젝터 쓰로트의 압력비를 그리고 식(6)은 노즐 목의 면적을 나타낸다. 이젝터의 압력조건, 흡입구의 유량, 흡입량과 주유동량 등의 입력자료를 바탕으로 이젝터의 면적계산은 El-Dessouky

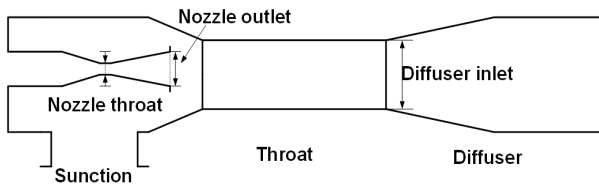


Fig. 3 The schematic of the TVR.

et al.⁽⁵⁾의 스팀 제트 이젝터 모델링을 이용하였다.

$$M_{p2} = \sqrt{\frac{2\eta_m}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_p}{P_2} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]} \quad (4)$$

$$\frac{P_{diff,o}}{P_{diff,i}} = \left[\frac{\eta_d(\gamma-1)}{2} M_{diff,i}^2 + 1 \right]^{(\gamma/\gamma-1)} \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{m_p}{P_p} \sqrt{\frac{RT_p}{\gamma m_n} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 MVR 및 TVR 모델링 검증

Table 1은 YC NCC, SKC, 그리고 LG Chem 내 화학공정의 입력조건과 공정 내 MVR을 통해 상승해야 할 설계온도 및 압력조건을 나타낸다. YC NCC의 경우 작동유체로 스팀이 사용되었고 3단의 MVR로 이루어져 있다. 각 단의 소요동력은 350 kW이고, 설계 기준 데이터와 본 모델링을 비교할 때 온도의 경우 오차 1.42%, 압력의 경우 4.18%로 매우 정확하게 예측함을 볼 수 있다. SKC의 경우에 있어서 작동유체는 스팀이고 MVR은 4단으로 구성되어 있다. 각 단의 설계 소요동력은 194, 216.8, 225.3, 그리고 206.8 kW이고 온도 및 압력예측에 있어서 각각 1.9, 6.8%의 오차를 보이고 있다. LG Chem의 경우 작동유체로 N-hexane 혼합물을 사용하고 있고 MVR은 2단으로 이루어져 있다. 각각의 소요동력은 377.3, 368.1 kW이다. 다른 비교와 달리 온도 및 압력에 있어서 비교적 큰 차이를 나타내고 있는데 이는 본 모델링에서 N-hexane 혼합물의 정확한 물성을 반영하지 못한 데에서 나타난 결과로 판단된다. Table 2는 YC NCC 화학공정의 TVR 입구조건과 TVR를 통해 상승해야 할 설계온도 및 압력조건을 나타낸다. 본

Table 1 Verification of the MVR model with YC NCC, SKC, LG Chem design data

		Inlet	Outlet		
			Design data	Present model	Error (%)
YC	Temperature(°C)	80.8	105.5	107	1.42
NCC	Pressure(kPa)	47.5	124.3	129.4	4.10
SKC	Temperature(°C)	80	115	117.2	1.91
	Pressure(kPa)	47.4	169.97	181.6	6.84
LG Chem	Temperature(°C)	97.2	120.7	128.5	6.46
	Pressure(kPa)	178	423.9	470.6	11.02

모델링에 사용된 외부 노즐의 지름은 0.0085 m, 내부 노즐의 지름은 0.00216 m, 목의 지름은 0.04629 m로 계산을 수행하였다. 이 경우 본 모델을 통해 예측된 출구 온도와 압력은 설계데이터와 온도에 있어서는 0.98%, 압력에 있어서는 3.62%의 오차를 보였다. Table 3은 주 유동값이 주어질 때 흡입구의 유량과 출구 유량을 계산한 결과를 나타낸다. 비록 본 모델의 검증에 있어 실측값이 아닌 설계 기준값을 사용했으나, 매우 작은 오차범위에서 서로 일치함을 볼 수 있다.

3.2 MVR 및 TVR의 적용 및 설계

3.2.1 MVR의 모델적용 및 설계사양

본 MVR 모델의 한 적용예로서 임의의 화학공정 내 실제 운전요구 조건을 바탕으로 MVR의 기본 설계를 수행하였다. Table 4에서 나타낸 바와 같이 MVR를 통해서 증발-응축기를 통해서 생산된 스팀을 게이지압력 기준 -0.587에서 0.367 kgf/cm²로 올리고자 한다. 이 경우에 3개의 압축기와 중간 냉각기가 도입된다. 이와 같은 경우 1단 압축과정에서는 전체 압력 상승분의 1/3 정도인 -0.587에서 -0.298 kg/cm²이 설계 조건이 된다. 증기의 질량유량은 17,000 kg/hr이고 폴리트로픽 계수를 0.75로 하면 압축기의 실제 소요동력이 400 kW값이 도출된다. 이 때 중간냉각을 적용하게 되면 압축기 출구의 증기 온도는 120℃가량 상승하게 되는데 일반적으로 이를 상승압력에 해당하는 포화증기(x = 1) 상태로 만들어 다음 단의 압축기 효율을 높이는 것이 일반적인 다단 MVR 시스템의 방법이다. 이 경우 계산된 냉각량과 인젝션 유량은 각각 263 kW와 0.1144 kg/s이다.

Table 2 Verification of the temperature and pressure in the TVR model

	Inlet		Outlet		
	Suction part	Primary part	Design data	Present model	error (%)
Temperature(℃)	105.5	200	123	124.2	0.98
Pressure(kPa)	124.4	1572	218.98	226.9	3.62

Table 3 Verification of the mass flow rate in TVR model

	Inlet		Outlet	
	Primary part	Suction part	Design data	Present model
Mass flow rate(kg/s)	4.596	4.767	9.651	9.652

Table 4 Design conditions for MVR and TVR

Design parameters	Design value
Steam amount generated in HX	17,000(kg/h)
Pressure increase in the MVR(gauge)	-0.587~0.367 (kgf/cm ²)
Pressure increase in the TVR	0.235~1.2(bar)

Table 5 Input conditions for TVR design

Design parameters	Design value
Entrainment ratio, w	1.1
Primary flow rate	16,545(kg/h)
P _p , P _{sunction} , P _{diff,o}	15, 0.235, 1.2(bar)
η_m, η_{diff}	0.85, 0.85

Table 6 Design values for the TVR

Design parameters	Design results
Nozzle throat	0.0524 m
Nozzle outlet	0.1043 m
Diffuser inlet	0.2428 m
T _{diff,o} , T _p , T _{sunction} [K]	396.8, 475.2, 379.1
M _{n,o} , M _{throat} , M _{diff,i}	1.417, 1.968, 0.323

3.2.2 TVR의 모델적용 및 설계사양

MVR의 한 설계 예와 마찬가지로 본 논문에서 제시된 이론적 TVR 모델을 바탕으로 Table 4와 Table 5의 공정 설계조건을 활용하여 TVR의 주요 부 면적과 속도를 Table 6에 나타냈다. 이젝터 내 노즐 목의 지름은 0.0542 m로 쓰로트의 지름은 0.243 m로 계산되었다. 이젝터 내 쓰로트에서 충격파가 생기고 이에 따라 M_{diff,i}는 마하수 1보다 낮은 0.323이 됨을 알 수 있다.

3.3 MVR 및 TVR 내 주요 인자 영향분석

본 모델링을 바탕으로 MVR 및 TVR의 주요 성능인자에 대해 변수고찰을 수행하였다. Fig. 4는 단단과 3단 MVR의 소비동력에 따른 출구압력의 변화를 나타낸다. 입구조건은 단단과 다단 모두 동일하며 입구압력은 47.76 kPa이고 온도와 유량은 각각 80.8℃, 그리고 4.44 kg/s이다. 3단 시스템의 경우 각 단별로 소비되는 동력은 모두 동일하게 유지하였다. 이는 다단 시스템의 경우 단 별로 소비동력을 변경하였을 때 최종 토출압과 온도에 큰 변화를 주지 못하기 때문이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 압축기 토출압력이 150 kPa까지는 단단과 다단의 소비동력의 변화가 매우 작게 나타났고 150 kPa 이후에는 단단의 소비동력이 다단에 비

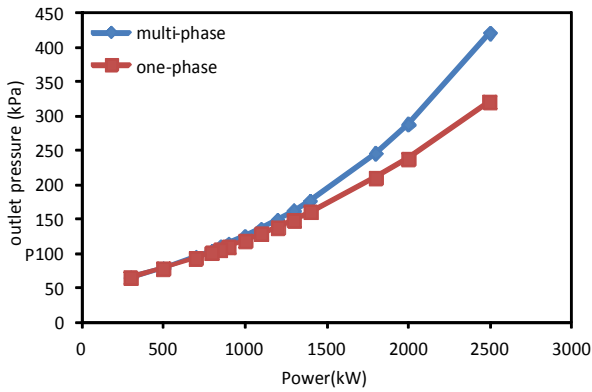


Fig. 4 Variation of outlet pressure with input power of a single and multi-stage MVR.

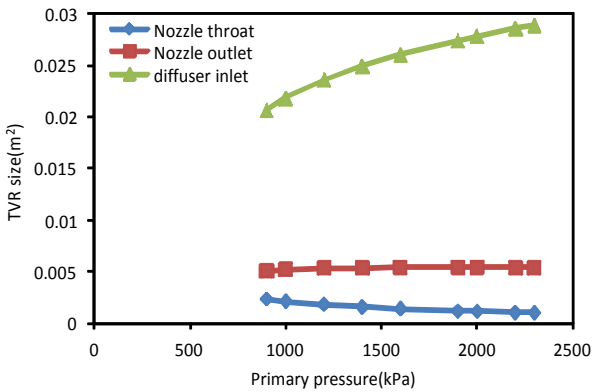


Fig. 5 Variation of TVR size with primary inlet pressure.

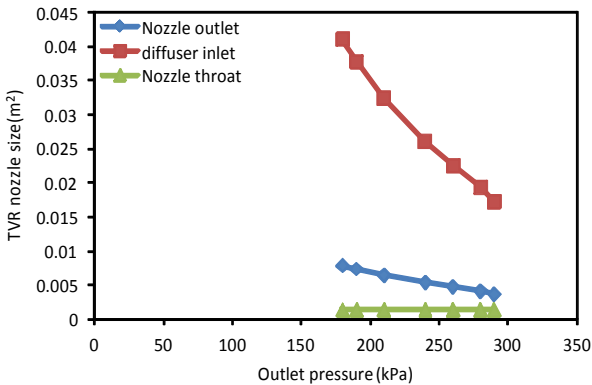


Fig. 6 Variation of nozzle size with outlet side pressure of TVR.

해 크게 나타났다. 동일한 출구압력 300 kPa을 기준으로 단단의 경우 다단에 비해 10% 정도 큰 소비동력을 필요로 한다.

Fig. 5는 TVR의 주구동부 압력변화에 따른 TVR 노

즐 및 디퓨저의 크기 변화를 나타낸다. 이 경우 주유동부의 압력은 900 kPa에서 2300 kPa로 변화시키고 TVR의 흡입구 압력과 출구압력은 각각 130 kPa과 240 kPa로 일정하게 유지하였다. 주 구동부의 증기압력이 증가함에 따라 노즐목의 크기는 감소하고 노즐출구와 디퓨저 입구의 면적은 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 TVR의 출구압력이 고정된 상태에서 주유동의 압력이 증가할 경우 노즐목의 감소를 통해 충분히 스팀을 팽창시켜 압력을 낮춘 후, 노즐 출구와 디퓨저 입구의 면적을 증대시켜 압력을 상승시키는 방법으로 설계가 필요함을 나타낸다. Fig. 6은 TVR의 출구압력변화에 따른 TVR의 주요부 크기변화를 나타낸다. 이 경우 주 유동부와 흡입구 압력은 각각 1600 kPa와 130 kPa로 일정하게 유지하였고 출구부 압력은 180 kPa에서 290 kPa까지 변화를 주었다. TVR 출구압력의 증대를 위해서는 주유동부의 압력이 고정되어 있을 때, 노즐목과 노즐출구의 면적비를 줄이고 디퓨저 입구면적과 출구면적의 비를 보다 크게 하는 방식으로 설계를 진행해야 함을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 화학공정 내 폐증기의 재활용을 위해 MVR과 TVR을 각각 이론적으로 모델링하였고, 이를 이용하여 설계 및 변수고찰을 수행하였다.

- (1) 본 MVR과 TVR의 모델을 3개사 설계 기준데이터와 비교한 결과 MVR의 출구온도의 경우 평균오차 $\pm 3.3\%$, 출구압력은 $\pm 7.3\%$ 의 오차를 나타냈고, TVR의 경우에는 온도와 압력 각각 ± 0.98 , $\pm 3.6\%$ 의 오차를 나타냈다.
- (2) 스팀 유량 17,000 kg/h과 MVR 내 게이지압력상승이 -0.587 에서 0.367 kgf/cm^2 일 때 계산된 냉각량과 인젝션 유량은 각각 263 kW와 0.1144 kg/s 로 나타났다. TVR의 경우 주유동부 16,545 kg/h, 압력상승이 0.235에서 1.2 bar일 때 TVR의 주요부의 크기, 스팀의 유동 온도 및 속도를 계산할 수 있었다.
- (3) 동일한 MVR의 출구 상승압력기준 단단과 3단 MVR의 동력을 고찰한 결과 150 kPa 이후에는 단단의 소비동력이 다단에 비해 크게 나타났다. 한편, TVR의 경우 TVR 내 주유동부 및 흡입부의 압력변화가 노즐목, 노즐출구, 그리고 디퓨저 입구의 크기에 미치는 영향을 확연히 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 지원으로 한국에너지 기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제임 (No. 2010T10010084710001).

References

1. Lee, Y. S. and Park, J. T., 1990, Waste heat recovery in evaporation plants by MVR system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 36-45.
2. Park, J. T. and Hong, S. H., 1994, Seawater desalination using mechanical vapor recompression method, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 403-413.
3. Oh, J. S., Sung, B. I., and Hyun, Y. I., 2003, Development of turbo steam compressors for MVR, Journal of Korean fluid machinery association, pp. 482-486.
4. Winchester, J. A. and Marsh, C., 1999, Dynamics and control of falling film evaporators with mechanical vapor recompression, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 77, pp. 357-371.
5. El-Dessouky, H., Ettouney H., Alatiqi I., and Al-Nuwaibit G., 2002, Evaluation of steam jet ejectors, Chemical Engineering and Processing, Vol. 41, pp. 551-561.