

증기 재압축을 활용한 증발공정에서 스팀 절감에 대한 연구

노 상균*

동양대학교 화공생명공학과
750-711 경북 영주시 풍기읍 동양대로 145

(2016년 8월 8일 접수; 2016년 8월 17일 수정본 접수; 2016년 8월 17일 채택)

The Reduced Steam Consumptions in the Evaporation Process Using a Vapor Recompression

Sang Gyun Noh*

Department of Chemical & Biomolecular Engineering
145 Dongyangdaero, Punggi-eup, Yeongju-si, Gyeongbuk 750-711, Korea

(Received for review August 8, 2016; Revision received August 17, 2016; Accepted August 17, 2016)

요 약

본 연구에서는 2중 효율 증발관을 이용하여 21.0 wt%의 NaCl 수용액에서 고형물의 NaCl을 1,524.58 kg h⁻¹만큼 석출시키는 공정에 대해서 증기 재압축을 활용하여 스팀 소모량을 3,139 kg h⁻¹에서 496 kg h⁻¹로 줄이는 공정에 대한 전산모사 및 최적화 작업을 수행하였다. 디에틸렌 글리콜(diethylene glycol)을 포함한 NaCl 수용액을 농축시키기 위한 증발농축 공정의 전산모사를 위해서는 AspenTech사의 Aspen Plus V8.8을 활용하였으며, 중간에 냉각기를 가지는 증기 재압축 공정의 전산모사를 위해서는 Schneider Electric사의 PRO/II with PROVISION V9.4를 이용하였다. 증기 재압축 공정에 대해서는 1기의 압축기를 사용한 공정과 중간에 냉각기를 가지는 2단 압축 공정을 상호 비교하였다.

주제어 : 증발, 단일효용, 다중효용, 증기 재압축, 최적화

Abstract : In this study, modeling and optimization study have been performed to obtain 1,524.58 kg h⁻¹ of a solidified NaCl by evaporating a 21.0 wt% of NaCl aqueous solution in order to reduce the steam consumption from 3,139 kg h⁻¹ to 496 kg h⁻¹ using a two-stage evaporation and a vapor recompression processes. Aspen Plus release 8.8 at AspenTech was utilized for the modeling of two stage evaporation process and PRO/II with PROVISION release 9.4 at Schneider Electric was also used for the simulation of two-stage vapor recompression process with an inter-cooler. For the simulation of the evaporation process containing NaCl aqueous solution, Aspen Plus release 8.8 at AspenTech Inc. was utilized and for the modeling of vapor recompression process PRO/II with PROVISION release at Schneider Electric Inc. For the vapor recompression process, single stage compression and two-stage compression system was compared.

Keywords : Evaporation, Single-effect, Multi-effect, Vapor recompression, Optimization

1. 서 론

증발농축 공정은 해수담수화[1], 오렌지 주스의 농축[2], 디에틸렌 글리콜 중에 포함되어 있는 수분 제거[3] 등에 폭넓게 활용되고 있다. 증발농축 공정은 단일효용 증발관을 사용하기도 하지만 압력을 점차 낮추어서 진행되는 다중효용 증발

관을 사용하기도 한다. 다음의 Figure 1과 2에는 단일효용 증발관과 이중효용 증발관의 공정 개요도를 나타내었다.

Figure 2에 의하면 증발하고자 하는 성분이 스팀인 경우에는 첫 번째 증발관에서 증발하는 스팀을 두 번째 증발관의 열원으로 사용할 수 있으며, 두 번째 증발관에서 증발하는 스팀은 다시 세 번째 증발관의 열원으로 사용할 수 있다. 따라서

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: sgnoh@dyu.ac.kr; Tel: +82-10-9779-1946; Fax: +82-54-630-1275

doi: 10.7464/ksct.2016.22.4.225 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

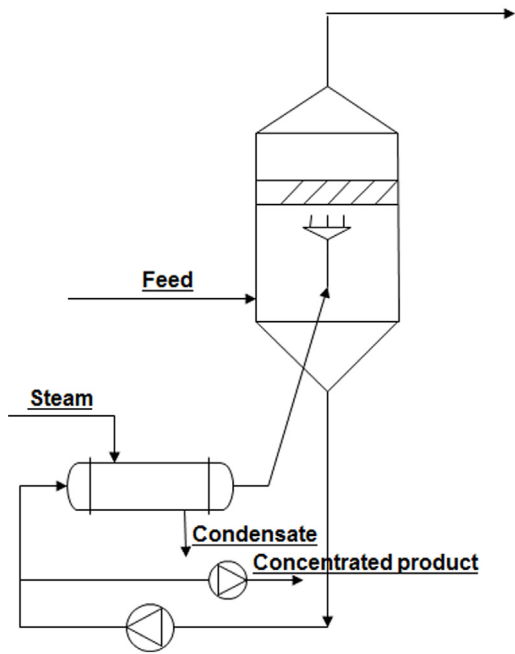


Figure 1. A schematic diagram of a single-stage evaporator.

증발시키는 성분이 스팀인 경우에는 단일효용 증발관에서 소모되는 스팀 사용량에 비해서 상당히 많은 양의 스팀 소모량을 절감할 수 있다는 장점이 있다.

한편 증기 재압축 공정을 위해서는 다음의 Figure 3과 같은 1단 압축 공정과 Figure 4와 같이 중간에 냉각기를 가지는 2단 압축 공정 사이에서 스팀 소모량을 비교하였다. 또한 2단 압축 공정에 대해서는 압축기의 총 소요동력을 최소화시켜 주는 최적의 중간 압력을 결정하였다.

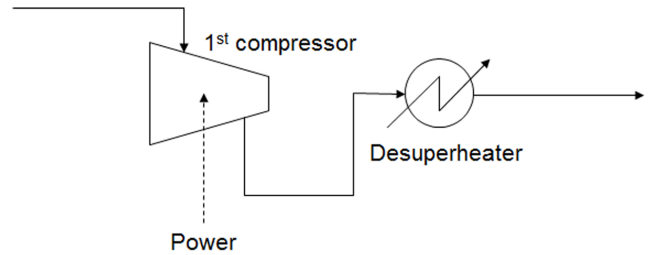


Figure 3. A schematic diagram of a single-stage compression process with a desuperheater.

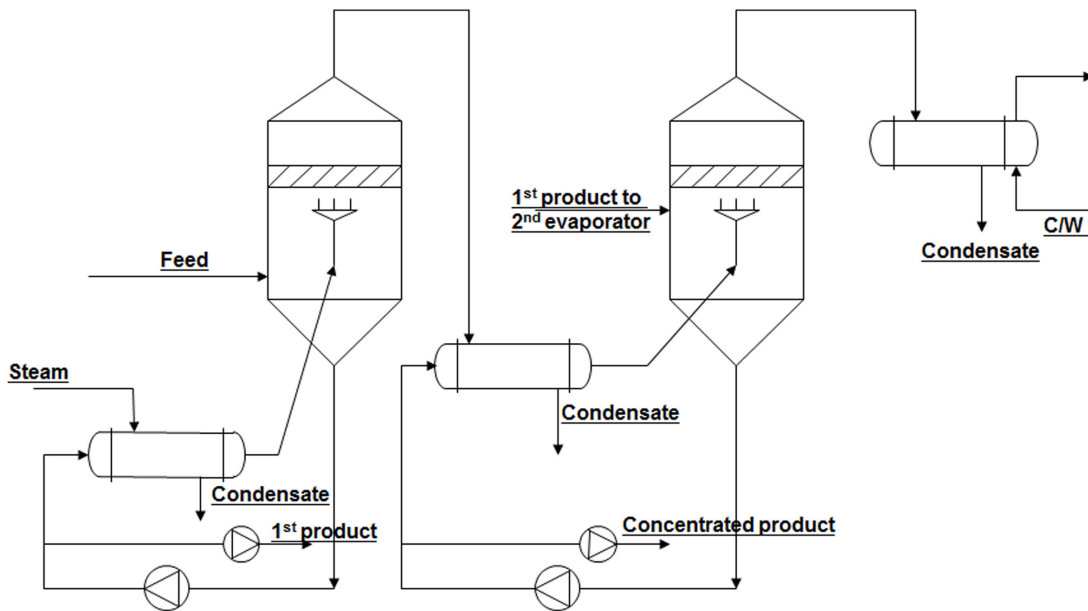


Figure 2. A schematic diagram of two-stage evaporators.

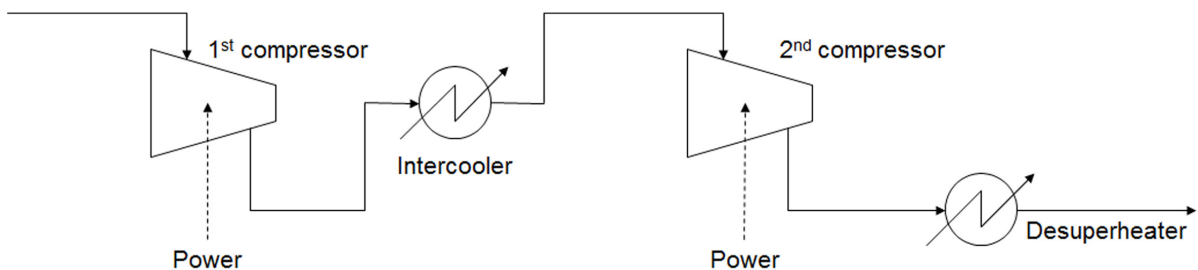


Figure 4. A schematic diagram of two-stage compression process with an inter-cooler and a desuperheater.

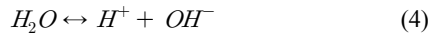
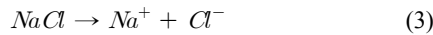
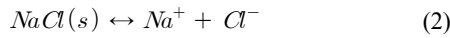
2. 열역학 이론

2.1. 증발농축 공정을 위한 Electrolyte NRTL 모델

물에 녹아서 양이온과 음이온의 전해질을 형성하는 혼합물에 대한 열역학적인 해석을 위해서 Aspen Plus에는 Electrolyte NRTL 모델식[4]을 사용하는데, 그 Gibbs 자유에너지 표현식은 다음의 Equation (1)에 나타내었다.

$$G_m^* = x_w \mu_w^* + \sum_s x_s \mu_{s,l}^* + \sum_k x_k \mu_k^\infty + RT \sum_j x_j \ln x_j + G_m^{*,E} \quad (1)$$

또한 본 공정의 전산모사를 위해서 전해질 반응은 다음의 3개의 반응을 고려하였다.



위의 (2)번 반응은 고체의 NaCl이 Na⁺ 이온과 Cl⁻ 이온으로의 반응 평형에 대한 평형상수를 나타내었으며, (3)번 반응은 평형반응이 아니라 해리되는 반응이므로 평형상수를 표시할 수 없다. 그리고 (4)번 반응은 전해질인 물이 H⁺ 이온과 OH⁻ 이온으로 해리하는 반응이므로 다음의 Equation (5)와 같이 이온반응 평형상수를 온도의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 각 계수들은 다음의 Table 1에 각각 나타내었다.

$$\ln K = A + \frac{B}{T} + C \ln T + DT \quad (5)$$

2.2. 증기 재압축 공정을 위한 Peng-Robinson 상태방정식

Peng-Robinson 상태방정식[5]은 다음의 Equation (6)에 나타내었다.

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a\alpha}{v(v+b)+b(b-v)} \quad (6)$$

위의 Equation (6)에서 a 는 에너지 매개변수이며, b 는 크기 매개변수이다. 이는 임계온도와 임계압력의 함수로 표현할 수 있으며 다음의 Equation (7)과 (8)에 각각 나타내었다.

Table 1. Coefficients in ionic equilibrium constant as functions of temperature

Coefficients	Equation (2)	Equation (4)
A	-203.588	132.899
B	4,381.18	-13445.9
C	35.8752	-22.4773
D	-0.0672161	

Table 2. Coefficients in Twu's alpha function for water

Coefficients	Value
C ₁	0.38464
C ₂	0.86999
C ₃	1.9367

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (7)$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (8)$$

그리고 α 는 알파 함수로써 순수성분의 온도에 따른 증기압을 잘 추산하기 위해서 Twu et al. [6]이 제안한 새로운 모델식으로 이는 아래의 Equation (9)에 나타내었다.

$$\alpha = T_r^{C_3(C_2-1)} \exp\left[C_1(1 - T_r^{C_2 C_3})\right] \quad (9)$$

여기에서 계수들인 C₁, C₂ 및 C₃ 값은 물질마다 고유한 값들이며 물에 대한 값들은 위의 Table 2에 나타내었다.

3. 전산모사

3.1. 2중 효용 증발공정의 전산모사

다음의 Table 3에는 증발농축 공정에 주입되는 원료의 조성을 나타내었다.

다음의 Figure 5에는 본 공정에서 적용한 2중 효용 증발공정에 대한 개요도와 주요 스트림에 대한 스트림 넘버를 표기하였다. Figure 5에 의하면 첫 번째 증발기인 EV-101로 원료인 1번 스트림과 24번 스트림이 주입되고, 7번 스트림으로 133.2 °C의 저압의 포화스팀이 HE-101 열교환기로 주입되어서 증발관 하부로부터 열교환기로 주입되는 액상류의 일부를 증발시켜서 4번 스트림을 다시 EV-101 증발관으로 환류시킨

Table 3. Feedstock condition

Component	Flow (kg h ⁻¹)	Weight (%)
Water	6,103	74
NaCl	1,732	21
Diethylene glycol	412	5
Total	8,247	100
Temperature (°C)	45	
Pressure	atmospheric	
Density (kg/m ³)	1,160	
Viscosity (cP)	9.0	
Specific heat	0.83	

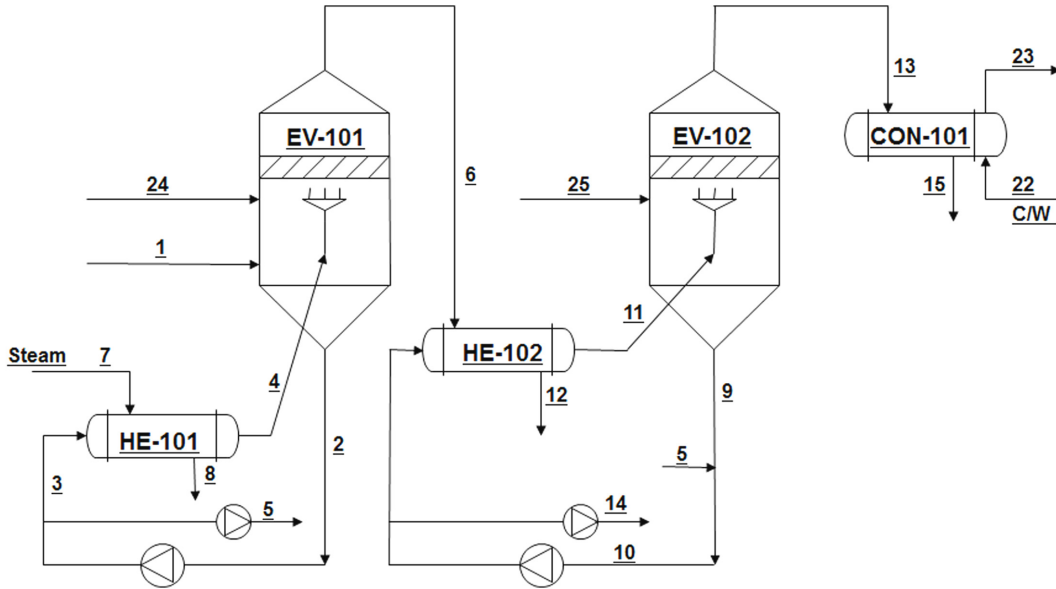


Figure 5. A schematic diagram for two-stage evaporation process in this study.

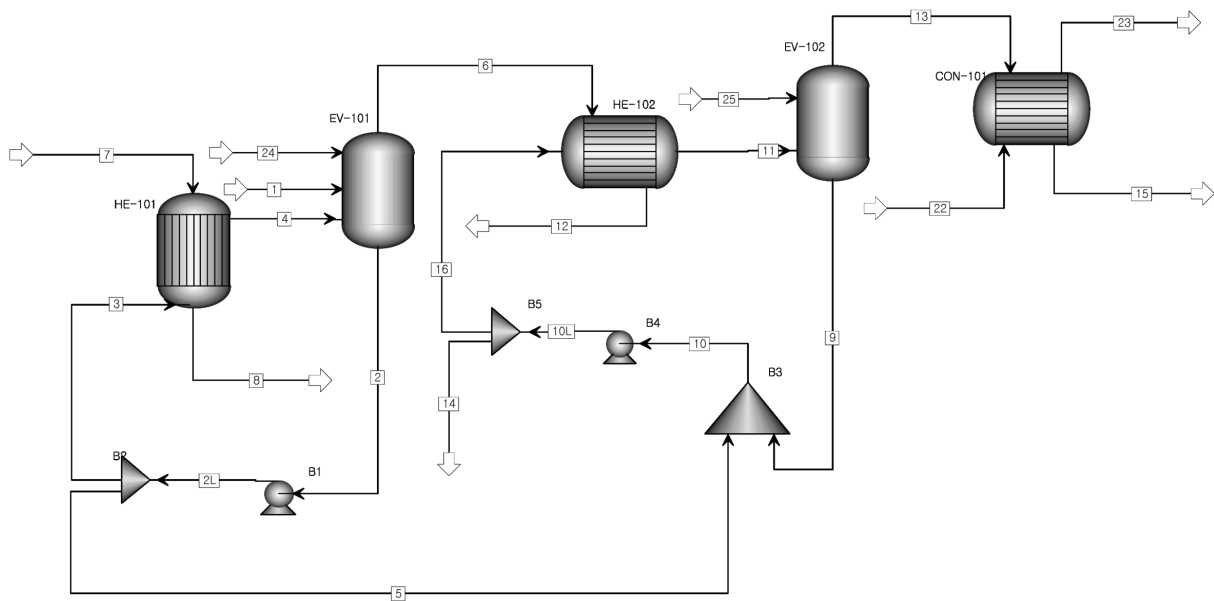


Figure 6. Process flow sheet for two-stage evaporation process using Aspen Plus.

다. EV-101 증발관에서는 6번 스트림이 증기류로 발생하는데 대부분이 스팀이다. EV-101 증발관의 운전압력이 332 torr이므로 6번에서 발생하는 스팀은 포화조건으로써 그 온도는 85.7 °C이다. 한편 EV-102 증발관의 운전압력은 92 torr이므로 포화온도는 56.3 °C이다. 따라서 6번 스트림은 EV-102 증발관의 열원으로 사용하기 위해서 HE-102 열교환기로 주입된다.

한편 다음의 Figure 6에는 Figure 5에 나타낸 2중 효율 증발 공정에 대해서 Aspen Plus를 활용해서 수행한 전산모사 플로 우쉬트를 나타내었으며, Table 4에는 전산모사 결과를 요약 하여 정리하였다.

Table 4. Simulation summary for two-stage evaporation process

Item	Result	Unit
EV-101 pressure	332	torr
Stream 6 flow rate	2,558	kg h ⁻¹
HE-101 duty	1.6371×10 ⁶	kcal h ⁻¹
Stream 7 flow rate	3,139	kg h ⁻¹
EV-102 pressure	92	torr
Stream 13 flow rate	3,006.8	kg h ⁻¹
HE-102 duty	1.4243×10 ⁶	kcal h ⁻¹
CON-101 duty	1.7204×10 ⁶	kcal h ⁻¹

Table 5. Heat and material balance for two-stage evaporation process

Stream	Unit	1	7	8	12	14	15	22	23	24	25
Temp.	°C	45.0	133.2	133.2	78.3	56.8	49.8	32.0	37.8	40.0	40.0
Press.	bar	1.0	3.0	3.0	0.4	1.8	0.1	3.0	3.0	3.0	3.0
Vapor frac.		0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mole flow	kmol h ⁻¹	401.9	174.2	174.2	141.9	76.9	166.8	16,652.5	16,652.5	4.4	5.6
Mass flow	kg h ⁻¹	8,247.0	3,139.0	3,139.0	2,557.6	2,862.7	3,006.8	300,000.0	300,000.0	80.0	100.0
H ₂ O	kg h ⁻¹	6,103.0	3,139.0	3,139.0	2,556.2	719.2	3,003.5	300,000.0	300,000.0	80.0	100.0
NaCl	kg h ⁻¹	1,732.0	0.0	0.0	0.0	1,728.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DEG	kg h ⁻¹	412.0	0.0	0.0	1.4	414.8	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0
H ₃ O ⁺	kg h ⁻¹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
OH ⁻	kg h ⁻¹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NA ⁺	kg h ⁻¹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NaCl (S)	kg h ⁻¹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CL ⁻	kg h ⁻¹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

다음의 Table 5에는 Figure 5에 나타난 2중 효율 증발공정에 대한 열 및 물질수지 결과를 요약 정리하였다.

3.2. 단일 압축기를 활용한 증기 재압축 공정의 전산모사

증발농축 공정에 증기 재압축 공정을 적용하면 다음의 Figure 7과 같다.

위의 Figure 7에 의하면 첫 번째 증발기에서 발생하는 스팀은 두 번째 증발기의 열원으로 사용하고, 두 번째 증발기에서 발생하는 저온, 저압의 스팀은 증기 재압축 공정을 거친 후에 최초의 스팀과 합쳐서 첫 번째 증발기의 열원으로 사용한다.

첫 번째로는 Figure 3에 나타난 바와 같이 단일 압축기와 desuperheater를 활용하여 92 torr, 56.3 °C의 저온과 저압상태의 쓸모없는 스팀의 압력을 가압하여 133.2 °C의 스팀을 만드는 공정에 대한 전산모사를 수행하였다. Figure 8에는 PRO/II with PROVISION을 활용한 1기의 압축기를 활용한 증기 재

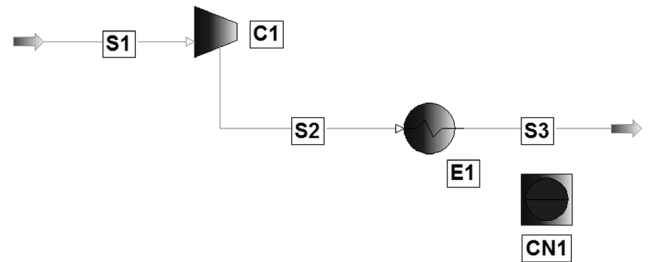


Figure 8. Process flow sheet for a single-stage evaporation process using PRO/II with PROVISION.

압축 공정에 대한 플로우 쉬트를 나타내었다. 압축기의 효율은 70%를 가정하였으면 압축기 후단의 열교환기는 desuperheater로서 여기에서 과포화 상태의 스팀을 포화상태로 만든다. 한편 controller의 역할은 desuperheater 후단의 스팀의 온도가

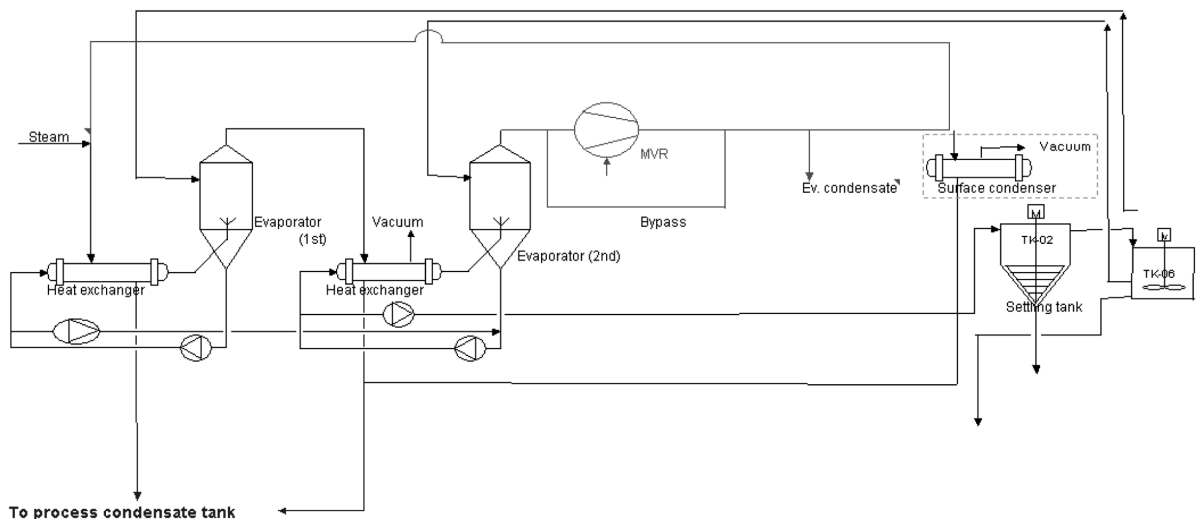


Figure 7. A schematic diagram for two-stage evaporation process with a mechanical vapor recompression process.

Table 6. Simulation summary for a single-stage evaporation process

Item	Result	Unit
Feed flow rate	2,558	kg h ⁻¹
Compressor power	747.24	kW
Compressor efficiency	70	%
Compressor discharge pressure	2,228.807	torr
Desuperheater duty	0.5548×10 ⁶	kcal h ⁻¹
Cooling water consumption at desuperheater	69.4	ton h ⁻¹
Cooling water supply temperature	32	℃
Cooling water return temperature	40	℃

133.2 ℃가 되도록 압축기 후단의 압력을 결정해 준다. Table 6에는 단일 압축기를 활용한 증기 재압축 공정에 대한 전산 모사 결과를 요약하였다.

3.3. 2단 압축 공정을 활용한 증기 재압축 공정의 전산모사

2단 압축 공정을 활용한 증기 재압축 공정에 대한 PRO/II를 활용한 플로우 쉬트는 다음의 Figure 9에 나타내었다. 한편 2단 압축 공정에서는 2기의 압축기의 소요 동력의 합이 최소가 되는 첫 번째 압축기의 최적의 도출압력을 결정하기 위한 최적화 작업을 수행하였다. 다음의 Figure 10에는 첫 번째 압축기 도출압력의 변화에 따른 총 소요동력의 변화를 도시하였다.

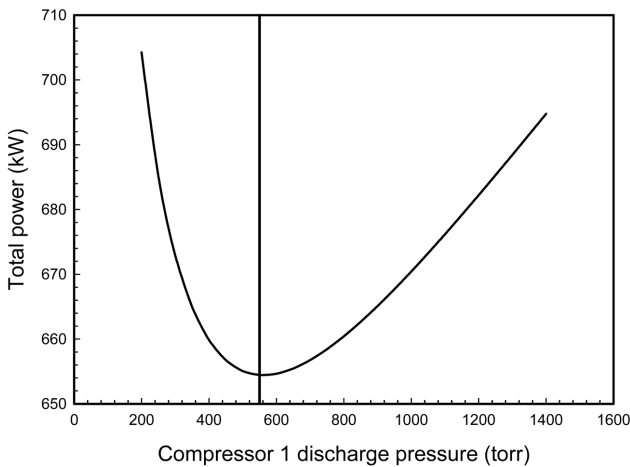


Figure 10. Determination of an optimal intermediate pressure which minimizes the compression power.

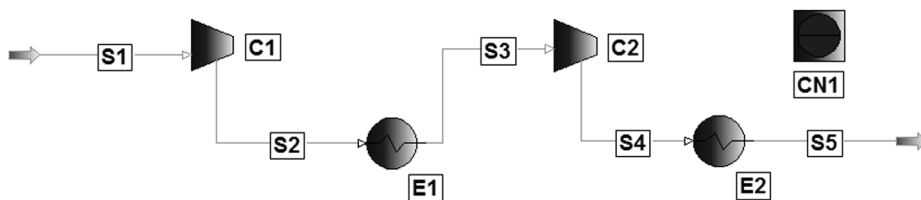


Figure 9. Process flow sheet for two-stage vapor recompression process using PRO/II with PROVISION.

Table 7. Simulation summary for two-stage vapor recompression process

Item	Result	Unit
Compressor 1 power	320.34	kW
Compressor 1 efficiency	70	%
Compressor 1 discharge pressure	550	torr
Inter-cooler duty	0.2257×10 ⁶	kcal h ⁻¹
Compressor 2 power	334.11	kW
Compressor 2 efficiency	70	%
Compressor 2 discharge pressure	2,228.81	torr
Desuperheater duty	0.2493×10 ⁶	kcal h ⁻¹

Table 7에는 2단 압축기를 활용한 증기 재압축 공정에 대한 전산모사 결과를 요약하였다.

4. 결론

본 연구에서는 디에틸렌 글리콜(diethylene glycol)이 함유되어 있는 NaCl 수용액을 2중 증발농축 공정을 활용하여 고형물의 NaCl을 얻기 위해서 두 번째 증발관에서 발생하는 증기류를 단일압축과 2단 압축 공정을 활용한 증기 재압축 공정을 활용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, NaCl 수용액과 같은 전해질이 포함된 2중 효용 증발농축 공정의 전산모사를 위해서는 Aspen Plus에 내장되어 있는 Electrolyte NRTL 모델식이 가장 적합함을 알 수 있었다.

둘째, 두 번째 증발관에서 증발하는 저압의 스팀을 증기 재압축 공정을 활용하여 133.2 ℃의 스팀을 얻기 위한 공정의 전산모사를 위해서는 PRO/II with RPROVISION에 내장되어 있는 새로운 알파 함수를 적용한 Peng-Robinson 상태방정식이 가장 적합함을 알 수 있었다.

셋째, 증기 재압축 공정을 활용하지 않았을 경우에 첫 번째 증발기에 필요한 스팀의 유량은 3,139 kg h⁻¹임을 알 수 있었으며, 증기 재압축 공정을 적용할 경우 2,558 kg h⁻¹의 저압의 스팀을 활용할 수 있기 때문에 스팀 소모량은 581 kg h⁻¹로 줄어들었다.

넷째, 단일 압축기를 적용할 경우 압축기의 소요동력은 747.27 kW임에 비해서 2단 압축 공정을 적용하고 총 소요동력을 최소화시키는 최적의 첫 번째 압축기의 도출압력을 정했을 경우 총 소요동력은 654.45 kW로 줄어들었음을 알 수 있었다.

감 사

본 연구는 2015년도 동양대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었음.

Nomenclature

- a : Equation of state attraction parameter
 b : Equation of state van der Waals co-volume parameter
 C_1 : Dimensionless alpha function coefficient
 m : Characteristic constant of a substance
 P : Pressure [kPa]
 R : Molar gas constant [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
 T : Temperature [K]
 v : Relative volume [$\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$]

Greek Symbols

- α : Dimensionless function of reduced temperature and acentric factor
 ω : Acentric factor

Superscripts

- C_2 : Alpha function dimensionless parameter
 C_3 : Alpha function dimensionless parameter

Subscripts

- c : critical property
 r : reduced property
 mix : mixture

References

1. Cipollina, A., Micale, G., and Rizzuti, L., Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes, Springer, Heidelberg, 1-16 (2009).
2. Salunkhe, D. K., and Kadam, S. S., "Handbook of Fruit Science and Technology: Production, Composition, Storage, and Processing," New York, New York: Marcel Dekker, 1-6 (1995).
3. Dan Laudal Christensen "Gas Dehydration," Aalborg University Esbjerg, February (2009).
4. Chen, C.-C., Britt, H. I., Boston, J. F., and Evans, L. B., "Local Composition Model for Excess Gibbs Energy of Electrolyte Systems. Part I: Single Solvent, Single Completely Dissociated Electrolyte Systems," *AIChE J.*, **28**(4), 588-596 (1982).
5. Peng, D.-Y., and Robinson, D. B., "A New Two-Constant Equation of State," *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **15**(1), 59-64 (1976).
6. Twu, C. H., Coon, J. E., and Cunningham, J. R., "A New Generalized Alpha Function for a Cubic Equation of State Part 1. Peng-Robinson Equation," *Fluid Phase Equilib.*, **105** (1), 49-59 (1995).