

고순도 용제 회수 시스템의 공정 조건 탐색을 위한 AMESim 모델 개발

김대현 · 주강우 · 김광선[†]

[†]한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학부

Developing AMESim Model to Find out Process Condition of High Purity Solvent Recovery System

Dae Hyun Kim, Kang Woo Joo and Kwang Sun Kim[†]

[†]Department of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education, Korea

ABSTRACT

As NMP (N-Methyl-2pyrrolidone) is becoming important in many fields, the demand for it is also rising rapidly. With its chemical property of high boiling point, low vapor pressure and high water solubility, it is easy to recover it after processing. Therefore, it is increasingly needed to develop a system that effectively recovers NMP solvent. The study produced a system modeling using AMESim software before developing high purity solvent recovery (HPSR) system to recover NMP solvent. Then, it verified reliability by comparing the simulation model with the test result.

Key Words : Lithium-ion Battery, Battery Pack, Green Energy, Numerical Analysis

1. 서 론

TFT-LCD생산공정에 있어서 NMP (N-Methyl-2pyrrolidone)는 Photoresist Stripper의 역할로서 반드시 필요한 용제로 사용되고 있다. 또한 하이브리드 전기자동차 및 전기자동차의 배터리에 사용되는 리튬-이온 전지의 생산에 있어서도 필수 용제로 사용되고 있다[1]. 이와 같이 다양한 분야에서 그 중요성과 사용량이 증가함에 따라 NMP의 수요 또한 빠르게 증가하고 있다[2]. 이러한 수요에 대응하기 위해 일부 업체에서 대용량의 NMP생산설비를 갖춘 상태이다. NMP는 202°C의 높은 비점, 0.345 mmHg의 낮은 증기압, 그리고 높은 수용성을 가지고 있는 화학적 특성을 가지고 있어 물에 의한 흡수 방법 및 저온 응축의 방법으로 용제의 회수가 가능하다[3]. 물에 의한 흡수 방법은 많은 양의 공급수가 필요하며 회수된 액상의 NMP 용액을 사용 가능한 높은 순도의 NMP로 정제하는 과정에서 많은 양

의 에너지가 필요하며 흡수기 및 분배기를 설치하기 위한 추가적인 부지가 필요하다[4]. 이러한 단점을 보완하기 위해 NMP의 낮은 증기압 특성을 이용한 저온 응축방식과 회전식 로터(Rotor) 시스템에 의한 농축 방식을 복합 구성한 고순도 용제 회수시스템(HPSR : High Purity Solvent Recovery)을 개발하고자 한다.

본 연구에서는 고순도 용제회수시스템 구성에 있어서 최적의 구성 조건을 탐색하기 위해 AMESim을 이용하여 공정 모델을 개발하였다.

2. 고순도 용제 회수 시스템

Fig. 1은 고순도 NMP 회수시스템의 Flow Diagram이다.

고순도의 NMP가 함유된 공정기체는 열 교환기로 유입되어 1차 냉각 및 응축을 통해 용제를 회수한다. 열 교환기에서 사용하는 냉각 과정은 냉각 코일과 로터를 통과한 저온의 공기를 사용하여 에너지를 절감할 수 있다. 열 교환기를 통과한 공정기체는 응축기를 통해 2차 응축시켜 용제를 회수한다. 응축기를 통과한 공

[†]E-mail : kskim@koreatech.ac.kr

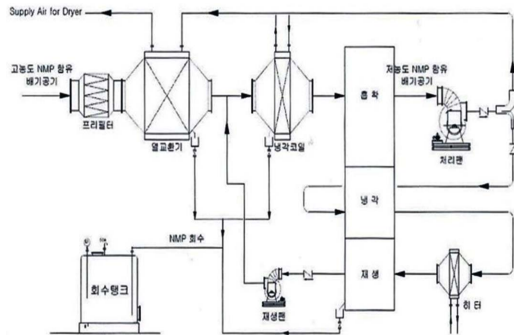


Fig. 1. Flow diagram of HSPR system.

정기체는 제올라이트(Zeolite)를 함유한 회전식 로터에서 흡착되어 NMP의 농도를 감소시킨다. 이 공정 기체 중 대부분은 1차 응축이 발생한 열교환기를 지나면서 승온되어 생산공정으로 유입된다. 이 공기를 재순환시키는 목적은 승온된 공기가 상온의 공기보다 건조에 필요한 열량을 감소시켜 건조 과정에서 필요한 에너지를 줄일 수 있기 때문이다.

로터에서 흡착과정을 지난 일부 공정 기체는 로터의 냉각에 활용한다. 이것은 연속회전식 로터의 특징으로 NMP를 탈착한 재생과정에서 축열된 로터가 회전하고 축열된 온도를 냉각시켜 로터에서 흡착된 처리 공정 기체의 온도 상승을 방지하기 위함이다. 또한 냉각과정에서 열원을 획득하여 히터의 부하를 감소시키는 중요한 역할을 한다.

NMP의 농축을 위한 로터 시스템은 로터에 함유된 제올라이트에 NMP를 흡착 후 열풍을 이용하여 탈착하여 NMP의 농도를 높여주는 시스템이다. 이 때 NMP의 탈착을 위한 열풍의 온도 및 열원에 대한 선정이 필요하며 로터를 이용한 NMP의 농축을 위한 최적의 시스템 구현을 위한 주요 인자들을 설계하는 것이 필요하다.

3. AMESim을 이용한 고순도 용제 회수 시스템 모델링

3.1. 열 교환기

Fig. 2는 전체 공정 중 열 교환기를 나타낸 그림이다. 고농도의 NMP가 함유된 공기는 열 교환기로 유입되어 1차적으로 저온의 공정기체와 열 교환 과정을 거친다. 이 과정 후에 NMP용제는 냉각 및 응축되어 별도의 회수 탱크로 이동한다. 또한 냉각 및 응축과정을 거친 공정 가스는 냉각코일로 이동하여 추가적인 냉각 및 응축과정에 투입된다. 이 때 열 교환에 의해 이루어지는 온도의 변화는 Table 1과 같다.

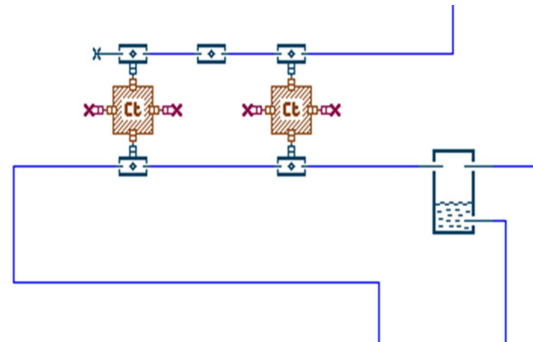


Fig. 2. AMESim model of heat exchanger.

Table 1. Temperature variations after heat exchange process.

공정 전(°C)	공정 후(°C)
135	76.2

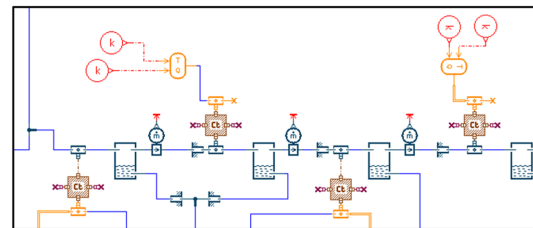


Fig. 3. AMESim model of cooling coil.

3.2. 냉각코일

Fig. 3은 전체 공정 중 냉각코일을 나타낸 그림이다. 열 교환기를 거치며 1차적으로 온도가 낮아진 공정기체는 냉각코일들을 거치며 추가적으로 NMP용제를 회수한다. 냉각 코일들은 총 4개의 코일로 구성되어 있으며 순차적으로 배치되어 있다. 냉각 코일들의 냉각 냉매로는 냉각수를 사용한다. 첫 번째 코일과 네 번째 코일은 서로 연결되어 순환코일의 역할을 한다. 두 번째 코일과 세 번째 코일은 각각 Chiller에 연결되어 냉각된 저온의 냉각수를 공급받는다. 냉각코일들을 거친 공정 가스는 회전식 로터 시스템에 투입된다. 각 코일을 거친 공정기체의 온도는 Table 2와 같다.

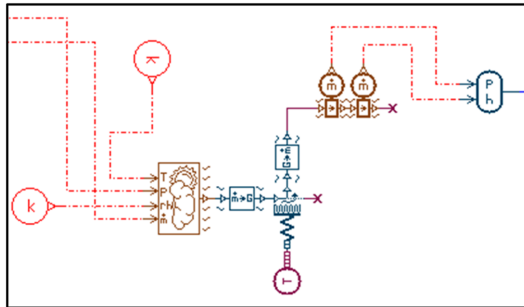
3.3. 회전식 로터 시스템

Fig. 4는 전체 공정 중 회전식 로터 시스템을 나타낸 그림이다.

공정 기체 내의 NMP는 냉각 코일을 거치며 대부분 회수되지만 공정 기체 내에는 아주 낮은 농도 값을 가지는 NMP가 포함되어 있다. 이 공정기체는 회전식 로

Table 2. Temperature of NMP gas after cooling process

	공정 후 온도(°C)
1차 코일	50
2차 코일	33
3차 코일	12
4차 코일	17

**Fig. 4.** AMESim model of rotary-type rotor system.

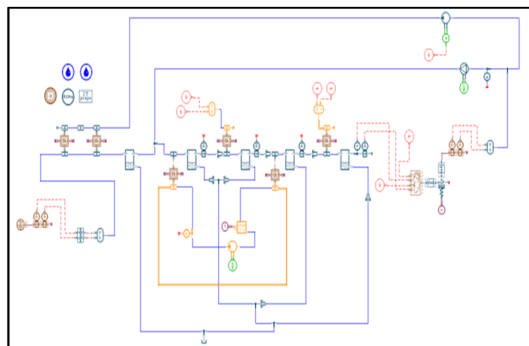
터 시스템을 거치며 높은 농도로 농축되어 다시 냉각 코일을 거치며 NMP를 회수하게 된다.

4. 결과 비교 분석

4.1. 해석 모델

HSPR 전체 공정은 Fig. 5에 나타나있다. 구성한 AMESim 모델을 바탕으로 NMP 회수 조건을 탐색하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 진행에 사용한 공기와 NMP의 물성치는 각각 Table 3에 나타나 있다.

공정 시뮬레이션의 검증을 위하여 Table 4에 나타나고 있는 경계 조건으로 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬

**Fig. 5.** Whole AMESim model of HSPR system.**Table 3.** Properties of Air & NMP

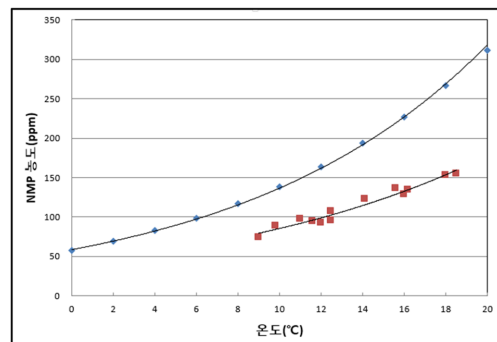
Properties	Air	NMP
Dynamic Viscosity (Pa·s)	1.85508e-5	0.0017
Molecular Weight (Kg/Kmol)	29.9664	99.1
Specific Heat (J/Kg·K)	1063.60	1260.227
Thermal Conductivity (W/m·K)	0.0260305	163.0

Table 4. Boundary Condition

항목	수치	
NMP 발생기	입력유량	9000 NCMH
	입력온도	135°C
	입력상대농도	40%
열교환기	열교환범위	76.2°C → 68.6°C
냉각코일	순환수 유량	130 LPM
	2차코일 온도	32/37°C
	3차코일 온도	7/12°C
로터	재생 온도	140°C

레이션을 실행하기 위하여 필요한 입력 조건(공정가스의 입력유량, 공정가스의 입력온도, 열교환기 및 냉각 코일의 설정 온도등)들은 실험 조건을 사용하였으며, NMP의 농축량을 동일한 조건의 실험 결과와 비교하여 모델의 정확도를 검증하였다[5].

Fig. 6과 Fig. 7은 각각의 온도 조건에 있어서의 NMP 기체의 포화농도곡선의 Data이다. 온도조건에 따라 NMP의 포화농도는 상이하며 NMP를 함유한 공정 기체는 열교환기 및 냉각코일, 회전식 로터시스템을 거치며 온도의 변화를 보인다. 각각의 공정을 거치며 감소한 온도에 따라 포화농도의 편차가 발생하며 발생한 편차 농도만큼의 NMP가 회수된다.

**Fig. 6.** Concentration data of NMP gas(0°C-20°C).

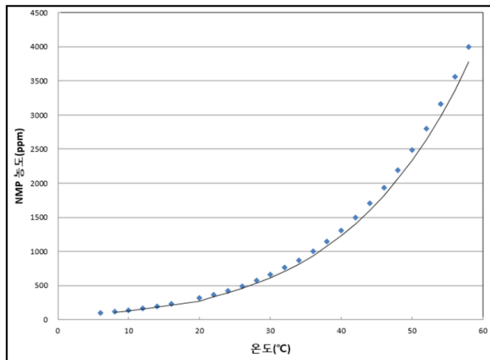


Fig. 7. Concentration data of NMP gas(0°C-80°C).

4.2. 해석 결과 분석

Fig. 8은 고순도 용제 회수 장치의 공정을 거치며 응축된 NMP가 Recovery Tank로 회수되는 NMP의 유량 시뮬레이션 결과를 나타낸 결과이다. 이 결과를 바탕으로 고순도 용제 회수시스템의 AMESim Model은 정상적으로 작동하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 고순도 용제 회수 장치의 AMESim Model을 다양한 온도 조건을 적용하여 시뮬레이션을 진행한

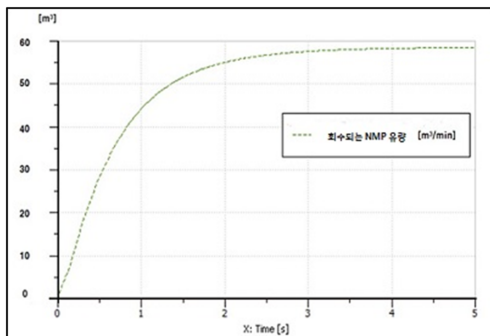


Fig. 8. The Flow rate of recovered NMP in recovery tank.

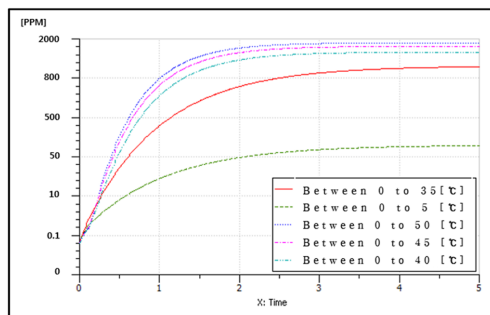


Fig. 9. Recovered amount of NMP with various temperature conditions.

Table 5. Experiment data of HSPR system.

항목	시스템입구 농도(ppm)	시스템출구 농도(ppm)	회수율(%)
1	1928	2.3	99.9
2	2325	3.5	99.8
3	431	2.9	99.3
4	465	2.8	99.4
5	600	2.3	99.6
6	607	3.8	99.4
7	212	3.0	98.6
8	213	4.1	98.1
9	236	2.8	98.8
10	290	1.5	99.6

결과이다. 수치 해석 결과를 살펴보면 온도의 하강 편차가 클수록 NMP 회수량은 증가하는 경향을 보였다.

Table 5는 실제 구성한 HSPR system의 시스템 입구 농도 별 시스템 출구에서의 농도와 회수율을 나타낸 결과이다. 시스템 입구에서의 NMP농도가 최저 212 ppm부터 최대 2325 ppm의 범위 내에서 투입되었을 때 최저 98.1%와 최고 99.9%의 회수율을 기록하였다. 이를 바탕으로 Fig. 9의 시뮬레이션 결과와 Table 5의 실험 결과를 비교해보면 1% 내외의 오차를 보이며 개발한 공정 모델의 신뢰성을 확보하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 회수 용제로서 NMP를 적용하여 저온 응축방식과 회전식 로터 시스템에 의한 농축 방식을 결합한 용제 회수 시스템을 AMESim 을 사용하여 모델링하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 실험 결과와 비교함으로써 해석의 신뢰성을 검증하였다. 이번 연구를 통해 개발된 AMESim 모델은 실제 용제 회수시스템의 구조, 동작 원리, 변수 등을 반영하여 구축하였으면 동일한 실험 조건에서 시뮬레이션 결과가 실험 결과와 거의 일치함을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 용제 회수 시스템 모델은 향후 다양한 용제를 대상으로 한 모델 개발에 활용할 수 있으며 용제 회수 알고리즘 개발에도 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 광역선도산업육성사업의 재원으로 (재)충

청광역경제권선도산업지원단의 지원을 받아 수행된 충청권광역경제권선도산업(A005800039)입니다.

참고문헌

1. A. Guefri, M. Kaneko, M. Peticlerc, M. Mori, K. Zaghbi, "LiFePO₄ water-soluble binder electrode for Li-ion batteries", *Journal of Power Source* 163, pp. 1047-1052, (2007).
2. Laura Wood, "Global and Chinese N-Methyl-2-Pyrrolidone (NMP) market research report 2014-2019", 2014 Oct 03, <http://www.businesswire.com/>, (2014).
3. Jongtae Jung, Jaehyun Roh, Jungho Cho, "A study for carbon dioxide removal process using N-Methyl-2-pyrrolidone solvent in DME production process", *Clean Technology*, 18(4), pp.347-354, (2012).
4. Peter E. Dahlgren, "Solvent recycling for reuse in semiconductor manufacturing", *IEEE/UCS/SEMI International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, pp.205-209, (1995).
5. *AMESim User Guide*, Imagine, (2014).

접수일: 2015년 9월 8일, 심사일: 2015년 9월 21일,
2차심사일: 2015년 10월 20일, 게재확정일: 2015년 10월 30일