

암모니아 흡수식 열펌프 충전식 정류기의 정류 특성에 관한 연구

김 돈 수, 윤 상 국^{*†}

한국해양대학교 대학원, *한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과

Rectification Characteristic of Packing Materials in the Packed-type Rectifier of NH₃/H₂O Absorption Heat Pump

Don Soo Kim, Sang Kook Yun^{*†}

Graduate School of Refrigeration & A/C Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

^{*}Department of Refrigeration & A/C Engineering, Pusan 606-791, Korea

(Received February 23, 2002; revision received August 20, 2002)

ABSTRACT: An experimental study on the characteristics of several kinds of packing materials was carried out in order to get the optimum design data for the packed-type rectification system of an NH₃/H₂O GAX absorption heat pump. Several suitable packing materials were examined and the bulk of steel wire was shown as the most effective packing material in rectifier. The optimum volumetric ratio of packed steel wire in rectifier was obtained as around 36%. The performance results can be adapted in rectifier design of absorption heat pump.

Key words: Packed-type rectifier(충전식 정류기), Packing material(충전재), Absorption heat pump(흡수식 열펌프), Steel wire(철섬유)

기 호 설 명

1. 서 론

C : 농도

L : 길이 [mm]

m : 질량유량흐름 [kg/s]

하첨자

b : 하부

i : 입구, 관내

t : 상부

암모니아 흡수식 열펌프는 발생기의 암모니아 수용액을 가스로 가열하면 비점이 낮은 암모니아와 함께 물의 일부도 증기상태로 발생되므로 암모니아와 물을 분리하는 정류기가 추가로 필요하게 된다. 정류기란 비등점이 다른 2종 이상의 용액을 가열하여 상승하는 기체와 하강하는 액체의 접촉에 의한 물질전달로 용액의 물질을 서로 분리하는 장치이다. 발생기에서 암모니아 수용액은 비등되어 정류기 상부에는 비점이 낮은 암모니아 농증기가 발생되며, 정류기 하부로는 암모니아가 약 1% 정도 함유된 수용액이 생성된다. 발생기(desorber) 상부의 증기는 암모니아 농도가 95% 정도이며, 최상부에 설치된 정류기(rectifier)에서 얻어지는 암모니아 농도는 99.8% 이상의 고농도가 된다. 정류기 출구의 암모니아 증기에 수분함

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-410-4975; Fax: +82-51-410-4363

E-mail address: rei@mail.hhu.ac.kr

량이 크면 암모니아 농도가 낮아 증발기와 응축기에서 유체의 포화온도가 높게 되고 수분이 증발기에서 증발이 되지 않게 되어 냉각효율과 COP가 크게 감소하게 된다.

정류기 형식에는 정류단 적용 방식과 충전재 (packed column) 방식이 있다. 정류단 방식은 발생기, GAX 가열기, 그리고 정류기가 일체형으로 이루어질 수 있으며, 충전재 방식은 발생기로부터 분리된 정류기를 장착하는 것이다. 보조정류단식은 발생기와 일체형으로 함으로써 온도구배와 물질전달이 용이하여 고순도의 암모니아 증기를 얻을 수 있는 장점을 지닌다. 여기서 GAX (generator absorber exchange) 시스템은 열펌프의 COP 향상을 위하여 흡수기의 발생열을 재생기에 이용하는 것이다.

$\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 흡수식 열펌프는 암모니아의 독성 및 폭발성 등으로 인하여 그 사용의 제약성을 갖고 있기 때문에 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 흡수식 열펌프에 대한 연구나 암모니아 증기의 흡수과정에 대한 연구는 매우 부족하다. 정류기의 열전달과 물질전달의 해석연구는 석유화학 분야에서 혼합물질의 분리증류를 위하여 액체 필름이나 하강하는 액체에 증기의 흡수 메카니즘에 대한 수많은 연구가 수행되어 왔으나,^(1,2) $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 흡수식 열펌프의 정류기에 대한 연구는 수행이 극히 저조한 실정이다.

Mah,⁽³⁾ Null,⁽⁴⁾ Peterson⁽⁵⁾은 GAX 가열기의 정류효과 향상과 관련이 있는 중간 가열기의 해석을 하였고, Mitsubishi의 Atsushi Tsujimori et al.⁽⁶⁾은 몇 가지 충전재의 정류 성능에 관한 연구를 수행하였으며, 국내에서는 김병주 등⁽⁷⁾이 수평관 정류기의 열 및 물질전달에 대하여 해석한 바 있고, 윤상국 등⁽⁸⁾도 발생기 일체형 정류기의 열 및 물질전달을 해석하였다. 김동선 등⁽⁹⁾은 GAX 열펌프에서 충전재의 수력학적 특성 및 물질전달에 관해 실험을 통하여 분석하였다.

본 연구는 GAX 시스템 일체형 보조 정류기와 충전식 정류기의 설계 기초자료를 얻고자 5RT 규모의 정류시스템 성능 실험장치를 제작하여 적정 충전재, 충전을 평형상태 등을 실험하였다.

2. 이론적 배경

충전식 정류기는 발생기 상부에 위치하고 셸튜브식(shell and tube) 열교환기이며, 암모니아 증

기와 수증기가 관 외부 및 충전재에 접촉하여 막응축이 일어난다. 관 내부는 냉각수가 펌프에 의해 순환 주입되어 암모니아 증기와 수증기로부터 열을 흡수한 후 가열되어 순환된다.

충전식 정류기에서 얻어지는 고순도 암모니아 증기의 농도는 식(2)와 같이 정류시스템에 대한 물질평형으로부터 구할 수 있다. 즉 재생기 중간부에 주입되는 암모니아수 양(m_i)과 농도(C_i), 그리고 발생기 하부에서 생성되는 양(m_b)과 농도(C_b)를 측정하면 암모니아 증기의 양과 농도를 산정할 수 있게 된다.

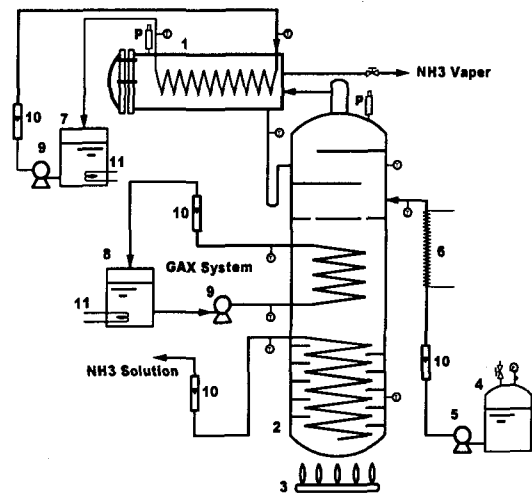
$$m_t = m_i + m_b \quad (1)$$

$$m_t C_t = m_i C_i + m_b C_b \quad (2)$$

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 충전식 정류기의 충전재와 충전율 실험을 위하여 Fig. 1과 같은 실험장치를 구성하였다.



- | | | |
|------------------------------------|--------------------------|-----------|
| 1. Rectifier | 2. Generator | 3. Burner |
| 4. NH_3 solution cylinder | 5. Solution pump | |
| 6. Heater | 7. Cooling solution Bath | |
| 8. Oil Bath | 9. Pump | |
| 10. Flow-meter | 11. Heater | |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 2는 본 실험에 적용한 충전식 정류기의 설계 개략도이다. Fig. 1의 실험장치는 발생기와 충전식 정류기, 하부의 가열용 가스버너, 그리고 용액 공급장치로 구성되어 있다. 재생기에 암모니아수를 공급하는 장치는 항온 압력용기, 펌프, 유량계, 그리고 가열히터를 설치하여 주입되는 용액의 온도를 일정하게 맞추었다. 재생기 중간의 GAX부는 오일을 가열하여 필요 열량을 공급하였다. 재생기 하부로부터 배출되는 묽은 암모니아 용액은 밸브와 유량계를 통하여 일정한 양으로 조절하였다. 재생기 내부는 시스템 압력에 따른 열 및 물질전달의 수치해석⁽⁶⁾에 의하여 평판식 보조정류기인 정류단이 8개 설치되었다. 그리고 Fig. 2의 충전식 정류기는 셀의 길이를 235 mm, 직경 102 mm, 내부 냉각관은 동관으로 외경 9.52 mm, 총길이 2,466 mm로 셀 내부에 11회 회전 제작하였다. 충전식 정류기의 충전재 교환을 위하여 끝단은 플랜지형(flange type)으로 제작하였으며, 충전재 충전 후 유동방지를 위해서 그물망(mesh)을 설치하였다.

재생기와 충전식 정류기의 각 부에 총 10개의 T형 열전대(thermometer)를 설치하여 입·출구 온도를 측정하였다. 열전대는 종류수로 만든 얼음으로 보정하여 ±0.15℃의 정밀도를 유지하였다. 충전식 정류기와 재생기의 압력은 압력변환기(pressure transducer)를 설치하여 측정하였다.

3.2 실험방법

본 연구의 목적은 충전식 정류기에서 얻어지는 암모니아 증기의 농도가 99.8% 이상이 되는 최적의 충전재와 충전율을 얻기 위한 것으로 다음과

같은 방법으로 실험한다. 먼저 NH₃/H₂O 용액조(feeding cylinder)에서 44.2% 농도의 암모니아수 0.6 L/min를 가변형 펌프로 송출하여 재생기에 주입한다. 이때 기준온도인 86.2℃로 상승시키기 위하여 유로에 설치된 5 kW 용량의 히터를 사용하여 가열하였다. 재생기 하부의 LPG용 버너(burner)를 점화하여 재생기 압력이 일정하게 유지되도록 열량을 주입한다. 본 장치는 5RT급 GAX 사이클로 구성되기 때문에 가열된 오일을 일정 유량으로 재생기 중단부에 공급하였다. 이때 재생기 하부의 버너에 의해 가열 증발된 암모니아와 수증기는 재생기 중간의 GAX부에 의해 추가 가열되어지며, 상부로 상승한 암모니아 증기는 충전식 정류기로 주입되게 된다.

충전식 정류기의 관내부는 45℃로 예열된 냉각수를 유량과 입출구 온도를 측정하면서 주입 순환시킨다. 재생기 상부에서 발생된 암모니아 증기는 이 충전식 정류기에 주입되어 충전재에 의하여 열 및 물질전달이 일어나 잔여수분은 응축되고 생성된 고순도의 암모니아 증기는 안전을 위하여 수조로 배출시켰다.

실험개시 후 조건이 평형상태에 도달하면 재생기 하부에서 배출되는 지점의 암모니아수의 농도, 온도와 유량을 측정한다. 또한 주입(feeding)되는 암모니아수의 농도와 유량을 확인한다. 이 두 지점의 유량과 농도로 식(2)에 의하여 충전식 정류기의 암모니아 고순도의 증기농도를 산정하게 된다. 한편 충전식 정류기와 재생기의 최적 압력은 암모니아 증기농도가 99.8% 이상이 될 때의 압력값으로 하였다. 개략적 실험조건은 Table 1과 같으며, 충전재의 종류는 Table 2에 나타내었다.

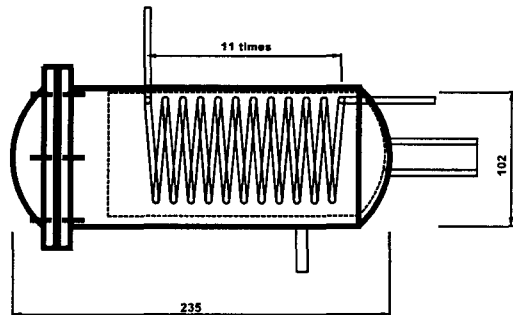


Fig. 2 Schematic diagram of packed type rectifier.

Table 1 Parameter and experimental ranges

Variable	Setting values
NH ₃ concentration of rectifier	99.8%
NH ₃ concentration of residue in generator	1%
Temperature range of GAX-Generator	132~136℃
Pressure	5~16.5 kg/cm ²
Temperature of NH ₃ feed solution	45.1℃
Ambient temperature of air for air-cooled condenser	32℃
Evaporator temperature	3℃

Table 2 Specification of packing materials

Materials	Specification
Raschig rings	D=10 mm OD, L=20 mm
Iron fibers	0.2 mm OD
Copper fibers	0.3~0.5 mm OD

각 지점의 암모니아 농도측정은 적정법을 사용하였으며 정밀도를 높이기 위하여 3~4회 농도를 측정하여 농도오차가 $\pm 0.5\%$ 이내로 유지되도록 하였다. 각 지점의 온도 데이터는 실험하고자 하는 압력이 정상상태에 도달한 후 HP3852A 데이터 처리기를 이용하여 수집하였다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 이와 연계된 최상부 충전식 정류기의 일정온도, 일정 압력하에서 충전재의 종류에 따른 정류효과와 시스템 내부의 압력변화에 따른 정류효과, 그리고 주입용액(feed solution) 온도의 변화에 따른 정류효과를 실험한 것으로 결과는 다음과 같다.

4.1 충전재별 정류특성

Fig. 3은 구리섬유(copper fiber)를 충전하고 압력을 16.5 kg/cm^2 , 용액주입량을 0.6 L/min 으로 일정하게 유지했을 때 정류효과를 나타내고 있다. 충전식 정류기내 구리섬유의 충전율이 증가함에 따라 생성되는 암모니아의 증기순도가 증가되어, 35%일 때 암모니아 농도가 최대치인 99.82%를

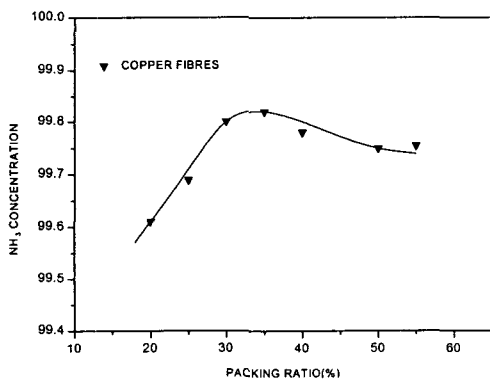


Fig. 3 NH₃ concentration with packing ratio of copper fibers.

얻을 수 있었다. 여기서 충전율은 정류기 전체 체적내 충전재가 차지하는 체적의 비율을 의미한다. 충전율 35% 이상에서 농도가 감소하는 이유는 적정 충전량보다 과다 충전되어 충전전의 저항에 의한 증기흐름의 감소로 열전달효과가 떨어지기 때문으로 판단되어진다.

Fig. 4는 랫쉬그링(Raschig ring)을 충전하고 상기와 같은 조건으로 일정하게 유지했을 때 정류효과를 나타내고 있다. 랫쉬그링의 구조는 직경 10 mm, 길이 20 mm 철재관의 측면 1/3이 절단된 형태로 제작하여 사용하였다. 충전율 30%에서 암모니아 농도를 99.84%까지 증가하다가 이후 감소하는 것을 알 수 있었으며 이유는 상기와 동일한 이유로 판단되어진다.

Fig. 5는 철섬유(iron fiber)를 충전하고 상기 조건과 동일한 조건으로 실험한 결과를 나타내고

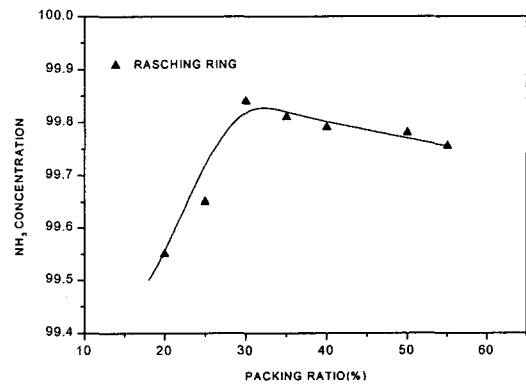


Fig. 4 NH₃ concentration with packing ratio of Raschig ring.

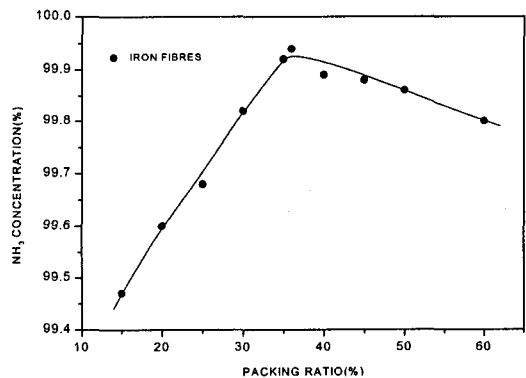


Fig. 5 NH₃ concentration with packing ratio of iron fibers.

있다. 충전율이 증가함에 따라 분리된 암모니아 농도도 증가되어, 충전율 36%일 때 최고치인 암모니아 농도 99.94%를 얻을 수 있었다. 본 연구를 통하여 충전식 정류기의 최적 충전재로는 가격이 저렴한 철섬유가 적절한 재료임을 알 수 있었으며 충전율 36%가 최적의 조건임을 얻을 수 있었다.

이같이 충전재 종류별로 얻어지는 암모니아 농도가 다른 이유는 충전재의 형태와 규격에 따라 석유화학 공정에서 정류 효과의 차이를 갖는 것과 동일한 것으로 판단된다.⁽¹²⁾ 즉 철섬유는 규격이 0.2mm로 균일하여 충전식 정류기내에 비교적 균일한 충전이 이루어져 암모니아 증기로부터 물의 열 및 물질전달이 원활하게 이루어져 제일 높은 암모니아 농도를 보이는 반면, 구리섬유는 열전달 효과는 철섬유보다 큰 반면 규격이 0.3~0.5mm로 불균일하여 정류효과 차이를 갖는 것으로 보인다. 한편 랫쉬그링은 충전재 간의 공간이 많아 암모니아와 물증기로부터 물의 응축이 원활하게 이루어지지 않는 것으로 분석된다.

또한 비철금속인 구리의 경우는 만약 산소가 존재하게 되면 부식이 발생하게 되고, 랫쉬그링은 제작의 어려움에 따라 가격이 고가인 반면 철섬유는 내식성이 있고 저가인 장점을 지닌다.

4.2 시스템 압력변화에 따른 정류효과

Fig. 6은 충전식 정류기에 철섬유를 36% 충전하고 용액을 0.6 L/min으로 일정하게 유지했을 때 시스템 압력에 따른 정류효율을 나타낸 것

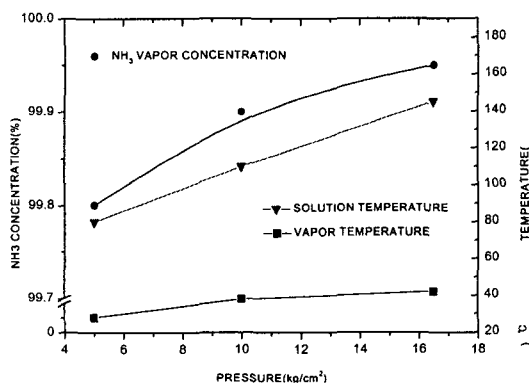


Fig. 6 NH₃ concentration with increasing pressure.

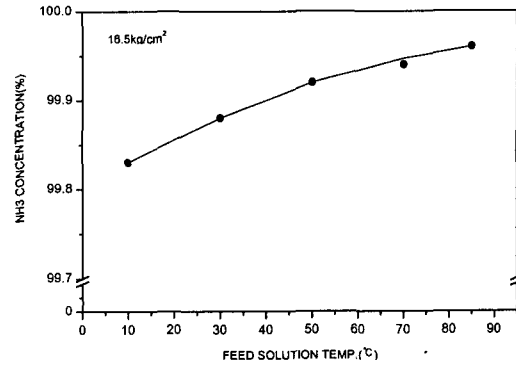


Fig. 7 NH₃ concentration with increasing temperature of feed solution.

이다. 본 실험장치 시스템 내부의 압력이 16.5 kg/cm² 즉 설계치에서 최고의 정류효율을 나타내었으며, 낮은 압력에서 정류효율이 낮은 이유는 재생기 증기의 생성량이 적고 충전식 정류기로부터 재생기 상부로의 환류량이 감소하기 때문으로 판단된다.

4.3 보조 정류기 주입용액 온도변화에 따른 영향

Fig. 7은 충전식 정류기에 철섬유를 36% 충전하고, 재생기 내부의 압력을 16.5 kg/cm², 재생기의 주입용액을 0.6 L/min로 유지하면서 주입용액 온도에 따른 암모니아 농도 실험결과를 나타내었다. 이는 재생기에 주입되는 열량을 일정하게 유지하였으므로 주입용액의 온도가 낮을수록 재생기 탑내의 온도구배가 저하되어 발생증기의 양이 감소되고, 반면 설계치인 주입용액의 온도가 86 °C에 근접할수록 정류되는 암모니아 증기의 농도가 증가하게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 5 RT급 NH₃/H₂O 흡수식 열펌프의 재생기 일체형 충전식 정류기 시스템을 제작하여 충전식 정류기에서 적정 충전재를 선정하고 최적의 충전율을 도출하기 위해 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 암모니아/물 흡수식 열펌프의 정류기의 충전재로 랫쉬그링, 구리섬유, 철섬유 중 철섬유가 가장 효과적이었다.
- (2) 충전식 정류기에서 암모니아 증기의 농도

를 99.8% 이상 정류하기 위한 철섬유의 적정 충전율은 36%이었다.

본 연구는 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 흡수식 열펌프에서 적정 충전재와 충전율에 대한 설계자료를 실제 규모의 장치를 제작하여 실험적으로 구하였으며, 충전식 정류기내의 열 및 물질전달 유동특성을 더욱 자세히 해석하려면 소규모의 정류장치와 충전재 단위 모델에 대한 특성실험이 필요하다고 사료된다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. Treybal, R. E., 1980, Mass Transfer Operation, 3rd ed., pp. 371-382.
2. King, C. J., 1982, Separation Process, 2nd ed., pp. 273-283.
3. Mah, R. S. H., Nicholas, J. J. and Wodnik, R. B., 1977, Distillation with Secondary Reflux and Vaporation; a Comparative Evaluation, AIChE J., Vol. 23, No. 5, pp. 651-658.
4. Null, H. R., 1976, Heat Pumps in Distillation, CEP, Vol. 7, pp. 58-64.
5. Peterson, W. C. and Wells, T. A., 1977, Energy-saving Schemes in Distillation, Chem. Engineering, No. 9, pp. 78-86.
6. Atsushi Tsujimori, Eiiehi Ozak and Katsuhige Nakao, 1997, Performance Analysis of Rectifier in $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ Absorption Heat Pump-Characteristics of Packed Tower-type Rectifier, Trans. of JSRAE, Vol. 14, No. 1, pp. 19-25.
7. Kang T.E. and Kim B.J., 1998, Heat and Mass Transfer in Rectifier of Ammonia-Water Absorption System, Proceedings of the SAREK, Summer, pp. 1128- 1133.
8. Yun S.K., 1999, Heat and Mass Transfer Characteristics of Generator Combined Rectification System of the GAX Ammonia Absorption Heat Pump, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 431- 439.
9. Kim D.S., Cho H.C., Ko C.S. and Lee D.J., 1998, Study on the Characteristics of Packing Material in the Rectifier of Ammonia/Water Absorption Heat Pump, Proceedings of the SAREK, Winter, pp. 26-31.
10. Perry, R. and Green, D., Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, 6th ed., Chapter 18, pp. 19-33.