

공학석사 학위논문

GAX 암모니아 흡수식 열펌프의 발생기 일체형
정류기의 정류 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Packing Material in the Rectifier
of the $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ GAX Absorption Heat Pump

지도교수 윤 상 국

2002년 2월

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과 김 돈 수

本 論 文 을 김돈수의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 : 김 동 혁 (인)

위 원 : 도 덕 희 (인)

위 원 : 윤 상 국 (인)

2002년 2월

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과 김 돈 수

목 차

Abstract

사용기호

그림 목차

표 목차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구 현황 및 목적	1
제 2 장 이론적 배경	4
2.1 충전식 정류기 설계	4
2.2 발생기내 보조 정류기 설계	8
제 3 장 실험 장치 및 실험 방법	15
3.1 실험 장치	15
3.2 실험 방법	22
3.3 데이터 분석	24
제 4 장 실험 결과 및 고찰	27
4.1 보조정류단수와 암모니아 농도	27
4.2 보조정류단 평형온도와 GAX가열부.....	32
4.3 정류단과 용액량	34
4.4 충전재별 정류 효과	38
4.5 시스템 압력에 따른 정류 효과	46
4.6 보조 정류기 Feed 용액온도에 따른 영향	47
제 5 장 결 론	48

참 고 문 헌	50
감사의 글	52

A Study on the Characteristics of Packing Material in the Rectifier of the NH₃/H₂O GAX Absorption Heat Pump

Kim, Don Soo

Abstract

Experimental study on the characteristics of several kinds of packing materials was carried out in order to get the optimum design data for the generator-GAX combined rectification system of an NH₃/H₂O absorption heat pump.

The mass and heat transfer phenomena of the rectification system were theoretically studied and the optimum locations for the injection of feed solution from solution-cooled absorber and the GAX desorber in generator were predicted. The total number of rectifying stages, the temperature of each stages and liquid/vapor flow rates in auxiliary rectifier column were determined to design the experimental apparatus for packed rectifier.

Experiments for several suitable packing materials in packed rectifier were performed and the result showed that the bulk of steel wire was the most effective packing material. The optimum volumetric packed rate in rectifier space was 36% by steel wire to make ammonia concentration over 99.98%. The condensation heat transfer of ammonia vapor by packing material in rectifier was analysed and its effect was presented.

These performance results can be adapted in rectifier design of NH₃/H₂O absorption heat pump.

사 용 기 호

- U : 총괄열전달 계수 [$\text{kJ/s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$]
 D : 발생기 상부 발생 암모니아증기량 [g/s]
 F : 발생기 주입용액 [g/s]
 G : 정류단 상승 증기량 [g/s]
 H : 엔탈피 [kJ/kg]
 L : 정류단 하강 용액량 [g/s]
 R : 환류비 [L_0/D]
 Q : 열량 [kJ/kg]
 W : 발생기하부 암모니아수 유량 [g/s]
 x : 용액중 암모니아 조성
 y : 증기중 암모니아 조성
 z : 정류기를 떠나는 증기의 암모니아 조성
 P_R : 충전율[%]
 C_N : 암모니아 농도

하첨자

- B : 발생기 용액가열부
 C : 정류응축기
 D : 발생기 상부
 F : 발생기 주입액
 G : 정류단 상승증기
 L : 정류단 하강액
0,1,.., m, n : 0, 1, .. m, n번째 정류단
 g : GAX부
 w : 발생기 하부

그림 목차

Fig. 2.1 Schematic diagram of generator combined rectification system	7
Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental apparatus.....	16
Fig. 3.2 Photograph of experimental apparatus	17
Fig. 3.3 Schematic diagram of Packed type Rectifier.....	18
Fig. 3.4 Schematic diagram of Generator and Auxiliary Rectifying column plates	19
Fig. 3.5 Photograph of Auxiliary Rectifying column plate and GAX tubes	20
Fig. 3.6 Photograph of wire packed Rectifier.....	21
Fig. 4.1 Liquid and vapor concentration of ammonia on rectifying stage at 15bar	29
Fig. 4.2 Liquid and vapor concentration of ammonia on rectifying stage at 16.5bar	30
Fig. 4.3 Liquid and vapor concentration of ammonia on rectifying stage at 20bar	31
Fig. 4.4 Equilibrium temperature of each rectifying stages	33
Fig. 4.5 Liquid and vapor flow rates on rectifying column plate at 15bar	35

Fig. 4.6	Liquid and vapor flow rates on rectifying column plate at 16.5bar	36
Fig. 4.7	Liquid and vapor flow rates on rectifying column plate at 20bar	37
Fig. 4.8	NH ₃ Concentration with increasing packing ratio (copper fibres)	40
Fig. 4.9	NH ₃ Concentration with increasing packing ratio (rasching ring)	41
Fig. 4.10	NH ₃ Concentration with increasing packing ratio (iron fibres)	42
Fig. 4.11	Comparison of Packing materials	43
Fig. 4.12	NH ₃ Concentration & UA with increasing packing ratio (Iron fibres)	44
Fig. 4.13	NH ₃ Concentration with increasing pressure	46
Fig. 4.14	NH ₃ Concentration with increasing temperature of feed solution	47

표 목차

Table 3.1 Parameter and Experimental ranges 23

Table 3.2 Specification of packing materials 23

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

인간의 쾌적한 삶을 위해 오랜 세월동안 냉·난방기에 대한 연구가 계속되어져 왔으나, 현재는 지구 오존층 파괴와 온난화에 대한 경각심으로 대체에너지에 대한 다방면의 연구가 이루어지고 있다.

특히, 국내의 전기구동 압축식 냉동기 사용 증가는 에너지 공급·수요의 불균형을 초래하게 되어 하절기의 전력 예비율이 위험수위에 이르고 있어 국가적으로 전력 수급에 큰 차질을 겪고 있다.

따라서 냉난방기의 에너지를 전기가 아닌 폐열이나 가스 등을 에너지원으로 사용하는 흡수식 냉동기에 대한 연구개발은 당연한 결과라고 할 수 있다.

흡수식 열펌프에는 작동매체에 따라 LiBr/H₂O식과 NH₃/H₂O식이 있다. 국내에서는 LiBr이 화학적으로 안정하고 냉매인 물이 증발잠열이 커서 LiBr/H₂O식의 개발에 많은 시간을 투자해 왔다. 하지만 작동조건에 따라 LiBr의 결정화와 부식성에 대한 문제가 있어 현재는 LiBr/H₂O보다는 열 및 물질전달 능력이 우수한 NH₃/H₂O식에 많은 연구가 집중되고 있으며 특히, 공랭화가 가능함으로 앞으로 시스템에 관한 연구가 지속적으로 이루어 질 것으로 판단된다.

1.2 연구 현황 및 목적

1.2.1 연구 현황

NH₃/H₂O 흡수식 열펌프는 암모니아의 독성 및 폭발성 등으로 인하여 그 사용이 제한되어 왔기 때문에 NH₃/H₂O 흡수식 열펌프에 대한 연구 결과가

매우 부족한 편이며, 암모니아 증기의 흡수과정에 대한 연구는 저조한 실정이다.

특히 정류기 설계를 위한 열전달과 물질전달의 해석연구는 석유화학에서 혼합물질의 분리정류를 위하여 액체 필름이나 하강하는 액체에 증기의 흡수 메카니즘에 대한 수많은 연구가 수행되어 왔으나,^[1,2] NH₃/H₂O 흡수식 열펌프의 정류기에 대한 연구는 수행이 미비한 편이다.

Mah^[3], Null^[4], Peterson^[5]은 GAX 가열기의 정류효과 향상과 관련이 있는 중간 가열기의 해석을 한 바 있고, Mitsubishi의 Atsushi Tsujimori^[6] 등은 몇 가지 충전재의 정류 성능에 관한 연구를 수행하였으며, 국내에서는 김병주 등^[7]이 수평관 정류기의 열 및 물질전달에 대하여 해석한 바 있고, 김동선 등^[8]은 GAX 열펌프에서 충전재의 수력학적 특성 및 물질전달에 관해 실험을 통하여 분석하였다.

1.2.2 연구 목적

암모니아 흡수식 열펌프는 발생기의 암모니아 수용액을 가스로 가열하면 비점이 낮은 암모니아와 함께 물의 일부도 증기 상태로 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%보다 낮으며, 최상부에 설치된 정류기(rectifier)에서 얻어지는 암모니아 농도는 99.8% 이상의 고농도이어야 한다. 정류기 출구의 암모니아 증기에 수분 함량이 크면 암모니아 농도가 낮아 증발기와 응축기에서 유체의 포화온도가 높게되고 수분이 증발기에서 증

발이 되지 않게 되어 냉각 효율과 COP가 크게 감소하게 된다.

암모니아 흡수식 열펌프의 COP 향상을 위한 방식으로는 흡수기의 발열을 발생기에 이용하는 GAX(Generator Absorber Exchange) 시스템이 있다.

정류기 형식에는 정류단 적용방식과 충전재(packed column) 방식이 있다. 정류단 방식은 발생기, GAX가열기 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.

본 연구는 GAX 시스템 일체형 보조 정류기와 충전식 정류기의 설계 기초자료를 얻고자 5RT 규모의 정류시스템 성능실험장치를 제작하여 적정 충전재, 충전율, 적정 보조정류단수, 평형상태 등을 실험, 해석하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 충전식 정류기 설계

충진식 정류기는 발생기 상부에 위치하고 Shell & Tube 식 열교환기이며 암모니아 증기와 수증기가 관 외부에 접촉하여 막응축이 일어난다. 관 내부는 암모니아 묽은 용액이 용액펌프에 의해 순환 주입되며 즉, 암모니아와 수증기로부터 외부의 열을 흡수한 후 흡수기로 주입된다.

충진식 정류기의 정류냉각관 설계를 위한 냉각관의 열전달 면적은 관내외부의 열전달 계수를 고려한 총괄열전달 계수를 구하여 산정한다.

$$Q = U_o A_o \Delta T_{LMTD} \quad (2.1)$$

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_i} \frac{D_o}{D_i} + R_{fi} \frac{D_o}{D_i} + \frac{x}{k} \frac{A_o}{A_m} + R_{fo} + \frac{1}{h_o} \quad (2.3)$$

2.1.1 관내부측 열전달 계수

관 내부 유체 흐름은 난류 유동으로 상변화 없이 44.2%의 암모니아수가 온도 45.1℃로 주입되어 78.9℃로 열교환 후 용액냉각 흡수기에 주입된다. 관내 단상유동이므로 Dittus and Boelter^[9] 실험식을 사용하여 구한다.

$$h_i = 0.023 \frac{k}{D_i} \left(\frac{Du\rho}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.4} \quad (2.4)$$

2.1.2 관외부측 열전달계수

관 외부에는 충전(packings) 물질이 채워지며 충전재의 상하는 다공성 채 (sieve)에 의해 지지된다. 관외부는 암모니아 증기와 수증기가 막응축에 의해 악화되며 충전재가 충전되어 있으므로 증기의 응축은 층류로 해석된다.

108.2°C, 94.5%의 암모니아 증기 6.84g/s가 주입되어 암모니아 농도 86.2°C, 48.7%, 0.70g/s의 묽은 암모니아수가 생성되어 GAX발생기 상부단으로 환류 되고, 32.6°C, 6.14g/s의 순도 99.8%의 암모니아 증기는 공기냉각 응축기로 배출된다.

수평관의 층류 막응축은 Nusselt식을 변형한 Dhir^[10]의 실험식으로 구한다.

$$h_o = 0.729 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right]^{1/4} \quad (2.5)$$

where, $Pr > 0.5$

$$Ja < 1.0$$

$$h'_{fg} = h_{fg}(1 + 0.681Ja)$$

liquid properties at t_m

h_{fg} at t_{sat}

$$Ja = \frac{C_{pl} (T_{sat} - T_s)}{h_{fg}}$$

2.1.3 전열면적 산정

식 (2.4), (2.5)를 이용하여 산정한 관내외부 및 총괄열전달 계수는 다음과 같다.

- 총괄열전달 계수 : $1589.8 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}$
- 관내부 열전달 계수 : $12.28 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}$
- 관외부 열전달 계수 : $122.48 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}$

열교환부 설계는 암모니아 증기 중에 포함된 수증기의 응축이 용이하도록 코일형을 채택하며 배관내 암모니아 유속을 0.5m/s 정도가 유지되도록 설계한다. 5RT 급을 기준하여 배관의 외구경 9.52mm, 총 관길이는 246.6cm로 Shell 내부에서 11회 감아준다. 외부 실린더는 직경 102mm, 길이 235mm의 원통형으로 구성하며 내부는 충전재를 충전한다.

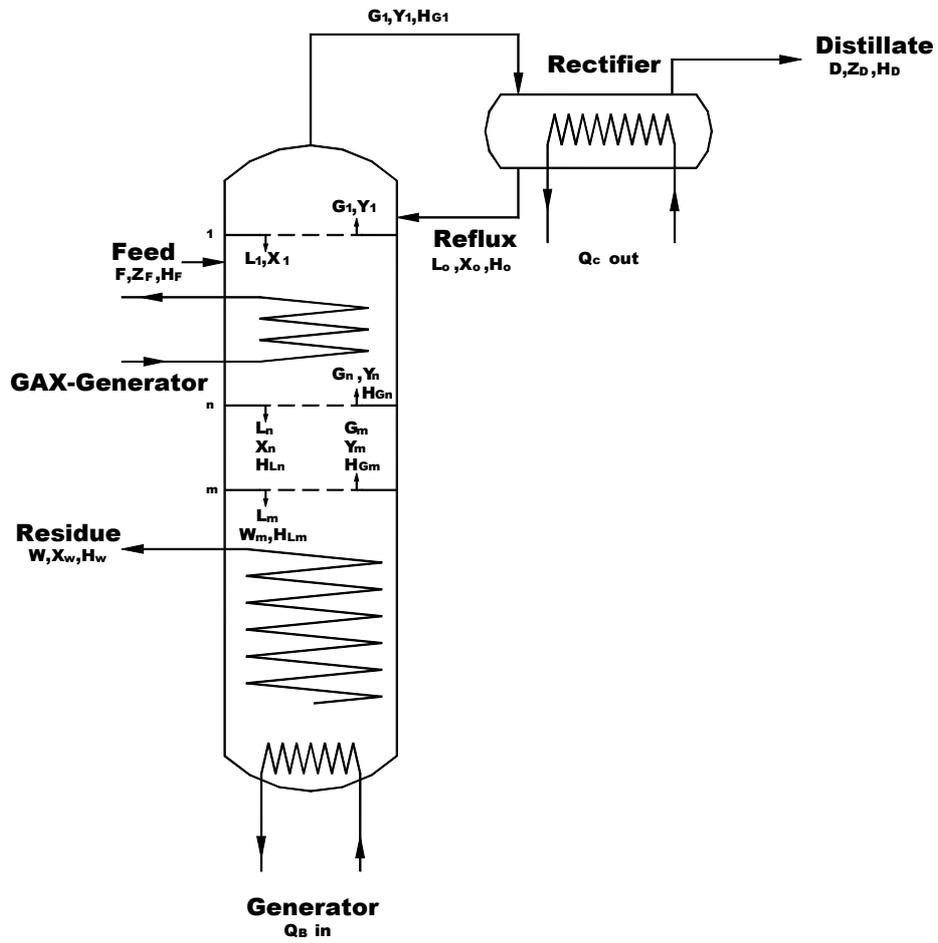


Fig. 2.1 Schematic diagram of generator combined rectification system

2.2 발생기내 보조 정류기 설계

2.2.1 열 및 물질 전달 해석

정류단을 적용하는 발생기 일체형 충전식 정류기는 Fig. 2.1과 같이 발생기 내부의 GAX 발생부, 정류탑부(rectifying column section), 환류부(stripping section) 그리고 발생기와 분리되어 구성된 충전식 정류기(packaging type rectifier)가 조합되어 있는 형태이다. 발생기 상부의 충전식 정류기에서 고순도의 암모니아 증기를 얻기 위해서는 발생기 내부에 GAX 발생부, 정류단을 갖는 보조 정류부와 환류가 설치된다.

이러한 발생기의 적정 설계를 위하여는 열 및 물질전달 해석이 필요하게 된다.

암모니아와 물이 분리되는 보조 정류탑부는 하부 또는 측면에 위치한 발생기의 가스 가열에 의하여 비점이 낮은 암모니아와 수증기가 상승하고, 탑 상부에서는 용액이 하강한다. 이 때 하강하는 용액은 충전식 정류기로부터 환류(reflux)하는 용액과 용액펌프로부터 충전식 정류기와 용액냉각흡수기를 거쳐 보조 정류탑부에 주입되는 급수용액(feed)으로 이루어진다.

보조 정류탑부는 하강하는 액체와 상승하는 증기의 접촉 시간을 많게 하는 보조 정류단(column plate)의 설계가 필요하며, 상부의 충전식 정류기(rectifier)는 기화되어 탑 상부로 상승한 증기 중에 포함된 미량의 고비점 물질 즉, 물을 응축시켜 환류시키는 장치로서 탑 상부에서 최종 암모니아 농도를 약 99.8% 이상 고순도로 얻기 위하여는 충전식 정류기가 필수적으로 설치되어야 한다.

가. 발생기 일체형 보조 정류기 전체의 열 및 물질전달

보조 정류탑 상부와 하부의 유출물의 적정 농도와 양을 얻기 위하여는 발생기의 주입열량과 충전식 정류기의 방출 열량, 보조 정류탑부의 단수와 직경, 암모니아수 최적 주입 위치 및 양을 결정하여야 한다.

보조 정류탑부 내부의 각 단에서의 물질 수지를 고려하기 위하여, 단하부로 하강하는 액과 상승하는 증기는 평형 상태로 가정한다. 탑 내부의 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 2가지 혼합물에 대한 Gibbs 상법칙의 자유도 변수는 조성과 상이 각기 2로 자유도는 두가지가 된다. 즉, 충전식 정류기 내부의 압력이 일정하므로 평형 단에서의 각종 인자들의 값은 1개의 변수 즉 온도에 의하여 좌우된다.

Fig. 2.1에서 보조 정류탑의 급수(feed) 주입구를 경계로 상부는 보조 정류부(rectifying section) 그리고 하부는 환류부(stripping section)로 구분되며, 탑주위 총괄 물질수지를 취하면 다음과 같다.

$$F = D + W \quad (2.6)$$

$$FZ_F = DZ_D + WX_W \quad (2.7)$$

충전식 정류기에서의 물질수지는

$$G_1 = D + L_0 \quad (2.8)$$

$$G_1 = D + RD + D(R + 1) \quad (2.9)$$

보조 정류탑 상부에서 물질 1(암모니아)에 대하여는

$$G_1 y_1 = DZ_D + L_o X_o \quad (2.10)$$

가 된다.

탑 상부에서의 에너지 수지는

$$G_1 H_{G1} = Q_c + L_o H_{L_o} + DH_D \quad (2.11)$$

$$Q_c = D[(R+1)H_{G1} - RH_{L_o} - H_D] \quad (2.12)$$

탑 하부에서의 에너지 수지를 취하면 발생기 하부 주입열량 $Q_B + Q_g$ 는

$$Q_B + Q_g = DH_D + WH_W + Q_c + Q_L - FH_F \quad (2.13)$$

여기서 Q_L 은 시스템의 에너지 손실로 무시될 수 있고, 충전식 정류기에서 제거되는 열량을 Q' , 탑 하부에서 유출되는 열량을 Q'' 라 하면,

$$Q' = (Q_c + DH_D)/D = (Q_c/D) + H_D \quad (2.14)$$

$$Q'' = H_W - Q_B/W \quad (2.15)$$

이며, 식(2.13)은

$$FH_F = DQ' + WQ'' \quad (2.16)$$

이 된다.

식 (2.6)과 (2.14)에서 F를 제거하면

$$\frac{D}{W} = \frac{z_F - x_W}{z_D - z_F} = \frac{H_F - Q'}{Q' - H_F} \quad (2.17)$$

이 식은 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 혼합물의 H-x-y 선도에서 보조 정류기 최상부의 암모니아 증기가 갖는 엔탈피 지점과 최하부 용액의 암모니아 농도에 대한 엔탈피 값을 연결하는 직선이 되며 발생기에 주입용액의 상태점 즉 조성과 엔탈피는 이 선상에 있게 된다.

나. 보조 정류부(rectifying section)의 열 및 물질 전달 해석

발생기 탑내 보조 정류부는 보조 정류단 사이를 충전식 정류기에서 환류되는 묽은 용액과 상승하는 암모니아 농증기가 흐르면서 물질전달이 발생되며, 이 용액은 GAX 가열기 외부관으로 적하하게 된다. GAX 외부관에서 하강하는 용액은 GAX 가열기에 의해서 추가로 증발되고 환류부에서 상승하는 증기와 물질전달이 일어나 증기 중 물은 흡수되고 암모니아는 증발하게 되어 상승하는 증기는 농도가 짙게 된다.

Feed 주입구 상부인 보조 정류부의 물질수지는

$$G_{n+1} = L_n + D \quad (2.18)$$

성분 A(암모니아)에 대하여

$$G_{n+1}y_{n+1} = L_n x_n + Dz_D \quad (2.19)$$

$$G_{n+1}y_{n+1} = L_n x_n - Dz_D \quad (2.20)$$

이 식의 왼쪽은 A물질의 상승량과 강하 액량의 차이를 의미한다.

정류시스템에서는 우측 항의 양이 일정하므로 탑 단수에 무관하게 A물질의 실질적 상승량은 일정하게 된다.

에너지 수지를 취하면

$$G_{n+1}H_{Gn+1} = L_n H_{Ln} + Q_c + DH_D \quad (2.21)$$

충진식 정류기에서 제거되는 열량 Q' 를 대입하면, 위 식은

$$G_{n+1}H_{Gn+1} - L_n H_{Ln} = DQ' \quad (2.22)$$

여기서 왼쪽 항은 탑 상부의 상승 유체와 하강 유체의 엔탈피 차를 나타낸다.

우측항을 일정하게 놓으면 실질적 상승 에너지 양은 일정하게 된다.

식 (2.21)과 식 (2.22)에서 D를 제거하면

$$\frac{L_n}{G_{n+1}} = \frac{z_D - y_{n+1}}{z_D - x_n} = \frac{Q' - H_{Gn+1}}{Q' - H_{Ln}} \quad (2.23)$$

이 식은 보조 정류부 탑내의 보조 정류단(column plate) 상하를 떠나는 유체의 상관관계로 내부환류비(internal reflux ratio)가 된다. 이 식 (2.23)으로부터

각 정류단을 상승하는 증기흐름량과 하강하는 용액흐름량을 구할 수 있다.

다. 환류부(stripping section)의 열 및 물질 전달 해석

암모니아 열펌프의 환류부는 용액이 가득 채워져 있으며, 보조 정류부에서 하강하여 환류부 상부로 주입된 용액은 단 사이로 하강하고 발생기에서 가열되어 기화된 증기는 단과 단 사이로 채널을 형성하며 보조 정류부로 상승된다. 이 때 각 단에서의 물질수지는

$$L_m = G_{m+1} + W \quad (2.24)$$

성분 A(암모니아)에 대하여

$$L_m x_m = G_{m+1} y_{m+1} + W x_w \quad (2.25)$$

$$L_m x_m - G_{m+1} y_{m+1} = W x_w \quad (2.26)$$

보조 정류부와 같이 환류부에서도 왼쪽 항은 A물질의 강하량과 상승량의 차이를 의미하며 우측항인 보조 정류기 하부에서 얻어지는 물은 암모니아 용액 즉 유출량이 된다. 이 유출액은 하강하는 용액과 열교환하고 환류부 상부로 배출된다.

에너지 수지는

$$L_m H_{Lm} + (Q_B + Q_g) = G_{m+1} H_{Gm+1} + W H_w \quad (2.27)$$

여기서 하부에 생성되어 환류부 상부로 배출되는 유출액의 열량을 Q'' 로 치환되면,

$$L_m H_{Lm} - G_{m+1} H_{Gm+1} = W Q'' \quad (2.28)$$

이 된다.

$$\frac{L_m}{W} = \frac{H_{Dm+1} - Q''}{H_{Gm+1} - H_{Lm}} = \frac{y_{m+1} - x_w}{y_{m+1} - x_m} \quad (2.29)$$

발생기내 보조 정류단수는 상기 물질 및 열수지 식과 Ponchon - Savarit^[11, 12]방식을 사용하여 구하며, 이는 암모니아-물 처럼 혼합열이 크고 비이상성을 지닌 유체 경우 직접 혼합물의 엔탈피 변화량을 고려해 산정하는 오차가 적은 방법이다. 암모니아와 물의 엔탈피 - 조성 선도를 사용하여 각 단에서 액체와 증기의 평형 조성을 구하여 단수를 산정한다.

한편 물질전달은 정류단(rectifying stage, column plate) 형상 즉 단의 직경, 단의 형태, 즉 증기의 상승을 위한 상승구의 크기와 액체의 하강을 위한 면적 등의 영향을 받으나 본 해석에서는 100% 효율로 간주한다.

제 3 장 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험 장치

본 연구에서는 발생기에서 발생한 암모니아 증기가 충전식 정류기의 충전재에 따른 열 및 물질전달에 관한 실험을 위한 장치 개략도는 Fig 3.1에 나타내었으며 본 실험에서 디자인된 충전식 정류기의 개략도는 Fig 3.3에 나타내었다.

성능실험 장치는 발생기와 충전식 정류기등의 주요 구성기기와 암모니아수를 공급하기 위한 압력용기, 냉각수 순환용 항온수조 등의 주변기기로 구성되었다. 실험에 사용된 충전식 정류기는 Fig 3.3에서 보여주는 바와 같이 쉘의 길이는 235mm, 직경 102mm이며 내부 냉각관은 외경 9.52mm, 총길이 2,466mm로 쉘 내부에서 11회 회전 제작되었다.

충진재의 교환을 위해서 충전식 정류기 끝단을 플랜지형(flange type)으로 하였으며 충전재 유동방지를 위해서 그물(mesh)를 설치하였다. 충전식 정류기에서 액화된 물이 발생기로 환류되는 것을 관찰하기 위해서 환류부를 진공호스로 설치하였다.

발생기 내부 온도는 하단부 및 중단부에 Thermometer를 설치하여 측정하였으며, 각 장비 입·출구의 온도는 총 10개의 지점에 열전대(thermocouple)에 의해 측정하였다.

압력측정은 Pressure transducer를 발생기 상부와 충전식 정류기 상부에 설치하였다.

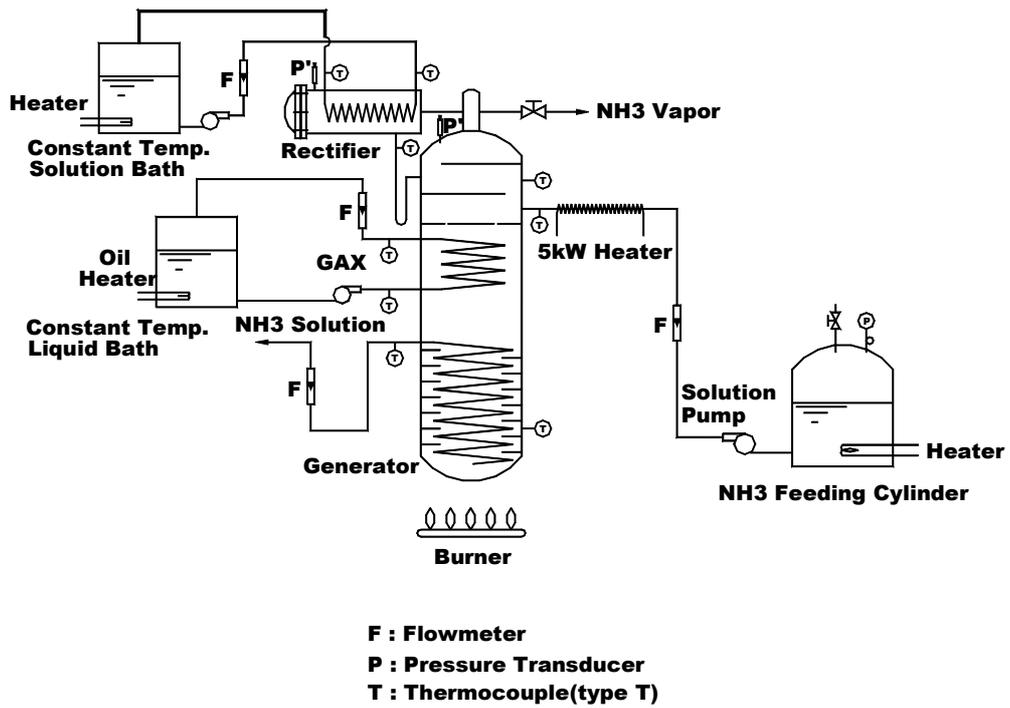


Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental apparatus



Fig. 3.2 Photograph of experimental apparatus

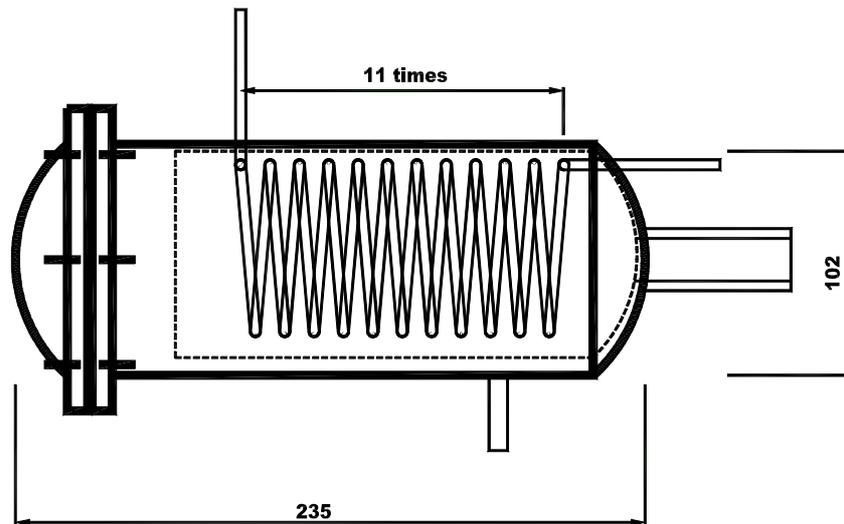


Fig. 3.3 Schematic diagram of Packed type Rectifier

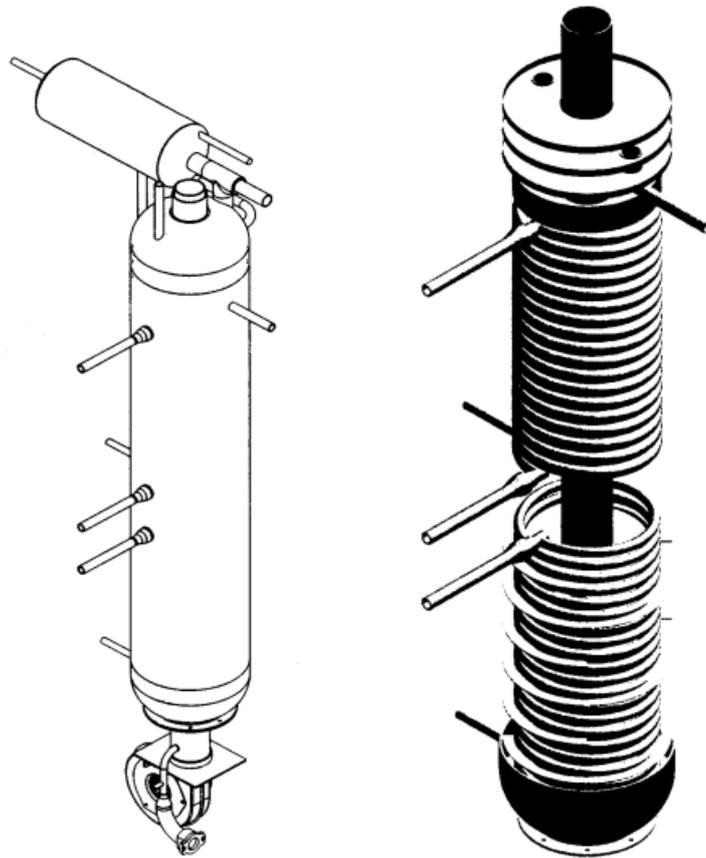


Fig. 3.4 Schematic diagram of Generator and Auxiliary Rectifying column
plates



Fig. 3.5 Photograph of Auxiliary Rectifying column plate and GAX tubes



Fig. 3.6 Photograph of wire packed Rectifier

3.2 실험 방법

발생기 일체형 보조 정류기내 각 단에서의 온도, 농도 변화에 대한 정확한 실시간 측정은 매우 힘들기 때문에 본 연구에서는 수치해석적 분석을 수행하였으며, 다만 발생기 입출구 증기와 액의 온도와 농도를 측정하여 설계의 타당성을 평가하였다.

본 실험의 주된 실험은 시스템 제작 시 설계되는 인자들 중에서 발생기 압력의 설계치와 비교하며 암모니아 증기농도가 최적이 되는 압력을 도출하고, 충전식 정류기내 충전재를 변화시켜가면서 최적의 정류효과를 나타내는 충전재와 충전율을 살펴보았다.

실험에 사용될 변수들은 발생기 일체형 충전식 정류기에서 적정단수와 NH_3 농도 그리고 system 압력, 충전재의 종류 그리고 충전재의 충전율이 될 수 있다.

실험조건에 대한 상세한 내용은 Table 3.1에 자세히 나타내었으며 실험에 사용된 충전재의 종류는 Table 3.2에 나타내었다.

실험 방법을 보면 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 암모니아 수용액 조(feeding cylinder)에서 45°C, 44.2% 농도의 암모니아수 0.6 l/min를 직류모터펌프로 펌핑하여 발생기로 보내며, 이 과정에서 설계온도인 86.2°C로 상승시키기 위해 5kW 용량의 히터를 사용하였다. 발생기 하부에는 버너(burner)를 사용하여 일정압력을 유지하도록 하였다.

본 실험을 5RT급 GAX cycle로 구성되기 때문에 발생기 중단부에 일정온도와 열교환 될 수 있도록 Constant Temperature Liquid Bath를 두었다. 버너(burner)에 의해 가열된 암모니아 증기는 1차 GAX부에 의해 열교환되어지며 열교환된 암모니아 증기는 충전식 정류기로 들어가서 45.1°C 냉각수와 열교환하여 암모니아 농도 86.2°C, 48.7%, 0.7g/s의 묽은 암모니아수가 생성되어 GAX발생기 상부단으로 환류되고, 32.6°C, 6.14g/s 순도 99.8%의 암모니아 증

기는 공기냉각 응축기로 배출된다.

Table 3.1 Parameter and Experimental ranges

Variable	setting values
NH ₃ concentration of rectifier	99.8%
NH ₃ concentration of residue in generator	10%
Temperature range of GAX-Generator	132 ~ 136°C
Pressure	5 ~ 16.5kg/cm ²
Temperature of NH ₃ solution	45.1°C, 35g/s
Ambient temperature of air for air-cooled condenser	32°C
Evaporator temperature	3°C

Table 3.2 Specification of packing materials

Materials	Specification
Rasching Ring	$\Psi = 10\text{mm}$, $L = 20\text{mm}$
Iron fibres	0.2mm OD
Copper fibres	0.3 ~ 0.5mm OD

3.3 데이터 분석

3.3.1 농도분석

충진식 정류기에서의 물질 전달 특성을 실험하기 위해서는 충진식 정류기의 입·출구에서의 암모니아 농도를 측정하는 것이 중요한데, 암모니아 농도를 측정하는 방법에는 가스 크로마토그래피법(gas chromatography), 적정법, 비중법 등이 있다.

가. 가스 크로마토그래피법(gas chromatography)

가스크로마토그래피법은 두 개의 상(phase) 사이에서 혼합물 개개의 성분이 분배되는 정도가 다른 성질을 이용하여 각각의 성분을 분리하는 기술을 말한다. 두 개의 상들 중 1개의 상은 표면적이 넓은 고정상(stationary phase)을 많이 쓰고, 이동상으로는 불활성 기체를 사용하거나 혼합물을 녹이면서 반응하지 않는 액체를 쓴다. 여기서 전자를 기체 크로마토그래피법, 후자를 액체 크로마토그래피법이라 한다.

기체 크로마토그래피법은 다음과 같이 설명된다. 용액 또는 가스 시료를 운반하는 가스(보통 헬륨가스)와 함께 가스 크로마토그래피의 시료 주입구에 주입한다. 이 주입 가스는 크로마토그래피의 칼럼에서 기화, 분리되고 각 성분이 접속부를 통하여 질량 분석계로 이동된다. 이를 다시 이온화실에서 이온화시킨다.

이 때 생긴 이온을 가속하여 자기장이나 전기장에 의해서 각 이온들을 질량/전하수에 따라서 분리한 후 이것을 검출, 기록함으로써 미지의 시료를 정성 또는 정량 분석한다. 그러나 강알칼리인 암모니아가 고정상의 기공 및 컬럼 내면을 부식시키는 성질을 가지므로 이를 사용하는 데에 어려움이 따른다.

나. 비중법

비중법의 원리는 용액의 온도와 비체적이 정해지면 농도를 찾을 수 있다는 것이다. 즉, 용액의 비체적과 온도를 정밀 측정한다면 이들 자료를 바탕으로 선도를 이용하여 암모니아 농도를 구할 수 있다.

다. 적정법

적정법을 이용하여 암모니아 농도를 측정하기 위해 피펫과 비이커를 이용하여 간단한 실험장치를 준비하여 먼저, 1N(Normal) 염산 수용액을 피펫을 이용하여 비이커에 붓고 질량을 측정한다. 이때 수용액의 색은 무색투명이다. 소량의 메틸 오렌지(methyl orange)를 염산용액에 첨가한다. 이 때 수용액은 적색을 띠게 되며, 메틸오렌지의 무게는 극히 미량이므로 무시할 수 있다. 측정하고자 하는 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 혼합물을 염산수용액에 섞는다. 이 때의 용액은 주황색을 띠게 된다. 혼합액을 용액의 색이 적색이 될 때까지 1N의 염산 용액을 교반을 시키면 주입시킨다. 이 때의 용액의 색은 순간적으로 바뀌므로 염산 용액의 주입량 조절에 주의를 요하게 된다. 적정이 끝나면 암모니아와 반응하는 염산의 몰비가 일정한 것을 이용하여 암모니아 용액의 농도를 구할 수 있다.

본 실험에서는 적정법을 이용하여 농도를 측정하였는데, 구한 값은 용액의 색 분별이 대한 객관성이 부족하여 객관성있는 데이터를 얻기위해 3~4회의 농도 측정을 통하여 $\pm 0.5\%$ 이내의 오차 범위에서 측정하였다.

3.3.2 온도 측정

각 장비의 입·출구 온도 측정을 위해 T형 열전대(Cu + Cu-Ni합금)를 이용하였다. 열전대는 납땜용접보다 오차가 적게 나타내는 spot welder에 의해 제작하였으며, 이때 정류수로 만든 얼음으로 오차를 보정하였다. $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이상의 오차를 나타내는 것은 다시 제작하여 재보정을 본 후 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ 의 정밀도를 유지하였다.

Data 수집은 실험하고자하는 압력이 정상상태에 도달한 후 실험값을 HP3852A 데이터 처리기를 이용하였다.

제 4 장 실험결과 및 고찰

발생기내 보조 정류기에서의 열 및 물질전달에 관한 연구는 발생기 일체형 충전식 정류기에서 시스템 압력에 따른 적정단수를 수치해석적으로 산정하여 시스템 압력 16.5kg/m^2 일 때의 발생기내 보조 정류 단수인 8단을 설치하였다. 이에 따른 최상부 충전식 정류기의 일정온도, 일정압력하에서 충전재의 종류에 따른 정류효과와 System 내부의 압력변화에 따른 정류효과 그리고 Feed 용액온도의 따른 정류효과를 실험하였다.

4.1 정류단수와 암모니아 농도

Fig. 4.1에서 Fig. 4.3은 발생기 주입열량의 변화에 의한 발생기 내부의 각기 다른 압력에서의 정류단수, 내부 암모니아 용액과 증기의 평형농도 변화를 보여준다. 그림은 정류된 암모니아 농도 99.8%를 얻기 위한 정류단수로써, 발생기 압력이 15bar 로 유지되면 정류단은 8개 단, 16.5bar는 9개 그리고 20bar는 10개의 단이 필요하게 된다. 이는 발생기 일체형 충전식 정류기의 설계 기준압력보다 운전압력이 높으면 암모니아 분리 효율이 감소하고 낮은 압력에서는 원활한 분리를 얻을 수 있음을 보여준다.

각 단에서의 물질전달은 단의 평형온도에서의 액과 증기의 평형농도, 그리고 각 정류단에서 n+1 단의 하부로 강하하는 온도가 낮은 용액의 암모니아 농도와, n단을 상승하는 온도가 높은 증기의 암모니아 농도의 차에 의하여 발생한다. 각 정류단을 상승하는 증기는 평형온도가 낮아지면서 물은 응축되고 암모니아 증기의 농도는 증가하게 되며, 또한 상승하는 농증기와 하강하는 묽은 암모니아용액의 농도의 차가 커서 물질전달율이 증가하게 된다. 그림에서 증기의 암모니아 농도는 단을 상승하면서 점차 농도가 증가하고 하강하는 용액 중 암모니아 농도는 암모니아를 방출하여 감소하고 있다. 단의 상부로 갈수록

용액과 증기에서의 암모니아의 농도는 증가하며, 상대적으로 물의 농도는 보조 정류기 하부로 갈수록 증가하고 상부에서 현저하게 감소하고 있다. 정류탑 바닥부의 용액은 발생기의 가열에도 불구하고 용액중 암모니아 농도가 낮아 발생하는 증기중 암모니아의 농도가 적고 물증기의 비율이 크게 된다.

용액에 잠겨져 있는 정류단 하부의 환류부에서는 단과 단사이의 농도가 완만하게 변하고 있으나 GAX가열 열량의 영향으로 정류부의 암모니아 증기농도는 급격히 변하고 있다.

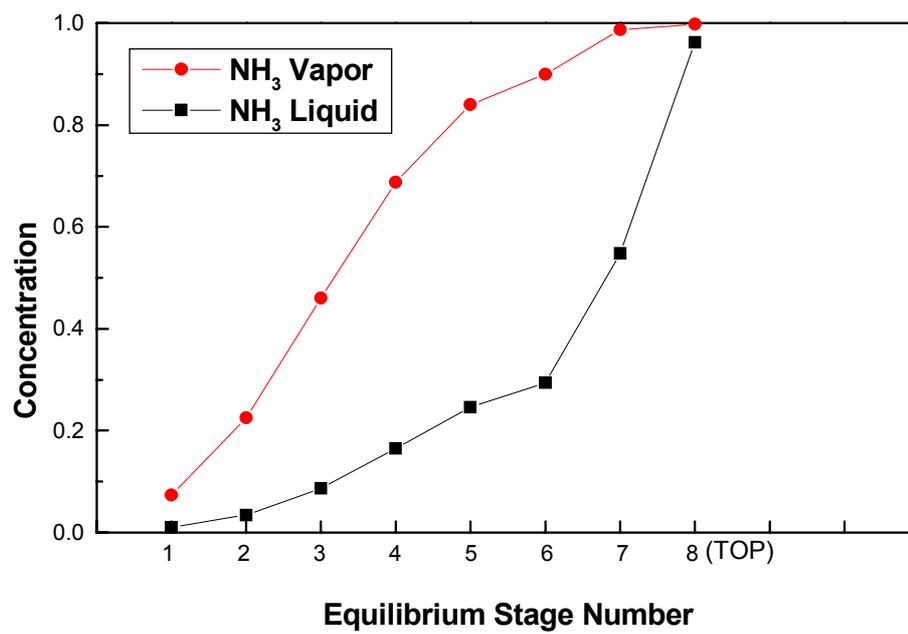


Fig. 4.1 Liquid and vapor concentration of ammonia on rectifying stage at 15bar

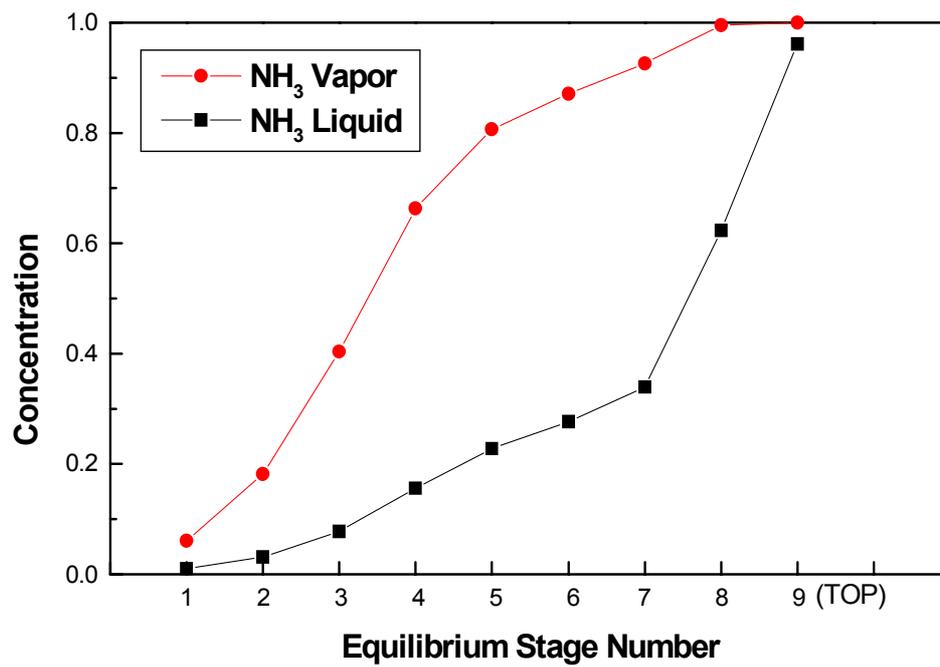


Fig. 4.2 Liquid and vapor concentration of ammonia on rectifying stage at 16.5bar

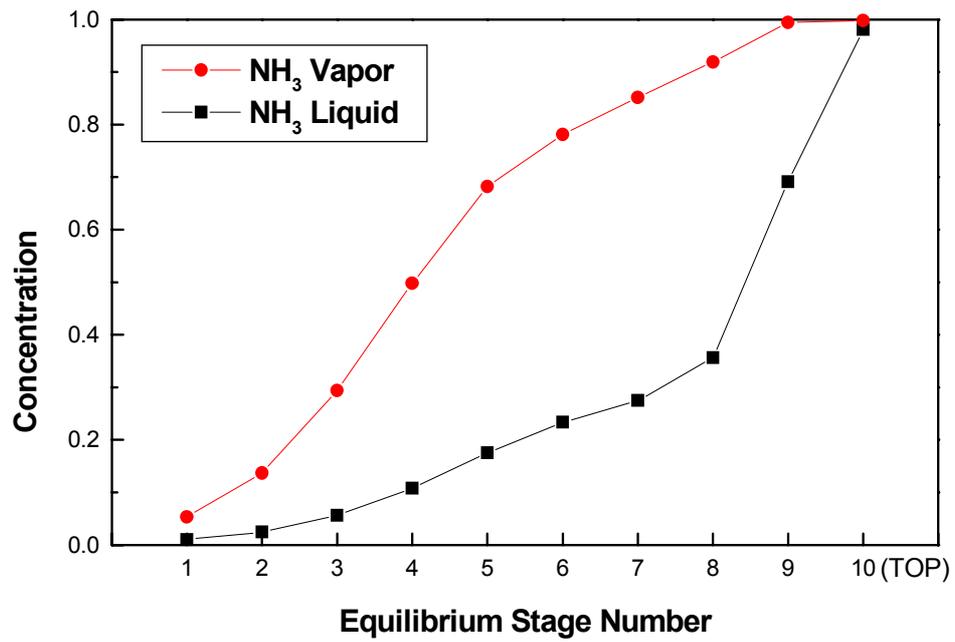


Fig. 4.3 Liquid and vapor concentration of ammonia on rectifying stage at 20bar

4.2 보조 정류단 평형온도와 GAX가열부

Fig. 4.4는 각 정류단에서의 하강용액과 상승증기의 평형온도로 압력이 높을수록 단의 하강용액과 상승증기의 평형온도가 높게 나타낸다. 환류부와 정류부의 완만한 온도차는 발생기 가열이 환류부 측에 비교적 균일한 열유속이 가해지고, 상부 정류부에도 GAX가열기에 의하여 균일한 열유속이 형성되기 때문으로 보인다. 이는 또한 암모니아/물 혼합물의 온도에 따른 조성과 엔탈피의 평형관계에도 기인한다. 상부 마지막 2~3개 단에서 온도가 급강하는 것은 보조 정류탑 상부단에서 환류액과 접촉 냉각이 이루어지기 때문이다. 마지막 단의 온도는 충전식 정류기에서 물 성분이 응축되는 온도를 나타내고 있다.

GAX 가열부의 적정 위치는 GAX의 온도중첩 범위에서 충전식 정류기를 제외한 상부 2째단과 3째단 사이에 설치하여야 함을 알 수 있다.

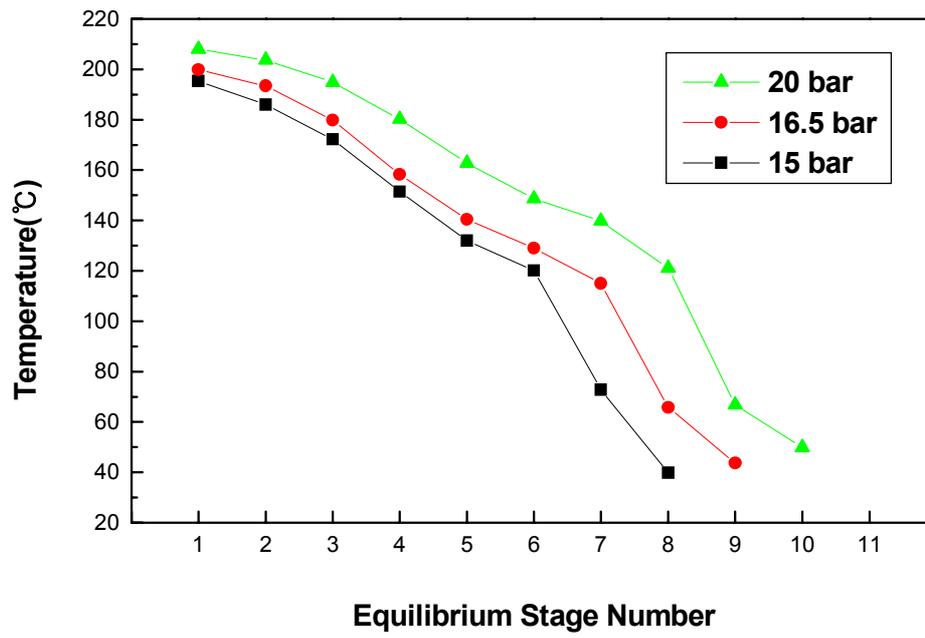


Fig. 4.4 Equilibrium temperature of each rectifying stages

4.3 정류단과 용액량

Fig. 4.5에서 Fig. 4.7은 각 압력에서 보조 정류단을 상승하는 증기유량과 하강하는 액의 유량을 나타낸다. 탑 내부 하강하는 용액의 흐름을 보면 탑 하부에서는 균일한 흐름을 보이고 상부에서는 감소한다. 이는 탑 상부에서 환류 용액만이 미량 흘러내리기 때문이고, 상부 3 ~ 4째 단에서 유량이 상승하는 것은 암모니아 수용액조(feeding cylinder)로부터 중간 농도의 용액이 GAX발생기로 주입되기 때문이다. 그림으로부터 암모니아 수용액조로부터 돌아오는 암모니아수의 주입지점을 설계할 수 있으며, 15bar에서는 충전식 정류기 제외한 4번과 5번 단사이, 16.5bar는 6번과 7번사이 그리고 20bar는 7번과 8번단 사이에 주입하여야 한다.

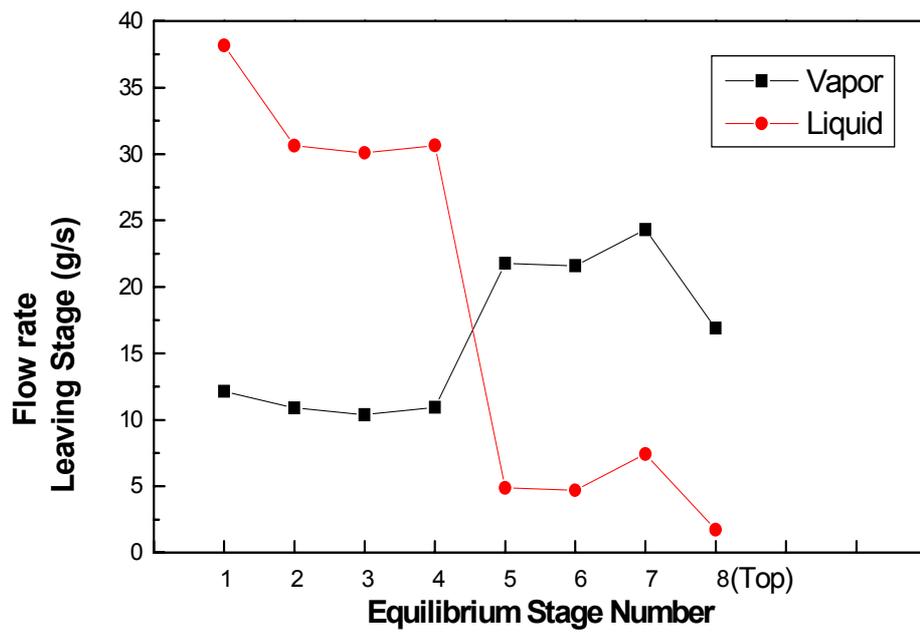


Fig. 4.5 Liquid and vapor flow rates on rectifying column plate at 15bar

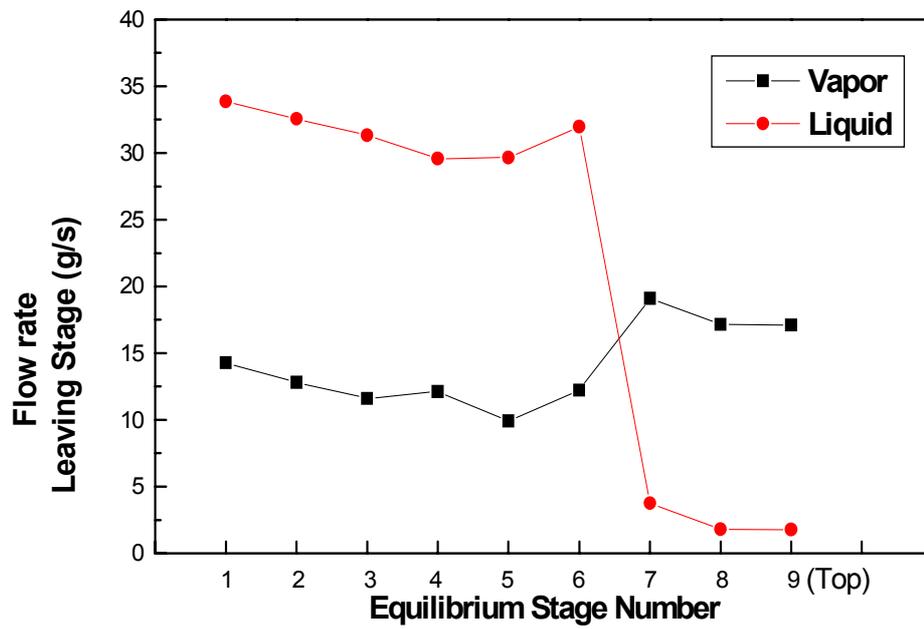


Fig. 4.6 Liquid and vapor flow rates on rectifying column plate at 16.5bar

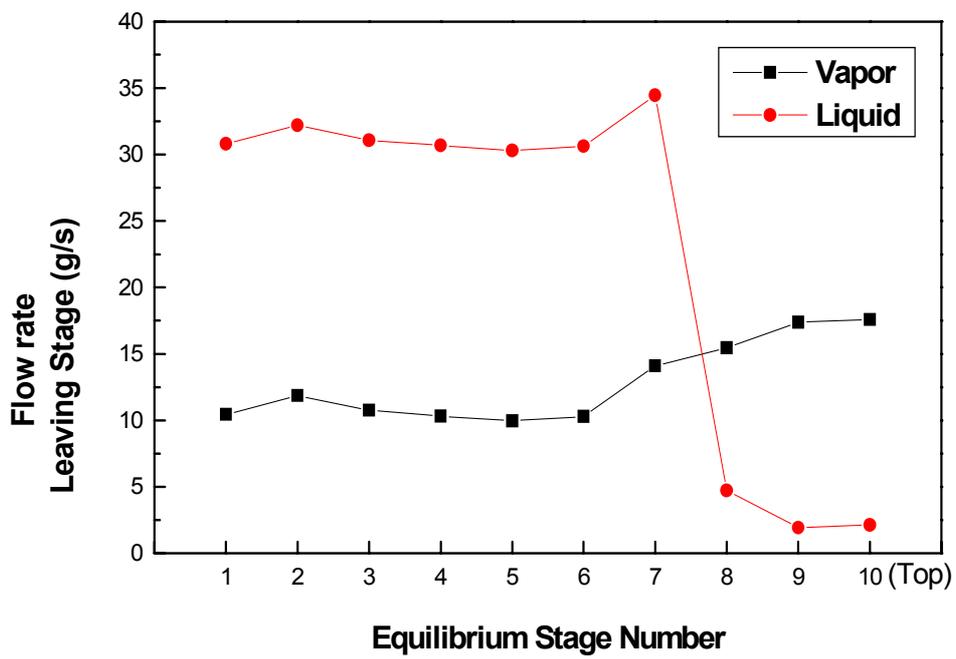


Fig. 4.7 Liquid and vapor flow rates on rectifying column plate at 20bar

반면 발생하는 증기 흐름량은 하부 환류부에서 비교적 균일한 흐름을 보이고 상부의 보조 정류부는 환류부보다 증가하나 용액이 주입되는 단에서 증기 흐름량이 증가하다 감소함을 보인다. 이는 탑 하부는 액과 증기의 물질전달 즉 증발과 흡수가 균일하게 형성되기 때문이고, 상부 GAX부에서는 흡수보다 증발이 크게 발생되며 특히 용액주입 단에서의 발생량이 크게 된다.

4.4 충전재별 정류효과

Fig. 4.8은 구리섬유(copper fibres)를 충전하고 압력을 16.5kg/cm^2 용액 주입량을 0.6 l/min 으로 일정하게 유지했을 때 정류효과를 나타내고 있다. 충전율 35%에서 암모니아 농도를 99.82%를 얻었다. 충전율 35%까지 효율이 꾸준히 증가하다가 감소하는 이유는 적정 충전량보다 과다 충전되어 충전재의 저항에 의한 증기흐름의 감소로 열전달 효과가 떨어지기 때문으로 판단되어 진다.

Fig. 4.9는 랫싱링(rasching ring)을 충전하고 상기와 같은 조건으로 일정하게 유지했을 때 정류효과를 나타내고 있다. 랫싱링(rasching ring)의 구조는 직경 10mm, 길이 20mm 철재 관의 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 판단되어 진다.

Fig. 4.10은 철섬유(iron fibres)를 충전하고 상기 조건과 동일한 조건으로 실험한 결과를 나타내고 있다. 충전율이 증가함에 따라 분리된 암모니아 농도도 증가되어, 충전율 36% 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.

이 같이 충전재 종류별로 얻어지는 암모니아 농도가 다른 이유는 충전재의

형태와 규격에 따라 석유화학 공정에서 정류 효과의 차이를 갖는 것과 동일한 것으로 판단된다^[14]. 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 크나 규격이 0.3~0.5mm로 불균일하여 정류 효과 차이를 갖는 것으로 보인다. 한편 랫싱링(rashing ring)은 충전재 간의 공간이 많아 암모니아와 물증기로부터 물의 응축이 원활하게 이루어지지 않는 것으로 분석된다.

또한 비철금속인 구리섬유의 경우는 산소가 존재하게 될 때 부식이 발생하게 된다. 랫싱링은 제작이 어려움에 따라 가격이 고가인 반면 철섬유는 내식성이 있고 저가인 장점을 지닌다.

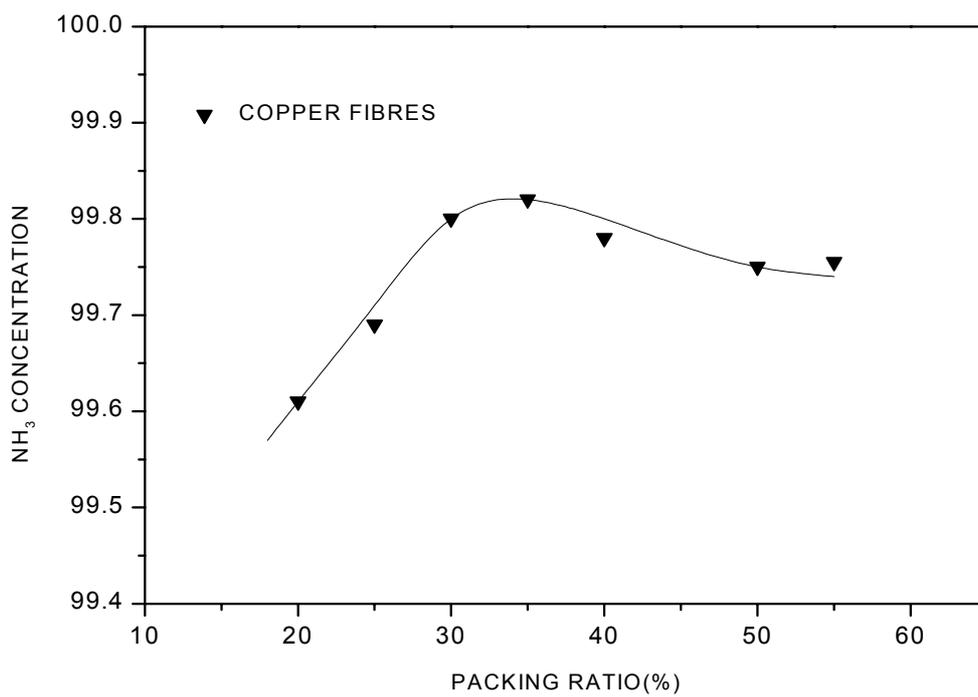


Fig. 4.8 NH₃ Concentration with increasing packing ratio(copper fibres)

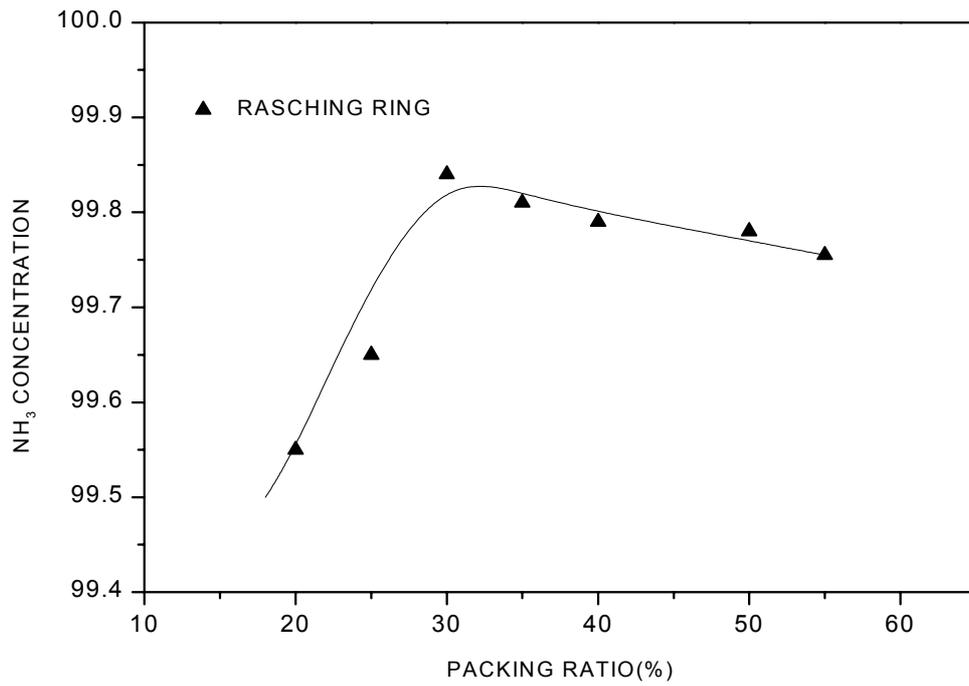


Fig. 4.9 NH₃ Concentration with increasing packing ratio(rasching ring)

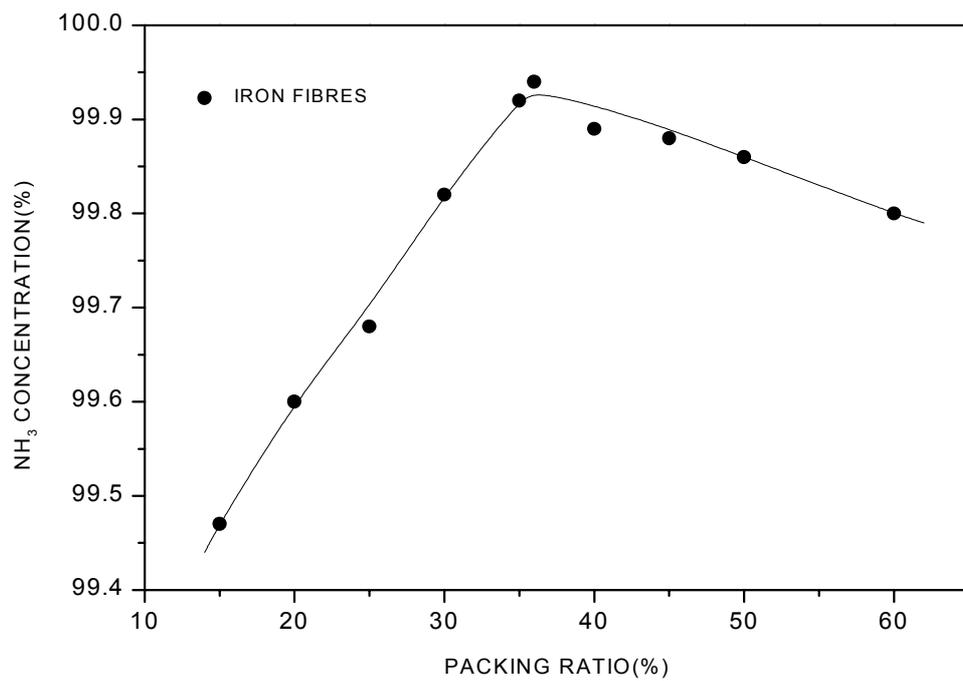


Fig. 4.10 NH₃ Concentration with increasing packing ratio(iron fibres)

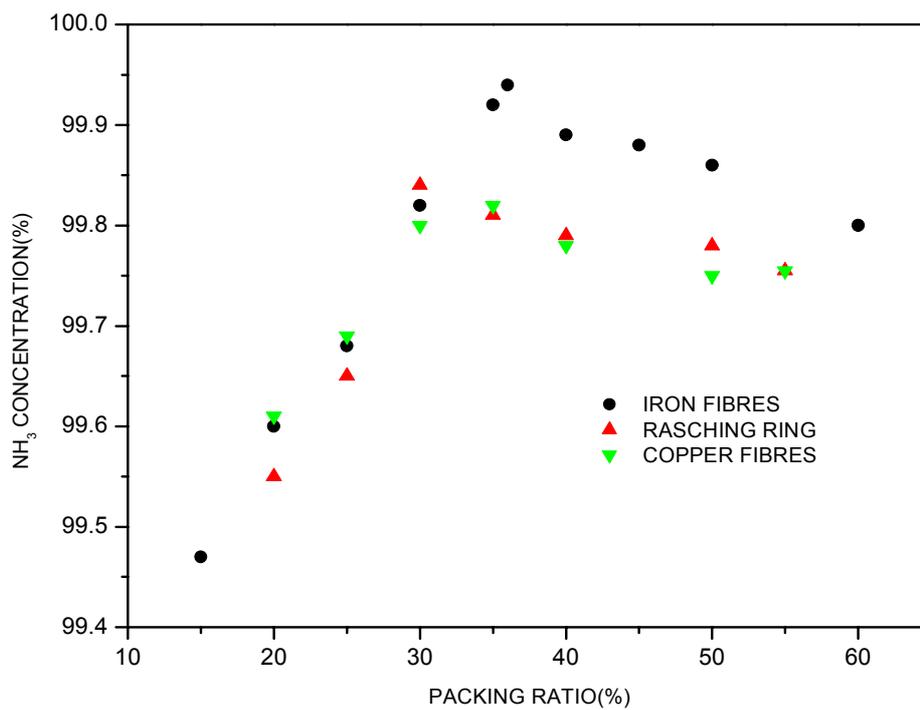


Fig. 4.11 Comparison of Packing materials

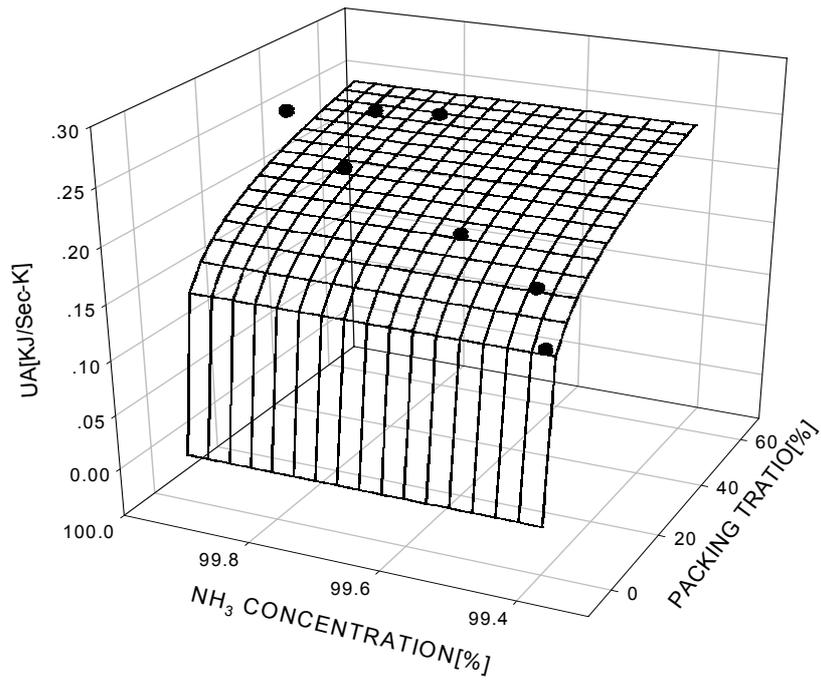


Fig. 4.12 NH₃ Concentration & UA with increasing packing ratio
(Iron fibres)

Fig 4.12는 철섬유(iron fibres)의 충전량에 따른 전열계수(UA)와 암모니아의 농도를 나타낸 그림이다. 충전재의 철섬유의 전열면적으로 정확히 나타낼 수 없으므로 전열계수 값을 총괄전열계수에 철섬유 전열면적이 곱하여진 UA 값으로 나타내었다.

관의 막응축 전열량 계산식인 식 (2.2)와 (2.3)을 적용하여 제작한 정류기의 전열량에 비하여, 철섬유를 15%~36% 충전했을 때 충전율에 따른 전열량이 1.06 ~ 1.32배 증가하였다. 이 때 전열량은 정류관내 냉각수의 온도차로 산정하였다. 이 전열량의 향상은 충전율에 영향을 받고 암모니아 농도에 영향을 주므로 이의 함수로 나타내면, 충전율을 P_R , 암모니아 농도를 C_N 이라고 할 때, $UA = f(P_R, C_N)$ 의 함수로 정의하여 Fig. 4.4.4로부터 관계식을 구하면 다음과 같이 나타내 진다.

$$UA = a \cdot (1 + b \cdot P_R^b \cdot C_N^d) \quad (4.1)$$

where, a : 0.01567

b : 7.3832E-3

c : 0.6212

d : 0.3927

위 식은 $\pm 20\%$ 이내의 정확도를 가지며, 충전식 시스템에서의 전열현상을 잘 나타내고 있다고 판단되어 진다.

4.5 시스템 압력에 따른 정류 효과

Fig. 4.13은 충전식 정류기에 침섬유(iron fibres)를 36% 충전하고 용액을 0.6 l/min으로 일정하게 유지했을 때 시스템 압력에 따른 정류효율을 나타낸 것이다.

본 실험장치의 설계치인 시스템 내부의 압력이 16.5kg/cm² 일 때 최고의 정류효율을 나타내는 것을 알 수 있었다.

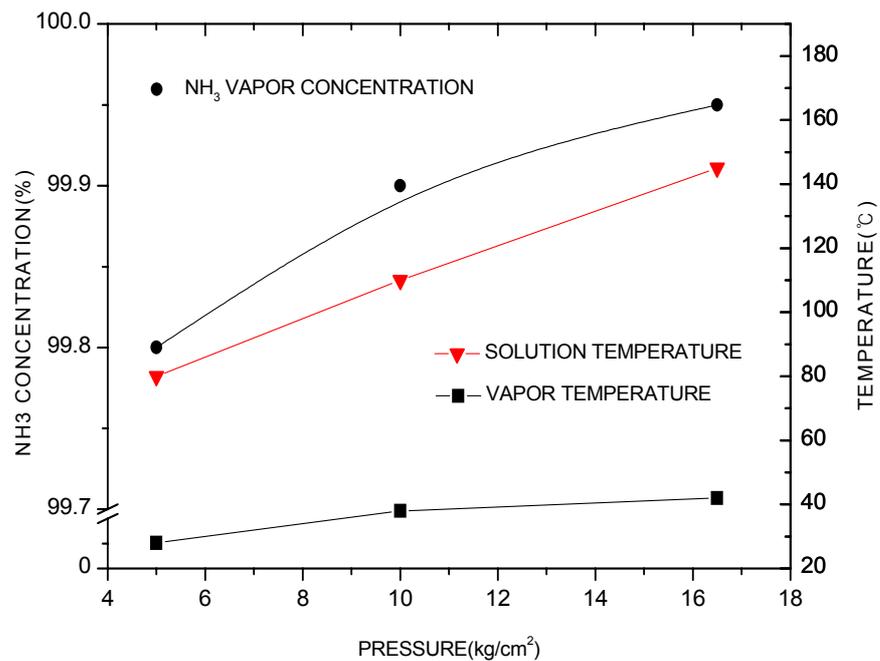


Fig. 4.13 NH₃ Concentration with increasing pressure

4.6 보조 정류기 Feed 용액온도에 따른 영향

Fig. 4.14는 충전식 정류기 및 발생기 내부에 압력 16.5kg/cm^2 , feed 용액 0.6 l/min 을 유지하고 철섭유를 36% 충전하였을 때 Feed 용액온도에 따른 암모니아 농도를 나타내었다.

이것은 열량주입은 일정하므로 온도가 낮을수록 많은 열량을 필요로 하게 되고 설계치인 86°C 에 근접할수록 정류되는 암모니아 증기의 농도가 증가함을 알 수 있었다.

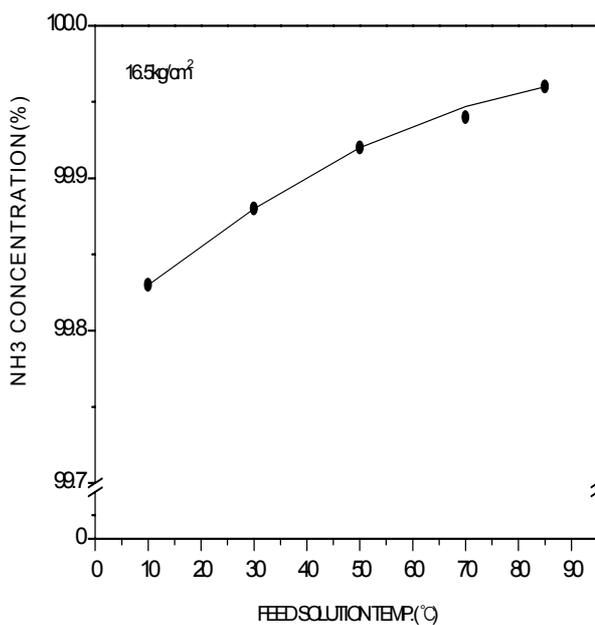


Fig. 4.14 NH_3 Concentration with increasing temperature of feed solution

제 5 장 결 론

본 논문에서는 5RT급 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 흡수식 열펌프의 발생기 일체형 충전식 정류기 시스템을 제작하여 열 및 물질전달 현상을 해석하였으며, 보조정류기의 정류단수와 정류단의 평형농도, 평형온도, 용액과 증기 흐름량, 환류량이 정류에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 충전식 정류기에서 적정 충전재를 선정하고 최적의 충전율을 도출하기 위해 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 발생기 일체형 보조 정류기의 정류단 설계에 있어서 발생기 압력이 높을수록 많은 정류 단수가 필요하게 된다.
- (2) 암모니아 수용액조로부터 주입되는 암모니아수의 적정 주입지점과 GAX 가열부의 적정 설치위치를 도출하였다.
- (3) 환류량이 감소하면 발생기 주입열량이 감소하며 환류액 농도와 충전식 정류기 상부증기의 농도차에 의한 흡수력 즉 물질전달이 저하되어 정류단이 무한히 많이 필요하게 된다.
- (4) 정류에서의 충전재는 철섬유(iron fibres)가 효과적이며, 암모니아 증기 농도 99.8%이상 정류를 위한 적정 충전율은 36%이다.
- (5) 충전재로 철섬유(iron fibres)를 15%~36% 충전하였을 때, 설계치보다 열량이 1.06 ~ 1.32배 증가하며 그에 따른 관계식은 다음과 같다.

$$UA = 0.1567 \cdot (1 + 7.3832E-3 \cdot P_R^{0.6212} \cdot C_N^{0.3927})$$

본 연구는 NH₃/H₂O 흡수식 열펌프에서 연구 수행이 미비한 상태에서 최적의 충전재와 충전율에 대한 기초자료를 실험적으로 파악하였다.

충진식 정류기내의 열 및 물질전달 특성을 더욱 자세히 이해하고 응용하려면 충전식 정류기 내부에서 일어나는 유동양식에 따른 특성실험과 충전재에서의 열 및 물질전달에 대한 현상 규명이 필요하다.

이후 System 용액 Feeding 량 변화 등과 같은 여러 인자를 변화해 가며 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

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 Katushige 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. 강태은, 김병주, 1998, "암모니아-물 흡수식 시스템에서 정류기의 열 및 물질전달", 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회논문집(III), pp. 1128-1133
8. 김동선, 조현철, 고철수, 이동진, 1998, "암모니아 흡수식 열펌프의 정류특성에 관한 연구", 공기조화 냉동공학회 동계학술발표회논문집, pp. 26-31
9. Incropera, F., "Introduction to Heat Transfer", 1985, pp360
10. Dhiir, V. K. and Lienhard, J. H., 1971, "Laminar Film Condensation on Plane and Axisymmetric Bodies in Non-uniform Gravity", J. Heat Transfer, 93, pp. 97-100
11. Phillip C. Wankat, "Equilibrium Staged Separations", pp. 15-21
12. Bogart, M. J. P., 1982, "Pitfalls in Ammonia Absorption Refrigeration", International J. of Refrigeration, Vol. 5, pp. 203-208
13. Robert E. Treybal, "Mass-Transfer Operations", pp.372-381

14. R. Perry and D. Green, Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, 6th Ed., Chapter 18, pp.19-33.

감사의 글

대망의 2002년 월드컵과 아시안 게임이 있는 해에 졸업을 앞두고 있어 흥분을 감출 수가 없습니다. 멀게만 그리고 힘들게만 보이던 졸업을 이렇게 무사히 마칠 수 있도록 지도와 가르침을 주신 윤상국 교수님께 진심으로 감사드립니다.

연구과정 중 배우는 사람으로서의 진정한 자세와 삶의 양식을 가르쳐 주신 김동혁 교수님, 정형호 교수님, 방광현 교수님, 도덕희 교수님께도 깊은 감사드립니다.

선배지만 친구처럼 옆에서 많은 도움을 주신 고주식 선배님, 권율 선배님, 황승기 선배님, 황창식 선배님, 이태호 선배님, 김건형 선배님 그리고 같이 졸업은 못하지만 큰 힘이 되어준 김선식에게도 감사의 말을 전합니다. 그리고 실험실에서 이제 마지막 기둥이 되어준 최훈 후배님께도 감사의 말을 전합니다. 직장을 다니면서 대학원 3, 4학기를 무사히 마칠 수 있도록 도와주신 한국하이프레스 직원분들과 특히, 기술부 박병월 부장님, 서승기 차장님, 변인수 과장님, 박진규 과장님, 송태정 대리님, 장정락 과장님, 손형호 대리님, 이승두 대리님, 이민구 선배, 이수원 형, 이우섭 선배, 서정수 님, 박계용 형, 강수현 님, 임현숙 님에게도 감사의 말씀 전하며, 아울러 논문을 마무리하는데 큰 도움이 되어주신 박수돌님께 이 지면을 빌어 감사드립니다.

죽마고우인 친구 이창훈과 올해 12월 결혼을 하는 추상현에게 고마운 마음을 전합니다.

언제나 옆에서 힘이 되어주는 김 희 님과 김 희님의 부모님께 머리 숙여 감사드립니다.

끝으로 저를 여기까지 남부럽지 않도록 보살펴 주시고 물심양면 힘써주신 아버지님, 어머니님, 누나, 매형, 그리고 동생에게 이 논문을 바칩니다.