

암모니아의 열전달 특성

Heat transfer characteristics of ammonia

김 영 일
Y. I. Kim

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터



- 1961년생
- 열공학 전공으로 공기조화 및 냉동공학에 관심을 가지고 있다.

백 영 진
Y. J. Baik

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터



- 1972년생
- 공기조화 및 냉동공학에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

암모니아는 독성, 가연성 및 동 재질의 부식성 등의 단점은 있지만 CFC계 냉매가 개발되기 전에는 우수한 열역학 및 열전달 특성 때문에 냉매로서 가장 많이 사용되어져 왔다. 미국에서는 약 120년, 일본에서는 약 80년 전부터 암모니아가 냉동 사이클에 사용되었고, 따라서 축적된 관련 기술 수준도 높고 경험도 많은 편이다. 지금도 미국에서는 상업용 냉동기의 80% 정도가 암모니아를 냉매로 사용하고 있다. 우리나라도 냉동창고 냉동용으로는 암모니아 시스템이 널리 사용되고 있다.

암모니아는 매년 약 1.2억톤이 생산되고 있으며 대부분 비료의 원료로 사용되고 있고 1~2% 정도만이 냉매로 사용되고 있다. 암모니아의 가장 큰 장점은 물과 같이 자연물질이라는 점이다. 그러나 물은 여러 가지 용도에 쉽게 사용되고 있는

반면 암모니아는 자극성, 독성 및 가연성 때문에 제한적으로 사용되고 있다. 암모니아 시스템은 대용량의 저온 산업용으로 적합하나 공조용으로는 널리 사용되지 못한 것이 사실이다.

그러나 최근 오존층 파괴와 지구 온난화에 따른 CFC와 HCFC의 규제에 따라 암모니아를 공조 시스템의 냉매로 사용하려는 연구개발이 활발하게 일어나고 있다. 암모니아는 열역학 및 열전달 특성이 우수하므로 공조용 열펌프 및 냉동기에 적용할 경우 기존 시스템에 비하여 성능 향상이 가능한 이점이 있다. 또한 하절기의 냉방용 전력 소비율 급증 문제에 대한 해결책과 흡수식 기기의 소형화 요구로 인하여 암모니아-물을 작동 유체로 하는 흡수식 열펌프에 대한 관심이 날로 증가하고 있는 실정이다. 이와 관련하여 본고에서는 암모니아의 냉매로서의 특징을 소개하고 이를 사용한 시스템의 사용 현황과 연구 개발 동향, 암모

니아 취급시 주의 사항을 소개한다. 그리고 암모니아 시스템 개발시 가장 기본이 되는 열전달계수에 대하여 기존 결과와 본 연구실에서 수행한 암모니아의 열전달계수 측정 실험을 기술한다.

2. 암모니아의 특성

어떠한 휘발성 물질이라도 원하는 증발온도에 서 액체로 존재하면 냉매로 사용이 가능하나 실제로는 독성, 가연성, 화학적 안정성, 가격 등에 의하여 제약을 받는다. 인체에 영향을 미치는 독성 정도를 TWA(time weight average concentration)와 STEL(short term exposure limit)로 나타내는데, TWA는 매일 8시간, STEL은 한번에 15분 동안의 노출 허용 농도를 나타낸다. 표 1은 각 물질의 TWA와 STEL의 값을 보여주고 있으며 암모니아가 인체에는 위험한 물질임을 알 수 있다.

표 1 노출 허용 농도 (ppm)

	TWA	STEL
Ammonia	25	35
Carbon dioxide	5,000	15,000
Sulphur dioxide	2	5
Methyl chloride	100	125
CFC, HCFC	1,000	1,250

암모니아는 표준 대기압과 기온에서 무색의 가스로 존재하며 화학적으로 한 개의 질소와 세 개의 수소로 구성되어 공기보다 가볍다. 물에 쉽게 용해되는 성질을 갖고 있어 암모니아는 1:1의 비율로 물에 용해될 수 있다. 표 2는 HCFC22와 비교한 암모니아의 물성치이다. 이 표에 따르면 암모니아는 인체에 대한 독성이 있지만 환경에는 무해하고 냉매로서 우수한 성질을 갖고 있음을 알 수 있다. 표 3은 암모니아의 냉매로서의 장단점을 나타낸다.

표 2 암모니아의 특성

	Ammonia	HCFC22
Chemical composition	NH ₃	CHClF ₂
Molecular weight (kg/kmol)	17.03	86.48
Ozone depletion potential	0	0.05
Global warming potential (100 years)	0	1500
Normal boiling point at 1.013 bar (°C)	-33.3	-40.8
Critical pressure (bar)	113.3	49.9
Critical temperature (°C)	132.3	96.2
Enthalpy of evaporation at 0°C (kJ/kg)	1261.7	204.9
Specific heat of sat. liq. at 0°C (kJ/kgK)	4.62	1.17
Specific heat of sat. vap. at 0°C (kJ/kgK)	2.66	0.74
Thermal conductivity of sat. liq. at 0°C (W/m K)	0.520	0.096
Thermal conductivity of sat. vap. at 0°C (W/m K)	0.022	0.010
Dynamic viscosity of sat. liq. at 0°C (10 ⁻⁶ Pa·s)	175.8	210.1
Dynamic viscosity of sat. vap. at 0°C (10 ⁻⁶ Pa·s)	9.09	11.8
Density of sat. liq. at 0°C (kg/m ³)	638.6	1281.8
Volume of sat. vap. at 0°C (m ³ /kg)	0.289	0.047
Flammable or explosive?	Yes	No
Toxic/irritating decomposition?	No	Yes
Approximate relative price	0.2	1

표 3 암모니아의 냉매로서의 장단점

장	점
임계점이 높아 넓은 온도범위에서 사용 가능하다. 증발 잠열이 크고 열전달 성능이 우수하다. 분자량이 작아 교축 손실이 작다. 냉동유로 광유를 사용할 수 있다. 물이 침투해도 큰 문제를 일으키지는 않는다. 값이 저렴하다.	작동 압력이 높다. 동 또는 동합금 재질을 사용할 수 없다. 비열비가 커서 과열도가 크다. 독성이 있다. 가연성이 있다.

그림 1~5는 냉동 사이클에서 요구되는 암모니아의 대표적인 특성을 타냉매와 비교한 것이다. 그림 1은 온도에 따른 포화압력으로 암모니아는 R22와 유사한 특성을 보여주고 있다. 그림 2에 따르면 암모니아 포화기체의 비체적은 크지만, 잠열이 커 그림 3과 같이 단위체적당 잠열은 큰 값을 보인다. 이 값이 클수록 필요 체적유량이 감

소하므로 압축기의 크기가 작아진다. 그림 4는 응축온도 35℃일 때의 이론 성능계수이며 암모니아가 가장 높음을 알 수 있다. 암모니아의 열전달계수가 타냉매에 비하여 높다는 점을 고려하면 실제 시스템에서의 성능계수는 더 높아진다. 그림 5에서는 암모니아가 타냉매에 비하여 높은 압축비를 요구함을 알 수 있다.

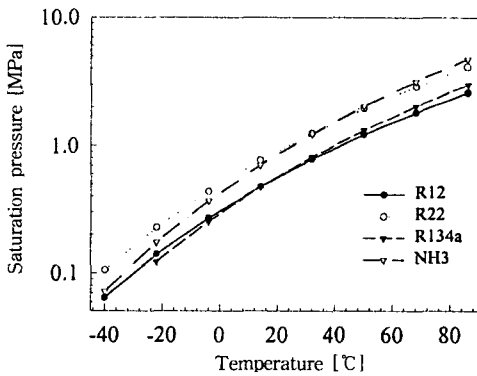


그림 1 포화 압력

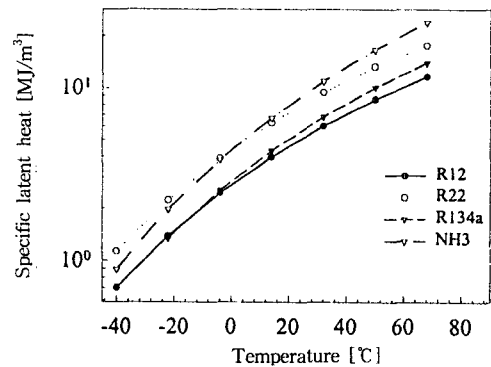


그림 3 단위체적당 잠열

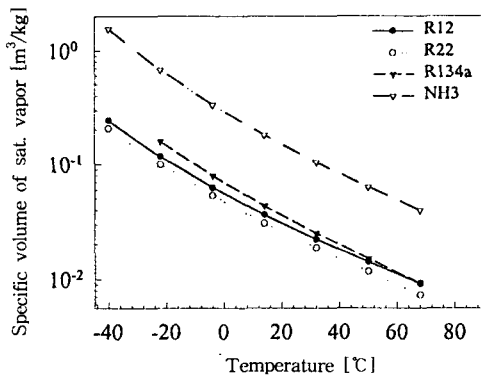


그림 2 포화기체의 비체적

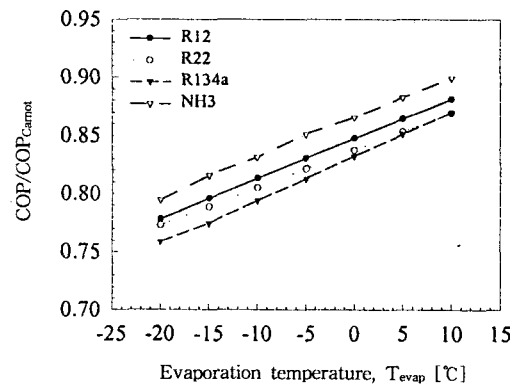


그림 4 성능계수

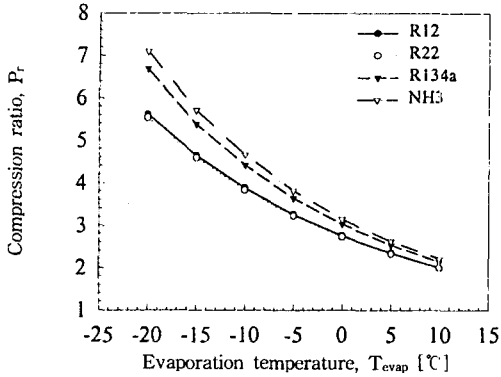


그림 5 압력비

3. 배관 및 안전 설비

실제로 암모니아를 사용하여 시스템을 제작하기 위해서는 기존의 CFC계 냉매와는 달리 주의해야 사항들이 있다.

3.1 배관 및 열교환기 재질 선정

암모니아는 열교환기에 일반적으로 사용되는 동을 부식시키므로 동 또는 동합금 재질을 절대 사용할 수 없다. 일반적으로는 강 또는 스테인레스 스틸을 사용해야 하는데 여기에는 여러 문제점이 따른다. 특히 핀-관 열교환기 제작시 확관 및 핀 용접이 용이하지 않아 제작 단가가 비싸지고 크기가 커지는 문제점이 있다. 알루미늄의 사용은 일부 가능한 것으로 알려져 있지만 권장되고 있지 않다. 최근에는 소형 시스템에 니켈 용접된 판형 열교환기나 적층형 열교환기를 사용하기도 한다. 암모니아 시스템의 배관과 관련하여 ASHRAE¹⁾에서는 ANSI/ASME B31.5 Code for Pressure piping과 ANSI/IIAR 2-1992, Equipment design and installation of Ammonia Mechanical Refrigeration Systems의 규격을 만족시켜야 할 것을 권고하고 있다. 암모니아 시스템에서는 2차유체를 통한 간접 열교환 방식을 적용하여 암모니아를 거주역과 격리시키는 방식도 널리 사용되고 있다.

3.2 밸브의 패킹 등 고분자 화합물의 재질 선정

시스템을 이루는 구성 요소 중에는 밸브나 펌프 등과 같이 고분자 화합물 패킹이 포함되어 있다. 이들 재질의 올바른 선정은 불화수소 계열의 시스템에서도 중요한 문제이지만 암모니아 시스템에서는 안전과 관련하여 더욱 중요하다. 온도 범위 -25~230 °C와 압력 100 bar 이하에서는 TFE 계열의 재질(상업명으로 Teflon으로 알려짐)을 선택하면 큰 문제가 없다.

3.3 누출시 대응 방안

암모니아는 분자량이 작아 일반 냉매에 비해 같은 압력차에서 누설량이 2.5배 정도 많고 독성이 있어 누출시 대응 방안이 중요하다. 그러나 자극적인 냄새가 강하여 탐지가 용이한 이점이 있어 공기 중에 부피비로 5 ppm만 되도 후각으로 검출이 가능하다.

실제 암모니아를 사용하는 중대형 시스템에서는 안전 장치를 구비하여 안전을 도모하고 있다. 안전 장치는 주로 암모니아 검출 센서와 배기 시스템, 그리고 살수 시스템 등으로 구성된다. 암모니아 증기는 공기보다 가볍고 물에 잘 녹는 성질이 있으므로 이를 이용하여 밖으로 불어내거나 물을 분무하여 흡수시켜 제거한다. 암모니아는 유황의 화염과 접촉시 하얀 연기를 내므로 이를 이용하면 암모니아를 손쉽게 검출할 수 있다. 보다 전문적인 방법으로는 화학반응 이용법(detector tubes and electrochemical sensor), 전기 전도도 이용법(solid state sensor), 적외선 또는 자외선 이용법, 그리고 IMS(ion-mobility spectrometry)법 등이 있으며, 각 검출 센서들의 특징²⁾을 표 4에 나타내었다.

3.4 기 타

기타 고려해야할 사항으로는 암모니아는 증발 잠열이 매우 크므로 시스템에 냉매를 주입하거나 제거할 시 열교환기나 밸브의 패킹 등이 동파되지 않도록 주의해야 하고, 특히 시스템 외부로 냉매를 버릴 때 악취로 인하여 대기 중으로 날려보내기 어려우므로 산(acid)을 적절히 사용하여 중화시켜 하수처리 하는 것이 좋다. 모든 작업에 있어서 암모니아용 장갑(주로 저가형으로 nitrile 재

표 4 암모니아 센서들의 특징

Sensor	Ammonia range	Operating temp. range	Operating humidity range	Application
Detector tubes	50~1000 ppm 0.5~30%, and other ranges	10 to 40 °C	40 to 60 % RH**	Personnel exposure level Leak detection No calibration High sensitivity
Electro-chemical	0.7~100 ppm	-5 to 45 °C -40 °C*	20 to 90 % RH	Personnel exposure level Leak detection Frequent calibration High sensitivity
Solid state	30~300 ppm to 5000 ppm	-40 to 90 °C	0 to 90 % RH	Leak detection Less frequent calibration
Infrared (or UV)	10~10000 ppm	0 to 50 °C	0 to 90 % RH	Personnel exposure level Centralized leak detection Less frequent calibration

* with heater, ** lower ranges with correction factors

질이 사용됨)을 착용하면 더욱 안전을 보장받을 수 있다. 암모니아는 기상에 대한 액상의 체적이 매우 작아 플러딩 등의 문제가 발생할 수 있으므로 증발기의 설계에 유의해야 한다.

4. 암모니아를 사용한 시스템의 사용 현황과 연구 개발 동향

암모니아는 관리인이 상주하는 대형 시스템에 많이 사용되어져 왔다. 이는 암모니아가 독성인데다 작동 범위도 고압, 고온이라 다른 냉매를 사용하는 시스템에 비하여 위험성이 상대적으로 많기 때문이다. 암모니아 냉매의 사용 현황에 관한 통계를 살펴보면 전체 사용 냉매 중 암모니아 냉매가 차지하는 비율이 미국 80%, 유럽 50%, 일본 20%로 나타나고 있다. 미국의 교통부(U.S. Department of Transportation)에서는 암모니아를 비발화성(non-flammable) 가스로 규정하고 있으며, 165 파운드(약 80 kg) 미만일 경우에는 고압 방지장치의 부착을 의무화하고 있지 않다.

암모니아를 사용한 시스템은 현재 유럽이나 미국 등지에서 산업용으로 음식 제조 공정, 냉동 보

관, 얼음 제조 등 다양한 목적에 아주 폭 넓게 사용되고 있다. 실례로 덴마크에서는 슈퍼마켓용 간접식 2단 암모니아 시스템이 사용되고 있으며, Lego factory는 1.9 MW급의 냉동 시스템을 갖추고 있다. 영국의 Westward 슈퍼마켓도 암모니아 시스템을 사용하고 있으며, 네덜란드에서는 정부청사의 냉난방을 암모니아-물 흡수식 열펌프 시스템으로 전환하였다. 또한 스웨덴에서는 200 kW 이상의 용량에서는 암모니아 시스템을 적용하고 있으며, 이 외에도 독일, 노르웨이 등지에서 암모니아 시스템을 사용하고 있다. 최근 북유럽을 중심으로 중소형(50~2000 kW)급의 고효율, 저가, 고신뢰성 및 안정성, 저충전량의 water chiller 개발도 활발히 진행되고 있다.

암모니아를 작동 유체로 하는 시스템 중 최근 가장 주목받고 있는 것은 암모니아-물 흡수식 열펌프 시스템이다. 암모니아-물 시스템은 물-리튬브로마이드 시스템에 비해 넓은 온도 범위에서 운전이 가능하고 시스템 변경이 용이하며 결정화 문제가 없어 소형 및 공랭화가 가능하다는 장점이 있다. 이와 관련하여 미국에서는 에너지성(Department of Energy)과 가스 연구소(GRI, Gas Re-

search Institute)의 프로그램을 통하여 많은 연구가 진행되어, 냉방 성적계수 0.6의 단일 효율 3 RT chiller가 수년 전부터 판매되고 있으며 최근에는 여러 종류의 GAX(generator-absorber heat exchanger) cycle을 적용하여 성능이 대폭 향상된 3~5 RT 용량의 열펌프 시제품이 제작, 출시되었다. 일본에서도 JGA(Japan Gas Association)와 MITI/DEDO(Ministry of International Trade and Industry) 등의 프로그램을 통하여 GAX 사이클을 적용한 시제품 개발을 완료하였으며, 상용화에 박차를 가하고 있다.³⁾ 국내에서도 계절에 따른 전력과 가스 수요의 불균형을 해소하고자 산업자원부, 한국가스공사, 한국전력에서 가스 열원 흡수식 열펌프의 개발을 적극 지원하고 있다. 정부 지원을 통하여 한국생산기술연구원을 중심으로 산학연 공동연구진이 용액순환 펌프를 없애고 이젝터를 적용한 5 RT급 암모니아 이용 공랭형 GAX 사이클 열펌프 시제품을 제작하였다. LG전자에서도 여러 종류의 시제품을 제작하여 성능시험 중이다. 이와 같이 국내에서도 암모니아-물 흡수식 열펌프 개발을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 실용화를 위해서는 국가 차원의 장기적인 지원이 필요한 실정이다.

5. 알려져 있는 암모니아 열전달 실험 결과

전술한 바와 같이 암모니아는 매우 오랜 역사를 지닌 냉매로서, 다른 자연 냉매에 비하여 비교적 많은 연구가 진행되었다. Ohadi 등⁴⁾은 순수 암모니아에 대한 기존의 많은 실험 자료들을 분야별로 정리하여 상세히 기술하였으며, 본고에서는 이를 간략히 소개하고자 한다.

흐름 비등에 대하여 Shah⁵⁾는 실험 데이터를 바탕으로 4개의 무차원수를 도입한 국부열전달계수 상관식을 제시하였고, Malek과 Colin⁶⁾은 수평관과 수직관에 대한 실험 결과로 평균열전달계수에 관한 실험식을 얻었으며, Chaddock과 Buzzard⁷⁾는 증발기 내의 광유가 열전달계수에 미치는 영향에 대하여 실험하여 광유의 농도가 클수록 열전달 성능이 나빠지는 것을 관찰하였다. Sabin 등⁸⁾은 수평관에서의 액막 열전달계수 예측 실험을 수행

하였고, Heimbach와 Köln⁹⁾은 풀비등 열전달계수 예측 실험을 수행하였다. 암모니아 증발에 영향을 미칠 수 있는 다른 요인들에 관한 연구도 많이 진행되었다. Mailen¹⁰⁾은 매끄러운 수직관과 두 종류의 수직 fluted tube에서의 증발에 대한 비교 실험을 수행하였고 Panchal 등¹¹⁾은 물의 혼입에 따른 증발 열전달계수의 감소를 관찰하였으며, Barthau¹²⁾는 압력 변화에 따른 증발 열전달계수의 변화에 대하여 실험하였다. 한편, Combs¹³⁾는 수직관에서의 막응축에 관하여 실험하여 Nusselt의 상관식 형태로 응축 열전달계수 예측 상관식을 제시하였고, Domingo¹⁴⁾는 수평관에 대한 막응축 실험을 수행하였다. Mirmov^{15,16)}는 수평관의 막응축에 대하여 광유의 영향을 조사하였고, Cherpurnenko 등¹⁷⁾은 수평관 내에서의 응축 실험을 수행하여 평균열전달계수에 관한 실험식을 제시하였다. 증발과 마찬가지로 응축에서도 열전달에 영향을 미칠 수 있는 여러 요인들에 관한 연구가 이루어져 관의 방향에 따른 열전달 실험, 매끄러운 관과 fluted tube, 그리고 spirally fluted tube 등에 대한 응축 열전달 실험 결과가 알려져 있다. 그러나 대부분의 암모니아를 사용한 이상 유동 실험은 불화수소 냉매들의 실험과 비교하여 여러 가지 어려움으로 인하여 실험 조건의 범위가 다소 좁고 불확실성이 커서 좀더 포괄적인 연구가 필요한 실정이다.

6. 암모니아의 수평관내 열전달 특성

암모니아를 사용하는 시스템을 설계하기 위해서는 암모니아 및 암모니아-물 혼합물의 열전달계수 상관식이 반드시 요구된다. 그러나 전술한 바와 같이 암모니아를 사용하여 많은 열전달 실험들이 수행되었음에도 불구하고, 수평관 내 응축 실험 결과는 많이 알려져 있지 않다. Ohadi 등은 암모니아의 관내 응축에 관하여 Cherpurnenko 등의 실험 결과만을 소개하고 있는데, 이를 살펴보면 매우 작은 질량유속 범위($0.68 \sim 17.8 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$)에 대한 평균열전달계수 예측에 국한되었고 실험 결과가 무차원수 형태로 제시되지 않아 사실상 수평관 내에서 암모니아의 강제 대류 응축 현상을

만족스럽게 설명하지는 못하였다. 이와 관련하여 본 연구실에서는 순수 암모니아를 작동 유체로 하여 단상 열전달계수와 응축 열전달계수를 실험적으로 구한 후, 그 실험 결과를 다른 물질의 측정 값으로부터 구해진 기존의 상관식들이 예측하는 값과 비교하여 이들 식이 암모니아에도 적용 가능한지의 여부를 살폈다.

6.1 실험장치

그림 6은 전체 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 실제 열전달계수를 측정할 시험부는 외경 9.52 mm(3/8 inch), 두께 0.9 mm의 수평 stainless steel관과 그것을 둘러싸고 있는 외경 19.05 mm(3/4 inch), 두께 1.07 mm의 동관으로 구성되어 있다. 전체 시험부의 유효길이는 4 m이고, 이것을 4 부분으로 균등하게 나누어서 각 부분에 대한 '평균열전달계수'를 측정하였다. 냉매 loop는 냉매 순환 펌프, heater, 열교환기 등으로 구성되었다. 냉매는 시험부에 들어가기에 앞서 heater를 통과 하며, 여기에서 시험부에서 필요로 하는 입구 조건으로 제어된다.

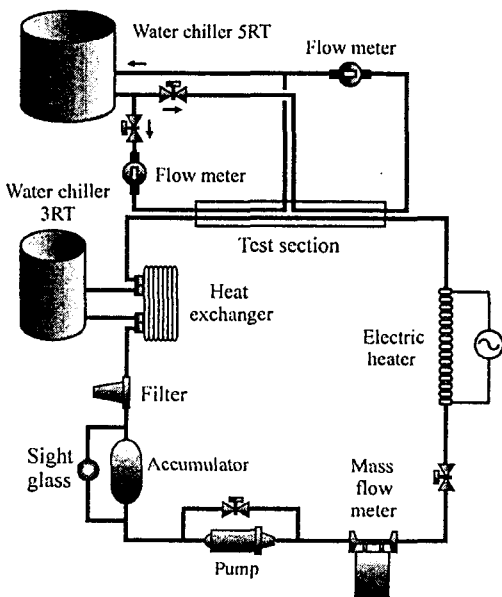


그림 6 실험장치의 개략도

6.2 실험방법 및 조건

우선 진공 펌프를 사용하여 시스템 내부를 약 5 Pa의 진공 상태로 만든 후 냉매를 충전하였다. 그 후 냉매 및 물의 온도와 유량, heater에 공급되는 전력 등을 조절하여 원하는 실험 조건에서 시스템이 정상상태에 이르도록 하였다. 냉매의 유량은 coriolis type 질량 유량계를, 시험부에 공급되는 물의 유량은 보정된 체적 유량계를 사용하여 측정하였다. 냉매의 압력은 시험부에서 입구와 출구를 포함하여 6곳에서 측정하였다. 냉매의 온도 측정에는 T형 열전대를 사용하였으며, 물의 온도 측정에는 T형 열전대 및 thermopile을 사용하였다. 모든 신호는 data acquisition system에 의해 측정되어 PC 화면에 표시 및 저장되었다. 측정된 온도, 압력 및 유량을 통해 1 m section에서의 총열전달계수 U_o 가 식 (1)에 의해 얻어지고, fouling에 의한 열저항을 무시하면 냉매 측의 열전달계수 h_i 는 식 (2)에 의해 결정된다. 식 (2)에서 h_o 는 환상 공간을 지나는 물의 열전달계수로서, 이 값은 modified Wilson plot¹⁸⁾을 이용한 별도의 실험을 통해 Re수와 Pr수, 그리고 반경 방향의 물성치 변화를 고려한 Sieder-Tate¹⁹⁾의 수정항으로 표시되는 상관식을 구하여 사용하였다.

$$U_o = \frac{Q_w}{A_o \cdot \text{LMTD}} \quad (1)$$

$$h_i = \left(\frac{1}{U_o} - \frac{1}{h_o} - \frac{x A_o}{k A_m} \right)^{-1} \cdot \frac{A_o}{A_i} \quad (2)$$

본 연구의 실험 조건을 표 5에 나타내었다. 단상 실험은 환상 공간을 지나는 물의 온도를 냉매

표 5 실험 조건

	Sub. liq.	Condensation
Mass flux [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$]	320~501	86~128
Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	18~47	34~47
Pressure [kPa]	1895~1908	1297~1903
Heat flux [kW/m^2]	12.1~38.2	38.6~62.6
Average quality	-	0.1~0.9

의 온도보다 낮게 하고 냉매의 질량 유속을 변화시키면서 수행하였고, 응축 실험은 냉매의 포화 온도와 질량 유속을 변화시키며 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 암모니아는 미국 Solkatrionic Chemical사의 제품으로 순도는 99.999%이다. 단상 실험에 대하여 시험부에서 열평형의 평균오차는 3.7%이고 최대오차는 8.4%였으며, 측정된 단상 및 응축 열전달계수의 평균 불확실성은 각각 15.8%, 14.0%, 그리고 불확실성의 최대값은 각각 18.9%, 21.7%였다.

6.3 실험결과 및 고찰

그림 7에 질량 유속과 평균 온도의 변화에 따른 단상 열전달계수의 변화를 나타내었다. 단상 열전달계수는 질량 유속과 온도에 비례함을 알 수 있다. 질량 유속이 크면 운동량이 크고 온도가 높으면 유체의 점도가 감소하여 열전달 향상의 요인이 된다. 그림 8은 실험을 통하여 얻은 단상 열전달계수 데이터와, 단상 유동의 열전달 특성을 잘 설명한다고 알려진 Gnielinski⁽²⁰⁾의 상관식을 사용하여 예측한 열전달계수를 서로 비교하여 나타낸 것이다. Gnielinski의 상관식을 적용하는데 있어서 벽면과 유체 사이에는 유한한 온도차가 있기 마련이므로, Petukhov⁽²¹⁾에 의해 제안된 수정항을 사용하였다. 그 결과, Gnielinski의 상관식은 약

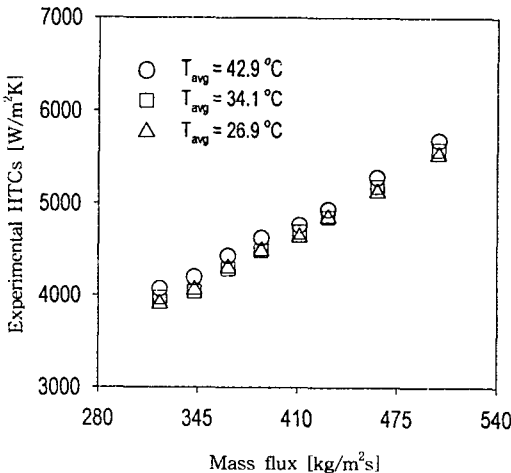


그림 7 질량 유속과 온도의 변화에 따른 단상 열전달계수의 변화

10%의 오차 범위 내에서 열전달계수의 경향을 잘 예측하였다.

그림 9는 Tandon 등⁽²²⁾이 제안한 방법을 사용하여 응축 과정에서의 유동 양식을 예측한 것이다. 응축이 진행됨에 따라 분무류 근처의 영역에서부터 환상류, 파형류 순으로 유동 양식이 변화하는 것을 정성적으로 잘 예측하고 있다. 그림 10은 질량유속과 건도의 변화에 따른 응축 열전달계수의 변화를 나타낸다. 응축 열전달계수는 질량유속과 건도에 비례함을 알 수 있다. 응축이 진행됨에 따라 건도가 감소하면 액막이 두꺼워지므로 열

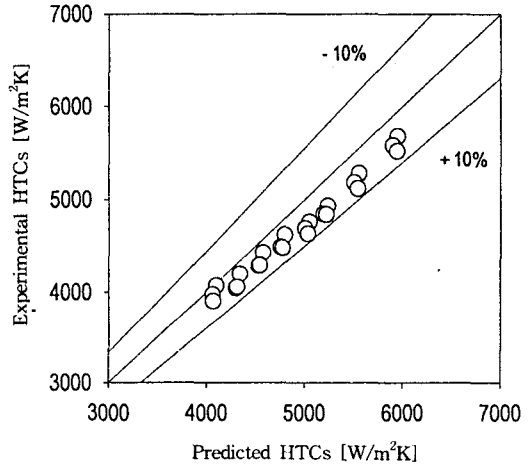


그림 8 단상 실험 결과와 Gnielinski의 상관식이 예측하는 값의 비교

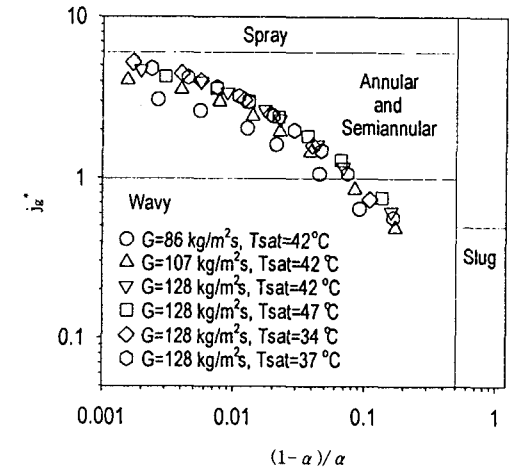


그림 9 응축 실험 결과를 바탕으로 작성한 Tandon의 유동 선도

저항이 증가하고 기상에서 액상으로 바뀌면서 체적이 현저히 감소하여 유체의 속도가 감소하므로 벽면에서 전단력이 감소한다. 저건도 영역에서는 질량유속의 증가에 따른 열전달계수의 증가가 미미한데, 이에 관하여 Dobson 등²³⁾은 파형류의 특성에 따른 것으로 설명하였다. 그림 11은 포화온도의 변화에 따른 응축 열전달계수의 변화를 나타낸다. 포화온도가 증가하면 열전달계수가 감소하는데, 이는 포화온도가 증가할수록 액상의 열전도율이 감소하고, 기상에 대한 액상의 밀도비가 감소하여 액상속도에 대한 기상의 속도비가 감소하기 때문이다. 그림 12는 본 연구의 실험 결과로 얻은 응축 열전달계수와 기존의 상관식을 사용하여 예측한 응축 열전달계수를 서로 비교하여 나타낸 것이다. 암모니아의 실험 결과를 바탕으로 하지 않는 기존의 상관식들은 열전달계수 변화의 정성

적인 경향은 잘 예측하였으나, 정량적으로는 만족스럽지 못하였다. 여러 상관식 중 본 연구의 응축 실험결과를 정량적으로 가장 잘 예측한 상관식은 Chen 등²⁴⁾의 식으로 평균절대오차는 11.6%이며, 평균절대오차의 표준편차는 10.2%이다. 본 연구의 실험 결과를 바탕으로 암모니아가 수평관내에서 응축되는 경우 암모니아의 실험 결과를 바탕으로 하지 않는 기존의 상관식에 비하여 열전달계수를 정확히 예측하기 위한 상관식을 제시하고자 한다. 상관식의 형태는 Cavallini와 Zecchin²⁵⁾이 제안한 것으로 하였으며, 비례상수와 Re수를 포함한 항의 지수를 미지수로 하여, 실험을 통하여 얻어진 Nu수와 계산된 Nu수의 상대오차가 최소가 되도록 하는 미지수들을 비선형 회귀분석을 통하여 결정하였다. 식 (3)은 회귀분석 결과 얻은 상관식이고, 그림 13은 실험을 통하여 얻은 열전달계수와 식 (3)을 사용하여 계산한 열전달계수를 서로 비교한 것이다. 본 연구에서 제시한 상관식으로 예측한 값의 평균절대오차는 4.9%이며, 평균절대오차의 표준편차는 4.1%이다.

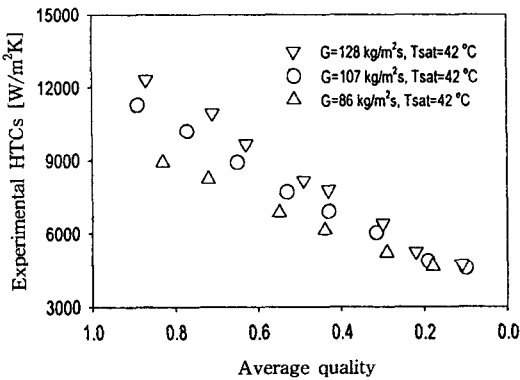


그림 10 질량 유속의 변화에 따른 응축 열전달계수의 변화

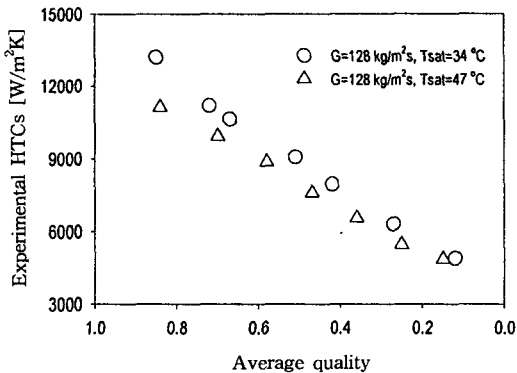


그림 11 포화 온도의 변화에 따른 응축 열전달계수의 변화

$$h_i = 0.046 Re_{eq}^{0.77} Pr_i^{0.33} \frac{k_l}{d_i} \quad (3)$$

$$Re_{eq} = Re_v \left(\frac{\mu_v}{\mu_l} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.5} + Re_l \quad (4)$$

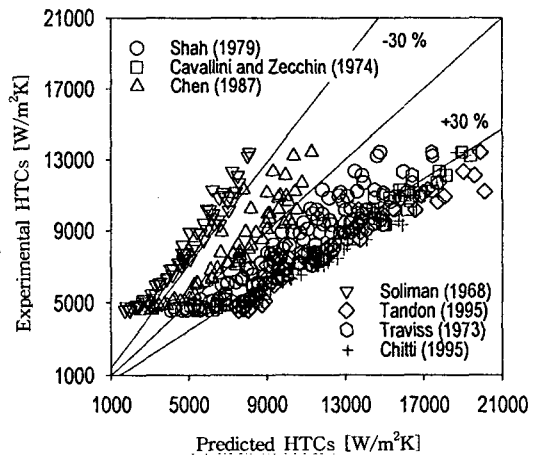


그림 12 응축 실험 결과와 기존의 여러 상관식들이 예측하는 값의 비교

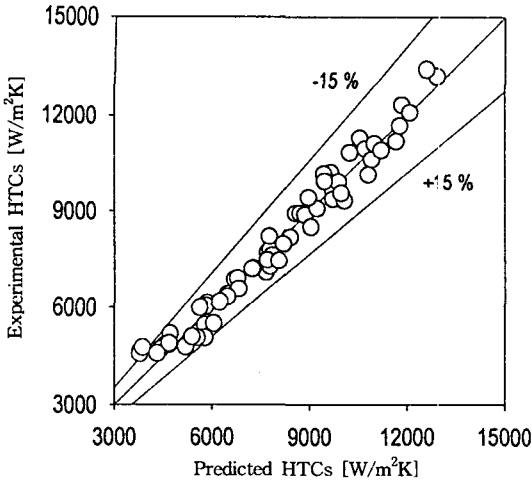


그림 13 응축 실험 결과와 본 연구에서 제안한 상관식이 예측하는 값의 비교

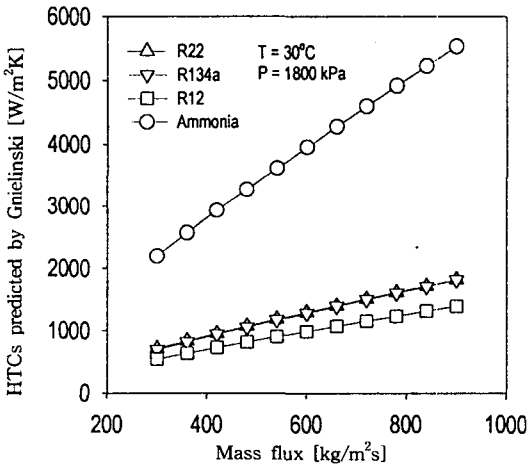


그림 14 여러 냉매들의 단상 열전달계수

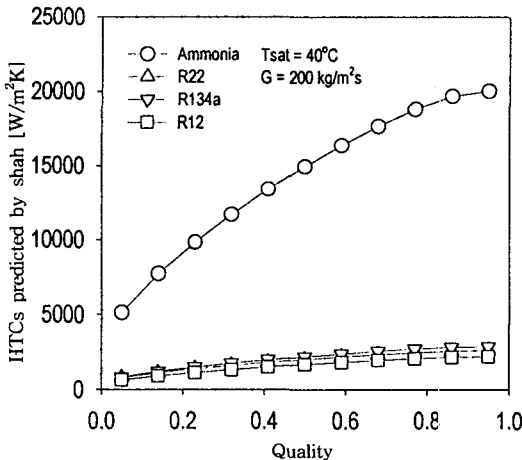


그림 15 여러 냉매들의 응축 열전달계수

참고자료로서 여러 냉매의 단상 및 응축 열전달계수를 비교하여 각각 그림 14와 15에 나타내었다. 단상 열전달계수는 Gnielinski의 식을 사용하여 예측하였으며, 응축 열전달계수는 Shah²⁶⁾의 식을 사용하여 예측하였다. 각 상관식들의 예측 오차를 고려한다 하더라도 암모니아가 타냉매에 비하여 열전달 성능이 매우 우수함을 알 수 있다.

7. 맺음말

암모니아는 독성, 가연성 및 재질 선택의 어려움 등의 단점은 있지만 CFC계 냉매가 개발되기 전에는 우수한 열역학 및 열전달 특성 때문에 냉매로서 가장 많이 사용되어져 왔다. 그러나 인체에 미치는 악영향 때문에 공조용으로는 사용되지 않고 주로 산업용 대형 시스템에 사용되어져 왔다. 그러나 최근 CFC계 냉매의 규제에 따라 암모니아를 공조 시스템의 냉매로 사용하려는 연구개발이 활발하게 일어나고 있다. 이와 관련하여 본 고에서는 암모니아의 냉매로서의 특징을 소개하고 이를 사용한 시스템의 사용 현황과 연구 개발 동향, 암모니아 취급시 주의 사항을 소개하였다. 그리고 암모니아 시스템 개발시 가장 기본이 되는 열전달계수에 대하여 기존 결과와 본 연구실에서 수행한 암모니아의 열전달계수 측정 실험을 기술하였다. 실험은 단상과 응축에 대하여 수행되었으며 기존 일반상관식과의 비교 결과 예측 오차가 비교적 많이 발생함을 알았다. 따라서 본 연구에서는 암모니아를 위한 응축 열전달 상관식을 별도로 제안하였다.

공조용 암모니아 시스템의 개발을 위해서는 아직도 여러 분야의 추가적인 연구가 이루어져야 한다. 예를 들어, 동 아닌 다른 재질의 선정, 핀 부착 방법, 암모니아용 펌프, 안전 설비, 암모니아-물 혼합물의 물성치 및 열/물질전달에 대한 연구가 요구된다. 이러한 연구가 이루어진다면 환경우호적 자연물질인 암모니아는 CFC 대체냉매로서 가장 적합한 후보 중 하나가 될 전망이다.

참 고 문 헌

1. ASHRAE, 1994, ASHRAE handbook: Refrigeration systems and application.
2. Perez-Blanco, Horacio and Stoecker, Wilbert F., 1994, Ammonia sensors for refrigeration applications, IIR 16th annual meeting march 6-9, pp. 353~378.
3. 강용태, 1999, 흡수식 냉동기 및 열펌프의 차세대 기술 및 응용, 한국정밀화학공업진흥회 주관 흡수식 냉동기 및 열펌프 워크샵.
4. Ohadi, M. M., Li, S. S., Radermacher, R., and Dessiatoun, S., 1996, Critical Review of Available Correlations for Two-phase Flow Heat Transfer of Ammonia, Int. J. Refrigeration, Vol. 19, No. 4, pp. 272~284.
5. Shah, M. M., 1976, A new correlation for heat transfer during boiling flow through pipes, ASHRAE Trans., Vol. 82, Pt 2, pp. 66~86.
6. Malek, A. and Colin, R., 1983, Ebullition de l'ammoniac en tube long transfert de chaleur et pertes de charges en tubes vertical et horizontal centre technique des industries mecaniques, Senlis, France, CETIM-14-011, pp. 1~65.
7. Chaddock, J. and Buzzard, G., 1986, Film coefficients for in-tube evaporation of ammonia and R502 with and without small percentages of mineral oil, ASHRAE Trans., Vol. 92, Pt 1A, pp. 22~39.
8. Sabin, C. M., Poppendiek, H. F., Connelly, D. J. and Dunbar, J. G., 1977, Heat transfer enhancement for the OTEC evaporator technical report, GLR-197 Geoscience, CA.
9. Heimbach, D. I. P. and Köln, S. B., 1974, Wärmeübergangskoeffizienten für die Verdampfung von ammoniak an einem überfluteten glattrohr-bündel, Ber Tech Wiss, Vol. 35, pp. 27~30.
10. Mailen, G. S., 1980, The enhancement of heat transfer for ammonia evaporation outside vertical tubes technical report, ORNL-5639, Oak Ridge National Laboratory.
11. Panchal, C. B., Lorenz, J. J. and Hillis, D. L., 1981, The effect of ammonia contamination by water on OTEC power system performance technical report, ANL/OTEC-PS-8, Argonne National Laboratory.
12. Barthau, G., 1976, Experimental investigation of convective boiling of ammonia at high pressure, Heat and mass transfer source book, 5th All-union conference, Scripta publishing, Minsk, pp. 106~110.
13. Combs, S. K., 1978, An experimental study of heat transfer enhancement for ammonia condensing on vertical fluted tubes technical report, ORNL-5356, Oak Ridge National Laboratory.
14. Domingo, N., 1982, Condensation of ammonia on the outside of smooth and fluted tubes at various tube positions technical report, ORNL-5826, Oak Ridge National Laboratory.
15. Mirmov, N. I. and Yemel'Yanov, Yu. V., 1976, Coefficient of heat transfer for ammonia condensers, Heat transfer Sov. Res., Vol. 8, No. 1, pp. 51~55.
16. Mirmov, N. I., 1972, Heat transfer during the condensation of ammonia vapor with admixture of mineral oils on horizontal tubes, Heat transfer Sov. Res., Vol. 4, No. 6, pp. 84~90.
17. Chepurenko, V. P., Lagutin, A. E. and Gogol, N. I., 1993, An investigation of heat exchange during condensation of ammonia inside a pipe at low heat flow

- densities, Energy efficiency in refrigeration and global warming impact, Proceedings of refrigeration science and technology Belgium, May 1993, International Institute of Refrigeration, Commissions B1/2, pp. 243~249.
18. Shah, R. K., 1990, Assessment of Modified Wilson Plot Techniques for Obtaining Heat Exchanger Design Data, *Heat Transfer* 1990, Vol. 5, pp. 51~56.
 19. Sieder, E. N. and Tate, G. E., 1936, *Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes*, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 28, pp. 1429~1435.
 20. Gnielinski, V., 1976, New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, *International Chemical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 359~368.
 21. Petukhov, B. S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, Vol 6, Academic Press, pp. 503~564.
 22. Tandon, T. N., Varma, H. K., Gupta, C. P., 1982, A new flow regimes map for condensation inside horizontal tubes, *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 763~768.
 23. Dobson, M. K., Chato, J. C., Hinde, D. K., and Wang, S. P., 1994, Experimental evaluation of internal condensation of refrigerants R12 and R134a, *ASHRAE Trans.*, Vol. 100, part 1, pp. 744~755.
 24. Chen, S. L., Gerner, F. M., and Tien, C. L., 1987, General film condensation correlations, *Exp. Heat Transfer*, Vol. 1, pp. 93~107.
 25. Cavallini, A. and Zecchin, R., 1974, A dimensionless correlation for heat transfer in forced convection condensation, *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 3, pp. 309~313.
 26. Shah, M. M., 1979, A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 22, pp. 547~556.