

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 23, No. 4, 2003

태양열 구동 NH₃/H₂O 흡수식 냉동기 리모델링 연구

신유수*, 맹주성**, 곽희열***

*한양대학교 대학원 기계공학과(ysshin@kier.re.kr)

**한양대학교 기계공학과(jsmaeng@hanyang.ac.kr)

***한국 에너지 기술 연구원(hykwak@kier.re.kr)

A Study on Remodeling for Solar driven NH₃/H₂O absorption chiller

Shin, You-Soo*/ Maeng, Ju-Sung**/ Kwak, Hee-Youl***

*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Hanyang University(ysshin@kier.re.kr),

**Dept. of Mechanical Eng., Hanyang University(jsmaeng@hanyang.ac.kr),

***Solar center, Korea Institute of Energy Research(hykwak@kier.re.kr)

Abstract

The aim of this research is to study the feasibility of the solar(hot fluid) driven NH₃/H₂O absorption chiller, made by re-manufacturing of Gas fired NH₃/H₂O absorption chiller. This experimental study is performed with the temperature of the inlet hot fluid of generator. In order to determine the inlet temperature of the generator, which gives maximum COP, the experimental data are obtained with various hot fluid supply temperature in range of 130~170°C. Remodeled chiller is operated with periodical cooling effect, which due to mixture subcooled pool boiling, then the COP is evaluated in average. The maximum COP(~0.36) is at 160°C. The temperature is stable operation temperature range of typical vacuum collector. It offers a feasibility of solar driven NH₃/H₂O absorption chiller.

Keywords : 태양열 구동(Solar driven), 발생기(Generator), 흡수식 냉동기(Absorption chiller), 암모니아/물(NH₃/H₂O)

기 호 설 명

A : 전열면적 (m²)
 q : 총열전달률 (W)

U : 총합열전달계수 (W/m²·°C)
 ΔT : 유입용액과 발생기내의 온도차 (°C)
 h : 대류열전달계수 (W/m²·°C)
 ΔP : 압력강하(Pa)

- C_p : 비열(kJ/kg · °C)
- V : 속도(m/s)
- D : 관의 단면적(m²)
- ℓ : 관의길이(m)
- N_u : Nusselt 수
- R_e : Reynolds 수
- P_r : Prandtl 수
- f : 마찰계수

1. 서 론

전 세계적으로 거주, 상업 및 특정 산업공간의 냉방은 꼭 필요한 기능이 되어가고 있고 막대한 양의 에너지가 냉방에 사용되고 있다. 우리나라의 경우 '02년의 총 전력 수요 중 19.5%를 냉방에 사용하였고 '05년경에는 23%대로 증가할 것으로 예상되며 여름철 전력 피크부하도 가중될 것으로 보인다.¹⁾ 이에 따라 에너지 이용합리화와 에너지 절약측면에서 빙축열, 천연가스, 폐열, 태양열 이용 등의 냉방방법 등이 모색되고 있으며, 이중 태양열 이용(구동) 냉방기술의 경우 냉방부하가 큰 하절기에 일사강도가 높아 사용 이점이 있고 집열기 과열문제 해소가 기대되어 IEA(Task25)참여국 등에서 연구가 활성화 되고 있다.

태양열 구동 흡수식 냉방은 H₂O/LiBr를 냉매/흡수제로 하는 냉동기가 NH₃/H₂O 방식의 냉동기보다 상대적으로 낮은 온도의 구동열원을 필요로 하기 때문에 연구의 주류를 이루고 있지만 근래 집열기의 저가화, 고효율화에 따라 소형, 공랭, 저온 냉동/장의 장점이 있는 NH₃/H₂O 냉동기의 경제성 및 가능성이 대두되고 있다.

태양열 구동 흡수식 냉동기는 집열부와 냉동기부로 구성되며 발생기와 집열기가 열교환기를 통해 연결되어 있는 형태를 취한다. 또한 집열기의

성능(효율)은 작동온도증가에 대해 감소하는 경향을 보이고 냉동기는 일정 작동온도까지는 성능이 증가하는 경향을 보인다. 따라서 태양열 구동 흡수식 냉동기의 작동온도에 따른 성능은 이 시스템의 사용가능성을 평가하는 주요 파라미터 이다.

태양열 구동 흡수식 냉방에 대한 기존의 연구를 살펴보면 M. R. Yeung et al.²⁾은 열원으로 평판형 집열기, 전기적 보조 가열기를 사용한 1.5RT의 H₂O/LiBr 흡수식 냉동기의 연간성능을 조사하였으며 Robert O. Guddat³⁾은 열원으로 진공관형 집열기, 15RT의 H₂O/LiBr 냉동기와 16.3ton의 Cold storage로 구성된 시스템을 개발 실증하였다. NH₃/H₂O 흡수식 냉동기를 이용한 연구로는 K. P. Murphy et al.⁴⁾이 태양열과 가스가 복합된 방식의 발생기로 성능을 예측한 것들이 있으나 아직까지 실제적인 설계 데이터 및 작동특성이 보고되지는 않았다.

본 연구는 1단 태양열 구동 NH₃/H₂O 흡수식 냉동기의 사용가능성을 검토하기 위해 기존 1단 가스직화 NH₃/H₂O 흡수식 냉동기를 발생기 개조를 통해 태양열 구동 냉동기로 변형/운전하여 작동특성 및 공급온도에 따른 성능을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

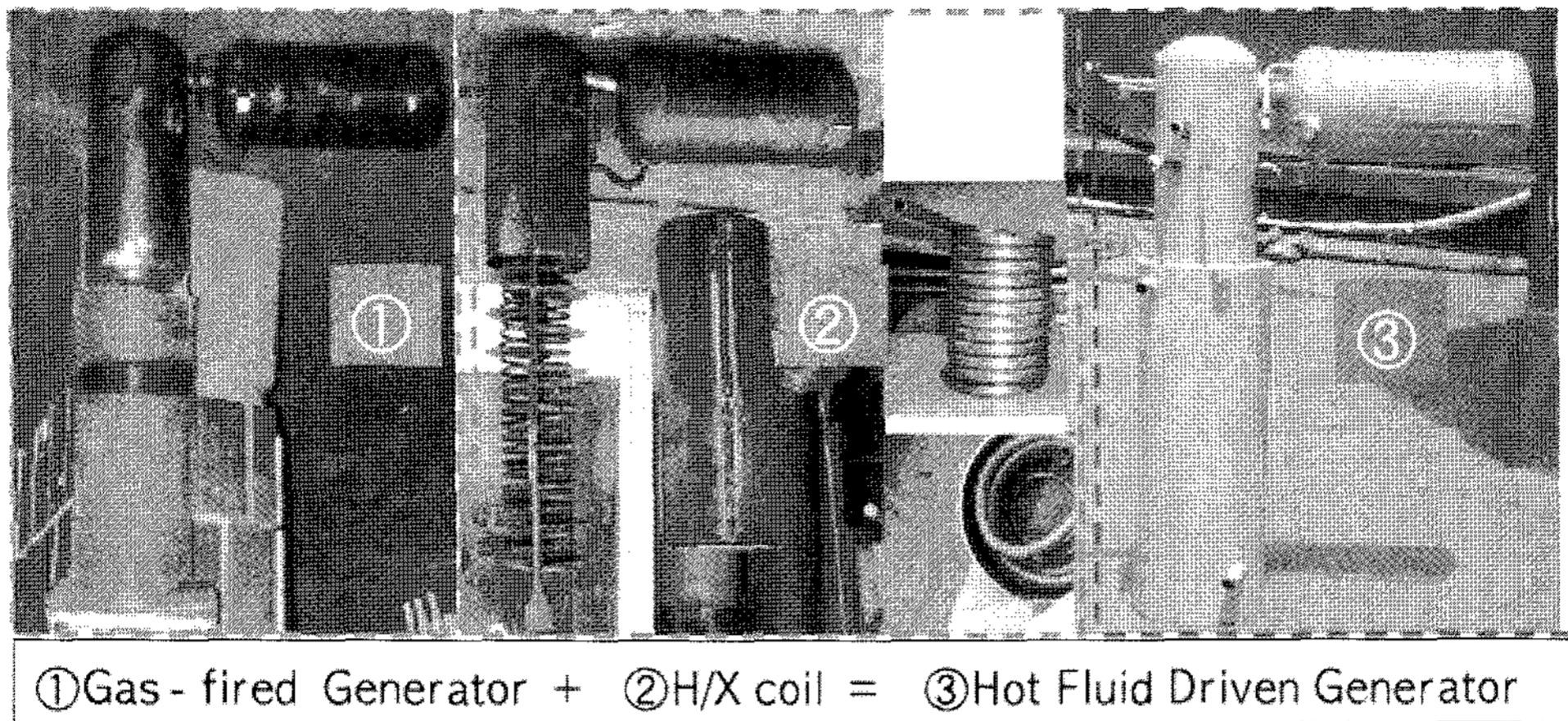
태양열 구동 흡수식 냉동기는 태양열 집열기의 역할을 하는 열수 공급장치(태양열 집열기를 통해 얻은 열원을 궁극적으로 열수의 형태이다.)와 열교환기를 통해 연결된 발생기(흡수식 냉동기) 그

1) 한정옥, 2003, 흡수식 냉방시스템의 경제성, HARFKO 2003 학술강연회, pp. 230

2) M. R. Yeung, P. K. Yuen, A. Dunn and L. S. Cornish, 1992, Performance of asolar-powered air conditioning system in Hong Kong, Solar Energy, Vol 48, No. 5, pp. 309-319

3) Robert O. Guddat, 1981, The prototype energy retrieval and solar(PERS) system Final report, DOE/BP-54

4) K. P. Murphy, J. C. Barke, B. A. Phillips, 1982, Solar assisted gas-fired absorption heat pump Final report, GRI-80/0172



①Gas - fired Generator + ②H/X coil = ③Hot Fluid Driven Generator

그림 1 . 개조과정

리고 이 냉동기에 부하를 제공하는 성능 실험장치로 구성된다.

2.1 열수 구동 발생기

Robur사의 3RT급 1단 NH₃/H₂O 흡수식 냉동기의 발생기에 전열코일(STS 304 HTB, 열교환기)를 삽입 열수로 구동할 수 있게 개조하였다. (그림 1 참조) 열교환기의 설계는 다음의 과정에 따라 수행되었다.

-열수공급 유량의 선정, 식(1)

발생기에 공급해야 하는 열전달률 : 17kW

열교환기의 입/출구온도(가정) : 180/150°C

열 매체유의 비열(165°C) : 2.479 kJ/kg · °C

열 매체유의 밀도(165°C) : 765.3 kg/m³

$$Q = mC_p dT = m \times (2.479) \times 30 \dots\dots\dots (1)$$

$$= 0.2286 \text{ kg/s}$$

-열교환 코일의 관경 선정

관경의 선정을 위하여 다음의 조건이 고려되어야 한다.

①발생기 내의 열교환코일은 보다 나은 열교환을 위해 난류유동을 하여야 한다.

②개조된 발생기내에 들어 갈 수 있는 코일의 최대길이가 15m라하고, 이 관에서의 압력강

하는 열수공급용 탱크가 일정수두 유지를 위해 9.8kPa(1kgf/cm²)의 압력을 유지한다고 할 때 4.9kPa(0.5kgf/cm²)이하가 되어야 한다. 층류유동처럼 압력강하가 관의 길이에 비례하고 하면 식(2)처럼 압력강하를 표시할 수 있다.

표 1. 상용강관의 압력강하와 Re수

외/내경 (mm)	ΔP/m(Pa)	f	Re
12/10	15836	0.0285	18542
15.88/13.4	2379	0.0255	13837
20/17	959	0.0245	10907

$$\Delta P = f \frac{\ell}{D} \frac{\rho V^2}{2} \dots\dots\dots (2)$$

$$f = \phi(Re, \frac{\epsilon}{D})$$

이 식과 Moody chart를 이용 상용강관의 내경에 따른 압력강하와 Re수를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 허용압력 내에 있는 관경은 외경 15.88mm이상의 관이었으며 또한 냉동기의 발생기 공간 내에서 (220Ψ 이내) 선정된 구경의 관이 코일형태로 가공이 가능하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 외경 15.88(호칭경 15A)인 관을 선정하였다.

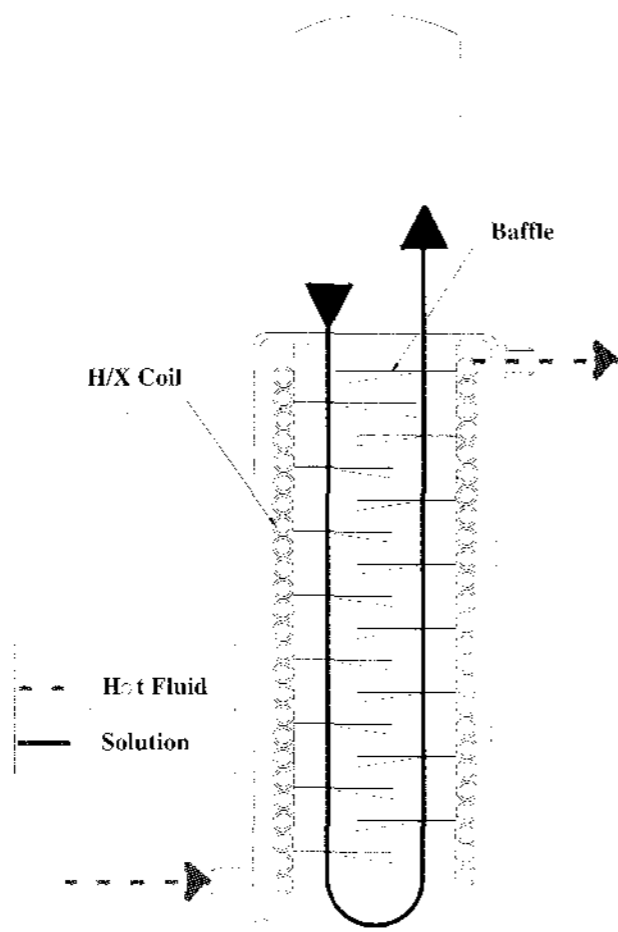


그림 2. 열수구동 발생기의 개념적 그림

- 가스 직화 방식과 등가 열전달률을 제공할 수 있는 코일의 길이 산정

개조된 발생기는 하부에서 열수가 유입 상부로 유출되고 상부에서 용액펌프로부터 용액이 들어오 고 내부에서 열교환 코일에 의해 가열되어 나가므 로 직교 유동 열교환기로 단순화 할 수 있다.(그림 2참조) 필요 코일의 길이 산정을 위해서 총합 열전달계수 값(U)과 대수평균온도차 (LMTD)가 필요하며 식(3)을 통해 계산하였다.

$$A = \frac{q}{U \Delta T_{LMTD}} \dots\dots\dots (3)$$

총합열전달계수는 관 벽의 열저항과 Fouling factor 를 무시하면 식(4)로 표시될 수 있다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{sol}} + \frac{1}{h_{coil}} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 발생기내의 용액(NH₃/H₂O)층의 대류 열전달계수(h_{sol})는, 비-공비(Non-Azeotropic) 혼합물 이어서 온도/엔탈피 관계가 비 선형적이다. 이는 대수평균온도차(LMTD)의 가정과 모순

되며, 열교환 해석을 복잡하게 한다.

본 연구에서는, 발생기내 혼합물 층의 대류열전달계수(h_{sol})를 가스직화 구동 실험 값(발생기 개조전 작동상태 확인 위한 실험)인 용액펌프로부터 발생기로 유입되는 용액의 온도와 발생기내 온도를 사용하여 식(5)로 계산하였다.

$$h_{sol} = \frac{q_{eg}}{A_g \times \Delta T} \dots\dots\dots (5)$$

그리고 열교환용 코일내부에 흐르는 열매체의 대류열전달계수는 식(6) (Petukhov 상관식)을 통해 계산하였다.

$$Nu = \frac{(f/8)RePr}{1.07 + 12.7 (f/8)^{1/2} (Pr^3 - 1)}$$

0.5 < Pr < 2000, 104 < Re < 5 × 10⁶

$$f = (1.82 \log_{10} Re - 1.64)^{-2}$$

\dots\dots\dots (6)

윗 식들을 통해 계산된 코일길이는 11.97m이며 이 길이에 최소한의 안전률을 곱한 길이를 삽입해야 한다. 그러나 냉동기내의 발생기 공간제약으로 인해 12m의 코일을 삽입하였으며 용액은 개조된 발생기를 냉동기에 거치 시킨 후 농도 (33%,wt)가 맞추어진 냉매 실린더를 통해 냉동기에 가스방식과 동등한 양을 주입하였다. 불응축 가스제거와 기타 점검은 제조사의 메뉴얼에 따라 수행되었다. 또한 가스 직화 방식의 오작동시 가스를 차단하는 제어 방식을 열수 구동 방식에 맞추어 열수 공급 펌프 제어방식으로 바꾸었다.

2.2 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 그림 3에 나타내었다. 실험장치는 개조된 발생기가 거치된 냉동기와 이 냉동기에 열원을 공급하는 열수 공급 탱크 그리고 증발기에 브라인을 공급, 냉방

용량을 측정하는 부하 탱크로 구성된다. 각각의 구성 및 설명을 표 2에 나타내었다.

표 2. 실험장치의 구성 및 설명

	용량 (체적/히터)	설명
열수공급 탱크	탱크1 200 l/ 15kW	발생기에 열수공급 역할 - 펌프, 유량계, 밸브류등 최대 ~ 350℃까지 사용가능
	탱크2 70 l/ 5kW	P.I.D 제어를 통한 온도제어 - 열매체유: Thermia B 오일 - 입/출구 배관 끝단에 J-type 써머 - 커플 이용 온도측정 - 바이패스 밸브①로 탱크2내의 일 - 정압력유지, 탱크 2상부 압력계이 - 지를 통해 유지정도 지시 - 밸브④를 통해 유량조절
부하 탱크	탱크3 150 l/ 5kW	-12℃ 브라인(7%, 프로필렌 글리 - 콜)을 증발기에 공급
	탱크4 80 l/ 5kW	P.I.D제어를 통한 온도제어 - 열교환기를 통해 항온조와 탱크3 - 연결, 온도 예-조정 역할
	항온조 자체용량 (가열/냉각 기능)	- 밸브⑥, ⑦을 통해 유량조절 - 입/출구 배관 끝단에서 RTD센서 - 이용 온도측정

2.3 실험방법

(1) 작동

개조된 흡수식 냉동기는 열수공급 유량과 브라인의 유량을 고정시킨 상태에서 전체 시스템이 안정된 실험조건으로 유지되는 정상상태 일 때 20~30분간 데이터를 취득, 작동을 관찰하였으며 압력은 냉동기의 고압측과 저압측 서비스 밸브에 연결된 매니폴드 게이지를 통해 관찰하였다. 냉동기의 성능은 성적계수 식(7)로 나타내었다.

표 3은 실험조건을 나타낸 것이다

$$COP = \frac{\text{단위시간당 냉동용량}(W)}{\text{단위시간당 공급열량}(W)} \dots\dots\dots (7)$$

(2) 열수 공급온도에 따른 실험

발생기에 공급되는 열수 유량을 0.13kg/s에서 0.31kg/s까지(10~25 l pm)변화시키며 성적계수 측정하였다. 여기서 얻은 최적 유량으로 공급 열수 온도를 변화시키며 공급온도에 따른 성능변화를 살펴보았다.

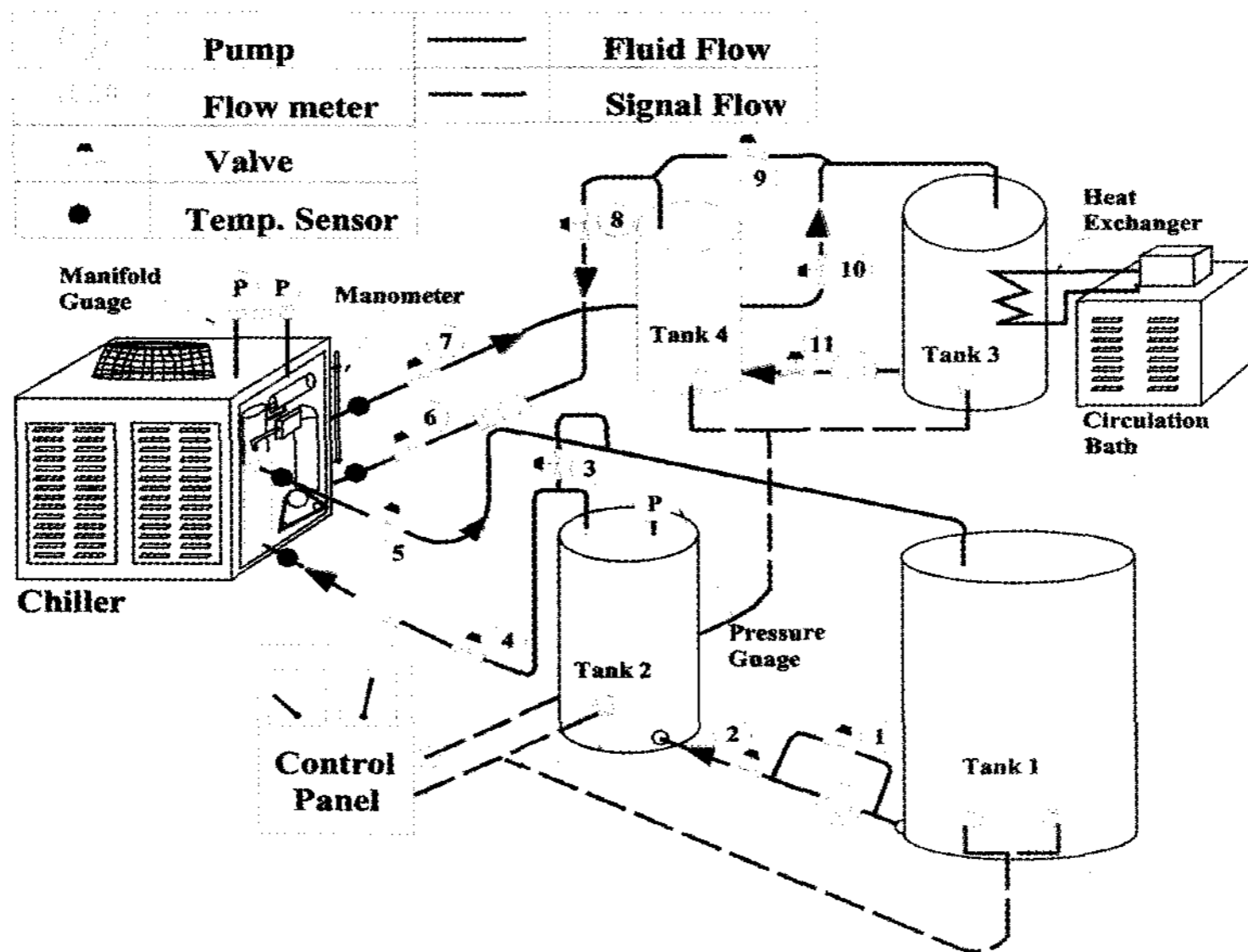


그림 3. 전체적인 실험장치의 개략도

표 3. 실험조건

외기온도	ARI Standard 560 에서는 흡수식 냉동기 성능 실험온도를 35°C로 규정하였다. 하지만 일정한 외기 온도조건 동안에 실험수행이 어려워 이에 준하는 32~35°C 사이에서 실험하였다.
브라인 공급온도	12°C로 브라인을 공급, 복귀하는 브라인의 온도차를 측정하였다.
브라인 유량	실험에 사용된 냉동기의 권장 유량을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 작동

그림 4는 개조된 냉동기의 작동을 고압측 압력과 성적계수로 나타낸 것이다. 개조된 냉동기는 주기적인 압력거동과 성능을 보이는데 이는 암모니아 수용액의 과냉 풀 비등 특성에 기인한 것이다. 즉, 고압이 1.5 Mpa 일 때 시간차를 가지고 냉동효과가(COP~0.36) 발생하며(심벌표시) 압력이 증가 또는 감소함에 따라 성능이 변한다. 본 연구는 기존 냉동기의 발생기 부분만을 개조하였기 때문에 공간에 큰 제약을 받았다. 따라서 연속적인 작동을 위해서는 발생기와 열교환 코일의 기하학적 형상변화 및 열교환 면적증대가 필요하다.

3.2 열수 공급온도에 따른 성능

그림 5와 6은 열수의 유량과 온도에 따른 성능을 나타낸 것이다. 주기성을 갖는 성능을 비교하기 위해 각 실험조건에서 성능주기의 평균을 취하였다. 열수 공급유량 0.26~0.27kg/s에서 성능이 높게 나타났지만 그 이상의 유량에서는 거의 차이가 없었다. 유량을 0.265kg/s로 고정시키고 공급 열수의 온도를 변화시키며 성능을 살펴본 결과, 다른 냉매/흡수제를 가지고 발생온도에 따른 성능을 관찰한 I. H. Malik et al.⁵⁾의 연구 그리

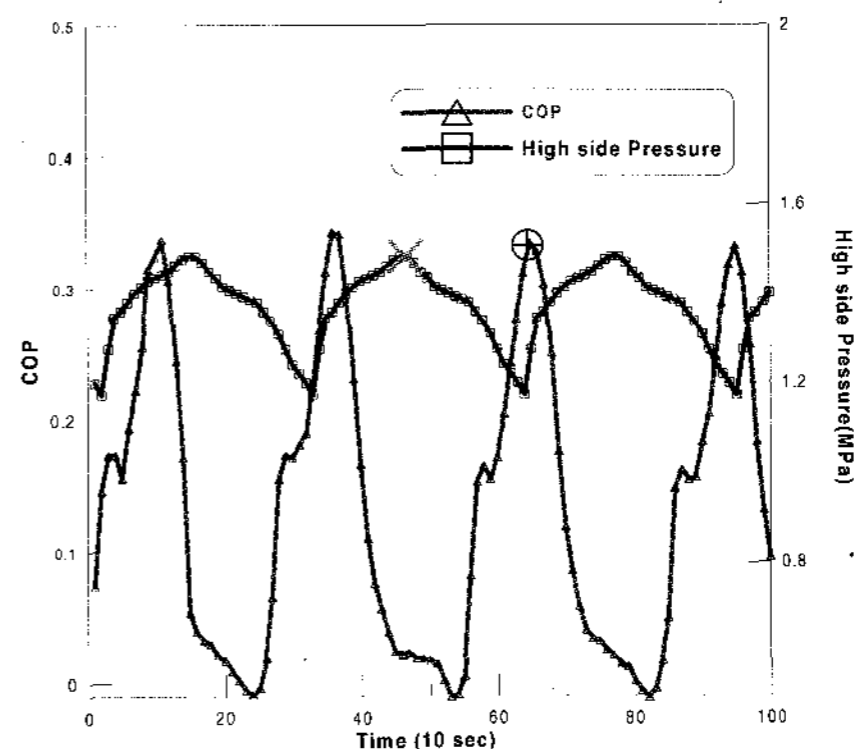


그림 4. 고압측 압력과 성적계수 (열수 공급온도 160°C)

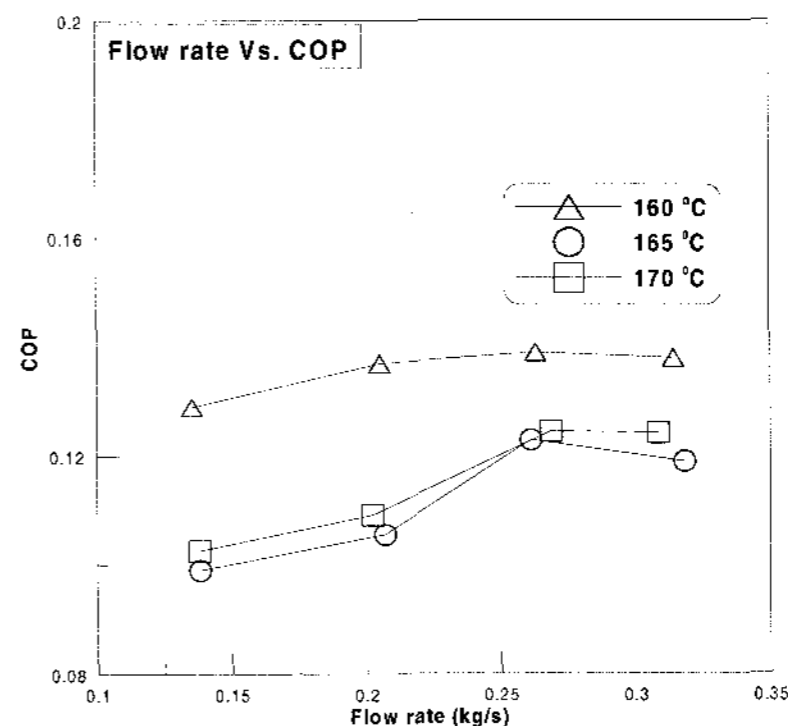


그림 5. 유량에 따른 성적계수

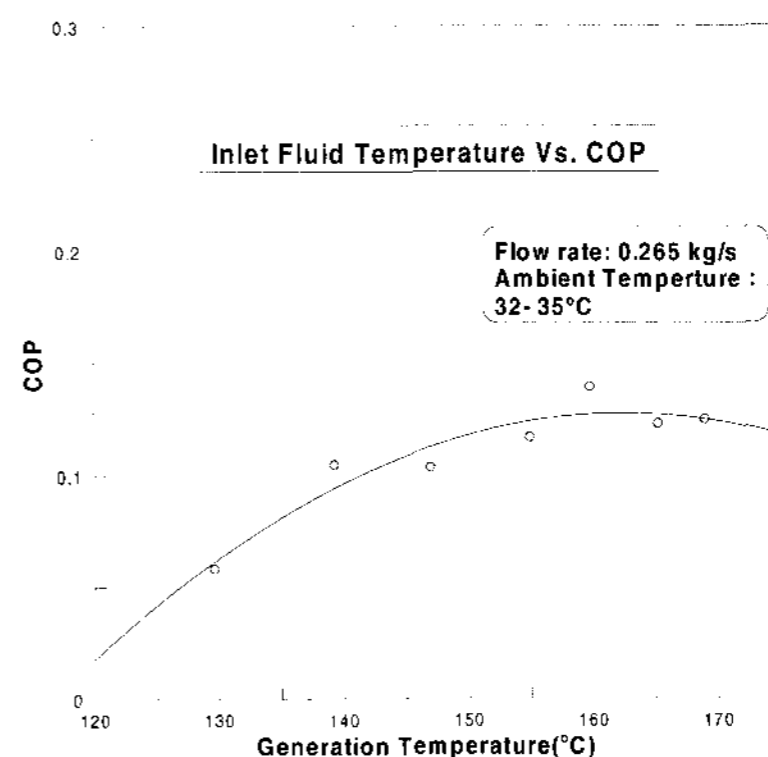


그림 6. 발생온도(열수 공급온도)에 따른 성적계수

5) I. H. Malik, M. Altamush siddiqui, 1996, Optimization of generator temperatures in the heat operated

absorption cycle using four types of aqueous salt solutions, Energy Convr. Mgmt Vol. 37, No. 4, pp. 433-445

고 NH₃/H₂O 냉동기(가스 직화 방식)의 발생온도를 변화 시켜가며 성능을 관찰한 José Fernández-Seara et al.⁶⁾의 연구와 유사하게 발생온도가 일정 이상 증가되어도 냉동기의 성능은 증가하지 않았으며 160°C 부근에서 최대성능을 나타냈다. 160°C의 작동온도는 일반적인 진공관형 태양열 집열기의 Stagnation 온도범위 이내이므로 적절한 냉동기의 개조/제작을 통한 태양열 구동 NH₃/H₂O 흡수식 냉동기의 구동은 가능할 것이라 판단하였다.

4. 결 론

- (1) 태양열 구동 NH₃/H₂O 흡수식 냉동기는 주기적인 성능을 보였다. 이는 혼합물의 과냉 풀 비등 특성에 의한 것이며 연속적 작동을 위해서는 발생기와 열교환기의 기하학적 형상변화가 필요함을 알 수 있었다.
- (2) 정상구동에 필요한 압력(1.5MPa)이 되었을 때 가스 직화방식과 유사한 성능(COP~0.36)을 가지는 것을 알 수 있었다.
- (3) 열수 공급유량 0.265kg/s, 온도160°C, 부근에서 최대 성능을 나타냈으며 그 이상 공급온도가 증가하여도 성능은 향상되지

않았다.

- (4) 최대 성능을 내는 열수 공급온도 160°C는 일반적인 진공관형 태양열 집열기의 Stagnation 온도범위 이내이다. 따라서 적절한 냉동기의 개조/제작을 통해 태양열 구동 NH₃/H₂O 흡수식 냉동기 구동은 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. P. B. Whalley, 1987, Boiling condensation and Gas-Liquid Flow, Clarendon Press, Oxford, pp. 167-170
2. L. A. Schaefer, 1997, Heat exchanger Mean temperature differences for refrigerant mixture., Georgia Institute of Technology.
3. Tohiki Inoue, Masanori Monde, Yoshio Teruya, 2002, pool boiling heat transfer in binary mixtures of ammonia/water, Int J. Heat and Mass Transfer, Vol. 45, PP. 4409-4415
4. R. M. Lazzarin, A. Gasparella, G. A. Longo, 1996, Ammonia-water absorption machines for refrigeration: theoretical and real performance, Int J. Refrig. Vol. 19, pp. 239-246

6) José Fernández-Seara, Manuel Vázquez, 2001, Study and control of optimal generation temperature in NH₃-H₂O absorption refrigeration systems., Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 343-357