

## 흡수식을 이용한 상온에너지수송의 모사 및 비용평가

김 성 수, 오 민 규, 전 상 현, 강 용 태\*

경희대학교 대학원 기계공학과, \*경희대학교 기계산업시스템공학부

### Simulation and Cost Estimation of Energy Transportation at Ambient Temperature Using an Absorption System

Sung Soo Kim, Min Kyu Oh, Sang Hyun Jeon, Yong Tae Kang\*

Graduate School, Kyung Hee University, Yong-in 449-701, Korea

\*School of Mechanical and Industrial Engineering, Kyung Hee University, Yong-in 449-701, Korea

(Received August 6, 2003; revision received October 4, 2003)

**ABSTRACT:** The objectives of this paper are to study the effect of key parameters on the cycle performance and capacity and to estimate the cost of latent and sensible energy transportation systems. The overall conductance (UA) of each component, the ambient temperature and the absorber inlet temperature are considered the key parameters. It is concluded that COP of the solution transportation using an absorption system (STA) at ambient temperature is 10% higher than that of the conventional sensible system. It is also found that the cost of STA system can be reduced 7.5 times to that of sensible energy transportation for one year of operation with 10 km transportation distance.

**Key words:** STA(용액수송흡수장치), NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O cycle(암모니아-물 사이클), Long distance solution transportation(용액장거리수송), Cost estimation(비용평가)

#### 기 호 설 명

AA : 단열분석기  
 Abs : 흡수기  
 ACA : 공기냉각흡수기  
 Con : 응축기  
 COP : 성적계수 ( $Q_{evap}/Q_{des}$ )  
 D : 관경 [cm]  
 Des : 발생기  
 Evap : 증발기  
 GFD : 가스연소발생기

HX : 열교환기  
 M : 냉매생성량/용액투입량 ( $\dot{m}_{ref}/\dot{m}_{s,s}$ )  
 P : 압력 [kPa]  
 Pre : 과냉기  
 Q : 열전달량 [kW]  
 SCA : 용액냉각흡수기  
 SHD : 용액가열발생기  
 SHX : 용액열교환기  
 T : 온도 [K]  
 UA : 총열관류율 [kW/K]  
 UA<sub>o</sub> : 기준 총열관류율 [kW/K]  
 V : 속도 [m/s]  
 W : 펌프일률 [kW]  
 x : 농도 [%]

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-202-8106

E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

그리스 문자

$\epsilon$  : 관의 표면거칠기 [mm]

1. 서론

산업의 고도화에 의해 에너지 수요는 지속적으로 급증하고 있다. 에너지 수요의 증가는 미래의 에너지 수급의 불균형을 초래하게 될 것이다. 현 시점에서 에너지의 효율적 사용은 매우 중요한 과제로 대두되고 있다.

본 연구에서는 에너지의 효율적 사용의 중요한 요소인 에너지수송에 관련된 상온에너지수송용 흡수식 냉동기(STA)<sup>(1)</sup>를 도입하였다. STA는 상온 에너지를 용액의 농도차를 이용하여 수송하므로 에너지수송시 소요비용을 최소화할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실험에 앞서 사이클 모사를 통해 실험에 필요한 기초적인 데이터 수립 및 성능분석을 수행하고, 최적설계를 통해 STA 구현 및 상용화에 있어 중요한 요소인 소요비용을 계산하여 기존의 현열방식에 의한 에너지수송과 농도차에 의한 잠열방식의 에너지수송 시스템을 비교한다.

2. 용액수송 흡수식 시스템(STA)

Fig. 1은 온도차에 의한 현열수송(a, b) 및 농도차에 의한 잠열수송(c)을 나타낸다. Fig. 1에서 a와 b의 경우는 기존의 현열수송방식으로서 열수 또는 냉수를 장거리수송한다. 이 방식은 잠열수

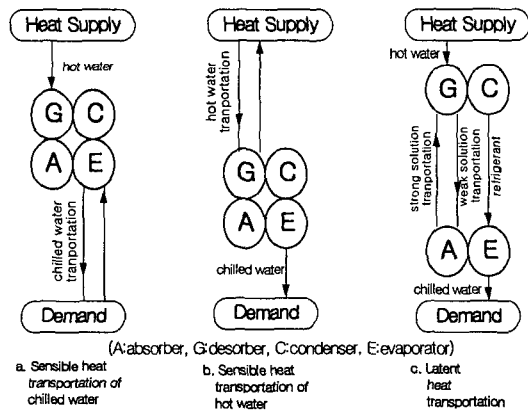


Fig. 1 Concept of STA.

송방식에 비해 유량이 증가하고 값비싼 단열재가 필요하게 된다. 이에 비해 c의 경우는 농도차에 의한 잠열수송으로서 외기온도와 동일한 상온에서 에너지수송이 이루어진다. 따라서 현열수송과 달리 단열재가 불필요하게 되며 유량 또한 감소하게 된다.

3. 사이클 모사

3.1 상용 시스템의 모사

본 연구에서는 일반적인 흡수식 시스템 모사 프로그램인 ABSIM(ABsorption SIMulation)<sup>(2)</sup>을 사용하였다.

Fig. 2는 상용 시스템의 모사를 위한 NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 흡수식 사이클이다. 시스템의 냉방용량은 5 RT이고, 공기에 의해서 응축기와 공기냉각흡수기가 냉각된다. 열원은 LPG 연소가스이며, 특징은 일반적으로 UA가 큰 유닛인 흡수기를 용액냉각흡수기와 공기냉각흡수기 부분으로 나누어 공기냉각에 의한 소형화가 가능하게 구성되어 있다.

3.2 상용 시스템의 모사결과 및 감도분석

Table 1에 각 유닛에 대한 기본조건이 제시되

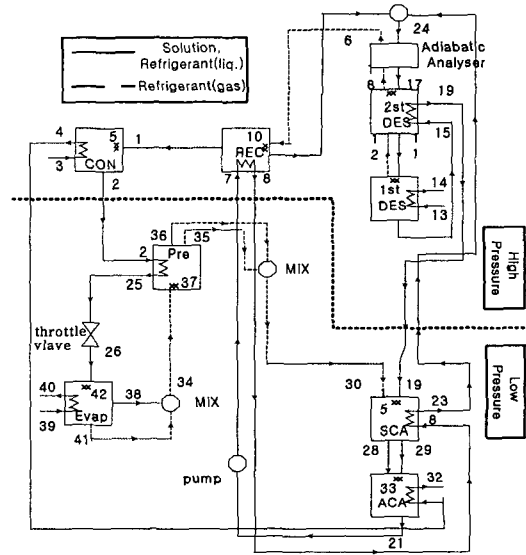


Fig. 2 Cycle diagram of a conventional NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O system.

Table 1 Basic condition of unit and pressure

	GFD	SHD	AA	Rec	Con	Eva	Pre	SCA	ACA
$UA_o$ (kW/K)	0.05	0.4	0	0.23	1.2	2	0.2	0.45	2.2
Pres (kPa)	1997	1997	1997	1997	1997	450	450	450	450

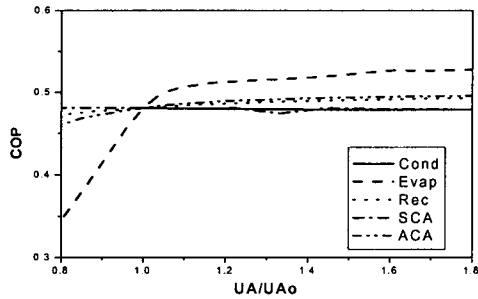


Fig. 3 COP versus  $UA$  variation.

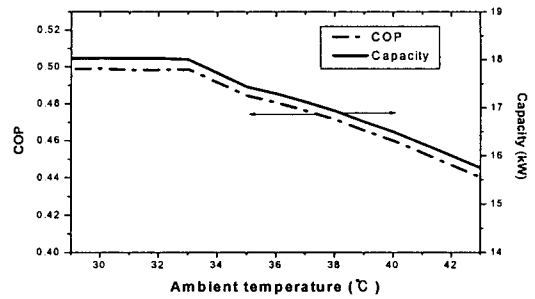


Fig. 4 COP and cooling capacity versus ambient temperature.

어 있고, 본 연구에서는 외기온도가 35°C 냉방용량이 5 RT일 때를 기준으로 모사를 수행하였다.

Fig. 3은 각 유닛의  $UA$ 에 따른 성적계수변화를 나타낸 결과이다. 상대적으로 증발기에 따른 성능 변화가 가장 크게 나타난다. 이는 증발기의  $UA$ 에 따라 성적계수에 가장 영향을 미치는 냉매증발량이 달라지기 때문이다. 또한  $UA$ 비가 1 이상에서는 증발기의  $UA$ 에 비해 증발할 수 있는 냉매량이 부족하게 되어 잠열뿐 아니라 현열열전달이 일어나 성적계수의 증가폭이 급격히 감소하게 된다.

Fig. 4는 외기온도에 따른 성적계수변화와 냉방용량변화를 나타낸다. 결과에서 볼 수 있듯이 33°C를 기준으로 온도가 상승할수록 성적계수 및 냉방용량이 줄어들었다. 이는 외기온도가 상승할수록 응축기에서 응축되는 냉매량과 흡수기에서

흡수되는 냉매량이 줄어들기 때문이다. 반면 33°C 이하에서는 성적계수 및 냉방용량이 일정하게 유지되며 이는 냉매생성량은 증가하나 성능 및 용량에 영향을 미치는 증발기 내에서 증발능력의 한계에 의해 변화가 없게 되기 때문이다.

### 3.3 STA 모사

Fig. 5는 상용 암모니아-물 시스템 및 STA의 PTx 선도를 나타낸다. 두 시스템은 흡수기 입, 출구 온도와 농도폭에서 큰 차이점을 보인다.

STA 시스템에서는 약용액이 흡수기로 유입되기 전의 온도가 장거리 수송에 따른 관의 열손실 효과에 의하여 상온까지 과냉된다. 기존 상용 암모니아-물 시스템과는 달리 과냉된 약용액이 흡수

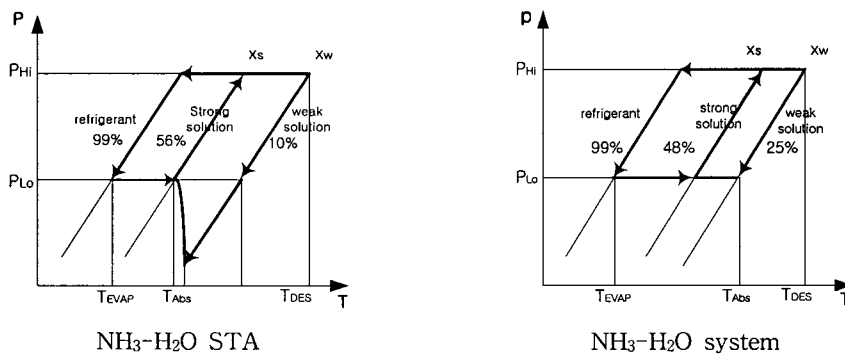


Fig. 5 PTx diagram of  $NH_3-H_2O$  system and STA.

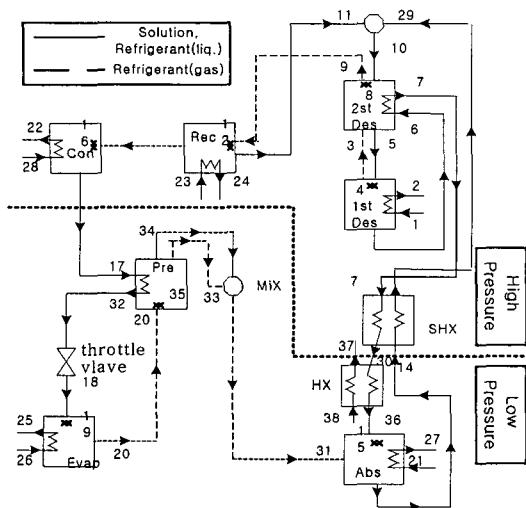


Fig. 6 System diagram for cycle modeling of STA.

기에 유입시 흡수능력이 증가하게 된다. 즉, 흡수를 차이에 의해 STA의 농도폭이 상대적으로 상용 암모니아-물 시스템의 농도폭에 비해 넓게 된다.

Fig. 6은 STA의 모사를 나타내는 개략도이다. 이 모델은 기본적으로 상용 사이클과 유사하나, STA 모사는 2가지 방법으로 수행되었다. 하나는 장거리 상온수송의 STA에서 내부 열회수를 위한 SHX을 추가한 것이고(case A), 다른 하나는 장거리수송시 외부로의 열손실을 표현하기 위한 HX를 별도로 추가한 것이다(case B).

### 3.4 STA 모사결과 및 감도분석

본 연구에서는 각 구성요소의 UA 변화와 흡수

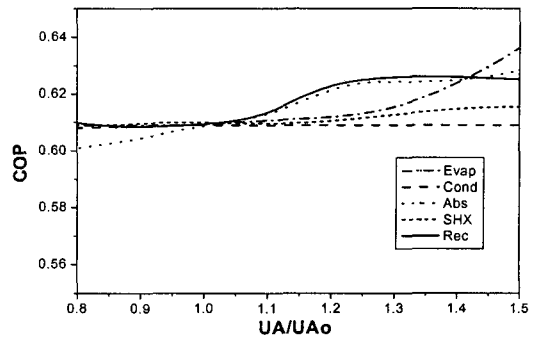


Fig. 7 COP versus UA variation.

기 입구온도변화가 COP에 미치는 영향을 고려하기 위하여 감도분석을 수행하였다. 감도분석에 이용된 사이클의 기준조건은 Table 2에 표시되어 있다. 감도분석시 버너효율은 85%, 냉방용량은 6.1 RT를 기준으로 하였다.

Fig. 7은 각 구성요소의 UA/UAo의 변화에 따른 성적계수변화를 나타낸다. 정류기, 흡수기 및 증발기의 UA가 증가함에 따라 COP가 상승함을 볼 수 있다. 또한 UA/UAo 비율이 1.4까지는 정류기와 흡수기의 UA가 증가함에 따라 COP가 증가하는 것을 볼 수 있고, 특히 정류기의 UA가 COP에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. UA/UAo 비율이 1.4 이상에서는 증발기의 UA가 COP에 가장 큰 영향을 미치게 된다.

Fig. 8은 장거리수송관에서의 입출구온도에 따른 상용 흡수식 시스템(Fig. 2)과 STA 시스템(Fig. 6)의 COP 변화를 나타낸다. 점선은 용액 열교환기에서 내부 열회수에 의해 용액온도가 상온까지 떨어진 경우(A : Heat recovery)의 용액온도변화에 따른 성능변화를 나타낸다. 이 경우에 기존 상용

Table 2 Basic conditions for STA simulation

	UAo (kW/K)	Pressure (kPa)	Temperature (°C)	Concentration (%)
Evaporator	4.741	464	2.3	99.99
1st Desorber	0.057	1108	63.6	52.3
2nd Desorber	0.766	1108	52.9	59
Condenser	4.309	1108	37.3	99.99
Rectifier	0.2	1108	52.9	99.44
Absorber	2.83	464	38.5	23.012
SHX	0.973	1108		
Precooler	0.249	464	12.2	99.99
HX	4.741	1108		

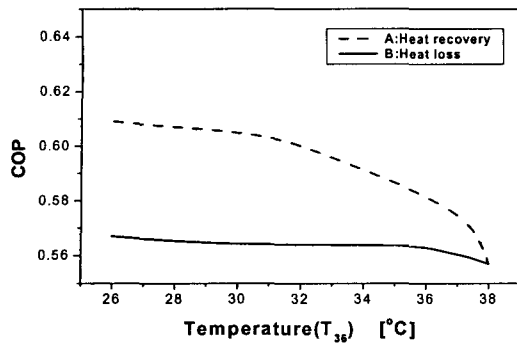


Fig. 8 COP versus temperature ( $T_{36}$ : Absorber inlet temperature).

흡수식 사이클에 비하여 약 10%의 성능향상을 볼 수 있는데 흡수기 입구온도가 26°C일 때 과냉된 약용액에 의해 흡수율이 향상되어 냉매용액비  $M(0.52)$ 이 상대적으로 덜 과냉된 38°C일 때의  $M(0.25)$ 보다 크다. 이는 결국 발생기에서 발생하는 냉매증기량의 증가를 의미하며 COP 향상에 원인이 되는 것이다.

Fig. 8의 실선은 case B에서 36상태점의 온도 변화(B: Heatloss)에 따른 성능변화를 나타낸다. 36상태점의 온도는 37상태점의 유량을 변화하여 제어하였다. 36상태점의 온도감소는 상용 흡수식 시스템의 장거리수송시 외부로의 열손실을 의미한다. 이 경우 열손실이 증가함에 따라 상용 흡수식 사이클에 비하여 COP가 약 3% 증가하였다. 이는 열손실에 의해 과냉된 약용액의 흡수성능이 열손실이 생기지 않은 약용액의 흡수성능보다 크기 때문이다. 결론적으로 과냉된 약용액이 COP에 미치는 영향이 외부로의 열손실보다 커서 COP가 미세하게 증가한다. 위 두 경우의 모사결과를 고려해 볼 때 SHX에서 충분한 내부 열회수를 한 후 STA 구현을 통한 약용액의 과냉, 즉 상온수송이 COP 증가에 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 소요비용평가

본 연구에서는 냉방능력이 5000 RT일 때 현열수송방식과 STA에 의한 잠열수송방식의 소요비용을 비교한다. 감가상각비 등을 고려한 LCA 기법을 통한 경제성 평가는 본 연구에서는 포함되지 않고, 초기설치비용과 운전비용만을 고려하여

Table 3 Cost of pipe and ammonia<sup>(3)</sup>

Diameter	Pipe+insul. materi. (won/m)	Pipe (won/m)	Ammonia (won/kg)
32A	53,881	1352	
50A	62,726	2180	
80A	81,471	3712	
100A	99,322	5303	
150A	118,087	8684	
200A	161,707	13995	1000
300A	241,189	25757	
400A	335,342		
500A	445,243		
700A	765,270		
800A	921,482		
850A	1,024,360		

다음과 같이 비교하였다.

- 잠열수송방식의 총소요비용

$$\text{총비용} = \text{관비용} + \text{NH}_3 \text{ 비용} + \text{펌프일 비용}$$

- 현열수송방식의 총소요비용

$$\text{총비용} = \text{관 및 단열재비용} + \text{물비용} + \text{펌프일 비용} + \text{열손실 비용}$$

단, 현열수송방식의 수송관 내의 물비용은 총비용에 비해 매우 작기 때문에 무시한다.

초기비용에 해당되는 관경크기에 따른 관비용과 암모니아 비용은 Table 3에 제시되어 있다(KSD 3562의 배관용 탄소 강관). 펌프일 비용은 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

용액의 펌프일률은

$$W_p = \dot{m}gH \quad (1)$$

여기서, 수두손실  $H$ 와 마찰계수  $f$ (난류유동시)는 다음과 같이 구해진다.

$$H = f \frac{LV^2}{2Dg} \quad (2)$$

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2.0 \log \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}_D f^{1/2}} \right) \quad (3)$$

펌프일률의 총합은

$$W_{Total} = W_{p01}(L) + W_{p02} + W_{p03} + W_{ap} \quad (4)$$

Table 4 Required mass flow rate for 5000 RT<sup>(4)</sup>

Fluid	Concentration (%)	Mass flow rate (kg/s)
Strong solution	56.60	28.7
Weak solution	10.80	13.9
Refrigerant	99.98	14.8
Hot water	0	264.6

Table 5 Conditions to calculate long distance pumping power<sup>(4)</sup>

	$\eta_p$	$\epsilon$	COP	$Q_{evap}$ (kW)
Latent type	0.85	0.0045	0.609	17584.3
Sensible type	0.85	0.0045	0.55	17584.3

여기서,  $W_{ap}$ 는 시스템의 고압측과 저압측의 압력 차이를 극복하기 위한 펌프일로 다음과 같이 구해진다.

$$W_{ap} = \frac{\dot{m}(p_H - p_L)}{\rho_1} \quad (5)$$

식(4)에서  $W_{p01}$ ,  $W_{p02}$ ,  $W_{p03}$ 는 강용액 및 약용액 수송과 액류 냉매수송에 필요한 펌프일률이다. 식(4)에 의해 총펌프일률을 구하고 펌프구동에 사용되는 비용은 두 사이클이 동일하게 150 원/kWh의 가격으로 계산한다.

Table 4와 Table 5에 펌프일률을 계산하기 위한 열적조건과 펌프효율 등을 나타내었다. 열손실 비용은 현열수송의 열수를 수송하는 과정에서만 발생한다. 그리고 비용은 7068원/(m·년)으로 계산하였다.<sup>(3)</sup>

4.1 소요비용평가 결과

Fig. 9은 수송거리 10 km일 때 현열수송방식의 구동기간에 따른 총비용을 나타낸 결과이다. 구동기간은 매년 냉방기간을 고려하여 총 4개월(6, 7, 8, 9월)로 가정하였다. 구동기간이 1년일 때 관경이 470 mm에서 최소비용 15억원이 소요된다. 구동기간이 늘어날수록 펌프일 비용이 전체비용에 지배적이므로 구동기간이 늘어날수록 최저비용 산정을 위한 관경은 늘어나게 된다.

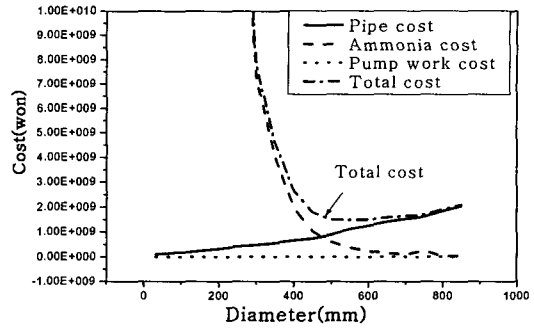


Fig. 9 Cost of sensible energy transportation (10 km, 1 year).

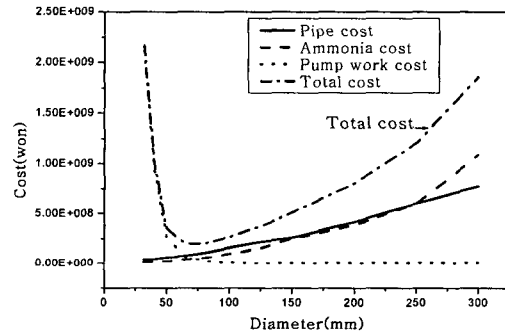


Fig. 10 Cost of latent energy transportation (10 km, 1 year).

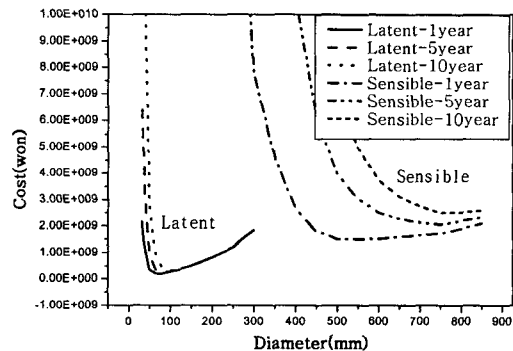


Fig. 11 Comparison of cost between latent and sensible energy transportation (10 km).

Fig. 10는 수송거리 10 km이고 구동기간이 1년일 때 STA에 의한 잠열수송방식의 비용을 나타낸 결과이다. 이 결과 그래프를 통해 최저비용을 산정할 수 있는 관경이 존재함을 알 수 있다. 최저비용은 관경이 65 mm에서 약 2억원이 소요된다.

Fig. 11는 수송거리 10 km일 때 구동기간에 따

른 현열수송방식과 잠열수송방식의 총비용을 나타낸 그래프이다. 잠열수송방식은 상온 에너지수송에 의하여 단열재 불필요 및 질량유량 감소 등의 장점이 있다. 질량유량의 감소에 비례하여 수송관의 관경이 감소하여 관비용과 펌프일 비용이 감소하게 된다. 본 연구결과 현열수송방식에 비해 잠열수송방식의 총비용은 약 7.5배 감소하게 되는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 암모니아-물 흡수식 열수송 시스템의 연구로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 공랭식 단효용 상용 시스템의 감도분석 결과 성적계수에 가장 큰 영향을 주는 유닛은 증발기이다.

(2) 공랭식 상용 시스템의 외기온도에 따른 성능분석시 33℃ 이상일 경우 응축기에서 응축되는 냉매량과 흡수기에서 흡수되는 냉매량이 감소하여 성능저하가 발생한다. 반면 32℃ 이하에서는 증발기의 증발한계로 성능이 일정하다.

(3) STA 모사시 장거리수송관의 내부 열회수를 통해 입·출구온도가 상온(26℃)에 가까워질수록 상용 흡수식 시스템(38℃)에 비해 약 10%의 COP 상승효과를 나타낸다.

(4) 잠열방식의 에너지수송과 현열방식의 에너지수송에는 최저비용을 결정할 수 있는 관경이 존재하고 잠열방식은 구동기간 1년, 거리가 10 km 일 때 관경이 65 mm에서 최저비용 2억원이 소요 되고, 현열방식은 동일조건에서 관경이 470 mm

에서 최저비용 15억원이 소요된다.

(5) 소요비용분석에 의해 잠열방식의 에너지수송은 현열방식의 에너지수송보다 관비용과 펌프일 비용을 줄임으로써 총비용이 약 7.5배까지 감소한다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2001-000-00398-0) 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

1. Kang, Y. T., Akisawa, A., Sambe, Y. and Kashiwagi, T., 2000, Absorption heat pump systems for solution transportation at ambient temperature-STA cycle, The International Journal of Energy, Vol. 25, pp. 355-370.
2. Grossman, G. and Zaltash, A., 2001, Absim-modular simulation of advanced absorption systems, International Journal of Refrigeration, Vol. 24, pp. 531-543.
3. Korea District Heating Engineering Co., 1999, The design standard unit cost of heat pipe 1999, pp. 50-53.
4. Jeon, S. H., Kim, S. S., Hong, H. K. and Kang, Y. T., Simulation of STA and economic analysis, Proc. of the SAREK 2002 Summer Annual Conf., Vol. 2, pp. 990-995.