

# 용액 수송 흡수장치(STA)의 모사 및 경제성평가

전 상 현, 김 성 수, 홍 회 기\*, 강 용 태†

경희대학교 대학원 기계공학과, \*경희대학교 기계산업시스템공학부,

Simulation of STA(solution transportation absorption system)  
and Economic Analysis

Sang Hyun Jeon, Sung Soo Kim, Hiki Hong\*, Yong Tae Kang†

Graduate School, Kyung Hee University,

\*School of Mechanical and Industrial Engineering, Kyung Hee University,

Yong-in, Kyung-gi 449-701, Korea

**ABSTRACT:** The objectives of this paper are to introduce the STA(Solution Transportation Absorption system) and to study the effect of key parameters on the cycle performance and capacity. This paper also compares the conventional NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O absorption cycle to the STA cycle and estimates the initial cost for the H<sub>2</sub>O-LiBr STA and the NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O STA cycle. It is concluded that COP of the STA cycle is 10% higher than that of the conventional cycle, and the solution can be transported to 100km with a transportation tube of 21cm diameter using the STA cycle.

Key words : STA(용액수송흡수장치), NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O cycle(암모니아-물 사이클)  
long distance solution transportation(용액장거리수송), cost analysis(비용분석)

## 기 호 설 명

COP : 성적계수 ( $Q_{evap}/Q_{des}$ )  
P : 압력 (kPa)  
Q : 열전달량 (kW)  
T : 온도 (K)  
UA : 총열관류율 (kW/K)  
 $W_p$  : 펌프일률 (kW)  
x : 농도 (%)  
V : 속도 (m/s)  
C : 비용 (won)  
D : 관경 (cm)  
L : 거리 (km)

$v$  : 체적 ( $m^3$ )  
 $\eta_e$  : 전기효율  
 $\eta_p$  : 펌프효율  
 $\epsilon$  : 관의 표면거칠기 (mm)  
R : 증기생성량/용액투입량 ( $\dot{m}_{ref} / \dot{m}_{s.s}$ )

## 하첨자

abs : 흡수기                      evap : 증발기  
cond : 응축기                   des : 발생기  
SHX : 용액열교환기           pre : 과냉기  
ref : 냉매                       s.s : 강용액  
HX : 열교환기

† Corresponding author  
Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-202-8106  
E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

## 1. 서론

19세기에 시작된 산업화에 의해 생활환경이 발

전되어 왔다. 반면, 산업화의 부산물로 공해 및 에너지고갈의 문제가 대두되었으며 이러한 문제 해결에 관심과 연구가 늘어가고 있다. 이에 따라 공기조화 및 냉동분야에서도 이를 반영하게 되었고, 하계에 주로 이용하게 되는 압축식 냉동시스템은 할로젠냉매의 사용으로 인해 환경적으로 지구 온난화 및 오존층파괴의 단점을 가지고 있으며, 많은 전기소모량으로 인해 하절기의 전력수급에 큰 차질을 빚을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Chloro fluorocarbon (CFC)계 냉매는 이미 사용이 금지되었고, Hydrochlorofluorocarbon(HCFC)계 냉매는 1997년 교토의정서에 의해 2020년부터 사용이 금지된다. 흡수식 냉동기는 자연냉매(H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> 등)를 이용하고 열원에 의해 구동되는 사이클로 압축식 냉동기의 단점을 보완할 수 있는 대안이 될 수 있다. 반면, 위의 장점에도 불구하고 흡수식 냉동기는 주요한 두 가지 단점이 있다. 첫째, 장비설치시 넓은 장비설치면적을 필요로 한다. 이런 이유에서 현재 빌딩 등의 중규모이상의 집단냉방에는 사용되나, 소규모의 개별냉방에는 이용되지 못했다. 둘째, 열원 공급에 따르는 추가문제점을 들 수 있다. 일반적인 흡수식 냉동기는 가스등의 연소에 의한 열을 이용하여 운전한다. 가스관의 설치에는 법적인 제약조건이 따르므로 가스관의 초기설치 및 관리의 어려움이 발생하게 된다. 이에 열원취급이 용이한 장거리수송을 이용한 집단냉방방법이 고안되었다. 집단냉방은 개별냉방에 비해 수요지에서 작동에 필요한 구성부품의 수가 줄어 적은 설치면적이 요구되며 장거리수송에서 열원공급의 비용이 거의 들지 않는 폐열을 이용하므로 경제적으로 시스템을 운전할 수 있다.

본 논문의 연구대상인 STA(Solution Transportation Absorption System)의 개념은 Akisawa<sup>[1]</sup> 등에 의해서 처음으로 제안되었고, 기초연구로 STA의 각 구성부품의 UA의 변화가 성능에 미치는 영향을 나타낸 감도분석<sup>[2]</sup>은 이루어졌으나, 상용 흡수식 시스템과의 성능비교와 환경에 따른 최대수송거리 및 초기설치비용에 대해서는 연구된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 i) 상용 암모니아-물 시스템과 유사한 조건에서의 각 구성부품의 UA의 변화가 성능에 미치는 영향 고찰, ii) 장거리 수송관 입출구의 온도변화에 따른

상용 암모니아-물 시스템과 STA의 성능평가비교, iii) 환경에 따른 최대수송거리 및 초기설치비용평가 등을 목적으로 한다.

## 2. 용액수송흡수식 시스템(STA)

Fig. 1은 장거리 현열수송 방법(a, b) 및 농도차에 의한 장거리 잠열수송(c)의 세 가지 수송방법을 나타낸다.

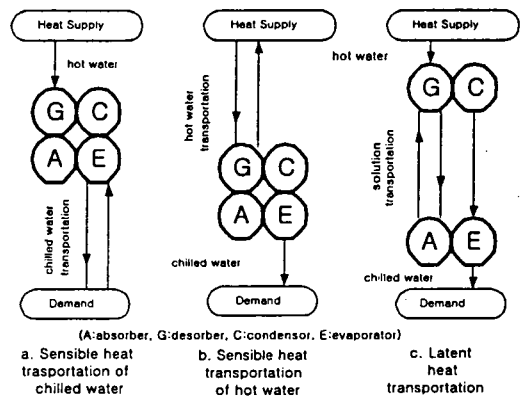


Fig. 1 Concept of STA

a. 와 b. 에서 볼 수 있는 현열수송 방법은 온도차에 따르는 엔탈피차에 의해 냉방을 하게되므로 유량이 많아지게 되어 환경 및 펌프일을 고려할 필요가 있다. 또한 열수 또는 냉수를 장거리수송하므로 많은 양의 단열재가 필요하게된다. 이에 비해 c. 는 위의 문제점을 가지지 않도록 제안된 STA로 명명되는 농도차에 의한 잠열상온수송을 나타낸다.

흡수식 시스템을 이용한 잠열상온수송의 장점을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 발전소 및 공업지대의 폐열에 의해 구동되므로 폐열배출과 가스등의 연소에 따른 환경피해를 줄이고 전력수급을 원활히 할 수 있다. 둘째, 발생기(desorber) 및 응축기(condensor)가 열원지역에 배치되고, 증발기(evaporator) 및 흡수기(absorber)가 거주지역에 배치됨으로써 개별냉방에 비해 적은 설치면적이 요구된다. 셋째, 농도차에 의한 잠열수송을 하게되므로 수송에 드는 냉매 및 용액의 유량이 현저히 줄어들게 되어 용액수송에 드는 환경 및 펌프일을 획기적으로 줄일 수 있다.

### 3. 모델링

본 연구에 이용된 흡수식 모사프로그램으로 ABSIM<sup>[3]</sup>(ABsorption SIMulation)을 사용하였다. Grossman에 의해 개발된 ABSIM은 암모니아-물 및 물-리튬브로마이드 흡수식 사이클을 모델링하는데 유용하게 사용된다. ABSIM은 흡수식 시스템 정상상태모사를 위하여 모듈타입으로 구성된 프로그램이다. 이 모듈타입의 코드는 각 지배방정식에 기초한 각 구성부품에 대한 서브루틴으로 구성되어 있고 작동유체의 열적특성치 서브루틴을 포함하고 있다. ABSIM을 이용한 흡수식 사이클 모델링에서 각 상태점에서의 열적상태 및 각 부속품의 UA 초기치를 결정해야 한다. 모든 초기입력치는 유체의 종류, 질량, 에너지 및 각 구성부품의 열적평형을 확인하여 재계산하는 과정을 거친다. 따라서 열적조건을 수립시키기 위해 초기입력치의 적절한 선택이 중요하다. 수립된 열적조건을 얻은 후 최대의 COP를 얻기 위한 열교환기 크기를 결정하기 위해 감도분석을 실시한다. Fig. 2는 본 연구에서의 사이클 모사를 위한 시스템 개략도를 나타낸다. 여기서 실선과 점선은 각각 액류와 증기의 흐름을 나타낸다. 이 사이클의 주안점은 흡수기와 용액열교환기 사이의 강용액, 약용액 및 증축기에서 과냉기로 들어가는 액류냉매를 장거리관을 이용하여 수송하게 되므로, 장거리관의 입출구온도를 제어할 필요가 있다. 이 장거리관의 역할을 하는 구성부품이 열교환기(Heat eXchanger: HX)이다.

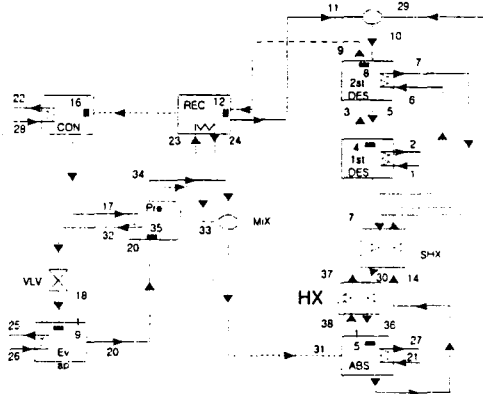


Fig. 2 System diagram for cycle modeling of STA

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 사이클 PTx 선도

Fig. 3은 기존의 암모니아-물 시스템 및 STA의 PTx선도를 나타낸다. 본 논문에서 언급되는 강용액은 냉매의 농도가 상대적으로 높은 용액을 의미하며, 약용액은 냉매의 농도가 상대적으로 낮은 용액을 의미한다. PTx 선도에서 보는 바와 같이 기존의 시스템과 STA시스템의 사이에는 흡수기입출구온도와 농도폭에서 큰 차이점을 보인다. STA시스템에서는 약용액이 용액열교환기(SHX)를 거친 후 흡수기로 유입되기 전에 상온까지 과냉된다. 또한 발생기를 거친 약용액과 흡수기에서 생성된 강용액의 농도차가 두 사이클에서 큰 차이를 보이고 있다. 이는 상용 암모니아-물 시스템 경우 과냉이 되지 않은 약용액은 흡수 과정을 거칠 때 STA시스템의 과냉된 약용액보다 흡수능력이 떨어지기 때문이다. 즉, 흡수율차이에 의해 농도폭이 다르게 나타나게 된다.

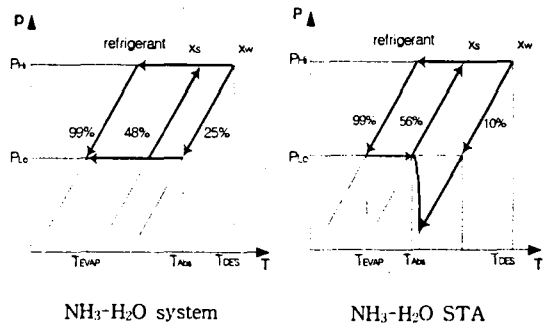


Fig.3 PTx diagram of NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O system and STA

#### 4.2 감도분석

본 연구에서는 각 구성요소의 UA변화와 흡수기 입출구온도변화가 COP와 용량에 미치는 영향을 고려하기 위하여 감도분석을 수행하였다. 감도분석에 이용된 사이클의 기준조건은 Table 1.에 표시되어 있다. 감도분석시 버너효율은 85%, 냉방용량은 6.1RT를 기준으로 하였다.

Fig. 5는 각 구성요소의 UA/UA<sub>0</sub>의 변화에 따른 COP변화를 나타낸다. 정류기, 흡수기 및 증발기의 UA가 증가함에 따라 COP가 상승함을

볼 수 있다. 그 이유는  $UA_{rec}$ ,  $UA_{abs}$  및  $UA_{evap}$ 가 증가함에 따라 같은 열량의  $Q_{des}$ 에 대하여 발생기에서 강용액의 탈암모니아화율이 높아 많은 증기냉매가 생성되어  $Q_{evap}$ 가 증가하기 때문이다. 또한  $UA/UA_0$  비율이 1.4까지는 정류기와 흡수기의  $UA$ 가 증가함에 따라 COP가 증가하는 것을 볼 수 있고, 특히 정류기의  $UA$ 가 COP에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.  $UA/UA_0$  비율이 1.4이상에서는 증발기의  $UA$ 가 COP에 가장 크게 영향을 미치게 된다.

Table 1 Base run conditions

|              | $UA_0$<br>(kW/K) | Pressure<br>(kPa) | Temperature<br>(°C) | Concentration<br>(%) |
|--------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| 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                   |
| Condensor    | 4.309            | 1108              | 37.3                | 99.99                |
| Rectifier    | 0.2              | 1108              | 52.9                | 99.44                |
| Absorber     | 2.83             | 464               | 88.5                | 23.012               |
| SHX          | 0.973            |                   |                     |                      |
| Precooler    | 0.249            | 464               | 12.2                | 99.99                |
| HX           | 4.741            |                   |                     |                      |

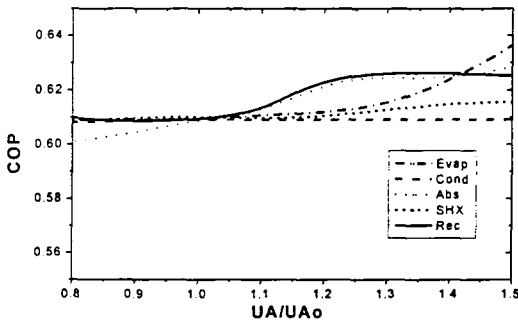


Fig. 5 COP versus  $UA$  variation

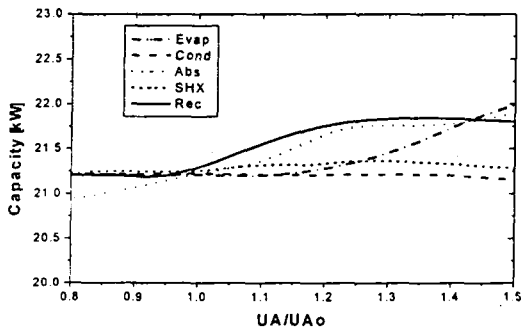


Fig. 6 Capacity versus  $UA$  variation

Fig. 6은 각 구성요소의  $UA$ 변화에 따른 사이클용량을 나타낸다. COP변화와 같이  $UA_{rec}$ 의 영향이 사이클용량에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 설정된 STA사이클의 조건에서 COP의 상승을 위해서  $UA_{rec}$ 의 선택이 중요한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 장거리수송관에서의 입출구온도에 따른 일반 흡수식시스템과 STA시스템의 COP경향을 나타낸다. 점선은 용액열교환기에서 내부열회수에 의해 용액온도가 상온까지 떨어진 경우(A: Heat recovery)의 용액온도변화에 따른 성능을 나타낸다. Fig. 2의 30 상태점과 36 상태점의 온도가 26~38°C범위에서 동일하게 변화할 때의 결과이다. 즉, 모사에서는 Fig. 2의 30 상태점 온도가 38°C의 경우는 일반 흡수식 시스템을 뜻하고 26°C일 때는 장거리수송관의 단열이 필요없는 STA시스템을 나타낸다. 이 경우에 종래의 일반 흡수식사이클에 비하여 약 10%의 성능향상을 볼 수 있다. 이는 흡수기입구온도가 26°C일 때 더욱 과냉된 약용액에 의해 흡수력이 향상되어 R(0.52)이 상대적으로 덜 과냉된 38°C일 때의 R(0.25)보다 크다. 결과적으로 26°C일 때 동일한 외부열원에 의해 생성되는 냉매증기량이 38°C보다 많다는 것을 의미하고 이것이 COP향상의 원인이 되는 것이다.

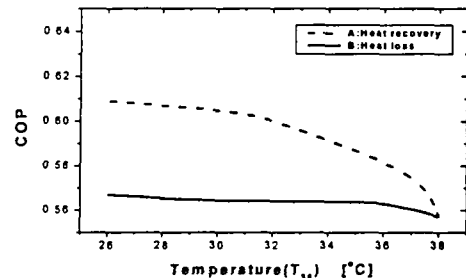


Fig. 7 COP versus Temperature( $T_{36}$ )

또한 Fig. 7의 실선은 Fig. 2의 30 상태점의 온도를 38°C로 고정한 후 36 상태점의 온도변화(B:Heat loss)에 따른 성능을 나타낸다. 36 상태점의 온도는 37 상태점의 유량을 변화하여 제어하였다. 일반 흡수식 시스템의 용액 열교환기를 거치는 약용액의 온도가 38°C내외이므로 Fig. 2.

에서 36 상태점의 온도가 38℃로 유지된다. 또한 36 상태점 온도가 하락하는 경우를 고려한 것은 STA의 장거리수송에 따른 열손실이 발생하는 경우를 뜻한다. 장거리수송에 따른 열손실이 발생하는 경우는 열손실이 발생하지 않는 경우에 비해 COP의 미약한 증가를 가져온다. 이는 장거리수송시 열손실에 의한 더욱 과냉된 약용액의 흡수력이 열손실이 생기지 않은 덜 과냉된 약용액의 흡수력보다 크기 때문이다. 결론적으로 약용액의 과냉이 COP에 미치는 영향이 외부로의 열손실보다 커서 COP가 미세하게 증가한다.

### 5. 관경에 따른 펌프일 및 경제성평가

본 연구에서는 실제적인 STA시스템의 출력냉방 열량을 펌프일률로 환산하여 냉방능력이 2000 RT 일 때 관경에 따른 최대수송거리를 계산한다.

용액의 펌프일률은 다음과 같이 정리된다.

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

수두손실  $H$ 는 다음과 같이 계산되고

$$H = f \frac{LV^2}{D2g} \quad (2)$$

여기서, 마찰계수  $f$ 는 다음과 같이 정의된다.

- 층류유동

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (3)$$

- 난류유동

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2.0 \log \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re_D f^{1/2}} \right) \quad (4)$$

한편, 펌프일률의 비용보다 높은 출력을 얻는 시스템이 경제적이므로 다음조건을 만족하도록 최대 수송거리를 결정한다.

$$\frac{W_{p01}(L) + W_{p02}(L) + W_{p03}(L) + W_{op}}{\eta_e \eta_p} \leq \frac{Q_{evap}}{COP} \quad (5)$$

여기서  $W_{op}$ 는 시스템의 고압측과 저압측의 압력차이를 극복하기 위한 펌프일이다.

$$W_{op} = \frac{\dot{m}_1(P_{Hi} - P_{Lo})}{\rho_1} \quad (6)$$

식(5)에서  $W_{p01}$ ,  $W_{p02}$ ,  $W_{p03}$ 는 강용액 및 약용액 수송과 액류냉매수송에 필요한 펌프일률이다. Table 2와 Table 3에 펌프일률을 계산하기 위한 열적조건과 펌프효율 등을 나타내었다. Fig. 8은 2000RT 기준시스템에서 관경에 따른 최대수송거리를 나타낸다. 최대수송거리는 각 상태점의 물성

치와 식(5)를 이용하였다. 결과에서 관경의 증가함에 따라 최대수송거리도 증가함을 알 수 있다. 이는 관경의 증가에 따라 속도가 줄어들고, 식(1) 및 식(2)에 의해 주어진 시스템의 냉방용량에 대하여 관경과 펌프일률은 반비례하게 되며, 펌프일률이 적어질수록 최대수송거리는 증가하게 된다. 본 연구의 조건에서는 관경이 17cm내외에서 50km, 21cm내외에서 100km까지 상온에서 장거리수송이 가능함을 나타내고 있다.

Table 2 Required mass flow rate for 2000 RT

| Fluid           | Concentration(%) | Mass flow rate(kg/s) |
|-----------------|------------------|----------------------|
| Strong solution | 56.60            | 11.47                |
| Weak solution   | 10.80            | 5.57                 |
| Refrigerant     | 99.98            | 5.90                 |

Table 3 Conditions to calculate long distance pumping power

|       | $\eta_e$ | $\eta_p$ | $\epsilon$ | COP   | $Q_{evap}$ (kW) |
|-------|----------|----------|------------|-------|-----------------|
| Value | 0.85     | 0.85     | 0.0045     | 0.609 | 21.4            |

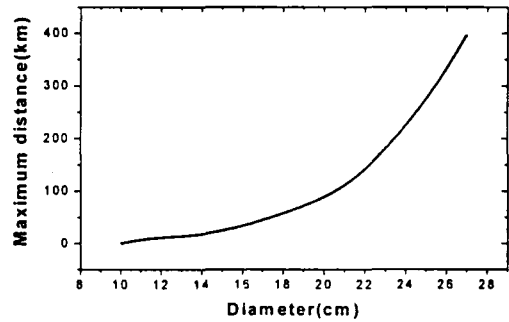


Fig. 8 Maximum distance versus diameter

다음으로 관경에 따른 물-리튬브로마이드 ST A 시스템과 암모니아-물 STA시스템의 초기설치비용을 고려하여 경제성을 평가한다. 냉방능력 2000RT를 기준으로 거리가 50km일 때 STA시스템의 초기 설치비용을 장거리수송관의 비용과 수송관내의 용액의 비용의 합으로 계산하였다. 암모니아-물 STA시스템에는 KSD 3562의 배관용탄소강관, 물-리튬브로마이드 STA시스템에는 K SD 5301의 배관용 동관을 사용한다.

$$C_{initial} = C_{pipe} + C_{solution} \quad (7)$$

$$v_{pipe} = \frac{\pi}{4} D^2 \times L_{pipe} \quad (8)$$

$$m_{total} = \rho v_{pipe} \quad (9)$$

$$x = \frac{m_{ref}}{m_{total}} \quad (10)$$

식(8)에 의한 각 수송관의 부피와 Table 4의 농도와 온도(26°C)로 밀도를 계산한 후, 식(9)에 의해 각 관에 필요한 용액의 총질량을 계산한다. 계산된 총질량으로 식(10)을 이용하여 각 관의 비용계산에 쓰이는 유체질량( $m_{ref}$ )을 구한다. 유동에 쓰이는 암모니아 및 리튬브로마이드의 총비용은 세 수송관 내의 각 유체질량의 합이므로 Table 5의 자료를 이용하여 유체비용을 계산하고 Table 5에 의해 관의 비용을 계산한다. 마지막으로 총비용은 식(7)에 의해 용액비용과 관비용의 합으로 계산한다.

Table 4 Required concentration for 2000 RT

| System           |             | H <sub>2</sub> O-LiBr STA <sup>[2]</sup> | NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O STA |
|------------------|-------------|--|---------------------------------------|
| Concentration(%) | Strong Sol. | 49.0                                     | 56.6                                  |
|                  | Weak Sol.   | 57.0                                     | 10.8                                  |
|                  | Refrigerant | 100                                      | 99.9                                  |

Table 5 Material cost for NH<sub>3</sub>-STA and LiBr-STA

| Diameter(mm) <sup>[4]</sup> | 15   | 20   | 25   | 32   |
|-----------------------------|------|------|------|------|
| NH <sub>3</sub> -STA        | 1108 | 1436 | 1872 | 2627 |
| LiBr-STA                    | 1532 | 2430 | 3507 | 4743 |

| Diameter(mm)         | 40                               | 50                               |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| (Won/m)              |                                  |                                  |
|                      | Solution <sup>[3]</sup> (Won/kg) |                                  |
| NH <sub>3</sub> -STA | 3289                             | 4222                             |
| LiBr-STA             | 6110                             | 9393                             |
|                      |                                  | Solution <sup>[3]</sup> (Won/kg) |
|                      |                                  | 1000(99.5%)                      |
|                      |                                  | 3200(55%)                        |

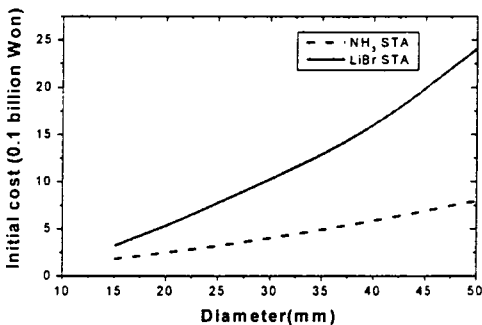


Fig. 9 Diameter versus initial cost (50 km)

Fig. 9는 관경에 따른 초기설치비용을 나타낸다. 이는 물-리튬브로마이드 STA시스템 및 암모니아-물 STA시스템의 초기비용을 고려한 경제성 유무를 판단하는 지표가 된다. Table 5의 자료에서 물-리튬브로마이드 STA시스템은 관비용 및 용액비

용이 암모니아 STA시스템에 비해 상대적으로 높아 초기비용에 한해서 암모니아-물 STA가 물-리튬브로마이드 STA보다 유리한 것으로 나타났다.

## 6. 결론

본 연구에서는 암모니아-물 STA시스템에 대한 연구로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 각 구성부품의 UA변화에 따른 COP에 가장 큰 영향을 미치는 구성부품은 정류기이다.

(2) 장거리수송관의 입출구온도가 상온(26°C)에 가까울수록 상용 흡수식시스템(38°C)에 비해 10%의 COP증가가 있으며, 장거리 수송관의 단열이 있는 STA시스템은 파냉에 의한 흡수율 상승에 의해 상용 흡수식시스템에 비해 미약한 COP 상승의 결과를 가져온다.

(3) 직경 21cm내외의 수송관에서 100km까지 장거리 수송이 가능하다.

(4) 장거리수송관의 초기설치비용에 해당하는 용액 및 수송관 비용의 합의 비교에 의해 암모니아-물 STA시스템이 물-리튬브로마이드 STA시스템보다 유리한 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2001-00398)지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1]. A. Akisawa, T. Kashiwagi, 1997, Long distance heat transportation at normal temperature based on the principle of absorption chiller, Refrigeration (in Japanese), Vol. 72, pp. 33-37.
- [2]. Y.T. Kang, A. Akisawa, Y. Sambe, T. Kashiwagi, 2000, Absorption heat pump systems for solution transportation at ambient temperature - STA cycle, The International Journal of Energy, Vol. 25, pp. 355-370.
- [3]. Grossman, G. and Zaltash, A., 2001, Absim-modular simulation of advanced absorption systems, International Journal of Refrigeration, Vol 24, pp. 531-543
- [4]. Cost of carbon steel pipe and copper pipe, [http://www.steel-n.com/esales/index\\_kr.html](http://www.steel-n.com/esales/index_kr.html)
- [5]. Personal communication, SK science, M. K. Yang