

LCC 분석에 의한 상온 에너지수송용 흡수식 냉동기(STA)의 경제성 평가

오 민 규, 이 봉 진, 홍 희 기*, 강 용 태*†
경희대학교 대학원 기계공학과, *경희대학교 기계산업시스템공학부

Life-Cycle Cost Analysis of Solution Transportation Absorption System

Min Kyu Oh, Bong Jin Lee, Hiki Hong*, Yong Tae Kang*†

Graduate School, KyungHee University, Yong-in 449-701, Korea

*School of Mechanical and Industrial Engineering, KyungHee University, Yong-in 449-701, Korea

(Received February 17, 2004; revision received March 30, 2004)

ABSTRACT: The objective of this paper is to evaluate the economic performance of latent and sensible energy transportation systems. LCC (Life-Cycle Cost) analysis is a practical method and a guideline for evaluating the economic performance of considered systems during the Life-Cycle Period. By comparing the LCC of alternatives, The most ideal alternative is determined which has the lowest LCC. It is concluded that the cost of STA (Solution Transportation Absorption system) can be reduced by 67% to that of sensible energy transportation for study period with 10 km transportation distance.

Key words: STA(상온 에너지수송용 흡수식 냉동기), Long distance solution transportation(용액 장거리수송), Life-cycle cost analysis(생애주기 비용분석)

기 호 설 명

COP : 성능계수, Q_{evap}/Q_{des}
D : 관경 [m]
f : 마찰계수
L : 관의 길이 [m]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
Q : 열전달량 [kW]
Re : Reynolds 수, $\rho VD/\mu$
V : 속도 [m/s]
W : 펌프일률 [kW]

그리스 문자

ε : 관의 표면거칠기 [m]

1. 서 론

최근 세계는 에너지의 효율적 사용 및 절약에 큰 관심을 가지고 있다. 산업이 고도화됨에 따라 에너지소비형 시스템은 기하급수적으로 증가하고 있으며, 현존하는 시스템의 에너지절약은 모든 산업에 지대한 관심으로 떠오르고 있다. 따라서 에너지의 체계적이고 효율적인 사용이 가능한 에너지절약형 시스템의 개발은 매우 중요한 과제로 인식되고 있다.

본 연구에서는 에너지의 효율적 사용의 중요한 요소인 에너지수송에 관련된 상온 에너지수송용

† Corresponding author

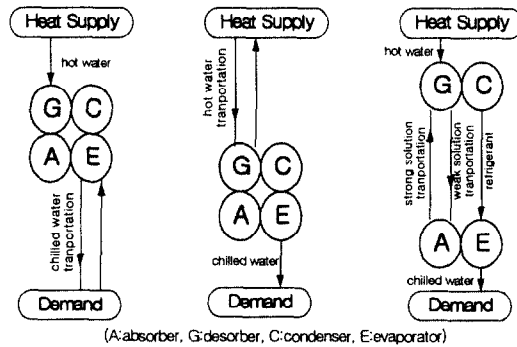
Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-202-8106

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

흡수식 냉동기(Solution Transportation Absorption system, STA)⁽¹⁾를 연구하였다. STA는 기존의 현열수송방식과 달리 상온 에너지를 용액의 농도차를 이용하여 수송하므로 에너지수송시 소요되는 비용을 최소화할 수 있다. 이런 에너지절약형 시스템의 상용화 및 구현 가능성을 가능하기 위해 생애주기비용 분석기법(Life-cycle cost analysis)⁽²⁻³⁾을 사용하였다. 생애주기비용 분석기법은 동일 분석기간 동안 발생하게 되는 시설물의 초기투자, 운영 및 유지관리, 최종적인 처분에 이르는 모든 비용을 고려하여 현재의 가치로 환산하고, 이를 통해 가장 경제적인 대안을 선정하는 데 매우 유용하게 사용된다. 따라서 본 연구에서는 기존의 현열수송방식인 지역 냉·난방 시스템과 상온 잠열수송방식인 STA의 수송설비에 초점을 맞추었으며, 생애주기비용 분석기법을 이용하여 두 시스템에 고려되는 모든 비용을 고찰하여, 이에 대한 결과를 비교·분석함으로써 STA 경제성을 평가하는 것을 목적으로 한다.

2. 용액수송 흡수식 시스템(STA)

Fig. 1은 온도차에 의한 현열수송(a, b) 및 농도차에 의한 잠열수송(c)의 개념을 나타낸다. Fig. 1에서 (a)와 (b)의 경우는 기존의 현열수송방식으로서 열수 또는 냉수를 장거리 수송한다. 이 방식은 잠열수송방식에 비해 유량이 증가하고 값비싼 단열재가 필요하게 된다. 이에 비해 (c)의 경우는 농도차에 의한 잠열수송으로서 외기온도



(a) Sensible heat transportation of chilled water (b) Sensible heat transportation of hot water (c) Latent heat transportation of chilled water

Fig. 1 Concept of STA.

와 동일한 상온에서 에너지수송이 이루어진다.⁽¹⁾ 따라서 현열수송과 달리 단열재가 불필요하게 되며 유량이 감소하게 되어 펌프동력비를 줄일 수 있다.⁽⁴⁾

3. 대안선정

STA의 경제성평가를 위해 본 연구는 현재 국내에 보급되어 운영되고 있는 지역 냉·난방 시스템의 열수송 설비와 직접적인 비교·분석을 통해 최소 LCC를 갖는 대안을 도출하고자 한다.

Fig. 2은 지역 냉·난방 설비를 나타내는 개략도이다. 지역 냉·난방 시스템(District Heating & Cooling System, DHCS)은 가스터빈을 이용한 1차 발전 후 발생하는 배열과 보일러에서 생산된 고온(535℃), 고압(101 kg/cm²)의 증기로 증기터빈을 운전하여 2차 발전기에서 전력을 생산하고 터빈에서 일을 하고 나온 증기의 열에너지를 추출하여 공장의 공업용 증기 등으로 사용한다. 대규모 열병합시설의 경우 증기 대신 온수를 생산하여 배관망을 통하여 아파트단지, 대단위 건물 등에 난방열을 공급하게 되며, 여름철에는 고온수를 공급하여 H₂O/LiBr 흡수식 냉동기를 가동시켜 상업 및 업무용 시설에 냉방을 제공한다.

Fig. 3은 STA 시스템을 나타내는 개략도이다. STA 시스템은 DHCS을 기준으로 하여 발전설비, 냉·난방 설비, 수송설비, 그리고 수요지 설비로 나뉘며 발전설비의 경우는 지역 냉·난방 설비와 동일한 조건으로 설계된다. STA는 발전

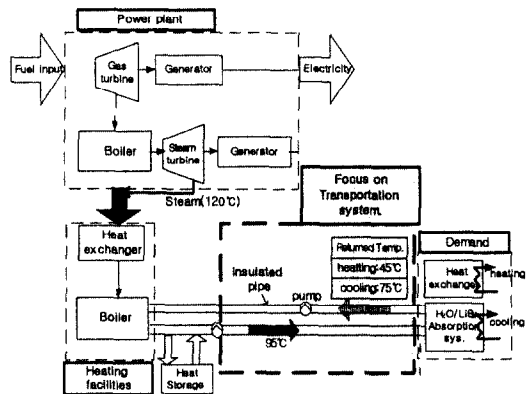


Fig. 2 Schematic diagram of district heating & cooling system (DHCS).

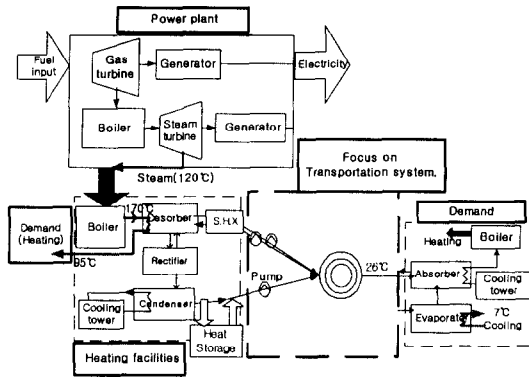


Fig. 3 Schematic diagram of STA system.

후 발생하는 폐열원을 추출하여 냉·난방 수요지에 공급하게 된다. STA 시스템은 DHCS와는 달리 이 성분 혼합물의 자연냉매인 암모니아/물을 이용하여 공급지에 발생기와 응축기를 설치하고 수요지에 흡수기와 증발기를 분리시켜 위치시킨다.

Fig. 2와 Fig. 3을 통해서 살펴본 두 시스템의 가장 큰 차이점은 에너지수송방식에 있다. DHCS은 현열수송방식이고, STA 시스템은 잠열수송방식이다. 따라서 LCC 분석시 각 대안의 선정 고려범위는 두 시스템의 가장 큰 차이점인 수송방식에 초점을 맞추어 수행하였으며, 그외 다른 설비들은 동일조건으로 고려하였다. 즉, DHCS와 STA 시스템의 경제성을 평가하기 위해 수송설비만을 고려하였다.

경제성 평가시 고려되는 기본조건은 냉방용량 5,000 RT, 수송거리 10 km를 기준으로 DHCS와 STA 시스템을 Table 1과 Table 2에 정리하였다. STA 시스템의 경우 세 개의 수송 라인에 각각 펌프가 설치되어 있고, 농도차에 의한 상온 잠열수송을 하기 때문에 열손실은 존재하지 않는다.

Table 1 Basic condition for economic estimation

System	Number of pipe	Number of pump	Heat loss
STA	3	3	None
DHCS	2	2	Considered

Table 2 Required mass flow rate for 5,000 RT

Items	DHCS	STA	STA	Refrigerant
Fluid	Hot water	Strong	Weak	
Concentration [%]	100	58	10	99.9
Mass flow rate [kg/s]	416.65	26.49	14.5	12.34

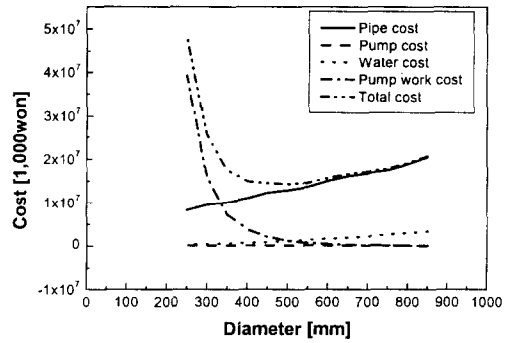


Fig. 4 Cost of DHCS.

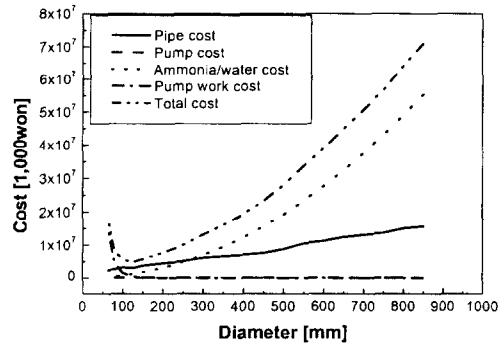


Fig. 5 Cost of STA system.

이에 비해 DHCS은 공급 및 회수 관에 각각 펌프가 설치되고 중·고온수를 수송함으로써 외부로의 열손실이 발생하게 된다.

본격적인 LCC 분석에 앞서 냉방용량 5,000 RT, 수송거리 10 km를 기준으로 배관자재비 및 공사비, 에너지수송에 따른 펌프 동력비, 암모니아 수용액 비용의 가격을 조사하였다. 조사된 비용을 관경을 기준으로 단순히 합산한 결과 Fig. 4 및 Fig. 5와 같이 DHCS은 관경이 500 mm, STA 시

시스템의 경우 125 mm일 때 최소비용이 나타났으며, 이를 경제성 평가시 각 대안의 기준설계값으로 결정하였다.

4. LCC 분석수행

4.1 분석기간

본 연구의 LCC 분석에서는 2003년 10월 현재를 가격 기준시점으로 하고, 분석기간은 법인세법에 근거를 두어 화력발전설비 기준인 20년으로 하였다. 시스템 구축을 위한 건설기간은 기존 집단 에너지사업의 통상적인 건설기간을 근거로 2년을 적용하였다. 따라서 LCC 분석을 수행하기 위한 분석대상기간은 2003년 10월부터 2025년 10월까지로 설정하였다.⁽⁵⁾

4.2 주요 비용

4.2.1 대안별 에너지 비용산정

두 시스템의 가동시간은 연중 냉방기간(6월 15일부터 9월 15일까지 4개월)으로 하여 92일(2,208 시간) 동안 24시간 연속운전을 하는 것으로 설정하였으며,⁽⁶⁾ Table 3에 펌프일률을 계산하기 위한 열적 조건과 펌프효율 등이 나타나있다.

펌프 일에 대한 소요비용은 다음과 같은 식으로 계산된다. 용액의 펌프일률은 다음과 같다.

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

여기서 수두손실 H 와 난류유동시 마찰계수 f 는 식(2), (3), (4)을 이용하여 구할 수 있다.

$$H = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

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

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4)$$

STA 시스템의 경우 펌프일률의 총합은 다음과 같다.

$$W_{total} = W_{s1} + W_{s2} + W_{s3} \quad (5)$$

Table 3 Conditions to calculate pumping power

Items	DHCS	STA
Operation time of a year [hr]	2,208	2,208
Diameter [mm]	500	125
Transportation distance [km]	10	10
Roughness [mm]	0.046	0.046
COP	0.7	0.61
Pump [EA]	2	3
Pump efficiency [%]	85	85
Consumption of electric power per hour [kWh]	526.2	209
Total consumption of electric power of operation time [MWh]	1,161.9	461.9
Total energy cost for a year [1,000 won]	76,102	30,257

식(5)에서 W_{s1} , W_{s2} , W_{s3} 는 각각 강용액, 약용액 및 냉매수송에 필요한 펌프일률이다.

DHCS의 경우 펌프일률의 총합은 다음과 같다.

$$W_{total} = W_{d1} + W_{d2} \quad (6)$$

식(6)에서 W_{d1} , W_{d2} 는 각각 열수 공급, 회수시 필요한 펌프일률이다. Table 3에 각 대안별 에너지비용 계산결과가 나타나 있다. 에너지비용 산정결과 DHCS의 경우 약 7,600만원, STA 시스템의 경우 약 3,000만원의 에너지비용이 소요되는 것으로 나타났다. 즉, STA 시스템이 DHCS에 비해 연간 약 60%의 에너지비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

4.2.2 초기투자비용

초기투자비용의 산출은 분석시점에서의 현재가격으로 이루어지며, 실제 시공을 담당하였던 건설업체의 견적자료를 기준으로 산출한다.

(1) 배관 자재 및 공사비

DHCS의 경우 열손실을 고려하여 이중보온관을 사용하며, 이에 비해 STA 시스템은 상온수송으로서 외부로의 열손실이 존재하지 않기 때문에 단열재를 사용하지 않는 일반 강관을 사용하였다. 지역냉·난방용 강관은 KS 규격(KSD-3562, SPSS 38) 제품을 사용한다. 본 연구의 LCC 분석에서 대안들의 배관공사시 토사구간과 도로구

Table 4 Piping work cost of both systems

Items	DHCS	STA
Diameter [mm]	500	125
Distance [km]	10	10
Number of transportation lines	2	3
Material cost per length [won/m]	413,447	48,194
Construction cost of sand/road [won/m]	878,575	249,401
Total Piping work cost per length [won/m]	1,292,022	297,595
Total Piping work cost [1,000 won]	12,920,219	2,975,949

간은 전체 배관공사의 각각 50%를 차지하는 것으로 가정하였다. DHCS와 STA 시스템의 배관공사비가 Table 4에 나타나 있다.

(2) 펌프

대안들의 기본설계를 기초로 펌프의 양정과 유량에 해당하는 펌프용량을 선정하였다. 그러나 펌프가격 조사과정에서 기기의 종류별, 업체별로 가격 차이가 큰 것으로 나타났으며, 특히 암모니아/물 용액이 작동유체인 STA 시스템의 경우는 펌프의 개별 제작을 해야 한다는 어려움 때문에 정확한 펌프가격 선정이 어려웠다. 펌프가격의 조사결과가 Table 5에 나타나 있다.

(3) 용액

DHCS에 배관 내 흐르는 열수는 상수도 공업용 효율체계를 따르는 것으로 1m³당 300원을 적용하였다.⁽⁷⁾ STA 시스템의 경우 암모니아/물 용액 28%를 충전하는 경우를 고려하였으며, 가격조사결과 2003년 10월 현재기준 암모니아/물 용액은 1m³당 325만원이다.⁽⁷⁾ 대안별 용액비용은 Table 6에 정리하였다.

4.2.3 기타 비용

DHCS은 2003년도 에너지이용 합리화 사업을

Table 5 Pump cost of both systems

Items	DHCS (1,000 won)	STA (1,000 won)	
Pump [EA]	2	2 (Ref., Weak)	1 (Strong)
Cost/EA	90,000	20,000	40,000

Table 6 Solution cost of both systems

Item	DHCS (won/m ³)	STA (1,000 won/m ³)
Cost	300	3,250

위한 자금지원 지침(산업자원부 공고 2002-239호 2003.1.7)을 적용받고 있다. STA 시스템 또한 전기 대체 냉방시설의 범주에 속하므로 이 자금의 지원을 받을 수 있다고 가정하였으며 이에 대한 내용을 Table 7에 정리하였다.⁽⁸⁾

집단에너지 사업투자비는 Table 8과 같이 시설분담금(수요자 부담)의 비율이 전체 투자비의 대비를 에너지특별기금 용자, 시설자금 용자, 자체자금약 60% 안팎을 차지하고, 나머지 약 40%의 투자 등(공급자 부담)으로 할당하게 된다.

기존 DHCS의 경제성 분석에 일반적으로 고려해야 할 기타 비용은 차입금에 대한 이자율 및 상환방법, 감가상각, 보험료, 인건비, 수선유지비 등이 있다. 차입금은 전체 투자비의 40% 수준이며, 2003년 10월 기준 8년 거치 7년 분할상환으로 연리 4.00%를 적용하였다. 보험료는 한국보험개발원의 보험요율을 기준으로 시설투자비의 0.166%하였으며, 수선유지비는 한국지역난방공사의 실적을 적용하여 기기 설비비의 1.4%로 하였다. 감가상각은 법인세법 제16조 12호의 유형고정자산에

Table 7 Subsidiary for energy project

Support rates	Interest rates	Period of loan
100%	4.00%	Redemption by installment for 7 years with a 8-year grace period

Table 8 Investment cost of DHCS (Unit: million won)

Section	1998	1999	2000	Total	Rate(%)
Supplier	3,743	8,008	3,743	15,494	36.6
Demander	9,052	9,052	9,052	27,156	63.7
Total	12,795	17,060	12,795	42,650	100.0

대한 잔존가치 및 감가상각법 기준으로 투자비의 20년 정액법으로 잔존가치 10%를 적용하였다.

4.2.4 비용변동요소의 고려

대안의 LCC 분석에 있어서는 여러 가지 가격 변동요소에 대한 고려가 필요하다. 미래에 발생하게 될 비용을 현재의 가치로 환산하기 위한 현금할인율의 산정은 식(7), (8)을 통해 실질이자율을 도출할 수 있다.

$$i_p = i + I + iI = i(1 + I) + I \quad (7)$$

$$\therefore i = \frac{(i_p - I)}{1 + I} \quad (8)$$

여기서, i 는 실질이자율, i_p 는 명목이자율, I 는 인플레이션율이다. 1996년부터 2002년까지 한국은행의 장기예금(5년) 이자율의 인상률 추이를 근거로 명목이자율을 8.45%로 산정하고, 1981년부터 2003년까지 소비자 물가지수의 인상률 추이를 근거로 물가상승률 4.79%를 감안하여 실질이자율을 도출한다.

5. LCC 분석결과

LCC 분석은 초기비용, 에너지비용 등 각종 요소를 고려하여 총비용으로 합산한 후 최소 LCC를 선정하고, 관경, 수송거리, 용액비 등에 따른 민감도 분석을 수행한다.

5.1 최소 LCC 선정

냉방능력 5,000 RT, 수송거리 10 km를 기준으로 DHCS의 경우 관경 500 mm, STA의 경우 관경 125 mm 구간에서 총 LCC를 Table 9에 정리

Table 9 Results of life-cycle cost analysis (Unit: 1,000 won)

Items	DHCS	STA
Initial cost	13,512,560	4,380,507
Energy cost	1,088,884	432,930
OM & R	2,722,223	883,573
Remaining value	-439,185	-144,105
Total LCC	16,884,482	5,552,905

하였다.

LCC 분석결과 초기투자비는 지역 냉난방 시스템이 130억원, STA 시스템이 이보다 87억원이 적은 43억원으로 도출되었다. 에너지비용은 현열수송방식이 11억원, 상온잠열수송방식의 경우 4억원이며, 20년간 약 7억원의 에너지비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 STA 시스템이 기존방식에 비해 약 114억원의 순익을 나타냈으며, 경제적인 대안임을 확인할 수 있다.

5.2 민감도 분석

Fig. 6은 관경변화에 따른 총 LCC 변화를 나타내는 그래프이다. DHCS의 경우 기준설계과정에서 최소비용을 보일 것으로 예상했던 500 mm보다 400 mm로 변경하였을 때 최소 LCC를 가지는

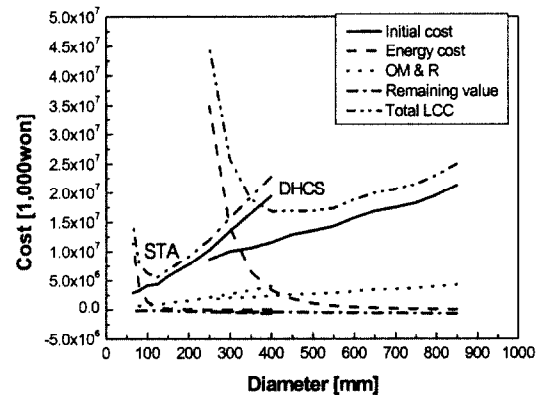


Fig. 6 Sensitivity analysis for pipe diameter.

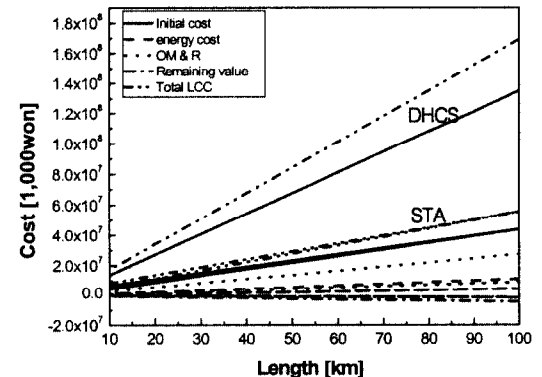


Fig. 7 Sensitivity analysis of transportation distance.

것으로 나타났으며, STA 시스템의 경우 기준설 계조건 125mm일 때 가장 적은 비용을 갖는 것 으로 나타났다. 결국 관경에 따른 민감도 분석시 대안별 최소 LCC는 DHCS은 관경 400mm에서 약 168억원, STA의 경우 관경 125mm에서 약 55억원으로 산정되었다.

Fig. 7은 수송거리에 따른 총 LCC 변화를 나타 내는 그래프이다. Fig. 7을 보면 DHCS의 총 LCC 변화율이 STA 시스템에 비해 높은 것을 알 수 있다. 수송거리 1km 변경시 DHCS의 경우 16억 8,000만원이 소요되며, STA 시스템의 경우 5억 5,000만원의 LCC 변화를 나타낸다. 즉, 수송거리 1km 증가시 기존방식에 비해 STA 시스템은 11 억 3,000만원의 비용을 절감할 수 있어 장거리 수송에서 유리하다는 것을 확인할 수 있다.

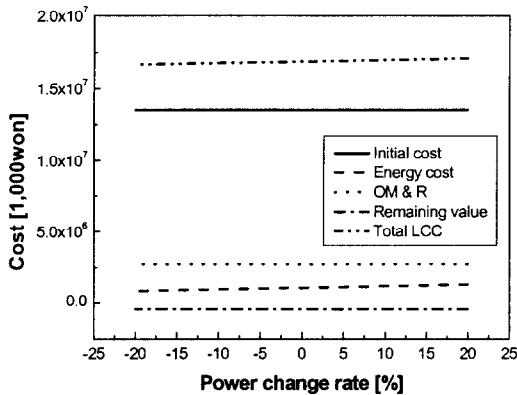


Fig. 8 Sensitivity analysis of power change rate for DHCS.

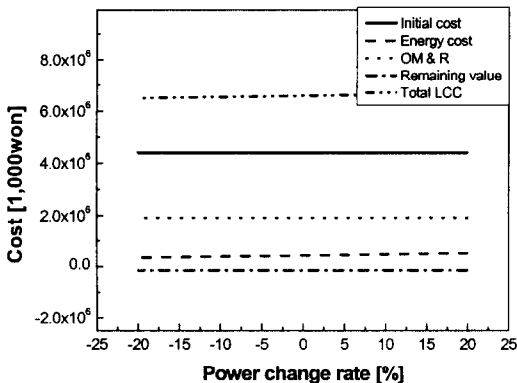


Fig. 9 Sensitivity analysis of power change rate for STA system.

5.3 기타 민감도 분석

초기투자비 선정시 불확실한 요인으로 작용했 던 펌프비용은 초기비용에서 차지하는 비율이 약 0.015~0.023%로 매우 낮게 나타났다. 따라서 펌 프비용 변화에 의한 총 LCC 변화는 매우 작기 때문에 최소 LCC를 갖는 대안 결정시 펌프의 영 향은 무시한다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 DHCS와 STA 시스템에 대하여 동력비 변화에 따른 총 LCC 변화를 나타 내는 그래프이다. 에너지비용에 따른 민감도는 DHCS가 STA 시스템보다 크게 나타났으며, 동 력비를 1% 변경시 DHCS의 총 LCC는 430만원 의 변화를 보이고, STA 시스템의 경우 총 LCC는 동력비를 1% 변경시 100만원의 변화를 보인다.

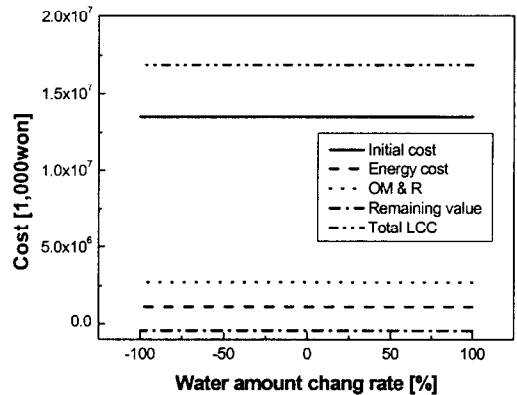


Fig. 10 Sensitivity analysis for water amount in DHCS.

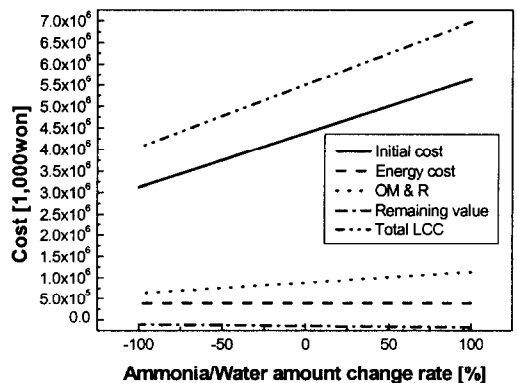


Fig. 11 Sensitivity analysis for ammonia/water amount in STA system.

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 DHCS와 STA 시스템에 대하여 용액비 변화에 따른 총 LCC 변화를 나타내는 그래프이다. DHCS의 경우 요구되는 용수량이 매우 크지만 용수의 단가가 300원/m³으로 총 LCC에 미치는 영향이 매우 작은 것으로 나타났다. STA 시스템의 암모니아/물 용액은 그 단가가 1m³당 325만원으로 1% 변경시 약 1,400만원의 변화를 나타냈다. 이 비용은 총 LCC에 약 0.002%에 불과하기 때문에 총비용에 큰 영향을 미치지 않는다.

6. 결 론

현열수송방식인 지역 냉·난방 시스템과 상온 잠열수송방식인 STA 시스템의 생애주기비용을 고려한 LCC 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 냉방능력 5,000 RT, 수송거리 10 km를 기준으로 STA 시스템은 관경 125 mm에서 최소 LCC를 가지며, 기존지역 냉·난방 시스템과 비교시 총비용이 약 67% 감소하기 때문에 경제적인 대안이다.

(2) LCC 분석 결과 잠열방식의 에너지수송은 현열방식의 에너지수송보다 연간 에너지소비량을 약 60% 절감할 수 있다.

(3) 수송거리 1 km 증가시 기존의 지역 냉·난방 시스템방식에 비해 STA 시스템을 적용할 경우 총비용을 약 67% 절감할 수 있다. 따라서 에너지 장거리수송시 상온잠열수송방식인 STA 시스템이 기존 현열수송방식인 지역 냉·난방 시스템에 비해 보다 더 경제적인 대안으로 평가된다.

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. Leigh, S. B., 2000, Optimization of facility management based on a life-cycle cost analysis, Journal of Korea Facility Management Association, Vol. 2, No. 1, pp. 79-90.
3. Dhillon, B. S., 1989, Life cycle costing techniques, Models and Applications, pp. 8-26.
4. Jeon, S. H., Kim, S. S., Hong, H. K. and Kang, Y. T., 2002, Simulation of STA and economic analysis, Proc. of the SAREK 2002 Summer Annual Conf., Vol. 2, pp. 990-995.
5. Korea Energy Management Corporation, 1998, 4, Collectivize Energy Project Plan.
6. Korea Electric Power Corporation, 2000.8, A Study on Load Pattern of Apartment House.
7. Korea Price Information Corporation, 2003, 10, The Monthly Commodity Price News Service.
8. Korea Energy Management Corporation, 2003, 7, Collectivize Energy Project Data.