흡수식을 이용한 에너지 장거리 수송/변환 기술

흡수식 사이클을 이용한 에너지의 장거리수송 기술을 소개하고 경제성평가 결과를 제시한다.

강 용 태
경희대학교 기계산업시스템공학부(ytkang@khu.ac.kr)

서 언

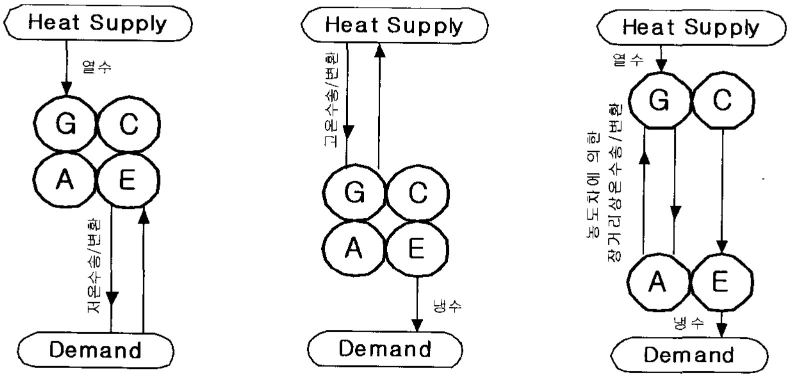
현재 에너지수요 측면에서 가장 높은 증가율을 보이고 있는 것이 바로 대도시 및 산업단지의 냉·난방 및 급탕용 에너지이다. 냉·난방에 사용되는 에너지는 100℃ 미만의 저온으로서 고열원 에너지인 화석연료의 사용은 에너지사용면에서 비효율적이다. 따라서 산업지역에서 버려지는 폐열원등의 각종 미활용에너지를 이용하여 냉·난방부하를 충족시킬 수 있는 에너지 절약형 시스템의 개발이 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 일반적으로 미활용에너지 및 폐열에너지 공급지역은 소비지역으로부터 멀리 떨어져 있다. 지금까지 흡수식시스템은 냉동 및 냉방의 개념에서 기술개발 및 실용적운전이 이루어져 왔으나, 본 논문에서는 흡수식시스템을 이용한 에너지의 장거리수송 및 변환 기술을 소개하고자 한다.

상온에너지수송용 흡수식시스템

기본개념 및 특징

상온에너지수송용 흡수식시스템(solution transpotation absorption system: STA)은 기존의 엔탈피 차에 의한 현열수송기술과 달리 환경친화적인 이성분 혼합물의 농도차를 이용한 상온 잠열수송기술로서 효율적 에너지 수송을 실현할 수 있는 차세대 기반기술이다.

STA의 개념은 **그림 1**로 요약된다. (a)와 (b)는 기존의 현열수송 방식으로서 에너지수송/변환과정이



(A:흡수기, G:발생기, C:응축기, E:증발기)

(a) 현열저온수송　(b) 현열고온수송　(c) 잠열상온수송

[그림 1] STA 개념도

수요지 또는 공급지의 어느 한쪽에서만 이루어져서 에너지를 열수(고온) 또는 냉수(저온)의 상태로 수송하게 된다. 따라서 장거리 수송시 열손실이 발생하며, 이를 최소화하기 위하여 값비싼 단열재의 사용이 요구된다. 실제로 기존의 열병합발전소에서 이용되는 지역난방시스템의 경우 값비싼 단열재가 발포된 이중보온관을 사용하고 있어 수송관의 설치 및 유지비가 경제적이지 못하다. 이에 비해 **그림 1**의 (c)의 경우는 농도차에 의한 잠열수송 방식으로서 열원의 공급지에 발생기와 응축기가 위치하고, 수요지에는 흡수기와 증발기가 분리되어 위치한다. 에너지 변환과정이 공급지 및 수요지에서 각각 이루어지고, 외기온도와 동일한 상온에서 에너지의 장거리 수송이 이루어진다. 따라서 현열수송과 달리 단열재가 불필요하게 되며 유량이 감소하게 되어 펌프동력비를 줄일 수 있다. 기존의 엔탈피차에 의한 현열수송방식과 농도차에 의한 상온에너지 수송/변환방식의 특징이 **표 1**에 정리되어 있다.

핵심기술 및 적용

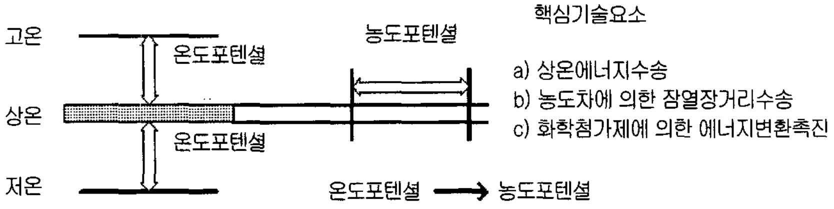
핵심기술 : 에너지수송/변환 기술은 에너지관련 기간산업 및 제품공정에 광범위하게 응용되고 있는 기술이다. 상온에서의 장거리 에너지수송/변환기술을 선진국에서는 이미 국가핵심주도기술로 채택해 독자적으로 개발된 수송/변환기술들을 보유하고 있다. 본 연구에서 개발중인 상온에너지수송/변환 기술은 a) 상온에너지 수송, b) 농도차에 의한 잠열수송 c) 화학첨가제에 의한 에너지변환촉진이라는 세가지 핵심요소를 포함한다. **그림 2**에 핵심 원리가 나타나 있다.

요약하면 첫째, 상온에너지 수송은 온도에너지 포텐셜이 없는 상온의 상태에서 에너지/물질의 수송을 가능케 하여 단열재가 없는 수송관을 이용할 수 있어서 장거리수송관의 설치 및 유지비가 획기적으로 줄어들게 하는 핵심요소기술이다.

둘째, 이성분 혼합물의 농도차에 의한 잠열수송은 수송매체의 양을 현열 수송에 비해 약 1/20 이하로 줄여 펌프동력을 획기적으로 줄이고, 기존 현열수송법의 가장 큰 한계 (장거리수송의 어려움)를 극복하여 장거리수송이 가능하게 하는 혁신적인 요소기술이다. 현실적으로 인천 및 서해안 지방의 공장산업지대에서 발생되는 에너지를 수도권의 일산 및 분당

<표 1> 에너지 수송방식의 비교

수송기술	현열에너지 수송	상온에너지 수송/변환
수송/변환 방법	엔탈피차에 의한 현열수송.	농도차에 의한 잠열수송.
특징	고온/저온상태로 에너지가 수송 되므로 단열재가 필요함.	상온에서 에너지를 수송/변환하므로 비싼 단열재가 필요없음.
	현열수송이므로 수송매체의 양에따라 거대한 펌프동력이 필요함.	이성분 혼합물의 농도차, 즉 잠열에 의한 에너지 수송이므로 수송관의 직경을 기존의 현열수송에 비하여 약 1/10로 줄일 수 있음.
	열병합발전소의 현열에너지수송의 경우 약 10km 정도까지 수송이 가능함.	현열수송에 비하여 수송매체의 양이 약 1/20로 줄어들어 장거리 수송이 가능함 (100km 이상).
	물을 수송매체로 사용하므로 환경에 친화적임	환경친화적인 이성분 혼합물 (물/리튬브로마이드 또는 암모니아/물)을 수송매체로 사용.

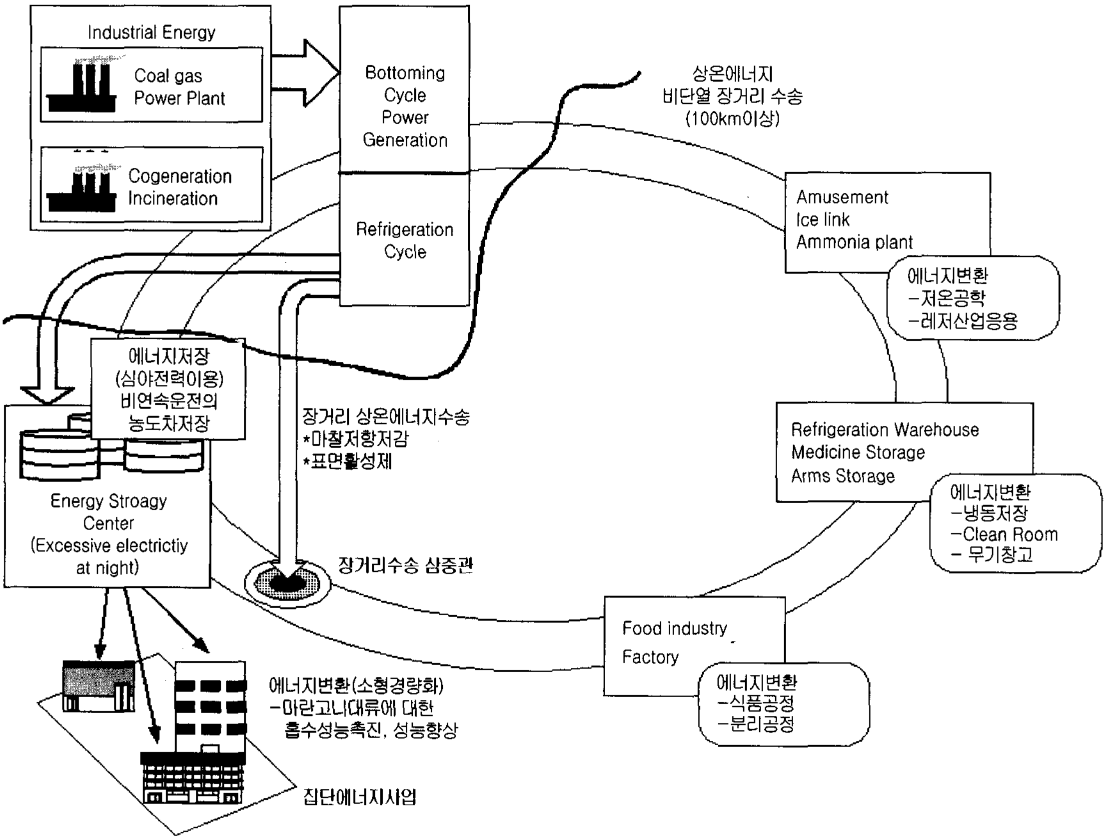


[그림 2] 상온에너지 수송/변화기술의 핵심기술요소

지역으로 장거리 수송하여 환경에 친화적인 차세대 에너지/물질 순환형 신도시를 개발하는데 핵심적으로 이용될 수 있는 기술이다.

셋째, 화학첨가제에 의한 에너지변환 촉진은 이성분 혼합물에 화학적 첨가제를 부가하여 표면장력의 불균형으로 인한 마란고니 대류를 발생시켜서 열/물질전달을 획기적으로 증가시키는 기술이다. 이에 대한 이론은 국제적으로 공인 받아서 레디컬-아우트 모델 (radical-out model) 이란 이론으로 발표되었다. Radical-out 현상은 암모니아의 흡수과정에 의해서 암모니아 수용액과 결합해있던 첨가제의 알킬기(radical)가 떨어져 나와 흡수표면으로 이동하는 현상을 의미한다. 본 이론은 이성분 혼합물의 열 및 물질전달 성능촉진을 위한 핵심기술로 박막열전달, 기포열전달 등에서 효과적으로 이용되며, 초소형 열교환기설계, 고온열기기의 냉각장치설계, 컴퓨터 칩 냉각장치설계 등에 기본적으로 응용되는 기술이다.

기반성 : 현재 에너지 수송/저장/변환기술은 전력저장, 지역냉난방시스템, 공정산업의 폐열회수 등 여러 분야에 응용되고 있으나 현열수송의 한계로 인해 10km 이내의 단거리수송만 가능하고, 거대한 펌프동력이 필요하며 비싼 설치 및 유지비가 요구되는 문제점이 있다. 따라서 위 기술이 향후 현대사회의 기반이 되는 집단에너지산업, 공기조화/냉동산업, 의료품저장산업, 식품공정산업, 레저산업, 제철산업, 원자력산업, 분리공정산업 등에 광범위하게 적용되기 위해서는 a) 100km 이상의 장거리수송이 가능하고, b) 거대한 펌프동력을 획기적으로 줄이고, c) 수송관의 초기설치비 및 유지비가 최소화될 수 있는 혁신적인 에너지 수송/변환기술이 필요하다. **그림 3**에 이성분 혼합물 (암모니아/물)을 이용한 상온에너지 수송/변환기술의 산업기반성 및 적용분야가



[그림 3] 상온에너지 수송/변화기술의 산업기반성

나타나 있다.

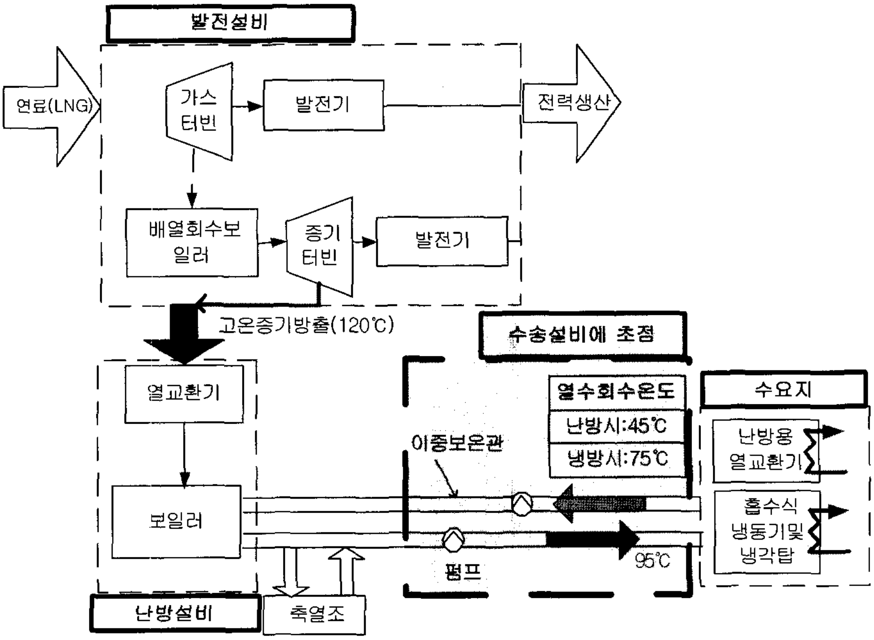
그림 3에서처럼 에너지공급처에서 산업에너지원(화석연료, 동력발전설비 등) 및 도시에너지원 (열병합발전, 소각로 등)의 일부는 암모니아/물을 작동유체로 하는 동력발전사이클(topping cycle)의 저부동력사이클(bottoming power cycle)을 구동하여 전력을 발생하고, 일부는 열펌프/냉동사이클을 구동하여 상온에너지 장거리수송/저장/변환에 이용된다. 삼중관으로 구성된 非단열 장거리수송관은 이성분 혼합물의 용액을 상온에서 에너지수요처로 수송하여 심야전력을 저장하는 에너지 저장센터, 지역냉난방센터, 식품공정산업, 냉동저장산업, 의료품/무기보관센터, 레저산업센터 등 각각의 요구조건에 따라 활용되도록 한다. 따라서 본 상온에너지 수송/변환기술은 차세대 환경친화형 신도시 개발에 필요한 제반 에너지관련 산업에 모두 이용되는 확고한 산업기반성을 가지고 있다.

STA의 경제성 평가

STA 시스템의 상용화 및 구현 가능성을 가늠하기 위해 생애주기 비용 분석기법(life-cycle cost analysis: LCC)을 사용하여 경제성 평가를 수행하였다. LCC 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 선정하는데 매우 유용하게 사용된다. 따라서 기존의 현열수송방식인 지역 냉 · 난방 시스템과 상온 잠열수송방식인 STA 시스템의 수송 설비에 초점을 맞추었으며, LCC 분석기법을 이용하여 두 시스템에 고려되는 모든 비용을 고찰하고, 이에 대한 결과를 비교 · 분석함으로써 STA 시스템에 대한 경제성 평가를 수행한다.

대안설정

그림 4는 기존의 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 터빈에



[그림 4] 지역냉 · 난방 시스템 개략도

서 일을 하고 나온 증기의 열에너지를 추출하여 공장의 공업용 증기 등으로 사용한다. 대규모 열 병합 시설의 경우 증기대신 온수를 생산하여 배관망을 통하여 아파트단지, 대단위 건물 등에 난방열을 공급하게 되며, 여름철에는 고온수를 공급하여 $H_2O/LiBr$ 흡수식 냉동기를 가동시켜 상업 및 업무용 시설에 냉방을 공급 하는 게 된다.

그림 5는 STA 시스템을 나타내는 개략도이다. STA 시스템은 발전배열 또는 산업 폐열원을 추출하여 냉 · 난방 수요지에 장거리 공급하게 된다. STA 시스템은 지역 냉 · 난방 시스템과는 달리 이 성분 혼합물의 자연냉매인 NH_3/H_2O을 이용하여 공급지에 발생기와 응축기를 설치하고 수요지에 흡수기와 증발기를 분리시켜 위치시킨다. 이때 발생기로 폐열원의 에너지가 유입되면 이 성분 혼합물 중 비등점이 낮은 성분(암모니아/물의 경우 암모니아)이 먼저 증발을 하게 되어 남아있는 액류는 저농도의 용액(약용액)이 된다. 이 약용액과 발생기에서 증발된 기류는 각각 내부 열교환을 거친 후 상온으로 온도가 하강되어 수요지에 설치된 흡수기와 증발기로 이동한다. 흡수기와 증발기는 지역 냉 · 난방 사업, 심야전력 이용을 위한 에너지 저장산업, 의약품저장산업, 식품공정산업 및 레저산업 등 각각의 요구환경에 따라 분리되어, 설치되며 수송된 에너지를 고온 또는 저온의 상태로 변환하여 사용된다.

LCC 분석 수행

• **분석기간**

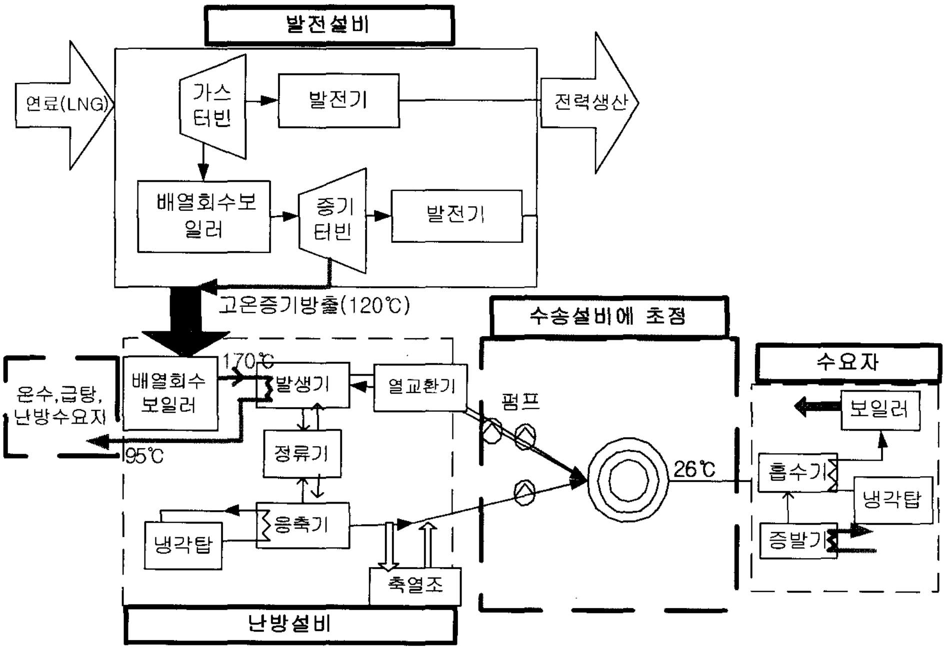
본 연구의 LCC 분석은 2003년 10월 현재를 가격 기준시점으로 하고, 분석기간은 법인세법에 근거를 두어 화력발전설비 기준 20년으로 하였다. 시스템 구축을 위한 건설기간은 기존 집단에너지사업의 통상적인 건설기간을 근거로 2년을 적용하였다. 따라서 LCC 분석을 수행하기 위한 분석대상 기간은 2003년 10월부터 2025년 10월까지로 설정하였다.

• **주요 비용**

- 에너지 비용산정

두 시스템의 가동 시간은 연중 냉방기간(6월 15일부터 9월 15일까지4개월)으로 하여 92일(2,208시간) 동안 24시간 연속운전을 하는 것으로 설정하였다.

총 펌프 일률을 구하고 펌프 구동시에 사용되는 비



[그림 5] STA 시스템 개략도

용은 두 시스템이 동일하게 한국전력의 2003년 10월 기준 산업용 전력(병) 요율체계를 따르는 것으로 설정하였으며, 분석기간 1차 년도를 기준으로 펌프를 가동시키기 위해 소요된 전력량에 산업용 전력 여름철 평균단가 65.5원을 고려하여 계산한다. 그 결과 지역 냉·난방 시스템의 경우 약 7천 6백만 원, STA 시스템의 경우 약 3천만 원의 에너지비용이 소요되는 것으로 나타났다. 즉, STA 시스템이 지역 냉·난방 시스템에 비해 연간 약 60%의 에너지 비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

- 초기투자비용

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

(1) 배관 자재 및 공사비

지역 냉·난방 시스템의 경우 열손실을 고려하여 이중보온관을 사용하며, 이에 비해 STA시스템의 경우는 상온수송으로서 외부로의 열손실이 존재 하지 않기 때문에 단열재를 사용하지 않는 일반 강관을 사용하였다. 배관공사시 토사구간과 도로구간은 전체 배관공사의 각각 50%를 차지하는 것으로 가정하였다.

(2) 펌프

대안들의 기본설계를 기초로 펌프의 양정과 유량에 해당하는 펌프용량을 선정하였다. 대안별 펌프비용은 **표 2**에 정리하였다.

(3) 용액

지역 냉·난방 시스템 배관 내 흐르는 열수는 상수도 공업용 요율체계를 따르는 것으로 1 m3 당 300원을 적용하였다. STA 시스템의 경우 암모니아/물 용액 28%를 충전하는 경우를 고려하였다. 대안별 용액비용은 **표 3**에 정리되어있다.

- 기타 비용

지역 냉·난방 시스템은 2003년도 에너지이용합리화사업을 위한 자금지원지침 (산업자원부공고 2002-239호 2003. 1. 7)을 적용 받고 있다. STA 시스템 또한 전기대체 냉방시설의 범주에 속하므로 이 자금의 지원을 받을 수 있다고 가정하였다. 분담금(수요자 부담)의 비율이 전체 투자비의 대략 60% 안팎을 차지하고, 나머지 약 40%의 투자비를 에너지특별기금 융자, 시설자금 융자, 자체자금 등(공급자 부담)으로 할당하게 된다.

LCC 분석 결과

LCC 분석은 초기비용, 에너지 비용 등 각종 요소를 고려하여 총비용으로 합산한 후 최소 LCC를 선정하고, 수송거리 따른 민감도 분석을 수행하였다.

• 최소 LCC 선정

냉방능력 5,000 RT, 수송거리 10 km를 기준으로, 지역 냉·난방 시스템의 경우 관경 500 mm, STA의 경우 관경 125 mm 구간에서 총 LCC는 **표 4**에 정리하였다.

LCC 분석결과 초기투자비는 지역 냉난방 시스템이 135억원, STA 시스템이 이보다 87억원이 적은 43억원으로 계산되었다. 에너지비용은 현열수송방식이 11억원, 상온잠열수송방식의 경우 4억원이며, 20년간 약 7억원의 에너지비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 결론적으로 STA 시스템이 기존방식에 비

<표 2> 대안별 펌프 비용

구분	지역냉·난방 시스템(1,000 won)	STA (1,000 won)	
펌 프 [EA]	2	2 (Ref., Weak)	1 (Strong)
비 용/EA	90,000	20,000	40,000

<표 3> 대안별 용액 비용

구분	지역냉·난방시스템 (won/m³)	STA (1,000 won/m³)
비 용	300	3,250

<표 4> LCC 분석결과

구 분	지역냉·난방시스템	STA 시스템
초기투자비	13,512,560	4,380,505
잔존가치	−609,116	−207,756
운영및유지관리비	2,722,210	883,587
에너지비	1,088,890	432,920
총 LCC	16,884,482	5,552,905

해 약 114억원의 순익을 나타냈으며, 경제적인 대안임을 확인할 수 있다.

• 민감도 분석

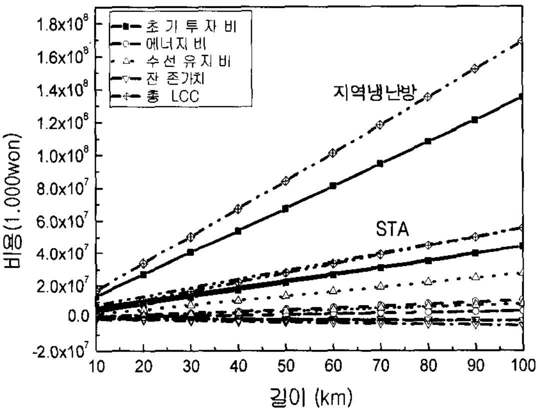
그림 6은 수송거리에 따른 총 LCC 변화를 나타내는 그래프이다. **그림 7**을 보면 지역 냉 · 난방 시스템의 총 LCC 변화율이 STA 시스템에 비해 높은 것을 알 수 있다. 수송거리 1 km 변경 시 지역 냉 · 난방 시스템의 경우 16억8천만 원이며, STA의 경우 5억5천만 원의 총 LCC의 변화를 나타낸다. 즉, 수송거리 1 km 증가시 기존 방식에 비해 STA의 총비용은 약 67%를 절감할 수 있어 장거리 수송에서 유리하다는 것을 확인 할 수 있다.

향후 방안

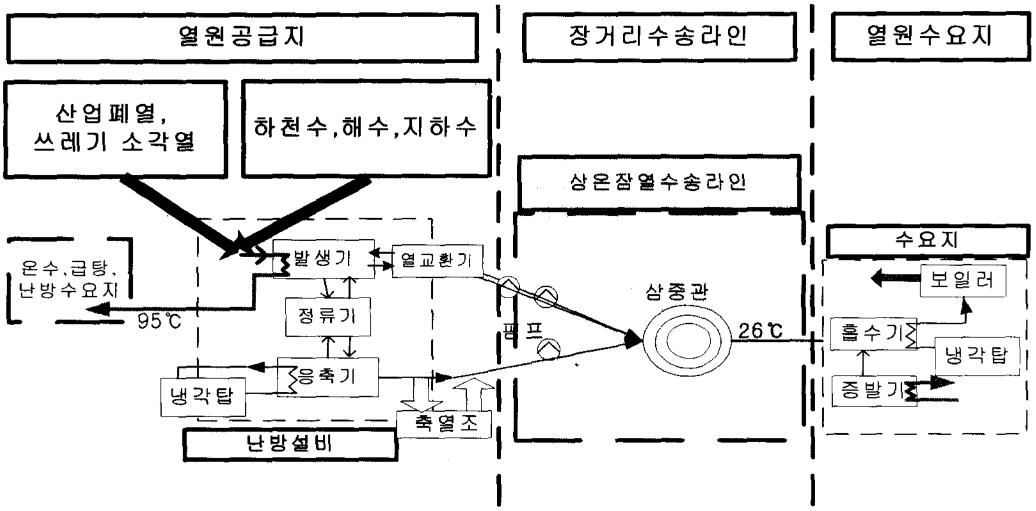
그림 7은 미활용에너지를 이용한 STA 시스템 개략도이다. STA 시스템의 궁극적인 목표는 상온에너지 수송/변환 기술을 적용하여 미활용에너지를 이용한 냉 · 난방 시스템의 구현이다. 사실상 미활용에너지(폐기물 소각열, 하수열, 공장배열 등)는 대도시 단지와 멀리 떨어진 지역에 대량으로 존재하고 있지만 온도레벨이 낮으며, 수요와 공급에 시간적 차이가 존재하고, 수요지와의 거리가 멀다. STA 시스템은 위와 같은 미활용에너지의 활용문제점을 해결하기위해서 열의 회수, 저장 및 플랜트 최적설계, 운전 등의 연구가 지속되어야할 것이다.

결 언

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



[그림 6] 수송길이에 따른 총 LCC 변화



[그림 7] 미활용 에너지를 이용한 STA 시스템 응용

(1) 냉방능력 5,000 RT, 수송거리 10 km를 기준으로 STA 시스템은 관경 125 mm에서 최소 LCC를 가지며, 기존 지역 냉·난방 시스템과 비교시 총비용이 약 67% 감소하기 때문에 경제적인 대안이다.
(2) LCC분석 결과 잠열방식의 에너지수송은 현열방식의 에너지수송보다 연간 에너지소비량을 약 60% 절감할 수 있다.
(3) 수송거리 1 km 증가시 기존의 지역 냉·난방 시스템 방식에 비해 STA 시스템을 적용할 경우 총비용을 약 67% 절감할 수 있다. 따라서 에너지 장거리 수송시 상온잠열수송방식인 STA 시스템이 기존 현열수송 방식인 지역 냉·난방 시스템에 비해 보다 더 경제적인 대안으로 평가된다.