

수평형 지열교환기의 하절기 성능실측

황 광 일*, 김 중 현**, 양 기 영**

*한국해양대학교 기계정보공학부, **삼성건설 기술연구소

A Experimental Study on the Performance of Horizontal-type GHEX in Cooling Season

K. I. Hwang*, J. H. Kim**, K. Y. Yang**

*Division of Mechanical and Information Eng., Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

** Institute of Technology, Samsung corporation, Gyonggi-Do 463-771, Korea

요 약 : 본 연구는 현장 실측과 시뮬레이션을 통하여 수평형 지열시스템의 운전성능을 측정평가한 것으로 연구 성과를 정리하면 다음과 같다. 하절기 측정에서 지중으로 방출되는 열량, 즉 온도차는 약 2.5~3.0 ℃의 범위에서 균일하게 발생하고 있었다. 또한 시뮬레이션 결과 냉방 시 지열교환기로의 입·출구 온도차는 약 5.3 ℃ 정도로 계산되었다. 이와 같이 실측값과 시뮬레이션 값 사이에 차이가 발생하는 것은, 시뮬레이션 입력 값 중 지열교환기의 시공조건과 유사한 모델이 내장되어 있지 않고, 지반 열전달계수의 불확실성, 그리고 운전패턴의 다양성을 프로그램이 해석하지 못하기 때문이었다. 따라서 현장의 지반 열전도 조사를 비롯한 지열시스템 설계, 시공, 운영 및 유지관리 프로세스가 시급히 확립되어야만 한다.

핵심용어 : 신재생에너지, 지열에너지, 지열교환기, 에너지절약

ABSTRACT : The purpose of this study is on the performance evaluation of horizontally installed GHEX(Geothermal Heat EXchanger) in cooling season. Followings are the results. By the result of data acquisition at the site, 2.5~3.0℃ temperature difference are gained from GHEX for/to heat pump system. And 5.3℃ temperature difference is calculated by the GLD, commercial simulation software. The different result between survey and simulation is occurred from the inappropriate input value into the GLD, like uncertain thermal conductivity coefficient of underground, unmatching shape of installation and operation pattern, etc.

KEY WORDS : Renewable energy, Geothermal energy, GHEX(Geothermal Heat Exchanger), Energy saving

1. 서 론

1.1 연구배경과 목적

산업혁명이 발생한 18세기 이후 국가간의 경쟁적인 산업화 정책은 생산동력원인 화석연료의 급속한 소비를 불러일으켰으며, 급기야 1970년대 이후 발생했던 오일쇼크와 산유국의 불안한 국제정세로 인해 화석연료의 무기화가 가능하다는 사실을 인식하게 되었다. 그러므로 국가 에너지의 97% 이상을 수입에 의존해야만 하는 우리나라를 비롯한 에너지 다소비국가에서는 에너지 확보에 대한 위기의식과 함께 새로운 에너지를 개발하기 위해 노력하고 있는 것이다. 또한 2005년 2월 16일 발효된 교토 의정서(Kyoto Protocol)에 따라 우리나라는 2013년부터 지구온난화를 유발하는 온실가스(이산화탄소, 메탄, 수소불화탄소, 아산화질소, 육불화황 등 6

가지) 배출량을 현재보다 현저히 줄여야 하는 부담을 안게 되었다. 이러한 상황을 인식하고 있는 우리 정부는 현재의 에너지 수급과 환경기술을 확보하기 위한 방안으로써 11개 분야의 신·재생에너지를 지정하고 각 분야별 기술개발과 보급을 제시하고 있으며, 또한 실제 보급사업을 전개하기 위하여 관공서 등의 공공건물에는 신·재생에너지 보급 등을 의무 시행하고 있다[1].

정부가 지정한 신·재생에너지 11개 분야 중 지열(地熱)은, 지표면을 통하여 흡수된 태양에너지를 지중에 저장한 에너지원으로, 평균지온은 지반의 물리적 특성과 깊이에 따라 다르게 나타나지만 우리나라의 경우에는 지표하 5 m 이하에서 평균 15 ℃의 안정적인 온도분포를 보이고 있으며 평균지온경사는 25.7 ℃/km[2]로 조사되었다. 이는 지열을 열원으로 하는 온도차 시스템을 계획하고 적절한 운전을 수행한

* hwangki@bada.hhu.ac.kr

다면 무한 에너지 공급원으로 활용될 수 있음을 의미하는 것이다.

국내의 기술개발 및 보급현황을 살펴보면, 유럽식의 지하 수 km 깊이의 심층부(深層部)의 고온을 이용한 발전기술도 검토되고 있으나, 실제 보급되고 있는 시스템은 지하 수십 ~ 300 m 깊이의 지열을 이용하는 방식이 주류를 이루고 있다. 그러나 이미 20세기 초에 기술개발과 보급을 시작해 수많은 적용실적을 가지고 있는 유럽의 국가들과는 달리 우리나라에 지열시스템이 현재와 같은 모습으로 도입된 것은 1990년대 후반부터이며, 실제 보급이 시작된 것은 전술한 신·재생 에너지 관련법이 시행된 2004년 이후라고 말할 수 있다.

한편 국내의 지열시스템 설계 수준과 현황은, 미국과 유럽의 설계기술을 원형으로 하고 있다. 그러나 미국과 유럽은 국내 건축물과 구조, 냉난방 부하 등 수요처의 특성이 다를 뿐만 아니라, 지열시스템 설계에서 가장 중요한 지반의 열역학적 특성이 다르기 때문에 그들의 설계기법을 그대로 국내에 적용할 경우 장기운전에 따른 성능저하 등의 문제가 발생할 가능성을 배제할 수 없는 것이 사실이다.

이에 본 연구에서는 시뮬레이션과 실측을 통해 수평형 지열시스템의 하절기 운전성능을 평가함으로써, 지열시스템의 설계 예측 성능과 실제 성능의 차이를 고찰하고자 한다.

1.2 연구문헌 고찰

지열시스템의 요소기술과 관련된 국내의 연구 성과로는, 이 등[3]이 지열배관의 열교환성능 실측조사를 통해 인근지역에서도 열저항이 4배 정도 차이날 수 있다는 사실을 보여 주었고, 신 등[4]은 현장의 열전도계수를 구하고 취득가능 냉난방열량을 계산하였으며 또한 지중 토양의 열축적 현상에 의한 영향을 검토해야만 함을 지적하고 있다. 또한 조 등[5]은 여름철과 겨울철을 포함하는 6개월 동안의 냉난방 시스템 운전 결과 지열교환기 입·출구 온도차는 평균 2.9 °C 이었음을 보고하고 있다. 그러나 전술한 바와 같이 국내에서 수년간에 걸친 장기운전에 따른 영향을 연구한 사례는 찾을 수 없었다.

반면 최근에 발표된 해외 연구에서는, 발전용 열원으로 개발된 필리핀의 BacMan 지역의 경우 1993년부터 2005년까지 추출된 지열의 온도를 조사한 결과 약 10% 정도의 온도 저하 후 취출온도가 안정되었다는 보고가 있으며[6], 냉방부하가 난방부하에 비해 상대적으로 많은 지중해연안지역에서 수행된 연구에서는 25년간의 장기운전에 따라 지중배관(Geothermal Heat EXchange pipe, GHEX)으로부터의 공급 온도가 2.6 °C 상승했음을 지적하고 있다[7].

1.3 연구의 범위와 방법

본 연구는 장기운전에 따른 지열시스템의 운전성능 변화를 파악하기 위한 것이다. 단, 기존 연구문헌의 고찰을 통하

여 지열시스템의 운전성능에 가장 큰 영향을 미치는 것은 지중에 매설된 지열배관의 열교환 능력임을 확인하였기 때문에, 본 연구에서는 지중배관 내를 흐르는 작동유체(Working fluid)의 온도변화에 주목하였다.

본 연구는 지열시스템 설치 후 실제 운전이력이 5년이 경과한 현장의 운전조건과 지열배관(이하 지열교환기로 표시) 내 작동유체의 온도변화에 대한 실측조사를 수행한 사례연구이다. 또한 5년전의 데이터와 비교 평가함으로써 지열시스템의 장기운전에 따른 운전성능 변화를 고찰하였다.

2. 수평형 지열교환기에 관한 이론적 고찰

냉방(또는 난방)사이클로 작동하는 지열시스템에서 지열교환기가 지중으로 방출(또는 흡수)하는 열량은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$Q_{pipe} = \dot{m} \cdot C_p \cdot |T_{pipe,in} - T_{pipe,out}| \quad \dots \quad (1)$$

단, \dot{m} : 지열배관 내 작동유체의 질량 유량

C_p : 작동유체의 비열

$T_{pipe,in}$, $T_{pipe,out}$: 지열배관 입·출구 온도

또한 3개 이상의 수평관이 지중에 매설되었을 경우 정상상태에서의 열전달량은 다음식과 같이 표현된다^[8].

$$Q_{gr,pipe} = S \cdot k \cdot |T_{mean,pipe} - T_{gr,surface}| \quad \dots \quad (2)$$

단, S : 전도형상계수

$$S = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{2w}{\pi D} \sinh \frac{2\pi z}{w}\right)} \quad (\text{per cylinder})$$

k : 열전도도(토양, 그라우트 등)

$T_{mean,pipe}$: 지열배관 평균온도

$$T_{mean,pipe} = \frac{T_{pipe,in} + T_{pipe,out}}{2} \quad \dots \quad (3)$$

$T_{gr,surface}$: 지표면온도

L : 지열배관 길이

D : 지열배관 관경

z : 지열배관 매립깊이

정상열전달 상태에서 식 (1)과 식 (2) 사이에는 아래와 같은 식이 성립한다.

$$Q_{pipe} = Q_{gr,pipe} \quad \dots \quad (4)$$

그러나 실제 지열교환기의 매설이 완료된 상태에서는 식 (1), (2), (4)가 온도와 유량만의 함수가 되며, 정유량운전일

때는 온도만의 함수가 된다는 것을 알 수 있다.

3. 지열교환기 성능의 실측평가

3.1 실측현장의 개요

측정현장은 서울시 강남구에 소재하며, 지하 4층 지상 23층인 3개동(棟)으로 형성되었고, 총 141세대 연면적 80,126 m² 인 주상복합건물이다.

Fig. 1은 지열시스템의 개요를 나타내고 있다. 이 현장의 수평형 지열교환기는 Fig. 2와 같이 건물 3개동 바닥의 버림 콘크리트위에 일정한 간격으로 설치 매설되었다. 매설된 지열교환기는 각각의 평균길이가 180 m 인 총177개 배관이 15개의 회로를 구성하고 있다. 완공이후 기계실 지열교환기 헤더의 모습이 Fig. 3과 같다. 지열시스템에서 생산된 냉난방열은 지하1층의 체력단련실(13개 회로)과 1층의 로비(2개 회로) 등 공용공간에 공급되고 있다.

지열시스템의 운전은 중앙관리실에서 프로그램에 의해 수행되며 운전시간은 Table 1과 같고, 운전방식은 정격용량 On-Off 운전이었다.

3.2 실측 항목 및 방법

실험은 2005년 7월 26일 ~ 2005년 7월 29일까지 4일간 수행하였다. 지열교환기의 입·출구 온도를 측정하기 위하여 열전대(Thermo couple)를 15개 지열교환기 회로의 입·출구에 각각 설치하였으며 10분 단위로 측정하였다. 또한 공조대상공간인 1층, 지하 1층과 매설된 지열교환기 위에 위치하고 있는 기계실 바닥, 그리고 외기조건을 알 수 있는 백엽상에 각각 고정형 온습도계를 설치하여 10분 단위로 측정하였다.

3.3 실측결과 및 고찰

3.3.1 실내·외 온습도 조건

측정기간인 2005년 7월 26일부터 7월 29일까지의 외기 조건 중 7월 27일과 7월 28일의 온도, 습도 변화를 Fig. 4 ~ Fig. 7에 나타냈다. 지하 4층에 있는 기계실은 평균온도 29℃, 평균습도 72% 정도의 비교적 안정적 상태에 있으나, 건물 내 거주민의 생활공간으로 지열시스템에 의해 공조가 이루어지고 있는 1층과 지하 1층의 재실공간은 24~30℃, 55~85%의 상태로써 실내조건이 이상적으로 관리 운영되고 있다고 판단하기는 어려웠다. 7월 27일과 28일의 조건이 상호 다른 것은, 7월 27일은 전형적인 여름 날씨였으나, 7월 28일은 이른 오전부터 비가 내리는 날씨의 영향을 받은 것으로 판단된다.

3.3.2 지열교환기의 입·출구온도 변화

지열교환기 회로는 전술한 바와 같이 1층용과 지하1층용 회로로 구분하여 운전되고 있다.

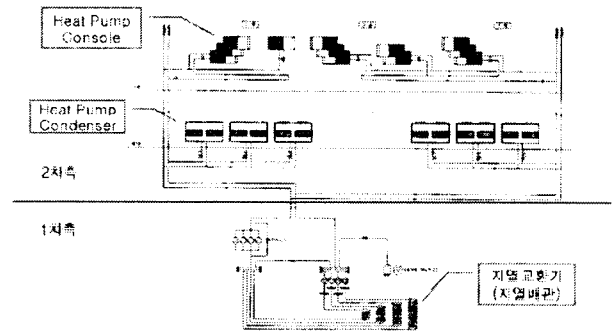


Fig. 1 Outline of geothermal system

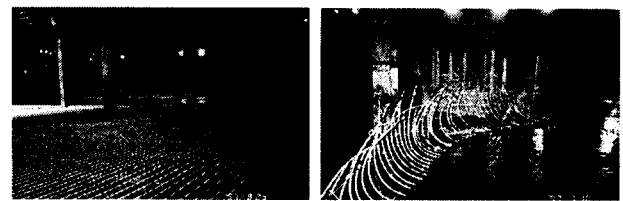


Fig. 2 Installation of horizontal GHEX pipe



Fig. 3 Header of GHEX pipes

Table 1 Daily operating schedule

	GHEX circuit for 1st floor	GHEX circuit for base 1st floor
Operation 1	09:00 ~ 10:00	11:00 ~ 14:00
Operation 2	12:00 ~ 14:00	15:00 ~ 18:30
Operation 3	15:00 ~ 18:00	17:30 ~ 21:30

Fig. 8과 9는 1층용 지중배관회로의, Fig. 10과 11은 지하 1층용 지중배관회로의 평균온도변화와 입·출구온도차를 보여주고 있다.

지하 1층과 1층용 각 회로의 입출구 온도를 보면, 28일 16:00 이후부터 29일 10:00까지의 온도분포가 다른 기간에 비해 낮게 나타나고 있는데, 이는 3.3.1 절에서 언급한 바와 같이 28일 오전부터 비가 내렸고 이로 인하여 설비 담당자가 주관적 판단에 의해 인위적으로 지열시스템을 2시간 빨리 종료하였기 때문이다

수평형 지열교환기의 하절기 성능실측

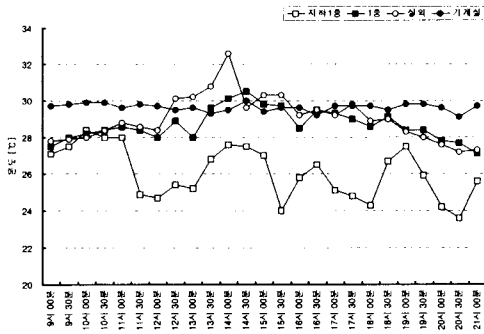


Fig. 4 Temperature (27th June 2005)

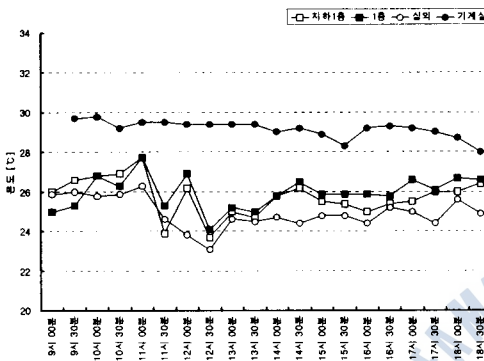


Fig. 5 Temperature (28th June 2005)

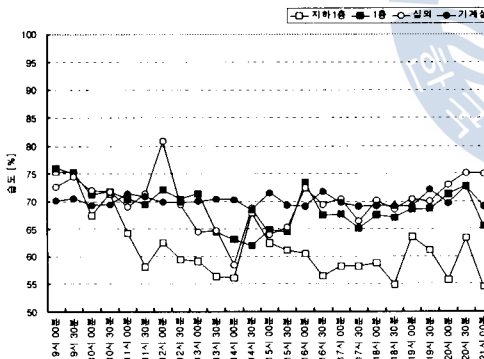


Fig. 6 Humidity (27th June 2005)

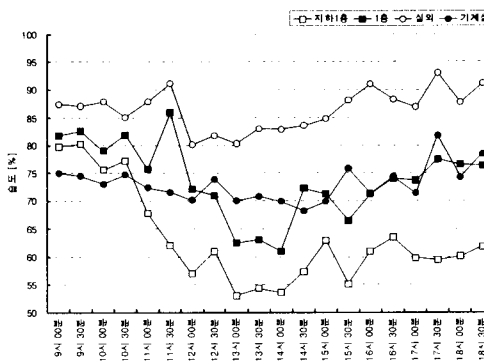


Fig. 7 Humidity (28th June 2005)

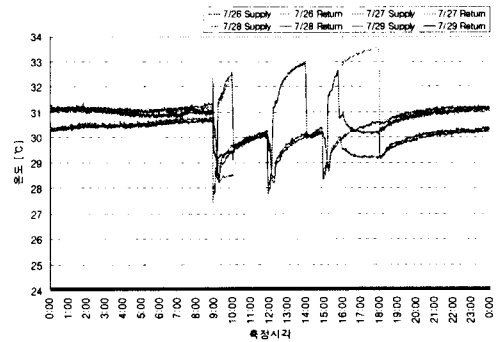


Fig. 8 Temperature variation of GHEX circuit for 1st floor

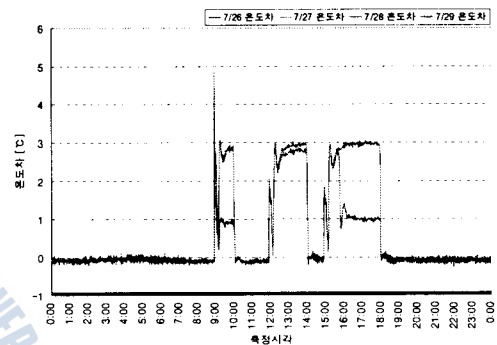


Fig. 9 Temp. difference variation of GHEX circuit for 1st floor

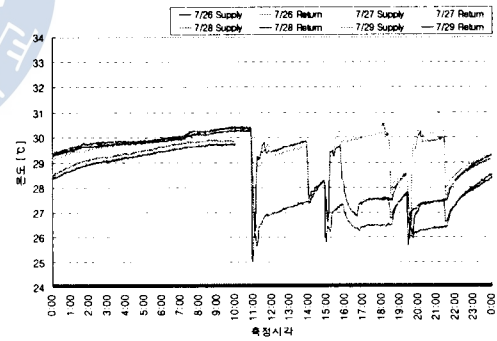


Fig. 10 Temp. variation of GHEX circuit for base 1st floor

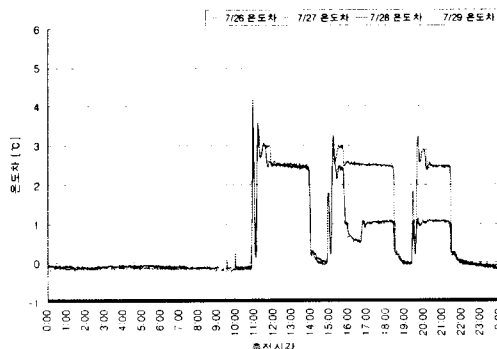


Fig. 11 Temp. difference variation of GHEX circuit for base 1st floor

구성된 1층용 회로에 대해서는, Fig. 8과 9로부터, 27일, 28일의 시스템 가동시간 중 지열교환기로부터의 공급온도는 28~30 °C, 환수온도는 31.5~33.5 °C의 범위에 있으며, 이 기간 중의 평균온도차는 약 3 °C의 균일한 열교환이 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

또한 Fig. 10과 11에서 알 수 있는 바와 같이, 지하1층용 회로에서는, 지열교환기의 공급온도 25~28 °C, 환수온도 29~30.5 °C로 평균 온도차는 약 2.5 °C 정도였다.

4. 시뮬레이션 평가

지중열 해석 프로그램으로 널리 사용되고 있는 GLD (Ground loop design)를 사용하여 실측 현장에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과 화면을 Fig.12에 나타내었다.

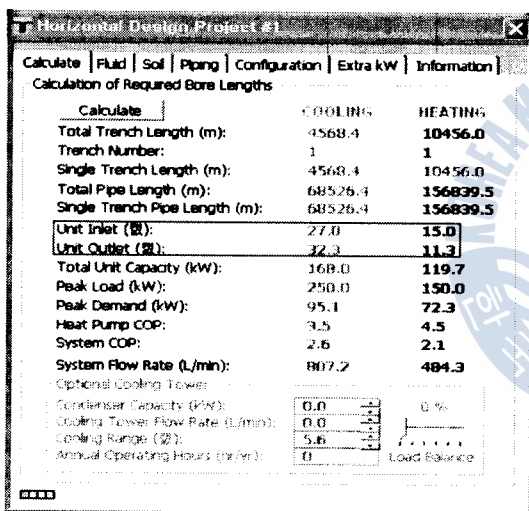


Fig. 12 Simulation result screen of GLD

시뮬레이션 결과는 냉방 시 히트펌프 입·출구, 즉 지열교환기로의 입·출구 온도차는 약 5.3 °C(32.3°C~27°C) 정도인 것을 알 수 있다. 이 결과는 실측에서의 지열교환기 입·출구온도차가 약 2.5~3.0 °C 내외인 것과는 다소 차이를 보이고 있는데, 이는 프로그램 내장모델 중 이 현장의 지열교환기 시공조건과 일치하는 모델이 없고, 지반 열전달계수의 불확실성, 그리고 변동운전패턴을 프로그램이 해석하지 못하기 때문으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 현장 실측과 시뮬레이션을 통하여 수평형 지열시스템의 운전성능을 측정평가한 것으로 연구 성과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 운전 중인 수평형 지열교환기에 대한 이론적 해석식을 정리하였고, 시공이 완료된 현장에서는 지열교환기 입구온도, 출구온도와 지표면온도 사이의 온도함수로 정리됨을 밝혔다.
- 2) 하절기 측정에서 지중으로 방출되는 열량, 즉 온도차는 약 2.5~3.0 °C의 범위에서 균일하게 발생하고 있었다.
- 3) 시뮬레이션 결과 냉방 시 지열교환기로의 입·출구 온도차는 약 5.3 °C 정도로 계산되었다.
- 4) 실측값과 시뮬레이션 값 사이에 차이가 발생하는 것은, 시뮬레이션 입력 값 중 지열교환기의 시공조건과 유사한 모델이 내장되어 있지 않고, 지반 열전달계수의 불확실성, 그리고 운전패턴의 다양성을 프로그램이 해석하지 못하기 때문이었다. 따라서, 설계 시에는 현장의 지반 열전도조사를 반드시 수행해야함과 동시에 다양한 운전 패턴에 대한 예측 시뮬레이션을 통하여 지열시스템의 성능을 예측하고, 운전 중에는 항시 성능을 확인하는 등 지열시스템 설계, 시공, 운영 및 유지관리 프로세스가 시급히 확립되어야만 한다고 판단된다.

참고문헌

- [1] 산업자원부, 대체에너지개발 및 이용·보급 촉진법 제11조제2항(2002.3), 동법 시행령 제16조(2004. 3).
- [2] 김미성, 김형찬, 국내지열분포현황, 지열에너지저널, 한국지열에너지학회, pp.33~38, 2005. 6
- [3] 이상훈 et al., 수직형 지열교환기(BHE)의 열성능 측정에 관한 실험적 연구, 대한설비공학회 2004하계학술발표대회는논문집, pp.48~54, 2004
- [4] 신현준 et al., 지열교환기의 열교환성능에 관한 연구, 대한설비공학회 2003동계학술발표대회 논문집 pp.176~181, 2003
- [5] 조정식 et al., 지열에너지 이용 냉난방시스템 성능분석, 지열에너지저널, 한국지열에너지학회, pp.19~25, 2005. 6
- [6] Fidel S. See et al., The BacMan Geothermal Field, Philippines ; Geothermal Changes and Operational Challenges After Ten Years of Productions, Proceedings World Geothermal Congress 2005
- [7] G. Romero et al., Comparative Study Between a Geothermal Heat Pump Systems and an Air-to-Water Heat Pump System for Heating and Cooling in Typical Conditions of the European Mediterranean Coast, Proceedings World Geothermal Congress 2005
- [8] Yunus A. Cengel, Heat Transfer 2nd ed., McGraw-Hill, 2004
- [9] Stephen P. Kavanaugh, Kevin Raffety, Ground-Source Heat Pumps : Design of Geothermal Systems for

수평형 지열교환기의 하절기 성능실측

Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE, 1997

[10]ASHRAE, Commercial Ground-Source Heat Pump
Systems, 1995

원고접수일 : 2005년 12월 30일

원고채택일 : 2006년 1월 9일

