

화력발전소의 온배수를 열원으로 이용하는 시설원예 난방용 히트펌프 시스템의 열교환기 설계기준 설정

유영선* · 강연구 · 장재경 · 김영화 · 김종구 · 강금춘
국립농업과학원 에너지환경공학과

Heat Exchanger Design of a Heat Pump System Using the Heated Effluent of Thermal Power Generation Plant as a Heat Source for Greenhouse Heating

Young Sun Ryou*, Youn Ku Kang, Jae Kyung Jang, Young Hwa Kim,
Jong Goo Kim, and Geum Chun Kang

Dept. of Energy & Environmental Eng., National Academy of Agricultural Science

Abstract. This study was carried out in order to determine the optimum length of a roll type PE pipe heat exchanger employed in the water-to-water heat pump system using the waste heat of the heated effluent flowed out from thermal power generation plants as a heat source. And the heat pump system of 30 RT for an experimental test was designed and manufactured. And also PE pipes were employed to recover the waste heat from the heated effluent. The inside diameter of PE pipe heat exchanger was 20 mm, the thickness was 2 mm and the diameter of a roll was 1,000 mm. And from the results of this study, we found that the optimum length of PE pipe heat exchanger was 75 m per the heat pump capacity of 1.0 RT (3.51 kW) and then the heating COP of heat pump system was 3.8.

Key words : coefficient of performance, heating, heat exchanger, heat pump, power generation

서 론

우리나라의 시설원예는 농업의 소득증대에 크게 기여하고 있으며, 농촌 인력의 감소 및 고령화 등으로 인하여 경영규모가 매년 증가하고 있는 추세이다. 최근에는 대규모 시설원예영농법인이 점점 증가하는 추세이고, 국가적 차원에서 미래를 대비한 100ha 규모의 대규모 시설원예단지를 조성할 계획을 마련하고 있다.

우리나라 시설원예의 가장 큰 문제점은 겨울철 난방 연료의 대부분을 석유에너지에 의존하고 있기 때문에 국제원유가격의 상승(매년 약 10%)으로 인하여 겨울철 난방에너지 비용이 증가하고 있다는 것이다. 또한 수출 단지의 경우에는 여름철 고온기에 상품성이 떨어지고 수확량이 감소하여 연중 출하에 큰 지장을 초래하고

있다(Kang 등, 2007; Kang 등, 2011).

이와 같은 생산현장의 애로사항을 해결하기 위하여 농림수산식품부에서는 2010년부터 시설원예 지열보급 사업을 추진하고 있으며 많은 예산을 투입하여 난방에너지 비용 절감에 적극 대처하고 있다(농림수산식품부, 농어업에너지이용효율화사업 시행지침서).

하지만 100 ha 이상 대규모의 시설원예단지가 조성된다면 설치비가 많이 드는 지열히트펌프의 보급만으로는 난방에너지 비용을 줄이는 문제를 해결하기가 쉽지 않기 때문에 설치비가 적게 들고 히트펌프의 성능을 제고할 수 있는 폐열의 재활용 등 새로운 대안을 찾아야 경제성을 높일 수 있을 것으로 판단되며, 화력 발전소에서 온배수의 형태로 배출되는 폐열을 열원으로 이용하는 히트펌프 시스템이 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

조정희 등(2010)은 국내의 발전소에서 배출되는 폐열을 양식업에 활용하는 방안을 연구하였으며, 연구보

*Corresponding author: ysryou@korea.kr
Received September 24, 2012; Revised October 18, 2012;
Accepted October 19, 2012

화력발전소의 온배수를 열원으로 이용하는 시설원예 난방용 히트펌프 시스템의 열교환기 설계기준 설정

Table 1. The gross generation and the heated effluent outflow of each power station in 2008 (EPSIS).

Power station	Yearly gross generation (TWh)	Heated effluent outflow ($\times 10^{-1}$ billion ton)
West coast	West Incheon	8.8
	Incheon	0.3
	New Incheon	12.2
	Posco Incheon	2.4
	Younghitung	11.7
	Pyeongtaek	4.9
	GS Bugok	3.0
	Dangjin	3.5
	Taean	23.8
	Boryung	23.4
East coast	Seocheon	1.9
	Younggwang	50
	Pusan	10.7
	Geori	25.8
	Ulsan	5.4
	Youngnam	0.7
	Wolseung	23.8
	Posco, Pohang	5.4
	Uljin	49.2
	Donghae	2.2
South coast & Jeju	Youngdong	1.6
	Yeosu	1.4
	Honam	3.7
	Gwangyang	3.2
	Yulchon	2.3
	Posco, Gwangyang	8.4
	Hadong	23.4
	Samcheonpo	24.5
	Jeju	1.0
	South Jeju	0.3

고서에 따르면 발전소에서 온배수의 형태로 버리지는 폐열은 2008년을 기준으로 연간 388.0TWh에 달하며, 국내의 발전소별 연간발전량 및 온배수 배출량은 Table 1에서 보는 바와 같다. 하지만 연간 온실난방에 소요되는 에너지량은 13.2TWh 정도이며, 이는 발전폐열의 약 3.4%에 불과하다.

또한 Korean electricity supply & demand status (2012)에 따르면 2010년을 기준으로 지역별 발전설비용량, 연간 발전량 및 연간가동율을 조사한 결과, Table 2에서 보는 바와 같이 기저부하를 담당하고 있는 석탄발전과 원자력발전의 가동율이 높게 나타났고, 연간 가동율이 높은 지역의 발전소에서 배출되는 온배수를 이용하는 것이 겨울철 온배수를 활용한 대규모

시설원예 난방시스템의 구성에 보다 더 효과적일 것으로 판단된다.

이상과 같이 화력발전소의 발전량과 발전폐열에 관한 조사연구를 수행하여 발전폐열을 대규모 시설원예 단지 난방시스템의 열원으로 활용할 수 있다는 판단을 하게 되었으며, 이 연구에서는 화력발전소에서 온배수의 형태로 배출되는 폐열을 히트펌프의 열원으로 이용하여 온실의 난방에 활용할 수 있는 히트펌프 시스템을 설계 제작하였고, 이 논문에서는 열교환기의 길이에 따른 난방 성능을 분석하여 폐열회수 열교환기의 설계 기준을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

현장설증연구를 위하여 제주특별자치도에서 서귀포 소재의 남제주화력발전소 인근에 조성한 아열대작물(시설감귤, 망고) 재배온실(Fig. 1)의 난방을 위한 폐열 회수 히트펌프 시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다.

남제주 화력발전소에서는 중유를 연료로 하여 연간 240MWh의 전기를 생산하고 있으며, 발전효율은 40% 수준이다. 온배수 배출온도는 겨울철에는 20°C, 여름철에는 35°C 수준이며, 연평균 온배수 배출량은 3,700만 톤으로서 약 30ha의 온실을 난방할 수 있는 발전폐열이 벼려지고 있다. 온실면적은 5,280m²이었으며, Table 3에서 보는 바와 같은 설계인자를 기준으로 최대난방부하를 계산하였다. 이때 최저외기온은 온도가 가장 낮게 나타나는 1월동안 최근 5년간(2006~2010)의 최저외기온 평균값을 사용하였다.

겨울철 온배수 배출온도는 약 20°C로서 온실을 직접 난방하기에는 온도가 낮으므로 온배수를 히트펌프의 열원으로 사용하는 난방시스템을 설계하고자 하였다. Table 3의 설계인자를 적용하여 계산된 최대난방부하는 417kW였으며, 이를 히트펌프의 냉동톤으로 환산하면 약 120RT가 된다. 따라서 히트펌프는 Table 4에서 보는 바와 같이 120RT를 30, 40, 50RT의 3대로 제작하여 난방부하의 변화에 따라 가동용량을 변화시킬 수 있도록 하였다.

히트펌프의 용량에 따른 난방능력과 냉방능력을 산정하기 위하여 Ryou(2008) 등이 설계기준으로 사용한 온도기준을 적용하였다. 즉 히트펌프의 난방능력은 냉매증발온도 10°C, 냉매응축온도 55°C, 응축기 입구 물

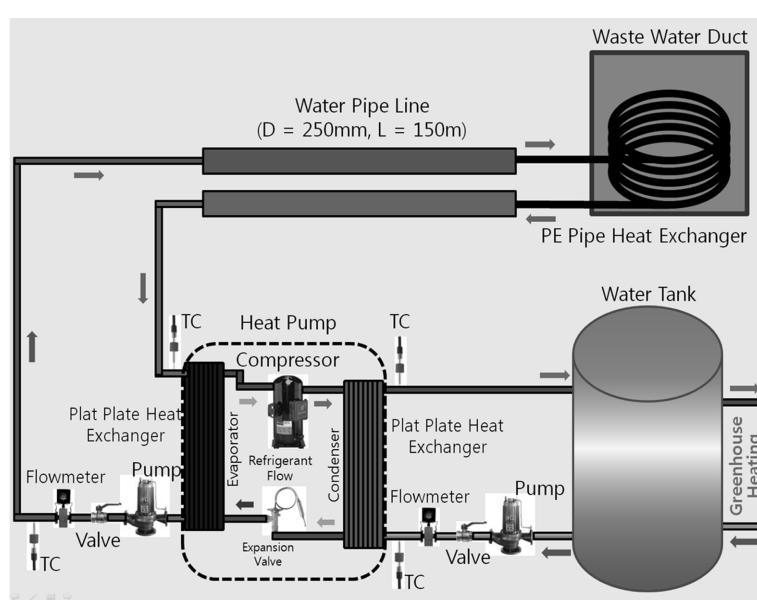
Table 2. Regional generation capacity, yearly gross generation and operation rate in 2010 (EPSIS).

Region	Generation capacity (kW)	Yearly gross generation (MWh)	Yearly operation rate (%)
Seoul	464,960	1,546,123	38.0
Pusan	4,968,203	40,885,523	93.9
Taegu	130,067	146,950	12.9
Incheon	10,688,330	62,767,223	67.0
Gwangju	10,252	37,852	42.1
Daejeon	91,565	195,645	24.4
Ulsan	3,402,988	10,149,654	34.0
Gyeonggi	6,124,721	22,203,575	41.4
Gwangwon	3,250,307	8,935,162	31.4
Chungbuk	585,322	1,150,328	22.4
Chungnam	16,159,027	118,271,671	83.6
Chonbuk	1,744,466	4,294,870	28.1
Chonnam	9,090,849	68,152,725	85.6
Kyungbuk	9,780,626	70,621,572	82.4
Kyungnam	8,744,719	62,567,627	81.7
Jeju	841,785	2,733,70	37.1
Total	76,078,187	474,660,206	71.2

**Fig. 1.** Power generation plant and greenhouse in South Jeju.

온도 25°C, 응축기 출구 물온도 50°C인 조건에서 설계하였으며, 냉방능력은 냉매증발온도 0°C, 냉매응축온도 35°C, 증발기 입구 물온도 25°C, 증발기 출구 물온도 7°C인 조건에서 설계하였다.

히트펌프의 용량이 결정되면 히트펌프의 증발기와 응축기를 통과하는 유체의 적정유량과 펌프동력을 결정해야 한다. Rhee 등(2004)의 보고에 따르면 물-물

**Fig. 2.** Schematic diagram of a water-to-water heat pump system with PE pipe heat exchanger.

화력발전소의 온배수를 열원으로 이용하는 시설원예 난방용 히트펌프 시스템의 열교환기 설계기준 설정

Table 3. Design factors to determine maximum greenhouse heating load.

Average temp. of heated effluent during winter season (°C)	Lowest outside air temp. (°C)	Greenhouse set temp. (°C)	Greenhouse heating area (m ²)	Heating load per unit area (W/m ²)	Maximum heating load of experimental greenhouse (kW)
20.0	5.0	20.0	5,280	79	417

※ Heat Pump Capacity: 417 kW = 118.8 RT ≈ 120 RT (1.0 RT = 3.51 kW).

Table 4. Heating and cooling capacity and power consumption of heat pump system.

Heat pump capacity (RT)	Heating mode		Cooling mode		Remarks
	Capacity (kcal/h)	Power consumption (kW)	Capacity (kcal/h)	Power consumption (kW)	
30	133,042	33.2	88,580	22.4	30RT*1
40	176,644	44.4	116,616	29.6	20RT*2
50	217,064	55.4	144,480	37.6	25RT*2

Table 5. Determination of water flow rate and pump power of heat pump system at 5.0°C difference of inlet and outlet water temperature passing through evaporator & condenser.

Heat pump capacity (RT)	Evaporator			Condenser		
	Water flow rate (LPM)	Head (m)	Pump power (kW)	Water flow rate (LPM)	Head (m)	Pump power (kW)
30	359.5	23	2.67	443.5	13	1.86
40	473.6	23	3.52	588.8	13	2.47
50	589.4	23	4.38	723.5	13	3.04

히트펌프에서 응축기 또는 증발기를 통과하는 열매체의 온도차 설계기준은 일반적으로 3.0~5.0°C 정도이며, 본 연구에서는 열매체 온도차를 5.0°C로 하여 열매체 유량을 결정하였다. Table 5는 열매체 온도차를 5.0°C로 하였을 때 30, 40, 50RT 히트펌프의 증발기 및 응축기측 열매체의 유량과 펌프동력 설계값을 나타내고 있다.

화력발전소의 폐열을 열원으로 이용하는 히트펌프 시스템은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 콤푸레서, 증발기, 응축기, 팽창밸브, PE파이프열교환기, 물탱크 등으로 구성하였으며, 실제 제작시에는 4-way 밸브를 설치하여 냉난방 겸용으로 제작하였다. 그림에서 보는 바와 같이 열매체의 온도를 측정하기 위하여 K 타입 열전 대를 열교환기 입출구에 설치하였고, 열교환기를 통하여 열매체 유량은 전자식 디지털 유량계와 초음파 유량계로 동시에 측정하여 비교함으로서 측정값의 신뢰도를 높이고자 하였다.

Ryou 등(2011a, 2011b, 2011c)은 해수를 열원으로 이용하는 히트펌프 시스템은 대부분 내부식성이 우수

한 티타늄 소재의 열교환기를 사용하고 있으나 제작비 용이 많이 들고 또한 용접부위의 부식이 우려되는 단점이 있다고 보고하였으며, 제작 및 설치비용이 적게 들면서 내부식성이 우수한 새로운 형태의 열교환기의 개발이 필요함을 주장하였다. 따라서 이 연구에서는 내부식성이 우수하고 제작비용이 적게 드는 난방용 PE 파이프를 열교환기 소재로 선택하였으며, 온배수의 온도와 히트펌프의 용량에 따른 PE 파이프 열교환기의 설계기준을 결정하기 위하여 Fig. 3에서 보는 바와 같이 볼밸브를 설치하여 열교환 면적을 변화시킬 수 있도록 제작하였다.

열교환기 제작을 위한 PE 파이프의 규격은 순환펌프의 동력과 제작비용 등을 고려하여 일반적으로 많이 사용되고 있는 내경 20mm, 두께 2mm로 결정하였다.

이때 히트펌프는 30RT, 40RT, 50RT를 각각 1대씩 제작하였으며, 폐열회수 열교환기의 길이를 결정하기 위한 실험은 30RT급 히트펌프를 이용하여 수행하였고, 실험결과에 근거하여 40RT, 50RT급 히트펌프의 열교환기 길이를 결정하고자 하였다.

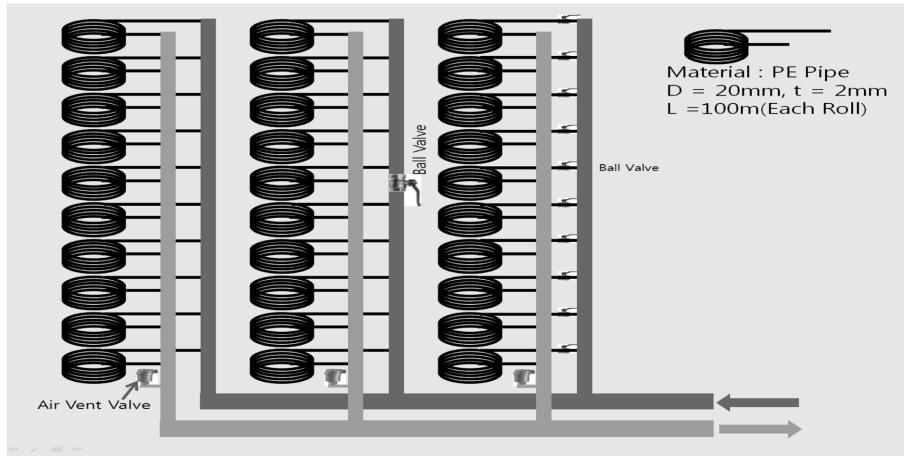


Fig. 3. Design of PE pipe heat exchanger.

또한 내경 20mm, 두께가 2mm인 PE 파이프를 Roll 형태로 제작하는 경우 변형없이 성형이 가능한 Roll의 최소직경은 1,000mm였으며, PE파이프의 열전 달개수와 길이에 따른 압력강하 등을 고려하여 1개의 Roll은 100m로 하였고, 총 30개의 Roll을 제작하였으며, 제작된 파이프의 총길이는 3,000m였다. 이와 같은 설계기준을 가지고 Fig. 3에서 보는 바와 같이 열교환기를 제작하여 발전소 온배수 덕트에 설치하였다.

결과 및 고찰

PE 파이프 열교환기의 길이를 1,600m에서 2,800m 까지 변화시켜 가며 증발기측을 통과하는 열매체(물)의 유량을 측정한 결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 6,420L/h에서 10,000L/h까지 곡선적인 변화를 보였으

며, 열교환기 길이가 1,600m 미만인 경우에는 유량이 너무 작아서 히트펌프의 작동이 불가능하였다. 따라서 30RT급 히트펌프가 원활하게 작동하기 위해서는 PE파이프 열교환기의 길이가 적어도 1,600m 이상이 되어야 한다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 열교환기의 길이가 1,600m에서 2,800m까지 증가하는 동안 증발기측의 열매체 온도차는 12.2°C에서 9.2°C까지 곡선적으로 감소하는 경향을 보였으며, 응축기측의 열매체 온도차는 5.8°C에서 6.2°C까지 약간 증가하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 열교환기의 길이가 증가할수록 증발기의 흡수열량과 응축기의 토출열량은 곡선적으로 증가하는 경향을 보였다. 증발기 흡수열량은 91.4kW에서 107.4kW까지 변화하였고, 응축기 토출열량은 132.9kW에서 144.8kW까지 증가하였다.

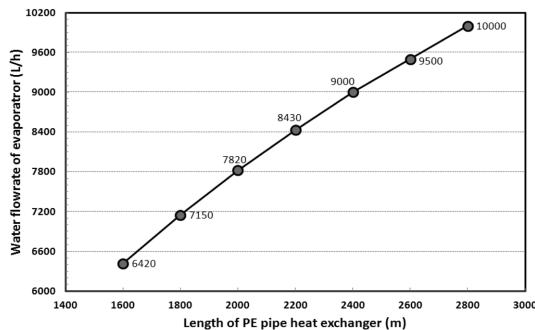


Fig. 4. Variation of evaporator water flow rate according to the length of PE pipe heat exchanger.

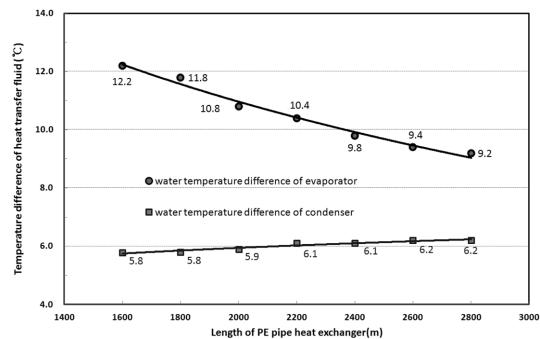


Fig. 5. Water temperature difference of evaporator and condenser according to the length of PE pipe heat exchanger.

화력발전소의 온배수를 열원으로 이용하는 시설원예 난방용 히트펌프 시스템의 열교환기 설계기준 설정

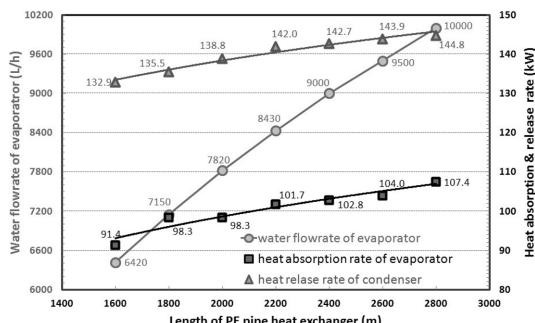


Fig. 6. Variation of heat capacity of evaporator and condenser according to the length of PE pipe heat exchanger.

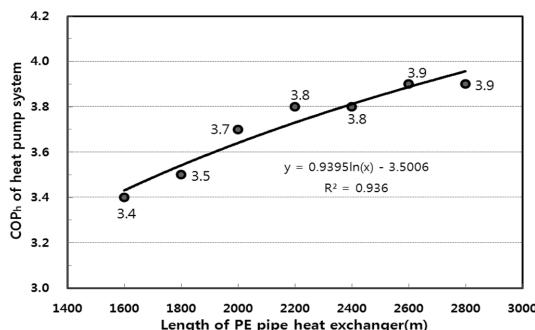


Fig. 7. COP variation of heat pump system.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 열교환기의 길이를 증가시켜 가며 난방성능계수를 분석한 결과 1,600m에서는 성능계수가 3.4로 나타났고, 열교환기의 길이가 증가하면서 3.5, 3.7로 증가하다가 2,200m와 2,400m에서는 3.8로 동일하게 나타났다. 또한 열교환기 길이가 2,600m, 2,800m인 경우에는 성능계수가 3.9로 거의 변화가 없었으며, 열교환기 길이를 2,200m에서 2,600m로 400m(18.2% 증가) 증가시켜 성능계수를 3.8에서 3.9로 0.1(2.6% 증가) 높인다는 것은 설치비용 측면에서 큰 의미가 없는 것으로 판단되었다. 따라서 30RT급 히트펌프 시스템의 적정 열교환기 길이를 2,200m로 결정하였으며, 1.0RT당 75m로 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

적  요

본 연구에서는 화력발전소에서 온배수의 형태로 배출되는 폐열을 히트펌프의 열원으로 이용하여 온실의 난방에 활용할 수 있는 히트펌프 시스템을 설계 제작

하였으며, 난방 성능을 분석하여 PE 파이프 열교환기의 설계기준을 제시하고자 하였다. PE 파이프 열교환기의 내경은 20mm, 두께는 2mm였으며, Roll의 직경은 1,000mm로 하였다. 연구결과 PE파이프 열교환기의 적정 길이는 1.0RT당 75m로 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단되었으며, 이때 히트펌프시스템의 난방성능계수(COPh)는 3.8로 나타났다.

주제어 : 난방, 발전, 성능계수, 열교환기, 히트펌프

사  사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ007432)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인  용  문  현

- Kang, Y.K., Y.H. Kim, Y.S. Ryou, J.K. Kim, J.K. Jang, and H.M. Lee. 2011. Heating effect of greenhouse cultivated mangos by heat pump system using underground air as heat source. Proceedings of the KSNRE 2011 conference: p.200 (In Korean).
- Kang, Y.K., Y.S. Ryou, G.C. Kang, Y.J. Kim, and Y. Paek. 2007. Heating performance of horizontal geothermal heat pump system for protected horticulture. Journal of Biosystems Engineering 32(1):30-36 (In Korean).
- EPSIS (<http://epsis.kpx.or.kr/>). 2012. Korean electricity supply & demand status. Korea Power Exchange (In Korean).
- Rees, S.J., J.D. Spitler, Z. Deng, and C.D. Orio. 2004. A study of geothermal heat pump and standing column well performance. ASHRAE Transactions 109(1): 3-11.
- Ryou, Y.S., Y.K. Kang, Y.H. Kim, J.K. Jang, J.G. Kim, and G.C. Kang. 2011a. Heating system for horticultural facilities using waste heat of thermal power generation plant. Proceedings of the KSAM 2011 winter conference 16(1):350-353 (In Korean).
- Ryou, Y.S., Y.K. Kang, Y.H. Kim, J.K. Jang, J.G. Kim, and G.C. Kang. 2011b. Heat pump system using the heated effluent of thermal power generation plant as a heat source. Proceedings of the KSNRE 2011 conference : p.190 (In Korean).
- Ryou, Y.S., Y.K. Kang, Y.H. Kim, J.K. Jang, J.G. Kim, and H.M. Lee. 2011c. Performance of a horticultural heating system using waste heat of thermal power generation plant. Proceedings of the Korean Society for

- Bio-Environment Control 2011 Conference 20(2):222-223 (In Korean).
8. Ryou, Y.S., Y.K. Kang, G.C. Kang, Y.J. Kim, and Y. Paek. 2008. Cooling performance of horizontal type geothermal heat pump system for protected horticulture. Journal of Bio-Environment Control 17(2):90-95 (In Korean).
9. Ryou, Y.S., Y.J. Kim, G.C. Kang, Y. Paek, and Y.K. Kang. 2006. Performance of heat pump water heater with dual condenser. Journal of Biosystems Engineering 31(5):423-429 (In Korean).
10. 농림수산식품부. 2012. 농업에너지이용효율화사업 시행지침서.
11. 조정희, 김대영, 이경삼. 2010. 빌전소 온배수 활용 저탄소 녹색양식업 발전 방향. 한국해양수산개발원 연구보고서:12-25.