

[기술보고]

금속재질 열교환기의 지중 열교환 효율에 관한 연구

송재용¹ · 김기준¹ · 안상곤¹ · 김진성² · 정교철^{3*}

¹(주)산하이앤씨, ²한국농어촌공사 농어촌연구원, ³안동대학교 지구환경과학과

[Technical Report]

Study on Efficiency for Underground Heat Transfer of Metal Heat Exchanger

Jae-Yong Song¹, Ki-Joon Kim¹, Sang-Gon An¹, Jin-Sung Kim², and Gyo-Cheol Jeong^{3*}

¹SanHa E&C Co., Ltd

²Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

³Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

Received 23 February 2015; received in revised form 2 March 2015; accepted 6 March 2015

본 연구는 지열시스템 열교환 효율의 개선방안을 모색하기 위한 것으로 금속재질의 열교환기인 동관 및 스테인레스관과 기존 지열시스템에 많이 적용되는 PE관을 이용하여 지열열교환기의 재질에 따른 열전달 효율을 비교 분석하였다. 또한 지하매질의 지하수에 포함되어 있는 지하수열을 동시 활용할 경우의 열전달 효율 변화를 평가하고 그 적용성을 검토하였다. 열교환기 내의 유속, 유량 및 열교환기의 구경을 조절함으로써 열교환기의 재질에 따른 열전달 효율을 평가 후 현장실증시험 설계인자를 도출하였다. 열교환 효율과 유효 열전도도는 현장 열전달 효율 시험 및 열응답 시험을 통해 변화양상을 분석하였다. 분석결과 금속재질이 PE관에 비해 높은 열전달 효율을 보였으며, 유량에서의 구경증대에 따른 열전달효율은 크지 않았으나 유속에서의 구경증대에 따른 열전달효율은 높아지는 것을 확인하였다.

주요어: 열교환기, 열효율, 열전도도, 금속

The purpose of this study is to analyze and compare the heat transfer efficiency of using copper pipe, stainless pipe and traditional PE pipe commonly used for geothermal heat exchanger, with aims at seeking improved methods. In addition, the varying efficiency of heat transfer from ground heat and groundwater heat was assessed and its applicability was discussed. Design parameters for empirical field study were derived by controlling flow rate, velocity and caliber of pipes of the heat exchanger after the thermal efficiency of the heat exchanger material was evaluated. The heat exchange efficiency and effective thermal conductivity were measured with changing pattern through field thermal efficiency and thermal response test. Experimental results show that the metal material showed higher heat transfer efficiency than the PE pipe. Although the heat transfer efficiency was not high with the increase of the pipe diameter in the flow rate, it was high with the increase of the pipe diameter in the velocity.

Key words: heat exchanger, heat efficiency, heat conductivity, metal

*Corresponding author: jeong@anu.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

세계적으로 화석에너지가 많이 이용되고 있으나, 교토의정서가 1997년에 발효되면서, 정부에서 건물에너지 효율등급, 에너지소비 총량제 등의 정책이 시행됨에 따라 햇빛, 바람, 물, 지열 등 친환경적이고 재생 가능한 에너지인 신재생에너지 설치가 중요시 되고 있다(No, 2014). 국가에너지기본계획에 따르면 우리나라의 신재생 에너지의 보급률은 2030년까지 11%를 목표로 하고 있으며, 지열분야 역시 2008년 대비 50배 이상의 보급을 예상하고 있다(Kim et al., 2008). 또한 미국 EPA 보고서에 의하면 냉난방시스템 중 가장 에너지가 효율적이고 비용효율적인 공조 시스템은 지열원을 이용한 냉난방시스템이라고 보고하였다(Lee et al., 2009). 최근까지 미국, 중국, 스웨덴, 독일, 일본이 최대 설비국으로 전세계 용량의 63%를 차지하며, 중국, 미국, 스웨덴, 터키, 일본이 세계 연간 사용량의 55%를 차지한다(Lund et al., 2011). 지열에너지는 잠재용량이 크며, 공급할 수 있는 잠재량이 안정 되어 있으며(MIT, 2006), 열과 유체와의 연속적인 순환에 기반한 것으로 어느 정도까지는 재생가능하다(Barbier, 2002). 지열을 이용한 냉난방 시스템은 설비 수명이 25년 정도이고 지중열 교환기 수명도 50년 이상으로 지중 열교환기의 경우 반영구적인 사용이 가능하며, 타 신재생에너지와 마찬가지로 친환경적인 에너지를 활용하는 방법이다. 우리나라에서는 지하수 이용(SCW)방식과 지반이용(수직 밀폐형)방식을 이용하고 있으며(Lee, 2009), 우리나라의 지열에너지 냉난방 시스템 기술은 미국, 유럽에 비해 초기 수준이며, 고유가에 따른 관심도 증가와 보급 활성화를 위한 제도적인 장치의 확대를 설치 사이트가 증가하고 있으나, 히트펌프는 수입에 의존하고 있다(Park et al., 2007). 지열 냉난방의 기본적인 원리는 냉방 시에는 시설물(건물 등) 내의 열을 지중으로 방출하고, 난방 시에는 지중의 열을 시설물 내에 공급함으로써 냉난방을 구현한다. 냉방 및 난방 사이클에서 각각 히트싱크(heat sink) 및 열원(heat source)의 역할을 하는 지열은 공기보다 안정적이다. 일

반적으로 냉난방 시스템과 비교하여 지열 열펌프 시스템은 수명이 길고 소음이 적으며 이산화탄소 배출이 적 으며(Lee, 2007), 상대적으로 저온의 에너지를 활용하지만, 연중 일정한 온도를 유지하기 때문에 항온성이 우수 하며 지리적 제약이 없는 것이 큰 장점이다. 현장에서 측정된 지중열전도도 값, 물의 유속, 파이프관의 압력 값, 물의 유량은 지열에너지를 이용하는데 있어서 지열 펌프시스템의 현장장비 운용 및 설계 시 중요한 인자 값이 된다(Cho et al., 2012).

본 연구는 기존 지열시스템의 효율에 대한 개선방안을 위하여 지중 열교환 효율을 높일 수 있도록 열전달 효율이 높은 재질의 열교환기를 사용하였다. 지열 및 지하매질에서 유동 가능한 지하수를 포함하는 지하수열을 동시 활용하기 위하여 분석 및 적용성을 검토하였다. 실 내시험을 통해 재질별 열교환 효율을 검토하여 현장실 증시험을 위한 열교환기 재질, 길이, 규격 등 실증시험 설계인자를 도출하였다. 실내시험을 바탕으로 설계된 열 교환기를 통해 시공성을 검증하였으며 현장 열효율 시험 및 열응답 시험을 통해 열교환 효율과 유효 열전도도를 측정하여 변화양상을 고찰하고 평가하였다.

재료 및 방법

열교환기 재질 및 규격

열교환기의 재질에 따른 효율을 평가하기 위하여 실험대상 열교환기는 동관, 스테인레스관 및 PE관으로 구분하여 제작하였다(Table 1). 규격은 PE관의 경우 기존 지열시스템에 많이 적용되는 32.00 mm PE관을 사용하였으며, 동관은 25.58 mm와 53.98 mm로 구경을 달리하였고 스테인레스관은 60.5 mm의 상용화된 관을 적용하여 시험을 수행하였다(Fig. 1).

실험방법

실내시험은 열교환기 내부 및 외부 유체의 주입속도, 유체 온도, 열교환기 재질 및 규격의 변화에 따른 효율 검증을 통해 현장실증시험을 위한 지열시스템 설치와 관

Table 1. Thermal exchanger for material and specifications.

Classification	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Weight (kg/m)	Length (m)
Copper	25.58	1.65	1.25	23.00
	53.98	2.11	3.07	23.00
PE	32.00	3.20	-	23.00
Stainless	60.50	2.00	-	23.00

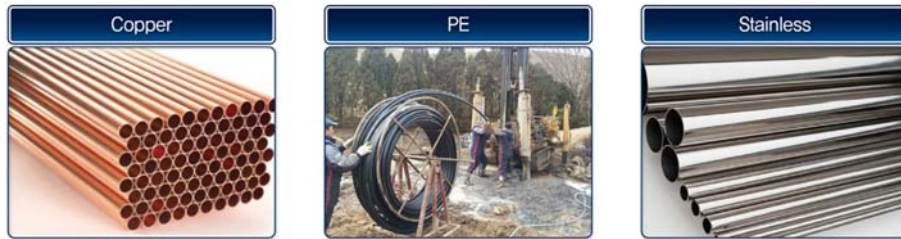


Fig. 1. Thermal exchanger for separating material.

Table 2. Configuration of indoor test devices.

Classification	Content
Tank 1	· This storage device copies circulating water of thermal exchanger. This one is used to flow W1 in Tank 2 · W1: circulating water in Tank 1
Tank 2	· This device copises underground aquifer · This one is made to exchange heat between W1 which is flowed in from Tank 1 and W2 in Tank 2, while W1 circulates inside thermal exchanger · W2: injection water of tank 2. Underground water keeps same temperature throughout year. This one is made to evaluate the efficiency of amniotic fluid by flowing in and out of tank 2
Thermal exchanger	· Copper (28.58 mm, 53.98 mm), PE pipe, Stainless pipe
Pump	· Power unit for a certain amount of inflow W1
Flowmeter	· Flow measuring devices (W1 and W2)
Themometer	· Automatic temperature measurement (W1, W2, W3)

Table 3. Specification of the test devices.

Classification	Standard
Tank1	· Inner diameter 2.0 m (L) × 1.0 m (W) × 1.0 m (H)
Tank2	· Inner diameter 2.5 m (L) × 1.5 m (W) × 1.0 m (H)
Pump	· Power consumption : 350 W, pump capacity : 9,300 l/hr
Flowmeter	· Flow range : 5~70 l/min, accuracy : ±2%
Themometer	· Range : -200 ~ 1,370°C (body only), accuracy : ±0.2% +1°C

련된 최적의 설계인자 도출을 목적으로 수행하였다. 시험장치는 2개의 열교환기 내 순환수를 모사하는 Tank 1, 지하수가 유동하는 지중 상황을 모사하는 Tank 2, 지중 열교환기의 재질별 효율을 평가하기 위한 동관, 스테인레스관 및 PE관으로 제작된 열교환기, 열교환기 내 유량을 일정량 유동시키기 위한 펌프로 구성된다(Table 2). 이외에도 Tank 1, Tank 2의 정확한 유량을 측정할 수 있는 유량계와 Tank 1, Tank 2 및 최종유출수의 온도를 측정할 수 있도록 온도계를 설치하였다(Table 3). 실내시험 방법은 열교환기 내의 유량을 조절함으로써 열교환기 재질 및 유량에 대한 효율을 평가하도록 계획하였다(Fig. 2). 시험완료 후 주입량에 따른 유입수(W1)와 유출수(W3)의 온도치를 분석하여 재료별 열교환기의 열 효율을 평가하고 이를 토대로 현장실증시험용 열교환기

재료를 선정하였다(Fig. 3). Tank 2에 시험대상 열교환기(동관, PE관 및 스테인레스관)를 설치 후 Tank 1에 2 m³의 지하수 저장 및 일정온도를 유지(21~22°C, 전열 히터 사용)하고 Tank 2에 일정량의 지하수를 지속적으로 유입한다. 이때, Tank 2에 저장되는 지하수의 온도는 약 15°C, 저장량은 약 4 m³이며, 유량조절관을 통해 저장량은 일정하게 유지한다. Pump 및 유량계를 이용하여 W1을 열교환기에 주입하며, Tank 2를 통과한 유입수(W1)는 외부로 유출(W3)한다. 초기 주입량은 약 5 l/min로 설정하였다. W1이 모두 소진될 때 까지 시험을 수행하며 W1, W2 및 W3의 온도를 5초단위로 연속 측정한다. 시험이 완료된 후 동일조건에서 W1의 주입량을 조정(약 5 → 10 → 15 → 20 → 30 → 40 → 50 l/min)하여 동일한 방법으로 실험을 수행하였다(Fig. 4).

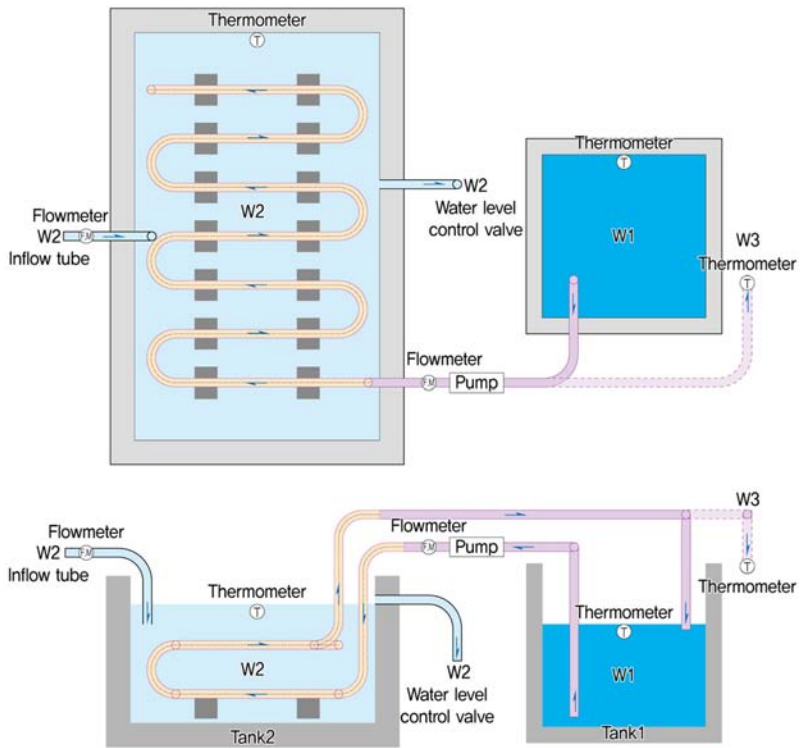


Fig. 2. Configuration painting of indoor test device.



Fig. 3. Photograph of devices.

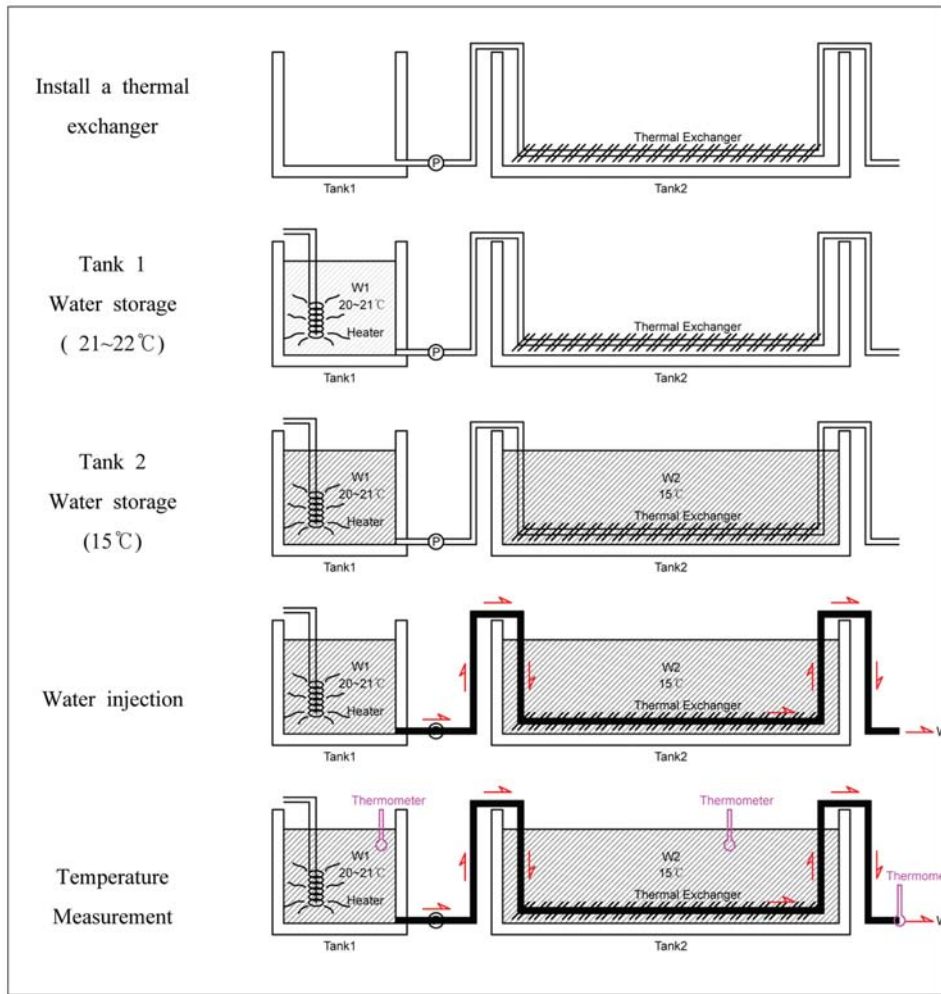


Fig. 4. Diagram of indoor test.

결과 및 토의

열교환기별 손실열량

PE관(32.00 mm)은 약 5~30 l/min의 유량으로 15회 시험을 실시하였다. 열교환기 유입수(W1)와 유출수(W3)의 최대 온도차이는 약 5 l/min의 유량으로 열교환기를 통과시켰을 때 1.4°C의 온도가 감소하는 것으로 확인되었고 최소 온도차이는 30 l/min의 유량으로 통과시켰을 때, 0.3°C의 온도변화가 측정되었다(Fig. 5). Tank 1 (W1)과 Tank 2 (W2)의 온도차를 감안할 때, 주입수의 유량이 약 5 l/min인 경우 평균 21.1% (약 1.27°C)의 열을 Tank 2로 방출하였으며, 주입량이 증가할수록 열 손실율이 감소하여 약 30 l/min의 경우에는 5.1% (0.3

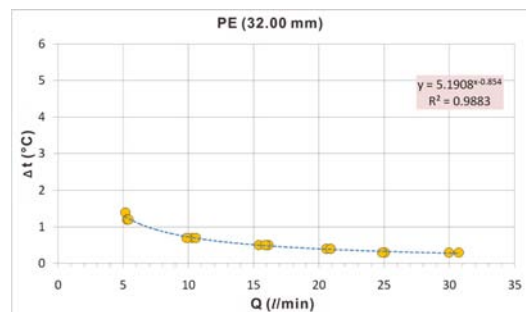


Fig. 5. Temperature change according to the flow volume of thermal exchanger (PE) injection.

°C) 정도만 방출하는 것으로 파악되었다(Table 4).

동관(25.58 mm)은 약 5~30 l/min의 유량으로 15회

Table 4. Test results of PE and heat loss of influent water.

Injection flow rate (l/min)	Results						Heat transfer coefficient (%) (W1-W3)/(W1-W2)		Heat transfer rate (kcal/min)	
	W1 (°C)	W2 (°C)	W3 (°C)	Temperature difference (°C)			Ratio	Average	Efficiency	Average
				(W1-W2)	(W1-W3)					
					Gap	Average				
5.16	21.5	15.5	20.1	6	1.4	1.27	23.3%	21.1%	7.22	6.68
5.29	21.7	15.7	20.5	6	1.2		20.0%		6.35	
5.4	21.6	15.6	20.4	6	1.2		20.0%		6.48	
10.26	21.5	15.6	20.8	5.9	0.7	0.70	11.9%	11.7%	7.18	7.16
9.86	21.7	15.7	21.0	6	0.7		11.7%		6.90	
10.56	21.6	15.6	20.9	6	0.7		11.7%		7.39	
16.14	21.5	15.6	21.0	5.9	0.5	0.50	8.5%	8.4%	8.07	7.91
15.41	21.7	15.7	21.2	6	0.5		8.3%		7.71	
15.9	21.6	15.6	21.1	6	0.5		8.3%		7.95	
20.58	21.5	15.6	21.1	5.9	0.4	0.40	6.8%	6.8%	8.23	8.30
20.9	21.7	15.8	21.3	5.9	0.4		6.8%		8.36	
25.05	21.5	15.6	21.2	5.9	0.3	0.30	5.1%	5.1%	7.52	7.48
24.84	21.7	15.8	21.4	5.9	0.3		5.1%		7.45	
30.72	21.5	15.7	21.2	5.8	0.3	0.30	5.2%	5.1%	9.22	9.10
29.97	21.7	15.8	21.4	5.9	0.3		5.1%		8.99	

Table 5. Test results of copper (25.88 mm) and heat loss of influent water.

Injection flow rate (l/min)	Results						Heat transfer coefficient (%) (W1-W3)/(W1-W2)		Heat transfer rate (kcal/min)	
	W1 (°C)	W2 (°C)	W3 (°C)	Temperature difference (°C)			Ratio	Average	Efficiency	Average
				(W1-W2)	(W1-W3)					
					Gap	Average				
5.4	20.5	14.4	16.5	6.1	4.0	4.17	65.6%	69.5%	21.60	21.42
5.34	20.8	14.4	16.3	6.4	4.5		70.3%		24.03	
4.66	20.5	15	16.5	5.5	4.0		72.7%		18.64	
9.75	20.5	14.6	17.4	5.9	3.1	3.03	52.5%	52.0%	30.23	31.13
10.74	20.7	14.5	17.5	6.2	3.2		51.6%		34.37	
10.28	20.5	15.1	17.7	5.4	2.8		51.9%		28.78	
17.17	20.5	14.8	18.5	5.7	2.0	2.10	35.1%	37.6%	34.34	33.44
16.25	20.5	14.7	18.4	5.8	2.1		36.2%		34.13	
14.48	20.5	15.2	18.3	5.3	2.2		41.5%		31.86	
20.95	20.5	14.8	18.6	5.7	1.9	1.80	33.3%	33.0%	39.81	38.11
21.42	20.5	15.3	18.8	5.2	1.7		32.7%		36.41	
24.6	20.5	14.9	18.9	5.6	1.6	1.55	28.6%	28.7%	39.36	38.21
24.71	20.5	15.3	19	5.2	1.5		28.8%		37.07	
30.02	20.5	15	19.1	5.5	1.4	1.55	25.5%	28.2%	42.03	46.31
29.76	20.7	15.2	19.0	5.5	1.7		30.9%		50.59	

Table 6. Test results of copper (53.98 mm) and heat loss of influent water.

Injection flow rate (l/min)	Results						Heat transfer coefficient (%) (W1-W3)/(W1-W2)		Heat transfer rate (kcal/min)	
	W1 (°C)	W2 (°C)	W3 (°C)	Temperature difference (°C)			Ratio	Average	Efficiency	Average
				(W1-W2)	(W1-W3)					
					Gap	Average				
5.05	21.6	15.9	17.5	5.7	4.1	4.37	71.9%	75.7%	20.71	21.73
4.81	22.0	16.3	17.6	5.7	4.4		77.2%		21.16	
5.07	21.5	15.6	16.9	5.9	4.6		78.0%		23.32	
10.54	21.6	16.3	18.6	5.3	3.0	3.20	56.6%	58.4%	31.62	32.55
10.15	21.9	16.5	18.9	5.4	3.0		55.6%		30.45	
9.88	21.5	15.8	17.9	5.7	3.6		63.2%		35.57	
15.55	21.6	16.5	19.2	5.1	2.4	2.60	47.1%	49.0%	37.32	40.40
14.98	21.9	16.7	19.4	5.2	2.5		48.1%		37.45	
16.01	21.5	15.9	18.6	5.6	2.9		51.8%		46.43	
20.42	22.2	16.4	19.9	5.8	2.3	2.27	39.7%	41.8%	46.97	46.12
19.79	21.9	16.8	19.8	5.1	2.1		41.2%		41.56	
20.77	21.4	16	19	5.4	2.4		44.4%		49.85	
25.27	22.2	16.5	20.3	5.7	1.9	1.93	33.3%	37.1%	48.01	50.18
26.28	21.9	17	20.1	4.9	1.8		36.7%		47.30	
26.3	21.4	16.3	19.3	5.1	2.1		41.2%		55.23	
30.41	22.2	16.8	20.5	5.4	1.7	1.67	31.5%	32.7%	51.70	51.13
30.51	21.9	17.1	20.4	4.8	1.5		31.3%		45.77	
31.07	21.4	16.3	19.6	5.1	1.8		35.3%		55.93	
41.21	22.2	16.9	20.9	5.3	1.3	1.43	24.5%	27.3%	53.57	57.59
39.28	21.1	15.5	19.6	5.6	1.5		26.8%		58.92	
40.18	21.4	16.5	19.9	4.9	1.5		30.6%		60.27	
50.92	22.2	17.1	21	5.1	1.2	1.30	23.5%	23.6%	61.10	65.52
49.97	21.1	15.7	19.9	5.4	1.2		22.2%		59.96	
50.32	22.0	16	20.5	6	1.5		25.0%		75.48	

시험을 실시하였다. 열교환기 유입수(W1)와 유출수(W3)의 최대 온도차이는 약 5 l/min의 유량으로 열교환기를 통과시켰을 때 4.5°C의 온도가 감소하는 것으로 확인되었고 최소 온도차이는 30 l/min의 유량으로 통과시켰을 때, 1.4°C의 온도변화가 측정되었다(Fig. 6). Tank 1 (W1)과 Tank 2 (W2)의 온도차를 감안할 때, 주입수의 유량이 약 5 l/min인 경우 평균 약 69.5% (약 4.17°C)의 열을 Tank 2로 방출하였으며, 주입량이 증가할수록 열손실율이 감소하여 약 30 l/min의 경우에는 28.4% (1.55°C) 정도만 열교환기에서 외부로 방출하는 것으로 파악되었다(Table 5).

동관(53.98 mm)은 약 5~50 l/min의 유량으로 24회 시험을 실시하였다. 열교환기 유입수(W1)와 유출수(W3)

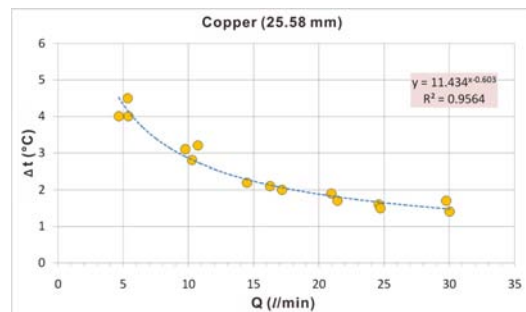


Fig. 6. Temperature change according to the flow volume of thermal exchanger (copper, 28.58 mm) injection.

의 최대 온도차이는 약 5 l/min의 유량으로 열교환기를 통과시켰을 때 4.6°C의 온도가 감소하는 것으로 확인되

Table 7. Test results of stainless (60.50 mm) and heat loss of influent water.

Injection flow rate (l/min)	Results						Heat transfer coefficient (%) (W1-W3)/(W1-W2)		Heat transfer rate (kcal/min)	
	W1 (°C)	W2 (°C)	W3 (°C)	Temperature difference (°C)			Ratio	Average	Efficiency	Average
				(W1-W2)	(W1-W3)					
					Gap	Average				
5.03	22.1	16.4	17.8	5.7	4.3	4.50	75.4%	77.9%	21.63	22.52
4.96	25.2	18.9	20.1	6.3	5.1		81.0%		25.30	
5.03	23.4	18.1	19.3	5.3	4.1		77.4%		20.62	
10.3	22.1	16.5	19	5.6	3.1	3.27	55.4%	58.5%	31.93	34.23
11.4	25.0	19	21.6	6.0	3.4		56.7%		38.76	
9.7	23.4	18.2	20.1	5.2	3.3		63.5%		32.01	
16.4	22.1	16.8	19.7	5.3	2.4	2.53	45.3%	46.7%	39.36	40.52
14.71	25.0	19.2	22	5.8	3		51.7%		44.13	
17.3	23.4	18.3	21.2	5.1	2.2		43.1%		38.06	
20.86	22.1	16.8	20	5.3	2.1	2.33	39.6%	42.9%	43.81	47.71
20.51	25.0	19.2	22.4	5.8	2.6		44.8%		53.33	
20	23.4	18.2	21.1	5.2	2.3		44.2%		46.00	
24.9	22.1	17	20.3	5.1	1.8	2.00	35.3%	38.0%	44.82	49.99
25.34	25.0	19.3	22.8	5.7	2.2		38.6%		55.75	
24.7	23.4	18.4	21.4	5.0	2		40.0%		49.40	
30.94	22.1	17.1	20.5	5.0	1.6	1.80	32.0%	34.6%	49.50	55.38
30.45	25.0	19.4	23	5.6	2		35.7%		60.90	
30.96	23.4	18.4	21.6	5.0	1.8		36.0%		55.73	

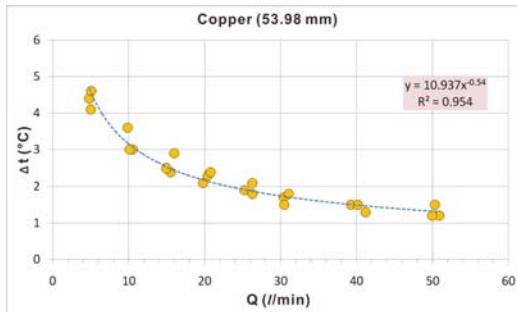


Fig. 7. Temperature change according to the flow volume of thermal exchanger (copper, 53.98 mm) injection.

었고 최소 온도차이는 50 l/min의 유량으로 통과시켰을 때, 1.2°C의 온도변화가 측정되었다(Fig. 7). Tank 1 (W1)과 Tank 2 (W2)의 온도차를 감안할 때, 주입수의 유량이 약 5 l/min인 경우 평균 약 75.7% (약 4.37°C)의 열을 Tank 2로 방출하였으며, 주입량이 증가할수록 열손실율이 감소하여 약 30 l/min의 경우에는 32.7% (1.67°C)가 방출되었고 약 50 l/min의 경우에는 23.6% (1.30°C) 정도만 열교환기에서 외부로 방출하는 것으로

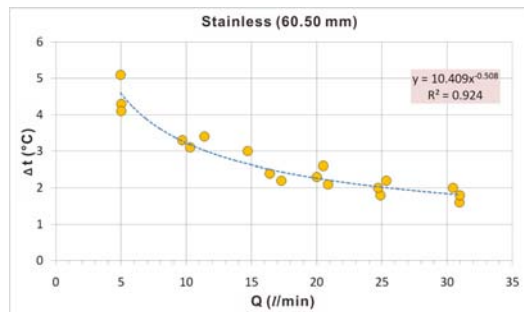


Fig. 8. Temperature change according to the flow volume of thermal exchanger (stainless, 60.50 mm) injection.

파악되었다(Table 6).

스테인레스관(60.50 mm)은 약 5~30 l/min의 유량으로 18회 시험을 실시하였다. 열교환기 유입수(W1)와 유출수(W3)의 최대 온도차이는 약 5 l/min의 유량으로 열교환기를 통과시켰을 때 5.1°C의 온도가 감소하는 것으로 확인되었고 최소 온도차이는 50 l/min의 유량으로 통과시켰을 때, 1.6°C의 온도변화가 측정되었다(Fig. 8). Tank 1 (W1)과 Tank 2 (W2)의 온도차를 감안할 때,

Table 8. Flow rate of PE (32 mm), compensation of temperature and calculation of efficiency.

Flow rete correction (Q, l/min)	Temperature correction (ΔT, °C)	Heat transfer rate correction (H, kcal/min)	5 l/min effective
5.00	1.31	6.57	100.0%
10.00	0.73	7.26	110.6%
15.00	0.51	7.71	117.4%
20.00	0.40	8.04	122.4%
25.00	0.33	8.30	126.5%
30.00	0.28	8.53	129.9%

주입수의 유량이 약 5 l/min인 경우 평균 약 77.9% (약 4.50°C)의 열을 Tank 2로 방출하였으며, 주입량이 증가할수록 열손실율이 감소하여 약 30 l/min의 경우에는 34.6% (1.80°C)가 외부로 방출하는 것으로 파악되었다 (Table 7).

열교환기별 온도 보정

열교환기 내 유체 주입에 있어 주입량을 세부적으로 컨트롤하여 정확한 주입량이 유지되어야 하나 시험 전 정확한 주입량 셋팅의 문제점과 시험과정에서의 미소한 주입량의 변화 등으로 인하여 각 시험에 따라 동일한 주입량이 주입하기가 곤란하였다. 그러나 타 열교환기와 비교를 위해서는 주입량이 모두 동일한 상태가 되어야 정확한 비교검토가 가능하므로 주입량 및 온도변화에 대한 보정을 수행하였다. 주입량은 5~10 l/min 단위로 보정하였으며 이에 따른 온도변화 보정은 열교환기 주입 유량에 따른 온도변화 그래프에서 얻어진 거듭제곱 공식을 대입하여 보정하였다.

PE관(32 mm)의 주입유량에 따른 온도변화 보정식 (1)은 다음과 같다.

$$\Delta T = 5.9108 \times Q^{-0.854} \tag{1}$$

여기서, ΔT는 온도변화 보정값, Q는 주입유량이다. 열교환기를 통과한 유체가 배출한 열량을 검토하면, 5 l/min의 경우 최소값인 6.57 kcal/min의 열량을 배출하였고 유량이 증가할수록 배출열량도 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 9). 최대유량인 30 l/min의 경우 8.53 kcal/min의 열량을 배출하여 5 l/min의 경우보다 약 129.9% 배출열량이 증대되는 것으로 파악되었다(Table 8).

동관(25.58 mm)의 주입유량에 따른 온도변화 보정식 (2)은 다음과 같다.

$$\Delta T = 11.434 \times Q^{-0.603} \tag{2}$$

여기서, ΔT는 온도변화 보정값, Q는 주입유량이다. 열

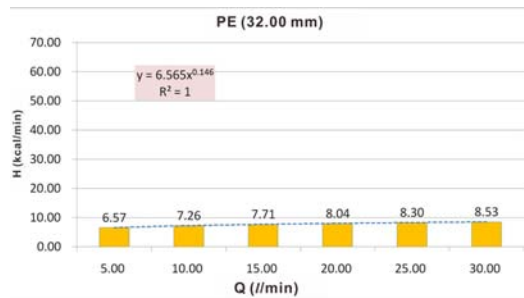


Fig. 9. Variation of emission quantity of heat proportional to the flow rate of thermal exchanger (PE) depending on the flow rate and temperature compensation.

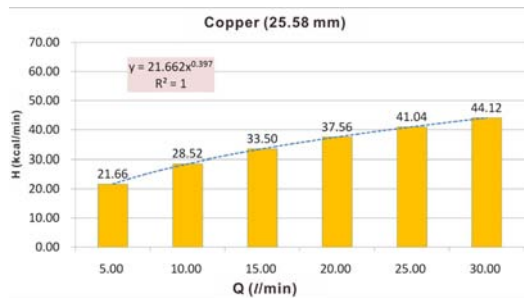


Fig. 10. Variation of emission quantity of heat proportional to the flow rate of thermal exchanger (Copper (25.58 mm)) depending on the flow rate and temperature compensation.

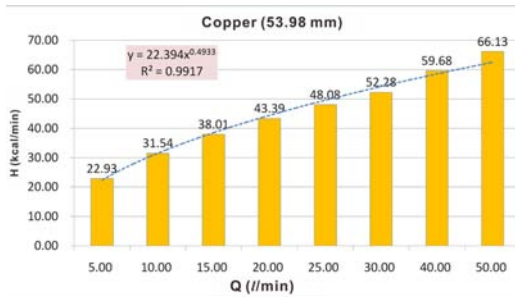
교환기 주입량 역시 5~10 l/min 단위로 보정하였으며 이에 따른 온도변화 보정은 동관(25.58 mm) 열교환기 주입 유량에 따른 온도변화 그래프에서 얻어진 거듭제곱 공식을 대입하여 보정하였다. 열교환기를 통과한 유체가 배출한 열량을 검토하면, 5 l/min의 경우 최소값인 21.66 kcal/min의 열량을 배출하였고 유량이 증가할수록 배출열량도 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 10). 최대유량인 30 l/min의 경우 44.12 kcal/min의 열량을 배출하여 5 l/min의 경우보다 약 2배 이상(203.7%)의 배출열량이 증대되는 것으로 파악되었다(Table 9).

Table 9. Flow rate of copper (25.58 mm), compensation of temperature and calculation of efficiency.

Flow rete correction (Q , l/min)	Temperature correction (ΔT , °C)	Heat transfer rate correction (H , kcal/min)	5 l/min effective
5.00	4.33	21.66	100.0%
10.00	2.85	28.52	131.7%
15.00	2.23	33.50	154.7%
20.00	1.88	37.56	173.4%
25.00	1.64	41.04	189.4%
30.00	1.47	44.12	203.7%

Table 10. Flow rate of copper (53.98 mm), compensation of temperature and calculation of efficiency.

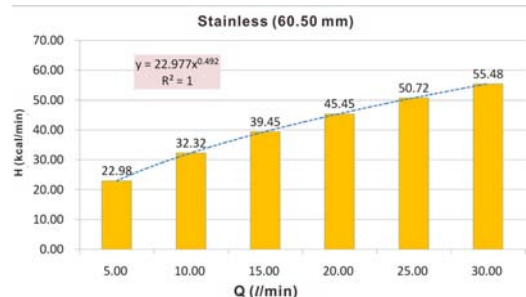
Flow rete correction (Q , l/min)	Temperature correction (ΔT , °C)	Heat transfer rate correction (H , kcal/min)	5 l/min effective
5.00	4.59	22.93	100.0%
10.00	3.15	31.54	137.6%
15.00	2.53	38.01	165.8%
20.00	2.17	43.39	189.2%
25.00	1.92	48.08	209.7%
30.00	1.74	52.28	228.0%
40.00	1.49	59.68	260.3%
50.00	1.32	66.13	288.4%

**Fig. 11.** Variation of emission quantity of heat proportional to the flow rate of thermal exchanger (Copper, 53.98 mm) depending on the flow rate and temperature compensation.

동관(53.98 mm)의 주입유량에 따른 온도변화 보정식 (3)은 다음과 같다.

$$\Delta T = 10.937 \times Q^{-0.54} \quad (3)$$

여기서, ΔT 는 온도변화 보정값, Q 는 주입유량이다. 열교환기를 통과한 유체가 배출한 열량을 검토하면, 5 l/min의 경우 최소값인 22.93 kcal/min의 열량을 배출하였고 유량이 증가할수록 배출열량도 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 11). 유량 30 l/min의 경우 52.28 kcal/min의

**Fig. 12.** Variation of emission quantity of heat proportional to the flow rate of thermal exchanger (Stainless, 60.50 mm) depending on the flow rate and temperature compensation.

열량을 배출하여 5 l/min의 경우보다 약 2배 이상 (228.0%)의 배출열량이 증대되었으며, 최대유량인 50 l/min의 경우에는 66.13 kcal/min의 열량을 배출하여 5 l/min의 경우보다 약 3배 가깝게(288.4%) 배출열량이 증대되는 것으로 파악되었다(Table 10).

스테인레스관(60.50 mm)의 주입유량에 따른 온도변화 보정식 (4)는 다음과 같다.

$$\Delta T = 10.409 \times Q^{-0.508} \quad (4)$$

Table 11. Flow rate of stainless (60.50 mm), compensation of temperature and calculation of efficiency.

Flow rete correction (Q , l/min)	Temperature correction (ΔT , °C)	Heat transfer rate correction (H , kcal/min)	5 l/min effective
5.00	4.60	22.98	100.0%
10.00	3.23	32.32	140.6%
15.00	2.63	39.45	171.7%
20.00	2.27	45.45	197.8%
25.00	2.03	50.72	220.7%
30.00	1.85	55.48	241.5%

Table 12. Efficiency of heat transfer according to both material and standard of thermal exchanger.

Flow rate (Q , l/min)	Thermal exchanger material and standard	Heat transfer rate (H , kcal/min)	PE effective	5 PE effective
5	PE (32 mm)	6.57	100.0%	100.0%
	Copper (25.58 mm)	21.66	329.9%	329.9%
	Copper (53.98 mm)	22.93	349.3%	349.3%
	Stainless (60.50 mm)	22.98	350.0%	350.0%
10	PE (32 mm)	7.26	100.0%	110.6%
	Copper (25.58 mm)	28.52	392.6%	434.4%
	Copper (53.98 mm)	31.54	434.2%	480.4%
	Stainless (60.50 mm)	32.32	444.8%	492.2%
15	PE (32 mm)	7.71	100.0%	117.4%
	Copper (25.58 mm)	33.50	434.7%	510.3%
	Copper (53.98 mm)	38.01	493.1%	578.9%
	Stainless (60.50 mm)	39.45	511.8%	600.8%
20	PE (32 mm)	8.04	100.0%	122.4%
	Copper (25.58 mm)	37.56	467.2%	572.0%
	Copper (53.98 mm)	43.39	539.7%	660.8%
	Stainless (60.50 mm)	45.45	565.4%	692.2%
25	PE (32 mm)	8.30	100.0%	126.5%
	Copper (25.58 mm)	41.04	494.1%	625.0%
	Copper (53.98 mm)	48.08	578.9%	732.3%
	Stainless (60.50 mm)	50.72	610.7%	772.5%
30	PE (32 mm)	8.53	100.0%	129.9%
	Copper (25.58 mm)	44.12	517.3%	671.9%
	Copper (53.98 mm)	52.28	613.0%	796.3%
	Stainless (60.50 mm)	55.48	650.5%	845.0%
40	Copper (53.98 mm)	59.68	-	909.0%
50	Copper (53.98 mm)	66.13	-	1007.3%

여기서, ΔT 는 온도변화 보정값, Q 는 주입유량이다. 열교환기 주입량 역시 5~10 l/min 단위로 보정하였으며 이에 따른 온도변화 보정은 Fig. 12의 그래프에서 얻어진 거듭제곱 공식을 대입하여 보정하였다. 열교환기를 통과

한 유체가 배출한 열량을 검토하면, 5 l/min의 경우 최솟값인 21.66 kcal/min의 열량을 배출하였고 유량이 증가할수록 배출열량도 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 12). 최대유량인 30 l/min의 경우 44.12 kcal/min의 열량

을 배출하여 5 l/min의 경우보다 약 2배 이상(241.5%)의 배출열량이 증대되는 것으로 파악되었다(Table 11).

유량에 따른 열전달 효율

열교환기 내 주입유량에 따른 열교환기별 효율을 분

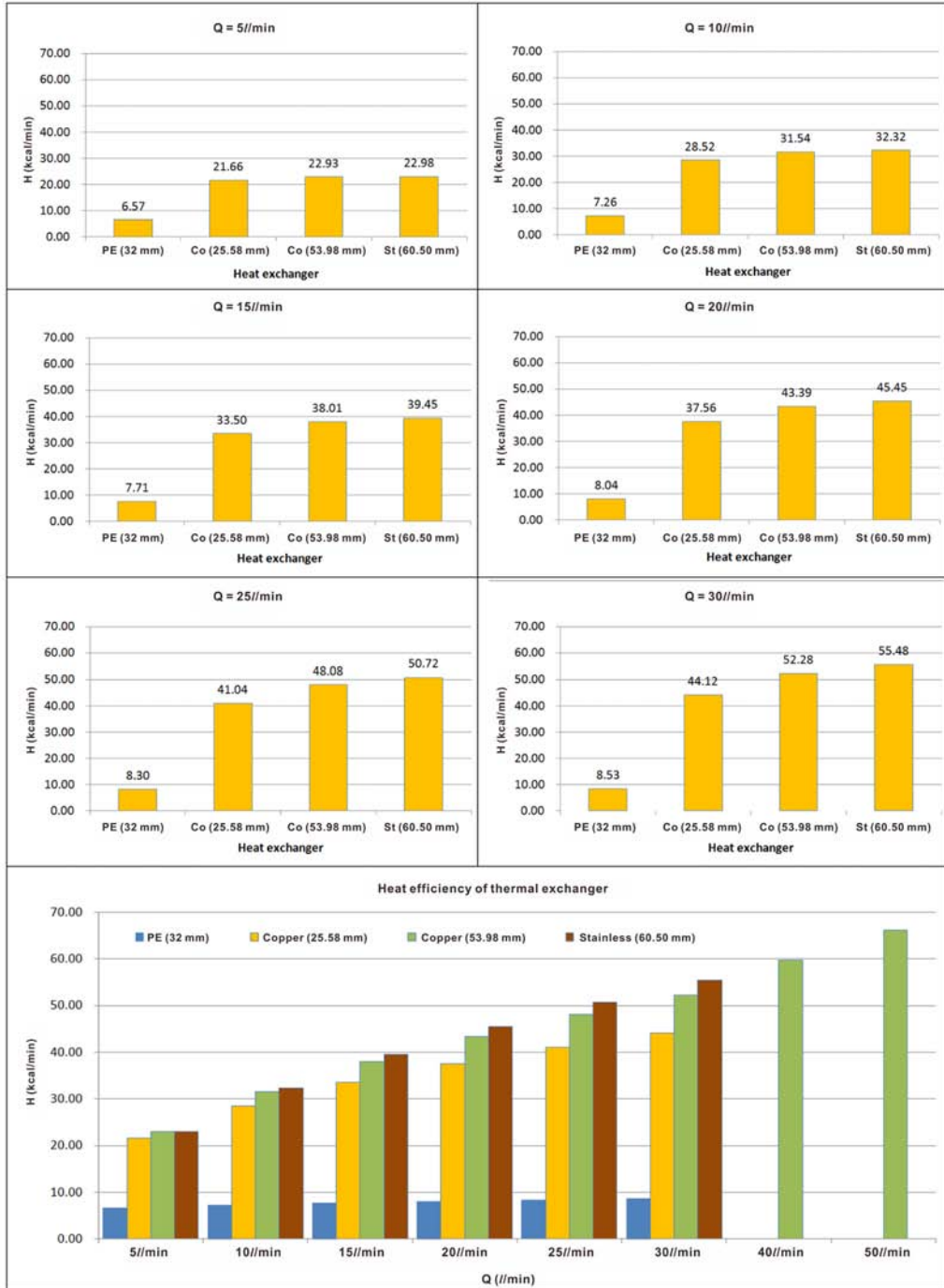


Fig. 13. Efficiency change according to material of thermal exchanger depends on flow rate of injection.

석하면, PE관 대비 금속관의 열전달효율이 매우 높게 나타났으며, 금속관의 경우 구경이 증가할수록 효율이 높아지는 것으로 파악되었으나 현 유량에서의 구경증대에 따른 효율개선은 크지 않은 것으로 분석되었다(Table 12). 각 주입량별 PE관 대비 효율을 분석하면 5 l/min의 경우 PE관 대비 동관, 스테인레스관은 3.2~3.5배 정도의 열전달 효율을 나타내고 있으며, 주입량이 증가할수록 효율은 점차적으로 증가되어 30 l/min의 경우에는 PE관 대비 동관(25.58 mm)가 5.17배, 동관(53.98 mm)가 6.13배, 스테인레스관(60.50 mm)가 6.5배 정도를 보인다. 5 l/min의 PE관 대비 효율을 검토하면, 30 l/min의 동관(25.58 mm) 효율은 6.7배, 동관(53.98 mm)가 7.96배, 스테인레스관(60.50 mm)가 8.45배 정도의 효율을 나타냈다. 이는 구경 및 유량이 증대될수록 더욱 높아지는데 50 l/min의 동관(53.98 mm)의 경우 5 l/min의 PE관 대비

10배 이상의 효율을 나타내는 것으로 파악되었다. 주입량별로 구경이 유사한 PE관(32 mm)과 동관(25.58 mm)를 비교하면, 5 l/min로 주입할 경우 PE관 대비 3.3배의 효율을 나타내는 것으로 나타났으며, 10 l/min일 경우 약 3.9배, 15 l/min일 경우 약 4.3배, 20 l/min이 경우 약 4.7배, 25 l/min의 경우 약 4.9배, 30 l/min의 경우 약 5.2배의 효율을 나타낸다. PE관 5 l/min 대비 동관(25.58 mm) 30 l/min를 비교하면 약 6.7배 정도 효율이 증대되며, PE관 10 l/min 대비 동관(25.58 mm) 30 l/min를 비교하면 약 6.0배 정도 효율이 증대되는 것으로 나타났다(Fig. 13). 열교환기 내 주입유량에 따른 분석결과를 볼 때, 일반적인 PE관을 유사 규격의 금속관으로 교체할 경우, 열전달 효율이 6배 정도 증대될 수 있음을 알 수 있으며, 이는 금속관으로 설치된 지열공 1공만으로도 기존 지열공 6개 설치효과를 나타낼 수 있음을 의미

Table 13. Efficiency of unit area according to flow rate depend on thermal exchanger.

Material	Diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Length (m)	Cross section (cm ²)	Contact area (m ²)	Flow rate (l/min)	Efficiency per unit area (kcal/min/m ²)	PE Effective
PE (32.00 mm)	32	25.6	23.0	5.1	3.70	5.00	1.77	100.0%
						10.00	1.96	100.0%
						15.00	2.08	100.0%
						20.00	2.17	100.0%
						25.00	2.24	100.0%
						30.00	2.31	100.0%
Copper (25.58 mm)	25.58	22.28	23.0	3.9	3.22	5.00	6.73	379.1%
						10.00	8.86	451.1%
						15.00	10.41	499.4%
						20.00	11.66	536.8%
						25.00	12.75	567.8%
						30.00	13.70	594.4%
Copper (53.98 mm)	53.98	49.76	23.0	19.4	7.19	5.00	3.19	179.7%
						10.00	4.39	223.4%
						15.00	5.29	253.7%
						20.00	6.03	277.7%
						25.00	6.69	297.8%
						30.00	7.27	315.4%
Stainless (60.50 mm)	60.5	56.5	23.0	25.1	8.16	5.00	2.81	158.6%
						10.00	3.96	201.5%
						15.00	4.83	231.9%
						20.00	5.57	256.2%
						25.00	6.21	276.7%
						30.00	6.80	294.7%

한다. 단, 이와 같은 효율은 지하수의 양수를 동반할 경우 가능하다. 지열은 열전도율에 따라 지열이 전도됨

으로써 일정량 이상의 지열 확보는 불가능하다. 그러나 지하수 유동을 발생시킬 경우 유동하는 지하수에서 지속

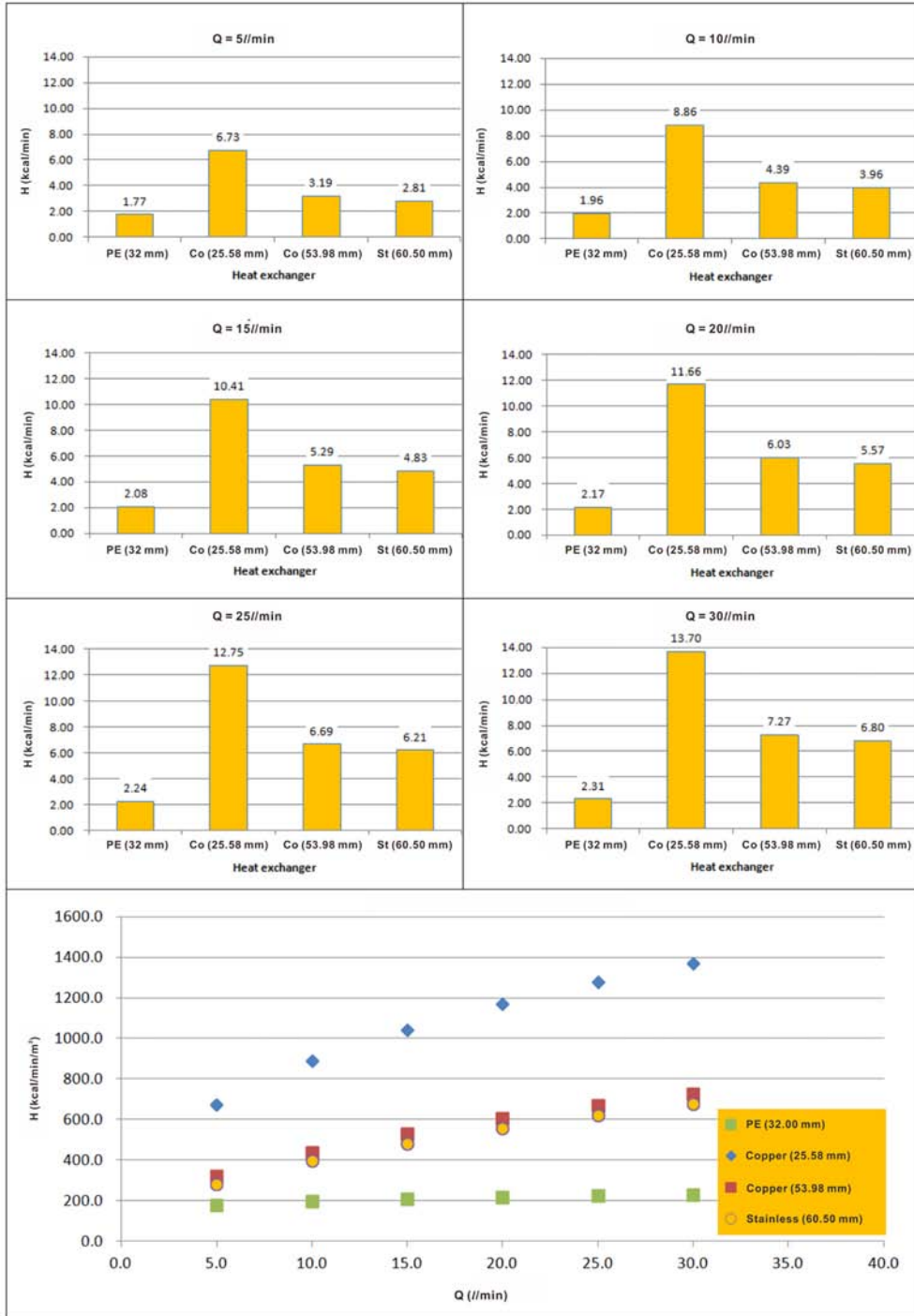


Fig. 14. Comparison of heat transfer per unit contact area according to flow rate of injection.

적으로 지하수열이 공급됨으로 인하여 높은 열교환 효율을 유지할 것으로 판단된다.

단위면적에 따른 열전달 효율

실내시험에서 수행된 열교환기는 상용화된 제품으로 제작하였으며, 이로 인하여 동일한 규격에 대한 시험을 실시할 수 없었다. 따라서, 동일 규격일 때의 효율을 평가하기 위하여 열교환기의 단위면적에 대한 열교환 효율을 검토하였다. 검토결과 25.58 mm 구경의 동관이 PE관 대비 약 3.8~5.9배 정도의 효율을 나타내어 단위면적당 열교환 효율이 가장 높게 평가되었다(Table 13). 또한, 열교환기 내 주입유량이 증대될수록 PE관 대비

효율이 증가하는 양상을 보이고 있다. 구경이 상대적으로 큰 53.98 mm 동관과 60.50 mm 스테인레스관의 경우에는 단위면적당 효율이 25.58 mm 동관에 비해 상대적으로 낮게 평가되었는데 이는 관경이 상대적으로 커 접촉면적이 넓은 반면 유입수가 열교환기 표면과 접촉 비율이 상대적으로 작고 유체의 열전도도가 금속에 비해 상대적으로 매우 낮아 유입수 내의 열이동이 제한적이기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 14).

유속에 따른 열전달 효율

열교환기 구경 변화에 따른 효율을 검토하기 위하여 각 열교환기 별 유속에 따른 효율을 분석하면, 유속이

Table 14. Change of heat transfer according to flow speed depends on thermal exchanger.

Material	Diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Length (m)	Cross section (cm ²)	Thermal exchanger internal volume (cm ³)	Flow rate (l/min)	Flow speed (cm/sec)	Heat transfer rate (H, kcal/min)
PE (32.00 mm)	32	25.6	23.0	5.1	11838.5	5.00	16.19	6.57
						10.00	32.38	7.26
						15.00	48.57	7.71
						20.00	64.76	8.04
						25.00	80.95	8.30
						30.00	97.14	8.53
Copper (25.58 mm)	25.58	22.28	23.0	3.9	8967.0	5.00	21.37	21.66
						10.00	42.75	28.52
						15.00	64.12	33.50
						20.00	85.50	37.56
						25.00	106.87	41.04
						30.00	128.25	44.12
Copper (53.98 mm)	53.98	49.76	23.0	19.4	44727.9	5.00	4.29	22.93
						10.00	8.57	31.54
						15.00	12.86	38.01
						20.00	17.14	43.39
						25.00	21.43	48.08
						30.00	25.71	52.28
						40.00	34.28	59.68
						50.00	42.85	66.13
Stainless (60.50 mm)	60.5	56.5	23.0	25.1	57665.3	5.00	3.32	22.98
						10.00	6.65	32.32
						15.00	9.97	39.45
						20.00	13.30	45.45
						25.00	16.62	50.72
						30.00	19.94	55.48

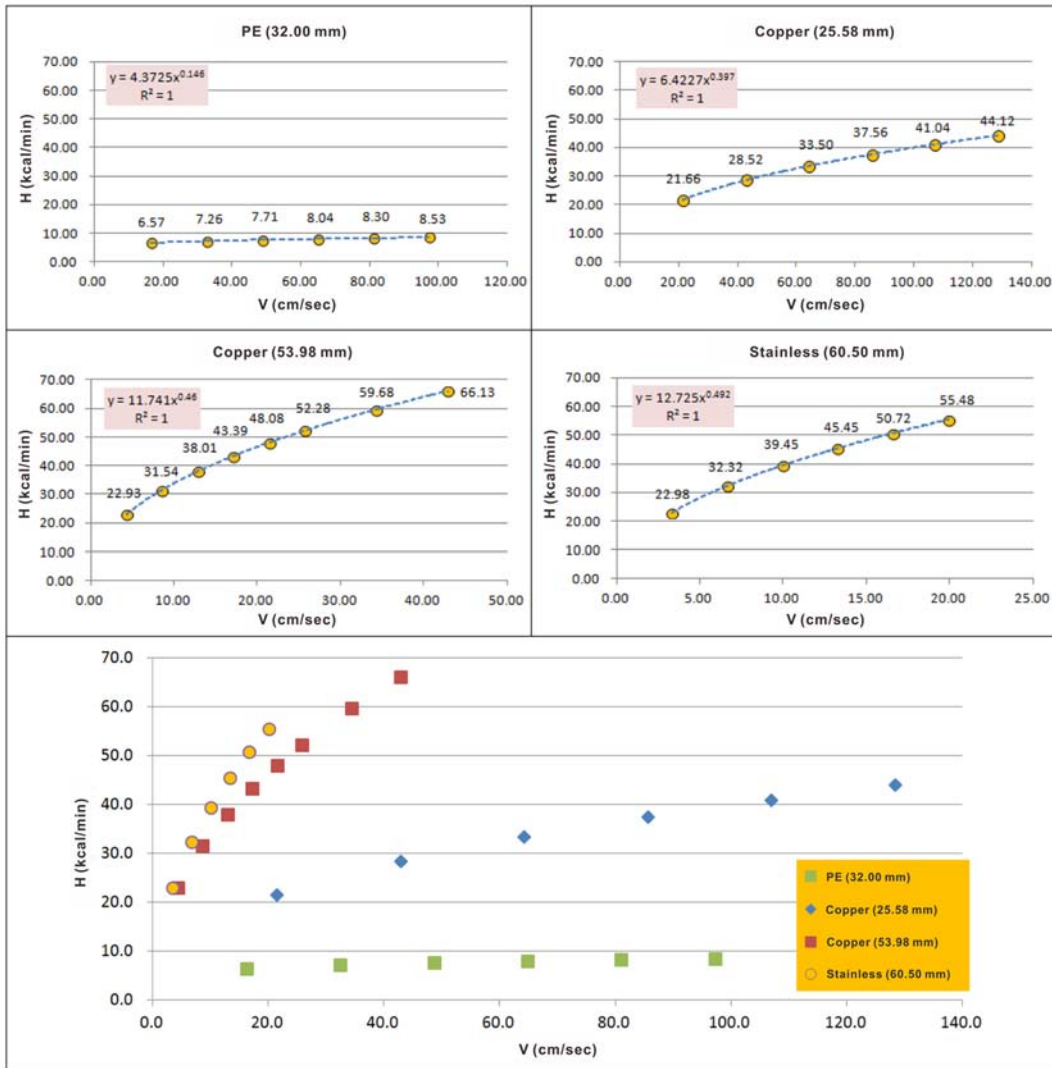


Fig. 15. Comparison of heat transfer according to injection speed depends on thermal exchanger.

증가할수록 열전달량이 증가하는 양상을 보이고 있으며, 금속재질이 PE관에 비해 유속증가에 따른 기울기가 커 유속이 증가할수록 상대적으로 높은 효율을 보이는 것으로 파악되었다(Table 14). 또한, 금속관의 경우 구경이 증대될수록 동일 유속하에서 열전달량이 높아지는데 이는 동일한 길이 내에서 구경이 커질수록 접촉면적이 구경에 비례하여 증대되고 유입유량은 구경 반지름의 제곱에 비례하여 증대되기 때문으로 판단된다. 즉, 구경이 커질수록 열교환기와 순환유체와의 접촉면적이 넓고 열교환기 내의 유입유량이 증대됨으로써 효율이 높아지는

것으로 볼 수 있다(Fig. 15).

실내시험에서 동관의 경우 2개 구경에 대한 시험을 실시하였다. 이들 동관에 대한 분석데이터에서 얻어진 계산식을 바탕으로 열교환기 구경증대에 따른 효율을 검토하였다(Table 15). 동일 재질의 동관의 경우, 동관 25.58 mm와 동관 53.98 mm의 내경의 비율은 약 1 : 2.23 정도이다. 이들 동관의 유속에 따른 열교환 효율을 검토하면 유속이 빠를수록 열전달량의 비가 소규모 증대되는 양상을 보이고 있으나 내경 비율인 1 : 2.23과 유사한 1 : 2.1(10 cm/sec 일 경우) ~ 1 : 2.4(100 cm/sec 일

Table 15. Change of heat transfer according to flow speed depends on copper size.

Size	Flow speed (cm/sec)							Note
	10	20	30	40	50	70	100	
Copper (25.58 mm)	16.0	21.1	24.8	27.8	30.4	34.7	40.0	() is heat transfer rate of 25.58 mm copper size
Copper (53.98 mm)	33.9 (2.1)	46.6 (2.2)	56.1 (2.3)	64.1 (2.3)	71.0 (2.3)	82.9 (2.4)	97.7 (2.4)	

경우)를 나타내어 동일재질에서 규격의 비율만큼 효율도 증대되는 것으로 확인되었다. 즉 구경이 2배 증대되면, 열전달량도 2배 증가되는 것으로 나타났다. 그러나 이는 2개 구경에 국한되어 시험한 데이터로써 구경 증가에 따른 정확한 효율증대를 평가하기 위해서는 추가적으로 다양한 구경에 대한 시험이 수행되어야 할 것이다.

결론

열교환기 내 주입유량에 따른 열교환기별 효율을 분석하면, PE관 대비 금속관의 열전달효율이 매우 높게 나타났으며, 금속관의 경우 구경이 증가할수록 효율이 높아지는 것으로 파악되었으나 현 유량에서의 구경증대에 따른 효율개선은 크지 않은 것으로 분석되었다. 각 주입량별 PE관 대비 효율을 분석하면 5 l/min의 경우 PE관 대비 동관, 스텐레스관은 3.2~3.5배 정도의 열전달 효율을 나타내고 있으며, 주입량이 증가할수록 효율은 점차적으로 증가되어 30 l/min의 경우에는 PE관 대비 동관(25.58 mm)가 5.17배, 동관(53.98 mm)가 6.13배, 스텐레스관(60.50 mm)가 6.5배 정도를 보였다.

단위면적에 대한 열교환 효율 검토결과 25.58 mm 구경의 동관이 PE관 대비 약 3.8~5.9배 정도의 효율을 나타내어 단위면적당 열교환 효율이 가장 높게 평가되었다. 또한 열교환기 내 주입유량이 증대될수록 PE관 대비 효율이 증가하는 양상을 보였다.

열교환기 구경 변화에 따른 효율을 검토한 결과 유속이 증가할수록 열전달량이 증가하는 양상을 보이고 있으며, 금속재질이 PE관에 비해 유속증가에 따른 기울기가 커 유속이 증가할수록 상대적으로 높은 효율을 보이는 것으로 파악되었다.

이와 같은 현장실내시험 결과를 토대로 하여 일반적인 PE관을 유사 규격의 금속관으로 교체할 경우 열전달 효율이 증대되는 효과를 얻을 수 있어, 금속재질 열교환기의 현장 적용성을 검토하고 현장실증시험을 실시하여 시공성을 검증한다면 기존 밀폐형 지중열교환기와의 비

교를 통해 실용화 가능성을 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

References

Barbier, E., 2002, Geothermal energy technology and current status: an overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1-2), 3-65.

Cho, H. N., Lee, D. H., and Jeong, G. C., 2012, Efficiency of geothermal energy generation assessed from measurements of deep depth geothermal conductivity, *The Journal of Engineering Geology*, 22(2), 233-241 (in Korean with English abstract).

Kim, O. J., Lee, K. H., and Kim, M. S., 2008, A study on improving the efficiency of ground heat exchanger, *The Korea Society of Mechanical Engineers Autumn Conference*, 11, 2008, 3142-3147 (in Korean with English abstract).

Lee, M. T., Kim, Y. I., and Kang, B. H., 2007, Dynamic simulation of ground source heat pump with a vertical U-tube ground heat exchanger, *Korean journal of air-conditioning and refrigeration engineering*, 19(5), 372-378 (in Korean with English abstract).

Lee, C. H., Lee, K. J., Choi, H. S., and Choi, H. P., 2009, Thermal conductivity and viscosity of graphite-added bentonite grout for backfilling ground heat exchanger, *Transactions of the Korea society of geothermal energy engineers*, 5(1), 19-24 (in Korean with English abstract).

Lee, J. Y., 2009, Current status of ground source heat pumps in Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6), 1560-1568 (in Korean with English).

Lund, J. W., Freeston, D. H., and Boyd, T. L., 2011, Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, *Geothermics*, 40(3), 159-180.

Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2006, *The future of geothermal energy*, Idaho National Laboratory, 200p.

No, S. T., 2014, An analysis of borehole depth variation of vertical closed loop ground heat exchanger with various design conditions, *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of the Korea*, 16(1), 233-238 (in Korean with English abstract).

Park, Y. B., Park, J. B., Lim, H. S., and Baek, S. K., 2007, Economic analysis of cooling-heating system using ground source heat in multi family apartment, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, 8(3), 11-18 (in Korean with English abstract).

송재용

산하이엔씨
462-120 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124
Tel: 031-776-0682
Fax: 031-776-0688
E-mail: sjy1010@hanmail.net

김기준

산하이엔씨
462-120 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124
Tel: 031-776-0682
Fax: 031-776-0688
E-mail: kkj@sanhaenc.com

안상곤

산하이엔씨
462-120 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124
Tel: 031-776-0682
Fax: 031-776-0688
E-mail: ask1209@hanmail.net

김진성

한국농어촌공사 농어촌연구원
426-908 경기 안산시 상록구 해안로 870
Tel: 031-400-1851
Fax: 031-400-1616
E-mail: gwater@ekr.or.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@anu.ac.kr