

지역난방 2차측 유량변화가 내부 열유속 및 에너지소비량에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

The Experimental Study of the Heat Flux and Energy Consumption on Variable Flow Rate for Secondary Side of DHS

홍성기(Seong-Ki Hong)^{1*}, 조성환(Sung-Hwan Cho)²

¹전주대학교 산학협력단, ²전주대학교 기계자동차공학과

¹Academic Cooperation, Jeonju University, Jeonju, 560-759

²Korea Department of Mechanical and Automotive Engineering, Jeonju University, Jeonju, 560-759, Korea

(Received September 24, 2013; revision received January 12, 2015; Accepted: March 2, 2015)

Abstract The presented work demonstrates the effects of flow rate on the secondary side of DHS (District Heating System). Increasing flow rate at the secondary side of DHS decreases energy consumption and time to reach the set-point of the heated room while increasing heat flux on the floor in the heating space. When flow rate increases, the overall heat transfer rate of radiant floor also increases. However, the results also show overall heat transfer rate to not increased linearly and thus the existence of an optimal flow rate for the secondary side of DHS. Control of the radiant floor with hot water may be more effectively accomplished with a combined control strategy that includes heat flux and a temperature set-point. This experimental analysis has been performed using a lab-scaled DHS pilot plant located at Jeonju University in Korea.

Key words District heating system(지역난방 시스템), Set point control(설정치제어), Outdoor reset control(외기보상 제어), Predictive optimal control(예측/최적제어), Heating control(난방제어), Indoor air temperature control(실내온도제어)

† Corresponding author, E-mail: baobab612@naver.com

기호설명

T : 온도 [°C]
 \dot{m} : 유량 [ℓ/m]
 C_p : 정압비열 [kJ/kg °C]
 \dot{Q} : 열전달량 [kW]
 A : 면적 [m^2]

그리스 문자

θ : 외기온도의 변화 기울기
 n : 비례상수

하첨자

i : 공급
 o : 환수
 w : 난방수
 or : 외기온도 한계
 b : 보일러

z : 실내

1. 서론

1차측 에너지 효율성 향상에 대하여 지역난방공사를 포함하는 에너지공급자 측에서 폭 넓게 세계적으로 꾸준히 진행되고 있다. 하지만 지역난방 공급 2차측 효율 향상에 대한 연구는 국내 실정을 살펴볼 때 적극적으로 진행되지 않았던 것이 사실이다. 반면, 전세계 유가의 지속적인 불안과 상승, 기후 조건의 악화, 도시의 밀집 및 건물의 첨단화에 따라 냉난방 에너지의 사용이 증가되고, 국가적인 에너지 비용이 증대됨에 따라 세대 소비자의 에너지 비용 부담과 국가적인 에너지 비용의 절감을 위해서 2차측의 열에너지 효율향상에 관한 연구의 필요성은 그 어느 때보다 크다고 할 수 있겠다.

국내 지역난방 시스템 적용 공동주택의 2차측의 난방 에너지 효율을 위해 연구될 수 있는 부분은 유량, 공급수 온도, 환수온도, 열교환기 등의 기구류, DPV, Inver-

ter 및 시스템에 걸쳐 다양하지만 2차측 열공급 효율을 연구하기 위해 가장 대표적으로 표현할 수 있는 함수는 아래와 같이 식(1)로 표현할 수 있다.

$$Q = f(mc_p, \Delta T) \quad (1)$$

Q : 열량

mc_p : 유량

ΔT : 공급온도와 환수온도의 차이

지역난방 시스템에서 2차측 열공급 효율을 향상시키기 위해 Adelman⁽¹⁾, Friedlander⁽²⁾은 외기온도와 난방 공급온도 사이에 선형관계가 있음을 착안해서 외기온도에 역비례로 공급수 온도를 제어하는 Outdoor Temperature Reset-Control 방안을 제안했으며, Cho et al.^(3, 4)은 실내 온도와 바닥 표면온도를 모두 쾌적한 범위로 유지시키는 다인자 제어방법 등을 제안하여 단일공간에 이용할 수 있는 다양한 제어방법을 연구하여왔다. 이러한 연구들은 지역난방 2차측 공급수 온도에 대해서만 연구되어졌던 것이 사실이다.

그러나 본 연구에서 2차측 열공급의 효율성 향상을

위하여 2차측의 유량이 에너지사용량에 미치는 영향을 연구하였다. 특히, 지역난방 2차측에 있어서 유량변화에 따른 난방공간 내부의 열류변화(Heat Flux), 에너지사용량의 변화, 실내 설정온도 및 다양한 변화에 대하여 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실제 지역난방 설비 시스템의 개략도를 나타내며 보이는 바와 같이 각각 난방과 급탕재열 및 급탕예열의 총 세 개의 열교환기가 중앙에 배치되어 있는 것을 볼 수 있다. 이들은 지역난방으로부터 공급된 열량을 수용가 측에 사용용도별로 분배 시킬 수 있는 장치이다. 실험실의 전체면적은 약 76 m² 규모의 Pilot Plant로써, 실제 건물과 외기온 환경을 모사할 수 있는 약 34 m² 크기의 챔버 내에는 독립된 두 개의 실내가 존재하며 약 42 m² 공간에 각종실험설비 및 자동제어 장치로 구성되어 있다.

Fig. 1는 이러한 지역난방 시스템을 모사한 본 연구

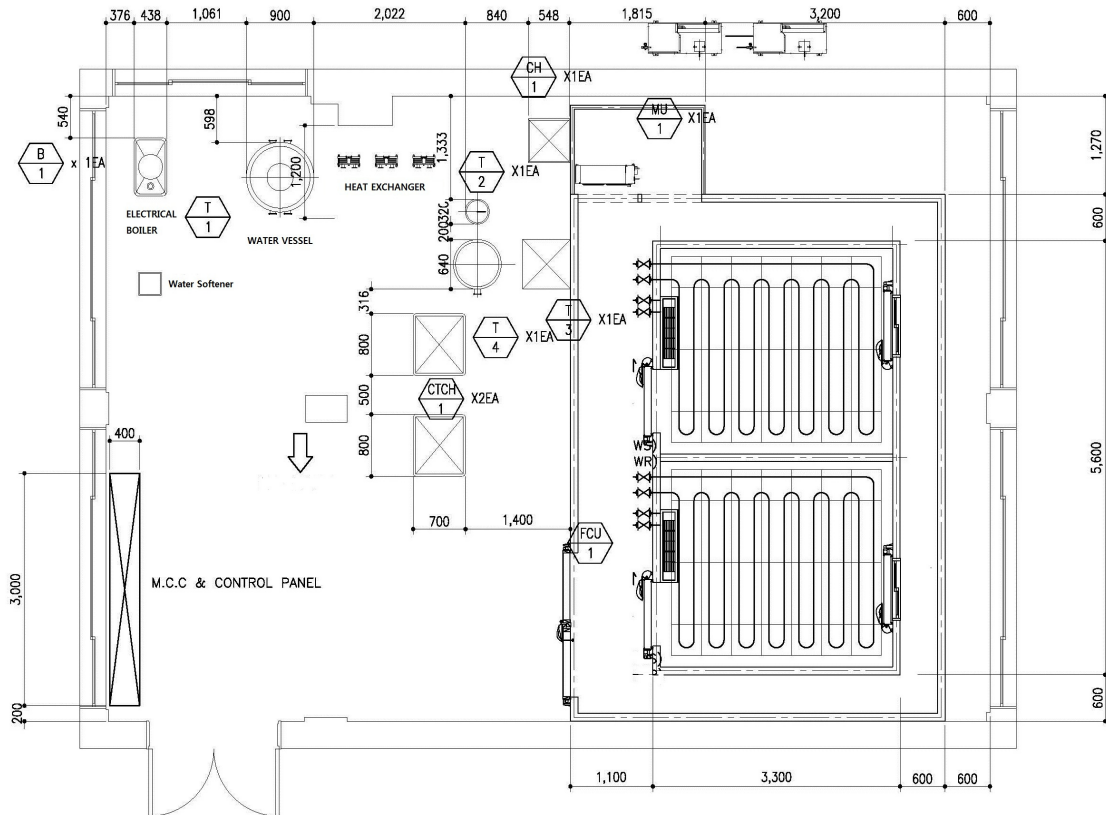


Fig. 1 Lay out of pilot plant.

Table 1 Mechanical facilities of experimental apparatus

machinery	use	
Boiler	medium temperature hot water	quantity of heat 27,520[kcal/hr]
	heating[4 p]	6,400[A = 0.098 m ²]
Heat Exchanger	service hot[3 p] water warm up	4,500[A = 0.098 m ²]
	service hot[3 p] water reheat	3,750[A = 0.098 m ²]
Pump	circulating pump	flow rate 26/58/60[LPM]
Valve	flow rate control	2-way or 3-way mixing valve
Air handling unit	outdoor temperature control	cooling capacity 7,800[kcal/hr]

의 설비시스템을 나타내고 있으며, 실험을 위한 모사용 장치는 Table 1과 같이 열원공급 측의 모사로 보일러와 온수탱크, 수용가 측에 열량을 전달하는 매개체 역할의 열교환기 파트와 순환펌프, 및 각종 밸브, 두 개의 방과 냉방유닛 등으로 구성되어 있다.

중온수보일러는 27,520 kcal/hr 용량의 전기보일러가 설치되었고, 최대유량 26 ℓ/min인 순환펌프에 의해 500 ℓ 용량의 중온수탱크에 고온수가 공급되며 On-Off 제어 방식에 의해 원하는 임의의 온도제어가 가능하다.

최대유량 26 ℓ/min인 온수 순환펌프는 열교환기로부터의 얻어진 열량을 챔버 내부에 존재하는 두 개의 난방공간에 바닥 난방을 통해 난방부하를 공급 및 환수 시킨다.

열전달을 담당하는 열교환기의 경우 6,400 kcal/hr 용량의 난방 열교환기와 4,500 kcal/hr 용량의 급탕재 열교환기, 3,750 kcal/hr 용량의 급탕 예열 열교환기로 가스켓식 판형 열교환기를 사용하였다. 난방과 급탕은 동시 및 개별 운전이 가능하다.

유량제어를 위해 인버터제어를 시행하였으며 인버터는 0.1~400 hz 변화가 가능한 LS 산전의 iG5A를 부착하였다.

밸브는 2-way 및 3-way 밸브를 사용하였으며 중온수보일러와 중온수탱크는 각자의 On-Off 제어기에 의해 제어되는데 비해 각종 펌프와 밸브 및 cooling unit은 XG5000 PLC를 거쳐 PC와 연동됨으로서 주어진 제어 로직으로 제어 될 수 있도록 하였다.

2.2 실험방법

모든 실험에서 1차측 공급온도를 100℃로 설정하였고, 2차측 공급온도는 제어하지 않았다. 실험에서 난방

Table 2 Flow rate in pipe to heating according to Frequency of pump

Frequency (hz)	18	30	42	60
Flow rate (ℓ/min)	2.7	4.2	6.1	8.7

공간 1의 실내온도는 20℃에서 시작하였으며, 챔버 내의 온도 즉 외기온도는 -4℃로 일정하게 유지하도록 제어 하였다. 보통 지역난방에서는 2차측 공급온도를 제어하기 위해 1차측 배관에 컨트롤밸브(구동기)를 두어 밸브의 개도를 제어함으로써 열교환기에 유입되는 중온수 유량을 제어하였으나 본 실험에서는 난방 2차측 공급온도를 제어할 필요가 없기 때문에 구동기 제어는 하지 않았으며, 따라서 중온수 유량은 일정하게 열교환기를 유입되게 하였다.

유량제어를 위해 인버터 시스템을 도입하여 난방 2차측 순환펌프의 회전수를 제어함으로써 실내난방에 작용하는 난방수의 유량을 제어하였으며, 실제 인버터 시스템에 의해 제어된 회전수에 따른 유량은 표와 같다.

Table 2에서처럼 인버터에 의해 유량을 조절하여 난방수의 온도와는 상관없이 난방을 하였으며, 실험에서 각각의 유량에 따른 난방속도, 전력 소비량 측정을 목적으로 GUI(Graphic User Interface) 프로그램을 만들고 각각의 포인트별 데이터 값을 분당 모니터링 하였다.

실험에서 유량변화에 따른 난방 2차측의 열부하는 난방공간의 온도를 20℃에서 난방을 시작하여 난방공간 내부의 온도가 30℃에 이를 때까지 부하로 한정하여 측정하였으며, 이는 각각의 실험에서 시간에 관계없이 동일하게 적용하였다.

추가적으로 난방공간의 바닥에서 올라오는 열류변화를 측정하기 위한 실험에서는 상기의 실험과 달리 Fan Coil Unit을 정지시킨 상태에서 순수 바닥에서 올라오는 열류만을 측정하였다. CM11B의 열류센서(Heat Flux Sensor)는 난방공간의 정 가운데에는 설치하고, LI-19의 데이터로거(Datalogger)를 설치하여 분당 난방 바닥에서 복사되어 올라오는 열류(Heat Flux)를 측정하였다. 열류는 각각의 실험의 목적을 달성하는 시간동안 측정되었다.

3. 실험결과 및 분석

지역난방 2차측 난방 공급수 유량을 달리한 경우별 설정실험에 있어서 유량의 변화가 에너지소비량에 미치는 영향에 대한 실험의 결과는 다음과 같다.

Fig. 3는 인버터 시스템 제어를 통해 지역난방 2차측 난방배관에 흐르는 유량 그래프를 보여주고 있다.

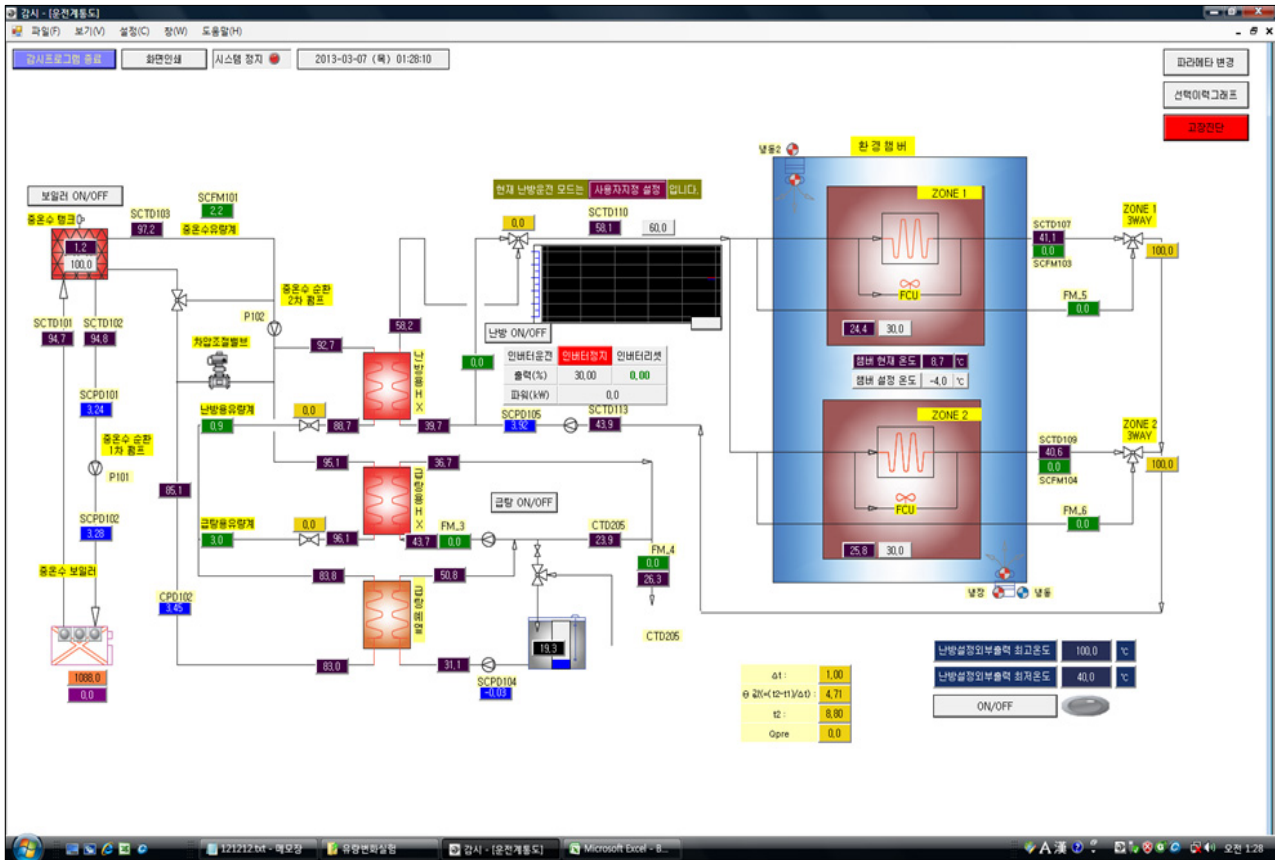


Fig. 2 GUI of control program.

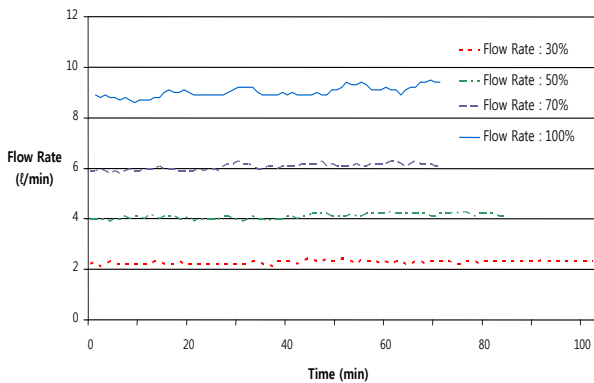


Fig. 3 Flow rate of 2st heat exchanger.

펌프의 정격출력은 60 hz이며 실험에서 30%, 50%, 70%, 100%로 유량을 제어했을 때 Table 2에서와 같이 유량이 변화하고, 100%일 때의 유량의 편차가 좀 더 크게 나타나지만 보편적으로 유량의 변화는 정상적으로 이루어지고 있고, 2차측 난방에 사용되는 유량은 충분히 정상적으로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

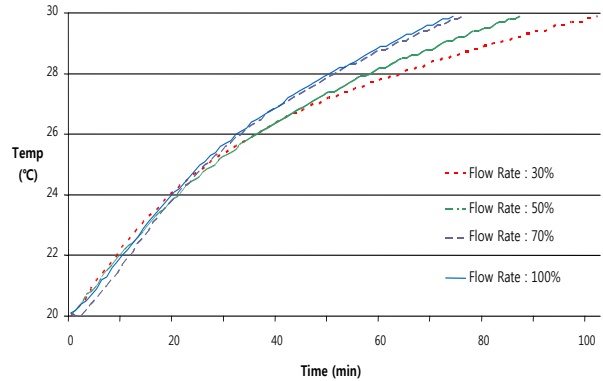


Fig. 4 Change of time in other to satisfy object of test.

Fig. 4는 인버터 시스템 제어를 통해 지역난방 2차측 난방배관에 흐르는 유량을 달리하여 룸 내부의 온도를 20℃에서 난방을 시작하여 룸 내부의 온도가 30℃에 이를 때까지 각각의 유량에서 난방부하를 달성하는 데 걸리는 시간과 온도를 나타내는 그래프이다. 유량이 30%일 때 룸 내부의 온도가 30℃에 이르는 시간이 가

Table 3 Time to reach from 20°C to 30°C

Frequency (hz)	18	30	42	60
Time (min)	104	89	78	76

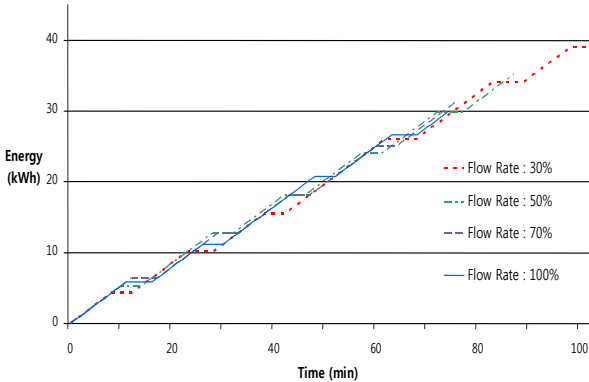


Fig. 5 Energy consumption of the each test.

장 길게 걸리는 것으로 나타나며, 유량이 100%일 때 룸 내부의 온도가 30°C에 이르는 시간이 가장 짧게 걸리는 것으로 나타난다.

특히 Fig. 5에서 볼 수 있는 현상은 유량이 70%일 때와 100%일 때의 시간의 격차는 미소하다는 사실 또한 확인할 수 있다. 이는 유량의 증가가 어느 시점을 지났을 때 더 이상의 효과를 보여주지 않는다는 것을 확인할 수 있었고 이는 유량의 Optimal Point가 존재한다는 것으로 사료된다.

각각의 경우에 따른 난방부하를 달성하는 데 걸리는 시간을 표로 작성하면 Table 3과 같다.

Fig. 5은 인버터 시스템 제어를 통해 지역난방 2차측 난방배관에 흐르는 유량을 달리하여 룸 내부의 온도를 20°C에서 난방을 시작하여 룸 내부의 온도가 30°C에 이를 때까지 각각의 유량에서 난방부하를 달성하는 데 필요한 에너지소비량(전력량)을 보여주는 그래프이다. 유량이 30%일 때 룸 난방 부하를 달성하는데 총 에너지소비량은 각각의 실험에서 가장 크게 나타난다. 실험을 진행할 때 난방공간 내부의 축열량을 감안하기 위하여 각각의 실험과 실험 사이에는 충분한 시간을 두고 냉각하여 실험을 진행하였다.

또한 유량이 100%인 경우 난방부하를 달성하는데 필요한 에너지소비량은 가장 적은 것으로 나타난다. 또한, 유량을 70%로 한 경우와 100%로 한 경우를 비교하면 에너지소비량에 있어 크게 차이가 나지 않는다는 것을 알 수 있다.

실험에서 실질적인 수치는 Table 4를 보면 알 수 있으며, Table 4는 각각의 실험에 따른 지역난방 2차측에

Table 4 Energy consumption of the each test

Frequency (hz)	18	30	42	60
Power consumption (kWh)	38.9	35.2	31.5	30.9

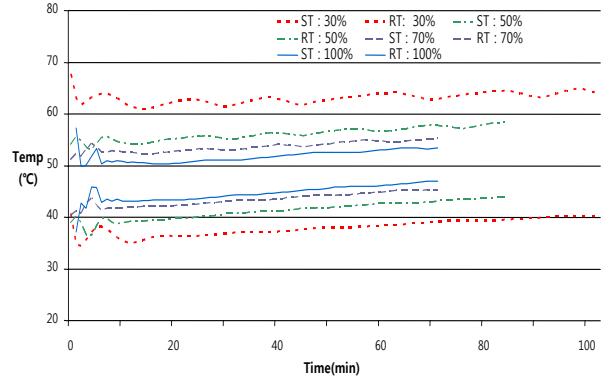


Fig. 6 Supply temperature and return temperature to the each test.

서 난방목적을 달성하는 데 따른 에너지소비량을 표로 나타낸 값이다. 유량의 증가가 난방공간의 설정온도에 도달하는 시간을 현격히 줄여주며 이에 따른 에너지 사용량도 같은 현상을 보여주는 것으로 나타났다. 이는 난방공간 자체가 하나의 열교환기 역할을 함으로써 유량의 증가가 전체적인 열전달 효과를 향상시킨다는 것으로 사료된다. 하지만 유량의 증가가 어느 시점을 지났을 때 더 이상의 효과를 보여주지 않는다는 것을 확인할 수 있었고, 이는 유량의 Optimal Point가 존재한다는 것으로 사료된다.

Fig. 6은 인버터 시스템 제어를 통해 지역난방 2차측 난방배관에 흐르는 유량을 달리하여 룸 내부의 온도를 20°C에서 난방을 시작하여 룸 내부의 온도가 30°C에 이를 때까지 각각의 유량에서 난방부하를 달성하는 실험을 수행하였을 때 열교환기 2차측의 온도변화를 나타내는 자료이다. 실험에서 유량이 30%일 때 공급온도의 온도가 가장 높고, 이때의 환수온도는 가장 낮게 나타난다. 또 실험에서 유량이 100%일 때 공급온도는 가장 낮고 이때의 환수온도는 가장 높게 나타난다.

50%와 70%의 경우는 비례적으로 공급온도는 낮아지고, 환수온도는 높아지는 것도 확인할 수 있다. 그러나, 2차측 공급온도를 각각의 유량에 따라 확인하면 30%에서 50%, 70%, 100%으로 변화할 때 공급온도가 낮아지는 현상은 선형비례(linear proportional)하지 않고 지수비례(exponential) 변화를 보여주고 있다.

그리고 열교환기에서 1차측 공급과 2차측 환수 사이에 열교환 효율을 비교하기 위해 1차측 공급수 온도와

Table 5 Efficiency of heat exchanger of the test

Frequency (hz)	18	30	42	60
Quantity of heat of 1st (kcal)	87.9	95.9	97.8	98.9
Quantity of heat of 2st (kcal)	56.8	60.8	62.3	63.1
Efficiency	0.646	0.634	0.636	0.637

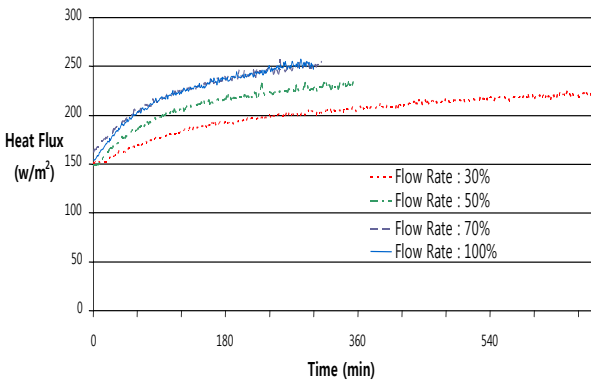


Fig. 7 Heat Flux Graph to the each test.

Table 6 Heat Flux of the each test

Frequency (hz)	18	30	42	60
Time (min)	709	355	311	303
Everage H.F (w/m ²)	201.3	208.4	225.3	226.1

환수 온도, 2차측 공급온도와 환수온도의 평균으로 열교환기 효율을 구하였다. Table 5는 각각의 실험에서 열교환기의 효율을 나타낸다.

Fig. 7은 인버터 시스템 제어를 통해 지역난방 2차측 난방배관에 흐르는 유량을 달리하여 룸 내부의 온도를 20℃에서 난방을 시작하여 룸 내부의 온도가 30℃에 이를 때까지 각각의 유량에 따른 난방공간의 바닥면에서의 열류(Heat Flux)량의 변화를 보여주고 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 유량이 정격출력의 30%일 경우 바닥면의 열류량이 낮아 30℃에 도달하는 시간이 다른 경우의 실험에 비해 현격한 차이를 보이고 있으며, 유량이 정격출력의 50%, 70%, 100%일 때의 순서로 열류량이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

또한 Table 6을 통해 난방공간의 난방목적 달성에 걸리는 시간과 그에 따른 열류량의 차이를 볼 수 있으며, 이는 유량이 적을 때는 난방 목적을 달성하

기 위한 난방공간 바닥에서의 열류량이 적어 난방 목적을 달성하기에 비효율적임을 판단할 수 있다.

우리나라와 같이 온돌을 난방의 주요 시스템으로 사용하는 경우에 있어서 실내의 설정온도에 의한 제어 보다는 바닥면의 Heat Flux를 제어하여 에너지를 절감하는 방안도 매우 효과적일 것이라고 사료되며, 온도 제어와 병행하여 유량을 제어하는 복합적 방안에 대한 연구도 진행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지역난방 시스템에서 2차측 유량의 변화가 에너지사용량에 미치는 영향과 열류를 분석하여 보았다. 본 실험으로 파악된 결과는 아래와 같다.

- (1) 열교환기 2차측 난방 유량이 실험에서와 같은 펌프 정격출력의 30%, 50%, 70%, 100%로 변화할 경우 난방공간의 설정온도에 도달하는 시간은 각각 104분, 89분, 78분, 76분으로 걸린다. 이는 유량의 증가가 난방공간의 열전달 효율을 상승시켜 난방공간의 설정온도에 도달하는 시간을 감소시키는 것으로 나타났다.
- (2) 난방공간의 바닥면에서 올라오는 열류량은 유량이 펌프 정격출력의 30%, 50%, 70%, 100%로 변화할 때 비록 공급온도가 각각 평균 63.1℃, 56.1℃, 53.6℃, 52.3℃로 낮아지더라도 201.3 w/m², 208.4 w/m², 225.3 w/m², 226.1 w/m²로 증가한다.
- (3) 이때 열교환기 1차측 총에너지 소요량(전력소요량)은 각각 38.9 kWh, 35.2 kWh, 31.5 kWh, 30.9 kWh로 감소하였다. 이는 낮은 온도 및 높은 유량으로 공급하는 것이 난방효과를 상승시키는 것으로 사료된다.
- (4) 지역난방 시스템 사용 공동주택에서 2차 측 난방에너지를 효율적으로 제어하기 위해서는 온도제어와 유량제어를 병행하여 제어하는 복합적 방안에 대한 연구도 진행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 에너지자원 융합원천 기술개발사업의 ‘에너지 효율 개선율(절감율) 평가기법 개발 및 DB 구축’(20122020100120)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

1. Adelman, D., 1988, Some control strategies for radiant floor heating, Radiant Times, pp. 4-5.

2. Friedlander, M., 1986, Premium heating with radiant slabs, *Solar Age*, pp. 66-71.
3. Cho, S. H., 1995, Thermal circumstance characteristics of the house with a floor heating system on the variations of heating control method, *Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference*, pp. 455-461.
4. Cho, S. H. and Tae, C. S., 1996, The effective heating control method of the radiant floor heating system, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 317-329.