[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 32, No. 3, 2012
ISSN 1598-6411

지열원히트펌프를 활용한 도로융설시스템의 성능 평가 및 예측

최덕인*, 황광일**

*한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과(chikd13@naver.com)
**한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부(hwangki@hhu.ac.kr)

An Evaluation and Prediction of Performance of Road Snow-melting System Utilized by Ground Source Heat Pump

Choi, Deok-In* Hwang, Kwang-Il**

*Dept. of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Graduate School, Korea Maritime University(chikd13@naver.com),
**Div.. of Mechanical and Energy Systems, Korea Maritime University(hwangki@hhu.ac.kr)

Abstract

Because of the climate changes and the development of building technologies, the cooling loads have been increased. Among the various renewable energies, geothermal energy is known as very useful and stable energy for heating and cooling of building. This study proposes a road snow-melting system of which heat is supplied from GSHP(Ground source heat pump) in viewpoint of the initial investment and annual running performance, which is also operating as a main facility of heating and cooling for common spaces. The results of this study is as followings. From the site measurement, it is found out that the road surface temperature above the geothermal heating pipe rose up to 5℃, which is the design temperature of road snow-melting, after 2 hours' operation and average COP(Coefficient of performance) was estimated as 3.5. The reliability of CFD has confirmed, because the temperature difference between results of CFD analysis and site measurement is only ±0.4℃ and the trend of temperature variation is quite similar. CFD analysis on the effect of pavement materials clearly show that more than 2 hours is needed for snow-melting, if the road is paved by ascon or concrete. But the road paved by brick is not reached to 5℃ at all. To evaluate the feasibility of snow-melting system operated by a geothermal circulation which has not GSHP, the surface temperature of concrete-paved road rise up to 0℃ after 2 hour and 40 minutes, and it does never increase to 5℃. And the roads paved by ascon and brick is maintained as below 0℃ after 12 hours geothermal circulation.

Keywords : 지열에너지(Geothermal Energy), 지열원히트펌프(Ground Source Heat Pump, GSHP), 도로융설(Road Snow-melting), 수치해석(Computational Fluid Dynamics, CFD)

submit date : 2012. 4. 3, judgment date: 2012. 4. 10, publication decide date : 2012. 6. 11
communication author : Hwang, Kwang-Il(hwangki@hhu.ac.kr)

1. 서 론

2005년 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법이 시행된 이후, 태양에너지, 풍력에너지, 지열에너지 등 법률에서 정의한 다양한 신재생에너지 설비의 보급률은 급격히 증가하고 관련 기술도 활발히 개발되고 있는 상황에서, 정부는 신재생에너지 산업을 차세대 성장 동력으로 선언한 바 있다. 더욱이 최근에 개정된 법률은 신축·증축·개축하는 건물에서 연면적 1,000m^{2}이상의 건물에서는 건물의 예상에너지 사용량의 10%이상(2012년의 경우로, 2013년부터는 매년 증가함)을 신·재생에너지로 공급하라고 명시하는 등 법률의 적용대상을 확대함으로써 신재생에너지 설비의 보급은 양적, 질적으로 더욱 증가할 것으로 예측된다.[1)2)]

신재생에너지 보급률은 나라마다 다른데 우리나라의 경우 풍력, 태양광, 연료전지, 지열, 태양열 등의 순으로 보급률이 높은 것으로 조사되었다[3)]. 대부분의 신재생에너지가 발전을 주요 목적으로 하고 있는 것과 달리 지열과 태양열은 열생산을 목적으로 하고 생산자와 소비자가 일치하는 경향을 보이고 있다. 특히 수십 년간 난방용 열생산 설비로 인식되었던 태양열급탕 설비에 비하여, 지열의 경우 지열원히트펌프(Ground source heat pump, 이하 GSHP로 표기)의 에너지원으로 활용될 경우 냉방과 난방이 모두 가능하기 때문에 건물용 냉난방 설비로 GSHP를 도입하는 사례가 더 많은 실정이다.

그러나 지열시스템[4)]의 설계와 운영 및 유지관리과정에서, GSHP의 냉열, 온열 설비용량은 정량적으로 정해져 있음에도 불구하고, 건물의 냉난방부하는 최대냉방부하가 최대난방부하보다 크고, 연간부하의 경년변화에 따른 냉난방부하간 불균형이 심화되고 지중온도가 상승하는 현상 등이 문제점으로 지적되었다.[5)6)7)] 이는 GSHP의 전반적인 성능 저하와 기기의 수명에 영향을 미치기 때문에, 겨울철에 새로운 온열수요 추가하여 GSHP의 온열생산량을 증가시킴으로써 지열시스템의 냉열과 온열의 균형을 확보하여 장기적인 관점에서 지열시스템의 성능안정을 추구할 필요가 있다.

한편 기존의 도로융설방식인 염화물계융설제 살포방식은 환경오염을 발생시키고, 전열선 융설방식은 과다한 운전비로 인해 민원이 다수 발생하는 문제를 내포하고 있다.[8)]

이에 본 연구에서는 GSHP가 겨울철에 공급 가능한 여분의 온열을 도로융설용으로 활용하는 방안을 제시하고, 적용된 현장실측을 통해 GSHP의 도로융설 성능을 평가하고 이를 기초로 다양한 CFD 해석을 수행함으로써 다른 구조를 갖는 도로에서의 적용가능성을 예측한다.

2. 현장 및 도로융설시스템 개요

2.1 현장 개요

GSHP에 의한 도로융설시스템이 적용된 현장은 경기도 용인시에 위치한 연면적 177,400㎡, 4개 블록, 2,393세대로 구성된 A현장으로, 현장의 모습은 Fig. 1과 같다. 이 현

1) 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법, 지식경제부, 2012.1.1
2) 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령, 지식경제부, 2012.2.28
3) 신·재생에너지센터, 2010년 신·재생에너지 보급통계, 에너지관리공단 2011.11
4) 본문 중 GSHP는 단순히 지열원히트펌프만을, 지열시스템은 GSHP, 펌프와 배관 등의 관련기기, 건물냉난방부하 전체를 통합적으로 지칭함
5) 황광일, 김중헌, 신승호, 연구·사무용 건물에 적용된 수직형 지열냉난방 시스템의 계절별 성능평가, 대한건축학회논문집 계획계, 제25권 제7호, 2009.7.
6) 황광일, 김중헌, 신승호, 김용식, 건물 기초 슬래브에 설치된 수평형 지열교환기 성능의 경년변화, 대한건축학회논문집 계획계, 제23권 제5호, PP.179~186, 2007.5
7) Thomas H. Durkin, Keith E. Cecil, Geothermal Central System, ASHRAE Journal, pp.42~48, 2007.8
8) オンサイト型都市融雪システム研究會, オンサイト型都市融雪システムの實際と計畫, 理工図書, 2000

장에 기초설계단계에서 검토된 지열시스템은 관리실, 커뮤니티 시설 등 공용공간의 냉난방을 목적으로 하였으나, 냉방부하와 난방부하 사이에 부하량 차이가 발생하였다.

Fig. 1 Site bird view

이에 이 현장에서는 지열시스템의 부하균형을 확보하기 위해 Fig. 2에 표시한 도로 경사도가 7% 이상인 3블록과 4블록의 메인 도로에 지열시스템에 의한 도로융설시스템을 도입하였다. Table 1은 3블록과 4블록의 냉난방 부하를 정리한 것이다. 융설부하는 강설시에 융설을 위한 도로표면온도, 즉 설계온도를 5℃로 설정한 상태에서 산정된 것이다.[9)]

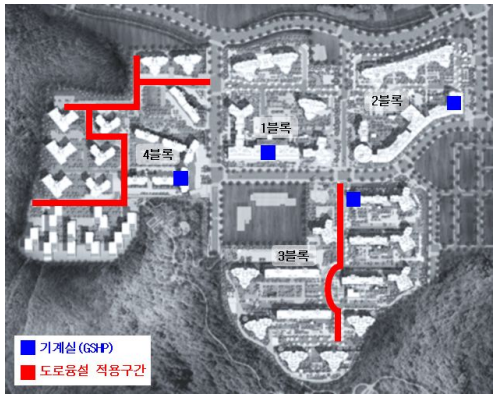


Fig. 2 Locations of road snow-melting installed

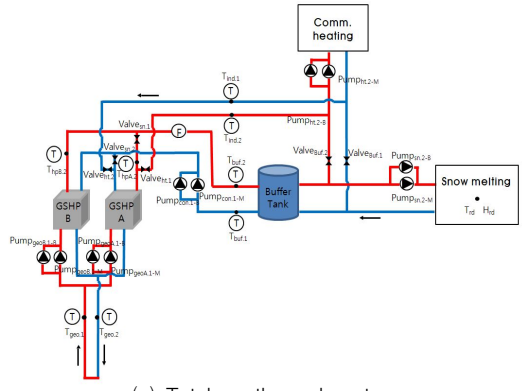
9) ASHREA Handbook, HVAC Application, Chapter 50, ASHREA, 2007

Table 1 Heating and cooling loads of each block [kW]

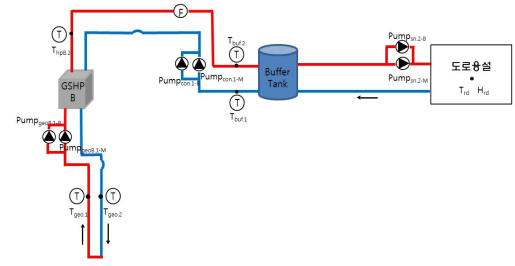
		Cooling	Heating	Diff.	Snow-melting
3rd block	Design	229	137	91	148
	Capacity	317	158	158	
4th block	Design	187	113	74	264
	Capacity	422	158	264	

2.2 도로융설시스템 개요

본 연구에서 제안하는 지열을 활용한 도로융설시스템은 지열시스템 중 GSHP가 공급가능한 여분의 온열을 활용하는 것이 주요 목적이기 때문에, 지열시스템의 배관망은 기본적으로 냉난방공급이 가능한 배관망에 도로융설용 배관망을 연결한 구조를 갖는다. Fig. 3(a)는 이 현장에 적용된 지열시스템 전체 계통을 나타내며, Fig. 3(b)는 도로융설 운전모드일 때의 시스템 계통을 나타낸다.



(a) Total geothermal system



(b) Geothermal system for road snow-melting mode

Fig. 3 System flows

도로융설용 배관은 PE 재질로 선정하였고, Fig. 4에 표시한 것과 같이 도로 표면에서 100㎜ 깊이, 150㎜ 간격으로 매설된 4개의 배관을 1개 조로 구성하여, 국산 자동차의 평균 바퀴간격을 고려해 1개 차로에 2개 조씩를 매설하였다.

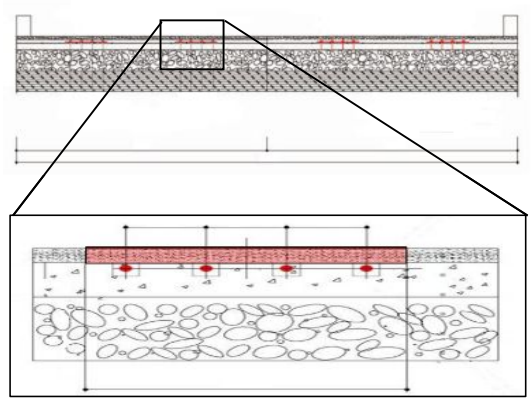


Fig. 4 A part of piping diagram of road snow-melting

3. 성능평가 및 예측

3.1 성능 측정 결과

현장에서 성능측정이 이루어진 날은 2010년 12월 30일 03:50~23:50으로 이 기간 동안의 기상조건은 Fig. 5에 표시된 것과 같이 평균기온 -6℃, 평균상대습도 85%였으며 시간당 적설량은 최저8.6㎜에서 최고 11.5㎜로 관측되었다.[10]

지열시스템에 의한 도로융설시스템의 성능을 측정평가하기 위하여 3블록 메인도로의 중앙부에 Fig. 6(a), (b)에 보이는 것과 같이 도로 중앙 1m 폭 내에 5㎝ 간격으로 20개 지점에 열전대를 설치하여 도로표면온도를 측정하였다. 전술한 바와 같이 융설배관을 150㎜ 간격, 4열로 설치하였기 때문에 1m 폭을 측정하면 융설배관과 주변 지점의 온도분포를 모두 측정할 수 있게 된다.

10) 기상청, http://www.kma.go.kr

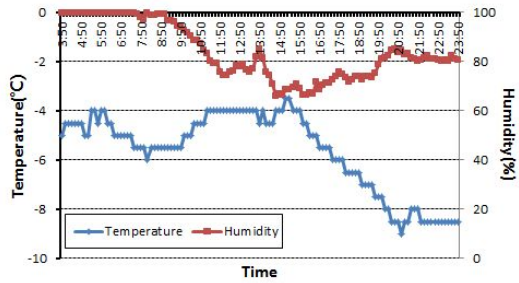


Fig. 5 Temperature and relative humidity(2010.12.30.)

(a) Location of measured

(b) Thermocouple attached on the road

Fig. 6 Measurement location of road surface temperature

Fig. 7은 각 측정점에서의 시간경과에 따른 온도변화를 나타낸 것으로, 시간축은 실제 시각이 아니라 지열시스템이 도로융설 모드로 운전을 시작한 이후의 시간을 나타낸다. 그림에서 같은 시간대에 온도가 높게 나타난 선은 융설배관 바로 위 도로표면에서 측정된 것이고, 낮은 온도를 보이는 선들은 융설배관에서 멀리 떨어진 도로표면에서 측정된 온도이다. 즉, 융설배관 근접지역에서의 도로표면온도는 융설운전이 시작된 2시간 경과 시점에 설계온도인 5℃이상을 달성하지만 융설배관으

로부터 상대적으로 먼 곳의 표면은 영상의 온도분포를 보이지만 12시간이 경과하여도 설계온도에는 도달하지 못한다. 이와 같은 융설과정 중의 GSHP의 운정성능(COP)[11]은 Fig. 8에 나타난 것과 같이 평균 3.5에서 매우 안정적으로 운전되고 있음을 알 수 있다.

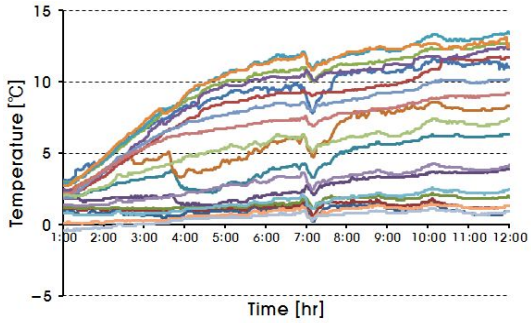


Fig. 7 Variation of road surface temperature(2010.12.30)

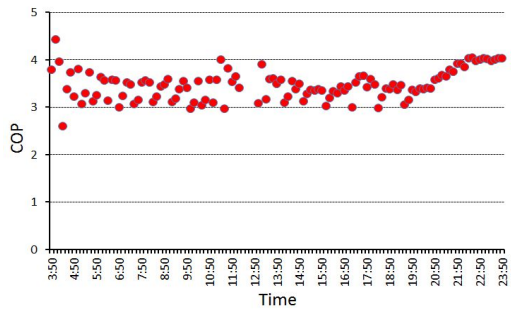


Fig. 8 COP of road snow-melting system by ground source heat pump(2010.12.30.)

3.2 CFD 해석 결과

열전달 상용 프로그램으로 널리 사용되고 있는 Fluent에 현장 설계데이터를 입력하여 성능예측을 수행하였고 이를 현장에서 취득한 측정결과와 비교하였다.

Fig. 9는 Gambit 프로그램을 사용하여 개발된 도로융설 해석 공간의 3차원 모델로, 배관이 매설된 지형의 지층 구조와 도로표면 상부를 포함한다. 길이 5m인 모델은 Periodic과 Symmetry 경계 조건을 사용했으며, map과 pave type의 메시로 격자를 구성하여, 총 950,000개의 Mesh Count가 발생하였다.

CFD를 위한 도로표면 상부의 공기 유속과 융설배관 내 온수 유속, 그리고 도로표면과 지중 1m 지점에서의 온도를 경계조건으로 설정하였고, 각 설정값은 현장측정일 당시의 조건을 동일하게 반영하였고 이를 표 2에 정리하였다.

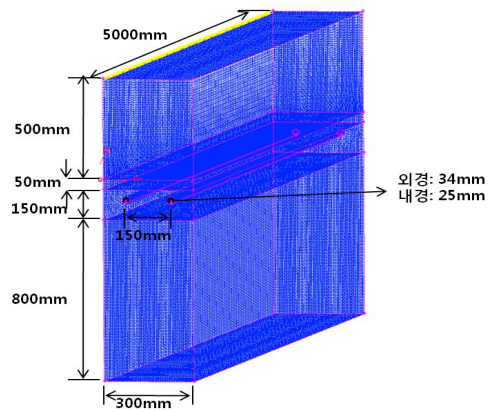


Fig. 9 Mesh modeling for CFD analysis

Table 2 Boundary conditions for CFD analysis

		온도	속도
Velocity inlet	Air	267.65K	4m/s
	Water	318.15K	1m/s
Surface	at 0m	267.65K	-
	at -1m	277.65K	-

CFD 수행에 의한 해석 결과 중 융설배관 위 도로표면의 온도분포는 Fig. 10과 같은 결과를 나타내었다. 이 결과를 Fig. 7의 가장 높은 온도 분포를 보이는 곡선, 즉 융설배관 상부 도로표면에서 측정한 온도변화 곡선과 오차 범위가 ±0.4℃ 이내로 매우 유사한 기울기와 경향을 보인다.

11) 황광일, 신동걸, 김중헌, 신승호, 정명관, 복합용도 건물에 적용된 400RT급 수직형 지열시스템의 입주전 성능평가, 한국태양에너지학회 논문집, Vol.28, No.3, 2008.6.

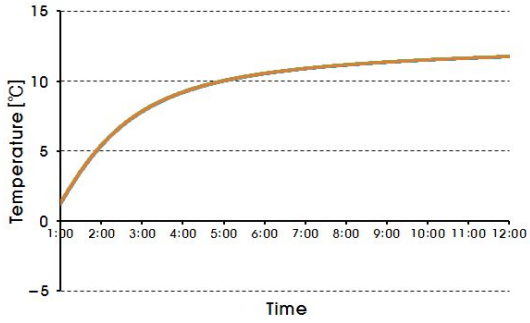


Fig. 10 Variation of road surface temperature by CFD analysis

3.3 CFD 성능 예측

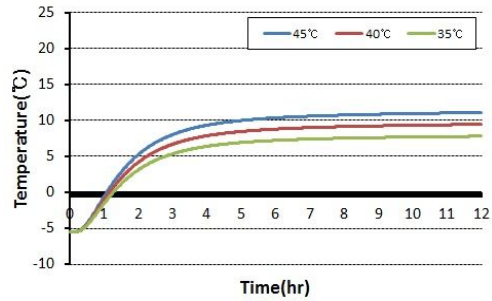
(a) GSHP에 의한 도로융설시스템

이 현장의 도로는 아스콘 포장(이하 '아스콘 포장도로'라 표기)이지만, 본 연구에서 제안하는 지열원 도로융설시스템의 적용성을 평가하기 위하여 대한주택공사 토목시설물 표준도[12]에 제시된 콘크리트 포장도로와 벽돌 포장도로를 모델링하여 성능을 예측 비교하였다. Gambit을 이용한 콘크리트 포장도로와 벽돌 포장도로의 모델링 조건은 3.2 절에 기술된 아스콘 포장도로 모델링과 동일한 방법으로 개발하였다. 표 3은 각 재질별 물성치[13]를 정리한 것이다.

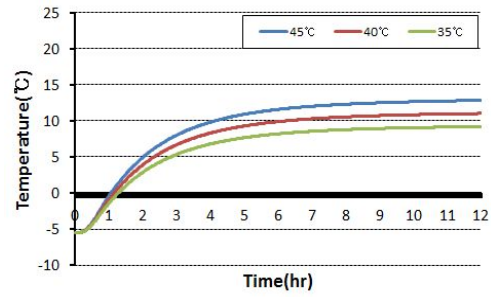
Table 3 Characteristic of road materials[11]

	Specific heat [kJ/kg·K]	Density [kg/m^3]	Heat conductivity [W/m·K]
Ascon	0.921	2,120	0.744
Concrete	0.879	1,500	0.593
Brick	1.047	1,400	0.442

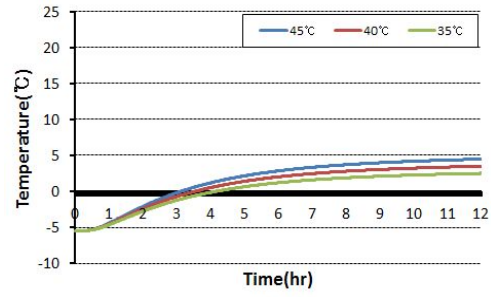
CFD 수행결과를 Fig. 11에 나타낸다. 결과를 비교분석해 보면 아스콘 포장도로와 콘크리트 포장도로는 융설을 위한 공급 온수가 45℃일 때는 2시간 경과 후, 35℃일 때는 3시간 경과 후 설계목표인 5℃에 도달하였으나, 4시간 경과 후의 온도변화에서는 공급온수의 온도가 35℃와 45℃의 10℃ 차이가 있다하여도 도로표면의 온도차이는 3~4℃에 불과함을 보여준다. 도로표면의 상대적 온도는 콘크리트 포장도로가 아스콘 포장도로보다 높은 것으로 예측되었다. 한편 벽돌 포장도로의 경우에는 3~4시간 경과 후 영상의 온도를 나타내지만 장시간 운전에도 설계목표인 5℃에 도달하지 못하는 것으로 예측되었다.



(a) Road covered by ascon



(b) Road covered by concrete



(c) Road covered by brick

Fig. 11 융설배관온도에 따른 도로표면의 온도변화

12) 토목표준설계도집, 대한주택공사, 2008.01

13) Kuzman Raznjevic, Handbook of thermodynamic tables and charts, Hemisphere Publishing Corporation, 1976

(b) 지중열 순환에 의한 도로융설시스템

GSHP 운전비 경감을 위해, GSHP를 운전하지 않고 단순히 지중에서 취득된 지중열을 펌프로 순환시켜 도로융설을 수행하는 지열원 순환식 도로융설시스템의 성능을 예측하였다.

지중의 평균온도를 280K[10]로 설정하고 앞항에서 개발한 아스콘 포장도로, 콘크리트 포장도로, 벽돌 포장도로 각 모델에 대해 CFD 해석을 수행하였다. Fig. 12의 해석 결과에 따르면, 콘크리트 포장도로만이 2시간 40분 후 도로표면온도가 0℃에 도달할 것으로 예측되지만 장시간 운전 후에도 도로융설 설계목표인 5℃ 보다 낮은 결과가 나왔다. 한편 12시간 경과 후 아스콘 포장도로의 평균온도는 -1.2℃, 벽돌 도로는 -2.7℃로나타남에 따라 지중열만으로는 도로융설이 불가능함을 알 수 있다.

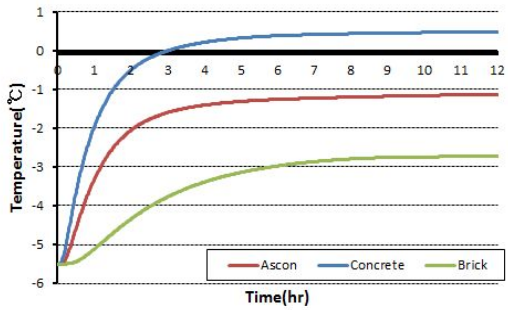


Fig. 12 Variation of road surface temperature by simply-geothermal-circulated system(w/o GSHP)

5. 결 론

지열을 에너지원으로 하는 기존 GSHP 방식 지열시스템에 추가적으로 도로융설 기능을 부여하여 초기투자비를 절감하고 연간 설비가동률을 향상시키기 위한 목적으로 수행된 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 제안 시스템 적용 현장에서의 실측 결과 융설배관 위 도로표면온도는 융설운전이 시작된 2시간 경과 시 도로융설을 위한 목표설계온도인 5℃에 도달하였고, 도로융설 운전 중 GSHP의 평균 성능계수(COP)는 약 3.5로 평가되었다.

(2) 현장 데이터에 근거한 CFD 해석결과와 실측한 도로표면온도 차이가 ±0.4℃ 이내였기 때문에 본 CFD 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

(3) CFD 해석으로 도로 포장재에 따른 융설성능을 비교 예측한 결과 아스콘 포장도로와 콘크리트 포장도로는 융설용 공급수가 45℃일 때 2시간 경과 후 도로표면의 온도가 설계목표인 5℃에 도달할 것으로 예측되었다.

(4) 융설을 위한 공급수의 온도 차이는 설계목표온도에 도달하는 시간에 영향은 주지만, 장시간 운전 시 도로표면으로 나타나는 온도는 상대적으로 작게 나타남에 따라, 집중 강설 시에 빠른 융설운전을 하기 위해서는 공급수 온도를 높게 하고 강설 기간이 긴 경우에는 공급수 온도를 낮추고 장기 운전하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

(5) GSHP를 활용하지 않고 단순히 지중열만을 펌프로 순환시켜 도로융설을 수행하는 지열원 순환식 도로융설시스템으로는 평가대상 포장재를 도로융설 설계목표인 5℃에 도달하지 못하였기 때문에 지중열만으로는 도로융설이 어려울 것으로 예측된다.

References

1. 황광일, 김중헌, 신승호, 연구·사무용 건물에 적용된 수직형 지열냉난방시스템의 계절별 성능평가, 대한건축학회논문집 계획계, 제25권 제7호, 2009.7.
2. 황광일, 김중헌, 신승호, 김용식, 건물기초 슬래브에 설치된 수평형 지열교환

기 성능의 경년변화, 대한건축학회논문집 계획계, 제23권 제5호, PP.179~186, 2007.5
3. Thomas H. Durkin, Keith E. Cecil, Geothermal Central System, ASHRAE Journal, pp.42~48, 2007.8
4. ASHREA Handbook, HVAC Application, Chapter 50, ASHREA, 2007
5. 황광일, 신동걸, 김중헌, 신승호, 정명관, 복합용도 건물에 적용된 400RT급 수직형 지열시스템의 입주전 성능평가, 한국태양에너지학회 논문집, Vol.28, No.3, 2008. 6.
6. 신동걸, 지열원 히트펌프 시스템의 운전방식에 따른 시스템 효율 향상 방법 연구, 한국해양대학교 대학원, 2009
7. Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Introduction to Heat Transfer, 5th, 2009.
8. オンサイト型都市融雪システム研究會, オンサイト型都市融雪システムの實際と計畵, 理工図書, 2000