

# 지열원 히트펌프를 이용한 도로융설시스템의 CFD 성능예측에 관한 기초연구

최덕인\*<sup>†</sup>, 김중헌\*\*, 김진호\*\*, 황광일\*\*\*

\*<sup>†</sup> 한국해양대학교 대학원, \*\*삼성건설, \*\*\*한국해양대학교 기계정보공학부

## A Basic Study on the Performance CFD simulation of Road Snow-melting system by Ground Source Heat Pump

Duk-In Choi\*<sup>†</sup>, Joong-Hun Kim\*\*, Jin-Ho Kim\*\*, Kwang-Il Hwang\*\*\*

\*<sup>†</sup> Graduate School of Korea Maritime University

\*\*Construction Division, Samsung corporation

\*\*\*Div. of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime University

### Abstract

Fluent ver.6.3 is used as CFD(Computational Fluid Dynamics) simulator to predict the performance of snow-melting system by geothermal pipes energy. As the results of this simulation, it is clearly shown that 50°C of working fluid in to geothermal evaluated as more effect comparing to 45°C of working fluid. The Surface temperature is come to 5°C at 1m/s speed and 50°C temperature of the working fluid.

**Key words** : Geothermal energy(지열에너지), Ground Source Heat Pump(지열원 히트펌프), simulation (시뮬레이션), Working fluid(작동유체)

### 기 호 설 명

$\rho_m$  : 물질 밀도, [kg/m<sup>3</sup>]

$Cp_m$  : 물질 비열, [J/kg·°C]

$k_m$  : 물질 열전도도, [W/m·°C]

$\mu_m$  : 물질 점성계수, [N·s/m<sup>2</sup>]

Pr : Prandtl 수,  $Cp \cdot \mu / k$

$Re_L$  : Reynolds 수,  $\rho u L / \mu$

$Nu$  : Nusselt 수,  $h \cdot L / k$

$h_m$  : 물질 대류열전달계수, [W/m<sup>2</sup>·°C]

$U$  : 총괄열전달 계수, [W/m<sup>2</sup>·°C]

### 하첨자 [기호설명]

$m$  : 물질전달

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-051-405-5030, Fax: +82-051-405-4790

E-mail: cdikd13@naver.com

접수일 : 2010년 11월 5일

심사일 : 2010년 11월 12일

채택일 : 2010년 11월 15일

### 1. 서 론

전세계적으로 그린하우스 가스 방출량을 감소시키기 위해서 많은 연구를 하고 있다. 그 중에서

일산화탄소나 이산화탄소를 발생시키는 화석연료 사용을 줄이고 대체에너지를 사용하여 그린하우스 가스를 줄이려는 노력을 하고 있다. 이런 대체 에너지의 종류에는 태양열에너지, 풍력에너지, 지열에너지 등의 많은 대체에너지가 있다. 각 대체 에너지마다 장단점을 가지고 있으며 지열에너지의 경우 지중으로부터 끊임없이 재생되는 열에너지를 이용하기 때문에 화석연료처럼 연료가 고갈될 우려가 없다는 장점을 가지고 있지만, 지중온도가 계절별로 약간씩 차이가 있기 때문에 얇은 지표층에서는 사용을 할 수 없다는 단점이 있다. 이런 지열에너지를 지열원히트펌프(Ground Source Heat Pump, 이하 GSHP로 표기)의 열원으로 이용하여 냉난방으로 사용되고 있다. 또한 GSHP를 겨울철 도로의 빙결을 방지하기 위한 도로용설시스템에 적용하여 널리 사용되고 있다. 도로용설시스템에 GSHP를 사용하게 되면 사람이 눈을 쓸어야할 노동을 줄일 수 있으며, 빙결되었을 경우 사용하는 염화나트륨을 사용하지 않아도 되기 때문에 비용이 절약되고 친환경적이라는 점과 도로의 결빙을 방지함으로써 운전자들의 미끄럼으로 인한 교통사고를 예방할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구는 GSHP를 이용한 도로용설시스템의 성능을 CFD(Computational Fluid Dynamics)해석 프로그램을 이용하여 GSHP를 가동하였을 경우 시간에 따른 도로의 온도변화를 예측 분석한 것이다.

## 2. 개요

### 2.1 설계조건

설계요소에는 기상데이터 및 물질들의 물성들이 필요하다. 먼저 기상데이터는 서울의 기상데이터를 사용하였다. Table 1에는 서울의 기상데이터 및 초기 조건을 나타내었다.

Fig. 1에 보이는 것처럼 지중구조는 표면에서부터 Ascon, Marble, Granite의 층으로 나누어져 있다. 여기서 도로용설 배관은 Marble층에 매립되게 된다. Table 2에는 각층 재료의 물성 및 층의 두께 및 매립되는 배관의 물성도 같이 나타내었다. Table 2의 Deep는 표면에서부터 물질이 차지

하고 있는 깊이를 말한다. 즉 Ascon의 경우는 표면(0m)에서부터 0.05m까지를 차지하고 있는 것이다.

Table 1 Initial conditions

Conditions	Value
Atmosphere [°C]	-5.5
Wind Speed [m/s]	4.0
Surface temperature [°C]	0
Water temperature [°C]	45
Water Speed [m/s]	1
Underground Temperature at -1m [°C]	4.5

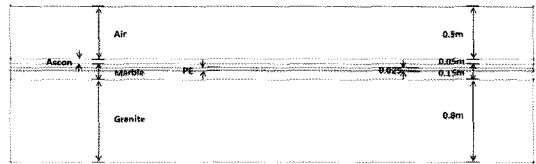


Fig. 1 Sectional view of modeling

Table 2 Material conditions

Conditions	Deep [m]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Theraml conductivity [W/m·°C]	Specific heat [J/kg·°C]
Ascon	0~0.05	2100	0.755	919.6
Marble	0.05~0.20	2700	2.4	877.8
Granite	0.20~	2500	3.3	961.4
PE	0.1	960	0.33	2299

Table 1과 Table 2의 조건을 초기조건으로 사용하여 표면의 온도가 시간의 경과에 따라 어떻게 변하는지를 확인하였다.

### 2.2 열전달 이론

초기 조건 및 물질들의 물성을 바탕으로 식을 통한 표면의 최종온도를 계산하였다. 공기와 물을 통한 대류열전달과 흙을 통한 전도열전달을 포함하는 총괄열전달 식을 이용하여 표면의 온도를 계산하였다. 표면의 온도  $T_s$ 는 식 (1)과 같다.

$$UA(T_{Water} - T_s) = h_{Air}A(T_s - T_{Air}) \quad (1)$$

여기서 U, A 및 h는 각각 총괄열전달계수, 면적, 대류열전달계수이다. 총괄열전달계수 U는 식 (2)와 같다.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{Water}2\pi r_1 L} + \sum_{A_{con}} \frac{\ln(\frac{r_m \text{외경}}{r_m \text{내경}})}{2\pi k_m L}} \quad (2)$$

여기서 x는 두께를 나타내고  $r_1$ 은 배관의 중심으로부터 재질이 바뀌는 경계까지의 반지름을 말한다. 식 (1)을 통해서 표면의 온도를 구하는데 필요한 요소들 중에서 대류열전달계수를 모르고 있기 때문에 대류열전달계수를 구해야한다. 대류열 전달은 Nu식 (3)을 변형하여 구할 수 있다.

$$Nu_L = \frac{h \cdot L}{k} \quad (3)$$

여기서 k 및 L은 각각 열전도도와 길이를 말한다. 이 길이는 평판과 같은 경우이고 만약 관내부의 유동이라면 L대신에 관경D가 들어간다. 이 Nu식은 일반적인 식이지만 Nu는 많은 실험식이 있기 때문에 실험식을 통해 구한 Nu를 구하여 대류열전달계수를 구할 수 있다. 여기서 사용한 실험식은 평판과 같은 경우 식 (4)와 같이 표현되고 관내유동의 경우 식 (5)와 같이 표현된다.

$$Nu_{Air} = 0.664 \times Re^{\frac{1}{2}} \times Pr^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

$$Nu_{Water} = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^n \quad (5)$$

식 (5)에 나타난 내부유동의 경우 Pr의 지수에 n이 표시되어 있는데 이는 가열일 경우와 냉각일 경우 대입되는 수치가 다르다. 가열일 경우 0.4를 냉각일 경우 0.3을 입력한다.

식 (4)와 식 (5)를 구하기 위해서는 Re라는 값을 알아야 한다. Re는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (6)$$

여기서  $\rho$ , V, L 및  $\mu$ 는 각각 밀도, 속도, 길이, 점성계수를 나타낸다. 이런 식을 이용하여 표면의 온도를 구할 수 있다.

### 2.3 모델링

CFD 해석프로그램은 Fluent 6.3.26version을 사용하였으며, 이 버전에서는 Gambit2.3.16version의 모델링 프로그램이 따로 되어있으며 모델링은 Fig. 2와 같이 실제 도로융설용 배관이 매립되어 있는 모습과 알고 있는 요소들을 바탕으로 수행하였고, 모델링 결과는 Fig. 3과 같다.



Fig. 2 The Road Snow-melting system is reclaimed at this actual area

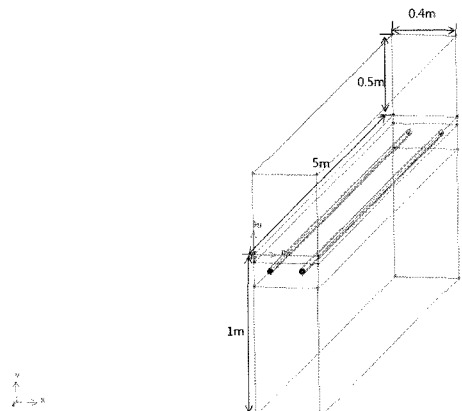


Fig. 3 Modeling

Fig. 3의 모델링을 해석하기 위해서 mesh 격자를 만들었는데 만들어진 mesh 격자는 총 95만개이며 모습은 Fig. 4와 같다.

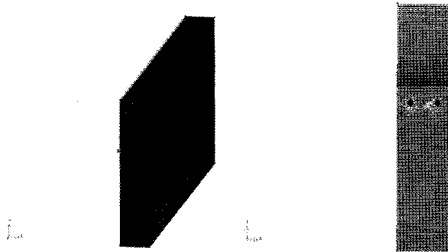


Fig. 4 Mesh Grid

### 2.4 Fluent 설정

Fluent에서 가장 중요한 설정중 하나는 경계조건을 설정하는 것이다. 모델링의 경계조건은 공기와 물이 들어오는 Velocity Inlet, 공기와 물이 나가는 Pressure Outlet과 Wall이 있고, Symmetry와 Periodic으로 입·출구와 양변을 설정하였다. Fig. 4에 경계조건의 모습을 나타내고 있다.

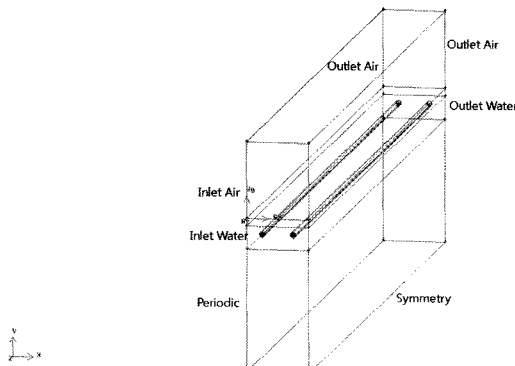


Fig. 5 Boundary Conditions

Fluent에서 경계조건 외로 설정한 것으로는 대표적인 유동 설정과 알고리즘 선택이 있다. Fluent에서 설정한 것으로는 다음과 같다.

- Unsteady
- Pressure-based
- k-ε model

- SIMPLE algorithm
- Second-Order Upwind Scheme

### 3. 성능예측 결과

겨울철 눈이 내릴 때와 내리지 않을 때를 비교하기 위해서 표면에 눈이 쌓였을 경우의 heat flux를  $-200W/m^2$ 을 설정하였다. 하지만 표면의 경우 고체인 흡과 유체인 공기가 만나는 면이기 때문에 heat flux를 설정할 수 없기 때문에 대기층에서  $-200W/m^2$ 을 흡수한다고 설정 하였다. 이렇게 정상상태 해석과, 비정상상태일 경우의 공기층에서의 heat flux 유무에 따라서 분석을 하였다. 이를 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Change the condition

구분	정상상태	비정상상태	공기층 Heat Flux	Water 유속
(1)	O			1m/s
(2)		O		1m/s
(3)		O	O	1m/s
(4)		O		0.75m/s
(5)		O	O	0.75m/s
(6)		O		0.5m/s
(7)		O	O	0.5m/s

#### (1) 정상상태

Fluent에서 정상상태로 해석했을 경우 표면 전체의 평균온도는  $272K(-1.15^{\circ}C)$ 를 나타냈다. 앞에서 세운 식을 통해서 구한 표면의 온도는  $270.9K(-2.25^{\circ}C)$ 를 보였다. 두 온도가  $1.1^{\circ}C$  차이를 보이고 있는데 이는 Fluent에서 해석한 경우는 해석 모델링에 파이프가 2개 매설되어 있기 때문에 전체적으로 열이 퍼졌기 때문에 식을 통해서 구한 것보다 높게 나온 것이라 생각한다.

#### (2) 유속 1m/s의 비정상상태

시간의 경과에 따라서 표면의 온도가 어떻게 변하는지를 확인하기 위해서 비정상상태로 해석을 하였다. 이 경우 초기조건인 물의 온도  $45^{\circ}C$ 와  $50^{\circ}C$ 를 비교하였다.

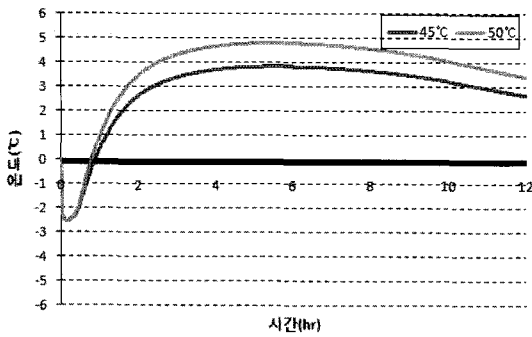


Fig. 6 Surface temperature Curve concerning supplied temperature of working fluid

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 45°C의 물이 배관에 공급되면 공급 후 53분 뒤 표면의 온도가 0°C에 도달하며 5.58시간 후 3.85°C의 최고 온도에 도달하는 반면 50°C의 물이 공급되면 공급 후 47분 뒤에 0°C에 도달하고 5.51시간 후에 4.81°C의 최고 온도에 도달한다.

(3) 유속 1m/s의 비정상상태와 눈의 열량을 감안했을 경우

눈의 열량인  $-200W/m^2$ 을 공기층에서 흡열한다는 가정을 세운 결과는 다음과 같다. 먼저 45°C의 물이 공급되는 경우 공급시작 후 3.73시간 후에 다시 0°C로 돌아오며 8.23시간 후에는 최고온도인 0.52°C에 도달하는 것을 볼 수 있다. 그리고 50°C의 물이 공급되면 2.23시간 후에 0°C에 도달되며, 7.45시간 후에는 최고온도인 1.46°C에 도달하게 되는 것을 Fig. 7을 통해서 볼 수 있다.

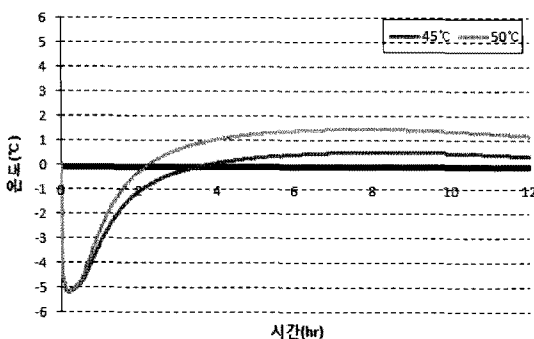


Fig. 7 Surface temperature Curve consider snow's quantity of heat to concerning supplied temperature of working fluid

Table 3에 제시한 경우를 해석한 결과 표면의 온도가 0°C에 도달하는 시간과 최고온도에 도달하는 시간을 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4 Analysis results concerning temperature and velocity

구분	0°C 도달시간 [hr]	최고온도 도달시간 [hr]	최고온도 [°C]	
(2)	45°C	0.88	5.58	3.85
	50°C	0.78	5.51	4.81
(3)	45°C	3.73	8.23	0.52
	50°C	2.23	7.75	1.46
(4)	45°C	0.9	5.51	3.78
	50°C	0.8	5.41	4.74
(5)	45°C	3.73	8.13	0.49
	50°C	2.2	7.63	1.43
(6)	45°C	1.43	5.55	4.06
	50°C	1.33	5.55	5.04
(7)	45°C	3.4	8	0.62
	50°C	2.15	7.5	1.58

4. 결론

본 연구는 GSHP를 이용한 도로융설시스템의 성능을 CFD해석 프로그램을 이용하여 예측 분석한 것이며 온도를 기존의 사용온도인 45°C와 현재 사용온도인 45°C와 비교를 하기위해서 50°C의 물을 공급 속도에 따라서 해석을 하였다.

가. 물의 공급 속도의 변화에 따른 결론

공급되는 물의 속도를 1m/s, 0.75m/s, 0.5m/s의 경우로 나눠서 해석을 하였다. 1m/s의 경우와 0.75m/s의 경우는 0°C에 도달하는 시간이 50분대로 비슷하였으나, 물의 공급 속도가 0.5m/s일 경우에는 0°C에 도달하는 시간이 1시간 30분대로 0°C에 도달하는데 시간이 더 걸리는 것을 확인하였다. 하지만 최고온도에 도달하는 시간은 모두 비슷했으며 최고온도는 오히려 0.5m/s일 경우가

가장 높게 나타났다.

### 나. 물의 공급 온도에 따른 결론

물의 온도를 45℃와 50℃로 공급했을 때 최고 온도에서 50℃일 경우가 45℃일 경우보다 1℃ 높게 나타났다. 또한 0℃에 도달하는 시간도 50℃일 경우가 45℃일 경우보다 짧게는 10분에서 길기는 한시간정도 빨리 도달하는 것을 볼 수 있다.

### 참고문헌

1. 이상우, 김중현, 신승호, 황광일, 수직형 지열교환기의 입·출구온도에 대한 실측과 CFD 결과 비교, 한국지열에너지학회논문집, v.3, no.1, pp.11-16, 2007년 6월
2. 신동걸, 김중현, 신승호, 황광일, 연구 · 사무공간의 냉난방용으로 설치된 400RT급 수직형 지열시스템의 봄철 성능평가, 한국지열에너지학회논문집, v.4, no.2, pp.9-14, 2008년 12월
3. Jin-Ho S. Kim, Jung Hun Kim, Geon Tae Lee., Design of Road Snow Melting system Using Piping System. 대한설비공학회 하계학술논문발표회 논문집
4. Dong-Keol Sin, 2009, A Study on Efficiency Improving Way of System by the Operating Method of Ground-Source Heat Pump Ststem. 한국해양대학교 학위논문
5. Hikmet Esen, Mustafa Inalli, Mehmet Esen., 2005, Numerical and experimental analysis of horizontal ground-coupled heat pump system, Building and Environment.