

## 지반 포화조건을 고려한 에너지파일의 열적거동 인자분석

### Thermal Influential factors of Energy pile considering Ground saturation

송진영<sup>1)</sup>, Jin-Young Song, 백진열<sup>2)</sup>, Jin-Yeol Paek, 윤태섭<sup>3)</sup>, Tae-Sup Yun, 정상섬<sup>4)</sup>, Sang-Seom Jeong

1) 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

2) 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

3) 연세대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

4) 연세대학교 토목공학과 정교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

**SYNOPSIS** : The thermal influential factor of energy pile system is investigated by considering the seasonal effect, saturation of ground, and fluid velocity based on the finite volume method. Analysis includes the evaluation of thermal resistance and corresponding heat exchange rate for each case. It is shown that the efficiency of heat exchange rate is more pronounced with higher fluid velocity due to the larger number of circulation for a given period. Through the parametric studies, it is also found that the degrees of saturation a little influenced thermal effect during 8 hours of operational scenario.

Keywords : thermal Influential factors, heat resistance, heat exchange rate

## 1. 서론

전 세계적으로 저탄소 녹색성장을 위한 신재생에너지 정책이 시행되고 있으며, 신재생에너지 중 지열 에너지를 이용한 에너지파일의 이용도가 높아지고 있다. 에너지파일은 최근 기성말뚝 중 PHC 말뚝을 이용하여 borehole 굴착과 열교환기 설치 및 깊은 기초로서의 성능을 동시에 만족시키는 PHC 말뚝형 에너지파일의 연구가 진행되고 있다.

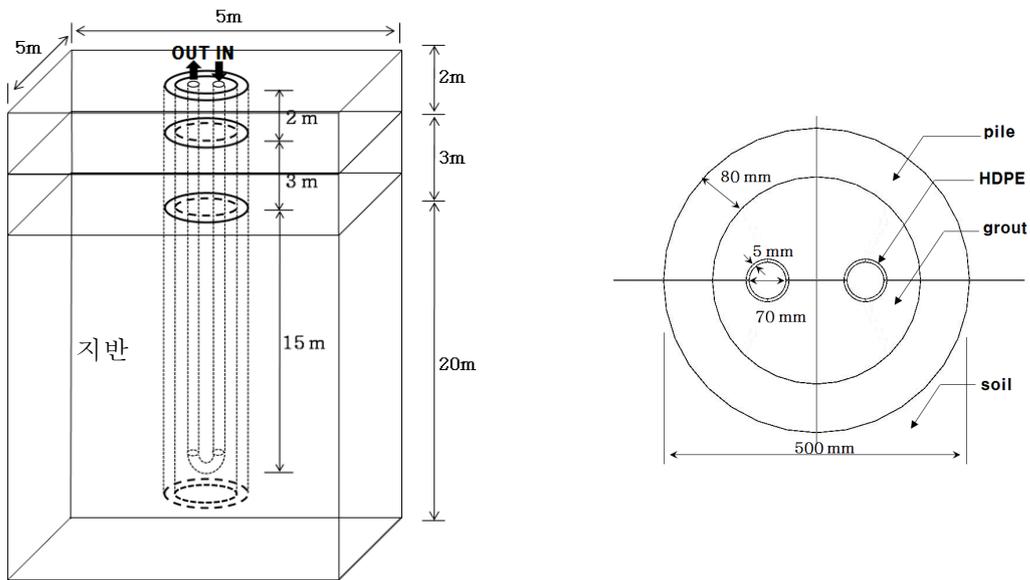
PHC 말뚝형 에너지파일은 지열을 이용하기 때문에 적절한 열효율을 가져야 하며, 열효율의 측정은 현장 실험을 통한 측정이 이루어지고 있다. 현장에서의 열효율 측정은 단일유속에 대하여 열효율 측정이 주로 이루어지고 있으며, 지반 포화조건과 계절별 조건에 대한 고려가 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 지열을 가장 많이 이용하는 시기인 동절기와 하절기에 대한 일일 운용시간의 열효율과 다양한 유속에 대하여 수치해석을 통하여 열효율을 측정하였다.

PHC 말뚝형 에너지파일은 열교환기가 Single-U type 형태의 에너지파일이 많이 쓰이며, 에너지파일의 지반 포화도 조건(포화, 건조)을 고려하여 유속별(0.3m/s, 0.4m/s, 0.5m/s, 0.6m/s, 0.9m/s, 1.2m/s), 계절별(동절기, 하절기) 열적거동과 유입수 조건(275K, 298K)에 따른 유출수 온도경향을 분석하였다. 분석시 지반과 PHC 말뚝형 에너지파일의 3D 모델을 유한체적법(FVM)으로 분석하였으며, 경계조건으로 지반 및 PHC 말뚝을 다층 온도지반으로 고려하여 2m, 3m 및 15m로 지반 온도 경계조건을 설정하여 동절기, 하절기 온도구배 조건으로 분석하였다. 운용조건으로 지반 및 PHC 말뚝의 내부 순환수의 유속이 없는 정상상태(state-state)로 초기 열적 거동을 설정하였으며, 운용시간은 법정 근로시간인 8시간을 기준으로 냉, 난방 가동시간을 설정하여 각 유속별 8시간의 transient 분석을 실시하였다. 또한, 8시간 운용시 에너지파일 모델별 열 저항 산출을 통한 에너지파일의 효율성 척도인 계절별, 유속별 열교환율(heat transfer rate)의 분석과 열적 영향거리 산출 및 유출수 온도에 대한 분석을 실시하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 PHC 말뚝형 에너지파일 Modeling

PHC 말뚝형 에너지파일은 지반에 PHC 말뚝을 설치하고 내경부에 열교환기 및 열교환기 고정을 위한 속채움재로 구성된다. 모델설정을 위하여 지반의 온도조건을 지반외부에 경계조건으로 설정하였으며, 경계면의 간섭을 최소화하기 위하여 지반크기를 말뚝 직경대비 10배인 5m×5m로 설정하였다. PHC 말뚝은 외경 0.5m, 내경 0.34m, 길이 20m인 PHC 말뚝으로 설정하였으며, 내경부의 속채움재는 직경 0.34m인 cement mortar, 열교환기는 HDPE관 재질을 사용하여 내경 70mm, 두께 5mm, 길이 40.2m로 설정하였다.



(a) PHC 말뚝형 에너지파일

(b) PHC 말뚝형 에너지파일 단면

그림 1. 지반을 고려한 PHC 말뚝형 모델링

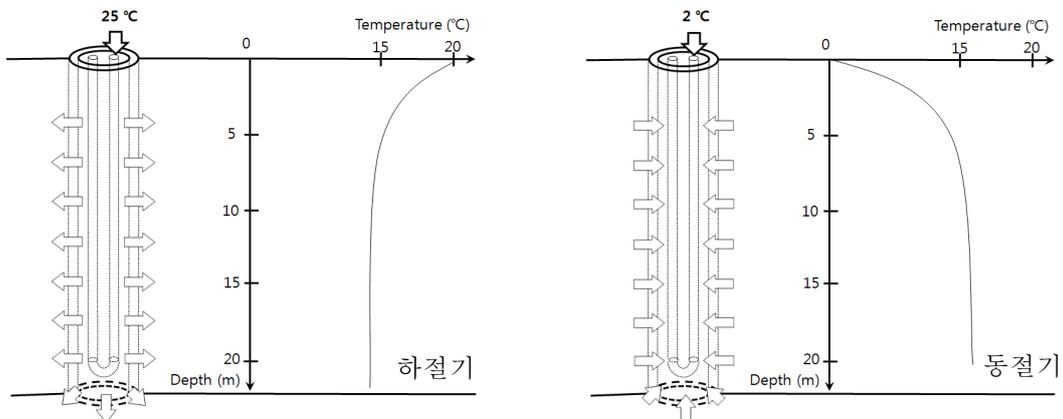


그림 2. 하절기 및 동절기 지반 온도분포

## 2.2 해석 조건

본 연구에서는 해석을 위하여 유한체적법을 사용하여 분석하였다. 대상은 지반(포화, 건조), PHC 말뚝, 속채움재, HDPE관 및 내부 순환수로 물을 사용하였다. 포화지반의 경우 공극이 없는 상태이며, 건조지반의 경우 흡과 간극(공기)로 이루어져 있어야 하나 해석의 편의상 흡만 존재하며 물성치를 완전건조 상태로 설정하였다. 먼저 지반의 경우 그림 1에서와 같이 지반을 세부분으로 나누어 동절기, 하절기 온도 경계조건을 설정하였으며, 유입수의 경우 동절기(275K)과 하절기(298K)으로 온도조건을 설정하였다. 온도측정은 유출구에서 단면적의 평균온도를 측정하였으며, 측정간격은 각 유속별 1회 순환시 측정하였다. 표 1은 해석에 사용된 물성치를 나타내었고, 표 2는 해석 조건별 case를 나타내었다.

표 1. 해석에 사용된 물성치

구 분		Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/kg·K)	Conductivity (W/m·K)	Viscosity (kg/m·s)	Diffusivity (m <sup>2</sup> /s)
지 반	포 화	2100	1300	2.5	-	9.2×10 <sup>-7</sup>
	건 조	1800	920	0.18	-	1.1×10 <sup>-7</sup>
PHC		2700	790	1.62	-	7.6×10 <sup>-7</sup>
속채움재(Cement)		3640	840	2.02	-	6.6×10 <sup>-7</sup>
HDPE		955	525	0.4	-	8.0×10 <sup>-7</sup>
Water		998.2	4182	0.6	0.001003	1.4×10 <sup>-7</sup>

표 2. 해석 조건별 case

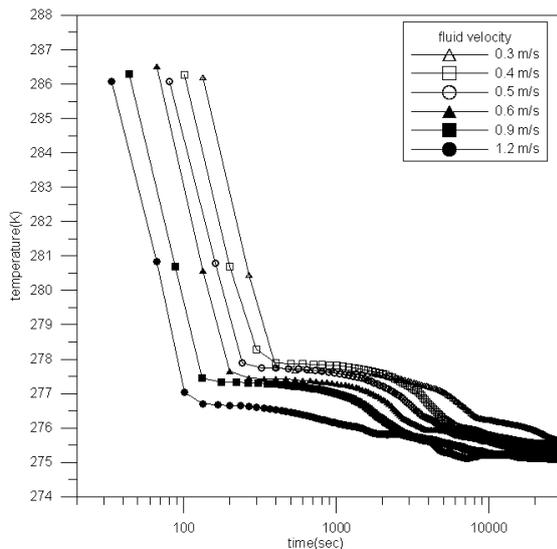
구 분	내 용			비 고
지반 경계 조건	동절기	2m	279K	지표면 온도설정 - 동절기(273K) - 하절기(293K)
		3m	283K	
		15m	288K	
	하절기	2m	291K	
		3m	289K	
		15m	288K	
유입수 온도	동절기	275K		유출구 온도측정
	하절기	298K		
유입수 유속/ 순환횟수	유 속	1회 순환시간(초)	순환횟수	1회 순환시 유출구 온도측정
	0.3m/s	134	214	
	0.4m/s	100.5	286	
	0.5m/s	80.4	358	
	0.6m/s	67	429	
	0.9m/s	44	654	
	1.2m/s	33.5	859	

### 3. 수치해석 결과

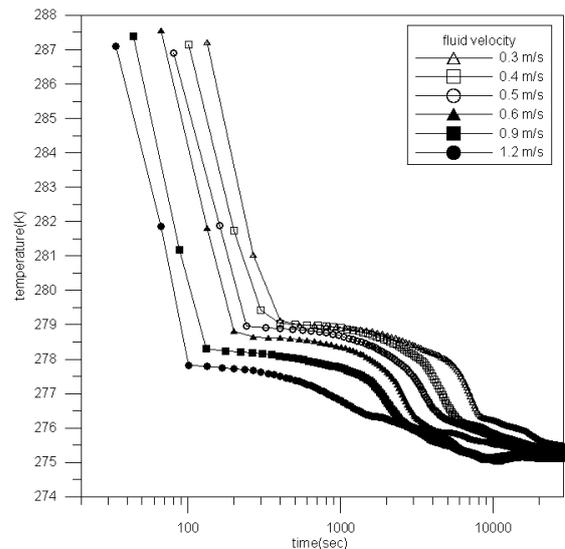
#### 3.1 유속별 유출구 온도변화

에너지파일 내부 순환수의 유속별 8시간 운용 시 표 2와 같이 유속별로 순환횟수의 변화를 보이며, 유출구 온도는 유속별로 다르게 나타났다. 그림 3은 동절기, 하절기 지반조건과 유속별 조건, 유입수 온도조건에 따른 유출구에서의 평균 유출온도의 해석결과를 나타낸다. 건조지반과 포화지반은 흙의 3상 구조에서 물을 제외한 흙과 공기로만 이루어진 완전건조 상태와 흙과 물로 이루어진 완전포화 상태이다. 지반 내 열전도는 공기로 이루어진 내부 공극이 존재하는 건조지반의 경우 흙의 열전도도와 공기의 열전도도의 조합으로 열이 전도되며, 흙의 3상 구조에서 흙과 내부 공극이 물로 이루어진 완전 포화지반보다 열전도도가 상대적으로 저하된다. 따라서, 포화시 지반자체의 복합적인 열전도도가 표 1과 같이 건조지반의 열전도도 보다 높게 나타난다.

동절기, 하절기 조건의 내부 순환수의 유출구 온도를 보면 건조지반보다 포화지반이 유속별 유출구의 온도 변화가 큰 것을 알 수 있다. 유속별로 살펴보면 동절기에 유속이 느릴시 유출구에서 온도효율이 상대적으로 크며, 이는 유속이 느릴 때 내부 순환수와 지반 사이의 열교환율이 비교적 일정하지만 지반의 열용량이 내부 순환수의 적은 순환횟수에 기인하여 유속이 빠를때보다 지반에 많이 존재하므로 높은 온도효율을 보이는 것으로 판단된다. 하절기에는 내부 순환수에서 지반으로 열이 전이가 되며, 이때는 지반으로 열용량이 축적되며 지반의 열적평형이 이루어진다. 따라서, 지반의 열적평형이 천천히 일어나는 것이 내부 순환수의 열이동을 좋게 만들며, 이러한 결과로 동절기와 마찬가지로 유속이 느릴 때 열교환율은 비교적 일정하지만 적은 순환횟수로 지반의 열용량 축적이 상대적으로 작아서 유출구 온도효율이 좋다. 또한, 그림 3에서 시간에 따른 그래프의 기울기를 보면 내부 순환수의 순환이 일어나기 전 지반에 충분히 축적된 열량에 의하여 초반 순환시 높은 열교환율을 보이며, 순환이 지속됨에 따라 에너지파일 주변의 지반에 그림 4와 같이 온도 구배가 형성되어 지반과 에너지파일과의 열적 평형이 진행되어 열교환이 저하됨을 알 수 있다. 따라서, 에너지파일에 있어서 순환 초반부의 짧은 시간에 높은 열교환이 일어나 유입수 온도대비 유출구의 온도가 급격히 변화되지만, 순환이 지속됨에 따라 지반과 에너지파일 사이의 열적 평형상태가 진행되어 유출구의 온도가 비교적 일정해 지는 것을 알 수 있다.

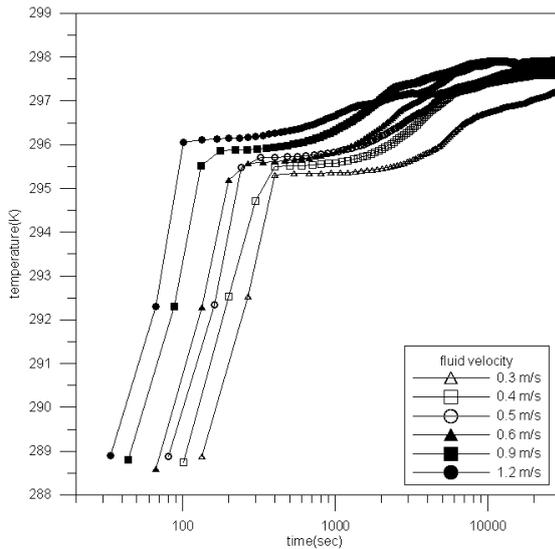


(a) 동절기 건조지반 유출수 온도

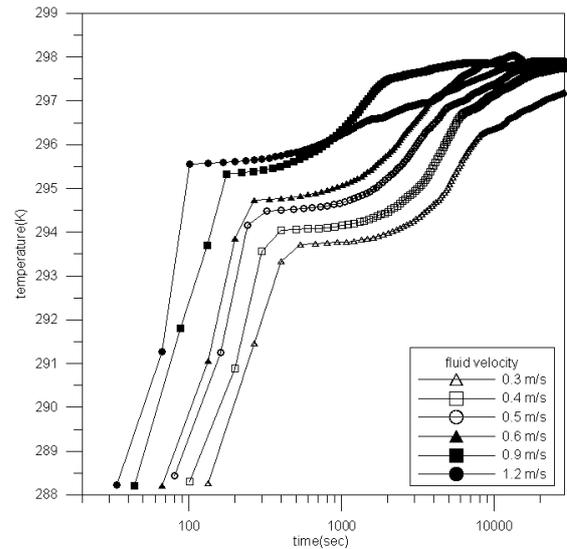


(b) 동절기 포화지반 유출수 온도

그림 3. 건조지반, 포화지반 계절별 유출수 온도분포(계속)

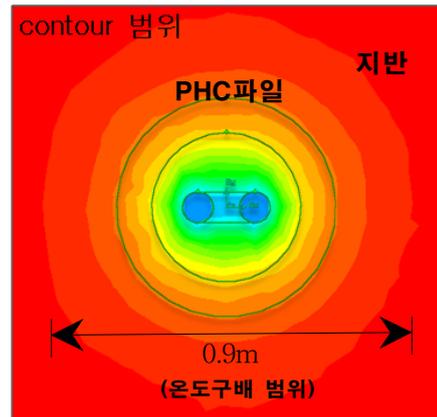
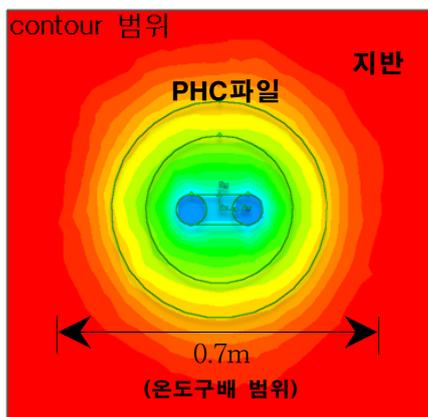


(c) 하절기 건조지반 유출수 온도



(d) 하절기 포화지반 유출수 온도

그림 3. 건조지반 및 포화지반 계절별 유출수 온도분포



(a) 건조지반 온도구배(동절기 0.3m/s, 깊이 -18m) (b) 포화지반 온도구배(동절기 0.3m/s, 깊이 -18m)

그림 4. 건조 및 포화지반 온도구배 Contour 범위(8시간 운용 후)

### 3.2 열교환율 산정

에너지파일의 열교환율을 산정하기 위하여 열전달 매개체의 열 저항을 산출하여 열교환율을 산정하여야 한다. 열전달 매개체는 내부 순환수, HDPE 파이프, 내부 속채움재, PHC 말뚝, 지반이다.

여기서,  $d_{hi}$ : 열교환기 내경,  $d_{ho}$ : 열교환기 외경,  $h_i$ : 대류 열전달 계수,  $Re$ : 레이놀드수

$Pr$ : 프란틀수,  $d_{ci}$ : PHC 내경,  $d_{co}$ : PHC 외경,  $d_b$ : 속채움재 직경

$k_f, k_h, k_b, k_c, k_s$ : 내부순환수, HDPE 파이프, 속채움재, PHC, 지반 열전도도

$R_{conv}, R_{hdpe}, R_{grut}, R_{phc}, R_{soil}$ : 내부순환수, HDPE 파이프, 속채움재, PHC, 지반 열저항

### 3.2.1 내부 순환수의 열 저항 산정

유체의 열 저항은 유체의 대류현상에 기인하며, 대류열전달계수( $h_i$ )를 계산하여 산정한다. 에너지파일의 내부 순환수 열 저항은 다음과 같다.

$$R_{conv} = \frac{1}{\pi d_{hi} h_i} \quad (1)$$

대류열전달계수( $h_i$ )는 Dittus-Boelter 상관관계에 따라 다음 식에 의하여 구해진다.

$$h_i = \frac{0.023 Re^{0.8} Pr^n k_f}{d_i} \quad (2)$$

여기서, 동절기  $n=0.3$ , 하절기  $n=0.4$

### 3.2.2 열교환기(HDPE) 및 PHC 파이프 열 저항 산정

열교환기 및 PHC 파이프의 경우 고체로서 열의 이동은 열전도로 이루어지며 식은 다음과 같다.

$$R_{hdpe} = \frac{\ln(d_{ho}/d_{hi})}{2\pi k_h} \quad (3)$$

$$R_{PHC} = \frac{\ln(d_{co}/d_{ci})}{2\pi k_c} \quad (4)$$

### 3.2.3 속채움재 열 저항 산정

속채움재의 열 저항 산정은 속채움재의 직경과 내부 U-type pipe의 외경과 배치에 따라 달라진다. U-type pipe의 배치에 따라서  $\beta_0, \beta_1$  값이 달라지며 열 저항 값이 차이가 난다. 본 논문에서는 표 3의 B type의 열교환기 배치형태를 사용하였다.

$$R_{grout} = \frac{1}{k_g \beta_0 (d_b/d_{ho})^{\beta_1}} \quad (5)$$

표 3. 열교환기(U-type)배치별  $\beta_0, \beta_1$  값(Remund CP, 1999)

Configuration	$\beta_0$	$\beta_1$	Correlation coefficient	Pipe type
A	20.10	-0.9447	0.9926	
B	17.44	-0.6052	0.9997	
C	21.91	-0.3796	0.9697	

### 3.2.4 지반의 열 저항 산정

PHC 말뚝 외부의 지반 열 저항을 산정하기 위하여 지반 조건은 (1) 지반의 열적물성은 균질, 등방 (2) 함수량 변화 무시 (3) 지하수의 이동효과 배제 (4) 각 매개체간 접촉열 저항 무시 등의 가정을 하여 지반의 열 저항을 산정하였으며, 열 저항 산정과 열교환율은 다음의 Kelvin의 line source theory를 사용하였다.

$$\Delta T = t_r - t_\infty = \frac{q}{2\pi k_s} \int_{\frac{r}{2\sqrt{at}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{q}{2\pi k_s} I(x) \quad (6)$$

여기서,  $r = r_b$

위 식에 따라 지반의 열 저항은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{soil} = \frac{t_b - t_\infty}{q} = \frac{1}{2\pi k_s} I\left(\frac{r_b}{2\sqrt{a\tau}}\right) = \frac{1}{2\pi k_s} I\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right) \quad (7)$$

여기서,  $0 < x \leq 1$  일 때  $I(x)$ 는

$$I(x) = 0.5(-\ln x^2 - 0.57721566 + 0.99999193x^2 - 0.24991055x^4 + 0.05519968x^6 - 0.00976004x^8 + 0.00107857x^{10}) \quad (8)$$

$x \geq 1$  일 때  $I(x)$ 는

$$I(x) = \frac{1}{2x^2 \exp(x^2)} \frac{A}{B} \quad (9)$$

여기서,

$$A = x^8 + 8.5733287x^6 + 18.059017x^4 + 8.637609x^2 + 0.2677737$$

$$B = x^8 + 9.5733223x^6 + 25.6329561x^4 + 21.0996531x^2 + 3.9684969$$

### 3.2.5 해석 대상의 열교환율 산정

위 식에 따라 전체 열 저항은 지반, PHC 말뚝, 속채움재, 열교환기(HDPE) 및 내부 순환수의 열 저항의 합과 같으며 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\sum R = R_{conv} + R_{hdpe} + R_{grut} + R_{phc} + R_{soil} \quad (10)$$

전체 열 저항 산정 후 식 11을 사용하여 열교환율을 산정한다.

$$q = \frac{\bar{t}_f - t_\infty}{\sum R} = \frac{(t_i + t_0)/2 - t_\infty}{\sum R} \quad (11)$$

### 3.3 해석 대상의 열교환율 산정

해석 대상은 그림 1과 같이 지반크기(5m×5m)내에 외경 0.5m의 에너지파일을 설치하여 동절기, 하절기 일 때 각각 포화, 건조상태의 각 대상별 열 저항을 산정하여 열교환율(heat exchange rate)을 구하였다. 동절기의 경우 열교환율이 음의 값으로 표현되며, 이는 지반에서 내부 순환수로 열류(heat flow)가 이동됨에 따라서 음의 값으로 표현되며, 하절기의 경우 내부 순환수에서 지반으로 열류(heat flow)가 이동됨에 따라 열교환율이 양의 값을 가진다. 결과값을 보면 해석에 사용된 직경 0.5m의 에너지파일의 경우 50~70W/m의 열교환율을 보이며, 이는 직경 0.6m 이하의 에너지파일의 열교환율 20~60W/m (Rolf Katzenbach, 2010)과 비교할 때 타당한 분석이라 판단된다. 여기서, 건조지반과 포화지반의 열 저항값의 분포를 살펴보면 포화지반과 건조지반의 열적 물성치는 일정하기 때문에 열저항의 경우 유속에 관계없이 비교적 일정한 것을 볼 수 있다. 또한, 포화지반과 건조지반의 열저항 값을 비교해보면 건조지반이 포화지반보다 열 저항값이 적게 산출되었다. 열확산율과 열전도도를 비교시 포화지반의 경우가 더 커서 열 저항값이 작게 산출되어야 하지만 식 7에 의하여 약 26시간 운용 이전의 열 저항값은 건조지반이 포화지반보다 작으며, 약 26시간 이후 운용시 건조지반의 열 저항값이 0.041156mK/W이 산출되어 포화지반의 열 저항값인 0.041153mK/W보다 커지는 것으로 나타났다. 이는 에너지파일에 공급되는 지반의 열용량이 건조지반과 포화지반이 26시간 이전에 충분하게 공급되고, 26시간 이후부터 물성치 차이에 기인한 열용량의 변화에 기인한 것으로 판단된다. 유속에 따라 분석된 평균 열 저항과 평균 열교환율은 표 4와 표 5와 같다.

표 4. 8시간 운용시 평균 열 저항

총 열 저항( $\Sigma R$ )		0.3m/s	0.4m/s	0.5m/s	0.6m/s	0.9m/s	1.2m/s
포화지반 (mK/W)	동절기	0.1655	0.1654	0.1653	0.1653	0.1652	0.1651
	하절기	0.1651	0.1651	0.1651	0.1651	0.1650	0.1650
건조지반 (mK/W)	동절기	0.1598	0.1598	0.1596	0.1595	0.1595	0.1594
	하절기	0.1595	0.1594	0.1594	0.1594	0.1593	0.1593

표 5. 조건별 8시간 평균 열교환율(heat exchange rate)

heat exchange rate		0.3m/s	0.4m/s	0.5m/s	0.6m/s	0.9m/s	1.2m/s
포화지반 (W/m)	동절기	-64.02	-65.23	-65.68	-66.34	-67.37	-67.58
	하절기	52.40	54.46	55.51	56.20	56.88	56.79
건조지반 (W/m)	동절기	-66.85	-68.10	-68.58	-69.08	-69.91	-70.34
	하절기	55.63	57.55	57.95	58.17	58.96	59.02

## 4. 결 론

직경 0.5m의 PHC 말뚝형 에너지파일의 지반조건별, 계절별, 유속별 유출온도 및 열교환율을 확인하기 위하여 FVM을 이용하여 수치해석을 실시하였다. 이를 통하여 얻은 에너지파일의 열적거동의 결론은 다음과 같다.

- (1) 동절기 지반의 경우 내부 순환수의 온도를 지반의 열용량을 사용하여 온도를 상승시키며, 하절기 지반의 경우 온도를 하강시킨다. 각 유속조건에서 보면 모든 유속에서 동일하게 초반 순환횟수에서 지반초기의 높은 열용량에 의하여 큰 열효율을 가지며, 이후 순환 시 에너지파일 주변지반의 열용량 변화로 인하여 유출구 온도가 비교적 일정하게 수렴하는 것을 볼 수 있고, 유속조건에 따른 유출구 온도효율은 유속이 작을수록 동절기 및 하절기 지반에서 좋은 것으로 나타났다.
- (2) 지반을 포함한 에너지파일의 열 저항 산정결과 동절기 및 하절기 포화, 건조 조건에서 8시간 운용시 비교적 일정한 열 저항 값을 가지는 것으로 판단된다. 지반 열저항의 경우 건조지반과 포화지반이 26시간 이후로 건조지반이 포화지반보다 커지는 것으로 나타나며, 열적 영향거리에 있어서 포화지반 상태가 높은 열전도도 및 열확산율에 의하여 건조지반보다 큰 것으로 나타났다.
- (3) 동절기 및 하절기, 유속별 열교환율을 보면 유속이 작을 때 열교환율이 작고, 유속이 클 때 열교환율이 큰 것을 볼 수 있다. 이는 유속이 작은 경우 유출구에서의 온도효율은 좋지만 전체적으로 순환 횟수가 적어 유속이 클 때의 순환횟수에 비하여 주변지반과 전체적인 열교환이 작게 일어난다. 따라서, 열교환율은 내부 순환수의 순환횟수에 따라 변화됨을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. 김도현(2010), 지반 조건을 고려한 에너지파일의 열전달 거동 분석, 석사학위논문, 연세대학교.
2. Liu Jun, Zhang Xu, Gao Jun, Yang Jie.(2009). "Evaluation of heat exchange rate of GHE in geothermal heat pump system." Renewable Energy 34, pp. 2898-2904.
3. tae sup yun(2005), "Mechanical and Thermal Study of hydrate Bearing Sediments", Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Georgia Institute of Technology.