등가열교환율을 적용한 현장타설 에너지파일 설계법

민선홍* · 박상우** · 정경식*** · 최항석****

Min, Sunhong* · Park, Sangwoo** · Jung, Kyoungsik*** · Choi, Hangseok****

Design Method for Cast-in-place Energy Pile Considering Equivalent Heat Exchange Rate

ABSTRACT

In this paper, a relative heat exchange rate is numerically compared for cast-in-place concrete energy piles with different heat exchange pipe configurations, and a new design method for energy piles is proposed. An equivalent heat exchange rate was estimated for the W-type (one series loop), multiple U-type (four parallel loops), and coil-type heat exchanger installed in the same large-diameter drilled shaft. In order to simulate a cooling operation in summer by a CFD analysis, the LWT (leaving water temperature) into a energy pile was fixed at 35 °C and then the EWT (entering water temperature) into a heat pump was monitored. In case of continuously applying the artificial maximum cooling load for 100 hours, all of the three types of heat exchangers show the marginally similar heat exchange rate. However, in case of intermittently applying the cooling load with a cycle of 8 hours operation-16 hours off for 7 consecutive days, the coil type heat exchanger exhibits a heat exchange rate only 86 % of the multiple U-type due to measurable thermal interference between pipe loops in the energy pile. On the other hand, the W-type possesses the similar heat exchange rate to the multiple U-type. The equivalent heat exchange rates for each configuration of heat exchangers obtained from the CFD analysis were adopted for implementing the commercial design program (PILESIM2). Finally, a design method for cast-in-place concrete energy piles is proposed along with a design chart in consideration of typical design factors.

Key words : Cast-in-place pile, Energy pile, Equivalent heat exchange rate, Computational fluid dynamic analysis, design method

초 록

본 연구에서는 현장타설 에너지파일의 열교환 파이프 배치 형태별 열교환율을 전산유체해석 프로그램(FLUENT)을 이용하여 평가하고, 이를 이용하여 에너지파일의 설계법을 제시하였다. 등가열교환율을 산정하기 위해 동일한 현장타설말뚝 제원에 대해 열교환파이프 배치 형태를 W-형(직렬), 복합 U-형(병렬 4쌍), 나선형의 3가지로 고려하였다. 건물측 부하조건은 여름철 냉방운용을 모사하기 위해 순환수의 에너지파일 유입 온도, 즉 히트펌프 유출온도(Leaving water temperature, LWT)를 35°C로 일정하게 유지하여 에너지파일 유출온도, 즉 히트펌프 유입온도(Entering water temperature, EWT) 변화를 관찰하였다. 지반에 최대 가산부하를 적용한 경우(100시간 연속 냉방부하 조건)에는 3가지 열교환기 형태가 유사한 열교환율을 보인 반면, 실제 히트펌프 가동에 의한 건물 냉방운용을 모사하기 위해 간헐적으로 일일 8시간 운용-16시간 정지를 7일간 반복 해석한 경우에는 W-형(직렬연결)과 복합 U-형(병렬 4쌍) 열교환기는 유사한 열교환율을 보이나, 나선형 열교환기는 파이프 루프 상호 간 열간섭으로 인해 복합 U-형 열교환기에 비해 약 86%의 열교환율을 갖는 것으로 평가되었다. 전산유체해석에 의해 계산된 열교환파이프 배치 형태별 에너지파일의 등가열교환율을 에너지파일 설계프로그램(PILESIM2)에 적용하여 다양한 형상의 현장타설 에너지파일에 대한 설계법과 대표적인 설계변수에 대한 설계도표를 제시하였다.

검색어 : 현장타설말뚝, 에너지파일, 등가열교환율, 전산유체해석, 설계법

* (주)에스텍건설그룹 지반사업부 대리, (전)고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (sunhong_y@hotmail.com)

** 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (ptstwt@korea.ac.kr)

*** 정회원 · (주)에스텍건설그룹 지반사업부 상무 (ksic2000@naver.com)

**** 정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Corresponding Author · Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ. · hchoi2@korea.ac.kr)

Received December 6 2012, Revised January 22 2013, Accepted March 30 2013

1. 서론

최근 국내외적으로 화석연료 고갈위기 및 온실가스 감축 의무화 등의 환경에너지 문제를 해결하기 위해 신재생에너지 개발 및 보급에 대한 관심이 모아지고 있다. 국내에서는 2012년 개정된 ‘신에너지 및 재생에너지 개발, 이용, 보급 촉진법’ 등의 관련 법규에 의한 1,000m² 이상 규모의 신축 공공건물의 경우, 전체 예상 에너지 사용량의 11% 이상을 신재생에너지를 사용하도록 의무화하는 등 신재생에너지 보급 활성화에 박차를 가하고 있다(Ministry of Knowledge Economy, 2012). 신재생에너지 중 지열에너지는 고온의 지열유체를 추출하여 전기에너지로 변환시키는 지열발전과 같은 간접이용 방식과 히트펌프(heat pump)나 냉동기와 같은 에너지 변환기기의 열원으로 활용하는 직접이용 방식으로 구분할 수 있다. 지열의 직접이용 방식 중 지열 냉난방 시스템은 반영구적이고 환경 친화적인 에너지로서 최근 들어 그 적용성에 대해 국내에서도 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 한반도의 기후특성은 춘하추동의 뚜렷한 4계절을 보여 봄과 가을의 경우에는 특별한 냉난방이 필요하지 않지만, 여름과 겨울에는 냉방과 난방이 각기 요구된다. 이러한 기후적 조건은 지열 냉난방 시스템을 활용하는데 있어서 큰 장점이 될 수 있다. 즉, 여름에는 실내를 냉방하기 위해 지중으로 방열하고 겨울에는 항온성의 지중으로부터 흡열하여 건물의 냉난방을 운용하는 방법으로 적절한 지중온도의 균형을 이룰 수 있다. 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency, US EPA)은 현재까지 개발된 냉난방 시스템 중 연중 안정적인 지중 온도를 활용하는 지열시스템을 가장 효율이 높은 신재생에너지 시스템으로 평가하였다.

현재까지 천부지열을 직접 활용하는 지열냉난방시스템은 수직 밀폐형 지중열교환기를 적용하는 시스템이 90% 이상이나, 수직 밀폐형 지중열교환기를 시공하기 위해서는 별도의 보어홀 천공과 그라우팅 등에 많은 비용이 소모(전체 시스템에 50% 이상)되어 초기투자비가 크게 증가하고, 이는 다른 열원과의 경쟁에서 불리하게 작용할 수 있다. 따라서 지열냉난방시스템을 일반 주택이나 상업용 건물에 적용하고 보급을 확대하기 위해서는 초기 공사비 절감을 위한 기술개발이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 기초구조물을 이용하는 지중열교환기의 개발에 관한 연구가 새로운 이슈로 대두되고 있다(Baek, 2004; Ryu, 2008; Gao et al., 2008b; Jun et al., 2009; Man et al., 2010; Nam et al., 2008, 2011).

에너지파일이란 기초구조물로 이용되는 콘크리트 또는 강관 말뚝 내부에 열교환 파이프를 설치하고 파이프 내부에 유체를 순환시켜 지중과 열교환을 유도하는 구조물로서 기존 건축 구조물의 기초로 사용되는 말뚝을 이용함으로써 구조물의 지지 기능

뿐만 아니라, 열교환기로서의 역할도 동시에 활용할 수 있는 장점이 있다. Morino and Oka (1994)은 외경 400mm 길이 20m의 강관과 일에 두 쌍의 PVC 파이프를 설치한 에너지파일을 지중열교환기로 처음 활용하였다. 이후 에너지파일에 대한 많은 실험적, 해석적 연구가 진행되었는데, 주로 냉난방시 에너지파일의 열교환 능력, 열교환파이프와 말뚝 형상에 따른 열교환 효율평가, 그리고 에너지파일 활용에 따른 지중 온도변화 예측 등의 연구에 초점이 맞추어졌다(Li et al. 2006; Hamada et al. 2007; Pahud and Hubuck 2007; Gao et al. 2008a, 2008b; Nam et al. 2008; Wood et al. 2009). 특히, 최근에는 에너지파일 운용 중에 발생하는 말뚝 내 열적-역학적 거동에 대한 지반공학적 접근이 Laloui et al. (2003, 2006), Bourne-Webb et al. (2009), Knellwolf et al. (2011)에 의해 시도되었다. 또한, Man et al. (2010)과 Cui et al. (2011)는 선형 열원모델에서 발전된 에너지파일에 적용할 수 있는 이론적 해석방법을 제시하였다.

국내에서는 에너지파일에 관한 연구가 주로 콘크리트 기성말뚝 중 가장 보편적으로 사용되고 있는 PHC(pretensioned spun high strength concrete)말뚝의 중공에 열교환파이프를 삽입한 에너지파일의 열적 거동 평가에 치중되어 있다(Min and Jeong, 2012; Park et al, 2012; Baek, 2004; Ryu, 2008; Ryu et al, 2012; Lim, et al., 2012; Jeong, et al., 2010; Choi and Lee, 2010; Lee et al., 2012; Park et al., 2012). 이는 국내 건설 여건과도 무관하지 않다. 국내는 지형적으로 일부 해안가를 제외하고는 대부분 양호한 암반이 조기 출현하고 있으며, 주거용 건물의 경우 구조물의 규모가 크지 않기 때문에 기성말뚝을 이용하여 상부구조물을 지지하는데 큰 무리가 없다. 따라서 개발에 따른 수요적인 측면에서 기성말뚝을 이용한 에너지파일에 대한 연구의 집중은 당연한 흐름이라고 볼 수 있다. 그러나 최근 들어 건설기술의 향상에 따른 고층 건물의 증가, 준설매립을 통한 육지의 확장으로 불량한 지역에서 건설공사가 증가하고 있는 실정이며, 따라서 기성말뚝 이외에 대규격 현장타설 콘크리트 말뚝의 사용량 또한 빈번해지고 있다.

유럽의 경우 Pahud and Hubuck(2007)이 스위스 쥐리히 공항에 설치된 총 440본의 현장타설말뚝 중 306본을 에너지파일로 시공하고 2004년 10월부터 2년간 순환수의 온도변화를 관측하여 에너지파일의 시스템을 평가하였고, 이 결과를 바탕으로 에너지파일 설계 프로그램인 PILESIM2를 개발하는 등, 대규격 현장타설 에너지파일을 대규모 공공건물에도 적극적으로 적용하고 있다. 하지만, 국내는 대규모 건축구조물의 기초로 설계되는 현장타설말뚝을 이용한 지중열교환기의 개발 및 설계방법 등에 대한 선행연구가 미미하다.

본 연구에서는 대형 기초구조물과 지열 냉난방시스템 가동을 위한 열교환기 역할을 동시에 수행할 수 있는 현장타설 에너지파일의

열교환파이프 배치 형태별 열교환율을 전산유체해석(Computational fluid dynamics, CFD)을 적용하여 평가하고, 이를 적용하여 현장 타설 에너지파일의 설계법을 제시하였다. 등가열교환율을 평가하기 위한 전산유체해석은 상용 유한체해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 외경이 1.5m이고 길이가 20m인 가상의 현장타설 에너지파일을 모사하고 파이프 총길이가 약 159m로 동일한 열교환 파이프를 배치 형태별로 W-형(직렬연결), 복합 U-형(병렬 4쌍), 나선형의 3가지 형태를 적용하였다. 특히, W-형은 U-형 열교환파이프 4쌍이 직렬로 연결된 구조로 각각 병렬로 상부에서 헤더로 연결된 복합 U-형과 구분이 된다. 건물측 부하조건은 여름철 냉방운용을 모사하기 위해 순환수의 에너지파일 유입온도, 즉 히트펌프 유출온도(Leaving water temperature, LWT)를 35°C로 일정하게 유지하여 에너지파일의 유출온도, 즉 히트펌프 유입온도(Entering water temperature, EWT) 변화를 관찰하였다. 먼저, 지반에 최대 가상부하를 적용한 경우에 대한 열교환을 비교를 위해서 각 현장타설 에너지파일에 대해 100시간 연속 냉방부하(유입온도 경계조건) 조건에 대해 수치해석을 수행하였다. 또한, 실제 히트펌프 가동에 의한 간헐적 냉난방 운영을 모사하기 위해 일일 8시간 운용-16시간 정지를 7일간 반복하는 과정을 모사하였다. CFD 수치해석에서 나타난 유입/유출 순환수의 온도와 유량을 이용하여 각 현장타설 에너지파일의 평균 및 총 열교환량을 산정하고 이를 이용하여 등가열교환율을 계산하여 에너지파일 설계프로그램(PILESIM2)을 보완하기 위한 설계 데이터로 활용하였다. PILESIM2는 에너지파일의 직경, 길이, 개수, 간격 등의 파일 조건과 지반의 열전도도, 지하수 존재 여부, 지하수 흐름(유속) 등의 지반 조건을 입력한 후 최대 50년까지의 냉/난방 모사를 통하여 에너지파일의 최적 부하량을 산정할 수 있는 에너지파일 설계 프로그램이다. 그러나 PILESIM2에서 설계 가능한 에너지파일의 열교환파이프 형상은 복합 U-형(1쌍~5쌍)과 이중관형으로 한정되어 다양한 열교환파이프 형태의 에너지파일 설계는 불가능하다(Pahud and Hubbuck,

2007). 본 논문에서는 이러한 단점을 해결하기 위하여 열교환파이프 형태에 따라 전산유체해석을 통해 산정한 등가열교환율을 평가하고, 이 값을 PILESIM2 에너지파일 설계에 활용하는 설계 알고리즘을 통하여 대표적인 설계변수들에 대한 설계도표를 제시하였다.

2. 에너지파일 전산유체해석 모델링

현장타설말뚝을 이용한 에너지파일의 열교환 효율을 전산유체(Computational fluid dynamics, CFD)해석으로 평가하기 위해 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 열교환파이프의 길이가 수치모델링 오차한계에서 동일하도록 W-형(직렬연결) 열교환파이프는 159.52m, 복합 U-형(병렬 4쌍)은 159.04m, 그리고 코일모양의 나선형 열교환파이프는 길이가 159.46m로 에너지파일을 모델링하였다. W-형은 열교환 파이프가 한 개의 유입구(inlet)와 한 개의 유출구(outlet)로 구성되어 에너지파일 길이방향으로 4회 왕복하는 직렬연결로 이루어져 있는 반면에 복합 U-형은 단순 U-형 열교환파이프 4쌍이 삽입되어 4개의 유입구와 유출구가 지상에서 연결되는 병렬구조로 이루어져 있다. 또한, 나선형은 W-형과 동일하게 에너지파일 당 한 개의 유입구와 한 개의 유출구로 구성되어 있으나 열교환 파이프 배열은 코일 형태로 현장타설말뚝 피복 내부에 철근망 외주를 감고 있는 형상이다 (Fig. 1).

본 논문에서 열교환파이프를 순환하는 유체의 흐름에 따른 열전달 거동을 해석하기 위해 열전달과 유체의 흐름간의 연계해석이 가능한 유한체적 수치해석(Finite Volume Method) 프로그램인 FLUENT를 적용하였다. FLUENT는 해석대상의 형상을 시각화하고 격자를 생성하는 전처리기(Pre-processor), 해석조건과 물성치를 입력하고 전산유체해석을 수행하는 연산기(Solver), 그리고 해석결과를 시각화하는 후처리기(Post-processor)로 구성된다. 전산유체해석에 적용된 현장타설 에너지파일의 해석단면은 Fig. 1과 같이 직경 1.5m의 현장타설말뚝에 깊이 20m까지 내경 27mm,

Fig. 1. Configuration of heat exchange pipe embedded in energy piles

외경 35mm을 갖는 열교환용 HDPE 파이프를 3가지 형태로 구성하고, HDPE 파이프 단면을 제외한 현장타설말뚝 내부는 콘크리트로 외부는 지반으로 모사하였다.

전산유체해석에 적용한 지반, 콘크리트, HDPE 파이프의 물성치는 기존 현장시험을 통해 얻어진 연구결과(Lee 등, 2011)와 Engineering tool box(2005)에서 제시한 값을 적용하여 Table 1에 정리하였다. FLUENT를 이용하여 열전달 거동을 평가하기 위한 3차원 수치해석 격자는 Fig. 2와 같이 해석의 정밀도를 높이기 위하여 Hex-dominant 격자 생성방법을 적용하였다. 또한 지반 외부의 경계를 충분히 모사함으로써 순환수가 열교환파이프를 통해 순환하면서 지중으로 방열이나 흡열하여 열전달이 파이프를 통하여 에너지파일, 지반으로 이루어지는 양상을 모사하였다.

3. 에너지파일 열교환을 평가

3.1 100시간 연속 냉방과정 모사

전산유체해석에 적용한 에너지파일의 길이는 20m로 비교적 저심도이므로 지반의 지열경사를 고려하지 않고 모든 깊이에 지반

초기온도를 15°C로 적용하였다. 또한, 열교환파이프를 순환하는 순환수의 질량유속을 0.56 kg/s, 에너지파일로 유입되는(히트펌프에서 나가는) 순환수의 온도(Leaving water temperature, LWT)를 35°C로 고정하여 100시간 동안 연속 냉방운용(최대 가상부하 적용)하는 조건에 대하여 에너지파일에서 유출되는(히트펌프로 들어가는) 순환수의 온도(Entering water temperature, EWT) 변화를 관찰하였다.

에너지파일의 열교환율(냉방모드의 경우 열방출율)은 에너지파일로 유입되는 순환수 온도(LWT, T_i)와 에너지파일에서 유출되는 순환수 온도(EWT, T_o)의 차에 순환유체의 질량유속($\dot{m}$)과 비열(C)의 곱으로 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Q = C \dot{m} \Delta T = C \dot{m} (T_i - T_o) \quad (1)$$

Fig. 3에서는 시간에 따른 각 에너지파일에서 유출되는 순환수 온도변화와 열교환율을 비교하였다. 또한, 식 (1)을 이용하여 산정한 에너지파일 형태별 열교환율은 Table 2에 비교하였다. 열교환 파이프 길이 당 100시간 총 열교환율은 각각 W-형 에너지파일이 3.73

Table 1. Material properties for CFD analysis (Lee et al., 2011; Engineering tool box, 2005)

	Ground	Energy pile (concrete)	HDPE pipe
Density (kg/m ³)	1700	2162	955
Specific heat (J/kg·K)	2500	800	525
Thermal conductivity (W/m·K)	1.71	2.11	0.4

Fig. 2. Numerical model configuration of energy piles

Fig. 3. Comparison of EWT and heat exchange rate (100-hours continuous cooling)

Table 2. Heat exchange rate of each energy pile (100-hours continuous cooling)

	W type	Multiple U type	Coil type
Temp. difference per unit (°C)	2.56	2.47	2.42
Mass flow velocity per unit (kg/s)	0.56	0.14	0.56
Number of units	1	4	1
Total pipe length (m)	159.52	159.04	159.46
Ave. heat exchange (kW)	5.95	5.74	5.63
Ave. heat exchange rate (W/m)	37.32	36.12	35.29
Total heat exchange rate (kW·h/m)	3.73	3.62	3.52
Equivalent heat exchange rate (over Multiple U type)	1.03	1	0.98

kW·h/m, 복합 U-형 에너지파일이 3.62 kW·h/m, 나선형 에너지파일이 3.52 kW·h/m로 산정되었다. 동일한 열교환파이프 길이에 연결방식만 달리한 W-형과 복합 U-형의 열교환율 차이는 에너지파일을 순환하는 순환수의 총 유량을 동일하게 유지하기 위해 W-형 열교환파이프 내 순환유속이 복합 U-형에서 개별 U형 열교환파이프 내 순환유속의 4배가 되도록 했으므로(Table 2 참조), 이에 따른

순환수의 난류유동의 열전달 특성의 차이로 판단된다.

각 에너지파일의 상대적 열교환율을 비교하면 W-형 에너지파일은 복합 U-형 에너지파일에 비해 약 103% 열교환율을 갖는 반면에, 나선형 에너지파일의 경우 복합 U-형 에너지파일에 비해 약 98% 열교환율을 보였다. 산정된 복합 U-형 에너지파일의 열교환율 대비 W-형과 나선형 에너지파일의 열교환율의 비 즉, 등가열교환율은

(a) W type energy pile

(b) Multiple U type energy pile

(c) Coil type energy pile

Fig. 4. Temperature distribution on cross section after 100-hours continuous cooling

(a) W type energy pile

(b) Multiple U type energy pile

(c) Coil type energy pile

(d) Comparison of heat exchange rate

Fig. 5. Comparison of EWT and heat exchange rate (7-days intermittent cooling)

W-형과 나선형 에너지파일에 대해 각각 1.03과 0.98로서 열교환기 형태에 따른 100시간 연속 냉방운용 시 열교환율의 차이는 미미하다. 이는 현장타설 에너지파일의 열교환 효율은 열교환 파이프 배열 형태 보다는 열교환파이프 전체 길이에 의해 결정됨을 시사한다. 하지만, 100시간 연속 냉방운용은 실제 건물 냉난방운용을 정확하게 모사하지 못하고, 히트펌프 가동이 정지되는 기간 동안 에너지파일의 열적 회복을 고려할 수 없다. 따라서, 건물의 실제 냉난방운용 조건에 대한 각 에너지파일의 열교환율에 대한 검토가

다음 절에서 수행되었다. Fig. 4는 100시간 연속 냉방가동 후 각 에너지파일의 형태별 횡단면의 온도분포를 보여준다.

3.2 간헐적 냉방운용을 고려한 수치해석 모사

에너지파일을 이용한 실제 여름철 냉방운용을 전산유체해석을 통해 모사하기 위하여 일반 상업용 건물의 일일 냉방운용 일정을 고려하여 7일간 해석을 수행하였다. 즉, 상업용 건물에 대한 여름철 냉방을 위해 일일 8시간 운용, 16시간 정지를 반복하는 간헐적

냉방운용을 7일간 모사하였다. 7일간 냉방과정 모사에는 앞 절의 100시간 연속 냉방운용 조건과 동일하게 지반의 지열경사를 고려하지 않고 지반 초기온도를 15°C로, 열교환파이프를 순환하는 순환수의 질량유속을 0.56 kg/s, 에너지파이프로 유입되는(히트펌프에서 유출되는) 순환수의 온도(LWT)를 35°C로 고정하여 에너지파일에서 유출되는(히트펌프로 유입되는) 순환수의 시간에 따른 온도(EWT) 변화를 추적하였다.

Fig. 5는 각 에너지파일에서 유출되는 순환수의 7일간 온도변화와 열교환율을 비교하여 보여준다. 각 에너지파일의 열교환율은 식 (1)을 이용하여 산정하였다. 유출수 온도(EWT)는 냉방 초기에는 지반과 원활한 열교환이 이루어져 비교적 낮은 온도를 유지하다가 시간이 지나면서 점차 증가하는 경향을 보이며, 냉방운용 정지

시에 유출수의 온도가 다시 감소하는 경향은 지반과 에너지파일의 열적 회복되는 것을 간접적으로 보여준다. 하지만, 일일 냉방 정지기간(16시간) 동안 지반의 초기온도(15°C)까지 지반의 온도가 완전히 회복되지 않고, 8시간 냉방운용에 의한 잔류지열이 존재한다. 또한, 냉방이 정지된 기간에 회복되는 지반(또는 유출수) 온도는 일일 냉방 주기가 증가되면서 점차 증가되다가 냉방 가동 후 약 6일 후는 일정한 온도(약 20°C 내외)로 유지되었다. Fig. 6은 마지막 날(7일째) 8시간 냉방 가동 후와 냉방 정지 16시간 지난 시점에서 각 에너지파일의 횡단면의 온도분포를 보여준다.

일일 8시간 운용, 16시간 정지를 반복하는 7일간 간헐적 냉방운용을 통해 발생한 각 에너지파일의 열교환율은 Table 3에 비교하여 정리하였다. 7일 냉방운용 중에 발생한 열교환파이프 길이 당 총

Fig. 6. Temperature distribution on cross section after 7-days intermittent cooling

Table 3. Heat exchange rate of each energy pile (7-days intermittent cooling)

	W type	Multiple U type	Coil type
Temp. difference per unit (°C)	3.64	3.69	3.14
Mass flow velocity per unit (kg/s)	0.56	0.14	0.56
Number of units	1	4	1
Total pipe length (m)	159.52	159.04	159.46
Ave. heat exchange (kW)	8.46	8.50	7.30
Ave. heat exchange rate (W/m)	53.01	53.43	45.80
Total heat exchange rate (kW·h/m)	2.97	2.99	2.56
Equivalent heat exchange rate (over Multiple U type)	0.99	1	0.86

Table 4. Input parameter for energy pile design program (PILESIM2)

Air temperature/daily sunlighth	Annual time-based data
Heat pump/cooling machine	Electric power, COP, EWT
Energy pile	Diameter, length, number, space, thermal resistance
Heat exchange pipe (HDPE)	Number(length), ID/OD
Ground condition	Initial temperature, thermal conductivity, heat capacity, depth, groundwater flow rate
Limitation	Exclusively design multiple U type and co-axial type

열교환율은 W-형 에너지파일이 2.97 kW·h/m, 복합 U-형 에너지파일이 2.99 kW·h/m, 나선형 에너지파일이 2.56 kW·h/m로 각각 산정되었다. W-형 에너지파일의 열교환율은 복합 U-형 에너지파일에 비해 약 99%로 거의 유사한 것에 비하여, 나선형 에너지파일의 경우 복합 U-형 에너지파일에 비해 약 86% 열교환율을 보였다. 또한, 복합 U-형 에너지파일의 열교환율 대비 W-형과 나선형 에너지파일 열교환율의 비 즉, 등가열교환율은 W-형과 나선형 에너지파일에 대해 각각 0.99와 0.86으로 산정되었다. 이 결과는 나선형 열교환기가 갖는 구조적 특성에 의해 W-형이나 복합 U-형에 비해 파이프루프 상호 간 열간섭이 커서, 상대적으로 낮은 열교환율을 갖는 것이라 유추할 수 있다. 한 가지 주의해야 할 사실은 본 논문에서 산정한 등가열교환율은 간헐적으로 일일 8시간 운용-16시간 정지를 반복하여 7일간 냉방운용 모사를 통해 얻어진 값이다. 즉, 일반적으로 실제 연간 냉난방 기간(약 2-3개월)에 비해 비교적 단기간의 모사결과이므로 실제 냉난방 기간 동안에 각 에너지파일에서 발생하는 상대적인 열교환을 비와는 다를 수 있다. 하지만, 본 논문에서는 7일간 냉방모사를 통해 얻어진 열교환율이 각 에너지파일의 열거동 특성을 적절히 나타낸다고 가정하고 이를 토대로 각 형상별 에너지파일의 설계법을 제시하였다.

4. 현장타설 에너지파일 설계법

본 논문에서는 앞 절의 7일 냉방운용 모사를 통해 산정한 열교환기 형태별 등가열교환율을 에너지파일 상용설계 프로그램인 PILESIM2에 적용하여 새로운 에너지파일 설계법을 제안하였다. 상용 에너지파일 설계 프로그램인 PILESIM2는 Pahud and Hubuck(2007)가 스위스 취리히 공항에 설치된 현장타설 에너지파일의 순환수의 온도변화를 장기간 관측하고 시스템 평가를 통해 검증한 설계 프로그램으로, Table 4와 같이 에너지파일의 직경, 길이, 개수, 간격 등의 말뚝제원과 지반의 열전도도, 지하수 존재 여부, 지하수 흐름(유속) 등의 지반조건을 설계변수로 하여 최대 50년까지의 냉/난방 모사를 통한 EWT 추이를 분석하고 이를 바탕으로 에너지파일의 최적 부하량 또는 에너지파일 제원을 설계할 수 있다. 그러나 PILESIM2에서는 에너지파일의 단면을 복합 U-형(1쌍-5쌍 열교

Fig. 7. Design algorithm for cast-in-place energy pile (determination of available heating/cooling load)

환파이프의 병렬연결)과 이중관형(co-axial type)에만 적용할 수 있으므로 일반적으로 현장타설 에너지파일에 설치 가능한 W-형(직렬연결)이나 나선형 열교환기와 같은 다양한 열교환파이프 배치 형태에 대한 에너지파일 설계에 직접 적용할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 앞 절에서 수행한 7일간 간헐적 냉방모사(8시간 가동-16시간 정지를 반복) 전산유체해석 결과로 산정된 열교환파이프 배열 형상에 따른 등가열교환율을 복합 U-형 에너지파일에 대한 상대적인 열교환 능력으로 보고 이를 등가 환산계수로 적용하는 설계알고리즘을 Fig. 7과 같이 제시하였다. 즉, PILESIM2를 이용하여 복합 U-형 열교환기의 현장타설 에너지파일에 대한 기본 설계를 수행하고, 여기에 열교환기 형상에 따른 상대적인 열교환 효율(등가열교환율)을 등가 환산계수로 적용하여 기본 설계된 건물의 최대 가용 냉난방부하량을 조정한다. 본 논문에서 제안한 설계방법은 현장타설 에너지파일뿐 아니라 PHC말뚝이나 광관말뚝 등의 기성말뚝을 활용한 에너지파일에도 Table 5에서 제시한 에너지파일의 직경 및 길이 등과 같은 입력변수의 조절을 통해 적용할 수 있다.

일반적으로 에너지파일은 기초구조체로서 상부하중을 지지할 수 있도록 하는 구조적 설계가 우선되므로, 본 논문에서는 주어진 에너지파일 설계조건(말뚝의 직경, 길이, 개수 및 이격거리)에 대해

냉난방 설비가 원활히 운용될 조건(작동 EWT가 설계 EWT 범위를 벗어나지 않도록)에서 획득할 수 있는 건물의 최대 냉난방 부하량을 산정하는 방법을 제안하였다. 신재생에너지 설비의 지원 등에 대한 기준 및 지침(지식경제부, 2012)에는 에너지파일의 설계 적합성은 건물의 요구 냉난방부하량에 대해 20년간 냉난방 운용시 예측되는 작동 EWT가 히트펌프 설계 EWT 범위 내에 유지되어야 한다고 규정하고 있다.

본 논문에서는 PILESIM2를 적용하여 총 108개의 Case에 대하여 현장타설 에너지파일 설계를 수행하였다. 지반 초기온도는 15°C로 가정하고 히트펌프 설계 유입온도(EWT)를 난방 시에는 5°C, 냉방 시에는 30°C를 적용하였다. PILESIM2를 적용하기 위해 4쌍의 복합 U-형 열교환 파이프가 병렬로 설치된 에너지파일에 대해 Table 5에 제시한 설계인자(지반의 열전도도, 지하수 흐름 등의 지반 조건과 에너지파일 직경, 길이, 간격 등의 말뚝조건)를 고려하고 Fig. 7의 설계 알고리즘을 적용하여 20년 냉난방 모사를

Table 5. Design parameters adopted for energy pile

Simulation length	20 years
Initial ground temperature	15°C
Heat exchange pipe	Multiple U type (4 parallel loops)
Design heat pump EWT	5°C(heating)/30°C(cooling)
Heat pump COP	3.8
Cooling machine COP	4.9
Ground thermal conductivity	2.0W/mK, 3.0W/mK
Groundwater flow	None, 1m/day, 2m/day
Number of energy pile	1, 4
Diameter of energy pile	1.0m, 1.5m
Space of energy piles	3m, 5m
Length of energy pile	10m, 20m, 30m

수행하였다. 특히, 설계변수 중 에너지파일 개수를 1개와 4개로 구분한 이유는 말뚝 간의 간섭효과를 평가하기 위함이다. 즉, 에너지파일 4개 조건(Case G7 - G18)에 대해서는 말뚝 사이 간격이 3m와 5m인 조건을 반영한다. 이 조건에 대해 다수의 에너지파일을 실제로 설계할 경우에는 4개 에너지파일을 한 개의 그룹(군말뚝 그룹)으로 간주하여 말뚝 간 간섭효과를 설계에 반영할 수 있다. 이와 반대로 에너지파일 1개 조건(Case G1 - G6)에 대한 설계는 말뚝 간의 간섭효과를 무시할 수 있는(즉, 말뚝 사이 간격이 5m 이상인 경우) 조건으로 에너지파일을 단말뚝으로 고려한다.

Fig. 8은 실제 에너지파일 설계 예를 보여 준다. Fig. 8(a)의 2010년 중부지방 기상데이터를 활용하고 각 Case에 대한 총 냉난방 부하량을 가정하여 Fig. 8(b)과 같이 설계 부하패턴을 입력변수로 적용한다. Fig. 8(b)는 해석 Case G1(에너지파일 개수=1본, 지하수 유속=0 m/day, 지반 열전도도=2.0 W/mK)에 대해 에너지파일 직경이 1.0 m이고 길이가 10 m인 조건에 대해 설계 EWT 조건을 만족하는 냉난방 부하패턴이다. 이 조건에 대해 최적화된 건물 냉난방부하량으로 20년간 냉난방 모사 시, EWT의 변화를 Fig. 9(a)에 예시하였다. 만약, 20년간 냉난방 모사에서 계산된 EWT가 히트펌프 설계 EWT 상한(30°C)를 벗어나게 되면 이는 에너지파일이 담당할 수 있는 건물 냉방부하량을 과도하게 산정한 것이고, 이와 반대로 설계 EWT 하한(5°C)를 벗어나게 되면 이는 건물의 난방부하량을 과도하게 산정한 것이다. 한편, Fig. 9(b)와 같이 계산된 작동 EWT가 설계 EWT 범위에 비해 너무 좁은 범위를 유지하는 것은 설계된 에너지파일의 열교환 능력을 과소평가한 것이다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 설계법에서는 Fig. 7의 설계 알고리즘을 따라 주어진 에너지파일 체원에 대하여 건물에서 요구되는 연간 냉난방부하량을 변화시키면서 냉난방운용을 모사하여 20년간 EWT의 변화가 히트펌프 설계 EWT 범위에 존재하도록 시행착오를 통한 최적화 과정을 거치게 된다.

(a) Annual air temp. in middle Korean Peninsula (in 2010)

(b) Design heating/cooling load pattern

Fig. 8. Annual air temperature and design heating/cooling load pattern (Case G1)

Fig. 9. Variation of heat pump EWT for 20 years (Case G1)

Fig. 10. Energy pile design cases (Case G1-G18)

Fig. 10은 본 논문에서 Table 5의 설계인자를 PILESIM2에 적용하여 4쌍의 복합 U-형 열교환파이프가 병렬로 설치된 에너지 파일에 대해 수행한 총 108개의 Case에 대한 설계 수행도를 보여준다. 또한, Fig. 11은 Case G1에서 G18까지 18가지 기본조건에 대하여 말뚝직경(1.0, 1.5m)과 말뚝길이(10, 20, 30m)의 6가지 말뚝제원을 조합하여 설계한 에너지파일 유닛당 냉난방 획득 부하량을 보여준다. 실제 에너지파일을 설계하기 위해서는 주어진 에너지파일 설계배치와 지반조건에 대해 Fig. 10의 설계 Case를 선정하고 설계말뚝제원(직경과 길이)에 해당하는 에너지파일 유닛당 냉난방 획득 부하량을 Fig. 11의 설계도표로부터 찾은 후, 전체 설계 에너지파일 개수를 곱하는 과정을 갖는다. 만약, 에너지파일을

구성하는 열교환 파이프 형상이 복합 U-형(병렬 4쌍)이 아니고 동일한 길이를 갖는 열교환 파이프가 W-형(직렬) 혹은 나선형이라면, Fig. 11의 설계도표에 Table 3에서 제시한 에너지파일 열교환파이프 형상별 등가열교환율을 가중인자로 고려하여 설계를 수행한다. 단, Fig. 11의 설계도표는 오직 4쌍의 복합 U-형 열교환 파이프가 병렬로 설치된 에너지파일에만 해당하고, 3쌍 혹은 5쌍의 복합 U-형에 대해서는 PILESIM2를 적용하여 추가 설계를 통해 Fig. 11와 유사한 설계도표를 작성할 수 있다.

중부지방 기상데이터(Fig. 8(a))를 설계에 적용하였기 때문에 Fig. 11의 설계도표는 난방부하가 냉방부하보다 큰 설계가 이루어졌다. 이로 인해 Fig. 9(a)에서 20년 히트펌프 운전 시, 지중온도와

Fig. 11. Design chart for annual heating/cooling capacity of energy pile

함께 히트펌프 유입온도(EWT)가 점차로 감소함을 알 수 있다. 하지만, 설계 최저온도(5°C) 보다는 펌프유입 온도가 높게 유지되어 적절한 설계가 이루어졌다고 판단된다. 또한, Fig. 11의 설계도표에서 지하수 흐름이 있을 때와 지반의 열전도도가 높을 때는 순환수와 지반사이의 열교환이 보다 활발히 이루어져 큰 냉난방 부하량을 얻을 수 있고, 파일 간격이 감소하면 각각의 에너지 파일간의 열간섭에 의하여 획득할 수 있는 부하량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

에너지파일을 설계하기 위해서는 에너지파일의 열교환파이프 형태에 따른 열교환 효율 및 성능 평가가 필요하다. 본 논문에서는 W-형(직렬), 복합 U-형(병렬 4쌍), 나선형 열교환파이프가 삽입된 에너지파일의 열교환 효율을 전산유체해석을 통해 산정하고, 이를 에너지파일 상용 설계 프로그램인 PILESIM2에 적용하여 현장타설 에너지파일의 설계법을 제시하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 열교환파이프 길이 당 100시간 총 열교환을 비교에서는 W-형과 나선형 에너지파일은 복합 U-형 에너지파일에 비해 약 각각 103%와 98%의 상대적 열교환율을 보였다. 이는 복합 U-형 에너지파일의 열교환을 대비 W-형과 나선형 에너지파일의 열교환율의 비 즉, 등가열교환율은 W-형과 나선형 에너지파일에 대해 각각 1.03과 0.98로서 열교환파이프 배치형상에 따른 열교환율의 차이는 매우 작아 현장타설 에너지파일의 열교환 효율은 열교환 파이프 배열 형태 보다는 열교환파이프 길이에 의해 결정됨을 알 수 있다.
- (2) 상업용 건물에 대한 여름철 냉방을 위해 일일 8시간 운용, 16시간 정지를 반복하는 간헐적 냉방운용을 7일간 모사한 결과, 발생한 열교환파이프 길이 당 총 열교환율은 W-형 에너지파일의 열교환율은 복합 U-형 에너지파일에 비해 약 99%로 거의 유사한 것에 비하여, 나선형 에너지파일의 경우 복합 U-형 에너지파일에 비해 약 86% 열교환율을 보였다. 즉, 복합 U-형 에너지파일 대비 W-형과 나선형 에너지파일의 등가열교환율은 W-형과 나선형 에너지파일에 대해 각각 0.99와 0.86 이다.
- (3) 에너지파일에 설치된 열교환파이프 형태에 따른 등가열교환율을 PILESIM2를 이용한 에너지파일 설계에 적용하는 설계 알고리즘을 제시하고, 대표적인 에너지파일 설계변수에 대한 설계도표를 제시하였다.
- (4) 가상설계 결과 지하수 흐름이 있을 때와 지반의 열전도도가

높을 때는 순환수와 지반사이의 열교환이 더 활발히 이루어져 높은 부하량을 획득할 수 있고, 파일 간격이 감소하면 에너지파일 간의 열간섭에 의하여 설계 냉난방 획득 부하량이 감소한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20113030110010)과 삼성물산(건설부문)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Baek, S. K. (2004). *Study on ground-coupled heat pump system using hollow piles*, Ph.D. Thesis, Busan University, Korea (in Korean).
- Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C. and Payne, P. (2009). "Energy pile test at Lambeth College, London: Geotechnical and Thermodynamic Aspects of Pile Response to Heat Cycles." *Geotechniques*, Vol. 59, No. 3, pp. 237-248.
- Choi, J. C. and Lee, S. R. (2010). "Numerical simulation of ground heat exchanger embedded pile considering unsaturated soil condition." *Proceedings of 2010 KGS Spring Conference*, Korean Geotechnical Society (KGS), pp. 213-220 (in Korean).
- Cui, P., Li, X., Man, Y. and Fang, Z. (2011). "Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils." *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 4113-4119.
- Engineeringtoolbox.com (2005). <http://www.engineeringtoolbox.com>
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. and Yang, J. (2008a). "Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles." *Applied Energy*, Vol. 85, pp. 901-910.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. and Yang, J. (2008b). "Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study." *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 2295-2304.
- Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., and Ochifuji, K. (2007). "Field performance of an energy pile system for space heating." *Energy and Building*, Vol. 39, pp. 517-524.
- Jeong, S., Song, J., Min, H. and Lee, S. (2010). "Thermal influence factors of energy pile." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers (KSCE)*, Vol. 30, No. 6C, pp. 231-239 (in Korean).
- Jun, L., Zhang, X., Gao, J. and Yang J. (2009). "Evaluation of heat exchange rate of GHE in geothermal heat pump system." *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 2898-2904.
- Knellwolf, C., Peron, H. and Laloui, L. (2011). "Geotechnical analysis of heat exchanger piles." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 10, pp. 890-902.
- Laloui, L., Moreni, M. and Vulliet, L. (2003). "Behavior of a dual-purpose pile as foundation and heat exchanger." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 388-402.
- Laloui, L., Nuth M. and Vulliet L. (2006). "Experimental and

- numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile.” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 30, pp. 763-781.
- Lee, C., Min, S., Koh, H., Yoo, J., Jung, K. and Choi, H. (2011). “Thermal performance of cast-in-place concrete energy pile.” *Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'11)*, Seoul, Korea, pp. 3747-3758.
- Lee, S., Park, H., Park, D. and Yoon, S. (2012). “Numerical simulation of seasonal performance of energy pile.” *Proceedings of the 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12)*, Seoul, Korea, pp. 2459-2465.
- Li, X., Chen, Y., Chen, Z. and Zhao, J. (2006). “Thermal performances of different types of underground heat exchangers.” *Energy and Building*, Vol. 38, pp. 543-547.
- Lim, H., Jeong, S., Ko, J. and Jeong, C. (2012). “The comparison of the temperature output on energy piles between field measurement and numerical analysis.” *Proceedings of 2012 KGS Fall Conference*, Korean Geotechnical Society (KGS), pp. 966-972 (in Korean).
- Man, L., Yang, H., Diao, N., Liu, J. and Fang, J. (2010). “A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2593-2061.
- Min, H. and Jeong, S. (2012). “Analysis of thermal efficiency on energy piles considering thermal influence factors.” *Proceedings of 2012 KGS Spring Conference*, Korean Geotechnical Society (KGS), pp. 1505-1512 (in Korean).
- Ministry of knowledge Economy (2012). *Standard and guide supporting for new and renewable energy systems*, Korea Energy Management Corporation (in Korean).
- Morino, K. and Oka, T. (1994). “Study on heat exchanged in soil by circulating water in a steel pile.” *Energy and Building*, Vol. 21, pp. 65-78.
- Nam, Y., Ooka, R. and Hwang, S. (2008). “Development of a numerical model to predict heat exchang rates for a ground source heat pump system.” *Energy and Building*, Vol. 40, pp. 2113-2140.
- Nam, Y. and Ooka, R. (2011). “Development of potential map for ground and groundwater heat pump systems and the application to tokyo.” *Energy and Building*, Vol. 43, pp. 677-685.
- Pahud, D. and Hubbuck, M. (2007). “Measured thermal performances of the energy pile system of the dock midfield at Zürich Airport.” *Proceedings of European Geothermal Congress 2007*, Unterhaching, Germany, pp. 1-7.
- Park, S., Lee, C., Park, Y-B, Sohn, J-R and Choi, H. (2012). “Research on heat exchange characteristics of coil-type PHC energy pile.” *Proceedings of 2012 KGS Spring Conference*, Korean Geotechnical Society (KGS), pp. 201-212 (in Korean).
- Park, S., Park, Y-B, Sim, Y-J, Lee, C. and Choi, H. (2012). “Study on heat exchange characteristics for PHC Energy piles.” *Proceedings of the 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12)*, Seoul, Korea, pp. 2493-2507.
- Ryu, H-K. (2008). “Development and performance evaluation of ground heat exchanger utilizing PHC pile foundation of building.” *Journal of Korean Solar Energy Society*, Vol. 28, No. 5, pp. 56-64 (in Korean).
- Ryu, H-K, Lee, B-S, Park, S., Lee, C. and Choi, H. (2012). “Study on the design and construction optimize of coil-type PHC enery pile.” *Proceedings of 2012 SAREK Summer Conference*, The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea (SAREK), pp. 402-406 (in Korean).
- Wood, C. J., Liu, H. and Riffat, S. B. (2009). “Use of energy piles in a residential building, and effects on ground temperature and heat pump efficiency.” *Geotechniques*, Vol. 59, No. 3, pp. 287-290.