실증실험과 GLHEPro 수치해석을 통한 이중관형 지중열교환기의 설계인자 분석 및 최적설계방안 연구

Determining Design Parameters and an Optimal Design Method for Coaxial Geothermal Heat Exchangers Using Verification Experiments and GLHEPro Numerical Analysis

홍성훈* · 정영욱** · 한신인*** · 김종영**** · 김정호***** · 권순철*****

Hong, Sunghoon*, Jung, Youngwook**, Han, Shinin***, Kim, Jongyeong****, Kim, Jeongho*****, and Kwon, Soonchul*****

Abstract

In this study, we investigated the effects that are dependent on the characteristics (length, diameter, type, and flow direction in a pipe) of a coaxial ground heat exchanger, via head loss and pressure drop measurement experiments. We identified that an increase in the length, a decrease in the diameter, and counter-flow generation inside the coaxial ground heat exchanger are the main factors responsible for increases in head loss. To optimize the design of a heat exchanger via numerical analysis using GLHEPro, we performed a sensitivity analysis considering the range of EWT, the number of heat exchangers, and the interval for installation. Based on these results, we calculated a 'Pareto solution' of 3 for the number of heat exchangers, taking into consideration the total heat exchanger length and power consumption conditions.

Key words : Coaxial Ground Heat Exchanger, Head Loss, Pressure Drop, GLHEPro, Sensitivity Analysis, Pareto Solution

요 지

본 연구에서는 이중관형 지중열교환기에 대한 손실수두와 압력강하 측정실험을 통해 교환기의 특성(길이, 직경, 종류, 관내 유체흐름 방향)에 의한 영향을 검토하였다. 실험결과 이중관형 지중열교환기의 길이 증가, 교환기의 직경 감소, 교환기 내부에서 반대방향 흐름이 손실수두를 증가시키는 주요 요인임을 확인하였다. 또한 열교환기의 최적설계과정에서 GLHEPro를 사용한 수치해석을 위해 주요 입력변수인 EWT와 열교환기 개수, 설치간격에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이를 바탕으로 전체 교환기 길이와 소비전력량 조건에 대해 '파레토 해'를 만족시키는 교환기 개수가 3개임을 확인하였다.

핵심용어 : 이중관형 지중열교환기, 손실수두, 압력강하, GLHEPro, 민감도분석, 파레토 해

*정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 박사과정(E-mail: superkick701@naver.com)

Member, Ph.D Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

** (주)서영엔지니어링 기술연구소 과장

General Manager, R&D Center, Seoyoung Engineering Corp.

*** (주)서영엔지니어링 기술연구소 전무

Managing Director, R&D Center, Seoyoung Engineering Corp.

****부산대학교 사회환경시스템공학부 석사과정

Master Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

*****부산대학교 사회환경시스템공학부 석사과정

Master Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

*****교신저자, 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 조교수(Tel: +82-51-510-7640, Fax: +82-51-513-9596, E-mail: sckwon@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

1. 서 론

화석연료 사용에 따른 이산화탄소의 배출은 바다를 산성화시켜 해양생태계를 심각하게 위협하고 있으며(Turley and Gattuso, 2012), 기후변화에 기여하여 극한 강우조건을 유발하는데 이는 도시 침수 및 하수관 파손 등의 기상재난을 일으키는 주원인으로 지적되고 있다(Forestieri et al., 2017).

세계 각국은 이러한 기후변화 문제에 보다 적극적으로 대응하고자 국제 기후변화협약인 The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)의 참여를 통해 선진국과 개발도상국의 구분 없이 이산화탄소 감축의무를 부여하는 파리협약(Paris Climate Agreement, 2015)을 채택하였으며, 감축목표 달성을 위해 화석에너지 의존도 감축, 에너지 효율성 제고, 청정 수송시스템 보급 확대, 신재생에너지 개발 및 보급, 자동차 연비기준 강화 등의 정책을 추진하고 있다(KEEI, 2016).

파리협약 참여국가 중 주요 에너지소비국에 해당하는 우리나라는 탄소배출량 저감계획 수립을 위해 아무런 감축 조치를 하지 않을 때 예상되는 2030년의 이산화탄소 배출량 대비 37%를 저감시키는 목표를 담은 자발적기여보고서(UNFCCC, 2015)를 UNFCCC사무국에 제출했다.

이와 관련하여 정부는 기존 에너지원을 대체하며 환경공해를 최소화시킬 수 있도록 신재생에너지 기술의 도입 및 보급 확대를 지속적으로 추진하고 있다. 일례로 ‘신재생에너지 설치의무화제도(MOTIE and KEA, 2018)’에 근거하여 공공기관이 연면적 1,000 m² 이상의 건축물을 신축·증축 또는 개축하는 경우 2019년 기준으로 연간 사용이 예측되는 총에너지량 중 신재생에너지가 27%의 비율을 충족하게 하는 등의 제도적 규제를 시행하고 있으며 그 비율은 점차 증가하고 있다.

신재생에너지로 분류되는 지열에너지는 열원 공급이 안정적이고 비교적 적은 운영비용으로 건물의 냉·난방과 급탕이 가능한 장점을 가져 공공기관 건물, 일반가정집, 농업용 하우스 등에서 그 적용사례가 증가하고 있다. 그러나 열교환기(Ground Heat Exchanger, GHE) 설치를 위한 천공비용으로 인해 초기 투자비용이 기존 설비에 비해 약 2배 정도로 높고(Yu and Bae, 2010), 특히 교환기 설치부지가 제한되는 경우 시공 자체가 불가하며, 보어홀 내에서 유입관과 유출관의 상호 열간섭이 발생하는 경우 열교환 효율이 저하되는 등의 단점도 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 열교환기 설치면적을 최소화하면서도 상호 열간섭 영향을 줄일 수 있는 이중관형 지중열교환기가 하나의 대안이 될 수 있으며, 설계기술의 확립을 위한 관련 연구가 필요하다.

현재까지 이중관형 지중열교환기에 대한 선행연구 사례로 Lee et al. (2013)은 수치해석을 통해 이중관 내에서

균일한 유량분배를 위해서는 유체 유입위치가 회전구간보다 더 지배적임을 확인하였고, 균일한 유량분배를 위한 유입위치 및 회전구간의 길이 비율을 제시하였다. Cho et al. (2012)은 4차례의 실증실험에서 열전도도 산정 및 비교를 통해 506 m의 동일한 깊이 조건에서 65 mm 직경의 U자형 지중열교환기와 내관이 65 mm, 외관이 150 mm인 이중관형 지중열교환기는 열전도도의 차이가 크지 않음을 확인하였다. 이외에도 이중관형 지중열교환기와 관련된 연구로는 열효율 향상을 위한 커플러 설치에 따른 열효율 평가 연구(Sivashanmugam and Suresh, 2007; Xu and Islam, 2016; Reddy et al., 2017)가 다수 존재하며, U자관과 이중관의 경제성을 비교하기 위해 Earth Energy Design (EED)와 Ground Loop Heat Exchanger Professional (GLHEPro) 프로그램을 이용해 교환기 길이 감소효과를 분석한 Raymond et al. (2015)의 연구 등이 있다.

관수로의 거동을 갖는 이중관형 지중열 교환기의 특성 상 펌프용량의 설계 시 고려해야 하는 주요 인자로는 압력강하 및 마찰손실이 있으나, 현재까지 국내외의 선행연구는 그 사례가 충분치 못한 실정이다.

이에 본 연구에서는 Pilot-scale 실험과 두 차례의 실증실험 과정에서 이중관형 지중열교환기의 압력강하 및 손실수두 측정을 통해 교환기의 특성(길이 및 직경, 흐름방향, 지중열교환기 종류)에 의한 영향을 평가하였다. 또한 GLHEPro를 이용하여 주요 변수에 대한 민감도 분석과 지중열교환기의 전체 길이와 소비전력량 모두를 고려한 파레토 최적해의 도출을 통해 최적설계안을 제시하였고, 해당 조건에서 Entering Water Temperature (EWT)의 최대·최소값을 확인하는 연구를 수행하였다.

2. 관내 손실수두 및 압력강하 측정방법

2.1 Pilot-scale 실험 간 손실수두 산정

이중관형 지중열교환기의 손실수두를 측정하는 Pilot-scale 실험을 위해 Hong et al. (2017)의 선행연구를 참고하여 이중관형 지중열교환기, 펌프시스템, 그리고 피에조미터 타입의 유입·유출부 수위계를 구축하였다. 이중관형 지중열교환기 실험체(Fig. 1)는 SDR 11규격의 Polyethylene (PE)관을 사용하여 외관길이 기준 4 m, 6 m, 8 m 길이로 전기열용착하고, 직경변화에 따른 손실수두 영향 분석을 위해 내관 40 mm, 외관 75 mm인 실험체와 내관 50 mm, 외관 90 mm인 실험체를 제작하여 사용하였다. 펌프시스템의 경우 최대 110 L/min까지 유량 조절이 가능한 정격출력 1,700 W의 장비를 활용하여 15 L/min부터 70 L/min까지 관내 유량을 5 L/min 간격으로 조정하였고, 유량조절 이후 수위계에서 안정된 수두 값을 읽어 손실수두를 산정하였다.

Fig. 1. Coaxial Heat Exchanger Sample for Pilot-scale Experiment

2.2 실증실험을 통한 지중열교환기 압력강하 측정

이중관형 지중열교환기의 실증 실험을 위해 실제로 현장 시공되어 운용 중인 충남 당진과 대전의 지중열교환기를 이용하였다. 실증실험은 Pilot-scale 실험조건과 달리 지중열교환기의 길이가 상당히 길기 때문에 손실수두가 크게 발생할 수 있다. 이에 피에조미터 관을 사용한 수두측정이 어려운 관계로 지중열교환기의 유입·유출부에 설치된 압력계를 이용해 압력강하 정도를 측정하고(Fig. 2), 이를 손실수두로 환산하였다. 1차 실증실험이 진행된 당진의 지중열교환기는 50 m 길이로 U자관(D 75 mm), 이중관(내관 40 mm, 외관 75 mm), 이중관(내관 50 mm, 외관 90 mm), 외관 재질이 스테인리스인 스테인리스 이중관(내관 40 mm, 외관 75 mm)의 종류를 가지며, 30 L/min부터 85 L/min까지 5 L/min 간격으로 유량을 조절하며 손실수두를 측정하였다. 2차 실증실험이 진행된 대전의 지중열교환기는 80 m 길이를 가지며 이중관(내관 40 mm, 외관 75 mm) 3개가 실험에 사용되었고, 15 L/min부터 60 L/min까지 5 L/min 간격으로 유량을 조절하며 손실수두를 측정하였다. 추가적으로 지중열교환기 내에서 supply관을 통해 교환기에서 히트펌프로 공급된 뒤 return관을 통해 교환기로 돌아가는 흐름을 ‘정상방향’으로, 그 반대의 경우를 ‘반대방향’으로 정의하여 순환수의 흐름방향에 따른 손실수두를 측정하고 그 영향을 분석하고자 하였다.

(a) Geothermal heat exchangers (b) Pressure gauges

Fig. 2. Heat Exchanger and Pressure Gauges Used for Verification Test

2.3 손실수두 측정 및 압력강하 분석 이론

관수로의 흐름을 갖는 지중열교환기에서 손실수두를 측정하고 해석하기 위해서는 관내 유체가 가지는 에너지를 길이개념으로 나타내는 것이 취급이 용이하며, 관련 이론으로는 Eq. (1)의 베르누이방정식(Bernoulli, 1738)을 이용할

수 있다. 여기서 첨자 1과 2는 각각 지점1과 지점2를 의미하며, γ 는 유체의 단위체적중량, P 는 압력, g 는 중력가속도, v 는 유속, 그리고 H_L 은 손실수두를 의미한다.

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma_2} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + H_L \quad (1)$$

교환기 내에서의 유체흐름 특성을 파악하고 마찰손실 등으로 인해 발생하는 손실수두를 산정하기 위해 관내 유속(V), 관 직경(D), 그리고 유체의 동점성계수(ν) 사이의 관계에 의해 도출되는 Re수(Reynolds, 1883)를 고려하였다(Eq. (2)).

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2)$$

본 실험에서 사용된 지중열교환기의 유량조건에서는 Re 수가 4,000이 넘는 난류 흐름에 해당하기 때문에 Eq. (3)과 같이 난류 조건에서 적용 가능한 Blasius 공식(Blasius, 1912)을 이용하여 마찰손실계수를 산정하였다.

$$\lambda = 0.316 \times Re^{-0.25} \quad (3)$$

이후 Eq. (3)을 통해 계산된 마찰손실계수(λ), 지열교환기 길이(L), 관 직경(D), 유속(v), 그리고 중력가속도(g)의 관계를 이용하는 Darcy-Weisbach (Weisbach, 1845) 공식을 사용하여 관수로 흐름에 의한 마찰손실량(major loss)을 산정하였다(Eq. (4)).

$$H_L = \lambda \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

2.4 마찰손실을 고려한 실증실험용 지열교환기의 손실수두 산정

Min and Choi (2011)의 연구에 따르면 지중열교환시스템을 설계·시공할 때 히트펌프의 유입관과 유출관 사이 또는 교환기 간 상호 열간섭이 발생하는 경우 열효율이 저하되는 것으로 알려져 있다.

이와 유사한 이유로 한국에너지공단은 ‘신·재생에너지 설비 원별 시공기준(KEA, 2017)’에서 지중열시스템의 효율 저하 방지를 위해 설계 시 보어홀 간격을 이격하여 천공해야 하며, 그 간격을 지중열교환기 설계계산서 등에 작성해야 함을 명시하고 있다. 본 연구의 실증실험에서 사용된 당진과 대전의 지중열교환기 역시 열효율 저하 방지를 목적으로 보어홀 간격이 이격되어 있으며 이로 인해 supply관과 return관의 길이가 길어져 관내 마찰손실(major loss) 영향을 무시할 수 없게 되었다.

이에 본 연구에서는 이중관형 지중열교환기의 손실수두

를 더 집중적으로 분석하기 위한 연구목적에 고려하여 supply 및 return관로에 의한 마찰손실량을 제외하고자 하였으며, 이를 위해 지중열시스템 설계시공도면(Appendix 1,2)에 근거하여 관로의 총 길이를 구하고 Eq. (4) 식을 이용해 산정된 마찰손실량 만큼을 손실수두 값에서 제외하였다.

3. GLHEPro를 이용한 이중관형 지중열교환기 최적설계

3.1 GLHEPro

국내에서 수직밀폐형 지중열교환기를 설계하는 경우 GLHEPro, GSHPCalc, EED, 그리고 Ground Loop Design (GLD) 중 하나 이상의 프로그램을 이용해야 하며, 이외의 설계 방법 및 프로그램을 적용하는 경우 한국에너지공단 신·재생에너지센터의 자문위원회 심의를 받아야 한다(KEA, 2018). 이중 Oklahoma 주립 대학교에서 개발한 GLHEPro는 냉·난방 부하, 지중 열 특성, 지중열교환기 및 열펌프 정보를 입력 자료로 사용하여 장기간에 걸친 월별 냉·난방 부하와 월별 최대 냉·난방 수요에 대해 지중열교환기의 온도 응답을 예측할 수 있는 지중열교환기 설계 프로그램이다(Spitler, 2000). 또한 GLHEPro는 지정된 EWT 조건에 맞도록 지중열교환기 길이를 자동으로 조절하는 기능이 있어 열교환기 설계 시 사용되고 있다.

본 연구에서는 대전시 유성구에 위치한 건축면적 193m² 단독주택을 대상으로 이중관형 지중열교환기의 설계최적화를 위해 ‘GLHEPro Ver5.0’을 이용하여 교환기 길이와 소비전력량을 분석하고자 하였다. 이때 대상 건물의 냉·난방 부하 계산을 위해 10년간 대전의 일별 최고·최저 온도 평균값(Korea Meteorological Administration, 2018)을 바탕으로 Satterlund et al. (1983)의 연구방법과 같이 Pearson Type III 모델을 이용하여 시간별 외기 온도를 추정하여 사용하였다. 또한 GLHEPro에서 제공하는 대전 지중 평균온도를 이용하였으며, 기반은 보통암으로 구성된 것으로 가정하여 열 물성 자료를 사용하였다(Table 1).

3.2 열펌프 및 순환펌프의 소비전력량 분석방법

지중열교환시스템을 운용하기 위해서는 열펌프와 순환펌프가 필요하며, 전체적인 효율향상을 위해서는 주요 에너지 소비원인 각 펌프의 소비전력량이 작은 것이 유리하기에 설계 최적화를 위해 두 펌프의 소비전력량 분석이 필요하다.

열펌프는 지열교환기를 순환하며 열펌프로 들어오는 순

환수 온도인 EWT에 의해 성능이 변하는데 일반적으로 난방 운전의 경우 EWT가 높을수록, 냉방운전의 경우 EWT가 낮을수록 Coefficient of Performance (COP)가 높아져 열교환을 위한 지중열교환기의 길이가 짧아진다. 본 연구에서는 5RT (Refrigeration Ton)급 물대물 지열펌프의 KS 규정에 의한 냉·난방 용량 및 소비전력과 Beak et al. (2016)에 의한 열펌프 유입 온도 변화에 따른 열펌프의 COP 성능 곡선의 기울기를 참고하였으며, 열펌프의 소비전력은 난방 조건 시 5.05 kW, 냉방 조건 시 3.73 kW로 고정하여 EWT 변화에 따른 열펌프 소비전력의 변화가 없도록 가정했다.

지열에너지 시스템에서 열펌프의 성능이 갈수록 향상되는 것에 비하여 순환펌프의 성능은 크게 향상되지 못하고 있는 실정으로 전체 에너지 소비에서 순환펌프가 차지하는 비율이 증가하고 있어(Geothermal Energy Education Center, 2011), 전체적인 효율을 높이기 위해서는 순환펌프의 에너지 소비를 줄이는 것이 매우 중요하다.

이와 관련하여 순환펌프의 소비 전력은 Eqs. (5), (6)과 같이 계산하였다.

$$P_s = 0.163 \times \frac{\gamma QH}{\eta} \quad (5)$$

$$P = \frac{P_s (1 + \alpha)}{\eta_b} \quad (6)$$

Eqs. (5)와 (6)에서 P_s 는 펌프의 축동력(kW), P 는 펌프의 전동기 출력(kW), γ 는 비중량(kgf/m³), Q 는 펌프의 토출량(m³/min), H 는 펌프의 전양정(m)이며, η , η_b , α 는 각각 펌프 효율, 전달효율, 여유율을 나타내며 각각 0.3, 1, 0.15로 설정하였다(ME, 2013).

이후 GLHEPro를 이용한 수치해석을 통해 도출된 열펌프와 순환펌프의 소비전력과 지중열에너지 시스템의 가동시간을 곱하여 총 소비전력량(kWh)을 산출하였다.

3.3 GLHEPro 입력변수 민감도 분석 및 최적설계 방법

이중관형 지중열교환기 설계 시 EWT는 열효율과 관련되어 교환기의 길이를 결정하는 인자이고, 교환기의 설치 개수는 손실수두와 순환펌프의 소비전력량에 영향을 미치며, 교환기의 설치간격은 열간섭에 따른 열교환 효율 저하 및 열펌프 연결배관의 길이를 증가시키는 요인으로 작용한다. 이러한 중요성 때문에 GLHEPro를 이용한 최적설계를 위해

Table 1. Heat Properties of the Ground

Ground Temperature (°C)	Thermal Conductivity [W/(m·K)]	Density [kg/m ³]	Specific Heat [kJ/(kg·K)]	Volumetric Heat [kJ/(°K·m ³)]
13.8	3.462	3203.6	0.836	2678.21

Table 2. Input Parameter Range for Sensitivity Analysis

Input Parameter		Max EWT (°C)	Min EWT (°C)	Number of GHE	Distance of GHEs (m)
Range		20 ~ 40	-5 ~ 10	1 ~ 6	2 ~ 7
Other Parameter	Max EWT	-	-	25	25
	Min EWT	-	-	5	5
	No. GHE	1	1	-	4
	Dist. GHE	-	-	5	-

주요 입력변수인 EWT 최대·최소값, 교환기 개수, 교환기 간격에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 각 변수별 입력값의 범위 및 기타 변수들의 입력 값을 설정하였다(Table 2).

이후 GLHEPro 프로그램 상에서 민감도가 높은 변수를 선정하여 대상지역에서 이중관형 지중열교환기에 대한 최적화 설계를 수행하였으며, 이를 위한 목적함수로 지중열교환기의 전체 길이와 20년간 열펌프와 순환펌프 운용에 따른 에너지 소비전력량의 합계로 선정하여 그 결과를 비교하였다.

이때 지중열교환기 길이와 소비전력량은 서로 상충(Trade-off)되는 특성을 갖게 되어 복수의 목적함수를 만족할 수 없었다. 이러한 문제의 해결을 위해 다른 목적함수 값을 증가시키지 않으면서 적어도 하나의 목적함수의 값을 감소시키는 해의 집합을 의미하는 ‘파레토 해(Arora, 2004)’를 도입하여 최적설계안을 도출하였다.

4. 손실수두 및 압력강하 측정결과 및 분석

4.1 길이 변화에 따른 손실수두 영향 분석

관수로에서 관로의 길이가 늘어나면 마찰손실 영향이 커져 손실수두가 증가하는데 본 실험에서는 그 경향이 재현되는지 확인하기 위해 Hong et al. (2017)이 수행한 Pilot-scale 실험결과와 본 연구에서 측정된 실증실험 자료를 바탕으로 이중관형 지중열교환기(내관 40 mm, 외관 75 mm)의 손실수두 값을 비교분석 하였다(Fig. 3). 분석 결과 교환기의 길이가 증가하면 동일한 유량조건이라도 손실수두가 더 크게 나타나고 있음을 확인하였으며, 추가적인 사항으로 모든 경우에서 손실수두는 2차 곡선 또는 지수함수 형태로 점차 그 크기가 급격히 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

Fig. 3. Results of Head Loss Depends on Pipe Length Conditions

4.2 직경 변화에 따른 손실수두 영향 분석

교환기 직경이 변하는 경우의 손실수두 변동 경향 분석을 위해 8 m 및 50 m 길이를 갖는 내관 40 mm, 외관 75 mm인 이중관과 내관 50 mm, 외관 90 mm인 이중관의 손실수두를 측정하고, 그 영향을 비교하였다. 이때 손실수두 감소효과의 정량적 비교를 위해 Eq. (7)과 같이 Head Loss Ratio (HLR)을 정의했다.

$$HLR(\%) = \frac{\text{Head Loss of Coaxial GHEs (50-90)}}{\text{Head Loss of Coaxial GHEs (40-75)}} \times 100 \quad (7)$$

동일 길이의 교환기에서 직경이 커지는 경우 손실수두가 모두 감소하였는데, 이는 내관·외관의 통과단면이 각각 56%, 27% 만큼 확대된 효과에 의한 것으로 판단된다. 추가적으로 교환기 길이가 더 긴 50 m의 경우 HLR이 작아 손실수두 감소효과가 더욱 크게 나타나는 경향을 확인할 수 있다(Fig. 4).

Fig. 4. Relation Between Head Loss and Diameter of the Pipe

4.3 관내 흐름방향에 따른 손실수두 측정결과 및 분석

지중열교환기는 일반적으로 열교환을 위해 일정한 방향으로 순환수가 흐르는 경우가 많으며, 그 반대방향의 흐름에 의한 손실수두를 측정된 연구는 충분치 못하다. 이에 본 실증실험에서는 현장 시공된 각 지중열교환기에서 순환수의 유입부와 유출부 변경에 따른 손실수두를 측정하였으며, 그 영향을 분석하였다. 이때 교환기 내에서 일반방향흐름(Normal Flow) 또는 반대방향흐름(Counter Flow)에 의한

손실수두 영향을 비교하기 위해 Eq. (8)과 같이 Head Loss Decrease Factor (HDF)를 정의하였다. 이때 HDF가 100%보다 크면 반대방향 흐름에 의한 손실수두가 정상방향흐름보다 커지는 것을 의미하고 있으며, 각 실험케이스에 대한 HDF의 산정결과는 Table 3과 같다.

$$HDF(\%) = \frac{\text{Head Loss by Counter Flow}}{\text{Head Loss by Normal Flow}} \times 100 \quad (8)$$

Table 3. Results of HDR Depends on Flow Direction at Each Geothermal Heat Exchanger

Flow rate (L/min)	HDR (Head Loss Decrease Factor (%))				
	GHE Length: 50 m			GHE Length: 80 m	
	Coaxial (40-75)	Coaxial (50-90)	Stainless (40-75)	Coaxial-A (40-75)	Coaxial-B (40-75)
25	-	-	-	115.9	138.5
30	-	-	-	116.5	126.1
35	-	-	-	115.8	119.7
40	-	-	107.2	110.7	125.4
45	116.1	-	85.7	111.8	108.2
50	136.5	272.2	80.2	104.9	106.7
55	109.9	268.4	82.4	101.3	109.9
60	118.0	229.5	97.8	102.2	110.8
65	98.3	238.2	91.7	-	-
70	99.4	223.8	98.3	-	-
75	104.8	226.9	93.9	-	-
80	108.6	235.5	94.2	-	-
85	113.7	232.7	90.8	-	-

모든 실험결과에서 손실수두가 측정되기 시작하는 초기 값은 다소 불안정한 관계로 일부 구간에서는 HDR이 일정하지 않은 경우도 있으나, 대체적으로 일정한 값을 나타내고 있다.

이때 HDR 평균값이 92.2%인 스테인리스 이중관을 제외한 나머지 이중관(내관 40 mm, 외관 75 mm)의 경우 HDR이 111.7%, 109.0%, 118.2%로 나타나 반대방향의 흐름이 발생하는 경우 약 9~18.2% 만큼 손실수두가 증가하는 경향을 보였으며, 특히 내관 50 mm, 외관 90 mm인 이중관은 HDR이 240.9%로 나타나 흐름 방향에 따른 손실수두 증가 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다. 상기 이유로 supply관과 return관을 체결하는 경우 착오로 인해 흐름 방향이 바뀌는 경우 손실수두가 증가하여 설계펌프용량을 감당하지 못할 수 있기에 순환수 흐름방향이 바뀌지 않도록 주의가 필요할 것으로 판단된다.

4.4 교환기 종류에 따른 손실수두 분석

수직밀폐형 지중열교환기는 교환기 형상에 의해 종류가 분류되는데 이때 동일한 길이 조건에서 교환기 종류에 따른

손실수두 영향을 평가하기 위해 충남 당진현장의 실증실험 결과를 비교분석하였다(Fig. 5). 분석 시 각 지중열교환기의 손실수두 값으로는 보다 일반적인 지중열시스템의 사용 환경인 정상방향 흐름 조건의 값을 사용하였다.

분석결과 U자관의 손실수두가 가장 크게 나타나 유체의 흐름이 불리한 것으로 나타났으며, 반대로 이중관(50-90)의 손실수두가 가장 낮아 유체 흐름상 유리한 것으로 분석되었다. 또한 스테인리스 이중관(40-75)의 손실수두는 30 L/min에서 55 L/min 유량까지는 이중관(45-70)에 비해 높았으나, 그 보다 높은 유량부터는 더 낮게 나타났다. 그러나 낮은 유량에서 손실수두 측정이 불안정한 30~40 L/min 구간을 제외하면 대체로 유사한 값을 나타내고 있다. 이는 스테인리스관이 외관의 재질만 스테인리스이고, 내관과 외관의 직경이 동일한 이중관 형상을 갖고 있기 때문인 것으로 판단할 수 있으며, 교환기 직경 등의 형상에 의한 영향에 비해 교환기 재질에 의한 영향은 상대적으로 크지 않음을 의미한다. 결과적으로 지중열교환기의 손실수두를 낮추기 위해서는 큰 직경의 교환기를 사용하는 것이 가장 효과적이며, U자관 형상보다는 이중관 형상을 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 또한 스테인리스 이중관의 분석결과를 고려할 때 교환기 외관의 재질이 다르더라도 유사한 형상인 경우 손실수두 값은 상대적으로 큰 차이가 없었기에 추가적인 열교환 성능 및 경제성 평가결과 등을 고려하여 목적에 맞는 교환기를 설계·시공하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

Fig. 5. Results of Head Loss According to Type of Thermal Heat Exchanger

5. GLHEPro를 이용한 이중관형 지중열 교환기 최적설계안 도출

5.1 입력변수 민감도 분석결과

Fig. 6은 GLHEPro 프로그램에서 EWT의 최대·최소값에 따라 조절된 지중열교환기 길이와 소비전력량의 분석결과를 나타내고 있다. 일반적인 지열시스템의 사용조건을 고려할 때 EWT의 최대값이 20℃이고, 최소값이 10℃일 때 교환기의 길이는 1,022 m인 것에 비해 최대값이 40℃이고 최소값이 -5℃일 때의 교환기 길이는 270 m로 나타나 약 4배

정도의 차이가 발생하였다(Fig. 6(a)).

한편 Figs. 6(a)와 (b)에 따르면 소요전력량과 지중열교환기의 길이는 비례하지 않는 것으로 분석되었다. 민감도 분석 결과 EWT가 일반적인 사용온도 범위인 최대값 20~35℃, 최소값 0~10℃을 벗어나는 경우 에너지를 얻기 위한 소비전력량이 증가할 수 있기 때문에 최적설계 시 상기 범위의 EWT를 사용하였다.

5.2 교환기의 최적 개수 및 설치 간격 분석결과

Fig. 7(a)는 교환기 개수에 대한 민감도 분석을 통해 지중열교환기 개수에 따라 변화하는 지중열교환기의 전체 길이를 나타내고 있다. 지중열교환기의 개수가 3개 이하인 경우

열교환기의 길이는 560 m 내외이며, 지중열교환기가 4개 이상이면 교환기 길이가 약 16% 정도 증가한 650 m로 나타났다. 소비전력량의 경우 지중열교환기의 개수가 늘어날수록 감소하였는데 이는 교환기 수량 증가에 따른 유량 분배효과에 의해 손실수두가 감소하여 순환 펌프 사용을 위한 필요 동력 및 소비 전력이 줄었기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 7(b)).

Fig. 8(a)는 민감도 분석을 통해 지중열교환기 설치 간격에 따른 교환기의 전체 길이 관계를 나타내고 있다. 분석결과 교환기 설치간격이 증가할수록 지중열교환기 사이의 열간섭이 적어져 열교환기 전체 길이가 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 설치간격 증가에 따라 교환기의 길이가

(a) Relation between EWT and length of GHEs

(b) Relation between EWT and energy consumption of GHEs

Fig. 6. Sensitivity Analysis for Determining the Value of Max. and Min. EWT

(a) Relation between number and length of GHEs

(b) Relation between number and energy consumption of GHEs

Fig. 7. Sensitivity Analysis for Determining Number of GHEs

(a) Relation between installation interval and length of GHEs

(b) Relation between installation interval and energy consumption of GHEs

Fig. 8. Sensitivity Analysis for Determining Installation Interval of GHEs

감소하는 정도는 점차 줄어들며, 특히 설치간격이 5 m 이상이 되는 경우부터는 교환기의 길이 감소효과가 미미한 것으로 나타났다. 또한 지중열교환기가 4개 설치되는 경우 설치간격이 1 m 늘어나면 총 배관 길이는 약 7 m가 늘어나기에 설치간격이 5 m 보다 크게 될 경우 공사비가 오히려 증가하였다. 또한 전체 에너지 소비량은 지중열교환기 간격에 큰 영향을 받지는 않았다(Fig. 8(b)). 이는 EWT가 동일한 조건이고 간격에 따른 지열에너지 시스템 가동시간의 차이가 연간 4시간 미만으로 작기 때문인 것으로 판단된다. 결과적으로 지중열교환기 및 배관의 전체 길이와 에너지 소비량을 종합적으로 고려할 때 최적설계 시 이중관형 지중열교환기의 설치간격은 5m인 경우가 가장 적절할 것으로 판단된다.

5.3 파레토해 도출을 통한 지중열교환기 최적 설계

이중관형 지중열교환기의 최적설계를 위한 입력변수의 민감도 분석 결과를 바탕으로 EWT의 최대값 범위는 20~35℃, 최소값 범위는 0~10℃으로, 지중열교환기 개수는 1~4개, 교환기 설치간격은 5 m로 지정하여 전역 범위에 대한 수치해석을 수행하였다.

Fig. 9는 GLHEPro를 이용한 수치해석을 통해 이중관형 지중열교환기의 전체 길이와 해석기간 동안의 소비 전력량 분석결과를 나타낸다. 이때 1개의 이중관형 지중열교환기를 제외하고 모든 경우에서 교환기의 길이가 증가할수록 소비 전력량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이중관형 지중열교환기의 최대 길이를 1개당 150 m로 가정할 경우, 3개의 지중열교환기를 설치할 때 이중관형 지중열교환기의 전체 길이와 소비 전력량에 대한 ‘파레토 해’를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 ‘파레토 해’를 만족하는 EWT의 경우 최대값은 29℃이상, 최소값은 5℃이하여야 하는 것으로 분석되었다.

Fig. 9. Optimized Design Results of GHEs

6. 결 론

본 연구에서는 손실수두 및 압력강하를 측정하는 Pilot-scale 및 실증실험을 통해 이중관형 지중열교환기의 특성(길

이, 직경, 관내 유체 흐름방향, 교환기 종류)에 따른 손실수두 영향을 검토하고, GLHEPro 수치해석을 통한 민감도 분석 및 설계최적화를 통해 이중관형 지중열교환기 설계인자에 대한 영향을 평가하였으며 주요 분석결과는 다음과 같다.

- (1) 4 m, 6 m, 8 m, 50 m, 80 m 길이로 제작된 이중관형 지중열교환기(내관 40 mm, 외관 75 mm)에 대한 손실수두 측정 결과 동일한 유량조건인 경우라도 교환기의 길이가 긴 경우의 손실수두가 더 크게 나타났으며, 손실수두는 유량증가에 따라 2차 곡선 또는 지수함수 형태로 그 크기가 급격히 증가하는 경향을 나타냄.
- (2) 직경이 작은 이중관의 손실수두에 대한 직경이 큰 이중관의 손실수두 비율을 의미하는 HDR의 평균값은 8 m 교환기에서 69.9%이고, 50 m 교환기에서 34.9%로 나타나 관경이 확대되는 경우 손실수두가 감소하는 영향을 확인하였으며, 손실수두 감소 경향은 교환기의 길이가 긴 경우가 더 큰 것으로 분석됨.
- (3) 정상방향 조건에서의 손실수두에 대한 반대방향 조건의 손실수두 비율을 의미하는 HDF의 산정 결과 관내에서 반대방향의 흐름이 발생하는 경우 내관 40 mm, 외관 75 mm인 이중관에서는 약 9~18.2%의 손실수두 증가효과가 나타났으며, 내관 50 mm, 외관 90 mm인 이중관의 경우 140.9%의 손실수두 증가효과를 보여 관내 흐름방향이 중요한 설계 요인으로 작용할 수 있을 것으로 판단됨.
- (4) 지중열교환기의 길이가 50 m로 동일한 U자관, 이중관(40-75), 이중관(50-90), 스테인리스 이중관(40-75)에 대한 손실수두측정 결과 유체흐름 특성 상 U자관이 가장 불리하며, 이중관(50-90)이 가장 유리한 것으로 분석되었음. 또한 이중관(40-75)과 스테인리스 이중관(40-75)의 손실수두 분석결과 이중관형 지중열교환기의 손실수두는 교환기 직경 등의 형상적 특성이 외관 재질특성 보다 큰 영향으로 작용하는 것으로 판단되며, 교환기에 대한 열교환 성능 및 경제적 타당성에 근거하여 목적에 맞는 교환기를 선택하는 것이 합리적으로 판단됨.
- (5) GLHEPro를 이용하여 교환기의 길이가 80 m인 이중관형 지중열교환기의 설계최적화를 위해 입력변수에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 EWT의 최대값은 20~35℃, 최소값은 0~10℃ 범위로 나타났고, 지중열교환기 설치개수 범위는 1~4개, 교환기 설치간격은 5 m로 도출되었음.
- (6) 민감도 분석을 통해 주어진 입력변수 값에 기반한 수치해석 결과 1개의 이중관형 지중열교환기의 길이가 150 m인 경우 총 3개의 지중열교환기를 설치하는 경우가 전체 교환기 길이와 소비전력량에 대한 ‘파레토 해’를 만족하는 최적설계안으로 분석됨.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20153030111110, 기존 지하공간 시설에 지열에너지 성능 부여를 위한 에너지 구조체와 최적화 기법 기반 설계·시공 기술 개발)과 한국연구재단 BK21플러스 사업의 일환으로 수행된 연구결과임(21A20132012304).

References

- Arora, J.S. (2004) Chapter 17: Multiobjective optimum design concepts and methods. *Introduction to optimum design* (2nd ed., pp. 543-564). San Diego, CA: Elsevier Academic Press.
- Back, N., Kim, S., and Shin, U. (2016). Heating and cooling performance analysis of ground source heat pump system in low energy house. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 28, No. 10, pp. 387-393.
- Bernoulli, D. (1738). *Hydrodynamica*. Argentorati: sumptibus Johannis Reinholdi Dulseckeri.
- Blasius, H. (1912). Das Aehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen. *Z. Ver. Dtsch. Ing.*, Vol. 56, No. 16, pp. 639-643.
- Cho, H.N., Lee, D., and Jeong, G. (2012). Efficiency of geothermal energy generation assessed from measurements of deep depth geothermal conductivity. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 22, No. 2, pp. 233-241.
- Forestieri, A., Arnone, E., Blenkinsop, S., Candela, A., Fowler, H., and Noto, L.V. (2017). The impact of climate change on extreme precipitation in Sicily, Italy. *Hydrological Processes*, Vol. 32, No. 3, pp. 332-348.
- Geothermal Energy Education Center. (2011). *Geothermal system design*. Seoul: Gun-ki-won Press.
- Hong, S., Han, S., Jung, Y., Kwon, Y., Kim, J., and Kwon, S. (2017). A study on fluid characteristics in double pipe heat exchanger by influent flow. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 4, pp. 361-367.
- Korea Energy Agency (KEA). (2017). *Construction standards for new and renewable energy equipment on equipment type*. (신재생에너지 설비 원별 시공기준, 한국에너지공단).
- Korea Energy Agency (KEA). (2018). *Guideline for supporting new and renewable energy equipment*. (신재생에너지 설비의 지원 등에 관한 지침, 한국에너지공단).
- Korea Energy Economics Institute (KEEI). (2016). *The changes in energy policy of major countries in 2016 for reducing greenhouse gas emissions*.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2018). *Detailed observation information by region*. (지역별 상세관측정보, 기상청).
- Lee, S., Cha, D., and Kwon, O. (2013). Flow characteristic with distance of inlet port and rotating length of fluid in the double heat exchanger. *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 51-57.
- Ministry of Environment (ME). (2013). *Guideline for designing and maintaining water reuse facility*. (물 재이용시설 설계 및 유지관리 가이드라인, 환경부).
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) and Korea Energy Agency (KEA). (2018). *Mandatory system for renewable energy installation*. (신재생에너지 설치의무화제도, 산업통상자원부, 한국에너지공단).
- Min, K.C., and Choi, J.H. (2011). Effect of the design parameters of geothermal heat exchanger design length. *Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 7, No. 2, pp. 10-15.
- Paris Climate Agreement. (2015). *The 21st conference of the parties of the UNFCCC (The United Nations Framework Convention on Climate Change)*.
- Raymond, J., Mercier, S., and Nguyen, L. (2015). Designing coaxial ground heat exchangers with a thermally enhanced outer pipe. *Geothermal Energy*, Vol. 3, Article No. 7, pp. 1-14.
- Reynolds O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinous, and of the law of resistance in parallel channels. *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 35, No. 224-226, pp. 84-99.
- Reddy, N.S., Rajagopal, K., and Veena P.H. (2017). Experimental investigation of heat transfer enhancement of a double pipe heat exchanger with helical fins in the annulus side. *International Journal of Dynamics of Fluids*, Vol. 13, No. 2, pp. 285-293.
- Satterlund, D.R., Chapman, R.C., and Beach, R.D. (1983). Modeling the daily temperature cycle. *Northwest Science*, Vol. 57, No. 1, pp. 22-31.
- Sivashanmugam, P., and Suresh, S. (2007). Experimental studies on heat transfer and friction factor character-

- istics of laminar flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, pp. 301-308.
- Spitler, J.D. (2000). A design tool for commercial building ground loop heat exchangers. *Proceedings of the fourth international heat pumps in cold climates conference*, Caneta Research Incorporated, pp. 1-15.
- The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). *Submission by the Republic of Korea intended nationally determined contribution*.
- Turley, C., and Gattuso J. (2012). Future biological and ecosystem impacts of ocean acidification and their socioeconomic-policy implications. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 4, No. 3, pp. 278-286.
- Weisbach, J. (1845). *Lehrbuch der ingenieur und maschinen-mechanik, Vol. 1. Theoretische mechanik*. Braunschweig, Germany: Vieweg und Sohn.
- Yu, H.K., and Bae, S.H. (2010) Performance monitoring study of building integrated geothermal system in winter. *Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 6, No. 1, pp. 23-28.
- Xu, Y., and Islam, M.D. (2016). Study of winglets vortex generators in a circular tube for thermal enhancement. *Proceedings of 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, International Centre for Heat and Mass Transfer and the American Society of Thermal and Fluids Engineers, pp. 1148-1153.

Received	February 26, 2019
Revised	February 28, 2019
Accepted	March 11, 2019

Appendix 1. Construction Drawing of GHEs in Dang-Jin

Appendix 2. Construction Drawing of GHEs in Dae-jeon