

3중관용 스페이서를 적용한 대구경 지중열교환기의 성능측정에 관한 연구

*0| 상훈¹⁾, 박 종우²⁾, **임 경빈³⁾

An Experimental Study on the Thermal Performance Measurement of Large Diameter Borehole Heat Exchanger(LD-BHE) for Tripe-U Pipes Spacer Apply

*Sanghoon Lee, Jongwoo Park, **Kyoungbin Lim

Abstract : Knowledge of ground thermal properties is most important for the proper design of large scale BHE(borehole heat exchanger) systems. The type, pipe size and thermal performance of the BHE is highly dependent on the ground source heatpump system—efficiency and instruction cost. Thermal response tests with mobile measurement devices were developed primarily for insitu determination of design data for large diameter BHE for triple-U spacer apply. The main purpose has been to determine insitu values of effective ground thermal conductivity and thermal resistance, including the effect of ground-water flow and natural convection in the boreholes. The test rig is set up on a some trailer, and contains a circulation pump, a inline heater, temperature sensors, flow meter, power analysis meter and a data logger for recording the temperature, fluid flow data. A constant heat power is injected into the borehole through the tripl-U pipes system of test rig and the resulting temperature change in the borehole is recorded. The recorded temperature data are analysed with a line-source model, which gives the effective insitu values of rock thermal conductivity and borehole thermal resistance of large diameter BHE for spacer apply.

Key words : Large Diameter BHE(대구경 지중열교환기), Thermal response test(열응답테스트), Triple spacer(삼중관 스페이서), Thermal resistance(열저항), Effective thermal conductivity(유효 열전도도)

Nomenclature

Q : heat injection, W

H : borehole depth, m

R : thermal resistance of borehole, K/(W/m)

T : temperature of fluid, °C

r : radius of borehole, m

t : elapsed time, hr

κ : slope of fluid mean temperature against ln(t)

α : heat capacity, W/m³

λ : thermal conductivity, W/ m.K

γ : Eulers constant, =0.5772

subscript

eff: effective

sur: surface

b : borehole

o : outside

f : fluid

1. 서 론

지열(Geothermal energy)을 이용하는 기술이 처음으로 소개되었던 지난 1999년 이후로 2004년부터 시작된 공공기관 신·재생에너지이용의무화 발표에 따라 지열 냉·난방시스템이 관공서뿐만 아니라 일반 건물에도 급격히 보급, 설치되고 있다. 이와 함께 2008년부터 신·재생에너지설비의

1) 전주비전대학 신재생에너지과

E-mail : md98053@hanbat.ac.kr

Tel : (063)220-4080 Fax : (063)220-3839

2) (주)제이엔지 기술연구소

E-mail : jong3878@hanmail.net

Tel : (063)271-3207 Fax : (063)271-3203

3) 국립한밭대학교 기계설계공학과

E-mail : kblim024@hanbat.ac.kr

Tel : (042)821-1160 Fax : (042)821-1587



Picture. 1 열응답테스트 장치 전경

지원·설치·관리에 관한 기준이 확립되어 보급지원과 관리지원이 점점 더 원활하게 되고 있다. 한편, 지열에너지를 보급하는 신·재생에너지전문기업만 해도 600여개가 넘어가고 있어 더욱 세심한 관리가 필요하다.

특히, 지열이용설비의 경우, 지열 열펌프유니트, 지중열교환기 등에 관한 기술적인 사항을 확실히 이해하지 못하는 전문기업이 상당수 있는 것으로 알려져 정부에서는 대학 또는 연구원에 지열전문인력양성(교육)기관을 운영하도록 지원하고 있다. 지중열교환기는 지열설비의 성능, 효율 및 초기 설치비용에 큰 영향을 미치는 부분이다.

지금까지 여러 가지 형태와 방식으로 효율이 높거나 비용이 저렴한 지중열교환기가 개발되어 왔다. 그러나, 아직까지는 이들 개발된 지중열교환기를 상용화하기에는 설치공법에 대한 표준화 연구나 설계프로그램 등의 제작 준비가 이루어지지 않아, 보급까지는 좀 더 시간이 필요하다. 향후 수년간 지열이용설비의 보급이 점점 늘어나게 되면 지중열교환기의 최적설계 및 효율적인 보급이 절실히 필요하게 될 것이다.

본 연구에서는 이러한 지중열교환기의 설계, 시공 및 상용화가 가장 빠를 것으로 예상되는 대구경 고효율 지중열교환기의 형식을 채택하여 현

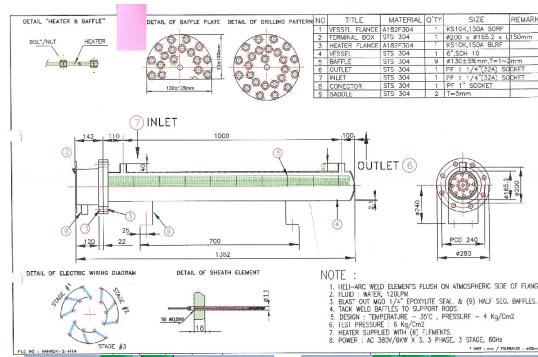


Fig. 4 인라인 히터 제작 도면

Fig. 2 지중열교환기의 형식
(좌:2관식, 우:4관식)

제의 측정기준에 의한 열성능(열전도도 및 열저항)을 측정하고, 그 성능을 평가하여 표준화된 설계·시공에 대한 기준 마련이 가능한지 알아보고자 하였다.

성능측정 대상 지중열교환기는 Fig. 1에 나타낸 것처럼 Triple-U 형식으로서, 하나의 보어홀에 6개의 파이프를 넣어 형성하는 구조이다. 지금까지 주로 보급·설치된 수직밀폐형 지중열교환기는 Fig. 2에서 보는 것처럼 2관식, 4관식이 주류를 이루었다. Triple-U (6관식) 형태의 열교환기는 전문프로그램인 EED(Earth Energy Designer)를 사용하면 설계가 가능하다. 상기 프로그램은 1995년에 처음으로 상용 프로그램으로 제작되어 독일, 스웨덴 등의 유럽에서 많이 사용되고 있다⁽¹⁻²⁾.

Triple-U (6관식) 지중열교환기는 직경 8인치 (203mm)의 대구경 BHE(Borehole Heat Exchanger)로서, 설치와 시공은 기존의 2관식 또는 4관식 지중열교환기와 동일하게 수행할 수 있다. 다만, 설치되는 파이프의 수가 너무 많아 서로 인접하기 쉬워져 열취득(heat extraction) 및 열주입(heat injection)에 대한 효율이 떨어질 수 있으나, 기존 2관식 지중열교환기에서처럼 이러한 단점을 해결할 수 있는 방법으로 제시되었던 스페이서(spacer)를 사용하면 파이프 열간섭 문제를 해결할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 Triple-U (6관식) 지

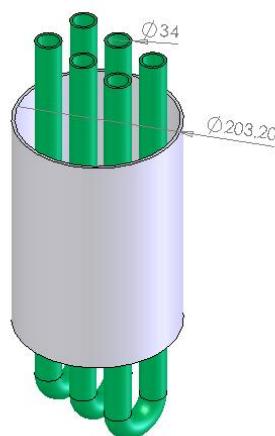


Fig. 1 Triple-U (6관식) 지중열교환기

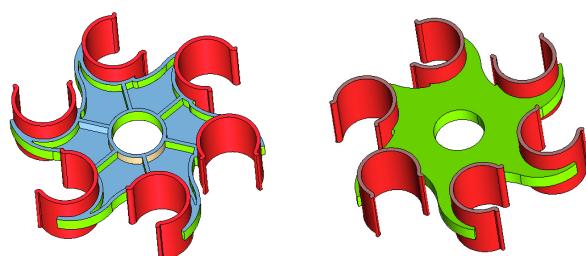


Fig. 3 삼중관용 스페이서(Triple Spacer)
(실용신안 제20-0444605호)

중열교환기의 설치·시공에 있어서 열효율 향상을 목적으로 Fig. 3과 같은 삼중판 스페이서(Triple spacer)를 채택하고 설치하였을 때와 설치하지 않았을 때 및 동일지역에 위치한 2관식 지중열교환기와의 열성능을 측정하고 평가하였다.

2. 실험방법

지중열교환기의 열성능(Thermal performance) 측정방법은 열응답테스트장치(Thermal response test rig)를 이용하여 평가하여 왔다⁽³⁻⁸⁾. 주요 측정 항목 및 측정기준은 지식경제부 고시(제 2008-232호)를 통하여 안내가 되었으며, 지중열교환기의 유효 열전도도(Effective thermal conductivity)를 측정하고 평가한다.

본 연구에서도 유효열전도도를 측정하고 평가하였으며, 아울러 열저항(Thermal resistance)에 대해서도 함께 평가하였다.

2.1 실험장치

2.2.1 열응답테스트 장치

본 연구에서 사용한 열응답테스트 장치(Thermal response test rig)는 Picture. 1에서 볼 수 있듯이 트레일러(trailer) 형태의 운반방식을 갖추었으며⁽⁹⁾, Table 1과 같이 열응답테스트 장치의 구성은 제어판넬(electrical unit)과 함께 데이터 기록계(Agilent 34970A)와 전력분석기(AW 240), 유량계(UMH-7510) 및 노트북(SP-10)을 설치하였고, 열매체 순환펌프, 인라인 히터, 버퍼탱크 등과 각 입·출구 배관에는 온도센서($1K\Omega$ 4-wire RTD)를 설치하였으며, 안전장치(flow switch, timer 등)에 대한 회로를 구성하였다.

특별히 인라인 히터는 Triple-U (6관식) 지중열교환기를 측정할 수 있도록 하기 위해서 Fig. 4와 같이 최대 18kW 용량을 갖도록 설계, 제작하였는데, 1 stage에서 6kW가 출력되고, 2 stage에서 12kW, 3 stage에서 최대 18kW로 순환매체를 가열 할 수 있도록 제작하였고, 상기 각 계측기들은 출

고 시 또는 정기 검교정을 완료한 장비를 사용하였다.

2.2 열응답테스트 이론

본 연구에서는 수직밀폐형 지중열교환기에 대하여 열성능을 측정하기 때문에 지금까지 잘 알려진 선형이론(line-source theory)을 사용한 분석법을 활용하였다. 선형이론은 1980년대에 이론상으로 정립되었고,⁽¹⁰⁻¹¹⁾ 최근에는 배열(array) 형태의 열 간섭이 있는 지중열교환기에 있어서 g-Function의 온도손실 극값(extremum)에 대한 비교 모델의 연구⁽¹²⁾도 진행되었다.

열응답테스트 결과로 얻는 평가 항목으로 유효 열전도도와 열저항은 다음의 식(1)과 식(2)와 같이 표현된다.

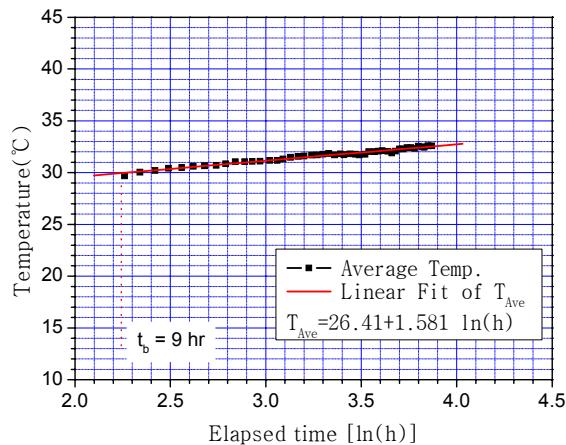


Fig. 7 $\ln(h)$ 에 따른 2관식 BHE의 평균온도 변화 및 선형 방정식

$$\lambda_{eff} = \frac{Q}{4\pi k H} \quad (1)$$

Table 1 열응답테스트 장치의 구성

순번	품 명	규 격	비 고
1	입형다단펌프	1.1kW, 380V, 3φ, 33m-100LPM	MVi403
2	인라인 히터	6kW x 3stage(18kW), 380V, 3φ	
3	데이터로거	16CH(PRT 8CH), 40W, 220V, 60Hz	34970A
4	온도센서	1kΩ, 4-wire RTD	±0.5%
5	유량계	접속경 50A, max flow ~7 m³/h	±%
6	전력분석계	3상-4선, 200A, 600V clamp	CW240, ±0.5%
7	온도제어기	3W-pt100, 5W, 220V, 1φ	±2%
8	Flow switch	AC110/220V, 1 SPDT, max 15A	
9	팽창탱크	30Lit, Max 10kgf/cm²	
10	PE탱크	100LIT, 소켓베이스 직경 32A x 2구	
11	바디 프레임	2000(L)*1400(W), 베이크라이트	
12	트레일러	max 600kg, 자동차등록	90라2150

$$R_b = \frac{H}{Q} (T_f - T_{sur}) - \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln(t) + \ln\left(\frac{4\alpha}{r_0^2}\right) - \gamma \right) \quad (2)$$

열저항 값을 평가해야 하는 이유는 어떠한 지중열교환기 설계프로그램에 있어서도 열저항 값은 프로그램 내부에서 수치적으로만 추정하여 계산되거나 때문이다.

따라서, 열응답테스트 실험을 통한 측정 값이 계산된 값과 일치하는지는 여부와 측정된 유효열전도도와 열저항 값을 사용하여 지중열교환기를 재설계하는 과정이 필요하다고 판단된다.

3. 실험결과

본 연구의 열성능 측정대상은 동일한 장소에 서로 8m 거리로 떨어져 있는 일정깊이(170m)로 설치된 2관식 및 6관식 지중열교환기로서, 이들 지중열교환기에 대하여 열응답테스트를 Table 2와 같은 조건으로 진행하였다.

Table 2 BHE사양 및 열응답테스트 실험조건

항목 \ 형식	2관식 BHE	6관식 BHE
BHE 투입전력(kW)	12.0 ± 0.5	18 ± 0.5
순환유량(LPM)	45 ± 2	86 ± 2
BHE 직경(m)	0.152	0.203
Pipe 단면적(m ²)	0.0025 (30호 x 1쌍)	0.0068 (25호 x 3쌍)

3.1 BHE 순환매체 온도변화 측정

Fig. 5는 2관식 BHE에서 측정한 지중열교환기 입.출구 온도변화를 나타낸 것이다. Fig. 6은 6관식 BHE에서 측정한 입.출구 온도변화이다. 지중열교환기가 설치된 장소의 초기온도는 각각 17.46°C 및 17.63°C로 거의 유사하게 나타났으나, 6관식 BHE의 입.출구온도의 시간에 따른 변화를 보면 시간이 경과함에 따라 초기에는 급격히 상승하다가 점점 완만하게 상승하여 41°C까지

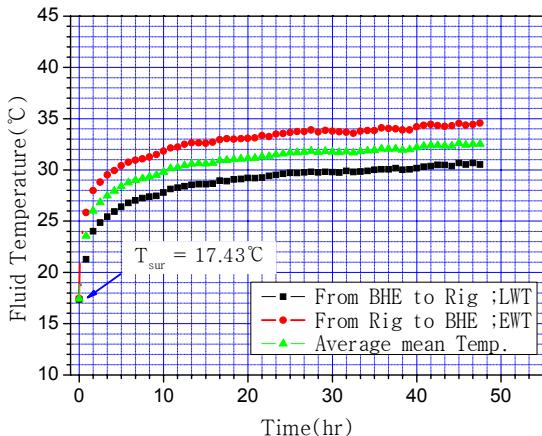


Fig. 5 2관식 BHE의 입.출구 온도변화

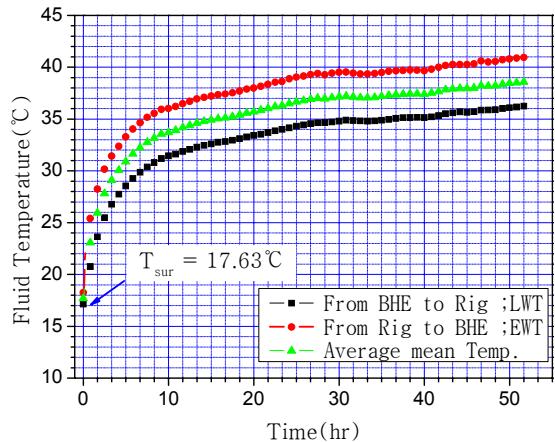


Fig. 6 6관식 BHE의 입.출구 온도변화

상승하였다.

이러한 이유는 지중열교환기로 투입하는 전력의 세기가 커진 반면 지중열교환기 열주입 효율이 상대적으로 2관식 BHE에 비해 작아졌기 때문이라고 추측된다. 한편, Fig. 7 및 Fig. 8에서는 2관식 및 6관식 지중열교환기의 순환매체 평균온도변화를 시간에 대한 자연로그 함수로 선형화(linear fitting)한 방정식을 표현하였다.

결과적으로 상기 식(1)을 사용하여 Table 3과 같이 2관식 및 6관식 지중열교환기의 열전도도를 구할 수 있었다. 즉, 6관식 지중열교환기가 2관식 지중열교환기에 비해 0.67% 높은 열전도도 값을 나타내었으나, 대규모의(large scale) 지중열교환시스템으로 설치되는 것과 설치현장의 암반이 화강암(열전도도가 우수)임을 감안하면 거의 일치하여 나타났다고 판단된다.

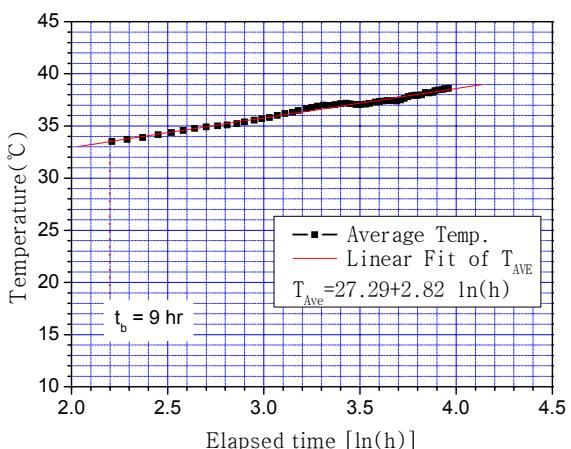


Fig. 8 ln(h)에 따른 6관식 BHE의 평균온도 변화 및 선형 방정식

Table 3 열전도도 계산 결과

항목	형식	2관식 BHE	6관식 BHE
투입전력량(kWh/m)		479.4	949.5
기울기(k)		1.581	2.82
유효열전도도, λ_{eff} [W/(m·K)]		2.98	3.0

3.2 열저항의 변화

Fig. 9 및 Fig. 10은 각각의 지중열교환기의 열저항 값의 변화를 나타낸 것이다. 그럼에서 볼 수 있듯이 2관식 지중열교환기의 열저항 값은 이 6관식 지중열교환기의 열저항 값에 비해 상대적으로 큰 값을 갖고 수렴하고 있음을 알 수 있다. 또한, Table 4에서 나타내었듯이 최초 지중열교환기 전문프로그램(EED)을 사용하여 얻은 계산 열저항 값은 실험 측정한 값에 비해 크게 나타났는데, 측정 후 열저항 값소율은 2관식에 비해 6관식 지중열교환기가 크게 나타났다.

Table 4 열저항에 대한 설계프로그램 계산 값

항목	형식	2관식 BHE	6관식 BHE
계산 열저항(kWh/m)		0.207	0.146
측정 열저항 값		0.1389	0.0897
측정값의 감소율		32.9%	38.5%

따라서, 지중열교환기를 최종적으로 설계 할 경우, 지중열교환기 전문설계프로그램의 설계 데이터(design data)에 수치적으로 계산된 값 대신 열응답테스트를 통한 실험 측정한 열저항 값을 입력하여 재설계과정을 거치면 최적의 지중열교환기가 설계될 수 있고, 시공 및 설치에 관한 비용이 절감될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 대구경 지중열교환기인 삼중관용 스페이서를 적용한 Triple-U (6관식) 지중열교환기에 대하여 별도로 제작된 열응답테스트 장치를 사용하여 열성능을 측정하였고, 동일한 장소에 함께 설치된 2관식 지중열교환기에 대해서도 열성능 측정을 수행한 결과, 열전도도 값에 있어서 거의 일치된 측정값을 얻을 수 있었다.

그러나, 열저항 값의 경우에는 지중열교환기 전문프로그램의 예측 값에 대해 실험 측정한 값이 작게 나타났는데, 6관식 지중열교환기의 열저항 값 감소율이 2관식 지중열교환기의 감소율보다 크게 나타났다.

따라서, 대규모 지중열교환시스템을 설치하는 경우에는 열전도도뿐만 아니라 열저항 값을 동시에 고려하는 것이 최적의 지중열교환기를 설계하

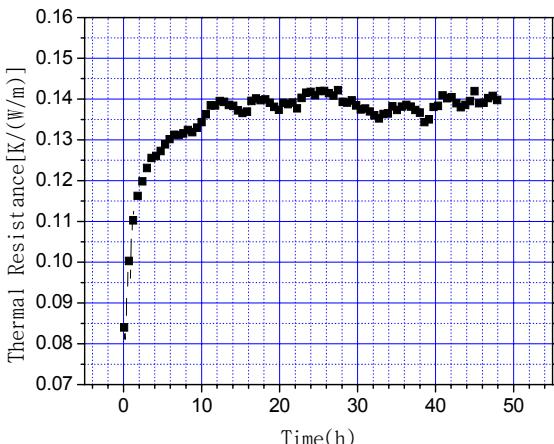


Fig. 9 열저항 값의 변화 (2관식)

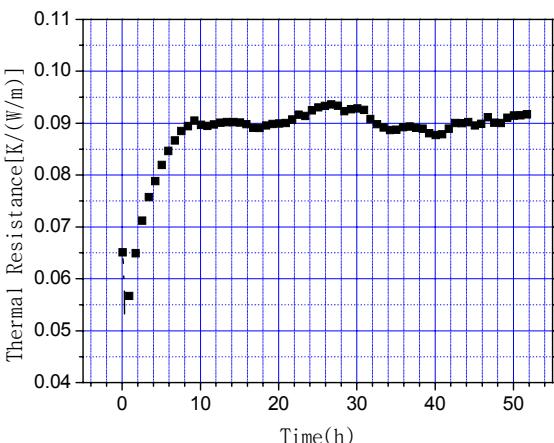


Fig. 10 열저항 값의 변화 (6관식)

는 방법이라고 판단된다.

후기

본 연구는 국립한밭대학교 산업체 기술지도의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] J. Claesson, "PC Design Model for Thermally Interacting Deep Ground Heat Exchangers", IEA Heat Pump Centre Report HPC-WR-8, 1991, pp. 95-104.
- [2] G. Hellstrom, B. Sanner, T. Gonka and S. Martensson, 1997, "Experiences with the Borehole Heat Exchanger Software EED", Paper from conference Megastock 1997, Sapporo, Japan.
- [3] Lim, K. B., Lee, C. H., Lee, S. H. and Soung, N. W., "An Experimental Study on the Thermal Performance Measurement of

- Vertical Borehole Heat Exchanger(BHE)", J. of KSME, Vo1. 30, No. 8, pp. 764-771, 2006.
- [4] Sohn, B. H, "Evaluation of Ground Effective Thermal Conductivity and Borehole Effective Thermal Resistance from Simple Line-Source Model", J. of SAREK, Vol. 19, No. 7, pp. 512-520, 2007.
- [5] Lim, K. B., Lee, S. H. and Lee, C. H., "An Experimental Study on the Thermal Performance of Ground Heat Exchanger", Experimental Thermal and Fluid Science 31, pp. 985-990, 2007.
- [6] Jeong, Y. M., Koo, J. M., Hwang, Y. J., Jang, S. Y., Lee, Y. H., Lee, D. H. and Lee, J. K., "Measurement of Ground Thermal Conductivity and Characteristics of Thermal Diffusion by the Ground Heat Exchanger", J. of SAREK, Vol. 20, No. 11, pp. 739-745, 2008.
- [7] Lee, S. K., Woo, J. S. and Kim, D. K., "A Study of Determining Initial Time of Line Source Model used in Estimating the Effective Soil Formation Thermal Conductivities", J. of Energy Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 167-174, 2008.
- [8] Kong, H. J., Lim, H. J., Choi, J. H. and Sohn, B. H., 2009, "An Experimental Study on the Effective of Ground Heat Exchanger to the Overall Thermal Conductivity", Proceeding of the SAREK conference, pp. 45-51.
- [9] Eklöf, C. and Gehlin, S., 1996, TED ; A mobile equipment for thermal response test, Master of Science Thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- [10] Mogensen, P., 1983, "Fluid duct wall heat transfer in duct system heat storage", Proc. Int. Conf. On Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Stockholm, Sweden, pp.652-657.
- [11] P. Eskilson, "Thermal analysis of heat extraction boreholes", Doctoral Thesis, University of Lund, Department of Mathematical Physics, Lund, Sweden, 1987.
- [12] Louis, L and Benoit, B, "A New Contribution to the Finite Line-source Model for Geothermal Boreholes", Energy and Buildings 39, pp. 188-198, 2007.