

# 지반내 자연대류에 대한 수치해석적 논의

## Numerical Discussion on Natural Convection in Soils

신 호 성<sup>1</sup> Shin, Hosung

### Abstract

Thermal behavior of soils is mainly focused on thermal conduction, and the study of natural convection is very limited. Increase of soil temperature causes natural convection due to buoyancy from density change of pore water. The limitations of the analysis using fluid dynamics for natural convection in the porous media is discussed and a new numerical analysis is presented for natural convection in porous media using THM governing equations fully coupled in the macroscopic view. Numerical experiments for thermal probe show increase in the uncertainty of thermal conductivity estimated without considering natural convection, and suggest appropriate experimental procedures to minimize errors between analytical model and numerical results. Burial of submarine power cable should not exceed the temperature changes of 2°C at the depth of 0.2 m under the seabed, but numerical analysis for high permeable ground exceeds this criterion. Temperature and THM properties of the seafloor are important design factors for the burial of power cable, and in this case effects of natural convection should be considered. Especially, in the presence of heat sources in soils with high permeability, natural convection due to the variation of density of pore water should be considered as an important heat transfer mechanism.

### 요 지

지반의 열적 거동은 대부분 열전도에 국한되어 연구가 진행되었으며, 자연대류 현상에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다. 지반의 온도증가는 간극수의 밀도변화에 따른 부력을 유발하여 자연대류를 발생시키게 된다. 유체역학 관점에서 다공질 재료내의 자연대류 해석의 제약조건에 대하여 논의하고, 거시적 관점에서 완전 결합된 열-수리-역학적인 지배방정식을 이용한 대류현상에 대한 수치해석 기법을 제시하였다. 실내 열전도도 측정을 위한 탐침기 실험에 대한 수치실험은 자연대류를 무시하고 평가된 열전도도의 불확실성에 대하여 논의하고, 모델식과의 오류를 최소화하기 위한 적절한 실험조건을 제시하였다. 해저 전력선의 매설은 해저면 0.2m 깊이에서의 온도상승을 2°C로 제한하고 있으나, 투수성이 큰 지반재료에 대한 수치해석결과는 기준온도를 초과하는 것으로 나타났다. 해저면의 온도와 열-수리-역학적 물성은 전력선의 매설설계에 중요한 설계인자이며 자연대류의 영향을 고려하여야 한다. 특히, 큰 투수성을 갖는 지반내에 열원이 존재하는 경우, 간극수의 밀도변화에 따른 자연대류가 중요한 열전달의 인자가 되므로 이를 고려한 해석을 수행하여야 한다.

**Keywords :** Natural convection, THM simulation, Thermal probe, Submarine power cable

1 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Univ. of Ulsan, Tel: +82-52-259-1723, Fax: +82-52-259-2629, [shingeo@ulsan.ac.kr](mailto:shingeo@ulsan.ac.kr))

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

지반구조물의 열해석은 동토지역과 같은 기후조건이나 기후변화에 의한 지반거동 특성에 대한 연구가 대부분을 차지하였다. 하지만, 최근에 지반 내부에 인위적인 열원을 설치하거나 지반내 열적 불균형을 해소하기 위한 연구가 활발히 진행되면서, 열이 수리-역학과 연계된 현상들에 대한 중요성이 강조되고 있다. 이러한 지반내 열의 확산과 유동은 동결 및 용해에 의한 지중 구조물 뿐만 아니라 지열에너지 개발, 인위적인 동결차수공법, 고준위 폐기물 저장시설, 탄소격리(carbon sequestration), 지중 가스 및 액체저장 시설, 해저 전력선 매설, 매립지 누수(landfill leakage), 메탄 하이드레이트 개발(CH<sub>4</sub> hydrate) 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 하게 된다.

일반적으로 대류는 유체의 움직임에 의하여 열이 이동하는 현상을 지칭하며, 유체의 열확산(molecular thermal diffusion)과 유체의 이동에 의한 열전달인 이류(advection)를 함께 포함하게 된다. 하지만, 열확산이 흡입자와 유체에 의하여 동시에 이루어지는 지반에 대한 열해석에서는 열의 이동이 전도(conduction, thermal diffusion), 대류(convection), 복사(radiation)에 의하여 이루어지는 것으로 구분한다. 특히, 지반공학에서 주요한 열전달 현상으로 인식되는 열전도는 흡입자들간의 접촉과 공극내의 유체의 연속성에 의하여 이루어지며, 대부분의 연구와 물성치의 평가가 열전도에 집중되어 왔다. 지반에서는 공기나 물의 흐름속도가 낮아서, 유체역학 분야와는 달리 대류는 주요 인자로 인식되지 않았다. 하지만 동결/용해, 응축/증발과 같이 상변화를 동반하는 지반내 열 대류는 잠재열(latent heat)에 의하여 열 이동을 급격하게 증가시킬 수 있다(Koorevaar et al., 1983). 높은 온도의 물체에서 발산되는 열복사(thermal radiation)는 지반 내부에서 전자기 복사(electromagnetic radiation)의 미비한 침투깊이(penetration depth)로 인하여 무시하고 있다(Farouki, 1981). 따라서 지반의 열의 이동은 잠재열의 유무와 더불어 전도(conduction), 대류(convection)에 의하여 발생한다고 할 수 있다.

지반공학에서 지반의 열전도도와 열용량에 대한 물성치 평가와 이를 이용한 열적 안정성 해석에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 반면, 유체역학 분야에서는 지중 에너지, 원자로의 사고후 열 제거, 오염물 확산 등에서 점성유체로 포화된 다공질 재료의 대류현상이 수십년 동안 주요한 연구 대상이 되어 왔다(Ingham and Pop,

2005; Nield and Bejan, 2006; Vadasz, 2008; Vafai, 2005). 유체역학에서 대류는 외부하중과 밀도차에 의한 유체의 이동(density different-driven motion)을 기준으로 강제 대류(forced convection), 혼합 대류(mixed convection transport), 그리고 자연 대류(natural, free 혹은 buoyancy-driven convection)로 구분한다(Lewis, 2004). 강제 대류는 유체의 흐름관에 작용하는 외부하중에 의한 큰 유속과 높은 수리학적 Reynolds number 조건하에서 발생하는 열흐름을 의미한다. 자연 대류는 강제적 유체 흐름(forced fluid flow)이 미비한 상태에서 유체의 밀도차만에 의한 유체의 이동으로 발생하는 대류 현상이다. 그리고 혼합 대류현상은 강제적 흐름과 밀도차에 의한 흐름이 공존하는 열의 흐름을 의미한다. 특히, 유체의 밀도차에 의하여 발생하는 자연대류는 부력에 의한 대류(buoyancy-driven convective flows)로써 다양한 학문분야와 밀접한 관련이 있다(Bear, 1972). 유체역학에서의 자연대류는 다공질 재료내 불안정 순환 대류(unstable circulative convection)의 가능성에 대한 안정성 연구에 중점을 두고 있다(Cheng, 1978; Nield and Bejan, 2006; Nithiarasu et al., 1997).

유체역학에서 온도조건이 고정된 수평층 구조(horizontal layered system)에서 불안정 대류의 발생 가능성이 주요 문제인 반면, 지반공학의 열해석에서는 낮은 수리학적 Reynolds number하에서 전도와 순환적 대류(circulative convection)가 중요한 열의 이동 현상이 된다. 불안정 순환 대류가 안정적 대류에 비하여 많은 열을 전달할 수 있지만, 순환 대류에서는 열원과 외부의 경계조건이 중요한 결정 인자가 된다. 자연적 지반조건에서 지반내 온도구배에 의한 불안정 대류의 형성은 매우 제한적으로 발생하지만(Johansen, 1975; Engström and Nordell, 2016; Simmons, 2005; Van Dam et al., 2009), 실내 실험이나 현장에 설치된 인위적인 열원에 의하여 자연대류가 발생하는 것으로 알려져 있다(Bidarmaghz and Narsilio, 2016; Grosan, 2009; Wang et al., 2016). 지중에너지 개발, 고준위 방사성 폐기물, 그리고 해저 매설 전력선 등의 장기간 지중 내부 열원을 발생시키는 경우, 전도에 의한 열 전달과 뿐만 아니라 대류에 의한 열의 이동이 중요한 열 유동 메커니즘이 된다.

본 논문에서는 다공질 재료의 거시적 관점에서 자연대류를 모사하기 위한 지배방정식의 수식화를 제시하고, 실내와 현장조건에서 자연대류의 발생을 예측하고 이에 대한 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 자연대류의 수치 수식화

지반과 같은 다공질 재료에서 자연대류를 모사하기 위한 수치해석 기법은 유체역학에 기준한 지배방정식을 이용하고 있다. 이에 유체역학 기반의 지배방정식의 간략히 소개와 적용의 타당성에 대하여 논의하고자 한다. 그리고 거시적 관점에서 다공질 재료의 자연대류를 모사하기 위한 열-수리-역학적 지배방정식을 유도하고자 한다.

### 2.1 유체역학의 자연대류 수식화

다공질 재료내 공극에서 Newtonian 거동특성을 보이는 유체 이동에 대한 연속방정식에 체적 평균법(volume Averaging)을 적용하여, 단순화된 다공질 재료에 대한 Navier-Stokes 방정식을 유도할 수 있다(Lewis, 2004; Vafai, 2005). 그리고 에너지 보존에 대한 지배방정식도 유사한 방법으로 유도할 수 있다.

$$\frac{\rho_f}{\phi} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{u_i u_j}{\phi} \right) \right] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\mu_f}{K} u_i + \frac{\mu_f}{\phi} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2}$$

$$\left[ \phi(\rho_p)_f + (1-\phi)(\rho_p)_s \right] \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_p)_f u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (1)$$

여기서,  $u_i$ 는 유체의 속도이며  $\phi$ 는 다공질 재료의 간극율(porosity)이다.  $\rho_f$ 와  $\mu_f$ 는 유체의 밀도(density)와 점도(viscosity)이다.  $K[m^2]$ 는 다공질재료 공극에 대한 절대 투수계수이다.  $T$ 는 유체와 입자의 국부적인 열평형(local thermal equilibrium) 조건에서의 온도이며,  $\lambda$ 는 등가 열전도도(thermal conductivity of porous matrix)이다.

다공질 재료의 유체 이동방정식(식 (1))에서 유속이 매우 느려서 비선형 관성효과를 무시할 수 있으면, 식 (2)와 같은 유사 Brinkman 방정식이 된다.

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\mu_f}{K} u_i + \tilde{\mu} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} = 0 \quad (2)$$

하지만, Brinkman은  $\phi > 0.6$ 보다 큰 경우에 대한  $K$ 와  $\phi$ 의 관계에 대한 실험적 연구를 수행하였다(Lundgren, 1972). 대부분의 다공질 재료에서  $\phi$ 는 작은 값을 가지므로, Brinkman 식은 매우 제한된 경우에만 적용할 수

있다(Nield, 2013). Auriault(2009)는 Brinkman 방정식은 매우 높은 간극율을 갖는 고정된 입자군에서의 유체 흐름에 대해서만 유효하고, 일반적인 공극 구조를 가지는 다공질재료에 대해서는 Darcy의 법칙이 유효한 것으로 결론지었다.

자연 대류를 모사하기 위해서는 추가적으로 유체이동 방정식에 온도변화에 따른 유체 밀도의 변화를 고려하여야 한다. 대부분의 연구논문과 상용 프로그램에서 수치해석의 수렴성을 이유로 Boussinesq의 근사법을 적용하고 있다. Boussinesq의 근사법은 유체의 밀도가 항상 일정하다고 가정하면서, 온도 변화에 의한 유체의 밀도차를 산정하여 이를 부력에 의한 외력으로 추가한다. 온도 변화에 따른 유체의 밀도 변화는  $\gamma(T) = \gamma_f [1 - \beta(T - T_0)]$ 라고 가정하고, 다공질 재료에서 자연대류를 모사하기 위한 유체의 이동방정식은 식 (3)과 같이 유도된다.

$$\frac{\rho_f}{\phi} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{u_i u_j}{\phi} \right) \right]$$

$$= -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\mu_f}{K} u_i + \frac{\mu_f}{\phi} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} + \gamma_f \beta (T - T_0) \quad (3)$$

하지만, Boussinesq의 근사법은 온도에 의한 유체의 밀도변화가 매우 작고, 온도변화에 의하여 다공질 재료와 유체의 물성변화가 거의 없는 경우에만 적용할 수 있다(Nield, 2013).

다음은 온도조건이 고정된 수평층 구조를 갖는 다공질 재료내에서 불안정 자연대류의 발생 가능성에 대하여 논의하고자 한다. 이론적 유체역학에서 다공질 재료내 불안정 자연대류의 가능성을 평가하기 위하여 부력과 점성력의 비로 나타나는 Rayleigh Number(Ra)를 이용하고 있다(Kundu, 1990). 불안정 자연대류의 발생 한계 Ra는 이론적으로  $4\pi^2$ 인 것으로 제안되었다(Horton and Rogers, 1945; Lapwood, 1948). Caltagirone 등(1981)은 Ra의 변화에 따른 다공질 재료에서의 자연대류를 다음과 같이 구분하였다.  $Ra < 4\pi^2$  : 초기교란이 안정되어 정적인(stationary) 대류발생,  $4\pi^2 < Ra < 240 \sim 300$  : 초기교란에 의하여 안정적인(steady counter-rotating)의 순환 대류,  $Ra > 240 \sim 300$  : oscillatory과 bifurcation 거동 즉 순환 흐름의 생성과 소멸을 반복하는 불안정 순환대류.

수평층 구조내의 포화된 다공질 재료에서 연직방향의 자연대류에 대한 Ra는 식 (4)와 같다(Khosrokhavar,

2016; Lapwood, 1948; Nield and Bejan, 2006; Wang, 2016).

$$Ra = \frac{K\Delta\gamma_w H}{\alpha_m \mu_w} = k \frac{\Delta\gamma_w / \gamma_w}{\alpha_m / H} \quad (4)$$

여기서,  $H$ 는 온도조건이 재하되는 수평층의 연직 높이이며,  $\alpha_m$ 은 다공질 재료의 열확산계수이다. 그리고  $\Delta\gamma_w$ 는 상하 경계면에서의 온도에 의한 유체의 밀도차이다. 수치해석에서 불안정 자연대류를 유발하기 위한  $Ra$ 는 한계값 ( $Ra=4\pi^2$ )보다 큰 것으로 나타났다(Blake et al., 1984; Engström and Nordell, 2016). 그리고 실제 현장실험에서는 지중 온도조건과 지반조건의 제약으로 인하여 불안정 자연대류의 관측이 어려운 것으로 사료된다(Johansen, 1975). 다만, 단층이나 절리를 포함하는 암반층이나(Malkovsky and Pek, 2015), CO<sub>2</sub> sequestration (Wang, 2016)이나 지열발전에서와 같이 온도차이가 큰 유체의 주입은 지중 온도 역구배를 형성하여 순환적 자연대류 발생 가능성이 클 것으로 판단된다. 그리고 다공질 재료에서 큰 간극비는 높은 투수계수( $k$ )와 낮은 열확산계수( $\alpha_m$ )를 나타내므로, 동일한 온도경계조건에서 식 (4)로부터 자연대류 발생가능성이 높다. 또한, 점토질 지반보다는 모래질 지반에서 투수계수의 지배적인 역할에 의하여 내부 열원에 의한 순환적 자연대류가 열의 흐름에 중요한 역할을 하며, 이를 반드시 고려하여야 한다.

## 2.2 연계된 열-수리-역학에 대한 다공질 재료의 거시적 수식화

고정된 다공질내의 자연대류를 모사하기 위한 유체역학적 수식화는 유체 흐름에 대한 체적 평균법과 Boussinesq의 근사법을 이용하여 지배방정식을 제시하였으며, 비선형 관성력(식 (1)의 왼쪽)이 유체의 운동학적 거동에 지배적인 역할을 하게 된다. 하지만, 일반적인 다공질 재료에서 유체의 운동학적 에너지는 효과적으로 소산되며, 단순한 Darcy 법칙에 의하여 유체의 흐름을 모사할 수 있다. 따라서, 거시적 관점에서 다공질 재료의 열-수리-역학적 현상에 대한 평형방정식들을 이용하여 지반내의 자연대류 현상을 모사할 수 있다.

다공질 재료에 대한 지배 방정식은 국부적인 양을 체적평균의 양으로 대체하는 등가 연속체의 거시적 접근

법(macroscopic approach)을 사용하였다(Gens and Olivella, 2001). 3상으로 이루어진 지반의 구성 요소들은 국부적인 압력과 온도의 평형조건에 있는 것으로 가정하였다. 다양한 종류의 물질이동에 대한 거시적인 평형방정식은 다음과 같이 일반화된 편미분 방정식으로 정리할 수 있다(Bear, 1990).

$$\frac{\partial \rho^\psi}{\partial t} + \nabla \cdot \tilde{j}^\psi = f^\psi \quad (5)$$

여기서,  $\psi$ 는 다공질 재료의 종류를 나타내며,  $\rho^\psi$ 는 해당 종류의 단위체적당 질량을 나타낸다.  $\tilde{j}^\psi$ 는 해당 종류의 이류(advective)형태와 비이류(non-advective)형태 질량 흐름을 나타내고,  $f^\psi$ 는 해당 종류의 단위체적당 생성과 소멸량을 나타낸다.

다공질 재료에서 자연대류는 온도에 따른 유체의 밀도변화에 의하여 발생하므로, 유체의 연속방정식과 열평형 방정식, 그리고 힘평형 방정식의 완전히 결합된 형태의 지배방정식들에 의해서만 모사할 수 있다. 불완전 결합이나 미결합(uncoupled)의 지배방정식의 수식화에 의해서는 자연대류를 모사할 수 없다. 그리고, 유체역학에서와 같이 추가적인 Boussinesq의 근사법에 의하여 부력을 간접적인 외력의 형태로 적용할 필요가 없다.

다공질 재료와 유체에 대하여 식 (5)를 적용하고, 열평형 방정식을 이용하여 다음과 같은 열-수리학적 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\rho_s(1-\phi)] + \nabla \cdot [\rho_s(1-\phi)\tilde{u}] &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} [\rho_l^w \phi S_l] + \nabla \cdot [\rho_l^w \phi S_l \tilde{u} + \rho_l^w \tilde{q}_l] &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} [(1-\phi)\rho_s E_s + \phi S_l \rho_l E_l] & \\ + \nabla \cdot \tilde{i}_c + \nabla \cdot \left[ (1-\phi)\rho_s E_s \tilde{u} + \phi S_l \rho_l E_l \tilde{u} + \rho_l^w \tilde{q}_l \right] &= 0 \quad (6) \end{aligned}$$

여기서,  $\rho_s$ 과  $\rho_l^w$ 는 다공질 재료의 입자와 유체의 단위 질량이며,  $\tilde{u}$ 는 연속체의 변위 속도이다.  $S_l$ 는 공극내의 유체의 포화도를 나타내며,  $\tilde{q}_l$ 는 유체의 단위면적당 유량으로 Darcy의 법칙에 의하여  $-k_l/\gamma_l(\nabla P_l - \gamma_l g)$ 로 표현할 수 있다.  $E_s$ 는 다공질 재료의 단위질량당 내부 에너지이며, 열전도에 의한 에너지 전달은 Fourier의 법

칙( $i_c = -\lambda \nabla T$ )을 이용하여 산정할 수 있다.

일반적인 다공질재료의 열-수리-역학적 연계해석에서는 유체의 단위중량이 일정하다고 가정한다. 하지만, 10°C~80°C 온도범위에서 물의 단위질량의 변화는 0.03 g/cm<sup>3</sup>(표준대기압)으로, 선형 열팽창계수로 환산시 69×10<sup>-6</sup>/°C이 된다. 이는 다른 재료의 열팽창계수에 비하여 대단히 큰 값으로(Quartz=0.33×10<sup>-6</sup>/°C, Concrete=12×10<sup>-6</sup>/°C, Steel=11×10<sup>-6</sup>/°C), 온도변화에 의한 간극수의 밀도변화는 다공질 재료의 열해석에서 반드시 고려하여야 한다. 하지만, 1MPa의 압력에 의한 물의 단위중량의 변화는 0.0006g/cm<sup>3</sup> 미만이므로 압력에 의한 영향은 고려하지 않았다. 따라서, 자연대류를 모사하기 위해서 식 (7)과 같이 온도에 따른 유체의 밀도변화를 고려하였다.

$$\frac{d}{dt}(\rho_i^w) = \frac{\partial \rho_i^w}{\partial T} \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

거시적인 힘평형 방정식으로부터 다음과 같은 전용력에 대한 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot (\underline{\sigma}' - S_i P_i \underline{1}) + (\rho_s(1-\phi) + \rho_i^w \phi) \underline{g} = 0 \quad (8)$$

여기서,  $\underline{\sigma}'$  은 다공질 재료에 작용하는 유효응력이고,  $P_i$ 은 유체의 압력을 나타낸다. 제시된 지배방정식들은 Galerkin 수식화를 적용하고 다공질 재료의 다상 흐름에 대한 열-수리-역학적 연계 현상에 대한 유한요소 수치해석 프로그램인 Geo-COUS(Geo-COUpled Simulator)과 결합하였다.

### 3. 지반의 자연대류에 관한 수치해석

지반내 열전달에서 자연대류는 자연현상적인 요인보다는 인위적인 열원에 의하여 발생할 가능성이 높다. 특히 지반의 열물성을 측정하기 위한 열탐침기(thermal probe) 실험과 열응답실험(Thermal Response Test)에서 자연대류가 발생하며(Anderson, 2014; Bidarmaghz and Narsilio, 2016), 현장에서 열원으로부터 장기간 열전달이 발생하는 고준위 방폐장이나 전력선 매립 등에서도 발생할 수 있다. 본 논문에서는 실내에서 열전도도를 측정 위한 열탐침기 실험과 해저면에 매설된 전력선에 대한 완전 연계된 열-수리-역학적 해석을 수행하여 자연

대류의 발생가능성과 효과에 대하여 논의하고자 한다.

#### 3.1 열탐침기를 이용한 열전도도 측정

지반의 열 물성치를 측정하기 위한 가장 일반적인 방법은 열탐침기를 이용하는 것이다. 그 중에서 단일 탐침법(single probe method)은 일정한 열원을 지반에 삽입하고 열원 부근의 온도 변화를 해석하여 지반의 열전도도를 평가하는 방법이다. 열탐침기를 이용한 열전도도 측정은 지중열교환기에서 지반의 열전도도 평가를 위하여 시행하는 열응답실험(Thermal Response Test)와 동일한 무한 선열원 모델(Infinite line heat source model)을 사용하고 있다. 물에 대한 열전도도 측정실험에서 물의 온도가 높아질수록 자연대류에 의한 열전도도 측정의 불확실성이 증가함을 잘 알려져 있으며(Kwon and Lee, 2012), 마찬가지로 지반의 열전도도를 평가하기 위한 열탐침기 시험법이 단순해 보이지만 주의가 필요한 실험방법이다. 최근 투수계수가 큰 다공질재료나 파쇄된 암반에 설치된 지중 열원(예, 지중열교환기)에 의한 자연대류의 중요성에 대하여 논의하였다(Bidarmaghz and Narsilio, 2016; Anderson, 2014; Gehlin and Hellstrom, 2003; Choi and Ooka, 2016). 특히, Choi와 Ooka(2014)는 TRT실험에 대한 유체역학에 기반한 자연대류 수치해석에서 높은 열원조건에서 자연대류에 의하여 높아진 열전달 능력으로 지중의 열전도도를 9% 이상 높게 평가함을 보여주었다. 따라서, 투수계수가 큰 다공질 재료에서 온도에 의한 자연대류를 고려하지 않는 것은 지중 열교환 시스템을 지나치게 과다 설계할 수 있다(Bidarmaghz and Narsilio, 2016).

본 연구에서는 기존의 연구자료(Manohar et al., 2000; Dang and Leong, 2015)를 이용하여 열탐침기의 재원(직경  $d=1.5\text{mm}$ , 길이  $L=6\text{cm}$ )과 시료의 크기(높이  $H=20\text{cm}$ )를 결정하고, 실험조건에 따른 탐침기 수치실험 결과를 분석하였다. 탐침기의 단위체적당 열원은 기존자료의 평균값인  $1.5\text{mW/mm}^3$ 을 적용하였으며, 초기 온도는 20°C이며 정수압 조건에서 시료 경계에서의 유체와 열적 유동이 없는 것으로 가정하였다. 시료의 직경에 따른 경계조건의 영향(boundary effect)을 분석하기 위하여  $(\exp[-D^2/(16at)]) \leq 1$ ,  $D$ =시료의 직경,  $\alpha$ =열확산계수, Tarnawski et al., 2011), 시료직경  $D=10\text{cm}$ ,  $20\text{cm}$ 에 대하여 수치해석을 수행하였다. 그리고 지반의 열전도도는 수치실험 결과를 바탕으로 정상상태(steady state)

의 무한 선열원 모델을 이용하여 산정되었다.

$$\lambda = \frac{q \ln(t_2/t_1)}{4\pi (T_2 - T_1)} \quad (9)$$

여기서,  $q$ 는 단위 깊이당 탐침기에서 발생하는 열원이며(본 수치실험 조건  $q=2.65\text{W/m}$ )이며,  $T$ 는 탐침기의 중앙부에 설치된 열전대(thermocouple)에서 측정된 온도이다.

이론적인 무한 선열원 모델(식 (9))과 실내 실험조건을 일치시키기 위해서는 열원의 직경은 없으며 무한 깊이에 설치되어 반경방향으로의 열흐름만 존재해야 한다. 이러한 실험조건을 만들기 위해서는 탐침기는 시료의 전구간에 설치되며, 상하면은 단열조건이고, 반경방향으로 무한히 넓은 시료에 대하여 실험을 수행하여야 한다. 실제의 제한된 실험조건에서 물성치 평가의 영향을 분석하기 위하여, 시료직경  $D=10\text{cm}$ 일 때 탐침기의 상단이 시료 표면에 위치하는 경우(Fig. 1(a) and 1(b))와 시료의 깊이  $3\text{cm}$ 에 위치하는 경우(Fig. 1(d))에 대하여 비교 분석하였다. 온도 변화에 의한 물의 밀도변화를 무시하면 자연대류가 발생하지 않으므로 “자연대류 미고려(w/o NC)”로 명시하고, 식 (7)과 같이 온도변화에 따

른 물의 밀도변화를 고려한 해석은 “자연대류 고려(w/ NC)”로 명시하였다.

Figure 1(a)와 1(b)는 온도에 의한 물의 밀도변화 고려 유무에 따른 탐침기 주위의 온도분포를 나타내고 있다 (열원 재하 500sec후). 두가지 해석 모두 탐침기 하부의 열확산을 볼 수 있으며, 물의 밀도변화 고려한 해석에서(w/ NC) 탐침기에 근접한 지표면부에서 부력에 의한 물의 유동으로 온도가 증가함을 알수 있다(Fig. 1(c)). Fig. 1(d)는 탐침기 상단을 시료에 3cm까지 삽입하였을 때, 열원 탐침기의 상하부로 열확산이 발생함을 보여주고 있다.

Fig. 2는 탐침기의 열원에 의한 주위 지반의 간극수 흐름을 보여주고 있다. Fig. 2(a)와 2(b)는 간극수의 밀도변화 고려 여부에 따른 간극수의 연직방향과 수평방향흐름을 보여주고 있다. 간극수의 밀도변화 미고려시(w/o NC, Fig. 2(a)) 자연대류가 발생하지 않지만, 온도에 의한 간극수의 밀도변화(w/ NC, Fig. 2(b))는 탐침기 주위에서 상승 흐름을 보이며 시료의 경계부근에서는 하강흐름을 유발함을 알 수 있다. 또한 탐침기 단부에서 간극수의 순환흐름으로 인하여 탐침기 방향으로의 수평흐름을 보여주고 있다. Fig. 2(c)는 탐침기의 상부를 시료내부 3cm까지 관입하였을 때, 온도에 의한 간극수

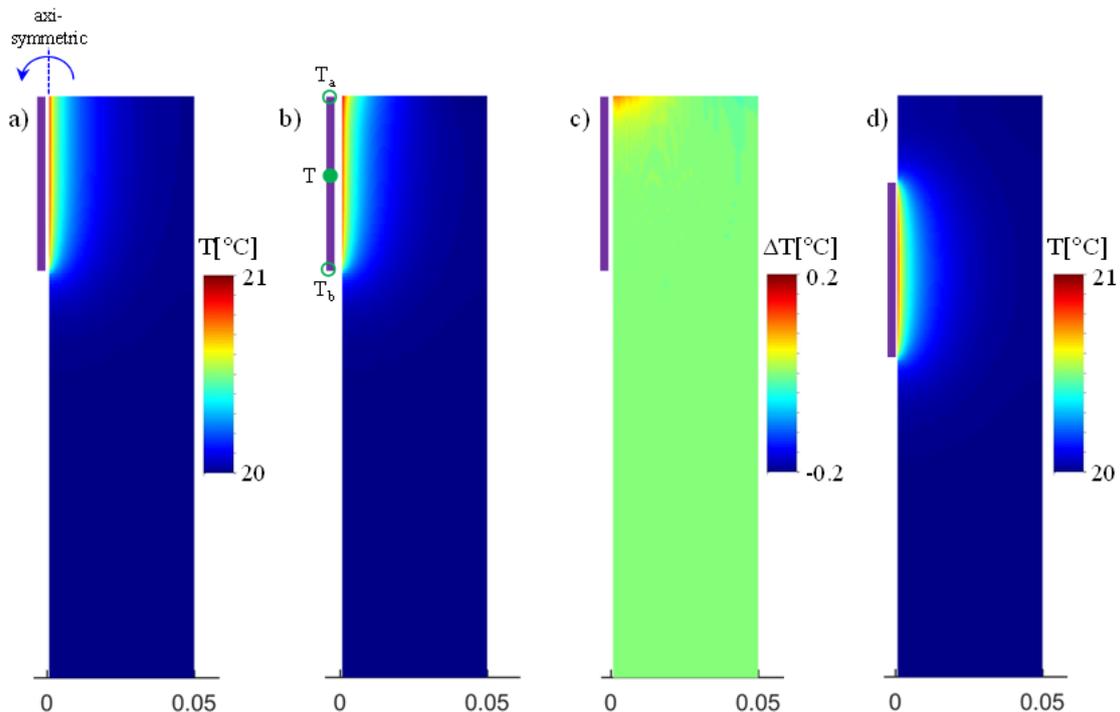


Fig. 1. Temperature distribution near the thermal probe at time 500sec (sample size:  $D=10\text{cm}$ ,  $H=20\text{cm}$ ). a) w/o Natural Convection (assuming constant fluid density, w/o NC), b) w/ Natural Convection (temperature varying fluid density, w/ NC) (Eq. 7), c) temperature difference from a and b, d) probe installed at 3cm deep (w/ NC).

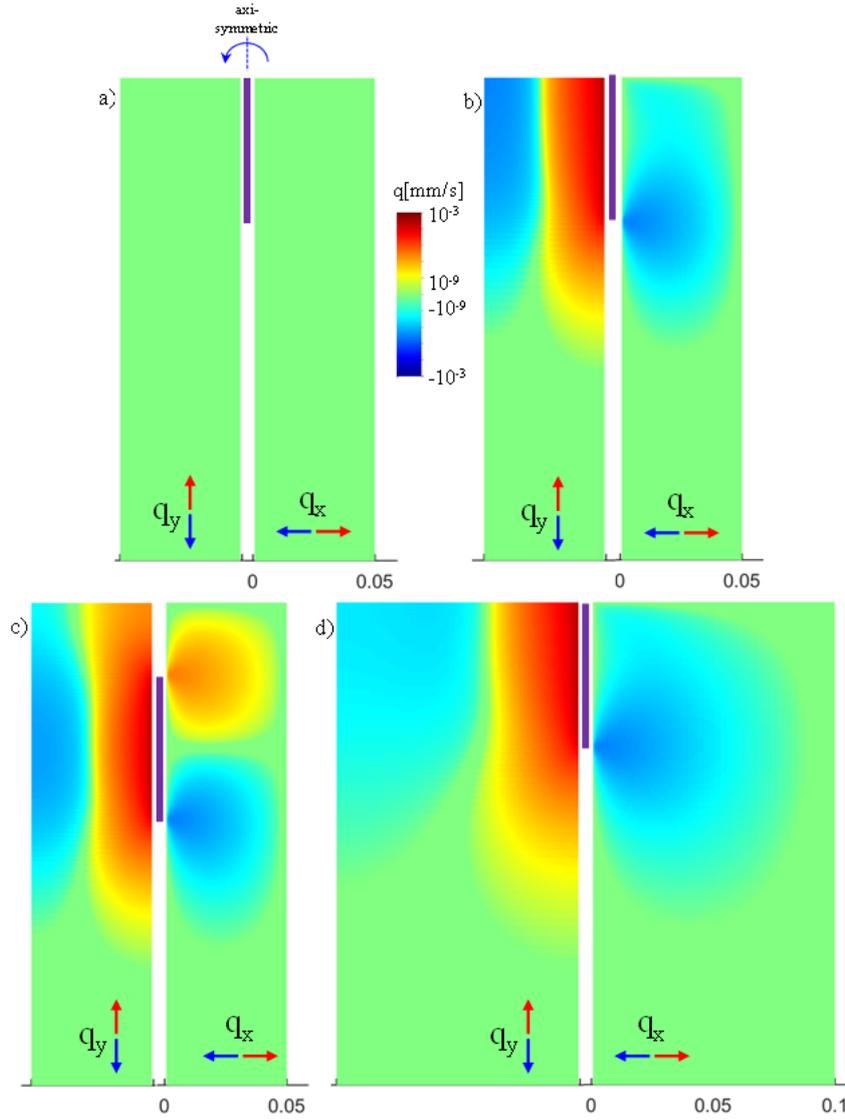


Fig. 2. Fluid flux (log scale) at time 500sec. a) w/o NC (sample D=10cm and H=20cm), b) w/ NC, c) probe installed at 3cm deep (w/ NC), d) D=20cm (w/ NC).

의 밀도변화로 상하 및 좌우의 완전 순환형태의 간극수 흐름 패턴을 보여주고 있다. Fig. 2(d)(w/ NC)는 시료 직경(D=20cm)의 증가에 따른 간극수의 흐름을 보여주고 있는데, Fig. 2(b)(D=10cm, w/ NC)에 비하여 간극수 흐름 범위가 넓어지면서 유속이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 3은 시간경과에 따른 탐침기의 여러 위치에서 온도변화를 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 간극수의 밀도변화를 무시한(w/o NC) 수치해석으로 탐침기의 상단(Ta)과 중앙부(T)에서의 온도가 매우 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만, 간극수의 밀도변화 고려(w/ NC)는 탐침기 주위의 온도상승으로 간극수의 밀도를 감소시켜, 유체의 부력에 의하여 열원이 시료의 상부로 확산되면서 탐침기의 상단(Ta)부의 온도가 중앙부(T)의 온도보다 높

게 나타남을 알 수 있다. 탐침기의 상부를 시료내부에 3cm까지 관입한 경우, 탐침기의 열원이 상부로 확산되면서, 탐침기의 상단(Ta)과 하단(Tb)에서의 온도가 매우 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 3(d)는 간극수의 밀도변화 고려유무와 탐침기의 설치위치에 따른 탐침기 중앙부에 의한 지점(T)에서의 시간경과에 따른 온도변화를 보여주고 있다. 본 해석에 사용된 모래지반에 대한 결과는 400sec까지는 직선적인 경향을 보이며(정상상태 steady state의 열흐름), 밀도변화나 계측심도에 의한 영향은 매우 미미하게 나타났다. 하지만, 400sec 이후부터는 각기 다른 온도경로를 따르면서 log(시간)에 대하여 직선적 온도변화에서 벗어남을 알 수 있다. 수치 실험결과에 대한 무한 선열원 모델(식 (8))을 이용하여 Fig.

3(d)의 탐침기 중앙부(T)의 온도 이력의 접선 기울기 (tangential slope)로부터 시간 경과에 따른 시료의 열전도도를 Fig. 4와 같이 산정하였다.

수치실험에서 사용된 입력 열전도도는  $2.0\text{W/m}\cdot\text{K}$ 이며, Fig. 4는 간극수의 밀도변화, 계측심도, 그리고 시료 직경의 변화에 따른 무한 선열원 모델을 이용한 평가된 열전도도를 나타내고 있다. 무한 선열원 모델을 이용하여 평가된 열전도도는 20sec~200sec 구간에서 대체로 일정한 값을 가지며, 평가된 열전도도는 실제 입력된 값보다 다소 작게 나타났다. 이는 열원의 두께가 없는 반경방향으로의 열확산만을 고려하는 무한 선열원 모델

과 실제 실험조건과의 차이에 기인한다. 탐침기에서 확산된 열원은 수평방향으로 진행하여 시료의 경계면에서 반사되며, 동시에 열확산 과정에서 탐침기의 설치 상부와 하부의 온도구배에 의하여 탐침기 하부로 확산되어 간다. 따라서 200sec 이후(w/o NC) 탐침기 하부의 온도확산에 의하여, 탐침기 중앙부(T)의 온도 증가폭이 감소되면서 일시적으로 열전도도를 크게 평가하게 된다. 하지만 시간이 경과되면서 열확산이 시료의 경계면에 반사되면서 열적 포화(thermal saturation)에 도달하고, 이에 따라서 온도 증가폭이 증가하면서 지속적으로 열전도도를 작게 평가하게 된다(Low and Loveridge,

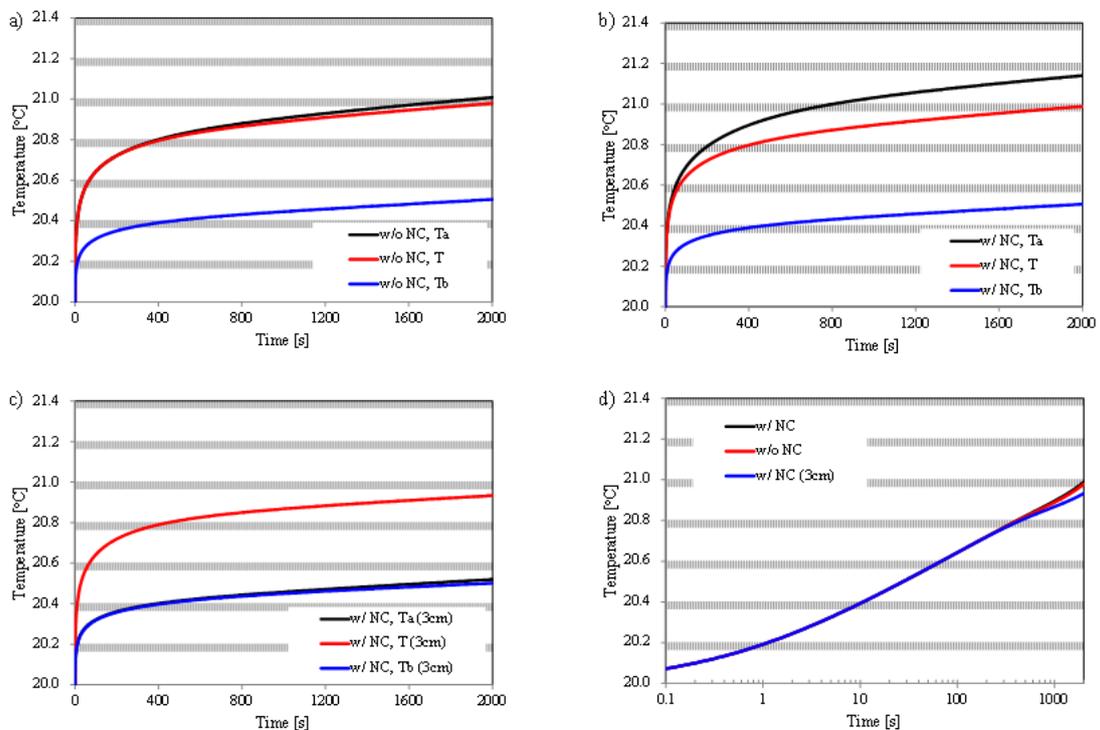


Fig. 3. Thermal response of thermocouple at different location. a) w/o NC (D=10cm), b) w/ NC, c) probe installed at 3cm deep (w/ NC), d) temperature comparison at the middle of the probe, Tb.

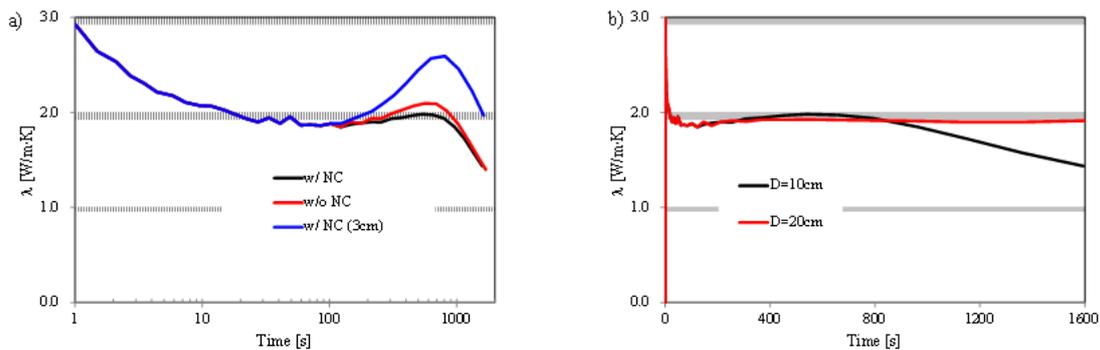


Fig. 4. Estimated thermal conductivity using infinite line source model. a) effect of natural convection and installed depth of the probe, b) effect of sample diameter (w/ NC).

2014). 간극수의 밀도변화를 고려하는 경우(w/ NC), 내부 열적 순환에 의하여 600sec까지 작은 열전도도 증가를 보이고 열적 포화에 의하여 산정된 열전도도는 감소하는 경향을 보인다. 탐침기의 상부를 시료내부에 3cm까지 관입한 경우(w/ NC, 3cm), 탐침기로부터의 열원이 시료의 상하부로 확산되면서 열전대(T)에서 온도 증가폭이 감소하여 열전도도를 크게 평가한 후, 열적 포화에 의하여 감소하게 된다. Fig. 4(b)는 시료의 직경은 10cm에서 20cm 증가시 평가된 열전도도의 시간경과에 따른 변화를 보여주고 있다. 시료 직경의 증가는 적절한 열전도도 측정을 위한 시간 범위를 크게 증가시킴을 알 수 있다.

본 수치실험은 투수계수가 큰 시료에서 탐침기를 이용한 열전도도 측정시, 탐침기의 설치깊이와 시료 크기의 중요성을 보여주고 있다. 지중의 열원에 의한 열확산 해석에서 온도변화에 의한 간극수의 밀도변화 무시하는 것은 지반의 열적 물성치 평가의 불확실성을 증가시킴을 알 수 있다. 투수성이 높은 시료에서 탐침기를 이용한 열전도도 측정시, 가능한 긴 탐침기의 상단부는 시료의 표면에 위치하고 시료 바닥은 단열재료를 사용하며 시료의 직경은 충분히 크게 하는 것이 매우 중요하다.

### 3.2 해저 전력선의 열소산 해석

해저에 설치되는 케이블이나 관은 열의 이동 측면에서 크게 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 원유나 가스의 이동을 위한 파이프라인은 효율적인 이송을 위하여 충분히 높은 온도를 유지하기 위해서 파이프 주변의 흙이나 해수로의 열 손실을 최소화하여야 한다(Cathie et al., 2005; Chakraborty et al., 2016). 반면, 해저 전력선은 가능한 최대의 전력을 전송하면서 전력선에 발생한 열손실을 주위 지반으로 원활하게 소산시켜 과열에 의한 케이블의 손상(meltdown)을 방지하여야 한다(Worzyk, 2009). 전력 케이블의 열방출에 의한 잠재적인 영향은 독일의 환경청들(Bundesamt für Naturschutz; Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer)에 의해 제기되었으며, 해저 전력케이블 설치에 의한 해양환경 피해에 대처하기 위하여 “2 K criterion”을 제시하였다. 이 기준안은 대부분의 해저 생물들이 해저면 몇 cm의 깊이 내에 서식하므로 해저면 0.2m에서의 온도상승을 2°C로 제한하는 것이다. 해저 전력선 설치에 의한 해저면의 온도변화는 케이블 주위의 온도와 지반의 열적 물성치에 매우 민감

하다. 또한 평균 25년의 사용 연한은 다공질 재료에서 지속적인 열원에 의한 자연대류의 영향이 중요한 고려 인자가 될 것으로 판단된다.

해저 전력선으로 주로 사용하는 HVDC(High voltage direct current) 케이블에서 발생하는 열손실량은 최대 전송시 10~100W/m이며, 이는 conductor의 ohmic losses ( $I_c^2 \cdot R$ )에 의하여 발생한다(Ardelean and Minnebo, 2015; Worzyk, 2009). 기존 연구결과와의 직접적인 비교를 위하여 단일 케이블(D=150mm)에서 발생하는 열손실량은  $q=30W/m$ 이고, 해저 지반의 열전도도는  $\lambda=1.0W/m \cdot K$ 으로 설정하였다(Worzyk, 2009, Fig. 3.8). 해저 전력선의 열원에 인한 지반내 자연대류에 의한 영향을 분석하기 위하여, 전력선의 매립깊이에 따른 수치해석을 수행하였다. 해수면의 깊이는 200m(해저면 온도  $T_s=12^\circ C$ ), 500m(해저면의 온도  $T_s=9^\circ C$ )로 구분하여 해석을 수행하였다(Fig. 5, 해저면의 온도는 NOAA의 자료를 이용하여 추정).

Fig. 6은 해수면의 깊이  $Z_w=200m$ 인 해저면  $Z_c=1m$  깊이에 매설된 전력 케이블이 열적 평형상태에 도달했을 때 지중 온도분포를 보여주고 있다. 해수의 밀도변화를 고려하지 않는 경우(Fig. 6(a), w/o NC), 지중 온도는 케이블 주변으로 방사형으로 확산된다. 하지만, 온도에 의한 해수 밀도의 변화(w/ NC)는 매설관에 의한 주위 지반의 온도를 증가시키고 해수의 밀도를 감소시켜, 해수의 부력에 의한 연직 방향으로 온도 확산분포를 갖는다(Fig. 6(b)). 이러한 매설관 주위의 부력에 의한 간극수의 상승은 Fig. 6(c)에서와 같이 매설관 측면 상부지점을 기준으로 원형에 가까운 자연대류에 의한 순환 흐름을 형성하게 된다.

Fig. 7은 간극수의 밀도변화 고려 유무와 전력선 매설 깊

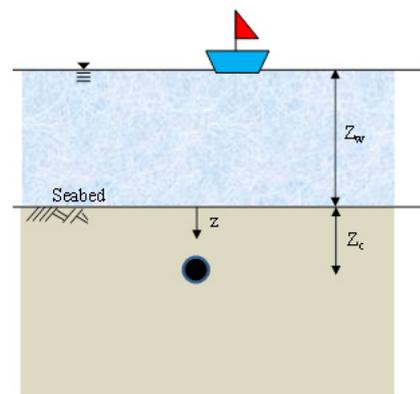


Fig. 5. Geometry and symbols used in analysis of buried power cable

이  $Z_c$ 가 매설관 상부의 지중온도 변화를 분석하였다. 전력 케이블에 의한 지중온도 변화 허용 기준안은 해저면 깊이  $z=-0.2\text{m}$ 의 온도 변화를  $2^\circ\text{C}$ 이하로 제한하고 있다. Fig. 7(a)는 열확산에 의한 케이블로부터  $z=-0.2\text{m}$  지점의 온도변화를 나타내고 있다. 매설관 설치심도  $Z_c=1.0\text{m}$ 일 때, 해수의 밀도변화를 무시한 해석(w/o NC)은 완만한 온도상승 곡선을 보이는 반면, 물의 밀도변화를 고려하는 해석(w/ NC)은 10day을 기준으로 급격한 온도증가를 보인 후 정상상태로 수렴함을 알 수 있다. 매설관 설치심도  $Z_c=2.0\text{m}$ 인 경우도 마찬가지로, 물의 밀도변화를 고려하는 해석은 미고려 해석보다 상대적으로 급격한 온

도 상승과 높은 정상상태 수렴 온도를 보여주고 있다.  $z=-0.3\text{m}$  지점(Fig. 7(b))의 온도 변화는  $z=-0.2\text{m}$  지점(Fig. 7(a))의 온도변화와 유사한 패턴을 가지며, 다만 열원에 더 가깝기 때문에 높은 정상상태 온도를 보여주고 있다. 매설 케이블 표면의 온도는 해수의 밀도변화에 따른 부력 효과로 자연대류에 순환흐름을 형성하여 물의 밀도변화를 무시한 해석보다 낮은 수렴 온도를 나타내고 있다. 또한, 매설관 표면의 정상상태 수렴온도는 설치심도  $Z_c$ 와 무관하게 매우 유사한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 해수의 밀도변화 고려 유무와 전력선의 매설 깊이  $Z_c$ 에 따른 정상 상태의 온도를 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 매설깊이의 변화에 따른  $z=-0.2\text{m}$ 에서 온도증가

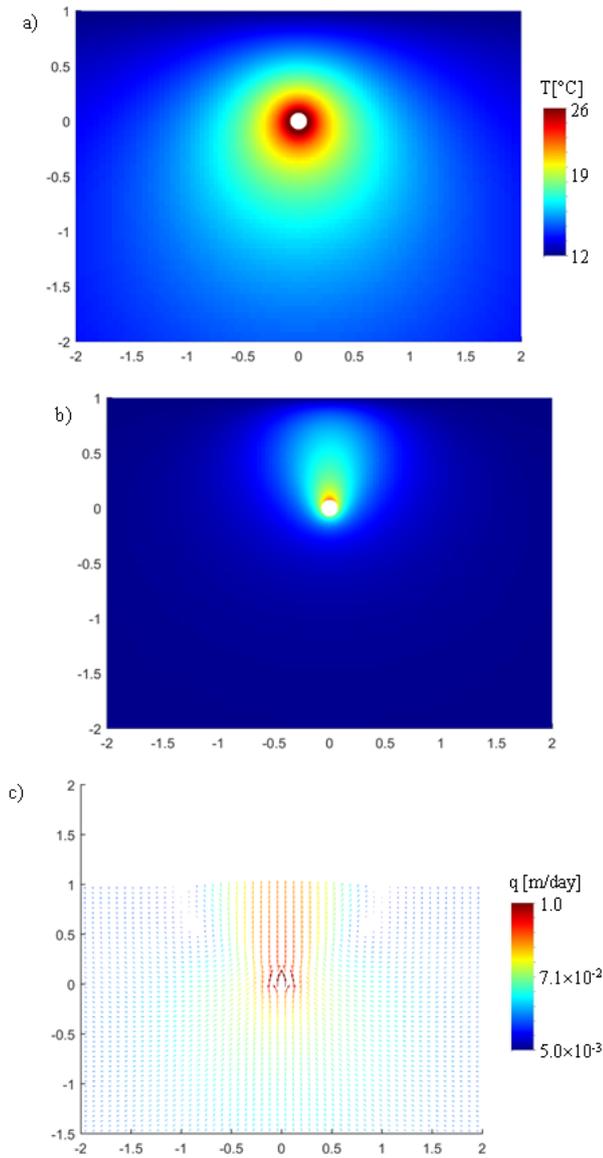


Fig. 6. Temperature and fluid flux distribution around power cable ( $Z_w=200\text{m}$ ,  $T_s=12^\circ\text{C}$ ,  $Z_c=1\text{m}$ ). a) temperature distribution under w/o NC ( $Z_c=1\text{m}$ ), b) temperature distribution under w/ NC ( $Z_c=1\text{m}$ ), c) fluid flux (w/ NC).

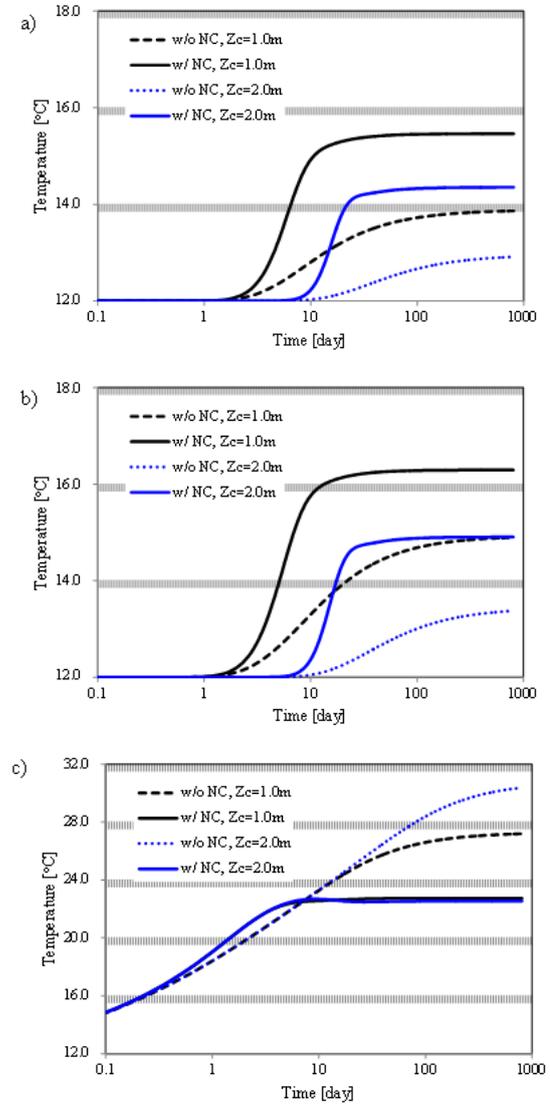


Fig. 7. Effect of burial depth  $Z_c$  and NC on variation of temperature with time at different location  $z$  ( $Z_w=200\text{m}$ ,  $T_s=12^\circ\text{C}$ ). a)  $z=-0.2\text{m}$ , b)  $z=-0.3\text{m}$ , c)  $z$  on the top of the cable

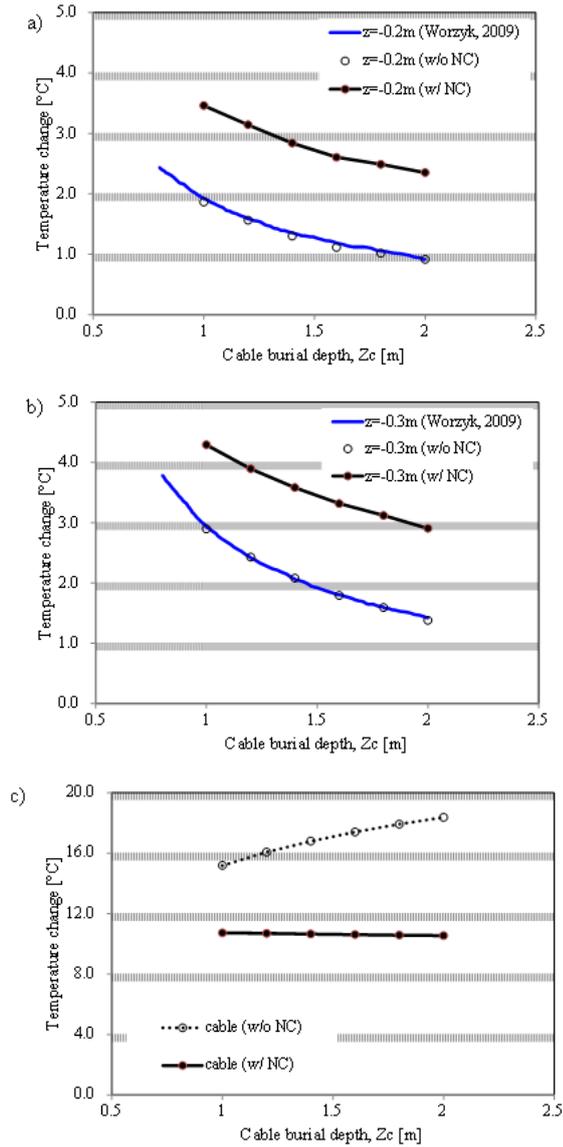


Fig. 8. Temperature at steady state due to thermal dissipation from power cable ( $Z_w=200\text{m}$ ,  $T_s=12^\circ\text{C}$ ). a)  $z=-0.2\text{m}$ , b)  $z=-0.3\text{m}$ , c)  $z=\text{on the top of the cable}$

를 나타내는데, 밀도변화를 무시한 해석결과(w/o NC)는 기존의 FEM 해석 결과와 매우 유사한 결과를 나타낼 수 있다(Worzyk, 2009). 이는 일반적으로 알려진 바와 같이 매설관을 1.0m 심도에 설치하면 매설 전력선의 온도변화 기준안을 만족하는 것으로 판단할 수 있다(Meißner et al., 2006). 하지만, 이는 온도에 의한 해수의 밀도변화를 무시한 해석결과이며, 해수의 밀도변화를 고려시 온도변화 기준인  $2^\circ\text{C}$ 를 상회함을 알 수 있다. Fig. 8(b)는  $z=-0.3\text{m}$ 에서의 정상상태의 온도변화를 나타내며,  $z=-0.2\text{m}$ (Fig. 8(a))의 경우와 마찬가지로 해수의 밀도변화에 의한 자연대류는 기존의 알려진 해석결과보다 높은 온도변화를 나타내고 있다. Fig. 8(c)는

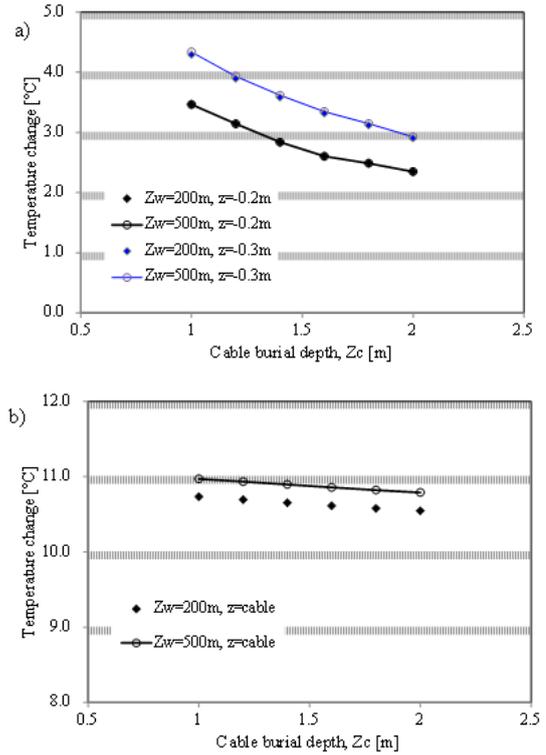


Fig. 9. Effect of the depth of ocean floor  $Z_w$  on temperature change (w/ NC). a)  $z=-0.2\text{m}$  and  $-0.3\text{m}$ , b)  $z=\text{on the top of the cable}$

매설깊이에 따른 전력케이블 표면에서의 온도변화를 나타내며, 자연대류에 의한 매설관 주변의 순환흐름은 매설관 표면의 온도를 매설깊이와 무관하게 일정한 온도로 유지함을 알 수 있다.

Fig. 9는 전력 매설관이 설치되는 지점의 수심  $Z_w$ 의 영향에 대한 수치해석 결과이다. 동일한 조건에서 수심의 증가는  $z=-0.2\text{m}$ 에서의 온도변화에 미치는 영향은 미비한 것으로 나타났다. 다만, 깊은 수심에 설치된 매설관 주변은 초기 온도( $T_s=9^\circ\text{C}$ ,  $Z_w=500\text{m}$ )가 낮으므로, 온도변화에 대한 물의 밀도변화가 작아 이로 인한 자연대류 순환흐름이 작아져서 케이블 주변에서의 온도 변화를 다소 크게 산정하였다(Fig. 9(b)).

지중에 설치된 지속적인 열원은 주위지반의 온도를 증가시켜 물 밀도의 불안정 구배를 형성하고 부력에 의한 자연대류로 간극수의 순환흐름을 형성하게 된다. 이러한 자연대류를 무시한 해석은 간극수의 이송에 의한 열의 전달을 과소평가하게 된다.

#### 4. 결론

지반내의 간극수는 높은 열팽창계수를 가지며, 지반

의 온도상승에 의한 단위중량의 감소는 부력에 의한 자연대류를 유발하게 된다. 지반내의 자연대류 현상은 다공질 재료에 적용하는데 제약이 있는 유체역학의 접근법을 사용하거나 직접적인 고려를 하지 못하고 있다. 본 논문에서는 거시적 관점의 완전 결합된 열-수리-역학 지배방정식과 온도변화에 따른 간극수의 밀도변화를 고려하여 지반의 대류현상에 대한 수치해석 방법을 제시하였다. 본 수치실험에서는 실내 열전도도 측정을 위한 탐침기 실험과 해저 매설 전력선의 내부 열원에 의한 자연대류의 발생과 이로 인한 영향에 대하여 논의하였다.

탐침기 실험에 대한 수치해석 결과는 투수성이 높은 지반에서 무한 선열원 모델을 이용한 열전도도 평가의 불확실성에 대하여 논의하였으며, 모델식과 실험조건의 차이로 인한 해석 결과의 오류를 최소화하기 위한 적절한 실험조건을 제시하였다.

해저면에 전력 케이블 설치시, 전력 전송시 발생하는 열손실로 인한 해저면 0.2m 깊이의 온도상승을 2°C로 제한하고 있다. 온도에 의한 해수의 밀도변화를 무시한 해석결과는 기존의 연구결과와 매우 유사한 결과를 나타내었으나, 해수의 밀도변화를 고려한 수치해석 결과는 케이블에서 확산된 열로 인한 부력에 의하여 매설관 주위에 순환적 자연대류가 발생하며, 이로 인하여 해저면의 온도변화가 2°C 이상 발생함을 보여주었다. 해저 매설 전력선의 해저면 연 온도변화와 지반의 정확한 열물성치를 이용하여 자연대류를 고려한 수치해석을 수행하고, 깊은 설치심도와 뒷채움 치환 등에 의한 공사비 증가에 대한 최적방안을 도출해야 한다.

지반의 열적 거동에 대한 연구는 대부분 열전도에 한하여 수행되었으나, 큰 투수성 갖는 지반내에 열원이 존재하는 경우 간극수의 밀도변화에 따른 자연대류가 중요한 열전달 인자가 되므로 이를 고려한 해석을 반드시 수행하여야 한다. 그리고 열탐침기에 대한 실험적 비교분석과 대규모 실증실험들과의 비교분석을 통하여 자연대류의 중요성에 대한 지속적인 논의가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 울산대학교(2016-0014)와 한국연구재단 개인연구지원사업(KNRF-2016014035)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

- Anderson, K., Shafahi, M., McGann, S., and Pakdee, W. (2014), "Numerical Simulation of 3-D Free Convection in Porous Media due to Combined Surface Forced Convection and Internal Heat Generation", 5th International conference on porous media and their applications in science, engineering and industry.
- Ardelean, M. and Minnebo, P. (2015), HVDC submarine power cables in the world: State-of-the-art knowledge, Office of the European Union.
- Auriault, J. L. (2009), "On the Domain of Validity of Brinkman's Equation", *Transp. Porous Media*, Vol.79, pp.215-223.
- Bear, J. (1990), Introduction to modeling of transport phenomena in porous media, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p.553.
- Bear, J. (1972), Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, NY, USA, p.764.
- Bidarmaghz, A. and Narsilio, G.A. (2016), "Shallow Geothermal Energy: Emerging Convective Phenomena in Permeable Saturated Soils", *Geotechnique Letters*, Vol.5, No.2, pp.1-5.
- Blake, K., Bejan, A., and Poulikakos, D. (1984), "Natural Convection Near 4°C in a Water-saturated Porous Layer Heated from Below", *Int J Heat Mass Transf.*, Vol.27, No.12, pp.2355-2364.
- Caltagirone, J.P., Meyer, G., and Mojtabi, A. (1981), "Structurations Thermoconvectives Tridimensionnelles Dans une Couche Poreuse Horizontale", *J. Mécanique*, Vol.20, pp.219-232.
- Cathie, D.N., Jaeck, C., Ballard, J.C., and Wintgens, J.F. (2005), "Pipeline Geotechnics: State of the Art", Proc. International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG) Perth, Australia, pp.95-114.
- Chakraborty, S., Talimi, V., Muzychka, Y., and McAfee, R. (2016), "Modeling of Heat Loss from Offshore Buried Pipeline through Experimental Investigations and Numerical Analysis", Arctic Technology Conference.
- Cheng, P. (1978), Heat transfer in geothermal systems, *Advances in Heat Transfer*, p.105.
- Choi, W. and Ooka, R. (2014), "The Effect of Natural Convection on Thermal Response Test", *Ashrae Trans.*, Vol.120, p.14-C047.
- Choi, W. and Ooka, R. (2016), "Effect of Natural Convection on Thermal Response Test Conducted in Saturated Porous Formation: Comparison of Gravel-backfilled and Cement-grouted Borehole Heat Exchangers", *Renewable Energy*, 96(A), pp.891-903.
- Dang, L. and Leong, W.H. (2015), "Thermal Conductivity Probe - Part I - A Theoretical Error Analysis", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.86, pp.992-1003.
- Engström, M. and Nordell, B. (2016), "Temperature-driven Groundwater Convection in Cold Climates", *Hydrogeology Journal*, Vol.24, No.5, pp.1245-1253.
- Farouki, O.T. (1981), Thermal Properties of Soils (No. CRREL-MONO-81-1). Cold regions research and engineering lab.
- Gehlin, S.E.A. and Hellstrom, G. (2003), "Influence on Thermal Response Test by Groundwater Flow in Vertical Fractures in Hard Rock", *Renew Energy*, Vol.28, No.14, pp.2221-2238.
- Gens, A. and Olivella, S. (2001), "THM phenomena in saturated and unsaturated porous media", *Revue Française de Génie Civil*, 5:6, pp.693-717.
- Grosan, T., Revnic, C., Pop, I., and Ingham, D.B. (2009), "Magnetic Field and Internal Heat Generation Effects on the Free Convection

- in a Rectangular Cavity Filled with a Porous Medium”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(5-6), pp.1525-1533.
20. Horton, C.W. and Rogers, F.T. (1945), “Convection Currents in a Porous Medium”, *J. Appl. Phys.*, Vol.16, pp.367-370.
  21. Ingham, D.B. and Pop I. (2005), *Transport phenomena in porous media*, Elsevier, Oxford.
  22. Johansen, O. (1975), *Thermal conductivity of soils*, Ph.D. thesis, Trondheim, Norway (CRREL Draft Translation 637, 1977), ADA 044002.
  23. Khosrokhavar, R. (2016), *Mechanisms for CO<sub>2</sub> sequestration in geological formations*, Springer Theses.
  24. Koorevaar, P., Menelik, G., and Dirksen, C. (1983), *Elements of soil physics*. Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland).
  25. Kundu, P. (1990), *Fluid mechanics*, Academic Press, New York, p.355.
  26. Kwon, S.Y. and Lee, S. (2012), “Precise Measurement of Thermal Conductivity of Liquid Over a Wide Temperature Range Using a Transient Hot-wire Technique by Uncertainty Analysis”, *Thermochim. Acta*, Vol.542, pp.18-23.
  27. Lapwood, E.R. (1948), “Convection of a Fluid in a Porous Medium”, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, Vol.44, pp.508-521.
  28. Lewis, R.W., Nithiarasu, P., and Seetharamu, K. N. (2004), *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*, Wiley, p.356.
  29. Lundgren, T.S. (1972), “Slow Flow through Stationary Random Beds and Suspensions of Spheres”, *J. Fluid Mech.*, Vol.51, pp. 273-299.
  30. Malkovsky, V.I. and Pek, A.A. (2015), “Onset of Fault-bounded Free Thermal Convection in a Fluid-saturated Horizontal Permeable Porous Layer”, *Transport in Porous Media*, Vol.110, pp.25-39.
  31. Manohar, K., Yarbrough, D.W., and Booth, J.R. (2000), “Measurement of Apparent Thermal Conductivity by the Thermal Probe Method”, *J. Test. Eval.*, Vol.28, No.5, pp.345-351.
  32. Meißner, K., Schabelon, H., Bellebaum, J., and Sordyl, H. (2006), *Impacts of submarine cables on the marine environment -A literature review*.
  33. Nield, D.A. and Bejan, A. (2006), *Convection in porous media*, Springer, New York.
  34. Nithiarasu, P., Seetharamu, K.N., and Sundararajan, T. (1997), “Natural Convective Heat Transfer in an Enclosure Filled with Fluid Saturated Variable Porosity Medium”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.40, No.16, pp.3955-3967.
  35. Simmons, C.T. (2005), “Variable Density Groundwater Flow: from Current Challenges to Future Possibilities”, *Hydrogeol. J.*, Vol.13, pp.116-119.
  36. Tarnawski, V.R., Momose, T., and Leong, W.H. (2011), “Thermal Conductivity of Standard Sands II. Saturated Conditions”, *Int J Thermophys*, Vol.32, No.5, pp.984-1005.
  37. Vadasz, P. (2008), *Emerging topics in heat and mass transfer in porous media*, Springer, New York.
  38. Vafai, K. (2005), *Handbook of porous media*, Taylor & Francis, Boca Raton, FL.
  39. Van Dam, R.L., Simmons, C.T., Hyndman, D.W., and Wood, W.W. (2009), “Natural Free Convection in Porous Media: First Field Documentation in Groundwater”, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.36, L11403.
  40. Wang, L., Hyodo, A., Sakai, S., and Suekane, T. (2016), “Three-dimensional Visualization of Natural Convection in Porous Media”, *Energy Procedia*, Vol.86, pp.460-468.
  41. Worzyk, T. (2009), *Submarine power cables: Design, installation, repair, environmental aspects (Power systems)*, Springer, p.318.

Received : January 11<sup>th</sup>, 2017

Revised : February 16<sup>th</sup>, 2017

Accepted : February 17<sup>th</sup>, 2017