

지중온도 변화 예측을 위한 지표면 경계조건 검토

Assessment of Surface Boundary Conditions
for Predicting Ground Temperature Distribution장 창 규¹ Jang, Changkyu최 창 호² Choi, Changho이 철 호³ Lee, Chulho이 장 근⁴ Lee, Janguen

Abstract

Soil freezing is a phenomenon arising due to temperature difference between atmosphere and ground, and physical properties of soils vary upon the phase change of soil void from liquid to solid (ice). A heat-transfer mechanism for this case can be explained by the conduction in soil layers and the convection on ground surface. Accordingly, the evaluation of proper thermal properties of soils and the convective condition of ground surface is an important task for understanding freezing phenomenon. To describe convection on ground surface, simplified coefficient methods can be applied to deal with various conditions, such as atmospheric temperature, surface vegetation conditions, and soil constituents. In this study, two methods such as n-factor and convection coefficient for the convective ground surface boundary were applied within a commercial numerical program (TEMP/W) for modeling soil freezing phenomenon. Furthermore, the numerical results were compared to laboratory testing results. In the series of the comparison results, the convection coefficient is more appropriate than n-factor method to model the convective boundary condition.

요 지

지반의 동결현상은 일반적으로 대기와 지반의 온도차이로 발생하는 열흐름에 의해, 지반에 존재하는 물이 동결되어 지반의 물리적 성질이 변하는 현상을 일컫는다. 동결현상 해석에 필요한 지중온도 변화는 크게 대기와 지반의 경계층에서 발생하는 열유동과 지중 내에서 흙을 구성하는 성분들의 열전도 현상으로 설명할 수 있다. 따라서 지표면의 경계조건과 지반의 열적 특성은 동결지반 온도분포 해석에 중요한 인자들이다. 지표면 경계조건은 대기온도, 지표의 식생상태, 토질조건을 포함한 간편상수법들이 제시되어 있다. 대기온도 변화에 따른 지표의 열전달을 설명하는 대표적인 열물성 값은 지표면에서의 n-factor와 대류 열전달계수이다. 본 연구에서는 대기와 지반의 경계층을 해석하는데 필요한 지표면 n-factor와 대류 열전달계수의 적용성을 분석하고자 실내실험을 수행 하였다. 실내실험 결과를 토대로 상용 수치해석 프로그램인 TEMP/W를 이용하여 각각의 경계층 조건에 따른 지중온도 변화를 해석하고 실내실험을 통해 측정된 온도 데이터와 비교하였다. 결론적으로 n-factor보다 지표면 대류 열전달계수를 적용한 수치 해석 모델이 실내실험 결과와 유사하였다.

Keywords : Ground surface boundary, n-factor, Convection coefficient, Frozen soil, Heat transfer

1 비회원, 과학기술연합대학원대학교 석사과정 (Graduate Student, Univ. of Science and Technology)

2 정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Eng. Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Construction and Technology)

3 정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 전임연구원 (Member, Research Specialist, Geotechnical Eng. Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Construction and Technology)

4 정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Eng. Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Construction and Technology, Tel: +82-31-910-0791, Fax: +82-31-910-0211, jlee@kict.re.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지중의 동결현상은 대기와 지반의 열흐름(heat transfer)으로 인해서, 지표에서 지중으로 확산되는 열에너지로 해석된다(Smith and Riseborough, 1996). 특히 지반의 동결현상은, 대기와 지표의 온도 차로 인해 발생하는 열흐름에 의해 지반에 존재하는 물이 동결되어 지반의 물리적 성질이 변하는 현상을 일컫는다. 그러므로 지반에서 열흐름(heat transfer)은 크게 대류를 통해 열에너지가 지표면으로 유입 또는 방출되는 지표면 경계조건과 지중에서 토립자간 열에너지의 열전도(conduction) 형태로 설명된다.

대기에서 지표로 투입 또는 방출되는 열에너지는 대기온도 조건보다 지표 부근에 존재하는 자연환경 및 생태환경, 지질학적 요소 등 지반의 공간적 변동성이 크게 영향을 미치기 때문에, 대기온도를 직접적으로 지표에 투입되는 열에너지로 결정하는 것은 극히 일부 지역으로 제한된다(Taylor, 1995; Klene et al., 2001). 따라서 지표에 투입되는 열에너지를 산정하기 위해 사용되는 방법은 대표적으로 n-factor(Calson, 1952) 방법과 뉴턴의 열 냉각이론을 응용한 지표면 대류 열전달계수(convection coefficient)를 사용하는 방법이 있다(Hassan, 1978). 이들 방식은 대기와 지표의 온도 및 지반조건을 바탕으로, 지표면에서의 열유속(heat flux)에 상응할 수 있는 모델링 방법을 제시하고 있다.

n-factor는 동계기간 동안 측정된 대기온도와 지표부근에서 측정한 온도데이터를 바탕으로, 지중 온도변화에 충족할만한 지표의 온도계수를 산출한다(Calson, 1952). 이 방식은 대기로부터 지표에 투입되는 열유속을 온도계수로 단순 수치화 할 수 있기 때문에 지반조건 및 생태환경, 식생 등 지표 위에 존재하는 다양한 환경 조건 등을 반영할 수 있다. 하지만 n-factor는 대기온도 변화 및 토사의 불균질한 특성 때문에 현장실험으로부터 적합한 온도계수를 산출하는데 어려움이 있으며, 동일 지반에서도 거리를 변화시키며 지표와 대기온도 변화를 측정해야 한다(Klene et al., 2001).

지표면 대류 열전달계수는 지표에 투입되는 열유속을 산출하기 위해 필요한 보정계수로써, 지표의 수분증발과 대기의 접촉으로 인하여 형성되는 대류현상을 바탕으로 지반의 열유속에 상응하는 일정계수를 도출하고 있다. 이 방식은 지표면에 접촉하는 유체의 상태 및 유체 이동에 영향을 주는 대기 및 지반 조건에 따라 자

연대류와 강제대류로 나누어 지표면 대류 열전달계수를 정의하고 있으며, 지표에 함유된 공기, 가스, 오일과 같은 유체의 증발현상을 세분화하여 수치화한다(Freitag, 1997).

지금까지 연구된 논문에서는 n-factor와 지표면 대류 열전달계수 방법을 이용한 지중온도 분포를 예측하는 방법에 대하여 적용타당성을 비교한 연구가 미미하다. 본 논문에서는 토사의 실내동결실험을 통해 측정된 지중온도 데이터를 비교대상으로 설정하고 n-factor와 대류 열전달계수 경계조건을 적용하여 해석결과의 신뢰성을 검토하고자 한다. 본 연구에서는 지표면에서의 열흐름을 분석하기 위해 모형토조 동결시험, QTM(quick thermal-conductivity meter)을 이용한 상온토사 열전도도 측정, 열해석 프로그램인 TEMP/W를 활용하여 모형토조 동결모델링을 수행하였다. 항온챔버를 이용한 실내 모형 시험은 대기조건을 영하 10°C의 상태로 제어하였으며, 대기 온도에 의해 지표에 투입되는 열유속을 균일하게 하기 위해 지반을 수분 포화상태로 조성하였다. 기존 연구에서 제시하는 표준사의 열전도도 경험식과 실내모형시험에서 산출된 열물성치를 수치해석에 반영하여, 지표면 경계조건에 입력한 n-factor와 대류 열전달계수를 이용한 해석결과가 실내 시험에서 측정된 토조 내의 동결시료 내부의 온도분포와 일치하는지 서로 비교하였다.

2. 열유속을 통한 지표 경계조건

n-factor(Calson, 1952)는 대기온도와 지표의 온도에 차이가 발생할 때 지표에 투입 또는 방출되는 열에너지를 지표 위에 존재하는 눈(snow), 식생환경, 토사조건 등을 반영하여 산정한다(Kade et al., 2006). 산출방법은

Table 1. n-factor values for various surface conditions (Andersland and Ladanyi, 2003)

Surface Type	Freezing (n_f)
Snow	1.0 (under snow)
Pavement free of snow and ice	0.9 (under snow)
Turf	0.5
Sand and gravel	0.9
Gravel	0.6–1.0
Probable range for northern conditions	0.9–0.95
Asphalt pavement	0.29–1.0 or greater
Concrete pavement	0.25–0.95

분을 X선 회절분석(X-ray diffraction, XRD)을 이용하여 분석하였으며, 그 결과 주문진 표준사는 석영(quartz) 76.4%, 정장석(orthoclase) 23.6%로 구성되어 있다(Table 4).

3.2 실험장치 및 시료조성

토사의 동결 실험을 위해 아크릴 모형 토조(40×40×35cm)를 2개 제작하였으며, 영하 10℃로 대기온도를 제어할 수 있는 항온챔버의 중앙에 모형토조를 배치하여 온도에 따른 토조 내부의 온도 변화를 측정하였다. 아크릴 모형 토조가 배치된 항온챔버는 200cm(W)×300cm(L)×250cm(H)의 크기이며, ±1℃ 온도분포를 통하여 영하 20℃에서 0℃까지 온도제어가 가능하다. 토사의 상대밀도가 31%와 55%가 유지되도록 3개층으로 나누어 분할 다짐 및 수분포화를 실시하였다.

Fig. 2는 항온챔버에 배치된 각 모형토조의 제원과 센서의 위치, 토조에 배치된 스티로폼 단열재의 열전도도의 모식도를 보여준다. 항온챔버의 외기온도 저하에 따른 모형 지반의 표면과 내부의 온도변화를 관찰하기 위

Table 4. Mineralogical analysis of Jumoonjin sand using X-Ray Diffraction (XRD)

Minerals	Quartz	Orthoclase
Contents (%)	76.4	23.6

해 영하 20℃에서도 측정 가능한 온도센서를 사용하였으며, 토조의 온도가 지표에서 심층부로 저하 될 수 있도록 챔버 냉각기 중앙에 배치하였다. 토조에 배치된 온도센서들은 총 8개이며, 센서 중 5개는 표층에서 2cm 간격으로 배치하였고 나머지 1개는 토조의 바닥에 배치하였다. 대기온도 센서는 총 2개로 시료의 표면에서부터 10cm와 30cm 상부에 설치하였다. 모형토조 내부의 시료가 지반의 표층에서부터 심층부로 동결될 수 있도록, 상부를 제외한 하부(바닥)와 측면 경계를 스티로폼 단열재(열전도도=0.04W/m·K, 두께=5cm)로 마감하였다. 따라서 항온챔버에서 생성된 차가운 공기는 토조의 측면 및 하부에 직접적인 영향을 미치지 않도록 제어하고 모형토조의 상부에서부터 하부로 1차원 열전달이 되도록 시료를 준비하였다. 토조 내부의 균일한 초기 온도 형성과 포화를 위해 상온에서 토조를 약 48시간 방치한 후 항온챔버에서 토사의 동결실험을 수행하였다.

4. 수치해석을 통한 지중의 동결현상 모델화

4.1 개요

대기온도 저하에 따른 지중의 동결현상을 유한요소 해석 프로그램인 TEMP/W를 활용하여 구현하였다. 수치해석에서는 지반의 규모, 대기의 경계조건, 토사에 적

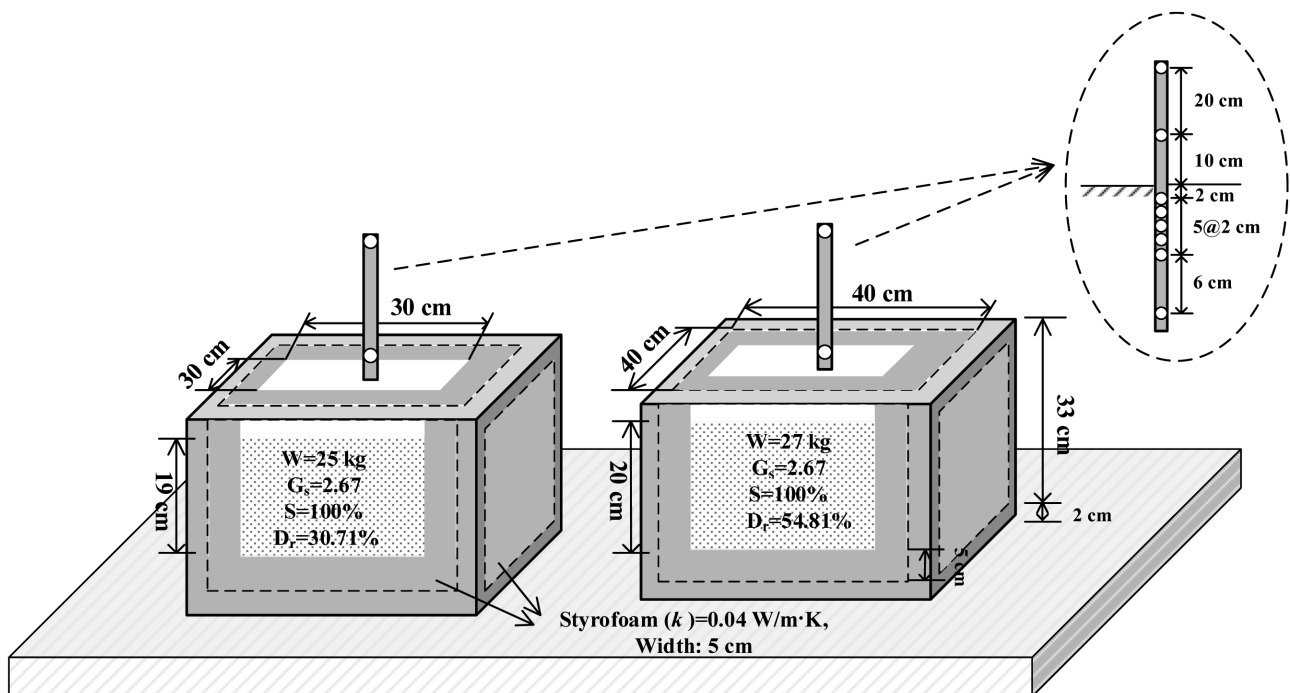


Fig. 2. Schematic diagram of freezing test specimens for Jumoonjin sand

용될 재료의 열물성치를 필요로 하며, 재료의 열전도도, 비동결 함수비, 체적당 토사의 함수비를 해석에 반영하였다. 본 연구에서는 실내모형시험을 TEMP/W에 반영하기 위해서 열전도도 실내 측정 결과를 고려한 경험식을 사용하였으며, 대기온도가 모형토조에 연직방향으로

만 영향을 주도록 수치 모델에서도 측면과 바닥에는 열 흐름이 차단되도록 경계조건을 설정하였다. TEMP/W의 외기조건은 실내실험을 통해 측정된 항온챔버의 외기온도 데이터를 기반으로 입력하였으며, TEMP/W 모델에서 지표에서의 수분증발 현상은 고려하지 않았다. Fig. 3은 TEMP/W에서 모사한 모형 토조 모델(상대밀도 55%의 토조)이며, 2차원 축대칭 모델을 사용하여 표현하였다.

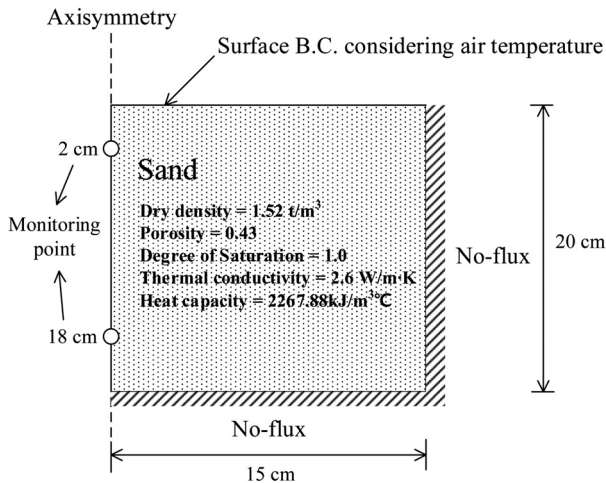


Fig. 3. TEMP/W numerical model for the freezing test of Jumoonjin sand ($D_r=55\%$)

4.2 표준사의 열물성 입력치

실내실험 측정결과와 경험식으로 산정된 열물성치, 토조 내부의 초기 온도, 경계조건을 TEMP/W에 입력하여 해석 결과와 실내실험 온도 측정 데이터를 비교 분석하였다. Table 5에 정리된 시료의 동결 및 비동결 열용량(unfrozen and frozen heat capacity)과 간극수의 잠열(latent heat)은 토조의 용적률(volumetric ratio)을 바탕으로 산출하였다(Osterkamp and Burn, 2003; Oraldo and Ladanyi, 2004; Oh, 2012). 시료 동결에 따른 체적 부동 수분비를 측정된 결과 미미하여 수치해석 입력조건에

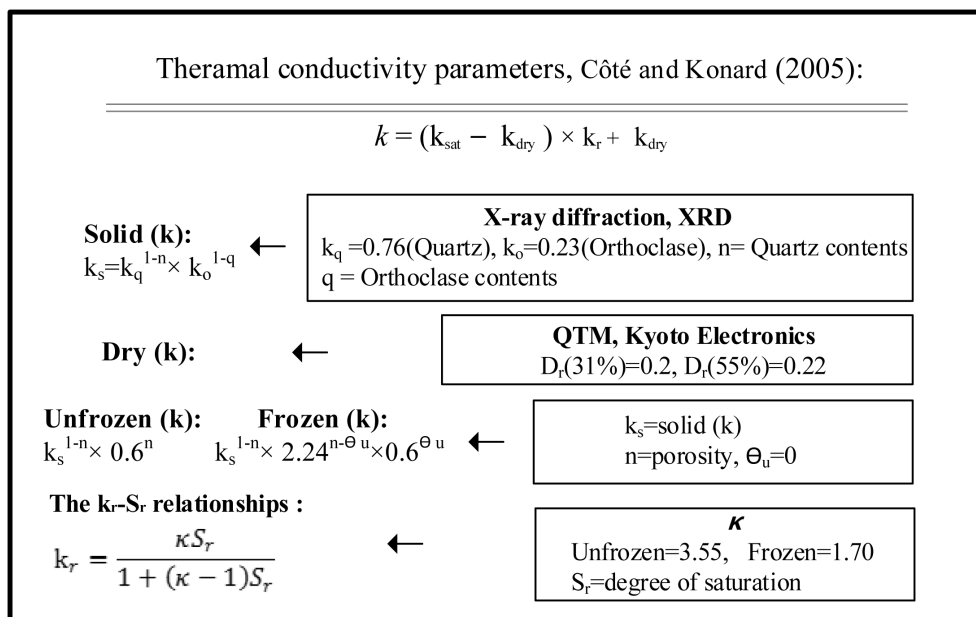


Fig. 4 Thermal conductivity calculation for unfrozen and frozen Jumoonjin sand

Table 5. TEMP/W input parameters of Jumoonjin sand

Volumetric of Jumoonjin sand	Relative density (31%)	Relative density (55%)
Un Frozen Heat Capacity ($\text{kJ/m}^3\text{°C}$)	2367.173	2267.88
Frozen Heat Capacity ($\text{kJ/m}^3\text{°C}$)	1408.501	1371.13
Latent Heat Water ($\text{kJ/m}^3\text{°C}$)	3.34×10^5	3.34×10^5
Initial Volumetric Water Contents (m^3/m^3)	0.44	0.43

서는 모든 간극수가 영하의 조건에서 동결된다고 간주하였다.

지표에 투입된 열에너지는 토사에 포함된 수분량에 따라 변화하며, 지반 열전도의 물리적 특성을 반영하는 열전도도를 통해 수치화 할 수 있다. Kerstern(1949)과 Johansen(1977), Côté and Konard(2005)의 열전도도 경험식은 토립자의 크기 및 동결과 융해에 따른 열전도도를 산출 할 수 있지만, 실제 토립자와 물의 구조를 반영하고 있지 않기 때문에 낮은 함수비에서 실측값과 비교할 때 오차가 발생할 우려가 있다(Farouki 1986; Lu et al., 2007). 본 연구에서는 주문진 표준사의 적정 열전도도를 산출 하기 위해, 열전도도 측정 장비(QTM, Kyoto Electronics)를 이용하여 상온 상태에서 토사의 포화 및 건조 상태의 열전도도를 측정 하였다. 측정한 주문진사의 포화 및 건조 상태의 열전도도 값과 Fig. 4의 방법을 이용하여 상온상태에서 Côté and Konard(2005)의 계수($\kappa=3.55$)를 산정하였으며 동결상태에서는 조립질 모래에 해당하는 값으로 $\kappa=1.7$ 을 사용하였다.

5. 실험결과 및 수치해석 비교

5.1 모형토조 실험결과

영하 10°C로 제어된 항온 챔버 내에 상대밀도가 다른 2개의 토조를 배치하고 약 10일동안 토사의 동결실험을 수행하였다. 각 토조들은 차가운 대기가 토조에 수직

방향으로만 영향을 미칠 수 있도록 토조 외벽은 스티로폼으로 단열하였으며, 대기에 노출된 2개 센서 및 6개의 지중 온도센서들의 온도변화를 일정시간 기준으로 측정하였다.

대기에 노출된 2개의 온도센서는 3일 후에는 영하 9.6°C로 설정온도인 영하 10°C에 수렴하였다. 실험 결과로부터 토사시료는 0°C에서 토조의 표층부에서 빙정을 형성하면서, 심층부로 동결이 진행되는 현상을 지중 온도센서를 통해 확인할 수 있었으며, 5일 이후에는 6개의 온도센서 모두 영하 2°C이하로 급격하게 저하되기 시작하였다. Fig. 6은 시간 경과에 따라 지중에 설치된 6개의 온도센서의 결과를 평균하여 지중 온도변화를 분석한 것으로, 토립자 간격이 조밀한 토조(상대밀도 = 55%)는 열전도계수가 크므로 느슨한 토조(상대밀도 = 31%) 보다 영하 10°C로 수렴하는 기간이 약 0.7일 단축되는 것을 관측하였다.

Fig. 7은 시간의 경과에 따른 n-factor지수를 도식화한 것으로서, 식 (1)에서 지표에서 30cm 상부에 위치한 온도센서에서 측정한 항온챔버의 누적된 일 평균 대기온도와 시료에서 깊이 2cm에서 측정한 지표온도를 바탕으로 n-factor지수를 산정한 결과이다(Fig. 2). 실험 개시 전 측정된 0°C 이상의 대기 데이터는 고려하지 않았다. 실험초기 대기온도는 영하 10°C로 제어되었으므로 2개의 토조 모두 누적된 일평균 대기온도(FDDa)는 크게 증가한 반면, 누적된 일평균 지표온도(FDDs)는 액체와 얼음이 공존하는 잠열구간(0°C)을 벗어날 때까지 서

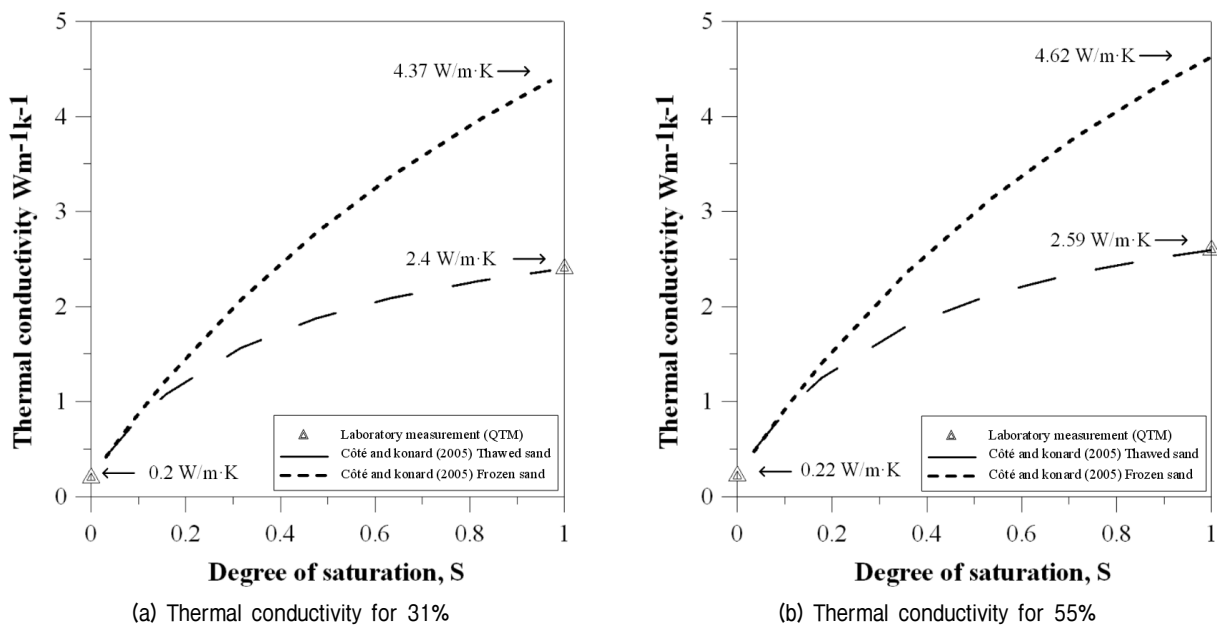


Fig. 5. Thermal conductivity with the degree of saturation for Jumoosin sand

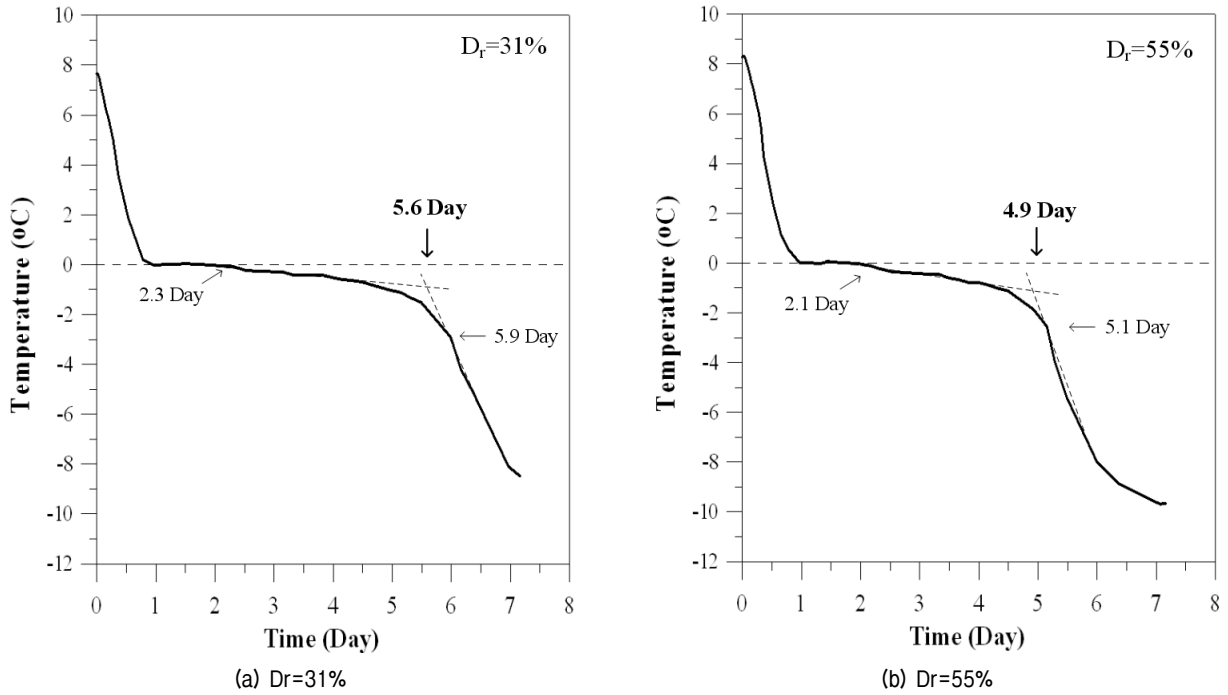


Fig. 6. Average temperature distributions in tested specimens

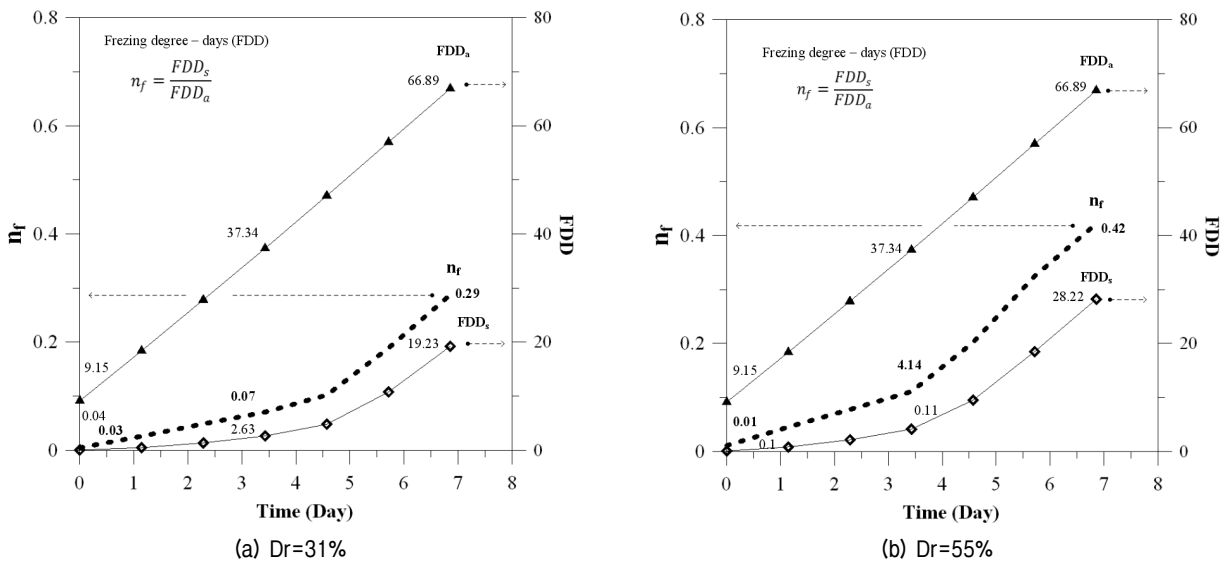


Fig. 7. Daily n-factors and cumulative FDDa and FDDs for Jumooinjin sand in freezing chamber

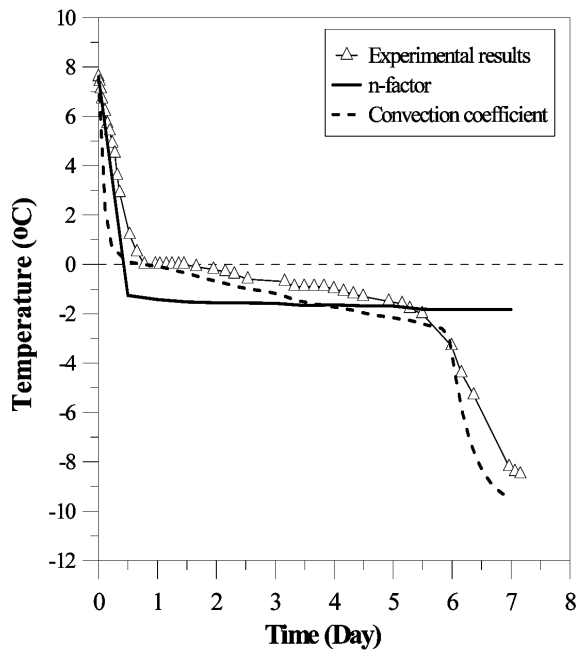
서히 증가하고, 잠열구간을 벗어나면 상대적으로 급격히 증가하고 있다. 또한 실험이 종료될 때까지 2개 토조들의 n-factor 수치는 증가하는 경향을 보였으며, 특히 조밀한 시료의 토조가 크게 증가하였다.

5.2 수치해석 결과

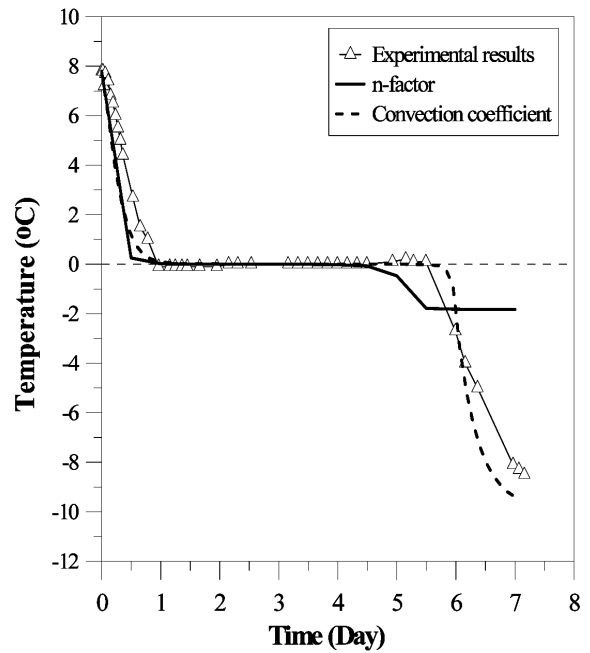
실내 모형실험과 경험식으로 산정된 주문진사의 열전도도, 토조 내부의 초기 온도, 경계조건 등을 TEMP/W

모델에 적용하고 시간의 경과에 따른 지반의 온도 분포를 수치해석적으로 분석하였다. 대기 경계조건은 실내 모형토조 동결실험에서 계측된 대기(30cm)와 지표온도 센서 데이터(2cm)를 바탕으로 상대밀도 31%인 시료에는 0.29, 상대밀도 55%인 시료에는 0.42를 수치해석 모델에 입력하였다. 지표면 대류 열전달계수는 자연대류를 기준으로 동결시료 내부의 온도분포와 일치하도록 역해석을 통해 도출하였다.

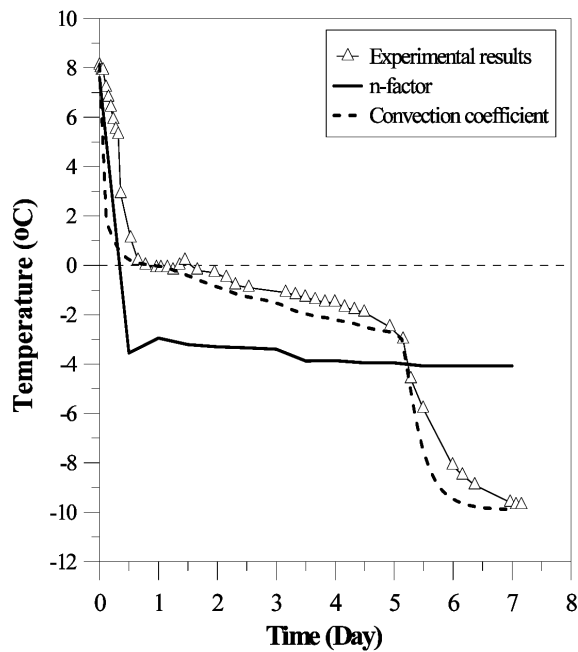
Fig. 8은 모델을 이용한 온도분포와 실내실험에서 측정



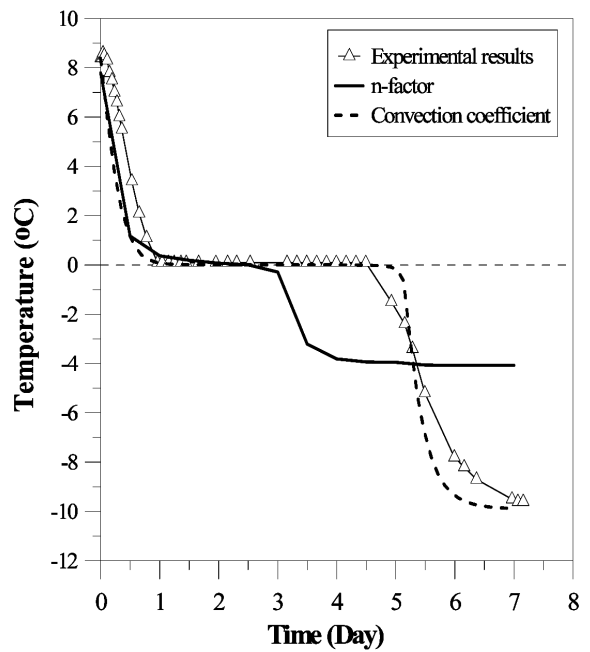
(a) Temporal temperature at 2cm depth (Dr=31%)



(b) Temporal temperature at 18cm depth (Dr=31%)



(c) Temporal temperature at 2cm depth (Dr=55%)



(d) Temporal temperature at 18cm depth (Dr=55%)

Fig. 8. Measured and predicted time dependent temperature variation

된 온도분포를 보여주고 있다. n-factor 경계조건을 적용한 수치해석결과의 경우에는 표층(2cm) 및 심층부(18cm) 모두 수치해석 결과가 모형토조의 실험결과와 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 실험초기 영하 10°C로 제어된 대기가 영상 8°C로 유지된 시료의 지표 유체와 접촉하면서 높은 열유속을 발생시켜 지반으로 확산되었기 때문이며, 이로 인해 대기온도와 표층 온도(2cm)를 바탕으로 열유속에 상응할 수 있는 n-factor를 정확히 산

출하는 것이 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 최근에는 현장에서 n-factor를 측정하고자 할 경우에는 온도센서를 지표로부터 깊이 20cm까지 배치하여 측정하도록 제시하고 있다(Karunaratn and Burn, 2003).

반면 지표면 대류 열전달계수를 경계조건으로 적용하여 수치해석을 수행한 결과, 상대밀도가 31%와 54%인 시료의 대류 열전달계수는 각각 $8\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 와 $10\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 이며, 표층(2 cm)과 심층부(18cm)까지 수치해석과 실내

실험의 온도분포가 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 두 시료 모두 지표층인 2cm부터 10cm까지는 실내실험의 온도분포와 다소 차이를 보였다. 이는 지표 부근의 높은 열유속 이외에도 수분증발을 포함한 대류 및 전도가 복합적으로 발생하는 지표경계조건의 영향을 고려하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 심층부인 18cm에 접근할수록 전체적인 지중의 온도분포와 수치해석의 온도분포는 일치하고 지표면 경계조건에 산출된 대류 열전달계수($8W/m^2 \cdot K$ 와 $10W/m^2 \cdot K$)는 Table 2에서 제시된 기존 열전달계수의 범위($6-28W/m^2 \cdot K$) 내에 포함되어 신뢰할만한 값으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 동토지역에서 지반의 동결시간을 분석한 기존 연구내용을 바탕으로, 지표면 경계조건(n-factor, 지표면 대류 열전달계수)에 따른 지반동결시 온도분포 수치해석 결과와 실내 동결실험에서 측정된 지중 온도 분포를 상호 비교분석하였다. 해석결과, 지표면 대류 열전달계수를 적용한 수치해석은 실내실험에서 관측된 시료 내부의 온도분포와 유사한 거동을 보였지만 n-factor를 적용한 해석은 지표(2cm)에서 심층부(18cm)에 이르는 모든 측정된 온도데이터와 상이한 결과를 보였다. 본 연구를 통해 분석된 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 모형토조 동결시험을 토대로 수치해석 프로그램인 TEMP/W에 지반의 열물성치 등을 적용하여 시간에 따른 지중의 동결현상을 모델링하였다. 모델링 된 지반의 지표면 경계조건에서 지표면 대류 열전달계수(상대밀도 31% 토조= $8W/m^2 \cdot K$, 상대밀도 55% 토조= $10W/m^2 \cdot K$)를 도출하였으며, 해석결과 전반적인 온도분포는 실내실험과 수치해석이 유사한 경향을 보였다. 특히 2개 토조 모두 표층부를 제외한 심층부에서 실내실험의 온도분포와 일치하는 경향을 보였다. 이는 지표에서 수분증발의 영향을 수치해석에서는 고려할 수 없기 때문으로 판단된다.
- (2) 약 7일동안 2cm에서 측정된 온도센서 데이터를 바탕으로 n-factor를 산정하여 TEMP/W 모델의 경계조건에 적용한 결과 실내실험과 수치해석 모두 표층에서 심층부에 이르는 온도분포가 상이한 경향을 보였다. 이는 지표의 경계조건에서는 열전도와 대류현상이 복합적으로 작용하여 지표 일정 부근에서

높은 열유속이 발생하였기 때문이며, 지표 2cm에서 측정된 온도 데이터를 바탕으로 지중의 동결현상 해석에 적절한 n-factor 수치를 산정하는 것이 타당하지 않음을 의미한다. 따라서 현장에서 n-factor를 산정하고자 한다면 가급적 표층부에서 20cm까지 측정된 지중온도를 바탕으로 선정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 “극한지 하부구조 급속시공 플랫폼 기술개발” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (2004), *Frozen Ground Engineering Second Edition*, ASCE, John Wiley & Sons. Inc, pp.58-61.
2. Carlson, H. (1952), “Calculation of depth of thaw in frozen ground”, *In: Frost Action in Soils: A Symposium. U.S. National Research Council*, Highway Research Board, Washington, DC, pp.192-223.
3. Chen, S. X. (2008), “Thermal conductivity of sands”, *Institute of Rock and Soil Mechanics*, Vol.44, No.10, pp.1241-1246.
4. Cote, J. and Konrad, J. M. (2005), “A Generalized Thermal Conductivity Model for Soils and Construction Materials”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, No.2, pp.443-458.
5. Farouki, O. T. (1986), *Thermal properties of Soils*, Series on Rock and Soil Mechanics Vol.11, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp.91-116.
6. Freitag, D. R. and McFadden, T. (1997), *Introduction to cold regions engineering*, New York: ASCE Press, pp.47-78.
7. Hassan, I. (1978), *Energy exchange at atmosphere - Earth interface*, UMI Number:EC52376, pp.1-8.
8. Johansen, O. (1977), *Thermal Conductivity of Soils*, Ph.D. dissertation, Trondheim, Norway (U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) Draft Translation637, Hanover, N.H., 1977, pp.248-253.
9. Kade, A., Romanovsky, V. E., and Walker, D. A. (2006), “The N-factor of Nonsorted Circles Along a Climate Gradient in Arctic Alaska”, *Wiley Inter Science*, Vol.17, pp.279-289.
10. Karunaratne, K. C. and Burn, C. R. (2003), “Freezing n-factors in discontinuous permafrost terrain, Takhini River, Yukon Territory, Canada”, *In: Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zurich: University of Zurich-Irchel, pp.519-524.
11. Kersten, M. S. (1949), *Laboratory Research for the Determination of the Thermal properties of Soils*, ACFEL Technical Report 23, pp.153-182.
12. Klene, A. E., Nelson, F. E., and Shiklomanov, N. I. (2001), “The N-factor in natural landscapes: variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk river basin, Alaska”, *Antarctic and Alpine Research*, Vol.33, No.2, pp.140-148.
13. Lu, S., Ren, T., Gong, Y., and Horton, R. (2007), “An improved

- model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature”, *SSSAJ*, Vol.71, No.1, pp.8-14.
14. Osterkamp, T. E. and Burn, C. R. (2003), *Permafrost*, in *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, edited by J. R. Holton, pp. 1717-1729.
15. Oh, M. Y. (2012), *An Experimental study on the Creep Behavior of Frozen Soils*, Dankook Univ., Seoul, pp.7-34.
16. Smith, M. W. and Riseborough, D. W. (1996), “Permafrost monitoring and detection of climate change”, *Permafrost and periglacial processes*, Vol.7, Issue 4, pp.301-309.
17. Taylor, A. E. (1995), “Field measurements of n-factors for natural forest areas, Mackenzie Valley, Northwest Territories”, *Geological Survey of Canada*, Current Research, 1995-B, pp.89-98.
- (접수일자 2013. 7. 30, 수정일 2013. 8. 14, 심사완료일 2013. 8. 19)