

간극수 염분농도에 따른 동결 사질토의 부동수분곡선 산정 및 검증 연구

Measurement and Verification of Unfrozen Water Retention Curve of Frozen Sandy Soil Based on Pore Water Salinity

김 희 원¹ Kim, Hee-Won
고 규 현² Go, Gyu-Hyun

Abstract

The characteristics of unfrozen water content in frozen soils significantly impact the thermal, hydraulic, and mechanical behavior of the ground. A thorough analysis of the unfrozen water content characteristics of the target subsoil material is crucial for evaluating the stability of frozen ground. This study conducted indoor experiments to measure the freezing point and unfrozen water content of sandy soil while considering pore water salinity. Utilizing the experimental data, we introduced a novel empirical model to conveniently estimate the unfrozen water retention curve. Furthermore, the validity of the unfrozen water retention curve was assessed by comparing the experimental data with the results of a simulation model that utilized the proposed empirical model as input data.

요 지

동결토의 부동수분특성은 지반의 열-수리-역학적 거동 전반에 걸쳐 지배적인 영향을 미치며, 동결 지반의 안정성 평가를 위해서는 대상 지반재료의 부동수분특성에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 간극수 염분농도를 고려한 동결 사질토의 부동수분곡선을 평가하기 위하여 흙의 어는점 및 부동수분을 측정하는 실내 실험을 수행하였으며, 계측된 실험데이터를 기반으로 부동수분포화도 곡선을 간편하게 추정할 수 있는 경험적 모델을 새롭게 제시하였다. 또한, 제안된 경험적 모델을 입력자료로 적용한 해석모델의 시뮬레이션 결과를 실험데이터와 비교함으로써 사용된 부동수분곡선의 적정성을 검증하였다.

Keywords : Freezing point depression, Frozen sandy soil, Numerical simulation, Salinity, Unfrozen water retention curve

1. 서 론

일반적인 지반 구성과 달리 동결토는 흙입자, 공기, 얼음, 그리고 부동수분이 존재하는 4상 구조 또는 흙입

자, 얼음, 그리고 부동수분으로 구성된 3상의 형태로 구성된다. 이 중, 부동수분은 영하의 온도 조건에서 얼지 않는 상태로 남아있는 간극수분으로서 동결토의 강도 및 변형, 열-수리학적 거동 변화에 영향을 미친다. 일

1 비회원, 금오공과대학교 토목공학과 석사과정 (Master Student, Dept. of Civil Engr., Kumoh National Institute of Technology)

2 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engr., Kumoh National Institute of Technology, Tel: +82-54-478-7620, gyuhungo@kumoh.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

례로, 동결토의 부동수분은 흙 입자 간 결합력을 유연하게 하여 동결토의 강도 및 강성을 저하시키기도 하며 (Ohrai, 1986; Kweon, 2003; Liu, 2014; Kim et al., 2016), 모세관 현상에 의해 상승한 지하수가 부동수막을 통하여 동결수반층 상부에 아이스렌즈를 형성시키기도 한다(Watanabe and Mizoguchi, 2002; Thomas et al., 2009; Shin and Park, 2003). 또한, 동결지반의 부동수분특성은 모관의 극저온 흡입력, 지하수 흐름 등과 같은 열-수리학적 거동에도 영향을 미친다(Burt and Williams, 1976; Zhou and Meschke, 2013). 이처럼, 동결토의 부동수분 특성은 동결 지반의 열-수리-역학적 거동 전반에 걸쳐 지배적인 영향을 미치며, 이러한 이유로 동결 지반의 안정성 평가를 위해서는 대상 지반재료의 부동수분특성에 대한 면밀한 검토와 평가가 필수적이다.

동결토 부동수분의 측정 방식은 Fig. 1과 같이 센서 타입 방식과 정밀장비를 활용하는 방식으로 나누어지며 각각의 측정 방식에는 장단점이 있다. NMR(nuclear magnetic resonance)이라고 불리는 자기공명장치를 통한 측정이 가장 정확한 측정 방식으로 이용되고 있으나(Tice et al., 1976; Watanabe and Mizoguchi, 2002; Chen et al., 2021; Kruse et al., 2018), 장비 구축 비용이 매우 비싸다는 단점이 있다. FDR(frequency domain reflectometry)는 동결-융해 과정에서 부동수분 함량을 연속적으로 측정할 수

있으며 가격이 저렴하다는 장점이 있지만 간극수의 염분 함량과 토양 유형에 따라 일관적인 값을 추정하지 못해 정확도가 낮다는 한계가 있다(Yoshikawa et al., 2004; Li et al., 2020). 현재 많은 선행연구에서 TDR (time domain reflectometry) 센서를 이용한 시료의 부동수분을 계측하고 있다(Patterson and Smith, 1981; Spaans and Baker, 1995; Kim et al., 2002; Liu and Yu, 2013; Kim et al., 2016). TDR 방식은 탐침을 지반에 매설하여 탐침에서 흘러보낸 전자기파의 이동시간을 계측하여 매질의 상대유전율을 측정한 후, 관계식을 통해 체적함수비를 도출해 내는 방식이다. TDR 방식은 NMR 방식과 비교 시 측정 오차가 0.5% 안에 드는 것으로 보고된 바 있으며(Smith and Tice, 1988), NMR 가격 대비 측정 성능이 우수한 측정 방식으로 여겨진다.

한편, 관련된 선행연구들로부터 동결토의 부동수분특성을 추정하는 여러 경험적 모델이 제안되었고(Tice et al., 1976; Michalowski, 1993; Osterkamp and Romanovsky, 1997; McKenzie et al., 2007; Nishimura et al., 2009; Westermann et al., 2011; Zhou and Meschke, 2013; Nicolsky et al., 2017), 이 중 대표적인 모델들을 Table 1에 제시하였다. 경험적 모델들은 대부분 실험 데이터를 기반으로 제안되었으며, 동결수분과 토양온도와의 관계를 간편하게 예측할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

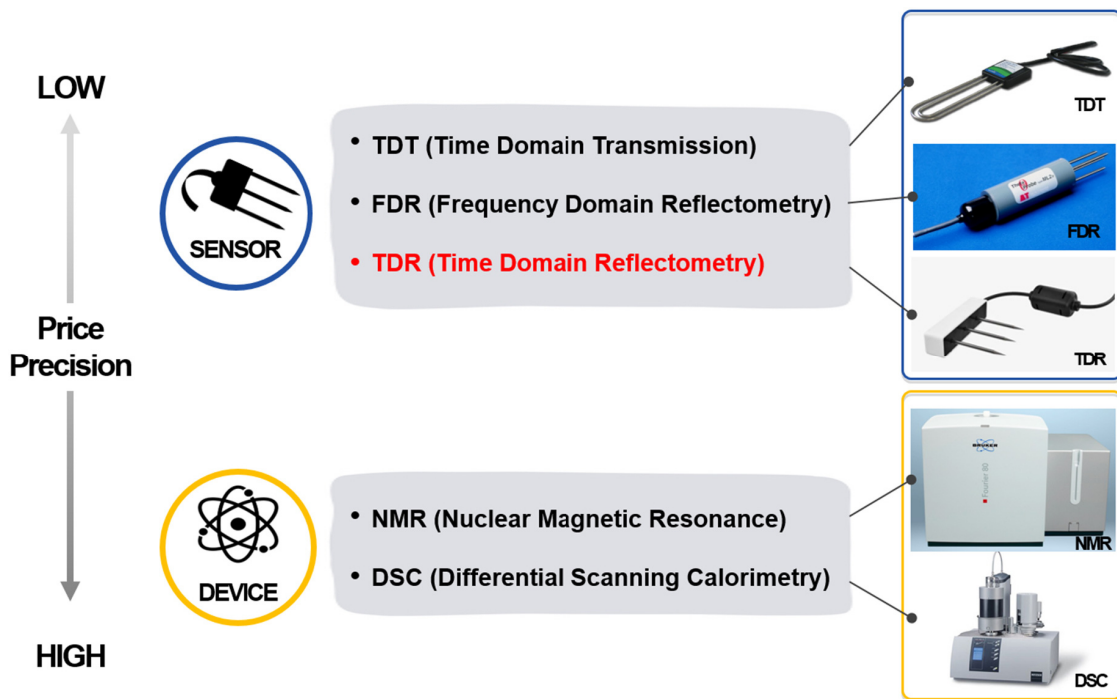


Fig. 1. Experimental technologies for the measurement of unfrozen water contents at subzero temperatures

Table 1. Empirical models established by unfrozen water content dataset

No.	Empirical model	Reference	Note
1	$S_w = \begin{cases} 1 & T \geq T_f \\ [1 - (T - T_f)^\alpha] & T < T_f \end{cases}$	Tice et al. (1976)	Max: 1 Min: S _r
2	$S_w = \begin{cases} 1 & T \geq T_f \\ \left(1 + \left(\frac{T_f - T}{\Delta T_{ch}}\right)^{\frac{1}{1-m}}\right)^{-m} & T < T_f \end{cases}$	Zhou and Meschke (2013)	
3	$S_w = \begin{cases} 1 & T \geq T_f \\ \left(1 + \left(-\frac{L\rho_w \ln(T/T_f)}{a_v}\right)^{\frac{1}{1-m}}\right)^{-m} & T < T_f \end{cases}$	Nishimura et al. (2009)	
4	$S_w = \begin{cases} 1 & T \geq T_f \\ S_r + (1 - S_r) \exp\left[-\left(\frac{T - T_f}{\gamma}\right)^2\right] & T < T_f \end{cases}$	Mckenzie et al. (2007)	

*S_r is residual unfrozen water saturation

하지만, 최근 지반 동결과 관련된 시공 현상이 다변화되면서 해안 지역의 터널 건설 또는 암염 퇴적층의 갱도 건설에서 인공지반동결(artificial ground freezing) 기술을 적용한 엔지니어링 프로젝트가 늘고 있는데(Hu and Liu, 2017; Semin et al., 2022), 이 경우 지반 내 간극수의 염분농도에 따른 지반재료의 열적 특성 변화에 대한 평가가 매우 중요하다. 기존에 흙의 부동수분곡선을 추정하는 경험적 모델들은 대부분 담수지반조건을 기반으로 한 모델로서 간극수의 염분농도를 고려한 특성을 반영하기 어려운 한계가 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 간극수 염분농도를 고려한 동결토의 부동수분곡선을 평가하기 위해 간극수의 염분농도를 달리한 시료를 조성하여 각 시료 별 어는점 및 부동수분량을 측정하는 실험을 수행하였고, 측정된 실험데이터를 기반으로 부동수분포화도 곡선을 간편하게 추정할 수 있는 경험적 모델을 새롭게 제시하였다. 또한, 제안된 경험적 모델을 입력자료로 적용한 해석모델의 시뮬레이션 결과를 실험데이터와 비교함으로써 사용된 부동수분곡선의 적정성을 검증하였다.

2. 실내동결실험

2.1 어는점 측정실험

간극수의 염분농도는 흙의 어는점 변화를 포함하여 부동수분곡선 전반에 영향을 미친다. Fig. 2의 실험 결과에서 알 수 있듯이 간극수 염분농도가 증가하면 흙의

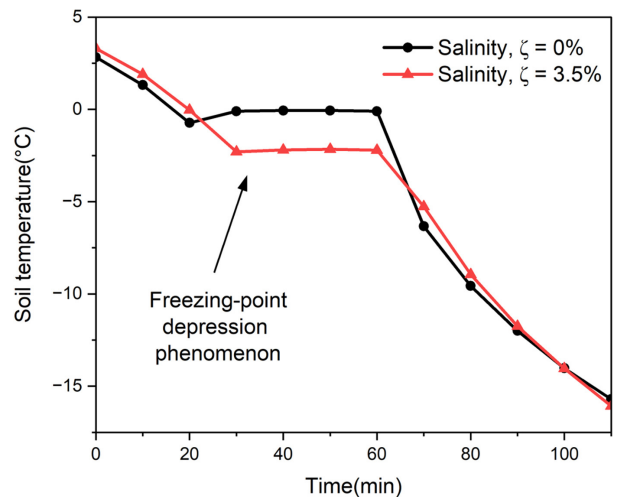


Fig. 2. Temperature distribution of sandy soil according to porewater salinity

어는점 내림 현상이 나타난다. 동결토 부동수분곡선을 추정하는 모델은 흙의 어는점(T_f)을 포함하고 있기 때문에(Table 1), 염수를 함유한 흙에 대해 부동수분곡선을 산정할 경우 간극수 염분농도에 따른 흙의 어는점을 신뢰성 있게 평가하는 것이 반드시 선행되어야 한다. 본 연구에서는 실내 동결실험을 통해 간극수 염분농도에 따른 사질토의 어는점의 변화를 살펴보았다. 사질토 재료인 주문진사를 미리 제조된 염수로 포화시킨 후 시료의 동결과정에서 확인되는 어는점(freezing point)을 기록하였다. 시료 조성에 있어 사용된 염수는 Instant Ocean 사의 인공소금(instant ocean sea salt)을 사용하였고, 인공소금을 목표 염도에 맞도록 계량한 후 증류수에

넣고 가열식 자력 교반기(hotplate with magnetic stirrer)를 이용하여 용해시켰다(Fig. 3). 인공소금 계량과 관련하여서는 ASTM D1141-98(2013)에 따른 인공 해수 제조법(국제표준)을 참고하였다. Table 2에 나타낸 바와 같이 자연해수(샘플 채취: 경주 나정항만)와 인공염수($\zeta = 3.5\%$ 로 제조)에서 측정된 염분농도는 각각 3.62%, 3.48%로서 매우 유사한 값을 나타내었다. 또한 자연해수와 인공염수로 각각 포화시킨 사질토에 대해 비정상 탐침법을 기반으로하는 METER group사의 열전도계(KD2-Pro)

를 사용하여 유효열전도도를 측정된 결과, 두 시료가 동결 및 비동결 상태에서 비교적 유사한 측정 결과를 보였다(Fig. 4). 이후, 다양한 간극수 염분농도 조건($\zeta = 0\% \sim 3.5\%$)에 대해 사질토 시료의 어는점을 측정하는 실험을 수행하였다. 측정 결과, 시료의 간극수의 염분농도가 커질수록 사질토의 어는점이 비선형적으로 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 5). 본 연구에서는 이러한 실내 실험 결과를 바탕으로 간극수의 염분농도별 시료의 어는점을 추정할 수 있는 경험식을 새롭게 제안하였다.

Table 2. Measured salinity of pure water, real sea water, instant sea water

Measured salinity (%)		
Pure water	*Real sea water	Instant sea water
0.00	3.62	3.48

*Collected from the sea off the coast of Gyeongju

$$T_f = -0.5758 \cdot e^{0.408 \cdot \zeta} + 0.535 \quad (1)$$

여기서, T_f 는 시료의 어는점($^{\circ}\text{C}$)이며, ζ 는 간극수의 염분농도(%)이다.

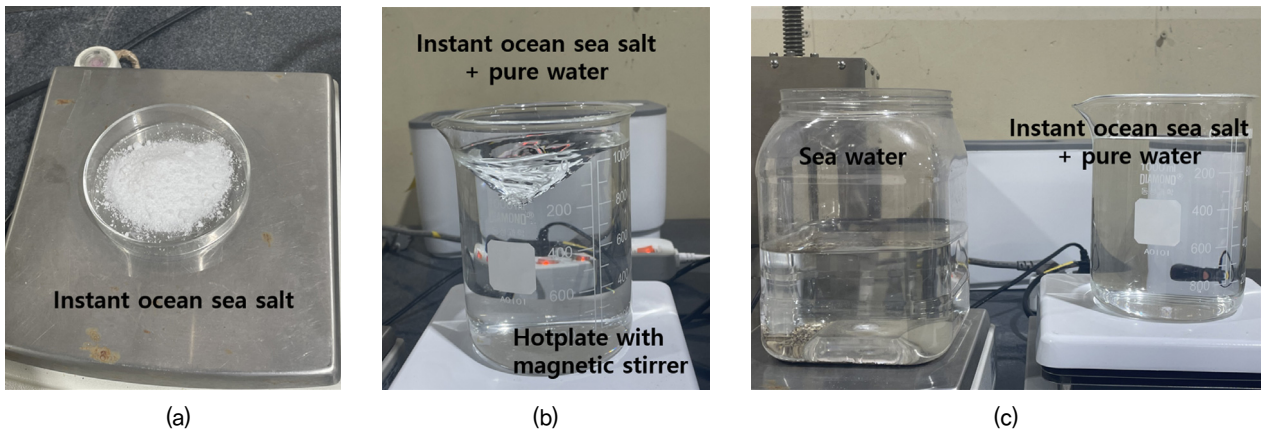


Fig. 3. Artificial salt water manufacturing process. (a) Weighing process to meet target salinity, (b) Salt dissolution process using hotplate with magnetic stirrer, (c) Preparation of sea water and artificial salt water

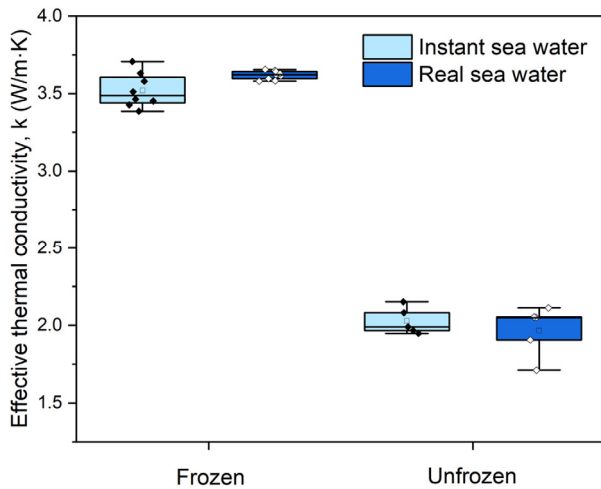


Fig. 4. Comparison of effective thermal conductivity of sandy soil with instant sea water and real sea water (initial gravimetric water content = 31%, porosity = 0.46)

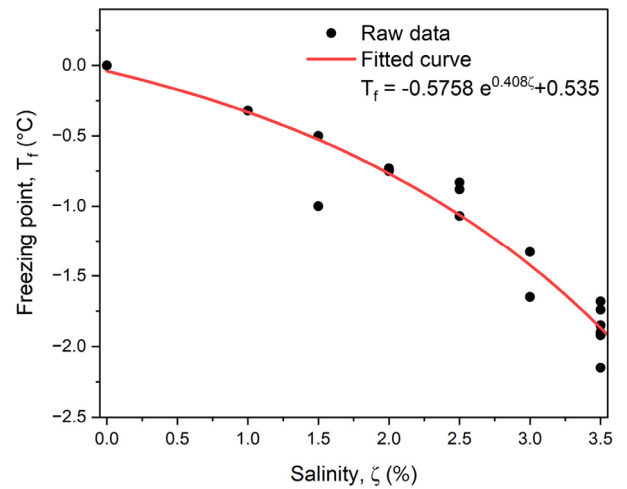


Fig. 5. Freezing point variation of sandy soil according to porewater salinity

2.2 부동수분 측정실험

사질토의 부동수분포화도 곡선을 산정하기 위해 두 가지 간극수 염분농도 조건($\zeta = 0\%$, 3.5%)에 대해 부동수분 측정실험을 수행하였다. 시료의 동결을 위해 사용된 챔버는 폭 500mm × 깊이 500mm × 높이 600mm의 규격으로서 챔버 내부 공기 온도를 최대 -90°C 까지 냉각시킬 수 있는 성능을 보유하고 있다. 챔버 내에 설치된 센서 고정 장치는 동결 중 간극수 상변화에 의한 체적팽창으로 야기될 수 있는 센서 이탈을 차단하도록 특수 제작되었다(Fig. 6). 시료는 직경(D) 14cm × 높이(H) 13cm 규격으로 조성하였고, 두 가지 염분농도 조건($\zeta = 0\%$, 3.5%)의 간극수로 시료를 각각 포화시켰다. 시료의 내부 온도가 -15°C 이하로 냉각될 때까지 동결실험을 진행하였고, Meter사의 TDR 센서(모델명: TEROS11)를 통해 시료의 부동수분량을 계측하되, 센서의 리더기를 챔버 바깥으로 빼내어 동결 중 실시간으로 시편 내부의 온도 및 부동수분량이 모니터링될 수 있도록 하였다.

Fig. 7은 두 가지 간극수 염분농도 조건($\zeta = 0\%$, 3.5%)에 대한 부동수분포화도곡선의 산정 결과를 보여준다. 어는점 이하의 온도 영역에서 계측된 부동수분특성곡선의 전반적인 양상은 지수함수적으로 감소하는 형태를 나타내었으며, 함유된 간극수의 염분농도가 높을수록 동결 직후의($0^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$) 부동수분곡선의 기울기는 상대적으로 완만해지는 경향을 나타내었다. 획득된 실험데이터를 기반으로 본 연구에서는 두 가지 간극수 염분농도 조건($\zeta = 0\%$, 3.5%)에 대해 사질토의 부동수분

포화도 곡선을 간편하게 산정할 수 있는 경험적 모델을 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$S_w = \begin{cases} 0.9109e^{0.4273(T-T_f)} + 0.1294, & \zeta = 0\% \\ 0.9589e^{0.2970(T-T_f)} + 0.1109, & \zeta = 3.5\% \end{cases} \quad (2)$$

여기서, S_w 는 부동수분포화도, T 는 흙의 온도, ζ 는 염분농도를 의미한다. 또한, T_f 는 흙의 어는점으로서 식 (1)과 같이 간극수 염분농도에 따라 달라지는 함수로 표현된다.

3. 수치해석

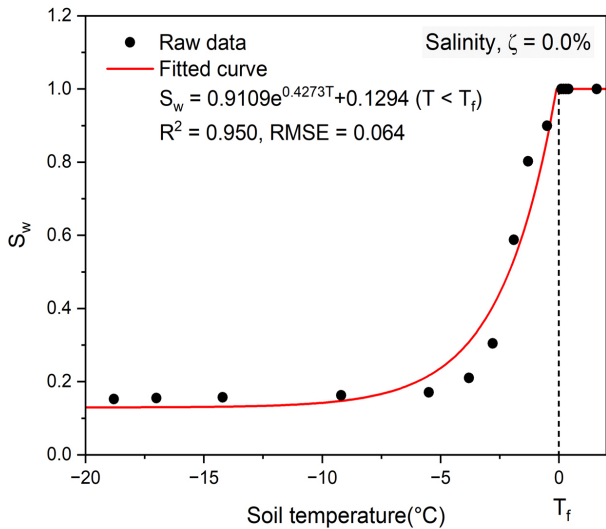
3.1 구성방정식

본 연구에서는 챔버 내 사질토의 동결과정을 모사하기 위한 수치해석모델을 구축하였다. 동결토 해석의 수식화는 열역학 이론을 기반으로 한다(Coussy, 2010; Coussy and Monteiro, 2007). 대상 시료인 사질토를 흡입자, 물, 얼음으로 이루어진 3상 구조로 간주하고 국부적인 온도 평형상태를 고려할 때, 동결에 의한 지반의 온도 변화는 다음과 같은 에너지 보존방정식을 통해 모사될 수 있다(Coussy, 2004; Michalowski and Zhu, 2006).

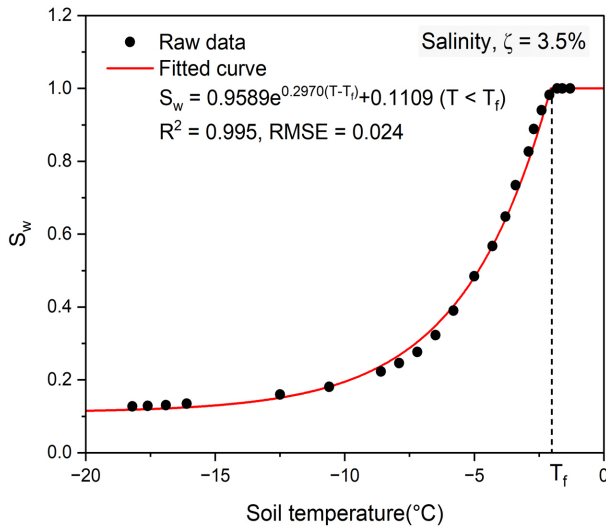
$$(\rho C - L\rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) \quad (3)$$



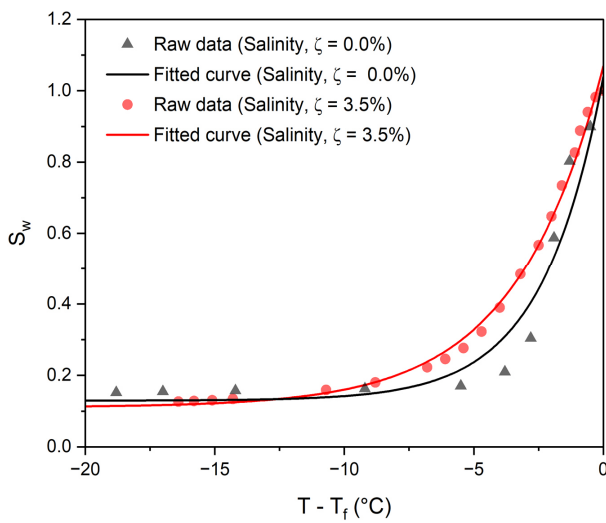
Fig. 6. Experimental setup for measurement of the unfrozen water content of frozen sandy soil



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Unfrozen water saturation curve according to porewater salinity. (a) $\zeta=0\%$, (b) $\zeta=3.5\%$, (c) comparison results in $T-T_f$ temperature domain

여기서, T 는 온도(K)이며, L 은 물의 단위 질량당 잠재 융해열(kJ/kg)을 의미한다. 식 (3)은 동결 시 간극수의 상 변화로 인한 에너지 방출을 나타내는 항이 포함되어 있으며, 지반의 체적 열용량 ρC 와 유효열전도도 λ 는 아래의 함수로 표현된다.

$$\rho C = \sum_j \rho_j C_j \theta_j \quad (4)$$

$$\lambda = \prod_j \lambda_j^{\theta_j}, \quad \text{where } \sum_j \theta_j = 1 \quad (5)$$

$$\theta_s = 1 - n, \quad \theta_w = n S_w, \quad \theta_i = n(1 - S_w) \quad (6)$$

$$S_w + S_i = 1 \quad (7)$$

여기서, θ 는 흙 시료의 체적분율(volume fraction)을 의미하며 아래첨자 j 는 흙입자, 물, 그리고 얼음을 뜻한다. 체적분율 θ 는 다시 흙입자의 부피분율(θ_s), 물의 체적분율(θ_w), 얼음의 부피분율(θ_i)로 구분되며 각각의 체적분율은 식 (6)과 같이 흙 시료의 간극률과 부동수분포화도(S_w)에 의해서 결정된다. 해석연구에서는 식 (2)에서 제안된 부동수분포화도곡선을 입력 인자로 사용하였으며, 이 곡선은 Fig. 7과 같이 간극수 염분농도에 따라 형태가 달라진다.

3.2 해석모형 및 경계조건

상기 기술된 구성방정식의 근사해를 산정하기 위해 상용 수치해석 코드인 COMSOL Multiphysics PDE module을 이용하였다(Comsol, 2023). 동결 실험에 사용된 시편은 3차원 원기둥 형상을 지니지만 해석의 효율화를 위해 원기둥의 수직단면만 고려한 2차원 모형을 사용하였다. 또한, Fig. 8과 같이 해석 영역은 동결 챔버 전체가 아닌 시료 영역까지만 고려하였고, 시료 바닥부 및 외곽부에는 식 (8)과 같은 열대류 경계조건을 부여하였다. 문헌에 따르면, 공기 매질에서의 자연대류(free convection) 발생 시 고려할 수 있는 대류열전달계수(convective heat transfer coefficient)의 대략적인 범위는 $6-30\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 로 알려져 있는데(Khayal, 2018), 본 연구에서는 제시된 범위의 중간값을 대류열전달계수로 적용하였다(Fig. 8). 또한, 실내 동결실험 시 동결챔버 내부와 맞닿아 있는 시료 바닥부는 열대류로 인한 냉각 효과가 상대적으로

적을 것으로 판단되어 외곽부의 80% 정도의 대류 열전달 계수를 사용하였다.

$$q|_{ext} = h_c(T_{ext} - T) \quad (8)$$

여기서, h 는 대류열전달계수($W/(m^2 \cdot K)$), T 는 계산된 시편 경계에서의 온도, T_{ext} 는 계측된 챔버 내부 공기 온도이다. 본 해석에는 총 4200개의 사각요소망(element mesh)이 사용되었으며, 해석 시간은 총 360분으로 설정

하였다. 또한, 해석모델에 적용된 재료물성은 Table 3에 제시하였다.

3.3 부동수분포화도곡선의 수치해석적 검증

Fig. 9는 사질토의 실내 동결실험 과정 중 얻어진 시료 온도 계측치와 실험을 모사한 수치해석모델의 시료 온도 예측치를 비교하고 있다. 동결과정에서 시료 온도는 점차 감소하다가 흙의 어는점 근처에 도달하게 되면 간극수 상변화에 의한 에너지 방출로 인해 냉각이 지연

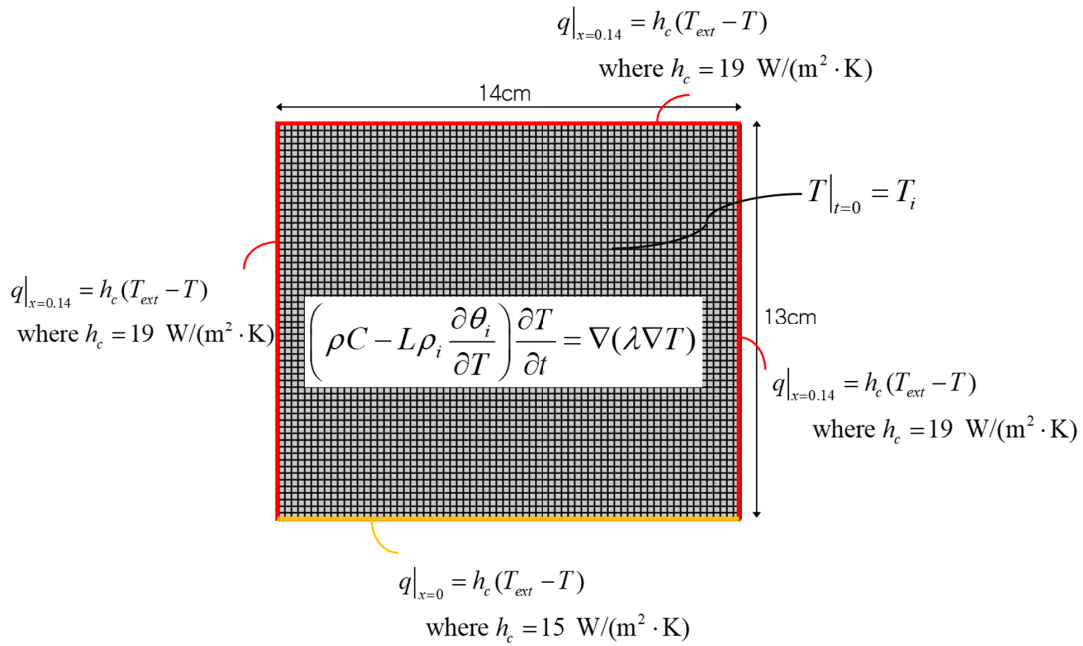


Fig. 8. Boundary conditions of the simulation model

Table 3. Material properties used in the simulation model

Parameter	Symbol	Value	Unit
Porosity of soil	n	0.48	-
Density of pure water	ρ_{pw}	1000	kg/m^3
Density of salt water	ρ_{sw}	1200	kg/m^3
Density of ice	ρ_i	917	kg/m^3
Density of solid particle	ρ_s	2620	kg/m^3
Heat capacity of water	C_w	4200	$J/(kg \cdot K)$
Heat capacity of ice	C_i	2100	$J/(kg \cdot K)$
Heat capacity of solid particle	C_s	900	$J/(kg \cdot K)$
Latent heat of fusion	L	3.33E05	J/kg
Thermal conductivity of pure water	λ_{pw}	0.58	$W/(m \cdot K)$
Thermal conductivity of salt water	λ_{sw}	0.58	0.58
Thermal conductivity of ice	λ_i	2.22	$W/(m \cdot K)$
Thermal conductivity of solid particle	λ_s^*	5.07	$W/(m \cdot K)$
Unfrozen water saturation curve	S_w	Eq. (2)	-

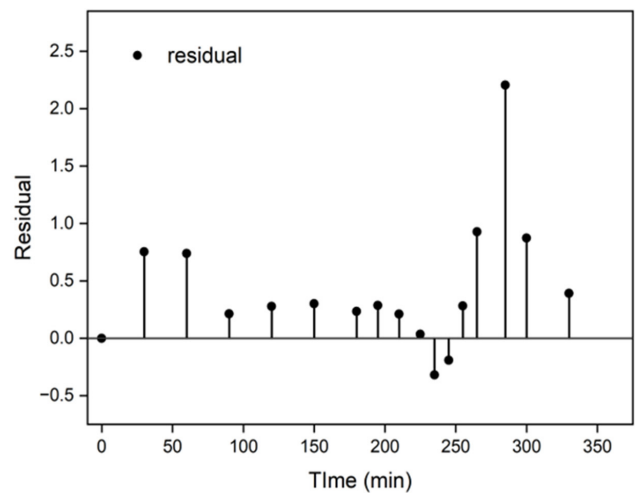
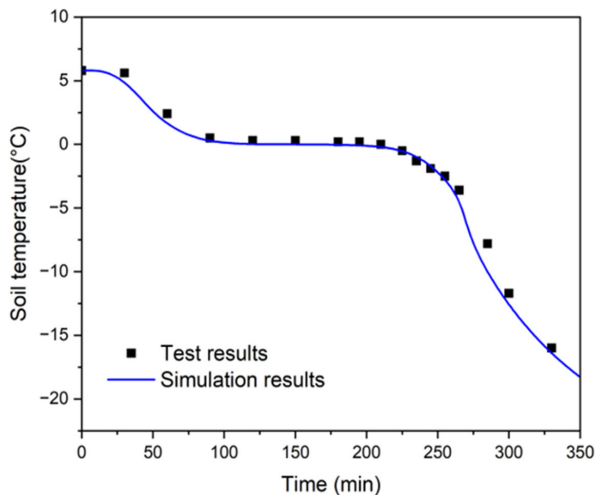
*Data was referred to in the work of Tokoro and Ishikawa (2016)

된다. 상변화 구간인 흙의 어는점에서 시료 온도가 일정 시간 동안 유지되다가 간극수 상변화가 완료되면 시료 온도는 다시 감소하는 특성을 나타낸다. 이러한 동결 특성에는 흙이 가진 부동수분특성이 지배적인 영향을 미치게 되는데, 부동수분포화도곡선을 입력자료로 적용한 해석 결과가 실험의 동결 양상과 유사한지를 비교함으로써 사용된 부동수분곡선의 신뢰성을 입증할 수 있다. Fig. 9에서 알 수 있듯이, 두 가지 간극수 염분농도 조건 ($\zeta = 0\%$, 3.5%)에 대해 해석모델에서 도출된 흙의 온도 변화 양상이 실험데이터와 매우 유사하였다. 따라서, 본 연구에서 도출된 부동수분곡선은 유의미한 신뢰성을 지니고 있으며, 향후 국내 사질토의 동결 거동을 다루는 다양한 해석 수행 시 유용하게 사용될 수 있는 입력 인자가 될 것으로 판단된다.

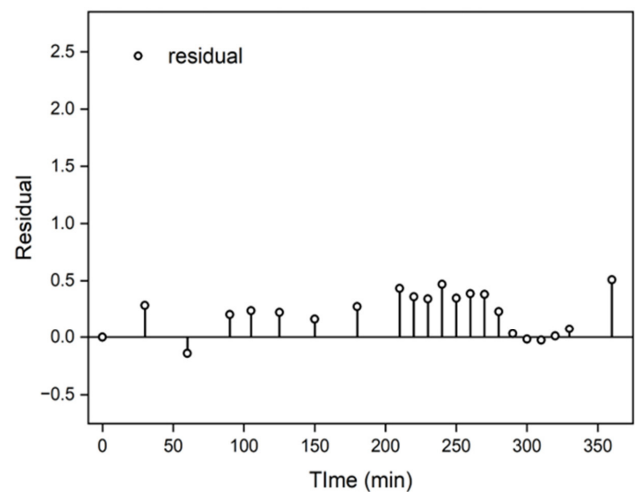
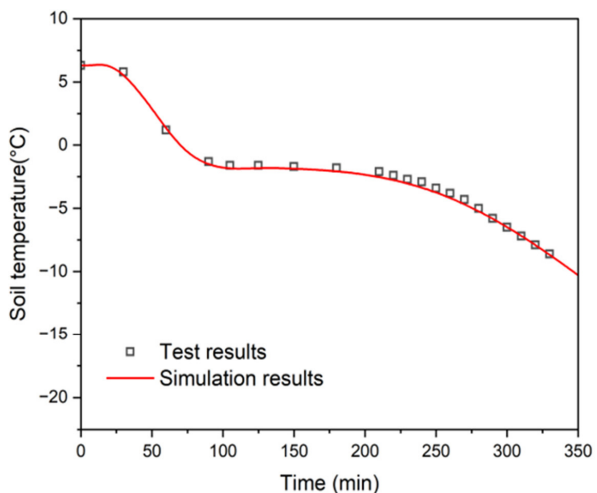
4. 결론

동결 지반의 신뢰성 있는 열적 거동 평가를 위해서는 흙의 부동수분특성에 대한 면밀한 검토와 이해가 필수적이다. 또한, 지반의 동결 과정을 모사하는 수치해석 시 지반재료의 부동수분곡선은 흙의 동결 거동에 영향을 미치는 매우 중요한 입력인자가 된다. 본 연구에서는 간극수 염분농도를 고려한 동결 사질토의 부동수분곡선을 평가하기 위해 흙의 어는점 측정실험 및 부동수분 측정실험을 수행하였으며, 계측된 실험데이터를 기반으로 부동수분포화도 곡선을 간편하게 추정할 수 있는 경험적 모델을 제시하였다. 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 다양한 간극수 염분농도 조건($\zeta = 0\% \sim 3.5\%$)에 대해 사질토 시료의 어는점을 측정하는 실험을 수행



(a) Porewater salinity, $\zeta = 0\%$



(b) Porewater salinity, $\zeta = 3.5\%$

Fig. 9. Comparison results of soil temperature during freezing (experiment and simulation)

한 결과, 시료의 간극수의 염분농도가 커질수록 사질토의 어는점이 비선형적으로 낮아지는 경향을 나타내었다.

- (2) 사질토의 동결실험에서 동결 초기에 시료는 점진적으로 온도가 감소하다가 간극수의 어는점 근처에 도달하면 상변화에 의한 에너지 방출로 인해 지반 냉각이 정체되고, 상변화가 끝남과 동시에 지반의 온도는 다시 감소하는데, 이러한 동결 거동은 시료의 부동수분특성에 의해 결정된다.
- (3) 두 가지 간극수 염분농도 조건($\zeta = 0\%, 3.5\%$)에 대해 부동수분포화도곡선을 산정한 결과, 어는점 이하의 온도 영역에서 계측된 부동수분특성곡선의 전반적인 양상은 지수함수적으로 감소하는 형태를 나타내었으며, 함유된 간극수의 염분농도가 높을수록 동결 직후의($0^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$) 부동수분곡선의 기울기는 상대적으로 완만해지는 경향이 나타났다. 이처럼 간극수의 염분 농도는 부동수분곡선의 기울기 변화를 초래하며, 이러한 변화는 지반 동결 시 열-수-력학적 거동에도 직간접적인 영향을 미칠 것으로 사료된다.
- (4) 계측된 실험데이터를 기반으로 부동수분포화도 곡선을 간편하게 추정할 수 있는 경험적 모델을 제시하였고, 경험적 모델을 입력자료로 적용한 해석 모델은 실험과 매우 유사한 시료의 온도변화 거동을 나타내었다. 따라서, 본 연구에서 도출된 부동수분곡선은 유의미한 신뢰성을 지니고 있으며, 염분을 포함한 국내 사질토의 동결 거동을 다루는 해석 수행 시 유용하게 사용될 수 있는 입력 인자가 될 것으로 판단된다. 추후 염분 농도의 범위를 세분화하여 부동수분곡선과 염분농도 사이의 상관관계를 규명하는 연구가 추진되면 보다 다양한 염분 지반 조건을 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음(2022-2023).

참고문헌 (References)

1. ASTM D1141-98, Standard practice for the preparation of substitute ocean water, 2013.

2. Burt, T. P. and Williams, P. J. (1976), "Hydraulic Conductivity in Frozen Soils", *Earth Surf Process*, Vol.1, No.4, pp.349-360.
3. Chen, Y., Zhou, Z., Wang, J., Zhao, Y., and Dou, Z. (2021), "Quantification and Division of Unfrozen Water Content during the Freezing Process and the Influence of Soil Properties by Low-field Nuclear Magnetic Resonance", *J. Hydrology*, Vol.602, pp.126719.
4. Comsol, Introduction to Comsol Multiphysics, Comsol, Inc., USA, 2023.
5. Coussy O. Mechanics and physics of porous solids. John Wiley and Sons; 2010.
6. Coussy O. Poromechanics. John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2004.
7. Coussy, O. and Monteiro, P. (2007), "Unsaturated Poroelasticity for Crystallization in Pores", *Comput Geotech*, Vol.34, No.4, pp. 279-290.
8. Hu, R. and Liu, Q. (2017), Numerical simulation of the effect of groundwater salinity on artificial freezing wall in coastal area, In EGU General Assembly Conference Abstracts, pp.13428.
9. Khayal, O. M. E. S. (2018), "Fundamentals of Heat Exchangers", *Inter. J. of Research in Comp. Applications and Robotics*, Vol.6, No.12, pp.1-11.
10. Kim, S. Y., Hong, W. T., Hong, S. S., Baek, Y., and Lee, J. S. (2016), "Unfrozen Water Content and Unconfined Compressive Strength of Frozen Soils According to Degree of Saturations and Silt Fractions", *J. of Korean Geotech. Soci.*, Vol.32, No.12, pp. 59-67.
11. Kim, Y. C., Bae, J. H., and Song, W. K. (2002), "An Experimental Study on the Unfrozen Water Contents and Ultrasonic Wave Velocity in Frozen Soil", *J. Korean Soc. Civil Eng.*, Vol.22, No.3C, pp. 207-217.
12. Kruse, A. M., Darrow, M. M., and Akagawa, S. (2018), "Improvements in Measuring Unfrozen Water in Frozen Soils Using the Pulsed Nuclear Magnetic Resonance Method", *J. Cold Reg. Eng.* Vol.32, No.1, pp.04017016.
13. Kweon, G.C. (2003), "Design of Anti-frost Layer Considering Frost Heaving Characteristics of Subgrade Soils", *Symposium on Korea Society of Civil Engineers*, pp.1786-1791.
14. Li, Z., Chen, J., and Sugimoto, M. (2020), "Pulsed NMR Measurements of Unfrozen Water Content in Partially Frozen Soil", *J. Cold Reg. Eng.*, Vol.34, No.3, pp.04020013.
15. Liu (2014), "Influence of Freeze-thaw Cycles on Resilient Modulus of Different Plasticity Index Subgrade Soil", *Chinese J. Geot. Eng.*, Vol.36, No.4, pp.633-639.
16. Liu, Z. and Yu, X. (2013), "Physically based Equation for Phase Composition Curve of Frozen Soils", *Transp. Res. Rec.* Vol.2349, No.2349, pp.93-99.
17. McKenzie, J. M., Voss, C. I., and Siegel, D. I. (2007), "Groundwater Flow with Energy Transport and Water-ice Phase Change: Numerical Simulations, Benchmarks, and Application to Freezing in Peat Bogs", *Adv. Water Resour.*, Vol.30, No.4, pp.966-983.
18. Michalowski, R. L. (1993), "A Constitutive Model of Saturated Soils for Frost Heave Simulations", *Cold Regions Sci. Technol.*, Vol.22, No.1, pp.47-63.
19. Michalowski, R.L. and Zhu, M. (2006), "Frost Heave Modelling Using Porosity Rate Function", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.30, pp.703-722.
20. Nicolsky, D. J., Romanovsky, V. E., Panda, S. K., Marchenko, S.

- S., and Muskett, R. R. (2017), "Applicability of the Ecosystem Type Approach to Model Permafrost Dynamics Across the Alaska North Slope", *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, Vol.122, No.1, pp. 50-75.
21. Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S., and Jardine, R. J. (2009), "THM-Coupled Finite Element Analysis of Frozen Soil: Formulation and Application", *Géotechnique*, Vol.59, No.3, pp.159-171.
 22. Ohrai, T. (1986), "Experimental Studies on the Effects of Ice and Unfrozen Water on the Compressive Strength of Frozen Soil", *Ph. D. dissertation, Hokkaido University*, Sapporo, Japan.
 23. Osterkamp, T. and Romanovsky, V. (1997), "Freezing of the Active Layer on the Coastal Plain of the Alaskan Arctic", *Permaf. Periglac. Process.*, Vol.8, No.1, pp.23-44.
 24. Patterson, D. E. and Smith, M. W. (1981), "The Measurement of Unfrozen Water Content by Time Domain Reflectometry: Result from Laboratory Tests", *Can. Geotech. J.*, Vol.18, No.1, pp.131-144.
 25. Semin, M., Levin, L., Bublik, S., Brovka, G., Brovka, A., and Agutin, K. (2022), "Parameterization of the Model of Artificial Clay Freezing Considering the Effect of Pore Water Salinity", *Fluids*, Vol.7, No.6, pp.186.
 26. Shin, E.C. and Park, J.J. (2003), "An Experimental Study on Frost Heaving Pressure Characteristics of Frozen Soils", *J. of Korean Geotech. Soci.*, Vol.19, No.2, pp.65-74.
 27. Smith, M.W. and A.R. Tice. (1988), Measurement of the unfrozen water content of soils. Comparison of NMR and TDR methods. CRREL-88-18. *Cold Regions Res. Eng. Lab.*, Hanover, NH.
 28. Spaans, E.J.A. and Baker, J.M. (1995), "Examining the Use of TDR for Measuring Liquid Water Content in Frozen Soils", *Water Resour. Res.*, Vol.31, No.12, pp.2917-2925.
 29. Thomas, H.R., Cleall, P., Li, Y.C., Harris, C., and Kern-Luetschg, M. (2009), "Modeling of Cryogenic Processes in Permafrost and Seasonally Frozen Soils", *Geotechnique*, Vol.59, No.3, pp.173-184.
 30. Tice, A.R., Anderson, D.M., Banin, A. The prediction of unfrozen water contents in frozen soils from liquid limit determinations. Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, 1976.
 31. Tokoro, T., Ishikawa, T., Shirai, S., and Nakamura, T. (2016), "Estimation Methods for Thermal Conductivity of Sandy Soil with Electrical Characteristics. Soils and foundations", Vol.56, No.5, pp.927-936.
 32. Watanabe, K. and Mizoguchi, M. (2002), "Amount of Unfrozen Water in Frozen Porous Media Saturated with Solution", *Cold Regions Sci. Technol.*, Vol.34, No.2, pp.103-110.
 33. Westermann, S., Boike, J., Langer, M., Schuler, T., and Etzelmüller, B. (2011), "Modeling the Impact of Wintertime Rain Events on the Thermal Regime of Permafrost", *The Cryosphere*, Vol.5, No.4, pp.945-959.
 34. Yoshikawa, K., Overduin, P. P., and Harden, J. W. (2004), "Moisture Content Measurements of Moss (*Sphagnum* spp.) Using Commercial Sensors", *Permaf. Periglac. Process.*, Vol.15, No.4, 309-318.
 35. Zhou, M. M. and Meschke, G. (2013), "A Three-phase Thermo-Hydro-mechanical Finite Element Model for Freezing Soils", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.37, No.18, pp.3173-3193.

Received : October 18th, 2023

Revised : October 30th, 2023

Accepted : October 31st, 2023