

고수압 해저터널에 급속 인공동결공법 적용시 간극수의 염분 농도가 동결속도에 미치는 영향 평가: 실내 동결챔버시험 위주로

오민택¹ · 이동섭² · 손영진³ · 이인모⁴ · 최항석^{5*}

¹비회원, 서울주택도시공사 토목기술부 사원

²비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

³정회원, SK건설 부장

⁴정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

⁵정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Effect of pore-water salinity on freezing rate in application of rapid artificial ground freezing to deep subsea tunnel: concentration of laboratory freezing chamber test

Mintaek Oh¹, Dongseop Lee², Young-Jin Son³, In-Mo Lee⁴, Hangseok Choi^{5*}

¹Staff, Seoul Housing & Communities Corporation

²Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³Member, General Manager, SK Engineering & Construction

⁴Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

⁵Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

ABSTRACT: It is extremely difficult to apply conventional grouting methods to subsea tunnelling construction in the high water pressure condition. In such a condition, the rapid artificial freezing method can be an alternative to grouting to form a watertight zone around freezing pipes. For a proper design of the artificial freezing method, the influence of salinity on the freezing process has to be considered. However, there are few domestic tunnel construction that adopted the artificial freezing method, and influential factors on the freezing of the soil are not clearly identified. In this paper, a series of laboratory experiments were performed to identify the physical characteristics of frozen soil. Thermal conductivity of the frozen and unfrozen soil samples was measured through the thermal sensor adopting transient hot-wire method. Moreover, a lab-scale freezing chamber was devised to simulate freezing process of silica sand with consideration of the salinity of pore-water. The temperature in the silica sand sample was measured during the freezing process to evaluate the effect of pore-water salinity on the frozen rate that is one of the key parameters in designing the artificial freezing method in subsea tunnelling. In case of unfrozen soil, the soil samples saturated with fresh water (salinity of 0%) and brine water (salinity of 3.5%) showed a similar value of thermal conductivity. However, the frozen soil sample saturated with brine water led to the thermal conductivity notably higher than that of fresh water, which corresponds to the fact that the freezing rate of brine water was greater than that of fresh water in the freezing chamber test.

Keywords: Rapid artificial ground freezing, Subsea tunnel, Frozen chamber, Heat transfer, Thermal conductivity, Freezing rate, Salinity

초 록: 고수압 조건의 해저터널 공사에 기존의 그라우팅 공법은 제한을 받게 되어 굴착작업이 어려울 수 있으나, 인공동결공법을 적용할 경우 신속한 차수 및 지반보강 효과를 얻을 수 있다. 인공동결공법을 적용할 경우, 동결 조건에 따라 동결토의 거동이 크게 변화하므로 기존의 연구 사례를 바탕으로 해저지반 등 특수한 조건에서 동결토의 역학적 거동을 예측하는 것에는 한계가 있다.

*Corresponding author: Hangseok Choi

E-mail: hchoi2@korea.ac.kr

Received August 16, 2016; Revised September 2, 2016;

Accepted September 6, 2016

또한, 인공동결공법의 설계를 위해서는 동결체 형성에 필요한 소요시간 및 동결범위를 산정해야 하며, 해저지반의 경우 간극수 내 염분의 영향을 반영해야 한다. 본 논문에서는 동결토의 열적 특성을 파악하기 위해 인조규사 시료에 대한 실내 열전도도 측정시험과 동결챔버시험을 수행하였다. 동결토와 비동결 포화토 간극수의 염도를 조절하여 동결 과정과 염분에 따른 유효 열전도도를 비정상 열선법을 적용하여 측정하였다. 인조규사 간극수의 염도에 의한 동결특성 변화를 파악하기 위해 동결챔버를 설계 및 제작하였고 이를 통하여 동결 조건을 변화시키며 동결챔버시험을 수행하였다. 동결 조건에 따른 시료내 온도 변화를 분석하고 이를 통해 동결 조건이 사질토의 열전달 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 비동결 포화토의 경우는 간극수가 담수(염도 0%)인 조건과 염수(염도 3.5%)인 조건 모두 유효 열전도도가 유사하게 평가되었으나, 동결토의 경우는 간극수가 염수인 조건이 보다 큰 유효 열전도도를 보였다. 이는 동결챔버시험에서 간극수가 염수인 조건이 담수인 조건보다 동결속도가 더 빠른 결과와 일치한다.

주요어: 급속인공동결공법, 해저터널, 동결챔버, 열전달, 열전도도, 동결속도, 염도

1. 서론

최근 국제 교류가 활발해짐에 따라 대륙 혹은 국가 간 교통 네트워크 구축을 위한 해저터널 건설이 주목 받고 있다. 우리나라와 같이 삼면이 바다로 둘러싸인 국가에서 해저터널의 건설은 대륙이나 국가를 연결하는 접근성 확보에 매우 중요한 역할을 하며, 이러한 해저터널 건설을 위해서는 해저 지반 조건에서의 해저터널 시공기술을 확보하여야 한다. 해저터널의 시공이 이루어지는 고수압 조건에서는 기존의 고압 그라우팅 공법이 제한을 받게 되어 굴착 작업이 어려울 수 있으므로 인공동결공법(*artificial ground freezing method*)을 적용해야 한다. 인공동결공법은 강관(동결관)을 지중에 매설한 후 강관 속으로 냉매를 순환시켜 연약 지반이나 대수 모래층을 인공적으로 일시 동결하여 내력벽 또는 차수벽으로 이용하는 공법으로, 동결의 방식에 따라 브라인(*brine*) 방식과 저온 액화가스 방식으로 구분된다(Andersland and Ladanyi, 2004). 인공동결공법은 강도 및 차수성이 뛰어나 동토벽 만으로 내력벽 또는 차수벽의 역할이 가능하고 강재나 콘크리트와의 동착력이 크므로 부재와 연속 또는 합성된 벽 구조의 형성이 가능하다. 또한 지반의 불균질에 관계없이 일정한 강도의 동토벽을 형성할 수 있으며, 목적하는 공사가 끝나면 융해시키므로 지반이 오염되거나 장애물로 남지 않는다는 이점이 있다. 이와 같은 장점으로 인하여 미국, 유럽 등에서는 1930년대 부터 상하수도 지하탱크 등의 건설공사에 인공동결공

법을 사용하여 왔으며, 최근 러시아에서는 영구동결층을 다양한 구조의 지하 냉동고로 이용하는 연구를 진행하고 있다. 또한, 국외에서는 시료의 동결상태에서 삼축압축시험을 수행하여 동결토의 파괴기준, 탄소성 구성모델 및 여러 조건에서의 강도, 변형특성에 대한 연구(Yang et al., 2011; Da Re et al., 2003, Xu et al., 2011)가 수행되고 있으며, 열-수리-역학의 연계 해석 기법에 대한 연구(Nishimura et al., 2009)와 터널에 적용하는 인공동결공법의 모사를 통하여 인공동결공법 적용시 최소의 시간동안만 동결하는 방법에 대한 연구(Li et al., 2006)등의, 유한요소해석법을 이용한 동결모사에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 최근에는 동결토의 역학적 특성을 미시적 관점에서 이해하고 모사하기 위하여 개별요소법을 이용한 동결토의 수치적 모사(Ishikawa and Miura, 2008)에 대한 연구 또한 수행되고 있다. 이처럼 국외 토목공사에서 지하구조물이나 연약지반의 터널 공사에 인공동결공법의 이용이 증가됨에 따라 동결토에 대한 연구가 중요시되고 있으나, 아직까지도 인공동결공법의 시공 사례와 동결토에 대한 이론적 규명은 매우 부족한 실정이다. 더구나, 국내 터널 공사에서는 인공동결공법이 적용된 적이 없으며 인공동결공법을 전문적으로 설계·시공하는 업체가 현재까지 없는 실정에 의해, 동결토나 인공동결공법에 대한 국내 연구는 더욱 미진하다. 현재 국내 연구는 동상이나 결빙 방지, 그리고 동결토의 강도 중심으로 진행되어 왔으며, 동결 온도와 재하 속도에 따른 동결토의 일축압축 강도 또는

전단강도에 관한 연구(서영교 등, 2008; 김영진, 2003; 강재모 등, 2013) 사례 등이 존재한다.

인공동결공법 기술의 개발은 국내 건설기술의 발전에 크게 기여할 수 있으며 토목 구조물의 안정성 증대를 도모할 수 있다. 효율적인 인공동결공법의 설계 및 시공을 위해서는 동결토의 강도뿐만 아니라 동결속도를 산정해야 하며, 특히 해저지반에서는 간극수의 압력과 염분의 영향 또한 고려하여야 하므로 기존에 수행되었던 제한된 연구 결과만을 고려하는 것은 인공동결공법의 설계 및 시공의 신뢰도와 경제성을 저해할 수 있다. 따라서 동결 조건에 따른 동결토의 강도 및 열적 특성 변화에 대한 검토가 필요하다.

본 논문에서는 동결 사질토의 열적 특성을 파악하기 위해 인조규사 시료에 대한 실내 열전도도 평가시험과 동결챔버시험을 수행하였다. 동결토의 유효 열전도도 측정을 위해 시험용 몰드를 제작하였으며 간극수의 염도를 조절하여 동결 과정과 염분에 따른 동결토의 열적 특성 변화를 파악하고자 하였다. 또한 간극수의 염도에 따른 사질토의 동결속도 변화를 파악하기 위해 동결챔버를 설계 및 제작하였고 이를 통하여 동결 조건을 변화시키며 급속 동결챔버시험을 수행하였다. 스테인리스강으로 제작된 동결챔버에 인조규사 시료를 담수와 염수로 포화시켜 조성한 후 시료 중앙에 위치한 동결관과 이로부터 일정한 간격으로 설치된 온도계를 이용하여 시료를 동결하면서 시간에 따른 시료의 온도를 측정하였다. 동결 조건에 따른 온도 변화의 차이를 분석하였고 이를 통해 동결에 따른 열적 특성 변화가 사질토의 동결속도에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 열전도도 측정 시험

2.1 비정상 열선법(Transient hot wire method)

토양의 유효 열전도도(Effective thermal conductivity)는 열의 흐름방향으로 작용하는 단위 온도구배 하에서

흐름의 단위면적당 전달되는 단위시간당 열전도량으로 정의한다. 토양의 열전도도를 측정하는 방법은 직접법(Carlsaw and Jaeger, 1959; Blackwell, 1956; Shannon and Wells, 1959) 및 간접법(De Vries, 1963; Kersten, 1949; Mickley, 1951; Germant, 1950; Johansen, 1975)으로 나누어진다. 일반적으로 직접법은 열원을 시료에 삽입하여 시간에 따른 토양 내의 온도를 측정함으로써 유효 열전도도를 산정하는데, 이때 열원을 무한선형 열원으로 가정하여 유효 열전도도를 산정한다. 이 중 비정상 탐침법은 측정방법이 간단하고 짧은 시간 내에 측정이 가능할 뿐만 아니라 높은 신뢰도의 측정값을 갖는 것으로 알려져 있다. 간접법은 경험에 의한 예측식을 활용하는 방법으로 주로 점토와 모래, 실트 시료의 유효 열전도도 예측에 적합하고 순환골재와 같이 복잡한 성상을 가진 재료에는 적합하지 않으며, 낮은 함수비에서는 열저항의 예측이 불가능하다.

본 논문에서는 비정상 열선법에 의해 시료의 유효 열전도도를 측정하였으며 측정 원리는 비정상 탐침법과 유사하다. 즉, 열선에 일정량의 열량이 공급될 때, 시간에 따라 열선의 온도가 상승하게 되며 온도와 시간의 관계($\ln t - \Delta T$)가 직선 형태로 나타나고 이때 직선의 기울기의 역수를 계산하여 대상 시료의 유효 열전도도를 산정하게 된다. 이를 열저항 관점으로 보면, 열저항이 작은 시료(매질)에서는 열선에서 발생한 열이 매질내로 비교적 빠르게 전달되므로 열선 내부의 온도 상승폭이 작은 반면 열저항이 큰 매질에서는 열선에 발생하는 열이 매질내로 비교적 느리게 전달되므로 열선 내부의 온도 상승폭이 커지게 된다.

2.2 시험 장비 및 시료 조성

본 시험에서는 담수와 염수로 포화된 인조규사 시료에 대한 비동결토와 동결토의 유효 열전도도 측정을 위해 KEM사의 열 계측 기기인 QTM-500을 적용하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 QTM-500은 비정상 열선법에 의해 매질의 열전도도를 단시간에 간단하게



Fig. 1. Assembly of QTM-500 system

Table 1. Specifications of QTM-500 system

Item	System Specifications
Measurement method	Transient hot-wire method
Measurement range	8 ~ 4300 °C·cm/W
Accuracy	± 5% for standard sample
Repeatability	± 3% for standard sample
Hot wire/Thermal sensor	Constantan wire/K-type thermocouple
Accuracy of applied current of wire	±0.05% for standard value
Measurement time	60 sec
Electric energy consumption	60 W

Table 2. Precision of QTM-500 system for standard specimen

Reference Materials	Thermal conductivity (W/m·K)		Error
	Reference Value	Measurement	
Silicon rubber	0.238	0.235	1.3%

측정 가능한 쾌속 열전도도계로서 8~4300°C·cm/W의 열저항 측정범위 및 ±5%의 정밀도와 ±3%의 재현성을 가지며 장비 사양은 Table 1과 같다. QTM-500 장비를 시험에 이용하기 전, 기존에 열전도도를 이미 알고 있는 표준시료의 열전도도를 측정하여 QTM-500 장비의 정밀도를 검증하였으며, 결과를 Table 2에 나타내었다.

일정한 입도조건의 시료를 사용하기 위해 20번체와 50번체 사이의 입경의 인조구사 6호사(D = 0.35 ~ 0.70 mm)를 대상으로 KS규정에 준하여 비중시험, 입도분포 시험을 각각 수행하였다. 시험 결과를 Fig.

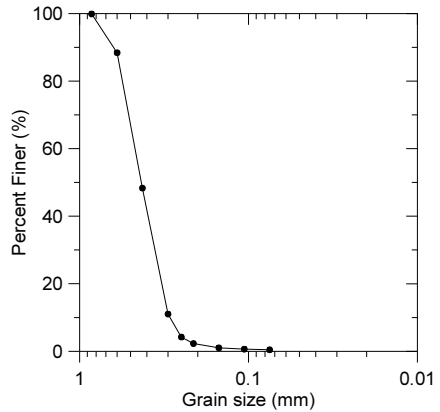


Fig. 2. Particle-size distribution curve of silica sand No. 6

Table 3. Physical properties of silica sand No. 6

Specific gravity	Void ratio		Grain size analysis (%)				C_u	C_c
	e_{max}	e_{min}	No.10	No.30	No.100	No.200		
2.64	1.069	0.655	100	88.4	1.02	0.45	1.57	2.05

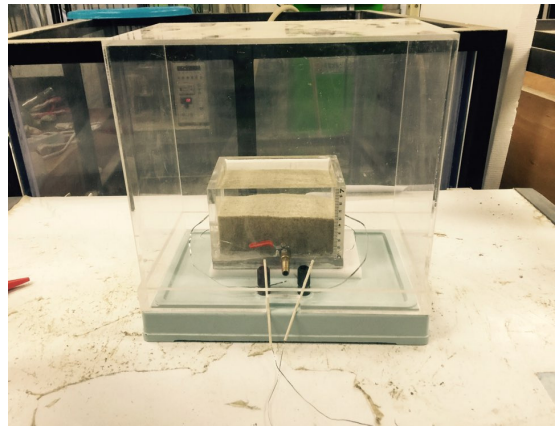


Fig. 3. Acrylic mold for measurement of thermal conductivity

2 및 Table 3에 나타내었다.

시료 내부의 유효 열전도도를 측정하기 위해 Fig. 3과 같은 아크릴 재질의 몰드를 제작하였다. 유효 열전도도 측정용 몰드의 크기는 0.15 m × 0.10 m × 0.10 m로, 내부 높이 0.03 m 지점에 열선이 설치되어 있어 시료의 표면이 아닌 내부에서 유효 열전도도를 측정할 수 있다. 시료의 두께 차이가 유효 열전도도 측정에 영향을 줄 수 있으므로 열선을 시료의 중앙에

위치할 수 있도록 높이 0.06 m의 균질한 밀도($\gamma_d = 1.4 \text{ t/m}^3$)로 시료를 조성하였으며 하부의 밸브를 통해 물을 유입하여 시료의 하단부터 포화시켰다.

2.3 열전도도 평가

간극수의 염도(소금 질량/소금물 질량)가 유효 열전도도에 미치는 영향을 파악하기 위해 간극수를 담수 조건(염도 0%)과 해수의 염도를 고려한 염수조건(염도 3.5%)으로 조제하여 각 시료를 24시간 동안 포화시켰으며 포화시료의 비동결 상태와 동결 상태에서 각각의 유효 열전도도를 측정하였다. 동결 시료의 경우 24시간 동결 후 냉동고 내부에서 유효 열전도도를 측정하였으며 측정 시마다 열선(Hot wire)으로 흐르는 열에 의해 주변 얼음이 녹고 시료내부 온도가 일정하지 않을 수 있음을 고려하여, 정밀한 측정을 위해 1회 측정이 끝나면 12시간 동안 시료를 재동결하여 내부 온도를 일정하게 유지한 후 유효 열전도도를 재 측정하였다. 염도 0% 시료와 3.5% 시료에 대해 동결 전과 동결 후 유효 열전도도를 5회 반복 측정하였으며 그 결과를 Table 4와 5에 나타내었다.

유효 열전도도 측정 결과, 포화 비동결토의 경우, 간극수의 염도에 상관없이 유효 열전도도가 2.11~2.22 W/m·K으로 측정되어 유효 열전도도에 미치는 염분의 영향이 미소한 것을 확인할 수 있다. 이는 전체 시료의 유효 열전도도에 지배적인 영향을 미치는 물의 평균 열전도도가 0.58 W/m·K이며, 염분의 경우 물에 용해되어

물의 열전도도 변화에 거의 기여하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 반면 동결토의 경우, 간극수에 염분이 포함되지 않은 담수조건 유효 열전도도가 3.8 W/m·K으로 측정되었으며 간극수에 염분이 포함된 염수조건 유효 열전도도가 4.5 W/m·K으로 측정되었다. 얼음의 열전도도가 2.18 W/m·K으로 물에 비해 매우 높으므로 동결되기 전에 비하여 유효 열전도도가 큰 폭으로 상승한 것으로 판단되며, 염분이 포함된 물이 동결하면서 탈염작용이 발생하고, 이로 인해 고체상태의 석출된 염분의 열전도도가 반영되어 염수로 포화된 동결토의 유효 열전도도가 담수로 포화된 동결토의 유효 열전도도에 비해 상대적으로 높게 측정된 것으로 유추할 수 있다.

3. 동결챔버시험

3.1 동결챔버 구성

간극수의 염분에 따른 동결토의 열적 특성 변화는 지반공학적인 관점에서 반드시 고려해야 하는 요인이다. 동결공법의 적용이나 계절에 따른 온도 변화로 인해 토체 내 물의 온도가 0°C 이하로 내려가면 물의 상변화가 발생한다. 하지만 비휘발성 용질이 녹아있는 용액의 증기압은 용매의 증기압보다 낮아지므로 용질이 녹아있는 용액의 어는점은 순수한 용매보다 낮아지게 되어, 간극수 내 염분이 포함된 토양의 어는점은 담수로 포화된 토양의 경우보다 낮아지게 된다.

Table 4. Thermal conductivity of unfrozen and frozen soil sample in case of fresh pore-water

Soil sample	Thermal conductivity (W/m·K)					Ave. value (W/m·K)
Unfrozen	2.16	2.21	2.22	2.16	2.33	2.22
Frozen	3.54	3.83	3.78	3.96	3.85	3.79

Table 5. Thermal conductivity of unfrozen and frozen soil sample in case of brine pore-water

Soil sample	Thermal conductivity (W/m·K)					Ave. value (W/m·K)
Unfrozen	2.06	2.10	2.11	2.11	2.15	2.11
Frozen	4.50	4.32	4.59	4.59	4.41	4.48

용질이 포함된 용액의 어는점 내림을 Fig. 4에 나타내었다.

한반도에서는 겨울철의 온도 저하로 인한 지반의 낮은 온도가 토양의 간극 내 수분을 동결시킴으로써 체적 팽창을 유발하고 동상 현상을 유발한다. 도로, 철도 및 가스관, 송유관 등의 지반구조물은 온도 변화로 인한 지반의 동결 현상에 의해 기능이 저하되거나 파손될 수 있다. 이러한 이유로 지반구조물의 안정성 확보를 위하여 동결토의 열적 특성이 다양한 방법으로 연구되어 왔으나 첨가물 혼합을 적용한 연구는 상대적으로 미비한 실정이다.

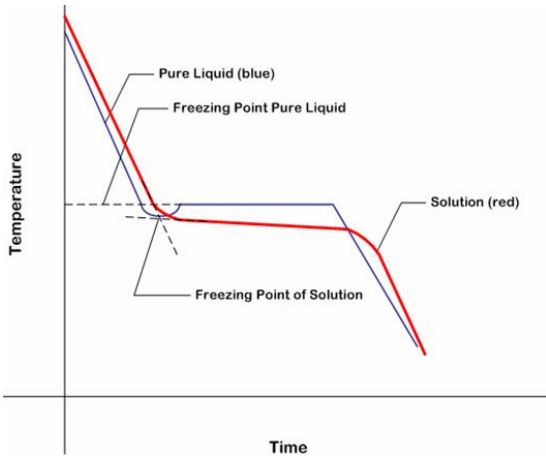
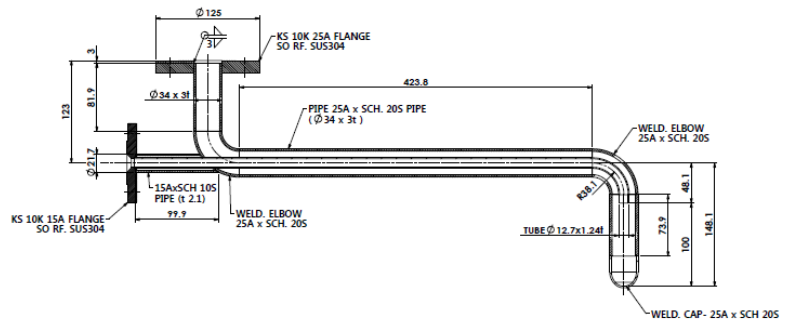


Fig. 4. Solute-induced freezing temperature depression

본 연구에서는 담수 및 염수로 포화된 지반의 동결 특성을 파악하기 위해 Fig. 5와 같은 급속 동결시험용 챔버를 제작하였다. 스테인리스강 재질의 동결챔버는 Fig. 5(a)와 같이 내측의 직경이 584.2 mm인 원통형이며, 상단과 하단은 타원형으로 제작되었다. 시료의 동결로 인한 체적 팽창에 의해 챔버에 변형 혹은 손상이 발생할 수 있으므로 챔버 벽체의 두께는 12.7 mm로 충분히 두껍게 제작하였다. 동결관은 Fig 5.(b)와 같이 스테인리스강 재질의 이중관으로, 방사 방향의 동결을 유발하기 위해 챔버 내부 중앙에 위치하고 있으며, 내관을 통해 냉매인 액화질소가 유입되면 곡면부 하단에서 기화한 후 외관을 거쳐 외부로 배출되는 구조로 제작되었다. 챔버 하단에는 시료의 포화를 위해 물을 주입할 수 있는 밸브가 설치되어 있으며 챔버 중앙에 위치한 동결관에서 수평 방향으로 일정한 간격(51 mm)으로 4개의 온도계(Thermocouple)가 설치되어 시간에 따른 시료의 온도변화를 측정할 수 있도록 하였다. 각 온도계는 상부 침단에서 온도를 측정하므로 동결 과정에서 온도계 자체를 통해 열 전달이 발생할 경우 시료의 온도 변화를 정확히 측정하기 어렵다. 이를 방지하기 위해 온도계의 온도 측정부 외의 외관에 단열 처리를 하여 가공하였다. 챔버 외부에는 Fig. 6과 같이 시료 포화용 물을 저장할 수 있는 물탱크와 시료 조성을 위한 지지대를 부착하였으며,



(a) Freezing chamber



(b) Double-tubed freezing pipe

Fig. 5. Schematics of freezing chamber and freezing pipe

동결 과정 종료 후 시료 채취를 할 수 있도록 코어드릴을 설치하였다. 또한 동결관의 외측 접합부에 우회 밸브(Bypass valve)를 연결함으로써 본 시험 전 배관에 냉매를 미리 순환시켜 본 시험 시 액화질소가 기화하지 않고 동결챔버 내부의 동결관에 다다를 수 있도록 하였다. 냉매와 동결관의 온도를 측정하기 위하여

우회 밸브의 유입구(Inlet)와 유출구(Outlet)에 별도의 온도계를 설치하였으며 Fig. 7에 동결관에 연결된 우회 밸브의 측면도를 나타내었다.

3.2 동결챔버시험 방법

본 논문에서는 간극수의 염분 함유에 따른 인조 규사의 동결속도 변화를 평가하기 위하여 동결관을 통해 시료를 동결하면서 시간에 따른 시료 내부의 온도 변화를 측정하였다. 동결챔버에 인조규사 6호사로 균질한 시료를 조성한 후 물탱크를 이용하여 하단에서부터 포화시켰으며 완전 포화를 위하여 시료 조성으로부터 24시간이 지난 후 동결시험을 수행하였다. 시료 중앙에서부터 방사 방향으로 열전달이 이루어지도록 동결관을 시료 상단의 중앙에 위치시켰으며, 챔버 하단으로부터 300 mm 높이의 위치에 동결관

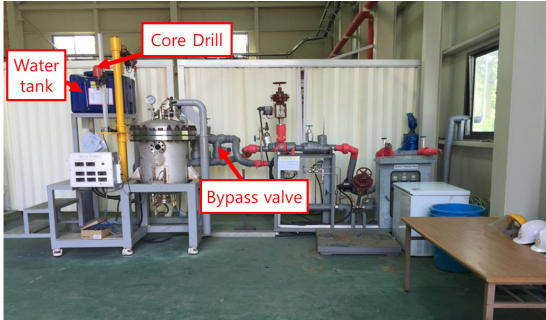


Fig. 6. Overview of laboratory freezing chamber system

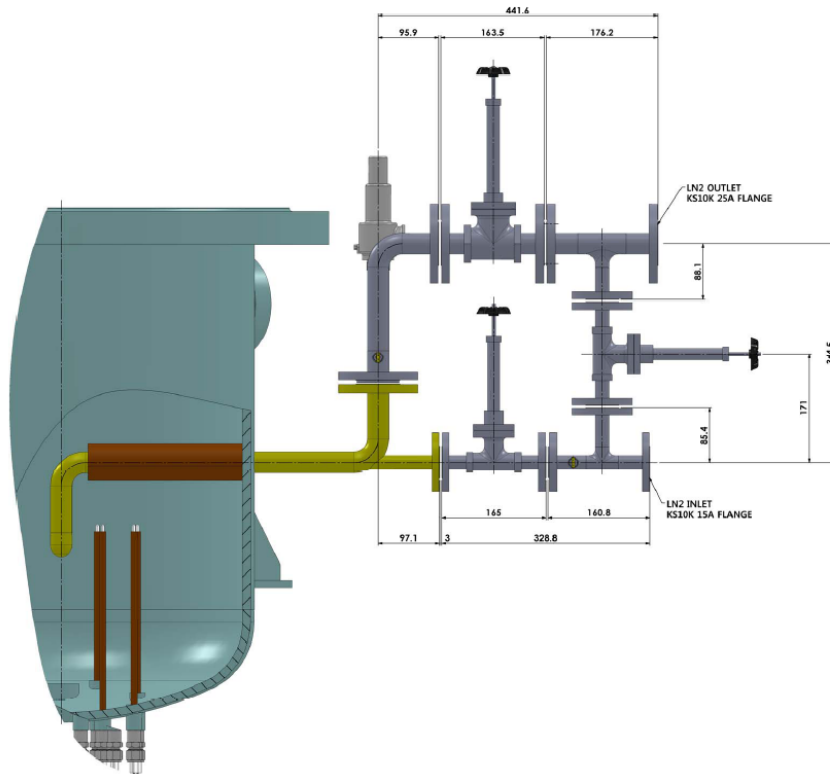


Fig. 7. Profile of bypass valve

으로부터 수평 방향으로 일정한 간격으로 4개의 온도계를 설치하여 시간에 따른 거리 별 시료의 온도 변화를 측정하였다. 챔버 내부의 온도계 뿐만 아니라 Bypass 배관의 유입구와 유출구에 설치된 온도계를 포함하여 본 시험에 적용된 모든 온도계의 종류는 K-type으로써, 서로 다른 종류의 금속 간 접점에서 온도 차이가 발생하면 온도에 따른 기전력이 재질에 따라 달라지므로 이로 인해 발생하는 전압차를 이용하여 온도를 측정하게 된다. 각 온도계에서 측정된 결과들은 전기적 신호에 의해 데이터로거로 전송되어 디지털 방식으로 기록하였다. 동결챔버시험이 수행된 장소는 상온 환경이므로 액화질소 용기로부터 나오는 액화질소(LN₂)는 시료에 삽입된 동결관에 도달하기 전에 이미 기화되어, 시료에 삽입된 동결관을 일정온도로 유지하기 어렵다. 따라서 본 시험을 시작하기 전에 우회 배관을 이용하여 동결챔버 내부에 있는 동결관을 제외한 외부 배관의 온도를 미리 액화질소의 온도만큼



Fig. 8. Frozen surface of soil sample after freezing chamber test

하강시킨 후 동결챔버시험을 수행하였다. 외부 대기 온도의 영향을 최소화하고 시료에 삽입된 동결관에 주입되는 액화질소의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 동결챔버와 연결된 모든 배관을 단열처리 하였으며, 시험 전 과정에서 유입구와 유출구의 온도를 상시 확인하였다. 시험은 시료의 체적 팽창으로 인한 챔버의 손상을 피하고자 동결관으로부터 가장 멀리 떨어진 4번 온도계의 측정값이 -2°C 에 이를 때까지 진행하였으며 동결시험 후 시료의 상부 단면을 Fig. 8에 나타내었다.

3.3 동결속도 평가

동결챔버시험에서는 약 150 kg 용량의 액화질소 용기를 이용하여 액화질소를 공급하였으며, 1회 동결챔버시험시 필요한 액화질소량이 액화질소 1개 용기의 용량을 상회하여 동결시험 중간에 용기를 교체하여 시험을 진행하였다. Fig. 9에서 나타나듯이 액화질소 용기 교체 시 액화질소의 공급량이 순간적으로 변하여 유입구와 유출구 온도 변화가 발생하였으나 그 구간이 길지 않고, 동결관의 평균 온도는 -194°C 로 유지되었다.

동결챔버시험시, 챔버 중앙에 위치한 동결관에 액

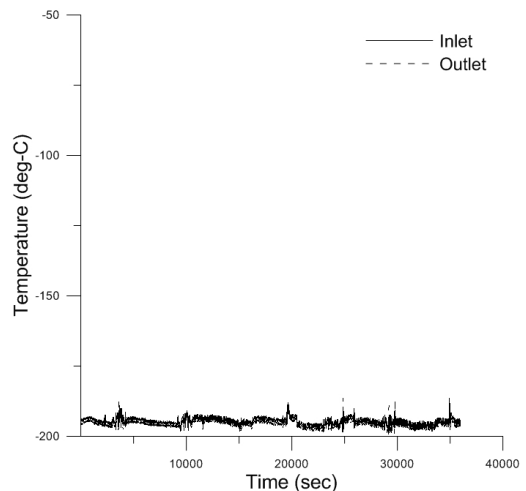


Fig. 9. Temperature at inlet and outlet of freezing pipe

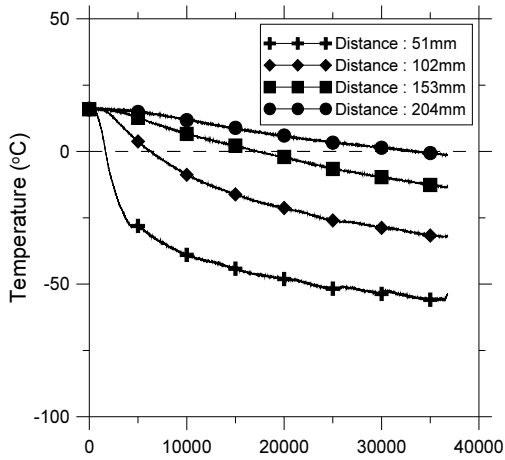


Fig. 10. Temperature change in soil sample saturated with fresh water

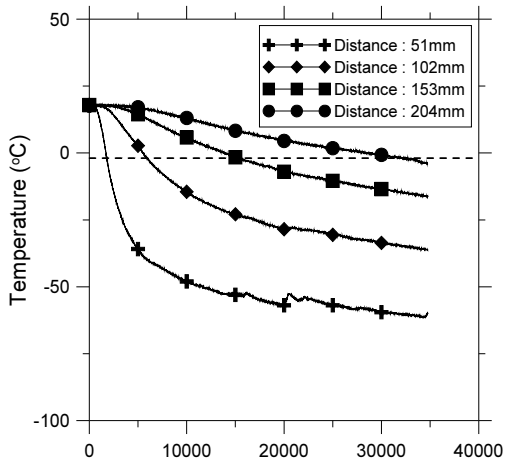


Fig. 11. Temperature change in soil sample saturated with brine water

화질소를 순환시켜 시료의 중앙부터 방사 방향으로 동결시켰으며 시간에 따른 시료의 온도 변화를 측정하여 동결 속도를 평가하였다. 동결관 외관에서부터 51 mm 간격으로 설치된 4개의 온도계를 통하여 온도 변화를 측정하였으며 시간에 따른 시료의 온도 변화를 간극수의 염도조건에 따라 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 또한 간극수의 염도에 따른 온도변화를 거리 별로 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 10과 Fig. 11에 도시된 점선은 담수와 염수 각각의 어는

점을 나타낸 점선이며, 그 값은 각각 0°C와 -1.91°C이다. Fig. 12에는 담수와 염수 모두의 어는점을 서로 다른 점선으로 도시하였다.

동결챔버시험은 동결관 외관으로부터 204 mm 떨어진 4번 온도계의 값이 물의 어는점 이하가 될 때까지 수행하였다. 다만, 담수조건에서의 동결챔버시험과 염수조건에서의 동결챔버시험의 수행시기는 약 3주 정도 차이가 있다. 이 기간 동안 시료의 초기 온도가 변화하여 염분이 포함되지 않은 경우 시료의 초기 온도가 16°C이었으며 염분이 포함된 경우 그 값이 17.9°C를 나타내었다. 하지만 시료의 초기 온도가 약 1.9°C정도만 상승하였고 이를 반영하여도 동결시간 변화의 경향이 뚜렷하게 나타났으므로 동결챔버시험 결과분석에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

시험 결과, 간극수가 담수인 경우(염도 0%), 일반적으로 시료의 동결 과정 중 잠열에 의해 0°C에서 온도가 유지되는 구간이 발생해야 하나 동결관의 온도가 극저온인 -196°C로 유지됨에 따라 주변 시료가 급격히 동결되어 본 시험에서는 온도가 유지되는 구간은 나타나지 않았다. 간극수가 염수인 경우(염도 3.5%)도 동일하게 동결이 진행되면서 온도가 일정하게 유지되는 구간이 발생하지 않았다. 하지만 간극수가 담수로 포화된 시료가 염수로 포화된 시료에 비하여 초기 온도가 1.9°C 가량 낮음에도 불구하고 동일한 온도에 도달하기까지 상대적으로 오랜 시간이 소요되었다. 간극수가 담수인 경우는 물의 어는점이 0°C이므로 4번 온도계의 측정값이 초기 시료 온도인 16°C에서 0°C에 도달할 때까지 동결을 진행하였으며 총 549.5분이 소요되었다. 간극수가 염수인 경우는 어는점 내림이 발생하여 물의 어는점이 -1.91°C로 변화하므로 4번 온도계의 측정값이 초기 시료의 온도인 17.9°C에서 -1.91°C에 이를 때까지 시험을 진행하였으나 간극수가 담수인 경우보다 비교적 짧은 536.45분이 소요되었다. 이는 비동결토와 동결토의 유효 열전도도 평가 결과와 유사한 경향을 보여준다. 즉, 간극수가 동결되기 전에는 담수조건 시료와 염수조건 시료의 유효

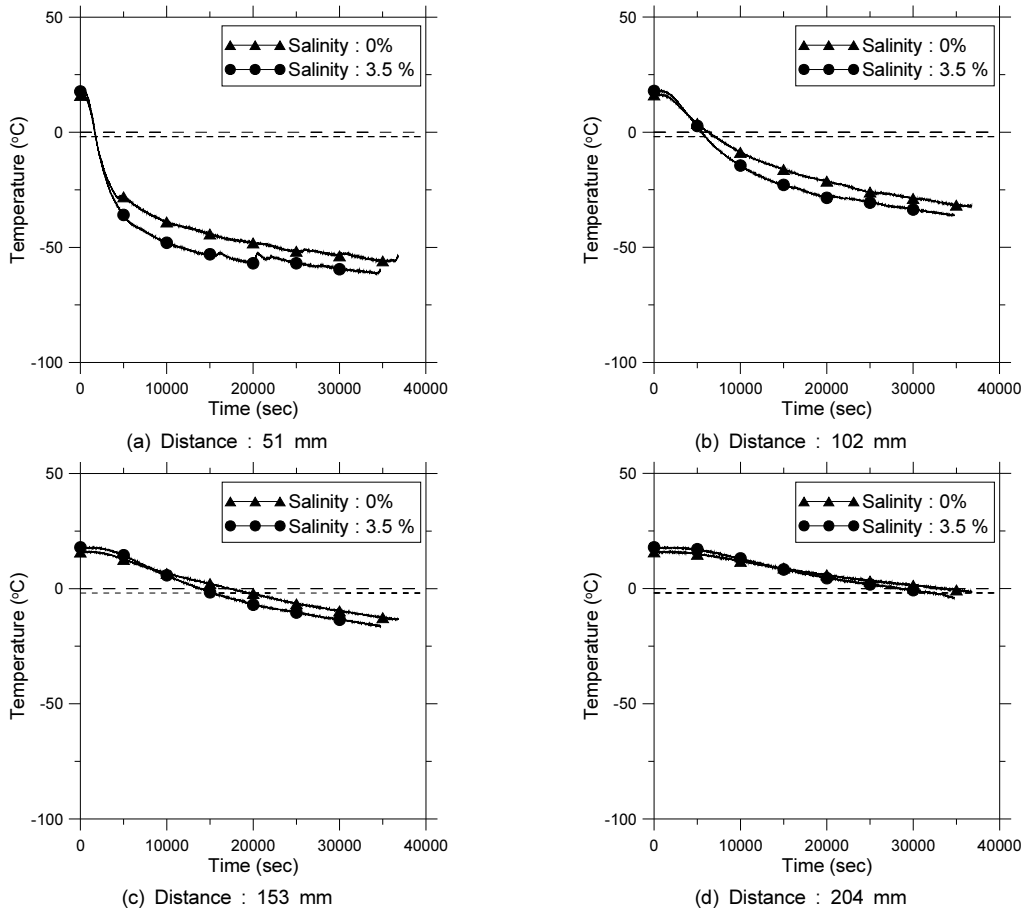


Fig. 12. Effect of salinity of pore-water on temperature variation at different location of soil sample

열전도도가 2.11-2.22 W/m·K으로 유사하나, 동결이 됨에 따라 담수조건 동결토의 유효 열전도도 3.79 W/m·K에 비해 염수조건 동결토의 유효 열전도도가 4.48 W/m·K으로 약 18% 증가하여 염수조건에서 동결 범위의 확산이 빠르게 이루어진 것으로 판단된다.

시료의 비열 또한 동결속도에 영향을 미칠 수 있으므로, 담수조건 시료와 염수조건 시료의 비열차이에 대한 검토가 필요하다. 순수한 물(담수)의 비열과 염도 3.5%의 염수의 비열은 각각 4182J/(kg·K)과 4000J/(kg·K)으로, 약 4.35%의 차이가 있다. 하지만, 본 논문의 동결챔버 시험에 조성된 시료의 경우, 비열 830J/(kg·K)의 인조 규사와 간극수가 혼합된 상태이므로 담수조건 시료와 염수조건 시료의 비열차이는 순수한 담수와 염수의

비열차이보다 적어진다. 동결챔버시험에 조성된 시료의 비열은 인조규사와 간극수의 질량비를 고려하여 산정할 수 있으며, 질량비를 고려하여 산정한 담수조건 시료와 염수조건 시료의 비열은 각각 1672J/(kg·K), 1640J/(kg·K)이다. 즉, 염수조건 시료의 경우에는 담수조건 시료에 비해 비열이 약 1.88% 감소하여 동결챔버시험에서 시료 온도저하를 촉진할 수 있으나, 유효 열전도도 차이에 의한 영향에 비해 매우 미미할 것으로 사료된다.

4. 결론

고수압 해저터널 공사에 적용하기 위한 인공동결공

법의 최적 설계를 위해서는 동결체 형성에 필요한 소요시간 및 동결범위를 적절하게 산정해야 하며, 해저지반의 경우 간극수 내 염분의 영향을 반영해야 한다. 본 연구에서는 담수와 염수로 포화된 비동결토와 동결토 시료를 조성하여 유효 열전도도를 측정하였다. 또한 동결챔버를 제작하여 담수 및 염수로 포화된 사질토에 대한 동결챔버시험을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 비정상 열선법(Transient hot wire method)을 적용하여 인조구사 시료의 비동결토와 동결토의 유효 열전도도를 측정한 결과, 간극수가 담수(염도 0%)로 포화된 경우, 유효 열전도도가 2.22W/m·K으로 측정되었으며 동결 시에는 3.79W/m·K으로 측정되었다. 이는 순수한 물이 0.58W/m·K으로 낮은 열전도도를 보이는 반면, 얼음은 2.18W/m·K으로 물에 비해 비교적 높은 열전도도를 나타내기 때문이다. 한편, 간극수가 염수(염도 3.5%)로 포화된 경우, 비동결토의 유효 열전도도는 담수조건의 유효 열전도도와 유사한 2.11W/m·K으로 나타났으나, 동결토의 유효 열전도도는 동결과정 중 석출된 염분의 열전도도가 반영되어 4.48W/m·K으로 증가하였다.
2. 간극수의 염분이 사질토의 동결 속도에 미치는 영향을 파악하기 위해 동결챔버를 제작하여 동결 챔버시험을 수행하였다. 시료의 입경($D = 0.35 \sim 0.70 \text{ mm}$) 및 밀도($\gamma_d = 1.4 \text{ t/m}^3$)는 열전도도 시험과 동일하게 적용하였으며, 동결관의 온도를 극저온인 -196°C 로 유지하여 시료를 급속 동결하였다. 시료의 중앙에서 방사 방향으로 동결을 수행하였으며 일정한 간격으로 배치된 온도 센서를 통하여 시간에 따른 온도변화를 측정하였다.
3. 동결챔버시험에서 간극수가 담수(염도 0%)인 경우, 물의 어는점이 0°C 이므로 상변화에 의한 온도 유지 구간이 발생해야 하나 급속 동결 시 나타나지 않았다. 간극수가 염수(염도 3.5%)인 경우, 물의

어는점 내림이 발생하여 -1.91°C 에서 동결이 발생하나, 간극수가 담수인 경우에서의 동결과 마찬가지로 상변화 구간이 나타나지 않았다.

4. 동결챔버시험에서 간극수가 염수인 경우, 동결관으로부터 204 mm 떨어진 위치까지 동결이 이루어지기까지 536.45분(32187초)이 소요되었다. 반면, 간극수가 담수인 경우, 동일한 범위의 동결까지 549.5분(32970초)이 소요되었다. 이는 동결토의 열전도도 시험에서 측정된 바와 같이, 담수조건 동결토의 열전도도에 비해 염수조건 동결토의 유효 열전도도가 약 18% 증가하여 염수조건에서 동결속도가 증가된 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술 자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13 건설연구 T01)과 한국연구재단의 지원(NRF-2014R1A2A2A01007883)으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Kang, J.M., Lee, J.G., Lee, J., Kim, Y. (2013), "Analysis of the Relationship between Unconfined Compression Strength and Shear Strength of Frozen Soils", Journal of the Korean geosynthetics society, Vol. 12, No. 3, pp. 23-29.
2. Kim, Y.C. (2003), "Experimental Studies on the Uniaxial Compression Strength Unfrozen Water Content and Ultrasonic Wave Velocity of Frozen Soils", Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 23, No. 5-C, pp. 309-317.
3. Seo, Y.K., Kang, H.S., Kim, E.S. (2008), "A Study of Cold Room Experiments for Strength Properties of Frozen Soil", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 22, No. 2, pp. 42-49.
4. Andersland, O.B., Ladanyi, B. (2004), Frozen Ground

- Engineering (Second edition). Chichester: John Wiley & Sons., p. 363.
5. Blackwell, J.K. (1956), "A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating material in Bulk", *Journal of Applied Physics*, Vol. 25, No. 2, pp. 137-144.
 6. Carlslaw, H.S., Jaeger, J.C. (1959), "Conduction of heat in solids", 2nd Edition, Oxford University Press, New York.
 7. Da Re, G., Germaine, J., Ladd, C. (2003), "Triaxial Testing of Frozen Sand: Equipment and Example Results", *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 17, pp. 90-118.
 8. De Vries, D.A. (1963), "Thermal properties of soils. In *Physics of plant environment*", Edited by W.R. Van Wijk. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, pp. 210-235.
 9. Germant, A. (1950), "The thermal conductivity of soil", *J. Appl. Phys.*, pp. 750-752.
 10. Ishikawa, T., Miura, S. (2008), "Numerical modeling for mechanical behavior of granular materials subjected to freeze-thaw action with DEM", 12th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol. 2, pp. 1219-1226.
 11. Johansen, O. (1975), "Thermal conductivity of soils", Ph.D. thesis, University of Trondheim, Trondheim, Norway. CRREL Draft English Translation 637, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H.
 12. Kersten, M.S. (1949), "Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils", Research Laboratory Investigations, Engineering Experiment Station, Technical Report 23, University of Minnesota, Minneapolis, Minn.
 13. Li, S., Lai, Y., Zhang, M., Zhang, S. (2006), "Minimum ground pre-freezing time before excavation of Guangzhou subway tunnel", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 46, pp. 181-191.
 14. Mickley, A.S. (1951), "Thermal conductivity of moist soil", *American Institute of Electrical Engineers Transactions*, 70, pp. 1789-1797.
 15. Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S., Jardine, R.J. (2009), "Thm-coupled finite element analysis of frozen soil: Formulation and application", *Geotechnique*, Vol. 59, pp. 159-171.
 16. Shannon, W.L., Wells, W.A. (1947), "Test for thermal diffusivity of granular materials", *Proceedings of ASTM*, Vol. 47, pp. 1044-1055.
 17. Xu, X., Lai, Y., Dong, Y., Qi, J. (2011), "Laboratory investigation on strength and deformation characteristics of ice-saturated frozen sandy soil", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 69, pp. 98-104.
 18. Yang, Y., Lai, Y., Dong, Y., Li, S. (2010), "The strength criterion and elastoplastic constitutive model of frozen soil under high confining pressures", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 60, pp. 154-160.