

해저터널 인공 동결공법에서의 냉매 사용량 산정

손영진¹ · 최항석² · 고태영^{3*}

¹비회원, SK건설 Infra Eng'g2팀 부장

²정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 정교수

³정회원, SK건설 TBM팀 부장

Estimation of the amount of refrigerant in artificial ground freezing for subsea tunnel

Youngjin Son¹ · Hangseok Choi² · Tae Young Ko^{3*}

¹General Manager, Infra Eng'g Team 2, SK E&C

²Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³General Manager, TBM Team, SK E&C

*Corresponding Author : Tae Young Ko, tyko@sk.com

Abstract

Subsea tunnel can be highly vulnerable to seawater intrusion due to unexpected high-water pressure during construction. An artificial ground freezing (AGF) will be a promising alternative to conventional reinforcement or water-tightening technology under high-water pressure conditions. In this study, the freezing energy and required time was calculated by the theoretical model of the heat flow to estimate the total amount of refrigerant required for the artificial ground freezing. A lab-scale freezing chamber was devised to investigate changes in the thermal and mechanical properties of sandy soil corresponding to the variation of the salinity and water pressure. The freezing time was measured with different conditions during the chamber freezing tests. Its validity was evaluated by comparing the results between the freezing chamber experiment and the numerical analysis. In particular, the freezing time showed no significant difference between the theoretical model and the numerical analysis. The amount of refrigerant for artificial ground freezing was estimated from the numerical analysis and the freezing efficiency obtained from the chamber test. In addition, the energy ratio for maintaining frozen status was calculated by the proposed formula. It is believed that the energy ratio for freezing will depend on the depth of rock cover in the subsea tunnels and the water temperature on the sea floor.

Keywords: Artificial ground freezing, Freezing efficiency, Freezing time, Liquid air, The amount of refrigerant

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(2)255-268(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.2.255>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received January 2, 2018

Revised February 21, 2018

Accepted February 26, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

초 록

해저터널은 시공중 예측치 못한 고수압으로 인한 해수 침투가 발생할 가능성이 매우 크다. 이에 고수압조건에서 차수 및 보강효과가 탁월한 인공 동결 공법의 적용이 대두되고 있다. 본 연구에서는 인공 동결 공법에 필요한 냉매량을 산정하기 위해 열흐름 에너지 이론 모델에 의한 이론적인 값을 계산하고, 동결 챔버 실험결과 및 수치해석결과와의 비교를 통해 적정성을 검증하였다. 염분과 수압에 따른 열적역학적 특성 변화를 규명하기 위해 동결용 챔버를 제작하여 염분과 수압 조건에 따라 사질토의 동결 시간을 파악하였다. 또한, 이론값과 수치해석 결과의 동결 시간은 유사한 경향을 확인하였다. 동결공법의 냉매량은 수치해석의 결과를 기반으로, 동결 챔버 실험을 통해 동결 효율의 결과와 이론식을 통한 동결 유지를 위한 에너지 비율을 적용하여 산정하였다. 동결유지를 위한 에너지 비율은 해저터널의 토피고와 해저면의 수온에 따라 좌우될 것으로 판단된다.

주요어: 인공 동결 공법, 동결 효율, 동결 시간, 액화 공기, 냉매 사용량

1. 서론

오염물질발생과 기상상황에 대한 영향이 최소화되고, 경제성 또한 매우 뛰어난 장거리 철도 운행을 위해서는 바다를 가로지르는 해저터널이 필요하다. 해저터널은 일반적인 육상터널과 달리 시공 중 예측치 못한 고수압으로 인한 해수 침투가 발생할 수 있으므로, 고수압에서 적용가능한 지반보강 공법의 필요성이 커지고 있다. 인공 동결 공법은 동결대상지반에 설치된 동결관을 통해 브라인(Brine)이나 초저온 액화질소를 주입하여 지반내 지하수를 동결하여 차수 및 지반의 강도를 증가시키는 공법으로(Andersland and Ladanyi, 2004), 지반조건에 관계없이 적용이 가능하며, 확실한 차수 및 지반보강을 달성할 수 있다.

브라인 및 액체질소를 이용한 동결공법 적용 사례를 살펴보면 다음과 같다.

네덜란드 Westerscheled 터널은 연장 6,600 m (2차선 병렬)로 이수식 쉴드(slurry shield) TBM으로 굴착되었으며, 6.5 bar의 고수압이 작용하고 TBM의 협착(clogging) 위험이 있는 하저 연약지반(느슨한 모래 및 점토층)을 통과하도록 계획되었다(Heijboer et al., 2004). Westerscheled 터널의 횡갱은 20~30 m 두께의 중간 정도 느슨한 모래에 점토, 이탄, 세사 등이 포함되어 있는 연약지반을 통과한다. 고수압으로 인한 하천수 용출방지 및 연약지반 보강을 위하여 횡갱 26개소에 인공 동결 공법을 적용하였다(Haß and Schäfers, 2005).

독일 Fürth시의 Subway-Line U1의 연장구간의 Stadthalle역과 인접한 Rednitz Valley 구간은 모래 및 연약지반으로 구성되어 있고 지상에는 역사문화적 가치가 큰 건물이 위치하고 있어 시공 시 주의가 필요하여 터널 굴착 시 지하수 용출, 지표침하 방지를 목적으로 56 m에 이르는 구간에 브라인을 사용한 인공 동결 공법을 적용하였다(Pimentel et al., 2011).

싱가포르 하수관로망 공사중 Ang Mo Kio 터널(연장 7,274 m, EPB shield TBM 적용) 전구간은 지표면 하부 30~40 m 심도의 고속도로 하부를 통과하고 대부분의 지반은 충적층의 단단한 지반으로 구성되어 있으나, 충적층

상부는 점토 등 연약한 지반이 존재하였다(Itoh et al., 2005). 고속도로 및 하천 하부 통과 전, TBM 커터(cutter) 교체와 장비점검이 필요했으나, TBM 장비가 정지한 지점의 터널 상부에 예상치 못한 초연약층이 존재하고 다량의 지하수가 유입되어 커터 교체 및 장비점검에 어려움이 발생하였다. 이에 막장면 차수와 터널상부의 붕락방지를 위해 인공 동결 공법을 보강방안으로 선정하였다.

이탈리아 Naples시의 Università Station은 매우 변화한 도심지로 정거장 시공 시 개착공법 적용이 불가능하였다. 정거장 중앙 위치에 수직구를 굴착하여 수직구로부터 양 방향으로 본선궤도와 연결되는 플랫폼 터널을 굴착하고 플랫폼으로 이동하는 에스컬레이터를 설치할 수 있도록 플랫폼 터널 양쪽 밖으로 경사터널을 굴착하였다(Pimentel et al., 2012). 플랫폼 터널 굴착 시 지하수 유출을 방지하기 위한 차수보강이 필요하며, 액화질소를 사용한 인공 동결 공법을 적용하였다.

이상의 조사로부터 동결공법의 냉매로 브라인과 액화질소가 주로 사용되며, 염분이 있는 고수압 조건에서는 기화온도가 더 낮은 액화질소가 동결 공법의 냉매로 적합하지만, 해저터널과 같이 밀폐된 공간에서는 별도의 배기설비가 필요하고 작업자의 질식에 대한 위험이 항상 존재하고 있는 단점이 있다. 해저터널의 특성(고수압, 환기조건)을 고려한 동결공법을 개발하기 위해, 동결 냉매로 액화공기(액화질소+액화산소)를 제안하였다. 액화공기는 기화후 일반 대기의 구성과 거의 동일하여, 작업자의 질식에 대한 우려가 전혀 없고, 기화온도(-194.5°C)는 액화질소(-195.8°C)와 큰 차이가 없다(Son et al., 2014).

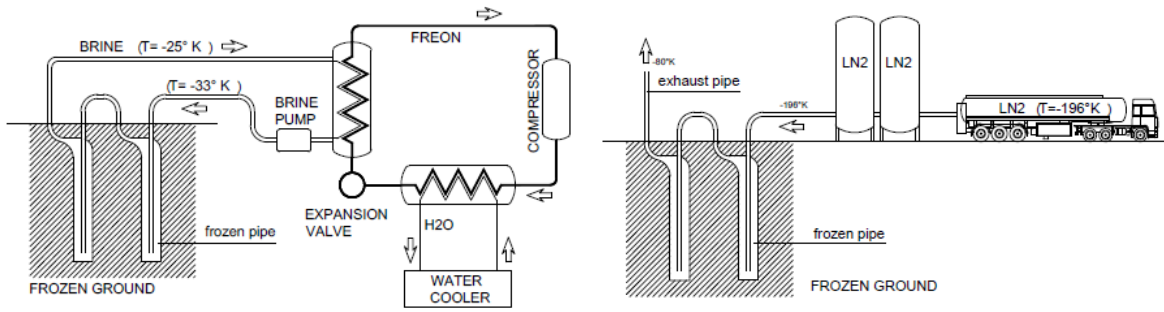
본 연구에서는 염분에 따른 동결토의 열적 특성 변화를 규명하기 위해 실내 챔버 실험을 통한 동결냉매(액화질소, 액화공기)에 따른 동결 효율을 확인하였다. 또한 효율적인 인공 동결 공법의 설계 및 시공을 위해서 신뢰도 있는 동결 소요시간과 사용되는 냉매량을 산정할 수 있는 이론식을 제시하였다. 이를 통해 국내 건설기술 발전과 기존의 인공 동결공법과의 차별화를 통한 기술자립을 달성할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 동결공법 냉매특성비교

2.1 브라인

브라인은 냉각 대상과 직접적으로 열 교환을 하여 상변화를 하지 않고 냉동 시스템 외부로 순환하며 간접적으로 열을 운반하는 매개체로 2차 냉매이다. 브라인을 동결공법 냉매로 사용할 때, 필요 장비는 냉각기, 압축기, 응축기, 냉각탑 및 순환펌프이며, 브라인을 냉각기에서 -30~-20°C 정도로 냉각시킨 후, 순환펌프로 지중에 매설된 동결관으로 보내고 지반과 브라인의 열 교환을 통하여 지반을 동결시킨다(Fig. 1(a)). 지반으로부터 열을 빼앗아 온도가 높아진 브라인이 냉각기로 돌아와 냉각되고 다시 동결관으로 보내지는 순환과정을 반복하여 원하는 범위 만큼 지반을 동결시킨다.

브라인은 순환하여 사용하는 특성에 따라 냉매의 재사용이 가능하여 재료비를 절감할 수 있고, 독성이 적어 작업자에게 위험이 적다는 장점이 있다. 하지만, 다른 냉매에 비하여 기화온도가 높아 지반을 동결하는데 상대적으로 긴 시간이 소요되고 냉각 및 순환에 따른 플랜트가 필요하므로 장비의 구성이 복잡하다.



(a) With brine

(b) With liquid nitrogen

Fig. 1. Schematic diagram of ground freezing (Colombo et al., 2008)

2.2 액화 질소

액화질소는 공기 중의 질소를 액화한 것으로, 다양한 산업분야에서 냉매로 사용하고 있다. 하지만, 폐쇄된 공간에서 액화질소를 냉매로 사용시 동결대상 지반과 열 교환 후 방출되는 질소가스로 인해 공기중의 질소농도가 높아져 질식의 위험성이 존재하므로 액화질소 사용시 주의를 요한다. 액화질소의 기화온도는 -195.79°C , 동결온도는 -210°C 로 냉매로 사용시 액화질소 가용온도는 $-210\sim-195.79^{\circ}\text{C}$ 이다.

액화질소는 브라인에 비하여 기화온도가 낮아 동결시간이 상대적으로 짧고 순환과정이 간단하여 동결에 필요한 장비가 간단하다는 장점이 있다(Fig. 1(b)). 하지만, 냉매의 재사용이 불가하고 기화시 대기중의 질소가스 농도가 증가하여 밀폐된 공간에서 작업자가 질식할 수 있는 위험성이 존재한다.

2.3 액화 공기

해수 용출과 지반 변형으로 인한 터널의 손실을 최소화하기 위하여 신속한 지반 보강 및 치수가 가능해야 한다. 고수압 조건에서의 급속 동결을 위해서는 액화질소를 사용한 방법이 적합하다고 판단된다. 하지만 기화된 질소가스의 누출로 인한 터널내 작업자의 질식 사고에 대한 위험이 존재하고, 기화된 질소가스를 외부로 배출할 수 있는 배기시설이 추가로 설치되어야 하는 문제점이 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 고수압 해저터널 조건에서 급속 동결이 가능한 새로운 냉매에 대한 검토를 수행하였다. 즉, 극저온, 안정성, 그리고 빠른 동결속도 모두를 만족하는 최적 냉매의 선정이 고수압 해저터널에 적용하기 위한 동결공법의 중요한 요소이다.

본 연구에서는 액화질소와 같이 급속 동결이 가능하면서 질식 위험을 줄일 수 있는 냉매로 액화공기(액화질소 + 액화산소)를 선정하였으며, Table 1에 냉매별 특징을 정리하여 비교하였다.

Table 1. Characteristics of refrigerants (from Stoss and Valk, 1979)

Characteristics	Brine	Liquid nitrogen	Liquid air
Minimum temperature	-55~-34°C*	-195.8°C*	-194.5°C*
Application section	Open and enclosed	Open space	Open and enclosed
Reuse of coolant	Standard	Impracticable	Impracticable
Frost penetration	Slow	Fast	Fast
Toxicity	Small	Required ventilation	None
Refrigeration plant	Required	Not required	Not required

*theoretical

3. 동결특성에 대한 이론적 모델

Fig. 2는 정상 상태의 동결관에 대한 반경방향 2차원 열 흐름을 나타낸다. Andersland and Ladanyi (2004)는 영향범위(반경 R로 가정)에 해당하는 지반을 동결하는 데 필요한 열에너지(식 (1), (2))와 동결시간(식 (3))을 제시하였다(여기서, [1] 동결구간 내 지반의 잠열, [2] 주위지반과 물의 동결온도차이에 따른 동결구간 내 현열, [3] 동결구간 내 물의 동결온도부터 냉각되는 온도까지의 현열, [4] 동결되지 않는 지반으로 배출되는 현열로 구성된다). 동결을 유지하기 위한 열에너지를 구하기 위해 식 (4)를 새로이 정리하였다. 반경 R을 동결하는 동안 동결범위 밖으로 배출되는 에너지는 동결이 완료된 이후 동결을 유지하기 위해 필요한 열에너지와 같으며, 식 (1)의 [4]항을 풀어서 정리하였다.

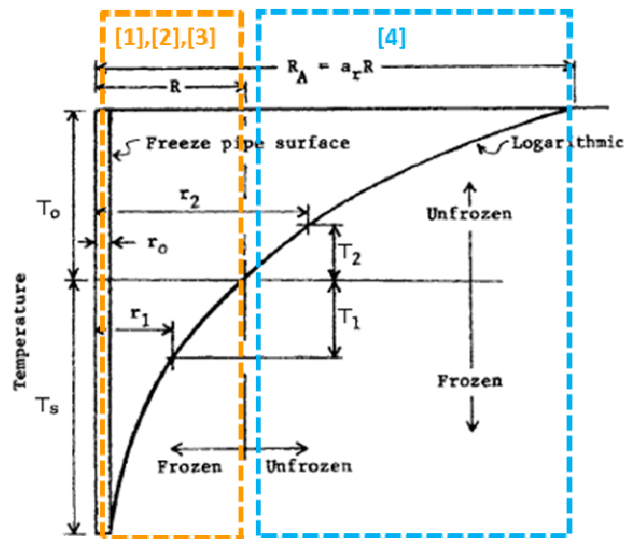


Fig. 2. Temperature distribution curve according to distance of single freezing tube (Andersland and Ladanyi, 2004)

$$Q_I = [1] + [2] + [3] + [4]$$

$$= \pi R^2 L + \pi R^2 C_u T_0 + C_u T_0 \frac{2\pi C_f T_s}{\ln \frac{R}{r_0}} \int_{r_0}^R dr_1 + 2C_u T_0 \int_R^{a_r R} \left(1 - \frac{\ln r_2 / R}{\ln a_r}\right) r_2 dr_2 \quad (1)$$

$$Q_I = \pi R^2 \left(L + \frac{a_r^2 - 1}{2 \ln a_r} C_u T_0 + \frac{C_f T_s}{2 \ln \frac{R}{r_0}} \right) \quad (2)$$

$$t_I = \frac{R^2 L_I}{4k_f T_s} \left(2 \ln \frac{R}{r_0} - 1 + \frac{C_f T_s}{L_I} \right) \quad (3)$$

$$Q_{I[4]} = \pi R^2 C_u T_0 \left(\frac{a_r^2 - 1}{2 \ln a_r} - 1 \right) \quad (4)$$

여기서, $L = \gamma d \frac{w}{100}$ L: 동결되지 않은 지반의 체적당 잠열

L': 표준 상태(0°C, 1 atm) 물의 잠열(L': 333.60 kJ/kg)

C_w : 물의 열용량, 4.187 MJ/m³ · °C (15°C에서)

C_u : $\frac{\gamma d}{\gamma d} \left(0.17 + \frac{w}{100}\right)$ C_w : 동결되지 않는 지반의 열용량

C_f : $\frac{\gamma d}{\gamma d} \left[\left(0.17 + \frac{w_u}{100}\right) + 0.5 \frac{w - w_u}{100} \right]$ C_w : 동결 지반의 열용량

w: 함수비, w_u : 부동수분 함수비, a_r : $\frac{R_A}{R}$ 이고, 일반적으로 3

$L_1 = L + \frac{a_r^2 - 1}{2 \ln a_r} C_u T_0$: 등가 잠열

k_f : 동결된 지반의 열전도도[W/m · K]

4. 동결시간 및 냉매 사용량 산정

이론적 모델을 검증하기 위해, 사질토 시료의 동결과 시료의 온도 변화를 측정할 수 있는 내경 584 mm의 동결 챔버를 제작하여 염분과 냉매에 따른 동결 시간과 냉매의 사용량을 파악하였다.

4.1 실내 동결 챔버 시험 방법 및 결과

동결토의 열적 특성이 염분을 제외하고 다른 요인의 영향을 받지 않도록 채 분석을 통해 분류된 인조규사 6호사를 이용하여 입자 크기에 의한 영향을 최소화하였다. 실험은 다음과 같은 순서로 진행하였다.

1. 매 실험마다 챔버 상부에 설치된 지지대를 이용하여 일정량의 규사를 동일한 높이에서 강사(sand rain)하였다. 이를 통해 균질한 밀도의 시료를 조성하였다.
2. 챔버 하단의 관으로 물을 주입하여 시료 하단에서부터 시료를 포화시켰다. 시료의 완전 포화를 위해 시료 조성 후 24시간을 유지하였다.
3. 챔버 내부에는 시료의 동결이 시작되는 동결관과 시료의 온도변화를 측정할 수 있는 온도계가 위치하고 있다.
4. 동결관은 스테인리스 재질의 이중관으로 제작하였으며, 내관을 통해 냉매인 액화질소가 유입되면 곡면부 하단에서 기화한 후 외관을 거쳐 대기중으로 배출되는 구조로 제작되었다.
5. 온도계는 동결관에서 수평 방향으로 일정한 간격(51 mm)을 두고 4개가 설치되어 시간에 따른 시료의 온도변화를 거리별로 측정할 수 있도록 하였다. 냉매의 소모량을 측정하기 위한 무게변화를 자동으로 기록하였다.
6. 동결관의 외측 접합부에 우회 배관을 연결함으로써 실험 전 동결관을 제외한 배관을 냉각시켜 배관부에 의한 열손실을 최소화하도록 하였다. 냉매와 동결관의 온도를 측정하기 위하여 우회 배관의 유입관(Inlet)과 유출구(Outlet)에 별도의 온도계를 설치하였다(Fig. 3, 4).

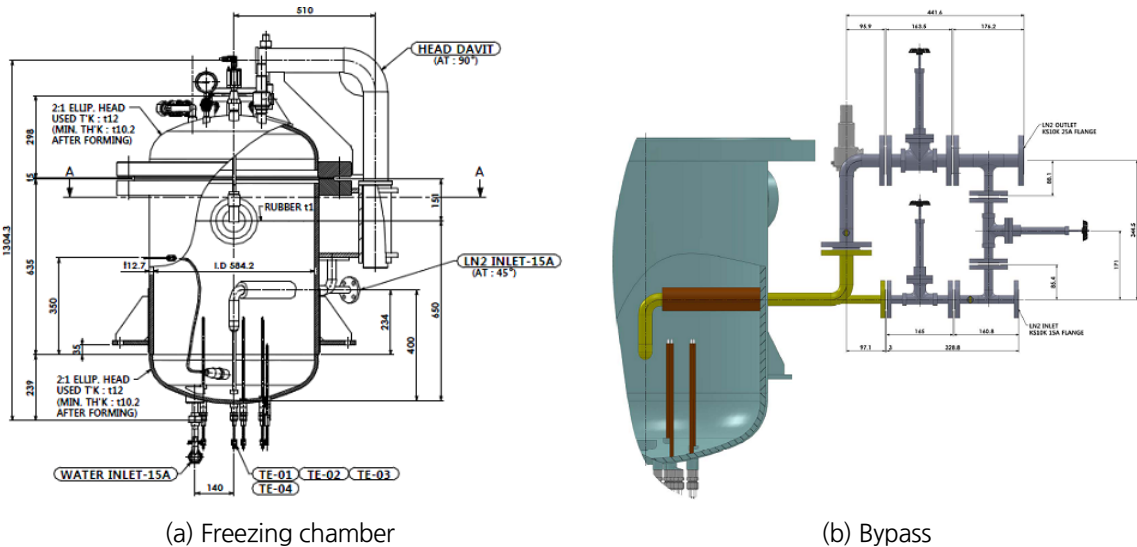


Fig. 3. Schematic diagram of lab-scale freezing chamber experiment

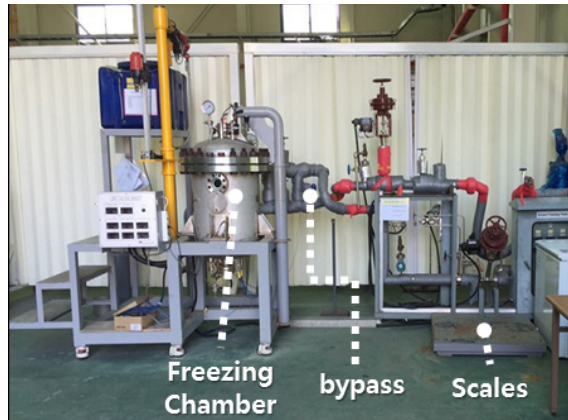


Fig. 4. Picture of lab-scale freezing chamber experiment

염분조건(염도 = 0%, 35%)과 냉매조건(액화질소, 액화공기)에 대한 실험조건을 Table 2에 정리하였다.

담수 조건(염도 = 0%)에서의 실험(Case 1, 3)은 동결 종료 시점을 4번 온도계(동결관에서 204 mm이격)의 측정값이 0°C에 이르렀을 때를 기준으로 하였다. 반면, 염수 조건(염도 = 35%)의 경우 물의 어는점 내림이 발생하므로 4번 온도계의 측정값이 -1.91°C인 시점을 동결 종료 기준으로 삼았다. Table 3에 실험조건에 따른 동결시간과 냉매 사용량을 정리하였다.

전체 동결시간은 기화온도가 낮은 액화질소를 이용한 경우(Case 1, 2)가 액화공기를 이용한 경우(Case 3, 4)보다 길게 소요되었다. 이는 챔버 내 온도 차이(약 10°C, Table 2 참조)로 인해 동결시간이 단축된 것에 기인한다.

Table 2. Cases of experiment with salinity and refrigerant types

Cases		Liquid nitrogen		Liquid air	
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Salinity		0‰	35‰	0‰	35‰
Temperature	In chamber	16.0°C	17.9°C	7.1°C	5.5°C
	In lab	16.1°C	17.9°C	4.5°C	4.5°C
Date		Apr. 23, 2015	May 13, 2015	Dec. 24, 2015	Dec. 22, 2015

Table 3. Results of experiment

Cases	Liquid nitrogen		Liquid air	
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Consumption (kg)	397.3	381.2	426.5	364.7
Freezing time (sec)	33,749	32,180	21,172	17,892
Freezing point (°C)	0	-1.91	0	-1.91

www.kci.go.kr

4.2 이론적 모델 검토 결과

Table 4에는 실내 동결 챔버 시험을 이론적 모델로 계산한 동결 시간과 냉매 사용량을 정리하였다.

Table 4. Results of theoretical model

Cases	Liquid Nitrogen		Liquid Air		Remarks
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
Amount of energy (J/m)	60,435,226	66,491,140	45,338,458	45,779,019	Eq. (2)
Freezing time (sec)	28,162	26,310	22,670	19,492	Eq. (3)
Heat of vaporization (J/mol)	5,570		5,820		*
Molecular weight (g/mol)	28.0134		28.8105		
Amount of refrigerant (kgf)	39.395	33.441	22.827	23.024	**

4.3 수치해석 결과

동결 챔버 실험의 수치모델링을 위해 COMSOL Multiphysics를 사용하였다. 동결에 따른 열전달 과정을 모사하기 위해 고체 상태에서의 열전달 모듈에 상변화(phase change)를 고려하여 시간 종속적 해석을 수행하였다. 동결 챔버와 내부의 동결관은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 2차원 축대칭 모델(Axisymmetric model)을 통해 실제 챔버 크기와 동일한 규격의 형상을 구성하였다. 동결관의 온도는 냉매의 기화온도를 기준으로 경계조건을 적용하였으며, 동결완료 시간은 실내 동결 챔버 시험과 마찬가지로 4번 온도계의 측정값을 기준으로 삼았다.

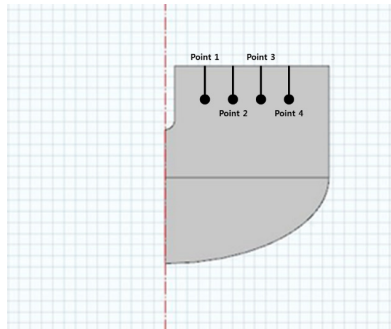


Fig. 5. Modeling in numerical analysis

본 수치 모델링에서는 동결 전·후의 물성치를 구분하여 Table 5와 같이 적용하였다. 또한 물, 얼음, 규사의 비열 값인 4,182, 2,090, 830 J/kg·°C를 기준으로 실험에 사용된 중량비로 환산하여 포화 및 동결 시료의 열용량 값을 산출하였다. 동결 챔버 실험에 대한 수치해석은 액화질소와 액화공기에 대하여 담수 조건에서의 시험(Case 1, 3)과 염수 조건에서의 시험(Case 2, 4)의 결과를 토대로 수행하였다.

Table 5. Thermal properties input in numerical analysis

Cases	Case 1, 3		Case 2, 4	
	Saturated	Frozen	Saturated	Frozen
Thermal Conductivity(W/m · K)	2.2	3.8	2.1	4.5
Density(kg/m ³)	1,854	1,854	1,854	1,854
Heat Capacity(J/kg · K)	1,700	1,300	1,700	1,300

Fig. 6에는 동결관에 적용된 냉매의 기화온도에 따라 수치 해석 결과로 얻은 동결관에 작용한 시간에 따른 에너지량이며, 이를 적분하면 동결을 위한 총에너지량을 산정할 수 있다. 기화온도가 높은 액화공기(-183.0°C)가 액화질소(-194.0°C)보다 외부온도와의 차이가 작을만큼 에너지량이 미소하게 작음을 알 수 있다.

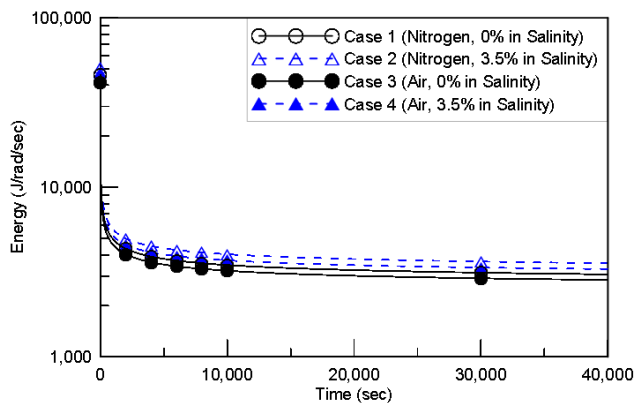


Fig. 6. Freezing energy with time in numerical analysis

Table 6에는 수치 해석에 따른 동결 시간과 냉매 사용량을 정리하였다. Table 4와 비교하면, 전체적인 경향은 일치하는 것으로 판단되며, 다음의 5 동결평가에서 실내실험, 이론식, 수치해석 결과를 비교 분석하였다.

Table 6. Results of numerical analysis

Cases	Liquid Nitrogen		Liquid Air		Remarks
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
Amount of energy (J/rad)	105,213,514	111,877,231	79,104,391	79,757,937	
Freezing time (sec)	29,560	26,880	23,320	20,110	
Heat of vaporization (J/mol)	5,570		5,820		*
Molecular weight (g/mol)	28.0134		28.8105		
Amount of refrigerant (kgf)	57.453	61.092	42.517	42.868	**

*Handbook of chemistry and physics (2004), ** Latent heat only

5. 동결 평가

5.1 동결 시간

Fig. 7은 실험 조건별 실내실험과 이론식, 수치해석에 대한 동결시간을 비교하였다. 염수 조건(Case 2, 4)의 동결이 담수 조건보다 빨리 발생하였으며, 액화 공기를 냉매로 이용한 경우(Case 3, 4), 챔버 내 온도차이로 인해 액화질소보다 빨리 진행되었다. 또한 액화 공기의 경우 초저온 유량 조절 펌프가 설치되지 않아, 실내실험이 이론식, 수치해석 결과보다 더 빨리 동결되었다. Table 2에 제시된 바와 같이 챔버 내 온도가 낮아 동결시간이 단축된 결과이다. 이론식과 수치해석결과를 비교하면, 모두 이론식의 동결이 더욱 빨리 진행되었음을 알 수 있다. 이는 수치해석에서는 시간에 따른 동결구근의 형성(포화지반의 열전도도와 동결지반의 열전도도 변화)를 모사할 수 있지만, 이론식에서는 식 (3)에서와 같이 단순화된 동결된 지반의 열전도도를 대입하기 때문에, 미미하지만 동결 시간의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

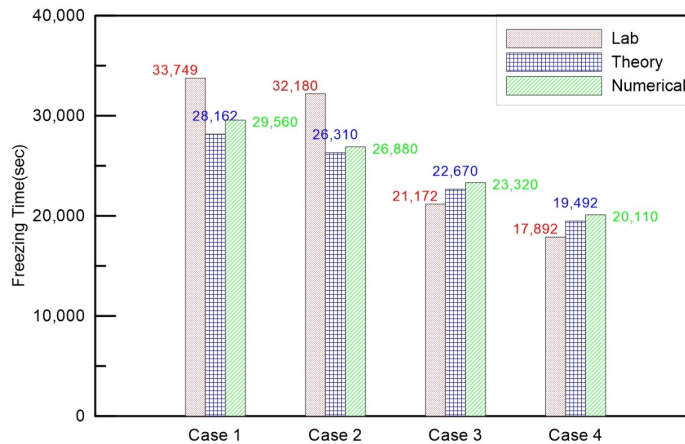


Fig. 7. Freezing time from experimental, theoretical model and numerical analysis

5.2 동결 효율

실제 사용되는 냉매의 사용량을 예측하기 위하여 동결 효율값을 계산하였다. 동결 효율은 실내 동결 챔버 시험을 통해 얻은 냉매 사용량을 수치 해석에서 얻은 이론적인 냉매 사용량으로 나눈 값으로, 수치해석에서 구한 이론적인 냉매 사용량(동결효율 100% 가정값)을 동결 효율로 나누면 실제 동결에 필요한 냉매량 산정이 가능하다.

동결 챔버 실험에서 냉매의 사용량은 대용량 저울을 이용하여 시간에 따른 초저온 용기의 무게를 측정하여 구하였다(Fig. 4, Table 3).

동결 챔버에서 동결관 길이의 한계로, 동결관에서 상변화(액체에서 기체)가 발생하고, 동결관 통과 전후 기체 상태의 냉매의 온도차이가 그리 크지 않아, 냉매의 잠열만을 고려하여 챔버 실험의 동결 효율을 계산하였다.

액화질소의 동결 효율은 평균 15.2%, 액화공기는 10.9%로 전반적으로 효율이 높지 않다(Table 7). 이는 동결 챔버 내 동결관 길이가 충분하지 않은 실내실험의 한계가 반영된 것으로 판단된다. 또한, 액화공기의 경우 초저온 유량 조절 펌프가 설치되지 않아, 액화질소보다 2배 이상의 유량으로 냉매를 주입하였다. 그러므로 액화공기의 동결 효율이 낮은 값을 가지는 것은 타당한 결과이다.

Table 7. Calculation of freezing efficiency in lab-scale freezing chamber

Cases	Liquid nitrogen		Liquid air		Remarks
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
Amount of energy (J/m)	105,213,514	111,877,231	79,104,391	79,757,937	Numerical analysis
Amount of refrigerant (kgf)	57.453	61.092	42.517	42.868	Latent heat only
Consumption (kg)	397.3	381.2	426.5	364.7	Experimental
Freezing efficiency (%)	14.461	16.026	9.969	11.754	

식 (4)를 식 (2)로 나누면 동결을 유지하기 위한 에너지 비율을 구할 수 있으며, Table 8에는 실내 동결 챔버 시험의 동결 유지 에너지 비율을 나타내었다. 액화 질소의 경우(Case 1, 2) 동결유지를 위한 에너지 비율은 평균 33.0%이고 이는 Sanger and Sayles (1979)에서 언급한 전체 에너지의 약 30%는 동결지반 경계면으로 배출되는 결과와 비슷한 경향을 가지고 있다. 하지만, 액화공기의 경우(Case 3, 4)는 평균 18.8%로 매우 크게 차이가 발생하였다. 이는 액화질소의 경우 챔버 내 지반의 온도가 16.0°C와 17.9°C이며, 액화공기의 경우는 7.1, 5.5°C로, 온도 차이(약 10°C, Table 2)로 인해 동결유지를 위한 에너지 비율의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

Table 8. Energy ratio for maintaining frozen status

Cases	Liquid nitrogen		Liquid air		Remarks
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
Amount of energy (J/m)	60,435,226	66,491,140	45,338,458	45,779,019	Eq. (2)
Amount of energy for frozen status (J/m)	18,785,587	23,258,905	8,336,104	8,700,075	Eq. (4)
Energy ratio (%)	31.08	34.98	18.36	19.01	Eq. (4)/Eq. (2)

6. 결론

해저터널 건설에 적절한 인공 동결 공법의 이론적 모델을 규명하기 위해, 시간 및 위치별 지반의 온도를 측정할 수 있는 실내 동결 챔버를 제작하여 시험을 수행하였다. 염분과 냉매의 변화에 따른 동결 시간, 냉매 사용량 및 동결 효율에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 동결시간은 시간에 따른 지반의 전도도의 차이를 모사할 수 있는 수치해석의 결과가 다소 짧지만, 이론식과 비교하여 동결시간의 차이는 크지 않아, 간편 이론식으로 동결시간을 예측하여도 무리가 없을 것으로 판단한다.
2. 액화 공기의 동결 효율은 약 10.9%이며, 액화 질소의 경우 약 15.2%로 산정되었다. 이는 열교환이 발생하는 동결관의 길이가 짧은 실내실험의 한계를 반영한 것으로 판단된다. 실제 인공 동결에서는 동결관 길이의 증가 및 현열의 적용에 따라 동결 효율은 상승할 것으로 예상할 수 있다.
3. 동결유지를 위한 에너지 비율은 경계면의 온도가 높은 경우(평균 17°C) 33.0%, 낮은 경우(평균 6°C) 18.8%로 계산되었다. 해저터널의 토피고와 해저면의 수온에 따라 좌우될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01, Project number: 13SCIP-B066321-01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Andersland, O. B., Ladanyi, B. (2004), Frozen Ground Engineering (Second edition). Chichester: John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, pp. 363.
2. Colombo, G., Lunardi, P., Cavagna, B., Cassani, G., Manassero, V. (2008), "The artificial ground freezing technique application for the Naples underground", Proceedings of the World Tunnel Congress 2008 on Underground Facilities for Better Environment and Safety, Agra, India, pp. 910-921.
3. Handbook of Chemistry and Physics (84th Ed, 2004), Boca Raton, FL : CRC-Press/ Taylor and Francis.
4. Haß, H., Schäfers, P. (2005), "Application of ground freezing for underground construction in soft ground", Proceedings of the 5th International Symposium TC28, Amsterdam, The Netherlands, pp. 405-412.
5. Heijboer, J., Hoonard, J., Linde, F.W.J. (2004), The Westerschelde tunnel: approaching limits, A.A. Balkema, The Netherlands, pp. 292
6. Itoh, J., Lee, Y. S., Yoo, S. W., Lee, S. D. (2005), "Ground freezing improvement for TBM maintenance in Singapore", Proceedings of the International World Tunnel Congress and the 31st ITA General Assembly, Istanbul, Turkey, pp. 471-476.
7. Pimentel, E., Papakonstantinou, S., Anagnostou, G. (2011), "Case studies of artificial ground freezing simulations for urban tunnels", Proceedings of the Word Tunnel Congress 2011 on Underground Spaces in the Service of a Sustainable Society, Helsinki, Finland, pp. 459-468.
8. Pimentel, E., Papakonstantinou, S., Anagnostou, G. (2012), "Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunneling", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 57-69.
9. Sanger, F. J., Sayles, F. H. (1979), "Thermal and rheological computations for artificially frozen ground

- construction”, *Engineering Geology*, Vol. 13, No. 1-4, pp. 311-337
10. Stoss, K., Valk, J. (1979), “Uses and limitations of ground freezing with liquid nitrogen”, *Engineering Geology*, Vol. 13, No. 1-4, pp. 485-494.
11. Son, Y.J., Lee, K.W., Ko, T.Y. (2014), “Studies of application of artificial ground freezing for a subsea tunnel under high water pressure - focused on case histories”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 5, pp. 431-443.