

# 해저터널을 위한 동결공법 냉매로서의 액화공기 적용성에 대한 실험적 연구

손영진<sup>1</sup> · 최형철<sup>2</sup> · 문흥만<sup>3</sup> · 최항석<sup>4</sup> · 고태영<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, SK건설, 부장

<sup>2</sup>비회원, 대성산업가스주식회사, 부과장

<sup>3</sup>비회원, 대성산업가스주식회사, 연구소장

<sup>4</sup>정회원, 고려대학교, 부교수

<sup>5</sup>정회원, SK건설, 부장

## Experimental study on the applicability of liquid air as the refrigerant in artificial ground freezing for subsea tunnels

Young-Jin Son<sup>1</sup>, Hyeungchul Choi<sup>2</sup>, Hung-Man Moon<sup>3</sup>, Hangseok Choi<sup>4</sup>, Tae Young Ko<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>General Manager, SK Engineering & Construction

<sup>2</sup>Manager, Daesung Industrial Gases Co., LTD.

<sup>3</sup>Managing of Director of Research, Daesung Industrial Gases Co., LTD.

<sup>4</sup>Professor, Korea University

<sup>5</sup>Senior Manager, SK Engineering & Construction

**ABSTRACT:** In this paper, the liquid air was selected as the refrigerant in artificial ground freezing to be used for rapid ground freezing and to reduce the risk of suffocation and the applicability of liquid air was verified. In order to evaluate the stability of the liquid air, the oxygen concentration of mixtures with liquid nitrogen and liquid oxygen was experimentally examined to meet the oxygen concentration criteria in the Occupational Safety and Health Act. In addition, the effects of the mixture ratio of liquid nitrogen and liquid oxygen, pressure and flow rate change in the storage vessel on the oxygen concentration in the liquid air were investigated. As a result, the ratio of liquid nitrogen and liquid oxygen 8: 2 was shown to meet the oxygen concentration standards. Pressure and flow rate change in the storage vessel did not have significant effects on the oxygen concentration in the liquid air.

**Keywords:** Artificial ground freezing, Subsea tunnel, High water pressure, Liquid nitrogen, Liquid air

**초 록:** 본 연구는 액체질소와 같이 급속 동결이 가능하면서 질식의 위험을 배제할 수 있는 냉매로서 액화공기를 선정하였고 이의 적용성을 평가하였다. 액화공기의 안정성을 평가하기 위해 액체질소와 액체산소가 혼합된 액화공기의 산소 농도가 산업안전보건법에 제시된 산소 농도 기준에 부합되는지를 실험적으로 검증하였으며, 액체질소 및 액체산소의 혼합 비율, 액화공기 저장용기의 압력변화 및 유량변화에 따른 액화공기 산소 농도변화를 살펴보았다. 그 결과, 액체질소 및 액체산소를 8:2로 혼합하였을 경우 산업안전보건법에 제시된 산소 농도 기준에 부합되는 것을 확인하였다. 액화공기 저장용기의 압력변화 및 유량변화는 액화공기의 산소 농도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

**주요어:** 동결공법, 해저터널, 고수압, 액체질소, 액체공기

## 1. 서 론

\*Corresponding author: Tae Young Ko  
E-mail: tyko@sk.com

Received February 15, 2016; Revised March 2, 2016;  
Accepted March 3, 2016

해저터널은 일반적인 육상터널과 달리 시공 과정에서 예측하지 못한 고수압으로 인한 해수 침투가 발생할 수 있으므로 해저터널의 설계 및 시공에는 고수압

조건에서의 차수 및 보강기술이 필요하나 현재 차수 및 보강기술로 많이 적용되고 있는 그라우팅 공법은 그 효과를 크게 기대하기 어렵다. 대안으로 동결공법이 적용될 수 있으나, 국내에서는 적용된 사례가 거의 없고, 관련된 연구도 거의 이루어지지 않은 실정이다.

동결공법에 일반적으로 적용하는 냉매는 브라인(brine)과 액체질소(LN<sub>2</sub>)를 들 수 있다(Harris, 1995). 선행 연구를 통해 고수압 조건의 급속 동결을 위해서는 액체질소를 사용한 방법이 좀 더 적합하다고 판단되었다(Son et al., 2014). 이는 -196°C 근처의 액체질소가 동결시간을 줄일 수 있고 유속의 영향을 적게 받아 급속 동결에 적합하기 때문이었다. 하지만 해저 터널과 같이 밀폐된 공간에서 액체질소를 급속 동결 냉매로 사용할 경우 가스 누출로 인한 작업자의 질식 사고에 대한 위험이 존재하고, 냉매로 사용된 질소가스를 외부로 배출할 수 있는 배기시설이 추가로 설치되어야 하는 문제점이 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 고수압 조건에서 급속 동결이 가능한 새로운 냉매에 대한 대안이 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 액체질소와 같이 급속 동결이 가능하면서 질식의 위험을 배제할 수 있는 냉매로서 액화공기를 선정하고 적용성을 평가하였으며 냉매별 특징을 Table 1에 이를 정리하였다.

비점이 서로 다른 액체질소(-195.79°C) 및 액체산

소(-182.95°C)를 이용하여 혼합할 경우 열역학 제 0 법칙에 의하여 온도가 다른 두 액체는 열역학적 평형이 이루어질 때까지 열교환을 하게 되는데 (Giancoli, 1984), 비점이 상대적으로 더 낮은 액체질소는 액체산소와 열교환을 하게 되어 온도가 상승하고 액체질소는 부분적으로 기화가 일어나게 된다. 이렇게 기화가 발생하는 문제 때문에 액화공기 혼합시 예측한 비율로 혼합하여도 실제 측정된 산소 농도는 다르게 나와서 정확한 산소 농도 예측이 어려워진다. 본 연구에서는 액체질소 및 액체산소의 혼합 비율, 액화공기 저장용기의 압력변화 및 유량변화에 따른 대기중 산소 농도변화를 살펴보았으며, 액화공기의 안정성을 평가하기 위해 혼합된 액화공기의 대기중 산소 농도가 산업안전보건법에 제시된 산소 농도 기준에 부합되는지를 실험적으로 검증하였다.

## 2. 액화공기 혼합 실험장치 개념 및 실험 계획

### 2.1 액화공기 제조 방법

고수압 해저터널용 급속냉매로 액화공기를 사용하기 위해서는 먼저 액화공기의 제조방법에 대한 검토가 필요하다. 동결을 목적으로 사용되는 초저온 가스

Table 1. Comparison of the refrigerant in artificial ground freezing

Division	Brine	Liquid Nitrogen	Liquid Air
Flow rate of groundwater	Below 2 m/day	Below 20 m/day	Below 20 m/day
Freezing period	3~12 weeks	Below 1 week	Below 1 week
Frozen section	Tunnel	Shaft for TBM, Cross-passage	Tunnel
Features	1. Available reusing refrigerant 2. Less toxic 3. Require a long time for freezing 4. Require complex freezing equipment (Require large plants)	1. Impossible reusing refrigerant 2. When liquid nitrogen is vaporized, nitrogen concentration in the air is increased. So, There is risk of suffocation 3. Relatively, require a short time for freezing 4. Relatively, simple freezing equipment	1. Impossible reusing refrigerant 2. Less toxic 3. Relatively, require a short time for freezing 4. Relatively, simple freezing equipment

는 대부분 액체질소에 의해 사용되고 있고 액화공기의 경우 별도의 사용치가 없으므로 유통되지 않고 액화공기를 직접 생산 또는 제조해서 사용해야 한다.

액화공기를 제조하기 위해서는 액화공기 Plant를 사용하거나, 액체질소와 액체산소를 혼합하는 방법을 고려할 수 있다. 먼저 액화공기 Plant를 이용한 액화공기 제조는 대기 중의 공기 중 수분을 제거하고 압축, 액화하는 과정을 거쳐야 하고 이러한 Plant 건설을 통한 액화공기의 생산은 대규모의 투자비가 필요하며 사용량이 많지 않을 경우 투자비 대비 경제성이 아주 낮으므로 본 연구에서는 Plant를 통한 액화공기의 제조는 검토에서 제외하였다. 액화공기를 제조하는 가장 현실적인 방법은 시중에 유통되고 있는 액체질소 및 액체산소를 혼합하여 액화공기를 만드는 방법이다. 액체질소 및 액체산소는 다양한 용도로 사용되고 있고 쉽게 구할 수 있으므로 이를 혼합하여 액화공기를 제조하는 방법이 더욱 적합한 방법으로 고려될 수 있다. 하지만, 액체질소와 액체산소를 혼합하여 액화공기를 제조할 경우 혼합된 액화공기의 안전성이 검증되지 않았기 때문에 본 연구에서 액화공기 실내 실험을 통해 액화공기의 안정성을 확인하고자 하였다.

## 2.2 액화공기 혼합 실험장치

액체질소와 액체산소를 혼합하여 혼합하는 방식으

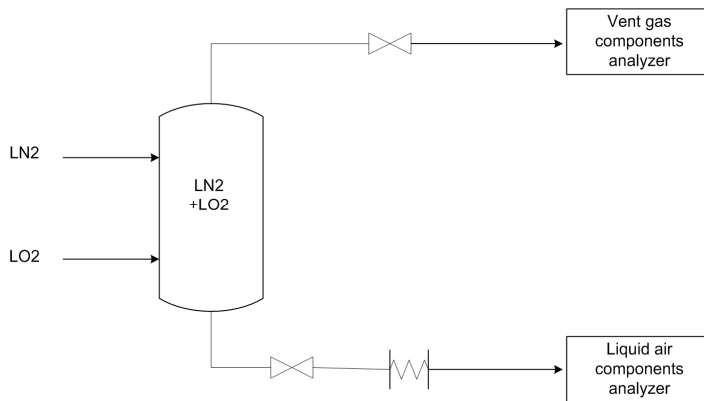
**Table 2.** Oxygen and hazardous gas concentration criteria in confined space

Gas	Concentration criteria
Oxygen	18~23.5%
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	Less than 1.5%
Hydrogen sulfide (H <sub>2</sub> S)	Less than 10 ppm
Flammable gas	Less than 10%

로 액화공기를 제조하기 위해 Fig 1 같은 실험 장치를 구상하였다. 실험 장치는 초저온 용기(LGC, Liquid Gas Cylinder) 내부에 액체질소와 액체산소를 주입하여 혼합한 다음 혼합물을 산소 분석기를 이용하여 액화공기의 대기중 산소농도를 측정하여 안정성을 평가 할 수 있게 하였다.

산업안전보건법에서는 밀폐공간 작업 시 건강장해를 예방조치 하여야 한다고 알리고 있다(Ministry of Employment and Labor, 2013). 또한 시행규칙에 의한 밀폐공간의 기준은 지층에 접하거나 통하는 우물·수직갱·터널·잠함·피트 또는 그 밖에 이와 유사한 것의 내부라 하고 정의하고 있는 만큼 동결공법을 적용하는 구간은 밀폐공간으로 판단한다. 따라서 밀폐공간의 작업자에 대한 건강장해를 예방하기 위해서는 위험 가스가 허용치 이내이며, 적절한 산소 농도를 유지 해주어야 하는데 이는 Table 2와 같다.

Table 2를 기준으로 하여 액화공기의 적정 산소 기준 농도는 19.0~23.0%가 되도록 목표를 정하고



**Fig. 1.** Conceptual diagram for liquid air mixture experiment

실험 장치를 구성하였다.

### 2.3 혼합에 따른 산소 농도

액화공기를 혼합하여 제조할 경우 산소 농도는 액체질소와 액체산소의 혼합비율에 따라 달라진다. 하지만 액체질소(-195.78°C)와 액체산소(-182.95°C)는 서로 다른 온도 때문에 두 물질을 혼합할 경우에는 열역학적 평형을 이룰 때까지 열교환을 하게 된다. 이때 기화되는 양을 예상하여 대기중 산소 농도를 예상할 수 있는데 혼합비율을 달리한 실험을 통하여 최적의 액체질소 및 액체산소의 혼합비율을 도출하고자 하였다. Table 3에는 압력에 따른 냉매의 액화온도(끓는점)를 정리하였다. 액화공기의 액화온도는 Sharp et al. (2008)에 대입하여 계산하였다.

### 2.4 압력 변화에 따른 산소 농도

액체질소와 액체산소는 대기압에서 약 -196°C, -183°C에서 끓는데 압력이 높아지면 이 끓는점이 높아지게 된다. 따라서 액화공기를 제조 후 유지압력에 따라 산소 농도 제어 또는 적정 유지 압력을 알 수 있다고 판단하여 본 실험을 하고자 하였다.

### 2.5 사용 유량에 따른 산소 농도 변화

초저온 용기에 액화공기를 보관하며 사용 할 경우 용기 내부는 점점 빈 공간이 생기게 된다. 이럴 경우 액화공기는 자연적으로 기화가 발생하며, 기화된 기체의 성분은 질소가 더 많이 포함된다. 따라서 액화공기의 사용량이 많을수록 산소 농도가 점점 높아진다고 예상됨에 따라 액화공기의 산소 농도에 영향이 있는지 확인하기 위하여 실험하였다.

## 3. 실험방법

액화공기 혼합 실험을 하기 위해서는 순도 99.999%의 액체질소와 99.5% 이상의 액체 산소를 준비한다. 일반적으로 같은 용기에 충전되기 때문에 충전 부피는 같아도 액체질소와 액체산소는 액체 상태에서의 무게는 다른데 이는 산소분자의 무게가 더 무겁기 때문이다(Table 4).

재료가 준비되었으면 실험을 위한 몇몇 기자재가 필요하다. 먼저 액화공기 혼합 실험을 통하여 제조한 액화공기를 분석하기 위해서는 % 단위로 분석을 할 수 있는 산소 분석기가 필요하다. 산소분석기는 측정하고자 하는 가스의 산소농도차에 의한 기전력(Reference cell과 Nernst cell 사이)을 전위차로 측정하여 이를

Table 3. Boiling point of gases with respect to pressure (Sharp et al., 2008)

Pressure (kPa)	Liquid Nitrogen	Liquid Oxygen	Liquid Air	Remark
0	-195.8°C	-183.2°C	-194.5°C	LN <sub>2</sub> : LO <sub>2</sub> = 8 ; 2 (in mol)
49.0 (0.49bar)	-192.3°C	-179.2°C	-190.9°C	
98.1 (0.98bar)	-189.5°C	-176.1°C	-188.1°C	
196.1 (1.96bar)	-185.3°C	-171.4°C	-183.8°C	
490.3 (4.90bar)	-176.9°C	-162.0°C	-175.2°C	

Table 4. Liquid air material

Material	Purity	Capacity
LN <sub>2</sub>	99.999%	121 kg (150l)
LO <sub>2</sub>	99.5%	168 kg (150l)

산소농도로 환산(Daesung Industrial Gases, 2008)하며, 실험 전 표준가스인 Span gas와 Zero gas를 이용하여 분석기를 교정하여 실험할 수 있도록 준비하였다. 그리고 액체질소와 액체산소를 혼합할 경우 초저온 용기에 주입량을 알 수 있도록 저울을 준비하였다. 액화공기는 초저온의 액체이기 때문에 취급 시 매우 조심하여야 하는데, 안전 장구 없이 취급을 해서는 절대 안 된다. 초저온 액체를 취급 시에는 초저온용 가죽장갑과 보안경을 준비하여 신체를 보호하고 휴대용 산소 농도 측정기를 휴대하여 가스 누출에 대비해야 한다. 그리고 액화공기를 혼합하여 제조할 경우 액체산소를 취급하게 되는데 액체산소는 조연성 물질로 실험 장치 주변에는 인화성 물질이 절대로 있어서는 안 되며 액체산소를 사용한 후에는 외부에서 30분 이상 환기를 충분히 시켜 주어 사고를 방지해야 한다. Fig. 2에 액화공기 혼합 실험장치를 나타내었다.



Fig. 2. Equipment for liquid air mixture experiment

## 4. 실험결과 및 토의

### 4.1 혼합 비율에 따른 액화공기 산소 농도

액화공기를 혼합하여 제조할 경우 초저온 용기 내부에 액체질소 및 액체산소를 주입하게 되는데, 이때 적절한 혼합비율로 혼합해야 목표로 하는 액화공기의 산소 농도(19.0~23.0%)로 제조할 수 있으므로 적정 혼합비율을 찾기 위해 혼합비율을 달리하여 실험을 진행하였다. 또한, 압력은 초저온 용기의 pressure building valve를 통하여 최대한 동일하게 유지하였다. Table 5에 혼합비율에 따른 액화공기의 산소 농도 실험의 조건을 나타내었고 Fig. 3에 혼합비율에 따른 대기중 산소 농도를 나타내었다.

실험 결과 액체질소 및 액체산소를 8:2로 혼합하였을 경우 목표로 하는 산소 농도 19.0~23.0% 사이에 들어오는 것을 확인하였고, 실증 규모에서 산소 농도 19.0~23.0%의 액화공기를 제조 할 경우에는 혼합비

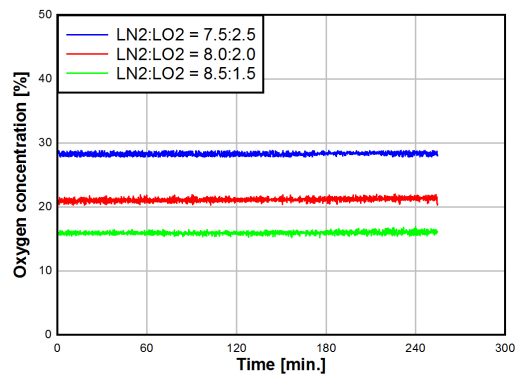


Fig. 3. Oxygen concentration in liquid air with respect to mixture ratio

Table 5. Experimental conditions for oxygen concentration in liquid air with respect to mixture ratio

LN <sub>2</sub> Portion (in mol)	LO <sub>2</sub> Portion (in mol)	Pressure (kPa)
7.5	2.5	279.5
8.0	2.0	282.4
8.5	1.5	281.5

을 8:2 결과인 21.1%을 기준으로 안전을 고려하여 액체산소의 혼합 비율은 18.2~21.6%로 산정되었다.

#### 4.2 유지 압력에 따른 액화공기 산소 농도

압력에 영향을 받는 비점에 따른 영향을 알기 위해 극저온 저장용기의 압력에 변화를 주어 실험을 하였다. 유지하는 압력 범위는 극저온 저장용기의 Design Pressure 내에서 Pressure Building Valve를 통하여 압력의 변화를 주었다. 액체질소와 액체산소의 비율은 8:2로 일정하게 하였으며, 유지 압력은 각각 평균 86.3 kPa, 282.4 kPa, 437.4 kPa 이었다. Table 6에 유지 압력에 따른 액화공기 산소 농도 실험의 조건을 나타내었고, Fig. 4에 유지압력에 따른 대기중 산소 농도 변화를 나타내었다.

유지 압력을 각각 평균 86.3 kPa, 282.4 kPa, 437.4 kPa 로 일정하게 유지 하면서 실험을 진행한 결과 액화공기의 평균 산소 농도는 각각 21.01%, 21.13%,

21.24%로 나타났으며, 그 변화는 크지 않다는 것을 확인하였다. 분석 농도의 변화가 미세하게 있지만 이는 분석기의 측정 오차값인 1% 이내에 들어오는 값이기 때문에 압력에 따른 산소 농도 변화는 없다고 판단 된다.

#### 4.3 사용 유량에 따른 액화공기 산소 농도

급속 동결공법에 액화공기를 적용할 경우 저장 용기 내에서 파이프를 통하여 액화공기를 이송하게 되는데, 이 경우 저장 용기 내 액화공기 양이 변하고 양이 변함에 따라 저장 용기의 압력 및 조성이 변화하기 때문에 사용 유량에 따라 액화공기의 산소 농도에 영향이 있는지 확인하기 위하여 액화공기 사용 유량을 각각 0.1 Nm<sup>3</sup>/hr, 4.5 Nm<sup>3</sup>/hr, 8.7 Nm<sup>3</sup>/hr로 달리하여 실험하였다(N:normal 상태, 0°C, 1 atm). Table 7에 사용 유량에 따른 액화공기 산소 농도 실험의 조건을 나타내었고, Fig. 5에 사용 유량에 따른 액화공

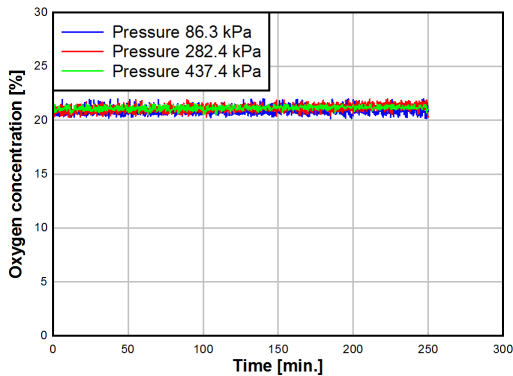


Fig. 4. Oxygen concentration in liquid air with respect to pressure

Table 6. Experimental conditions for oxygen concentration in liquid air with respect to pressure

LN <sub>2</sub> Portion (in mol)	LO <sub>2</sub> Portion (in mol)	Pressure (kPa)
8.0	2.0	86.3
8.0	2.0	282.4
8.0	2.0	437.4

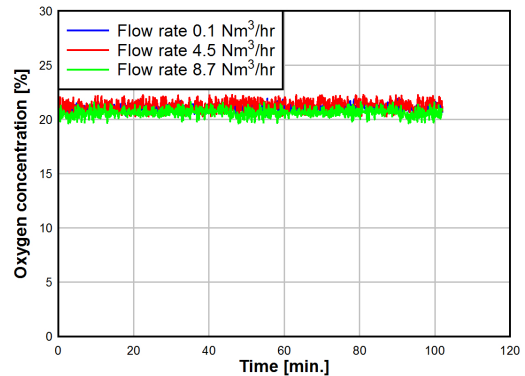


Fig. 5. Oxygen concentration in liquid air with respect to flow rate

Table 7. Experimental conditions for oxygen concentration in liquid air with respect to flow rate

LN <sub>2</sub> Portion (in mol)	LO <sub>2</sub> Portion (in mol)	Flow rate (Nm <sup>3</sup> /hr)	Pressure (kPa)
8.0	2.0	0.1	282.4
8.0	2.0	4.5	281.5
8.0	2.0	8.7	251.1



기 산소 농도 변화를 나타내었다.

실험 결과 액화공기의 평균 산소 농도는 각각 21.01%, 21.24%, 20.63%로 나타났으며, 액화공기 사용 유량이 변하여도 액화공기의 산소 농도는 크게 변하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 액체질소와 같이 급속동결이 가능하면서 질식의 위험을 줄일 수 있는 냉매로서 액화공기를 선정하였고, 급속동결 냉매로서 액화공기의 적용성을 실험적으로 평가하였다. 액체질소 및 액체산소의 혼합 비율, 액화공기 저장용기의 압력변화 및 유량 변화에 따른 액화공기 산소 농도변화를 살펴보고, 액화공기의 안정성을 평가하기 위해 혼합된 액화공기의 산소 농도가 산업안전보건법에 제시된 산소 농도 기준에 부합되는지를 실험적으로 검증하였다. 본 연구를 통하여 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

액체질소 및 액체산소를 8:2로 혼합하였을 경우 산업안전보건법에 제시된 산소 농도 기준에 부합되는 산소 농도 19.0~23.0% 사이에 들어오는 것을 확인하였다.

액화공기의 유지 압력에 따른 산소 농도 변화를 살펴본 결과 압력 변화에 대하여 액화공기의 산소 농도는 큰 영향이 없었다.

액화공기 사용 유량에 따른 산소 농도 변화를 살펴

본 결과 사용 유량은 액화공기의 산소 농도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 파악되었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

1. Daesung Industrial Gases Co. LTD (2008), DOA-3000R Oxygen Analyzer Manual.
2. Giancoli, D.C. (1984), General physics, Prentice-Hall, New York, p. 892.
3. Harris, J.S. (1995), Ground freezing in practice, Thomas Telford, London, p. 264.
4. Ministry of Employment and Labor (2013), Occupational Safety and Health Act.
5. Sharp, D.A., Lee, J.M., Yeo, Y.K., Lee, S.C. (2008), Process design using HYSYS, A-Jin, Seoul, p. 207.
6. 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.