고수압 해저터널 건설을 위한 동결공법 적용성에 관한 연구 - 사례를 중심으로 -

손영진¹ · 이규원² · 고태영^{3*}

¹비회원, SK건설 Infra기술2팀, 부장

²비회원, SK건설 Infra기술2팀, 대리

³정회원, SK건설 Infra기술2팀, 과장

Studies of application of artificial ground freezing for a subsea tunnel under high water pressure - focused on case histories -

Young-Jin Son¹, Kyu-Won Lee², Tae Young Ko^{3*}

¹Senior Manager, Infra Engineering Team 2, SK Engineering & Construction

²Junior Manager, Infra Engineering Team 2, SK Engineering & Construction

³Manager, Infra Engineering Team 2, SK Engineering & Construction

ABSTRACT: In this paper case studies of artificial ground freezing, which have not been applied in Korea, have been investigated for the water cut-off in a subsea tunnel under high water pressure and the most commonly used cooling mediums of brine and liquid nitrogen are examined. Since sea water with pressure has the lower freezing point than pure water, the lower temperature cooling medium is required in the application of subsea tunnel. Also, the cooling medium must have refrigeration safety and is able to reduce executing time. Brine freezing system can reuse cooling medium and is safer than liquid nitrogen freezing. But it takes more time to freeze ground and needs complex circulation plants. On the other hand, liquid nitrogen freezing system can't recycle cooling medium and may cause breathing problems or asphyxiation through oxygen deficiency. But, freezing with liquid nitrogen is fast and requires simple refrigeration equipment. Principal elements of design for ground freezing in subsea tunnel have been extracted and these elements are needed further research.

Keywords: Artificial ground freezing, Subsea tunnel, Cross-passage, Face, High water pressure, Brine, Liquid nitrogen LN₂

초 록: 본 연구는 고수압 해저터널의 차수를 위한 동결공법 적용성 평가를 위해 국내 적용사례가 없는 동결공법의 해외 시공사례를 조사하였으며, 지반 동결공법에서 보편적으로 사용하는 냉매인 브라인(brine)과 액체질소(LN₂)에 대한 분석을 수행하였다. 고수압 조건의 해수는 순수한 물에 비하여 어는 점이 더 낮기 때문에 지상에서보다 동결시간이 더 길 수 있고 해저터널과 같이 폐쇄된 공간에서의 적용 시 냉매는 안정성을 확보할 수 있어야 하고 공기 단축이 가능해야 한다. 브라인은 재사용이 가능하고 독성이 적어 인체에 미치는 영향이 적으나, 동결에 상대적으로 장시간 필요하고 동결장비가 복잡한 특징을 가지고 있으며, 액체질소는 냉매의 재사용이 불가하며 기화 시 공기 중 질소농도 증가로 질식의 위험성이 있으나, 상대적으로 동결시간이 짧으며, 동결장비가 간단한 특징을 가지고 있는 것으로 파악되었다. 또한 향후 추가적인 연구가 필요한 해저터널 연결구 및 막장면 주변 지반에 대한 동결공법의 주요 설계요소를 도출하였다.

주요어: 동결공법, 해저터널, 연결구, 막장면, 고수압, 브라인, 액체질소

***Corresponding author:** Tae Young Ko

E-mail: tyko@sk.com

Received July 16, 2014; **Revised** July 28, 2014;

Accepted August 7, 2014

Copyright ©2014, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 국내·외에서 대륙을 연결하는 해저터널 건설에 대한 관심이 증가하고 있다. 국내에서는 부산과 거제도를 잇는 가덕 해저터널(3.7 km)이 2010년에 개통되었고 대천항~원산도간 보령 해저터널(6.29 km)은 현재 시공 중에 있으며, 목포~제주간 해저터널 건설계획이 구상되는 등 국내 해저터널 수요가 증가하고 있다. 세계적으로도 이스탄불의 보스포루스(Bosphorus) 해협을 관통하는 유럽과 아시아를 잇는 터키 유라시아 터널이 시공 중에 있으며, 중국 랴오닝-산둥 해저터널(122 km), 러시아의 베링(Bering) 해협 해저터널(104 km) 건설계획 등 세계 해저터널 시장의 수요도 점차적으로 증가하고 있는 추세이다.

해저터널은 육지에서의 터널과 달리 지질학적인 상태에 따라 매우 높은 수압이 작용할 수 있으며, 대규모 해수 유출 및 지반변형 발생 시 고수압으로 인하여 그라우팅(Grouting) 공법과 같은 일반적인 차수 및 보강공법 적용이 어렵다. 따라서, 고수압 조건에서도 차수 및 보강이 가능한 동결공법이 대안으로 적용될 수 있다. 동결공법은 지반에 포함되어 있는 물을 인공적으로 동결시켜 지반의 강도증가와 차수를 목적으로 하는 보조공법이다.

본 논문에서는 전 세계적으로 수요가 증가하고 있는 해저터널의 설계 및 시공기술 확보의 일환으로 향후 추가적인 연구를 위한 고수압 해저터널에서의 동결공법 설계요소를 도출하였으며, 이를 위해 동결공법 시공사례를 조사하고 동결공법에서 보편적으로 사용하는 냉매인 브라인(brine)과 액체질소(LN₂)에 대한 분석을 수행하였다.

2. 동결공법 시공사례

2.1 Westerscheled 터널

Westerscheled 터널은 네덜란드 남서부의 Zeeland Flandre에서 South Beveland까지의 연결도로이며, 1998년에 착공하여 2003년에 완공되었다(Heijboer et al., 2004). Westerscheled 터널은 2차선 병렬터널, 연장 6,600 m로 이수식 쉴드(slurry shield) TBM으로 굴착되었으며, 6.5 bar의 고수압이 작용하고 클로깅(clogging) 위험이 있는 하저 연약지반(느슨한 모래 및 점토층)을 통과하는 터널이다. Westerscheled 터널의 연결구(연결구 제원: 단면적 6.25 m², 연장 12 m, 250 m 마다 설치)는 20~30 m 두께의 중간 정도 느슨한 모래에 점토, 이탄, 세사 등이 포함되어 있는

Fig. 1. Artificial ground freezing in the Westerscheled tunnel: (a) The configuration of the freeze-pipes around the of cross-passage and (b) The freezing installation and piping (after Heijboer et al., 2004).

연약지반을 통과한다. 연결구 시공시 고수압으로 인한 하천수 용출방지 및 연약지반 보강을 위하여 26 개소에 지반 동결공법을 적용하였다. 동결공법의 냉매로 브라인을 사용하였으며, 94 kW 용량의 냉각기를 사용하여 -37°C 의 온도를 유지하였다. 냉각기를 비롯한 동결장비는 긴 배관으로 인한 열손실을 방지하기 위하여 동결공법을 적용하는 연결구 가까이 설치되었다.

동토(凍土)의 최소 두께는 2m이며, 연결구 주위의 지반으로 냉매를 주입하기 위하여 연결구 굴착선 주위에 1 m 간격으로 동결 파이프(freezing pipe)를 설치할 공(孔)의 위치를 선정하고 막장면에서 수평방향으로 천공 후 동결 파이프를 삽입하였다. 연결구 1개소당 22 개의 동결 파이프 온도측정을 위한 온도 측정구(temperature hole) 2공이 설치되었다(Fig. 1).

연결구 주위의 원하는 영역만큼의 지반만 동결시키기 위해서는 적정 온도 유지가 필요하다. 특히, 본선터널과 연결구 교차부에 설치된 강재 세그먼트는 동토와 접하여 있고 열 전달성이 높아 동토와 열 교환이 발생하고 이로 인하여 동토의 온도가 상승하여 동토가 설계된 대로 형성되지 않을 가능성이 있다. 이러한 현상을 방지하고자 드라이아이스(dry ice)를 이용하여 강재 세그먼트의 온도를 저온으로 유지하였으며, 강재 세그먼트가 설치된 부분 외 연결구 주위 지반에는 지반 내에 임시 공간을 굴착하여 지반 내 공기의 온도를 낮추어 주었다. 이러한 시공관리를 통하여

Westerscheled 터널의 모든 연결구에서 설계된 대로 동토를 형성할 수 있었다.

2.2 Fürth Subway-Line U1 Stadthalle ~Klinikum 구간 (이하 Fürth Subway)

독일 Fürth시의 Stadthalle역과 Klinikum역 사이 구간은 Fürth Subway-Line U1의 연장구간의 일부이며, 2002년에 완공되었다. 당 구간의 터널은 단선 병렬 터널로 연장은 1,300 m이며 NATM 공법으로 굴착되었고 주로 풍화암과 침전물로 구성된 지반을 통과한다(Pimentel et al., 2011).

Stadthalle역과 인접한 Rednitz Valley 구간은 모래 및 연약지반으로 구성되어 있고 지상에는 역사적·문화적 가치가 큰 건물이 위치하고 있어 시공 시 주의가 필요한 것으로 판단되었으며, 터널굴착 시 지하수 용출, 지표침하 방지를 목적으로 56 m에 이르는 구간에 지반 동결공법을 적용하였다. 동결공법의 냉매로 브라인을 사용하였으며, 2개조의 동결장비를 운영하였고 사용한 냉각기의 용량은 465 kW이다.

동결공법을 적용한 터널단면의 상반은 대수층이고 하반은 암반이므로 동토는 상반 대수층에만 형성하였으며, 동토의 두께는 1 m이다. 3차원 열-수리 연동 수치해석을 수행하여 온도분포 양상 및 동토의 형성을 Fig. 2와 같이 분석하였다. 이를 바탕으로 동결 파이프를 Fig. 3과 같이 배치하였으며, 정거장의 수직

Fig. 2. The predicted temperature field around the tunnels at three time points: (a) 7 days, (b) 13 days, and (c) 28 days (after Pimentel et al., 2011).

Fig. 3. The configuration of freeze pipe around the tunnel (after Pimentel et al., 2011).

구에서 수평방향으로 천공하여 동결 파이프를 동결 대상지반에 삽입하였다. 1단면 당 동결 파이프 23개, 온도측정을 위한 온도 측정구가 터널방향과 수평으로 8개, 수직으로 5개가 설치되었다.

2.3 DTSS(Deep Tunnel Sewerage System) 4공구 Ang Mo Kio 터널 (아하 DTSS 4공구)

싱가포르 1차 하수관로망 총 48.1 km 공사중 제 4공구로 싱가포르 중부 Ang Mo Kio 지역에 위치하며, 당 공구의 Ang Mo Kio 터널은 연장 7,274 m로 토압식 쉴드(EPB shield) TBM으로 굴착되었다(Itoh et al., 2005). Ang Mo Kio 터널의 전 구간은 지표면 하부 30~40 m 심도의 고속도로 하부를 통과하고 대부분의 지반은 충적층의 단단한 지반으로 구성되어 있으나, 충적층 상부는 점토 등 연약한 지반이 존재한다. 이 연약층은 싱가포르 현지에서 'Kallang formation'이라 통칭한다.

TBM 장비의 커터(cutter) 교체 및 고속도로 및 하천 하부 통과 전 장비점검을 위하여 굴진을 멈추고 TBM 장비 앞 부분에 위치한 커터 챔버(cutter chamber)에 작업자가 진입해야 하나, TBM 장비가 정지한 지점의 터널상부에는 초 연약층이 존재하고 막장으로부터 커터 챔버 내로 다량의 지하수가 유입되어 커터 교체 및 장비점검에 어려움이 발생하였다. 이에 막장면 차

Fig. 4. Design of frozen soil (after Itoh et al., 2005).

수와 터널상부의 붕락방지를 위한 보강방안을 검토하였으며, 지반 동결공법을 보강방안으로 선정하였다.

동결공법의 냉매로는 액체질소를 사용하였으며, Fig. 4와 같이 폭 7.3 m, 높이 7.45 m, 연장 4.6 m의 동토가 형성되고 동결 완료 시 동토의 일축압축강도는 $150 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$, 커터 챔버 내 온도는 -20°C 를 유지하도록 설계하였다. 동결 파이프는 42공, 간격은 0.9 m이며, 지상에서 동결이 필요한 심도까지 수직 천공하여 150 mm PVC 파이프를 설치 후 그 속에 동결 파이프를 삽입하였다. 또한, 온도측정을 위하여 온도센서를 동토 외부에 3개, 내부에 1개, 총 4개를 설치하여 동토의 온도를 관리하였다.

2.4 Naples subway-Line 1 Platform tunnel of the Università Station (이하 Naples subway)

이탈리아 Naples시의 Università Station은 Naples subway-Line 1의 연장 구간인 Piazza Dante와 Centro Direzionale 구간 상에 위치한 정거장으로 1993년에 완공되었다(Pimentel et al., 2011). Naples Subway-Line 1의 연장 구간은 매우 변화한 도심지로 작업공간의 확보가 용이치 않다. 따라서 정거장 시공 시 개착(cut and cover)공법 적용이 불가하다. 이에 연장 구간 내 위치하는 정거장 시공 시 Fig. 5와 같이 정거장 중앙

Fig. 5. Naples subway: (a) Isometric view of Università station and (b) plan view of the T1 tunnel (after Pimentel et al., 2012).

위치에 수직구를 굴착하여 수직구로부터 양 방향으로 본선궤도와 연결되는 플랫폼(Platform) 터널을 굴착하고 플랫폼으로 이동하는 에스컬레이터를 설치할 수 있도록 플랫폼 터널 양쪽 바깥으로 경사터널을 굴착하였다. 터널굴착은 NATM 공법을 적용하였다. Università Station 역시 위와 동일한 방법으로 시공되었으며, 깊이 30 m, 폭 40 m, 길이 20 m의 수직구, 연장 48 m의 플랫폼 터널 4개소 및 에스컬레이터 시설이 위치할 경사터널 4개소로 구성된다.

Università Station 구간은 불규칙한 수직방향의 균열이 상당히 발달하여 굴착 시 지하수 유출 가능성이 높은 응회암이 플랫폼 터널 깊이에 분포하고 있다. 또한, 해안과 인접하여 있어 지표면까지 지반이 포화되어 있다. 이에 Università Station의 플랫폼 터널 굴착 시 지하수 유출을 방지하기 위한 차수보강이 필요하며, 차수보강 방안으로 지반 동결공법을 선택하였다.

동결공법의 냉매로 액체질소를 사용하였으며, 동결 파이프에 주입 시 액체질소의 온도는 -196°C 이며, 동결 파이프에서 배출 시 기화된 질소의 온도는 $-60 \sim -100^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 액체질소 주입압력을 유지하였다. 터널 주변으로 1 m 두께의 동토가 형성되고 온도는 -10°C 이하를 유지하도록 동결공법을 설계하였다.

동결 파이프는 길이 50 m로 Fig. 6과 같이 배치하였으며, 정거장의 수직구에서 수평방향으로 천공하여 동결 파이프를 동결 대상지반에 삽입하였다. 동결 파이프의 길이는 50 m로 플랫폼 터널의 연장 48 m 전체를 아우른다. 동결 파이프를 삽입할 공(孔)은 정거장의 수직구에서 수평천공으로 굴착되었다. 동결 파이프의 길이가 50 m이므로 천공길이가 상당히 긴 편이며, 이러한 장공 천공 시 수평도를 맞추기가 어려우므로 모든 홀이 평행이 되게 천공하는 것은 사실상 불가능하다. 장공 천공으로 인한 오차의 허용범위는 천공길이의 0.5%이며, 당 사례의 경우, 오차 허용범위는 0.25 m이다. 설계상 동결 파이프 간의 간격은 0.75 m이나, 인접한 2개의 동결 파이프가 서로 마주보는

방향으로 수평도가 어긋났을 경우, 천공길이 50 m 지점에서는 인접한 동결 파이프와의 간격이 최소 0.25 m로 0.75 m의 3분의 1까지 좁아질 수 있다. 따라서 장공 천공으로 인한 오차를 동결 파이프 간 간격에 반영하여 동결 파이프를 1.25 m 간격으로 배치하였다. 플랫폼 터널 1개소당 동결 파이프 55개, 온도측정을 위한 온도 측정구 11개가 설치되었다. Fig. 7은 실제 동결된 막장면의 모습이다.

Fig. 6. Initial cross section A-A (cf. Fig. 5) with the installed freeze pipes, the thermometer chains and the excavation profile of the T1 tunnel (after Pimentel et al., 2012).

Fig. 7. Face with freezing of a substantial thickness of ground (after Colombo et al., 2008).

2.5 기타 사례

굴착이 아니거나, 본 연구와의 유사성이 낮은 시공 사례를 Table 1부터 4까지 요약하여 정리하였다.

동결공법이 적용된 사례이기는 하나 TBM에 의한

Table 1. Under-crossing of the river Limmat in Zurich (after Pimentel et al., 2012).

Division	Contents
Excavation Method	NATM
Geological conditions	gravel, deposits, glacial till, molasse
Section applied ground freezing	Main tunnel across river section
Refrigerant	Brine
Construction method	Insert a frozen pipe by horizontal drilling at the shaft
Uniqueness	Sheet pile installation on the side of the tunnel in order to prevent heat exchange with bottom of the river

Table 2. Subway section 3.4H, Düsseldorf in Germany (after Haß and Schäfers, 2005).

Division	Contents
Excavation Method	NATM
Geological conditions	sand, gravel
Section applied ground freezing	Top of the tunnel across lower of the building
Refrigerant	Brine
Construction method	Insert a frozen pipe by horizontal drilling at the tunnel face
Uniqueness	Ground freezing applied by injection water into the unsaturated soil above the water table

Table 3. Fahrlach tunnel, Mannheim in Germany (after Haß and Schäfers, 2005).

Division	Contents
Excavation Method	NATM
Geological conditions	fill layer, sand, gravel
Section applied ground freezing	Cross passage
Refrigerant	Brine
Construction method	Insert a frozen pipe by horizontal drilling at the tunnel face
Uniqueness	1. Ground freezing applied by injection water into the unsaturated soil above the water table 2. Erouting injection in frozen soil in order to maintain an appropriate flow rate

Table 4. Rehabilitation of a jet grouted seal block, Fernbahn tunnel Lot 3, Berlin in Germany (after Haß and Schäfers, 2005).

Division	Contents
Excavation Method	TBM
Geological conditions	sand, gravel
Section applied ground freezing	Shaft for TBM
Refrigerant	Brine
Construction method	Insert a frozen pipe by vertical drilling at the ground
Uniqueness	Ground freezing applied for prevent water inflow and sediment run off during removing the concrete caisson wall for TBM.

3. 동결공법 냉매

고수압 조건의 해수는 순수한 물에 비하여 어는점이 더 낮다. 이유는 해수가 순수한 물에 비하여 어는점이 약 2°C 정도 낮고, 대기압 하에서의 어는 점보다 고수압 하에서의 어는 점이 더 낮기 때문이다. 따라서 기존 지상에서의 동결공법 시공 시 사용하는 냉매보다 더 저온의 냉매가 필요하다. 또한, 해저터널과 같이 응급상황 발생 시 접근이 어려운 공간에서의 동결공법 시공 시 냉매는 안정성을 확보할 수 있어야 하며, 해수 용출과 지반 변형으로 인한 터널의 손실을 최소화 하기 위하여 신속한 지반 보강 및 치수가 가능해야 한다. 즉, 극저온, 안정성, 그리고 빠른 동결속도를 모두 만족하는 최적의 냉매를 선정하는 것이 고수압 해저터널에 적용하는 동결공법의 중요한 요소이다.

국외 동결공법의 사례연구를 통해서 동결공법 분야에서 보편적으로 사용되는 냉매는 브라인과 액체질소로 파악 되었으며, 브라인과 액체질소에 대한 조사 및 상기 동결공법 국외 사례를 통한 분석을 수행하였다.

3.1 브라인

브라인은 2차 냉매로 일반적인 냉매와 같이 냉각 대상과 직접적으로 열 교환을 하여 상 변화를 하지 않고 냉동 시스템 외부를 순환하며 간접적으로 열을 운반하는 매개체이다. 브라인은 무기질 브라인과 유기질 브라인으로 분류된다. 무기질 브라인은 탄소를 포함하지 않은 브라인으로 염화칼슘(CaCl_2), 염화나트륨(NaCl), 염화마그네슘(MgCl_2) 등이 있으며, 유기질 브라인은 탄소를 포함하는 브라인으로 에틸렌 글리콜($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$), 프로필렌 글리콜($\text{HOC}_2\text{H}_3(\text{CH}_3)\text{OH}$), 에틸 알코올($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 등이 있다. 브라인 중 무기질 브라인인 염화칼슘 브라인은 독성이 적고 생산이 쉬워 산업분야에서 가장 널리 이용된다. 염화칼슘 브라인의 끓는 점은 -55°C 이며, 냉매로 사용시 가용온도는 $-25^{\circ}\text{C} \sim -35^{\circ}\text{C}$ 이다.

브라인을 지반 동결공법 냉매로 사용 시 필요한 장비는 냉각기, 압축기, 응축기, 냉각탑 및 순환펌프이며, 브라인을 냉각기에서 $-20 \sim -30^{\circ}\text{C}$ 정도로 냉각시킨 후, 순환펌프로 지중에 매설된 강관으로 보내고

Fig. 8. Brine freezing (after Haß and Schäfers, 2005).

지반과 브라인의 열 교환을 통하여 지반을 동결시킨다(Fig. 8). 지반으로부터 열을 빼앗아 온도가 높아진 브라인이 냉각기로 돌아와 냉각되고 다시 강관으로 보내지는 순환과정을 반복하여 원하는 범위만큼 지반을 동결시킨다.

지반 동결공법 적용 시 일반적으로 지하수 유속, 동결지반 체적, 지반동결 필요기간, 지반동결 구간에 따라 사용할 냉매를 결정한다. 브라인은 일반적으로 지하수 유속 2 m/day 이하, 동결지반의 체적 200~35,000 m³, 지반동결 기간 3~12주, 지반동결 구간 수직갱, 수평갱, 터널 천단부 등의 조건에서 동결공법 냉매로 사용한다(Harris, 1995, Table 5에서 요약).

브라인은 동결 시 순환과정의 특성 상 냉매의 재사용이 가능하여 지반 동결공법에 적용 시 재료비를 절감할 수 있고 앞서 언급하였듯이 독성이 적어 인체에 미치는 영향이 미미하다는 장점이 있다. 하지만, 다른 냉매에 비하여 온도가 낮아 지반을 동결하는데 상대적으로 긴 시간이 소요되고 순환과정상 대형 플랜트(Plant)가 필요하므로 장비의 구성이 복잡하다.

3.2 액체질소

액체질소는 공기 중의 질소를 액화한 것으로, 다양한 산업분야에서 냉매로 사용하고 있으며, 초대형 냉동창고, 산업폐기물의 동결 및 분쇄, 원자력 발전의 고온가스 냉각재, 초전도 마그네트의 냉각재 등 다양한 분야에 이르는 기술개발이 진행되고 있다. 하지만, 폐쇄된 공간에서 액체질소를 냉매로 사용시 냉각 대상과 열 교환 후 방출되는 질소가스 때문에 공기중의 질소농도가 높아져 질식의 위험성이 존재하므로 액체질소 사용 시 주의를 요한다. 액체질소의 끓는 점은 -196°C, 어는 점은 -210°C로 냉매로 사용 시 액체질소가용온도는 -196~-210°C 이다.

액체질소를 지반 동결공법의 냉매로 사용 시 탱크로리(tank lorry)에 의해 운반된 액체질소를 직접 지중에 매설된 강관으로 보내고 브라인과 마찬가지로 지반과 액체질소 사이의 열 교환을 통하여 지반을 동결시킨다(Fig. 9). 지반으로부터 열을 빼앗아 기화된 질소가스는 대기 중으로 배출된다.

액체질소는 일반적으로 지하수 유속 20 m/day 이

Fig. 9. Liquid nitrogen LN2 freezing (after Haß and Schäfers, 2005).

하, 동결지반 체적 200 m^3 이하, 지반동결 기간 1주 이하, 지반동결 구간 TBM 발진·도달 수직구, 교차 연결부 등의 조건에서 동결공법 냉매로 사용한다 (Harris, 1995, Table 5에서 요약).

액체질소는 브라인에 비하여 온도가 낮아 지반 동결시간이 상대적으로 짧고 순환과정이 간단하여 동결에 필요한 장비가 간단하다는 장점이 있다. 하지만, 냉매의 재사용이 불가하고 앞서 언급하였듯이 지하 시 공기중의 질소농도가 증가하여 밀폐된 공간에서 작업자가 질식할 수 있는 위험성이 존재한다.

3.3 브라인과 액체질소 비교·분석

Table 5에 상기 서술한 기존 동결공법 냉매 연구에서 조사된 브라인과 액체질소 일반적인 적용 조건 및 특징을 요약·비교하였다.

또한, 동결공법 냉매의 일반적인 적용 조건 및 특징과 동결공법 사례 연구를 통하여 냉매 선정 시 고려사항을 도출하였다. 동결공법 사례 연구를 통하여 냉매 선정의 공통점을 분석한 결과, 환기 조건에 따라 환기가 원활한 조건일 경우 액체질소, 환기가 원활하지 않은 조건일 경우 브라인을 동결공법 냉매로 선정했음을 알 수 있었다. 브라인을 동결공법 냉매로 사용한 Westersceled 터널과 Fürth subway의 경우, Westersceled 터널은 하저터널이며, Fürth subway는 동결공법을 적용한 구간 상부에 역사적·문화적 가치가 큰 건물이

위치하고 있다. 두 사례 모두 터널 중간에 환기를 위한 수직구 설치가 불가하여 환기에 불리한 조건이다. 따라서, 환기가 용이치 않은 공간에서 질식의 위험성 및 인체 유해성이 적은 브라인을 동결공법의 냉매로 사용하였다. 한편, 액체질소를 동결공법 냉매로 사용한 DTSS 4공구와 Naples subway의 경우, DTSS 4공구는 지상에서 동결공법을 수행하였으며, Naples subway는 동결공법을 적용한 플랫폼 터널 중간에 정거장 수직구가 존재하고 수직구와 연결된 경사터널과 플랫폼 터널이 서로 연결되어 있어 두 사례 모두 환기에 유리한 조건이다. 따라서, 작업자가 질식의 위험성으로부터 안전한 조건이므로 브라인에 비하여 동결속도가 빨라 신속한 지반 치수 및 보강이 가능한 액체질소를 냉매로 사용하였다.

이외 Table 5와 같이 기존의 동결공법 냉매 연구에서 지하수 유속, 동결지반 체적, 지반 동결기간, 지반 동결구간과 같은 냉매 별 적용 조건을 제시하였지만, 동결공법 사례를 분석한 결과, 제시된 모든 조건을 고려하여 냉매를 선정한 경우는 없었다. 이는 최적의 냉매를 선정할 시 기존 동결공법 냉매 연구에서 제시한 냉매 별 적용 조건과 더불어 작업공간, 경제성, 냉매 조달 등 현장의 다양한 외적 요인을 고려하였기 때문이다.

브라인과 액체질소의 동결공법 냉매로서의 일반적인 적용 조건 및 특징 조사와 동결공법 사례 연구를 통하여 냉매의 적용성을 비교·분석한 결과, 최적의

Table 5. Comparison of brine and liquid nitrogen LN₂

Division	Brine	Liquid Nitrogen
Flow rate of ground water	Below 2 m/day	Below 20 m/day
Volume of frozen soil	200~35,000 m ³	Below 200 m ³
Freezing period	3~12 weeks	Below 1 week
Frozen section	Vertical tunnel, Horizontal tunnel, Top of tunnel	Shaft for TBM, Cross Passage
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

동결공법 냉매를 선정하기 위한 최우선 고려사항은 작업자의 안전을 확보할 수 있는 환기 조건이며, Table 5와 같이 기존 동결공법 냉매 연구에서 제시한 지하수 유속, 동결지반 체적, 지반 동결기간, 지반 동결구간과 같은 일반적인 조건은 작업공간, 경제성, 냉매 조달 등의 다양한 외적 요인을 함께 고려하여야 한다.

4. 고수압 해저터널 동결공법 설계요소

해저터널에서 본선터널 사이에 일정 간격으로 설치되는 연결구 굴착과 본선터널 TBM 굴진 중 커터 점검 및 교체에 따른 굴진 정지는 해저터널 전체 공사 기간에 큰 영향을 미칠 수 있는 요소이다. 공사기간에 대한 영향이 큰 연결구 및 막장면에서 대규모 해수유출 및 지반변형이 발생할 경우, 공기자연으로 인한 경제적 손실은 물론 터널의 전반적인 안정성을 저해할 수 있으므로 신속히 효과적인 차수 및 보강공법을 적용하여야 한다. 그러나, 해저터널과 같은 고수압 조건에서는 그라우팅 공법과 같은 일반적인 차수 및 보강공법은 고결제를 지반으로 주입하는 압력이 수압보다 작을 경우, 공법 적용이 불가하다. 따라서, 고수압의 해저터널에서는 그라우팅 공법 대신 주입 압력에 대한 제한이 적은 동결공법이 효과적인 차수 및 보강 공법이 될 수 있다.

고수압 해저터널의 연결구 주변 및 TBM 막장면에 동결공법을 적용하기 위하여 국외 동결공법 사례 및 동결공법 냉매 조사·분석을 통하여 동결공법 주요 설계요소 5가지를 도출하였다.

첫째 설계요소는 동결범위 선정이다. 동결범위 선정을 위해서는 지반조건을 고려한 동토의 목표 지반 강도를 정하는 것이 필수이다. 목표 지반강도 발현을 위하여 동토의 두께 및 단면을 정한 후 동결 대상 구간의 연장이나 수에 따라 전체 동결범위를 선정할 수 있다. DTSS 4공구에서는 지반의 목표 일축압축강도를 $150 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$ 으로 설정하고 이를 발현시키기 위한 폭 73 m, 높이 7.45 m, 연장 4.6 m의 동결범위

를 선정하였다. 이 밖에도 Westerscheled 터널, Fürth subway, Naples subway 역시 목표 지반강도 발현을 위하여 동토의 두께 및 단면을 설정하였다.

둘째 설계요소는 동결온도 선정이다. 동결온도 선정을 위해서는 전체 공사기간을 고려한 동토의 목표 지반강도 유지기간을 정하는 것이 필수이다. 목표 지반강도 유지기간을 정한 후 동결기간 동안 동토를 동결시키고 동결상태를 유지할 수 있는 최적의 동결온도를 선정하여야 한다. DTSS 4공구 및 Naples subway에서는 동토의 동결온도를 각각 -20°C (커터 챔버 온도), -10°C 로 설계하여 동결기간 동안 동토를 유지하였으며, 온도 측정구를 설치하여 동결온도 유지를 위한 모니터링을 수행할 수 있도록 하였다. DTSS 4공구 및 Naples subway를 비롯한 Westerscheled 터널과 Fürth subway 역시 동토의 온도를 모니터링 할 수 있도록 온도 측정구를 설계에 반영하였다.

셋째 설계요소는 냉매 선정이다. 동결공법 냉매 선정 시 최우선으로 고려하여야 할 사항은 작업자의 안전이다. 해저터널과 같이 환기구 또는 환기설비 설치가 어렵거나 위급한 상황에서 구조를 위한 접근이 어려운 조건에서는 냉매의 인체에 대한 유해성을 고려하여야 한다. 환기에 불리한 조건인 Westerscheled 터널과 Fürth subway의 경우, 질식의 위험성이 없고 인체 유해성이 적은 브라인을 냉매로 사용하였으며, 환기에 유리한 조건인 DTSS 4공구와 Naples subway의 경우, 작업자가 질식의 위험성에서 안전할 수 있어 브라인 보다 동결속도가 빨라 신속한 지반 차수 및 보강이 가능한 액체질소를 냉매로 사용하였다. 이와 같이 냉매 선정 시 작업자의 안전을 우선적으로 확보한 후 Table 5에서 제시한 동결범위, 동결온도, 지하수 유속과 같은 일반적인 냉매 별 적용 조건이 고려되어야 하며, 추가적으로 작업공간, 경제성, 냉매 조달 등 현장의 외적 요인이 함께 고려되어야 한다.

넷째 설계요소는 동결공 배치이다. 동결공을 적정 수준보다 조밀하게 배치하면, 냉매 투입이 과다해져 재료비가 증가할 수 있으며, 동결공을 적정 수준보다

넓게 배치하면, 원하는 만큼의 동토 형성이 어렵다. Fürth subway의 경우, 3차원 열-수리 연동해석으로 시간 별 지반의 온도분포 양상을 분석하여 동결공의 간격을 정하였으며, 정확한 지반조사를 통해 상반 대수층에만 동토를 형성하도록 동결공을 배치하였다. 또한, Naples subway는 동결공이 50 m 이상의 장공으로 천공 시 수평도가 어긋나 발생할 수 있는 시공오차를 동결공 배치에 반영하였다. 이와 같이 효율적인 동결공 배치를 통하여 재료비 절감 및 시공에서 발생할 수 있는 오차를 극복할 수 있다.

다섯째 설계요소는 동토의 열 교환 방지이다. 동토와 인접한 곳에 열 전도율이 높은 구조물이나 지보재가 존재할 경우, 동토와 구조물이나 지보재 사이에 열 교환이 발생하여 동토의 온도가 상승할 수 있다. 따라서, 열 전도율이 높은 구조물이나 지보재가 동토와 인접한 곳에 설치될 경우, 열 교환을 방지하기 위한 조치를 취하여야 한다. Westerscheled 터널의 경우, 본선터널과 동결공법을 적용한 연결구의 교차부에 설치된 강재 세그먼트와 동토 사이에 열 교환이 발생할 것에 대비하여 드라이아이스를 이용하여 강재 세그먼트의 온도를 저온으로 유지하였다.

5. 결 론

해저터널은 육지에서의 터널과 달리 고수압이 작용하여 터널 내 해수용출 및 지반변형이 발생할 수 있으며, 이를 일시적으로 차수할 수 있는 동결공법을 적용하여 문제를 해결 할 수 있다. 본 연구에서는 향후 해저터널에 적용할 수 있는 동결공법 설계요소 도출을 위하여 국내 적용 사례가 없는 동결공법의 국외 사례를 조사하였고 동결공법에 보편적으로 사용하는 냉매에 대한 검토를 수행하였다. 주요한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 동결공법은 하저터널 교차 연결구, 터널 천단 그리고 TBM 디스크 커터 점검 및 교체 등 다양한 분야에 적용되고 있으며, 주로 사용되는 냉매는 브라인

과 액체질소이다.

2. 고수압 조건의 해수는 순수한 물에 비하여 어는점이 더 낮기 때문에 지상에서 사용하는 냉매보다 저온의 냉매가 필요하다. 또한, 해저터널과 같이 환기구 설치가 어렵고 굴착이 진행되어감에 따라 막장으로의 접근 길이가 길어지는 경우, 냉매는 최우선으로 안정성을 확보할 수 있어야 하며, 해수 용출 및 지반 변형으로 인한 터널의 손실을 최소화하기 위하여 신속한 보강이 가능할 수 있도록 동결 속도가 빨라야 한다.
3. 브라인은 냉매의 재사용 가능하고 독성이 적어 인체에 미치는 영향이 적으며, 동결에 상대적으로 장시간 필요하고 동결장비가 복잡한 특징을 가지고 있다. 또한, 환기가 용이하지 않은 조건에서는 작업자의 안전을 확보하기 위하여 질식 위험성이 없는 브라인을 동결공법의 냉매로 사용한다. 액체 질소는 냉매의 재사용이 불가하고 기화 시 공기 중 질소농도 증가로 질식의 위험성이 있으며, 동결에 상대적으로 단시간 소요되며, 동결장비가 간단한 특징을 가지고 있다. 또한, 환기가 용이한 조건에서는 작업자가 질식 위험성으로부터 안전하므로 신속한 동결이 가능한 액체질소를 동결공법의 냉매로 사용한다.
4. 해저터널에 필요한 동결공법의 주요 설계요소는 동결범위 및 동결온도 선정, 냉매 선정, 동결공 배치, 동토의 열 교환 방지, 이상 5가지가 도출되었으며, 동결공법에 대한 TH-M 수치해석 모델 개발, 모형 동결실험 및 동결공법 현장 실증실험 등을 통하여 도출한 설계요소들에 대한 향후 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. Colombo, G., Lunardi, P., Cavagna, B., Cassani, G., Manassero, V. (2008), "The artificial ground freezing technique application for the Naples underground", Proceedings of Word Tunnel Congress 2008 on Underground Facilities for Better Environment and Safety, Agra, India, pp. 910-921.
2. 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.
3. Harris, J.S. (1995), Ground Freezing in Practice, Thomas Telford, London, p. 264.
4. Heijboer, J., Hoonaard, J., Linde, F.W.J. (2004), The Westerschelde Tunnel: Approaching Limits, A.A. Balkema, The Netherlands, p. 292.
5. 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.
6. Pimentel, E., Papakonstantinou, S., Anagnostou, G. (2011), "Case studies of artificial ground freezing simulations for urban tunnels", Proceedings of Word Tunnel Congress 2011 on Underground spaces in the service of a sustainable society, Helsinki, Finland, pp. 459-468.
7. 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, pp. 57-69.