

## 동적 콘 관입기를 이용한 활동층 심도평가

# Evaluation of Active Layer Depth using Dynamic Cone Penetrometer

홍원택<sup>1)</sup> · 강성훈<sup>1)</sup> · 박근보<sup>2)</sup> · 이종섭<sup>†</sup>

Won-Taek Hong · Seonghun Kang · Keunbo Park · Jong-Sub Lee

Received: November 24<sup>th</sup>, 2015; Revised: November 26<sup>th</sup>, 2015; Accepted: December 14<sup>th</sup>, 2015

**ABSTRACT :** An active layer distributed on surface of an extreme cold region causes a frost heave by repeating the freezing and thawing according to the seasonal temperature change. Since the height of frost heave is greatly affected by the thickness of active layer, an accurate evaluation of the thickness of active layer is necessary for the safe design and construction of the infrastructure in the extreme cold region. In this study, dynamic cone penetrometer, which is miniaturized in-situ penetration device, is applied for the evaluation of active layer depth distribution. As the application tests, two dynamic cone penetration tests were conducted on the study sites located in Solomon and Alaska. In addition, ground temperature variations were obtained. As the results of the application tests, the depth of interface between the active layer and the permafrost was evaluated from the difference in dynamic cone penetration indexes of the active layer and the permafrost, and a layer was detected around the interface considered as an ice lens layer. Also, the interface depths between the above zero and the below zero temperature determined from the ground temperature variations correspond with the interface depths evaluated from the dynamic cone penetration tests. This study demonstrates that the dynamic cone penetrometer may be a useful tool for the evaluation of the active layer in the extreme cold region.

**Keywords :** Active layer, Dynamic cone penetrometer, Extreme cold region, Permafrost, Ice lens

**요 지 :** 동토지반을 구성하는 지층 중 표층에 분포하는 활동층은 계절에 따라 동결과 융해를 반복하여 지표면의 동상을 야기한다. 동상 높이는 활동층의 두께에 큰 영향을 받으므로, 동토지반 상부 인프라시설의 안전한 설계 및 시공을 위하여 활동층의 두께 산정은 매우 중요한 부분을 차지한다. 본 연구에서는 경량화된 원위치 관입시험 방법인 동적 콘 관입기를 이용하여 동토지반에서 활동층이 분포하는 심도를 평가하고자 하였다. 동적 콘 관입시험을 적용하기 위한 대상현장으로서 알래스카에 위치한 솔로몬 지역의 동토지반이 선택되었으며, 해당 지역의 두 개소에서 지중온도계측 및 동적 콘 관입시험이 수행되었다. 적용시험 결과 동적 콘 관입 시험으로부터 획득된 동적 콘 관입지수는 활동층 및 영구동토층에서 서로 상이한 값을 나타내는바 동적 관입특성에 따른 활동층과 영구동토층의 경계부 심도가 산정되었으며, 경계부 심도에서 아이스 렌즈층으로 판단되는 구간이 감지되었다. 해당 개소에서 획득된 지중온도분포도에서 영상 및 영하 온도의 경계 심도는 본 연구의 동적 콘 관입시험으로부터 획득된 활동층 분포 심도와 부합하는 결과를 보였다. 본 연구에서 적용된 동적 콘 관입기는 대형장비의 접근 및 적용에 한계가 있는 극한지 동토 지역의 활동층 심도 평가를 위하여 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

**주요어 :** 활동층, 동적 콘 관입기, 극한지, 영구동토층, 아이스 렌즈

## 1. 서 론

비교적 접근성 및 작업성이 높은 지역에서의 에너지 및 자원이 고갈되어감에 따라 극지방 자원개발에 대한 전 세계적인 관심이 높아지고 있다. 극한지의 경우 철, 구리 등 천연광물이 극지방을 제외한 지역의 매장 총량보다 많을 것으로 예측되어 미래 자원의 보고로 불리고 있다. 특히 북극의 경우 전 세계 확인매장량의 15% 이상에 해당하는 석유자원을 보유하고 있으며, 미발견회수가능(Undiscovered, Technically recoverable) 자원 또한 다량 보존되어 있을 것으로 보고되

었다(Smith, 2007). 이에 따라 북극 지역 자원개발을 위한 국내·외 건설업체의 인프라건설, 자원이용량 확보를 위한 도로 및 철도건설 등 극한지 전반에 걸친 사업진출이 활발히 이루어지고 있다.

북극권 동토지반은 러시아, 알래스카, 캐나다, 노르웨이 등에 걸쳐 전 육지의 23%에 해당하는 면적을 차지한다. 동토지반은 계절의 변화에 상관없이 동결상태를 유지하는 영구동토층(Permafrost)과 계절변화에 따라 동결·융해를 반복하는 활동층(Active layer)으로 구성된다(U.S Army and Air force, 1983). 동토지반의 구성요소는 공기, 물, 흙 입자 뿐만

1) School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

2) Arctic Research Center, Korea Polar Research Institute

† School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University (Corresponding Author : jongsub@korea.ac.kr)

아니라 얼음 또한 큰 부분을 차지하므로 국내에 분포하는 비동결토와 서로 다른 거동특성을 보이며, 국내의 지반조건 등 건설환경과 상이하여 여러 가지 문제점이 발생하고 있다 (Chae et al., 2014). 이에 따라 영구동토층의 거동특성 획득을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Kim et al.(2014)은 인공동결 시료를 대상으로 삼축압축실험을 수행함과 동시에 탄성파를 측정하여 동결토의 강도 및 강성특성을 평가하고자 하였으며, Kim et al.(2015)은 전단파 트랜스듀서가 설치된 직접전단시험기를 이용하여 함수비가 낮은 동결토의 전단강도 및 강성특성을 평가하고자 하였다. 또한 동토지반에서 토목구조물 설계 및 시공 시 흙 입자 사이 얼음으로 인한 지반의 강도상승효과, 지반과 말뚝 사이의 동작용으로 인한 지지력 상승효과 등을 고려하여 최적의 설계 및 시공을 위한 연구가 진행되었다(Parameswaran, 1978). 활동층에 관련된 연구로서 동결·융해 전과 후의 시료에 대한 반복삼축시험이 수행된 바 있으며(Yoon et al., 2003), 활동층 동결 시 아이스 렌즈층의 생성과정에 대한 규명 및 동상 범위에 대한 연구가 진행된 바 있다(Gilpin, 1980; Loch, 1981). 그러나 실제 동토지반에서 동상력 및 동상 범위는 활동층 두께에 큰 영향을 받으므로(Wang & Li, 1999) 활동층 심도 평가에 대한 연구가 요구된다.

본 연구에서는 동적 콘 관입기를 이용하여 동토지반의 활동층 심도를 평가하고자 동토지반이 분포하는 현장을 대상으로 동적 콘 관입시험을 수행하였다. 동적 콘 관입시험 결과로부터 대상지반의 활동층 및 영구동토층의 경계부 심도를 산정하였으며, 지중 온도센서로부터 획득된 지중온도 분포와 상호비교하였다. 본 논문은 활동층 및 동적 콘 관입기에 대하여 개략적으로 설명하며 적용 현장 및 실험과정, 결과의 분석내용을 다룬다.

## 2. 활동층(Active layer)

극한지의 지질구조는 Fig. 1과 같이 하부로부터 비동결

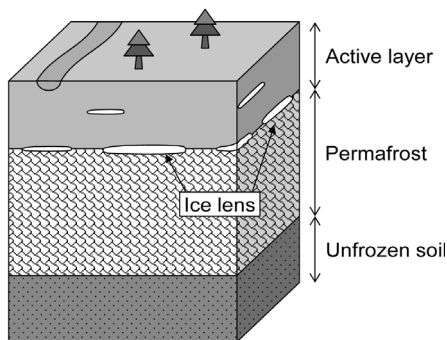


Fig. 1. Geological structure of an extreme cold region

층(Unfrozen soil), 영구동토층(Permafrost), 활동층(Active layer)으로 구성된다(U.S Army and Air force, 1983). 비동결층은 극한의 기온에서도 지열로 인하여 동결되지 않는 지층을 말한다. 비동결층 상부에 분포하는 영구동토층은 계절에 상관없이 2년 이상 동결상태를 유지하는 지층이며, 알래스카 북부의 영구동토층 두께는 최대 600m까지 이르는 것으로 알려져 있다(Osterkamp & Payne, 1981). 영구동토층 상부로부터 지표면까지 분포하는 활동층은 계절에 따라 동결과 융해가 반복되는 지층으로 극한지 지반의 표층 부분에 해당하며, 두께는 해당 지역의 위도 및 지표면에 분포하는 식생(Vegetation) 유무에 관계된다(Price, 1971; Romanovsky & Osterkamp, 1995; Hinzman et al., 1991; Guglielmin et al., 2008). 영상의 기온에서 활동층이 융해될 때 내부의 수분은 영구동토층으로 인하여 하부로 침투되지 못하여 매우 높은 습윤상태를 유지한다. 또한 영하의 기온에서 활동층이 동결될 때 내부의 수분은 지표면부터 상변화가 발생하며, 생성된 얼음 결정은 하부의 수분을 흡수, 여러 심도에 걸쳐 아이스 렌즈(Ice lens) 층을 형성한다(Konrad & Morgenstern, 1980; Nixon, 1991). 아이스 렌즈층은 여름철 영상의 기온에서 활동층의 융해와 동반하여 물로 융해되나 일부 영구동토층과 접한 아이스 렌즈층은 융해되지 않고 잔류하는 경우도 있다. 이러한 활동층의 동결과 융해에 따른 아이스 렌즈층의 생성은 동토지반의 동상(Frost heave)의 원인이 되며, 동상력(Frost heave force)은 활동층 상부에 건설된 철도 및 도로의 파괴를 야기하므로 활동층 상부 및 내부에 도로망 등 인프라시설을 건설하고자 할 경우 활동층 심도평가를 기반으로 한 동상 범위 결정은 매우 중요한 과정이라고 할 수 있다.

## 3. 동적 콘 관입기(Dynamic cone penetrometer)

극한지에 분포하는 동토지반은 도로, 철도 등 이송망의 부재로 접근성이 용이하지 않다. 그러므로 표준관입시험(Standard penetration test), 콘 관입시험(Cone penetration test) 등 대형 관입장비가 동반되어야 하는 원위치 관입시험 방법은 적용성에 한계가 있다. Scala(1956)에 의하여 소개된 동적 콘 관입기(Dynamic Cone Penetrometer, DCP)는 소형화된 원위치 관입시험 장비로서, 장비의 유지보수가 용이하며 시험방법이 간소하고 이동성이 매우 우수하여 미연방도로국, 미공병단 등 널리 이용되고 있는 시험 방법이다(Mohammadi et al., 2008). 동적 콘 관입기는 Fig. 2와 같이 직경 20mm, 선단각 60°의 원추와 직경 16mm의 관입로드, 해머 가이드 및

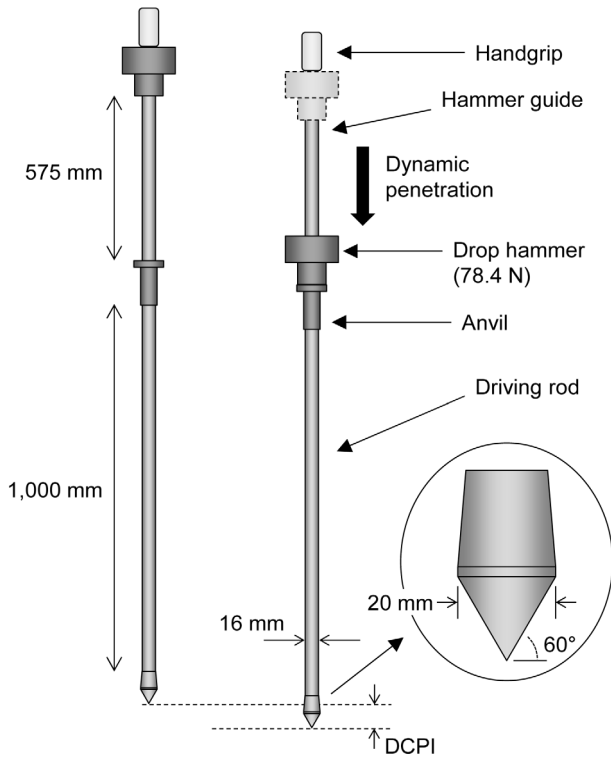


Fig. 2. Schematic drawing of dynamic cone penetrometer

해머로 구성된다(ASTM D6951, 2009).

동적 콘 관입기는 무게 78.4N의 해머를 낙하고 575mm로 자유 낙하시켜 타격함으로써 대상지반에 동적으로 관입되며, 매 타격 시의 관입심도인 동적 콘 관입지수(Dynamic Cone Penetration Index, DCPI)로부터 대상지반의 심도에 따른 강도특성을 획득한다. 동적 콘 관입지수는 시험 진행 시 기록된 타격횟수 및 관입심도로부터 Eq. (1)과 같이 계산된다.

$$DCPI_n[mm/blow]=P_n-P_{n-1} \quad (1)$$

여기서,  $P_n$ 과  $P_{n-1}$ 은 각각  $n$ 번째와  $n-1$ 번째 해머타격 시 관입된 심도를 나타낸다.

#### 4. 현장실험

동적 콘 관입기를 이용한 활동층 심도평가 대상현장으로서는 Fig. 3과 같이 알래스카 솔로몬(Solomon, AK)에 위치한 동토지반이 선택되었다. 해당 현장의 위도 및 경도는 각각  $64^{\circ}50'N$ ,  $163^{\circ}42'W$ 이며 고도는 약 200m이다. 또한 대상현장은 Fig. 4와 같이 지표면에 공기와 지중열 교환을 지연시키는 식생이 분포하고 있으므로 활동층과 영구동토층의 경계면 심도가 비교적 얇을 것으로 예상되는 구간이다.

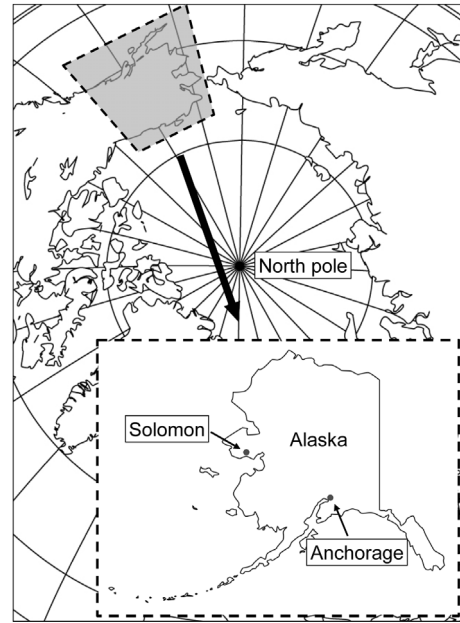


Fig. 3. Topographical map of the test location



Fig. 4. Photographic image of a site for the field study in Solomon, Alaska

동적 콘 관입기 관입시험 지점으로서 해당 현장에서 약 100m 간격으로 2개소(Point-A, Point-B)가 선택되었으며, 각각의 개소에 측정범위  $-40^{\circ}C \sim 80^{\circ}C$ 의 온도센서를 지표면으로부터 0, 50, 100, 200, 300, 500, 700mm 심도의 지중에 설치하였다. 각 온도센서를 통하여 해당 심도의 지중온도를 1시간 간격으로 획득하였으며 24시간 동안 획득된 지중온도를 각각의 심도에 대하여 평균함으로써 관입시험 수행 당시 심도에 따른 평균 지중온도 분포도를 작성, 동적 콘 관입시험의 결과와 상호비교하였다. 본 연구에서의 동적 콘 관입시험은 알래스카 솔로몬 지역의 평균기온이 가장 높은 시기인 7~8월에 수행되었으며, 관입시험 위치에서의 평균기온은 지표면(심도 0mm)에 설치된 온도센서로부터 획득되었다.

## 5. 실험결과

### 5.1 Point-A

본 연구에서 수행된 동적 콘 관입시험의 전경은 Fig. 5와 같다.

Point-A에서 동적 콘 관입시험은 심도 약 900mm까지 수행되었으며 Fig. 6(a)는 심도에 따른 동적 콘 관입지수(Dynamic Cone Penetration Index, DCPI)를 보여준다. 동적 콘 관입지수는 관입초반 낮은 구속압의 효과로 심도 약 250mm에서 80mm/blow의 값을 나타내었다. 이후 심도 300mm와 530mm 사이 구간에서는 약 40mm/blow의 값을 나타내었으며, 550mm 심도 이후 구간에서는 값이 급격히 감소하여 1~3mm/blow의 값을 나타내었다. 동적 콘 관입지수 주상도(Fig. 6(a))로



Fig. 5. Photographic image of dynamic cone penetration test

부터 Point-A 개소에서는 심도 900mm까지 두 개의 층이 존재하는 것으로 판단될 수 있다. 그러나 동적 콘 관입지수 주상도 상에서 비교적 큰 동적 콘 관입지수를 보이는 구간(심도 약 300~530mm)과 작은 동적 콘 관입지수를 보이는 구간(심도 약 600mm 이후)은 명확히 구분되는 반면, 심도 650mm 근처 구간 및 800mm 근처 구간과 같은 작은 동적 콘 관입지수를 보이는 구간 내에서의 심도별 강도특성 상호 비교는 명확하지 않다.

Fig. 6(b)는 심도에 따른 동적 콘 관입기 누적 타격횟수를 보여주며 이는 일정 심도까지 관입되기 위하여 동적 콘 관입기를 타격한 횟수를 의미한다. Fig. 6(b)의 누적 타격횟수 주상도에서는 총 세 개의 서로 다른 기울기 구간 및 기울기 변화구간이 나타났다. 동일한 기울기를 갖는 구간에서의 누적 타격횟수 주상도의 기울기(mm/blow)는 해당 구간의 평균 동적 콘 관입지수를 나타내므로 기울기가 클수록 작은 동적 콘 관입 저항력을, 기울기가 작을수록 큰 동적 콘 관입 저항력을 나타내며 동일한 기울기 구간 내에 있는 지층은 동일한 상태의 동적 콘 관입 저항력을 나타낸다고 할 수 있다. Fig. 6(b)에서 서로 다른 기울기는 0~570mm 구간, 640~670mm 구간, 670mm 이후 구간으로 구분되며 각각 활동층, 30mm 두께의 아이스 렌즈층, 영구동토층으로 판단되었다. 여기서 심도 570~640mm 구간 또한 활동층으로 판단되나 하부의 큰 동적 콘 관입 저항력을 보이는 아이스 렌즈층 및 영구동토층에 대한 경계효과로 인하여 감소 경향의 기울기가 나타난 것으로 판단된다. Fig. 6(c)는 Point-A에 설치된 온도센서로부터 획득된 지중온도 분포를 보여준다. 지표면에서의 온도는 약 12°C이며, 심도에 따라 비선형적으로 감소하고 심도 700mm에서는 영하의 온도가 측정되었다. 이는 심도 500mm와 700mm 사이에

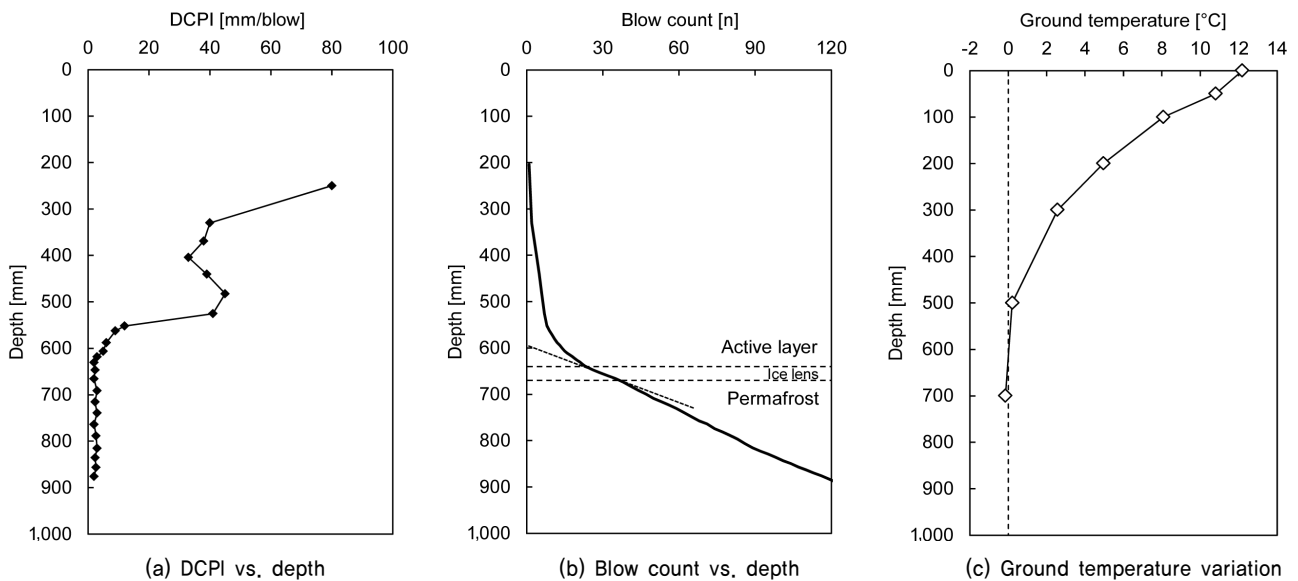


Fig. 6. Experimental results of Point-A

활동층과 영구동토층의 경계면이 존재할 것으로 판단되는 결과이며 Fig. 6(a) 및 Fig. 6(b)의 동적 콘 관입지수 주상도 및 누적 타격횟수 주상도의 분석결과와 부합하는 결과이다.

## 5.2 Point-B

Point-B에서 동적 콘 관입시험은 심도 약 850mm까지 수행되었다. 동적 콘 관입지수는 Fig. 7(a)와 같이 낮은 구속압의 효과로 인하여 심도 약 250mm에서 약 90mm/blow의 매우 큰 값을 나타내었으나 심도 약 300mm부터 500mm 구간까지는 약 40mm/blow의 값을 나타내었으며, 심도 500mm 이후 구간에서는 동적 콘 관입지수가 급격히 감소하여 심도 1~3mm/blow의 값을 나타내었다. 그러므로 상기 동적 콘 관입지수 주상도로부터 약 600mm 심도에서 활동층과 영구동토층의 경계면이 나타날 것으로 판단될 수 있다. Fig. 7(b)의 심도에 따른 누적 타격횟수 주상도를 보여준다. 누적 타격횟수 주상도 상에는 심도 0~530mm 구간, 590~645mm 구간, 645mm 이후 구간에서 각각 일정한 기울기의 세 개의 층이 나타났으며, 530~590mm 구간에서 경계효과로 인한 감소 경향의 기울기 구간이 나타났다. 세 개 층은 지표면으로부터 각각 활동층, 55mm 두께의 아이스 렌즈층, 영구동토층으로 판단된다. 또한 Fig. 7(c)에 도시된 지중온도 분포도로부터 활동층과 영구동토층의 경계면은 심도 500mm와 700mm 구간에 존재할 것으로 판단되는바 동적 콘 관입지수 주상도 및 누적 타격횟수 주상도로부터 산정된 활동층 두께, 아이스 렌즈층의 두께 및 영구동토층 경계심도는 신뢰할 만한 결과로 판단된다.

## 5.3 층별 동적 콘 관입지수

알래스카 솔로몬 지역에 분포하는 동토지반의 활동층, 아

이스 렌즈층, 영구동토층은 Fig. 6(b) 및 Fig. 7(b)의 심도별 누적 타격횟수 주상도에서 서로 다른 기울기를 나타낸다. 또한 5.1절에 기술한 바와 같이 일정 구간에서의 기울기(mm/blow)는 해당 구간의 평균 동적 콘 관입지수를 나타낸다. Point-A 및 Point-B의 각 층별 누적 타격횟수 기울기를 유효숫자 소수점 두 번째 자리까지 계산하여 Table 1에 정리하였다.

Point-A 및 Point-B의 각 층에서 계산된 기울기는 서로 매우 유사한 값을 보였으며 평균적으로 활동층의 경우 40.4 mm/blow, 아이스 렌즈층의 경우 2.2mm/blow, 영구동토층의 경우 2.62mm/blow의 값을 나타내었다. 활동층과 아이스 렌즈층은 서로 동적 콘 관입지수에 큰 차이가 있으므로 경계면 구분이 용이하나, 아이스 렌즈층과 영구동토층의 경우 그 차이가 매우 작으므로 누적 타격횟수 주상도로 표현 및 층간 기울기를 상호비교함으로써 경계심도를 명확히 판단해야 한다.

## 6. 요약 및 결론

동토지반에 건설된 기반시설의 안정성은 계절에 따라 동결과 융해를 반복하는 활동층의 동상력에 의하여 큰 영향을 받을 수 있으므로 동상 범위 예측 및 안정적인 설계 및 시공을 위하여 활동층의 심도평가는 매우 중요한 사안이다. 동토

Table 1. Average dynamic cone penetration index according to the layers

	Active layer (mm/blow)	Ice lens (mm/blow)	Permafrost (mm/blow)
Point-A	40.18	2.23	2.61
Point-B	40.62	2.17	2.62
Average	40.40	2.20	2.62

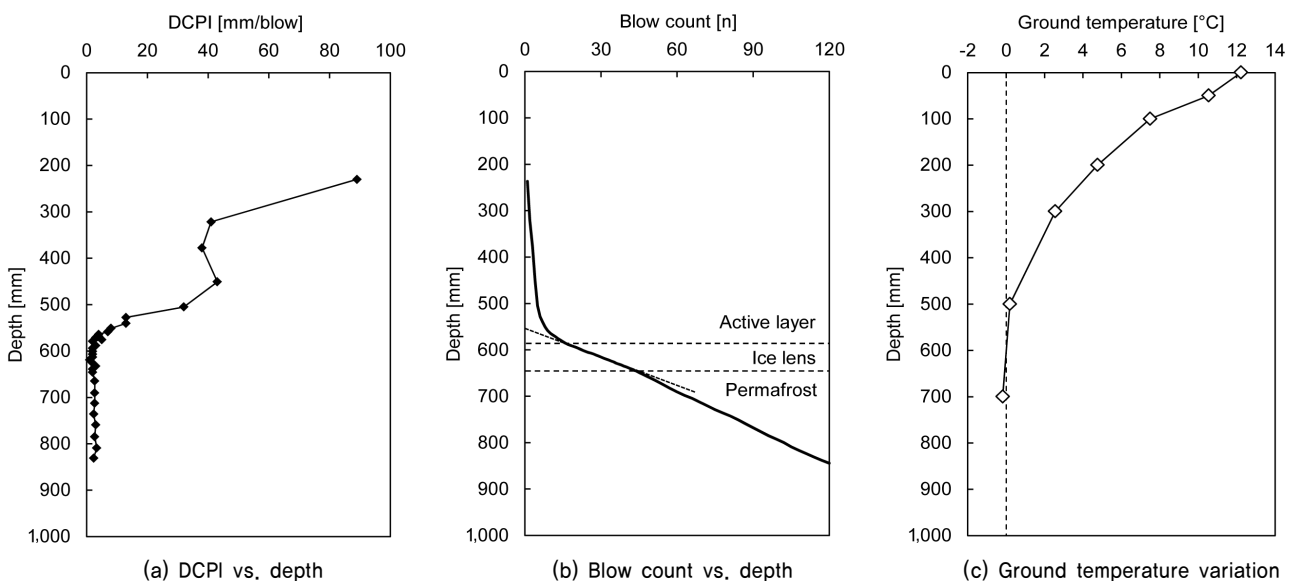


Fig. 7. Experimental results of Point-B

지반이 분포하는 극한지 지역은 큰 부피와 무게를 차지하는 기존 지반조사 장비의 접근이 매우 어려우므로 경량화되어 높은 이동성을 보유한 조사장비의 적용이 요구된다. 본 연구에서는 동적 콘 관입기(Dynamic Cone Penetrometer, DCP)를 이용하여 동토지반의 활동층 심도를 평가하고자 하였다.

동적 콘 관입기를 이용한 활동층 심도평가를 위하여 알래스카에 위치한 솔로몬 지역(Solomon, AK)의 지반이 대상현장으로써 선택되었다. 대상 동토지반에 대한 동적 콘 관입시험은 약 100m 간격으로 총 2회 수행되었으며, 총 관입심도는 각각 900mm 및 850mm이다. 대상 동토지반에서 수행된 동적 콘 관입시험을 통하여 심도에 따른 동적 콘 관입지수를 획득하였으며 활동층 두께, 아이스 렌즈층 두께 및 영구동토층의 경계심도를 산정하였고 각각의 개소에 설치된 온도센서를 통한 지중온도 계측값과 상호비교하였다. 각 층에서 평균 동적 콘 관입지수는 활동층의 경우 40.4mm/blow, 아이스 렌즈층의 경우 2.2mm/blow, 영구동토층의 경우 2.62mm/blow로 나타나 활동층과 아이스 렌즈층은 경계면의 심도가 명확히 판단되었으나 아이스 렌즈층과 영구동토층의 경우 평균 동적 콘 관입지수의 차이가 매우 작으므로 심도별 누적 타격 횟수를 도시함으로써 기울기 변화를 통하여 경계부 심도를 더욱 명확히 판단할 수 있었다. 또한 동적 콘 관입시험 결과로부터 획득된 각각의 활동층 경계부 심도는 온도센서를 이용하여 계측된 영상·영하 경계부와 부합하는 결과를 보여 본 연구에서 수행된 동적 콘 관입시험 결과 및 분석방법은 활동층 두께 및 영구동토층 경계심도를 높은 신뢰도로 산정할 수 있음을 보였다.

본 연구에서 적용된 동적 콘 관입기는 극한지 지역에서의 높은 이동성과 간결한 시험절차로써 활동층의 심도평가를 위한 관입시험 방법으로 유용하게 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

## 감사의 글

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0018110)을 밝히며, 이에 감사드립니다.

## References

1. ASTM D6951 (2009), Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications, Annual Book of ASTM Standard 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 1~7.
2. Chae, D. H., Kim, Y. S., Lee, J. G. and Cho, W. J. (2014), An experimental study on the creep behavior of frozen sand, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 15, No. 2, pp. 27~36 (in Korean).
3. Gilpin, R. R. (1980), A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils, Water Resources Research, Vol. 16, No. 5, pp. 918~930.
4. Guglielmin, M., Evans, C. J. E. and Cannone, N. (2008), Active layer thermal regime under different vegetation conditions in permafrost areas. A case study at Signy Island (Maritime Antarctica), Geoderma, Vol. 144, No. 1, pp. 73~85.
5. Hinzman, L. D., Kane, D. L., Gieck, R. E. and Everett, K. R. (1991), Hydrologic and thermal properties of the active layer in the Alaskan Arctic, Cold Regions Science and Technology, Vol. 19, No. 2, pp. 95~110.
6. Kim, J. C., Lee, J. S., Hong, S. S. and Lee, C. H. (2014), Characteristics of shear strength and elastic waves in artificially frozen specimens using triaxial compression tests, The Korean Society of Engineering Geology, Vol. 24, No. 1, pp. 111~122 (in Korean).
7. Kim, S. Y., Lee, J. S., Kim, Y. S. and Byun, Y. H. (2015), Evaluation of the shear strength and stiffness of frozen soil with a low water content, The Korean Society of Engineering Geology, Vol. 25, No. 1, pp. 93~102 (in Korean).
8. Konrad, J. M. and Morgenstern, N. R. (1980), A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17 No. 4, pp. 473~486.
9. Loch, J. P. G. (1981), State of the art report - frost action in soils, Engineering Geology, Vol. 18, No. 1~4, pp. 213~224.
10. Mohammadi, S. D., Nikoudel, M. R., Rahimi, H., and Khamchian, M. (2008), Application of the dynamic cone penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils, Engineering Geology, Elsevier, Vol. 101, No. 3, pp. 195~203.
11. Nixon, J. F. (1991), Discrete ice lens theory for frost heave in soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, No. 6, pp. 843~859.
12. Osterkamp, T. E. and Payne, M. W. (1981), Estimates of permafrost thickness from well logs in northern Alaska, Cold Regions Science and Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 13~27.
13. Parameswaran, V. R. (1978), Adfreeze strength of frozen sand to model piles, Canadian geotechnical journal, Vol. 15, No. 4, pp. 494~500.
14. Price, L. W. (1971), Vegetation, microtopography, and depth of active layer on different exposures in subarctic alpine tundra, Ecology, Vol. 52, No. 4, pp. 638~647.
15. Romanovsky, V. E. and Osterkamp, T. E. (1995), Interannual variations of the thermal regime of the active layer and near-surface permafrost in northern Alaska, Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 6, No. 4, pp. 313~335.
16. Scala, A. J. (1956), Simple methods of flexible pavement design using cone penetrometers, New Zealand Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 1~34.
17. Smith, T. (2007), Arctic dreams - a reality check., GEO ExPro, Vol. 4, No. 4, pp. 16~24.
18. U. S. Army and Air force (1983), Arctic and subarctic construction foundation for structures, Department of The Army and The Air Force, pp. 1~7.
19. Wang, Z. and Li, S. (1999), Detection of winter frost heaving of the active layer of Arctic permafrost using SAR differential interferogram, IGARSS'99 Proceedings, Vol. 4, pp. 1946~1948.
20. Yoon, Y. W., Kim, S. E., Kang, B. H. and Kang D. S. (2003), Dynamic behavior of weathered granite soils after freezing-thawing, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 19, No. 5, pp. 69~78 (in Korean).