

## 동결토 전단강도를 활용한 동착강도 산정에 관한 연구

### A Study for Predicting Adfreeze Bond Strength from Shear Strength of Frozen Soil

최 창 호<sup>1</sup> Choi, Changho

고 성 규<sup>2</sup> Ko, Sunggyu

#### Abstract

Bearing capacity of pile foundations in cold region is dominated by adfreeze bond strength between surrounding soil and pile perimeter. It denotes that adfreeze bond strength is the most important design parameter for foundations in cold region. Adfreeze bond strength is affected by various factors like 'soil type', 'frozen temperature', 'normal stress acting on soil/pile interface', 'loading rate', 'roughness of pile surface', etc. Several methods have already been proposed to estimate adfreeze bond strength during past 50 years. However, most methods have not considered the effect of normal stress for adfreeze bond strength. In this study, both freezing temperature and normal stress have been controlled as primary factors affecting adfreeze bond strength. A direct shear box was used to measure adfreeze bond strength between sand and aluminum under different temperature conditions. Based on the test results, the relation between shear strength of frozen sand and adfreeze bond strength have been investigated. The test results showed that both of shear strength and adfreeze bond strength tend to increase with decreasing frozen temperature or increasing confining pressure. The ratio of shear strength and adfreeze bond strength, expressed as  $r_s$ , decreased initially frozen section but increased at much lower frozen temperature and there were uniform intervals under the different normal stress conditions. A method for predicting adfreeze bond strength using  $r_s$  has finally been proposed in this study.

#### 요 지

동토지반 말뚝기초의 지지력은 말뚝구조물 표면과 주변 토사의 접촉면에서 발현되는 동착강도에 의해 산정되며, 이는 동착강도가 동토지반 기초설계를 위한 가장 주요한 설계정수임을 의미한다. 동착강도는 토사종류, 동결온도, 말뚝표면에 수직방향으로 작용하는 지중응력, 재하속도, 말뚝구조물의 표면 거칠기 등 다양한 인자들에 동시다발적인 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 1960년대부터 동토지반 기초설계를 위한 동착강도 산정방법들이 제안되어 왔으나, 대부분 동결온도와 말뚝구조물 표면특성에 대한 영향은 고려하고 있는 반면 동착강도의 주요 영향인자 중 하나인 지중응력에 의한 영향을 고려하지 않고 있어 소정깊이 이상의 말뚝기초 설계를 위한 동착강도 산정방법으로 활용되기에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 동결온도뿐 아니라 지중응력이 동착강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 직접전단시험기를 활용한 동결토 전단강도 및 동착강도 측정실험을 각각 수행하였다. 실험결과 전단강도와 동착강도는 모두 동결온도 조건이 낮아질수록, 혹은 수직응력 조건이 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 전단강도와 동착강도의 정량적 관계분석을 위해 정의된 전단강도와 동착강도의 비  $r_s$ 는 초기 동결온도에서는 급격하게 감소하는 경향을 나타냈으나, 동결온도가 낮아질수록 증가하며 수렴구간을 형성해가는 경향을 보였다. 본 연구에서는 최종적인

1 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원/과학기술연합대학원대학교 부교수 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology/Associate Professor, University of Science and Technology, chchoi@kict.re.kr, 교신처자)

2 정회원, 과학기술연합대학원대학교 석사과정 (Member, Graduate Student, University of Science and Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 지자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

연구결과로서 동결온도 및 수직응력 조건을 바탕으로 결정된  $r_s$  값을 이용하여 동결토의 전단강도로부터 동착강도를 예측할 수 있는 방법을 제안하고 있다.

**Keywords** : Adfreeze bond strength, Cold region, Direct shear test, Frozen sand, Pile foundation

## 1. 서론

알래스카(Alaska), 시베리아(Siberia), 티벳(Tibet) 등의 지역에서 나타나는 영구동토(permafrost) 지반은 계절과 상관없이 2년 이상 동결되어 있는 지층(영구동토층, permafrost layer)이 존재하는 지반을 의미한다(Esch, 2004). 일반적인 비 동결지반에서 말뚝기초의 지지력이 말뚝 주면에서 작용하는 마찰력 및 선단지지력에 의해 지배되는 것과는 달리, 영구동토에서 말뚝기초의 지지력은 말뚝 주면과 동결토의 접촉면에서 작용하는 동착강도(adfreeze bond strength)에 의해 지배된다. 여기서, 동착(adfreezing)이란 수분이 동결하며 이질 재료의 표면에 부착하는 현상을 의미하며, 지반공학 분야에서는 토사와 기초구조물의 접촉면에 존재하는 간극수가 동결되어 토사와 기초구조물을 접착(bonding)시키는 현상을 의미하며(Terashima 외, 1999), 동상현상과 함께 동토지반의 대표적인 공학적 특성으로 보고되고 있다(고성규 등, 2010(a)). 동착강도는 간극수의 동결로 접착된 기초구조물과 토사의 접촉면에서 슬립(slip)파괴가 일어날 때의 최대응력으로 정의된다(Cutbertson-Black, 2001).

동착강도는 토사의 종류, 동결온도, 함수비, 기초구조물 표면거칠기, 재하속도, 지중응력 등 다양한 인자들에 영향을 받는 것으로 보고되고 있으며(Scarr와 Mokwa, 2008), 특히, 토사 내 간극수의 동결정도에 직접적인 영향을 미치는 동결온도와 밀접한 관계가 있다(Freitag와 McFadden, 1997). 영하의 동결온도에서도 토사 내 간극수는 100% 동결되지 않으며 소량의 부동수분(unfrozen water)을 포함하게 되는데, 이는 간극수의 동결정도를 판단할 수 있는 지표로서, 토사종류 및 지중응력 등이 같은 조건에서도 부동수분이 적을수록 동착강도가 크게 나타나는 특성이 있다(Assali, 1994). 또한, 동착강도는 기초구조물 표면에 접하는 동결된 간극수의 접착력 뿐만 아니라, 토립자와 구조물 표면에서 작용하는 마찰에 의한 영향을 받으므로 마찰면에 수직방향으로 작용하는 지중응력과의 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된

다. Davis(2001)의 연구결과에 따르면 영구동토층은 지역에 따라 수백 미터 이상의 깊이로 나타나기도 하며, 사람들이 주거하고 있는 대표적인 영구동토 지역인 알래스카나 유콘(Yukon)등과 같은 지역에서도 영구동토층이 깊게는 50m~100m까지 나타나는 것으로 보고되고 있다. 이는 영구동토지반에서 말뚝기초의 설계 시 소정깊이 이상의 지중에서 말뚝표면에 수직으로 작용하는 지중응력에 의한 영향을 고려해야 할 필요성을 증명하고 있다.

하지만, 기존에 제시되어온 동토지반 말뚝기초의 설계 동착강도 산정방법들은 주로 동결온도와 말뚝재료의 표면특성에 대한 영향을 고려하고 있는 반면, 지중응력이 동착강도에 미치는 영향은 고려하지 않고 있어, 소정깊이 이상의 지중에 시공되는 말뚝기초의 설계에 활용되기에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 본 연구는 설계 동착강도를 산정하기 위한 기존 연구동향을 분석하고, 이를 바탕으로 동결온도와 지중응력의 영향을 고려할 수 있는 보다 합리적인 동착강도 산정방법의 제안을 목적으로 수행되었다. 본 논문은 기존에 제안되고 있는 동착강도 산정방법들의 특성을 정리하고, 본 연구에서 수행한 직접전단시험의 구체적인 방법과 측정결과를 정리한다. 이어서 실험을 통해 측정된 동착강도와 기존 동착강도 산정방법에 의해 추정된 결과들을 정량적으로 비교/분석하고, 실험결과를 바탕으로 추정된 전단강도와 동착강도의 비  $r_s$  값을 이용하여 동결토의 전단강도로부터 동착강도를 추정할 수 있는 방법을 제안한다.

## 2. 기존 동착강도 산정방법

### 2.1 동착강도 산정방법

동착강도는 영구동토지반에서 말뚝기초 설계를 위한 주요 설계정수로서 고려되고 있으며, 1960년대부터 지금까지 다양한 실험연구를 바탕으로 동착강도 산정을 위한 다양한 방법들이 제안되어왔다(고성규 등, 2010(b)).

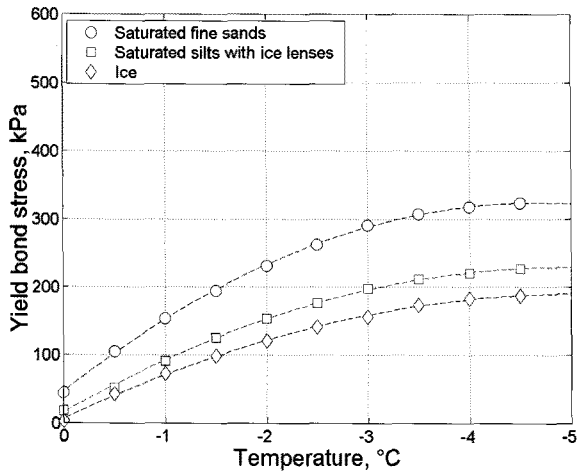


그림 1. 동결온도에 따른 동착강도(Sanger, 1969)

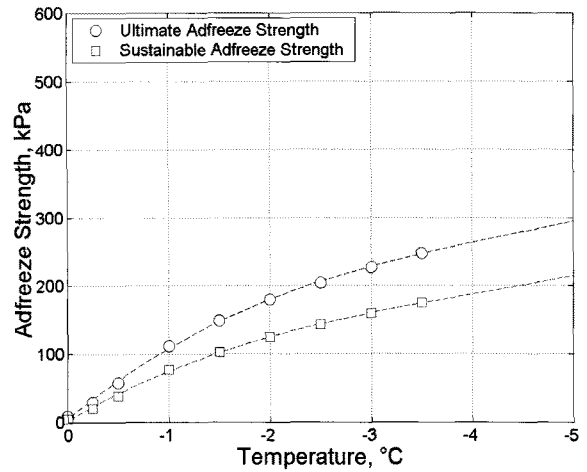


그림 2. 동결온도에 따른 동착강도(Linell과 Lobacz, 1980)

표 1. 말뚝재료와 슬러리 종류에 따른 수정계수(Linell과 Lobacz, 1980)

말뚝 재료	Slurry soil	
	Silt	Sand
Steel	1.0	1.5
Concrete	1.5	1.5
Wood, untreated or lightly creosoted	1.5	1.5
Wood, medium creosoted (no surface film)	1.0	1.5
Wood, coal tar-treated (heavily coated)	0.8	0.8

Sanger(1969)는  $-4.5^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 의 동결온도 범위에서 포화 사질토(saturated fine sands)와 아이스렌즈가 있는 포화 실트(saturated silt with ice lenses) 및 얼음(ice)에 매설된 강관말뚝의 표면에서 작용하는 전형적인 동착강도를 제안하였으며, Linell과 Lobacz(1980) 역시 직경 0.22m의 강관말뚝을 활용한 실험결과를 바탕으로  $-3.5^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 의 동결온도 범위에서 나타나는 동착강도에 말뚝재료와 슬러리(그라우트 재) 종류에 대한 수정계수를 곱하여 산정하는 방법을 제안하였다. 그림 1과 2는 각각 Sanger(1969)와 Linell과 Lobacz(1980)가 제시한 그래프로부터 디지털라이저(digitizer)를 이용하여 읽어 들인 데이터를 바탕으로 동결온도 범위를  $-5^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 로 확대하여 동착강도를 추정된 결과를 나타내고 있으며 표 1은 Linell과 Lobacz(1980)가 제안한 수정계수를 나타내고 있다. 여기서, 그림 1과 2는 원본으로부터 데이터를 읽어 들이는 과정에서 약간의 오차가 발생했을 가능성이 있을 것으로 판단된다.

Weaver와 Morgenstern(1981)은 토사와 기초구조물간의 접촉면에서 작용하는 동착강도  $\tau_a$ 는 같은 흙의 동결 상태에서의 장기(long term) 전단강도  $\tau_h$ 와 식 (1)의 관계가 성립한다고 제안하였다.

표 2. 말뚝 표면 거칠기에 따른 계수값 (Weaver와 Morgenstern, 1981)

말뚝 재료	m
Steel	0.6
Concrete	0.6
Uncreosoted Timber	0.7
Corrugated Steel	1.0

$$\tau_a = m\tau_h \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 말뚝 표면의 거칠기에 따른 특성을 나타내는 계수이며  $\tau_h$ 는 동결토의 장기 전단강도를 나타낸다. 장기 전단강도란 전단시험 시 파괴강도 발현 이후 지속적인 전단변형을 유지하기 위해 시료에 가해지는 응력을 의미한다. 말뚝 표면 거칠기에 따른 계수  $m$ 은 표 2와 같이 대표적인 말뚝 재료인 강재(steel), 콘크리트, 표면처리가 되지 않은 목재, 부식된 강재에 대하여 제안되었다. Weaver와 Morgenstern(1981)는 영구동토의 지중에서 작용하는 수직응력  $\sigma$ 는 일반적으로 매우 작기 때문에 장기 전단 강도를 산정할 때 수직응력의 함수인 마찰력은 무시할 수 있다고 제안하였으며, 이를 적용하여 동착강도 산정식을 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$\tau_{a,lt} \approx mc_{lt} \quad (2)$$

여기서,  $c_{lt}$ 는 동결토의 장기 점착력을 의미한다. 하지만, Ladanyi와 Theriault(1990)는 말뚝의 변위에 의하여 점착력이 순간적으로 감소되거나 어떤 제한된 조건하에서 점착력이 사라질 경우 말뚝의 지지력을 지배하는 건 접촉면에 작용하는 수직응력에 의한 마찰력이라고 제안하였고, 이를 적용하여 수직응력의 영향을 고려하는 동착강도 산정식을 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\tau_{a,lt} = mc_{lt} + \sigma_{n,tot} \tan \phi_{lt} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_{n,tot}$ 는 초기 지반 응력(total original ground stress),  $\phi_{lt}$ 는 말뚝과 토사 접촉면에서의 잔류 마찰각(friction angle in residual state)을 의미한다. Fang(1991)은 말뚝기초 설계 시 활용할 수 있는 전형적인 동착강도를 말뚝재료 및 표면 거칠기에 관계없이 온도에 따라 표 3과 같이 제안하여, 보다 간단한 방법으로 설계 동착강도를 산정할 수 있도록 하였다. 그림 3은 Fang(1991)이 제안한 온도에 따른 동착강도 데이터를 바탕으로  $-5^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$  범위에서 나타나는 동착강도의 추정결과를 나타내고 있다. Bowles(1996)는 재료와 온도에 따른 경험적 계수만을 이용하여 동착강도를 산정할 수 있는 방법을 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$f_{au} (\text{kPa}) = M_1 + M_2 (T)^{0.7} \quad (4)$$

표 3. 온도에 따른 전형적인 설계 동착강도(Fang, 1990)

온도(°C)	-0.55	-1.11	-2.22	-3.88	-6.66
동착강도(kPa)	34.5	68.9	124	172.4	193

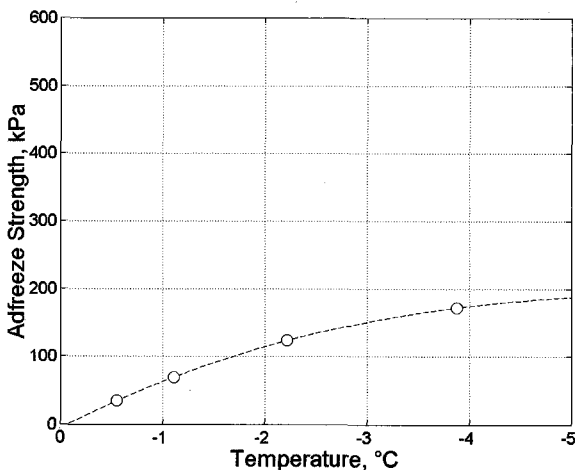


그림 3. 동결온도에 따른 동착강도(Fang, 1991)

여기서,  $f_{au}$ 는 동착 강도,  $T$ 는 동결온도(절대값),  $M_1$ 은 정수1(순수한 얼음 0; 실트 약 40; 모래 약 70),  $M_2$ 는 정수2(순수한 얼음 75; 실트 혹은 자갈 약 80; 고운 중간 크기 모래 150)를 의미한다. Bowles(1996)의 동착강도 산정식을  $-5^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 도시화하면 그림 4와 같다. 또한, Bowles(1996)는 토사의 동결온도가 약  $-12^{\circ}\text{C}$ 에서  $-10^{\circ}\text{C}$  사이로 내려갈 경우 동착강도가 수렴 값에 도달한다고 제안하였다.

## 2.2 기존 방법의 한계

상기 기술한 동착강도 산정방법들은 크게 1)동결온도에 따른 전형적인 동착강도를 대표적인 말뚝재료에 따라 산정하는 방법과 2)동결토 전단강도와와의 관계를 통하여 추정하는 방법으로 대별할 수 있다. Sanger(1969), Linell과 Lobacz(1980), Fang(1991), Bowles(1996) 등이 제안하고 있는 동결온도에 따른 동착강도는 제안자에 따라 그 값의 편차가 크며, 지중응력이 동착강도에 미치는 영향에 대해서는 고려하지 못한다는 한계가 있다. 또한, Weaver와 Morgenstern(1981)가 제안하고 있는 동결토 전단강도와와의 관계를 활용한 동착강도 산정방법은 토사의 전단강도 특성을 고려할 수 있다는 장점이 있으나 재료에 대한 수정계수만을 적용하고 있어, 동결토 전단강도와 동착강도의 비율이 동결온도와 지중응력 조건과는 무관하다는 가정을 전제로 하고 있다. 하지만 서론에서 기술한 바와 같이 영구동토 지반 내 동결지층은 지역에 따라 수백 미터 이상의 깊이에 이르기 때문에 동토지반 말뚝기초 설계를 위해서는 심도가 깊은 지층에서 작용하는 지중응력의 영향을 고려해야 할 필요가

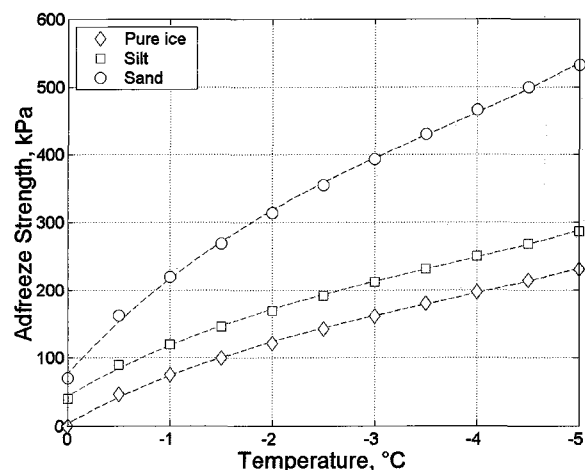


그림 4. 동결온도에 따른 동착강도(Bowles, 1996)

있을 것으로 판단된다. Ladanyi와 Theriault(1990)가 제안한 이론은 Weaver와 Morgenstern(1981)의 방법을 개선하여 유일하게 지중응력이 동착강도에 미치는 영향을 고려하고 있으나, 지중응력의 증감이 동결토 전단강도와 동착강도의 비율에 직접적인 영향을 미치고 있지는 않다. 동결토의 전단강도로부터 동착강도를 추정하는 방법에 대한 연구를 수행하기 위해서는 동결온도와 수직응력의 변화가 동착강도에 미치는 영향뿐 아니라 동결토 전단강도와 동착강도의 비율에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

### 3. 직접전단시험

기존 연구에 따르면 동착강도를 측정하기 위한 실험 방법으로는 전단실험, 인발실험, 수평하중재하실험, 모형말뚝실험 등 다양한 방법이 있다(고성규 등, 2011). 본 연구에서는 동결토 전단강도와 동착강도의 관계를 정량적으로 분석하기 위하여 전단강도와 동착강도 실험이 모두 가능하며, 수직응력을 재하할 수 있는 직접전단시험법을 활용하여, “동결 사질토 전단시험”과 “알루미늄 모형재료-동결 사질토 전단시험”의 두 가지 직접전단시험을 수행하였다. 여기서, “알루미늄 모형재료-동결 사질토 전단시험”은 두 이질재료인 알루미늄과 동결 사질토의 접촉면에서 발생하는 동착강도를 측정하기 위하여 알루미늄 모형재료를 전단박스 하부에 설치하고, 전단박스 상부에 동결 사질토 공시체를 제작하여 수행한 직접전단시험을 의미한다.

#### 3.1 실험장비

본 연구에서 수행한 전단시험은 동토지역의 저온환경을 모사하기 위하여 대형 냉동챔버 내에서 대기온도를 영하로 유지한 상태에서 수행되었고 최저  $-30^{\circ}\text{C}$ 의 온도조건에서도 가동과 측정이 가능하도록 제작된 동결토 전단시험장비를 활용하였다. 동결토 전단시험기는 수평하중, 수직변위, 수평변위를 각각 0.01kg, 0.01mm, 0.01mm 단위로 측정할 수 있으며, 각 채널의 측정값은 2Hz의 속도로 측정되었다. 수평하중의 재하 및 로드 셀(load cell) 최대 측정값은 각각 5ton이며, 수직변위계(LVDT) 측정범위는 100mm이다. 전단박스는 가로 세로 크기가 100mm × 100mm이고 높이가 40mm인 정방형 박스를 활용하였다. 그림 5는 동결토 전단시험기의 모

습과 주요 구성요소들의 명칭을 나타내고 있다.

### 3.2 실험방법

실험에 활용된 토사는 표 4에서 정리하고 있는 바와 같이 비중 2.67, 최대/최소 건조밀도는 각각  $1.70\text{t}/\text{m}^3$ 과  $1.36\text{t}/\text{m}^3$ 의 물리적 특성을 나타내는 주문진 표준사를 활용하였다. 동결 사질토 전단시험을 위한 시료는 공기 중의 습윤화를 방지하기 위하여 토사를 건조로에서 꺼낸 직후에 중량을 측정함으로써 노건조 직후를 기준으로 제작되었으며, 상대밀도 76.9%( $e=0.66$ )를 기준으로 제작하였다. 시료는 주문 제작한 다짐봉을 사용한 3층 다짐을 통하여 제작되었고, 동결을 시작하기 전 1시간 동안 수침시켜 시료를 완전 포화시켰다. 알루미늄 모형재료-동결 사질토 전단시험을 위한 시료는 그림 6과 같이 평평한 면을 갖도록 제작된 알루미늄 모형을 하부전단박스에 삽입하고 상부전단박스에 토사를 채우는 방식으로 제작하였으며, 동결토 전단시험을 위한 시료와 마찬가지로 동결을 시작하기 전 1시간 동안 수침시켜 시료를 완전 포화시켰다. 동착강도가 발현되는 알루미늄 모형의 표면은 거칠기가 없도록 매끈하게 가공하였으며, 베어링을 삽입하여 상하부 전단박스의 거리를 0.3mm 간격으로 띄워 두 이질재료의 표면에서 순수한 동착강도가 발현될 수 있도록 하였다.

포화가 완료된 시료는 대형 냉동챔버 내에서 상재하중 없이 동결시켰다. 포화된 시료의 중심부까지 냉동챔버의 동결온도조건과 평형을 이루는 총 동결시간을 정

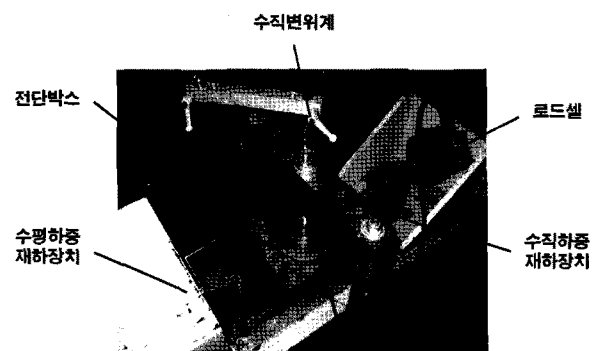
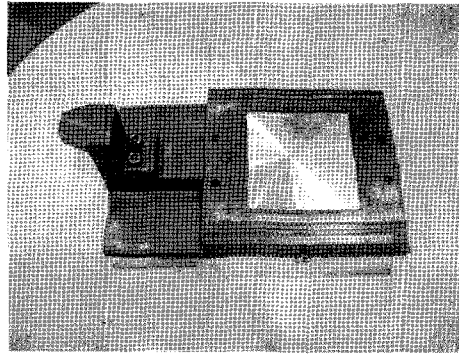


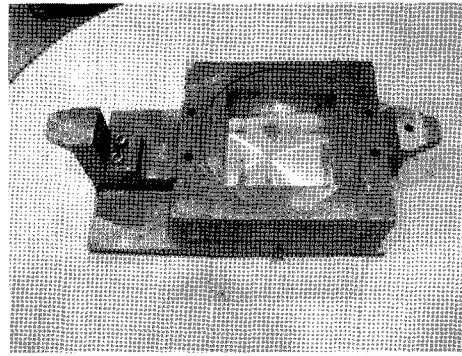
그림 5. 동결토 전단시험기

표 4. 주문진 표준사 물성치

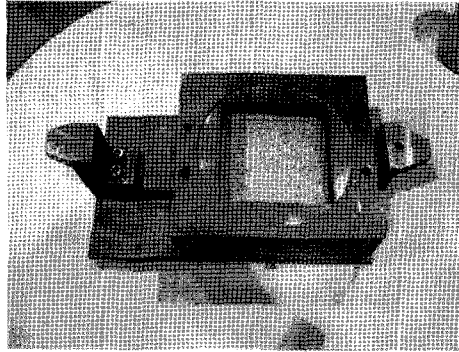
흙의 공학적 특성	비중	최대건조밀도 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	최소건조밀도 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	USCS
	2.67	1.70	1.36	SP



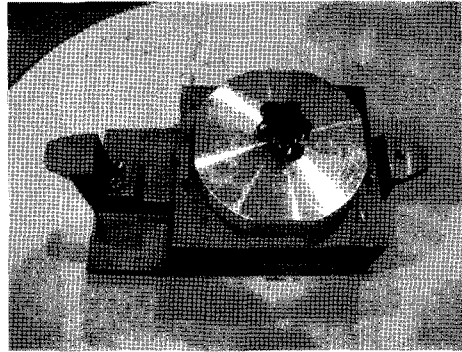
(a) 하부박스 모형재료 삽입



(b) 상부박스 조립



(c) 토사채움



(d) 정적다짐

그림 6. 시료제작 과정

확히 파악하기 위하여 중심부에 온도계를 삽입한 예비 시료를 만들어 시료내부 온도를 측정하였고, 수회에 걸친 온도측정결과 냉동챔버의 동결온도  $-2^{\circ}\text{C}$  조건에서 약 10시간정도의 시간이 흐르면 냉동챔버 내부의 대기 온도와 시료중심부의 온도가 평형을 이룬다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 경험을 바탕으로 본 실험에서는 시료를 약 24시간동안 충분히 동결시켰다.

동결된 시료의 전단 시, 수평변위로 인해 감소하는 실제 전단면의 면적에서 작용한 전단응력을 정확하게 측정하기 위하여 각 수평변위에 대하여 전단면 면적을 보정하였으며, 전단속도는 Parameswaran(1978)의 동착강도 측정실험에서 활용된 변위재하속도를 적용하여 분당 0.1%의 변형율이 발생하도록 0.1mm/min의 속도를 적용하였다.

### 3.3 실험결과

본 연구에서는 1)동결 사질토 전단시험과 2)알루미늄 모형재료-동결 사질토 전단시험을 각각 상온(비동결상태),  $-2^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$ 의 동결온도 조건에서 수행하였으며, 각 온도조건별로 1atm, 2atm, 3atm(1atm $\approx$ 98kPa)의 수직응력을 재하하였다. 실험결과 동결온도 조건이 낮아질수

록, 또는 수직응력이 커질수록 동결 사질토의 전단강도 및 알루미늄 모형재료와 동결 사질토의 표면에서 작용하는 동착강도가 크게 나타나는 경향을 보였다. 각 실험 조건별 결과 값은 표 5에 구체적으로 나타내었다. 동결 사질토의 경우 동결온도  $-5^{\circ}\text{C}$  조건에서 최대 3.5MPa 이상의 전단강도를 나타내었으며, 알루미늄과 동결 사질토의 경우  $-5^{\circ}\text{C}$  조건에서 최대 0.9MPa 이상의 동착강도가 발현되었다.

그림 7은 동결 사질토 전단시험 결과로, 시료 파괴시점에서 나타난 전단강도  $\tau_f$ 를 종축에, 해당 시료에 재하된 수직응력  $\sigma$ 를 횡축에 대하여 나타내고 있으며, 각 온도조건별 측정결과에 대하여 1차원 회귀분석으로 추정한 직선으로부터 산정된 점착력  $c$ 와 내부마찰각  $\phi$ 의 값을 나타내고 있다. 그림 8은 알루미늄 모형재료와 동결 사질토간의 동착강도시험 결과로, 시료 파괴시점에서 나타난 동착강도  $\tau_{ad}$ 를 종축에, 해당 시료에 재하된 수직응력  $\sigma$ 를 횡축에 대하여 나타내고 있으며, 각 온도 조건별 측정결과에 대하여 1차원 회귀분석으로 추정한 직선으로부터 산정된 두 이질재료간 부착력  $a$ 와 마찰각  $\delta$ 의 값을 나타내고 있다. 여기서, 각 온도조건별 1차원 회귀분석결과 동결토 전단강도의 경우 추세선의 결정 계수  $R^2$ 값이 평균 0.9968이며, 알루미늄과 동결 사질토

표 5. 전단시험 결과정리

전단시험	온도조건(°C)	수직응력 $\sigma$ (kPa)	전단강도 $\tau_f$ (kPa)	점착력 $c$ (kPa)	내부마찰각 $\phi$ (°)	$R^2$
동결 사질토	>0	98	82.0	1	38.1	0.9997
		196	146			
		294	236			
	-2	98	1624	1485	58.2	1.0
		196	1781			
		294	1941			
	-5	98	2824	2474	74.2	0.9906
		196	3160			
		294	3518			
전단시험	온도조건(°C)	수직응력 $\sigma$ (kPa)	동착강도 $\tau_{ad}$ (kPa)	부착력 $a$ (kPa)	마찰각 $\delta$ (°)	$R^2$
알루미늄-동결 사질토	>0	98	41	18	13.6	0.9864
		196	69			
		294	88			
	-2	98	239	140	44.2	0.9954
		196	323			
		294	430			
	-5	98	665	548	51.9	0.9904
		196	816			
		294	915			

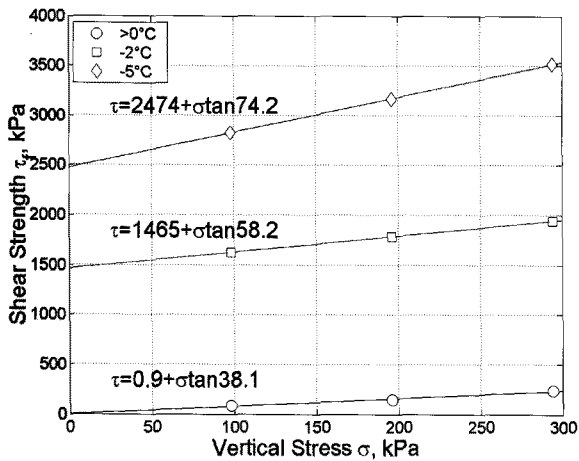


그림 7. 동결 사질토 전단시험 결과

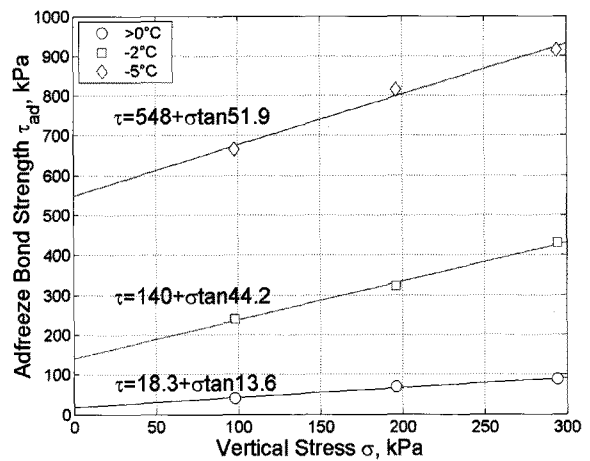


그림 8. 알루미늄-동결 사질토 동착강도 시험 결과

의 동착강도의 경우 추세선의  $R^2$  값이 평균 0.9907로 비교적 안정적인 분석결과를 나타냈다.

두 경우 모두 동결온도 조건이 낮아질수록 점착력(부착력)과 내부마찰각(마찰각)이 크게 나타나는 경향을 나타냈으나, 점착력(부착력)은 온도가 낮아질수록 동결토의 점착력  $c$ 와 알루미늄-동결 사질토의 부착력  $a$ 의 편차가 -17.4kPa에서부터 1926kPa로 증가하는 반면, 동결토의 내부마찰각  $\phi$ 와 두 이질재료간의 마찰각  $\delta$ 의 경우 편차가 24.5°에서 14°로 감소하다 다시 22.3°로 증가하는 경향을 보이며 뚜렷한 상관관계를 나타내지는 않

았다. 이러한 결과는 온도변화에 따른 동결토 전단강도와 동착강도의 관계를 분석하기 위해서는 전단강도(동착강도)를 구성하는 점착력(부착력)과 내부마찰각(마찰각) 항을 구분하여 비교하는 방법은 타당하지 않다는 사실을 의미하는 것으로 판단된다.

### 3.4 기존 산정방법과 결과비교

제 2.1절에서 기술한 기존 동착강도 산정방법들을 활용하여 본 연구에서 수행한 실험과 유사한 조건으로 -2°C

표 6. 실험결과 및 기존 산정방법에 의한 추정 값 비교

제안자	산정방법	동결온도		비고
		-2°C	-5°C	
실험결과	직접전단시험	140kPa	548kPa	부착력 $a$ (수직응력 $\sigma=0$ )
Sanger(1969)	-4°C~0°C범위의 전형적인 동착강도 제안	230kPa	320kPa	saturated fine sand
Linell과 Lobacz(1980)	-4~0°C범위의 동착강도 그래프와 수정계수의 곱으로 산정	270kPa	443kPa	sand-steel ( $m=1.5$ )
Weaver와 Morgenstern(1981)	$\tau_a = m\tau_u$	891kPa	1648kPa	$\tau_u = \tau_f$ 가정 steel( $m=0.6$ )
Ladanyi와 Theriault(1990)	$\tau_{a,t} = mc_t + \sigma_{n,tot} \tan\phi_u$	891kPa	1648kPa	$c_t = c$ 가정 steel( $m=0.6$ )
Fang(1991)	동결온도에 대한 전형적 동착강도 프로제안	110kPa	190kPa	-
Bowles(1996)	$f_{au} (kPa) = M_1 + M_2(T)^{0.7}$	314kPa	533kPa	-

와 -5°C 동결온도 조건에서의 동착강도를 각각 추정하였으며, 그 결과를 실험결과를 통해 측정된 부착력  $a$ (수직응력  $\sigma=0$ )의 값과 비교한 결과를 표 6에 나타내었다. 여기서, 비교에 활용된 부착력  $a$ 는 수직응력에 대한 동착강도 그래프(그림 8참조)에서 1차원 회귀분석으로 추정된 직선과 종축이 만나는 교점에서 나타나는 동착강도를 의미한다. 기존 산정방법을 활용하여 동착강도를 추정할 때, 토사는 모두 사질토 조건을 선택하였고, 말뚝 재료에 대한 수정계수는 본 실험시 활용된 알루미늄 모형재료와 가장 유사한 강재료에 대한 수정계수 값을 활용하였으며, 동결토의 장기전단강도( $\tau_u$ ) 및 장기점착력( $c_t$ )는 각각 최대 전단강도( $\tau_f$ ) 및 점착력( $c$ )로 대체하여 산정하였다. 그 결과 -2°C 조건에서는 Fang(1991)이 제안한 동착강도가 110kPa로 실험결과인 140kPa와 가장 유사한 결과를 나타내었고, -5°C 조건에서는 Bowles(1996)가 제안한 동착강도가 533kPa로 실험결과인 548kPa와 편차가 가장 적었으며 전반적인 경향은 Linell과 Lobacz(1980)가 제안한 방식의 추정결과가 가장 유사한 경향을 나타냈다. 하지만, 기존 동착강도 산정방법들은 같은 조건에서도 산정방법에 따라 동착강도의 편차가 비교적 크게 나타났으며, 실험결과를 통해 확인한 바와 같이 수직응력이 커질수록 동착강도가 커지는 현상을 반영할 수 없어 소정깊이 이상의 지층에서 기초구조물에 작용하는 실제 동착강도를 산정하기 위한 방식으로는 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

#### 4. 동착강도 산정방법 제안

앞서 정리한 전단실험결과를 바탕으로 동결토의 전

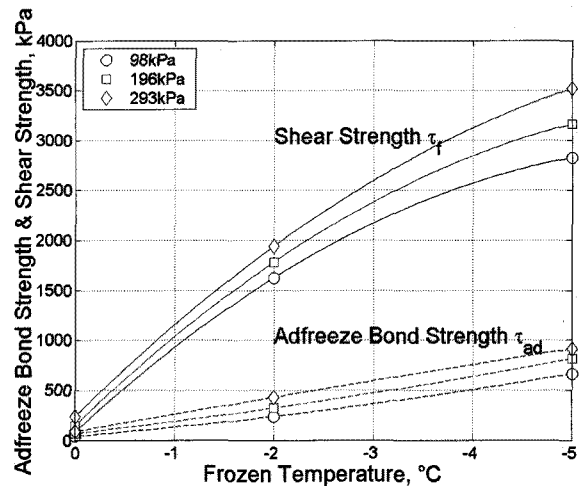


그림 9. 온도에 따른 전단강도 및 동착강도

단강도와 알루미늄 모형재료와 동결 사질토의 접촉면에서 작용하는 동착강도의 관계를 분석하기 위하여 동결온도 조건에 대한 강도를 그림 9와 같이 도시화하였다. 여기서, 상온에서의 실험결과는 토사가 동결하기 직전, 즉 온도조건 0°C 직전까지 동일하다고 가정하였고 그래프 상에서는 0°C에 위치시켰다. 그림 9에서 횡축은 동결온도를, 종축은 전단강도와 동착강도를 나타내고 있으며, 실선(solid line)의 추세선으로 연결된 결과가 전단강도를, 점선(dashed line)의 추세선으로 연결된 결과가 동착강도를 의미한다. 그림 9에서 나타낸 추세선은 2차원 보간법(polynomial interpolation)을 사용하여 추정한 곡선으로, 두 실험결과들은 각각 온도의 변화에 따라 전단강도의 경우 위로 볼록한 2차원 곡선 형태를 나타내며 증가하고 있으며, 동착강도의 경우 아래로 볼록한 2차원 곡선 형태를 나타내며 증가하는 경향을 보였다. 또한, 수직응력의 차이에 따라 일정한 비율의 간격



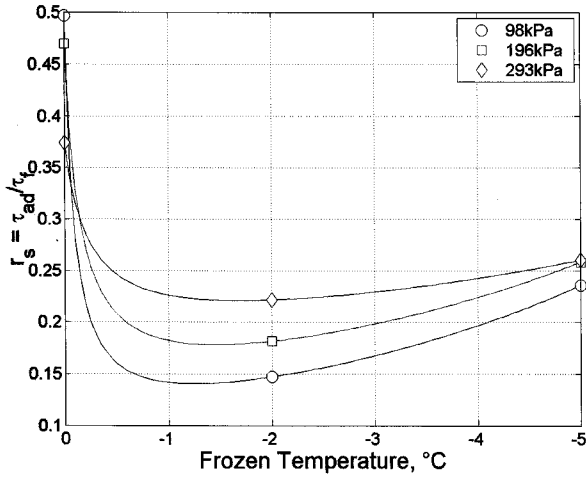


그림 10. 전단강도와 동착강도의 비  $r_s$

을 두고 나타나고 있음을 확인 할 수 있다.

2차원 보간법을 활용하여 추정된 결과를 바탕으로 동결토의 동착강도와 전단강도의 비  $r_s (= \tau_{ad} / \tau_f)$ 를 계산하였다. 그 결과  $-2^\circ\text{C}$  동결조건에서 수직응력 1atm, 2atm, 3atm 조건에서 각각 0.15, 0.18, 0.22의 비를 나타냈으며, 동결온도가  $-5^\circ\text{C}$  조건으로 낮아질수록  $r_s$ 의 값이 약 0.25로 수렴구간을 형성하는 경향을 나타냈다. 그림 10은 그림 9에 나타난 동착강도와 전단강도 값의 비율을 동결온도에 대하여 나타낸 것으로 전반적으로 동결 직후 동착강도와 전단강도의 비  $r_s$  값이 급격히 감소하다가 동결온도가 낮아질수록 증가하며 수렴구간을 형성해 나가는 경향을 나타내고 있다. 이는 전단강도가 온도가 낮아질수록 위로 볼록한 형태를 나타내며 증가하는 반면 동착강도는 아래로 볼록한 형태를 나타내며 증가하는 경향으로 인하여 두 추세선이 볼록해지는 동결초기 구간에서는 상대적 편차가 증가하다가 일정 구간을 넘어 서면 상대적 편차가 감소하기 때문이다. 본 연구에서는 동결온도와 수직응력을 고려한 계수  $r_s$ 를 활용하여 평평한 구조물재료에 대한 동착강도를 추정할 수 있는 방법을 식 (5)와 같이 제안하는 바이다.

$$\tau_{ad} = r_s \tau_f \quad (5)$$

여기서,  $\tau_{ad}$ 는 동착강도,  $\tau_f$ 는 동결토의 전단강도를 의미한다. 그림 10으로부터  $-5^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ 의 동결온도 범위에서 각 수직응력조건에 따른 전단강도와 동착강도의 비  $r_s$ 를 추정할 수 있다. 식 (5)의 방법을 통한 동착강도 산정방법의 정확성을 확인하기 위하여 Ladanyi와 Theriault(1990)

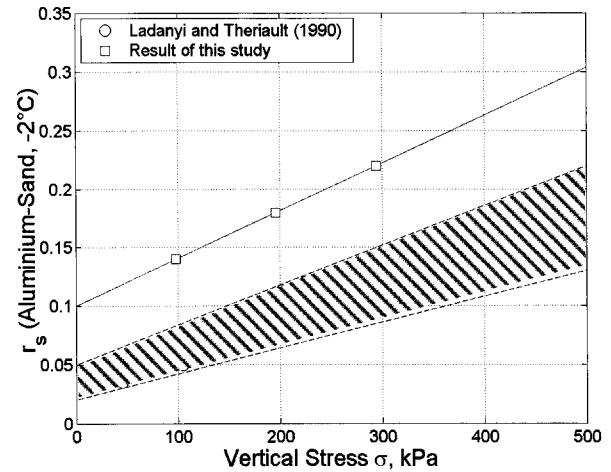


그림 11. 기존실험결과와 본 연구결과와의 비교(Ladanyi와 Theriault, 1990)

의 기존 실험결과와 비교해 보았다. Ladanyi와 Theriault (1990)는  $-2^\circ\text{C}$ 의 동결조건에서 수직응력 45, 105, 202, 225, 396kPa 조건에서 동결토 전단시험과 알루미늄 재료에 대한 동착강도 측정실험을 수행하였고 그 결과를 동착강도와 전단강도의 비로 나타내면 각각 0.03, 0.05, 0.11, 0.12, 0.13과 같다. Ladanyi와 Theriault(1990)의 실험결과를 통해 측정된 동착강도와 전단강도의 비는 편차가 크고 비교적 산발적으로 나타나 이를 그림 11의 빗금친 부분과 같이 범위로 제시하였으며, 문헌조사 결과 동착강도와 전단강도의 비를 활용한 동착강도 산정식을 제안하지 않은 것으로 알려져 있다. 반면, 본 연구에서 측정된  $r_s$  값은 그림 11의 본 연구결과에 나타낸바와 같이  $-2^\circ\text{C}$ 이 동결온도 조건에서 비교적 선형적인 관계를 나타냈으며 1차원 회귀분석으로 추정된 추세선으로부터 Ladanyi와 Theriault(1990)의 기존실험에서 측정된 수직응력조건에 따른  $r_s$  값은 각각 0.11, 0.14, 0.18, 0.19, 0.24로 나타났다. 본 연구결과는 기존실험결과와 비교하여 작게는 약 1.6배에서 크게는 3.7배의 차이를 나타냈으며, 기존 실험결과로부터 제안되고 있는 동착강도와 전단강도 비의 범위로부터 벗어나 전체적으로 크게 나타나고 있다. 하지만 기존 실험결과로부터 제안되고 있는 동착강도와 전단강도 비의 범위는 그 측정결과 값의 편차가 크고, 제시하고 있는 범위가 넓어 수직응력이 미치는 영향의 경향성을 분석하기 위한 자료로는 신뢰성이 떨어지는 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구결과와 Ladanyi와 Theriault(1990)의 기존 연구결과와의 일대일 비교결과는 향후 보다 다양한 수직응력 및 토사 조건에서의 추가적인 실험을 통해 축적된 데이터를 바

표 7. Ladanyi and Theriault(1990) 실험결과와 비교

동결온도	수직응력 (kPa)	Ladanyi와 Theriault(1990)의 $r_s$	$r_s$	편차(배)
-2°C	45	0.03	0.11	3.7
	105	0.05	0.14	2.8
	202	0.11	0.18	1.6
	225	0.12	0.19	1.6
	396	0.13	0.24	1.8

탕으로 면밀하게 분석될 필요가 있을 것으로 판단된다. 두 연구결과와의 차이를 표 7에 정리하였다.

### 5. 결 론

영구동토지반에서 말뚝기초의 지지력을 지배하는 설계정수인 동착강도는 토사의 종류, 동결온도, 함수비, 기초구조물 표면거칠기, 재하속도, 지중응력 등 다양한 요인으로부터 영향을 받는다. 1960년대 이후로 기초 설계를 위한 동착강도 산정을 위한 다양한 방법이 제안되어왔으나 그 결과 값의 편차가 크고, 마찰면에 수직방향으로 작용하는 지중응력의 영향을 무시하는 등 실제 기초설계를 위한 정수산정방법으로 활용하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 합리적인 동착강도 산정방안을 도출하기 위한 목적으로 사질토와 알루미늄 모형재료를 활용하여 1)동결 사질토 전단시험과 2)알루미늄 모형재료-동결 사질토 전단시험을 수행하였고, 다음과 같은 연구결과를 도출하였다.

- (1) 실험결과 동결 사질토의 전단강도  $\tau_f$ 와 알루미늄 모형재료-동결 사질토 접촉면에서 작용하는 동착강도  $\tau_{ad}$ 는 동결온도가 낮아질수록, 수직응력이 커질수록 증가하는 경향을 나타내었다.
- (2) 실험을 통해 측정된 동착강도와 기존에 제안된 산정방법들로 추정된 동착강도를 비교해본 결과 같은 조건에서도 산정방법에 따라 동착강도의 편차가 비교적 크게 나타났다.
- (3) 2차원 보간법을 활용해 추정된 전단강도와 동착강도의 추세선을 바탕으로 동결토 전단강도와 동착강도의 비  $r_s(=\tau_{ad}/\tau_f)$ 를 산정한 결과, 토사의 동결직후  $r_s$ 가 급격히 감소하다가 동결온도가 낮아질수록 수렴구간을 형성해가는 경향을 나타냈으며, 그래프로부터 결정된  $r_s$ 값을 활용하여 동결토 전단강도로부터 동착강도를 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

- (4) 본 연구에서 제안된  $r_s$ 는 -2°C의 동결온도 조건에서 기존 연구결과와 비교하여 상대적으로 편차가 작게 나타났으며 선형적인 관계를 나타냈다. 하지만 기존 연구에서 측정된 결과들과 비교하여 전체적으로 큰 값을 나타내 본 연구결과와 정확성을 분석하기 위해서는 추가적인 연구가 수행되어야 할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 한정된 동결온도 조건(-5°C~상온)내에서 수행된 것으로, 향후 연구결과와 폭넓은 활용을 위하여 동결온도범위를 최저 -20°C까지 확대한 추가적인 실험을 필요로 한다. 또한, 본 연구에서 제안한 계수  $r_s$ 는 평평한 알루미늄 모형재료와 일정한 재하속도 및 토사종류에 대한 것으로, 기초구조물의 표면 거칠기에 대한 보정계수를 정량적으로 분석하고 활용할 수 있는 방안을 도출하기 위한 추가적인 연구가 필요하며, 하중의 재하속도와 토사종류 등 다양한 인자들이 동착강도에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 말뚝구조물의 표면 거칠기를 정량적으로 분석하기 위해서는 재료 표면의 단면도를 활용하여 거칠기를 정량화 할 수 있는 프랙탈계수(fractal dimension)의 개념을 적용하는 방법이 효과적일 것으로 판단된다(Vallejo와 Zhou, 1995).

본 연구에서 제안한 동착강도 산정방법은 동결토 전단강도를 기준점(reference point)으로 활용하여 동착강도를 추정할 수 있는 가능성을 제시하며, 향후 말뚝재료의 표면거칠기, 재하속도, 토사종류 등에 관한 추가적인 연구수행을 통하여 다양한 영향인자들을 다차원적으로 고려할 수 있는 합리적인 계수  $r_s$ 의 산정방안이 도출될 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 기관고유사업인 “극

한지 하부구조 급속시공 플랫폼 기술개발”과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 고성규, 최창호, 채종길 (2010(a)), “토사의 동상량 및 동상력 측정을 위한 실내 실험장치 개발”, 2010 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp.131-137.
2. 고성규, 최창호, 채종길 (2010(b)), “한지 구조물 기초를 위한 설계정수 연구의 필요성”, 2010 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집 - 지반환경 및 사면안정 기술, pp.93-101.
3. 고성규, 최창호, 채종길 (2011), “사질토와 알루미늄 재료의 접촉면에서 작용하는 동착강도의 주요 영향인자 분석”, 2011년 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.1276-1284.
4. 吉田 光則, 大市 貴志, 山岸 暢, 金野 克美, 後町 光夫, 平野 徹, 藤野 和夫, 堀口 薫, 水野悠紀子, 山岡 勝, 近藤 孝, 浅井 規夫, 佐竹 正治 (1993), “着雪氷防止技術に関する研究”, 北海道立工業試験場報告, No.292, pp.13-22.
5. Assali, I. F. (1994), *Thermal analysis and bearing capacity of piles embedded in frozen soils*, Thesis for Master Degree, University of Windsor, Ontario, Canada.
6. Bowles, J. E. (1996), *Foundation analysis and design 5th ed.*, McGraw-Hill.
7. Cuthbertson-Black, R. (2001), *The interaction between a flighted steel pipe pile and frozen sand*, Thesis for Master Degree, University of Manitoba.
8. Davis, T. N. (2001), *Permafrost: A guide to frozen ground in transition*, Fairbanks, Alaska, University of Alaska Press.
9. Esch, D. C. (2004), *Thermal analysis, construction, and monitoring methods for frozen ground*, The technical council on cold regions engineering, Virginia: American Society of Civil Engineering.
10. Fang, H-Y. (1991), *Foundation engineering handbook*, New York: Van Nostrand Reinhold.
11. Freitag, D. R. and McFadden, T. (1997), *Introduction to cold regions engineering*, New York: ASCE Press.
12. Ladanyi, B. and Theriault, A. (1990), “A study of some factors affecting the adfreeze bond of piles in permafrost”, *Proc. of geotechnical engineering congress, GSP 27 ASCE*, Vol.1, pp.213-24.
13. Linell, K. A. and Lobacz, E. F. (1980), *Design and construction of foundations in areas of deep seasonal frost and permafrost*, U. S. Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 80-34.
14. Parameswaran, V. R. (1978), “Adfreeze strength of frozen sand to model piles”, *Canadian geotechnical journal*, Vol.15, No.4, pp.494-500.
15. Sanger, F. J. (1969), *Foundations of structures in cold regions*, U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Monograph III-C4.
16. Scarr, K. L., Mokwa, R. L. (2008), *Axial capacity of piles founded in permafrost: A case study on the applicability of modern pile design in remote mongolia*, Project Report, BioRegions International, Bozeman, Montana.
17. Terashima, T., Kawai, T., Furuya, A., Narita, K., Usami, N., Saeki, H. (1999), “Experimental study on adfreeze bond strength between ice and pile structure”, *Proc. of 9th international offshore and polar engineering conference*, Vol.2, pp.549-556.
18. Weaver, J. S. and Morgenstern, N. R. (1981), “Pile design in permafrost”, *Canadian geotechnical journal*, Vol.18, No.3, pp.357-370.
19. Vallejo, L. E., Zhou, Y. (1995), “Fractal approach to measure roughness of geomembranes”, *Journal of geotechnical engineering*, ASCE, Vol.121, No.5, pp.442-446.

(접수일자 2011. 3. 22, 심사완료일 2011. 10. 4)