

# 동결된 화강풍화토와 알루미늄판 접촉면에서 발현되는 동착강도 측정 연구

## A Study for Adfreeze Bond Strength Developed between Weathered Granite Soils and Aluminum Plate

이 준 용<sup>1)</sup> · 김 영 석<sup>1)</sup> · 최 창 호<sup>†</sup>

Joonyong Lee · Youngseok Kim · Changho Choi

Received: September 5<sup>th</sup>, 2013; Revised: September 17<sup>th</sup>, 2013; Accepted: October 30<sup>th</sup>, 2013

**ABSTRACT** : Bearing capacity of pile is governed by only skin friction in frozen ground condition, while it is generally governed both by skin friction and end bearing capacity in typically unfrozen ground condition. Skin friction force, which arises from the interaction between pile and frozen soils, is defined as adfreeze bond strength, and adfreeze bond strength is one of the most important key parameters for design of pile in frozen soils. Many studies have been carried out in order to analyze adfreeze bond strength characteristics over the last fifty years. However, many studies for adfreeze bond strength have been conducted with limited circumstances, since adfreeze bond strength is sensitively affected by various influence factors such as intrinsic material properties, pile surface roughness, and externally imposed testing conditions. In this study, direct shear test is carried out inside of large-scaled freezing chamber in order to analyze the adfreeze bond strength characteristics with varying freezing temperature and normal stress. Also, the relationship between adfreeze bond strength and shear strength of the frozen soil obtained from previous study was analyzed. The coefficient of adfreeze bond strength was evaluated in order to predict adfreeze bond strength based on shear strength, and coefficients suggested from this and previous studies were compared.

**Keywords** : Frozen ground condition, Adfreeze bond strength, Direct shear test, Coefficient of adfreeze bond strength

**요 지** : 비동결된 지반에서의 말뚝기초 지지력은 주면마찰력과 선단지지력에 의해 지배되는 것과 달리 동토지역에서의 말뚝기초 지지력은 일반적으로 주면마찰력에 의해 지배된다. 동토지역에서 말뚝기초와 동결토 사이 접촉면에서 발현하는 주면마찰력은 동착강도로 정의하며, 동착강도는 동토지역 말뚝기초의 설계 지배정수로 알려져 있다. 동토지역에서 말뚝기초의 지지력을 지배하는 설계정수인 동착강도 특성을 분석하기 위하여 지난 50여 년 동안 많은 연구가 수행되었으며, 현재에도 활발히 연구가 수행 중에 있다. 하지만 동착강도의 경우 토사의 물성특성, 말뚝표면의 거칠기 및 외부적인 시험조건에 의하여 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있어 현재까지 진행된 많은 연구들은 제한된 영향인자를 고려하여 수행되었다. 본 연구에서는 동결온도 및 수직응력 조건에 따른 동착강도 특성을 분석하기 위하여 대형 냉동챔버 내에서 직접전단시험을 수행하였으며, 시험결과를 바탕으로 기존에 동일한 조건으로 측정된 동결토 전단강도와 상관관계를 분석하였다. 또한, 향후 동결토 전단강도를 활용하여 동착강도를 추정할 수 있는 동착강도 비례계수를 산정하였으며, 기존 연구와의 비교분석을 통하여 기존 계수에 대한 문제점을 고찰하였다.

**주요어** : 동토지역, 동착강도, 직접전단시험, 동착강도 비례계수

## 1. 서 론

본 연구는 “동결온도 조건에서의 화강풍화토 전단강도 특성에 관한 연구(Lee & Choi, 2013)”의 연결 편으로, 동토지역의 기초구조물 설계에서 필수적인 동착강도 특성을 분석하고 기존의 동결토 전단강도 결과(Lee & Choi, 2013)와의 상관관계를 이용하여 동착강도를 추정할 수 있는 비례계수를 도출하는데 초점을 맞추어 수행하였다.

극한지(極寒地)에 존재하는 영구동토지반은 지층 내 계절의 변화에 상관없이 일 년 내내 얼어있는 동결토층이 존

재하는 지반을 의미하며, 일반적으로 영구동토층 상부는 계절변화에 따라 동결·융해를 반복하는 활동층이 나타나 는 지층 구조를 지니고 있다. 동토지역에서 말뚝기초는 활동층을 통과하여 영구동토층에 설치하게 되며, 말뚝기초의 지지력 산정은 말뚝 선단에서 동결토사의 전단강도에 의한 선단지지력과 수분이 함유된 토사와 구조체 사이에 작용하는 말뚝 주면마찰력으로 구분되어 예측될 수 있으나, 일반적으로 주면마찰력만을 고려하여 지지력 설계를 수행한다. 여기서, 주면마찰력은 말뚝과 동결토의 접촉면에서 발현되는 동착강도로 산정되며, 이러한 동착강도는 동토지반 말

1) Korea Institute of Construction Technology Geotechnical Engineering Research Division

† Korea Institute of Construction Technology Geotechnical Engineering Research Division (Corresponding Author : chchoi@kict.re.kr)

뚝기초의 지지력을 지배하는 설계정수로 알려져 있다(Ladanyi & Theriault, 1990).

현재까지 동토지역에서 말뚝설계를 위한 동착강도의 산정은 이론적 접근 방식 대신 주로 수년 동안 구축된 말뚝 시험 결과를 통한 경험적 자료를 토대로 수행되고 있다. 최근 국내·외적으로 동토지역 개발에 대한 필요성이 대두되면서 동토지반에서의 말뚝기초 설계 동착강도를 산정하기 위한 많은 연구 및 시험 등이 수행되었으며, 그 결과 영구동토 지반에서의 기초구조물 설계를 위한 많은 동착강도 자료가 축적 중에 있다(Sanger, 1969; Linell & Lobacz, 1980; Weaver & Morgenstren, 1981; Fang, 1991; Bowles, 1996; Choi, 2011; Ko & Choi, 2011). 대표적으로 Weaver & Morgenstren(1981)과 Tsytoich(1975)는 지중온도, 말뚝 종류와 토사종류에 따른 동착강도 특성에 관한 연구를 수행하였다. 또한, 동결온도조건에 따른 동결토의 전단강도 특성을 고려할 수 있다는 장점으로 인하여 많은 연구자들은 동결토 전단강도와와의 관계를 활용하여 동착강도를 산정하는 연구에 많은 관심을 기울이고 있다(Weaver & Morgenstern, 1981; Ladanyi & Theriault, 1990; Choi, 2011; Choi & Ko, 2011; Ko & Choi, 2011).

하지만 동결토 전단강도 뿐만 아니라 동착강도의 경우 입도분포, 유기물함량, 함수비 또는 함빙비와 같은 흙의 내재성 물질 특성과 변형율, 온도, 응력-변형율 이력, 기초구조물의 표면 거칠기와 같은 외부적인 실험조건에 따라 영향을 받는 것으로 알려졌기 때문에 기존 연구결과를 통하여 기초구조물이 시공되는 특정 동토지역의 동착강도 특성을 정확히 예측하기는 쉽지 않다. 이와 같은 이유로 지금까지 수행된 동착강도에 관한 기존 연구동향을 살펴보면 다양한 토사 종류 및 외부적인 실험조건에 대한 동착강도 특성에 대한 연구가 부족한 실정이다.

앞서 언급한 바와 같이 동착강도는 동토지역에서 말뚝 기초를 설계하기 위한 지배적인 설계정수이다. 따라서 특정 동토지반의 기초구조물 설계에 있어 지중온도, 활동층의 두

께, 토사의 종류, 함수비 또는 함빙비를 고려한 동착강도의 산정은 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 동토지역의 저온환경을 모사할 수 있는 대형 냉동챔버와 극저온 환경에서도 운영이 가능하도록 설계된 직접전단시험기를 활용하여 동결온도 및 수직응력 변화에 따른 알루미늄 재료와 화강풍화토 접촉면에서 발현되는 동착강도 특성을 분석하였으며, 향후 동착강도 추정에 활용하기 위하여 선행 연구(Lee & Choi, 2013)와 동일한 조건으로 측정된 화강풍화토의 전단강도 특성을 이용하여 동착강도와의 상관관계를 분석하였다.

## 2. 기본이론

Fig. 1에서 나타난 바와 같이 동토지반의 말뚝기초 하중 조건은 계절에 따라 동토지반의 깊이에 따른 동결상태가 변화하며, 동시에 말뚝에 작용하는 하중조건이 변화한다(Phukan, 1985). 따라서 동토지반에서 기초구조물을 설계하기 위해서는 계절 변화에 따른 하중조건의 변화에 안정적으로 대응할 수 있도록 해야 한다. 계절에 따라 변화하는 하중 조건에 적합한 말뚝기초의 지지력 산정 및 상향력 검토 과정에서 지배적인 역할을 하는 요소는 Fig. 1과 같이 하계기간의 경우 영구동토층에서 작용하는 주면지지력  $P_s$ 와 동계기간의 경우 동결된 활동층에서 작용하는 상향력  $P_u$ 이며, 여기서 주면지지력과 상향력은 말뚝과 동결토의 접촉면에서 발현하는 동착강도( $\tau_a$ 와  $\tau_u$ )에 의해 발생한다.

동착강도란 간극수의 동결에 의해 접착된 기초구조물과 토사의 접촉면에서 미끄럼파괴(slip failure)가 일어날 때의 최대응력으로 정의된다(Cutbertson-Black, 2001). KICT(2012)에 따르면 동착강도와 수직응력의 관계는 Eq. (1)과 같이 각 온도조건에서 Mohr-Coulomb의 전단강도 이론의 적용이 가능하다.

$$\tau_a = a + \sigma \tan \delta \quad (1)$$

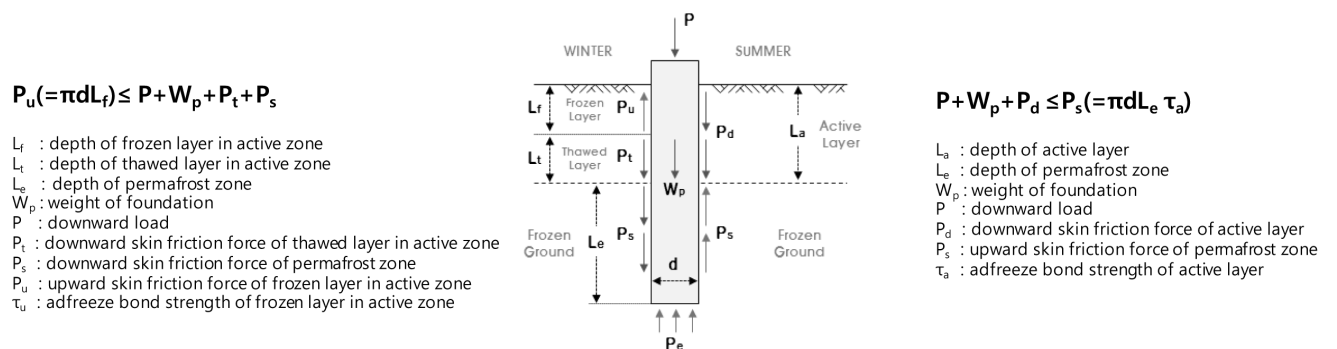


Fig. 1. Loading conditions of pile foundation in frozen ground(Phukan, 1985)

여기서,  $\tau_a$ 는 동착강도,  $a$ 는 부착력,  $\sigma$ 는 수직응력,  $\delta$ 는 마찰각이다. Mohr-Coulomb의 전단강도 이론을 적용하여 서로 다른 이질재료의 접촉면에서 작용하는 강도정수를 산출한 경우, 점착력  $c$ 는 일반적으로  $a$ 로 표현한다(Chun et al., 2001; Seo et al., 2003).

동토지역에서 말뚝기초 설계를 위한 동착강도의 산정 방법은 크게 시험장비를 이용하여 현장 또는 실내에서 직접적으로 측정하는 방법과 동결토사의 전단강도 특성을 고려하여 추정하는 방법으로 나누어진다. 특히 많은 연구자들은 동결온도에 따른 토사의 전단강도 특성을 바탕으로 동착강도를 추정하는 연구를 수행하였다(Weaver & Morgenstren, 1981; Ladanyi & Theriault, 1990; Choi, 2011; Choi & Ko, 2011; Ko & Choi, 2011). 동결토사의 전단강도 특성과 동착강도의 상관관계는 Eq. (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$\tau_a = r_s \times \tau_f \quad (2)$$

여기서,  $\tau_a$ 는 동착강도,  $\tau_f$ 는 동결토의 전단강도,  $r_s$ 는 말뚝의 종류와 거칠기를 고려하여 동착강도를 예측하는 비례계

Table 1. Coefficient  $r_s$  for predicting adfreeze bond strength (Weaver & Morgenstern, 1981)

Material Type	$r_s$
Steel	0.6
Concrete	0.6
Uncreosoted Timber	0.7
Corrugated Steel	1.0

수로 정의된다. Weaver & Morgenstren(1981)은 말뚝재료가 강재, 콘크리트, 표면처리가 되지 않은 목재, 부식된 강재인 경우의 동착강도 비례계수  $r_s$ 를 Table 1과 같이 제시하였다.

동결토 전단강도와 수직응력의 관계는 비동결토사의 Mohr-Coulomb 전단강도 이론에 의해서 표현될 수 있으며, 동결토의 전단강도와 수직응력의 관계는 Eq. (3)과 같다. 특히, Sayles(1973)는 25% 이상의 함수비와 37% 이상의 간극률을 지닌 동결토의 전단강도에 대하여 Eq. (4)와 같은 포물선 형태의 전단강도 곡선식을 제안하였다.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (3)$$

여기서,  $\tau_f$ 는 동결토의 전단강도,  $c$ 는 점착력,  $\sigma$ 는 수직응력,  $\phi$ 는 내부마찰각이다.

$$\tau_f = (c + b \cdot \sigma)^{0.5} \quad (4)$$

여기서,  $\tau_f$ 는 동결토의 전단강도,  $c^{0.5}$ 는 수직응력이 0일 경우의 점착력,  $b$ 는 내부마찰각의 함수이다.

### 3. 시험방법 및 결과

#### 3.1 시험장비 및 재료 특성

본 연구에서는 Lee & Choi(2012, 2013)가 활용한 대형 냉동챔버 및 직접전단시험기를 활용하여 시험을 수행하였



(a) Outside



(b) Inside

Fig. 2. Freezing chamber in frozen soil mechanics laboratory(Lee & Choi, 2012)

다. 본 연구에 활용한 냉동 챔버는 2,000 mm(W)×3,000 mm(L) × 2,500 mm(H) 크기로 ±1℃의 온도분포 조절을 통하여 -20℃ 까지 온도제어가 가능하며, Fig. 2는 챔버의 외부 및 내부 모습을 보여준다. Fig. 3에 보여진 직접전단시험기는 대형 냉동 챔버 내에 설치되어 있으며, -30℃에서 운용이 가능하도록 특수 제작되었다. 시험장비에 대한 세부적인 사항은 Lee & Choi(2013)를 참조한다.

본 연구에서는 Lee & Choi(2013)의 동결토 전단강도 결과와 연계하여 Lee & Choi(2013)에서 활용한 동일한 시험 장비와 재료를 활용하였다. 본 연구에서 사용한 화강풍화토는 관악산 인근 지역에서 채취하였으며, 통일분류상 ‘SW’

Table 2. Physical properties of weathered granite soil

	Weathered Granite
$G_s$	2.67
$e_{max}$	1.227
$e_{min}$	0.418
$D_{50}$	0.71
$C_u$	6.07
$C_c$	1.29
USCS	SW

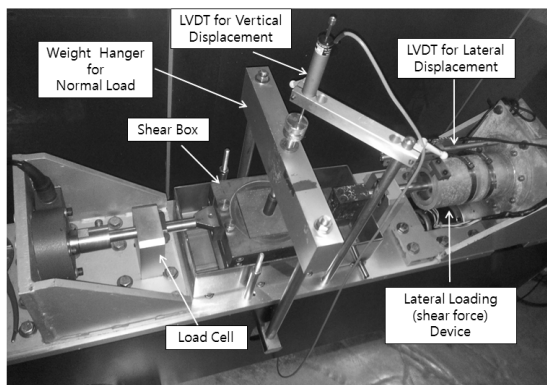


Fig. 3. Direct shear test apparatus for frozen soils(Lee & Choi, 2012)

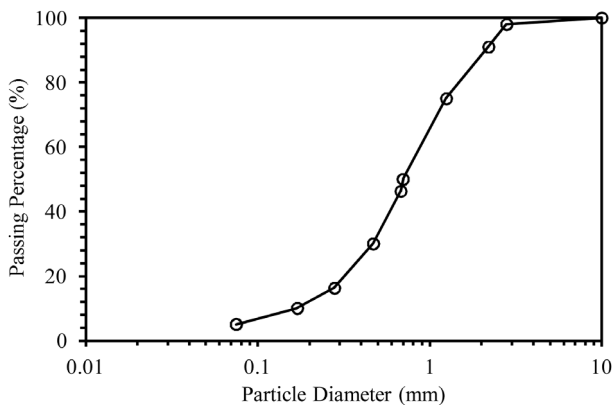


Fig. 4. Grain size distribution curve of weathered granite soil (Lee & Choi, 2013)

에 해당하며, 비중은 2.67이다. Fig. 4는 시험대상 화강풍화토의 입도분포곡선을 나타내고 있으며, Table 2는 화강풍화토의 기본 물성치를 보여준다.

### 3.2 시험방법

본 연구에서 수행한 알루미늄 모형재료와 화강풍화토를 활용한 동착강도 시험은 Lee & Choi(2013)에서 수행한 동결토 전단강도 시험과의 일관성을 가지도록 동일한 시험조건으로 공시체를 제작하였다. 공시체를 제작하기 전 시료는 15.5%의 함수비 조건을 가지고 화강풍화토와 물을 잘 혼합한 뒤 비닐팩을 이용하여 함수량의 손실을 막고 함수비가 균일하게 퍼지도록 약 24시간 동안 보관하였다. 24시간 이후 하부전단상자 내에 알루미늄 모형재료를 Fig. 5와 같이 삽입하고, 상부전단상자 내에 함수비 15.5%의 화강풍화토 시료를 삽입한 후 상대밀도 76%의 기준으로 공시체를 제작하였다. 제작된 시험공시체는 동착강도 시험을 위하여 대형 냉동챔버 내에서 상재하중 없이 동결시켰으며, 동결과정에서 발생할 수 있는 수분 손실을 방지하기 위하여 비닐팩으로 전단상자를 마감하였다. Lee & Choi(2013)의 동결토 전단시험에 따르면 시험공시체의 중심부 온도는 약 6시간 이후 대형 냉동챔버의 온도조건과 평형을 이룬다는 것을 확인하였으나, 동착강도는 동결시간에 따라 예민하게 달라질 수 있으므로 모든 조건별 공시체를 기존연구와 동일하게 24시간 동안 동결시켰다.

냉동챔버 내에서 24시간 시험공시체를 동결한 후, 본 연구에서는 Lee & Choi(2013)와 동일한 0.5 mm/min의 전단속도로 하중을 재하하였다. 본 시험은 수직응력 변화에 따른 동착강도 특성을 살펴보기 위하여 다섯 가지의 동결온도 조건을 설정하여 수행하였다. 즉, 동착강도 시험은 상대밀도(76%), 함수비(15.5%), 전단속도(0.5 mm/min)의 고정된 조건하에 세 가지의 수직응력(100 kPa, 200 kPa, 300 kPa)과 각 수직응력에 대한 다섯 가지의 동결온도조건(상온, -2℃,

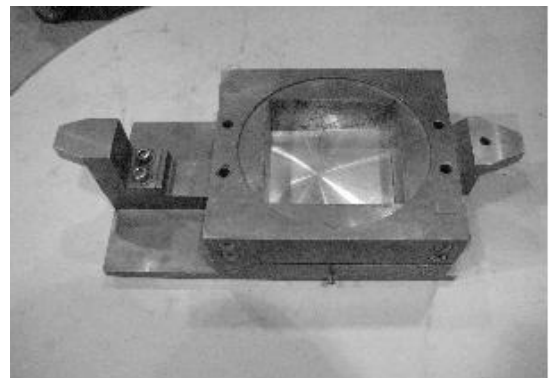


Fig. 5. Picture of Aluminium in the lower part of direct shear box

-5°C, -10°C, -15°C)에서 수행하였다. 각 조건에 따른 동착강도 시험은 전단응력이 일정해질 때까지 또는 전단변형율이 공시체 너비의 약 10%에 도달할 때까지 하중을 재하하였다.

### 3.3 시험결과

Fig. 6은 각 동결온도 조건과 수직응력에 따른 화강풍화와 알루미늄 모형재료간의 동착강도 측정 결과를 보여주고 있다. Fig. 6의 (a)에서 (e)까지는 각각 동결온도가 상온( $\geq 0^\circ\text{C}$ ), -2°C, -5°C, -10°C, -15°C 조건에서 수행된 시험결과

를 나타내고 있으며, x축에 수평변위를 y축에 전단응력을 도시하였다. Fig. 6에 나타난 직접전단시험기를 통한 동착강도 측정 시험 결과를 살펴보면 변수조건으로 적용한 동결온도와 수직응력 조건에 따라 동착강도는 다양하게 변화하였는데 동결온도가 낮아질수록, 또는 수직응력이 증가할수록 동착강도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 알루미늄 모형재료와 토사의 접촉면에서 발생하는 파괴거동은 동결온도가 낮아질수록 취성이 뚜렷해지는 특성을 나타냈으며, 동결온도 조건이 낮아질수록 알루미늄 모형재료와 동결토사의 접촉면에서 미끄럼파괴(slip failure)가 일어나는

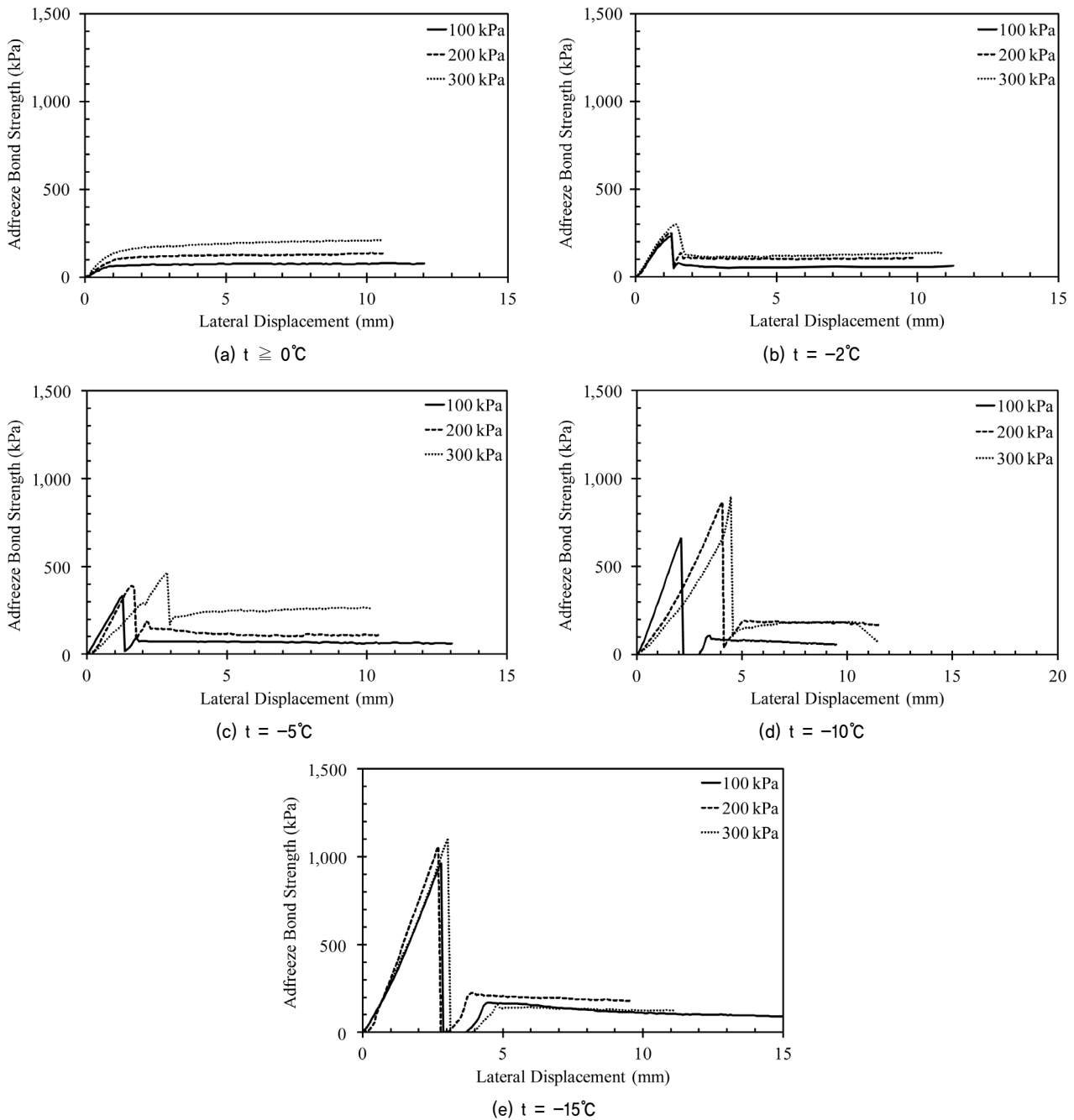


Fig. 6. Adfreeze bond strength test results with varying vertical stress for different freezing temperatures

Table 3. Shear strength of weathered granite soil and adfreeze bond strength with varying freezing temperature and vertical stress

Freezing temperature (°C)	Normal Stress (kPa)	Water Content (%)	Relative Density (%)	Shear Strength(kPa) (Lee & Choi, 2013)	Adfreeze Bond Strength (kPa)
≥ 0°C	100	15.5	76	263	81
≥ 0°C	200	15.5	76	291	137
≥ 0°C	300	15.5	76	335	210
-2	100	15.5	76	543	123
-2	200	15.5	76	667	231
-2	300	15.5	76	863	298
-5	100	15.5	76	1,469	330
-5	200	15.5	76	1,690	389
-5	300	15.5	76	1,913	464
-10	100	15.5	76	2,350	660
-10	200	15.5	76	2,577	864
-10	300	15.5	76	2,921	895
-15	100	15.5	76	2,916	961
-15	200	15.5	76	3,050	1,056
-15	300	15.5	76	3,293	1,105

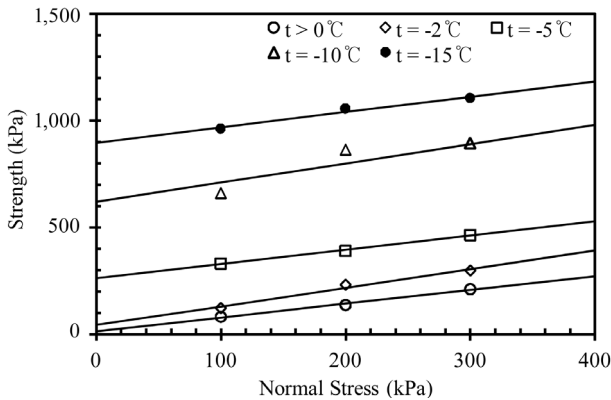


Fig. 7. Adfreeze bond strength with varying vertical stress

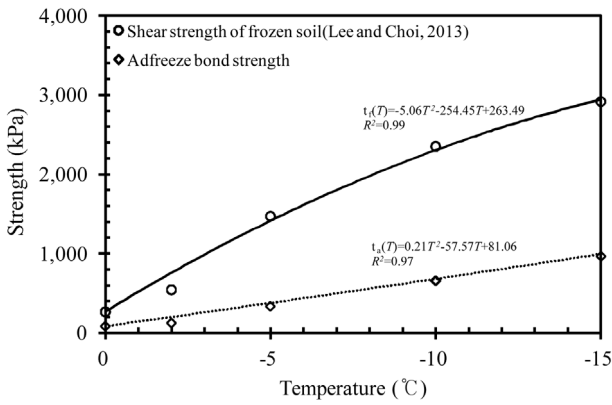
최대강도 발현지점이 뚜렷하고, 파괴 이후 발현되는 잔류강도가 적은 취성파괴 거동을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6에 나타난 수평변위와 전단응력의 그래프로부터 도출된 동착강도와 수직응력의 관계를 보여주고 있다. Fig. 7과 같이 부착력(y 절편값)은 동결온도가 낮아질수록 지속적으로 증가하는 경향을 보이는 반면 마찰각은 약 32~42° 정도를 나타내고 있다. Table 3은 각 동결온도 및 수직응력에 따른 동착강도 결과를 보여준다. 기존의 동결토 전단강도와 비교해보면 같은 동결온도 및 수직응력 조건에서 동착강도는 동결토 전단강도 대비 약 1/2~1/4배 정도인 것을 확인할 수 있다.

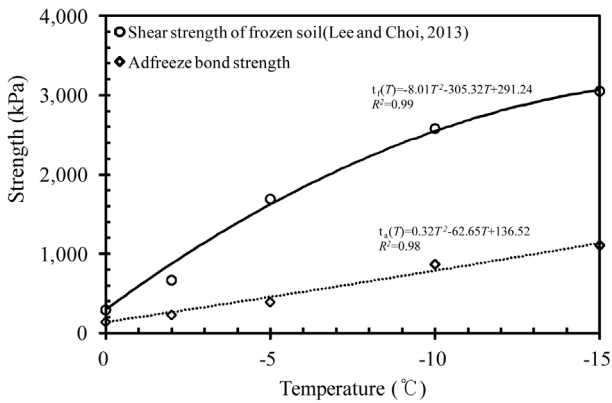
#### 4. 동착강도 비례계수 산정

본 연구에서 도출한 실내 동착강도 시험결과와 기존 연구(Lee & Choi, 2013)의 동결토 전단시험 결과의 상관관계

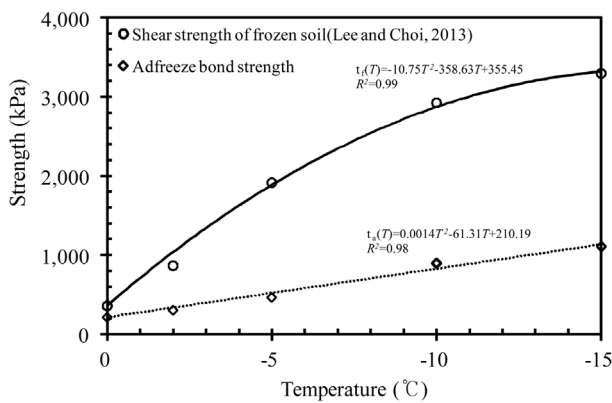
를 바탕으로 동토지반 기초설계에 활용할 수 있는 동착강도 비례계수를 도출하였다. 여기서, 상온조건의 시험결과는 간극수의 동결이 발생하는 시기인 0°C 직전까지 동일하다고 가정하였다. Fig. 8은 세 가지 수직응력 조건에서 동결온도 조건에 따른 동착강도 및 동결토 전단강도 시험 결과(Lee & Choi, 2013)를 나타내고 있으며, Fig. 8에 나타난 추세선은 2차원 보간법을 사용하여 추정된 곡선이다. Fig. 8과 Table 3에서 나타난 바와 같이 동결토 전단강도는 -10°C 까지 각 동결온도 구간별로 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있으며, -10°C에서 -15°C의 구간에서는 동결토의 전단강도 증가율이 낮아지는 추세를 나타내고 있다. 동결온도 조건에 따른 동착강도의 경우도 100 kPa부터 300 kPa의 수직응력 조건에 대한 강도 증가율이 정도의 차이는 있으나, 전반적인 증가율의 변화양상은 동결토 전단강도와 유사한 거동을 보이고 있다. Fig. 9는 Fig. 8에서 각각의 수직응력 조건에 따른 동착강도 및 동결토 전단강도 추정 곡선을 바탕으로 Eq. (2)를 통해 계산된 동착강도 비례계수,  $r_s$ 를 나타낸다. 수직응력이 200 kPa과 300 kPa 조건에서의 동착강도 비례계수는 동결온도가 0°C에서 -5°C 구간에서 감소하는 경향을 보인 후 동결온도가 -5°C 이하부터는 소폭 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 동결온도 0°C ~ -5°C 구간에서 동착강도 비례계수는 수직응력 조건에 따라 편차가 나타났으며, 이후 온도가 내려갈수록 유사한 증가경향을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 동결토 전단강도를 참고 값으로 활용하여 동착강도 산정 시 동결온도 및 수직응력 조건이 상관관계에 영향을 미친다는 것을 의미하며, 동결온도 조건과는 관계없이 고정된 상수인 Table 1을 이용하여 동착강도를 산정하는 기존의 방법은 한계가 있다는 사실을 시사



(a) 100kPa



(b) 200kPa



(c) 300kPa

Fig. 8. Shear strength and adfreeze bond strength with varying vertical stress

하는 것으로 판단된다. 또한, 기존의 주문진 표준사를 활용한 동착강도 산정에 관한 연구(KICT, 2012)를 살펴보면 초기 동결온도 조건에서 동착강도 비례계수는 수직응력으로 인한 영향이 상대적으로 미미하므로 수직응력을 고려하지 않아도 된다고 제안하였으나, Fig. 9에서 나타난 바와 같이 0°C에서 -5°C의 초기 동결온도 구간에서 수직응력은 동착강도 비례계수에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 따라서 상기와 같은 온도 범위 내에서 동결토 전단강도 및 비례계수를 활용한 동착강도 산정 시 수직응력에 따른 영향을 고

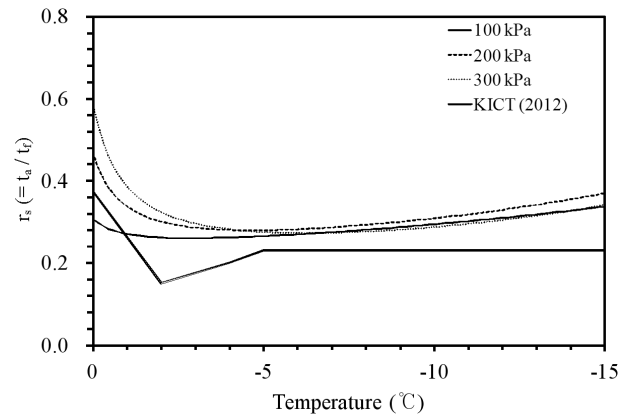


Fig. 9. Coefficient  $r_s$  for predicting adfreeze bond strength from shear strength of frozen sand

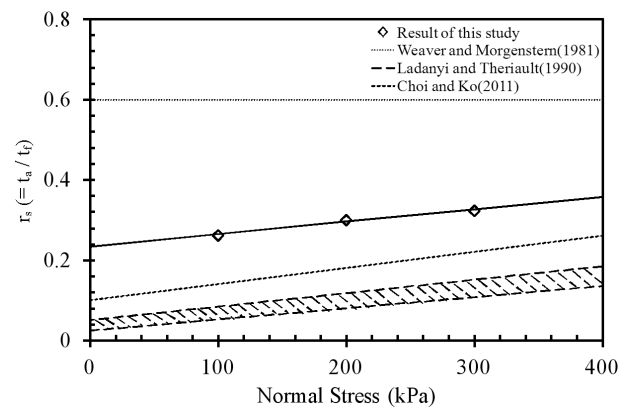


Fig. 10. Coefficient  $r_s$  from this study and previous studies at -2°C

려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10은 동결온도 -2°C 조건에서 기존 연구결과의 비례계수 값과 본 연구의 비례계수 값을 상호 비교하여 보여준다(Weaver & Morgenstern, 1981; Ladanyi & Theriault, 1990; Choi & Ko, 2011). Fig. 10과 같이 본 연구에서 수행한 동착강도 비례계수 결과는 기존의 연구결과와 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 동착강도 및 동결토 전단강도의 경우 토사의 내재성 물성과 외부적인 실험 조건에 따라 민감하게 영향을 받고, 또한 각각의 시험에서 활용한 토사 및 모형 재료의 차이에 기인한다고 판단된다. 따라서, 말뚝기초 설계 동착강도 산정에 있어 현장 조건에 대한 정확한 검토가 무엇보다도 중요한 사항으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 대형 냉동챔버 내에 구축된 직접전단시험기를 활용하여 동결온도 및 수직응력 조건을 변화시키며, 화강풍화토와 알루미늄 모형재료의 접촉면에서 발견되는 동착강도 특성을 분석하였다. 또한, 화강풍화토를 활용한

기존의 동결토 전단강도 시험 결과 값을 활용하여 동착강도를 추정할 수 있는 비례계수를 산정하였다. 본 연구의 시험 결과 및 분석을 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 동착강도 특성은 다양한 매개변수에 의하여 민감하게 반응하기 때문에 기존 동결토 전단강도 시험 값을 활용하기 위하여 동일한 조건을 적용하여 동착강도 측정시험을 수행하였다. 본 연구에 따르면 동착강도는 동결온도가 낮아지거나 수직응력이 커질수록 전반적으로 증가하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 또한, 알루미늄 모형재료와 토사의 접촉면에서 발생하는 파괴거동이 동결온도가 낮아질수록 취성이 뚜렷해지는 특성을 나타내었다.
- (2) 기존 연구에서 정리된 동결토 전단강도와 본 연구의 동착강도 시험결과를 바탕으로 동결온도와 수직응력에 따른 전단강도와 동착강도의 상관관계를 분석하였다. 상기 분석내용을 바탕으로 본 연구에서는 직접적인 동착강도 측정 없이 동결토 전단강도를 참고 값으로 활용하여 동착강도를 산정할 수 있는 동착강도 비례계수( $r_s$ )를 제안하였다. 본 연구에서 제안한 동착강도 비례계수는 0°C에서 -5°C까지의 초기 동결온도 조건에서 수직응력 영향에 의하여 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있었으나, 동결온도 조건이 -5°C 이하로 내려갈수록 수직응력이 동착강도 비례계수에 미치는 영향이 감소하는 것으로 확인하였다.
- (3) 본 연구에서 제안한 비례계수와 기존 연구의 비례계수를 비교한 결과 많은 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 토사종류, 모형재료의 종류 및 외부적인 시험 조건 등 다양한 인자들에 의하여 동착강도가 민감하게 반응하기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구의 동착강도 측정 시험은 여러 영향인자에 의한 동착강도 특성 분석 및 향후 동결토 전단강도 값을 참고 값으로 활용하여 동착강도를 추정할 수 있는 기준점을 제시하기 위하여 수행하였다. 특히, 본 연구결과에 따르면 동착강도 비례계수는 다양한 인자에 의하여 영향을 받기 때문에 기존 연구를 통해 제안된 고정 수정계수 및 추정곡선을 적용하여 동착강도를 산정하는 것은 많은 오차를 내포하게 된다. 따라서 향후 동토지역 말뚝기초 설계에 있어 동착강도의 산정은 현장 조건을 고려한 세분화된 연구를 통해 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 기관고유사업인 “극한지하부구조 급속시공 플랫폼 기술개발” 과제에 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

## References

1. Bowles, J. E. (1996), Foundation analysis and design 5th ed., McGraw-Hill, New York, pp. 472~533.
2. Choi, C. H. (2011), A study on the effect of pile surface roughness on adfreeze bond strength, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 12, No. 12, pp. 79~88 (in Korean).
3. Choi, C. H. and Ko, S. G. (2011), A study for predicting adfreeze bond strength from shear strength of frozen sand, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 10, pp. 13~23 (in Korean).
4. Chun, B. S. Lim, H. S. and Kim, D. H. (2001), Skin friction properties of SIP pile through direct shear test, Fall Conference of the Koeran Society for Railway, pp. 558~561 (in Korean).
5. Cutbertson-Black, R. (2001), The interaction between a flighted steel pipe pile and frozen sand, Master's thesis, University of Manitoba, Manitoba, Canada, pp. 34~56.
6. Fang, H-U. (1991), Foundation engineering handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 735~749.
7. KICT (2012), Development of foundation design and evaluation system for cold region ground condition 3<sup>rd</sup> year report, KICT 2012-147, Korea Institute Construction Technology, pp. 35~116 (in Korean).
8. Ko, S. G. and Choi, C. H. (2011), Experimental study on adfreeze bond strength between frozen sand and aluminium with varying freezing temperature and vertical confining pressure, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 9, pp. 67~76 (in Korean).
9. 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. 213~224.
10. Lee, J. Y. and Choi, C. H. (2012), A study for shear strength characteristics of frozen soils under various temperature conditions and vertical confining pressures, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 13, No. 11, pp. 51~60 (in Korean).
11. Lee, J. Y. and Choi, C. H. (2013), Shear strength characteristics of weathered granite soil below the freezing point, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 14, No. 7, pp. 19~29 (in Korean).
12. Linell, K. A. and Lobacz, E. F. (1980), Design and construction of foundations in areas of deep seasonal frost and permafrost, Special Report of Cold Regions Research Engineering Laboratory, U. S. Army, pp. 80~134.
13. Phukan, A. (1985), Frozen ground engineering, Practice-Hall, New Jersey, pp. 190~199.
14. Sanger, F. J. (1969), Foundations of structures in cold regions, U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Monography III-C4, p. 91.
15. Sayles, F. H. (1973), Triaxial and creep tests on frozen ottawa sand, Permafrost Second International Conference, Yakutsk, U.S.S.R, pp. 384~391.
16. Seo, M. W., Shin, J. S., Park, J. B. and Park, I. J. (2003), Evaluation of interface shear properties between geosynthetics and soils through inclined board tests, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 19, No. 6, pp. 285~298 (in Korean).
17. Tsytoich, N. A. (1975), The mechanics of frozen ground(trans.), eds. G. K. Sinzow and G. P. Tschobotarioff, Scripta/McGraw Hill, New York, p. 426.
18. Weaver, J. S. and Morgenstern, N. R. (1981), Pile design in permafrost, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 18, No. 3, pp. 357~370.