

## 시험 방법에 따른 동결토의 인장강도

### A Comparative Study on the Tensile Strength of Frozen Soil according to Test Methods

서 영 교<sup>1</sup> Seo, Young-Kyo

강 효 섭<sup>2</sup> Kang, Hyo-Sub

#### Abstract

In this study, the blast-induced vibration effects on the structural stability of the adjacent tunnel and the stability were estimated with respect to the allowable peak particle velocity (PPV). The blasting distance from the tunnel satisfying the allowable PPV was estimated based on the analytical solutions, United States Bureau of Mines (USBM) suggestions, and the equations used in the subway in Seoul. The allowable blasting distance was estimated by using finite difference analysis (FDA) and the behavior of the concrete lining and rock bolts was examined and the stability of those was estimated during the blast. Research results show that the blast-induced vibration effects on the structural stability are negligible for the concrete lining but relatively large for the rock bolts.

#### 요 지

본 연구에서는 쪼갬 인장시험과 Fang, H. Y. and Fernandez(1981)에 의해 고안된 일축관입시험을 통한 동결토의 인장강도를 살펴보았다. 본 연구는 영하 15도의 환경 속에서 화강풍화토, 표준사와 카오리가 혼합된 사질 혼합토의 일축관입인장강도와 쪼갬 인장강도가 어떻게 변화하는지를 고찰하였다. 동결공시체는 함수비, 점토함량에 따라 다양하게 실험을 실시하였으며, 함수비와 점토함량에 따라 일축관입인장강도와 쪼갬 인장강도간의 상호관계를 분석하였다. 결과를 요약하면, 평균적으로 쪼갬 인장강도는 일축관입인장강도에 비해서 4배정도 큰 강도를 나타내었다. 함수비가 증가함에 따라 두 인장강도간의 차이가 크게 나타났으며, 그리고 점토함량이 증가할수록 두 인장강도는 모두 감소하는 경향을 나타내었다.

**Keywords** : Frozen soil, Split tensile test, Tensile strength, Unconfined penetration test

#### 1. 서 론

최근 국외 토목공사에서 지하구조물이나 연약지반의 터널공사에서 인공동결공법이 종종 이용되고 있으며, 국내에서는 LNG, LPG 등의 저온 액화 가스 저장용 지하탱크 주변의 인공동결문제와 관련하여 동결공법이 주목받고 있는 추세이다. 인공동결공법은 1930년대부터 미국, 유럽, 소련 등에서 상하수도 지하철 지하탱크

등의 건설공사에 사용되어 왔으며, 현재 러시아에서는 영구동결층을 다양한 구조의 지하냉동고로 이용하는 연구가 진행되고 있다. 또한 일본에서는 터널공사를 위해 개발한 SR-JP(Shield Root Pre-Supporting System for Junction as Permanent Structure)공법은 동결토 공법을 한정적인 지수 동결로 억제한 방호공으로 사용하고 있다. 이와 같이 동결공법에 대한 활용분야가 다양해지고 있으며, 동결토에 대한 역학적 특성 연구가 중요시되고

1 정회원, 한국해양대학교 해양공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Ocean Eng., Korea Maritime Univ, YSEO@hhu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국해양대학교 해양공학과 학사과정 (Member, Undergraduate Student, Dept. of Ocean Eng., Korea Maritime Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

있지만 국내 연구의 경우 미비한 실정이다.

동결토는 흙의 종류, 토립자의 배열상태, 함수비, 부동수분, 건조단위중량, 염분함유량 등의 여러 가지 요인이 복잡하게 작용하기 때문에 동결토의 역학적 성질은 매우 복잡하다(김영진, 2003). 동결토는 부동수분이 많고 적음에 따라 얼음의 밀착관계가 달라지므로 강도가 달라진다고 밝혔다(Ohrai, 1986). 김영진(2002, 2003)은 연구에서 TDR 장비를 이용하여 부동수분이 증가할수록 일축압축강도가 감소하고 있음을 실험적으로 밝혀내었으며, 부동수분은 일반적으로 점토 성질을 많이 포함하고 있는 흙에서 많이 존재한다고 알려져 있다. 이는 흙의 평균입경이 작을수록 흙 입자 주위에 잔존하는 부동수량이 많게 되는 것이 주원인이다. 그리고 Tice 등(1978)은 핵자기 공명장치(NMR)를 이용한 연구를 통해서 흙의 부동수분이 함수비에 따라서 약간 변한다는 주장을 제기하기도 하였다. 국내에서 류능환(1995)은 함수비, 염분농도, 입도배합 및 동결속도가 동결토의 압축강도에 미치는 영향을 연구한 바 있으며, Richard 등(1981)은 압축과 인장시험을 통해 온도, 공시체의 크기, 변형률의 다양한 조건하에서 동결토의 강도특성과 파괴형태를 연구하였다. 이와 같이 동결토는 여러 요인에 의해서 비균질한 상태를 보이기 때문에 강도특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 동결토의 쪼갬인장시험과 일축관입시험을 통하여 동결토의 인장강도 특성을 분석하였다. 일축관입시험은 Chen(1970)의 양면편칭시험법을 개량하여 CBR(California bearing ratio)과 다짐시험을 활용하여 흙의 인장강도를 측정할 수 있도록 Fang 등(1981)에 의해 제시된 방법이다. 일축관입시험에서 얻어진 인장강도는 흙, 몰타르, 콘크리트 등의 쪼갬인장시험과의 비교를 통해서 거의 일치 하고 있음을 실험을 통하여 증명하였다. 국내에서는 정수정 등(2006)은 모래와 벤토나이트 혼합토를 이용한 실험에서 기존의 일축관입시험의 측정오류 등을 개선한 개량일축관입시험을 실시하여 시험의 신뢰성을 증명해 보였다. 흙의 인장강도는 지반공학 분야에서 중요한 변수중의 하나이다. 하지만 많은 지반공학자들은 흙의 인장강도가 압축강도와 비교하면 상대적으로 그 값이 작고, 적합한 인장강도 측정법의 결여로 인한 신뢰할 수 있는 데이터의 부족으로 영에 가깝다고 생각하여 무시하는 경향이 있다. 인공동결공법을 이용한 지하구조물이나 터널공사 시 동결토의 인장강도는 매우 중요한 변수로 작용한다. 따라서 본 연구

에서는 흙의 종류, 함수비, 점토함량의 변화에 따른 인장강도를 살펴 보고, 파괴면의 형태가 다른 쪼갬인장시험과 일축관입시험의 인장강도 비교를 통해서 비 균질한 동결토의 강도가 어떻게 달라지는지 살펴보았다.

## 2. 인장강도실험의 이론적 배경

### 2.1 쪼갬 인장시험(Split Tensile Test)

본흙의 인장강도 측정방법에는 직접인장 시험방법과 쪼갬 인장시험방법이 있다. Fig. 1과 같이 쪼갬 인장시험방법은 직접인장시험과 달리 특별한 장치를 필요로 하지 않고, 간단히 인장강도를 측정할 수 있기 때문에 우리나라에서도 KS F 2423에 표준인장 시험방법으로서 규정하고 있다. 쪼갬 인장강도 계산식은 식 (1)과 같다.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

여기서, 인장강도( $\sigma_t$ ), 시험기의 최대 하중( $P$ ), 공시체의 지름( $d$ ), 공시체의 길이( $l$ )를 나타내고 있다.

### 2.2 일축관입시험(Unconfined Penetration Test)

일축관입시험은 Chen(1970)의 양면편칭시험법을 개량하여 CBR(California bearing ratio)과 다짐시험을 활용하여 흙의 인장강도를 측정할 수 있도록 Fang and Fernandez(1981)에 의해 고안된 방법으로 일축관입시험을 통한 인장강도 계산식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi(KbH - a^2)} \quad (2)$$

여기서, 인장강도( $\sigma_t$ ), 작용하중( $P$ ), 흙의 종류와 공시

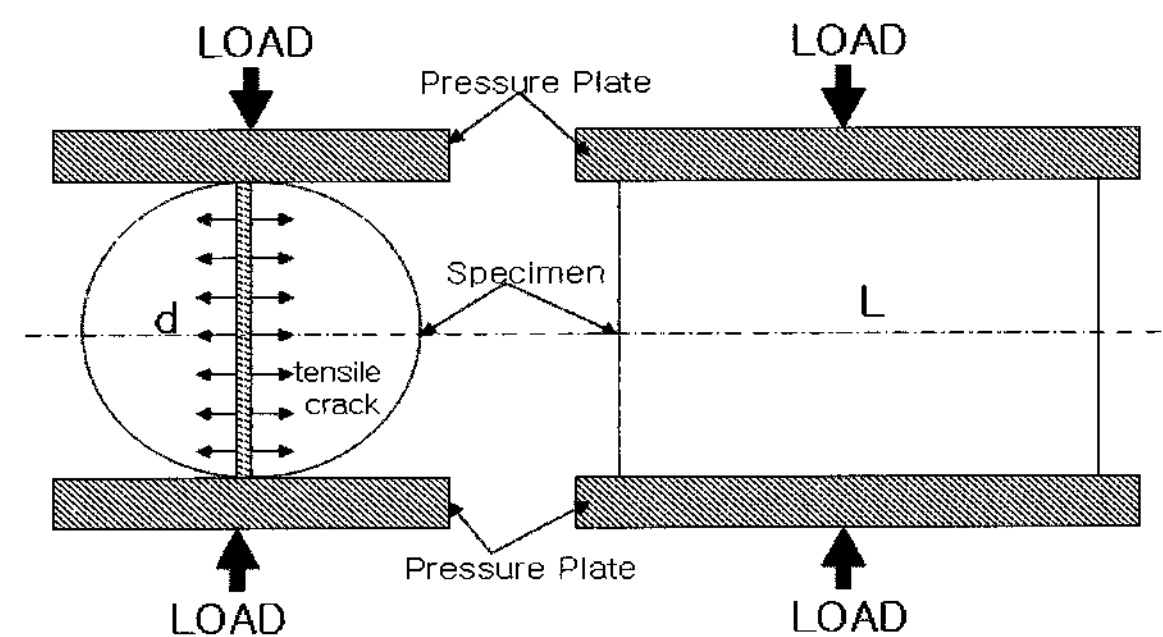


Fig. 1. Split tensile test

체-디스크 크기에 의한 계수(K), 공시체 높이(H), 원반 반경(a), 공시체 반경(b)을 나타내고 있다.

일축관입시험으로부터의 인장강도 추정이론은 소성 이론에 근거하며, 콘크리트와 암의 지지력 거동을 예측하기 위해 사용되었다(Chen 등, 1969; Chen, 1970). 이러한 시험방법을 Fang 등(1971)은 흙이나 비금속 건설재료에도 적용이 가능하며, 이는 콘크리트나 몰타르의 지지력 거동이 흙의 지지력 거동과 밀접하게 연관되어 있기 때문이라고 밝히고 있다.

여기서 이러한 이론을 적용하기 위해서는 주요 두 가지 가정을 만족해야 한다고 Fang 등(1981)은 밝히고 있다. 첫번째는 일반적인 한계이론을 완전한 소성체의 이상적인 흙을 인장 및 압축 시 충분한 국부변형이 발생되어야 한다는 것이며, 두번째는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 수정 Mohr-Coulomb 파괴면이 인장측면에서는 작지만 0이 아닌 인장 값을 갖는 파괴면으로 간주되어야 한다는 것이다.

Fig. 3(a)는 원통공시체의 일축관입시험에 대한 이상

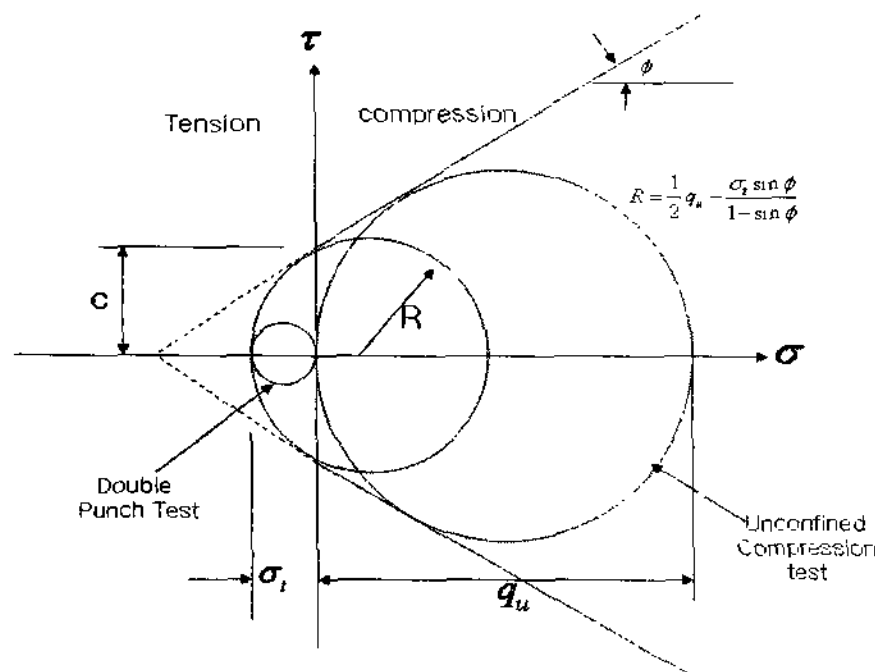


Fig. 2. Modified Mohr-Coulomb failure criterion (Fang and Chen, 1971)

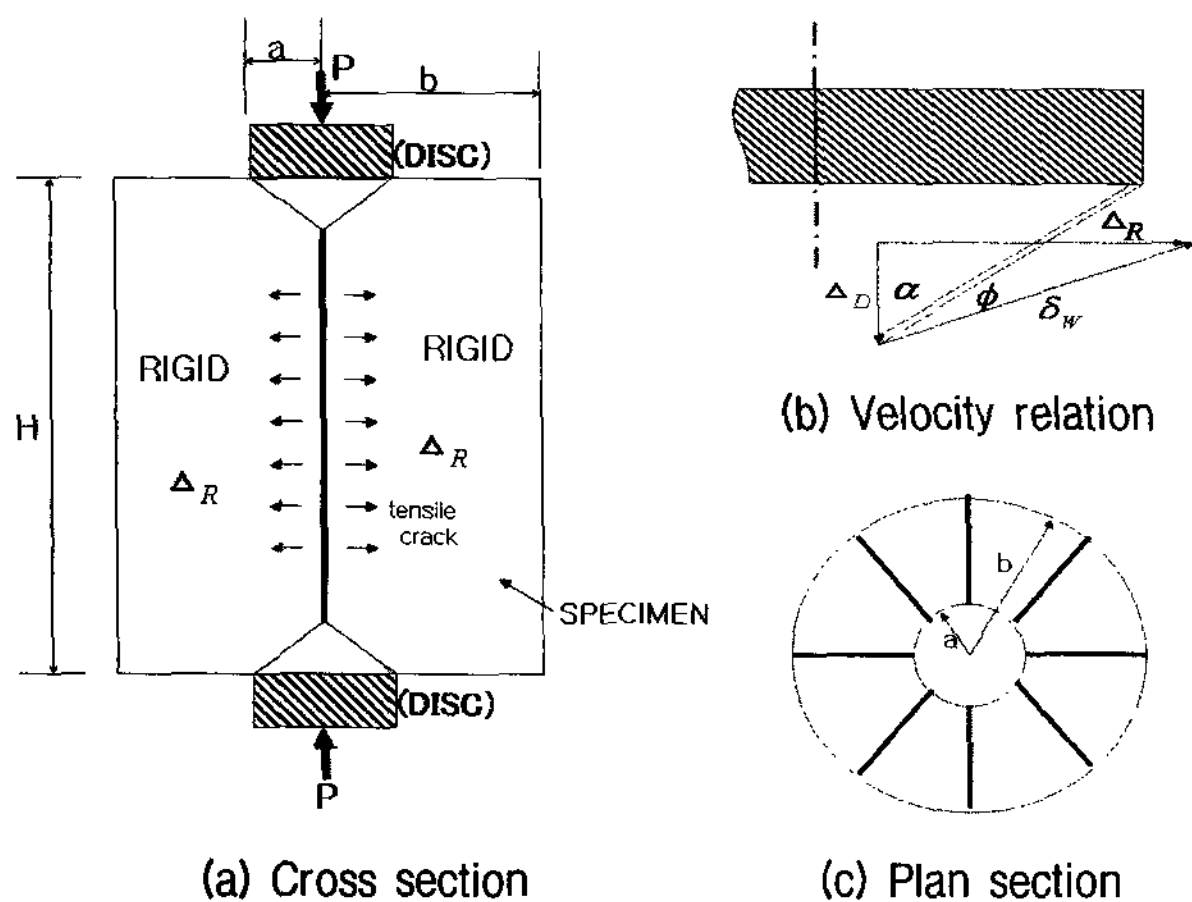


Fig. 3. Cross section and velocity relation of the unconfined penetration test (Fang and Chen, 1972)

적인 파괴형태를 나타내고 있으며, 방사선모양으로 여러 개의 인장균열과 함께 공시체의 밑부분과 위부분의 바로 아래에 콘 형태의 파괴면이 형성되어 있다. 콘 형태의 두 개의 파괴면은 아래, 위로 이동하면서 주위의 재료를 옆으로 이동 파괴시킨다. Fig. 3(b)은 파괴메카니즘의 속도벡터 관계를 보여 주고 있는 그림이다. 상대속도벡터( $\delta_w$ )은 내부마찰각( $\phi$ )과 함께 콘 파괴면의 각점의 속도벡터를 의미하며,  $\Delta R$ 와  $\Delta D$ 는 각각 상대속도벡터( $\delta_w$ )의 수평방향과 수직방향 성분이다.

한계해석법에 의한 내부에너지소멸율의 인장응력( $\sigma_t$ )은 각 불연속면의 면적에 수평방향 속도벡터성분( $\Delta R$ )을 곱해서 구하며, 외부일률은 하중 P에 수직방향성분의 속도벡터( $\Delta D$ )를 곱해서 구한다. 내부에너지소멸율에 대한 외부일률(external work) 관계로부터 작용한 힘(P)에 대한 상한값을 다음과 같이 산출할 수 있다 (Fang 등, 1981).

$$\frac{P}{\pi a^2} = \frac{1 - \sin \phi}{\sin \alpha \cos(\alpha + \phi)} \frac{q_u}{2} + \tan(\alpha + \phi) \left( \frac{bH}{a^2} - \cot \alpha \right) \sigma_t \quad (3)$$

여기서, ( $q_u$ )는 일축압축강도로 정의되며, ( $\phi$ )은 내부마찰각, ( $\alpha$ )은 콘의 각도를 의미하며, 상한해는 콘의 각도( $\alpha$ )가 최소인 다음의 조건,  $\partial P_u / \partial \alpha = 0$ 을 만족해야 한다.

$$\cot \alpha = \tan \phi + \sec \phi \left[ 1 + \frac{\frac{bH}{a^2} \cos \phi}{\frac{q_u}{\sigma_t} \left( \frac{1 - \sin \phi}{2} \right) - \sin \phi} \right]^{1/2} \quad (4)$$

위 식 (4)은  $\alpha \geq \tan^{-1} \left( \frac{2a}{H} \right)$  일 때 유효하며, 위 결과를 이용하여 식 (3)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P \leq P_u = \pi (KbH - a^2) \sigma_t \quad (5)$$

위 결과를 정리하면 식 (2)의 계수(K)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \tan(2\alpha + \phi) \quad (6)$$

식 (6)의 계수(K)는 식 (3)에서 알 수 있듯이 내부마찰각 뿐만 아니라 압축인장강도비, 공시체-디스크 비에도 영향을 받는다.

Fang 등(1981)은 Table 1과 같이 공시체 지름-디스크, 공시체 높이-지름, 높이에 대한 하중재하비율을 실험을 통하여 계수(K)를 제시하였다.

Table 1. Proposed values of parameter K (Fang and Fernandez, 1981)

Specimen Size	K Value	
	Soil	Stabilized Soil
Harvard miniature compaction mold (3.3×7.2cm)	1.05 to 1.10	...
Proctor mold (10.2×11.3cm)	1.0	1.2
CBR mold (15.2×17.8cm)	0.8	1.0
Specimen-disc ratio	0.2 to 0.3	
Height to diameter of specimen ratio	0.46 to 1.0	
Rate of loading	ASTM recommendation for axial strain at a ration of 0.5 to 2 percent of height per minute.	

### 3. 실험내용 및 방법

#### 3.1 시료의 성질

본 연구에서 사용된 시료는 국내에 널리 분포하고 있는 화강풍화토와 주문진 표준사에 대표적인 점토인 카오리나이트를 중량비로 10%, 20%, 30%씩 섞어서 사용하였다. 화강풍화토와 표준사에 점토 비율이 섞인 기본 시료의 기본 물성을 파악하기 위해 KS F 시험방법에 의해 체가름, 비중시험, 액·소성시험, 다짐시험, 투수시험을 수행하였다. 시료의 기본 물리적 성질은 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 이러한 실내시험 결과를 바탕으로 통일분류법(USCS)에 의해 시료를 분류해 보면 화강풍화토는 SP-SM으로 볼 수 있고, 표준사에 점토 함유비 10%인 시료는 균등한 모래, 점토 함유비 30%인 시료는 세립질 모래로 생각할 수 있다.

#### 3.2 인장시험 장비

본 시험에 사용한 시험기 UTM(Universal Testing Machine; 시험속도 0~200mm/min, 최대압축하중 20톤급)은 저온(Cold Room)에서 작동 가능하도록 특수 제작되었으며

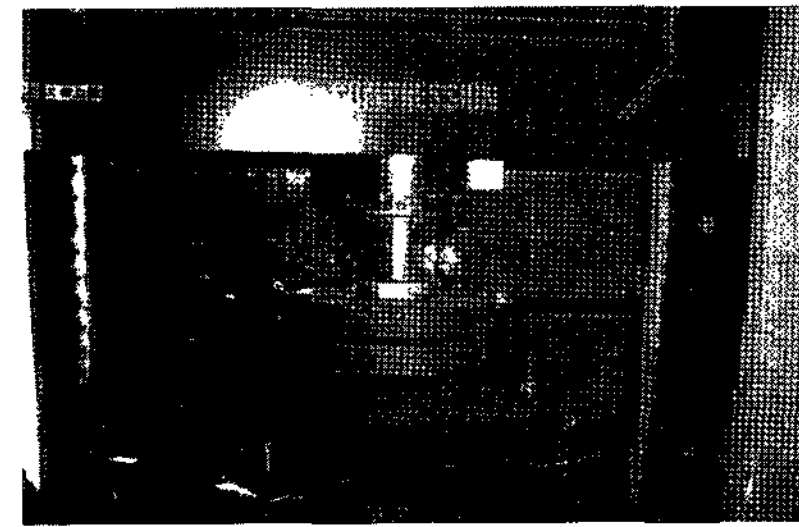


Photo 1. Universal testing machine (UTM)

인장, 압축, 굴곡, 항절 시험들을 할 수 있는 만능 재료 시험기로서 종래의 지침식 시험기(Analog) 및 숫자식 시험기(Digit type)에서 발전된 것으로 하중을 전자식 감응 장치인 Load Cell로 감지하여 디지털 표시장치로 표시하게 되며, 정밀도 및 내구성 면에서 훨씬 발전된 시험기이다(Photo 1). 또한 시험 중에는 시험 하중(Load) 과 변형량(Deformation)의 관계를 Digital Display Panel 및 컴퓨터로 데이터를 나타냄으로서 자료 분석이 용이하다.

#### 3.3 공시체 제작 방법

본 연구에 사용된 시편은 직경 100mm, 길이 210mm 로 주문 제작된 아크릴 통을 몰드로 사용하고, 밀도를

Table 2. Properties of weathered granite soil

Initial water content (%)	Percent passing No. 200 sieve(%)	LL (%)	PL (%)	$\omega_{opt}$ (%)	$r_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	USCS
28.34	5.6	43.4	29.8	27	1.44	SP-SM

Table 3. Properties of mixed sandy soil

Properties of soil		$r_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	$\omega_{opt}$ (%)	permeability (K, cm/sec)	uniformity coefficient ( $C_u$ )	coefficient of gradation ( $C_c$ )
Clay content (%)	10	1.79	13.2	$4.17 \times 10^{-2}$	1.76	1.22
	20	1.93	12.0	$8.25 \times 10^{-3}$	1.88	1.24
	30	2.03	10.8	$1.40 \times 10^{-3}$	1.98	1.23



균질하게 하기 위해 2.5kg 래머로 3층, 25회 표준 다짐을 실시하여 제작하였다. 동결 화강풍화토 인장 시험에서 함수비에 따른 강도 특성을 알아보기 위해서 함수비를 20%, 25%, 30%, 35%, 40%로 변화시켜 공시체를 제작하였고, 사질토혼합토의 경우에는 점토(10%, 20%, 30%)와 함수비 비율(7%, 15%, 20%)에 각각 나누어서 공시체를 제작하였다. 시료는 일관된 결과 값을 얻기 위해서 표준사를 제외한 화강풍화토와 카오리나이트를 40번체에 걸러진 시료를 사용하였다. 다짐된 시편은 동결과정에서 발생할 수 있는 수분 손실 및 체적팽창을 고려하여 랩으로 상하부분을 마감하였다. 시편의 동결은  $-15^{\circ}\text{C}$ 의 Cold Room에서 6일(144시간) 동안 동결시켰고, 동결온도와 동결시간에 따라 예민하게 달라질 수 있는 동토의 강도를 고려하여 모든 시편에 동일하게 적용시켰다.

6일간 동결시킨 시편은 시료를 추출하는데 동결과정에서 몰드와 시편 사이의 수분으로 인한 부착력이 크게 작용하기 때문에 다짐시험 시 사용되는 유압식시료추출기를 사용하여 추출하였다. 추출된 시료는 동결과정에서 시료 안에 포함된 수분에 의해 체적 팽창 현상이 발생되었다. 몰드는 횡 방향으로 구속되어 있는 원형단면으로서 골고루 응력이 작용하기 때문에 변형은 무시할 수 있다. 그러나 축 방향으로 1cm 내외로 시편의 위, 아래 부분으로 팽창하여 울퉁불퉁한 상태로 된다. 일축관입 시험 시 위, 아래 부분이 고르지 않으면 편심이 발생되어 정확한 값을 측정할 수 없으므로 수평자와 절단기를 사용하여 트리밍을 실시하였다.

Cold Room에서 동결되는 시편은 이론적으로 시편의 모든 부분이 균질하게 동결되었다고 가정되나 실질적으로 부동수분, 일관된 다짐, 함수비가 많은 시편의 경우 긴 동결시간에 의한 흙의 침전 현상 등으로 100% 균질하지 않기 때문에 추출된 시편은 실험의 일관성과 결과의 오차를 줄이기 위한 방법으로 동결시킬 때 위, 아래 방향을 표시하고 인장 시험을 실시하였다.

### 3.4 인장시험 방법

쪼갠 인장시험은 Photo 2에서와 같이 원주형 공시체에 대하여 연직 평면에 평행하게 작용하는 정적 압축하중을 가함으로써 진행되었다. 하중 재하시 변형 속도는  $1\text{mm}/\text{min}$ 으로 고정하였고, 실험시 Cold Room의 온도를  $-15^{\circ}\text{C}$ 의 일정한 상태로 유지하면서 모든 시험을 수행하

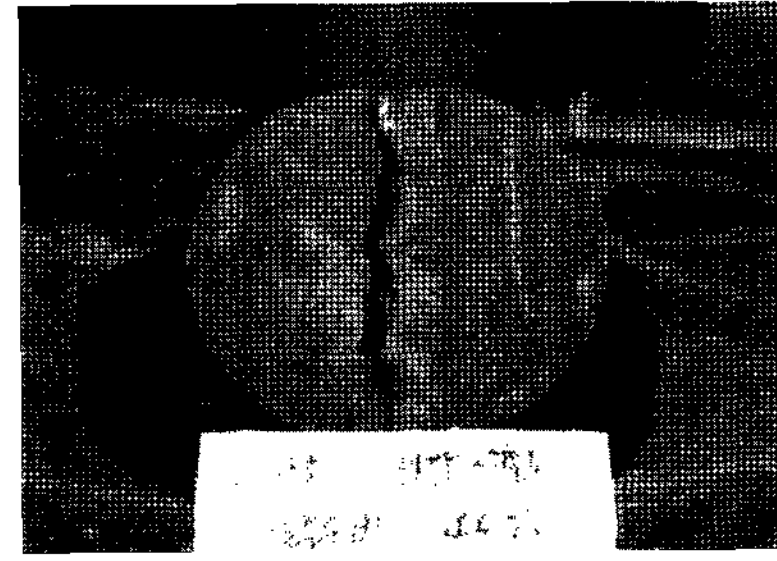
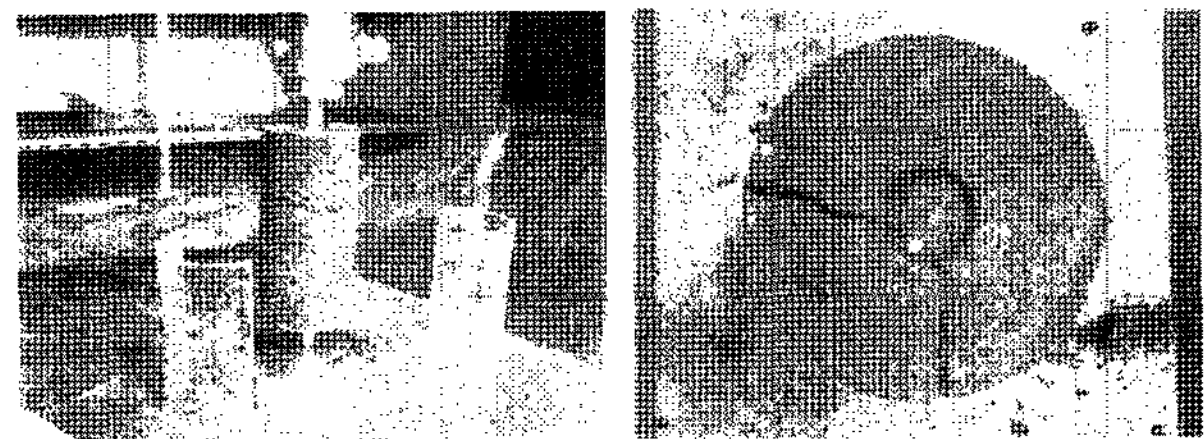


Photo 2. Split tensile test of frozen soil



(a) Test set-up

(b) mode of failure

Photo 3. Unconfined penetration test of frozen soil

였다.

일축관입시험시험을 위해 Photo 3에서처럼 UTM장비의 가압판과 하부 판을 자체 제작하였고, 공시체를 시험기에 설치할 때 편심을 줄이기 위해서 하부 판에 시료직경에 맞게 홈을 파고, 홈 부분에 반으로 잘려진 아크릴 원통을 꽂아서 시료의 중심을 맞추도록 하였다. 재하속도는 시료 길이의 0.5%로 쪼갠 인장시험과 같은  $1\text{mm}/\text{min}$ 으로 하고, Table 1(Fang and Fernandez, 1981)에 제시한 시험조건에서 공시체와 디스크의 직경 비(0.25), 공시체높이와 공시체의 직경 비(0.5)를 만족하기 위해 관입disk 크기를 25mm로 사용하였다. 그리고 인장 강도를 계산할 때 필요한 계수(K)는 이론을 근거로 계산한 결과 0.97이란 값을 얻을 수 있었다. 이를 토대로 앞선 일축관입시험의 이론을 근거로 시험을 수행하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 동결화강풍화토의 응력-변형률 거동 특성

기존의 Fang 등(1981)의 쪼갠인장시험과 일축관입시험의 강도비교에서 강도차이가 거의 나지 않고 일치하게 나타나고 있고, 본 연구도 이와 같은 이론을 적용하기 위하여 비동결토를 이용한 두 인장시험간의 비교시험을 수행하였으며, 결론은 Fig. 4와 같이 두 인장강도가 거의 차이가 나지 않는 신뢰할 만한 결과를 보이고 있다.

이러한 이론을 바탕으로  $-15^{\circ}\text{C}$ 에서 동결화강풍화토

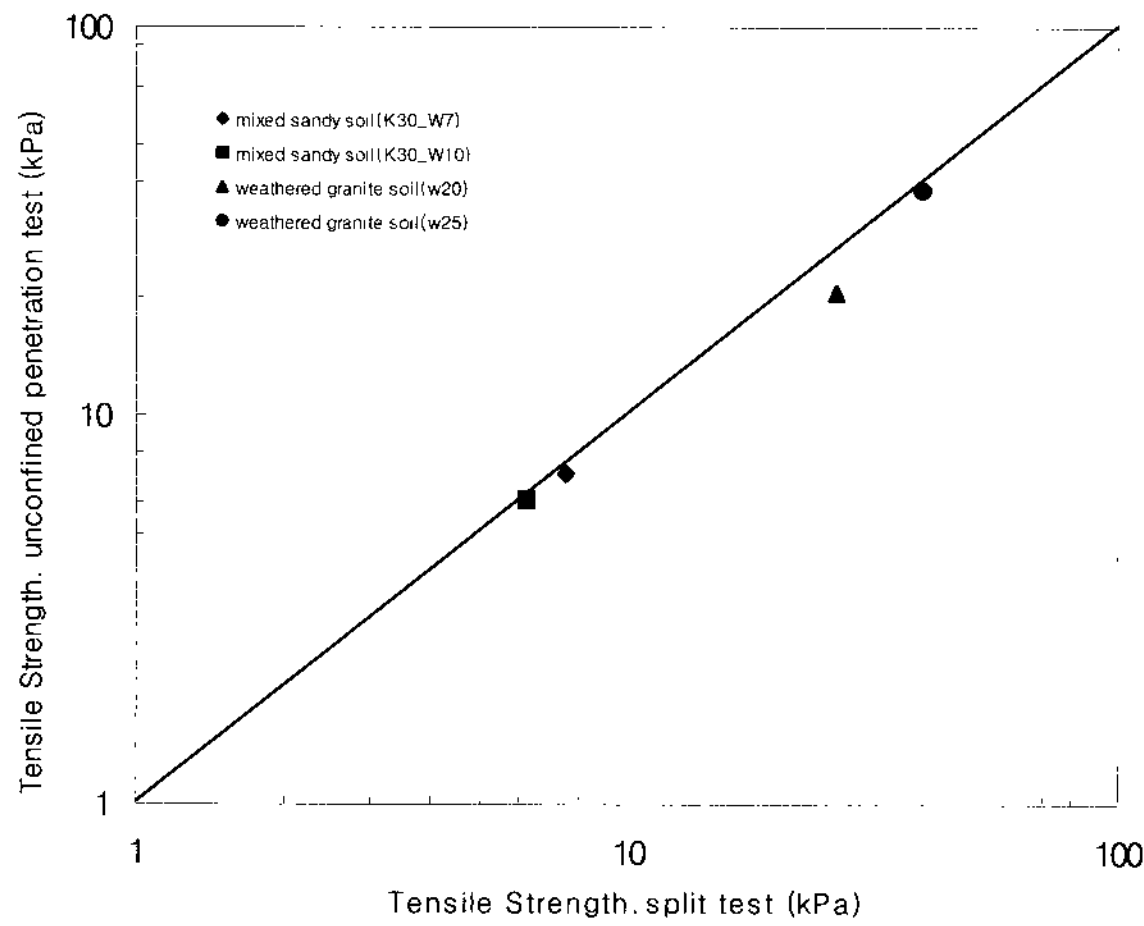


Fig. 4. Comparison of tensile strength by unconfined penetration and split tensile tests

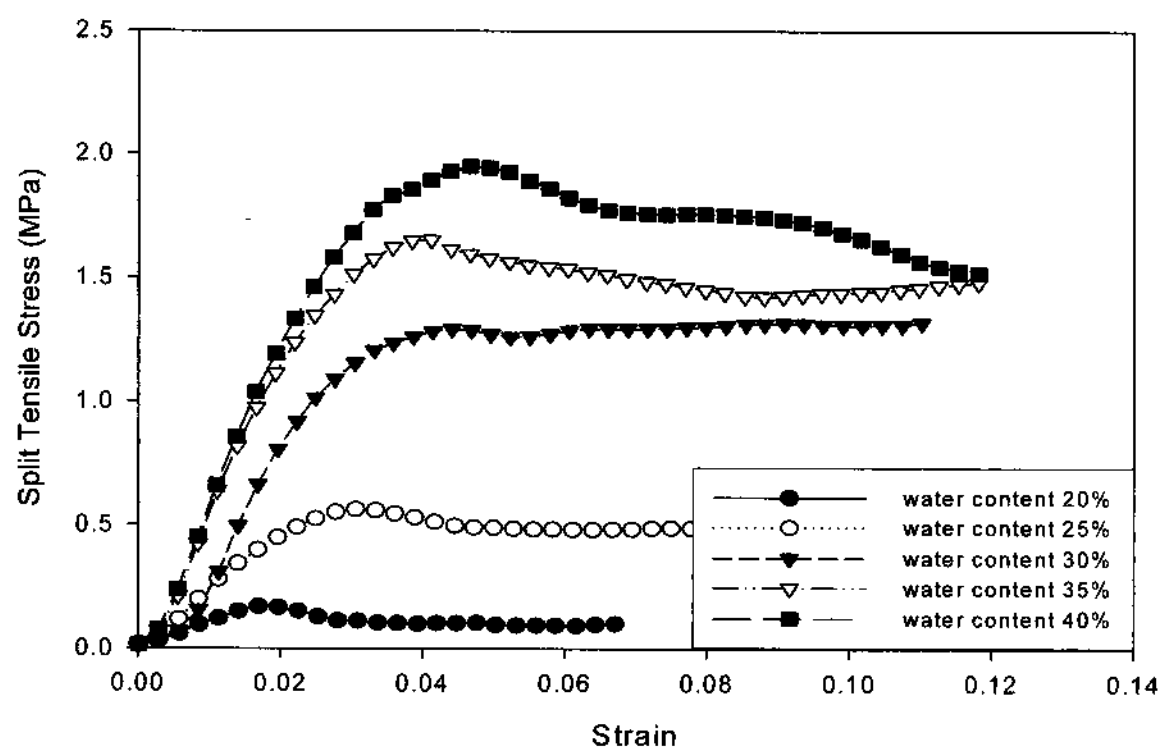
의 함수비변화에 따른 쪼갬인장시험과 일축관입시험의 응력-변형률 거동 특성은 Fig. 5와 같다. Table 4는 각각의 인장시험에 따른 최대인장강도와 시험전 후의 함수비 변화를 나타내고 있으며, 시험전과 시험후의 함수비 변화에서 크게 차이가 나고 있지 않음을 보여 주고 있다.

Fig. 5(a)는 쪼갬인장시험에서의 인장강도변화를 나타내며, 함수비에 따라서 0.14~1.96(MPa)의 강도 분포를 나타내고 있고, 함수비가 커질수록 최대인장강도와

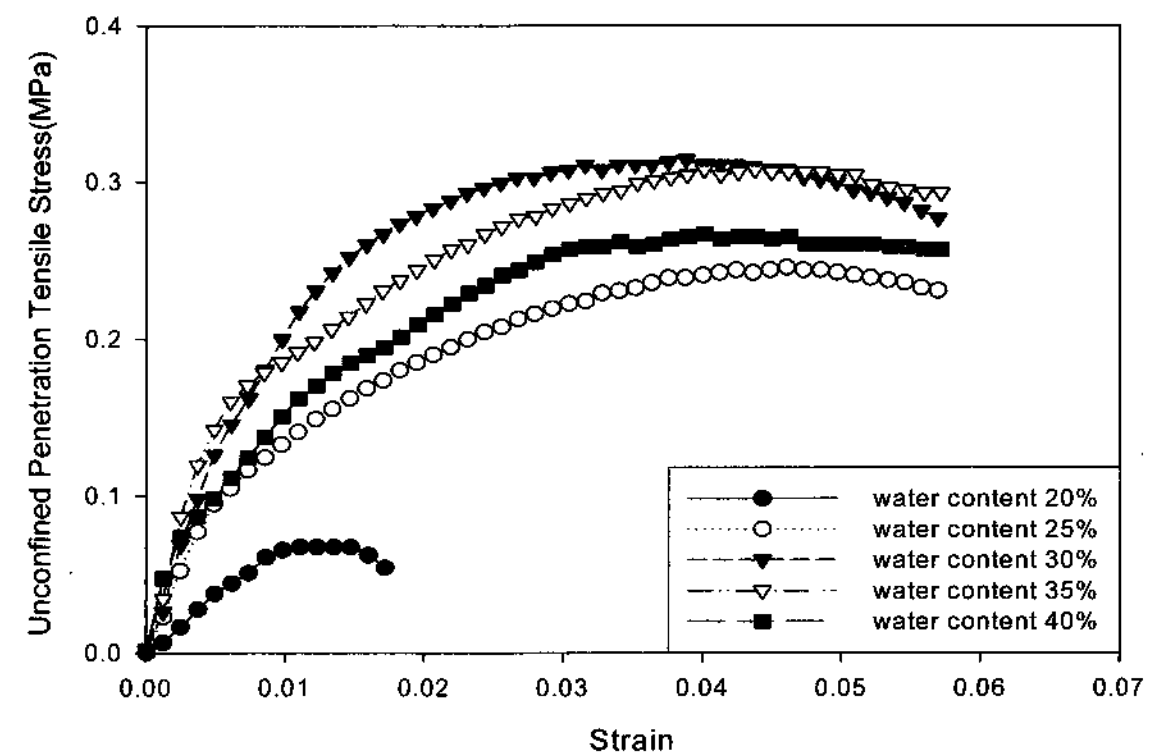
초기 응력-변형률 곡선의 기울기가 증가하고 있음을 보여 주고 있다. Fig. 5(b)는 일축관입시험에서 응력-변형률 곡선을 나타내고 있으며, 함수비에 따른 인장강도 변화는 0.11~0.36(MPa)의 강도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 함수비가 증가할수록 쪼갬인장시험의 최대강도는 증가하는 반면 일축관입시험의 최대강도는 함수비 30% 이후부터는 미소하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 쪼갬인장강도와 일축관입강도의 차이는 함수비가 증가할수록 크게 차이가 남을 알 수 있다. 이는 비동결토의 인장강도 비교시험과 다른 양상을 보인다. 이와 같은 결과는 6일간(144시간) 동결한 동결토를 파괴형상이 다른 두 인장시험을 통하여 동결토의 내부가 비균질하게 형성되어 있어 강도에 영향을 가져왔다고 판단된다.

#### 4.2 동결사질혼합토의 응력-변형률 거동 특성

동결사질혼합토의 함수비와 점토함유율(Kaolinite)에 따른 쪼갬인장과 일축관입시험결과의 응력-변형률 거동 특성을 Fig. 6에 나타내고 있으며, Table 5는 각각의 인장시험에 따른 최대인장강도와 시험 전후의 함수비 변화를 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 쪼갬인장시험을 통한



(a) Split tensile test



(b) Unconfined penetration test

Fig. 5. Stress-strain curves of tensile test result in weathered granite frozen soil

Table 4. Compression and tensile strength date of frozen soil

Type of soil	Water content (%)		Temperature (°C)	Split tensile strength (MPa)	Unconfined penetration strength (MPa)
	before	after			
weathered granite soil	20	20.1	-15	0.14	0.11
	25	26.2	-15	0.53	0.32
	30	31.6	-15	1.35	0.36
	35	35.2	-15	1.74	0.35
	40	40.5	-15	1.96	0.32

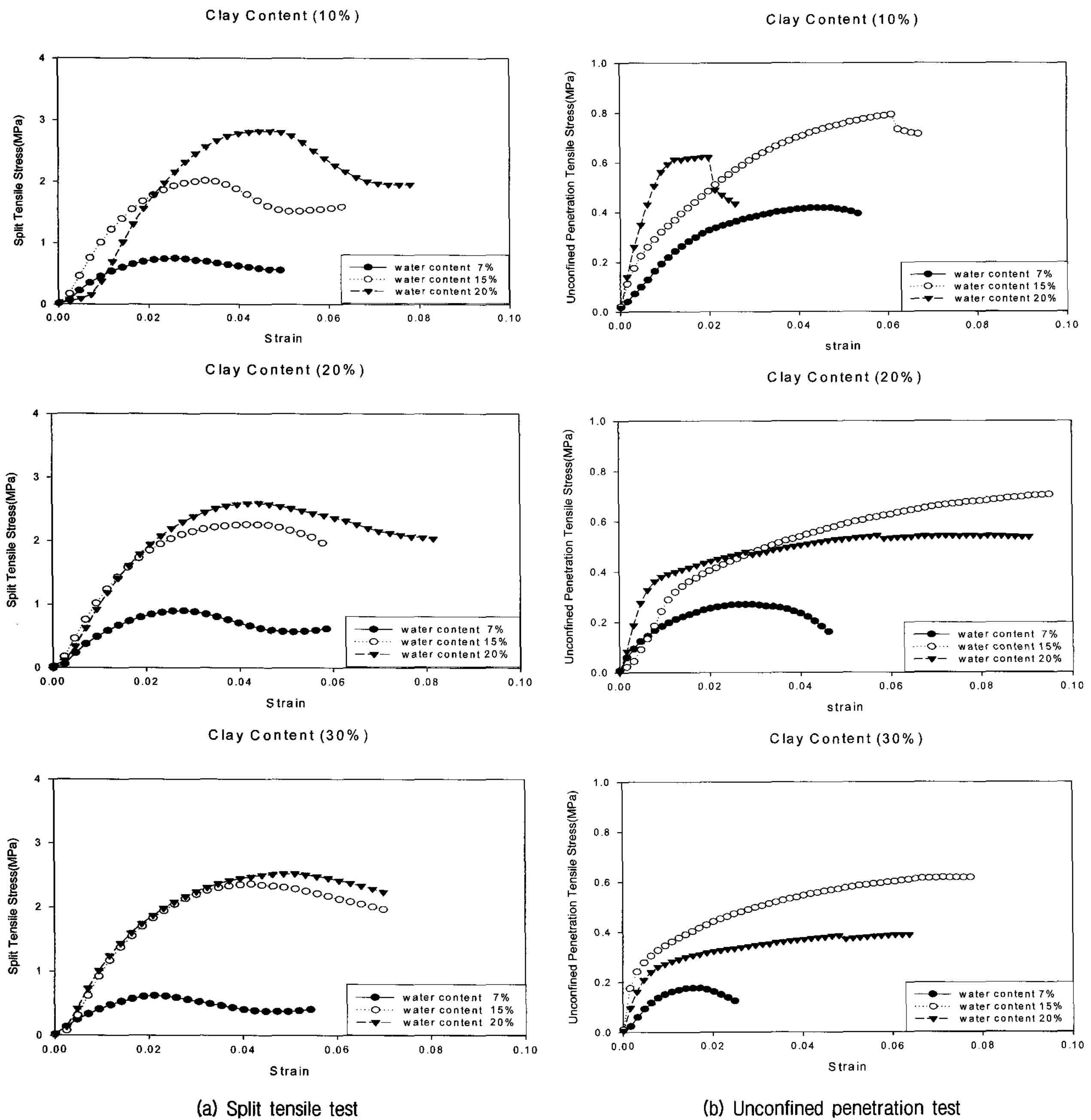


Fig. 6. Stress-strain curves of tensile test result in mixing a frozen sandy soil

Table 5. Compression and tensile strength date of mixing a frozen sandy soil

Type of soil	Water content (%)		Temperature (°C)	Split tensile strength (MPa)	Unconfined penetration strength (MPa)
	before	after			
sand & clay (10%)	7	6.7	-15	0.90	0.45
	15	14.2	-15	2.49	0.81
	20	18.2	-15	2.76	0.60
sand & clay (20%)	7	6.6	-15	1.02	0.29
	15	13.8	-15	2.67	0.70
	20	18.0	-15	2.86	0.52
sand & clay (30%)	7	7.5	-15	0.58	0.16
	15	14.0	-15	2.37	0.57
	20	18.7	-15	2.53	0.43

응력-변형률거동을 나타내며, 함수비와 점토함량에 따라 0.6~2.8(MPa)범위의 최대인장강도를 나타내고 있다. 또한 4.1절에서 동결화강풍화토의 쪼갬인장시험 결과와 동일하게 함수비가 증가할수록 쪼갬인장강도 또한 증가하고 있음을 보여 준다. Fig. 6(a)의 쪼갬인장시험의 응력-변형률거동을 보면 점토함량이 적은 10%인 경우 첨두(Peak)응력이 잘 나타나고 있으나, 점토함량이 증가할수록 첨두응력이 나타나지 않으며 완만하게 감소하고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 6(b)는 점토함유비, 함수비에 따른 일축관입시험 결과의 응력-변형률곡선을 나타내고 있다. 동결사질혼합토의 일축관입시험의 인장강도를 보면 0.16~0.81(MPa)의 강도로 분포함을 알 수 있으며, 함수비 15% 이후에는 강도가 감소되고 있음을 나타내고 있다. 또한 점토 함량이 증가할수록 강도는 전체적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6(b)의 일축관입시험결과 응력-변형률곡선에서는 쪼갬인장시험의 응력-변형곡선과는 달리 첨두(Peak)응력이 나타나지 않고 응력이 떨어지는 속도가 아주 느리거나 꾸준히 올라가는 형태를 보이고 있다. 특히 점토함유량이 적은 10%에 함수비 20%경우 응력이 급격히 올라가다가 파괴되면서 급격히 감소되는 얼음에 가까운 취성적인 형태를 보이고 있다.

### 4.3 함수비 변화에 따른 특성

Fig. 7은 동결화강풍화토의 쪼갬인장시험과 일축관입시험에서의 최대인장강도를 함수비변화에 따른 결과를 나타내고 있다. 동결화강풍화토의 쪼갬인장강도의 경우 함수비가 증가할수록 강도의 증감 폭은 감소하지만 전체적으로 강도가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 일축관입인장의 경우 함수비가 30%이후에서는 감소함을 알 수 있다. 또한 함수비가 증가할수록 쪼갬인장과의 강도 차이가 계속해서 증가하고 있는 경향을 보이고 있다.

Fig. 8에서는 동결사질혼합토의 쪼갬인장시험과 일축관입인장시험의 결과로 최대인장강도를 함수비에 따라 비교한 그래프를 나타내고 있다. 동결사질혼합토의 쪼갬인장의 경우 함수비가 증가할수록 강도가 증가하는 반면, 일축관입시험의 최대인장강도의 경우 함수비가 15%이후로 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 동결화강풍화토와 거의 비슷한 강도 형태를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 하중을 재하 하는 방식과 파괴에 이르는 응력경로가 다른 두 인장시험을 통한 결과로 판단되어

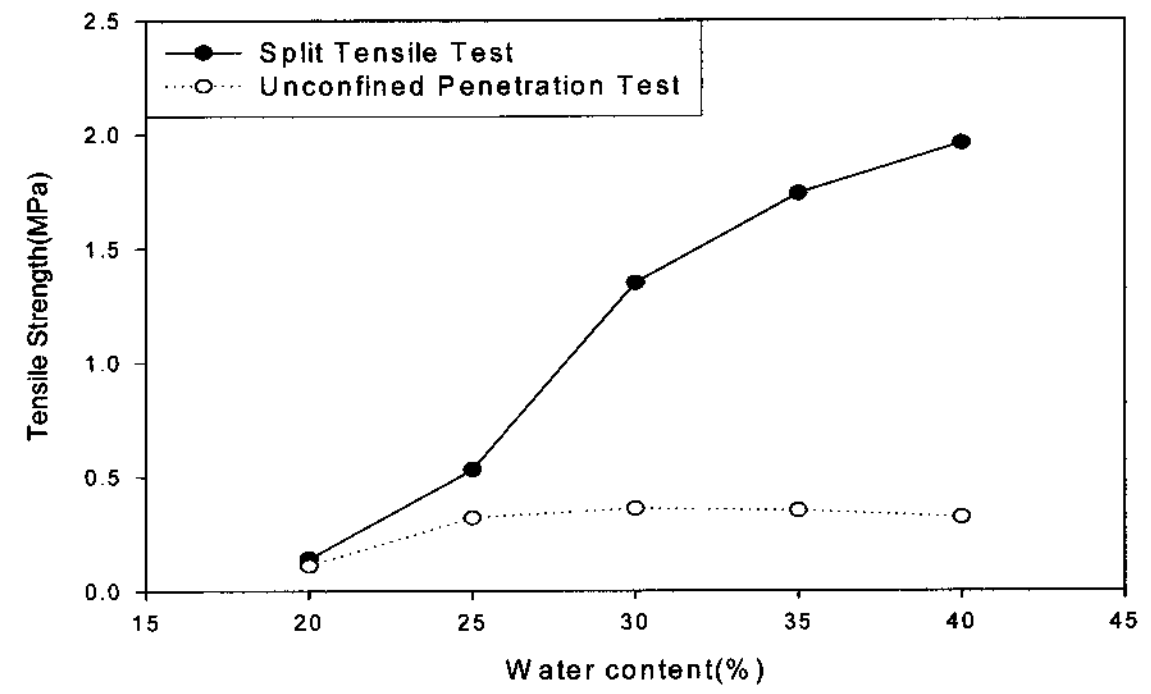


Fig. 7. Comparison of weathered granite frozen soil strength with various water content determined by tensile tests

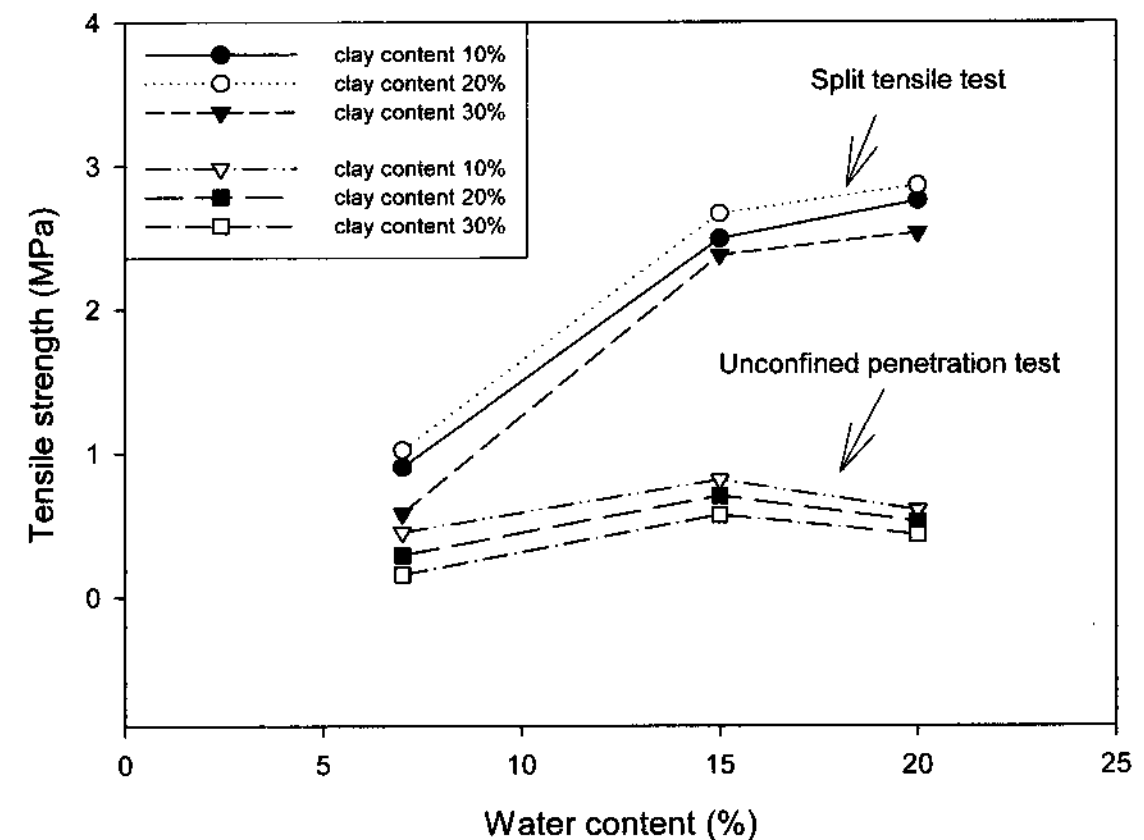


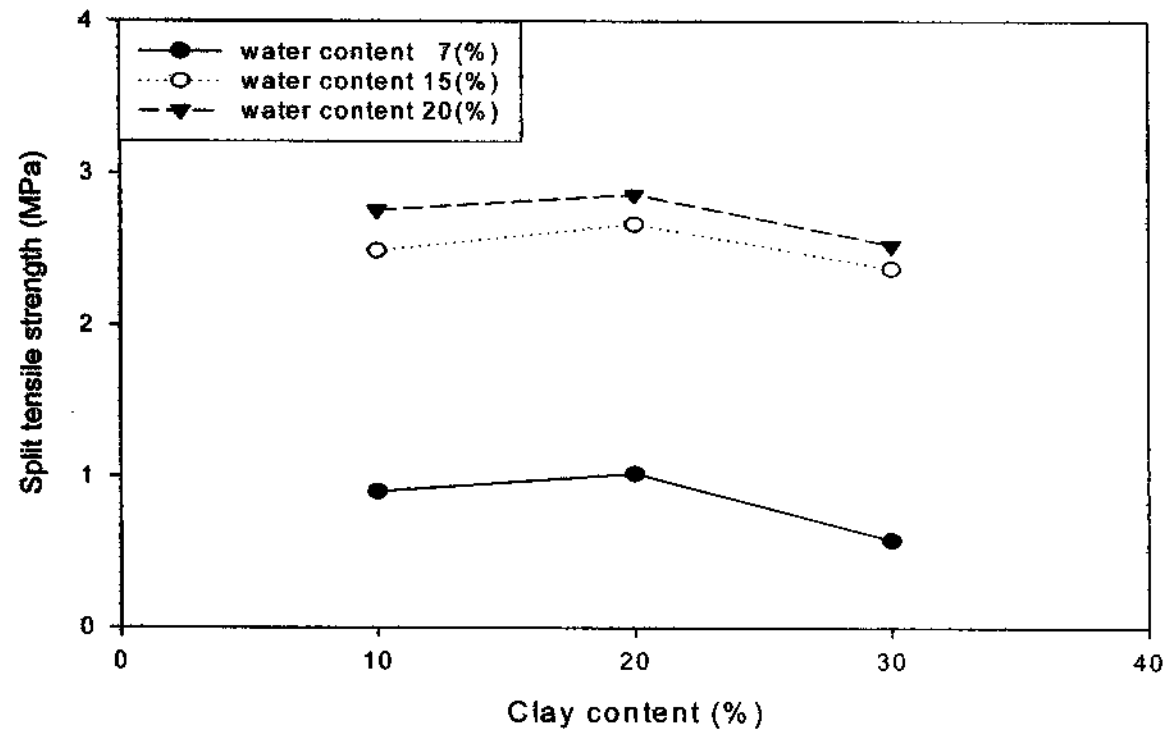
Fig. 8. Comparison of mixing a frozen soil strength with various water content determined by tensile tests

지며, 쪼갬인장시험의 경우 Fig. 1과 같이 시료를 눕혀 축 양옆의 면에 하중이 작용하여 벌어지는 형태이며, 일축관입시험의 경우 Fig. 3(a) 같이 시료를 세워 축을 기준으로 방사선모양으로 하중이 전달되는 형태이다. 이러한 차이로 인하여 본 연구에서 동결토의 쪼갬인장시험과 일축관입시험의 인장강도가 크게 차이가 났다고 사료되며, 이는 동결토가 균질하게 얼어있지 않고 비균질한 상태로 되어 있다고 판단할 수 있다. 또한 쪼갬인장시험보다 일축관입시험에서 비균질한 동결토의 강도가 민감하게 반응한다고 판단되어지며, 함수비에 따라서도 그 영향이 미치고 있음을 보여주고 있다.

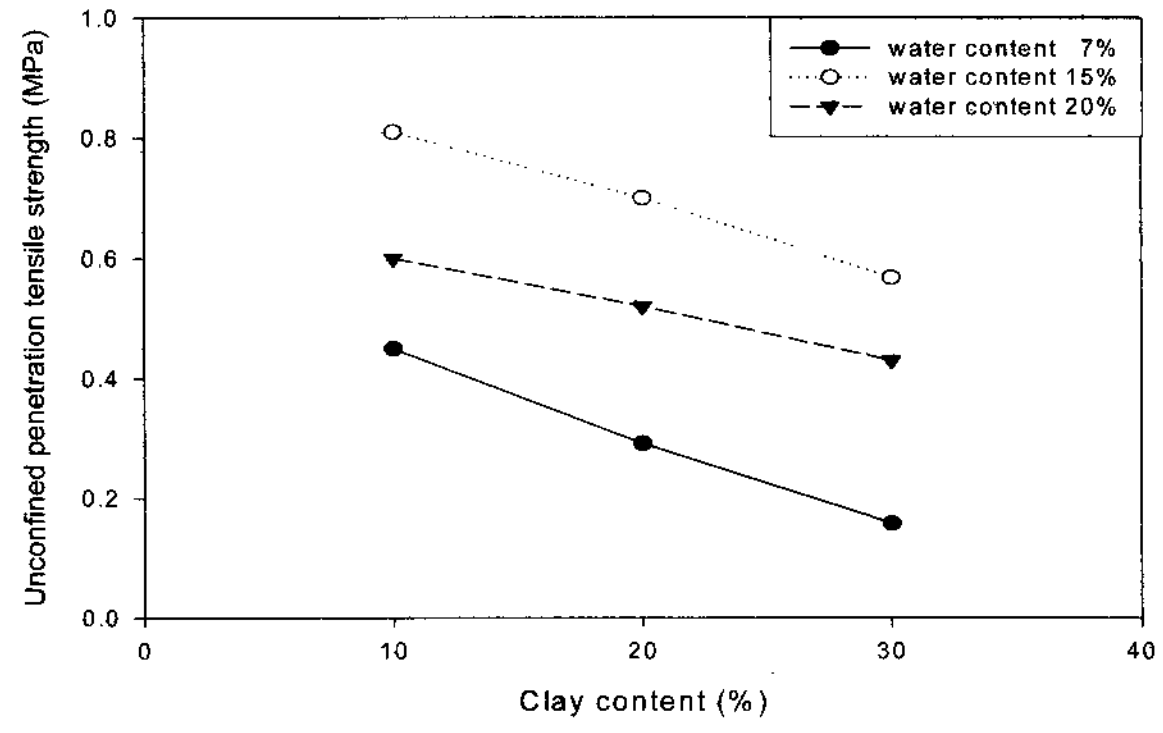
### 4.4 동결사질혼합토에서 점토함유비 변화에 따른 특성

Fig. 9(a)은 점토함유비에 대한 쪼갬 인장강도 곡선을 나타내고 있으며, Fig. 9(b)은 점토함유비에 대한 일축관입인장강도 곡선을 나타내고 있다. 같은 온도에서 동결된 시료는 점토, 실트, 모래, 자갈 순으로 강도가 크게 나타나는데 이는 구성 흙 입자의 평균입경이 작을수록





(a) Split tensile test



(b) Unconfined penetration test

Fig. 9. Relationships of tensile strength vs clay content and water content

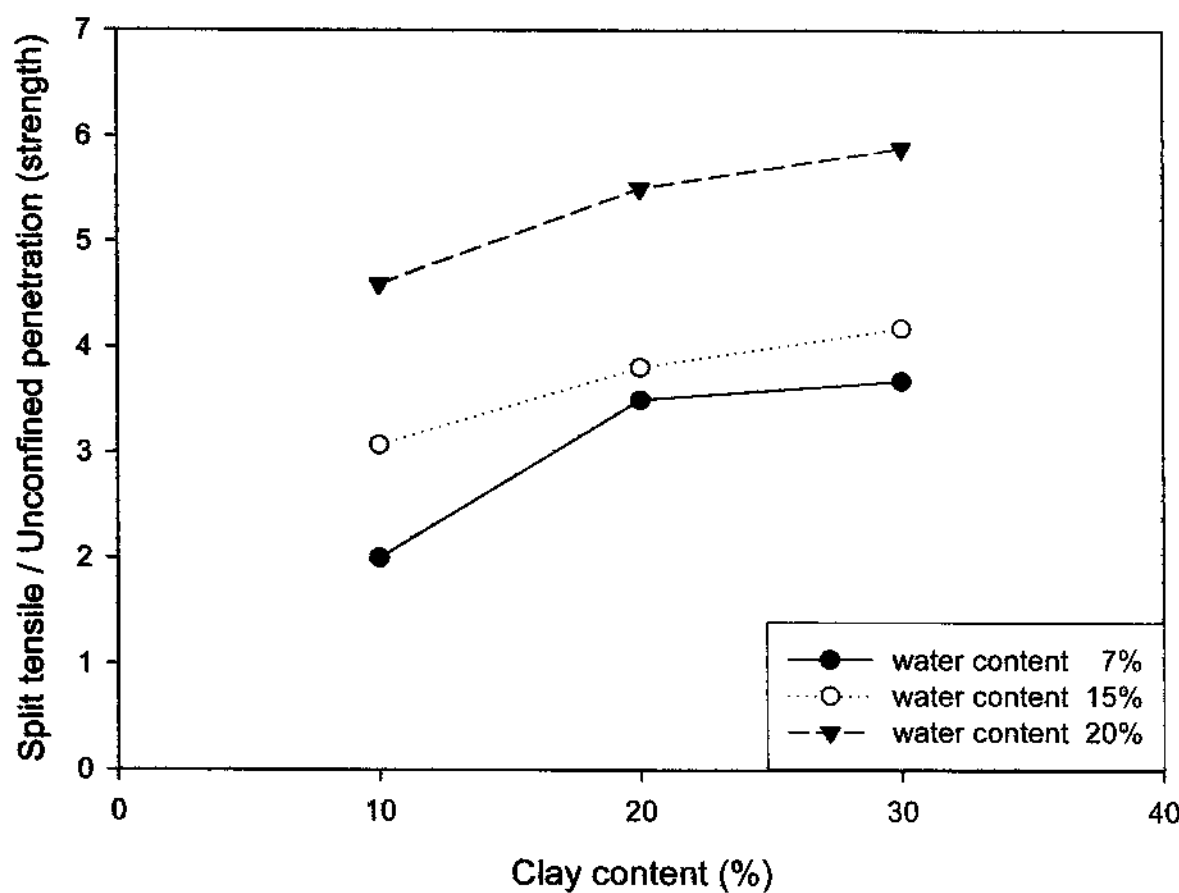


Fig. 10. Relationships of tensile strength ratio vs clay content and water content

흙 입자 주위에 흡착되어 잔존하는 부동수량이 많게 되는 것이 주원인이다(김영진, 2003). 본 연구에서도 점토 함유비가 많을수록 강도가 작아짐을 보이고 있으며, Fig. 9(a)의 점토함유비에 대한 쪼갠 인장강도 곡선에서 보듯이 점토함유비 10%~20%구간에서는 강도가 증가하는 현상을 보이고 있지만 전체적으로 감소함을 알 수 있다. Fig. 9(b)의 일축관입시험의 경우를 보면 점토함유비에 따라 인장강도가 감소함을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 또한 Fig. 10에서는 점토함유비와 함수비에 따른 쪼갠 인장강도와 일축관입강도비를 나타내고 있다. 점토함유비와 함수비가 증가함에 따라 강도비가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 4.3절에서 함수비 변화에 따른 강도변화에서 나타나듯이 쪼갠 인장시험보다 일축관입시험에서 비균질한 동결토의 강도가 민감하게 반응한다고 판단되어지며, 두 인장시험의 강도비교를 통해 동결토의 강도는 함수비와 점토함유비에 따라 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기존에 널리 사용하는 간접인장시험인 쪼갠 인장시험과 더불어 일축관입시험을 통해 인장강도를 측정하였으며, 두 인장시험방법간의 비교를 통해서 동결토의 인장강도에 미치는 영향을 연구해 보았다. 그 요약 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 동결화강풍화토의 쪼갠인장강도는 함수비에 따라 0.14~1.96(MPa)의 분포를 나타내며, 일축관입인장강도는 0.11~0.36(MPa)의 분포를 나타내었다. 동결사질혼합토의 경우 쪼갠인장강도는 함수비와 점토함량에 따라서 0.6~2.8(MPa)의 강도분포를 나타내며, 일축관입인장강도는 0.16~0.8(MPa)의 강도분포를 나타내었다.
- (2) 인장시험 방법에 따른 강도 차이를 살펴 보면, 동결화강풍화토와 동결사질혼합토의 경우 모두 평균적으로 일축관입시험의 최대인장강도가 쪼갠인장시험의 최대인장강도보다 약 4배 정도 작은 강도를 나타내고 있다. 이는 공시체를 눕혀 측면을 가압하여 인장을 측정하는 방식과 시료를 세워 정중앙 부분을 가압하여 구하는 방법의 파괴에 이르는 응력경로가 다른 두 인장시험을 통한 차이에서 나타난 결과라고 판단되어지며, 동결공시체가 균질하게 얼어 있지 않고 비균질한 상태로 얼어 있으며, 강도에 영향을 주는 것으로 판단된다.
- (3) 함수비변화에 따른 강도의 변화를 살펴 보면, 함수비가 증가할수록 일축관입 인장강도와 쪼갠 인장강도가 모두 대체적으로 증가하는 양상을 보이고 있지만, 함수비가 커짐에 따라서 두 인장강도의 차이

가 더욱 커짐을 알 수 있다.

- (4) 점토함유량에 따른 강도의 변화를 살펴보면, 점토 함량이 증가함에 따라 두 인장강도 모두 작아짐을 알 수 있다. 그리고 일축관입시험의 결과에서 최대 인장강도의 뚜렷한 감소 양상이 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 동결토의 내부변화에 따른 강도가 일축관입시험에서 더욱 민감하게 반응하는 것으로 사료된다.
- (5) 인장시험방법에 따른 두 인장강도를 통해서 동결토의 인장강도특성에 대해서 알아보았으며, 향후 동결토 내부변화의 상태를 파악할 수 있는 추가적인 시험과 다양한 온도변화와 공시체 크기에 따른 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 해양수산부 영남 Sea-Grant사업단의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

1. 김영진 (2003), “동결토의 일축압축 강도와 부동수분, 초음파 속도와의 관계”, *대한토목학회논문집*, 제23권, 제5-C호, pp.309-317.
2. 김영진, 배정호, 송원근 (2002), “동결토의 온도변화에 따른 부동

수분과 초음파속도의 변화에 관한 실험적 연구”, *대한토목학회 논문집*, 제22권, 제3-C호, pp.207-217.

3. 류능환 (1995), “동결토의 압축강도에 관한 실험적 연구(II)”, *농업과학연구*, Vol.6, No.0, pp.87-99.
4. 정수정, 김태형, 김찬기 (2006), “다짐된 모래-벤토나이트 혼합토의 인장강도 측정”, *대한토목학회논문집*, 제26권, 제6-C호, pp.377-384.
5. Chen, W. F. (1970), “Double punch test for tensile strength of concrete”, *ACI*, Vol.67, pp.993-995.
6. Chen, W. F. and Drucker, D. C. (1969), “Bearing capacity of concrete blocks or rock”, *Jour. of Eng. Mech. Div., Proc. ASCE*, Vol.95, No.EM4, pp.955-978.
7. Fang, H. Y. and Fernandez (1981), “Determination of Tensile Strength of Soils by Unconfined-Penetration Test”, *ASTM STP 740*, pp. 130-144.
8. Fang, H. Y. and Chen, W. F. (1972), “Further Study Of Double-Punch Test For Tensile Strength Of soils”, *The Third Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, pp.211-215.
9. Fang, H. Y. and Chen, W. F. (1971), “New Method for Determination of Tensile Strength of Soils”, *Highway Research Record 354*, pp.62-68.
10. Ohrai, T. (1986), “Experimental Studies on the Effects of Ice and Unfrozen Water on the Compressive Strength of Frozen Soil”, *Ph. D. dissertation, Hokkaido University, Sapporo, Japan*.
11. Richard A. Bragg and O. B. Andersland (1981), “Strain Rate, Temperature, and Sample Size Effects on Compression and Tensile Properties of Frozen Sand”, *Engineering Geology*, Volume 18, Issues 1-4, pp.35-46.
12. Tice, A.R., Burrous, C.M. and Anderson, D.M. (1978), “Phase Composition Measurements on Soils at Very High Water Contents by the Pulsed Nuclear Magnetic Resonance Technique”, *Presented at Trans. Res. Board Meeting, Washington, D.C., Jan., pp.16-20*.

(접수일자 2007. 10. 19, 심사완료일 2008. 4. 8)