

동결토의 동적 특성에 관한 연구

An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Frozen Soil

서 상 열* Suh, Sang-Youl

Abstract

Ultrasonic propagation velocities of both the dilatational and shear waves through the weathered tuff soil sampled from the area lying between Ulanbator and Beijing were measured under temperature condition of near subzero by means of sing-around method. After comparing the results with obtained data on unfrozen water content, a linear relation between velocities and unfrozen water content was performed with high coefficient value. Experimental results of two kinds of rather uniform materials, namely, glass-beads and silica micro-beads, testified the similar linear relations. In addition, the change rate of dilatational wave velocities with the change of volumetric unfrozen water content was not dependent on soil type. Although a rational theory of the ultrasonic velocities dependence on the unfrozen water content is not yet proposed, the presented empirical relationships may suggest the appropriate evaluation to the effect of unfrozen water on dynamic characteristics of frozen soil.

요 지

본 연구에서는 우란바탈(Ulanbator)에서 북경(Beijing)사이의 지역에서 샘플링한 동결된 응회암 풍화토의 동적 특성을 규명하기 위해 풍화토와, 글래스비드(glass bead)를 대상으로 온도변화에 따른 초음파 속도를 sing-around 법을 사용하여 측정하였다. 본 실험을 통해 초음파 속도는 온도가 증가함에 따라 감소하였고 초음파 속도와 부동수분 사이에는 선형적인 관계가 존재함을 확인하였다. 또한 동결토의 초음파 실험결과, 종파가 시료의 종류에 크게 영향을 받지 않기 때문에 부동수분과 초음파 속도와의 관계규명에 적합하다고 판단된다.

Keywords : Dilatational wave, Frozen soil, Shear wave, Unfrozen water, Weathered tuff soil

1. 서 론

지중의 온도가 0°C 이하로 내려갈 경우 흙속의 공극수가 동결된 상태로 존재하는 흙을 동결토라고 한다.

일반적으로 동결토는 미동결토보다 투수성이 급격히 감소되고, 콘크리트처럼 강도가 증가하는 특성이 있다. 이러한 동결토의 특성을 이용하여 흙을 인공적으로 동결시켜 이용하는 경우도 있다. 예를 들어 동토에 heat pipe를 설치하여 그 냉기를 작물의 저온보관에 이용하거나(土谷, 1996), 폐기물의 방호벽(Mohamed, et al., 1995), 도심부의 지하터널 또는 연약지반의 공사에도

동토가 이용되고 있다(지반동결공법). 이와는 반대로 인공적으로 동결토를 이용할 때 동결을 잘 제어하지 못할 경우 동결토내에 온도구배가 형성되어 동결토와 미동결토 사이에 빙편(ice lens)이 성장함에 따라 동결토의 체적이 팽창하여 인근 구조물에 심각한 영향을 미치기도 한다.

특히 21세기 새로운 에너지의 공급원으로 부상되고 있는 천연가스(LNG)의 시베리아 개발 사업이 한, 일, 중, 러시아의 공동사업으로 현재 진행 중에 있으며, 일차 대상노선으로 선정된 이르쿠츠크에서 천진까지의 총 2,875km 구간에서 2005년부터 본격적인 파이프라

* 정희원, 영남이공대학 토목과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam College of Science & Technology, ssy@ync.ac.kr)

인 건설 공사가 시작될 전망이다.

대상 구간 중에서 우란바톨과 북경 사이의 상당한 구간이 응회암이 풍화되어 다공질체 파우더로 존재하고 있음이 1차 지반조사를 통해 확인되었다. 지금까지는 시베리아 지역에 기존의 파이프라인을 지상에 설치하여 상온의 상태로 천연가스나 원유를 수송하는 방법을 사용하였다. 이러한 운송방법의 문제점으로는 지반응해에 따른 동결토에서의 메탄 유출로 인한 지구온난화, 지상노출에 따른 안정성 결여, 생태계의 파괴와 같은 문제점을 가지고 있기 때문에 이를 최소화하고 동일 단면적 내에 최대량을 운반하기 위해 이르쿠츠크에서 천진까지의 파이프라인은 저온의 상태로 지중에 매설하는 방법을 사용할 계획에 있다. 특히 계절동토에 해당하는 이 지역에 평균 -20°C 를 유지하는 냉각파이프라인(chilled pipeline)과 관련 도로 및 시설물이 건설되기 전에 동결토의 역학적 특성을 파악하는 것이 시급한 상황이다. 그러나 일반 흙과는 달리 동결토에 대한 역학적 특성을 다룬 연구는 극소수에 불과하며 주로 압축강도시험이 사용되고 있다. 강도시험시 파괴현상은 동결토 시료내부의 극히 일부의 국부적인 불균일성에 크게 지배되기 때문에 시험결과의 오차가 커서 역학적 특성을 파악하기가 용이하지 않다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 현장에서 샘플링한 시료를 사용하여 동결토의 전반적 특성평가가 가능한 비파괴 방법으로 초음파 펄스(pulse)법의 일종인 싱어라운드(sing-around)방법을 사용하여 -10°C 의 저온영역에서 수분이 용해하는 0°C 까지의 온도변화에 따라서 동결토의 종파, 횡파와 같은 동적 특성을 분석하였다. 또한 부동수와 초음파 속도와의 관계 분석 통해 동결토 강도에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나인 동결토의 부동수량 분석에 적합한 초음파의 종류를 제시하고, 나아가 관련 결과를 향후 시베리아 동토지역에서의 국내 관련 업체의 진출시 필요한 데이터로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험장치는 송신기에서 발생한 초음파 펄스가 액체 중의 시료를 통과해서 수신기-증폭기에 도달하면 이것을 전기적 신호로 변환시키고, 반복적으로 다음의 초음파를 발생시키는 신호전파 방식을 이용한 것이다. 따라

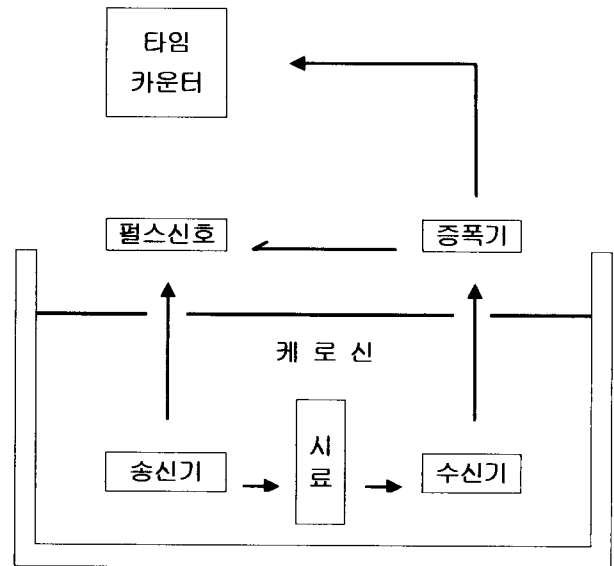


그림 1. 초음파 실험장치의 구성도면

서 시료를 통과한 초음파의 이동시간과 이동거리, 시료의 두께 등을 이용해서 초음파속도가 계산된다.

본 실험장치는 크게 송신기, 수신기, 증폭기, 컨트롤 판넬(control panel)등으로 구성되어 있다. 그림 1에 나타난 바와 같이 시료를 액체(kerosene)가 들어 있는 아크릴용기에 설치하고 송신기, 수신기를 저온실 내에, 컨트롤 판넬은 상온의 실험실 내에 설치한 후 저온실의 온도를 $-10^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 까지 변화시켜 시료의 종파와 횡파 속도를 측정하였다. 신호의 반복주기 T의 측정은 조절 판넬에 부착되어 있는 타임카운터(time counter)를 사용하였고 주파수의 범위는 2MHz를 기준으로 하였다.

시료의 온도는 서미스터(thermister)를 사용하여 $1/50^{\circ}\text{C}$ 의 정도(precision)로 측정하였으며, 측정 데이터는 GPIB를 통해서 컴퓨터에 자동기록 되도록 하였다.

2.2 실험방법

실험에 사용한 시료의 물성치를 표 1에 나타내었다. 실험시료는 샘플링한 시료를 체분석 하여 1mm이하의 시료를 사용하였다. 초음파 실험은 일정 함수비의 시료를 직경 35mm, 두께 5mm로 샘플을 만든 후 동결에 따른 시료의 체적 팽창을 최소화하기 위해 -20°C 의 저온실에 12시간 방치한 후 -10°C 로 설정된 초음파 장치 내에 샘플을 설치하여 샘플의 온도가 -10°C 와 일치한 것을 확인 한 다음 신호의 반복주기 T를 타임카운터를 통해서 측정하였다. 그 다음 아크릴 내 액체의 온도를 새로운 설정 온도로 변화시켜 온도계를 통해서 시료의 온

표 1. 시료의 물리적 특성

% by weight	Clay (<0.005 mm)	39%
	Silt (0.005~0.074 mm)	52%
	Sand (0.074~1.0 mm)	9%
Atterberg limit	LL	38.7%
	PL	16.3%
	IP	21.4%
Specific gravity		2.59
Specific surface area		17.2 m ² /g
Permeability		3.8×10 ⁻⁸ cm/sec
Average water content of undisturbed sample		23%

도가 안정화됨을 확인한 후 반복주기 T를 같은 방법으로 측정하였다. -10℃~0℃의 온도 범위 내에서 이러한 방법을 반복하여 샘플의 초음파를 측정하였다.

3. 초음파의 측정원리 및 방법

3.1 측정원리

실험에 이용한 장치의 구성단면을 그림 1에 보여준다. 그림에서 보여 주는 것처럼 초음파 펄스의 반복주기 T를 타임카운터로 측정하였다. 주기 T는 송신기와 수신기 사이의 전파시간 t와 전자 회로계의 지연시간 te로 하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = t + t_e \quad (1)$$

3.2 측정방법

3.2.1 액체(kerosene)의 전파속도 측정

액체 내에서 시료의 초음파 속도를 측정하기 위해서는 먼저 액체의 속도측정이 필요하다. 그림 2에 나타낸 바와 같이, 발신기와 수신기 사이의 간격을 L₁로 할 경우, 초음파 pulse의 반복주기 T₁은 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

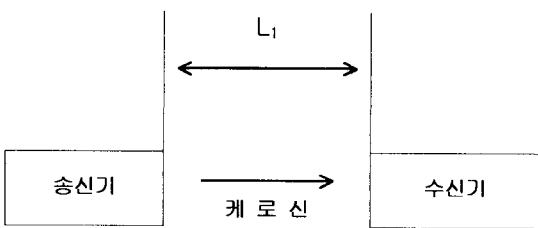


그림 2. 송신, 수신기간의 L₁ 거리에서의 T₁ 주기

$$T_1 = t_1 + t_{e1} \quad (2)$$

같은 요령으로 발신기와 수신기 사이의 간격을 L₂로 할 경우(그림 3), 식 (3)으로 나타낼 수

$$T_2 = t_2 + t_{e2} \quad (3)$$

있다. 동일 조건에서 측정을 했기 때문에 전자회로계의 지연시간 te는 변화하지 않는 것으로 가정 할 경우, 식 (2), (3)으로부터 식 (4)를 얻는다.

$$T_2 - T_1 = t_2 - t_1 \quad (4)$$

액체(kerosene)의 초음파 속도 (V_k)는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 타임카운터(time counter)로 측정한 T₁, T₂, ΔL을 식 (5)에 대입하여 액체의 초음파 속도를 계산하였다. 실제 측정에서 L₁과 L₂의 거리차 ΔL은 2cm를 기준으로 하였다.

$$V_k = \frac{L_1}{t_1} = \frac{L_2}{t_2} = \frac{L_1 - L_2}{t_1 - t_2} = \frac{\Delta L}{T_1 - T_2} \quad (5)$$

3.2.2 종파속도의 측정

그림 4에서와 같이 수신기와 발신기 사이의 거리를 L₁, 두께 d인 시료를 액체 중에서 초음파 전달 방향과 수직으로 고정시키고 초음파의 반복주기 T₃를 측정한다. 측정된 T₃는 액체(L₁-d)와 시료 d의 각각의 전파시간 t₃, t_p, 지연시간 te로 이루어져 있고 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_3 = t_3 + t_p + t_e \quad (6)$$

식 (6), 2와 거리 L₁을 이용하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_1 - T_3 = (t_1 - t_3) - t_p \quad (7)$$

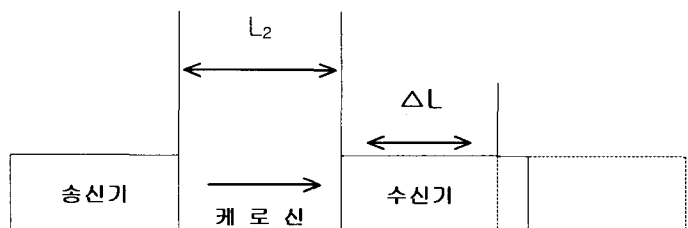


그림 3. 송신, 수신기간의 L₂ 거리에서의 T₂ 주기

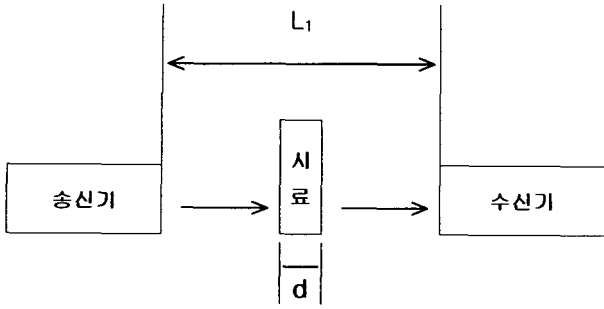


그림 4. 초음파 T_3 의 순환 주기 측정

t_1, t_2, t_p 를 액체속도(V_k), 종파속도(V_p), 이동거리 L_1 , L_1-d 로 나타내면 다음과 같다.

$$T_1 - T_2 = \left(\frac{L_1}{V_k} - \frac{L_1-d}{V_k} \right) - \frac{d}{V_p} \\ = \left(\frac{1}{V_k} - \frac{1}{V_p} \right) \times d \quad (8)$$

식 (8)에서 시료에 전달되는 종파속도(V_p)는 다음과 같이 계산된다.

$$V_p = \frac{1}{\frac{1}{V_k} - \frac{T_1 - T_3}{d}} \quad (9)$$

3.2.3 횡파속도의 측정

횡파의 측정은 파의 굴절특성을 이용해서 측정한다. 시료에 초음파의 입사각이 0° 인 경우 시료에 발생하는 탄성파는 종파뿐이나 입사각이 0° 이상일 경우 종파와 더불어 횡파가 발생한다. 고체의 파의 속도가 액체보다 빠르기 때문에 종파와 횡파는 고체 내에서 굴절된 방향으로 전파된다(그림 5).

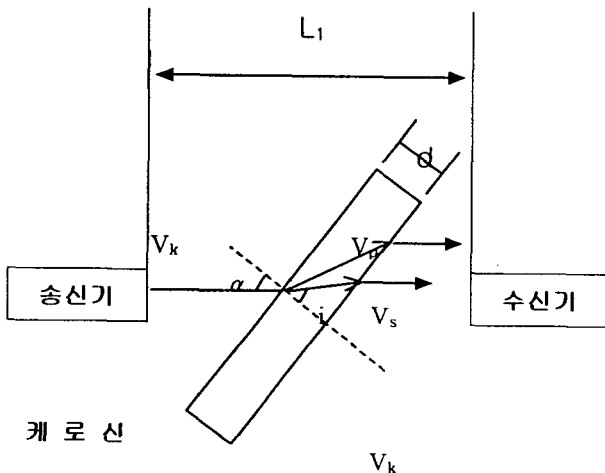


그림 5. 입사각 i° 에서의 순환주기 T_4 의 측정

그림 5에 나타낸 것처럼 입사각이 시료에 수직이 아닐 경우 시료 내에는 P파, S파가 동시에 발생하게 되며, 이러한 파의 굴절은 다음과 같은 Snell법칙으로 결정되어진다.

$$\frac{\sin i}{\sin \alpha} = \frac{V_k}{V} \quad (10)$$

여기서 i 는 입사각, α 는 굴절각, V_k 는 액체의 속도, V 는 시료의 속도를 나타낸다.

식 (10)에서 입사각을 0° 에서 점차적으로 증가시킬 경우, 어느 입사각에서 굴절각이 90° 가 되어, 종파는 시료를 통과하지 않고 전부 반사된다. 이러한 입사각을 임계입사각 이라고 하며 종파의 경우에도 존재한다. 일반적으로 종파속도가 횡파속도보다 빠르기 때문에 횡파 임계각이 종파 임계각보다 작다. 입사각을 종파 임계각보다 큰 각도로 할 경우 횡파만이 시료에 전파되고 횡파 주기 T_4 는 그림 5의 기하학적 관계로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_4 = t_e + \frac{L_1 - \frac{d \cdot \cos(i-\alpha)}{\cos i}}{V_k} + \frac{d}{V} \quad (11)$$

식 (11)를 대입하여 정리하면 횡파속도(V_s)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = \frac{1}{\frac{\cos(i-\alpha)}{V_k} - \frac{(T_1 - T_4) \cos i}{d}} \quad (12)$$

이상의 4종류의 초음파 pulse 신호의 반복주기 T_1, T_2, T_3, T_4 를 측정하여 샘플의 함수비 변화에 따른 중, 횡파의 속도를 계산하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 임계 입사각의 결정

초음파 속도(V_p, V_s)는 반복주기 T_4 에 대해서 종파 임계 입사각 이하 일 경우 종파속도로, 종파임계 입사각 이상일 경우 위에서 설명한바와 같이 횡파속도로 측정된다. 그림 6에서는 -10°C 에서 응회암 풍화토 (모래 혼합율: 0%)를 대상으로 입사각 변화에 따른 초음파 속도의 변화를 나타내었다.

응회암 풍화토의 종파 임계 입사각은 18° 를 경계로

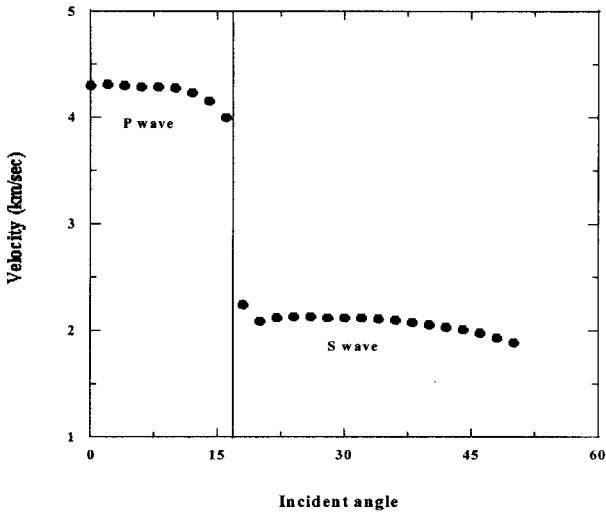


그림 6. 입사각 변화에 따른 초음파 속도의 변화

초음파 속도가 4.0~4.3km/sec에서 1.9~2.1km/sec로 급격히 변화함을 보여준다. 즉 입사각이 18° 이상이 되면, 식 (10)에 의거 종파의 굴절각이 90°가 되어 굴절파에는 종파가 없어지고 고체 속에는 횡파만 존재하게 됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 실험오차를 고려하여 T4의 측정시 18°보다 큰 입사의 35°를 기준으로 횡파를 측정하였다.

4.2 혼합물의 변화

응회암 풍화토에 표준사를 0~30%까지 혼합한 5종류의 시료에 대하여 온도 변화에 따른 종파, 횡파속도의 변화를 그림 7, 8에 나타내었다.

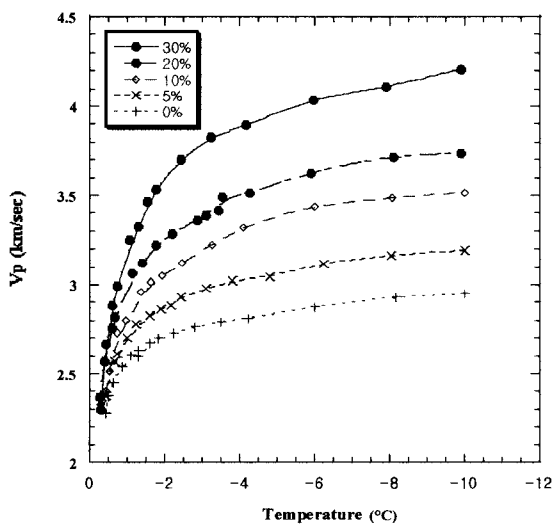


그림 7. 종파속도 V_p 와 온도변화와의 관계

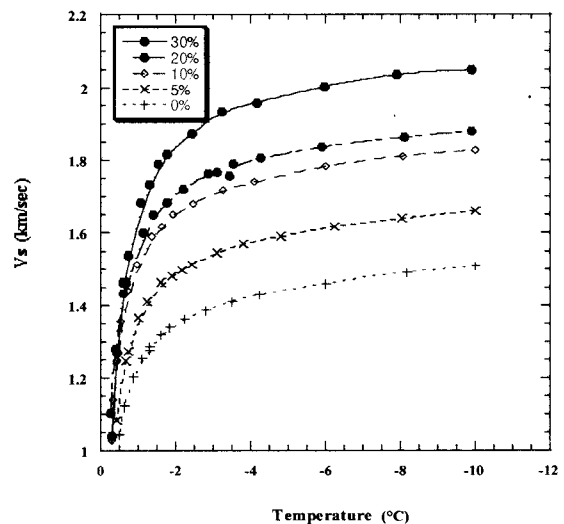


그림 8. 횡파속도 V_s 와 온도변화와의 관계

그림 7, 8의 결과에 따르면 -10°C에서 -3°C까지는 온도 증가와 더불어 완만하게 연속적으로 속도가 감소하였으나, -3°C 이상이 될 경우 그림에 나타낸 바와 같이 동토의 초음파 속도가 급격히 감소함을 보여준다. 이것은 김(2002), Thimus의 연구결과(1991)와 잘 일치하고 있다. 즉 동토중의 부동수량이 증가한 결과, 초음파속도가 현저히 감소됨을 보여주고 있다. 다시 말해서 온도상승의 결과 부동수량의 증가할수록 초음파 속도가 큰 얼음이 초음파 속도가 작은 부동수로의 상변환의 영향임을 알 수 있다.

그러나 Thimus가 지적한 것처럼 현 단계에서는 동토를 구성하고 있는 흙, 얼음, 부동수, 공기 등의 기하학적 구성비로 동토의 초음파속도를 추정하는 것은 어려우며, 특히 얼음의 경우 온도상승에 따른 속도 저하는 거의 0°C까지 일정하기 때문에 온도상승에 따른 동토의 초음파속도 저하는 동토를 구성하고 있는 얼음의 초음파속도 의존성만으로는 설명이 불가능하다(福田, 1991)

또한 부동수의 존재가 동토의 초음파속도에 어떤 영향을 미치는지 명확한 이론적 분석은 아직 되어 있지 않으나 부동수량을 정량적으로 측정하는 방법의 하나로써 초음파 측정법이 효과적이라고 사료된다. 이런 유효성을 검증하기 위해 NMR을 사용하여(Tice, 1982, 1988) 동일 시료를 대상으로 온도변화와 부동수량의 관계를 그림 9에 나타내었다. -10°C에서 7.5%의 부동수가 존재하였고 특히 -1°C~0°C 사이에서 부동수량이 급격히 증가하였다. 이러한 부동수와 온도와의 관계는 동상에 민감한 흙의 경우와 유사하였고(Williams, 1964) 그

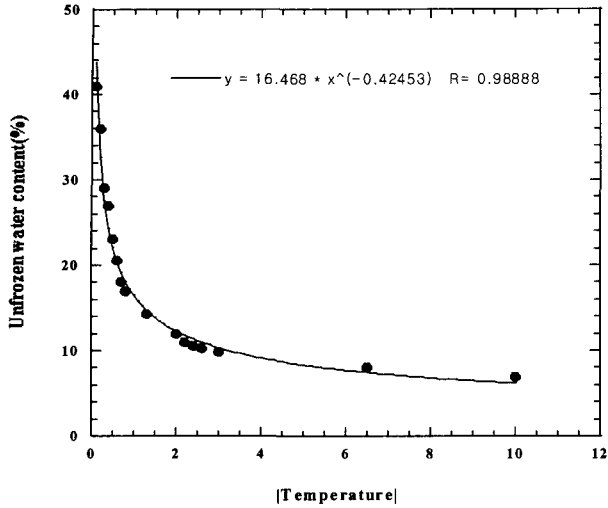


그림 9. 응회암 풍화토의 부동수량과 온도와의 관계

결과를 회귀분석을 통해서 식 (13)과 같은 실험식을 얻었다(서, 1999).

$$\theta_u = 16.4|T|^{-0.425} \quad (13)$$

θ_u 는 부동수량(%), T는 온도이다. 여기서 모래의 경우 표면에서의 모관력, 입자사이에 작용하는 분자간력

등이 미미하기 때문에 모래에서는 부동수가 존재하지 않는 것으로 판단된다. 따라서 혼합율이 증가한 만큼 시료내에서의 부동수는 혼합율 증가에 비례하여 감소하는 것으로 사료되며, 모래의 혼합율을 고려한 부동수분량은 아래의 실험식을 사용하여 혼합율과 임의의 온도에서 구할 수 있다.

$$\theta_u = 16.4|T|^{-0.425}(1-M) \quad (14)$$

식 (14)에서 M은 모래의 혼합율을 나타낸다.

상기 식 (14)의 계산결과는 증량함수비로 이를 체적함수비로 환산하여 각각의 온도변화에 대응하는 초음파 속도와 부동수와의 관계를 그림 10, 11에 나타내었다.

그림 10, 11의 결과의 회귀분석을 통해 종파, 횡파속도는 식 (15)와 같이 나타낼 수 있었고,

$$V = A \cdot \theta_u + B \quad (15)$$

표 2, 3에서는 식 (15)에 적용된 종파, 횡파 각각의 변수 A, B와 실험식의 상관계수를 보여준다. 표 2, 3에서 초음파 속도와 부동수분량 사이의 높은 상관계수는 동결토의 동적 특성을 파악하는데 초음파속도로부터 부

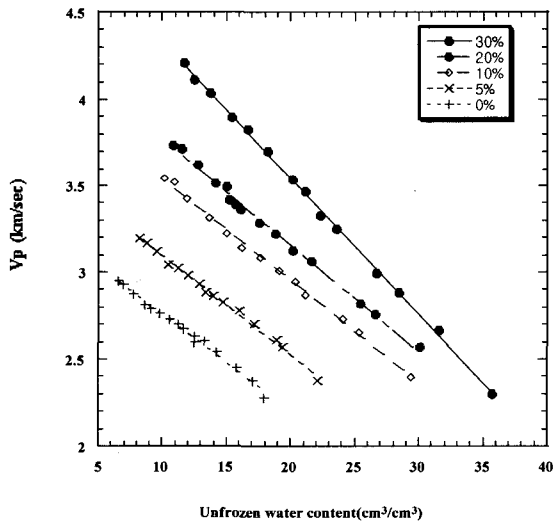


그림 10. 종파와 부동수와의 관계

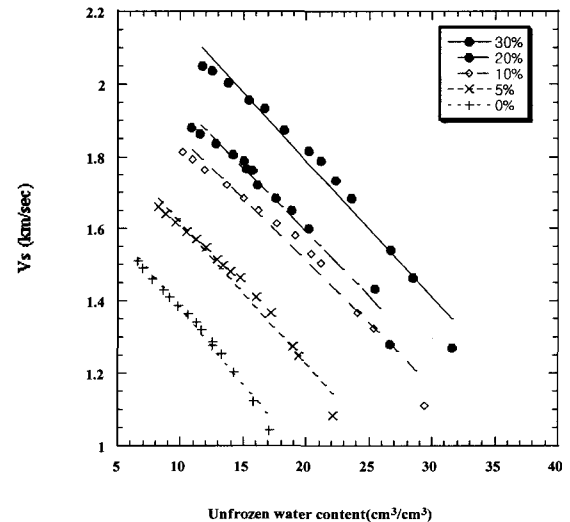


그림 11. 횡파와 부동수와의 관계

표 2. 응회암 풍화토의 종파 변수와 상관계수

Mixing ratio(%)	A	B	Correlation coefficient
0	-0.055	3.306	0.992
5	-0.057	3.657	0.995
10	-0.059	4.128	0.997
20	-0.061	4.385	0.995
30	-0.079	5.113	0.999

표 3. 응회암 풍화토의 횡파의 변수와 상관계수

Mixing ratio(%)	A	B	Correlation coefficient
0	-0.042	1.769	0.988
5	-0.039	2.005	0.977
10	-0.031	2.152	0.985
20	-0.030	2.238	0.987
30	-0.038	2.541	0.975

동수량의 정성적 추정이 가능함을 시사한다. 또한 그림 10, 11에 보인 바와 같이 종파와 횡파 모두 서로 평행한 상태를 이루고 있다. 이러한 결과로부터 변수 A는 부동수의 영향, 변수 B는 흙의 성분 또는 흙 종류의 영향을 알 수 있다. 부동수가 동토의 초음파 속도에 영향을 미치는 명확한 이론적 분석은 현 단계로서는 어려우나, 부동수 변화에 따른 초음파 속도는 그림 10, 11의 결과로부터 부동수가 1% 증가함에 따라 종파 60m/sec, 횡파 35m/sec 정도 감소함을 확인하였다.

4.3 글래스비드(glass bead)의 초음파 특성

부동수와 초음파 속도와의 관계를 좀더 명확하게 하

기 위해 2종류의 글래스비드(Glass Beads(0.2mm), Silica Micro-Bead(1-10 μ m))를 사용하여 초음파와 부동수와의 관계를 조사하였으며, 그림 12, 13에서는 글래스비드의 온도변화에 따른 초음파속도와 부동수와의 관계를 보여준다. 또한 그림 14, 15에서는 부동수와 초음파와의 관계를 나타내었다. 이 결과에서도 알 수 있듯이 초음파와 부동수와의 거의 선형적인 관계가 존재함을 재확인하였다. 표 4에서는 글래스비드에 적용된 종파, 횡파 각각의 변수 A, B와 상관계수를 보여준다. 이러한 측정 결과로부터 부동수 증가에 따른 종파속도의 감소율은 약 60m/sec로 응회암 풍화토와 유사하나 횡파의 감소율은 응회암 풍화토의 경우보다 큰 약 56m/sec로 다소 크게 측정되었다. 또한 표 2, 3에서 종파의 변수 A값을 비

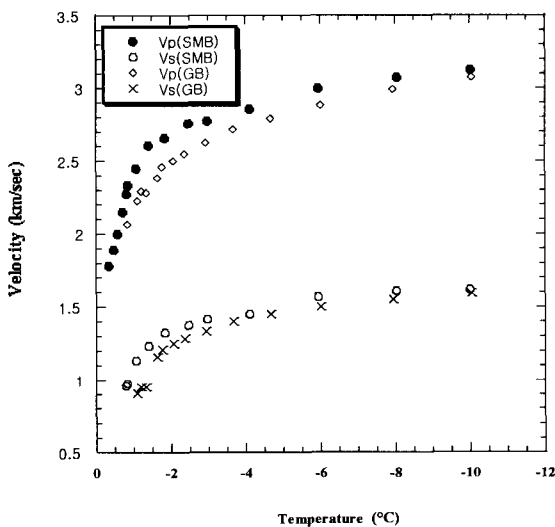


그림 12. 글래스비드의 초음파 속도

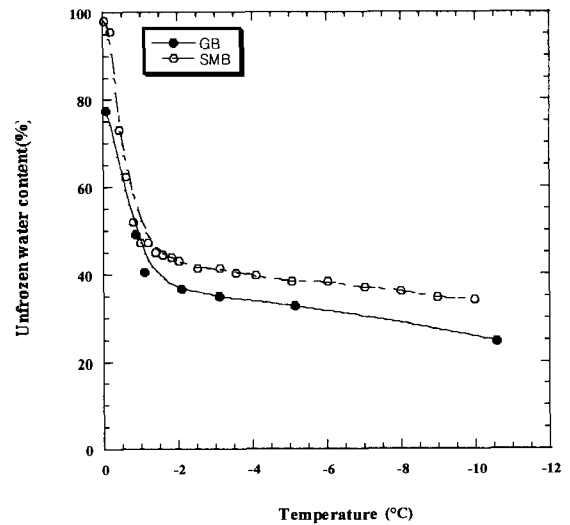


그림 13. 글래스비드의 부동수량과 온도와의 관계

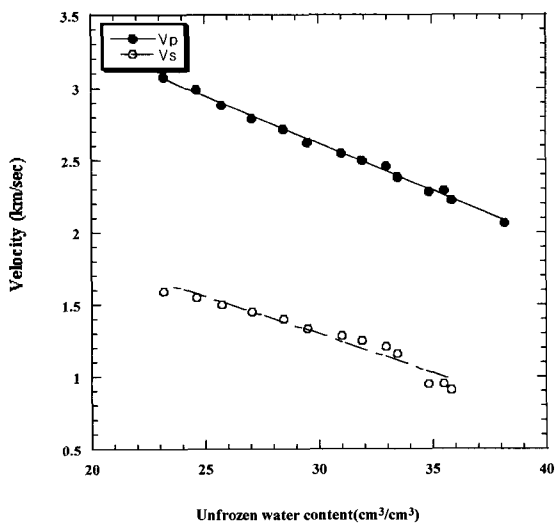


그림 14. 부동수량과 초음파 속도(GB)

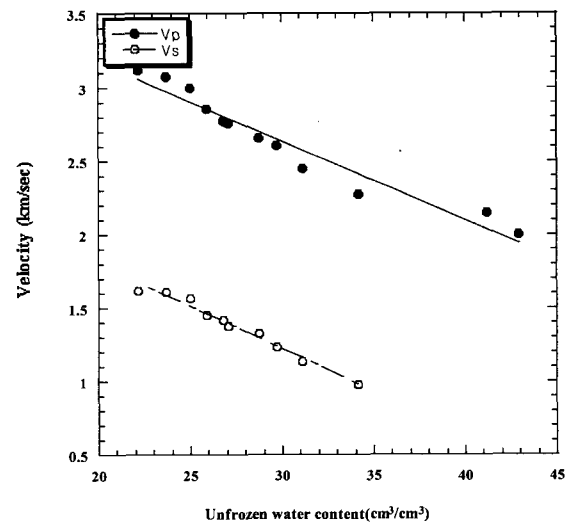


그림 15. 부동수량과 초음파 속도(SMB)

표 4. 글래스비드의 종, 횡파 변수와 상관계수

	Material	A	B	Correlation coefficient
Dilatational wave	GB	-0.065	4.568	0.997
	SMB	-0.063	4.482	0.975
Shear wave	GM	-0.052	2.857	0.948
	SMB	-0.061	3.044	0.979

교해 보면 종파의 경우는 횡파와는 달리 시료의 종류에 영향을 받지 않고 비교적 일정한 값을 유지하고 있음을 보여준다. 이러한 결과로부터 부동수량과 초음파 속도와와의 상관관계를 규명하기 위해서는 횡파보다는 종파가 효과적이라고 판단된다.

5. 결론

응회암 풍화토, 글래스비드를 대상으로 한 초음파 실험 결과, 동결토의 부동수분량과 초음파 속도 사이에는 선형적인 관계가 존재함을 확인하였고 S파보다는 P파가 동결토의 부동수분량 분석에 적합하다고 사료된다. 본 연구와 관련된 세부적인 실험결과는 다음과 같다.

- (1) 동결토의 초음파 속도는 온도의 상승과 더불어 감소하였고 특히 -2℃ 이상의 범위에서 급격히 감소하였다. 이러한 결과는 동결토의 부동수분량의 증가와 밀접한 관계가 있음을 확인하였고 응회암 풍화토의 임계 입사각은 18°로 관측되었다.
- (2) 초음파 속도는 부동수분량과 선형적인 관계($V=A \cdot \alpha_0+B$)가 성립하였다.
- (3) 응회암 풍화토에서 부동수 1%의 변화에 종파 60m/sec, 횡파는 36m/sec, 글래스비드의 경우 종파 64m/sec, 횡파는 56m/sec 정도가 감소되었고 종파가 횡파보다 시료의 종류에 관계없이 일정한 속도를 유지하였다.
- (4) 입경이 다른 2종류(1-10 μ m, 0.2mm)의 글래스비드를 사용한 초음파 실험결과 응회암 풍화토와 유사한 거동을 하였고 입경 차이에 따른 초음파 속도의 차이는 미미하였다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 영남이공대학 연구조성비 지원에 의해 이루어 졌으며 본 논문이 완성되기까지 귀중한 조언을 해주신 국민대학 건설시스템공학부 황성일, 조남준교수님께 깊은 사의를 표합니다. 아울러 실험시료를 제공해준 北見工大 土木開發工學科 Suzuki 교수님께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김영진, 배정호, 송원근(2002), "동결토의 온도변화에 따른 초음파 속도의 변화에 관한 실험적 연구", 대한토목학회, 제22권, 제3-C호, pp.207-217.
2. 서상열(1999), "응회암 풍화토의 동결특성에 관한 열역학적인 연구-상재하중과 동결점 저하를 중심으로-", 한국지반공학회논문집, 제15권, 제6호, pp.297-306.
3. 福田 正己, 井上 正側(1973), "凍土の動的性質について", 低温科學 物理編 31, pp.246-259.
4. 福田 正己(1991), "0℃附近の凍土中の超音波速度の測定", 低温科學 物理編 50, pp.83-86.
5. 土谷 富士夫, 了戒 公利(1966), 冷熱エネルギーをも用いた凍上低温システム", 農業土木學會誌 64, pp.231-235.
6. Mohamed A. M. O., Yong R. N. and Mazus M. T.(1995), "Contaminant migration in engineered clay barriers due to heat and moisture redistribution under freezing conditions", *Canadian Geotechnical J.* 32, pp.40-59.
7. Thimus, J. F., Aguirre-Puente, and Cohen-Tenoudji, F.(1991), "Determination of unfrozen water content of an overconsolidated clay down to -160° by sonic approaches-Comparison with classical method", *In proceedings of the 6th International Symposium on Ground Freezing*, pp.83-88.
8. Tice, A. R.(1982), The relationship between the ice phase and unfrozen water phase in frozen soil as determined by pulsed nuclear magnetic resonance and physical desorption data, USA cold region research and engineering laboratory, CRREL report 82-12.
9. Tice, A. R.(1988), An frozen water contents of undisturbed and remolded Alaskan silt as determined by nuclear magnetic resonance, USA cold region research and engineering laboratory, CRREL report 88-18.
10. Williams, P. J.(1964), "Unfrozen water content of frozen soils and moisture suction", *Geotechnique*, 14, pp.231-241.

(접수일자 2003. 1. 6, 심사완료일 2003. 2. 15)