

페타이어 파우더 혼합토의 열전도율 특성에 관한 연구

A Study on the Thermal Conductivity Characteristics of Discarded Tire Powder-Soil Mixture

김 학 삼¹ Kim, Hak-Sam

서 상 열² Seo, Sang-Youl

中村 大³ NakamuRa, Dai

山下 聡⁴ Yamashita, Satoshi

鈴木 輝之⁵ Suzuki, Teruyuki

Abstract

Thermal conductivities using the thermal probe method were determined for frost susceptible soil with three types of discarded tire powder under the condition of a temperature variation from $-20^{\circ}\text{C} \sim +10^{\circ}\text{C}$. Also, the amount of unfrozen water contents was measured by the pulsed NMR method. The variation of unfrozen water content in the experimental condition could be expressed as a function of temperature given by an exponential equation. A new model for calculating the thermal conductivity of frozen soil was proposed. It is extended from the two element method and subdivided into three constituent elements.

요 지

본 연구에서는 동상성이 높은 대상 시료에 입경이 다른 3종의 페타이어분말을 대상으로 서멀 프루브법을 이용하여 $-20^{\circ}\text{C} \sim +10^{\circ}\text{C}$ 의 온도변화에 따른 열전도율을 실측하는 것과 동시에 펄스형NMR장치를 이용하여 동토층의 부동수분량을 측정하였고 이를 온도함수로 나타내었다. 또한 열전도율 계산모델의 하나인 2상계모델을 발전시켜 3상계 동결토 영역에 적용 가능한 새로운 모델을 제안하였다.

Keywords : Pulsed nuclear magnetic resonance, Discarded tire powder, Thermal conductivity, Thermal probe, Unfrozen water content

1. 서 론

21세기 새로운 에너지 공급원으로 각광받고 있는 천연가스(LNG)의 시베리아 개발사업이 한·일·중·러의 4개국 공동프로젝트로 현재 진행 중에 있으며, 대상노선으로 선정된 이르쿠츠크-북경-천진까지의 약 2,900km

구간에서 본격적인 파이프라인 건설 공사가 조만간 시작될 전망이며 이에 따라 향후 국내 건설 관련업체들의 활발한 진출이 예상된다.

또한 파이프라인 건설계획 노선 중에서 시베리아 일부를 제외한 대부분이 계절동토 지역에 속하는 것으로 1차 지반조사를 통해 확인되었다. 이 지역에 파이프라

1 영남이공대학 토목과 부교수 (Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., YNC, kimhs@ync.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 영남이공대학 토목과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., YNC)

3 北見工業大学 社会環境工学科 助教 (Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KIT)

4 北見工業大学 社会環境工学科 教授 (Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KIT)

5 北見工業大学 社会環境工学科 教授 (Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KIT)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

상을 건설할 경우 -20°C 의 천연가스가 파이프라인을 통하여 지속적인 이동으로 인한 지반동결의 영향으로부터 파이프라인 구조물을 보호하기 위해서는 흙의 동상 특성 규명이 필수 불가결하며(서상열, 2003), 이러한 지반의 동상현상을 규명하기 위해서는 동결토의 열전도율 특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

상온에서 흙의 열전도율 측정은 서멀프루법이 개발된 이후, 흙의 열전도율에 미치는 영향인자에 대해 많은 관련 실험식이 제안되고 있으나, 일반적으로 Kerstern (1949), Johansen(1977)의 실험식이 대표적으로 많이 사용되고 있다. Kerstern의 실험식은 건조밀도와 함수비를 사용하여 실트 점토 사질토로 구분해서 열전도율을 추정하고 있지만, 건조토와 자갈의 열전도율 측정에는 적용할 수 없는 것으로 알려져 있다. Johansen식은 더욱 실측치에 근접하지만 열전도율을 추정할 파라미터로 부동수, 석영함유량 등이 필요하기 때문에 실무적으로 이용하기가 어려운 것으로 판단되며 어떤 방법으로도 $\pm 25\%$ 정도의 오차가 있는 것으로 나타났다.

또한 저온에서(0°C 이하) 즉 동결토의 열전도율 관련 연구는 국내에서 극히 일부에서 단편적으로 이루어지고 있는 반면(건기연, 1993; 김학삼, 2001; 김영진 등, 2009), 외국에서는 다양한 분야에서 관련 연구가 진행되고 있다(鈴木 등, 2004; Jaff, M 등, 2006; 徳本, 2006; 和希 등, 2007).

기존의 열전도율 추정모델 중에서 미동결토의 대표적인 열전도 모델로서 Maxwell의 전기전도율을 구하는 식을 응용한 De Vries모델(1963), 토양의 거시적인 열전도율을 나타낸 직병렬모델(Wooside, 1961)이 있으며, 동결토의 열전도모델로는 열전도율의 실측치와 모델에 의한 계산치와 비교 검토가 이루어진 Farouki모델(1982), 福田모델(1976) 등이 대표적이다.

현재 칠드파이프라인건설 외에, 인공지반동결 활용, LNG탱크 건설 등 동결과 관련된 토목구조물 설계시 반듯이 열전도율 요소를 반영하고 있다. 이러한 구조물에는 동결토와 미동결토의 영역이 항시 공존하고 있기 때문에, 열전도율은 동결토, 미동결토의 두 영역에 걸쳐 연속적으로 다룰 수 있는 모델을 활용하는 것이 바람직하다. 그러나 현재까지 이와 관련된 열전도율 모델을 제시한 연구사례를 찾아볼 수 없었다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 산업부산물의 일종인 페타이어를 재활용 측면에서 페타이어를 4mm이하로 분말화 한 후 기존의 동상방지층 재료를 일정부분

대신 할 새로운 동상방지재로서의 활용성과 나아가 서두에서 언급한 칠드파이프라인 충전제 및 동상방지재로서의 활용가능성을 검토하기 위한 제1단계 과정으로 먼저 페타이어 분말 혼합토의 열전도율 특성 파악을 목적으로 하였다. 또한 온도변화에 따른 열전도율 특성을 분석하였고, 펄스형 NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 장치를 이용하여 동결토의 부동수분량을 측정하였을 뿐 아니라 부동수분량을 온도의 함수로써 나타내었다. 아울러 Wooside가 제안한 미동결토 영역에서 토립자와 물로 이루어진 2상의 열전도 모델을 발전시켜 동결토 영역까지 적용가능한 부동수의 존재를 고려한 토립자, 얼음, 부동수로 구성된 3상의 새로운 열전도 모델을 제안 하였다.

2. 열전도율 모델의 결정

2상 상태의 열전도율을 구하는 문제는 고체와 액체의 열전도율을 어떻게 배분하느냐가 관건이 된다. 지금까지 제안된 많은 열전도 모델은 고체와 액체의 열전도율을 몇 가지 방법을 사용하여 배분할 수 있으며, 이러한 배분 방법을 배분모델 이라고 한다. 배분방법에는 상가평균형, 상승평균형, 조화평균형 등이 있다(土質工学会編, 1994).

2상계, 고체, 액체의 열전도율을 $\lambda_T, \lambda_s, \lambda_w$ 로, 고체의 체적비율을 n , 액체의 체적비율을 $(1-n)$ 으로 나타낼 경우 상가평균형, 상승평균형, 조화평균형의 2상계 열전도율은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

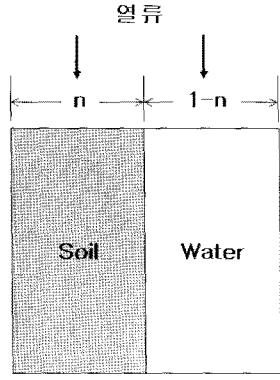
$$\text{상가평균형: } \lambda_T = n\lambda_s + (1-n)\lambda_w \quad (1)$$

$$\text{상승평균형: } \lambda_T = \lambda_s^n \times \lambda_w^{(1-n)} \quad (2)$$

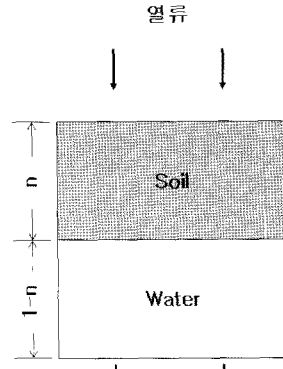
$$\text{조화평균형: } \lambda_T = \frac{1}{\frac{n}{\lambda_s} + \frac{1-n}{\lambda_w}} \quad (3)$$

식 (1)은 그림 1(a)에 나타낸 바와 같이 열이 고체와 액체를 일정 비율로 따로 흘러가는 병렬모델, 식 (3)은 그림 1(b)와 같은 직렬모델, 식 (2)는 식 (1)을 대수형태로 나타낸 것이다. 상기의 기본식을 사용하여 2상계의 열전도율을 설명하는 것이 어렵기 때문에 일반적으로 식 (1)과 식 (3)의 복합 형태인 직렬·병렬모델이 주로 사용되고 있다. 이 모델을 그림 2에 나타내었으며 그림에 보인바와 같이 열의 이동경로는 ①토립자가 직접 접촉되어 있는 부분(b), ②액체로 이루어진 부분(c), ③토립자와 액체로 이루어진 부분(a)으로 열이 이동하는 3가지의 경우로 가정하였다.

즉 열은 3가지의 통로를 통해서 동시에 흘러간다는



(a) 상가평균모델



(b) 조화평균 모델

그림 1. 상가평균모델과 조화평균모델(土質工學會編, 1994)

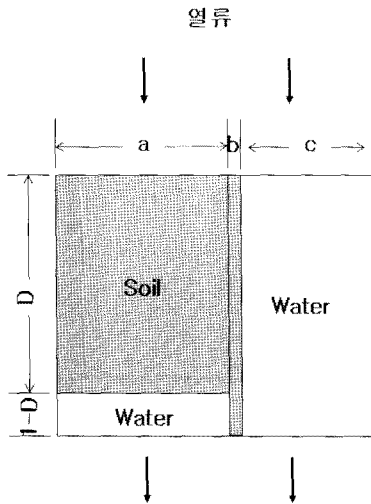


그림 2. 직렬·병렬모델(Wooside, 1961)

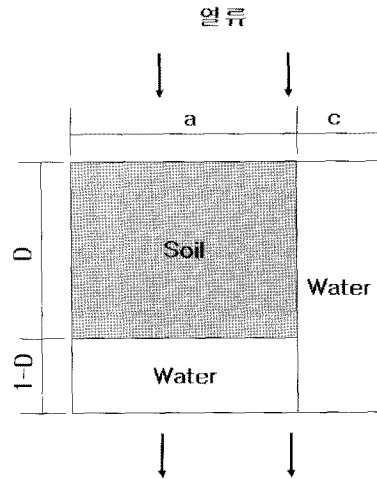


그림 3. 간략화된 직·병렬 모델(Woodside, 1961)

것을 전제로, 그림 2의 조건에서 2상계 열전도율(λ_T)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_T = \frac{a}{\frac{D}{\lambda_s} + \frac{1-D}{\lambda_w}} + b\lambda_s + c\lambda_w \quad (4)$$

여기서 a, b, c는 ③, ①, ②에 해당되는 부분의 비율, d는 a에서 토립자가 차지하는 비율을 나타낸다. 식 (4)는 Wyllie 등이(1954) 전도성입자의 전기전도를 설명하기 위해 제안된 식을 Woodside 등이(1961) 흡입자의 열전도율 계산에 응용한 것이다. 식 (4)를 흡의 열전도율 모델화에 적용하기 위해 그림 2에서 4개의 정수에 대하여 다음과 같은 관계가 존재한다.

$$a + b + c = 1.0 \quad (5)$$

$$a \cdot d + b = n \quad (6)$$

식 (5), (6)만으로는 4개의 정수를 추정할 수 없기 때문에 실험적으로 몇 가지의 방법을 활용하여 결정할 수 있다. b는 토립자의 접촉에 의한 열전도율의 비율이기 때문에, 유체의 열전도율이 무시 될 경우, 진공상태에서는, $\lambda_w = 0$ 가 되어 식 (4)에서 $b = \lambda_T / \lambda_s$ 로 나타낼 수 있고 木村(1957)의 연구결과에 따르면 b는 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 의 범위로 나타나 실제 무시될 정도로 작음을 알 수 있다. $b=0$ 를 대입하면 a, c, d 3개의 미지수로 나타난다. 여기서 Woodside(1961)은 d의 값이 1-n이 0.2~0.6의 범위에서는 $d = n / (n + 0.03)$ 의 관계가 성립함을 실험적으로 증명하였다.

본 연구에서는 Woodside가 제안한 간략화된 직·병렬 모델을(그림 3) 응용하여 미동결토에서 뿐 아니라 동결토에서의 적용 가능한 열전도 모델을 페타이어 혼합토를 대상으로 검토하고자 한다. 식 (7)은 그림 3의 모델을 적용하여 식 (1), (3)의 직렬·병렬모델과 동일한 전개과정을 통해 유도되었다.

$$\lambda_T = \frac{a}{\frac{D}{\lambda_s} + \frac{1-D}{\lambda_w}} + c\lambda_w \quad (7)$$

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 대상 시료의 기본 특성

열전도 특성을 파악하기 위하여 밀도시험, 입도분포 시험, 비표면적시험 등의 물성실험을 실시하였다. 본 열

표 1. 대상 시료의 기본 특성(S type)

특성	페타이어 혼합율(%)			
	0	10	20	30
비중(Gs)	2.66	2.38	2.21	1.97
최대건조밀도(rd _{max})	1.79	1.69	1.51	1.36
최적함수비(W _{opt} , %)	19.3	18.2	17.1	14.9
액성한계(LL, %)	46	41	-	-
소성지수(I _p , %)	8	14	-	-
비표면적(m ² /g)	54	-	-	-
흙의 분류(USCS)	SC	SC	SC	SC

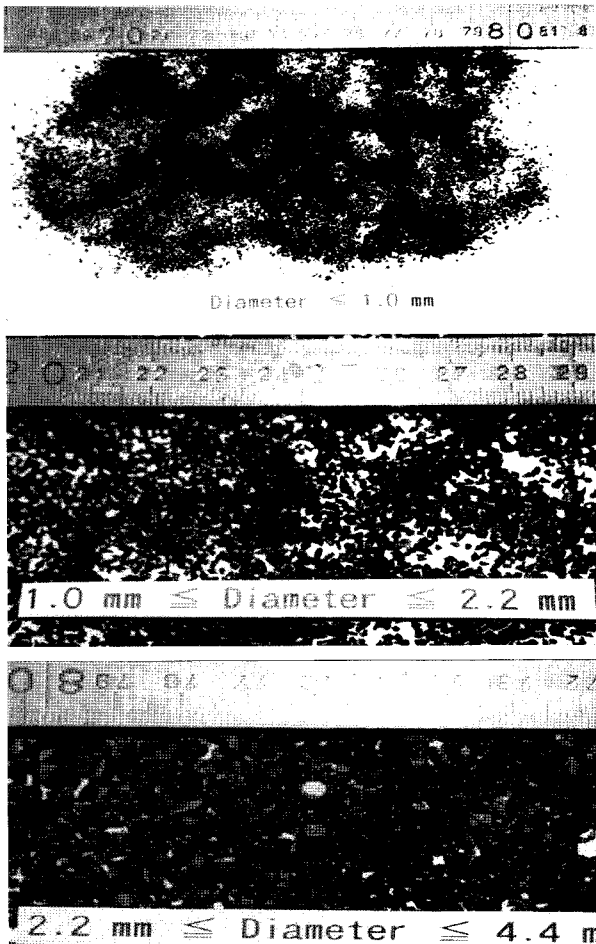


사진 1. 페타이어분말 사진

전도실험에 사용한 시료는 일본 토마코마이시(苫小牧市) 근교에서 채취한 동상성이 높은 시료로 비중 2.66, 비표면적 54m²/g, 액성한계(LL) 46%, 소성한계(PL) 38%로 나타났고 통일분류법에 의해 SC로 판명되었다. 흙시료의 기본 특성을 표 1에, 페타이어 분말은 사진 1에 나타내었고, 대상 페타이어 파우더의 입도분포곡선은 그림 4와 같다. 본 연구에서 S type은 1.1mm이하, M type은 1.1- 2.2mm, L type은 2.2-4.4mm 범위의 페타이어 파우더 입경을 나타낸다.

3.2 시료의 열전도를 측정

열전도율의 측정은 비정상법의 일종인 서멀프루브법을 이용하였다. 흙과 같은 토립자, 물, 공기로 구성된 불균질한 물체에 있어 서멀프루브법로 측정된 열전도율은 대류, 복사, 수분 및 증기 이동에 의한 영향을 포함한 열전도율이지만, 일반적으로 토립자간 대류, 복사에 의한 효과는 적고, 또한 측정시 프루브 온도상승을 낮게 함으로써 수분 및 증기이동의 영향을 무시할 수 있기 때문에 흙의 열이동은 주로 전도에 의한 것으로 판단하였다. 그림 5, 6에 열전도율의 측정장치 계통도 및 서멀프루브의 구조를 보여준다. 측정장치는 서멀프루브, 정전압장치, 릴레이, A-D컨버터, 마이크로볼트미터, 컴퓨터, 정도 ±0.005°C 이내에서 제어 가능한 저온항온조로 구성되어 있다. 프루브 전압의 on-off 및 데이터 수집과 처리는 컴퓨터로 수행하였다.

본 연구에서 사용한 프루브는 외경 2.0mm, 길이 100mm의 스테인리스강관 내에 전기히터(히터 저항치 R=12.59Ω)와 온도센서로서 T형 열전대를 삽입하였고 내부에 파라

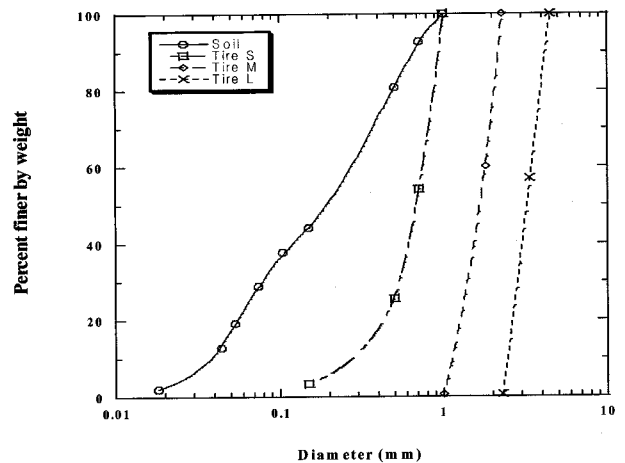


그림 4. 대상 시료의 입도분포 곡선

핀으로 절연·고정시켰다. 온도 측정점은 프루브 중앙부와 상부(기준온도)의 2점으로, 이 2점의 온도차에 의해 발생하는 기전력을 측정하고 상승온도를 측정하였다.

그림 7에 측정시 프루브의 온도상승 ΔT 의 한 예를 보여주는 것으로 프루브 온도상승 ΔT 를 1°C 이내로 되도록 전압을 조정하였다. 만약 온도상승 ΔT 를 1°C 보다 크게 할 경우 동결토 내부에 큰 온도구배가 형성되어 이 구배를 따라 수분확산이 발생하고 전도 이외의 열이 이동할 가능성이 있다. 또한 온도상승 ΔT 를 작게 할 경우, 시료에 열이 흐르지 않을 가능성이 있기 때문에 이것을 방지하기 위해 온도상승 ΔT 를 1°C 내로 하였다.

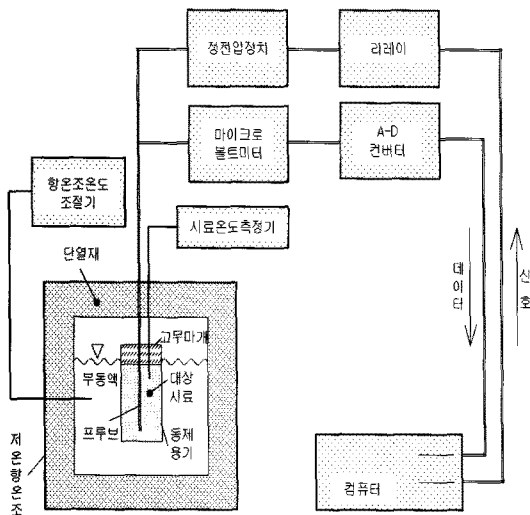


그림 5. 열전도율 측정 장치의 계통도

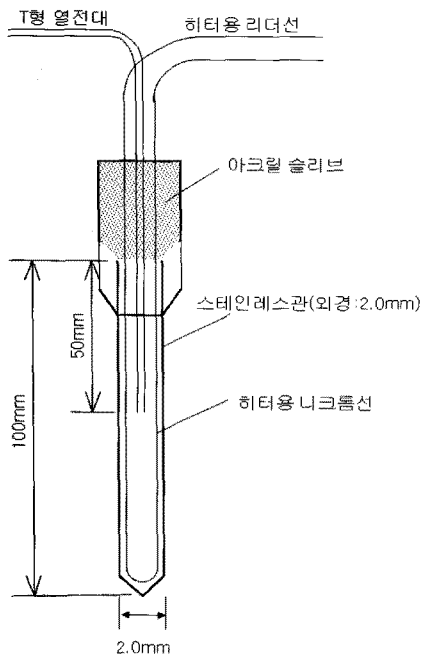


그림 6. 서멀프루브의 구조

서멀프루브법은 직류전원과 히터선에서 프루브 내부에 일정 열량을 지속적으로 가했을 때 프루브의 온도를 열전대로 측정하고, 컴퓨터 제어에 의해 전류를 흐르게 함과 동시에 프루브 내의 온도변화를 자동 계측하였다. 이때 시간경과에 따른 프루브내 온도변화를 열전도율의 함수로 나타낼 수 있다. 이상의 측정원리를 이용하여 열전도율을 구한 관계를 식 (8)에 보여준다.

$$\lambda = \frac{Q}{4H} \times \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{\Delta T} \quad (8)$$

여기서 λ 는 열전도율($\text{W/m}\cdot\text{K}$), Q 는 프루브 단위 길이당 발열량(W/m), t_1 및 t_2 는 시간(h), ΔT 는 t_1 에서 t_2 까지 프루브 온도상승($^\circ\text{C}$)을 나타낸다. 온도상승 기울기 $\Delta T/(\ln t_2 - \ln t_1)$ 는 측정시작 후 6sec에서 600sec 사이에 수집한 데이터를 이용하여 최소자승법에 의해 얻은 직선의 경사를 사용하였다.

열전도율을 측정하기 전에 건조 시료에 일정 비율의 페타이어 파우더(0, 10, 20, 30%:중량비)를 용기 내에서 균일하게 혼합한 후 대상시료(함수비:70%기준)를 24시간 진공펌프를 사용하여 포화시킨 후 외경 12cm, 높이 15cm의 원통형 플라스틱 용기에 높이 10cm까지 시료를 채우고 프로브를 시료상부 중앙부에 수직으로 삽입시킨 후 토양의 건조와 상부에서 온도영향을 방지하기 위해 고무마개를 사용하였다. 실험중 시료내의 온도는 저온 항온조를 사용하여 조정하였으며, 시료는 냉각시 수분이동을 최소화하기 위해 -20°C 로 급속 냉각시킨 후 단계적으로 온도를 상승시켜 최종 10°C 까지 온도변화

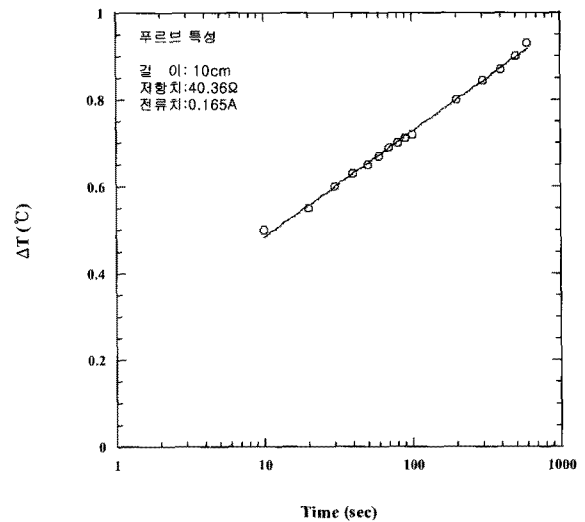


그림 7. 프루브 검정의 온도곡선

에 따른 열전도율을 측정하였다. 하나의 측정온도에 대하여 2시간 간격으로 3회 측정 후 설정온도를 변경할 때에는 변경된 온도에서 24시간 방치한 다음 열전도율을 측정하였다.

3.3 부동수분량의 측정

동토 중에서도 얼지 않는 물 즉 부동수분량을 펄스형 NMR을 이용하여 측정하였다. 펄스형 NMR의 측정원리는 동토시료에 일정시간 자장을 가한 후 수소원자핵(플라톤)의 완화과정이 고체로 존재하는 얼음과 액체인 부동수에서는 다르다는 것을 이용하였다. 즉, 얼음 플라톤의 감소가 종료하는 40 μ s 이후에 검출된 FID(자유자 기유도감소)신호는 액체플라톤에 의한 것이며, 또한 FID 신호의 강도는 플라톤의 수에 비례하기 때문에 이 신호를 측정함으로써 시료 중에 부동수분량을 정량적으로 구하는 것이 가능하다.

실험은 포화토를 소정의 건조밀도로 되도록 시료토를 25mm 샘플관에 넣고 시료내 수분이동이 발생하지 않고 얼음 형성이 균일하게 이루어지도록 사전에 -20 $^{\circ}$ C로 유지한 저온수조를 사용하여 급격히 동결시켜, 시료내의 온도가 충분히 일정온도에 도달되었음을 확인하고 하루 밤을 방치한 후 FID신호를 측정하였다. 측정은 자장에 평행한 축으로부터 경사각을 90 $^{\circ}$ 기울인 진동자장 즉 90 $^{\circ}$ 펄스를 0.2sec마다, 40 μ s의 FID신호의 최대치를 기록하였다. 측정은 설정 온도에서 5회씩 이루어졌으며, 그 평균치를 적용하였다. 측정 종료 후, 항온조 측정온도를 바꾸어 측정을 수행하고 5 $^{\circ}$ C까지 계측을 반복하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 부동수분량

부동수분량은 일반적으로 단위토양체적중에 존재하는 부동수의 체적 비율(cm^3/cm^3)로 표시된다. 그림 8에 펄스형 NMR 장치로 측정한 페타이어분말 혼합토에 대해 온도의 변화에 따른 부동수분량의 변화 결과를 보여준다. 부동수분량은 0 $^{\circ}$ C ~ -5 $^{\circ}$ C 사이에서 온도저하와 더불어 급격히 감소하지만, -10 $^{\circ}$ C 이하에서는 부동수가 완만하게 감소함을 알 수 있다. 전기연(2003)의 연구에서 온도와 부동수분량의 관계를 규명한 것과 같이, 본 연구에

서도 그림 8의 결과로부터 부동수분량과 온도와의 관계를 온도의 누승함수인 식 (9)로 나타낼 수 있었다. 실측치로부터 최소자승법에 의해 얻은 각 시료의 계수 a, b 및 상관계수 r을 표 2에 나타내었고 그림 8의 각각의 곡선은 실험치의 정수를 이용하여 계산한 부동수분량을 보여준다. 또한 표 2에 나타낸 것과 같이 4종류의 혼합토를 대상으로 0 $^{\circ}$ C 이하의 영역에서 온도와 부동수분량의 관계를 식 (9)로 나타낼 때, 각각의 상관계수 r은 0.844 ~ 0.949로 나타났다.

$$\theta_u = a \cdot |T|^b \quad (9)$$

여기서 θ_u 는 부동수분량(cm^3/cm^3), $|T|$ 는 토양온도 절대치($^{\circ}$ C), a, b는 정수이다.

부동수는 크게 구분해서 자유수인 과냉각수, 토립자 등의 작용에 의한 구속수 및 용존물질에 의해 빙점강화된 물로 구분할 수 있다. 일반적으로 부동수 존재의 주된 이유는 토립자의 표면에 결합하여 수화층을 형성하고 있는 흡착수의 영향이라고 사료되며(木下 誠一, 1982), 시료온도가 내려감에 따라 구속수의 화학포텐셜이 감소되고, 토립자의 구속력이 약해진 결과, 결국 토립자로부터

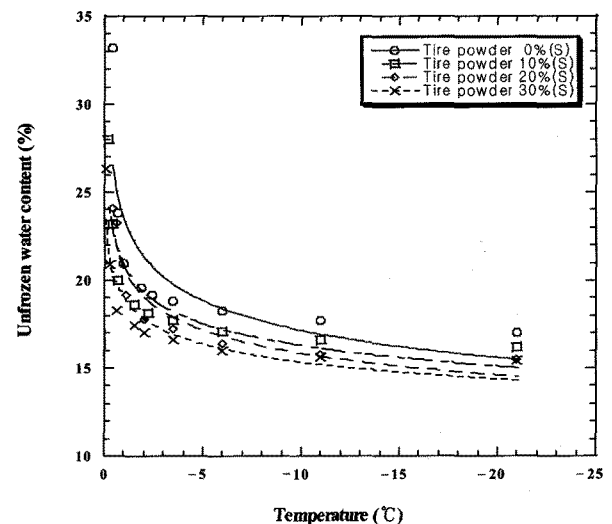


그림 8. 동결토 부동수분량의 온도변화

표 2. 대상시료 부동수분량(θ_u)의 계수 a, b 및 상관계수 r

페타이어 파우더 혼합율(%)	a	b	r
0	23.408	-0.136	0.844
10	20.825	-0.107	0.923
20	20.620	-0.115	0.949
30	18.966	-0.092	0.932

터 거리가 떨어져 있는 간극수부터 얼음으로 변화하는 것으로 판단된다. 이러한 사실에 주목하여 Dillon(1966)과 Anderson(1972) 등은 토양종류에 따른 부동수분량의 차이를 토양의 비표면적을 도입하여 관계를 규명하였으며, 일반적으로 토양의 비표면적은 입경분포곡선과 관계가 깊은 것으로 알려져 있다.

또한 그림 8에서 혼합율이 증가함에 따라 부동수분량이 감소하는 경향을 보이고 있으며 이러한 결과는 혼합토 단위체적당 차지하는 부동수분량의 감소가 주된 원인으로 사료된다. 다시 말해서, 페타이어 파우더는 흡착수를 파우더 입자표면에 형성하지 못하고 페타이어 파우더 특성상 그대로 배수시키는 특성 때문에 혼합토의 단위체적당 부동수분량은 페타이어 파우더 혼합율에 비례하여 감소한 결과라고 판단된다.

4.2 혼합율과 온도변화와 열전도율의 관계

그림 9(a)~(c)에 페타이어 파우더 혼합율을 변수로 하여, 시료온도 $-20^{\circ}\text{C} \sim +10^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켰을 때의 열전도율(λ) 추이를 보여준다. 여기서 페타이어 파우더 혼합율은 혼합토 시료 무게 중에 포함되어 있는 페타이어 파우더의 무게비율로 (페타이어 파우더(g))/(전혼합토 무게(g))로 나타내었다. 이하의 본 논문 중에는 페타이어 파우더 혼합율을 단순히 혼합율로 나타내었다.

그림 9의 (a)~(c)에서 0°C 이상의 미동결 영역에서 열전도율은 시료온도의 증가와 함께 약간의 증가 또는 거의 일정한 값을 보이고 있다. 그러나 온도가 0°C 이하에서는 시료중의 수분이 동결됨에 따라 열전도율이 대폭 증가하였고 더욱 지속적으로 온도를 저하시킬 경우 열전도율의 값은 조금씩 증가함을 보여준다. 동결에 의한 0°C 전후로 열전도율의 큰 변화는 열전도율이 $0.6\text{W/m}\cdot\text{K}$ 인 물이 $2.3\text{W/m}\cdot\text{K}$ 의 얼음으로 상변화의 결과임을 보여준다(柏淵辰招, 1973). 또한 동결된 상태에서 시료온도가 저하됨에 따라 열전도율도 조금씩 증가하는 것은 그림 8에서 알 수 있는 것처럼 부동수가 점차적으로 얼음으로 상변화의 영향을 반영하고 있다. 즉 온도변화에 따른 열전도율의 변화 폭의 차이는 시료내 수분이 얼음으로 변화하는 비율의 차이에 의한 결과임을 보여준다. 또한 모든 시료가 혼합율에 관계없이 시료온도가 -5°C 에서 -20°C 로 저하함에 따라 열전도율의 증가폭($\Delta\lambda$)은 $0.04 \sim 0.08\text{W/m}\cdot\text{K}$ 범위로 나타났다. 또한 혼합율 0%에서 30%로 증가함에 따라 예를 들어 -20°C 를 기준으로 열전도율이 $2.25\text{W/m}\cdot\text{K}$

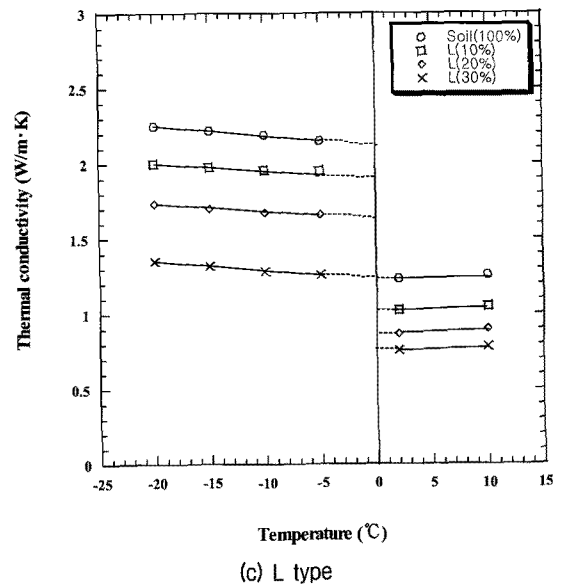
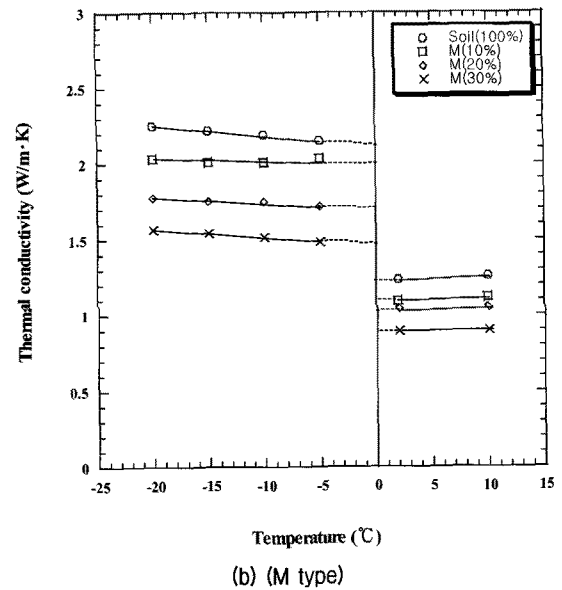
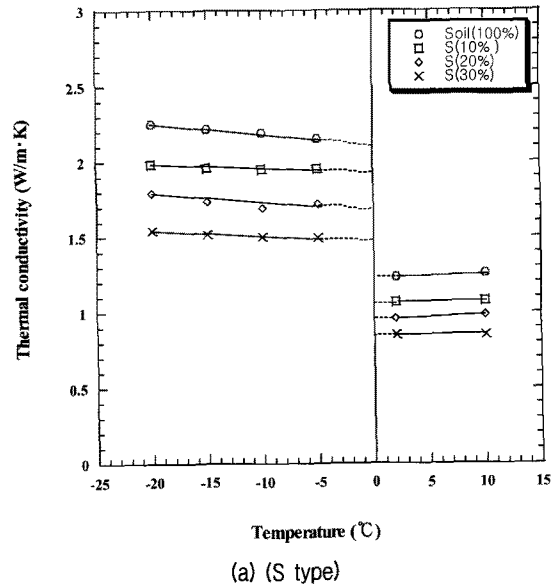


그림 9. 온도변화와 열전도율의 관계

에서 1.39w/m·K로 약 38.3% 감소하였다(L파우더 기준). 이러한 결과는 흙보다 낮은 0.2W/m·K 정도의 열전도율을 가지고 있는 페타이어 파우더의 영향과 파우더 혼합에 따른 시료 전체의 부동수분량의 감소가 주된 원인으로 사료된다.

동결 및 미동결 상태에서 파우더 분말이 증가함에 따라 열전도율이 감소하고 있다. 즉 -20℃에서 혼합율이 1% 증가함에 따라 열전도율은 0.029w/m·K 감소하였고, +10℃에서는 평균 0.016w/m·K 정도로 -20℃의 열전도율의 반 정도로 나타났다. 일반적으로 페타이어 조각을 지반에 사용한 동상대책은 단열효과에 의한 동결진행을 억제하는 것에 있다. 그러나 페타이어 분말을 사용할 경우 본 연구에서 알 수 있듯이 30%정도 혼합할 경우 큰 단열효과는 기대할 수 없음을 그림 9의 결과로부터 예측 가능하다.

그림 10은 -20℃에서 혼합율과 열전도율과의 관계를 S, M, L 파우더 크기에 따른 열전도율의 변화를 보여준다. 혼합율 20%까지는 파우더 크기에 관계없이 거의 유사한 열전도율을 보이고 있으나 그 이후 점차적으로 혼합율이 증가함에 따라 열전도율이 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 30% 혼합율에서 L파우더의 경우 S, M 파우더보다 상대적으로 많은 0.21W/m·K의 열전도율이 감소하였다. 이러한 결과는 S, M 파우더 혼합토의 경우 토립자 또는 파우더 사이에 존재하는 간극수가 얼음으로 상변화하면서 각각의 얼음이 서로 연결되어 이를 통해서 열전달이 이루어진 반면, L파우더(30%) 혼합토는

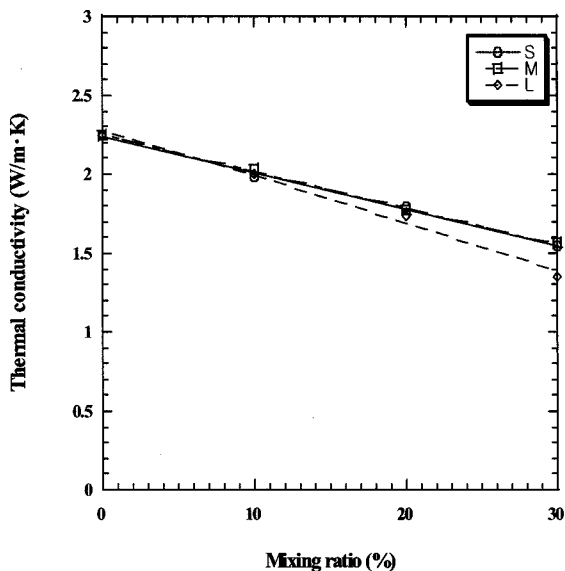


그림 10. 페타이어 크기와 열전도율의 관계

간극에 존재하는 얼음이 파우더에 의해 분단으로 인한 열이동이 원활하지 못한 결과로 사료된다.

5. 혼합토의 열전도모델 검토

앞장의 실험결과, 혼합율의 증가와 온도변화에 따른 열전도율이 일정한 경향을 보이고 있으며, 동토중의 부동수분량을 온도의 함수로 나타낼 수 있었다. 이상의 결과로부터 동결토를 구성하는 토립자, 얼음, 부동수의 3상으로부터 열전도모델의 구축이 가능하다고 사료된다.

흙의 열전도모델은 과거 다양한 모델이 제시되어 있으나, 본 연구에서는 Wooside(1961)가 제안한 미동토 영역에서의 토립자, 물 2상계 직·병렬모델을 발전시켜 동토영역을 다룰 수 있는 토립자 얼음 부동수 3상계 모델을 제안하여 미동결토에서 동결토 영역까지 연속적으로 활용 가능한 열전도모델 검토를 수행하였다.

그림 11은 본 연구에서 제안된 열전도율 모델을 보여준다. 그림 3의 모델을 기초로 하여 미동결토의 경우 토립자 부분을 흙과 파우더로 구분하였고(그림 11(a)), 동결시 흙과 파우더는 구조적 변화는 없는 반면 물이 얼음과 부동수로 온도에 따라 일정비율로 구분되는 것을 그림 11(b)에 나타내었다. 또한 혼합토내에 흐르는 열류의 방향은 그림에서 화살표로 나타낸 것과 같이 위에서 아래로 향하고 있으며, 열류는 혼합토와 물, 물층 통해서 전달되고 혼합토는 다시 토립자와 파우더가 병렬로 존재하는 것으로 가정하였다. 여기서 혼합토내의 수분은 열류의 방향과 같이 위에서 아래로 순차적으로 얼음으로 변형하는 것으로 취급하였다. 식 (1), (3)의 유도과정과 동일한 방법을 적용하여, 그림 11의 제시된 모델 조건으로부터 혼합토의 미동결토의 열전도율 λ_{mu} , 동결토의 열전도율 λ_{mf} 를 유도하였다.

$$\lambda_{mu} = \frac{a}{\frac{D}{\lambda_t \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t}\right)^2 X + \lambda_s \left(1 - \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t}\right)^2 X\right)} + \frac{1-D}{\lambda_w}} + c\lambda_w \quad (10)$$

$$\lambda_{mf} = \frac{a}{\frac{D}{\lambda_t \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t}\right)^2 X + \lambda_s \left(1 - \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t}\right)^2 X\right)} + \left(\frac{1-D}{\lambda_w} \times \frac{d\theta_u}{d\theta_0} + \frac{1-D}{\lambda_i} \left(\frac{\theta_0 - d\theta_u}{\theta_0} \frac{d\theta_u}{dT}\right)\right)} + \frac{c}{\frac{1}{\lambda_w} \times \frac{d\theta_u}{d\theta_0} + \frac{1}{\lambda_i} \times \frac{\theta_0 - d\theta_u}{\theta_0} \frac{d\theta_u}{dT}} \quad (11)$$

여기서 λ 는 열전도율, θ_0 는 미동결토의 체적함수율,

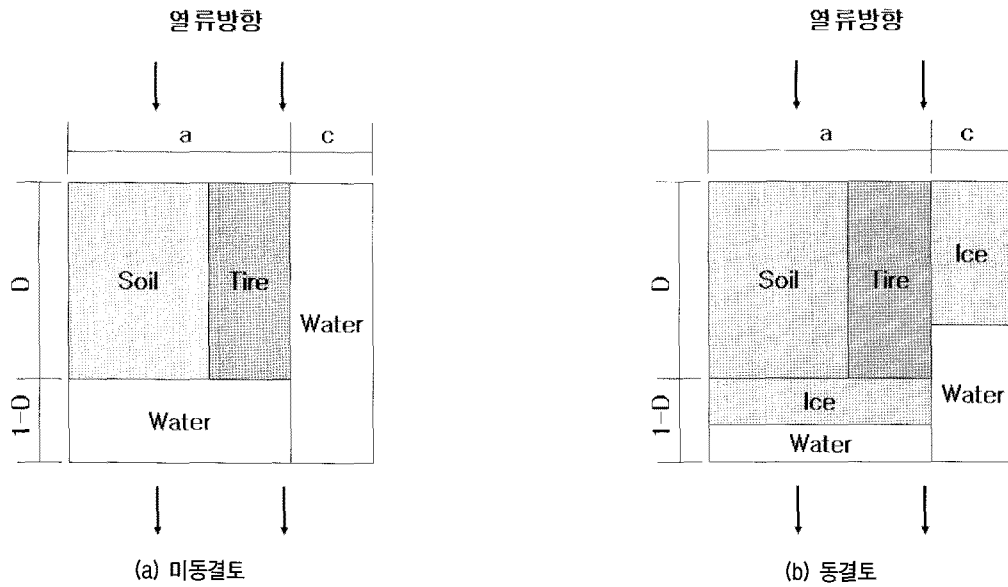


그림 11. 혼합토의 열전도모델

$d\theta_v/dT$ 는 $-T^{\circ}\text{C}$ 에서의 부동수분량, γ 는 밀도, X 는 파우더 혼합율, 아래첨자 m, s, t, w, i 는 각각 혼합토, 흙, 타이어파우더, 물, 얼음을 u, f 는 미동결토와 동결토를 나타낸다. 또한 a, c, D 는 실험종료 후 대상 시료의 기본조건(밀도, 함수비, 체적)으로부터 결정되는 실험상수이다.

식 (11)에서 $d\theta_v/dT = \theta_0$ (미동결의 체적함수율)의 관계가 성립하면 식 (10)이 되고 $d\theta_v/dT = \theta_0$, 혼합율(X)=0를 대입하면 식 (7)과 동일한 식이 성립한다. 또한 식 (10), 식 (11)은 혼합토(흙+페타이어 파우더)를 대상으로 하였기 때문에 식 (7)과 비교해 볼 때 $(\frac{\gamma_s}{\gamma_t})^{2/3}$ 의 항이 추가 되었다. 이것은 흙과 페타이어의 밀도의 차이를 그림 10의 모델에 반영한 것이며 여기서 2/3를 취한 이유는 열전도는 단위면적을 단위시간에 통과하는 열량을 기준으로 하는 반면 각 시료의 밀도는 단위체적당 기준으로 하기 때문에 체적을 단면적으로 환산하기 위해 2/3를 취하였다.

또한 식 (11)에서 $d\theta_v/dT$ 는 $-T^{\circ}\text{C}$ 에서의 부동수분량을 나타낸 것으로 그림 8에서 관련 데이터를 활용하거나, 식 (9)를 직접 식 (11)에 대입하여 사용하는 것도 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 모델을 적용하기 위해서는 변수 중에서 고상율 n 을 혼합토로부터 결정할 필요성이 있으며, 나아가 불포화 상태 즉 공기가 포함된 4상의 열전도 모델의 문제는 향후과제로 남겨놓는다.

6. 결론

본 연구에서는 페타이어 파우더를 활용하여 페타이어 혼합토의 열전도율을 평가하기 위해 NMR을 이용한 부동수실험, 서멀프루브법을 사용한 열전도율실험을 수행하였으며, 본 연구 범위내의 결과에 의한 결론은 아래와 같다.

- (1) 펄스형NMR장치를 이용하여 동토중의 부동수분량을 측정하였다. 그 결과 온도와 부동수분량의 관계를 0°C 이하의 영역에서 온도의 거듭제곱 관계로 나타낼 수 있었다.
- (2) 파우더 혼합율이 증가함에 따라 열전도율은 감소하였으며, -20°C 를 기준으로 혼합율 1% 증가함에 따라 열전도율은 $0.029\text{W/m}\cdot\text{K}$ 감소하였고, $+10^{\circ}\text{C}$ 에서는 평균 $0.016\text{W/m}\cdot\text{K}$ 정도로 -20°C 의 열전도율의 반 정도로 나타났다. 또한 동일 혼합율에서, 파우더의 입경크기에 관계없이 거의 유사한 열전도율이 측정되었다.
- (3) 미동결토의 열전도모델인 Woodside가 제안한 토립자 물의 2상 모델을 발전시켜 동결토 영역에 서도 적용 가능한 토립자 얼음 부동수로 구성된 3상 모델을 제안하였고 3상 모델의 구체적 계산방법을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. 김영진, 신재원, 손승모 (2009), “세종기지 및 시베리아 흙의 동결특성 시험”, *한국지반공학학회 논문집*, 제10권 제2호, pp.5-12.
2. 김학삼 (2001), “서멀프루법에 의한 동결토의 열전도율 측정예 관한 연구”, *영남이공대학 산업기술연구*, 13집, pp.62-73.
3. 서상열 (2003), “동결토의 동적 특성에 관한 연구”, *한국지반공학학회논문집*, 제19권 제1호, pp.229-236.
4. 한국건설기술연구원 (1993), “동토지역 기초구조물의 최적설계 기법연구(2)”, *과학기술처*, pp.55-72.
5. 한국건설기술연구원 (2003), “동결심도 및 포장내부 온도 조사”, *한국건설기술연구원*, pp.50-53.
6. 木下 誠一 (1982), “凍土の物理学”, 森北出版, pp.83-88.
7. 鈴木 輝之, 沢田 正剛, 山下 聡 (2004), “切込み砕石層の熱伝導率の測定”, *地盤工学会 北海道支部技術報告集 第44号*, pp.15-20.
8. 粕淵 辰招 (1973), “土壤の熱伝導機構に関する諸問題”, *農業気象*, 第29卷, 第3号, pp.201-208.
9. 土谷 富士夫 (1986), “十勝地方における火山灰土壤の凍結, 凍土が農地に及ぼす影響に関する研究”, 博士各位論文, 北海道大学, pp.44-54.
10. 徳本 家康 (2006), “土壤凍結圃場における団粒構造を持つ黒ボク土の水分・熱同時運送”, 博士各位論文, 岩手大学, pp.68-83.
11. 土質工学会編 (1994), “土質基礎工学ライブラリ23土の凍結 その理論実際”, pp.22-68.
12. 和希, 鈴木 健 (2007), “地盤材料の比熱・熱伝導率の簡易測定法の開発”, *43回地盤工学研究発表会発表講演集*, pp.547-548
13. 福田 正己 (1976), “非定常法による凍土の熱伝導率の測定”, *低温科学 物理編*34, pp.249-252.
14. Anderson, D. M. (1972), “Prediction unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements”, *Highway Research Record*, 393, pp.12-16.
15. Dillon, D. M. and Anderson, O. B. (1966), “Prediction unfrozen water contents in frozen soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, 3(2), pp.53-60.
16. De Vries, D. A. (1963), “Thermal properties of soils”, *Physics of environment*, North Holland Pub. Co. Amsterdam, pp.210-235.
17. Farouki, O. T. (1982), “Evaluation of methods for calculating soil thermal conductivity”, *US Army Corps of Engineers, CRREL REPORT* 82-8.
18. Jaff, M., Robert, S., John, S. and John, M. (2006), “Characterizing the two-dimensional thermal conductivity distribution in sand and gravel aquifer”, *Soil Science Society of America Journal* 70, pp. 1281-1294.
19. Johansen, O. T. (1977), “Thermal conductivity of soil”, *Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, pp.177-223.
20. Kersten, M. S. (1949), “Thermal properties of soils”, *University of Minnesota, Institute of Technology, Engineering Experiment Station, Bulletin*, No. 28.
21. Willie, M. R. and Southwick, P. F. (1954), “J. Petrol. Technol.”, 6, 44.
22. Wooside, W. and Messmer, J.H. (1961), “Thermal conductivity of porous media. 1. Unconsolidated sands”, *Jour. Appl. Physics*, 32, pp.1688-1699.

(접수일자 2010. 1. 12, 심사완료일 2010. 5. 15)