

토양 열전도를 이용한 토양함수비 예측에 관한 연구

조진우^{*,1)} · 강도경²⁾ · 강이석³⁾

¹⁾ 국방과학연구소 연구계획부

²⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

³⁾ 충남대학교 기계설계공학과

A Study for Prediction of Water Contents in Soil by Using the Soil Thermal Conductivity

Jin-Woo Cho^{*,1)} · Do-Kyung Kang²⁾ · E-Sok Kang³⁾

¹⁾ *Research and Development Programming Division, Agency for Defense Development, Korea*

²⁾ *The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

³⁾ *Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Korea*

(Received 11 August 2014 / Revised 28 November 2014 / Accepted 27 February 2015)

ABSTRACT

Vehicles and UGV(Unmanned Ground Vehicle) need a variety of road informations, such as road profile, soil type and soil water contents, to run a cross country course. Especially, soil water contents are very important factor to judge the vehicle mobility, because it can change soil strength. This paper describes the real-time measuring method of soil water contents by using the soil thermal conductivity.

Key Words : Soil Water Contents(토양 함수비), Soil Thermal Conductivity(토양 열전도계수), Vehicle Mobility(차량기동성)

1. 서론

유·무인 차량의 야지기동성은 주행하고자 하는 노면의 Profile, 토양종류, 토양의 함수비에 의하여 영향을 받는다. 특히 토양함수비는 토양강도를 변화시키기 때문에 기동성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자 중 하나이다. 무인차량의 경우 주행 중 토양강도를 측정하거나 함수비를 확인할 수 없어 연약지반에서의 기동

가능 여부를 판단하는 것이 어렵다. 따라서 무인차량의 토양강도를 확인하는 능력은 연약지반에서의 자율 주행 가능 여부를 판단하기 위해 반드시 갖추어야 할 능력으로 판단된다.

토양강도를 측정하는 방법으로 Con-penetrometer를 이용하는 방법이 있으나, 이는 직접 토양 접촉에 의한 측정방법으로 무인차량이 사용할 수 있는 방법이 아니다.

따라서 무인차량의 경우 한가지 방법으로 토양강도를 측정하여 통과 여부를 판단하는 것이 어려우므로, 여러가지 예측방법을 개발하고 종합하여 연약지반 통

* Corresponding author, E-mail: jinoo@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

과여부를 판단할 수 있도록 추진해야 할 것으로 판단된다.

이를 위해 본 논문에서는 토양강도에 가장 영향을 많이 미치는 함수비를 비접촉식으로 측정하는 방법에 대해 연구하였다.

토양함수비를 측정하는 방법^[1]으로 토양샘플을 채취하여 실험실에서 측정하는 방법과 현장에서 사람이 직접 장비를 작동시켜 측정하는 방법이 있으며, 본 논문에서는 주행 중에 토양함수비를 측정할 수 있는 방법으로 토양과 일정거리를 두고 레이저를 조사한 후 함수비에 따른 토양의 열전달 특성을 이용하여 토양함수비를 예측하는 방법을 제안하였다. 먼저 3종의 토양^[2]에 대하여 실험실에서 레이저 조사 시 함수비에 따른 열전달 실험을 수행하였고, 토양모델을 만들어 시뮬레이션을 수행하여 획득한 결과와 실험결과를 비교 분석하였다.

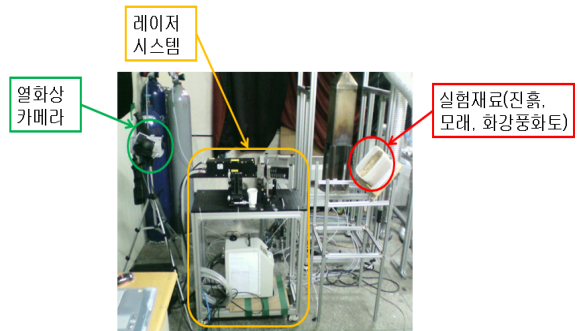


Fig. 1. Experimental devices

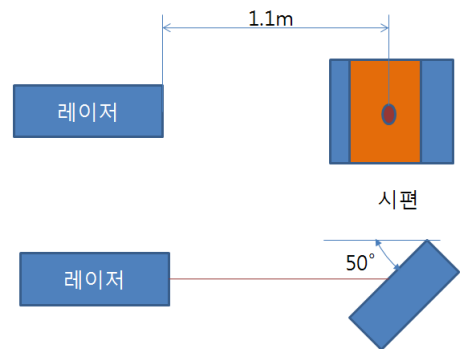


Fig. 2. Laser irradiation

2. 토양 열전달 분석

2.1 토양 열전달 실험

본 실험에 사용된 토양은 국내에서 가장 많이 분포된 화강풍화토(Clayey sand with gravel)와 연약지의 대표적인 토양인 진흙(Clayey sand) 및 모래(Poorly-graded sand)이며, 레이저는 출력이 42 mJ(Table 1)이고 토양 온도 측정은 열상카메라(측정정확도 : ± 2 %)를 이용하였다.

Table 1. Specification of laser

출력	분포	빔의 크기/모양
42 mJ	균일분포	직경 5.779 mm/원형

실험장치는 열화상카메라, 레이저시스템 등으로 구성되며(Fig. 1) 실험방법은 토양을 채운 박스(장×폭×고, 200×200×100 mm)를 50° 기울였으며, 1.1 m 거리에 레이저를 설치하였다(Fig. 2). 토양온도 측정은 레이저 조사 전에 측정하고, 그 후 레이저를 10초간 조사한 후 조사된 부위의 토양 온도를 측정하였다. 실험중 주위 온도는 20 \pm 2 °C를 유지하였으며, 토양 함수비는 0~40%까지 변화시키면서 실시하였다.

2.1.1 토양분류

실험에 사용된 토양에 대하여 미육군 공병단에서 개발한 통일분류법을 이용하여 분류한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Soil type

토양종류	통일분류법
화강풍화토	Clayey sand with gravel
진 흙	Clayey sand
모래	Poorly-graded sand

2.1.2 실험결과 및 고찰

화강풍화토(Clayey sand with gravel)에 대하여 함수비 조건은 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %로 설정하였으며, 각 조건별 레이저조사는 9회 실시하였고, 열화상카메라로 레이저 조사 전·후의 토양시편 중심부의 온도를 측정하였으며, 온도 분석은 조사 전·후의 온도 변화값에 대하여 분석하였다.

실험결과 함수비 0 %에서 온도변화가 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 토양 입자간 연결된 부분이 균일하지 않으며 또한 공기로 채워져 있어 열전도율이 일정하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 레이저가 조사된 부위의 토양 온도변화는 함수비가 클수록 작아지는 경향을 보이며, 이는 토양 입자 간에 채워진 수분의 양이 늘어남에 따라 열전도도 커지기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 3).

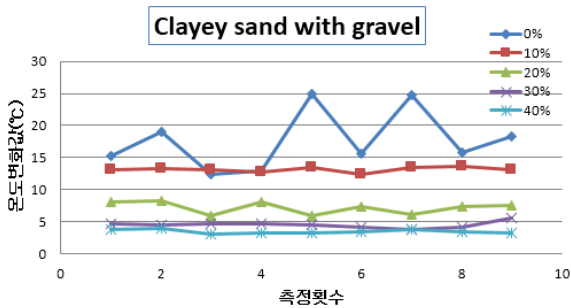


Fig. 3. Test results of clayey sand with gravel

진흙에 대한 함수비 조건은 0 %, 20 %, 30 %, 40 %로 설정하였으며, 각 조건별 실험은 9회 실시하였다.

진흙의 경우도 함수비 0 %에서 온도변화분포가 불규칙하게 나타나고 있으며, 20 %의 경우 7, 8회 측정시 함수비 30 %에서 더 큰 온도변화가 측정되었으나 전체적으로 화강풍화토와 마찬가지로 함수비가 높을수록 온도변화가 작아지는 경향을 보임을 알 수 있다(Fig. 4).

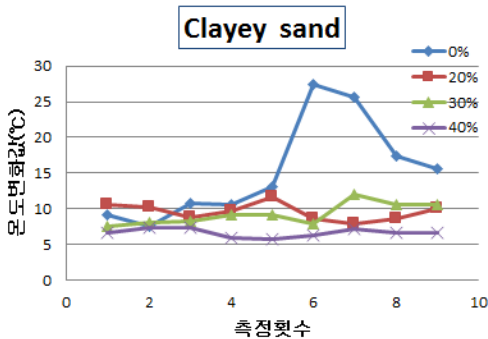


Fig. 4. Test results of clayey sand

모래에 대한 함수비 조건은 0 %, 10 %, 20 %로 설정하였으며, 각 조건별 레이저 조사는 9회 실시하였다.

모래의 경우도 함수비 0 %에서 온도변화가 불규칙하게 나타나고 있으며, 10 %, 20 %의 경우에는 온도변화가 비교적 일정하게 나타나고 있고 함수비가 높을수록 온도변화가 작아지는 경향을 보이고 있다(Fig. 5).

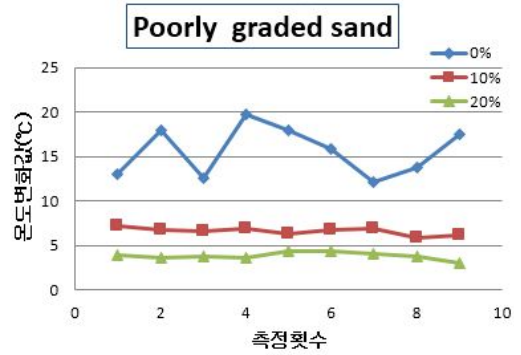


Fig. 5. Test results of poorly graded sand

각 토양별 평균 온도변화(Table 3, Fig. 6)는 화강풍화토의 경우 함수비 20 %까지 비교적 큰 폭으로 온도가 떨어지고, 20 % 이상의 함수비에서는 온도 변화가 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이는 함수비가 일정수준 이상되면 토양 입자간 연결에 의한 열전도 특성 차이가 작게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Table 3. Variation of temperature(°C) at water contents

함수비	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %
화강풍화토	17.6	13.2	7.2	4.5	3.5
진 흙	15.2	-	9.5	9.3	6.6
모 래	15.6	6.6	3.8	-	-

진흙의 경우도 화강풍화토와 유사하게 0 %에서 20 %로 변화시 온도변화가 비교적 크게 나타나고 있으며, 20 %에서 30 % 및 40 %로 변화시 온도 변화가 적게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

모래의 경우 10 %까지 온도 변화가 화강 풍화토와 마찬가지로 비교적 크게 나타나고 있다. 20 %에서는 화강풍화토와 다르게 온도변화가 작게 나타나고 있다. 또한 함수비 0 %의 경우 온도변화 평균이 비교적 비슷하게 나타나고 있으며, 모래의 경우 함수비 10 %에서 온도변화 평균이 화강풍화토 20 %, 진흙 40 %에서의 값과 유사하게 나타나고 있고 모래 함수비 20 %에

서 온도변화는 화강풍화토 40 %와 유사하게 나타나고 있다.

이는 모래의 경우 입자크기가 화강풍화토 보다 큰 특성 때문인 것으로 추정된다. 함수비 20 %에서 진흙, 화강풍화토, 모래 순으로 온도변화가 작게 나타나고 있는 것을 볼 수 있으며 이 또한 토양 입자크기와 연관이 있을 것으로 판단된다. 또한 30 %, 40 %에서도 마찬가지로 진흙, 화강풍화토 순으로 온도변화가 작게 나타나고 있다.

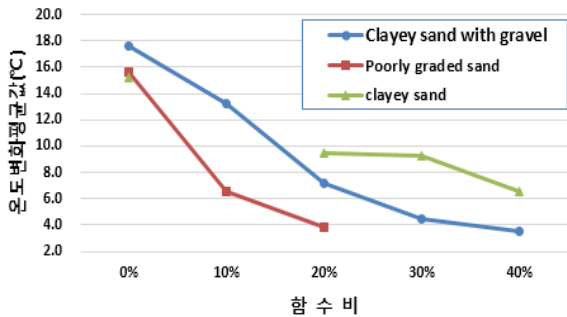


Fig. 6. Variation of temperature at water contents

2.2 토양 열전달 해석

토양함수비 Simulation 예측을 위해서는 토양의 Thermal conductivity(열전도율)이 필요하며^[3,4], 본 연구에 사용한 토양의 thermal conductivity(λ)는 Johansen (1975)^[6]이 제안하고(식 1) Sen Lu, Yuanshi Gong, Robert Horton 등이 수정한 식 (2)~(5)^[5]을 적용하였다. 모델링(Fig. 7) 및 열전달 해석은 ANSYS사의 CFX를 사용하였다(Fig. 8).

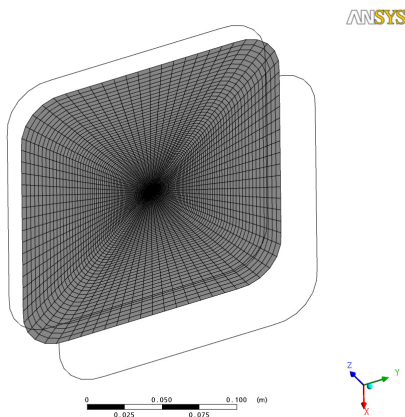


Fig. 7. Grid model

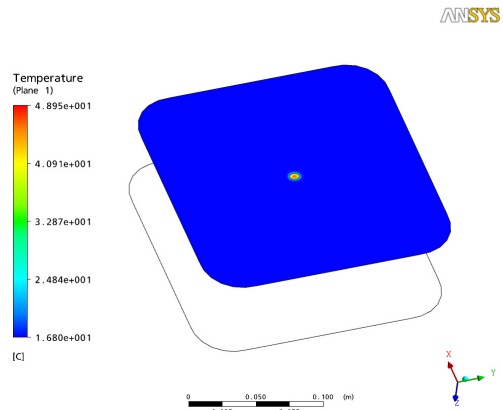


Fig. 8. Simulation result

또한 열전달 해석에 사용된 토양은 화강풍화토와 모래이며 물성치는 Table 4와 같다. 진흙은 토양 관련 자료를 확보하지 못해 분석에 사용하지 않았다.

Table 4. Properties of soil

토양종류	Dry unit weight (tf/m ³)	Specific gravity of soil	Porosity (n)	Saturated water content (θ _s , %)
화강풍화토	1.44	2.65	0.4595	100.00
모래	1.34	2.66	0.4949	57.86

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry})Ke + \lambda_{dry} \quad (1)$$

식 (1)에서

$$Ke = \exp\{\alpha [1 - Sr^{(\alpha-1.33)}]\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{sat} &= \lambda_s^{1-n} \lambda_w^n \\ &= (\lambda_q^q \lambda_o^{1-q})^{1-n} \lambda_w^n \\ &= (7.7^q \lambda_o^{1-q})^{1-n} \times 0.594 \end{aligned} \quad (3)$$

또한 석영의 thermal conductivity와 water의 thermal conductivity는 각각 7.7 Wm⁻¹K⁻¹와 0.594 Wm⁻¹K⁻¹^[5]이다.

$$\lambda_{dry} = -an + b = -0.56n + 0.51 \quad (4)$$

여기서 a, b 값은 본 연구에서 사용된 토양의 Porosity(n) 값이 $0.2 < n < 0.6$ (Table 4)이므로 각각 0.56, 0.51이 된다⁵⁾.

식 (2)~(4)를 식 (1)에 대입한 thermal conductivity는

$$\lambda = \left\{ \left[(7.7^q \times \lambda_o^{1-q})^{1-n} \times 0.594 \right] - (-0.56n + 0.51) \right\} \times \exp\left\{ \alpha [1 - Sr^{(\alpha-1.33)}] \right\} + (-0.56n + 0.51) \quad (5)$$

λ_{dry} : thermal conductivity of dry

λ_{sat} : thermal conductivity of saturated

K_e = Normalized thermal conductivity

q : 석영함유량(조립토(모래) : 0.3)⁷⁾

α : soil texture dependent parameter(0.96 : 조립토⁵⁾)

$Sr = \theta/\theta_s$ (θ : water content,

θ_s : saturated water content)

n : porosity

λ_o : thermal conductivity of other minerals($2.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)⁶⁾

위 식 (5)를 이용한 토양 열전달 해석결과는 다음과 같다(Fig. 9, 10).

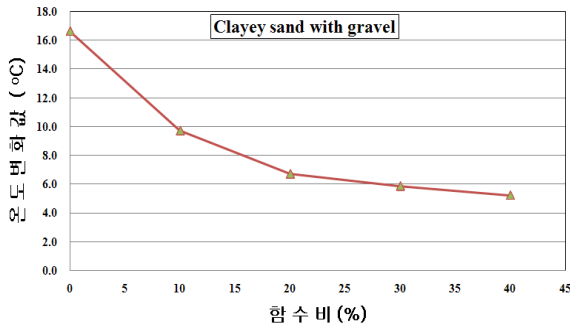


Fig. 9. Simulation result of clayey sand with gravel

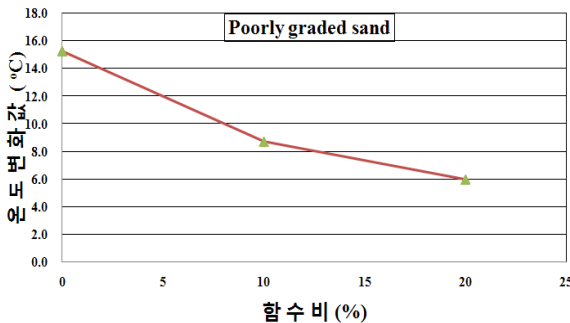


Fig. 10. Simulation result of poorly graded sand

해석 결과, 화강풍화토 및 모래의 경우도 실험과 같이 함수비가 증가할수록 온도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

2.3 실험 및 해석결과 비교

실험결과와 해석결과를 비교 검토하면 화강풍화토의 경우 전체적으로 유사한 경향을 보이고 있으며, 함수비 0 % 및 20 %에서 거의 동일한 결과를 얻었다(Fig. 11).

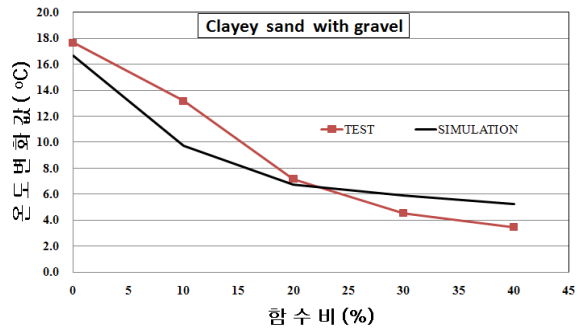


Fig. 11. Comparison of simulation and test results at clayey sand with gravel

모래의 경우 온도변화가 거의 유사한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 12).

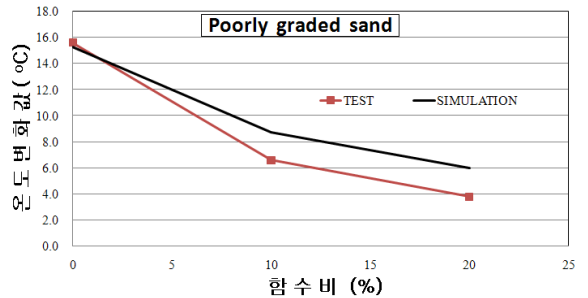


Fig. 12. Comparison of simulation and test results at poorly graded sand

3. 결론 및 고찰

이상의 검토결과, 레이저를 이용하여 실시간 비접촉으로 토양의 함수비별 온도변화 특성을 측정된 결과 함수비가 증가함에 따라 온도변화가 작아지는 특성을 나타내는 것을 알 수 있으며, 이는 토양에 포함되어

있는 수분에 의하여 열전달율이 높아지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 simulation에 의한 예측결과가 실험값과 비교적 유사한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있으므로 차후 보다 다양한 조건에서 더 많은 실험을 실시하고 정밀한 토양 물성치를 알 수 있다면 다양한 토양 조건에서 함수비 예측이 가능할 것으로 판단된다.

따라서 이러한 특성을 이용하여 주위온도 변화에 따라 토양종류별 함수비를 변화시켜가면서 온도특성 자료 및 토양강도 자료를 Data Base화하고, 향후 레이저를 이용한 비접촉 토양함수비 측정시스템의 개발 및 운용이 가능하다면, 무인차량이 연약지반으로 판단되는 지역에 진입하지 않고 실시간 비접촉으로 토양의 함수비 측정 및 토양강도를 예측하여 연약지반 통과 가능 여부를 판단할 수 있을 것이다.

References

- [1] 김용필, 정경환, 송용선, “지반공학 시험법 및 응용,” 세진사, p. 53, 1997.
- [2] 강도경, 이상호, 유용기, “기동시험장 내구시험로 특성분석 결과보고서,” pp. 11-12, 2001.
- [3] 한대석, “흙의 열전도율 산정법에 관하여,” 한국지반공학회지, 제7권, 제3호, pp. 65-72, 1991. 9.
- [4] 강화석, 이귀현, 강위수, 오재현, “적외선 조사된 토양에 대한 열전달 모델,” 한국농업기계학회지, 제21권, 제4호, pp. 137-143, 1996.
- [5] Sen Lu, Tusheng Ren, Yuanshi Gong, Robert Horton, “An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature,” Soil Science Society of America, Vol. 71, No. 1, pp. 8-14, 2007.
- [6] Johansen O., “Thermal Conductivity of Soils,” CREEL, 1997.
- [7] Peters-Lidard, C. D., E. Blackburn, X. Liang, E. F. Wood, “The Effect of Soil Thermal Conductivity Parameterization on Surface Energy Fluxes and Temperature,” Journal of Atmos. Sci., Vol. 55, pp. 1209-1224, 1998.
- [1] 김용필, 정경환, 송용선, “지반공학 시험법 및 응용,” 세진사, p. 53, 1997.