

흙의 급속 함수비 측정방법에 관한 연구

A Study on Speedy Water Content Measurement Method for Soils

박 성 식¹ Park, Sung-Sik

김 주 영² Kim, Ju-Young

이 새 벽³ Lee, Sae-Byeok

Abstract

During a construction of embankment, sub base, or retaining wall backfill, the speedy measurement of water content is necessary. In this study, a test method for field determination of water content of soil by the calcium carbide gas pressure (speedy water content measurement method) was evaluated for its reliability and accuracy. Dry oven and microwave oven methods were also used for water content measurement. In the test, weathered granite and Nakdong River sand in the site and kaolinite were used for water content measurement. The mass of 20, 22, 24, 26, 28, and 30 g of soil was respectively tested for 1, 3, and 5 min. The effect of each sample on water content was compared one another and analyzed. As the mass and testing time increased, the water content increased. The amount of soil was more important factor than testing time for the speedy water content measurement. In order to obtain similar result to that of dry oven method, 3 min of testing time with 24 g of soil was necessary for weathered granite classified as SM and 3 min with 30 g for Nakdong River sand classified as SP. For Nakdong River sand with 20-50% of kaolinite, the water content by speedy measurement increased as the clay content increased.

요 지

본 연구에서는 성토, 보조기층, 옹벽 뒤채움 토사의 함수비를 신속하게 측정할 목적으로 현장에서 주로 사용되는 칼슘 카바이드의 화학적 반응을 이용한 급속 함수비 측정방법의 정확도 및 신뢰성에 대해 연구하였다. 이를 위해 급속 함수비 측정방법에서 얻은 실험 결과와 항온 건조로 및 전자레인지리를 이용하여 얻은 결과를 비교, 분석하였다. 함수비시험에는 국내 현장에서 채취한 화강풍화토와 낙동강모래를 비롯하여 모래-카올리나이트 혼합토를 사용하였다. 먼저 급속 함수비시험에서는 20, 22, 24, 26, 28, 30g의 시료를 각각 1, 3, 5분으로 작동하여 시료 양과 작동시간에 따른 함수비의 영향을 비교, 분석하였다. 시료 양과 작동시간이 증가함에 따라 급속 함수비도 일반적으로 증가하였으며, 작동시간보다는 시료 양이 더 큰 영향을 미쳤다. 흙의 통일분류법 상 SM으로 분류된 화강풍화토의 경우에는 24g으로 3분 측정된 급속 함수비가 항온 건조로로 구한 함수비와 가장 유사하였으며, SP로 분류된 낙동강모래의 경우에는 30g으로 3분 측정된 경우가 가장 유사하였다. 낙동강모래에 카올리나이트가 20-50% 함유된 인공 시료의 경우, 급속 함수비는 점토 함유량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

Keywords : Speedy water content measurement, Calcium carbide, Fine content, Drying oven

1 정회원, 경북대학교 공과대학 건설환경에너지공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Tel: +82-53-950-7544, Fax: +82-53-950-6564, sungpark@knu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 포스코건설 대리 (Assistant Manager, Posco E&C)

3 비회원, 경북대학교 공과대학 건설환경에너지공학부 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

흙의 함수비는 액소성한계, 단위체적중량시험, 다짐 시험과 같은 각종 토질정수 산정에 필요하며, 흙의 상태를 표시하는 간극비, 포화도, 건조밀도를 구하는데도 사용된다. 따라서 흙의 정확한 함수비 측정은 흙의 공학적 성질을 파악하는데 반드시 필요한 항목이며, 일반적으로 항온 건조로를 이용하여 실내에서 함수비(KS F 2306; ASTM D2216)를 측정하고 있다. 한편, Berney et al.(2012)은 흙의 함수비 측정방법을 네 종류(gravimetric, electrical, chemical and nuclear devices)로 분류한 다음 건조로부터 구한 함수비를 기준으로 이들 방법의 정확성이나 오차를 서로 비교, 분석하였다. 흙댐의 심벽(core), 제방, 도로 보조기층, 옹벽 뒤채움과 같은 흙 다짐작업 시 현장 흙의 함수비를 신속하게 측정해야 할 경우에 항온 건조로 사용이 어려우므로 칼슘 카바이드(calcium carbide)의 화학적 반응을 이용한 급속 함수비 측정방법(ASTM D4944)이 자주 사용되고 있다. 칼슘 카바이드가 물과 반응하면서 생성되는 가스의 압력을 이용하여 흙 속에 포함된 물의 양을 간접적으로 측정하는 원리이다. 전자레인지로 사용하여 짧은 시간 내에 흙의 함수비를 측정하는 방법(ASTM D4643)도 사용 가능하지만, 현장에 전원공급이 필요하다. 한편, 알코올 연소법이나 방사능 측정법(nuclear device)도 현장에서 사용할 수 있는 함수비 측정방법 중에 하나이다(Berney et al., 2012). 이와 같이 현장에서 신속하게 함수비를 측정할 수 있는 방법에 대한 신뢰성이나 오차와 관련된 보고서나 연구사례는 많지 않은 실정이다(Berney et al., 2012; Sotelo et al., 2014). 최근 Park et al.(2013)은 전자레인지로 사용하여 유기질 토의 함수비를 신속하게 측정한 바 있으며, 30g 정도의 흙을 사용할 경우 최소 12분 정도 작동시키면 항온 건조로부터 구한 함수비와 유사한 값을 나타내었다.

현장에서 화학적 장치에 해당하는 칼슘 카바이드를 사용한 급속 함수비 측정방법을 사용하기 위해서는 먼저 항온 건조로로 측정된 함수비와의 상관관계를 구한 다음 이를 현장에서 보정하여 사용하고 있다. 하지만, 시험에 사용하는 흙 시료의 사용량이나 세립분 함유량 그리고 시험시간에 따라 보정계수가 차이 날 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 현장에서 사용되고 있는 급속 함수비 측정방법의 정확성 및 신뢰성을 분석하기 위해 현장에서 채취한 흙을 비롯하여 모래-카올리나이트 혼합토를 대상으로 ASTM D4944에 근거하여 급속 함수비

측정시험을 실시하였다. 시험에 사용하는 흙 시료의 양과 시험시간 그리고 세립분 함유량을 변수로 사용하였으며, 급속 함수비 측정방법으로 측정된 함수비를 비교 분석하기 위해 기존 항온 건조로와 전자레인지를 이용한 함수비 측정 방법도 사용하였다.

2. 함수비 측정방법 및 실험재료

2.1 건조로를 이용한 함수비 측정방법

ASTM D2216에서는 항온 건조로를 이용한 함수비 측정방법에 대해 설명하고 있으며, 특히 섬유질이나 유기질 성분이 많은 흙의 경우에는 건조로의 표준온도인 110°C에서 특정 유기질이 분해되는 경향을 보이므로 60°C로 온도를 낮추어 측정할 것을 권장하고 있다. 노건조 시간은 일반적으로 18~24시간 정도이며, 시료 무게에 따른 저울의 최소 눈금값은 Table 1과 같다.

2.2 전자레인지를 이용한 함수비 측정방법

ASTM D4643에서는 전자레인지를 이용한 함수비 측정방법에 대해 설명하고 있으며, 700W 출력의 전자레인지 사용을 권장하고 있다. 시료 양은 Table 2에서 제시하고 있으며, 일반적으로 100g의 시료를 3분 정도 작동하도록 제시하고 있다.

2.3 급속 함수비 측정방법

본 연구에서는 급속 함수비 측정방법으로 물과 반응하는 시약으로 칼슘 카바이드를 이용하여 화학반응에

Table 1. Minimum scale for sample mass

Sample mass (g)	Minimum scale (g)
Below 10	0.001
10~100	0.01
100~1000	0.1
Over 1000	1

Table 2. Minimum scale for sample mass

Sieve retaining not more than about 10% of sample	Recommend mass of moist specimen (g)
2.0 mm (No. 10)	100~200
4.75 mm (No. 4)	300~500
19 mm	500~1000

의한 흙의 함수비를 측정하는 방법(ASTM D4944)을 사용하였다. 측정방식은 습한 토양과 특정 시약을 적절한 부피 검사 장치에 넣고 혼합될 때 발생된 기체 압력으로 함수비를 측정하는 원리이다. 원지반에서 채취한 시료를 4분법으로 나눈 다음, 이 시료를 No.4체(4.75mm)로 체가름하여 통과한 시료를 실험에 사용하였다. 칼슘 카바이드는 No.50체(0.355mm)를 전부 통과하고 No.140체(0.106mm)에 10% 이하 통과하는 것을 사용하였다.

시험장치 구성 품목은 Fig. 1과 같으며, 주요 시험과정은 다음과 같다. (i) 시료를 스푼으로 계량하여(예: 20g) 급속 함수량 시험기 안에 넣고 강철구 2개를 넣는다. (ii) 시료와 강철구가 들어 있는 시험기 내부에 칼슘 카바이드 22g을 넣는다. (iii) 시험기를 다 흔들었으면 수평한 곳에 두고 시험기 하부 게이지 다이얼 눈금의 움직임을 확인하며, 이때 게이지 다이얼 눈금이 움직인다면 다시 흔들어주어 눈금이 움직이지 않을 때까지 흔들어준다. ASTM D4944 기준에서 시료 양은 20g 이상을 요구하고

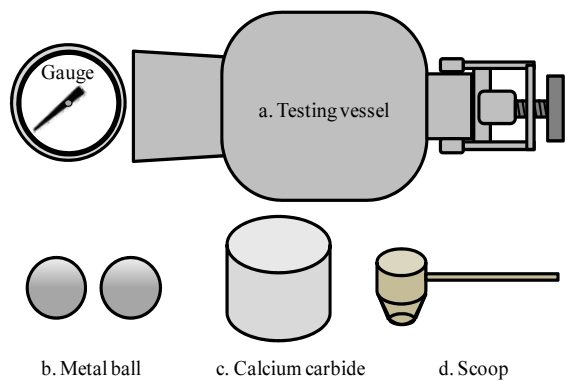


Fig. 1. Components of speedy moisture testing equipment

있으며, 시험기를 흔드는 시간(이하 ‘작동시간’이라 함)은 모래의 경우 1분 정도, 점토의 경우에는 최대 3분 정도의 시간을 제시하고 있다.

2.4 실험재료

급속 함수비 측정방법의 신뢰도를 분석하기 위해 국내 토목 현장에서 자주 사용되는 화강풍화토(weathered granite, W. Granite로 표시)와 낙동강모래(Nakdong River sand) 그리고 대표적인 점토광물인 카올리나이트(kaolinite)를 사용하였으며, 각각의 화학적 구성은 Table 3과 같다. 화강풍화토는 일반적으로 퇴메우기 및 뒤채움 시 현장 유용도로 자주 사용되며, 현장 위치, 지형, 그리고 지질 특성에 따라 광물성분이 다소 다를 수 있다. 화강풍화토는 풍화 정도에 따라 암에 가까운 흙에서부터 점성토까지 존재하며, 수분에 상당히 취약해 포화가 되면 전단강도가 현저히 저하된다. 또한, 토립자가 파쇄되어 세립화되기 쉽고, 자연 상태에서 투수성은 크지만 잘 다져진 지반에서는 불투수성에 가까워지기도 한다(Kim, 2006). 화강풍화토의 압축성은 모래와 점토 중간 정도이다.

본 연구에서 사용한 화강풍화토는 경북 김천시 남면 용전리 일대 4곳에서 표토를 제거하고 지표면 1m 아래 지점의 흙을 채취하였다. 채취한 시료를 순서대로 화강풍화토 1, 화강풍화토 2, 화강풍화토 3, 화강풍화토 4로 구분하였으며, 낙동강모래는 함수비를 달리하여 모래 1과 2로 구분하였다. 이들 흙의 물리적 특성은 Table 4와 같다. 흙의 통일분류법 상 화강풍화토는 대부분 실트질 모래인 SM으로 분류되었다. 먼저 화강풍화토 1, 2, 3 및

Table 3. Chemical composition of soils used in testing

Soil type	Component (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂
W. Granite	62.48	19.56	2.93	1.82	5.69	2.04	0.71
Nakdong River sand	78.23	11.32	4.03	2.43	1.98	1.66	0.35
Kaolinite	46.79	33.86	0.63	0.0	3.83	4.55	0.34

Table 4. Material properties of soils used in testing

	Specific gravity	Max grain size (mm)	Coeff. of uniformity	Coeff. of curvature	Plasticity	Fine content (%)	USCS
W. Granite 1	2.69	53	14.9	0.5	NP	8.2	SP-SM
W. Granite 2	2.68	90	95.3	2.6	NP	3.4	GW
W. Granite 3	2.64	4.8	8.0	2.1	NP	29.7	SM
W. Granite 4	2.66	53	28.6	2.6	NP	23.4	SM
Nakdong River sand	2.65	2	1.8	1.0	NP	0	SP

4, 그리고 모래 1과 2의 함수비를 건조로를 이용하여 측정하였으며, 측정된 함수비는 화강풍화토의 경우 각각 5.7, 6.0, 5.9, 6.1%, 모래는 각각 3.3, 3.1%이다. 화강풍화토와 모래를 각각 20, 22, 24, 26, 28, 30g씩 나누어 준비하고 칼슘 카바이드 22g을 넣고 함수비를 측정하였다. 모래-카올리나이트 혼합토 시료는 낙동강모래 20g에 카올리나이트를 모래 무게의 20%에서 최대 50%까지 혼합한 다음 작동시간에 따른 급속 함수비를 측정하였다. 칼슘 카바이드는 22g으로 동일하게 사용하였으며, 건조로로 측정한 함수비는 카올리나이트 함유량에 관계없이 5.4%로 동일하다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 급속 함수비 측정 결과

3.1.1 화강풍화토 시료의 함수비 비교

본 연구에서는 시료 양 및 작동시간에 따른 함수비 변화를 비교하였다. Fig. 2-5는 화강풍화토의 함수비 측정 결과이다. 각각의 그림에서 (a)는 작동시간(1, 3, 5min)에 따른 함수비 변화를 나타내고, (b)는 시료 양(20, 22, 24, 26, 28, 30g)에 따른 함수비 변화를 나타내고 있다.

화강풍화토의 경우, Fig. 2(a)-5(a)와 같이 시료 양에 관계없이 작동시간이 증가함에 따라 함수비는 증가하

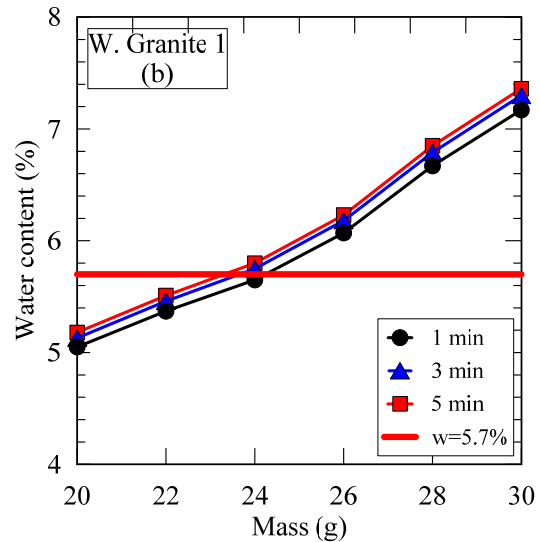
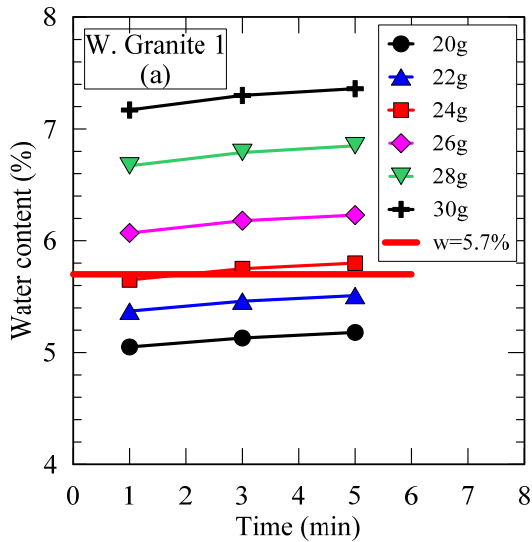


Fig. 2. Result of water content by speedy measurement for W. Granite 1

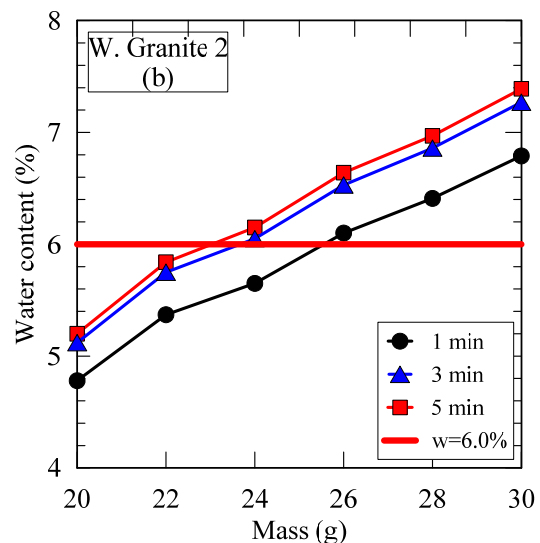
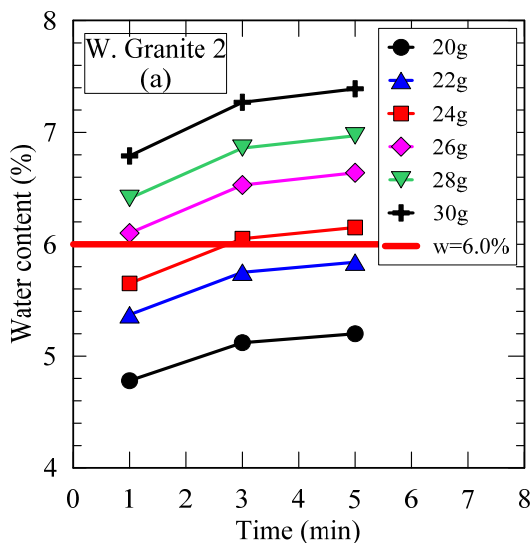


Fig. 3. Result of water content by speedy measurement for W. Granite 2

였다. 시료 양이 동일한 경우에 작동시간이 1분에서 5분으로 증가함에 따라 함수비는 0.1-0.7% 정도 증가하였으나, 전반적으로 1% 이내로 작동시간에 따른 영향은 크지 않았다. 한편, Fig. 2(b)-5(b)와 같이 작동시간이 동일한 경우에 시료 양이 증가함에 따라 함수비는 상당히 증가하였다. 일반적으로 시료 24g으로 3분 동안 시험한 경우가 건조로 시험 결과(그림에 실선으로 표시)와 가장 유사한 값을 나타내었다. 그리고, 시료 양이 24g보다 적은 경우에는 함수비를 과소평가하였으며, 특히 시료가 20g인 경우 화강풍화토 시료에 따라 함수비를 5-15% (작동시간 3분 기준) 정도 과소평가하였다. 한편 24g 보다 많을 경우에는 함수비를 과대평가하였으며, 시료가

30g인 경우 화강풍화토 시료에 따라 함수비를 13-28% (작동시간 3분 기준) 정도 과대평가하였다. Berney et al. (2012)은 급속 함수비 측정에 사용하는 흙 시료가 20g 정도로 소량이므로 시료 입경이 굵은 경우에는 일부 세립분(fine grained material)만 칼슘 카바이드와 반응하게 되므로 가스압-함수비 상관관계가 과대평가되는 경향이 있다고 보고하였다. 이와 같이, 본 연구에서 사용한 화강풍화토도 입경이 굵은 실트질 모래이므로 급속 함수비가 전반적으로 과대평가된 것으로 판단되며, 특히 흙 시료 양이 증가할수록 시료 내 세립분이 증가하면서 더욱 과대평가되는 것으로 판단된다.

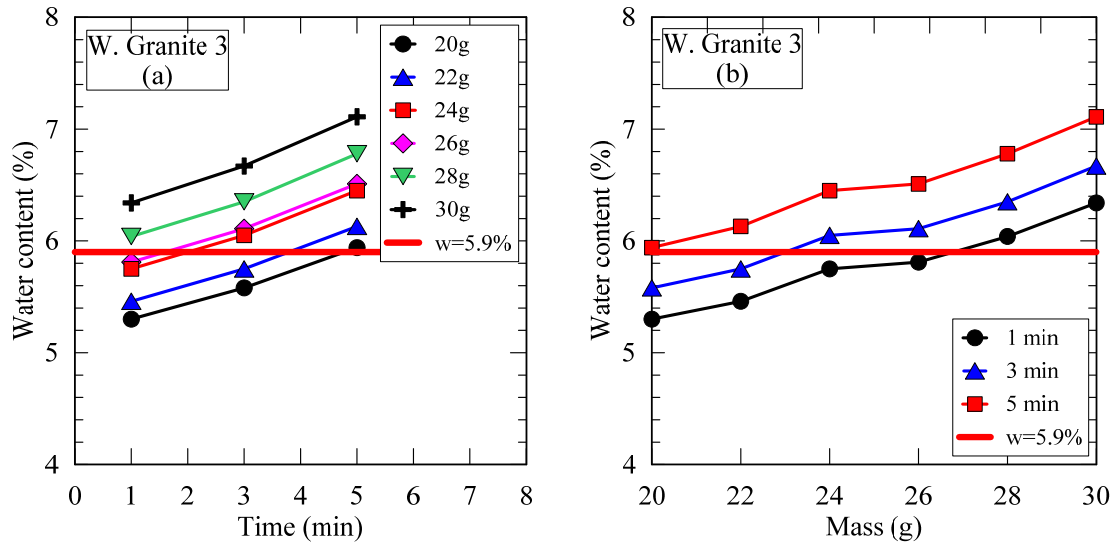


Fig. 4. Result of water content by speedy measurement for W. Granite 3

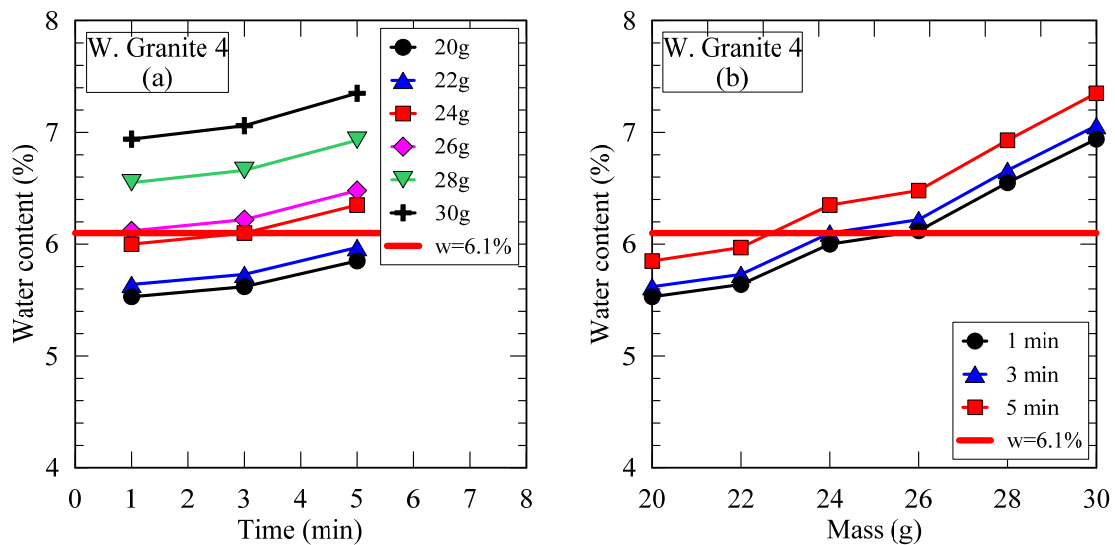


Fig. 5. Result of water content by speedy measurement for W. Granite 4

3.1.2 모래 시료의 함수비 비교

Fig. 6 및 7에 나타난 모래의 급속 함수비도 화강풍화토와 유사하게 작동시간과 시료 양이 증가함에 따라 측정된 함수비는 증가하였다. 작동시간의 증가에 따른 차이는 화강풍화토와 유사하게 1% 이내로 크게 차이하지 않았다. 시료 30g으로 3분 동안 시험한 경우가 건조로 시험 결과(그림에 실선으로 표시)와 가장 유사한 값을 나타내었다. 그리고, 시료 양이 30g보다 적을 경우에 대부분 함수비를 과소평가하였으며, 최대 45%(작동시간 3분 기준)까지 과소평가하였다. 이는 화강풍화토에 비해 모래 시료에 칼슘 카바이드와 주로 반응하는 세립분이 상대적으로 적어 가스압이 낮아 함수비를 실제보다 과소평가한 것으로 판단된다.

3.1.3 모래+카올리나이트 시료의 함수비 비교

본 연구에서는 대표적인 점토광물인 카올리나이트를 이용하여 세립분 함유량이 급속 함수비의 상관관계에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 8(a)와 같이 작동시간이 증가함에 따라 함수비도 증가하였으며, 작동시간은 3-5분 사이가 적절한 것으로 판단된다. Fig. 8(b)와 같이 세립분인 점토 함유량(Fine content)이 30% 이상 포함될 경우 함수비를 과대평가하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 얻은 결과와 유사하게 시료 양이 증가하여 함수비가 증가한 부분도 있지만, 점토와 같은 세립분의 양이 일정 이상으로 될 경우 가스압-함수비 상관관계가 과대평가되기 때문으로 판단된다.

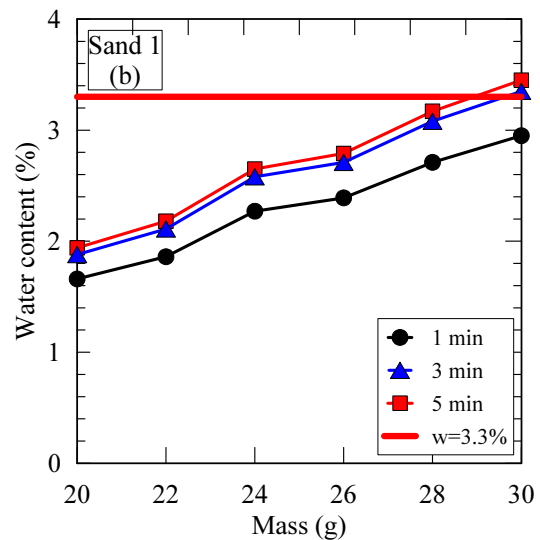
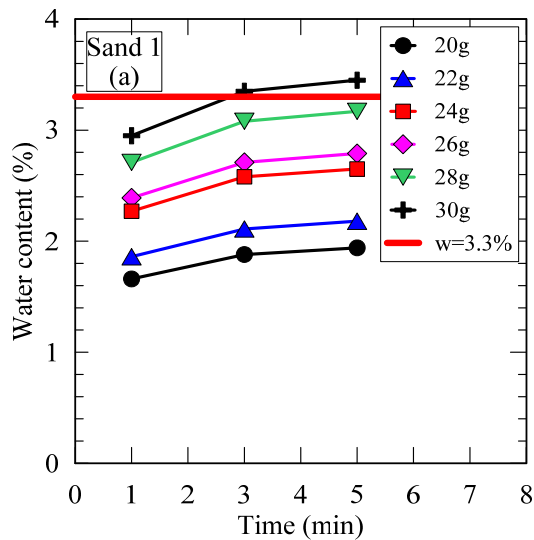


Fig. 6. Result of water content by speedy measurement for Sand 1

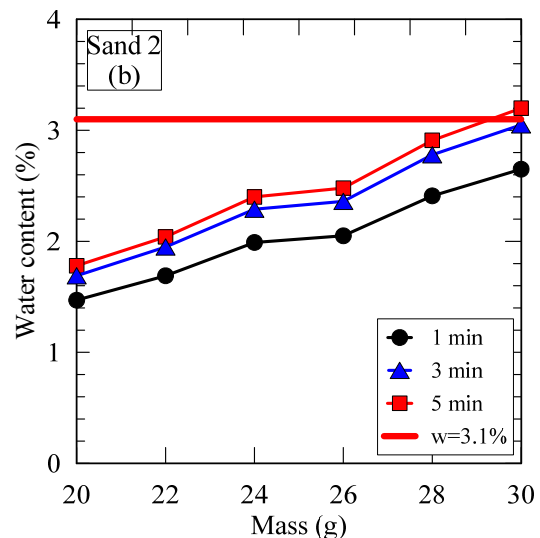
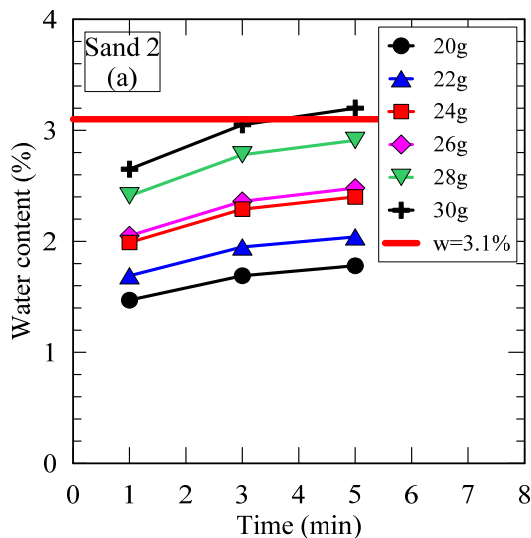


Fig. 7. Result of water content by speedy measurement for Sand 2

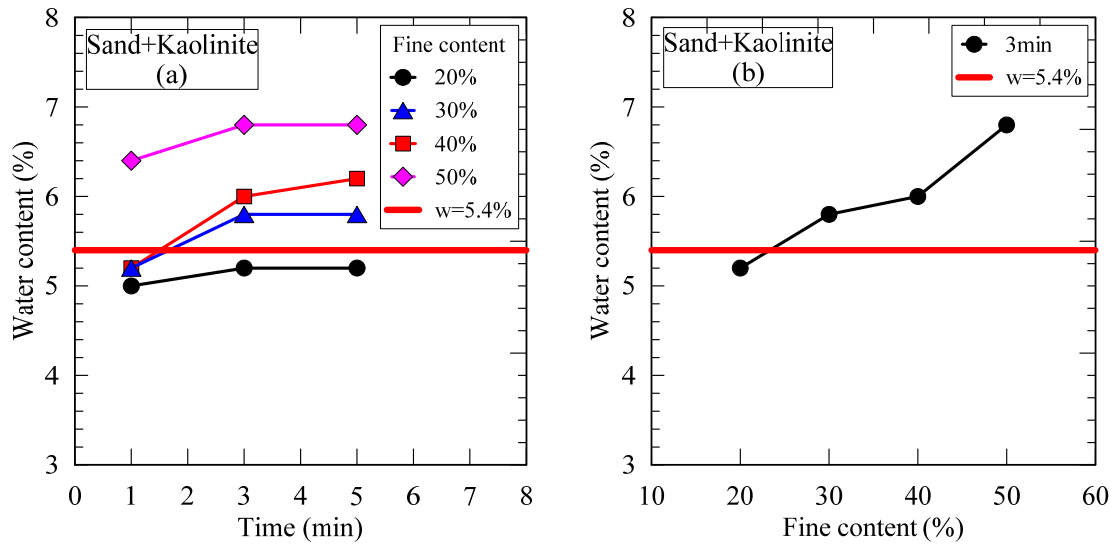


Fig. 8. Result of water content by speedy measurement for Sand+Kaolinite

3.2 전자레인지를 이용한 함수비 측정 결과

급속 함수비시험에 사용한 동일한 흙을 대상으로 전자레인지기를 이용하여 함수비를 측정하였다. Fig. 9와 10은 각각 화강풍화토와 모래 시료에 대한 대표 결과만을 나타내고 있다. 함수비는 전자레인지 작동시간이 증가함에 따라 흙의 종류에 관계없이 모두 건조로에서 얻은 값에 가깝게 증가하는 경향을 보였다. 전자레인지 작동시간이 동일한 경우 급속 함수비시험 결과와 달리 시료 무게에 따른 변화는 거의 나타나지 않았으나, 화강풍화토의 경우 무게가 증가함에 따라 함수비가 다소 감소하는 경향을 보이기도 하였다. 건조로에서 얻은 함수비와

유사한 결과를 얻기 위해서는 시료 무게와 무관하게 전자레인지 작동시간이 화강풍화토의 경우 9분, 모래는 7분 정도가 적절한 것으로 판단된다. 이것은 화강풍화토 내의 세립분의 영향으로 측정시간이 좀 더 소요되는 것으로 판단된다. 기존 연구 사례(Park et al., 2013)에서도 모래에 비해 점토의 경우 측정시간이 더 요구되는 것으로 나타났으며, 점토나 유기질토가 포함된 경우 12분(시료 30g 기준) 정도의 시간이 필요한 것으로 나타났다. Kramarenko et al.(2016)도 함수비가 40-50%인 점토의 경우 이와 유사하게 10-15분 이상의 측정시간을 제시하였다.

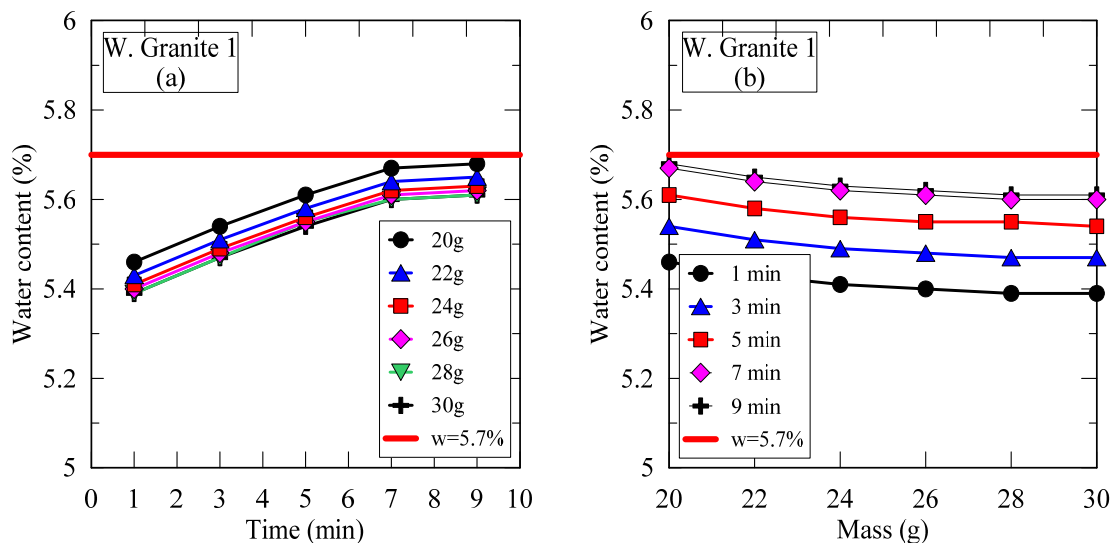


Fig. 9. Result of water content by microwave oven heating for W. Granite 1

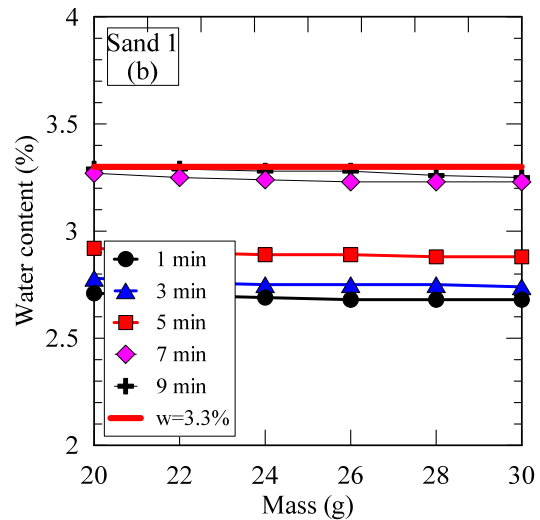
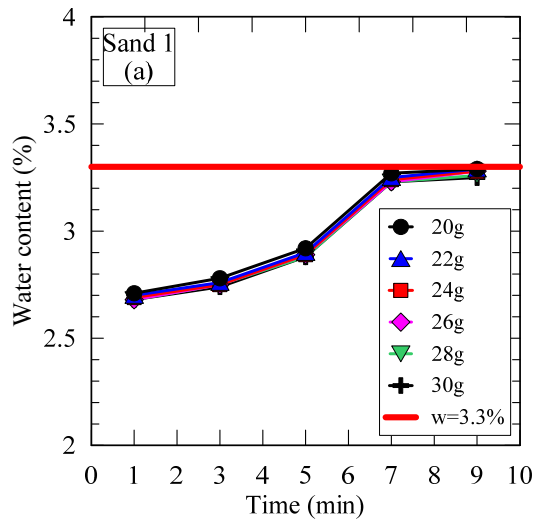


Fig. 10. Result of water content by microwave oven heating for Sand 1

3.3 급속 함수비 측정방법 검증에 관한 고찰

현장에서 급속 함수비 측정방법을 사용하기 위해서는 사전에 건조로시험(KS F 2306; ASTM D2216) 결과와 비교하는 검증 과정이 필요하다. 화강풍화토 1 시료를 24, 26, 28g 준비하고 각각의 시료에 함수비를 3, 6, 9%로 증가시키면서 급속 함수비시험과 건조로시험을 실시하여 함수비를 비교하였다. 작동시간은 3분으로 동일하게 적용하였으며, Fig. 11은 결과를 비교하고 있다. 시료 양이 24g일 때는 두 방법으로부터 구한 결과가 동일하지만, 시료 양이 증가할수록 급속 함수비 측정방법으로부터 구한 값이 더 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 현장에서 함수비를 측정할 때 가능한 한 시료 양을

검증 시와 동일하게 사용하여야 실험 오차를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, Berney et al.(2012)은 여러 종류의 함수비 측정 방법 중 급속 함수비 측정방법의 신뢰도가 가장 낮은 것으로 평가하였지만, 급속 함수비 시험기의 검증과정에서 사용한 작동시간과 시료 양을 실제 시험 시에도 동일하게 사용한다면 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 검증에 사용한 시료에 포함된 세립분을 조사 기록하고 실제 실험에서 사용된 시료에 포함된 세립분과 차이가 있을 경우 이에 대한 보정도 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 성토, 보조기층, 옹벽 뒤채움 토사의 함수비를 현장에서 신속하게 측정할 목적으로 주로 사용되는 칼슘 카바이드의 화학적 반응을 이용한 급속 함수비 측정방법의 정확도 및 신뢰성에 대해 연구하였다. 이를 위해 급속 함수비 측정방법에서 얻은 실험 결과와 향운 건조로 및 전자레인지기를 이용하여 얻은 결과를 비교, 분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

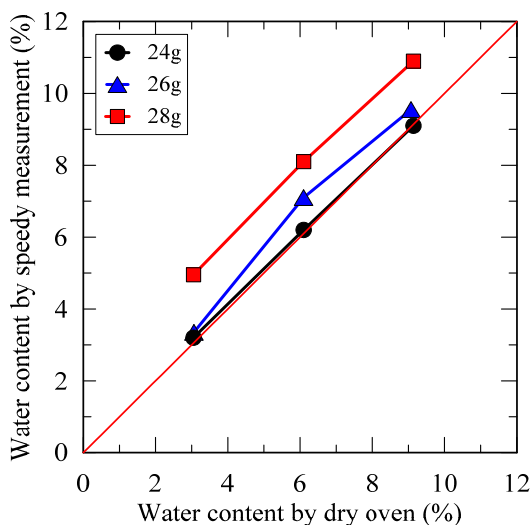


Fig. 11. Comparison of water content by different methods

- (1) SM으로 분류된 화강풍화토의 급속 함수비 측정 결과, 시료 양과 작동시간이 증가함에 따라 함수비는 모두 증가하는 경향을 보였다. 24g의 시료를 3분 동안 시험한 경우가 건조로 시험 결과와 가장 유사한 값을 나타내었다. 한편, 작동시간 3분을 기준으로 화강풍화토의 양이 24g보다 적을 경우 5-15% 과소

평가하고, 많을 경우 13-28% 정도 과대평가하는 것으로 나타났다.

- (2) SP로 분류된 낙동강모래의 급속 함수비 측정 결과, 화강풍화토와 마찬가지로 시료 양과 작동시간이 증가함에 따라 함수비는 증가하는 경향을 보였다. 30g의 시료를 3분 동안 시험한 경우 가장 유사한 값을 나타내었다. 작동시간 3분을 기준으로 모래 양이 30g보다 적을 경우 최대 45%까지 과소평가하는 것으로 나타났다.
- (3) 급속 함수비 측정에서 작동시간에 따른 차이는 1% 이내로 미미하였으나, 시료 양에 따른 차이는 최대 30% 정도로 시험 시료의 양이 더 큰 영향을 미쳤다. 따라서 현장 적용 시에는 검증 시와 동일한 양의 시료를 사용하여 오차를 줄이도록 한다.
- (4) 낙동강모래에 점토가 포함된 경우, 점토 함유량과 작동시간이 증가함에 따라 급속 함수비 측정방법으로 구한 함수비는 증가하였다. 일반적으로 시료 내 굵은 입자보다는 세립분이 먼저 칼슘 카바이드와 빠르게 반응하므로 급속 함수비 시험기의 현장 적용 시에는 세립분에 따른 보정계수의 차이를 반드시 고려해야 한다.
- (5) 전자레인지로 측정한 결과는 시료 종류에 관계없이 시료 무게에 따른 차이보다는 작동시간에 따른 차이가 크게 나타났다. 적절한 작동시간은 화강풍화토의 경우 9분, 모래의 경우 7분 정도가 소요되며, 이는 기존 연구 결과와 유사하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(14RDRP-B076268)으로 수행되었으며, 일부는 한국연구재단의 공공복지안전기술개발사업(No. 2012M3A2A1050982) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. ASTM D2216, *Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp.1135-1139.
2. ASTM D4643, *Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Microwave Oven Heating*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA.
3. ASTM D4944, *Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA.
4. Berney, E. S., Kyzar, J. D., and Oyelami, L. O. (2012), Device comparison for determining field soil moisture content, *U.S. Army Engineering Research and Development Center*, ERDC/GSL TR-11-42.
5. Kim, D. M. (2006), Engineering Characteristics of Weathered Granite Soil-Bentonite Mixtures, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.7, No.6, pp.45-56.
6. KS F 2306, *Test method for water content of Soils*, Korean Industrial Standards.
7. Park, S.-S., Choi, S.-G., and Ryu, J.-H. (2013), A study on the measurement of moisture content in the organic soils, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.10, pp.29-37.
8. Sotelo, M. J., Mazari, M., Garibay, J., and Nazarian, S. (2014), Variability of moisture content measurement devices on subgrade soils, *Geo-Congress 2014, Geo-characterization and modeling for sustainability*, pp.1425-1432.

Received : November 2nd, 2016

Revised : December 23rd, 2016

Accepted : December 30th, 2016