



## 원관형 토양샘플러를 이용한 토양물리특성 추정

### Estimation of Characteristic of the Soil Physical using the Pipe Type Soil Sampler

유지현<sup>a</sup> · 정명관<sup>b</sup> · 박승기<sup>c,†</sup>

Ryu, Ji Hyun · Jung, Myung Kwan · Park, Seung Ki

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a pipe type soil sampler that can easily collect soil cross section survey and soil samples to conduct ecological environment surveys while minimizing ecological disturbance in the area subject to soil survey.

Furthermore, this study develop the exponential type estimation specific weight formula (ESWF) that uses pipe type soil sampler to easily carry out soil cross section survey and soil sample while estimating the specific weight of the area using water content and soil sample length variation ratio (SLVRs) and to obtain apparent specific gravity, hardness, and max. porosity which are used as growth of corps and ecological environment index. The calibration results of ESWF showed a high degree of significance, with NSE for actual specific weight ( $\gamma_0$ ) and calibration estimation specific weight ( $\gamma_{ec}$ ) 0.95,  $R^2$  for 0.954, and RMSE for 0.051. The verification results of ESWF showed a high significance, with NSE for actual specific weight ( $\gamma_0$ ) and verification estimation specific weight ( $\gamma_{ev}$ ) 0.881,  $R^2$  for 0.978, and RMSE for 0.055.

**Keywords:** Pipe type soil sampler; experimental soil column; specific weight; apparent specific gravity; hardness; soil sample length variation ratio (SLVR); estimation specific weight formula (ESWF)

#### 1. 서론

토양에 대한 조사는 주로 농학적, 공학적 관점에서 수행되어 왔으나 이제 환경적 측면을 고려한 국토의 효율적 이용을 위하여 점차 그 중요성이 높아지고 있으며, 친환경 사업 결과에 따른 하천 퇴적지 등에서의 식생특성, 미소동물의 생육특성 등 생태적 특성 연구에 필수적인 인자로 토양의 생태학적 특성 및 이화학적 특성분석이 확대되고 있다 (Lee, 2004).

미래농업은 ICT기술을 활용한 스마트팜 기술을 통해 환경 정보 (온도 · 상대습도 · 광량 · 이산화탄소 · 토양 등) 및 생육 정보에 대한 정확한 데이터를 기반으로 생육 단계별 정밀한 관리와 예측 등이 가능하여 균일하고 품질 좋은 농산물을 생산하여 농업 경쟁력을 향상시킬 수 있을 것이다 (KREI, 2016). 이 때 경작지에서 스마트농업을 위한 토양정보는 토양수분함

량, 토양수분장력, 토양수분 매트릭 포텐셜, 토양의 경도, 가비중, 단위중량 등이 있으며 각각의 토양정보에 적합한 토양 센서가 사용되고 있고 이들 토양센서들의 효율적인 운영을 위해 보정과 검증을 위한 토양시료 채취가 필수적이다.

토양시료는 토양의 물리적, 화학적, 생물학적, 방사성적 특성을 정량하기 위해 채취한다. 토양특성이 파악되어야 할 때 마다 전체를 실험하는 것은 일반적으로 불가능하기 때문에 가능한 대표성이 높은 샘플의 채취가 필요하다. 토양 시료채취의 목적은 일반적인 토양의 질 시험을 위한 시료 채취, 토양도 작성을 위한 특별한 목적의 시료 채취, 법과 규정적 행위를 지원하기 위한 시료 채취, 유해성이나 유해성 평가의 일부로서 시료 채취 등으로 구분된다(KSISO 10381-1:2009).

현재, 토양 샘플러는 다양한 토양조사의 목적에 적용할 수 있도록 개발되었으며 크게 불교란 샘플러, 교란 샘플러로 구분된다. 불교란 샘플러는 피스톤 상태에 따라 얇은관 샘플러, 이중관식 샘플러 및 호일식 샘플러로 구분되고 대구경 불교란 샘플러에는 쉘브록샘플러, 라발샘플러, NGI샘플러 등이 있으며 모래채취샘플러, 블록샘플러, 코아샘플러 등의 특수 불교란 샘플러가 있다. 교란시료와 암척코아 샘플러에는 스프릿배럴, 오거볼링, 싱글 코아 배럴, 더블 코아 배럴, 트리플 코아 배럴 등이 있다 (Ryu, 2009). 그러나 기존의 토양샘플러는 토양조사를 위한 시료채취라는 단일 목적으로 사용되고 있으며 시료채취 과정에서 토양의 물리적 특성을 직 · 간접적으로 파악하는 연구는 전무한 실정이다.

<sup>a</sup> Staff, Hwaseong · Suwon District Office, Korea Rural Community Corporation

<sup>b</sup> Ph.D. Student, Department of Agricultural Engineering, Kongju National University

<sup>c</sup> Professor, Department of Regional Construction Engineering, Kongju National University

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-41-330-1263, Fax: +82-41-330-1269

E-mail: [skpark@kongju.ac.kr](mailto:skpark@kongju.ac.kr)

Received: October 15, 2019

Revised: December 23, 2019

Accepted: December 26, 2019

Lee (2004)는 토양환경조사로 얻어지는 자료의 질적 수준은 실험실에서의 분석과정에서 결정되기 보다는 현장에서의 시료 채취과정에서 더 큰 영향을 받게 된다고 평가하였다. Kim et al. (2006)은 토양시료 채취의 주의사항으로 토양자체의 불균질성을 고려하여 특정지점에 치우치지 않게 할 것을 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 토양조사 대상지의 생태적 교란을 최소화하면서 토양단면조사와 토양시료를 손쉽게 채취하여 생태환경조사에 적용할 수 있는 할 수 있는 원관형 토양 샘플러를 개발하였고, 다짐정도와 함수비를 다르게 조성한 토양 시험체에서 원관형 토양 샘플러로 직접 토양시료를 채취하기 위한 관입시험을 실시하였으며, 원관형 토양 샘플러의 토양 샘플 길이 변화율과 토양의 물리적 특성인자와의 상관관계를 구명하여 토양의 물리적 특성값을 유도할 수 있는 추정식을 개발하고 적용성을 검증하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 원관형 토양 샘플러 제작

원관형 토양 샘플러는 Fig. 1과 같이 길이 540 mm, 내경 30 mm, 외경 31.4 mm인 스테인레스 강관 파이프로 제작하였다. 원관형 토양 샘플러의 선단부는 20 mm, 중앙부는 10 mm, 손잡이는 110 mm이며 선단부와 중앙부 및 중앙부와 손잡이부의 사이는 파이프의 반을 제거하여 토양단면을 관찰할 수 있도록 하였고 선단부는 경사각을 두어 토양 샘플 채취시 교란을 최소화하였다. 원관형 토양 샘플러의 면적비는 9.6%로 교란되지 않은 시료를 채취하기 위한 면적비인 10% 이하를 만족하였다 (Ryu, 2009).

### 2. 토양 시험체

#### 가. 거푸집 제작

토양 시험체의 거푸집은 다짐과 고하중 매달림 저울로 중량 측정시 외형 및 다진 토양이 흐트러지지 않도록 보강한 합판으로 제작하여 사용하였다. 토양 시험체 거푸집의 규격

은 가로, 세로 및 깊이가 각각 415 mm, 500 mm, 500 mm 이며 내용적은 0.1037 m<sup>3</sup>, 무게는 16.6 kg이다 (Ryu, 2009).

#### 나. 시험토

시험토는 대전광역시 유성구 원촌동 갑천 좌안 저수로 호안 공위에 퇴적된 토양을 채취하여 사용하였다. 시험토는 실험실로 운반한 후 그늘에서 건조하였으며 흙의 입도 시험 방법 (KSF2302:2017)에 따라 입도시험을 실시하였다 (Ryu, 2009).

#### 다. 토양 시험체의 형성

토양 시험체는 KSF2312 규정의 건조법에 준하여 시험토가 동일 함수비 상태에서 무다짐, 40회 다짐 및 80회 다짐으로 구분하여 형성하였다. 세립토의 함수량-관입저항시험방법 (KSF2333:2015)에서 동일 함수비 조건하에서 함수비-관입저항곡선은 3점 이상을 연결하여야 한다고 규정되어 있다.

한 차례 시험이 끝난 후 시험토에 물을 첨가하여 함수비를 증가시킨 후 토양 시험체를 다시 형성하였다. 토양 시험체의 다짐은 목재 다짐봉 (40 mm× 40 mm× 800 mm, 630 g)을 이용하였으며 다짐층수는 2층으로 하였고 소정의 다짐이 끝난 후 표면을 평탄하게 정리하였다.

## 3. 실험방법

#### 가. 토양 시험체의 단위중량 산정

토양 시험체의 중량은 천장 크레인에 설치한 고하중 매달림 저울 (Max. 500 kg, Min. 0.2 kg)로 측정하였다. 단위중량은 거푸집 중량을 제외한 순수 시험토의 중량을 거푸집의 내용적 (0.1037 m<sup>3</sup>)으로 나누어 산정하였다.

#### 나. 토양 시험체의 경도측정

토양 시험체의 경도측정은 토양 시험체의 중앙부에서 야마나카 (山中)경도계를 이용하여 5회 이상 측정하고 그 평균값을 취하였으며, 식 (1)을 이용하여 경도를 환산하였다 (RDA, NAST, 2000).

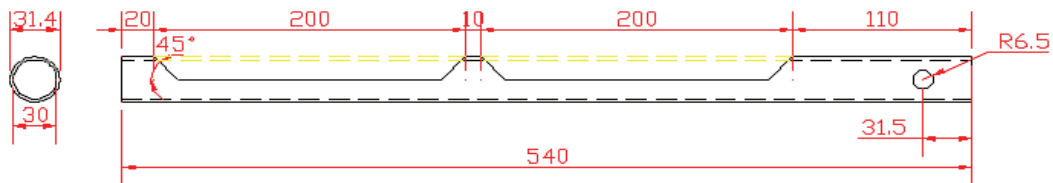


Fig. 1 A design drawing of pipe type soil sampler

$$R = \frac{100 \times x_h}{0.795 \times (40 - x_h)^2} \quad (1)$$

여기서  $R$ 은 경도 ( $kg/cm^2$ ),  $x_h$ 는 Cone이 후진한 길이 (mm) 이다.

다. 원관형 토양 샘플러의 관입시험

원관형 토양 샘플러의 관입시험은 토양 시험체의 표면을 1/2로 구획한 후 토양의질-시료채취-제1부:시료 채취 프로그램에 관한 지침 (KSIISO10381-1:2009)을 준용하여 “W” 형태로 5회 이상 관입시험을 실시하여 평균값을 취하였다. 원관형 토양 샘플러의 관입은 세립토의 함수량-관입저항시험방법 (KSF2333:2015)을 준용하여 Fig. 2와 같이 토양 시험체 표면에 수직방향을 유지하면서 200 mm를 약 20초 동안 일정한 속도로 관입하였다 (Ryu, 2009).

원관형 토양 샘플러의 관입이 종료된 후 원관내 깊이를 측정하였다. 토양 샘플 길이 변화량은 식 (2)로 구하였으며 토양 샘플 길이 변화율은 식 (3)으로 구하였다.

$$SLV = 200 - (540 - L_{pi}) \quad (2)$$

$$SLVR = \frac{SLV}{200} \times 100 \quad (3)$$

여기서  $SLV$ 는 토양샘플길이 변화량 (mm),  $L_{pi}$ 는 원관형 토양 샘플러내 깊이 (mm),  $SLVR$ 은 토양 샘플길이 변화율 ( $SLVR$ : Soil sample Length Variation Ratio) (%) 이다.

라. 토양 시험체의 불교란시료 채취 및 함수비 측정

토양 시험체의 함수비, 가비중 및 최대 공극율을 구하기 위하여 불교란 시료를 채취하였다. 불교란시료 채취는 ASTM (2006)에서 불교란시료 채취방법으로 제시한 Hand Operated Ring-Lined Barrel Sampler를 이용하였고 토양 시험체 중앙부에서 3회 실시하여 평균값을 취하였으며, 사용된 불교란시료 Can용량은 100  $cm^3$  이다.

함수비는 흙의 함수비 시험 방법 (KSF2306:2015)에 의거하여 측정하였으며 식 (4)를 이용하여 함수비를 산출한다. 가비중 ( $G_a$ )은 식 (5)와 같이 불교란시료 Can으로 채취한 시험토의 건조중량을 불교란시료 Can용량으로 나누어 구한다. 최대 공극율은 함수비 측정을 위해 노건조한 불교란 시료를 수중에서 48시간 완전히 포화시킨 포화중량을 측정하여 식 (6)과 같이 구한다 (Ryu, 2009).

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 \quad (4)$$

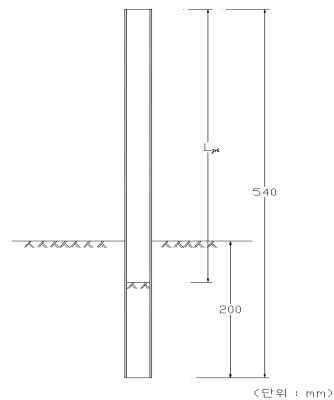
$$G_a = \frac{m_b - m_c}{100} \quad (5)$$

$$e_{max} = (m_{sat} - m_a) \times 100 \quad (6)$$

여기서  $w$ 는 함수비 (%),  $m_a$ 는 시료와 용기의 질량 (g),  $m_b$ 는 노건조 시료와 용기의 질량 (g),  $m_c$ 는 용기의 질량 (g),  $G_a$ 는 가비중 ( $gf/cm^3$ ),  $e_{max}$ 는 최대공극율 (%),  $m_{sat}$ 는 포화시료와 용기의 질량 (g) 이다.



(a) Experiment photo



(b) Measurement value specification

Fig. 2 Photo of penetration test of pipe type soil sampler

#### 4. 원관형 토양 샘플러 측정값의 일반식 유도

##### 가. 토양시험체 측정값들의 상관관계 분석

토양 시험체 측정값의 통계분석은 토양 시험체의 단위중량, 경도, 가비중 등 상호 토양 물리성 인자와의 상관관계 분석과 토양 시험체에서 원관형 토양 샘플러로 측정된 토양 샘플 길이 변화율 (SLVR)과 단위중량, 경도, 가비중 등 토양 물리성 인자의 상관관계분석 및 유의성 검증을 실시한다.

##### 나. 다짐정도와 함수비 변화에 따른 토양시험체의 특성변화

토양시험체의 다짐정도와 함수비 변화에 따른 특성변화는 토양시험체 형성에서 제시한 것과 같이 다짐횟수와 함수비를 변화시키면서 구한 각각의 단위중량을 종속변수로 하고 SLVR를 독립변수로 하여 식 (7)과 같이 상관관계식을 유도한다.

$$\gamma_{oi} = f(SLVR_i) \quad (7)$$

여기서  $\gamma_{oi}$ 는  $i$ 번째 토양시험체의 단위중량 (gf/cm<sup>3</sup>),  $SLVR_i$ 는  $i$ 번째 토양시험체의 원관형 토양 샘플러로 측정된 토양 샘플 길이 변화율 (%)이다.

##### 다. 원관형 토양샘플러의 관계식 유도

원관형 토양샘플러의 관계식은 식 (7)으로 구한 토양시험체의 단위중량과 SLVR의 상관관계식의 상수 (a)와 계수 (b)를 함수비를 독립변수로 하는 식 (8)과 같이 유도한다.

$$a, b = f(W_c) \quad (8)$$

여기서 a는 원관형 토양샘플러의 관계식의 상수, b는 원관형 토양샘플러의 관계식의 계수,  $W_c$ 는 함수비 (%)이다.

#### 5. 원관형 토양샘플러 측정값을 이용한 단위중량 추정

원관형 토양샘플러상수의 관계식 유도에 사용된 측정값을 사용하여 단위중량추정식 (ESWF : Estimation Specific Weight Formula)에 대한 보정을 실시하고 원관형 토양샘플러상수의 관계식 유도과정에서 유보하였던 토양시험체 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율의 실험자료를 활용하여 로 단위중량추정식 (ESWF)의 검증을 실시한다.

단위중량추정식 (ESWF)의 보정과 검증은 식 (9)~식 (11)과 같이 토양시험체의 단위중량과 단위중량추정식으로 구한 추정단위중량을 대상으로 평균제곱근오차 (RMSE), Nash-Stucliff Efficiency (NSE), 결정계수 (Coefficient of Determination; R<sup>2</sup>)를 구하여 단위중량추정식의 적용성을 검증한다 (Kang and Park, 2003; Park and Kwon, 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\gamma_{oi} - \gamma_{ei})^2} \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_{oi} - \gamma_{ei})^2}{\sum_{i=1}^n (\gamma_{oi} - \bar{\gamma}_o)^2} \quad (10)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_{oi} - \bar{\gamma}_o)(\gamma_{ei} - \bar{\gamma}_e)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\gamma_{oi} - \bar{\gamma}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\gamma_{ei} - \bar{\gamma}_e)^2}} \right]^2 \quad (11)$$

여기서, RMSE는 Root Mean Square Error (gf/cm<sup>3</sup>),  $\gamma_{oi}$ 는 토양시험체의 단위중량 (gf/cm<sup>3</sup>)  $\gamma_{ei}$ 는 단위중량추정식으로 구한 단위중량 (gf/cm<sup>3</sup>), n은 자료수,  $\bar{\gamma}_o$ 는 토양시험체의 단위중량의 평균 (gf/cm<sup>3</sup>),  $\bar{\gamma}_e$ 는 단위중량추정식으로 구한 단위중량의 평균

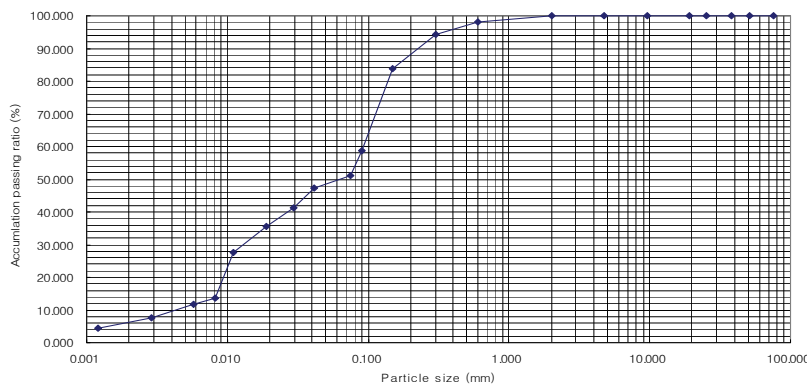


Fig. 3 Grain size accumulation curve of experimental soil

( $gf/cm^3$ )이다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 시험토의 특성

본 연구에 사용한 토양 시험체 시험토의 입도분포특성은 Fig. 3과 같이 모래, 미사 및 점토의 함량은 각각 50.8%, 43.0%, 6.2%로 삼각좌표 분류법에 의하면 사질로미로 분류되었다 (Chang et al., 2009).  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  및  $D_{60}$ 은 각각 0.0043 mm, 0.014 mm, 0.992 mm로 균등계수 ( $C_u$ )는 21.4, 곡률계수 ( $C_c$ )는 0.5이다 (Ryu, 2009).

#### 2. 토양 시험체의 실험결과

토양 시험체의 단위중량, 경도, 토양 샘플 길이 변화율, 함수비, 가비중 및 최대공극율은 Table 1과 같다. 토양 시험체

단위중량의 최대값은  $1.672 gf/cm^3$ , 최소값은  $0.891 gf/cm^3$ 이다. 경도의 평균 최대값은 16.6 mm, 평균 최소값은 0.2 mm, 식 (1)을 이용하여 구한 압력단위 경도값은 각각  $3.81 kgf/cm^2$ ,  $0.02 kgf/cm^2$ 이고 평균 표준편차는 0.81이다. 토양 샘플 길이 변화율은 식 (2)를 이용하여 구하였으며 평균 최대값은 86 mm, 평균 최소값은 11 mm 이고 평균 표준편차는 2.80이다. 토양 샘플 길이 변화율은 식 (3)을 이용하여 구하였으며 최대값은 42.8%, 최소값은 5.5% 이다. 함수비는 풍건시킨 시험토를 시험 진행상황에 따라 물을 첨가하여 조절하였으며 식 (4)를 이용하여 구하였고, 최대값은 34.0%, 최소값은 11.1% 이다. 가비중은 식 (5)를 이용하여 구하였으며 최대값은  $1.279 gf/cm^3$ , 최소값은  $0.848 gf/cm^3$  이다. 최대공극율은 식 (6)을 이용하여 구하였으며 최대값은 60.6%, 최소값은 44.3% 이다 (Ryu, 2009).

함수비와 다짐수에 따른 단위중량의 변화특성은 Fig. 4(a)와 같이 다짐수와 함수비가 증가할수록 단위중량이 증가하는 일반적인 특성을 잘 반영하고 있다. 함수비와 다짐수에 따른

Table 1 Result of soil testing in experimental soil column

No.	Com-paction (Times)	Specific Weight ( $gf/cm^3$ )	Hardness			Penetration			Water content (%)	Apparent specific gravity ( $gf/cm^3$ )	Max. porosity (%)
			Length (mm)		Pressure ( $kgf/cm^2$ )	SLV (mm)		SLVR (%)			
			av.	S.D.		av.	S.D.				
1	0	0.897	0.2	0.08	0.02	47	3.96	23.3	11.7	0.884	58.2
	40	1.140	9.1	0.04	1.20	17	1.64	8.7	11.2	1.070	54.9
	80	1.190	9.6	0.11	1.31	14	1.92	7.2	11.1	1.140	53.1
2	0	0.947	1.2	0.13	0.10	44	1.48	21.8	14.2	0.903	60.5
	40	1.167	12.2	1.23	1.99	19	1.10	9.7	16.7	1.058	54.5
	80	1.252	14.4	2.26	2.76	13	1.30	6.3	16.3	1.165	53.6
3	0	0.891	1.1	0.62	0.09	62	3.36	30.8	18.5	0.848	60.6
	40	1.157	9.7	1.92	1.33	24	1.48	12.2	17.7	1.000	53.5
	80	1.234	10.8	0.79	1.59	19	2.50	9.7	17.2	1.102	52.3
4	0	1.070	2.2	0.47	0.19	61	13.26	30.4	25.8	0.951	55.3
	40	1.329	11.7	1.16	1.84	19	1.26	9.4	25.2	1.165	47.6
	80	1.435	12.6	1.35	2.11	14	1.92	7.2	25.9	1.198	45.3
5	0	1.005	1.7	0.20	0.15	64	2.95	32.2	24.1	0.916	57.4
	40	1.298	13.7	0.80	2.49	20	2.05	10.1	24.2	1.125	50.9
	80	1.400	16.6	0.88	3.81	11	2.55	5.5	24.0	1.198	49.5
6	0	1.068	0.5	0.08	0.04	86	8.05	42.8	27.0	0.956	55.8
	40	1.398	15.1	1.35	3.06	20	1.10	9.8	27.9	1.208	46.0
	80	1.510	16.2	1.12	3.60	15	1.30	7.3	27.5	1.265	44.6
7	0	1.230	2.0	1.06	0.17	85	1.48	42.3	33.5	1.043	52.8
	40	1.605	9.5	0.56	1.28	26	1.87	13.0	34.0	1.279	46.5
	80	1.672	9.7	0.70	1.33	26	2.17	12.8	34.0	1.275	44.3
Max.		1.672	16.6	2.26	3.81	86	13.26	42.8	34.0	1.279	60.6
Min.		0.891	0.2	0.04	0.02	11	1.10	5.5	11.1	0.848	44.3
Av.		1.233	8.6	0.81	1.45	34	2.80	16.8	22.3	1.083	52.2

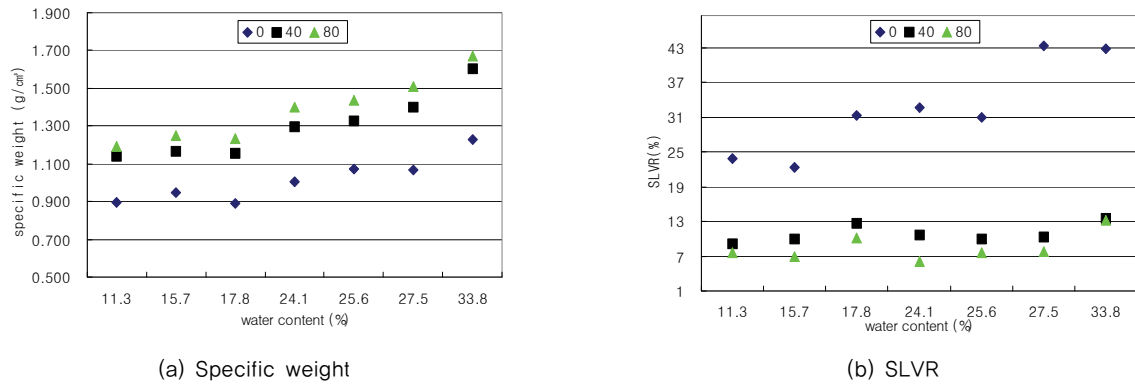


Fig. 4 Change characteristics of specific weight and SLVR according to the water content and compaction

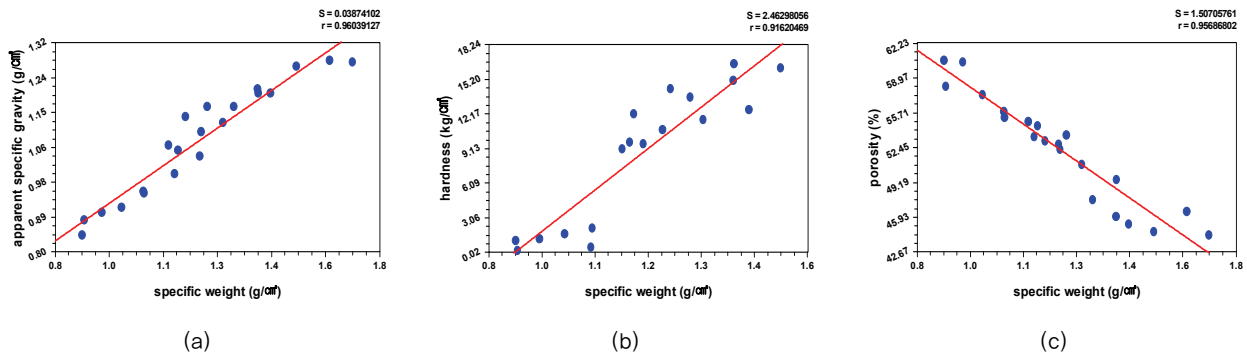


Fig. 5 Relation of specific weight and another parameter (apparent specific gravity, hardness and max. porosity)

토양 샘플깊이 변화율 (*SLVR*)의 변화특성은 Fig. 4(b)와 같이 매우 느슨한 토양시료에서 변화율이 크게 나타나는 특성을 나타내고 있다.

### 3. 측정인자들의 상관관계

#### 가. 단위중량과의 관계

식물근의 풍부도, 식물근의 굵기, 소동물 통로의 밀도 등 생태학적인 특성은 토양경도, 가비중, 단위중량 등 토양의 물리적 특성에 의하여 큰 영향을 받는다. 흙의 단위중량의 변화는 여러 가지 요소에 영향되나 그 중 중요한 것은 토질, 외부에서 가해지는 에너지의 종류와 그 대소, 흙의 함수량 등이다 (Lee, 2004; Ryu, 2009). 토양 시험체 단위중량은 동일한 다짐 조건에서 함수비가 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 보였다 (Kim et al., 2006).

토양 시험체의 단위중량 ( $\gamma_0$ )과 가비중 ( $G_a$ ) 및 단위중량과 경도 ( $H$ )와의 관계는 Fig. 5(a, b)와 같이 양의 상관관계를 보였다. 단위중량에 대한 관계식은 식 (12), 식 (13)과 같고 결정계수  $R^2$ 는 각각 0.839, 0.922를 보였다. 토양 시험체의 단위중량과 최대 공극량 ( $P_{max}$ )과의 관계는 Fig. 5(c)와 같이 음의 상

관관계를 보였고 관계식은 식 (14)와 같고 결정계수  $R^2$ 는 0.935로 고도의 유의성을 보였다 (Ryu, 2009).

$$H = -26.08 + 29.366 \times \gamma_0 \quad (R^2 = 0.839) \quad (12)$$

$$G_a = 0.349 + 0.595 \times \gamma_0 \quad (R^2 = 0.922) \quad (13)$$

$$P_{max} = 79.54 - 22.132 \times \gamma_0 \quad (R^2 = 0.935) \quad (14)$$

#### 나. 토양 샘플 길이 변화율 (*SLVR*)과의 관계

원관형 토양 샘플러로 채취한 토양 샘플 길이 변화율 (*SLVR*)과 토양 시험체의 단위중량 ( $\gamma_0$ ), 가비중 ( $G_a$ ) 및 경도 ( $H$ )와의 관계는 Fig. 6과 같이 음의 상관관계를 보였고 관계식은 식 (15)~식 (17)과 같다

토양 샘플 길이 변화율 (*SLVR*)과 토양 시험체의 단위중량 ( $\gamma_0$ ), 가비중 ( $G_a$ ) 및 경도 ( $H$ )의 결정계수  $R^2$ 는 각각 0.653, 0.780, 0.870을 보였으며 흙의 단위중량이 함수비와 다짐 정도에 따라 크게 변화하는 특성을 반영하여 상대적으로 낮은 값을 보였다 (Ryu, 2009).

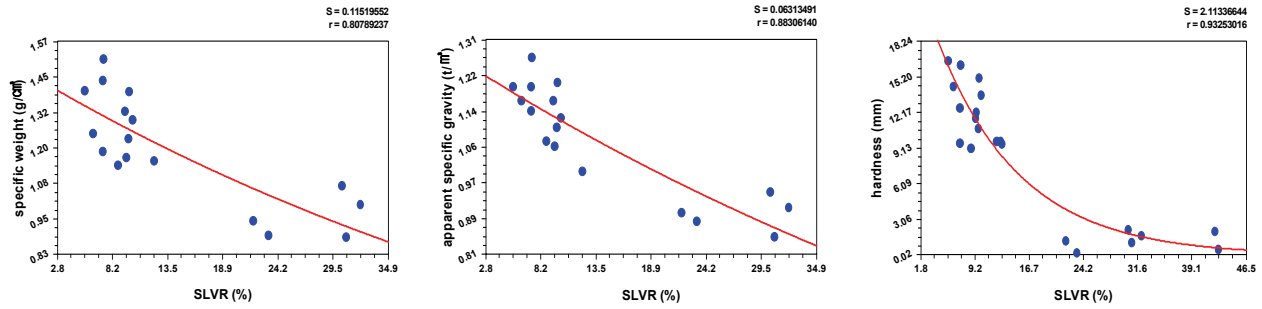


Fig. 6 Relationship of SLVR and another parameter (specific weight, apparent specific gravity and hardness)

Table 2 Result of regression analysis of SLVR and specific weight( $\gamma_0$ )

No.	Water constant (%)	constant "a"	coefficient "b"	R <sup>2</sup>
1	11.3	1,340	-0.0175	0.998
3	17.8	1,410	-0.0149	0.986
4	24.1	1,492	-0.0125	0.992
6	27.5	1,573	-0.0091	0.974
7	33.8	1,863	-0.0099	0.982

$$\gamma_0 = 1.461 \times e^{(-0.0148 \times SLVR)} \quad (R^2 : 0.653) \quad (15)$$

$$G_a = 1.265 \times e^{(-0.0122 \times SLVR)} \quad (R^2 : 0.780) \quad (16)$$

$$H = 26.173 \times e^{(-0.0875 \times SLVR)} \quad (R^2 : 0.870) \quad (17)$$

4. 원관형 토양 샘플러 측정값의 관계식 유도 결과

가. 다짐 정도와 함수비에 따른 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율 (SLVR) 특성

Table 1의 시험결과중 함수비와 다짐 정도에 따른 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율과의 관계식 유도에는 No. 1, 3, 4, 6, 7를 적용하였고 관계도는 Fig. 7과 같으며 동일한 함수비 상태에서 다짐정도에 따라 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율의 변화는 뚜렷한 음의 상관관계를 보였다.

흙의 단위중량은 토성, 다짐특성, 흙의 함수량 등에 따라 크게 변화하기 때문에 원관형 토양 샘플러 길이 변화율과의 변화특성이 뚜렷하지 않았으며 다짐횟수에 따라 변화량이 크게 나타났다. 이러한 원인은 흙의 단위중량이 함수비와 다짐 정도에 따라 크게 변화하는 특성을 반영한 결과로 판단되었다 (Ryu, 2009).

나. 함수비에 따른 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율 관계식 유도

SPSS (Ver. 23)통계패키지를 이용하여 Fig. 7에서 적용한 No. 1, 3, 4, 6, 7 시험결과의 단위중량을 종속변수로 토양 샘플

길이 변화율을 독립변수로 하는 지수형 관계식을 식 (18)과

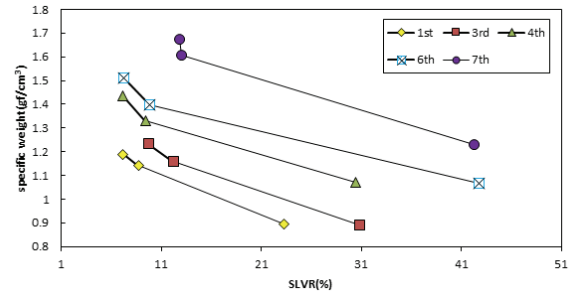


Fig. 7 Relationship of SLVR and specific weight with difference of compaction and water content

같이 유도하였으며 각각의 시험결과에 대하여 구한 관계식의 상수와 계수는 Table 2와 같다.

$$\gamma_{0i} = a \times e^{(b \times SLVR_i)} \quad (18)$$

여기서  $\gamma_{0i}$ 는  $i$ 번째 시험결과의 단위중량 (gf/cm),  $SLVR_i$ 는  $i$ 번째 시험결과의 토양 샘플 길이 변화율 (%),  $a$ ,  $b$ 는 상수와 계수이다.

관계식 유도에 적용한 시험결과의 함수비 변화는 11.3%~33.8%이고, 상수값 ( $a$ )의 변화는 1.340~1.863이며 계수값 ( $b$ )의 변화는 -0.0175~-0.0091이다. 결정계수  $R^2$ 는 0.974~0.998로 고도의 유의성을 나타냈다.

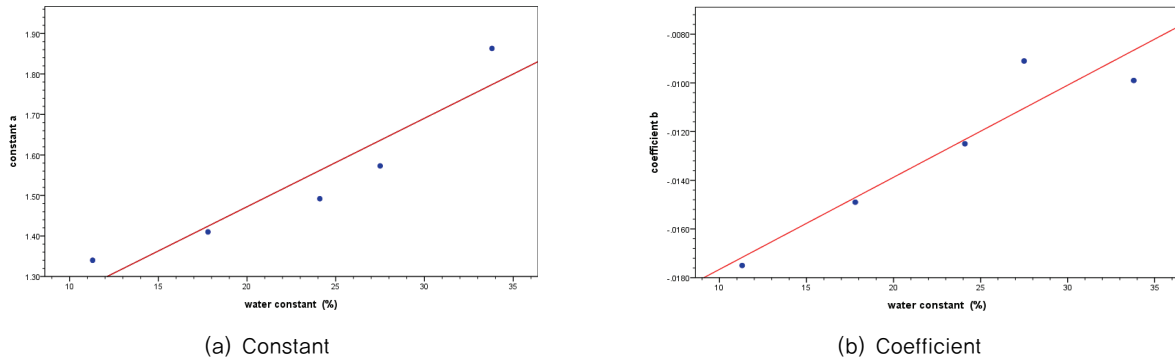


Fig. 8 Constants and coefficients of the relational expression between specific weight ( $\gamma_0$ ) and soil sample length variation ratio ( $SLVR$ ) according to water content (%)

Table 3 Calibration result of the Estimation Specific Weight Formula (ESWF)

Rank	Measured value			Estimated value		
	Water constant (%)	SLVR (%)	$\gamma_0$ ( $gf/cm^3$ )	constant "a"	coefficient "b"	$\gamma_{ec}$ ( $gf/cm^3$ )
1st	11.7	23.3	0.897	1.2904	-0.0167	0.874
	11.2	8.7	1.140	1.2795	-0.0169	1.104
	11.1	7.2	1.190	1.2773	-0.0170	1.130
3rd	18.5	30.8	0.891	1.4386	-0.0140	0.935
	17.7	12.2	1.157	1.4212	-0.0143	1.193
	17.2	9.7	1.234	1.4103	-0.0145	1.225
4th	25.8	30.4	1.070	1.5977	-0.0111	1.141
	25.2	9.4	1.329	1.5847	-0.0113	1.425
	25.9	7.2	1.435	1.5999	-0.0110	1.478
6th	27.0	42.8	1.068	1.6244	-0.0106	1.032
	27.9	9.8	1.398	1.6435	-0.0102	1.487
	27.5	7.3	1.510	1.6348	-0.0104	1.515
7th	33.5	42.3	1.230	1.7656	-0.0080	1.259
	34.0	13.0	1.605	1.7765	-0.0078	1.605
	34.0	12.8	1.672	1.7765	-0.0078	1.608

다. 함수비에 따른 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율 관계식 유도

함수비에 따른 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율과의 관계식의 상수와 계수는 Fig. 8과 같으며 결정계수  $R^2$ 는 각각 0.883, 0.906으로 높은 유의성을 보이고 있다. 함수비에 따른 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율의 상수와 계수를 추정하기 위한 관계식을 식 (19), 식 (20)과 같이 유도하였다.

$$a = 1.0353 + 0.0218 \times Wc (R^2 : 0.833) \quad (19)$$

$$b = -0.0214 + 0.0004 \times Wc (R^2 : 0.906) \quad (20)$$

여기서  $a$ 는 함수비에 따른 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율의 상수,  $b$ 는 함수비에 따른 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율의 계수,  $Wc$ 는 함수비 (%)이다.

5. 원관형 토양 샘플러 측정값을 이용한 단위중량 추정방법

가. 단위중량 추정방법의 보정

원관형 토양 샘플러 측정값을 이용한 단위중량 추정절차는 ①원관형 토양 샘플러로 토양시료를 채취하면서 함수비와 토양 샘플 길이 변화율 ( $SLVR$ )를 구하고 ②구한 함수비를 식 (19), 식 (20)에 대입하여 상수  $a$ 와 계수  $b$ 를 구하며 ③상수  $a$ 와 계수  $b$  및 토양 샘플 길이 변화율 ( $SLVR$ )를 식 (18)에 적용하여 추정할 수 있다.

본 연구에서는 식 (18)을 토양샘플을 채취하면서 해당토양의 단위중량을 추정할 수 있는 단위중량추정식 (ESWF : Estimation Specific Weight Formula)으로 제안한다.

단위중량추정식의 보정은 Table 1의 1, 3, 4, 6, 7번째 시험의 측정값인 함수비,  $SLVR$ , 실측단위중량을 적용하였으며 그



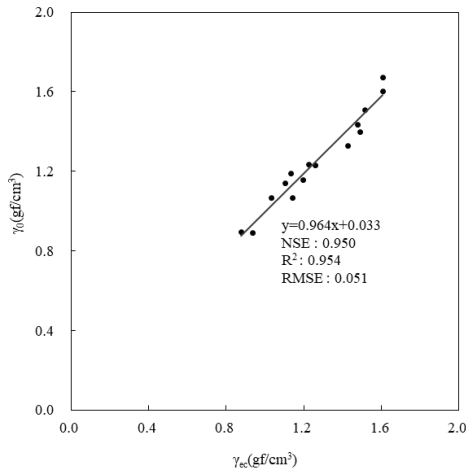


Fig. 9 Relationship of actual specific weight ( $\gamma_0$ ) and calibration estimation specific weight ( $\gamma_{ec}$ )

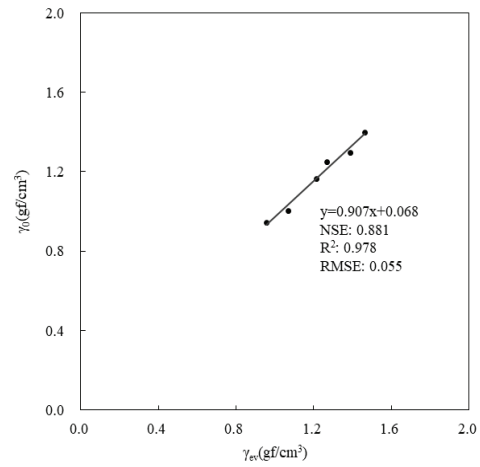


Fig. 10 Relationship of actual specific weight ( $\gamma_0$ ) and verification estimation specific weight ( $\gamma_{ev}$ )

Table 4 Verification result of the Estimation Specific Weight Formula (ESWF)

Rank	Measured value			Estimated value		
	Water constant (%)	SLVR (%)	$\gamma_0$ (gf/cm <sup>3</sup> )	constant "a"	coefficient "b"	$\gamma_e$ (gf/cm <sup>3</sup> )
2nd	14.2	21.8	0.947	1.3449	-0.0157	0.955
	16.7	9.7	1.167	1.3994	-0.0147	1.213
	16.3	6.3	1.252	1.3906	-0.0149	1.266
5th	24.1	32.2	1.005	1.5607	-0.0118	1.068
	24.2	10.1	1.298	1.5629	-0.0117	1.388
	24.0	5.5	1.400	1.5585	-0.0118	1.461

결과는 Table 3과 같으며  $\gamma_0$ 는 실측단위중량이고  $\gamma_{ec}$ 는 보정 추정단위중량이다.

단위중량추정방법의 보정결과는 Fig. 9과 같이 실측단위중량 ( $\gamma_0$ )과 보정추정단위중량 ( $\gamma_{ec}$ )의 NSE가 0.95,  $R^2$ 가 0.954, RMSE가 0.051로 고도의 유의성을 보였다.

#### 나. 단위중량 추정방법의 검증

단위중량추정식의 검증은 단위중량추정식의 개발 및 보정에서 유보하였던 Table 1의 2, 5번째 시험결과를 대상으로 실시하였다. 그 결과는 Table 4와 같으며 상수  $a$ 는 1.345~1.559, 계수  $b$ 는 -0.0117~-0.0157값을 보였다.

실측단위중량 ( $\gamma_0$ )과 검증추정단위중량 ( $\gamma_{ev}$ )의 관계는 Fig. 10과 같고 NSE가 0.881,  $R^2$ 가 0.978, RMSE가 0.055로 매우 높은 유의성을 보였다.

#### 다. 단위중량 추정방법 적용

본 연구는 경작지에서 환경 정보 및 생육 정보에 대한 정확한 데이터를 취득하기 위한 토양샘플을 채취하면서 단위중량

추정식 (ESWF)으로 단위중량을 구하고 작물의 생육이 필수적인 단위중량과 가비중, 경도, 최대함수비 등 토양의 물리적 특성값을 구할 수 있을 것이다.

그러나 본 단위중량추정식 (ESWF)의 일반적인 적용을 위하여 본 식이 개발되는 과정에서 적용되었던 다음의 제한적인 조건에 대한 해결이 요구된다.

- ① 토양 샘플 길이 변화율 (SLVR)에 적용한 관입깊이 20cm로 한 가지 인 점,
- ② 경작지 및 자연조건에서 흔하게 접하는 자갈과 식물뿌리에 대한 고려가 없는 점,
- ③ 원관형 토양 샘플러의 내경 30 mm인 점 등 이다.

## IV. 결론

본 연구에서는 토양단면조사와 토양시료를 손쉽게 채취할 수 있는 원관형 토양 샘플러를 개발하였고 이 샘플러를 이용하여 토양시료를 채취하는 과정에서 얻을 수 있는 함수비와 토양 샘플 길이 변화율 (SLVR)을 이용하여 해당토양의 단위중량을 추정하고 작물의 성장 및 생태환경지표로 활용

되는 가비중, 경도, 최대공극율을 구할 수 있는 지수형 단위중량추정식 (ESWF : Estimation Specific Weight Formula)을 개발하였다.

원관형 토양 샘플러를 이용한 단위중량추정식 (ESWF)개발은 모래, 미사 및 점토의 함량은 각각 50.8%, 43.0%, 6.2%로 사질토인 토양시험체에서 다짐정도와 함수비를 변화하면서, KSF 규정에 의거하여 토양의 토양 샘플 길이 변화율 (SLVR), 단위중량, 가비중, 경도 등 토양의 물리적 특성인자값을 구하였고 총 7회 실시하였다. 토양 시험체의 단위중량과 가비중, 경도, 최대 공극률 및 토양 샘플 길이 변화율 (SLVR)과 단위중량, 가비중, 경도에 대한 상관분석을 실시하여 유의성을 확인하였으며 관계식을 유도하였다.

5회의 토양시험체 실험 결과중 단위중량을 종속변수로 토양 샘플 길이 변화율을 독립변수로 하는 지수형관계식을 유도하였으며 상수값 ( $a$ )의 변화는 1.340~1.863이고 계수값 ( $b$ )의 변화는 -0.0175~-0.0091이며 결정계수  $R^2$ 는 0.974~0.998로 고도의 유의성을 나타냈다. 함수비에 따른 단위중량과 토양 샘플 길이 변화율의 지수형관계식의 상수와 계수를 추정하기 위한 관계식을 유도하였다.

원관형 토양 샘플러로 토양시료를 채취하면서 함수비와 토양 샘플 길이 변화율 (SLVR)를 구하고, 함께 구한 함수비로 상수  $a$ 와 계수  $b$ 를 정하며, 상수  $a$ 와 계수  $b$  및 토양 샘플 길이 변화율 (SLVR)을 적용하여 토양샘플을 채취하면서 해당 토양의 단위중량을 추정할 수 있는 단위중량추정식 (ESWF)으로 제안하였다.

단위중량추정식 (ESWF)개발에 사용한 5회의 토양시험체 실험 결과를 사용하여 단위중량추정식 (ESWF)에 대한 보정을 실시하였다. 단위중량추정식의 보정결과는 실측단위중량 ( $\gamma_0$ )과 보정추정단위중량 ( $\gamma_{ev}$ )의 NSE가 0.95,  $R^2$ 가 0.954, RMSE가 0.051로 고도의 유의성을 보였다.

단위중량추정식의 검증은 토양시험체 실험 결과중 단위중량추정식 개발 및 보정에서 유보하였던 2회의 실험결과를 대상으로 실시하였으며 상수  $a$ 는 1.345~1.559, 계수  $b$ 는 -0.0117~-0.0157값을 보였다. 단위중량추정식의 검증결과는 실측단위중량 ( $\gamma_0$ )과 검증추정단위중량 ( $\gamma_{ev}$ )의 관계가 NSE는 0.881,  $R^2$ 는 0.978, RMSE는 0.055로 매우 높은 유의성을 보였다.

단위중량추정식 (ESWF)의 적용에는 토양 샘플 길이 변화율 (SLVR)의 변화성, 적용예상 토양내 자갈 및 식물체에 대한 고려, 원관형 토양 샘플러 내경의 다양한 적용성에 대한 고려 등의 필요할 것이다.

## REFERENCE

1. ASTM, 2006. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, Soil and Rock ( I ):D420-D5611, pp. 841-856.
2. Chang, P. W., W. J. Jeon, C. S. Song, C. Yu, S. H. Eam, and Y. S. Kim, 2009. *Soil mechanics*, Goomibook, Seoul, Korea, p. 56 (in Korean).
3. Kang, M. S., and S. W. Park, 2003. Development and application of total maximum daily loads simulation system using nonpoint source pollution model. *Journal of Korean Water Resources Association* 36(1): 117-128 (in Korean).
4. Kim, J. G., J. H. Park, B. J. Choi, J. H. Shim, G. J. Kwon, B. A. Lee, Y. U. Lee, and E. J. Joo, 2006. *Ecological research methodology*, Bomoondang, Seoul, p. 44 (in Korean).
5. KREI, 2016. Smart farm operation analysis and development direction research, KREI, Naju, p. 145 (in Korean).
6. KSF2302:2017, 2017. Standard test method for particle size distribution of soils, Korean Agency for Technology and Standards.
7. KSF2306:2015, 2015. Standard test method for water content of soils, Korean Agency for Technology and Standards.
8. KSF2333:2015, 2015. Standard test method for moisture-penetration resistance relations of fine-grained soils, Korean Agency for Technology and Standards.
9. KSISO10381-1:2009, 2014. Soil quality-sampling-part 1: Guidance on the design of sampling programmes, Korean Agency for Technology and Standards.
10. KSISO10381-4:2009, 2014. Soil quality-sampling-part 4: Guidance on the procedure for investigation of natural, near-natural and cultivated sites.
11. Lee, J. C., 2004. Cost-effective investigation on contaminated land and assessment of measurement uncertainty. *Economic and Environmental Geology* 37(1): 49-59 (in Korean).
12. Park, Y. S., and J. H. Kwon, 2014. Application and effectiveness analysis of SWAT filter strip in Golji watershed. *Korean Journal Environmental Agriculture* 33(1): 30-36 (in Korean). doi:10.5338/KJEA2014.33.1.30.
13. RDA, NAST, 2000. *Analysis method of the soil and plant*, NAST, Suwon, p. 202 (in Korean).
14. Ryu, J. H., 2009. Development of pipe type soil sampler for ecology environmental survey, Master Degree, Kongju, Kongju National University (in Korean).