Comparison of Wet Oxidation and Dry Combustion Methods for Organic Matter Analysis of Soils Derived from Granite, Limestone, and Volcanic Ash

Myung-Sook Kim^{1*}, Sang-Ho Jeon², Tae-Goo Lee², Ha-il Jung², Chung-Woo Kim³, and Yoo-Kyung Kim⁴

¹Senior Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

²Junior Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

³Junior Researcher, Chungcheongbukdo Agricultural Research and Extension Services, Chueongju 28130, Korea

⁴Junior Researcher, Jeju Special Self-Governing Province Agricultural Research and Extension Services, Seokypu 63556, Korea

*Corresponding author: msk74@korea.kr

ABSTRACT

Received: November 2, 2021

Revised: November 16, 2021

Accepted: November 17, 2021

ORCID

Myung-Sook Kim

<https://orcid.org/0000-0002-4382-0194>

Tae-Goo Lee

<https://orcid.org/0000-0002-3115-7516>

The objective of this study was to compare soil organic matter contents determined by oxidation method (Tyurin) and dry combustion method. A total of 238 soil samples were collected across an agricultural region originated from granite, limestone, volcanic ash soils. Results showed that soil organic matter content by dry combustion method for granite and limestone-derived soils was 1.09 - 1.12 times higher than that of Tyurin method, and 1.24 times higher for volcanic ash-derived soil. A significant linear relationship was found between Tyurin method and dry combustion method. The coefficients of determination (R^2) between two method for granite, limestone, and volcanic ash soils were 0.984***, 0.847***, and 0.997***, respectively. Soil organic matter contents on Tyurin method with respect to dry combustion method varied between 70% and 82%. There was no significant difference between two methods for paddy, upland, and plastic film house soils among granite derived soils. Therefore, dry combustion method using regression equations could be converted effectively to measurement value of Tyurin method. Using automatic dry combustion method, it may be possible to analyze soil organic matter content cost effectively by reducing labor input.

Keywords: Carbon analyzer, Dry combustion, Soil organic matter, Soil parent material

Regression equations of soil organic matter between dry combustion method and Tyurin method.

Introduction

토양 유기물은 토양과 대기 사이의 탄소 순환 및 온실 가스 교환에 중요한 역할을 하고 있고, 이를 통해 생태계 서비스를 제공하고 있다 (Adolfo, 2010; Sepahvand et al., 2019). 또한, 작물에게 양분을 공급하고, 입단화로 토양구조를 형성하여, 수분 보유력을 증진시키는 등 토양 비옥도와 식물 생장에 큰 영향을 주고 있다 (Seo et al., 2004; Jung and Kim, 2006). 농업적으로 토양 유기물은 농경지에 질소비료를 추천하는 공급능 지표로 사용되고 있고 (Frank and Roeth, 1996; Jung and Kim, 2006; NAS, 2019), 토양 질 평가를 통해 (Arshad and Martin, 2002; Yoon et al., 2004; Kim et al., 2019; Sepahvand et al., 2019) 농경지 관리에 활용되는 중요한 인자이기 때문에, 국가 농경지의 변화를 모니터링하는 항목으로 조사하고 있다 (Sepahvand et al., 2019). 국내에서도 농촌진흥청에서 농업환경변동조사를 통해 농경지의 유기물 함량을 모니터링하고 있고, 국가 정책사업으로 2020년부터 공익직불제를 시행하여 유기물 함량의 적정성을 점검하고 있다 (Chae et al., 2020; MAFRA, 2020)

그러나 토양 분석은 시간이 많이 걸리는 단점이 있기 때문에, 유기물 함량의 분석 효율성이 높고, 신속하게 측정할 수 있는 분석법이 더욱 필요하게 되었다.

토양 유기물을 측정하는 방법에는 습식산화법 (wet oxidation)과 건식연소법 (dry combustion)이 국제적으로 많이 사용되고 있다 (Nelson and Sommers, 1982; Kimble et al., 2001). 습식산화법은 토양 중 유기탄소를 크롬산으로 산화시켜 토양 유기탄소를 추정하는 방법이다. 농황산과 크롬과 같은 화학물질의 사용으로 인해 폐용액의 처리 문제 (Schulte and Hopkins, 1996; Zhang et al., 2005) 등이 발생하지만 최소한의 장비로 분석할 수 있으므로 널리 사용되고 있다. 건식연소법은 산소가 있는 조건에서 800 - 1,000°C의 고열로 토양 탄소를 산화시켜 이산화탄소로 전환하여 유기탄소의 양을 측정하는 방법이다. 고가의 장비라는 단점에도 불구하고 건식연소법은 분석기기가 자동으로 측정할 수 있어 분석이 간편하고, 가장 정확한 방법이라고 알려져 있다 (Konen et al., 2002).

토양의 탄소 함량은 기후, 토양 산성 또는 석회질의 유형 (Navarro et al., 1993), 토지이용관리 (Wang et al., 1996), 토성 (Olayinka et al., 1998)에 따라 달라진다. 시료중의 무기탄소량을 직접 측정하거나 또는 시료 중의 무기탄소를 제거해주는 등의 전처리 과정을 거쳐야 한다. 여러 가지 토양을 대상으로 토양유기물 분석법인 Wakley-Black법 (Walkley and Black, 1934), dry combustion법, loss on ignition, Tyurin법을 비교한 연구들이 있고, 근래에 mid-infrared reflectance spectroscopy를 이용한 분석법의 연구되었다 (Sepahvand et al., 2019). Wakley-Black법과 건식연소법을 칠레 화산토양 (Matus et al., 2009), 파푸아 뉴기니아의 humic brown 토양 (Drover and Manner, 1975)을 대상으로 비교하였다. 특히 Matus et al. (2009)은 활성 알루미늄 (Al)과 잘 결정화되지 않은 광물 (비정질 및 산화물)로 낮은 pH 및 유기물 고정화가 높은 특성을 가진다고 하였고, Wakley-Black법 측정값에 보정계수 (correction factor)로 1.26 - 1.47를 곱하여 사용하면, 경제적으로 토양유기탄소를 분석할 수 있다고 하였다. Jankauskas et al. (2006)은 토양 (Lithuanian Eutric Albeluvisols)의 유기물을 dry combustion, loss on ignition, Wakley-Black, Tyurin method으로 분석법들간에 유기물 분석치를 서로 변환하기 위한 회귀식과 보정계수를 제시하였다. 국내 토양 (논, 밭, 시설재배지)으로 Tyurin법과 건식연소법으로 비교하였고 (Seo et al., 2004), calcimeter를 이용하여 무기탄소를 측정하고, 총탄소에서 빼주는 방법에 대해서도 연구되었다 (Jung and Kim, 2006). ISO (1995)에서 제안한 방법은 HCl로 무기탄소를 제거한 후에 건식연소법으로 분석하는 방법을 제안하였고, 토양개량제를 투입한 염기성 토양에서도 pH 6.5 (0.01M CaCl₂로 측정) 이상일 때 무기탄소를 제거 또는 측정하여 분석하도록 하고 있다.

본 연구는 국내 농경지의 대부분을 차지하는 화강암 유래 토양, 영월 및 단양 지역 등에 일부 분포하는 석회암 유래

토양, 제주도와 울릉도에 분포하는 화산회 유래 토양을 건식연소법 및 Tyurin법을 이용하여 토양 유기물을 분석하고 이들이 서로 전환할 수 있는 회귀식을 구하고자 연구를 수행하였다.

Materials and Methods

습식산화법인 Tyurin법과 원소분석기를 이용한 건식연소법을 비교하기 위해 국내 농경지로부터 238점을 채취하여 시험토양으로 사용하였다. 모재 특성과 농경지 이용형태가 다양한 토양을 선정하였는데, 화강암 유래 토양 149점 (논 51점, 밭 49점, 시설재배지 49점), 석회암 유래 토양 50점 (논 5점, 밭 45점), 유기물이 높은 화산회 유래 토양 39점 (시설재배지)으로 구성되었다. 이러한 토양들을 나무망치로 분쇄한 후 200 mesh 체를 통과시켜 Tyurin법으로 유기물을 분석할 때 이용하였다. Tyurin법은 강산성 조건에서 산화제인 $K_2Cr_2O_7$ 과 200°C로 온도로 산화시킨 후 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 로 산화환원의 적정법으로 토양 유기물 중 탄소의 함량을 분석한 후 1.724를 곱하여 유기물 함량으로 계산하였다 (NAAS, 2010). 건식연소법은 직경 250 μm 체에 통과시킨 토양시료를 사용하였으며, 원소분석기 (Vario MAX CNS, Germany)를 이용하여 표준시료와 함께 900°C에서 측정하여 탄소함량을 분석한 후 1.724를 곱하여 유기물 함량으로 환산하였다. 화강암 및 화산회 유래 토양 중에서 pH 7.0 이상인 토양, 석회암 유래 토양의 유기물 함량은 무기탄소를 제거하기 위해 4M HCl 2 mL를 토양 1 g에 추가한 후 4시간 방치하였고, 데시케이터에서 16시간 건조 과정을 거친 후에 원소분석기로 탄소함량을 분석하였다 (ISO, 1995). 기존의 토양유기물 분석법인 Tyurin법과 원소분석기를 이용한 건식연소법을 모재 유래 토양별로 비교하고자 SAS 프로그램 (ver 9.4, SAS Institute, USA)으로 ANOVA 분석과 회귀검정을 실시하였다.

Results and Discussion

토양 시료의 특성 공시토양은 모재 및 pH 등 화학적 특성이 다양한 농경지 토양을 선정하였다. 화강암 유래 토양은 pH가 4.0 - 8.8의 범위에 있었고, 평균값은 6.2로 약산성이었다 (Table 1). 석회암 유래 토양은 pH가 7.1 - 8.6의 범위로 평균값은 7.8의 약알칼리성을 나타냈다. 화산회 유래 토양은 pH가 3.7 - 8.4의 범위로 평균값은 화강암 유래 토양보다 낮은 5.7의 약산성이었다.

화강암 유래 토양을 토지이용 형태별로 비교한 결과, 논토양에서 pH 평균과 범위는 각각 6.1, 5.1 - 8.1, 밭토양의 pH 평균과 범위는 6.2, 4.5 - 8.8, 시설재배지 토양의 평균값과 범위는 6.2, 4.0 - 8.0이었고, 논, 밭, 시설재배지의 pH 평균값은 6.1 - 6.2로 유사하였으며, 국가 정책사업으로 시행된 토양개량제 지원사업으로 화강암 유래 토양이라도 pH가 높은 토양은 27지점을 포함하였다. 채취한 토양의 pH의 변이계수는 11 - 16%였고, 교환성 칼슘과 마그네슘 함량의 변이계수는 32 - 137%로 나타나 조사된 자료의 시료채취지점에 따라 큰 변이를 나타냈다.

Tyurin법으로 분석한 화강암, 석회암, 화산회 유래 토양 시료의 유기물 평균 함량은 각각 23.7 g kg⁻¹, 28.6 g kg⁻¹, 59.2 g kg⁻¹으로, 범위는 각각 1.7 - 89.5 g kg⁻¹, 7.9 - 70.3 g kg⁻¹, 11.0 - 194.5 g kg⁻¹으로 나타났다. 화산회 유래 토양의 유기물 함량이 가장 높았고, 그 다음은 화강암 유래 토양이었으며, 석회암 유래 토양의 유기물 함량이 낮게 나타났다. 원소분석기 (Vario MAX CNS, Germany)를 이용하여 분석한 토양시료의 유기물 함량은 각각 27.2 g kg⁻¹, 49.5 g kg⁻¹, 73.4 g kg⁻¹으로, Tyurin법보다 화강암 유래 토양은 1.12배, 석회암 유래 토양은 1.87배, 화산회 유래 토양은 1.24배 높았다. 즉, Tyurin법의 토양유기물 함량은 화강암 유래 토양에서 건식연소법의 92%, 화산회 유래 토양에서 81%에 해

당하는 양이었다. Belchikova (1975), Orlov and Grishina (1981)는 Tyurin법의 유기탄소 함량은 건식연소법의 85 - 90%에 양이며, Jankauskas et al. (2006)은 건식연소법의 94.8%의 값이라고 발표한 연구결과와 유사하였다. Matus et al. (2009)은 칠레 화산회 토양으로 Tyurin법과 유사한 습식산화법인 Walkley-Black를 적용한 결과, 건식연소법의 70 - 82%라고 하였다.

화강암 유래 토양에서 토지이용형태별로 유기물 함량을 비교한 결과, Tyurin법으로 분석한 유기물 함량의 평균값은 각각 22.3 g kg⁻¹, 18.5 g kg⁻¹, 30.3 g kg⁻¹이었고, 범위는 논토양에서 7.2 - 45.9 g kg⁻¹, 밭토양에서 1.7 - 62.6 g kg⁻¹, 시설

Table 1. Descriptive statistics of granite, limestone, and volcanic ash soil properties.

Soil		pH (1:5H ₂ O)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ex. cation (cmol _c kg ⁻¹)		
				K	Ca	Mg
Granite soils (n = 148)	Mean	6.1	219	0.32	4.6	1.0
	Standard error	0.7	180	0.30	2.3	0.7
	Minimum	5.1	2	0.06	1.9	0.3
	Maximum	8.6	859	1.54	13.1	3.8
	CV (%)	11	82	92	50	69
	Mean	6.2	562	0.74	5.4	1.9
	Standard error	1.0	569	0.78	3.0	1.3
	Minimum	4.5	5	0.00	0.3	0.1
	Maximum	8.8	2,059	3.50	12.3	6.2
	CV (%)	16	101	106	56	72
	Mean	6.2	1,111	1.66	9.7	3.2
	Standard error	0.8	733	1.76	5.3	2.2
	Minimum	4.0	41	0.14	1.3	0.4
	Maximum	8.2	2,618	9.91	26.3	11.2
	CV (%)	13	66	106	55	69
	Mean	6.2	627	0.91	6.5	2.0
	Standard error	0.8	655	1.25	4.4	1.8
	Minimum	4.0	2	0.02	0.3	0.1
	Maximum	8.8	2,618	9.91	26.3	11.2
	CV (%)	14	104	137	67	88
Limestone soils (n = 50)	Mean	7.8	433	0.79	11.3	2.4
	Standard error	0.3	333	0.57	3.7	1.0
	Minimum	7.1	4	0.10	0.9	0.4
	Maximum	8.6	1,283	2.43	20.5	4.4
	CV (%)	4	77	73	32	43
Volcanic ash soils (n = 39)	Mean	5.7	988	2.2	10.8	3.7
	Standard error	1.1	669	1.3	7.0	2.1
	Minimum	3.7	98	0.7	1.8	0.6
	Maximum	8.4	2,798	7.1	27.1	10.4
	CV (%)	20	68	57	65	58
Optimum range		6.0 - 7.0	300 - 550	0.5 - 0.8	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0

재배지 토양에서 4.8 - 89.5 g kg⁻¹이었다 (Table 2). 이들 시료는 농촌진흥청에서 농업환경변동조사사업으로 2019년 논토양 (3 - 83 g kg⁻¹), 2017년 밭토양 (2 - 111 g kg⁻¹), 2020년 시설재배지 (7 - 160 g kg⁻¹)에 조사된 토양유기물 함량 최대값의 0.55 - 0.56배 수준에 해당하였다. 원소분석기로 분석한 유기물 함량의 평균값은 논토양에서 24.9 g kg⁻¹, 밭토양에서 21.1 g kg⁻¹, 시설재배지에서 35.5 g kg⁻¹이었고, Tyurin법보다 논토양은 1.12배, 밭토양은 1.14배, 시설재배지 토양은 1.17배로 시설재배지 토양이 분석법 간의 차이가 가장 컸고, 그 다음은 밭토양, 논토양의 순서로 나타났다. 범위값은 논토양에서 8.1 - 57.4 g kg⁻¹, 밭토양에서 0.8 - 78.8 g kg⁻¹, 시설재배지 토양에서 4.9 - 103.1 g kg⁻¹이었다.

Table 2. Soil organic matter determination of granite, limestone, and volcanic ash soils by wet combustion and dry combustion.

Soils	Item	Soil organic matter determined by Tyurin method (g kg ⁻¹)	Soil total carbon determined by dry combustion method (g kg ⁻¹)
Granite soils (n = 149)	Mean	22.3	24.9
	Standard error	8.8	10.2
	Minimum	7.2	8.1
	Maximum	45.9	57.4
	CV (%)	39	41
	Mean	18.5	21.1
	Standard error	14.0	17.2
	Minimum	1.7	0.8
	Maximum	62.6	78.8
	CV (%)	76	82
Plastic film house soils (n = 49)	Mean	30.3	35.5
	Standard error	18.0	21.3
	Minimum	4.8	4.9
	Maximum	89.5	103.1
	CV (%)	59	60
	Mean	23.7	27.2
	Standard error	14.8	17.8
	Minimum	1.7	1.1
	Maximum	89.5	103.1
	CV (%)	62.7	65.5
Limestone soils (n = 50)	Mean	28.6	49.5
	Standard error	11.2	24.1
	Minimum	7.9	8.8
	Maximum	70.3	125.5
	CV (%)	39	49
Volcanic ash soils (n = 39)	Mean	59.2	73.4
	Standard error	45.2	56.4
	Minimum	11.0	12.0
	Maximum	194.5	249.3
	CV (%)	76	77

토양유기물의 건식연소법과 Tyurin 비교 화강암, 석회암, 화산회 유래 토양을 Tyurin법과 건식연소법과의 분석한 유기물 함량을 회귀분석한 결과는 Fig. 1과 같다. 토양유기물 함량을 건식연소법에서 Tyurin법으로 전환하기 위한 회귀식은 원점을 지나는 직선식으로 분석하였고, 화강암 유래 토양은 Y (Tyurin 법) = $0.859 X$ (건식연소법), 화산회 유래 토양은 Y (Tyurin 법) = $0.8039 X$ (건식연소법)으로 계산되었으며, 이들의 결정계수 (R^2)는 각각 0.984, 0.997로 높은 유의성을 나타냈다. 그리고 회귀직선이 건식연소법 방향으로 약간 기울어져 있었으며, 이는 건식연소법으로 측정값이 전체적으로 Tyurin법으로 분석한 값보다 높다는 것을 의미한다. 건식연소법의 경우 탄소를 완전히 연소시키는 반면, 난분해성 유기물의 경우 중크롬산칼륨과 같은 산화제에 의해 완전하게 산화되지 않아 건식연소법보다 낮게 측정될 수 있다고 보고된 바 있다 (Seo et al., 2004; Jankauskas et al., 2006; Matus et al., 2009). 그리고 이러한 특성은 유기물 고정화가 화강암 유래 토양보다 큰 화산회 유래 토양에서 더욱 두드러지게 나타나는 것으로 추정된다.

Fig. 1. Regression equations of soil organic matter between dry combustion method and Tyurin method.

Fig. 1에서는 무기탄소를 제거하지 않고 분석한 석회암 유래 토양은 Tyurin과 건식연소법으로 분석한 값 사이에서 회귀식은 통계적으로 유의성이 없었다. 이를 보완하기 위해 Fig. 2에서 무기탄소를 제거한 후 측정된 유기물 함량은 계산하였다.

Fig. 2. Regression equation of soil organic matter between Tyurin method and dry combustion with limestone soils removed of inorganic carbon.

석회암 유래 토양을 무기탄소를 제거하지 않고 건식연소법으로 분석한 토양유기물의 평균값 (31.3 g kg^{-1})은 동일 시료를 무기탄소를 제거하고 건식연소법으로 분석한 토양유기물 평균값 (28.6 g kg^{-1})보다 58%정도 과다하게 추정되었다. Jung and Kim (2006)은 석회암 유래 토양에서 무기탄소의 측정을 고려하지 않고 건식연소법을 이용해 토양유기탄소를 분석했을 때 분석된 유기탄소 결과가 약 22 - 28% 가량 과다 추정될 수 있다고 하였는데, 본 실험에서보다는 차이가 적었다. 이러한 차이는 본 실험에서 무기탄소함량 분석치를 직접적으로 제시하지 않았지만, 공시토양의 무기탄소함량이 높을 때 Jung and Kim (2006) 실험의 시료보다 편차가 더 커질 수 있다고 판단된다. 무기탄소를 제거하고 건식연소법으로 추정된 토양유기물 함량은 Tyurin법보다 1.09배 높았고, Tyurin법과 무기탄소를 제거 후 건식연소법으로 분석한 토양유기물 함량은 통계적으로 유의한 상관 관계 ($R^2 = 0.847^{**}$)에 있었으며, 회귀식은 $Y (\text{Tyurin법}) = 0.891X (\text{건식연소법})$ 으로 도출할 수 있었으며, Tyurin에 의한 토양유기물 평균값 (28.6 g kg^{-1})에 대해 2.98 g kg^{-1} 의 표준 오차를 나타내었다.

화강암 유래 토양을 대상으로, 토지이용형태 (논, 밭, 시설재배지)별로 유기물 함량을 구분하여 Tyurin법과 건식연소법과의 관계를 회귀분석하였다 (Fig. 3). Tyurin법과 건식연소법은 회귀식의 원점을 지나는 직선식으로 분석하였고, 회귀식은 논토양에서 $Y (\text{Tyurin법}) = 0.8902X (\text{건식연소법})$, 밭토양에서 $Y (\text{Tyurin법}) = 0.8486X (\text{건식연소법})$, 시설재배지 토양에서 $Y (\text{Tyurin법}) = 0.8505X (\text{건식연소법})$ 의 직선 회귀식을 구할 수가 있었으며, 그에 따른 결정계수 R^2 은 각각 0.975, 0.988, 0.982로 통계적인 유의성이 높았다. 그리고 가을기가 건식연소법 분석치 방향으로 기울어져 있었다. Seo et al. (2004)은 논과 밭토양 212점을 가지고 Tyurin법과 건식연소법으로 분석하였을 때 직선회귀식을 구한 결과 $Y (\text{Tyurin법}) = 0.846X (\text{건식연소법})$ 으로 결정계수도 0.991로 매우 높은 유의성이 있었고, 회귀직선이 건식연소법 방향으로 약간 기울어져 있다고 결과와 유사하게 나타났다.

Fig. 3. Regression equation of soil organic matter between dry combustion and Tyurin method with paddy, upland, and plastic film house soils.

pH 7.0을 초과한 토양의 유기물 함량의 정확성을 높이고자 화산회 (시설재배지 6점) 및 화강암 유래 토양 (논 4점, 밭 10점, 시설재배지 7점)을 대상으로 무기탄소를 제거 전, 무기탄소를 제거한 후에 원소분석기를 이용한 건식연소법, Tyurin법으로 분석한 유기물 함량을 비교하였다 (Table 3). 그 결과 무기탄소를 제거한 후에 건식연소법으로 분석한 토양유기물 평균값 (13.5 g kg^{-1})은 무기탄소 제거 전 (16.7 g kg^{-1})보다 24% 정도 낮아졌으며, Tyurin법보다는 13% 정도 높은 값이었다. 이번 실험은 시료수가 적은 단점이 있기 때문에 추후에 농경지 이용형태 (논, 밭, 시설재배지), 모재 특성 (화강암 및 화산회 토양)을 감안하여 많은 시료수를 확보한 후 Tyurin법과 dry combustion 법을 비교하는 추가 연구가 필요하다.

Table 3. Soil organic matter determination of volcanic ash and granite soils over pH 7.0 by wet oxidation (Tyurin) and dry combustion (CN analyzer after no treatment), and dry combustion after removal of inorganic carbon.

	Organic matter by Tyurin method	Organic matter by CN analyzer	Organic matter by CN analyzer after inorganic carbon removal
Average	11.9	16.7	13.5
Min	7.1	7.3	6.9
Max	54.0	67.6	58.0

Conclusions

토양 유기물은 토양의 질 및 비옥도의 향상, 공익직불제의 이행점검, 온실가스원을 관리하는 차원에서 중요성이 높아지고 있다. 이 연구의 목적은 모재 특성 (석회암, 화산회, 화강암)에 따른 Tyurin법과 건식연소법을 비교하여 분석하였다. 건식연소법으로 분석한 토양유기물 함량은 Tyurin법보다 화강암 유래 토양은 1.12배, 석회암 유래 토양은 1.09배, 화산회 유래 토양은 1.24배로 높았다. 건식연소법 (X)을 Tyurin법 (Y)의 유기물 함량으로 변환할 경우, 직선 회귀식은 석회암 토양에서 $Y = 0.891X$, 화산회 토양에서 $Y = 0.804X$, 화강암 유래 토양에서 $Y = 0.859X$ 였고, 결정 계수 (R^2)도 매우 높은 유의성 (0.847*** - 0.997***)을 나타냈다. 특히, 석회암유래 토양은 반드시 무기탄소 제거 후에 측정해야 정의 상관 관계를 보이기 때문에, 정확도를 높이기 위해서는 무기탄소 제거 과정을 반드시 거쳐야 한다. 결론적으로 석회암, 화강암, 화산회 유래 토양의 유기물 함량은 원소분석기로 간편하게 측정된 후 회귀식을 이용하여 Tyurin법의 유기물 함량으로 전환할 수 있고, 이러한 방법은 공익직불제의 토양검정 및 국가농경지의 토양질을 모니터링 할 때 필요한 토양유기물 함량을 효과적으로 분석하는데 기여할 수 있다.

Acknowledgement

This study was conducted by support of National Institute of Agricultural Sciences (NAS) research and development project (project number: PJ015700012021).

References

- Adolfo, C.C. 2010. Analyzing the relation between loss-on ignition and other methods of soil organic carbon determination in a tropical cloud forest (Mexico). *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 41:1454-1462.
- Arshad, M.A. and S. Martin. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agric., Ecosyst. Environ.* 88:153-160.
- Belchikova, N.P. 1975. Loss-on ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *J. Soil Sci.* 15:84-92.
- Chae, H.G., S.H. Kim, and T.K. Kim. 2020. Priority decision of cross-compliance of public-benefit direct payment for agriculture and rural area. *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.* 21(4):218-225.
- Drover, D.P. and H. Manner. 1975. Comparison between Walkley-Black and a dry combustion method for determining organic carbon in a humic brown soil, Papua-New-Guinea. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 65(5):495-500.
- Frank, K.D. and F.W. Roeth. 1996. Using soil organic matter to help make fertilizer and pesticide recommendations.

- p. 33-40. In J.M. Bogham et al. (ed.) *Soil organic matter: Analysis and interpretation*. SSSA Special Publication No. 46. SSSA, Madison, WI, USA.
- ISO (International Standard Organization). 1995. Soil quality-determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary) (<https://www.iso.org/standard/18782.html>).
- Jankauskas, B., G. Jankauskiene, A. Slepetiene, M.A. Fullen, and C.A. Booth. 2006. International comparison of analytical methods of determining the soil organic matter content of lithuanian eutric albeluvisols. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37:707-720.
- Jung, W.K. and Y.H. Kim. 2006. Soil organic carbon determination for calcareous soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(6): 396-402.
- Kim, M.S., S.J. Park, S.H. Kim, H.Y. Hwang, S.H. Ahn, D.W. Lee, and Y.H. Lee. 2019. Changes of soil chemical quality index of paddy soils by long-term application of soil amendments. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52(4):334-344.
- Kimble, J.M., R. Lal, and R.F. Follett. 2001. Methods for assessing soil C pools. p. 3-12. In R. Lal et al. (ed.) *Assessment methods for soil carbon*. Lewis Publishers, BocaRaton, USA.
- Konen, M.E., P.M. Jacobs, C. Lee Burras, B.J. Talaga, and J.A. Mason. 2002. Equations for predicting soil organic carbon using loss-on-ignition for north central U.S. Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1878-1881.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2020. Implementation guidelines for basic public-benefit direct payment system in 2020. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea.
- Matus, F.J., M. Escudey, J. Forster, and M.G. Cutiño. 2009. Is the Walkley-Black method suitable for organic carbon determination in Chilean volcanic soils?. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 40:1862-1872.
- NAAS (National Institute of Agricultural Science). 2010. *Methods of soil analysis*. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- NAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2019. *Fertilizer recommendation for crops*, 4th ed. Rural Development Administration, Jeonju, Korea.
- Navarro, A.F., A. Roig, J. Cegarra, and M.P. Bernal. 1993. Relationship between total organic carbon and oxidizable carbon in calcareous soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24:2203-2212.
- Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 539-579. In A.L. Page (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*, 2nd edition. ASA-SSSA, Madison, USA.
- Olayinka, A., A. Adebayo, and A. Amusan. 1998. Evaluation of organic carbon oxidation efficiencies of a modified wet combustion and Walkley-black procedures in Nigerian soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29:2749-2756.
- Orlov, D.S. and L.A. Grishina. 1981. *Guide in chemistry of humus*. MGU Press (in Russian), Moscow, Russia.
- Schulte, E.E. and B.G. Hopkins. 1996. Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition. p. 21-31. In F.R. Magdoff et al. (ed.) *Soil organic matter: Analysis and interpretation*. SSSA, Madison, USA.
- Seo, M.C., K.H. So, B.G. Ko, and Y.K. Son. 2004. Comparison of Tyurin method and dry combustion method for carbon analysis in soils of low inorganic carbon content. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37(5):315-321.
- Sepahvand, H., R. Mizaeitalarposhti, K. Beiranvand, M. Feizian, and T. Müller. 2019. Prediction of soil carbon levels in calcareous soils of Iran by mid-infrared reflectance spectroscopy. *Environ. Pollut. Bioavailability* 31(1):9-17.
- Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.
- Wang, X.J., J.P. Smethurst, and A.M. Herbert. 1996. Relationships between three measures of organic matter or carbon in soils of eucalypt plantations in Tasmania. *Aust. J. Soil Res.* 34:545-553.
- Yoon, J.H., B.G. Jung, H.J. Jun, and H.K. Kwak. 2004. Soil quality assessment method of paddy and upland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37(6):357-364.
- Zhang, M., Y. Li, and P.J. Stoffella. 2005. Comparison of analytical methods for organic matter in composts and organic mulches. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36:2587-2599.