

분광광도계를 이용한 점토함량 분석의 정확성 및 정밀성 평가

박순남 · 김계훈* · 강지영¹

서울시립대학교 자연과학대학 환경원예학과, ¹서울대학교 농업생명과학대학 농업과학공동기기센터

Accuracy and Precision of Spectrophotometric Measurement of Clay Content in Soils

Soon-Nam Park, Kye-Hoon Kim* and Ji-Young Kang¹

Department of Environmental Horticulture, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

¹National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Received March 17, 2006; Accepted April 11, 2006

Accuracy and precision of the spectrophotometric analysis of clay content in soils were estimated by comparison with the conventional pipet method. Clay contents in 25 soil samples of various physico-chemical properties including texture were determined by spectrophotometry and pipet methods, and the two sets of data an clay content were compared by several statistical analyses. The correlation between clay contents determined by spectrophotometry and pipet methods was highly significant. The regression coefficient was 0.98** and the slope of regression equation was close to 1.0. The standard deviation and CV of clay contents measured by spectrophotometry were smaller than those found in the data of clay contents obtained by pipet method. In conclusion, compared to the conventional pipet method, spectrophotometry was a rapid, convenient, accurate and precise method for the measurement of clay content in soils.

Key words: spectrophotometry, pipet method, clay content

서 론

토양의 점토함량 분석은 농업 및 산업분야 등에서 매우 중요하다. 지금까지 많은 연구자들이 점토함량 분석방법에 대하여 연구해 왔으며,¹⁻¹⁰ 전통적인 피펫법의 단점을 보완하여 laser-light, x-ray, γ -ray, 비탁법(turbidimetry), 분광광도법 등을 원리로서 기기를 이용해서 단시간에 많은 시료의 입경을 분석하는 기법도 연구되었다.¹¹⁻¹⁹ 이러한 분석방법의 정확성은 토성분석시 현재 가장 많이 사용되고 있는 피펫법이나 비중계법과 비교되어 왔다.

마이크로 피펫법(micro-pipet method)은 용기의 부피와 침강 시간을 줄여 제한된 공간에서 짧은 시간에 많은 시료를 분석할 수 있는 방법으로 토성과 점토함량의 정밀도가 비중계법에 비해 떨어지지 않았다.²⁰ 농토배양 사업 중 객토대상지 선정 및 객토원의 적합성 여부 판정을 위해 가장 기초가 되는 점토함량을 현장에서 측정할 수 있는 점토함량 간이 측정기는 피펫법과 유의성이 인정되어 현장에서 점토함량 간이 측정법으로 이용되고 있다.⁹

입도 분석 방법으로는 체를 이용한 분리방법과 침강법 외에도 powder technology와 다른 응용 분야에서 사용되는 다양한 방법이 있다. 이러한 방법 중에는 광학현미경법(optical microscopy), 투과전자 현미경법(transmission electron microscopy; TEM), 주사전자 현미경법(scanning electron microscopy; SEM), 전기감지영역법(electrical sensory zone, coulter counter) 같은 전자기적 방법이나 레이저광 산란법(laser light scattering), 비탁법(turbidimetry), 홀로그래피(holography), x-선 원심분리법(x-ray centrifuge) 같은 빛의 산란을 이용하는 방법 등이 있다.¹¹ 기기를 이용한 점토함량 정량분석은 쿨터계수기(coulter counter), 비탁계(turbidimeter)나 레이저광 분석기(laser-light technique) 등을 통해 가능하지만 기계가 고가이고, 피펫법이나 비중계법에 비해 정확성이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 많은 시료를 신속하게 분석하고자 할 때에는 이러한 기계를 이용할 필요가 있다.⁴ 또한, 입도 측정을 위해 기기를 사용할 경우 기기의 분석원리를 이해하고 분석가능 범위, 주어진 사양 등을 고려하여 적절한 기기를 선택해야 한다.²¹

최근에는 γ -ray attenuation법이 입경분석에 이용되고 있다.²¹⁻²⁴ γ -ray attenuation을 기초로 한 자동화된 입경 분석기를 이용하여 토양 입경을 분석한 후 피펫법과 비교한 결과 모래와 점토에서 고도의 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다.¹⁶ 그러나 γ -

*Corresponding author
Phone: 82-2-2210-2605; Fax: 82-2-2214-4030
E-mail: johnkim@uos.ac.kr

ray attenuation은 방사성 물질을 사용하기 때문에 안전성이 문제되고 면허가 있는 숙련된 기술자가 필요한 단점이 있다.

본 연구는 분광광도계(spectrophotometer)를 이용하여 토양 중 점토함량을 측정하고 이 방법의 정확성 및 정밀성을 피펫법과 비교하고자 수행하였다.

재료 및 방법

토양시료. 시험에 사용된 토양은 토양통, 토양층 및 점토함량이 다양한 토양 시료 25점을 이용하였다(Table 1).

피펫법에 의한 점토함량 분석. 각 시료별로 피펫법에 따라 3회 반복하여 점토함량을 측정하였다.⁴⁾ 풍건토양 10 g을 500 ml 툴 비이커에 넣고 증류수 30 ml와 30% 과산화수소수 25 ml를 가한 뒤 전열판 위에서 유기물 분해가 끝날 때까지 과산화수소수를 추가로 5 ml씩 가한 후 유기물을 완전 분해하였다. 이 때 시료의 기본중량은 시료 10 g 중의 수분함량과 유기물 함량을 감한 것으로 하였다. 유기물 분해가 완료된 시료는 2,000~2,500 rpm으로 약 5분간 원심분리한 후 상정액을 제거하는 방법을 반복하여 가용성 물질을 제거하였다. 이 원심분리병에 분산제 5% hexametaphosphate 10 ml를 가한 후 약 18시간 정도를 진탕시키며 시료를 완전히 분산시켰다. 분산이 완료된 시료는 증류수로 씻으면서 현탁액을 U.S. No. 300 체 위에 부어서 세척하면서 현탁액이 1 l 실린더에 모이게 한 후 증류수로 1 l의 눈금을 맞추었다. 점토함량 분석을 위해 실린더를 Hand stirrer로 1분간 20회 정도 상하로 저어 현탁액이 균일하게 혼합되도록 한

후 점토(0.002 mm)가 10 cm 하강하는데 걸리는 시간(20°C일 경우 8시간)이 경과한 후 수운별 시간에 맞춰 수면으로부터 10 cm 깊이에서 차례로 25 ml를 피펫으로 취하여 105°C에서 건조하여 점토함량 계산에 이용하였다. 이 때 Blank test를 통해 분산제의 무게를 보정하였다.

분광광도법을 이용한 점토함량 분석. 분광광도법을 이용한 점토함량 분석은 다음 과정을 거쳐 수행되었다.¹⁷⁾ 250 ml 삼각 플라스크에 풍건 토양 0.5 g과 분산제((10 ml, 1 N NaOH + 10 ml, 5% HMP)/l) 100 ml를 가하고 12시간 동안 진탕하여 시료를 충분히 분산시켰다. 진탕속도는 약 130 rpm으로 하였다. 분산이 끝난 시료는 흡광도가 1이내에 들어오도록 적당히 희석하였다. 6배 희석의 경우 분산이 끝난 250 ml 삼각 플라스크를 교반하면서 5 ml 자동 피펫으로 5 ml를 취한 후 분산제 25 ml를 가하여 희석하였고, 11배 희석도 동일한 방법으로 수행하였다. 이 때 희석용기는 시료 분산시 이용했던 용기와 동일하게 250 ml 삼각 플라스크를 이용하였다. 혼합 점토 표준용액은 표준 점토광물을 이용하여 토양시료 분산시 사용한 동일한 분산제로 희석을 반복하면서 조성하였고, 검정선은 파장 500 nm에서 선행여부를 확인하였다. 검정선 작성이 끝난 후 먼저 cell을 기기에 삽입하고 희석된 시료가 들어 있는 250 ml 삼각 플라스크의 입구를 파라필름으로 덮고 상하로 30초간 흔든 후 파라필름을 벗기고 250 ml 삼각 플라스크의 수면에서 4 ml를 용량 피펫으로 취하여 이미 삽입되어 있는 cell에 옮기고 즉시 흡광도를 측정하였다. 측정값은 흡광도와 희석배수를 다음 식에 의해 분광광도법으로 측정된 점토함량을 구하였다.

Table 1. Chemical and physical properties of the soils used in the clay content analysis

Sample No.	Horizon	Soil series	pH	Organic matter (g/kg)	CEC (cmolc/kg)	Soil texture
1	A	Yeongog	6.6	27.9	15.1	Silt loam
2	A	Daegog	6.8	16.2	10.9	Silt loam
3	A	Noigog	4.3	27.6	12.7	Sandy loam
4	A	Bugog	5.6	18.8	11.5	Sandy loam
5	A	Bugog	4.3	18.1	10.3	Loam
6	A	Nagdong	6.0	36.2	10.0	Sandy loam
7	A	Jungdong	5.8	33.6	9.8	Sandy loam
8	A	Nagdong	5.2	21.6	8.0	Sandy loam
9	A	Songieong	7.7	26.9	13.9	Clay loam
10	A	Gopyeong	6.7	33.6	15.4	Silt loam
11	A	Baegsan	7.3	36.9	16.7	Silt clay loam
12	A	Asan	5.6	20.9	9.0	Clay loam
13	A	A-Haeri	7.4	15.5	6.8	Sandy loam
14	A	Gocheon	6.4	35.7	9.6	Sandy loam
15	B	Yeongog	5.9	14.8	12.7	Silt loam
16	B	Bansan	4.4	20.2	13.3	Silt clay loam
17	B	Jeonnam	4.8	9.5	12.5	Clay
18	B	Bansan	5.8	12.8	14.7	Silt clay loam
19	B	Noigog	5.0	10.7	10.1	Sandy loam
20	B	Nagdong	4.7	7.4	4.5	Loamy sand
21	B	Baesan	4.9	14.0	11.7	Clay loam
22	B	Yeam	7.0	3.4	6.7	Sandy clay loam
23	B	Asan	5.6	4.0	8.3	Clay loam
24	B	Daegog	6.2	10.0	13.8	Silt clay loam
25	B	Sangju	5.5	17.4	9.5	Sandy loam

$$\% \text{ of clay in soil} = \% \text{ in solution} \times \text{희석배수} \times 100/0.5$$

분광광도법으로 측정된 점토함량은 회귀방정식 $Y = 38.03X_1 - 0.17X_2 - 1.17$ (Y = 피펫법에 준한 점토함량(%); X_1 = 분광광도법으로 측정된 점토함량(%); X_2 = 유기물 함량(g/kg))에 대입하여 피펫법에 준한 점토함량으로 환산하였다.¹⁷⁾

분광광도법을 이용한 토양 중 점토함량 분석은 피펫법으로 분석한 동일 시료를 3반복하여 측정하였다. 또한 토양시료의 희석비율에 따른 분광광도법의 정확도와 정밀도를 평가하기 위해 희석배수를 달리하여(6배, 11배 희석) 그 결과를 피펫법과 비교하였다.

결과 및 고찰

Fig. 1은 동일 시료에 대하여 분광광도법으로 점토함량을 측정 후 최종 환산된 결과를 피펫법과 비교한 것이다. 또한, 분광광도법에 의한 점토함량 측정은 희석과정을 거치기 때문에 희석배수에 의한 영향을 받을 수 있으므로 희석배수를 달리한(6배, 11배) 비교실험을 수행하였다. 희석배수를 달리하여 측정된 점토함량을 피펫법과 회귀분석을 통해 비교한 결과 6배, 11배 희석 모두 기울기가 1이고 y절편이 0에 가까우며, 상관계수가 0.98이상으로 피펫법과 고도의 상관관계를 이루고 있었다. 희석배수간의 차이는 t-test로 분석한 결과 1% 범위에서 정확도의 차이가 없는 것으로 나타났다.

본 실험에서 조사된 분광광도법과 피펫법과의 상관계수는 0.98로 이 결과는 x-ray attenuation을 원리로 한 Sedigraph를 이용하여 입경을 분석한 결과와 피펫법간의 상관계수 0.97과 γ -ray attenuation을 원리로 한 분석기로 점토함량을 분석한 결과와 피펫법의 상관계수인 0.97과 거의 비슷한 수준이었다.^{16,19)} 또한, 이것은 전자기적 방법의 하나인 쿨터계수기로 측정된 점토함량과 피펫법의 상관계수인 0.61보다 높았으며,¹⁸⁾ laser light scattering에 기초한 Microtrac Model 7991-0으로 측정된 점토함량과 피펫법간의 상관계수인 0.84보다 높은 수치였다.¹²⁾

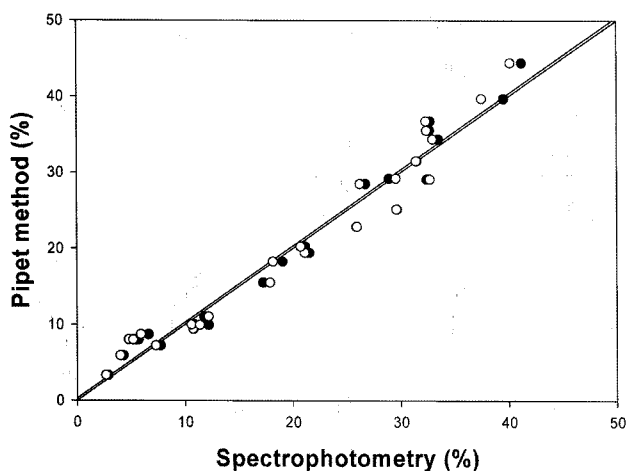


Fig. 1. Relationships between clay contents determined by spectrophotometry and pipet method. -●-: Dilution rate of $\times 6$, $y = x - 0.00002$ ($r = 0.98^{**}$); -○-: Dilution rate of $\times 11$, $y = x + 0.2919$ ($r = 0.98^{**}$).

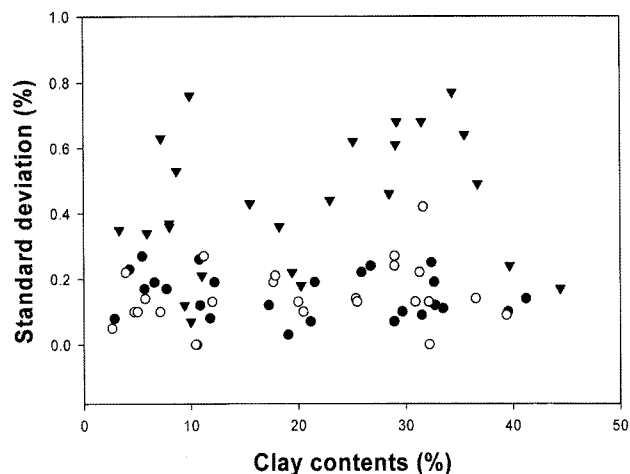


Fig. 2. Standard deviation of clay contents measured by spectrophotometry and pipet method. ●: Spectrophotometry (dilution rate of $\times 6$), ○: Spectrophotometry (dilution rate of $\times 11$), ▼: Pipet method.

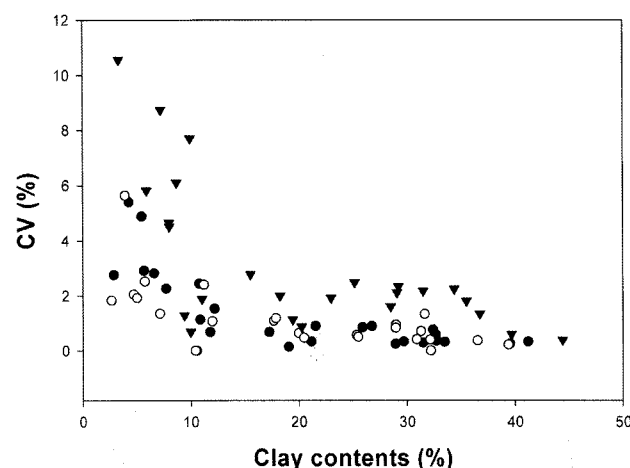


Fig. 3. Coefficient of variation of clay contents measured by spectrophotometry and pipet method. ●: Spectrophotometry (dilution rate of $\times 6$); ○: Spectrophotometry (dilution rate of $\times 11$); ▼: Pipet method.

따라서 분광광도법을 이용한 점토함량 분석은 x-ray, γ -ray, laser light 등을 원리로 한 분석방법에 비해 더욱 정확하다고 할 수 있다. 그러나 다른 원리를 이용한 분석기들은 점토함량 외의 미사나 모래 함량까지 한꺼번에 분석이 가능하지만 분광광도법은 점토함량 측정만 가능한 단점이 있다.

분광광도법과 피펫법 두 방법간의 정밀도를 분석하기 위해 평균농도별 표준편차를 Fig. 2에 나타냈다. 3반복의 표준편차는 피펫법에서 가장 크게 나타났으며 분광광도법을 이용하였을 때는 희석배수를 달리했을 경우 모두 비슷하게 낮게 나타났다. 이는 피펫법의 전 과정이 수동으로 이루어지기 때문에 실험 수행자와 외부의 영향을 많이 받을 수 있기 때문이라 할 수 있다. 그러나 두 방법 모두 표준편차가 1이내에 들어 정확성은 물론이며 정밀성 또한 떨어지지 않는 것을 알 수 있다. 분광광도법의 희석배수에 의한 표준편차는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

Table 2. Comparison of spectrophotometry and pipet method of clay content analysis

	Spectrophotometry	Pipet method
Sample weight (g)	0.5	10
Limitation	None	Temperature, space, time
Preparation time (h)	0	30
Shaking time (h)	12	18
Measurement time (h)	1	10

Fig. 3은 분광광도법과 피펫법의 정밀성을 비교하기 위해 점토함량별 변이계수(CV)를 조사한 것이다. 분광광도법에 의해 측정된 점토함량은 회석배수를 달리했을 때 모두 CV가 0~6% 정도로 나타났으며 피펫법으로 측정된 점토함량의 변이계수는 0.4~11% 정도로 분광광도법에 비해 상대적으로 변이의 폭이 큰 것으로 조사되었다. 그러나 두 방법 모두 CV가 10% 내외로 변이의 폭이 비교적 적어 두 방법 모두 정밀한 방법이라 할 수 있다. 특이한 것은 점토함량이 낮을수록 두 방법 모두 CV가 높게 나타난 점이다. 이에 따라 점토함량이 낮은 시료를 분석할 때는 특히 주의를 기울여 분석의 오차 범위를 최소로 줄여야 할 것으로 판단된다. 이상에서 분광광도법과 피펫법간의 정확성 및 정밀성은 거의 차이가 없는 것을 알 수 있었다.

Table 2에서는 분광광도법과 피펫법을 이용한 점토함량 분석 시 소요시간 등의 차이를 비교하였다. 피펫법은 약 10g의 토양 중 유기물을 분해 후 건조하여 측정할 무게를 이용하기 때문에 많은 양의 시료와 유기물 분해시 많은 시간이 소요된다. 그러나 분광광도법은 균일한 시료만 준비된다면 0.5g으로 충분히 시료 중 점토함량을 분석할 수 있다.

외부적 간섭요인을 살펴보면 분광광도법은 온도, 공간, 시간 등의 제약요인 없이 언제든지 분석이 가능하다. 그러나 피펫법은 침강온도에 따라 피펫으로 현탁액을 취하는 시간이 크게 달라지기 때문에 수온이 20°C일 경우 침강시간이 8시간 정도 소요된다. 또한, 피펫법에서 이용하는 11 용량의 실린더는 많은 공간을 차지한다.

시료의 전처리 시간을 비교해보면 분광광도법은 유기물 함량을 보정하고자 할 경우 통상적으로 수행하는 유기물 함량을 분석하여 회귀방정식에 대입하면 된다. 그러나 피펫법은 유기물 분해시 2일 이상의 시간이 소요되며 가용성 염류를 제거하기 위해 원심분리를 반복해야 하는 번거로움이 있기 때문에 많은 시간이 소요되고 이 과정에서 점토함량 일부가 유실될 우려가 있다. 또한, 시료의 균일한 분산을 위해 분광광도법은 분산액을 넣고 약 12시간 동안 정치시키지만 피펫법은 왕복 진탕기에서 18시간 정도 진탕해야 한다.

측정시간은 분광광도법의 경우 시료를 회석한 후 검정선 작성 후 즉시 흡광도를 측정할 수 있기 때문에 시료만 준비되면 약 2분 간격으로 시료의 흡광도를 연속해서 측정할 수 있다. 그러나 피펫법의 경우 수온에 따라 침강시간이 달라지기 때문에 점토입자가 11 실린더의 10 cm까지 하강하는 시간을 기다린 후 정확하게 10 cm 깊이에서 25 ml의 시료를 취해야 한다. 또한, 채취한 시료는 12시간 정도 105°C에서 충분히 건조시킨 후 0.1 mg까지 정확하게 정량하고 빈용기의 무게를 따로 재서

계산에 이용한다.

전체적인 시간을 비교해보면 분광광도법은 분산시간 12시간을 제외하면 바로 회석하여 측정이 가능한 반면, 피펫법은 여러 제약요인이 작용하고, 많은 시간을 요한다. 따라서 분광광도법을 이용한 점토함량 분석은 시간적인 측면을 고려할 때 피펫법에 비해 크게 유리한 것을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 분광광도법을 이용한 점토함량 분석은 단시간에 많은 시료를 정확하고 정밀하게 측정할 수 있다. 또한 분광광도법에 의한 점토함량 측정방법은 토양개량이나 산업적 이용의 이유로 점토함량을 신속, 정확하게 측정할 필요가 있는 농민이나, 기술자, 연구자들에게 매우 유용할 것으로 생각된다.

초 록

본 연구는 분광광도계를 이용하여 토양중 점토함량을 분석하는 방법의 정확성과 정밀성을 평가하기 위하여 수행하였다. 이를 위하여 분광광도계를 이용하는 방법과 피펫법을 이용하여 동일한 시료의 점토함량을 측정하고 두 방법간의 정확성과 정밀성을 비교하였다. 두 방법으로 동일 시료의 점토함량을 분석한 결과 상관관계는 $y = x - 0.0002 (r = 0.98^{**})$ 로 매우 높았고 기울기는 1에 가까웠으며 절편은 0에 가까워 정확성에는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한, 점토함량에 대한 두 방법간 정밀성을 비교하기 위하여 표준편차와 변이계수를 조사한 결과 분광광도법의 표준편차와 변이계수가 피펫법보다 더 낮게 조사되었다. 따라서 분광광도계를 이용하면 시간과 공간을 절약하고 신속하고 정확하게 토양 중 점토함량을 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

Key words: 분광광도법, 피펫법, 점토함량

참고문헌

1. Bouyoucos, G. J. (1933) A comparison between the pipette method and the hydrometer method for making mechanical analysis of soils, with new directions. *Soil Sci.* **38**, 335-343.
2. Daddah, M. T. (1974) The hydrometer method for detailed particle-size analysis: 1. Graphical interpretation of hydrometer readings and test of method. *Soil Sci.* **118**, 102-108.
3. Day, P. R. 1950. Physical basis of particle size analysis by the hydrometer method. *Soil Sci.* **70**, 363-374.
4. Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986) Particle size analysis. In *Methods of Soil Analysis Part 1*, A. Klute (2nd ed.) pp. 383-411. American Society of Agronomy, Madison, WI.
5. Hyun, B. K., Kim, M. S., Eom, K. C. and Jo, I. S. (2000) A more simplified hydrometer method for soil texture analysis. *J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert.* **33**, 153-159.
6. Jo, I. S., Kim, L. Y., Ryu, K. S., Im, J. N., Um, K. T. and Kwag, Y. S. (1984) Design and performance of the modified hydrometer for the rapid measurement of clay content in soils. *J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert.* **17**, 325-329.
7. Kilmer, V. J. and Alexander, L. T. (1949) Methods of making mechanical analyses of soils. *Soil Sci.* **68**, 15-24.

8. Liu, T. K., Odell, R. T., Etter, W. C. and Thornburn, T. H. (1966) A comparison of clay contents determined by hydrometer and pipette methods using reduced major axis analysis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **30**, 665-669.
9. Miller, W. P. and Miller, D. M. (1987) A micro-pipette method for soil mechanical analysis. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **18**, 1-15.
10. Sur, H. S. and Kukal, S. S. (1992) A modified hydrometer procedure for particle size analysis. *Soil Sci.* **153**, 1-4.
11. Allen, T. (1997) In *Particle size measurement*. (5th ed.) Chapman and Hall, New York.
12. Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J. and Degraer, G. (1998) Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *Catena* **32**, 193-208.
13. Buurman, P., Pape, T. and Muggler, C. C. (1997) Laser grain-size determination in soil genetic studies 1. Practical problems. *Soil Sci.* **162**, 211-218.
14. Coakley, J. P. and Syvitski, J. P. M. (1991) Sedigraph technique. In *Principles, methods, and application of particle size analysis*. J. P. M. Syvitski. pp. 130-142. Cambridge University Press, New York.
15. Muggler, C. C., Pape, T. and Buurman, P. (1997) Laser-grain size determination in soil genetic studies 2. Clay content, clay formation, and aggregation in some Brazilian oxisols. *Soil Sci.* **162**, 219-228.
16. Naime, J. M., Vaz, C. M. P. and Macedo, A. (2001) Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. *Comput. Electron. Agric.* **31**, 295-304.
17. Park S. N., Kim, K. H. and Kang, J. Y. (2005) Use of spectrophotometry for quantitative determination of soil clay content. *J. Korean. Appl. Biol. Chem.* **48**, 183-188.
18. Pennington, K. L. and Lewis, G. C. (1979) A comparison of electronic and pipet methods for mechanical analysis of soils. *Soil Sci.* **128**, 280-284.
19. Welch, N. H., Allen, P. B. and Galindo, D. J. (1979) Particle-size analysis by pipette and SediGraph. *J. Environ. Qual.* **8**, 543-546.
20. Chung, J. B., Kim, M. K., Kim, B. J. and Kim, K. H. (1999) Comparison of micro-pipette method and hydrometer method in soil particle size analysis. *J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert.* **32**, 274-278.
21. Stockham, J. D. and Fochtmann, E. G. (1979) In *Particle size analysis*. (3rd ed.) Ann Arbor Science, Michigan.
22. Vaz, C. M. P., Oliveira, J. C. M., Reichardt, K., Crestana, S., Cruvinel, P. E. and Bacchi, O. O. S. (1992) Soil mechanical analysis through gamma ray attenuation. *Soil Technol.* **5**, 319-325.
23. Elias, E. A., Bacchi, O. O. S. and Reichardt, K. (1999) Alternative soil particle-size analysis by gamma-ray attenuation. *Soil Tillage Res.* **52**, 121-123.
24. Ofivérira, J. C. M., Vaz, C. M. P., Reichardt, K. and Swartzendruber, D. (1997) Improved soil particle-size analysis by gamma-ray attenuation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **61**, 23-26.