

체적기압판 추출장치를 이용한 물보유함수의 매개변수 추정

Estimation of Parameters in Water Retention Function using Volumetric Pressure Plate Extractor

윤성용(Soung - Yong Yun)* · 박재현(Jae - Hyeon Park)** · 김상준(Sang - Jun Kim)***

요 약 : 본 연구에서는 비포화흐름을 해석하는데 있어 기초자료가 되는 물보유함수를 추정하기 위하여 SUS, KUS 등 두가지 국내토양에 대한 물보유함수를 체적기압판추출장치를 이용하여 측정하였다. 체적기압판추출장치를 사용할 때 압력을 점차적으로 증가하면서 흡시료로 배출되는 물의 양을 정확히 측정한다. 또한 압력이 점차적으로 줄어들 때 흡에 유입되는 물의 양을 정확히 측정한다. 실험결과 젖음 또는 마름과정에 따라 물보유함수가 차이가 나는 이력현상이 발생하였다. 대표적인 물보유함수인 Gardner식, Brooks-Corey식 그리고 van Genuchten식의 실측치에 대한 매개변수 추정을 통하여 그 물리적 의미와 각 토양시료별 매개변수 값을 구하였다. 그 결과 Gardner식, Brooks-Corey 그리고 van Genuchten의 매개변수는 공기유입값과 토양의 입경 크기에 관계 되는 변수임을 알 수 있었다. 결론적으로 van Genuchten식이 측정된 실험자료를 가장 정확하게 모의함을 알 수 있었다.

Abstract : In this study the experiment on water retention curve was conducted by using a volumetric pressure plate extractor for two different soils (SUS and KUS). When the volumetric pressure plate extractor is used, the volume of water removed from the soil sample at each increasing pressure step can be accurately measured and retained. When pressure values are subsequently reduced, the volume of water that returns to the soil can then also be accurately measured. The hysteresis effect of water retention curve was considered in the experiment. Parameters of water retention function were estimated by fitting experimental data with three proposed equations. Results of estimation showed that parameters of Gardner, Brooks-Corey and van Genuchten equations were found to be associated with air-entry value and width of size distribution. Consequently van Genuchten equation was proved to be best fitted through the measured data points.

서 론

대수층과 같이 포화상태의 토양에서는 지하수면을 기준으로 하여 지하수위에 비례하는 정압력이 발생하지만 비포화 상태의 토양에서는 토양 속의 공극에 의해 모세관현상이 발생하기 때문에 토양 내 함수비에 따른 負의 압력(negative pressure), 즉 모세관압력수두가 발생한다. 이때 함수량과 모세관압력수두의 관계를 물보유함수(water retention function)라고 하는데 물보유함수는 토양에 따라 다르게 나타나는 고유한 물리적 특성이 다. 물보유함수는 함수량에 따른 모세관압력수두를 표시한 함수이기 때문에 어떤 토양의 물보유함수를 알고 있을 경우 함수량만 알고 있어도 물보유함수를 이용하여 그 함수량에 대응하는 모세관압력수두를 알 수 있고 역으로 모세관압력수두를 알고 있으면 그 모세관압력수두에 대응하는 함수량을 알 수 있다. 뿐만 아니라 물보유함수는 비포화투수계수를 추정하는 기초자

료로 사용되기도 한다. 비포화투수계수를 직접 측정하는 것은 시간과 비용이 많이 요구되고 측정 절차가 까다롭기 때문에 일반적으로 물보유함수와 포화투수계수를 이용한 추정된 비포화투수계수를 사용하고 있다(박창근, 1993). 이러한 이유로 물보유함수는 비포화흐름에 있어 가장 기초가 되는 자료라 할 수 있으며 토양의 이러한 물리적 특성은 실험을 통하여 자료를 획득하는 것이 일반적이다.

물보유함수를 측정하기 위해서는 함수량과 함수량에 따른 모세관압력수두를 동시에 측정하여야 한다. 토양시료의 모세관압력수두를 측정하는 방법은 모세관압력수두가 매우 큰 다공성암(porous ceramic)이 부착된 흡수력계(tensiometer)를 이용하는 데 흡수력계는 모세관압력수두만을 측정할 수 있기 때문에 모세관압력수두를 측정된 지점의 함수량을 동시에 측정하기 위하여는 함수량을 간접적으로 측정하는 장치를 동시에 사용하여야 한다. 토양의 함수량을 간접적으로 측정하는 장치로는 감마선을 이용한 함수량측정장치(gamma-ray attenuation apparatus)와 TDR(time domain reflectorimeter)을 이용하는 방법 등이 있다. 그러나 이 장치들을 이용하는 방법은 두 개(함수량과 모세관압력수두)의 측정장치를 사용하여야 하는 번거로움이 있다.

외국의 경우 Topp(1969, 1971a)과 Gilham 등(1976)은 각각

*안산공업전문대학 토목학과(Dept. of Civil Engineering, Ansan Technical College, Kyeonggi-do 425-701, Korea)

**서울대학교 토목공학과(Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

***경원대학교 토목공학과(Dept. of Civil Engineering, Kyeongwon University, Kyeonggi-do 461-701, Korea)

Rubicon Silt Loam, Caribou Silt Loam, Dune Sand에 대하여 물보유함수를 실측하였으며 이후에도 많은 연구자에 의해 토양의 특성에 따른 물보유함수의 실측값들이 보고되었다. 국내의 경우 강우영 등(1995)이 개발한 실험장치에 흡수력계(tensiometer)를 부착하여 사질토에 대한 물보유함수를 측정하였다. 강우영 등이 개발한 실험장치는 국내에서 독창적으로 개발한 것으로 국내토양에 대한 물보유함수를 처음으로 측정하였다는 의미를 갖지만 자연배수와 증발을 이용하여 함수량을 조절한 후, 변화된 토양시료의 무게변화에 따른 함수량을 산정하였기 때문에 인장력계 주변의 함수량을 정확히 추정하였다고 보기는 어렵다. 또한 모세관압력수두를 측정하는 인장력계의 반응시간이 오래걸리고 압력에 따른 사용범위가 매우 제한적이기 때문에 측정에 어려움이 따를 뿐만 아니라 모세관압력수두가 크거나 작은 지점에서는 물보유함수를 정확히 추정해내지 못했다. 모세관압력수두가 낮아질 때 토양내의 물이 배수되기 시작하는 모세관압력수두를 공기유입값(air entry value)이라 하는데, 일반적으로 물보유함수는 공기유입값과 모세관수(capillary water) 중 식물이 뿌리를 통하여 흡수할 수 있는 정도의 함수량을 나타내는 잔류함수량(residual water content) 근처에서 비선형적으로 변하기 때문에 이들의 값을 정확히 실측하는 것이 필요하다. 그러나 강우영 등은 모세관압력수두가 매우 낮을 때 측정할 수 있는 잔류함수량과 모세관압력수두가 높을 때 측정할 수 있는 공기유입값을 실험장치의 한계로 실측해 내지 못했다.

본 연구에서는 함수량과 모세관압력수두를 동시에 측정하고 모세관압력수두의 작은 변화에도 함수량이 민감하게 반응할 뿐만 아니라 압력에 따른 사용범위의 제한이 적은 체적기압판 추출장치(volumetric pressure plate extractor)의 원리 및 활용에 관해 검토하여 국내토양의 물보유함수의 자료를 구하고자 한다. 또한 실측된 자료를 가지고 제안된 대표적인 물보유함수의 매개변수를 추정함으로써 각 제안식이 갖는 장단점을 비교하고자 한다.

체적기압판 추출장치 (Volumetric Pressure Plate Extractor)

물보유함수를 측정할 수 있는 체적기압판 추출장치의 원리 및 구성 실험방법을 살펴보면 다음과 같다.

체적기압판 추출장치의 원리

물보유함수 자료를 실험을 통해 얻을 수 있는 체적기압판 추출장치의 측정원리는 다음과 같다. 대기 중의 비포화토양에서는 토양 내의 공극에 의하여 모세관현상이 발생하며 모세관압력에 해당하는 흡인력으로 주위의 물을 끌어들이는 상태가 된다. 체적기압판 추출장치는 측정시료를 압력용기에 넣고 용기 내에 양압력을 걸어주게 되는데 이때 토양 내 모세관압력수두의 절대값이 걸어준 양압력과 같아 질 때까지 토양내의 물이 빠져나오게 된다. 하지만 토양 내의 모세관현상으로 일정한 양의 물이 빠지고 나면 더 이상의 물이 빠지지 않게 되는데 이 때 빠져나온 물의 양을 측정하여 토양 내의 남아있는 물의 양을 역산하면 걸어준 양압력하의 함수량을 구할 수 있다. 용기에 걸어준 양압

력의 크기는 용기 내 토양이 가지는 모세관압력의 절대값과 크기가 같게 된다. 즉 체적기압판 추출장치는 시료 내에 가해지는 양압력이 비포화토양에서 발생하는 모세관압력의 절대값과 같다는 원리로써 개발된 장치이다.

양압력의 크기를 다르게 하여 용기에 압력을 걸어주고 동시에 함수량을 측정한다면 함수량에 따른 모세관압력을 동시에 측정하여 물보유함수를 구할 수 있다. 이때 체적기압판 추출장치는 함수량변화에 따른 모세관압력수두를 동시에 측정하여 물보유함수를 구할 수 있는 장점을 지니고 있다. 체적기압판 추출장치는 측정시료를 압력용기에 넣고 모세관압력수두의 절대값(positive)에 해당하는 양압력을 걸어주어야 하므로 공기압축장치(air compressor)와 이를 조절해 주는 압력조절장치(regulator), 이 때의 압력변화를 측정할 수 있는 압력측정장치, 그리고 용기에서 들어가거나 나오는 물의 양을 정밀하게 측정하는 장치들을 필요로 한다.

이 장치는 시료를 용기내부에 넣어서 실험을 하므로 현장실험에는 적합하지 못하기 때문에 현장에서의 비포화 토양특성을 측정하고자 하면 우선 흡수력계나 TDR 등을 이용하여 모세관압력만을 측정하고 나중에 측정지점의 토양을 채취하여 체적기압판 추출장치를 이용한 토양특성곡선을 구하고 이 자료를 이용하여 함수량 변화를 구하면 된다. 본 실험에서 사용한 장치는 Soil Moisture社의 제품으로 최고 -2000 cm까지 이르는 모세관압력수두를 측정할 수 있는 제품이다. 특히 이력현상 측정장치를 추가하여 비포화상태의 이력현상까지도 구할 수 있다.

체적기압판 추출장치의 구성

설치된 체적기압판 추출장치의 전체적인 개략도는 Figure 1과 Photo 1과 같다. Figure 1에서 보는 바와 같이 체적기압판 추출장치는 체적기압판에 양압력을 공급해주는 공기압축장치(air compressor)와 압력을 일정하게 조절해주는 공기압 조절장치(regulator), 그리고 압력을 신호로 바꾸어주는 압력변환기(pressure transducer)와 압력의 크기를 읽어주는 직독식압력계(direct pressure reading system)로 구성되어 있다. 또한 주변기기로는 공기압축장치로부터 공급되는 고압 공기의 수분을 제거해주는 수분제거기(water filter)와 체적기압판 용기로 들어가는 조절공기에 일정한 습도를 유지해주는 습도조절기(vapor saturator), 그리고 체적기압판에 들어가고 나오는 물의 양을 측정하는 이력현상 기기(hysteresis apparatus) 등이 있다.

이들 장치 중 체적기압판 추출장치와 이력현상 기기는 Soil Moisture社에서, 압력변환기(PDCR920)와 직독식압력계는 Druck社에서 그리고 공기압축장치(3마력)는 Campbell社에서 구입하였으며 그외의 장치는 부품을 직접구입하여 제작하였다. 공기압축장치는 14 bar까지의 압력을 가할 수 있으며 자체 공기압조절장치에 의하여 精度는 낮지만 일정한 압력을 유지해 준다. 물보유함수자료를 얻기 위해서는 시료의 함수량이 작은 경우 변화가 매우 큰 압력이 필요하고(약 1 bar~2 bar) 함수량이 큰 경우에는 精度가 높은 압력(약 10^3 bar~ 10^4 bar)이 필요하므로 본 연구에서는 3종류의 공기압 조절장치를 사용하였다. 주 공기압조절장치(main regulator)는 15bar의 압력까지 조절할 수 있고 精度는 약 0.1 bar이며 제1 공기압조절장치는 5 bar의 압

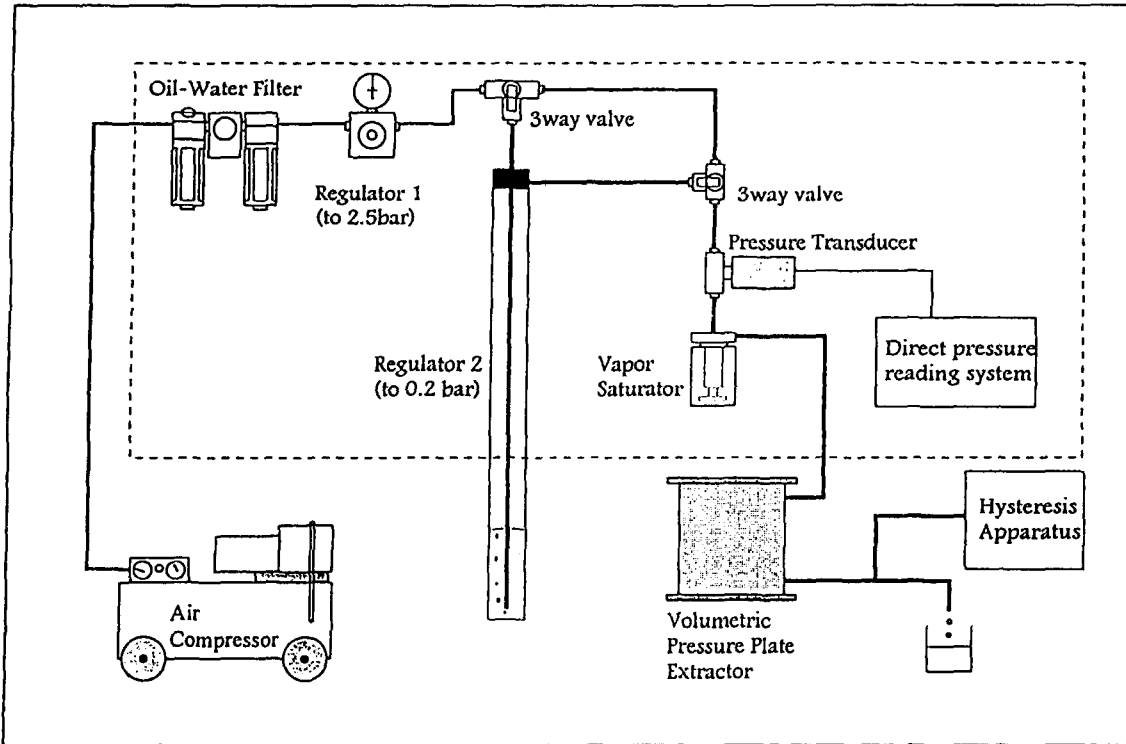


Figure 1 Schematic of the volumetric pressure plate extractor apparatus.

력까지 조절할 수 있고 精度는 약 0.05 bar인 기기를 사용하였다. 그러나 이들 두가지 공기압조절장치를 사용한 결과 精度가 높은 압력(약 10^{-3} bar~ 10^{-4} bar)을 조절해주는 데 어려움이 있었고 정압력을 오랜시간 유지해 주기가 곤란하였기 때문에 精度가 높고 정압을 유지할 수 있는 제2 공기압조절장치를 설치하였다. 제2 공기압조절장치는 수두에 의해 정압을 유지해주는 장치로서 Figure 2에 나타내었다. Figure 2에서 보는 바와 같이 제2 공기압조절장치는 아크릴재질로 만들어진 지름 5 cm, 길이 200 cm인 바깥기둥과 직경 1 cm, 길이 180 cm의 내부튜브, 물을 공급하는 펌프와 물을 배수시키는 밸브, 내부 튜브에 연결된 압축공기를 조절하는 밸브 등으로 구성되어 있다. 이 장

치의 원리는 바깥기둥에 물을 일정높이로 유지시킨 후 위에 위치한 밸브를 통하여 압축공기를 가해주면 기둥하단의 튜브로 물 높이보다 높은 압력은 공기방울로 배출된다. 배출되고 남은 기둥 상단의 튜브를 통해 가해지는 압력은 바로 물의 높이와 같은 일정한 압력이 된다. 즉 물기둥 높이만 조절하면 물기둥 높이에 해당하는 일정한 압력이 전달되는데 물의 높이는 펌프를 이용하여 조정하였다. 물기둥의 수두를 통해 압력을 조절하는 제2 공기압조절장치는 오랜시간 정압을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 매우 높은 精度(10^{-4} bar)로 조절할 수가 있고 여기에 직독식압력계를 연결하여 유지압력을 바로 읽을 수 있도록 설계하여 본 실험에서는 매우 유용하게 사용하였다. 본 실험에서는 高價의 직독식압력계를 사용하였지만 물기둥에 의한 공기압조절장치를 만들고 물기둥의 높이를 측정하면 압력을 알 수 있게 된다.

체적기압판 추출장치의 세부도는 Figure 3에 도시하였다. Figure 3에서 보는 바와 같이 최대 2 bar의 양압력이 가해지기 때문에 체적기압판을 고정하는 볼트와 너트가 있고 압력구 (pressure inlet)와 배수되는 튜브(outlet tube)가 있으며 체적기압판에 내부에 발생하는 물방울을 제거해주는 히터판 (heater block)이 있다. 이들을 간단히 압력용기라고 칭하기도 한다. 체적기압판 추출장치의 핵심은 다공성 세라믹판(porous ceramic plate)이라고 할 수 있는데 세라믹판은 압력이 가해져도 공기는 빠져나가지 않고 단지 물만 빠져 나갈 수 있게끔 한 장치이다. 본 실험에서는 최대 2 bar의 압력까지 사용할 수 있는 다공성 세라믹판을 사용하였다. 다공성 세라믹판 위에 성형된 시료를 올려놓게 되며 시료는 두께 1 cm, 내부직경이 4.85 cm인 링에 고정하게 된다. 시료 고정링의 두께를 크게 하면 반응시간

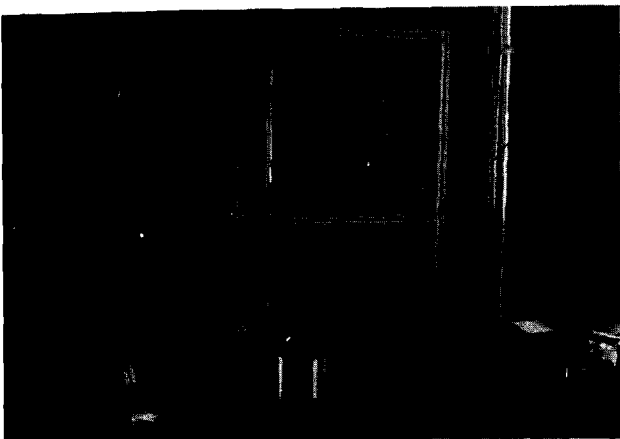


Photo 1. Volumetric pressure plate extractor apparatus.

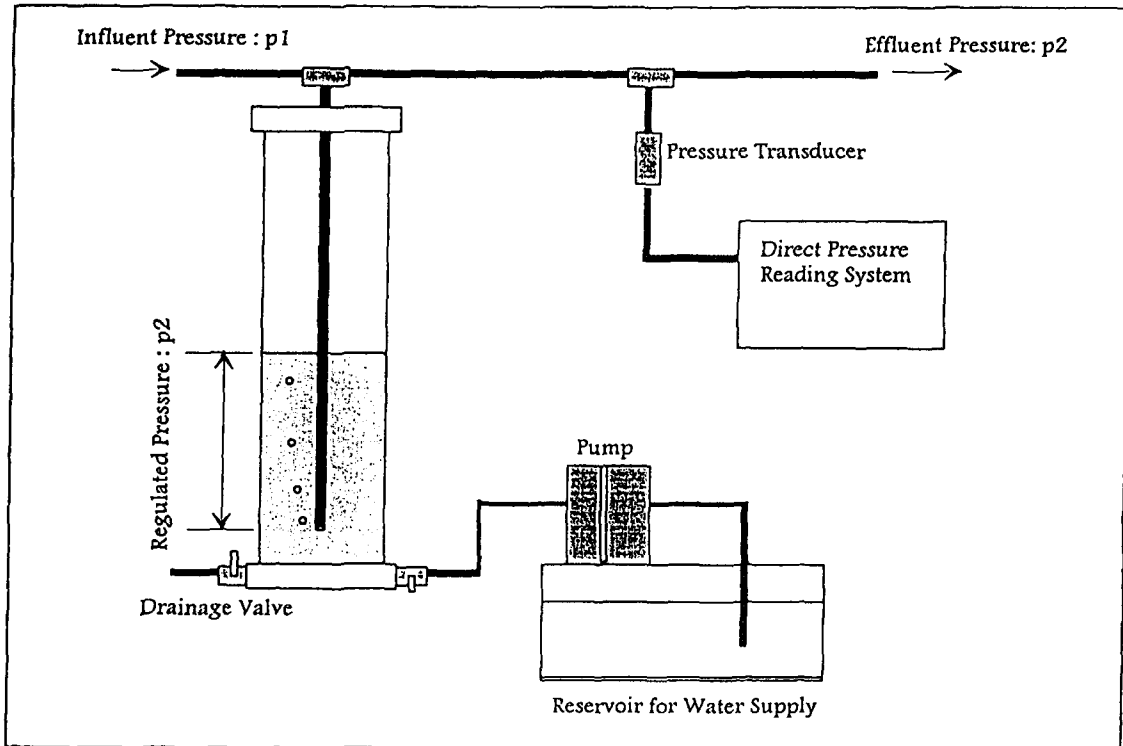


Figure 2. Apparatus for regulating the low pressure.

이 오래걸리게 되고 너무 얇게 하게 되면 반응시간은 짧아지나 시료 성형에 문제가 발생한다.

체적기압판 추출장치의 실험방법

이력현상을 고려한 물보유함수를 얻으려면 우선 건조과정 실험을 수행한 후, 흡윤과정의 실험을 수행하였다. 체적기압판 추출장치를 이용하여 물보유함수를 추정하는 건조과정의 실험방법은 다음과 같다.

(1) 시료를 링에 성형하여 다공성 세라믹판위에 올려 놓고 여기에 물을 가해주어 토양이 포화상태가 유지될 수 있도록 한다 (Figure 4, Photo 2).

(2) 토양이 포화되었다고 판단되면 체적기압판 추출장치의

볼트와 너트로 고정하고 수평을 맞춘다.

(3) 포화된 측정시료가 설치된 압력용기에 일정한 크기의 양 압력을 걸어주면 토양 내의 물을 밀어내어 물이 용기 밖으로 빠져나온다.

(4) 배출된 물의 양을 측정하여 토양 내에 남아있는 물의 양을 역산하면 압력용기에 가해진 양압력하의 함수량을 구할 수 있다.

(5) 압력을 변화시키면서 (3), (4)의 과정을 반복한다.

이와는 반대로 압력을 낮추어 주면 토양은 일정량의 물을 흡수하게 되고 이때도 마찬가지로 압력과 함수량의 관계를 알수 있게 된다. 포화된 토양에서 압력을 점차로 높여 주면서 추출된 물의 양을 측정하는 것을 흡의 마름과정에 대한 물보유함수를 구하는 것이라고 한다면 잔류함수량을 가진 토양에서 압력을 낮추어서 흡수되는 물의 양을 측정하는 것은 흡의 젖음과정에 대한 물보유함수를 구하는 것이 된다. 젖음과정에 대한

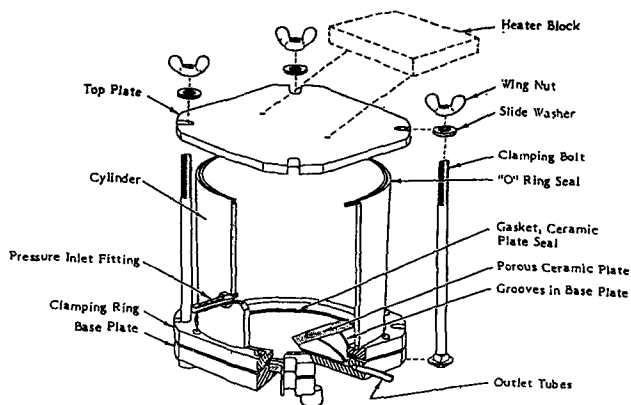


Figure 3. Cutaway view of the extractor.

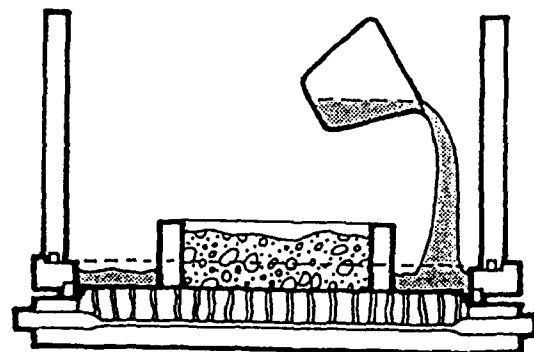


Figure 4. Process of saturating soil.

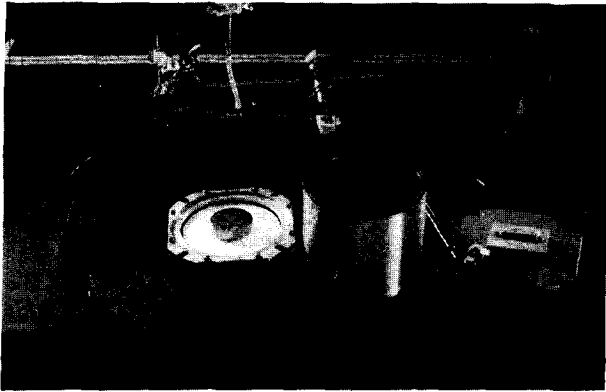


Photo 2. Settled soil on the ceramic plate.

실험방법은 우선 잔류함수량까지 도달한 토양시료에 압력을 낮추어 주면서 흡수되는 물의 무게를 측정한다. 15 bar의 압력을 48시간 정도 가해준 후 압력용기를 열고 시료의 무게를 측정하고 이를 다시 건조기에 넣어 48시간 지난후 시료의 무게를 측정하면 잔류함수량을 추정할 수 있게 된다. 그러나 본 실험에서는 2 bar가 한계인 다공성세라믹판을 사용하였기 때문에 잔류함수량이 실제보다 큰 값으로 추정되었다고 판단된다.

실험시료의 물리적 분류 및 특성

본 실험에서는 서울시 관악구 신림동 서울대학교내 소재한 나대지에서 채취한 토양(Seoul Univ. Soil, SUS)과 성남시 경원대학교 근처 나대지에서 채취한 토양(Kyeongwon Univ. Soil, KUS)을 사용하였다. 이들 토양의 물리적 특성을 알아보기 위하여 입경분포, 포화함수량, 잔류함수량, 포화투수계수 등의 값을 실험을 통하여 살펴보았다.

실내실험에 적합한 시료를 구성하기 위하여 현장에서 채취한 토양을 우선 5 mm 크기 이상의 자갈을 분리한 후 이를 자연건조하여 사용하였다. 실험에 사용한 토양시료를 체분석(sieve analysis)한 결과 입경별 누가곡선은 Figure 5와 같다. 입경별 누가곡선에 의하면 KUS시료는 미사(silt)가 10%, 세사(fine sand)가 22%, 조사(coarse sand)가 68%로 국제토양학회법이나 미국농무부에 의해 제안된 토성분류법(삼각도표법)에 의해 분류된 토성은 사토(sand, S)와 양질사토(loamy sand, LS)사이 해당되며, SUS시료는 미사가 4%, 세사가 8%, 조사가 88%로 사토

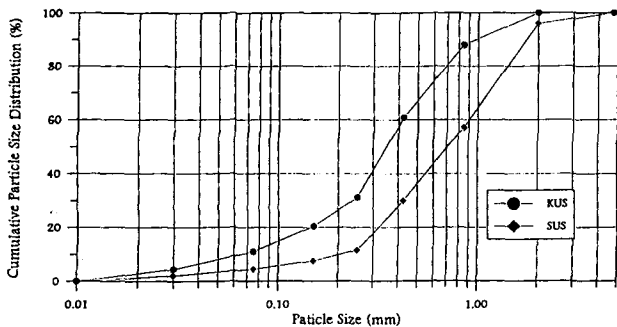


Figure 5. Cumulative particle size distribution for KUS and SUS.

(sand)에 해당한다.

토양에서의 비포화흐름이나 오염원의 이송에 중요한 영향을 주는 요소가 포화함수량(θ_s), 잔류함수량(θ_r), 그리고 체적밀도(ρ_b)이다. 여기서 잔류함수량(residual water content)이란 모세관수(capillary water)중 식물이 뿌리를 통하여 더 이상 흡수할 수 없는 정도의 함수량을 의미하며 위조점(wilting point)이라고도 한다. 이 때의 모세관압력은 15 bar에 해당하는데, 본 연구에서는 체적기압관 추출장치의 다공성 세라믹판의 한계로 인해 2 bar의 압력을 4일 동안 가했을 때의 함수량을 잔류함수량으로 추정하였다.

체적밀도(bulk density)란 자연상태의 토양에서 토양입자 간의 부피 뿐만 아니라 공극의 부피를 합한 부피에 대한 밀도를 말하는데 이 특성들을 구하기 위해 원통형 시료채취기를 이용하여 일정부피의 포화토양을 채취하고 이 시료를 105°C 오븐에 건조시킨후 무게를 측정하였다(Gravimetric method; Topp, 1993).

앞에서 기술한 바와 같이 물보유함수식을 이용한 비포화투수계수 추정에 있어 비포화흐름의 정확한 계산을 위하여는 정확한 포화투수계수를 필요로 한다. 본 연구에서는 실험에 사용하는 두 시료에 대하여 정수두방법을 이용한 포화투수계수를 측정하였는데 본 연구에서 사용한 정수두 실험장치는 Figure 6과 같다. Figure 6에서와 같이 정수두유지를 위하여 고수조를 설치하였으며 정수두유지를 위하여 필요한 물은 펌프를 이용하여 공급하였다. 일정수두 이상의 물은 배수관을 통하여 배수시켰다. 이때 측정된 포화투수계수는 다음과 같은 공식을 이용하였다.

$$K_s = \frac{Q}{A} \frac{L}{h_1 + h_2} \quad (1)$$

여기서 K_s : 포화투수계수, Q : 유출유량, A : 시료의 단면적, L : 시료의 길이 그리고 h_1, h_2 : 수두이다.

실험을 통하여 측정된 실험시료들에 관한 포화함수량, 잔류함수량, 체적밀도를, 그리고 포화투수계수를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 사용한 함수량은 부피함수량(volumetric water content)이다.

물보유함수의 매개변수 추정

Mishra 등(1989)에 의하면 대표적으로 많이 쓰이는 물보유함수는 Brooks-Corey(1964a, b)식과 van Genuchten(1980)식이라고 보고하고 있다. Russo와 Bresler(1980b)는 7개 흙에 대한 실측자료를 이용하여 Brooks-Corey식의 매개변수를 추정하였는데 만족할 만한 결과를 얻었다고 보고하고 있다. 한편 Talsma(1985)는 Brooks-Corey식을 이용하여 비포화투수계수를 유도한 다음 14개 흙에 대한 실측자료와 비교하였는데, Brooks-Corey식은 모든 흙에 대해 사용하기에는 부적절하다고 보고하였다. Nielsen 등(1986)은 공기유입값을 포함하고 있는 Brooks-Corey식은 공기유입값 부근에서 급격한 변화를 발생시킨다고 보고하고 있다.

한편 Yeh 등(1985a)과 Mantoglou 등(1987b)은 비포화 비균질 매질의 추계학적 모형을 구성하면서 식이 간단하게 구성되어 있는 Gardner(1958)-Russo(1988)식을 사용했다.

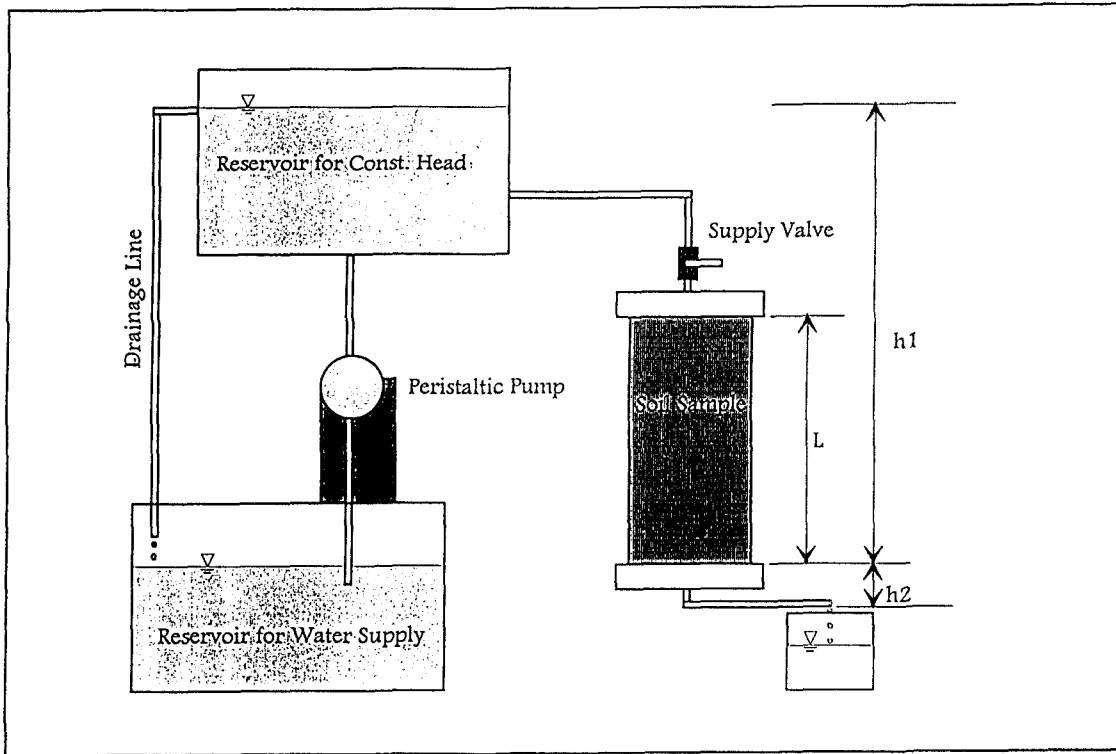


Figure 6. Schematic of the apparatus for constant head method.

van Genuchten식은 모든 모세관압력수두에서 함수보유능력이 연속이므로 불연속인 Brooks-Corey식에 비해 수치해석시 효율성을 증대할 수 있는 장점을 갖는 반면에 Field 등(1984)은 van Genuchten식의 비포화투수계수를 유도하여 실험치와 비교하였는데 실험실에서 구한 물보유함수가 사용되었을 때 van Genuchten식은 비포화투수계수의 예측에 부적절하고 오히려 현장자료가 바람직하다고 보고 있다. 그렇지만 실제로 van Genuchten식(1980)은 실험에서 얻은 물보유함수의 비선형성

을 가장 잘 모의하기 때문에 van Genuchten식이 발표된 이후 많은 연구자들이 van Genuchten식을 사용하여 비포화 흐름과 관련된 제반문제를 해석하고 있다. 본 연구에서는 실측된 물보유함수자료를 가지고 대표적인 물보유함수인 Gardner식, Brooks-Corey식 그리고 van Genuchten식의 매개변수를 추정하여 각 변수가 갖는 물리적인 의미와 각식의 장,단점을 비교하고자 한다. 대표적인 물보유함수인 Gardner식, Brooks-Corey식 그리고 van Genuchten식을 Table 2에 정리하였다.

Table 1. Saturated water content, residual water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity for SUS and KUS

Soil Sample	Saturated Water Content (θ_s , cm^3/cm^3)	Residual Water Content (θ_r , cm^3/cm^3)	Bulk Density (ρ_b , g/cm^3)	Saturated Hydraulic Conductivity (K_s , cm/sec)
SUS	0.3788	0.05	1.7046	1.67×10^{-2}
KUS	0.4549	0.05	1.6126	2.22×10^{-3}

Table 2. Water retention function and hydraulic conductivity function by gardner, brooks-corey, van genuchten

Author	Gardner	Brooks-Corey	van Genutchen
Parameters			
S	$(1 + 0.5\alpha \psi) \exp(-0.5\alpha \psi)^{45}$	$[\frac{\psi}{\psi_{ac}}]^{-\beta}$, $\psi > \psi_{ac}$ 1, otherwise	$\frac{1}{(1 + A\psi ^n)^m}$, $m = 1 - \frac{1}{n}$
$K_r(\psi)$	$\exp(-\alpha \psi)$	$[\frac{\psi}{\psi_{ac}}]^{-n}$, $\psi > \psi_{ac}$ 1, otherwise ($n = 2 + 2.5\beta$)	$\frac{1 - A\psi ^{n-1} (1 + A\psi ^n)^{-m}}{(1 + A\psi ^n)^{m2}}$

S: effective degree of saturation ($= \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$), θ : water content, θ_s : saturated water content, θ_r : residual water content, ψ : capillary pressure head, ψ_{ac} : air entry value, $K_r(\psi)$: relative hydraulic conductivity ($= \frac{K(\psi)}{K_s}$), $K(\psi)$: unsaturated hydraulic conductivity, K_s : saturated hydraulic conductivity, α , β , A: empirical parameters

물보유함수는 강한 비선형성을 지니고 있으므로 SAS(Statistical Analysis System)의 DUD(Doesn't Used Derivative)방법을 이용하여 매개변수를 추정하였다. DUD방법은 각식에 대한 미분치가 필요 없고 반복법으로 매개변수를 추정하는 방법이다.

실험결과와 분석

비포화흐름에서 물이 공극으로 들어갈 때 bottle-neck 효과와 물이 공극으로부터 나올 때 raindrop현상이 발생하게 되어 젖음 또는 마름과정에 따라 물보유함수가 차이가 나는 이력현상이 발생하는데 본 실험에서도 이력현상이 명확히 측정되었다. 측정된 물보유함수값을 Figure 7에 도시하였다. SUS시료에 대한 물보유함수의 실측값을 나타낸 Figure 7(a)와 KUS시료에 대한 Figure 7(b)를 비교해 보면 같은 함수량일 때 상대적으로 입경이 작은 KUS시료의 모세관압력이 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 물보유함수인 Gardner식, Brooks-Corey식 그리고 van Genuchten식의 실측치에 대한 매개변수 추정을 통하여 얻어진 각 도양시료별 매개변수값은 Table 3과 같다.

Table 3에서 보듯이 Gardner식의 매개변수 α 는 시료의 입경

Table 3. The parameter of water retention function by gardner, brooks-corey, van Genuchten

Water retention function	Drying process		Wetting process	
Gardner	α		α	
(KUS)	0.0526		0.1186	
(SUS)	0.0889		0.2147	
Brooks-Corey	ψ_{ac}	β	ψ_{ac}	β
(KUS)	9.95	0.3372	5.30	0.4094
(SUS)	6.47	0.7474	8.59	0.9763
van-Genuchten	A	n	A	n
(KUS)	0.03729	1.6113	0.04048	2.1987
(SUS)	0.02331	3.7089	0.06273	2.6123

이 클수록 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 마찬가지로 Brooks-Corey의 매개변수 β 와 van Genuchten의 매개변수 n도 입경이 클수록 큰 값을 나타낸다. 결국 매개변수 α , β 그리고 n은 입경의 크기에 관계되는 변수임을 알 수 있다. Brooks-Corey의 공기유입값 ψ_{ac} 은 공극수가 배수될수 있는 최대한의 압력으로서 일반적으로 실험적으로 구하기가 어려우므로 본 연구에서는

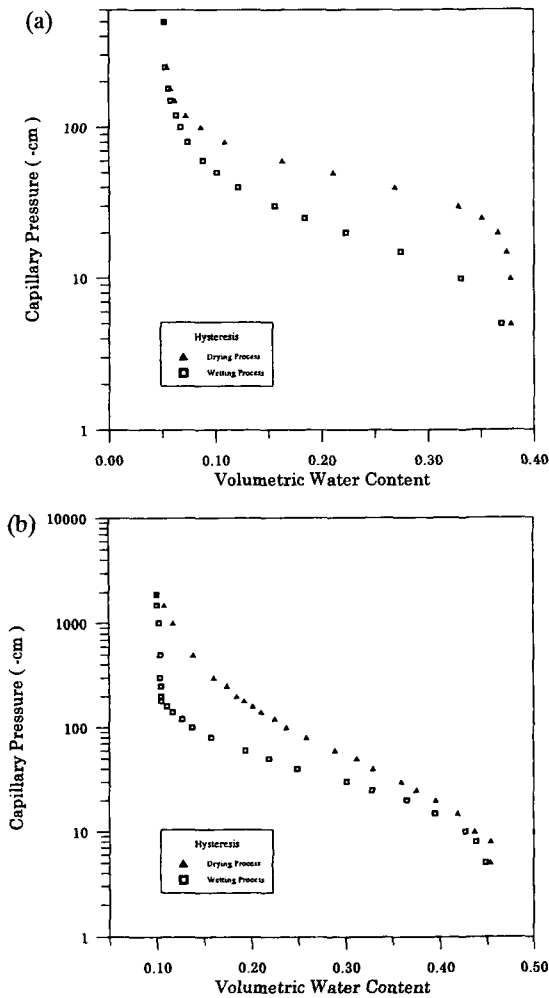


Figure 7. Measured retention data: (a) SUS, (b) KUS.

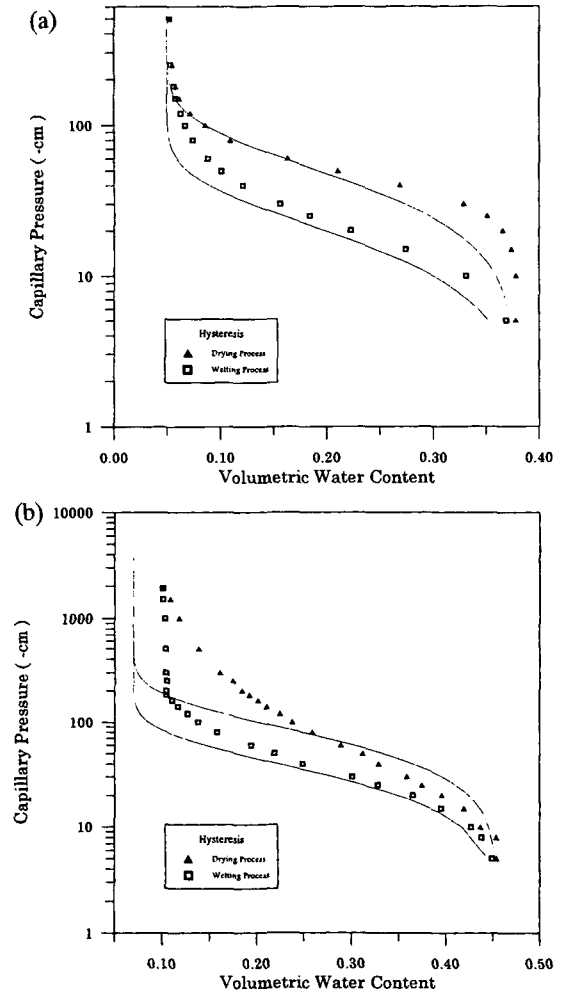


Figure 8. Comparison between measured and estimated data by Gardner equation: (a) SUS, (b) KUS.

Brooks-Corey의 매개변수 β 와 마찬가지로 실측치에 대한 매개변수 추정을 하였다. 마름과정과 젖음과정에서 공통적으로 KUS시료보다 SUS시료의 공기유입값의 절대값이 크게 나타났다. 일반적으로 입경이 작을수록 공기유입값의 절대치는 커지게 되는데 본 실험에서는 이러한 물리적 의미를 내포하는 공기유입값을 추정할 수 없었다.

Figure 8은 측정자료와 Gardner식으로 추정된 물보유함수값을 비교한 것이다. SUS시료에 대한 결과(Figure 8(a))를 살펴보면 마름과정에서 함수량이 약 0.20보다 작고 모세관압력수두가 약 -50 cm보다 작은 부근에서는 Gardner식에 의해 추정된 값과 실측값이 대체로 일치하였지만 공기유입값 부근에서는 추정된 모세관압력수두가 컸다. 젖음과정인 경우에는 전반적으로 Gardner식의 추정값이 실측값보다 모세관압력수두가 컸다. KUS시료에 대한 결과(Figure 8(b))를 살펴보면 마름과정과 젖음과정 모두 함수량이 작은 잔류함수량부근에서 실측값과 큰 차이를 보였다. 이러한 사실로부터 물보유함수는 공기유입값 부근과 잔류함수량 부근에서 강한 비선형성을 나타내는데 매개변수가 하나인 Gardner식으로는 두 개의 비선형구간을 동시에 모의해내지 못한다는 것을 알 수 있었다.

Figure 9는 측정자료와 Brooks-Corey식으로 추정된 물보유함수값을 비교한 것이다. Figure 9에서 보듯이 추정된 값은 공기유입값 부근에서는 대체로 일치하였지만 잔류함수량 부근의 비선형구간에서는 실측값에 대한 모의를 못해내는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Brooks-Corey식이 물리적 의미를 갖는 공기유입값에 대한 매개변수와 곡선의 기울기를 규정하는 매개변수(β)로 규정된 식이기 때문에 나타난 것으로 해석된다. Gardner식은 두 개의 비선형구간 중 임의의 하나의 구간에 대한 모의를 하였지만 Brooks-Corey식은 둘 중 공기유입값 부근을 중점으로 실측값을 모의해내는 모형이기 때문에 Gardner식 보다 개선된 물보유함수라고 평가할 수 있다.

Figure 10는 측정자료와 van Genuchten식으로 추정된 물보유함수값을 비교한 것이다. Figure 10에서 보듯이 van Genuchten식으로 추정된 값은 측정된 값과 매우 일치하는 것을 알 수 있다. 다만 KUS시료에 대한 결과(Figure 10(b))를 살펴볼 때 잔류함수량 부근에서 차이를 보인다. 본 실험에서는 2 bar가 한계인 다공성세라믹판을 사용하여 KUS시료의 잔류함수량을 추정했기 때문에 van Genuchten식으로 모의된 값과 차이를 보인다고 판단된다.

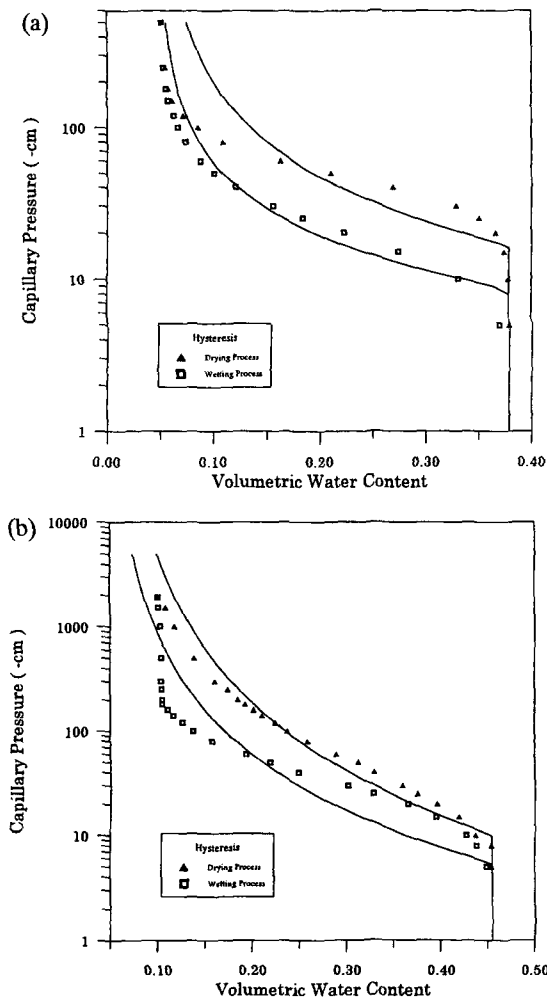


Figure 9. Comparison between measured and estimated data by Brooks-Corey equation: (a) SUS, (b) KUS.

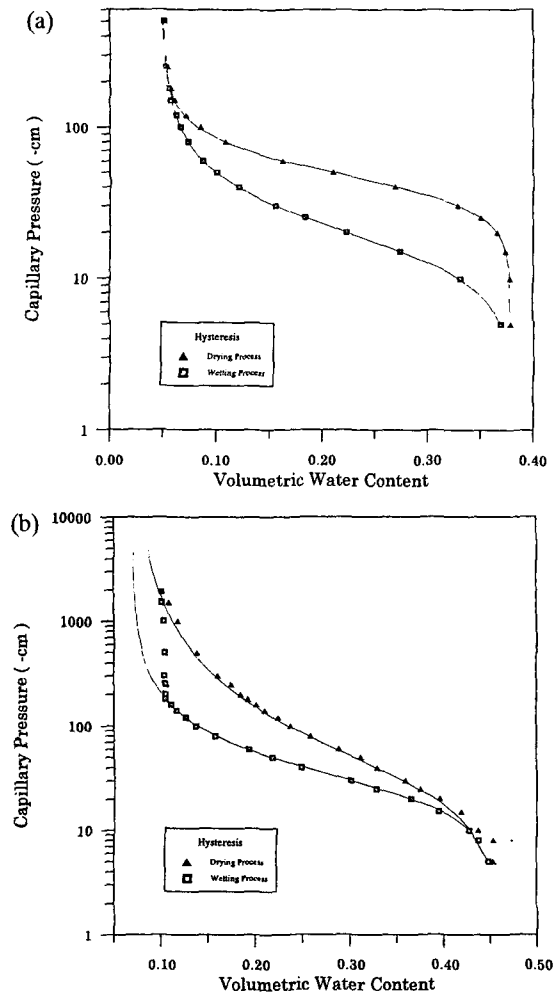


Figure 10. Comparison between measured and estimated data by van Genuchten equation: (a) SUS, (b) KUS.

결국 대표적인 물보유함수를 실측치와 비교하여 모의 해본 결과 van Genuchten식이 가장 정확하게 추정됨을 알 수 있었다.

결 론

본 연구에서는 비포화흐름을 해석하는데 있어 기초자료가 되는 물보유함수를 추정하기 위하여 SUS, KUS 등 두가지 국내토양에 대한 물보유함수를 기압관추출장치를 이용하여 측정하였다. 실험결과 bottle-neck 효과와 물이 공극으로부터 나올 때 raindrop현상이 발생하게 되어 젖음 또는 마름과정에 따라 물보유함수가 차이가 나는 이력현상이 발생하였다. 대표적인 물보유함수인 Gardner식, Brooks-Corey식 그리고 van Genuchten식의 실측치에 대한 매개변수 추정을 통하여 그 물리적 의미와 각 토양시료별 매개변수 값을 구하였다. Gardner식의 매개변수 α 와 Brooks-Corey의 매개변수 β , 그리고 van Genuchten의 매개변수 n 은 토양의 입경 크기에 관계 되는 변수임을 알 수 있었다. 그러나 본실험에서는 van Genuchten의 매개변수 A 와 Brooks-Corey식의 매개변수 β 의 물리적 의미를 찾기가 어려웠다. Gardner식은 물보유함수의 두 개의 강한 비선형구간 중 임의의 하나의 구간에 대한 모의를 하였지만 Brooks-Corey식은 둘 중 공기유입값 부근을 중점으로 실측값을 모의해내는 모형임을 알 수 있었고 이로서 Brooks-Corey식은 Gardner식 보다 개선된 물보유함수라고 평가할 수 있었다. van Genuchten식으로 추정된 값은 측정된 값과 매우 일치하는 것을 알 수 있었고 이로서 van Genuchten식이 가장 적합한 물보유함수임을 알 수 있었다.

참고문헌

- 강우영, 박재현, 박창근, 선우중호, 1995, "다공성 매질에서의 이력 현상에 대한 실험적 연구", 한국수자원학회지, 28(8), p. 215-222.
- 박창근, 1993, 비포화 비균질 다공성 매질에서 이력현상모형의 개발과 적용, 서울대학교 공학박사 학위논문.
- 정상옥, 1988, "A Simplified Method for Higher Order Scanning Curves in the Soil Water Characteristic Function". 한국수문학회지, 21(2), p. 193-201.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T., 1964a, "Hydraulic Properties of Porous Media and Their Relation to Drainage Design". Trans. of ASAE, 7(1), p. 26-28.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T., 1964b, "Hydraulic Properties of Porous Media". Hydrol. Paper No.3, Colorado State Univ., Fort Collins.
- Field, J. A., Parker, J. C. and Powell, N. L., 1984, "Comparison of Field- and Laboratory-Measured and Predicted Hydraulic Properties of a Soil with Macropores". Soil Science, 138(6), p. 385-396.
- Gardner, W. R., 1958, "Some Steady State Solutions of Unsaturated Moisture Flow Equations with Application to Evaporation from a Water Table". Soil Science, 85, p. 228-232.
- Mantoglou, A. and Gelhar, L. W., 1987b, "Capillary Tension Head Variance, Mean Soil Moisture Content, and Effective Specific Soil Moisture Capacity of Transient Unsaturated Flow in Stratified Soils". W.R.R., 23(1), p. 47-56.
- Mishra, S. and Parker, J. C., 1989, "Effects of Parameter Uncertainty on Predictions of Unsaturated Flow". Jr. of Hydrology, 108, p. 19-33.
- Nielsen, D. R., van Genuchten, M. T. and Biggar, J. W., 1986, "Water Flow and Solute Transport Process in the Unsaturated Zone". W.R.R., 22(9), p. 89S-108S.
- Russo, D., 1988, "Determining Soil Hydraulic Properties by Parameter Estimation: On the Selection of a Model for the Hydraulic Properties". W.R.R., 24(3), p. 453-459.
- Russo, D. and Bresler, E., 1980b, "Field Determinations of Soil Hydraulic Properties for Statistical Analysis". Jr. of Soil Sci. Soc. Am., 44, p. 697-702.
- Russo, D. and Bresler, E., 1981, "Soil Hydraulic Properties as Stochastic Processes: I. An Analysis of Field Spatial Variability". Jr. of Soil Sci. Soc. Am., 45, p. 682-687.
- Russo, D. and Bresler, E., 1982, Soil Hydraulic Properties as Stochastic Processes: II.
- Talsma, T., 1985, "Prediction of Hydraulic Conductivity from Soil Water Retention Data". Soil Science, 140(3), p. 184-188.
- Topp, G. C., 1969, "Soil-Water Hysteresis Measured in a Sandy Loam and Compared with the Hysteretic Domain Model", Proc. of Soil Sci. Soc. Am., 33, p. 645-651.
- Topp, G. C., 1971a, "Soil Water Hysteresis in Silt Loam and Clay Loam Soils", W.R.R., 7(4), p. 914-920.
- Topp, G. C. 1993, Soil Water Content. Pages 541-557 in M. R. Carter, Ed. Soil Sampling & Methods of Analysis, Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers.
- van Genuchten, M.T., 1980, "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils". Jr. of Soil Sci. Soc. Am., 44, p. 892-898.
- Yeh, T.-C. J., Gelhar, L. W. and Gutjahr, A. L., 1985a, "Stochastic Analysis of Unsaturated Flow in Heterogeneous Soils: I. Statistically Isotropic Media". W.R.R., 21(4), p. 447-456.