

부산 임기광산 폐석적치장 광미의 불포화 특성곡선 산정

Estimation on Unsaturated Characteristic Curves of Tailings obtained from Waste Dump of Imgi Mine in Busan

송 영 석¹ Song, Young-Suk

김 경 수² Kim, Kyeong-Su

정 승 원³ Jeong, Sueng-Won

이 춘 오⁴ Lee, Choon-Oh

Abstract

To investigate the unsaturated characteristics of the tailings obtained from the waste dump at Imgi mine, matric suction and volumetric water content were measured in both drying and wetting processes using Automated Soil-Water Characteristics Curve Apparatus. Based on the measured result, Soil Water Characteristic Curves (SWCC) were estimated by van Genuchten model. According to the unsaturated soil classification method, the tailings of the waste dump correspond to clayey sand. As a result of Suction Stress Characteristic Curve (SSCC) by Lu and Likos model, SSCC has a shape of S which is similar to SWCC. The hysteresis phenomenon occurred in SSCCs, which means the suction stress of drying path is larger than that of wetting path in the same effective degree of saturation. The effective stress of unsaturated soil is equal to that of saturated soil when matric suction is less than Air Entry Value (AEV). However, the effective stress of unsaturated soil is larger than that of saturated soil when matric suction is more than AEV. Meanwhile, unsaturated hydraulic conductivity by van Genuchten model decreased with increasing matric suction, and the hydraulic conductivity of drying path is larger than that of wetting path.

요 지

본 연구에서는 임기광산 폐석적치장을 형성하고 있는 광미의 불포화 특성을 조사하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 측정장치를 이용하여 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 측정결과를 토대로 van Genuchten 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정하였다. 산정된 흡-함수특성곡선(SWCC)의 α 와 n 을 이용하여 흡의 종류를 구분하면 폐석적치장 광미시료는 점토질 모래(clayey sand)에 해당한다. Lu and Likos 방법으로 광미시료의 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정한 결과 흡-함수특성곡선(SWCC)과 유사한 S자형 곡선을 나타낸다. 동일한 유효포화도에서 건조과정의 흡입응력이 습윤과정의 흡입응력보다 크게 발생하는 이력현상이 나타났다. 그리고 불포화토의 유효응력은 공기함입치 이내로 작용할 경우 포화시 유효응력과 동일하나, 공기함입치 이상의 모관흡수력이 작용할 경우 포화토의 유효응력보다 큰 값을 갖는다. 한편, van Genuchten 방법으로 산정된 광미시료의 불포화

1 정희원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Tel: +82-42-868-3035, Fax: +82-42-868-3414, yssong@kigam.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정희원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

3 정희원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

4 비희원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (Senior Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

투수계수는 모관흡수력이 증가함에 따라 감소하며, 건조과정의 투수계수가 습윤과정의 투수계수보다 크게 발생됨을 알 수 있다.

Keywords : Waste dump, Tailings, Soil-Water Characteristic Curve (SWCC), Suction Stress Characteristic Curve (SSCC), Hydraulic Conductivity Function (HCF)

1. 서론

휴폐광산이 유발하는 광해에는 폐경도 방치에 의한 지반침하, 산성광산폐수의 유출, 광미 및 폐석의 적치에 의한 주변 환경오염 및 적치사면 붕괴 등을 들 수 있다 (Dorbry and Alvarez, 1967; Banks et al., 1997; Blight, 2000) 광산들은 대부분 험준한 산골에 위치하고 정상부근의 노두에서부터 하부로 수평갱을 개설하면서 채굴하므로 채광 초기에는 소규모의 폐석적치장을 계곡을 따라 축대를 쌓고 설치하여 운영하지만, 사갱이나 수갱을 개착해서 채굴하면서 대규모의 폐석적치장을 설치하게 된다. 석탄광산의 폐쇄로 인하여 방치되는 폐석사면들은 미관상 좋지 않을 뿐만 아니라, 불안정한 사면의 경우에는 집중호우시 인명과 재산피해를 유발할 수 있으므로 이에 대한 철저한 보완대책이 필요하다(Blight et al., 1981; Lo and Kohn, 1996; Kang et al., 2004).

특히, 폐석적치장은 적절한 보수와 유지관리가 이루어지지 않고 자연 상태로 방치되어 있는데, 이로 말미암아 적치장의 법면 일부의 광미가 유실되고 표면침식 등의 문제가 발생되고 있다(Blight and Amponash-Da Costa, 2004). 실제로 국내에서도 집중강우로 인한 적치장의 일부 법면이 유실되거나 변형이 발생되고, 폐석적치장의 하중으로 인하여 하부에 존재하는 사면의 변형이 발생된 사례가 있다(Cho et al., 2011, 2013). 따라서 폐광산지역에 대한 환경공학적인 측면에서의 안정성과 더불어 지반공학적인 측면에서의 안정성을 확보할 수 있는 연구가 요구되고 있다.

Fig. 1은 자연적인 물 순환에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 정상상태의 지하수위는 일반적으로 지형조건, 토질특성, 지표하의 물의 침투 혹은 증발 등으로 인하여 조절된다. 지하수위와 지표면 사이에 위치하고 있는 불포화 영역에 존재하는 물의 양은 전체 물 순환시스템의 전체 양에 작은 부분을 차지한다. 그러나 불포화영역은 대기과 일정깊이에서의 지하수 대수층사이에서 필수적으로 형성되므로, 실제로 물 순환시스템 상에서 매우 중

요하다.

이러한 불포화 영역에 존재하는 흙은 고전적인 포화토의 이론으로는 설명할 수 없는 다른 거동특성을 보인다. 즉, 불포화토에서는 부간극수압(또는 모관흡수력)의 영향으로 인한 겉보기 점착력의 발생과 간극 내의 공기 함입으로 인한 투수성 저하 등으로 인해 외부 하중조건에 따른 변형특성이나 지반내 간극수의 침투흐름이 포화토와는 다른 거동특성을 나타낸다(Jennings and Burland, 1962; Fredlund and Morgenstern, 1977; Lu and Likos, 2006).

불포화토의 거동을 이해하는데 가장 중요한 요소는 흙-함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)이다. 흙-함수특성곡선(SWCC)의 정의는 함수비 혹은 포화도와 모관흡수력의 관계 또는 응력상태 변수로 규정할 수 있다(Fredlund and Rahardjo, 1993). 한편 Lu and Likos(2006)는 모관흡수력과 포화도의 상관관계를 토대로 불포화토의 응력상태를 평가할 수 있는 흡입응력(suction stress)을 제안하였다. 흡입응력은 모관흡수력 혹은 유효포화도와 특정한 상관관계를 갖게 되는데 이를 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristics Curve, SSCC)이라 제안하였다. 흡입응력특성곡선은 불포화토의 응력상태를 평가하는 중요한 지표로 사용할 수 있으며, 함수량에 따른 지반의 강도를 예측 및 평가할 수 있다.

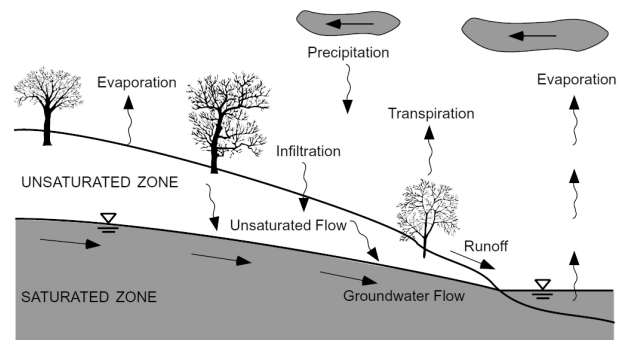


Fig. 1. Role of the unsaturated zone in the natural hydrologic circle (Lu and Likos, 2004)

본 연구에서는 부산 임기광산 폐석적치장에서 채취된 광미의 불포화 특성을 조사하기 위하여 흡·함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC) 및 투수계수함수(Hydraulic Conductivity Function, HCF)를 산정하고자 한다. 이를 위하여 먼저 자동 흡·함수특성곡선 시험장치(Song et al., 2012)를 이용하여 임기광산 폐석적치장 광미의 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력과 체적함수비를 측정한다. 측정된 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡·함수특성곡선(SWCC)을 산정하고, 불포화 상태에서 포화도에 따른 모관흡수력을 분석한다. 흡·함수특성곡선(SWCC)으로부터 구한 불포화 관련계수를 이용하여 Lu and Likos(2006)에 의해 제안된 흡입응력특성곡선(SSCC)과 van Genuchten(1980)에 의해 제안된 불포화 투수계수함수(HCF)를 산정하고자 한다.

2. 시험재료 및 방법

2.1 현장개요

본 연구의 대상지역인 임기광산은 부산광역시 기장군 철마면 임기리에 위치하고 있으며, 납석광산으로 1980년대까지 가행되다가 1992년에 폐광되었다. 그 이후 특별한 광해방지대책이 수립되지 않은 채 현재까지 방치되고 있다.

본 지역은 경상 누층군의 하양층군에 속하는 대동층과 이를 피복 또는 관입하는 유천층군의 화산암류 및 백악기 불국사 심성 관입암이 분포한다. 또한 안산암질 암이 열수변질작용을 받아 생성된 혼합형 납석광상이다. 주요 구성광물은 석영, 견운모, 납석, 고령토 및 황철석이다(Lee and Kang, 1964; Son et al., 1978).



Fig. 2. Site view of waste dump at Imgi mine

연구 대상지역은 부산광역시의 상수원으로 이용되고 있는 회동저수지의 상류지역으로서 폐석적치장을 통해 흘러나오는 침출수가 어떤 정화매체도 거치지 않고 폐석적치장 옆 계곡으로 유입되고 있다. 이 지역의 pH를 측정한 결과 폐석적치장에서 흘러나오는 침출수의 pH는 3이하의 강산성을 띄고 있으며, 지속적으로 유출되는 황(S), 철(Fe) 등 여러 중금속을 함유한 지하수가 계곡으로 유입되어 수영강으로 합류하고 최종적으로 회동저수지로 유입되고 있다(Jeong et al., 2005).

2.2 시험재료

본 연구에 사용된 광미 시료는 폐석적치장 사면에서 채취한 것이며, Fig. 2는 임기광산 폐석적치장의 시료채취현장을 나타낸 것이다. 대상 시료의 공학적 특성을 알아보기 위하여 단위중량, 비중, 입도분석, 엑소성한계, 다짐시험 등을 수행하였다. 시험결과에 따르면 대상 시료는 통일분류법(USCS) 상에서 실트질 모래(SM)에 해당하며, 현장건조단위중량은 $1.594t/m^3$ 으로 조사되었다.

Fig. 3은 폐석적치장 광미의 입도분포곡선을 나타낸

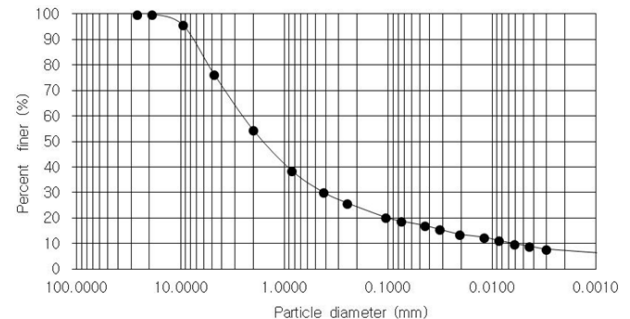
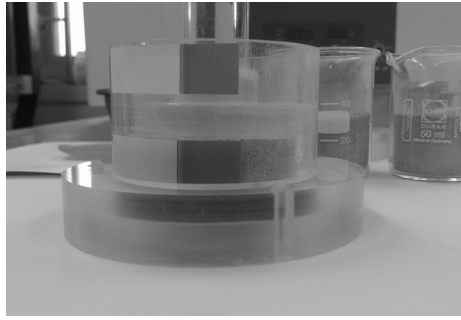


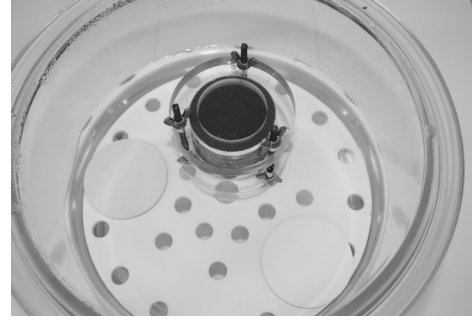
Fig. 3. Grain size distribution curve of the mine tailings

Table 1. Physical properties of the mine tailings

Property	Symbol	Unit	Measured value
Specific gravity	G_s	-	2.73
Natural water content	w	(%)	6.87
Total unit weight	γ_t	(t/m^3)	1.70
Dry unit weight	γ_d	(t/m^3)	1.59
Effective particle size	D_{10}	(mm)	0.0064
Uniformity coefficient	e_u	-	406.30
Coefficient of curvature	e_g	-	10.80
Liquid limit	LL	(%)	24.49
Plastic limit	PL	(%)	N.P.
USCS	-	-	SM



(a) Three-layered compaction



(b) Saturation of soil sample

Fig. 4. Forming and saturating soil sample

것이며, Table 1은 폐석적치장 광미 시료의 기본적인 물리적 특성을 측정한 결과이다.

2.3 시료성형

본 연구에서는 임기광산 폐석적치장 광미의 현장조건을 모사하기 위하여 현장에서의 건조단위중량인 $1.59t/m^3$ 의 조건으로 시료를 성형하였다. 시료를 성형하기 위하여 플라스틱 몰드(직경 5.05cm, 높이 3.89cm)와 플라스틱 봉을 이용하여 3층 다짐을 실시하였다. Fig. 4(a)는 플라스틱 몰드에 시료를 성형하는 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 층마다 플라스틱 봉으로 시료를 다져 현장에서의 건조단위중량과 동일하게 시료를 성형하였다. 그리고 시료 상하부에 다공석을 두어 포화시 시료내부에 물이 원활하게 흐를 수 있도록 하였다. 시료를 포화시키기 위하여 데시케이터와 진공펌프를 활용하였다. 즉 데시케이터 내에 정제된 증류수를 채우고, 성형된 시료를 약 2/3정도 물에 잠기도록 한 다음 진공펌프를 이용하여 데시케이터 내부를 진공상태로 만든다. 이때 시료는 높은 배압을 받게 되며, 물이 시료의 하부로부터 포화되면서 상부로 흘러가기 때문에 간극내 남아 있는 공기를 제거하면서 포화가 진행된다. 시료를 포화시키기 위하여 진공상태의 데시케이터 내부에 약 24시간 두었다. 일반적으로 모래의 경우 약 1시간, 실트 및 점토의 경우 약 24시간 이상을 두면 시료가 포화된다(Song et al., 2010). Fig. 4(b)는 데시케이터 내부에 성형된 시료를 위치한 모습이다.

2.4 흡-함수특성곡선(SWCC) 측정

본 연구에서는 임기광산의 폐석적치장 광미의 흡-함수

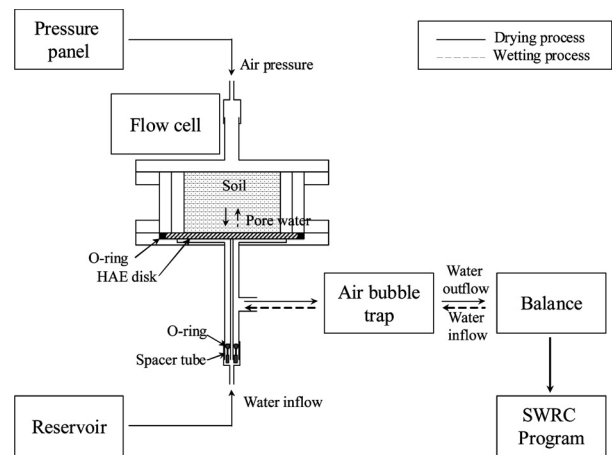


Fig. 5. Conceptual diagram of the automated SWCC apparatus (Song et al., 2012)

특성곡선(SWCC)을 산정하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 시험장치를 활용하였다(Song et al., 2012). 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생할 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화토의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다. 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 시험장치는 압력조절장치, 플로우셀, 물저장소, 공기방울트랩, 저울, 시료준비장치, 측정시스템 등으로 구성되어 있다. 그리고 축변환기법을 도입하여 공기의 압력을 0-300kPa 범위까지 적용시킬 수 있다.

Fig. 5는 본 시험장치의 계통도를 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 먼저 압력조절장치에 의해 공기압을 흡시료에 가하게 된다. 공기압에 의해 포화된 시료내 간극수가 빠져나가게 되며, 이러한 간극수는 HAE(High Air Entry) 디스크와 공기방울트랩을 거쳐 저울을 통하여 측정된다. HAE 디스크는 공기와 흡입자들이 이동하는 것은 제한하지만 물의 흐름을 제한하지 않는다. 이때 공기압은 흡시료의 모관흡수력으로 작용

하게 되며, 흡시료가 가지는 일정한 공기함입치를 넘어 서게 되면 흡시료 내부에 있는 간극수가 빠져나오기 시작한다. 본 실험에서는 3 bar의 공기압까지 제어할 수 있는 HAE 디스크를 이용하였다.

본 시험장치에서는 실시간으로 간극수의 유출입 상태를 그림으로 보여줌으로써 다음 단계의 공기압을 가하는 시점을 정확하게 알 수 있다. 따라서 공기압을 단계별로 증가시켜 흡시료내 간극수를 배출시킴으로서 건조과정에서 대한 함수특성을 나타낼 수 있으며, 반대로 공기압을 단계별로 감소시켜 흡시료 내 간극수를 유입시킴으로서 습윤과정의 대한 함수특성을 나타낼 수 있다. 이러한 결과를 이용하여 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선을 예측할 수 있으며, 불포화토의 특성치를 산정할 수 있다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 모관흡수력과 간극수량 측정결과

Fig. 6은 폐석적치장 광미에 대하여 모관흡수력 재하 및 제하시 시간에 따른 간극수의 측정량을 나타낸 것이다. 즉, 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정과, 반대로 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정을 재현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 건조과정에서는 모관흡수력이 증가함에 따라 간극수의 유출량은 증가하며, 습윤과정에서는 모관흡수력이 감소함에 따라 간극수의 유입량이 증가함을 알 수 있다. 단계별 모관흡수력을 조절하기 위하여 일정단계 모관흡수력 수준에서 간극수 유출 및 유입량이 수렴된 이후 다음 단계의 모관흡수력을 재하 혹은

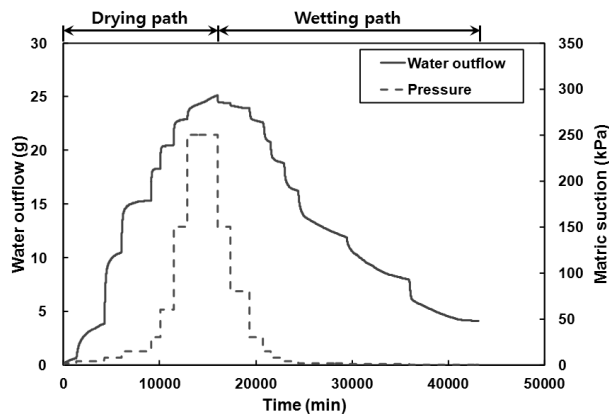


Fig. 6. Mass of water outflow for various matric suction states

제하하였다. 한편 습윤과정의 시험시간이 건조과정의 시험시간보다 상대적으로 긴 것으로 나타났다. 이것은 건조과정에서 간극에 갇힌 독립된 공기에 의한 흐름의 저항에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 측정결과를 이용하여 모관흡수력과 체적함수비의 상관관계를 도식한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시료내 체적함수비가 감소함에 따라 모관흡수력이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 동일한 체적함수비에서 건조과정의 모관흡수력은 습윤과정의 모관흡수력보다 더 큰 것으로 나타났다.

3.2 흡-함수특성곡선(SWCC)

측정된 모관흡수력과 간극수량을 토대로 van Genuchten (1980)방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. van Genuchten(1980)은 Mualem(1976)의 제안식을 토대로 유효포화도(S_e)와 압력수두(h)의 상관관계를 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. 식 (1)은 van Genuchten(1980)에 의해 제안된 흡-함수특성곡선(SWCC) 산정식을 나타낸 것이다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right]^m \quad (1)$$

여기서, α 는 공기유입값과 관계된 계수, n 은 변곡점의 경사에 관계된 계수, 그리고 m 은 잔류함수비에 관계된 계수이다.

측정된 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 비선형 최소제곱법 (nonlinear least squares analysis)을 적용하

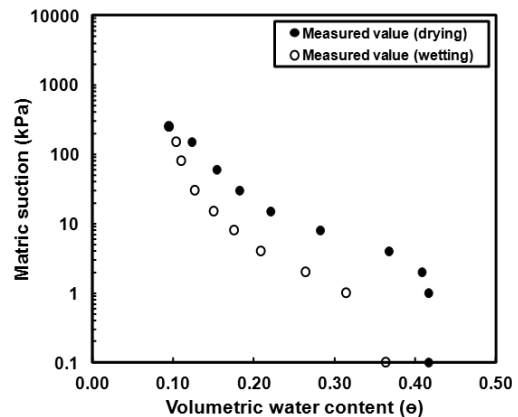


Fig. 7. Relationship between matric suction and volumetric water content

여 van Genuchten(1980)방법의 불포화 관련계수인 α , n 및 m 을 산정하였다. 최소제곱법의 신뢰도를 나타내는 결정계수(coefficient of determination, R^2)는 건조과정의 경우 0.994, 습윤과정의 경우 0.998로 매우 높게 나타났다. Table 2는 건조 및 습윤과정에 대한 폐석적치장 광미 시료의 불포화 관련계수를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 공기유입값과 관계된 계수 α 는 습윤과정에서 더 큰 값을 가지며, 변곡점의 경사에 관계된 계수 n 과 잔류함수비에 관계된 계수 m 은 건조과정에서 더 큰 값을 갖는다. 표에 나타낸 불포화 관련계수와 식 (1)을 이용하여 광산폐석적치장 광미의 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다.

Fig. 8은 van Genuchten(1980)방법을 적용하여 산정한 불포화 관련계수를 이용하여 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡-함수특성곡선(SWCC)에서 모관흡수력과 체적함수비는 S자 형태의 비선형적인 관계를 나타내며, 곡선의 기울기도 차이를 보이는 것으로 나타났다.

한편, 건조과정에서의 공기함입치(AEV)와 잔류체적함수비(θ_r^d)와 습윤과정에서의 수분함입치(Water Entry Value, WEV)와 잔류체적함수비(θ_r^w)를 구하기 위하여 Fig. 8의 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC) 상에서 도해적인 방법을 적용하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 건조과정에서 공기함입치(AEV)는 2.5kPa이

며, 포화체적함수비(θ_s^d)는 0.416, 잔류체적함수비(θ_r^d)는 0.095이며, 습윤과정에서 수분함입치(WEV)는 0.6kPa이며, 포화체적함수비(θ_s^w)는 0.364, 잔류체적함수비(θ_r^w)는 0.095로 산정할 수 있다.

본 연구에서 사용된 시료는 납석 광미시료이며, 공기함입치(AEV)는 2.5kPa, 흙의 종류는 실트질 모래(SM)이다. 참고로 Abdul-Hussain and Fall(2011)의 실험에 사용된 구리 광미시료의 공기함입치(AEV)는 5kPa, 흙의 종류는 실트질 모래(SM)이며, 금 광미시료의 공기함입치(AEV)는 6kPa, 흙의 종류는 소성이 낮은 실트(ML)이다.

Fig. 9는 흙의 종류에 따라 불포화 특성을 나타낸 것으로 Lu et al.(2010)에 의해 제안되었다. 즉, 공기함입치와 관련된 계수 α 와 변곡점의 경사에 관련된 계수 n 의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 폐석적치장 광미시료는 점토질 모래(clayey sand, SC)의 불포화 특성을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 입도분포곡선을 이용한 통일분류법에 의하면 광미시료는 실트질 모래(SM)로 구분된다. 이는 입도분포곡선을 토대로 한 분류방법과 불포화특성곡선을 토대로 한 분류방법의 차이로 인하여 발생된 것으로 판단된다. 이러한 이유는 광미시료의 경우 모래의 성분이 우세하고 실트 혹은 점토의 성분이 작으므로, 간극 내에서 물이 빠져나가는 속도는 모래성분에 주로 영향을 받으며, 실트 혹은 점토

Table 2. Best curve fitting parameter by van Genuchten model

Path	α (kPa ⁻¹)	n	m	R^2
Drying	0.180	1.811	0.448	0.994
Wetting	0.787	1.670	0.401	0.998

Table 3. Hydrological parameters determined with SWCC data

Path	AEV/WEV (kPa)	θ_s	θ_r
Drying	2.5	0.416	0.095
Wetting	0.6	0.364	0.095

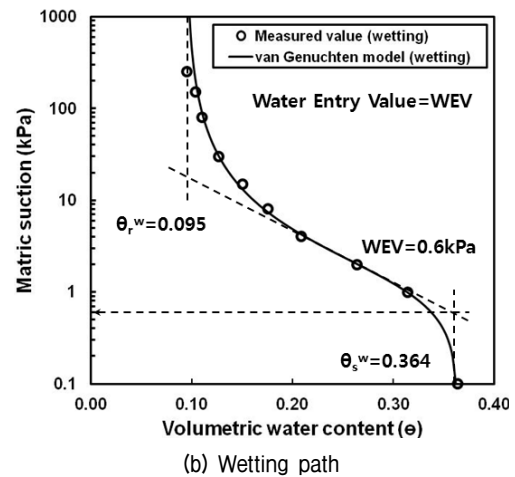
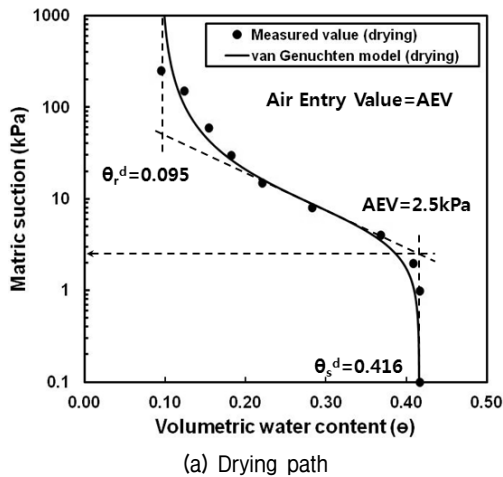


Fig. 8. SWCCs estimated by van Genuchten model

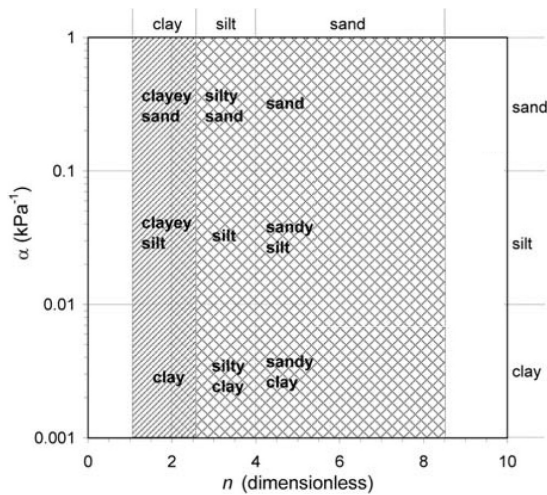
의 함량에 따른 차이가 명확하게 구분되기 어렵기 때문이다.

Fig. 10은 폐석적치장 광미 시료의 건조 및 습윤과정에 따른 측정결과와 van Genuchten(1980) 방법으로 예측한 흡-함수특성곡선(SWCC)을 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 모관흡수력에서 건조과정의 체적함수비가 습윤과정의 체적함수비 혹은 유효포화도 보다 더 크게 나타났다. 이와 같이 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)이 일치하지 않는 현상을 이력현상(hysteresis)라고 한다. 이와 같은 이력현상의 원인으로는 잉크병 효과(Ink-bottle effect), 모세관 응축(Capillary condensation), 갇힌 공기(Entrapped air), 팽창 및 수축(Swelling and Shrinkage), 접촉각 이력현상

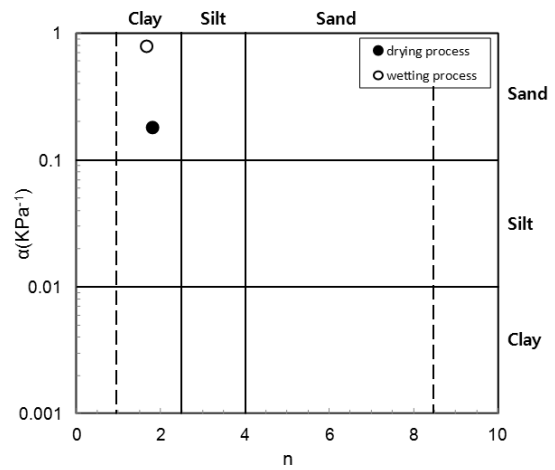
(Contact angle hysteresis)을 들 수 있다. 이 가운데 이력현상의 주요원인으로는 잉크병 효과를 들 수 있다. 잉크병 효과는 흙의 구조적 특징(간극의 크기, 형상 및 분포)이 비균질하기 때문에 발생하며, 비균질한 간극에서의 모세관을 고려함으로써 알 수 있다. 즉 물을 흡수하는 습윤과정에서는 큰 간극의 영향이 절대적이고, 물을 배수하는 건조과정에서는 작은 간극의 영향이 주요하기 때문이다(Lu and Likos, 2004).

3.3 흡입응력특성곡선(SSCC)

Lu and Likos(2006)는 흡입응력항(σ^s)을 적용하여 불포화토의 유효응력을 식 (2)와 같이 Terzaghi(1943)의

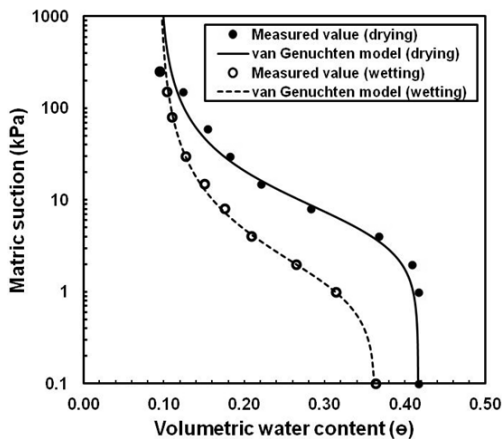


(a) Illustration of suction stress regimes for various soils (Lu et al., 2010)

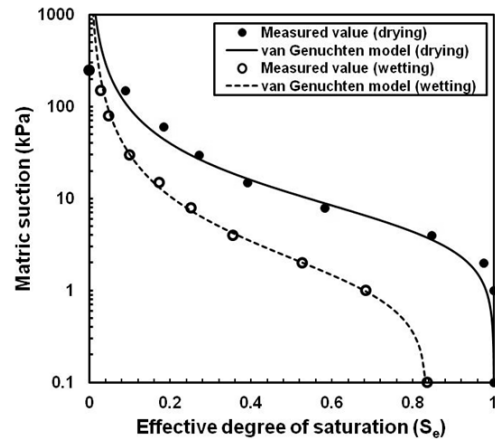


(b) Unsaturated parameters of tailings in waste dump

Fig. 9. Range of values of the α and n parameters according to soil types



(a) Relation between matric suction and volumetric water content



(b) Relation between matric suction and effective degree of saturation

Fig. 10. Comparison of SWCCs in drying and wetting paths

유효응력과 유사한 형태로 제안되었다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (2)$$

여기서 σ^s 는 흡입응력이다.

그리고 Lu and Likos(2006)는 불포화토의 흡입응력을 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) S_e \quad (3)$$

식 (3)은 체적함수비 혹은 유효포화도와 모관흡수력 사이의 상관관계를 적용하여 추가적으로 확장시킬 수 있다. 만약 van Genuchten(1980)의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 활용하면, 유효포화도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_e = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^m = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (4)$$

여기서, α , n 및 m 은 불포화 계수로서, α 는 공기함입치와 관련된 계수, n 은 변곡점의 경사에 관련된 계수, 그리고 m 은 잔류함수비에 관련된 계수이다. 또한 $m = 1 - 1/n$ 로 나타낼 수 있다.

식 (3)에 식 (4)를 대입하고 모관흡수력의 항을 제외하면 식 (5)와 같이 전체포화범위에 대한 흡입응력을 산정할 수 있는 공식을 유도할 수 있다.

$$\sigma^s = -\frac{S_e}{\alpha} \left(S_e^{1-n} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad 0 \leq S_e \leq 1 \quad (5)$$

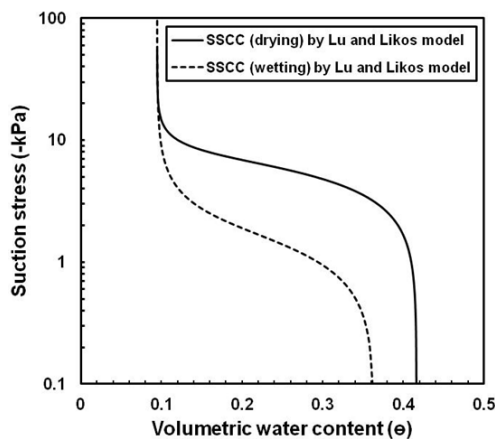
이와 유사하게 식 (3)에 식 (4)을 대입하고 유효포화도의 항을 제외하면 식 (6)에서 보는 바와 같이 전체 모관흡수력 범위에 대한 흡입응력 산정공식을 유도할 수 있다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \quad u_a - u_w \leq 0 \quad (6a)$$

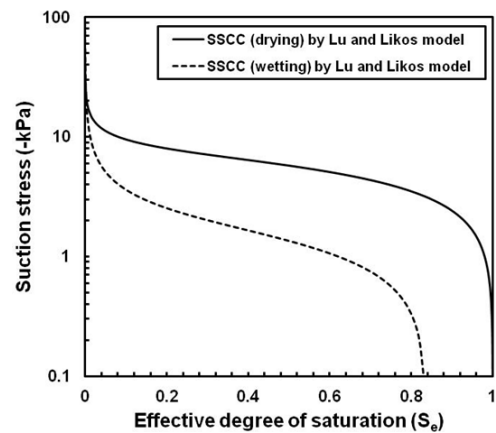
$$\sigma^s = -\frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{(n-1)/n}} \quad u_a - u_w \geq 0 \quad (6b)$$

Lu and Likos(2006)에 의하면 흡입응력은 고결작용, 반데르발스 인력, 전기이중층 척력에 기인한 입자간의 물리화학적 응력과, 표면장력 및 부간극수압으로 인하여 발생하는 모관흡수력의 결과로 개념화 시킬 수 있다. 흡입응력을 구성하는 이러한 입자간 응력들은 함수비, 포화도 혹은 모관흡수력의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 흡입응력은 흡-함수 시스템의 특성함수로 나타낼 수 있다. 즉, 흡입응력은 모관흡수력 혹은 유효포화도와 특정한 상관관계를 갖게 되며, 이를 흡입응력특성곡선(SSCC)이라고 한다.

Fig. 11은 광산폐기물 폐석미분에 대한 건조 및 습윤 과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)으로부터 측정된 불포화도 관련계수(α , n)와 식 (3) 및 식 (6)을 이용하여 체적함수비 혹은 유효포화도에 따른 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이



(a) Relation between suction stress and volumetric water content



(b) Relation between suction stress and effective degree of saturation

Fig. 11. SSCCs estimated by Lu and Likos model

건조과정과 습윤과정의 유효포화도 혹은 체적함수비에 따른 흡입응력의 거동은 비슷하지만 크기는 다르게 나타났다. 동일한 유효포화도에서 건조과정의 흡입응력이 습윤과정의 흡입응력보다 큰 것으로 나타났다. 그리고 흡입응력특성곡선(SSCC)은 흡-함수특성곡선(SWCC)과 유사한 S자형 곡선을 나타내고 있다.

흡입응력특성곡선(SSCC)에 따르면 광미로 이루어진 폐석적치장의 경우 강우침투로 인하여 물이 유입되면서 흡입응력은 지속적으로 감소하게 되며, 유효응력도 지속적으로 감소하게 됨을 알 수 있다. 따라서 폐석적치장의 사면의 경우 강우시 급격한 사면붕괴보다는 적치장내 물이 유입되면서 유효응력이 지속적으로 감소되는 진행성 사면붕괴가 발생할 것이다.

Fig. 12는 폐석적치장 광미의 모관흡수력에 따른 흡입응력과 포화시 흡입응력($\sigma^s = -(u_a - u_w)$)을 함께 도시한 것이다. 모관흡수력이 공기함입치 이내로 작용할 경우 흡입응력은 포화시 흡입응력상태를 유지하는 것으로 나

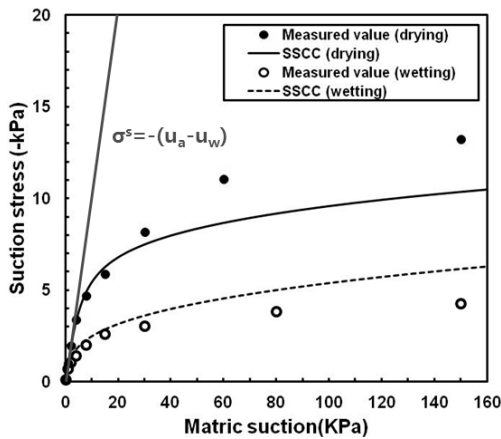


Fig. 12. Variation of suction stress in terms of matric suction

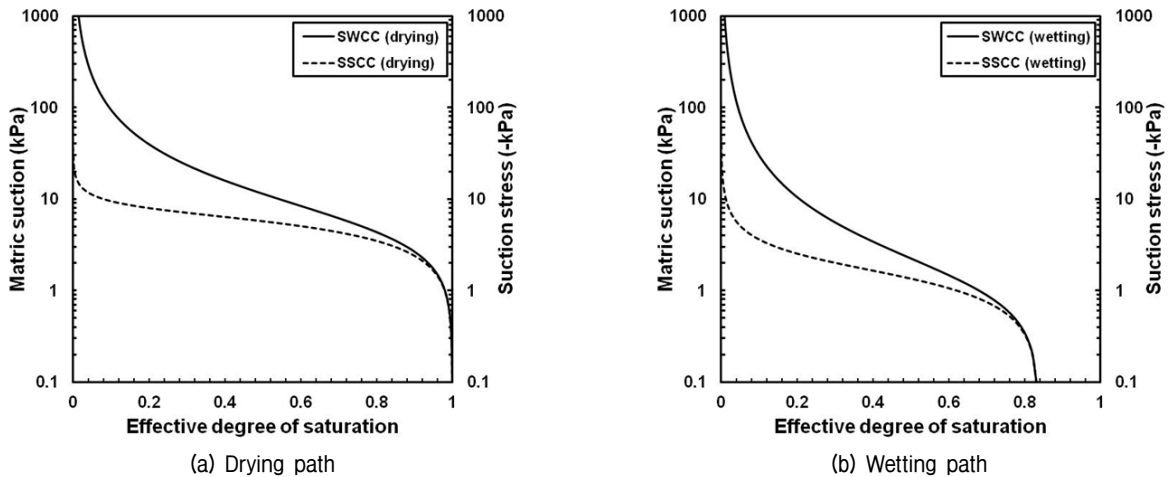


Fig. 13. Comparison between SWCC and SSCC

타났다. 그러나 모관흡수력이 공기함입치 이상으로 작용할 경우 모관흡수력에 따른 흡입응력의 증가속도는 감소하나 지속적인 증가를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 불포화토의 유효응력은 공기함입치 이상의 모관흡수력이 작용할 경우 포화토의 유효응력과 다른 값을 갖게 되며, 포화토의 유효응력보다 큰 값을 갖는다. 즉, 불포화토의 전단강도는 포화토의 전단강도보다 큰 값을 갖게 되므로 지반의 안정성 측면에서 유리하게 작용한다.

3.4 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)의 비교

Fig. 13은 폐석적치장 광미의 건조 및 습윤과정에서 산정된 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 함께 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유효포화도가 감소함에 따라 모관흡수력과 흡입응력은 증가하는 것으로 나타났으며, 두 곡선의 형상도 유사한 것으로 나타났다. 유효포화도가 감소함에 따라 흡입응력은 비교적 작게 증가하는 반면 모관흡수력은 상대적으로 크게 증가함을 알 수 있다. 한편, 유효포화도가 감소함에 따라 모관흡수력과 흡입응력의 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 건조과정의 경우 유효포화도가 약 0.9이상, 습윤과정의 경우 유효포화도가 약 0.75이상의 구간에서는 모관흡수력과 흡입응력은 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다.

3.5 투수계수함수(HCF)

보통 실험적인 방법으로 불포화토의 투수계수함수

를 결정하기 어렵기 때문에 이론적인 방법을 선호하고 있다. 그 가운데 흡-함수특성곡선의 불포화 계수를 이용하여 투수계수함수를 추정하는 계수추정방법이 주로 사용되고 있다. 특히 Mualem(1976)의 모델을 기초로 한 van Genuchten(1980)의 투수계수함수 모델이 계수추정방법으로 가장 많이 이용되고 있다. 식 (7)은 van Genuchten(1980)이 제안한 불포화토의 투수계수함수를 나타낸 것이다.

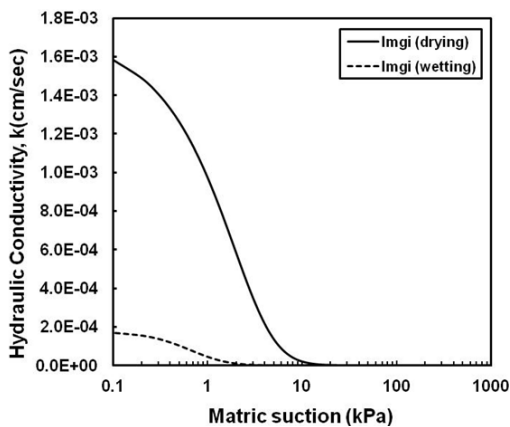
$$k = k_s \times S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (7)$$

여기서, k =불포화 투수계수, k_s =포화투수계수, S_e =유효포화도, $m=1-1/n$ ($0 < m < 1$)

Table 4는 폐석적치장 광미에 대한 건조 및 습윤과정의 포화투수계수를 나타낸 것이다. 이를 위하여 먼저 삼축압축시험기를 이용한 투수시험을 통하여 광미의 포화투수계수를 측정하였다. 표에서 보는 바와 같이 건조과정에서의 포화투수계수는 습윤과정에서의 포화투수계수보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이 값을 토대로 van Genuchten(1980)이 제시한 불포화토의 투수계수함수 산정식을 이용하여 건조 및 습윤과정에서 모관흡수력 혹은 유효포화도에 따른 투수계수를 산정할 수 있다.

Table 4. Hydraulic conductivity of mine tailings under saturated condition

Condition	k_s (cm/sec)
Drying	1.71×10^{-3}
Wetting	1.76×10^{-4}

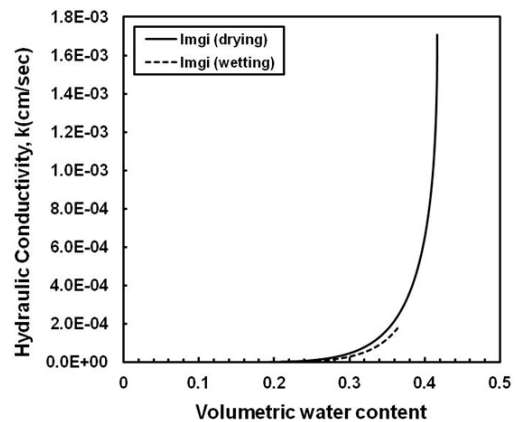


(a) Relation between hydraulic conductivity and matric suction

Fig. 14는 폐석적치장 광미의 불포화 투수계수함수를 나타낸 것이다. Fig. 14(a)은 폐석적치장 광미의 모관흡수력과 불포화 투수계수의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 모관흡수력이 증가함에 따라 불포화 투수계수는 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 동일한 모관흡수력 상태에서 불포화 투수계수는 건조과정의 경우가 습윤과정의 경우보다 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 Wayllace and Lu(2012)의 실험결과와 유사하며, 이는 이력현상을 일으키는 원인에 의해 발생된 것으로 유추할 수 있다. 한편 Fig. 14(b)는 폐석적치장 광미의 체적함수비와 불포화 투수계수의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 체적함수비가 증가함에 따라 불포화 투수계수는 증가하는 것으로 나타났다. 낮은 체적함수비에서 건조 및 습윤과정의 투수계수는 유사하게 나타나지만 이후 동일한 체적함수비에서 습윤과정의 투수계수가 건조과정의 투수계수보다 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 습윤과정의 경우 건조과정에 비하여 체적함수비에 따른 불포화 투수계수의 변화가 비교적 작은 것으로 나타났다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 임기광산 폐석적치장을 형성하고 있는 광미의 불포화 특성을 조사하였다. 이를 위하여 먼저 현장조건에 맞게 광미시료를 성형하고, 자동 흡-함수특성곡선 시험장치(Song et al., 2012)를 이용하여 임기광산 폐석적치장 광미의 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 측정된 모관흡수력과



(b) Relation between hydraulic conductivity and volumetric water content

Fig. 14. HCFs estimated by van Genuchten model

체적함수비를 토대로 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡수특성곡선(SWCC)을 산정하였다. 이를 토대로 Lu and Likos(2006)에 의해 제안된 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정하고, van Genuchten(1980)의 방법으로 불포화 투수계수함수(HCF)를 산정하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 임기광산 폐석적치장 광미에 대한 흡수특성곡선(SWCC)을 산정한 결과 불포화 관련계수인 α 와 n 은 점토질 모래(clayey sand)의 범위에 존재함을 알 수 있다. 그러나 통일분류법에 의하면 광미시료는 실트질 모래(SM)로 구분된다. 광미시료의 경우 모래성분이 우세하므로 간극 내에서 물이 빠져나가는 속도는 모래성분에 주로 영향을 받으며, 실트 혹은 점토의 함량에 따른 차이를 명확하게 구분하기 어렵다.
- (2) 임기광산 폐석적치장 광미의 흡입응력특성곡선(SSCC)은 흡수특성곡선(SWCC)과 유사한 S자형 곡선을 나타낸다. 그리고 동일한 유효포화도에서 건조과정의 흡입응력이 습윤과정의 흡입응력보다 크게 발생하는 이력현상이 나타난다.
- (3) 흡입응력특성곡선(SSCC)에 따르면 광미로 이루어진 폐석적치장의 경우 강우침투로 인하여 물이 유입되면서 흡입응력은 지속적으로 감소하게 되며, 유효응력도 서서히 감소되므로 폐석적치장의 사면에서는 강우시 진행성 사면붕괴가 발생할 것으로 예측할 수 있다.
- (4) 불포화도의 유효응력은 공기함입치 이내로 작용할 경우 포화시 유효응력과 동일하나, 공기함입치 이상의 모관흡수력이 작용할 경우 포화도의 유효응력보다 큰 값을 갖는다.
- (5) 임기광산 폐석적치장 광미의 불포화 투수계수는 모관흡수력이 증가함에 따라 감소하며, 건조과정의 투수계수가 습윤과정의 투수계수보다 크게 발생됨을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘광산개발에 따른 지질환경재해 확산제거 기술 개발(No. 14-3212)’ 과제와 미래창조과학부의 재원인 한국연구재단-공공복지안전연구사업(No. 2012M3A2A1050983)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌 (References)

1. Abdul-Hussain, N. and Fall, M. (2011), Unsaturated hydraulic properties of cemented tailings backfill that contains sodium silicate, *Engineering Geology*, Vol.123, pp.288-301.
2. Banks, D., Younger, P.L., Arnesen, R.T., Iversen, E.R., and Banks, S.B. (1997), Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly, *Environmental Geology*, Vol.32, No.3, pp.157-174.
3. Blight, G.E. (2000), Management and operational background to three tailings dam failures in South Africa, *Slope Stability in Mining*, Littleton, Colorado, USA, pp.383-390.
4. Blight, G.E. and Amponash-Da Costa, F. (2004), Towards the 1000-year erosion-free tailings dam slope - A study in South Africa, *Ground Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization*, New Hampshire, USA, pp.365-376.
5. Blight, G.E., Rea, C.E., Caldwell, J.A., and Davidson, K.W. (1981), Environmental protection of abandoned tailings dams, *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, Vol.1, pp.303-308.
6. Cho, Y.C. and Song, Y.S. (2011), Investigation and analysis of ground deformation at a coal waste depot in Dogye, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.21, No.3, pp.199-212. (in Korean)
7. Cho, Y.C. and Song, Y.S. (2013), Deformation characteristics of a slope at a coal waste depot through analysis of monitoring results, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.23, No.1, pp.19-27. (in Korean)
8. Dobry, R. and Alvarez, L. (1967), Seismic failures of Chilean tailing dams, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.93, No.SM6, pp.237-260.
9. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons Inc., New York.
10. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. (1977), Stress Variables for Unsaturated Soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.103, No.5, pp.447-466.
11. Jennings, J.E.B. and Burland, J.B. (1962), Limitation to the use of effective stresses in unsaturated soils, *Geotechnique*, Vol.12, pp. 125-144.
12. Jeong, Y.W., Ko, K.S., Kim, J.G., Kim, T.K., Kim, H.S., Park, K.G., Park, S.W., Shin, S.C., Shin, J.H., Ahn, J.S., Yeom, S.J., Lee, J.H., Lee, J.S., Lee, P.G., Im, G.J., Jeon, C.W., Ji, S.W., Choi, Y.S., Hong, S.G., and Hong, Y.G. (2005) *A study on urban geo-environmental assessment, management, and improvement in the Pusan area*, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, OAA2004020-2005(2), pp.130-134. (in Korean)
13. Kang, S.S., Cheong, Y.W., Choi, S.B., and Baek, H.J. (2004), Stability analysis of the coal mine waste dump, *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol.41, No.4, pp.291-300. (in Korean)
14. Lee, M.S. and Kang, P.C. (1964) Explanatory text of the geological map of Yangsan sheet (1:50,000), Geological Survey of Korea.
15. Lo, R.C. and Kloth, E.J. (1996), Design against tailings dam failure, *Int. Sym. Seismic Environ. Aspects Dam Design*, Santiago, Chile, Vol.1, pp.35-50.
16. Lu, N. and Likos, W.J. (2004), *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York.
17. Lu, N. and Likos, W.J. (2006), Suction stress characteristic curve for unsaturated soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.2, pp.131-142.

18. Lu, N., Godt, J.W. and Wu, D.T. (2010), A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil, *Water Resources Research*, Vol.46, W05515.
19. Mualem, Y. (1976), A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resource Research*, Vol.12, pp.513-522.
20. Park, H.Y., Ju, J.W., Cheong, Y.W., and Yeo, I.W. (2007), Feasibility study of slug test in unsaturated mine tailings pile of the Imgi abandoned mine in Busan, *Journal of KoSSGE*, Vol.12, No.3, pp.10-16.
21. Son, C.M., Lee, S.M., Kim, Y.K., Kim, S.W., and Kim, H.S. (1978), Explanatory text of the geological map of Dongrae and Weolnae sheets (1:50,000), Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources.
22. Song, Y.S., Hwang, W.K., Jung, S.J., and Kim, T.H. (2012), A comparative study of suction stress between sand and silt under unsaturated conditions, *Engineering Geology*, Vol.124, pp.90-97.
23. Song, Y.S., Lee, N.W., Hwang, W.K., and Kim, T.H. (2010), Construction and application of an automated apparatus for calculating the Soil-Water Characteristic Curve, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.20, No.3, pp.281-295 (in Korean)
24. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley, New York.
25. van Genuchten, M.T. (1980), A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
26. Wayllace, A. and Lu, N. (2012), A transient water release and imbibitions method for rapidly measuring wetting and drying soil water retention and hydraulic conductivity functions, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.35, No.1, GTJ103596.

Received : January 29th, 2014
 Revised : February 17th, 2014
 Accepted : March 13th, 2014