

# 준설 점토 지반에서의 증발 이론 개발

## Evaporation Theory for Reclaimed Clay

이 형 주\*<sup>1</sup> Lee, Hyung-Joo

이 인 모\*<sup>2</sup> Lee, In-Mo

이 영 남\*<sup>3</sup> Lee, Young-Nam

성 상 규\*<sup>4</sup> Sung, Sang-Gyu

### Abstract

Desiccation of a soil is basically the removal of water by evaporation, which is controlled by evaporativity and evaporability. Surface evaporation improves the trafficability which is essential for the access of construction equipment in the area reclaimed with soft clay. The existing traditional methods for evaluating evaporation can not account for the deformation of reclaimed soft soils during evaporation. Therefore, a theoretical model for predicting the rate of evaporation from the surface of a deformable material is proposed. The model is based on a system of equations for coupled heat and mass transfer in unsaturated soils. The modified pressure plate extractor test and glass desiccator test were carried out to obtain the soil-water characteristic curve for a deformable soil. The column drying test was conducted to investigate one dimensional water flow, heat flow and evaporation in the surface. A finite difference program was developed to solve the coupled nonlinear partial differential equations, which permit the study of water, vapor and heat flows in the deformable soil. Comparison between measured and simulated values shows a reasonably good matching between the two.

### 요 지

흙의 건조현상은 기상조건에 지배받는 evaporativity와 지반의 물 전달 능력에 지배받는 evaporability의 영향을 받는다. 지표면증발은 점토로 매립된 지반에서 건설장비의 주행성을 확보하기 위해서는 필요불가결한 요소이다. 본 논문에서는 준설 점토 지반에서의 증발현상을 규명할 수 있는 모델을 제시하였다. 이 모델은 포화토 및 불포화토에서의 수분과 물의 이동 및 열전달에 대한 식으로 구성되어 있다. 흙수분 특성곡선을 구하기 위하여 압력판추출시험 (pressure plate extractor test)과 데시케이터시험이 수행되었으며 일차원 증발현상을 규명하기 위하여 컬럼증발시험을 수행하였다. 체적이 변하는 흙에서의 물, 증기 및 열전달 비선형 미분방정식을 풀기 위하여 유한차분프로그램을 개발하였으며 실험결과와 이론해를 비교하였다.

**Keywords :** Evaporation, Numerical analysis, Reclaimed clay, Soil-water characteristic curve

### 1. 서 론

급속한 경제발전과 산업화에 따라 국토의 효율적 이

용이 요구되고 있으며 이를 위해 국토의 평면적 확대가 요구되고 있다. 우리나라 서해안과 남해안에서는 국토확장을 통한 산업단지조성을 위하여 활발히 해

\*1 정회원, 삼성건설 토목영업팀, 차장 (Member, Ph. D., Samsung Engrg. & Construction, General Manager, hyungjoo.lee@samsung.com)

\*2 정회원, 고려대학교 토목환경공학과, 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Env. Engrg., Korea Univ.)

\*3 정회원, 현대건설 기술연구소 소장 (Member, Ph. D., Hyundai Engrg. & Construction, Executive Director)

\*4 정회원, 롯데건설 기술연구소 책임연구원 (Member, Ph. D., Lotte Construction, Chief Researcher)

안매립사업이 수행되고 있다. 현재까지의 해안매립사업은 매립재로 산토나 해성 모래가 사용되었다. 이와 같은 재료는 점점 구득이 어려워지고 있으며 그 가격 또한 상승하고 있다. 한 예로 전라남도 울촌 제1지방공단 조성사업은 매립재로 해성 모래 대신 인근지역에서 쉽게 구득할 수 있는 해성토를 준설하여 매립하는 공법을 사용하여 시행 중에 있다. 해성토로 준설 매립된 지역은 함수비가 150%정도인 액성상태이므로 후속공정을 위한 장비의 진입이 불가능하다. 장비진입을 위해서는 해성토로 준설 매립된 단지의 표면을 건조시켜야 한다.

현재까지 증발 시 체적이 변하지 않는 지반에 대해서는 많은 연구들이 행해져왔다. 대부분의 연구에서 지표면에서의 증기압은 Philip 등이 제안한 식(1957)을 사용하고 있다. 일반적으로 이 모델은 짧은 기간동안의 증발 현상에 대해서는 잘 맞는다고 알려져 왔다. 그러나 이 모델은 증발은 체적함수비(volumetric water content)의 차에 의해 이루어진다는 가정을 하고 있으므로 균질하고 등방인 지반에서만 적용가능하다.

Wilson 등(1994)은 비정상류상태에서 물, 증기 및 열의 흐름해석모델을 제안하였다. Wilson 등에 의해 제안된 이론해는 체적이 변하지 않는 조립토에서의 실험결과와 잘 일치하였으나 체적이 변하는 경우에는 적용할 수 없다. Silva 등(1999)은 포화상태에서 자중압밀을 고려할 수 있고 나무뿌리를 통한 물 소비를 고려할 수 있는 모델을 제시하였다. 그러나 이 모델에서는 지표면과 공기 사이에서의 증발현상을 고려하지 않았다.

본 논문에서는 매립재료로 사용되어지고 있는 해성점토와 같이 증발 시 체적이 변하는 흙에서의 증발식을 제안하였다. 제안된 일차원 증발이론을 검증하기 위하여 컷립시험을 실시하였으며 이를 이론해와 비교하였다.

## 2. 이론식 개발

### 2.1 흙-수분 특성곡선

포화된 흙에 흡입력이 작용하면 흙매체의 가장 큰 간극의 물부터 빠져 나오게 된다. 흡입력을 계속 증가시키면 흙 매체의 수분은 계속적으로 감소하게 되며 이로부터 흡입력에 대한 흙수분의 어떤 상관관계를 생각할 수 있으며 이 관계를 나타낸 것이 흙-수분 특성곡선이다. 흙-수분 특성곡선은 많은 사람이 제안(Brooks and Corey,

1964; Aberg, 1996)하였으나 이 모델들은 체적이 변하는 경우에는 적용할 수 없다.

체적이 변하지 않는 경우의 포화도, 체적함수비 및 중량함수비 관계는 다음과 같다.

$$\theta = \frac{e_o}{1+e_o} S = \frac{G_s}{1+e_o} \omega \quad (1)$$

여기서,  $\theta$ 는 체적함수비,  $\omega$ 는 중량함수비,  $e_o$ 는 초기 간극비이고 S는 포화도이다.

식 (1)을 이용하면 체적이 변하지 않는 흙에서의 체적함수비를 알 수 있으나 체적이 변하는 흙에서는 수분이 감소하는 동안 체적이 같이 감소하므로 즉, 간극비가 변하므로 식 (1)을 이용하여 체적함수비를 구할 수가 없다. 체적이 변하는 흙에서 중량함수비로부터 체적함수비를 구하기 위해서는 중량함수비와 간극비와의 관계를 알아야 한다. 이 관계를 알기 위해서는 수축시험(shrinkage test)을 하여야 한다. 따라서 체적이 변하는 흙에서 흙-수분특성곡선을 구하기 위해서는 압력판추출시험과 수축시험을 동시에 실시하여야 한다.

Fredlund 등(1994)은 체적이 변하지 않는 흙에서의 흙-수분특성곡선을 식 (2)와 같이 제안하였다. 식 (2)에서 첫 번째 항은 흡입력이 작용하지 않을 때의 포화체적함수비를 나타내며 두 번째 항은 간극크기의 분포와 관련이 있는 항으로 곡선의 모양을 나타낸다.

$$\theta_i = \theta_s \left[ \frac{1}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}} \right]^m \quad (2)$$

여기서,  $\theta_i$ 는 체적함수비,  $\theta_s$ 는 포화체적함수비,  $\psi$  = 흡입력이고 a, n 및 m은 상수이다. 체적이 변하는 흙에서는 식 (2)의 첫 번째 항인 포화체적함수비가 상수가 아니고 간극비의 함수이므로 식 (2)를 다음과 같이 나타내었다.

$$\theta_i = \theta_{si} \left[ \frac{1}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}} \right]^m \quad (3)$$

여기서,  $\theta_{si}$ 는 포화체적함수비(간극비)이다. 식 (3)에서 첫 번째 항은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\theta_{si} = \frac{e_{(w)}}{1+e_{(w)}} S \quad (4)$$

여기서,  $e_{(w)}$ 는 간극비(중량함수비)이다. 수축실험으로

부터 간극비-중량함수비를 구한 후 식 (4)를 이용하여 중량함수비로부터 체적함수비를 구할 수 있다.

## 2.2 불포화토에서의 흐름방정식

불포화토에서 열, 수증기 및 물의 비정상류 흐름은 Wilson 등(1994)이 제안한 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = C_w \frac{\partial}{\partial y} \left( k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + C_v \frac{\partial}{\partial y} \left( D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

여기서,  $C_w = \frac{1}{\rho_w g m_w^2}$ 는 액체상에 대한 체적변화 계수,  $C_v = \frac{1}{\rho_w^2 g m_w^2} \left( \frac{P+P_v}{P} \right)$ 는 증기상에 대한 체적변화 계수,  $m_w^2$ 는 압밀계수( $m^2/kN$ ),  $D_v$ 는 증기확산 계수 (coefficient of vapor diffusion) ( $kg \cdot m/(kN \cdot s)$ )이고  $P_v$ 는 간극수증기압(kPa)이다.

지반에서 전도와 잠열에 의한 열흐름 방정식은 다음과 같다.

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_v \left( \frac{P+P_v}{P} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left( D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (6)$$

여기서,  $C_h$ 는 지반의 비체적열계수( $J/m^3 \cdot ^\circ C$ ),  $\lambda$ 는 지반의 열전도도( $w/(m \cdot ^\circ C)$ )이고  $L_v$ 는 잠열계수 (latent heat of vaporization)( $J/kg$ )이다.

위의 두 식은 증발 시 체적이 변하지 않는 지반에서의 증발해석에 사용될 수 있으나 체적이 변하는 경우에는 적용할 수가 없다. 따라서 본 논문에서는 material 좌표  $z$ 을 사용하여 체적이 변하는 경우를 고려하였다.  $t=0$ 인 초기단계에서 요소  $\partial a$ 는 단위체적의 흡입자와 초기

간극비  $e_o$ 로 구성된다. 어떤 시간  $t$ 에서 흙의 체적은 일정하지만 간극비  $e$ 는 초기치  $e_o$ 와 다르다. 따라서  $\partial y$ 에 대한  $\partial a$ 의 비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial y}{\partial a} = \frac{1+e}{1+e_o} \quad (7)$$

Material 좌표계와 Lagrangian 좌표계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{1}{1+e_o} \quad (8)$$

그림 1은 material좌표계, convective좌표계 및 Lagrangian좌표계 사이의 관계를 보여준다. 여기서, material 좌표  $z$ 는 공간좌표  $y$ 와 다음과 같은 관계에 있다.

$$\partial y = \partial z(1+e) \quad (9)$$

식 (9)를 이용하여 식 (5)와 식 (6)을 material 좌표계로 변환시키면 식 (10) 및 식 (11)과 같다. 식 (10)과 식 (11)은 체적이 변하는 흙에서의 물과 수증기 그리고 열의 흐름에 대한 식이다.

$$m_w^2 \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k_w}{1+e} \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) + \frac{P+P_v}{\gamma_w P(1+e)} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{D_v}{1+e} \frac{\partial P_v}{\partial z} \right) \quad (10)$$

$$(1+e)C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\lambda}{1+e} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - L_v \left( \frac{P+P_v}{P} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{D_v}{1+e} \frac{\partial P_v}{\partial z} \right) \quad (11)$$

간극 속에 물과 공기가 혼재할 경우, 공기속의 물분자와 물속의 물분자 사이에는 물-수증기 플럭스(liquid-

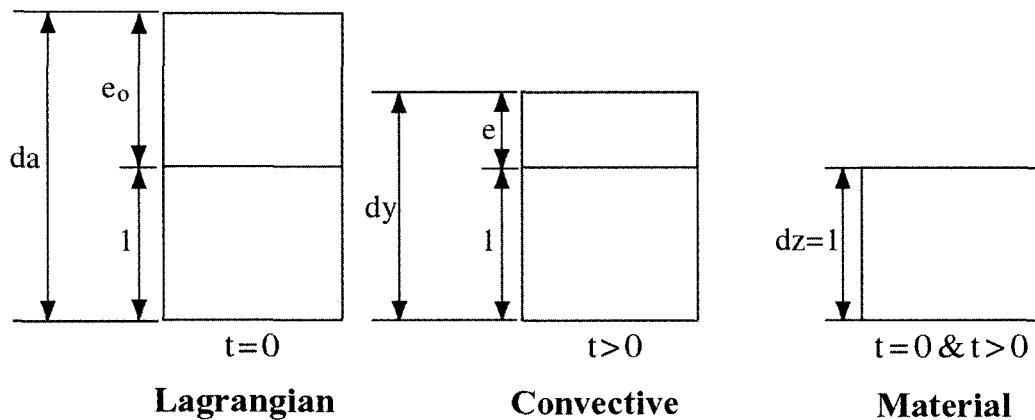


그림 1. 공간좌표와 material 좌표체계

vapour water flux)가 발생한다. 이와 같은 관계는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$P_v = P_{vs}H_r \quad (12)$$

여기서,  $P_v$ 는 수증기압,  $P_{vs}$ 는 포화수증기압이고  $H_r$ 는 상대습도이다.

### 2.3 지표면에서의 증발

해석에서 공기와 물의 상부경계조건은 대기의 증기압과 강우이다. 지표로부터 대기로의 수증기 증발에 대한 상부 경계조건은 Penman(1948)이 제안한 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$E = f(u)(e_s - e_a) \quad (13)$$

여기서,  $E$ 는 대기로의 수증기 플럭스(mm/day),  $f(u)$ 는 풍속, 지표면의 거칠기, 대기의 상태 등에 관련된 함수,  $e_s$ 는 지표면에서의 증기압(kPa)이고  $e_a$ 는 대기에서의 증기압(kPa)이다. 상부경계조건인 지표에서의 증발속도는 지표에서의 부분증기압의 함수이므로 수증기의 흐름과 열의 흐름에 대한 방정식을 동시에 풀어야 한다.

### 2.4 유한차분방정식

수증기의 흐름과 열의 흐름을 나타내는 지배방정식 식 (10)과 식 (11)은 비선형적이며 투수계수, 비체적열계수 및 증기확산계수는 시간과 위치에 따라 변한다. 따라서 이런 지배방정식을 동시에 풀기 위해서 유한차분법이 사용되었다. 식 (10)을 유한차분법을 이용하여 차분화 시키면 다음과 같다. 본 연구에서는 유한 차분 프로그램인 'Vapor'를 개발하였다.

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \frac{\alpha}{m_w^2 \gamma_w} \frac{1}{(1+e_i)^2} \left[ k_{i+\frac{1}{2}} \left( \frac{h_{i+1}^n - h_i^n}{\Delta z_{i+1}} \right) - k_{i-\frac{1}{2}} \left( \frac{h_i^n - h_{i-1}^n}{\Delta z_i} \right) \right] + \frac{\alpha}{m_w^2 \gamma_w} \frac{P + P_{vi}}{P(1+e_i)^2} \left[ D_{vi+\frac{1}{2}} \left( \frac{P_{vi+1}^n - P_{vi}^n}{\Delta z_{i+1}} \right) - D_{vi-\frac{1}{2}} \left( \frac{P_{vi}^n - P_{vi-1}^n}{\Delta z_i} \right) \right] \quad (14)$$

표 1. 기본물성 시험결과

Sample	Specific Gravity	Atterberg Limit			Clay and Silt Size (%)	USCS
		LL	PL	PI		
Yulchon Soil	2.66	53	20	33	91.0	MH

여기서,  $\alpha$ 는  $\frac{2At}{(\Delta z_i + \Delta z_{i+1}) \times (1+e_i)}$ 이다.

## 3. 실내시험

### 3.1 시험시료의 물성

본 연구에서 사용된 시료는 전라남도 울진지방에서 채취한 준설토이다. 이 준설토의 입도분포를 추정하기 위하여 입자크기분석법(particle size analysis)이 사용되었다. 본 시험으로부터 시료의 입도분포는 log-normal한 분포를 보인다는 것을 알 수 있다(그림 2). x-ray 회절시험(diffraction analysis) 결과 준설토의 주 구성광물은 일라이트(illite)인 것을 알 수 있었으며 x-ray 분별시험(fraction analysis) 결과 열전달과 관련이 있는 석영이 50%정도 포함되어 있는 것을 알 수 있었다. 준설토의 액성한계는 53%, 소성한계는 20%이고 200번체 통과량은 93%이므로 통일분류법에 의하면 준설토는 고소성실트(MH)로 분류할 수 있다. 준설토의 기본 물성치를 표 1에 나타내었다.

### 3.2 흡-수분특성곡선 시험

흡-수분특성곡선시험은 흡수력과 함수비와의 관계를 나타내며 불포화토의 투수계수를 간접적으로 구하기 위한 시험이다. 매트릭 흡수력 1500 kPa까지는 압력판 추출시험을 이용하여 수행하였으며 1500 kPa 이상에서

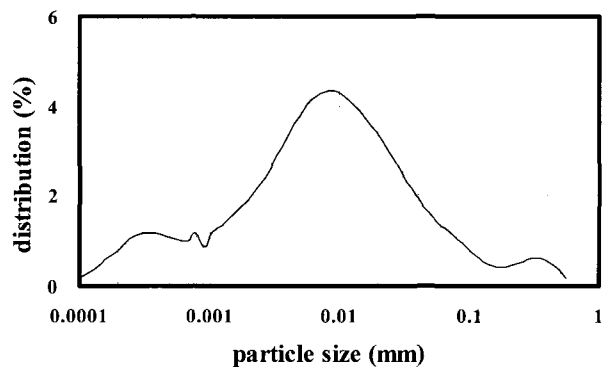


그림 2. 입자분포곡선

의 전흡수력과 함수비와의 관계는 데시케이터를 이용하여 구하였다. 간극비와 중량함수비와의 관계를 구하기 위하여 수축시험이 수행되었다.

밀폐된 용기 속에 보관된 시료는 증류수를 혼합하여 함수비가 150%가 되게 조성하였다. High air entry disc (HAED)는 증류수에 24시간 수침시켜 100% 포화시킨 후 사용하였다. 증류수로 포화된 HAED위에, 직경 5cm, 높이 1cm인 시료 링 속에 시료를 채운 후 공기압을 가하였다. 공기압을 가한 후 압력판 외부로 흘러나오는 물의 양을 측정하여 물의 양이 0으로 되었을 때를 평형상태로 추정하였다. 공기압이 100 kPa에서는 2일정도 소요되었으며 1500 kPa에서는 7일정도 소요되었다. 즉 공기압이 높아질수록 평형에 도달하는 시간이 길어졌다.

데시케이터시험의 시료무게는 평형상태 도달시간을 단축하기 위하여 2g으로 제한하였으며 데시케이터용기 속에 있는 바닥판의 통기구를 막지 않고 시료의 무게변화를 정확히 측정하기 위하여 시료는 살레 대신 알루미늄 호일을 이용하여 용기 속에 집어넣어 측정하였다. 데시케이터 속의 온도와 습도는 온습도계를 용기 속에 집어넣어 측정하였다. 준설토의 투수계수 및 수증기 확산계수는 매우 낮으므로 시료가 평형상태에 도달하는데 4주가 소요되었다. 상대습도가 낮은 용기의 시료일수록 빨리 시료의 표면이 하얀색으로 변화되는 것이 관찰되었으며 이는 상대습도가 낮을수록 빨리 함수비가 감소하여 시료 속의 잔류염이 표면으로 이동되는 현상이 관찰되었다.

수축한계시험은 직경 10 cm, 높이 1 cm의 용기에 슬러리 시료를 넣은 후 자연건조시켜 간극비를 측정하였다. 수축시험결과는 그림 3과 같으며 그림으로부터 수축은 일반수축, 잔류수축 및 한계수축 3단계로 일어난

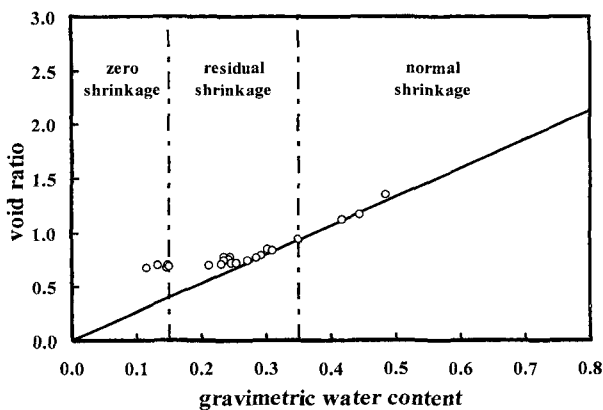


그림 3. 간극비와 중량함수비 관계

다는 것을 알 수 있다. 함수비 35%까지는 포화상태를 나타내며 이 때부터 시료는 불포화 단계에 접어들으며 함수비 15%까지 수축하고 이 이하의 함수비에서는 체적의 변화가 없다는 것을 알 수 있으며 이 때의 간극비는 0.68이었다.

### 3.3 수정압력판 시험

본 연구에서는 위와 같이 독립된 두 가지 실험결과를 결합하여 흙-수분특성곡선을 구하는 방법에 대하여 종래의 방법을 변형하여 각 흡인력 단계마다 체적변화를 측정할 수 있는 실험기구를 고안하여 실험을 실시하였다. 그림 4는 수정 압력판 시험기이다. 수정 압력판 시험기는 건조과정에서 발생하는 체적변화를 측정하기 위하여 기존의 압력판 시험기내에 체적을 측정할 수 있는 수정 압력판 셀을 집어넣은 것이다. 체적변화는 수축한계시험 방법을 이용하여 구하였다. 즉, 체적을 아는 셀의 내부에 시료를 넣은 후 공기압을 가하면 시료내의 수분은 배수관을 따라 대기압상태의 외부로 빠져나간다. 시험이 종료된 후 시료의 체적변화는 수축한계시험 시 사용되는 수은을 이용하여 구할 수 있으며 시료의 함수비를 측정함으로써 흡인력-중량함수비-간극비 관계로부터 흡인력-체적함수비 관계인 흙-수분특성곡선을 직접적으로 구할 수 있다.

### 3.4 체적이 변하는 흙의 흙-수분특성곡선

압력판추출시험과 데시케이터시험으로부터 중량함수비-흡인력과의 관계를 구할 수 있으며 이 결과에 수축한계시험을 조합하면 건조 중 체적이 변하는 흙의 체적함수비-흡인력과의 관계를 구할 수 있으며 이를 그림 5에 도시하였다. 또한 새로이 고안된 수정압력판시험으로부터 구한 체적함수비-흡인력의 관계도 그림 5에 도

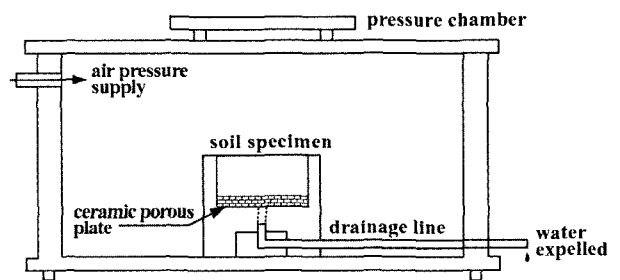


그림 4. 수정압력판 셀 시험기

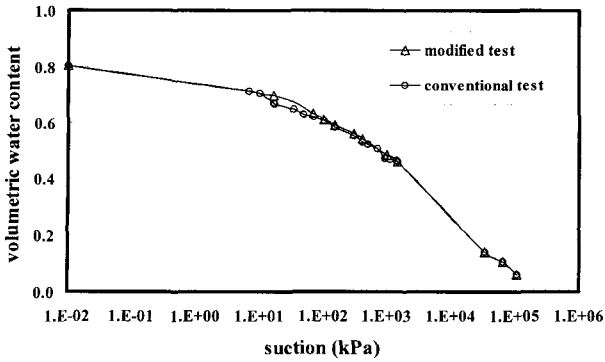


그림 5. 흡-수분특성곡선 비교

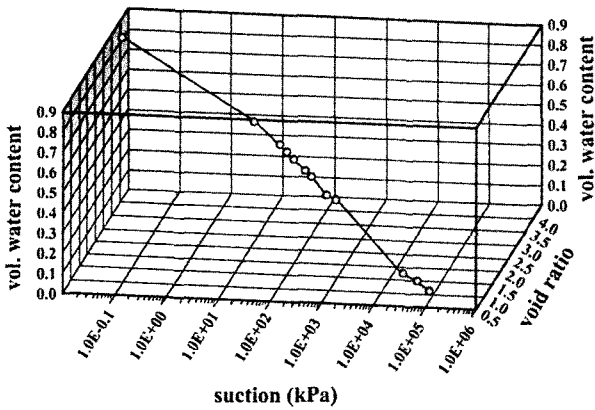


그림 6. 3차원 공간에서의 흡-수분특성곡선

시하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 새로이 제안한 수정 압력판 시험으로부터 구한 흡-수분특성과 종래의 실험과 수축한계실험결과를 조합하여 얻은 흡-수분특성은 거의 일치하는 경향을 보여준다. 상기결과를 식 (3)을 이용하여 3차원 공간상에 표시하면 그림 6과 같다.

### 3.5 컬럼 증발시험

본 시험은 흡 속에서 물의 흐름과 증기의 흐름이 동시에 발생하는 경우의 표면 증발현상을 규명하기 위하여 수행되었다. 본 시험의 시험기구 구성도는 그림 7과

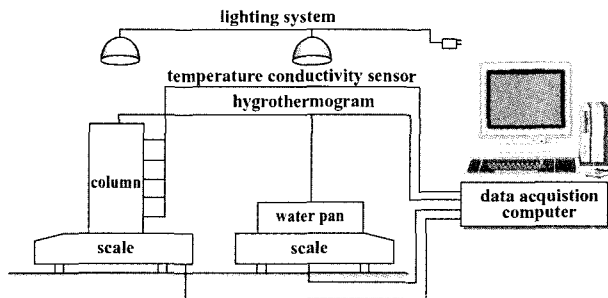


그림 7. 컬럼증발시험의 시험기구 구성도

같다. 시험에 사용된 원통형 용기는 유리섬유로 제작되었으며 직경은 24 cm, 높이는 80 cm이고 용기외부에 공기 차단층을 두어 외부온도의 영향을 최소화 하였다. 증발시험은 외부 대기의 온습도변화에 민감하게 반응하므로 일정한 대기 환경을 조성해주는 것이 필요하여 대기의 환경변화에 비교적 영향을 받지 않는 곳에서 수행되었으며 광원을 이용하여 대기의 온도보다 시료표면의 온도를 높여주어 즉, 대기의 습도보다 지표면 상부의 습도를 낮추어 외부의 온습도변화에 영향을 받지 않도록 조절하여 주었다. 시험에 사용된 광원으로는 250W 전구가 사용되었다. 시료표면 위 대기의 온습도를 측정하기 위하여 HMP45C가 사용되었으며 시료내부의 온도 및 흡인력을 측정하기 위하여 캐나다 Saskatchewan 대학에서 제작한 Thermal conductivity sensor(TCS)가 사용되었다. TCS는 원통형으로 직경은 28mm이고 높이는 48mm이다. TCS는 내부에 열발생장치와 온도변화를 측정하기 위한 온도계 및 주변지반의 함수비와 동일상태로 재현하기 위한 다공적으로 구성되어 있다. 본 센서는 센서내부의 열발생장치를 이용하여 50초간 열을 발생시켰을 때의 열전달능력을 측정하여 시료의 흡인력을 측정한다.

증발량의 일변화량을 측정하기 위한 정밀전자저울은 HP100K가 사용되었다. 본 저울의 정밀도는 1g이며 최대 100kg까지 측정할 수 있다. 또한 최대가능증발량을 측정하기 위해 HF-3000GD가 사용되었다. 본 저울의 정밀도는 0.01g이며 최대 3kg까지 측정이 가능하다. 본 시험에 사용된 계측기기들을 제어하고 자동계측을 하기 위하여 제어측정 시스템 CR10X가 사용되었다.

올촌 시료는 초기함수비를 150%로 조성한 후 3일 동안 침전시켜 안정화시킨 후 원통형 용기 속에 집어넣었다. 원통형 용기 속에 시료를 집어넣고 시료가 마르지 않게 표면에 물을 부어 넣은 후 광원을 2일 동안 비추어 가면서 초기 조건을 맞추어 주었다. 이와 같이 하여 일 평균증발량이 7 mm/day가 되도록 조정하였다. 대기 및 시료의 온도변화가 없는 것이 확인 된 후 증발시험을 시작하였다.

시료 속에 집어넣은 TCS의 위치는 시료의 체적변화에 의하여 시료의 하부방향으로 이동을 하므로 TCS와 자동계측장치를 연결하는 전선의 길이를 조절하여 주었으며 전선주위에 크랙이 발생하지 않도록 하였다. 증발이 진행되면서 시료의 체적변화에 의하여 시료는 수직방향으로 변형되었으며 또한 수평방향으로도 변형되

었다. 수평방향의 변형에 의하여 시료와 용기통 사이에 크랙이 발생하였다. 이는 증발면의 확대를 가져오고 2차원흐름을 발생시키므로 이를 방지하기 위하여 용기통과 시료사이에 발생한 크랙에 해성토를 주입하여 이를 방지하였다.

#### 4. 수치해석

##### 4.1 압밀계수

압밀계수(coefficient of consolidation)는 반대수지(semi-log scale)위에 그려진 흡수분특성곡선의 기울기로부터 구할 수 있다. 흡수분특성곡선을 모사하기 위하여 여러 경험식이 제안되었다. 이 중 Fredlund 등(1994)이 제안한 식은 0에서 10<sup>6</sup> kPa 범위에서 모래, 실트 및 점토 등 모든 흙에 대하여 잘 맞으므로 본 연구에서 사용되었다. Fredlund 등은 간극크기분포를 모사하기 위하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$f(\psi) = \frac{mn(\psi/a)^{n-1}}{a[e+(\psi/a)^n]\{\ln[e+(\psi/a)^n]\}} \quad (15)$$

여기서, n, m 및 a는 계수이고  $\psi$ 는 흡인력이다. 상기의 식은 흡수분특성곡선의 기울기를 나타내므로 압밀계수로 사용할 수 있다. 계수를 구하기 위해서 curve fitting 방법이 사용되었으며 추정된 a, n 및 m 값은 617, 0.34 및 1.59이다.

##### 4.2 투수계수 및 증기확산계수

식 (10)을 풀기 위해서는 투수계수가 필요하다. 투수계수는 포화토 및 불포화토에서 물의 전달능력을 나타

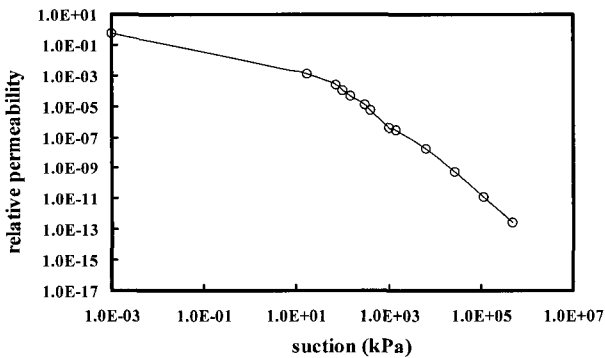


그림 8. 율촌해성토의 흡인력과 상대투수계수의 관계

내는 중요한 계수로 증발현상과 직접적으로 관련되어 있다. 본 연구에 사용된 포화투수계수는 일정변형을 압밀시험으로 구하였으며 불포화 상태의 투수계수는 흡수분특성곡선으로부터 구하였다. 일정변형율압밀시험으로부터 구한 초기포화투수계수는 7x10<sup>-5</sup> cm/sec이다. 불포화투수계수는 흡수분특성곡선으로부터 Fredlund 등(1994)이 제안한 방법을 이용하여 구하였다. 이렇게 구한 상대투수계수를 그림 8에 나타내었다. 증기확산계수 D<sub>v</sub>는 Wilson 등(1994)이 제안한 식을 이용하여 구하였다.

##### 4.3 열전달 계수

지반의 체적열용량(volumetric heat capacity), C<sub>h</sub>, 는 온도의 단위 변화당 단위체적지반의 열함량의 변화로써 정의된다. 지반의 체적열용량은 불포화토에서 일정한 값이 아니라 포화도에 따라 변한다. 지반의 체적열용량은 Newman(1995)이 제안한 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_h = \gamma_d(C_s + 4184\theta_{si}) \quad (16)$$

여기서, C<sub>h</sub>는 체적열용량 (J/m<sup>3</sup>°C),  $\gamma_d$ 는 건조단위중량 (Kg/m<sup>3</sup>), C<sub>s</sub>는 중량비열 (mass specific heat) (J/kg°C)이고  $\theta_{si}$ 는 체적함수비이다. 본 연구에서는 해성토의 중량비열로서 750 J/Kg°C가 사용되었다. 체적비열용량과 중량함수비의 관계를 그림 9에 나타내었다. 지반의 열전도도(thermal conductivity)는 단위온도기울기 조건에서 단위시간에 단위면적을 통하여 이동되는 열의 양으로 정의되며 포화도 및 석영이 차지하는 비율의 함수이다. 본 연구에서는 Johansen(1975)이 제안한 식을 사용하였으며 이를 그림 10에 나타내었다. 그림으로부터 열전도도는 0.07에서 0.8 W/m<sup>2</sup>°C의 범위를 보인다는 것을 알 수 있다.

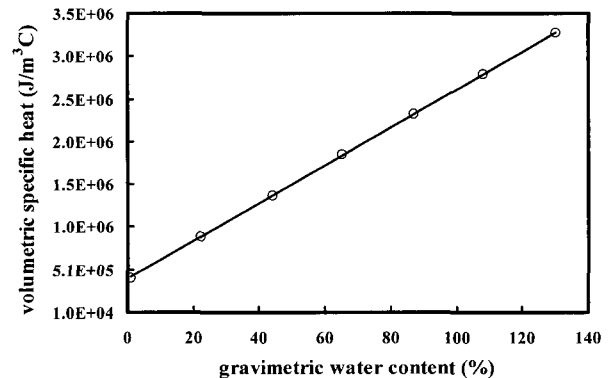


그림 9. 중량함수비와 체적열용량과의 관계

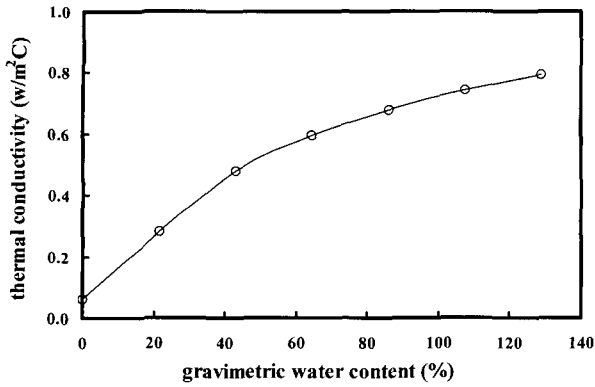


그림 10. 중량함수비와 열전도도와의 관계

#### 4.4 수치해석

전 절에서 구한 계수들과 본 연구에서 개발한 수치해석 프로그램 Vapor를 이용하여 증발량 해석을 실시하였으며 이를 실험결과와 비교하였다. 본 해석을 통하여 순증발량, 온도분포 및 흡입력 분포를 구할 수 있다. Vapour프로그램은 증발 시 체적변화를 고려할 수 있으므로 침하량도 구하였다.

수치해석은 실험기간과 같이 115일 동안에 대해 수행되었다. 70 cm의 컬럼은 40개의 노드(node)로 표현하였다. 수치해석시 안정성은 노드길이의 역수에 비례하므로 상부건조층에서의 노드길이는 5 mm 정도로 하였으며 하부로 갈수록 노드길이를 길게 하였다. 초기함수비는 일정하게 하였으며 초기온도분포는 온도계로 측정된 값이 사용되었다. 건조층 상부로의 물의 흐름은 없다고 가정하였으며 수증기 플럭스는 식 (13)을 이용하여 구하였다. 상부건조층에서의 수증기압은 각 시간단위에서 최상층 노드의 흡입력을 이용하여 구하였다. 하부층으로의 수증기 및 물의 플럭스는 없는 것으로 가정하였다.

### 5. 수치해석결과와 실험결과의 비교

Vapor프로그램의 적합성과 건조과정을 묘사하기 위하여 수치해석결과를 시험결과와 비교하였다. 순증발량(actual evaporation rate)을 비교하였으며 건조 중 체적이 변하는 점토의 침하량을 비교하였다. 시간에 따른 흡입력의 변화 및 온도분포 등을 Lagrangian좌표로 표시하였다.

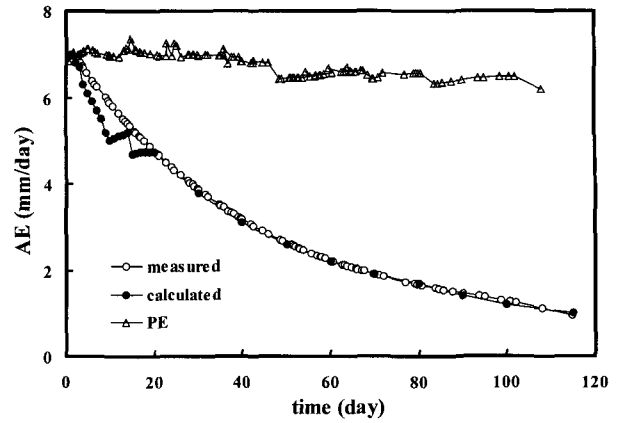


그림 11. 해석으로부터 구한 순증발량과 실험으로부터 구한 순증발량 비교

#### 5.1 순증발량

실험으로부터 구한 순증발량과 수치해석으로부터 구한 순증발량을 그림 11에 나타내었다. 그림으로부터 가능증발량(potential evaporation)은 115일 동안 거의 일정한 것을 알 수 있고 순증발은 3단계를 - 초기일정증발을 단계(initial constant-rate stage), 증발율감소 단계(falling-rate stage), 저증발율 단계(slow-rate stage) - 거쳐 일어난다는 것을 알 수 있으며 해석치와 실험치가 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 초기의 일정증발율 단계는 2-3일정도 밖에 진행되지 않으며 이는 체적이 변하는 흙에서 증발에 의한 체적변화에 의해 투수계수가 감소하여 즉 물전달능력이 감소하여 순증발량이 감소한 것으로 사료된다. 초기의 증발량은 7 mm/day정도이며 점차 감소하여 저증발율단계에서는 1 mm/day인 것을 알 수 있다. 7일과 15일째에서 해석치와 실험치 사이에서 약간의 불일치가 일어난다는 것을 알 수 있다. 이는 해석치가 대기온도 및 습도의 영향에 보다 민감하게 반응하기 때문인 것으로 사료된다.

#### 5.2 침하량

해석으로부터 구한 침하량과 실험으로부터 구한 침하량을 그림 12에 나타내었다. 증발이 진행됨에 따라 침하속도는 점차 감소한다. 이는 순증발량이 증발이 진행되면서 점차 감소한다는 사실과 일치한다. 그림으로부터 20일째부터 80일째사이에서 해석치가 실험치보다 작다는 것을 알 수 있다. 이는 이 기간동안 실험시 크랙이 발생하여 즉 수평방향의 증발이 일어나 침



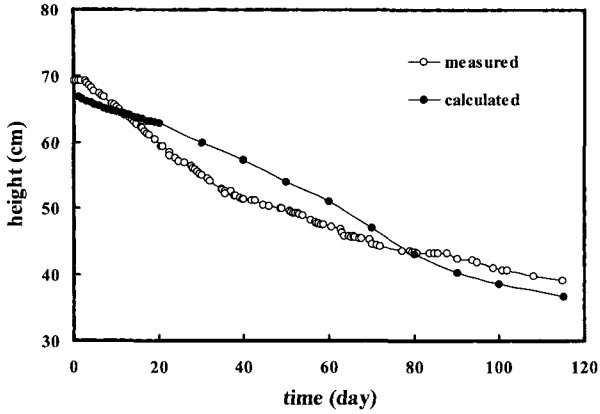


그림 12. 해석으로부터 구한 침하량과 실험으로부터 구한 침하량 비교

하량이 해석치보다 더 크게 일어났기 때문인 것으로 사료된다.

### 5.3 체적함수비 분포

실험으로부터 구한 체적함수비와 수치해석으로부터 구한 체적함수비를 그림 13에 나타내었다. 그림으로부터 시간이 지남에 따라 상부의 체적함수비가 급격히 감소한다는 것을 알 수 있다. 증발초기에는 투수계수가 커 하부의 물이 상부까지 전달되어 하부층의 체적함수비도 감소하나 저증발율 단계에서는 상부층이 불포화토가 되어 증발이 주로 상부층의 증기확산에 의해 이루어져 상부층의 체적함수비가 급격히 감소하게 된다. 즉, 증발 초기단계에서는 증발에 의해 상부에서 감소된 물은 하부로부터 충분히 공급되나 증발이 진행되면 하부로부터의 물의 공급이 충분하지 못하고 증발은 상부에서만 일어나게 된다는 것을 알 수 있다.

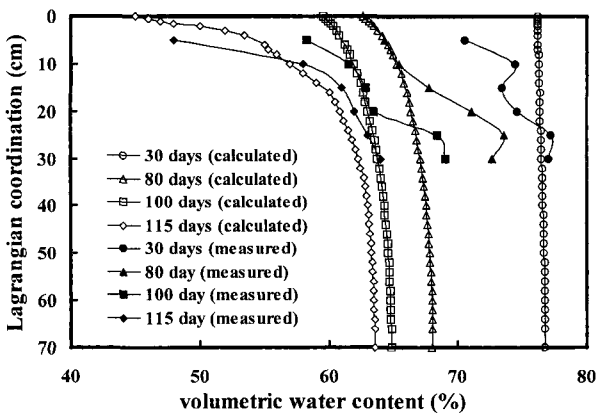


그림 13. 해석으로부터 구한 체적함수비와 실험으로부터 구한 체적함수비 비교

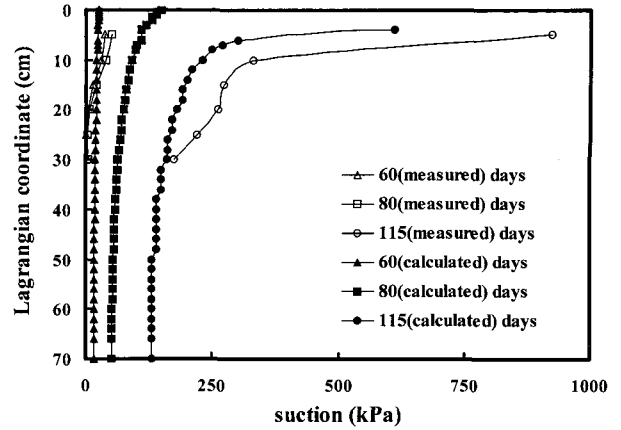


그림 14. 해석으로부터 구한 흡인력과 실험으로부터 구한 흡인력 비교

### 5.4 흡인력 분포

물흐름의 동력이 되는 흡인력의 시간에 따른 분포를 그림 14에 도시하였다. 그림으로부터 시간의 경과에 따라 지표에서는 흡인력이 발휘되기 시작하여 부의 간극수압이 발휘되기 시작하는 것을 알 수 있다. 지표하 5 cm에 설치된 TCS에서 측정된 115일째의 흡인력은 900 kPa 정도이다. 그림 5로부터 900 kPa에 해당하는 체적함수비는 50%이고 이를 중량함수비로 환산하면 35%이다. 그림 3으로부터 중량함수비 35%는 수축한계란 것을 알 수 있다. 즉 증발말기에 상부 5 cm는 불포화토가 되었다는 것을 알 수 있으며 이는 증발말기에 흡인력이 급격히 증가되었고 순 증발량이 저증발율 단계에 있다라는 사실과도 일치한다.

### 5.5 지중온도 분포

그림 15에 해석으로부터 구한 지중온도와 실험으로

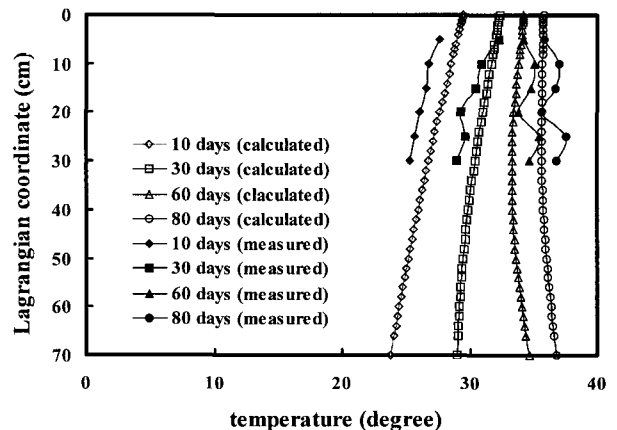


그림 15. 해석으로부터 구한 지중온도와 실험으로부터 구한 지중온도 비교

부터 구한 지중온도의 분포를 도시하였다. 지중온도는 증발에 의해 소모되는 에너지의 양에 영향을 받는다. 그림으로부터 초기에는 하부의 지중온도가 상부보다 약간 높으나 시간이 지남에 따라 상부의 지중온도가 하부의 지중온도보다 높다는 것을 알 수 있다. 이는 증발초기에는 증발에 의해 소모되는 에너지가 많아 상부온도의 증가가 없으나 증발능력이 떨어지는 증발말기에는 증발에 의해 소모되는 에너지가 적어 상부층의 온도가 상승하였기 때문으로 사료된다.

## 6. 결 론

건조 증 체적이 변하는 준설점토에 대한 실험 및 해석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 건조 증 체적이 변하는 준설점토의 체적함수비는 식 (3)과 같이 간극비와 흡인력의 함수로 표현되며 3차원 공간상에 표현하여야 한다.
- (2) 종래의 실험방법과 수축한계실험을 조합한 결과와 새로이 제안한 수정압력판 셀 실험의 결과는 거의 일치하며 두 방법 중 어느 방법을 사용하여도 체적이 변하는 흙의 흙-수분특성곡선을 구할 수 있다.
- (3) 컬럼증발시험 및 해석을 통하여 증발은 3단계를 - 초기일정증발율단계(initial constant-rate stage), 증발율 감소단계(falling-rate stage), 저증발율단계(slow-rate stage) - 거쳐 일어난다는 것을 알 수 있다.
- (4) 증발이 진행됨에 따라 침하속도는 점차 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 증발이 진행되면서 순증발량이 점차 감소한다는 사실과도 일치한다.
- (5) 증발 초기단계에서는 증발에 의해 상부에서 감소된 물은 하부로부터 충분히 공급되나 증발이 진행되면

하부로부터의 물의 공급이 충분하지 못하고 상부층이 불포화토가 되어 증발은 상부층에서 증기의 확산에 의해 이루어진다는 사실을 알 수 있다.

- (6) 증발초기에는 증발에 의해 소모되는 에너지가 많아 상부온도의 증가가 없으나 증발능력이 떨어지는 증발말기에는 증발에 의해 소모되는 에너지가 적어 상부층의 온도가 올라 간다라는 것을 알 수 있다.
- (7) 새로이 제안한 수치해석모델은 증발 증 체적이 변하는 흙에서의 증발을 잘 모사할 수 있다는 것을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Aberg, B. (1996), "Void sizes in granular soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.3, pp.236-239.
2. Brooks, R. H., and Corey, A. T. (1964), "Hydraulic properties of porous media", Hydrology Paper No.3, Colorado State university (Fort Collins).
3. Fredlund, D. G., and Xing, A. (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Can. Geotech. J.* 31, pp.521-532.
4. Johansen, O. (1975), "Thermal conductivity of soil", Ph.D. Thesis, (CRREL Draft Translation 637), Trondheim, Norway.
5. Newman, G. P. (1995), "Heat and mass transfer in unsaturated soils during freezing", M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
6. Penman, H. L. (1948), "Natural evapotranspiration from open water, Bare Soil and Grass", *Proc. R. Soc. London Ser. A.* 193: 120-145
7. Philip, J. R., and de Vries, D. A. (1957), "Moisture movement in porous materials under temperature gradient", *Transaction, American Geophysical Union*, Vol.38, No.2, pp.222-232.
8. Silva, M. J., Biggar, K. W., Sego, D. C., Chanasyk, D. S., and Naeth, M. A. (1999), "Plant dewatering of tailings : a theoretical model", submitted for publication.
9. Wilson, G. W., Fredlund, D. G., and Barbour, S. L. (1994), "Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.151-161.

(접수일자 2002. 11. 21, 심사완료일 2003. 5. 30)