

## 강우시 불포화 준설토로 형성된 제방의 사면안정성 변화에 대한 수치해석적 연구

### Numerical Study on the Variation of Slope Stability for the Embankment Formed by Unsaturated Dredging Soils during Rainfall

유 승 경<sup>1</sup>      You, Seung-Kyong  
송 영 석<sup>2\*</sup>      Song, Young-Suk

#### ABSTRACT

In this study, the variation of wetting front and ground water level at the embankment constructed in the Saemangeum area were predicted considering rainfall duration times and the slope stability analysis of the embankment was carried out according to prediction results of wetting front and ground water level. The embankment was formed by dredging soils. A suction stress, a cohesion and a frictional angle of dredging soils measured by soil tests were applied to estimate the unsaturated soil properties. According to the analysis results of the wetting front and the ground water level for various rainfall duration time, the wetting front began to descend from the upper part of embankment at the beginning time of rainfall and after 1 hour of rainfall duration time. After that, the ground water level continued to ascend as the rainfall duration time was getting longer. After rainfall, the ground water level was distributed at a certain depth, and the ground water level was gradually descending as time goes by. According to the slope stability analysis of the embankment considering the variation of the wetting front and the ground water level, the safety factor of slope was rapidly reduced as the rainfall began to infiltrate into the ground, and the minimum safety factor of slope was estimated after 24 hours of rainfall duration time. Meanwhile, the safety factor of slope was increased with regaining the matric suction in the ground after rainfall.

#### 요 지

본 연구에서는 새만금지역의 방수제 제방단면을 대상으로 강우지속시간에 따른 침투깊이와 지하수위 변화를 예측하고 이를 토대로 사면안정해석을 수행하였다. 준설토로 구성된 제방의 불포화 지반정수를 산정하기 위하여 실험으로 구한 흡입응력과 직접전단시험으로 구한 점착력 및 내부마찰각을 이용하였다. 강우에 따른 침투깊이와 지하수위 변화를 예측한 결과 강우초기와 지속시간 1시간 경과 후 제방 상부에 강우의 침투로 인하여 습윤전선이 하강하며, 이후 강우 지속시간이 길어짐에 따라 지하수위는 지속적으로 상승하였다. 강우 발생이후에는 지하수위가 일정한 깊이로 분포되고 있으며, 시간이 경과할수록 지하수위는 점차 하강하였다. 강우에 따른 침투깊이와 지하수위 변화를 고려하여 사면안정해석을 수행한 결과 강우로 인한 침투가 발생됨에 따라 사면안전율은 급격히 감소하며, 강우지속시간이 24시간일 때 사면안전율이 가장 낮게 나타났다. 강우 발생이후에는 지반내 모관흡수력이 회복됨에 따라 사면안전율이 증가함을 알 수 있다.

**Keywords** : Dredging soil, Unsaturated soil, Rainfall duration, Safety factor of slope

#### 1. 서 론

우리나라의 경우 대부분의 사면파괴는 우기에 집중적

으로 발생되므로 강우가 사면붕괴의 주된 요인임을 알 수 있다. 일반적으로 강우로 인한 사면파괴는 지하수위 상승으로 인하여 사면지반내의 간극수압이 증가함으로서 발생

1 정회원, 명지전문대학 토목과 부교수 (Member, Associate Professor, Department of Civil Engrg., Myongji College)

2\* 정회원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, E-mail: yssong@kigam.re.kr)

되는 것으로 알려져 왔다. 그러나 실제로는 지하수위 상승에 의한 사면파괴보다는 강우의 침투로 인하여 습윤전선이 임계깊이까지 하강함에 따른 얇은 사면파괴가 주를 이루고 있다.

강우가 침투하게 되면 지반내 모관흡수력이 감소하게 되고 이로 인하여 전단강도가 감소하게 되어 파괴가 발생하게 된다(Ng 등, 1998; 조성은 등, 2000; 김재홍 등, 2002). Fredlund 등(1995)는 집중강우가 발생되더라도 지하수위의 높이는 대부분 수미터의 범위에서만 상승하므로 깊은 곳에 위치하고 있는 지하수위의 상승은 얇은 사면파괴에 큰 영향을 미치지 못한다고 보고한 바 있다.

침투를 고려한 사면안정해석에 관한 연구는 국내외에서 많이 진행되고 있다. 이를 살펴보면 강우로 인하여 지표면으로부터 침윤선의 하강깊이와 분포를 가정하여 한계평형해석을 수행하는 방법(홍원표 등, 1996; 송영석 등, 2011), 불포화 지반의 일차원 침투이론(Lumb, 1975; Pradel 등, 1993)으로 침투해석을 수행하고 이를 토대로 한계평형해석을 수행하거나(김재홍 등, 2002), 유한요소해석을 수행하는 방법(Ng 등, 1998; Griffiths 등, 2005; 조성은 등, 2000; 김종렬 등, 2005), 상용프로그램인 SEEP/W로부터 침투깊이를 산정하여 한계평형해석을 수행하는 방법(이강일 등, 2006; 한태곤 등, 2007) 등이 있다.

본 연구에서는 새만금지역의 방수제 단면을 대상으로 상용프로그램인 SEEP/W를 이용하여 강우지속시간에 따른 침투깊이를 산정하고 SLOPE/W를 이용하여 한계평형해석을 수행하였다. 이를 위하여 새만금지역의 방수재료를 대상으로 불포화지반의 고유 특성인 흡·함수특성곡선을 자동 흡·함수특성곡선 측정장치를 이용하여 측정하였

다. 특히, 불포화지반에 대한 흡입응력을 직접 구하여 불포화 강도정수를 선정하였다. 이와 같이 선정된 불포화 지반정수를 토대로 상용프로그램인 SEEP/W를 이용하여 새만금지역 방수제 단면에 대한 침투해석을 수행하였다. 그리고 침투해석결과를 이용하여 강우시 포화깊이의 증가에 따른 사면안정성을 한계평형해석 프로그램인 SLOPE/W를 이용하여 해석하였고 해석결과로부터 강우지속시간에 따른 새만금지역 방수제 사면의 안정성 변화를 분석하여 그 결과를 제시하고자 한다.

## 2. 연구대상지역

연구대상지역은 새만금 방수제 동진 1공구 가운데 방수제 공사구간이다. 새만금 방수제 동진 1공구의 방수제는 길이가 5400m, 폭이 24m로 시공예정이다. 대상지역의 지층구성은 지표면으로부터 사질토층이 약 30m두께로 존재하고 있으며, 사질토층 중간에 약 1-5m두께의 점토층이 혼재되어 있다. 그리고 사질토층 하부에는 풍화토층 혹은 풍화암층이 존재한다(박경호 등, 2011).

본 연구에서의 해석대상단면은 방수제 공사구간 가운데 Zone-C1구간으로서 상부로부터 사질토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있으며, 상부 사질토층의 경우 최대 23.6m 두께로 존재하고 있다. 이와 같은 지반위에 새만금 준설토를 이용하여 높이 7.62m의 제방을 구축할 계획이며 제방은 1:6의 완만한 경사로 설계되어 있다. 제방의 외측 관리수위는 EL(-)1.23m이고 홍수위는 EL(+ )2.98m이다. 그림 1은 해석대상단면인 Zone C-1구간의 지층구조와 방수제 구축계획을 나타낸 것이다.

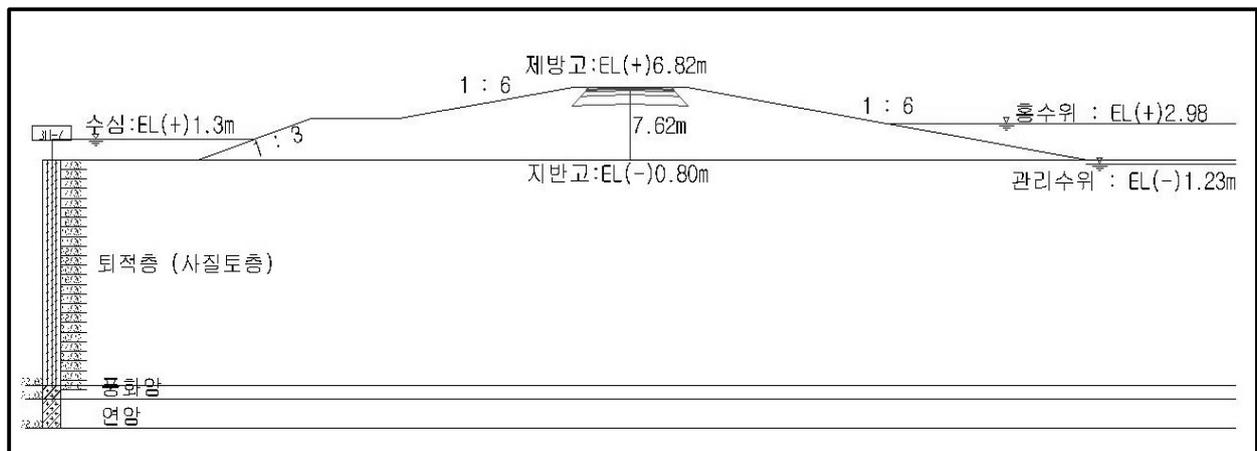


그림 1. 해석대상 단면도

### 3. 지반 및 강우조건

#### 3.1 지반조건

연구대상지역에서 채취된 준설토를 대상으로 각종 토질시험(비중시험, 입도시험, 다짐시험, 직접전단시험, 흡수특성곡선측정시험 등)을 수행하였다. 토질시험결과 대상지역에서 채취된 준설토의 비중은 2.69, 유효입경은 0.01mm, 곡률계수는 1.15, 균등계수는 8.09인 것으로 조사되었다. 한편, 채취된 준설토에 대한 직접전단실험을 수행하여 강도정수를 구하였다. 그림 2는 직접전단시험으로부터 구한 연직응력과 전단응력의 관계를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 포화시 준설토의 점착력은 2kPa 이고, 내부마찰각은 33.5°로 결정할 수 있다.

Fredlund 등(1977)는 불포화토의 역학적 거동을 순연직 응력(net normal stress)과 모관흡수력으로 구분하여 독립적으로 취급하였다. 식 (1)은 제안된 불포화토의 전단강도를 나타낸 것이다. 첫 번째와 두 번째 항은 고전적인 Mohr-Coulomb의 파괴규준으로 구성되어 있으며, 세 번째 항은 전단강도에 대한 모관흡수력의 영향을 나타내기 위하여 추가적인 내부마찰각( $\phi^b$ )으로 나타내었다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (1)$$

여기서,  $c'$ 는 유효점착력,  $\phi'$ 는 유효내부마찰각,  $\phi^b$ 는 모관흡수력과 관련된 내부마찰각,  $u_a$ 는 간극공기압,  $u_w$ 는 간극수압이다.

한편, Lu 등(2004, 2006)는 Terzaghi(1943) 및 Bishop (1959)의 유효응력 공식을 확장하여 불포화토의 응력상태

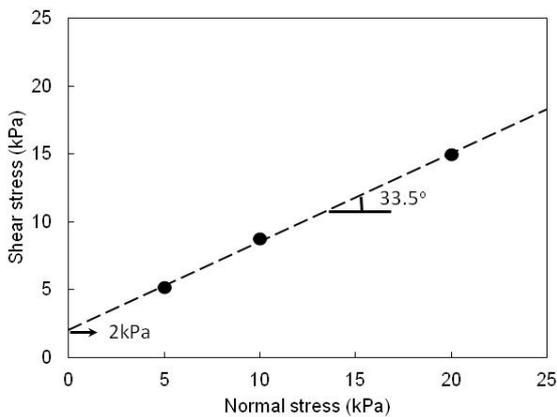


그림 2. 직접전단시험 결과

를 표현할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 유효응력 산정공식은 입자상호간에 발생하는 물리화학적 응력, 표면장력에 의한 모관응력 및 흙의 구조에 따른 응력을 고려하고 있다. 이를 정리하면 식 (2)와 같은 불포화토의 전단강도 공식을 유도할 수 있다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' - \sigma^s\tan\phi^s \quad (2)$$

여기서,  $\sigma^s$ 는 흡입응력으로 모관흡수력과 유효포화도에 의존하는 값이다.

식 (2)에서 보는 바와 같이 전단강도는 외부의 다른 응력에 영향을 받지 않고 오로지 흡입응력에 영향을 받는다고 판단할 수 있다. 이 흡입응력은 크게 간극 체적당 간극수가 가지는 에너지를 의미하기 때문에 흙이 오로지 불포화 상태일 때만 존재하고 부의 값을 가지고 있으므로 유효응력을 증가시키는 역할을 한다.

본 연구에서는 Fredlund 등(1977)에 의해 제안된 식 (1)에서 모관흡수력의 영향을 나타내기 위한 추가적인 내부마찰각( $\phi^b$ )을 구하기 위하여 Lu 등(2006)와 Lu 등(2010)에 의해 제안된 흡입응력을 활용하고자 한다. 흡입응력은 모관흡수력과 유효포화도의 곱으로 정의할 수 있으므로 흡수특성곡선에서의 면적을 의미하며, 모관흡수력 혹은 유효포화도와 특정한 상관관계를 갖게 된다.

대상지역의 제방재료인 준설토의 불포화 특성을 조사하기 위하여 자동 흡수특성곡선 시험장치(Song 등, 2012)를 활용하였다. 본 시험장치를 이용하여 준설토의 모관흡수력과 간극수량을 측정하였으며, 이를 토대로 흡수특성곡선을 산정하였다(송영석 등, 2011). 그림 3은 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡수특성곡

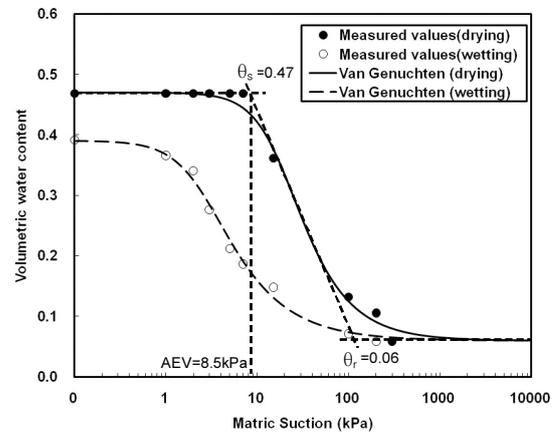


그림 3. van Genuchten 방법을 이용한 흡수특성곡선 예측

표 1. 대상지역 준설토의 불포화 관련 계수

Condition	$a$ ( $\text{kPa}^{-1}$ )	$n$	$m$	AEV (kPa)
Drying	0,05	2,08	0,52	8,50
Wetting	0,38	1,87	0,47	

표 2. 수치해석을 위한 지반정수 산정

구 분	$\gamma_t$ ( $\text{t/m}^3$ )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ ( $^\circ$ )	$\phi^b$ ( $^\circ$ )	$k_s$ (m/s)
제방재료(준설토)	1,70	2,0	33,5	17,9	4,9E-6
퇴적층	1,85	0	30,0	-	7,6E-6
풍화암	2,0	29,4	30,0	-	5,1E-7
연암	2,4	245	34,0	-	7,6E-8

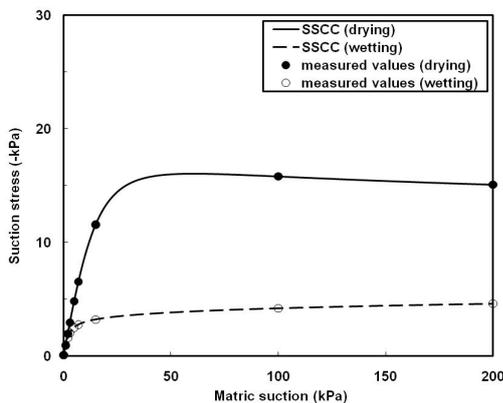


그림 4. 모관흡수력에 따른 흡입응력 산정결과

선을 예측한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 공기압입치는 8.50kPa이며, 포화체적함수비( $\theta_s$ )는 0.47이고, 잔류체적함수비( $\theta_r$ )는 0.06이다. 그리고 표 1은 대상지역 준설토에 대한 불포화 관련계수를 산정한 결과이다.

그림 4는 대상지역의 준설토에 대한 흡-함수특성곡선을 이용하여 모관흡수력에 따른 흡입응력을 산정한 결과이다(송영석 등, 2011). 그림에서 보는 바와 같이 건조과정의 흡입응력은 습윤과정의 흡입응력보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 모관흡수력에 따른 흡입응력은 건조 및 습윤과정에서 다른 경향을 갖는 것으로 나타났다. 즉, 건조과정의 경우 모관흡수력이 60kPa일 때 까지 흡입응력은 증가하다가 이후 미소하게 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 습윤과정의 경우 모관흡수력이 증가함에 따라 흡입응력은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

이와 같이 그림 4에서와 같이 실험을 통하여 산정한 흡입응력과 직접전단시험으로 구한 점착력 및 내부마찰각을 토대로 식 (2)를 이용하여 불포화 전단강도를 산정할 수 있다. 본 연구에서는 지표면으로부터 2m 깊이까지의 불포화 전단강도를 검토하고자 하였으며, 지표면에서 깊이가

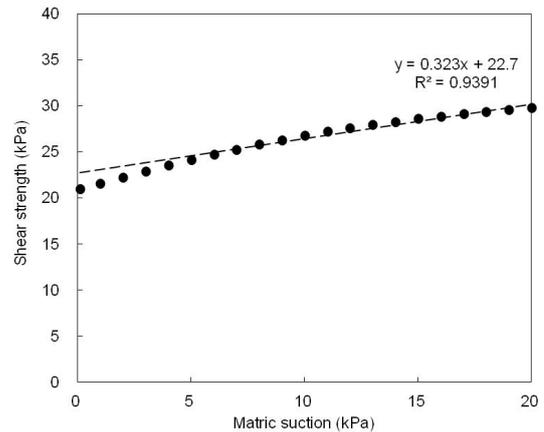


그림 5. 모관흡수력과 불포화 전단강도의 상관관계

증가할수록 부의 간극공기압이 증가함을 고려하여 모관흡수력과 전단강도의 상관관계 범위를 결정하였다.

그림 5는 지표면으로부터 2m 깊이를 고려하여 20kPa까지의 모관흡수력과 앞서 계산한 불포화 전단강도의 상관관계를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모관흡수력과 불포화 전단강도는 비선형적인 관계를 나타내고 있으며 이를 직선화하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석결과를 토대로 본 직선의 기울기를 산정할 수 있으며, 이는 식 (1)에서의  $\phi^b$ 가 된다. 이와 같이 산정된  $\phi^b$ 는 17.9 $^\circ$ 로 결정할 수 있다.

새만금지역의 방수제 제방단면을 대상으로 상용프로그램인 SEEP/W를 이용하여 강우지속시간에 따른 침투깊이를 산정하고 SLOPE/W를 이용하여 한계평형해석을 수행하고자 한다. 이를 위하여 전술한 바와 같이 제방재료인 준설토에 대한 불포화 지반정수를 산정하였으며, 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 퇴적층, 풍화암층 및 연암층의 지반정수는 대상구간에 대한 지반조사보고서에서 제시된 값을 적용하였다.

### 3.2 강우조건

해석대상 제방에 대한 침투해석에서 최대강우량을 실제 강우시 사면지반 침투에 적용하기 어렵다. 왜냐하면 우선 최대강우량의 경우 지속시간이 길지 않기 때문에 강우는 사면지반 내부로 침투되기 보다는 외부로 유출되어 해석상에서 무의미한 값이 될 수 있다. 따라서 제방에 대한 침투해석에서 적절한 강우개념을 적용하기 위해서는 확률론적 강우강도 개념을 활용하여 강우강도와 강우지속을 동시에 고려하는 것이 타당하다고 판단된다.

표 3. 부안지역의 확률 강우량(단위: mm)

재현기간 (년)	강우지속시간(분)									
	10	20	40	60	120	240	360	720	1440	2880
2	114.51	75.38	49.62	38.86	25.58	16.84	13.19	8.68	5.71	3.76
3	146.68	94.97	61.48	47.68	30.87	19.99	15.50	10.03	6.50	4.21
5	182.39	116.61	74.56	57.39	36.70	23.46	18.06	11.55	7.38	4.72
10	227.71	143.95	91.00	69.59	43.99	27.81	21.27	13.44	8.50	5.37
20	270.99	170.02	106.67	81.21	50.95	31.97	24.34	15.27	9.58	6.01
50	327.34	203.87	126.98	96.26	59.95	37.34	28.31	17.63	10.98	6.84
100	369.46	229.16	142.14	107.50	66.68	41.36	31.28	19.40	12.03	7.46
200	411.52	254.40	157.26	118.70	73.38	45.36	34.24	21.16	13.08	8.09

표 4. 강우재현기간에 따른 강우강도 산정(t: 지속시간, 분)

재현기간	10년 빈도	20년 빈도	50년 빈도	100년 빈도
Sherman 형	$\frac{1044.7}{t^{0.662}}$	$\frac{1274.9}{t^{0.673}}$	$\frac{1577.9}{t^{0.683}}$	$\frac{1805.5}{t^{0.689}}$

강우강도와 지속기간의 상관식으로는 보통 Japanese형, Talbot형, Sherman형의 세 가지 제안식이 주로 사용된다. 본 침투해석에서는 식 (3)에서 나타난 Sherman형 제안식을 사용하였다.

$$I(mm/hr) = \frac{a}{t^n} \quad (3)$$

본 연구에서는 대상지역의 인근에 위치한 부안지역의 강우자료를 활용하였다. 표 3은 부안지역의 강우자료를 이용하여 확률 강우량으로 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 2년에서부터 200년까지의 강우 재현기간을 고려하여 계산하였다. 일반적으로 장마나 태풍 등에 의한 대부분의 집중강우의 강우지속시간은 2일 이내이다. 따라서

재현기간을 100년으로 가정할 경우 확률강우량은 12.04mm/hr이 된다. 한편 표 4는 Sherman형 제안식을 이용하여 강우 재현기간에 따른 강우강도를 계산한 것이다.

#### 4. 해석 및 결과분석

##### 4.1 해석단면

본 연구에서는 새만금지역의 방수제 단면을 대상으로 상용프로그램인 SEEP/W를 이용하여 강우지속시간에 따른 침투깊이와 지하수위를 산정하고 SLOPE/W를 이용하여 한계평형해석을 수행하고자 한다. 그림 6은 본 연구의 방수제 단면에 대한 수치해석 단면을 나타낸 것이다. 각종 실험으로 통하여 구한 지반정수 및 van Genuchten 방법으로 구한 불포화관련 계수를 해석시 입력자료로 활용하였으며, 지하수위는 현장에서 측정한 결과를 토대로 설정하였다.

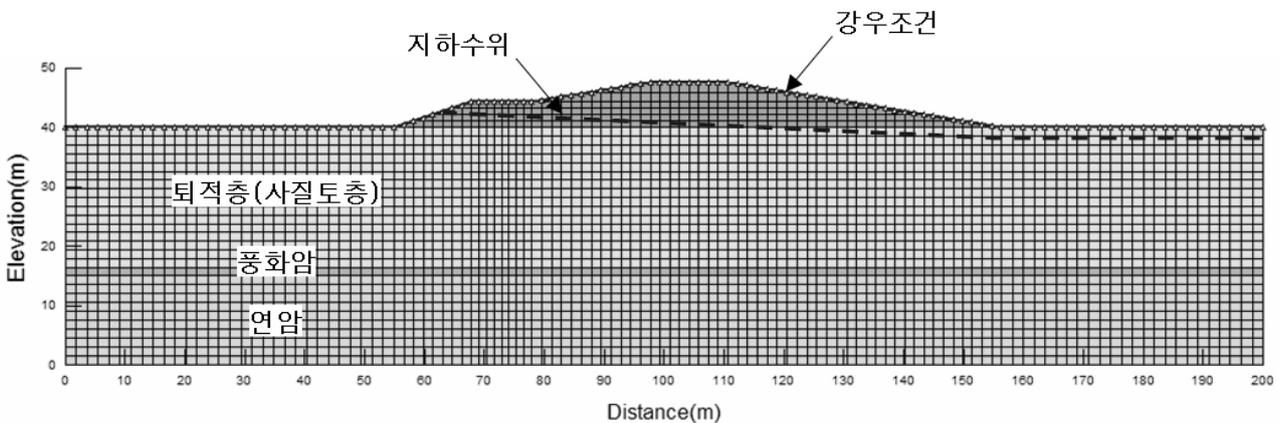
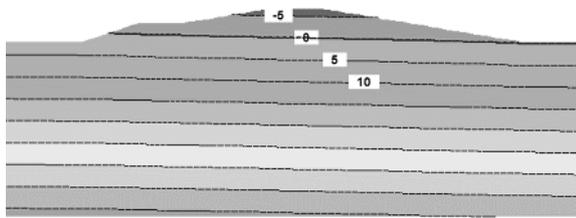


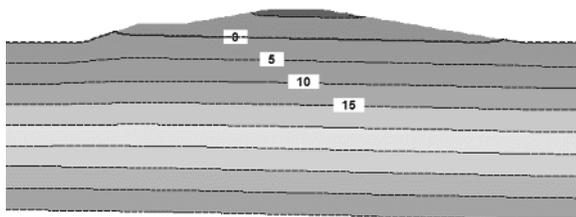
그림 6. 수치해석 단면

## 4.2 강우침투 해석

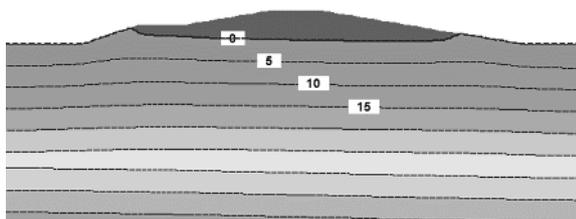
그림 7은 해석 대상 지반에 대하여 강우강도를 고려하지 않은 초기 조건(건기 시)과 강우강도를 고려한 우기 시(지속시간 1시간, 12시간, 24시간)에 대한 침투해석의 결과를 나타내고 있다. 건기 시에는 해석지반 중에 현장에서 계측된 지하수위가 분포하고 있으며 제방 상부에 모관흡수력으로 인하여 부의 간극수압을 발생되었다. 즉 지하수의 영향으로 인하여 지하수위 상부의 모관상승고까지 부의 간극수압이 발생하게 되는 것이다. 그리고 강우초기와 지속시간 1시간 경과 후 제방 상부에 강우의 침투로 인하여 습윤전선(wetting front)이 하강하는 것을 볼 수 있다. 이후 습윤전선이 하강하고 지하수위가 상승하게 되어 서로 만나게 되며, 강우 지속시간이 길어짐에 따라 지하수위



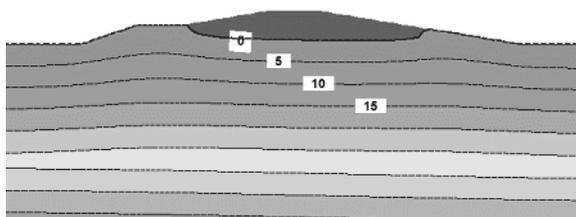
(a) 초기 조건(건기시)



(b) 강우 조건(지속시간 1시간)



(c) 강우 조건(지속시간 12시간)

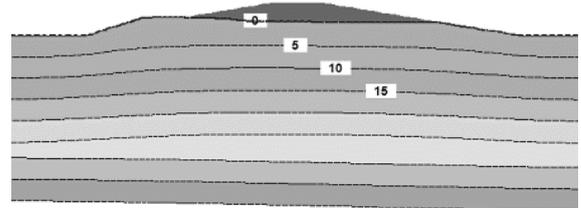


(d) 강우 조건(지속시간 24시간)

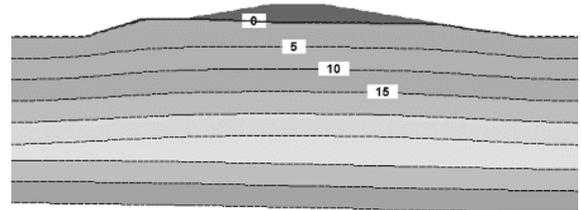
그림 7. 강우에 따른 침투해석 결과

는 지속적으로 상승하고 있음을 알 수 있다.

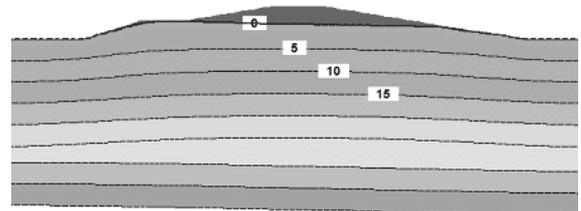
한편, 그림 8은 강우가 종료된 후 시간의 경과에 따른 대상 지반의 지하수위와 수두의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 강우가 지속된 시점에서의 지하수 위와는 다르게 6시간이 경과된 시점에서 제방부의 지하수위가 일정한 깊이로 분포되고 있음을 알 수 있다. 그리고 경과 시간이 흐를수록 지하수위는 제방의 끝단으로부터



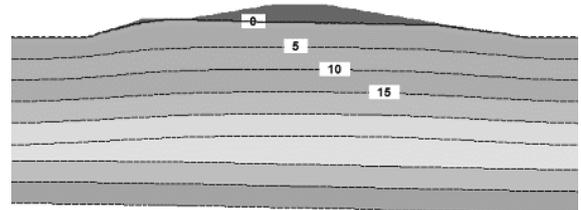
(a) 강우 종료 후 6시간 경과



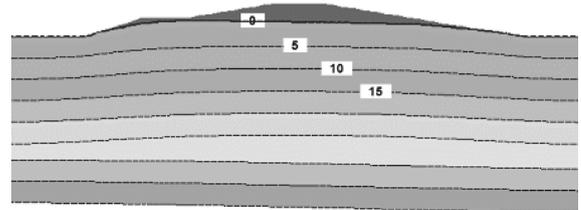
(b) 강우 종료 후 12시간 경과



(c) 강우 종료 후 18시간 경과



(d) 강우 종료 후 24시간 경과



(e) 강우 종료 후 48시간 경과

그림 8. 강우 종료후 침투해석 결과

점차 하강하고 있음을 알 수 있다.

### 4.3 강우침투를 고려한 사면안정해석

그림 9는 강우지속시간에 따른 침투깊이와 지하수위를 고려하여 대상사면에 대한 사면안정해석을 수행한 결과이다. 해석 대상 제방에 대하여 강우강도를 고려하지 않은

초기 조건(건기 시)과 강우강도를 고려한 우기 시(지속시간 1시간, 12시간, 24시간)에 대한 사면안정 해석을 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 강우지속시간이 증가함에 따라 제방의 사면안전율은 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 강우지속시간이 12시간일 경우 활동면이 지하수위 아래에서 발생되며, 활동면의 크기도 지하수위의 영향으로 인하여 다르게 발생됨을 알 수 있다.

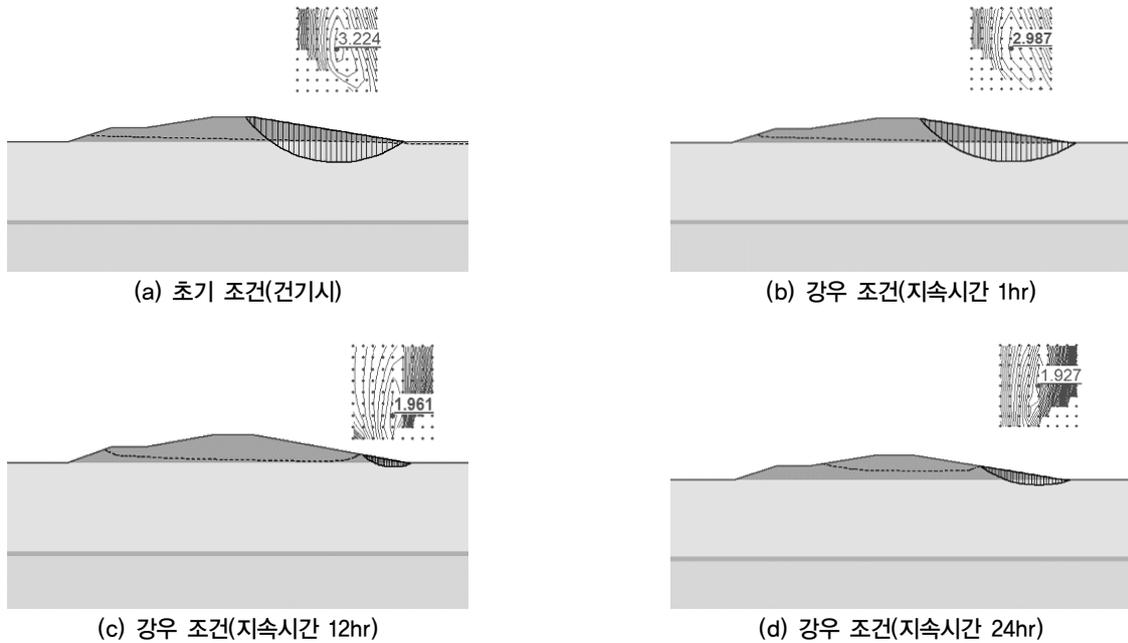


그림 9. 강우에 따른 사면안정해석 결과

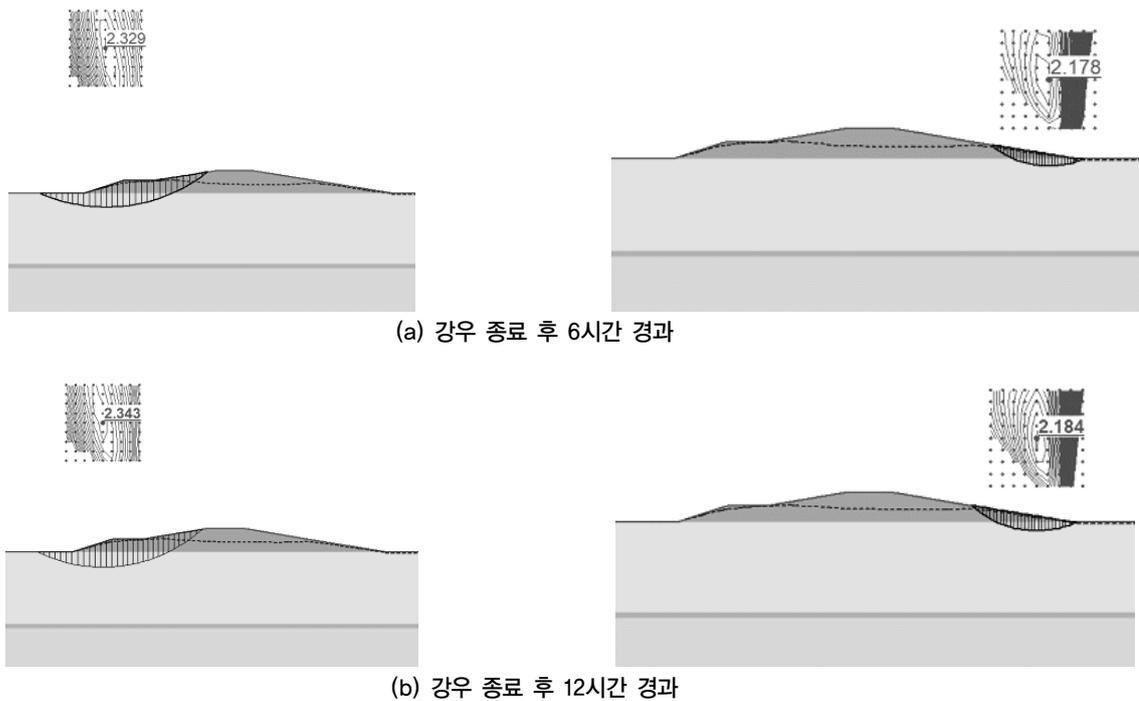
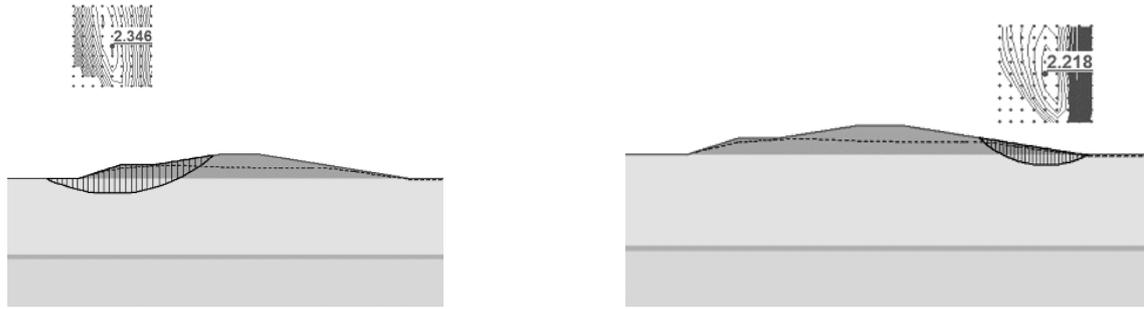
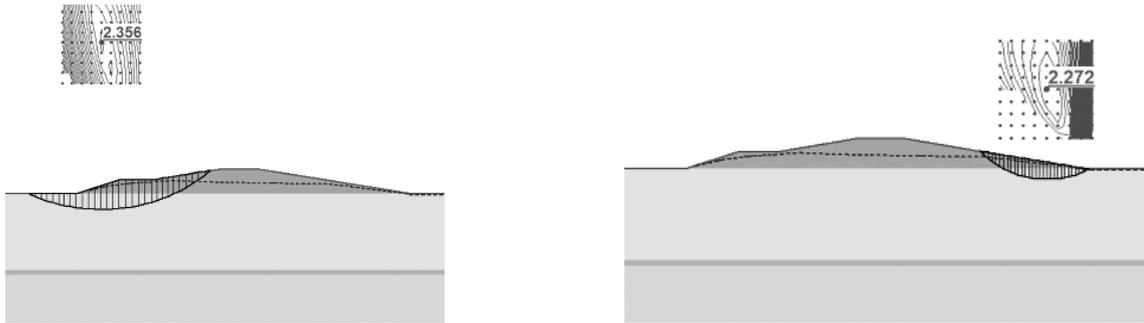


그림 10. 강우 종료후 사면안정해석 결과(계속)



(c) 강우 종료 후 24시간 경과



(d) 강우 종료 후 48시간 경과

그림 10. 강우 종료후 사면안정해석 결과

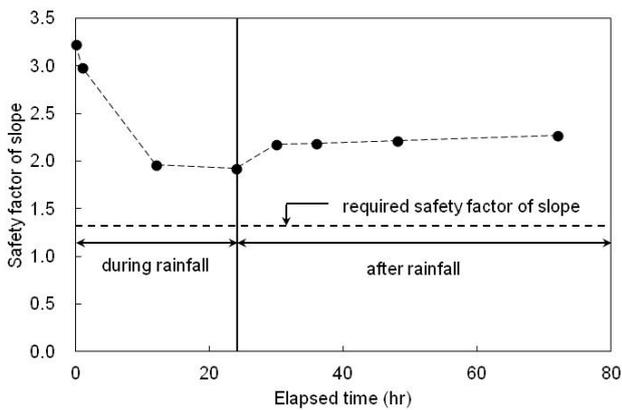


그림 11. 강우 및 시간에 따른 제방의 사면안전율 변화

그림 10은 강우가 종료된 후 대상 지반의 지하수위와 수두의 변화를 고려하여 사면안정해석을 수행한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 제방의 좌측사면은 강우가 종료된 이후 시간이 경과하여도 사면안전율은 변화가 없는 것으로 나타났다. 그러나 제방의 우측사면은 시간이 경과함에 따라 사면안전율이 미소하게 증가하는 것으로 나타났다. 한편 활동면이 지하수위 저면에서 발생하는 이유는 지하수위 상부의 불포화토층에서 모관흡수력의 작용에 의해 지반의 전단강도가 증가하였기 때문이라고 판단된다.

그림 11은 제방의 우측사면에 대하여 시간의 경과에 따른 사면안전율 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와

같이 건기 시에 사면안전율이 가장 높으며, 강우로 인하여 침투가 발생됨에 따라 사면안전율은 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 강우지속시간이 24시간일 때 사면안전율이 가장 낮게 나타났으나, 강우가 발생이후 사면안전율은 회복하는 것으로 나타났다. 이는 강우 발생이후 지반내 모관흡수력이 회복됨에 따라 사면안전율이 증가한 것으로 판단된다. 한편 강우 시 사면안전율의 기준치를 1.3으로 가정한다면 대상사면은 강우로 인한 안정성을 확보하고 있다고 볼 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 새만금지역의 방수제 제방단면을 대상으로 강우지속시간에 따른 침투깊이와 지하수위 변화를 예측하고 이를 토대로 사면안정해석을 수행하였다. 준설토로 구성된 제방의 불포화 지반정수를 산정하기 위하여 자동 흡수특성곡선 측정장치를 이용하였다. 사면안정 해석결과를 토대로 강우지속시간에 따른 새만금지역 방수제 제방사면의 안정성 변화를 분석하였으며, 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 대상지역 준설토에 대한 강도정수를 산정한 결과 점착력은 2kPa, 내부마찰각은 33.5°이다. 그리고 불포화

관련계수를 산정한 결과 공기함입치는 8.50kPa, 포화체 적함수비( $\theta_s$ )는 0.47, 잔류체적함수비( $\theta_r$ )는 0.06이다.

- (2) 대상지역 준설토에 대한 불포화 내부마찰각을 산정한 결과  $\phi^b$ 는 17.9°로 나타났으며, 흡-함수특성곡선을 이용하여 산정한 흡입응력과 직접전단시험으로 구한 점착력 및 내부마찰각을 활용하였다.
- (3) 불안지역의 강우자료와 Sherman형 제안식을 이용하여 강우재현기간에 따른 강우강도를 산정할 수 있다. 재현기간을 100년으로 가정할 경우 대상지역의 확률 강우량은 12.04mm/hr이 된다.
- (4) 강우초기와 지속시간 1시간 경과 후 제방 상부에 강우의 침투로 인하여 습윤전선이 하강하며, 이후 강우 지속시간이 길어짐에 따라 지하수위는 지속적으로 상승한다. 강우 발생이후 지하수위가 일정한 깊이로 분포되고 있으며, 시간이 경과할수록 지하수위는 점차 하강한다.
- (5) 강우에 따른 침투깊이와 지하수위 변화를 고려하여 사면안정해석을 수행한 결과 강우로 인한 침투가 발생됨에 따라 사면안전율은 급격히 감소하며, 강우지속시간이 24시간일 때 사면안전율이 가장 낮게 나타났다. 강우발생이후에는 지반내 모관흡수력이 회복됨에 따라 사면안전율이 증가함을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 한중일 과학기술협력 확충사업인 “전자기학/수리학/지질공학/지질학적 접근에 의한 산사태 조기경보시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 김재홍, 박성원, 정상섭, 유지형 (2002), “강우시 습윤에 의한 불포화 풍화토의 사면 안정 해석연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 제2호, pp.123-136.
2. 김종렬, 강승구, 강희복, 박승균, 박철원 (2005), “강우시 석회암 풍화토 사면의 안정해석에 관한 연구”, *지질공학*, 제15권, 제1호, pp.9-17.
3. 박경호, 최풍곤, 배정호, 손석기 (2011), “지반특성을 고려한 새만금방수제 단면 검토”, *한국지반공학회 가을학술발표회 논문집*, pp.1225-1236.
4. 송영석, 유승경 (2011), “새만금지역 준설토의 불포화특성에 대한 실험적 연구”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제10권, 제3호, pp.25-32.
5. 송영석, 홍원표 (2011), “강우시 습윤전선 및 지하수위를 고려

- 한 사면의 안정성 해석”, *지질공학*, 제21권, 제1호, pp.25-34.
6. 이강일, 장용채, 김태훈, 정연인 (2006), “강우특성을 고려한 불포화 풍화잔류토 사면의 안정성 해석”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제7권, 제2호, pp.5-14.
7. 조성은, 이승래 (2000), “강우특성을 고려한 표면파괴에 대한 안정성평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제16권, 제5호, pp.107-116.
8. 한태곤, 김홍택, 백승철, 강인규 (2007), “강우시 토사사면의 불포화 특성을 고려한 간편 설계법”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제8권, 제5호, pp.57-65.
9. 홍원표, 최승호, 한중근, 황인철 (1996), “강우시 사면안정 해석법에 관한 연구”, *대한토목학회 학술발표회논문집*, pp.195-198.
10. Bishop, A. W. (1959), “The principle of effective stress”, *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknisk*, Vol.106, No.39, pp.859-863.
11. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), “Stress Variables for Unsaturated Soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.103, pp.447-466.
12. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1995), *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons Inc., New York.
13. Griffiths, D. V. and Lu, N. (2005), “Unsaturated slope stability analysis with steady infiltration or evaporation using elastoplastic finite elements”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.29, pp.249-267.
14. Lu, N. and Likos, W. J. (2004), *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York.
15. 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.
16. 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.
17. Lumb, P. (1975), “Slope failures in Hong Kong, Quarterly”, *Journal of Engineering Geology*, Vol.8, pp.31-65.
18. Ng, C. W. W. and Shi, Q. (1998), “Numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage”, *Computer and Geotechnics*, Vol.22, No.1, pp.1-28.
19. Pradel, D. and Raad, G. (1993), “Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.2, pp.315-332.
20. 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.
21. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York.
22. 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.

(논문접수일 2011. 11. 22, 심사완료일 2011. 12. 17)