

## 장기간 강우특성 변화에 따른 국내 사면의 안정성

### Slope Stability by Variation of Rainfall Characteristic for Long Period

이 정 주<sup>1</sup> Lee, Jeong-Ju  
김 재 홍<sup>2</sup> Kim, Jae-Hong  
황 영 철<sup>3</sup> Hwang, Young-Cheol

#### Abstract

Shallow landslides and debris flows are a common form of soil slope instability in South Korea. These events may be generally initiated as a result of intense rainfall or lengthening rainfall duration because of the effects of climate change. This paper presents the evaluation of rainfall-induced natural soil slope stability and reinforced soil slope instability under vertical load (railway or highway load) throughout South Korea based on quantitative analysis obtained from 58 sites rainfall observatories for 38 years. The slope stability was performed for infinite and geogrid-reinforced soil slopes by taking an average of maximum rainfall every ten years from 1973 to 2010. Seepage analysis is carried out on unsaturated soil slope using the maximum rainfall at each site, and then the factor of safety was calculated by coupled analysis using saturated and unsaturated strength parameters. The contour map of South Korea shows four stages in 10-year-time for the degree of landslide hazard. The safety factor map based on long term observational data will help prevent rainfall-induced soil slope instability for appropriate design of geotechnical structures regarding disaster protection.

#### 요 지

국내 토사 사면 불안정성의 일반적인 형태는 얇은 사면파괴와 토석류로 구분할 수 있다. 일반적으로 이러한 사면파괴는 장기간의 기후변화 영향에 의해 강우강도 및 지속시간에 의존성이 높아지고 있다. 본 연구는 전국 58개 기상관측소에서 최근 38년간 강우 관측 자료를 정량적(지속 시간별 최대강우강도로 분류)으로 이용하여 강우로 발생하는 자연 사면의 안정성과 철도나 고속도로와 같은 수직하중이 재하되고 있는 토목섬유로 보강된 성토사면의 불안정성을 평가하고자 한다. 강우패턴에 따른 무한사면과 토목섬유 보강된 유한사면 안정해석은 1973년부터 2010년까지의 기간을 대략 10년 단위로 나누어 관측소별 지속시간에 따른 최대강우량을 산정하여 수행하였다. 기상관측소에서 최대강우강도를 사용하여 불포화 침투해석을 수행하여, 산사태 위험도를 10년 단위별 4단계에 걸쳐 등고선 지도로 나타내었다. 비록 지반조건을 화강풍화토의 평균적인 강도정수와 일반적인 경사로 일정하게 가정하였지만, 장기간 기상관측자료를 토대로 기후 변화에 따른 사면의 불안정성을 예측할 수 있었으며, 기상변화의 경향을 대비할 수 있는 지반구조물의 적절한 설계도움이 되리라 판단된다.

**Keywords :** Climate change, Slope stability, Rainfall duration, Rainfall intensity, Landslide hazard

1 비회원, 전북대학교 토목공학과 박사후연구원 (Post Doctor, Dept. of Civil Engr., Chonbuk National Univ.)

2 정회원, 전북대학교 토목공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil Engr., Chonbuk National Univ., Tel: +82-70-4060-8182, Fax: +82-63-270-2421, woghdjfk@gmail.com, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engr., Sangji Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 12월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2014 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

지구온난화에 의한 기후변화는 집중호우의 증가와 극치강우의 빈도 증가 등으로 나타나고 있으며, 이렇게 달라진 강우특성으로 인해 기상재해가 증가하고 있다. 국내에서도 기후 변화 현상이 강우 패턴에 영향을 주면서 토사 사면의 불안정성도 높아지고 있다. 집중호우의 발생이 잦아지고 강우강도는 점점 증가하면서 극심한 홍수가 발생하여 하천이나 저수지의 수위상승으로 인해 토사 사면의 강도저하를 유발한다. 사면 표층의 침식이나 토석류와 같은 현상을 사면 안정성 검토로 예측하기에는 여전히 수치해석상 한계가 있지만, 이러한 불안정성을 분석하는 연구방향으로 토사 사면 파괴와 밀접한 강우강도의 영향은 계속해서 연구가 진행 중이다 (Collison et al., 2000; Dehn et al., 2000; Dixon and Brook, 2007, Kim et al., 2012). 강우로 인한 일반적인 자연사면의 안정성뿐만 아니라 선로와 도로의 직선화와 성토 및 절토사면의 증가로 인해 다양한 환경적인 조건에서 사면의 안정화 작업이 필요하다. 장기간 강우 변화 특성에 대응하는 토목섬유로 보강된 사면 역시 국내 여러 지역의 강우패턴으로 인한 산사태 위험도 분석은 지반구조물 설계나 방재대책으로 연계시킬 수 있다.

국내 최근 강우특성으로는 강우량이 늘고 있음에도 강우일수는 줄어들어 집중호우 형태의 비가 내리고 있으며 대부분 사면파괴가 이 기간에 발생하고 있다. 2011년에는 국내 81개 관측소 기준으로 토석류 41개소(50.6%), 자연사면붕괴 18개소(22.2%), 인공사면붕괴 22개소(27.2%)로 발표되었다(Hwang et al., 2012). 본 연구 내용으로 국내 58개소의 강우 관측소에서 관찰한 38년간의 강우패턴이 토사사면에 어떠한 영향을 끼치고 있는지 살펴보기 위해 수문기상 자료를 수집하고 일정한 지형조건을 가정하여 국내 지역의 위험도를 살펴보았다. 일반적인 사면해석들은 불포화 토사사면에 대한 해석들이 많이 이루어지고 있기 때문에 불포화 침투해석을 통하여 지반 내의 모관흡수력을 연계한 한계평형해석을 수행하였다. 연도별 최대 강우강도를 10년 단위로 평균을 찾고 4단계(1970년대, 1980년대, 1990년대, 2000년대)에 걸친 사면의 안정해석을 하였다. 각 기상관측소를 중심으로 안전율을 표시하여 국내 지도를 작성하고 강우패턴에 따른 토사사면의 불안정성을 쉽게 알아 볼 수 있었다. 본 연구는 수문학적인 자료를 이용하여 지반구조물

의 안정성 평가를 연계하는 기초적인 연구이며, 향후 다양한 방법으로 지반조사 자료를 공유한다면 국내의 합리적이고 효율적인 지반구조물 설계에 도움이 될 것이라 판단된다.

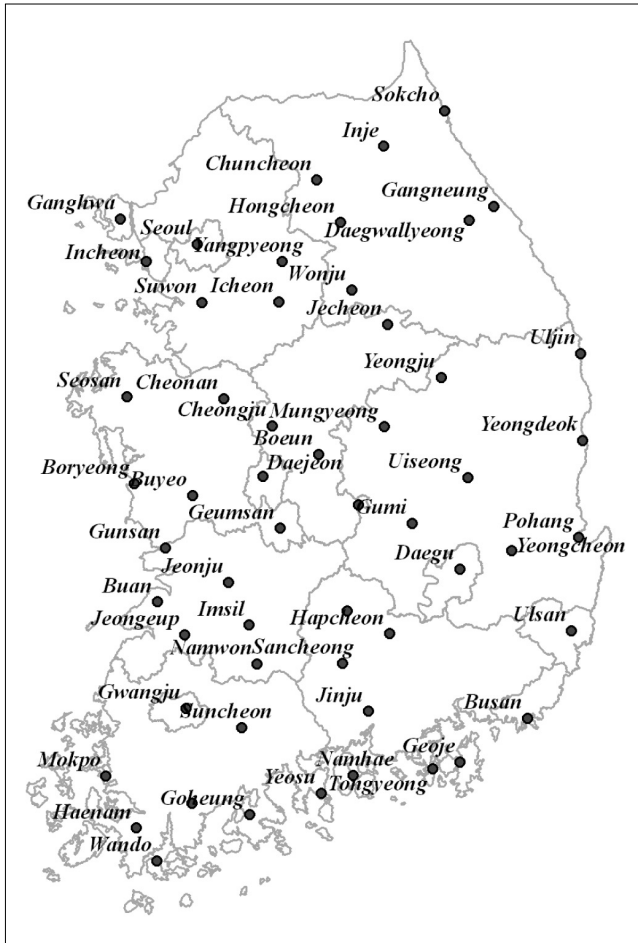
## 2. 장기간 기상관측소의 강우량 조사

장기간의 강우 관측자료를 토대로 최대강우량을 산정하여 강우 침투시 사면의 안정성을 분석하였다. 국내 강우관측소 중 30년 이상의 장기간 관측 자료를 보유한 관측소는 63개소이지만, 제주도와 울릉도를 제외하고 내륙에 위치하는 58개소(강우관측 데이터 오류 2곳 제외)의 38년간의 최대강우강도를 4시간과 8시간의 강우지속시간을 기준으로 산정하였다. Fig. 1은 국내 강우관측소의 위치와 각 관측소의 code 번호를 보여주고 있다.

강우에 의한 사면안정해석을 위해 최대강우강도 적용은 Fig. 2와 같이 1973년부터 2010년까지 연도별 최대강우강도를 지속시간 4시간과 8시간을 기준으로 정리하였다. 실제 현장에서 사면 설계 시 지반구조물의 중요도에 따라서 강우빈도별 강우지속시간은 다르게 적용하고 있기 때문에 여러 강우지속시간을 적용하지 못하고, 비교적 시대별 강우증가량이 분명했던 4시간과 8시간으로 결정하였다.

Fig. 2는 모든 강우관측소에서 취합한 연도별 연강수량(총강수량)의 범위를 '막대' 표시로 나타내고 있다. 각 지속시간에 따라 최대강우강도를 연도별 취합하여 1973-1980년, 1981-1990년, 1991-2000년, 2001-2010년의 연평균 최대강우강도를 평균하여 적용하였다. 일반적인 사면의 불안정성은 극우 강우나 집중호우처럼 최대 일일강우강도에서 발생하고 있지만, 본 연구에서는 장기간 강우의 패턴에서 사면의 불안정이 어떻게 변화되고 있는지 관찰하기 위해서 4단계로 분류하였다. 또한, 10년 단위로 총 강우량을 누적하였을 때, 최근 들어 점점 상승하고 있음을 Fig. 2에서 일렬로 나타나고 있는 ( $\Delta$  $\circ$  $\nabla$  $+$ ) 표시로 보여주고 있다. 이렇게 산정하여 평균한 최대강우강도는 각 관측소 위치를 근간으로 무한사면과 토목섬유로 보강한 유한사면에 불포화 침투해석과 한계평형해석을 수행하여 안전율을 계산하였다.

Fig. 3은 시대별로 각 관측소마다 적용된 10년 평균 최대 강우강도의 분포를 보여주고 있다. 강우지속 4시간과 8시간을 적용할 때, 사면안정해석에 사용한 각 관



No.	Station Code	Station Name	No.	Station Code	Station Name
1	90	Sokcho	30	202	Yangpyeong
2	100	Daegwallyeong	31	203	Icheon
3	101	Chuncheon	32	211	Inje
4	105	Gangneung	33	212	Hongcheon
5	108	Seoul	34	221	Jecheon
6	112	Incheon	35	226	Boeun
7	114	Wonju	36	232	Cheonan
8	115	Ulleungdo	37	235	Boryeong
9	119	Suwon	38	236	Buyeo
10	129	Seosan	39	238	Geumsan
11	130	Ulsan	40	243	Buan
12	131	Cheongju	41	244	Imsil
13	133	Daejeon	42	245	Jeongeup
14	135	Chupungnyeong	43	247	Namwon
15	138	Pohang	44	256	Suncheon
16	140	Gunsan	45	260	Jangheung
17	143	Daegu	46	261	Haenam
18	146	Jeonju	47	262	Goheung
19	152	Ulsan	48	272	Yeongju
20	156	Gwangju	49	273	Mungyeong
21	159	Busan	50	277	Yeongdeok
22	162	Tongyeong	51	278	Uiseong
23	165	Mokpo	52	279	Gumi
24	168	Yeosu	53	281	Yeongcheon
25	170	Wando	54	284	Geocheon
26	184	Jeju	55	285	Hapcheon
27	189	Seogwipo	56	289	Sancheong
28	192	Jinju	57	294	Geoje
29	201	Ganghwa	58	295	Namhae

Fig. 1. Location of 58 sites rainfall observatories and their station code

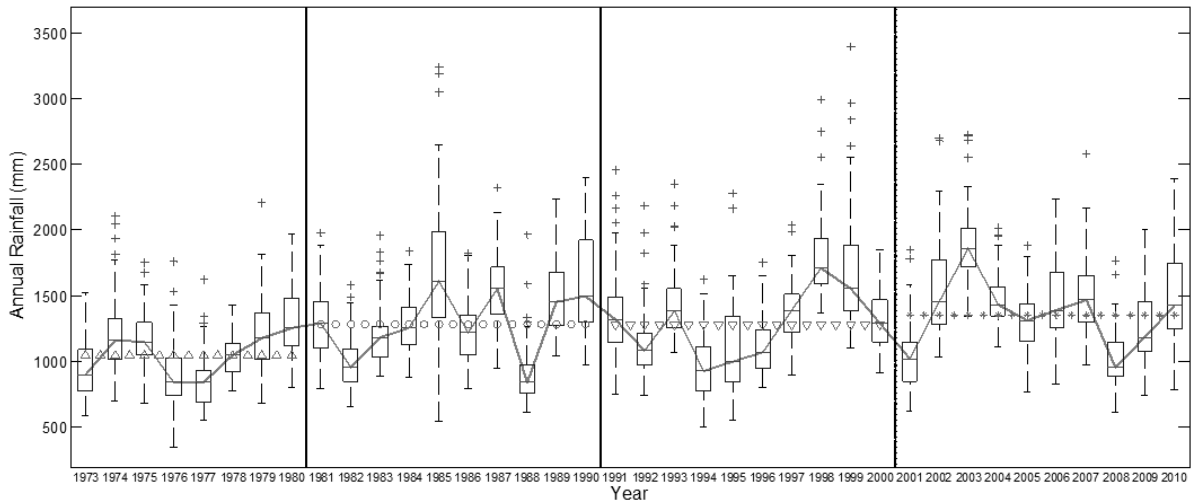


Fig. 2. Variation of maximum rainfall intensity obtained from 58 sites rainfall observatories

측소의 세대별 평균 최대강우강도를 나타낸다. 70년대 보다 2000년대의 평균 강우량 분포가 대체적으로 크게 증가하고 있음을 보여주고 있다.

### 3. 무한사면 안정해석

#### 3.1 침투해석과 사면안전을 평가

기상관측소에 해당하는 강우자료를 적용하기 위해

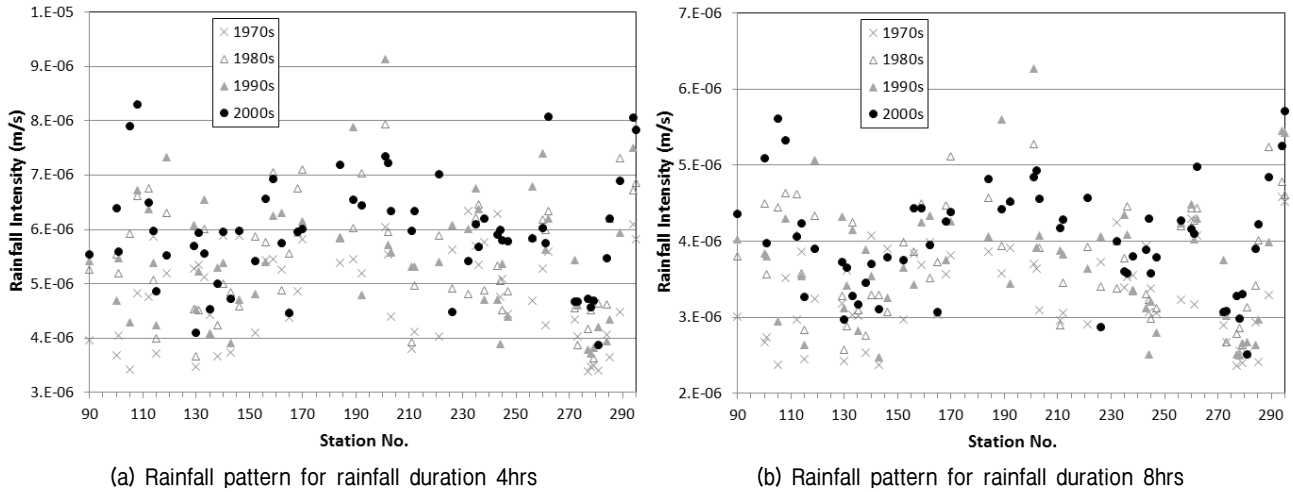


Fig. 3. Distribution of maximum rainfall intensity for 10-year average each observatories

Table 1. Material properties and parameters of unsaturated seepage analysis

Saturated permeability	$a (=1/\alpha)$	$n$	Saturated volumetric water content	Residual volumetric water content	Unit weight	Cohesion	Friction angle
$5.556 \times 10^{-6}$ m/s	53 kPa	1.22	0.435	0.083	19 kN/m <sup>3</sup>	10 kPa	30°

국내 모든 지역을 동일한 무한사면으로 가정하여 사면 안정해석을 수행하였다. 일반적인 화강풍화토의 물리적, 역학적 특성과 침투해석에 필요한 불포화지반의 수리학적 특성은 Table 1과 같다(Kim et al., 2013). 국내 자연사면을 무한사면으로 가정하여 사면의 지형조건을 Fig. 4에서처럼 구성하였다. 사면의 경사각은 34°를 이루고 있으며 사면의 안정성은 사면의 국부적인 파괴가 아닌 전체적인 파괴가 발생하도록 해석을 수행하였다. 사면해석과 연계된 침투해석은 강우강도가 투수계수보다 클 때 ponding 현상을 무시하였으며 지하수위가 사면의 안정성에 영향을 끼치지 않는 조건으로 설정하여 안정 해석이 이루어졌다. 불포화 지반의 침투해석 모델은 van Genuchten(1980) model를 사용한 상용프로그램(GeoStudio, 2012)을 이용하여 유한요소해석과 한계평형해석을 연계한 사면의 안전율을 평가하였다.

불포화 침투해석과 연계하여 한계평형해석이 이루어질 때, 여러 패턴의 강우강도를 적용하여 다양하게 변화되는 불포화 지반의 유효응력이 고려되어 진다. Fig. 5는 강우지속 4시간과 8시간의 경우에서 불포화 침투해석으로 얻어진 지반 내부의 모관흡수력을 보여준다.

Fig. 5는 임의 기상관측소의 최대강우강도  $5.33 \times 10^{-6}$  m/s를 적용하고 강우지속 4시간과 8시간 나누어 침투해석하여 얻은 결과를 보여준다. 강우지속 4시간 후 지반내의 모관흡수력은 표층에서 포화가 시작되고 있으

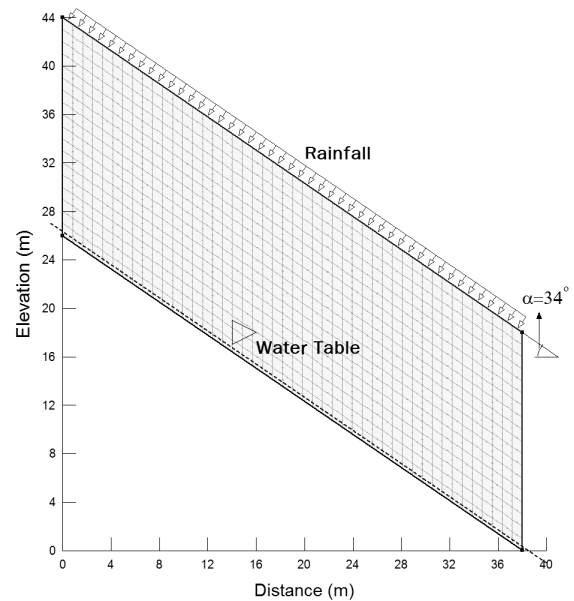
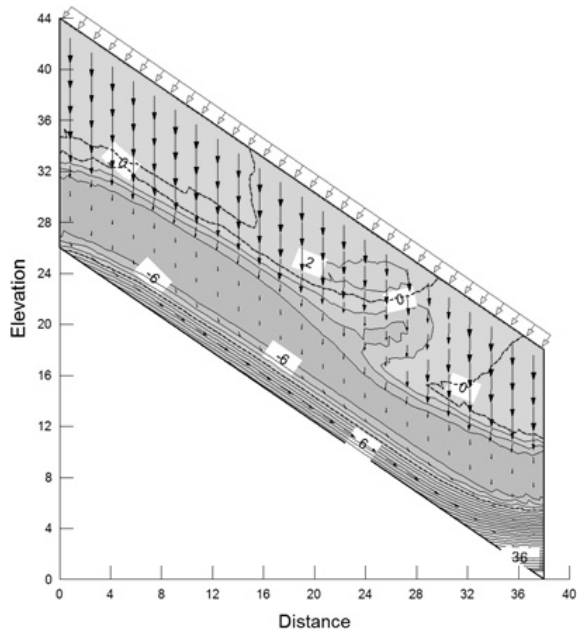


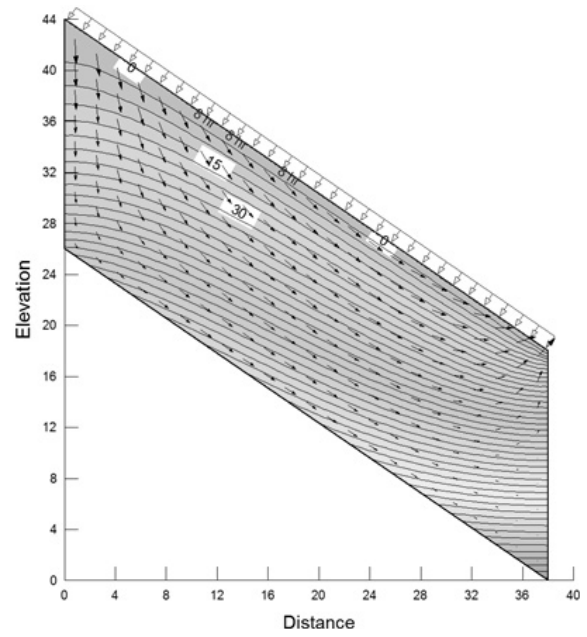
Fig. 4. Geometry of infinite slope for numerical analysis

며, 8시간에서는 모든 사면 내에서 포화된 상태를 보여주고 있다.

모관흡수력의 감소는 불포화 유효응력으로 연계되어 지반의 전단강도가 저하된다. 이러한 침투해석에서 얻은 간극수압으로 계산하여 사면의 안전율을 검토할 때, 지반 내의 포화된 상태에 따라 안전율의 감소를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 강우지속 4시간과 8시간의 지반내의 유효응력 차이를 Fig. 6에서 사면 안전율로 보여주고

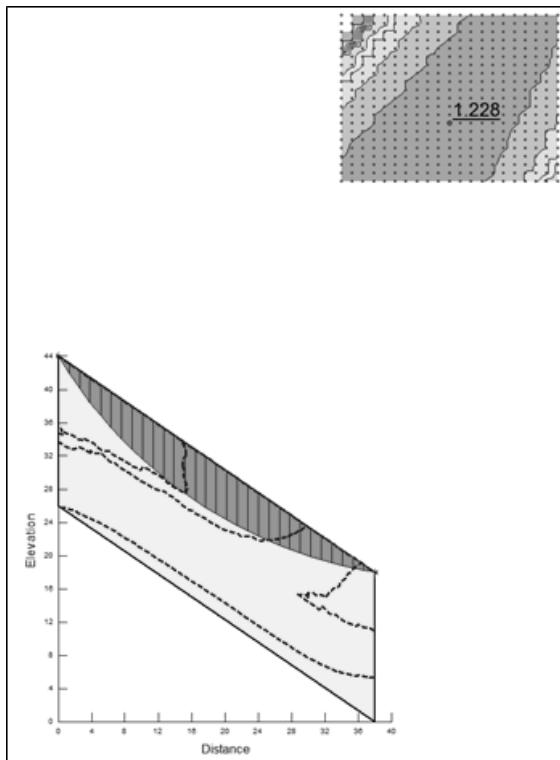


(a) Rainfall duration 4hrs

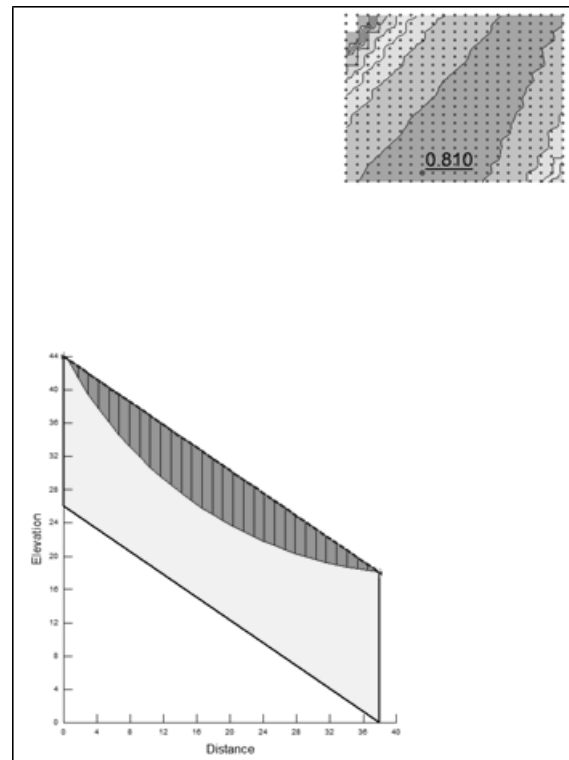


(b) Rainfall duration 8hrs

Fig. 5. Seepage analysis applied by rainfall intensity  $5.33 \times 10^{-6}$  m/s



(a) Rainfall duration 4hrs



(b) Rainfall duration 8hrs

Fig. 6. Slope stability analysis after seepage analysis (rainfall intensity =  $5.33 \times 10^{-6}$  m/s)

있다.

Fig. 5(a)는 표층에 약간의 모관흡수력이 잔존해 있기 때문에 사면의 전단강도의 저하가 Fig. 5(b)보다 작다. 따라서 완전 포화된 강우지속 8시간의 경우에서 훨씬

작은 안전율을 보이고 있다. 비록 연계해석에 대한 사례를 강우지속시간에 따른 2가지 경우로 나타냈지만, 무한사면의 침투해석과 사면안정성 해석은 기상관측소 58개소에서 모두 이루어졌으며, 각 관측소의 최대강우를

고려하여 강우패턴에 대한 안전율들의 변화는 총 464 횟수(58개소 × 2가지 강우지속시간 × 10년간 4단계)의 연계해석을 수행하였다.

### 3.2 장기간 강우관측을 위한 산사태 위험지도

각 강우관측소를 기준으로 사면안정해석을 수행한 결과, 강우지속 4시간과 8시간으로 나누어 산사태 위험 지도를 ArcGIS (ESRI, 2011) 프로그램을 이용하여 나타 내었다. 최대 강우지속 4시간은 최대 안전율 1.303에서 최소 안전율 1.197 사이에서 사면해석이 평가되었고, 최 대 강우지속 8시간은 최대 안전율 1.268에서 최소 안전 율 0.792 사이에서 평가되었다. Fig. 7에서 안전율이 작 은 값들이 빨간색, 큰 값들은 녹색으로 각각 표시되고 있다.

Fig. 7에서처럼 강우지속 4시간과 8시간 산사태 위험 도 표시는 각각의 안전율 범위에서 등고선 색깔을 표시 하였기 때문에 4시간과 8시간에서 보여주는 분포 색깔 은 동일한 안전율이 보여주고 있는 것은 아니다. 지속시 간별 안전율의 범위가 다르지만 장기간 강우관측 자료 를 토대로 토사사면의 안전성 위험도는 시간이 경과함 에 따라 강우지속 4시간인 경우 전체적인 범위로 넓게 불안정성을 보이며, 강우지속 8시간인 경우 위험성을 보이는 지역들이 2000년대에 분포가 커지고 있음을 보

여준다. 비록 관측소별로 10년 평균한 최대강우강도는 일일 최대강우강도 보다 훨씬 작은 강우가 적용되었지 만, 지속시간이 길어지면서 기후변화로 인한 강우패턴 은 극우강우와 집중호우의 증가의 영향이 토사 사면 불 안정성으로 연관되고 있다고 판단할 수 있다. 그리고 산 사태 위험지도(Fig. 7)를 통하여 기후변화에 따른 사면 안정성 취약지역을 확인할 수 있었다.

## 4. 토목섬유로 보강된 사면안정해석

### 4.1 Geo-grid 보강사면의 침투해석과 사면안정해석

강우자료에서 연도별 최대강우량을 산정하여 무한사 면해석과 동일한 방법으로 불포화 침투해석과 연계한 사면 안정성을 분석하였다. 38년간의 최대강우강도를 강우지속 8시간을 기준으로 geo-grid 보강사면의 인장 강도를 10kN과 30kN으로 보강한 사면에 대해서 해석을 수행하였다. Fig. 8은 토목섬유(geo-grid)로 보강된 유한 사면을 가정된 지반조건을 보여주고 있다. 보강사면 설 계법 역시 한계평행해석에 근거한 것으로 FHWA 설계 지침(Elias et al., 2001)을 토대로 제안한 Schmertmann et al.(1987)의 설계기준을 수치해석에 적용하였다.

$$T_{pull} = 2 \times L_e \times b \times \sigma_v \times f^* \quad (1)$$

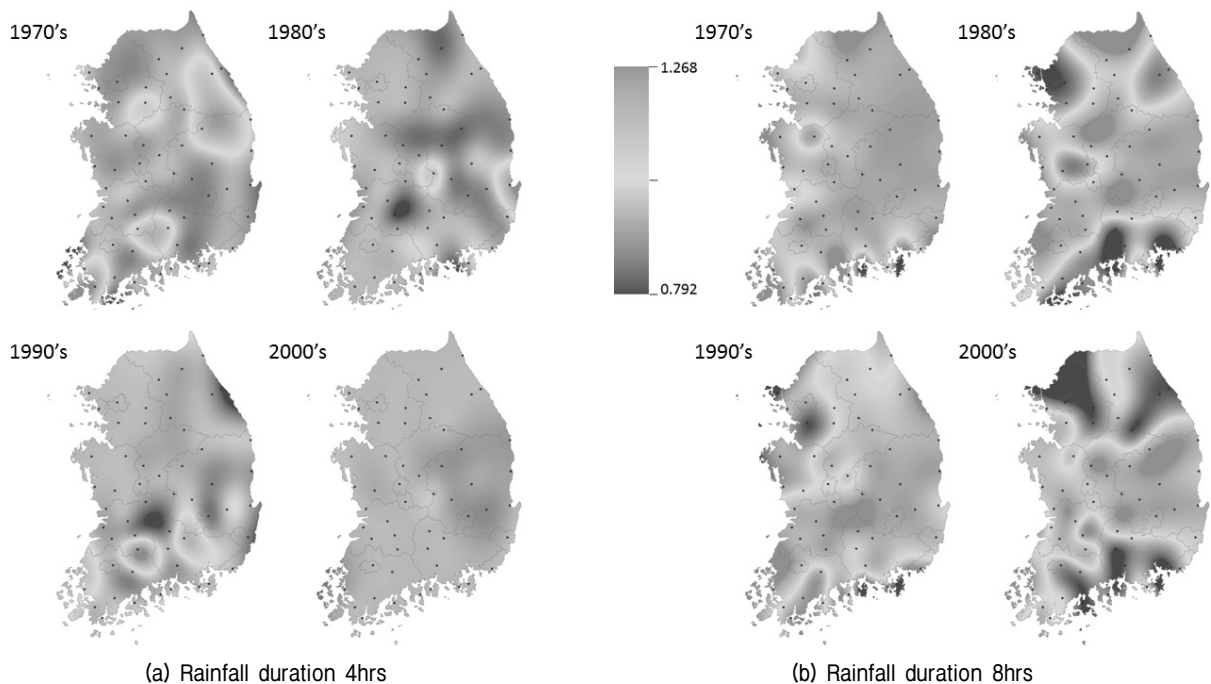


Fig. 7. Landslide hazard map using maximum rainfall intensity in 38 years rainfall duration

토목섬유로 보강된 일반적인 사면은 유한사면으로 가정하고 인발저항력은 Eq. (1)과 같으며, 보강재의 인발저항력( $T_{pull}$ )은 보강재의 유효길이( $L_e=3.5m$ ),  $b$ 는 보강재의 폭(1m), 보강재 위에 작용하는 수직응력  $\sigma_v$ 은 토목섬유 보강재의 마찰계수( $f^*$ )  $2/3\tan\phi$ 를 사용 한다 (Korean Geosynthetics Society, 2010; Elias et al., 2001). 사면의 경사는 1(V):0.5(H) 으로 보강사면의 총 높이 5m 에 0.6m간격으로 인장강도가 10kN인 보강재(geo-grid)를 포설하고 보강재 소요 개수는 8개이다. 보강사면에 적용되는 상단의 외부하중은 열차 또는 도로 수직하중으로  $10kN/m^2$ 으로 하였다(Lee et al., 2006; Yoo and Kim, 1998).

Geogrid로 보강된 사면에서 침투해석은 흙에 대한 투수계수와 같은 조건으로 불포화 해석을 수행하였으며, 강우강도가 투수계수보다 클 때 ponding 현상을 무

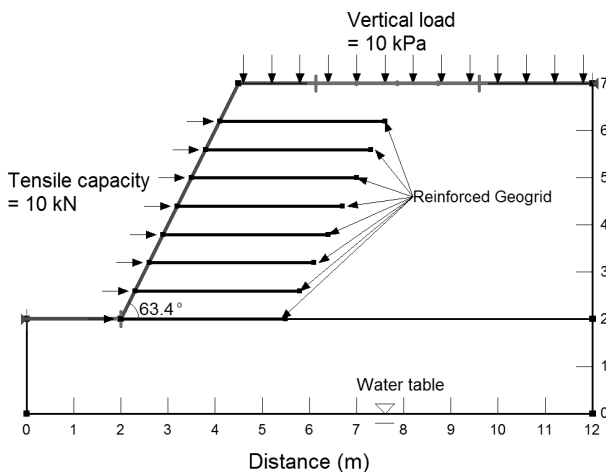


Fig. 8. Geometry of geo-grid reinforced soil slope for numerical analysis

시하였고, 지하수위는 사면의 안정성에 영향을 끼치지 않는 조건으로 설정하여 안정 해석을 수행하였다. 무한사면의 강우자료 적용과 마찬가지로 강우지속 8시간에 따라 최대강우강도를 연도별 취합하여 1973-1980년, 1981-1990년, 1991-2000년, 2001-2010년의 연평균 최대 강우강도를 평균하여 강우강도로 수치해석에 적용하였다. 보강사면에 적용한 지반의 물리적, 역학적 특성은 Table 1과 같은 조건으로 사용하였다. Fig. 9는 강우지속 8시간에서 임의 지역의 인장강도 10kN 보강사면에 2가지 최대 강우강도( $1.0\times 10^{-6}m/s$ 와  $5.33\times 10^{-6}m/s$ )를 적용하여 얻은 침투해석을 보여주고 있다. 작은 강우강도(Fig. 9(a) =  $1.0\times 10^{-6}m/s$ )를 적용한 지반에서는 불포화 유효응력이 잔존하고 있으나, 큰 강우강도(Fig. 9(b) =  $5.33\times 10^{-6}m/s$ )에서는 사면 내에는 완전 포화된 상태를 보여주고 있다.

Fig. 10은 인장강도 10kN와 30kN 보강사면에서 동일한 강우강도( $5.33\times 10^{-6}m/s$ )를 적용하여 침투해석 이후에 사면안전을 평가를 보여준다. 2가지 사면안정해석에서는 강우지속 8시간에 해당하는 불포화 침투해석 이후에 geo-grid 인장강도의 크기에 따라 사면의 안전성은 1.391과 1.597로서 차이를 보이고 있다. 보강사면의 설계법에 근거한 급경사(slope angle= $64^\circ$ )이기 때문에 사면파괴의 파괴면은 사면의 toe에 고정시켜 파괴를 발생시켰다. 연계해석에 대한 사례를 인장강도에 따른 2가지 경우로 나타냈지만, 보강사면의 침투해석과 사면안정성 해석은 무한사면의 해석방법과 마찬가지로 사면안정 해석은 총 464 횟수(58개소  $\times$  2가지 인장강도  $\times$  10년간 4단계)의 연계해석을 수행하였다.

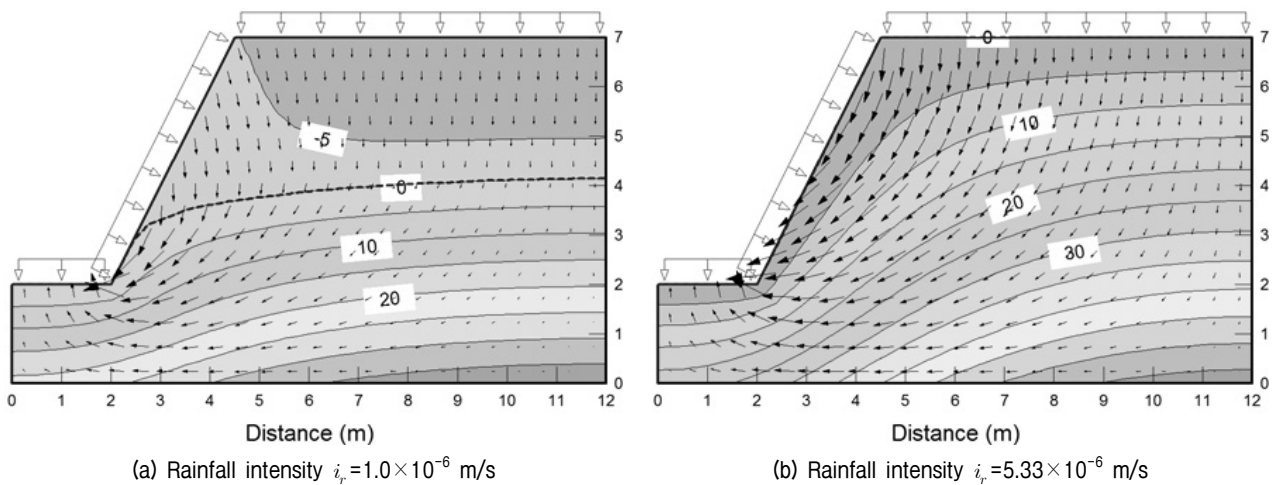


Fig. 9. Seepage analysis applied by two type of rainfall intensity

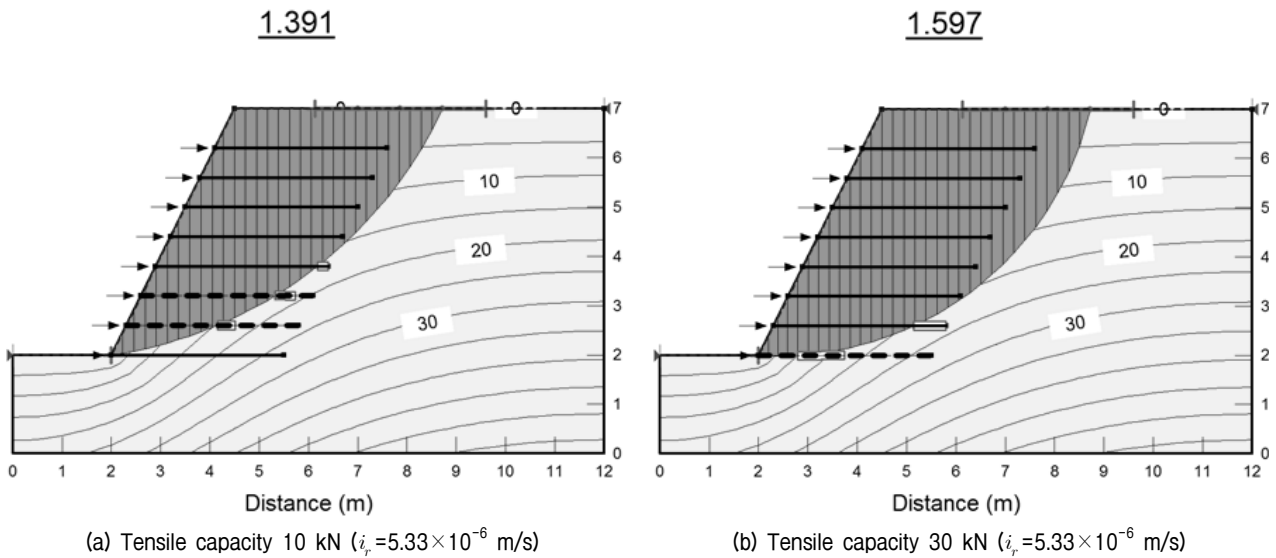


Fig. 10. Slope stability after seepage analysis in geo-grid reinforced slope (after 8hrs)

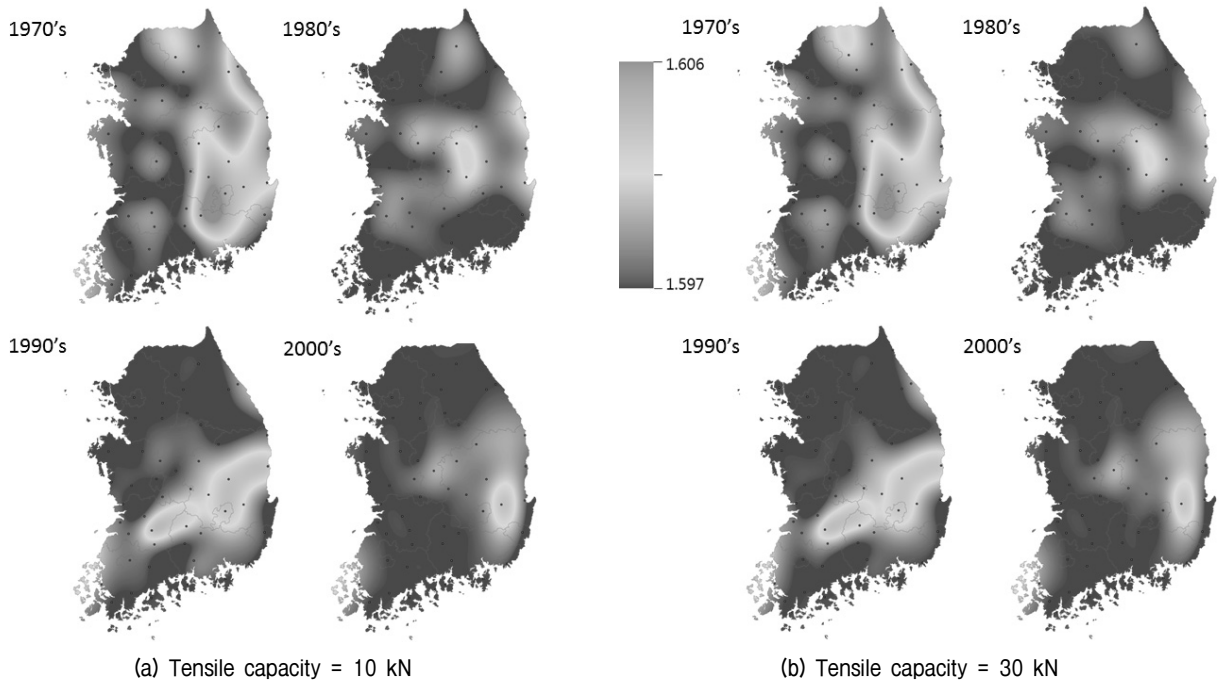


Fig. 11. Landslide hazard map of geogrid-reinforced soil slope due to maximum rainfall intensity

#### 4.2 장기간 강우관측을 위한 산사태 위험지도

각 기상관측소를 기준으로 사면안정해석을 수행한 결과, 강우지속 8시간으로 산사태 위험지도를 Fig. 11과 같이 나타내었다(ESRI, 2011). 무한사면에서 해석한 최대 안전율 1.286에서 최소 안전율 0.792으로 평가되었으나, 토목섬유 보강사면의 인장강도 10kN에서 최대 안전율 1.401에서 최소 안전율 1.391로 평가되었고, 인장강도 30kN 보강된 사면에서 최대 안전율 1.606에서 최

소 안전율 1.597로 평가되었다. 장기간 강우관측 자료를 토대로 시간이 경과함에 따라 무한사면인 경우에는 위험성을 보이는 지역들이 점차 국부적으로 위험도를 보이고 있었으나, 보강사면에서 안전율은 70년대에 지역적으로 안전율의 차이가 약간 발생하지만, 시간이 지남에 따라 대체적으로 비슷한 사면 안전율을 보였다. 이는 보강한 토목섬유의 인장강도를 증가시켰을 때도 같은 경향을 보이고 있으며, 토목섬유로 보강된 사면은 강우패턴에 영향을 받지 않고 사면이 안전측면으로 일정하



게 보강이 되고 있다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 기대효과

본 연구는 연 최대강우량을 강우지속 4시간과 8시간으로 나누어 10년 단위 평균값을 얻어 기후변화에 대한 국내 토사사면의 위험도 분석을 수행하였다. 불포화 지반의 침투해석을 연계하여 모관흡수력을 고려한 사면 안정해석을 수행한 결과, 사면 지형조건을 동일하게 가정하였을 때 장기간 강우패턴 적용시, 일반사면은 밀접하게 관련을 보이고 있었으나, 보강사면은 강우패턴에 상관없이 사면의 안전성을 보였다. 38년간의 장기간 관측한 결과를 다음과 같이 얻을 수 있었다.

- (1) 장기간에 걸친 수문자료를 여러 가지 방법으로 평가할 수 있지만, 연평균 최대 강우강도를 이용하여 사면해석에 적용한 결과, 강우지속 4시간일 경우 시간이 지남에 따라 사면의 불안정성이 전국적으로 확대되고 있었으며, 강우지속 8시간일 경우에는 최근 들어 사면 붕괴의 위험성이 높은 지역을 뚜렷하게 확인할 수 있었다.
- (2) 비록 국내 모든 지역을 동일한 무한사면으로 가정하였으나, 장기간의 강우패턴에 영향을 받고 있는 지역적인 위험성을 확인할 수 있었으며, 강우 특성을 지역적으로 고려한다면 방재대책을 위한 지반구조물 설계 시 중요한 산사태 위험지도로써 도움이 될 것으로 판단된다.
- (3) 토목섬유로 비탈면을 적절하게 보강한다면 장기간 강우패턴에 상관없이 사면의 안전성을 유지하고 있었다. 최대강우강도 10년을 단위로 평균하여 적용한 값들은 최근 발생하는 극우강우나 집중호우 크기에 미치지 못하지만, 사면보강을 위해 일정한 인장강도 이상으로 적용하여 사면의 안전성을 확보한다면 강우특성에 상관없이 사면을 보강할 수 있다고 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국

연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A2062218와 NRF-2013R1A6A3A01064667).

## 참고문헌 (References)

1. Collison, A., Wade, S., Griffiths, J., and Dehn, M. (2000), "Modeling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England", *Engineering Geology*, Vol.55, pp.205-218.
2. Dehn, M., Burger, G., Buma, J., and Gasparetto, P. (2000), "Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling", *Engineering Geology*, Vol.55, pp.193-204.
3. Dixon, N. and Brook, E. (2007), "Impact of predicted climate change on landslide reactivation: case study on Mam Tor, UK", *Landslides*, Vol.4, pp.137-147.
4. Elias, V., Christopher, B. R., and Berg, R. R. (2001), *Mechanically Stabilized Earth Walls and reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines*, Publication No. FHWA-NHI-00-043, National Highway Institute, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
5. ESRI (2011), *ArcGIS Desktop: Release 10: Environmental Systems Research Institute*, Redlands, CA, USA.
6. GeoStudio (2012), version 8.0.10, *Manual for SEEP/W and SLOPE/W modeling*, GEO-SLOPE International, Ltd., Calgary, Alberta, Canada.
7. Hwang, H, Jun, K., and Yune, C. (2012), "Site Investigation on Slope Hazard and Triggering Factors of 2011 in Korea", *Journal of Korean Geotechnical Society National Conference*, pp.13-18.
8. Kim, J., Jeong, S., and Richard, R.A. (2012), "Instability of partially saturated soil slopes due to alteration of rainfall pattern", *Engineering Geology*, Vol.147-148, pp.28-36.
9. Kim, Y., Kim, J., Lee, J., and Kim, S. (2013), "A Study on Soil Slope Stability Design Considering Seepage Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.1, pp.135-147.
10. Korean Geosynthetics Society (2010), 3<sup>rd</sup> Short Course, Design, Construction, and Test Evaluation for Reinforced Earth Method, pp.39-41, pp.362-364.
11. Lee, S.H., Jung, Y.H., Lee, I.W., and Yoo, S.J. (2006), "Numerical Modelling of Reinforced Soil Slopes under Railway Load", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.9, No.6, pp.753-760.
12. Schmertmann, G.R., Chouery-Curtis, V.E., Johnson, R.D., and Bonaparte, R. (1987), "Design charts for geogrid-reinforced soil slopes", *Proceeding of Geosynthetics '87*, New Orleans, USA, pp.108-120.
13. van Genuchten (1980), "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
14. Yoo, C.S. and Kim, O.M. (1998), "A Study on Design of Geosynthetically Reinforced Slopes", *Proceeding of Korean Society of Civil Engineering*, pp.351-354.

Received : April 23<sup>rd</sup>, 2014

Revised : May 30<sup>th</sup>, 2014

Accepted : June 13<sup>th</sup>, 2014