Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 33, No. 3: 1027~1035, May 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.3.1027

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Geotechnical Engineering **지반공학**

강우사상의 영향을 고려한 불포화 풍화사면의 안정성

김병수* · 박성완**
Kim, Byeong-Su*, Park, Seong-Wan**

Effect of Rainfall-Patterns on Slope Stability in Unsaturated Weathered Soils

ABSTRACT

In this study, two rainfall patterns are utilized for practical consideration of rainfall phenomena in unsaturated soil slope design. One is the I.D.F (Intensity-Duration-Frequency) method which is an existing design rainfall method and ignores the effect of the variation of the rainfall according to the time. The other is the Huff method which considers this effect oppositely. First, the safety of factor of the slope according to the variation of an initial suction which means the precedent rainfall effect was examined by means of the application of the I.D.F method. Through the application of two rainfall patterns, it was discussed how the rainfall pattern affects the factor of safety of the slope. As a result, it is found that the Huff method is more practical on the evaluation of the slope stability than the I.D.F method.

Key words : Rainfall pattern, I.D.F method, Huff method, Slope stability, Initial suction

초 록

사면안정 해석 시, 사면파괴의 주원인인 강우사상의 현실적 접목을 위하여 본 연구에서는 다음 두 가지 방법을 채택하였다. 하나는 시간에 따른 강우량 변화의 영향을 무시한 기존의 설계강우 방식인 I.D.F(Intensity-Duration-Frequency)곡선을 이용하는 방법이며, 다른 하나는 시간의 영향을 고려하여 강우사상을 표현한 Huff 방법이다. 먼저 I.D.F 방법의 강우사상을 적용하여 선행강우효과를 나타내는 초기흡수력의 변화에 따른 사면의 안전율의 변화를 알아보았다. 또한, 두 강우사상의 방식을 적용하여 강우사상이 사면의 안전율 변화에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 그 결과, Huff 방법의 강우사상이 I.D.F 방법보다 더 현실적으로 사면의 안전성 평가가 이루어 질 수 있음을 확인할 수 있었다.

검색어 : 강우사상, I.D.F 방법, Huff 방법, 사면안정, 초기흡수력

1. 서 론

우리나라 국토의 63.7%가 산지로 이루어져 있는데 인구 팽창과 이에 따른 개발로 인해 부수적으로 주거지 및 도로변에서 인공적인 사면을 쉽게 접할 수 있다(Chang 2012). 한편 기상변화로 인한 태풍과 호우로 산사태의 발생 빈도가 증가 추이에 이로 인한 인명과 재산 피해가 빈번하게 발생하고 있다. 특히 기상의 급격한 변화로 강우의 패턴이 변하고 있는 실정으로 기존 방식보다는 변화하는 환경조건을 고려한 사면에서의 안정성 평가가 현실적인 대안으로 인식되고 있다.

기존의 관련 연구들을 살펴보면 주된 사면파괴 발생 원인이 절토로 인한 안정성 감소와 풍화 촉진 등으로 지반의 강도감소 및

* 정회원 · 일본 고베대학교 토목공학과 박사 후 연구원 (flykbs@naver.com)
** 정회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 부교수 (**Corresponding Author** · Dept. of Civil and Environmental Eng., Dankook Univ. · spark@dankook.ac.kr)

Received October 7 2012, **Revised** October 29 2012, **Accepted** April 1 2013

Copyright ⓒ 2013 by the Korean Society of Civil Engineers
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.

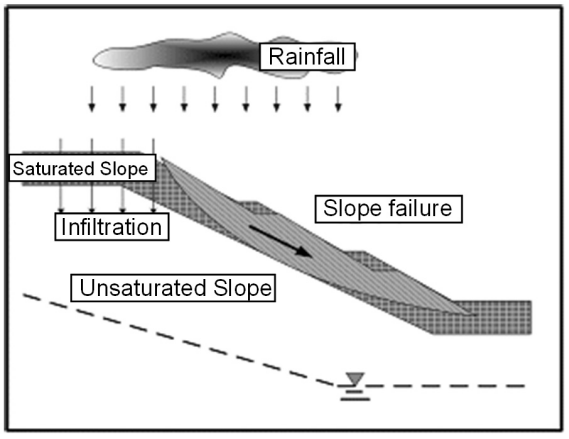

Fig. 1. Conceptual View of Unsaturated Slope Failure due to Rainfall

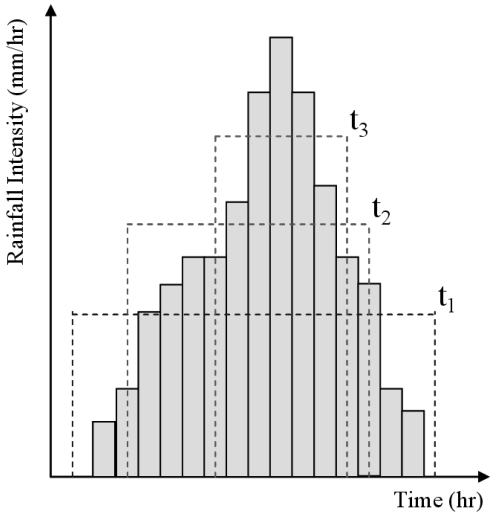

Fig. 2. Definition of Average Maximum Rainfall Intensity

사면 내 침투수에 기인하고 있는 것으로 알려져 있다(Krahn et al. 1989; Fredlund and Rahardjo 1993; Lambe 1996; Ng and Shi 1998, Chang 2012). 따라서 국내에서도 강우 시 사면파괴의 메커니즘을 이해하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 사면안정성 평가에 기존의 포화토 방식의 적용보다는 불포화지반의 이론 적용이 보다 현실적인 대안으로 자리잡고 있다 (Kim et al. 2002; Park and Shin 2009; Lee et al. 2009; Oh et al. 2008; Ng and Shi 1998; Rahardjo and Leong 1997; Kim et al. 2004).

따라서 본 논문에서는 국내 풍화토 시료를 대상으로 불포화토 상태를 고려한 이론을 적용하여 지반의 불포화함수특성을 알아보고 유한요소 프로그램 Seep/w와 Slope/w (Geo-Slope 2004)를 활용하여 시간적 분포를 고려한 강우사상을 적용한 후 불포화 침투 및 사면의 안정성 평가를 각각 실시하였다.

2. 강우 사상

강우사상은 시간에 따른 강우량의 패턴을 의미하는데 각종 토목구조물을 설계하는데 고려되는 중요한 요소이다. 특히 사면의 경우 강우사상이 미치는 영향은 매우 크며 이를 적용함에 있어 시간적 영향을 고려하지 않은 I.D.F 곡선과 시간적 분포에 따른 Huff 방법을 각각 해석과 분석에 적용하여 그 차이를 살펴보고자 하였다.

2.1 I.D.F 방법

I.D.F (Intensity-Duration-Frequency)는 일종의 극치 강우량의 분석결과로 이를 산정할 때 대상 강우사상은 통계학적 독립성의 가정을 유지할 수 있도록 분리되며, 이때 사용되는 기준은 보통 강우사상간 시간간격으로 분리된다. 각 독립사상에서 최대 평균 강우강도를 Fig. 2와 같이 각 지속기간별로 산정하여 분석목적에 따라 연 최대치 계열과 연 초과치 계열 등을 구성한다. 이때 각 호우로부터 최대 평균 강우강도를 선별하는데 있어 실제 강우지속기간보다 더 긴 지속기간의 경우, 총 강우량을 주어진 지속기간으로 나눔으로써 최대 평균 강우강도를 계산한다.

예를 들어, 실제 강우량이 30분 지속되고 총 강우량이 20mm일 때 40분 지속기간의 평균 강우강도는 (20/40)×60=30 mm/hr이고, 60분인 경우는 (20/60)×60=20 mm/hr가 된다. 이와 같이 지속기간별 최대평균 강우강도의 계산에 있어 관측자료의 단위시간간격에 따라 고정시간과 임의 지속기간의 문제가 야기될 수 있다. 이렇게 구성된 계열을 이용하여 이론적 확률분포함수에 의해 수학적으로 모형화시키거나 도식적 방법에 의해 해석하여 재현기간별, 지속기간별에 따른 강우강도식이나 I.D.F 관계곡선이 얻어진다. Fig. 2와 같이 I.D.F에서는 각 지속기간별 최대 평균 강우강도 혹은 강수량을 고려하기 때문에 각 지속기간 내 호우의 시간적 변화를 전혀 고려하지 못한다. 따라서 설계호우에서도 관측호우와 같이 시간적 분포를 고려해야 한다.

2.2 Huff 방법

1967년 Huff는 미국 일리노이주의 강우기록을 통계학적으로 분석하여 강우량의 시간적 분포를 나타내는 무차원 시간분포곡선을 제시하였다 (Huff 1967; 1970). 이는 Fig. 3과 같이 강우의 누가곡선을 이용하여, 전 지속기간을 4등분하였을 때 분류된 구간에서 우량의 최대부위가 어느 부분에서 나타나는지 조사하였다.

이와 같이 4개 그룹으로 분류된 강우를 시간적으로 무차원화 시키기 위하여 개개 강우의 누가지속기간과 이에 따른 강우량을 각각 백분율로 표시하고, 이를 식으로 나타내면 다음 식(1)과 (2)와 같다.

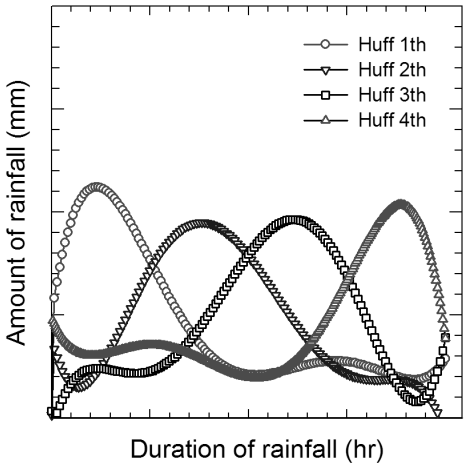

Fig. 3. Time Distribution of Rainfall Pattern by Huff Method

$$PT(i) = \frac{T(i)}{T_0} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$PR(i) = \frac{R(i)}{R_0} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서, PT(i): 임의시간 T(i)에서의 강우지속기간 비, T(i): 강우시작 후 'i'번째 시각의 경과시간, T_0: 총 강우지속기간, i: 단위 증분횟수, PR(i): 임의시간 T(i)에서의 강우량 비, R(i): 임의시간 T(i)까지의 누가우량, R_0: 지속기간, T_0의 총 우량이다.

이와 같이 무차원 누가곡선을 이용하여 각 그룹에 속한 호우들을 분리하여 분석한다. 먼저, 제 1구간 호우 분석일 경우 각 지속기간 증분회수별로 각 확률을 추정한 후, 각 확률별로 시간분포를 추정한다. 이때 각 확률누가곡선은 10%의 확률간격으로 작성하는 것이 일반적이다. 여기서, 확률누가곡선은 주어진 그룹에 대해 한 속성의 측정자료를 가지고 누가 백분율 또는 누가빈도표를 작성하여 이를 도표화한 것으로, 각 급간의 정확상한계 바로 밑까지 놓여 있는 사례의 전체 사례에 대한 비율로써 표현된다.

Huff 방법은 각 지속기간에 따른 호우의 성질에 따라 조건부 확률개념을 도입하여 무차원곡선을 각 조건별로 사용할 수 있으나, 이를 우량주상도로 작성하기 위해서는 도식적 기법이나 회귀식에 의한 기법들이 필요하다. 물론 회귀식에 의한 기법은 컴퓨터의 발달과 함께 쉽게 활용할 수 있다. 그러나 사용된 함수가 상대적으로 저차원(3차 이하)의 함수라면 누가곡선식을 정확하게 표현할 수 없다. 만약 고차원의 함수를 사용하면 분석은 상대적으로 힘들어지게 된다. 또한 호우선정에 있어 단일 호우사상의 전후로 6시간 이상이 무강우이면, 한 호우로 정의하고 있지만 이렇게 한 호우로 분리되는 기준은 아직 수문학적으로 증명되지 않았다.

이 방법에 의한 연구결과를 이용하여 설계우량주상도를 구축하는 절차는 다음과 같다.

1단계 설계재현기간과 지속기간에 대한 강우 깊이(즉, 강우강도)를 결정한다. 지점별로 해석된 I.D.F 관계 혹은 D.D.F (Depth-Duration-Frequency)에서 재현기간과 지속기간에 따른 강우 깊이를 결정한다.

2단계 설계지속기간에 해당하는 무차원 누가곡선을 결정한다. 설계지속기간에 해당하는 정보를 획득하여 구간을 선정하고 선정된 구간에서 확률을 결정 무차원 누가우량 값을 채택한다.

3단계 무차원 누가우량 값을 이용하여 무차원 우량주상도를 작성한다. 무차원 누가우량 값은 지속기간을 10개로 나누었을 때의 누가우량이므로 후행 값에서 선행 값을 빼주어 무차원 우량주상도를 작성한다. 그러나 유출해석을 하기 위해서 지속기간을 10개 보다 적거나 많게 나눌 필요가 있다. 이때는 도식적 기법이나 회귀방정식식 (3)을 이용하여 무차원 누가우량 값을 재작성하여, 무차원 우량주상도를 계산한다.

$$Y = C_0 + C_1 X + C_2 X^2 + C_2 X^3 + ... + C_n X^n \quad (3)$$

여기서, Y(%)는 누가우량, X(%)는 지속기간이고, C_0, C_1, C_2,…, C_n은 지역에 따른 상수이다.

4단계 무차원 우량주상도를 설계우량주상도로 전환한다. 무차원 우량주상도는 백분율로 되어있기 때문에 설계우량주상도를 구축하기 위해서는 1단계에서 결정한 강우깊이 및 지속기간을 무차원 우량주상도 값에 곱한다.

3. 불포화토 함수 및 투수특성

사용된 시료는 경기도 의정부지역의 절토사면부에서 채취된 편마풍화토로 Fig. 4와 Table 1은 시료에 대한 기본 물성실험을 실시한 결과이며, 편마풍화토는 통일분류상 SP-SM 시료이다.또한 투수실험 결과, 일반적인 풍화토에 대한 투수계수의 범위를 초과하지는 않는 것으로 판단되었다.

불포화 함수특성곡선 시험을 수행하여 편마풍화토에 대한 건조과정의 함수특성곡선을 획득하였고 흡수력과 체적함수비 변화를 정량화하기 위하여 Fredlund and Xing (1994)의 비선형 3계수 맞춤화식을 적용하였다.

$$\theta = C(\psi)\left\{\frac{\theta_s}{\ln[e + (\psi / a)^n]}\right\}^m \quad (4)$$

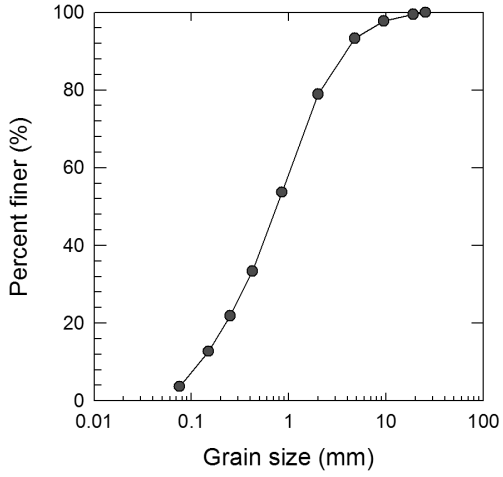

Fig. 4. Grain Size Distribution of Gneiss Weathered Soils

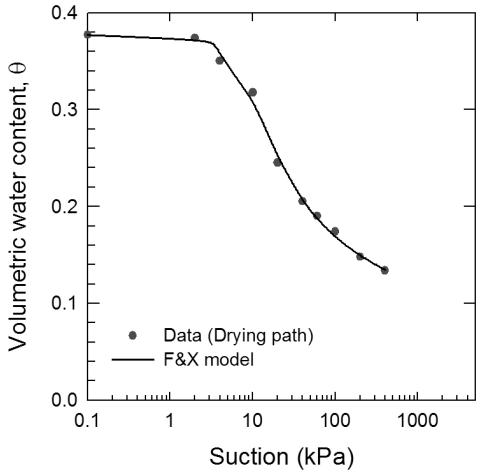

Fig. 5. SWCC of Gneiss Weathered Soils

Table 1. Properties of Soils

Soil particle density (g/cm^3)	2.676
Passing rate, #200 (%)	3.7
Liquid limit (%)	-
Plastic limit (%)	N.P
Permeability coefficient, K_s (cm/sec)	2.03×10^{-4}
Cohesion, c (kPa)	4.9
Angle of internal friction, ϕ' (°)	34.8
USCS	SP-SM

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln[1 + (\psi / \psi_r)]}{\ln[1 + (10^6 / \psi_r)]} \tag{5}$$

여기서, θ: 체적함수비, θ_s: 포화시 체적함수비, a: 공기함입치와 관련된 계수, n: 함수특성곡선의 기울기와 관계하는 곡선계수, m: 잔류함수비와 관계하는 곡선계수이다. 또한, $C(\psi)$: 보정계수이고, ψ_r: 잔류체적함수비 θ_r: 대응하는 흡수력을 의미한다.

Fig. 5는 획득된 흡수력과 체적함수비의 함수특성 관계를 보이고 있다. 여기서 공기함입치는 4.80kPa이며, 값 a는 7.41, n은 1.90, 그리고 m은 0.50가 얻어졌다. Fig. 6은 편마풍화토의 불포화토 투수계수를 보이고 있는데 Fredlund et al. (1994)에 의해 제안된 식(6)를 사용하여 간접적으로 추정하였다.

$$k_r = \frac{\int_{\ln(\psi)}^{b} \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \times \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{aev})}^{b} \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \times \theta'(e^y) dy} \tag{6}$$

여기서 k_r: 포화시 투수계수에 대한 불포화시 투수계수에 대한

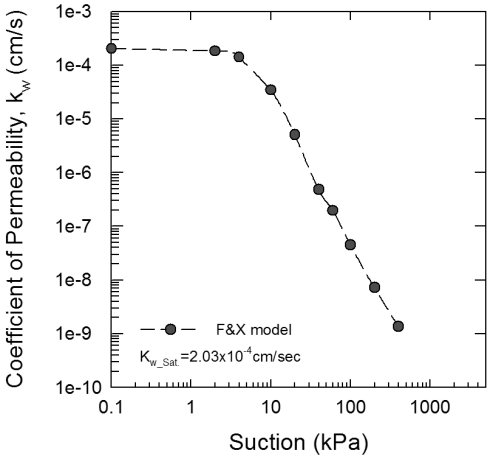

Fig. 6. Unsaturated Permeability of Gneiss Weathered Soils

비, b: 1000000에 자연로그를취한 값, θ': 식(4)를 모관흡수력 Ψ에 대해 미분한 값이다, ψ_{aev}: 공기함입값 이다.

그림의 결과로부터, 흡수력이 증가함에 따라 불포화토 투수계수가 낮아지고 있음을 볼 수 있다.

4. 불포화토 풍화사면의 안정성 평가

안정성 평가를 위하여 두 가지 경우로 나누었는데 불포화토 사면의 선행강우 효과를 알아보고 I.D.F 방법의 강우사상을 적용하여 불포화토 사면의 초기흡수력 변화에 따른 사면의 안전성을 평가하였다. 둘째로는 사면 파괴의 원인인 강우사상을 두 가지 방식, 즉 I.D.F 방법과 Huff 방법을 적용하여 강우사상이 사면의 안전성에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

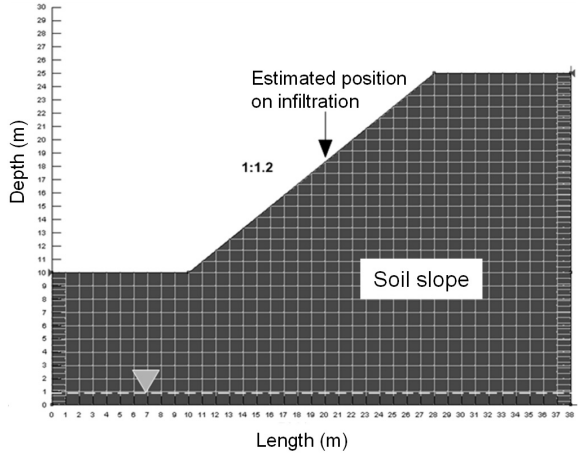

Fig. 7. Model View of Infinite Soil Slope

Table 2. Increase in Apparent Friction Angle due to Suction (ϕ^b)

Initial suction	5 kPa	10 kPa	25 kPa
ϕ^b	31.6°	27.7°	17.3°

4.1 해석 조건

해석대상을 Fig. 7과 같이 단층 2차원 무한 토사사면으로 1:1.2의 경사를 가지며 형상은 길이 38m, 높이 25m로 경사구간은 길이는 18.0m, 높이 15.0m로 하였다. 지하수위는 침투거동에 영향을 최대한 배제하기 위해 하부에서 지하 9.0m에 존재하는 것으로 가정하였다. 또한 편마토의 불포화 함수특성곡선과 투수계수, 그리고 강도정수 값들을 지반 물성치로 적용하였다. 여기서 사면지반의 단위중량은 16.7kN/m^{3}로 하였다.

불포화상태 사면안정 해석을 위한 지반의 강도 정수는 포화상태 삼축압축실험(CU-test)을 실시한 후 흡수력 증가에 의한 내부마찰각, ϕ^b를 획득하기 위해 Vanapalli et al. (1996)에 의해 제안된 전단강도식에서 겉보기 점착력항에서의 식(6)과 같은 관계식을 활용하여 추정하였다. Table 2는 편마풍화토의 흡수력 증가에 의한 내부마찰각, ϕ^b값을 나타내었다.

$$\tan\phi^b = \left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)\times\tan\phi' \tag{6}$$

여기서, ϕ^b: 모관흡수력에 의한 내부마찰각(°), θ: 체적함수비, θ_r: 잔류체적함수비, ϕ': 유효 내부마찰각(°)이다.

Huff 방법의 경우, 태풍으로 인한 강우의 영향이 큰 강원도 강릉지역의 강우사상에 대한 분위별 무차원 누가곡선은 대표적으로 2분위 무차원 확률 50%를 사용하였다. Fig. 8에서는 식(3)을 이용하여 강릉지역의 총 강우시간을 100%로 하고, 10개

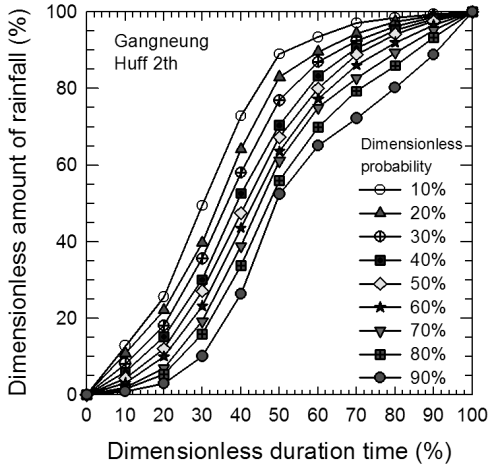

Fig. 8. Non-dimensional Cumulative Curve (Huff 2nd) in Gangneung

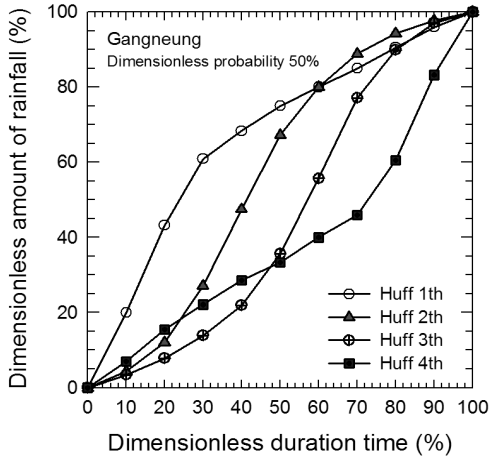

Fig. 9. Non-dimensional Cumulative Curve under Probability 50% in Gangneung

구간으로 나누어 총 강우의 각 10%에 해당하는 시간구내에서의 강우를 총 강우량에 대한 %를 나타내고 있다. 여기서, C_0, C_1, C_2,…, C_6은 1.12E-02, 8.09E-01, -8.01E-02, 5.31E-03, -1.10E-04, 9.45E-07, -2.96E-09이 각각 적용되었다. Fig. 9에서 각 분위마다 50%의 무차원 확률은 해당분위의 호우의 절반을 초과하는 누가강우 양상을 의미하며, 90%는 호우의 10% 또는 그 이하가 발생할 분포를 의미한다. 따라서, 각 분위별로 발생확률 10~90%의 9가지 분포형태에서 첨두강우가 해당 분위의 중심에 위치하는 50%를 선택하였다. 이는 국내 강우설계에서 주로 채택되고 있는 발생확률이다 (MOCT 2000).

본 연구의 사면안정해석에서는 대표적으로 Huff 방법의 2분위를 적용하였고, 해석 시 불포화 침투깊이 추정과 사면 안정 해석을 위하여 Bishop의 간편법을 적용하였다.

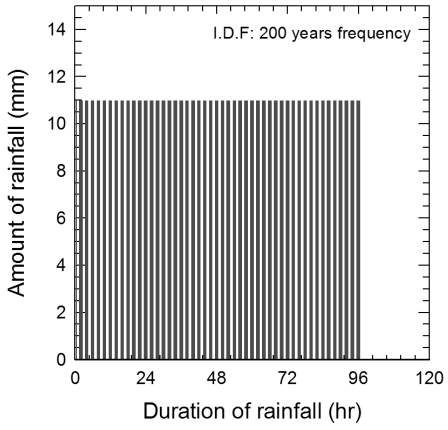

Fig. 10. Used Rainfall Pattern in Analysis (I.D.F Method Case)

Table 3. Condition for I.D.F. Method Case

Contents	
SWCC	Drying curve
Initial suction	5, 10, 25 kPa
Rainfall Pattern	I.D.F Method
	Gangneung (527.6mm × 2=1055.2mm) (200 years Frequency, Rainfall duration: 96 hours)

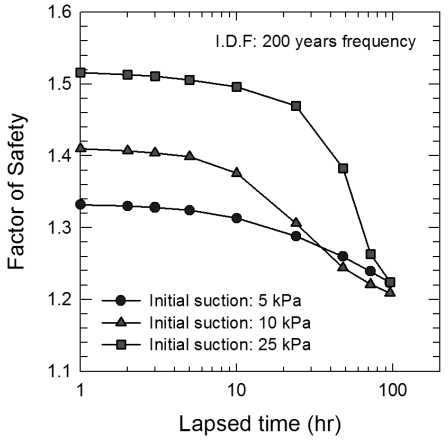

Fig. 11. Change in Factor of Safety under Various Initial Suction in Slope

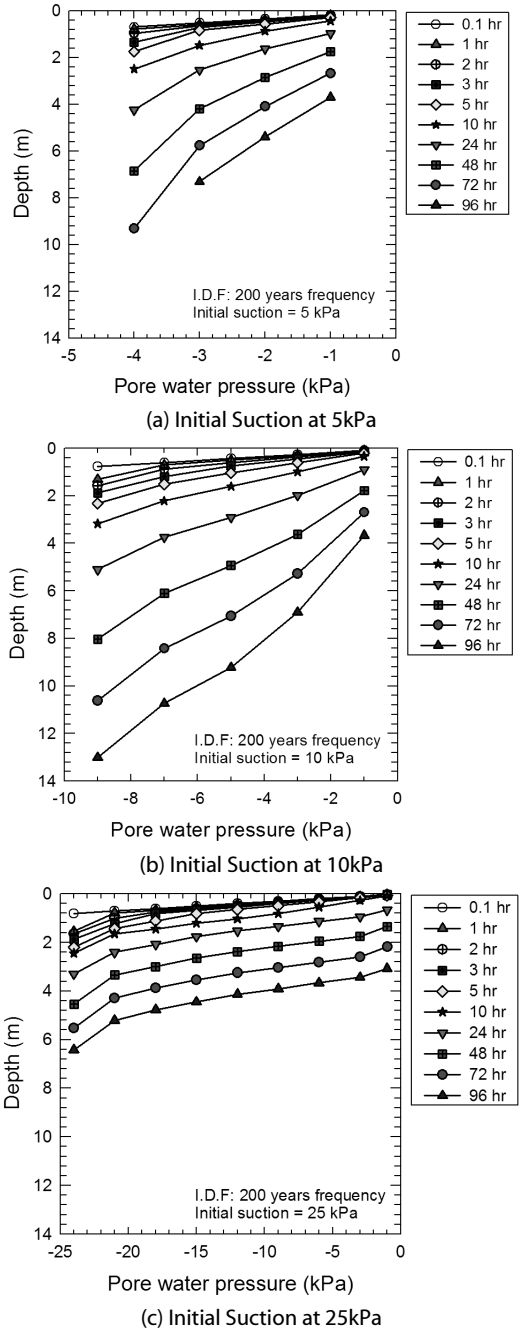

Fig. 12. Pore-water Pressure Distribution along with depth and rainfall duration

4.2 초기흡수력에 따른 사면의 안전성 평가

4.2.1 해석 조건

선행강우 효과를 나타내는 초기흡수력에 따른 안전성을 평가하기 위해 강우사상은 I.D.F 방법을 사용하였다. 강우강도는 강원도 강릉지역의 200년 빈도 48시간의 강우조건을 적용하여, 이를 96시간으로 연장하는 방식으로 안정해석을 실시하였다. 이와 같은 조건은 편마풍화토의 포화투수계수보다 높은 강우강도를 사용함으로써 사면내 침투로 인한 파괴를 유도하기 위한 것이다. 초기사면안정에 어떤 영향을 미치는지 알아보고자 수분특성곡선에서 포화도에 따라 흡수력의 변화가 큰 구간을 상정하였다. 따라서 초기흡수력 5, 10, 25 kPa이 적용되었고, 해석에 사용된 강우사상은 Fig. 10과 같다. 해석 조건은 Table 3과 같은데 해석시간은 총 96시간으로 하여 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 24, 48, 72, 96 총 11단계에 걸쳐 사면에 대한 안전율 변화 값을 획득하였다.

4.2.2 해석 결과

편마풍화토 사면의 초기흡수력에 따른 안전성 평가를 위한 해석 결과는 Fig. 11과 같다. 초기흡수력이 증가함에 따라 흡수력에 의한 겉보기 점착력이 증가하며 전단강도가 증가하고 있다. 따라서, 초기흡수력이 5, 10, 그리고 25kPa 순으로 증가할 수록 초기 사면 안전율이 높아짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 흡수력이 높을수록, 포화되기까지의 시간의 지연과 높은 흡수력에 의한 지반의 전단강도 증가로 인한 것에 기인한다. 그림에서 24시간 이후 초기흡수력에 따라 안전율이 감소되지 않고 오히려 높은 흡수력 상태의 안전율 감소 경향이 역전됨을 볼 수 있다. 이와 같은 원인은 초기흡수력에 따라 강우 시 사면의 포화대의 형성 위치가 바뀌기 때문이다. 이러한 지반의 깊이별 흡수력 변화는 Fig. 12에서 확인할 수 있는데 초기흡수력이 높아질수록 사면의 포화대 형성시간이 늦춰지고 있음을 알 수 있다.

따라서, 지반의 초기흡수력은 강우 시 사면의 안전율 변화에 큰 영향을 미치고 있으며 초기흡수력을 유지하는 것이 강우 시 사면파괴를 효과적인 방법임을 알 수 있다. 따라서 지반의 초기흡수력 유지를 위해서는 사면에서의 표면 배수의 역할이 매우 중요하다고 판단된다.

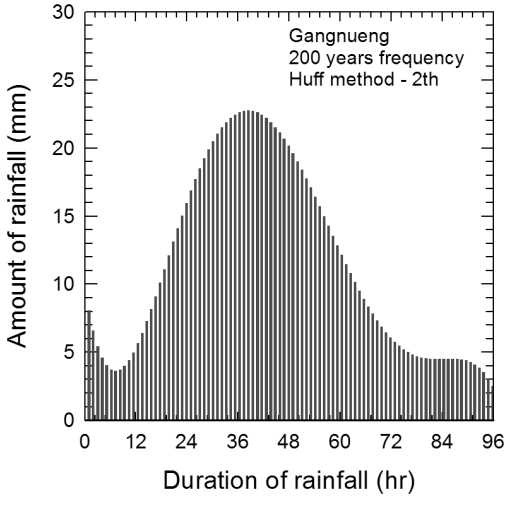

Fig. 13. Adopted Rainfall Pattern for Gangneung Case

Table 4. Condition for Huff Method Case

Contents	
SWCC	Drying curve
Initial suction	10 kPa
Rainfall Pattern	Huff Method - 2th
	Gangneung (527.6mm × 2 = 1055.2mm) (200 years Frequency, Rainfall duration: 96 hours)

4.3 강우사상에 따른 안전성 평가

강우사상을 I.D.F와 Huff 방법(2분위)으로 적용하여 불포화 풍화사면의 강우사상에 따른 안전율 변화를 살펴보았다. 두 방법의 가장 큰 차이점은 시간의 흐름에 따른 강우사상을 묘사할 수 있는지 여부이다. I.D.F 방법은 획일적으로 시간에 따라 최대강우강도를 적용하고 있으나, Huff 방법의 경우 지역의 특성에 맞게 강우사상을 시간의 흐름에 따라 적용하는 방법이다.

4.3.1 해석 조건

강우사상의 효과만을 보기 위하여 사면의 초기흡수력을 10kPa

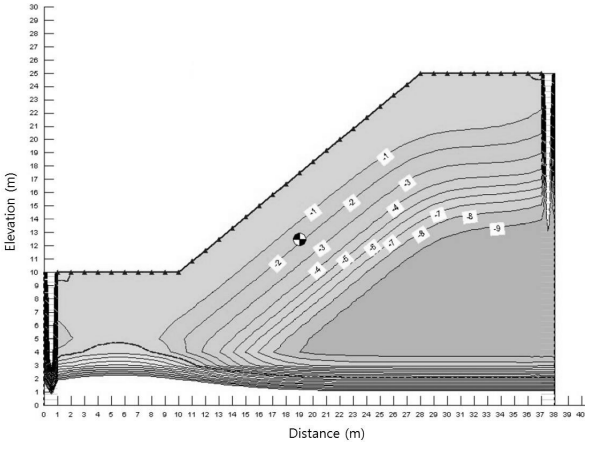

Fig. 14. Pore-water Pressure Distribution under Initial Suction at 10kPa (Huff Method: 2nd and 96 Hours Rainfall)

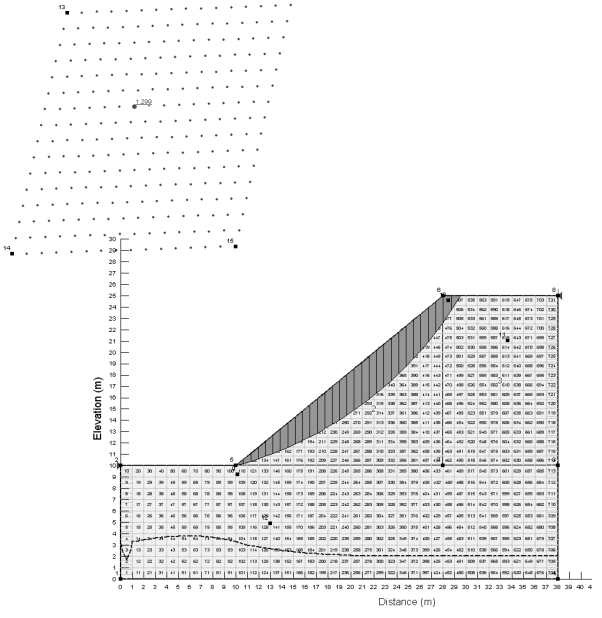

Fig. 15. Factor of Safety under Initial Suction at 10kPa (Huff Method: 2nd and 96 Hours Rainfall)

로 가정하고 강우사상에 대한 해석을 수행하였다. 특히 강우사상을 결정하는데 있어 명확한 안전율 비교를 위해 강우지속시간을 96시간까지 지연시키는 과정이 필요하여 본 연구에서는 48시간 527.6mm의 강우조건을 96시간 1055.2mm의 강우량으로 조정하였다. 이와 같은 강우사상에 대한 조건은 Fig. 13에서 나타내었다.

4.3.2 해석 결과

Fig. 14와 15에서 불포화토 사면(초기흡수력 10kPa)에 대한 Huff방법 2분위 강우사상을 적용한 후, 96시간이 경과된 침투해석 결과와 최종 파괴단면을 보이고 있다. 96시간후의 안전율은 1.299를 보이고 있으며, 이 결과는 Fig. 11에서의 결과에서도 이미 나타내었다. 한편, Fig. 13에서 보이듯 강우량이 40시간을 기점으로 감소하고 있기 때문에, Fig. 16에서와 같이 강우지속시간 96시간에 사면의 표층부위가 점점 음의 간극수압, 깊이별 흡수력이 상승하

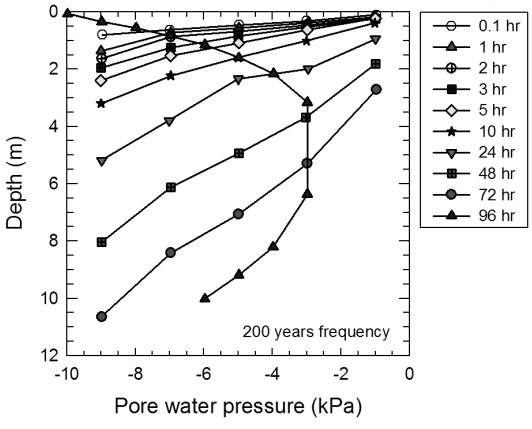

Fig. 16. Pore-water Pressure Distribution along with depth and rainfall duration under Initial Suction at 10kPa (Huff Method: 2nd)

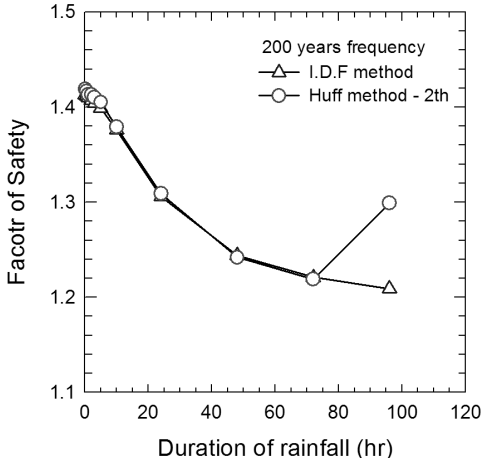

Fig. 17. Change in Factor of Safety based on Rainfall Pattern (Initial Suction at 10kPa)

며 불포화상태로 전환되고 있음을 알 수 있다. 결국, I.D.F 방법과 Huff 방법의 적용된 강우사상이 Fig. 13과 같이 다른 유형으로 적용되기에 침투 및 안정해석 결과가 상이하게 도출된다고 판단된다. 강우 지속시간 72시간 이후부터 강우사상에 따라 I.D.F 방법은 시간에 따른 감소를 나타내었고, Huff 방법은 안전율의 증가를 나타내고 있다 (Fig. 17). 즉 Huff 방법의 경우 실제 강우와 같은 주기(2분위)중 하나로 적용됨으로써 72시간 이후에 사면의 안전율이 회복되고 있음을 알 수 있다.

따라서, I.D.F 방식과 같은 일정한 강우사상의 적용은 계속적인 안전율 감소를 유도함으로써 실제 사면 거동의 안전율 변화를 나타내지 못하고 있으며, 이는 실제 사면 설계 시 안전측 결과를 도출할 것으로 추정된다. 한편, Huff 2분위에 대한 안전율 변화 양상과 깊이별 흡수력 변화를 통해, 현장사면의 설계와 예측에 있어 Huff 방법과 같은 실제 강우사상을 적용함으로써 지역 실정을 반영한 사면의 거동을 파악할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 불포화조건에서 강우사상에 따른 사면안정성을 평가하였는데 결론은 정리하면 다음과 같다.

(1) 불포화 사면에서 초기흡수력에 따른 안정해석에서 초기흡수력이 증가할수록 사면의 안전율은 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 초기 흡수력이 높을수록, 포화되기까지의 시간의 지연과 높은 흡수력에 의한 지반의 전단강도의 증가에 영향을 받기 때문이라 할 수 있다.

(2) I.D.F와 Huff 방법에 따른 불포화사면 안전율 변화를 살펴본 결과, 시간분포를 고려한 Huff 방법은 사면 안전율 변화를 유연하게 나타내고 있음을 알 수 있었다. 따라서 일정한 강우사상과 더불어 현장 사면의 설계에 있어 Huff 방법과 같은 실제 강우사상을 적용함으로써 그 지역 실정에 맞는 사면의 안전율을 병행하여 도출할 수 있어 보다 효과적인 분석이 가능하리라 판단된다.

(3) 추가적인 연구를 통하여 시간분포를 활용한 강우패턴과 다양한 지역을 대상으로 불포화상태 사면에서 사면지반과 강우조건과의 상호작용을 평가가 가능하며 이를 통하여 보다 실제적인 방법을 제시할 수 있으리라 기대한다.

감사의 글

본 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2010-616-D00098).

References

Chang, B. (2012). "Paradigm change for disaster reduction on cut slope in korea." *Disaster & Safety, National Disaster Management Institute*, Vol. 14, No. 4, pp. 16-21 (in Korean).

Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532.

Fredlund, D. G. and Rahardjo H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils,* John Wiley &Sons, Ins.

Fredlund, D. G., Xing, A. and Huang, S. (1994). "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 3, pp. 533-46.

GEO-SLOPE International Ltd. (2004). "Computer program SEEP/W for finite element seepage analysis." User's guide, Calgary, Alta, Canada.

GEO-SLOPE International Ltd. (2004). "Computer program SLOPE/W for slope analysis." User's guide, Calgary, Alta, Canada.

Huff, F.A. (1967). "Time distribution of rainfall in heavy storms." *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.

Huff, F. A. (1970). "Time distribution characteristics of rainfall rates." *Water Resources Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 447-454.

Kim, J., Park, S. W., Jeong, S. and Yoo, J. (2002). "A study of stability analysis on unsaturated weathered slopes based on rainfall-induced wetting." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 18, No. 2, pp. 123-136 (in Korean).

Kim, J., Jeong, S., Park, S., and Sharma, J. (2004). "Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils." *Engineering Geology*, Vol. 75, No. 3-4, pp. 251-262.

Krahn, J., Fredlund, D. G., and Klassen, M. J. (1989). "Effect of soil suction on slope stability at Notch Hill." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, No. 2, pp. 269-278.

Lambe, P. C. (1996). "Residual soils. In : Special Report 247. Landslides : Investigation and Mitigation." *Washington DC: TRB, National Research Council*, pp. 507-524.

Lee, S. R., Kim, Y., Oh, T., and Kim, H. (2009). "Influence of rainfall intensity and saturated permeability on slope stability during rainfall infiltration." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 1, pp. 65-76 (in Korean).

Ministry of Construction and Transportation. (2000). *Report of Investigative Study on Water Resources Management in Year 1999* (in Korean).

Ng, C. W. W., and Shi, Q. (1998). "A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage." *Computers and geotechnics*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-28.

Oh. S., Moon, J., Kim, T., and Kim, Y. (2008). "A case study of rainfall-Induced slope failures on the effect of unsaturated soil characteristics." *Journal of Korea Society of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 3C, pp. 167-178 (in Korean).

Park, S. and Shin G. (2009). "Stability analysis on unsaturated gneiss weathered soil slopes considering wetting path soil- water characteristic curve." *Journal of Korea Society of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 5C, pp. 191-198 (in Korean).

Rahardjo, H., and Leong, E. C. (1997). "Soil-water characteristic curves and flux boundary problems, unsaturated soil engineering." *Practice-Geotechnical Special Publication*, 68, pp. 88-112.

Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, M. D., and Clifton, A. W. (1996). "Model for prediction of shear strength with respect to soil suction." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 379-392.