



저수지 제체 단면 형상 변화에 따른 안전을 및 침투유량 분석

Analysis for the Safety Factor of Slope and Seepage according to Change Cross-Section in the Reservoir Embankments

노수각* · 손영환**† · 봉태호* · 박재성* · 최우석*

Noh, Soo-Kack · Son, Young-Hwan · Bong, Tae-Ho · Park, Jae-Sung · Choi, Woo-Seok

ABSTRACT

Many factors about the stability for the reservoir embankments is determined when the facility is completed. Therefore the initial design of the embankment is important. Many researchers focused the effect of soil parameters although the cross section greatly affects the stability and can be controlled in design step. The objective of this research is to analysis of the effects for the safety factor of slope and seepage according to change cross-section in embankment. As a result, the quantity of seepage decreased as the gradient of downstream slope decreased and was proportional to the height of embankments. There was a linear relationship between the gradient of slope and the safety factor of slope. However the gradient of slope did not affect other side slope. All in a relationship, regressive equations with a high correlation coefficient were calculated and can be applied the simple estimation method of the stability using the cross-section. As results of analyzing the sensitivity, the friction angle and permeability critically effect for the slope stability and the seepage, respectively. The effect of the slope gradient was similar to major soil properties.

Keywords: Reservoir embankment; Cross-section; Gradient of slope; Safety factor; Seepage

1. 서 론

농업용 저수지는 인간이 조성한 가장 거대한 토목 구조물의 하나로 농업용수를 공급하고 홍수피해를 저감시키고 휴식 공간을 제공하는 등 인류에게 중요한 역할을 수행하지만 문제가 발생하였을 경우 엄청난 인적, 재산 피해를 주는 것은 물론 높은 복구 비용이 요구된다 (Chang et al., 1997). 이러한 사고를 방지하기 위하여 안정성을 사전 분석하여 설계하며 완공된 이후에도 시설물 안전 진단을 정기적으로 실시하며 기준을 설정하여 계측기를 매설하고 점검하여 안정성 평가에 적용하도록 하고 있다 (Kim and Lee, 2009). 이러한 진단을 통하여 위험하다 판단될 경우, 보수보강을 실시하고 있으나 여전히 많은 문제와 피해가 발생하고 있다 (Kim, 2005; Lee et al., 2009). 특히 2013년 4월 경주시에 위치한 산대 저수지가 붕괴되어 약 1.2 ha의 농경지가 매

몰되고 차량 13대가 침수 되는 등 많은 재산 피해가 발생하여 저수지 제체의 안정성에 대한 관심이 증대되고 있다.

제체의 붕괴 유형은 크게 침투, 침식, 월류, 활동 붕괴 등으로 구분된다 (Yoon, 2004; Kong et al., 2012). 저수지 제체 설계 시 이에 대한 가능성을 종합적으로 검토하여 안정성을 확보하게 된다. 처음 형성된 제체의 안정성은 안전을 산정 기준에 따라 토질 상태나 단면이 변하지 않는 한 변화하지 않기 때문에 초기 설계가 매우 중요하다.

제체의 활동 안정성과 침투류는 제체를 이루고 있는 성토재의 물리적 성질에 많은 영향을 받게 된다. 따라서 제체의 침투유량과 활동 안정성을 산정하기 위하여 토질 정수의 정확한 파악과 이에 대한 영향에 대한 연구들이 많이 이루어졌다 (Lee and Lim, 2007; Lee and Lim, 2011; Park et al., 2010). 최근에는 지반 공학에서 다루고 있는 토질 정수가 가지고 있는 재료 성질의 불확실성과 공간적 분포를 고려하여 안정성을 평가하는 연구가 이루어지고 있다 (Jeon et al., 2013; Kim and Lee 2002; Jeon et al., 2012).

하지만 토질 정수는 설계시 현장 조사 자료를 활용하거나 일반적인 문헌값을 인용하여 계산하기 때문에 결정론적 방법으로 해석시 그 영향을 반영하기 힘들다는 문제점이 있다. 또한 안전율과 침투해석에는 제체 성토재의 물리적 성질뿐 아니라 단면의

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원

** 서울대학교 조경·지역시스템공학과 조교수

† Corresponding author Tel.: +81-2-880-4585

Fax: +81-2-873-2087

E-mail: syh86@snu.ac.kr

2013년 6월 24일 투고

2013년 9월 27일 심사완료

2013년 10월 7일 게재확정

형상에 영향을 받게 된다. 설계시에는 토질 정수의 변화 보다는 단면의 형상에 따라 안전율이 결정되게 되기 때문에 단면 변화가 안전에 미치는 영향에 대한 정확한 고찰이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 상하류 사면 경사 및 제체 높이 등의 단면 형상 변화에 따른 각 사면의 안전율 및 침투유량을 비교 분석하여 이에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 토질정수 및 단면 변화에 따른 안전율 및 침투유량의 민감도 분석을 통하여 제체 단면 형상이 안전율 및 침투유량에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

II. 적용이론

1. 침투류 해석

본 연구에서는 침투류 해석에 유한요소법을 사용하였다. 침투류의 유한요소 해석을 위해 이용되는 지배 미분 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, H : 전수두

k_x : x방향의 투수계수

k_y : y방향의 투수계수

k_z : z방향의 투수계수

Q : 유량

θ : 체적 함수비

t : 시간

이 방정식에서 지반 내부의 임의의 위치와 임의의 시간동안 미소 체적에 유입 및 유출되는 유량의 변화량이 체적 함수비의 변화량과 같음을 의미한다. 간단히 말해 x, y, z 방향의 흐름 변화율에 외부작용 유량을 더한 값은 시간에 대한 체적 함수비 변화율과 같다.

체적 함수비의 변화는 응력상태와 흙의 성질에 따른 간극수압의 변화에 관련이 있으며 그 관계식은 식 (2)와 같다.

$$\partial \theta = m_w \partial u_w \quad (2)$$

여기서, m_w : 저류계수

또한 전수두는 식 (3)과 같이 압력수두와 위치수두의 합으로 표현할 수 있다.

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + z \quad (3)$$

여기서, H : 전수두

u_w : 간극수압

γ_w : 물의 단위중량

z : 표고

이를 u_w 에 대하여 정리하고 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q \\ & = m_w \gamma_w \frac{\partial (H - z)}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

표고가 일정할 경우 시간에 대한 y 의 도함수는 없어지고 다음과 같은 지배 미분 방정식이 형성된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q \\ & = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \end{aligned} \quad (5)$$

2. 사면안정해석

초기 사면안정해석은 비탈면을 단일 물질로 가정하여 여러가지 방법을 통해 실시되었다 (Morengstern, 1963). 하지만 비탈면이 이질의 지층으로 이루어 졌을 때, 파괴면을 하나로 가정하여 산출하는 안전율 이론의 적용이 어려워 절편법을 사용한다. 절편법은 예상 파괴 활동면 원호 안에 있는 흙덩이를 일정한 폭을 가지는 여러 가지 절편으로 나누고 각 절편의 바닥을 직선으로 가정한다. 모든 절편에 작용하는 모멘트의 평형을 고려하여 안전율을 산출하면 식 (6)과 같다.

$$F_s = \frac{\sum c' l + \tan \phi' \sum N'}{\sum W \sin \alpha} \quad (6)$$

Bishop (1955)은 절편 양측에 작용하는 연직 방향의 합력을 0이라고 가정하여 간편법을 제안하였다. 즉, 각 절편의 저면에 작용하는 전단응력은 전단강도를 안전율로 나눈 값이므로 연직 방향의 합력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W &= N' \cos \alpha + ul \cos \alpha + T \sin \alpha \\ &= N' \cos \alpha + ul \cos \alpha + \frac{c' l}{F_s} \sin \alpha + \frac{N'}{F_s} \tan \phi' \sin \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

이 식을 정리하여 N 을 산출하면 식 (8)과 같다.

$$N = \frac{W - \frac{c'l}{F_s} \sin\alpha - ul \cos\alpha}{\cos\alpha + \frac{\tan\phi' \sin\alpha}{F_s}} \quad (8)$$

여기서, N : 파괴면 바닥에서 발생하는 수직응력

W : 흙의 하중

c' : 흙의 점착력

ϕ : 흙의 마찰각

α : 파괴면의 각도

l : 파괴면의 길이

여기서, $l = b \sec\alpha$ 이므로 식 (6)에 대입하고 N 을 절편법 안전율에 대입하면 다음과 같다.

$$F_s = \frac{1}{\Sigma W \sin\alpha} \Sigma [c'b + (W - ub) \tan\phi'] \left[\frac{\sec\alpha}{1 + \frac{\tan\alpha \tan\phi'}{F_s}} \right] \quad (9)$$

식 (9)는 Fellenius 방법보다 복잡하며 안전율 F_s 가 식 양변에 있으므로 시행착오법을 써서 결정한다.

III. 연구방법

사면 안정 해석과 침투류 해석을 위하여 제체를 단일 성토체로 설계하여 해석을 실시하였다. 제체의 성토재는 양질의 사질토로 가정하였으며 적용된 토질 정수는 Table 1과 같다. 제체 단면 형상 변화에 따른 안전율 및 침투유량의 변화를 분석하기 위하여 단면 형상을 단순사면으로 설계하였으며 높이, 댐마루 폭, 상류사면, 하류사면을 변화시켜 설계하였다. 댐마루폭은 단면의 확대만을 고려하기 위하여 가장 작은 높이인 10 m 제체 설계시 사용된 3 m를 높이에 비례하여 확대시켰으며 수위 조건 또한 제체 높이의 80 %로 고정시켰다. 상류 사면의 경사도는 보통 저수지 제체 설계에 사용되는 조건인 2.0~2.5 범위에서, 하류 사면은 2.0~3.0 범위에서 변화시킨 값을 적용하였다. 본 연구에서 적용된 해석 조건은 Table 2와 같다.

설계된 제체 사면의 사면 안전율 침투해석을 실시하기 위하여 GEOSLOPE사의 지반공학해석 프로그램 패키지 GeoStudio 2007의 수리침투해석 프로그램 Seep/W를 사용하였으며 침투 해석 수위 조건은 만수위를 가정하였다 (Geo-Slope Int. Ltd., 2007a). 또한 제체 활동 안정성 해석은 동일한 프로그램 패키지의 사면

Table 1 Physical properties of soil

Physical properties	Value
γ_t (kN/m ³)	20
c (kPa)	25
ϕ (°)	30
k (cm/sec)	1.0×10^{-6}

Table 2 The analysis conditions

Parameter	Condition	Remarks
Height (m)	10, 15, 20, 25	
Crest width of embankments	30 % of the height of embankments	Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, 2002
Water level	80 % of the height of embankments	
Slope (n : 1)	Upstream	2, 2.2, 2.4, 2.5
	Downstream	2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0

안정해석 프로그램 Slope/W를 사용하였다 (Geo-Slope Int. Ltd., 2007b). 활동 안정성 해석은 침투해석 결과를 연계하여 분석하였다. 사면 안정 해석은 이론은 Bishop 간편법을 사용하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 제체 단면 변화에 따른 침투유량 변화

제체 단면 형상의 변화에 따른 침투유량을 분석하기 위하여 상류, 하류 사면의 경사도를 변화시켜 침투유량을 분석하였다. 침투유량은 제체 단면의 중앙에서 측정하였으며 상하류 사면 경사도에 따른 침투유량 분석결과는 Fig. 1과 같다.

사면 경사도 변화에 따른 침투 유량 변화를 분석한 결과, 하류 사면 경사도가 낮아질수록 (n 값이 커질수록) 침투유량이 작아지는 것으로 나타났다. 상류사면 경사도와 침투유량과의 그래프에서는 상류 사면 경사도가 같을 경우, 하류 사면 경사도 변화에 따라 침투 유량이 수직으로 상승하나 상류 사면 경사도 변화에 대해서는 평행하게 나타났다. 따라서 침투유량의 경우, 하류사면의 경사도에 영향을 받아 n값이 증가함에 따라 침투유량이 감소하나 상류사면 경사도의 영향은 미미한 것으로 판단된다. 하류 사면 경사도와 침투유량과의 상관관계 그래프에서는 이 같은 현상이 더욱 확연히 표현되었다. 하류 사면 경사도가 감소함에 따라 침투유량이 감소하는 것으로 나타났으나 상류 사면 경사도의 영향을 받지 않아 같은 하류사면 경사도에서 다른 상류사면 경사도를 가진 4개의 침투유량 값이 한 곳에 표기되어 나타났다.

제체의 규모에 따른 침투 유량 변화를 살펴보기 위하여 제체 높이와 침투 유량과의 상관관계에 대하여 분석하였다. 각 사면

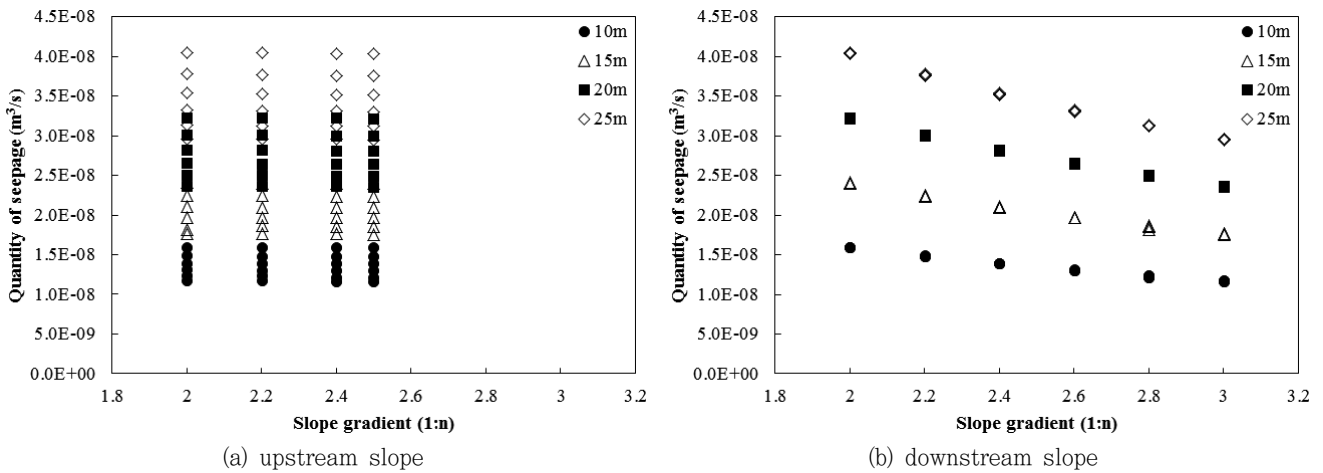


Fig. 1 A quantity of seepage according to change the gradient of each slope

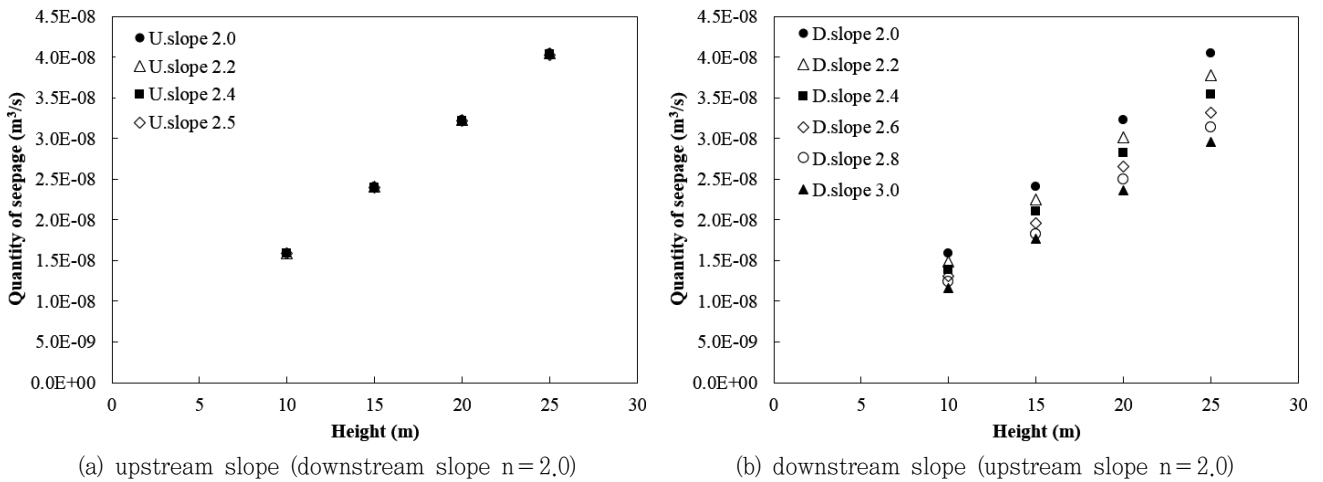


Fig. 2 A quantity of seepage according to change the height of the embankment for the gradient of each slope

경사도에서 제체 높이에 대한 영향을 함께 살펴보기 위하여 하류 사면의 경사도가 2.0 일 때 각 상류 사면의 경사도에 따른 침투 유량을 Fig. 2 (a)에 도시하였으며 상류사면의 경사도를 2.0으로 고정하였을 때 하류 사면 경사도에 따른 침투유량의 변화는 Fig. 2 (b)와 같다.

제체 높이가 침투 유량에 미치는 영향을 분석한 결과, 제체 높이가 증가함에 따라 침투유량이 선형적으로 증가하였다. 이는 제체 높이가 커질 경우 면적이 비례적으로 증가하기 때문이다. 또한 하류 사면 경사도를 고정 시, 상류 사면 경사도에 대한 영향이 미미하였으며 하류 사면 경사도가 증가함에 따라 높이 변화에 따른 침투유량 증가폭이 감소하였다. 이에 대한 정확한 상관관계를 규명하기 위하여 회귀식을 도출하였으며 각 하류 사면 경사도에 따른 높이와 침투유량과의 회귀식은 Table 3과 같다.

사면 경사도와 침투유량과의 관계를 정확하게 파악하기 위하여 상하류 사면의 경사도 n 값의 범위를 0.3~3.0으로 확대시켜

Table 3 Regressive equations between the quantity of seepage and the height of embankments

The gradient of downstream slope (1 : n)	$Q = a \cdot H + b$		
	a	b	R ²
2.0	1.64×10^{-9}	$- 5.1 \times 10^{-10}$	1
2.2	1.53×10^{-9}	$- 4.4 \times 10^{-10}$	1
2.4	1.43×10^{-9}	$- 3.8 \times 10^{-10}$	1
2.6	1.35×10^{-9}	$- 4.5 \times 10^{-10}$	0.9999
2.8	1.27×10^{-9}	$- 5.7 \times 10^{-10}$	0.9992
3.0	1.20×10^{-9}	$- 2.8 \times 10^{-10}$	1

Q : the quantity of seepage
 H : the height of embankments
 a, b : dimensionless

분석을 실시하였다. 침투유량 분석에는 하류사면 경사도 변화에 따른 침투유량 변화가 가장 크게 나타난 25 m 제체에 대하여

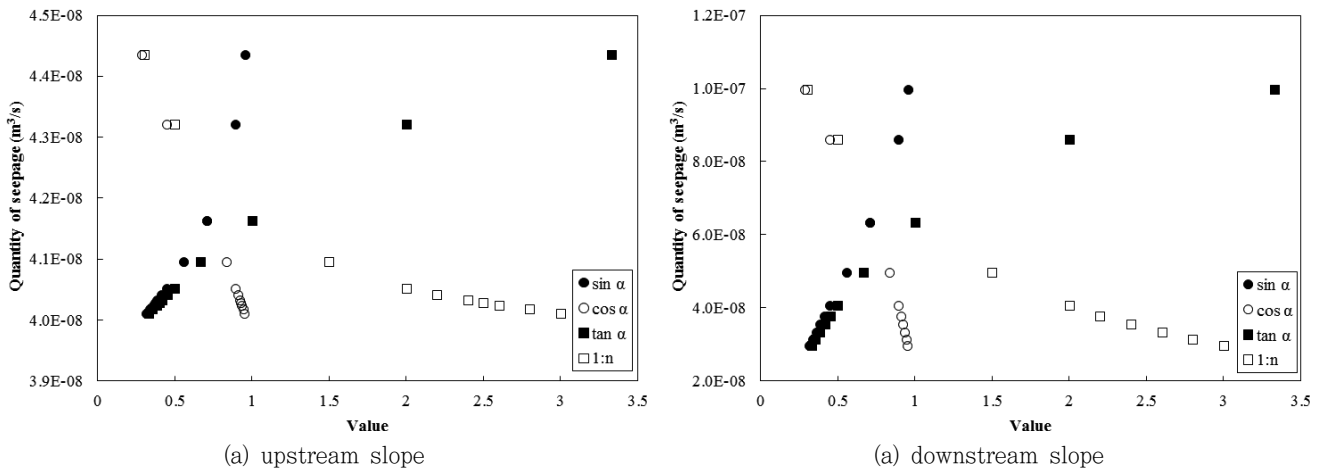


Fig. 3 A quantity of seepage according to change trigonometric function value of the gradient of each slope
 * the height of the embankment H=25 m, the gradient of another side n=2.0

Table 4 Regressive equations between the gradient of embankments slope and the quantity of seepage

Slope	Regressive equation	R ²
Upstream	$Q = -6.26 \times 10^{-9} \cos(\text{the gradient of upstream}) + 4.61 \times 10^{-8}$	0.9991
Downstream	$Q = 1.03 \times 10^{-7} \sin(\text{the gradient of downstream}) - 4.89 \times 10^{-9}$	0.9867

실시하였으며 반대 사면의 경사도 n은 2.0으로 고정하였다. 기존 문헌에 따르면 침투 유량은 수두차와 유출면의 길이에 영향을 받는다 (Das, 2002). 제체의 경우, 유출면은 하류사면에 형성되어 유출면의 길이가 하류사면 경사도의 삼각함수 값으로 표현된다. 따라서 사면 경사도가 침투유량에 미치는 영향의 정확한 분석을 위해 각 상하류 사면 경사도의 삼각함수 값 (sin, cos, tan)에 따른 유출량 변화를 함께 분석하였다 (Fig. 3).

넓은 범위에서의 상하류 사면 경사도 (n=0.3~3.0)와 삼각함수 값에 따른 침투유량 변화 분석 결과, 앞서 실시한 결과와는 다르게 상하류 사면 경사도가 모두 침투유량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하지만 그 변화의 폭은 상류 사면 경사 변화에 따른 최소값과 최대값의 차이가 10.59 %로 최소값과 최대값이 3.36배 차이가 나는 하류 경사 변화에 따른 영향에 비하여 매우 작았다. 경사도의 삼각함수 값과의 상관관계는 상하류 사면의 경향이 유사하게 나타났으나 sin 값과 cos 값에 대한 경향이 다소 다르게 나타났다. 상류사면 경사도 변화에서는 cos 값이 하류사면 경사도 변화에서는 sin 값이 침투유량과 높은 선형관계가 있는 것으로 판단되며 다른 지수에 대한 경향은 유사하게 나타났다. 상하류 사면 모두 경사도가 높은 n=0.3~2.0에서 높은 침투유량 변화가 일어났으며 2 이상의 값에서는 그 변화가 높은 경사도에 비하여 매우 낮게 나타났다. 따라서 앞서 실시한 n=2.0~3.0 분석에서는 이와 같은 결과가 표현되지 못한 것으로 판단된다. 상류 사면과 하류 사면 경사도와 침투유량과의 회귀식

은 Table 4와 같다. 제체 높이와 침투 유량은 정확히 선형관계가 형성되기 때문에 상류 사면과 하류 사면과의 상관 관계식과 앞서 실시한 각 하류 사면 경사도에 대한 높이에 따른 침투 유량에 대한 회귀식을 이용하여 모든 높이와 상하류 사면 경사도에 대한 상관관계를 유추할 수 있을 것이라 판단된다.

2. 제체 단면 변화에 따른 안전율 변화

제체 단면 형상이 사면 안전율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상하류 사면 경사도를 변화시켜 사면 안전율을 분석하였으며 상하류 사면의 경사도가 반대측 사면 안전율에 미치는 영향도 함께 분석하였다. 먼저 상류 경사도의 변화를 살펴보았으며 경사도는 n 값을 일반적 설계 경사도인 2.0~2.5를 적용하였다. 상류 사면 경사도 변화에 따른 상하류 사면 안전율 변화는 Fig. 4와 같다.

제체 상류 사면의 경사도 n값이 증가함에 따라 (경사도가 낮아짐에 따라) 상류사면의 안전율이 선형적으로 높아지는 것으로 나타났으며 상류 사면 경사도 변화에 따른 하류사면 안전율은 평행하게 나타났다. 이는 상류사면의 경사도는 상류사면 안전율에만 영향을 미치며 하류사면의 안전율에는 크게 영향을 주지 않는 것을 의미한다. 사면 경사도가 안전율에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 각각의 제체 높이별로 상류 사면 경사도와 상류 사면 안전율의 회귀식을 산출하였다 (Table 5).

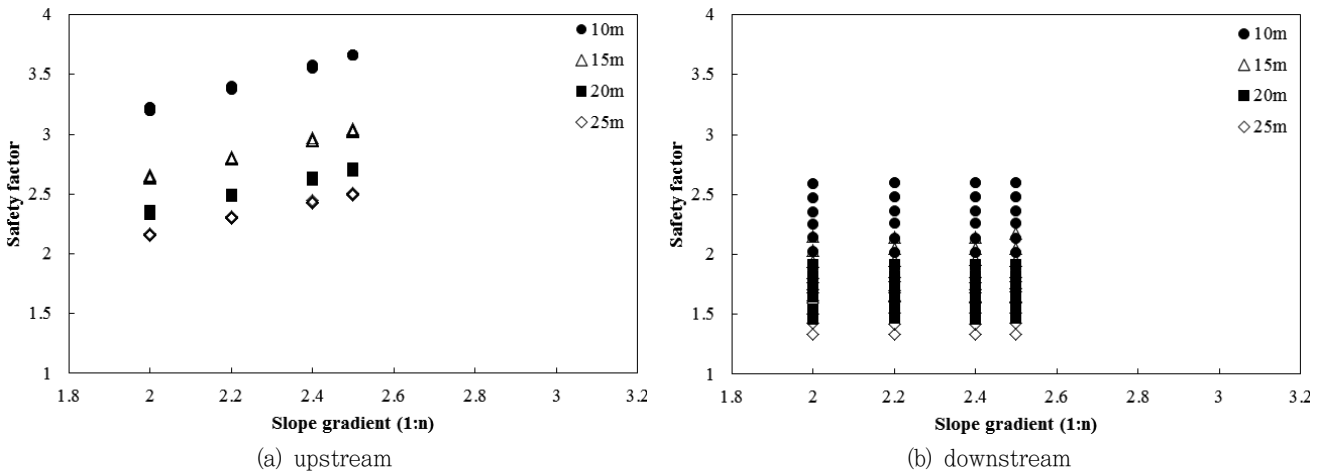


Fig. 4 Safety factor of each slope according to change the gradient of upstream slope

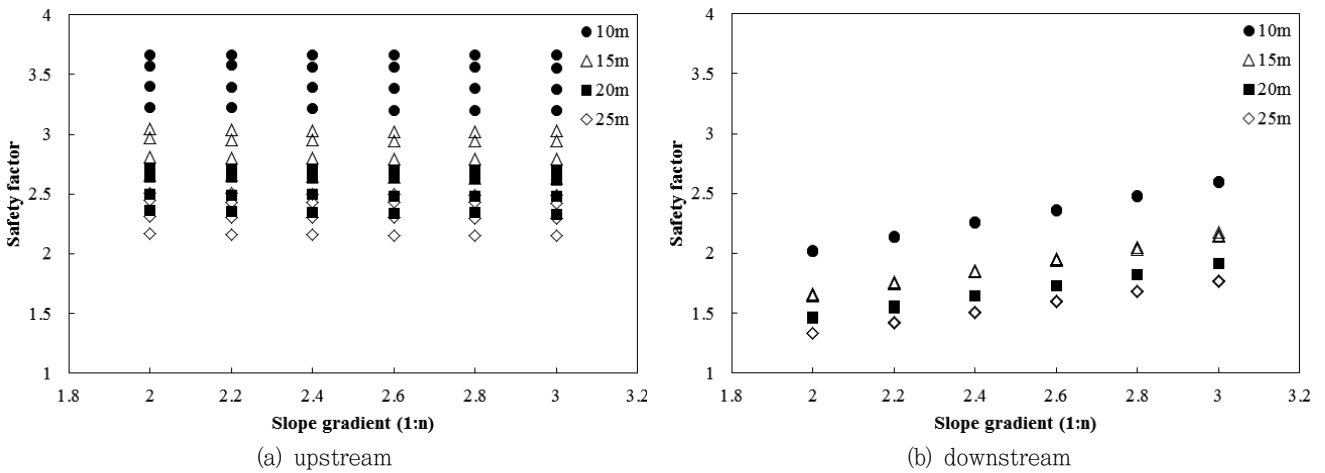


Fig. 5 Safety factor of each slope according to change the gradient of downstream slope

Table 5 Regressive equations between the gradient of upstream and the safety factor of upstream slope

Height	$SF_{up} = \alpha n_{up} + \beta$		
	α	β	R^2
10 m	0.9011	1.4066	0.9981
15 m	0.7705	1.1051	0.9965
20 m	0.7174	0.9111	0.9967
25 m	0.6813	0.7986	0.9975

SF_{up} : the safety factor of upstream slope
 n_{up} : the gradient of upstream slope
 α, β : dimensionless

회귀식 산출 결과, 상류 사면 경사도와 안전율은 높은 선형 상관관계가 형성되었으며 제체 높이가 높아짐에 따라 기울기가 줄어들고 y 절편이 작아지는 것으로 나타났다. 이를 통해 제체의

Table 6 Regressive equations between the gradient of downstream and the safety factor of downstream slope

Height	$SF_{down} = \alpha n_{down} + \beta$		
	α	β	R^2
10 m	0.5705	0.8825	0.9996
15 m	0.4954	0.6648	0.9980
20 m	0.4510	0.5617	0.9995
25 m	0.4352	0.4645	0.9997

SF_{down} : the safety factor of downstream slope
 n_{down} : the gradient of downstream slope
 α, β : dimensionless

규모가 커질수록 안전율이 경사도의 영향을 적게 받는 것을 알 수 있다.

하류 사면은 상류 사면에 비하여 안전율이 낮게 산출되기 때

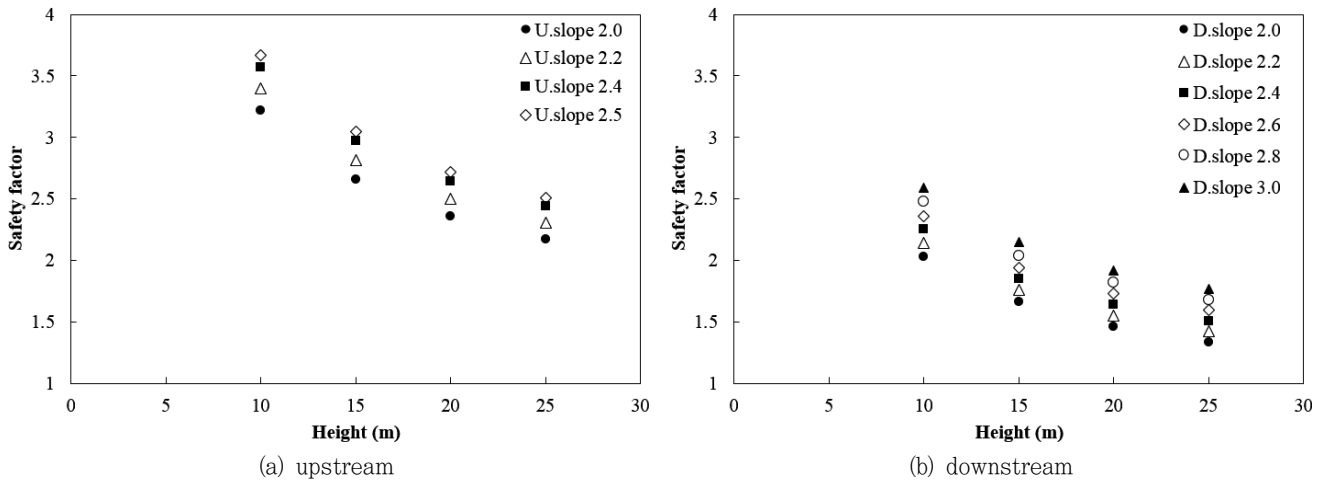


Fig. 6 Safety factor of each slope according to change the height of the embankment for each gradient of slope
* the gradient of another side n=2.0

문에 보통 경사도의 n값을 2.0~3.0으로 설계한다. 따라서 본 연구에서도 설계에서 사용되는 범위 안에서 n 값을 변화시켰으며 하류 사면 n값 변화에 따른 상하류 사면 안전율 변화를 Fig. 5에 도시하였다.

제체 하류 사면의 경사도 n값이 증가함에 따른 상하류 사면 안전율 변화는 상류 사면 경사도 적용 시와 같은 경향을 나타냈다. 하류 사면 경사도 n값과 하류 사면 안전율은 선형 상관관계가 형성되었으며 하류 사면의 경사도는 상류 사면의 안전율에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 선형 관계가 형성된 하류 사면 경사도와 하류 사면 안전율의 회귀식을 산출하였으며 각 높이별로 구분하였다 (Table 6).

하류 사면 경사도와 하류 사면 안전율 관계식 또한 높이가 높아짐에 따라 기울기가 줄어들고 y 절편이 작아지는 것으로 나타났다. 또한 같은 제체 규모에서 하류 사면 경사도 변화에 따른 안전율 변화의 기울기가 상류 사면의 경우보다 더 작은 것으로 나타났다. 따라서 하류 사면의 안전율은 상류 사면에 비하여 사면 경사도의 영향을 작게 받는다.

앞서 살펴본 바와 같이 상하류 사면 경사도 변화에 따른 안전율 변화가 제체의 규모에 따라 달라지기 때문에 높이에 따른 안전율 변화를 분석하기 위하여 제체 높이에 따른 상하류 사면 안전율 변화를 분석하였다. 각각 사면 경사도에서의 제체 높이에 따른 안전율 변화는 Fig. 6과 같다.

상하류 사면 안전율 모두 제체의 높이가 커짐에 따라 안전율이 낮아지는 것으로 나타났으며 정확한 상관관계를 분석하기 위하여 각 사면 경사도에서의 제체 규모 상승에 따른 안전율 회귀식을 산출하였다 (Table 7). 높이와 안전율은 지수관계가 형성되었으며 사면 경사도 n 값이 커짐에 따라 지수가 작아지고 계수는 소폭 상승하는 것으로 나타났다. 이는 경사도 n 값이 커지면 안

Table 7 Regressive equations between the height of embankments and the safety factor of each slope

The gradient of downstream slope (1 : n)	SF = a · H ^b			
	a	b	R ²	
Up stream	2.0	8.6754	-0.433	0.9977
	2.2	8.9534	-0.424	0.9967
	2.4	9.2772	-0.417	0.9973
	2.5	9.4387	-0.414	0.9969
Down stream	2.0	5.8111	-0.460	0.9983
	2.2	5.9596	-0.447	0.9972
	2.4	6.1740	-0.441	0.9973
	2.6	6.2488	-0.427	0.9965
	2.8	6.5100	-0.424	0.9950
3.0	6.7284	-0.418	0.9977	

Q : the safety factor

H : the height of embankments

a, b : dimensionless

전율이 상승하기 때문에 x 축을 로그 변환시 y절편이 커지는 것을 나타내며 사면 경사도가 커질수록 지수가 작아지므로 높이 상승에 따른 영향이 작아지는 것으로 판단된다.

3. 토질정수와 제체 단면의 영향 비교

제체의 사면 안전율과 침투 유량은 제체를 이루고 있는 성토재의 토질정수의 영향을 크게 받는다. 따라서 제체의 안정성을 결정하는 토질정수와 본 연구에서 분석한 제체의 현상이 사면 안전율과 침투유량에 미치는 영향을 비교하였다. 제체 성토재 토질 정수의 영향만을 분석하기 위하여 제체의 기준 단면은 높이

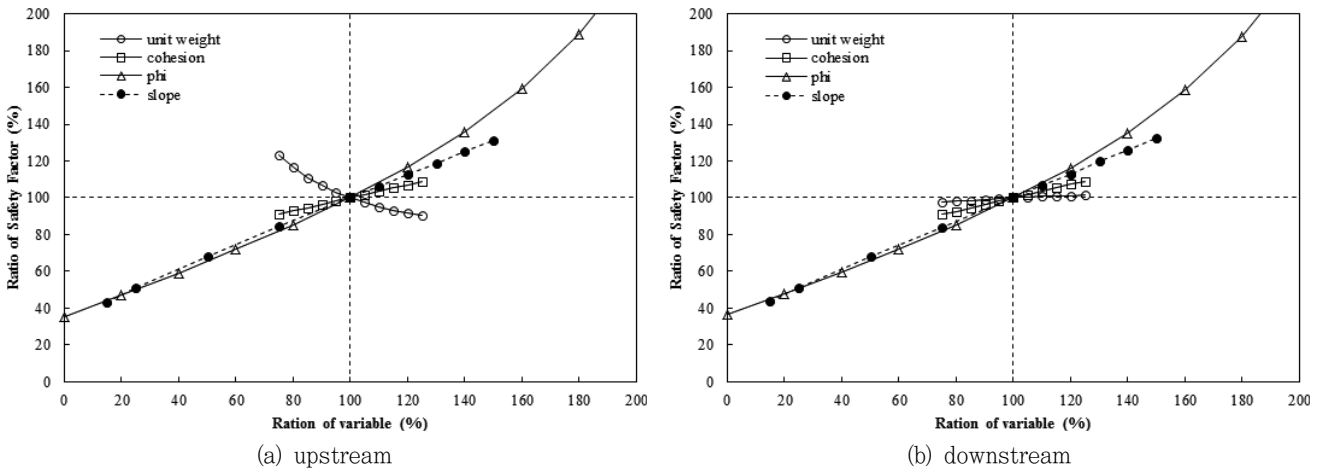


Fig. 8 Sensitivity of soil properties and the slope gradient for the safety factor of each slope

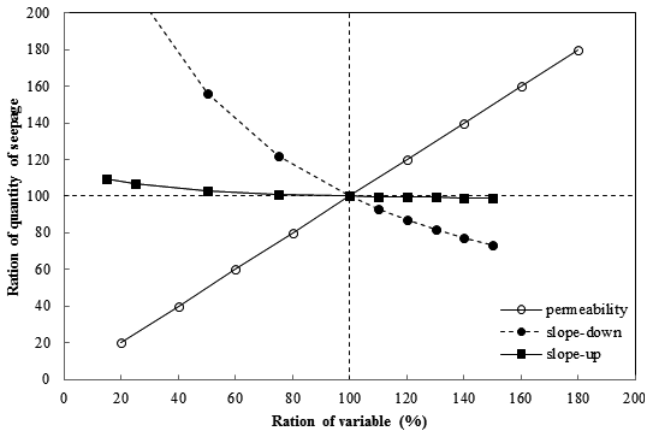


Fig. 7 Sensitivity of the permeability and the slope gradient for the quantity of seepage

25 m, 상하류 사면 경사도 n 값은 2.0으로 고정하였다. 토질 정수에 대한 민감도는 분석에 적용된 토질정수를 기준으로 증감을 백분율로 표기하여 크기 변화 비율에 따른 안전율의 변화를 분석하였다. 침투유량에 영향을 미치는 요소로는 성토재의 투수계수와 상하류 사면 경사도를 고려하였으며 이에 대한 민감도 분석 결과는 Fig. 7과 같다.

투수계수와 사면 경사도가 침투유량에 미치는 영향을 분석한 결과, 투수계수가 증가함에 따라 침투유량이 선형적으로 증가하였으며 하류사면의 경사도는 투수계수와 유사한 민감도를 보였다. 하지만 상류사면의 경사도는 두 인자에 비하여 매우 작은 민감도를 나타냈다. 상하류 사면 모두 경사도가 기준 경사도보다 높아질 때 (n 값이 작아질 때) 더 큰 민감도를 보였다. 경사도는 침투유량 영향인자인 유출면과 면적을 결정하므로 침투유량에 직접적으로 영향을 미치는 투수계수 수준으로 침투유량에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

사면 안전율에 영향을 미치는 요소로는 성토재의 단위중량, 마찰각, 점착력을 선정하였으며 침투유량에 영향을 미치는 요소로는 투수계수를 고려하였다. 기준 단면에서의 각각의 토질정수에 대한 사면 안전율에 대한 민감도 분석 결과는 Fig. 8과 같다.

토질정수에 대한 민감도 분석에서 기준 단면에서의 상류사면 안전율은 성토재의 마찰각과 단위중량의 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타났다. 성토재의 기준으로 적용한 단위중량이 80 %에서 120 %로 변화하는 동안 상류 사면의 안전율은 116 %에서 90 %로 26 % 감소하였으며 같은 비율로 마찰각이 변화할 때 사면 안전율이 85 %에서 117 %로 32 % 증가하였다. 하류 사면의 안전율 또한 성토재의 마찰각에 가장 큰 영향을 받지만 단위중량에 대한 민감도는 상류 사면에 비하여 작게 나타났다. 마찰각이 기준에 비하여 80 %에서 120 %로 변화할 때, 86 %에서 116 %로 30 % 증가하여 상류사면과 비슷한 증가폭을 보였다. 사면 경사도와 토질정수가 사면 안전율에 미치는 영향을 비교한 결과, 상하류 사면 모두 가장 높은 민감도를 보인 성토재의 마찰각과 유사한 결과를 나타냈다. 사면경사도가 기준 n 값인 2.0에 비하여 80 % 수준인 1.6에서 120 %수준인 2.4로 변화할 때 상하류 사면 안전율은 각각 25 %, 26 % 증가하는 것으로 나타났다. 성토재의 마찰각은 파괴에 대한 저항으로 작용하는 전단 강도를 결정하는 중요한 요소로 전체 안전율에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며 경사도 또한 파괴면의 면적과 하중이 받는 경사도를 결정하는 요소로 중요한 고려요소로 판단된다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 상하류 사면 경사도 및 제체 높이 등의 단면형상 변화가 사면 안전율과 침투유량에 미치는 영향을 분석하였고 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 상하류 사면의 경사도 및 제체 높이가 침투유량에 미치는 영향을 분석한 결과, 상류 사면의 경사도는 보통 설계 경사도에서는 침투유량에 큰 영향을 미치지 않으나 높은 경사도에서 영향이 증가하여 n값이 0.3~2.0 범위에서 침투유량이 약 10 % 정도의 차이를 나타냈다. 반면 하류 사면의 경사도와 침투유량은 높은 비례관계가 형성되었으며 높이가 증가함에 따라 그 기울기가 급해져 영향력이 더 크게 미치는 것으로 분석되었다.

2. 상하류 사면의 경사도와 각각 사면의 안전율과의 상관관계를 분석한 결과, 각각의 사면 경사도는 변화하는 축의 안전율에는 선형적 비례관계가 형성되나 반대편 사면에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며 사면 경사도에 따른 안전율 변화는 하류 사면보다 상류사면이 더 크게 나타났다. 또한 상하류 사면 모두 제체의 높이가 커짐에 따라 안전율이 지수적으로 감소하였으며 경사도가 안전율에 미치는 영향을 감소시키는 것으로 나타났다.

3. 제체 형상이 제체 안전율과 침투유량에 미치는 영향의 정도를 분석하기 위하여 제체 성토체의 토질 정수와의 함께 민감도를 분석하였다. 침투유량은 직접적 영향인자인 투수계수와 유사한 민감도를 보였으며 상하류 사면 모두 사면 안전율에서 가장 큰 영향요소인 마찰각의 변화와 유사한 경향을 나타냈다.

4. 제체의 단면 형상은 사면 안전율 및 침투유량과 매우 높은 상관관계가 있으며 성토체의 토질정수와의 정량적 영향에서도 높은 민감도를 보였다. 이에 대한 관계 분석을 통해 제체 안정성 해석시 시험 및 가정을 통해 고정적으로 적용하는 토질정수의 불확실성을 보완하여 정확히 측정 가능하며 인위적으로 변경 가능한 제체 형상의 고려를 통해 합리적 설계를 하여 안정적 제체 건설에 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

본 연구는 농림수산식품부 생명산업기술개발사업 기획과제(과제번호: 311009-3) 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Bishop, A. W., 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5: 7-17.
2. Chang, P. W., C. S. Song, T. K. Park, C. W. Woo, and J. W. Won, 1997. Studies on structural degradation of agricultural reservoirs in Kyungki province. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 39(4): 90-97 (in Korean).
3. Das, B. M., 2002. *Principles of geotechnical engineering*. Thomson Learning Asia, Singapore.
4. Geo-Slope, 2007a. SEEP/W manual. Geo-Slope Int. Ltd., Calgary, Alta., Canada.
5. Geo-Slope, 2007b. SLOPE/W manual. Geo-Slope Int. Ltd., Calgary, Alta., Canada.
6. Jeon, J. H., S. R. Lee, S. Yoon, and Y. T. Kim, 2013. Slope stability analysis based on probabilistic characteristics of unsaturated soil properties of weathered granite soil. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 13(1): 161-168 (in Korean).
7. Jeon, K. H., S. R. Lee, and Y. T. Kim, 2012. Probabilistic characteristics soil-water characteristic curve of unsaturated weathered granite soil. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12(3): 133-139 (in Korean).
8. Kim H. T., 2005. The cause of the fault of fill dam and the direction of facility safety inspection against flood. *Journal of Facility Safety* 19: 48-61 (in Korean).
9. Kim, H., and S. Lee., 2002. A Study to Develop a Practical Probabilistic Slope Stability Analysis Method. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 18(5): 271-280 (in Korean).
10. Kim, M. H., and D. W Lee, 2009. Safety evaluations of reservoir embankment by instrument system. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 51(6): 33-43 (in Korean).
11. Kong, Y. S., T. W. Kang, and S. H. Lee, 2012. A study for seepage control of levee with a pervious toe drain. *Journal of Korea water resources association* 45(6): 569-581 (in Korean).
12. Lee, J. W., and H. D. Lim, 2011. An equation to estimate steady-state seepage rate of rockfill dam. *Journal of Korean Geotechnical Society* 27(10): 69-80 (in Korean).
13. Lee, J., J. Jeon, and H. Lim, 2009. Assessment of the priority order of monitoring devices on maintenance for the long-term safety of existing fill dam. *Journal of Korean Geo-Environmental Society* 10(7): 67-79 (in Korean).
14. Lee, K. T., and H. D. Lim, 2007. A study on seepage and crest settlement of central cored rockfill dam-the case of Im-Ha dam. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 27(6C): 383-392 (in Korean).
15. Moregenstern, N., 1963. Stability charts for earth slopes

- during rapid drawdown. *Geotechnique* 13: 121-131.
16. Park, B. S., S. G. Jun, K. J. Cho, and N. J. Yoo, 2010. Sensitivity analyses of influencing factors on slope stability. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 10(3): 91-100 (in Korean).
17. Yoon, K. S., 2004. The analysis for the type of the collapse of river embankments and design methods. *Journal of Korea water resources association* 37(5): 50-60 (in Korean).