침식과 침투영향을 고려한 하천제방의 위험도 평가

Risk Assessment of Levee Embankment Integrated
Erosion and Seepage Failure Factor

안 기 홍* / 한 건 연**

Ahn, Ki Hong / Han, Kun Yeun

Abstract

In this study the risk integrated erosion and seepage failure factor and combined risk of the levee embankment were assessed. For the research of the reliability, the risk assessment of erosion, seepage and both of them combined for the levee embankment were conducted using discharge curve and stage hydrograph generated by stochastic rainfall variation method during typhoon and monsoon season. The risk of erosion was evaluated using tractive force and the seepage analysis was performed by selecting representative cross sections for SEEP/W model analysis. And the probability of seepage failure was assessed with MFOSM analysis using critical hydraulic gradient method. Unlike deterministic analysis method, quantitative risk could be obtained and the characteristics of realistic rainfall variation patterns as well as a variety of factors contributing to levee failure could be reflected in this research. The results of this study show significantly enhanced applicability for the combined risk. As this model can be employed to determine dangerous spots for levee failure and to establish flood insurance linked with flood risk map, it will dramatically contribute to the establishment of both efficient and systematic measures for integrated flood management on a watershed.

keywords : risk assessment, erosion, seepage, MFOSM method, levee embankment

요 지

본 연구에서는 하천제방의 침식, 침투영향을 고려한 위험도 및 통합위험도를 산정하였다. 이를 위해 체계학적 강우변동 생성기법을 이용하여 생성된 태풍기와 장마기별 유량 및 수위수문곡선을 활용하여 하천제방에 대한 침식, 침투 그리고 통합 위험도를 산정하였다. 침식에 대한 하천제방의 위험도는 허용 소류력을 이용하여 평가하였고 침투류 해석은 각 제방별로 대표 제방단면을 선정 후 SEEP/W 모형을 통해 해석을 실시하였으며 한계동수경사법을 이용한 MFOSM 분석을 통해 제방의 침투붕괴 위험도를 산정하였다. 본 연구에서는 확정론적 분석방법과 달리 정량적인 위험도를 산정할 수 있었고 실제 강우 변동의 특성 및 다양한 제방파괴 요인을 반영하였으며, 이를 하나의 위험도로 통합하여 제시하고 있으므로 본 연구모형의 결과는 그 적용성에 있어 매우 유용할 것으로 판단된다. 본 연구모형은 향후 홍수에 대한 제방파괴 위험지점 파악 및 제내지 홍수위험도와 연계한 홍수보험, 주민대피지도 구축 등에 활용될 수 있어 유역의 홍수통합관리시 효율적이고 체계적인 대책수립에 크게 기여할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 위험도 평가, 침식, 침투, MFOSM 기법, 하천제방

* 한국수자원공사 댐·유역관리처 공동연구원

Co-researcher, Dam & Watershed Dept., K-Water, Daejeon 306-711, Korea

** 교신저자, 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 교수

Corresponding Author, Professor, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea
(e-mail: kshanj@knu.ac.kr)

1. 서론

최근 지구온난화에 따른 이상기후 현상과 급격한 도시화 및 산업화에 따른 유출양상의 변화 등으로 사상 유례가 없는 홍수들이 빈발하고 있으며 인명과 재산피해 또한 막대하다. 현재의 이러한 이상기후는 일시적 현상이 아니라 앞으로도 빈번히 발생될 것으로 우려되고 있으며 이에 따른 태풍 등의 대규모 호우로 인해 댐 및 제방 붕괴와 같은 비상상황이 초래될 수 있다. 실제로 국내에서는 1990년 9월 일산제 제방붕괴로 인한 일산지역의 대침수 피해, 1991년 8월에는 태풍 ‘글래디스’에 의한 부산 수영강 상류부의 제방월류에 따른 저지대 침수로 인한 큰 피해가 있었다. 1992년 9월 방조제 붕괴로 인한 목포시의 침수피해와 1995년 태풍 ‘제니스’와 집중호우로 인해서 금강, 남한강, 북한강, 삼교천, 내성천 등 전국에 걸친 하천유역에서 범람침수 피해가 있었다. 1996년 한탄강 유역에서 발생한 연천댐의 붕괴와 이에 따른 제방월류에 의한 범람피해 등은 이 분야에 대한 종합적인 연구의 필요성을 증대시켰다.

지구온난화로 인한 홍수빈도 및 강우강도 증가에 따른 홍수피해 규모의 증대는 홍수재해를 불가피한 자연현상으로 인식하고 발생피해에 대하여 복구하던 소극적 자세에서 탈피하여 과학적·공학적인 대응기술 개발을 통한 적극적 홍수방어 체계의 구축이 요구되고 있다. 또한, 설계빈도의 무조건적인 상향조정에 따른 확정론적인 방법의 한계성 인식과 추계학적 방법을 이용한 정량적 위험도 해석의 필요성이 전세계적으로 대두되고 있다.

Vrouwenvelder(1987)은 네덜란드의 제방 설계에 적용되는 추계학적 설계기법을 검토하였으며, Termaat and Calle(1994)는 제방의 안전도에 대한 기댓값, 표준편차, 자기상관함수는 제방 길이방향으로 정규함수 분포를 가진다고 가정하고, 전단 강도의 공간적 변동성을 확률변수로 고려하여 2차 모멘트 확률분석에 적용된 Bishop 형태의 사면 안정모형을 검토하였다. 그 결과 네덜란드의 제방에 대해 축조가 완료된 상태에서 대략적으로 0.005퍼센트의 파괴확률을 가진다고 결론지었다. 또한, Calle *et al.*(1989)은 네덜란드에서의 방조제와 하천제방 아래에 발생할 수 있는 파이프에 대한 추계학적 방법을 개발하였다. Brizendine(1997)은 제방에 대한 위험도 분석을 실시하였는데, 그는 현장 실험 및 연구실에서의 실험 자료를 토대로 risk tree를 구성하여 사면 안정 및 침투, 그리고 월류에 대한 위험도를 종합적으로 분석하였다. Asoka and A-Grivas(1982), Chowdhury(1984), 그리고 Li and Lumb(1987)은 추계학적 사면 안

정해석에 대한 연구를 진행하였다. 그리고 Wolff(1994)는 제방의 지질공학적인 파괴확률을 계산하기 위해 부하-저항 모형을 적용하였는데, 그는 파이프, 침식, 슬라이딩에 대한 파괴확률을 MFOSM기법을 이용해 산정하였으며, 이때 실행함수는 미국 내에서 산정된 경험식을 사용하였다. 또한 Steenbergen *et al.*(2004)은 네덜란드의 제방 시스템의 안전도를 평가하기 위해 월류, 파이프, 사면안정 등을 고려한 모형을 개발하였다.

한편 국내에서의 하천 수공구조물에 대한 위험도분석에 관한 연구로는 한건연 등(1997a, 1997b)이 댐 및 하천제방의 수문학적 위험도 평가를 위해 Monte Carlo 기법과 AFOSM 기법에 의한 해석을 실시하였고, 이종석(2002)은 댐의 안전성 평가를 위해 Event Tree 분석과 경제성 분석을 실시하여 인명 및 재산에 대한 댐 위험성 관리 방안을 제시하였다. 그리고 전민우 등(2006)은 HEC-2 프로그램과 Monte Carlo 기법을 연계하여 부등류에 의한 하천제방의 불확실도 계산을 실시하였다. 그리고 건설교통부(2002)는 하천시설물 설계시 신뢰도 분석 개념을 도입하기 위해 월류시 제방 위험도 산정 및 치수경제성 분석을 실시하였다.

많은 선행연구자들에 의해 수공구조물의 신뢰도 필요성은 언급된 바가 있고 그 중요성도 강조되어 왔다. 하지만 이러한 필요성에 부합하여 실시된 각종 요인별 신뢰도 분석은 수리·수문학적 요인 혹은 지반공학적인 요인 등 하나의 요인만을 다루는 제한성을 보였다. 그리고 지반공학적인 요인의 통합모형 구축시 해당 국가 및 지역에 해당하는 경험식을 사용하는 한계성을 보였다. 이에 본 연구에서는 안기홍 등(2009)이 실시한 강우변동 생성기법을 이용한 하천제방의 월류 위험도 평가와 함께 하천제방의 침식, 침투영향에 대한 위험도 평가를 추가적으로 실시하여 물리적 기반 하에 강우-유출해석 및 하천흐름해석 그리고 신뢰도 평가라는 하나의 체계를 구축하고 신뢰도 평가시 수리·수문학적 요인 및 지반공학적인 요인을 모두 반영한 실질적이고 통합적인 하천제방의 안정성 평가 체계를 구축하고자 하였다.

2. 하천제방의 신뢰도 평가

2.1 제체 침식파괴 해석 모형

홍수위가 증가함에 따라, 유속의 증대 혹은 파력에 의해 제방의 침식(erosion)이 발생된다. 일반적으로 국내에서는 제방의 침식을 방지하기 위해 호안을 설치하는데 유속 3m/s 이상의 경우 호안을 설치하도록 규정하고 있다(한국수자원학회, 2002). 이 규정을 활용한 제체의 침식 해석은 평균유속에 대한 Manning 식을 사용

하여 평균유속은 기댓값과 변동계수로 나타낼 수 있다는 가정 하에 실시될 수 있지만 결국 호안의 설치 유·무를 확인하는데 국한될 수밖에 없으므로 현재의 호안 설치 상황을 제대로 반영할 수는 없다. 이를 위해 본 연구에서는 하천정비기본계획 수립시 통상적으로 시행되는 호안의 종류에 따른 허용 소류력의 비교를 통해 제체의 침식 유·무를 판단하였다.

개수로에서 경계면의 전단응력은 힘으로 표시되며 이를 통상 소류력이라 한다. Fig. 1의 값들을 이용하여 수로 내 흐름방향으로의 길이 Δx , 수심 y , 폭 ΔT 인 작은 물기둥을 고려하면 이 기둥에 미치는 중력은 $\gamma y \Delta x \Delta T$ 가 된다. 여기서 하류로 갈수록 바닥과 수면 경사가 충분히 작다고 보면 ($\Delta z / \Delta x \cong \Delta h / \Delta x \cong 0$), 압력은 정수압 분포를 갖게 된다. 흐름 방향으로 작용하는 중력의 분력은 중력에 $\Delta h / \Delta x$ 를 곱한 $\gamma y \Delta x \Delta T$ 가 된다. 단면 내에서 Δh 는 일정하고, $y \Delta T$ 의 합은 흐름 단면적 A 가 되므로 유체 체적에 작용하는 중력의 흐름 방향 분력을 단면 전체에 모두 합하면 $\gamma A \Delta h$ 가 된다.

Fig. 1. Longitudinal Profile for Computing of Tractive Force

이 힘과 맞서는 마찰력은 단면평균 전단응력 τ 와 유변 P 를 이용하면 $\tau P \Delta x$ 가 된다. 이 마찰력은 흐름 방향의 중력과 반드시 같은 선에서 작용하지는 않으나, 바닥 경사와 수면경사가 작은 경우 힘의 작용선은 같다고 볼 수 있다. 이 경우 두 힘은 같아야 하므로 흐름 방향을 '+'로 보고 Δh 는 근원적으로 '-'임을 고려하면 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\gamma A \Delta h - \tau P \Delta x = 0 \quad (1)$$

따라서 단면 평균 전단응력 τ 는 Eq. (2)로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \gamma R S_0 \quad (2)$$

여기서, γ : 물의 단위중량, R : 경심, S_0 : 바닥경사

한편, 흐름이 등류가 아니고 가속도가 있는 흐름일 경우, Eq. (1)은 더 이상 0이 아니다. 정상류에서 국부 가속도는 생략하고 이동 가속도만 고려하면 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\gamma A \Delta h - \tau P \Delta x = (\rho A \Delta x) V \frac{dV}{dx} \quad (3)$$

Eq. (3)을 다시 정리하면, Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau &= -\gamma R \left(\frac{dh}{dx} + \frac{V}{g} \frac{dV}{dx} \right) = -\gamma R \frac{d}{dx} \left(h + \frac{V^2}{2g} \right) \\ &= \gamma R S_f \end{aligned} \quad (4)$$

결국, 하천 수로 내 소류력(τ) 계산식은 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = \gamma R S_f = \frac{\gamma}{C^2} v^2 \quad (5)$$

여기서, S_f : 동수경사, v : 평균유속,

C : Chezy 유속계수 ($v = C \sqrt{R S_f}$)

소류력 τ 는 흐름의 수리학적 특성 및 하도의 기하학적 형태가 그대로 유지된다면 중방향으로는 일정하다고 가정할 수 있다. 하지만 횡방향으로는 Fig. 2와 같이 최대 단위소류력은 변하게 된다. 그리고 만일 하도가 만곡되거나 기하학적 형태가 변하게 되면 그림에서 주어진 계수를 적용할 수 없다. Lane and Carlson(1953)은 실험 및 현장 분석을 통해 Fig. 3과 같은 사다리꼴 단면에서의 소류력 변화곡선을 제시하였다.

Fig. 2. Maximum Unit Tractive Force Based on w/y (Lane and Carlson, 1953)

본 연구에서는 적용 유역의 단면형상을 사다리꼴로 가정하였기 때문에 Fig. 3을 참고하여 0.77값을 사용하였다. 또한 하천에서의 소류력이 실제하천에 설치되어 있는 호안의 허용소류력보다 클 경우 침식에 의한 제방 붕괴가 이루어진다고 가정하여 이를 실행함수로 간주하여 제방침식과파괴에 대한 위험도를 산정하였다. 하도 내

Fig. 3. Tractive Force Curve for Trapezoidal Cross Sections(Lane and Carlson, 1953)

각 계산단면에 대한 실행함수(W_k^e)는 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_k^e = g_k(d_p, t, p_p, h_b) - \tau_{k,a} \quad (6)$$

여기서, $g_k(\cdot)$: k 단면에서의 모형의 수치해석 결과
 $\tau_{k,a}$: k 단면에서의 허용소류력

k 단면에서의 제방 침식파괴 확률($P_{f,k}^e$)은 Eq. (7)을 통해 산정할 수 있고 제방 침식파괴에 대한 위험도($P_{f,k}^e$)는 Eq. (8)을 통해 근사적으로 산정하였다.

$$P_{f,k}^e = \Pr(\tau_{\max,k} > \tau_{k,a}) \quad (7)$$

$$= \Pr[\tau_{k,a} - g_k(d_p, t, p_p, h_b) < 0]$$

$$= \Pr[W_k^e(d_p, t, p_p, h_b, \tau_{k,a}) < 0]$$

$$P_{f,k}^e = \Phi(-\beta_k) = \Phi\left(-\frac{\mu_{W_k}}{\sigma_{W_k}}\right) \quad (8)$$

여기서, β_k : k 단면에서의 신뢰도 지수

μ_{W_k} : k 단면에서의 실행함수 W_k^e 의 평균값

σ_{W_k} : k 단면에서의 실행함수 W_k^e 의 표준편차

Table 1은 호안 종류에 따른 허용 소류력을 나타내고 있다(건설교통부, 1997).

Table 1. Estimates of Allowable Tractive Force

type of bank protection	allowable tractive force(kg/m ²)
no bank protection, original condition	2.0
pitching	16.0
concrete block	20.0
Rubble-cmound	24.0
retaining wall, stone masonry	60.0
turf	2.0

2.4 제방 침투파괴 해석

지반내 침투 거동은 Darcy법칙의 투수계수와 유량의 관계, 간극수압과 체적함수비의 관계, 부간극수압과 투수계수의 관계 등에 관한 연구결과와 경험식을 통해 판단할 수 있다. Darcy의 법칙(투수성-유량 관계식)은 포화지반의 흐름에 관한 투수계수와 유량의 관계를 다음의 식으로 나타낼 수 있다. 흙 속의 물은 유속이 작아 층류의 흐름을 보이므로 Darcy법칙을 적용할 수 있다.

$$Q = KSA \quad (9)$$

여기서, K : 투수계수

흔히 흙을 통과하는 물의 흐름은 오직 한 방향만이

아닐뿐더러 흐름의 직각인 전체 면적에 걸쳐 균일하게 흐르는 것도 아니다. 이러한 경우 일반적으로 유선망(flow nets)을 사용하게 되는데 이 유선망의 개념은 흐름속의 어떤 한 점에서의 정상류(steady flow)상태를 나타내는 Laplace 방정식에 근거를 두고 있다.

Fig. 4는 임의의 시간에서 단위 용적을 출입하는 흐름은 용적당 함수량의 변화와 같다는 것을 나타내고 있다. 즉, 공급 유량과 x, y 방향 흐름 변화율 합은 시간에 관한 용적당 함수량의 변화율과 같다. 물은 비압축성이고, 흙요소에서 체적변화가 일어나지 않는다고 가정하면, 요소의 총 유입량과 총 유출량은 동일하다. 따라서, Eq. (10), Eq. (11)과 같이 표현된다.

Fig. 4. Flow in a Porous Material

$$\left[\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dz dy + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) dx dy \right] - [v_x dz dy + v_z dx dy] = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

Darcy의 법칙에 의하여 수평방향 및 수직방향의 유출속도를 구하여 Eq. (11)을 정리하면 Eq. (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (12)$$

제방의 침투해석에는 주로 유선망을 이용하는데 이 유선망은 등방성 흙에서의 연속방정식을 이용하여 유선과 등수두선의 조합을 통해 해석한다. 일반적으로 유선망을 손으로 작도하기엔 어려우므로 상용프로그램을 이용한다. 이에 본 연구에서는 SEEP/W 모델을 이용하여 유선망을 작성하여 지반누수 해석에 활용하였다. 해석 프로그램인 SEEP/W 모델은 물의 흐름이 포화토와 불

포화토를 통과할 때 Darcy의 법칙을 따른다는 가정으로 시작된다. 제방침투해석을 통한 제방의 안정성 평가를 위해서는 일반적으로 한계동수경사법과 한계유속 및 침투유량을 이용하는 법이 사용되는데 한계동수경사(S_c) 산정식은 Eq. (13)과 같다.

$$S_c = \frac{(G_s - 1)}{1 + e} = (1 - n')(G_s - 1) \quad (13)$$

여기서, G_s : 토립자의 비중, e : 간극비, n' : 간극률

제방 침투에 대한 기준안전율은 문헌 및 적용사례를 검토하면 Table 2와 같다. 문헌 및 적용사례를 통해서 본 연구에서는 침투과피에 대한 안전율을 2.0으로 선정하여 해석하였다. 또한 하천설계기준(2005)에서도 한계동수경사에 의한 방법은 제체의 안정을 위해선 침투류해석에 의해 산출된 동수경사가 한계동수 경사의 1/2 이하가 되어야 한다고 명시되어 있다.

그리고 제방의 침투해석 안정성 평가를 위해서 본 연구에서는 제방침투 안정성 평가시 가장 많이 사용되고 있는 한계동수경사법을 이용하여 제방의 침투붕괴 위험도를 산정하였다.

Table 2. Safety Factors for Seepage Failure

reference	safety factor	use
U.S. NAVFAC(1986), Soil Mechanics Design Manual	2.0	2.0
Hunt(1986), Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation	≥ 3.0	
Das(1998), Principles of Geotechnical Engineering	≈ 4.0	

즉, Eq. (14)와 같은 침투과피의 안전율을 기준으로 실행함수(W_k^s)를 구성할 수 있다.

$$W_k^s = F_{S_k}(e, G_s \gamma_d) - F_{S_{crit}} \quad (14)$$

여기서, γ_d : 흙의 단위중량($\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e}$),

$F_{S_{crit}}$: 기준안전률

한계동수경사법에서의 안전율(F_s)은 Eq. (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \frac{S_c}{S} = \frac{G_s - 1}{S(1 + e)} \quad (15)$$

Eq. (15)의 안전율에 대한 평균과 분산, 변동계수는 Eq. (16), (17), (18)을 통해 산정할 수 있다.

$$\mu_{F_S} = E[F_S] = w_0 + \frac{\partial F_S}{\partial \gamma_d}(\mu_{\gamma_d} - x_{\gamma_d}) + \frac{\partial F_S}{\partial G_S}(\mu_{G_S} - x_{G_S}) \quad (16)$$

$$\sigma_{F_S}^2 = \text{Var}[F_S] = \left(\frac{\partial F_S}{\partial \gamma_d} \right)^2 \text{Var}[\gamma_d] + \left(\frac{\partial F_S}{\partial G_S} \right)^2 \text{Var}[G_S] \quad (17)$$

$$V_{F_S} = \frac{\sigma_{F_S}}{E[F_S]} \quad (18)$$

안전율은 확률모멘트 $E[F_S]$ 와 σ_{F_S} 값을 가지는 대수 정규분포형태를 가진다고 가정하게 되면 대수정규분포 형태를 갖는 확률모멘트는 Eq. (19)와 (20)을 통해 산정할 수 있다. 대수정규분포는 지반공학적 안전율 및 투수계수와 같은 확률변수시 가장 많이 사용되는 분포형이다(Wolff, 1994).

$$E[\ln F_S] = \ln E[F_S] - \frac{\sigma_{\ln F_S}^2}{2} \quad (19)$$

$$\sigma_{\ln F_S}^2 = \sqrt{\ln(1 + V_{F_S}^2)} \quad (20)$$

결국 제방침투로 인한 파괴확률($P_{f,k}^s$)은 Eq. (21)의 관계를 통해 산정될 수 있다.

$$P_{f,k}^s = \Pr(\ln F_{S_{k, \max}} < \ln F_{S_{k, \text{crit}}}) \quad (21)$$

여기서, $F_{S_{k, \max}}$: k 단면에서의 모의 최대안전율
 $F_{S_{k, \text{crit}}}$: k 단면에서의 기준안전율

3. 시스템의 신뢰도 분석

일반적으로 시스템은 여러 하부시스템 및 성분으로 이루어져 있고 이들 각각의 실행은 전체 시스템의 실행에 영향을 미친다. 전체 시스템의 신뢰도는 각 하부시스템의 신뢰도가 아닌 하부시스템간의 상호작용과 통합 구조에 의해 영향을 받는다. 파괴형태 및 경로의 기능적 형태 및 구성에 따라 병렬 및 직렬시스템으로 구분할 수 있다. 즉, 직렬시스템은 모든 성분이 조건을 만족할 경우일 경우에만 전체 시스템 실행이 가능한 시스템이고, 병렬시스템은 여러 성분 중 적어도 하나 이상의 성분만이 조건을 만족할 경우에도 실행이 가능한 시스템을 말한다. 결국 수공구조물의 파괴 메커니즘도 역시

하나의 시스템으로 간주할 수 있다.

직렬시스템에서 하나의 성분의 실행이 실패한다면 이는 전체 시스템에 영향을 미치게 된다. 만약 시스템이 n 개의 성분으로 구성되어있고, i 번째 성분의 파괴확률을 P_{f_i} 라 한다면 i 번째 성분의 신뢰도는 $P_{r_i} = 1 - P_{f_i}$ 가 되고, 전체 시스템의 신뢰도는 Eq. (22)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} P_r &= P_{r_1} P_{r_2} P_{r_3} \cdots P_{r_i} \cdots P_{r_n} \\ &= (1 - P_{f_1})(1 - P_{f_2})(1 - P_{f_3}) \cdots (1 - P_{f_i}) \cdots (1 - P_{f_n}) \end{aligned} \quad (22)$$

병렬시스템의 경우에 있어서는 시스템은 오직 모든 성분의 실행조건이 만족되지 않을 경우에만 파괴가 이루어지므로 전체 시스템에 대한 신뢰도는 Eq. (23)과 같이 표현된다.

$$P_r = 1 - P_{f_1} P_{f_2} P_{f_3} \cdots P_{f_i} \cdots P_{f_n} \quad (23)$$

Fig. 5는 전체시스템에 대한 분석과정을 나타내고 있다. 앞서 언급한 각각의 불확실도 분석과 파괴 메커니즘의 각 원인은 하나로 조합되어 결국 전체 시스템에 대한 신뢰도를 도출하게 된다.

Fig. 5. Process of System Reliability Analysis

공학적 시스템에 대한 정량적 신뢰도 분석과정은 다음과 같다.

- 1) 시스템의 범위 규정, 시스템 형태 확인 및, 문제와 연관된 조건을 규정
- 2) 파괴 원인 확인 및 구분 실시
- 3) 시스템의 작동과 파괴에 영향을 미치는 요인 확인
- 4) 각 영향요소 성분 및 하부시스템에 대한 불확실도 분석 실시
- 5) 시스템 및 파괴의 특성에 따라 logic tree 구성
- 6) logic tree에 따라 시스템 신뢰도를 계산방법을 결정
- 7) 6)에서 선택한 방법을 통해 시스템의 신뢰도 및 파괴확률 계산

본 연구에서는 하천제방의 파괴원인별 위험도를 계산한 후 직렬시스템의 신뢰도분석과정을 하천제방에 적용하여 하천제방의 통합 위험도를 산정하였다.

4. 적용 및 검토

4.1 대상구역

본 연구에서는 태풍 ‘루사’로 인해 특히 피해가 심했던 지역 중 하나인 경북 김천지역에 위치한 감천유역에 축조된 실제 제방에 대해 적용해 보았다. 이 유역은 태풍 ‘루사’ 및 ‘매미’시 집중호우로 인해 하천이 범람하고 급격한 유속에 견디지 못한 수충부의 취약한 제방은 삽시간에 파제되어 주변 농경지 및 가옥을 덮쳤다. 이로 인하여 가옥의 침수는 물론 전도되는 피해와 미처 신속하게 대피하지 못한 주민들은 귀중한 생명을 잃게 되었다. 일시에 쏟아진 폭우로 강물이 급속히 불어나고 감천 수계의 전 지구에 대하여 공통적으로 발생한 피해원인은 상류로부터 붕괴된 산사태와 이로 인한 하천으로의 토사 유입으로 하상이 높아지고 수위 상승과 더불어 기존 제방의 취약한 지구로부터 서서히 붕괴되면서 제내측 농경지와 가옥의 침수가 6~8시간 지속되었다. 강우양상 생성을 위해 먼저 30년 이상의 관측년수를 가진

추풍령관측소(1937~2008), 구미관측소(1973~2008), 거창관측소(1972~2008)의 강우량 자료를 활용하여 시간에 따른 강우 양상을 분석하였다.

4.2 하천제방의 침식파괴 위험도 해석

제방의 침식파괴의 가장 큰 요인은 크게 하천의 유속과 소류력을 꼽을 수 있다. 일반적으로 하천의 대표 유속이 3m/s 초과유무에 따라 호안을 설치하게 된다. 이에 본 연구에서는 각 단면에서의 유속과 하천정비기본계획시 주로 호안의 안정성 판단을 위해 사용되고 있는 건설교통부(1997)가 제시한 허용 소류력을 이용하여 침식파괴로 인한 제방의 안정성을 평가하였다. 호안 종류에 따른 허용 소류력값을 기준으로 부하-용량관계를 정립하고 이를 실행함수로 사용하였으며, 수문학적 불확실도가 고려된 계산결과를 토대로 신뢰도 지수를 활용하여 하도의 각 단면에서의 제방의 침식으로 인한 파괴확률을 산정하였다. 감천 유역의 호안은 주로 콘크리트 블록과 돌망태로 구성되어 있어 대상유역의 전 구간을 콘크리트 블록으로 간주하고 연구를 진행하였다.

Fig. 6은 장마기와 태풍기에 대한 강우양상에 따른 소류력 중단도를 나타내고 있고, Fig. 7은 장마기와 태풍기에 대한 하도의 상류부에서부터 하류부까지의 전 구간에 대한 침식파괴 확률을 나타내고 있다. 호안 종류에 따른 허용 소류력의 값은 문헌에 따라 조금씩 다른 값을 보이고 있으나 일반적으로 20~24kg/m²의 값을 보이고 있어 대상유역에 대한 소류력에 의한 침식파괴 확률은 매우 낮았으며 24km 구간과 35~38km 구간의 소류력의 차이는 거의 동일하나 구간별 제원의 차이로 인해 파괴확률의 차이가 발생하였다. 그리고 장마기 보단 태풍기의 유속의 영향이 크게 반영되어 침식파괴 확률이 좀 더 높음을 알 수 있었다. 하지만 제방의 침식에 대한 안전성 확보를 위한 이론적인 해석방법은 아직 미진한 상태로 경험적 방법을 사용할 수밖에 없었다. 이는 보다 정확한 이론적 해석방법이 정립될 시 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 6. Tractive Force Profile with Rainfall Variation

Fig. 7. Probability of Erosion Failure

4.3 하천제방의 침투파괴 위험도 해석

본 연구에서는 제체 및 기초의 침투류에 대하여 수치해석적 방법으로 침투류의 수두, 유속, 등수두선, 침투압분포 등을 구하여 제체의 누수 및 제체의 안정성을 검토하였다. 본 연구의 침투류 해석은 각 제방별로 대표단면을 선정 후 앞서 산정한 최고홍수위에서의 정상류 침투해석을 실시하였는데 이를 위해 침투해석에 있어서 널리 사용되고 있는 GEO-SLOPE사의 SEEP/W 모형을 이용하였다.

일반적으로 제방 설계시에는 계획 홍수량, 제내지 토지이용현황, 사회·경제적 여건, 하천환경, 기초지반상태 등을 고려하여 제방단면을 결정한 후 결정된 단면에 대해 안정계산을 실시하여 필요한 안전율을 확보할 수 있도록 최종단면을 결정한다. 지하수 침투로 인한 파이프 및 과다 침투유량 발생여부는 제방의 구성단면, 매립재료 및 원지반의 투수특성, 조위변화 등 제반조건에

의해 결정된다. 본 연구에서는 감천하천정비기본계획(1997)과 김천홍수피해용역보고서(2005) 상에 제시된 구간별 표준단면형상 및 조건을 이용하여 분석을 실시하였으며, Fig. 8과 Table 3은 본 연구에서 사용된 해석단면의 형상과 제원을 나타내고 있다.

그리고 침투해석시 적용된 지반정수는 기존의 현장 실험결과를 포함하는 보고서와 기존문헌 값을 종합하여 분석한 후 합리적인 값을 적용하였다. 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 각각의 단면에서 제내지층에서 계산된 동수경사와 한계동수경사를 비교하는 한계동수경사법을 이용하여 제방 침투에 대한 안정성 검토를 실시하였다. 그리고 안전율은 하천설계기준(2005, 한국수자원학회)에서 제시된 2를 사용하였고, 안전율의 분포형은 대수정규분포를 사용하였다.

Fig. 9는 장마기 주요 단면에 대한 침투해석 결과를 나타내고 있고, Fig. 10은 태풍기 주요 단면에 대한 침투해석 결과를 나타내고 있다. 이는 기 산정된 홍수위

Fig. 8. Shape of the Cross Sections

Table 3. Properties of the Cross Sections

Reach	b	h_1	h_2	slope, m	K_1 (cm/s)	K_2 (cm/s)
Reach 1 (No. 86 ~ No. 83)	4	6	4	2	1×10^{-4}	1×10^{-3}
Reach 2 (No. 82 ~ No. 26)	5	6	4	2	1×10^{-4}	1×10^{-3}
Reach 3 (No. 25 ~ No. 0)	7	6	4	2	1×10^{-4}	1×10^{-3}

를 이용하여 해석된 결과로서 파괴확률이 비교적 크게 나타난 금송고지점, 신음제, 신림제, 아천 및 울곡천 합류부, 대천 합류부 등의 주요 단면을 나타내고 있다. Fig. 11은 장마기와 태풍기에 대한 강우양상에 따른 동수경사의 종단도를 나타내고 있고, Fig. 12는 장마기에 대한 하도의 상류부에서부터 하류부까지의 전 구간에 대한 침투파괴 확률을 나타내고 있으며, Fig. 13은 태풍기에 대한 하도의 상류부에서부터 하류부까지의 전 구

간에 대한 침투파괴 확률을 나타내고 있다.

한계동수경사법은 하천수위의 영향을 크게 받고 있어 지류의 합류부지역에서의 침투파괴의 확률이 높음을 확인할 수 있었다. 하지만 본 연구에서의 적용은 포화로 가정하고, 정상류 모의를 통한 결과를 토대로 하고 있어 실제보단 다소 과대 산정되었을 염려가 있다. 이는 보다 세밀한 추가연구가 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 9. Results of Seepage Analysis in Monsoon

Fig. 10. Results of Seepage Analysis in Typhoon

Fig. 11. Critical Hydraulic Gradient Profile with Rainfall Variation

Fig. 12. Probability of Seepage Failure in Monsoon

Fig. 13. Probability of Seepage Failure in Typhoon

4.4 제방의 통합 붕괴확률 해석

일단 각각의 파괴 메커니즘별 위험도가 산정되면, 이들을 하나의 전체 위험도로 통합하는(combine) 과정이 필요하게 된다. 이를 위해 각각의 파괴 메커니즘은 서로간의 상관관계는 존재하지 않는 독립적인 사상으로 간주하였다. 이러한 가정은 하나의 파괴원인에 대한 파괴확률이 증가함에 따라 다른 파괴확률에도 영향을 줄 수 있기 때문에 엄격히 말해 실제적인 건 아니다. 하지만 각각의 파괴원인간의 상관관계에 대한 충분한 연구가 진행되지 못하였고 또한 이들의 상관관계를 규명하는 것은 본 연구의 범위를 넘어서는 것이기 때문에 파괴원인간의 독립성을 가정하여 이론적인 간략화를 구성하였다. 이는 합리적인 하천제방의 위험도분석과정을 다루는 본 연구에 있어 바람직하다고 생각된다.

하천제방의 붕괴는 앞서 언급한 월류에 의한 파괴와 침식에 의한 파괴, 그리고 침투파괴 등으로 발생될 수 있다. 이들 각각의 파괴원인은 각각의 파괴원인이 전체 제방붕괴 위험도에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 하천제방의 전체 위험도 산정은 직렬시스템의 신뢰도분석 내용을 적용하여 실시하였다. 월류에 의한 파괴확률은 안기홍 등(2009)이 실시한 강우변동 생성기법을 이용한 하천제방의 월류 위험도 평가 내용을 활용하였다. Fig. 14는 감천유역의 상류부에서 하류부까지의 장마기 좌·

우측제방의 위험도를 산정한 결과이고, Fig. 15는 태풍기 좌·우측제방의 위험도를 산정한 결과를 나타내고 있다. 그리고 Table 4와 Table 5는 장마기와 태풍기의 주요 지점에 대한 파괴요인별 산정결과를 나타내고 있고, Fig. 16은 감천 하류부쪽의 주요지점에 대한 파괴요인별 산정결과를 나타내고 있다. 또한 Fig. 17은 장마기와 태풍기의 좌·우측제방의 위험도를 전체 유역도 상에 도시한 결과이다. 그림에서와 같이 제방의 파괴확률은 월류에 의해 가장 큰 영향을 받고 있었으며, 침식에 의한 파괴확률은 전체 위험도에 비해 미미함을 알 수 있었다. 특히 지좌1제, 내고제 등에서 침투파괴의 위험도가 높게 산정되었다. 그리고 금송교 부근과 아천 및 울곡천 합류부, 대천 합류부 등에서 매우 높은 통합위험도가 나타나는데 이는 해당지점이 100년 빈도 미만으로 설계되어 월류에 의한 영향이 크게 반영된 결과로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 하천제방의 지반공학적 위험도를 이전의 연구와 연계하여 실시함으로서 통합위험도를 산정하였다. 추계학적 강우변동 생성기법을 이용하여 생성된 태풍기와 장마기별 유량 및 수위수문곡선을 활용하여 하천제방에 대한 침식, 침투 그리고 통합 위험도를

Fig. 14. Probability of Levee Failure in Monsoon

Fig. 14. Probability of Levee Failure in Monsoon

Fig. 15. Probability of Levee Failure in Typhoon

Fig. 16. The Probability of Failure at Main Cross Sections

Fig. 17. Risk Classified by Levee Failure Factors on Gamcheon Watershed

Table 4. Comparison of the Probability of Failure Classified by Levee Failure Factors in Monsoon

	#	RKM(km)	overtopping	erosion	seepage	combined
left	61	30.60	2.34×10^{-5}	3.67×10^{-232}	6.25×10^{-3}	6.27×10^{-3}
	52	26.22	1.80×10^{-6}	3.64×10^{-176}	6.83×10^{-5}	7.01×10^{-5}
	30	15.18	1.57×10^{-5}	4.09×10^{-4}	3.26×10^{-8}	4.25×10^{-4}
	29	14.68	1.78×10^{-3}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.80×10^{-4}	2.36×10^{-3}
	28	14.18	7.00×10^{-7}	$0.00 \times 10^{+0}$	6.83×10^{-5}	6.89×10^{-5}
	18	9.07	1.76×10^{-2}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.81×10^{-2}	3.54×10^{-2}
	17	8.57	1.60×10^{-6}	$0.00 \times 10^{+0}$	2.20×10^{-7}	1.83×10^{-6}
	14	7.07	1.13×10^{-1}	3.12×10^{-250}	1.18×10^{-1}	2.18×10^{-1}
	13	6.55	5.13×10^{-2}	1.61×10^{-187}	2.23×10^{-2}	7.24×10^{-2}
	5	2.50	1.08×10^{-4}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.29×10^{-14}	1.08×10^{-4}
	4	2.00	3.26×10^{-2}	1.42×10^{-38}	6.72×10^{-10}	3.26×10^{-2}
	3	1.50	2.40×10^{-2}	1.66×10^{-6}	3.16×10^{-7}	2.40×10^{-2}
	2	1.00	1.47×10^{-2}	2.80×10^{-75}	1.45×10^{-8}	1.47×10^{-2}
	1	0.47	2.02×10^{-1}	4.60×10^{-24}	6.78×10^{-3}	2.08×10^{-1}
	#	RKM(km)	overtopping	erosion	seepage	combined
right	80	38.20	5.33×10^{-10}	$0.00 \times 10^{+0}$	4.02×10^{-5}	4.02×10^{-5}
	59	29.80	2.78×10^{-4}	$0.00 \times 10^{+0}$	6.25×10^{-3}	6.52×10^{-3}
	58	29.30	7.64×10^{-1}	3.62×10^{-282}	6.05×10^{-1}	9.07×10^{-1}
	49	24.78	1.40×10^{-6}	$0.00 \times 10^{+0}$	7.25×10^{-6}	8.68×10^{-6}
	48	24.24	2.00×10^{-7}	$0.00 \times 10^{+0}$	8.42×10^{-6}	8.67×10^{-6}
	44	22.21	1.46×10^{-3}	2.32×10^{-226}	1.75×10^{-5}	1.48×10^{-3}
	43	21.69	8.56×10^{-1}	6.54×10^{-73}	4.10×10^{-1}	9.15×10^{-1}
	30	15.18	$0.00 \times 10^{+0}$	4.09×10^{-4}	2.45×10^{-21}	4.09×10^{-4}
	16	8.07	6.86×10^{-4}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.75×10^{-3}	6.43×10^{-3}
	15	7.57	8.07×10^{-4}	$0.00 \times 10^{+0}$	7.97×10^{-3}	8.77×10^{-3}
	11	5.52	3.93×10^{-3}	1.35×10^{-210}	8.86×10^{-4}	4.81×10^{-3}
	10	5.02	7.41×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	4.10×10^{-1}	8.47×10^{-1}
	7	3.50	$0.00 \times 10^{+0}$	3.41×10^{-6}	$0.00 \times 10^{+0}$	3.41×10^{-6}
	5	2.50	1.80×10^{-6}	$0.00 \times 10^{+0}$	3.20×10^{-24}	1.80×10^{-6}
	4	2.00	4.24×10^{-4}	1.42×10^{-38}	3.55×10^{-35}	4.24×10^{-4}
	3	1.50	3.42×10^{-4}	1.66×10^{-6}	4.11×10^{-19}	3.42×10^{-4}
	2	1.00	2.78×10^{-3}	2.80×10^{-75}	2.42×10^{-13}	2.78×10^{-3}
	1	0.47	7.56×10^{-3}	4.60×10^{-24}	9.81×10^{-11}	7.56×10^{-3}

산정하였다. 침식에 대한 하천제방의 위험도는 각 단면에서의 유속과 하천정비기본계획시 주로 호안의 안정성 판단을 위해 사용되고 있는 호안형식별 허용 소류력을 이용하여 평가하였다. 침투류 해석은 각 제방별로 대표 단면을 선정 후 앞서 산정한 최고홍수위에서의 정상류 침투해석을 실시하였는데 이를 위해 침투해석에 있어서 널리 사용되고 있는 GEO-SLOPE 사의 SEEP/W 모형을 이용하였고 한계동수경사법을 이용한 MFOSM 분석을 통해 제방의 침투붕괴 위험도를 산정하였다. 침식과 파괴의 경우 다른 파괴요인에 비해 상대적으로 낮은 위험

도를 보였으며 외현천 합류부나 선산수위표 부근에서 다소 높은 위험도를 보였다. 침투파괴의 경우는 지좌1제와 내고제 등에서 높은 위험도를 보였다. 그리고 하천제방 파괴요인별 위험도를 하나로 통합하여 통합 위험도를 산정하였다. 이를 통해 유역 각 단면별 통합 위험도를 확인할 수 있었고, 파괴요인별 산정결과를 도표와 GIS상에 도시하였다. 상류부의 금송교 지점과 하류부의 아천, 울곡천 합류부, 대천합류부 근처에서 0.948, 0.940, 0.904 등 매우 큰 위험도를 얻어 해당 지점에 대한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

Table 5. Comparison of the Probability of Failure Classified by Levee Failure Factors in Typhoon

	#	RKM(km)	overtopping	erosion	seepage	combined
left	61	30.60	1.12×10^{-2}	2.88×10^{-123}	4.45×10^{-2}	5.52×10^{-2}
	52	26.22	3.25×10^{-3}	1.55×10^{-92}	1.20×10^{-3}	4.45×10^{-3}
	44	22.21	5.69×10^{-4}	2.26×10^{-117}	7.33×10^{-12}	5.69×10^{-4}
	43	21.69	1.06×10^{-4}	1.46×10^{-37}	5.64×10^{-15}	1.06×10^{-4}
	42	21.20	1.72×10^{-5}	4.37×10^{-226}	7.45×10^{-16}	1.72×10^{-5}
	36	18.22	3.13×10^{-5}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.26×10^{-10}	3.13×10^{-5}
	33	16.68	4.02×10^{-4}	$0.00 \times 10^{+0}$	6.39×10^{-7}	4.03×10^{-4}
	31	15.68	9.22×10^{-4}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.26×10^{-7}	9.22×10^{-4}
	30	15.18	7.18×10^{-3}	1.80×10^{-3}	1.75×10^{-5}	8.99×10^{-3}
	29	14.68	6.01×10^{-2}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.26×10^{-2}	7.20×10^{-2}
	28	14.18	1.38×10^{-3}	$0.00 \times 10^{+0}$	8.86×10^{-4}	2.27×10^{-3}
	24	12.18	3.11×10^{-5}	5.12×10^{-186}	4.38×10^{-13}	3.11×10^{-5}
	19	9.62	1.04×10^{-3}	$0.00 \times 10^{+0}$	3.51×10^{-5}	1.07×10^{-3}
	18	9.07	1.61×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.08×10^{-1}	2.51×10^{-1}
	17	8.57	2.82×10^{-3}	$0.00 \times 10^{+0}$	3.06×10^{-5}	2.85×10^{-3}
	15	7.57	2.48×10^{-4}	4.15×10^{-236}	1.31×10^{-5}	2.61×10^{-4}
	14	7.07	3.60×10^{-1}	1.60×10^{-150}	3.34×10^{-1}	5.74×10^{-1}
	13	6.55	2.39×10^{-1}	1.17×10^{-118}	1.59×10^{-1}	3.60×10^{-1}
	7	3.50	6.11×10^{-4}	1.30×10^{-4}	1.83×10^{-16}	7.40×10^{-4}
	6	3.00	1.36×10^{-3}	2.80×10^{-73}	1.05×10^{-15}	1.36×10^{-3}
	5	2.50	2.11×10^{-2}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.05×10^{-7}	2.11×10^{-2}
	4	2.00	1.25×10^{-1}	4.90×10^{-82}	6.83×10^{-5}	1.26×10^{-1}
	3	1.50	2.09×10^{-1}	4.20×10^{-11}	2.61×10^{-3}	2.11×10^{-1}
	2	1.00	1.68×10^{-1}	1.77×10^{-73}	5.80×10^{-4}	1.69×10^{-1}
	1	0.47	5.06×10^{-1}	7.57×10^{-121}	1.13×10^{-1}	5.62×10^{-1}
right	80	38.20	8.83×10^{-5}	$0.00 \times 10^{+0}$	6.46×10^{-4}	7.34×10^{-4}
	59	29.80	3.16×10^{-2}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.29×10^{-2}	8.28×10^{-2}
	58	29.30	8.68×10^{-1}	9.90×10^{-156}	6.05×10^{-1}	9.48×10^{-1}
	55	27.75	1.66×10^{-3}	1.79×10^{-116}	2.67×10^{-5}	1.69×10^{-3}
	51	25.72	1.13×10^{-5}	1.17×10^{-214}	1.45×10^{-8}	1.14×10^{-5}
	49	24.78	2.77×10^{-3}	$0.00 \times 10^{+0}$	2.96×10^{-4}	3.06×10^{-3}
	48	24.24	1.66×10^{-3}	$0.00 \times 10^{+0}$	2.96×10^{-4}	1.96×10^{-3}
	45	22.71	1.62×10^{-3}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.18×10^{-8}	1.62×10^{-3}
	44	22.21	5.25×10^{-2}	2.26×10^{-117}	1.79×10^{-3}	5.42×10^{-2}
	43	21.69	8.99×10^{-1}	1.46×10^{-37}	4.10×10^{-1}	9.40×10^{-1}
	39	19.70	3.44×10^{-4}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.05×10^{-7}	3.44×10^{-4}
	30	15.18	2.23×10^{-5}	1.80×10^{-3}	2.08×10^{-15}	1.82×10^{-3}
	16	8.07	3.96×10^{-2}	$0.00 \times 10^{+0}$	3.09×10^{-2}	6.92×10^{-2}
	15	7.57	5.81×10^{-2}	4.15×10^{-236}	4.20×10^{-2}	9.76×10^{-2}
	14	7.07	2.71×10^{-3}	1.60×10^{-150}	6.23×10^{-6}	2.72×10^{-3}
	12	6.00	3.58×10^{-3}	$0.00 \times 10^{+0}$	2.43×10^{-6}	3.58×10^{-3}
	11	5.52	7.94×10^{-2}	1.03×10^{-127}	1.94×10^{-2}	9.73×10^{-2}
	10	5.02	8.38×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	4.10×10^{-1}	9.04×10^{-1}
	7	3.50	$0.00 \times 10^{+0}$	1.30×10^{-4}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.30×10^{-4}
	6	3.00	7.52×10^{-4}	2.80×10^{-73}	6.53×10^{-18}	7.52×10^{-4}
	5	2.50	3.56×10^{-3}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.29×10^{-14}	3.56×10^{-3}
	4	2.00	4.03×10^{-3}	4.90×10^{-82}	7.88×10^{-20}	4.03×10^{-3}
	3	1.50	3.29×10^{-2}	4.20×10^{-11}	3.32×10^{-10}	3.29×10^{-2}
	2	1.00	8.19×10^{-2}	1.77×10^{-73}	1.26×10^{-6}	8.19×10^{-2}
	1	0.47	1.26×10^{-1}	7.57×10^{-121}	4.60×10^{-5}	1.26×10^{-1}

본 연구에서는 안전과 위험여부만을 알려주는 확정론적 분석방법과 달리 정량적인 위험도를 산정할 수 있었고 실제 강우 변동의 특성 및 다양한 제방파괴 요인을 반영하였으며, 이를 하나의 위험도로 통합하여 제시하고 있으므로 본 연구모형의 결과는 그 적용성에 있어 매우 유용할 것으로 판단된다. 그리고 수리·수문·지반공학적 안정성 평가체계를 통합하여 일원화하였고, 강우-유출-흐름해석-통합 위험도 평가라는 일련의 체계를 확립하였다. 본 연구모형은 향후 홍수에 대한 제방파괴 위험지점 파악 및 제내지 홍수위험도와 연계한 홍수보험, 주민대피지도 구축 등에 활용될 수 있어 유역의 홍수통합관리시 효율적이고 체계적인 대책수립에 크게 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2002). **하천시설물 설계시 신뢰도 분석 개념 도입에 관한 연구**.
- 건설교통부 부산지방국토관리청 (1997). **감천 하천정비기본계획(보완)**.
- 경상북도 (2005). **침수흔적조사 및 홍수지도제작 용역**.
- 김종해, 한건연, 박종석 (2002). “하천제방의 신뢰도 분석을 위한 HEC-2 모형의 Monte Carlo 모의.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 517-522.
- 김종해, 한건연, 서규우 (2003). “하천 홍수범람모의를 위한 불확실도 해석기법의 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 661-671.
- 소방방재청 (2007). **2007년도 주요통계 및 자료**, pp. 316-317.
- 이종석 (2002). “댐의 안전성 평가를 위한 위험도 해석 기법의 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, Vol. 35, No. 6, pp. 651-664.
- 전민우, 한건연, 김지성 (2006). “Monte Carlo 기법에 의한 하천제방의 안정성 평가.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, Vol. 26, NO. 5-B, pp. 501-510.
- 한건연, 안기홍, 김지은 (2008). “감천 유역의 강우양상 분석 및 추계학적 생성에 관한 연구.” **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 501-510.
- 한건연, 이종석, 김상호 (1997a). “댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발 : I. 모형 및 이론.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 679-690.
- 한건연, 이종석, 김상호 (1997b). “댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발 : II. 적용 예.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 691-698.
- 한국수자원학회 (2002). **하천설계기준·해설**.
- 한국수자원학회 (2005). **하천설계기준·해설**.
- A-Grivas, D. (1980). “A reliability approach to the design of geotechnical systems.” *Rensselaer Polytechnic Institute Research Paper, Transportation Research Board Conference*, Washington, D.C.
- Asoka, A. and A-Grivas, D. (1982). “Spatial variability of the undrained strength of clays.” *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol. 108, No. 5, pp. 743-755.
- Brizendine, A.L. (1997). *Risk-Based Analysis of Levees*, Ph.D. Thesis, Univ. of West Virginia.
- Calle, E.O.F., Best, H., Sellmeijer, J.B., and Weijers, J. (1989). “Probabilistic analysis of piping underneath water retaining structures.” *Proc. 12th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Vol. 2, pp. 819-822.
- Chowdhury, R.N. (1984). “Recent Developments in Landslide: Probabilistic Methods.” *Proc. 4th Int. Symp. on Landslides*, Vol. 1, Toronto, pp. 209-228.
- Das, B.M. (1998). *Principles of Geotechnical Engineering*, Thomson Learning Inc.
- Hunt, R.E. (1986). *Geotechnical engineering analysis and evaluation*, McGraw-Hill.
- Kanning, W., Baars, S.V., and Vrijling, J.K. (2008). “The Stability of Flood Defenses on Permeable soils : The London Avenue Canal Failures in New Orleans.” *6th Int. Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, No. 2.72, pp. 1-9.
- Kuo, J.T., Yen, B.C., Hsu, Y.C., and Lin, H.F. (2007). “Risk analysis for dam overtopping-Feitsui Reservoir as a case study.” *J. Hydraul. Engrg., ASCE*, Vol. 133, No. 8, pp. 955-963.
- Lane, E.W. and Carlson, E.J. (1953). “Some factors affecting the stability of canals constructed in course granulated material.” *Proc. of the*

- Minnesota Internal Hydraulics Convention*, pp. 37 - 48.
- Li, K.S. and Lumb, P. (1987). "Probabilistic Design of Slopes." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, pp. 520-535.
- Steenbergen, H.M.G.M., Lassing, B.L., Vrouwen-velder, A.C.W.M., and Waats, P.H. (2004). "Reliability analysis of flood defence system." *HERON*, Vol. 49, No. 1, pp. 51-73.
- Termaat, R.J. and Calle, E.O.F. (1994). "Short term acceptable risk of slope failure of levees." *Proc. of the 13th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India.
- Tung, Y.K. and Yen, B.C. (2005). *Hydrosystem engineering uncertainty analysis*, McGraw-Hill Book Company, NY, USA.
- U.S. Naval Facilities Engineering Command (1986). *Soil Mechanics Design Manual 7.01*.
- Vrijling, J.K. (2000). *Probabilistic Design - Lecture Note*, IHE Delft.
- Vrouwenvelder. (1987). *Probabilistic design of flood defences*, Report No. B-87-404, IBBC-TNO, The Netherlands.
- Wolff, T.F. (1994). *Evaluating Reliability of Existing levees*, report to US. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

논문번호: 09-063	접수: 2009.06.08
수정일자: 2009.06.19	심사완료: 2009.06.26