

# 하천제방의 건전도 평가를 위한 수치해석적 연구

## Numerical Analysis for Integrity Evaluation of River Bank

정혁상<sup>1)</sup> · 변요셉<sup>1)</sup> · 천병식<sup>2)</sup> · 최봉혁<sup>3)</sup> · 김진만<sup>†</sup>

Jung, Hyuksang · Byun, Yoseph · Chun, Byungsik · Choi, Bonghyuck · Kim, Jinman

**ABSTRACT** : An influence factors for soundness evaluation of river levee include consisting embankment in case piping, permeability coefficient of ground, height of embankment, the width of crest, material characteristics of embankment and foundation ground, shape of embankment slope, an influence for penetration of rainfall or river water in case slope stability. In this study, it was operated a feasibility investigation of existing design result, stability evaluation for permeability coefficient use and permeability coefficient change of foundation ground to investigate an influence in line with permeability coefficient change for result of river levee penetration analysis. The evaluation results of influence factors, the permeability coefficient was used in design and it was evaluated influence in safety factor of piping. After the evaluation of influence factors, the permeability coefficient used in the design appears with the fact that differs in a design report about same soil.

**Keywords** : Embankment, Integrity evaluation, Piping, Permeability coefficient

**요 지** : 하천제방 건전도 평가에 대한 영향인자는 누수의 경우 제체, 기초를 구성하는 지반의 투수계수가 있으며, 제방의 높이, 둑마루 폭 등 기하학적 요인이 있고, 비탈면 안정성의 경우 제체 및 기초 지반의 재료적 특성, 제체 비탈면의 형상, 강우나 하천수의 침투에 따른 영향 등이 있다. 본 연구에서는 하천제방 침투해석에 중요한 투수계수 변화에 따른 영향 검토를 위하여 기존 설계결과 타당성 검토, 문헌자료 투수계수 사용에 따른 안정성 평가, 기초지반 투수계수변화에 따른 안정성 검토를 수행하였다. 영향인자 평가 결과, 설계 시 사용되는 투수계수는 동일한 토질에 대해서도 설계문헌에 따라 상이한 것으로 나타났으며, 검토 결과 파이핑 안전율에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

**주요어** : 하천제방, 건전도 평가, 파이핑, 투수계수

## 1. 서 론

최근 우리나라는 지구 온난화에 따른 기상이변으로 이상 홍수 발생과 제방의 노후화 등으로 인해 홍수 시 제방이 붕괴되고 이에 따른 인명 및 재산피해가 증가되고 있다. 대표적인 예로 2002년 태풍 루사와 장기홍수로 인한 인명 및 재산피해가 전국적으로 270명이 사망되거나 실종되었고, 7,634동의 주택이 파손되고, 17,749ha의 농경지가 유실되는 등 6조 1,038억 원이라는 막대한 피해가 발생하였다. 또한, 2003년의 경우는 태풍 매미로 인하여 140명의 인명 피해와 4조 7,810억 원이라는 막대한 인명 및 재산 피해가 발생하였다. 그럼에도 불구하고 우리나라의 제방의 유지관리 및 안전진단기술도 미국이나 일본에 비해 미흡한 실정이다(한국건설기술연구원, 2004). 하천제방의 건전도 평가는 강우 및 하천수의 침투와 관련된 파이핑 및 비탈면 안정 해석을 수행하는 과정으로, 영향인자는 파이핑의 경우 제체, 기초를 구성

하는 지반의 투수계수와 제방의 높이, 둑마루 폭 등 기하학적 요인이 있다. 비탈면 안정성의 경우 제체 및 기초 지반의 재료적 특성, 제체 비탈면의 형상, 강우나 하천수의 침투에 따른 영향 등이 있다.

한편, 국내에서 수행된 연구는 한건연 등(1995)이 제방 붕괴에 따른 범람 홍수와 전파특성을 수치모의를 통해서 규명하였고, 이종태 등(2001)은 제방자체의 파괴양상을 실험을 통해서 모의하여 제방 단면의 기하학적 특성과 축조재료 및 다짐도가 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 또한 정형식 등(1998)은 홍수 시 제방의 침윤선의 변화와 그에 따른 제체누수에 대한 연구를 통하여 설계 시 적용인자들의 영향을 검토하였으며, 권교근 등(2006)은 우리나라 하천제방에 대한 내부 침식 파괴연구를 통해 균열 및 파이핑 저항등급을 소개하고, 유한요소해석을 통해 한계유속과 한계동수경사에 의한 현행 설계방법의 안정성 검토 결과를 비교하여 실효성을 판단하였다. 국외에서는 일본의 Fujita 등(1984)이

1) 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

2) 정회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

3) 비회원, 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 연구원

† 비회원, 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 책임연구원 E-mail : jmkim@kict.re.kr

하천제방의 붕괴형상에 대하여 2차원 실험을 실시하여 제방 붕괴의 양상에 대해 규명한 바 있으며, Uno 등(1998)은 하천 제방 안전성 평가를 위하여 제방붕괴사례를 조사하여 분석하여 제방의 안정성 검토를 위한 기초연구를 수행하였다.

본 연구에서는 기존 설계결과와 타당성 검토, 문헌자료에 의한 물성치 사용에 따른 안정성 평가 그리고 기초지반 투수계수변화에 따른 파이핑 안정성 검토를 통하여 하천제방 침투해석 결과에 대한 투수계수 변화에 따른 영향을 평가하고, 합리적인 투수계수 적용에 대한 검토를 목적으로 연구를 수행하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 파이핑

제방의 경우 제외지에서 제내지로 제체 및 제체 하부 기초지반으로 물이 침투되는 경우, 이 침투력은 어느 한계를 넘어서 흙속을 통과하는 침투수의 유속이 빨라지게 되고 토립자가 유실되어 파이핑이 발생한다. 파이핑의 특징은 파이핑이 진행되는 동안 제체는 제체 구성 재료의 결합력에 버티고 있다가 더 이상 버티지 못하고 급작스러운 붕괴로 나타나는 것이다.

#### 2.1.1 영향인자

Sherard(1953)는 사례 검토를 통해 제체의 재료특성이 균열과 파이핑에 미치는 영향을 분석하였다. 파이핑 피해를 입은 제방 10개와 지형조건이나 시공조건이 매우 취약하였음에도 불구하고 균열 피해를 입지 않은 제방 21개를 고려하였고, 이것을 통해 제방의 재료특성에 따른 균열과 표 1에서 보는 바와 같은 파이핑 영향인자를 선정하고 파이핑 저항등급에 대해 제안하였다.

#### 2.1.2 저항등급

파이핑의 저항등급은 균열과 동일한 방법으로 발생시기, 피해규모, 진행정도, 지속시간이 고려되었으며 재료의 입도와 소성도를 기본으로 다짐방법의 영향을 고려하여 파이핑 저항등급을 제안하였다(권교근 등, 2006). 파이핑에 가장 크

게 저항하는 재료, 중간정도로 저항하는 재료의 입도는 등급을 나누어 제안하였으며, 대단히 취약한 재료는 대표입도 곡선으로 제안하였다. 또한 소성도 기준에 대해서도 각각 제안하였다.

### 2.2 파이핑에 대한 평가 방법

일반적으로 파이핑에 대한 평가방법은 한계동수경사에 의한 평가방법과 한계유속에 의한 평가방법이 있다. 한계동수경사에 의한 평가방법은 Terazaghi의 이론식에 기초하여 검토하는데, 흙의 포화상태이거나 포화에 가까운 정상 침투 경우에만 성립하며, 방조제나 하천 제체와 같이 수위변화가 반복되는 경우에는 적용이 부적절하다. 한계동수경사는 입자 형상, 입도 분포, 점착력 등은 고려되지 않고 재료가 균질하며, 상향침투력에 의해 유효응력 0이 되는 조건으로 침투력과 유효응력이 서로 같게 된다. 이때의 동수경사를 한계동수경사라 하며, 한계동수경사는 식 (1)과 같이 표현한다.

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = (1 - n)(G_s - 1) \quad (1)$$

여기서,  $i_{cr}$  : 한계동수경사  
 $G_s$  : 토립자의 비중  
 $e$  : 간극비  
 $n$  : 간극률

동수경사가 한계동수경사에 이르면 앞서 말한바와 같이 흙의 유효응력은 0이 되므로 점착력이 없는 흙은 전단강도를 가질 수 없게 되며, 이때 파이핑이 발생하게 된다. 일반적으로 파이핑에 대한 안전율  $F_s$ 는 식 (2)와 같이 정의하며, 일반적으로 2.0 이상이면 파이핑에 대하여 안전한 것으로 판단한다.

$$F_s = \frac{i_{cr}}{i_{max}} \quad (2)$$

여기서,  $F_s$  : 안전율  
 $i_{max}$  : 최대동수경사

표 1. 파이핑 영향인자(Sherard, 1953)

파이핑에 영향을 미치는 요소	파이핑과의 연관성
세립분의 소성도와 투수성	저소성의 재료는 침식에 대한 저항능력이 작고 다짐불량으로 인한 투수성이 큰 침투대를 형성
제방 재료의 균질성	입경이 균등한 빈입도 재료일수록 대규모 포화대를 형성
다짐도	다짐불량은 어느 정도 소성을 기대할 수 있는 재료라 할지라도 결합력을 약화시켜 파이핑 저항능력이 크게 저하

한편, 한계유속에 의한 평가 방법은 투수계수에 따른 한계유속을 설정하여 파이핑의 발생 여부를 결정하는 경험적 요소가 포함된 이론적 방법이며 경험적으로 입증된 방법이다. 흙 입자의 유동이 시작되는 한계유속에 대한 연구는 Justin(1936)에 의하여 시작된 후, Sughii 등(1989)에 의하여 연구되었다. Justin(1936)은 제체 및 기초의 토립자가 소류력에 의하여 입자가 밀려나가는 한계 침투유속을 식 (3)으로 구하고 입자는 그 한계치를 넘으면 파이핑이 발생한다고 본다.

$$V = \sqrt{\frac{W \cdot g}{A \cdot \gamma_w}} \quad (cm/sec) \quad (3)$$

여기서,  $W$  : 토립자의 수중 중량

$A$  : 물의 흐름을 받는 토립자의 면적

$\gamma_w$  : 물의 단위중량

$g$  : 중력 가속도

Sughii 등(1989)은 토립자의 소류력(또는 토립자의 침강속도)을 바탕으로 하여 한계유속을 제안하였다. 토립자의 자유침강유속을 한계유속으로 생각할 경우 식 (4)와 같다.

$$V_c = \frac{1}{18v} \cdot (G_s - 1) \cdot d^2 \cdot g \quad (4)$$

여기서,  $d$  : 유효입경(D10)

$v$  : 동점성계수

### 3. 수치해석

#### 3.1 수치해석 대상 구조물 개요

파이핑 사례는 낙동강 본류에 위치한 A제, B제, C제, D제, 금호강 본류에 위치한 E제, F제를 대상으로 하였다. A제는 전 구간이 기성제 구간이나 제방축조 시기가 약 30년 이상으로 제체상태가 불량한 상태이다. A제는 제내지측에 제체 침투로 인한 비탈면 붕괴 현상 및 침투수에 의한 파이핑이 발생한 현장이다. B제는 제내지측 비탈면부에 침투로 인한 비탈면 붕괴 현상 및 제내지측 농경지 지반 표면에 A제와 같이 보일링 현상이 관찰되었다. C제는 1992년 축제가 완료된 제방으로 제체에 누수가 발생한 현장이다. D제는 1992년 축제가 완료된 제방으로 여유고 3.0m 내외, 길이는 1,580m이며 제체 누수로 인한 비탈면 붕괴 및 파이핑이 발생하였다. E제는 1989년에 축조된 제방으로써 본 구간은 여유고 부족 구간 및 제체 누수 구간이 일부 있으나 대부분은

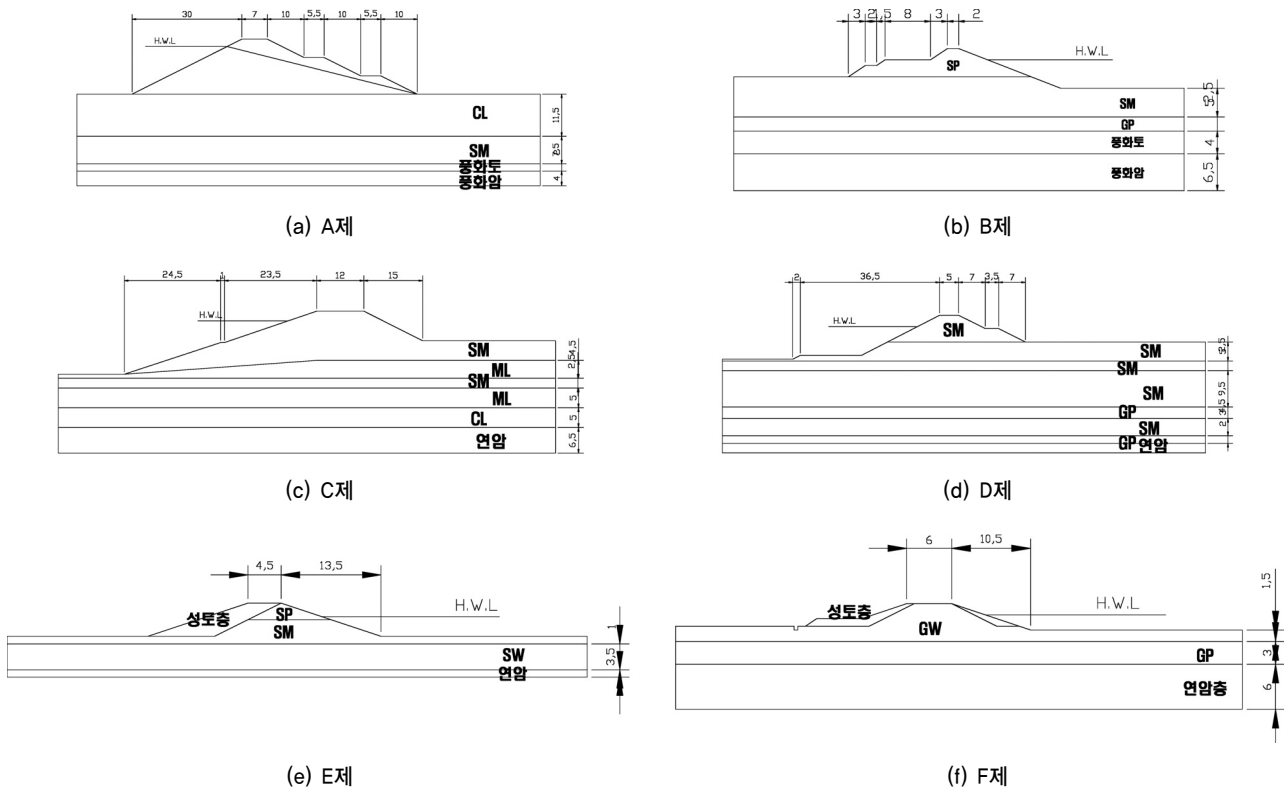


그림 1. 사례 검토대상 제방 조건

독마루 폭이 부족하며 토사호안 및 호안블럭이 설치되어 있으나 상태가 불량하여 고수호안 정비가 요구된다. F제는 1956년에 설치된 제방으로써 제방상태는 매우 노후화되어 있고, 독마루 폭이 3.0~3.5m로 부족한 상태이며, 제방의 독마루에는 콘크리트로 포장을 하여 마을 주민들이 활용하고 있고 제외지 비탈면에는 호안이 설치되어 있지 않으며 비탈면 경사가 1:2.0으로 하천설계기준의 비탈면 경사에 미치지 못하고 있다. 현장조사 확인 결과 주변 제내지 지반에서 홍수 시 파이핑이 발생하는 것으로 나타났다. 그림 1은 사례 검토대상의 제방 조건을 보여주고 있다.

### 3.2 침투해석 및 검토조건

하천제방 침투해석 결과에 대한 투수계수 변화에 따른 영향 검토를 위하여 파이핑이 발생한 낙동강 및 금호강 하천제방사태에 적용하여 원설계결과 타당성 검토, 문헌자료 투수계수 사용에 따른 안정성 평가, 기초지반 투수계수변화에 따른 안정성 검토를 다음과 같이 수행하였다. 첫째, 원설계결과 타당성 검토는 원설계보고서의 지반 물성치 및 해석조건을 사용하여 제내지 최대침투유속이 발생하는 지점에서 동수경사법에 의한 파이핑 안정성 평가를 수행하고 원설계보고서의 안정성 평가 결과와 비교하여 타당성 검토를 수행하였다. 둘째, 문헌자료 투수계수 사용에 따른 안전성 평가는 해석 단면의 지반 물성 실험 자료가 전혀 없을 경우에 대한 문헌값 사용에 따른 영향 평가를 위하여 제체 및 기초지반의 투수계수를 NAVFAC(2000)기준과 기존 하천제방 설계자료 등 문헌 값만을 적용하여 파이핑 안전성 검토를 실시하였다. 셋째, 기초지반 투수계수 변화에 따른 안전성 검토는 기초지반 투수계수의 문헌 값 사용에 따른 문제점

제시를 위하여 기초지반 투수계수를 문헌 값 범위에서 변화시키고 제체 및 하부 기초지반의 경우 설계보고서의 투수계수를 사용하여 파이핑 안정성 검토를 수행하였다.

검토를 위해 원설계 문헌의 안정해석 결과와 비교하기 위하여 2차원 침투해석 프로그램 SEEP/W(Geo-slope, 1998)을 사용하였는데, SEEP/W는 모관흡수력에 따라 변화하는 체적함수비와 투수계수를 고려하여 시간에 따른 침투 현상을 해석하고 불포화토층의 수두와 수압의 분포를 계산할 수 있는 장점을 지닌 상용프로그램이다. 침투해석 시 침투수가 집중되는 유출부 영역을 세분화하여 침투유속과 국소 동수경사를 평가한 후 실제 파이핑이 발생한 지점에 대해 한계 동수경사에 의해 파이핑 안정 검토를 하였다. 안정성 여부는 댐설계기준(국토해양부, 2005) 및 하천설계기준(한국수자원학회, 2002)과 동일한 NAVFAC(2000)의 최소안전율 2.0을 적용하여 판단하였다. 또한 침투해석 시 요소의 크기는 일본하천설계기준(건설성, 2000)에서는 분할요소의 최소 두께를 제방 높이의 1/10 이하로 적용하는 것을 제안하고 있는데, 이를 본 해석에 적용하였다. 경계조건은 제체의 밑바닥은 불투수층으로 가정하였고, 설계 시 적용 기준 안전율은 하천설계기준(한국수자원학회, 2002)에서 제시한 한계동수경사법에 의한 기준안전율 2.0을 사용하는 것으로 검토하였고, 원설계 수위조건은 8개 설계 자료 모두 계획홍수위에 대한 정상침투 상태로 검토하였다. 한편, 제체의 기초지반의 투수계수 및 물성치는 원설계문헌 값을 근거로 하여 표 2와 같이 적용하여 해석을 수행하였다. 이때, 기초하부 지반인 풍화토 및 풍화암층의 투수계수는 원설계문헌에 제시되어 있지 않아 다른 현장의 설계에서 일반적으로 사용되는 문헌 값에 의한 투수계수를 적용하였다.

표 2. 영향인자 검토에 적용된 투수계수(계속)

구분		원설계 및 설계검토 (역해석)(cm/sec)	문헌자료 (cm/sec)	기초지반변화 (cm/sec)
A제	제체	실트질 모래(SM)	$1.75 \times 10^{-3}$	$1.75 \times 10^{-3}$
	기초지반	세립 모래섞인 실트질 점토(CL)	$2.60 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-6}$
				$1.00 \times 10^{-7}$
				$1.00 \times 10^{-8}$
	기초하부지반	실트섞인 세립 내지 중립 모래질 자갈(SM)	$2.60 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$
풍화토		$1.00 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-5}$
	풍화암	$1.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-6}$
B제	제체	실트 및 자갈질 모래(SP)	$2.02 \times 10^{-2}$	$2.02 \times 10^{-2}$
	기초지반	실트질 모래(SM)	$4.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-3}$
				$1.00 \times 10^{-4}$
				$1.00 \times 10^{-5}$
	기초하부지반	모래질 자갈(GP)	$1.21 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-1}$
풍화토		$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-5}$
	풍화암	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-6}$

표 2. 영향인자 검토에 적용된 투수계수

구분		원설계 및 설계검토 (역해석)(cm/sec)	문헌자료 (cm/sec)	기초지반변화 (cm/sec)	
C제	제체	실트질 모래(SM)	$1.50 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-4}$	
	기초지반	실트질 모래(SM)	$1.50 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-4}$	
					$1.00 \times 10^{-3}$
					$1.00 \times 10^{-4}$
					$1.00 \times 10^{-5}$
	기초하부지반	실트(ML)	$3.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-6}$
		실트질 모래(SM)	$1.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-4}$
실트(ML)		$3.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-6}$	
저소성 점토(CL)		$1.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-6}$	
연암		$1.00 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-7}$	
D제	제체	실트질모래(SM)	$6.15 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-4}$	
	기초지반	실트질모래(SM)	$6.02 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-4}$	
					$1.00 \times 10^{-3}$
	기초하부지반	실트질모래(SM)	$6.02 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$6.02 \times 10^{-3}$
		실트질모래(SM)	$3.82 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$3.82 \times 10^{-3}$
		모래질 자갈(GP)	$1.00 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-2}$
		모래질 자갈(GP)	$1.00 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-2}$
모래질 자갈(GP)		$1.00 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-2}$	
연암	$1.00 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-7}$		
E제	제체	실트질 모래(SM)	$2.74 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-4}$	
	하부제체	자갈질 모래(SP)	$1.80 \times 10$	$1.00 \times 10^{-1}$	
	기초지반	실트질 모래(SM)	$1.80 \times 10$	$1.00 \times 10^{-4}$	
					$1.00 \times 10^{-3}$
	기초하부지반	모래질 자갈(SW)	$3.60 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-1}$	$3.60 \times 10^{-1}$
연암		$1.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-6}$	
F제	제체	실트질 모래(SM)	$2.74 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-4}$	
	기초지반	자갈 및 자갈 질 모래(GW)	$1.80 \times 10$	$1.00 \times 10^{-2}$	
				$1.00 \times 10^{-1}$	
기초하부지반	모래질 자갈(GP)	$1.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-6}$	

## 4. 수치해석결과 및 분석

### 4.1 원설계결과의 타당성 평가

원설계결과 타당성 검토는 기존 설계문헌의 지반 물성치 및 해석조건을 사용하여 제내지 최대침투유속이 발생하는 지점에서 동수경사법에 의한 파이핑 안정성 평가를 수행하고 기존 문헌의 안정성 평가 결과와 비교하였다. 그 결과 파이핑에 대한 안전율은 표 3에서 보는 바와 같이 A제의 경우 문헌에 의한 투수계수 범위에 대해 안전율이 1.62로 나타났고, E제의 경우는 투수계수 범위에 대해 0.78로 A제 E제 둘 다 기준 안전율 2.0을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, 투수계수 증가에 따라 동수경사가 감소하여 파이핑에

대한 안전율이 증가하는 것으로 평가되었다.

B제, C제, D제의 경우 문헌자료에 의한 검토결과 각각의 최소안전율이 2.06, 6.07, 2.56으로 안정한 것으로 검토되었는데, 기초지반의 투수계수 범위에 대한 검토 결과 B제의 경우는 투수계수 감소 시 동수경사가 증가하여  $1.00 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$  이하의 투수계수의 경우 기준 안전율 2.0을 만족하지 못하는 것으로 평가되었다. 또한 C제의 경우는 전체적으로 기준 안전율 2.0을 만족하는 것으로 평가되었고, D제의 경우는 투수계수 감소 시 동수경사가 증가하는 경향을 나타냈는데,  $1.00 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$  이하의 경우 기준 안전율 2.0을 만족하지 못하는 것으로 평가되었다. F제의 경우는 문헌자료에 의한 검토 결과 안정한 것으로 검토되었고, 투수계수 범위에 대한 검토 결과 투수계수 감소 시 동수경사가 증가하는 경향

표 3. 한계동수경사 검토 결과

구분		최대동수경사( $i_{max}$ )	한계동수경사( $i_c$ )	안전율( $i_c / i_{max}$ )	판정	
A제	원설계	0.40	0.97	2.43	O.K	
	설계검토	0.46	0.97	2.11	O.K	
	문헌자료	0.60	0.97	1.62	N.G	
	기초지반 변화 (cm/sec)	$1.00 \times 10^{-6}$	0.93	0.97	1.04	N.G
		$1.00 \times 10^{-7}$	0.99	0.97	0.98	N.G
$1.00 \times 10^{-8}$		1.0	0.97	0.97	N.G	
B제	원설계	0.47	0.91	1.94	N.G	
	설계검토	0.44	0.91	2.06	O.K	
	문헌자료	0.44	0.91	2.06	O.K	
	기초지반 변화 (cm/sec)	$1.00 \times 10^{-3}$	0.41	0.91	2.22	O.K
		$1.00 \times 10^{-4}$	0.47	0.91	1.94	N.G
$1.00 \times 10^{-5}$		0.51	0.91	1.78	N.G	
$1.00 \times 10^{-6}$		0.53	0.91	1.72	N.G	
C제	원설계	0.54	0.91	1.68	N.G	
	설계검토	0.77	0.91	1.18	N.G	
	문헌자료	0.15	0.91	6.07	O.K	
	기초지반 변화 (cm/sec)	$1.00 \times 10^{-3}$	0.07	0.91	13.00	O.K
		$1.00 \times 10^{-4}$	0.09	0.91	10.11	O.K
$1.00 \times 10^{-5}$		0.18	0.91	5.06	O.K	
$1.00 \times 10^{-6}$		0.31	0.91	2.94	O.K	
D제	원설계	0.25	1.00	4.00	O.K	
	설계검토	0.23	1.00	4.35	O.K	
	문헌자료	0.39	1.00	2.56	O.K	
	기초지반 변화 (cm/sec)	$1.00 \times 10^{-3}$	0.50	1.00	2.00	O.K
		$1.00 \times 10^{-4}$	0.70	1.00	1.43	N.G
$1.00 \times 10^{-5}$		0.90	1.00	1.11	N.G	
$1.00 \times 10^{-6}$		1.00	1.00	1.00	N.G	
E제	원설계	0.20	0.90	4.50	O.K	
	설계검토	0.18	0.90	5.00	O.K	
	문헌자료	1.15	0.90	0.78	N.G	
	기초지반 변화 (cm/sec)	$1.00 \times 10^{-3}$	1.04	0.90	0.87	N.G
		$1.00 \times 10^{-4}$	1.27	0.90	0.71	N.G
$1.00 \times 10^{-5}$		1.38	0.90	0.65	N.G	
$1.00 \times 10^{-6}$		1.40	0.90	0.64	N.G	
F제	원설계	0.21	0.90	4.29	O.K	
	설계검토	0.12	0.90	7.50	O.K	
	문헌자료	0.12	0.90	7.50	O.K	
	기초지반 변화 (cm/sec)	$1.00 \times 10^0$	0.08	0.90	11.25	O.K
		$1.00 \times 10^{-1}$	0.11	0.90	8.18	O.K
$1.00 \times 10^{-2}$		0.21	0.90	4.29	O.K	

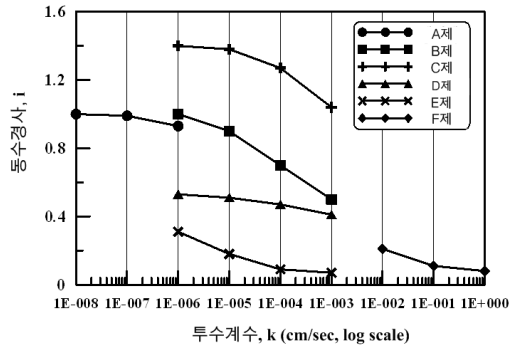
을 나타냈으며, 전체적으로 기준 안전율 2.0을 만족하는 것으로 평가되었다.

이를 통해 원설계 타당성 검토 결과는 분석대상 8개 설계 자료 중 5개 현장의 경우 원설계 자료를 이용한 재해석 결과 파이핑에 대한 안전율이 증가하는 것으로 나타났으며, 원설계 자료를 이용한 재해석 결과 수치적 차이는 발생하지

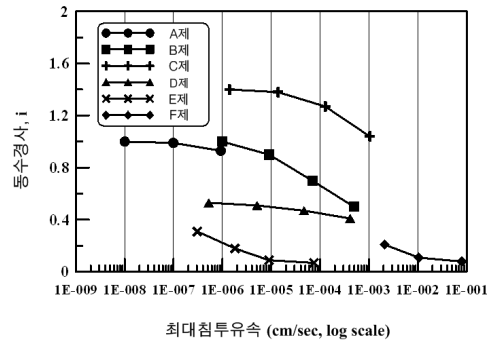
만 안정성 검토 결과는 타당한 것으로 판단되었다.

#### 4.2 투수계수 문헌자료 사용에 따른 안전성 평가

문헌자료 투수계수 사용에 따른 안전성 평가는 해석 단면의 지반 물성 실험 자료가 전혀 없을 경우에 대한 문헌값 사용에 따른 영향 평가를 위하여 제체 및 기초지반의 투수



(a) 투수계수와 동수경사 관계



(b) 최대침투유속과 동수경사의 관계

그림 2. 기초지반 투수계수 및 침투유속과 동수경사의 관계

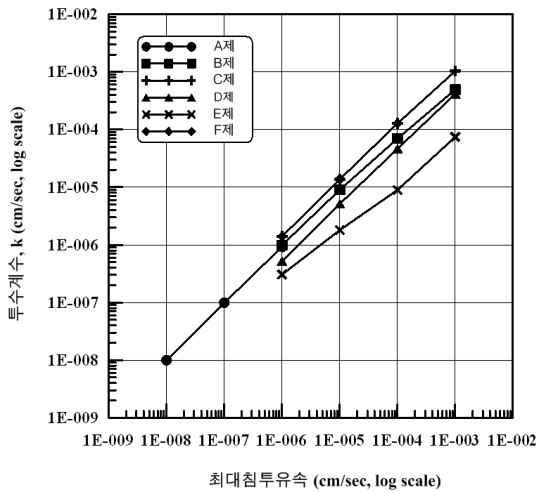


그림 3. 투수계수와 최대침투유속의 관계

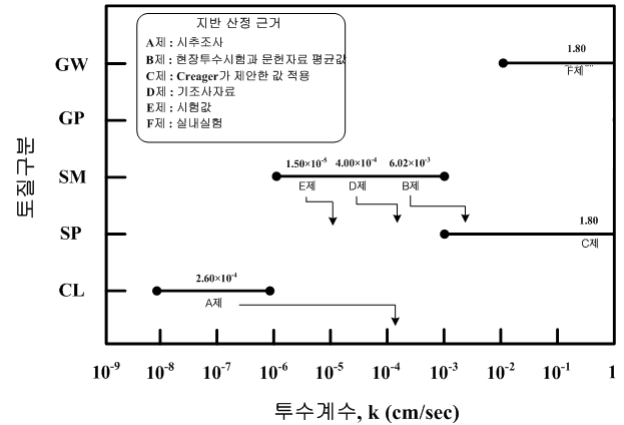


그림 4. 문헌에 의한 토질 별 투수계수범위와 원설계에 반영된 투수계수 비교

계수를 NAVFAC(2000)기준과 기존 하천제방 설계자료 등 문헌 값만을 적용하여 파이핑 안전성 검토를 실시한 결과, 검토제방의 기초지반 투수계수 및 침투유속과 동수경사의 관계는 그림 2에서 보듯이 A제와 유사하게 침투유속은 기초지반 투수계수에 비례하고, 동수경사는 투수계수와 침투유속에 반비례하는 것으로 평가되었다.

한편, 투수계수와 침투유속의 비례관계는 그림 3에서 보는 바와 같이 투수계수의 증가에 비해 침투유속의 증가가 상대적으로 작게 나타났다. 따라서 각 투수계수 별 동수경사는 Darcy의 법칙에 따라 투수계수가 증가할 경우 상대적으로 작은 침투유속의 영향에 의해 오히려 감소하는 것으로 평가되었다.

### 4.3 기초지반의 투수계수 변화에 따른 안전성 평가

기초지반 투수계수 변화에 따른 안전성 검토는 기초지반 투수계수의 문헌 값 사용에 따른 문제점 제시를 위하여 기초지반 투수계수를 문헌 값 범위에서 변화시키고 제체 및 하부 기초지반의 경우 설계문헌의 투수계수를 사용하여 파이핑 안정성 검토를 수행한 결과, 투수계수 감소 시 오히려 동수경사가

증가하여 A제, B제, D제, E제 등 4개 현장의 경우 파이핑에 대한 기준 안전율 2.0을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 기초지반의 투수계수는 파이핑 안전율에 큰 영향을 주므로 실험에 의한 투수계수를 사용하여야 할 것으로 판단된다.

또한, 그림 4에서 보는 바와 같이 A제의 경우에는 기초지반이 CL로서 투수계수의 범위는 일반적으로  $10^{-8} \sim 10^{-6}$  cm/sec의 범위에 속하는데, 설계 시 사용된 투수계수는  $2.60 \times 10^{-4}$  cm/sec로 SM의 투수계수 범위에 속하는 값을 사용한 것으로 나타났다. 또한, 기초지반이 SM으로 동일한 B제, E제, D제의 경우 중, B제는 기초지반의 투수계수 값을 SP 범위에 속하는 투수계수 값을 사용한 것으로 나타났다. 이것은 설계 시에 파이핑 안전율에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되어 문헌자료의 적용에 의한 제방의 안정성 검토는 반드시 실험에 의한 물성치를 사용하여야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서 실시한 기존 설계결과의 타당성 검토, 문헌 자료에 의한 물성치 사용에 따른 안정성 평가 그리고 기초

지반 투수계수변화에 따른 파이핑 안정성 검토를 통하여 하천제방 침투해석 결과에 대한 투수계수 변화에 따른 영향을 평가하고, 합리적인 투수계수 적용에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 원설계 타당성 검토 결과는 분석대상 6개 설계 자료 중 5개 현장의 경우 원설계 자료를 이용한 재해석 결과 파이핑에 대한 안전율이 증가하는 것으로 나타났으며, 원설계 자료를 이용한 재해석 결과 수치적 차이는 발생하지만 안정성 검토결과는 타당한 것으로 판단되었다.
- (2) 문헌자료에 제체 및 기초지반 물성치 적용에 의한 안전성 검토 결과 D제, F제의 경우 원설계와 동일하게 기준 안전율 2.0을 만족하는 것으로 나타났고, A제, E제 등 2개 현장의 경우 원설계에서 기준안전율 2.0을 만족하나 문헌자료 적용에 의한 검토 결과 기준안전율 2.0을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, B제, C제 등 2개 현장의 경우 원설계에서 기준안전율 2.0을 만족하지 못하나 문헌자료 적용에 의한 검토 결과 기준안전율 2.0을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 문헌자료의 적용 시 안전율에 큰 영향을 주는 것으로 나타나 하천제방의 건전도 평가 시에는 반드시 실험에 의한 물성치를 사용하여야 할 것으로 판단된다.
- (3) 기초지반의 투수계수를 문헌에 의한 투수계수 범위에 대해 변화시키며 수행한 파이핑 안정성 검토 결과, 투수계수 감소 시 오히려 동수경사가 증가하여, 4개 현장의 경우 파이핑에 대한 기준 안전율 2.0을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 기초지반의 투수계수는 파이핑 안전율에 큰 영향을 주므로 실험에 의한 투수계수를 사용하여야 할 것으로 판단된다.
- (4) 영향인자 평가 결과 설계 시 사용되는 투수계수는 동일한 토질에 대해서도 설계문헌에 따라 상이한 것으로 나타났으며, 검토 결과 파이핑 안전율에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 따라서, 문헌자료의 적용에 의한 제방의 안정성 검토는 투수계수, 간극비 등 여러 가지 변

화인자에 의해 안정성 평가결과를 좌우할 수 있는 사항으로 하천제방의 건전도 평가 시에는 반드시 실험에 의한 물성치를 사용하여야 할 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. 국토해양부(2005), *댐설계기준*, 한국수자원학회, pp. 130~137.
2. 건설성 하천국(2000), *일본하천제방설계지침*, 제3고, pp. 221~245.
3. 권교근, 한상현(2006), 우리나라 하천제방에 대한 내부 침식 파괴연구, *대한토목학회 논문집*, Vol. 26, No. 1C, pp. 32~42.
4. 이종태, 이상태(2001), 하천제방 붕괴 양상의 실험적 연구(II)-축조재료 및 다짐도의 영향, *한국수자원학회 논문집*, Vol. 34, No. 2, pp. 155~167.
5. 정형식, 이승호(1998), 제방형태에 따른 제체사면의 안정검토에 관한 연구, *1998 사면안정 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, pp. 147~160.
6. 한건연, 박제홍, 이종태(1995), 1990년 9월 일산제 제방붕괴에 따른 범람홍수파의 해석, *1995년도 학술발표회 논문집(II)*, 대한토목학회, pp. 45~48.
7. 한국건설기술연구원(2004), *하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서*, 건설교통부, pp. 331~352.
8. 한국수자원학회(2002), *하천설계기준*, pp. 182~215.
9. Fujita, Y., Tamura, T., Muramoto, Y.(1984), Experiments on Enlarging Process of River Bank Breaches, *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, Vol. 27, No. B-2, pp. 369~392.
10. Geo-slope(1998), *User's Guide for SEEP/W, version 5*, Geo-slope International Ltd, Canada, pp. 187~244.
11. Justin, J. D.(1936), *Earth Dam project*, Wiley, New York, p. 1.
12. NAVFAC(2000), *Foundation & Earth Structures*, Design Manual 7.2, pp.38~43.
13. Sherard, J. L.(1953), *Influence of Soil Properties and Construction Methods on the Performance of Homogeneous Earth Dams*, Technical Memorandum 645, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, pp. 1~71.
14. Sughii, T. O., Asto, D., Woono, D. O., Yamada, S. G.(1989), Process of Seepage Failure and Effect of Hetro Geneity in Soil(Japaness), *Soil and Foundation*, Vol. 6, No. 4, pp. 17~22.
15. Uno, T., Morisugi, H., Sugii, T., Nakano, Y.(1988), Stability Evaluation of River Levees on the Basis of Actual Levee Breachings, *Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 400, No. 3-10, pp. 161~170.

(접수일: 2010. 5. 6 심사일: 2010. 6. 10 심사완료일: 2010. 9. 27)