



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

제내 비탈끝 유공관을 이용한
제방 침투 조절에 관한 연구



2014년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

서현규

공학석사 학위논문

제내 비탈끝 유공관을 이용한
제방 침투 조절에 관한 연구

지도교수 이 상 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2014년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

서 현 규

서현규의 공학석사 학위 논문을 인준함.

2014년 2월 21일



주 심 공 학 박사 김 수 한 (인)

위 원 공 학 박사 이 종 섭 (인)

위 원 공 학 박사 이 상 호 (인)

목 차

표 목차	vi
그림 목차	viii
Abstract	x
1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 동향	2
1.3 연구 내용 및 방법	3
2. 침투에 의한 제방파괴	4
2.1 제방 파괴 유형	4
2.2 국내·외 제방 관련 설계기준 비교	6
2.3 제방 침투	10
2.4 유공관에 의한 누수 방지	17
2.4.1 누수 방지 대책	17
2.4.2 연구에서 적용한 유공관을 이용한 누수 방지 대책	22

3. 유공관을 이용한 제방 침투 조절 실험 25

3.1 제방과 유공관의 설계 25	25
3.1.1 실험용 제방 설계 25	25
3.1.2 유공관 규격 설계 28	28
3.1.3 제체 및 유공관의 재료 32	32
3.2 유공관을 이용한 제방 침투 조절 실험의 수행 34	34
3.2.1 침투 조절 실험의 수행 방법 34	34
3.3 유공관 설치 높이에 따른 침윤선 양상 39	39
3.4 유공 크기에 따른 침윤선 양상 41	41

4. 유공관을 이용한 제방 침투의 수치모의 43

4.1 침투해석 프로그램 비교 43	43
4.2 SEEP/W 45	45
4.2.1 SEEP 의 소개 45	45
4.2.2 해석해에 의한 방법 45	45
4.2.3 지배방정식 47	47
4.2.4 유한요소법 50	50
4.3 침투 해석 및 모형의 보정 52	52
4.3.1 입력자료 및 모의조건 52	52
4.3.2 SEEP/W 모형의 보정 53	53
4.4 SEEP/W 모형의 결과 검증 59	59
4.5 SEEP/W 모형 검증의 활용 62	62

4.5.1 유공관 미설치 시 침투 모의 62

4.5.2 체내 비탈끝부터 유공관 중심의 위치별 침투 모의 62

4.5.2 기초지반 표면부터 유공관 중심의 높이별 침투 모의 64

4.6 무차원 지표 66

4.7 유공관의 효과 68

5. 결론 및 향후 연구 69

6. 참고문헌 72



표 목차

표 2.1 제방 붕괴 원인별 세부 유형 분류	5
표 2.2 국내·외 제방 단면 결정 기준 비교	8
표 2.3 제방 침투에 대한 안전성 평가 방법	12
표 2.4 입경별 한계 유속	14
표 2.5 Mononobe 경험식 계수값	16
표 2.6 침투의 형태와 특성	19
표 2.7 제방에 적용하는 대표적인 누수 방지 대책	20
표 2.8 기초지반에 적용하는 대표적인 누수 방지 대책	21
표 3.1 실험용 제방의 설계 제원	27
표 3.2 실험용 제방의 설계	29
표 3.3 시료의 투수시험 결과	32
표 3.4 시료의 입도분석시험 결과	33
표 4.1 침투해석 프로그램 비교	44
표 4.2 침윤선 유출경계면 및 단위 유출량 결정 방법	46
표 4.3 수위 60 cm 제방의 침투 모의 모형의 보정결과	56
표 4.4 수위 70 cm 제방의 침투 모의 모형의 보정결과	57
표 4.5 제방실험과 침투 모의 모형의 보정결과 RMSE	57
표 4.6 수위 80 cm 제방의 침투 모의 모형의 검증결과	59
표 4.7 수위 85 cm 제방의 침투 모의 모형의 검증결과	60
표 4.8 제방실험과 침투 모의 모형의 검증결과 RMSE	60
표 4.9 한계동수경사와 산출된 동수경사 비교(거리별)	64

표 4.10 한계동수경사와 산출된 동수경사 비교(높이별) 65
표 4.11 제내 비탈끝부터 유공관 중심의 거리와 제방저폭의 관계 지표 66
표 4.12 기초지반 표면부터 유공관 중심의 높이와 제방고의 관계 지표 67



그림 목차

그림 2.1 침투과괴 모식도 (한국건설교통기술평가원, 2004)	11
그림 2.2 Mononobe 경험식 개요도	15
그림 2.3 배수공의 형상	23
그림 2.4 본 연구에서 제시한 유공관 형상	24
그림 3.1 위압수두의 측정위치	26
그림 3.2 위압수두 측정용 위압수두계와 줄자 설치	26
그림 3.3 실험용 제방의 형상	27
그림 3.4 실험용 제방의 설계(유공관의 위치)	30
그림 3.5 유공관을 포함한 제방	31
그림 3.6 입도분포도곡선	33
그림 3.7 위압수두계의 수두	35
그림 3.8 실험-1의 침윤선	36
그림 3.9 사면이 젖은 상태(실험-1)	36
그림 3.10 실험-2의 침윤선	37
그림 3.11 사면 붕괴 상태(실험-2)	37
그림 3.12 실험-3의 침윤선	38
그림 3.13 사면이 마른 상태(실험-3)	38
그림 3.14 유공관 설치 높이에 따른 침윤선	40
그림 3.15 유공 크기에 따른 침윤선	42
그림 4.1 침윤선 해석기법	46
그림 4.2 침투해석 제방 단면	52

그림 4.3 투수성의 방향의존성 53

그림 4.4 여러 가지 흙에 대한 간극비와 이방성비 관계 54

그림 4.5 투수계수-간극수압 관계 그래프 55

그림 4.6 수위 60 cm의 실험과 침투 모의 모형의 보정결과 비교 58

그림 4.7 수위 70 cm의 실험과 침투 모의 모형의 보정결과 비교 58

그림 4.8 수위 80 cm의 실험과 침투 모의 모형의 검증결과 비교 61

그림 4.9 수위 85 cm의 실험과 침투 모의 모형의 검증결과 비교 61

그림 4.10 유공관 미설치 시 침투 모의 결과 62

그림 4.11 제내 비탈끝부터 유공관 중심의 위치별 침투 모의 결과 63

그림 4.12 기초지반 표면부터 유공관 중심의 높이별 침투 모의 결과 ... 65



A study for seepage control of levee by
the perforated drainpipe around landside toe

Hyeongyu Seo

Department of Civil Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The levee is the facility which is constructed along with a river for the protection of landside and for passage of water when there is a flood. When the seepage is exposed to the atmosphere on the landside surface of levee, it may eventually lead to levee failure. The seepage water may be removed from the landside surface by a properly designed drainage system. The purpose of the study is to show seepage control potential of levee by a perforated drainpipe by hydraulic experiments. The experimental levee has the following dimension: the bottom width is 2.8 m; the top width is 0.4 m; the levee body height is 0.6 m; the side slop is 1:2; and the foundation ground depth is 0.3 m. The test cases were performed with the four stages of 0.6, 0.7, 0.8, and 0.85 m at the riverside and the piezometric heads on the levee bottom were measured. The position of a perforated drainpipe greatly affected the seepage through levee body. The larger the perforation area got, the lower the phreatic surface

level was. The experiment results were used for the calibrations and verifications of SEEP/W model. The perforated drainpipe for seepage control might be more economical than covering method. Elements of the perforated drainpipe may be made in a factory and it can reduce the construction period.

Keywords: seepage control, levee, perforated drainpipe, hydraulic experiment, SEEP/W



1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

제방은 유수를 원활하게 소통시키고 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 흙으로 축조한 공작물이다(한국수자원학회, 2009). 국민의 재산과 생명의 보호를 목적으로 하는 제방은 충분히 안전하게 건설되어야 한다. 하지만 2002년 8월 낙동강 유역의 장기홍수, 2002년의 태풍 루사와 2003년의 태풍 매미 등의 홍수는 강원도와 낙동강 유역에 설치된 다수의 제방을 붕괴 시켰고, 이후 제방의 중요성이 부각되었다. 여전히 홍수로 인한 제방의 붕괴는 수재해의 주요 관심사이다.

국토개발기술연구센터의 문헌(國土開發技術研究センター, 2002)과 윤광석(2004) 등 다수의 문헌에 의하면, 제방의 붕괴 유형은 월류에 의한 붕괴, 침식에 의한 붕괴, 활동파괴에 의한 붕괴, 침투나 누수에 의한 붕괴 등이 있다. 1987~2003년까지의 제방붕괴는 758건 발생하였으며, 월류로 인한 붕괴는 300건(39.6%), 침식에 의한 붕괴 259건(38.9%)에 해당한다(윤광석, 2006). 과거와 달리 극한홍수의 발생빈도가 높아짐에 따라 제방의 안전성 확보 방안에 대한 적극적인 검토가 필요하다.

본 논문에서는 제방의 침투 파괴 중 제체의 침투 파괴 방지를 위한 기술의 하나인 유공관을 이용한 침투 조절(seepage control)에 관한 내용을 다루고 있다. 본 논문의 목적은 단면 확대공법과 피복공법에 비해 상대적으로 경제적이고 시공이 간단한 유공관을 이용한 침투 조절 기법을 소개하고 제방 실험과 수치모의를 통해 해당 기술의 효과를 확인하는데 있다.

1.2 연구 동향

본 논문의 주제와 관련된 연구동향을 살펴보면 정형식 등(1989)은 홍수시 제방의 침윤선의 변화에 따른 제체누수에 대한 연구를 통하여 제방의 설계 시 적용되는 인자들의 영향을 검토하였고, 김상규 등(1992)은 관공(piping)의 실제 사례를 경험적 그리고 실험적으로 원인을 규명하고자 하였다. 신방웅 등(2000) SEEP/W 모형을 사용하여 적용 물성치와 경계 조건, 대상제체의 침윤선 변화, 단명선정에 따른 침투해석을 수행하였다. 강명수(2004)는 낙동강 중·하류부 하천 제방을 대상으로 SEEP/W모형으로 침투 해석을 하였다. 임동균 등(2005)은 정상류 상태의 침투 현상에 대한 SEEP/W, Z_SOIL, SEEP2D 모형의 예측 결과를 비교하였다. 한국건설교통기술평가원(2006)은 SEEP/W 모형을 이용한 침투 보장 기법의 수치모의를 수행하였으며, 최정진(2007)은 제방 누수에 대한 파괴방지 대책으로 차수벽의 위치에 따라 제방 안정성을 평가하고 SEEP/W 모형으로 수치 모의를 수행하였다. 박윤환(2008)은 제방현장의 시료에 대한 상수를 추정하고 하고 SEEP/W 모형을 이용하여 수치 모의 후 제방의 안정성 평가를 하였다.

국외의 연구 동향으로는 Uno 등(1988)은 제방의 안정성 평가를 위해 제방 붕괴 조사를 하였고, 1994년에는 홍수의 재현기간을 고려하여 제방의 안정성을 평가하였다. 中島秀雄(2003)은 침투 현상을 규명하기 위해 제방실험을 수행하였고, 강우, 제방의 피복재료, 그리고 포화도 등이 침투에 미치는 영향을 분석하였다.

1.3 연구 내용 및 방법

우리나라에서는 제체의 침투에 의한 제방 파괴 방지를 위한 단면 확대공법, 앞비탈 피복공법을 제시하고 있다(한국수자원학회, 2009). 그리고 단면 확대공법 가운데 제내지축 보강의 유형으로 기설 제체보다 투수성이 큰 재료를 사용하도록 제시하고 있다. 투수성이 큰 재료를 제내지축에 설치하여 배수를 촉진시킨다는 관점에서 보면 해당 기법이 유공관을 이용한 기법과 유사할 수 있다. 하지만 한국수자원학회(2009)에서 제시하는 제내지축 보강기법은 기본적으로 제방 단면을 키우는데 초점이 맞추어져 있으므로 유공관을 이용하는 기법과는 기술적, 경제적인 관점에서 다르다.

본 연구의 목적은 단면 확대공법과 피복공법에 비해 상대적으로 경제적이고 시공이 간단한 유공관을 이용한 침투 조절 기법을 소개하고 제방 실험과 수치모의를 통해 해당 기술의 효과를 확인하는데 있다. 이를 위해 연구에서 사용되는 제방실험 재료로는 확실한 침투를 위해 현장에서 채취한 흙을 모래와 1:1로 섞어 사용하였다. 실험용 제방의 축조 방법은 하천 설계 기준에 맞게 하도록 노력하였다.

실험은 네 가지 경우로 수행하였으며 실험별 수위를 4가지로 같게 적용하였다. 유공관의 유용성을 확인하는 것이기 때문에 정상류 상태의 침윤선 변화를 기록하였다.

수치해석은 GeoStudio 2004의 SEEP/W 모형을 사용하였다. 입력변수는 실험값의 물성치를 사용하였으며 경계조건은 제방실험과 동일한 일정 수위를 적용하였다.

2. 침투에 의한 제방파괴

2.1 제방 파괴 유형

제방 파괴의 원인은, 크게 제방 월류에 의한 파괴, 과도한 유속과 소류력에 의한 제방 침식 파괴, 제방 단면부실 및 연약 기초지반에 의한 누수 및 침하에 의한 파괴, 하천 구조물과의 접합부에서 발생하는 붕괴 등으로 구분할 수 있다. 한국건설교통기술평가원(2004)은 표 2.1과 같이 월류, 침식, 체체 불안정, 하천구조물에 의한 파괴 등 4가지로 제방 붕괴 원인을 구분하였다.

각 붕괴유형 중 월류는 다시 설계홍수량의 과소 책정과 집중호우와 같은 기상이변에 의한 제방고 등의 수리 단면적 부족, 토사나 유목으로 인한 통수능 저하, 교량의 교대 및 교각에 의한 통수단면적 감소에 의한 월류 등으로 세분될 수 있다. 침식은 하천의 급경사, 급격한 만곡에 의한 과도한 유속과 소류력에 의한 제방 세굴, 협소해지는 하폭 구간에서 발생하는 제방 세굴, 협소해지는 하폭 구간에서 발생하는 제방 세굴, 장기간의 하상변동 등에 의한 제방 하단부의 세굴 등으로 세분하여 분류되었다. 체체 불안정은 성토재료의 불량과 제방 표준 단면적의 부족, 체체 및 지반 누수에 의한 관공 현상, 제방기초의 침하와 같이 체체 불안정을 유발할 수 있는 제방 설계나 시공상의 문제점의 세부항목으로 분류되었다. 최근에 발생한 통관 주위의 제방 붕괴뿐만 아니라, 교량 붕괴 및 보 설치 지점에서 발생하는 붕괴도 제방의 안전성을 저하 시키는 요인이 되고 있다.

표 2.1 제방 붕괴 원인별 세부 유형 분류

파괴유형 분류		파괴 유형의 세부 분류		파괴 유형의 원인
A	월류	1	수리단면적의 부족	설계홍수량의 과소 책정, 과도한 홍수 등으로 하폭, 제방고 등 수리단면적의 부족으로 일부 구간 월류하여 제방이 손실, 파괴
		2	토석류 및 유목 등에 의한 통수능 저하	산사태 등에 의한 토석류 및 유목 등이 하천으로 유출되어 하도에 퇴적되거나 교량의 교각등에 걸쳐 하천 통수 단면적을 감소시켜 홍수가 제방의 일부 구간을 월류, 제방이 파손
		3	교량에 의한 통수능 저하	교량의 교대, 교각 등에 의해 하천 통수단면적이 감소하여 홍수가 제방을 월류하여 제방이 파손
B	침식	1	하천의 급경사, 급격한 만곡	과대한 유속과 소류력에 의하여 하천의 급경사, 급격한 만곡부 등의 제방 호안가 체체가 세굴 유실 또는 파괴
		2	협소해지는 하폭	상류의 하폭보다 하류의 하폭이 협소해지는 하천 구간에서 홍수류에 의해 제방 호안과 체체가 세굴 유실 또는 파괴
		3	제방 하단부 세굴	장기간에 걸친 하상변동 등에 의하여 고수부지가 유실되고 제외측 제방의 하단부분이 세굴되어 파괴
C	제체 불안정	1	성토 재료의 불량	제방의 축제성토의 재료가 하상물질인 모래와 모래 섞인 자갈 등이 그대로 이용되어 제방이 붕괴가 발생
		2	제체 표준 단면적 부족	제방폭이 좁거나, 범면경사가 급하여 침윤선 등의 발달에 의해 제방 파괴
		3	관공(piping) 현상	제방 하단부나 제체의 관공 현상으로 제방이 파괴
		4	제방 기초의 침하	연약 기초 지반 등으로 인하여 제방이 부등침하나 과도한 침하가 발생한 파괴
		5	시공 중이거나 불안정 상태	시공 중이거나 최근에 완공된 제방이 안정되지 않은 상태에서 하천수위 상승 등으로 제방의 일부가 유실 또는 파손
D	구조물에 의한 파괴	1	교량 파괴	교량이 파괴됨으로써 연속적으로 제방 일부가 파괴되는 현상
		2	하천구조물 접합부	콘크리트 구조물과 축제 등 제방의 흙과 다른 물질이 접합하는 부분에서 제방의 일부가 유실 또는 파손
		3	보 설치 지점	보가 설치된 지점에서 일반적으로 유속과 소류력이 급격히 증가되는데, 이로 인해 보의 양안 제방이 일부 유실되거나 파손

2.2 국내·외 제방 관련 설계기준 비교

제방 안전성에 가장 기본이 되는 요소는 제방 단면이다. 우리나라의 하천 제방은 특별한 경우를 제외하고는, 단면 형상(높이, 독마루 폭, 비탈 경사 등)을 하천 규모(계획 홍수량)에 상응하는 일률적인 표준단면으로 정하는 형상 규정 개념을 기본으로 설계되어 왔다. 제방설계에서 제방 단면의 크기를 결정하는 여러 가지 항목들 중 중요한 요소는 비탈경사이다. 이러한 형상 규정 설계 개념은 경험적인 판단을 근거로 한 것이다(한국수자원학회, 2009). 동일한 제체 높이와 독마루폭을 가지고 있다면 비탈경사는 완만할수록 제방의 안전도가 향상된다. 우리나라 경우, 2003년 이전에는 1:2 이하의 비탈경사를 원칙으로 하고 있었으나, 2003년 하천설계기준 개정 시 1:3 이하로 개정된 바 있고, 2009년 하천설계기준에서는 제체 높이가 0.5 m 이상인 제방의 경우에는 1:3으로 개정되었다.

표 2.2은 우리나라와 일본, 미국의 제방 단면 결정 기준을 비교(김규호와 윤광석, 2005)한 것이다. 일본은 河川堤防設計指針(建設省 河川堤防設計研究會, 2000)에서 1:3 이하의 완경사를 원칙으로 제시하고 있다. 일본의 경우도 이전에는 1:2의 비탈경사를 원칙으로 했으나, 수문량과 제체 자체의 불확실성을 보완하기 위하여 기준을 강화시킨 것으로 볼 수 있다. 미국의 경우 1:2 경사는 최소한의 경사로 안전성과 유지관리 측면에서 가능하면 완경사 제방을 설계하도록 하고 있다.

제방 여유고는 우리나라와 일본이 동일하게 계획홍수량에 따라 여유고를 결정하는데 비해 미공병단에서는 농경지의 제방과 도시지역의 제방을 구분하여 여유고에 차이를 두고 있다. 이는 치수안전도를 고려하여 여유고를 결정하는 것이다.

제체의 높이에 관한 규정의 경우, 우리나라와 일본은 관련된 규정 자체가 없는 반면에 미 공병단은 약 7.5 m(25 ft) 이하로 제한하고 있다. 미국의 이러한 제체의 높이에 대한 제한은 제체의 안전성을 확보한다는 의미이다. 미국에서는 만약 제체를 규정된 높이 이상으로 설계할 경우, 비탈경사를 완경사로 하거나 턱(소단)을 설치하여 보완하도록 하고 있다.



표 2.2 국내·외 제방 단면 결정 기준 비교

구분	한국		일본	미국
	하천설계기준 (2009)		河川堤防設計 指針 (2000)	Design and Construction of Levees (2000)
비탈 경사	1:3 이하		1:3 이하 (수피제방 1:30)	1:2 이하
여유 고	계획홍수량 (m ³ /sec)	여유고 (m)	국내 기준과 동일	농경지 제방 : 2 ft 도시 제방 : 3 ft
	200 미만 200 이상~500 미만 500 이상~2,000 미만 2,000 이상~5,000 미만 5,000 이상~10,000 미만 10,000 이상	0.6 이상 0.8 이상 1.0 이상 1.3 이상 1.4 이상 2.0 이상		
마루 폭	계획홍수량 (m ³ /sec)	독마루 폭 (m)	국내 기준과 동일	최소 마루폭 : 10~12 ft
	500 미만 500 이상~2,000 미만 2,000 이상~5,000 미만 5,000 이상~10,000 미만 10,000 이상	3 이상 4 이상 5 이상 6 이상 7 이상		
제체 높이	-		-	25 ft 이하
소단 폭	원칙적으로 소단을 설치하지 않음		제방에 소단을 두지 않음	제시되어 있지 않음
다짐 도	최대 건조밀도의 90 % 이상		90 % (평균치 90 % 이상 확보)	다짐기 사용 시 95 % 도달
더둔 기	제체 특성, 기초지반의 토질 및 제체 높이에 따라 더둔기 높이 규정		허용 침하량으로 규정	다짐 방법별로 더둔기 높이 설정

설계 기준 중 특이한 점은 일본의 제방 턱에 대한 규정이다. 일본의 河川堤防設計指針(建設省 河川堤防設計研究會, 2000)에서는 제방에 턱을 두지 않는 것을 원칙으로 제시하고 있다. 그 이유는 빗물이 제방의 턱에 고여 제체로 침투하는 경우 제방의 안전성을 크게 저하시킬 수 있다는 것이다. 우리나라도 이에 관련하여 비탈면 설계 시 턱을 두지 않는 것으로 최근에 개정된 바 있다.

다짐도는 안전성에 대한 제체재료의 특성 중 하나로서 매우 중요한 요소이다. 다짐도에 대한 규정은 우리나라의 경우 최대건조밀도의 85 %로 제시되고 더 높은 안전성이 요구되는 구간에 대해서는 90 % 다짐도로 제시되고 있다. 일본은 목표 다짐도의 하한치를 85 %로 제시하고 있으며, 이러한 다짐도를 확보하기 위하여 시공 시에는 90 %의 다짐도를 목표로 시공하도록 규정하고 있다. 미국의 경우에 다짐도에 대한 명확한 규정은 없으나 진동기계를 이용하여 다짐하는 경우 95 %의 다짐도 달성이 제시되고 있으며, 이러한 다짐도 규정은 완경사 제방이나 특별한 경우에 대해서는 적용되지 않는다.

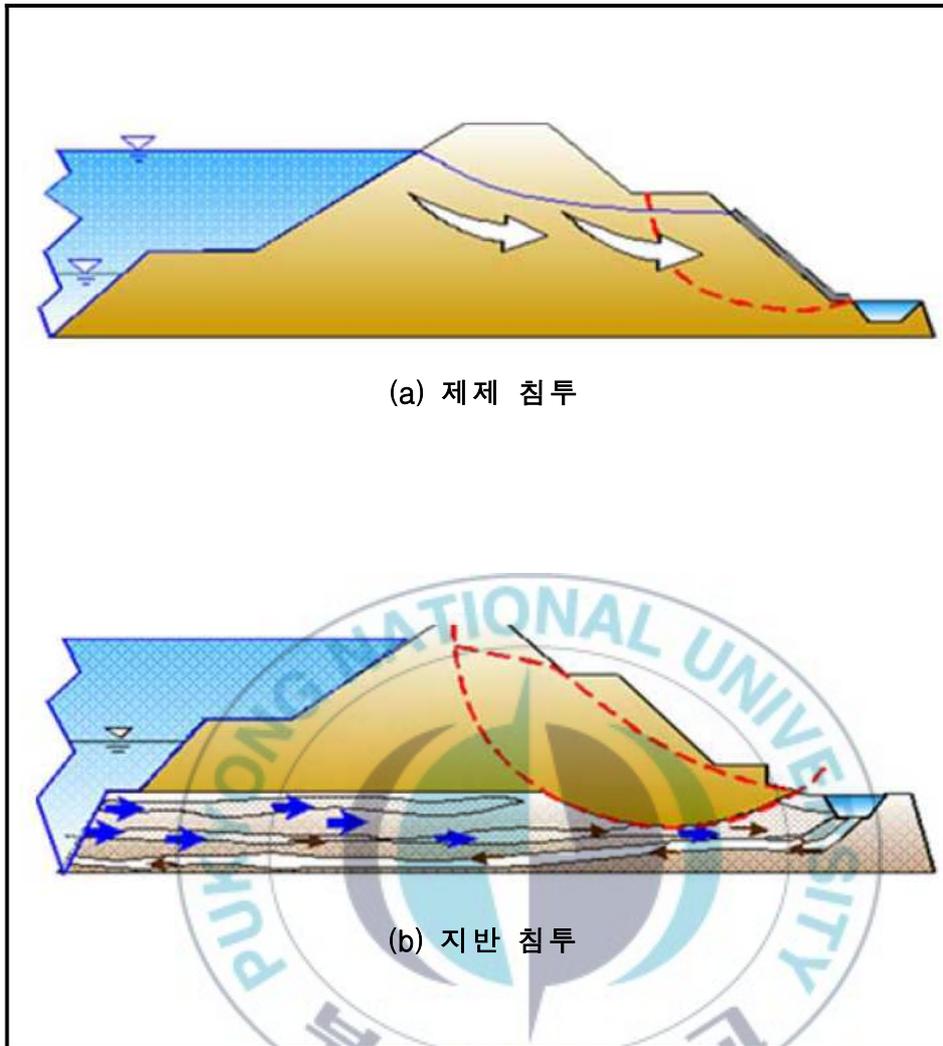
더돋기 높이에 대한 규정은 예상침하량에 대한 설계제방고의 확보를 위한 것으로서 우리나라의 경우 제체 높이에 비례해서 더돋기 높이를 제시하고 있고, 미국의 경우에는 다짐 방법에 따라서 더돋기 높이를 제시하고 있다. 일본의 경우는 더돋기 높이에 대한 규정은 없다.

2.3 제방 침투

제방의 침투는 제체 누수라고도 표현되며, 제방의 제외지측 수위가 상승하여 제체 또는 지반을 통해서 제내지의 제방 비탈끝 부근에서 침투수가 유출하는 것을 말한다. 그림 2.1과 같이 침투에는 제체를 통해 침투하는 제체 침투와 지반을 침투하는 지반 침투가 있으며, 침투위치에 따라 파괴양상도 다르다.

지반침투에 의한 파괴는 다음과 같이 발생한다. 제체 하부의 투수성이 높은 경우에 하천수위가 상승함으로써 침투압이 증가하여 제내지측 지반에 침투수가 용출하는 파이핑 현상이 발생하고 토사의 유출로 인해 제방이 붕괴된다. 이러한 지반누수의 발생원인은 지반의 재료가 투수성이 높은 모래나 자갈층인 경우, 제방의 제외지 또는 제내지에 골재 채취나 세굴 등에 의해 투수층을 노출시켰을 경우, 하천수위와 제체 지반과의 차이가 커져 침투압이 증가했을 경우에 발생한다. 제방은 어느 정도의 투수성을 가진 흙을 기초지반 위에 축조하는 만큼 제외 수위의 상승에 의한 제체와 기초지반의 침투 및 누수는 필연적인 현상이다. 그럼에도 불구하고 제체 기초지반을 완전히 차수하지 않는 것은 일부 침투가 발생되더라도 지하수 수리학의 측면에서 관공 현상이 일어나지 않으면 제체의 안전에는 문제가 없기 때문이다. 관공 현상은 토체 내에서 물이 통과하면서 분사현상으로 인해 세립토사가 누수에 의해 씻겨 유출되어 유로가 짧아지기 때문에 동수경사가 커져서 물의 통로가 생기면서 흙이 세굴되어 나가는 과정을 의미한다.

표 2.3은 제방 침투에 대한 안전성 평가 방법인 한계 동수경사에 의한 방법과 한계 유속에 의한 방법의 수식과 관련 변수 및 매개 변수를 나타내고 있다.



(a) 제제 침투

(b) 지반 침투

그림 2.1 침투파괴 모식도 (한국건설교통기술평가원, 2004)

표 2.3 제방 침투에 대한 안전성 평가 방법

방법 구분	수 식	관 련 변 수
한계 동수 경사에 의한 방법 (Terzaghi 식)	$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e}$ $= (1 - n)(G_s - 1)$	i_c : 한계동수경사
		G_s : 토립자의 비중
		e : 흙의 간극비
		n : 흙의 간극률
한계유속에 의한 방법 (Justin 방법)	$V = \sqrt{\frac{Wg}{A\gamma_w}}$	W : 토립자의 수중중량(gf)
		A : 물의 흐름을 받는 토립자의 면적(cm ²)
		γ_w : 물의 단위중량(gf/cm ³)
		g : 중력가속도(cm/sec ²)

관공현상을 일으키는 한계동수경사는 Terzaghi 식에 의해 계산된다. 분사 현상에 대한 저항력은 소성 지수가 큰 재료일수록 큰 경향이 있고, 점착력이 없는 사립자의 i_c 는 0.5~0.8의 값을 가진다. 한계 동수경사에 의한 제방 누수에 대한 안전성 판정 기준은 침투류 해석에 의해 산출된 동수경사가 한계 동수경사의 1/2 이하일 경우이다.

한계유속에 의한 방법은 흙입자의 입경에 대하여 소류력에 의해 입자가 밀려나가는 한계의 침투 유속을 산정하여 평가하는 방법으로 Justin 방법과 같이 구한다. 실유속이 한계유속 이하로 되도록 설계하고 이보다 클 경우 피복 공법 또는 차수막 공법 등의 보강공법을 사용해야 한다.

한국수자원학회(2009)에서는 제방이 침투에 대하여 안전하기 위해서는 침투류 해석에 의하여 얻어지는 침투류의 실제 유속이 입경에 대한 한계유속의 1/100 이하가 되어야 하며, 표 2.4는 입경별 한계유속을 나타낸 것이다.



표 2.4 입경별 한계 유속

재료 번호	입경(mm)	한계유속 (cm/s)	재료 번호	입경(mm)	한계유속 (cm/s)
1	4.0~4.8	20.0	6	0.25~0.5	4.2
2	2.8~3.4	17.0	7	0.11~0.25	3.5
3	1.0~1.2	10.0	8	0.075~0.11	2.5
4	0.7~0.85	8.5	9	0.044~0.075	2.0
5	0.5~0.7	7.0			

제체침투에 의한 파괴는 다음과 같이 일어난다. 제체 내의 침윤선이 제내지 비탈면에 도달하면 누수가 발생하고 그 양이 많으면 파이핑 현상에 의해 붕괴가 일어나거나 또는 침투수에 의해 활동파괴가 발생한다. 제체 침투에 대한 안전을 확보하기 위해서는 침윤선을 낮추어야 한다. 침윤선은 침투류 계산에 의해 결정된다. 침투류 계산은 비정상 포화·불포화 침투류 계산법과 2차원 정상 침투류 계산법이 있고 우리나라에는 2차원 정상 침투류 계산법의 Mononobe의 경험식을 사용하여 홍수 시 침윤선을 계산하여 안전을 평가한다(식 2.1과 2.2). 침윤선이 제내지 비탈면

에 나타나면 단면폭 확대, 제체에 차수막 설치, 배수공 설치 등의 보강공법을 사용한다.

$$L_{\max} = C \times \sqrt{(K/H) \times H_0 \times T_0} \quad (2.1)$$

$$Y = H_0 \left(1 - \frac{X^2}{L_{\max}^2}\right) \quad (2.2)$$

여기서, L_{\max} 는 침윤선의 최대 전진길이를 말하고, Y 는 침윤선의 곡선방정식, H_0 는 계획홍수위의 수심 H_{\max} 의 3/4에 해당하는 수심(m), T_0 는 홍수지속시간(hr), K 는 투수계수, N 은 간극률(%), C 는 토사의 종류, 유효입경, 간극률 등에 따라 변한다. 그림 2.2는 Mononobe 경험식 개요도이고, 표 2.5는 Mononobe 경험식 계수이다.

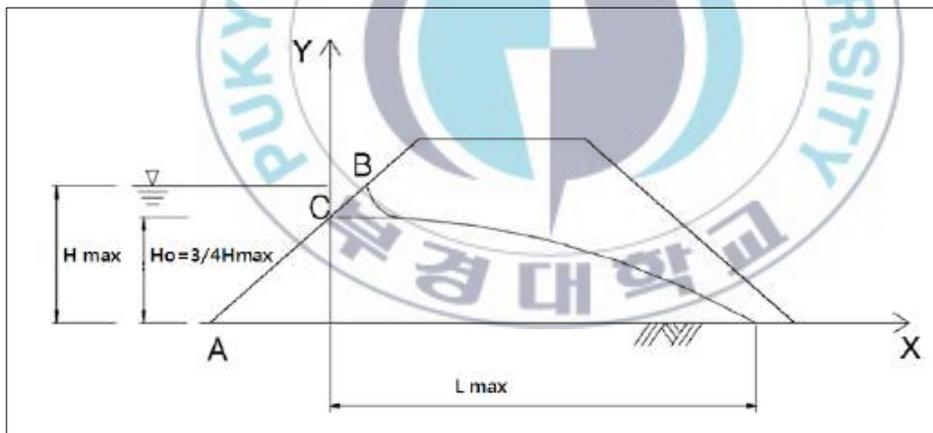


그림 2.2 Mononobe 경험식 개요도

표 2.5 Mononobe 경험식 계수값

구 분	토 제	세 사 제	자 갈 득
Mononobe 경험식 계수(C)	2.00	3.66	6.92



2.4 유공관에 의한 누수 방지

2.4.1 누수 방지 대책

제방 누수는 일반적으로 하천수가 제체 또는 기초 지반에 침투해서 제방의 제내 비탈면, 제내 비탈끝 또는 제내지에서 스며 나오는 현상을 총칭한다. 제체 누수의 원인은 제방단면이 너무 작은 경우나 제체 재료가 투수성이 크고 차수벽이 없는 경우, 제체를 충분히 다지지 않는 경우에 발생한다. 또한 제체가 동물에 의해 구멍이 뚫린 경우나 제체 내에 통문이나 통관 등이 매설되어 있는 구조물과의 접촉부에 공동현상이 발생한 경우에 발생한다. 기초지반 누수의 원인은 지반의 투수성이 큰 모래층 또는 자갈층인 경우나 고수부지 부근의 표토가 세굴되어 투수층이 노출되었을 경우이며, 골재 채취 등으로 투수층이 노출되었을 경우나 설계 시 예상 못했던 지반 침하로 침투압이 증가하였을 경우에도 기초지반의 누수가 발생한다. 침투의 각 형태적 개념과 특징은 표 2.6과 같다.

제체누수는 제체의 침윤선이 결정적인 요인이 되므로 침윤선을 낮추어 제체 하부에 위치하도록 해야하며, 지반 누수가 있을 경우에는 적절한 대책공법을 강구해야 한다. 제방 누수에 대한 보강을 위해서는 제체에 전단강도가 큰 재료를 사용하며, 제체내 강우 및 하천수 유입을 차단하여야한다. 또한 제체 및 기초지반의 동수경사를 작게 하여서 제체내 침투한 물은 신속하게 배수하여야한다.

대표적인 제방 누수 방지 대책은 한국건설교통기술평가원(2006)에서 제시한 표 2.7, 2.8과 같다. 표에 제시되어 있는 것과 같이 누수 방지 대책을 분류하면 제방에 적용하는 것과 기초지반에 적용하는 것으로 크게 구분할 수 있다. 제방에 적용하는 대책은 동수경사를 감소시키고 활동에 대한 안전성을 확보하기 위한 단면확대기법, 강우나 하천수의 제방으로

침투를 방지 및 억제하기 위한 피복기법, 제방 내의 침투수를 신속하게 배수하는 것을 목적으로 하는 배수공을 설치하는 방법 등이 있다. 기초지반에 적용하는 대책은 주로 기초지반으로 하천수가 침투하는 것을 억제 또는 방지하는 것에 초점을 맞추고 있으며, 제내외지 및 제방에 강널막뚝 등을 적용하는 차수기법, 고수부지 표면에 피복재료를 적용하는 피복기법 등이 있다. 또한 제방 내부의 침투수를 신속히 배수하는 배수공을 설치하는 방법은 지반조건이나 설치위치에 따라서 기초지반 대책으로 적용되기도 한다.



표 2.6 침투의 형태와 특성

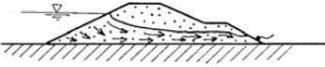
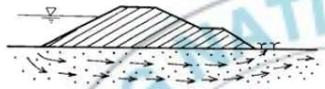
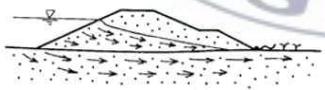
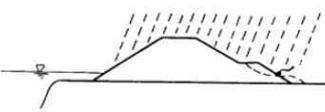
침투형태	개념도	특징
제체침투		<p>하천수위의 상승에 따라 제체내의 침윤면이 상승하고, 하천수가 제내 비탈면이나 비탈끝에서 스며 나오는 현상으로, 제체가 투수성이 높은 모래나 자갈로 축조되어 있는 경우, 제체 단명이 작고 침투로 길이가 짧은 경우, 제체 내에 공극이나 균열이 있는 경우에 발생하기 쉽다.</p>
기반침투		<p>제체가 난투수성이고 기초 지반의 투수성이 높은 경우, 내외 수위의 수두차에 의해 하천수가 지반내를 침투하고, 제내 비탈끝에서 제내지에 걸쳐서 스며 나온다. 이 때, 침투수와 함께 토사가 용출되는 경우가 있다.</p>
		<p>기반의 제외 비탈쪽이 불투수층이 되어 있는 경우를 멈춤형 지반으로 칭하며 제체내의 침윤면을 상승시켜, 외수위가 높게 되면 양압력이 크게 되어 비탈면 붕괴의 위험성이 높게 된다.</p>
복합침투		<p>제체와 기반 모두 투수성이 높은 경우에는 제체 침투와 기반 침투가 동시에 발생한다.</p>
강우침투에 의한 비탈면 붕괴		<p>외수위는 그다지 높지 않지만, 제체에 강우가 침투하면, 침윤면을 상승시켜, 침투를 조장하거나 제내 비탈면이 붕괴되거나 한다.</p>

표 2.7 제방에 적용하는 대표적인 누수 방지 대책

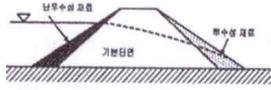
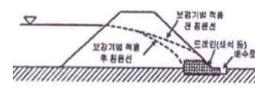
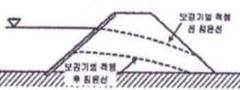
명칭	단면확대기법	배수공을 이용한 기법	피복기법
개요도			
원리 및 효과	<ul style="list-style-type: none"> • 제방 단면 확대를 통해서 침투 길이를 연장시키고, 동수경사를 감소시켜 제방 안전성 증대 • 비탈경사면을 완만하게 함으로써 활동과괴에 대한 안전성 증대 	<ul style="list-style-type: none"> • 제내지 비탈끝 투수성이 큰 재료로 바꾸어 제방 내부에 침투한 물을 신속하게 배수함 • 제방 내부의 침윤면 상승을 억제하여 제방의 저항력 억제함 	<ul style="list-style-type: none"> • 제외지 비탈사면을 난투수성 재료(토질 및 인공재료)로 피복하여 홍수 시 하천수의 제방 침투 억제
설계 시 유의사항	<ul style="list-style-type: none"> • 제외지 및 제내지에 여부지 필요. 제외지의 경우 통수량을 고려하며 제내지의 경우 부지 확대 여부 검토 • 제외지 축의 확대는 기존 제방 재료보다 난투수성 재료를 적용하고, 제내지 축의 확대는 기존 제방 재료보다 투수성이 높은 재료 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 제방 내부로부터 배수된 물을 배출할 배수로 필요 • 배수공 재료는 자갈 또는 쇄석 등을 이용하여 피복 	<ul style="list-style-type: none"> • 투수성이 높은 사질토의 제방에 효과가 큼 • 피복재료 적용 후 활동 등에 대한 안전성 검토 필요 • 차수시트를 적용한 경우 복토나 불록 등에 의해 차수시트에 잔류수압이 작용하여 부상 및 변형이 발생할 수 있음 • 난투수성 지반인 경우 배수대책 확보
시공 시 유의사항	<ul style="list-style-type: none"> • 확대에 필요한 재료는 용이하게 입수할 수 있어야 함 • 기존 제방과의 일체화 향상을 위해 층따기 실시 	<ul style="list-style-type: none"> • 제방 및 필터재료와의 접합부에 간격이 생기지 않도록 유의함 • 중장비 등에 의한 필터재료 손상에 유의함 	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 제방과의 일체화 향상을 위해 층따기 실시 • 차수시트의 이음부분 및 끝단부의 시공에 유의함 • 복토는 충분히 압밀하도록 함
유지 관리 시 유의사항	<ul style="list-style-type: none"> • 연약지반의 경우 침하 등이 발생할 수 있으므로 상단의 침하량 및 크랙 등을 지속적으로 계측 및 관리함 	<ul style="list-style-type: none"> • 효과 검증 등을 위해 배수공을 설치한 제방 내부에 수위관측장치 및 배수관계를 설치하는 것 등이 바람직하고, 홍수 및 폭우 시에는 배수상황을 관찰하고, 홍수 후 토사 유출 등의 유무 점검 	<ul style="list-style-type: none"> • 흙을 이용한 경우 건조에 의한 크랙 발생 유의 • 차수시트 적용시 말뚝 및 초목 등의 뿌리에 의한 손상 유의와 제외지 비탈끝 부근에 침투수가 체류하기 쉬운 점에 유의
기타	<ul style="list-style-type: none"> • 다른 보강기법과 함께 적용하기 용이함 	<ul style="list-style-type: none"> • 녹화 등을 위해 복토를 시행하는 경우, 배수공 내부로의 토사 유입 방지 주의 	<ul style="list-style-type: none"> • 제방 변형이 발생한 경우 차수시트에 대한 손상 유무 확인 필요

표 2.8 기초지반에 적용하는 대표적인 누수 방지 대책

명칭	차수기법	피복기법
개요도		
원리 및 효과	<ul style="list-style-type: none"> 강널말뚝, 시트파일, 연속지중벽, 그라우팅 등에 의해 차수벽을 설치하여 기초지반으로의 침투수 억제 	<ul style="list-style-type: none"> 고수부지를 난투성 재료로 피복함으로써 침투 길이를 증대시키고 체내지 비탈끝 부근의 간극수압을 감소시킴
설계 시 유의 사항	<ul style="list-style-type: none"> 차수벽의 재료로는 강널말뚝, 시트파일, 연속지중벽, 그라우팅 등이 이용됨 침투수를 억제하기 위해서 차수벽을 투수층 두께의 80~90%까지 관입시킬 필요있음 	<ul style="list-style-type: none"> 고수부지가 사질토와 같이 투수성이 높은지역에 높은 효과를 기대 흐름방향으로 30 m 이상 설치하는 것이 바람직함 양질의 토질재료를 적용하는 경우 세굴방지 등을 위해 50 m 이상의 두께를 포설하고, 잔디로 피복하는 것이 바람직함
시공 시 유의 사항	<ul style="list-style-type: none"> 차수벽의 시공은 주변 환경을 고려하여 선정 차수벽 접합부 시공에 유의 기존 제방과 차수벽의 접합부 처리에 유의 	<ul style="list-style-type: none"> 토질재료를 적용하는 경우 차수성을 증대 시키기 위한 충분한 압밀 필요 기존 제방과 피복재료의 접합부 처리 유의
유지 관리 시 유의 사항	<ul style="list-style-type: none"> 기본적으로 유지관리가 필요하지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> 토질재료 이용 시 건조에 의한 크랙발생 유의 체외지 비탈끝 부근에 침투수가 체류하기 쉬운 점에 유의
기타	<ul style="list-style-type: none"> 지하수 흐름을 차단하므로 주변 환경의 영향을 검토할 필요가 있음 제외지층 액상화에 의한 변형에 대한 효과가 기대됨 	

2.4.2 연구에서 적용한 유공관을 이용한 누수 방지 대책

유공관을 이용한 누수 방지 대책은 제방에 침투한 강우 및 하천수의 신속한 배수를 위한 유공 부분, 집중된 침투수를 제내지로 유도 및 배출하기 위한 배수로 부분, 제방의 토립자 유출방지 및 유공의 막힘 방지를 위한 필터 부분으로 구성된다. 배수공의 형상은 대표적으로 그림 2.3과 같이 일본의 국토기술연구센터(國土開發技術研究センター, 2002)에서 제시하는 사각형 모양의 배수공과 미국의 U.S. Army Corps of Engineers(2000)에서 제시하는 삼각형 모양의 배수공으로 구분 할 수 있다. 또한 새롭게 제안하는 유공관 배수공은 네덜란드, 헝가리에서 배수관을 사용하는 것에 착안한 것이다. 본 연구에서는 그림 2.4와 같은 형상으로 유공관을 설계하였다.



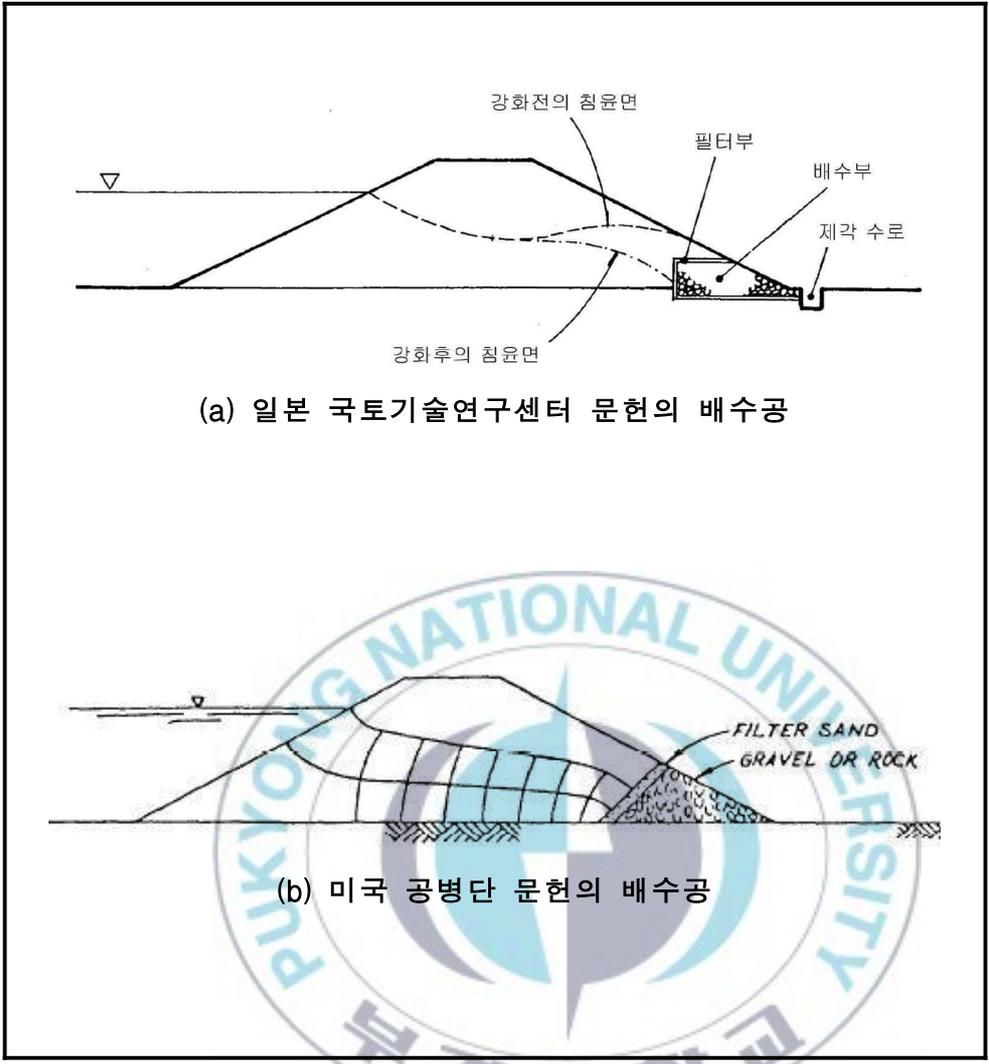


그림 2.3 배수공의 형상

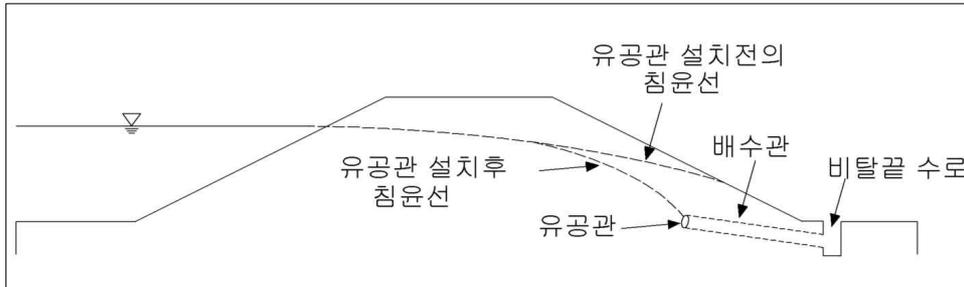


그림 2.4 본 연구에서 제시한 유공관 형상



3. 유공관을 이용한 제방 침투 조절 실험

3.1 제방과 유공관의 설계

3.1.1 실험용 제방 설계

제방 침투 실험을 위한 제방은 $12.5 \times 0.6 \times 1.05$ m 의 수조 내부에 제작하였다. 제방 침투에 따른 제체 내의 위압수두(piezometric head)를 측정하기 위해 0.30 m 간격으로 13개의 위압수두계(piezometer)와 줄자를 설치하였다(그림 3.1, 3.2). 제작된 제방 모형의 형상은 그림 3.3과 같다. 축조된 제방의 규격은 저면의 폭 2.8 m, 마루 폭 0.4 m, 제체의 높이가 0.6 m, 사면경사 1:2, 기초 지반의 높이 0.3 m이다. 실험용 제방 설계 제원은 표 3.1과 같다.

한국수자원학회(2009)는 제방의 비탈경사를 1:3으로 제시하고 있다. 본 연구에서는 덜 안전한 규격의 제방에 대한 침투 현상과 이에 대한 유공관의 효과를 검토하기 위하여 표준 비탈경사보다 경사가 급한 1:2로 제방을 제작하였다. 또한, 비탈 경사가 1:3으로 개정된 것은 2005년으로서 기 설치된 제방의 대다수는 비탈경사가 1:2이므로 연구 진행에 적합한 조건으로 판단된다.



그림 3.1 위압수두의 측정위치

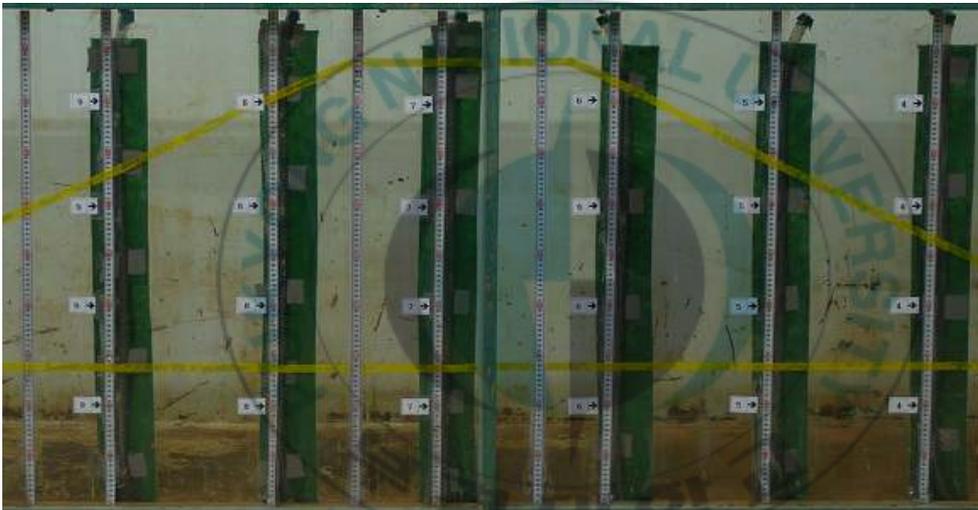


그림 3.2 위압수두 측정용 위압수두계와 줄자 설치

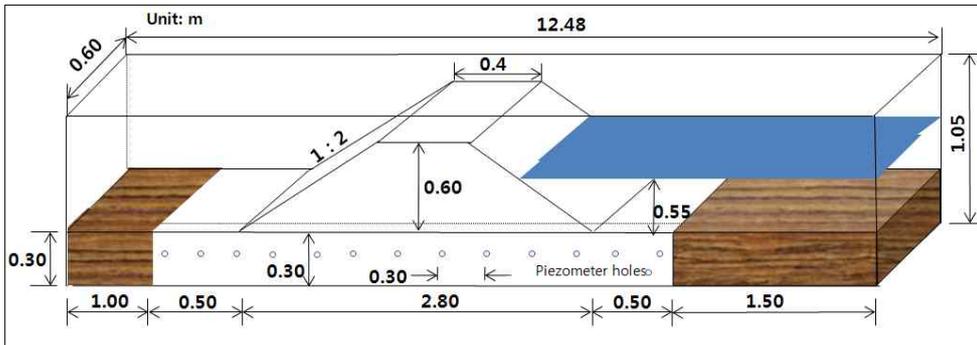


그림 3.3 실험용 제방의 형상

표 3.1 실험용 제방의 설계 제원

사면 경사	마루폭 (m)	제체 높이 (m)	저면폭 (m)	제외지 (m)	제내지 (m)	기초지반 높이 (m)	위압수두계 간격 (m)
1:2	0.4	0.6	2.8	0.5	0.5	0.3	0.3

3.1.2 유공관 규격 설계

다수의 문헌에서 유공관의 언급은 있지만 설치 규격에 대한 언급은 없었다. 다만 국토개발기술연구센터(1998)식 문헌에서 보면 평균 동수경사가 0.3 이하가 되도록 하고 있다.

본 연구에서 유공관의 규격 설계를 위하여 제내 포화표면 길이 산정식(Das, 2005a)을 참조하여 유공관의 설계를 하였다(표 3.2). 기초지반 바닥부터 유공관의 높이는 기초지반 깊이와 같도록 300 mm로 하였다. 유공관에 의한 평균 동수경사는 0.23으로서 일본 국토기술연구센터식 배수공의 설계 기준을 만족하는 범위에 있다(그림 3.4). 그림 3.5는 유공관 설치 전경과 유공관을 포함한 완성된 제방이다.



표 3.2 실험용 제방의 설계

침윤선의 제내지극 포화표면 위치 계산	
<p>The diagram illustrates a dam cross-section with a water level on the left and an impervious layer at the bottom. The water level is at height H. The dam has a top width B and a total height H. The upstream slope is at an angle β to the horizontal, with a horizontal distance Δ from the water level to the toe. The downstream slope is at an angle α to the horizontal. The horizontal distance from the toe to the phreatic surface is d. The phreatic surface is a curve starting at the water level and ending at the toe. A small element of the phreatic surface is shown with horizontal distance dx and vertical distance dz. The length of the phreatic surface is L. The impervious layer is at the bottom, and the water level is indicated by a triangle symbol.</p>	
α	배수층의 경사는 사면 경사와 동일하게 적용 $\alpha = \tan^{-1}(0.5) = 26.565^\circ$
Δ	$\Delta = 550 \times 2 = 1100 \text{ mm}$
d	$d = 2800 - 0.7\Delta = 2800 - 0.7 \times 1100 = 2030 \text{ mm}$
L	$L = \frac{d}{\cos\alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha} - \frac{H^2}{\sin^2\alpha}}$ $= \frac{2030}{\cos(\tan^{-1}0.5)} - \sqrt{\frac{2030^2}{\cos^2(\tan^{-1}0.5)} - \frac{550^2}{\sin^2(\tan^{-1}0.5)}}$ $= 362 \text{ mm}$

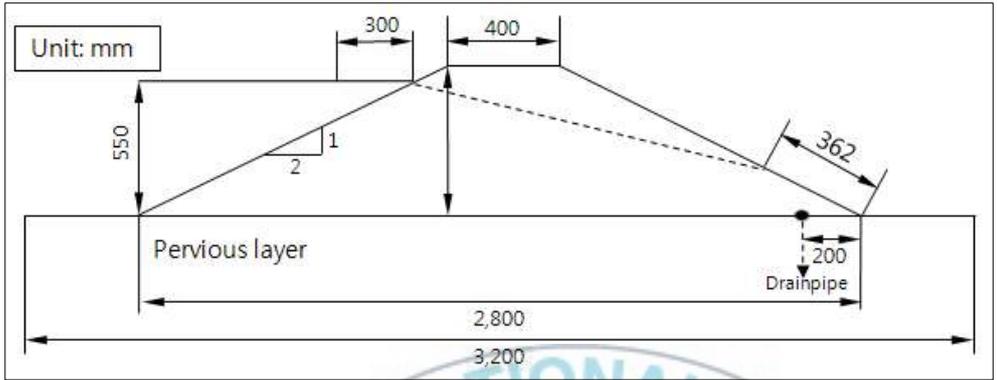


그림 3.4 실험용 제방의 설계(유공관의 위치)





(a) 유공관의 설치 전경



(b) 유공관을 포함한 실험용 제방

그림 3.5 유공관을 포함한 제방

3.1.3 제체 및 유공관의 재료

연구에서는 제방 침투 실험 뿐만 아니라 동일한 조건에 대한 수치모의를 수행한다. 수치모의를 수행하기 위해서는 제체 재료에 대한 물리적 특성이 요구된다. 따라서 제방에 사용된 제체 재료에 대한 입도분석과 투수시험을 수행하였다. 표 3.3, 3.4는 실험에 의해 결정된 흙의 물리적인 특성을 나타낸다. 제방 침투 실험에 사용된 제체의 재료는 통일분류법 (Unified Soil Classification System; USCS) 상 실트를 함유한 모래(SM)로 분석되었다. 그리고 투수계수는 $3.06 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 인 것으로 나타났다.

한국수자원학회(2009)에서 제시하고 있는 제체 재료의 투수계수 기준은 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 사용한 제체의 재료는 투수성을 크게하여 유공관의 배수효과를 알아보기 위해 3배 이상 초과하는 제체 재료를 사용하였다.

국토개발기술연구센터(1998)는 유공관에 대하여 제체의 투수계수보다 100배 이상 큰 재료를 사용하도록 제시하고 있다. PVC인 유공관을 감싸고 있는 부직포의 투수계수는 1 ~ 100 cm/sec으로서 연구에서 사용된 제체 재료의 투수계수 보다 100배 이상 큼을 알 수 있다.

표 3.3 시료의 투수시험 결과

투수계수 (cm/sec)	함수비(%)	간극비	단위중량 (gf/cm ³)	
			γ_d	γ_t
3.06E-03	7.820	0.721	1.525	1.644

표 3.4 시료의 입도분석시험 결과

USCS (통일분류법)	비중	자갈 (%)	모래 (%)	실트 (%)	점토 (%)
SM	2.63	19.49	64.79	8.02	7.69

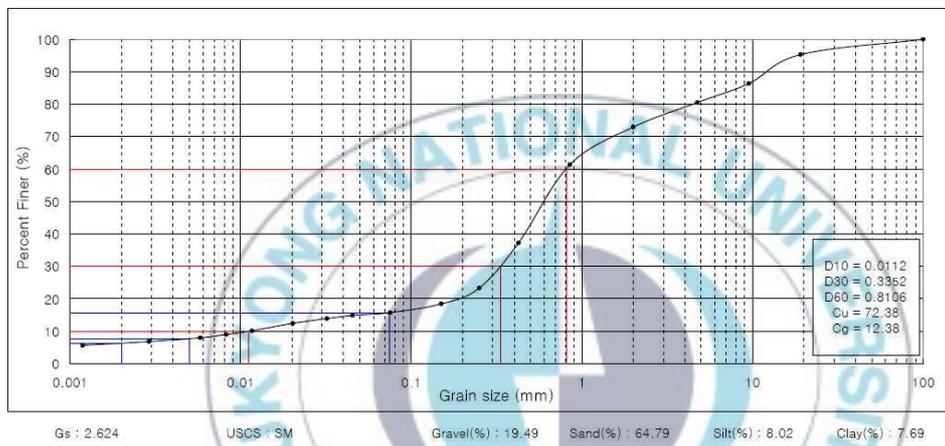


그림 3.6 입도분포도곡선

3.2 유공관을 이용한 제방 침투 조절 실험의 수행

3.2.1 침투 조절 실험의 수행 방법

연구에서는 정상 상태의 침투 실험을 목표로 수행하였다. 하지만 수위를 순간적으로 목표까지 채우기란 매우 어렵다. 이에 따라 연구에서는 수위를 각각의 실험의 목표치인 60 cm, 70 cm, 80 cm, 85 cm만큼 천천히 올린 후, 각 수위를 유지하면서 위압수두의 변화를 측정하여 침투 실험을 수행하였다. 위압 수두계의 측정값은 위압계 자유수면의 높이이며 부착된 줄자의 눈금을 읽어 측정되었다. 측정시간 간격은 위압수두계가 빠르게 변화한 초기에는 15분 간격으로 하였고, 시간의 경과에 따라 측정시간 간격을 늘렸다. 측정은 위압수두가 안정상태에 도달할 때까지 수행되었다. 그림 3.7은 수위 60 cm일 때의 위압수두 사진이다.





그림 3.7 위압수두계의 수두

(1) 실험-1

실험-1에서 유공관 중심의 높이를 바닥으로부터 30 cm로 하고 관의 면적당 유공 비율을 5 %로 하여 수위를 60 cm~85 cm까지 천천히 수위를 올렸다. 그림 3.8은 실험-1의 수위별 위압수두이고, 그림 3.9는 사면이 젖은 사진이다.

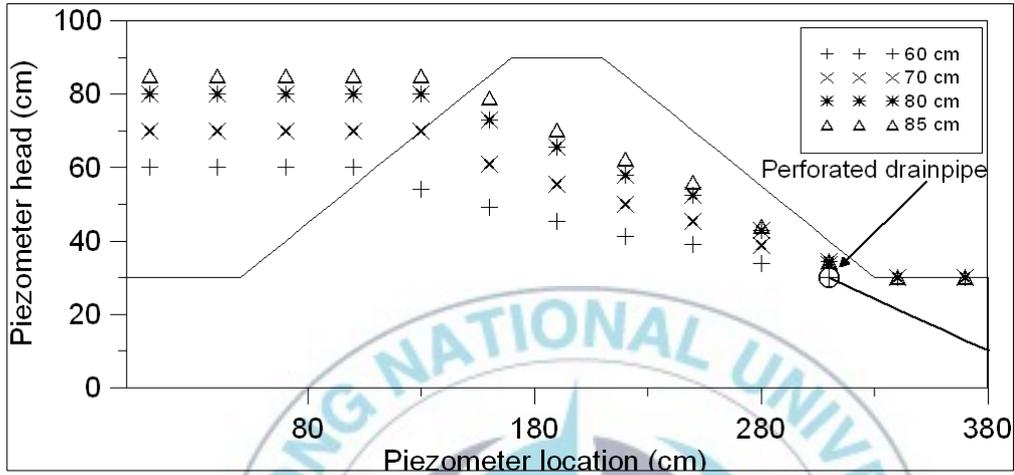


그림 3.8 실험-1의 침윤선



그림 3.9 사면이 젖은 상태(실험-1)

(2) 실험-2

실험-2에서 면적당 유공의 비율은 5 %이고, 유공관 중심의 높이를 바닥으로부터 27 cm로 낮추어 측정을 하였다. 그림 3.10은 실험-2의 수위별 위압수두이고, 그림 3.11은 사면 붕괴 사진이다.

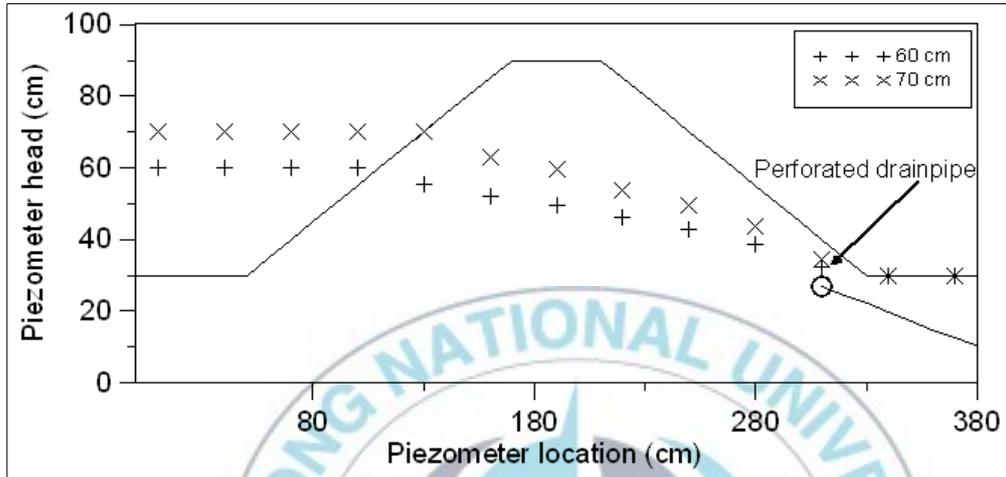


그림 3.10 실험-2의 침윤선



그림 3.11 사면 붕괴 상태(실험-2)

(3) 실험-3

실험-3은 유공관의 높이는 30 cm로 하고 면적당 유공의 비율을 10 %로 하였다. 그림 3.12는 실험-3의 수위별 위압수두이고, 그림 3.13은 실험-3의 사면 상태이다.

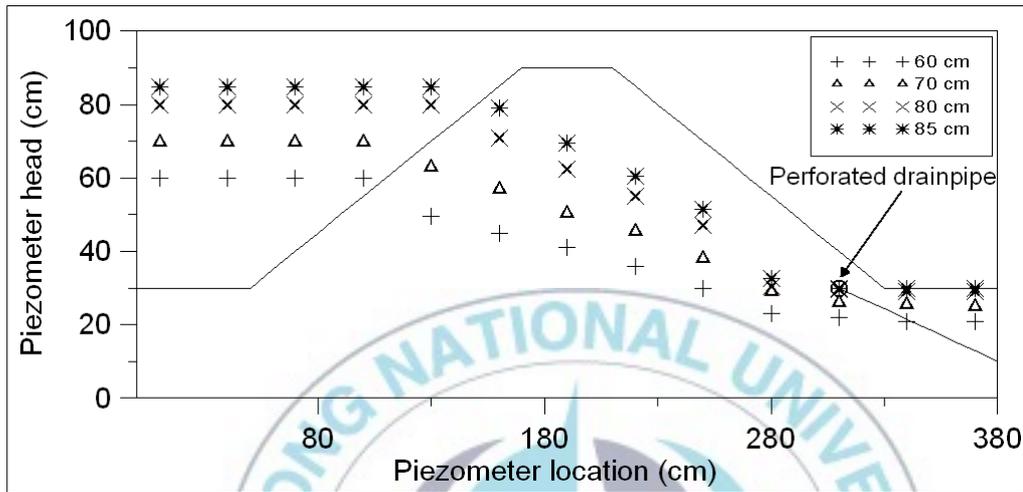


그림 3.12 실험-3의 침윤선

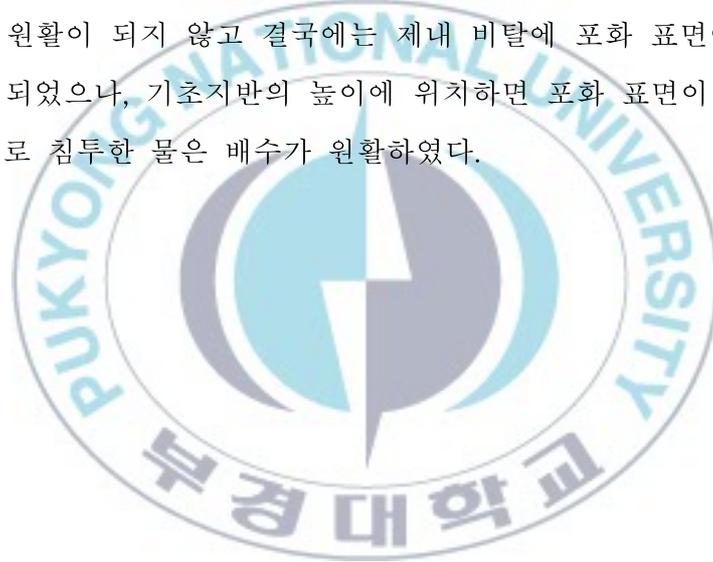


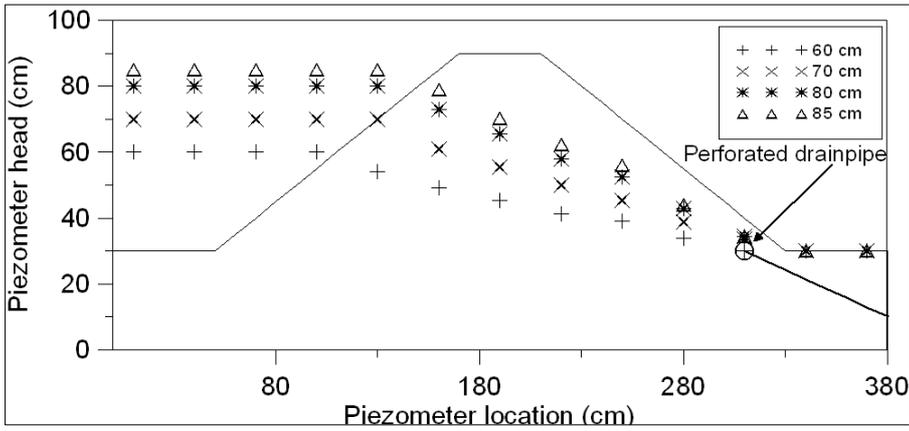
그림 3.13 사면이 마른 상태(실험-3)

3.3 유공관 설치 높이에 따른 침윤선 양상

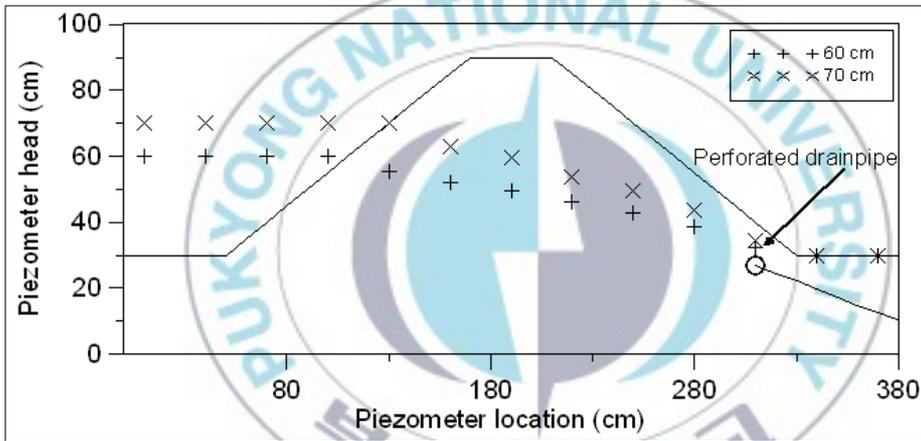
그림 3.14는 제방 침투 실험의 실험별 유공관 설치 높이에 따른 침윤선 변화 양상을 나타낸다. 실험-1은 유공관 높이가 바닥부터 30 cm인데 제외 수위를 85 cm까지 올렸지만 비탈 사면으로 침윤선이 통과하지 않고 배수가 원활히 되었다. 반면 실험-2는 유공관 높이가 27 cm이고 제외 수위를 70 cm로 올리는 순간부터 비탈 사면이 젖기 시작했고, 수위를 80 cm로 올린지 10분만에 비탈사면이 붕괴되는 것을 확인하였다.

유공관의 면적당 유공 면적을 5 % 동일하게 하고 제외 수위가 85 cm 이하인 경우에, 유공관의 중심 높이가 기초지반(30 cm)의 높이보다 낮으면 배수가 원활이 되지 않고 결국에는 제내 비탈에 포화 표면이 발생하여 붕괴가 되었으나, 기초지반의 높이에 위치하면 포화 표면이 발생하지 않고 제체로 침투한 물은 배수가 원활하였다.





(a) 유공관 설치 높이 30 cm (실험-1)



(b) 유공관 설치 높이 27 cm (실험-2)

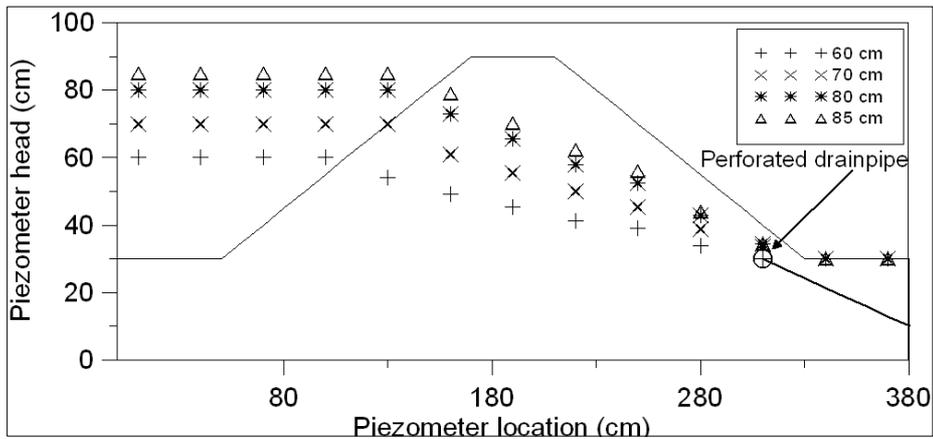
그림 3.14 유공관 설치 높이에 따른 침윤선

3.4 유공 크기에 따른 침윤선 양상

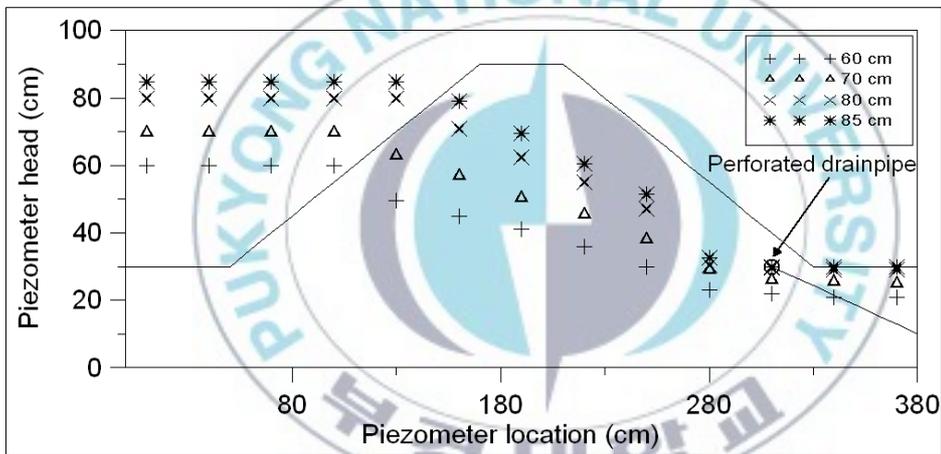
그림 3.15는 제방 침투 실험의 실험별 유공의 크기에 따른 침윤선 변화 양상을 나타낸다. 실험-1은 면적당 유공의 비율이 5 % 인 경우인데 수위를 85 cm까지 올려도 사면으로 침윤선이 통과하지 않고 제체로 침투한 물은 배수가 원활히 되었으나 제내지 지면에 일정양의 물고임 현상이 있었다. 반면 유공의 면적 비율을 10 %로 증가시킨 실험-3은 실험-1과 침윤선이 거의 동일하나 유공관을 지날때부터 유공 크기에 의한 배수의 원활로 제내지의 지면에 물고임 현상이 없었다.

위 비교 실험은 면적당 유공의 비율이 적합한지를 알 수 있는 비교 실험이다. 유공의 크기가 제방의 상황에 맞지 않는다면 유공이 침투량을 감당하지 못하고 포화표면이 발생하여 붕괴가 일어 날수 있는 것으로 분석되었다.





(a) 면적당 유공 비율 5 % (실험-1)



(b) 면적당 유공 비율 10 % (실험-3)

그림 3.15 유공 크기에 따른 침윤선

4. 유공관을 이용한 제방 침투의 수치모의

4.1 침투해석 프로그램 비교

침투해석을 위해 실무에 적용할 수 있는 프로그램은 정상침투해석에 유한요소 기법을 적용하여 개발한 Tracy의 SEEP2D, Narasimhan의 FLUMP, 유한차분 기법에 의한 TRUST, Neuman의 UNSAT2, Kraha의 PC-SEEP, Desai의 SEEP2DFE, Bathe의 ADINAT 등과 경계요소법을 적용한 BIE2DCP, FEMWATER, FEMWASTE, SEEPAGE, GWAP, SEEP, LOCUS 등의 프로그램 등이 개발되었다(임동균 등, 2005). 이런 침투해석 프로그램들은 적용이론, 수치해석기법, 전개과정, 입력요소, 사용자 편의성을 위한 부가기능 그리고 처리속도 등에 차이가 있다. 침투해석 프로그램은 크게 정상상태 침투해석과 비정상상태 침투해석이 가능한 프로그램으로 구분할 수 있다. 과거에는 유한차분법을 적용하였으나, 최근에는 유한요소법과 경계요소법을 적용하는 추세이다. 국내에 적용사례가 있는 프로그램을 소개하면 표 4.1과 같다. 침투해석은 대상 제방을 적절히 구축하고 외력 및 토지조건을 최대한 실제 현상과 유사하게 설정하여 실시한다. 침투해석은 진술한 바와 같이 다양한 사용 프로그램이 존재하며, 각 프로그램의 장단점 및 한계를 정확히 파악할 필요가 있다 (한국건설교통기술평가원, 2006).

표 4.1 침투해석 프로그램 비교

프로그램명	적용 기법	적용 범위	한계점
SEEP2D	FEM	<ul style="list-style-type: none"> 정상상태 해석 정상상태 해석 시 입력용이 및 계산속도 빠름 	<ul style="list-style-type: none"> 비정상 조건 해석이 용이하지 않음
UNSAT2	FDM	<ul style="list-style-type: none"> 식물뿌리에 의한 삼투, 자연증발 등 고려 비정상 조건 고려 	<ul style="list-style-type: none"> 비정상 조건 해석이 용이하지 않음(반복 계산) 사용자 편의성 미확보
TRUST	IFDM	<ul style="list-style-type: none"> 격자 표현 자유로움 비균질도의 접촉면 해석 가능 양해법과 음해법 혼용 해석 	<ul style="list-style-type: none"> 기하학적 입력자료 필요(입력자료 구축이 어려움)
SEEP/W	FEM	<ul style="list-style-type: none"> 정상 및 비정상 해석 가능 비등방성, 비균질성 토질 해석 사용자 편의성 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 원시코드 미공개 프로그램에 대한 보완 및 변형 불가능
Z_SOIL	FEM	<ul style="list-style-type: none"> 토양, 암반, 지중 구조물, 흙-구조물 상호작용, 지하수 흐름 해석 	<ul style="list-style-type: none"> 원시코드 미공개 적용 사례 미비 (유럽에서 주로 사용)

4.2 SEEP/W

4.2.1 SEEP 의 소개

SEEP/W는 GEO-STUDIO사가 개발한 지반공학 범용프로그램으로서 평형방정식, 연속방정식 등을 지배방정식으로 선택하여, 2차원 연속공간을 Galerkin의 가중잔차법(weighted residual method)의 유한요소망(finite element mesh)으로 분할하고 이를 통한 침투해석을 수행하여 해를 구하는 프로그램이다. SEEP/W는 단순한 포화-정상류부터 복잡한 포화/불포화-비정상 상태흐름까지 계산할 수 있다.

4.2.2 해석해에 의한 방법

침투와 같은 지하수 흐름은 매우 복잡한 수학적 및 물리적 관계를 가지고 있으므로, 대부분의 지하수 흐름 문제에 대해 정확해를 알지 못한다. 특히 실제 지하수 흐름 양상을 정확히 해석하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 기존의 연구자는 해석해를 이용하여 지하수 문제를 해결하고자 하였으나, 이와 같은 연구는 이상적인 조건에 대한 침투해석을 시행한 것으로 많은 제약조건을 내포하고 있다. 미국 공병단은 제방 내부의 침투량과 침윤선 위치를 결정하기 위하여 기존의 연구자들이 제시한 해석해 방법을 정리하였다(임동균 등, 2005). 기초 지반이 없는 경우에 그림 4.1과 같이 제방 단면 자료, 상류단 경계(h), 그리고 유출경계면(a)이 정의되면, 제방 내부의 침윤선은 포물선이라는 기본 가정으로부터 침윤선을 해석적으로 결정할 수 있다. 즉, 미지경계조건(unknown boundary)인 유출경계면 a를 결정하면, 침윤선을 해석할 수 있다. 또한 유출경계면으로부터 유출량을 해석적으로 결정할 수 있으며, 기초 지반이 없는 경우에 유출경계면 및 유출량을 결정하는 방법은 다양한 연구자에 의해 표 4.2와 같이 제시되었다.

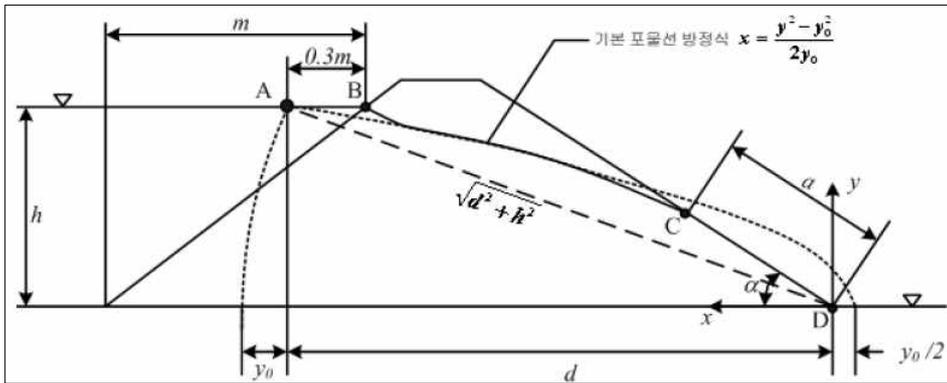


그림 4.1 침윤선 해석기법

표 4.2 침윤선 유출경계면 및 단위 유출량 결정 방법

α	연구자	방정식
$< 30^\circ$	Schaffernak-Van Iterson	$\alpha = \frac{d}{\cos\alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha} - \frac{h^2}{\sin^2\alpha}}$ $q = k\alpha \sin\alpha \tan\alpha$
$\leq 90^\circ$	Casagrande	$\alpha = S_0 - \sqrt{S_0^2 - \frac{h^2}{\sin^2\alpha}}$ $\alpha \leq 60^\circ, S_0 = \sqrt{d^2 + h^2}$ $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ, S_0 = \widehat{AC} + \overline{CD}$ $q = k\alpha \sin^2\alpha$
180°	Kozeny	$\alpha_0 = \frac{y_0}{2} = \frac{1}{2}(\sqrt{d^2 + h^2} - d)$ $q = 2k\alpha_0 = ky_0$

4.2.3 지배방정식

(1) 지하수 흐름 지배방정식

지하수 흐름 지배방정식은 일반적으로 Darcy법칙 식 (4.1)과 질량보존의 법칙 식 (4.2)에 의해 구성된다.

$$V = K\nabla h \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot (k\nabla h) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.2)$$

여기서, V 는 Darcy 유속, K 는 투수계수, h 는 침윤 수위, Q 는 경계 내부의 유량, t 는 시간, θ 는 체적단위의 함수량이다. 식 (4.2)를 수직 2차원 평면(x, y)에 대한 식으로 표현하면 식 (4.3)과 같다.

$$K_x \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + K_z \left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.3)$$

지하수 흐름 지배방정식은 내부유량 Q 가 0이고 정상조건의 경우 식 (4.3)의 우변이 제거된 Laplace 방정식 형태를 취하며, 비정상조건의 경우 Fourier 방정식 형태를 취하게 된다. 또한 비포화조건을 고려할 경우 투수계수와 체적함수량은 간극수압의 함수이다. 이와 같은 지배방정식을 해석하는 수치모형들은 적용이론, 수치해석기법, 전개과정, 입력요소, 사용자 편의성을 위한 부가기능, 그리고 처리속도 등에 따라 다양한 사용 프로그램이 개발되어 있다. 또한 침투 해석 프로그램은 크게 정상상태 침투해석과 비정상상태 침투해석이 가능한 프로그램으로 구분할 수 있으

며, 현재 일반적으로 사용되는 프로그램이 개발되었다.

(2) SEEP/W 지배방정식

투수영역 내에서 임의의 위치에 있는 요소의 경우 들어오고 나가는 유량의 차는 체적함수비와 차와 동일하다. 즉, 외부에서 유입되는 유량과 요소내의 유량의 변화량의 합은 체적함수비의 시간에 따른 변화율과 같다. 이를 식으로 나타내면 식 (4.4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.4)$$

여기서, H는 전수두, K_x 는 x방향 투수계수, K_y 는 y방향 투수계수, Q는 적용된 경계유량, θ 는 체적함수비, t는 시간을 나타낸다.

식 (4.4)는 임의의 시간에서 단위 체적을 출입하는 흐름 양은 체적함수비의 변화와 같다는 것을 말한다.

정상상태의 경우에는 임의의 시간에서 유입유량과 유출유량이 같으므로 우변이 0이 되며 체적함수비는 응력상태와 흙의 성질에 따라 식 (4.5)와 같이 변화한다.

$$\partial \theta = m_v \partial u_w \quad (4.5)$$

여기서, m_v 는 저류계수, u_w 는 간극수압 이다. 그리고 전수두는 식 (4.6)과 같이 압력수두와 위치수두의 합으로 표현될 수 있다.

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (4.6)$$

여기서, γ_w 는 물의 단위중량, y 는 위치수두 이다.

그리고 식 (4.6)을 다시 쓰면 식 (4.7)과 같다.

$$u_w = \gamma_w(H - y) \quad (4.7)$$

식 (4.7)을 식 (4.5)에 대입하면 아래의 식 (4.8)과 같다.

$$\partial \theta = m_w \gamma_w \partial (H - y) \quad (4.8)$$

식 (4.8)을 식 (4.4)에 대입하면 아래의 식 (4.9)와 같은 식이 나온다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial (H - y)}{\partial t} \quad (4.9)$$

위치수두는 일정하므로 시간에 관한 y 항은 없어지고 식 (4.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.10)$$

4.2.4 유한요소법

유한요소법은 연속체인 구조물을 1차원인 막대, 2차원인 삼각형이나 사각형, 3차원인 중실체(사면체, 6면체)의 유한 개의 요소로 분할하여 각각의 영역에 관하여 에너지원리를 기초로 하는 근사해법에 의하여 계산을 해나가는 수치계산 방법이다.

유한요소 수식화를 위하여 지배방정식에 Galerkin 방법을 적용하면 식 (4.11)로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} & \int_a ([B]^T [C] [B] R) dA \{H\} + \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle R) dA \{H\}, t \\ & = q \int_L (\langle N \rangle^T R) dL \end{aligned} \quad (4.11)$$

여기서, [B]는 동수경사 행렬, [C]는 요소침투 행렬, [H]는 절점수두 벡터, λ 는 $m_w \gamma_w$ 이다. 그리고 $\langle N \rangle^T \langle N \rangle$ 는 토체행렬식 [M]이며, $\{H\}, t = \frac{\partial h}{\partial t}$ 는 시간에 따른 수두변화, q는 요소단면을 통과하는 단위유량, $\langle N \rangle$ 는 보간함수 벡터이다.

위의 식을 행렬식으로 다시 쓰면 식 (4.12)와 같다.

$$[M] \{H\}, t + [K] \{H\} = \{Q\} \quad (4.12)$$

여기서, [M]은 질량 행렬, [K]는 요소특성 행렬, {Q}는 유량 벡터이다.

식 (4.12)에 대한 해가 수렴되면 영역 내 임의의 절점에서 수두를 알 수 있고 이로부터 각 적분점에서 동수경사와 흐름속도를 구할 수 있다.

하지만 정상상태 흐름의 경우에는 총수두가 시간의 함수가 아니므로
유한요소 식은 식 (4.13)과 같이 간략화 된다.

$$[K]\{H\} = \{Q\} \quad (4.13)$$



4.3 침투 해석 및 모형의 보정

4.3.1 입력자료 및 모의조건

본 논문에서 실험-3의 결과값을 이용해 침투 해석 모형을 보정하였다.

수치모의를 수행하기 위해서는 격자의 크기, 경계조건, 매개변수 등의 설정이 요구된다. 한국건설교통기술평가원(2005)은 일본의 하천제방설계 지침과 기존의 연구 및 해당 연구를 통해 격자크기를 제체 높이의 1/10 이하로 적용하는 것이 타당한 것으로 제시하고 있다. 연구에서는 해당 내용을 고려하고, 격자의 크기를 제체 높이의 약 1/30인 $0.5 \times 3.0 \times 3.0$ cm인 삼각형 격자로 설정하였다. 하지만 유공관 쪽은 원이 포함되어 있는 관계로 좀 더 세밀하게 격자를 구성하였다.

그림 4.2는 유공관 침투해석을 할 제방 단면 격자 망이다.

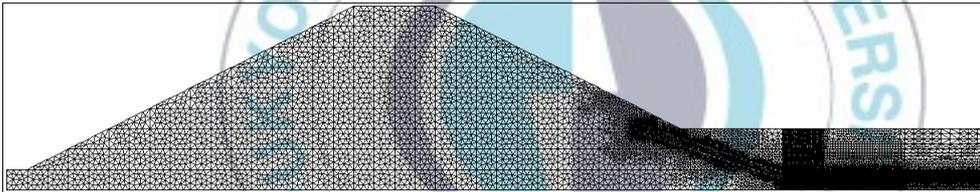


그림 4.2 침투해석 제방 단면

SEEP/W의 경계조건은 전수두(head), 압력수두(pressure head), 총 플럭스(total flux), 단위 플럭스(unit flux) 등을 정의하여 설정할 수 있고, 유입유량을 설정하는 총 플럭스 또는 단위 플럭스의 경계조건 설정 시 침윤 가능면(potential seepage face)을 정의할 수 있다. 본 논문에서는 실험-3의 수위별로 제외지의 수면과 접하는 부분의 경계조건을 설정하였다. 정상상태 해석에 있어서 SEEP/W 프로그램의 주요 매개변수는 수직·수평($k_r = k_y/k_x$) 투수계수의 비와 투수계수-간극수압의 관계이다.

4.3.2 SEEP/W 모형의 보정

(1) 수직·수평($k_r = k_y/k_x$) 투수계수

대부분의 흙은 등방 투수성을 가지지 않는다. 일반적으로 k 는 물의 흐름방향에 따라 변화한다. Das (2005b)는 연직방향으로부터 α 각도만큼 기울어진 방향으로 지반 내 물이 흐르는 상태를 나타내고 있다. 지반 내에서 수직방향 ($\alpha = 0^\circ$)과 수평방향 ($\alpha = 90^\circ$)에 대한 투수계수를 각각 k_v 와 k_H 라고 하면 k_v 와 k_H 의 크기는 현장의 지반형성과정을 포함한 몇몇 요소들에 따라 달라진다(그림 4.3).

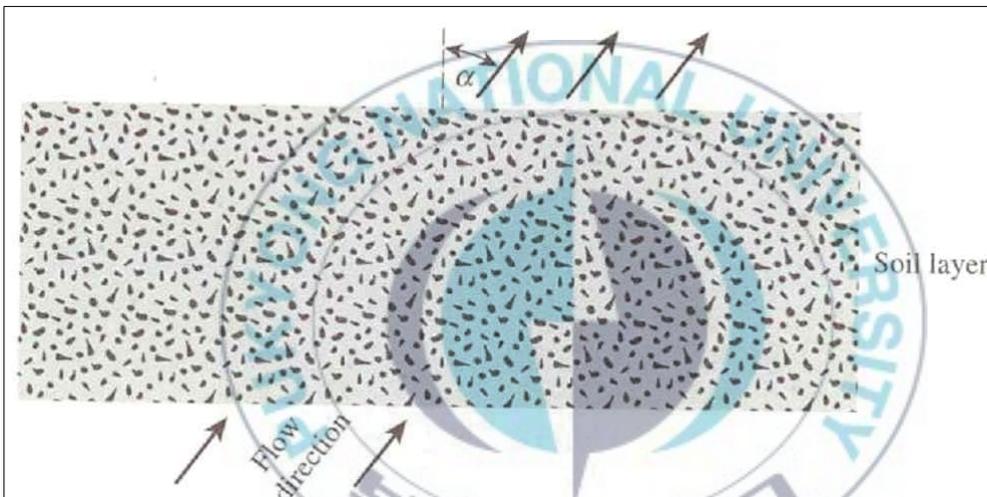
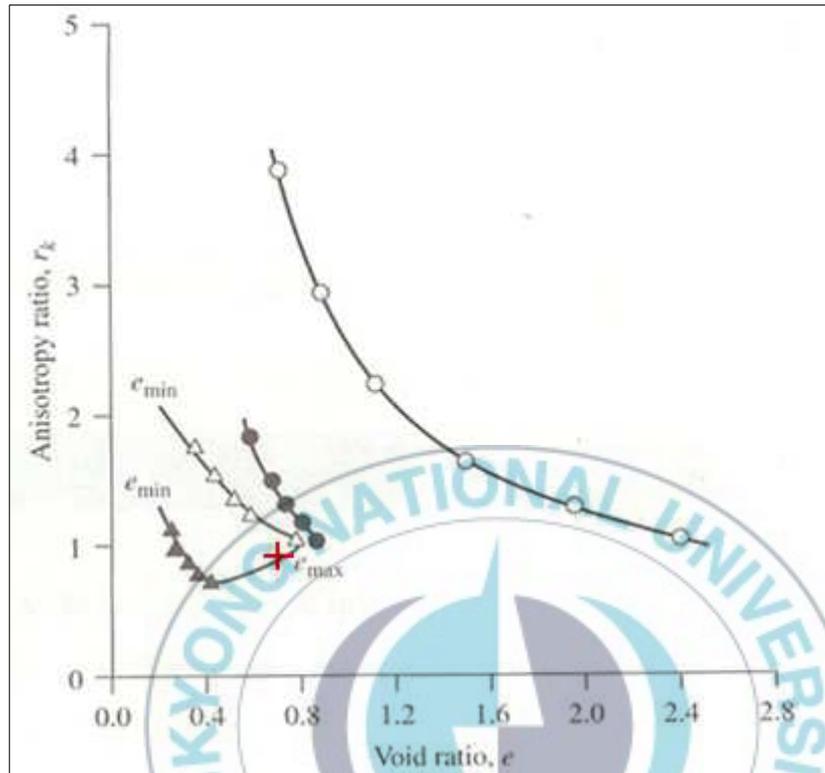


그림 4.3 투수성의 방향의존성

Basak(1972)와 Al-Tabba and Wood (1987)는 간극비에 따른 투수계수 이방성비 $r_k = k_H/k_v$ 의 변화를 조사하기 위하여 실내시험을 실시하였다. Basak의 시험과 Al-Tabba and Wood의 시험으로부터 구한 r_k 와 간극비(e)의 변화는 그림 4.4와 같다. 한편, Chapuis et al (1989)는 모래에 대한 시험결과를 제시하였다. 시험에 사용된 시료는 일차원 정적 및 동

적 다짐에 의해 조성되었다. 이들 시험으로부터 구한 e 의 변화에 따른 r_k 의 변화도 그림 4.4와 같다.



- Kaolin (Al-Tabbaa and Wood, 1987)
- △ Static compaction-sand (Chapuis et al, 1989)
- Dispersed kaolin (Basak, 1972)
- ▲ Dynamic compaction-sand (Chapuis et al, 1989)

그림 4.4 여러 가지 흙에 대한 간극비와 이방성비 관계

그림 4.4를 보면 본 논문에서 사용한 시료는 k_V 가 k_H 보다 작은 것을 알 수 있다. 즉 본 논문에서는 $r_k < 1$ 보편된다. 하지만 SEEP/W에 적용을 했을 때에는 r_k 에 1보다 작은수치들을 적용했을 때 보다 1 일때의 오차가 작게 나와 r_k 는 1로 적용을 하였다.

(2) 투수계수-간극수압

침투 실험에 의해 분석된 위압수두계별 위압수두와 수치모의에 의해 결정된 위압수두의 오차가 최소가 되도록 투수계수와 간극수압의 관계를 추정하였다. 투수계수와 간극수압의 관계는 SEEP/W의 매뉴얼에 제시되어 있는 그래프를 이용하여 가정하였다. 그림 4.5는 투수계수와 간극수압 관계 그래프이다.

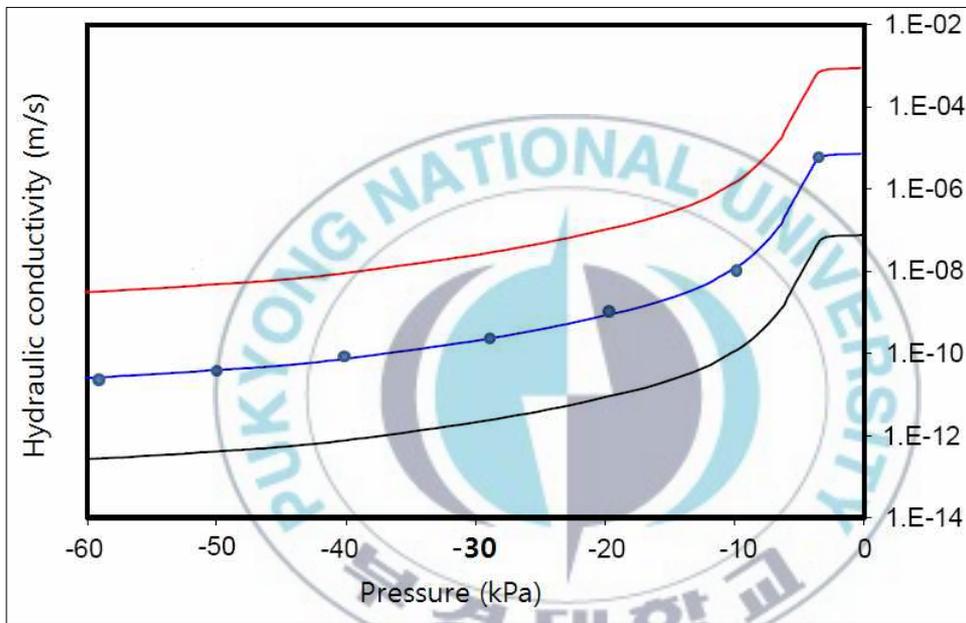


그림 4.5 투수계수-간극수압 관계 그래프

그림 4.5와 같이 본 논문의 투수계수 $3.06E-05$ m/s를 생각하여 점 7개를 정하고 그 위치의 값을 선택한 다음 모형을 보정하였다.

(3) 침투 모의

제방 침투 모의 모형의 보정은 유공의 크기와 유공관의 높이가 적절한 실험-3의 수위 60 cm, 70 cm를 대상으로 하였다.

제방 침투 실험과 침투 모의 모형의 보정 결과의 통계량은 평균제곱 오차의 제곱근(root mean square error; RMSE)으로 나타냈다(표 4.5). 그림 4.6, 4.7은 각 수위별 실험과 침투 모의 모형의 보정결과 비교 그래프이다.

표 4.3 수위 60 cm 제방의 침투 모의 모형의 보정결과 (단위: cm)

Piezometer Head	Piezometer location						
	0.0	10.0	40.0	70.0	100.0	130.0	160.0
침투 실험 값	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	49.5	45.0
침투 모의 모형의 값	60.0	59.7	58.4	55.2	55.2	50.9	45.5
Piezometer Head	Piezometer location						
	190.0	220.0	250.0	280.0	310.0	340.0	370.0
침투 실험 값	41.0	36.0	30.0	23.0	22.0	21.0	21.0
침투 모의 모형의 값	40.1	34.5	28.4	21.6	16.4	15.6	15.6

표 4.4 수위 70 cm 제방의 침투 모의 모형의 보정결과 (단위: cm)

Piezometer Head	Piezometer location						
	0.0	10.0	40.0	70.0	100.0	130.0	160.0
침투 실험 값	70.0	69.8	69.8	69.8	69.8	63.0	57.0
침투 모의 모형의 값	70.0	69.9	69.7	68.8	66.4	62.4	56.8
Piezometer Head	Piezometer location						
	190.0	220.0	250.0	280.0	310.0	340.0	370.0
침투 실험 값	50.5	45.5	38.0	29.0	26.0	25.5	25.0
침투 모의 모형의 값	50.5	43.6	35.8	27.3	20.8	19.7	19.7

표 4.5 제방실험과 침투 모의 모형의 보정결과 RMSE

구분	RMSE (cm)
수위 60 cm 제방	0.86
수위 70 cm 제방	0.81

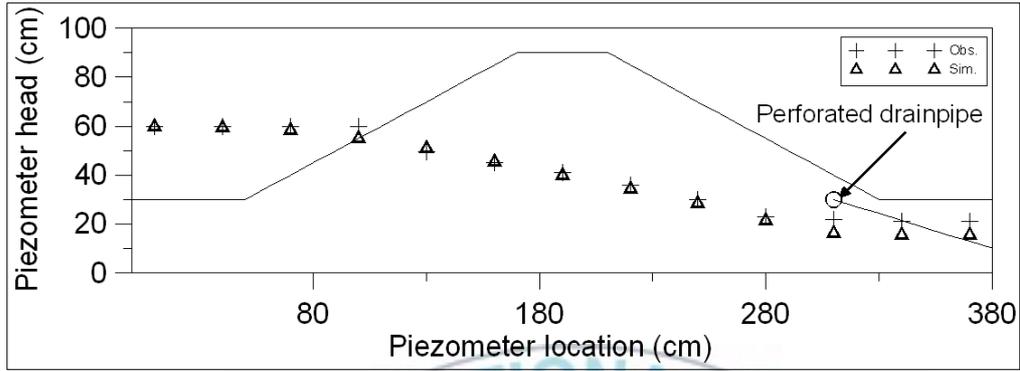


그림 4.6 수위 60 cm의 실험과 침투 모의 모형의 보정결과 비교

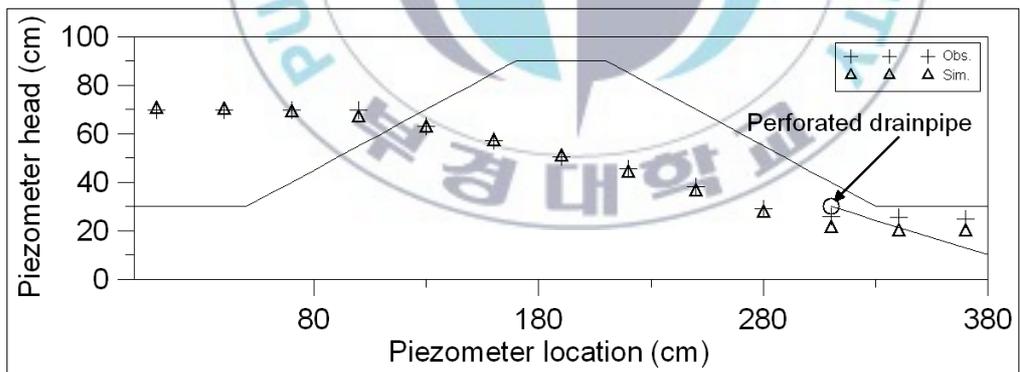


그림 4.7 수위 70 cm의 실험과 침투 모의 모형의 보정결과 비교

4.4 SEEP/W 모형의 결과 검증

그리고 보정된 침투 모의 모형의 프로그램을 이용하여 수위를 80 cm, 85 cm로 상승시켜서 침투 모의 모형을 수행한 결과 제방 사면에 포화 표면이 발생하지 않고 유공관으로 배수가 원활히 되었다.

침투 모의 모형의 검증 결과 통계량은 평균제곱오차의 제곱근으로 나타냈다(표 4.8). 그림 4.8, 4.9은 각 수위별 실험과 침투 모의 모형의 검증 결과 비교 그래프이다.

표 4.6 수위 80 cm 제방의 침투 모의 모형의 검증결과 (단위: cm)

Piezometer Head	Piezometer location						
	0.0	10.0	40.0	70.0	100.0	130.0	160.0
침투 실험 값	80.0	79.7	79.7	79.7	79.7	79.7	71.0
침투 모의 모형의 값	80.0	79.9	79.8	79.0	77.1	73.6	68.2
Piezometer Head	Piezometer location						
	190.0	220.0	250.0	280.0	310.0	340.0	370.0
침투 실험 값	62.5	55.0	47.0	30.5	29.5	29.0	28.5
침투 모의 모형의 값	61.4	53.3	44.0	33.5	25.5	24.2	24.2

표 4.7 수위 85 cm 제방의 침투 모의 모형의 검증결과 (단위: cm)

Piezometer Head	Piezometer location						
	0.0	10.0	40.0	70.0	100.0	130.0	160.0
침투 실험 값	85.0	84.9	84.9	84.9	84.9	84.9	79.0
침투 모의 모형의 값	85.0	84.9	84.8	84.1	82.3	79.0	73.8

Piezometer Head	Piezometer location						
	190.0	220.0	250.0	280.0	310.0	340.0	370.0
침투 실험 값	69.5	60.5	51.5	32.5	30.0	30.0	30.0
침투 모의 모형의 값	66.8	58.3	48.1	36.7	27.9	26.5	26.5

표 4.8 제방실험과 침투 모의 모형의 검증결과 RMSE

구분	RMSE (cm)
수위 80 cm 제방	0.85
수위 85 cm 제방	0.90

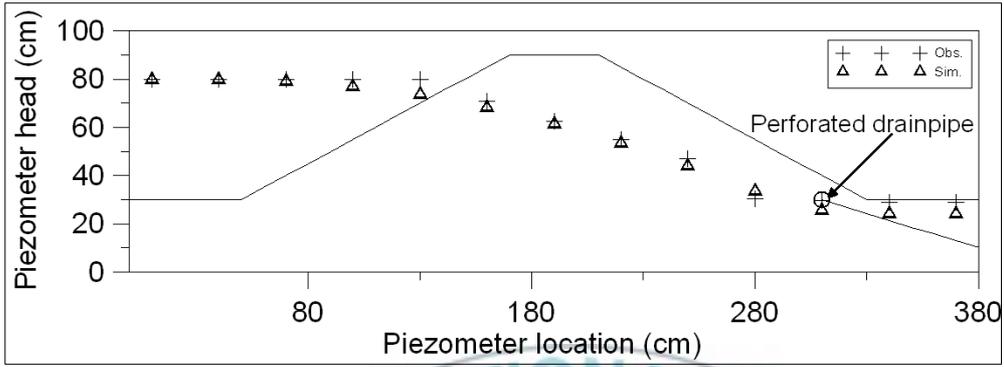


그림 4.8 수위 80 cm의 실험과 침투 모의 모형의 검증결과 비교

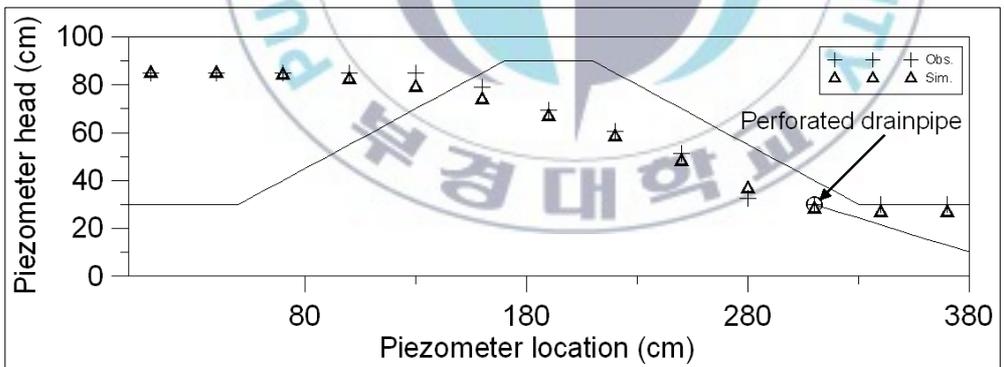


그림 4.9 수위 85 cm의 실험과 침투 모의 모형의 검증결과 비교

4.5 SEEP/W 모형 검증의 활용

4.5.1 유공관 미설치 시 침투 모의

검증된 침투 모의 프로그램을 이용하여 유공관이 없는 경우의 침투 모의를 수행하였다. 그림 4.10을 보면 제내 비탈면에 포화 표면이 발생한 것을 확인 할수 있다.

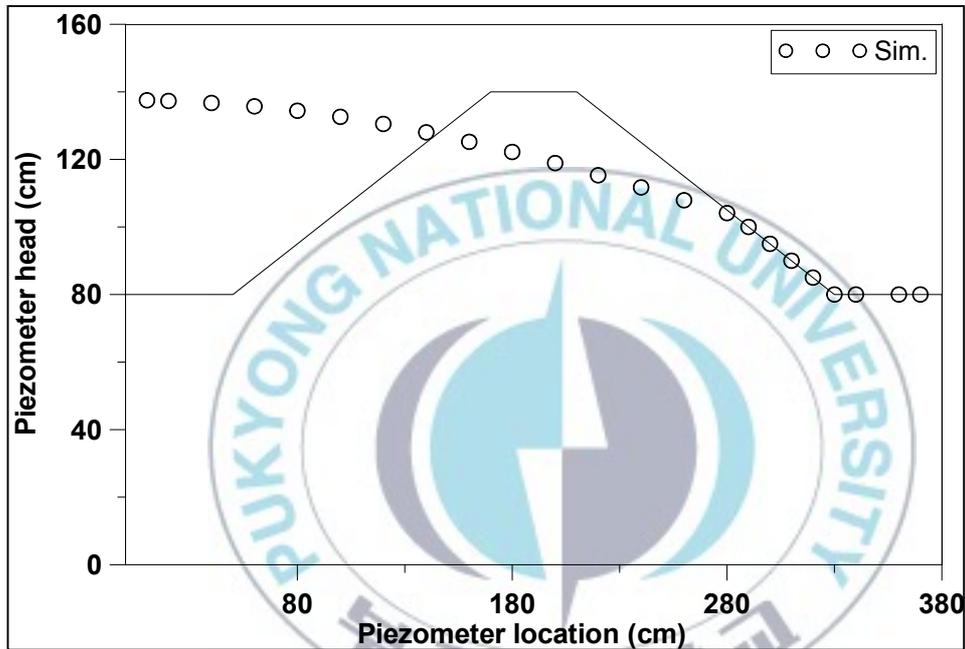


그림 4.10 유공관 미설치 시 침투 모의 결과

4.5.2 제내 비탈끝부터 유공관 중심의 위치별 침투 모의

제내 비탈끝부터 유공관의 위치에 따라 안전성의 변화를 살펴보고자 침투 모의를 수행하였다. 기초지반의 높이를 30 cm에서 80 cm로 증가시켰고, 수위는 135 cm로 고정하여 침투 모의를 수행하였다. 유공관의 중심 높이는 기초지반 표면의 높이(80 cm)로 고정하고, 유공관 중심의 위

치를 제내 비탈끝에서 제외 비탈끝으로 점점 이동시켜 침투 모의를 수행하였다. 수행결과 그림 4.11처럼 제내 비탈끝으로부터 거리가 80 cm까지는 제내지 표면이 포화되지 않았으나 90 cm부터 제내지 표면이 포화되는 것을 볼 수 있다.

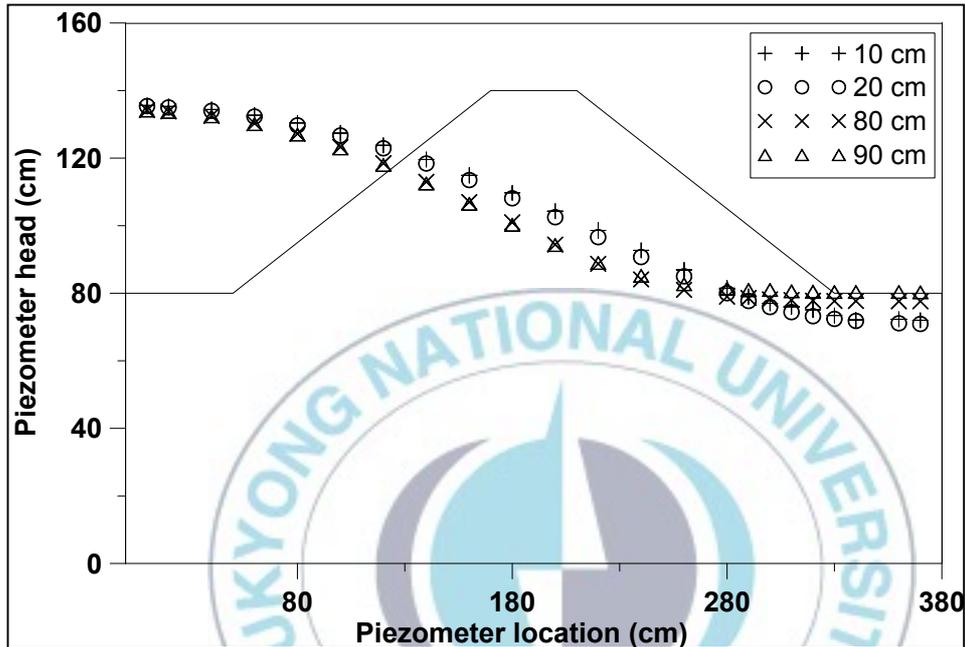


그림 4.11 제내 비탈끝부터 유공관 중심의 위치별 침투 모의 결과

침투 모의 상으로는 제내 비탈끝으로부터 거리가 80 cm일 때 제내지가 포화되지 않아 안전해 보인다. 하지만 침투 모의 만으로는 안전하다는 판단을 할 수 없기에 표 2.3 하천설계기준(2009)에서 제시한 한계동수경사에 의한 안전성을 검토하였다. 제방이 관공에 대하여 안전하려면 침투류 해석에 의하여 산출한 동수경사(i_e)가 한계동수경사(i_c)의 1/2 이하가 되도록 해야한다. 표 4.9는 한계동수경사와 산출된 동수경사의 비교 값이다. 한계동수경사는 $i_c = (G_s - 1)/(1 + e)$ 의 수식으로 계산하였으며 흙

의 공극비 e 는 0.72, 토립자의 비중 G_s 는 2.62로 계산된 한계동수경사는 0.95이다. 산출한 동수경사는 유공관의 유공 지점의 값이다.

표 4.9 한계동수경사와 산출된 동수경사 비교(거리별)

제내 비탈끝부터 유공관 중심위치(cm)	i_e	$0.5 \cdot i_c$	비교
10	0.31	0.48	<, 안전
20	0.33	0.48	<, 안전
30	0.35	0.48	<, 안전
40	0.38	0.48	<, 안전
50	0.40	0.48	<, 안전
60	0.42	0.48	<, 안전
70	0.46	0.48	<, 안전
80	0.50	0.48	>, 불안전
90	0.55	0.48	>, 불안전

침투 모의 상으로는 80 cm까지가 안전한 것처럼 보였으나 한계동수 경사에 의한 안전율의 계산 결과 70 cm 지점까지가 안전한 것으로 분석 되었다.

4.5.2 기초지반 표면부터 유공관 중심의 높이별 침투 모의

다음으로, 유공관 중심이 제내 비탈끝부터 떨어진 거리를 20 cm로 고정하고, 유공관 중심의 높이는 기초지반표면을 기준으로 두고 높이별 침투 모의를 수행하였다. 그림 4.12와 같이 기초지반 표면부터 중심의 높이가 -30 cm 인 지점까지 침투 모의에 문제가 없었다. 그리고, 유공관의 중심의 높이가 +10 cm를 초과하면 유공관이 비탈표면 밖으로 나오기 때문에 침투 모의를 수행 할 수 없었고, 유공관의 중심의 높이가 -30 cm 미만이 되면 제각수로 높이로 인한 배수관 기울기로 문제로 침투 모의를 수행할 수 없었다.

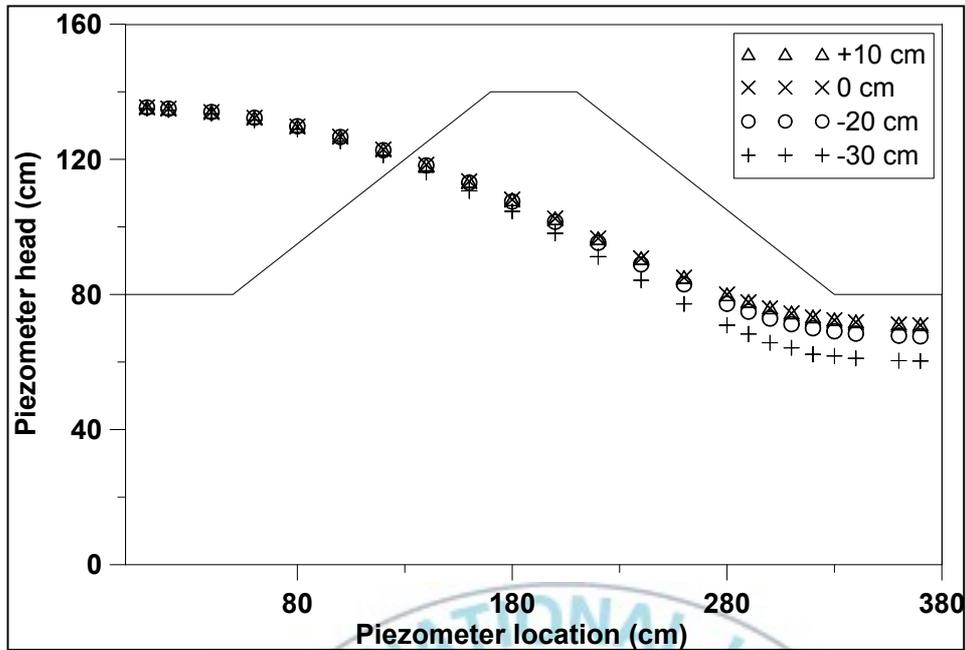


그림 4.12 기초지반 표면부터 유공관 중심의 높이별 침투 모의 결과

또한, 4.5.2절과 같이 안전율을 계산한 결과 표 4.10를 보면 유공관의 중심이 기초지반 표면부터 -20 cm 높이에 있을 때까지 안전한 것으로 분석되었다.

표 4.10 한계동수경사와 산출된 동수경사 비교(높이별)

기초지반 표면부터 유공관의 중심위치(cm)	i_e	$0.5 \cdot i_c$	비교
+10	0.27	0.48	<, 안전
0	0.33	0.48	<, 안전
-5	0.36	0.48	<, 안전
-10	0.39	0.48	<, 안전
-20	0.4	0.48	<, 안전
-30	0.5	0.48	>, 불안전

4.6 무차원 지표

4.5.1, 4.5.2절의 결과 값을 이용하여 제내 비탈끝부터 유공관 중심의 거리(d)와 제방저폭(D)의 관계와 기초지반 바닥부터 유공관 중심의 높이(h)와 제방고(H)의 관계를 구할 수 있었다. 하천설계기준(2009)에서는 산출된 동수경사(i_e)가 한계동수경사(i_c)의 1/2이하가 되어야 한다고 기술하고 있다. 표 4.11를 보면 한계동수경사(i_c)와 산출된 동수경사(i_e)비교 분석에 의하여 d/D 가 0.25 이하가 되어야 안전하다고 할 수 있다.

표 4.11 제내 비탈끝부터 유공관 중심의 거리와 제방저폭의 관계 지표

제내 비탈끝부터 유공관 중심위치(d)	제방저폭 (D)	i_e, i_c 비교	d/D
10 cm	280 cm	$i_e < i_c$, 안전	0.04
20 cm	280 cm	$i_e < i_c$, 안전	0.07
30 cm	280 cm	$i_e < i_c$, 안전	0.11
40 cm	280 cm	$i_e < i_c$, 안전	0.14
50 cm	280 cm	$i_e < i_c$, 안전	0.18
60 cm	280 cm	$i_e < i_c$, 안전	0.21
70 cm	280 cm	$i_e < i_c$, 안전	0.25
80 cm	280 cm	$i_e > i_c$, 불안전	0.29
90 cm	280 cm	$i_e > i_c$, 불안전	0.32

표 4.12처럼 한계동수경사의 안전조건에 의하여 h/H 가 -0.33 초과 하지 않는 것이 좋은 것으로 분석된다.

표 4.12 기초지반 표면부터 유공관 중심의 높이와 제방고의 관계 지표

기초지반 표면부터 유공관 중심위치(h)	제방고 (H)	i_e, i_c 비교	h/H
0	60 cm	$i_e < i_c$, 안전	0
-5	60 cm	$i_e < i_c$, 안전	-0.08
-10	60 cm	$i_e < i_c$, 안전	-0.17
-20	60 cm	$i_e < i_c$, 안전	-0.33
-30	60 cm	$i_e > i_c$, 불안전	-0.5

d/D 가 0.25보다 작아야 한다는 조건과 h/H 가 -0.33 초과이어야 한다는 조건은 각각, 유공관 중심의 높이가 기초지반표면에 위치한 경우와 제내 비탈끝에서 20 cm 떨어진 경우의 결과이다. 보다 일반적인 조건은 여러 토성과 위치에서 수치 모의 또는 실험을 수행하여 구할 필요가 있다.

4.7 유공관의 효과

4.5.1 절과 같이 배수공을 설치하지 않은 제방의 경우, 제내지 사면에 포화표면이 발생하였다. 포화표면이 발생된 제방은 침투에 대하여 불안정한 상태가 되어 파괴될 수 있다. 반면에 유공관을 제내 비탈끝 부근에 설치하면 침투수가 원활히 배수되어 제내 비탈에 포화표면이 나타나지 않았다(그림 3.13). 즉, 유공관 배수공으로 공병단식 배수공과 유사한 침투 조절의 효과를 달성하는 결과를 얻었다. 하지만 4.5 절과 같이 유공관 중심의 거리(그림 4.11)와 높이(그림 4.12), 상황에 따른 유공의 크기(그림 3.15)가 적절하지 않는다면 원활한 배수가 되지 않으므로 설치하기 전에 유공관의 설계를 면밀하게 수행할 필요성이 있다.



5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 하천 제방의 누수 방지 대책 중 하나인 제내지층 비탈 끝 배수공의 하나로서 유공관을 설치하는 방법에 대한 효과를 검토하였다. 실험을 통한 검토결과 배수공으로서 유공관의 유용성을 확인하였다. 유공관에 대한 언급은 여러문헌에서 확인 할 수 있으나 규격을 제시한 문헌은 없었다. 본 논문에서는 배수공 규격 설계를 위하여 기초지반이 없는 경우의 제내 포화표면 길이 산정식을 참조하여 유공관의 설계를 하였다. 유공관의 면적당 유공 면적을 5 % 동일하게 하고 제외 수위가 85 cm 이하인 경우에, 유공관의 중심 높이가 기초지반(30 cm)의 높이보다 낮으면(실험-2) 배수가 원활이 되지 않고 결국에는 제내 비탈에 포화 표면이 발생하여 붕괴가 되었으나, 기초지반의 높이에 위치하면(실험-1) 포화 표면이 발생하지 않고 제체로 침투한 물은 배수가 원활하였다.

그리고 유공관의 중심 높이를 30 cm로 동일하게 하고 제외 수위가 85 cm 이하인 경우에, 유공관의 유공면적이 5 %일 때(실험-1) 제체로 침투한 물은 배수가 원활히 되었으나 제내지 지면에 물고임 현상이 있었다. 반면 유공의 면적 비율을 10 % 증가시킨 실험-3은 침윤선은 거의 동일하나 유공관을 지날때부터 유공 크기에 의한 배수의 원활로 제내지의 지면에 물고임 현상이 없었다. 이 비교 실험은 면적당 유공의 비율이 적합한지를 알 수 있는 비교 실험이다. 유공의 크기가 제방의 상황에 맞지 않는다면 유공이 침투량을 감당하지 못하고 포화표면이 발생하여 붕괴가 일어 날수 있는 것으로 분석되었다. 그리고 유공관의 높이와 유공의 크기가 적합해야지 배수가 원활히 되는걸로 분석되었다.

제방 침투 실험의 결과를 바탕으로 침투 모의 모형을 보정하고 검증하였다. 보정자료를 바탕으로 침투 모의 수행하여 수위를 85 cm까지 올

려도 비탈 사면에 침윤선이 통과 하지 않고 배수가 원활히 되는 것을 확인 할 수 있었다.

유공관을 설치함으로써 실험제방의 침투 조절이 가능하였고 누수 방지를 위한 배수공으로서 적합하다고 판단된다. 하지만 유공의 중심위치와 유공의 크기가 적합해야 배수가 원활한 것을 확인하였다.

또한 4.5.1, 4.5.2절처럼 검증된 모형을 활용하여 제내 비탈끝에서 유공관의 거리와, 기초지반 바닥부터 유공관의 높이를 변경하면서 수치 모의한 결과 수치 모의 상으로는 안전하게 나오는 위치도 하천설계기준(2009)에서 제시한 안전율에 만족하지 못하는 경우가 발생했다.

우리나라에서는 제방 제체의 침투 방지 기술로서 주로 제방 단면을 확대하거나 제외지 사면의 피복기법을 사용한다. 제방 단면을 확대하기 위해서는 제방 부지의 확보뿐 아니라 제체 재료의 확보, 제방 성토에 필요한 공사비 등 많은 비용과 노력이 요구된다. 사면 피복 기법의 경우에도 제외지측 사면을 콘크리트 타설 등을 통해 보호해야 하므로 시공에 어려움이 있고, 많은 비용이 소요된다. 이러한 단점의 해결 수단 미국, 일본 등 외국에서는 사석배수공 기법을 사용하고 있다. 해당 기법은 제내 비탈끝에 사석을 설치하여 제체 내의 침투수를 신속히 배수하여 제체 내에 형성되는 침윤선의 높이를 낮춘다. 또한 제방의 기초 지반을 통한 침투수도 배수시키므로 기초 지반에 대한 침투 보강의 역할을 수행한다. 하지만 이러한 사석배수공 또한 재료로 사용되는 사석이 많이 확보되어야 한다. 사석을 확보하기 위해서는 넓은 채석장이 확보되어야 하고, 현장여건에 따라 채석장 확보가 어려울 경우 공기가 길어지는 문제점이 있다. 유공관을 이용한 제방의 침투 조절 방법은 기존의 단면 확대기법, 피복기법, 차수벽 설치 기법, 사석배수공 기법에 비해 시공이 간단하고, 경제적인 방법이다. 특히, 사석배수공 기법과 비교할 때, 유공관은 공장 제

작이 가능하므로 공기를 단축할 수 있고, 재료 확보를 위한 채석장의 확보가 필요 없어 비용을 크게 절감할 수 있는 장점이 있다.

본 논문의 제방 침투조절 실험과 수치 모의는 한 가지 제체 재료로 수행하였다. 하지만 제체의 재료는 한 가지로 국한 되지 않으므로 제체의 재료별 유공의 규격과 유공관 중심의 위치를 결정하는 여러 경우의 실험과 수치 모의가 후속될 필요가 있다.



6. 참고문헌

- 강명수 (2004). 낙동강 유역특성을 고려한 제방안정에 관한연구. 석사학위논문, 연세대학교
- 공영산 (2011). 제내 비탈끝 배수공을 이용한 하천제방의 침윤조절. 석사학위논문, 부경대학교
- 공영산, 강태욱, 이상호 (2012). “제내 비탈끝 배수공을 이용한 제방의 침투 조절에 관한 연구.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, Vol. 45, No. 6, pp. 569-581.
- 건설교통부 (2004). 하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서, 한국건설교통기술평가원.
- 건설교통부 (2005). 하천시설물 유지관리 매뉴얼, 한국건설교통기술평가원.
- 김상규, 김영목 (1991). “강우로 인한 사면 불안정.” 대한토질공학회 논문집, 대한토질공학회, Vol(1), pp. 53-64.
- 김상규, 신승목, 서홍석, 한성길 (1992). “침투유속에 의한 제방의 파이핑 해석 사례 연구.” 대한토목학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 497-500.
- 김규호, 윤광석 (2005). “자연친화적 하천 제방설계.” 한국하천협회, 하천제방의 설계 시공 및 유지관리, 2005년 하천협회 특별교육 워크숍.
- 박윤희 (2008). 하천제방 축조재료로서 하상재료의 활용성 분석. 석사학위논문, 진주산업대학교.
- 신방웅, 강종범, 방성택, 경구현 (2000). “파이핑 현상에 따른 하천제방의 안정성 평가.” 건설기술논문집, Vol. 19, No. 2, pp. 157-167.
- 양문용 (2001). 수치해석과 모형실험을 통한 제방의 침투 및 파괴 해석.

석사학위논문, 동의대학교

- 윤광석 (2004). “하천제방 붕괴 유형분석 및 설계방안.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, Vol. 39, No. 5, pp. 50-60.
- 윤광석, 김규호, 이성준 (2006). “하천제방의 안전성.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, Vol. 39, No. 5, pp. 14-19.
- 임동균, 여홍구, 강준구, 김규호 (2005). “제방 침투 수치모형의 적용 및 검토.” 대한토목학회 정기학술대회, pp. 1898-1901.
- 정형식, 유재일, 안상로 (1989). “토질체체의 파이핑 파괴에 대한 실험적 연구.” 대한토질공학회지, Vol. 5, No. 4, pp. 17-26.
- 최정진 (2007). 하천제방의 합리적인 침투방지대책. 석사학위논문, 경북대학교.
- 한국건설교통기술평가원 (2006). 제방 침투 보강기법 분석, R&D/03산학연 C01-01, 건설교통부, pp. 43-62.
- 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준 해설.
- Das, B.M. (2005a). *Principles of geotechnical engineering*.
- Das, B.M. (2005b). *Principles of geotechnical engineering*.
- Al-Tabbaa, A., and Wood, D.M. (1987). “Some Measurements of the permeability of Kaolin.” *Geotechnique*, Vol. 37, pp. 499-503.
- Basak, P. (1972). “Soil structure and its effects on hydraulic conductivity.” *Soil science*, Vol. 114, No. 6, pp. 417-422.
- Chapuis, R.P., Gill, D.E., and Bass, K. (1989). “Laboratory permeability tests on sand: Influence of compaction method on anisotropy.” *Canadian geotechnical journal*, Vol. 26, pp. 614-622
- Geo-Slope Interantional Ltd. (2007). *Seepage Modeling with SEEP/W 2007*. Calgary, Alta, Canada.

- Taylor, R.L., and Brown, C.B. (1976). "Darcy flow with a free surface." *Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 93, pp. 25-33.
- Uno, T., Morisugi, H., Sugii, T., Nakano, Y.(1988), "Stability Evaluation of River Levees on the Basis of Actual Levee Breachings". 日本土木學會論文集, 第400号III-10, pp. 161-170.
- U.S. Army Corps of Engineers (2000). *Design and Construction of Levees*. pp. 5-9.
- 國土開發技術研究センター (1998). ドレージ工設計マニュアル.
- 國土開發技術研究センター (2002). 河川堤防の構造検討の手引き. pp. 72-78.
- 中島秀雄 (2003). 河川堤防, 技報堂.
- 河川堤防設計研究會 (2000). 河川堤防設計指針, 建設省.



감사의 글

2011년 11월 교수님께 대학원을 진학하고 싶다고 말씀 드리고, 2012년 2월 대학원을 진학했고, 벌써 2년이라는 세월이 흘렀습니다. 이 2년이라는 시간이 길지도 짧지도 않았던 것 같습니다. 아니 오히려 짧았다고 표현하는 것이 맞는 것 같습니다. 이 짧은 시간동안 전 수자원시스템 연구실에 소속되어 많은 것을 배운 것 같습니다. 그리고 어려운 일이 있거나 괴로워 할 때 격려해주시고 도와주신 분들에 감사의 말을 올립니다.

우선, 많이 부족한 저를 하나하나 짚어가면 가르쳐 주신 이상호 교수님께 감사의 말을 올립니다. 특히, 학문적으로 배운 것 말고도 다른 개인적인 일에도 잊지 않으시고 걱정하며 격려 해주시며 길을 인도 해주신 것에 대해 마음속 깊이 감사의 말을 올립니다.

또한, 소중한 시간을 할애하여 저의 논문을 심사해 주셨던 이종섭 교수님, 김수한 교수님께도 감사의 말을 올립니다.

연구실의 가장 큰형이셨던 태욱이 형 태욱이 형한테 정말 많이 배운 것 같습니다. 비록 지금은 취업을 하셔서 옆에 계시지 않으시지만 아직도 연구실에 오시면 저한테 도움 되라고 이야기를 많이 해주시는데 정말 감사합니다. 이제 연구실의 중심인 태훈이 나랑 동갑이지만 동갑처럼 느껴지지 않게 나한테 도움주고 가르쳐준거 고맙게 생각 한다. 그리고 동

생이지만 먼저 졸업한 동근이한테도 고맙다는 말을 전하고 싶다. 이제 1년 정도 남은 병권이와 곧 진학하는 영규는 연구실에서 많은걸 배워갔으면 한다. 특히, 태훈이가 귀찮을 정도로 달라붙어서 많은걸 배워갔으면 하며 수자원시스템 연구실 소속이라는 자부심을 가졌음 한다.

그리고 수자원시스템 연구실에 자부심을 느끼게 해주고 항상 관심을 가져주시는 강신욱 선배님, 박종표 선배님, 이정민 선배님, 조희호 선배님, 최정민 선배님, 이동엽 선배님, 공영산 선배님, 박복성 선배님, 김도영 선배님, 송한기 선배님, 최재훈 선배님께 감사의 말을 올립니다.

또, 내 실험을 위해 많은 도움을 준 지현, 우성, 규찬이 너희들 아니었음 실험 어떻게 했을지 앞이 캄캄하다. 내가 힘들 것 같으면 알아서 도와주고 정말 고맙다. 도움 잊지 못할 것 같다.

마지막으로 넉넉지 않은 생활형편이지만 대학원 생활하는데 어려움을 느끼지 않게 해주신 부모님과 형께 감사의 말을 전하고 싶습니다.

