

# 양질토와 혼합처리된 국내 하상토의 제체재료로서의 침투특성

## Seepage Characteristics of Domestic Bed Sediments Mixed with Good-quality Soil as Levee Fill Material

최 봉 혁<sup>1</sup> Choi, Bong-Hyuck

김 경 민<sup>2</sup> Kim, Kyung-Min

김 진 만<sup>3</sup> Kim, Jin-Man

이 대 영<sup>4</sup> Lee, Dae-Yeong

### Abstract

To improve the stability of levee structure, it is required to use good quality fill materials, intensive management, appropriate hydraulic structure and construction of cut-off wall. In particular, the most important factor of levee construction technology is to use bed sediment for its safety. In this study, seepage model test and numerical analysis were performed based on a standard section of levee recommended in the river design standard of Korea (2005). The results of test and analysis show that most of the bed soil is a sand (SP in USCS), which does not satisfy the permeability criteria for levee materials ( $k=10^{-3}$  cm/sec), thus for the safety of levee it is required to adopt a stabilizing method such as good quality soil mixing, water content control.

### 요 지

하천제방의 안정성 향상을 위해서는 양질의 성토재료 사용, 철저한 다짐관리, 적절한 수리구조물 및 차수벽 설치 등이 필요하다. 특히, 하천제방 축조를 위한 양질의 성토재료는 하천제방의 안정성에 있어서 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 하상토의 제방 성토재료로서 적합성 평가를 위한 기초연구로서, 국내 하상토의 제체재료로서의 침투에 대한 안정성 평가를 위하여 하천설계기준(2005)의 제체 표준단면을 이용한 모형시험과 수치해석을 수행하였다. 그 결과 국내 발생 하상토의 경우 대부분이 모래(SP)로서 하천설계기준 제체재료의 투수계수( $10^{-3}$ cm/sec 이하)를 만족시키지 못하였으며 양질토 혼합 및 함수비 조정 등과 같은 안정처리공법이 요구되는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Bed sediment, Fill material, Good quality soil mixing, Levee, Seepage, Water content control

### 1. 서 론

최근 하천제방은 노후화 및 이상홍수로 인하여 치수 구조물로서 안정성이 떨어지고, 홍수 시 제방붕괴로 인한 인명 및 재산피해가 가중되어 왔었다. 국내 제방붕

괴 유형은 1987년~2003년까지의 통계자료에 의하면 조사건수 758건 중 월류 300건(39.6%), 침식 295건(38.9%), 제체 불안정 87건(11.5%), 구조물에 의한 파괴 76건(10.0%) 등인 것으로 보고하고 있다(한국건설기술연구원, 2004).

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Disaster & Environment Research Division, KICT)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 Post-Doc. (Member, Post-Doc., Geotechnical Disaster & Environment Research Division, KICT, kyungmin@kict.re.kr, 교신저자)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 책임연구원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Disaster & Environment Research Division, KICT)

4 정회원, 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Disaster & Environment Research Division, KICT)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

하천제방 붕괴 원인은 분석 결과를 고찰하면 수공학적 원인 뿐 만 아니라 지반공학적인 원인과 직·간접적으로 관련되어 있음을 알 수 있다. 예로써 제체 불안정에 의한 파괴는 전통적으로 지반공학분야인 제체 및 기초지반의 침하, 침투, 사면안정 등과 관련된 설계 및 시공, 유지관리 등의 문제점들이 복합되어 발생된다.

이러한 관점에서 하천설계기준(2005)은 치수 구조물로서 제방분야 설계기준 개정과 관련하여 수공학 및 지반공학 관련 전문가가 공동 대안을 제시하였다는 점에서 큰 의의가 있다.

2005년도 하천설계기준 개정 중 지반공학분야와 관련된 중요 내용으로는 입도분포특성, 투수특성 등을 고려한 제방재료 선정 기준을 강화하였고, 제체재료로서 하상토의 활용을 제한적 권장하였으며, 제방다짐관리 기준을 강화하여 제방 구간일 때 상대다짐도 90%로 상향, 구조물 구간일 때 상대다짐도 95%로 상향 조정하였다. 또한 1:3 비탈면 경사 완화에 의한 제방안정성, 친수성, 장비 접근성을 개선하고 배수통문 주변 제방재료 선정, 다짐규정 강화, 말뚝사용의 예외적 제한, 파이핑 방지 관련 설계 및 대책공법의 보완 등이 있다.

한편, 1990년대까지는 하천제방의 축제 재료와 관련하여 하상토를 이용하여 제방공사를 시행하였으나, 2005년 개정된 하천설계기준에서는 최근 피해사례를 감안하여 다짐 및 재료관리가 어려운 하상토의 축제 재료로의 사용을 원칙적으로 금지하고, 하천제방의 축제 재료로서 전단강도 및 투수특성이 양호한 양질토를 사용하도록 권장되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 낙동강 유역 하상토의 제체재료로서의 침투에 대한 안정성 평가를 위하여 하천설계기준(2005)의 제체 표준단면을 이용한 모형시험과 수치해석을 수행하였다.

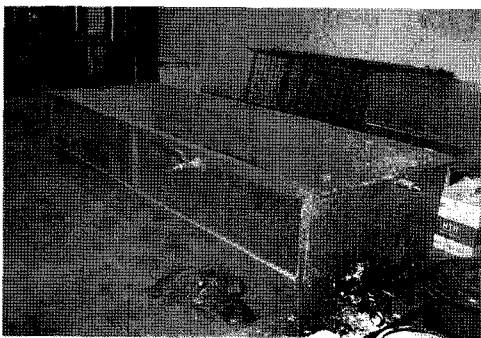


그림 1. 모형토조

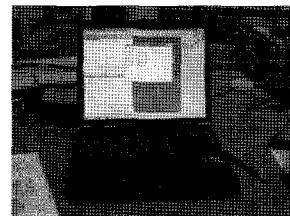
## 2. 침투모형실험

### 2.1 모형실험 개요

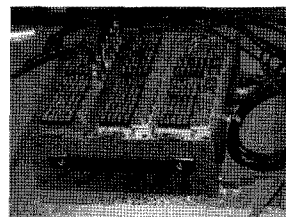
본 실험은 투수저항성이 불량한 모래(SP)를 제체 재료로 사용하였을 경우에 대한 제체 내의 침투특성을 파악하기 위한 것으로, 제체 하부 기초지반은 상대적으로 투수저항성이 큰 화강풍화토(SM)를 사용하여 기초지반으로의 침투를 방지하였다.

침투모형실험에 사용된 모형토조는 그림 1에서 보듯이 310cm×96cm×50cm 크기의 철제 박스를 이용하였으며, 박스의 전면은 투명아크릴을 이용하여 제체 형상 및 실험 중 거동 특성을 관찰할 수 있도록 하였다. 모형토조실험에 사용된 주요 장비로는 데이터 로거 및 컴퓨터, 간극수압 측정기를 위한 간극수압계로 구성되어 있다(그림 2 참조).

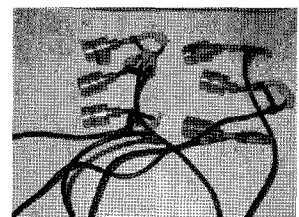
모형실험에 적용한 제방 축소모형은 그림 3에서 보는 바와 같이 높이 12cm, 두마루 폭 12cm, 제체 경사 1:3의 단면으로 제작하였으며, 제체재료의 경우 하상토 모래(왜관하상토-1, SP), 기초지반의 경우 화강풍화토(SM)를 사용하여 실험 중 기초 지반으로의 침투를 방지하였다. 제체 내 간극수압계 설치는 제방 중앙 하부를 중앙부 1개소, 제외지 쪽으로 10cm 이격하여 1개소, 제내지 방향으로 각 10cm 이격하여 3개소를 설치하였고, 수위 조건을 측정하기 위하여 제외지 방향 앞비탈 기슭에서 20cm 이격하여 1개를 설치하여 총 6개소를 설치하였다(그림 3(a)참조). 한편, 모형실험에 적용된 수위조건은 그림 3(b)에서 보듯이 1시간에 걸쳐 최대 수위 10cm로



(a) 계측용 컴퓨터

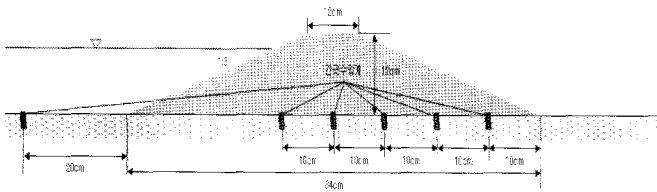


(b) 데이터 로거

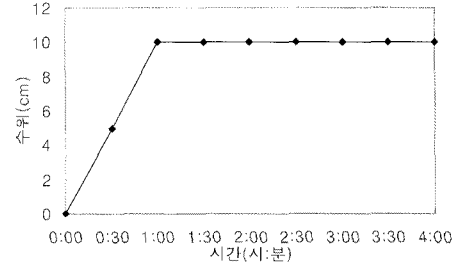


(c) 간극수압계

그림 2. 주요 시험장비

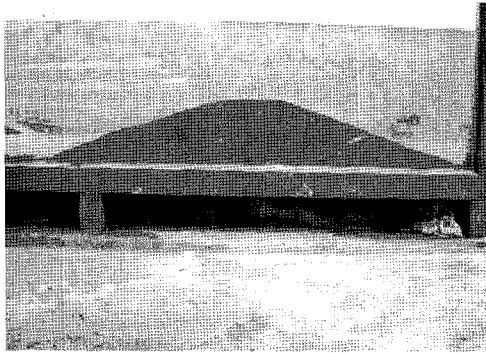


(a) 모형실험 단면

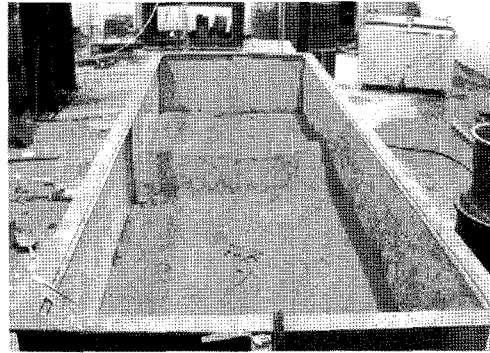


(b) 수위 조건

그림 3. 모형실험 단면 및 수위 조건



(a) 제체 조성 원료 후 모습



(b) 제체 조성 후 제외지 수위 10cm 유지

그림 4. 제체 조성 및 제외지 수위 조절

증가하고, 이후 최대 수위 10cm를 유지하도록 하였다.

## 2.2 모형실험 결과

모형실험에 적용된 수위조건은 1시간에 걸쳐 최대 수

표 1. 시간 경과에 따른 간극수압 및 수두 변화(제체 중앙부)

경과 시간(분)	간극수압( $\text{tonf/m}^2$ )	수두(cm)
15분	$3.6 \times 10^{-3}$	0.4
30분	$2.3 \times 10^{-3}$	2.2
45분	$6.0 \times 10^{-3}$	6.0
60분	$6.5 \times 10^{-3}$	6.5
75분	$6.7 \times 10^{-3}$	6.7
90분	$7.5 \times 10^{-3}$	7.5

위 10cm로 증가하고, 이후 최대 수위 10cm를 유지하는 조건으로 홍수 시 수위가 올라가고 일정기간 최대 홍수위가 지속되는 비정상수위조건을 적용하였다.

모형실험 결과는 시간경과에 따른 간극수압 및 수두 변화를 보여주는 표 1에서 보듯이 제체 내 간극수압 및

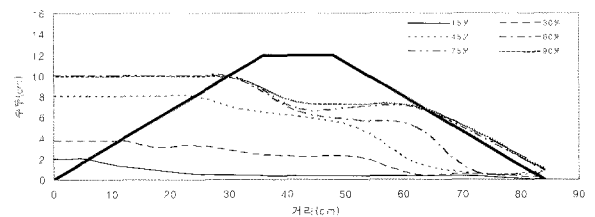


그림 5. 모형실험을 통한 시간경과에 따른 제체 내 수두변화

수두는 경과시간 60분에 걸쳐 최대 수위에 도달하는 수위조건에 따라 점차 상승하고, 최대 수위 도달 이후 계속 상승하여 경과시간 75분(최대 수위 지속시간 15분)에 제체 누수가 발생하는 것으로 나타나 제체 침투만을 고려할 경우 모래(SP)는 제체 재료로 부적절한 것으로 평가되었다.

### 2.3 모형 단면을 이용한 수치해석

#### (1) 수치해석 개요

침투해석은 약 760 여 개의 치밀한 4절점 평면요소로 이루어진 유한요소망을 이용하였다. 수치해석에 이용된 프로그램은 스위스 ZACE 사에서 개발된 지반과 관련된 흙과 암반, 지중 구조물, 굴착, 흙-구조물 상호 작용과 지하의 흐름의 수치해석적 시뮬레이션 등에 주로 적용되는 지반전용 해석 프로그램인 Z-SOIL 프로그램 사용하여 수행하였다.

침투해석은 단면 및 수위 조건을 모형실험과 동일하게 설정하여 수행하였으며, 메쉬의 크기는 제체 높이의 1/10 이하인 가로 1cm, 세로 1cm로 설정하였으며, 해석에 사용된 각 지반의 투수계수는 앞서 수행된 실내 실험 자료를 사용하였으며, 기타 물성치는 대표적인 값을 이용하였다.

#### (2) 수치해석 결과

그림 6은 수치해석을 통한 시간경과에 따른 제체내 수두변화를 나타내고 있다. 앞서 수행한 모형시험 결과와 마찬가지로 경과시간 60분에 걸쳐 최대 수위에 도달

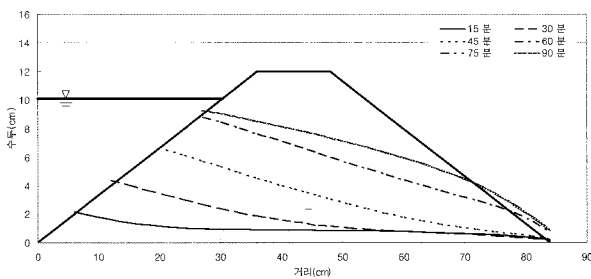


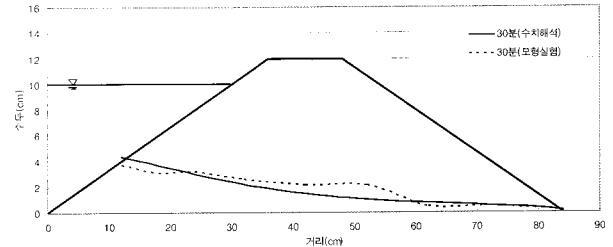
그림 6. 수치해석을 통한 시간경과에 따른 제체 내 수두변화

표 2. 해석에 이용된 지층구성 및 지반 물성치

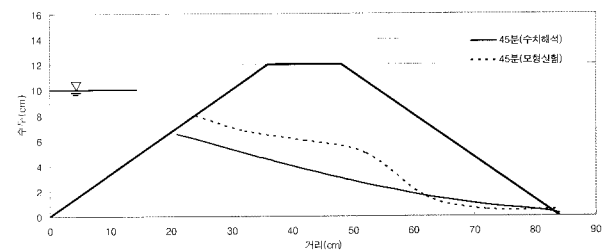
재 료	탄성계수 (E, tonf/m <sup>2</sup> )	단위중량 (γ <sub>t</sub> , tonf/m <sup>3</sup> )	간극비 (e)	투수계수 (cm/sec)	점착력 (c, tonf/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (φ, °)
제체(SP)	3,500	1.7	0.5	$4.85 \times 10^{-2}$	0.06	34.1
기초(SM)	5,000	1.9	0.43	$3.05 \times 10^{-5}$	0.62	31.4

하는 수위조건에 따라 점차 상승하고, 최대 수위 도달 직후인 경과시간 60분에 제체 누수가 발생하는 것으로 나타났다.

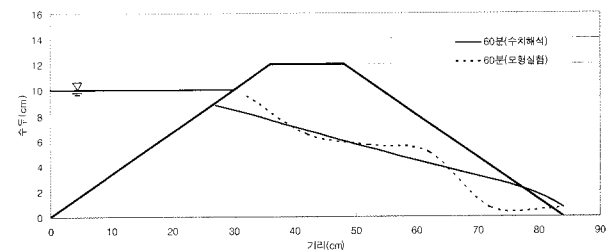
한편 그림 7에서는 시간경과에 따른 모형실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 7에서 보듯이 시간 경과에 따라 모형실험결과가 다소 차이가 나타났으나



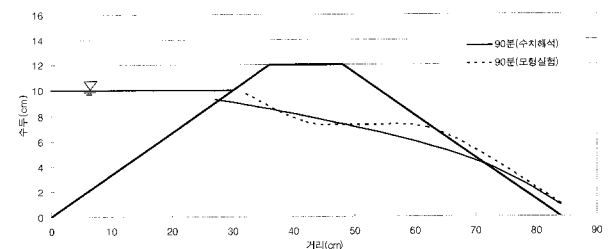
(a) 30분 경과 후



(b) 45분 경과 후



(c) 60분 경과 후



(d) 90분 경과 후

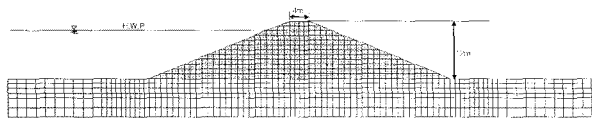
그림 7. 시간경과에 따른 모형실험결과와 수치해석결과의 비교

전체적인 경향은 일치되는 것으로 평가되었다.

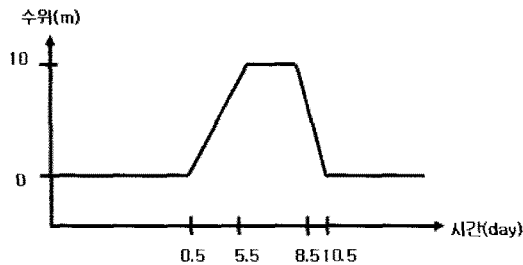
### 3. 하상혼합토 이용 축조제방의 안정성 평가

#### 3.1 수치해석 개요

해석에 이용된 단면은 제체 높이 12.0m, 둑마루 폭 4.0m, 제체 경사 1:3의 단면으로 설정하였으며(하천설계기준, 2005), 제체 재료는 모형실험에 사용된 모래(SP), 화강풍화토(SM), SP 25%+SM75%, SP50%+SM50%, SP75%+SM25%로 혼합한 재료를 이용하였다. 이때 기초지반의 경우 투수저항성이 크도록( $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec) 화강풍화토(SM)를 사용하여 실험 중 기초 지반으로의 침투를 방지



(a) 침투해석 단면



(b) 적용 수위조건

그림 8. 실물 침투해석 단면 및 수위조건

하였다.

침투해석에 적용된 수위 조건은 평수위 지속시간 10 시간, 평수위에서 5일에 걸쳐 최대수위에 도달한 후 3일의 지체시간을 거쳐 2일 동안에 평수위로 돌아오는 비정상 수위조건을 적용하였다.

한편, 해석에 이용된 메쉬 크기는 제체 높이의 1/10 이하인 가로 1m, 세로 1m로 설정하였으며, 해석에 사용된 각 지반의 투수계수 및 기본 물성치는 실내 실험 자료를 사용하였으며, 기타 물성치는 대표적인 값을 이용하였다.

#### 3.2 수치해석 결과

하상혼합토를 이용하여 축조된 제방의 안정성 평가는 혼합비에 따른 제체 사면안정성평가, 제체 침투에 따른 제체내 포화영역의 변화, 제체 선단부의 유속벡터의 변화를 통해 평가하였다.

사면안정성평가 결과는 하상혼합토 혼합비에 따른 사면안정 해석결과를 보여주는 표 4에서 보듯이 제체 재료 SP의 경우 수위가 상승 중인 4일 째에 사면안전율이 1.1로 불안정한 것으로 나타났으며, SP75%+SM25%의 경우 최대수위 도달 후 최대수위 지속시간 3일 째인 경과시간 8일에서 사면안전율이 1.2로 불안정한 것으로 나타났다. 그 외의 제체 재료의 경우 사면의 안정성이 가장 떨어질 것으로 예상되는 최대수위 지속시간 3일 째인 경과시간 8일에서 안전율 2.0 이상으로 안정한 것

표 3. 해석에 이용된 지층구성 및 지반 물성치

재료	탄성계수 (E, tonf/m <sup>2</sup> )	단위중량 ( $\gamma$ , tonf/m <sup>3</sup> )	간극비 (e)	투수계수 (cm/sec)	점착력 (c, tonf/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 ( $\phi$ , °)
제체	SP	3,500	1.70	$4.85 \times 10^{-2}$	0.06	34.1
	SP25%+SM75%	5,000	1.87	$7.98 \times 10^{-5}$	0.55	32.1
	SP50%+SM50%	4,000	1.94	$1.02 \times 10^{-4}$	0.34	32.8
	SP25%+SM75%	4,000	1.95	$9.00 \times 10^{-3}$	0.21	33.4
	SM	5,000	1.85	$3.05 \times 10^{-5}$	0.62	32.1
기초(SM)	5,000	1.9	0.43	$1.0 \times 10^{-7}$	0.5	30.0

표 4. 해석결과에 따른 사면안정성 및 유속벡터

제체 재료	사면안정성		유속벡터(cm/sec)	
	안전율(FS)	경과시간(일)	Vx	Vy
SP	1.1	4	$2.8 \times 10^{-2}$	$7.3 \times 10^{-6}$
SP75%+SM25%	1.2	8	$3.7 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-5}$
SP50%+SM50%	2.0 이상	8	$1.5 \times 10^{-6}$	$3.9 \times 10^{-7}$
SP25%+SM75%	2.0 이상	8	$8.9 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-7}$
SM	2.0 이상	8	$1.9 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-8}$

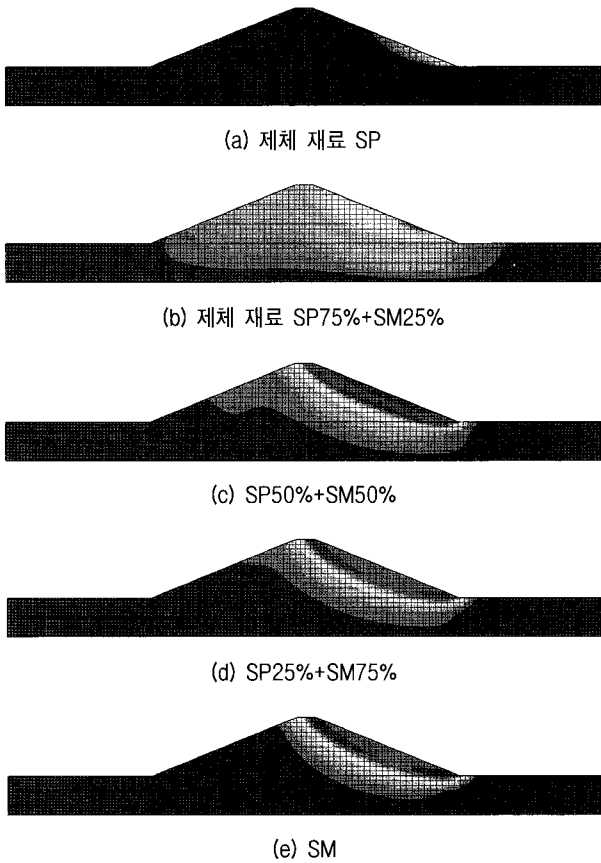


그림 9. 제체 재료에 따른 사면안정해석결과

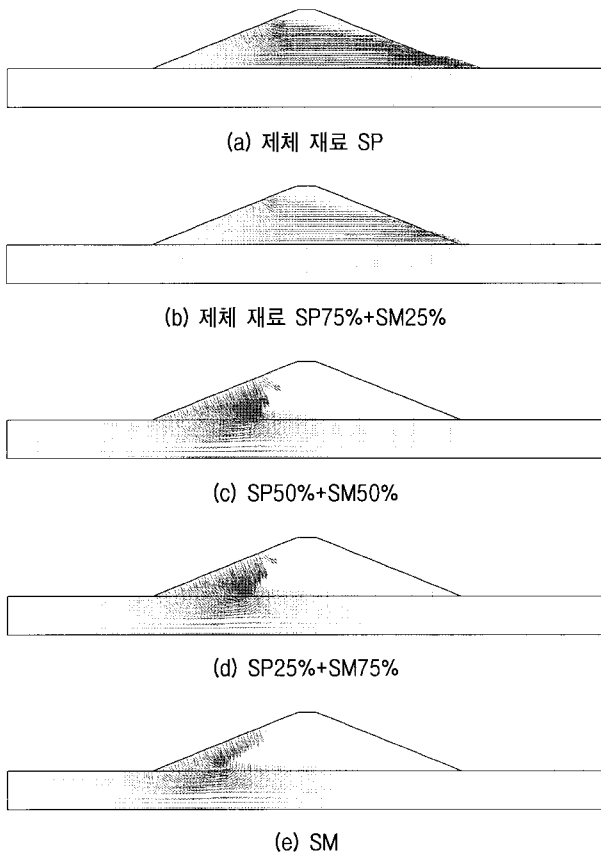


그림 10. 제체 재료에 따른 유속벡터 변화(수위 지속시간 8일 째)

으로 나타났다. 이때, 각 혼합비에 따른 하상혼합토로 축조된 제방의 예상파괴면은 그림 9에서 보듯이 제체 사면 내 파괴가 발생하는 것으로 나타났다.

제체 선단부에서 검토한 유속벡터는 표 4에서 보듯이 사면안정해석결과와 마찬가지로 제체 재료 SP, SP75%+SM25%에서는 각각  $2.8 \times 10^{-2}$ ,  $3.7 \times 10^{-3}$ 로 다른 경우에 비해 1,000배 이상 크게 나타나 상대적으로 제체 누수의 위험성이 있을 것으로 판단된다.

해석결과에 따른 포화영역은 제체 재료에 따른 포화영역 변화를 보여주는 그림 11에서 보듯이 제체 재료 SP, SP75%+SM25%의 경우 정상침투상태의 포화영역이 발생하는 반면에 상대적으로 제체 재료의 투수저항성이 큰 SP50%+SM50%, SP25%+SM75%, SM의 경우 제체 침투가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

본 해석결과를 종합하면 제체 재료 SP, SP75%+SM25%인 경우 사면안정성이나 제체 침투에 취약하며, SP50%+SM50%, SP25%+SM75%, SM의 경우 상대적으로 안정성이 확보되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 하상혼합토를 이용하여 제방을 축조할 경우 하상토(SP)와 양질토(SM)의 혼합비는 SP:SM이 25:75 이상의 것을 사용하여야 할 것으로 판단된다.

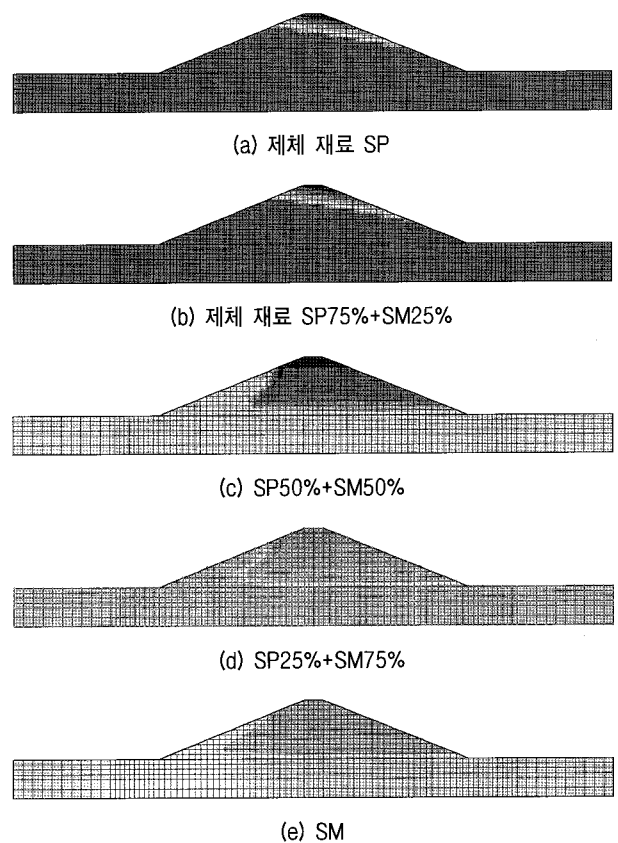


그림 11. 제체 재료에 따른 포화도 변화(수위 지속시간 8일 째)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 국내 발생 하상토 및 혼합비율에 따른 하상혼합토의 제체 재료로서의 적합성 평가를 위하여 하천설계기준(2005)의 제체 표준단면을 이용한 축소 모형시험과 모형 및 실물에 대한 수치해석 등 제방 안정성 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제체 재료 모래(SP)를 이용한 축소모형시험 결과를 통한 제체 내 간극수압 및 수두는 경과시간 60분에 걸쳐 최대 수위에 도달하는 수위조건에 따라 점차 상승하고, 최대 수위 도달 이후 계속 상승하여 경과 시간 75분(최대 수위 지속시간 15분)에 제체 누수가 발생하는 것으로 나타나 제체 침투만을 고려할 경우 모래(SP)는 제체 재료로 부적절한 것으로 나타났다.
- (2) 모형시험 조건을 이용한 수치해석 결과는 모형시험 결과와 마찬가지로 경과시간 60분에 걸쳐 최대 수위에 도달하는 수위조건에 따라 점차 상승하고, 최대 수위 도달 직후인 경과시간 60분에 제체 누수가 발생하는 것으로 나타나 모형시험결과 전체적인 경향은 일치되는 것으로 나타났다.

- (3) 하상혼합토의 혼합비에 실단면 수치해석 결과 제체 재료 SP, SP75%+SM25%인 경우 사면안정성이나 제체 침투에 취약하며, SP50%+SM50%, SP25%+SM75%, SM의 경우 상대적으로 안정성이 확보되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 하상혼합토를 이용하여 제방을 축조할 경우 양질토(SM)의 혼합비율을 50% 이상이 되어야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 추진하는 2005년 건설기반구축사업(C105B1000006-05B0100-00610)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 임동권, 여홍구, 김규호, 강준구 (2006), 제방 침투 수치해석 모형의 적합성 분석, *한국수자원학회 논문집*, 제 39권 3호, pp.241-252.
2. 한국건설기술연구원 (2004), *하천제방 관련 선진기술 개발*, 건설교통부
3. 한국수자원학회 (2005), *하천설계기준·해설*

(접수일자 2008. 7. 1, 심사완료일 2008. 9. 8)