

조위변화에 따른 방조제 끝막이 사석단면의 침투거동 Seepage Behavior of Sea Dyke Final Closure with Tidal Variation

유전용¹⁾, Jeon-Yong Yoo, 오영인²⁾, Young In Oh, 김현태³⁾, Hyun-Tae Kim, 정인영⁴⁾, Jeung In-Young

¹⁾ 한국농촌공사 농어촌연구원 농공기술연구실 책임연구원, Chief Researcher, Agricultural Engineering Research Division, Rural Research Institute, KRC(jyryu@ekr.or.kr)

²⁾ 한국농촌공사 농어촌연구원 농공기술연구실 선임연구원, Senior Researcher, Agricultural Engineering Research Division, Rural Research Institute, KRC

³⁾ 한국농촌공사 농어촌연구원 농공기술연구실 수석연구원, Research Fellow, Agricultural Engineering Research Division, Rural Research Institute, KRC

⁴⁾ 한국농촌공사 농어촌연구원 농공기술연구실 실장, Research Director, Agricultural Engineering Research Division, Rural Research Institute, KRC

SYNOPSIS : Sea dyke construction is simply defined that the cutting procedure of sea water flow. Sea dyke construction is more difficult than in-land construction because it's placed on deep seabed and exposed sea wave attack. Especially, the final closure of sea dyke is most dangerous due to the fast velocity of tidal flow. The final closure section is consisted with vast rubble and heavy stone gabion, therefore the discharge velocity at land side of final close section is irregularly and sometime occur the fast discharge velocity. In this study, the seepage model test performed to evaluate seepage behavior with tidal variation of final closure and continuous sea dyke section such as discharge velocity, hydraulic gradient, and phreatic line. Based on the seepage model test results, the maximum discharge velocity of final closure section is 1.7m/sec. Also the local discharge velocity increment and vortex is occurred.

Key words : Seepage behavior, Final closure, Sea dyke, Seepage model test, Discharge velocity

1. 서 론

방조제 공사는 바다를 막아 바닷물의 흐름을 차단해가는 과정이라고 간단하게 정의할 수 있다. 바다를 막아나가는 방법으로는 공사현장에서 가장 쉽게 경험할 수 있는 육상공사와는 달리 수심이 깊고 파랑이 심한 바다에서 이루어지는 공사이기 때문에 축조재료의 유실이 많고 심할 경우 방조제가 붕괴되는 위험이 큰 공사이다. 따라서 방조제 단면의 안전성을 도모하고 축조재료의 유실을 최소화할 수 있는 공법이 방조제 공사의 성패를 좌우하는 최대의 관건이라고 할 수 있다. 특히, 방조제의 최종 끝막이 단면은 대규모 사석과 돌망태 등을 이용하여 일차적으로 바다를 막아 해수를 차단하는 기능을 수행한다. 따라서, 방조제의 최종 끝막이 단면은 해수의 유입을 차단하여 유속이 저감되기는 하나, 구성 재료가 불규칙하고 간극이 크기 때문에 일반적인 지반내의 침투흐름보다 상당히 빠른 침투가 발생되므로 끝막이 후의 후속공정인 필터공, 성토공 등에 많은 영향을 미친다. 본 연구에서는 방조제 끝막이 후 축조된 사석단면과 후속공정을 통하여 축조되는 방조제단면에 대한 실내 침투모형시험을 수행하여 침투거동을 예측 및 분석하였다. 침투모형 시험 장치는 높이 1.8m, 길이 5.0m, 수로 1.0×1.0×1.0m 크기이며 유속제어 및 조위재현을 위한 자동 유량 및 압력조절장치를 장착하였다. 다양한 조위변화를 재현하여 사석단면내의 유속변화, 침윤선 분포 등을 계측하여 침투거동을 분석하였다. 실내 침투모형시험 결과, 끝막이 사석단면의 침투유속은 최대 1.7m/sec 발생하였으며, 국부적인 유속증가 및 와류현상이 관측되었다.

2. 사석단면을 통과하는 조위의 침투유속

끝막이 1차 사석단면이 막히고 나면 내외수위차가 커지고 사석제의 공극이 크기 때문에 사석제를 통과하는 흐름은 난류(turbulent flow) 상태가 된다. 난류상태에서 동수경사는 투수계수에 비례해서 급격히 커지고 제체를 구성하는 사석에 부하되는 하중도 커지게 된다. 1차 사석단면을 통과하는 흐름이 난류이기 때문에 층류(laminar flow) 상태의 지하수 흐름에 적용하는 Darcy 방정식은 직접 사용할 수 없으며 투수계수와 유속과의 관계를 변형시켜 사용하여야 하며, 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_f^n = a \cdot i \quad (1)$$

여기서 U_f : 침투유속(m/sec), a : 투수계수상수(m/sec) n , n : 지수로서 층류 시에는 1, 난류 시에는 2, 층류와 난류사이에서는 1~2, i : 동수경사이다. Darcy 방정식에서 $U_f = K \cdot i$ 이므로 두 방정식을 정리하면 다음 식 (2)와 같다.

$$K = a^n i^{\frac{1-n}{n}} \quad (2)$$

델프트수리연구소에서 동수경사와 침투유속에 관한 수리시험을 많은 투수성 재료를 대상으로 실시하였으며 그 결과를 다음 표 1과 같이 제시하였다. 또한, 그림 1은 Cedergren(1977)이 제시한 투수성재료의 평균입径별 침투유속을 도시한 바와 같다.

표 1. 난류상태에서 투수계수상수(a)와 투수계수(k)의 관계

재료별	n	a	k(m/sec)			
			i=1.0	i=0.5	i=0.25	i=0.1
사석 1000/3000kg	2.0	0.066	0.25	0.36	0.51	0.81
사석 60/300kg	2.0	0.025	0.16	0.22	0.30	0.50
철광석 버럭	1.53	0.0135	0.060	0.076	0.097	0.13
인광석 버럭	1.4	0.015	0.050	0.061	0.074	0.096
샌드위치형 지수층	1.3	0.00013	0.0010	0.0012	0.0014	0.0018
자갈	1.0	0.00036	0.00036	0.00036	0.00036	0.00036
모래	1.0	0.000032	0.00032	0.000032	0.000032	0.000032

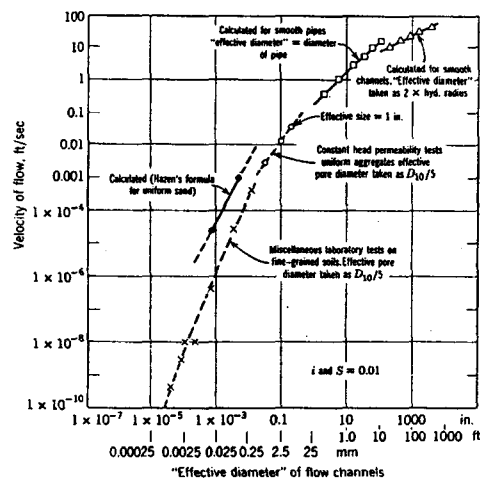


그림 1. 지반재료를 통과한 침투유속과 임의 관경을 통과하는 등가유속

3. 방조제 단면에 대한 침투모형시험

3.1 침투모형시험 단면

본 연구에서는 1차 사석깔막이 후, 후속 공정인 필터공, 성토물막이 공정의 원활한 수행과 안정한 방조제 단면축조를 위하여 깔막이 후 방조제단면에 대한 침투모형시험을 수행하였으며, 조위변화에 따른 동수경사변화, 침투유속(discharge velocity) 및 침윤선 분포 등을 측정하였다. 또한, 1차 사석단면 깔막이 후 속공정으로 진행되는 근고공, 근고공 필터매트 시공에 따른 침투유속 저감효과를 분석하였다. 그림 2는 본 연구의 침투모형시험을 수행한 방조제 단면을 도시한 것이다.

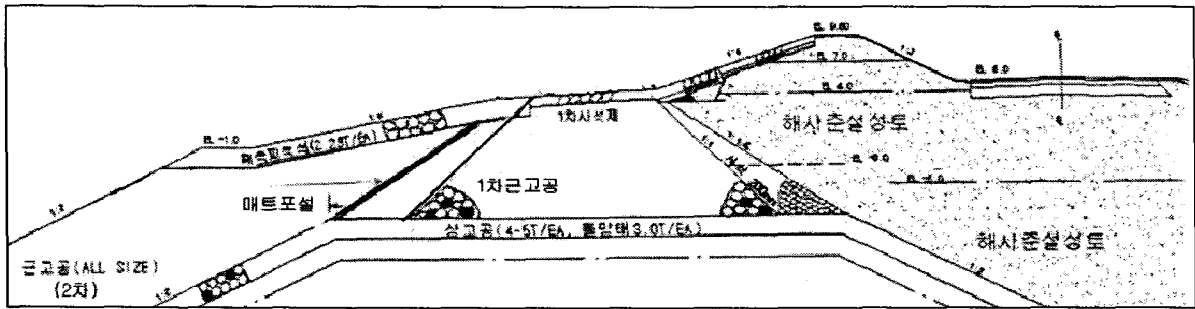


그림 2. 침투모형시험 단면도

3.2 침투모형시험 장치

방조제 침투모형시험 장치는 높이 : 1.8m, 길이 : 5.0m, 수로: 1.0×1.0×1.0m 크기이며, 유속제어 및 조위재현을 이한 자동 유량 및 압력조절장치를 장착하였다. 그림 3은 방조제 침투모형시험 장치의 측면을 나타낸 것이며, 그림 4는 자동유량 및 압력조절장치를 나타낸 것이다. 총 수압 펌프용량은 펌프량 : 1500ℓ/min, 최대압력 : 10kg/cm²인 펌프를 사용하였다.



그림 3. 침투모형시험장치

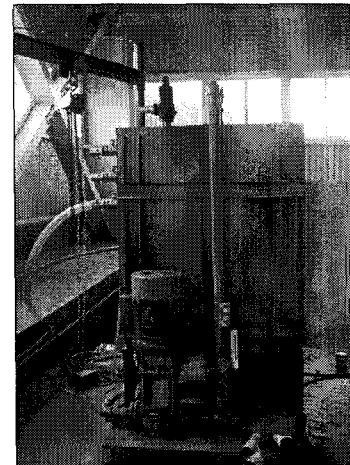


그림 4. 자동유량 및 압력조절장치

3.3 침투모형시험 경계조건 및 계속

수리모형시험(Hydraulic model test)은 수학적인 수단에 의하여 해답을 얻는 것이 곤란한 수리학상의 제 현상을 실험과 유사한 모형으로 재현시켜, 해답을 얻는 방법이다. 해안 및 항만구조물은 일반적으로 경계조건이 복잡하기 때문에 수리모형시험이 유효한 수단으로 활용된다. 본 연구에서는 수리모형시험 기법을 이용한 방조제 침투모형시험을 수행함으로써 깔막이 후 방조제에서 발생될 수 있는 제 현상에 대하여 분석하였다.

수리모형시험에서는 모형에서의 현상이 일정한 규정에 따라서, 실물에서의 현상을 나타내는 것이 요구된다. 따라서, 기하학적 상사, 운동학적 상사, 및 역학적인 상사의 3종류의 상사(Similarity)가 성립할 필요가 있다. 일반적으로 축소 모형시험에 대한 상사는 규정되어 있는 상사율을 적용하여 실시하며, 가장 일반적인 파에 관한 현상의 상사는 중력이 지배적이기 때문에 Froude의 상사율에 의해 수리모형시험이 조작된다. Froude의 상사율에 의한 정상모형의 물리량 축척은 표 2에 나타낸 바와 같다.

표 2. 수리모형시험의 상사율

Quantity	Dimension	Prototype	Model
Area	[L ²]	1	1/l _r ²
Volume	[L ³]	1	1/l _r ³
Time	[T]	1	1/l _r ^{1/2}
Velocity	[LT ⁻¹]	1	1/l _r ^{1/2}
Force	[MLT ⁻²]	1	1/W _r l _r ³
Stress	[ML ⁻¹ T ⁻²]	1	1/W _r l _r
Strain	-	1	1
Energy	[ML ² T ⁻²]	1	1/W _r l _r ⁴
Friction	-	1	1

침투모형시험에서 적용한 새만금 방조제 단면의 모형축척은 조위변동의 제원, 수로의 크기, 펌프 성능 등을 고려하여 정상모형의 1/15으로 선정하였다. 압력과 무게는 다음 식 (3)에서 보는 바와 같이 축척의 세제곱에 의하여 상사법칙이 적용되므로 축척의 비가 작더라도 상당한 압력과 무게가 작용한다.

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{W_m}{W_p} = \frac{\gamma_m}{\gamma_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^3 \quad (3)$$

여기서, m 과 p 는 모형(model)과 실물(prototype)을 의미하는 첨자이며, F 는 힘, W 는 무게, γ 는 단위중량, L 은 축척을 의미한다. 방조제 구성 재료에 대한 상사는 1차 사석단면 최소입경 150mm(돌망태 최소입경) 이상, 근고공 : 최대입경 150mm, All size을 적용하였으며, 방조제 끝막이에 직접 투입될 재료를 선정하여 시험을 수행하였다. 그림 5는 1차 사석단면의 침투모형시험 경계조건을 나타낸 것이며 그림 6은 근고공의 설치장면을 나타낸 것이다. 본 연구의 침투모형시험단면 및 시험조건은 수위조건에 따른 단면 내 침윤선 분포 및 수압분포, 수위조건에 따른 유출(Discharge) 유속, 수심별 유속분포, 유속계측에 따른 투수계수 산정, 근고공 매트 설치심도에 따른 유속 분포 등 4가지 항목에 대하여 분석하였다. 본 연구의 침투모형시험에 사용된 계측장치는 수위계(간극수압계) 10조, 유속계 2조이며, 전체 데이터 수집은 Data logger (TDS-602)을 통하여 수집 분석하였다. 그림 7은 침투모형시험에 사용된 간극수압계와 유속계 측정 장면을 나타낸 것이다.

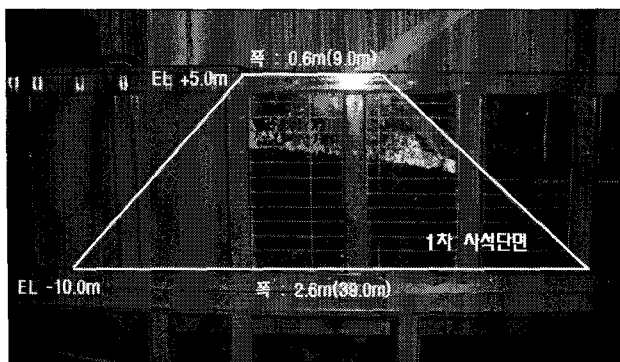


그림 5. 1차 사석단면 침투모형 경계조건

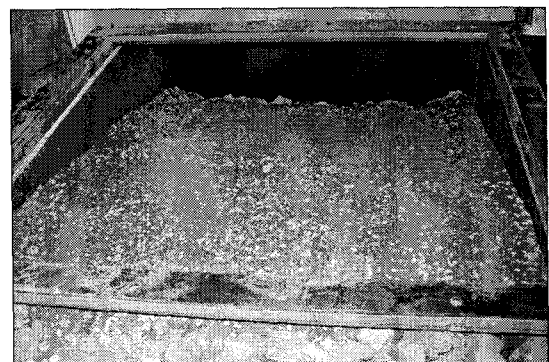


그림 6. 근고공 설치장면

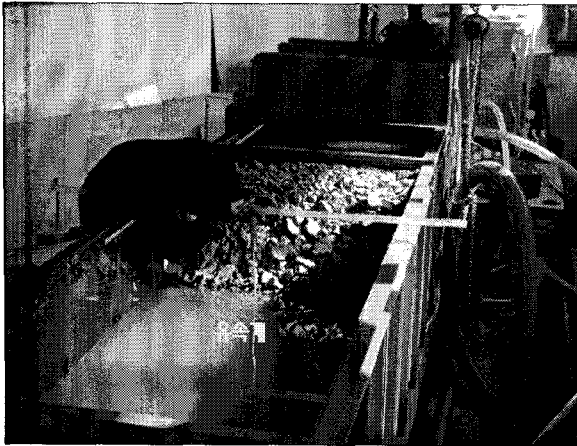


그림 7. 침투유속계 설치장면

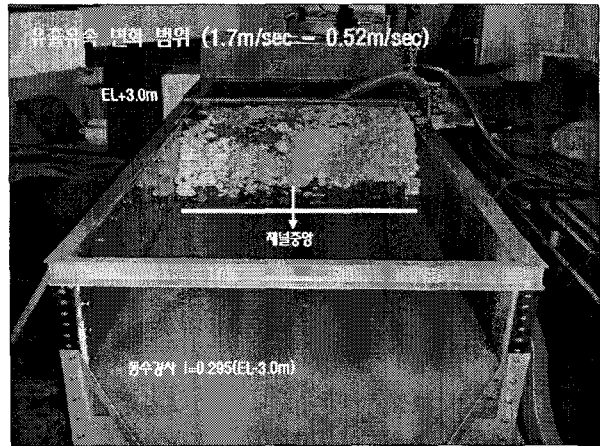


그림 8. 1차 사석단면의 유출유속 범위

4. 시험결과 및 분석

4.1 1차 사석단면 축조 후 수위조건에 따른 유속 및 투수계수분석

그림 8은 1차 사석단면 설치 후(사석끝막이 완료)의 방조제 단면에 대한 침투모형시험장면을 나타낸 것이며, 그림 9~10은 해측 수위조건에 따른 1차 사석단면 침투유속분포를 도시한 것이다. 시험결과에서 보는 바와 같이 동수경사 최대 (EL3.0m/EL -3.0)일 때, 1차 사석단면 유출유속 범위는 약 1.71~0.52m/sec로 분포되었다. 또한, 침투유속 및 동수경사 변화 분석에 따른 1차 사석단면 투수계수는 1.145~0.428m/sec로 도출되었으며, 조위 및 유속변화에 따른 침투해석결과는 표 3에 총괄 기술하였다.

1차 사석단면을 통과한 유출유속은 와류발생지역 3지점을 제외한 구간의 최대유속은 약 0.757m/sec로 나타났다. 반면, 최대 유출유속은 최대 수위차 (최대 동수경사)조건에서 1.7m/sec로 발생되었으며, 본 구간에서는 불규칙한 와류발생 및 큰 유속변화가 측정되었다. 이러한 현상은 1차 사석단면이 국부적으로 간극율이 크거나 해측으로 부터의 직접적인 유로가 형성된 구간에서 발생할 수 있는 현상으로 다양한 시공사례에서 1차 사석 끝막이 완료 후 관측된 사항이다. 따라서, 새만금 방조제 1차 사석 끝막이 완료 후에도 불균질한 사석단면 형성으로 인하여 국부적인 유속증가 및 와류현상이 발생할 수 있으며, 이러한 현상이 장기적으로 지속되어 끝막이 단면의 안정성에 영향을 미치지 않도록 면밀한 모니터링과 즉각적인 대책이 요구된다.

표 3. 수위조건에 따른 1차 사석단면 침투유속 시험결과

Test No.	동수경사	최대 유출유속	근고공 및 필터매트설치유무	비고
No. 1	0.082	0.21587	1차사석단면	동수경사 증가에 따른 유속증가
No. 2	0.129	0.36878	1차사석단면	
No. 3	0.184	0.46174	1차사석단면	
No. 4	0.295	0.77782	1차사석단면	
No. 5	0.184	0.37336	필터매트	No 3 에 비해 약 19.1%유속저감
No. 6	0.295	0.59304	필터매트	No 4 에 비해 약 23.7%유속저감
No. 7	0.227	0.21601	근고공	No 4 에 비해 약 53.2%유속저감
No. 8	0.354	0.28106	근고공	No 4 에 비해 약 63.8%유속저감

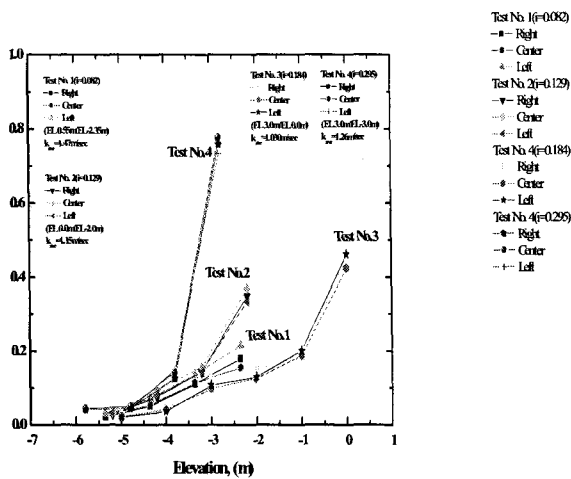


그림 9. 1차 사석단면 침투유속 분포

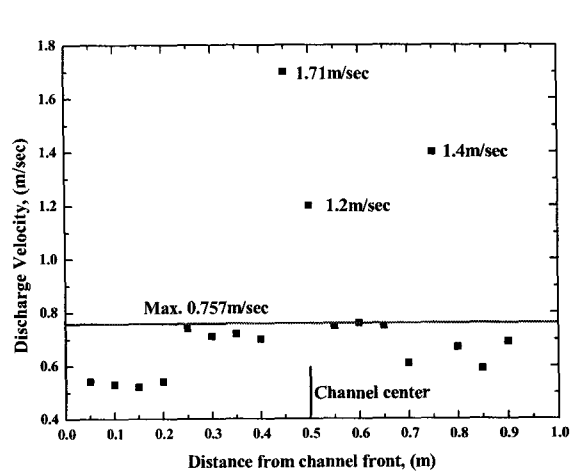


그림 10. 단면위치에 따른 유속측정결과

4.2 1차 사석단면+근고공 매트 축조 후 수위조건별 유속 및 투수계수

그림 11~12는 1차사석 단면과 근고공 필터매트(Sill 표고까지 설치 시)를 설치한 후의 시험장면과 동수경사분포에 따른 유출유속 분포를 나타낸 것이다. 그림 12에서 보는 바와 같이, 1차 사석단면 측면에 근고공 필터매트를 시공에 따라 1차 사석단면을 통과하는 침투유속이 최대 23.7%에서 19.7%까지 감소되는 것으로 볼 수 있다. 즉, 1차 사석단면 해측사면에 필터매트를 포설할 경우, 조위변동에 따른 해수침투에 대한 간섭을 통하여 유속저감 효과를 얻을 수 있는 것으로 도출되었다.

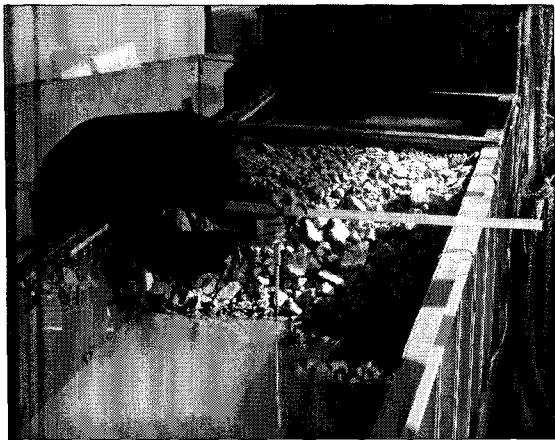


그림 11. 1차사석단면+근고공 매트설치후 시험장면

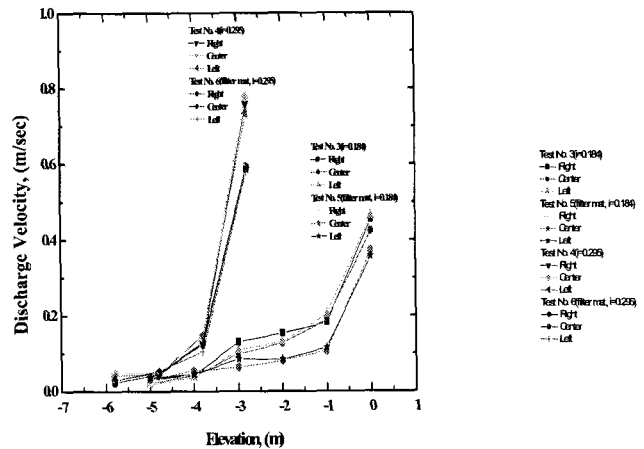


그림 12. 1차 사석단면+ 근고공 매트 시험결과

4.3 1차 사석단면+근고공 축조 후 수위조건별 유속 및 투수계수

그림 13~14는 1차 사석단면과 근고공만 시공하였을 경우, 유출유속분포를 나타낸 것이다. 근고공 시공에 따라 53.2%~63.8%의 유출유속감소 효과가 나타나는 것으로 도출되었다. 따라서 근고공과 근고공 매트를 동시에 시공할 경우, 약 75%~85%의 유출유속 감소효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 표면침투유속을 제외하고 수심이 깊어질수록 침투유속은 급격히 감소하여 EL -4.0m이하에서 침투유속이 약 0.1m/sec 이하로 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

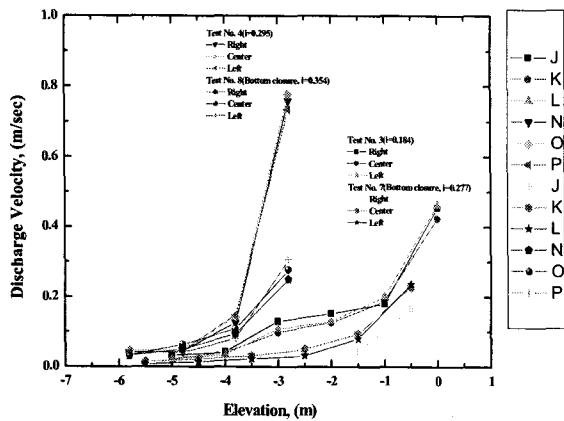


그림 13. 1차 사석단면+근고공 시험결과

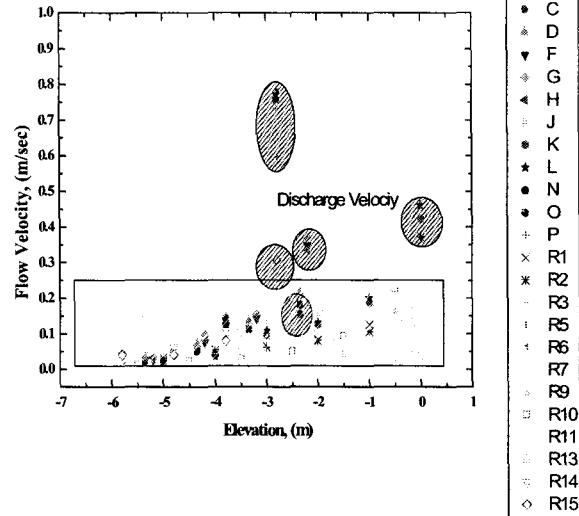


그림 14. 수심에 따른 유속분석

4.4 근고공 필터매트 포설심도에 따른 침투모형시험 결과

상기 기술한 침투모형시험 결과에 의하면 근고공 선시공 및 근고공 필터매트를 시공할 경우, 1차 사석 단면을 통과하는 침투유속을 저감시킬 수 있으며 쇄석필터공의 시공 시 충분한 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 근고공 필터매트의 효율적인 적용을 위하여 근고공 필터매트 설치 심도에 따른 침투모형시험을 수행하였다.

근고공 필터매트의 설치위치는 그림 15에 보는 바와 같이 1차 사석단면에서 5.0m의 회차로 및 사면조성 후 포설하는 것으로 구성하였으며, 설치심도의 검토는 EL -3.0m, -5.0m, -7.0m, -10.0m에 대하여 검토하였다. 그림 16은 근고공 필터매트 설치심도에 따른 1차 사석단면 침투유속변화(최대동수경사 발생시 EL +3.0m/EL -3.0m)를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 근고공 필터매트를 EL -5.0m까지는 침투유속이 크게 감소하나, EL -5.0m 이상에서는 포설심도가 증가하여도 침투유속의 저감효과가 크지 않은 것으로 도출되었다. 이러한 결과는 EL -5.0m이하에서는 침투유속이 급격히 감소하여 근고공 필터매트의 포설효과가 크게 발생되지 않는 것으로 판단된다.

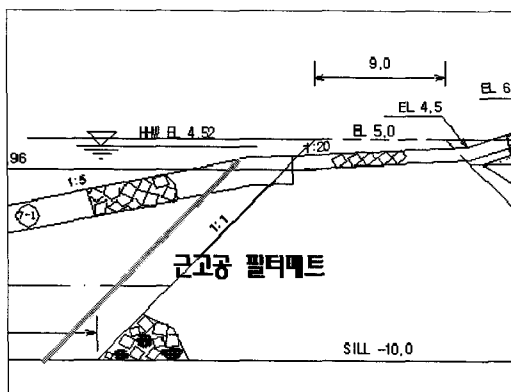


그림 15. 유속저감 대책안(단면도)

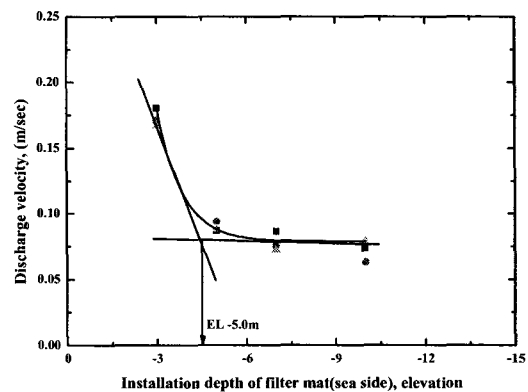


그림 16. 시공심도에 따른 유출유속 분포

5. 결론

본 연구에서는 방조제 끝막이 후 축조된 사석단면과 후속공정을 통하여 축조되는 방조제단면에 대한

실내 침투모형시험을 수행하였으며, 조위변화에 따른 동수경사변화, 침투유속(discharge velocity) 및 침윤선 분포 등을 분석하였다. 또한, 1차 사석단면 끝막이 후속공정으로 진행되는 근고공, 근고공 필터 매트 시공에 따른 침투유속 저감효과를 분석하였다. 침투모형시험을 통한 방조제 단면에 대한 침투거동에 대한 연구결과 총괄 결론은 다음과 같다.

1. 1차 사석단면을 통과한 유출유속은 와류발생지역 3지점을 제외한 구간의 최대유속은 약 0.757m/sec로 나타났다. 반면, 최대 유출유속은 최대 수위차 (최대 동수경사)조건에서 1.7m/sec로 발생되었으며, 본 구간에서는 불규칙한 와류발생 및 큰 유속변화가 측정되었다. 이러한 현상은 1차 사석단면이 국부적으로 간극율이 크거나 해측으로부터의 직접적인 유로가 형성된 구간에서 발생될 수 있는 현상으로 다양한 시공사례에서 1차 사석 끝막이 완료 후 관측된 사항이다.
2. 방조제 1차 사석 끝막이 완료 후에도 불규칙한 사석단면 형성으로 인하여 국부적인 유속증가 및 와류 현상이 발생될 수 있으며, 이러한 현상이 장기적으로 지속되어 끝막이 단면의 안정성에 영향을 미치지 않도록 면밀한 모니터링과 즉각적인 대책이 요구된다. 반면, 근고공과 근고공 매트를 동시에 시공할 경우, 약 75%~85%의 유출유속 감소효과를 얻을 수 있는 것으로 실험결과 도출되었다.
3. 근고공 필터매트를 EL -5.0m까지는 침투유속이 크게 감소하나, EL -5.0m 이상에서는 포설심도가 증가하여도 침투유속의 저감효과가 크지 않은 것으로 도출되었다. 이러한 결과는 EL -5.0m이하에서는 침투유속이 급격히 감소하여 근고공 필터매트의 포설효과가 크게 발생되지 않는 것으로 사료된다.
4. 물막이 사석단면은 단기간 내에 규모가 큰 돌망태와 사석재를 혼합하여 시공하는 관계로 설계 사면대로 유지되지 않고 울퉁불퉁한 사면이 될 수밖에 없다. 따라서, 큰 공극을 메우고 사면의 평탄성을 유지하기 위하여 해측 근고공을 5m 정도 폭으로 시공한 후 사면매트를 포설할 경우, 침투량 및 침투유속을 효과적으로 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 농어촌진흥공사, (1990), "000지구 방조제 단면의 해사축조 공법 및 끝물막이 공법연구" 농림수산부
2. 농어촌진흥공사, (1994), "000 간척 종합 개발 조사설계 종합 보고서" 농림부
3. 농업기반공사(1999), "000 방조제 끝막이 공정검토 및 축조재료 유실방지 공법 연구", 농림부
4. 농업기반공사, (2003), "방조제 해측사면 성토재료 거동분석에 관한 연구", 농림부, pp. 112-117
5. 이행우, (2005), "방조제 바닥사석층의 규모 및 통수성에 따른 제체 침투특성연구", 공학박사 학위논문, 서울대학교
6. Abt, S.R., Ruff, J.F., and Wittler, R.J., (1991) "Estimating Flow through Riprap", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp. 670-675
7. Cedergren, H.R. (1977), "*Seepage, Drainage, and Flow net*", Wiley and Son, pp. 28