

비정상 상태의 방조제 침투해석 Seepage Analysis of Sea Dike under Unsteady State

오남선* · 이광수**

Oh, Nam Sun* and Lee, Kwang Soo**

요 旨 : 현재 군장국가공단 조성지역은 방조제 체절작업이 완료된 상태로 방조제 외측은 물론 내측 수역도 조석 운동을 하는 특이한 형태의 거동을 보이고 있다. 본 연구에서는 방조제의 파이핑에 대한 위험 가능성을 조사하기 위하여 유한요소법을 이용한 침투해석을 실시하였다. 방조제의 경우 외측 수역의 조석운동으로 인하여 비포화 침투를 고려한 비정상 흐름해석이 필요하다. 특히 대상해역에서는 내측 수역도 외측 수위의 영향을 받아 조석운동을 하기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 경계조건을 구하기 위하여 방조제 내외측에 조위계를 설치한 후 그 결과를 이용하였다. 또한 성토제의 재료를 조사하기 위하여 입도분석을 실시하였다. 얻어진 결과를 이용하여 방조제 전후면의 조위변화를 고려한 해석을 실시하였으며, 계산결과를 한계속도와 비교하였다.

핵심용어 : 방조제 파이핑, 침투해석, 조화운동, 유한요소해석

Abstract □ The sea dike at Gun-Jang Industry Area had been constructed recently and both inside and outside areas of the dike show harmonic behaviour. To examine stability against piping, 2 dimensional seepage analysis was executed using finite element method. To investigate the harmonic motion of water level, unsteady and unsaturated flow analysis is needed, and specially harmonic motion in the both areas from the dike should be considered. Water level recorder was used to obtain tidal harmonic data, and sieve analysis has been carried out so that the distribution of grain diameter of the dike material is clearly informed. The calculated velocity was compared with critical velocity.

Keywords : sea dike piping, seepage analysis, harmonic motion, finite element method

1. 서 론

군장 국가공단은 호안공 사석제 체절작업이 진행되어 갑에 따라 내·외 수위차가 증가하게 되어 체절후에는 내수위의 변화가 외조위보다 작아져 내수위와 외수위의 차가 크게 증가한다. 따라서 내·외 수위차로 인한 파이핑작용에 의해 체제지반 세굴과 이로 인한 체제의 파괴가 일어날 우려가 있다. 이에 대비하기 위하여 내수위 조건별로 체제의 파이핑작용을 검토하고 파이핑현상이 일어나지 않도록 사석제 내측에 Filter공과 더불어 보강토로 보강하는 계획을 세운 바 있다(한국토지개발공

사, 1993). 당시 파이핑 검토시에는 내·외 수위차 2.26 m를 가정하여 단면을 설계하였다.

현재 군장 국가공단의 남측호안은 파이핑에 대비한 사석제 내측의 보강토 공사가 이루어지지 않은 상태이다. 군장 국가공단의 호안은 체절이 이루어진 상태이나 북측 방조제의 투수성이 큰 일부 구간을 통하여 제한적으로 해수의 유출입이 이루어지고 있어 일반적인 형태의 체절수역과는 다른 특이한 형태의 내수위 거동을 보이고 있다. 또한 대상해역의 남측에서는 농림부에서 새 단급 간척사업이 시작되어 현재 약 28 km에 해당하는 외곽 방조제를 축조하는 사업이 진행중으로 설계당시와

*목포해양대학교 해양시스템공학부 토목공학과(Dept. of Ocean Civil Engrg., Mokpo Marine Univ., Mokpo, Chonnam 530-729, Korea)
**한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Coastal and Harbor Engrg. Research Center, Korea Ocean Research and Development Inst., Ansan, Kyonggi 425-744, Korea)

는 해역의 해수유동 양상이 변화하였다. 그리고, 체질된 해역의 내부 수역에서는 공동조성을 위하여 매립공사를 위한 제방 축조가 시작되었다. 이와 같이 대상 수역의 상태가 설계 당시에 비하여 변화하였으며 현재 매립공사가 진행중이므로 설계 당시 남측호안의 보강토 공사에 대한 전면적인 재검토가 필요하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 변화된 환경에 따른 파이핑 발생여부를 검토하고 보강토 공사의 필요여부 또는 다른 대안을 제시하고자 한다.

군장국가공업단지의 방조제 단면계획은 축조재료가 토사로 구성되었으며 기초지반은 투수성이 큰 세립질 모래 또는 실트이다. 특히 토사에 의해 형성되는 성토부의 침투조건은 토립자의 이동 및 성토과정중 발생하는 세립자의 유실 및 분리 때문에 안정성이 더욱 불리하다고 볼 수 있다. 또한 조수간만의 차 및 파력에 의해 공기와 물이 함께 침투하는 방조제의 경우에는 일반적인 경우보다 파이핑에 대한 안정조건이 불리하게 된다. 이와 같은 제체에 대하여 실무에서는 일반적으로 단순한 형태의 경험식을 이용하고 있다. 그러나 이들 식은 사용상의 제약점이 많으며 경험적인 요소를 토대로 하였으므로 결과의 신뢰성에도 문제가 있다. 오남선(1997)은 조석의 영향을 받는 방조제에 대하여 정상(steady) 상태로 가정된 경우와 비정상(unsteady) 상태를 모의한 경우에 대한 제체내 흐름을 비교한 바 있다. 그 결과에 따르면 조석현상의 영향을 받는 방조제에 대하여 비정상 흐름으로 모의를 한 경우 제체내 흐름이 정상상태를 가정한 경우보다 최대유속이 10배 가까이 빠르게 나타날 수 있음을 밝히고, 조석현상의 영향을 받는 경우 반드시 비정상흐름을 반영할 수 있는 파이핑 해석이 필요한 것으로 결론지었다. 그러나 기존의 경험식들은 흙댐과 같이 정상흐름으로 가정할 수 있는 경우에 주로 실무에서 이용하는 것으로 그 제약점이 많다. 따라서 본 연구에서는 기존의 파이핑 해석방법을 검토한 후, 본 방조제의 제반조건을 가장 적절히 고려할 수 있는 방법을 선택하고자 한다. 그리고 본 방조제에 대한 파이핑 해석을 실시하고 그 결과를 분석하고자 한다.

2. 연구동향 및 방법

파이핑에 관한 최초의 이론식은 Terzaghi(1943)에 의한 것으로 한계수두를 도입하여 해석하였다. 그러나 이 이론식은 흙이 완전히 포화된 상태나 포화에 가까운 정

상침투의 경우에만 성립되며, 방조제와 같이 조위 또는 홍수에 의하여 수위의 변화가 반복될 경우 적용이 곤란하다.

Lane(1935)은 크리프 비(weighted creep ratio)를 기준으로 하여 파이핑에 대한 안전율을 검토하는 경험적인 방법을 제안하였으며 지금까지 그 간편성으로 인하여 실무에 자주 적용되고 있다. 그러나 Lane의 방법은 흙속의 응력형태와 지속시간이 구조물의 형태에 따라 다양하게 변화하는 경우, 특히 방조제와 같이 구조물 자체가 기초지반과 동일한 재료로 구성되어 성토부를 통하는 투수경로가 발생하고 구조물의 중요성이 큰 경우에는 크리프 비의 적용에 상당한 무리를 초래하는 것으로 알려지고 있다(농림수산부와 농어촌진흥공사, 1990). 그럼에도 불구하고 Lane의 방법은 세립의 모래 및 실트를 제외하고는 안전측에 속하기 때문에 개략적인 해석이 필요한 흙댐의 경우에는 자주 사용된다.

이외에도 흙속을 통과하는 침투수의 유속이 토립자를 유동하게 하는 한계치를 벗어나 파이핑이 발생하는 현상을 수학적으로 해석하는 방법이 있으며, 또한 유속과 유효압력간의 관계식과 토립자의 입경별 또는 투수계수에 따른 한계유속을 설정하여 파이핑의 발생여부를 결정하는 경험요소가 포함된 이론적 방법이 있다. 근래에는 전산기를 이용하여 복잡한 이론적 해석이 가능해짐에 따라 전산기를 이용한 유한요소법(FEM)이나 유한차분법(FDM) 또는 경계요소법(BEM)을 통한 침투현상의 해석결과에서 침투수의 유속을 구할 수 있게 되었다.

Mustafa and Morris(1983)는 흙댐인 Wallace 댐의 흐름해석을 위하여 유한요소해석을 실시하고 관측치와 비교하였으며 비포화 흐름에 대한 수치적 접근이 필요함을 강조하였다. Ching(1987)은 흙댐내의 수위저하곡선에 대하여 BEM(Boundary Element Method)을 이용하여 수치해석을 실시한 바 있다. 해석의 간편성을 위하여 모세관 효과와 투수계수의 시간별 변동을 무시하였으며 BEM을 침투해석에 대한 효율적인 방법으로 제시하였다. William 등(1994)은 최근 1980년 붕괴된 Debris-Avalanche 댐에 대하여 3차원 해석을 실시한 바 있다. 댐 붕괴의 원인에 대하여 Heaving, Piping, Internal Erosion 세 분야로 나누어 해석을 실시하였으며 계산결과에 따르면 Heaving에 대하여 취약한 것으로 결론지었다. Piping해석에 관해서는 그 정확한 해석의 어려움을 역설하고 동수경사를 계산한 후 허용동수경사와 비교하는 방법을 채택하였다.

우리나라의 경우 농림수산부와 농어촌진흥공사(1990), 그리고 허재근(1996)이 새만금지구와 고흥만 방조제에 대하여 각각 유한요소해석을 실시한 바 있는데, 이들은 조석운동을 고려하지 않고 수위상태를 정상상태로 가정한 후 정해진 수위조건하에서 해석을 실시하였다.

또한 파이핑해석에 주로 이용되는 전산프로그램으로는 UNSAT2, FLUMP, SEEP/W 등이 있다. 이들 모형을 이용하여 수치해석을 통하여 침투유속을 계산할 수 있으며 이를 한계유속과 비교함으로써 파이핑의 발생여부를 판단할 수 있다.

흡입자의 유동이 시작되는 한계유속에 대한 연구는 Justin에 의하여 시작된 후, Sughii(1989)에 의하여 연구되었다. 또한 일본 토질공학회(JSSMFE)에서는 1982년 토립자의 입경별로 침투수의 한계유속을 제안하였다. Schmieder는 흙의 대표적 단위중량을 고려하여 한계유속과 유효입경, 투수계수와와의 관계를 유도한 후, 이를 근거로 허용유속에 관한 실용적 기준을 만들었는데 이는 식 (1)과 같다.

$$V_{lim} = 5 \times 10^{-2} (K)^{1/4} \quad (1)$$

여기서 V_{lim} 은 허용유속이고, K 는 투수계수이다.

방조제의 경우 댐에서 나타나는 정상상태의 침투가 아닌 비정상상태의 침투가 이루어지게 된다. 외해 쪽의 경계조건은 시간에 따라 변화하게 되며 내수쪽 또한 집중호우 및 홍수시의 수위상승 또는 침투현상으로 인해 변화하게 된다. 특히 본 연구의 대상해역은 복측 방조제의 투수성이 큰 일부 구간을 통한 해수의 유출입으로 인하여 방조제 내측도 시간에 따라 수위가 변화하는 조석운동을 하고 있다. 이와 같이 시간적으로 변화하는 수위조건하에서는 불포화영역이 발생하게 되며, 불포화영역을 통하는 침투해석의 필요성은 Terzaghi(1943) 등에 의해 발표되었다.

시간적으로 변화하는 현장조건을 정확히 만족하여 해석할 수 있는 이론적 방법은 없으나 가능한한 만족시킬 수 있는 방법을 적용하는 것이 타당하다. 따라서 위에서 언급한 파이핑 해석방법 가운데 비정상상태의 모의가 가능한 수치해석방법을 이용하는 것이 적절할 것으로 판단되며, 그 결과를 기존의 연구에서 제안된 한계유속과 비교함으로써 파이핑 발생여부를 판단할 수 있을 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 허재근(1996), 오남선(1997) 등이 국내에 적용한 바 있는 GEO-SLOPE사의 SEEP/W(version 3)을 이용하여 방조제내의 흐름

을 분석하기로 한다.

3. 지배방정식 및 입력조건

해석에 사용한 지배방정식, 입력조건, 그리고 경계조건은 다음과 같다.

3.1 지배방정식

그림 1과 같은 단면적에서 비포화 토질에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\left(v_{wx} + \frac{\partial v_{wx}}{\partial x} dx \right) dydz + \left(v_{wy} + \frac{\partial v_{wy}}{\partial y} dy \right) dx dz - v_{wx} dy dz - v_{wy} dx dz - Q dx dy dz = \frac{\partial V_w}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, V_w : 흙속 물의 체적
 v_{wx} : x방향으로의 유속
 v_{wy} : y방향으로의 유속
 dx, dy, dz : x, y, z 방향의 요소 길이
 Q : 경계조건으로 부여되는 단위 체적당 유량(flux)
 위 식을 정리하고, 토질의 원래 체적인 $V_o = dx dy dz$ 로 나누면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial v_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial v_{wy}}{\partial y} - Q = \frac{\partial (V_w/V_o)}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial v_{wy}}{\partial y} - Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, $\theta = V_w/V_o$ 는 체적 함수비(Volumetric water content)를 의미하며, 이 값은 토질의 성질 및 응력 상태에 따

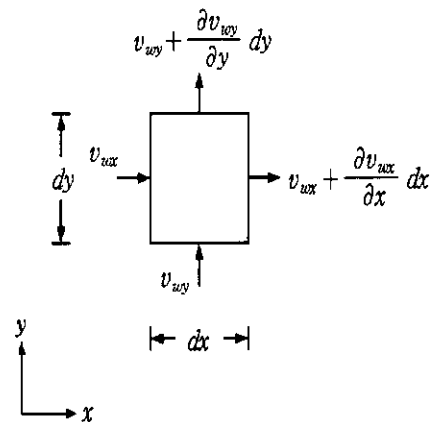


그림 1. 비압축성 유체의 직사각형 요소.

라 변화하는 값이다. 식 (4)는 물리적으로 특정 시각, 지점에서 단위 체적내로 유입되는 유량과 유출되는 유량의 차이는 체적 함수비의 시간당 변화량과 같다는 것을 의미하는 질량보존의 법칙을 의미한다.

. 포화 및 비포화조건에 대한 응력상태는 2개의 변수에 의하여 표현할 수 있으며, 식 (4)의 우변은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -m_w^* \frac{\partial u_w}{\partial t} \tag{5}$$

여기서, m_w^* = 물의 체적 변화 계수, 또는 저장곡선의 기울기
 u_w = 간극수압(pore water pressure)

이다. 식 (4)의 유속 v_{wx} , v_{wy} 를 Darcy의 법칙을 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$v_{wx} = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \tag{6a}$$

$$v_{wy} = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \tag{6b}$$

여기서, k_x , k_y 는 x, y방향의 수리 전도도(Hydraulic conductivity), h 는 전수두(위치수두 + 간극수압에 의한 수두)를 의미한다.

식 (6a), (6b)의 유속은 단면 전체에 걸쳐서 흐름이 발생하는 것으로 가정하기 때문에 이 속도는 평균속도 개념이 도입된 것이다(이 속도를 Darcy 속도라 함). 그러나 미시적으로 살펴보면 흙 속에서의 물의 흐름은 유효 공극만을 통해서 흐르기 때문에 실제 흙속에서의 물의 흐름(침투속도라 함)은 Darcy 속도보다 빠르게 된다. 따라서 침투속도와 Darcy 속도와와의 관계는 다음과 같다.

$$v_e = \frac{v_w}{\theta} \tag{7}$$

여기서, v_e : 침투속도 또는 유효속도

v_w : Darcy 속도

θ : 유효 간극률(effective porosity)

물의 단위중량을 γ_w 라고 하면, 전수두는

$$h = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \tag{8}$$

로 표현되므로, $\gamma_w \partial h = \partial u_w$ 로 표현된다. 이 관계식과 식 (5), (6a), (6b)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = m_w^* \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} \tag{9}$$

식 (9)와 같은 편미분방정식은 일반적으로 해석해 (Analytic solution)를 구할 수 있는 경우가 극히 한정되어 있으므로, 대부분 전산기를 이용하여 수치해(Numerical solution)를 구한다. 해석방법으로는 유한요소법, 유한차분법, 경계요소법 등 여러 종류가 있으나, 본 연구에서는 유한요소법을 이용한 SEEP/W를 이용하여 해석하였다. 유한요소법은 자료의 입력이 간단하고, 사전 처리(pre-processing) 및 사후 처리(post-processing)가 손쉬울 뿐 아니라, 경계면 처리가 용이한 장점이 있다. 반면에 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

3.2 토질특성

파이핑의 해석에 가장 중요한 요인은 투수계수이다. 본 연구에서는 투수계수의 산정을 위하여 제방 축조에 사용된 토사에 대하여 실험실에서 체분석을 실시하였다. 체분석 결과는 그림 2에 나타내었다. 체분석결과로부터 D_{10} 은 0.015 cm로 결정하였으며 이 값을 식 (10)으로 표현되는 Hazen 공식에 대입한 결과 성토부의 투수계수는 2.25×10^{-4} m/sec로 결정하였다. 이 값은 대략적인 방법에 의해 구한 결과이긴 하나 기존의 연구들에서 사용된 축조부의 투수계수와 비교하여 안전측에 속하므로 무리없이 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

$$k = 100 \times D_{10}^2 \tag{10}$$

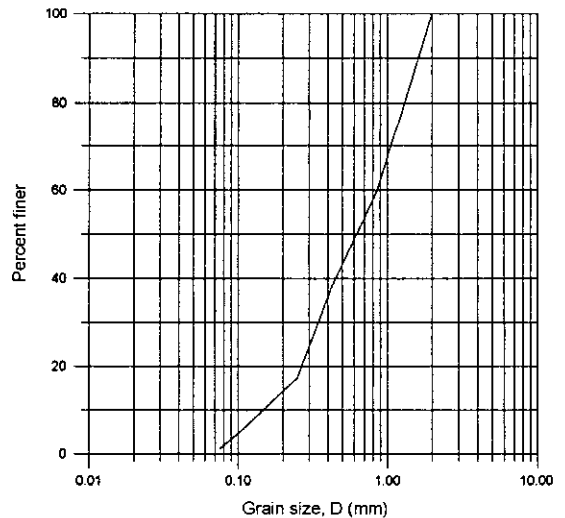


그림 2. 성토재의 입도분포 곡선.

표 1. 단면별 투수계수

단면구분	입도 구분	투수계수(m/sec)
기초지반	실트질 모래	7×10^{-6}
성토부	세립질 모래	2.25×10^{-4}
사석부	자갈(과쇄암)	4.2×10^{-3}

여기서 k 는 투수계수(cm/sec), D_{10} 은 대표입경(cm)을 나타낸다.

또한 파이핑 해석에 필요한 투수계수 가운데 기초지반의 투수계수는 같은 해역에 대하여 농림수산부와 농어촌진흥공사(1990)에서 적용한 값을 그대로 이용하며, 사석부에 대해서는 일반적으로 이용되는 대표값을 이용하기로 한다. 표 1은 본 연구에서 사용한 각 단면별 투수계수를 나타내었다.

본 연구에서 수행하고자 하는 비정상상태의 침투에서는 연속적인 수위의 상승, 하강으로 인하여 비포화영역이 발생하게 된다. 따라서 이와 같은 단면의 침투해석을 위하여 압력에 따른 투수계수 곡선이 필요하다. 그림 3(a), (b), (c)는 표 1의 투수계수를 기초로 하여 재료별로 이용되는 일반적인 투수계수곡선을 본 연구의 수행에 맞게 수정한 것이다.

3.3 체적 함수비의 선정

비정상 침투해석에는 투수계수와 같이 압력에 따른 체적 함수비(Volumetric water content)의 변화곡선이 필요하다. SEEP/W에서는 기존 연구를 통하여 조사된 재료별 체적 함수비 곡선을 제공하고 있으며 본 연구에서는 이용된 재료별 체적함수비 곡선을 그림 4(a), (b), (c)에 나타내었다.

3.4 기초지반의 두께 선정

본 연구에서는 군장국가공단(1990)에서 해당구역의 방조제 축조를 위하여 조사한 자료로부터 퇴적층의 평균 두께 14 m를 이용하기로 한다. 파이핑은 대부분 지표 및 성토부와 접한 부분에서 발생하며, 퇴적층의 투수계수가 작을 경우 그 두께가 흐름해석에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다.

3.5 경계조건

방조제 외측과 내측의 경계조건을 구하기 위하여 조위계를 이용하여 관측을 실시하였다. Aanderaa WLR-7을 이용하여 방조제 외측과 내측에서 동시에 관측하였으며, 관측지점의 위치를 그림 5에, 관측개요를 표 2에

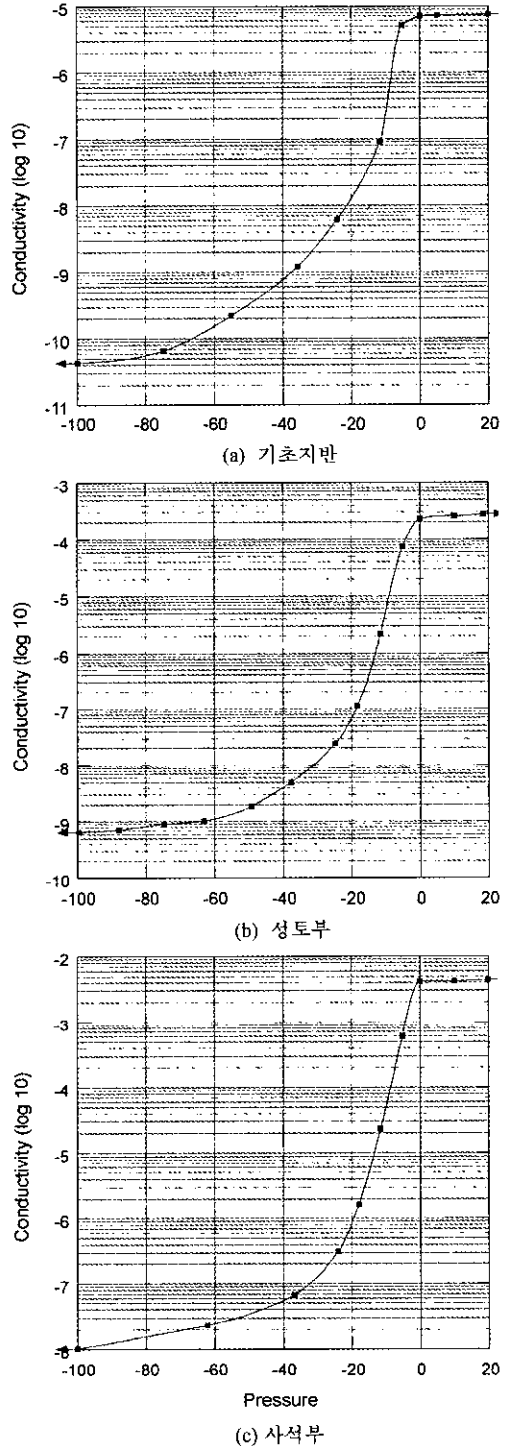
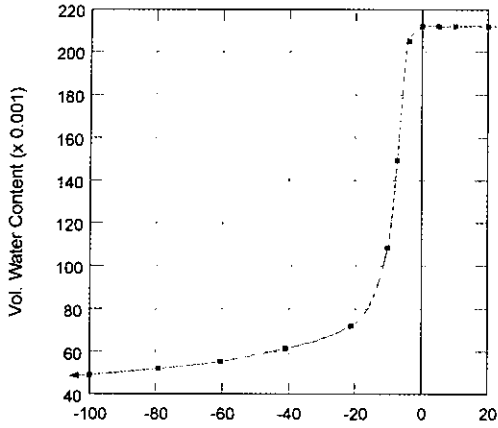
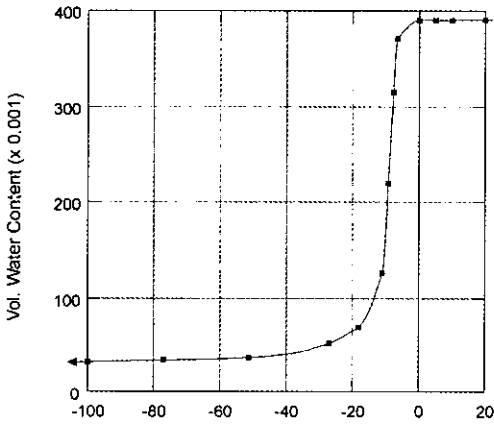


그림 3. 간극수압과 투수계수 상관도.

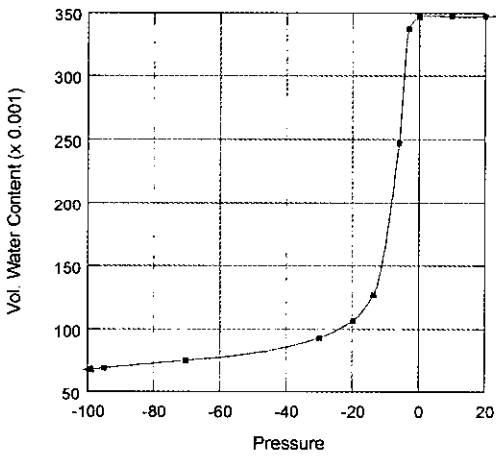
나타내었다. 내 외측의 수위차는 정현곡선으로 나타나고 있으며, 특히 대조시에 조차가 가장 크게 나타나게 된



(a) 기초지반



(b) 성토부



(c) 사석부

그림 4. 간극수압과 체적함수비 상관도.

다. 따라서 대조기인 2000년 7월 3일의 수위자료를 경계조건으로 활용하였다. 그림 6(a), (b)는 대조기의 수위

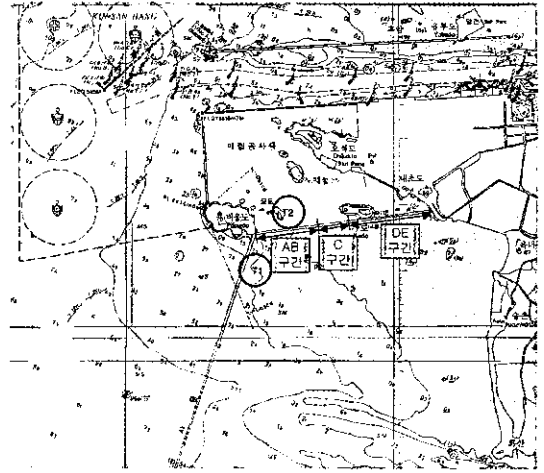
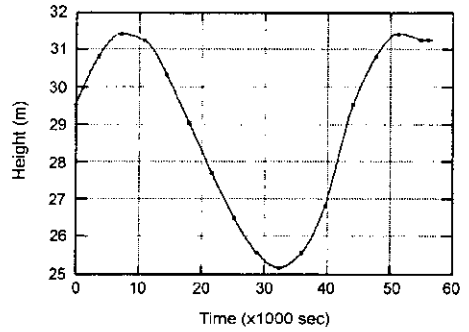


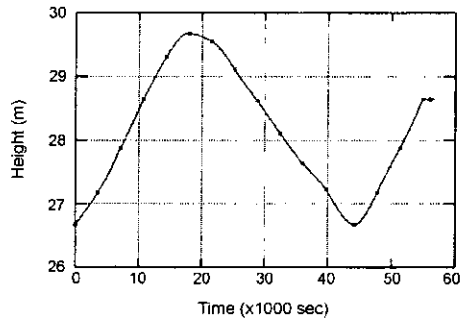
그림 5. 조석관측 지점 위치도.

표 2. 조석관측 개요

관측 장소	관측 위치	관측 기간	측정 기기
T1	35° 55' 58" N	2000. 6. 25.	Aanderaa 검조기
	126° 32' 06" E	~2000. 7. 12	(WLR-7)
T2	35° 56' 55" N	2000. 6. 25.	Aanderaa 검조기
	126° 32' 52" E	~2000. 7. 12	(WLR-7)



(a) 방조제 외측(T1)



(b) 방조제 내측(T2)

그림 6. 방조제 내·외측의 수위변화.

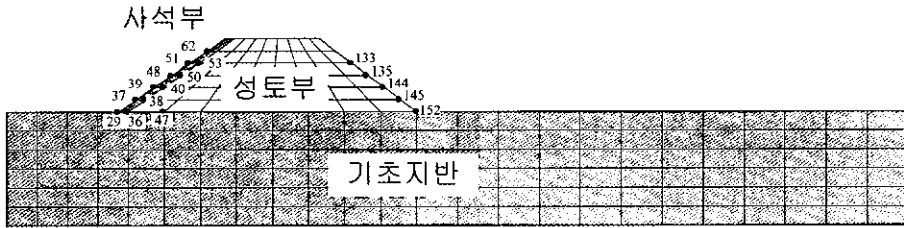


그림 7. 남측호안 격자망도(단면 DE).

변화를 그림으로 비교한 것으로 방조제 건설로 인한 방조제 내측과 외측의 수위차를 관찰할 수 있다.

3.6 방조제 단면 구성 및 격자 구성

침투해석은 남측 방조제의 AB구간, C구간, DE구간의 3개 단면에 대하여 실시하였다. 이들 방조제의 위치는 그림 5에 도시하였으며, 단면의 형태는 한국토지개발공사(1993)의 자료를 이용하였다. 그림 7은 전술한 토질 특성 및 기초 지반의 깊이를 바탕으로 방조제 단면 DE를 단순화한 후, 단면의 제체별 투수계수, 함수량, 경계조건 등을 대입하여 직사각형 형태의 유한요소 격자망을 자동 생성한 그림이다. 세 단면 중 DE를 선정한 이유는 다른 단면에 비하여 침투량이 가장 많을 것으로 판단되었기 때문이다.

4. 결과분석

전술한 방법에 의하여 계산된 결과를 분석하면 다음과 같다.

4.1 시간별 해석

전술한 입력자료들을 이용하여 유한요소망을 구성한 후 침투해석을 실시하였다. 모형의 결과는 4조석 주기(수렴상태에 도달한 것으로 가정)에 대해서 예비 모의를 수행한 후 5번째 조석주기에 해당하는 결과 중 낙조 및 창조시의 결과를 도시하였다. 그림 8(a)는 단면 DE의 낙조시 유속벡터도를, 8(b)는 창조시의 유속벡터도를 도시한 결과이다. 그림으로부터 조위에 따른 유속벡터의 변화를 관찰할 수 있으며 파이핑에 취약한 부분을 관찰할 수 있다. 창조시에는 제체내로 물이 침투되고 침투한 물이 낙조시에 다시 빠져나옴을 관찰할 수 있다. 특히 낙조시에 조위면을 따라 큰 유속의 흐름이 생성되고 방조제에서는 이러한 흐름이 파이핑의 원인이 되는 것을 알 수 있다. 그리고 낙조 및 창조시의 등전수두선도는 그림 9(a), 9(b)에, 낙조 및 창조시의 등압력수두선도는 그림 10(a), 10(b)에 도시하였다.

4.2 단면별 해석

각 단면별로 제체의 재료별 유속결과를 관찰하고 각

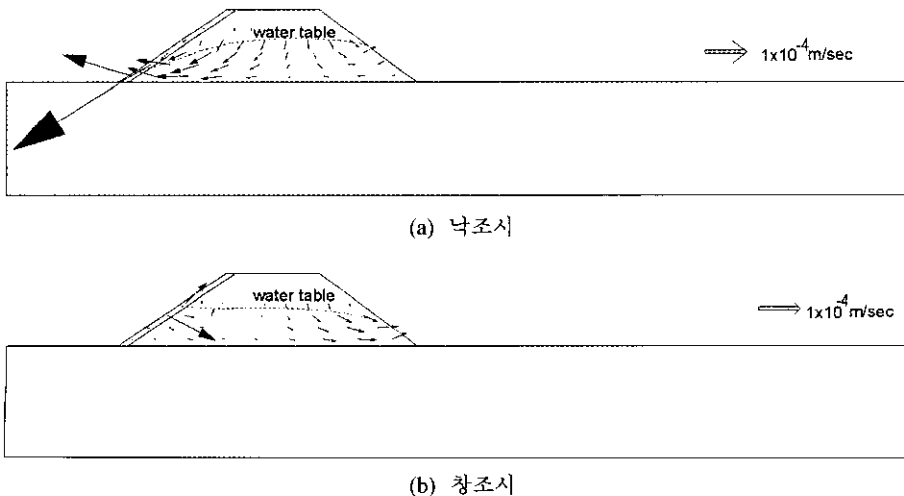
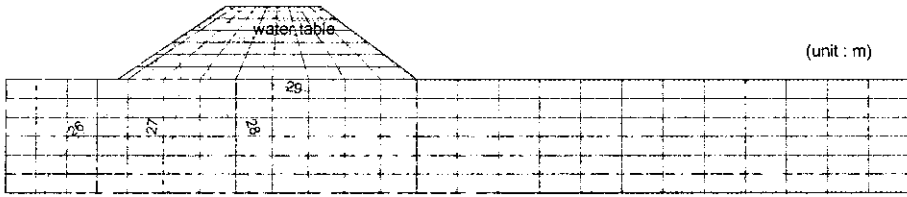
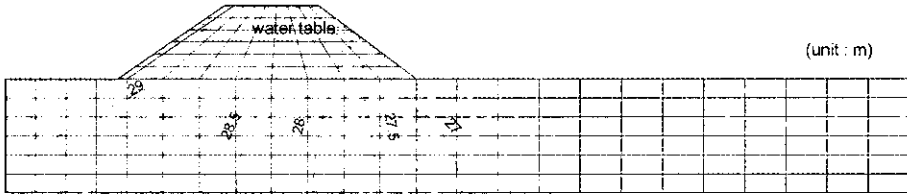


그림 8. 단면 DE의 유속벡터도.

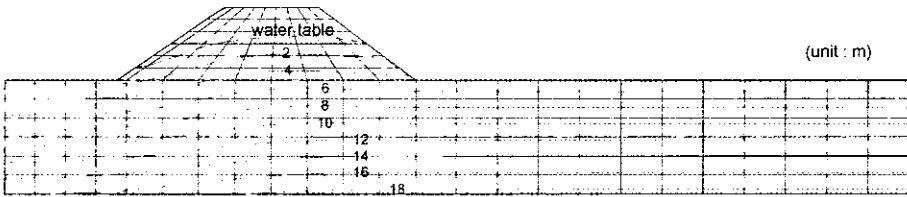


(a) 낙조시

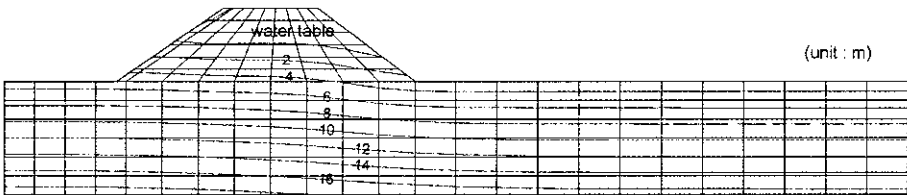


(b) 창조시

그림 9. 단면 DE의 등전수두선도.



(a) 낙조시



(b) 창조시

그림 10. 단면 DE의 등압력수두선도.

재료별 최고 유속을 계산하여 파이핑 발생의 가능성 여부를 판단하였다. 세 단면중 DE단면에 대하여 제체별로 시간에 따른 유속 및 그 크기의 변화를 그림 11(a), (b), (c), (d)에 나타내었다. 각 격자의 위치는 그림 7에 도시하였다. 그림 11(a)는 방조제 외해쪽의 사석부를 나타내며 그림 11(b)는 제방 성토제의 외해쪽 사석부와 만나는 부분, 그림 11(c)는 제방 성토제의 내측 수위와 만나는 부분, 그림 11(d)는 기초지반이 제방과 만나는 경계의 내측과 외측 부분이다. 각 그림에서 일반적으로 해당 단면의 수위가 낮고 제방 반대쪽의 수위가 높을 경우에 파이핑과 관련된 큰 유속을 가지는 것으로 나타

났으며, 해당 단면의 수위가 상승하고 있는 경우에는 수위상승에 따른 침투수의 제방내 상승으로 인하여 유속이 높게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다.

4.3 침투유속에 의한 파이핑 검토

침투유속에 의해 파이핑을 고려하는 방법은 현재까지 알려진 실용적인 파이핑해석 방법중 기타 방법에 비해 이론적인 배경과 함께 경험적으로 입증된 방법이다. 따라서 본 연구에서는 유한요소 해석결과로 나온 침투유속과 전술한 허용유속을 비교함으로써 본 방조제의 파이핑에 대한 안정성을 검토하였다.

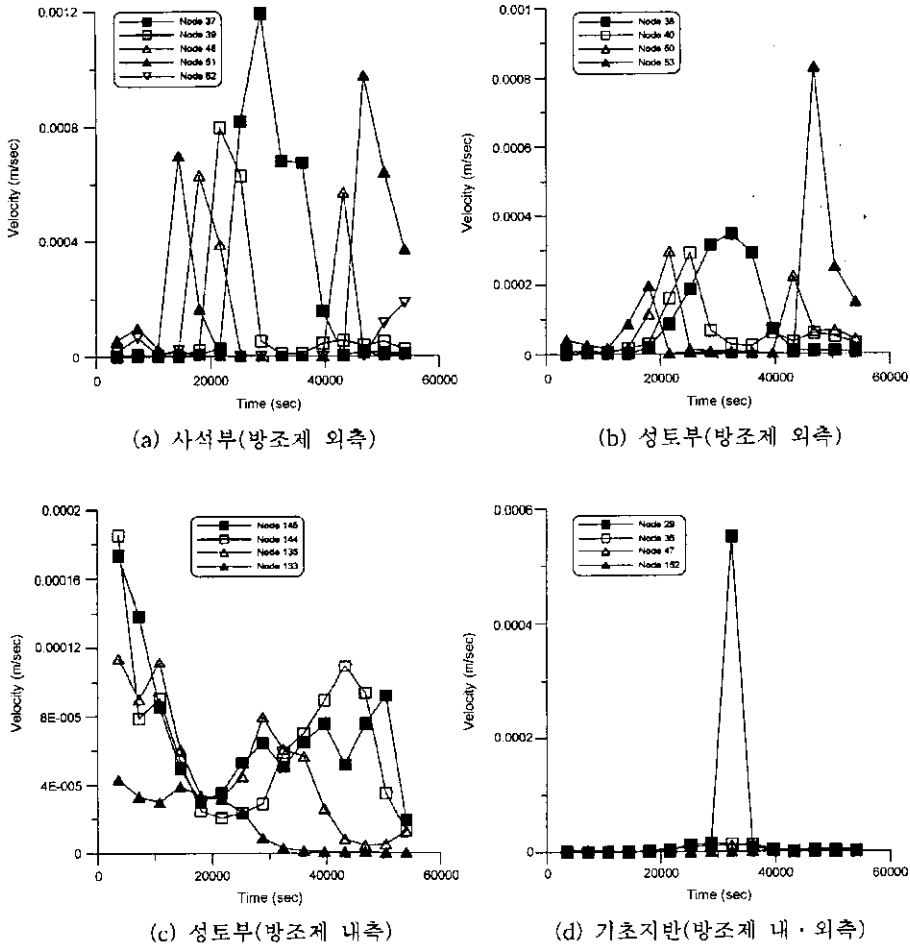


그림 11. 단면 DE의 시간별 유속변화.

이를 위하여 우선 Schmieder의 식 (1)에 본 방조제의 단면해석에 이용한 투수계수를 대입함으로써 각 단면별 허용유속을 구할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

기초지반 : 2.57×10^{-3} m/sec

성토부 : 6.12×10^{-3} m/sec

사석부 : 1.3×10^{-2} m/sec

전술한 바와 같이 방조제의 파이핑에 대한 안정성 검토를 위하여 해석결과로부터 각 단면별로 발생하는 최대유속을 계산한 후 이를 Schmieder의 허용유속과 비교하여 표 3에 나타내었다. 표에서 실제속도는 수치해석의 계산속도로부터 흡속의 간극을 흐르는 비율을 고려하여 계산한 것으로 다음 식 (11)에 의해 계산된 값이다.

$$V_c = \frac{v_w}{\beta} \tag{11}$$

여기서, $\beta = 1 - (1 - n)^{2/3} = 0.313$, n 은 간극율로 허재근 (1996)이 방조제의 파이핑 해석에 이용한 43%를 이용하였다.

표 3에서 보면 계산결과 모든 경우에 대하여 침투속도가 한계유속을 초과하지 않는 것으로 나타나 본 계방은 파이핑에 대하여 안전한 것으로 나타났다. 단면별로 계산결과를 살펴보면 일반적으로 예측할 수 있듯이 단면의 폭이 가장 좁은 단면 DE에서 침투유속이 한계속도에 가장 접근하는 것으로 나타났다. 또 모든 단면에서 볼 때 기초지반의 경우 방조제의 외측에서 방조제의 외해가 간조상태일 때 높은 침투유속이 나타나 파이핑이 발생할 가능성은 내해보다는 외해쪽이 높은 것으로 나타났다. 또한 성토부의 경우도 방조제의 내해보

표 3. 단면별 최대유속과 허용유속의 비교

단면	위치	발생시간(sec)	계산된 속도(m/sec)	실제속도(m/sec)	허용유속(m/sec)	비고
AB	사석부	45000	1.30×10^{-3}	4.15×10^{-3}	1.30×10^{-2}	
	성토부(외측)	46800	3.39×10^{-4}	1.08×10^{-3}	6.12×10^{-3}	
	성토부(내측)	45000	4.37×10^{-5}	1.40×10^{-4}	6.12×10^{-3}	
	기초지반	32400	3.87×10^{-4}	1.24×10^{-3}	2.57×10^{-3}	제방외측에서 발생
C	사석부	50400	2.67×10^{-3}	8.53×10^{-3}	1.30×10^{-2}	
	성토부(외측)	46800	1.10×10^{-3}	1.10×10^{-3}	6.12×10^{-3}	
	성토부(내측)	10800	2.87×10^{-5}	9.17×10^{-5}	6.12×10^{-3}	
	기초지반	32400	4.76×10^{-4}	1.52×10^{-3}	2.57×10^{-3}	제방외측에서 발생
DE	사석부	48600	1.37×10^{-3}	4.37×10^{-3}	1.30×10^{-2}	
	성토부(외측)	46800	1.49×10^{-3}	4.76×10^{-3}	6.12×10^{-3}	
	성토부(내측)	41400	1.13×10^{-4}	3.61×10^{-4}	6.12×10^{-3}	
	기초지반	32400	5.50×10^{-4}	1.76×10^{-3}	2.57×10^{-3}	제방외측에서 발생

다는 외해쪽에서 더 높은 침투유속을 가지는 것으로 나타났다.

일부 구간의 경우 침투유속이 한계유속에 가까운 값을 보이므로 내해쪽의 매립공사가 끝나기 전까지 지속적인 감시가 필요할 것으로 보인다. 또한 내해쪽보다는 외해쪽에서 큰 값의 침투속도를 보이는 것으로 나타나 파이핑이 발생한다면 외해쪽에서 나타날 가능성이 크므로 내해의 수위상승에 대한 주의가 필요할 것으로 보인다. 특히 홍수시 금강 방류에 의한 방조제 내측 수위의 상승여부와 상승 수위 등을 조사, 관찰하고 이에 따른 파이핑 발생여부를 지속적으로 감시하는 것도 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

군장국가공단 매립을 위한 방조제는 현재 체질이 끝난 상태이다. 본 연구에서는 이 영역에 대하여 현재 상태에서 파이핑에 대한 안정성을 검토하였다. 방조제의 파이핑 해석에는 GEO-SLOPE사의 SEEP/W 프로그램을 이용하였다. 이 영역은 방조제 외측과 내측이 모두 조석운동을 하는 특이한 거동을 보이고 있으므로 정확한 해석을 위해서는 비포화흐름을 고려한 비정상해석이 반드시 필요하다. 이를 위하여 조석관측자료와 성토재의 입도분포실험자료들을 입력자료로 이용하였다.

각 단면별로 격자망을 구성한 후 조사된 입력자료를 바탕으로 파이핑의 발생여부를 검토하였다. 각 단면별, 시간별 유속 및 전수두, 압력수두의 변화를 고찰하였으며 해석의 결과로 나온 최대 침투유속을 한계유속과 비

교함으로써 방조제의 파이핑에 대한 안정성을 검토하였다.

현 상태에서는 보강토를 축조하지 않더라도 방조제는 파이핑에 대하여 안전한 것으로 나타났다. 그러나 일부 지점의 최대 침투유속이 한계유속에 가까운 값을 보여 지속적인 감시가 필요한 것으로 나타났다. 방조제의 단면별 침투유속을 고찰한 결과 모든 단면에서 제방내측에 비하여 외해쪽 단면의 유속이 높은 것으로 나타나 파이핑이 발생한다면 방조제의 외해쪽 부분에서 발생할 것으로 판단되었다. 따라서 홍수시 금강방류로 인하여 내해쪽 수위가 상승할 경우 파이핑에 위험한 요소로 작용할 수 있으므로 이에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 농림수산부, 농어촌진흥공사, 1990. 새만금지구 방조제 단면 및 기초처리에 관한 설계검토.
- 오남선, 1997. "방조제의 파이핑에 대한 안정성 검토", 목포해양대학교 교내논문집, 5(II), pp. 281-291.
- 한국토지개발공사, 1993. 군·장국가공단개발사업(군산지구-1단계)실시설계보고서(호안공 및 부대공).
- 허재근, 1996. 방조제의 소성침하예측 및 파이핑의 해석, 석사학위논문, 전남대학교.
- Ching, S. C., 1987. "Boundary element method in drawdown seepage Analysis for Earth Dams," *J. of Computing in Civil Eng.*, 1(2), pp. 83-98.
- Lane, E. W., 1935. "Security from under-seepage: masonry dams on earth foundations," *Trans., ASCE*, pp. 1235-1272.
- Mustafa, M. A. and Morris, L. M., 1983. "Unsteady seepage

- analysis of Wallace dam," *J. of Hyd. Eng.*, **109**(6), pp. 809-826.
- Sughii, T.O., Sato, D., Woono, D.O. and Yamada, S.G., 1989. "Process of seepage failure and effect of heterogeneity in soil(Japanese)," *Soil and Foundation*, Vol. 6.
- Terzaghi, K., 1943. *Theoretical soil mechanics*, John Wiley and Sons, New York.
- William, M., Schuster, R. L. and Sabol, M. A., 1994. "Potential for seepage erosion of landslide dam," *J. of Geotechnical Eng.*, **120**(7), pp. 1211-1229.