

중금속으로 오염된 사력재의 댐축조 재료 활용 가능성 평가를 위한 수치 모델링

석희준^{1*} · 서민우¹ · 김형수² · 이정민³

¹한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, ²한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원

³한국수자원공사 수자원환경처 과장

Numerical Simulation for Evaluation the Feasibility of Using Sand and Gravel Contaminated by Heavy Metals for Dam Embankment Materials

Heejun Suk^{1*}, Min-Woo Seo¹, Hyoung-Soo Kim² and Jeong-Min Lee³

¹Korea Water Resources Corporation, Senior Researcher

²Korea Water Resources Corporation, Principle Researcher

³Korea Water Resources Corporation, Assistant Manager

Numerical analysis was performed to investigate the effect of heavy metal contamination on neighboring environment in case a dam is constructed by using rockfill materials contaminated by heavy metals. The numerical simulation carried out in this research includes both subsurface flow and contaminant transport in the inside of the CFRD(Concrete Faced Rockfill Dam), using two commercial programs, SEEP2D and FEMWATER. The three representative cases of scenarios were chosen to consider a variety of cases occurring in a dam site; (1) Scenario 1 : no crack in the concrete face slab, (2) Scenario 2 : a crack in the upper part of face slab, and (3) Scenario 3 : a crack between plinth and face slab in the lower part of face slab. As a result of seepage analysis, the amount of seepage in scenario 2 was calculated as 14.311~14.924 m³/day per unit width, corresponding to the 1,000 times higher value than that in other scenarios. Also, in the simulation of contaminant transport by using FEMWATER, specified contaminant concentration of 13 ppb in main rockfill zone was set to consider continuous leakage from the rock materials. Through the analysis of contaminant transport, we found that elapsed times to take for the contaminant concentration of about 2 ppb to arrive at the end of a dam are as follows. Scenario 1 has the elapsed time of 55,000 years. In Scenario 2, it is 50 years. Finally, scenario 3 has 27,000 years. The rapid transport of the contaminant in scenario 2 was attributed to greater seepage flow by 500 times than other scenarios. Although, in case of upper crack in the face slab, it was identified that the contaminant might transport to the end of a dam within 100 years with about 2 ppb concentration, however, it happened that the contaminant was hardly transported out of the dam in other scenarios, which correspond to either no crack or a crack between plinth and face slab. In conclusion, the numerical analysis showed that the alternative usage of the contaminated sand and gravel as the dam embankment material can be one of the feasible methods with the assumption that the cracks in a face slab could be controlled adequately.

Key words : CFRD(Concrete Faced Rockfill Dam), Abandoned mine, Heavy metal, Numerical analysis, Seepage flow

본 연구에서는 중금속으로 오염된 토양이나 자갈을 댐 축조 재료로 사용할 경우 주변 환경에 미치는 영향을 파악하기 위하여 댐 침투수와 오염물 거동에 대한 수치 모의를 실시하였다. 두 가지 상용 프로그램(SEEP2D 와 FEMWATER)을 이용하여 침투수 분석을 수행하였으며, 결과를 상호 비교 분석함으로써 수치 모의의 신뢰성을 획득하였다. 특히 오염된 댐 축조재료로 인한 환경적 안정성을 검토하기 위하여 세 가지 시나리오, 즉 댐체에 균열이 없는 경우(시나리오 1), 댐의 차수벽 역할을 하는 표면 콘크리트 슬래브 상부에 균열이 발생하는 경우(시나리오 2), 댐체 하부 즉 프린스와 콘크리트 슬래브와 접촉부에 균열이 발생하는 경우(시나리오 3)에 대하여 각각 수치 모의를 실시하였다. 침투수 해석 결과, 슬래브 상부에 균열이 있는 경우, 즉 시나리오 2에서 계산된 단위폭당 침투수량은 14.311~14.924

*Corresponding author: sxh60@kowadco.or.kr

m³/day으로 다른 경우에 비해 약 1,000배 큰 값을 보였다. 또한 FEMWATER 프로그램을 사용하여 오염물 거동을 수치모의하였다. 오염물질이 지속적으로 침출되어 나오는 상황을 고려하여 주축조구역은 농도 13 ppb가 지속적으로 유지되도록 초기조건을 설정하였다. 오염물 거동분석 결과 시나리오 1에서 2 ppb 정도의 오염물이 댐체 하류 부분에 도달하는데 걸리는 시간은 최소 55,000년이었으며, 시나리오 2의 경우 약 50년 정도, 마지막으로 시나리오 3의 경우 27,000년이였다. 댐체 상부에 균열이 발생한 경우는 댐에 균열이 발생하지 않은 경우보다 약 500배 이상 빠른 유속이 나타나기 때문에 오염물도 균열이 발생하지 않은 경우에 비해 상당히 빠르게 퍼져나가는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 슬래브 상부에 균열이 발생한 경우 100년 이내에 댐체 하부로 2 ppb 이상의 오염물이 전달될 가능성이 있음을 확인하였지만, 균열이 없거나 슬래브 하부에 균열이 발생한 경우에는 오염물이 외부로 이동될 가능성이 거의 없었다. 따라서 콘크리트 슬래브에 대한 지속적인 유지 관리로 균열 발생을 적절히 제어할 수 있다면, 본 연구에서 제안한 오염된 사력재의 CFRD 내부 축조재료로의 활용은 고려 가능한 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : CFRD(콘크리트차수벽형석괴댐), 폐광산, 중금속 오염, 수치 모의, 침투수

1. 서 론

금속광산, 비금속광산, 석탄광산 등의 활동에 의해 발생하는 오염물질은 비소(As), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb) 등의 유해성 무기물질이며, 이들은 주변 토양, 하천수, 지하수, 식물, 주민들에게 직간접적으로 악영향을 미치고 있다. 이들 중금속들은 분해가 거의 일어나지 않아 자연적으로 정화가 매우 어려울 뿐만 아니라, 동식물의 성장에 장애를 주며, 장기간 노출되는 경우 과도한 중금속 축적을 가져와 심각한 장애를 줄 수 있다(KIWE, 2004). 이러한 환경 오염원에 대한 조사, 평가 및 복원기술 개발은 1990년대 들어 활발히 진행되었으며, 현재에도 계속적으로 확대되고 있다(Yi *et al.*, 2003).

이러한 중금속을 제거하는데 적합한 정화기술로는 토양세척법, 오염토양 굴착·매립법, 고형화·안정화, 전기영동법, 객토·복토법, 식물 경작법 등을 들 수 있다. 하지만 대부분의 정화법들은 오염 면적이 넓고 처리 물량이 많은 경우 정화시 막대한 비용을 수반하게 된다(Kim *et al.*, 2005). 또한 오염지역을 복구한다고 하여도 오염 지역을 완벽하게 정화하는 것이 매우 어렵다고 알려져 있다(Jung and Lee, 2001). 따라서 오염 현장에 대한 근본적이고 전면적인 정화법을 적용하는 것은 현실적으로 쉽지 않다.

한편 최근들어 댐 예정지 상류에 분포하는 폐광산, 축산단지, 군사격장 등의 오염원에 대한 환경적 위협성이 제기되었고, 이러한 요인들은 댐 건설 적정지 선정에 또다른 장애가 되고 있다(KIWE, 2004). 이러한 오염원은 댐 건설 후 저수지 수질에 지속적으로 영향을 미칠 수 있는 요인들로 알려져 있다. 이와 같이 댐 수몰지 내에 존재하는 중금속 오염토는 장기간에 걸쳐 저수지 수질에 직간접적으로 영향을 미칠 수 있으므로

댐축조 전에 철저히 오염원 조사를 통해 적절한 대책을 수립하여야 한다. 그러나 폐광산 등은 장기간에 걸쳐 처리되지 않은 상태로 노출된 경우가 많아 오염이 광범위하게 분포되어 있고, 처리 대상 오염량도 상당한 경우가 일반적이다. 최근에는 이러한 중금속 오염 토양에 대해 처리 효율이 높은 토양세척 공법(soil washing)을 널리 사용하고 있으나, 처리량이 많은 경우 세척량에 비례하여 비용이 증가하게 된다. 이렇듯 중금속으로 오염된 토양을 댐 건설 전에 처리하고자 하거나 안전하고도 경제적인 정화 대안을 찾기 어려운 것이 현실이다.

본 연구에서는 수치모의를 통해 다량의 오염토 처리를 위한 여러 대안 중 하나로 댐 수몰지에 존재하는 오염토를 댐 내부 축조재료로 활용하는 방안의 가능성을 검토하였다. 이러한 방안은 현재까지 시도된 사례가 거의 없으므로 사전에 다양한 검토가 필요하며, 본 연구에서는 일차적으로 수치해석을 통해 본 방안의 적용 가능성을 예비적으로 확인하고자 하였다. 이러한 처리 방안은 기존의 고형화·안정화 처리법과 유사하게 오염물질이 다른 매체로 전달되지 않도록 오염토를 격리시키면서도 댐 축조재료로도 활용하는 경제적인 방안이다. 본 연구에서는 예비적으로 다양한 상황에 대한 수치해석을 실시하여, 제시된 방안의 신뢰성 및 타당성을 획득하고자 하였다.

연구 대상 댐은 최근에 국내외적으로 널리 적용되고 있는 표면차수벽형석괴댐(Concrete Face Rockfill Dam, 이하 CFRD)으로서 CFRD는 댐체 상류측 표면에 콘크리트 차수벽이 시공되어 침윤선이 댐체재를 통과하지 않으므로 댐체 내부의 오염물질이 외부로 유출될 가능성이 매우 낮은 댐형식이다. CFRD는 댐단면이 물과 접하는 상류부에 차수를 위한 프린스(plinth) 및 콘크리트 차수벽과 차수벽을 지지하는 차수벽 지지존 및 암

석준으로 구성되며(KWRA, 2003), 차수재료로는 철근 콘크리트, 아스팔트 콘크리트, 철재, 목재 또는 토목섬유 등이 사용된다(Park et al., 2004a). 또한 차수벽의 균열과 균열부위를 통한 누수가 있더라도 손상 부위가 표면부에 국한되어 보수도 용이하다고 알려져 있다(KIWE, 1999, 2002). Fig. 1은 이러한 CFRD의 일반적인 형식을 보여주고 있다. Fig. 1에서 프린스(plinth)는 차수벽과 기초 지반을 수밀 상태로 연결시키고 기초 그라우팅의 캡(cap) 역할을 하며 아울러 차수벽 및 제체에서 전이되는 하중을 지지하여 지반으로 전달하는 차수벽의 주춧돌(toe) 역할을 하는 철근콘크리트 구조물이다.

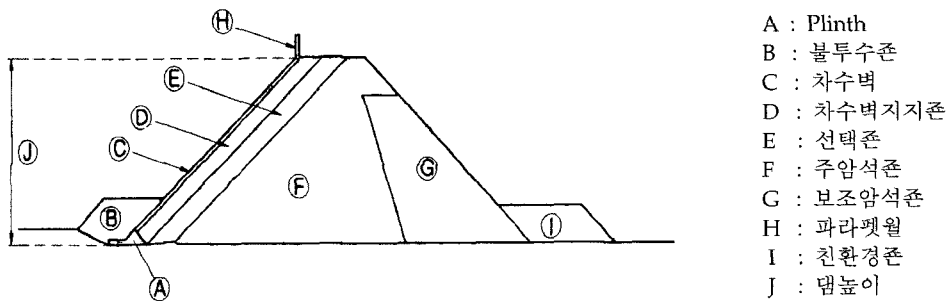
본 연구에서는 전술한 바와 같이 오염된 사력재를 댐 축조 재료로 사용할 때 주변 환경에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 차수벽 균열 조건을 달리한 3개 시나리오에 대하여 댐 침투수와 오염물 거동 수치해석을 수행하였다. 침투수 분석을 하기 위하여 두가지 상용 프로그램, 즉 SEEP2D(GMS, 2004)와 FEMWATER(GMS, 2004)를 이용하여 그 결과를 상호 비교 분석함으로써 신뢰성을 획득하였고, FEMWATER의 침투수 흐름결과를 수분거동모형상태로 설정한 후 오염물 거동 분석을 실시하여 오염물의 이동량을 예측하였다. 이러한 침투수 및 오염물질 이동 수치모의를 통해 본 정화 대안의 적용 가능성을 검토하였다.

2. CFRD 수치 해석 개요

본 연구에서 최근에 국내외적으로 널리 시공되고 있는 CFRD 형식의 댐을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 해석 대상 댐 단면은 Fig. 1에 제시된 표준 단면과 거의 유사하며, 해석이 수행된 댐 단면의 구체적인 제원은 Fig. 2 및 Table 1과 같다. 본 댐에는 콘크리트 차수벽과 암반부에 grouting을 시공하여 댐체 및 암반으로의 누수를 최소화하고자 하였으며, 댐체 하부에는 배수층을 두어 침투된 누수 및 내부 수분의 흐름을 유도하도록 하였다. 또한 댐체 중앙 하부에는 누수 집수벽을 설치하였다.

기본적으로 CFRD에서 콘크리트 차수벽은 물이 댐체 내부로 침투하는 것을 막기 위해서 설치되나 콘크리트 슬래브에 횡방향 균열 또는 깨진 틈이 발생할 수 있으므로 다음의 세 가지 시나리오를 적용하여 각각에 대한 수치모의를 실시하고 그 결과를 상호 비교하였다. 첫 번째 시나리오는 콘크리트 슬래브에 균열이 발생하지 않은 경우이고, 두 번째 시나리오는 콘크리트 슬래브 상부에 균열이 발생한 경우, 세 번째 시나리오는 콘크리트 슬래브 하부에 균열이 발생한 경우이다(Table 2).

지하수 흐름을 파악하기 위해 GMS ver5 FEMWATER와 SEEP2D를 이용하여 수치모의를 실시하였다. FEMWATER(GMS, 2004)는 3차원 유탄요소법을 이용



- A : Plinth
- B : 불투수존
- C : 차수벽
- D : 차수벽지지존
- E : 선택존
- F : 주암석존
- G : 보조암석존
- H : 파라펫월
- I : 친환경존
- J : 댐높이

Fig. 1. Standard cross section of CFRD (KWRA, 2003).

Table 1. Characteristics in each zone of the CFRD.

구분	구역	특성	입도범위	비고
Zone 1, 1A	불투수구역	누수차단, 차수벽 균열 및 응력발생 억제	최대치수 300 mm이하	점토재 및 랜덤재
Zone 2	차수벽지지구역	차수벽 강성변형억제, 세립분함량조절 제2불투수층	최대치수 75~150 mm	사력재
Zone 4	주축조구역	Main Fill	최대치수 500 mm이하	사력재
Zone 3C	부축조구역	하류댐부분을 안정화	최대치수 800 mm이하	암석재
Zone 1B	환경친화구역	주변환경과 조화	최대치수 300 mm이하	랜덤재

Table 2. Scenarios of numerical analysis.

Case	설 명	침투수 분석 프로그램	오염물 거동 프로그램
시나리오 1	콘크리트슬래브에 균열이 발생하지 않은 경우	FEMWATER	
시나리오 2	콘크리트슬래브 상부에 균열이 발생한 경우	&	FEMWATER
시나리오 3	콘크리트슬래브 하부에 균열이 발생한 경우	SEEP2D	

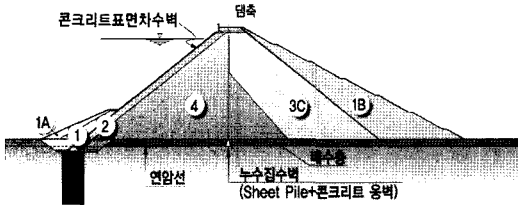


Fig. 2. CFRD cross section used in the analysis.

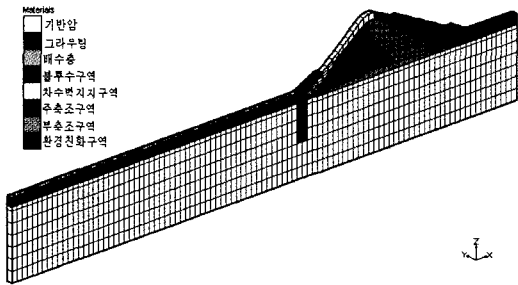


Fig. 3. Zoning of the dam for numerical analysis (FEMWATER).

하여 포화대와 불포화대에서 지하수의 흐름과 오염물 거동을 수치모의하는 프로그램이다. SEEP2D(GMS, 2004)는 2차원 유한요소법을 이용하여 지하수의 흐름을 주로 수치모의하는 프로그램이며, 댐이나 제방에서의 지하수 흐름의 종단면도(XZ 축)를 나타내는데 많이 사용되고 있다. 그러나 SEEP2D는 오염물 거동 수치모의는 하지 못한다.

3. 침투수 분석

3.1. FEMWATER 침투수 흐름 수치모의

침투수 분석을 수행하기 위하여 우선 댐체 및 기반암을 격자화 시킨 후 지하수 수치 범용 프로그램인 GMS ver.5 FEMWATER를 이용하여 수치모의하였다. 이때 총 모의 영역은 490 m×10 m×98 m이고, 총 절점 갯수는 3,400개, 총 요소 개수는 1,584개이다. 댐체 내부 및 기초 지반은 수리 물리화학적 특성에 따라 8개의 영역으로 나누었으며, 각 영역은 Fig. 3에 나타났다.

수치해석에 적용된 수리 물성치는 국내 H댐 자료를

Table 3. Hydraulic conductivity of each zone.

축 조 재 료	수리전도도 (cm/s)	수리전도도 (m/d)
기반암	6.0×10^{-7}	5.18×10^{-4}
그라우팅	1.2×10^{-8}	1.00×10^{-5}
배수층	9.0×10^{-1}	$7.78 \times 10^{+2}$
불투수구역	7.6×10^{-7}	6.54×10^{-4}
차수벽지지구역	6.0×10^{-4}	5.18×10^{-1}
주축조구역	6.7×10^{-2}	$5.79 \times 10^{+1}$
부축조구역	7.4×10^{-2}	$6.39 \times 10^{+1}$
환경친화구역	2.0×10^{-6}	1.73×10^{-3}

Table 4. Input parameters of a unsaturated zone.

공 국 률	0.43
잔류 수분함양	0.045
van Genuchten 상수, α	0.01
van Genuchten 상수, β	2.68

참고로 하여 설정하였으며(Table 3), 이 때 적용된 수리 물성치는 기존 댐 설계 물성치와 거의 유사하였다(KWRA, 2003). 또한 불포화대에서 수분거동을 모의하기 위해서 van Genuchten 관계식을 사용하였으며 이때에 이용된 입력상수 값은 Table 4와 같다(Carsel and Parrish, 1998). 적용된 van Genuchten 관계식은 압력수두와 수분함양의 관계를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^\beta} \right)^{1-\beta} \quad (1)$$

여기서, θ 는 수분함양(dimensionless), α 는 van Genuchten 상수(L^{-1}), β 는 van Genuchten 상수(dimensionless), h 는 압력수두(L)이다.

본 수치해석에서 기반암은 0 m-60 m에 그리고 댐은 60 m-98 m 높이에 위치한다. Fig. 3의 댐단면에서 왼쪽은 상류측에 해당하며, 오른쪽은 하류측에 해당된다. 이때 댐 내의 지하수 흐름을 모의하기 위한 경계조건에서 상류측에 해당하는 왼쪽 측면의 절점과 하류측에 해당하는 오른쪽 측면의 절점은 일정 총수두조건으로 설정하였으며, 상류측 수위는 94 m, 하류측 수위는 55 m였다. 경계조건 설정을 시각적으로 표현하기 위해

여 Fig. 4(a)와 같이 나타냈으며 여기서 원형점에 해당하는 부분이 일정 총수두조건이 설정된 절점들이다. 강우에 의한 유입을 고려하기 위해서 댐의 상부에 일정 유량경계조건이 적용된다. 단, 댐의 정상부와 좌측부에는 콘크리트 슬래브가 설치되어 불투수구역으로 포장될 것이므로 이 지역에는 강우의 유입이 없는 것으로 하였다. 일정유량 값은 H댐이 위치한 지역의 평균 강수량과 환경친화구역의 매질을 고려하여 강우량의 1%에 해당하는 10.21 mm/yr의 양이 유입되는 것으로 하였다. 일정유량 경계조건을 시각적으로 나타내기 위하여 Fig. 4(b)에서와 같이 댐 하류측에 삼각형으로 나타내었다. 마지막으로 댐의 하류부 사면에서는 침투가 발생하므로 댐 하류 사면에는 가변경계조건을 설정하였다. Fig. 4(c)는 가변경계조건에 해당하는 영역을 사각형으로 표시하였다.

3.2. FEMWATER 침투수 흐름 수치 모의 결과

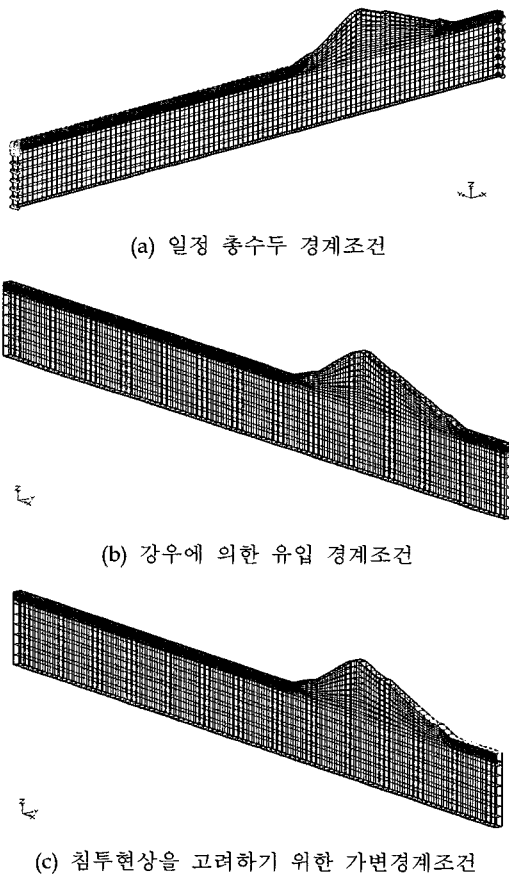


Fig. 4. Boundary conditions for seepage analysis in FEMWATER.

3.2.1. 균열이 발생하지 않은 경우 (시나리오 1)

콘크리트 슬래브에 균열이 발생하지 않은 경우를 가정하여 콘크리트 슬래브에 비흐름 경계조건을 설정하였다. 실제로 불투수구역의 수리전도도는 0.000654 m/day이지만 주축조구역과의 수리전도도 차수가 5배 정도의 차이가 나기 때문에 행렬 연산식이 수렴하기 어려운 조건으로 변한다. 따라서 컴퓨터 수치모의 시간은 상당히 증가될 뿐만 아니라 수치오차가 내재될 확률이 높다. 따라서 상류경계부분을 일정수두조건으로 설정하기보다는 비흐름 경계조건으로 설정하였다.

앞에서 언급한 물성치와 경계조건을 이용하여 FEMWATER를 이용해 수치 모의를 실시한 결과, Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 배수층에서 유속이 가장 빠른 것을 확인할 수 있다. 이는 침투수는 주로 배수층에서 빠르게 흐르고, 기반암 부분에서는 낮은 수리전도도로 인해서 지하수 속도가 낮다는 것을 보여주는 것이다. 또한 이 때 댐의 주축조구역에서의 최대 속도는 7.757×10^{-3} m/day, 최저 속도는 6.84×10^{-5} m/day, 평균속도는 1.093×10^{-3} m/day이다. Fig. 5(b)의 댐 침윤

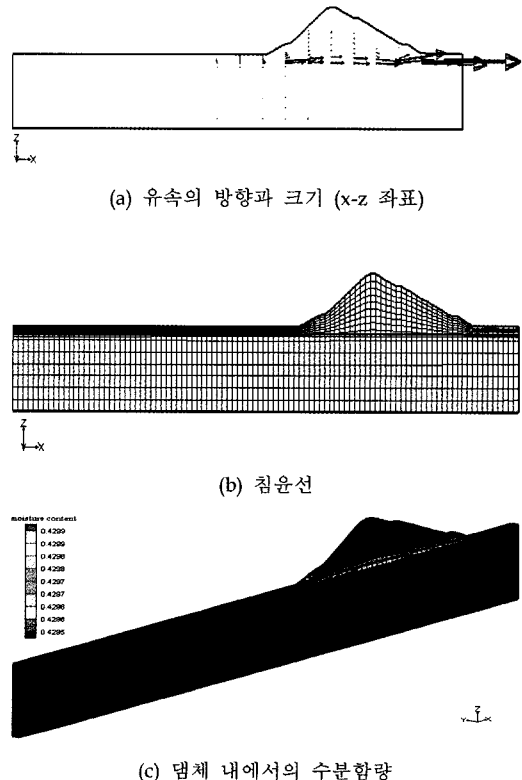


Fig. 5. Numerical Results for seepage using FEMWATER (scenario 1).

선 분포를 보면 콘크리트 차수벽에서 급격히 하강하여 배수층 상단에 걸쳐 나타난다. 즉 배수층은 포화대에 포함되고, 댐의 침윤선 상단부분은 불포화대 영역에 속한다. 이는 Fig. 5(c)의 수분함량분포에서도 일치하게 나타난다.

마지막으로 댐의 우측경계에서 배수층을 통해 빠져나가는 침투수량을 산정하였다. 계산결과 댐 단위폭당 침투수량은 약 $0.017 \text{ m}^3/\text{day}$ 으로 나타났으며, 이 값은 강우와 지하수의 영향으로 판단된다. 이에 대하여 보다 상세히 분석해보면, 댐으로 유입되는 강우의 총량은 $0.002393 \text{ m}^3/\text{day}$, 지하수에 의해 배수층에 유입되는 침투수량은 $0.0146 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 따라서 배수층에서 단위폭당 침투수량 중에서 강우에 의한 침투수량은 14%이며, 나머지 86%는 지하수에 의한 침투수임을 알 수 있다. 이는 환경친화구역의 수리전도도가 낮아 강우의 유입이 현저히 낮기 때문에 배수층에서 강우에 의한 침투수량이 작은 것으로 판단할 수 있다.

3.2.2. 콘크리트 슬래브 상부에 균열이 발생한 경우 (시나리오 2)

콘크리트 슬래브 상부에 균열이 발생한 경우를 가정하여 침투수 흐름 분석을 수행하였다. 이 때 콘크리트 슬래브에서 균열이 생긴 부분을 일정총수두로 경계조건을 설정하였고, 균열이 발생된 위치는 Fig. 6과 같이 가정하였다.

FEMWATER를 이용해 수치 모의를 실시한 결과, 총수두의 경우 균열이 생긴 부분에서 총수두가 높게 나타났다. 배수층에서 유속이 빠르고, 균열이 생긴 부분에서도 유속이 빠르나 댐체 내부로 갈수록 급격히 작아짐을 알 수 있다(Fig. 7a). 이 때 댐의 주축조구역에서의 최대 속도는 3.56 m/day , 최저 속도는 $2.0 \times 10^{-3} \text{ m/day}$, 평균 속도는 $6.187 \times 10^{-1} \text{ m/day}$ 였다. 수치모의 결과를 보면 침윤선은 배수층 상단에 걸쳐 있는 것을 볼 수 있으며(Fig. 7b), Fig. 7c는 댐체 내에서의 수분 함량분포를 나타낸다.

마지막으로 댐의 상부에 균열이 있을 때 댐의 우측 경계에서 배수층을 통해 빠져나가는 침투수량을 산정한 결과 침투수량은 약 $14.311 \text{ m}^3/\text{day}$ 로, 이는 균열이 발생하지 않은 경우에 비해 침투수량이 약 1,000배 정도 증가한 수치이다.

3.2.3 슬래브 하부에 균열이 발생한 경우(시나리오 3)

콘크리트 슬래브 하부에 균열이 발생한 경우를 가정하여 침투수 흐름 분석을 수행하였다. 하부는 콘크리트 슬래브와 프린스의 이음부에 해당하는 부분으로서 균열의 우려가 높은 곳을 선택하였다. 이 때 콘크

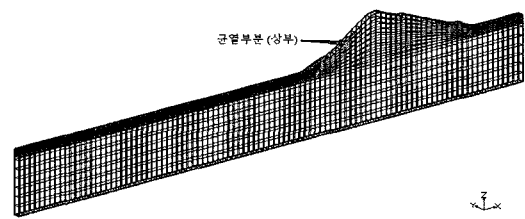


Fig. 6. Location of a crack in Scenario 2.

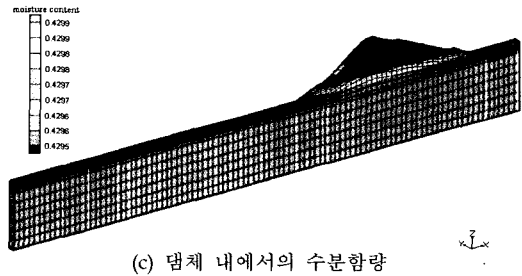
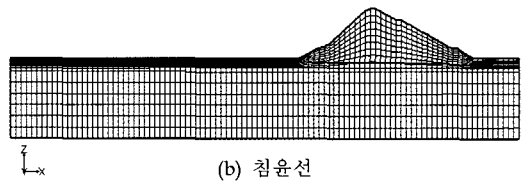
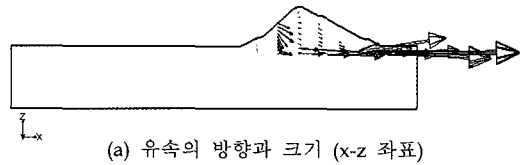


Fig. 7. Numerical Results for seepage using FEMWATER (scenario 2).

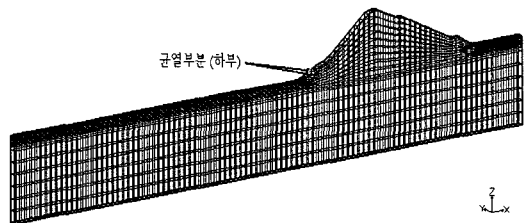


Fig. 8. Location of a crack in Scenario 3.

리트 슬래브에서 균열이 생긴 부분을 일정 총수두로 경계조건을 설정하였고, 균열이 발생된 위치는 Fig. 8과 같이 가정하였다.

FEMWATER를 이용해 수치 모의를 실시한 결과, 균열이 생긴 부분에서 총수두가 높게 나타났다. 또한 흐름 속도를 보면 배수층에서 유속이 빠르고, 균열이

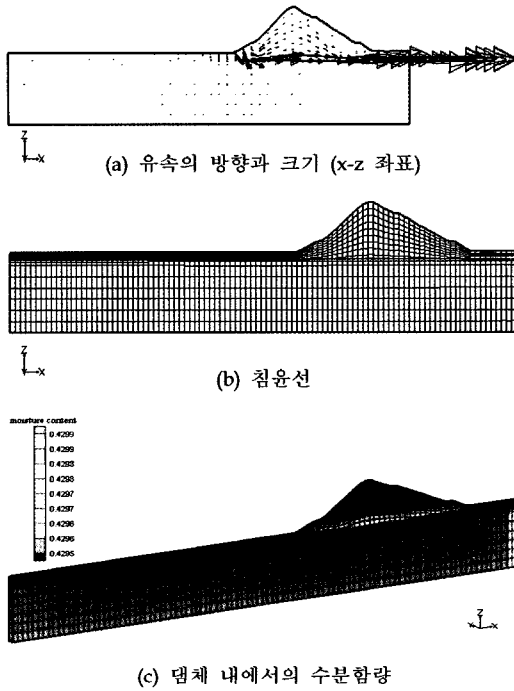


Fig. 9. Numerical Results for seepage using FEMWATER (scenario 3).

생긴 부분에서도 유속이 빠르나 댐 체로 갈수록 급격히 작아짐을 알 수 있다(Fig. 9a). 댐의 주축조구역에서의 최대 속도는 1.23×10^{-2} m/day, 최저 속도는 1.3×10^{-4} m/day, 평균 속도는 1.96×10^{-3} m/day로 나타났다. 침윤선 수치모의 결과를 보면 배수층 상단에 걸쳐 있는 것을 볼 수 있으며(Fig. 9b), Fig. 9c는 댐에서의 수분 함량분포를 나타낸다.

마지막으로 댐의 하부에 균열이 있을 때 댐의 우측 경계에서 배수층을 통해 빠져나가는 침투수량이 계산되었다. 침투수량은 약 $0.02694 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 계산되었다. 이는 균열이 발생하지 않은 경우에 비해 침투수량이 약 1.5배 늘어난 것이며, 상부에 균열이 발생한 경우에 비하여는 매우 작은 수치이다.

3.3. SEEP2D 침투수 흐름 수치 모의

FEMWATER에 의한 댐체 지하수 흐름 수치모의 결과를 검증하기 위해 SEEP2D 프로그램을 이용하여 동일한 상황에 대한 수치모의를 실시하였다. SEEP2D로 수치모의 하기 위해 영역을 격자화 하였으며, 이때 총 절점은 1,648개이고, 총 요소는 3,070개이다.

댐내 및 기초지반은 수리 물리학적인 특성에 따라 FEMWATER에서와 동일하게 8개의 영역으로 나누었

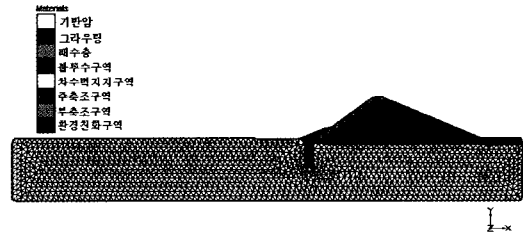


Fig. 10. Dam Zonation for numerical analysis (SEEP2D).

다. 각 영역은 Fig. 10에 나타내었다. SEEP2D는 2차원 모델로 측면도를 모의하도록 프로그램되었기 때문에 댐 내에서의 지하수의 흐름을 모의하는데 많이 사용되는 모델이다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 SEEP2D는 좀 더 많은 격자와 노두점을 가지고 영역화할 수 있다. 댐 내부 물성치는 FEMWATER와 마찬가지로 Table 3의 값을 이용하였다.

불포화대를 모의하기 위해 van Genuchten 관계식을 이용하였으며 van Genuchten 관계식을 위한 상수 α 와 β 는 FEMWATER에서와 같이 Table 4의 값을 이용하였다. 경계조건 역시 FEMWATER에서와 같이 상류측에 해당하는 왼쪽 측면의 절점과 상류측 수위는 z 축 좌표가 94 m에 해당하는 값으로 일정 총수두조건을 주었다. 또한 하류측 수위는 수치해석 격자망에서 z축 좌표가 55 m에 해당하는 값을 일정 총수두조건으로 주었다. FEMWATER에서와 같이 강우에 의한 유입으로 10.21 mm/yr (총 강수량의 1%에 해당)의 양이 침투하는 것으로 하였다. 댐의 정상부와 좌측부는 불투수구역으로 덮여질 것을 가정하여 비흐름 경계조건을 설정하였다. 이상과 같이 FEMWATER와 똑같은 조건을 가정하여 콘크리트 슬래브에 균열이 발생하지 않은 경우, 균열이 댐의 상부에 발생한 경우, 균열이 댐의 하부에 발생한 경우에 대해 각각 SEEP2D를 이용한 수치모의를 실시하였으며 결과는 다음과 같다.

3.4. SEEP2D 침투수 흐름 수치 모의 결과

3.4.1 균열이 발생하지 않은 경우 (시나리오 1)

콘크리트 슬래브에 균열이 발생하지 않은 경우를 가정하여 콘크리트 슬래브에 비흐름 경계조건을 설정하였다. 앞에서 언급한 물성치와 경계조건을 이용해 SEEP2D 수치 모의를 실시한 결과, 총수두의 분포가 FEMWATER에서 구한 총수두의 분포와 일치하였고, 이 때의 유속은 Fig. 11(a)에 나타내었다. FEMWATER에서와 같이 배수층에서 지하수의 유속이 가장 빠른 것을 확인할 수 있으며, 댐의 주축조구역에서는 유속이 느

린 것을 볼 수 있다. 주축조구역에서의 최대 유속은 4.9×10^3 m/day, 최저 속도는 2.88×10^5 m/day, 평균 속도는 1.0×10^3 m/day로 이는 FEMWATER와 거의 같은 결과이다. 마찬가지로 댐에서의 침윤선은 Fig. 11(b)에 나타내었다. FEMWATER와의 결과를 비교해 보면 침윤선이 거의 같은 부분에 위치한다.

마지막으로 댐의 우측경계에서 배수층을 통해 빠져 나가는 침투수량을 산정하였으며, 이 때 침투수량은 약 $0.0156 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 계산되었다. 이는 FEMWATER의 $0.017 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 거의 일치함을 할 수 있다.

3.4.2 슬래브 상부에 균열이 발생한 경우(시나리오 2)

콘크리트 슬래브 상부에 균열이 발생한 경우를 가정하여 콘크리트 슬래브에서 균열이 생긴 부분을 일정 총수두경계조건으로 설정하였다. 콘크리트 슬래브에서 균열이 생긴 위치는 FEMWATER의 경우와 같은 위치에 균열 위치를 설정하였다. SEEP2D를 이용해 수

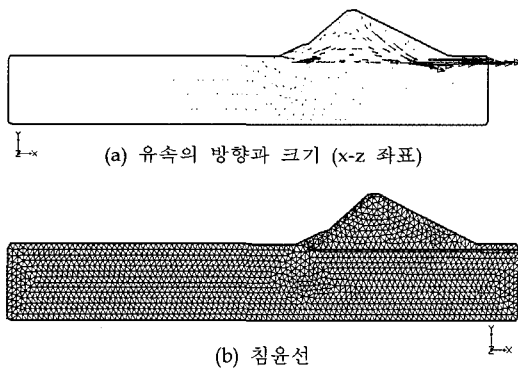


Fig. 11. Numerical Results for seepage using SEEP2D (scenario 1).

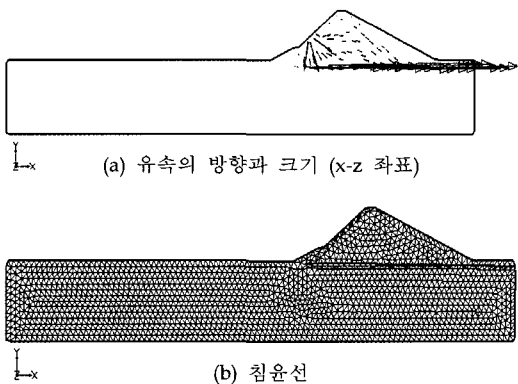


Fig. 12. Numerical Results for seepage using SEEP2D (scenario 2).

치 모의를 실시한 결과, 총수두 분포는 FEMWATER의 결과에서와 같이 균열이 생긴 부분에서 총수두가 높은 것을 알 수 있다.

유속은 Fig. 12(a)에 나타내었다. Fig. 12(a)에서 볼 수 있듯이 배수층에서 지하수의 유속이 가장 빠른 것을 확인할 수 있고, 댐에서 균열이 생긴 부분에서 유속이 빨라진 것을 볼 수 있다. 댐의 주축조구역에서의 최대 유속은 4.36 m/day 이고, 최저유속은 $8.5 \times 10^3 \text{ m/day}$ 평균 유속은 $8.39 \times 10^1 \text{ m/day}$ 이다. 이는 FEMWATER에서 계산된 주축조구역에서의 최대 속도인 3.56 m/day , 최저 속도 $2.0 \times 10^3 \text{ m/day}$, 평균 속도 $6.187 \times 10^1 \text{ m/day}$ 와 거의 비슷한 값이다. 그리고 댐에서의 침윤선은 Fig. 12(b)에 나타내었다.

마지막으로 댐의 우측경계에서 배수층을 통해 빠져 나가는 침투수량이 계산되었다. 침투수량은 $14.92 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 계산되었으며, 이는 FEMWATER에 의해 계산된 침투수량인 $14.31 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 거의 일치하는 값이다.

3.4.3 슬래브 하부에 균열이 발생한 경우(시나리오 3)

콘크리트 슬래브 하부에 균열이 발생한 경우를 가정하여 콘크리트 슬래브에서 균열이 생긴 부분을 일정총수두로 경계조건을 설정하였다. 콘크리트 슬래브에서 균열이 생긴 위치는 FEMWATER의 경우와 같도록 설정하였다.

SEEP2D를 이용해 수치 모의를 실시한 결과, 총수두 분포는 FEMWATER의 결과에서와 같이 균열이 생긴 부분에서 총수두가 높은 것을 알 수 있었다. 유속은 Fig. 13(a)에서 볼 수 있듯이 배수층에서 지하수의 유속이 가장 빠른 것을 확인할 수 있고, 댐에서 균

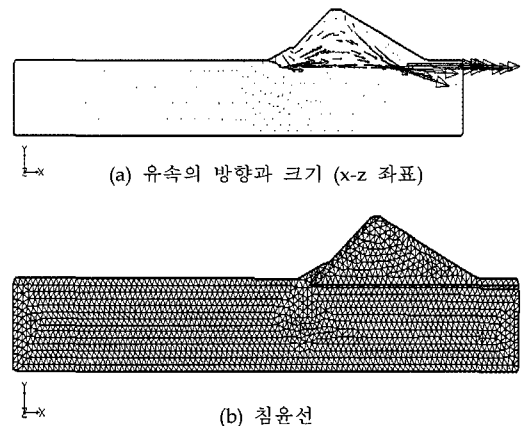


Fig. 13. Numerical Results for seepage using SEEP2D (scenario 3).

열이 생긴 부분에서 지하수의 유속이 급격히 빨라진 것을 볼 수 있다. 댐의 주축조구역에서의 최대 유속은 1.19×10^{-2} m/day, 최저 유속은 8.88×10^{-5} m/day 평균 유속은 2.40×10^{-3} m/day이다. 이는 FEMWATER에서 계산된 주축조구역에서의 유속과 거의 비슷한 값이다. 그리고 댐에서의 침윤선은 Fig. 13(b)에 나타내었다.

마지막으로 댐의 우측경계에서 배수층을 통해 빠져 나가는 침투수량이 계산되었다. 침투수량은 0.032 m³/day로 계산되었다. 이는 FEMWATER에 의해 계산된 침투수량인 0.027 m³/day와 거의 일치하는 값이다.

3.5. FEMWATER와 SEEP2D의 결과 비교

균열이 발생하지 않은 경우, 주축조구역에서의 속도, 배수층에서의 침투수량, 누수집수벽 지점에서의 침투수량에 대하여 FEMWATER와 SEEP2D의 결과를 Table 5에 동시에 제시하여 이를 비교하였다. Table 5에서 볼 수 있듯이 균열이 발생하지 않은 경우 FEMWATER의 계산결과와 SEEP2D의 계산결과가 거의 비슷한 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 균열이 상부에 발생한 경우, 주축조구역에서의 속도, 배수층에서의 침투수량, 누수집수벽 지점에서의 침투수량에 대한

FEMWATER의 결과치와 SEEP2D의 결과치가 Table 6에 제시하였다. 균열이 상부에 발생한 경우 역시 FEMWATER의 계산 결과와 SEEP2D의 결과가 거의 비슷한 것을 볼 수 있다.

슬래브 하부에 균열이 발생한 경우, 주축조구역에서의 속도, 배수층에서의 침투수량, 누수집수벽 지점에서의 침투수량에 대한 FEMWATER의 결과와 SEEP2D의 결과를 Table 7에 함께 제시하여 이를 비교하였다. 이 경우 역시 FEMWATER의 계산결과와 SEEP2D의 계산결과가 매우 유사함을 확인할 수 있다.

FEMWATER의 수치 모의 결과를 다른 댐체 침투수 거동 분석 프로그램인 SEEP2D와 비교하여 두 프로그램이 유사한 결과를 도출해 냄을 확인하였으며, 따라서 FEMWATER의 지하수 흐름의 결과에 대한 신뢰성을 획득할 수 있음을 확인하였다.

한편 콘크리트 상부에 균열이 발생하였을 경우(시나리오 2), 다른 경우 즉 균열이 없거나 균열이 하부에 발생하였을 때보다 약 1,000배 정도 큰 침투수량이 나타났다. 이는 균열이 상부에 발생하면 침윤선이 높게 형성되어 댐체 내부를 관통하는 침투 면적이 하부에 균열이 발생한 경우보다 훨씬 크기 때문에 나타난 것

Table 5. Comparison for numerical seepage analysis between FEMWATER and SEEP2D (scenario 1).

항 목	FEMWATER	SEEP2D
주축조구역에서 최대 속도 (m/day)	7.8×10^{-3}	4.9×10^{-3}
주축조구역에서 최저 속도 (m/day)	6.8×10^{-5}	2.9×10^{-5}
주축조구역에서 평균 속도 (m/day)	1.1×10^{-3}	1.0×10^{-3}
배수층 단위폭당 침투수량 (m ³ /day)	1.7×10^{-2}	1.6×10^{-2}
누수집수벽 지점에서 단위폭당 침투수량 (m ³ /day)	7.3×10^{-3}	1.1×10^{-2}

Table 6. Comparison for numerical seepage analysis between FEMWATER and SEEP2D (scenario 2).

항 목	FEMWATER	SEEP2D
주축조구역에서 최대속도 (m/day)	3.6	4.4
주축조구역에서 최저속도 (m/day)	2.0×10^{-3}	8.6×10^{-3}
주축조구역에서 평균속도 (m/day)	6.2×10^{-1}	8.4×10^{-1}
배수층 단위폭당 침투수량 (m ³ /day)	$1.4 \times 10^{+1}$	$1.5 \times 10^{+1}$
누수집수벽 지점에서 단위폭당 침투수량 (m ³ /day)	7.4	$1.1 \times 10^{+1}$

Table 7. Comparison for numerical seepage analysis between FEMWATER and SEEP2D (scenario 3).

항 목	FEMWATER	SEEP2D
주축조구역에서 최대속도 (m/day)	1.2×10^{-2}	1.2×10^{-2}
주축조구역에서 최저속도 (m/day)	1.3×10^{-4}	0.9×10^{-4}
주축조구역에서 평균속도 (m/day)	2.0×10^{-3}	2.4×10^{-3}
배수층 단위폭당 침투수량 (m ³ /day)	2.7×10^{-2}	3.2×10^{-2}
누수집수벽 지점에서 단위폭당 침투수량 (m ³ /day)	1.3×10^{-2}	2.6×10^{-2}

Table 8. Input parameters for the numerical analysis of contaminant transport.

변수	입력 수치
물의 밀도 (kg/m ³)	1,000
물의 점성도 (kg/m/day)	94.8
Bulk density (kg/m ³)	1,200
Longitudinal dispersivity (m)	10
Lateral dispersivity (m)	10
Distribution coefficient (m ³ /kg)	0.343

이었다. 이러한 해석 결과는 균열의 위치가 댐체 내부 침투수량에 큰 영향을 미침을 보여주는 것으로, 본 침투 해석 결과는 콘크리트 표면 차수벽 중 특히 상부에 균열이 발생하지 않도록 제어하는 것이 내부 침투수량을 줄여 환경적 및 수리학적 안정성을 확보하는데 매우 중요함을 시사한다.

4. 오염물 거동 수치모의

FEMWATER 프로그램을 이용하여 댐 내에서 오염물의 거동에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치모의를 하기 위한 입력상수는 Table 8과 같으며 이를 이용하여 오염물 거동 수치모의를 실시하였다. 여기서 분배계수는 H댐 환경영향 평가시 산정된 값 0.343 m³/kg을 이용하였다.

본 수치 해석에의 오염물 초기농도는 모든 영역에서 0 ppb로 가정하였다. 오염물 거동을 수치모의 하기 위한 경계조건은 Fig. 14와 같다. 즉 오염된 재료가 주축조구역에 적용되었으므로 이로부터 오염물질이 지속적으로 침출되어 올 것이므로 이 부분의 오염물 농도는 13 ppb로 유지하게 하였다(Fig. 14a). 이 때 오염된 사력재가 위치하는 곳이 일반적으로 침윤선 위에 나타나고, 이 부분은 불포화대에 속한 곳이므로 수분거동은 매우 느리게 일어나므로 위에서 언급한 바와 같이 침출수 오염도 농도가 시간에 따라 거의 일정하다고 가정하였다. 한편 추축조구역의 침출농도는 H댐 인근 오염토양 시료를 US EPA의 인공 산성강우(pH 5.6) 조건에서의 토양 용출시험법(SPLP; Synthetic Precipitation Leaching Procedure)에 따라 구한 농도를 적용하였다. 하류측 경계부분에서는 오염물질이 자연스럽게 빠져나가도록 유출경계조건을 사용하였다(Fig. 14b).

앞에서 언급한 침투수 분석과 같이 오염물 거동 모사도 콘크리트 슬래브에 균열이 발생하지 않은 경우, 댐의 상부에 균열이 발생한 경우, 댐의 하부에 균열이 발생한 경우 세 가지 시나리오를 가정하여 수치모의를

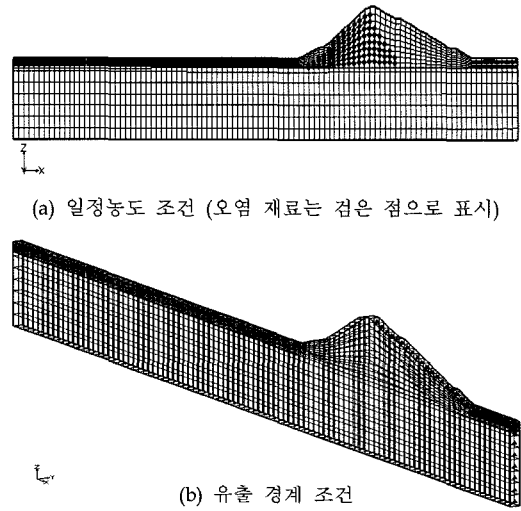


Fig. 14. Boundary conditions for contaminant transport analysis in FEMWATER.

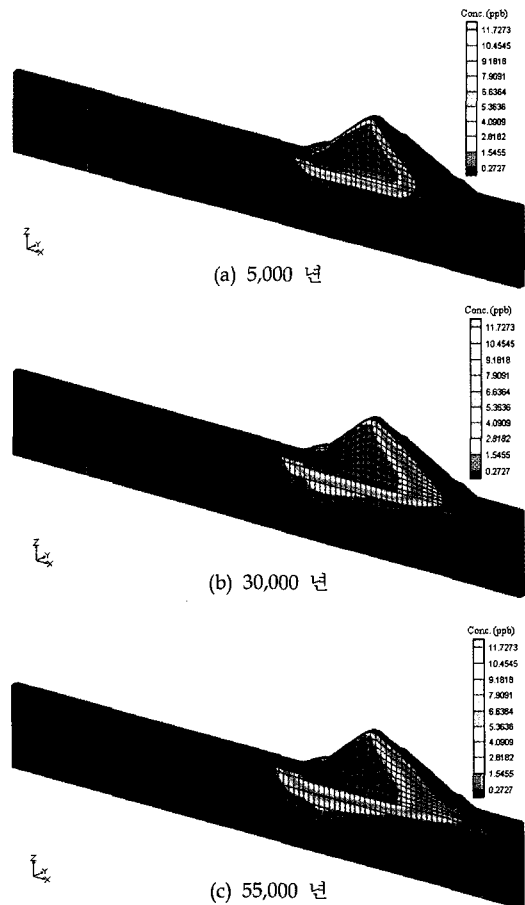


Fig. 15. Contaminant plume migration with time (scenario 1).

수행하였으며, 침투수 거동은 앞선 해석에서 얻은 결과를 이용하였다.

4.1. 균열이 발생하지 않은 경우(시나리오 1)

댐체 콘크리트 슬래브에 균열이 발생하지 않은 경우의 시간에 따른 오염물 분포를 수치모의한 결과는 Fig. 15와

같다. 총 모의 시간은 55,000년이다. Fig. 15의 결과에서 볼 수 있듯이 오염물은 시간에 지남에 따라 주로 침투수 속도가 빠른 배수층을 따라 흘러가는 것을 볼 수 있다.

4.2. 슬래브 상부에 균열이 발생한 경우(시나리오 2)

댐체 상부에 균열이 발생한 경우, 시간에 따른 오염

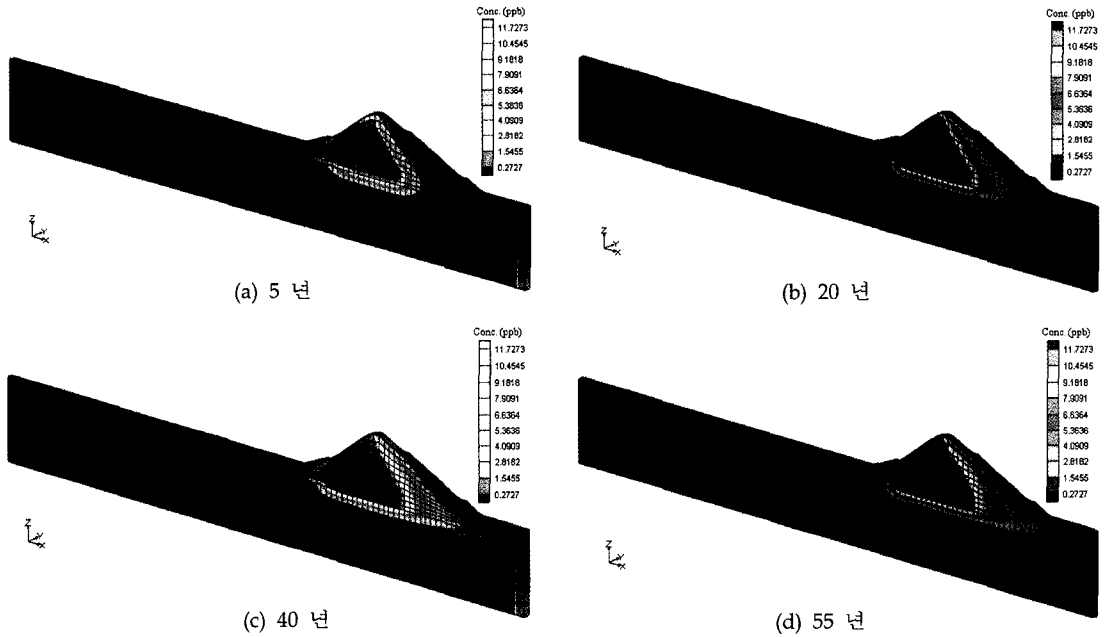


Fig. 16. Contaminant plume migration with time (scenario 2).

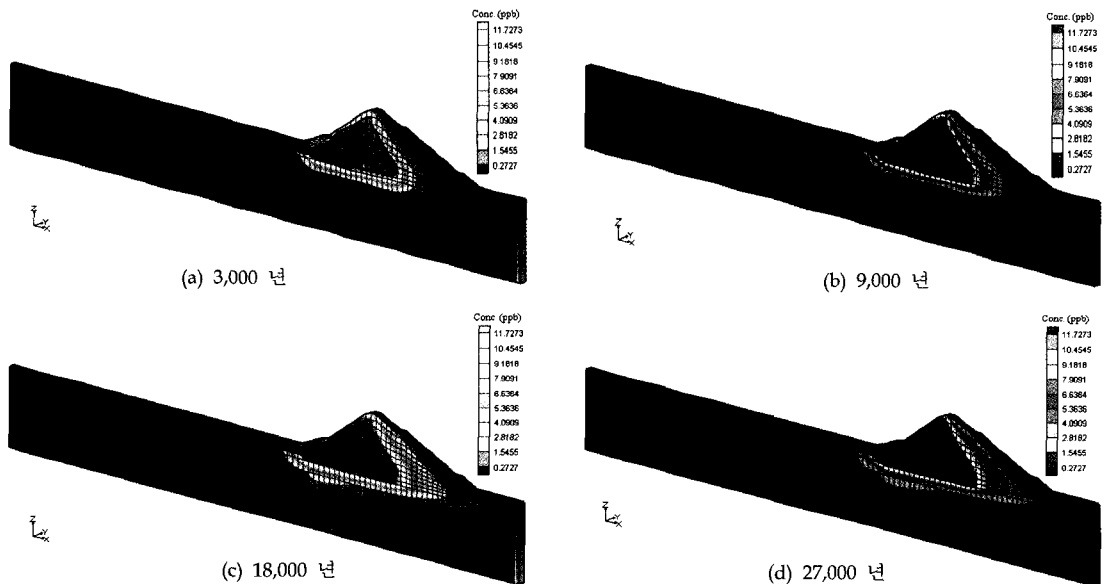


Fig. 17. Contaminant plume migration with time (scenario 3).

물의 분포를 수치모의한 결과는 Fig. 16과 같다. 댐체 상부에 균열이 발생한 경우의 유속은 댐에 균열이 발생하지 않은 경우의 유속보다 약 500배 이상 빠르기 때문에 오염물도 균열이 발생하지 않은 경우에 비해 상당히 빠르게 퍼져나가는 것을 확인할 수 있다. 이때 총 모의 시간은 55년이다.

4.3. 슬래브 하부에 균열이 발생한 경우(시나리오 3)

댐체 하부에 균열이 발생한 경우, 시간에 따른 오염물의 분포를 수치모의한 결과는 Fig. 17과 같다. 이때 총 모의 시간은 27,000년이다. 침투수에서와 마찬가지로 하부에 균열이 발생한 경우, 상부에 균열이 발생한 경우에 비해 훨씬 느리게 오염물질이 이동함을 알 수 있다.

4.4. 오염물 이동 수치 모의 결과 분석 및 제안

본 수치해석을 통해 댐체 축조 재료에 흡착되어 있는 오염물의 이동을 예상할 수 있었다. 수치 모의 결과를 보면 침투수 분석에서와 같이 균열의 위치에 따라 오염물의 이동 양상에 차이를 보였다. 오염물 거동 분석 결과 시나리오 1의 경우 2 ppb 정도의 오염물이 댐체 하류 부분에 도달하는데 걸리는 시간은 최소 55,000년 정도이고, 시나리오 2의 경우 약 50년 정도, 마지막으로 시나리오 3의 경우 27,000년이었다. 댐체 상부에 균열이 발생한 경우는 댐에 균열이 발생하지 않은 경우보다 약 500배 이상 빠른 유속이 나타나기 때문에 오염물도 균열이 발생하지 않은 경우에 비해 상당히 빠르게 퍼져나가는 것을 확인할 수 있었다.

종합하면 슬래브 상부에 균열이 있는 경우(시나리오 2)에서 가장 넓게 오염물이 이동하였으며, 이 때 주변 지역으로 퍼져나간 오염물의 농도는 50년 후 댐체 하류 사면 끝단에서 약 2 ppb 전후의 값을 나타내었다. 이는 생활용수로 이용되는 지하수의 수질 기준이 중금속(카드뮴, 비소 등의 경우 10-50 ppb 임을 고려하면 아주 작은 수치임을 알 수 있다. 또한 시나리오 1과 시나리오 3의 결과에서 볼 수 있듯이 콘크리트 슬래브에 균열이 없거나 하부에 균열이 발생하는 한 단기간 내에 오염물이 외부로 유출될 가능성이 극히 희박함을 알 수 있다. 본 연구 결과에 의하면 콘크리트 슬래브에 대한 시공 및 유지관리가 정상적으로 이루어져 균열에 의한 침투수 관리가 성공적으로 이루어진다면 본 해석 결과에서와 같이 댐체 내부에 오염된 재료를 이용하는 것은 적용 가능한 대안이 될 수 있을 것이다.

이처럼 CFRD는 기본적으로 댐체 내로의 침투가 없

다고 가정하지만, Mori(1999)에 의하면 콘크리트 슬래브의 건조 수축, 댐체 내부 재료의 침하, 제체의 부등 침하로 인하여 균열이 발생할 수 있음을 지적한 바 있다. 해석결과에서와 같이 슬래브 상부에 균열이 발생한 경우는 다른 상황에 비해 오염물의 이동이 빠르게 진행되므로 이에 대하여 사전에 대비책을 세우는 것이 필요할 것으로 요구된다. 기존 연구에 의하면 슬래브 하부 bedding zone(차수벽 지지층)의 적절한 설계 및 시공, perimetric joint(주변 이음) 정밀 시공 등을 통해 침투량을 최소화시킬 수 있으며, 시간이 지남에 따라 진행되는 압축에 의한 균열 폐쇄 또는 물 속의 실트질에 의한 균열 감소 등으로 이러한 균열에 의한 누수 가능성이 감소되기도 한다고 알려져 있다(Park *et al.*, 2004b; Sherard, 1985; Ding *et al.*, 2000).

5. 결 론

본 연구에서는 중금속으로 오염된 토양이나 자갈을 댐 축조 재료로 사용할 경우 주변 환경에 미치는 영향을 파악하기 위하여 댐 침투수와 오염물 거동에 대한 수치 모의를 실시하였다. 두 가지 상용 프로그램(SEEP2D와 FEMWATER)을 이용하여 침투수 분석을 수행하였으며, 결과를 상호 비교 분석함으로써 수치 모의의 신뢰성을 획득하였다. 특히 오염된 댐 축조재료로 인한 환경적 안정성을 검토하기 위하여 세 가지 시나리오, 즉 댐체에 균열이 없는 경우(시나리오 1), 댐의 차수벽 역할을 하는 표면 콘크리트 슬래브 상부에 균열이 발생하는 경우(시나리오 2), 댐체 하부 즉 프린스와 콘크리트 슬래브와 접촉부에 균열이 발생하는 경우(시나리오 3)에 대하여 각각 수치 모의를 실시하였다. 침투수 해석 결과, 슬래브 상부에 균열이 있는 경우, 즉 시나리오 2에서 계산된 단위폭당 침투수량은 14.311~14.924 m³/day으로 다른 경우에 비해 약 1,000배 큰 값을 보였다.

또한 FEMWATER 프로그램을 사용하여 오염물 거동을 수치모의 하였으며, 오염물질이 지속적으로 침출되어 나오는 상황을 고려하여 주축조구역은 농도 13 ppb가 지속적으로 유지되도록 초기조건을 설정하였다. 오염물 거동분석 결과 시나리오 1의 경우 2 ppb 정도의 오염물이 댐체 하류 부분에 도달하는데 걸리는 시간은 최소 55,000년 정도이고, 시나리오 2의 경우 약 50년 정도, 마지막으로 시나리오 3의 경우 27,000년이었다. 댐체 상부에 균열이 발생한 경우는 댐에 균열이 발생하지 않은 경우보다 약 500배 이상 빠른 유속이

나타나기 때문에 오염물도 균열이 발생하지 않은 경우에 비해 상당히 빠르게 퍼져나가는 것을 확인할 수 있었다.

결론적으로 상부 슬래브에 균열이 발생한 경우 100년 이내에 댐체 하부로 2 ppb 이상의 오염물이 전달될 가능성이 있음을 확인하였지만, 균열이 없거나 슬래브 하부에 균열이 발생한 경우에는 오염물이 외부로 이동될 가능성이 거의 없었다. 또한 가장 넓게 오염물이 이동한 시나리오 2(상부에 균열이 발생한 경우)에서 주변 지역으로 퍼져나간 오염물의 농도 약 2 ppb는 생활 용수로 이용되는 지하수의 중금속(카드뮴, 비소 등) 수질 기준 10-50 ppb 보다 매우 작은 수치이므로 이로 인한 환경적 위험도 아주 낮다고 할 수 있다. 즉 본 연구를 통해 콘크리트 슬래브에 대한 지속적인 유지 관리로 균열 발생을 적절히 제어할 수 있다면 오염된 사력재의 CFRD 내부 축조재료로의 활용 가능성이 있음을 확인하였다.

하지만 콘크리트 슬래브의 건조 수축, 댐체 내부 재료의 침하, 제체의 부등 침하로 인하여 균열이 발생할 수 있으므로 슬래브 하부 bedding zone(치수벽 지지존)의 적절한 설계 및 시공, perimetric joint(주변 이음) 정밀 시공 등을 통해 침투량을 최소화시키는 등 설계 및 시공시 균열 발생 억제를 위하여 세심한 주의를 기울여야 할 것이다.

사 사

본 연구는 “수자원의 지속적인 확보 프론티어 연구 사업” 중 “대수층 활용 상수도 공급시스템 개발(과제 번호: 3-4-2)” 연구의 일환으로 이루어졌으며, 이에 사업단에 감사드립니다.

참고문헌

Carsel, R.F. and Parrish, R.S. (1998) Developing joint probability distributions of soil-water retention characteristics. *Water Resources Research*, v. 24, n. 5, p. 755-769.

Ding, L., Zhou, X., Yang, K., Chao, H. and Cui, Y. (2000) Research on the siltation self-healing watertight structure for super high CFRD. *Proceedings of International Symposium on CFRDs*, 18th Sep., 2000, Beijing, China.

GMS (2004) *Groundwater Modeling System. Tutorials Vol III. GMS Version 5.0.*

Jung, Y. and Lee, S. (2001) Potential Contamination of Soil and Groundwater from the Residual Mine Tailings in the Restored Abandoned Mine Area : Shihung Mine Area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 34, n. 5, p. 461-470.

Kim, E.I., Kang, W.H. and Park, J.Y. (2005) Characteristics of Arsenic Contaminated Soil in an Abandoned Mine Area and Solidification/Stabilization of the Soil. *Jour. of Korea Society of Waste management*, v. 22, n. 4, p. 363-371.

KIWE (1999) CFRD An experimental study on the reducing crack of CFRD face slab concrete. *Technical report (WRRI-ST-99-1)*, Korea water resources corporation.

KIWE (2002) CFRD Enhanced Durability Performance of Face Slab concrete in CFRD. *Technical report (WRRI-ST-02-1)*, Korea water resources corporation.

KIWE (2004) A Study on Risk Assessment and Removal Techniques of Contaminated Groundwater/Soil within submerged area by dam reservoir. *Technical report (KIWE-DRC-04-13)*, Korea water resources corporation, p. 45-46.

KWRA (2003) *Guideline for dam design.* Korea Water Resources Association, p. 217-219.

Mori, R.T. (1999) Deformations and cracks in concrete face rockfill dams. *Concrete Face Rockfill Dams. Proceedings, 2nd Symposium on CFRD, Florianopolis, Brazil, October.*

Park, D.S., Shin, D.H., Kim, H.S., Im, J.Y. and Park, H.G. (2004a) Present and future of CFRD. *Geotechnical engineering*, Korea Geotechnical Society, v. 20, n. 7, p. 16-27.

Park, D.S., Shin, D.H., Kim, H.S., Im, J.Y. and Park, H.G. (2004b) Understanding the behavior of CFRD. *Geotechnical engineering*, Korea Geotechnical Society, v. 20, n. 8, p. 6-16.

Sherard, J.L. (1985) The upstream zone in concrete-face rockfill dams. *Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction, and Performance*, ASCE.

Yi, J.M., Lee, J.S. and Chon, H.T. (2003) Chemical Speciation of Arsenic in the Water System from Some Abandoned Au-Ag Mines in Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v. 36, p. 481-490.