

연구논문

소택지의 효율적 설계를 위한 수리학적 특성 해석

정영욱¹⁾ · 강상수²⁾ · 장한기³⁾ · 백환조^{4)*}

Analysis of Hydraulic Characteristics for Efficient Design of Wetlands

Young Wook Cheong, Sang Soo Kang, Han Ki Jang and Hwanjo Baek*

Abstract : Efficiency of the subsurface-flow treatment system drops with time, as the hydraulic conductivity of the wetland soil decreases significantly due to the chemical reactions with the wastewater, eventually leading to overland flow or flooding. In this study, reduction in the hydraulic conductivities of substrate materials with time was taken into account in the design of the subsurface flow system, using finite element method. As the hydraulic conductivity of substrate decreases below a certain limit set by the inflow rates, installation of perforated pipes become no longer effective. Hence, sufficient hydraulic conductivity of substrate materials is a key parameter for efficiency of constructed wetlands. Also, it is required to design the upper boundary of wetland as an equipotential boundary to induce more flow into substrate layer.

Key words : wetland, hydraulic conductivity, substrates, equipotential boundary

요 약 : 인공소택지의 효율은 기질물질과 광산배수 사이의 화학적 반응에 기인하는 수리전도도의 감소에 따라 점차 저하되며, 결과적으로 소택지의 표면을 흐르는 월수현상이 발생한다. 본 연구에서는 소택지의 설계에 수치해석을 통한 기질물질의 수리전도도 감소를 반영하여 고찰하였다. 기질물질층의 수리전도도가 감소함에 따라 소택지를 통과하는 전체 유출량도 급격하게 감소하며, 특히 기질물질층의 수리전도도가 유입수량에 따른 한계치 이하로 감소하는 경우에는 유공관의 설치도 큰 효과를 나타내지 못할 것으로 예상된다. 따라서 기질물질층의 수리전도도를 일정 수준이상으로 유지할 수 있는 방안이 필수적이다. 또한 정확효과가 기대되는 기질물질층에 많은 유량이 통과하도록 유도하기 위해선 소택지의 상부경계를 등수두경계로 설계하여야 할 것으로 판단된다.

주요어 : 소택지, 수리전도도, 기질물질, 등수두경계

서 론

1989년부터 추진된 석탄산업합리화사업에 의하여 2001년까지 경제성이 확보되지 않은 석탄광산 335개, 금속광산은 약 900여개가 휴·폐광되었다(Fig. 1). 많은 석탄광산들이 폐광되면서 환경오염 및 지반침하 등 안전문제가 제기되고 있으며, 폐광산의 주변에 산재하는 폐굴속을 함유한 산성폐수로서 적절한 정화장치가 설치되어 있지 않은 경우 주변의 수계나 토양을 오염시킬 가능성이 높다. 석탄산업합리화사업단은 산성광산배수(Acid Mine Drainage, AMD) 유출탄광 중 오염도(pH 5.8

이하, Fe 10ppm 이상)가 높고 유출량이 50 t/day 이상인 59개 탄광을 정화대상으로 하여 체계적인 환경정비 사업을 추진하고 있다(민정식, 2002).

폐광산 광산배수를 처리하기 위한 방법들로서는 광산배수의 유출을 원천적으로 방지하기 위한 갱도밀폐법, 광산배수의 산화작용진행을 억제하기 위한 갱도처리법, 중화 및 침전에 의한 물리화학적 혹은 자연정화 처리법 등이 있다. 이러한 처리법들 중 물리화학적 처리방법은 광산배수의 처리에 매우 효과적이거나, 운전비 및 슬러지 처분 비용이 지속적으로 소요되므로 적용이 어려운 단점이 있다. 따라서 선진국에서는 폐광산지역 광산배수를 처리하기 위하여 최소한의 경비만이 소요되는 자연정화처리기술의 연구를 활발히 진행하고 있는 상태이다(Cohen and Staub, 1992 ; Cevaal and Whiting, 1994 ; Dietz *et al.*, 1994 ; Diebold *et al.*, 1995 ; 정영욱 외, 1997).

자연정화처리기술 중 인공소택지(constructed wetland)의 한 방식인 혐기성 소택지는 환원작용이 발생할 수 있는 조건의 소택지로서 광산폐수는 지중흐름(subsurface flow, SSF)의 형태로 유동한다. 소택지는 폐수의

2005년 8월 4일 접수, 2005년 9월 9일 채택

1) 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

2) 한국지질자원연구원 지반안전연구부

3) (주)희순지오텍 지반조사팀

4) 강원대학교 공과대학 지구·환경공학부

*Corresponding Author(백환조)

E-mail: hwanjo@kangwon.ac.kr

Address: Division of Environmental and Geosystem Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea

흐름이 상향류 혹은 하향류의 형태로 일어나도록 설계된다(Cohen and Staub, 1992). 혐기적 조건이 유지되는 환경에서는 황/황산염 환원미생물이 자라게 된다. 이 미생물들이 황환원을 통하여 에너지를 얻으면서 자라는 과정에서 폐수의 pH를 회복시키고 폐수 내 포함된 중금속을 흡착하여 소택지에 침전물로 남아 결과적으로 폐수에 포함된 중금속을 제거하는 역할을 한다(Daniel, 1993). 혐기성 소택지는 겨울에도 운용이 가능하며, pH의 저하와 중금속 제거효과를 일으키는 주요 반응은 황산염환원균(Sulfate Reduction Bacteria, SRB)에 의한 황산염 환원작용이다. 황산염 환원반응 과정에서 형성된 금속 황화물은 금속산화물이나 수산화물에 비해 용해도가 낮아서 매우 안정적이며 재용출의 우려가 적다. 또한 대부분의 중금속은 일반적인 혐기조건에서 H₂S와 반응하여 황산염 화합물을 형성한다(Cohen and Staub, 1992).

본 연구는 휴·폐광산의 폐갱구나 폐적치장에서 발생하는 산성광산배수의 자연정화처리시설에서 인공소택지를 이용한 정화과정 중에 발생하는 문제점들을 파악하여 소택지의 정화효율 향상을 위한 방안을 수립하기 위하여 수행되었다. 일반적으로 발생하는 문제점들의 주요 원인으로는 매질 내에 침전물 발생에 의한 막힘현상과 부적절한 수리학적 설계오류를 들 수 있다. 따라서, 인공소택지의 자연처리 정화기술의 효율성 향상을 위해서는, 폐수의 유동과정에서 발생하는 황화물 침전물에 의한 기질물질의 수리학적 특성의 변화를 파악하고, 유입수와 배출수의 유동에 대한 수치해석을 통한 최적설계와 유지관리가 필수적이다.

연구방법

인공소택지의 지표/지중 흐름에 대한 수리학적 고려가 충분하지 못한 경우, 기질물질 층 내의 상태 변화와 관련하여 예기치 못한 유동현상이 발생한다. 일반적으로 발생하는 문제점들의 주요 원인으로는 매질 내에 산화물 침전에 의한 수리전도도 감소현상과 수리학적 설계의 오류를 들 수 있다. 소택지내의 정화과정에서 발생하는 침전물은 기질물질의 공극율과 수리전도도를 감소시키며, 소택지 정화효율에 미치는 영향이 매우 크다. 본 연구에서는, 수리전도도의 감소에 따른 소택지 효율의 변화에 대하여 2차원 수리모델을 적용하여 유출수량의 변화를 고찰하였다. 또한 현재 가행중인 자연정화처리시설에서 소택지의 효율을 향상시키기 위한 설계방안을 검토하였다.

소택지의 수리모델 해석

다공성 매질 내에서의 유체의 거동을 해석하기 위하여 상용프로그램인 Seep/w를 사용하였으며, 각 절점에서만 유출수의 흐름이 발생하고 해당 요소의 다른 지점에서는 유출수의 유동이 없는 것으로 가정하였다. 소택지 상부 경계의 각 절점에서 발생하는 flux들을 모두 합산하면 경계면을 통과하는 전체 수량이 된다. 2차원 해석을 적용하였으며, 단면의 수직방향의 폭은 단위 길이로 가정하였다. 소택지 상부의 각 절점을 통과하는 유출수량(nodal boundary flux)은 다음의 식(1)로 구하며, 일정 기간 동안 발생하는 총 유량은 경과시간과 소택지의 폭을 곱하여 계산한다(Freeze and Cherry, 1979). 이 식에

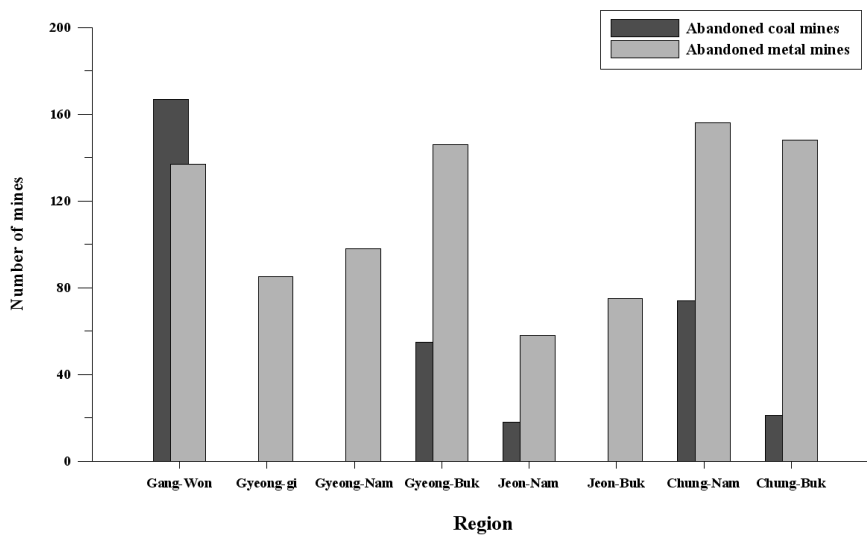


Fig. 1. Total number of abandoned mine in Korea. (after 민정식, 2002)



Fig. 2. Overview of the constructed wetland at Dalsung mine.

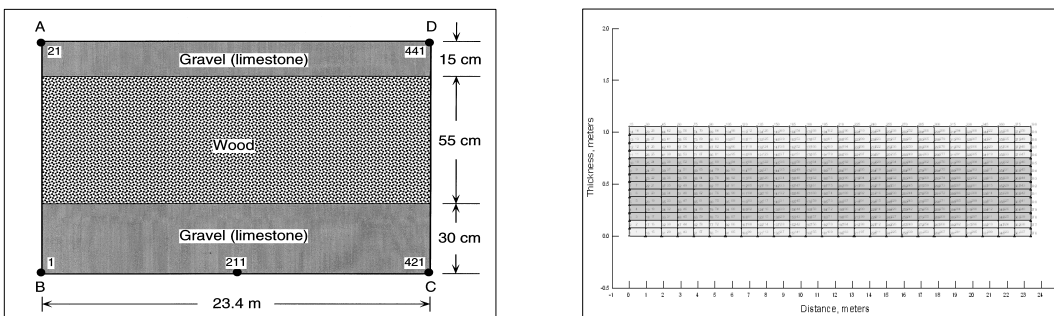


Fig. 3. Schematic cross section and finite element model for the constructed wetland(Dalsung mine).

서 q 는 시간당 유출수량, Q 는 총 유출수량, 그리고 A 는 유출이 발생하는 단면적을 나타낸다. 수리전도도 k 는 속도의 단위[m/sec]로 주어지며, 수력구배 i 는 무차원의 계수이다.

$$q = \frac{Q}{t} = k \cdot i \cdot A \quad (1)$$

달성광산 소택지의 수리모델

소택지 수리모델은 대구광역시 달성군 가장면에 위치한 달성광산 소택지를 적용하였다. 소택지 단면은 23.4 m×22.4 m이고 유입수는 상부의 일차 침전지로부터 소택지의 좌측하단으로 월수된다. Fig. 2는 달성광산에 설치된 일차침전지와 호기성 및 혐기성 소택지 시설을 나타낸다. 유입량은 80 m³/day, 전체 수두(total head)의 차 (ΔH_t)는 1.0~1.1 m이며, 소택지의 좌하부를 통해서 광산배수의 유입이 이루어지고, 하부경계는 불투수경계

(no flux boundary), 즉 유선(flowline)으로 가정할 수 있다. 기질물질의 수리전도도는 본 소택지의 당초 설계에 적용된 값을 반영하여, 석회암골재의 경우 $k = 1 \times 10^{-2}$ m/sec, 참나무조각은 $k = 1 \times 10^{-5}$ m/sec를 가정하였다.

각 층은 수리학적 등방성과 정상유동(steady-state flow)을 가정하고, 소택지 단면을 350개의 직사각형 요소들로 분할하였다(Fig. 3). 침전물 발생 및 수리전도도의 감소를 반영하기 위하여 중간 기질물질인 참나무조각의 수리전도도를 $k = 2.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ m/sec까지 5 단계로 구분하여 수리전도도의 감소에 따른 영향을 해석하였다. 석회암골재는 침전물에 의한 수리전도도의 감소가 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

수리해석 경계조건

수리해석에 필요한 경계조건에는 전체 수두의 차, 등수두선 및 유선의 분포, 유입점 및 유출점 등이 포함된

Table 1. Design concepts and relevant boundary conditions

	Design Concept	Boundary Conditions
Case 1	Present design	<ul style="list-style-type: none"> ▶ AB, BC, CD, and AD are no flux boundaries (that is, flow lines) ▶ Inflow occurs at node 1, with total head of 2 m ▶ Outflow occurs at node 441, with total head of 1 m
Case 2	Inflow occurs at node 211, using perforated pipe	<ul style="list-style-type: none"> ▶ AB, BC, CD, and AD are no flux boundaries ▶ Inflow occurs at node 211, total head is 2 m ▶ Outflow occurs at node 441, total head is 1 m
Case 3	Inflow occurs at node 421, using perforated pipe	<ul style="list-style-type: none"> ▶ AB, BC, CD, and AD are no flux boundaries ▶ Inflow occurs at node 421, total head is 2 m ▶ Outflow occurs at node 441, total head is 1 m
Case 4	Perforated pipe is installed for whole length of wetland	<ul style="list-style-type: none"> ▶ AB, CD, and AD are no flux boundaries ▶ BC(including nodes 1, 421) is an equipotential line, with total head of 2 m ▶ Outflow occurs at node 441, with total head of 1 m
Case 5	Inflow occurs at node 1, using perforated pipe	<ul style="list-style-type: none"> ▶ AB, BC, and CD are no flux boundaries, but AD is an equipotential line with total head of 1.1 m ▶ Outflow occurs at 10cm higher point of node 441 ▶ Inflow occurs at node 1, and total head is 2 m
Case 6	Inflow occurs at node 211, using perforated pipe	<ul style="list-style-type: none"> ▶ AB, BC, and CD are no flux boundaries, but AD is an equipotential line, total head is 1.1 m ▶ Outflow occurs at 10cm higher point of node441 ▶ Inflow occurs at node 211, total head is 2 m
Case 7	Perforated pipe is installed for whole length of wetland	<ul style="list-style-type: none"> ▶ AB and AD are no flux boundaries ▶ BC(including nodes 1, 421) is an equipotential line, total head is 2.0 m, also AD is an equipotential line, with total head of 1.1 m ▶ Outflow occurs at 10cm higher point of node441

다. 일반적으로 소택지 하부에 설치되는 유공관에 의하여 경계조건이 크게 달라진다. 효율적인 소택지설계조건을 구하기 위하여 달성광산 소택지의 경계조건을 몇 개의 case로 구분하여 해석하였다. 적용된 경계조건은 Table 1과 같으며, 이에 따른 소택지 내에서의 유동특성 및 유출량의 변화를 고찰하였다.

유공관의 영향

현재 가행되고 있는 달성광산 소택지 설계에서는 유입수의 대부분이 곧바로 상향유동을 하게 되므로 하부에 유공관을 설치하여 소택지 하단 전체를 등수두경계로 설정하고, 중간층의 수리전도도는 $2.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ m/sec로 변화시키면서 유동벡터(flowvector), 수두손실 contour 및 상부절점에서의 총 유출수량에 대해 고찰하였다.

실제 가행되는 소택지의 하부경계에 유공관을 설치하여 등수두경계로 설정하여도 시간이 경과함에 따라 유공관의 clogging 현상 등에 의해 하부끝단의 전수두가 일

정하게 유지되지 않음을 가정하여 해석을 실시하였다. 소택지 크기는 12.5 m×12.5 m, 유입수는 상부의 소택지로부터 월류(overflow)형태로 현 소택지 좌측하단으로 유입되고, 전체 수두의 차는 1 m, 수리전도도는 달성광산의 경우와 동일한 것으로 가정하였다(Fig. 4). 소택지 상부의 전체 수두가 1.1 m인 등수두경계, 하부경계는 2 m를 기본으로 하여 바닥부의 수두차를 유출끝단부터 1.8~2.0m, 1.6~2.0m, 1.4~2.0m, 1.2~2.0m, 1.1~2.0m 로 변화시켜가며 총 유출수량 및 유동벡터를 비교하였다.

수리모델 해석 결과

달성광산의 현 설계

현재 달성광산의 소택지에서 유입수는 혐기성 소택지의 좌하부 절점으로 유입되고, 상향유동 후 소택지의 위상부를 통하여 다음 소택지로 유입된다. Fig. 5는 수리전도도가 변화함에 따라 소택지 내에서 발생하는 유동특성

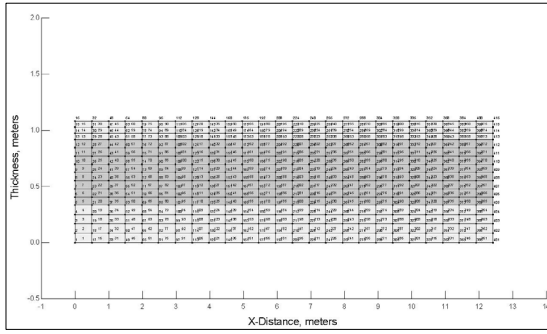
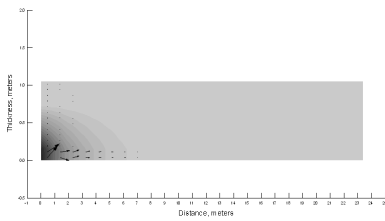


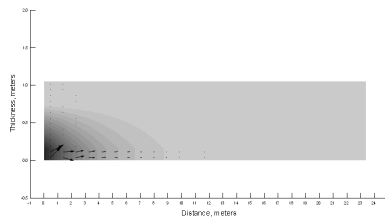
Fig. 4. Wetland model for hydraulic analysis.

을 유동벡터로 나타낸 것이다. 소택지의 좌하부를 통하여 유입이 일어나는 경우, 중간층의 수리전도도가 비교적 클 때(Fig. 5(a))는 유입수의 대부분이 유입점에서 상향유동을 시작하며 수두손실은 이 부분에서 집중되어 발생함을 확인할 수 있다. 따라서, 유입지점에서 소택지의 하부경계를 따라 우측으로 유동하는 유량은 상대적으로 작은 편이며, 이는 유동벡터의 크기 변화로 나타난다.

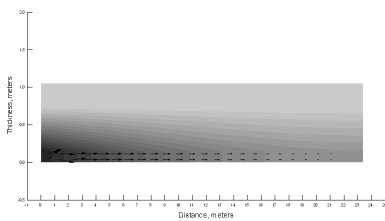
광산폐수의 유입과 침전물의 발생이 지속됨에 따라 중간층의 수리전도도는 점차 감소할 것이며, 이에 따른 유동특성의 변화는 Figs. 5(b) ~ 5(d)로 나타난다. 결과적으로, 유동형태는 거의 유사하지만, 수두손실을 나타내는 contour 분포나 유동벡터의 양상이 달라짐을 확인할 수 있다. 그러나, 중간층의 수리전도도가 저하됨에 따라 상향유동량은 급격하게 감소하게 된다.



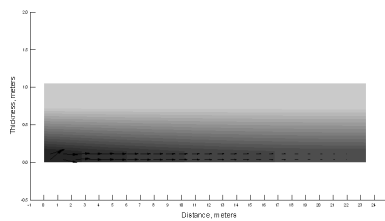
(a) $k = 2.0 \times 10^{-4}$ m/sec



(b) $k = 1.0 \times 10^{-4}$ m/sec



(c) $k = 1.0 \times 10^{-5}$ m/sec



(d) $k = 1.0 \times 10^{-6}$ m/sec

Fig. 5. Flow characteristics within the wetland of the present design (Dalsung mine)

Fig. 6은 소택지 상부의 각 지점을 통과하는 유출수량을 나타낸다. 현재의 설계에서는 유입지점으로부터 수평방향 거리가 멀어짐에 따라 통과수량은 크게 감소함을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 5에 나타난 유동벡터의 분포 특성을 반영하고 있는 것이다. 또한, 중간층의 수리전도도가 감소함에 따라 소택지를 상향으로 통과하는 전체 유출수량도 급격하게 감소함을 보여준다.

경계조건에 따른 유동특성의 변화

각 경계조건에서의 유동특성을 나타내는 Fig. 7에서, 소택지의 상부가 불투수경계로 설정된 현재의 설계인

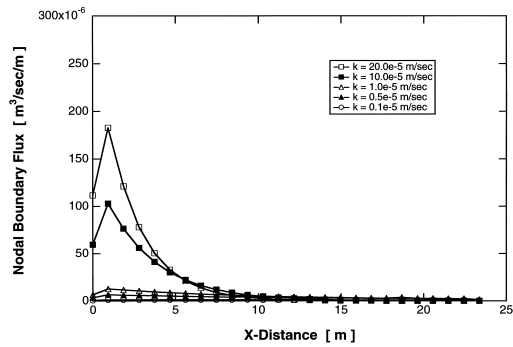


Fig. 6. Variation of total boundary flux at the wetland surface, due to the changes in the hydraulic conductivity (Dalsung Mine).

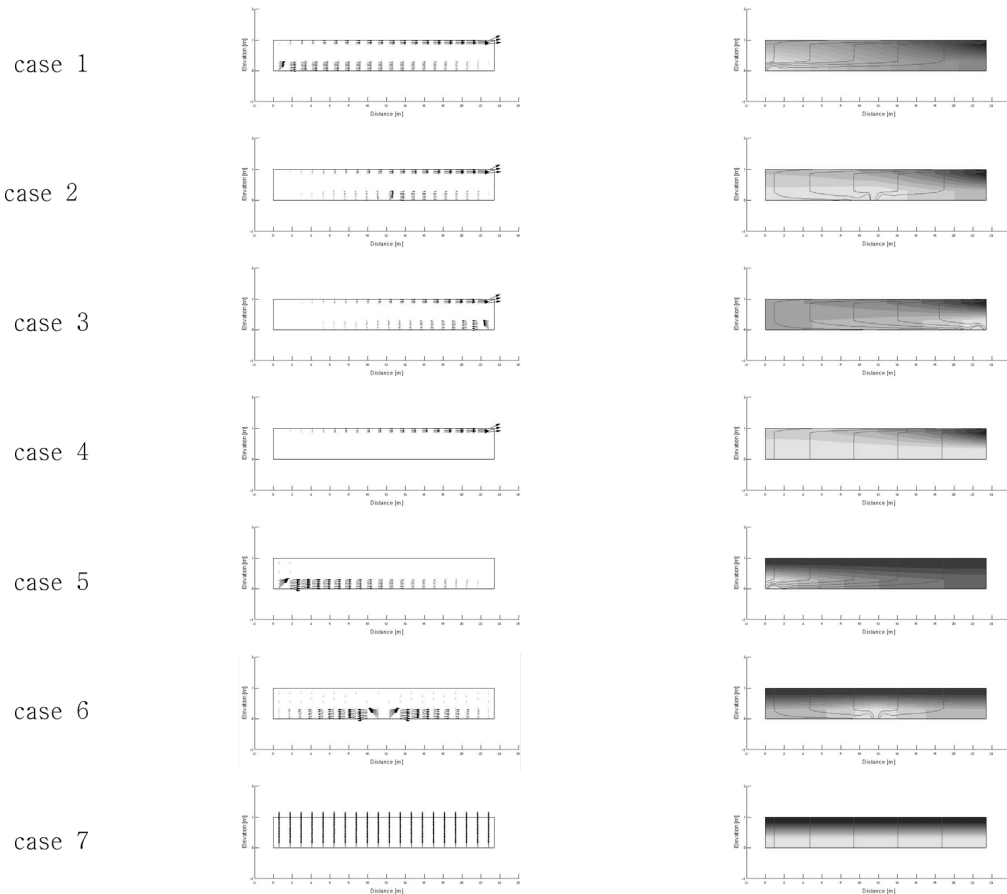


Fig. 7. Flow vectors and equipotential lines for each boundary condition.

case 1 ~ case 4에서는 유량흐름의 대부분이 석회암 자갈층을 통과하는 경로를 통하여 발생함을 알 수 있다. 그러나, Fig. 7에 포함된 유동경로들은 실제 유량을 반영하지는 않는다. 즉, 각각의 경로를 따라 이동하는 유량사이에는 큰 차이가 있다. 따라서 정화효과가 주로 발생할 것으로 예상되는 참나무조각 층에 많은 유량이 통과하도록 유도하기 위해선 case 5 ~ case 7과 같이 상부경계를 등수두경계로 설계하여야 한다. 또한, 소택지로부터의 정화된 광산배수가 유출되는 지점을 상부 자갈층보다 상부에 위치하도록 적당한 높이의 턱을 설치하여 해결할 수 있을 것으로 판단된다. Case 7에 대한 결과로부터, 소택지의 하단에 전 길이에 걸쳐 유공관을 설치하는 경우, 소택지의 기질물질 층에 가장 많이 광산배수가 통과하게 되므로 더욱 효율적인 결과를 얻을 수 있다. 혹은, case 5나 case 6의 설계를 택하여도 현재보다는 양호한 결과

를 얻을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 case 5 ~ case 7에서 소택지 상부표면을 통과하는 유출(flux)을 나타내며, 이를 합산하면 소택지의 단위 폭당 발생하는 총 유출량(total flux)이 계산된다. 단, 기질물질 층의 수리전도도는 변화하지 않는 것으로 가정하였다. Case 7의 경우 유출이 상부 자갈층 표면에 균등하게 분포하고 있으며 case 5는 유동이 소택지의 좌측에 집중하여 발생함을 확인할 수 있다. 또한 전체 유출량도 상당한 차이를 나타낸다.

유공관의 영향

수치해석 결과, 유동특성이나 유동경로의 분포는 수리전도도의 감소와 무관하게 Fig. 7의 case 7과 유사한 경향을 나타낸다. 수두손실을 나타내는 contour의 분포도 유사하여, 대부분의 수두손실은 기질물질층에서 집중하

여 발생함을 확인할 수 있다. 유입된 광산폐수는 소택지의 전 구간에 걸쳐 균등하게 상향유동을 하지만, 기질물질층의 수리전도도가 감소함에 따라 유출수량은 점차 감소할 것으로 예상된다. Fig. 9에 나타난 바와 같이, 기질물질의 수리전도도의 변화는 소택지 내부에서의 유동특성을 크게 변화시키지 않으나, 전체 유출수량은 급격하게 감소함을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 기질물질의 수리전도도 감소에 따른 총 유출량의 변화를 나타낸 것이다. 즉, 변경된 설계(case 7)와 비교하여 총 유출량이 상당한 차이를 보여주고 있으며, 수리전도도가 감소함에 따라 유출수량도 급격하게 감소함을 확인할 수 있다. 기질물질층의 수리전도도가 1.0×10^{-5} m/sec 이하로 감소하는 경우에는 유공관의 설치가 큰 효과를 나타내지 못할 것으로 판단되었다. 따라서, 소택지의 하부경계를 등수두경계로 만들기 위해 유공관을 설치하는 것은 소택지의 효율을 높이는 데 상당히 효과적일 것으로 판단되지만, 더욱 중요한 것은 기질물질층의 수리전도도를 일정 수준이상으로 유지할 수 있는 방안이 강구되어야 할 것이다.

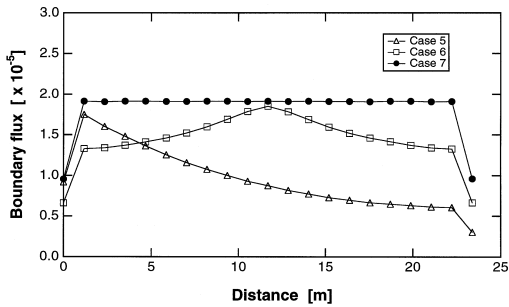


Fig. 8. Total boundary flux at the surface of wetland.

수두변화에 따른 유출량의 변화

소택지 하부경계의 전체 수두를 유입이 시작되는 좌측부터 우측 바닥끝까지 2.0~2.0m, 2.0~1.7m, 2.0~1.4m, 2.0~1.1m로 변화시켜 유출량 및 유동경로, 유동벡터 등을 비교하였다. Fig. 11은 소택지 상부경계를 통해 나오는 유출량을 나타낸다. 수두차가 없는 등수두경계일 경우에는 거의 일정한 양이 유출되지만, 우측하부 끝단으로 갈수록 수두에 변화가 생기는 2.0~1.7m, 2.0~1.4m, 2.0~1.1m의 경우에는 유출량이 점차 감소함을 확인할 수 있다. Table 2는 하부경계의 수두차에 따른 각각의 소택지 상부경계에서의 총유출량을 나타내고, Fig. 12는 이를 그래프로 나타낸 것이다.

한국지구시스템공학회지

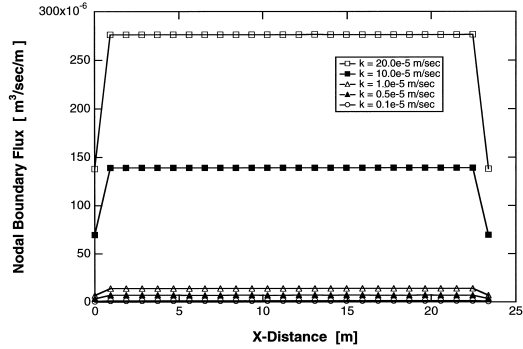


Fig. 9. Total boundary flux due to the changes in the hydraulic conductivity (Dalsung mine with perforated pipes).

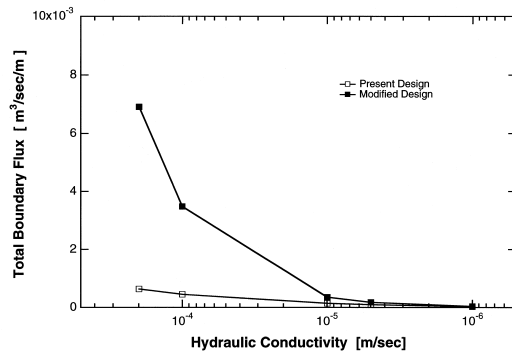


Fig. 10. Changes in the total boundary flux due to the variation of hydraulic conductivity.

Fig. 13는 소택지 하부경계의 수두변화에 따른 유동벡터와 등수두선의 분포를 나타낸다. 수두변화가 클수록 광산폐수가 수직으로 이동하는 양이 감소하고 수평으로 이동을 한 후 수직으로 이동하는 경향이 보이지만 이러한 현상은 비교적 수리전도도가 좋은 석회석 층에서 발생한다. 정화효율에 주된 역할을 하는 기질물질층에서는 대부분의 광산폐수가 수직으로 통과하므로 정화효율이 크게 저하되지는 않을 것이나 총 유출량이 감소하므로 이에 대한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

결론

본 연구에는 산성광산배수의 정화처리시설 중 소택지에서 흔히 발생하는 문제점을 수치해석을 통하여 검토하

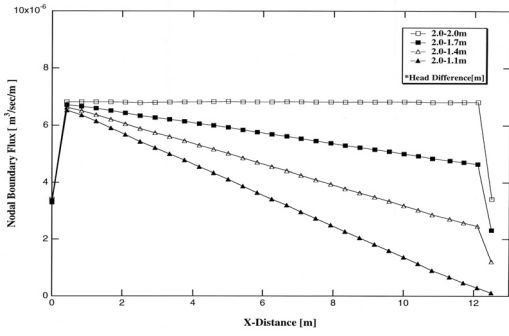


Fig. 11. Nodal boundary flux of upper boundary.

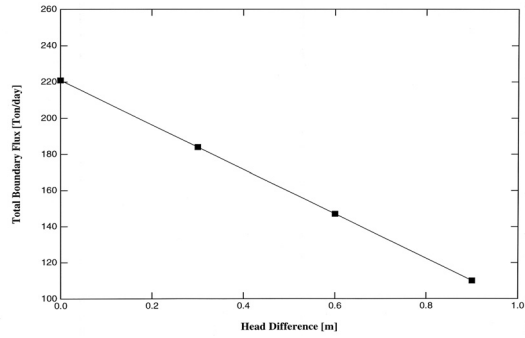


Fig. 12. Changes in the total boundary flux due to head difference.

Table 2. Changes in the total boundary flux due to head difference

Head difference (m)	Nodal boundary flux ($\times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$)	Total boundary flux (Ton/day)
2.0 — 2.0	2.045	221
2.0 — 1.7	1.704	184
2.0 — 1.4	1.363	147
2.0 — 1.1	1.023	110

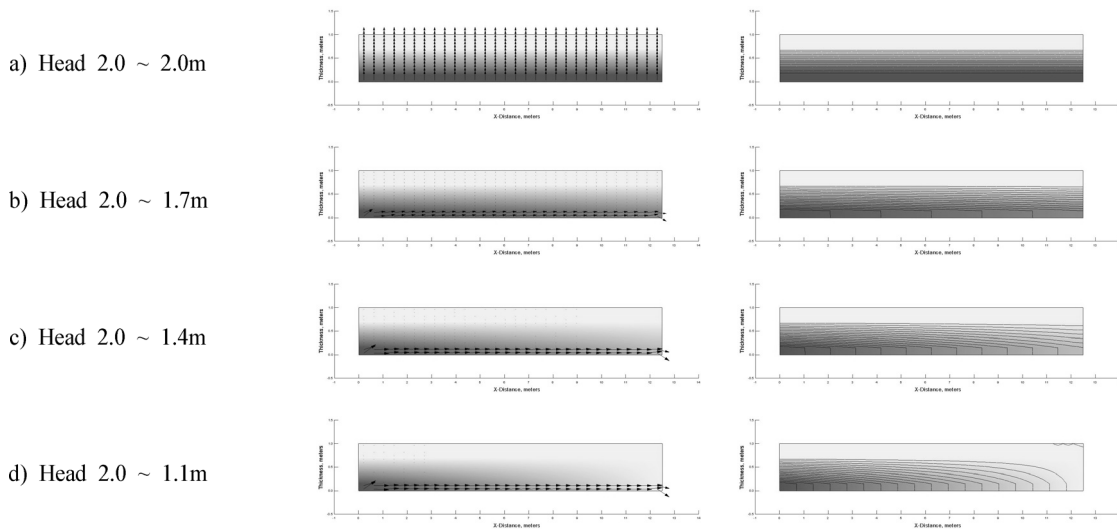


Fig. 13. Flow characteristics within the wetland.

고, 정확효율 향상을 위한 설계조건을 제시하고자 실시 하였다.

1. 달성광산의 현 소택지 모델에 대한 수치해석 결과, 유입부분으로부터 수평방향으로 거리가 멀어짐에 따라 통과수량이 급격하게 감소하고 정화시설의 효율이 크게

저하되어 있음을 확인할 수 있다.

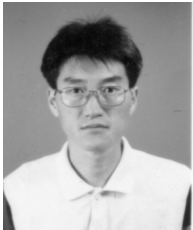
2. 소택지 하부에 유공관을 설치하여 상부를 통한 유수량의 분포를 균등하게 유지할 수 있으나, 유공관 내부에 발생하는 침전물의 영향으로 소택지 상부를 통해 나오는 유출수량이 크게 감소하므로 이에 대한 대책이 필요하다.

3. 정화효과가 기대되는 기질물질층에 많은 유량이 통과하도록 유도하기 위해선 소택지의 상부경계를 등수두 경계로 설계하여야 한다. 따라서, 광산배수가 유출되는 지점을 자갈층보다 상부에 위치하도록 적절한 높이의 턱을 설치하여 해결할 수 있을 것이다.

4. 기질물질층의 수리전도도가 감소함에 따라 소택지를 통과하는 전체 유출량도 급격하게 감소한다. 특히, 유입수량에 따라 기질물질층의 수리전도도가 기준치 이하로 감소하는 경우에는 유공관의 설치도 큰 효과를 나타내지 못할 것으로 판단된다. 따라서 기질물질(충전물질)층의 수리전도도를 일정 수준이상으로 유지할 수 있는 방안이 필수적이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 산업자원부 출연사업인 “광산환경오염 광해 관리지침개발연구”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.



정 영 욱

1984 강원대학교 자원공학과 공학사
1986 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1991 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 책임연구원
(E-mail: ywc@kigam.re.kr)



장 한 기

2002년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사
2004년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사

현재 (주)희송지오택 지반조사팀
(E-mail: janga000@hanmail.net)

참고문헌

- 민정식, 2002, *폐금속광산 광해방지 및 복원사업*, 한국지질자원연구원, pp. 1-2.
- 정영욱, 민정식, 권광수, 이현주, 1997, “광산폐수 정화용 소택지의 기질물질 효율성 평가 : 실험결과를 중심으로,” *한국자원공학회지*, 제34권 2호, pp. 142-151.
- Cevaal, J.N. and Whiting, D., 1994, “Treatment of mine drainage using passive biological system : design and results from a full-scale system,” *Proceedings, Mining Environmental Management Conference*, Reno, NV, pp. 1-16.
- Cohen, D.R.H. and Staub, M.W., 1992, *Technical Manual for the Design and Operation of Passive Mine Drainage Treatment System*, U.S. Bureau of Reclamation, pp. 6-12.
- Daniel, D.E., 1993, *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, Chapman & Hall, pp. 137-163.
- Diebold, F.E., Drury, W.J., Chatham, W.H., Mueller, R. and Figueira, J.F., 1995, *Wetland Project Phase II: Wetland Demonstration Study Work Statement*, University of Montana, pp. 1-27.
- Dietz, J.M., Watta, R.G. and Stidinger, D.M., 1994, “Evaluation of acidic mine drainage treatment in constructed wetland systems,” *Proceedings, 1994 Int. Land Reclamation and Mine Drainage Conf. and the Third Int. Conf. on the Abatement of Acidic Mine Drainage*, Pittsburgh, pp. 70-79.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice Hall Inc., pp. 52-56.

강 상 수

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원
(本學會誌 第41卷 第4号 參照)

백 환 조

현재 강원대학교 공과대학 지구·환경공학부 부교수
(本學會誌 第41卷 第4号 參照)