

반응벽체의 수리지질학적 거동에 대한 수치해석 사례



최 성 대
서울대학교 지구환경시스템공학부
석사과정 (sopitt@naver.com)



이 광 현
서울대학교 지구환경시스템공학부
박사과정 (monkey@snu.ac.kr)



박 준 범
서울대학교 지구환경시스템공학부
부교수 (junbpark@snu.ac.kr)

1. 서론

1990년대 초반에 소개된 반응벽체 기술은 1990년대 중반부터 미국과 유럽을 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔으며 현재는 북미에서 유럽, 아프리카, 아시아에 이르기 까지 전 세계적으로 그 적용성이 널리 확대되고 있다(www.prb-net.org).

반응벽체는 오염지하수를 정화하기 위한 현장 정화기법으로써, 오염지하수의 유로상에 오염물질을 정화할 수 있는 적절한 반응물질이 채워진 반응벽을 설치하여, 반응물질과 오염물질간 화학적, 물리적, 생물학적 반응을 유도하여 오염물질을 처리하는 기법이다. 반응벽체의 개념도는 그림 1에 나타나 있다.

반응벽체 기술은 현장의 오염물질 특성에 따라 적절한 반응물질을 선택하여 설치 할 수 있어 다양한 오염물질에 대해 그 적용성이 높으며, 다른 정화기법에 비교하여 저가의 비용으로 설치가 가능하며 설

치 완료 후 유지관리비가 거의 들지 않는다는 장점이 있다.

반응벽체는 그 구조와 형상에 따라 크게 연속벽식 반응벽체(Continuous wall)과 유도벽식 반응벽체(Funnel and gate system)로 구분할 수 있다. 연속벽식 반응벽체의 경우, 상대적으로 시공이 쉽고 기존 지하수 흐름에 큰 영향을 미치지 않는 장점이 있으나 오염대(plume)가 넓은 범위에 존재하는 경우 설치비용이 높아지는 단점이 있다.

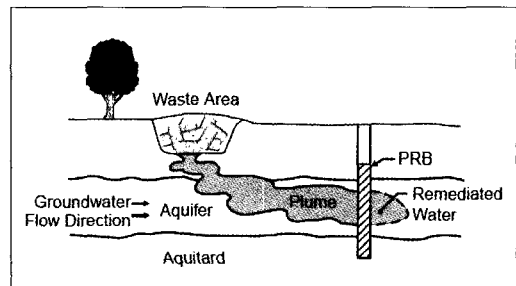


그림 1. 반응벽체 개념도(www.clu-in.org)

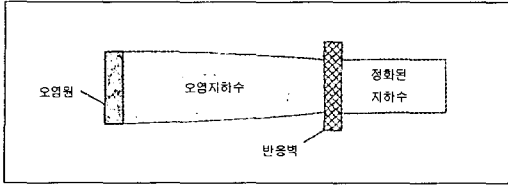


그림 2. 연속벽식 반응벽체 개념도

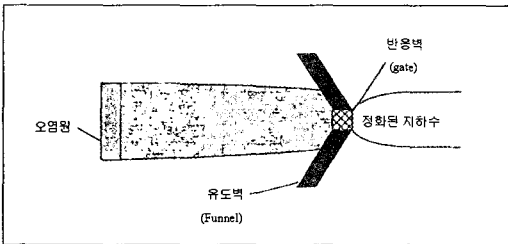


그림 3. 유도벽식 반응벽체 개념도

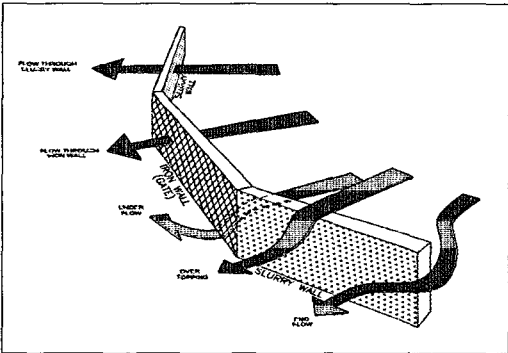


그림 4. 반응벽체에서 발생 가능한 흐름(K.C. Scott, 2000)

이러한 연속벽식 반응벽체의 단점을 보완하고 보다 효율적인 오염지하수 처리를 위해 유도벽식 반응벽체 기술이 개발되었다. 유도벽식 반응벽체의 경우 그림 3과 같이 주변 지하수를 인위적으로 반응벽으로 유도하므로 기존 지하수 흐름에 큰 영향을 미치게 된다.

이렇게 인위적으로 지하수의 흐름을 변화시키는 경우 그 흐름변화에 대한 예측과 조절이 반응벽체의 설계에 중요한 요인이 된다.

유도벽식 반응벽체를 설치한 경우 발생 가능한 흐

름은 크게 5가지로 분류할 수 있다. 우선 설계자가 의도한 흐름인 반응벽을 통과하는 흐름(flow through the gate)이 있다. 그리고 설계목적과 부합하지 않으며 오염지하수 처리에 부정적인 역할을 하게 되는 유도벽을 통과하는 흐름(flow through the cutoff-wall), 벽체의 상부를 통과하는 흐름(over topping), 벽체의 하부를 통과하는 흐름(under flow), 마지막으로 벽체의 측면을 통과하는 흐름(end flow)이 있다(그림 4).

반응벽체 기술이 발전함에 따라 지하수의 흐름에 맞춰 벽체를 변화시키던 방식에서 좀 더 경제적이고 효율이 높은 벽체로 지하수의 흐름을 유도하는 방식으로 변화 되고 있다. 이러한 변화에 따라 반응벽체를 설계함에 있어 지하수의 수리학적 거동평가 및 그림 4에서 설명한 부정적인 흐름의 차단 또는 최소화가 매우 중요한 요소가 되었다. 그러므로 반응벽체를 설계하는데 고려되어야 하는 요인들을 알아보고, 지하수 흐름에 대한 평가 방법 및 연구사례들을 살펴봄으로써 추후 반응벽체를 설계함에 있어 참고 자료로 삼고자 한다.

2. 반응벽체 설계시 고려요소

반응벽체 기술은 지반환경공학 분야에서 뿐만 아니라 환경공학, 수자원공학 등 이미 다른 많은 분야에서 연구되어 왔으며 실제 현장에 적용되어 왔다.

그림 5는 반응벽체를 설계하기 위한 대략적인 흐름도를 보여준다. 반응벽체의 설계요소는 크게 현장 특성과 반응벽체 특성, 두 가지로 구분할 수 있다.

반응벽체 설계에 관여하는 현장특성은 대수층 매질특성과 지하수 및 오염물질의 특성으로 구성되며

반응벽체의 수리지질학적 거동에 대한 수치해석 사례

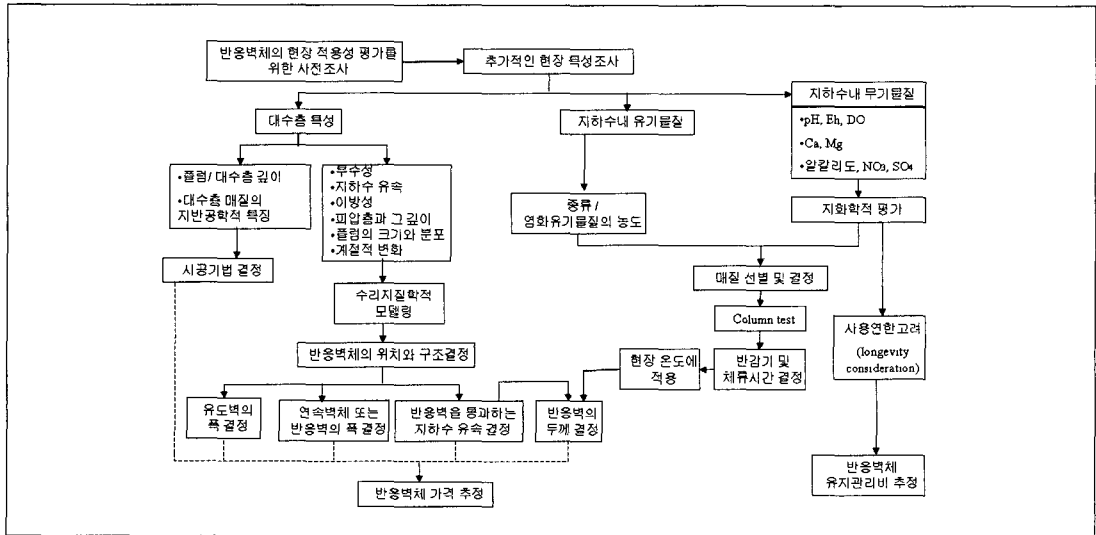


그림 5. 반응벽체 설계 흐름도(Gavaskar 1999)

이는 오염대의 특성과 수리지질학적 특성, 지화학적 특성으로 구별할 수 있다. 첫째로, 오염물질의 특성에 따라 플럼의 특성이 결정되게 되는데 이를 통해 오염대의 분포, 농도, 화학적 특성을 파악하여 설계에 반영한다. 두 번째로는 수리지질학적 특성이 있는데, 간극비, 투수계수, 계절별 지하수위 변화 등이 이에 속한다. 마지막으로 지화학적 특성으로는 현장 지하수의 pH, Eh, 용존산소량 등이 있다.

반응벽체의 특성을 결정하는데 가장 중요한 요소는 반응벽의 두께를 결정하는 것이라고 할 수 있다. 반응벽의 두께는 통상적으로 체류(지체)시간(residence time)을 통해 결정되는데 유입 오염지하수의 농도, 유입유속, 투수계수, 반감기 등이 체류시간에 영향을 미치는 요인들이다.

유도벽식 반응벽체의 경우 유도벽의 형상과 방향(orientation), 투수계수, 반응벽의 수 등이 반응벽체 설계에 영향을 미치게 되는데 이에 관해서는 이 글 중반부에 논할 모델링부분에서 언급될 것이다.

대수층에 존재하는 미생물은 오염물질이 이동하는 동안 생물학적 분해를 통해 오염물질의 농도를 낮추는 역할을 한다. 하지만 반응벽 내에 미생물이 생장하는 경우 미생물이 반응벽체에 긍정적인 역할만을 하는 것은 아니다. 반응벽에서 생장하는 미생물의 영향에 대해서는 최근 반응벽체의 장기거동 및 사용연한과 관련하여 활발한 연구가 수행중이나 아직 그 거동특성이 명확히 규명되지 않은 상태이다. 하지만 일반적으로 반응벽 내에 미생물이 존재함으로 인해 반응성에는 긍정적인 영향을 미치지만 미생물 증식으로 인하여 반응벽내의 간극을 막아 투수성을 떨어뜨리는 등 반응벽의 투수특성에는 부정적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Ott, 2000).

3. 모델링을 통한 연구사례

전술한 바와 같이 반응벽체 기술이 발전함에 따라

기존의 지하수 흐름을 그대로 이용하지 않고 인위적으로 지하수 흐름을 반응벽체로 유도하여 그 효율을 증대시키기 시작하였다. 그로 인하여 반응벽체를 설계하는데 있어서 지하수 거동의 정확한 예측과 평가가 더욱 중요시 되고 있다. 이를 위해 지하수의 거동 예측 및 오염물질 이동해석을 수행할 수 있는 프로그램을 이용한 모델링이 활용되고 있다. 일반적인 모델링 프로그램으로써 Visual MODFLOW와 FLOWNET 등이 있으며 이러한 프로그램들은 지하수를 이용하는 다른 여러 학문분야에 사용되어 그 적용성을 인정받고 있다. 이러한 모델링 프로그램을 사용함에 따라 반응벽체를 설계함에 있어 보다 편리하게 해당 현장 특성에 맞는 경제적이고 효율적인 설계가 가능해졌다. 또한, 반응벽체 설치 후 발생 가능한 문제에 대한 예측을 가능하게 하여 장기적인 거동평가도 실시할 수 있게 되었다.

반응벽체 설계에 영향을 미치는 요소에 대해 모델링을 통해 평가한 몇 가지 사례들을 정리해 보았다.

3. 1 유도벽식 반응벽체에서 그 구조와 형상에 따른 거동연구

Starr and Cherry(1994)는 유도벽식 반응벽체에

서 구조와 형상에 따른 거동연구를 수행한 바 있다. 유도벽식 반응벽체는 그 구성에 따라 다양하게 구분할 수 있다. 우선, 반응벽의 수에 따라 단일 반응벽 시스템(Single gate system)과 다중 반응벽 시스템(Multiple gate system)(그림 6)으로 구분할 수 있으며, 하나의 반응벽 내에 몇 종류의 반응물질을 채웠느냐에 따라 단일 반응물질 시스템(Single reactor system)과 다중 반응물질 시스템(Multiple reactor system)(그림 7)으로 구분할 수 있다.

반응벽체 설계자가 유도벽식 반응벽체를 사용하고자 할 경우 다음과 같은 사항들을 고려하여 구성 형식을 결정해야 한다.

1. 오염원으로부터 흘러나오는 모든 오염지하수를 반응벽으로 유도할 수 있는가?
2. 원하는 농도까지 배출되는 지하수의 농도를 낮추기에 충분할 만큼 반응벽 내에서의 체류시간을 가지는가?
3. 유도벽의 크기와 반응벽의 수는 최소가격에 맞게 적당한가?

설계자는 모델링을 통해 위의 세 가지 항목에 대해 평가해 볼 수 있다.

본 논문에서는, 모델링 프로그램으로 FLOWNET을 사용하였고 균질 등방의 대수층을 가정하였다.

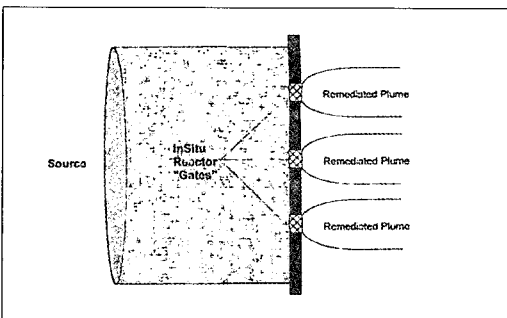


그림 6. 다중 반응벽 시스템(Starr and Cherry, 1994)

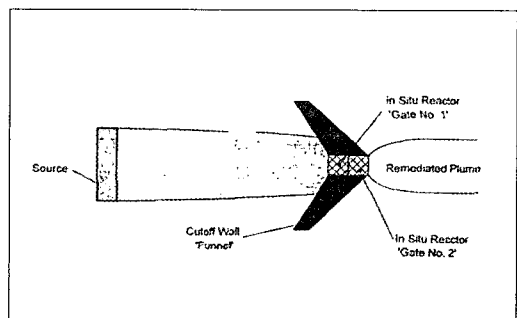


그림 7. 다중 반응물질 시스템(Starr and Cherry, 1994)

반응벽체의 수리지질학적 거동에 대한 수치해석 사례

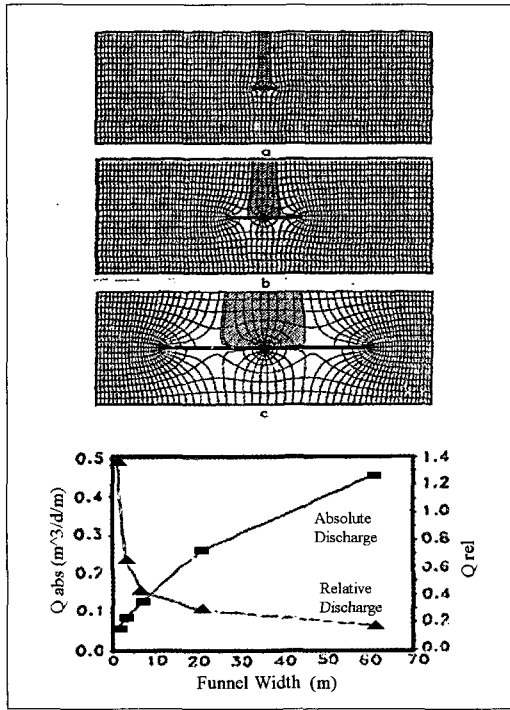


그림 8. 유도벽 폭에 대한 영향(Starr and Cherry, 1994)

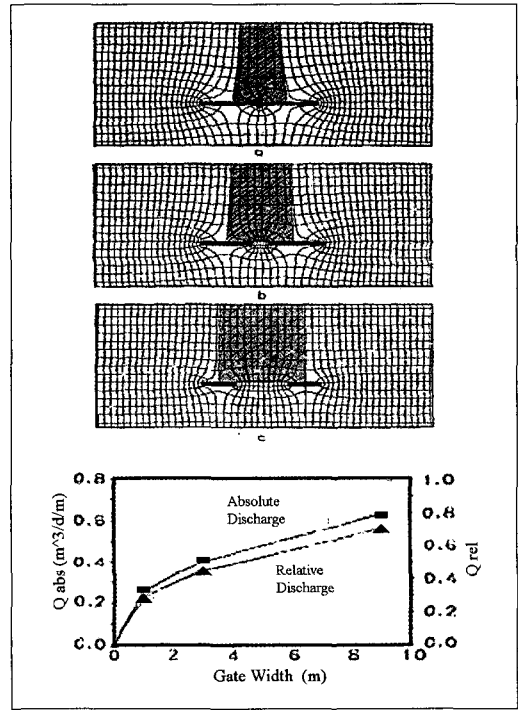


그림 9. 반응벽 폭에 대한 영향(Starr and Cherry, 1994)

지하수의 흐름을 유선과 등수두선으로 표현하였으며 각 유선은 동일한 유량을 통과시키므로 이 유선의 개수를 통해 방출량을 알 수 있다.

모델링의 결과를 정리하면 다음과 같다.

그림 8은 동일한 반응벽의 크기에 대해 유도벽의 크기를 달리하여 모델링한 결과를 보여준다. 유도벽의 폭이 증가함에 따라 반응벽을 통한 방출량이 증가하였고 capture zone(반응벽 위쪽 음영부분)도 넓어지게 된다. 하지만 반응벽 폭의 증가에 비례하여 방출량이 증가하는 것은 아니며 반응벽의 폭이 일정 크기 이상이 되면 방출량은 거의 증가하지 않는 결과를 보였다.

그림 9는 같은 길이의 반응벽체에 대해 반응벽의 크기에 의한 영향을 보여준다. 반응벽의 폭이 커짐

에 따라 반응벽을 통한 방출량이 증가하고 capture zone도 넓어지는 결과를 보여준다. 또한 상대 방출량 역시 증가하는 추세를 보이지만 반응벽의 설치비용이 유도벽보다 비싸다는 점을 감안할 때 경제성에 대한 고려가 필요하다.

그림 10은 같은 크기의 반응벽체에 대해 반응벽의 투수계수에 의한 영향을 보여준다. 반응벽의 투수계수가 증가함에 따라 방출량은 증가했으나, 대수층과 반응벽 투수계수의 차가 커짐에 따라 방출량 증가량은 점차 감소하는 경향을 보인다. 반응벽의 투수계수를 증가시키는 대표적인 방법은 반응물질의 입자크기를 크게 하는 것이다. 입자 크기가 큰 반응물질의 경우 표면적이 상대적으로 작으므로 반응성이 감소하게 된다. 그러므로 설계자는 반응벽의 투

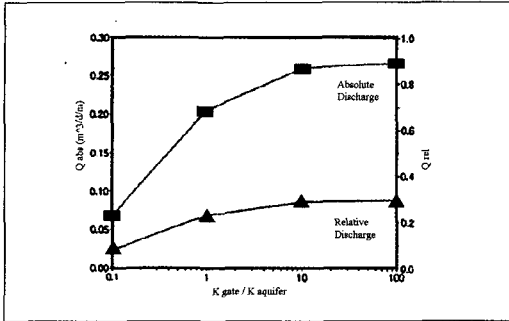


그림 10. 반응벽의 투수계수에 대한 영향 (Starr and Cherry, 1994)

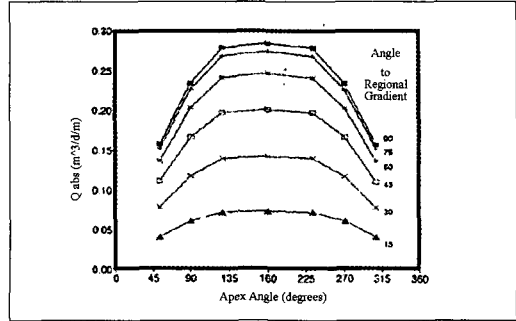


그림 11. 반응벽과 유도벽이 이루는 각도와 유도벽과 지하수 유입방향이 이루는 각도에 대한 영향(Starr and Cherry, 1994)

수계수 결정시 이를 유의해야만 한다.

그림 11은 반응벽과 유도벽이 이루는 각도와 유도벽과 지하수 유입방향이 이루는 각도에 대한 영향을 보여준다. 반응벽과 유도벽이 이루는 각도가 180°인 경우, 즉 직선형 유도벽의 경우 방출량이 가장 많다. 하지만 127~233° 범위에서는 직선형 유도벽의 경우와 큰 차이를 보이지는 않았다. 유도벽과 지하수 유입방향과의 관계를 살펴보면, 유도벽과 지하수 유입방향이 직각에 가까운 80~90°인 경우 가장 많은 방출량을 보였으며 60° 정도의 각도를 가진 경우도 90°의 경우와 약 15% 정도의 차이만을 보였다. 그러므로 같은 크기의 반응벽체를 시공할 경우 반응벽과 유도벽이 이루는 각도를 180±50°로 설정하고 유도벽과 지하수 유입방향이 이루는 각도를 90±30° 이내가 되도록 설치할 경우 최대 방출량을 얻을 수 있다.

3.2 현장 모델링 사례 연구

Scott and Folkes(2000)는 미국 콜로라도 덴버에 위치한 현장에 여러 가지 형태의 반응벽체에 대해 지하수 흐름을 모사해 봄으로써 당 현장특성에 적절한 반응벽체 형상을 제안하고 있다. 현장의 지층과

수리 지질학적 특성은 76개 이상의 관측정을 통해 구했으며 투수계수는 현장 펌핑 테스트와 슬러그 테스트를 통해 얻었다. 지하수 흐름은 USGS MODFLOW를 이용하여 모사하였고 PATH3D를 통해 입자추적을 수행하였다. 대수층의 투수계수는 1×10⁻⁵cm/sec에서 1×10⁻³cm/sec정도의 범위를 보였으며 3,000 µg/l 농도의 1,1-dichloroethene과 분해산물인 1,1,1-trichloroethane, TCE로 오염되어 있다. 지하수는 북동쪽 방향으로 수두경사 0.02로 흐르고 있다 (그림 12).

모델링 수행시 보다 보수적인 설계를 위하여 대수층의 투수계수는 1×10⁻³cm/sec를 사용하였으며 유

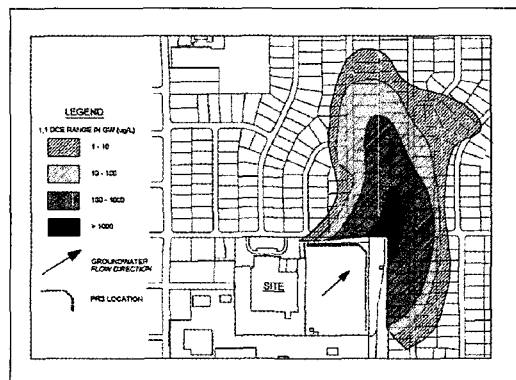


그림 12. 현장 모습과 오염대의 분포(Scott, 2000)

반응벽체의 수리지질학적 거동에 대한 수치해석 사례

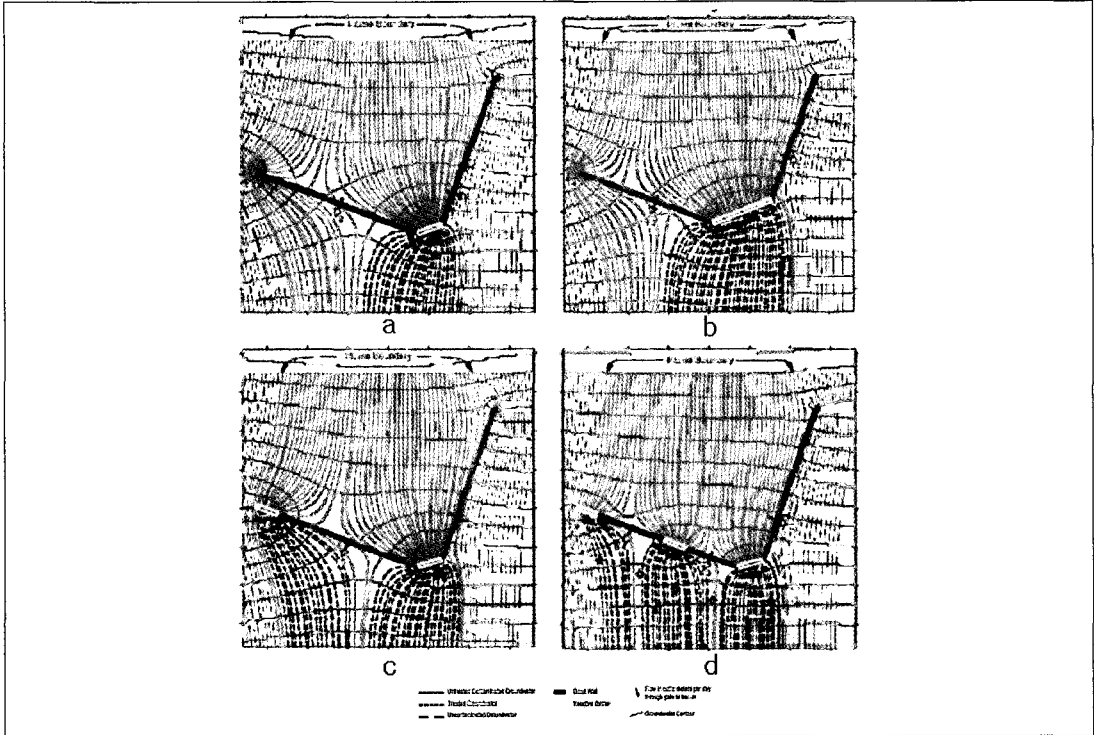


그림 13. 반응벽체 배열에 따른 지하수 흐름의 변화(K.C. Scott, 2000)

도벽의 투수계수는 $1 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$, 반응벽의 투수계수는 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 가정하였다. 모델링을 통하여 다양한 유도벽과 반응벽의 길이에 대한 영향 및 반응벽의 개수와 위치에 따른 변화를 알아 보았다. 또한 이 글의 전반부에 언급한 처리지하수 농도에 부정적인 영향을 미치는 유도벽을 통과하는 흐름, 유도벽의 상·하, 측면부를 통과하는 흐름에 대해 평가해 보았으며 벽체를 통과하는 유량을 통해 체류시간을 알아보았다.

그림 13은 위에서 설명한 현장에 대한 모델링 결과를 보여준다.

그림 13(a)의 경우 반응벽을 통과한 유량은 $12.4 \text{m}^3/\text{day}$ 이고 측면부를 통과한 흐름이 $6.8 \text{m}^3/\text{day}$, 유도벽을 통과한 총 유량이 $2.9 \text{m}^3/\text{day}$ 로써 총 오염

지하수 중 31%가 처리되지 않고 반응벽체를 통과한 것으로 나타났다. 그림 13(b)의 경우는 총 $5.8 \text{m}^3/\text{day}$ 가, 그림 13(c)의 경우 $2.9 \text{m}^3/\text{day}$, 그림 13(d)의 경우 $0.7 \text{m}^3/\text{day}$ 의 처리되지 않은 지하수가 반응벽체를 통과한 것으로 나타났다.

그림 14는 각 모델링 결과에 대한 해석 결과를 보여준다. 좌측 상단에서부터 시계방향으로 첫 번째 그래프는 각 조건에 따른 처리되지 않은 지하수의 비율을 나타내고, 두 번째 그래프는 각 조건에 따른 반응벽 통과 유량, 세 번째 그래프는 반응벽 개수에 따른 수두 증가량, 마지막 네 번째 그래프는 각 조건에 따른 측면부 흐름량을 보여주고 있다. 그림 13(d)와 같이 반응벽의 총 길이가 45m이고 3개의 반응벽을 사용한 경우가 다른 세 가지의 경우와 비교하여

상대적으로 높은 반응벽 통과유량을 보였으며 측면 부 흐름량, 처리되지 않은 지하수량, 수두 증가량은 모두 다른 조건보다 낮은 값을 보였다. 그림 13(b)와 그림 13(d)는 동일한 길이의 반응벽을 사용했지만 그 성능에서는 많은 차이를 보였다. 그러므로 반응벽의 수와 위치가 반응벽체의 거동 및 경제성, 안정성에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4. 결론

이 글의 도입부에 언급한 장점 이외에도 많은 장점들을 가지고 있는 반응벽체기술은 혁신적인 현장 오염 정화기법으로써 전 세계적으로 각광받고 있다. 반응벽체 기술이 소개된 초기부터 많은 연구를 수행한 미국이나 유럽의 경우 이미 많은 양의 연구 자료와 풍부한 시공경험을 가지고 있다. 특히 미국 환경

청(U.S. EPA)의 경우 Permeable Reactive Barriers Action Team을 구성하여 반응벽체 기술 개발에 많은 지원을 하고 있다. 이에 반하여 국내의 경우, 반응벽체에 대한 연구가 매우 부족한 상황이며 특히, 반응벽체의 시공이나 모델링에 관한 연구 자료는 극히 미미한 실정이었다.

최근 국내에서도 반응벽체에 대한 관심이 높아짐에 따라 국내 업체가 시공경험을 축적해 가고 있고, 많은 연구자들에 의해 새로운 반응물질이 개발되는 등 점차적으로 반응벽체에 대한 연구가 활발해 지고 있는 것은 그나마 다행스러운 일이라고 할 수 있겠다. 그러나, 반응벽체 기술이 보다 발전하기 위해서는 반응물질의 개발이나 시공기술 뿐만 아니라 이 글에서 언급한 바와 같이 모델링 기술이나 장기거동에 대한 평가, 모니터링 기술개발, 생물학적 영향 평가 등 보다 폭 넓은 분야에 대한 연구가 함께 수행되어야 할 것이다.

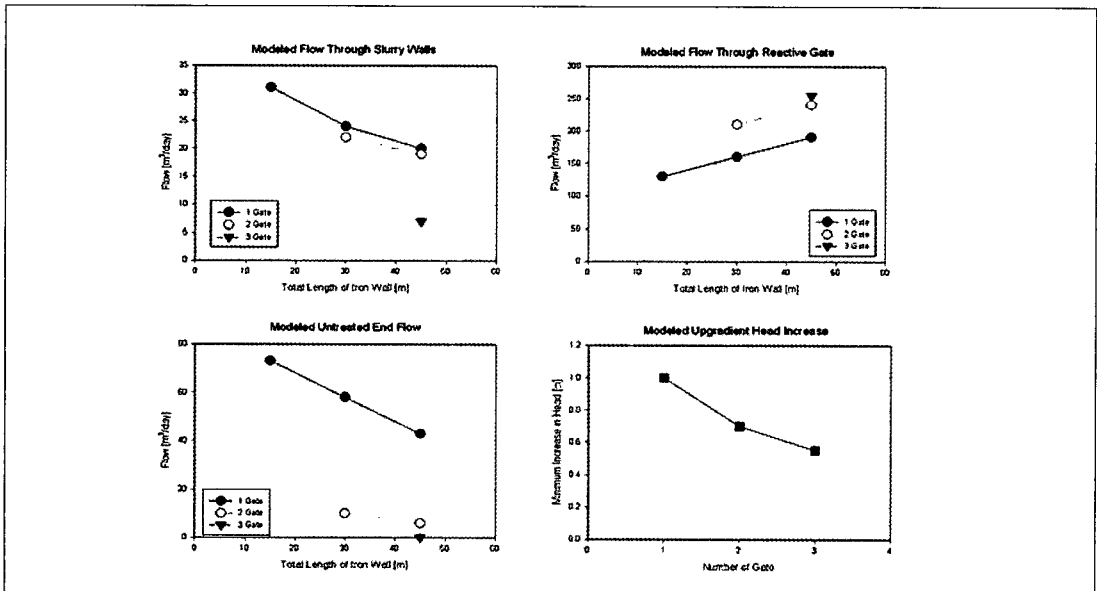


그림 14. 모델링 결과(Scott, 2000)

연회비 인상에 관한 안내

우리학회는 지난 15년간(1993년부터 2007년) 정회원 및 특별회원 등의 연회비를 동결·유지하여 왔으나 부득이 물가 상승 등을 고려하여 지난 임시 대의원 회의(2007. 05. 18)에서 학회운영규칙을 개정하여 아래와 같이 회비를 인상하기로 하였습니다.

- 아 래 -

학회운영규칙 제2장 회원 및 회비

제7조(입회금 및 연회비) 정회원의 입회금 및 회비의 종별에 따르는 연회비는 다음과 같다.

현 행	변 경
입회금 15,000원	입회금 30,000원
정회원의 연회비 20,000원	정회원의 연회비 30,000원
학생회원의 연회비 10,000원(학부생에 한함)	학생회원의 연회비 10,000원(학부생에 한함)
특별회비의 연회비 ;	특별회비의 연회비 ;
• 특급 1,000,000원 이상	• 특급 2,000,000원 이상
• 1 급 500,000원 이상	• 1 급 1,000,000원 이상
• 2 급 300,000원 이상	• 2 급 500,000원 이상
• 도서관 회원 50,000원	• 도서관 회원 50,000원

◎ 종신회비 : 연회비의 12배 산정 납부

◎ 시행일시 : 2007년 9월 1일

연회비 인상 기일 유예 및 정회원의 자격 복원 안내

현재 연회비 장기 미납으로 인한 제명 또는 현재 미납 회비가 있는 정회원이 종신회원으로 변경하기 위해서는 체납 연회비 전액을 납부하고 종신회비를 납부하여야 하나 제12대 이 송 회장 취임에 즈음하여 종신회비(240,000원)를 납부하는 경우 복원 기간(2007년 5월 21일 부터 8월 31일까지)에 한하여 체납 연회비 전액을 탕감하기로 의결하였습니다. 또한 상기와 같이 2007년 9월 1일부터 연회비가 인상되오니 해당회원은 복원기간 내에 종신회비를 납부하여 주시기 바랍니다.

아울러, 정회원 여러분께서도 회비 인상일(2007년 9월 1일) 이전에 회비 및 종신회비를 납부하여 혜택을 받으시기 바랍니다.

- 아 래 -

◎ 복원기간 : 2007년 5월 21일부터 8월 31일까지

◎ 학회 홈페이지 결제 시스템 이용

◎ 은행계좌 입금 : 예금주 (사)한국지반공학회 / 국민은행 534637-95-100979

- 꼭 본인명으로 입금하셔야 하며 입금 후 학회 사무국으로 전화 통지 요망

◎ 기타 문의 사항은 학회 사무국(양윤희 과장)으로 연락바랍니다.