2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 천층처분시설에서 처분고 인접지역에서의 지하수 유동 모델링
# Groundwater Flow Modeling for Near-Field of a Hypothetical Near-Surface Disposal Facility

박희영, 박주완, 장근무, 김창락
한국전력공사 원자력환경기술원
대전광역시 유성우체국 사서함 149호

## 요 약

불포화대에 위치한 천층처분시설에서 처분고 인접지역에 대한 지하수 유동 양상을 정량적으로 분석하였다. 처분고 인접지역에 설치할 수리방벽층에 대한 세가지 대안모델을 설정하고, 처분시설 폐쇄후 처분덮개를 통과한 침투수의 유동경로분석을 실시하여 처분고 내부로의 침투수 유입가능성을 평가하였다. 시간경과에 따른 침투수량의 변화와 인공방벽의 열화에 따른 수리물성치 변화를 고려한 해석결과, 처분고 내부로의 지하수 유입을 억제하기 위해서는 방벽층을 처분고 상부와 측면에 모두 설치하는 것이 필요한 것으로 판단되었으며, 이 경우 벤토나이트/모래 혼합재를 사용한 방벽층이 장기적으로 수리학적 건전성을 유지하는 것이 중요함을 알 수 있었다.

## Abstract

For a hypothetical near-surface radioactive disposal facility, the behavior of groundwater flow around the near-field of disposal vault located at the unsaturated zone were analyzed. Three alternative conceptual models proposed as the hydraulic barrier layer design were simulated to assess the hydrologic performance of engineered barriers for the facility. In order to evaluate the seepage possibility of the infiltrated water passed through the final disposal cover after the facility closure, the flow path around and water flux through each disposal vault were compared. The hydrologic parameters variation that accounts for the long-term aging and degradation of the cover and engineered materials was considered in the simulations. The results showed that it is

necessary to construct the hydraulic barrier at the upper and sides of the vault, and that, for this case, achieving design hydraulic properties of bentonite/sand mixture barrier in the as-built condition is crucial to limit the seepage into the waste.

## 1. 서 론

중저준위 방사성폐기물 천층처분시설의 성능/안전성 평가에서는 얼마나 많은 양의 강우(또는 지표수)가 처분시설로 침투하여 얼마나 빨리 처분된 폐기물과 접촉한 후 궁극적으로는 오염물질(방사성 핵종)이 얼마 빨리 지하 대수층으로 이동하는가가 중요한 관건중의 하나이다. 따라서 천층처분 시설의 안전성을 확보하기 위해서는 처분덮개를 통과한 침투수의 처분고(disposal vault) 내부로의 유입이 최대한 억제하는 것이 필요하다. 현재 국내에서 수행된 천층처분 시설의 개념설계 에서는 처분고 상부 및 인접영역은 저투수성의 벤토나이트와 모래 혼합층을 설치하고 나머지는 자연토양으로 충전하는 것을 고려하고 있다.[1] 본 논문에서는 이러한 개념설계에 대해서 대안모델로서 벤토나이트/모래 방벽층을 처분고 상부 및 측면에 모두 설치한 경우, 상부에만 설치한 경우, 설치하지 않은 경우 3가지에 대해 지하수 유동해석을 실시하여 처분고 주위 지반에서의 유동 양상을 정량적으로 분석하고, 처분시설 설계 기본자료를 제공하고자 하였다. 지하수 유동 해석에서 100년 이후로는 콘크리트의 열화가 발생하는 것으로 가정하여 콘크리트의 물성을 변화시켜 주었으며, 처분덮개를 통한 초기 침투수량은 물수지 해석결과에 근거하여 설정하였다. 처분고 지하수 유동해석에 사용된 해석코드는 PORFLOW[2]이다.

## 2. 처분고 해석모델

자유수면 상부의 처분고를 포함하는 불포화 지반의 2차원 유동해석을 위한 해석모델의 모식도는 그림 1과 같다. 해석모델은 처분고 상부 및 측면부의 벤토나이트, 처분고를 이루는 콘크리트층, 처분고 내부의 고화체 그리고 처분고 주위의 자연 토양층으로 이루어지며 각 매질의 배치 및 제원은 그림 1과 같다. 따라서 해석은 처분덮개를 통과한 침투수가 각각 다른 물성을 가지는 매질에서의 유동경로 분석을 실시하여 처분고 내부로의 침투수 유입 가능성을 정량적으로 분석하고자 한다. 또한 세가지 개념모델에 대한 각각의 지하수 유동 해석 결과를 비교·분석하여 최적의 처분고 설계모델을 제시하고자 한다.

해석모델은 단일 처분고 만을 고려하였으며 대칭성을 고려하여 처분고를 기준으로 좌측부만 모델화 하였다. 좌우측면의 경계조건은 No-flow 조건이다. 모델의 상부면

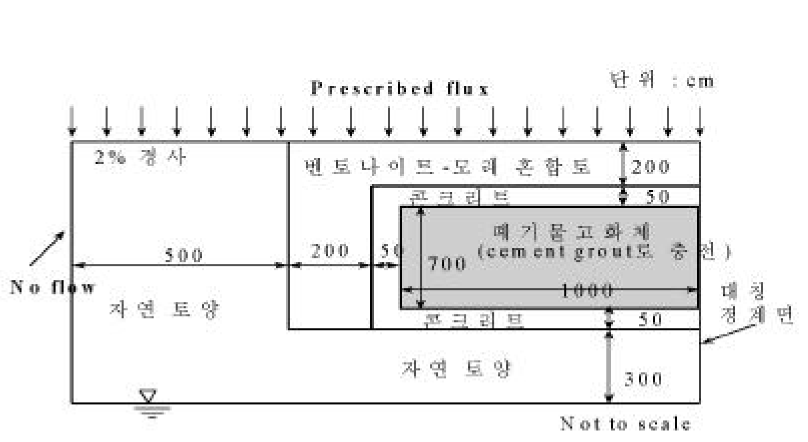
표 1. van-Genuchten 관계식에 따른 매질의 물성과 상부 경계면에서의 유량

| 매질 | | $\theta_s$ | $k_{sat}$ (m/year) | β | α ( $m^{-1}$ ) |
|---|---|---|---|---|---|
| 자연 토양 | | 0.47 | 31.5 | 1.523 | 4.4 |
| 벤토나이트/모래 혼합토 | | 0.36 | 3.15E-2 | 1.203 | 0.16 |
| 콘크리트 | 100 yrs | 0.40 | 3.15E-3 | 1.08 | 0.63 |
| | 100 300 yrs | 0.40 | 3.15E-2 | 1.70 | 6.3 |
| | 300 600 yrs | 0.37 | 1.89E+3 | 2.08 | 0.68 |
| 처분고 | 100 yrs | 0.50 | 3.15E-3 | 1.57 | 7.0E-5 |
| | 100 300 yrs | 0.50 | 3.15E-2 | 1.70 | 6.3 |
| | 300 600yrs | 0.37 | 1.89E+3 | 2.08 | 0.68 |
| 침투수량 | 100 yrs | 3.5 mm / year | | | |
| | 100 300 yrs | 35.0 mm / year | | | |
| | 300 600 yrs | 350.0 mm / year | | | |

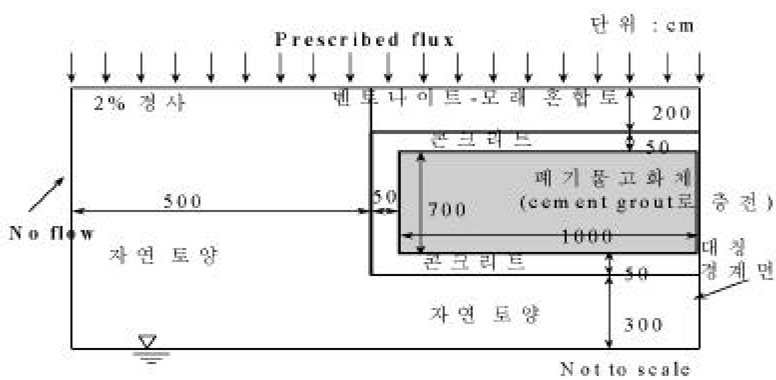
은 일정유량 경계조건으로써 이는 HELP 코드를 이용한 처분덮개의 물수지 해석 결과로 구해진 처분덮개를 통과한 침투수량이다. 그리고 모델의 하부면은 지하수면이며 경계조건으로 압력조건은 0 이다. [3]

해석은 처분고 폐쇄 후 600년까지 수행하였으며 100년 이 후에는 콘크리트의 열화를 고려하여 이에 해당하는 물성으로 변화시켰다. 그리고 해석모델의 상부면에 가해지는 유량은 100년에서 300년까지는 처분덮개 중 인공방벽의 열화를 고려한 해석결과에 근거하여 100 년 이내의 범위에서의 침투수량의 10배를 경계조건으로 설정하였다. 그리고 300년 이후에는 100년에서 300년까지의 범위에서의 침투수량의 10배를 경계조건으로 설정하였다. 표 1은 100 년과 300년을 기준으로 van-Genuchten 관계식에서 요구되는 매질의 물성과 상부 경계면에서의 유량을 보여 준다. 여기서 각 매질의 수리학적 물성치는 문헌상의 값을 인용하였다.

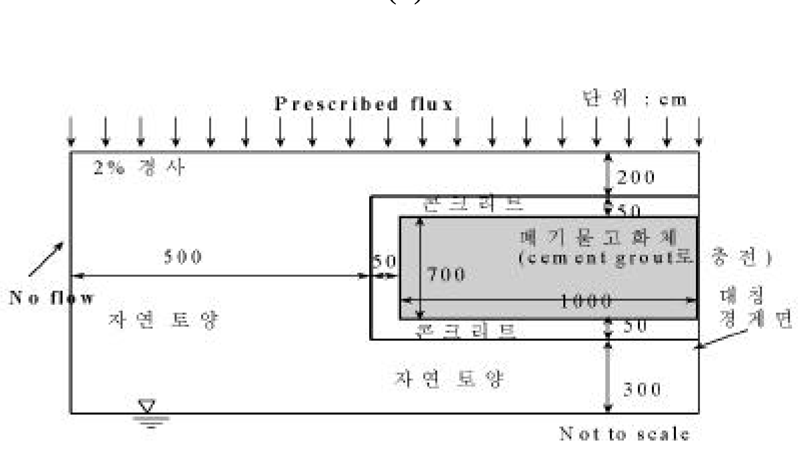
해석에 사용된 PORFLOW는 다변 포화 다공성 또는 균열 매질에서의 다상 유체 흐름, 열전달, 용질이동 해석을 위한 소프트웨어 패키지이다.[3] PORFLOW에서는 절점적분법(Nodal Point Integration)에 의한 지배미분방정식의 적분을 수행한다. 이는 원천적으로 질량보존식을 성립하게 한다. 해석에 사용된 PORFLOW 해석코드에서는 압력방정식에 대한 대안으로서 4 개의 구성방정식 중 하나를 사용자가 선택할 수 있으며 다상 또는 압축성이 강한 유체에 대해서 추천되는 다음의 지배방정식을 사용하였다.




(a)




(b)




(c)

**그림 1. 처분고 주변 불포화지반의 지하수 유동 해석 개념 모델**
(a) **벤토나이트/모래 방벽층을 상부 및 측면에 설치한 경우**
(b) **방벽층을 상부에만 설치한 경우** (c)**방벽층을 설치하지 않은 경우**

$$S_e^n \frac{\partial \Delta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i}\left[R^n K_{ij}^n \left(\frac{\partial \Delta}{\partial x_j} - B_j^n\right)\right] + \frac{\partial}{\partial X_i}\left(R^n K_{ij} \frac{\partial \phi}{\partial X_j}\right) + m_v^n - \frac{\partial Q^n}{\partial t} \qquad (1)$$

여기서 $S_e$: 유효 저류계수, △: 현재 측정된 수두와 새로운 상태에서 측정된 수두 차이, Ψ: 현재 측정된 수두, $m_v$: 단위 체적당 질량 감소 또는 증가 체적률, $K_{ij}$ ;수리전도도 텐서, Q: 선원항(sink or source), R: 기준치에 대한 국부 유체 밀도비, $B_j$: 경계벡터이다.

PORFLOW에서는 내재된 다상 유체 흐름을 위한 다양한 포화도 관계식을 사용가능하나, 본 해석에 사용된 포화도와 압력수두와의 관계식은 van Genuchten 조건식으로 다음과 같다.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\Psi|^{\beta})]^m} \qquad (2)$$

$\theta_r$ : 잔류 수분량(-)

$\theta_s$ : 포화 수분량(-)

Ψ : 흡입수두 (m)

α , β, $m = 1 - 1/\beta$ : 실험 상수

불포화 수리전도도는 van Genuchten 관계식으로부터 포화 수리전도도와 유효 포화도의 함수로써 계산된다.

$$K(\theta) = k_s \sqrt{S}\,(1 - ((1 - S^{1/m})^m)^2 \qquad (3)$$

이 식에서 $S = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ : 유효 포화도(-)

$k_{sat}$ : 포화 수리전도도 (m/sec)

### 3. 평가 결과 분석

처분고 지하수 유동 해석은 이미 언급된 바와 같이 그림 1의 개념모델에 근거해서 그림 2와 같이 해석모델을 구성하였다. 처분고 상부의 벤토나이트 층에 2% 경사가 적용되었다. 유한 차분 요소는 가로방향 35 개 세로방향 26 개로 등분할 하였다.

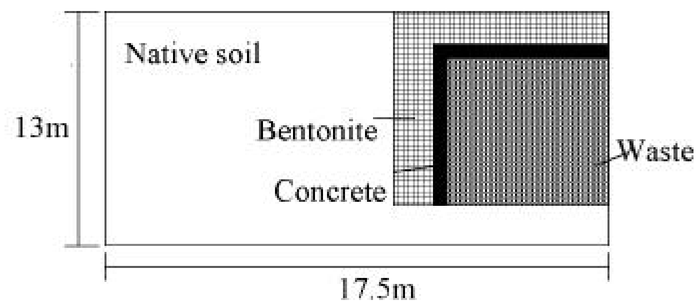



그림 2. PORFLOW에서의 처분고 지하수 유동 해석 모델

최적의 처분고 설계모델을 제시하기 위해 세 가지의 개념모델에 대한 유동 해석 결과들을 비교하였다. 그림 3에서 5는 각 개념모델에 대한 유동 해석 결과로써 처분고 폐쇄 후 300년에서 600년 범위의 지하수 유동 방향 및 크기를 보여준다. 그림 3은 처분고 상부 및 측면부에 벤토나이트/모래 방벽층을 모두 설치한 경우의 지하수 유동 방향 및 크기를 보여주는데, 벤토나이트/모래의 저투수성 때문에 지하수가 방벽층을 투과하지 못하고 이 방벽층의 가장자리를 따라 흐르는 것을 나타내고 있다. 따라서 처분고 내부로 지하수의 유입은 거의 없다고 볼 수 있다 . 그림 4는 처분고 상부에만 벤토나이트/모래 방벽층을 설치한 경우의 지하수 유동 방향 및 크기를 보여준다. 침투수된 지하수가 방벽층의 상부면을 따라서 흐르다가 방벽층이 없는 측면부에서는 처분고 가장자리로 유입되어 처분고 내부 전체로 지하수가 유입되는 것을 볼 수 있다.

그림 5는 벤토나이트/모래 방벽층을 설치하지 않은 경우의 지하수 유동 방향 및 크기이다. 지하수 유입을 억제시킬 수 있는 저투수성의 방벽층이 없기 때문에 처분고 상부에서부터 지하수가 유입되어 처분고 내부 전체를 통해 지하수가 유입되고 있다.

표 2는 각 개념모델의 처분고 폐쇄 후 300년에서 600년 범위의 포화도를 나타내고 있다. 방벽층을 처분고 상부와 측면에 설치한 경우는 처분고 내부로의 지하수 유입량이 거의 없고 중력배수가 계속 발생하여 처분고 내부의 포화도가 초기치 0.4에

표 2. 처분고 폐쇄후 300 600년의 포화도

| 개념모델 | 상부 및 측면에 방벽이 있는 경우 | 상부에 방벽이 있는 경우 | 상부에 방벽이 없는 경우 |
|---|---|---|---|
| 처분고 상부 | 0.38 | 0.40 | 0.91 |
| 처분고 측면부의 자연 토양 | 1.0 | 0.97 | 1.00 |
| 처분고 하부의 자연 토양 | 0.30 | 1.00 | 1.00 |
| 폐기물 | 0.011 | 1.00 | 1.00 |

비해 많이 감소한 것을 알 수 있다. 처분고 상부와 측면부는 침투수량의 증가로 포화도가 증가하였고, 처분고 하부에서는 중력배수의 영향으로 포화도는 감소하였다. 상부에만 방벽층을 설치한 경우는 처분고 가장자리로 지하수의 유입이 발생하고 있기 때문에 처분고 상부를 제외한 나머지 부분에서 완전포화된 상태를 보이고 있다. 방벽을 설치하지 않은 경우 또한 처분고 내부 전체로 지하수가 유입되고 있어 처분고가 완전히 포화되어 있음을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 결과를 통해 처분고 내부로의 지하수 유입을 억제하기 위해서는 저투수성의 벤토나이트/모래 방벽층을 처분고 상부 및 측면부에 모두 설치하는 것이 필요함을 알 수 있으며, 이 방벽층이 건전성을 유지한다면 처분고 설치 후 600년까지도 처분고 내부로 지하수가 유입되는 것을 방지할 수 있을 것으로 생각된다. 처분고 설계모델로 적합한 벤토나이트/모래 방벽을 처분고 상부 및 측면부에 모두 설치한 경우의 유동 해석 결과를 자세히 살펴보면 다음과 같다. 먼저 대체적인 유동 양상은 그림 6, 7, 8와 같다. 그림 6은 100 년 이내 범위에서 지하수 유동 방향 및 크기를 보여준다. 처분고 상부에 위치하는 벤토나이트와 모래의 저투수성으로 인해서 지하수의 흐름은 벤토나이트 층을 투과하지 못하고 이 층의 가장자리를 따라서 흐르게 된다. 그리고 이 층의 끝 부분에서 하부 방향으로 흐른다. 그러므로 그림에서와 같이 처분고 내부로의 지하수 유입은 상대적으로 매우 작다고 할 수 있으며 처분고 하부에서 지하수 유동속도도 매우 미약하다. 그림 7은 폐쇄 후 300 년 시점에서의 지하수 유동 방향 및 크기를 보여 준다. 이 해석은 100 년 시점에서 계산된 포화도를 초기 조건으로 재 설정하고, 열화가 발생한다고 보고, 표 1에서와 같이 콘크리트와 처분고의 물성을 변화 시켜 해석을 수행한 결과이다. 상부의 침투수량은 이미 언급한 바와 같이 100년 이내의 조건보다 10 배 증가한 값을 입력값으로

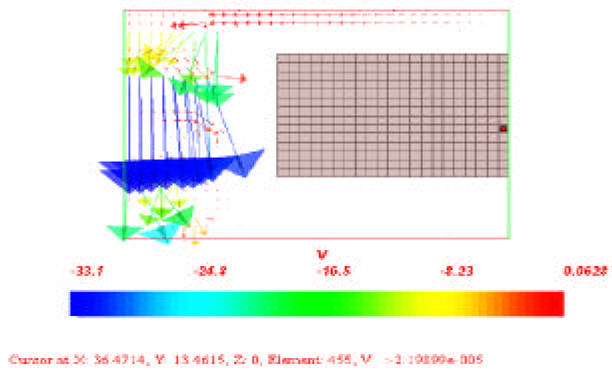



**그림** 3. **방벽층을 처분고 상부 및 측면부에 모두 설치한 경우의 폐쇄 후** 300**년 이후 지하수 유동**

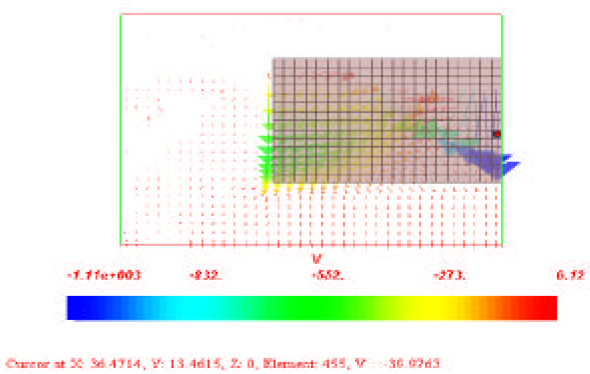



**그림** 4. **방벽층을 처분고 상부에만 설치한 경우의 폐쇄 후** 300**년 이후 지하수 유동**

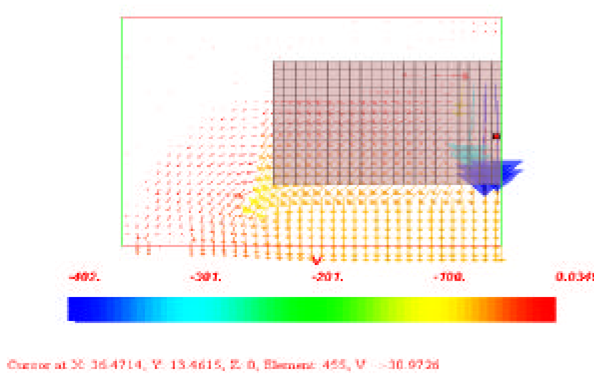



**그림** 5. **방벽층을 설치지 않은 경우의 폐쇄 후** 300**년 이후 지하수 유동**

하였다. 지하수 유동속도 양상은 침투수량의 증가로 인해서 절대치는 증가하였으나 벤토나이트와 모래 혼합층의 저투수성으로 인하여 대체적인 양상은 거의 동일하다. 그러므로 폐쇄 후 300 년 시점에서도 처분고 내부로의 침투수량은 상대적으로 매우 작다고 할 수 있다. 그림 8은 폐쇄 후 600년 시점에서의 지하수 유동 방향 및 크기를 보여 준다. 이 해석 또한 폐쇄 후 300년 시점에서 계산된 포화도를 초기조건으로 재 설정하고, 열화가 발생하므로 콘크리트와 처분고의 물성을 표 1의 값으로 변화시켜서 해석을 실시하였다. 침투수량 또한 300년 시점의 10배인 350mm/year를 적용하였다. 물론 침투수량의 증가로 인해 지하수 유동 속도의 절대치는 증가했지만, 벤토나이트/모래 방벽층의 건전성이 유지되고 있어 폐쇄 후 600년 시점에서도 역시 처분고 내부로 유입되는 지하수량은 매우 작다고 할 수 있다.

표 3은 처분고 폐쇄 후 600년까지의 유동 속도와 포화도를 자세히 보여준다. 처분고 폐쇄 후 시간이 지남에 따라 침투수량이 증가하여 지하수 유동 속도의 절대치가 계속 증가하고 있음을 알 수 있다. 포화도 분포를 살펴보면, 먼저 폐쇄 후 100년 시점에서는 처분고 내부로의 지하수 유입량이 매우 미약하므로 처분고 내부의 포화도는 초기치인 약 0.4 에서 거의 변화를 보여 주고 있지 않다. 그리고 해석모델의 상부면에서는 저투수층인 벤토나이트와 모래 혼합층의 영향으로 지하수 침투수량이 축적되어 포화도는 증가하며 모델의 하부면은 자유수면이므로 포화도 1, 즉 완전포화도 값을 보여준다. 그리고 처분고 하부 및 좌측면의 자연토양에서는 침투수량보다 중력배수되는 유량이 큰 이유로 인해서 포화도는 초기치 0.4보다 감소하는 양상을 보여 준다. 폐쇄 후 300년 시점의 포화도는 처분고 내부로의 지하수 유입은 없는 반면 침투수량의 증가로 처분고 내부의 포화도는 초기치에 비해 많이 감소한 값을 보이고, 처분고 측면부에서는 포화도가 증가하였다. 벤토나이트/모래 방벽층은 저투수성이므로 초기포화도와 거의 비슷한 값을 유지하고 있다..

마지막으로 폐쇄 후 600년 시점에서는 처분고 내부로의 지하수 유입이 발생하지 않은 상태이므로 처분고 내부의 포화도는 300년 시점에서보다도 더 감소하였다. 그러나 침투수량은 증가하여 중력배수되는 양이 증가하여 처분고 측면부는 완전히 포화된 상태를 보인다. 그리고 벤토나이트/모래 방벽층은 처분고 폐쇄 후 600년이 지난 시점에서도 포화도의 변화를 거의 보이지 않아, 건전성을 유지하고 있음을 알 수 있다.

이러한 해석을 통해서 처분고로의 지하수 유입량을 억제하기 위해서는 벤토나이트/ 모래 혼합층이 건전성을 유지하는 것이 매우 중요함을 알 수 있으며 건전성이 유지된다고 가정하면 폐쇄 후 600년까지도 처분고 내부로 유입되는 지하수량을 상당히 억제할 수 있는 것으로 판단된다.

**표 3. 처분고 상부 및 측면부에 방벽을 설치한 경우의 지하수 유동 해석 결과**

| 지하수 유속(m/year) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 시간 (년) | 처분고 하부의 자연 토양 | 처분고 측면부의 자연 토양 | 벤토나이트/모래 혼합토 | 콘크리트 | 폐기물 |
| 0 100 | 1.75E-3 | 6.81E-3 | 1.77E-3 | 7.54E-7 | 1.26E-6 |
| 100 300 | 1.27E-3 | 1.20E-1 | 1.75E-2 | 7.20E-5 | 2.23E-8 |
| 300 600 | 1.67E-3 | 0.62 | 8.75E-2 | 4.20E-5 | 8.18E-6 |
| 포화도 | | | | | |
| 시간 (년) | 처분고 하부의 자연 토양 | 처분고 측면부의 자연 토양 | 벤토나이트/모래 혼합토 | 콘크리트 | 폐기물 |
| 0 100 | 0.26 | 0.38 | 0.40 | 0.40 | 0.4 |
| 100 300 | 0.039 | 0.60 | 0.43 | 8.70E-5 | 0.07 |
| 300 600 | 0.28 | 1.0 | 0.43 | 6.80E-3 | 0.011 |

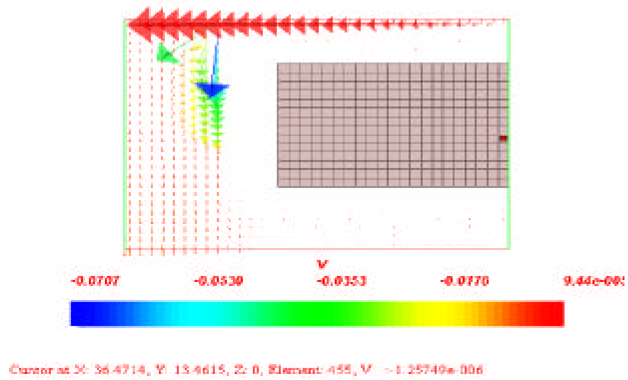



**그림** 6. **폐쇄 후** 100**년 시점 지하수 유동**(**처분고 상부 및 측면부에 설치**)

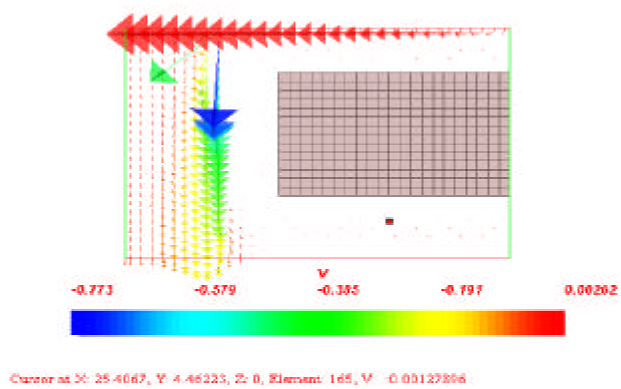



**그림** 7. **폐쇄 후** 300**년 시점 지하수 유동**(**처분고 상부 및 측면부에 설치**)

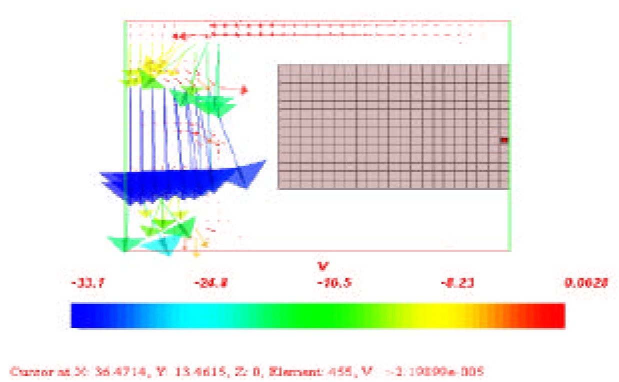



**그림** 8. **폐쇄 후** 600**년 시점 지하수 유동**(**처분고 상부 및 측면부에 설치**)

## 4. 결 론

불포화대에 위치한 천층처분 시설에서 처분고 인접지역에 대한 지하수 유동해석을 수행하였다. 처분덮개를 통과한 침투수의 처분고 유입 가능성에 대해 세 가지 대안모델을 구성하여 지하수 유동 측면에서 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 처분고 내부로의 지하수 유입을 억제하기 위해서는 저투수성의 벤토나이트/모래 방벽층을 처분고 상부 및 측면부에 모두 설치하는 것이 필요하다.
2) 처분고로의 지하수 유입량을 억제하기 위해서는 벤토나이트/ 모래 혼합층이 건전성을 유지하는 것이 매우 중요함을 알 수 있으며 건전성이 유지된다고 가정하면 폐쇄 후 600년까지도 처분고 내부로 유입되는 지하수량을 상당히 억제할 수 있는 것으로 판단된다.

상기 해석에서는 기존 문헌상 매질의 물성치를 사용한 지하수 유동 측면에서의 방벽의 거동을 살펴보았으며, 추후 좀더 다양한 대안해석과 처분부지 내 토양의 물성치 확보 및 분산을 고려한 불포화대에서의 핵종이동 해석을 통하여 최적의 불투수 방벽 설계가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. 중·저준위 방사성 폐기물 천층처분 시설 개념설계 종합보고서, 한국전력공사 원자력 환경기술원, 2000-1300-단9, 2000.
2. ACRi, PORFLOW: A Software Tool For Multiphase Fluid Flow, Heat and Mass Transport in Fractured Porous Media, 1999.
3. K. Chang et al., Water Balance Evaluation of Final Closure Cover for Near-Surface Radioactive Wastes Disposal Facility, J. Korean Nucl. Soc., Vol. 32, No. 3, PP 274-282, 2000.
4. P. D. Meyer et al., Hydrologic Evaluation Methodology for Estimating Water Movement Through the Unsaturated Zone at Commercial Low-Level Radioactive Waste Disposal Sites, NUREG/CR-6346, 1996.