

임해지역의 모의 지하 비축 시설 주변에서 해수 침투에 의한 지하수 유동 특성

Groundwater Flow Characteristics Affected by the Seawater Intrusion near Simulated Underground Storage Caverns in the Coastal Area

황 용 수 (Yong Soo Hwang)

한국원자력연구소

배 현 숙 (Hyun Sook Bae)

충남대학교 환경공학과

서 동 일 (Dong Il Seo)

충남대학교 환경공학과

김 경 수 (Kyung Soo Kim)

한국원자력연구소

김 천 수 (Chun Soo Kim)

한국원자력연구소

요약 / ABSTRACT

임해지역에 건설되는 지하 비축 기지 주변에서의 지하수 유동에 영향을 미치는 주요 요인들로는, 지형적인 영향, 공동 굴착으로 인한 영향 및 해수 침투에 따른 영향으로 대별된다. 본 논문은 모의 지하 원유 비축 기지 지역을 대상으로 이러한 현상에 의한 지하수 유동 특성 변화를 2차원 수치 모델로 해석하였다. 해석 결과 상기 3가지 요인 중 공동 굴착에 의한 영향이 가장 중요한 것으로 판명되었다. 이와 같은 조건에서 저장 공동으로부터 외부로의 지하수 유동 경로 해석이 상세히 수행되었다. 수치 모델링 결과 공동 굴착으로 인하여 공동 주변 지하수압에 심각한 변화가 일어났으며 이에 따라 지하수 유동 경로도 바뀌었다. 수벽공을 이용한 적절한 운영압을 적용함으로써 저장 공동에 비축된 유류의 누출을 저감할 수 있음을 보였다.

주요어 : 지하수 유동, 유류 저장 비축 기지, 수벽공, 해수 침투

There are three major processes to impact the groundwater flow near underground storage caverns in the coastal area; effect of topography, effect of sea water intrusion, and effect of excavation. In this paper, the effects of three items were numerically studied to identify the major cause for altering the flow pattern. It turned out that the excavation is the most significant effect on the groundwater flow

system. The groundwater pressure distributions and consequent groundwater pathways were significantly altered near the openings. By increasing the groundwater pressures from water curtain holes, the potential leakage of storage cavern was properly prevented

Key Words : Groundwater flow, Oil storage cavern, Water curtain, Sea water intrusion

서 언

지하비축기지 건설 시 암반 내에 유류를 저장하는 기본 원리는 공동 주변 암반의 지하수압이 공동 내부의 압력을 초과하여 지하수가 암반으로부터 공동 내부로 흐르도록 하는 것이다. 결정질 암반 내에 공동을 굴착할 경우 지하공간의 형성 외에 발파의 영향에 의하여 생성되는 새로운 균열이나 기존에 존재하던 절리과 단열(fracture) 등과의 연결에 의해 지하수 흐름이 변하여 저장공동으로부터 유류가 유출될 가능성이 있으므로 이를 차단시켜 주어야 하는데 여기에는 자연지하수압을 이용하는 방법과 수벽공(water curtain hole)을 저장공동 상부와 그 주변에 설치하여 인공적으로 지하수압을 높여주는 방법이 있다. 자연지하수압을 이용하는 지하비축시설은 운영 중 안정 지하수위의 지속적인 유지가 가능하여야 하므로 입지선정에 어려움이 따를 뿐 아니라 강우량, 지하수 함양량, 암반의 수리적 특성 등 다수의 자연적 조건들이 자세히 파악되어야 한다. 지하비축지에서 공동의 수리동력학적 안정성 확보를 위하여 적용하고 있는 수벽공 시스템은 지하수위 유지는 물론 공동 주변의 지하수압을 높여주는 방법으로서 많이 이용되고 있으나 설치비용의 과다 및 운영비용의 증가로 수벽공의 경제적인 설계방법은 비축시설 건설 및 운영에 중요한 의미를 갖는다. 가장 경제적인 수벽공 설계는 최소한의 수벽공 설치와 주입수 공급으로 운영기간 중 공동의 수리안정성을 확보하는 것이다. 이를 위해서는 지질조건, 암반의 수리학 및 공학적 특성, 자연지하수위, 수벽공의 크기 등 여러 조건을 검토함으로써 최적의 수벽공 설계가 가능해야 한다(이경주와 이희근, 1998).

이러한 지하 구조물은 지하수 유동 체계와 매우 밀접한 관계를 가지고 있으므로 시설의 효율적인 운영을 위해서는 구조물의 역학적 안정성에 대한 연구뿐만 아니라 암반의 수리동력학적 측면에서의

연구가 중요하다. 지하공간 개발 및 터널건설에 있어서 지하수의 유입은 굴착과 보강공사의 진행을 어렵게 할뿐만 아니라 구조물의 안정성에 심각한 문제가 야기될 수 있는데 이는 암반 내 분포된 불연속면의 존재에 기인한다(송명규외, 1994). 즉, 일반적으로 자연상태의 암반은 역학적, 수리적, 열적으로 평형상태에 있으나 인위적인 행위에 따른 변화가 가해지면 이러한 초기 평형상태는 붕괴되고, 상호작용으로 새로운 평형상태로 접근하려 한다(안형준과 이희근, 1997;이희석외, 1998). 지하 암반 내에 공동이 굴착되면, 주변 암반에는 초기 지압의 재분배에 의한 응력 변화가 발생하여 공동 단면의 축소 변형 및 파괴가 유발되며(김중우, 1996), 지하수 유동 경로인 암반 내 균열의 폭 변화를 야기하여(서백수외, 1996) 지하수 유동 체계를 변화시킨다. 이러한 지하수 흐름에 대한 연구는 주로 석유공학, 수리지질학 분야에서 진행되어 왔으며 최근 들어서는 실험실 및 현장실증실험을 통해서 불연속면의 밀도, 간격, 길이, 틈새크기, 거칠기 등의 역학적 특성을 고려한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다(장현익외, 1996). 이와 더불어 수치해석을 통한 공동 주위 암반의 지하수 유동연구도 활발히 진행되고 있다.

본 논문은 임해지역에 건설되는 지하비축시설의 주변 지하수 유동 특성이 해수-담수 경계면에 의하여 어떠한 영향을 받는지, 그리고 수벽공 주입압의 변화에 따라 어떻게 달라지는 지에 대한 것이다.

임해지역에서 광역적인 지하수의 흐름은 수리경사를 따라 해수영역으로 배출되나, 해안 인접지역에서 지하수를 채수하거나 지하 공동을 굴착하게 되면 수리경사가 역전되는 조건이 형성되어 지하수의 배출이 감소되고, 동시에 해수가 내륙부의 대수층으로 침투하게 되는 것을 해수 침투(seawater intrusion)라 한다. 이러한 해수-담수 경계면의 특성에 대한 최초의 조사는 Ghyben(1888)과 Herzberg(1901)에 의해 각각 수행되었는데 해안지

임해지역의 모의 지하 비축 시설 주변에서 해수 침투에 의한 지하수 유동 특성

역의 균질동방성 자유수면 대수층에서 단순한 정수압 조건을 가정했다. 즉 Fig. 1에 나타난 바와 같이

해수의 밀도 ρ_s 와 담수의 밀도 ρ_f 를 구별하는 경계면이 내륙쪽으로 침투한 양상을 보여주었다.

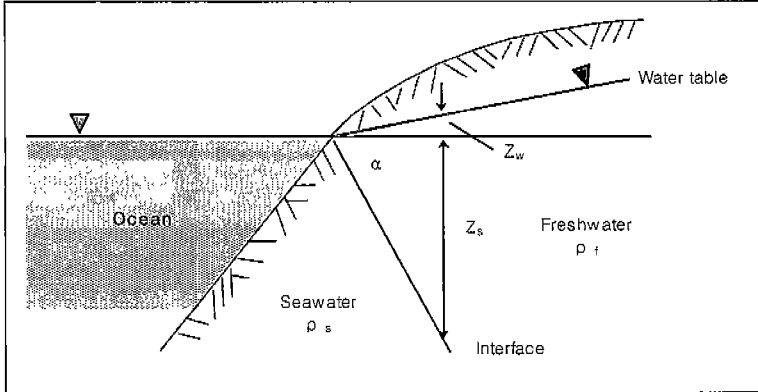


Fig. 1. Seawater-freshwater interface in an unconfined coastal aquifer under hydrostatic condition.

정수압 조건하에서 지하수면으로부터 경계면까지 확장된 담수의 단위 칼럼 무게는 경계면 상의 지점에서 해수면으로부터 동일한 깊이까지 확장된 해수의 단위 칼럼에 의해 균형을 이룬다. Fig. 1로부터,

$$\rho_s g z_s = \rho_f g (z_s + z_w) \quad (1)$$

또는

$$z_s = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} z_w \quad (2)$$

를 얻을 수 있다.

- 여기서, ρ_s = density of seawater
- ρ_f = density of freshwater
- g = gravitational acceleration
- z_s = depth of seawater
- z_f = depth of freshwater
- $\rho_f = 1.0, \rho_s = 1.025$ 에 대해
- $z_s = 40z_w$ (3)

이다(Freeze and Cherry, 1979; 김천수의, 1997; Bouwer, 1978). 이는 임해지역의 자유면 대수층의 경우 지하수체는 해수면 상부의 지하수 단위 1m 당 약 40배의 심도까지 분포한다는 것을 의미하며, 이 분포는 서로 다른 밀도를 갖는 유체 간에 존재하는 정수압 평형을 설명하는 것이다.

방정식 (3)에 나타난 Ghyben-Herzberg 관계식의 적용에 있어서 중요한 점은 해수-담수의 평형조건은 지하수면이 해수면보다 위에 있어야 하고, 수리경사는 바다쪽을 향하여야 형성하게 된다. 이러한 평형 상태가 붕괴되면 해수가 육지로 침투할 수 있다. 대부분의 실제 상황에서, Ghyben-Herzberg 관계식은 해수-담수 경계면에 대한 심도를 실제보다 작게 계산하고 있으나 실제로 해안선 근처에서는 지하수의 배출이 끊임없이 일어나며 단지 유체의 흐름이 없고 밀도 차만을 고려할 경우에는 어느 곳에서든지 담수가 해수 위에 떠 있는 수평의 경계면이 형성된다(김천수의, 1997). 그러나, Fig. 1에서와 같이 해수-담수 경계면을 불투수성 선으로 가정하는 것은 실제로 경계면 주위의 확산 영역에서 담수와 해수가 혼합되는 경향이 있다는 점에서 비현실적이다. 이 영역의 크기는 지질학적 구조의 확산 특성에 의해 지배되며 급격한 경계면에 대한 해석 방법은 담수의 유동 양상에 대해 만족할 만한 예측을 가능하게 하지만 확산에 의한 영향은 유동의 양상과 경계면의 위치를 변경시킬 수 있다.

고전적인 이론에 의하면 해수가 침투된 대수층에서 해수-담수간 경계면은 하나의 유선을 형성하고, 이 경계면을 횡단하는 유체의 흐름은 없는 것으로 가정한다. 그러나, Biemond(1957)와 Collins

(1971)에 따르면 경계면은 일반적으로 수 십 cm에서 수 m의 혼합 영역(mixing zone)으로 구성된다(Freeze and Cherry, 1979). Kohout(1960)는 미국 Florida 해안(Biscayne 피압 대수층)에서 해안선에 직각 방향으로 39개의 관측공을 설치하여 해수-담수 경계면을 조사하였다. 이 결과에서는 서로 다른 밀도를 갖는 담수와 해수가 만나 염소 이온 농도의 변화를 보이는 전이대(transition zone)가 형성되는 것이 증명되었다(Freeze and Cherry, 1979; 김천수 외, 1997). 즉, 실제 해수-담수 경계면 자체가 밀도차가 미미한 두 유체의 흐름을 구분하는 불투수면인지, 혹은 확산에 의한 요인으로 전이대가 형성되는 것인지에 대하여는 향후 연구의 대상이 되어야 할 것이다. 이 논문에서는 현재 세계적으로 널리 사용되고 있는 영국 AEAT 사가 개발한 CONNECTFLOW를 이용하여 대상 지역을 2차원으로 하여 지하 공동 건설과 해수 침투에 의한 영향을 해석하였다.

개념 모델의 설정

본 연구에서는 지하수 유동 특성이 잘 나타날 수 있도록 기반암, 사암, 신선한 화강암, 미세하게 균열된 화강암, 심한 풍화대, 매우 심한 풍화대의 6개 지층으로 가정하였으며, 가상의 단층대와 후광을 수직으로 두 곳에 위치시켜 복잡하게 문제를 구성하였다. 대상지역의 기반암은 매우 투수계수가 낮아 모델 바닥은 유동이 없는 것으로 가정되었으며, 서측경계는 지상에서 가장 높은 지형을 지하수 분수령으로 선택하였고, 동측 경계는 담수와 해수의 전이대를 고려하기 위하여 바다쪽으로 300m 정도 모델을 확장시켜 설정함으로써 전체적인 시스템이 고려될 수 있도록 하였다. 이상과 같은 가정에 의해 모델의 경계조건을 다음과 같이 설정하였다. 먼저, 모델의 육지쪽 최상부 지표의 경계조건은 다음의 세 가지 경우에 입각해서 설정되었다. 첫째, 일반적으로 강우량이 많은 지역에서 지하수면과 지표면이 일치한다는 점과, 둘째, 지하수면과 지표면을 동일시하는 보수적인 관점과, 셋째, 우리 나라에서는 연평균 강우량의 70%가 집중되는 여름철에 주로 지하비축기지에서 유류 유출 사고가 발생하

Table 1. Assumed permeabilites of the study site.

| Rock Types | Permeability[%] | |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Kxx | Kyy |
| More Heavily Weathered | 1.0×10^{-9} | 1.0×10^{-9} |
| More Heavily Weathered Fault | 1.0×10^{-8} | 1.0×10^{-8} |
| More Heavily Weathered Halo | 1.0×10^{-10} | 1.0×10^{-10} |
| Heavily Weathered | 1.0×10^{-10} | 1.0×10^{-10} |
| Heavily Weathered Fault | 1.0×10^{-8} | 1.0×10^{-8} |
| Heavily Weathered Halo | 1.0×10^{-11} | 1.0×10^{-11} |
| Fractured Granite | 1.0×10^{-11} | 1.0×10^{-11} |
| Fractured Granite Fault | 1.0×10^{-10} | 1.0×10^{-10} |
| Fractured Granite Halo | 1.0×10^{-12} | 1.0×10^{-12} |
| Fresh Granite | 1.0×10^{-12} | 1.0×10^{-12} |
| Fresh Granite Fault | 1.0×10^{-11} | 1.0×10^{-11} |
| Fresh Granite Halo | 1.0×10^{-12} | 1.0×10^{-12} |
| Sandstone | 1.0×10^{-9} | 1.0×10^{-9} |
| Sandstone Fault | 1.0×10^{-8} | 1.0×10^{-8} |
| Sandstone Halo | 1.0×10^{-10} | 1.0×10^{-10} |
| Bed Rock | 1.0×10^{-12} | 1.0×10^{-12} |
| Bed Rock Fault | 1.0×10^{-14} | 1.0×10^{-14} |
| Bed Rock Halo | 1.0×10^{-15} | 1.0×10^{-15} |
| Oil Storage Cavern | 1.0×10^{-8} | 1.0×10^{-8} |
| Oil Storage Cavern Fault | 1.0×10^{-8} | 1.0×10^{-8} |
| Oil Storage Cavern Halo | 1.0×10^{-8} | 1.0×10^{-8} |

는데 이때의 지하수면이 지표면과 일치한다는 사실에 입각해서, 지하수 유동 방정식을 위해 필요한 경계조건은,

$$P = \rho_f g z \quad (4)$$

임해지역의 모의 지하 비축 시설 주변에서 해수 침투에 의한 지하수 유동 특성

염분 전달 방정식을 위한 경계조건은, 이 육지쪽의 유체는 담수이므로, 염분 농도는 0으로 설정하였다.

모델의 동측인 바다쪽 경계조건은,

$$P = (\rho_f - \rho_s)gz \quad (5)$$

이 부분은 해수이므로 염분 전달 방정식을 위한 경계조건은,

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{c}{\rho_b} + \frac{(1-b)}{\rho_f} \quad (6)$$

여기서, c = the mass fraction of concentrated salt solution

ρ_b = the density of concentrated brine

ρ_f = the density of fresh water

ρ_c = the density at concentration c

본 연구에서 사용한 각 지층의 투수계수는 기존의 문헌자료를 참고하여 유동지역을 구성하고 있는 암종별 투수계수를 Table 1과 같이 가정하였다. 또한 단층의 경우에는 주변 암반보다 10배~100배 정도 투수계수가 크다고 가정하였다.

본 논문에서 사용한 CONNECTFLOW는 영국 AEA Technology에서 개발된 다공성 매질 프로그램인 NAMMU와 불연속 단열망 프로그램인 NAPSAC을 통합한 것인데, 해수-담수의 상호 반응, 포화, 불포화대에서의 지하수, 열 분포 및 오염물질 이동 등을 위한 요소법에 의해 해석하는 프로그램이다. 이 프로그램은 스웨덴 Äspö 프로젝트, 독일의 salt 프로젝트 및 영국의 Nirex 프로젝트를 통하여 검증되었으며, 지하수 유동 평가, 일반 매립지 평가, 오염 물질 이동 평가, 유전 개발 프로젝트 및 지하 공동 굴착 공사 등에 널리 사용되고 있다.

본 논문의 계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같이 정상상태 지하수 유동과 염분 전달 방정식이다.

$$K \nabla^2 h = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (7)$$

여기서, K = hydraulic conductivity[L/t]

h = pressure head[L]

S_s = specific storage[1/L]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho c) + \nabla \cdot (q \rho c) = \nabla \cdot (\phi \rho D \cdot \nabla c) \quad (8)$$

여기서, c = the mass-weighted concentration

D = the components of the dispersion tensor

본 연구에서는 대상 지역을 2차원으로 모델링하였다. 잘 알려진 바와 같이 2차원 모델링은 연구 대상 부지 내 지하수 유동을 입체적으로 평가를 할 수는 없으나, 지형도 등을 통한 최적 단면의 선정을 통하여 대상 부지 내 주요 지하수 유동 경로를 평가하는데는 적절한 것으로 알려지고 있다. 대부분의 정밀 지하수 유동 평가 연구에서는 우선 주요 2차원 단면들에서의 지하수 유동 평가 작업을 수행한 후 이를 종합하여 3차원 지하수 유동 평가를 수행하고 있다. 이 논문에서는 현재 해당 부지에 대한 정밀한 부지 조사가 아직 수행되지 않아 입력 자료가 불충분하므로 우선 지형도 등을 통하여 최적 2차원 단면을 설정하여 지하수 유동을 분석한 결과를 논의하였고 향후 연구를 통하여 입체적인 대상 부지 내 지하수 유동을 종합 평가할 예정이다.

지하 공동 건설 전의 지하수 유동

본 모델에서 평가된 지하 매질은 지하수위 하부는 포화상태로 가정하였으며 담수는 해수의 농도가 매우 급격히 변화하는 서쪽 경계에 근접한 지역과 구별된다. 이 전이대의 위치, 형태와 폭은 염분의 확산성과 육지쪽 지표 지형으로 인한 수두차에 의한 지하수압 분포에 좌우된다. 염분 전이대는 지형에 의한 요인과 해수의 증가된 밀도에 의한 수두가 정확히 균형을 이루는 지점에 위치하므로, 담수는 해수-담수 경계면 위까지 유동하다가 해안 근처에서 배출된다. 해수는 대상 모델의 서쪽 경계로부터 침투하여 염분 전이대에 도달할 때까지 유동하다가 해저를 통해 배출되기 전에 위쪽으로 이동한다. 본 모델의 기저 암반에서는 유동이 거의 없으며 지형의 고도가 높기 때문에 육지쪽에서 담수의 유동을 유도하는 충분한 압력이 작용한다. 반면 해수의 밀도에 의한 유동력은 해수와 담수 사이의 밀도 차가 매우 크지 않기 때문에 상대적으로 작다. 그러므로, 높은 투수성의 사암층에서 상대적으로 강한 지하수 유동이 해수 담수 경계면을 바다쪽으로

로 이동시킨다. 따라서 정확한 모델링을 위해서는 충분히 바다쪽으로 모델 대상 지역을 확장하는 것이 중요하다. 만약 지형적 요인으로 인한 지하수 유동 영향이 감소한다면 염분의 침투는 훨씬 광범위하게 발생할 것이다. 또한 염분의 농도는 전이대를 횡단하는 확산에 의해 염분 지역에서부터 감소하므로 만약 확산에 의한 영향이 크다면, 염분 손실률은 높아지고 전이대의 폭은 더 넓어지게 된다.

지하공동 건설 전의 염분 분포는 Fig. 2의 (a)~(b)에 나타나 있는데, 단층대의 영향을 고려하지 않았으므로 염분 분포는 거의 유사하다. 그림에서 보듯이 대상 암반 내의 지하수의 대부분은 담수이고 해수 성분은 바다 부근에서만 나타나며, 등농도선은 수리적 특성이 서로 다른 지층을 지날 때 굴절된다. 즉 투수계수가 상대적으로 높은 지층에서는 육지쪽 지형에 의해 자연적으로 형성된 압력의 영향으로 담수가 해수 경계면을 바다쪽으로 이동시키는 것을 알 수 있고 지하 깊은 곳에서는 지형에 의한 지하수 압력의 영향을 덜 받게 되므로 등농도선이 육지쪽으로 치우치는 것을 볼 수 있다. 또한 지표와 가까운 부분에서는 해수의 밀도가 담수의 밀도 보다 높아 육지쪽에서의 해수 침투가 발생하고 있다.

지하공동 상·하부의 각각 6개 지점을 출발점으로 하여 해수 침투를 고려한 경우에 대한 지하수 유동 경로에 대한 평가 결과가 Fig. 3의 (a)~(b)에 도시되어 있다. Fig. 3의 (a)-1과 (a)-2를 살펴보면, 유동경로의 출발점이 위치한 지층은 소규모 단열들이 존재하는 화강암으로, 투수계수가 $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 이고, 그 하부에 투수계수가 $1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$ 인 비교적 신선한 화강암과, 투수 계수가 비교적 높은 값인 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 를 갖는 사암층이 존재하고 있다. 이처럼 투수계수가 상대적으로 큰 균열 화강암과 사암층에서는 지하수는 수직적 방향보다는 높은 투수 계수로 인하여 수평 방향으로 이동하려는 경향이 강하기 때문에 유동 경로가 바다를 향하고 있다. 반면, 투수계수가 낮은 비교적 신선한 화강암에서는 수직 방향으로 유동 경로가 하향한다. 또한 주변 지층보다 투수계수가 10배 정도 큰 단층대 부근으로 유동 경로가 집중되며, 일부는 단층을 따라 흐르기도 한다. 모델의 기저 부분인 기반암은 투수계수가 낮아 거의 불투수층에 가깝다고 할 수 있으며, 내륙에서

시작된 유동 경로는 균열 화강암층에서 다른 유동 경로에 비해 수직 방향으로 흘러갔는데 이것은 지형에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다. Fig. 3의 (b)-1과 (b)-2는 단층과 단층 주변 파쇄대(halo)가 없는 지형에서의 지하수 유동 경로를 나타낸 것으로, 단층대가 있는 경우와 비교하면 바다 쪽에서 네 번째 유동 경로가 수평 방향으로 흐른다는 차이를 보인다. 즉, 단층대가 존재할 때에는 투수계수와 공극율이 큰 단층대를 통과해서 사암층까지 지하수 유동이 발생하였으나, 단층대가 없는 지형에서는 일부 유동경로가 수평 방향으로 형성되는 것을 볼 수 있다. 지하 60m 지점에서 시작된 유동 경로의 경우에는 비교적 신선한 화강암층을 만나면서 수직 방향으로 지하수 유동이 발생하였으나, 30m 지점에서 시작된 유동 경로는 신선한 화강암반을 약간 통과하다가 다시 투수계수가 높은 지층으로 연결된다.

지하 공동 건설 후의 지하수 유동

본 장에서는 연구대상지역에 지하 공동이 건설된 후 공동에 유류가 절반 정도 저장되어 있는 경우를 표현하기 위해 저장공동의 운영 압력을 0.5kg/cm^2 로 설정하였고, 수벽공의 주입압을 달리하여 수벽공의 효율을 평가해 보았다.

수벽공의 주입압이 0.5kg/cm^2 일 경우

해수 침투를 고려했을 때 저장공동의 운영압과 수벽공의 상대 주입압이 모두 0.5kg/cm^2 일 경우의 염분 분포는 Fig. 4의 (a)~(b)에 나타나 있다. 비축기가 건설된 후의 염분은 전체적으로 저장공동 주변에 분포한다. Fig. 4의 (a)에 나타난 바와 같이 단층대가 있는 지형에서는 단층대를 지날 때 굴곡이 생기며, 단층대가 없는 지형에서는 Fig. 4의 (b)에 나타난 바와 같이 완만한 모습을 보이고 있다.

수벽공의 주입압이 2.0kg/cm^2 일 경우

수벽공의 상대 주입압을 0.5kg/cm^2 에서 2.0kg/cm^2 로 증가시키면 0.5kg/cm^2 에서 볼 수 있었던 등농도선의 심한 굴곡을 볼 수 없지만 바다와 육지의 경계면 상에서 Fig. 5의 (a)~(b)에 나타난 바와 같이 다소 뚜렷한 동심원의 염분 분포가 형성된다.

임해지역의 모의 지하 비축 시설 주변에서 해수 침투에 의한 지하수 유동 특성

수벽공의 주입압이 3.0kg/cm²일 경우

Fig. 6의 (a)~(b)를 살펴보면 수벽공의 주입압이 0.5kg/cm²나 2.0kg/cm²때 보다 수벽공의 역할이 증가 되어 등농도선이 바다쪽으로 편재되어 나타난다. 또한 수벽공의 상대 주입압이 증가할수록 바다쪽의 등농도선 간격이 넓어지고 있는데 이는 육지에서 가해지는 지하수 유동에 의해 바다 쪽에서 침투하는 염분 농도가 감소하기 때문이다.

또한 수벽공 상대 주입압을 상기 3가지 경우로 변화시켜 가면서 지하수 유동 경로를 살펴보았을 때 단층대가 존재하는 지형과 존재하지 않는 지형에서 낮은 상대 주입압일 경우뿐만 아니라 높은 주입압에서조차도 바다쪽 상부에서 시작한 유동경로가 완전히 차단되지 못하고 시설도 유입하는 양상을 보이고 있는 바 이러한 경향은 Fig. 7의 (a)와 (b)에 나타나 있다.

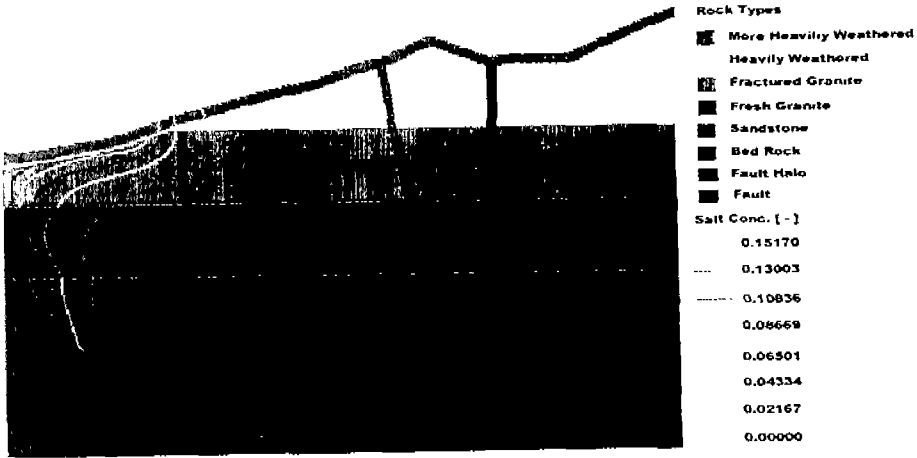


Fig. 2(a). Contours of dimensionless salt concentrations with faults and halo before excavation.

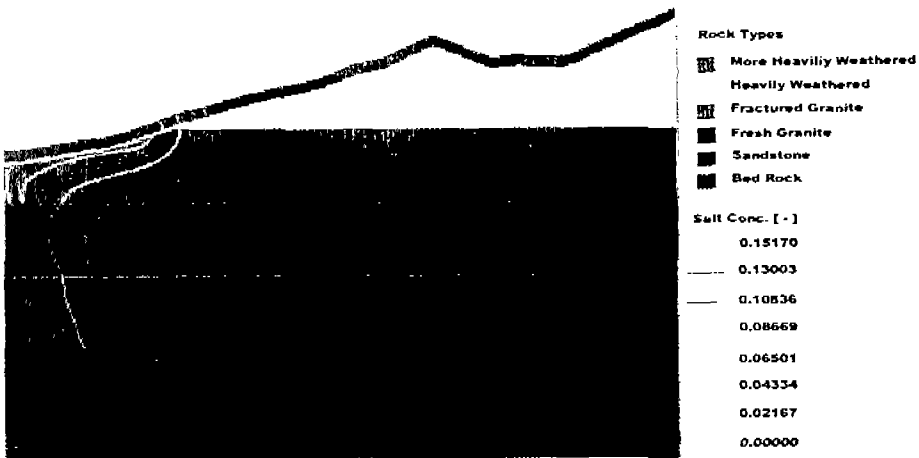


Fig. 2(b). Contours of dimensionless salt concentrations without faults before excavation.

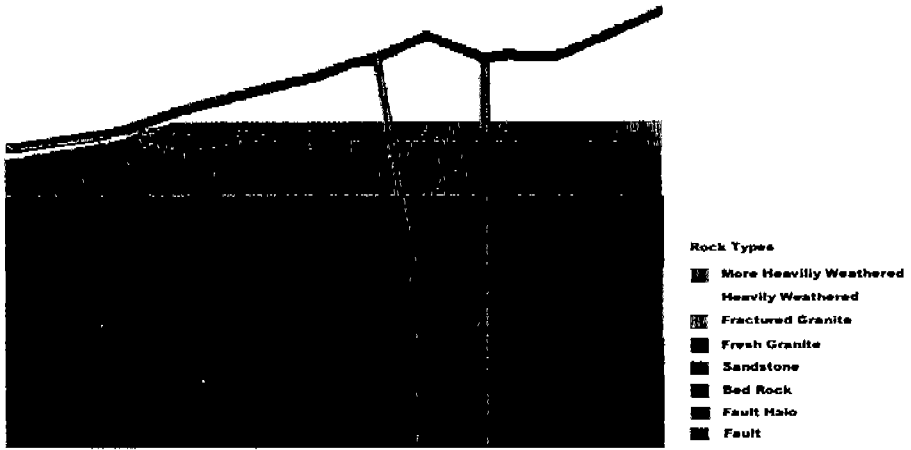


Fig. 3(a)-1. Pathlines from the position at the floor of oil storage cavern before excavation, including faults and halos.

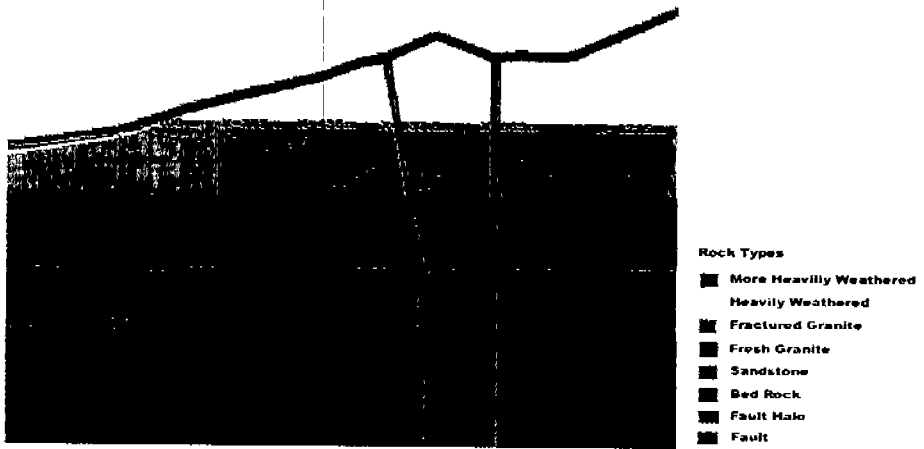


Fig. 3(a)-2. Pathlines from the position at the ceiling of the oil storage cavern before excavation, including faults and halos.

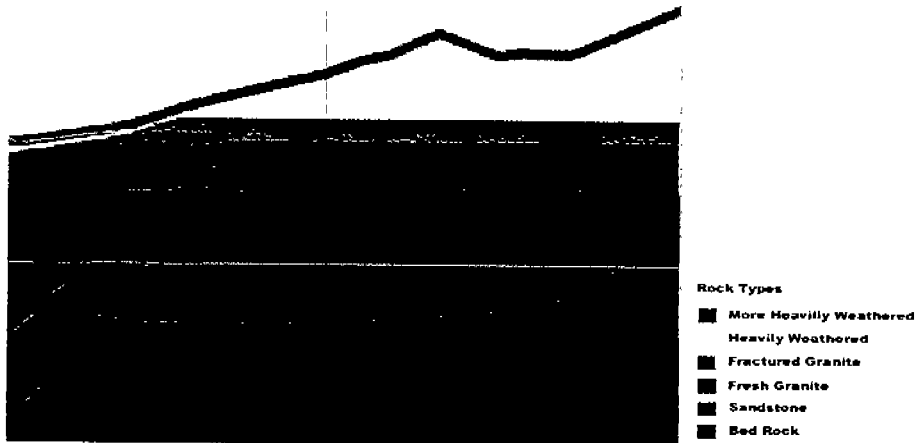


Fig. 3(b)-1. Pathlines from the floor of the oil storage cavern before excavation, excluding faults and halos.

임해지역의 모의 지하 비축 시설 주변에서 해수 침투에 의한 지하수 유동 특성

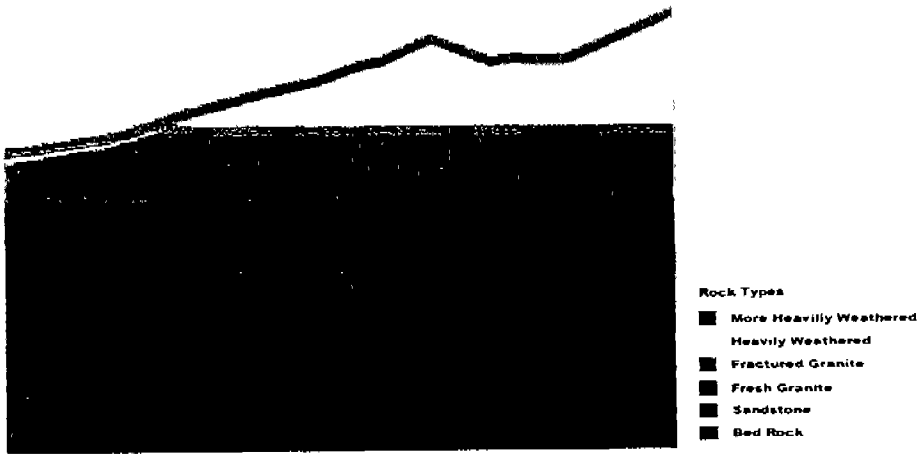


Fig. 3(b)-2. Pathlines from the ceiling of oil storage cavern before excavation, excluding faults and halos.

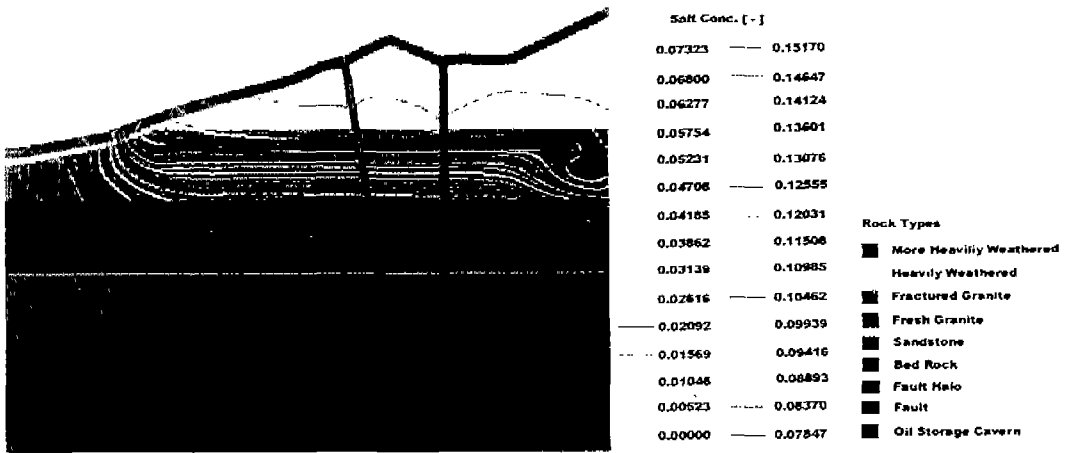


Fig. 4(a). Contours of dimensionless salt concentrations with faults ($WCH=0.5\text{kg/cm}^2$).

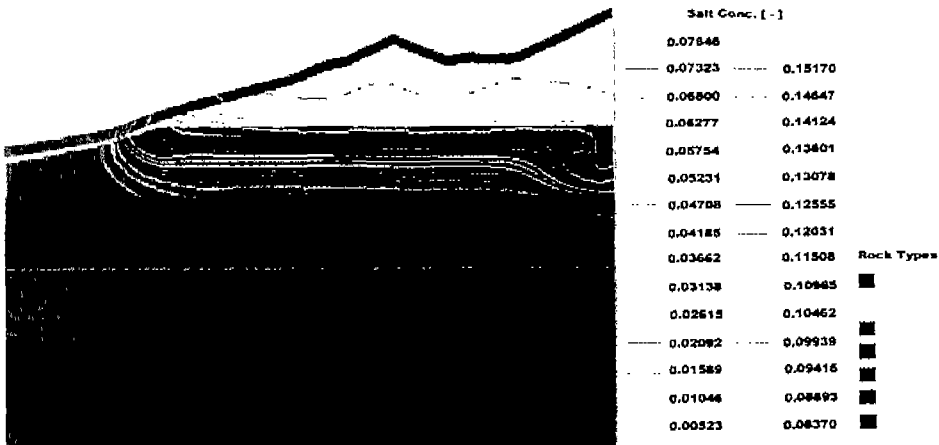


Fig. 4(b). Contours of dimensionless salt concentrations without faults ($WCH=0.5\text{kg/cm}^2$).

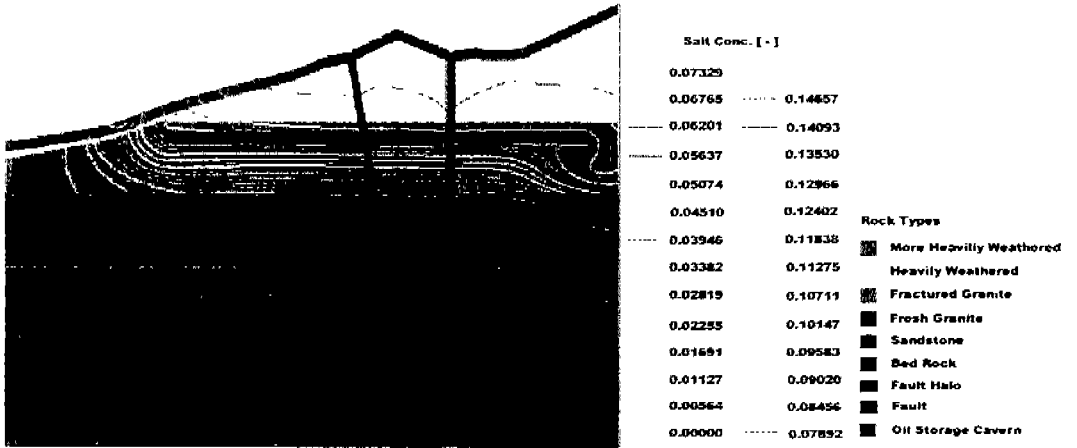


Fig. 5(a). Contours of dimensionless salt concentrations with faults ($WCH=2.0\text{kg}/\text{cm}^2$).

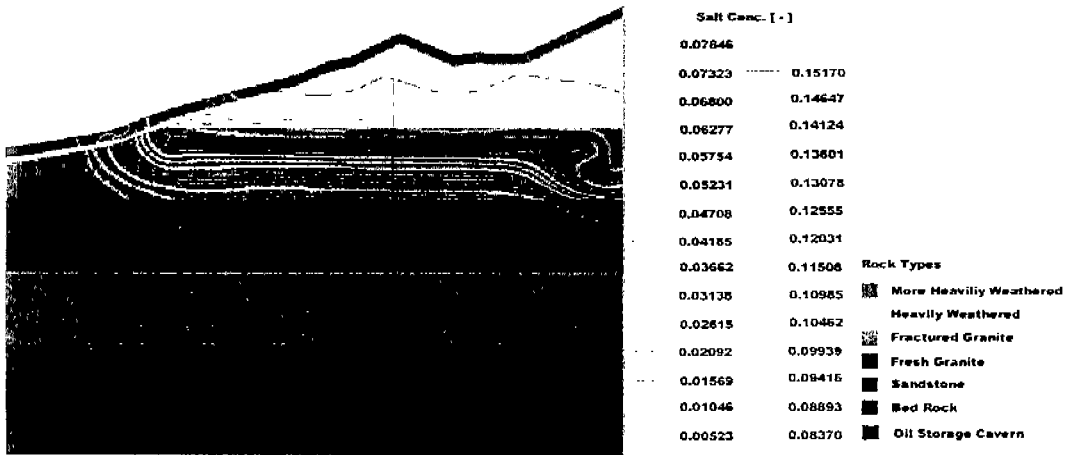


Fig. 5(b). Contours of dimensionless salt concentrations without faults ($WCH=2.0\text{kg}/\text{cm}^2$).

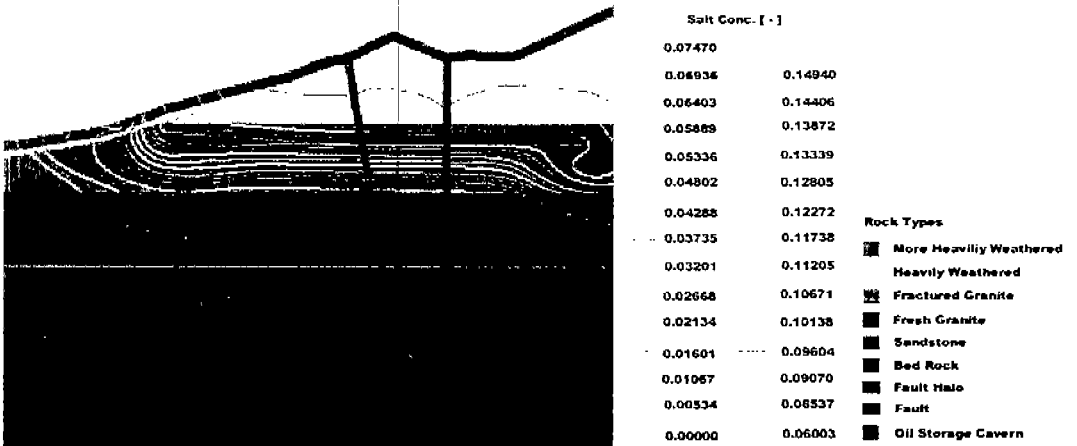


Fig. 6(a). Contours of dimensionless salt concentrations with faults ($WCH=3.0\text{kg}/\text{cm}^2$).

입해지역의 모의 지하 비축 시설 주변에서 해수 침투에 의한 지하수 유동 특성

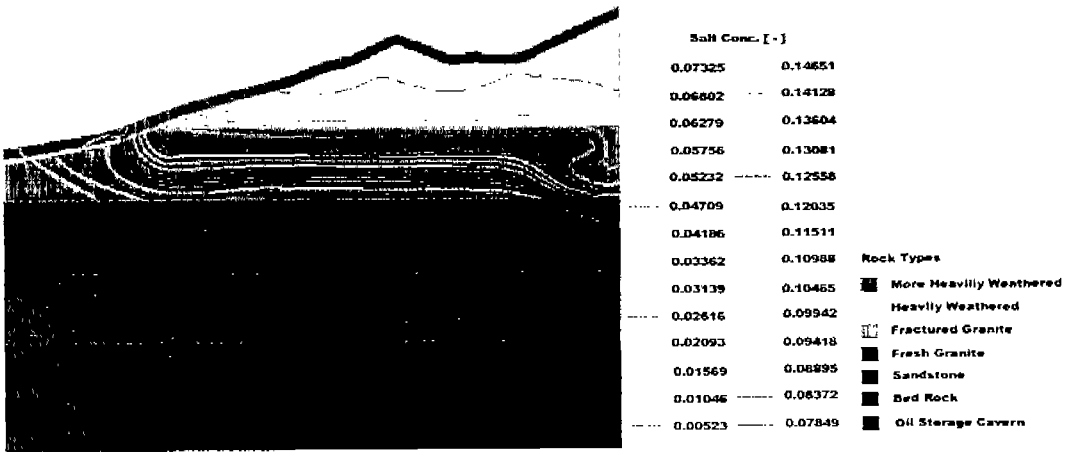


Fig. 6(b). Contours of dimensionless salt concentrations without faults (WCH=3.0kg/cm²).

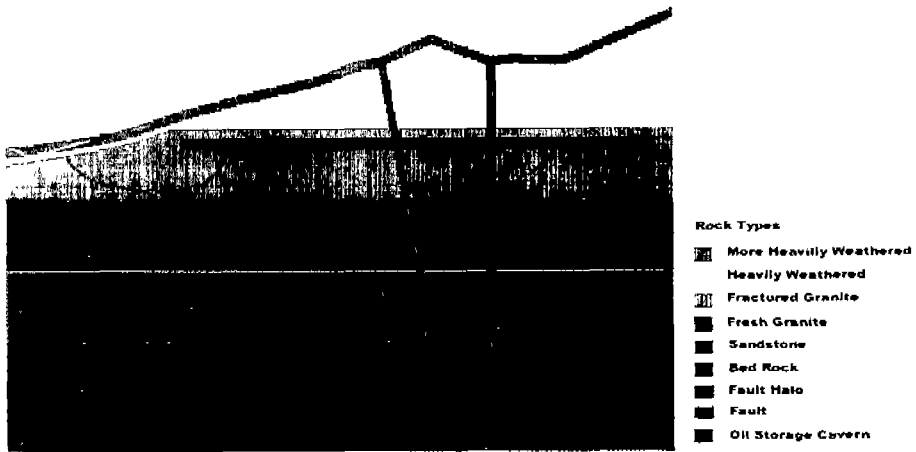


Fig. 7(a). Pathlines from the offshore with faults after excavation.

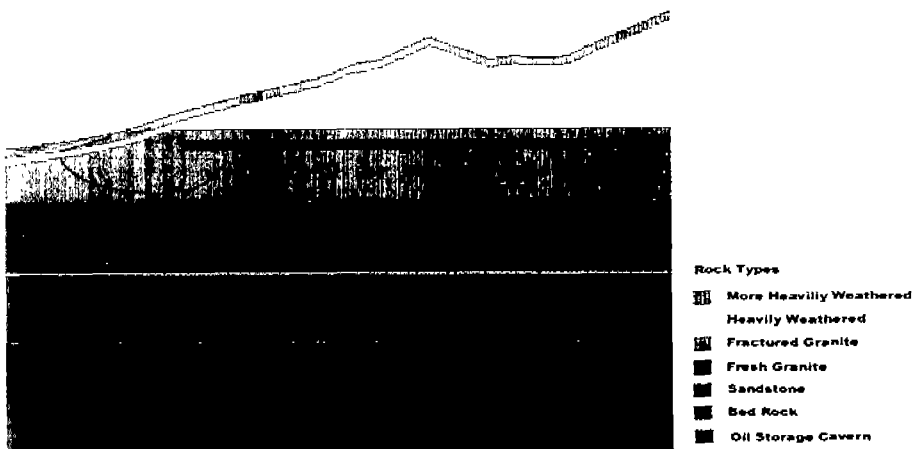


Fig. 7(b). Pathlines from the offshore without faults after excavation.

결 론

본 논문에서 살펴본 바와 같이 모델링 대상 대부분의 지역에서 지하수는 담수로 구성되어 있었으며 해수는 해수-담수 경계면 좌측에 분포하고 있다. 이와 같은 해수-담수 분포 전이대의 위치, 형태와 폭은 확산으로 이동하는 염분의 량과 지형 및 지질과 밀접한 관련이 있다. 본 모델에서 평가한 지역에서는 우측에 존재하는 높은 지형에 의한 담수의 위치 에너지로 인한 좌측으로의 지하수 유동력의 영향이 해수와 담수의 밀도 차로 인하여 발생하는 우측으로의 지하수 유동력보다 훨씬 크기 때문에 본 논문에서 도시된 바와 같이 해수-담수 경계면이 좌측으로 구부러진 형태로 발달하게 된다. 따라서 원유비축기지를 건설하기 전에는 저층부에서는 해수-담수 경계면이 바다와 인접한 곳까지 밀려서 존재하게 되며 상대적으로 지형 표고차의 영향이 적게 나타나는 심부 암반의 경우에는 해수가 육지쪽으로 많이 침투하는 양상을 보이고 있다.

비축기지가 설치된 후에는 공동 건설로 인하여 공동 주변의 지하수압이 급격히 감소함에 따라 국부적으로 연안에서만 머물던 해수가 육지쪽으로 대거 유입되게 된다. 이러한 해수 침투로 인하여 콘크리트 성분으로 구성되는 저장동굴 구조물은 부식이 빠르게 발생하게 되며 본 논문에서 나타난 바와 같이 공동 주변의 압력 강하로 인하여 공동 하부로부터 외부로의 지하수 및 유류 유출 경로가 탄생하게 되어 지하 구조물의 안정성 및 유류 유출로 인한 경제적 그리고 환경상의 여러 문제가 발생하게 될 것으로 예상된다.

따라서 적절한 위치에 수벽공을 건설하여 유류의 유출 및 해수 침투를 방지하는 일이 매우 중요하다. 본 논문에서 평가된 내용과 같이 적절한 수벽공 주입압을 가함으로써 상당량의 유출 경로가 차단됨을 알 수 있었다. 다만 완전한 유동 경로 폐쇄를 위해서는 수벽공 주입압 뿐만 아니라 저장공동의 운영압을 높게 유지해 주어야 하나 운영 비용이 높아지므로 적정 주입압을 가해 주고 가능한 차단 경로는 그라우팅으로 처리하는 방법 등으로 경제적 이면서도 효율적인 차수 대책을 세워야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 김종우, 1996. 천반 곡률반경에 따른 아치형 공동의 변형거동에 관한 연구, 한국암반공학회지, 6, 10-18.
- 김천수, 김경수, 배대석, 송승호, 1997. 임해지역 주변에서의 해수침투특성, 한국지하수환경학회지, 4, 61-72.
- 서백수, 백환조, 민경원, 암석시편의 균열조사를 위한 탄성과 주시 및 진폭변화에 관한 연구, 한국암반공학회지, 6, 239-244, 1996.
- 송명규, 주광수, 문현구, 1994. 암석절리와 균열망내에서의 채널흐름에 관한 이론적 수치해석적 연구, 한국암반학회지, 4, 1-16.
- 안형준, 이희근, 1997. 암석의 온도 의존성을 고려한 열-수리-역학적 상호 작용의 수치해석적 연구, 한국암반공학회지, 7, 13-19.
- 이경주, 이희근, 1998. 지하 유류 비축 기지 수벽공의 효율에 관한 현장 계측 및 수치 해석 연구, 한국암반공학회지, 8, 79-86.
- 이희석, 김명환, 이희근, 1998. 암반내 축열시스템의 열-수리-역학적 상호 작용에 대한 수치 해석적 연구, 한국암반공학회지, 8, 17-25.
- 장현익, 장근무, 이정인, 1996. 통계적 접근법에 의한 불연속암반의 지하수 유동해석, 한국암반공학회지, 6, 30-38.
- Ghyben, W. B., 1888. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam, Tijdschrift van het Koninklijk Inst. van Ing.
- Herzberg, A., 1901. Die Wasserversorgung einiger Nordseebader, J. Gasbeleucht. Wasserversorg., 44, 815-819.
- Bouwer, H., 1978. Groundwater Hydrology, McGraw-Hill, Inc., 604p.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979. Groundwater, Prentice-Hall Inc., 480p.

황용수

한국원자력연구소 심지층처분시스템개발분야
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150
Tel : (042) 868-2034

임해지역의 모의 지하 비축 시설 주변에서 해수 침투에 의한 지하수 유동 특성

Fax : (042) 868-2034

E-mail : ucne28@nanum.kaeri.re.kr

배현숙, 서동일

충남대학교 환경공학과

대전광역시 유성구 궁동 220

Tel : (042) 822-6998

Fax : (042) 822-5610

E-mail : siana@netian.com(배현숙)

seodi@hanbat.chungnam.ac.kr(서동일)

김경수, 김천수

한국원자력연구소 심부지질환경특성연구분야
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

Tel : (042) 868-2030

Fax : (042) 868-2063

E-mail : nkskim1@nanum.kaeri.re.kr(김경수)

ncskim1@nanum.kaeri.re.kr(김천수)