

임해지역 주변에서의 해수침투특성

Hydrogeological Characteristics of Seawater Intrusion in the Coastal Area

김천수(Chun - Soo Kim)* · 김경수(Kyung - Su Kim)* · 배대석(Dae - Seok Bae)* · 송승호(Seung - Ho Song)**

요 약 : 임해지역에서의 지하수 이용 및 지하공동 건설시 육지부 대수층으로의 해수침투가 문제될 수 있으며, 지하수질의 저하 또는 지하공동내의 시설부식을 초래할 수 있다. 본 연구는 임해지역의 지하공동시설 주변 지표수와 지하공동내 유입수에 대한 수질 분석과 환경동위원소 분석, 그리고 지하공동과 해안사이에 위치하는 수직수벽공에서의 심도별 수리특성조사와 수리간섭시험 등을 통하여 해수침투 현상을 규명하고, 이를 수리지질학적 관점에서 해석하였다. 육지부가 자유면대수층 조건일 때 이론적인 담수-해수체 경계면과 연구지역에서 확인된 해수침투경로와는 상당한 차이가 있었다. 지하공동으로 침투하는 해수의 주 경로는 해수체와 연결되는 sub-horizontal 단열대인 것으로 해석되었다. 임해지역에서 준평형 상태의 지하수 체계에 변화를 초래하는 인위적 행위로 인하여 담수-해수체 경계면에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 해수체와 연결되는 투수성 단열대의 분포특성이다.

Abstracts : With increasing activities for groundwater withdrawal and for the construction of underground cavern in the coastal areas, the seaward flow of groundwater has been disturbed or even reversed, resulting in seawater intrusion in aquifers. This phenomenon would be attributed to the freshwater contamination and the corrosion of steel materials. The hydrogeological and geochemical investigations have performed to characterize the seawater intrusion into the underground caverns located in the coastal area. Assuming the inland aquifer as unconfined one, we have found out that the theoretical interface of freshwater-seawater is far different from the pathways identified. In the study site, the main pathways of seawater intrusion into the underground cavern are characterized as the sub-horizontal fractures (zones). The seawater intrusion in granitic terrane would depend mainly on the characteristics of conductive fracture system developed along the coastal area.

서 론

임해지역에서 광역적인 지하수의 흐름은 수리경사를 따라 해수영역으로 배출된다. 그러나, 해안 인접지역에서 지하수를 취수하거나 공동을 굴착하게 되면 수리경사가 역전되는 조건이 형성되어 지하수의 배출량이 감소되고, 동시에 해수가 내륙부의 대수층으로 침투하게 된다. 담수와 해수체간의 평형적인 경계면에 변화를 초래하는 이러한 인위적 행위가 있는 한 해수침투 문제는 당연한 개연성이 있으면서도 심도있게 다루어지지 않고 있다.

임해지역에서의 해수침투가 현안문제로 대두되는 분야는 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 지하수를 이용하는 음용수, 생활용수 및 농업용수의 수질저하에 따른 문제, 둘째는 지하수의 흐름에 민감한 지하공동시설(방사성폐기물처분시설, 원유/가스 비축시설 등)에서의 지하수유동체계의 변화와 시설의 부식문제로 집약될 수 있다. 유류비축시설을 지하암반에 설치하는 장점으로는 천연적인 기밀성이 뛰어나고, 역학적으로 안정하며, 항온의 특성을 가지고 있고, 보안성 및 경제성이 우수하다는 점 등으로 정리할 수 있다. 그리고, 지하비축시설의 부지위치 역시 수송조건이 관건이므로 주로 임해지역에 위치하고 있다.

본 연구는 후자의 문제에 관한 것으로서, 임해지역에서의 해수침투에 대한 이론과 사례들을 살펴보고, 지하공동시설 주변에서의 수리특성조건을 분석하여 해수침투의 수리지질학적 현상을 파악코자 하였다.

임해지역의 지하수분포 사례

국내의 경우 학술적으로 조사된 사례는 제주도지역에 국한되어 있다. 제주도지역의 지하수자원은 크게 용천수와 관정으로 개발되고 있다. 용천수의 경우 동부지역의 수비전도도(electrical conductivity)는 195~4,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 북부지역의 것은 75~1,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로서 기타 지역의 70~550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 과 구별된다.

*한국원자력연구소(Geoenvironmental Sciences, Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Dukjin-dong, Yuseong-gu, Taejon 305-353, Korea)

**한국석유개발공사(Korea Petroleum Development Corporation, 1588-14 Kwanyang-dong, Dongan-gu, Anyang, Kyunggi-do 440-060, Korea)

이는 특히, 동부지역의 경우 지하수에 용해되어 있는 염소이온 농도와 관련된다(김천수, 1992).

제주도 지하수의 부존특성은 최근 제주도 수자원종합개발계획 수립을 위한 지하수기초조사시에 심도있게 다루어졌다(한국수자원공사, 1993). 제주도 지하수는 상위지하수, 기저지하수와 준기저지하수로 구분하고 있으며, 이 중 해수와 접하고 있는 지하수는 기저지하수로 대수층의 지하수가 해수와의 비중차이로 해수체 상부에 부존하는 담수체를 말한다. 기저지하수의 분포가 가장 넓은 지역은 조천수역에서 남원수역까지 포함하는 동부 해안지역으로 내륙 7 km까지 분포된 것으로 보고되고 있다. 기저지하수의 수리학적 특성은 Ghyben-Herzberg 원리로 해석하고 있으며, 해수와 지하수의 경계면 특성을 다음과 같이 요약하였다.

(1) 해수와 지하수의 경계면은 염수가 혼합된 점이대(transition zone)가 형성되며 담수체 하부에는 좁게 분포되고 해안 가까울수록 넓게 분포한다. 이러한 현상을 동부지역 구좌 및 성산의 해안 용천수가 높은 염소이온농도를 나타내는 요인으로 해석하였다.

(2) 해안가에 형성되는 지하수 배출지역(seepage face)의 크기는 매질의 투수성과 충전/배출량에 따라 좌우된다. 배출량이 적은 지역에서는 지하수가 해안가에서 용출되며, 많은 지역에서는 해안에서 멀리까지 지하수가 용출된다.

(3) 기저지하수에서 양수가 이루어질 때 지하수위 강하에 따른 수리학적 변화는 지하수 lens의 수축으로 나타나며, 새로운 평형상태를 이루는데는 상당한 기간이 소요된다.

임해지역에서의 지하수분포에 가장 크게 영향을 주는 또다른 요인은 암맥, 단열대, 피압층 등 지질구조적 특성이다. 하와이섬의 경우에 의하면, 피압층이 없는 lava 대수층의 경우 일반적으로 지하수체는 얇으며, 해안가에서 지하수면의 높이가 1 m이고 내륙쪽으로는 3~4 m일 때 담수체의 두께는 150 m를 넘지 못하는 것으로 알려져 있다. 해안가에 lava층의 지하수가 바다로 유출되는 것을 억제할 수 있는 피압층이 있을 경우에는 지하수면이 3~12 m까지 상승하고, 지하수체는 거의 550 m 두께에 달하는 것으로 알려졌다(Back et al., 1988).

지하공동내 해수침투사례

임해지역에 입지하는 대규모 지하공동시설로는 시설의 요건상 방사성폐기물처분시설과 원유비축시설이 있다. 방사성폐기물처분시설은 폐기물 중의 핵종이 자연상태의 background 수준으로 붕괴하여 인간생활권에 무해한 정도까지 소요되는 시간을 시설의 lifetime으로 설정하는데, 중·저준위폐기물의 경우에는 약 100~300년, 고준위폐기물의 경우에는 수 천년~수 만년에 이른다. 처분되는 중·저준위폐기물은 콘크리트 고화체, 고준위폐기물은 유리질 고화체의 형태로 각각 부식성과 내구성, 건전성이 뛰어난 재료의 용기에 담겨져 처분된다. 처분시설 부지의 위치는 수송의 용이성을 고려하여 주로 임해지역에 위치한다. 세계에서 유일하게 중·저준위폐기물을 동굴처분하고 있는 스웨덴의 Forsmark 처분공동은 수심이 5 m인 해저 암반(EL.-60 m)에 위치하고 있어서 공동내부로 해수가 침투하고 있다. 방사성폐기물처분장에서 해수침투문제는 지역고유의 해

수특성에 대하여 부식에 강한 처분용기의 재질선정에 비중을 두고 있다.

석유자원이 없는 우리나라는 일정량의 원유, 경유, LPG 등을 비축하여 국내 에너지소요량을 안정적으로 공급한다는 정책을 시행하고 있다. 우리나라의 비축시설은 1978년을 시초로 민·관·용 등 다수의 시설이 운영 중에 있으며, 현재 추가시설 등이 공사 중에 있고, 향후 지하비축시설의 증설이 계획되어 있다.

지하비축시설은 저장공동을 지하의 일정한 심도에 설치하여 공동주변에 작용하는 지하수의 정수압(hydrostatic pressure)을 공동내의 압력보다 항상 높게 유지시킴으로써 공동에 저장되어 있는 원유의 가스나 LPG가 누출되는 것을 방지하는 원리를 이용하는 것이다. 지하수압을 유지시키는 방법으로는 자연 지하수압에 부가하여 인위적으로 수벽공(watercurtain hole)을 설치하여 일정한 수압을 유지시켜주므로써 시설의 안전성을 완벽하게 확보하는 방법을 취하고 있다.

지하비축시설의 전체적인 layout은 부지지형, 지질구조와 응력분포, 지하수위분포와 자연적인 충전 배출특성 및 해수의 영향권 등을 고려하여 결정하게 된다. 공동내부로 해수가 침투되면 공동으로의 유입수는 지하수, 수벽공 주입수와 해수가 혼합되어 염소이온농도가 증가되므로 공동내에 설치되는 유류의 입출하 관련 시설이 부식될 가능성이 있다. 설계 당시에는 해수침투에 의한 영향을 충분히 고려하여 공동의 layout을 결정하고 시설의 안전성을 극대화시키기 위하여 보수적인 방법으로서 해안선과 공동 간에 수직수벽공을 설치하고 있다. 이 수직수벽공의 역할은 원위치에서 해수영역보다 더 높은 수두를 유지시킴으로써 해수의 침투를 억제 또는 염소이온농도를 희석시키는 데에 있다. 일반적으로 탄소강은 내부식성이 약하고, 스텐강과 티탄강 등은 상대적으로 강한 금속으로 분류된다. 이들 금속에 형성된 산화방지용 부동화막의 안정성에 영향을 미치는 주요 인자는 온도, 수소이온농도, 염소이온농도 등이다. 특히 해수체에 접하는 환경에서는 해수 중의 NaCl농도가 3%일 때 부식속도가 최대인 것으로 알려져 있다(Uhlig, 1985).

국내의 경우, 지하공동의 건설과정에서 해수침투현상이 인지되어 후속조치가 이루어졌었다. 이들 공동은 대부분 EL.-30~60 m에 위치하는데, 해안에 인접하는 공동 근처에서 해수가 침투되었다(한국원자력연구소, 1996a, 1996b). 한편, 임해 LPG 시설의 경우 부탄공동은 EL.-60 m, 프로판공동은 EL.-120 m에 각각 위치하는데, 부탄공동에서만 해수가 침투되고 있는 것으로 알려져(이은용, 1996), 임해지역에서의 전통적인 담수-해수체 경계면이론에 배치되고 있다.

담수-해수체의 경계면 이론

일반적으로 암반내 기저지하수는 Ghyben-Herzberg 원리에 의하여 렌즈상의 담수체로 고려된다. Baydon-Ghyben과 Herzberg는 약 100년 전에 자유면대수층의 경우 임해지역에서의 지하수체는 해수면 상부의 단위지하수위 당 약 40배의 심도까지 분포한다는 것을 발견했다(Hubbert, 1940). 즉, 이 분포는 서로 다른 밀도를 갖는 유체간에 존재하는 정수압 평형을 설명하는 것이다.

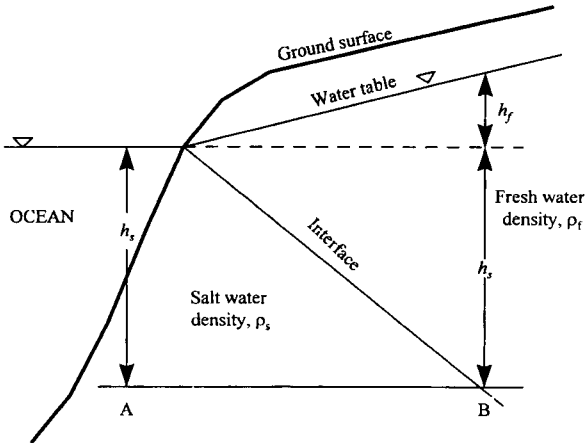


Figure 1. Idealized sketch of fresh- and salt-water distribution in an unconfined coastal aquifer to illustrate the Ghyben-Herzberg relation (after Todd, 1959).

$$h_s = 40h_f \quad (1)$$

이때, h_s 는 해수층의 심도이고, h_f 가 담수체의 수두이다 (Figure 1). Ghyben-Herzberg관계식의 적용에 있어서 중요한 점은 담수-해수체의 평형조건은 지하수면이 해수면보다 위에 있어야 하고, 수리경사는 바다쪽을 향하여야 한다는 것이다. 이러한 평형이 깨지면 해수가 육지부로 침투할 수 있는 조건이 형성되는 것이다.

초기 연구이래로 이 관계식에 대한 한계가 지적되었다 (Hubbert, 1940). 해수침투는 대수층의 규모와 지하수면의 표고에 좌우되며, 해안선 근처에서는 이 관계식은 담수체의 배출을 위한 seepage face를 형성하기 위하여 나누어져야만 한다. 정수두압 평형이라는 것은 no flow를 의미하지만, 해안선 근처에서는 지하수의 배출이 끊임없이 일어난다. 단지 유체의 흐름이 없고 밀도차만을 고려할 경우에는 어느 곳에서든지 담수체가 해수체 위에 떠 있는 수평의 경계면이 형성된다. 그러나 실제의 상황은 Figure 2와 같은 유선망과 등수두선을 갖는다. 등수두선을 따르는 전체 압력이 일정하고, 유선이 상향의 경사를 갖기 때문에 Ghyben-Herzberg관계식에서 주어지는 경계면까지의 심도는 실제의 심도보다 더 적어지게 된다. 수리경사가 작을수록 이 차이는 적어지게 되며, 수리경사가 커질수록 이 차이는 더욱 커지게 된다.

이러한 담수체의 배출에 따른 해안가에서의 경계면 해석을 위하여 Glover(1964)는 경계면의 x 좌표(해안선을 원점으로 내륙쪽에서의 거리)와 z 좌표(EL.0 m로부터 심도)가 다음 식으로 주어지는 단순 모델을 개발하였다.

$$z = \frac{Gq'}{K} + \sqrt{\frac{2Gq'x}{K}} \quad (2)$$

이때, $G = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w}$
 ρ_w = density of fresh water
 ρ_s = density of salt water

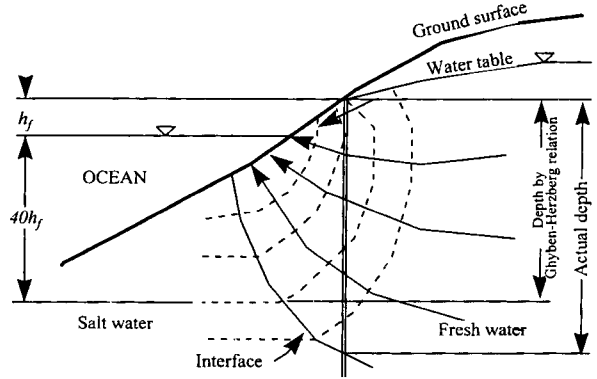


Figure 2. Discrepancy between actual depth to salt water and depth calculated by the Ghyben-Herzberg relation (after Hubbert, 1940).

q' = discharge from the aquifer at the coastline, per unit width((L³/T)/L)

K = hydraulic conductivity(L/T)

담수-해수체 경계면의 형상에 관한 견해를 살펴보면, Cooper(1959)는 해안가 자유면대수층에서는 해수대와 담수대 양자에서 모두 유체의 흐름이 일어나는데, 담수는 해안에 배출되기 위하여 상향으로 흐르게 되고, 경계면 근처에서의 해수체내에는 순환유동이 일어난다고 하였다. 이론적으로 해수가 침투된 대수층에서 담수-해수체간 경계면은 하나의 유선을 형성하고, 이 경계면을 가로지르는 유체의 흐름은 없는 것으로 가정하고 있다. 그러나, 일부 조사결과(Bimond, 1957; Collins, 1971)에 따르면 경계면은 일반적으로 수 십 cm에서 수 m의 좁은 mixing zone으로 구성되어 있는 것으로 보고되어 있다. Kohout(1960)는 미국 Florida 해안에서 해안선에 직각방향으로 39개의 관측공을 설치하여 담수-해수체 경계면을 조사하였다. 이 결과에서는 서로 다른 밀도를 갖는 담수와 해수가 만나 염소이온농도의 변화를 보이는 전이대(transition zone)가 형성되는 것이 증명되었다. 즉, 실제 담수-해수체 경계면 자체가 밀도차가 미미한 두 유체의 흐름을 경계짓는 no flow boundary인지, 확산에 의한 전이대가 형성되는 것인지에 대하여는 향후 연구의 대상이 되어야 할 것이다. 한편, 육지부 기저지하수체의 규모는 충전율, 대수층의 수리전도도 및 피압층의 유무와 관련되며, 담수체의 수축과 조석효과에 따라 경계면에 변화가 일어난다는 견해도 있다(Fetter, 1988). 담수-해수간 경계면문제는 확산 및 용질이 동이론을 이용하여 수학적으로 연구되기도 하였다(Bredehoeft & Pinder, 1973; Segol et al., 1975).

지하비축시설주변 해안가 수리특성

시설개요

입해에 위치하는 여수, 거제지역의 조사대상 비축시설의 공동은 EL.-30 m부터 -60 m심도에 위치하며, 공동의 단면적은 H30 m×W18 m이다. 공동 간의 pillar폭은 최소 60 m를 유지하고 있다. 수평수벽공은 공동상부 각각 EL.0 m와 EL.-10 m

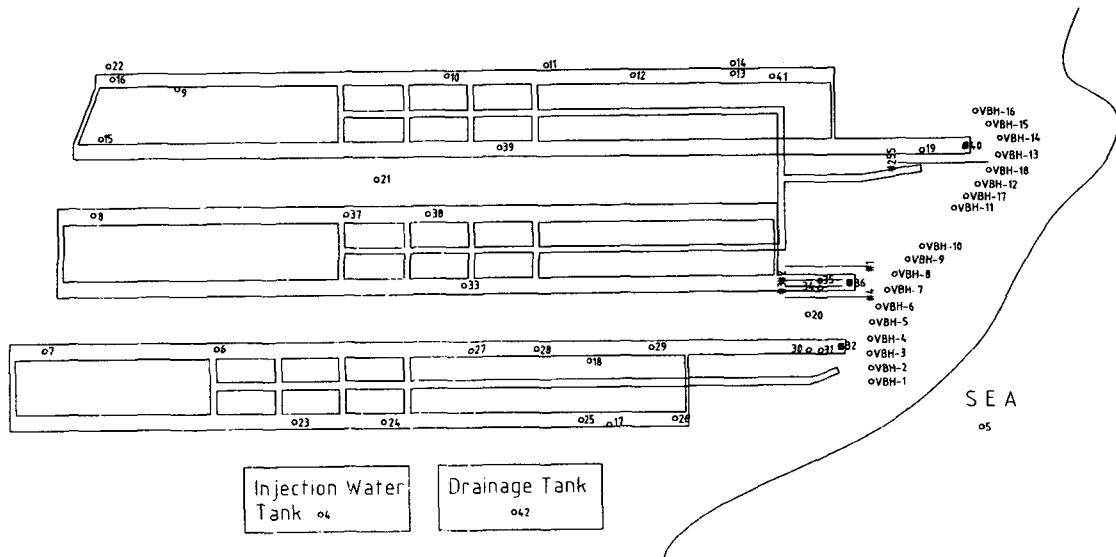


Figure 3. Layout and sampling points at Yeosu site. Samples from 6 to 22 are collected from the HWB (Horizontal Watercurtain Boreholes) and symbol(#) represents the number of HWB. The VBH means the vertical watercurtain boreholes.

에 저장공동과 평행하게 굴착길이 약 80~120 m의 직경 76 mm~150 mm공이 설치되어 있다. 수평수벽공의 주수압력은 약 2 kg/cm²로 유지되고 있다. 해수침투 방지 목적의 지상 수직수벽공은 여수지역에 총 18개, 거제지역에는 총 15개가 설치되었다. 여수지역의 수직수벽공은 지표로부터 EL.-60 m까지, 거제지역은 EL.-40 m까지 굴착되었다. 설치위치는 공동으로부터 약 20 m, 해안선으로부터는 50 m~100 m정도 이격되어 있다(Figure 3, Figure 4: 시설보안 상 도면의 척도 및 방위는 생략하였음).

지질 및 수리지질특성

자연상태에서 지하수는 충전과 배출의 평형을 유지하려는 방향으로 계속적인 변화가 일어나며, 이 변화의 주된 원인은 수리학적 수두차에 의하여 생성되는 유동력이다. 수리학적 변화는 지하지질의 수리학적 인자와 경계조건에 좌우된다. 여수지역과 거제지역의 공동이 위치하는 모양은 각각 백악기말 유천층군에

해당되는 화산암을 관입한 미분상화강암과 화강섬록암으로 구성되어 있다. 따라서, 2개 조사지역의 위치는 다르나 수리지질학적으로 같은 매질로 고려할 수 있다.

자연지하수위 분포는 일반적으로 지형의 굴곡과 유사한 형상으로 분포하지만 해안가 부근에서는 지형에 비하여 현저히 낮은 수위를 유지하고 있다. 이는 해안가에 분포하는 암반의 투수성이 높아 지하수 배출이 많기 때문인 것으로 판단된다.

조사지역의 지하수 주 유동로는 지하공동 건설시에 확인된 단열대 분포특성과 관계된다. 두 지역에 발달된 단열대는 NE와 NW방향의 2개 조로 구분되며, 격자상을 이루고 있는 것이 특징이다. 여수지역의 주 단열대는 N60~70° E방향이며 N30° W방향의 단열대가 교차하고 있다. 각 단열대의 간격은 60~250 m의 범위를 갖고 있으며, 이 지역의 주 지하수유동로는 수리경사 방향과 일치하는 N30° W 단열대로 사료된다. 거제지역은 주 유동로가 N40~60° W 단열대로 형성되어 있으며, 이를 교차하는 N10~30° E 단열대가 분포되어 있다. 단열대 간격은 NE계열이 100~300 m, NW계열이 150~250 m를 이루고 있다.

수문화학특성

공동내부로 유입되는 물은 강수로부터 충전된 지하수, 수벽공 주입수, 그리고 해수가 일부 혼합된 특성을 갖고 있다. 대상지역 주변의 수질특성분석을 위하여 해안에 인접한 공동 내부의 다량 누수지점에서 시료를 채취하였으며, 비교 분석을 위하여 유입수, 지표수, 주입수 및 해수시료를 채취하였다. 한편 순수한 부지고유 지하수특성 규명을 위한 대표시료는 지하수압이 수평수벽공 주입압(2 kg/cm²)보다 높은 지점에서 채취하였다. 시료채취는 여수지역에서 2회, 거제지역에서 1회 행하였다. 지표수, 지하수 및 해수 각각의 물시료에 대하여는 이화학분석을 위한 전처리를 하였다. HCO₃⁻는 0.02 N 질산을 사용한 적정법으로서 측정하였으며, pH, Eh, 수비전도도, 온도에 대하여

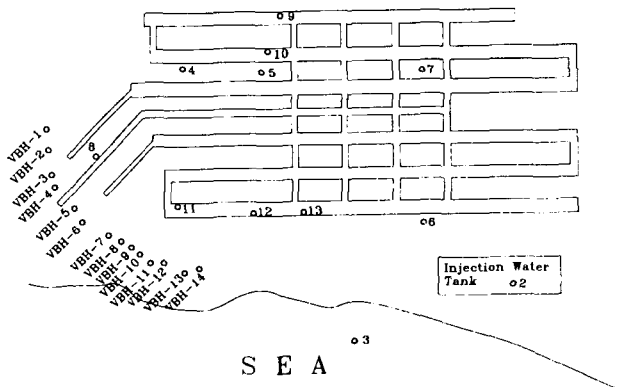


Figure 4. Layout and sampling points at Geoje site. Sample from 4 to 7 are collected from the HWB. The VBH means the vertical watercurtain boreholes.

는 Portable Ion Meter(ORION Model 290A, Orion Research Inc.)를 이용하여 측정하였다.

여수지역의 화학성분 분석결과, 지표수와 주입수는 Ca-HCO₃형이고, 지하수는 Ca-HCO₃형이 우세하고 일부 Na-HCO₃형으로 전이되며, 전형적인 해수는 Na-SO₄-Cl형이다. 공동에 유입되는 물은 Ca-HCO₃형과 Ca-HCO₃형에서 Na-HCO₃형으로 진화된 물과 그 후 해수침투에 의해 혼합된 Na-SO₄-Cl형 등으로 나타났다(Table 1; Figure 5).

이 결과로부터 지하수 및 주입수가 해수와의 혼합비율이 클수록 Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻농도가 지하수 혹은 주입수에 비해 현저하게 증가되는 것을 알 수 있다. 분석결과, 해수가 공동 주변의 지하수와 수벽공 주입수와 혼합되어 공동내부로 유입되고 있는 지점은 5개 지점(시료번호 27, 31, 35, 39, 41)으로 확인되었다. 시료채취지점 27번과 39번은 초기('96. 5. 22)의 분석수치로서 그 이후에는 해수침투의 현상이 나타나지 않았다. 이 지점은 해안선으로부터 충분히 이격되어 있기 때문에 과거에 trap되었던 해수성분이 탈수되는 과정에서 유입된 것으로 보여진다. 시료채취지점 41번은 해당 지점의 공동바닥에서 채취한 것으로서 공동유입수에 해수성분이 혼합된 결과이다.

거제지역의 지하수, 지표수, 주입수는 공히 Ca-HCO₃형에 가깝다(Table 2; Figure 6). 공동으로 해수가 침투하는 흔적은 1개 지점에서 확인되는데, 시료채취지점 11번은 해수의 성분과 유사하다. 시료번호 10번은 Ca-SO₄형으로서 그라우팅재의 성분

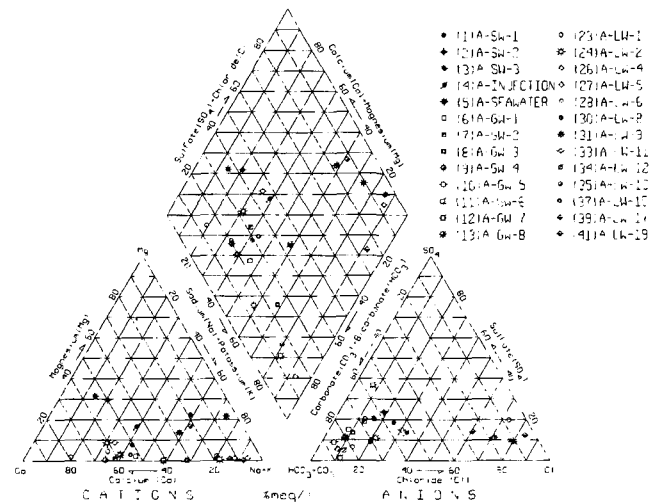


Figure 5. Piper diagram of the major ion composition (milliequivalents) of water from Yeosu site.

이 용해된 것으로 보여진다.

동위원소 특성

강수 중에 포함되어 있는 환경동위원소(environmental isotopes)에는 ²H, ¹³C, ¹⁸O, ³⁴S, ¹⁵N 등의 안정동위원소와 ³H 및 ¹⁴C 등의 방사성동위원소들로 구성되어 있다. 특히, ²H와 ¹⁸O 등은 지하수 중에 용존되어 있는 다른 화학성분과의 반응이 일

Table 1. Chemical compositions of water in Yeosu site (May 22 & July 4) (단위 : µg/ml)

Location*	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO ₃	NO ₃	SO ₄ ²⁻
(1) A-SW-1	6.0	3.2	2.2	1.6	4.7	18.0	ND	4.7
(2) A-SW-2	4.0	1.2	10.0	3.6	6.0	32.0	ND	10.3
(3) A-SW-3	3.0	0	10.0	3.5	4.7	32.0	ND	8.0
(4) A-INJECTION	6.8	2.6	8.2	1.9	11.6	32.0	ND	6.5
(5) A-SEA WATER	8,200	500.0	435.0	1,319	13,857	3,200	ND	2,150
(6) A-GW-1	22.0	0.6	22.0	0.59	6.1	98.0	ND	15.1
(7) A-GW-2	12.0	0.1	17.0	0.16	6.1	56.0	ND	12.3
(8) A-GW-3	21.0	0.9	8.6	0.08	5.5	67.0	ND	9.4
(9) A-GW-4	13.0	0.3	22.0	0.1	4.9	78.0	3.4	8.7
(10) A-GW-5	21.0	0.4	13.0	0.08	2.7	78.0	ND	6.4
(11) A-GW-6	21.0	0.2	13.0	0.07	4.1	54.0	ND	28.0
(12) A-GW-7	27.0	0.5	5.1	0.1	6.0	78.0	0.4	0.8
(13) A-GW-8	13.0	1.6	18.0	0.54	4.6	73.0	9.4	7.8
(23) A-LW-1	12.0	1.4	21.0	0.94	8.0	78.0	2.4	5.0
(25) A-LW-3	8.1	1.3	15.0	1.3	10.0	54.0	2.2	6.9
(26) A-LW-4	72.0	4.0	4.1	0.47	10.0	176.0	10.6	8.7
(27) A-LW-5	190.0	31.0	23.0	1.4	260	45.0	47.1	95.9
(28) A-LW-6	18.0	4.2	74.0	1.1	14.0	240.0	2.8	11.6
(30) A-LW-8	12.0	0.5	13.0	1.2	9.0	54.0	5.4	5.4
(31) A-LW-9	2,132	17.0	890.0	271.0	3,949	1,700	4.6	849.0
(33) A-LW-11	8.0	1.4	13.0	1.2	11.0	34.0	2.4	7.4
(34) A-LW-12	64.0	3.2	13.0	1.0	14.0	175.0	5.8	7.9
(35) A-LW-13	3,850	99.9	1,200	575.0	7,551	1,980	ND	1,283
(37) A-LW-15	13.0	3.1	16.0	0.53	6.0	56.0	3.5	13.4
(39) A-LW-17	200.0	50.0	17.0	0.43	209.0	150.0	74.4	66.2
(41) A-LW-19	200.0	40.0	30.0	1.2	314.0	28.0	42.2	62.8

(1) * SW: Surface water, GW: Groundwater, LW: Leakage water into cavern, (2) ND < 0.1 µg/ml

Table 2. Chemical compositions of water in Geoje site

(단위 : µg/ml)

Location*	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
(1) B-SW-1	9.3	2.0	5.6	2.6	14.5	31.0	ND	3.1
(2) B-INJECTION	12.0	2.0	9.3	2.7	18.0	38.0	ND	4.8
(3) B-SEAWATER	10,000.0	6.4	426.0	1,310.0	14,604.0	5,928.0	12.0	2,140.0
(4) B-GW-1	17.0	2.0	14.0	1.1	18.4	61.0	ND	5.1
(5) B-GW-2	13.0	2.0	11.0	2.3	16.7	47.8	ND	4.4
(6) B-GW-3	12.0	2.0	18.0	1.2	15.0	58.7	ND	6.7
(7) B-GW-4	8.8	2.0	20.0	3.7	10.9	82.3	ND	4.3
(8) B-LW-1	11.0	2.0	22.0	2.9	15.6	84.3	ND	5.5
(9) B-LW-2	24.0	9.3	30.0	0.2	16.9	128.0	ND	11.7
(10) B-LW-3	250.0	17.0	324.0	9.1	792.0	169.4	ND	132.0
(11) B-LW-4	2,600.0	92.0	501.0	296.0	4,405.0	1,612.0	ND	635.0
(12) B-LW-5	10.0	2.0	24.0	0.1	14.7	67.4	ND	8.3
(13) B-GW-6	13.0	2.0	4.3	13.0	14.3	72.4	ND	11.0

(1) * SW: Surface water, GW: Groundwater, LW: Leakage water into cavern, (2) ND < 0.1 µg/ml

어나지 않으므로 물의 거동현상을 직접적으로 반영하는 추적자로서 중요한 역할을 한다.

해양에서 증발된 수증기는 내륙으로 이동하면서 동위원소 분별작용(fractionation)을 거친다. 결국 수증기는 해수에 비해 가벼운 동위원소들로 구성되어 강수를 형성하고, 이 과정이 계속 진행되면서 대륙의 지형 및 온도변화에 따라 지표수 및 지하수에 다양한 동위원소가 분포된다. δ¹⁸O은 시료 중의 ¹⁸O/¹⁶O의 비를 나타내는 것으로서 고도의 효과를 잘 반영해 준다(Craig, 1961). 일반적으로 우리나라에서 고도효과에 의한 동위원소 조성의 변화율은 δ²H의 경우 1~4%/100 m이며, δ¹⁸O의 경우에는 0.15~0.5%/100 m의 범위를 갖는 것으로 보고되어 있다(Kim & Nakai, 1988).

여수지역의 환경동위원소 분석을 위하여 '96년 5월부터 10월까지 다섯 차례에 걸쳐 시료를 채취하였다(Table 3). 이 중 환경동위원소분석과 이화학분석을 동시에 실시한 시료에 대하여 해수성분의 유입을 지지하는 SO₄²⁻이온과 δ¹⁸O과의 상관관

계를 분석하였다. 분석결과, 지하수는 충전지역의 고도효과를 반영하는 양상을 잘 나타낸다. 수벽공의 지상표고가 높을수록 δ¹⁸O값이 낮고, 저지대 쪽으로 갈수록 높은 값을 나타내다가 해수에서는 거의 0에 근접한다. 즉, δ¹⁸O값이 주입수의 값(-6.08~-6.24)보다 크고 SO₄²⁻이온농도가 지하수의 값보다 큰 31, 32, 34, 36번 지점에서 해안쪽에서의 공동벽면을 따라 해수가 침투하는 것으로 해석할 수 있다(Figure 7).

수직수벽공 공내시험 및 수리간섭시험

여수지역

수직수벽공과 수평수벽공간에 실시한 수리간섭시험과 공내 온도검층, 수비전도도의 측정결과 해안가에 인접한 지하공동 지역에서의 지하수유동체계에 대한 수리지질학적 특성이 확인되었다. 계측장비는 Hydrolab Surveyor 3(Hydrolab Corp.)를 이용하였다.

수직수벽공에서 측정한 수비전도도 분포는 150~18000 µS/cm의 범위로 나타나며 하부의 특정한 심도에서 수비전도도값이 급격히 상승하고 있다(Figure 8). 일부 급격히 변하는 구간을 제외한 수벽공의 수비전도도 분포는 150~450 µS/cm로서, 이는 주입수 수비전도도값의 범위와 일치된다. 심도에 따른 수비전도도 변화는 온도에서와 같이 EL.-30 m를 기준으로 상부구간은 각 수벽공에 따라 증감의 변화를 보이며, 하부구간에서는 일정한 값을 유지하고 있다. 따라서, 해수침투현상은 수비전도도값의 변화에서 명확히 구분되고 있다.

수리간섭시험 결과 수직수벽공 중 해수가 혼합되는 지점은 다음과 같다.

- VBH-7 : 전 구간에 해수가 혼합되어 있으며, 주 침투구간은 EL.-25~-35 m, EL.-45 m 하부
- VBH-11, 12 : 주 침투구간은 EL.-40 m하부로서 수비전도도값이 급격히 증가하여 해수수준인 18000 µS/cm 유지
- VBH-13, 14 : 주 침투구간은 EL.-55 m 하부로서 수비전도도값은 3000~4000 µS/cm로 혼합된 특성을 나타낸다.
- VBH-16 : 심도가 얕아서 주 침투구간은 알 수 없으나 EL.-50 m 하부로 추정

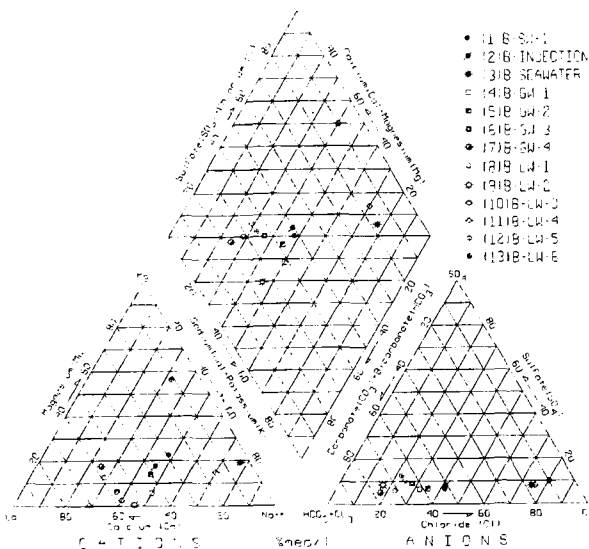


Figure 6. Piper diagram of the major ion composition (milliequivalents) of water from Geoje site.

Table 3. Results of environmental isotope analysis in Yeosu site. Number in parentheses indicates the SO_4^{2-} concentration

Location*	Sampling elevation (m)	Ground surface elevation (m)	Sampling date				
			May 22	June 19	July 4	Aug. 6	Oct. 25
(1) A-SW-1	240	240	-7.33(4.7)				
(2) A-SW-2	155	155	-7.06(10.3)				
(3) A-SW-3	30	30	-6.73(8.0)	-7.11			
(4) A-INJECTION	0	0	-6.08(4.5)	-6.28	-6.24(6.5)		-7.30(?)
(5) A-SEAWATER	0	0	0.15(2,150)	-0.70			
(6) A-GW-1	0	130	-7.40(11.0)	-7.40	-7.49(15.1)		-7.03
(7) A-GW-2	0	172	-7.69(9.0)	-7.56	-7.65		-7.71(9.4)
(8) A-GW-3	0	190		-7.71	-7.83		-5.04(?)
(9) A-GW-4	0	160		-7.32(8.7)	-7.46		-7.28
(10) A-GW-5	0	170		-8.41(6.4)	-8.45		-8.44
(11) A-GW-6	0	155		-8.14(28.0)	-8.20		-8.18
(12) A-GW-7	0	130		-7.70(0.8)	-7.68		-7.80
(14) A-GW-9	0	120	-7.41	-6.41	-7.30		-7.32
(15) A-GW-10	0	185	-7.53(5.3)				-7.51
(16) A-GW-11	0	175		-6.96			-7.26
(17) A-GW-12	-12.4	70				-6.43	
(18) A-GW-13	-12.3	100				-6.56	
(19) A-GW-14	-12.9	35				-6.30	
(20) A-GW-15	-18.7	50				-6.34	
(21) A-GW-16	-17.8	175				-7.42	
(22) A-GW-17	-15.8	170				-7.28	
(23) A-LW-1	-60	90	-6.72(4.2)	-6.87	-6.65(5.0)		-7.50(7.5)
(24) A-LW-2	-60	80			-6.23(6.9)		
(25) A-LW-3	-60	80			-6.23		
(26) A-LW-4	-60	65	-6.39(9.2)	-6.62(8.7)	-6.29		
(27) A-LW-5	-60	110			-6.56(95.9)		
(28) A-LW-6	-60	115			-6.28(11.6)		-7.37(12.1)
(29) A-LW-7	-60	95			-6.28		-7.25(11.6)
(30) A-LW-8	-60	50	-6.33(5.4)	-6.30	-6.40(5.4)		-5.26(429.4)
(31) A-LW-9	-60	45		-5.17(849.0)	-5.10		-6.08(1,085)
(32) A-LW-10	-60	33					
(33) A-LW-11	-60	150			-6.14(7.4)		-3.66(1,705)
(34) A-LW-12	-60	50	-3.24(1,283)	-6.17	-6.21(7.9)		-3.98(1,546)
(36) A-LW-14	-60	33					
(37) A-LW-15	-60	173			-6.69(13.4)		
(38) A-LW-16	-60	180		-6.15			
(39) A-LW-17	-60	180			-5.44(66.2)		
(40) A-LW-18	-60	30	-5.96(19.9)	-7.12			-6.95(22.7)
(42) A-LW-20							-6.40(230.4)

* SW: Surface water, GW: Groundwater, LW: Leakage water into cavern

수직수벽공의 심도에 따른 온도분포는 21°C에서 16°C까지 변화를 보였다. 일반적인 온도변화의 특성은 EL.-30 m를 기준으로 상부와 하부구간으로 구분된다. 상부구간의 온도변화 특성은 심도가 깊어 질수록 다음과 같이 3가지로 분류된다.

- 온도감소 후 증가 : VBH-6, -11, -12, -14, -16, -17
- 온도증가 후 감소 : VBH-2, -3, -4, -7, -9, -10
- 지속적인 온도증가 : VBH-8, -13

상부구간의 온도변화는 투수성단열과의 교차에 의한 지하수 및 주입수의 혼합과정에 의한 변화로 사료되며, 상부구간에 발달된 sub-horizontal 단열과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 조사 당시 주입수와 해수의 온도는 20~21°C로 측정되었다.

수평수벽공의 주입수가 해안으로 유출되는 것을 확인하기 위하여 해당 수평수벽공의 주입 중단 및 재개에 따른 수직수평공의 수위변화를 관측하였다(Figuer 9). 4개의 수직수벽공 중 VBH-6와 VBH-7의 2개 수벽공에서 2 m의 수위상승이 계속되었으며, VBH-10에서는 급격한 수위강하 후 미미한 수위상승이 인지되었다. 이는 주입수가 단열대를 따라 해안으로 유출되고 있는 증거이며, 해당 단열대를 관통한 수벽공에서 수위변화를 나타내고 있는 것으로 사료된다. 각 공에서 계속되는 수위변화율은 수직수벽공 주변의 수리전도도 값의 차이에도 기인되지만, 교차되는 단열대의 분포특성 때문인 것으로 판단된다. 해안으로 유출되는 주입수량은 보다 자세한 수리지질특성이 파악되어야만 정량적인 분석이 가능할 것이다.

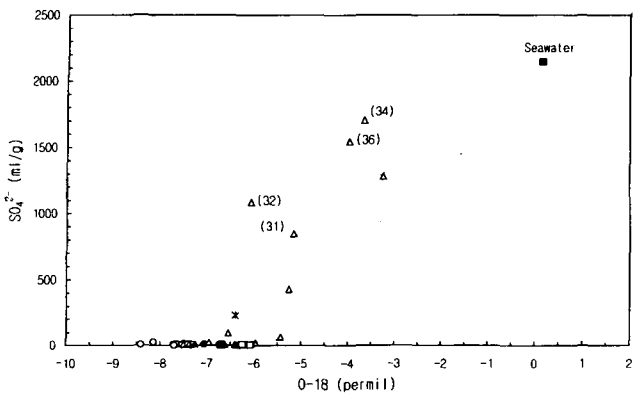


Figure 7. Relation between Oxygen-18 and SO_4^{2-} from Yeosu site. ● Surface water, ■ Seawater, ○ Groundwater, △ Cavern leakage water, * Drainage water, □ Injection water.

거제지역

B지역은 총 14개의 수직수벽공이 약 80°수직의 경사공으로 설치되었다. 지상표고는 EL.26~28 m이고, 공저표고는 EL.-40 m 내외이다. 이 중 측정 가능한 10개의 수벽공에서 심도별 온도, 수비전도도, 수소이온농도, 산화-환원전위 및 용존산소량을 측정하였다(Figure 10).

자연지하수위는 EL.-5~16 m까지 변화의 폭이 큰 것이 특징이다. 수직적 온도의 변화는 VBH-1번을 제외하고는 심도에 비례하여 증가하는 양상을 보인다. 이 중 VBH-11번은 EL.-10 m부근에서 급격히 증가하였다.

수비전도도는 주입수가 80~100 $\mu S/cm$, 천부지하수가 150~180 $\mu S/cm$ 의 범위를 갖는데, 수직수벽공에서는 120~240 $\mu S/cm$ 의 범위를 갖는다. VBH-10과 같이 천부지하수의 범위를 벗어나는 것도 있지만 전반적으로 해수침투의 영향을 받는 변환점은 없었다. 다만 VBH-11과 -12번의 경우 EL.0 m, VBH-13번은 EL.-15 m에서 미세하게 증가하는 경향을 보이는

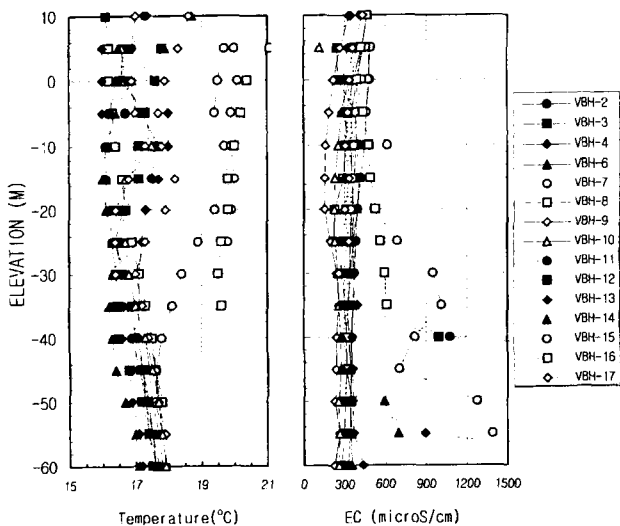


Figure 8. Vertical variations of temperature and electrical conductivity from VBH in Yeosu site.

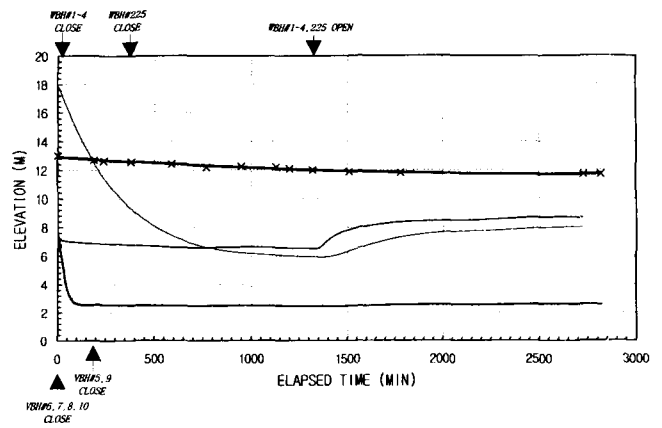


Figure 9. Results of hydraulic interference test from vertical boreholes in Yeosu site. — VBH-6, - - VBH-7, — VBH-10, ×× VBH-8.

점이 특징이다.

수소이온농도(pH)는 주입수가 9.0, 천부지하수가 6.5로서 상당한 차이가 있다. 수직수벽공에서는 6.0~8.0사이의 값을 갖는다. VBH-6번은 9.1~9.3의 값을 갖는데, 이것은 진입터널 portal부에 집중된 그라우팅제에 의한 영향으로 보인다.

산화-환원전위는 주입수가 227 mV, 천부지하수가 300~335 mV의 범위를 갖는다. 수직수벽공에서는 30~346 mV의 범위를 갖는다. 수소이온농도와 산화-환원전위 관계(Cloke, 1966)로부터 해수면하의 지하수는 water stable 환경에 있고, 용존산소량은 산화-환원전위와 상관관계를 갖는 것으로 계속되었다.

해수침투현상

여수 및 거제지역에서 수행한 일련의 수질분석과 현장 수리특성시험의 결과로부터 해당지역의 수리지질학적 특성에 따른 지하공동으로의 해수침투현상을 보다 자세히 파악할 수 있었다. 직접적인 확인수단이 되는 수질특성으로부터는 여수지역의 경우 31번과 35번 지점에서, 거제지역의 경우에는 11번 지점에서 해수가 침투되는 것을 알 수 있다. 물시료의 안정동위원소 분석결과를 정리하면 여수지역에서는 31, 32, 34, 36번 지점에서 해수침투가 인지되었다. 즉, 여수지역에서는 모두 5개 지점(31, 32, 34, 35, 36)에서 해수가 침투하는 것으로 정리되는데, 모두 해안과 가까운 지역에 해당된다.

지하공동과 해수면 경계 사이에 설치된 수직수벽공에서 실시한 심도별 수리특성조사는 해수침투 경로를 확인하는 방법이라 할 수 있다. 이 중 수비전도도는 총고용물(total dissolved solids)과 밀접한 상관관계를 가지므로 여타 특성보다 해수침투에 대한 좋은 지시자 역할을 한다. 여수지역은 수직수벽공의 공저표고가 EL.-60 m로서 지하공동 바닥의 표고와 같다. Figure 8에서 보는 바와 같이 VBH-7, -11, -12, -13, -14에서 해수침투의 증거를 확인할 수 있다. 이와 달리 거제지역의 수직수벽공에서는 해수침투의 증거를 결정적으로 확인하기 어렵다. 이는 수직수벽공의 공저표고(EL.-40 m)와도 관계가 있을 것으로 보여진다.

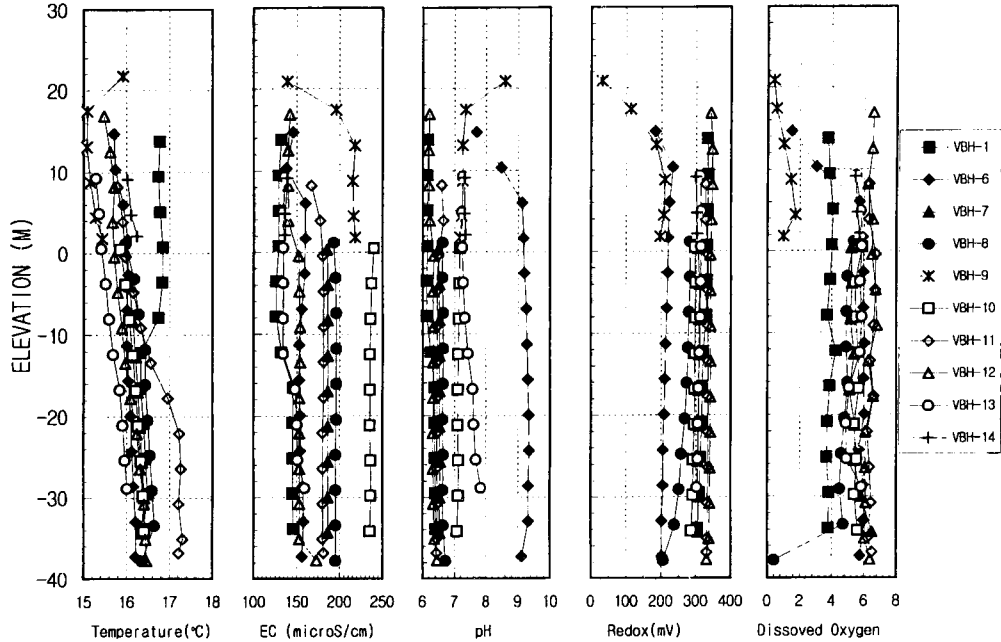


Figure 10. Vertical variations of the hydrological properties from VBH in Geoje site.

토 의

이론적 담수-해수체 경계면

해수침투현상이 잘 파악되는 여수지역에서 이론적인 담수-해수체 경계면과 실제의 현상을 비교하기 위하여 식 (1)과 (2)에 의한 경계면을 계산하였다. 해석단면은 시료번호 34, 35, 36번에 해당하는 공동의 방향과 평행한 단면이다(Figure 11).

Glover(1964)에 의한 식 (2)에서 q' 은 자유면대수층으로 가정할 경우 다음의 Dupuit equation(Fetter, 1988)으로 계산될 수 있다.

$$q' = -\frac{1}{2} K \left(\frac{h_2^2 - h_1^2}{L} \right) \quad (3)$$

이때, K = hydraulic conductivity(L/T)
 h_n = saturated thickness of the aquifer
 L = width of the aquifer

위 식 (3)에서 대수층의 평균 수리전도도를 3.5×10^{-8} m/sec ((주)삼림컨설턴트, 1995)로 적용하고, 대수층의 포화두께를 상부지하수위를 기준으로 하였을 경우와 관측공 하부구간에서 계측되는 지하수압을 기준으로 하였을 경우(한국원자력연구소, 1996)를 각각 비교하였다(Table 4). Case 1과 2에 의한 배출량에 대하여 식 (2)를 계산한 결과와 식 (1)(Ghyben-Herzberg이론식)에 의한 결과는 Table 5와 같고, 이를 Figure 11에 도시하였다.

Figure 11에 도시된 담수-해수체 경계면들은 지하공동이 굴착된 상태에서 계측된 지하수위와 배출량에 의해서 설정될 수 있는 경계면으로서 현재 수평 및 수직수벽공을 통해서 약 850 m^3/day 이 강제 주입되고 공동 내부에서 약 650 m^3/day 이 배

수되는 조건은 배제된 것이다. 만약 이 조건을 고려한다면 이들 경계면은 바다쪽으로 훨씬 이동하게 될 것이다. Case 1은 관측공에서 계측되는 자연상태의 지하수위를 반영하였을 경우로서, 이 때의 수리경사는 약 0.21에 달하게 되어 단위 폭당 배출량도 Case 2에 비하여 약 10배 크다. 결국 seepage face가 바다쪽으로 220 m까지 밀려나게 되고, 담수체의 두께도 내륙부 400 m 지점에서는 약 1 km에 달하게 된다. Case 2는 double completion된 관측공에서 계측되는 지하수압을 수위로 환산하여 적용하였을 경우로서, seepage face는 20.5 m정도이고 경계면도 완만한 곡선의 기울기를 갖는다. 해수와 담수의 밀도차를 고려

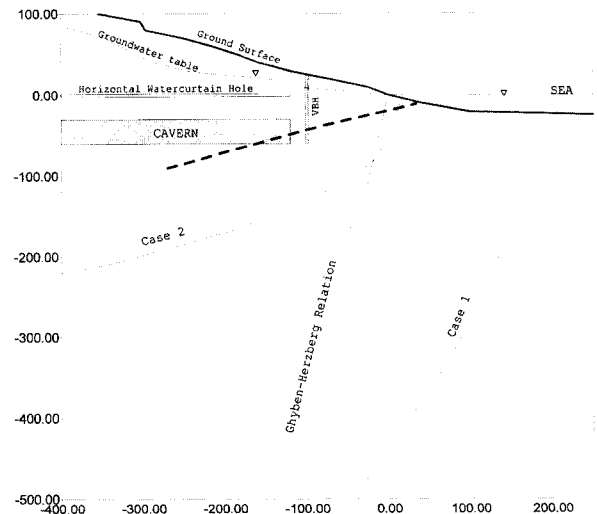


Figure 11. Theoretical interfaces of the freshwater and seawater. Dotted line implies the seawater pathway into the cavern.

Table 4. Comparison of the discharge from the aquifer along the coastline, per unit width, in terms of the hydraulic conductivity and the groundwater level

Aquifer thickness	K (m/sec)	h_1 (m)	h_2 (m)	q' ($m^3/sec/m$)
Case 1 Groundwater level		130	20	3.85×10^{-7}
Case 2 Groundwater pressure head	3.5×10^{-8}	39.4	17.4	3.57×10^{-8}

한 Ghyben-Herzberg 이론식에 의한 경계면은 seepage face 없이 해수면 상부의 단위지하수위에 비례하여 가파른 기울기를 갖는다. 이들 세개의 경계면 중 Case 2가 자연적인 평형상태와 유사한 것으로 사료된다. 이것은 단열암반에서 수리경사를 결정할 때, 시추공에서 계측되는 자연수위만을 고려하는 것보다는 적정 심도에서 계측되는 지하수압을 이용하는 것이 더 의미있는 것을 말해주는 것이다.

단열암반 내에 지하공동을 설치할 경우 대기압조건이 형성되므로 준평형상태의 담수-해수체 경계면에 변화를 주게 된다. 이러한 조건은 연속체개념으로 볼 때 경계면이 육지쪽으로 이동하는 결과를 초래할 것이다. 반면에 수벽공을 통해서 주입되고 shaft를 통해서 배수되는 물량을 고려한다면 경계면은 바다쪽으로 이동하게 될 것이다. 과연 이동의 정도가 얼마나 될 것인가에 대하여는 지질조건, 경계조건 등을 고려한 모델링에 의해서만 예측 가능할 것이다. 거제지역에 대하여는 여수지역과 유사한 경계조건으로 하여 해수침투 유무를 모델링한 바 있는데, 공동이 해안과 155 m 이격되고, 수직수벽공의 공저심도가 EL.-40 m일 때 해수침투가 없는 것으로 해석되었다(백산엔지니어링(주), 1995).

이와 같이 이론적인 경계면과 실제적인 현상과는 상당한 거리가 있다. 이론적인 해석방법은 가정조건이 단순하기 때문에 실질적으로 적용하기엔 무리가 있다. 단열암반에 있어서는 일반적으로 매질 자체의 투수계수가 10^{-9} m/sec 이하이기 때문에 물의 흐름을 지배하는 것은 투수성 단열(대)일 수 밖에 없다. 결국, 해수체와 접한 투수성 단열(대)가 지하공동과 연결되어 있다면 Case 2와 같은 경계면에서 판상 혹은 channel 형태의 해수통로가 형성될 것이다.

해수침투경로

여수지역에서 수비전도도값이 급격히 상승하는 VBH-11~14의 경우는 하부에 발달되어 있는 저경사 단열대를 통해서 해수가 침투하는 것으로 쉽게 해석될 수 있다. 지표지질조사와 지하공동 건설시 확인된 지질구조는 N50° E/15° NW의 단열대로서 해안가(EL.0 m)에서 지하공동 천정까지 연장되어 있다((주)삼림컨설턴트, 1996). 저경사 단열대가 수직수벽공과 교차하는 지점은 EL.-20 m 근처이며, 단열대를 따른 유동로는 해안으로부터 약 80 m의 거리를 갖는다. 한편 수직수벽공에서 해수 혼합이 계측되는 심도는 각 공마다 차이를 보인다. VBH-16에서는 수비전도도가 점차적인 증가를 보이나, VBH-11, -12에서는 EL.-40 m 지점에서, VBH-13, -14에서는 EL.-55 m 지점에서 급격히 상승하고 있다. 이는 해수와 담수의 경계면에 존재하는

Table 5. Calculation of the seawater-freshwater interface. Value z means the depth below m.s.l. at the distance x from the coastline

Distance x (m)	z (m)		
	Case 1	Case 2	From equation (1)
0	439	41	0
3	491	56	12
6	512	63	24
10	533	69	40
20	572	81	80
30	602	90	120
40	627	98	140
50	649	105	200
60	669	111	240
70	688	116	280
80	705	122	320
90	721	126	360
100	736	131	400
120	764	140	560
140	790	148	740
160	815	155	800
180	837	162	920
200	859	168	1000
250	908	184	1160
300	953	197	1760
350	994	210	2800
400	1033	221	3400

* Seepage (outflow) face : Case 1 = 220 m, Case 2 = 20.5 m

점이대로 해석하기 보다는 수평 및 수직수벽공의 주입수의 영향과 아직까지 파악되지 않은 해안으로 경사진 sub-horizontal 단열군과의 교차에서 생겨나는 유동로의 복합적인 결과로 사료되며, 정확한 유입지점은 알 수 없었다. 또한 해수침투현상이 확인되는 수벽공사이에 위치하는 VBH-17에서 변화가 없는 것은 수벽공 설치시 수반되는 그라우팅에 의해서 해수침투로가 봉쇄된 것으로 보여진다. 시료채취지점 19번과 40번에서 해수침투현상이 발견되지 않은 것도 지하공동 시공시 수행된 그라우팅 및 숯크리트 등 철저한 보강공사의 결과로 판단된다.

해수가 침투되고 있는 지점(31, 32, 34~36번)에서의 수리구조적 특성을 검토해 보면, 해수체와 연결되는 침투경로는 해안 쪽 bench III 상단부(EL.-52 m)에서 교차되고, 경사방향은 NW, 경사각은 최대 20° 이내인 sub-horizontal 단열대로 동일한 방향을 갖는 2개조 이상의 구조가 추정 가능하다. 이 지역에 발달된 sub-vertical 단열대는 지하공동 건설시 조사된 항내지질도와 수평수벽공의 수리간섭시험 결과에서 확인되었다. 시료채취지점 34번~36번에서는 VBH-10 방향으로 발달된 N60° E/85° NW의 단열대와 시료채취지점 31번과 32번에서는 VBH-1 방향으로 연장되는 N50° W/70° NE의 단열대가 분포한다. 두 단열대와 연장선 상에 있는 VBH-10과 VBH-1에서 수비전도도의 변화가 없는 것으로 보아 sub-vertical 단열대는 주변 지하수와 수벽공 주입수가 해안으로 유출되는 경로로 추정할 수 있다.

수리간섭시험시 반응을 보인 VBH-6와 -7 중 수비전도도의 증가는 VBH-7에서만 계측되었다. VBH-7 주변에서 sub-vertical 단열대는 확인되지 않았으며, 수비전도도 변화가 단계적으

로 심도에 따라 증가하는 특성으로 보아 sub-horizontal 단열대에 의한 해수침투가 이루어지는 것으로 사료된다. 또한 VBH-7의 온도변화는 EL.-20 m까지는 주입수의 온도와 유사하게 높은 온도를 보이며, 수리간섭시험시의 반응도 빨리 나타나는 특성이 있다.

상기 특성에 근거하여 해수가 침투되고 있는 지하공동 주변의 해수침투경로는 이 지역에 발달된 여러 조의 sub-horizontal 단열대에 의하여 지배를 받으며, 상부구간(>EL.-20 m)으로는 지하수 및 수벽공 주입수가 유출되고, 그 하부구간으로는 해수가 침투되고 있는 것으로 유추할 수 있다. 온도변화의 특성에 의하면 해안으로의 지하수유출은 빠르게 일어나고 있으나, 해수침투는 상대적으로 느리게 진행되는 것으로 사료된다.

결 언

임해지역에 위치하는 지하공동시설 주변에서의 수리특성조사를 통하여 해수침투의 수리지질학적 현상을 파악하였다.

1. 여수 및 거제지역의 지표수와 지하공동내 유입수에 대한 수질 분석 및 환경동위원소분석을 통하여 해안에 인접한 지점에서 지하공동내로의 해수침투가 확인되었다.

2. 지하공동과 해안사이에 위치하는 수직수벽공에서의 심도별 수리특성조사와 수리간섭시험을 통하여 여수지역에서는 5개 공에서 해수침투의 증거를 확인할 수 있었으나, 거제지역에서는 그 증거를 확인할 수 없었다.

3. 여수지역 지하공동 주변암반이 평균 수리전도도가 3.5×10^{-8} m/sec인 자유면대수층 조건인 경우, 대수층의 포화두께를 자연수위로 기준으로 할 때가 관측공 하부구간에서 예측되는 지하수압을 기준으로 할 때보다 배출량과 seepage face가 약 10배 크다. 지하공동이 굴착된 현 상태에서 담수-해수체 경계면은 후자의 경우가 상대적으로 타당한 것으로 해석되었다. 따라서, 단열암반에서 수리경사를 결정할 때, 여건이 허용하는 범위에서 시추공에서 예측되는 자연수위보다는 적정 심도에서 예측되는 지하수압을 이용하여야 한다.

4. 여수지역 해안가 주변의 해수침투경로는 이 지역에 발달된 NE방향, 경사 20° NW이내인 여러 조의 sub-horizontal 단열대에 지배되며, 상부구간(>EL.-20 m)으로는 지하수 및 수벽공 주입수가 유출되고, 하부구간으로는 해수가 침투되고 있는 것으로 유추된다. 기타 sub-vertical 단열대들은 공동내부에서의 그라우팅 등에 의해 지하공동으로의 해수침투로 역할을 하지 못하고, 주변 지하수와 수벽공 주입수가 해안으로 유출되는 경로 역할을 하는 것으로 판단된다. 임해지역에서 준평형 상태의 암반지하수체계에 변화를 초래하는 인위적 행위로 인하여 담수-해수체 경계면에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 해수체와 연결되는 투수성 단열대의 분포특성이다.

5. 향후 연구는 임해지역에서 준평형 상태의 지하수체계를 초기조건으로하여 지하공동 굴착 및 수벽공을 통한 인위적 주수행위가 담수-해수체 경계면에 미치는 영향을 등연속체모델과 불연속체모델로서 비교분석하고, 이를 근거로 향후 임해지역에 건설될 지하공동시설의 설계에 이용토록 할 계획이다.

감사의 글

본 연구를 위하여 현장조사를 배려해 주시고 관련 조사자료를 제공해 주신 한국석유개발공사 지재용님, (주)진로엔지니어링 이창우님, 벽산엔지니어링(주) 이상삼님, 홍재모님, 선경건설(주) 신주열님, 엘지건설(주) 김동규님께 감사드립니다.

참고문헌

- 김천수, 1992, 제주도 지하수환경의 오염취약성, 1992년도 제8회 공동학술강연회, 대한광산지질학회, 대한지질학회, p. 13-28.
- 벽산엔지니어링(주), 1995, ○○수리지질 관련 검토서(internal report), 한국석유개발공사.
- 이은용, 1996, Personal Communication.
- (주)삼림컨설팅트, 1996, ○○비축기지 1차공사 감리용역-최종 수리시험 해석보고서, 한국석유개발공사.
- (주)삼림컨설팅트 ○○시공감리단, 1995, 수리전산 Modeling 결과(internal report), 한국석유개발공사.
- 한국수자원공사, 1993, 제주도 수자원종합개발계획수립 보고서, 건설부, 제주도, 한국수자원공사.
- 한국원자력연구소, 1996a, ○○지하원유비축시설 수리안정성 종합 검토보고서, 한국석유개발공사, 선경건설주식회사, 엘지건설주식회사.
- 한국원자력연구소, 1996b, ○○지하원유비축시설 수리안정성 종합 검토보고서, 한국석유개발공사, 벽산엔지니어링(주).
- Back, W., Rosenshein, J. S. and Seaber, P. R., 1988, Hydrogeology, The Geol. Soci. America, p.524.
- Biemond, C., 1957, Dune water flow and replenishment in the catchment area of the Amsterdam water supply, Jour. Inst. Water Engrs., 11, p. 195-213.
- Bredehoeft, J. D. and Pinder, G. F., 1973, Mass transport in flowing groundwater, Water Resources Research, 9, p. 193-210.
- Cloke, P. L., 1966, The geochemical application of Eh-pH diagrams, Jour. of Geol. Educ., 4, p. 140-148.
- Collins, M. A., and Gelhar, L. W., 1971, Seawater intrusion in layered aquifers, Water Resources Research, 7, p. 971-979.
- Cooper, H. H. Jr., 1959, A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in coastal aquifer, Jour. Geophysical Research, 64, p. 461-467.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters, Sciences, p. 1702-1703.
- Fetter, C. W. Jr., 1988, Applied hydrogeology, Merrill Pub. Com., p.592.
- Fetter, C. W. Jr., 1972, Position of the saline water interface beneath oceanic island, Water Resources Research, 8, p. 1307-1314.
- Glover, R. E., 1964, The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer, In sea water in coastal aquifers, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1613-C, p. 32-35.
- Hubbert, M. K., 1940, The theory of groundwater motion, Jour. Geol., 48, p. 785-944.
- Kim, K. H. and N. Nakai, 1988, Isotope compositions of pre-

- precipitations and groundwaters in South Korea, Jour. Geol. Soc. Korea, 24(1), p. 39-46.
- Kohout, F. A., 1960, Flow pattern of fresh water and salt water in the Biscayne aquifer of the Miami area, Florida, Int'l Asso. of Sci & Hydrology, No.52.
- Revelle, R., 1941, Criteria for recognition of seawater in groundwaters, *Tras. Amer. Geophysical Union*, 22, p. 593-597.
- Segol, G., Pinder, G. F. and Gray, W. G., 1975, A Galerkin-finite element technique for calculating the transient position of the saltwater front, *Water Resources Research*, 11, p. 343-347.
- Uhlig, H. H., 1985, *Corrosion and corrosion control*. 3rd edition, 108p.