

지하공동굴착 시 수리지질조사 자료를 이용한 저장공동 심도의 지하수체계 특성 연구

조성일*¹⁾ · 김천수¹⁾ · 김경수¹⁾ · 송무영²⁾ · 전한석³⁾

¹⁾한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부, ²⁾충남대학교 지구환경과학과, ³⁾한국석유공사 건설기술처

Characterization of a groundwater system by subsurface hydrogeological investigation data

Sung-Il Cho*¹⁾ · Chun-Soo Kim¹⁾ · Kyung-Su Kim¹⁾
Moo Young Song²⁾ · Han Seak Jeon³⁾ *

¹⁾Radwaste Disposal Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute,

²⁾Dept. of Geology and Earth and Environmental Sciences,

³⁾Engineering Dept., Korea National Oil Corporation

본 논문은 지하시험시설을 이용한 수리지질환경 연구의 대안으로 지하유류저장시설 건설과정 중 도출된 자료를 이용하여 저장공동 심도에서의 지하수체계를 해석해 보고자 하였다. 지하공동굴착과 동시에 지표관측공 28개를 통해 지하수위가 측정되었고, 수평수벽공 95개와 수직수벽공 63개에 의해 압력 및 주입량이 일일주기로 측정되었다. 또한 수리적 연결성 확인을 위한 수벽공 간 수리간섭시험이 수행되었다. 저고경사의 투수성 단열의 수리적 연결성에 따라 주입압의 분포양상이 다르게 나타났다. 수평수벽공의 압력분포에 의해 수리특성을 달리하는 세 개의 수리영역으로 구분 가능하였고, 공동 C-2 < C-1 < C-3 영역 순으로 지하수압이 높은 것으로 해석되었다. 지하수압이 높은 C-3 영역은 1차적인 지구화학 자료에 의해 심부 지하수를 많이 포함하는 특성을 보이고 있고, 일부 수벽공은 천부지하수의 특성을 나타내며 다른 구역보다 높은 지하수압을 유지하고 있다. C-2 상부의 수벽공은 지하수압이 낮고 주입량도 많지 않아 상부 지하수체와의 수리적 연결성이 불량한 지하수 영역으로 해석할 수 있다. 본 연구결과는 단열암반의 불균질성 및 규모종속성에 따른 규모별 지하수부존체계를 이해하고 지하수체계에 대한 지표조사 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 지하유류저장시설, 투수성 단열, 지하수체계, 수벽공, 수리간섭시험

This paper intended to assess the hydro-structure characteristics of volcanic rocks based on the hydrogeological data obtained from the underground storage cavern during construction. The variation of groundwater levels was periodically measured from the 28 surface monitoring holes(NX size) and the hydraulic pressures and injection rates were daily monitored from the water curtain holes(95 hori-

* Corresponding author : chosi@kaeri.re.kr

zontal holes and 63 vertical holes). The hydraulic interference tests were performed in whole water curtain holes. The distribution patterns of hydraulic pressure are closely related to the dip angles of fracture intersected to the water curtain holes. Three domains can be grouped by the distribution of hydraulic pressures in the horizontal water curtain holes. The initial hydraulic pressures measured immediately after drilling of water curtain holes are high in ascending order of the cavern C-2, C-1, and C-3. The preliminary hydrochemical data also indicate that the portions of the deep groundwater composition is relatively great in the cavern C-3 area. Some of the horizontal water curtain holes in the cavern C-3 show a steady higher groundwater pressure with the composition of shallow groundwater indicating the outer boundary as constant hydraulic boundary. The water curtain holes in the cavern C-2 is characterized as low initial hydraulic pressure and less injection rates, suggesting poor hydraulic connectivity to a shallow groundwater system.

The results of the study can help to understand a hydraulic compartment concept in a fracture hydro-geology and be utilized during the surface investigation for a groundwater system.

Key words: underground storage cavern, conductive fractures, groundwater system, water curtain holes, hydraulic connectivity

서 론

암반 내의 지하수유동체계는 복잡한 단열의 분포특성에 의해 그 해석이 매우 난해하다. 또한 조사의 제한성에 의한 불확실성 역시 신뢰도 저하의 요인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 국외에서는 지하시험시설을 통한 지표 예측자료와 실제 지하공동의 조사자료를 비교함으로써 지질구조 및 지하수유동 과정에 대한 이해도를 한 단계 높이는 계기를 마련하였다(Carlsten, L. et al., 1989; Rhén, I. et al., 1997). 국내에서는 아직까지 이러한 지하시험시설을 이용한 조사, 해석 및 예측내용의 검증에 대한 연구는 초기단계에 있기 때문에 본 논문에서는 지하시험시설을 이용한 연구를 대체할 수 있는 방안으로 지하에 유류를 저장할 목적으로 건설되는 시설을 이용하여 지하공동 심도에서의 지하수체계 특성을 해석해 보고자 하였다.

지하에 유류를 저장하기 위해서는 자연적인 방벽의 기능, 즉 공동외곽의 지하수압이 공동내부보다 항상 높게 유지되어야 하며, 지하수 흐름이 공동으로 형성되는 수리적 조건에 의하여 저장공동의 수밀성이 확보되어야 한다. 이러한 기능을 보완하기 위하여 수벽시스템(water curtain system)이라는 인공적인 수리방벽 시설에 의해 저장안정성을 극대화하게 된다.

지금까지 국내 비축시설의 수리안정성평가는 다공성 연속체 개념에 근거하여 이루어지고 있고, 평가방법은 주로 수치모델링에 비중을 두어왔다. 그러나 이러한

평가방법은 실제적으로 암반지하수에서 발생하는 모든 유동현상을 해석하는데 한계가 있고, 국지적인 수리안정성 문제발생 시 대처하기에 어려움이 있었다. 지하비축시설 주변 모암의 지하수체계해석은 지하공동건설 시 발생하는 유입량과 이에 따른 지하수위 변화를 보다 신뢰성 있게 해석하는 것이다. 따라서 본 연구목적은 건설 중인 추가비축시설의 지하수압 분포특성을 파악하고, 이에 따른 투수성 구조의 수리적 연결성을 검토하는 것이다.

암반 내 지하수유동체계는 일반적으로 투수성 구조의 분포특성과 이의 수리특성을 정확히 파악하는 것이 가장 중요하게 알려지고 있다. 지하수체계는 격리된 부존체계(hydraulic compartment)를 이루고 있으며, 소수의 투수성 단열에 의하여 연결되어 있는 것으로 보고되고 있다(Olsson, 1992; Doe, 1999). 따라서 지하수유동체계 해석 시 수리특성을 달리하는 경계를 설정하고 경계에 따른 각 영역의 수리특성을 해석하는 작업이 선행되어야 한다.

본 논문은 ○○지역 지하유류저장시설 건설 중 공동굴착 과정에서 도출된 지표관측공의 수위변화자료, 수벽공의 압력 및 주입량, 수리간섭시험 자료를 이용하여 저장공동 심도에서의 지하수체계를 1차적으로 해석하였다. 이 자료는 조사된 단열분포자료와 수벽공의 지하수화학 자료와 통합하여 부지 수리지질특성모델(site hydrogeological descriptive model)을 구성하게 될 것이다.

연구지역의 수리지질자료

연구지역의 지질은 Fig. 1a와 같이 백악기 말 유천층군의 화산암류 및 이를 관입한 불국사 화성암류의 알칼리장석화강암과 맥암으로 구성되어 있고(한국동력자원연구소, 1989), 현재 운영 중에 있는 기존의 지하유류저장시설에 추가로 지하유류저장시설이 건설되고 있다.

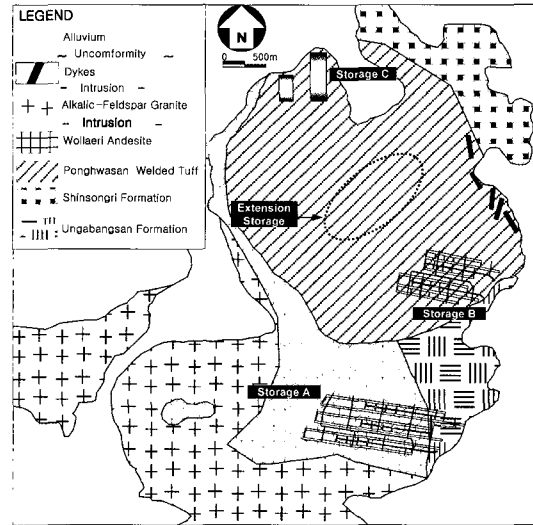
비축시설의 기본설계조사 단계에서 수행된 지하지질 조사는 지표조사로 이루어지며, 이는 지표 지구물리탐사 및 시추조사, BHIV 검층, 시추공의 구간별 정압시험을 포함한다. 조사결과로부터 해석된 수리지질학적 특성은 다음과 같이 정리된다.(엘지엔지니어링, 1999; 한국석유공사-한국원자력연구소, 1999; 김정수, 2000).

조사결과로 예측된 단열대 외의 암반은 치밀하여 낮은 투수성을 갖는 것으로 해석되었고, 시설이 건설될 지역은 지형적인 경사가 급하고 표토층의 발달이 미약하다. 따라서 강수의 많은 양이 지표유출로 손실되어 지하수 함양량이 충분하지 못하기 때문에 작은 양의 지하수 유출로도 지하수위강하가 크게 발생할 수 있는 것으로 예측하였다.

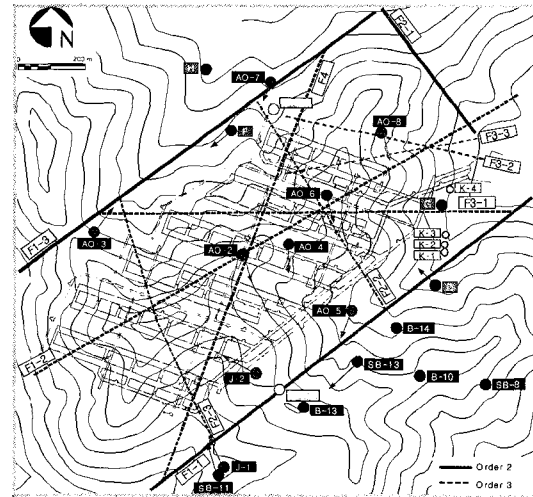
지하수 분포는 지형적인 특성과 함께 저장공동 시설지역 내를 통과하는 단층대의 발달로 인하여 지하수는 주로 단열대에 부존되어 국지적으로 상이한 지하수 부존 체계를 형성하고 있을 것으로 예상하였다.

선구조 분석으로 인지된 F1-1 및 F1-3 구조대(Fig. 1b)는 신규시설의 수리경계면의 역할을 할 것으로 예측되고 지표관측공에서 확인된 지하수위에 의하면 기존시설과 인접한 F1-1 구조대는 약 EL. 15m~EL. 50m로 낮게 형성되어 있는 것으로 분석되었다.

지하공동굴착 시 도출된 지하수관련 자료는 총 28개의 저장공동 주변에 설치된 지표관측공(NX 크기, Fig. 1b)의 수위변화자료와 저장시설에 설치된 수벽공(10cm 구경)의 주입량과 주입압 자료이다. 지표 관측공은 상하부의 수위를 독립적으로 계측할 수 있는 이중 수위측정시설(double completion)이 설치되어 있다. 지하공동의 상부 25m(EL. -4m) 지점에 95개의 수평수벽공(Horizontal Water curtain holes: HW), 파이프 터널(Pipe Tunnel: PT)과 수벽공 분기터널(Water curtain Branch Tunnel: WBT-3, 6) 내에 수직수벽공(Vertical Water curtain holes : VW) 63개가 설치되어 있다(Fig. 2). 수벽공 굴착 후 패커를 설치하여 초기압을 측정하였으며 상부 약 30m 지점에 물탱크를 이용



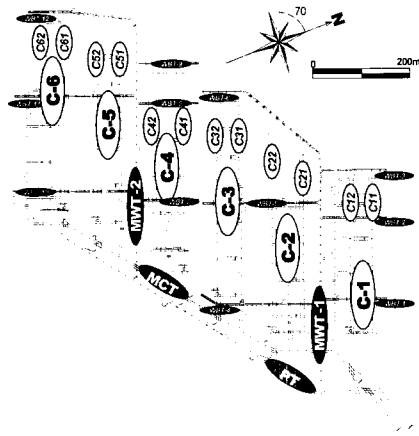
(a) Geologic map



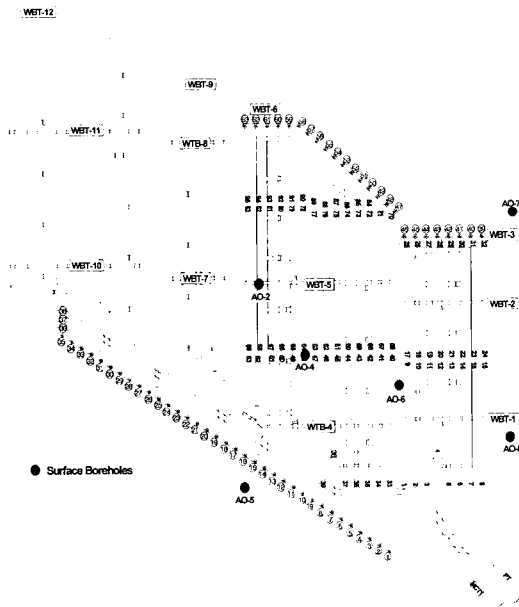
(b) Distribution of fracture zones

Fig. 1. Characteristics of the geology and fracture zone in the study area.

한 정수압 차이로 주입이 이루어지고 있고, 수벽공 압력 및 주입량이 일일주기로 계속되고 있다. 수벽공 설치 시 수벽공의 계측된 초기압은 비교적 지하수체계의 교란이 최소화한 상태에서 저장공동 주변의 수리특성을 대변하게 되며, 주입압 및 주입량의 장기계측 결과는 공동굴착에 따른 주변 지하수체계의 변화에 대한



(a) The name of underground caverns



(b) The distribution of water curtain holes.

Fig. 2. Specification of underground caverns in the site.

정보를 제공한다. 따라서 수벽공의 압력분포 및 주입량 특성의 분석을 통해 수리경계를 구분하고 수리경계에 의해 구분되는 각각의 영역에 대한 3차원적인 수리특성의 해석이 가능하게 한다.

지하공동 심도의 수리특성

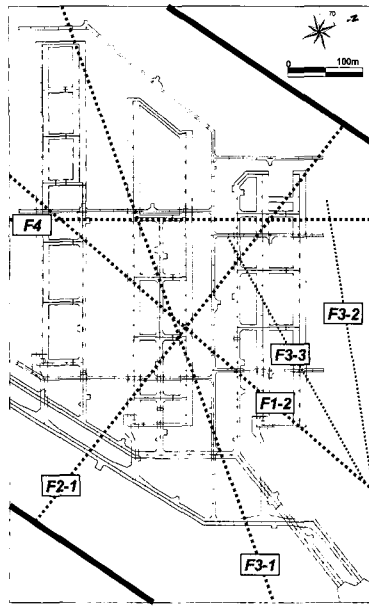
본 연구지역의 수리지질특성은 기본설계 조사 시 지표 조사결과에 의하여 수리적으로 중요한 다수의 투수성 단열대가 분포될 것으로 예상하였다. 조사 당시 조사공에서 관측된 지하수위 분포특성은 대부분 지형적인 특성을 반영하고 있었으며, AO-5와 AW-1의 상대적으로 낮은 수위는 수리경계를 이루는 F1-1 구조대와 관련된 것으로 해석하였다. 그러나 공동굴착 과정에서 밝혀진 투수성 구조의 분포특성은 기본조사 시 예상하였던 투수성 구조와 상이한 분포를 보이고 있다. 지표조사 단계에서 예측된 Order 3규모의 구조대 중 F1-2 구조대를 제외하고 위치 및 방향이 다르거나 확인되지 않았다.(한국석유공사-한국원자력연구소, 2002, Fig. 3). 따라서 공동굴착 시 수집된 수리지질 자료에 근거하여 굴착 시 변화되고 있는 지하수체계에 대한 수리동력학적 변화를 해석하고자 한다.

지표관측공 수위변화

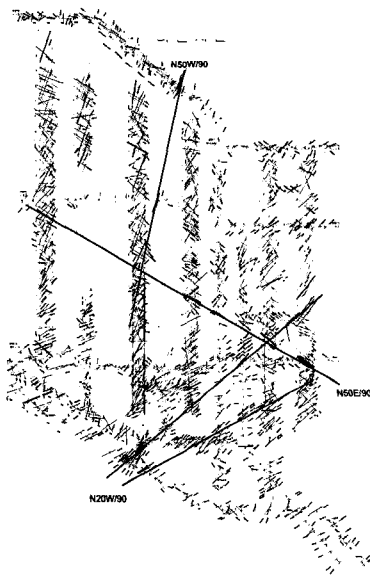
지표관측공의 수위변화는 공동굴착으로 발생하는 지하수체계의 변화를 지시하는 인자로 고려되며, 각 공별 기준수위를 설정하여 저장공동 운영 시 수리 안정성을 평가하는 자료로 활용되고 있다. 일반적으로 공동굴착과 관련하여 발생하는 수위강하는 공동의 굴착일시와 위치를 분석하여 투수성 구조의 연결유무를 파악 할 수 있게 된다. 보다 정확한 수위변화 관측을 위하여 중요한 관측공은 상부와 하부구간의 수위를 동시에 계측할 수 있는 이중 수위측정시설(double completion)을 설치하게 된다.

저장공동 상부에 위치하는 관측공[AO-2, 4, 6, 8(U)]은 강수영향에 의하여 큰 변화를 나타내고 있다(Fig. 4a). 현재 수위가 공동굴착 전 초기수위와는 10~20m의 차이를 보이고 있으나, 계절에 따른 수위의 차가 25~50m 되는 것을 고려 할 때 공동굴착과 관련하여 해석하기에 적절하지 않은 것으로 분석된다.

F1-1 구조대 지역의 지하수체계 변화는 AO-5(L)와 AW-1(L)에서 인지되는 지하수위변화로 해석될 수 있다(Fig. 4b). AO-5의 수위는 이중 수위측정시설 설치 후 하부수위는 EL. 13m를 기록하였으며 상부수위는 EL. 130m로 상승하였다. 이는 기본설계조사 시 계측된 평균 EL. 31m의 수위와 큰 특성차이를 보이고 있다. 또한 지표조사 시 약 EL. 32m의 수위가 계측되었던 AW-1은 이중 수위측정시설 후 AW-1(U)는 EL.



(a) Surface area(predicted)



(b) Underground Cavern(verified)

Fig. 3. The fracture distribution around underground caverns(C-1~3).

68.44m로 상승하였고, AW-1(L)은 EL. 30.08m를 유지하였다. 이중 수위측정시설의 설치시기(2001/10)는 공동의 입구부분을 굴착 할 시기라서 공동굴착의 영향이 미치지 않는 상태임을 고려하면, 지표관측공의 낮은 하부수위는 F1-1구조대의 수위를 반영하는 것으로 해석된다. 그러나 AW-1(L)은 2001년 10월에 급속히 수위가 강하하여 낮은 수위(EL. -0.17m)를 기록하였다가 2003년 9월 급격히 수위가 상승(EL. 23.8m)하였다. 이러한 급격한 수위변화는 F1-1 구조대의 국지적인 작은 규모를 갖는 지하수 저류체의 수위를 반영하는 것으로 사료된다. 수위강하는 공동굴착의 영향으로 판단되나, 확실한 투수성 구조의 특성이 아직 파악되고 있지 않다. 수위상승은 수직수벽공의 주입수의 영향으로 판단되며, 현재 두 공의 수위는 모두 안정적인 수위를 유지하고 있는 것으로 분석된다.

굴착공사와 관련된 수위변화는 AO-8(L), AO-7(U, L), AW-2(U, L) 공에서 뚜렷이 나타난다(Fig. 4c). AO-8공의 수위 변화는 공사터널(construction tunnel)의 분기점 굴착과 관련하여 수위강하가 이루어 졌고, 추가 수벽공 설치(2002/9)로 안정적인 수위가 유지되고 있다. 이는 C-1공동의 상부영역(Gallery)과 하부영역(Bench) 공사기간 중 수위강하가 인지되지 않는 것으로 알 수 있으며, 수벽공 주입에 의하여 C-1공동의 안정된 지하수위가 유지되는 것으로 해석된다. AO-7과 AW-2공은 서로 인근에 위치하여 유사한 지하수위 변화를 보이고 있으며, 이는 수벽공터널 굴착 시 지하수 유입을 유발하였던 저경사 단열군과 수리적으로 연결된 결과로 해석하고 있다. 지하수위 강하폭의 차이는 있으나 이중 수위측정시설의 상하부 모두 굴착과 관련하여 수위강하를 보인다. 이들 공의 수위변화 특성은 초기 수벽공터널 굴착 시 가장 큰 폭의 강하율을 나타내고 저장공동 상부영역(Gallery) 굴착 시는 추가적인 소폭의 수위강하를 나타낸다. 그러나 공동 하부영역(Bench) 공사 중에는 일시적인 수위강하는 있으나 짧은 기간 내에 수벽공의 주입압 수준으로 회복되고 있다. 이러한 지표관측공의 수위변화 폭의 차이는 투수성 구조의 수리적 연결성 차이에 의한 것으로 해석된다.

수벽공의 수리특성

수직수벽공

지하공동 C-1~6의 남동측에 위치한 수직수벽공

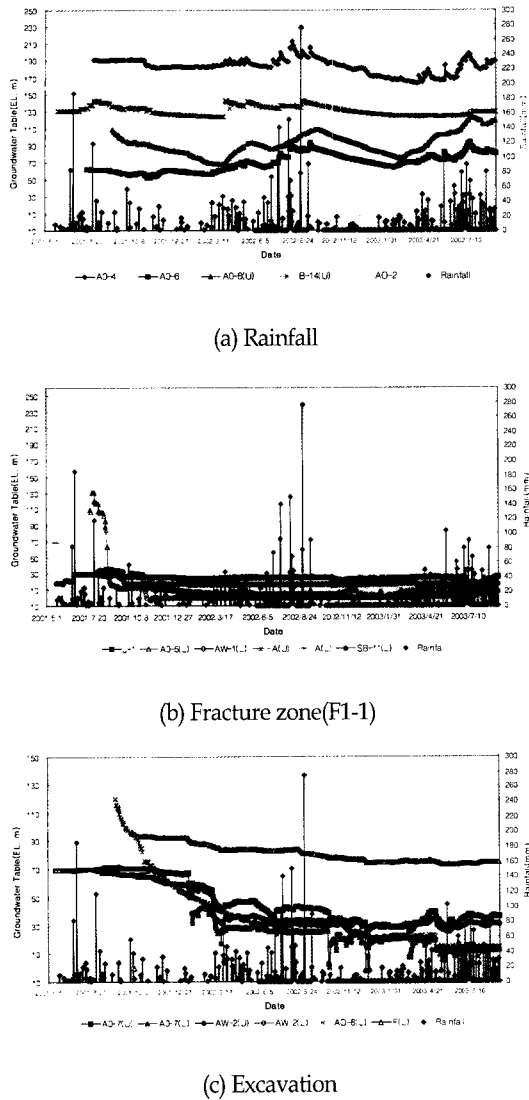


Fig. 4. Fluctuation of groundwater table from surface boreholes.

1~38번과 C-1~3 북서측의 수벽공 터널 내 39~63번공으로 구분하여 압력 및 주입량 변화, 수리간섭시험에 의한 지하수체계 변화를 분석하였다. 남동측에 위치한 수벽공 1~38번은 저장공동 암반의 수리경계를 이루고 있는 F1-1 구조대와 수리적 연결성에 대한 자료를 도출하고, 수벽공 39~63번은 F1-3 구조대와 수리적 연결성을 파악하여 현재 건설 중인 시설의 독립적인 지하수체계를 유지시키는 기능을 판단하는 기초자료가

되며, 인근 기존시설과의 수리간섭현상을 해석하게 된다. 수벽공의 수리간섭시험은 격 공으로 주입을 중단하여 주입중단 시 발생하는 공별 수위강하 현상을 분석하여 수직수벽공의 효율성과 수리적 연결성을 해석하게 된다.

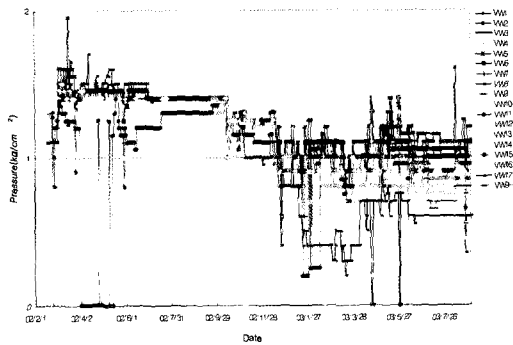
① F1-1 구조대 주변의 수직수벽공: VW-1~38

수직수벽공의 수리간섭시험 결과에 의하면 3개 구역이 수벽공 간 간섭현상(수리적 연결성)이 우세하게 나타났다. 수벽공 주입중단 시의 최저 지하수위는 수리간섭시험 결과의 수위 강하율을 연장하여 예측하게 된다. 저장공동 C-2와 인접한 VW-2~6공의 주입중단 시 예측되는 최저수위는 EL. -3~3m, 그 외의 대부분 지역은 EL. -10~-15m의 낮은 수위로 예상되고 있다. 이러한 낮은 수위는 공동굴착에 의한 영향으로 해석된다. 그러나 수벽공 주입이 원활하게 시행될 때는 최저지하수위가 EL. 14m 이상으로 수벽공 압력이 안정적으로 유지되고 있다. 또한 추가로 설치된 F1-1 구조대 방향의 경시수벽공 (VW-9-1, 21-1, 33-1)은 주입중단이나 주입 시 모두 다른 수직수벽공보다 높은 수위를 보이고 있으며, 이는 남쪽 수리경계인 F1-1 구조대의 지하수위(EL. -11.5~4.5m)를 반영하는 것으로 해석된다. 수벽공의 수위자료는 공동굴착 후 주입수가 중단되어도 지하수가 F1-1 구조대에서 공동구역으로 유동하는 조건이 형성되는 것으로 분석된다.

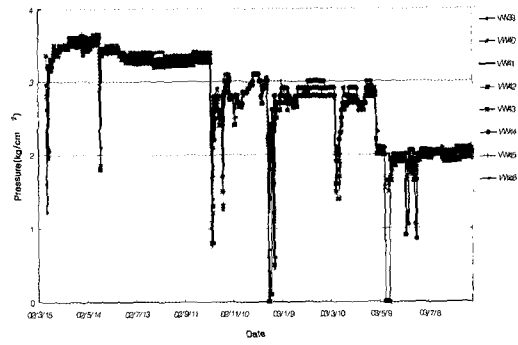
수직수벽공의 공통현상 중 하나는 다량주입이 발생하는 공들은 주입중단 시 수압이 낮게 예측되는 특성을 보인다. 또한 주입 시 보이는 VW-1~16공 구간의 다양한 주입압 분포는 수직에 가까운 단열들이 발달한 구간으로 해석 할 수 있으며, VW-17~38공 구간에 나타나는 작은 폭의 주입압 분포는 수평에 가까운 단열에 의한 수리연결성을 대변하는 것으로 해석 할 수 있다(Fig. 5). VW-2~6구간과 관련된 지질구조는 아직 확인되지 않으나, VW-17~22구간은 N50~60°E계의 저경사 단열조와 그리고 VW-29~32구간은 N20~30°E 계의 저경사 단열조의 영향으로 해석된다.

② F1-3 구조대 주변의 수직수벽공 : VW-39~63

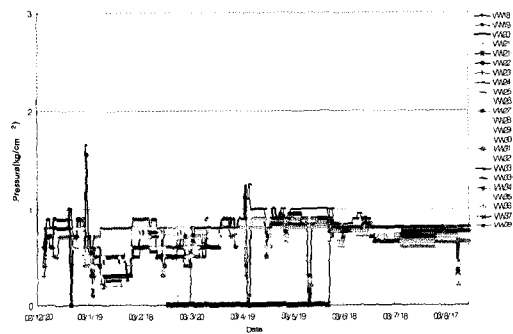
수벽공 주입중단 시 예측된 최저수위는 WBT-3구간이 다소 낮은 EL. -7~-7.5m로, WBT-6 구간은 -2~2m의 분포로 도출되었다. 그러나 수벽공 주입 시의 지하수압은 1.8~1.9 kg/cm²(EL. 13~14m)로 매우 안정적인 지하수위를 유지하고 있다. 또한 WBT-3 구간의 거의 동일한 주입압의 분포특성은 경사가 수평에 가까운



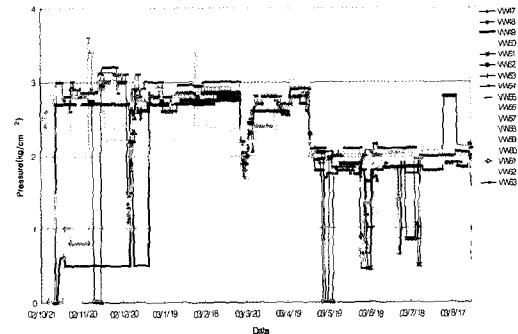
(a) VW-1~17



(a) VW-39~46



(b) VW-18~38



(b) VW-47~63

Fig. 5. The distribution of pressures in the vertical water curtain holes(PT).

Fig. 6. The distribution of pressures in the vertical water curtain holes(WBT-3, 6).

단열에 의한 전형적인 수리적 연결특성으로 판단된다 (Fig. 6). 다량으로 주입되는 공들은 주로 WBT-3 구간에서 나타나고 있으며, 이는 C-1 공동의 굴착에 의한 영향으로 저경사 단열계의 수리적 연결성에 의한 것으로 사료된다. 수벽공의 수리간섭시험으로부터 분석된 F1-3 구조대 주변의 수리적 연결성은 다음과 같다.

- WBT-3 구간(VW-44 제외)의 수벽공들은 매우 양호한 수리적 연결성을 나타내며, 이는 수벽공 터널공사 시 관찰되었던 N15°E 계열의 저경사 단열계에 의한 것으로 해석되고 있다.
- WBT-6 구간(VW-52-59)의 양호한 수리적 연결성은 N20~40°E 계열의 저경사 단열로 분석된다.

수평수벽공

수평수벽공은 저장공동의 25m 상부에 20m 간격으

로 100m의 길이로 설치하게 되며, 초기수압 측정은 공동굴착 전에 이루어지기 때문에 저장공동 주변의 건설 전 지하수압을 대표하게 된다. 공동 상부영역(Gallery) 굴착 후에 실시되는 수리간섭시험에 의해 예측되는 지하수압은 공동굴착으로 변화된 지하수압 특성을 알 수 있게 된다. 일반적으로 높은 초기 지하수압과 주입 시 나타나는 수벽공의 높은 압력은 지표(천부 지하수체)와 수리적 연결성이 양호한 단열(대)이 분포된 지역의 특성을 나타내며, 낮은 초기수압을 갖는 수벽공 또는 높은 초기 지하수압을 보이던 수벽공이 주입 시 낮은 지하수압을 나타낼 때는 천부지하수체와 수리적 연결성이 미약한 지역으로 해석하게 된다(한국원자력연구소, 1996a). 또한 같은 양상의 지하수압 변화를 보이는 수벽공들은 주변부에 발달된 수리 연결성이 양호한 단열과 교차하고 있다고 해석하게 된다(한국원자력연구소, 1996b). 따라서 수평수벽공의 지하수압 변화 및 분

Table 1. Hydraulic characteristics of water curtain holes with the mean low pressure.

	Minimum hole pressure after injection intermittence pressure(kg/cm ²)	Hole pressure during injection (kg/cm ²)	Injection Rate	Hydraulic connectivity
WBT-1 HW-9~10	-0.5, -4	> 2.0	High	Poor
WBT-2 HW-17	-0.75~-0.05,	0.5~1.95	High	Good
WBT-4 HW-40~42	-0.65~0.35	1.95~2	Weakly high	Poor Poor
WBT-5 HW-56 HW-80~83 (*)	-3 -0.25 ~ -0.65	0.5 2	High 0	Poor Good
WBT-6 HW-84~88 HW-93~95	0.5~0.75 0~0.25	1.95~2 2.05~2.5	0 0	Good Good

* Injection pressure : 2.9~3.2kg/cm²

포에 의하여 저장공동 암반에 발달된 지하수 도메인의 차이점을 파악할 수 있다. 그러나 예측되는 지하수압은 100m 길이의 수벽공의 지하수압을 대변하기 때문에 교차하는 단열대의 특성을 도출하기에 어려움이 있다.

수평수벽공의 수리간섭시험 결과로부터 예측되는 수벽공 주입중단 시 최저 지하수압 지역은 대부분 주 수벽터널-1(Main Water curtain Tunnel : MWT-1) 주변으로 형성되고, 저수압 지역은 WBT-1구역의 일부, WBT-5, 6 구역의 일부공에서 나타나고 있다. 이러한 저수압 지대는 공동굴착으로 인하여 변화된 지하수체계의 위치를 대변하게 되며, 각 공의 주요 수리특성은 Table. 1에 요약하였다.

지하공동 C-1, 2, 3 상부에 설치된 수평수벽공 95개의 압력분포는 C-1의 HW-32번과 C-2의 HW-67번을 경계로 수벽공 설치 시 예측된 초기 지하수압의 분포 특성이 다르게 나타난다(Fig. 7). C-3 상부의 수평수벽공(HW-67, 68, HW-79~83, HW-91, 93)에서 높은 초기 압(최고 : 16.5kg/cm²) 분포를 보이고, C-1 상부에서 상대적으로 낮은 초기압 분포(최고 : 6.5kg/cm²)를 보이고 있다. C-2 상부는 초기압이 1.4kg/cm² 이하로 지형적으로 중간고도에 위치하지만 가장 낮은 초기압 분포를 나타내고 있다. 현재 분석된 자료에 의하여 수리학적 도메인을 3개영역으로 분류하였으며, 이와 관련된 투수성 구조의 특성 파악을 위하여 수벽공 내 BHTV자료와 공동의 단열대 분포자료를 현재 정밀분

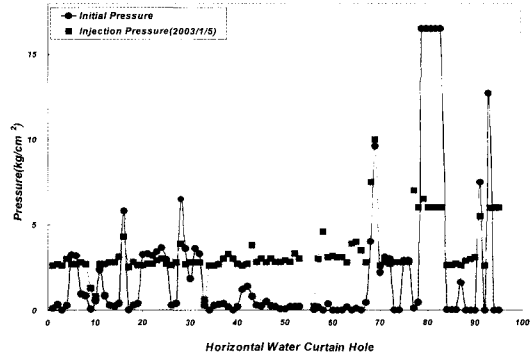


Fig. 7. The pressure distribution of horizontal water curtain holes.

석 중에 있다.

공동건설에 따른 지하수체계 변화

공동굴착과 관련하여 발생한 지하수변화 특성을 본 절에서 기술하였으며, 공동굴착 중 발생하는 최대 지하수위 강하는 현재까지 축적된 자료에 의하여 다음과 같이 요약된다.

- AO-7/AW-2 : 저경사 단열과의 직접적인 연결에 의한 55~60m 강하
 - AO-8 : 저경사 단열과 수직에 가까운 단열체계에 의한 98m 강하
 - HW-80~83 : 특정 투수성 구조는 미확인, 130m 강하
 - HW-93~95 : 특정 투수성 구조는 미확인, 50m 강하
- 공동굴착에 따른 지하수위의 강하는 예상외로 일부 지역에서만 나타나고 있다. 지하수위 강하지역은 지하수체계의 국지적인 변화특성을 나타내며, 주로 수리적 연결성이 양호한 투수성 구조에 의한 영향을 받고 있다. 본 연구지역의 특성 중 하나는 해안가 지역에 특징적으로 발달된 저경사 단열군으로 C-1 저장공동 구역에서 우세하게 발달되어 있으며 AO-7, 8공의 지하수위 강하가 이와 관련되는 것으로 관찰되고 있다. 이는 인근의 기존시설 건설공사에서도 인지되었던 저경사 단열대와 유사한 특성을 갖고 있다.

저장공동구역에서 수리적으로 격리된 지하수 도메인으로 사료되는 C-3 공동상부의 WBT-5 북쪽(HW-80~83)과 WBT-6 서쪽구역(HW-93~95)은 주입중단 시 예상되는 최저 지하수압이 다른 구역보다 높게 나타났고, 현재 주입이 안 되는 상태에서도 안정된 지하수압을 유지하고 있는 것이 특징적이다. 또한 수

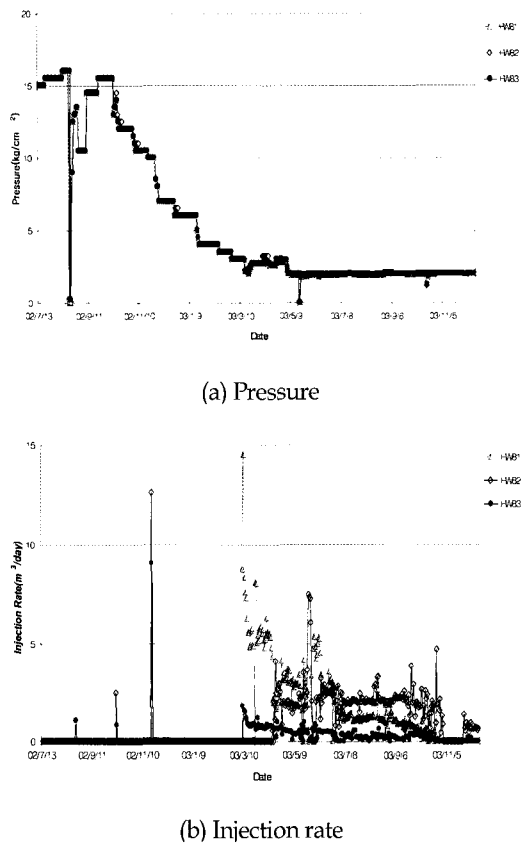


Fig. 8. The distribution of pressures and injection rate in HW-81~83.

Table 2. The hydraulic pressures and hydraulic conductivities of water curtain holes.

	Initial hydraulic pressure (kg/cm ²)	Water curtain hole pressure (kg/cm ²)*	Geometric mean of hydraulic conductivity (m/sec)
C-1	0~6.5	0.8~4.3	8.63 × 10 ⁻⁹
C-2	0~3.1	0.2~4.6	1.4 × 10 ⁻⁹
C-3	0~16.5	2.6~10	9.99 × 10 ⁻¹⁰

* Water curtain hole pressures in November, 2002 at 3.2kg/cm² of injection pressure

벽공 설치 시 예측된 초기 지하수압은 매우 높은 수위를 기록하였던 지역으로 수리간섭시험 시 도출된 저수압 특성은 하부의 공동굴착에 의하여 변화된 지하수체계의 특성을 대변한다.

WBT-5의 HW-80~83 수벽공은 수벽공 설치 시 초기 수압이 15.5 kg/cm²로 예측되었으나 2002년 10월부터 2003년 5월 5일까지 2.3~2.4kg/cm² 으로 감소하였고 (Fig. 8a), 한편 WBT-6의 HW-93~95공은 초기수압이 7kg/cm²로 예측된 후 2002년 12월부터 서서히 감소하여 현재는 2.2~2.5 kg/cm²의 수압을 유지하고 있다. 수벽공 주입량은 HW-81과 83의 경우 2003년 3월 10일부터 주입이 시작되었다가 2003년 11월 2일 이후에는 주입이 이루어지지 않고 있다. HW-82는 2003년 4월 14일부터 주입이 개시되었으며 2003년 11월 27일부터 주입량 감소로 소량이 기록되고 있다(Fig. 8b). 이러한 주입압과 주입량의 변화는 C-3 공동굴착(2003/1~4)의 영향으로 해석된다. 공동굴착에 따른 수벽공 주입압의 감소와 주입량의 증가는 주로 지하공동 상부영역 (Gallery) 굴착 시 크게 변하며 하부(Bench)로 내려갈 수록 일부공의 주입량이 소량증가(HW-82: 2003/11) 하는 것으로 분석된다.

수평수벽공의 굴착 전 지하수압력(초기압) 분포특성에 의하면 수리특성을 달리하는 세 개의 영역으로 구분 가능하였다(Fig. 9). 저장공동 C-2 < C-1 < C-3 영역 순으로 초기 지하수압이 높고, C-3 영역은 지형적인 영향을 반영하는 것으로 해석되며 C-2 영역은 굴착 전에도 낮은 지하수위를 유지하였던 특성을 알 수 있다. 굴착 후에 예측되는 수벽공의 지하수압은 C-3 영역은 18공의 지하수압이 주입압(3.2 kg/cm²)보다 높은 지하수압을 유지하고 있으나 C-1 영역은 2공만이 주입압 보다 높게 나타나는 전반적으로 지하수압이 하강된 것으로 예측되고 있다. 이는 저경사 절리에 의한 지하수 유출에 원인이 있는 것으로 해석되며, 또한 C-1 상부의 수벽공은 상대적으로 높은 수리전도도에 기인하고 있는 것으로 판단된다(Table 2). C-2 상부의 수벽공들은 일반적으로 지하수압이 낮고 수벽공 터널 부근을 제외한 지역은 주입량이 많지 않아 상부 지하수대와 수리적으로 연결이 불량한 지하수 도메인으로 해석할 수 있다. C-2 상부의 일부 수벽공은 주입압 보다 높은 지하수압으로 예측되는데, 이는 주입수에 의한 지하수위 변화로 사료된다.

저장공동 암반의 수리경계를 이루고 있는 F1-1과 F1-3 구조대의 지하수위 변화는 국지적인 자료에 의하여 해석되어진다. F1-3 구조대의 수위 변화는 AO-7과 AW-2의 수위변화인 50~60m의 수위강하로 대변되며, 이러한 수위변화는 저경사 단열이 발달된 C-1공동 지역에 국한되어 인지되고 있다. F1-1 구조대의 공동굴착 전의 수위는 AO-5와 AW-1공의 하부 지하수위인

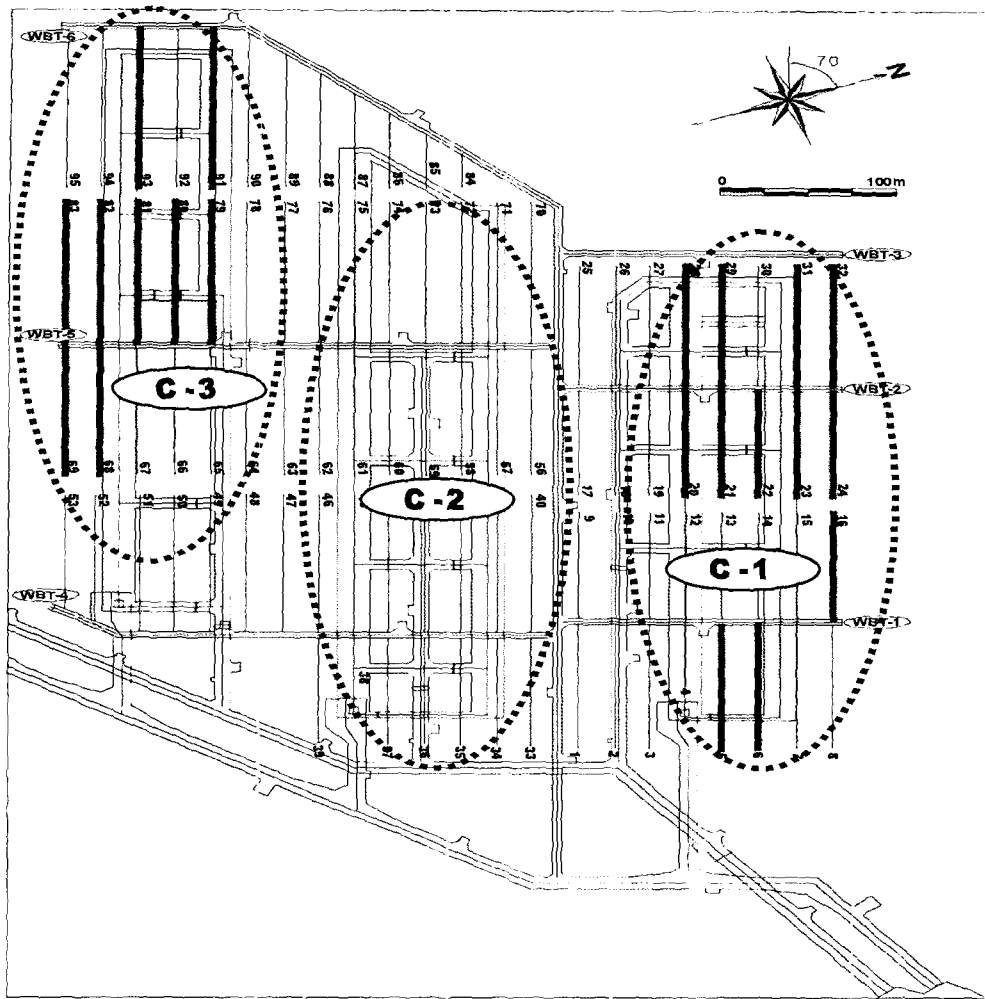


Fig. 9. The pressure distribution of horizontal water curtain holes.
 [Initial pressure > Injection pressure(3.2kg/cm², measuring date: 2002/11/14)]

EL 13~30m로 추정되며, 굴착 후의 지하수위는 추가로 설치된 경사수벽공(VW-9-1, 21-1, 33-1)의 수위인 EL. -11.5~4.5m로 해석 될 수 있다. 각 공에서 계측된 지하수위는 구조대의 불균질한 특성으로 인하여 F1-1 구조대를 대표하는 수위로 해석하기는 어려우나 지하수위 범위를 나타내는 것으로 고려 될 수 있다. 상기 수위변화에 의하면 굴착 후 약 20여미터의 수위강하가 발생되었으나 F1-1 구조대의 지하수위는 수직수벽공의 주입으로 인하여 안정된 수위가 유지되고 있는 것으로 분석된다. 또한 주입수가 중단되어도 지하수유동 방향은 구조대에서 굴착된 저장공동방향으로 형성되는 것으로 사료된다.

지하수위변화에 근거하여 수리학적 방법으로 해석한 지하수체계 변화에 대한 검증을 위하여 지구화학적 접근방법의 일환으로 지하수압이 높은 수벽공(overflow)을 대상으로 시료를 채취하여 수리화학특성을 분석하였다. 저장공동의 수리시험 전에 채수한 지하수화학특성은 2개의 그룹으로 뚜렷하게 구분된다. 제 1 그룹은 Tritium함량이 0.5~1.27 TU, pH는 9.22~10.06, Na는 17.7~21.8 mg/L의 범위를 갖고 있으며, 제 2그룹은 4.59~5.83 TU, 8.42~8.87 pH와 Na는 7.02~14.2 mg/L의 범위를 나타낸다(Table 3). 여수지역 지표수의 화학 성분 중 Tritium 함량은 6 TU에 이르는 것을 감안하면, 상기 제1그룹은 심부지하수의 특성을 제 2그룹은 천부

Table 3. Geochemical characteristics of water sample in water curtain holes(Sampling date : 2002/8/2).

	pH	Eh (mV)	EC (μ S/cm)	DO (mg/L)	TDS (mg/L)	Tritium (TU)	Na (mg/L)
HW-15	8.42	154	75	4.04	5.1	5.09	7.02
HW-16	8.87	167	78	3.83	4.5	4.49	8.04
HW-43	8.59	170	81	4.16	5.1	5.14	7.22
HW-60	8.73	118	95	3.88	5.3	5.25	11.1
HW-68	8.60	189	105	3.79	4.6	4.59	14.2
HW-69	9.22	161	89	3.87	1.1	1.06	18.1
HW-71	10.06	96	120	4.37	1.3	1.27	18.7
HW-72	9.45	80	121	5.09	1.0	1.00	16.6
HW-73	9.36	77	358	4.82	0.7	0.72	21.8
HW-77	8.30	227	66	4.16	5.5	5.54	5.43
HW-79	9.05	89	98	3.86	0.5	0.50	17.7
HW-80	9.20	171	78	3.72	3.2	3.19	12.4
HW-81	9.34	143	92	3.98	1.0	0.95	17.3
HW-82	8.51	190	99	4.66	11.2	11.24	11.3
HW-83	8.49	122	98	3.83	5.8	5.83	11.0
Surface water	7.26	145	71	6.04	6.0	6.03	51.2

지하수의 특성을 나타내는 것으로 구분 될 수 있다. 심부지하수의 특성은 주로 C-3 공동과 C-2 공동의 북부지역에 분포하고 있으며, 천부지하수는 C-2과 C-1 공동영역에 분포하고 있다. 이는 지형적인 특성과도 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 분석된다. C-3 공동 중 천부지하수의 특성을 나타내는 수벽공들(HW-80, 81, 83)은 지표와 수리적 연결성이 양호한 단열대와 교차하고 있는 것으로 판단되며, 이는 수리지학적특성과 일치하는 것으로 관찰되었다.

16개의 지표관측공에서 실시된 구간별(6~9m) 정압 수리시험 자료에 의하여 도출된 지하공동 심도의 유효수리전도도는 5.05×10^{-9} m/sec로 제시되었다(김경수 2000). 수평수벽공에서 실시된 수리시험은 전공의 길이(약 100m)를 대상으로 하였으며, 각 공의 지하수압 특성에 따라 주입 또는 배출시험을 실시하였다. 시험결과는 기하평균에 의하여 각 공동의 평균 수리전도도를 도출하였고, 해석된 C-1, 2, 3 전체의 유효수리전도도는 5.11×10^{-9} m/sec로 나타났다. 공동굴착 후 측정된 수리전도도는 다소 높을 것으로 예상하였으나 매우 유사한 값을 보이고 있다. 이에 대한 정밀분석은 단열체계 분포특성과 추가적인 지구화학자료 특성에 의하여 심도 있게 분석될 것이다.

결론

지하유류저장시설 건설과정 중 공동굴착 과정에서 도출된 수리지질학적 자료를 토대로 저장공동 심도에서의 수리특성은 다음과 같이 해석되었다.

1. 수직수벽공은 저고경사의 투수성 단열 포함 여부에 따라 수리적 연결성에 의한 주입압의 분포양상이 다르게 나타났다. 남동측의 수리경계면으로 해석되는 F1-1 구조대의 최저수위는 EL. -15~2m로 예측된다.
2. 수평수벽공의 압력분포특성에 의해 수리특성을 달리하는 세 개의 영역으로 구분하였고, C-2 < C-1 < C-3 영역 순으로 지하수압이 높게 분포한다. 또한 C-2 상부의 수벽공은 지하수압이 낮고 주입량도 많지 않아 상부 지하수체와의 수리적 연결성이 불량한 지하수 영역으로 해석할 수 있다.
3. 1차적인 지구화학 자료에 의하면 지하수압이 높은 지역은 심부 지하수를 많이 포함하며 체류시간이 긴 것으로 해석되며, 이는 지형적 특성과도 밀접한 관계가 있는 것으로 분석된다. 또한 지하수의 화학적 특성 자료는 지표와 수리적으로 연결된 단열대를 도출할 수 있는 수단으로 활용될 수 있다.
4. HW-80~83과 HW-93~95공은 주입 중단 시 예상되는 최저 지하수압이 다른 구역보다 높게 나타나고 주입이 안 되는 상태에서도 안정된 지하수압을 유지하고 있는 것이 특징적이며, 압력 및 주입량의 진화과정은 하부의 공동굴착에 의한 지하수체계 변화를 대변하는 자료가 되고 있다.

5. 저장공동 심도의 지하수체계는 소수의 저고경사 투수성 단열 및 상부 지하수체의 수리적 연결성에 의해 다양한 지하수체계(Hydraulic compartment)를 형성하고 있다.

사 사

본 연구는 한국석유공사와 한국원자력연구소에서 공동으로 시행하는 연구개발사업에 의하여 수행되었다. 현장조사에 협조를 아끼지 않으신 한국석유공사 및 대우엔지니어링 관계자 여러분께 심심한 감사를 드린다.

참고문헌

- 김경수, 2000, 수치모델링을 이용한 지하원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구, 박사학위논문, 충남대학교, 212p.
- 한국동력자원연구소, 1989, 1:50,000 남해-서상 지질보고서.
- 엘지엔지니어링(주), SK 건설(주), 1999, U-1 추가비축기지 조사설계 용역 지질조사보고서.
- 한국석유공사-한국원자력연구소, 1999, 암반지하수체계특성 연구, 91p.
- 한국석유공사-한국원자력연구소, 2002, 지하비축시설 건설 중 현장실측자료를 이용한 지하수유동체계 해석기술 개발, 46p.
- 한국원자력연구소, 1996a, U-2E 지하원유비축시설 수리안정성 종합검토 보고서.
- 한국원자력연구소, 1996b, U-1-1 지하원유비축시설 수리안정성 종합검토 보고서.
- Carlsten, S., Lindqvist, L., Olsson, O., 1989, Comparison between radar data and geophysical, geological and hydrological borehole parameters by multivariate analysis of data, SKB-TR-89-15, 296p.
- Doe, T. W., 1999, Evaluating fracture network geometry from hydraulic data and underground test facilities, in proceedings of the international symp. on dynamics of fluids in fractured rocks, Frybishenko(ed), Feb. 10-12, 1999, 65-68.
- Olsson, O., 1992, Site characterization and validation - Final report, Stripa project, Technical Report 92-22, 364p.
- Rhén, I.(ed), Bäckblom, G.(ed), Gustafson, G., Stanfors,

R., Wikberg, P., 1999, ÄSPÖ HRL-Geoscientific evaluation 1997/2 : Results from pre-investigations and detailed site characterization, SKB TR 97-03, 240p.

투 고 일 2004년 2월 7일
 심 사 일 2004년 2월 8일
 심사완료일 2004년 3월 4일

조성일

한국원자력연구소 심부지질환경특성연구
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
 Tel : 042-868-2064
 E-mail : chosi@kaeri.re.kr

김천수

한국원자력연구소 심부지질환경특성연구
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
 Tel : 042-868-2063
 E-mail : ncskim1@kaeri.re.kr

김경수

한국원자력연구소 심부지질환경특성연구
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
 Tel : 042-868-2365
 E-mail : kskim@kaeri.re.kr

송무영

충남대학교 자연과학대학 지질학과
 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지
 Tel : 042-821-6423
 E-mail : mysong@cnu.ac.kr

전한석

한국석유공사
 431-711 경기도 안양시 관양동 1588-14
 Tel : 031-380-2881
 E-mail : hanseok@knoc.co.kr