

수리영역 개념을 적용한 단열암반의 지하수유동체계 해석

조성일^{*1)} · 김천수¹⁾ · 배대석¹⁾ · 김경수¹⁾ · 송무영²⁾

¹⁾한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부, ²⁾충남대학교 지질환경과학과

Analysis of a Groundwater Flow System in Fractured Rock Mass Using the Concept of Hydraulic Compartment

Sung-II Cho^{*1)} · Chun-Soo Kim¹⁾ · Dae-Seok Bae¹⁾ · Kyung-Su Kim¹⁾ · Moo-Young Song²⁾

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

²⁾Dept. of Geology and Earth and Environmental Sciences

본 연구는 지하유류저장공동 굴착 시 조사된 단열체계 및 수리인자를 토대로 투수성구조영역과 수리암반영역으로 세분화하여 연구지역의 불규칙하고 복잡한 지하수유동체계를 해석해 보고자 하였다. 지하공동 내에서 확인된 단열분포특성과 지하공동굴착과 동시에 지표관측공 28개를 통해 측정된 지하수위 및 수평수벽공 95개와 수직수벽공 63개에 의해 일별로 계측된 압력 및 주입량을 통해 연구지역은 지하수의 방벽역할을 하는 3개의 투수성구조영역과 4개의 수리암반영역으로 구분이 가능하였다. 공동심도에 발달된 투수성 구조는 국지적 큰 규모 단열대인 NE-1과 2개의 국지규모 단열대로 구성되고 있으나, 수리암반영역은 국지규모 단열대에 의하여 4개영역으로 구분된다. FZ-2 구조대와 인접한 수리암반영역 Domain-A와 B는 수평수벽공의 초기압이 최대 약 15 kg/cm²까지 높으며, 지하공동 굴착 시 상·하부의 지하수위변화의 차이가 10 ~ 40 m로 상·하부의 수리적 연결성이 양호한 것으로 평가된다. 반면, FZ-1 구조대와 인접한 Domain-C와 D는 이중수위측정시설 설치 시 상부와 하부의 지하수위차는 최대 약 120 m로 매우 크게 나타났으며, 상부 지하수는 공동굴착 시 수위가 크게 변화하지 않았다. Domain C, D의 하부암반의 수리전도도(7.2×10^{-10} m/sec)는 상대적으로 낮은 지하수 함양량의 원인을 제공하고 있으며, 연속체계념의 지하수유동모델링을 통해 계산된 4개영역의 함양량은 연구지역의 20년간 평균 강수량(1,356 mm/year)의 2%로 계산되었다.

주요어 : 지하유류저장시설, 수리영역, 지하수, 수리전도도, 함양률

This study aims to evaluate a complex groundwater flow system around the underground oil storage caverns using the concept of hydraulic compartment. For the hydrogeological analysis, the hydraulic testing data, the evolution of groundwater levels in 28 surface monitoring boreholes and pressure variation of 95 horizontal and 63 vertical water curtain holes in the caverns were utilized. At the cavern level, the Hydraulic Conductor Domains(fracture zones) are characterized one local major fracture zone(NE-1)and two local fracture zones between the FZ-1 and FZ-2 fracture zones. The Hydraulic Rock Domain(rock mass) is divided into four compartments by the above local fracture zones. Two Hydraulic Rock Domains(A, B) around the FZ-2 zone have a relatively high initial groundwater pressures up to 15 kg/cm² and the differences between the upper and lower groundwater levels, measured from the monitoring holes equipped with double completion, are in the range of 10 and 40 m throughout the construction stage, indicating relatively good hydraulic connection between the

* Corresponding author: chosi@kaeri.re.kr

near surface and bedrock groundwater systems. On the other hand, two Hydraulic Rock Domains(C, D) adjacent to the FZ-1, the groundwater levels in the upper and lower zones are shown a great difference in the maximum of 120 m and the high water levels in the upper groundwater system were not varied during the construction stage.

This might be resulted from the very low hydraulic conductivity(7.2×10^{-10} m/sec) in the zone, six times lower than that of Domain C, D. Groundwater recharge rates obtained from the numerical modeling are 2% of the annual mean precipitation(1,356mm/year) for 20 years.

Key Words: underground oil storage cavern, hydraulic compartment, groundwater, hydraulic conductivity, recharge rate

서론

결정질암반 내 지하수유동체계는 불규칙하고 복잡한 분포특성을 갖는 소수의 투수성 단열에 의하여 지배되므로, 투수성 구조의 기하학적인 분포특성과 이의 수리특성을 정확히 파악하는 것은 매우 중요하며, 분리단열망(DFN : Discrete Fracture Network)을 통한 유동개념과 수리지질학적 특성이 다른 영역으로 세분화하여 각 영역의 특성에 의하여 전체적인 유동체계를 해석하는 방법이 이용된다.

분리단열망 모델은 암반이 투수성 단열과 불투수성 매질로 대변되는 개념모델로 수치모델 내에 개개의 단열을 모두 포함할 수 없으므로 수리적으로 중요한 단열만을 고려하는 것이 관건이며, 불연속 단열(2-D) 또는 단열면(3-D)들의 망의 교차점을 통해 형성된 수로에 의해 지하수유동체계를 해석한다. 따라서 지하수유동해석은 조사자료의 신뢰도에 따라 정확성이 좌우된다. 그러나 높은 신뢰도의 자료를 확보하기 위해서는 많은 조사가 요구되며, 컴퓨터 계산능력의 한계로 인해 해석할 수 있는 모델크기가 제한되는 단점이 있다. 반면, 본 연구에서 적용한 수리영역 개념은 Andersson et al.(2002)이 제시한 방법으로, 지하수의 주 유동로와 방벽역할을 하는 투수성구조영역(HCD : Hydraulic Conductor Domain)과 투수성구조영역을 경계로 하는 수리암반영역(HRD : Hydraulic Rock Domain), 토질층과 지표풍화파쇄대를 포함하는 수리토질대영역(HSD : Hydraulic Soil Domain)으로 구분하여 영역별 단열분포특성과 수리특성을 정밀조사하는 방법이다(Fig. 1). 본 접근방법 역시 수리경계 역할을 하는 투수성구조영역과 수리암반영역 내의 단열체계 및 수리특성이 정확히 조사되어야만 높은 해석신뢰도를 기대할 수 있다.

본 연구지역에 건설되는 지하유류저장시설은 유류

의 누출에 대한 수리학적 안정성을 재고하기 위하여 설치되는 수벽공(water curtain holes)과 지하수유동체계 파악을 위하여 상·하부의 지하수위를 독립적으로 계측할 수 있는 이중수위측정시설(double completion)이 설치된 지표관측공(Table 1, Fig. 3a: 대우엔지니어링 2003)을 통해 공동굴착 시 지하수체계변화를 비교적 정밀하게 조사할 수 있는 장점이 있다. 또한 공동 내 단열조사(fracture mapping)를 통해 신뢰도 높은 단열분포특성을 파악할 수 있다.

따라서 본 연구는 지하유류저장공동 굴착 시 비교적 정밀하게 해석된 단열체계 및 수리인자를 토대로 투수성구조영역과 수리암반영역으로 세분화하여 영역별 수리특성을 조사하고, 지하수유동모델링을 통해 연구지역의 불규칙하고 복잡한 지하수유동체계를 해석해 보고자 하였다.

수리경계 구분

연구지역의 지질은 Fig. 2a와 같이 백악기 말 유천층군의 화산암류 및 이를 관입한 불국사 화성암류의 알칼리장석화강암과 맥암으로 구성되어 있고(박희인 외, 1989), 선구조 분석을 통해 예측된 국지주단열대(local major fracture zone) 규모의 FZ-1 및 FZ-2, FZ-3 구조대(Fig. 2a)는 시추조사 시 일부 확인되었으며, 기존에 이미 건설되어 운영 중에 있는 저장시설 Storage B와 C, 현재 추가적으로 굴착 중에 있는 신규시설 사이의 수리적 경계역할을 하고 있는 것으로 해석하였다(조성일, 2005).

본 연구지역 전반의 공간적인 수위분포특성은 공동굴착 전 나공(open hole)상태에서의 평균수위(엘지엔지니어링(주)SK 건설(주), 1999)를 이용하여 해석하였다. 연구지역의 지하수위는 지형경사에 우선 지배되며, 추

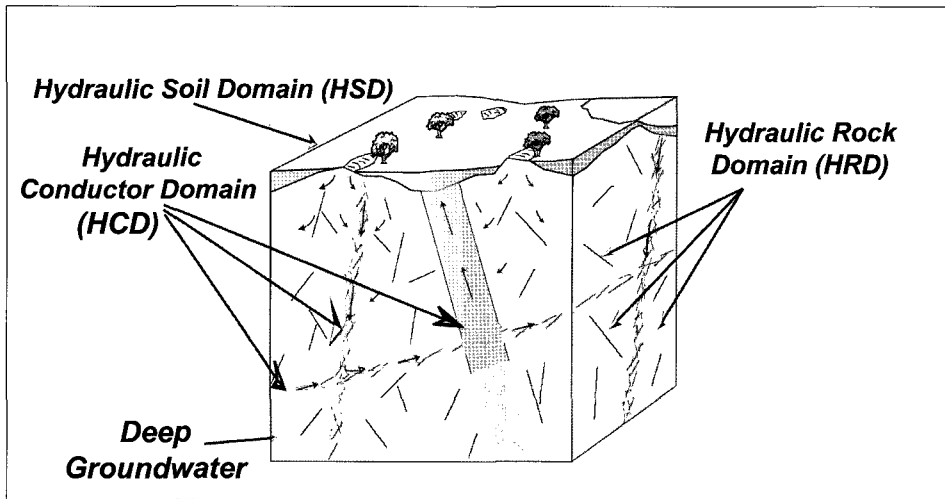
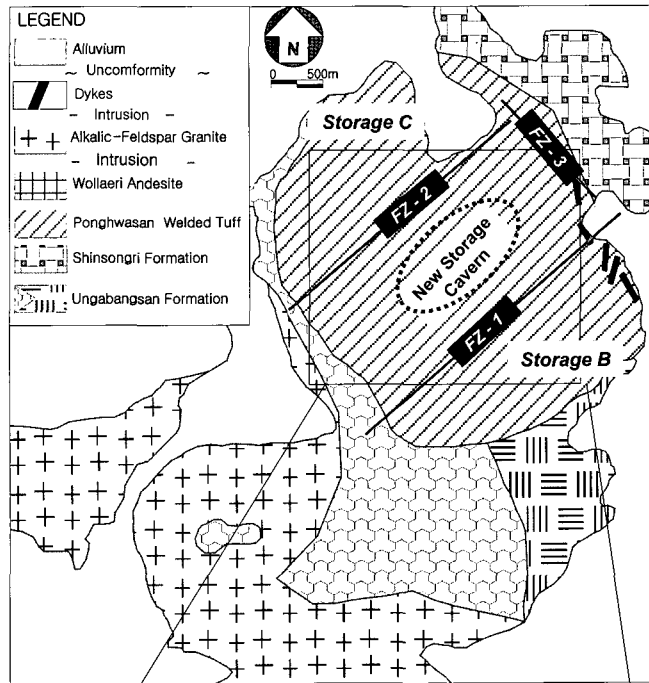


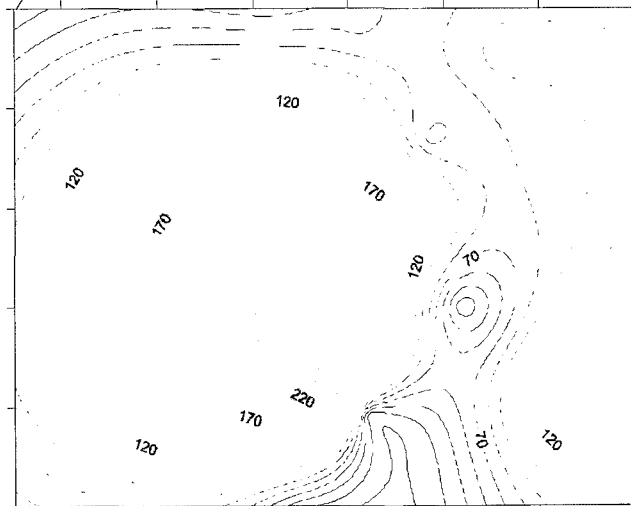
Fig. 1. Conceptual model of the hydraulic domain(Andersson et al., 2002).

Table 1. Specification of the double completion boreholes in the study area.

Hole No.	Upper Zone(U, EL. m)	Lower Zone(L, EL. m)
B-13	11.1 ~ 266.2	-14.5 ~ -29.8
B-14	10.1 ~ 145.1	-27.9 ~ -12.9
SB-8	12.3 ~ 177.3	-27.7 ~ -12.7
SB-11	54.9 ~ 195	-30 ~ 28
SB-13	-1 ~ 177.5	-43.3 ~ -27.2
J-1		-59.6 ~ 188.47
J-2		40.66 ~ 281.69
AO-1		-60.84 ~ 98.91
AO-2		5 ~ 270.78
AO-3	35 ~ 200.65	-59.64 ~ 10
AO-4		4.97 ~ 231.62
AO-5	7 ~ 143.17	-67.32 ~ -18
AO-6		6 ~ 221.3
AO-7	-20.2 ~ 70.42	-74.58 ~ -45
AO-8	27 ~ 144.47	-60 ~ 3.82
AW-1	36 ~ 270.8	-14.27 ~ 6
AW-2	0 ~ 87.8	-62.2 ~ -25
H		-140.63 ~ 4.17
I		-91.17 ~ 4.61
G	18.35 ~ 65.33	-30.5 ~ -5.15
F	13.93 ~ 103.2	-61.14 ~ -14.25
A	-4.87 ~ 45.87	-60 ~ -24.67
D	38.72 ~ 89.84	-60 ~ 24.06



(a) Geologic map



(b) Groundwater table(EL. m) before the excavation

Fig. 2. The geologic map and groundwater table of the study area.

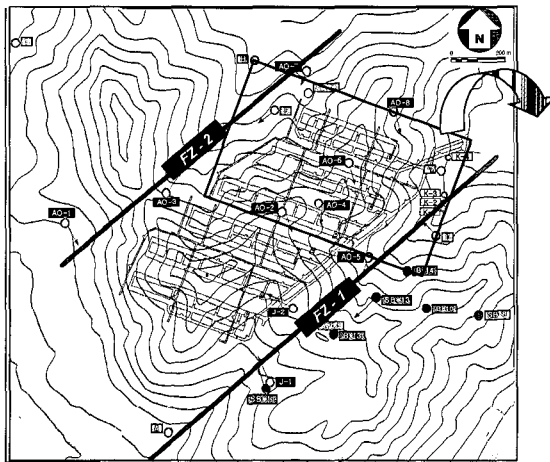
가 저장시설 북측의 FZ-2 구조대 주변은 지형의 경사와 유사한 지하수위를 형성하고 있으나, 남측의 Storage B 지구와 경계를 이루는 FZ-1 구조대 주변은 지하수위가 약 EL. 15 m ~ EL. 50 m로 지형의 고도와는 최대 약 120 m의 급격한 지하수위 경사를 갖는다(Fig. 2b).

지표로부터 최대 약 340 m 최소 110 m 심도하의 지하저장공동 상부 26 m 지점(EL. -4m)에 설치된 95개 수평수벽공(직경 : 110 mm)의 초기지하수압은 지하공동 내에서 확인된 NE-1 단열대를 경계로 FZ-1과 인접한 두 지역의 낮은 영역과 FZ-2 구조대 주변의 높은 수압영역으로 구분된다(Fig. 3). 높은 수압영역은 NW-2 단열대를 경계로 Domain-A는 7 ~ 16.5 kg/cm²로 매우 높은 초기압 분포를 보이며, Domain-B도 3 ~ 6.5 kg/cm²로 비교적 높은 압력분포를 보이고 있다. Domain-A와 Domain-B의 지형적 고도차가 약 100 m에 이르는 것을 고려하면 두 지역의 초기압은 지형적인 영향으로 해석

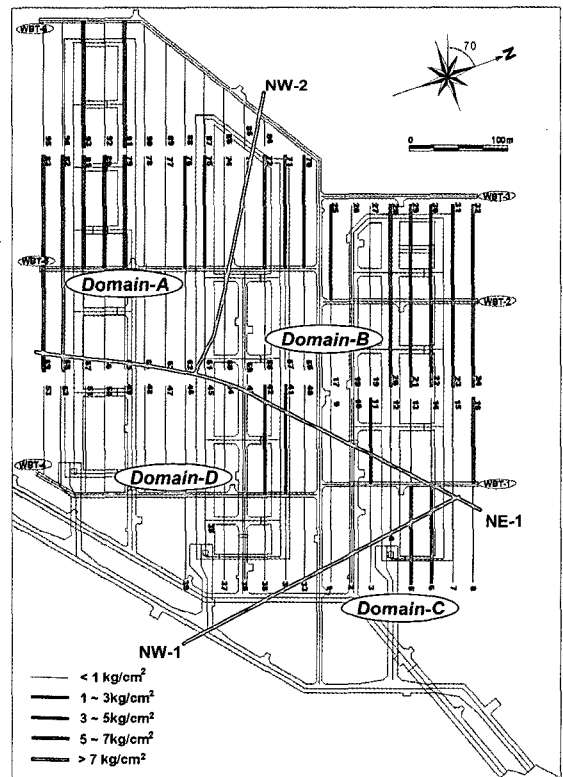
가능하다. 이 두 영역의 초기압은 인근 지표 관측공의 이중수위측정시설에서 계측된 하부지하수위와도 매우 근사한 수치를 나타낸다. 그 외에 1 ~ 5 kg/cm²의 초기압은 국지적으로 분포하고 있으나 공동지역 면적의 50 % 이상이 1 kg/cm² 보다 낮은 초기압을 나타내고 있다.

반면, FZ-1 구조대와 인접한 Domain-C와 D는 0 ~ 1.4 kg/cm²로 매우 낮은 초기압분포를 보이고 있다. FZ-1 구조대와 인접한 파이프 터널(pipe tunnel) 내의 수직수벽공 VW-1 ~ 17번의 초기압은 NW-1 단열대를 경계로 최대 약 12 m의 수두차를 나타내며, FZ-2와 인접한 수벽공분기터널(water curtain branch tunnel) WBT-3과 6에 위치한 수직수벽공은 NW-2 단열대를 경계로 저경사투수성 단열이 교차하는 VW-39 ~ 51번의 수벽공이 4 ~ 5 m 낮은 수두분포를 나타낸다.

연구지역은 지표관측공 및 수벽공에서 도출된 공동 굴착 전 수위분포를 고려하면 NE-1 단열대를 경계로 이



(a) Surface boreholes



(b) Initial pressures(NE-1, NW-1, NW-2 :

Confirmed fracture zones in the cavern)

Fig. 3. Location map of surface boreholes and distribution of the initial pressures in the water curtain holes.

중수위측정시설 상·하부의 수위차가 크지 않고 수평수벽공의 초기압이 상대적으로 높은 북서부 지역(FZ-2 구조대 주변)과 이중수위측정시설 상·하부의 수위차가 매우 크고 수평수벽공의 초기압이 비교적 낮은 남동부 지역(FZ-1 구조대 주변)으로 구분 할 수 있으며, NW-1과 NW-2 단열대를 경계로 다시 세분화 할 수 있다. 따라서 국지단열대 규모의 NE-1, NW-1, NW-2 단열대는 투수성구조영역으로 해석 가능하고, 본 단열대에 의해 구분된 4개의 수리암반영역으로 세분화할 수 있다.

영역별 수리특성

투수성구조영역

투수성구조영역 NE-1, NW-1, NW-2 단열대의 수리특성은 투수량계수와 저유계수로 평가될 수 있으나, 본 연구지역의 수벽공에서 수행된 수리시험은 정압주입/수위강하시험으로, 이중패커가 아닌 수벽공 입구에 단일의 패커만을 설치한 후 수벽공 전 구간에 대해서 시험을 하였기 때문에 투수성구조영역에 국한된 정확한 특성을 해석하기에는 한계가 있었다. 따라서 본 논문에서는 투수성구조영역이 교차하는 수벽공만을 선별하여 수리전도도의 평균값으로 산정하였다. Holmén(1997)은 단열암반 내 투수성은 기하평균으로서 대표 값을 선정하는 것이 타당한 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서도 수리영역에 대한 대표값은 기하평균으로 계산하였다. 기하평균에 의한 투수성구조영역별 수리전도도도는 $1 \times 10^9 \sim 4 \times 10^8$ m/sec의 범위를 갖는다(Table 2).

단열대를 제외한 본 연구지역의 특징적인 투수성구조는 WBT-3 하부의 종단부에서 교차된 N15°E/18°SE 방향의 저경사 투수성 단열로, 공동굴착 시 많은 양의 지하수가 본 단열을 통해 유입되어 주변 지하수의 수위강하를 유발하였다. 저경사투수성 단열은 BHIV(BoreHole TeleViewer) 결과에 의하면 개구성(open)이며 단열 틈의 크기가 약 0.02 m의 특성을 갖고 있다. 본 단열과 수리적으로 직접적인 연결성을 갖는 수직수벽공은 VW40, 42, 43, 45, 46번공이며, 이에 의해 계산된 수리전도도의 기하평균은 5×10^7 m/sec로 매우 높은 값을 갖는다.

수리암반영역

수성구조영역에 의해 세분화된 4개 수리암반영역의 수리특성은 공동굴착과 동시에 계측된 지표관측공 및 수벽공의 수위변화에 따른 수리적 연결성과 수벽공의

정압주입/수위강하시험에 의한 수리전도도의 평균값으로 산출하였다. 수리암반영역은 투수성구조영역이 교차된 수벽공과 지하공동으로 주입수가 직접 유출되는 수벽공을 제외한 각 영역 내 수벽공들의 수리전도도의 평균값으로 수리특성을 평가하였다. 각 영역의 수리전도도의 평균값은 기하평균이 $2 \times 10^{10} \sim 4 \times 10^9$ m/sec로 저경사투수성 단열이 교차하는 Domain-B의 수리전도도가 가장 높으며 독립적인 수리영역으로 해석된 Domain-D가 가장 낮은 수리전도도를 나타내었다(Table 2).

FZ-1 구조대와 인접한 Domain-C와 D의 지하수체계는 AO-5(L: 하부)와 AW-1(L)에서 인지되는 지하수위변화로 해석될 수 있다(Fig. 4). AO-5의 수위는 이중수위측정시설 설치 후 하부수위는 EL. 13 m를 기록하였으며 상부수위는 EL. 130 m로 상승하였다. 이는 이중수위측정시설 설치 전 계측된 EL. 31 m의 평균수위와 매우 큰 차이를 보이고 있다. 또한 지표조사 시 약 EL. 32m의 수위가 계측되었던 AW-1은 이중수위측정시설 설치 후 AW-1(U: 상부)는 EL. 68.44 m로 상승하였고, AW-1(L)은 EL. 30.08 m를 유지하였다. 이중수위측정시설의 설치시기(2001/10)는 공동의 입구부분을 굴착 할 시기라서 공동굴착의 영향이 미치지 않는 상태임을 고려하면, 지표관측공의 낮은 하부수위는 FZ-1구조대의 수위를 반영하는 것으로 판단된다. 그러나 AW-1(L)은 2001년 10월에 급속히 수위가 강하하여 낮은 수위(EL. -0.17 m)를 기록 하였다가 2003년 9월 급격히 수위가 상승(EL. 23.8 m)하였다. 이러한 급격한 수위변화는 FZ-1 구조대의 국지적인 작은 규모를 갖는 지하수 저류체의 수위를 반영하는 것으로 사료된다. 수위상승은 수직수벽공의 주입수의 영향으로 판단되며 현재 두 공의 수위는 모두 안정적인 수위를 유지하고 있는 것으로 관측되고 있다.

FZ-2 구조대와 인접한 Domain-A와 B의 지하수체계는 AO-7(U, L), AW-2(U, L) 공에서 뚜렷이 나타난다(Fig. 5). AO-7과 AW-2공은 서로 인근에 위치하여 유사한 지하수위변화를 보이고 있으며, 이는 수벽공터널 굴착 시 지하수 유입을 유발하였던 저경사 투수성 단열과 수리적으로 연결된 결과로 해석하고 있다. 또한 지하수위 강하 폭의 차이는 있으나 이중수위측정시설의 상·하부 모두 굴착과 관련하여 유사하게 수위가 변화하였다. 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-1) 공사 중에는 일시적인 수위강하는 있었으나 짧은 기간 내에 수벽공의 주

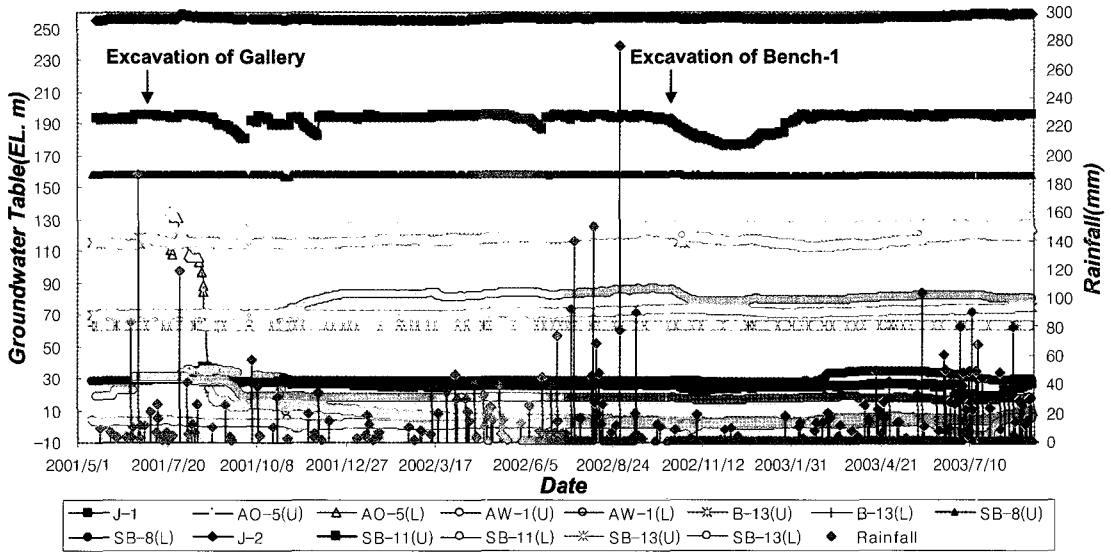


Fig. 4. Evolution of the groundwater levels in the surface boreholes around the FZ-1 fracture zone.

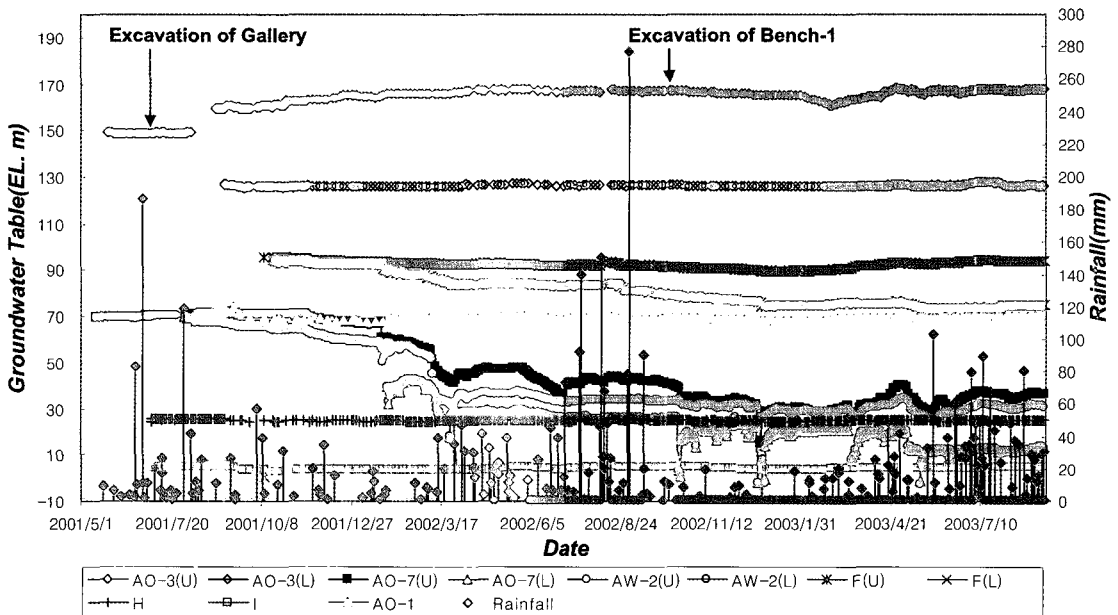


Fig. 5. Evolution of the groundwater levels in the surface boreholes around the FZ-2 fracture zone.

입압 수준으로 회복되었다. 이러한 지표관측공 수위변화 폭의 차이는 투수성 구조의 수리적 연결성 차이에 의한 것으로 해석된다.

지하수유동모델 구성

개념모델

지하수유동모델링 과정에서 가장 중요한 단계는 모델링하려는 지하수체계에 대해 가능한 한 자연상태에 가까운 개념모델을 설정하는 것이다. 수리지질학적 개념모델은 지하수유동특성의 기초가 되는 지하수체계에 대한 종합적인 이해정도를 나타내는 것으로, 보다 자세하고 정확한 개념모델을 구성하기 위해서는 조사가 진행되면서 축적되는 자료를 이용하여 단계적으로 초기의 개념모델을 수정·보완하여야 한다. 본 연구에서는 연속체 개념의 Visual Modflow(2.81)을 이용하여 3차원적 지하수유동체계 해석을 수행하고자 하였으며, Visual Modflow 프로그램은 첫 번째 단계에서 대상지역의 지형, 지질, 지질구조의 주요특성을 대표하는 지질구조 개념모델을 설정하였다.

본 연구지역 내 지표관측공의 이중수위측정시설을 통해 계측된 상부와 하부구간의 지하수위는 그 차이가 너무 크기 때문에 두 개 지하수위를 동시에 만족할 수 있는 하나의 모델을 구성하는 것은 쉽지 않다. 따라서 상부 지하수위와 하부지하수위를 모두 만족할 수 있는 두 개의 모델을 구성하여 지하수유동체계를 해석하였다.

모델영역 내 암종은 동일 암종으로 모델 내에서 암종 구분은 하지 않았으며, 최상부층인 투수성이 높은 지표 풍화대는 상부지하수체계 해석 시에만 포함시켰고, 모델의 수직방향으로의 수리지질학적 특성이 동일한 단일의 층으로 설정하여 공동굴착 전 초기수위를 상부경계로 입력하였다. 수평적으로는 제 2장 및 3장에서 해석된 저장공동 내 분포하는 3개 단열대 및 수리암반영역의 수리특성을 각각 반영하였다. 모델의 북쪽 및 남쪽, 그리고 동쪽경계는 지하수유동의 경계를 이룰 것으로 예측되는 FZ-1 및 FZ-2, FZ-3 구조대를 모델의 수리경계로 하였고, 서쪽은 제석산 정상부의 능선을 경계로 설정하였으며, 하부경계는 모델영역의 x, y방향의 크기를 고려하여 약 1/3 크기에 해당하는 EL. -250 m까지 확장하였다.

해석영역 및 경계조건

해석영역은 962 m × 814 m 규모로, 공동의 외곽지역

은 20 m × 20 m, 공동이 위치하는 영역은 10 m × 10 m 간격으로 격자를 구성하였으며, 총 column 수는 91, row수가 95, layer 수는 14로 설정하였다(Fig. 6).

모델의 최상부층은 상부지하수체계 해석 시에는 지표고도를 상부경계로 입력하였고, 하부지하수체계 해석 시에는 수벽공에서 계측된 초기수압을 수위로 환산한 값을 입력하여 계산하게 하였으며, 두 모델 모두 함양량도 상부경계조건으로 입력하였다. 모델의 좌측 제석산 능선부 및 우측 FZ-3 구조대 경계부는 general head boundary, 모델영역 내 계곡부는 river boundary, 지하공동 및 수벽공에는 대기압 상태로 간주하여 대기압 상태에서의 constant head boundary 값을 입력하였고, 바다에 해당하는 영역에도 constant head를 적용하였다. 또한 본 연구지역의 저수위분포를 이루고 있는 FZ-1 구조대 주변의 경우 Storage B지구의 저장공동 건설에 의한 수위강하를 반영하여 EL. -30 m 부근에 general head boundary를 적용하였다.

입력인자

수치모델링에 요구되는 수리전도도는 수리영역별 수벽공에서 계산된 평균값을 각각 입력하였고(Fig. 6b, 6c; Table 2), 공동의폭 10 m 내에는 그라우팅(grouting)에 의한 차수효과를 고려하여 암반의 수리전도도보다 낮은 값을 반영하였다. 그러나 Domain-D는 암반자체가 그라우팅 영역의 수리전도도보다 낮은 값을 갖기 때문에 그라우팅에 의한 효과를 적용하지 않았다. FZ-1 및 FZ-2 구조대의 수리전도도는 지표조사단계에서 계산된 값(노영조, 2001)을 적용하였고, 공극률과 저류계수와 같은 일부 조사되지 않은 인자에 대하여는 일반적인 범위(Anderson & Woessner, 1992; Franklin & Dusseault, 1989)의 값을 사용하였다(Table 2).

상부층의 초기수위는 공동굴착 전 수평수벽공에서 측정된 초기수압을 수위로 환산한 후 Domain-A는 EL. 165 m, Domain-B는 EL. 61 m, Domain-C는 28 m, Domain-D는 10 m인 등수두선도를 작성하여 모델에 입력하였다. 함양량의 초기값은 지표조사단계에서 적용한 60 mm/year를 반영하였다.

모델교정

모델교정은 Gallery 굴착 후의 지하공동 내 실 유입량과 지표관측공에서 실 계측된 수위자료에 모델의 결과값이 일치할 때까지 입력인자를 반복적으로 교정하여

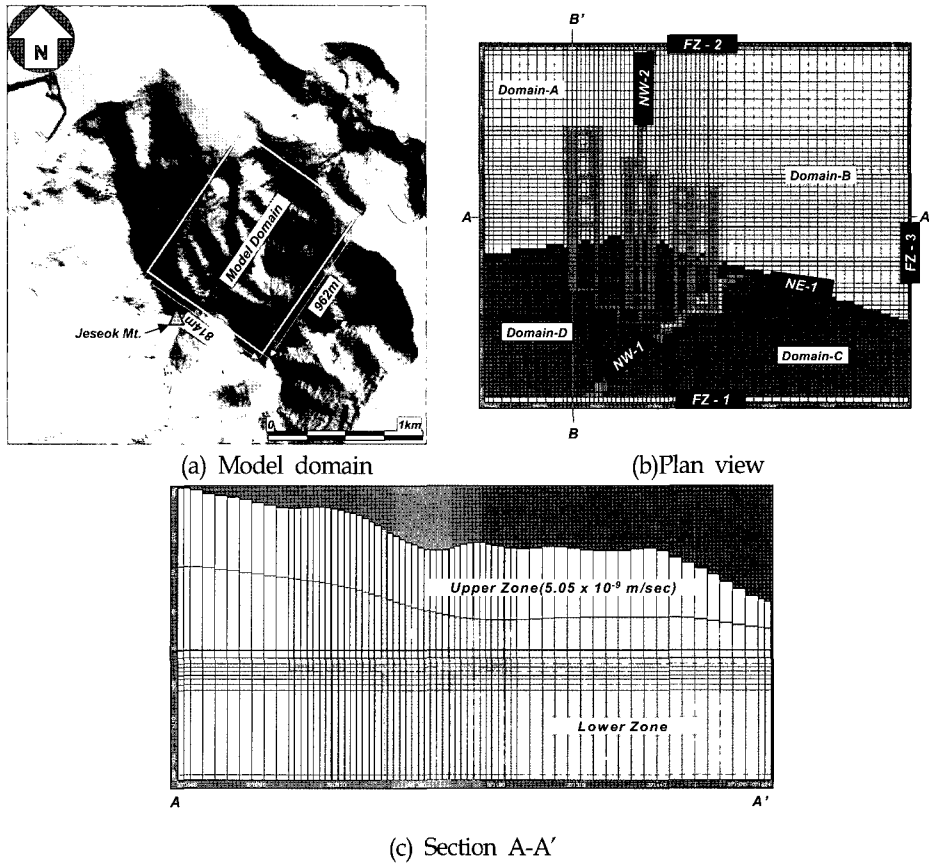


Fig. 6. The model domain and plane view, cross section of the model with hydraulic conductivities.

Table 2. Input parameters for the hydrogeological zones based on the porous continuum model.

Zone		Hydraulic Conductivity(m/sec)	Storage Coefficient	Porosity (%)
HRD	Domain-A	4.36×10^{-9}	0.0002	0.03
	Domain-B	4.85×10^{-9}		
	Domain-C	2.15×10^{-9}		
	Domain-D	7.23×10^{-10}		
HCD	FZ-1	3.20×10^{-8}	0.0003	0.05
	FZ-2	3.80×10^{-8}	0.0519	0.05
	NE-1	1.80×10^{-8}	0.0002	0.03
	NW-1	3.00×10^{-8}		
	NW-2	1.34×10^{-9}		
Grouting domain		1.7×10^{-9}		

수행되었다. 수리전도도 값은 비교적 지표관측공 및 수벽공 내 시험을 통해 비교적 신뢰도는 높을 것으로 예측되어 불확실성이 높은 함양량만을 교정하였다. Gallery 굴착 후 예측된 공동 내 실 유입량은 평균 약 60 ton/day로 예측되었고, 교정된 모델에 의해 계산된 유입량은 두 개 모델에서 각각 57 ton/day, 65 ton/day로 비교적 실 유입량과 유사한 값이 도출되었다. 지하수위는 실제측치와 모델결과 값이 $\pm 1\sim 10$ m의 편차를 나타내었다.

민감도 분석

불확실성이 교정된 모델에 미치는 영향을 알아내기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 교정된 모델을 이용하여 저유계수(S_s), 비산출률(S_y), 함양량(R), 수리전도도(K) 값을 3배, 6배, 10배로 증가시킨 후 10일 후, 1000일 후, 정상류 상태에서의 유입량과 수위 변화를 각각 비교하여 해석방법에 따라 입력인자가 모델에 미치는 영향을 알아보았다.

시간에 따른 입력인자의 민감도는 유입량의 경우 10일 및 1000일 경과 후에는 저유계수와 수리전도도가 매우 민감하며, 정상류 상태에서는 함양량이 가장 민감한 것으로 나타났다(Fig. 7a). 수위변화의 경우 10일 및 1000일 경과 후에는 4개 입력인자 모두 큰 차이를 나타내지 않지만 정상류 상태에서는 수리전도도와 함양량이 매우 민감한 것으로 해석되었다(Fig. 7b).

지하수유동체계 해석

함양량

함양량은 다양한 지질환경과 기후조건에 의해 불확실성이 매우 높은 인자의 하나로, 국내에서는 일부 학자들에 의해 7.8 ~ 18 % (건설교통부, 1996)의 넓은 범위가 제안되어 있다. 함양량은 본 연구지역과 같이 유류저장의 효율성을 높이기 위해 요구되는 지하수의 기준수위를 유지해야 하는 경우에는 그 중요도는 매우 높다. 따라서 본 연구에서는 함양량을 변수로 모델을 교정한 후 최적의 함양량을 도출하였다.

Gallery 굴착이 완료된 시점의 4개의 수리암반영역의 수위와 모델의 결과치가 비교적 잘 일치할 때의 함양량은 Domain-A는 50 mm/year, Domain-B는 35

mm/year, Domain-C는 15 mm/year, Domain-D는 10 mm/year로, 연구지역의 20년간 평균 강수량이 1356 mm/year인 것을 감안할 때 모델에서 계산된 이 지역의 강수에 대한 함양율은 약 2%로 지표조사 시 적용된 5.24%(노영조, 2001)보다 다소 낮게 산정되었다. 이러한 결과는 본 연구지역의 수벽공에서 계산된 낮은 수리전도도값에 기인하는 것으로 판단된다.

상부지하수체계

상부지하수체계는 지표고도를 상부경계로 입력하고 지표풍화대의 투수성이 높은 상부층(Fig. 6c)을 모델에 반영하여 해석하였다. 상부층은 지표조사 시 계산된 유효수리전도도 5.05×10^{-9} m/sec(김경수, 2000)를 적용하였다.

공동굴착 전 상부수위는 FZ-1 과 FZ-2 구조대 주변에서 큰 차이를 보이지 않았지만(Fig. 8a), Gallery 굴착이 완료된 시점에서는 FZ-2 구조대 주변에서 수위강하가 보다 크게 발생하였다(Fig. 8b). 이러한 결과는 FZ-1 과 FZ-2 구조대의 상·하부의 수리전도도 차이로 인한 결과로 해석가능하다. 즉, 수리전도도는 투수성 단열의 수리적 연결성과 직접적인 연관성이 있기 때문에, FZ-1 구조대와 인접한 Domain-D의 공동주변의 수리전도도는 상부구간보다 상대적으로 매우 낮으며 투수성이 높은 상부구간은 수직적 흐름보다 수평적 흐름이 우세한 지하수유동에 기인되는 것으로 해석된다. 따라서 함양량이 많지 않으며 지하수위 강하 폭도 크지 않다. 반면, FZ-2 구조대와 인접한 Domain-A와 B 영역은 상·하부의 수리전도도 값이 차이가 FZ-1 구조대보다 크지 않기 때문에 공동굴착에 의한 지하수유출에 의해 상부지하수위의 강하 폭이 크며 수직방향으로의 유동이 우세하다.

하부지하수체계

공동주변의 하부지하수체계는 상부지하수체계 해석 시 사용된 모델을 이용할 경우 하부의 낮은 수리전도도 값 때문에 지표관측공에서 예측된 하부구간의 낮은 지하수위를 만족할 수 없으므로 불가피하게 지표풍화대(upper zone; Fig. 6c)를 제거하고 상부경계조건을 하부지하수위로 입력하여 모델을 구성하였다.

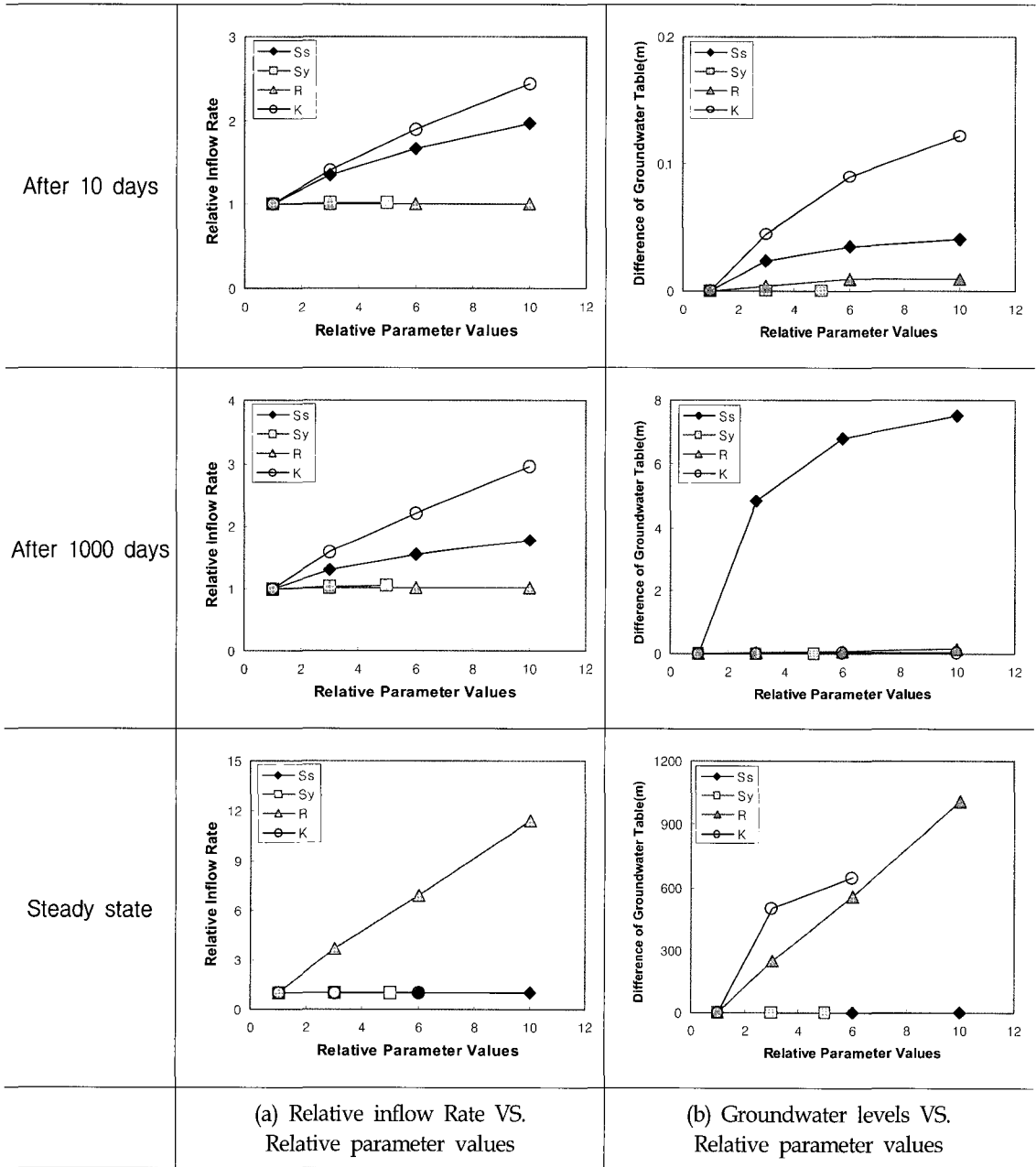
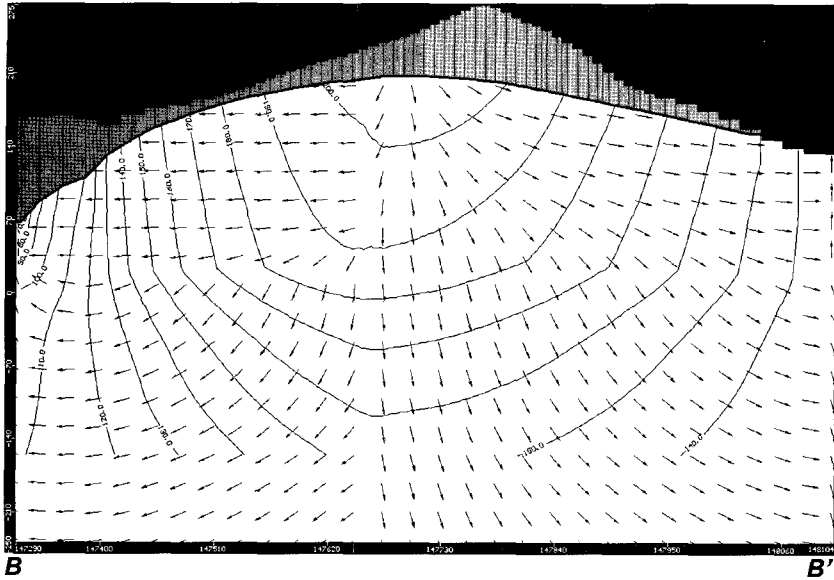
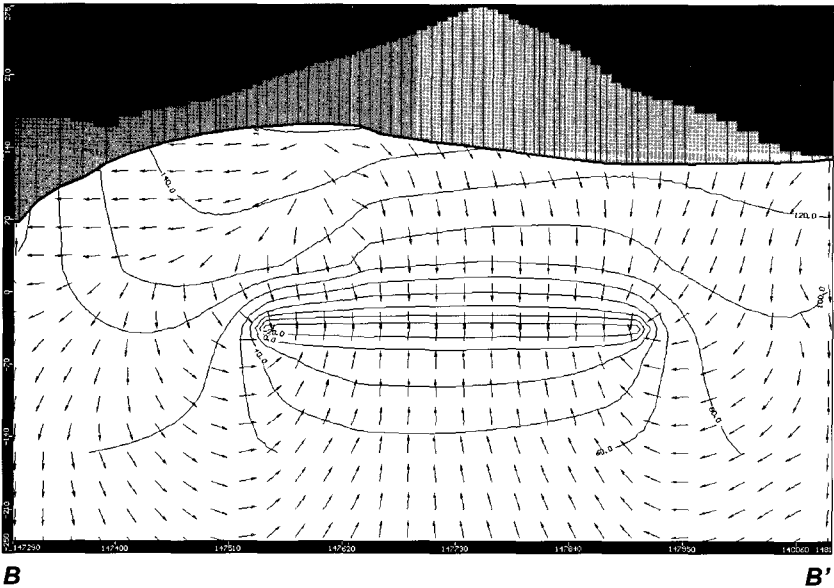


Fig. 7. Results of the sensitivity analysis.



(a) Before the excavation



(b) After the excavation

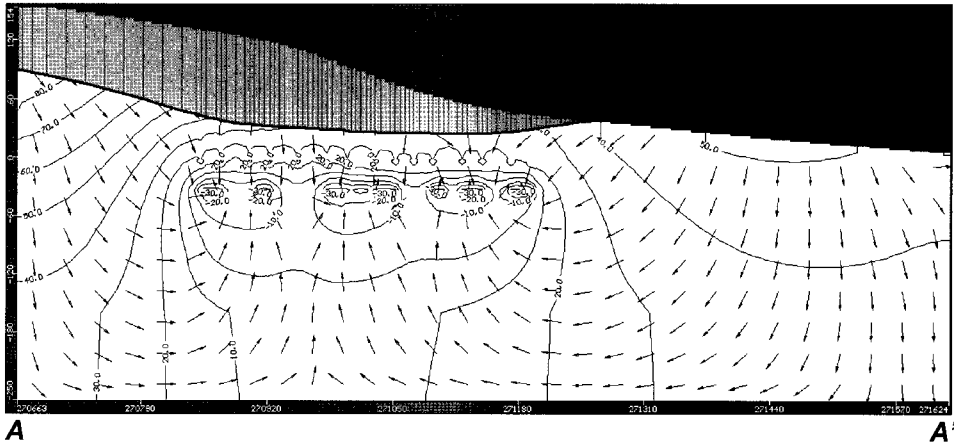
Fig 8. Upper groundwater system after excavating the Gallery.

지하공동 주변의 지하수체계 역시 수리암반영역의 수리 전도도 값의 차이에 기인한 지하수위 강하 폭의 차이로 해석할 수 있다. 공동굴착 전 수평수벽공의 초기압에 의해 계산된 수위는 Gallery 공동굴착 후 FZ-2 구조대 주

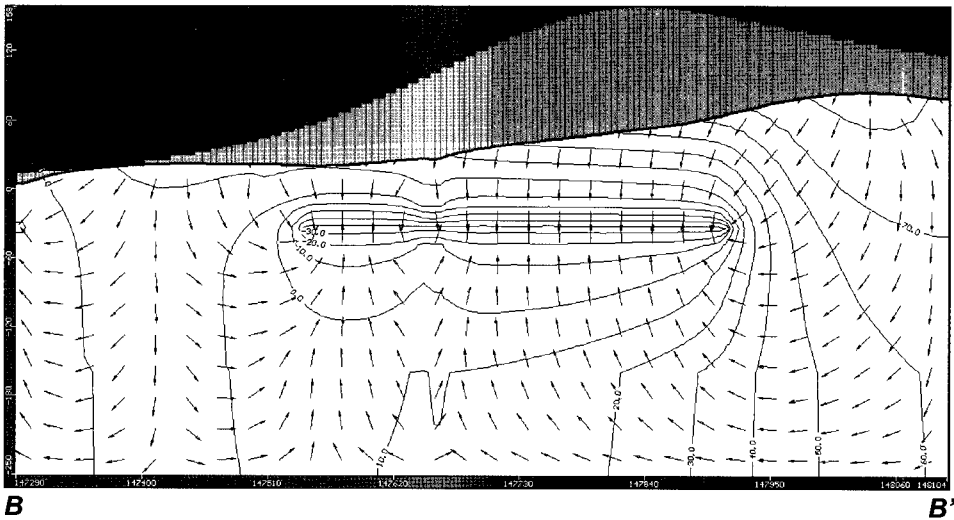
변에서 비교적 큰 폭(약 100 m)으로 강하하였다(Fig. 9b). 그러나 공동굴착 전부터 낮은 수위를 보이는 FZ-1 구조대 주변은 Domain-D의 낮은 수리전도도 값에 의해 수위강하 폭이 Gallery 굴착전과 유사하거나 10여 미터

내외로 수위강하 폭이 크지 않으며, 수벽공의 계측결과에 의하면 일부 수벽공 (HW-41, 42, 45, 46)은 주입에 의해 수위가 다소 상승하였다. 제석산 정상부는 동측해안

에 비해 수위강하 폭이 비교적 크며, C1과 C2 인근의 공동상부지역은 약 10 ~ 40 m의 수위강하가 발생되었다 (Fig. 9a).



(a) Section A-A'



(b) Section B-B'

Fig. 9. Lower groundwater system after excavating the Gallery.

결론

지하유류저장시설 건설과정 중 공동굴착 과정에서 도출된 단열체계 및 수리특성을 토대로 해석한 연구지역의 지하수유동체계는 다음과 같다.

1. 지표관측공 및 수벽공의 공동굴착 전 수위분포를 고려하면 NE-1 단열대를 경계로 이중수위측정시설 상·하부의 수위차가 크지 않고 수평수벽공의 초기압이 상대적으로 높은 FZ-2 지역과 이중수위측정시설 상·하부의 수위차가 매우 크고 수평수벽공의 초기압이 비교적 낮은 FZ-1 지역으로 구분되며, 수직수벽공의 초기압 분포에 의하여 NW-1과 NW-2 단열대를 경계로 다시 세분화 할 수 있다. 따라서 국지주단열대 규모의 NE-1, NW-1, NW-2 단열대는 투수성구조영역으로 해석 가능하고, 본 단열대에 의해 구분된 4개의 수리암반영역으로 세분화할 수 있다.

2. 본 연구지역에 분포하는 FZ-1 및 FZ-2 구조대 주변부는 지표부와 지하공동 주변의 수리적 연결성에 따라 상이한 지하수체계 특성을 나타낸다. FZ-1 구조대 지역은 지하공동 굴착 전부터 Storage B의 건설에 의한 영향으로 저수위분포대를 형성하고 있었으며, 추가저장공동의 굴착과 동시에 이중수위측정시설에 의해 계측된 상·하부의 지하수위는 큰 폭의 수위차를 나타내었다. 이는 하부지하수가 공동굴착에 의해 공동 내로 유출되어 수위가 강하하였으나 상부의 지하수는 수리적 연결성이 불량하여 함양되지 못했기 때문으로 유추할 수 있다. 즉 상부지하수는 하부의 낮은 수리전도도로 인해 수직방향보다 수평방향의 유동이 우세할 것으로 예측된다. 반면 FZ-2 구조대 주변은 상부와 하부의 수리전도도 차이가 크지 않은 것은 투수성 단열에 의한 수리적 연결성이 양호하기 때문에 상·하부수위 차이가 크지 않고 공동굴착에 민감한 반응을 나타낸다. 공동상부 주변의 상부지하수위는 지표고도에 많은 영향을 받으며, 공동조사 시 확인된 3개의 단열대는 지하수의 주 유동로로서의 기능보다는 수리암반영역의 경계역할이 우세하고, 4개의 수리암반영역 내 상·하부의 수리특성은 인접한 구조대와의 수리적 연결성에 따라 다양한 지하수위분포 및 함양량, 유동방향의 특성을 보인다.

3. 본 연구에서는 투수성구조영역과 수리암반영역으로 구분하여 단열체계 및 수리특성을 해석하였다. 본 조사방법은 연속체매질 개념의 지하수유동모델링 수행 시 단열암반의 다양한 수리특성을 모델에 반영하여 FZ-1 및 FZ-2 구조대 주변의 상이한 지하수체계를 해석하는

데 중요한 역할을 하였다. 따라서 연속체매질 개념의 지하수유동모델도 본 연구에서와 같이 세분화된 수리특성을 모델에 반영한다면 모델결과의 신뢰도 향상을 기대할 수 있을 것이다.

사사

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

참고문헌

- 건설교통부, 1996, 지하수관리 기본계획보고서.
- 김경수, 2000, 수치모델링을 이용한 지하원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구, 충남대학교 박사학위논문, 212p.
- 노영조, 2001, 전남 여수시 북부 화산암지역에서의 수치모델링에 의한 지하수유동특성 연구, 충남대학교 석사학위논문, 87p.
- 대우엔지니어링(주) 시공감리단, OO 추가비축기지공사 공사평가보고서 제 3권, 2003.
- 박희인, 박용안, 정지곤, 1989, 광양도폭 지질보고서, 한국동력자원연구소.
- 엘지엔지니어링(주), SK 건설(주), 1999, U-1 추가비축기지 조사설계 용역 지질조사보고서.
- 조성일, 2005, 지하저장공동 건설을 위한 단열암반의 지하수체계 평가방법 연구, 충남대학교 박사학위논문, 208p.
- Anderson, M. P. and Woessner, W. W., 1992, Applied groundwater modeling - Simulation of flow and advective transport, Academic Press, Inc., 381p.
- Andersson, J., Berglund, J., Follin, S. Hakami, E., Halvarson, J., Hermanson, J., Laaksohrju, M., Rhén I., Wahlgren, C., 2002, Testing the methodology for site descriptive modelling. Application for the Laxemar area. SKB TR-02-19, SKB, Stockholm, 346p.
- Franklin, J. A. and Dusseault, M. B., 1989, Rock engineering, McGraw-Hill Pub. Co., 600p.
- Holmén, J. G., 1997, On the flow of groundwater in closed tunnels - Generic hydrogeological modeling of nuclear waste repository, SFL 3-5, SKB TR 97-10, 240p.

투 고 일 2006년 2월 7일
 심 사 일 2006년 2월 8일
 심사완료일 2006년 3월 16일

배대석
 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
 Tel : 042-868-2030
 E-mail : ndsbae@kaeri.re.kr

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

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

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

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