

수치모델링을 이용한 지하원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구

Hydrogeological Stability Study on the Underground Oil Storage Caverns by Numerical Modeling

김경수(Kyung Soo Kim)

한국원자력연구소

정지곤(Ji Gon Jeong)

충남대학교 지질학과

요약/Abstract

본 논문은 화산암지역에 건설되는 비축기지를 대상으로 지표지질조사, 지표단열조사, 시추조사, 수리시험 결과 등을 토대로 지하수유동 수치모델 해석을 통하여 저유공동의 기밀성 요건을 만족시킬 수 있는 수벽시스템을 설정하고, 이러한 시스템 하에서의 공동유입량과 인접시설과의 수리간섭 영향을 평가하였다. 수리지질 안정성 해석을 위한 접근방법은 3차원 연속체 수치모델링과 더불어 이의 결과를 비교 또는 보완하기 위한 단열망 모델링 해석방법을 병행하였다.

저유공동의 심도를 결정하고, 투수성단열의 확실적인 상호연결성 정도를 계산한 결과와 연직 수리경사, 수벽공 효율성, 저유공동과 수벽시스템간 이격거리 등의 제반 요건을 만족시키는 수벽시스템을 계산하였다. 연속체 모델에 의한 저유공동으로의 누수량은 건설기간 중에는 $130 \sim 140\text{m}^3/\text{day}$, 운영 중에는 약 $120\text{m}^3/\text{day}$ 일 것으로 예측되었고, 단열망 모델에서는 $80 \sim 175\text{m}^3/\text{day}$ 의 범위인 것으로 계산되었다. 신규 시설의 건설로 인하여 기존 시설지구의 함양유역 감소가 불가피하고, 이로 인하여 지하수위 강하 및 유동량의 감소가 발생될 것으로 예상되므로, 보수적인 관점에서 기존 지하수위를 유지하기 위하여 인공적인 수압을 가해줄 수 있는 별도의 지상 혹은 지하의 수직 수벽시스템이 요구된다.

주요어 : 비축시설, 기밀성, 수밀성, 수벽 시스템, 수치모델링

This study aims to establish the methodology for design of an optimum water curtain system of the unlined underground oil storage cavern satisfying the requirements of hydrodynamic performance in a volcanic terrain of the south coastal area. For the optimum water curtain system in the storage facility, the general characteristics of groundwater flow system in the site

are quantitatively described, i.e. distribution of hydraulic gradients, groundwater inflow rate into the storage caverns, and hydrogeologic influence area of the cavern. In this study, numerical models such as MODFLOW, FracMan/MAFIC and CONNECTFLOW are used for calculating the hydrogeological stability parameters.

The design of a horizontal water curtain system requires considering the distance between water curtain and storage cavern, spacing of the water curtain boreholes, and injection pressure. From the numerical simulations at different scales, the optimum water curtain systems satisfying the containment criteria are obtained. The inflow rates into storage caverns estimated by a continuum model ranged from about 120 m³/day during the operation stage to 130~140 m³/day during the construction stage, whereas the inflow rates by a fracture network model are 80~175 m³/day. The excavation works in the site will generate the excessive decline of groundwater level in a main fracture zone adjacent to the cavern. Therefore, the vertical water curtain system is necessary for sustaining the safe groundwater level in the fracture zone.

Key Words : underground oil storage cavern, gas tightness, water tightness, water curtain system, numerical modeling

서 언

지하에 건설되는 원유비축시설은 기본적으로 원유나 액화석유가스의 공간적 이동을 억제시킴으로써 자연 생태계로부터 안전하게 격리시킬 수 있는 성능을 필요로 한다. 이러한 관점에서 암반이 갖는 천연적인 방벽 기능이 저유공동(oil storage cavern)의 기밀성(gas tightness)을 보장할 수 있다는 점에서 커다란 장점이 된다. 원유의 지하공동 저장원리는 원유가 물보다 가볍고 서로 혼합되지 않는다는 특성을 이용하여 주변 암반에서 저유공동으로의 지하수 흐름이 지속적으로 유지됨으로써 저장물이 저유공동 주변의 암반이나 생태계로 유출되는 것을 방지하는 것이다. 즉, 저유공동 주변의 수리동력학적 수밀성(water tightness) 확보가 곧 시설의 기밀성 확보를 보장한다고 할 수 있다.

이러한 배경에서 인공적인 방벽 개념의 수벽시스템(water curtain system)이 고려되어야 하는 이유는 Söder(1994)의 연구결과에서 찾아볼 수 있다. 그는 실제 비축시설에서 자연지하수위와 공동주변의 지하수압을 알고 있는 상태에서 실험적으로 공동 내부의 압력을 단계적으로 상승시키면서 가스 누출량을 측정하였다. 그의 연

구결과 수벽시스템이 없는 경우 주변 지하수압보다 낮은 개스압 조건에서도 공기가 누출되는 것으로 밝혀졌는데, 이는 공동주변의 단열 및 운영터널 등에 의하여 부분적으로 지하수압 강하가 발생할 수 있는 것으로 해석하였다. 즉, 자연 지하수체계만으로 기밀성을 확보한다는 것은 완전하지 못하다는 것과 이러한 불안정성은 저유공동 모양의 불균질성에서 비롯되는 것을 알 수 있다.

한편, 국내 지하원유비축시설의 수벽시스템 설계는 근래에 이르기까지 주로 외국 설계사의 기술에 의존해 왔다(Geostock, 1992, 1996; VBB Viak, 1991). 이들은 수벽시스템 설계를 위하여 주로 저유공동 주변부에 대한 2차원 수치해석에 치중하였다.

본 논문은 ○○지역 추가비축기지(Fig. 1; 이하 “추가비축기지”)를 대상으로 지표지질조사, 지표단열조사, 시추조사, 수리시험 결과 등을 토대로 지하수유동 수치모델 해석을 통하여 저유공동의 기밀성 요건을 만족시킬 수 있는 수벽시스템을 설정하고, 이러한 시스템 하에서의 공동 유입량과 인접시설과의 수리간섭 영향을 평가하는 데 목적이 있다. 입력자료 결정을 위한 제반 조사결과에 대하여는 김경수 외(1999a, 1999b)에 의해 기 발표되었으며, 여기에서는 김경수(2000)

의 논문 중 수치모델링에 의한 설계기법에 한하고자 한다.

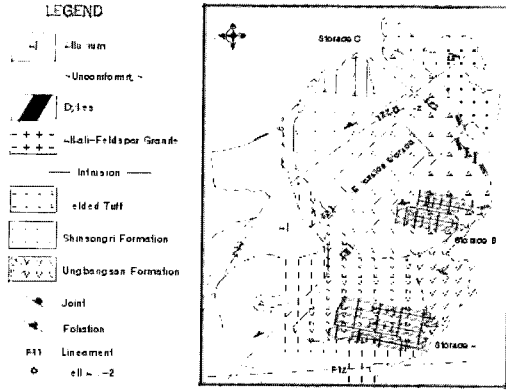


Fig. 1. Geologic map of the study area.

저유공동의 수리동력학적 요건

저장유의 기밀성 확보를 위한 수리동력학적 개념은 가압 상태의 저유공동압보다 공동 주변의 지하수압을 높게 유지함으로써 지하수가 항상 공동 내로 유동하는 조건을 만들어주는 것이다. 이러한 조건은 자연적인 지하수압과 인공적인 수벽공을 설치하여 만들어 줄 수 있으며, 국내에 건설된 시설도 수리동력학적 개념을 이용하고 있다. 저장유의 최대 운영압이 정해져 있을 때, 개스의 누출은 공동 주변의 지하수압 분포특성에 의해 좌우되며, 이와 관련된 핵심사항들은 (1) 개스누출을 방지할 수 있는 운영 기준 안전 지하수위, (2) 지하수면 하 공동의 심도, (3) 운영중 수벽공 주입압 등이 있다. 이 중에서 가장 중요하게 다루어져야 할 사항으로는 공동 주변의 기준 지하수위이다. 이와 관련하여 제시된 기밀성 기준은 자연상태의 지하수 수리경사와 수두를 고려한 경우와 인공적인 수벽시스템 (WCS)을 고려한 경우로 구분하여 설명된다.

$$I_o > 1.0 \text{ (Åberg, 1977)} \quad (1)$$

$$H \geq P + S \text{ (Komada, 1985)} \quad (2)$$

$$\Phi_o \geq \Phi_c + (S + S_f) \text{ (Geostock, 1992)} \quad (3)$$

$$P_g = a + bH \text{ (without WCS) =}$$

$$p_o + c \cdot p_{wc} \text{ (with WCS)} \quad (4)$$

(Liang & Lindblom, 1994)

위 식에서 I_o 는 공동 상부 영역의 연직방향 수리경사이고, H , Φ_o 는 공동 굴착으로 인한 최저 지하수두, P , Φ_c , P_g 는 저유공동의 최대 운영 압력, S 는 지하수체계 변화를 고려한 최소 안전 계수, S_f , a , b , p_o , c 는 저유공동의 배치, 공동 수, 심도 등과 관련된 형상계수, 그리고, p_{wc} 는 수벽공의 주입수압이다.

공동 주변의 포화된 단열을 따라 발생하는 개스의 유출에 대한 이론적 설명은 Åberg(1977)에 의해 시도되었다. 그는 개스의 이동은 단열 내의 정지된 지하수나 느리게 유동하는 지하수에서도 이루어지고 있으며, 공동 상부에서의 연직방향의 수리경사가 1.0보다 커야 한다는 이론을 제시하였다. 이것은 포화된 암반만으로는 개스의 유출 방지에 대한 필요조건은 제공하지만 충분조건은 유지될 수 없다는 것을 의미한다. 이에 대한 신뢰도는 여러 연구자(Bawden, 1980; Goodall, 1986; Nakagawa et al., 1987; Watanabe et al., 1987) 들에 의하여 검토되었으며, 상기 기준은 아직도 타당성있게 받아들여지고 있다. 이 후 Goodall et al.(1988)은 공동으로부터의 모든 개스누출 경로들을 따라 지하수압이 어느 정도 높게 유지되는 한 개스가 누출되지 않는다는 단순한 기준을 제시하였고, Geostock(1992)과 Komada(1985)는 형상계수(shape factor)와 안전율(safety factor)이 반영되어야 한다고 하였다. Liang & Lindblom (1994)은 지하수두와 저유공동에서 개스누출이 일어나지 않는 허용 최대 개스압(임계개스압)과의 관계는 거의 선형의 비례 관계가 있는 것으로 제시하였다.

위 식에서 S 는 비축시설 건설시 발생될 수 있는 수리지질학적 불확실성, 즉, 운영압 및 지하수위의 급격한 변화 그리고 굴착시 발생하는 여굴, 파쇄대의 발달에 의한 지하수체계의 변화 등의 요소들을 고려하여 정하는 안전계수로서 약 15m를 반영하고 있다(Geostock, 1992, 1996). S_f 는 공동 건설시 자연상태의 지하수위가 강하

되는 정도를 나타내는 부지고유의 지하수체계를 대변하는 것으로서 Geostock(1992, 1996)은 약 10m~29m를 적용하였다. 즉, ϕ_c 와 $(S + S_f)$ 는 기밀성 유지에 필요한 최소한의 지하수압에 해당된다. 한편, S_f 는 공동의 건설로 인하여 직접적으로 수위강하가 발생하기 때문에 기밀성 기준에 가장 핵심이 되는 변수인 반면에, 경험적으로 적용되고 있는 S 는 보수적인 성격의 변수에 해당된다.

접근 방법

추가비축기지 지구의 저유공동 수리지질 안정성 해석을 위한 절차로서 먼저 공동 굴착시 수리지질학적 기준의 지하수위(reference groundwater level)를 결정한다. 그리고 수리지질학적 특성을 고려하여 형상계수를 산출하여 저유공동의 심도를 결정한 다음, 이 조건 하에서 수치해석을 통한 수벽공 간격, 주입압, 심도 등을 계산한다. 이러한 인공제어 시스템의 성능이 기밀성을 만족하는 조건 하에서 공동 내부로의 유입량과 인접시설과의 수리간섭현상을 검토하였다(Fig. 2).

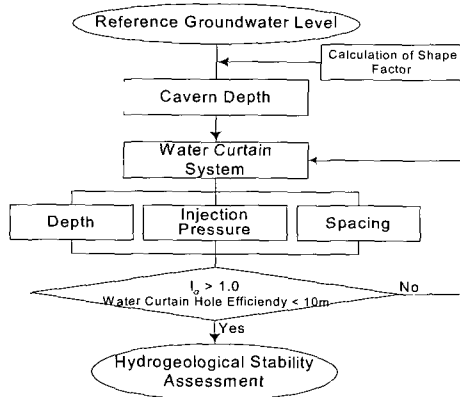


Fig. 2. Design procedure of the water curtain system for underground oil storage caverns.

비축시설의 수리지질 안정성 해석에 도입된 시설규모와 수치해석 과정에서의 비축공동의 규모와 배치는 기 설계도면(엘지엔지니어링(주)와 SK건설(주), 1999)을 참고하였다. 공동의 최대 운영압은 $2\text{kg/cm}^2(\text{abs})$ 인 것으로 하였다.

다공성 연속체 매질 수치해석용은 Visual MODFLOW package (Scientific Software Group, 1997), 단열망 매질 해석은 FracMan/MAFIC (Golder Asso., 1994)과 CONNECTFLOW (Hartely, 1996) 프로그램을 이용하였다.

연속체 모델의 해석영역은 추가비축기지과 인접하는 B와 C지구를 포함하기 위하여 남측으로는 A지구와 B지구 사이, 북측으로는 C지구를 포함한 남해 일부, 동측으로는 남해, 서측으로는 F11 구조대가 지나는 계곡까지를 모델링 영역으로 하였다(Fig. 3). 추가비축기지 공동 주변의 해석격자는 $5\text{m} \times 5\text{m}$, 수벽공은 $1\text{m} \times 1\text{m}$, 기타 외곽 지역은 $10\text{m} \times 10\text{m}$, $10\text{m} \times 50\text{m}$, $50\text{m} \times 50\text{m}$ 의 격자망으로 구성하였고, 가로축은 161개, 세로축은 248개 격자로, 그리고 지표로부터 EL.-400m까지 총 16개 층으로 나누었다(Fig. 4). 경계조건으로는 F11 구조대가 이루는 하천부, B지구와 C지구 사이의 계곡부는 강패키지(river package), 모델 좌측 경계부와 우측 계곡부는 일반수두경계패키지(general head boundary), 바다쪽은 일정수두(constant head)를 적용하였다(Fig. 4). 수치모델링에 요구되는 수리인자는 기존의 연구결과(김경수 외, 1999a, 1999b)에서 도출되었으며, C지구의 수리인자는 (주)삼립건설턴트(1993)의 자료를 인용하였다. 공극률과 같은 일부 조사되지 않은 인자에 대하여는 일반적인 범위의 값(Anderson & Woessner, 1992; Franklin & Dusseault, 1989)을 적용하였으며(Table 1), 함양율은 정류상태의 보정을 통하여 5.24%(71mm/y)를 적용하였다.

단열망 모델에 입력된 단열조는 Fisher 분포를 따르는 2개 조(159/89, 251/87)의 고경사 단열조와 저경사 단열조(68/16)로 구성된다. 이들의 실간격치는 0.3m~0.9m의 범위를 갖는다.

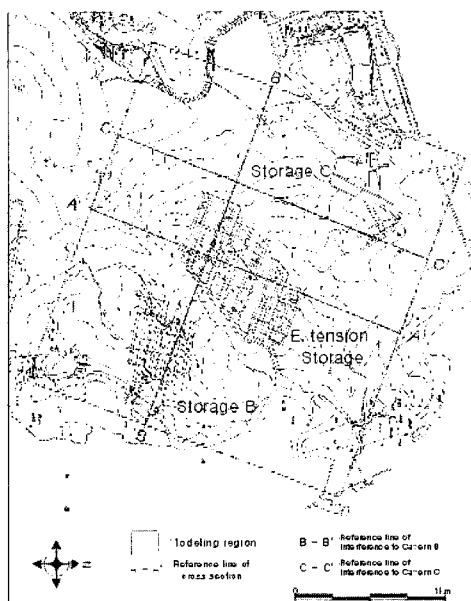


Fig. 3. Numerical modeling region including Storage B and C.

Table 1. Input parameter for hydrogeological unit in porous continuum model.

Zone	Hydraulic conductivity (m/s)	Storage coefficient	Porosity (%)
Welded lapilli tuff	5.05×10^{-9}	0.0002	0.03
Sedimentary rocks	3.00×10^{-8}	0.0500	0.05
Grouted mass	2.80×10^{-9}	0.0001	0.03
F21	3.20×10^{-8}	0.0003	0.05
F22	3.80×10^{-8}	0.0519	0.05

기준 지하수위와 저유공동의 심도

기준 지하수위

기준 지하수위는 비축공동의 굴착단계와 운영 기간 중에 반드시 유지되어야 하는 최저 지하수위를 지시하는 것으로서 부지의 수리지질특성에 의하여 결정되는 사항이다. 추가비축기지 주변에서 계측되는 최저 지하수위는 F21 구조대(Fig. 1)에 형성되어 있는 EL.20m와 동측의 해수면이 이에 해당된다. 따라서 본 지역의 기준 지하수위는 다음과 같은 특성을 고려하여 보수적인 수위인 해수면(EL.0m)으로 설정하였다. 첫째, 본 지역은 표토층 발달이 미약하고 급경사를 이루고 있어 강수에 의한 지하수 함양량이 평균치(10%) 이하일 것으로 판단되고, 지하수체의 부존상태 역시 치밀한 암반에 분포하는 단열틈에 한정되어 있기 때문에 적은 량의 지하수 유출도 큰 폭의 지하수위 강하를 유발할 수 있을 것으로 판단된다. 둘째, 지하수체의 유동경계는 양 계곡부에 발달된 구조대(F21, F22)로 이루어져 있으며, 특히 기존 B지구의 건설로 인하여 낮은 지하수위를 유지하고 있다. 따라서, 본 지역의 주변에는 B지구 외에도 C지구가 운영 중에 있고, 동시에 해안에 인접되어 있기 때문에 안전성을 고려

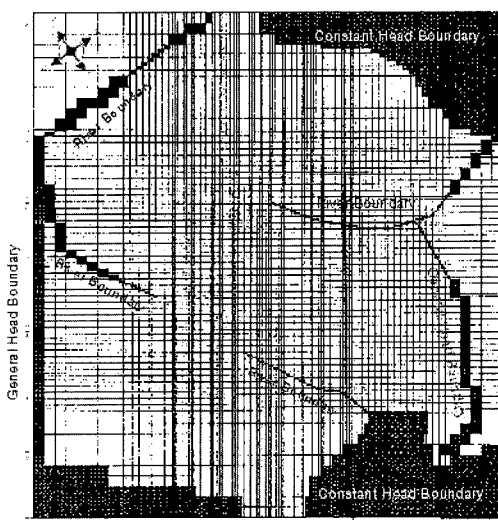


Fig. 4. Model grids and boundary conditions.

할 때 극단적인 수위강하는 해수면까지 고려되어야 한다.

저유공동의 심도

저장공동의 수밀성(water tightness) 확보를 위한 필요조건은 공동 상부의 지하수체계에 작용하는 지하수압이 공동 저장압보다 높아야 한다는 것이다(Geostock, 1992). 식 (3)에서 저유공동의 최대 운영압력(Φ_c)과 공동 굴착에 따른 안전율 및 형상계수($S + S_f$)는 수밀성 유지에 필요한 최소한의 지하수압에 해당된다. 연구지역에 설정된 기준 지하수위가 유지된다는 조건 하에 공동의 심도는 이를 기준으로 할 때, 공동 최대 운영압력의 수두보다 낮아야 하고, 또한 수벽시스템이 설치되지 않는 조건에서 공동 굴착에 따른 기준 지하수위면에서의 절대 수두 강하량보다 낮아야 한다. 따라서 공동의 심도(D_c)는 식 (5)와 같이 단순화될 수 있다.

$$D_c \leq \Phi_o - \Phi_c - (S + S_f) \quad (5)$$

추가비축기지에서의 저유공동의 최대 운영압력은 $2\text{kg/cm}^2(\text{abs})$ 이므로 공동굴착에 따른 형상계수를 계산하기 위하여 공동의 심도가 EL.-20m일 경우와 EL.-30m일 때 MODFLOW를 이용하여 기준 지하수위면에서의 절대 수두 강하량을 계산하였다.

계산결과(Fig. 5), 공동 심도가 EL.-20m일 때는 기준 지하수위면에서의 절대 수두가 최대 -11m, EL.-30m일 때 -13m까지 강하되는 것으로 계산되었다. 이것은 기준 지하수위면의 수두가 EL.0m를 유지하고 수벽시스템이 설치되지 않는 조건에서 저유공동의 심도는 식 (5)에서 최소 안전율 15m, 최대 운영압 10m를 적용하면 EL.-36m~38m 이하이어야 함을 의미하는 것이다. 수벽시스템 설치를 고려할 경우에는 수벽공에 주입되는 수압이 기준 지하수위면에 일정수두로 작용하는 것으로 간주할 수 있으므로 저유공동의 심도를 상승시킬 수 있게 된다. 이 때 수벽공 주입압을 EL.15m~20m의 수두 범위인 것으로 설정하고 공동 굴착에 의한 최대 지하수위 강하량을 적용하면 저유공동의 심도는 식 (5)에

의하여 EL.-18m~-23m 이하이어야 한다.

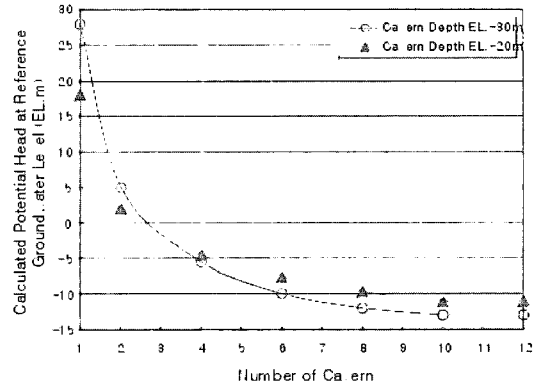


Fig. 5. Calculated drawdown of potential head at reference groundwater level in terms of the cavern construction.

수벽 시스템

연구지역 내 추가비축기지 지구를 중심으로 하는 지하수체계는 제석산(EL.330m)을 중심으로 남북과 동서로 발달된 능선을 따라서 groundwater divide line이 형성되어 있으며, 계곡부를 포함하는 3개의 소규모 지하수체계 영역으로 분리되어 있다. 기존시설 중 북측 영역의 C지구는 투수성이 낮은 F22 구조선과 능선부에 의하여 수리경계면이 구성될 것으로 사료되나, C지구의 시설이 추가비축기지 시설보다 깊은 심도에 있으므로 신규 공동건설에 따른 지하수체계 변화를 최소화하여야 한다. 한편, 남측의 지하수체계 영역에 건설된 B지구와는 투수성단열대(F21)에 의하여 낮은 수위의 수리경계를 이루고 있다. 따라서 3개 지하저장시설의 운영 중 발생하는 지하수 체계변화에 무관하게 수리안정성을 확보하기 위하여는 각 시설 모두 독립적으로 지하수체계를 관리할 수 있는 인공적인 수벽 시스템이 필수적이다.

이와 더불어, A와 B지구의 공동 건설시 예측된 지하수위는 최고 200m까지 변화하는 곳도 있었고, 건설 중 수벽공 주입 중단시 지하수압이 해수면 이하로 강하되는 지역도 나타나는 등 지

하수압이 투수성단열대 분포특성에 지배되는 특성을 보였다. 그러므로, 공동굴착 시 지하수위 변화를 최소화하기 위하여는 효과적인 그라우팅 작업으로 단열대의 수리전도도를 낮추고, 지하수압 유지를 위한 수벽공이 설치되어야 한다.

수벽공 설치 기준

수벽터널과 저유공동과의 거리는 수벽시스템의 효율성에 직접적인 영향을 미치게 되며, 이는 공동심도의 수리지질특성과 공동의 역학적 안정성에 의하여 정하여진다. 이격거리의 결정에 동시에 고려되어야 하는 사항은 수벽공과 저유공동 사이의 지하수흐름과 수리경사 분포이다. 전자의 경우, 수벽공과 저유공동 간의 수리경사가 일정하고 평행한 지하수흐름을 유지하는 조건은 수벽공과 저유공동 간의 거리 (L)가 수벽공 간격 (S_b)보다 더 커야 한다(Muskat, 1946). 후자의 경우, 저유공동으로부터 개스의 누출을 방지하기 위한 최소 기밀성 조건은 저유공동 상부와 수벽시스템 간의 지하수체계에서의 수리경사 (I_o)가 1.0보다 커야 한다(Åberg, 1977). 또한, 앞에서 계산된 공동 굴착에 따른 지하수위 강하량과 최대 운영압에 의한 저유공동의 적정 심도는 EL.-18m~-23m이었다. 수리지질학적으로 저유공동과 수벽공 간의 거리가 증가하면 수리경사는 작아지게 된다. 따라서 기밀성을 만족하는 수리지질학적 안정성 측면에서 수벽터널과 저유공동간의 최소 연직 이격거리는 25m 내외로 결정할 수 있다.

수벽공 효율성(water curtain hole efficiency)은 수벽공 설치 심도에서 일정한 수압으로 주입되는 수벽공들 사이에 형성되는 지하수두의 진폭으로서 설명되는 것으로(Geostock, 1996), Muskat(1946) 이론을 보완하는 것으로 볼 수 있다. 수리지질학적으로는 수벽공 간에 형성되는 지하수두의 진폭이 적을수록, 즉, 수벽공 간격이 가까울수록 저유공동과의 사이에 형성되는 평행한 등수두선의 범위가 넓어지기 때문에 기밀성 조건이 향상된다. 그러나, 동일한 조건에서 저유공동과 수벽공 간의 거리가 증가할수록 수벽공의 효율은 향상되는 반면에 기밀성은 감소된다.

따라서 수벽공과 저유공동 사이의 최소 이격거리가 약 25m 내외인 점을 감안하면, 수벽공 효율이 10m 이내인 경우, 저유공동 상부까지 약 15m 폭 암반에서 균질, 평행한 지하수압 조건이 형성될 수 있으며, 수벽공 효율이 과다할 경우, 즉, 지하수두의 진폭이 클수록 그 만큼의 안정적인 지하수압 조건이 저하된다는 점이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 Table 2와 같이 상기의 조건을 동시에 만족시키는 기준을 설정하였다. 이 설계 기준에 근거하여 먼저 단열망 모델링을 통하여 적정 수벽공 간격을 검토한 다음, 연속체 모델링로서 수벽공 심도, 간격, 주입압을 변화시키면서 12가지 조합에 대하여 분석하였다.

Table 2. Design criteria for water curtain system.

Considerations	Criteria
Distance between water curtain system and storage cavern	$\geq 25m$, $L > S_b$
Vertical hydraulic gradient(I_o)	≥ 1.0
Water curtain hole efficiency	$\leq 10m$

수벽공 간격 도출

시추조사, 수리시험 및 텔레뷰어 검층결과로서 도출된 투수성단열의 분포특성을 이용하여 저유공동을 중심으로하는 100m×100m×100m 규모의 3-D 단열망모델을 구성하였다(Fig. 6). FracMan 프로그램의 샘플링기법을 이용하여 심도 EL.0m에서의 수벽공 간격에 따른 투수성 단열의 교차정도를 계산하였다. 이 때, 계산조건은 수벽공의 설치방향이 290°, 연장길이는 100m, 간격은 5m, 10m, 15m, 20m, 30m, 50m인 경우이다.

저유공동 상부에 놓이는 수벽공에 교차되는 전체 투수성단열의 빈도를 1.0으로 하였을 때, 인접 수벽공과 직접 교차되는 단열의 빈도와 간접적으로 교차되는 단열의 빈도를 간격의 변화에 따라 계산해 보았다. 계산결과, 인접 수벽공 간 투수성단열이 직접 및 간접적으로 90% 이상

의 확률로서 교차될 수 있는 간격은 약 17m 이하인 것으로 계산되었다(Fig. 7).

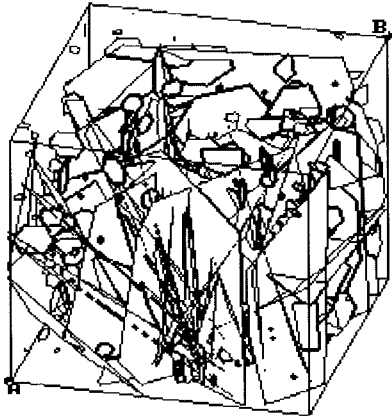


Fig. 6. Three dimensional fracture network model(W100m×H100m×L100m) to estimate the water curtain hole spacing.

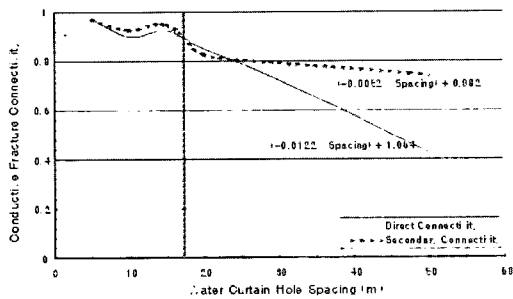


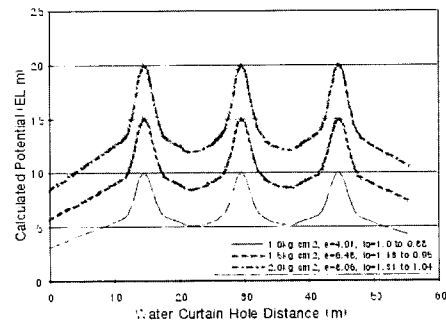
Fig. 7. Intersection probability of conductive fractures between water curtain holes in terms of the hole spacing.

최적 수벽 시스템 계산

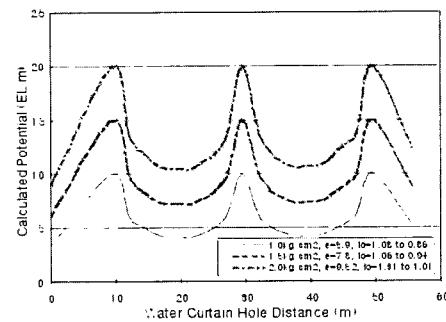
MODFLOW를 이용한 수치해석에 있어서 먼저 저유공동과 수벽시스템의 이격거리를 25m와 30m인 경우로 모사하기 위하여 저유공동의 심도를 해수면(기준 지하수위) 하 EL.-30m에 위치하도록 하였다. 수벽공 간격은 단열망 모델링에서 추정된 17m를 고려하여 15m와 20m인 경우로 모사하였다. 수벽공에 주입되는 수두는 10m, 15m, 20m인 경우로 모사하였다(Table 3: Fig. 8).

Table 3. Calculated vertical hydraulic gradient and water curtain hole efficiency.

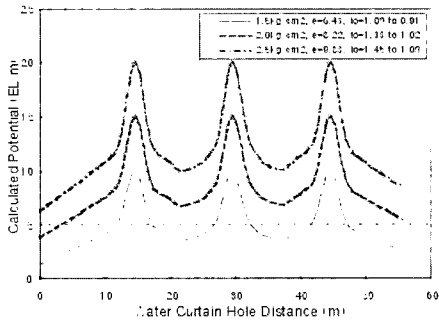
Water curtain level (EL.m)	Water curtain hole spacing (m)	Injection hole pressure (kg/cm ²)	Vertical hydraulic gradient (L)		Water curtain hole efficiency (m)
			Min	Max	
0	15	1.0	0.88	1.0	4.91
		1.5	0.95	1.13	6.48
		2.0	1.04	1.31	8.06
	20	1.0	0.86	1.08	5.90
		1.5	0.94	1.06	7.80
		2.0	1.01	1.31	9.52
-5	15	1.5	0.91	1.09	6.43
		2.0	1.02	1.33	8.13
		2.5	1.09	1.45	9.83
	20	1.5	0.90	1.0	7.60
		2.0	1.04	1.31	9.60
		2.5	1.09	1.45	11.46



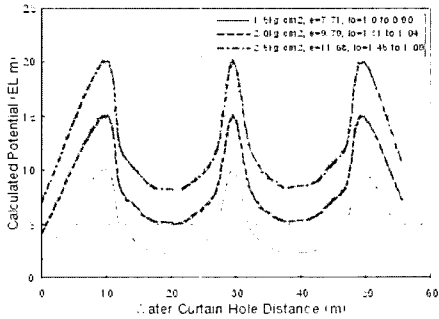
(a) Water curtain tunnel = EL.0m, Water curtain hole spacing = 15m



(b) Water curtain tunnel = EL.0m, Water curtain hole spacing = 20m



(c) Water curtain tunnel =EL.-5m,
Water curtain hole spacing = 15m



(d) Water curtain tunnel =EL.-5m,
Water curtain hole spacing = 20m

Fig. 8. Calculation of vertical hydraulic gradient and water curtain hole efficiency in the case of water curtain system at EL.0m and EL.-5m.

Table 3에서 연직 수리경사의 최대값은 저유 공동 상부에서, 최소값은 저유공동 사이의 필라 영역에서 계산한 것이다. 연직 수리경사는 보수적으로 최소값을 적용하는 것이 타당하므로 모두 6 가지의 경우가 안정성 기준을 만족시킨다. 수벽공 효율의 안정성 기준을 초과하는 경우는 심도 EL.-5m에서 수벽공 간격 20m일 때 2.5kg/cm² 압력으로 주입할 경우에만 해당된다.

계산 결과를 도표로 나타내면 Fig. 9와 같다. 수벽공 효율성과 연직 수리경사는 수벽공 주입압에 대하여 선형의 비례관계를 보인다. 다만, EL.-5m에 20m 간격으로 설치되는 수벽공에 2.5kg/cm²의 수압을 가해 줄 경우에는 수벽공

효율이 급격히 저하되는 특징을 보인다. 최적 수벽시스템은 해수면을 기준 지하수위로 하였을 때 저유공동이 EL.-30m를 유지하는 조건에서 수벽공 간격, 수직 수리경사, 그리고 수벽공 효율이 최대이고 주입압이 최소가 되는 조건을 동시에 만족시키는 경우이다. Fig. 9에서 설계기준을 만족시키는 수벽시스템은 모두 5가지의 경우인 것으로 계산되었다. 이 중에서 시설의 경제성에 비추어 기밀성을 만족시키는 조건 중에서 수벽공 간격이 넓은 2가지의 방안을 최적의 시스템으로 선정할 수 있다.

- Case 1 : 수벽공 심도 EL.0m에서 간격 20m, 주입수압 2.0kg/cm² 인 조건
- Case 2 : 수벽공 심도 EL.-5m에서 간격 20m, 주입수압 2.0kg/cm² 인 조건

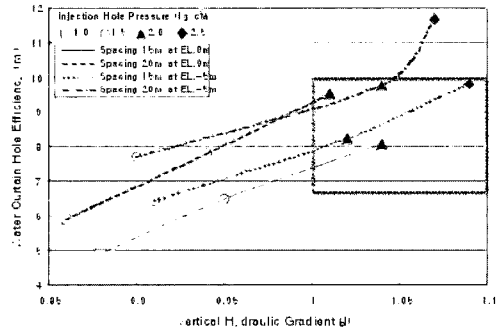


Fig. 9. Relations of the water curtain hole efficiency and vertical hydraulic gradient to hole spacing and injection pressure.

단열망 모델링을 이용한 최적 수벽 시스템 검토

연속체 모델에 의하여 결정된 최적 수벽 시스템에 대하여 FracMan을 이용한 단열망 모델링을 통하여 비교 분석하였다. 해석영역은 해석 프로그램의 계산 능력을 감안하여 단일 저유공동과 수벽 시스템을 포함하는 70m×70m×70m 규모의 암반블록을 설정하였다. 외곽부 경계요소 중 상부 경계면은 일정수두 경계조건, 좌우 및 하부 경계면을 통해서는 흐름이 없는 것으로 설정하였다. 저유공동은 대기압과 최대 운영압일 경우로, 수벽공은 주입압을 경계조건으로 하였다(Fig. 10).

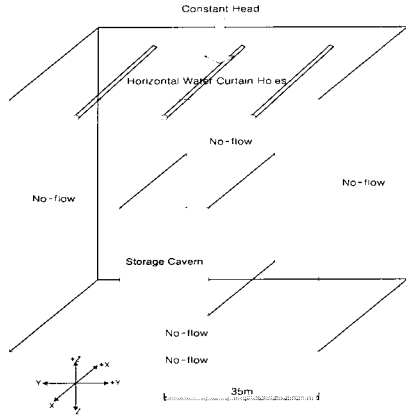


Fig. 10. Conceptual model region and boundary conditions for the fracture network model.

그리고, FracMan에 요구되는 단일 투수량계수의 대표값과 분포형태를 결정하기 위하여 CONNECTFLOW를 이용하였다. 본 논문의 접근방법에서 언급한 3개 단열조별 투수량계수를 입력자료로 해서 다공성 연속체 매질의 대표값에 근접하는 단열조별 투수량 계수를 역산하였다. 역산된 단열조별 투수량계수값의 범위는 산술평균이 $2.6 \times 10^7 \sim 4.4 \times 10^7 \text{m}^2/\text{s}$, 기하평균이 $2.3 \times 10^7 \sim 4.1 \times 10^7 \text{m}^2/\text{s}$ 의 범위에 있는 것으로 추정되었다.

단열조별로 투수량계수가 정의된 해석 영역 내에 길이 70m의 단일 저유공동과 EL.0m와 EL.-5m에 20m 간격으로 설치된 3개 수평수벽공이 배치되도록 하여 유한요소망을 구성하였다. 전술한 Case 1과 Case 2에 대하여 수벽공을 통한 주입수압과 저유공동이 건설 중일 때와 운영 중일 때를 모사하여 MAFIC(Golder Asso., 1994)을 이용하여 계산하였다. Fig. 11은 Case 1에 대한 모사결과이다.

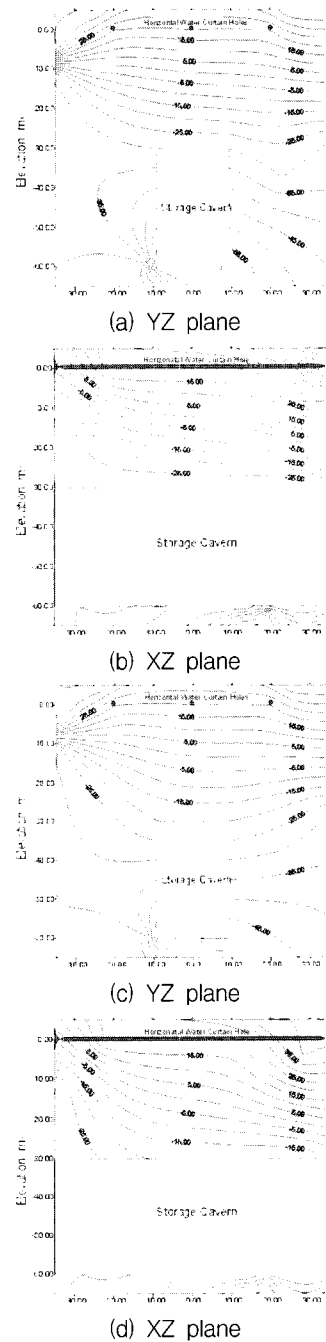


Fig. 11. Potentiometric head distribution section under the construction stage(a, b) and the operation stage(c, d) in the Case 1.

계산결과 수벽공이 위치하는 심도부터 저유공동의 상부에는 주입압에 따라 거의 평행한 등수두 분포를 보여준다. 그러나, 단열망이 서로 연결되지 않는 영역, 즉, YZ 면과 XZ 면의 좌측 경계부에서는 낮은 등수두분포를 보이고, XZ 면의 우상단부와 같이 연결성이 양호한 영역은 상부 경계조건의 정수두압에 의하여 높은 등수두선이 분포하는 것을 보여준다. 연직 수리경사의 최대값은 YZ 면의 저유공동 상부에서, 최소값은 단열의 연결성이 불량한 XZ 면의 좌측 경계부에서 계산하였다(Table 4). 수벽시스템의 Case 별로 연직 수리경사값은 최소값이 1.20~1.29로서 양자 모두 설계 기준치를 만족시키는 것으로 계산되었다. 단열망 모델로서 계산된 연직 수리경사값은 다공성 연속체 모델에 의한 값과 비교해 볼 때(Fig. 9), Case 1, 2 모두 약 1.2배 큰 것으로 계산되었다.

Table 4. Calculated vertical hydraulic gradient from the discrete fracture network model.

Case of water curtain system	Water curtain level (EL.m)	Water curtain hole spacing (m)	Injection hole pressure (kg/cm ²)	Condition of storage cavern	Vertical hydraulic gradient (L)	
					Min	Max
Case 1	0	20	2.0	Construction	1.23	1.64
				Operation	1.20	1.35
Case 2	-5		2.0	Construction	1.29	1.80
				Operation	1.24	1.40

저유공동 누수량

저유공동의 누수량은 연속체 및 단열망 모델 수치해석 결과와 계산식에 의한 결과를 비교하였다. 공동으로의 유입량(Q)은 K가 공동 주변 암반의 유효 수리전도도이고, ΔH가 저유공동과 수벽공간의 수두차, r₁이 저유공동 중심으로부터

터 지하수면까지의 거리, 그리고, r_c이 저유공동 단면적의 등반경일 때 식 (6)으로 계산된다(Reinius, 1977). 식 (6)은 공동 모양이 등방성 매질이며, 그의 수리적 특성은 등방성 유효수리전도도로 대표된다고 가정하므로 실제 그라우팅 유무의 경우에 대하여 단일 수리전도도값을 적용할 수 밖에 없는 것이 한계점이다.

$$Q = \frac{2\pi K \Delta H}{\ln\left(\frac{r_1}{r_c}\right)} \quad (6)$$

계산결과는 저유공동으로의 누수량에 해당되는 것으로서 기타 공사용 터널, 연결 터널 및 입출하 수향(shaft)으로의 누수량은 제외되었기 때문에 최소 누수량으로 고려될 수 있다. 계산식에 의한 누수량은 지수효과와 유무에 따라 큰 차이를 보이며, 수치모델링에 의한 결과보다 최대 2배 이상 크게 계산된다. 또한 위 식은 수벽공과 저유공동간의 수두차가 거리에 비하여 더 민감하기 때문에 Case 1의 조건에서 누수량이 많은 것으로 계산된다(Table 5).

Table 5. Calculated total inflow into the storage caverns by the analytic equation and the porous continuum model.

Method	Case of water curtain system	Condition of storage cavern	Total inflow (m ³ /dav)	
			non-grouted	grouted
Eq. (6)	Case 1	Construction	270.87	150.18
		Operation	216.69	120.15
	Case 2	Construction	253.00	140.28
		Operation	196.78	109.11
Porous continuum model	Case 1	Construction	132.36	115.48
		Operation	121.16	102.14
	Case 2	Construction	137.24	123.01
		Operation	117.98	103.89

연속체 모델링에 의한 누수량은 Case 별로 큰 차이를 보이지 않으며, 그라우팅 효과로서 최소 10.4%에서 최대 15.7%까지 누수량 감소가 예측

된다. 계산식에 의한 값과는 달리 수벽시스템과 저유공동간의 거리가 멀수록 누수량은 감소하는 것으로 계산된다. 계산결과를 정리하면, 그라우팅으로 저유공동 주변 암반의 투수성을 10배 가량 감소시킨다는 가정 하에서 건설과 운영단계에서 저유공동으로 유입되는 누수량은 Case 1의 경우 약 100~115m³/day, Case 2의 경우는 약 100~125m³/day일 것으로 예측된다. 그러나, 그라우팅에 의한 지수효과를 무시할 경우에는 Case 1의 경우 약 120~130m³/day, Case 2의 경우는 약 120~140m³/day일 것으로 예측된다.

Table 6. Calculated total inflow into the storage caverns by the discrete fracture network model.

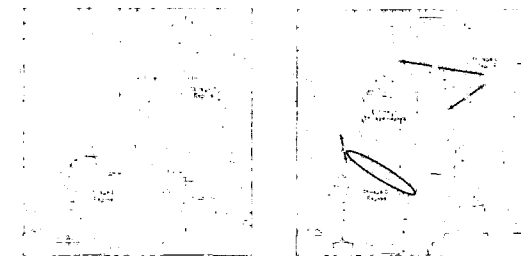
Boundary		Case 1 (m ³ /day)		Case 2 (m ³ /day)	
		Construction	Operation	Construction	Operation
Outer	Top	14.91	14.91	14.94	14.92
	Bottom	0.00	0.00	0.00	0.00
	Sides	0.00	0.00	0.00	0.00
	Total	14.91 (15%)	14.91 (19%)	14.94 (9%)	14.92 (11%)
Horizontal water curtain holes	#1	13.58	11.26	34.04	26.74
	#2	42.12	34.44	75.89	59.10
	#3	27.15	19.77	48.23	34.38
	Total	82.86 (85%)	65.47 (81%)	158.16 (91%)	120.22 (89%)
Storage caverns	97.76 (100%)	80.37 (100%)	173.10 (100%)	135.16 (100%)	

한편, FracMan/MAFIC에 의한 단열망 모델에서 계산결과는 Table 6과 같다. 저유공동의 유입량은 Case 1의 경우 약 80~98m³/day, Case 2는 135~173m³/day의 범위인 것으로 계산되었다. 이것은 그라우팅이 이루어지지 않은 조건에서 연속체 개념 모델에 의한 계산결과(Table 5)와 비교하면, 건설 중일 때 Case 1은 약 26% 적게, Case 2는 약 26% 많게 계산된 결과이다. 그리고 운영단계에서는 Case 1은 약 34% 적게, Case 2는 약 15% 많게 계산된 것이다. 단열망 모델에

의해 계산 가능한 물수지를 살펴 보면, 건설단계에서는 Case 1의 경우, 저유공동으로의 누수량 중 자연 지하수가 약 15%, 수벽공 주입수가 약 85%를 차지한다. Case 2의 경우는 지하수가 약 9%, 수벽공 주입수가 약 91%를 차지한다. 운영단계에서는 Case 1의 경우 지하수가 약 19%, 주입수가 약 81%를 차지한다. Case 2의 경우에는 지하수가 약 11%, 주입수가 약 89%를 차지하는 것으로 계산되었다.

인접시설과의 수리간섭영향

추가비축기지의 건설로 야기될 수 있는 지하수체계의 변화와 이에 따른 B와 C지구에 미치는 수리안전성에 대한 영향을 분석하였다. 현재 운영 중인 인접 B와 C지구의 지하수체계는 제석산을 중심으로하는 추가비축기지의 능선을 경계로 각각 독립적으로 형성된다(Fig. 12a). 건설단계부터 운영시기에 이르기까지 지하수유동 체계(Fig. 12b)는 추가비축기지를 중심으로 3개 영역으로 나뉘어진다. 가장 큰 특징은 지하수위의 강하와 함께 주 함양지역의 경계선이 B 및 C지구 쪽으로 각각 이동한다는 점이다.



(a) Pre-construction stage (b) Operation stage

Fig. 12. Potentiometric head distribution map at EL.0m. Storage B and C are in operation. Bold dashed lines represent the groundwater divide line. Lines and circles are the reference locations to calculate the change of hydraulic gradient.

Fig. 13의 단면을 살펴 보면, F21 구조대는 B 지구와 추가비축기지 사이에서 양 쪽으로 지하수를 함양시켜주는 경계면 역할을 하는 것으로 해석된다. F22 구조대는 C 지역에서 지하수의 흐름에 별 다른 변화를 주지 않으나 함양지역이 감소된다. 추가비축기지와 C지구 사이의 지하수 체계는 공동 굴착으로 인한 독립적인 함양영역의 형성으로 인한 C지구의 함양영역 축소를 초래한다. 지하수유동 경계면은 F22 구조대 부근에서 형성된다.

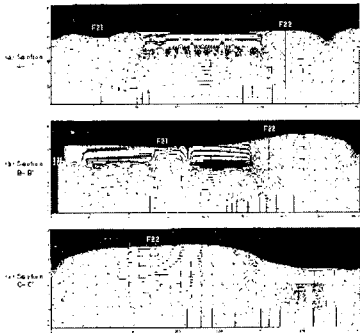


Fig. 13. Potentiometric head distribution sections(see Fig. 3) in the operation stage where Storage B and C are in operation. Bold dashed lines represent the groundwater divide line.

Table 7. Decrease of the hydraulic gradient in the Storage B and C regime due to the construction of Extension Storage.

Groundwater flow regime	Reference from Fig. 12b	Distance (m)	Pre-construction		Operation		Decrease rate of hydraulic gradient (%)
			Head difference (m)	Hydraulic gradient	Head difference (m)	Hydraulic gradient	
Storage B	㉠	276.9	110	0.40	52	0.19	52.5
	㉡	46.2 ~ 138.5	70 ~ 78	0.56 ~ 1.52	15 ~ 22	0.16 ~ 0.33	71.4 ~ 78.3
Storage C	㉢	443.1	98	0.22	60	0.14	36.4
	㉣	849.2	185	0.22	142	0.17	22.7

이와 같이 신규 시설의 건설로 인하여 기존 B와 C지구의 함양유역 축소, 수리경사 및 지하수 유동량의 감소가 불가피하다. 기존 지하수위면에서 계산되는 지하수두를 이용하여 4개 지점에서 계산한 수리경사 감소 경향은 Table 7과 같다. B지구는 적게는 약 50%에서 많게는 약 80%까지의 수리경사 감소가 예측된다. C지구는 최대 40% 정도의 상대적으로 적은 감소율을 보이는 것으로 계산되었다. 이들 수리경사의 감소는 추가비축기지 지구와 C지구의 수리적 기밀성과는 직접적인 관계가 없는 것으로 판단되며, 지하수 유동량은 투수성단열(대)의 특성에 따라 좌우되기 때문에 실질적으로 C지구에 미치는 유동량 감소의 직접적인 영향은 미비할 것으로 판단된다. 그러나, F21 구조대를 경계로 이웃하는 B지구의 경우 F21 구조대의 기존 지하수위가 유지될 것인가 하는 문제는 현재로서는 예측 불가하며, 지하수 유동량 감소에 대한 조치 방안이 강구되어야 할 것이다. 즉, 추가비축기지의 건설로 인하여 B지구의 함양유역 축소가 불가피하고, 이로 인하여 양 시설간 수리적 경계면 역할을 하는 F21 구조대의 지하수위 및 유동량이 큰 폭으로 강하될 것으로 예측되므로 보수적인 관점에서 기존 지하수위 유지를 위한 보조의 수직 수벽시스템이 요구된다.

연구 결과 및 토의

본 논문은 지하원유비축시설의 기밀성 확보를 위한 수리지질 안정성 해석방법에 있어서 그동안 적용되어왔던 2차원 다공성 연속체 수치모델링을 3차원으로 확장하여 해석하였으며, 더불어 단열망 모델링에 의한 해석방법도 병행하였다.

최적 수벽시스템

추가비축기지에 설치될 저유공동의 기준 지하수위면은 F21 구조대의 지하수위가 최저 EL.15m에 형성되어 있고, 신규 공동의 굴착으로 인하여 해수면까지 강하될 것으로 예상하여 EL.0m로 설정하였다. 저유공동의 심도는 기준

지하수위면에서 공동 굴착에 따른 수두 강하량과 자유공동의 최대 운영압을 고려하여 약 EL.-25m 하부에 설치되어야 할 것으로 계산되었다.

추가비축기지의 독립적인 수리지질학적 안정성 및 기밀성 유지를 위하여 수평 수벽시스템이 요구된다. 자유공동 상부에 분포될 것으로 추정되는 투수성단열들을 단열망 모델로 모사하여 확률적인 단열의 상호연결성 정도를 계산한 결과와 연직 수리경사, 수벽공 효율성, 자유공동과 수벽시스템간 이격거리 등의 제반 요건을 만족시키는 수벽시스템을 계산하였다. 자유공동의 수밀성을 만족시키는 최적의 수벽시스템은 해수면을 기준 지하수위로 하고, 자유공동이 EL.-30m에 위치할 때 수벽공 심도 EL.0m에서 간격 20m, 주입수압 2.0kg/cm² 인 조건과 수벽공 심도 EL.-5m에서 간격 20m, 주입수압 2.0kg/cm² 인 조건이다.

조사과정에서의 지하지질 해석결과에 대한 불확실성은 수치모델링에서 완전하게 배제될 수 없기 때문에 향후 굴착과정에서의 확인과 재평가를 통하여 초기 설계시의 해석모델의 수정과 이를 통한 재 해석이 이루어져야 할 것이다. 최종적인 수벽시스템은 굴착 중 도출되는 수리지질 자료에 근거하여 수리지질학적 안정성과 경제성 시공 측면에서 가장 효율적인 측면에서 재평가되어야 할 것이다.

한편, 인접 A와 B지구는 자유공동 심도가 EL.-30m, 수벽시스템과 자유공동과의 이격거리가 30m(EL.0m), 수벽공 간격은 전자가 8~16m, 후자가 10.5m로 되어 있으며, 양자 모두 EL.20m의 수두로서 주입하는 것으로 설치되어 있다. 따라서 본 논문의 계산 결과와의 차이점은 수벽시스템과 자유공동 간의 이격거리가 좁혀질 수 있고, 수벽공 간격은 B지구와 비교할 때, 2배 가량 넓게 설치될 수 있다는 점이다.

자유공동 누수량

추가비축기지의 공사용 터널, 연결 터널 및 입출하 수항을 제외한 자유공동으로의 누수량 예측을 위한 여러 가지 방법 중에서 연속체 모델

에 의한 보수적인 예측치, 즉, 그라우팅이 완벽하지 못할 경우를 고려하면, 건설기간 중에는 130~140m³/day, 운영 중에는 약 120m³/day일 것으로 예측된다. 단열망 모델에 의한 누수량은 각각 100~175m³/day, 80~135m³/day의 범위인 것으로 계산되어 연속체 모델에 의한 값과 차이를 보였다. 그리고 B지구의 수벽공 주입수가 차지하는 비율이 43%인 것과 비교해 보면, 단열망 모델의 경우 약 80~90%로 계산되어 전체적인 계산결과의 신뢰성이 결여되는 것으로 사료된다. 이러한 적용상의 문제점은 단열 투수량계수의 불확실성에서 비롯될 가능성도 있을 것이며, 향후 B지구의 운영단계에서의 누수량과의 비교를 통하여 신뢰성이 재 검토되어야 할 필요가 있다.

인접시설과의 수리간섭 영향

추가비축기지의 건설로 인하여 B지구의 함양유역 감소가 불가피하고, 이로 인하여 양 시설간 수리적 경계 역할을 하는 F21 구조대의 지하수위 강하 및 유동량의 감소가 발생될 것으로 예상된다. 기준 지하수위면에서 F21 구조대를 따라서 약 60m의 수두 강하와 이에 따른 수리경사의 감소율은 약 80%에 달할 것으로 예측된다. 따라서 보수적인 관점에서 기준 지하수위를 유지하기 위하여 적어도 자유공동의 바닥 심도(EL.-60m)까지 수압을 가해줄 수 있는 별도의 지상 혹은 지하의 수직 수벽시스템이 요구된다.

C지구와의 수리적 경계는 계곡을 따라 분포하는 F22 구조대 부근에서 형성될 것으로 예상되는데, 지하수 함양지역의 수두는 현재의 기준 지하수위면에서 약 40m 감소하고 최대 40%의 수리경사 감소가 예측된다. F22 구조대를 관통하는 AW-2번 공 (Fig. 1)에서 시행된 장기 양수 시험 결과, C 지구의 관측공에서는 수위강하가 전혀 관측되지 않았다(엘지엔지니어링(주)와 SK건설(주), 1999). 따라서, 수치모델링 결과와 현재까지의 현장 수리시험의 결과만을 고려할 때 F22 구조대는 C지구와의 수리적 방벽 기능을 하는 것으로 사료된다.

결 언

본 논문은 각종 지질 및 수리지질학적 조사 자료를 토대로 하여 수치모델링을 이용한 지하원유비축시설의 수리지질 안정성 해석방법 제시를 목적으로 하였다. 이러한 해석의 궁극적인 목표는 우선적으로 저장유와 개스의 누출을 방지하는 것이고, 동시에 경제적인 시스템이 되어야 한다는 데에 있다. 본 논문의 결론은 다음과 같이 정리된다.

1. 3차원 연속체 모델을 이용한 지하원유비축 시설에 대한 광역 규모의 수리지질학적 안정성 요건의 해석방법은 기존의 2차원 대표 단면에서의 해석 기법과 비교할 때 연구지역의 수리지질학적 특성을 유사한 수준으로 모사 가능하기 때문에 독립 압체 내에서의 공간적인 지하수체계 변화뿐만 아니라 주변 시설과의 수리지질학적 간섭 해석에도 유용하게 적용될 수 있다.
2. 3차원 단열망 모델은 암반 블록 규모의 지하수체계 해석과 단열 투수량계수의 역산에 적용 가능하나, 해석 영역을 확장시킬 수 있는 입력 파라미터의 결정방법과 실제 계측치와의 대비를 통하여 신뢰도를 향상시킬 수 있는 기법이 보완되어야 한다.
3. 지하원유비축시설의 수리지질학적 안정성 해석은 3차원 수치모델을 이용하여 설계인자, 즉, 저유공동의 심도와 내부 압력조건, 수벽공의 심도, 간격, 주입압 조건들의 조합을 통하여 검토되어야 한다. 신규 비축시설의 건설로 인한 주변 시설과의 수리적 간섭 영향은 각 단위 시설별 지하수 함양구역의 축소와 수리경사의 감소 현상으로 나타난다. 특히 투수성 구조대는 지표 및 시추조사만으로는 정밀한 해석이 어렵기 때문에 건설 과정에서 이러한 구조가 확인될 경우 시설간의 간섭영향 뿐만 아니라 해수침투에 의한 영향을 경감시키기 위하여 수리지질학적 특성이 재 확인되어야 하며, 이를 근거로 수리적 영향 저감방안이 수립되어야 한다.

본 연구와 관련하여 지질 및 수리지질학적 불확실성을 경감시킴으로써 수치모델링에 의한 해석결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 다음과 같은 내용에 대하여는 향후 비축시설의 수리안정성 설계 과정에서 충분히 다루어져야 하겠다.

- 정확한 조사 시추공의 위치와 굴진 방향의 결정을 위한 투수성단열(대)에 대한 예측, 탐사, 해석기법의 향상
- 시추공에서 관통되는 투수성단열대에 대하여 그 발달 방향과 수리특성을 확인할 수 있는 조사기법의 정립
- 단열망 모델링을 위하여 일정구간별 정압주입시험을 통하여 부정류해석에 의한 단열조별 단열 투수량계수 결정
- 저유공동의 굴착으로 인한 지하수위 강하량의 결정을 위하여 암반 수리인자, 저유공동의 수, 저유공동의 간격 등의 변수를 포함하는 일반화된 관계식 개발
- 단열망 모델의 해석 영역의 확장을 위한 투수성단열 밀도의 결정방법

감사의 글

이 논문이 마무리될 수 있도록 긴 시간 동안 도와 주신 한국원자력연구소 김천수박사님과 현대지엔지니어링(주) 이영동차장께 감사드리며, 세심한 토의로서 논문의 완성도를 높여 주신 충남대학교 송무영교수님, 원자력환경기술원 이찬구박사님, 부경대학교 정상용교수님께 감사드립니다. 연구지역의 제공과 기존 조사자료의 열람을 협조하신 한국석유공사 전한석부장님, (주)대우엔지니어링 송승호상무님, 그리고, 이창우감리단장님께도 감사드립니다. 어려운 여건에도 불구하고 현장조사를 지원해 주신 (주)대우엔지니어링 김경희과장, (주)세터기술 김상준과장, 충남대학교 조성일석사, 그리고 수치모델링에 도움을 주신 충남대학교 노영조석사께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김경수, 이운용, 김천수, 1999a, 여수반도 북동부

- 지역의 선상구조와 단열계 분포특성, 대한지질공학회지, 제9권 제1호, p.31-43.
- 김경수, 이은용, 김천수, 배대석, 정지곤, 1999b, 여수반도 북동부지역의 지표 및 지하 단열계 분포특성, 1999년도 대한지하수환경학회·한국토양환경학회 춘계공동학술발표회 논문집, p.16-17.
- 김경수, 2000, 수치모델링을 이용한 지하원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구, 충남대학교대학원 박사학위논문, 214p.
- 엘지엔지니어링(주), SK 건설(주), 1999, U-1 추가비축기지 조사설계용역 지질조사보고서.
- (주)삼림컨설턴트, 1993, 여천지구 프로판 공동남측의 수리지질학적 특성 분석 보고서.
- Anderson, M. P. and Woessner, W. W., 1992, Applied groundwater modeling - Simulation of flow and advective transport, Academic Press, Inc., 381p.
- Bawden, W. F., 1980, Two-phase flow through rock fractures, Ph.D Thesis, Dept. of Civil Eng., Univ. of Toronto.
- Franklin, J. A. and Dusseault, M. B., 1989, Rock engineering, McGraw-Hill Pub. Co., 600p.
- Geostock, 1996, U-1-2 Crude oil storage(Yochon) hydrogeological audit at the end of construction : Final Report, Hyundai Eng. & Const. Co., Ltd.
- Geostock, 1996, U1-2 crude oil storage - Hydrogeological audit at the end of construction, Hyundai Eng. & Construction Co., Ltd.
- Geostock, 1992, LPG underground storage project in Pyongtaek - Basic design, Yukong Gas Ltd.
- Golder Assoc. Inc., 1994, FracMan-Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling and exploration simulation(Version 2.306).
- Golder Assoc. Inc., 1994, MAFIC-Matrix/fracture interaction code with solute transport user documentation(Version β1.4).
- Goodall, D. C., 1986, Containment of gas in rock caverns, Ph.D Thesis, Dept. of Civil Eng., Univ. of California, Berkley.
- Goodall, D. C., Åberg, B. and Brekke, T. L., 1988, Fundamental of gas containment in unlined rock caverns, Rock Mech. Rock Eng., V21, pp.235-258.
- Hartely, L. J., 1996, Connetflow (Release 1.0) - User guide, AEA Technology.
- Komada, H., et al., 1985, Study on leaked air from copressed air storage in rock mass, 17th Sym. on rock mechanics in Japan.
- Liang, J. and Lindblom, U., 1994, Critical pressure for gas storage in unlined rock caverns, Technical Note, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.31, No.4, pp.377-381.
- Muskat, M., 1946, The flow of homogeneous fluids through porous media, McGraw-Hill Book Co., Inc.
- Nakagawa, K., Komada, H., Miyashita, K. and Murata, M., 1987, Study on compressed air storage in unlined rock caverns, 6th Int. ISRM Congress on Rock Mech., Montreal, Canada.
- Reinius, E., 1977, Groundwater flow to rock caverns, The 1st Int'l Symp. on Storage in Excavated Rock Caverns, ROCKSTORE 77, Stockholm, Sweden, Sep. 5-8.
- Scientific Software Group, 1997, Visual Modflow - The standard software package for professional three-dimensional groundwater flow and contaminant transport modeling.
- Söder, C O, 1994, Water curtains in gas storage (An experimental study), Ph.D thesis, Chalmers Univ. of Tech., Sweden, 201p.
- VBB Viak, 1991, U2 expansion project - Geohydrological modeling.
- Watanabe, K., Ishiyama, K. and Asaeda, T., 1987, Instability of the interface between

gas and liquid in an open fracture model,
6th Int. ISRM Congress on Rock Mech.,
Montreal, Canada.

Åberg, B., 1977, Prevention of gas leakage
from unlined reservoirs in rock, The 1st
Int'l Symp. on storage in excavated rock
caverns, ROCKSTORE 77, Stockholm,
Sweden.

김경수

한국원자력연구소 심부지질환경특성연구분야
대전광역시 유성구 덕진동 150 (우: 305-353)
TEL : (042) 868-2365
FAX : (042) 868-2063
e-mail : kskim@kaeri.re.kr

정지곤

충남대학교 자연과학대학 지질학과
대전광역시 유성구 궁동 220 (우: 305-764)
TEL : (042) 821-6424
e-mail : jgjeong@cnu.ac.kr