

지하 LPG 저장공동에서의 Clogging 추정을 위한 역해석 수치모형

A Numerical Model of Inverse Analysis for Estimating the Clogging in the Underground LPG Storage Cavern

강태섭(Tae - Scob Kang)* · 한일영(II - Yeong Han)*

요 약 : 지하 LPG 저장공동의 모니터링 자료를 이용하여 투수계수를 추정하기 위한 Galerkin 유한요소 역해석 수치모형(SK-EST)이 개발되었다. 이 역해석 수치모형은 해석영역 전체구간에 대해 수두(압)분포를 근사하여 구성된 행렬방정식을 계산함으로써 투수계수를 산출한다. 실제 적용성을 검증하기 위해 현재 운영 중인 지하 LPG 저장공동 간극수압계의 모니터링 자료를 이용한 역해석을 실시하였다. 또한 간극수압계의 작동상태를 확인하기 위해 측정된 심도별 수압측정 자료를 이용하여 심도별 투수계수 변화를 개발된 수치모형(SK-EST)을 이용하여 추정하고 수압시험 결과와 비교하였다.

Abstract : A numerical model (SK-EST) for estimating hydraulic conductivity using monitoring data of underground LPG storage cavern was developed. The model calculates hydraulic conductivity from matrix equation which is established from the distribution of hydraulic potential. To verify the applicability of this model, an inverse analysis was performed using the monitoring data of pressure cell of an operating underground LPG storage cavern. And also using the water pressure packer test data which were obtained to look over the operation capability of pressure cell, conductivity variation with depth was estimated using the developed numerical model (SK-EST) and was compared with in situ results.

서 론

지하 유류저장의 원리는 암반내에 공동을 굴착하여 공동 주변 암반의 간극수압을 공동내압보다 크게하여 지하수가 암반으로부터 공동 내부로 흐르도록 함으로서 저장되어 있는 유류가 저밀도 및 고휘발성으로 인하여 암반속으로 누출되는 것을 방지하는 것이다. 지하 유류저장공동의 기밀성 유지를 위한 인위적 충전방법의 하나로 저장공동 상부구간에 수벽공(Water Curtain Holes)을 설치하여, 지하수가 수벽공으로부터 암반 열극을 통하여 저장공동으로 유입되도록 하는 방법이 있다. 암반 열극 내에 암석 광물성분과 지하수의 화학반응에 의해 침전물이 생성되거나, 박테리아와 같은 미생물 군이 성장하게 되면 암반의 투수성을 저하시켜 유량이 감소되며 결과적으로 수벽시스템의 효율성을 낮추는 결과를 초래하여 저장공동의 기밀성 유지에 치명적인 결과를 초래하게 된다. 따라서 저장공동의 운영중에 기밀성 유지 여부를 지속적으로 확인하고, 문제점 발견시 이에 대한 대비책을 강구하기 위해서는 먼저 저장공동 암반의 현재의 투수계수를 파악해야만 한다.

현재 저장공동 운영중에 기밀성 유지 여부를 판단하기 위한 방법으로 저장공동 주변 암반내 설치된 간극수압계로부터 모니터링을 실시하여, 측정되는 압력과 저장공동 운영압의 차이를

비교하는 방법이 있다. 즉 간극수압계에서 측정되는 압력과 저장공동 운영압의 차가 안전계수 이상일 때 기밀성 기준이 만족되고 있다고 판단할 수 있다(Figure 1). 수벽시설의 설치 목적은 기지의 운영중에 가스의 누출을 방지하기 위하여 인위적으로 저장공동 상부의 Hydraulic Potential을 높이고 저장공동으로 연결된 함수 절리대의 수리경사를 증진시키기 위함이다. 저장공동의 기밀성 유지를 위해서는 수벽공과 수벽공 사이에 설치된 간극수압계의 깊이 수벽공 효율성에 의한 수두와 안전계수 사이의 값을 유지해야 하는데 이 기준 이하로 감소하였을 때 그 원인규명을 위한 정량적 분석이 요구된다.

간극수압계의 값을 통해 관측되는 암반내 지하수두 변화의 원인은 암반내 수리특성 변화와 강수량의 변화에 따른 지하수 함양률의 변화 등 다양하다. 본 연구에서는 강수량에 의한 지하수두의 변화 보다는 암반내 수리특성(투수계수 감소 등)에 따른 지하수유동의 변화만을 고려한다.

최근까지는 모니터링 자료를 활용하기 보다는 저장공동 운영중에 암반에 시추를 하여 직접적인 조사 및 수리시험 등을 통해 암반의 투수계수를 산출하고 그에 따른 간극수압 강하의 원인을 찾았다. 그러나 이 방법은 저장공동 운영중 실시하게 되므로 대단히 위험하고 또한 막대한 비용과 시간을 필요로 한다.

본 연구에서는 이러한 직접적인 시추조사에 의한 방법에 대한 대안으로 모니터링 자료를 활용하여 암반의 투수계수를 추

*SK건설(주) 부설연구소(R&D Center, SK Engineering & Construction Ltd., 192-18, Kwanghun-Dong, Chongro-Gu, Seoul 110-300, Korea)

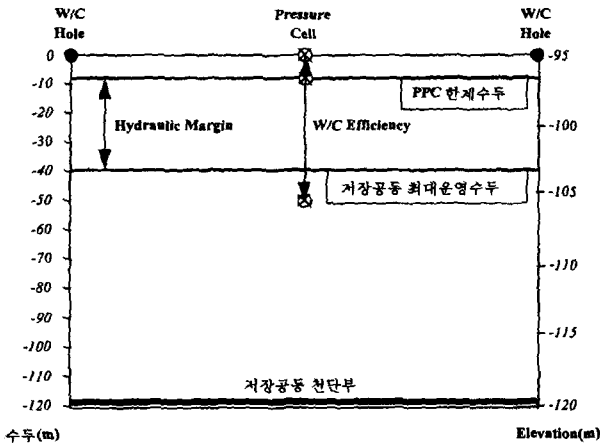


Figure 1. The maintenance of tightness in underground LPG storage cavern.

정하기 위한 수치모형을 제시하였다. 먼저 Galerkin 유한요소법을 이용하여 직접법에 의한 역해석 수치모형을 유도하고, 수치해의 결과들을 해석해와 비교함으로써 제시된 수치모형의 타당성을 검토하며, 실제 운영기지의 간극수압 모니터링 자료를 이용하여 투수계수를 산출하고 시추조사를 통해 얻은 수리시험결과와 비교 분석하였다.

역해석 수치모형

역해석의 개념

지하수 흐름 및 용질이동의 수치모의 단계(Figure 2)에서, 모의 결과를 수두나 용질농도와 같이 현장에 분포하고 있는 양으로 관측할 수 있는 값과 비교해서 받아들일 수 있는 결과를 얻을 때까지 모의에 이용되는 모형, 모형모의의 경계조건 그리고 매질의 특성값들을 조정하는 것을 Model Calibration이라 한다. 일반적으로 모형과 경계조건은 개념설계 단계에서부터 지질 및 수리시험 자료 등을 통해 설정된다. 한편 매질의 특성값들은 설정된 모형 및 각 조건들에 대해 관측값을 산출하기 위한 매질의 고유한 매개변수로 작용하게 되고 이를 알아내기 위해서 시행하는 절차를 Parameter Estimation이라 한다. Parameter Estimation의 역산문제를 풀기 위한 방법은 크게 직접법(Direct Method)과 간접법(Indirect Method)으로 구분할 수 있

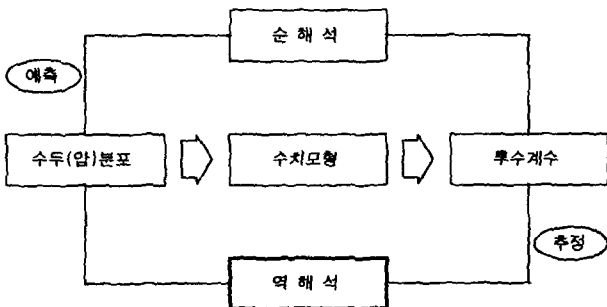


Figure 2. Schematic diagram showing groundwater flow simulations.

고(Neuman, 1973), 이들과 함께 선형적 정보(Prior Information)를 결합한 통계추정방법(Stochastic Inversion Method)이 이용되고 있다(Yeh, 1986).

간접법은 순해석 모형을 통해 관측 수두분포에 근사한 결과를 얻을 때까지 입력 매개변수 값을 조정하여 모의를 반복하는 방법이다. 일단 매개변수의 초기 추정값을 입력하여 모의를 실시한 후, 계산된 결과를 실제 관측한 결과와 비교한다. 만일 두 결과가 미리 지정된 오차의 범위 내에서 충분히 근사하다고 판단되면 모의는 종료되고, 그 때 매개변수의 추정값이 해로서 받아들여진다. 계산결과가 오차의 범위를 벗어날 경우에는 매개변수 값을 조정하여 입력하고 다시 모의를 실시한다. 이 과정은 계산값이 관측값과 근사해질 때까지 계속 반복된다. 따라서 매번 반복시 모의의 전과정을 수행해야 하기 때문에, 간접법은 계산적으로 비효율적이다.

매개변수를 독립변수로 설정하여 초기값을 입력해야 하는 간접법에서와는 달리, 직접법은 지배방정식에서 매개변수를 종속변수로 설정하여 경계치 문제(Boundary Value Problem)의 해를 구하는 방법이다. 즉 관측 수두 또는 수압분포를 입력값으로, 추정 매개변수를 출력값으로 하는 1차 선형편미분방정식의 해를 구하는 것이다. 그러므로 직접법은 반복적인 모의과정이 필요 없고 따라서 간접법에 비해 계산이 더 빠르다. 또한 간접법에 비해 상대적으로 이론이 간결하여 쉽게 선형방정식으로 만들 수 있는 장점이 있다. Figure 3은 직접법과 간접법에 의한 역해석을 개념적으로 설명하고 있다.

수치모형의 유도

수치모형을 구성하기 위하여 2차원의 불균질 등방성 매질을 가정한다. 여기서 불균질 매질은 다공성 매질내에서 위치에 따라 다른 투수계수 분포를 갖는 것을 의미한다. 정상상태 피압수두가 매질내 임의의 점에서 알려져 있고 투수계수는 알려져 있지 않은 것을 가정할 때, 이 문제에 대한 흐름 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \tag{1}$$

여기서, K는 투수계수, h는 수두이다.

일의적인 해를 갖기 위한 경계조건은

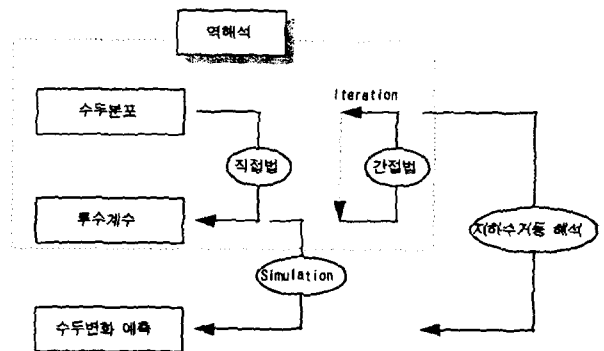


Figure 3. Schematic diagram showing direct and indirect methods.

$$\mathbf{K}(\Gamma) = \mathbf{K}_0 \quad (2)$$

와 같이 매질의 경계 Γ 를 따라 투수계수(\mathbf{K}_0)가 주어지는 형태의 Dirichlet 조건과 Darcy의 법칙으로부터 Flux의 개념으로 표현되는 다음과 같은 Neumann 조건으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{K}(\Gamma) = -q_0 \frac{\partial h}{\partial n} \quad (3)$$

여기서 q_0 는 경계의 단위 길이당 연직방향의 Flux이고 $\frac{\partial h}{\partial n}$ 은 경계에 수직한 흐름방향을 따르는 수리경사이다.

일반적인 Galerkin 과정(Pinder & Frind, 1972)을 따라 다음과 같이 함수 L 을 정의한다.

$$L(\mathbf{K}) \equiv \frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{K} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathbf{K} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

미지의 함수 \mathbf{K} 는 영역내 임의의 점을 따라 유한한 급수로 근사될 수 있다.

$$\mathbf{K}(x, y) \simeq \hat{\mathbf{K}}(x, y) = \sum_{i=1}^n \mathbf{K}'_i \phi_i(x, y) \quad (5)$$

n 은 영역내 절점의 개수이고, 여기서 기준함수 ϕ_i 를 적절히 선택하였을 때 \mathbf{K}'_i 는 절점에서의 해가 된다.

Galerkin 법에서 이 근사해는 함수 L 로 치환되고, 그 결과 잔차(Residual)는 기준함수 각각에 대하여 직교(Orthogonal)하도록 만들어진다. 직교함수(Orthogonal)의 정의로부터 이러한 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\iint_R L(\hat{\mathbf{K}}) \cdot \phi_i(x, y) dx dy = 0 \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

또는

$$\iint_R \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\hat{\mathbf{K}} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\hat{\mathbf{K}} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] \cdot \phi_i(x, y) dx dy = 0 \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

식 (7)에 대한 부분적분을 통해 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\iint_R \left(\hat{\mathbf{K}} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} + \hat{\mathbf{K}} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \right) dx dy - \int_S \left(\hat{\mathbf{K}} \frac{\partial h}{\partial x} l_x \phi_i + \hat{\mathbf{K}} \frac{\partial h}{\partial y} l_y \phi_i \right) ds = 0 \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

여기서 l_x, l_y 는 경계에 수직 외부방향의 방향 코사인이다. 식 (8)의 두 번째 적분항에서, $\hat{\mathbf{K}} \frac{\partial h}{\partial n}$ 은 수직방향으로 경계를 가로지르는 흐름을 나타내기 때문에 S 를 따라 흐름이 없는 부분에서는 선적분이 0이 된다. 식 (5)의 시행해를 치환함으로써 얻

은 식 (8)에서 \mathbf{K}'_i 는 유일한 미지수가 된다. 따라서 n 개의 방정식으로 이루어진 이 계에서 미지수 \mathbf{K}'_i 에 대한 해를 구할 수 있다.

이 해를 구하기 위하여 다음과 같은 유한요소법의 과정을 거치게 된다. 여기서는 사각형 요소를 이용한 유한요소법을 적용하였다. 먼저 수두와 투수계수가 모두 같은 절점에서 정의된다고 가정하면, 이 절점계에서 두 값들은 같은 절점 기준함수를 공유하게 되고, 이를 절점에 대한 벡터로 표시할 수 있다. 먼저 미지(未知)의 절점 투수계수에 대하여

$$\hat{\mathbf{K}}(x, y) = \Phi^T(x, y) \mathbf{K}, \quad (9)$$

그리고 기지(既知)의 절점 수두에 대하여 다음과 같이 표시된다.

$$\hat{h}(x, y) = \Phi^T(x, y) \mathbf{h} \quad (10)$$

식 (9)와 (10)을 (8)에 대입하면, 각각의 요소에 대해 적분이 가능하다.

$$\sum_e \left\{ \iint_R \left[\Phi^T \mathbf{K} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\Phi^T \mathbf{h}) \frac{\partial \phi_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (\Phi^T \mathbf{h}) \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \right) \right] dx dy - \int_S \left[\Phi^T \mathbf{K} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\Phi^T \mathbf{h}) l_x + \frac{\partial}{\partial y} (\Phi^T \mathbf{h}) l_y \right) \phi_i \right] ds \right\} = 0 \quad (11)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

일반적인 과정을 거쳐서, 식 (11)은 다음과 같이 미지(未知)의 \mathbf{K} 의 계수들로 표현될 수 있다.

$$\sum_e \left(\mathbf{a}_i^T + \mathbf{b}_i^T \right) \mathbf{K} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

여기서 \mathbf{a}_i^T 와 \mathbf{b}_i^T 는 계의 특성, 즉 요소의 형태와 수두에만 관계되는 계수행렬이다. 이들 두 행렬의 계수들은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{a}_{ij} = \sum_{k=1}^m \left[h_k \iint_R \phi_j \left(\frac{\partial \phi_k}{\partial x} \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + \frac{\partial \phi_k}{\partial y} \frac{\partial \phi_j}{\partial y} \right) dx dy \right] \quad (13)$$

$$\mathbf{b}_{ij} = - \sum_{k=1}^m \left[h_k \int_S \phi_j \left(\frac{\partial \phi_k}{\partial x} l_x + \frac{\partial \phi_k}{\partial y} l_y \right) ds \right] \quad (14)$$

여기서 m 은 요소를 이루는 절점의 개수이다.

요소에 대한 적분은 공간상의 좌표계(x, y)에서보다 한번의 길이가 2인 정사각형 요소로 이 좌표를 변환한 국부좌표계(ξ, η)를 이용하여 쉽게 계산할 수 있다(Zienkiewicz, 1971; Pinder & Frind, 1972; Frind & Pinder, 1973). 그 때 식 (13)은 다음과 같이 변환된다.

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^m \left[h_k \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \phi_j \left(\frac{\partial \phi_k}{\partial x} \frac{\partial \phi_k}{\partial x} + \frac{\partial \phi_k}{\partial y} \frac{\partial \phi_k}{\partial y} \right) \det J d\xi d\eta \right] \quad (15)$$

여기서 J는 요소에 대한 Jacobian 행렬이다. 마찬가지로 선적분 역시 Jacobian 행렬의 계수들을 이용하여 위와 같은 방법으로 변환될 수 있다. 그 때 식 (14)는 국부좌표계에서의 변 $\eta = \pm 1$ 을 따라

$$b_{ij} = - \sum_{k=1}^m \left[h_k \int_{-1}^{+1} \phi_i \phi_j \left(- \frac{\partial \phi_k}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi_k}{\partial y} \frac{\partial x}{\partial \xi} \right) \eta d\xi \right] \quad (16a)$$

이고, 변 $\xi = \pm 1$ 을 따라

$$b_{ij} = - \sum_{k=1}^m \left[h_k \int_{-1}^{+1} \phi_i \phi_j \left(+ \frac{\partial \phi_k}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial \phi_k}{\partial y} \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) \xi d\eta \right] \quad (16b)$$

이 된다. 여기서 나타난 적분은 가우시안 구적법(Gaussian Quadrature)를 이용하여 계산될 수 있다. 가우시안 적분은 다음과 같은 방법으로 수행된다.

$$\int_{\tau=-1}^{\tau=+1} f(\tau) d\tau = \sum_{KG=1}^{NP} G_{KG} f(\tau_{KG}) \quad (17)$$

여기서 $f(\tau)$ 는 $\tau=-1$ 과 $\tau=+1$ 사이 구간에서 적분될 함수이다. KG는 가우스 점(Gauss Point), NP는 가우스 점들의 총 개수, G_{KG} 는 가우스 적분 가중상수(Weighting Constant)이고 τ_{KG} 는 KG 가우스 점에 해당되는 위치이다. 이 적분은 n차의 폴리노미알 $f(\tau)$ 에 대해 (2n-1)의 가우스 점이 사용될 때 정확한 적분을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 적분항의 폴리노미알이 모두 2차 이하이기 때문에 주어진 좌표의 방향에서 두 개의 가우스 점이 이용된다. 이 경우에, G_{KG} 는 1이고 식 (17)은 다음과 같게 된다.

$$\int_{\tau=-1}^{\tau=+1} f(\tau) d\tau = \sum_{KG=1}^2 f(\tau_{KG}) \quad (18)$$

가우스 점 1과 2에 대한 τ_{KG} 는 각각 $\pm \frac{1}{\sqrt{3}}$ 이다.

식 (12)에서 방정식들은 다음과 같은 행렬방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$([A] + [B])(K) = (0) \quad (19)$$

여기서 [A]와 [B]는 각 요소 행렬들을 조합한 계수행렬(Global Coefficient Matrix)이고 (K)는 전체 영역에 대해 절점 투수계수를 포함하는 벡터이다. 이 행렬방정식의 계는 다음과 같이 분리할 수 있다.

$$\left(\begin{bmatrix} A_{uu} & A_{uv} \\ A_{vu} & A_{vv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{uu} & B_{uv} \\ B_{vu} & B_{vv} \end{bmatrix} \right) \begin{pmatrix} K_u \\ K_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

여기서 (K_u)는 미지의 투수계수를 포함하는 벡터이고, (K_v)는 경계조건에 의해 정의되는 투수계수 벡터이다. 식 (20)의 행렬식을 계산하여 얻을 수 있는 첫 번째 식은 다음과 같다.

$$([A_{uu}] + [B_{uu}])(K_u) = -([A_{uv}] + [B_{uv}])(K_v) \quad (21)$$

이 행렬방정식을 이용하여 미지의 투수계수 벡터(K_u)에 대한 계산을 할 수 있다.

구성된 수치모형에 대한 FORTRAN 프로그램이 작성되었다. 프로그램의 실행을 위한 입력자료는 절점과 요소에 대한 정보와 절점의 수, 그리고 경계조건을 위한 투수계수로 구성되어 있다.

프로그램은 Galerkin 유한요소법과 사각형 요소를 적용하고 있고, 투수계수 산출을 위해 역행렬을 구하는 방법을 이용하였다. 또한 이 프로그램은 1차원 및 2차원 불균질 매질의 정상상태 흐름에 대해 적용이 가능하다.

기존의 상용 역해석 모델들이 거의 간접법을 사용하는데 비해 본 모델은 직접법을 적용하고 있다. 그 이유는 지하 유티저장기지의 운영시 실제 간극수압계에 의한 측정이 지속적으로 이루어지고 있고, 이 측정값들은 이전의 시추조사 결과와 거의 일치하고 있어서 관측오차에 따른 가능성이 적기 때문에 직접법을 적용했을 때의 일반적인 단점이 상당히 보완될 수 있기 때문이다. 또한 간접법을 이용하는 기존 모델을 사용할 때는 추정해야 할 변수에 대해 최적화가 되어 있지 않기 때문에 변수에 대해 고려해야 할 사항이 많고, 직접법에 비해 상대적으로 최적화를 위한 반복과정 때문에 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다(Neuman, 1973; Frind & Pinder, 1973; Yeh *et al*, 1983). 이에 비해, 본 모델은 지배방정식에 대한 해의 반복적인 산출과정이 필요없다.

본 모델의 처리 흐름도는 Figure 4와 같다. 그림에서 통상적인 유한요소 해석법의 일련의 과정을 거쳐서 얻어진 행렬방정

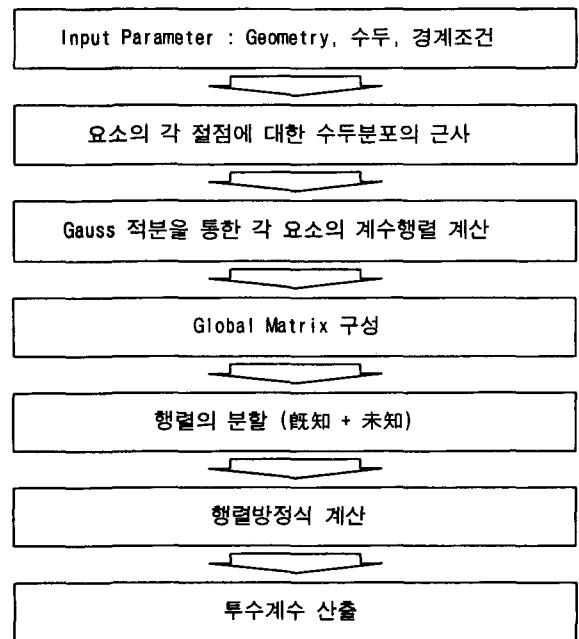


Figure 4. Flow chart of the estimation procedure.

식을 계산함으로써 최종적으로 미지의 절점에 대한 투수계수를 산출하게 된다.

검정(Calibration)

수치모형 검정을 위해 균질 매질과 불균질 매질의 두가지 경우에 대해 고려하였다. 계산결과를 수치모형에 대한 해석적인 해와 비교함으로써 본 프로그램을 통한 계산의 타당성을 검토하였다.

균질매질

Figure 5는 균질 매질에서 일정한 방향으로의 흐름을 묘사하고 있다. 이 매질은 단위 폭을 갖는 Column 형태의 1차원적인 양상을 띠고 있고 또한 모든 영역에 걸쳐 일정한 투수계수 분포를 갖고 있으므로 이 매질내 흐름에 대한 수리경사 역시 일정하다. 투수계수는 매질의 경계 $x=0$ 를 따라 주어져 있다. 하부의 그래프에서 보이는 수두분포를 통한 역해석 결과는 같은 그래프 상에서 점으로 표시되어 있다. 이 결과는 실선으로 표시된 해석적인 해와 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

불균질매질

Figure 6은 불균질 매질에서 일정한 방향으로의 흐름을 묘사하고 있다. 이 매질의 기하학적 양상은 앞 절의 균질 매질의 경우와 일치한다. 그러나 투수계수는 x 방향을 따라 선형적으로 증가한다. 이 경우에 매질의 폭이 일정하기 때문에, Darcy 법칙으로부터 수리경사의 역은 선형적으로 변화되어야 함을 알 수 있다. 그러므로 역해석을 위해 필요한 피압수두분포는 쉽게 계산될 수 있다. 경계조건에 대한 투수계수는 균질 매질의 경우와 마찬가지로 $x=0$ 를 따라 주어져 있다. 하부의 그래프에서 보이는 수두분포를 통한 역해석 결과는 같은 그래프 상에서 점으로 표시되어 있다. 이 결과 역시 실선으로 표시된 해석적인 해와 거의 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

토의

이상의 균질 및 불균질 매질의 두가지 경우에서 본 프로그램

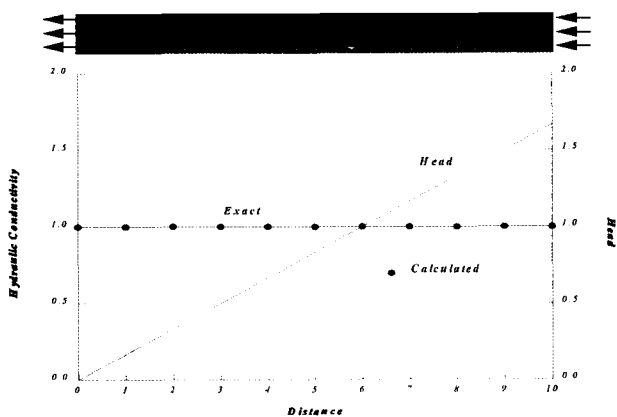


Figure 5. Estimation of hydraulic conductivity in a homogeneous medium.

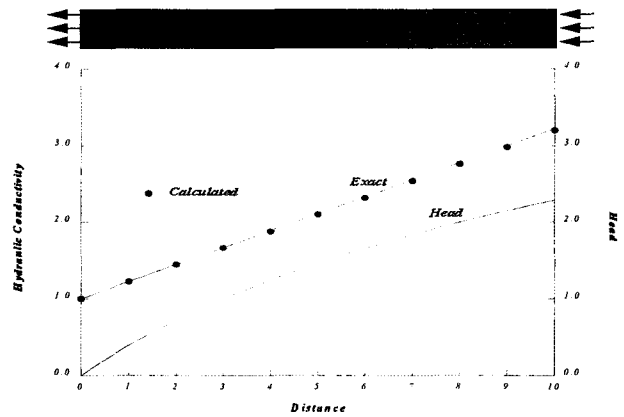


Figure 6. Estimation of hydraulic conductivity in an inhomogeneous medium.

을 통한 역해석 결과는 모두 타당한 계산결과를 보여주고 있다. 그러나 수치모형의 내재적인 특성상 입력 수두분포에 대한 함수가 되도록 선형적으로 표현되어야 하고 이를 위해서는 계산 영역내 요소의 크기를 가능한 한 작게 유지하도록 해야 한다. 즉 수두분포에 대한 함수가 높은 차수의 급수로서 표현되어야 한다. 수두분포가 제대로 선형 함수로 표현되지 못할 때에는 입력자료에 계단 형태의 섭동(Perturbation)이 심해져서 계산결과 의 오차가 더욱 커지게 되고 결국 해의 수렴정도가 낮아진다.

한편 높은 차수의 급수로 수두분포를 선형화 시키게 되면 결국 많은 자료를 입력해야 하고 그에 따른 계산 부담도 따라서 커지게 된다. 또한 한정된 입력자료에 대해 계산 영역내 요소의 크기를 줄이는 방법도 역시 자료의 보간(Interpolation)을 요구하게 되므로 보간에 따른 자료의 왜곡 또는 오차가 발생하게 된다. 이를 피하기 위해서 각 요소를 구성하는 절점의 수를 늘려서 Cubic 또는 Quadratic 요소를 통한 계산을 실시함으로써 오차를 줄이는 방법을 사용하여야 한다(Bathc, 1996). 이러한 방법은 입력자료에 대한 별도의 보간을 요구하지 않으므로 보간에 따른 오차를 고려하지 않아도 되고, 또한 요소의 크기를 줄이지 않아도 되므로 계산시간 역시 크게 증가하지 않는다.

검증(Verification)

수치모형의 실제 적용성을 검증하기 위하여, 현재 운영중인 국내 LPG 저장공동 간극수압계의 모니터링 자료를 이용한 역해석을 실시하였다. Figure 7은 LPG 저장기지 공동 주변 암반내 설치된 간극수압계에서의 간극수압 변화 양상을 보여주고 있다(선경건설(주) 부설연구소, 1994). 이 간극수압계는 저장공동의 상부에 위치하는 수벽공과 수벽공 사이에 설치되어 있다. 따라서 저장공동 운영압과 수벽시스템의 효율성에 따른 직접적인 지하수두 값을 측정한다고 말할 수 있다. 하부의 막대그래프는 저장공동 운영압의 변화를 나타내고, 점으로 표시된 것은 간극수압계의 모니터링 관측값의 변화 양상이다. 저장공동 운영압의 유류 입출하에 따른 변화 주기와 간극수압계 모니터링 값의 변화 주기가 일치하고 있는 것으로 보아 간극수압계의 기계적인 이상은 없는 것으로 판단된다. 이에 비해, 간극수압계의

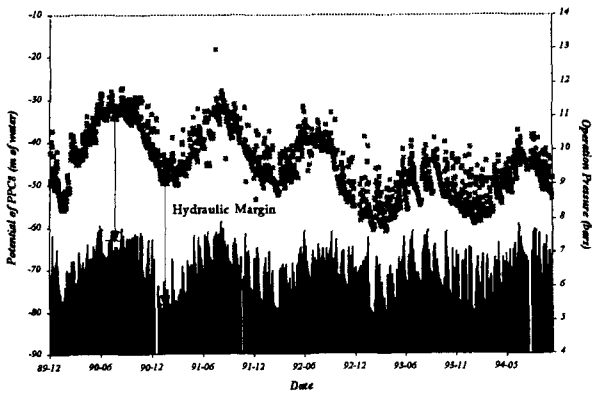


Figure 7. Monitoring of a pressure cell (from the 1st report on the construction of tightness evaluation system in Ulsan LPG terminal, Yukong Gas Ltd.) Hydraulic Margin.

값들은 전반적으로 감소하는 양상을 보여주고 있고, 또한 일부 값을 제외하고는 전반적으로 안전계수 이하의 양상을 보여주고 있다.

한편 Figure 8은 같은 기간 동안의 강수량 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서도 마찬가지로 강수량의 변화주기와 간극수압계 모니터링 값의 변화주기가 일치하고 있다. Figure 7과 Figure 8에서 나타난 양상을 종합하여 판단할 때, 강수량, 공동 운영압, 그리고 간극수압계 모니터링 값 사이에는 일정한 변화 주기를 갖는 상호 연관성을 갖는 것을 알 수 있다.

따라서, 간극수압계 모니터링 값의 감소현상은 간극수압계 주변 암반 매질내 Clogging에 의한 투수계수 감소로 인한 것으로 유추할 수 있고, 이 문제에 대한 원인 규명을 위해서는 저장 공동 주변 암반 매질의 투수계수를 추정해야 한다.

간극수압계 모니터링 값의 감소 원인을 규명하기 위해 간극수압계 가까운 곳에 시추공을 설치하고 수리시험을 실시하였다. 검증을 위해, 먼저 간극수압 모니터링 자료를 이용하여 간극수압계에 가장 가까운 수벽공과 간극수압계 사이 구간의 투수계수를 역해석을 통해 추정하고 최초의 투수계수와 비교하여 투수계수 감소량을 구하고, 간극수압계와 같은 시추공 심도에서의 투수계수와 역해석으로 추정된 투수계수를 비교함으로써 Clogging의 범위를 추정하였다.

수벽공과 간극수압계 사이 구간의 투수계수는 $1.4e-9$ m/sec

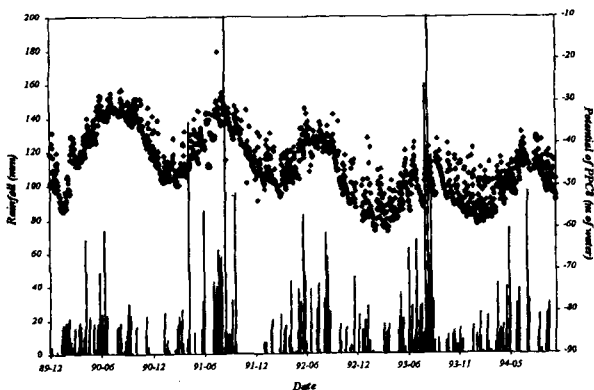


Figure 8. Rainfall during the monitoring of a pressure cell.

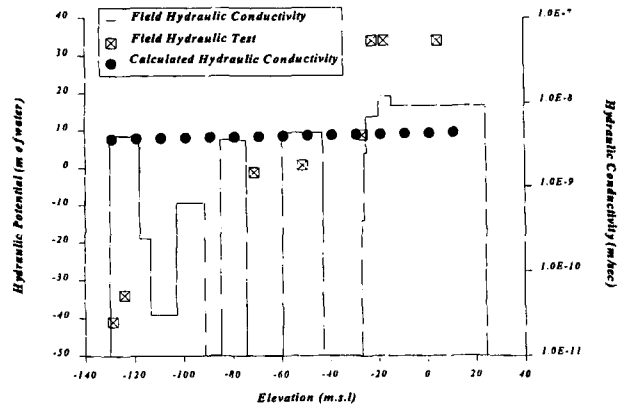


Figure 9. Results from water pressure packer test and inverse analysis (from the report on completion of the new piezometer installation work).

로 같은 심도의 시추공에서의 투수계수 값 $3.7e-9$ m/sec에 비해 낮게 산출되었다. 또한 이 값들은 간극수압계에서 Clogging에 의한 수압감소가 일어나기 전 $5.0e-9$ m/sec를 초기 투수계수로 볼 때, 수벽공으로부터 Clogging이 간극수압계를 경유하여 시추공 방향으로 확산되어 가고 있으며 Clogging 정도는 수벽공으로부터 멀어질수록 미약한 것을 추정할 수 있다.

시추공의 수리시험 자료를 이용하여 시추공의 심도에 따른 투수계수 변화를 추정하였다. Figure 9는 시추공의 수리시험 ((주)유공가스, 1994) 및 역해석 결과를 나타내고 있다. 해석 결과는 지상에서 저장공동 심도로 깊어짐에 따라 비스듬하게 감소하고 있으나 전체적으로 거의 일정한 양상을 보여주고 있다. 이 결과는 수리시험시 산출한 구간별 투수계수 분포, 즉 그림에서 막대그래프로 표시된 결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

결론 및 토의

직접적인 시추조사에 의한 방법에 대한 대안으로 모니터링 자료를 활용하여 암반의 투수계수를 추정하기 위한 수치해석 방법을 제시하였다. 이 방법은 Galerkin 유한요소법을 이용하고 있고, 역해석 수치모형을 구성하기 위해 직접법을 적용하였다. 수치모형의 타당성을 확인하기 위해 균질과 불균질 매질의 두 가지 경우를 대상으로 역해석 수치모의를 실시하였다. 그 결과, 계산된 수치해는 두가지 경우 모두 해석해와 정확히 일치하였다. 실제 운영되고 있는 지하 LPG 기지의 간극수압 모니터링 자료를 이용하여 투수계수를 산출하고 시추조사를 통해 얻은 수리시험 결과와 비교 분석하였다. 해석구간내 Clogging이 발생하기 전과 후를 가정하여, 수치모형을 통해 투수계수 감소의 정도를 추정할 수 있었고, 또한 투수계수 감소의 원인이 되는 Clogging의 확산 방향을 추정할 수 있었다.

이상의 결과로부터, 제시된 직접법 역해석 수치모형은 실제 모니터링 자료를 이용한 투수계수 추정으로 암반 매질내의 Clogging 여부를 판단할 수 있는 유용한 방법이 될 수 있음을 알 수 있다. 모니터링 상황 및 지질조건을 포함한 여러 가지 정보들을 고려하여 이 수치모형을 적용한다면, 보다 나은 해석결과를 바탕으로 지하 유류저장기지의 효율적인 유지관리에 도움이 될

수 있을 것으로 판단된다.

한편, 현재 제시된 수치모형은 Clogging을 전제로한 국부적인 영역에 대한 해석을 통해 해당 영역의 수리특성값을 산출한다. 이 값들을 광역적인 지하수유동 해석에 적용하기 위해서는 REV(Representative Element Volume)를 규명하는 작업이 추가되어야 한다. 또한, 서론에서 언급한 바와 같이 수치모형을 적용하는 대상은 불연속면의 특성을 갖는 암반을 대상으로 하는데 반해 이 수치모형을 유도하기 위한 전제는 일반적인 다공성 매질의 불균질 매질을 가정하는 것이었다. 향후 이러한 불연속적인 절리암반에 대한 보다 실제적인 모의를 위해서 절리망을 결합하는 지하수유동 역해석 모형이 연구될 예정이다.

감사의 글

본 연구를 위해 많은 지원과 협조를 해주신 (주)SK가스 오경택님과 정광필님께 감사드립니다.

참고문헌

선경건설(주) 부설연구소, 1994, (주)유공가스 울산 LPG 기지 기밀성평가 시스템구축 1차 보고서.

- (주)유공가스, 1994, 신규 지하수위 관측공 설치공사 준공 보고서.
- Bathe, K. J., 1996, *Finite Element Procedures*, New Jersey, Prentice-Hall, Inc..
- Frind, E. O., and Pinder, G. F., 1973, Galerkin solutions of the inverse problem for aquifer transmissivity, *Water Resources Research*, 9(5), p. 1397-1410.
- Neuman, S. P., 1973, Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty, *Water Resources Research*, 9(4), p. 1006-1021.
- Pinder, G. F., and Frind, E. O., 1972, Application of Galerkin's procedure to aquifer analysis, *Water Resources Research*, 8(1), p. 108-120.
- Yeh, W. W. G., 1986, *Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem*, *Water Resources Research*, 22(2), p. 95-108.
- Yeh, W. W. G., Yoon, Y. S., and Lee, K. S., 1983, Aquifer parameter identification with kriging and optimum parameterization, *Water Resources Research*, 19(1), p. 225-233.
- Zienkiewicz, O. C., 1971, *The Finite Element Method in Engineering Science*, New York, McGraw-Hill.