

지하공동 주변의 지하수 흐름(수막) 해석을 위한 수치모형의 확립 Establishment of Numerical Model for Groundwater Flow (Water Curtain) Analysis around Underground Caverns

정 일 문* · 조 원 철** · 배 덕 호***
Chung, Il Moon · Cho, Won Cheol · Bae, Deg Hyo

Abstract

Finite element model is established for the simulation of groundwater flow due to water curtain around underground oil storage cavern. The symmetric global conductance matrix is solved by vector storage Choleski decomposition method. The model is verified through comparison with the results of electric analogy. For the application of this model to real site, the finite element meshes are constructed according to representative vertical cross and longitudinal sections. In cross-sectional analysis, potential and flow distributions are compared based on the cavern pressure and horizontal water curtain. For longitudinal section, effects between nearly located caverns with or without vertical water curtain are analyzed. These results prove that the established model can be used as a tool for flow analysis around underground caverns.

요 지

본 연구는 지하심부에 유류(油類)를 저장할 때 널리 이용되는 수막(水膜)시설의 설치에 따른 공동주변의 흐름해석을 모의하기 위한 유한요소모형의 확립에 관한 것이다. 최종 행렬방정식의 대칭형 전체전도행렬을 풀기위해 벡터저장방식의 Choleski 법을 이용하였으며, 전기상사법의 결과와 비교하여 모형을 검증하였다. 모형을 실제 비축기지에 적용하였으며, 대표적인 횡단면에 대해 요소망을 구성하여 공동내부의 압력과 수평수막설치에 따른 포텐셜과 유속의 변화 등을 비교하고, 종단면에 대한 분석을 통해 연직수막설치에 따른 포텐셜의 변화와 인접공동간의 영향을 비교 분석한 결과 본 연구에서 확립된 모형은 공동주변 흐름해석에 유용하게 이용될 수 있는 것으로 확인되었다.

* 연세대학교 토목공학과 박사과정 수료
** 연세대학교 토목공학과 교수
*** 창원대학교 토목공학과 조교수

1. 서 론

1.1 연구목적

최근 생활수준의 향상과 각종 산업의 발달로 지하 공간을 효율적으로 이용하고자 하는 많은 노력이 경주되고 있다. 이는 지상공간의 부족으로 야기되는 문제일 뿐 아니라, 어떤 특수한 경우에는 지상공간보다 활용면에서 볼 때 지하공간이 보다 효율적이기 때문이다.

그 대표적인 예로서는 핵폐기물의 보관 및 유류비축 기지건설 등이 있다. 이 중 후자의 경우는 지하에 공동을 굴착하되 무복공상태로 유류를 저장하므로 건설비가 저렴하고 유지비가 적으며 보안상의 문제도 훨씬 적어진다라는 장점을 가지고 있다. 또한 탄화수소물을 지하에 비축하는 방법은 지상에 저장하는 것보다 운영, 유지비의 절감, 안정성, 환경보전등의 장점을 가지고 있으며, 특히 액화석유 가스(LPG)를 지하에 저장할 경우 액체상태로 저장하는 것이 유리하므로 압력 및 온도를 조절하여 액체상태로 저장하는 방법이 발달하였다.

지하저유공동의 성능을 보장하기 위해서는 무엇보다도 기밀조건(氣密條件, gas containment criteria)을 충족시켜야 하는데 기밀조건이란 저장공동내의 내용물이 자체의 압력때문에 공동밖으로 새어나가는 것을 막기 위한 조건이다. 이를 위해서는 지하수압을 공동내부의 유류압력보다 높게 유지시켜야 하며 자연지하수위로 이를 충족시키지 못하는 경우에는 유류저장공동의 상부에 물을 주입하여 공동주위에 수막(water curtain)을 형성하므로써 유류가 새어나오지 않게 하는 방법을 널리 이용하고 있다. 이와같은 수봉식(水封式) 연료 지하저장방식은 효과적인 토지이용과 경제성 측면에서 유리하여 40여년전 스웨덴에서 처음 실시한 이후 구미 각국에서 다수의 실적과 안전성을 실증한 바 있다. 이때 수막과 공동과의 위치관계는 기밀도 평가에 있어 매우 세심하게 고려되어야 할 사항으로 수막시설 설계전단계에서 지하수면의 영향범위를 고찰하여야 하고 일단 수막시설이 설치된 후에도 지하저유공동의 효율적 유지관리와 시설의 안전을 위해서 주기적인 지하수의 흐름

해석을 실시해야 한다.

본 연구의 목적은 흐름 영역내에 다수의 공동 및 수막시설의 존재로 인해 유발되는 흐름특성을 규명하는 것으로, 해석의 도구로서의 수치모형을 확립하고, 실제 운영되는 공동을 중심으로 수막과 공동간의 위치관계 및 지하 매질의 특성에 따른 해석을 실시하고자 한다.

1.2 연구동향

수막시설의 개념은 스웨덴의 Åberg(1977)에 의해 처음 제안 되었는데, 그는 무복공 지하암반공동에 LPG를 저장하고 이의 누출을 막기위해 지하수위를 유지하는 방안을 제시하였다. Komada 등(1980)은 저장공동의 자연지하수압의 영향과 인공적인 지하수압에 대한 수치연구와 더불어 암반의 틈으로의 가스 누출에 관한 모형실험을 실시하였다. Lindblom(1989)은 가스저장을 위한 암반공동 주변의 수막의 기능을 설명하였으며, 가스의 유입을 막기 위한 수리경사 조건과 주입량 및 수막시설의 장기영향 등을 분석하였다.

국내에서도 지하공동시설관리에 관한 연구는 계속 되어 왔으며, 정형식 등(1982)은 전기상사모형실험을 통하여 공동형태가 가스누출에 미치는 영향과 여러가지 형상의 공동에서 유류이동을 방지하는 지하수위, 공동내의 유류수준, 공동간격 등을 검토하였다. 또한 정형식과 이익효(1983)는 전기상사모형실험을 통하여 수평 및 연직 수막을 설치하여 가스의 누출과 유류이동을 방지하려 할 때 효과적인 수막의 위치, 인접공동간격, 수막의 수두, Borehole 간격 등을 검토하였다. 정우엔지니어링(1984)에서는 물수지의 개념으로 강우에 의한 지하수 보충을 결정하고, 지하공동 굴착공사 완료시기의 평면적 분포와 정상 운용시의 최대 지하수 양수량을 예측하였다. Suh 등(1986)은 가스기밀조건에 관한 동수경사를 공동의 형상별로 제안하였으며, 기밀을 유지하는 범위에 대해서도 고찰하였다. 임종세와 강주명(1993)은 비축기지의 기밀성여부와 시설운영상태를 수리공학적 분석 및 수질공학적인 분석을 통해 해석하였으며 장근무와 이정인(1995)은 건설중인 지하원유비축기지를 대상으로 공동의 굴착으로 인한 공동주위 암반의

투수계수의 변화에 대한 해석과 저장공동의 수리학적 기밀성에 대한 해석을 실시하였다. 한일영 등(1995)은 분리열극개념모형을 LPG공동에 적용하여 연속체 모형과의 비교를 수행하고 용질이동의 모의도 검토하였다.

1.3 연구방법 및 제한사항

일반적으로 지하암반을 통한 지하수 흐름해석에 있어서는 함수층의 불규칙한 분포, 시간과 위치에 따른 유동조건 변화, 국부적인 시험에서 구한 수리지질학적 매개변수들을 적용하는데 대한 한계점 등이 문제점으로 대두되고 있으며, 이를 해결하기 위해서는 조사공의 수를 증가시켜야 하나 열극분포와 수리학적 매개변수의 정확한 값을 얻을 수 있는 만큼 조사공을 늘리는 것은 현실적으로 어려움이 따른다.

따라서, 보다 현실적인 방법으로 수학적모형을 사용하여, 공동과 수막간의 위치관계 등을 규명해 왔는데, 기존의 해석적 방법(Åberg, 1977)이 한계를 드러냄에 따라 수치모형의 사용이 활발해지고 있다. 수치모형에서는 흐름해석의 기본가정을 세우고, 입력자료의 보정등 실제현상의 단순화를 통해 지하수체계의 문제점을 해결해 나가고 있다. 본 연구에서는 매질특성에 대해서 암반을 다공성 매질로 가정된 연속체모형(Bear, 1972)을 확립하고자 한다.

지하공동의 기밀성에 관한 이론을 수학적으로 검토하고, 지하공동의 형상 및 수막시설의 기하학적 요소를 합리적으로 고려하기에 적합한 수치기법으로 Galerkin 유한요소법(Pinder와 Gray, 1977; 조원철, 1991)을 선택하였다. 직사각형 및 사변형 요소를 이용하여 2차원 공간을 이산화하였으며, 경계조건을 고려한 모형의 반응을 전기상사법과 비교하여 검증하고 이를 실제 공동에 적용하고자 한다.

2. 공동주변의 흐름과 기밀조건

암반내에 공동을 굴착하여 LPG 또는 원유를 저장하는 경우, 암반내의 균열을 통한 가스 누출을 방지하려면 공동주변의 암반은 지하수에 의해 포화되어야 한다. 기밀성의 원리는 공동내의 LPG나 원유의 압력보다 주변 암반중의 지하수의 정수압을 항상 높게 유

지해 줌으로써 가스가 누출되지 못하고 지하수가 공동속으로 흐르도록 해야 하는데, 공동내의 누출을 방지하려면 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$Y/\gamma_w < H-F-S \quad (1)$$

여기서 Y는 공동내의 최대운영압력(t/m^2)이며, γ_w 는 물의 단위중량(t/m^3), H는 공동 천정 꼭대기에서의 정수두(static head, m), F는 형상계수(shape factor, m), S는 안전율(safety factor, m)이다.

안전율은 지하수면의 변화, 저장압의 변화에 의존하며, 형상계수는 공동형상, 흐름 경계조건, 저장 유류의 물리적 성질에 의존한다.

저장공동내의 가스가 주변암반으로 누출되는 것을 방지하려면 공동주위의 어느 곳이나 지하수로 포화상태를 이루고, 수리학적 포텐셜이 공동내 포텐셜보다 크게 하여서 물이 공동안으로 유입되게 하여 공동의 기밀성을 보장한다. 이러한 조건을 충족시키려면, 특수한 지질조건이 아닌 경우, 일반적으로 공동 상부에 수막터널을 굴착하여 이 터널에서 공동 표면을 완전히 덮을 수 있도록 수막공을 설치하고 지하에서 물을 공급하여 각 수막공에 주입하므로써 수막터널 위치에서의 포텐셜을 증가시켜야 한다.

지하공동을 굴착하면, 상부지하수위는 저하되며, 공사가 끝난 뒤에 재충전된다 하더라도 일단 공극이 비면 원래의 포화상태를 유지하기가 어려워진다. 따라서, 공동굴착으로 인한 주변암반의 수위강하를 방지하기 위해서 공동굴착전에 수막공을 설치하여 물을 주입하며, 주입된 물로 인해 굴착중 공동내의 누수 개소를 파악할 수 있다.

3. 지배방정식과 수치모형

공동은 완전한 원형이 아니고 복수 공동간의 상호 간섭영향으로 생기는 오차, 수막의 위치에서만 등포텐셜면을 형성하기 때문에 해석적으로는 정확하게 산출할 수 없으므로, 수치모형에 의한 해석이 필요하다. 이를 위해서는 지하수 흐름문제중 댐아래의 침윤 문제가 고려되어야 한다. 지배방정식은 연속방정식과 Darcy의 법칙으로부터 얻어진 정상포화흐름방정식이다(Freeze와 Cherry, 1979).

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial \Phi}{\partial y}) \quad (2)$$

여기서 K_x, K_y 은 x, y 방향의 투수계수이고 Φ 는 전수 두이다. 경계조건은 기지의 수두값을 부여하는 Dirichlet 경계조건과 zero 침윤조건으로 구성되며, 지정된 흐름을 값이 없을 때 다음의 Neumann 경계조건이 주어진다(Segerlind, 1984).

유속성분은 Darcy법칙을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_x = -K_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (4)$$

$$V_y = -K_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad (5)$$

Galerkin법을 이용한 유한요소정식화에 의한 적분 방정식에 경계조건을 도입하면, 행렬의 형태로 표현 되는 선형방정식계를 얻을 수 있다(Cook, 1981; Wang과 Anderson, 1982; 임상전 등, 1993).

$$[A]\{x\} = \{B\} \quad (6)$$

여기서 $[A]$ 은 기지의 계수들인 a_{ij} 의 행렬이고, $\{x\}$ 은 미지항 x_i 의 벡터, 그리고 $\{B\}$ 는 기지의 값 b_i 의 벡터이다. 식 (6)의 행렬방정식은 다음식 (7)과 같이 구성된다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$[A]$ 가 대칭행 행렬인 경우, Choleski 분해법을 이용하여 식 (8)과 같이 $[A]$ 행렬을 상부삼각행렬과 하부삼각행렬의 곱으로 분해할 수 있다(Cook, 1981).

$$[A] = [U]^T [U] \quad (8)$$

여기서 $[A]$ 의 성분은 다음식 (9)~(11)과 같이 계

산된다.

$$u_{ii} = [a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} u_{ki}^2]^{1/2}, i=j \quad (9)$$

$$u_{ij} = \frac{a_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} u_{ki} u_{kj}}{u_{ii}}, i < j \quad (10)$$

$$u_{ij} = 0, i > j \quad (11)$$

대칭행렬 $[A]$ 가 분해되면, $[A] = [U]^T [U]$ 가 되어, 방정식은 식 (12)와 같이 된다.

$$[A]\{x\} = \{B\} = [U]^T [U]\{x\} = \{B\} \quad (12)$$

여기서 벡터 $\{z\}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$[U]\{x\} = \{z\} \quad (13)$$

$$[U]^T \{z\} = \{B\} \quad (14)$$

만일, $[U]$ 의 성분이 다음과 같다면,

$$[U] = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ 0 & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ 0 & 0 & u_{33} & \cdots & u_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$[U]^T$ 의 성분은 식 (16)과 같다.

$$[U]^T = \begin{bmatrix} u_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ u_{21} & u_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & u_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{1n} & u_{2n} & u_{3n} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$\{z\}$ 의 값을 대하여, 식 (14)는 다음식 (17)을 이용하여 풀 수 있으며, $\{z\}$ 의 값을 계산한 후에 식 (18)을 이용하여 $\{x\}$ 값을 푸는 것으로 계산과정을 마친다.

$$z_i = \frac{[b_i - \sum_{k=1}^{i-1} u_k z_k]}{u_{ii}}, i=1 \dots n \quad (17)$$

$$x_{n+1-i} = \frac{[z_{n+1-i} \sum_{k=1}^{i-1} u_{n+1-i, n+1-k} X_{n+1-k}]}{u_{n+1-i, n+1-i}} \quad (18)$$

또한, [A] 행렬이 대각행렬중심에 0이 아닌 값들이 집중된 띠행렬(banded matrix)인 경우는 벡터저장기법(vector storage method)을 이용할 수 있다(Istok, 1989). 벡터저장기법에서는 대각행렬을 중심으로 행렬을 점유하는 띠안에 있는 값들만이 저장되고, 그외에 0의 값을 가지는 부분은 배제시켜 컴퓨터 용량을 줄일 수 있다. 이 경우 [A] 행렬은 벡터로 저장되며 그 크기 L은 다음과 같다.

$$L = \text{반띠폭}(\text{방정식수} - \text{반띠폭} + 1) + (\text{반띠폭} - 1)(\text{반띠폭}/2) \quad (19)$$

본 연구에서는 직사각형 및 선형사변형 요소를 이용한 2차원 유한요소모형을 확립하였으며, 요소마다 수리지질특성치를 x, y 방향으로 각각 달리 부여하여, 비균질 이방성 매질에 적용할 수 있도록 하였고, 사변형요소에 대해서는 Jacobian 행렬과 Gauss point를 이용한 수치적분으로 요소전도 행렬값을 구하였으며, Solver로는 상기한 벡터저장 Choleski 법을 이용하였다.

4. 모형의 검증

지하저장공동 상부의 포텐셜이 정상상태로 유지되고 있는 경우는 정상침윤해석으로 포텐셜과 유속 및 유량 등을 검토할 수 있으므로, 그림 1의 댐 침윤모형을 검증대상으로 선택하여 전기상사법(electric analogy; EA)의 결과와 비교하였다(Rushton과 Redshaw, 1979).

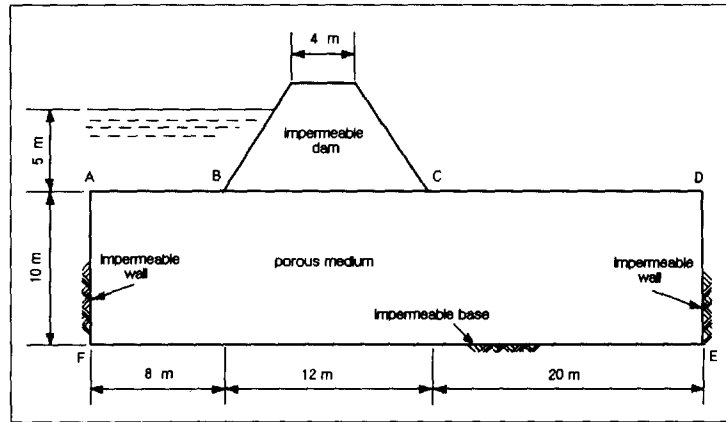


그림 1. 댐 침윤의 검증모형

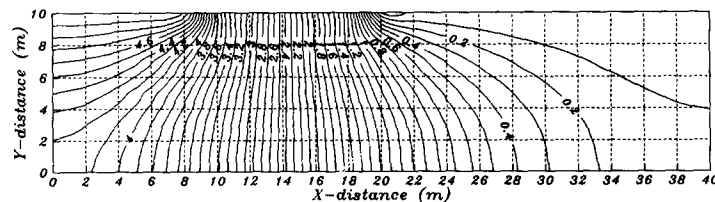


그림 2. 유한요소모형을 이용한 등포텐셜도

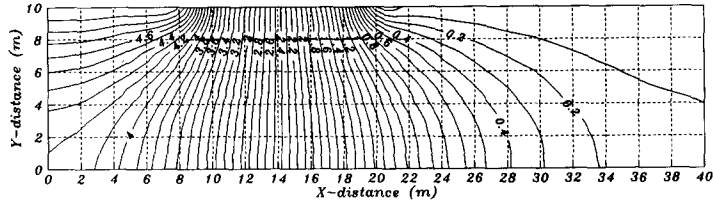


그림 3. 전기상사법을 이용한 등포텐셜도

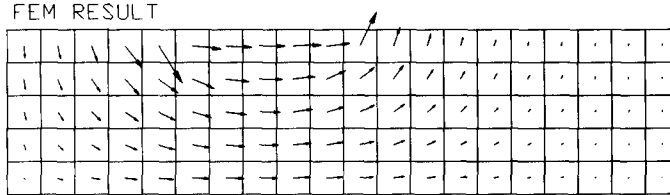


그림 4. 유한요소모형을 이용한 유속의 분포양상(최대유속 1.18m/day)

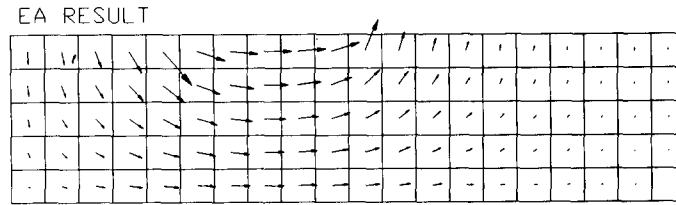


그림 5. 전기상사법을 이용한 유속의 분포양상(최대유속 1.22m/day)

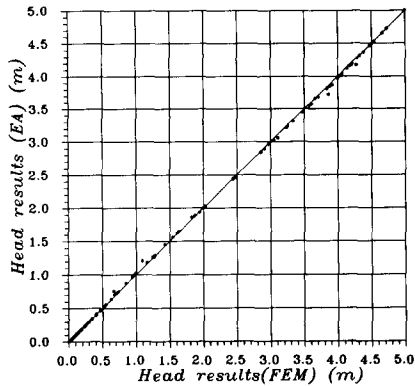


그림 6. 포텐셜값의 비교

검증을 위한 경계조건으로 A-B 구간에 총 수두 5 m를 주었고, C-D사이는 0을 주었다. A-F, D-E구간은 각각 불투수벽면이고, E-F는 불투수기저면, B-C구간은 불투수댐으로 가정하였다. 적용결과는 그

림 2~3에 나타내었다.

그림 2와 3의 결과를 비교해 보면, 모형에 의한 포텐셜의 분포가 전기상사법의 결과와 거의 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

유향 및 유속의 크기를 검토하기 위해 그림 4~5에 유향도를 비교하였다.

유향도 역시 포텐셜과 마찬가지로 전기상사법의 결과와 거의 유사한 양상을 나타내었다. 참고로 계산된 수두값을 비교하기 위해 그림 6에 상관도를 나타내었는데, 두 방법에 의한 계산수두값들이 거의 일치함을 볼 수 있다.

5. 모형의 적용

본 연구에서 확립한 모형을 실제 지하공동에 적용하기 위해 A비축기지를 선정하여, 복수공동에 대한 연직 2차원 중형단면해석을 실시하였다.

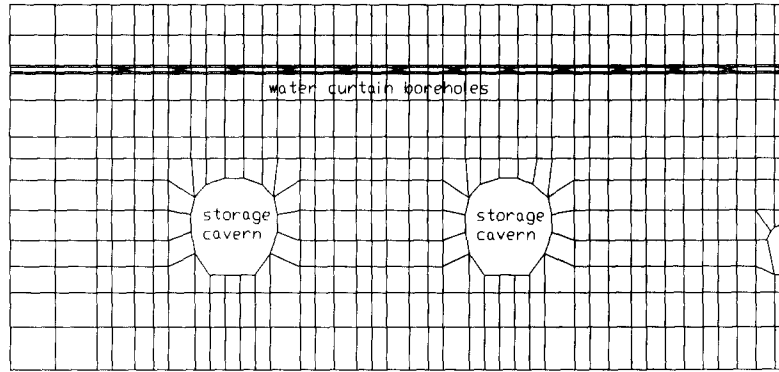


그림 7. 횡단면 해석을 위한 유한요소망

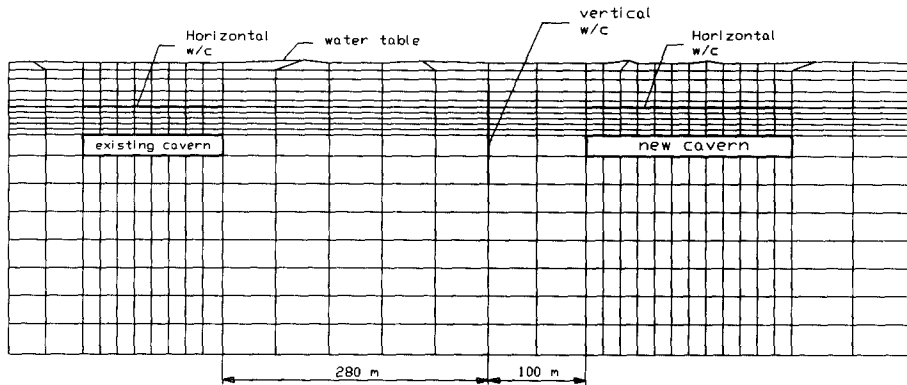


그림 8. 종단면 해석을 위한 유한요소망

횡단면(cross section) 해석의 목적은 수평수막과 공동간의 위치관계에 따른 공동의 기밀성을 평가하기 위한 것으로, 694개의 절점과 621개의 요소로 유한요소망을 구성하였으며(그림 7), 요소망의 좌우측과 하단부는 흐름이 없는(no flow)경계로, 상부경계와 공동주위, 그리고 수평수막공들을 둘러싼 격점에는 고정수두(Dirichlet)값을 경계조건으로 설정하였다.

종단면(longitudinal section) 해석의 목적은 인접한 공동시설간의 영향을 파악하기 위한 것으로, 660개의 절점과 588개의 요소를 이용한 요소망을 구성하였으며(그림 8), 수평수막과 연직수막을 동시에 고려할 수 있도록 하였다. 요소망의 좌우측과 하단부에는 흐름이 없는 경계로, 공동과 수막경계에는 고정수두값을 주었다.

5.1 자료조사

본 연구에서 적용하려는 A기지에 저장되는 유류의 종류는 프로판가스로 최대허용압력은 86 t/m²이다. 암반지질 및 수리지질자료에 따르면, 횡단면의 균질이고 등방인 포화투수계수는 2×10^{-9} m/sec로 매우 낮은 투수성을 보이고 있다. 종단면 포화투수계수는 균질·등방으로 볼때 평균적으로 0.2 m/day이지만, 일부 지역에서는 수평투수계수는 0.1 m/day, 연직투수계수는 1 m/day의 이방성을 나타내기도 하였다. 지표면 가까운 일부지점에서는 고투수성 지점(100 m/day)이 존재하였다(A 비축기지 기본설계 보고서, 1991).

공동의 설계단계에서 안전율은 22.1 m, 형상계수

는 8.4 m로 정해졌으며, 식 (1)을 만족시키려면, $Y/\gamma_w = 86$ m이므로, 공동상부의 심도까지 최소한 116.5 m의 수두가 확보되어야 하므로 상부지하수위 Etl. 1.5 m를 고려하여 공동상부심도는 Etl. -115 m, 수평수막시설의 위치는 Etl. -90 m로 결정되었으며, 횡단면의 수평수막공 간격은 25 m로 정해졌다. 공동과 수막터널의 연직간격과 수막공간격은 상호보완적인 관계에 있으며, 설계단계에서 여러 경우를 조합하여 결정된 것이다. 종단면의 경우, 기존 공동과의 수리간섭현상을 막기 위하여 연직수막이 설치되었다.

5.2 횡단면에서의 적용

공동내의 기밀성을 파악하기 위해 먼저 횡단면에 대한 유황을 검토하였다. 상부경계조건인 지하수위는 Etl. 1.5 m이며, 수막위치에서의 높이는 Etl. -90.0 m이므로, 주입압 95 t/m²를 감안하면, 수막공에서의 수두값은 Etl. 5.0 m이며 내부 경계조건이 된다. 공동경계에서의 수두는 유류를 저장하지 않은 경우, 압력은 대기압(P = 0)과 같게 되어 총수두(Φ)는 위치수두와 같으며, 유류를 저장한 경우에는 저장압에 해당하는 압력수두 86 m를 더한 값이 총수두값이 된다.

공동내에 유류저장 유무에 따른 모의실험결과를 그림 9~10에 나타내었다. 유류가 없는 경우에는 수막공과 공동내의 수두(포텐셜)차가 크게 나타나 수두경사도 매우 급하게 나타났으며, 86 t/m²의 저장압을 가진 프로판을 저장한 경우에는 수막과 공동간의 수두차가 적어짐으로 수두경사가 다소 완만해짐을 볼 수 있다. 운영중인 경우 공동상부에서의 하향압은 87 t/m²(-28+115)로 86 t/m²의 상향압보다 크게 나타나 기밀성확보가 이루어짐을 볼 수 있었다.

횡단면에 대한 유속분포를 그림 11~12에 나타내

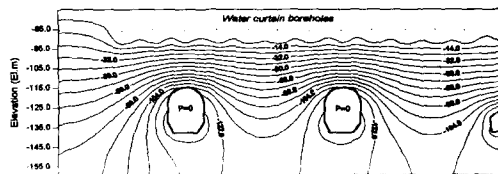


그림 9. 횡단면에 대한 등포텐셜도(공동 = 대기압)

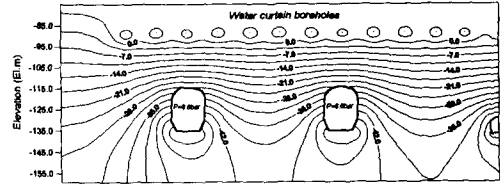


그림 10. 횡단면에 대한 등포텐셜도(공동 = 저장압)

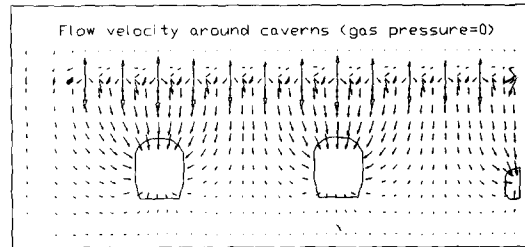


그림 11. 횡단면에 대한 유속벡터도

(공동내부압 = 대기압; 최대유속 = 2.075×10^{-3} m/day)

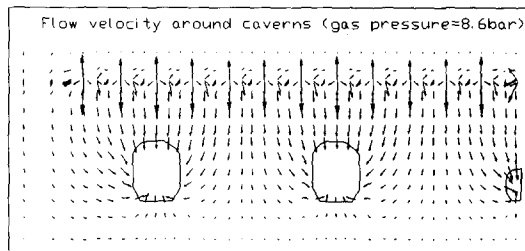


그림 12. 횡단면에 대한 유속벡터도

(공동내부압 = 저장압; 최대유속 = 6.755×10^{-4} m/day)

었다. 수막공의 인접위치에서는 수두차가 커서 유속벡터는 상·하향으로 크게 나타나며, 좌우측으로는 상쇄효과로 작은 값을 나타냈다. 지하수 흐름은 유류저장 유무에 관계없이 공동내로 향하고 있음을 확인하였으며, 공동내부가 저장압인 경우보다 공동내부압이 대기압일 때, 공동으로 유입되는 침윤속도도 상대적으로 크게 나타났다. 최대유속은 공동내부압이 대기압인 경우 약 2.075×10^{-3} m/day, 공동내가 저장압인 경우 6.755×10^{-4} m/day로 공동내에 유류를

저장하지 않은 경우 약 3배의 유속차가 있음을 확인하였다.

5.3 종단면에서의 적용

기존의 공동부근에 신규공동을 설치함으로써 일어나는 인접공동간의 영향을 살펴보기 위해 종단면 해석을 실시하였다. 기존공동과 신규공동간의 간격은 280 m이며, 신규공동에서 100 m떨어진 위치에 연직수막(vertical water curtain)이 설치되었다.

기존공동의 내부압은 86 t/m^2 이며, 상부에는 수평수막시설이 설치되어 운영중이고, 신규공동상부에도

수평수막이 설치되어 있으나 유류가 저장되어 있지 않은 상태($P = P_{atm}$)이다. 이와같이 인접공동간의 유류수준의 차이가 큰 경우는 인접공동간의 수리학적 간섭이 일어나므로, 연직수막의 유무에 따른 수리학적 영향을 분석하기 위해 연직수막시설에 물을 주입하기 전과 주입하여 연직수막의 수두를 El. 5.0 m로 운영한 경우에 따른 수두분포의 변화를 살펴보았다(그림 13~14). 그림 13은 신규공동이 비어 있는 상태에서 연직수막에 물을 주입하지 않은 경우에 해당한다. 횡단면과 종단면의 흐름해석에서 저장공동 상부의 포텐셜(El. -28 m)은 동일한 값을 나타내어 모형을 통한 중.횡단 계산값의 타당성을 상호 확인할

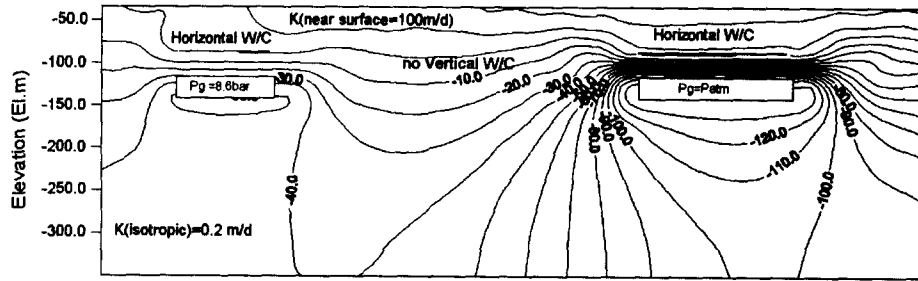


그림 13. 종단면에 대한 수직수막 설치전의 등포텐셜도

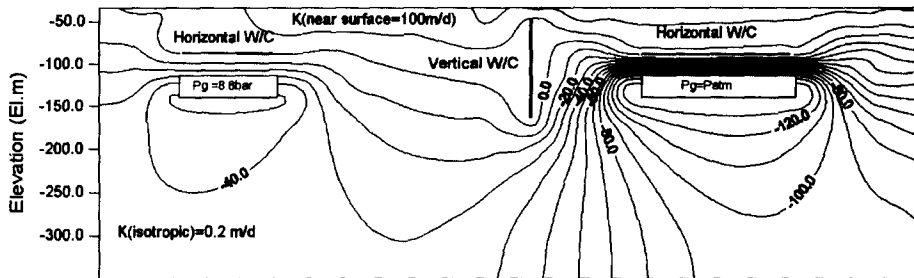


그림 14. 종단면에 대한 수직수막 설치후의 등포텐셜도

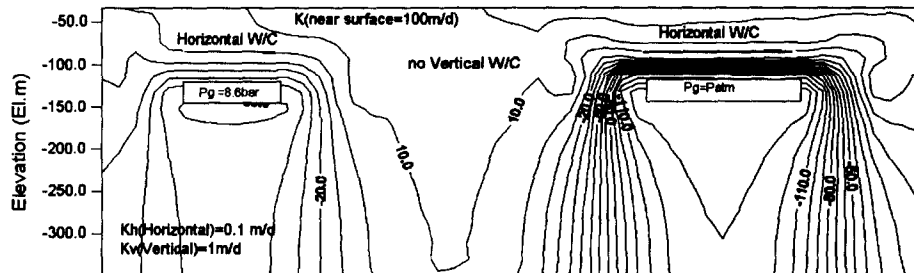


그림 15. 이방성을 고려한 종단면의 등포텐셜도

수 있었다. 연직수막을 설치한 후의 모습을 그림 14에 나타내었으며, 연직수막의 설치로 공동간의 수리학적 간섭이 적어짐을 볼 수 있다.

적용대상지역의 수리지질학적 특성인 투수계수는 대부분 등방성($K = 0.2 \text{ m/day}$)이지만, 자료조사에서 밝힌 바와 같이 이 지역의 투수계수 시험과정에서 일부 지역에서 이방성을 나타내어, 대상지역의 전역에 대해 이방성을 적용하였을 때의 수두분포의 변화양상을 살펴보았으며, 그러한 경우에 대해 연직수막시설의 필요성 여부를 검토하였다.

연직투수계수를 수평투수계수의 10배 ($K_v = 1 \text{ m/day}$, $K_h = 0.1 \text{ m/day}$)로 본다면, 공동간의 수리학적 영향이 크게 감소되어 연직수막이 없어도 기존공동의 영향이 신규공동에 미치지 못함을 알 수 있다(그림 15). 그러나 실제 지역 전체의 매질특성을 이방성으로 볼 수는 없으므로, 기존공동과 신규공동간의 수리학적 영향을 감소시킬 수 있는 연직수막시설의 설치의 바람직한 것으로 판단된다. 이와 같이 연직수막은 매질의 특성에 따라 그 역할 및 효율이 달라지며, 수막시설 설계 전단계에서 매질의 특성을 정확하게 파악하는 과정이 필수적으로 선행되어야 하겠다.

6. 결 론

본 연구는 지하공동주변의 흐름해석을 위한 수치모형을 확립하여, 인공수막설치시 설치된 기존 공동주위의 지하수 흐름을 분석한 것으로 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

(1) 기존의 해석적 방법의 한계를 극복하기 위해서는 수치모형의 사용이 불가피하며, 지반을 저투수성의 다공매질로 가정하면, 침윤해석을 이용하여 공동주변의 흐름을 모의할 수 있으며, 수막의 영향 및 공동내의 압력은 내부 경계조건으로 처리할 수 있다.

(2) 공동의 기하학적 형태를 합리적으로 고려하기 위해서 Galerkin 유한요소법을 이용한 2차원 수치모형을 확립하였으며, 최종적으로 얻어지는 행렬방정식의 계수행렬이 대칭형의 띠행렬이므로, 벡터저장기법을 이용한 Choleski 방법으로 해를 효율적으로 구할 수 있었다.

(3) 모형의 검증은 댐 침윤해석에 주로 사용되는

전기상사법(EA)의 결과와 비교하였으며, 수두 및 유속분포에 있어 만족한 결과를 나타내었다.

(4) 실제 지하비축기지인 A기지에 대해 본 모형을 적용하여, 횡단 2차원 분석을 실시한 결과, 수막압 95 t/m^2 를 적용하였을 때 공동상부에서의 수두는 공동내부의 저장유무에 관계없이 하향의 유속분포를 나타냄으로 지하수 흐름이 공동내로 흐르며, 공동상부의 수두와 수막공의 수두차로 인한 공동의 기밀성을 계산상으로 확인할 수 있었다.

(5) 인접공동간의 영향을 분석하기 위해 종단 2차원 해석을 수행하였으며, 신규공동과 기존공동간에 연직수막을 설치한 경우, 수리학적 영향을 감소시킬 수 있으며, 만일 연직투수계수가 수평투수계수의 10배인 경우라면 연직수막이 없어도 기존공동의 영향은 신규공동으로 미치지 못함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 '95년도 한국학술진흥재단 공모과제 연구비(과제번호 01E 0775)에 의하여 연구된 것으로 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- A 비축기지 기본설계보고서. (1991). 한국석유개발공사. 임상전, 광병만, 이주성 (1993). 유한요소법. 동명사.
- 임종세, 강주명 (1993). "지하비축기지의 효율적 관리에 관한 연구." 한국자원공학회지, 제30권, pp. 408~416.
- 장근무, 이정인 (1995). "지하원유저장 공동주위 암반의 변형거동에 따른 투수계수 변화." 한국자원공학회지, 제32권, pp. 103~115.
- 정우엔지니어링 (1984). "지하원유 비축기지 주위의 지하수리분석." 연구보고서, 정우엔지니어링 주식회사.
- 정형식, 선용, 김운영 (1982). "지하원유비축공동의 수밀성에 관한 연구." 대한토목학회논문집, 제2권, 제4호, pp. 33~38.
- 정형식, 이익효 (1983). "지하원유비축공동에서 Water Curtain의 효율성에 관한 연구." 대한토목학회논문집, 제3권, 제3호, pp. 87~94.

- 조원철 (1991). "3차원 지하수 흐름에 의한 화학물질의 이동에 관한 수치모형." 한국학술진흥재단 연구보고서.
- 한일영, 조성만, 정광필 (1995). "지하 LPG 저장공동의 기밀성 평가를 위한 분리열극개념의 지하수 유동 및 용질이동 모형 모의기법적용." 지질공학회지, 제5권, 제2호, pp. 155-165.
- Åberg, B. (1977). "Prevention of gas leakage from unlined reservoir in rock." *Rockstore* 77, pp. 399~413.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier.
- Cook, R.D. (1981). *Concepts and applications of finite element analysis*, 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Istok, J. (1989). *Groundwater modeling by the finite element method*. American Geophysical Union.
- Komada, H., Nakagawa, K., Kitahara, Y., and Hayashi, M. (1980). "Study on seepage flow through rock mass surrounding caverns for petroleum storage." *Rockstore* 80, pp. 303~310.
- Lindblom, U. (1989). "The performance of water curtains surrounding rock caverns used for gas storage." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 26, No. 1, pp. 85~97.
- Pinder, G.F., and Gray, W.G. (1977). *Finite element simulation in surface and subsurface hydrology*. Academic Press, NY.
- Rushton, K.R., and Redshaw, S.C. (1979). *Seepage and groundwater flow*. John Wiley & Sons.
- Segerlind, L.J. (1984). *Applied finite element analysis*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York.
- Suh, J.K., Kim, C.H., and Jung, H.S. (1986). "Study on the condition of preventing gas leakage from unlined rock caverns." *Proceedings of L.R.C.*, pp. 725~736.
- Wang, H.F., and Anderson, M.P. (1982). *Introduction to groundwater modeling*. W.H. Freeman.

〈접수: 1996년 10월 23일〉