韓國水資源學會論文集
第38卷 第7號 · 2005年 7月
pp. 537~544

경계요소모형을 이용한 지하 저장공동의 지하수 유입량 분석

Analysis of Groundwater Flow into Underground Storage Caverns by Using a Boundary Element Model

정 일 문* / 이 정 우** / 조 원 철***
Chung, Il Moon / Lee, Jeongwoo / Cho, Woncheol

Abstract

For the proper management of high pressurized gas storage caverns, analysis of groundwater flow field and inflow quantity according to the groundwater head, gas storage pressure and water curtain head should be performed. The finite element method has been widely used for the groundwater flow analysis surrounding underground storage cavern because it can reflect the exact shape of cavern. But the various simulations according to the change of design factors such as the width of water curtain, shape of cavern etc. are not easy when elements were set up. To overcome these limitations, two dimensional groundwater flow model is established based on the boundary element method which compute the unknown variable by using only the boundary shape and condition. For the exact computation of drainage rate into cavern, the model test is performed by using the exact solution and pre-developed finite element model. The test result shows that the model could be used as an alternative to finite element model when various flow simulations are needed to determine the optimizing cavern shape and arrangement of water curtain holes and so forth.

keywords : Underground storage cavern, Groundwater inflow, Boundary Element Method

요 지

LPG등 고압가스를 지하에 저장하는 저장공동의 효과적인 관리를 위해서는 지하수위, 가스저장압, 수막공 주입압 등에 따른 공동주변의 유동장 해석, 공동내로의 지하수 유입량 해석을 실시해야 한다. 기존에는 공동의 정확한 형상을 반영하기 위해서 유한요소법이 보편적으로 사용되어 왔으나 한번 설정한 유한요소망으로부터 공동의 설계요소를 변경하는 작업은 수월하지 않아 설계전단계에서 공동 및 수막시설의 다양한 배치에 따른 모의를 수행하는데는 다소 무리가 있다. 이러한 불편함은 경계부의 형상과 조건만으로 내부점에서의 미지변수 계산을 효과적으로 수행할 수 있는 경계요소법을 도입함으로써 극복할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지하공동으로 배수되는 유입량 산정을 위해 경계요소법을 근간으로 한 2차원 지하수 흐름모형을 구성하였으며 지하공동으로 배수되는 정확한 유입량 산정을 위해 해석해 및 기존의 유한요소해석결과와 비교하여 수치해석의 타당성을 제시하였다. 이 모형은 공동의 설계단계에

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원
Senior Researcher, KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
(e-mail: imchung@kict.re.kr)
** 정회원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사후 과정
Postdoctoral, Yonsei University, Seodaemun-Gu, Seoul, 120-749, Korea
(e-mail: ljw007@yonsei.ac.kr)
*** 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학전공 교수
Professor, Yonsei University, Seodaemun-Gu, Seoul, 120-749, Korea
(e-mail: woncheol@yonsei.ac.kr)

서 수막공의 간격과 배열형태, 공동의 최적형상을 결정하기 위한 모의실험에서 기존의 유한요소해석의 단점을 극복하는 대안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지하저장공동, 지하수 유입량, 경계요소법

1. 서 론

토층 혹은 암반층내에 공동(空洞)이 존재하는 경우는 그 용도에 따라 관개배수용 유공관, 해저나 하저터널, 그리고, 대규모 지하에너지 저장공동 등으로 구분할 수 있다. 이때 공동내부는 주변부 수압보다 낮게 되어 흐름이 공동을 향해 진행되는 수렴흐름(converging flow)의 양상을 보인다. 이러한 경우에 공동으로 유입되는 침윤수량(seepage)에 대한 정보는 전술한 지하구조물의 설계와 시공 그리고 유지관리에 있어 매우 중요하다. 따라서, 목적하는 침윤수량을 기준으로 설계할 경우, 주변부 지하수흐름의 예상치 못한 영향에 대한 검토를 수행하는 것은 매우 중요하다. 어떤 경우든 정확한 침윤수량의 체적과 수리학적 경사를 계산하는 것은 매우 중요하다. 몇몇 구체적인 배수양상에 대해서는 보다 명확한 이해가 요구되는데, 예를 들면, 터널내로의 유입량을 고려한 최적의 터널심도는 얼마가 될 것인가, 지하가스 저장공동의 가스누출을 막기 위한 최소유입량은 어느 정도인가 하는 것은 설계 및 유지관리에 있어 중요한 평가지표가 될 것이다.

암반내에 공동을 굴착하여 LPG 혹은 원유를 저장하는 경우, 암반내의 균열을 통한 가스누출을 방지하려면 공동주변의 암반은 지하수에 의해 포화돼야 한다. 이러한 가스기밀(氣密:Gas tightness)을 유지하려면 공동내의 LPG나 원유의 압력보다 주변암반중의 지하수 정수압이 항상 높게 유지되며 따라서 수두차에 의해 지하수가 공동속으로 일정하게 유입되도록 설계되어야 한다. 이와같은 조건을 만족시키려면, 특수한 지질조건이 아닌 경우, 일반적으로 공동상부에 수막터널(Water Curtain Tunnel)을 굴착하여 이 터널에서 공동 표면을 완전히 덮을 수 있도록 수막공(Water Curtain Hole)을 설치하고 지하에서 물을 공급하여 각 수막공에 주입함으로써 수막터널 위치에서의 포텐셜을 증가시켜야 한다. 왜냐하면 지하공동 굴착시 상부 지하수위가 저하되며, 공사가 끝난 뒤 재충전되더라도 일단 공극이 비면 원래의 포화상태를 유지하기가 어려워지기 때문이다. 따라서 공동굴착으로 인한 주변암반의 수위강하를 방지하기 위해 공동 굴착전에 수막공을 설치하여 물을 주입하며, 주입된 물로 굴착중 공동내의 누수개소를 파악하는데 역이용하기도 한다. 이처럼 저장공동에서의 유입량은 상부의 수압과 공동내의 가스압과의 관계를 파악할 수 있는 정량적인 지표가 된다. 공동내의 가스압이 저하되면 유입량이 많아지고, 상승하면 유입량이 줄어든다. 또한 상부 지하수위가 감소하면, 그만큼 유입량도 감소하므로 공동내의 유입량은 되도록 일정하게 유지되는 것이 공동의 유지관리면에서 유리하며, 유입량의 급증 혹은 급감이 일어나는 경우는 그 원인을 조기에 규명하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 공동내로 유입되는 지하수 유입량을 정확히 산정할 수 있는 계산기법이 확립돼야 한다.

다공매질내에서 무한히 긴 공동의 압력이 대기압 혹은 기지의 값이라면, 매질의 투수성 정보만으로 유입량을 추정할 수 있으며, 이를 위해서 여러 가지 해석적인 방법과 수치적인 방법이 동원된다. 터널 유입량을 정량적으로 평가하기 위해 가장 편리하고 빠르게 도입할 수 있는 것은 해석해를 이용한 방법이지만, 흐름과 매질을 지나치게 단순화함으로써 실제적용에는 많은 제약이 따르므로 해석해는 주로 수치모델의 결과를 검증하는데 사용되고 있다.

결국 현실적인 문제를 풀기 위해서는 유한차분-유한요소법등의 수치기법을 이용한 모형을 사용하여 침투류 해석을 수행하게 되는데, 이때 어떤 수치모형을 사용할 것인지 결정하는 것도 모델링의 전체흐름을 좌우하는 중요한 과정임에 틀림없다. 지하저장공동의 유입량해석에 있어서는 공동의 정확한 형상을 반영하기 위해서 유한요소법이 보편적으로 사용돼 왔으나 한번 설정한 유한요소망으로부터 공동의 설계요소를 변경하는 작업은 수월하지 않아 설계 전 단계에서 공동 및 수막시설의 배치를 달리하는 수치모의에는 여러 가지 불편함이 따른다. 이러한 불편함은 경계부의 형상과 조건만으로 내부점에서의 미지변수 계산을 효과적으로 수행할 수 있는 경계요소법을 도입함으로써 극복할 수 있다. 이에 본 연구에서는 지하공동으로 배수되는 유입량 산정을 위해 경계요소법을 근간으로 한 2차원 지하수 흐름모형을 개발하였다. 지하공동으로 배수되는 정확한 유입량 산정을 위해 최근에 제시된 해석해 및 기존의 유한요소 해석결과와 비교하여 수치해석의 타당성을 제시하였고 다양한 경계조건변화에 따른 유입량의 계산을 보다 효율적으로 수행할 수 있었다.

2. 해석적 방법

지하공동내로 일정하게 배수되는 유입량을 계산하는 대표적인 해석해는 Goodman 등(1965)이 제시한 것으로 식(1)과 같다.

$$Q=\frac{2\pi K\Delta H}{\ln(2\Delta H/R)} \tag{1}$$

여기서 Q는 단위폭당 유입량, K는 투수계수, ΔH는 지하공동내 수두와 상부수두와의 수두차, 그리고 R은 원형공동의 반경이다. 이 식은 원형의 공동 경계부가 등포텐셜(equipotential line)이라는 가정하에 유도된 것으로서 공동의 반경이 대상 영역에 비해 상대적으로 매우 작은 경우에만 유효하다. 이 공식은 특히 내부가 대기압상태인 터널이나 석회암 공동으로의 유입량 해석에 널리 이용되고 있다.

Fujii와 Kacomiv (1998)는 공동 경계부를 등압선(isobar line)으로 간주하여 공동 형상과 유입량과의 관계를 해석적으로 표현하였는데, 본 연구에서는 Fujii와 Kacomiv (1998)의 해석적인 표현 중 좌표축 방향을 수정하여 비어있는 공동내로의 유입량과 공동형상, sink 깊이와의 관계를 유도하였다. 이들은 내부가 비어있는 공동에서의 정확한 유입량식을 유도하기 위해 식(2)와 같이 'sink -solution' 관계를 이용했다.

$$\phi(x,y)=\frac{q}{2\pi}ln\frac{\sqrt{x^2+(y+d)^2}}{\sqrt{x^2+(y-d)^2}} \tag{2}$$

여기서, Φ는 식(3)으로 표현되는 것으로 투수계수로 나누어진 속도포텐셜, $q=(Q/K)$는 sink의 강도로 투수계수로 나누어진 단위길이당 유입량, d 는 sink의 깊이, x,y는 공동경계부 좌표이다.

$$\phi=(H+y)-p \tag{3}$$

여기서, H는 지표면에서 담수된 깊이까지의 거리, p는 압력수두로 압력을 단위중량으로 나눈 것이며, 그림 1의 a-a선을 따라서 $\phi=0$이다.

공동 내부가 비어있는 경우 ($p=0$)일 때, x 에 관해서 정리하면, 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x(y)=\pm\sqrt{\frac{e^{4\pi(H+y)/q}(y-d)^2-(y+d)^2}{1-e^{4\pi(H+y)/q}}} \tag{4}$$

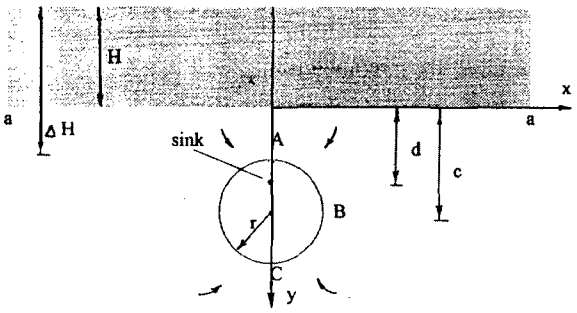


그림 1. 공동내로의 지하수 유입

식(4)는 정확한 원형이 아니며 공동 반경이 작은 경우에는 원에 가깝다. 이러한 해석적인 표현은 수치모형의 검증에 활용될 수 있다.

3. 지배방정식과 수치모형

공동은 완전한 원형이 아니고 복수 공동간의 상호간섭영향으로 생기는 오차, 수막의 위치에서만 등포텐셜면을 형성하기 때문에 해석적으로는 정확하게 산출할 수 없으므로, 수치모형에 의한 해석이 필요하다. 지하저장공동의 유입량해석에 있어서는 공동의 정확한 형상을 반영하기 위해서 유한요소법이 보편적으로 사용돼 왔다(한일영 등, 1996; 정일문 등, 1997). 그러나 해석에 반영해야 하는 요소들의 상대적인 규모차이가 클 경우(공동의 높이는 20m이상인데 반해 수막공의 크기는 10cm 정도임), 유한요소망을 구성하는데 다소 불편함이 있고, 설계변경시 한번 구성한 유한요소망을 수정하는 작업도 수월하지 않은 것이 사실이다. 이러한 불편함은 경계부의 형상과 조건만으로 내부점에서의 미지변수 계산을 효과적으로 수행할 수 있는 경계요소법을 도입함으로써 극복할 수 있다.

경계요소법은 주어진 영역 내부 및 경계에서의 미지변수의 거동을 지배하는 편미분 방정식을 경계치에만 관련된 적분방정식으로 변화시키고, 이 방정식의 수치해를 구하는 방법이다. 이 방법은 Green의 정리를 이용하여 영역경계에서 정의되는 수직경계플럭스와 미지의 포텐셜, 그리고 보조함수의 곱으로 표현되는 적분항들을 푸는 것이다. 경계는 작은 구획(segment)들로 구성되며, 이들은 절점으로 표현된다. 포텐셜과 수직경계플럭스는 이들 절점값에 좌우되므로 경계부가 양호하게 설정될수록 구해지는 해의 정도는 높아지게 된다. 경계요소법의 수학적인 배경에 관해서는 많은 저자들의 문헌이 소개되고 있으며(Becker, 1992; Brebbia 등, 1984), 지하수 분야에서도 활발한 연구가 진행되고 있다(Ligget과 Liu, 1983; 조용식, 1996; Fidelibus와 Lenti, 1996).

본 연구에서는 지하공동주변의 2차원 지하수 흐름해석을 위해서 식(5)과 같이 라플라스 형태의 방정식을 지배방정식으로 사용하였다.

$$K_x\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+K_y\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}=0 \tag{5}$$

여기서 $h(x,y)$는 포텐셜 수두를 나타낸다.

아래의 식(7)을 만족하는 기본해(fundamental solution)인 가중함수 h^*라 하고, Green의 정리를 이용하면 다음과 같은 식 (6)이 얻어진다.

$$\int_\Omega h\left(K_x\frac{\partial^2 h^*}{\partial x^2}+K_y\frac{\partial^2 h^*}{\partial y^2}\right) + h^*\left(K_x\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+K_y\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right)d\Omega=\int_\Gamma\left(h\frac{\partial h^*}{\partial n}-h^*\frac{\partial h}{\partial n}\right)d\Gamma \tag{6}$$

여기서 $\frac{\partial}{\partial n}=K_x n_x\frac{\partial}{\partial x}+K_y n_y\frac{\partial}{\partial y}$이다.

$$K_x\frac{\partial^2 h^*}{\partial x^2}+K_y\frac{\partial^2 h^*}{\partial y^2}=\Delta(x-\xi)\Delta(y-\zeta) \tag{7}$$

여기서 K_x, K_y는 x,y 방향의 수리전도도, (x,y)는 기저점의 좌표, (ξ,ζ)는 적분이 수행되는 경계면상의 소스점의 좌표, 그리고 Δ는 Dirac delta 함수를 나타내며, h^*는 식 (8)과 같다.

$$h^*(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})=\frac{1}{2\pi(K_x K_y)}ln\frac{1}{R} \tag{8}$$

여기서 $\boldsymbol{x}=(x,y)$, $\boldsymbol{\xi}=(\xi,\zeta)$, 그리고
$R=\sqrt{\frac{(x-\xi)^2}{K_x}+\frac{(y-\zeta)^2}{K_y}}$ 이다.

식(5)와 식(7)을 식 (6)에 대입하고 극한 $x\to\xi$, $y\to\zeta$ 을 취하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$c\,h(\boldsymbol{x})+\int_\Gamma h(\boldsymbol{\xi})\frac{\partial h^*(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})}{\partial n}d\Gamma =\int_\Gamma\frac{\partial h(\boldsymbol{\xi})}{\partial n}h^*(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})\,d\Gamma \tag{9}$$

여기서 c는 경계형상계수(geometric coefficient), n은 단위 외향 벡터이다.

식 (9)와 같은 적분방정식을 풀기 위해서 경계만을 N개의 요소로 이산화하여 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$c\,h(\boldsymbol{x}_i)+\sum_{j=1}^{N}\int_{\Delta\Gamma_j}h(\boldsymbol{\xi}_j)\frac{\partial h^*}{\partial n}(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{\xi}_j)\,d\Gamma =\sum_{j=1}^{N}\int_{\Delta\Gamma_j}\frac{\partial h}{\partial n}(\boldsymbol{\xi}_j)\,h^*(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{\xi}_j)\,d\Gamma\ (i,\cdots,N) \tag{10}$$

여기서, N은 경계부의 요소의 총 개수, $\Delta\Gamma_j$은 j번째 요소의 길이이다. 수치해를 구하기 위해서 각 요소에서의 포텐셜 수두와 그 도함수는 상수라고 가정하여 각 요소의 중심에 대해 적용하면, $c=1/2$이 되고 식 (11)과 같은 포텐셜 수두 및 그 1차 도함수에 관한 일련의 선형방정식을 얻게 된다.

$$\sum_{j=N_I+1}^{N}A_{ij}\,h_j+\sum_{j=1}^{N_I}B_{ij}\left(\frac{\partial h}{\partial n}\right)_j = -\sum_{j=N_I+1}^{N}B_{ij}\left(\frac{\partial h}{\partial n}\right)_j-\sum_{j=1}^{N_I}A_{ij}\,h_j \quad (i=1,\cdots,N) \tag{11}$$

여기서, N_I는 Dirichlet 타입의 경계조건이 부여되는 공동 경계부를 표현하는 요소의 개수이며, 계수 A_{ij}와 B_{ij}는 각각 요소 j에서의 가중함수 h^*와 그 도함수의 적분값으로서 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{ij}=-\frac{\Delta\Gamma_j}{2\pi K_x K_y}\sum_{m=1}^{M}w_m\left[\frac{(x-\xi_m)}{R_m^2 K_x}n_x+\frac{(y-\zeta_m)}{R_m^2 K_y}n_y\right]\ (i\neq j)$$
$$=1 \qquad (i=j) \tag{12}$$

$$B_{ij}=\frac{\Delta\Gamma_j}{2\pi K_x K_y}\sum_{m=1}^{M}w_m\ln R_m \quad (i\neq j)$$
$$=\frac{\Delta\Gamma_j}{2\pi K_x K_y}\left[\ln\left(\frac{\Delta\Gamma_i}{2}\right)-1\right]\ (i=j) \tag{13}$$

여기서, m은 가우스 적분점을 나타내는 인덱스, M은 가우스 적분점의 개수, w_m은 가우스 적분점 m에서의 가중치, n_x,n_y는 법선벡터 n의 방향성분이다. 식 (11)는 가우스 소거법 등을 이용하여 수치해를 구할 수 있다.

4. 수치모형의 검증

경계요소법을 이용한 수치모형의 결과를 식(1)에 나

타낸 Goodman 등(1965)의 해석해와 수정된 Fujii와 Kacomiv(1998)의 해석해와 비교하였다. 검증을 위한 공동 형상은 반경이 5.366m인 대칭형의 원형단면인 경우(case 1)와, 식(4)를 만족하는 경계부 단면(case 2)으로 설정하였다. 대상 경계영역의 크기는 600 m × 300 m, sink 깊이(d)는 50 m로 정하였다. 경계요소의 상부경계조건은 등포텐셜인 $\phi = 0$ m를 주었으며, 양측면과 바닥에 대해서는 흐름이 없는 경계로 가정하였다. 공동 경계부는 등포텐셜인 $\phi = -50$ m (case 1)와 등압력인 $p = 0$ (case 2)를 주었다. 즉, case 1은 통상적인 터널 유입량 검증에 활용되는 방법으로 공동 경계부의 조건은 압력수두와 위치수두를 모두 0으로 적용한 경우이며, case 2는 공동 경계부의 조건을 적용함에 있어서 위치수두와 압력수두 중 압력수두만을 0으로 적용함으로써 case 1에 비해 공동 경계조건을 보다 현실적으로 반영한 것이다. 매질은 균질이고 등방인 것으로 가정하였으며, 수리전도도의 값은 0.1 m/day로 정하였다. 각각의 경우에 대한 수치해는 105.9 m^2/day, 107.9 m^2/day로서 해석해 107.4 m^2/day와의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 경계영역의 크기에 따른 해석해와의 오차를 비교하여 표 1에 나타내었다. 이에 의하면 영역의 크기가 커질수록 수치해는 점차 해석해에 근접하게 산정되었는데, 이는 해석해 유도시 가정사항인 대수층 영역이 무한하다는 점과 일관되도록 수치모형의 검증을 위한 대상 영역의 크기가 충분히 크게 설정되어야 함을 의미한다.

5. 모형의 적용

5.1 유한요소해석결과와의 비교

보다 일반적인 적용을 위해 지하유류 저장공동주변에 본 모형을 적용하였다. 적용을 위한 A기지에 분포하는 주 암석은 화강암질 편마암 및 흑운모 호상편마암으로 저장공동심도의 기반암은 국부적인 소규모 파쇄대를 제외하면 치밀 견고한 암반이고, 공동심도의 수리전도도는 약 2×10^{-9}m/sec이며, 공동상부의 수리전도도는 약 1×10^{-7}m/sec로 나타났다(한국석유개발공사, 1985).

지하수두는 큰 변동이 없이 일정한 기간을 선택하여 정상상태의 조건을 만족하는 경우로 제한하였다. 공동내의 저장품은 프로판 가스로 최대허용압은 86t/m^2이다. 공동의 형상은 마제형으로 높이 22.5m, 폭 18m이며, 인위적인 주입시설인 수벽공 간격은 25m이다. 수평수막시설의 위치는 El. -90m이고, 상부의 지하수두는 El. 1.5m에 위치한다. 경계조건은 상부 지하수두와 공동경계부, 그리고 수막이 설치된 부분이다.

수치해석결과의 타당성을 검토하기 위해 기 수행된 바 있는 동일단면에 대한 유한요소해석 결과(정일문, 1997)와 비교하였다. 본 연구에서는 유한요소법의 결과와 비교하기 위해 요소망내의 절점과 동일한 좌표를 경계요소법의 내부절점으로 사용하여 계산하고 그 결과를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 포텐셜의 분포는 두 경우 모두 거의 차이를 나타내지 않았다. 이는 경계요소모형이 기존의 유한요소모형을 대체할 만한 것임을 입증하는 것으로 본 연구에서 제안한 모형의 활용 가능성을 보여준 것이다.

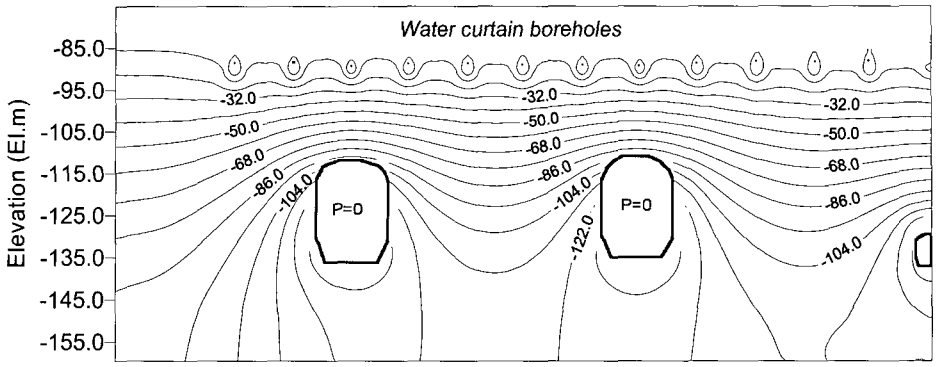
5.2 공동압에 따른 유입량 변화

전 절에서 언급한 것과 같이 본 연구에서 개발한 경계요소모형을 활용하여 공동압의 변화에 따른 공동내 유입량의 변화를 살펴보았다.

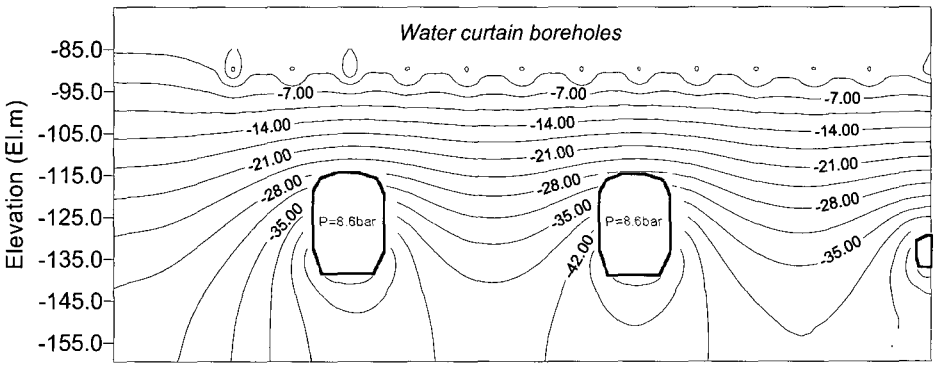
그림 4는 상부경계조건인 지하수위의 변화 및 수막공 주입압에 따른 공동내의 유입량과 가스압과의 관계를 정량적으로 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 수막공이 설치된 경우이며 점선은 수막공이 설치되어 있지 않은 경우이다. 운영당시 실제의 상부경계조건인 지하수두 h =-1.5 m 에 대해 수막공 유무 및 가스압에 따른 공동 1, 2의 유입량을 산정하여 그림 4에 도시하였다. 그림 4에서 보는 것처럼 공동내압과 유입량은 서로 반비례하는 특성을 보이고 있으며, 내부 압력이 커질수록 유입량은 줄어드는 특성을 잘 나타내고 있다. 유입량이 줄어들수록 공동의 가스누출 방지를 위한 여유는 줄어들게 된다. 그림 4의 경우는 상부 지하수위가 EL.1.5m를 유지하는 경우이므로 상부 경계수위인 지하수위가 점차 줄어들 경우 저장공동에서 가스가 누출되지 않는 공동의 심도를 설계하는 것은 매우 중요하다. 따라서 실제로 지하수위 변동이 급격하게 -40m 이상 변하는 것은 거의 불가능하나 가스누출이 시작되는 조건을 찾아보기 위하여

표 1. 공동내 유입량에 대한 수치해와 해석해의 비교

해석조건	해석해를 참값으로 본 수치해의 백분율 오차 (%)				
	160m×100m	300m×100m	400m×100m	600m×100m	600m×300m
Case 1	16.03	5.87	4.06	3.20	1.40
Case 2	15.27	4.34	2.38	1.49	0.47

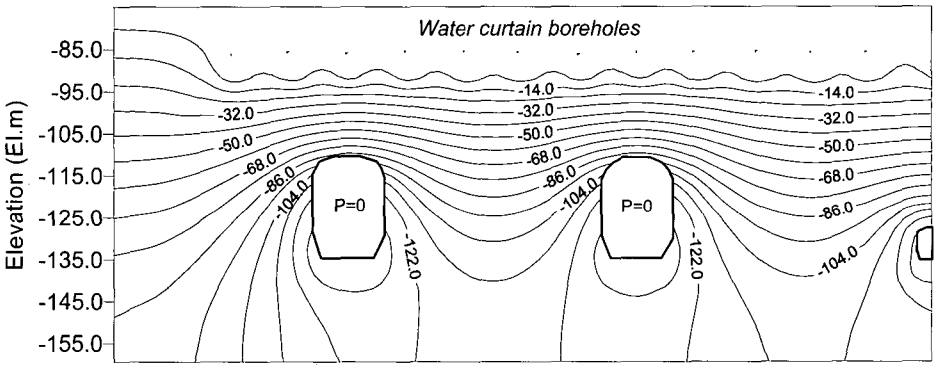


(a) 공동압=대기압

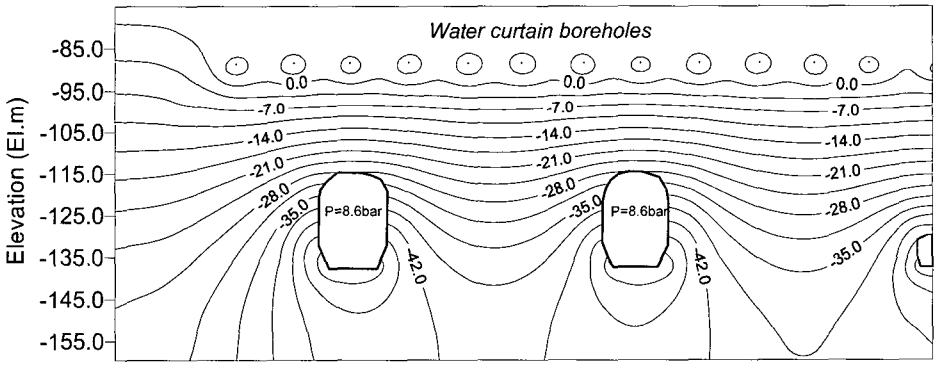


(b) 공동압=8.6bar

그림 2. 경계요소법에 의한 공동 주변의 등포텐셜 분포도



(a) 공동압=대기압



(b) 공동압=8.6bar

그림 3. 유한요소법에 의한 공동 주변의 등포텐셜 분포도

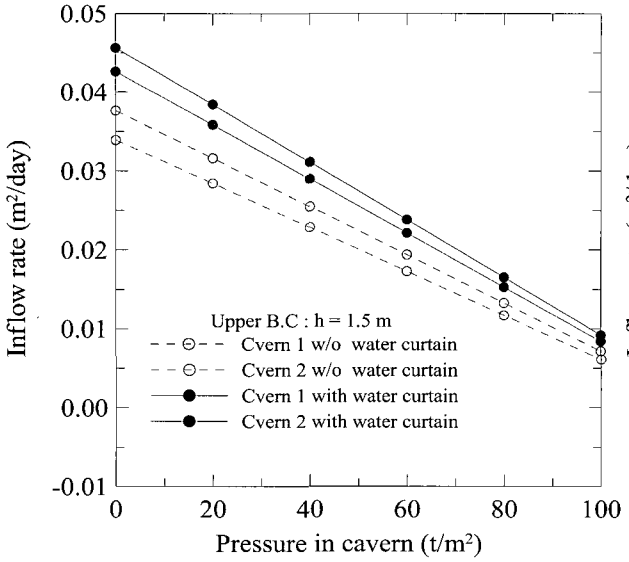


그림 4. 공동내 저장압과 유입량과의 관계
(상부경계수두 h=1.5m, 수막압력수두 5m)

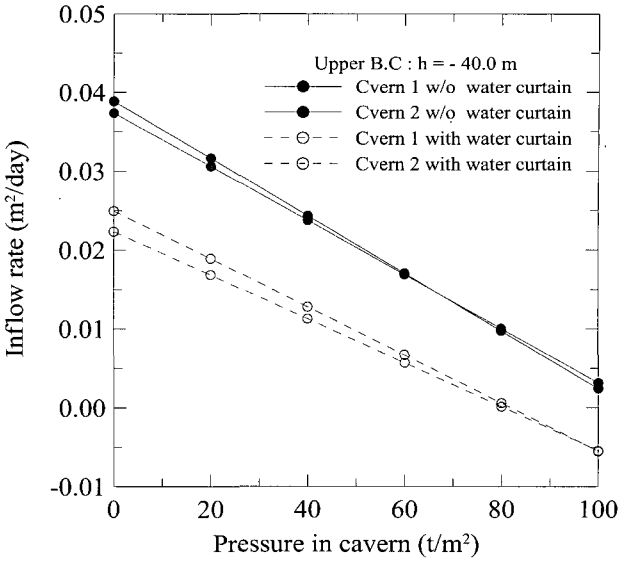


그림 5. 공동내 저장압과 유입량과의 관계
(상부경계수두 h=-40.0m, 수막압력수두 5m)

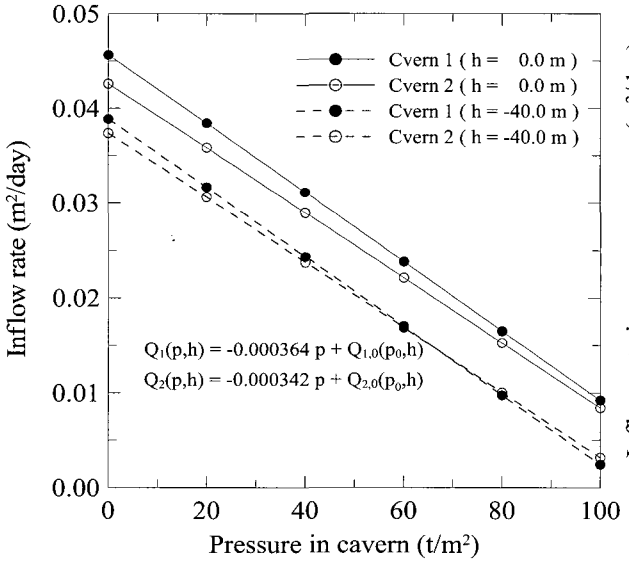


그림 6. 공동내 저장압과 유입량과의 관계
(상부경계수두 h=0, -40 m, 수막압력수두 5m)

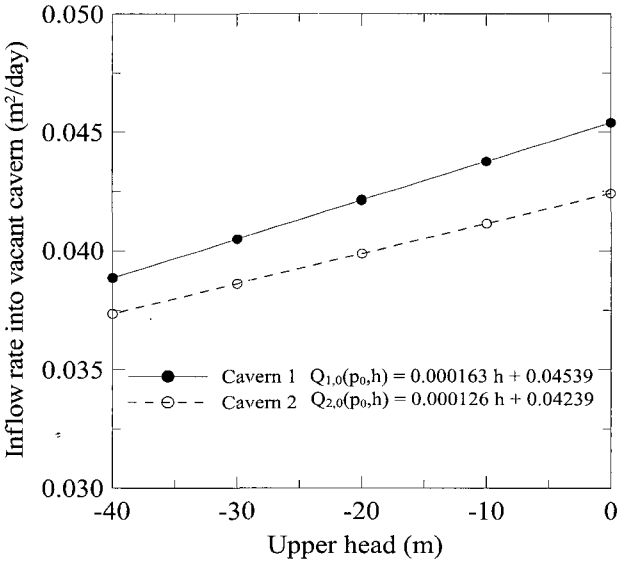


그림 7. 상부경계수두와 유입량과의 관계
(공동압 p=0 t/m², 수막압력수두 5m)

극한 조건인 h=-40.0 m 경우 유입량을 산정하여 그림 5에 나타내었다. 상부경계수두를 -40m 까지 낮추어야 비로소 수막시설이 없고, 저장압이 약 80 t/m^2 를 초과하는 경우에야 유입량 값이 음의 값이 되어 누출이 시작되는 것을 알 수 있다. 이는 운영당시 상부지하수위가 공동의 기밀성을 유지하기에 충분하다는 것이며, 달리 표현하면 지하수면에 대한 공동심도가 충분히 깊게 시공되어 가스누출에 대해 안정성을 충분히 확보하여 운영되고 있음을 의미하는 것이다.

수막공이 유입량에 미치는 영향으로 그림 4와 같이 상부지하수위가 충분한 경우에는 수막공 유무에 따라 유입량의 차이가 작았으나, 그림 5와 같이 상부지하수위가 낮은 경우에는 거의 두 배 이상의 차이를 보여 수막공의 영향이 작용한 것으로 분석되었다.

5.3 가스압에 따른 유입량 산정식

본 연구에서는 가스압의 변화에 따른 유입량과의 관계를 분석하기 위해 가스압 p=0~100t/m^2, 상부지하수두 h=El.-40~0m, 수막공 주입압력수두El.5m 일 때 공동의 유입량을 계산하여 그 결과를 그림 6 및 그림 7에 나타내었고 지하저장공동의 운영 및 유지관리에 활용될 수 있도록 식(14)와 같이 선형관계로 표현된 상

부수두 및 가스압에 따른 유입량 산정식을 수식화하여 제시하였다.

$$Q_1(p,h) = -0.000364p + Q_{1,0}(p_0,h) = -0.000364p + 0.000163h + 0.04539 \quad (14a)$$

$$Q_2(p,h) = -0.000342p + Q_{2,0}(p_0,h) = -0.000342p + 0.000126h + 0.04239 \quad (14b)$$

여기서 $Q_1(p,h)$와 $Q_2(p,h)$는 가스압p와, 상부경계수두h의 함수로서 각각 공동 1과 공동 2의 유입량이며, $Q_{1,0}(p_0,h)$와 $Q_{2,0}(p_0,h)$는 공동이 비어있는 경우($p_0(=p=0)$)의 공동 1, 2의 유입량으로서 그림 6에서의 종축의 절편과 그림 7의 직선으로 표현된다. 그림 6에서 각 공동의 경우 상부수두와 관계없이 가스압과 유입량의 기울기는 같고, 식 (14)와 같이 선형관계식으로 유도되었는데, 이는 지배방정식과 경계조건의 선형관계에서 기인한 것이다. 위에서 제시한 바와 같이 유입량, 가스압, 상부지하수두의 관계식은 유입량을 산정하거나 역으로 지하수두를 산정하는 등 A기지 공동의 운영 및 유지관리에 효과적으로 활용될 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 지하공동의 설계 전 단계에서 다양한 지하수 유동 수치모의에 활용할 수 있는 2차원 경계요소모형을 개발하였고, 지하저장공동이 위치한 A기지에 효율적으로 적용하였다. 이에 관한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 개발된 경계요소모형은 공동의 설계 단계에서 수막공의 간격과 배열형태, 공동의 최적형상을 결정하기 위한 모의실험에서 기존의 유한요소모형과 같이 영역내부를 이산화할 필요 없이 경계부의 형상과 조건만으로 내부점에서의 미지변수 계산을 효과적으로 수행하므로 지하공동 등 복잡한 내부경계가 존재할 경우에 효과적으로 활용 가능하다.

(2) 경계요소모형을 이용한 유입량, 가스압, 상부지하수두의 관계식은 공동내 유입량을 산정하거나 역으로 지하수두를 산정하는 등 A기지 공동의 운영 및 유지관리에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

정일문, 조원철, 배덕효 (1997). "지하저장공동주변의 지하수 흐름해석을 위한 수치모형의 확립." **한국수자원학회 논문집**, 제30권, 제1호, pp. 63~73.

조용식 (1996). "경계요소법을 이용한 중력댐에 작용하는 동수압 산정." **대한토목학회 논문집**, 제16권, 제II-1호, pp. 33-41.

한국석유개발공사 (1985). **A사업조사 설계용역 기본조사 보고서.**

한일영, 서일원, 오경택 (1996). "수치모의를 통한 지하 LPG저장시설에 인접한 폐기물 매립지에서의 침출수 이동예측 및 제어공법 검토." **지하수환경**, 제3권, 제2호, pp.51~59.

Becker, A.A. (1992). *The Boundary Element Method in Engineering, A Complete Course*, McGraw Hill.

Brebbia, C.A., Telles, J.C.F., and Wrobel, L.C. (1984) *Boundary Element Techniques, Theory and Application in Engineering*, Springer-Verlag.

Fujii, N. and Kacimov, A.R. (1998). "Analytically computed rates of seepage flow into drains and cavities." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 22, pp. 277-301.

Fidelibus, C., Lenti, V. (1996). "BEM code for ground-water problems in multizoned domains with normal boundary flux discontinuities." *Ground water*, Vol. 34, No. 5, pp.943-948.

Goodman, R.E., Moye, D.G., van Schalkwyk, A., and Javandel, I. (1965). "Ground water inflows during tunnel driving." *Engineering Geology.* 2, pp. 39-56.

Ligget, A.J. and Liu, P.L. (1983). *The Boundary Integral Equation Method for Porous Media Flow*, George Allen and Unwin Ltd.

(논문번호:05-13/접수:2005.1.15/심사완료:2005.06.13)