

지하저장공동의 지하수 유입량에 관한 정량적 분석

A Quantitative Analysis of Groundwater Flow into Underground Storage Caverns

정일문*, 이정우**, 조원철***
Il-Moon Chung, Jeongwoo Lee, Woncheol Cho

요 지

암반 내에 공동을 굴착하여 LPG 혹은 원유를 저장하는 경우 공동에서의 지하수 유입량은 공동상부의 수압과 공동내의 가스압과의 관계를 파악할 수 있는 정량적인 지표가 된다. 공동내의 유입량은 되도록 일정하게 유지되는 것이 굴착등의 시공단계와 공동 운영 및 유지관리면에서 유리하며, 유입량의 급증 혹은 급감이 일어나는 경우는 그 원인을 조기에 규명하여야 한다. 이를 위해서는 지하수위, 가스저장압, 수막공 주입압 등에 따른 공동주변의 유동장 해석, 공동내로의 지하수 유입량 해석을 실시해야 한다. 지하저장공동의 유입량 해석에 있어서는 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 수행하는 데는 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 구성하였고, 이를 지하저장공동이 위치한 A기지에 적용하여 상부경계조건인 지하수위의 변화, 수막공 주입압 등에 따른 공동내의 유입량과 공동저장압과의 관계를 정량적으로 분석하였다. 분석 결과를 지하저장공동의 운영 및 유지관리에 활용될 수 있도록 수식화하여 제시하였다.

핵심용어 : 지하저장공동, 지하수 유입량, 경계요소법

1. 서 론

암반 내에 공동을 굴착하여 LPG 혹은 원유를 저장하는 경우, 암반내의 균열을 통한 가스누출을 방지하려면 공동주변의 암반은 지하수에 의해 포화되어야 한다. 이러한 가스기밀(氣密: tightness)을 유지하려면 공동내의 LPG나 원유의 압력보다 주변암반중의 지하수 정수압이 항상 높게 유지되어야 하며 수두차에 의해 지하수가 공동으로 일정량 유입되도록 설계되어야 한다. 이러한 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 주입하므로써 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 이용하기도 한다. 운영중에도 공동내의 가스압이 저하되면 유입량이 많아지고, 상승하면 유입량이

* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : imchung@kict.re.kr
** 정희원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · E-mail : ljw007@yonsei.ac.kr
*** 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목전공 교수 · E-mail : woncheol@yonsei.ac.kr

줄어든다. 또한 상부 지하수위가 감소하면, 그만큼 유입량도 감소하므로 공동내의 유입량은 되도록 일정하게 유지되는 것이 공동유지관리면에서 유리하며, 유입량의 급증 혹은 급감이 일어나는 경우는 그 원인을 조기에 규명하는 것이 필요하다. 이처럼 저장공동에서의 유입량은 상부의 수압과 공동내의 가스압과의 관계를 파악할 수 있는 정량적인 지표가 된다.

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 단순화하므로써 실제 적용에는 많은 제약이 따른다. 따라서 해석하는 주로 수치모델의 결과를 테스트하는데 국한시켜 사용되고 있다. 결국 현실적인 문제를 풀기 위해서는 실제 계산영역에 대해 유한차분-유한요소법(FDM-FEM)등의 수치기법을 사용한 침투류 해석을 수행하게 되는데, 이때 어떤 수치모형을 사용할 것인지 결정하는 과정도 모델링의 전체흐름을 좌우하는 중요한 과정임에 틀림없다. 지하저장공동의 유입량해석에 있어서는 공동의 정확한 형상을 반영하기 위해서 유한요소법이 보편적으로 사용돼 왔다(한일영 등, 1995; 정일문 등, 1997). 그러나 해석에 반영해야 하는 요소들의 상대적인 규모차이가 클 경우(공동의 높이는 20m 이상인데 반해 수막공의 크기는 10cm 정도임), 유한요소망을 구성하는데 다소 불편함이 있고, 설계변경시 한번 구성한 유한요소망을 수정하는 작업도 쉽지 않은 것이 사실이다. 이러한 불편함은 경계부의 형상과 조건만으로 내부점에서의 미지변수 계산을 효과적으로 수행할 수 있는 경계요소법을 도입함으로써 극복할 수 있다. 경계요소법의 수학적 배경에 관해서는 많은 저자들의 문헌이 소개되고 있으며(Becker, 1992; Brebbia 등, 1984), 지하수 분야에서도 경계요소법을 이용한 수치해석을 수행한 바 있다(Liggett과 Liu, 1983; 조용식, 1996).

본 연구에서는 지하공동으로 배수되는 유입량 산정을 위해 경계요소법을 근간으로 한 2차원 지하수 흐름모형을 구성하였고, 이를 지하저장공동이 위치한 A기지에 적용하여 상부경계조건인 지하수위의 변화, 수막공 주입압 등에 따른 공동내의 유입량과 공동저장압과의 관계를 정량적으로 분석하였으며 분석 결과를 지하저장공동의 운영 및 유지관리에 활용될 수 있도록 간단한 수식으로 제시하였다.

2. 지배방정식과 수치모형

본 연구에서는 지하공동주변의 2차원 지하수 흐름해석을 위해서 식(1)과 같은 지배방정식의 해를 경계요소법을 이용하여 구하였다.

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

여기서 $h(x, y)$ 는 포텐셜함수 (potential head), K_x, K_y 는 x, y 방향의 수리전도도를 나타낸다. 식(1)을 만족하는 기본해(fundamental solution)인 가중함수 h^* 라 하고, Green의 정리를 이용하면

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

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

$$K_x \frac{\partial^2 h^*}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h^*}{\partial y^2} = \Delta(x - x_s) \Delta(y - y_s) \quad (3)$$

여기서 (x_s, y_s) 는 기저점의 좌표, 그리고 Δ 는 Dirac delta 함수를 나타내며, h^* 는 식 (4)와 같다.

$$h^*(x, y | x_s, y_s) = \frac{1}{2\pi(K_x K_y)} \ln \frac{1}{R} \quad (4)$$

여기서 $R = \sqrt{\frac{(x - x_s)^2}{K_x} + \frac{(y - y_s)^2}{K_y}}$

식(1)과 식(3)을 식 (2)에 대입하고 극한 $x \rightarrow x_s, y \rightarrow y_s$ 을 취하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$c(x_s, y_s) h(x_s, y_s) + \int_{\Gamma} h(x, y) \frac{\partial}{\partial n} h^*(x, y | x_s, y_s) d\Gamma - \int_{\Gamma} \frac{\partial}{\partial n} h(x, y) h^*(x, y | x_s, y_s) d\Gamma = 0 \quad (5)$$

여기서 c 는 경계형상계수(geometric coefficient), n 은 단위 외향 벡터이다. 수치해석에는 경계만을 이산화하며, 기저의 경계조건을 도입하므로써 미지수인 포텐셜함수와 포텐셜함수의 1차 도함수에 관한 일련의 선형방정식을 얻게 된다. 방정식의 해는 가우스 소거법 등을 이용하여 수치해를 구할 수 있다.

3. 수치모형의 적용

지하 가스저장공동주변에 본 수치모형을 적용하기 위해서는 수리지질학적 매개변수의 결정이 첫 번째 단계라고 할 수 있다. 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/sec이다(한국석유개발공사, 1985). 지하수두는 큰 변동이 없이 일정한 기간을 선택하여 정상상태의 조건을 만족하는 경우로 제한하였다. 공동내의 저장품은 프로판 가스로 최대허용압은 86 t/m^2 이다. 공동의 형상은 마제형으로 높이 22.5m, 폭 18m이며, 인위적인 주입시설인 수벽공 간격은 25m이다. 수평수막시설의 위치는 El. -90m이고, 상부의 지하수두는 El. 1.5m이다. 경계조건은 상부 지하수두와 공동경계부, 그리고 수막이 설치된 부분이다.

그림 1은 공동이 비어있는 경우($p=0$)와, 저장가스압이 최대저장압인 경우($p=86 \text{ t/m}^2$)의 공동 주변의 등포텐셜 분포를 나타낸 것이다. 전체적인 흐름장은 공동쪽으로 수렴되는 양상을 보이고 있으며 수막공의 주입압으로 인해 공동상부의 등포텐셜 라인이 조밀하게 분포되어 있다. 등포텐셜 분포 양상은 두 경우 유사하지만, 계산된 속도포텐셜의 플럭스값으로부터 유입량을 산정한 결과, 그림 2에서와 같이 두 경우의 유입량은 약 두 배 정도의 차이를 보임으로서 가스압이 유입량에 지배적인 인자임을 알 수 있다.

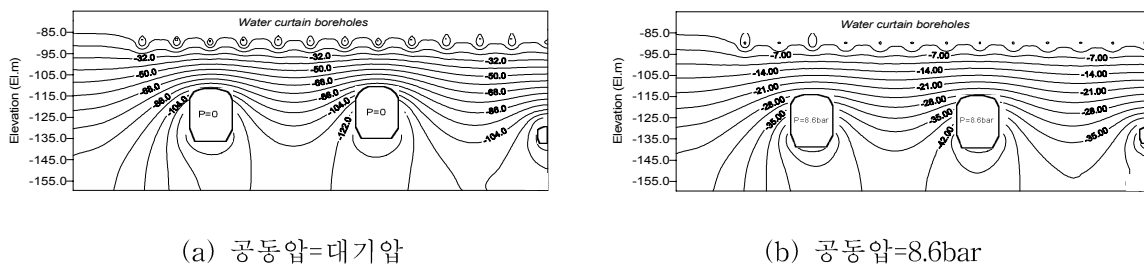
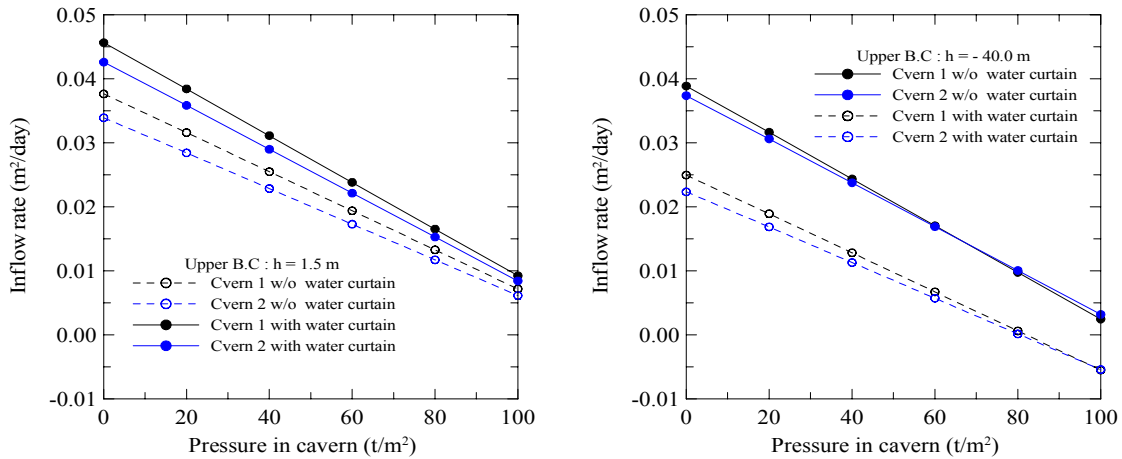


그림 1. 경계요소법에 의한 공동 주변의 등포텐셜 분포도

그림 2에서는 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 $h=-1.5$ m에 대해 수막공 유무 및 가스압에 따른 공동 1, 2의 유입량을 산정하여 그림 2(a)에 도시하였고, 실제로 지하수위 변동이 급격하게 -40 m 이상 변하는 것은 거의 불가능하나 가스누출이 시작되는 조건을 찾아보기 위하여 극한 조건인 $h=-40.0$ m 경우 유입량을 산정하여 그림 2(b)에 나타내었다. 상부경계수두를 -40 m 까지 낮추어야 비로소 수막시설이 없고, 저장압이 약 80 t/m^2 를 초과하는 경우어야 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 2(a)와 같이 상부지하수위가 충분한 경우에는 수막공 유무에 따라 유입량의 차이가 작았으나, 그림 2(b)와 같이 상부지하수위가 낮은 경우에는 거의 두 배 이상의 차이를 보여 수막공의 영향이 작용한 것으로 분석되었다.



(a) 상부경계수두 $h=1.5$ m, 수막압력수두 5m (b) 상부경계수두 $h=-40.0$ m, 수막압력수두 5m

그림 2. 공동내 가스압과 유입량과의 관계

가스압 $p=0\sim 100 \text{ t/m}^2$, 상부지하수두 $h=-40\sim 0$ m, 수막공 주입압력수두 5m일 때 공동의 유입량을 계산하여 그 결과를 그림 3 및 그림 4에 나타내었고, 지하저장공동의 운영 및 유지관리에 활용될 수 있도록 (6)에서와 같이 선형관계로 표현된 상부수두 및 가스압에 따른 유입량 산정식을 수식화하여 제시하였다.

$$Q_1(p, h) = -0.000364p + Q_{1,0}(p_0, h) = -0.000364p + 0.000163h + 0.04539 \quad (6a)$$

$$Q_2(p, h) = -0.000342p + Q_{2,0}(p_0, h) = -0.000342p + 0.000126h + 0.04239 \quad (6b)$$

여기서 $Q_1(p, h)$ 와 $Q_2(p, h)$ 는 가스압 p 와, 상부경계수두 h 의 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 3에서 중축의 절편과 그림 4의 직선으로 표현된다. 그림 3에서 각 공동의 경우 상부수두와 관계없이 가스압과 유입량의 기울기는 같고, 식 (6)과 같이 선형관계식으로 유도되었는데, 이는 지배방정식과 경계조건인 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.

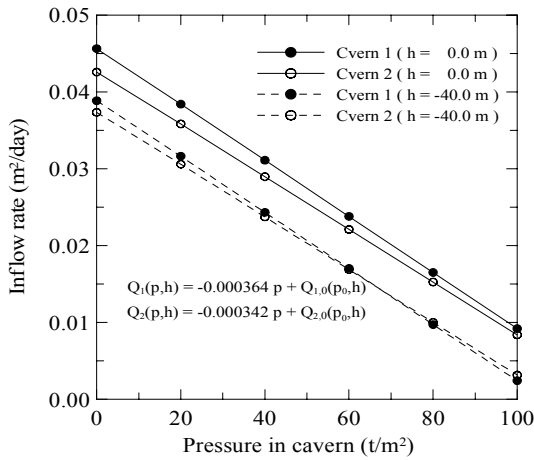


그림 3. 상부수두, 가스압, 유입량의 관계

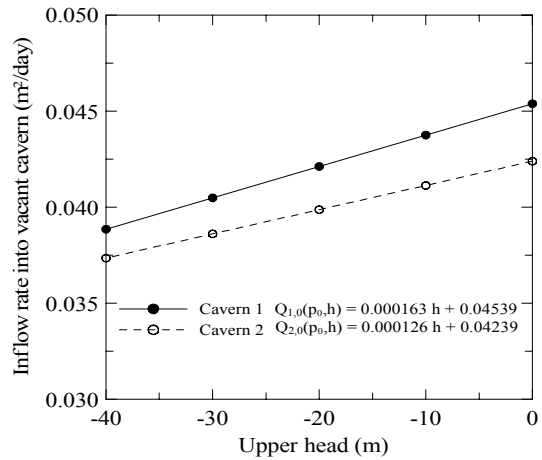


그림 4. 상부수두와 비어있는 공동내 유입량의 관계

4. 결 론

본 연구에서는 지하공동으로 배수되는 유입량 산정을 위해 경계요소법을 근간으로 2차원 지하수 흐름모형을 구성하였고 이를 지하저장공동이 위치한 A기지에 적용하여 지하수위의 변화, 수막공 주입압에 따른 유입량과 가스압과의 관계를 정량적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지하공동으로 배수되는 정확한 유입량 산정을 위해 2차원 경계요소모형을 적용한 것으로, 다양한 경계조건변화에 따른 유입량의 계산을 보다 효율적으로 수행할 수 있었다. 이 기법은 공동의 설계단계에서 수막공의 간격과 배열형태, 공동의 최적형상을 결정하기 위한 모의실험에서 기존의 유한요소해석의 단점을 극복하는 대안으로 활용될 수 있을 것이다.
- (2) 유입량 분석결과 상부지하수위 및 공동의 위치가 공동의 기밀성을 유지하기에 적절하여 가스누출에 대한 안정성이 충분히 확보된 것으로 분석되었다.
- (3) 본 연구에서 제시한 유입량, 가스압, 상부지하수두의 관계식은 공동내 유입량을 산정하거나 역으로 지하수두를 산정하는 등 A기지 공동의 운영 및 유지관리에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 정일문, 조원철, 배덕효 (1997). 지하저장공동주변의 지하수 흐름해석을 위한 수치모형의 확립, 한국수자원학회 논문집, 제30권, 제1호, pp. 63~73.
2. 조용식 (1996). 경계요소법을 이용한 중력댐에 작용하는 동수압 산정, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제II-1호, pp. 33-41.
3. 한국석유개발공사 (1985). A사업조사 설계용역 기본조사 보고서.
4. Becker, A.A. (1992). The Boundary Element Method in Engineering, A Complete Course, McGraw Hill.
5. Brebbia, C.A., Telles, J.C.F., and Wrobel, L.C. (1984). Boundary Element Techniques, Theory and Application in Engineering, Springer-Verlag.
6. Liggett, A.J. and Liu, P.L. (1983). The Boundary Integral Equation Method for Porous Media Flow, George Allen and Unwin Ltd.