

LPG 지하저장기지 수평 수벽공의 클로킹 현상 발생시 지하수위 및 주입수량, 삼출수량의 변화양상에 관한 실험적 연구

한 충 용, 강 주 명*

서울대학교 자원공학과, 서울대학교 지구환경시스템 공학부*

An Experimental Study on Change Patterns of Groundwater Head, Injection Water Flowrate and Seepage Water Flowrate under Clogging Phenomena

Choongyong Han, Joe M. Kang*

Dept. of Min. & Pet. Eng., Seoul Nat'l Univ., Div. of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul Nat'l Univ.*

1. 서론

대규모의 LPG를 무복공 지하공동(Unlined Underground Cavern)에 저장할 때는 가스의 공동내 기밀성 보장을 위해 대부분의 경우 공동 상부에 다수의 수평공을 천공하여 인위적으로 물을 주입하여 가압시키는 수장막 시스템(Water Curtain System)을 설치하여 운영하게 된다. 이 시스템을 장기간 운영시 수평 수벽공에 클로킹 현상이 발생되면 저장공동 주위의 지하수위가 설계된 수치보다 낮아져 LPG가 누출될 수 있으므로 이러한 클로킹 감지에 관한 연구가 절실하다.

따라서 이 연구에서는 클로킹 현상을 감지할 수 있는 인자들로 기존에 제시되었던 공동 주위의 지하수위 변화, 수평 수벽공으로 들어가는 주입수량의 변화, 공동 안으로 들어오는 삼출수량의 변화에 관하여 실험적으로 LPG 지하저장기지를 모사하여 고찰해 보고자 하였다.

2. 본론

2.1 클로킹에 의한 공동 주위의 지하수위 변화에 관한 실험

2.1.1 실험 모델

이 실험은 투명한 압력용기 안에 인조 화강암 재질의 지하저장기지 모형을 장착하여 수행되었다. 인조 화강암 매질의 공극률은 약 22% 였고 유체투과율은 약 61 md 이었다. 수평 수벽공으로 들어가는 주입수는 유체축적기(Fluid Accumulator)를 연결하여 일정한 압력으로 공급하였고 공동에 저장되는 가스를 모사하기 위해서는 압축 공기를

사용하였다. 공동압력을 일정하게 유지하기 위하여 삼출수배출구에 후방압력조절기(Back Pressure Regulator)를 연결하였다. 매질은 압력용기 밑바닥으로부터 다소 떠 있게 하여 매질 주위가 전체적으로 동수위가 될 수 있게끔 하였다. 실험 모델의 모식도는 Fig. 1 과 같다.

한편 모델의 가정은 다음과 같다.

- (1) 매질은 균질하다.
- (2) 압력용기 내부로의 물의 유입이 없다.
- (3) 공동 단면은 원형이다.
- (4) 수평 수벽공의 방향은 공동의 길이 방향과 같다.
- (5) 매질은 물로 완전히 포화되어 있다.

2.1.2 실험 변수 및 측정 변수

실험 변수는 수평 수벽공 압력(P_{wc}), 공동의 압력(P_g), 수평 수벽공의 클로킹 정도 및 발생 위치 등 네 가지이다. 수평 수벽공의 압력은 5, 10, 15, 20, 25 psi 로 설정하여 보다 현장에 가까운 값으로 모사하고자 하였고 공동의 압력은 수평 수벽공 압력을 각각에 대하여 5등분한 값들과 저장물이 없는 대기압 상태를 포함하여 총 여섯 개의 값을 설정하였다. 클로킹에 의한 수평 수벽공의 막힘 현상은 수평 수벽공으로 들어가는 파이프의 밸브를 닫아 주입수가 들어가지 못하게 함으로써 모사하였다. 주입수가 세 개의 수평 수벽공으로 주입되는 경우를 정상인 경우로 보았고 막힌 개수가 증가할수록 클로킹이 심해지는 것으로 보았다. O 표는 정상인 상태를, X 표는 클로킹 된 상태를 나타낸다.

측정 변수는 공동 주위의 지하수압(P_w)이다.

2.1.3 실험 방법

인조 화강암 비축 기지 모형을 물로 포화시킨 후 저장공동으로 압축 공기를 주입하기 위해 저장공동 내부의 물을 약간 배출시킨다. 앞에서 결정한 압력으로 수벽공의 압력을 일정하게 준다. 저장공동에 압축 공기를 주입하고 저장 압력을 변화시키면서 평형 상태의 지하수압을 측정한다.

클로킹 정도의 변화를 모사하기 위해 수평 수벽공의 막힌 개수를 달리하며 상기 과정을 반복한다.

마지막으로 수벽공의 주입 압력을 변화시키며 상기 과정을 반복한다.

2.2 현탁물질에 의한 클로킹 발생에 따른 주입수량과 삼출수량의 변화에 관한 실험

2.2.1 실험 모델

본 실험에서 사용한 모델은 앞 실험의 모델과 동일하다. 단, 이 실험에서는 지하수압을 항상 일정하게 유지하기 위하여 압력용기에 후방압력조절기(Back Pressure Regulator)를 연결하였다.

모델의 가정은 공동 주위의 지하수압을 항상 일정하게 하기 위하여 압력용기 내부로 물의 유입이나 유출이 있었다는 것을 제외하고는 앞 실험과 동일하다.

2.2.2 실험 변수 및 측정 변수

실험 변수는 주입되는 현탁물질의 양이다. 클로킹을 일으킬 수 있는 현탁물질로는

점토가 대표적이므로 본 실험에서는 벤토나이트를 사용하였다. 측정 변수는 주입수량과 삼출수량이다.

2.2.3 실험 방법

중류수에 벤토나이트를 넣고 응집을 막기 위하여 수산화나트륨을 첨가한 후 멀티믹서로 충분히 섞어서 숙성시킨다. 수평 수벽공 압력은 17 psi, 지하수압은 13 psi, 공동압력은 10 psi 로 일정하게 유지하면서 현탁액을 주입한다. 삼출수량은 공동 안으로 들어오는 물의 양을 직접 메스실린더와 초시계를 이용하여 측정하고 주입수량은 일 회 실험시 주입된 주입수량을 실험 시간으로 나누어서 구한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 클로킹에 의한 공동 주위의 지하수위 변화

3.1.1 공동의 압력에 의한 영향

지하수압은 공동의 압력이 커짐에 따라 증가하는 양상을 보였다. 이것은 공동의 압력이 증가할수록 공동 방향으로의 동수구배가 감소하여 공동 내부로 들어오는 삼출수량이 감소하게 되고 그 감소량만큼이 공동 외부 방향 주위로 유동하게 되는데 실험 모델에서는 매질 외부에서 no flow boundary를 가정하였으므로 유체 압축에 의해 압력이 증가하게 된 것이다(Fig. 2).

3.1.2 수평 수벽공의 클로킹에 의한 영향

클로킹이 심해질수록 지하수압은 떨어졌다. 동일한 수평 수벽공의 압력을 준다 할지라도 클로킹이 발생하면 물이 주입되는 단면적이 그만큼 작아지는 것을 의미하므로 주입되는 유량은 감소하게 되어 지하수압은 떨어지게 된다.

한편 실제 발생한 클로킹의 정도가 다르다 할지라도 공동의 압력이 지하수압보다 크면 클로킹의 영향은 과약되지 않았다. 매질의 외부 경계의 지하수위는 등포텐셜을 이루고 있으므로 공동압력과 지하수압이 같아졌다 할지라도 공동의 상부는 위치수위의 증가 때문에 공동의 수위보다 높지만 공동의 아랫부분은 위치수위가 감소하므로 공동의 수위보다 낮게 된다. 만일 공동 내부가 압축 공기만으로 채워져 있다면 이러한 상황에서는 일반적으로 받아들여지고 있는 공동의 가스 누출 저장 방지 조건인 수직동수구배가 1보다 커야 한다는 것을 만족시키지 못하므로 가스 누출이 발생했을 가능성이 있다. 본 실험에서는 현장에서와 마찬가지로 공동 아랫부분을 항상 물로 채우고 있었으므로 매질 밖으로 공기 방울이 나오는 것은 보이지가 않았지만 매질 내부에서는 공동의 아랫부분으로 압축 공기 또는 공동 내부에 있던 물이 누출되었다고 생각되며 이 때문에 지하수압이 높아져서 클로킹에 의한 지하수압의 감소 효과가 상쇄된 것으로 사료된다(Fig. 3, Fig. 4).

따라서 클로킹 발생 여부를 보다 잘 파악하기 위해서는 공동의 압력을 대기압에 가까운 낮은 압력으로 놓았을 때의 지하수위를 공동 운영 초기의 지하수위와 비교해 보아야 한다는 결론을 내릴 수가 있다.

3.1.3 수평 수벽공의 압력에 의한 영향

클로킹에 의한 지하수압의 감소율은 수벽공의 압력이 커질수록 다소 감소하는 경향을 보였는데 이것은 수벽공의 압력 증가에 의한 주입수량의 증가가 클로킹에 의한 주입수량 감소보다 더 크기 때문으로 사료된다(Fig. 3, Fig. 4).

또한 수평 수벽공의 압력이 클수록 공동 압력에 의한 지하수압의 증가율은 감소하는 양상을 보였다. 이는 수평 수벽공의 압력이 클수록 동일한 유동 길이에 대하여 압력 감소가 상대적으로 작기 때문이다(Fig. 5).

3.1.4 수평 수벽공의 막힌 위치에 의한 영향

지하수압의 클로킹에 의한 변화 양상은 동일한 정도의 클로킹이 발생했다면 클로킹이 발생한 수평 수벽공의 위치와는 상관없이 거의 비슷하게 나타났다. 이는 실험에서 매질 외부 경계를 등포텐셜이 되도록 하였기 때문이라고 생각되며 이러한 가정을 하지 않았을 경우에는 다른 결과가 나올 수 있다고 사료된다(Fig. 6).

다공질 매체 내에서의 지하수 유동은 수위 차에 의하여 발생하게 되는데 이 때 수위 h 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$h = z + (P/\gamma) \quad (h: \text{전체수위}, z: \text{위치수위}, P/\gamma: \text{압력수위})$$

본 실험에서 측정된 지하수압의 변화 양상은 지하수위의 변화 양상과 같다고 볼 수 있는데 이 이유는 실험 모델 특성상 위치 수위는 압력 수위에 비하면 매우 미소하므로 압력의 변화가 전체수위의 변화를 지배한다고 생각할 수 있기 때문이다. 따라서 앞에서 실험 결과로써 제시된 지하수압의 변화 양상은 지하수위의 변화 양상과 거의 동일하다고 볼 수 있다.

3.2 현탁물질에 의한 클로킹 발생에 따른 주입수량과 삼출수량의 변화

실험 결과는 Fig. 7 과 같다. 여기서 1 공극부피는 수평 수벽공 3개의 부피 총합으로 설정하였다. 공극부피나 벤토나이트의 양이 증가한다는 것은 클로킹의 정도가 증가하는 것으로 볼 수가 있다. 클로킹이 심해질수록 주입수량과 삼출수량은 감소하는데 주입수량의 감소율이 삼출수량이 감소율보다 다소 크게 나타남을 확인할 수 있다. 삼출수량은 지하수위에 민감한 인자이므로 수평 수벽공의 수위가 지하수위에 근접할수록 클로킹에 의한 삼출수량의 감소는 둔화될 것으로 생각되고 주입수량의 클로킹에 의한 감소율은 수평 수벽공과 지하수위 차가 커질수록 증가할 것이라고 생각된다. 한편 현탁액을 주입하는 시간에 따른 유량의 변화를 살펴보면 시간이 지날수록 주입수량과 삼출수량은 선형적으로 감소함을 알 수가 있다(Fig. 8). 이 이유는 시간이 지날수록 클로킹 발생에 의하여 주입수량이 감소하게 되면 그 만큼 벤토나이트가 같은 시간 동안 덜 들어가기 때문이다.

4. 결론

4.1 지하수위는 공동의 압력이 커짐에 따라 증가하고 클로킹이 심할수록 감소하는데 실제 발생한 클로킹의 정도가 다르다 할지라도 공동의 수위가 지하수위에 근접하게 되

면 클로킹의 영향은 파악되지 않으므로 클로킹 발생을 지하수위 변화에 의해서 보다 잘 감지하려면 공동의 압력을 대기압에 가깝게 하고 공동 운영 초기의 지하수위와 현재 운영 상태의 지하수위를 비교해 보아야 한다.

4.2 클로킹에 의한 지하수위의 감소율은 수벽공의 압력이 커질수록 다소 감소하고 공동 압력에 의한 지하수위의 증가율은 수벽공의 압력이 클수록 감소한다.

4.3 현탁물질에 의한 클로킹이 심할수록 주입수량과 삼출수량은 감소하는데 주입수량의 감소율이 삼출수량의 감소율보다 크게 나타난다. 만일 시간에 따른 주입수량과 삼출수량의 변화 양상이 선형적으로 감소하는 것으로 나타난다면 현탁물질에 의한 클로킹일 가능성이 높으므로 주입수에 대한 선처리, 예를 들면 침전이나 여과 등을 보다 확실하게 해주어야 한다.

참고문헌

1. Lindblom, U., "The Performance of A Water Curtain during 10 Years of Operation", Proc. of the Int. Conference on Storage of Gases in Rock Caverns, Trondheim(1989).
2. Aberg, B., "Prevention of Gas Leakage from Unlined Reservoirs in Rock", Rockstore 77, pp 399-413(1977).
3. Erling Reininus, "Groundwater Flow to Rock Caverns", Proc. 1st Int. Symp. Storage in Excavated Rock Caverns, Stockholm, pp 343-348(1977).
4. Goodall, D. C. and Aberg B. & Brekke, T. L., "Fundamentals of Gas Containment in Unlined Rock Caverns", Rock Mech. & Rock Eng., 21, pp 235-258(1988).
5. Kim, S. J., and Joe M. Kang, "An Interpretation of Water Curtain System of Underground Storage Cavern with 3D Finite Element Model in Dual-Porosity Fracture System", Ph.D. Dissertation, Seoul Nat'l. Univ., Seoul, Korea(1995).
6. Lim, J. S., and Joe M. Kang, "A Study on Efficient Management for Underground Storage Cavern", M.S. Thesis, Seoul Nat'l. Univ., Seoul, Korea(1993).

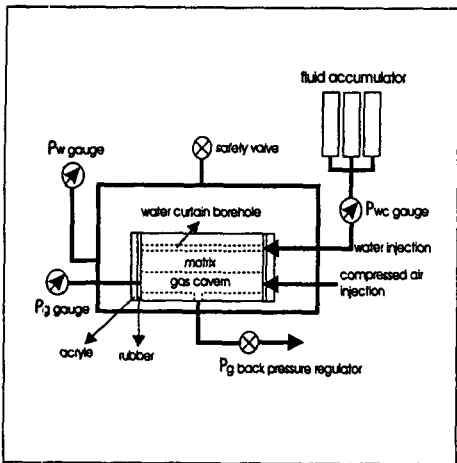


Fig.1 Schematic diagram of experiment model.

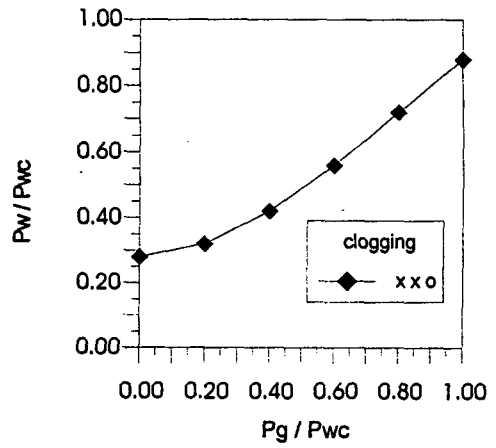


Fig.2 Groundwater pressure change.
Pwc = 5 psi

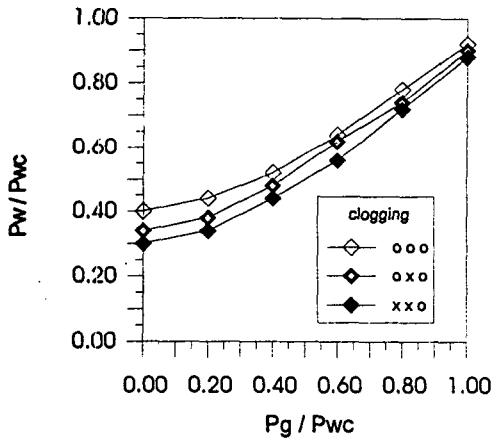


Fig.3 Groundwater pressure change.
Pwc = 5 psi

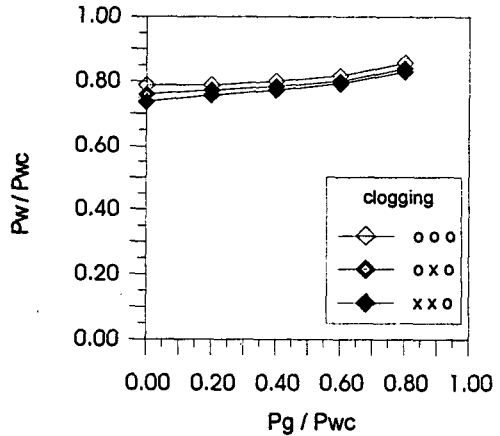


Fig.4 Groundwater pressure change.
Pwc = 25 psi

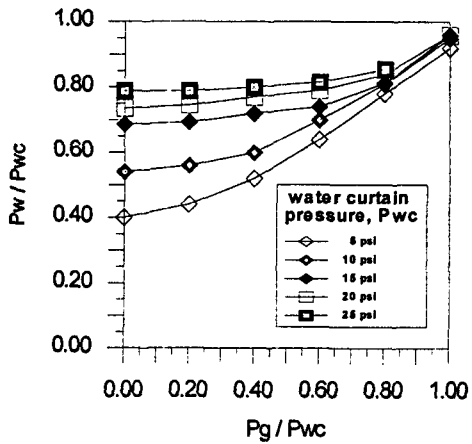


Fig.5 Groundwater pressure change.
clogging: 0 0 0

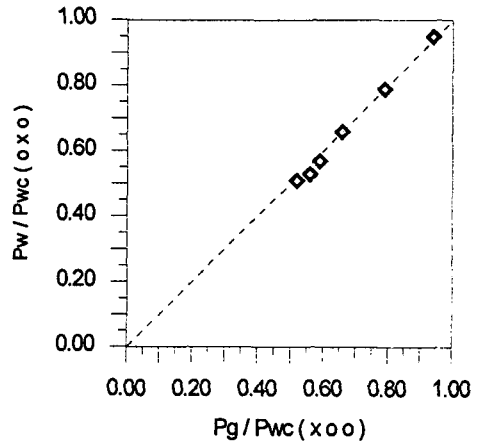


Fig.6 Effect of clogging location.
 $P_{wc} = 10$ psi

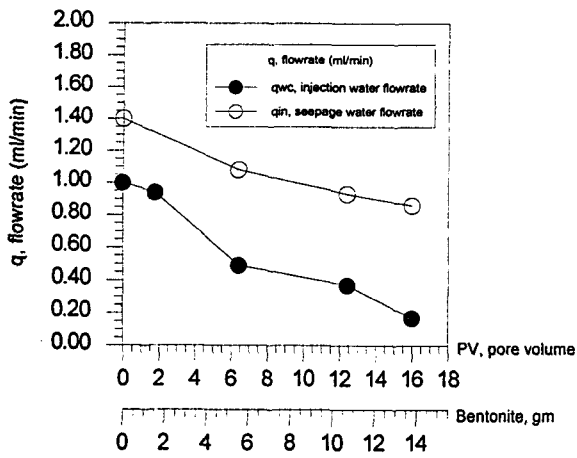


Fig.7 Change of flowrate.

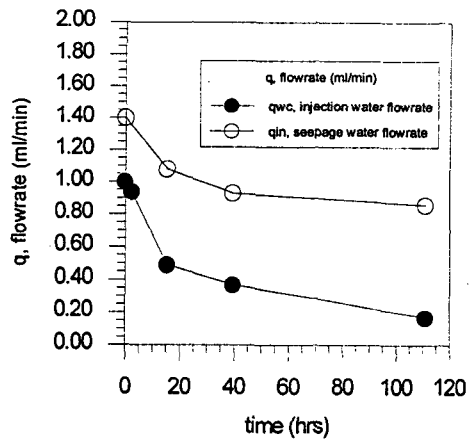


Fig.8 Change of flowrate.