

LPG 지하저장공동 Water Curtain System의 정량적 안정성 해석

- 인도 VISAKHAPATNAM LPG Project

남열우, 김성구, 나승훈
LG건설

1. 서론

지하에 LPG를 저장하는 방식은 온도와 압력의 조절양상에 따라 상온고압식과 상압저온식으로 구분할 수 있다. 국내에서 유류지하비축에 일반적으로 적용되고 있는 상온고압식은 수력학적 원리에 따라 지하심부에서 가스 증기압을 초과하는 수압을 Cavern 내부로 작용시켜 저장하는 방식이다(Söder, 1994). 따라서 상온고압식 저장에서는 지하심부 결정질 암반에 비축기지가 건설되며 저장품의 기밀성 유지가 관건이 된다. 이를 위해 암반절리 중에 있는 기포형태의 가스가 Cavern 쪽으로 이동하도록 수두분포가 형성되어야 하며 이의 만족조건은 수직동수구배가 1보다 큰 경우이다(Åberg, 1977).

일반적으로 지하비축기지는 대상지역의 광역적 수계, 지반의 수리적 특성, 지하수위, 강수량과 함양률, Cavern의 설치심도와 형상, 저장품의 종류 등 여러요인에 의해 수리적 안정성이 영향을 받으므로 기밀성 만족여부를 확인하기 위한 해석학적 검증은 필요로 한다. 지하비축기지의 기밀성 해석에서는 대상지역을 포함하는 광역수계의 넓이에 비해 수벽공(water curtain borehole)의 크기가 작아 개개의 수벽공을 정량적으로 모델링 하기 어렵다. 수벽공이 실제보다 크게 모델링 되는 경우 수벽공을 통한 주입량은 Thiem식에 따라 수벽공 직경에 비례하여 증가하며, 이에 따라 수벽공 주위의 압력분포양상도 변화한다. 반대로 수벽공의 실제 크기를 모사하기 위해 국지적인 모델링을 수행하는 경우 연속적인 지반에서 타당한 경계조건을 설정할 수 없다.

본 연구에서는 광역수계의 유동과 Cavern 주위의 국지적 유동을 분리함으로써 실제 수벽공 크기를 구현하여 모델링 작업을 정량화 하고자 하였다. 전체 광역수계의 모델링 결과는 국지적 모델링의 경계조건을 설정하기 위한 자료로 활용되며 국지적 모델링은 실제 수벽공 크기를 재현하여 해석된다. 이와 같은 조합모델링 방법을 적용하여 인도의 VISAKHAPATNAM Project 수장막 체계의 수리적 안정성을 검증하였다.

2. 인도 VISAKHAPATNAM LPG Project

2.1 대상구역

본 Project의 대상구역은 인도의 동부해안가에 위치하고 있다. Fig.1에서 보는 바와 같이 대상구역의 북쪽과 동쪽은 바다에 인접해 있고 남쪽과 서쪽 경계는 광역분수령으로 구분될 수 있다(SA LPG, 2001a). 따라서 북쪽과 동쪽부분 경계는 일정수두경계, 남쪽과 서쪽 경계는 비유동경계로 설정할 수 있다.

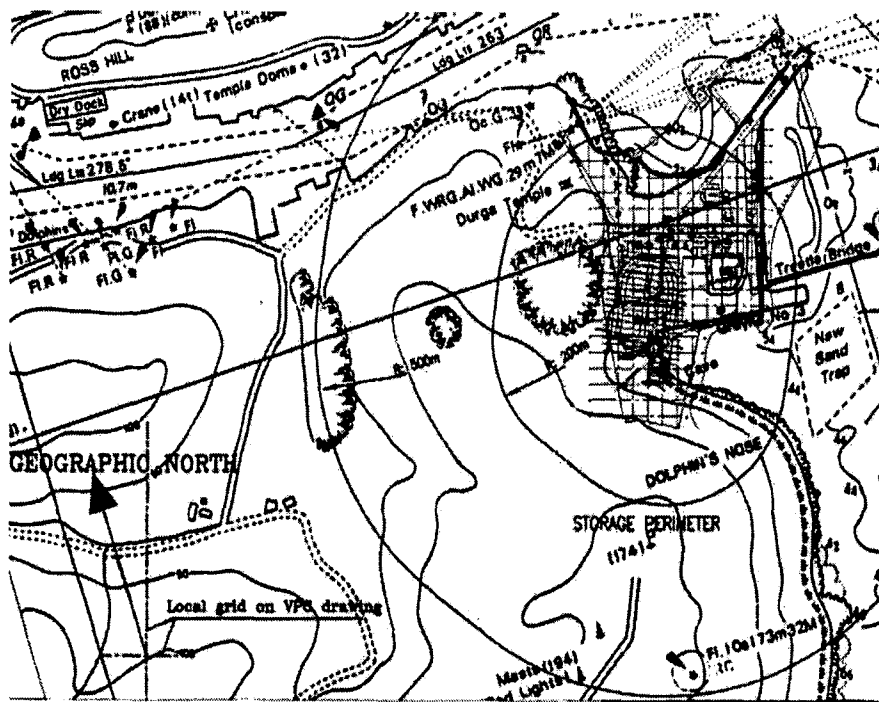


Fig. 1. The site map of VISAKHAPATNAM LPG terminal

2.2 지하저장시설

Cavern은 총 120,000 m³ 규모의 프로판을 저장하기 위해 E.L -162~-186m에 건설된다 (SA LPG, 2001a). 해당지역의 기온과 지온이 높아 프로판의 증기압이 커서(37.8 °C에서 14 bar) 상대적으로 대심도가 요구된다. Cavern 심도 및 수장막체계의 심도는 Table 1과 같으며 형상은 Fig. 2와 같다.

Table 1. The elevation of underground facilities

Cavern and boreholes	Elevation
Water gallery crown	-144
Water curtain boreholes	-147
Water gallery invert	-148
Cavern crown	-162
Cavern invert	-186

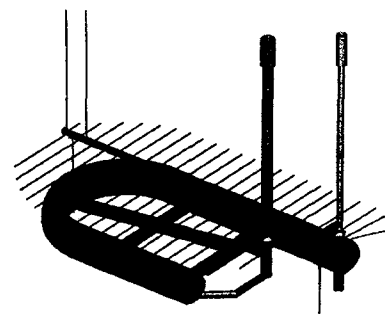


Fig. 2. The shape of underground facilities

2.3 수리적 특성

대상지반의 수리적 특성을 파악하기 위해 총 8곳의 시추공에서 55회의 수압시험이 실시

되었다(SA LPG, 2001b). 시험결과 시험시추공 위치에 따른 편차는 상대적으로 작았으며 심도에 따른 변화양상이 뚜렷하였다. 심도 100m까지는 심도증가에 따라 지반의 투수성은 선형감소하는 것으로 나타났고 그 이상의 대심도에서는 심도와 투수성의 상관관계는 미약한 것으로 분석되었다. 지층상부의 토양과 풍화암은 $0.4 \sim 240 \times 10^{-8}$ m/sec의 투수계수 범위를 가졌으며, 하부 기반암에서는 평균 0.55×10^{-8} m/sec의 투수계수가 산정되었다. 해당지역의 강수량은 1,080 mm/year로 조사되었다.

3. 지하저장기지의 수리안정성 해석

3.1 사용 프로그램

본 연구에서는 Visual MODFLOW ver.2.8.2(Waterloo Hydrogeologic, 2000)를 사용하였다. 이 프로그램은 지하수 유동해석을 위한 3차원 모델로서 유한차분법을 이용하고 있다.

3.2 수리학적 특성 상수의 보정(Calibration)

본 작업은 지하공동이 건설되기 이전의 광역 지하수계에서의 관측수두와 모델링 수두를 서로 유사하게 일치시켜 적용된 입력자료의 타당성을 검증하는 작업이다. 보정작업은 정상상태(Steady state)에서 실시되었다.

(1) 보정 Parameter

수리학적 유동 특성에 가장 큰 영향을 주면서도 자료획득에 불확실성이 많은 투수계수, 수평투수계수에 대한 수직투수계수의 비, 지하수 함양률 3가지로 설정하였다.

(2) 보정결과

현지 지하수두는 총 8공에서 관측되었다. 3가지 보정 Parameter를 조합하여 관측수두와 모델링 수두를 일치시킨 결과 Table 2와 같은 결과를 얻었다. 이때의 보정 Parameter는 Table 3과 같이 산정되었다.

Table 2. The comparison of heads

Borehole	Observed Head (m)	Simulated Head (m)	Discrepancy (m)
A	1.2	1.7	+0.5
B	1.4	1.3	-0.1
C	1.4	1.2	-0.2
D	0.6	0.7	+0.1
E	2.0	2.1	+0.1
F	0.9	1.1	+0.2
G	1.5	1.9	+0.4
H	1.5	1.6	+0.1

Table 3. The calibrated parameters

	Elevation (m)	Horizontal Permeability (m/sec)	Vertical Permeability (m/sec)
Perm.	0 ~ 180	5×10^{-6}	2.5×10^{-7}
	-25 ~ 0	5×10^{-7}	5×10^{-8}
	-50 ~ -25	5×10^{-8}	5×10^{-8}
	-100 ~ -50	5×10^{-9}	5×10^{-9}
	-250 ~ -100	1.6×10^{-9}	1.6×10^{-9}
Recharge Rate	5 % of total precipitation		

3.3 광역적 모델링(Global modeling)

(1) 격자망 및 입력자료

격자망은 Fig. 3과 같이 구성하였다. 격자의 수는 횡(Row)방향으로 88개, 열(Column)방

향으로 66개이며, 32개의 층(Layer)으로 구성하였다. 외부경계조건은 동쪽과 북쪽 해안선은 정수위로 설정하였으며, 남쪽과 서쪽은 지형적인 분수령을 경계로 비활동격자로 설정하였다. 내부경계조건으로는 Water curtain tunnel과 Water curtain borehole은 수두 E.L 0m의 정수두로, Cavern과 Connection tunnel들은 최대운영압을 가정하여 심도에 따라 수두 E.L -58.5 ~ -34.5m로 설정하였다. 지반특성 등의 자료는 지반조사 자료와 보정작업 결과를 이용하여 입력되었다.

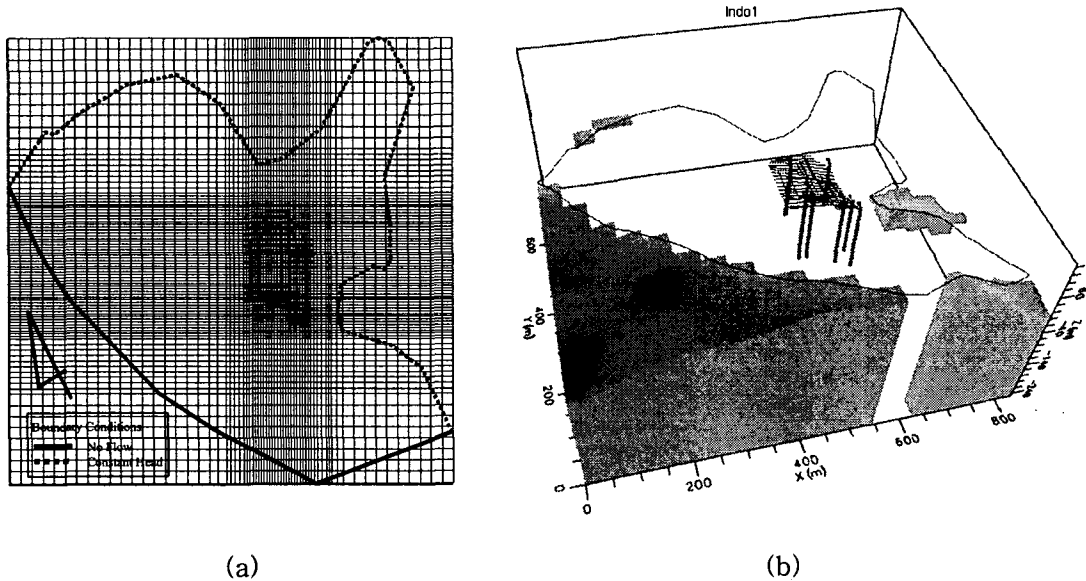


Fig. 3. Grid network and boundary conditions of global modeling (a) plane figure, (b) 3D figure

(2) 결과 및 분석

모델링 결과 주요심도(Water curtain 심도, Water curtain과 Cavern 중간위치)에서의 수두분포는 Fig. 4와 같다.

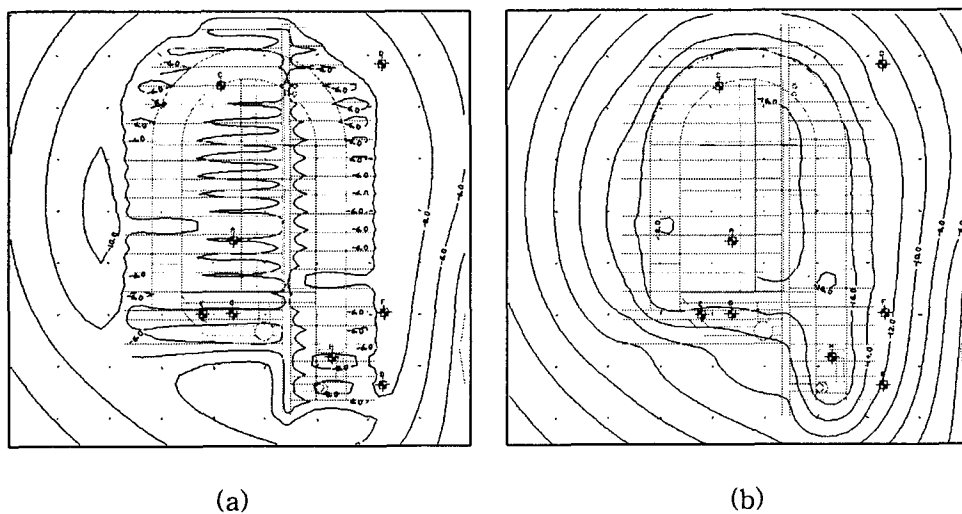


Fig. 4. Hydraulic head contours (a) at E.L -148 m, (b) at E.L -155 m

Fig. 4의 두 경우 모두 수리학적 기밀성 조건을 만족시키지만 광역적 모델링에서 수두의 절대값에 정량적인 의미를 부여하기는 어렵다. Fig. 4의 (a)에서 그림상 Cavern의 좌측에서 최소 수두 부분이 관찰된다. 이것은 Cavern 우측은 해안에 의한 정수두 경계조건에 의해 수두지지가 가능한데 반해 좌측은 산악지형에 따른 비유동경계에 인접하여 상대적으로 수두강하량이 큰 것으로 풀이된다. 이 현상은 Fig. 4의 (b)에서도 마찬가지로 관찰되어 전반적으로 Cavern 좌측(북서쪽)이 수리적으로 기밀성에 가장 불리한 것으로 판단된다. 한편 Cavern으로의 지하수 유입량은 $8.7 \text{ m}^3/\text{day}$ 인 것으로 산정되었다.

3.4 국지적 모델링(Local modeling)

(1) 격자망 및 입력자료

국지적 모델링은 광역적 모델링의 결과에 의거하여 기밀성 조건에 가장 취약한 Cavern 북서쪽 부분에서 수행하였다. 해석영역은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 직육면체 형태로서 Cavern과 수벽공 간의 수두분포를 집중적으로 해석하기 위해 최소한의 영역으로 설정되었다. 격자의 수는 횡(Row)방향으로 20개, 열(Column)방향으로 32개이며, 24개의 층(Layer)으로 구성하였다. 특히 수벽공에 해당하는 격자는 실제와 같은 NX 규격($\phi 54\text{mm}$)으로 구성하였다.

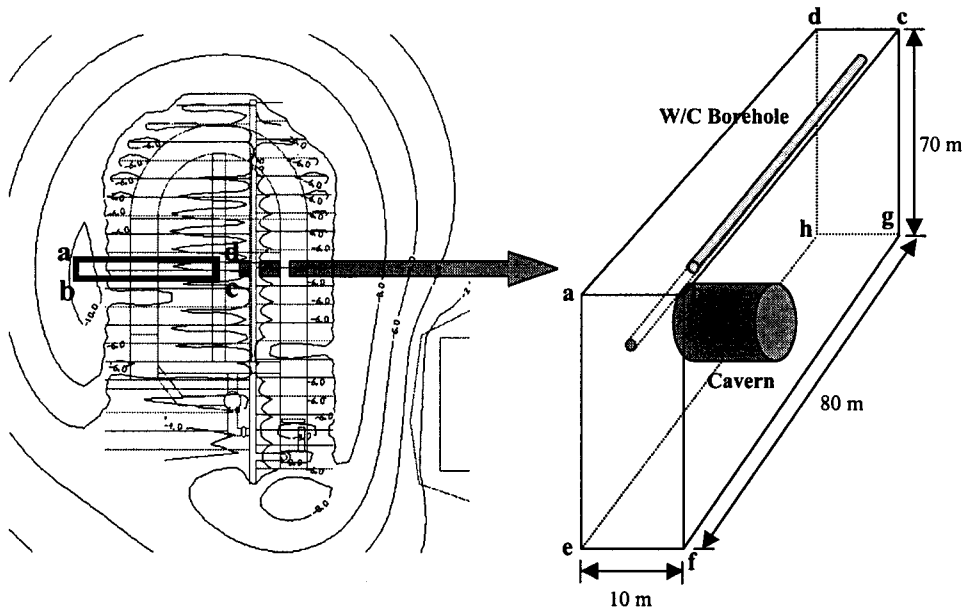


Fig. 5. The site and grid system for local modeling

해석영역은 6개의 외부경계면으로 구성되어 있다. 그중 Fig. 5의 $\square bcfg$ 와 $\square adhe$ 는 같은 수두를 갖는 상호인접한 수벽공으로 부터 같은 거리에 위치하므로 비유동경계가 형성된다. 나머지 4면의 경계는 일정유량경계로서 광역적 모델링 결과로 산정되었다. 외부경계조건을 정리하면 Table 4와 같다. 내부경계조건은 광역적 모델링에서와 같이 수벽공은 수두 E.L. 0m로, Cavern과 Connection tunnel은 그 심도에 따라 E.L. -58.5 ~ -34.5 m로 설정하였다.

지반의 수리적 상수는 지반조사결과와 보정작업결과에 따라 투수계수는 $1.6 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$,

수직투수계수에 대한 수평투수계수의 비는 1.0으로 설정하였다.

Table 4. Outer boundary conditions of local modeling

Side	Boundary Condition
□bcgf	No Flow
□adhe	No Flow
□abcd	Constant Flux, 0.0143 m ³ /day
□efgh	Constant Flux, 0.0559 m ³ /day
□abfe	Constant Flux, 0.0296 m ³ /day
□cdhg	Constant Flux, 0.0083 m ³ /day

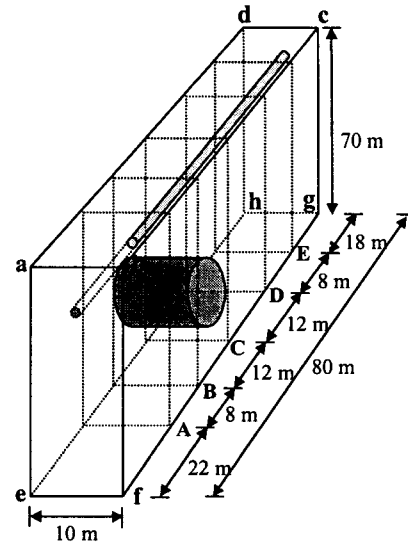


Fig. 6. The location of contour sections

(2) 결과 및 분석

3차원으로 수행된 국지적 모델링 결과, 수두분포를 분석하기 위해 대표단면 5개소를 Fig. 6과 같이 선정하였다. Cavern 중앙부의 횡단면인 단면 C를 중심으로 나머지 4단면을 해석영역의 위치별 특성을 대표하도록 Fig. 6과 같이 배치하였다. 모델링 결과에 따른 수두 분포를 각각 단면에서 도시하면 Fig. 7과 같다.

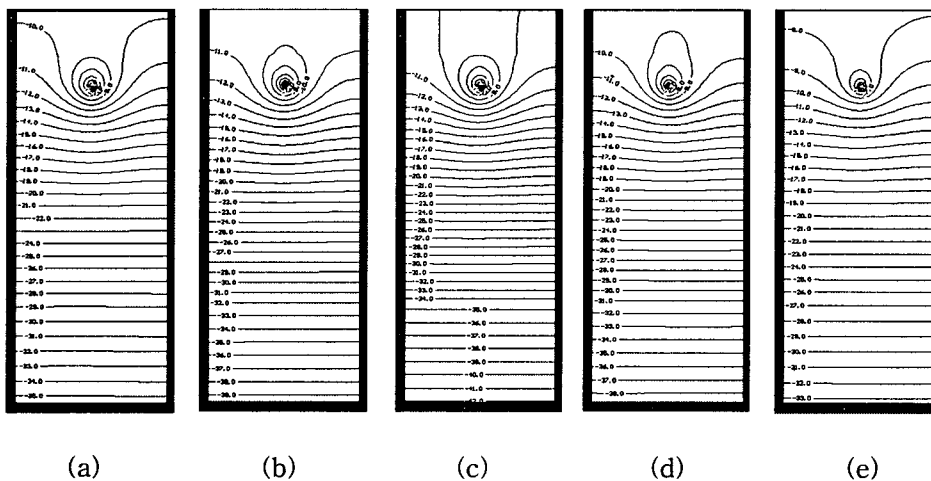


Fig. 7. The hydraulic head contours (a) at section A, (b) at section B, (c) at section C, (d) at section D, (e) at section E

수벽공 심도에서 최소수두와 이때의 수직동수구배는 Table 6과 같이 정리된다. 전술한

바와 같이 기밀성 유지 조건은 수직동수구배가 1.0 이상인 경우이므로 5단면 모두 기밀성조건을 만족시키는 것을 알수 있다.

Table 6. The hydraulic gradients in typical 5 sections

Section	Head at W/C borehole	I_v^* between W/C borehole and cavern
A	-11.8	1.51
B	-12.2	1.49
C	-11.5	1.53
D	-11.5	1.53
E	-9.8	1.65

* I_v : Vertical hydraulic gradient

4. 결론

LPG지하저장시설의 기밀성을 정량적으로 분석하기 위해 광역적 모델링과 국지적 모델링을 조합하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 불확실한 수리상수에 대한 보정작업을 수행하여 투수계수 및 지하수 함양률을 결정하였다. 정상상태에서 관측과 해석에 의한 수두차는 8개 관측공 평균 0.21m, 최대 0.5m로 비교적 근소한 차이를 보였다.
- 광역적 모델링을 통해 Cavern 북서쪽이 외부경계조건 및 Cavern 형상에 의해 기밀성에 불리한 위치임을 확인하였다. 또한 국지적 모델링 해석영역으로의 지하수 유출입량을 계산하여 국지적 모델링 경계조건의 근거로 활용하였다.
- 기밀성 조건에 가장 취약한 구역의 국지적 모델링 결과, 최고운영압 조건에서 Cavern과 수벽공 사이의 수직동수구배가 1.5 이상으로서 기밀성 조건을 만족시키는 것을 확인하였다.

참고문헌

- 1 SA LPG(South Asia LPG Company Limited), 2001a, "VISAKHAPATNAM LPG Underground Storage Project-Technical General"
- 2 SA LPG(South Asia LPG Company Limited), 2001b, "VISAKHAPATNAM LPG Underground Storage Project-Cavern Construction"
- 3 Söder, C. O., 1994, "Water Curtains in Gas Storage", PH. D. Dissertation, Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, Sweden
- 4 Waterloo Hydrogeologic, 2000, "Visual MODFLOW ver.2.8.2: Ground Water Flow and Contaminant Transport Mode", Waterloo Hydrogeologic Inc.
- 5 Åberg, B., 1977, "Prevention of Gas Leakage from Unlined Reservoirs in Rock", The First International Symposium in Storage in Excavated Rock Caverns, ROCKSTORE 77, Stockholm, Sweden, September 5-8