

지하 유류비축기지 수벽공의 효율에 관한 현장계측 및 수치 해석 연구

이경주¹⁾ · 이희근²⁾

Field Measurements and Numerical Analysis on the Efficiency of Water Curtain Boreholes in Underground Oil Storages

Kyung-Ju Lee¹⁾ and Hi-Keun Lee²⁾

ABSTRACT This study was performed to suggest suitable design conditions of water curtain system through analysis on pressure down in boreholes by hydraulic tests carried out in construction fields for underground oil storages. The influence by hydraulic conductivities of rock mass around boreholes on pressure down in boreholes was analysed. The relationship between array of boreholes and their pressure down was also analysed. Groundwater flow analysis on crude oil and LPG storages was carried out to evaluate results of field tests and to investigate distribution of hydraulic gradient in rock mass around cavern using finite difference method. As the results, hydraulic tests showed that pressure down in boreholes was inverse proportional to the hydraulic conductivity of surrounding rock mass. The rate of pressure down of boreholes was not influenced by water curtain system more than 20m over cavern and was proportional to installation interval of boreholes. The hydraulic gradient in rock mass around cavern was proportional to distance and interval of boreholes and its value was not satisfactory to oil tightness condition in case of no water curtain system.

1. 서 론

무복공 지하공동에 유류를 저장, 보관하는 방법이 1940년대 스웨덴에서 처음으로 시도된 이래 현재까지 세계 여러 나라에서 원유나 석유제품, LPG를 위한 지하비축기지를 성공적으로 건설, 운영하여 오고 있다. 우리나라는 지난 70년대 두차례에 걸친 석유파동을 경험한 이후 지속적인 경제성장을 위하여 에너지 자원의 수급, 안정이 무엇보다 중요함을 인식하고 국내·외 유전개발 사업과 병행하여 유류 비축사업의 일환으로 비축기지를 건설, 운영하여 오고 있다. 정부는 국제 에너지 기구의 비축 권고 물량인 90일분을 비축 목표로 하여 정부와 민간 기업 주도하에 각각 60일, 30일분의 비축계획을 수립하고 비축사업을 추진하여 왔으나 우리나라 에너지 장기 수급 전망에 의하면 2010년까지는 유류 소비량이 꾸준히 증가할 추세여서 정부의 유류비축 목표물량 90일분 확보를 위하여는 비축기지의 추가 건설이 요구되고 있는 실정이다.

유류 지하비축기지 건설시 무복공 결정질 암반내에

유류를 저장하는 기본 원리는 공동 주변 암반의 공극수압이 공동내 가스압을 초과하여 지하수가 암반으로부터 공동 내부로 흐르도록 하는 것이다. 유류의 지하공동 저장시 가스누출 방지를 위한 이론적 근거는 Aberg,¹⁾ Goodal,²⁾ Komada³⁾ 등의 공동주변 암반의 적절한 동수구배 확보론과 프랑스 Geostock 사의 기지 운영조건, 공동의 기하학적 배치에 따른 기준 이상의 지하수위 확보론이 있으나 공동 주변 암반의 공극수압이 공동 내압보다 커야 한다는 기본 원리에서 보면 크게 다르지 않다. 결정질 암반내에 공동을 형성하여 유류를 저장할 경우 암반내에는 발파의 영향에 의한 새로운 균열이나 기존에 존재하던 절리와 열극 등 불연속면이 있어 이들이 유체 통로로 작용하게 되어 가스 누출의 원인이 되므로 이를 차단시켜 주어야 하는데 이에 크게 암반 자체의 투수계수를 개선하는 방법과 지하수를 이용한 수리적 차단벽을 형성하여 주는 방법이 있다. 지하비축기지에서도 공동의 수리공학적 안정성 확보

1) 정회원, 한국석유개발공사 석유비축처 과장

2) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

를 위하여 적용하고 있는 수벽공 시스템은 지하수위 유지는 물론 공동 주변 암반의 공극수압을 높여주는 공법으로서 많이 이용되고 있다. 그러나 설치비용의 과다 및 운영비용의 증가로 수벽공의 경제적인 설계방법은 비축기지 건설 및 운영에 중요한 의미를 갖는다. 가장 경제적인 수벽공 설계는 최소한의 수벽공 설치와 물공급으로 운영기간중 공동의 수리공학적 안정성을 확보하는 것이다. 이를 위하여는 지질조건, 암반의 공학적 특성, 투수계수, 자연지하수위, 수벽공의 배치 등 여러 조건을 검토함으로써 최적의 수벽공 설계가 가능해야 한다.

본 연구에서는 국내에서 건설중인 지하비축기지를 대상으로 수벽공 현장 수리시험을 통하여 자료를 분석하고 그 결과를 유한차분법에 의한 수치해석 방법으로 검증하여 최적의 수벽공 설계조건을 제시하고자 하였다.

2. 지질 및 암반의 공학적 성질

연구를 수행한 대상 기지들은 제각기 다른 4개 지역에 건설되고 있으므로 지질조건 또한 제각기 다르다.

A 지역은 중생대 쥐라기에 관입된 대보화강암 지역이며 B 지역은 선캄브리아기의 경기 변성암 복합체에 속하는 편마암류가 주된 구성 암반이다. C 지역은 중생대 백악기말 화산암류인 응회암과 이를 관입한 화강암류

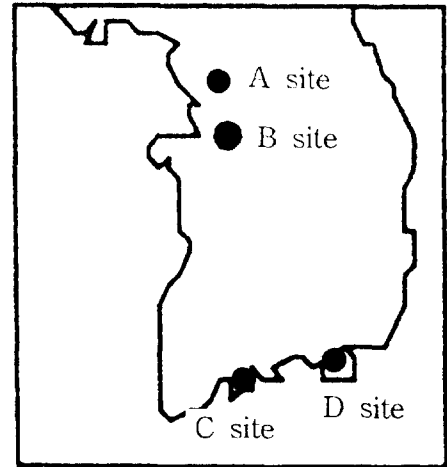


Fig. 1. Location map of underground oil storages

Table 1. Engineering characteristics of in situ rocks in target sites

Content	R.Q.D(%)	Rating	R.M.R	Rating	Q-system	Rating
A site	93	Excellent	61	Good	6	Good
B site	90	Excellent	63	Good	7	Good
C-1 site	86	Good	68	Good	16	Good
C-2 site	96	Excellent	78	Good	44	Good
D site	94	Excellent	82	Excellent	11	Good

Table 2. Physical properties of rock specimens in target sites

Content	Specific gravity(g/cm ³)	Porosity(%)	Seismic velocity	
			P-wave(m/s)	S-wave(m/s)
A site	2.763	0.79	3,900	2,400
B site	2.678	1.10	4,300	2,100
C-1 site	2.584	0.71	4,600	2,500
C-2 site	2.713	0.11	5,800	2,600
D site	2.747	0.65	5,700	3,200

Table 3. Mechanical properties of rock specimens in target sites

Content	Compressive strength (kg/cm ²)	Tensile strength (kg/cm ²)	Shear strength (kg/cm ²)	Cohesion (kg/cm ²)	Internal friction angle	Young's modulus (kg/cm ²)	Poisson's ratio
A site	1,501	88	196	204	54°	5.20 × 10 ⁵	0.22
B site	1,490	120	210	196	42°	4.65 × 10 ⁵	0.24
C-1 site	2,060	110	238	195	47°	4.69 × 10 ⁵	0.38
C-2 site	3,040	200	390	371	57°	8.39 × 10 ⁵	0.41
D site	1,746	105	241	244	58°	7.28 × 10 ⁵	0.26

로 구성되어 있고 D 지역은 중생대 백악기에 관입된 화강섬록암이 주된 구성 암반이다. 각 기지의 위치는 Fig. 1과 같으며 지역별 구성 암반의 대표적인 공학적 특성과 물리, 역학적 성질은 Table 1~Table 3과 같다.

3. 현장측정방법

수벽공 주변 암반의 투수계수 측정은 수벽공 설치 직후 주입강하시험법을 이용하여 수행하였다. 시험방법은 수벽공내 공기를 제거하고 안정수압을 유지하여 초기값을 측정후 15분간 물을 주입하면서 주입물량과 주입압력을 측정한다. 이때 주입압력은 최대 10 bar 까지로 한다. 물 주입이 끝난후에는 45분간 또는 주입시간의 약 3배동안 압력강하를 기록한다. 측정된 압력강하 자료로부터 투수계수 산정은 Thies의 비평형방정식⁴⁾으로부터 유도된 Horner plot method를 이용하여 아래의 식으로 구한다.

$$K = \frac{2.303 Q}{4\pi Lm} \quad (1)$$

상기식 (1)에서 K는 투수계수이고 Q는 주입물량이며 L은 시험구간, 즉 수벽공의 길이이다. m은 반대수 방안에 plot한 시간경과에 따른 압력강하 직선의 기울기이다.

수벽공 설치 및 저유공동의 굴착이 완료된 후 암반의 수리적 특성과 수벽공의 효율 측정을 위하여 수리시험을 수행하며 본 연구에서는 수압강하시험(Draw down test)과 효율성시험(Pulse test)을 수행하였다. 수압강하시험은 전체 수벽공의 물주입을 중단함으로써 수벽공의 내부압력이 떨어지는 경향을 분석하여 암반의 수리적 특성을 규명하는 시험이며 효율성 시험은 격공별로 수벽공에 물을 주입하고 이웃하는 수벽공의 내부압력 변화를 측정하여 수벽공간 수리적 간섭효과를 규명하는 시험이다.

수압강하시험 및 효율성시험의 절차는 전체 수벽공에 물을 주입하여 일정 압력을 유지시킨 후 주입을 중단하고 시간경과에 따른 수벽공의 수압강하를 측정한다. 측정 종료후 수벽공에 물을 공급하여 시험 이전의 압력을 회복시킨 후 격공별로 물주입수벽공과 관측수벽공으로 나누어 관측수벽공의 물주입을 중단하고 시간경과에 따른 관측수벽공의 수압강하를 측정한다. 측정결과로부터 수벽공의 수두 분포 특성과 수벽공간의

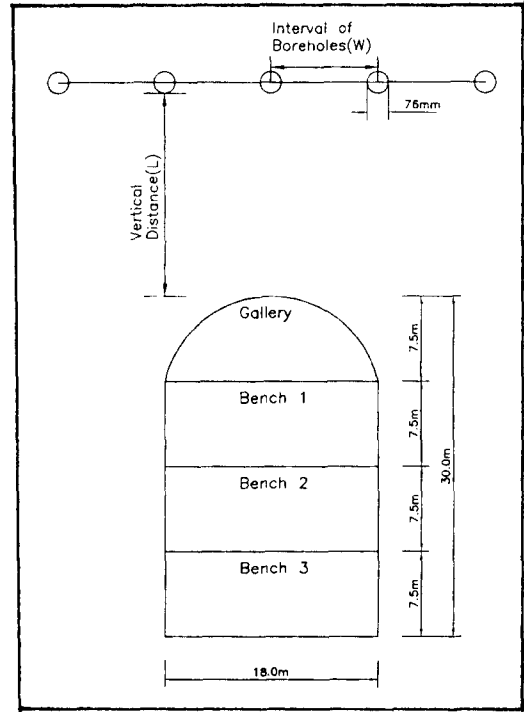


Fig. 2. Section of boreholes and cavern

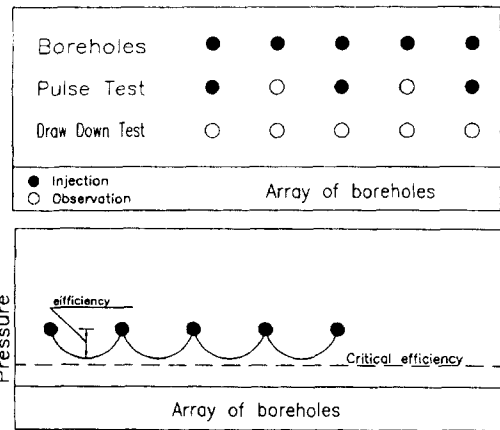


Fig. 3. Array of boreholes in pulse test and draw down test

수리적 간섭 영향을 분석한다.

Fig. 2는 수리시험을 수행한 지하 유류비축기지의 수벽공과 저유공동의 설치모식도이며 Fig. 3은 수압강하시험과 효율성시험시 물주입수벽공과 관측수벽공의 배열을 나타낸 모식도이다. Table 4는 지역별 기지의 수벽공과 저유공동의 설계제원을 나타낸 것이다.

Table 4. Design conditions of cavern and water curtain boreholes in storages

Content	A storage	B storage	C storage		D storage
			C-1	C-2	
Oil type	Diesel	LPG	Crude oil	Crude oil	Crude oil
Section of cavern	18×30 m	18×27 m	18×30 m	18×30 m	18×30 m
w/c boreholes interval	12 m	10 m	8 m, 16 m	10.5 m, 21 m	7 m, 14 m
Injection pressure of w/c boreholes	2 bar	10 bar	2 bar	2 bar	2 bar
w/c boreholes depth	EL+5 m	EL-90 m	EL 0 m	EL 0 m	EL-10 m
w/c boreholes length	100~200 m	100~110 m	90~110 m	90~110 m	110 m
Cavern depth	EL-10 m~ EL-40 m	EL-115 m~ EL-142 m	EL-30 m~ EL-60 m	EL-30 m~ EL-60 m	EL-30 m~ EL-60 m
w/c boreholes distance from cavern	15 m	25 m	30 m	30 m	20 m

4. 측정결과 및 고찰

4.1 암반 투수계수에 따른 수벽공 수압강하 분석

Fig. 4는 A 및 C-2, D 기지의 수압강하시험 결과를 암반의 투수계수별로 plot한 그래프이다. 수벽공의 수압강하는 투수계수 감소에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며 0~1.3 kg/cm² 사이의 값을 나타내었다. 투수계수에 따른 수벽공의 수압강하의 산점도 회귀분석결과 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있었다.

$$Pd = -0.413 \log K - 2.545, \quad K < 5.0 \times 10^{-7} \text{ m/s} \quad (2)$$

상기식 (2)에서 Pd(Pressure down)는 수벽공의 수압강하 크기이며 K는 암반의 투수계수이다. Fig. 5는 A 및 C-2, D 기지의 효율성시험 결과를 암반의 투수계수별로 plot한 그래프이다. 수벽공의 수압강하는 투수계수가 감소함에 따라 증가하였으며 그 크기는 0~1.1 kg/

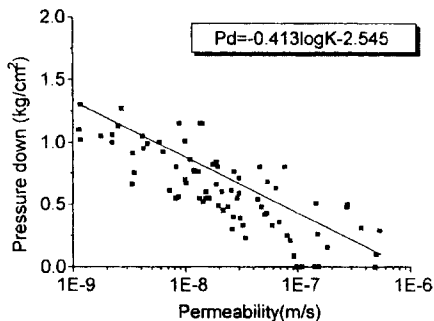


Fig. 4. Pressure down of boreholes by draw down test

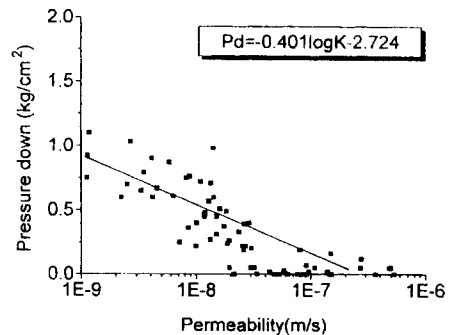


Fig. 5. Pressure down of boreholes by pulse test

cm² 사이의 값을 나타내었다. 투수계수에 따른 수벽공의 수압강하의 산점도 회귀분석결과 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있었다.

$$Pd = -0.401 \log K - 2.724, \quad K < 2.0 \times 10^{-7} \text{ m/s} \quad (3)$$

상기 시험결과에서와 같이 수벽공의 수압강하는 투수계수가 클수록 작게 나타났는데 이는 저유공동 굴착 이후 수벽공내 지하수의 흐름이 저유공동으로 전환됨에 따라 투수계수가 큰 수벽공의 경우에는 수벽공 상부 주변 암반으로부터 수벽공으로의 지하수 유입이 상대적으로 원활하여 저유공동으로의 지하수 유동율과 거의 평형을 이루는데 기인하며 투수계수가 작은 경우에는 수벽공으로의 지하수 유입이 저유공동 발파의 영향으로 균열면이 생성 또는 확장된 저유공동 주변 암반으로 흐르는 유동율에 미치지 못함으로 수벽공의 수압강하가 상대적으로 크게 나타나는 것으로 판단된다.

4.2 수벽공과 저유공동 상부 거리에 따른 수벽공 수압강하 분석

Fig. 6은 수벽공과 저유공동 상부 거리에 따른 수벽공 수압강하율 분석을 위하여 기지별로 수벽공 안정수압이 2 bar (B 기지는 10 bar) 내외이며 투수계수가 1.0×10^{-7} m/s, 1.0×10^{-8} m/s, 1.0×10^{-9} m/s에 근접한 수벽공을 선정하여 분석을 수행한 결과이다. Fig. 6에서 수벽공과 저유공동 상부 거리가 25 m, 30 m인 B 및 C-2 기지의 수압강하율은 거리에 관계없이 거의 비슷하였으나 20 m인 D 기지의 경우는 다소 증가하였으며 15 m인 A 기지에서는 급격한 증가를 나타내었다. 이는 A 기지의 경우 수벽공이 타 기지에 비하여 저유공동과 상대적으로 근접하여 지하수 유동이 용이하여 나타난 결과로 판단된다. 수벽공과 저유공동 상부 거리가 20 m~30 m인 경우 수벽공의 수압강하율은 설계에 의한 거리의 차이보다는 지역 암반의 수리적 특성에 좌우된다고 할 수 있다.

4.3 수벽공 설치 간격에 따른 수벽공 수압강하 분석

수벽공의 설치 간격은 저유공동의 기밀조건에 영향을 줄 뿐 아니라 시공과 운영에 따른 경제성에도 영향을 미친다. 수벽공 간격이 멀어지면 임계효율성 값이 낮아질 것이며 반면에 간격이 좁아지면 수벽공 설치비용과 운영비용 증가로 효율적이지 못하게 된다. 본 연구에서는 각 기지별로 수벽공 설치 간격이 서로 상이함을 이용하여 효율성시험에 따른 수벽공의 수압강하율을 투수계수별로 분석하였다. 대상기지는 B, C-2, D 등 3개 기지이고 이때 수벽공의 설치 간격은 각각 10 m, 14 m, 21 m 이었다. 분석결과 수압강하율은 Fig. 7과

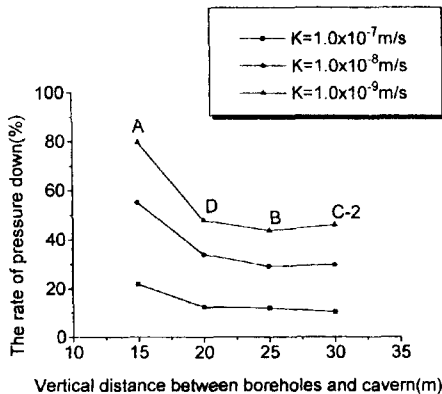


Fig. 6. The rate of pressure down in boreholes according to distance between boreholes and cavern

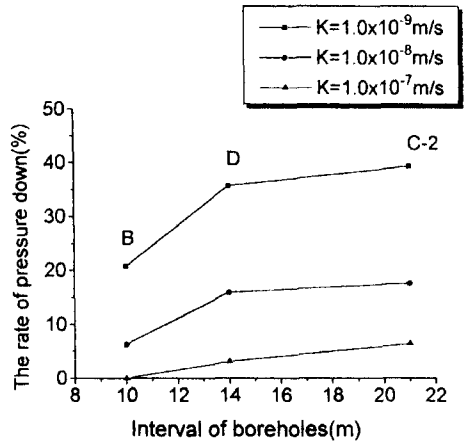


Fig. 7. The rate of pressure down in boreholes according to installation interval of boreholes

같이 수벽공 설치 간격이 작아짐에 따라 감소하였으며 특히 간격이 14 m 이하로 작아짐에 따라 수압강하율은 크게 감소하는 것으로 나타났다.

5. 지하수 유동해석

5.1 해석조건 및 입력자료

지하 유류비축기지 건설 현장에서 수행한 수벽공 수리시험을 수치해석에 의한 Simulation을 통하여 현장 측정 결과의 타당성을 검토하였으며 이를 근거로 수벽공 설계조건을 검토하였다. 수치해석 프로그램의 수학적 모델은 다공질 매질을 통하여 일정한 밀도를 유지하며 이동하는 3차원적 지하수 유동에 대한 다음과 같은 편미분 방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

상기식 (4)에서 K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 은 x, y, z 방향의 투수계수이며 h는 수두, S_s 는 저류계수, t는 시간이다. 상기식 (4)는 비균질 이방성 매질에서의 비평형 조건하 지하수 유동을 나타내는 식으로 대수층의 경계조건 및 초기조건과 함께 지하수 유동의 수학적 표현으로 식(4)의 해는 $h(x, y, z, t)$ 로 표현되며 본 연구에서는 유한차분법을 이용하여 해석을 수행하였다.

현장 시험결과를 검증하기 위하여 D 지하비축기지를 대상으로 6열의 자유공동 중 Symmertic으로 가정하여 우측 3열에 대하여 해석을 실시하였다. 해석 대상 지역의 상부경계는 지하수위 측정 결과 EL+40 m를 유지하고 있으므로 이를 Constant cell로 지정하여 경계로 하였으며 자유공동 단면의 크기는 갠리리와 벤치-1 만이 굴착된 시점에서 수리시험이 수행되었음을 고려하여 높이 15 m, 폭 18 m로 하였고 자유공동의 심도는 EL-30~EL-45 m로 하였다. 하부경계는 주요 해석 대상 구간이 수벽공 설치 심도인 EL-10 m 내외의 지역임을 감안하여 EL-60 m로 설정하였고 자유공동 우측은 경계의 영향을 최소화 하기 위하여 외곽 70 m 까지 해석 구간으로 설정하였다. 수벽공 설치 간격은 14 m이나 현장 효율성 시험 결과를 검증할 목적으로 28 m로 해석하였다. 암반의 투수계수는 수벽공 하부 구간의 경우 자유공동 굴착을 위한 발파의 영향으로 교란되었을 것을 감안하여 시공중 누수량을 근거로 역산하여 구한 3.0×10^{-8} m/s를 적용하였고 수벽공 상부 구간의 경우는 현장 수리시험시 암반의 투수계수에 따른 수벽공의 수압강하 경향을 검증하기 위하여 1.0×10^{-7} m/s, 1.0×10^{-8} m/s, 1.0×10^{-9} m/s의 세 경우로 나누어 등방성으로 해석을 수행하였다.

한편 현장에서 수행한 수리시험은 약 3~4일간에 걸쳐 측정된 자료이므로 이와 동일한 시간대에서의 해석 결과를 얻기 위하여 Transient 상태로 해석을 실시 하였다. 수치해석 결과 수벽공 주변 암반의 투수계수가 감소함에 따라 수벽공의 수압강하는 증가함으로써 현장 수리시험 결과와 동일한 경향을 나타내었으며 아래 Table 5에서와 같이 상호 값들은 10% 미만의 차이를 나타내었다.

5.2 수압강하 해석

지하 유류비축기지 현장 수리시험은 4일간에 걸쳐 수행된 결과이므로 실제 시공 기간에 비하여 보면 대단

Table 5. Comparison of pressure down in boreholes by numerical analysis with field measurements in pulse test

Permeability (m/s)	Pressure down(kg/cm ²)	
	field measurements	numerical analysis
1.0×10^{-7}	0.07	0.075
1.0×10^{-8}	0.36	0.393
1.0×10^{-9}	0.75	0.786

히 짧은 시간이며 따라서 장기간에 따른 수벽공의 수압강하 값을 제시하여 주지 못한다. 또한 수벽공 사이 암반의 수압분포에 대하여는 측정할 방법이 없다.

본 절에서는 수벽공과 자유공동 상부 거리(15 m, 20 m, 25 m, 30 m) 및 수벽공 설치 간격(10 m, 14 m, 21 m)에 대하여 각 12개 경우의 수벽공 설계조건과 이에 대한 효율성시험 및 수압강하시험 등 총 28개 경우에 대하여 정상류 상태로 수치해석을 수행하여 지하비축기지 시공중 수벽공 주변 암반에서의 장기간에 걸친 최종 수압강하 값을 해석하였다.

Fig. 8은 수벽공 간격이 각각 10, 14, 21 m 일때 수벽공과 자유공동 거리에 따른 수벽공 사이 지점에서의 암반의 수압강하를 나타낸 것이다. 암반의 수압강하는 수벽공과 자유공동 거리가 감소함에 따라 증가하였으며 현장시험 결과와 같이 거리가 15 m인 경우 수압강하가 가장 크게 나타났다. 그러나 현장시험에서 거리 20 m 이상인 경우에는 거리가 암반의 수압강하에 영향을 주지 않았으나 수치해석 결과는 영향을 줌으로써 다소의 차이를 나타내었는데 이는 수치해석시 균질, 등방성인 연속체로서의 가정과 실제 암반의 비균질, 이방적 특성과의 차이에 기인하는 것으로 수벽공과 자유공동 상부 거리에 따른 영향을 전혀 배제할 수 없었음으로 사료된다. 암반의 수압강하는 수벽공 간격에 따라 0.395~1.03 kg/cm²를 나타내었다.

Fig. 9는 수벽공 간격 10, 14, 21 m에 대한 수벽공과 자유공동 상부 거리에 따른 효율성시험 및 수압강하시험을 해석한 결과이다. 해석결과 암반의 수압강하는 수벽공과 자유공동 거리가 감소함에 따라 증가하였으며

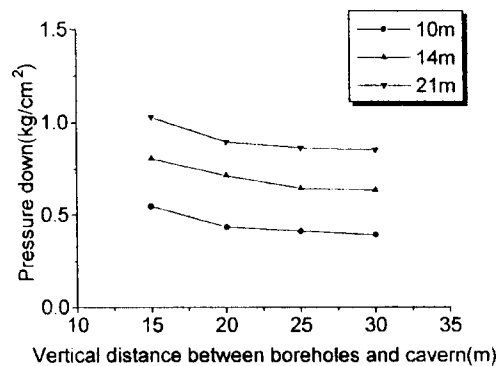


Fig. 8. Pressure down in rock mass according to distance between cavern and boreholes in numerical analysis

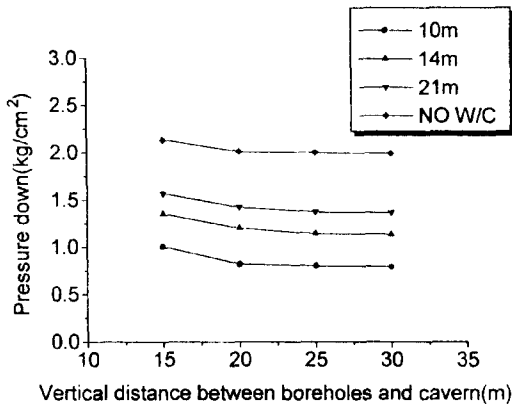


Fig. 9. Pressure down in rock mass according to distance between cavern and boreholes in pulse test and draw down test in numerical analysis

효율성시험 결과 그 크기는 0.795~1.567 kg/cm² 이었고 수압강하시험 결과 크기는 1.989~2.133 kg/cm² 이었다. 정상류 상태로 해석하여 얻은 암반의 최종 수압강하는 현장에서 4일간 수행하여 얻은 효율성시험 결과의 3.0~3.3배의 크기이었다.

시간경과에 따른 암반의 수압강하는 4일 후 총 수압강하의 30% 이었으며 60일 경과후에는 85%, 3년후에는 90% 이었다.

5.3 동수구배 해석

원유공동의 운영 내압을 2 bar로 가정하여 수벽공 거리와 간격에 따른 저유공동 주변 암반의 동수구배를 검토하였다. 해석조건은 수벽공과 저유공동 상부 거리 각 15 m, 20 m, 25 m, 30 m와 수벽공 설치 간격 5 m, 10 m, 14 m, 21 m, 30 m, 40 m, no w/c의 총 28개 경

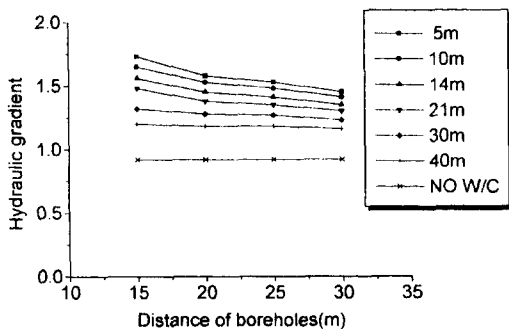


Fig. 10. Distribution of hydraulic gradient in rock mass over cavern

우를 검토하였다.

Fig. 10은 해석결과로서 동수구배는 수벽공 거리가 감소할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 수벽공이 저유공동에 근접할수록 저유공동으로의 지하수 유동이 크게 일어나므로 암반 내에서의 동수구배는 증가하나 반면 수벽공에서의 수압은 감소하는 것을 의미한다. 저유공동 상부에서의 수직동수구배는 수벽공 설계조건에 따라 1.23~1.73 이었으며 수벽공 미설치시는 0.92 이었다.

5.4 LPG 저유공동 주변 암반의 수압강하 및 동수구배 해석

국내에 건설중인 지하 LPG 비축기지의 설계조건을 고려하여 수치해석을 수행하여 저유공동 주변 암반의 수압강하 및 동수구배 분포를 검토하였다. 수벽공과 저유공동 거리는 25 m, 수벽공 설치 간격은 10 m, 20 m, no water curtain으로 하였으며 수벽공 심도는 EL-90 m, 주입수압은 10 bar로 하였으며 저유공동은 시공 및 운영상태(7.9 bar)의 두 경우로 나누어 해석을 실시하였다. 투수계수는 현장조사 값 2.0×10^{-9} m/s를 적용하였고 등방성 정상류 상태를 가정하였다. 해석결과 암반의 수압강하는 Table 6에서와 같이 수벽공 간격이 10 m일 경우 시공 및 운영시 각각 1.62, 0.8 kg/cm² 이었으며 20 m일 경우는 3.32, 1.7 kg/cm² 이었다. 수벽공 미설치시는 시공중 9.98 kg/cm² 이었고 운영중에는 4.66 kg/cm²을 나타내었다. Table 7은 저유공동 주변 동수구배 분포 해석 결과이다. 시공상태인 대기압하에서 수벽공 간격 10 m일 경우 공동상부 동수구배는 4.95이

Table 6. Pressure down in rock mass over LPG cavern (kg/cm²)

Cavern pressure	Boreholes interval		
	10 m	20 m	no w/c
1 bar(construction)	1.62	3.32	9.98
7.9 bar(operation)	0.8	1.7	4.66

Table 7. Distribution of hydraulic gradient in rock mass over LPG cavern

Cavern pressure	Boreholes interval		
	10 m	20 m	no w/c
1 bar(construction)	4.95	4.33	1.22
7.9 bar(operation)	2.25	1.97	0.5

었으며 간격 20 m 및 수벽공 미설치시는 각각 4.33, 1.22 이었다. 반면 운영중 동수구배 분포는 수벽공 간격이 10, 20 m 일 때 각각 2.25, 1.97이었으나 수벽공 미설치시는 0.5를 나타내었다. 이로부터 동 LPG 기지의 수벽공 설치는 반드시 필요한 것으로 검토되었다.

6. 결 론

지하 유류비축기지 수벽공 수리시험 결과를 분석하여 암반의 투수계수가 수벽공 수압강하에 미치는 영향을 조사하였으며 수벽공과 저유공동 상부 거리 및 수벽공 설치 간격이 수벽공 수압강하에 미치는 영향을 분석하고 이를 유한차분법으로 검증하였다. 또한 수벽공과 저유공동 상부 거리 및 수벽공 설치 간격에 따른 저유공동 주변 암반의 동수구배 분포에 관한 해석을 실시하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 수압강하시험 및 효율성시험 결과, 수벽공 수압강하는 암반의 투수계수가 낮아짐에 따라 증가 하였으며 그 크기는 원유기지와 LPG 기지에서 각각 0~2.0 kg/cm², 0~1.1 kg/cm² 및 1.3~5.2 kg/cm², 0~2.5 kg/cm² 이었다.

2) 수압강하시험을 통하여 수벽공과 저유공동 상부 거리가 수벽공 수압강하에 미치는 영향을 분석한 결과 거리가 15 m일 경우 암반의 투수계수에 따라 수벽공 수압강하율은 20%~80%를 나타내었으며 거리가 20~30 m일 경우에는 거리에 관계없이 10%~48%의 수압강하율을 나타내었다.

3) 효율성시험을 통하여 수벽공 설치 간격이 수벽공 수압강하에 미치는 영향을 분석한 결과 간격이 10 m, 14 m, 21 m 일 때 암반의 투수계수에 따라 수벽공의 수압강하율은 각각 0~21%, 3~36%, 6~40%를 나타내었다.

4) 수벽공 수압강하시험 및 효율성시험에 대한 수치해석 결과 수벽공 수압강하는 설계조건에 따라 각각 1.989~2.133 kg/cm² (4개 경우) 및 0.795~1.567 kg/cm² (12개 경우) 이었고 수벽공 정상 운영에 대한 수치해석 결과 수벽공 사이 암반에서의 수압강하는 설계조건에 따라 0.395~1.03 kg/cm² (12개 경우) 이었다.

한편 현장 효율성시험시 측정된 약 4일간의 수벽공 수압강하는 수치해석하여 얻은 최종 수압강하의 30%이었으며 60일 후에는 85%, 3년후에는 90% 수준이었다.

5) 지하 유류비축기지 운영조건에 따른 수치해석 결과 저유공동 상부에서의 동수구배는 수벽공 거리가 감소할수록 증가하는 경향을 보여주었으며 검토된 수벽공 설계조건에 따라 동수구배 범위는 1.23~1.73을 나타내었으며 수벽공 미설치시는 0.92를 나타내었다.

6) 지하 LPG 비축기지 설계조건에 따른 수치해석 결과, 운영압력 7.9 bar에서 수벽공 간격이 10 m, 20 m 일 때 수벽공의 수압강하는 각각 0.8, 1.7 kg/cm² 이었으며 수벽공 미설치시는 4.66 kg/cm² 이었다. 한편 동수구배는 수벽공 간격이 10 m 일 때 공동 상부에서 2.25 이었으나 수벽공 미설치시는 0.5를 나타내어 동 지하 LPG 비축기지의 기밀유지를 위하여는 수벽공 설치 반드시 필요한 것으로 검토되었다.

참고문헌

1. B. Aberg, 1977, Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock, The first Int. symposium on storage in excavated rock caverns, Rockstore 77, vol. 2, pp. 399~413.
2. D. C. Goodal, B. Aberg & T. L. Brekke, 1988, Fundamentals of gas containment in unlined rock caverns, Rock Mech. and Rock Eng., vol. 21, pp. 235~258.
3. H. Komada & K. Nakagawa, 1980, Study on Seepage flow through rock mass surrounding caverns for petroleum storage, Proc. of the Int. Sympo. on Subsurface Space, Rockstore 80, vol. 1, pp. 303~310.
4. 한정상, 1982, 지하수학 개론, 박영사, pp. 78~100.
5. 장근무, 1994, 지하 원유 저장공동 주위 암반의 변형 거동 특성에 따른 지하수 유동해석, 서울대학교 공학 박사학위논문, pp. 104~110.