

지하 유류비축기지 Water Curtain 차폐시설에 대한 이론적·수치해석적 연구

김세훈, 정우철, 김택곤, 이진무 (SK건설주식회사 GEOTASK팀)

1. 서 론

지하공동에 저장된 유류 저장 원리는 수리지질적인 조건에 의해 보장된다. 공동주변의 지하수압이 <그림 1>과 같이 가압된 저장공동보다 높게 유지됨으로써 지하수가 항상 공동내로 유동하는 상태로 만드는 것이다.

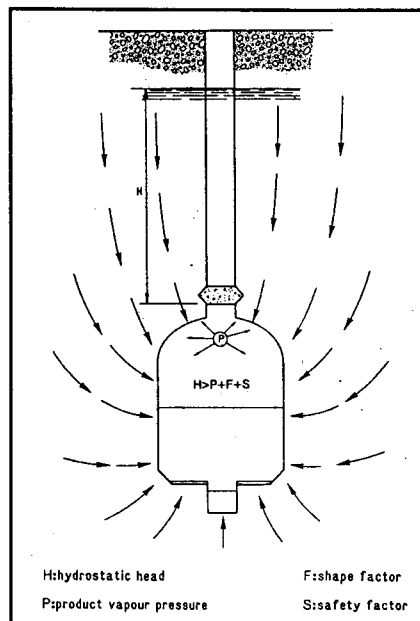


그림 1. 저장공동 기밀성 유지 조건(Geostock, 1984)

저장공동의 차폐(기밀성)와 관련된 조건식은 <표 1>에 표시된 Aberg 와 Geostock사가 제안한 식이 주로 적용되고 있다. 이 중, Geostock사가 제안한 차폐 설계 기법의 경우, 국내에 도입되어 적용되고 있지만, 주요 설계 인자인 형상계수(Shape Factor)의 적용등 분석과정이 제시되고 있지 않아, 국내 설계진에 의해 적용된 사례는 없는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 Geostock사가 제안한 기밀성 조건식에 대해 분석하였으며, 대상 시설물을 해저 환경하의 LPG(Propane 및 Butane) 지하저장기지에 적용하여 수행하였다. 분석 결과, 일정 지반조건 및 수리지질 조건하에서는 저장공동 운영압에 따라 형상계수 값이 변화하며, 저장공동 운영압 및 형상계수의 상관관계를 이용하여 공동의 최대 허용 작용압을 구할 수 있음을 확인하였다. 또한 저장물의 최대운영압과의 비교를 통하여 기밀성 여부를 평가하였다.

2. 기밀성 조건

전술한 바와 같이 기밀성을 확보하기 위한 연구 내용은 아래 <표 1>과 같이 Aberg 및 Geostock사가 제안한 식이 주로 이용되고 있으며, 본 논문에서는 Geostock사 제안한 식을 이용하여 분석하였다.

표 1. 공동의 기밀성을 확보하기 위한 기준수위 설정조건

구 분	수리학적 조건식	개 념
Aberg (1977)	$I = \frac{P_{w/c} - P_g}{\rho_w \cdot g \cdot H} \geq 1$	<ul style="list-style-type: none"> • $I \geq 1$: 균열 암반에서 기포(bubble)가 상승하는 것을 막기 위해서는 공동상부의 동수경사(I)가 1보다 커야함 • W/C 개념을 도입하여 실험
Geostock (1984)	$H \geq P_g + F + S$	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 형태의 공동에 대한 실험 • 공동형상별 최대 운영압과 공동깊이를 규명

* 공동의 기밀성에 대한 조건식은 Komada(1980, 1985)등 많은 연구진에 의해 제시되어 있지만, 본 논문에서는 대표적인 조건식만을 언급하였다.

2.1 Geostock 제안식

Geostock사는 Hele-Shaw 모델을 통하여 다양한 형태의 공동에 대한 실험을 실시하였고 저장공동 상부 지하수위와 공동의 최대 허용압력은 공동형상과 환경에 따라 달라진다고 밝혔다. 가스 누출 방지를 위한 수리안전을 위하여 지하수압이 저장공동의 가스압력과 공동의 형상에 따른 계수 및 안전계수의 합보다 커야 한다는 다음과 같은 기준식을 제안하였다.

$$\phi(0) \geq \phi(\text{stor.}) + (Sf + S)$$

- $\phi(0)$: 지하수면의 Potential(기준수위)
- $\phi(\text{stor.})$: 저장공동의 최대 압력(Potential)
- Sf : 형상계수(Shape Factor). 저장공동의 기하학적 모양, 지하수유동 경계조건, 저장물의 물리적 특성, 암반의 다양한 불연속면등에 영향을 받음
- S : 안전계수(Safety Factor). 운영중에 급작스런 지하수위 변화, 저장압의 변화, 굴착 작업중 발생한 여굴에 의한 굴착면의 불규칙성, 기타 암반내 예상되지 못한 불연속면 분포등을 감안한 값

2.2 지하수면의 Potential

저장공동의 기밀성을 만족하기 위한 지하수위(기준수위)의 Potential로서, 지하수면이 기

준수위까지 저하될 경우, 기밀성 유지에 문제가 될 수 있으므로, 자연적 혹은 인공적으로 지속적으로 물을 주입하여야 한다.

2.3 저장 운영압

① 최대 운영압(Maximum Operating Pressure, MOP)

이 값은 운영중에 저장공동에 작용하는 최대 압력이다. 이는 기존 자료, 다음과 같이 구성 조건을 고려하여 결정한다.

- 공동의 온도
- 저장물의 물리적 특성
- 계획 용량, 저장물의 입하/출하시의 유량, 온도

② 최대 허용 작용압(Maximum Allowable Working Pressure, MAWP)

MAWP는 15m의 안전계수를 고려하여 산정한 수리동력학적인 기준에서 획득된 공동에서의 최대로 작용될 수 있는 압력이다. 따라서, MAWP는 공동 심도, 기준수위, 형상계수, 안전계수와 밀접한 관련이 있다. 저장공동의 기밀성이 확보되기 위해서는 MAWP가 MOP보다 큰 값을 갖아야 한다.

2.4 형상계수(Sf)

형상계수는 저장공동의 형상, 지하수 유동의 경계 조건, 저장물의 물리적 특성, Water Curtain, 모암의 특성 등이 고려되어 결정되며, 국내 지하비축시설에 적용된 형상계수는 8 ~ 35m의 값이 적용되었다.

설계시에는 좌표 기하 계산, 수치 모델, 모의 시험에 의해 결정되는 것이며, 본 논문에서는 수치모델링(Visual Modflow v4.1 이용)을 통하여 결정하였다.

2.5 안전계수(S)

지하저장 시설을 시공, 운영하면서 얻은 경험으로부터, 안전계수는 다음 사항을 고려하여 결정된다.

- 급격한 저장압력의 변화
- 지하수위의 저하
- 여굴에 의한 공동 형상의 불규칙성

보통 국내 비축기지에서는 15~20m의 안전계수를 적용하고 있다.

2.6 Geostock 제안식 검토

앞에서 언급한 Geostock 제안식은 기밀성 만족 영역을 도출하기 위하여 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\phi(0) \geq \text{MAWP} + (Sf + S) \quad (1)$$

상기 (1)식에서 기준수위($\phi(0)$)와 안전계수(S)는 현장 설계 조건에 따라 고정된 수로 가정할 수 있으며, 식 (1)은 아래와 같이 다시 변형할 수 있다.

$$\text{MAWP} + Sf \leq \phi(0) - S \quad (2)$$

(2)식은 아래 <그림 2>의 음영으로 표시된 부분을 나타내며, 이는 곧 기밀성 만족 영역을 나타낸다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 동일한 저장공동의 심도에서 공동에 작용하는 운영압 조건을 변화시켜가며, 각각 수치모델링을 수행하였으며, 그 결과를 통해 Sf 의 값을 구하였다. 그 결과가 아래 <그림 2>의 점선(운영압별 형상계수 Graph)으로 표시되고 있으며, 이 점선이 기밀성 만족 영역과 교차하는 지점이 그 심도에서의 MAWP를 나타낸다. 이렇게 결정된 MAWP는 공동에서 최대로 허용되는 작용압을 나타내며, 최대운영압(MOP)과의 비교를 통하여 기밀성에 대한 평가를 수행할 수 있다. 결론적으로, 이렇게 구해진 MAWP가 MOP보다 큰 값을 나타낼 때, 기밀성 조건을 만족하는 것으로 판단할 수 있다.

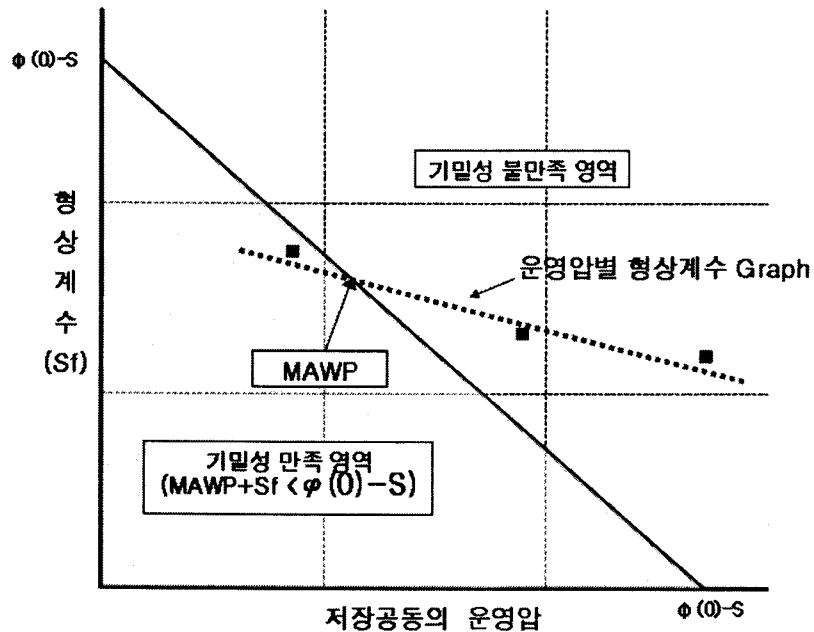


그림 2. 최대허용작용압(MAWP)을 도출하기 위한 그래프

3. 해저 LPG 저장공동의 기밀성 평가

본 논문에서는 전술한 바와 같이 해저 환경하의 LPG 지하저장공동에 대해, 아래와 같은 Modeling 조건 및 기밀성 평가 조건을 설정하여 수행하였다.

3.1 Modeling 조건

① Modeling Program : Visual Modflow(v 4.1)

② 지층조건

- 해저수심 : EL(-)20m 까지 위치
- 토사층 : EL(-)10.3 ~ 37.4m 까지 위치
- Fracture rock zone : EL(-)33.4 ~ 52.8m 까지 위치
- Hard rock zone : EL(-)33.4m ~

③ Initial Head

- 본 지역 일대는 매립지로 지하수위는 해수면과 거의 유사(-0 msl 적용)

④ Boundary Condition

- 해수 및 해수면(Constant Head (EL 0m)적용)

⑤ 수리상수

구분	Conductivity(m/s)	Storage(Ss)
토사층	5.0×10^{-7}	1.0×10^{-4}
Fracture rock	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
Hard rock	5.0×10^{-8}	5.0×10^{-6}
Grouting Zone	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-6}

* Grouting Zone은 저장공동 누수구간에 대한 Grouting을 고려한 영역이며, 공동 주변 10m구간에 대해 적용

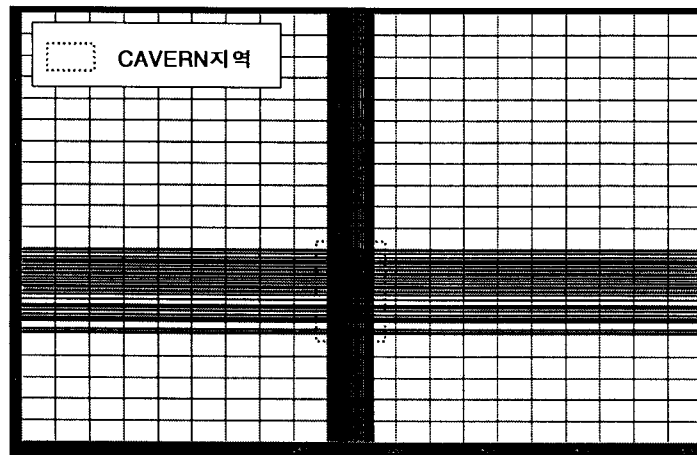


그림 3. 해석 모델 격자망(평면도)

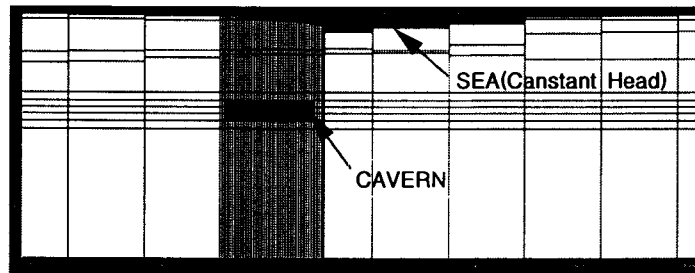


그림 4. 해석 모델 격자망(단면도)

3.2 기밀성 평가 조건

① 기준수위($\phi(0)$)

대상 구간의 정수두는 EL(+0)m를 기준으로 조위 영향(tidal effect)을 고려하였으며, 조위는 EL(+5)m ~ EL(-5)m 범위에서 분포하는 것으로 하였다. 따라서, 기준수위는 조위의 하한값인 EL(-5)m를 적용하였다.

② 최대 운영압(Maximum Operating Pressure, MOP)

본 논문에서는 해저 하부인 점을 감안 10°C 기준일때의 액화압력을 고려하여 Propane은 6.6(kg/cm²(g)), Butane은 1.1(kg/cm²(g))로 적용하였다.

③ 안전계수(S)

본 논문에서는 해저 환경하로 급격한 지하수위 변화등이 발생할 확률이 적은 것을 고려하여 15m의 안전 계수를 적용하였다.

3.3 검토 방법

저장 공동은 Water Curtain 차폐시설이 없는 상태로 공동 천단부 심도별(EL(-)70m, EL(-)100m, EL(-)120m) 및 운영압별(1.0, 3.0, 6.0, 9.0 kg/cm²)에 대하여 해석을 수행하여, 기밀성 평가를 수행하였으며, 기밀성을 만족하지 못할 경우, Water Curtain 차폐시설을 적용하여 기밀성 조건을 재검토하여, 만족성 여부를 평가하였다.

4. 수치모델링 해석 결과

4.1 Water Curtain 차폐시설 미설치시

각 저장공동 심도별(EL(-)70m, 100m, 120m) 및 운영압별(1.0, 3.0, 6.0, 9.0 kg/cm²) 조건

을 변화시켜가며 수치해석을 수행하였으며, 해석 결과는 다음과 같다.

표 2. 심도 및 운영압별 형상계수값

Cavern Crown 심도(EL(-)기준)	운영압조건 (kg/cm ²)	형상계수	Geostock*
-70	1.0	20.5	-24.5
	3.0	18.8	-6.2
	6.0	11	16.0
-100	1.0	53.5	-21.5
	3.0	51.6	-3.4
	6.0	46.9	21.9
-120	3.0	72.2	-2.8
	6.0	68.7	23.7
	9.0	61.4	46.4

* Geostock = $\phi(\text{stor.}) + S_f + S$

모델링 결과로부터 형상계수 및 운영압의 관계를 아래와 같이 그래프로 표현하였다.

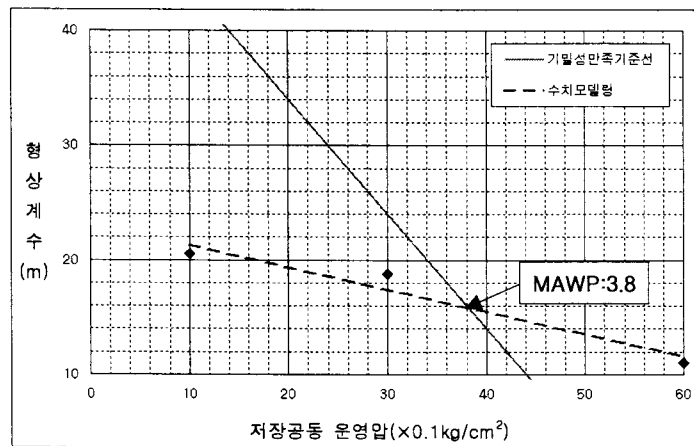


그림 5. 운영압별 형상계수 Graph 및 MAWP 값(심도 EL(-)70m)

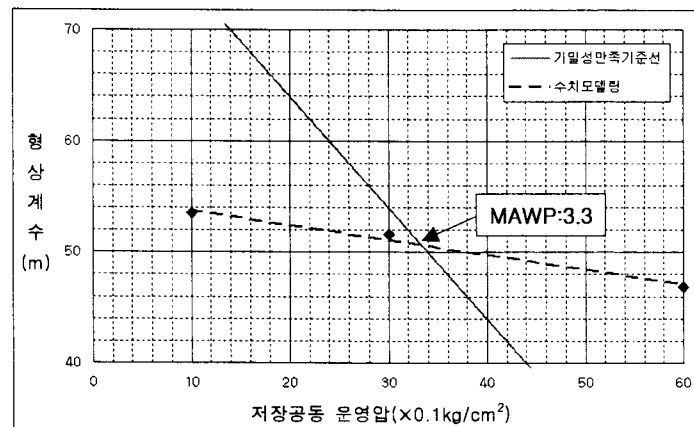


그림 6. 운영압별 형상계수 Graph 및 MAWP 값(심도 EL(-)90m)

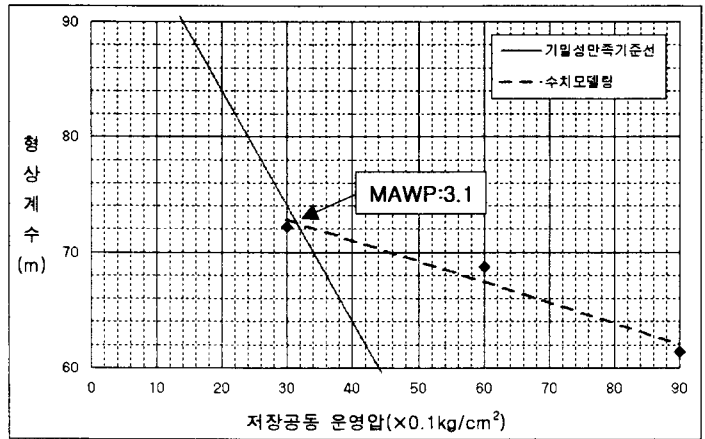


그림 7. 운영압별 형상계수 Graph 및 MAWP 값(심도 EL(-)90m)

상기 결과를 정리하면 다음과 같다.

표 3. 기밀성 평가 해석 결과

심도	공동의 MAWP (kg/cm ²)	Propane		Butane	
		MOP(kg/cm ²)	만족여부	MOP(kg/cm ²)	만족여부
-70m	3.8	6.6	불만족	1.1	만족
-100m	3.3		불만족		만족
-120m	3.1		불만족		만족

위 <표 3>에 나타나 있듯이, 심도에 따라 공동의 MAWP가 3.1~3.8 kg/cm²로 분석되어 Propane의 최대 운영압(MOP)에는 불만족하나, Butane의 경우 만족하는 것으로 나타났다. 따라서, Propane의 경우 Water Curtain 차폐시설의 설치가 필요한 것으로 판단된다. Butane의 경우 모든 심도에서 기밀성 조건을 만족하며, 형상계수를 고려하였을 때 심도 EL(-)70m가 타당한 것으로 판단된다.

4.2 Butane 저장기지 기밀성 평가

상기 해석에서 Butane의 저장심도는 EL(-)70m가 타당한 것으로 결론지어졌으며, 실제 가정한 최대 운영압(MOP)인 1.1 kg/cm²으로 기밀성 평가를 수행하였다. 해석 결과는 다음과 같으며, 기밀성을 만족하는 것으로 평가되었다.

표 4. Butane 저장기지 기밀성 평가 결과

Cavern Crown 심도	MOP(kg/cm ²)	기준수위(Φ(0))	형상계수	Geostock*	만족여부
EL(-)70m	1.1	-5m	20.2	-23.8	만족

* Geostock = $\phi(\text{stor.}) + S_f + S$ 이며, 기준수위(Φ(0), EL(-)5m)보다 작을 경우, 기밀성을 만족한 것으로 본다

4.3 Propane 저장기지 기밀성 평가 - Water Curtain 차폐시설 설치

Propane 저장기지의 경우, 심도별/운영압별 검토시 모두 불만족으로 평가되었으며, 이는 Water Curtain 차폐시설의 설치가 필요함을 나타낸다. 따라서, Water Curtain 차폐시설을 수치해석시 반영하였으며, 조건은 다음과 같다

- ① 수벽터널과 저장공동 상부간의 거리 : 25m
- ② 수벽공의 설치 심도 : EL(-)94.0m
- ③ 수벽공간의 간격 : 2 case (10m, 20m)
- ④ 수벽공의 수두조건 : EL(-)0.0m

표 5. 수벽공 간격별/운영압별 형상계수값

Cavern Crown 심도(EL(-)기준)	수벽공 간격	운영압조건 (kg/cm ²)	형상계수	Geostock
-120m	10m	3.0	40.5	-34.5
		6.0	28.3	-16.7
		9.0	22.5	7.5
	20m	3.0	54.8	-20.2
		6.0	46.3	1.3
		9.0	28.4	13.4

모델링 결과를 바탕으로, 형상 계수 및 운영압의 상관관계를 아래와 같이 그래프로 표현하였으며, 저장공동의 MAWP를 도출하였다.

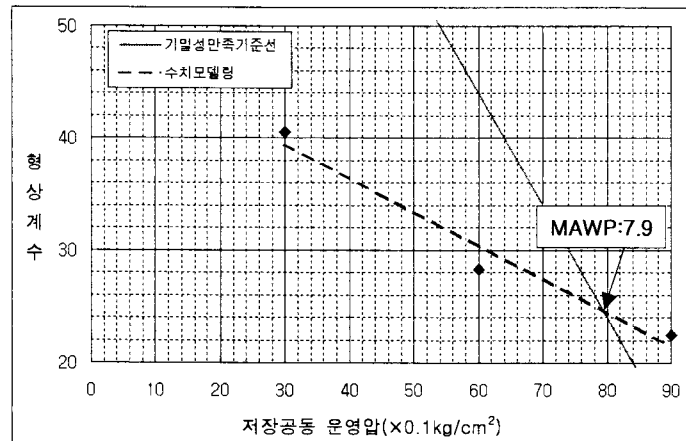


그림 8. 운영압별 형상계수 Graph 및 MAWP 값(수벽공 간격 10m)

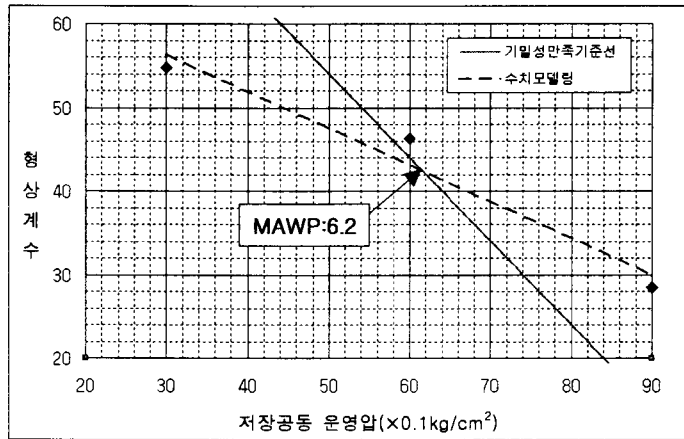


그림 9. 운영압별 형상계수 Graph 및 MAWP 값(수벽공 간격 20m)

상기 결과를 정리하면 다음과 같다.

표 6. 수벽공 간격별 Propane 저장공동 기밀성 평가 결과

Cavern Crown 심도(EL(-)기준)	수벽공 간격	공동의 MAWP (kg/cm ²)	Propane	
			MOP(kg/cm ²)	만족여부
-120m	10m	7.9	6.6	만족
	20m	6.2	6.6	불만족

해석결과, 수벽공을 10m 간격으로 설치하였을 경우는 기밀성 조건을 만족하나, 20m 간격인 경우는 기밀성 조건을 불만족하는 것으로 나타났다.

상기 결과를 토대로, Propane의 최대 운영압(6.6kg/cm²)하에서 기밀성 평가를 최종 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

표 7. Propane 저장기지 기밀성 평가 결과

Cavern Crown 심도	MOP (kg/cm ²)	기준수위 (φ(0))	형상계수	Geostock*	만족 여부
-120m	6.6	-5m	27.1	-11.9	만족

* 평가 방법은 Butane 저장기지과 동일

4. 결 론

지하유류 비축기지에 대한 차폐에 대한 설계 방안을 연구하기 위하여, Geostock사에서 제안한 기밀성 조건식을 이용하여 저장공동 심도별, 운영압별 Case Study를 통하여 최적

기밀성 조건을 평가하였으며, 이상의 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기준수위와 안전계수를 고정하였을 경우, 저장공동의 운영압 및 형상계수의 상관관계를 이용하여, 저장공동의 최대 허용 작용압(MAWP)을 구할 수 있으며, 이를 운영시 저장물의 최대 운영압(MOP)과의 비교하여, 최적 설치 기준(심도, 수벽공 간격)을 결정할 수 있다.
- (2) 심도 및 운영압 조건을 변화시키며 수행한 해석 결과(Water Curtain 차폐시설 미설치), Butane 저장기지의 경우 저장공동 천단부 심도가 EL(-)70.0m일 때 최적의 저장 심도로 나타났으며, Propane의 경우 모든 심도에서 기밀성을 불만족하여, 차폐 시설을 설치해야하는 것으로 나타났다.
- (3) Propane 저장기지의 경우, 저장공동 천단부 심도를 EL(-)120.0m에 설정하고, Water Curtain 차폐시설을 설치하였으며, 수벽공 간격을 10m, 20m인 경우에 대해 검토하였다. 검토 결과, 10m인 경우에만 기밀성을 만족하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통평가원에서 위탁시행 한 2007년도 첨단도시개발사업(과제번호:05건설핵심 D10, 과제명 : 해저 시설물 차폐기술 개발, 세부과제명 : 해저 에너지저장시설 차폐 및 시공시물레이션 기술 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참고문헌

1. SK건설 부설 연구소, 1993, 지하유류저장시설의 조사, 설계 및 운영을 위한 지하수공동 해석기법연구.
2. 한국석유공사, 2005, 울산추가비축기지 조사설계용역 실시설계보고서.
3. Aberg, 1977, Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock, rockstore 77, 399-413
4. Geostock, 1980, "유체 지하저장법" 대한민국 특허청 특허 공보.
5. Geostock, 1997, Basic Design for Inchon LPG Underground Storage Project.
6. Geostock, 2007, Feasibility Study for Underground Crude Oil Storage at Jinzhou.