

암반동굴식 지하 LNG 저장 시스템 설계를 위한 기화율의 선정

정소걸¹⁾, 박의섭^{2)*}, 이희석³⁾, 정우철⁴⁾

Determination of Boil-Off gas Ratio for the Design of Underground LNG Storage System in Rock Cavern

So-Keul Chung, Eui-Seob Park, Hee-Suk Lee and Woo-Cheol Jeong

Abstract A new underground LNG storage concept in the rock mass has been developed by combining underground cavern construction and new ice-ring barrier technologies with the conventional cryogenic insulation system. Technical feasibility of the storage system has been verified through construction and operation of the pilot storage cavern and a full-scale project is expected to start in the near future. One of the most important issues in the LNG storage system is the operational efficiency of the storage to minimize heat loss during a long period of operation due to the cryogenic heat transfer. This paper presents several important results of heat transfer and coupled hydro-thermal analyses by a finite element code Temp/W and Seep/W. A series of heat transfer analyses for full-scale caverns were performed to determine design parameters such as boil-off gas ratio (BOR), insulation thickness and pillar width. The result of the coupled hydro-mechanical analysis showed that BOR for underground storage system remains at about 0.04 %/day during the early stage of the operation. This value could be even much lower when the discontinuities in the rock masses are taken into consideration.

Key words Underground LNG storage cavern, Cryogenic, Heat transfer, Boil-Off gas Ratio (BOR), Ice-ring

초 록 기존의 단열 시스템, 지하동굴 건설기술과 새로운 동결링 방벽기술을 결합하여 암반동굴식 지하 LNG 저장시스템이 개발되었다. 이 저장시스템의 기술적 적합성은 파일럿 동굴 실증시설의 건설과 운영을 통해 검증된 바 있으며, 조만간 실규모 프로젝트가 시작될 예정이다. LNG 저장시스템에서 중요한 사항 중의 하나는 극저온 열전달을 통해 장기간의 운영 기간동안 열손실을 최소화하는 것이다. 이 논문은 지하 LNG 저장 시스템의 설계를 위한 몇 가지 중요한 열전달 해석 결과를 제시하며, 기화율, 단열재 두께와 같은 설계 변수를 결정하기 위해 일련의 실규모 동굴에 대한 열전달 및 열수리 해석을 실시하였다. 열수리 연계해석결과 LNG 저장시설의 기화율은 초기 단계에서 0.04 %/day로 떨어져 유지되는 것으로 나타났다. 이 값은 암반내 존재하는 불연속면을 고려할 때 더욱 낮아질 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 지하 LNG 저장, 극저온, 열전달, 기화율, 동결링

1. 서 론

수 십 년간의 석유류 지하 저장 기술과 전 세계적인

로 적용되고 있는 LNG 운반선 및 지상탱크의 멤브레인에 사용되는 단열 내조(containment) 시스템이 새로 개발된 지하수 배수 및 동결링(ice-ring) 개념과 결합되어 북극식 LNG 지하 암반 저장기술이 개발되었다(한국지질자원연구원, 2003, 2004, 2005a, Lee et al., 2006a).

SK건설, Geostock과 SN Technigaz는 1998년부터 공동연구에 착수하였으며, 2002년부터 3년간 한국지질자원연구원과 함께 대전 LNG Pilot Plant의 설계, 시공 및 운영과정을 통하여 본 기술이 검증된 바 있다(한국지질자원연구원, 2003, 2004, 2005a). 또한 Pilot Plant 결과 및 이로부터 축적된 기술에 관해서는 국내의 지하

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 지하공간연구실 책임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 지하공간연구실 선임연구원

³⁾ SK건설주식회사 GSUC팀 부장

⁴⁾ SK건설주식회사 GEOTASK팀 대리

* 교신저자 : espark@kigam.re.kr

접수일 : 2007년 2월 11일

심사 완료일 : 2007년 2월 23일

저장 및 가스 관련학회에 30여 편을 발표한 바 있다 (Chung, 2006, Lee et al., 2003, Lee et al., 2005, 박의섭 외, 2005, 정우철 외, 2006).

극저온의 LNG(-162°C)를 저장할 경우 비록 단열재를 설치하더라도 저장탱크 내외부의 급격한 온도차로 인한 열손실을 완전히 피할 수 없어 소량이나마 연속적인 기화(Boil-off) 가스가 발생한다(Dalström, 1992). 기존의 지상식 또는 반지하식 저장탱크의 경우 탱크 외부 온도가 일정하게 유지되므로 기화를 통한 저장 LNG의 손실은 LNG의 장기저장을 어렵게 하고 경제적인 부담으로 작용한다. 하지만 암반동굴식 지하 저장시스템은 저장 기간 동안 벽체와 결합된 암반의 지속적인 냉각으로 인하여 열손실이 감소하는 장점이 있는 것으로 보고되고 있다(Lee et al., 2006b). 따라서 실규모 상용 지하 LNG 동굴 저장시설의 경제적이고 안전한 설계와 시공을 위해서, 운영중인 시스템과 주변 암반의 열전달 특성과 이에 따른 효율적인 설계 기화율을 산정하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 지하 LNG 저장 동굴의 설계를 위해 실시된 열전달 해석 결과를 제시하였고, 기화율과 단열재 두께 등의 설계 변수를 결정하기 위해 일련의 실규모 동굴에 대한 열전달 및 열-수리 해석을 실시하였다. 본 결과를 이용하여 경제적이고 안전한 장기저장이 가능한 기화율 및 관련 동굴 설계 변수들을 도출하고자 하였다.

2. LNG 저장 동굴의 구조 및 기화율 산정

2.1 복공식(lined) 지하 LNG 저장 동굴의 구조

지하 LNG 저장 동굴의 구조는 Fig. 1에 설명된 바와 같이 극저온으로부터 암반을 보호하기 위해 주름이 있

는 스테인리스 스틸 멤브레인과 폴리우레탄 단열재(PU foam insulation panel)로 구성된 내조시스템(containment system)과 이의 설치와 지지를 위한 콘크리트 라이닝 벽체로 구성된다.

동굴 주변 암반의 지하수는 저장동굴 건설 중에 정교한 배수시스템을 통해 완전히 배수된다. 일정 기간 운영되어 주변 암반이 충분히 냉각된 후에 배수시스템을 중지하게 되면 지하 암반의 수위가 회복되어 구조물에서 어느 정도 떨어진 암반 내 ice-ring을 형성시켜 또 다른 누출 차단을 위한 천연 방벽을 형성하는 것으로서, 본 기술은 원천 기술로 특허 등록된 바 있다.

이러한 개념을 실증하기 위해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 대전 파일럿 실증 시설이 2003년에 건설되어 1년간 액화질소(LN₂, -196°C)를 주입 운영하였다. 이를 통하여 ice-ring의 형성 과정을 실증하였으며, 계측 결과 분석을 통해 암반의 안정성에 전혀 문제가 없음을 확인

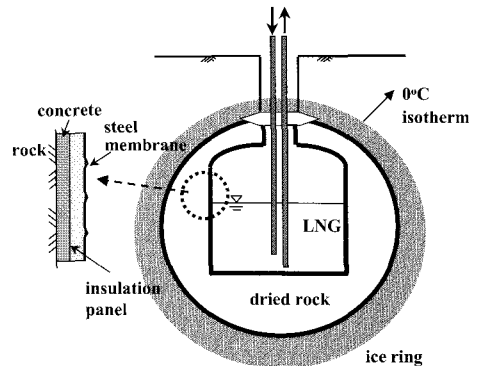


Fig. 1. Schematic structure of an underground LNG storage cavern

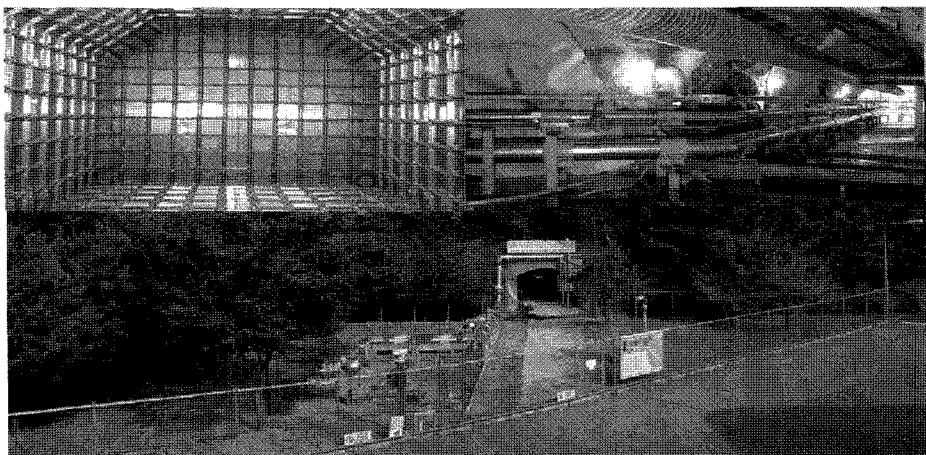


Fig. 2. In- and outside view of the underground pilot storage facility in KIGAM, Daejeon

할 수 있었다 (한국지질자원연구원, 2004, 2005a).

2.2 LNG 저장탱크의 기화율 산정

LNG 저장탱크의 기화율(boil-off gas ratio, BOR) 계산은 일반적으로 저장 방식에 상관없이 동일하며 저장 탱크 내외부의 온도차가 일정한 경우 이론적으로 계산할 수 있다. 또한 수치해석 또는 현장 계측치로부터 얻은 온도나 열 유속(flux) 자료를 통해 산정할 수 있다.

일반적으로 암반의 온도 전파 특성은 수치해석적으로 잘 예측되는 것으로 확인되고 있으며(Chung, 2006), 2004년 대전 파일럿 저장 시설에서의 계측 및 수치해석 예측 결과가 매우 잘 일치하였으므로(이대혁 외, 2004, Lee et al., 2006b) 저장 동굴 설계시 검증된 수치해석 코드를 이용하여 적절한 경계 및 초기조건으로 해석한 열전달 해석 결과를 이용하여 기화율을 계산하는 것은 무리가 없다.

예비 열전달 계산을 통해 확인한 결과 온도나 열 유속 모두 거의 동일한 결과가 산출되었다. 따라서 본 연구에서는 다음 식을 이용하여 LNG 저장시설 운영 중에 발생하는 BOR을 산정하였다.

$$BOR = 100 \cdot K_i (T_i - T_{LNG}) \cdot \frac{1}{L_{LNG} \cdot \rho_{LNG}} \cdot S_f (\%/day) \quad (1)$$

여기서 K_i 는 단열 계수이고, S_f 는 저장탱크의 체적과 관련된 형상계수(shape factor), T_i 와 T_{LNG} 는 각각 섭씨 단위의 콘크리트-단열재 접촉면(interface)에서의 접촉 온도와 LNG의 저장온도(-162°C)이다. L_{LNG} 는 LNG의 기화잠열(J/kg)이고 ρ_{LNG} 는 LNG의 중량(kg/m³)이다. 보통 LNG는 메탄을 비롯한 여러 가지 가스 성분의 혼합체이나 가장 보수적인 메탄의 물성을 기준으로 사용하게 된다.

식 (1)에서 K_i 는 각 층별 단열재의 열전도도(thermal

conductivity) k_i (J/day · m °C)와 단열재의 두께 e_i 에 영향을 받으며 식 (2)과 같이 표현된다.

$$K_i = \frac{k_i}{e_i} \quad (2)$$

또한 형상계수는 열손실에 영향을 미치는 표면적 대 체적의 비로서 식 (3)과 같다.

$$S_f = \frac{S}{V} \quad (3)$$

여기서 S 와 V 는 저장 탱크의 표면적 및 체적이다.

지상식 및 반지하식 저장탱크의 경우 외기와 접촉 있거나 지반의 동결팽창을 방지하기 위해 일정한 온도를 유지하기 때문에 식 (1)에서 외기 온도가 일정하므로 단열재 설계 사양에 따라 일정한 기화율을 보인다. Table 1은 최근에 적용되는 각 저장방식별 설계 기화율을 나타낸다. 하지만 국내외의 지상 및 반지하식 운영사례에 의하면 운영 중에는 설계 기화율보다 다소 크게 발생하는 것으로 보고되고 있다(한국지질자원연구원, 2005b). 지하 암반동굴식의 경우에는 아직 상용시설이 건설되지 않았지만 설계 계산 및 목표치를 근거로 제시하였으며 본 연구에서 해석을 통해 상세하게 분석하였다.

3. 해석 방법 및 모델

3.1 열전달 해석

먼저 실규모 저장동굴의 적정 설계변수를 찾기 위해 유한요소모델을 이용하여 열전달해석을 실시하였다. 이 해석의 주요 관심사는 암반 주변의 최대 냉각 온도와 이에 따른 장기 운영시의 BOR이다. 30×20 m(H:W)의 2개의 저장동굴이 60 m 떨어져 있는 전형적인 동굴 배치에 대하여 Table 2와 같은 기본 물성을 근거로 다양

Table 1. Comparison of BOR for different type of LNG storage

Item	Above-ground	In-ground	Underground
BOR (Vol. %/day)	Membrane: 0.1 9% Nickel: 0.05-0.075	Membrane: 0.1	Membrane: 0.02-0.05
Basis	Design requirement	Design requirement	Theory and calculation

Table 2. Input properties for reference heat transfer analysis with finite element model

Property	PU Foam	Concrete	Rock
k (W/m °C)	0.020	2.627	2.627
Specific heat (J/kg °C)	1674	710	710
Density (kg/m ³)	65	2500	2700

한 조건에서 예비 해석을 실시하였다.

상세해석으로서 30년 운영기간 동안의 BOR을 계산하기 위해서는 위의 유한요소 해석모델과 열전달 상용 코드인 Temp/W가 사용되었으며 LNG 주입 직후 운영기간에 따른 열전달 과정을 모사하여 기간별 BOR을 계산하였다. 저장동굴이 배치되는 암반은 다공질 연속체로 가정하였으며, 운영 중 입출하에 따른 영향은 고려하지 않았다.

해석된 저장동굴의 단면은 Fig. 3에서와 같이 폭 20 m, 높이 30 m의 마제형으로, 콘크리트 라이닝의 두께는 50 cm이고, 단열재는 30 cm, 40 cm 두께를 각각 적용하여 해석하였다. 저장지지는 지표 하 50 m에 위치하고, 대기 온도와 암반의 온도는 상온 15°C로 설정하였다. 이러한 경계 및 초기 조건은 기본적인 암반동굴 설계사양을 적용하는 경우 국내 암반층의 일반적인 특성이다.

Temp/W를 이용한 열전달 해석에 사용된 물성 값은 Table 3과 같다. 콘크리트와 암반의 열전도도는 예비해석값과 동일하게 적용하였고, 프로그램 특성상 비열(specific heat)값 대신 단위부피당 열용량(volumetric heat capacity)으로 환산하여 적용하였다. 단열재(PU foam)의 열전도도는 일반적으로 온도 의존 특성을 크게 보이

는데, 지상탱크에서 많이 사용되고 있는 규격 중 Grade A와 E에 대하여 적용하였다(Fig. 4 참조).

3.2 열-수리 해석

열전달 및 BOR 계산에 있어 지하수 흐름과 암반의 건조포화상태에 따른 영향을 고려하기 위해 열-수리 연동해석을 수행하였다. 본 해석에서는 열해석 코드인 Temp/W와 지하수 유동해석 코드인 Seep/W가 사용되

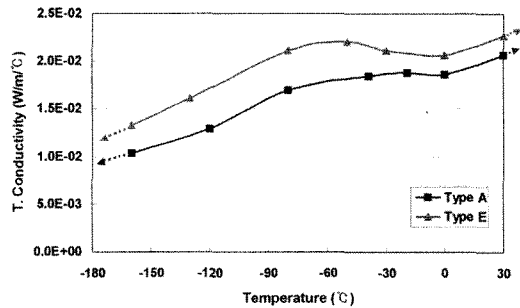
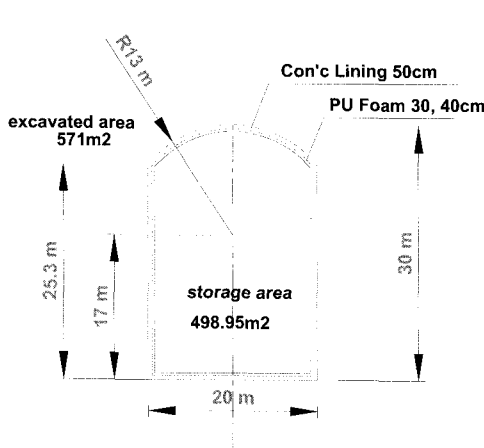
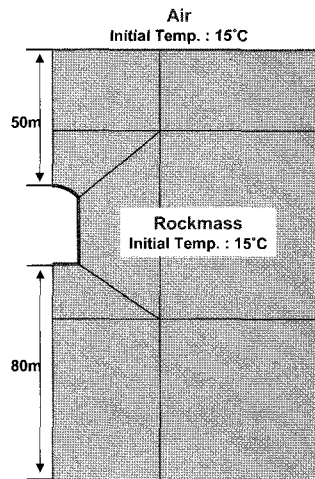


Fig. 4. Thermal conductivity variations of insulation according to the temperature



(a) Cavern Section



(b) Model boundary

Fig. 3. Cavern section and model boundary for analysis

Table 3. Material properties for heat transfer analysis

Material	T. conductivity (k_r , W/m/°C)	Volumetric heat capacity (C_p , J/m ³ /°C)
PU foam	Grade A, E	1.088×10^5
Concrete	2.627	2.30×10^6
Rock	2.627	2.49×10^6

었는데, 각 코드에서 1 time step 씩 번갈아 해석되면서 연동해석을 수행하였다(정우철 외, 2006). LNG 주입 직후에 주변 암반이 냉각되기 시작하고, 주입 후 3년 경과 시에 배수를 종료하여 하강된 지하수위를 회복시키는 것으로 모사하였다.

Fig. 5에서처럼, 초기 지하수위는 지표 하 20 m이고, 배수시스템으로 인해 지하수위는 저장동굴 하부 10 m 까지 떨어진 것으로 가정하였다. 공동 단면과 나머지 해석 조건들은 열해석과 동일하게 적용하였다.

열-수리 해석에서 사용된 물질 중 열물성은 Table 4에 제시된 바와 같이 콘크리트와 암반 내에 함유된 공극수가 냉각된(frozen) 상태와 그렇지 않은(unfrozen) 상태에 따라 열전도도와 열용량을 다르게 적용하였고 추가된 수리특성 값은 아래와 같다. 여기서 냉각 여부에 따른 열전도도 및 열용량은 각각 다음 식 (4)와 식 (5)에 의해 계산되었다(Krahn, 2004).

$$k_{sat} = k_s^{(1-n)} k_{w,i}^n \tag{4}$$

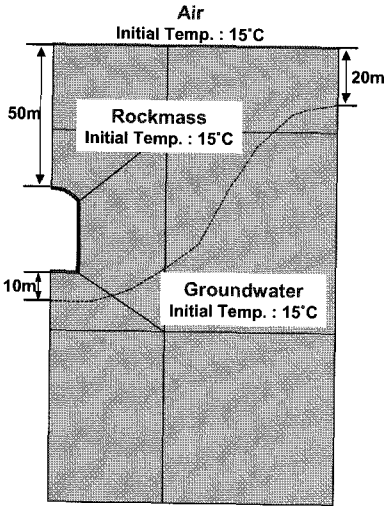


Fig. 5. Boundary and initial condition for hydro-thermal analysis

여기서, k_{sat} 는 포화상태의 열전도도이고, k_s , k_w , k_i 는 각각 매질 입자(material particle), 액체 상태의 지하수, 얼음 상태의 지하수의 열전도도를 나타내며, n 은 공극비이다.

$$C = \gamma_d(c_s + c_w w_u + c_i w_f) \tag{5}$$

여기서, C 는 전체 매질의 단위체적당 열용량이며, C_s , c_w , c_i 는 각각 매질 입자, 액체 상태의 지하수, 얼음 상태의 지하수의 비열을 나타낸다. r_d 는 매질 입자의 단위 중량이며, w_u , w_f 는 각각 냉각 상태, 액체상태의 함수비를 나타낸다.

4. 해석 결과

4.1 열전달 해석

Fig. 6은 단열재의 열전도도가 0.02 W/m°C일 경우, 유한요소모델의 열전달 해석에서 구한 30년 운영 후의 전형적인 열전파 특성 결과를 보여준다. 대부분의 암반은 동굴 벽면 바로 근처를 제외하고는 -30°C 보다 높은 분포를 보인다. 따라서 이러한 온도 범위에서 암반내 균열이 생성되거나 전파되는 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다(Lee et al., 2006a). 암주 부분의 암반 온도는 냉각 열원의 중첩으로 인해 다른 측벽보다 상당히 낮은 온도를 보인다. 천장 부근의 열전파는 측벽부보다 느리게 진행되는데, 이는 액화 상태(-162°C)로 접촉되는 바닥부나 측벽부와는 달리 천장부에선 가스 상태(-110°C)로 접촉하기 때문이다.

Fig. 7은 서로 다른 단열재 두께에 대하여 30년 운영 후에 동굴 수평면상 중심을 따라서의 온도분포를 비교한 것이다. 단열재 두께가 20 cm인 경우를 제외하고는 최대 암반온도 하강의 측면에서 동굴 구조물의 안정성에 큰 문제가 없을 것으로 생각된다. 암주 폭에 따른 민감도 분석에서도 마찬가지로 동굴 폭의 3배 정도 간격으로 암주 내 온도 저하 폭이 허용 수준 이내로 나타났다. 열하중에 의한 공동 안정성과 관련해서는 보다 상

Table 4. Thermal and hydrogeological properties for Hydro-Thermal analysis

Material	Thermal				Hydrogeological
	Thermal conductivity (k, W/m°C)		Volumetric heat capacity (C _p , J/m ³ /°C)		Hydraulic conductivity (m/sec)
	Frozen	Unfrozen	Frozen	Unfrozen	
PU foam	Grade A, E		1.088×10 ⁵		Optional
Concrete	2.621	2.554	2.28×10 ⁶	2.32×10 ⁶	1.0×10 ⁻⁷ (at saturation)
Rock	2.621	2.554	2.48×10 ⁶	2.52×10 ⁶	

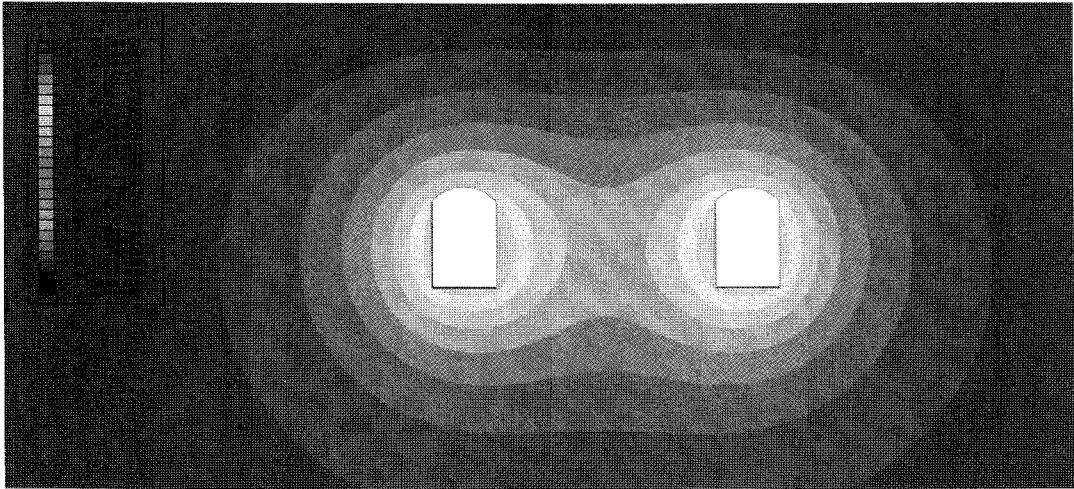


Fig. 6. A typical contour of heat propagation after 30 years of operation for prototype LNG storage cavern (Thermal conductivity $k=0.02$)

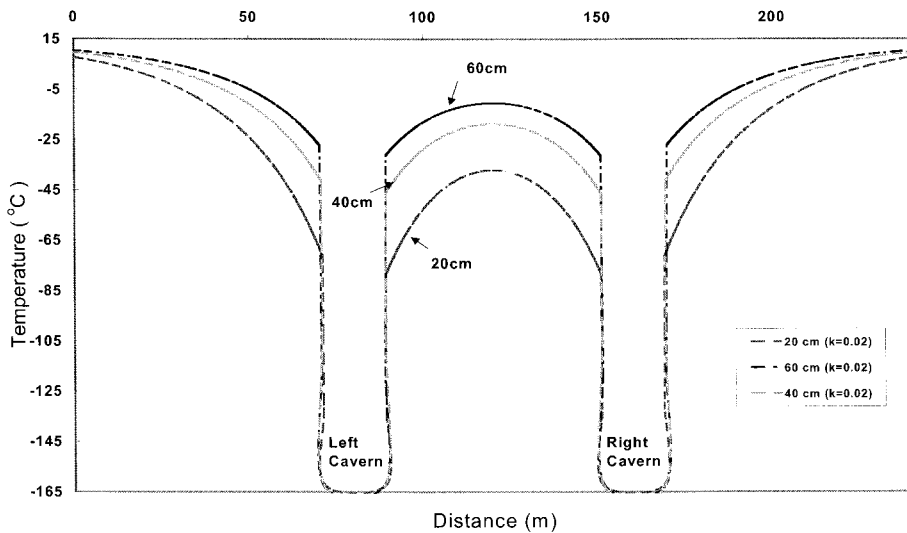


Fig. 7. Typical temperature profile along horizontal center of caverns after 30 years of operation

세한 열역학 해석이 필요하다.

앞 절에서 제시된 열전달 모델에 대해 Temp/w를 이용하여 열전달 해석이 수행되었다. 단열재 두께와 등급을 다르게 하여 비정상류 해석을 수행하여 운영 기간에 따른 BOR 및 열전과 특성을 산정하였으며, 그 결과는 다음 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타나 있다.

해석 결과, 기존의 연구결과와 마찬가지로 LNG 주입 이후 시간이 지남에 따라 점진적으로 BOR이 감소하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 9에서처럼 시간이 지남에 따라 저장공동 주변 암반이 냉각되어 -162°C 의 LNG와의 온도차가 점차 줄어들기 때문이다. 특히 Temp/w를 이

용하여 구한 BOR은 동일한 조건에서 수행한 유한요소 열전달 해석으로 구한 값과 거의 차이가 없어 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

또한, Fig. 8에서 보는 바와 같이 BOR은 단열재의 두께와 등급에 크게 의존하는 것으로 나타났다. 단열재 두께를 30 mm로 한 경우, A 등급에서는 BOR이 5년 후에 0.055%, 10년 후에 0.052%에 도달하였고, E 등급에서는 BOR이 5년 후에 0.063%, 10년 후에 0.06% 수준에 도달하였다. 또한, 40 mm A 등급 단열재를 적용하는 경우는 LNG 주입 후 1년이 채 되지 않아 BOR이 0.05% 이하로 떨어지고, 15년이 지나면 0.04% 까지 떨

어짐을 알 수 있다. 이러한 해석 결과는 LNG 저장기지의 설계에 있어 적절한 BOR의 결정은 단열재 두께 및 재질 등을 조절함으로써 충분히 가능함을 알 수 있다.

Fig. 9는 열전달 해석으로 구한 0°C 등온선의 전파과정을 보여준다. LNG 주입 이후 시간이 경과함에 따라 점차적으로 0°C 등온선의 두께가 증가하나, 30년 경과 후에도 지상까지 도달하지 못하였다. 이는 LNG 지하저장으로 인한 암반 내 온도저하가 지상부의 식생에 영향을 미치지 못함을 의미하기도 한다.

4.2 열-수리 연동해석

상기한 바와 같이 열-수리 연동해석은 동결링 형성 전의 초기 열전달 상태를 건조상태 암반에서 전달되는 것

으로 고려할 수 있고, 배수 종료 직후 상승하는 지하수위와 동결링 형성의 효과를 정확히 고려할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 효과는 다음 Fig. 10과 Fig. 11에 나와 있다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 열-수리 연동해석은 열전달 해석에서는 볼 수 없는 두 가지 주요한 현상을 발견할 수 있다. 하나는 LNG 주입 후 초기 3년간 BOR이 열해석 결과에 비해 상당히 작아지는 현상이다. 이는 건조 암반이 냉각되면 열전도도와 열용량이 모두 작아지기 때문인데, 이는 암반의 단위부피당 함수비와 포화도, 0°C 이하에서도 냉각되지 않고 남아있는 함수비 등에 따라 그 정도가 달라진다.

불포화상태 다공질 매질의 열전도도는 다음 식 (6)과

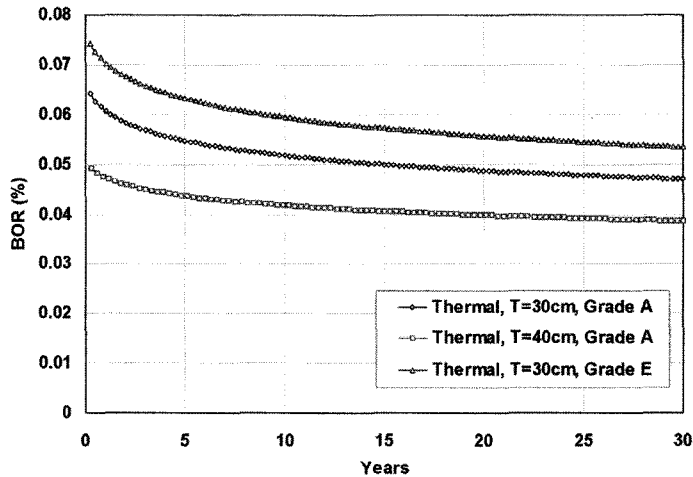


Fig. 8. Results of BOR from heat transfer analysis

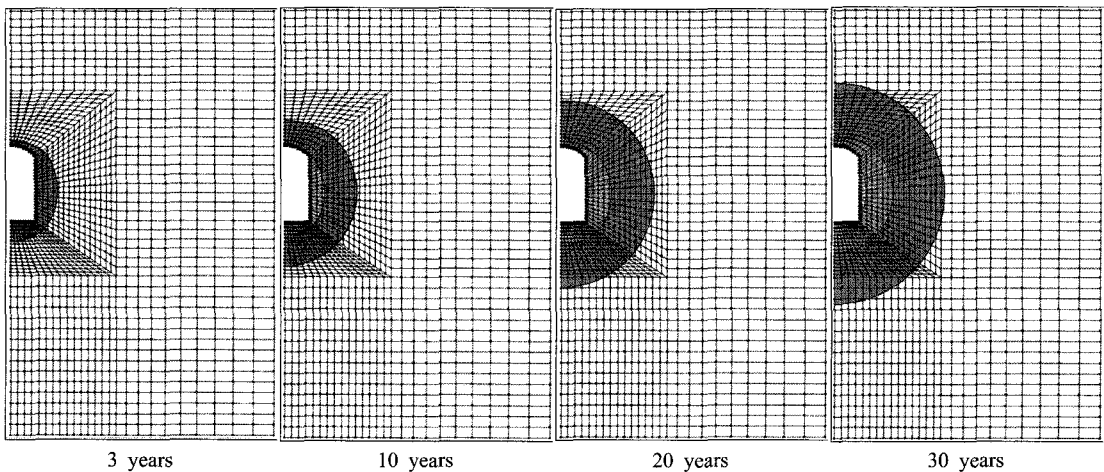


Fig. 9. 0°C isotherm propagation during cavern operation from heat transfer analysis

같고(Krahn, 2004), 열용량은 식 (5)에서 c_w , c_i 대신에 대기에 대한 비열을 적용하여 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} k_{unsat} &= (k_{sat} - k_{dry})K_c + k_{dry} \\ k_{dry} &= k_s^{(1-n)} k_a^n \\ K_c &= \text{Log} S + 1.0 \text{ for unfrozen material} \\ &= S \text{ for frozen material} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, k_{unsat} , k_{sat} , k_{dry} 는 각각 불포화, 포화, 완전건조 상태의 열전도도를 나타내고, k_a 는 대기의 평균 열전도도를 나타내며, S 는 포화도이다.

이렇게 냉각된 건조 암반에서는 포화상태의 암반에 비해 열전도도와 열용량이 감소한다. 열전도도의 감소는 저장동굴 내 LNG의 초기 기화 가스량을 줄게 하고, 열용량의 감소는 운영 기간에 따라 BOR이 줄어드는 정도를 크게 해 주는 효과를 보이게 된다. 따라서 배수된 암반 상태에서 열전달이 이루어지는 초기 운영기간 중에 BOR 값은 Fig. 10에서 보여주는 바와 같이 비정상류 열-수리 연계해석을 통해 크게 줄어들고, 이 기간이 길어질수록 더 큰 효과를 얻을 수 있다. 이 결과는 저장공동 주변 암반에 천연적으로 존재하는 공극, 균열, 절리 등을 고려하지 않은 해석에 의한 것이므로, 보냉 특성을 갖는 불연속면이 실제 존재하는 현지암반에서는 기화율이 더욱 감소할 것으로 예상된다.

두 번째 현상은 3년경과 후 배수를 종료한 시점에서 BOR이 약간 상승하는 현상을 보이고 있다는 점이다. 이는 상온의 지하수가 냉각된 암반 내로 들어오면서 이루어지는 열전달과 동결링 생성시 발생하는 잠열로 인해 공동 주변의 암반온도가 순간적으로 상승하기 때문

이다. 이러한 현상은 본 해석에서 암반의 투수계수를 1×10^{-7} m/sec로 다소 크게 적용함으로 인해 상승하는 지하수의 속도가 열전달에 비해 매우 빨라 0°C 등온선 안으로 침투된 지하수의 양이 다소 많았기 때문인 것으로 판단된다. 하지만, 본 해석의 결과에서처럼 초기 열전도도 감소 효과로 인해 배수 중단 단계에서 BOR이 이미 0.04 %/day 아래로 감소하였고, 투수계수가 본 대상 암반과 같이 큰 경우는 배수 중단 후 지하수 상승속도를 조절할 수 있기 때문에 이러한 현상이 BOR에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 열전달만을 고려한 경우에 비해 동일시점에서 생성된 ice-ring의 두께 역시 훨씬 크므로 이 역시 지하저장 방식의 효율을 높일 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 11은 열-유동 연계해석으로 구한 0°C 등온선의 전파과정을 보여준다. Fig. 9의 열전달 해석만으로 구한 0°C 등온선의 전파 과정과 비교할 때, 전반적인 경향이 매우 유사함을 알 수 있다.

이상의 결과에서, LNG 지하 저장시설의 BOR 계산에는 냉각 상태 건조 암반의 열전도도 및 열용량 변화, 배수 후 지하수 상승속도, 동결된 지하수의 양 등의 요소가 고려되어야 한다는 점을 알 수 있다. 하지만, 이러한 요소들이 BOR에 어떤 영향을 주는지 미리 파악할 수 있다면, LNG 지하 저장시설의 설계시 적절한 BOR 결정에 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다. 예를 들어 상기 해석에서 초기 열전달 기간을 더 늘리고 배수 중단 시점을 더 늦춘다면 Ice 생성 이후의 BOR 값이 본 해석 결과보다 더 작은 값으로 산정될 것으로 생각된다. 이는 실제 설계 단계에서 다른 요소를 고려한 후 결정되어야 할 것이다.

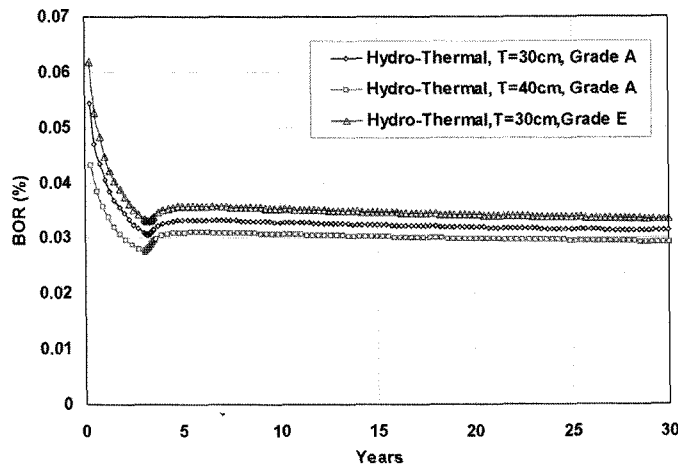


Fig. 10. Results of BOR from coupled hydro-thermal analysis

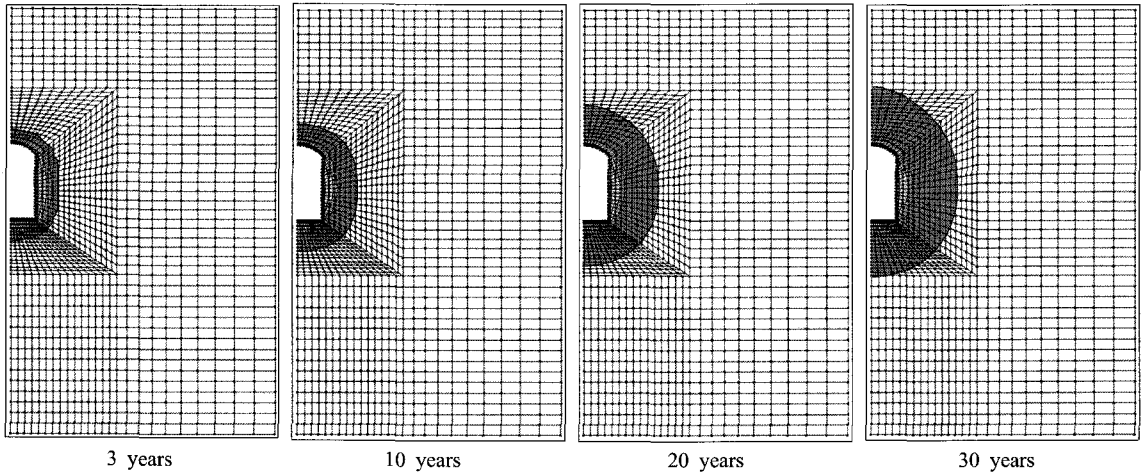


Fig. 11. 0°C isotherm propagation during cavern operation from hydro-thermal analysis

5. 결론

본 연구에서는 실규모 지하 LNG 저장시스템의 기화율, 단열재 두께, 압주 폭 등의 주요 설계변수를 결정하기 위해 열전달 및 열-수리 해석을 실시하였으며, 이로부터 구해진 값을 근거로 암반동굴식 지하 LNG 저장시스템의 설계 기화율을 산정하였다.

해석 결과 기존의 지상 및 반지하식 저장탱크와는 달리 암반동굴식 지하 저장시스템은 주변 암반의 지속적인 냉각으로 인해 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 기화율을 보였으며, 또한 열-수리 연동해석에서는 건조암반의 냉각 시 열전도도 및 열용량의 감소로 인해 기화율이 감소된 결과를 보였다. 이 결과는 저장공동 주변 암반에 천연적으로 존재하는 공극, 균열, 절리 등을 고려하지 않은 해석에 의한 것이므로, 보냉 특성을 갖는 불연속면이 실제 존재하는 현지암반에서는 기화율이 더욱 감소할 것으로 예상된다. 해석 결과에서 확인할 수 있듯이 향후 단열재, 암반의 열특성 및 수리지질 특성에 대한 상세설계를 통하여 설계 기화율 0.04 %/day 이하를 충분히 달성할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 수준의 기화율은 LNG의 장기저장을 가능하게 하여 동고하저의 비이상적인 LNG 수요시장에서 큰 경제적인 이점을 줄 수 있다.

본 연구 결과로부터 LNG 저장시설 주변 암반의 열전달 특성 및 기화율이 이론 및 수치적 방법으로 잘 예측될 수 있으며 열손실 및 기화량 측면에서 지하 암반동굴식이 유리하다는 것을 확인하였다.

암반동굴식 지하 LNG 저장시스템은 지하 암반 내에 건설되므로 방호나 테러 등의 위협으로부터 안전하고

기존 탱크에 비해 경제적이며 부지활용성이나 환경적인 측면에서 탁월한 장점을 가지고 있으므로 국내 실규모 저장시설의 건설을 시작으로 전 세계적으로 향후 차세대 LNG 저장시설로 광범위하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

이 연구는 과학기술부 기관고유 연구사업 ‘고심도 지하연구실험실(URL) 구축 및 실증실험연구’의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌

1. 박의섭, 정소걸, 김호영, 이대혁, 2005, 지하 LNG Pilot Cavern 주변암반의 Ice Ring 형성 수치모사, 한국암반공학회 추계학술발표회 논문집, 강원대학교, pp. 347-359.
2. 이대혁, 이희석, 김호영, 박의섭, 정소걸, 2004, 대전 LNG Pilot Cavern 주변암반의 온도 분포 및 거동 계측결과, 한국암반공학회 추계학술발표회 논문집, 한국지질자원연구원, pp. 35-48.
3. 정우철, 이희석, 이대혁, 김호영, 최영태, 2006, 대전 LNG Pilot Cavern에서의 배수 시스템 평가 및 Ice-ring 형성에 관한 냉열, 수리 연동 해석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제 16권 1호 pp. 38-49.
4. 한국지질자원연구원, 2003, LNG 지하저장 기반기술개발 및 Pilot Plant 운영결과 분석연구(1차년도)
5. 한국지질자원연구원, 2004, LNG 지하저장 기반기술개발 및 Pilot Plant 운영결과 분석연구(2차년도)
6. 한국지질자원연구원, 2005a, LNG 지하저장 기반기술개발 및 Pilot Plant 운영결과 분석연구(3차년도)
7. 한국지질자원연구원, 2005b, 천연가스 지하공동 비축시스템 타당성 분석, 산업자원부 정책용역과제보고서

8. Chung, S.K., 2006, Thermo-Mechanical Behavior of Rock Masses around Underground LNG Storage Cavern, Keynote Lectures in Proc. of 4th Asian Rock Mech. Symp. Nov. 2006 Singapore, p. 19-28.
9. Dalström, L.O., 1992, Rock Mechanical Consequences of Refrigeration - A Study Based on a Pilot Scale Rock Cavern". Ph.D Thesis, Chalmers University of technology, Gothenburg, Sweden.
10. Jeong, W.C., Woo, S.W., Lee, H.S., Lee, D.H., Lee, J.M., Choi, Y.T., Jung, Y.B. Park, E.S. and Chung, S.K., 2006, Coupled Heat Transfer and Water Flow Analysis on Ice Ring Formation around a Underground LNG Storage Caver". Proceedings of the GEOPROC 2006 International Symposium, Weiya Xu (ed). May, 22-25, 2006, Nanjing China, p. 602-625.
11. Krahn, J., 2004, Thermal Modeling with Temp/W, GEO-SLOPE International Ltd
12. Lee, D.H., Kim H.Y., Gatelier, N., Amantini, E., 2003, Numerical Study on the Estimation of the Temperature Profile and Thermo-mechanical Behaviour in Rock around the Taejon LNG Pilot Cavern, International Symposium on the Fusion Tech. of Geosystem Eng., Rock Eng. And Geophys. Exploration, Seoul, Korea, Nov. 18-19, 2003, p. 233-237.
13. Lee, H.S., Lee, D.H., Kim, H.Y. and Choi, Y.T., 2006a, Design Criteria for Thermo-mechanical Stability of Rock Mass around Lined Rock Cavern for Underground LNG Storage, *Tunnelling & Underground Space Technology*. 21, p. 337.
14. Lee, H.S., Lee, D.H., Jeong, W.C., Song, Y.W., Kim, H.Y. Park, E.S. and Chung, S.K., 2006, Heat transfer and Boil-off Gas Analysis around Underground LNG Storage Cavern, Proc. of 4th Asian Rock Mech. Symp. Nov. 2006 Singapore, p. 180.

정 소 길



1975년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1982년 Ecole des mines de Nancy (France)
DEA
1984년 Orleans 대학(France) 공학박사
Tel: 042-868-3231
E-mail: skchung@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구
부 책임연구원

박 의 섭



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구
부 선임연구원

이 희 석



1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 02-3700-7229
E-mail: hslee@skec.co.kr
현재 SK건설 GSUC팀 부장

정 우 철



1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2001년 서울대학교 대학원 지구환경
시스템공학부 공학석사
Tel: 02-3700-7064
E-mail: wcjeong-j@skec.co.kr
현재 SK건설 GEOTASK팀 대리