

## 대전 LNG Pilot Cavern에서의 배수시스템 평가 및 Ice Ring 형성에 관한 냉열수리 연동해석

정우철<sup>1)\*</sup>, 이희석<sup>2)</sup>, 이대혁<sup>3)</sup>, 김호영<sup>4)</sup>, 최영태<sup>5)</sup>

### Evaluation of Drainage System and Coupled Analysis of Heat Transfer and Water Flow for Ice Ring Formation in Daejeon LNG Pilot Cavern

Woo-Cheol Jeong, Hee-Suk Lee, Dae-Hyuck Lee, Ho-Yeong Kim and Young-Tae Choi

**Abstract** LNG storage in lined rock cavern demands various techniques concerned with rock mechanics, thermo-mechanics and hydrogeology in design, construction and maintenance stage. LNG pilot cavern was constructed in Daejeon in order to verify these techniques. In this paper, evaluation of drainage system and ice ring formation was studied by numerical simulation. By Modflow analysis in the viewpoint of aquifer and Seep/W analysis in the viewpoint of flow system, it was verified that the drainage system in the pilot cavern was efficiently operated. Since ice ring formation can be simulated by interactive relation between heat transfer and water flow, coupled analysis of those was performed. In this analysis, the position of ice ring was presumed and it was demonstrated that the formation is affected by velocity and direction of groundwater flow.

**KeyWords** LNG storage, lined rock cavern, drainage system, ice ring, coupling analysis of heat transfer and water flow

**초 록** 복공식 LNG 지하저장기지 건설을 위해서는 암반역학, 열역학 및 수리지질특성과 관련된 여러 가지 기술이 요구되며, 이러한 기술의 적용성을 입증하기 위한 일환으로 대전에 Pilot cavern을 건설하였다. 이 논문에서는 Pilot cavern에 적용된 기술 중 배수시스템 평가와 Ice ring 모사에 관한 수치해석 연구를 수행하였다. 대수층관점의 Modflow와 유동시스템 관점의 Seep/W 해석을 통해 적용된 배수시스템이 효율적으로 작용하였음을 확인하였다. Ice ring 형성은 열전달과 지하수 흐름의 상호작용을 통해 모사될 수 있는데, 이에 대한 모사를 위해 Temp/W-Seep/W 프로그램을 이용한 냉열수리 연동해석을 수행하였다. 이러한 해석을 통해 Ice ring의 형성 위치를 추정할 수 있었고, Ice ring 형성에 지하수 유동 속도 및 방향이 영향을 크게 미친다는 것을 확인했다.

**핵심어** 복공식 지하저장공동, LNG 저장기지, 배수시스템, Ice ring, 냉열수리 연동해석

## 1. 서 론

SK건설, Geostock 및 Technigaz 3사는 복공식 지하 암반공동에 LNG를 저장하는 새로운 기술을 상용하기 위한 사전작업의 일환으로 대전에 Pilot cavern을 건설하였다. Pilot cavern은 실규모 지하암반공동 건설을 위해 고안된 내조시스템이 적절한지를 확인하고, 그 동안

연구된 암반공학적, 열역학적 및 수리지질학적 기술들의 타당성을 입증하는데 그 목적이 있었다.

대전 Pilot cavern을 운영하는 동안, 주변 암반에 계측시스템을 설치하여 여러 연구기술들의 검증에 활용하였다. 이러한 기술들은 크게 세가지로 구분되는데, 암반, 절리의 변위 및 록볼트 축력 등의 암반역학적 특성, 저장공동의 냉각 및 해빙 과정중의 열역학적 특성 그리고 배수시스템 가동 전후의 수리지질 특성이 그것이다. 실제 이러한 특성들은 별개의 메커니즘으로 나타나는 것이 아니라, 서로 밀접한 연관을 가지게 된다. 저장공동이 극저온으로 냉각되면 주변 암반이 열수축을 한다거나 극저온부에서 지하수가 얼어서 지하수 흐름이 차단되는 등이 이러한 특성을 말해주는 것이다. 따라서, 각각의 특성들에 대한 개별적인 검증도 중요

<sup>1)</sup> SK건설 GEOTASK팀 대리

<sup>2)</sup> SK건설 GSUC팀 과장

<sup>3)</sup> SK건설 GSUC팀 부장

<sup>4)</sup> SK건설 GSUC사업담당 상무

<sup>5)</sup> SK건설 토목기술본부 상무

\* 교신저자 : wcjeong-j@skcc.co.kr

접수일 : 2005년 11월 1일

심사 완료일 : 2005년 12월 1일

하지만, 서로 연관된 부분을 동시에 고려하는 연동해석도 역시 중요하다. 현재 계측결과 중 암반역학적 특성과 열역학적 특성은 설계 시의 해석과 유사한 결과를 얻었으며, 콘크리트 라이닝 및 내조시스템으로 이루어진 저장 개념은 저장공동 안정성에 문제가 없는 것으로 파악되었다(이대혁 외, 2004b, 이대혁 외, 2004c). Pilot cavern 운영의 핵심 기술인 지하수 배수에 관련된 부분은 효율성 시험을 통해 배수 효율성에 대한 평가가 수행된 상태이다(이대혁 외, 2004a).

본 논문은 계측 결과 중 배수시스템에 의한 수리지질 특성에 관련된 부분을 수치해석 결과와 비교하였고, 열적 특성과 수리지질 특성 간의 연동해석을 통해 Ice ring 형성 과정을 모사해 보았다. 수리지질 수치해석을 위해 사용된 프로그램은 대수층 관점의 모델링을 위한

Modflow와 유동 시스템 관점의 모델링을 위한 Seep/W를 사용하였고, 냉열수리 연동해석은 Temp/W - Seep/W를 사용하여 해석을 수행하였다.

## 2. Pilot Cavern의 운영원리

본 Pilot cavern은 극저온의 저장물질을 지하 저장공동에 저장할 시 발생하는 주변 암반의 냉각 및 지하수의 빙결로 인한 영향을 관찰하기 위함이 가장 큰 목적이므로, 안전상 액화천연가스 LNG(액화 온도  $-162^{\circ}\text{C}$ ) 대신 액화질소 LN2(액화온도  $-196^{\circ}\text{C}$ )를 저장하였다.

본 Pilot cavern의 운영원리 및 운영도는 각각 다음 Fig. 1, 2와 같다. 일반적인 터널공사와 달리 강제적으로 지하수를 배수하게 되는데, 암반이 지하수에 의해

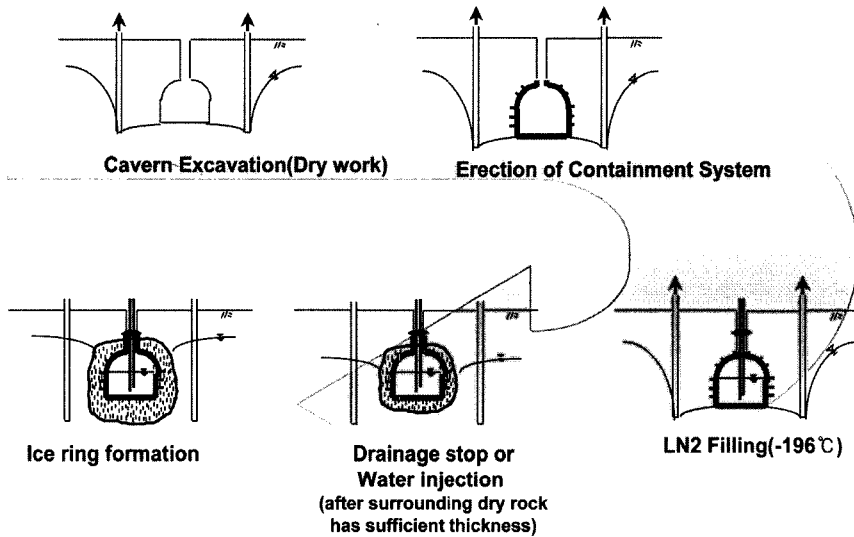


Fig. 1. Schematic picture of lined rock cavern in Daejeon Pilot Cavern

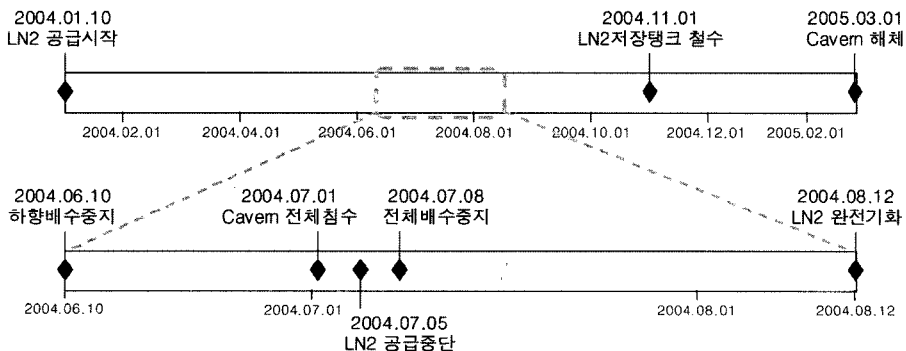


Fig. 2. Operation diagram of Daejeon LNG Pilot Cavern

포화된 상태에서의 냉각을 방지하기 위해 굴착 초기 단계부터 체계적인 배수 시스템에 의해 지하수를 배수하게 된다. 건설공사 전 과정을 거쳐 배수가 이루어진 다음, 극저온 상태인 액화질소를 저장하게 되면 저장공동 주위로부터 0℃ 등온선이 건조 암반에서 전파하게 된다. 0℃ 등온선이 일정거리 이상 전파한 후에 배수시스템을 중단하면, 지하수가 회복함에 따라 0℃ 등온선과 만나 저장공동 주위에 지하수가 얼어 더 이상 저장공동 안으로 유입되지 않는 구간인 Ice ring이 형성되게 된다.

### 3. 배수시스템과 관련된 수리지질 해석

#### 3.1 해석 개요

Fig. 3과 같이 대전 LNG Pilot Cavern에서는 지하수 냉각팽창에 의한 콘크리트 라이닝의 균열을 방지하기 위해 체계적이고 효과적인 배수시스템을 갖추고 지하수를 배수하였다. 본 배수시스템의 효율성을 평가하기 위해 Modflow 및 Seep/W를 사용하여 수치해석을 수

행하였고, 이를 예측결과와 비교하였다. 대수층 관점의 Modflow 해석은 1개 층(Layer)의 평면해석을 수행하였고, 유동시스템 관점의 Seep/W로는 대표단면에 대하여 해석을 수행하였다. 여기서, 대수층 관점의 해석은 각 대수층 내에서 수두차에 의한 수직방향의 흐름이 고려되지 않는 반면, 유동시스템 관점의 해석에서는 이것이 고려되는 점에 두 해석의 차이가 있다.

본 해석에 사용된 물성값들은 Table 1에 정리된 바와 같다. 수리전도도(Hydraulic conductivity)는 Lugeon test와 Injection/Fall-off test를 통해 구해진 값들을 기하평균하여 적용하였고, 저류계수(Storativity)와 공극율(Porosity)은 문헌값을 적용하였으며, 강우량은 기상청의 자료를 적용하였다. 초기 수위의 경우는 7개의 관측공에서 측정된 지하수위 데이터를 가지고 표고에 대하여 1차식을 구한 후, 전 해석구간에 대하여 보간법(Interpolation)을 사용하여 분포시켰다.

본 해석에서는 각 배수공에서 측정된 유량을 배수공에 대한 입력변수로 적용하여 해석결과 구해진 지하수

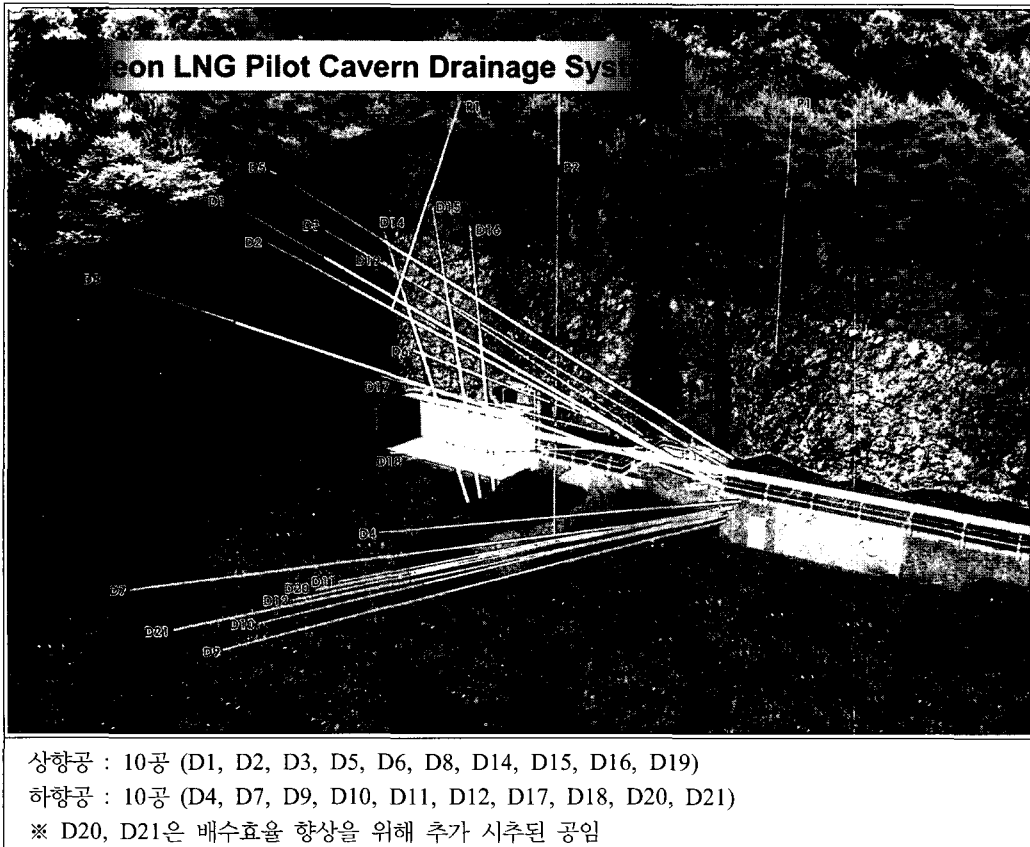


Fig. 3. Drainage system in Daejeon LNG Pilot Cavern

**Table 1.** Material properties for hydrogeologic modeling.

Rock	Hydraulic conductivity (m/sec)	Storativity		Porosity
		Specific storage	Specific yield	
Granite	$4.72 \times 10^{-6}$ (at saturation)	$1.0 \times 10^{-6}$	0.02	0.02

Note 1) Specific storage : The volume of water that a unit volume of aquifer releases from storage under a unit decline in hydraulic head.

2) Specific yield : The volume of water that an unconfined aquifer releases from storage per unit surface area of aquifer per unit decline in the water table.

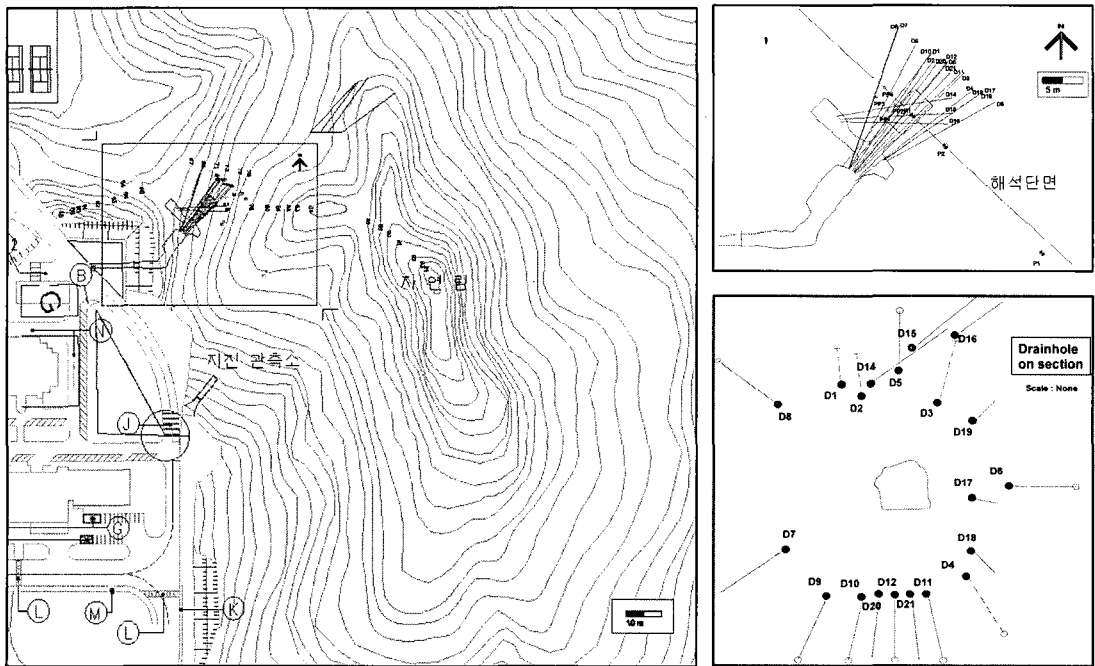
위 강하량을 예측결과와 비교하였다. 해석 기간은 모든 배수시스템이 가동된 2003년 9월 18일부터 하향배수를 중지시킨 2004년 6월 10일까지이다. 총 배수공 20공에서 실제 배수된 공은 D6, D8, D18, D19, D20, D21 뿐인데, 이는 기존에 진입터널이 존재한 상태에서 터널까지 자연배수가 된 상태이고 수리간섭시험을 통해 일부 배수공에서 사전에 배수가 된 상태여서 저장공동 주위에 지하수위가 주변에 비하여 다소 떨어져있는 상태이기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4는 본 해석이 수행된 지역의 Boundary와 해석 단면을 보여주고 있다. 이때, 해석구간은 입의의 수리경

계(Hydraulic boundary)에 의해 나뉘어지지 않고 배수 영향 범위가 수리경계에 영향을 줄 정도로 넓지 않으므로, 배수의 영향을 받지 않을 정도의 충분한 거리의 경계(Distant boundary)를 설정하여 본 해석을 수행하였다.

**3.2 해석 결과**

Fig. 4의 해석 모델과 해석단면에 대하여 Modflow 및 Seep/W 해석을 수행하였다. 하향배수를 중지시킨 2004년 6월 10일까지의 해석된 수위강하량을 예측값과 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 예측공 중 R1공의 경우는 저장공동 천단 상부 5.6 m 지점(EL+59 m)까지만 굴착



(a) Model boundary(distant boundary)

(b) Model section

**Fig. 4.** Model boundary and section for analysis

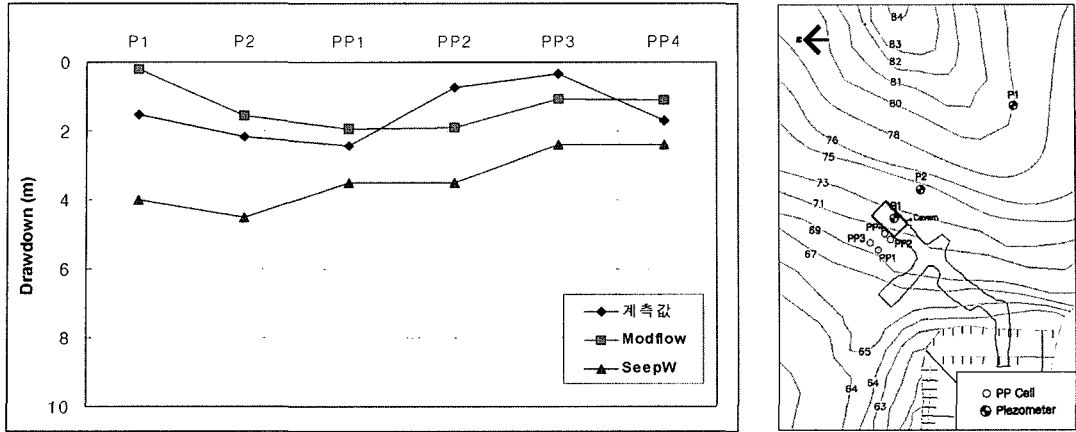


Fig. 5. Comparison between measured and analyzed drawdown

되어 지하수위가 그 이하로 떨어질 경우는 측정이 불가능하였으므로 결과를 비교하지 않았다.

해석결과, Modflow 해석결과는 계측값과 유사하고, Seep/W 해석결과는 계측값보다 다소 크게 나온 것으로 나타났다. Fig. 5에서 간극수압 측정셀(Porepressure cell, PP1~PP4)의 경우는 간극수압을 측정하여 지하수위를 유추하는 시스템으로, 배수가 완료된 상태와 같이 지하수위가 측정셀 위치 아래로 떨어지는 경우 정확한 값을 얻어내는 데 어려움이 있다. 따라서 계측값 중 정확하다고 말할 수 있는 것은 P1, P2이며, 이 계측치만 비교해 보면 Modflow 해석결과는 계측값과 유사하게 나왔고, Seep/W 해석결과는 수위강하가 계측값에 비해 다소 크나 그 양상은 비슷한 것으로 나타났다. Seep/W 해석 결과와 Modflow 해석 결과가 이렇게 다르게 나온 이유는 대수층 관점의 평면해석은 수직방향의 흐름을 고려하지 않지만, 유동 시스템 관점의 단면해석의 경우 수직방향의 흐름을 고려하여 수위강하량이 더 커지기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 해석 결과는 실제 암반층에서 불연속면을 따라 흐르는 양상을 연속체 해석 프로그램으로 모사했다는 점에서 해석 결과의 정확성이 다소 떨어질 수 있다. 하지만, Fig. 5에서 보여지는 것처럼 이러한 해석이 설계 단계의 배수량 유추와 배수 효율성 평가에는 효과적이라 판단된다.

#### 4. Ice ring 형성에 대한 냉열수리 연동해석

##### 4.1 냉열수리 연동해석

냉열수리 연동해석(Coupled analysis for ground

freezing and water flow)이란 열전달과 지하수 흐름이 동시에 고려되어 해석이 수행되는 것으로, 지반이 얼고 녹는 과정에서 지하수 흐름의 방향과 속도가 바뀌게 되고, 지하수 흐름의 방향과 속도로 인해 열전달에 영향을 주는 과정이 해석에 반영된다. Fig. 6과 같이 함수비 및 지하수의 유속과 흐름 방향에 따라 열전달이 더 빨라지거나 느려지게 되고, 지반과 지하수가 얼게 되면 지하수 흐름의 방향이 바뀌거나 속도가 급격히 저하되게 된다.

본 해석에서는 Temp/W와 Seep/W를 사용하여 냉열수리 연동해석을 수행하였다. Temp/W는 다공질 매질을 대상으로 하는 열전달 유한요소 프로그램이고, Seep/W는 지반-지하수-공극간의 관계를 고려한 침투해석 유한요소 프로그램이다.

연동해석이 수행되는 방법은 Fig. 7과 같다. 우선 두 프로그램은 각 Time step 마다 번갈아 해석이 수행되게 되는데, 각 해석된 결과를 상대 프로그램에 전달시켜 준다. 그런 다음 전달된 결과는 다음 Time step에서 각각 입력변수를 변경시켜 해석에 적용될 수 있게 한다. 이런 방식으로 두 프로그램이 모든 Time step에 대해서 입력변수가 수정되면서 번갈아 해석을 수행해 모든 과정을 완료시킨다.

냉열수리 연동해석을 수행할 시, 적용되는 지배방정식은 다음과 같다(Krahn, 2004a, Krahn, 2004b)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho_c V_x \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_c V_y \frac{\partial T}{\partial y} + Q = (c + Lw \frac{\partial w_s}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

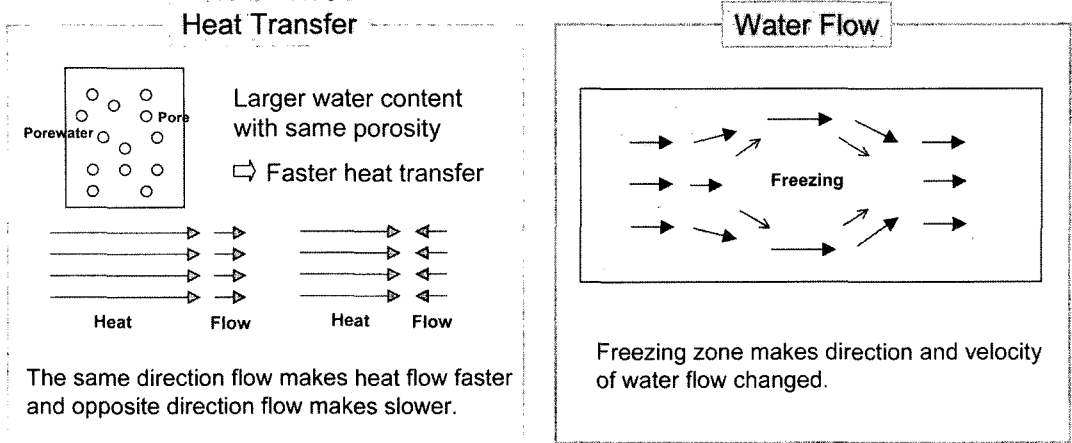


Fig. 6. Coupling of heat transfer and water flow

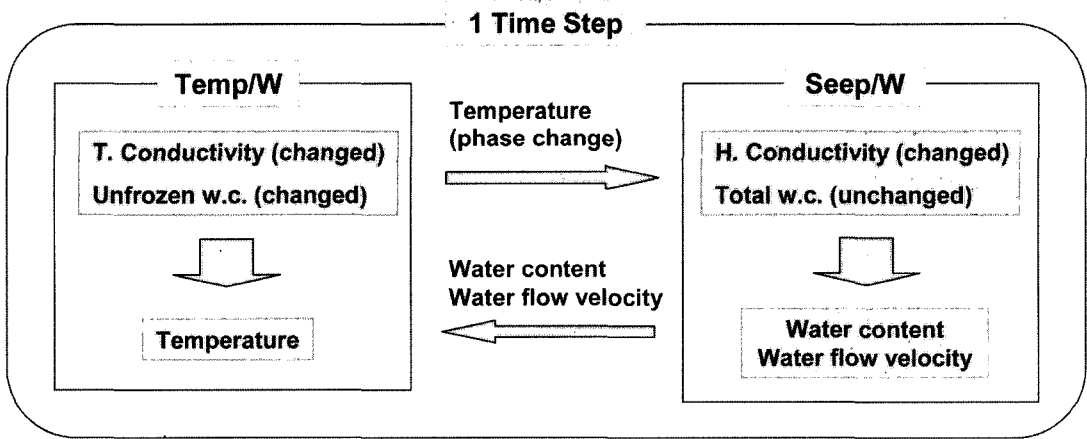


Fig. 7. Temp/W - Seep/W coupling

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = m_w r_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad \left( = \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \quad (2)$$

여기서,  $k_{xy}$ 는 x, y 방향의 열(수리)전도도이며, Q는 단위면적당 열유량(flux)이다.  $\rho_w$ 는 공극수의 단위부피당 비열,  $V_{xy}$ 는 x, y 방향에서의 지하수 유동속도, c는 단위부피당 열용량, L은 지하수의 잠열을 나타낸다. 또한, w는 지반의 함수(부피)비,  $w_u$ 는 전체함수비에 대하여 얼지 않고 남아있는 함수비(Unfrozen water content,  $0 \leq w_u \leq 1$ ),  $m_w$ 는 지반의 압축성,  $r_w$ 는 물의 단위중량을 나타낸다.

식 (1)과 (2)는 각각 Temp/W, Seep/W에 적용되는 지배방정식인데, 식 (1)의 세 번째 및 네 번째 term은

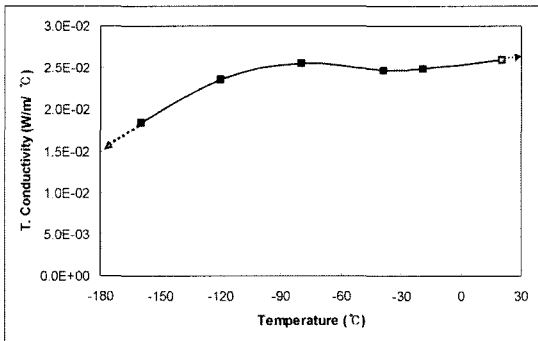
대류성 열전달(Convective heat transfer)을 나타내는 것으로 Seep/W에서 해석된 함수비 및 유동속도가 열전달에 반영이 되는 것을 나타내고, 방정식 오른쪽 term의  $Lw(\partial w_u / \partial T)$ 는 공극수의 상변화 시 발생하는 잠열을 나타낸다. 대류성 열전달은 전달되는 매질이 액체 및 기체인 경우에 해당하는 열전달 형태로 전도에 비해 열전달율이 작지만, 지하수 흐름 속도가 클 경우에는 Ice ring의 위치와 두께에 영향을 주게 된다.

Temp/W 해석에서 저장공동 주위의 온도와 상변화 구간이 결정되면, 식 (3)과 같이 0°C 이하로 떨어지는 온도변화량에 따라 흡입압이 발생하게 된다(Black and Tice, 1989).

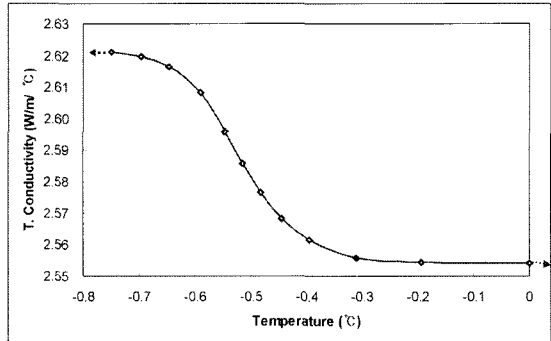


Table 2. Material properties for coupled analysis.

Material	Temp/W				Seep/W
	T. conductivity (k, W/m/°C)		Volumetric heat capacity (C <sub>p</sub> , J/m <sup>3</sup> /°C)		H. conductivity (m/sec)
	Frozen	Unfrozen	Frozen	Unfrozen	
PU foam	Variable		1.088×10 <sup>5</sup>		Optional
Concrete	2.621	2.554	1.811×10 <sup>6</sup>		3.3×10 <sup>-7</sup> (at saturation)
Rock	2.621	2.554	2.480×10 <sup>6</sup>	2.520×10 <sup>6</sup>	



(a) PU foam



(b) Rock &amp; Concrete

Fig. 9. Thermal conductivity distribution for temperature

#### 4.3 해석 결과

연동해석에 앞서 초기 열전달 상태를 구하기 위해 역 화질소 공급 이후부터 하향 배수를 중단하기 이전까지의 열전달 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 10과 같다. 해석결과, 하향 배수를 중단하기 직전인 2004년 6월 10일에는 0°C 등온선이 저장공동 하부, 측면, 상부에서 인버트 기준으로 각각 -3.9 m, +5.2 m(측면방향), +4.6 m 정도로 전파된 것으로 나타났다. 저장공동 측면 방향에 설치된 Extensometer의 온도 계측 데이터와 비교한 결과, 가장 가까운 C6에서의 해석결과가 계측결과와 유사한 결과를 보이고 있어, 초기 열전달 해석 결과의 신뢰성을 입증해 주고 있다.

이상에서 해석된 결과를 초기조건으로 하여 하향배수가 중단된 후 0°C 등온선과 상승하는 지하수위가 만나 Ice ring이 형성되는 과정을 모사해 보았다. Fig. 11은 Ice ring 형성 과정을 날짜별로 나타난 그림인데, 0°C 등온선과 지하수 침투선으로 둘러싸인 구간을 Ice ring이 형성된 구간으로 추정하였다. 여기서 지하수 침투선은 Seep/W에서의 지하수위선으로, 간극수압이 0인 지점을 연결한 등수압선이며, 이는 포화 구간과 불포화 구간의 경계선을 의미한다.

냉열수리 연동해석에서 수리지질 특성에 관련된 것 중 열 전달에 영향을 주는 요소로 잠열과 유동(유속 및 흐름방향)이 있는데, 본 해석 구간과 같이 대상지반이 암반층인 경우는 잠열의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. Fig. 12는 일반적인 암반층에서 0°C 이하로 온도가 떨어질 경우, Unfrozen water content를 실험을 통해 구한 값을 나타낸 것이다(Krahn, 2004b). 이 실험 결과에 따르면, 온도가 -0.75°C로 떨어졌을 때의 Unfrozen water content가 0.05의 매우 작은 값으로 감소하는 것을 보았을 때, -1.0°C 아래로만 떨어져도 Unfrozen water content가 거의 0에 가까워 질 것으로 보인다. 따라서 본 해석구간에서는 잠열로 인해 지하수가 0°C 이하에서 완전히 얼지 않고 물과 얼음이 공존하는 구간이 0°C 등온선에서 -1°C 등온선 사이 구간에서만 위치하게 되고, 이는 배수된 지하수가 상승하여 저장공동 근처의 0°C 이하의 암반으로 침투하는 순간 대부분이 얼음으로 변하게 된다는 것을 말해준다.

이처럼 Ice ring 형성에 잠열의 영향은 그다지 크지 않지만 지하수 흐름은 큰 영향을 준다. Fig. 13에서 보여지는 것처럼, 배수가 중지되면서 상승하는 지하수가 0°C 등온선과 만났을 때, 만나는 구간에서는 열전달과



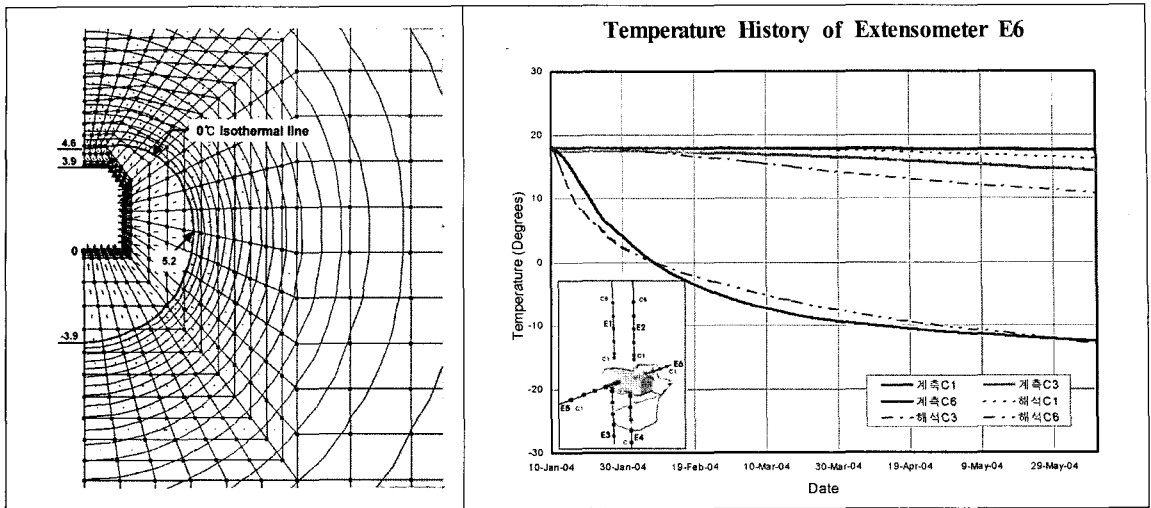


Fig. 10. Results of initial heat transfer analysis

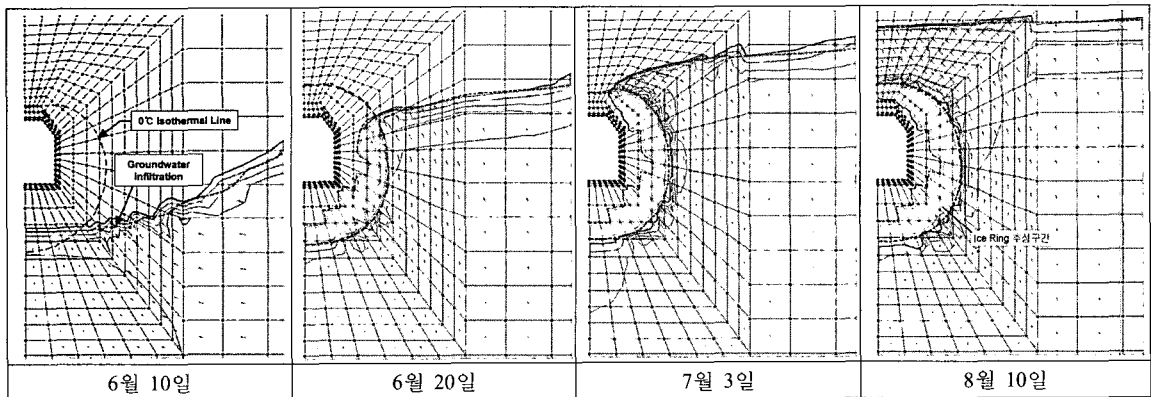


Fig. 11. The process of Ice ring formation

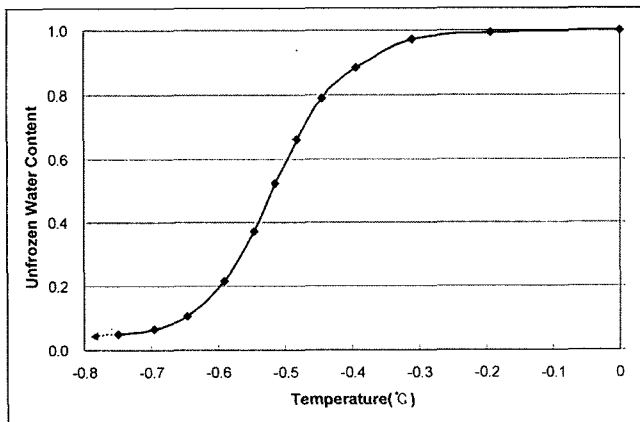


Fig. 12. Unfrozen Water content by latent heat in frozen rock below 0°C (Krahn, 2004b)

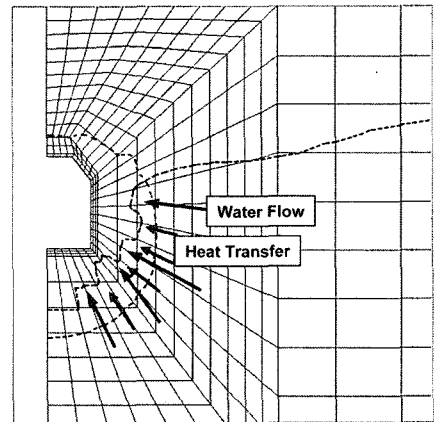


Fig. 13. Direction of heat transfer and water flow

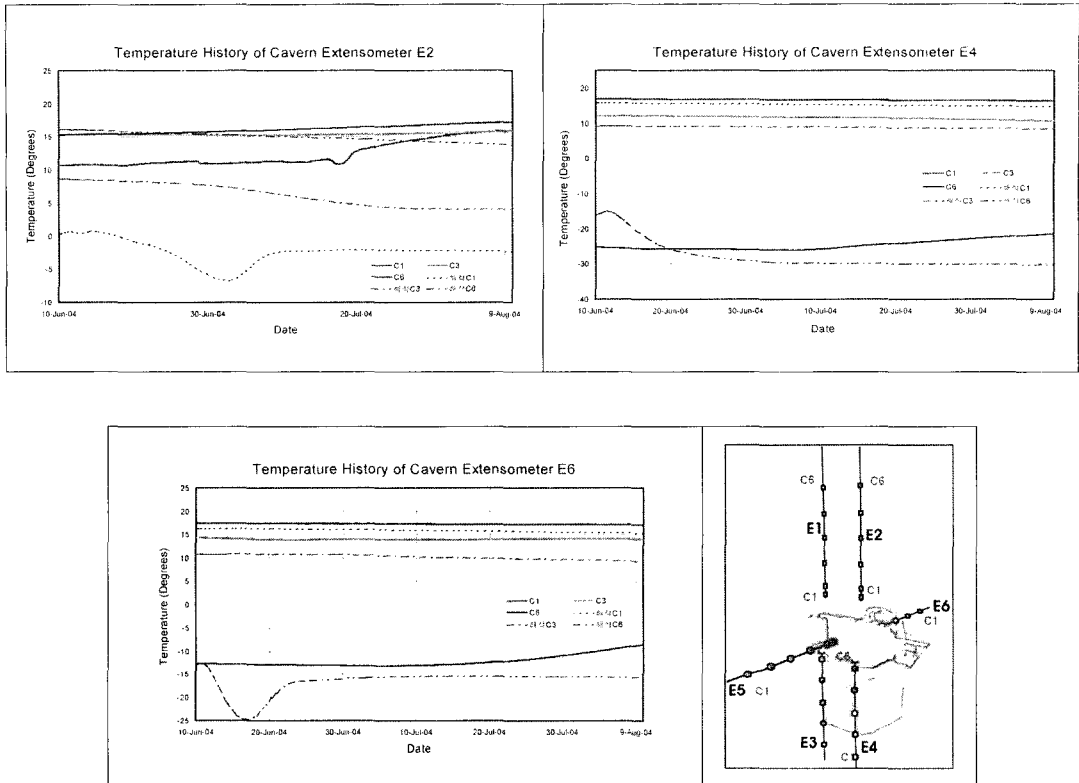


Fig. 14. Comparison the temperature history by numerical analysis and real measurement

지하수 흐름의 방향이 같은 방향이 된다. 따라서, 식 (1)에서처럼 상온의 지하수가 가지고 있는 열량이 대류성 열전달의 형태로 0°C 등온선과 지하수위가 만나는 구간에 추가로 전달되고, 이로 인해 0°C 등온선이 전파되는 속도가 느려지며, 0°C 등온선의 안쪽 구간에서는 온도가 계속 떨어지지 않게 된다. 이러한 결과는 Fig. 14의 계측 결과를 통해서도 증명될 수 있다.

Fig. 14에서 저장공동 측면(E6)과 하부(E4)에서는 수치해석 결과와 계측 결과가 전반적으로 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 하지만, 상부구간은 열전도에 있어 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 실제로는 8월 10일까지 저장되어 있던 액화질소가 완전 기화되었지만, 해석에서는 이를 고려하지 않아 열전달이 실제에 비해 상당히 크게 나온 것으로 생각된다. 이러한 특징은 측면(E6)에서도 계측결과에 비해 온도가 약간 낮은 것으로 나타나고 있으며, 해당 기간 동안 모든 접촉면에 액화질소가 접촉해 있는 하부(E4)의 경우가 계측결과와 가장 유사하게 나왔음을 알 수 있다.

Fig. 15는 지하수위 분포에 대한 해석 결과와 계측 결

과를 비교한 것이다. 저장공동 중심에서 수평거리로 약 11.0 m 떨어진 곳에 위치한 P2공의 계측결과와 비교해 보았을 때, 하향 배수가 중단된 뒤 상승하는 지하수의 모사가 유사했음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 대전 LNG pilot cavern을 운영하는 동안 활용된 기술 중 배수시스템에 관한 수리지질 특성과 저장공동 주변 냉각된 암반과 배수가 중단되어 상승하는 지하수위와 만나 Ice ring이 형성되는 과정을 검증하였다. 배수시스템에 관한 수리지질 특성은 대수층 관점의 모델링을 위한 Modflow와 유동 시스템 관점의 모델링을 위한 Seep/W를 사용하여 수치해석을 수행한 후, 그 결과를 관측공에서 관측된 지하수위와 비교하였다. Ice ring 형성에 대한 모사는 Temp/W - See/W를 사용하여 냉열수리 연동해석을 수행하였고, 마찬가지로 계측결과와 비교하였다. 본 연구에서 수행된 해석과 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

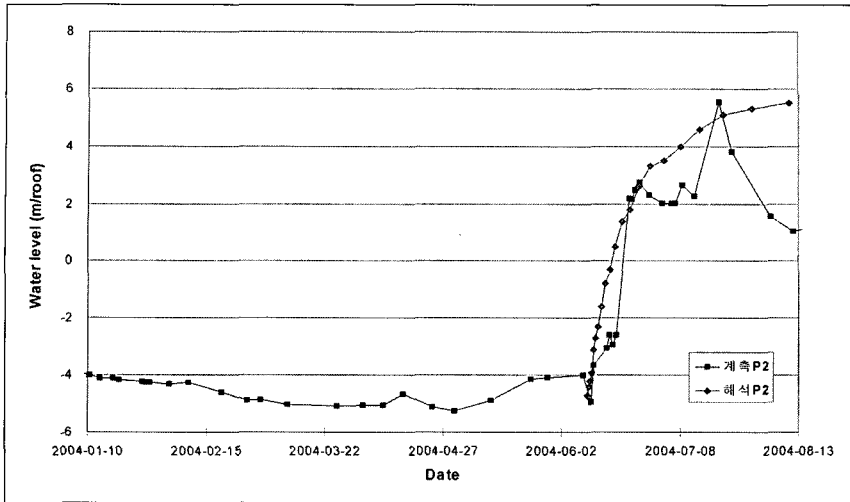


Fig. 15. Comparison between ground water level by numerical analysis and real measurement

- (1) 배수시스템에 대한 검증을 위해 각 배수공에서 측정된 유량을 배수공에 대한 입력변수로 적용하여 구해진 지하수위 강하량을 계측결과와 비교하였다. 해석결과, Modflow 결과는 계측값과 아주 유사하게 나왔고, Seep/W 경우는 수위하강이 다소 크나 그 양상은 매우 비슷한 것으로 나타났다.
- (2) 본 수리지질 해석 결과는 실제 암반층에서 불연속면을 따라 흐르는 양상을 연속체 해석 프로그램으로 모사했다는 점에서 정확성이 다소 떨어질 수 있다. 하지만, 이러한 해석이 설계 단계의 배수량 유추와 배수 효율성 평가에는 효과적이라 판단된다.
- (3) 액화질소가 공급되기 시작해서 하향 배수를 중단하기 직전까지 0℃ 등온선이 저장공동 하부, 측면, 상부에서 인버트 기준으로 각각 -3.9 m, +5.2 m(측면 방향), +4.6 m 정도로 전파된 것으로 나타났다. 저장공동 측면 방향에 설치된 Extensometer의 온도 계측 데이터와 비교한 결과, 매우 유사한 결과를 보이고 있어 초기 열전달 해석 결과의 신뢰성을 입증해 주고 있다.
- (4) 하향 배수가 중단된 이후부터 액화질소 기화가 완료될 때까지의 냉열수리 연동해석을 수행하였으며, Ice ring 형성구간은 0℃ 등온선과 간극수압이 0인 지점을 연결한 지하수위선으로 둘러싸인 구간으로 추정하였다. Ice ring 형성과 관련하여 대전 Pilot cavern이 위치한 구간과 같은 암반층에서는 잠열의 영향은 크지 않은 것으로 나타났으며, 상승하는 지하수의 속도와 방향에 크게 영향을 받는 것으로 분

석되었다.

- (5) 냉열수리 연동해석 결과, 저장공동 측면과 하부에서 온도 계측 결과가 전반적으로 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있었다. 상부구간은 열전도에 있어 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 해석 시 액화질소가 완전 기화되는 것으로 고려하지 않아 열전달이 실제에 비해 크게 나온 것으로 판단된다. 지하수위 분포 역시 계측결과와 매우 유사해, 하향 배수를 중단하고 상승하는 지하수의 모사가 적절했음을 증명했다.

#### 참고문헌

1. 이대혁, 도효림, 김호영, Anne Moretto, 2004, 대전 LNG 지하저장 Pilot Cavern에서의 지하수 배수 시스템 설계 및 결과, 한국암반공학회 터널분과위원회 학술세미나 논문집, pp. 85-94
2. 이대혁, 이철욱, 이희석, 김호영, 정소걸, 한공창, 2004, 대전 LNG Pilot Cavern 건설공사 요약 및 초기 계측자료 분석 결과 - 암반공학적 측면을 중심으로, 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 85-100
3. 이대혁, 이희석, 김호영, 박의섭, 정소걸, 2004, 대전 LNG Pilot Cavern 주변 암반의 온도분포 및 거동 계측 결과, 한국암반공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 35-48
4. Black, P. and Tice, A., 1989, Comparison of Soil Freezing Curve and Soil Water Curve Data for Windsor Sandy Loam, Water Resources Research, 25(10): 2205-2210
5. Krahn, J., 2004, Seepage Modeling with Seep/W, GEO-SLOPE International Ltd
6. Krahn, J., 2004, Thermal Modeling with Temp/W, GEO-SLOPE International Ltd

**정우철**

1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
2001년 서울대학교 대학원 지구환경시스  
템공학부 공학석사



Tel: 02-3700-7064  
E-mail: wcjeong-j@skec.co.kr  
현재 SK 건설 GEOTASK 팀 대리

**이희석**

1993년 서울대학교 공과대학 자원공학  
과 공학사  
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사



Tel: 02-3700-7229  
E-mail: hslee@skec.co.kr  
현재 SK 건설 GSUC 팀 과장

**이대혁**

1991년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사



Tel: 02-3700-8644  
E-mail: dhlee-d@skec.co.kr  
현재 SK 건설 GSUC 팀 부장

**김호영**

1980년 서울대학교 공과대학 자원공학  
과 공학사  
1982년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사



Tel: 02-3700-7481  
E-mail: hykim-d@skec.co.kr  
현재 SK 건설 GSUC 사업담당 상무

**최영태**

1979년 연세대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1999년 연세대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
2006년 수원대학교 대학원 토목공학과  
공학박사



Tel: 02-3700-7477  
E-mail: ytchoi@skec.co.kr  
현재 SK 건설 토목기술본부 상무