

지하 LNG 저장기지에서의 절리면 내 Ice Ring 형성에 관한 열-수리 연동해석

정우철, 김택곤, 이진무 (SK건설주식회사 GEOTASK팀)
박의섭, 정소걸 (한국지질자원연구원)

1. 서론

수 십 년간의 석유류 지하 저장 기술과 전 세계적으로 적용되고 있는 LNG 운반선 및 지상탱크의 멤브레인에 사용되는 단열 내조(containment) 시스템에 새롭게 개발된 지하수 배수 및 동결링(Ice Ring) 개념을 결합하여 복공식 LNG 지하 암반 저장 기술이 개발되었으며, 주요 핵심기술은 다년간의 부단한 연구개발 및 특허를 통해 확보되었다(이대혁 외, 2004a, Lee et al., 2006). 이러한 연구성과를 바탕으로 현재 상용화 단계에 있는 복공식 LNG 지하 저장 기술은 실규모 프로젝트의 수행에 있어 보다 경제적인 시공과 최초로 수행되는 사업에 대한 Risk의 최소화를 위한 세부적인 연구가 필요하였다.

복공식 LNG 지하 암반 저장의 핵심기술 중 하나인 동결링 형성 기술은 지하 암반과 지하수의 열특성과 수리지질특성의 복합적인 메카니즘에 의해 규명이 가능한 기술로, 대전 LNG Pilot Plant의 설계, 시공 및 운영을 통해 실증 적용되었으며, 여기서 얻어진 계측결과와 수치해석 결과와의 비교한 연구 논문들을 통해 검증된 바 있다(정우철 외, 2006, 정용복 외, 2006, Jeong et al., 2006).

동결링 형성에 관련된 연구 결과, 절리면 내를 흐르는 지하수의 동결온도는 동결시의 잠열, 불연속면의 간극과 지하수 유동 속도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Jeong et al., 2006). 여기서 잠열에 의한 동결온도의 영향은 현재 실험 및 이론적으로 규명되어 계산이 가능하지만, 불연속면의 간극과 지하수 흐름속도에 의한 동결온도 변화에 관련된 연구는 미미한 상태이다. 본 논문에서는 절리면 내 지하수 유동에 대한 열-수리 연동해석과 CFD 해석을 통해 동결링 형성 시 지하수 동결 온도에 관하여 분석하였다.

2. 지하수 동결온도

동결링 형성의 개념은 그림 1에서 잘 설명되어 있다. 공동 주변과 하부에 배수공을 설치하여 굴착과 함께 공동 주변의 지하수를 완전 배수시키고, 공동 내부에 내조시스템을 완성한 후 -162°C 의 극저온의 LNG를 저장 운영하게 되면 공동 주변 암반의 온도가 점차 낮아지게 된다. 지하수가 동결하게 되는 온도인 0°C 의 등온선은 저장시간이 증가할수록 공동 주변으로 전파되어 나가게 되며, 공동과 층

분한 거리까지 전파되었을 때, 지하수 배수를 점진적으로 중단하면 지하수가 상승하여 0℃ 등온선과 만나 동결되어 동결링이 형성되게 된다.

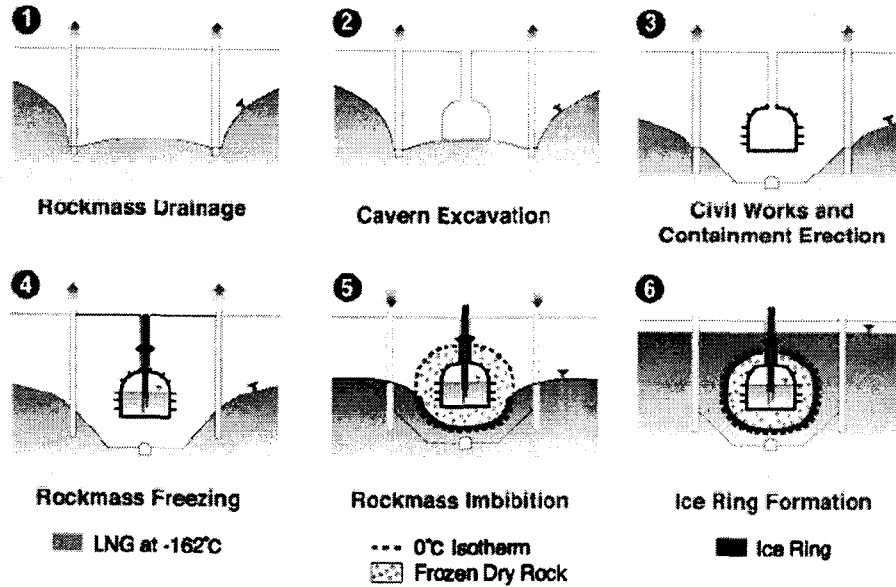


그림 1. 동결링 형성 개요도

이때 지하 암반내의 지하수는 절리면을 따라 흐르게 되는데, 절리면 내 지하수가 동결될 시 지하수는 0℃ 등온선과 만나는 직후 바로 동결되는 것이 아니라 0℃ 등온선 안쪽으로 일정 거리 이상을 침투한 후 동결이 되게 된다. 이러한 이유는 크게 2가지로 요약될 수 있다. 하나는 지하수가 동결하면서 상변화하는 부피만큼의 열량이 잠열로 발생하는데, 이에 의해 추가되는 열량만큼 지하수 동결을 막아주기 때문이다. 여기서 발생하는 잠열은 지하 암반 내 함수비를 알 수 있다면 이론적으로 계산 가능하다. 또 하나의 이유는 0℃ 등온선 안쪽의 암반 절리면을 따라 지하수가 통과할 때, 상온의 지하수에서 냉각된 암반으로의 열전달이 이루어지는데 일정한 시간이 소요되기 때문이다. 이때의 열전달 소요 시간은 절리의 간극에 영향을 크게 받게 되고, 상승하는 지하수는 그 유동 속도가 빠를수록 0℃ 등온선 안쪽으로 더 깊이 침투하게 될 것이다. 따라서 0℃ 등온선 내 지하수 침투거리는 절리의 간극과 상승하는 지하수의 유동속도에 영향을 받는다고 말할 수 있다(Jeong et al., 2006). 본 논문에서는 0℃ 등온선 안쪽으로 침투한 지하수가 완전히 동결한 지점의 접촉 암반의 온도를 '지하수 동결온도'로 편의상 명명하였다(그림 2 참조).

기존 연구에서는 끈지암 지하저장고 운영사례 분석 및 모델링 연구(이규상, 2004) 결과를 적용하여 지하수 동결온도를 -3℃로 가정하였다. 하지만 앞서 설명한 것처럼 지하수 동결온도는 절리의 간극과 지하수 유동속도에 따라 달라지며, 이에 대한 연구는 현재 미미한 상태이다. 본 논문에서는 절리면 내 지하수에서의 열-수리 연동해석과 CFD 해석을 통해 동결링 형성 시 지하수 동결 온도에 관하여 분석하였다.

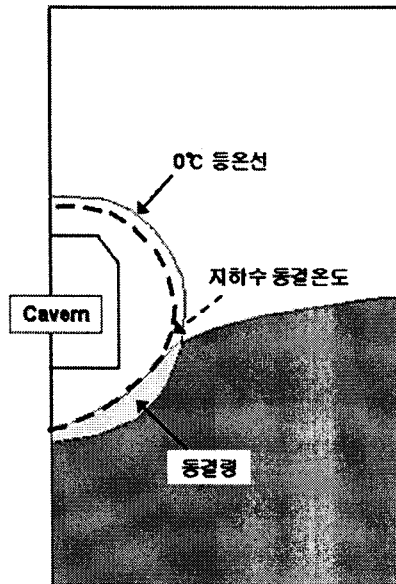


그림 2. 동결링과 지하수 동결온도

3. 열-수리 해석 방법 및 조건

3.1 해석 방법

본 해석은 상용 CFD 코드인 FLOW3D를 이용하여 수행되었으며, 해석 과정은 다음과 같다. 그림 3에서처럼 동결링 생성 시 상승하는 지하수는 암반 내에서 절리면을 따라 흐르게 된다. 앞서 설명한 바와 같이 지하수 동결온도는 암반 내 절리면의 간극과 지하수의 유동속도에 의해 영향을 받으므로, 본 해석에서는 두 가지 영향 요인을 변화시켜 가면서 이에 따라 지하수가 0°C 등온선 안쪽으로 어느 정도 침투하는 지를 수치 모델링을 통해 모사하여 지하수 동결온도를 구하였다.

해석 과정은 크게 세가지로 구분하여 모사하였다. 우선 사전 해석에서 절리면 내 지하수 유동에 미치는 모세관력의 영향을 분석하였다. 다음 본 해석에서는 RMR 분류등급을 참조하여 절리 간극에 따라 소규모 절리와 대규모 절리로 구분하여 각각 해석을 수행하였다.

그림 4는 FLOW3D 해석에 사용된 해석모델을 보여준다. 모델 하부 절리면을 통하여 상승하는 지하수가 0°C 등온선을 통과하게 되면 지하수가 주변암반에 빼앗긴 열량에 비례하여 얼음으로 상변화를 일으키게 된다. 이 때 전체 지하수 양에서 상변화된 정도를 그림 4b에서처럼 Solid fraction으로 나타내며, 이 값이 1이 되면 완전한 얼음으로 바뀌어 지하수 유동이 멈추게 된다. 실제 해석에서는 모델링 소요 시간의 단축을 위해 반단면 해석을 수행하였으며, Solid fraction이 0.95 이상이 되면 완전히 얼음으로 되는 것으로 가정하여 해석을 중단시켰다.

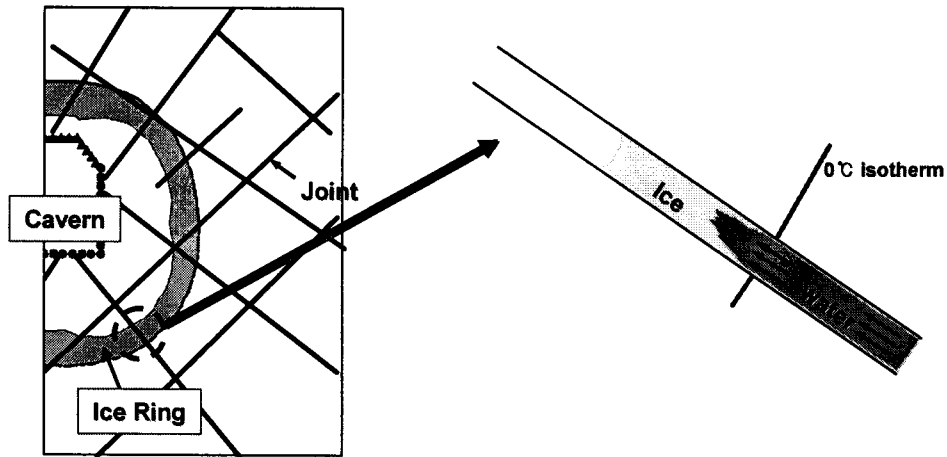
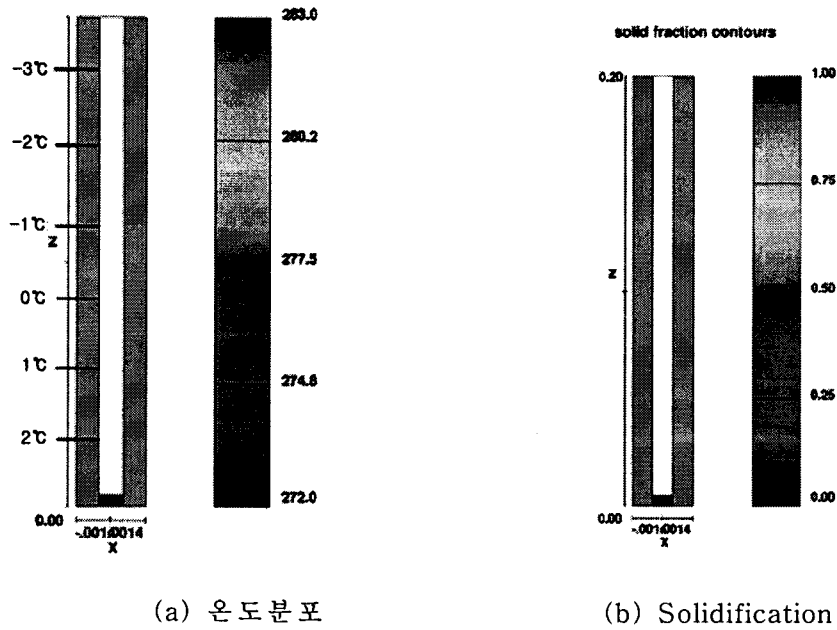


그림 3. 절리면 내 Ice Ring 형성



(a) 온도분포

(b) Solidification

그림 4. 해석 모델

3.2 해석 조건

본 해석의 주요 입력 변수는 절리면의 간격, 암반의 온도가 0°C 근처에서 절리면 내 동수경사(hydraulic gradient), 암반내의 온도분포로 나눌 수 있다.

이러한 변수에 대해 표 1에 정리된 범위의 값을 해석에 적용하였다. 표 2는 이 밖에 FLOW3D의 CFD 해석에 요구되는 기타 물성치를 정리하여 나타내었다.

표 1. 입력변수 적용범위

입력 변수	적용 범위
절리면의 간극	0.05 ~ 5.0 mm
동수 경사	0.1 ~ 5.0
공동 주변 등온선의 간격	0.3 m/°C

표 2. CFD 해석 물성치 요약

물의 밀도	1000	Kg/m ³
얼음 밀도	1000	Kg/m ³
물의 동점성계수 (Dynamic viscosity coefficient of water)	0.001	Pa/s
물/암반의 접촉각(Contact angle)	90	Degree
물의 표면장력(Surface tension)	0.073	N/m
물의 동결점	273	K
물의 열전도도(Thermal conductivity)	65	W/mK
암반의 열전도도	1.88	W/mK
물의 비열(Specific heat)	4187	J/KgK
얼음의 비열	2040	J/KgK
물의 잠열	3.35E+05	J/KgK

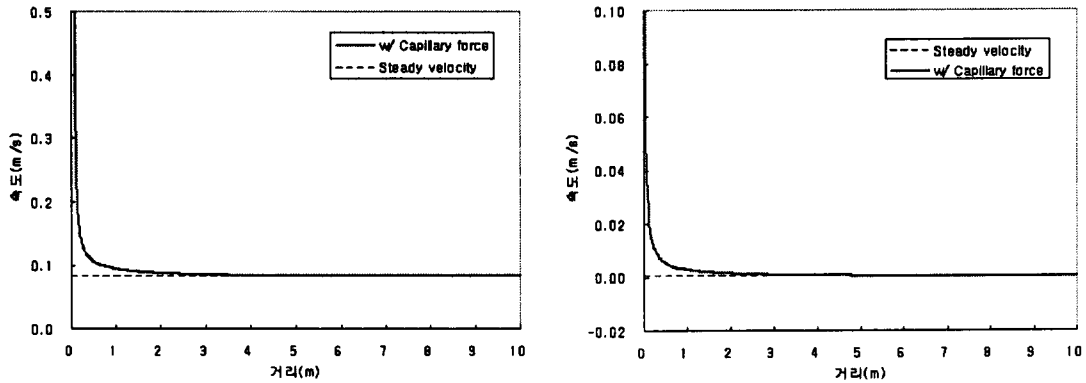
4. 해석 결과

4.1 절리면 내 모세관력의 영향

그림 4의 모델에 대하여 절리간극이 1mm, 동수경사 0.1의 조건과 절리간극 0.05mm, 동수경사 0.1인 조건으로 해석한 결과를 각각 내부유동의 정상상태(Steady-state)의 결과와 비교하였으며, 그림 5는 해석 결과를 보여주고 있다.

해석결과에서 진행거리가 크지 않은 초기에는 모세관력의 영향으로 절리면을 지나는 지하수의 속도가 크게 나타나지만, 진행거리가 1m 이상으로 길어짐에 따라 정상상태의 내부유동인 경우의 속도에 근접해 가는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 절리면내를 따라 지하수가 유동함에 따라 모세관력의 영향은 점점 미미해지고 주로 동수경사에 따른 수두차와 절리면에서의 점성력이 지배적인 영향을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 배수 종료 후 상승하는 지하수가 최소 1m 이상을 진행 한 후 0°C 등온선과 만나게 될 경우, 절리면의 유동양상에서 모세관력의 영향은 미미하다고 말할 수 있으며, 본 해석에서는 모세관력의 영향을 무시하였다.



(a) 절리간극 1mm, 동수경사 0.1 (b) 절리간극 0.01mm, 동수경사 0.1

그림 5. 절리면 내 모세관력의 영향

4.2 소규모 절리에서 동결링 형성

일반적으로 지하암반 내 절리면을 따라 흐르는 지하수 유동 속도는 빠르지 않아 Darcy 법칙이 적용되며, 레이놀드(Reynolds, Re) 수가 2000이하인 층류에 해당한다. 층류 유동은 절리면의 간극에 따라 다음의 관계를 갖는다.

$$V = \frac{d^2}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} = \frac{d^2 \gamma}{12\mu} \frac{\Delta H}{L} \quad (1)$$

여기서 d 는 간극, μ 는 점성계수, γ 는 단위중량을 나타내며, ΔP 는 압력차, ΔH 는 수두차, L 은 절리면을 따라 지하수가 유동하는 거리를 나타낸다.

이는 Darcy 식과 다음의 관계를 갖는다.

$$V = K \cdot i \quad \text{에서} \quad K = \frac{d^2 \gamma}{12\mu}, \quad i = \frac{\Delta H}{L} \quad (2)$$

여기서 K 는 투수계수, i 는 동수경사이다.

식 (1), (2)에서, 절리면 내 유동속도는 간극과 동수경사에 의해 결정됨을 알 수 있으며, 두 변수를 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 또 하나의 변수인 암반 내 등온선 간격은 사전 수행된 연속체 해석결과를 참조하여 0.3~1.8m로 변화시켜 해석하였다. 소규모 절리의 간극은 0.05~0.3mm 범위에서 해석을 수행하였고, 해석 결과는 다음 표 3과 같다. 이 중 절리간극 0.05mm, 동수경사 1.0, 등온선 간격 0.3m/°C인 조건으로 해석을 수행하여 얻은 결과를 그림 6에 나타내었다.

표 3의 해석 결과에서 소규모 절리간극 수준에서는 지하수가 최대 -0.43°C 이내로 침투하는 것으로 나타났다. 이는 기존의 가정된 온도는 -3.0°C에 비해서 다소 높은 온도임을 말해 준다. 그림 6에서는 지하수가 절리면 벽면온도 0°C인 곳을 지나 진행해 갈 때 초기에는 절리면 벽면과 중앙간의 온도차가 나타나지만,

얼마 지나지 않아 그 온도차가 없어져 절리면 벽면과 중앙에서 거의 같은 온도를 나타낸다는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 절리간극의 크기가 매우 작아 상승하는 지하수에서 암반에 열에너지가 전달되는 데 걸리는 소요시간이 매우 작기 때문이다.

표 3. 소규모 절리에서의 해석 결과

절리 간극 (mm)	동수 경사	등온선 간격 (m)	지하수 침투길이 (m)	동결 온도 (°C)	절리 간극 (mm)	동수 경사	등온선 간격 (m)	지하수 침투길이 (m)	동결 온도 (°C)	
0.05	0.1	0.3	2.99E-02	-0.009	0.1	0.1	0.3	3.29E-02	-0.010	
		0.8	6.45E-02	-0.052			0.8	5.66E-02	-0.045	
		1.3	1.28E-01	-0.167			1.3	1.27E-01	-0.166	
	1.0	0.3	3.16E-02	-0.009		0.5	0.3	3.79E-02	-0.011	
		0.8	8.05E-02	-0.064			0.8	7.13E-02	-0.057	
		1.3	1.29E-01	-0.168			1.3	1.37E-01	-0.178	
	2.0	0.3	3.39E-02	-0.010		1.0	0.3	6.32E-02	-0.019	
		0.8	5.69E-02	-0.046			0.8	1.11E-01	-0.089	
		1.3	1.32E-01	-0.172			1.3	1.55E-01	-0.202	
	3.0	0.3	3.65E-02	-0.011		0.2	0.1	0.3	7.59E-02	-0.023
		0.8	8.23E-02	-0.066			0.8	1.08E-01	-0.086	
		1.3	1.34E-01	-0.175			1.3	1.76E-01	-0.229	
4.0	0.3	3.90E-02	-0.012	0.3	0.1	0.3	1.57E-01	-0.047		
	0.8	8.40E-02	-0.067		0.8	2.60E-01	-0.208			
	1.3	1.37E-01	-0.178		1.3	3.33E-01	-0.433			

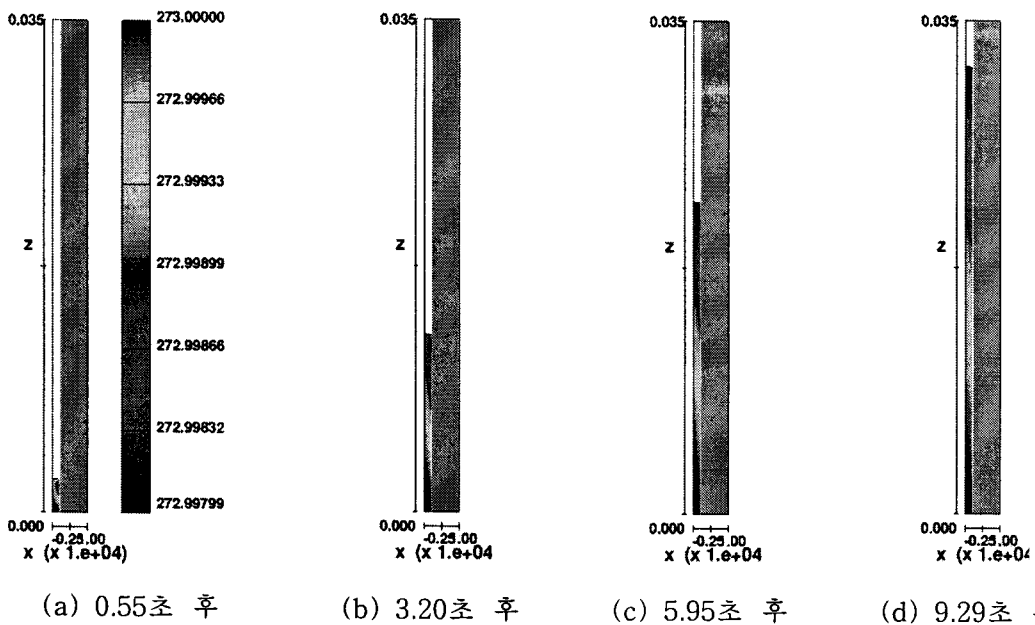


그림 6. 소규모 절리에 대한 해석결과 - 온도분포

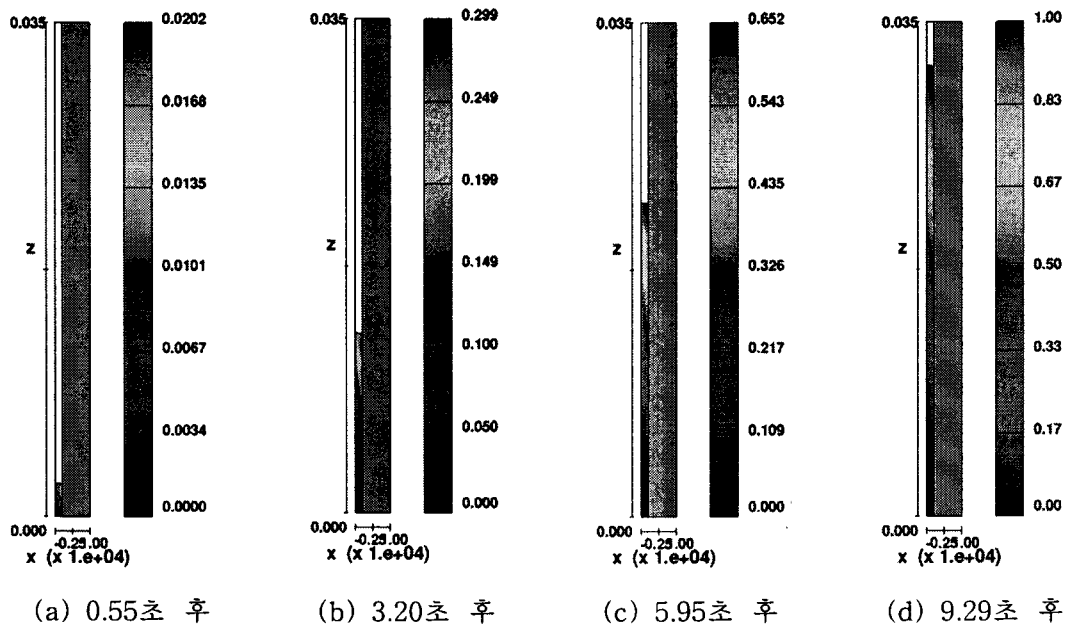


그림 7. 소규모 절리에 대한 해석결과 - 얼음분포

또한 지하수 진행방향으로의 온도 기울기(gradient)도 그리 크지 않음을 볼 수 있는데 이것은 지하수가 진행한 거리가 크지 않아서 절리면의 온도변화가 크지 않고 그에 따라 지하수의 온도변화도 크지 않기 때문이다.

얼음분포를 나타낸 그림 7을 보면 초기에는 얼음분포가 가장 큰 곳이 절리벽면에 접촉한 부분에서 나타나 점차로 진행해 가면서 절리면 중앙부 쪽으로 옮겨가서 완전히 얼음으로 변하는 것을 알 수 있다. 하지만, 절리 간격이 매우 작아 이러한 영향은 그리 크지 않음을 보이고 있다.

4.3 대규모 절리에서의 동결링 형성

단층, 파쇄대 등 투수성이 큰 구조대 구간에서의 지하수 침투가 지하 LNG 저장 시설에서 실질적으로 중요한 문제가 될 수 있고, 이 구간에 대한 해석을 수행하였다. 절리간극을 0.1mm에서 단계적으로 증가시켜가며 해석을 수행하였고, 등온선 간격(0.3m/℃)과 동수경사(1.8)는 앞의 소규모 절리의 해석 조건에서 가장 보수적인 조건으로 고정하였다.

해석결과는 표 4와 같으며, 절리간극이 1mm 이상이 되면 지하수 동결온도가 -8.6℃로 기존 해석에서 가정되고 있던 -3℃를 훨씬 초과하게 됨을 알 수 있다. 표 4에서 1mm 이상에서의 유동속도를 볼 때, 0.9m/s 이상으로 나타남을 알 수 있는데, 일반적인 지하 암반 내의 Darcy 유동에 비해 비이상적으로 빠르므로 실제 암반 내 현상과는 다소 동떨어져 보인다. 이는 식 (1)에 의해 추정된 유동속도가 실제 단열 암반 내 지하수 유동에서 나타나는 절리간극 내 충전물과 거칠기에 의한 영향이나 다양한 방향으로 발달되어 있는 절리들이 서로 불규칙적으로 연결되어 생기는 마찰력 등의 영향이 고려되지 못하기 때문이다.

표 4. 대규모 절리에서의 해석 결과

동수경사	등온선 간격 (m/°C)	절리간극 (mm)	유동속도 (m/s)	지하수 침투길이 (m)	소요시간 (s)	동결온도 (°C)	비고
1.9	0.3	0.1	0.0094	0.0373	5.807	-0.124	층류유동
		0.5	0.2348	0.6842	3.783	-2.281	
		1.0	0.9393	2.5697	3.683	-8.566	
		1.5	1.4473	6.5747	4.893	-21.916	난류유동
		2.0	1.7960	9.7493	5.796	-32.498	
		2.5	2.1148	13.0741	6.575	-43.580	
		3.0	2.4115	16.4816	7.264	-54.939	
		4.0	2.9551	23.6735	8.526	-78.912	
		5.0	3.4500	28.9981	9.082	-96.660	

표 4의 해석결과에서 절리간극 1.0mm 이하는 $Re < 2000$ 으로 층류 유동으로 해석되었고, 절리간극 1.5mm 이상은 $Re > 4000$ 으로 난류 유동으로 해석되었다.

절리간극 5.0mm, 동수경사 1.9, 등온선 간격 0.3m/°C인 조건으로 해석을 수행하여 얻은 결과를 그림 8, 그림 9에 나타내었다. 그림 8b를 보면 지하수가 상승하면서 대부분의 영역에서 거의 0°C (273K)에 가까운 일정한 온도로 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 절리면을 따라 상승하는 지하수가 0°C 이하로 냉각된 암반 절리면을 통과하면서 동결이 되기 시작하지만, 절리면 내 지하수의 유량이 많아 완전히 얼음으로 바뀌는 데 다소 시간이 소요되기 때문에 완전히 동결 되지 않고 얼음과 물이 공존하는 상태로 유지되어 있기 때문이다.

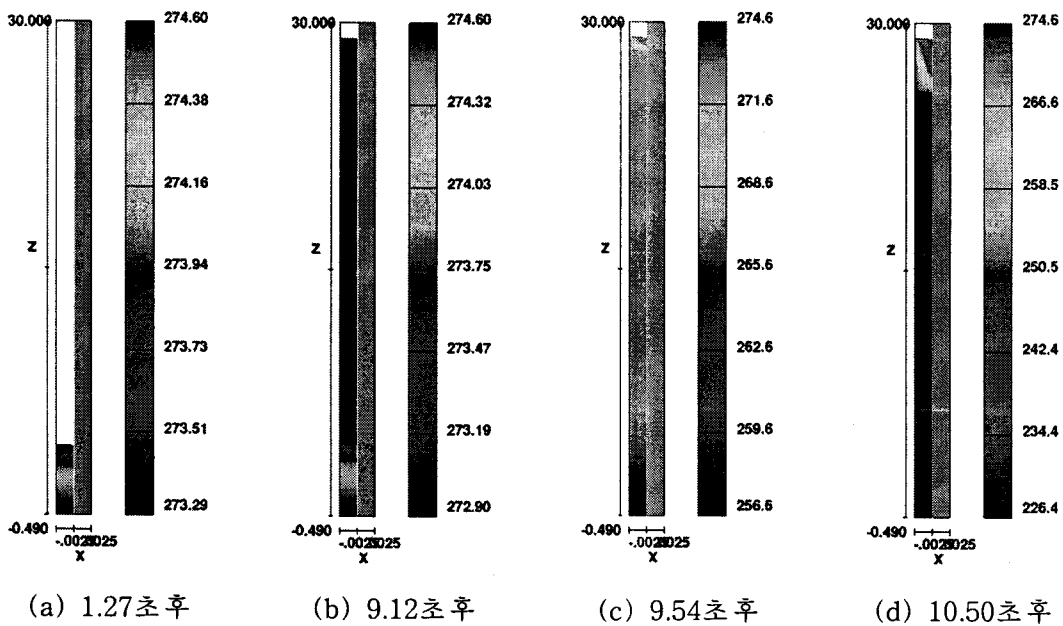


그림 8. 대규모 절리에 대한 해석결과 - 온도분포

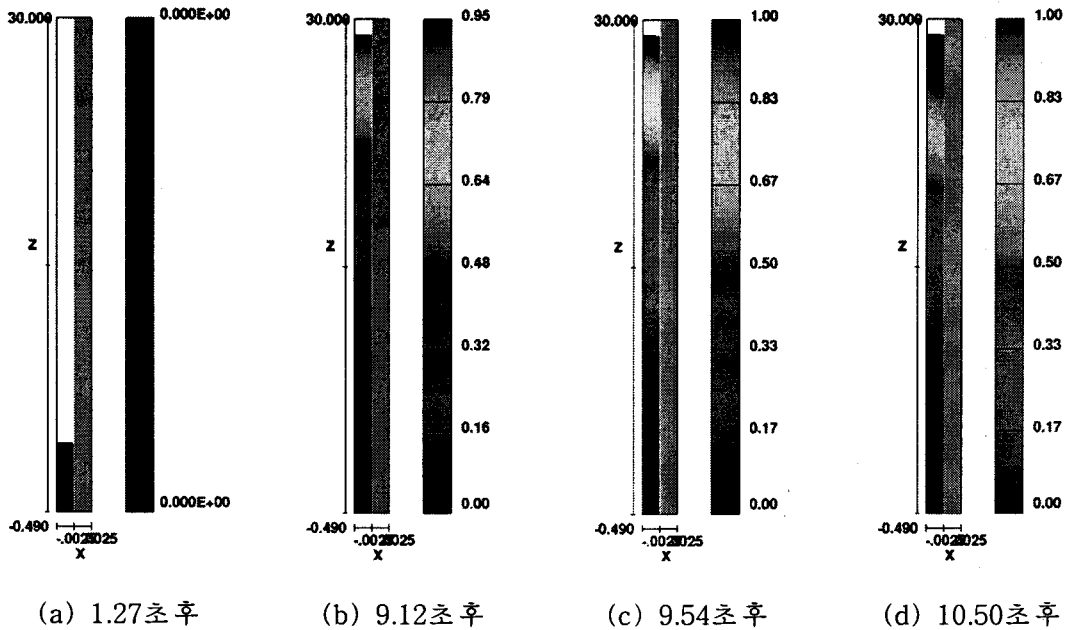


그림 9. 대규모 절리에 대한 해석결과 - 얼음분포

소규모 절리의 경우와 달리 상변화하는 지하수가 이렇게 넓은 영역에 걸쳐 분포하는 이유는 열전달 속도의 차이에 기인하는 것으로, 대규모 절리의 경우 유속이 매우 커서 절리면의 벽면을 통해 빠져나가는 열전달 속도와 계속적으로 상승하는 지하수가 가지고 올라오는 열전달 속도가 서로 거의 비슷하기 때문이다. 따라서 온도의 변화가 빠르지 못하고 그림 9b와 같은 얼음분포를 나타낸다.

하지만 일단 상변화가 끝나 얼음으로 변화하면 그림 9c, 9d에서 볼 수 있는 것처럼 온도의 변화가 급격하게 발생하는 데, 이는 지하수가 침투한 곳의 벽면 온도가 매우 낮아졌기 때문에 지하수와 절리면과의 온도차이가 커서 빠르게 열전달 현상이 나타나기 때문이다.

앞서 설명한 바와 같이 암반 내 충전물, 거칠기 및 절리간의 연결부의 마찰력 등을 고려하여 실제 암반 내 유동특성에 맞게 해석을 수행하기 위해, 식(1)에서처럼 간극에 의해 유동속도를 결정하는 대신, 식(2)를 활용하여 등가 투수계수에 의해 유동속도를 결정하는 방법으로 대체하였다(그림 10 참조).

동수경사(1.8)와 등온선 간격(0.3m/°C)은 앞선 해석과 같은 값으로 적용하였고, 투수계수는 국내 유류 비축기지 현장의 수리지질조사 결과들을 참고하여 투수성 구조대 구간의 값으로 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 를 적용하였다(선경건설 주식회사 외, 1992, LG엔지니어링주식회사 외, 1999, (주)대우엔지니어링 외, 2004). 대규모 절리의 간극은 각각 그림 11에서 RMR등급 분류상 불연속면 상태의 Rating이 0인 절리상태를 적용하여 최대 5mm까지에 대하여 해석하였다.

해석 결과는 표 5와 같으며, 지하수 동결온도 중 가장 낮은 온도가 -0.233°C 로 해석되었음을 알 수 있다.

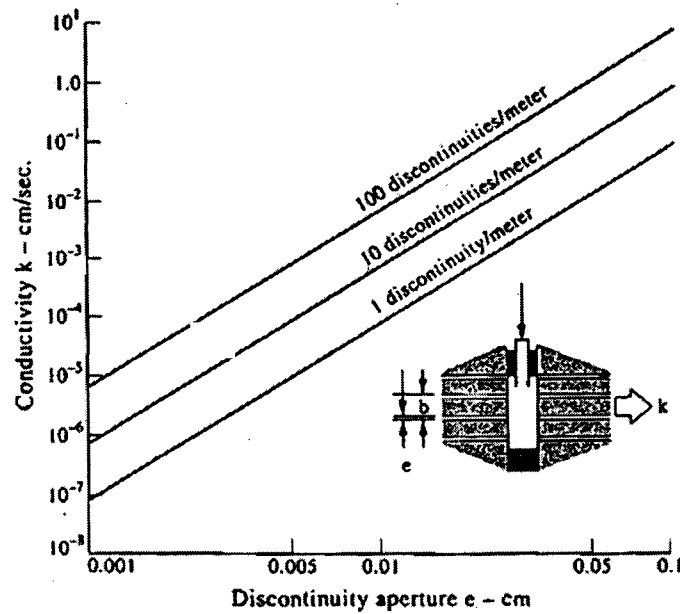


그림 10. 절리간극과 투수계수의 관계(절리간극 = 1m)

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS							
Parameter		Range of values					
1	Strength of intact rock material	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred	
	Point-load strength index	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa 1 - 5 MPa < 1 MPa	
	Rating	15	12	7	4	2 1 0	
2	Drill core Quality RQD	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%	
	Rating	20	17	13	8	3	
3	Spacing of discontinuities	> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm	
	Rating	20	15	10	8	5	
4	Condition of discontinuities (See E)	Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 0.1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous	
	Rating	30	25	20	10	0	
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing
	Rating	15	10	7	4	0	

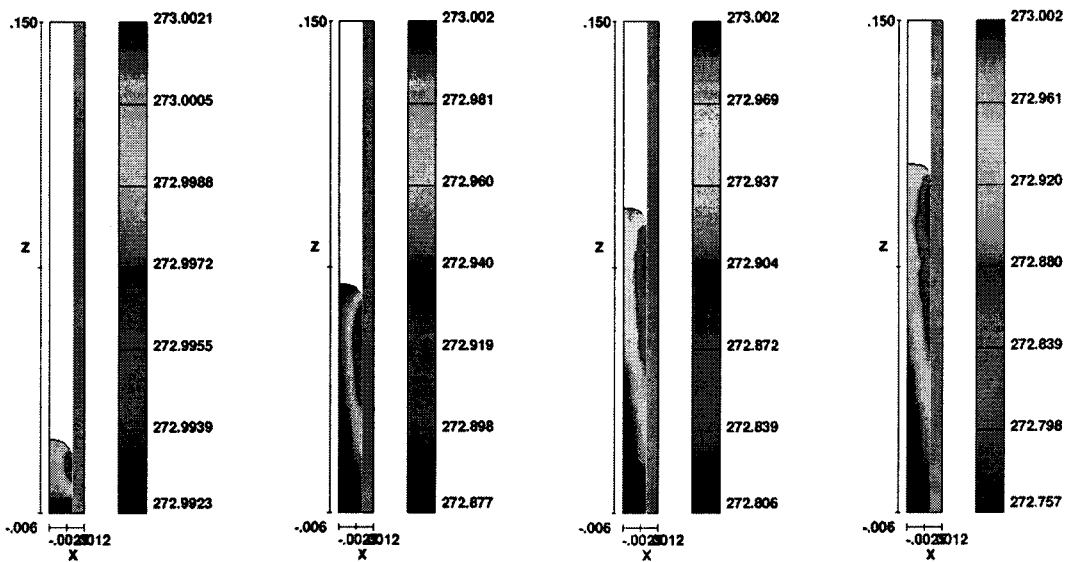
그림 11. RMR과 절리간극

국내 유류 비축기지 현장의 조사결과를 고려해 봤을 때, 단층대와 파쇄대에서 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 보다 작은 투수계수를 갖는 구간은 거의 드물다. 또한, 간극 5mm는 RMR 분류 중 4. 절리면의 상태(틈새)에서 0점에 해당하는 간극상태로, 단층대와 파쇄대를 대표한다고 말할 수 있다. 따라서 본 해석결과는 ice ring 생성 온도를 기존의 -3°C 에서 안전율에 따라 다소 높일 수 있다는 것을 말해준다.

표 5. 실제 암반의 특성을 고려한 대규모 절리에서의 해석 결과

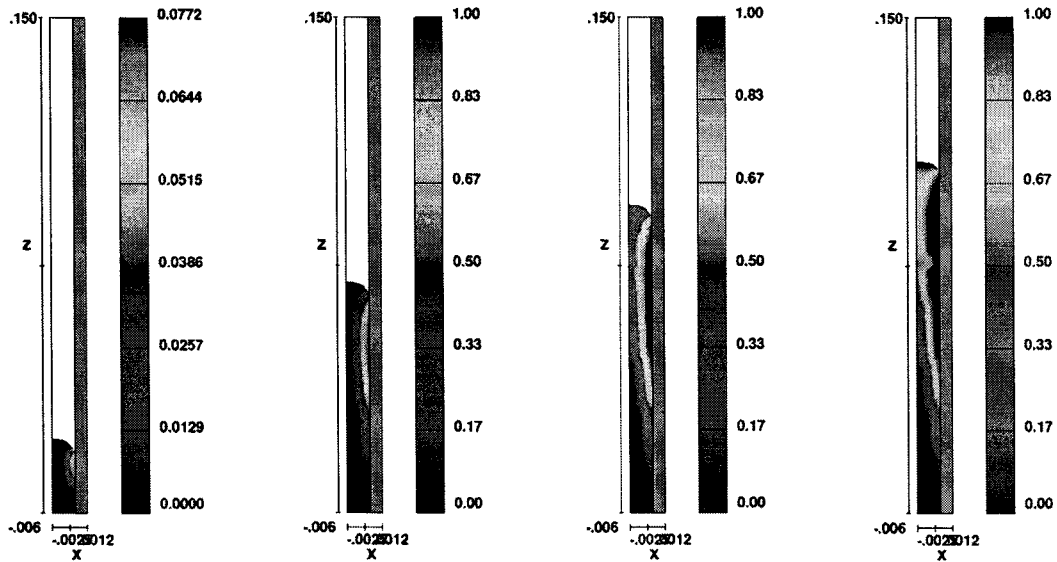
동수경사	등온선 간격 (m/°C)	절리간극 (mm)	투수계수 (m/s)	유동속도 (m/s)	지하수 침투길이 (m)	동결온도 (°C)
1.8	0.3	0.5	1.00E-06	1.80E-06	1.67E-02	-0.055
		1.0	1.00E-07	1.80E-07	2.16E-02	-0.072
			1.00E-06	1.80E-06	2.53E-02	-0.084
			1.00E-05	1.80E-05	3.96E-02	-0.123
		5.0	1.00E-07	1.80E-07	2.23E-02	-0.074
			1.00E-06	1.80E-06	3.11E-02	-0.104
1.00E-05	1.80E-05		6.98E-02	-0.233		

온도분포를 나타낸 그림 12와 얼음분포를 나타낸 그림 13을 함께 보면 초기 절리면에서 얼음이 형성되기 시작하여 완전히 얼음으로 변하는 영역이 절리면 벽에 최초로 생성된다는 것을 알 수 있다. 또한 절리면의 중앙에는 지하수의 온도가 영상인 구간도 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 지하수의 유속이 매우 느리기 때문에 영하의 온도를 가지는 절리면 벽과 접촉하는 지하수는 점차 얼음으로 변하고, 점성의 증가로 유동속도가 더욱 작아지지만 절리면의 중앙을 따라서는 지하수가 계속 상승할 수 있다는 것을 의미한다.



(a) 16분 후 (b) 64분 후 (c) 89분 후 (d) 104분 후

그림 12. 실제 암반의 특성을 고려한 대규모 절리에서의 해석 결과 - 온도분포



(a) 16분 후 (b) 64분 후 (c) 89분 후 (d) 104분 후

그림 13. 실제 암반의 특성을 고려한 대규모 절리에서의 해석 결과 - 얼음분포

5. 결론

본 연구에서는 복공식 LNG 지하 저장기지의 핵심요소인 동결링 형성 시 지하수 동결온도의 적절한 산정을 위해 단일 절리면 내 유동에서의 동결링 형성을 모사하여 보았다. 본 연구로 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 단일 절리면 내 동결링 형성 시 지하수 동결온도에 영향을 주는 요소는 지하수 상승속도와 간극이며, 모델링 결과 두 요소 모두 영향을 미치는 것이 증명되었다. 층류 유동의 경우 지하수 상승속도는 동수경사와 간극에 영향을 받게 되므로, 이 세가지 변수 중에 두가지만 결정되면 지하수 동결온도를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 동결링 형성 시 지하수 동결온도는 소규모 절리와 대규모 절리 모두 기존의 가정된 온도인 -3°C 이상으로도 적용할 수 있다고 판단된다.
- (3) 하지만 본 해석은 여러 가지 가정된 조건의 한정된 범위에서 해석이 수행된 것으로, 지하수 동결온도에 대한 보다 명확한 결정을 위해서는 보다 다양한 해석 조건에서 분석이 이루어져야 한다. 또한, 실규모 저장시설의 시공 중에 국부적으로 나타날 수 있는 대규모 절리 및 구조대에 대해서는 그라우팅을 시공하여 발생할 수 있는 Risk를 최소화 하도록 하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2007년도 첨단도시개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐 기술개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. 선경건설 주식회사, 주식회사 삼림건설턴트, 1992, 제2 LPG 기지 기본조사보고서.
2. 이규상, 2004, 지하암반 냉동 저장고 주변의 온도분포에 관한 현장 계측 및 수치 해석, 서울대학교 박사학위논문, p.161.
3. 이대혁, 이철욱, 김문상, 유재원, 김호영, 2004a, 대전 LNG Pilot Cavern 건설 공사 요약, 한국터널공학회 2004 정기학술발표회 논문집 4.22-23, p.307-318.
4. 정용복, 박찬, 정소걸, 정우철, 김호영, 2006, 극저온 지하저장고 주변 ice ring 생성 모델링을 위한 열-수리 해석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 제 16권, 3호 p.241-250.
5. 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 p.38-49.
6. (주)대우엔지니어링, 벽산엔지니어링(주), 2004, 울산추가비축기지 기본조사보고서.
7. LG엔지니어링주식회사, SK건설 주식회사, 1999, U-1 추가비축기지 기본조사보고서.
8. 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 Jeong, 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.
9. 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.
10. Lee, H.S., Lee, D.H., Jeong, W.C., Song, Y.W., Kim, H.Y. Park, E.S. and Chung, S.K, 2006b, Heat transfer and Boil-off Gas Analysis around Underground LNG Storage Cavern, Proc. of 4th Asian Rock Mech. Symp. Nov. 2006 Singapore, p.180.