

절리를 고려한 복공식 LNG 지하저장공동 주변 암반의 열역학적 거동

조용훈, 이승철, 이희석, 김택곤, 이진무, 김호영 (SK건설주식회사)

1. 서 론

지하 LNG 및 극저온 저장시설 설계에 있어 가장 중요한 점은 암반의 냉각으로 인한 인장응력 및 절리의 벌어짐, 이를 통한 저장물질(액체 또는 기체)의 누출을 방지하는 것이라 할 수 있다. 물론 이러한 인장응력 발생을 억제하기 위해서는 그에 상응하는 초기암반의 압축응력이 요구되며, 이는 실질적으로 저장공동의 토피고에 해당되게 된다. 과거의 연구결과(K. Monson 외, 2001)에 의하면 등방 초기응력조건에서 직경 25m의 무복공식 원형 LNG 지하저장공동 열역학 수치해석 결과, 절리 분포조건에 따라 차이를 보이긴 하나 50년 운영시 인장응력의 발생을 방지하기 위해서는 약 500m의 토피가 필요한 것으로 나타났다.

이에 반해, 복공식 LNG 지하저장시설은 공동내 Containment 시스템을 설치하고 공동외부에 차수 빙벽(Ice Ring) 형성하여 암반의 냉각속도를 지연시키고 저장물질의 누출을 방지하는 방식이다. 이러한 복공식 LNG 지하저장시설은 SK건설, Geostock 및 Technigaz 사에 의해 수년간 연구되어 왔으며, 이의 상용화를 위하여 2003년 대전에 Pilot Plant를 건설하여 실험을 이미 성공적으로 수행한 바 있다. Pilot Plant 운영 결과, 극저온 물질 저장으로 인한 암반의 열전파를 예측하는 것은 큰 어려움이 없는 것으로 나타났으며, 공동 주변의 암반 변위가 암반쪽으로 향하여 콘크리트 라이닝을 포함한 Containment 시스템으로 이루어진 저장공동 안정성에 주변 암반의 냉각이 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(이대혁 외, 2004). 그러나 Pilot Scale이 아닌 실규모(Full Scale)의 경우의 암반의 응력, 변위 및 공동의 안정성은 절리의 분포 형태에 직접적으로 영향을 받을 것으로 예상된다.

본 논문에서는 장기간 LNG 저장시의 실규모 복공식 LNG 저장시설 주변의 암반과 절리의 거동을 파악하기 위하여 일련의 열역학 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 UDEC ver. 4.0을 사용하여 절리 방향, 절리 간격 및 초기응력상태 등에 대한 총 6가지의 Case를 30년의 LNG 저장 조건에 대하여 수행하여, 암반과 절리의 열역학적 거동을 파악하고 이를 통하여 저장공동의 안정성을 평가하였다.

2. Prototype LNG 지하저장시설 저장개념

그림 1은 실규모 복공식 LNG 지하저장시설의 표준 배치도이며, 그림 2은 저장공동의 표준단면 형상과 치수이다. 본 복공식 LNG 지하저장개념은 시공단계와 초기 운영단계까지 저장공동 주변을 완전히 배수시키고, LNG를 저장한 뒤 공동 주변 일부를 냉각시킨 후 배수를 중단하여 지하수위 회복

에 따라 공동 주변 0°C 근처에서 차수빙벽(Ice Ring)을 형성시킨다. 또한 공동내부에 멤브레인, 보냉재(폴리우레탄 폼) 및 콘크리트 라이닝으로 이루어진 Containment 시스템을 시공하여 가스 또는 액체의 유출을 방지한다(그림 3). 보냉재의 설치로 암반의 냉각속도를 지연시켜 암반내 과도한 인장응력과 절리 벌어짐 발생을 제어함으로써 저장공동의 토피를 50m 수준으로 계획하게 된다.

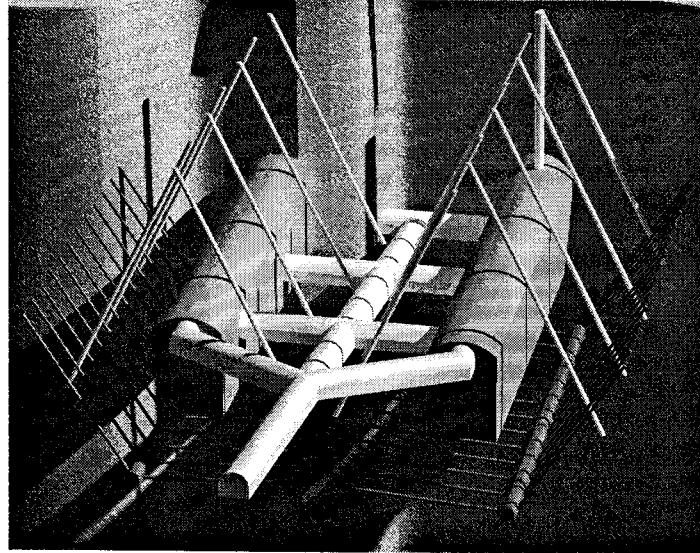


그림 1. 실규모 지하저장시설의 표준 배치도

3. 수치 모델링

3.1 해석영역, 경계조건 및 적용 모델

전체 해석 요소망은 2개의 저장공동이 80m의 중심간격으로 배치되며, 공동은 천단높이를 기준으로 지표하 50m에 위치한다고 가정하였다. 본 해석은 열역학적 해석이므로 일반적으로 적용되는 역학 해석경계보다 더 큰 해석영역이 필요하며, 이를 만족시키는 수준의 해석영역을 설정하였다. 역학적 경계조건은 해석 요소망의 좌측 및 우측면에 수평 변위와 하면의 수직변위를 구속시켰다.

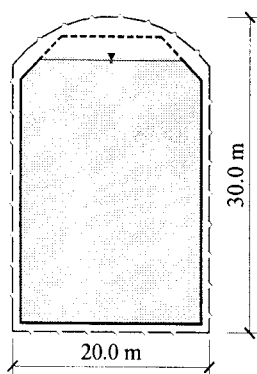


그림 2. 저장공동 표준단면그림

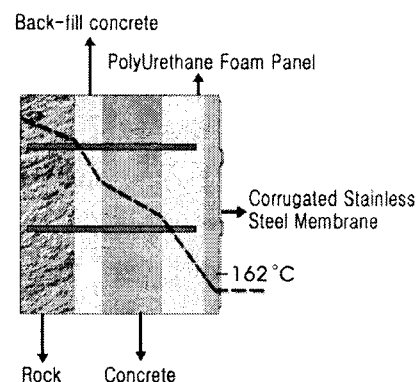


그림 3. Containment 시스템

저장공동내 Containment 시스템에 LNG 저장시 액체상태와 기체상태가 공존하게 되는데, 이러한 점을 고려하여 그림 2에서 실선으로 표시된 액체부분은 -162°C의 일정온도 경계조건, 점선으로 표시된 기체 부분은 열대류 경계조건(-120°C, 대류열전달계수 0.114W/(m² K))으로 적용하였다. 지표 또한 열대류 경계조건(18°C, 대류열전달계수 9.75W/(m² K))을 적용하였으며, 암반의 초기 온도는 18°C로 적용하였다.

해석에 적용된 암반과 절리 모델은 각각 Mohr-Coulomb 및 Coulomb slip이다.

3.2 적용 물성

암반과 절리의 역학적, 열적 물성은 대전 Pilot Plant 설계의 조사결과로부터 결정된 값을 적용하였으며, 이는 표 1~2에 요약되어 있다. 또한 사용된 지보재의 물성 및 설치현황은 표 3와 같다.

표 1. 암반, 콘크리트 및 보냉재의 역학 및 열물성

종 류	밀 도 (kg/cm ³)	탄성 계수 (GPa)	포아송 비	점착력 (MPa)	내부 마찰각 (°)	인장 강도 (MPa)	팽창각 (°)	열팽창계수 (10 ⁻⁶ /°C)	열 전도도 (W/m°C)	비 열 (J/kg°C)
암 반	2,660	20.3	0.28	3.0	26	7.3	26	6.64	2.63	710
Con'c	2,500	23.0	0.25	8.0	30	2.4	30	6.64	2.63	710
보냉재	65	0.023	0.20	10,000	70	10,000	0	-	0.02	1674

표 2. 절리 역학적 물성

절리전단강성 (GPa/m)	절리수직강성 (GPa/m)	절리점착력 (MPa)	절리마찰각 (°)	절리인장강도 (MPa)	절리 팽창각 (°)
1.9	5.42	0.05	41.2	0.0	0.0

표 3. 지보재의 물성 및 설치현황

쑈크리트	밀 도 (kg/cm ³)	탄성계수 (GPa)	열팽창계수	두께 (mm)
	2,500	5.2(soft)/15.6(hard)	10.0e-6	60
록볼트	탄성계수(GPa)	항복강도(kN)	열팽창계수	길이 및 설치간격(m)
	211	200	10.0e-6	L=4, CTC 2.5×2.5

일반적으로 암반을 포함한 일반 재료의 역학적 및 열적 물성은 온도 의존성을 띄는 것으로 알려져 있으며, 이러한 온도 변화에 따른 물성의 변화는 결국 열역학 해석시 암반의 거동에 영향을 미치게 된다. 암반 물성의 온도 의존성에 대한 기존 연구결과들을 종합해 보면 인장강도, 압축강도, 탄성계수 및 열전도도는 온도가 감소함에 따라 어느정도까지는 증가하고, 반대로 열팽창계수 및 비열은 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 암반 물성의 온도 의존성은 암반과 저장공동의 열역학적 거동에 어느 정도 영향을 미칠 것으로 예상되지만, 본 해석에서는 모든 물성은 온도변화에 대하여 일정한 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 30년 운영시 암반의 최저 온도가 약 -50°C에 이르지 못한다는 점을 감안할 때, 온도 0~-5 0°C 구간 내에서의 온도 의존성에 의한 물성 변화량은 그다지 크지 않다는 점에 근거하였다 (Glamheden, R., 2001).

3.3 해석절차 및 해석 Case

해석은 초기응력상태, 공동 굴착 및 지보재 시공, Containment 시스템 설치, LNG저장(열역학해석)의 순으로 이루어졌다. 실제 시공절차에 부합되도록 각 공동의 굴착 및 지보재 설치의 Gallery, Bench 1~3의 순으로 단계별로 진행되었으며, 각 단계는 암반의 종방향 아칭효과를 고려하기 위해 하중분담율(60-20-20%)을 적용하였다.

또한 LNG 저장은 Containment 시스템 내부에 30년동안 그림 3의 상태와 같이(Full Charge) 완전히 채워져 있는 것으로 가정하였다.

표. 4. 해석 Case 요약

	절리 set	절리간격	절리방향	Ko
1	2개	40m	45°, 135°	1.0
1(2)	2개	40m	45°, 135°	2.0
2	2개	7m	45°, 135°	1.0
3	2개	7m	0°, 90°	1.0
4	1개	7m	90°	1.0
5	1개	7m	0°	1.0

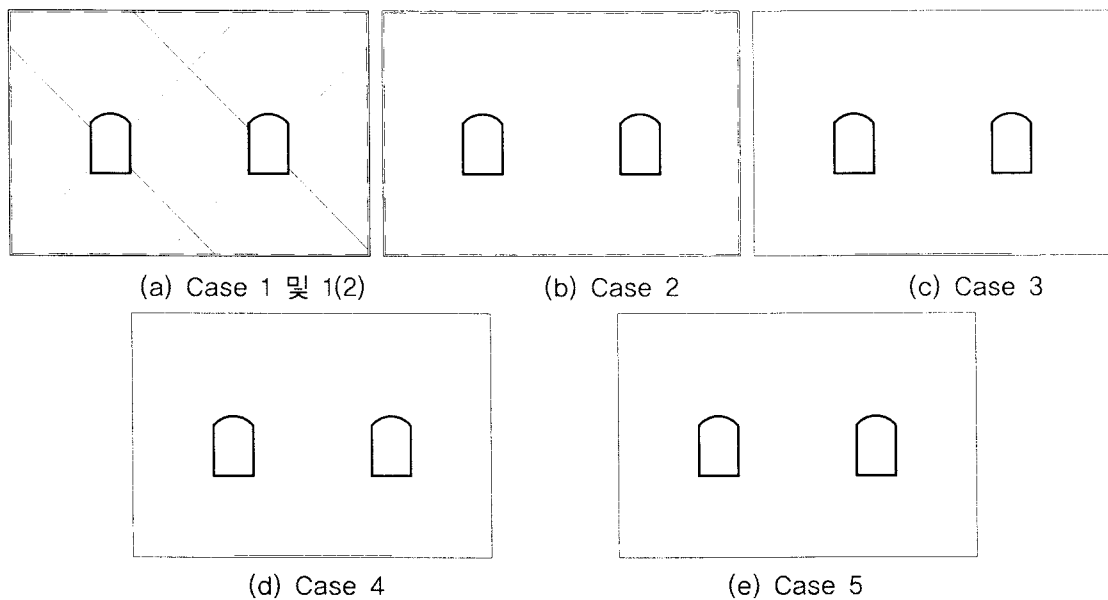


그림 4. 해석 Case 모식도

적용 프로그램 내에서의 열역학 커플링 해석은 단위시간증분에 대한 열적, 열학적 해석을 각각 교대로 반복 수행하는 방식을 사용하는데, 본 해석에서는 시행오차의 과정을 거쳐 단위시간증분을 5일로 설정하여, 5일의 열해석을 수행한 후 역학적으로 수렴상태에 도달하는 과정을 반복하도록 하였다. 이를 통하여 총 30년의 LNG 저장기간에 대한 열역학해석을 수행하였다.

총 6개의 해석 Case에 대한 열역학 해석을 수행하였으며, Case 1~5의 차이점은 절리 방향 및 분포 간격이고, Case 1과 1(2)은 차이점은 초기응력상태이다. 이를 간단히 요약하면 표 4 및 그림 4와 같다.

4. 해석 결과

Case 1~5 및 1(2)의 해석결과를 요약하면 표 5와 같으며, 최대 수직 및 수평변위는 공동 굴착면의 천단과 바닥에서의 최대수직변위, 굴착면 좌우측벽의 최대수평변위이다.

표. 5. 해석결과 요약

Case	최대수직변위 (mm) ^{*)}	최대수평변위 (mm) ^{*)}	인장응력 (MPa)	절리벌어짐 (mm)	절리천단변위 (mm)	비 고
1	-18.280	9.392	5.140	6.513	7.394	Ko=1.0, 30년 운영시
2	-20.380	6.744	2.680	6.348	4.342	Ko=1.0, 30년 운영시
3	-26.587	6.744	2.365	7.075	5.480	Ko=1.0, 30년 운영시
4	-22.315	5.411	3.399	5.594	4.513	Ko=1.0, 30년 운영시
5	-22.512	8.670	4.314	4.886	2.120	Ko=1.0, 30년 운영시
1(2)	-16.927	9.469	4.837	4.844	2.585	Ko=2.0, 30년 운영시

^{*)} (+) 값은 암반쪽으로 향하는 변위

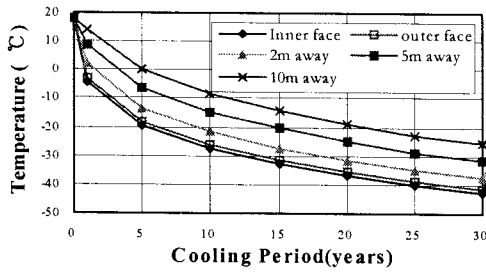
LNG저장으로 인한 암반 온도의 변화는 암반의 변위, 응력 및 절리거동에 영향을 미친다. 일차적으로 암반이 냉각되면서 공동의 배치 및 인접공동 영향으로 인해 부분적으로 온도 저하 더욱 빨리 진행되는 부분이 발생하게 된다. 암반의 온도저하 차이로 인한 암반 수축량도 위치에 따라 다르게 발생하며, 이로 인하여 암반내 인장응력이 증가되게 된다. 이러한 인장응력 증가량의 일부는 절리의 거동, 특히 절리의 벌어짐으로 해소되며(stress relaxation), 저장기간이 진행되어도 인장응력은 일정 수준까지만 증가하게 된다.

4.1 암반 온도

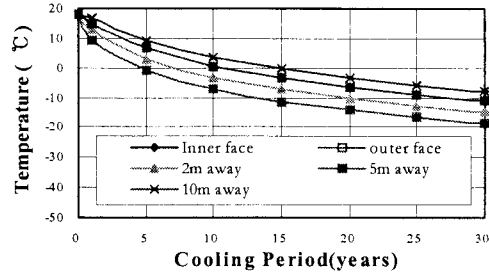
Containment 시스템을 비롯한 암반의 온도는 LNG 저장으로 인해 저장기간에 따라 감소한다. 그림 5는 저장기간에 따른 필라 측벽부와 공동 천단부에서의 콘크리트 라이닝 내·외면 및 굴착면에서 2m, 5m, 10m 떨어진 위치에서의 온도이다.

저장기간 30년에서의 암반의 최저온도 -41.7℃는 필라 측벽부에서 발생하며 이는 2개의 공동이 서로 인접해 위치한 부분이기 때문이다. 암반의 최저온도 -41.7℃는 LNG의 온도가 -162℃인 점을 감안할 때, 30년 운영시 보냉재는 약 120℃의 온도저하를 지연시키는 역할을 했다고 할 수 있다. 반면 온도가 가장 적게 감소하는 부분은 천단부로서 이는 설정한 열경계조건에 기인하며, 콘크리트 라이닝 내면에서 약 -20℃, 굴착면에서 10m 떨어진 위치에서 약 -9℃ 정도이다.

그림 6은 굴착면과 굴착면에서 10m 떨어진 위치의 온도구배이다. 저장기간 초기에 온도가 급속히 저하됨에 따라 온도구배도 급격히 감소하지만, 천단부는 약 10년 이후 거의 일정한 값 약 -1.1℃/m에 이르며, 필라 측벽부는 5년 이후 꾸준히 증가하여 30년 운영시 약 -1.6℃/m에 해당하는 것으로 나타났다.



(a) 필라 측벽부의 온도분포



(b) 천단부의 온도분포

그림 5. 콘크리트 라이닝 내외면 및 굴착면 부근의 온도분포

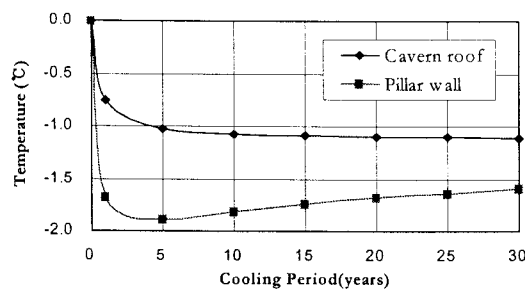
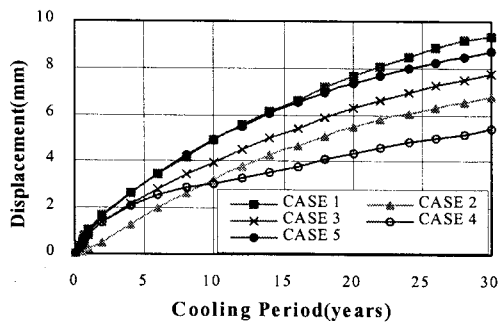


그림 6. 공동 천단부와 필라 측벽부의 온도구배(°C/m)

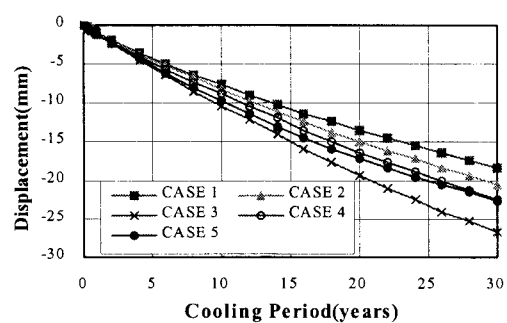
4.2 암반 거동

LNG 저장으로 인하여 암반 온도는 저장기간의 증가에 따라 지속적으로 감소하게 되는데, 이러한 온도 저하로 인해 암반은 수축하게 된다. 암반 수축으로 인해 천단부를 제외한 저장공동 굴착면은 암반쪽으로 향하는 변위가 발생하였다. 그에 반해 천단변위는 내공쪽으로 향하는 하향변위를 보였으며, 그 크기는 Case에 따라 약 18.3~26.6mm의 값을 보였다.

그림 7에서 보는 바와 같이, 발생 변위는 절리의 방향성 및 절리간격에 대해 경향은 비슷하나, 그 크기는 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 필라부 측벽의 수평변위의 경우, 40m 간격의 1set의 절리가 분포하는 Case 1은 약 9.4mm의 가장 큰 변위가 발생하는데 반해 7m 간격의 수직 절리만 존재하는 Case 4의 경우 가장 작은 약 7.3mm의 변위가 발생하였다. 공동천단부의 수직변위는 7m 간격의 수평 및 수직절리가 분포하고 있는 Case 3에서 가장 큰 26.6mm의 변위가 발생하였으며, 40m 간격의 1set의 절리가 존재하는 Case 1에서 가장 작은 18.3mm의 변위가 발생하였다.



(a) 필라 측벽부의 굴착면의 수평변위



(b) 천단부의 굴착면의 수직변위

그림 7. 굴착면의 수직 및 수평변위

한편, 공동측벽의 수평방향 변위는 필라부에서 그 반대편 보다 크게 발생하는데, 이는 앞절에서 언급한 바와 같이, 필라부의 온도가 더욱 저하되어 암반수축이 보다 활발히 진행되기 때문이다.

이러한 공동 굴착면에서의 변위는 Containment 시스템 내의 콘크리트 라이닝에 영향을 미치게 되는데 측벽의 경우 암반쪽을 향하는 변위는 콘크리트 라이닝에 추가적인 하중을 발생시키지 않는 반면, 하향으로 향하는 천단 수직변위는 라이닝에 영향을 미치게 된다. 천단부의 하향변위와 바닥부의 하향변위의 차, 즉 이들 간의 상대변위량이 실질적으로 콘크리트 라이닝에 영향을 미치게 되는데, 이 값은 모든 Case에 대해 약 7.4~12.9mm이다. 따라서 저장공동 및 Containment 시스템의 안정성을 확보하기 위해서 콘크리트 라이닝은 이러한 상대변위를 지지할 수 있도록 설계되어야 한다.

4.3 암반 응력

앞에서 언급한 바와 같이, 암반이 냉각되면 암반내 인장응력이 발생하게 되는데, 보다 엄밀하게는 온도 차이에 의한 암반 수축량의 차이에서 인장응력의 발생 및 증가가 비롯된다고 할 수 있다. 이러한 인장응력의 증가는 저장공동의 안정성 및 저장 효율성에 영향을 미치게 된다. 암반내 과도한 인장응력이 발생되면 암반의 인장파괴가 발생하게 되고, 또한 과도한 절리 벌어짐을 유발하여 Containment 시스템의 부분적 파괴 또는 저장물질의 손실을 초래하게 되기 때문이다.

그림 8(a)에서 보는 바와 같이, LNG 저장전 매우 작은 값을 보이던 최대인장응력은 저장기간이 증가함에 따라 증가하였으나, 저장기간에 초기에 급속히 증가하던 최대인장응력은 대부분의 Case에서 저장기간 10년 정도부터 그 증가량이 크게 감소하여 15년 이후에는 거의 일정한 값에 도달하는 것으로 나타났다. 최대인장응력은 공동 주변암반의 횡방향 수축으로 인해 공동 상부와 하부에서 접선 방향으로 발생하였다. 반면, 암반의 최대압축응력은 저장기간 초기에 급속히 감소하여 3년 이후부터는 거의 일정한 값에 도달하였다.

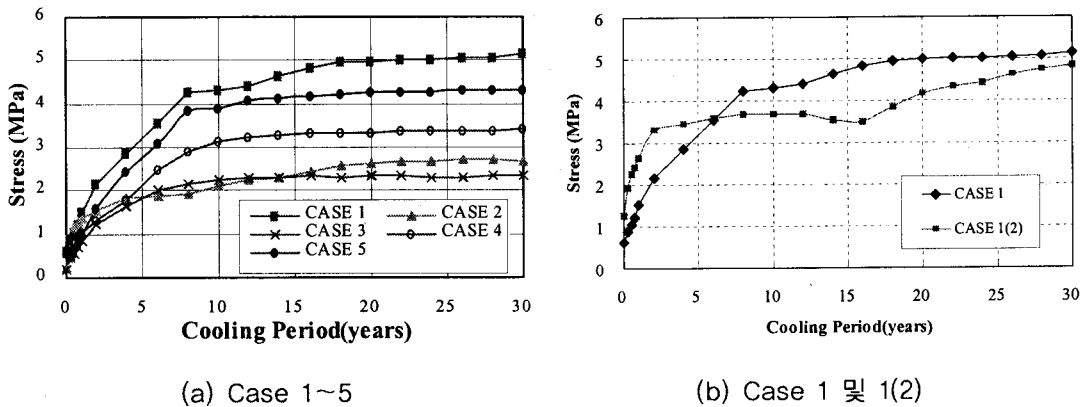


그림 8. 공동주변 암반의 최대인장응력

암반내 절리 분포상태에 따른 인장응력 발생의 경향을 살펴보면, 가장 소수의 절리가 존재하는 Case 1의 경우가 가장 크게 나타났으며, 가장 다수의 절리가 존재하는 Case 2와 Case 3의 경우 가장 작게 발생하였다. Case 1의 최대 인장응력값은 Case 2와 Case 3의 약 2배 정도이며, 이러한 이유는 암반의 인장응력 증가에 따른 절리 벌어짐에 의한 영향이다. 즉 증가되는 암반내 인장응력은 절리의 벌어짐으로 인하여 응력 해소가 발생한다. 따라서 상대적으로 절리가 다수 존재하는 경우에는 절리 벌어짐이 다수의 절리에서 발생하기 때문에 인장응력도 그만큼 더 해소되게 되는 것이다. 한편 Case 1~5에서 발생한 최대인장응력은 암반의 인장강도 대비 약 70% 수준에 해당되므로, 암반내에서의

인장파괴는 발생하지 않았다.

그림 8(b)으로부터 암반의 초기응력상태에 따른 영향을 대략적으로 파악할 수 있는데, 저장기간 30년을 기준으로 Case 1(2)은 Case 1에 비해 축압계수는 1.0에서 2.0으로 100% 증가하였으나, 최대인장응력의 크기는 약 1~6%정도 감소하는 것으로 나타났다.

4.4 절리 거동

그림 9에서 보는 바와 같이, LNG 저장에 따른 암반의 수축으로 인해 절리의 벌어짐은 증가하게 된다. 절리의 벌어짐도 절리의 분포상태에 따라 달라지는데, 가장 적은 절리가 존재하는 Case 1에서 가장 큰 벌어짐이 발생하며, 절리가 다수 존재하는 Case 2와 3 비교적 작은 벌어짐이 발생한다. 이러한 이유는 적은 수의 절리가 존재하는 경우에는 암반수축으로 인한 절리의 벌어짐이 소수의 절리에 집중되고, 다수의 절리가 존재하는 경우에는 다수의 절리에 걸쳐 발생하기 때문이다.

동일한 간격의 절리가 존재하지만 방향성이 서로 다른 Case 4(수직절리)와 Case 5(수평절리)의 결과는 비교적 큰 차이를 보이는데, 암반의 수축으로 인해 수직절리 벌어짐이 수평절리 벌어짐보다 크게 발생하는 것이며, 이는 공동주변 암반의 수축은 수평적으로 보다 많이 발생한 것을 의미한다.

초기응력상태에 따른 영향은 그림 9(b)를 통해 확인할 수 있는데, 축압계수가 1.0에서 2.0으로 증가하면 절리의 벌어짐은 감소하는 것으로 나타났다. 축압계수가 증가하여 수직절리의 수평적 벌어짐을 감소시키기 때문인 것으로 판단된다.

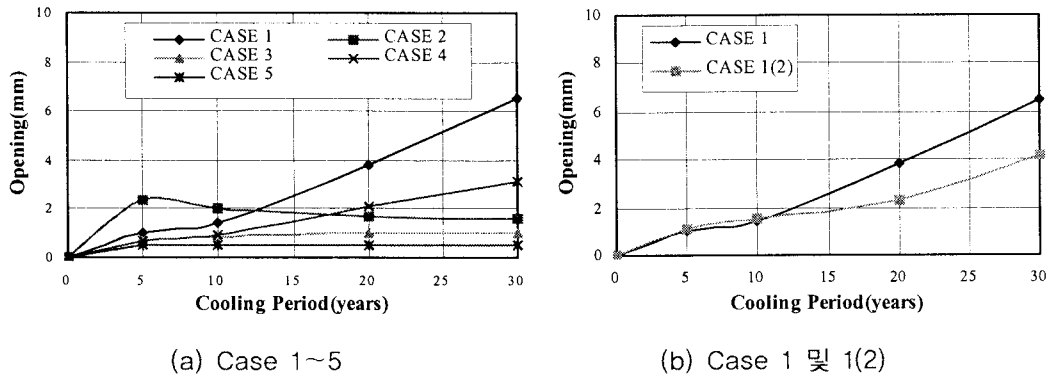


그림 9. 최대 절리 벌어짐

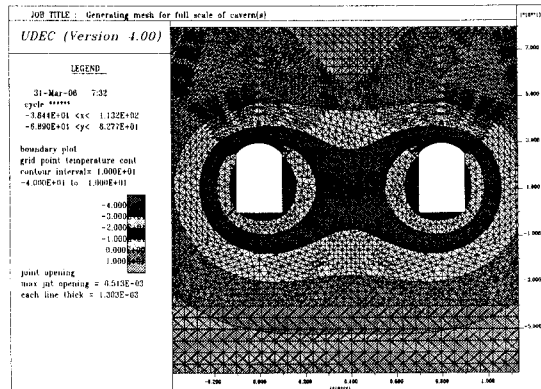


그림 10. 30년 저장시 암반의 온도분포와 절리 벌어짐(Case 1)

5. 결 론

본 논문에서는 극저온 물질인 LNG의 지하저장을 위한 실규모 복공식 LNG 지하저장시설의 열역학적 수치해석을 통해 주변 암반과 절리의 거동을 예측하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

LNG 저장으로 인해 암반은 냉각되고, 이로 인하여 암반자체의 수축 및 인장응력이 증가되었다. 그러나 인장응력은 주변에 위치한 절리의 벌어짐 증가로 일정량 해방되는 것으로 나타났다. 응력해방으로 인해, 저장기간이 증가하여도 주변 암반의 최대 인장응력은 일정 기간후 더 이상 증가하지 않았으며 이로 인해 암반의 인장파괴는 발생하지 않는 것으로 나타났다. 30년 운영시 절리의 벌어짐이 가장 크게 발생하는 소수의 절리만이 존재하는 경우에 약 6.5mm 정도 발생하는 것으로 나타났으며, 이러한 수치는 재료의 보냉 및 손실을 방지해주는 저장공동 내부의 Containment 시스템의 안정성에는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

한편, 암반의 수축으로 발생하는 공동 굴착면의 변위는 천단부를 제외하고 암반쪽으로 향하였으나, 천단부에서는 내공쪽으로 향하는 하향변위가 발생되어 천단부에서의 하향변위와 바닥부에서의 하향변위와의 차인 상대변위량 만큼의 변위에 대해서는 콘크리트 라이닝 설계시 고려해야 할 부분이라고 판단된다.

이러한 수치해석 결과로부터 저장공동 주변의 절리는 방향성에 따라 차이를 보이긴 하나, 일정수의 절리가 존재하는 경우 암반의 냉각으로 발생하는 인장응력은 절리 벌어짐을 통하여 비교적 양호하게 재분배되는 것으로 나타났다. 실제 시공에서는 발파시 굴착면과 근접한 암반에서 암반이완이 발생하므로 온도전파 및 암반수축은 본 해석보다는 작을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

■ 참고문헌 ■

1. 이대혁, 김호영, 한공창, 신중호, 박찬, 2003, 대전 복공식 LNG 지하동굴 Pilot 저장 공동 주변 열역학적 수치해석 사례, 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집.
2. 이대혁, 이희석, 김호영, 박의섭, 정소걸, 2004, 대전 LNG Pilot Cavern 주변 암반의 온도 분포 및 거동 예측 결과, 한국암반공학회 추계학술발표회 논문집.
3. Glamheden, R., 2001, Thermo-Mechanical Behavior of Refrigerated Cavern in Hard Rock, Thesis for the Degree of Doctor Philosophy, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers university of technology, Sweden.
4. K. Monsen, N. Barton, 2001, A Numerical Study of Cryogenic Storage in Underground Excavation with Emphasis on the Rock Joint Response, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 1035~1045.