

## 지하 저온저장시설의 에너지 효율 극대화를 위한 설계기술

정우철, 도효림, 김세훈, 김택곤, 이진무(SK건설(주))

### 1. 서론

지하암반은 계절적 대기온도의 영향을 거의 받지 않고, 암반 고유의 특성인 항온·항습성이 있어 냉동·냉장물류의 저장에 좋은 매개체로 인식되고 있다(김호영 외, 1997). 미국 및 북유럽의 선진국에서는 오래전부터 지하암반에 경제적으로 저장하고 있으며, 우리나라에서도 경기도 광주시 일대에 “곤지암 지하저장터미널”을 시공하여 운영하고 있다.

이러한 지하식 저온저장시설은 일반적인 지상식과 달리 저장실 내에 마감재로 샌드위치 패널이나 발포식 우레탄폼 등의 단열재를 사용하지 않고 암반 자체를 단열재로 사용하게 된다. 지하암반은 열을 차단하는 단열과 저장하는 축열기능을 가지고 있어 지상시설의 단열재가 미설치되더라도 효율적인 냉열저장효과를 발휘할 수 있게 되는 것이다. 따라서 저장실의 배치나 저장실 운영시스템의 설계에서도 지상시설의 그것과는 달리 암반의 특성이 고려된 설계가 수행될 필요가 있다.

본 연구에서는 열유동해석을 통해 지하 저온저장시설 주변 암반의 냉열특성을 분석하고, 이를 바탕으로 저장실 배치와 운영시스템에서 에너지 효율을 극대화하기 위한 설계기술을 개발하는 데 그 목적이 있다.

### 2. 지하 저온저장시설과 암반의 열특성

#### 2.1 지하식 저온저장시설

지하식 저온저장시설은 지질이 양호한 산지에 저장공동을 굴착하고 그 안에 저온물류를 저장하는 시설을 말한다(그림 2.1 참조). 저장시설이 모두 지하에 배치되기 때문에 지상부지 사용이 극소화 되고 다른 용도로 활용할 수 있으며, 암반 자체의 단열 및 축열 기능을 이용하여 전력비 등 유지비용을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다(한국자원연구소, 1997).

그림 2에서 지하식 저온저장시설이 지상식 시설과 대비하여 가지고 있는 4가지 주요 장점에 대하여 정리하였다. 첫째로, 지하암반은 항온·항습성이 우수하여 저온물류의 대부분을 차지하는 농축수산물의 품질 유지에 우수하다는 장점이 있다. 곤지암 지하저장터미널에서 실험한 결과에 따르면, 저장기간 3개월동안 양파, 배, 사과 등 농산물의 건전율과 총산함량을 비교하여 지하저장실이 지상시설보다 품질유지 면에서 유리함이 입증되었다(농업기반공사, 2003). 둘째로, 지하식의 경우 지하암반의 단열 및 축열 효과로 전력비가 감소되어 에너지 절감 효과가 있고, 대기온도의 영향을 덜 받기 때문에 계절에 상관없이 전력 소모량이 일정하다는 장점이 있다. 셋째로, 지하식은 화재에 취약한 샌드위치 패널이나 우레탄 폼을

마감재로 사용하지 않기 때문에 화재에 안전하며, 마지막으로 저장시설을 양호한 암질에 배치시킬 경우 지상식 대비 공사비가 저렴하다는 장점이 있다.



그림 2.1 지하식 저온저장시설의 조감도

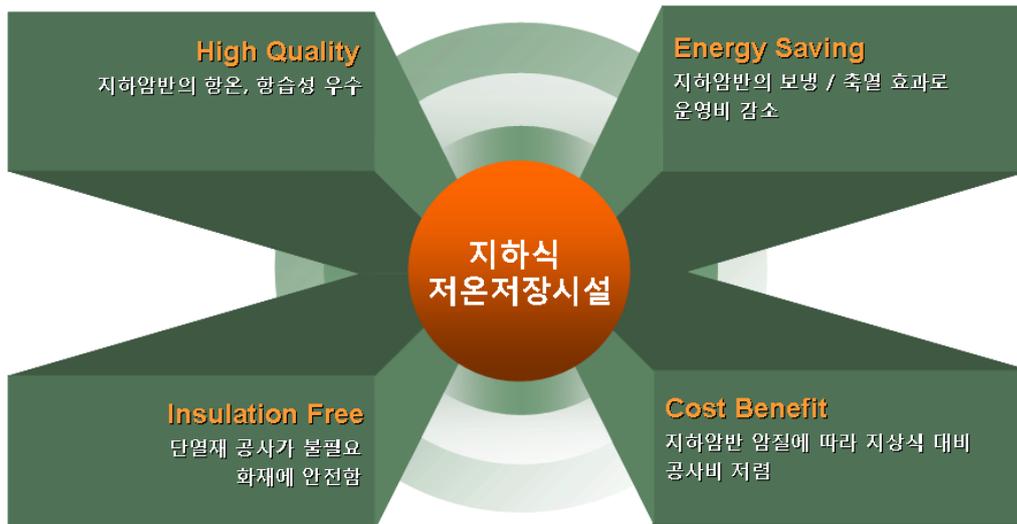


그림 2.2 지하식 저온저장시설의 장점

## 2.2 지하 저온저장시설 주변암반의 열특성

지하 저온저장시설을 운영하게 되면 냉동기 가동으로 저장공동 내 공기 온도가 저하되게 되는데, 이렇게 냉각된 공기가 주변암반의 열을 빼앗아 암반의 온도가 점차적으로 하강하게 된다. 운영초기에는 저장실 벽면 암반에서부터 온도가 하강하기 시작하고, 열전도로 인해 주변으로 냉열이 전파되게 되는 것이다(그림 2.3 참조).

지하암반 내의 열전달은 일반적으로 전도형태로 일어나게 된다. 표 2.1은 여러가지 물질의 열전도도(Thermal conductivity)를 나타내는데, 표에서 보여지는 것처럼 암석의 열전도도는 강재, 알루미늄 등에 비해 매우 작음을 알 수 있고, 이런 점에서 암반은 그 자체로 단열

기능을 발휘한다고 말할 수 있다. 지하암반 내에는 절리, 균열 등의 불연속면이 존재하게 되는데, 이 구간에서의 열전도도는 무결암 보다도 일반적으로 더 작게 된다. 불연속면 구간의 열전도도는 그 공간이 지하수로 포화되어 있는지의 여부에 따라 차이가 있는데, 이는 표 2.1에서처럼 물과 공기의 열전도도에 차이를 보이기 때문이다. 지하암반의 불연속면 내 지하수가 동결되어 있는 경우에는 고체상태의 얼음이 액체상태의 물에 비해 열전도도가 다소 커서 열전달에 보다 유리하게 된다.

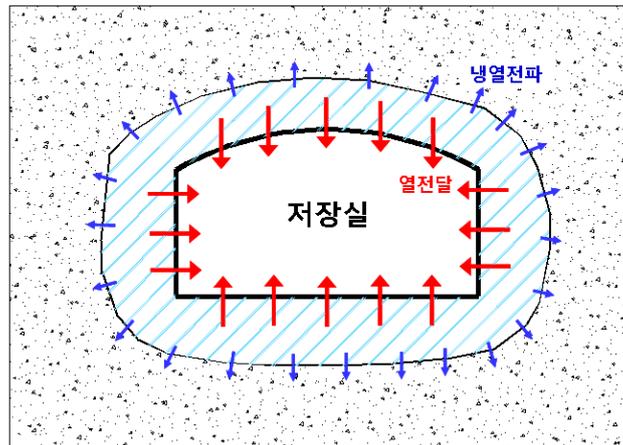


그림 2.3 지하 저온저장시설에서의 냉열 전파

표 2.1 여러 물질의 열전도도(Krahn, 2004)

Material	Water	Ice	Air	Rock			Metal		
				Granite	Sandstone	Gneiss	Steel	Aluminum	Copper
Thermal Conductivity (W/m·°C)	0.605	2.23	0.023	1.7~4.0	1.8~4.2	2.5	35~52	156~190	386

이렇듯 지하암반의 열전도도는 무결암 뿐 아니라 불연속면에 충전되어 있는 물질에 따라 차이를 보이게 된다. 또한, 암반 내 불연속면은 연속성이 무한대가 아니며 구간에 따라 불연속면의 양면이 접촉하고 있게 되어, 같은 암종으로 구성된 암반도 이러한 불연속면의 상태에 따라서 다양한 열전도도를 갖을 수 있다. 박연준 등(2002)은 지하암반 내 다양한 불연속면의 상태에 따라서 열전도도의 차이를 연구하였다. 표 2.2는 그 결과를 요약해 주고 있는데, 전반적으로 불연속면 간극이 클수록, 그리고 포화되어 있는 구간이 작을수록 열전도도가 작아진다는 것을 알 수 있다.

지하암반의 또 하나의 열적 특성은 암반 자체에 열을 저장할 수 있다는 점이다. 암반의 축열기능은 열용량(Heat capacity)과 밀접한 관련이 있다. 암반의 열용량은 암반의 온도를 1°C 높이는데 필요한 열량으로 암반의 온도가 열유동에 따라 얼마나 쉽게 변하는지를 알려주는 값이다. 지하 저온저장시설에서 냉동기 가동에 의해 주변 암반이 냉각되게 되면 그림 2.3에서와 같이 저장실 방향으로 열유동이 생기게 된다. 이때, 열유동에 따라 주변 암반은

열을 빼앗겨 온도가 하강하게 되는데, 그 크기는 암반의 열용량이 클수록 작아지고, 그 구간도 더 작아지게 된다. 또한, 이 구간에서는 냉동기를 가동하는 동안 암반에 냉열이 저장되어 냉동기 가동을 중단하더라도 일정기간동안 저장실 내부에 냉기가 유지시킬 수 있게 된다.

표 2.2 불연속면의 상태에 따른 지하암반의 열전도도 비교(박연준 외, 2002)

Thermal Conductivity	Joint Condition	Air 100% Contact 0%	Water 100% Contact 0%	Air 50% Contact 50%	Water 50% Contact 50%
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
$k_{xx}$		1.359	2.968	1.889	3.033
$k_{yy}$		2.348	3.066	2.672	3.083
$k_{xx}/k_{yy}$		0.579	0.968	0.707	0.984

일반적으로 냉동저장실의 경우  $-25^{\circ}\text{C}$  정도의 온도조건으로 운영되는데, 운영 전에 저장실의 온도를 운영온도인  $-25^{\circ}\text{C}$ 까지 떨어뜨리기 위한 예냉기간을 갖는다. 저장실의 온도가 운영온도까지 하강시키는데 일정기간이 소요되기 때문에, 그 기간동안 저장실의 차가운 공기가 암반벽면으로부터 열을 빼앗아 암반벽면의 온도도 저장실 내부와 같이 운영온도까지 하강하게 된다. 이때, 냉열이 저장되는 구간, 즉 냉동기 가동 이후 온도변화를 보이는 구간은 암반의 고유 특성인 열용량뿐 아니라 냉동용량과도 관련이 있다. 그림 2.4는 냉동용량 차이에 따라 냉열이 저장되는 영역의 차이를 보여주고 있다. 냉동용량이 작을수록 저장실 온도를 운영온도까지 떨어뜨리는 데 더 많은 시간이 소요되기 때문에 냉열이 저장되는 영역도 더 넓어지게 된다. 냉열 저장구간이 더 넓다는 것은 냉동기 가동을 중단했을 때 저장실 내 냉기를 적정온도구간에서 유지시키는 기간이 더 길다는 것을 의미한다.

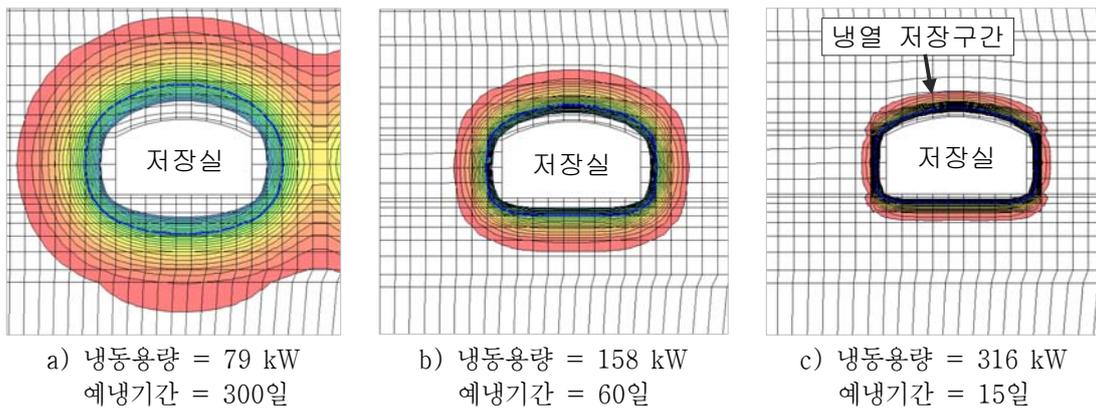


그림 2.4 냉동용량에 따른 냉열 저장구간 비교  
(저장실 벽면온도가 운영온도  $-25^{\circ}\text{C}$ 에 도달 시 예냉 종료)

### 3. 열유동해석을 통한 최적 설계기술

앞 장에서 설명된 바와 같이 지하식 저온저장시설의 효율적인 운영을 위해서는 지상식과

지하식 시설의 차이점을 명확히 파악할 필요가 있고, 지하식 저장실 주변 암반의 열특성을 이해할 필요가 있다. 지하 저온저장시설에서 에너지 효율을 극대화 하기 위해 지하암반의 열특성 이용하여 운영시 소요 전력량을 최소로 하는 최적설계를 개발하였다.

### 3.1 지상식과 지하식의 비교

그림 3.1은 지상식과 지하식 시설의 저장실을 비교한 모식도이다. 그림에서처럼 지상식 시설은 저장실 내·외부 온도차가 일정하여 운영기간에 관계없이 벽면침입열이 일정한 반면, 지하식의 경우 운영기간에 따라 주변암반의 온도가 하강하여 내·외부 온도차가 작아져 벽면침입열이 작아지게 된다. 이러한 지하식의 특징으로 인해 앞서 언급한 바와 같이 지하식의 운영시 요구되는 전력량이 지상식에 비해 작게 된다.

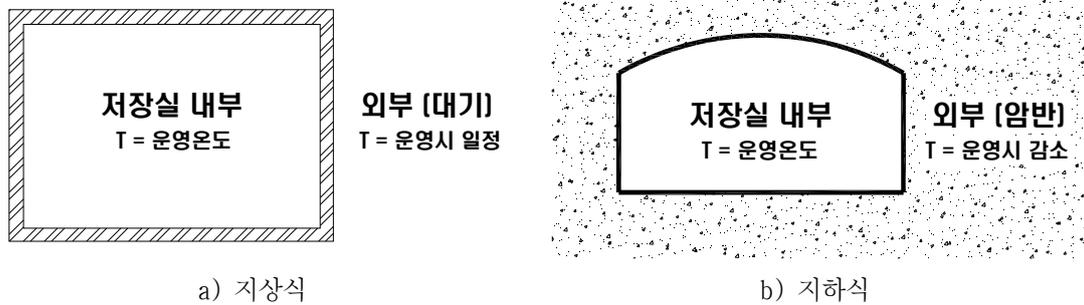


그림 3.1 지상식과 지하식의 저장실 모식도

그림 3.2는 10,000톤 기준의 저온저장시설에 대하여 지상식과 지하식의 냉동기 가동 전력량을 비교한 그래프이다. 그림에서 보여지는 것처럼 예냉기간과 운영초기에는 단열재의 유무의 차이로 지하식의 누적전력량이 더 크지만, 약 3.8년 이후부터는 지하식 저장실의 내·외부 온도차의 감소로 인해 누적전력량이 더 작아지게 됨을 알 수 있다.

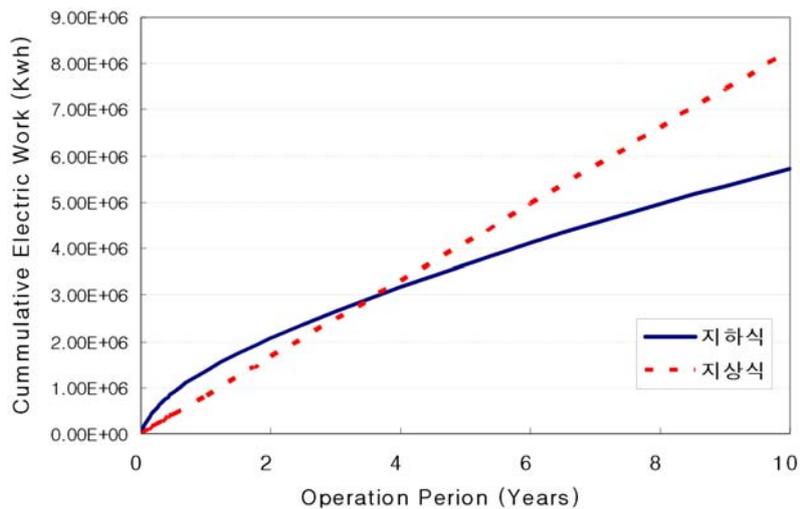


그림 3.2 지상식과 지하식 저온저장시설의 비교

일반적으로 냉동저장시설을 운영할 시에는 설정된 운영온도를 지속적으로 유지하기보다는 저장품의 품질유지를 고려한 최소한의 온도편차를 두며 운영하게 된다. 예를 들어, 운영온도가  $-25^{\circ}\text{C}$ 이고 품질유지가 가능한 온도편차가  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 라고 가정하면, 실제 운영시에는  $-25^{\circ}\text{C}$ 에 도달하도록 예냉을 한 후 냉동용량의 100%로 가동하여 저장실 온도가  $-28^{\circ}\text{C}$ 에 도달하며 냉동기 가동을 중단하고, 가동 중단으로 저장실 온도가  $-22^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하게 되면 다시 냉동기를 가동하는 방식을 반복하게 된다. 그러나 이러한 방식은 단열재에 의해 저장실 내·외부의 열전달이 거의 없는 지상식에는 적합하지만, 암반의 축열을 이용하여 저장실의 냉기를 보존하는 지하식에는 적합하지 않다. 냉동설비의 용량을 100%로 하여 너무 단기간에 저장실 온도를 품질유지 최저온도인  $-28^{\circ}\text{C}$ 에 도달시키게 되면, 냉열이 저장되는 구간이 충분하지 못하여 가동을 중단하는 동안 냉기보존의 효율이 떨어지게 된다. 또한, 저장실 온도가  $-28^{\circ}\text{C}$ 에 도달하여 냉동설비 가동을 완전히 중단하게 되면 암반에 저장된 냉열이 빠른 속도로 소진될 수가 있다. 따라서, 지하식 저온저장시설에서의 운영에서는 냉동용량의 가동률을 시간에 따라 다르게 하여 암반의 축열효과를 최대로 활용하는 것이 에너지 효율을 극대화하는 방안이 될 수 있다.

지상식에 대비하여 지하식 시설의 또 하나의 차이점은 저장실간 온도간섭이 발생한다는 점이다. 지상식은 저장실 사이에 단열재가 설치되어 온도간섭이 거의 없지만, 지하식은 저장실 사이가 암반의 매질로 가득채워져 있어 운영함에 따라 온도간섭이 나타나게 된다. 이러한 저장실간 온도간섭으로 인해 예냉기간을 단축시키거나 필요 냉동용량을 줄일 수 있게 된다.

### 3.2 열유동해석 개요

지하식 저온저장시설에서의 지하암반의 열특성을 이용한 최적설계를 개발하기 위해 열유동 해석을 수행하였다. 해석을 위해 저장용량 10,000톤 기준의 지하 저온저장시설의 개념 설계(Concept design)를 수행하였으며, 그림 3.3은 이렇게 설계된 저장실의 배치도와 단면도를 보여주고 있다. 저장실은 냉동실 5실( $12,011\text{m}^2$ ), 냉장실 1실( $1,529\text{m}^2$ ), 정온실 1실( $1,745\text{m}^2$ )로 배치하였고, 주저장실의 단면은 18m(폭) $\times$ 10m(높이)이고 연결부 저장실은 10m(폭) $\times$ 10m(높이)로 설계하였다. 해석은 다공질 지반에서의 열유동을 모사할 수 있는 상용프로그램인 Temp/W를 사용하였으며, 지층은 화강암 단일층으로 적용된 물성은 다음 표 3.1과 같다.

표 3.1 열유동 해석에 적용된 물성값

Rock	T. Conductivity (W/m $\cdot^{\circ}\text{C}$ )	Volumetric Heat Capacity (KJ/m $^3\cdot^{\circ}\text{C}$ )	Water Content
Granite	2.63	2,500	0.05

그림 3.4는 본 해석에 사용된 모델을 보여주고 있다. 화강암의 초기온도는  $15^{\circ}\text{C}$ 로 계절에 따라 일정한 것으로 가정하였고, 저장실을 지표하 30m 하부에 배치하여 대기온도와 복사열의 영향은 무시하였다. 냉동실과 냉장실이 운영온도는 각각  $-25^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ 로 설계하였고, 정온

실의 운영온도는 15℃로 본 해석에서는 고려하지 않았다. 품질유지를 위한 온도편차는 운영 온도±3℃로 가정하였다.

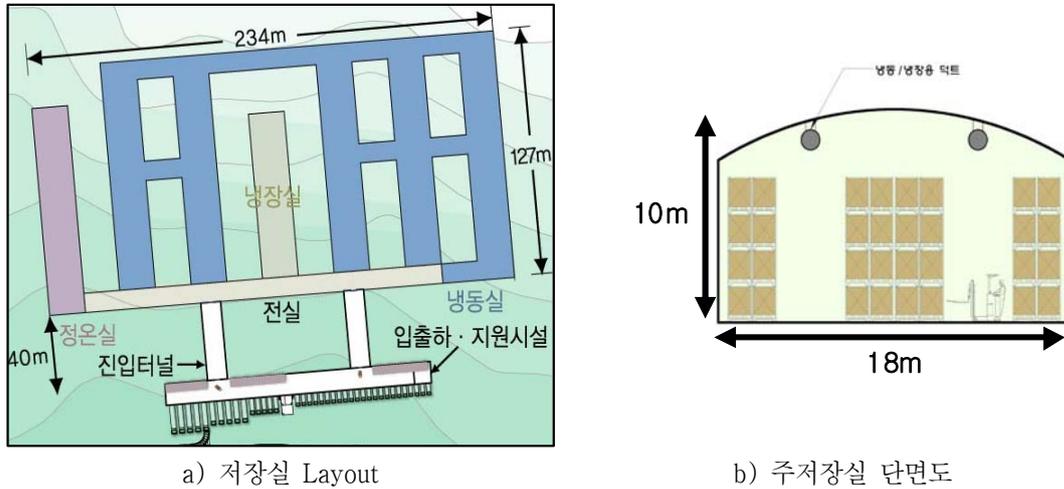


그림 3.3 10,000톤 기준 지하 저온저장시설 개념설계도

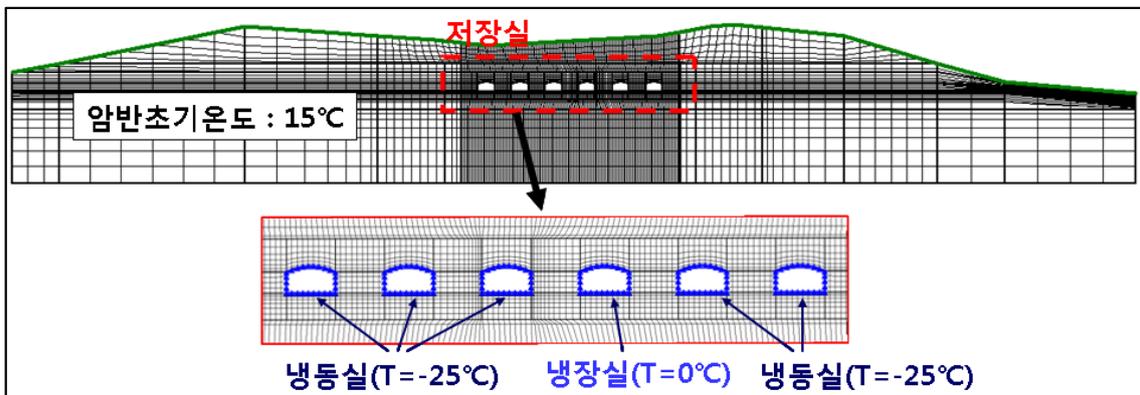


그림 3.4 해석 모델

지하 저온저장시설의 열유동해석은 다음과 같은 순서로 수행되었다. 1단계로 저장실간 온도간섭효과를 최대화 하기 위해 암반의 구조적 안정성을 해치지 않는 범위 내에서 저장실의 Layout을 서로 간 근접하게 배치한다. 2단계로는 시운전인 예냉기간과 설계 냉동용량을 산정한다. 3단계로는 운영기간 모델링을 구축하여 반복적인 해석과 Layout 배치의 조정을 통해 운영시스템을 수립한다. 마지막 4단계로는 종래의 지상식 운영시스템 방식과 비교하여 에너지 효율을 극대화 할 수 있는 최적 Layout 및 운영시스템을 결정한다. 그림 3.5는 상기와 같은 방법으로 수행하는 지하 저온저장시설의 설계 순서도를 보여주고 있다.

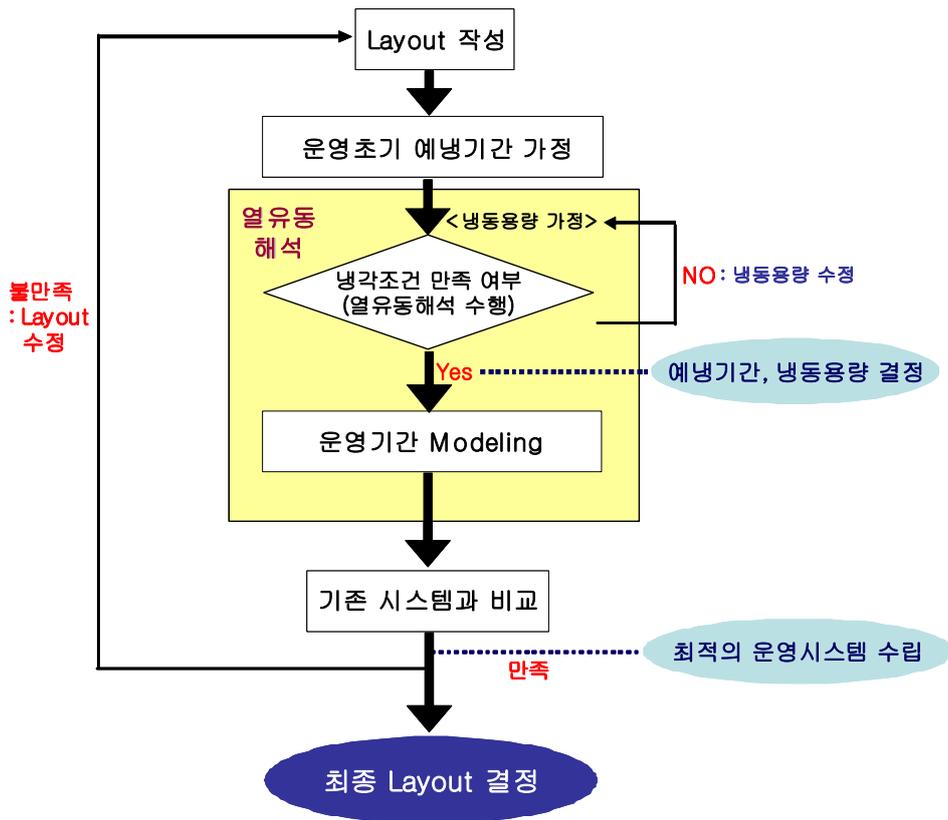


그림 3.5 열유동 해석을 통한 최적 설계 순서도

### 3.3 열유동해석 결과 및 최적 설계기술

지하 저온저장시설의 최적 설계를 위해 그림 3.5와 같은 순서로 열유동 해석을 수행하였다. 1단계로 그림 3.3에서 보여진 바와 같이 온도간섭효과를 충분히 발휘하기 위하여 저장실 간 간격을 최소로 줄이기 위해 저장실 폭(18m)과 같은 간격으로 저장실 Layout을 배치하였다.

다음 2단계로 시운전 예냉기간을 가정하여 설계 냉동용량을 산정하였다. 암반의 축열효과를 높이려면 예냉기간을 최대한 연장하는 것이 유리하지만, 실제 시운전 기간이 짧을수록 운영 시 유리하기 때문에 예냉기간을 최대 2달로 가정하였다. 예냉기간 2달을 기준으로 각 저장실의 설계용량을 표 3.2와 같이 산정하였으며, 예냉 후 저장실 주변 암반의 온도 분포는 그림 3.6과 같다. 그림 3.6에서 예냉기간 2개월 후 주변암반의 축열구간, 즉 냉동기 가동으로 열을 빼앗긴 암반구간은 저장실에서 6.3~7.0m 까지로 나타났으며, 예냉기간 중에는 저장실 간 온도간섭은 나타나지 않음을 알 수 있다. 예냉하는 동안 저장실 간 온도간섭 효과를 보기 위해서는 설계용량을 줄여 예냉기간을 늘리거나, 저장실 간 간격을 더 줄이는 두가지 방법이 있다. 하지만, 이는 저온저장시설의 운영일정과 저장실의 구조적 안정성을 고려하여 결정되어야 한다.

표 3.2 각 저장실의 설계 냉동용량

저장실	냉동실 #1	냉동실 #2	냉동실 #3	냉동실 #4	냉동실 #5	냉장실 #1
벽면침입열 (Kw)	339.72	312.54	312.54	312.54	339.72	82.17
기타부하 (Kw)	40.49	37.33	36.29	36.29	37.33	75.38
냉동용량 (Kw)	380.21	349.87	348.83	348.83	349.87	157.55

주) 기타부하에는 환기열, 제품 냉각열, 고내 발생열(냉각 FAN, 전등, 작업원 등)이 해당함

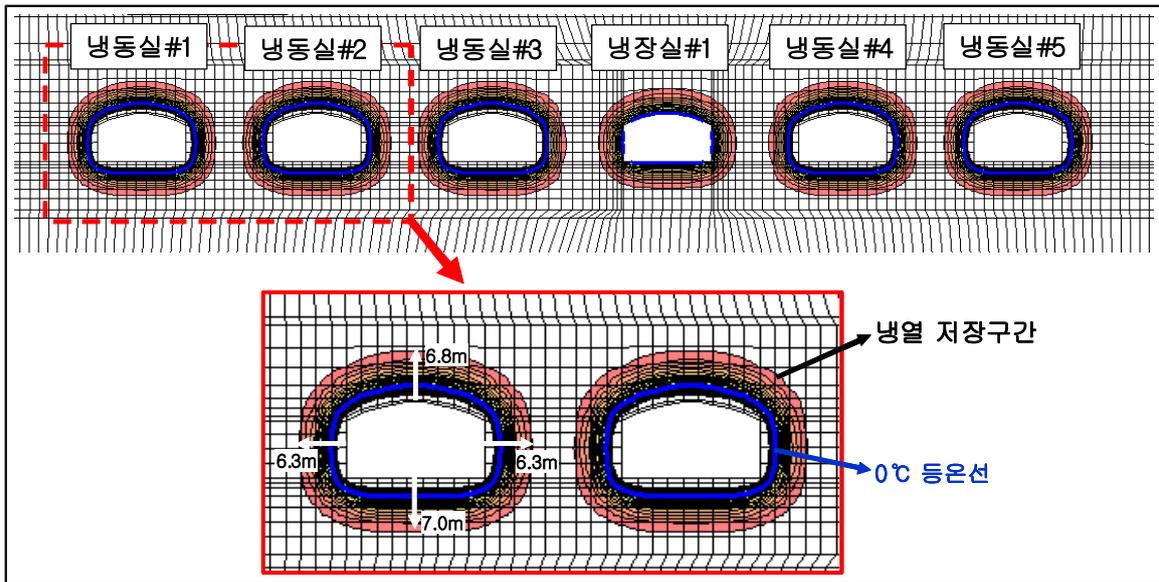


그림 3.6 2달 예냉 후 저장실 주변 암반의 온도분포

3단계로 표 3.3과 같이 몇 개의 Case로 나누어 운영기간에 대한 열유동 해석을 수행하였다. 우선 기존의 지상식과 같은 방식과 비교하기 위해 Case 1을 수행하였고, 보다 에너지 효율을 높일 수 있는 시스템을 마련하기 위해 Case 2, 3에 대하여 해석한 후 Case 1과 비교하였다. 운영기간은 예냉기간을 포함하여 2년으로 하였고, 각각의 Case에 대하여 소요되는 전력량을 통하여 에너지 효율을 비교하였다.

표 3.3 운영기간의 열유동 해석을 위한 운영시스템

Case	운영 방법
기존 시스템	Case 1 · 최고온도(-22℃)에서 냉동기 100% 가동 · 최저온도(-28℃)에서 냉동기 가동 중단
본 개발 시스템	Case 2 · 최고온도(-22℃)에서 냉동기 가동률 80%로 가동 · 최저온도(-28℃)에서 냉동기 가동률 20%로 가동
	Case 3 · 최고온도(-22℃)에서 냉동기 가동률 60% 가동 · 최저온도(-28℃)에서 냉동기 가동률 40% 가동 · 운영기간에 따라 가동률 조정

그림 3.7은 열유동해석을 결과 중 냉동실 #1에서의 각 Case별 소요 전력량을 비교한 그래프이다. 해석한 결과 기존시스템인 Case 1의 경우는 운영기간 2년 경과 후 누적 전력량이 4.55E+06 kWh로 나타났다. 냉동기 가동률을 최대 80%-최소 20%로 조합한 Case 2의 경우는 2년 경과 후 누적 전력량이 3.51E+06 kWh로 나타나, 기존시스템 대비 전력량이 77%로 감소한 것으로 분석되었다. Case 3은 반복해석을 통해 최적의 시스템을 찾기 위한 방안으로 냉동기 가동률을 최대 60%-최소 40, 20%로 운영기간에 따라 다르게 조정하여 해석한 사례로, 2년 경과 후 누적 전력량이 3.01E+06 kWh로 나타나, 기존시스템 대비 전력량이 66%까지 감소한 것으로 분석되었다.

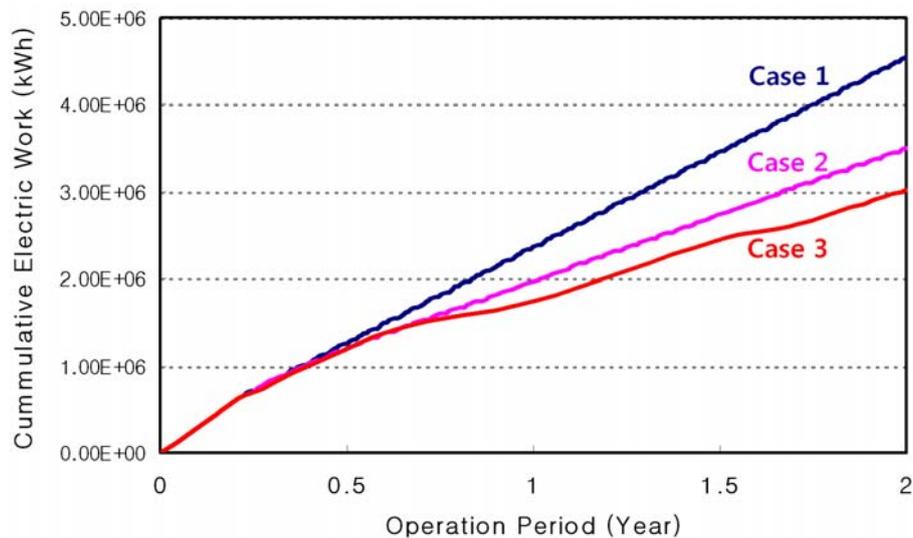


그림 3.7 냉동실 #1에서의 운영기간에 따른 Case 별 누적 전력량

마지막 4단계로 3단계 해석 결과를 바탕으로 최적 운영시스템과 Layout을 산정했다. 최적 Layout 작성을 위해서는 저장실의 안정성해석과 열해석을 반복하거나 열-역학적 연동해석을 수행하여 저장실간 간섭효과를 최대로 하는 배치를 하여야 하나, 본 연구에서는 안정성 해석을 생략한 대신 저장실간 간격이 저장실 폭과 같을 때 최적인 것으로 가정하였다. 또한, 앞서 분석한 바와 같이 기존시스템을 포함한 3가지 Case를 비교해 볼 때, Case 3의 경우가 2년의 운영기간 동안의 누적 전력량이 최소로 나타나 에너지 효율을 최대로 하는 최적 운영시스템인 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지하 저온저장시설에서 저장실 주변 암반의 냉열특성에 대하여 분석하였고, 시운전인 예냉기간과 운영기간 동안 전력량을 최소화 하여 에너지 효율을 극대화할 수 있는 설계 기술을 제시하였다. 본 연구로 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지하 저온저장시설 주변 암반은 단열기능과 축열기능을 가지고 있다. 지하암반이 단열기능을 발휘하는 이유는 무결암 자체의 열전도도가 철과 알루미늄 등 금속 물질에 비하여 매우 낮을 뿐 아니라, 지하 암반 내 불연속면의 분포와 포화 상태에 따라 열전도도는 더욱 낮아지게 되기 때문이다. 또한, 지하식 저온저장시설은 지상식과 달리 냉동기를 가동함에 따라 주변 암반의 온도가 하강하게 되는데, 이렇게 냉열이 저장된 암반구간은 저장실의 냉기를 유지시키고 냉열을 지속적으로 제공하는 기능을 수행한다.
- (2) 지상식 시설은 저장실 내·외부 온도차가 일정하여 운영기간에 관계없이 벽면침입열이 일정한 반면, 지하식의 경우 지하암반의 축열기능으로 인해 내·외부 온도차가 운영기간에 따라 점차 작아져 벽면침입열도 작아지게 된다. 이러한 지하식의 특징으로 인해 지하식의 운영시 요구되는 누적전력량은 지상식에 비해 작게 된다.
- (3) 일반적으로 지상식 시설은 운영 시 일정한 온도편차를 두어 저장실 온도를 최대운영온도와 최소운영온도 사이에 유지되도록 하는데, 최대운영온도에 도달하면 냉동기를 100%로 가동하고 최소운영온도까지 떨어지면 가동을 중단하는 방식으로 운영된다. 그러나 이러한 방식은 암반의 축열을 이용하여 저장실의 냉기를 보존하는 지하식에는 적합하지 않다. 운영기간 동안 지하암반에 냉열을 충분히 저장하고 유지하기 위해서는 냉동기 가동 시 가동률을 낮추어 장기간 축열이 될 수 있게 하고, 최소 운영온도까지 떨어져서도 일정량의 냉기를 공급하여 주변암반의 냉열이 빠른 속도로 소진되는 것을 막는 것이 유리하다. 즉, 운영기간에 따라 냉동기 가동률을 조정하여 운영하는 것이 소요되는 전력량을 최소로 할 수 있는 방안이 될 수 있다.
- (4) 지하암반의 열특성을 이용하여 지하 저온저장시설에서 에너지 효율을 극대화하기 위한 설계 기술을 다음과 같이 개발하였다. 1단계로는 저장실간 온도간섭효과를 최대로 하기 위해 암반의 구조적 안정성을 해치지 않는 범위 내에서 저장실의 Layout을 서로 간 근접하게 배치하고, 2단계로 시운전인 예냉기간과 설계 냉동용량을 산정하며, 3단계로는 운영기간 모델링을 구축하여 반복적인 해석과 Layout 배치의 조정을 통해 운영시스템을 수립하며, 마지막 4단계로 종래의 지상식 운영시스템 방식과 비교하여 에너지 효율을 극대화 할 수 있는 최적 Layout 및 운영시스템을 결정하게 된다.
- (5) 상기와 같이 개발된 설계기술을 검증하기 위해 저장용량 10,000톤 기준으로 설계된 지하 저온저장시설에 대한 열유동 해석을 수행하였다. 그 결과 지상식과 같은 방식으로 운영하는 기존시스템에 비해 냉동기 가동률을 운영기간에 따라 조정하는 방식이 지하식 시설에 보다 적합한 것으로 나타났다. 냉동기 가동률을 최대 80%-최소 20%로 조합한 시스템은 기존시스템에 비해 전력량이 77%로 감소한 것으로 나타났고, 냉동기 가동률을 최대 60%-최소 40, 20%로 운영기간에 따라 다르게 조정하여 적용한 시스템은 기존시스템에 비해 66%까지 감소한 것으로 분석되었다.

## 참고문헌

1. 김호영, 박연준, 한공창, 박의섭, 1997, 천심도 절리 암반 중에 굴착된 지하 냉장저장 공동의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 7, pp. 58-64
2. 농업기반공사, 2003, 곤지암 지하저장 터미널 운영백서
3. 박연준, 유광호, 신희순, 신중호, 2002, 절리 및 지하수가 암반의 열전파 특성에 미치는 영향, 터널 및 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 12, No. 3, pp. 220-228
4. 한국자원연구소, 1997, 암반의 냉열유동 및 저온하의 공동안정성 해석기술 개발연구
5. Krahn, J. 2004. Thermal Modeling with Temp/W. GEO-SLOPE International Ltd.