

## 곤지암 지하암반 저장고 온도계측 결과 분석

이규상<sup>1)</sup>, 이정인<sup>2)\*</sup>

### Analysis of In-situ Temperature Measurement at Gonjiam Cold Storage Cavern

Gyu-Sang Lee and Chung-In Lee

**Abstract** The decreasing pattern of underground temperature measured at 'Gonjiam cold storage cavern' during 7 years which was the first commercial scale underground food storage cavern in Korea was analyzed. The variation of energy consumption was discussed by comparing the consumed energy at the initial operation stage with that at later stage, when the temperature distribution reached a stabilized condition. The point to be considered at the design stage was also discussed by comparing the required refrigerator capacity at the initial operation stage with that at later stage. The extra energy to freeze the groundwater contained in pore space was discussed by analyzing the changing pattern of the rock temperature. The variation of measured rock temperature was compared with the estimated temperature using a numerical code, FLAC. The accuracy of the numerical estimation was discussed by comparing the heat flux measured by the operation time of the refrigerator with that estimated numerically.

**KeyWords** temperature distribution, heat flux, FLAC, freezing storage, latent heat of freezing

**초 록** 경기도 광주군에 건설된 상업적 규모의 지하암반 저장고인 '곤지암 지하암반 저장고'에 대한 약 7년간 운영중에 측정된 결과를 분석하였다. 운영 초기에 투입되었던 에너지와 저장고 주변의 온도가 안정화된 이후의 에너지를 비교하여 에너지 소비의 변화경향을 분석하였다. 초기 냉동기 설계에 필요한 용량과 저장고 운영에 필요한 냉동기 용량을 비교하여 초기 냉동시스템 설계 시 고려할 점에 대해 논하였다. 7년간 암반 내 지중온도 변화 양상을 분석하여, 암반 내 지하수가 동결될 때에 소요되는 추가적인 에너지에 대해 논하고, 현재 암반 온도 분포 상황을 초기의 온도분포를 예측한 FLAC 수치해석 결과와 비교하였다. 냉동기 가동시간에 따른 투입된 열유량과, 2차원, 3차원 수치해석에 의한 열유량을 비교하여 수치해석에 의한 열유량 예측의 정확성에 대해 논하였다.

**핵심어** 온도분포, 열유량, FLAC, 냉동저장, 동결잠열

### 1. 서 론

선진국에서는 이미 지하암반의 항온·항습성 특성을 이용한 지하 저장시설을 건설하여 축산물, 수산물, 각종 가공식품, 실과류, 곡물 등을 경제적으로 저장해오고 있다(안대영, 1994). 이에 비하여 국내에서는 지상 저장설비는 규모화되고 있으나, 지하의 경우 재래식 토굴을 이용한 농산물 저장, 폐광을 이용한 버섯재배 등 극히 소규모의 지하공간 이용에 그칠뿐 외국 경우처럼 첨단화된 대규모 지하저장시설은 시작 단계에 있다. 우리나라는 국토의 70%가 견고한 암반으로 되어있는 산지로서 지하저장시설의 건설과 이용이 활발한 북유럽

과 유사한 자연조건을 갖추고 있다. 이러한 지질·지형학적 여건을 활용하여 지가가 높은 대도시 주변의 지하에 대규모 저장시설을 건설하여 환경파괴 없이 에너지 절약과 토지 이용의 효율화를 기할 수 있다. 농업기반공사에서는 1996년 경기도 광주군에 농수축산물 지하암반저장고를 건설하여 현재까지 약 7년간 농수축산물을 저장하고 있다. 주 저장품목은 냉동육류가 주종을 이루고 있으며, 암반저장고 운영온도는 초기 예냉시에는 -20℃로 유지되다가, 초기 예냉을 위한 냉동이 완료된 2000년부터는 -18℃를 기준으로 냉동기의 가동과 중지가 이루어지고 있다. 냉동식품 저장을 위한 법정 기준온도는 -18℃로서, 저장고내에 부착된 온도계가 -18℃보다 높게 되면 냉동기가 가동되고, 낮아지면 작동을 중지하도록 설정되어 있다. 초기 예냉시에는 24시간 냉동기 가동이 이루어 졌으며, 현재는 주로 심야(밤 10~6시)에 가동을 해 냉동기 가동에 따른 전기료를 절감하고 있다.

<sup>1)</sup> 농업기반공사, 농어촌연구원 수리시험연구실 주임연구원

<sup>2)</sup> 서울대학교, 지구환경시스템공학부 교수

\* 교신저자 : cilee@snu.ac.kr

접수일: 2005년 5월 13일

심사 완료일: 2005년 6월 22일

곤지암 암반 저장고 운영 결과를 활용한 수치해석적 분석은 이미 발표되었으나(이규상과 이정인, 2004), 암반 저장고 운영에 대한 분석은 아직 없었다. 본 발표를 통하여 그동안 지하암반저장시설 운영관리에 대한 노하우와 시험연구사항 등을 기록 유지하여 향후에 정부, 지방자치단체, 민간단체 등에서 지하저장창고 건설시 조사·설계 및 공사감리 등 기술적 업무에 활용되기를 바란다.

## 2. 암반저장고 운영을 위한 온도변화

### 2.1 냉동저장고 가동을 위한 냉동시스템

일반적인 냉동창고의 냉각방식은 냉동기의 설치 형태에 따라 집중식과 개별식으로 분류되며, 집중식은 대용량의 냉동기로 여러 개의 냉장실을 냉각하는 방식이고, 개별식은 각 냉장실 마다 냉동기를 단독으로 설치하여 냉각하는 방식이다. 설비비는 지상 시설이나 지하 시설이 비슷하지만, 단열 처리된 창고에 부하량이 일정하게 소요되는 지상 저장창고는 개별식이 장점을 가질 수 있다. 지하암반 저장고는 암반의 특성을 이용한 창고로 초기에는 암반의 축냉과 물품의 냉동을 동시에 수행하기 때문에 열 부하량이 많이 소요되고, 축냉이 진행함에 따라 냉동기 부하량이 감소하는 특징이 있다. 곤지암 지하암반 저장고의 경우는 장치가 복잡하고 운전상에 전문지식 및 기술이 요하지만 각각의 저장고에 대한 냉동부하 조절이 용이하며, 장기간 운영 후 열부하량 감소에 대한 대처가 쉬운 집중식 냉동시스템으로 설치되었다(Fig. 1)(농업기반공사, 2003).

냉동기 용량 선택 시 계획된 저장고별 용도는 냉동저장 2조, 냉장저장 2조로 설계되었지만, 운영 초기 전체 암반 저장고를 냉동 저장으로 용도가 변경되어 냉동부하가 증가하였다. 또한 초기 예냉 중에 지하수 및 동결 잠열의 영향으로 암반 저장고의 온도를 물품 저장에 적당한 온도로 낮추는 시간이 지연됨에 따라 초기 예냉시간을 단축시키기 위하여 132 kW 냉동기 1기를 증설하였고, 증발기 용량을 증설하여 배치를 변경하였다(Table 1). 당초 1, 2, 3 저장고에 17.5 RT의 증발기가 배치되었고, 4, 5 저장고에 10 RT의 증발기가 배치되었는데, 1 저장고에서는 저장고 북측 외벽을 직접 냉각시켜야 하므로 많은 에너지가 필요하며, 5 저장고에서는 주변 암반 상태가 불량하여 과도한 열손실이 발생하여 큰 용량의 증발기를 배치하였다(농업기반공사, 2003). 냉동기 용량을 표시하는 RT (Refrigerator Ton)는 하루 동안 1톤의 얼음을 생산할 수 있는 능력을 나타내며, 대략 3.5 kW에 해당한다. 증발기의 용량이 커지면 암반

저장고에서 주변 공기를 일시에 냉동시키는 능력이 커지는 것을 의미한다(원성필, 2003).

### 2.2 지하암반 저장고 운영을 위한 초기 예냉

#### a) 지하암반 저장고 예냉 기간 분석

소규모 지상 저장창고는 냉동기 가동 후 짧은 시간 내에 목표 온도에 도달하게 되지만, 상업적 목적의 대규모 지하암반 저장고는 장기간의 운영 후에 목표온도에 도달하게 된다. 설계 당시 수치해석에 의한 열유동 분석에서는 암반 저장고의 온도가 짧은 시간에 목표 온도인  $-20^{\circ}\text{C}$ 에 도달하는 것으로 설정하였으나, 운영 결과 암반 저장고내의 온도가 약 2~5개월 후에  $-20^{\circ}\text{C}$ 에 도달된 것으로 계속되었다. 초기 암반 온도는  $11\sim 13^{\circ}\text{C}$ 로 연중 일정하게 나타났으며, 외벽의 냉동이 전혀 진행되지 않은 상태에서 시작된 5 저장고의 예냉은 약 5개월이 소요되었고, 주변 암반의 온도가 일부 하강한 상태에서 시작된 4호실 예냉은 2개월, 규모가 2배인 3호실 예냉은 3개월, 그리고 4호 냉동기 설치 후 용량이 증가된 상태로 예냉한 결과 2호실은 2개월, 1호실은 3개월이 소요되었다(Table 2)(농업기반공사, 2003).

Table 1. Unit-cooler capacity of storage cavern

Cavern No.	Unit-cooler capacity ( ~ '98. 12. ), (RT)	Unit-cooler capacity ( '98. 12 ~ ), (RT)
Cavern No. 1	17.5	30.0
Cavern No. 2	17.5	27.5
Cavern No. 3	17.5	17.5
Cavern No. 4	10	10
Cavern No. 5	10	17.5
Sum	72.5	102.5

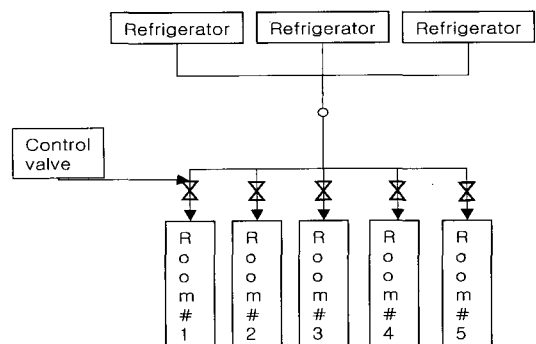


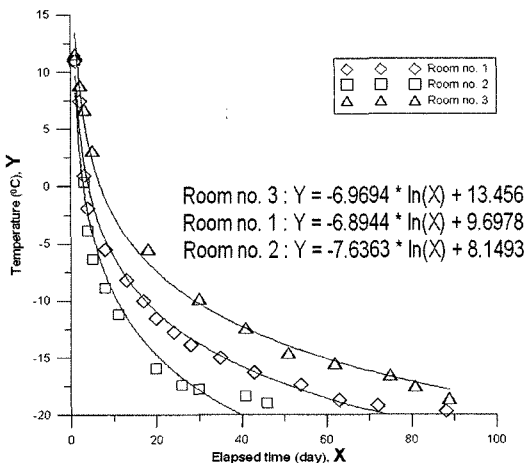
Fig. 1. Center-controlled refrigerator system

**Table 2.** Elapsed time for pre-cooling

Cavern No.	Pre-cooling period			Temperature (°C)
	Start	End	Elapsed time (day)	
Cavern No. 1	99. 1. 4	99. 4. 7	93	-21.7
Cavern No. 2	98. 12. 8	99. 2. 6	60	-21.7
Cavern No. 3	98. 7. 21	98. 10. 27	98	-21.3
Cavern No. 4	98. 6. 19	98. 8. 8	50	-21.5
Cavern No. 5	98. 1. 4	98. 5. 26	142	-21.0

**b) 지하암반 저장고별 초기 온도 강하 경향 분석**

지하암반 저장고의 초기 온도 분석을 위해 저장고 내에 설치된 자동온도 기록장치의 온도 강하 경향을 분석한 결과, 저장고 온도는 지수 함수적으로 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 이중 2 저장고는 약 50일 후에, 1 저장고는 약 70일 후에, 3 저장고는 100일 후에 설정온도에 도달하였다. 4 저장고와 5 저장고는 초기 온도가 불규칙하게 변하여 분석에서는 제외하였다. 1, 2 저장고는 예냉이 이루어지기 직전에 냉동기 증설이 이루어져 상대적으로 온도 하강 시간이 짧게 나타났다. 냉동기의 냉동능력은 냉매와 저장고의 온도차가 클수록 효율이 크게 나타나므로, 저장고의 온도가 높은 초기에는 저장고의 온도가 급격히 떨어지고 이후 점차 감소하는 경향이 줄어든다. 따라서, 저장고의 초기 온도 하강 경향은 Fig. 2와 같이 로그함수로 근사시킬 수 있다. 3곳의 저장고에서 얻어진 관계식은 지하암반에 건설되는 저장고의 초기 온도 하강 조건에 대한 근사값으로 수치해석 시 이용할 수 있을 것으로 판단된다.



**Fig. 2.** Variation of room temperature of storage cavern at pre-cooling stage

**c) 냉동기 가동시간 변화**

냉동기 가동 계획은 초기 예냉을 위한 가동과 암반 저장고의 적정 관리온도인 -18°C를 유지하기 위한 가동으로 나눌 수 있다. 1998년 1월부터 1999년 6월까지의 암반 저장고의 온도를 설정 온도까지 낮추기 위해 최대한 냉동기를 가동하였으며, 이후부터 현재까지는 암반 저장고 온도를 적정 관리 온도인 -18°C를 유지하면서 유지관리비 중의 하나인 전기료를 절감하기 위하여 전력비가 가장 싼 심야시간 위주로 냉동기를 가동하였다.

1998년 1~6월 기간 동안은 암반 저장고의 초기 운영상태로 냉동기 가동이 불규칙하게 이루어져 가동시간이 적었지만, 이후에는 약 20~23시간 정도 가동이 이루어져서 평균 약 18시간의 가동이 이루어 졌다 (Table 3). 2000년 이후부터 암반 저장고를 -18°C를 유지하는데 필요한 냉동기 가동시간이 줄어들고 있으며, 2004년에는 100kW, 132kW 두 대의 냉동기를 약 8.9시간 가동하여 암반 저장고 내 온도를 -18°C로 유지 가능하였다(농업기반공사, 2003).

냉동기 가동시간 자료를 기초로 1년 평균의 냉동기 가동시간과 냉동기 용량을 곱하여 지하암반 저장고 운영에 소요된 하루 평균 에너지를 계산한 결과, 1998년 냉동기가 증설되기 전에는 3,752 kWh/day로 계산되었으며, 냉동기 증설 후인 1999년은 7,387 kWh/day의 에너지가 투입된 것으로 계산되었다. 이후 2000년에는 4,278 kWh/day로 감소하였으며, 2001년, 2002년, 2003년에는 각각 3,571 kWh/day, 3,230 kWh/day, 3,105 kWh/day로 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 2004년은 냉동기 가동시간을 급격히 줄여서 소모된 에너지 또한 2,171 kWh/day로 급격히 감소하였다. 곤지암 암반 저장고에 기록된 연도별 평균 사용 전력량은 1999년 8,098 kWh/day, 2000년 5,349 kWh/day, 2001년 4,957 kWh/day, 그리고 2002년에 4,464 kWh/day 이었다(농업기반공사, 2003). 따라서, 초기 예냉이 끝난 2000년부터 2002년까지 냉동기 가동에 따른 전력소모와 저장고 전체의 전력 소모의 차이는 약 1171 ~ 1386

**Table 3.** Averaged daily operation time of refrigerator by every half term during 7 years

Capacity of Ref.	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
100 kW	18.55	23.75	14.50	13.05	12.10	9.50	8.60
55 kW	16.10	23.00	8.35	8.40	4.70	8.30	1.35
55 kW	18.50	16.80	9.35	8.85	5.40	8.80	0.95
132 kW	-	21.45	14.10	10.00	11.15	9.15	9.20

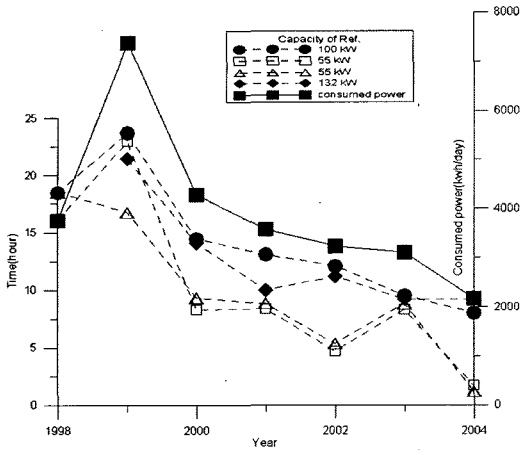


Fig. 3. Averaged daily operation time of each refrigerator during 7 years

kWh/day로 나타나며, 이 차이는 증발기의 제상, 사무실 냉, 난방, 저장고 내 조명시설 등으로 소모된 열량이다.

2.3 지하암반 저장고별 투입 열량 분석

냉동기 가동에 따른 지하암반 저장고에 투입되는 열량을 분석하기 위하여, 냉동기 가동시간, 냉동기 용량 및 저장고 표면적을 계산하여 저장고에 투입되는 열량을 분석하였다.

냉동기의 용량과 평균냉동기 가동시간을 곱하여 저장고 면적으로 나누어주면 단위면적당 일평균 투입 열량이 계산된다.

$$\text{Heat flux} = \text{Capacity of Ref.} * \text{Time} / \text{Area} \quad (1)$$

여기서, Heat flux는 열유량(kW/m<sup>2</sup>)이고, Capacity of Ref는 냉동기 용량(kW), time은 냉동기 평균가동시간

Table 4. Averaged applied heat during 7 years

Year	100 kW Ref.	55 kW Ref.	55 kW Ref.	132 kW Ref.	Sum (W/m <sup>2</sup> )
1998	9.8	4.7	5.4	-	19.9
1999	11.8	5.1	5.1	15.9	37.9
2000	7.7	2.6	2.9	10.6	23.8
2001	6.6	1.6	3.3	7.2	18.7
2002	6.4	1.3	1.6	8.2	17.5
2003	5.0	2.4	2.6	6.7	16.7
2004	4.2	0.5	0.3	6.7	11.7

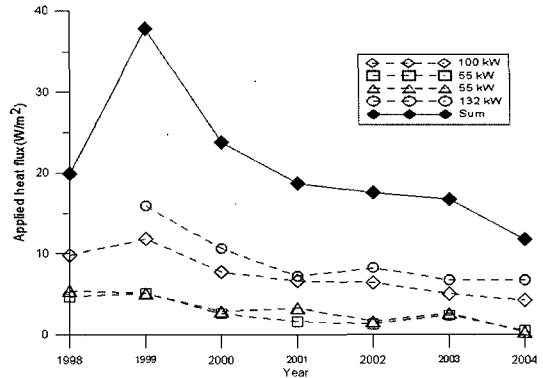


Fig. 4. Applied heat flux per unit area at each storage cavern during 7 years

(hour)이고, Area는 저장고 표면적(m<sup>2</sup>)이다.

냉동능력의 단위인 RT는 3.5kW의 에너지로 환산될 수 있으므로(원성필, 2003), 냉동능력은 각 냉동기의 냉동능력(Table 1 참고) \* 3.5kW로 구하였다.

Table 4는 계산된 냉동기 용량을 연도별 평균 냉동기 가동시간으로 곱하여 24시간으로 나누어 계산된, 해당 연도의 평균 투입 에너지이다. 전체 지하암반 저장고에 1년 단위로 투입된 평균 에너지는 1998년 19.9 W/m<sup>2</sup>로 암반 저장고 전체에 투입되었으며, 1999년에는 37.9 W/m<sup>2</sup>, 2000년 23.8 W/m<sup>2</sup>, 2001년 18.7 W/m<sup>2</sup>로 평균 에너지가 점차 감소하면서 안정화되는 추세를 보여준다(Fig. 4). 특히하게 2004년은 11.7 W/m<sup>2</sup>로 급격히 감소하였는데, 이는 창고운영이 민간에 위탁되어 냉동기 가동시간을 급격히 줄여서 투입에너지가 감소한 것으로 판단된다.

3. 암반저장고 암반온도 변화

3.1 계측 시스템

지하암반 저장고의 암반 내 온도 분포상황을 분석하기 위하여 총 8곳에 암반 온도 계측기를 설치하였다(Fig. 5). 이중 T-1 계측기는 암반 저장고 입구 방향에 설치하여 지표면과의 열적 평형상태에 도달할 때까지의 암반 온도변화 양상을 계측하기 위하여, T-2, 3은 냉동실 외벽의 온도변화 양상을 계측하기 위하여, T-4, 5, 6, 7, 8은 암반 저장고 사이 벽의 온도변화를 계측하기 위하여 벽면으로부터 각각 0.5m, 1m, 2m, 4m, 6m, 10m 지점에 설치하였다. 측정된 암반 온도자료는 자동 기록장치를 통하여 1일 6회 기록하였다. 또한, 각 암반 저장고 증발기 옆에 자동 온도장치를 설치하여 냉동기

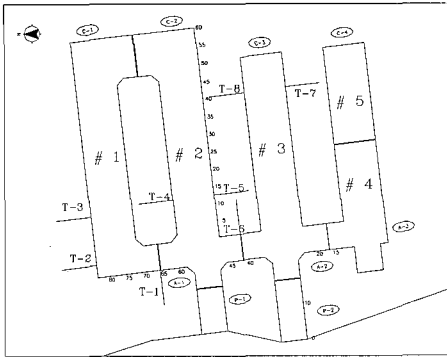


Fig. 5. Installation of thermistor string

가동과 함께 암반 저장고의 실내 온도 변화를 기록하여 향후 암반 계측자료와 비교가 가능하도록 하였다. 본 분석에서는 그중 대표값을 나타내는 T-3, T-4 지점에 대한 분석을 실시하였다.

3.2 경과시간에 따른 온도 변화

시간 경과에 따른 암반 내 온도 변화 양상을 분석하기 위하여, 1 저장고 입구부터 15m 안쪽인 T-3, T-4 계측자료를 암반 벽면으로부터 거리에 따른 온도 변화를 일정시간 마다 기록하였다. 1 저장고의 냉동이 시작된 시기는 1999년 1월 4일 이고, 시간이 경과함에 따라 순차적으로 벽면온도가 내려가는 경향이 나타난다. 60일 경과한 시점에서 암반 내 1m 지점의 온도는 -9℃를 나타냈고 6m 지점의 온도는 9℃로 온도가 약간 하강하였으며, 10m 지점의 온도는 12℃로서 냉동기 가동에 따른 영향을 받지 않았다. 냉동기 가동 1,200일 후는 2002년 4월에 해당하는 시기로, 암반 내 1m 지점의 온도는 -15℃, 10m 지점의 온도는 1℃를 나타내고 있다. 냉동기 가동 2,250일 후는 2005년 2월에 해당하는 시기로 2004년 냉동기 가동 시간이 줄어든 영향으로 암반 내 1m 지점의 온도는 약간 상승하였으며, 여전히 암반 내 6m, 10m 지점의 온도는 하강하고 있다(Fig. 6). 1, 2 저장고 사이 암반의 온도는 T-4 계측기의 온도자료를 정리한 것으로, T-4 계측기는 2 저장고에 설치되어 벽면으로부터 거리는 2 저장고에서 1 저장고 쪽으로 증가하여 나타나므로, 온도분포의 방향을 통일하기 위하여 1 저장고 벽면을 기준으로 거리를 나타내었다. 경과시간은 2 저장고 예냉 시작 시점인 98년 12월 8일을 기준으로 계산하였다. 1 저장고와 2 저장고의 예냉 시기의 차이가 1개월로 냉동기 가동 후 60일 경과 후의 온도는 벽면에서 2m 지점이 3.9℃, 11m 지점의 온도가 -8.6℃로서 2 저장고 쪽 암반 온도가 더 낮게 나타나고 있으

며, 1,220일 경과 시점에서는 -16℃와 -18℃로 차이가 많이 감소하였다. 벽면의 가운데 지점인 6m 지점의 온도가 가장 높게 나타나며 1,220일 경과 시점에서 -14.7℃를 나타낸다. 11m 지점의 온도는 경과시간 360일에서 -17.3℃를 1,220일에 -18℃로 거의 변화가 없지만, 2m 지점의 온도는 경과시간 360일에 -13.4℃를 나타내고, 1,220일에 -16℃로서 온도가 계속 내려가는 경향을 나타낸다. 냉동기 가동 2250일 후인 2005년 2월은 저장고 벽면과 가까운 곳은 온도가 약간 상승하는 경향을

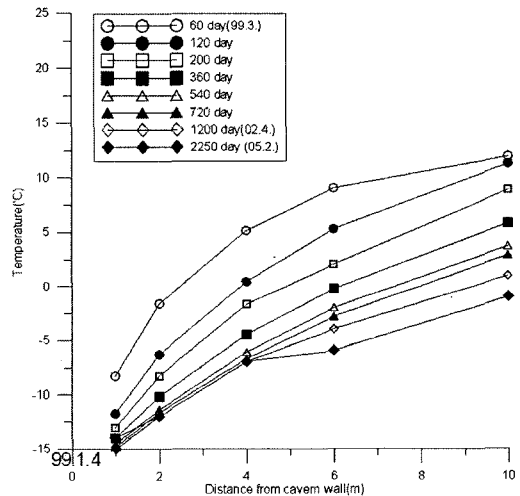


Fig. 6. Temperature distribution at the pillar between cavern No.1 and 2

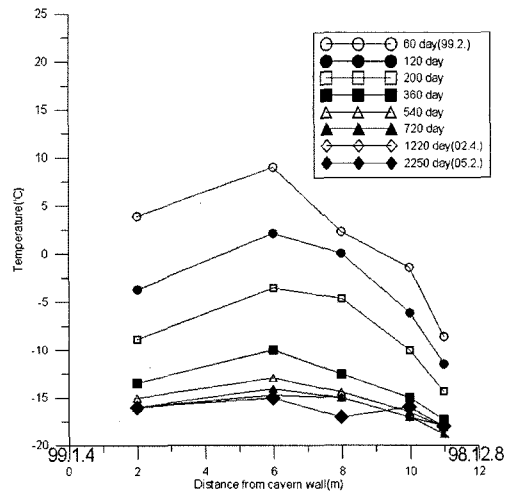


Fig. 7. Temperature distribution at the northern wall of cavern No. 1

나타내며, 벽면중심부는 여전히 낮아지는 경향이 나타난다(Fig. 7).

### 3.3 계측자료 분석을 통한 동결잠열의 영향

열역학 제 1 법칙에 따르면 물질이 열을 주고 받으면 온도가 변하게 되는데, 열을 주고 받으면서도 물질의 온도가 변하지 않는 경우는 물질이 상변화하는 경우이다(원성필, 2003). 일반적으로 물질이 상변화 할 때는 온도 변화없이 열을 흡수 또는 방출하게 되며, 순수한 단일 물질에서 상변화는 일정 온도에서 발생하지만 여러 가지 성분이 혼합된 물질의 상변화는 여러 온도나 또는 일정 온도범위에서 일어나게 된다. 따라서, 지하암반 내에 포함된 공극수의 동결이 발생할 때는 다른 온도구간에 비해 소비하는 열량이 많게 된다. 따라서, 동일한 열량이 계속 공급되는 상태에서는 온도변화가 일어나는 경과시간이 길어지게 된다.

지하암반 저장고에서 상변화 과정이 암반의 온도 하강 경향에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상변화가 일어나는 온도 범위에서 계측자료를 비교적 많이 얻을 수 있었던, T-2, T-3 계측기에 대하여 암반 내 온도가 1°C 하강하는데 소요되는 시간을 분석하였다. Fig. 8은 T-2 지점에 대한 분석으로, 1m, 2m, 4m 에 대해 계측자료의 온도가 1°C 변화하는데 소요되는 일수를 계산하였다. 암반 벽면에서 1m 자료에서 2°C에서 1°C로 변화하는데 2일이 소요되었으며, 1°C에서 0°C로 변화하는데 5일, 0°C에서 -1°C, -1°C에서 -2°C, -2°C에서 -3°C로 변화하는데 각각 3일, 3일, 2일이 소요되었다. 암반 벽면으로부터 2m 지점의 자료에서는 2°C에서 1°C로 변화하는데 6일이 소요되었으며, 1°C에서 0°C로 변화하는데 14일, 0°C에서 -1°C, -1°C에서 -2°C, -2°C에서 -3°C로 변화하는데 각각 8일, 11일, 15일이 소요되었다. 또한, -3°C에서 -4°C로 변화하는데 13일이 소요되었다. 전체적인 온도 하강 경향은 온도가 낮아지면서 온도 변화에 소요되는 일수가 커지는 경향을 보이고 있는데, 0°C에서는 다른 온도 변화 일수보다 2.5배정도 더 소요되고 있으며, -1°C와 -2°C에서도 -3°C 경우에 비해 더 큰 값을 나타내고 있다. Fig. 9는 T-3 계측지점의 온도 변화 일수로서, 6m 지점의 결과는 2°C에서 1°C로 변화하는데는 43일이 소요되며, 1°C에서 0°C로 변화하는데는 130일로 약 3배정도 더 길게 소요되었다. 또한, 0°C에서 -1°C로 변화하는데는 97일이 소요되었으며, -1°C에서 -2°C로 변화하는데는 -1°C 경우보다 짧은 81일이 소요되었다. 따라서, 지하암반 저장고 주변에서 지하수의 동결에 의한 영향으로 온도 변화 일수가 길어지는 것을 확인하

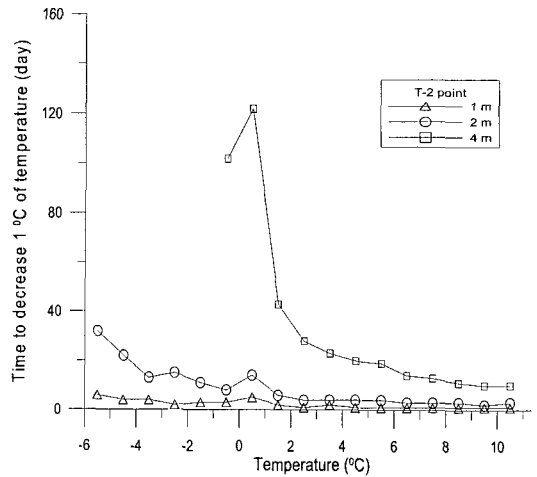


Fig. 8. Time to decrease rock mass temperature by 1°C at T-2 points

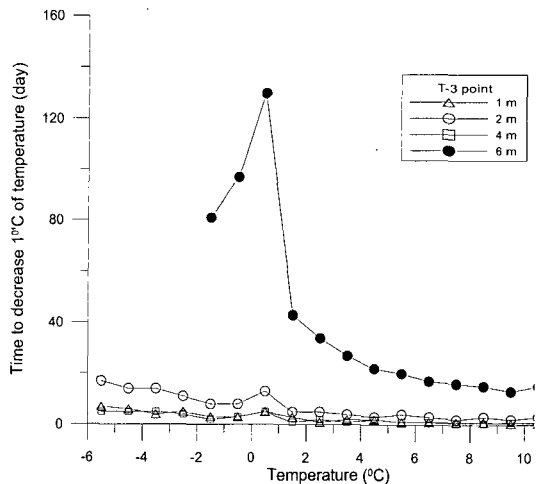


Fig. 9. Time to decrease rock mass temperature by 1°C at T-3 points

였으며, 지하수의 동결은 0°C에서 -3°C 범위에서 발생하는 것을 확인하였다.

### 4. 수치해석 및 계산을 통한 열유량 분석

냉동저장고 설계단계에서 냉동기 용량 설계를 위하여 열유동분석을 통한 열유량을 예측하였지만, 초기의 열유동 분석은 암반내에 포함된 지하수의 영향이 고려되지 못하였다. 냉동저장고 운영 결과 암반 내 지하수가

온도분포에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었으므로(이규상과 이정인, 2004), 냉동기 가동시간에 따른 측정된 열유량은 Fig. 4에 제시한 결과를 이용하였으며 수치해석에 의한 열유량 분석은 이규상과 이정인(2004)에 의한 결과를 이용하였다.

수치해석에서 열유량 계산은 FLAC 2D, 3D(Itasca Inc.)를 이용하였으며, 지하수 및 동결잠열의 영향을 위한 열물성 보정을 위하여 FLAC 내부 함수인 FISH를 이용하였다. FISH 함수를 이용하여 저장고 벽면에 단위면적당 일정 열유량을 적용하면서 암반 벽면의 온도를 기록하였으며, 암반 벽면의 온도가 설정온도에 도달하면 적용된 열유량을 제거시켰다. 최종적으로 열유량이 적용된 시간과 열유량을 이용하여 단위면적당 적용된 열유량을 계산하였다. 모델링에 대한 자세한 사항은 이규상과 이정인(2004)에 설명되어 있으며, 여기서는 수치해석의 결과와 실제 측정된 열유량의 차이를 비교 설명한다.

Fig. 10은 측정된 열유량과 2차원 3차원 수치해석에 의한 결과를 비교한 것이다. 냉동기 가동 초기인 1999년은 측정된 결과와 2차원 3차원 수치해석의 결과가 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그러나 암반 저장고 운영을 위한 초기 예냉기간이 종료된 2000년 이후부터 측정된 결과와 2차원 3차원 수치해석 결과는 큰 차이를 나타내고 있다. 수치해석과 측정된 결과의 차이는 암반 저장고 내부에서 소모되는 식품의 호흡열, 사람의 영향, 조명기구의 영향 등에 의한 열부하가 고려되지 못하였고(냉동물체조수산업협동조합, 1994), 또한 암반 저장고 주변을 흐르는 지하수에 의한 열손실이 고려되지 못하

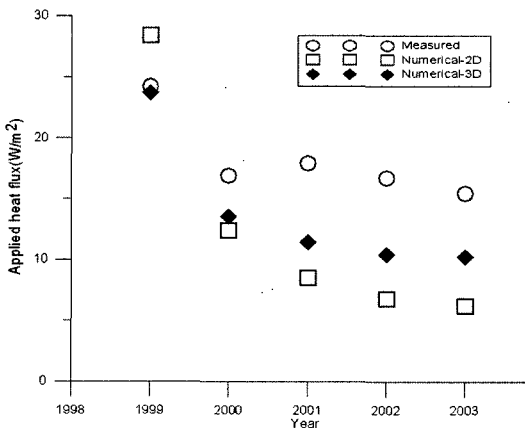


Fig. 10. A comparative graph between measured data and results of numerical analysis on applied heat flux at storage cavern #1

여 발생한 것으로 판단된다. 암반 저장고 주변의 지하수는 항상 유동하고 있으며, 저장고 주변에서 차가워진 지하수는 다른 곳으로 이동하고, 새로운 지하수가 저장고 주변으로 유입되어 암반저장고에서 추가적인 에너지 손실을 가져오는 것으로 판단되지만, 저장고 건설 당시부터 꾸준한 지하수에 대한 조사가 이루어지지 못하여 이에대한 영향을 수치해석에서 고려하지 못하였다. 2004년의 경우는 3차원 수치해석결과와 측정된 결과는 잘 일치하는 경향을 나타내지만, 이는 2004년 이루어진 운영 시간의 감소에 기인한 것으로 실제 상태는 측정된 결과보다 높을 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 곤지암 지하암반 저장고의 7년간의 운영 결과를 분석한 것으로, 기존의 연구와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지하암반 저장고의 초기 온도 분석을 위해 저장고 내에 설치된 자동온도 기록장치의 온도 강하 경향을 분석한 결과, 저장고 온도는 지수 함수적으로 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 초기 온도 하강 경향을 로그함수로 회귀 분석한 결과는 향후 지하암반 저장고의 초기 온도 하강 조건에 대한 근사값으로 수치해석 시 이용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 암반 저장고의 초기 운영은 약 20~23시간 정도 가동이 이루어 졌지만, 초기 예냉이 완료된 2000년 이후부터 암반 저장고를 -18℃로 유지하는데 필요한 냉동기 가동시간이 줄어들고 있으며, 2004년에는 각각 100kW, 132kW 두 대의 냉동기를 약 8.9시간 가동하여 암반 저장고 내 온도를 -18℃로 유지가 가능하였다.
- 3) 암반 저장고 계측자료에서 암반 온도가 1℃ 변화하는데 소요되는 일수를 분석한 결과, 영상의 온도구간에서 소요되는 일수에 비해 0~3℃ 구간에서 소요일수가 3배정도 길어졌다. 이는 암반 내 포함된 지하수의 동결잠열의 영향으로 절리가 발달한 암반에서는 암반온도 분포예측을 위하여 지하수의 영향과 아울러 동결잠열에 대한 영향도 고려되어야 한다.
- 4) 측정된 열유량과 2차원 3차원 수치해석에 의한 결과를 비교한 결과, 냉동기 가동 초기인 1999년은 측정된 결과와 2차원 3차원 수치해석의 결과가 큰 차이를 보이지 않지만, 암반 저장고 운영을 위한 초기 예냉기간이 종료된 2000년 이후부터 측정된 결과와 2

차원 3차원 수치해석 결과는 큰 차이를 나타내고 있다. 수치해석과 측정된 결과의 차이는 암반 저장고 내부에서 소모되는 식품의 호흡열, 사람의 영향, 조명기구의 영향 등이 고려되지 못하였고 또한 암반 저장고 주변을 흐르는 지하수에 의한 열손실이 고려되지 못하여 발생한 것으로 판단된다.

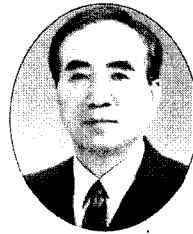
## 참고문헌

1. 냉동물제조수산업협동조합, 1994, 냉동식품의 이론과 실제, 유림문화사, 448-455.
2. 농업기반공사, 2003, 곤지암 지하저장 터미널 운영백서.
3. 신중호, 박연준, 김호영, 박찬, 1999, 아치형 냉동저장공동 주위 암반의 열전도 특성 및 열물성 평가, 터널과 지하공간 9, 27-35.
4. 원성필, 2003, 냉동공학, 보성각, 91-142.
5. 안대영, 1994, 농수축산물 지하저장시설 형태별 경제성 비교와 실례, 곡물엘리베이터와 농수축산물 지하암반 저장 시설 특별 심포지엄 자료집, 농어촌진흥공사, 173-195.
6. 이규상, 이정인, 2004, 지하암반 냉동저장고 주변의 온도 분포 예측을 위한 수치해석. 터널과 지하공간 14, 287-294.



### 이 규 상

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1996년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
 2004년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사  
 Tel: 031-400-1852  
 E-mail: leegs@karico.co.kr  
 현재 농협기반공사 농어촌연구원 지하수 연구실 주임연구원



### 이 정 인

1963년 서울대학교 공과대학 광산학과, 공학사  
 1965년 서울대학교 대학원 광산학과, 공학석사  
 1974년 일본 도호쿠대학(東北大學) 대학원 자원공학과, 공학박사  
 Tel: 02-880-7221  
 E-mail: cilee@snu.ac.kr  
 현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수