

# 암반 저장창고 건설을 통한 에너지 절감과 장기보존에 대한 연구

(A study of energy saving and  
long conservation in construction of rock store house)

최예환(강원대) · 채경희\*(우송공대)  
Choi, Ye Hwan · Chae, Goung Hee

## Abstract

The most important thing to consider in cold store design are to save cooling energy consumption and to keep goods freshly. Specially there are many efforts to save energy with cold store in Korea. A building energy simulation program should be used to optimally select a cooling system to match the criteria of cooling rate and storage rate in a given cool crop storage building and HVAC system. The low maintenance costs, high degree of safety and environmental impacts are also favouring the underground solution. There are obviously a lot of possibility for cost-effective storage of cooled or frozen goods or liquids in ground water rock.

## I. 서론

우리나라의 농업생산물도 UR협상의 타결로 전세계의 농산물과 함께 무한한 경쟁시대에 돌입하게 되었다. 연구증가와 대도시 인구과밀에 의한 도시시설의 포화, 대량소비시대에 대처할 대량저장의 필요성, 환경오염 등의 문제로 지상공간 이용의 한계를 초래하고 있다. 이에 따라 국내농업의 경쟁력 강화를 위해서는 국토의 효율적 활용, 환경보존, 에너지절약, 보안 및 안전 등 여러 가지 잇점으로 암반저장시설 개발이 세계적인 추세이다.

지하 암반은 단열성과 항온성, 방사능차단성, 기밀성불연, 방화, 방폭성, 화학적 안전성 등 지상에 비하여 활용할 수 있는 유리한 점이 많기 때문에 유류비축, 압축공기 및 열수저장, 지하발전소, 핵폐기물 처리등 에너지관련 저장시설을 비롯하여 농·수·축산물 암반저장시설 등 다방면에 활용하고 있다.

국토 70%가 산지인 우리나라는 기반암이 매우 견고하기 때문에 농어촌 지역과 도시근교에 교통이 편리하며 지형과 지질조건이 양호한 지역을 쉽게 찾을 수 있으며 이러한 지역에 인공적으로 동굴을 굴착하여, 암반저장창고를 용이하게 건설할 수 있을 것이다.

지하 암반저장창고를 최적환경조건하에 적절한 위치, 적절한 규모로 건설한다면 에너지 절감과 장기보존할 수 있으며, 저렴한 운전비로 운전이 가능하므로 농수산물의 공급이 가능해져 국민의 수익성을 제고할 수 있다.

---

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (1998년 10월 24일)

## II. 냉장창고 기본설계의 방법

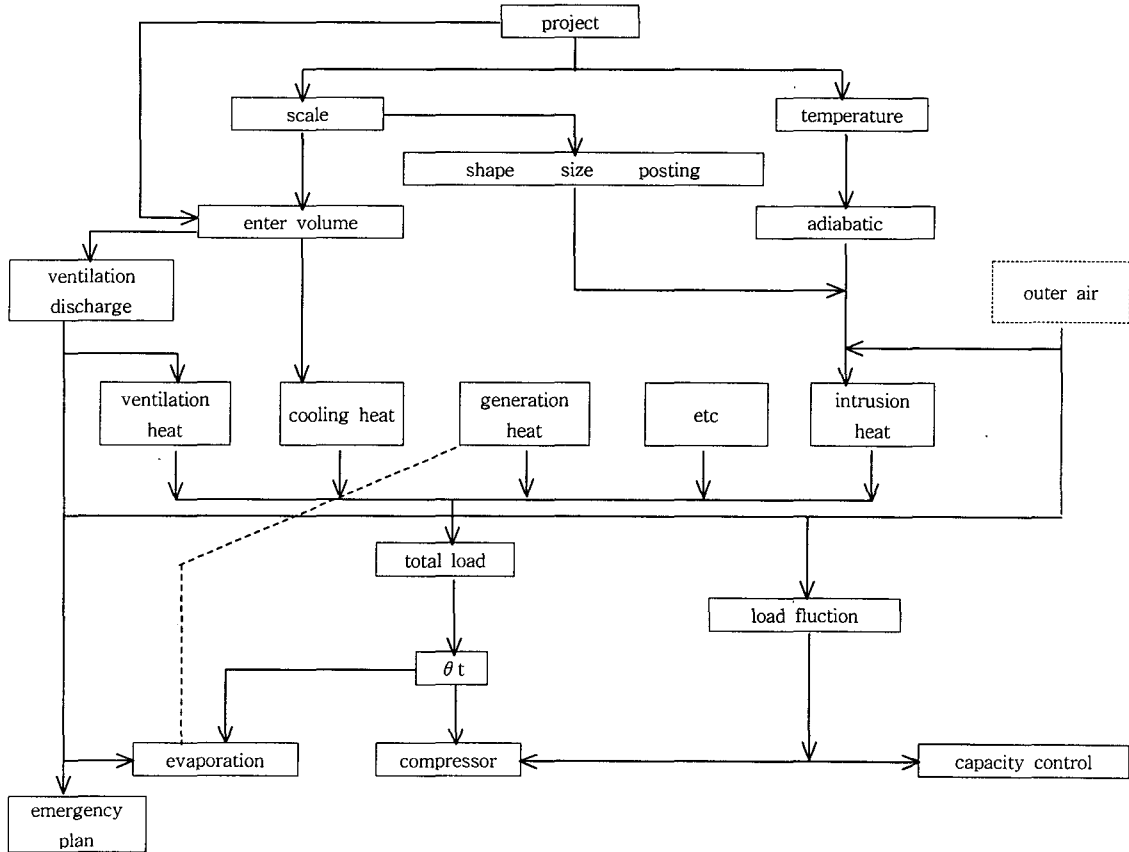


Fig 1. Route of freezer design

냉장고의 부하열량을 산정하는 경로를 나타낸 것이 Fig 1이다. 즉, 냉장고 부하의 요소는 1) 침입열, 2)냉각열, 3)발생열, 4)환기열, 5)기타로 대별되고, 현재의 창고업법에서는 4) 및 5) 항목을 1)~3) 항목 합계의 35%로 보고 있다.

부하열량을 산정하려면 냉매의 증발온도를 설정해서 압축기·증발기를 일괄적으로 선정할 수 있지만 계절, 활용시간대 등 부하 변동 요소, 장치의 분할, 용량제어방식을 포함시켜 검토해야 한다.

### 1. 지하냉동창고의 설계를 위한 기술적 사항에 대한 검토

#### 1) 설계 구성 요소

지하냉장창고의 설계에 관련된 구성요소를 도식화하면 Fig2과 같다. 즉, 냉장창고운영의 구성요소인 저장품의 종류, 저장조건 및 저장기간, 그리고 물동량에 대한 설계기준을 충족시키기 위해서 지하공간의 설계, 냉동공조설비의 설계, 그리고 창고의 운영시스템이 상호 연관성을 가지고 검토되어야 하며, 최종적으로 각 구성요소의 요구조건을 최적화하는 설계가 이루어져야 한다.

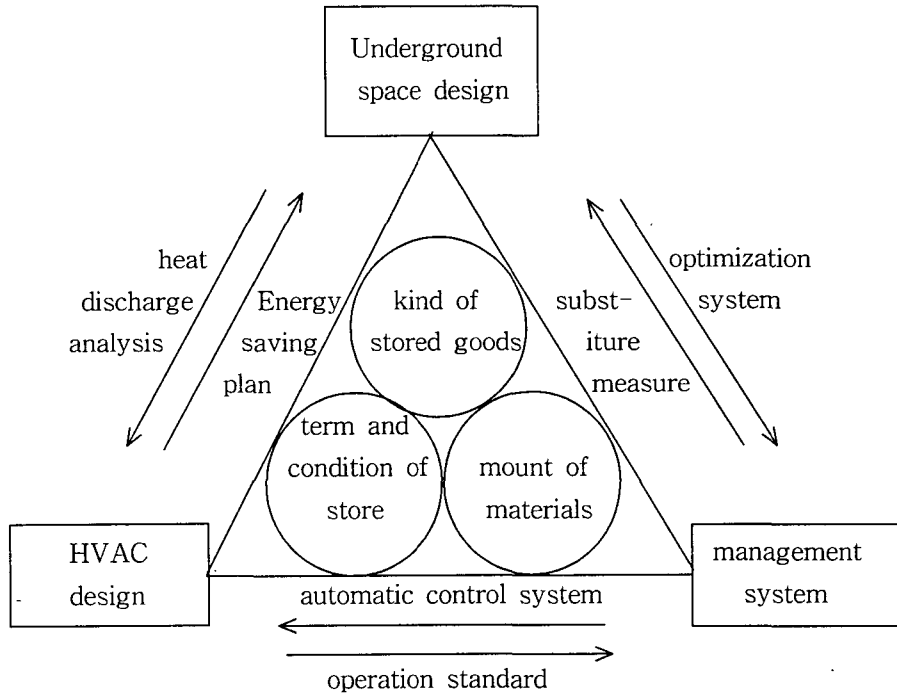


Fig 2. The design line-up of underground refrigerator store

III. 지하저장암반의 열유동 분석

1) 열유동 방정식

전도에 의한 열유동의 기본식은 Fourier의 법칙에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \dots\dots\dots(1)$$

여기서  $q_i$ 는  $i$ 방향으로의 단위면적당 열유동량( $w/m^2$ )이며,  $k_{ij}$ 는 열전도계수( $w/m^2C$ )이고,  $T$ 는 온도이다. 열유동은 매질 자체에 축적되며 매질의 온도 변화를 유발하게 되는데, 온도의 변화와 열유동량의 관계는

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_{net}}{C_p} m = \frac{1}{C_p \rho} \left\{ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

으로 나타내어진다. 여기서  $Q_{net}$ 는 매질로 유입되는 실열량( $w$ ; 즉, 유입량-유출량)이며  $C_p$ 는 매질의 비열( $J/kg^C$ ),  $m$ 은 매질의 질량( $kg$ )이다. 이 두 식이 전도에 의한 열유동의 기본식이 된다. 상기 두식을 2차원 열전도 문제에 적용하기 위하여 합치면,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_p \rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} = \frac{1}{C_p \rho} \left\{ k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

으로 되며, 이를 열확산 방정식(diffusion equation)이라 한다.

만일 매질의 열전도가 등방성이라면  $k_x = k_y = k$ 로 되어 (3)식은

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{C_p \rho} \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right\} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

로 되며  $\alpha$ 는 열확산계수 (thermal diffusivity)라 하여 (m<sup>2</sup>/sec)의 차원을 갖게 되는데, 이는 매질의 열전도 속도를 나타내는 척도가 된다.

2) 정상상태에서의 열유동

매질 내부에서 온도변화 없이 일정한 상태로 열유동이 일어날 경우 이를 정상상태 전도라 한다. 1차원적인 열유동을 고려하면 (1)식은

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots(5)$$

로 표현될 수 있다. 이 식에서 k는 열전도도로서 좁은 범위의 온도에서는 상수로 간주할 수 있으므로, 변수는 x와 T뿐이다. 따라서 벽면 양측에서의 온도차와 벽면의 두께가 주어지면 윗식은

$$q = k \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\Delta T}{R_T} \dots\dots\dots(6)$$

로 된다. 여기서 복합 열전도도 R<sub>T</sub>는 다음 식으로 나타내어 진다.

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{\Delta x_3}{k_3} + \frac{1}{h_3}} \dots\dots\dots(7)$$

3) 비정상 상태의 열유동

비정상 상태에서는 열의 유동이 매질 자체의 온도변화를 수반하므로 열유속 q는 매질 내에서 일정하지 않게 된다. 등방성 매질의 경우 (4)에 의하여 매질내의 온도 분포가 구해진다. 이의 일반해는 특수한 경우에 한해서만 구하여 질 수 있다. 암반은 반무한 고체로 간주할 경우, 공동내부에서의 열흐름은 시간의 경과에 따라 공동내부의 냉기가 암반내부로 침투하는 것으로 볼 수 있는데, (4)식을 적당한 경계조건하에서 적분하면 다음과 같이 온도 T<sub>i</sub>인 암반표면에서 거리 X지점에서의 온도 T를 구하는 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{T_i - T}{T_i - T_o} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \dots\dots\dots(8)$$

여기서 z는  $\frac{x}{2\sqrt{at}}$ 로 정의되며 무차원이고, T<sub>i</sub>는 암반 표면온도, T<sub>o</sub>는 암반내부의 초기온도이다, 시간의 경과에 따라 고체에 전달된 열유량을 계산하기 위해서는 표면에서의 온도경사를 구

하여야 한다.  $q = \frac{k(T_o - T_i)}{\sqrt{\pi at}}$  식을 미분하면

$$\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = - \frac{T_i - T_o}{\sqrt{\pi at}} \dots\dots\dots(9)$$

이 된다. 따라서 고체표면에 전달된 총 열유량은 식 (1)에 의하여

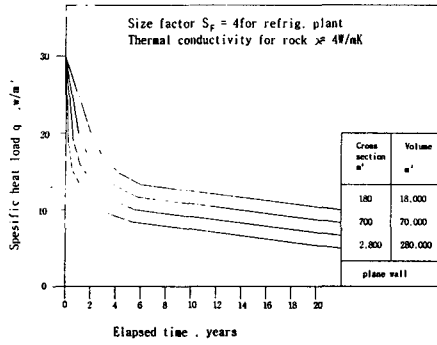


Fig 3. Specific heat load with elapsed time for cold store in rock for various store sizes.

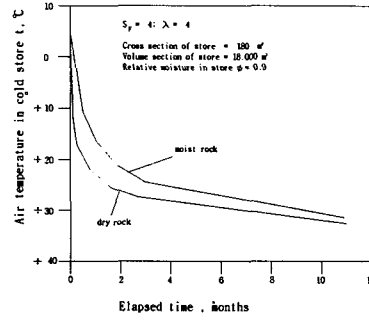


Fig 5. Influence of latent heat transfer on cooling - down curve for a cold stor in rock.

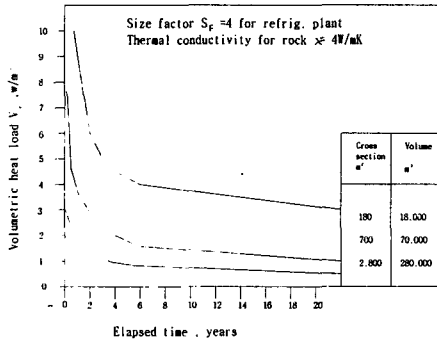


Fig 4. Volumetric heat load with elapsed time for cold store in rock for various store sizes.

$$q = -k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{k(T_i - T_o)}{\sqrt{\pi a t}} \dots \dots \dots (10)$$

로 나타내어진다.

4) 수치해석에 의한 열유동 계산

전절에서 언급한 바와같이 특수한 경우를 제외하고는 열확산 방정식의 일반해를 구할 수 없으므로 수치해석법을 사용하게 된다. 일반적으로 잘 알려진 수치해석 프로그램인 FLAC을 이용하여 지하 공동에 대한 2차원 열유동해석을 실시하였다.

5) 냉동시스템

냉동시스템의 가장 독특한 특질은, 그 용량이 기화기의 온도 곱, 저장공간내의 공기온도에 크게 좌우된다는 점이다. 전형적인 설비의 성능곡선이 낮은 온도하에서 나선형 압축기의 성능이 더 좋은 것은 그 것의 체적 효율성이 더 좋은 때문이다.

설비 용량을 냉동저장의 규모로 연결하기 위해서는, 비용량(specific capacity)이란 개념이 도

입된다. 이것은 총 설비 용량을 암반저장공동의 총 내부표면적으로 나눈 값이다.  
 냉동설비의 여러 가지 크기는 다음의 간단한 식으로 결정된다.

$$p_o = S_F \cdot (15 + 0.275 \cdot t_{air}), W/m^2(\text{암반표면}) \dots \dots \dots (11)$$

여기서,  $p_o$  = 냉동설비의 비용량  
 $S_F$  = 냉동설비의 크기를 규정하는 크기변수  
 $t_{air}$  = 냉동저장공간내의 공기 온도

6) 암반과 찬 공기간의 열이동

암반과 찬 공기간의 열이동에는 다음과 같은 2개의 기본 요소가 있다.

- 자연대류와 강제대류의 혼합
- 암반표면의 습기 증발에 의한 잠열의 이동

열이동에 영향을 미치는 또 다른 요소는 과대 발파와 채굴로 인한 암반표면의 확대이다.  
 이러한 모든 영향을 고려한 열이동함수(h)가 개발, 시험되어 왔다.

$$h = SIF \cdot (h_o + 1.8 \cdot \Delta t^{0.33}) \cdot (17.5 \frac{\Delta P}{\Delta t} + 1), W/m^2K \dots \dots \dots (12)$$

$SIF$  = 암반의 표면확대계수  
 $h_o$  = 강제대류(예; 저장공간내의 공기속도함수)에 따른 열이동계수  
 $\Delta t$  = 암반표면과 찬 공기간의 온도차  
 $\Delta p$  = 암반표면과 찬 공기간의 증기압차(누수가 없는 건조암반의 경우는 0임)

IV. 결 론

냉동설비 크기와 열전도도의 영향, 냉각곡선에서의 잠열이동의 영향, 평면벽 및 냉동저장공동의 3가지 크기에 대하여 시간경과에 대한 비열부하(specific heat load)시간경과에 따른 체적 열 부하(volumetric heat load)의 관계를, 1. 2 및 3차원 컴퓨터에 의해 암석의 열적성질, 저장소 내부의 암석과 공기사이에 발생하는 열전달을 가능하게 했으며, 저온저장고에서 단열문제는 수치계산방법중 유한 체적법을 도입하였다. 특히, 자연조건이 적합한 곳이면 어디라도 합리적인 설계, 시공을 통해 지하암반 저장 시설이 설치될 수 있다.

지하암반 저장에 대한 국내자료가 미비한 상태이므로, 이에 대한 적극적인 연구가 이루어져야 할 것이다. 이러한 지하암반 저장창고가 많은 지역에 확대 보급된다면 저렴한 운전비로 운전이 가능하므로, 농수축산물의 안정적인 공급이 가능해져 모든 국민에게 혜택이 돌아갈 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. ASHRAE, "Handbook Of Fundamentals", American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers, 1997

2. ASHRAE, "Handbook Of Refrigeration", American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers, 1994
3. Broch, E.(1993) : Use, planning and design of Underground structures. Proc. seoul symp. Underground Space and Construction Technology, 8-9 Oct., 1983, seoul, p. 31-47.
4. Broch, E. and Odegaard, L. (1980): Storing water in rock caverns is safe and cheap. In M. Bergman (ed.): Subsurface Space. Pergamon Press, Oxford, p. 259-266.
5. Frivik, P.-E., Comini, G. (1982): Seepage and Heat Flow in soil Freezing. Journal of heat Transfer, Vol. 104, p.323-328, May 1982.
6. Frivil, P.-E., Thorbergsen, E. (1982): Thermal Analysis of a Refrigerated Rock Storage for Ammonia. Report (in Norwegian) from Divisions of Refrigeration Engineering, Trondheim, June 1982. Status: Restricted.
7. Kannberg, L 1985, "Aquifer thermal energy storage in the United states, "Proceeding of the international conference on the energy storage for building heating and cooling, Septe nilber 22-26 1985, Pablic Work Canada, Toronto, Canada, pp 3-8
8. Midkiff, K, Song W, and Brdtt, C, 1991 "Thermal Performance and Challenges for a Sea -sonal chill Energy storage Based Air-Condio system, "asce 91-HT-29
9. Song, Ueong K. 1990, "Air-Conditioning system based on seasonal aquifer chill energy storage" Phd Thesis, The University of Alabama, Tuscaloosa, AL
10. Thorbergsen, E. (1990): "Design Programs for Compression Heat Pump Refrigeration Systems and Components", 3rd Unternational Energy Agency Heat Pump Conference, Tokyo, Japan, March, 1990.
11. Thorbergsen, E.(1994): "PC Program for Design of Public Halls in Rock Caverns-Modeling and User International Symposium on Underground Openings for Public Use, Gj0vik, Norway, June, 1994.
12. 송영길, 이관수, 이태희, 김양현, 1993, "지하대수층을 이용한 축열시스템의 설계( I ): 등온 해석 공기조화냉동공학회 논문집", Vol5. No2 PP102~110
13. 오후규 역, 1994, "냉동참고", 한국냉동공조기술협회발행, pp53-64