

農水産物の 地下 冷蔵貯蔵 技術

On the technology for iced storage of agriculture and fishing products in underground

김 호 영*

Kim, Ho Young

序 論

우리나라의 상업용 대규모 冷蔵倉庫의 시설능력 은 1992년 현재 冷凍倉庫 1,013,000톤, 低溫倉庫 496,935톤이며, 이는 경제성장과 변화에 따라 앞으로도 꾸준히 늘어날 것으로 전망된다. 냉장창고는 에너지 소비가 큰 시설이며, 특히 여름철 戰力 負荷가 매우 크다. 전체 상업용 냉장창고의 年間 전력소비는 약 380,000Mwh, 여름철의 月間 전력소비는 약 60,000Mwh로 推定되며, 여름철에 약 300~400Mw의 最大負荷가 요구된다. 따라서 냉장창고에 대한 에너지 절약과 최대부하 切削을 위한 기술개발은 電力需給體系에 긍정적인 영향을 가져올 것으로 기대된다.

냉장창고의 에너지 節減方案으로서 현재의 冷凍 工程을 개선할 경우, 절약가능한 정도는 약 10% 일 것으로 생각된다. 그러나 현재 地上에 건설되고 있는 냉장창고를 地下에 건설한다면 地下岩盤의 斷熱性和 蓄熱能力을 활용하게 되므로 30% 이상 電力이 절감되며, 또한 여름철에도 냉동설비를 야간에만 운영할 수 있어 深夜電力의 활용과 최대부하 절삭효과를 얻을 수 있다. 특히 냉장창고와 같이 窓門이 없는 건물은 지하에 건설하여도 운영상 전혀 문제가 없다. 노르웨이, 스웨덴, 美國 등지에서

는 30년 전부터 다양한 규모의 냉장저장고를 지하에 건설하여 운영하고 있으며, 최근에는 日本에서도 다녀간 實證試驗을 거쳐 지하 농수산물 저장 및 유통시설을 대규모로 운영하고 있다.

국토의 70%가 山地인 우리나라는 基盤岩이 매우 견고하기 때문에 농어촌지역과 도시근교에 교통이 편하고 地形과 地質條件이 양호한 지역을 쉽게 찾을 수 있으므로, 이러한 지역에 人工的으로 동굴을 굴착하여 냉장창고를 용이하게 건설할 수 있을 것이다. 특히 최근에는 農水産物 流通施設의 필요성이 크게 대두되고 있으므로 地下空間의 활용을 통해 지상공간이 부족한 문제를 해결하고 환경을 보전하는 부가적 이점을 얻을 수 있다.

地下冷蔵倉庫에 대한 검토는 1983년 농어촌개발공사에서 처음 실시하였으며(김정옥 1983, 1984; 농어촌개발공사. 1984), 그후 대통령 지시에 따라 한국식품개발연구원과 한국농촌경제연구원에서 이의 타당성을 검토한 바 있다(한국식품개발연구원 1991; 한국농촌경제연구원 1991; 허길행 1991). 또한 최근에는 한국식품개발연구원에서 국내 廢鑛山을 대상으로 지하냉장창고의 적용 가능성에 대한 연구를 수행하였다(한국식품개발연구원 1992). 그러나 이러한 연구검토에도 불구하고 아직까지도 지하냉장창고가 實用化되지 못한 것은 여러가지 이

* 선경건설주식회사 지하 비축팀 차장(工博)

유가 있겠지만 가장 큰 이유로는 경제적, 기술적 타당성에 대한 證明이 이루어지지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

技術의 概念

식품의 低溫貯藏을 凍結點 기준으로 저장온도에 따라 개략적으로 분류하면 <표 1>과 같으며, 이러한 저온저장시설을 일반적으로 貯藏倉庫라 부른다.

冷蔵貯藏에서 貯藏期間(Time)과 貯藏溫度(Temperature)는 밀접한 관계가 있으며, 품질보존을 위해서는 온도변화의 허용범위(Tolerance)

<표 1> 식품의 저장온도에 따른 분류

분 류	저장온도	저장기간	저장품목
冷蔵貯藏	+10~-2℃	1週~6個月	鮮魚, 건어물, 과일, 채소, 肉類등
冷凍貯藏	-10~-25℃	3~12個月	수산물, 肉類, 냉동식품, 동결야채, 아이스크림 등
超低溫貯藏	-40℃ 이하	6個月이상	참치, 가다랭이, 참돔 등

가 중요하다. 온도변화는 식품의 세포 내에 얼음 結晶을 성장시켜 세포를 파괴하고 解凍 時에 內汁의 탈락(drip loss)을 유발하여 식품의 품질을 저하시킬 뿐만 아니라 에너지 손실의 원인이 된다. 또한 저장물의 表面乾燥를 방지하기 위해 濕度를 매우 높은 상태로 유지하여야 하며, 특히 냉장저장에서 습도유지는 필수적인 조건이다.

地下岩盤은 年中 溫度가 일정하며, 熱傳道率이 낮고 대규모로 구성되어 있으므로 암반 중에 냉장창고를 건설하면 에너지를 절약하고 저장품의 품질

보존을 도모할 수 있다. 또한 암반 자체가 斷熱材 역할을 함에 따라 斷熱壁을 시공할 필요가 없으므로 建設費를 절감할 수 있다. 지상창고는 벽면과 실내공기의 溫度差異로 인해 열복사 대류가 발생하므로 내부의 온습도 분포가 均質하게 유지되지 못하여 결과적으로 貯藏品의 품질이 저하된다. 그러나 地下에서는 암반의 온도가 안정된 상태이므로 창고벽면은 항상 내부공기와 동일한 온도를 유지하며, 실내온도가 증가하면 천정과 벽면으로부터 永畜熱이 발생되어 온도를 안정시키는 역할을 하게 된다. 따라서 恒溫恒濕이 유지되므로 저장품의 품질을 장기간 보존할 수 있다. 또한 냉동설비의 고장이나 전력공급이 중단된 경우, 오랫동안 실내온도의 상승을 방지하게 되므로 별도의 전력공급설비 또는 예비 냉동설비가 필요하지 않다.

外國의 예를 보면 지하냉장창고는 지상창고에 비해 냉각설비용량은 50~75%, 연간 에너지 소비는 25~50%까지 감소하였으며, 습도는 95% 이상으로 년중 변화가 거의 없이 유지가 가능하였다.

地下冷蔵倉庫의 建設方式

일반적으로 冷蔵倉庫는 消費地 또는 生産地 부근 교통이 편리한 곳에 위치하는 것이 유리하다. 地下 冷蔵倉庫는 이에 부가하여 지질조건이 양호하며 기반암이 견고한 곳에 건설되어야 한다. 外國에는 廢鑛山을 이용하여 냉장저장고로 사용한 예도 있다. 그러나 우리나라의 鑛山은 지역적으로 편중되어 있고 교통이 불편한 곳에 위치한 경우가 많다. 또한 폐광산은 동굴의 규모가 작거나 廢鑛된지 오래되어 출입이 위험하고, 地下水 유입이 많아 습도제어가 어려운 점등으로 인해 그대로 냉장창고로 사용하기에는 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 우리나라의 여건에서는 암반 내에 空洞을 굴착하여 냉장창

고를 건설하는 것이 가장 타당하며 가능성이 큰 것으로 판단된다.

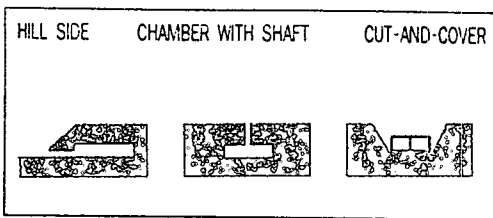
지하에 人工的으로 空洞을 구축하는 방법으로는 <그림 1>과 같은 方案들을 생각해 볼 수 있으며, 이들에 대해 특성을 평가하면<표 2>와 같다. 結論的으로 우리나라 조건에는 구릉지를 이용한 동굴식이 가장 적합한 것으로 판단된다.

<표 2> 建設方式의 특성평가

건설방식	경제성	입지 용이성	접근성	건설 용이성	운영 시스템	에너지 절약	비고
동굴식 (Hill-side)	○	△	○	○	○	○	
지하식 (Chamber)	△	○	×	△	×	○	자동화시스템 필요
개착식 (Cut-and-cover)	×	○	△	○	△	△	동결냉장지반은 건설불가

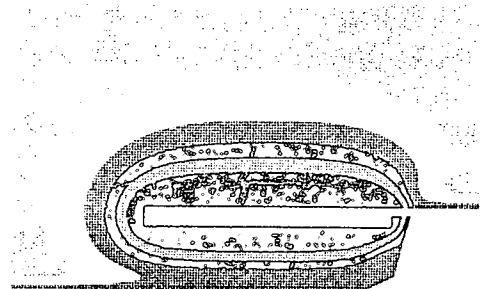
地下冷藏倉庫의 熱設計

岩盤을 설계온도까지 冷却하는데는 어느 정도의 에너지와 시간이 소요되지만, 일단 설계온도에 도달하게 되면 암반은 매우 효과적인 온도 및 습도의 차단벽 역할을 수행하게 된다. 地下貯藏空洞은 모양과 크기가 일정하지 않고, 온도분포는 시간에 따라 변화하는 경계조건을 가지는 3次元 非正常 熱傳達 問題가 되어 수학적으로 복잡하다.



<그림 1> 지하냉장창고의 건설방식

또한 암반은 節理와 같은 불연속면이 散在하며, 지하수의 流動이 있으므로 열계산을 더욱 복잡하게 만든다. 따라서 암반의 열적특성, 저장공동의 형태, 岩石과 空氣 사이의 열전달 특성, 지하수의 潛熱效果, 공기 중 습도에 의한 열특성 등, 제반조건을 고려한 3차원 電算解析 프로그램을 이용하여 熱計算을 수행하게 된다.



<그림 2> 지하 냉동창고 주위 암반의 온도분포

<그림 2>는 저장공동 주변의 온도분포를 FDM (Finite Difference Method)으로 해석한 例이다.

지하냉장창고의 열계산은 다른 두가지 사항의 결정을 위해 실시된다.

(1) 초기 冷却期間의 예측

(2) 空洞으로부터 流出되는 熱量 및 운영시 에너지 필요량의 계산

초기 냉각기간을 예측하는 것은 상업운영이 시작될 수 있는 시점을 예측하는 것이며, 豫冷을 위한 냉각기 용량을 결정하는데 필요한 자료를 제공하는 것이다.

熱計算으로부터 다음과 같은 사항을 결정한다.

(1) 암반저장공동의 형태와 규모의 최적화

(2) 냉동시스템의 설계

(3) 冷却曲線의 예측

(4) 연간 에너지 소비곡선 결정 및 비용산출

岩石의 열전도도는 組成鑛物에 따라 달라지며 석영은 8w/mK, 장석, 운모, 방해석은 2.0~3.0w/

mK의 범위를 가진다. 따라서 석회암과 운모편암류는 2.0~2.5w/mK로 열전도도가 가장 낮고, 화강암과 규암은 3.5~6.0w/mK로 비교적 높다. 편마암류는 이들의 중간 정도이다.

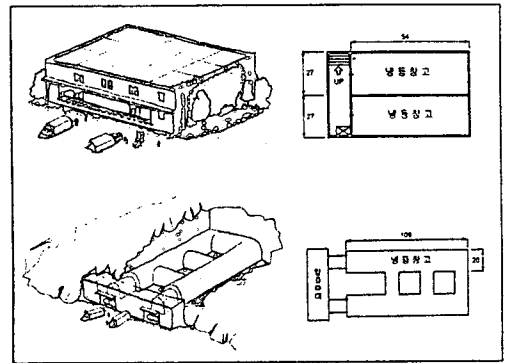
熱的인 관점에서 본다면 저장공동의 형태는 求刑이 가장 이상적이다. 그러나 저장공동의 斷面積이 충분히 크다면 形態 보다는 體積의 영향이 훨씬 크다. 따라서 저장공동의 단면적을 최대한 크게 하는 것이 熱設計 측면에서 유리하다(Broch, 1994). 한편 저장공동이 길어지면 저장품의 이동거리가 늘어나 창고 입출고 시스템에 나쁜 영향을 주므로, 길이를 줄이기 위해서도 斷面積이 큰 것이 좋다.

貯藏空洞의 形態와 配列

貯藏庫의 높이는 貯藏品의 有效積載 높이에 따라 제한된다. 따라서 貯藏空洞의 단면적을 크게 하려면 空洞의 폭이 커져야 하며, 공동은 납작한 형태가 된다. 그러나 岩石力學的인 측면에서 安定性을 유지하기 위해 공동의 폭은 제한되며, 공동의 최대 허용폭은 암반의 工學的 特性에 따라 달라진다. 국내의 기반암 조건에서 상업용 저장고의 요구치인 15~20m의 폭의 저장공동을 굴착하는데는 안정성에 큰 문제가 없는 것으로 분석되었다(김호영 외, 1994).

저장공동의 형태는 다수의 터널을 평행하게 배열하는 방법(Multiple Parallel Openings)과 사각형의 방들 사이에 암석기둥을 격자 모양으로 남기는 방법(Room and Pillar)이 있다. 後者は 적어도 30,000坪 이상의 대규모 시설에 적합하며, 소규모 시설에는 형태상 前者가 적합하다. 여러개의 저장공동의 평행하게 배열하면 열관점에서 공동의 폭을 늘리는 형태가 되며, 또한 굴착시 다수의 작업장을 개설하게 되므로 굴착 장비 및 인원의 효율적 운영

이 가능하여 굴착비를 줄일 수 있는 장점이 있다.



〈그림 3〉 지상 및 지하 냉장창고(저장용량 5,000톤)

〈표 3〉 지하 및 지상 냉장창고의 비교

항 목	地下	地上	地下/地上	
저장용량	5,000톤	5,000톤		
냉각설비용량	150kw	280kw	54%	
년간전력사용량	876Mwh	1,318Mwh	66%	
전간전력비용	37,800천원	60,800천원	63%	
① 토목 및 건축	3,041백만원	3,027백만원		
건설비	② 냉동설비비	490	720	
	③ 기타설비비	608	605	
	④ 전기설비비	243	303	
	합 계	4,328백만원	4,655백만원	94%

이상과 같이 저장공동의 Layout 설계에는 공동의 熱的 舉動과 암석역학적인 안정성, 굴착의 효율성과 함께 운영 시의 입출하 시스템 등을 종합적으로 고려하여 설계가 이루어져야 한다.

地下貯藏倉庫의 經濟性

地下冷藏倉庫의 에너지 절감효과와 經濟性을 分析하기 위해 동일한 규모의 地上 및 地下冷藏倉庫의 표준 모델을 설계하였다. 저장온도는 -25℃, 저

장규모는 5,000톤으로 설정하였으며, 표준모델은 〈그림 3〉과 같다. 운영조건을 동일하게 가정하여 年間 電力使用量과 建設費를 비교한 결과는 〈표 3〉과 같다. 비교를 위한 제반조건은 일반적으로 통용되는 사항으로 가정하였다. 지상 냉장창고는 여름철의 최대부하량에 安全率을 감안하여 설계용량을 결정하게 된다. 그러나 지하는 암반의 축열능력을 최대한 활용하여 晝間の 熱負荷를 하루 전체로 平準化할 수 있으며, 安全率을 고려할 필요가 없으므로 설계용량에서 큰 차이를 나타낸다. 결과적으로 지하창고의 냉각설비용량은 지상의 54%로 계산되었다. 또한 지하냉장창고는 지상에 비하여 연간 總電力使用量에서 34%, 總電力費用에서 37%의 절약 효과가 있음을 알 수 있다.

토목 및 건축공사비의 추정결과, 지상과 지하의 공사비는 대략 같은 것으로 계산되었으며, 지하는 냉동설비비와 전기 설비비에서 지상보다 유리한 것으로 나타나 최종적으로 총공사비는 지상의 94%로서 6%의 건설비 절감효과가 있는 것으로 계산되었다.

結 言

이상에 살펴본 바와 같이 地下 冷蔵倉庫는 지사

창고에 비해 消費電力이 30% 이상 절약될 뿐만 아니라 건설비도 줄일 수 있다. 또한 地上空間을 다른 用途로 활용하거나 地上의 綠地를 보존할 수 있는 장점도 있다. 농수산물의 市場開放에 따라 국내 農業의 경쟁력 강화를 위해서는 농수산물의 流通 現代化가 시급하며, 이에 따라 低溫貯藏庫의 필요성은 더욱 커지고 있다. 따라서 地下貯藏倉庫를 적절한 위치에 적정한 규모로 건설한다면 이에 대한 좋은 解決方案이 될 수 있는 것이다.

그러나 모든 技術이 그러하듯이 外國의 성공사례가 많이 있다 하여도 이를 國內에 적용할 때에는 國內條件에 적합하도록 충분한 기술적 검토와 타당성 분석이 이루어져야 한다. 즉, 新技術 導入을 위한 適應性(Adaptation)研究가 필요한 것이다. 筆者는 通商産業部의 지원으로 韓國資源研究所와 地下冷蔵倉庫의 實用化를 위한 共同研究를 수행하고 있다. 소규모의 지하냉장 및 냉동저장 Pilot Plant를 건설하여 地下建設에 따른 기술적 문제를 검토하고, 실제 地下環境에서 여러가지 농수산 식품의 저장 및 보존실험을 실시할 계획이며, 현재 Pilot Plant의 설계를 完了하였다. 이러한 實用化 研究에는 앞으로도 政府의 지속적인 支援이 필요하며, 이를 통해 지하냉장창고의 실용화는 물론, 地下空間開發技術의 發展에도 도움이 될 것을 기대해 본다.

本 學 會 發 刊 書 籍

ANFO 爆劑新發破學, 東亞出版社	岩石 力學, 機電研究社
新火藥發破學, 機電研究社	岩石 力學解說 同上
新火藥發破學解說, 寶 晋 齋	智山許墳博士回甲紀念集
서울地下鐵工事 3, 4號線發破工法.(非賣品)	