

여름 무·배추 토굴저장고 경제성 분석

장인석¹, 김재민², 구부금³, 한응수⁴

^{1,2,3}농식품가치연구소, ⁴세계김치연구소

I. 서 언

저장시설에는 설치장소에 따라 지상, 지하, 반지하 등의 방법으로 구분할 수 있다. 지상 저장시설은 통상 높은 지가, 위치제한 등 어려움이 있으며 저장고의 벽면과 내부온도와의 차이로 인해 복사 및 대류가 발생하여 내부공간의 온·습도 분포가 균일하지 못해 저장식품의 품질저하와 에너지 손실이 발생한다. 지하 저장시설에서 암반저장의 경우 벽면을 이루는 주변암반이 큰 열용량을 지니고 있어 냉각, 냉장 및 보온 시설물로 사용할 경우 일정한 온도를 유지하는데 유리하며 공기의 출입이 한정되어 있어 내부공기의 온도 및 습도조절이 상대적으로 용이하다는 점에서 장점이 있다.

농수산물 및 식품의 지하저장시설은 지하공간이 주는 일반적인 장점 이외에도 크게 두가지 측면에서 장점이 있다. 첫째는 소비자와 매우 근접한 곳으로 운송하여 대량의 물품을 비축하여 놓음으로써 성수기와 비수기에 의한 수요 변화에 쉽게 대처할 수 있다. 둘째는 지하에 저장시설을 만든다면 우선 각 저장물에 요구되는 온도 및 습도조절이 용이하고 밀폐가 쉬우며 도난 및 설치류, 해충 등에 의한 피해를 줄일 수 있다. 전세계적으로 15~20%의 곡물이 저장 중에 손실된다는 사실을 인식할 때 지상보

다 저장조건이 좋은 지하공간의 이용은 유용한 방법이라고 할 수 있다.

미국과 유럽의 여러 나라에서는 지하암반 내부에 저장시설을 갖추고 있어 곡물저장, 수산물 냉동저장, 농산물 및 빙과류, 음료수, 주류 등의 저장에 이용하고 있다. 캔자스시티에서는 지하공동을 이용하여 식품을 비롯한 가공제품과 원료를 대규모로 저장하고, 노르웨이, 스웨덴에서는 지하암반저장고에 아이스크림, 냉동육, 청어 등을 냉동 및 냉장상태로 저장하고 있다. 이에 반하여 국내에서는 지하 움을 이용한 농산물 저장, 폐광도 및 토굴을 이용한 젓갈류의 숙성 및 저장, 폐광산을 이용한 버섯재배 등 소규모적인 지하저장사례는 있으나 외국의 경우처럼 상업적인 목적으로 건설된 전문적인 저장시설은 없다. 그러나 국내의 경우 지하의 암반조건이 좋고, 여름과 겨울의 기온차이가 심한 편이며 도시인구가 차지하는 비율이 매우 크다는 점을 고려하면 에너지 절약과 유통 효율화 측면에서 그 필요성이 높다고 하겠다.

본 연구는 국내 폐광산의 내부와 지상에 소규모 저장시설을 설치하고, 여름 무·배추 저장실험을 통해 저장효과를 분석하였으며, 저장시설별로 실제 투입 및 운영비용 등을 산정하여 비교분석하고 이를 근거로 토굴저장시설의 경제성을 분석하였다.

II. 문헌 연구

1. 국내 연구사례 조사

1) 지하 저장시설 에너지 효율 극대화

국내 지하 저장시설의 운영은 폐갱도 및 토굴을 이용한 젓갈류의 숙성 및 저장, 폐광산을 이용한 버섯재배 등 소규모적인 지하 저장사례를 제외하고는 극히 미미한 수준이다. 다만, 1993년부터 농어촌진흥공사, 선경건설 등 몇몇 기관에서 지하저장 시설의 실용화 가능성에 대한 연구가 진행되었으며 실제로 곤지암 등 일부 지역에서 저장고를 설치·운영하고 있으나 확대되지 못하고 있는 실정이다. 지하저장은 저장시설이 모두 지하에 배치되기 때문에 지상부지 사용이 극소화되고 다른 용도로 활용할 수 있으며 암반 자체의 단열 및 축열기능을 이용하여 전력비 등 유지비용을 최소화할 수 있고 대기온도의 영향을 덜 받기 때문에 계절에 상관없이 전력소모량이 일정하다는 장점이 있다(한국자원연구소, 1997).

일반적으로 지상식 저장시설은 운영 시 일정한 온도 편차를 두어 저장실 온도를 최대 운영온도와 최소 운영온도 사이에 유지하는데 최대 운영온도에 도달하면 냉동기를 100%로 가동하고 최소 운영온도까지 떨어지면 가동을 중단하는 방식으로 운영된다. 그러나 이러한 방식으로는 암반의 축열을 이용하여 저장실의 냉기를 보존하는 지하식에는 적합하지 않다. 운영기간 동안 지하암반에 냉열을 충분히 저장하고 유지하기 위해서는 냉동기 가동시 가동률을 낮추어 장기간 축열이 될 수 있게 하고 최소 운영온도까지 떨어져서도 일정량의 냉기를 공급하여 주변 암반의 냉열이 빠른 속도로 소진되는 것을 막는 것이 유리하다. 즉, 운영기간에 따라 냉동기 가동률을 조정하여 운영하는 것이 소요되는 전력량을 최소화할 수 있는 방안이 될 수 있다.(SK건설㈜, 2009)

2) 지하 저장시설 에너지 효율 극대화

지하암반은 항온·항습성이 우수하여 저온물류의 대부분을 차지하는 농축수산물의 품질유지에 우수하다는 장점이 있다. 곤지암 지하저장터널에서 실험한 결과에 따르면 저장기간 3개월 동안 양파, 배, 사과 등 농산물의 건전율과 총산함량을 비교하여 지하 저장시설이 지상시설보다 품질유지 면에서 유리함을 입증하였다(농업기반공사, 2003)

3) 경제성 분석 사례

1994년 농어촌진흥공사를 중심으로 곡물 엘리베이터와 농축수산물 지하 암반저장시설 설치 등의 노력으로 추진된 연구결과에 따르면 지하 저장시설이 지상 저장시설에 비해 경제성이 있는 것으로 나타났다.

그 내용을 분야별로 살펴보면 다음과 같다. 반지하 저장시설에서 지상 저장시설의 온도는 냉각기 가동 중지후 불과 8~12시간 경과 후 1~2℃정도 상승이 있는 반면, 지하 저장시설의 온도는 외기 온도에 관계없이 거의 일정하다. 반지하 저장시설은 작업 시간대인 중부하시와 최대 부하시에 냉각기를 3~4시간 가동하여도 저장온도 -20℃를 유지하는 반면에 지상 저장시설은 거의 24시간을 가동하여 저장온도를 유지하고 있는 바, 단열재 시공상태 입고 물량, 외기 등의 영향이 크다. 보관원가의 구성 중 전력비의 점유율이 반지하 저장시설에서는 4.4%인데 비해 지상 저장시설은 30% 정도로서 차이가 매우 크다.

지하 저장시설을 하는 경우 그 단면 규모를 18mW×8.5~23mH로 하여 저장 수용능력에 따라서 저장고의 길이와 높이를 달리하는 것으로 하였고 저장규모에 따라 저장시설이 복수인 경우 저장시설간의 이격거리는 저장고 폭의 1배 이상으로 직·병렬 배치토록 한다. 저장시설을 1,000평 규모로 건설하는 경우 냉동부하는 지하 저장시설에서 178KW이고 지상 저장시설에서는 223.5~ 233.9KW로 산정되

었다. 저장시설을 같은 규모로 하는 경우 지상 저장 시설의 전력요구량은 271.9KW인데 반하여 지하 암반저장의 경우 22.5%가 절감되는 222.2KW로 계산되었다.

저장시설에 대한 건설비는 지하의 경우 1,952천 원/평이나 지상저장의 경우 2,431천원/평으로 24.5%의 비용이 절감되며 순가용 면적 비율을 감안하면 지상 및 지하 저장시설에서 각기 61,390원/m², 29,300원/m²으로서 지하시설이 110%이상 공사비 부담이 절감된다고 본다. 운영관리 측면에서 보면 1,000평 규모의 지하와 지상 저장시설에서 각기 148백만원, 211백만원이 소요되는 것으로 계산되었는 바 지하시설이 지상시설에 비하여 42.6%에 해당하는 63백만원의 운영비가 절감되는 것으로 판단된다 (벽산 엔지니어링, 1994).

2. 해외 연구사례 조사

1) 지하 저장시설 규모

외국의 경우 지하 저장시설의 크기는 매우 다양하며 암반 굴착의 경우 폭이 4.0~25.0m, 높이가 3.0~25.0m, 길이는 20~170m 정도이고 cavern 간의 이격거리는 굴착폭 이상으로 되는 경우가 많다. 폐광된 공동을 활용한 지하 저장의 경우 저장시설의 높이는 부존 암층의 두께에 따라 대체로 5.3~7.6m 정도고 폭은 저장규모에 따라 정해졌으며 저장실간의 이격거리는 대체적으로 높이의 2배에 가까운 15m 정도이었다. 지하 저장시설의 단면형상은 탄두형으로 직선부분을 5.0m 이상으로 저장고의 crown 부에는 pipe 및 설비를 하게 되는데 외국의 경우 암반 균락지하 저장시설 형태와 기존의 공동을 활용한 지하 저장시설 형태로 구분하여 볼 수 있다.

노르웨이 오슬로 지역 등에 있는 암반 굴착 지하 저장시설의 경우 저장용량의 크기는 1,000~100,000m³ (14~25m(W)×8.0~25.0m(H)×33~170m (L)) 이고, 수개의 공동이 조합형태로 되어 있으며, 저장온도는 저장품목에 따라 -22~-33℃으로 하고 있다. 또한 지하

암반저장의 내벽 중 천정과 벽면은 암반이 노출된 상태에 있으며, 바닥은 콘크리트포설과 rack설치를 위한 rail이 부설되어 있고 터널 입구는 콘크리트 벽으로 막아 출입구를 만들고 있다. 중국 저장성의 저장산시에는 지하심도 40m에 여러 개의 cavern 공동의 크기(6.0~9.0m(W)×6.2m(H)×13.5~28.0m(L))로 하였는데 진입터널 양쪽에 배열하였으며 cavern간의 간격은 터널 폭의 1.5배 정도로 하고 있다. 핀란드 발루아 지역의 지하 저장시설은 폭과 높이가 각각 12m이고 길이가 33m으로 평행하게 배열되어 있다. 냉각온도는 -27℃로 운영되고 있으며 저장은 truck, stacker, crane 및 through flow법을 이용하고 있고 단열재는 별도로 하지 않고 암반 자체나 콘크리트 분사 표면이 활용되고 있다. 일본의 우도노미야시의 오타니쵸 채석적지는 과실저장 시험용으로 지하 저장고(1,200~1,500m³)를 평균 높이 6~10m로 경사지거나 거의 평평하게 설치하였으며 신규 지하 저장시설은 그 규모를 28m(L)×4m(W)×3m(H)로 하여 굴착하고 단열벽을 설치하였다. 기존 공동을 활용한 지하 저장시설의 경우는 석회석 광물을 room & pillar 방식으로 채광한 후 형성된 지하 공동들이 폐광 후 별도의 확장과 보수공사를 거치지 않고 지하 저장고로 활용되고 있는 경우다.

지하 저장고는 폐광된 석회석 광산의 규모에 따라 다르지만 현재 개발되어 사용되고 있는 지하 저장고의 면적은 보유 회사별로 24,000m²~511,525m² 등인데 이들은 저장종류 및 경영방식에 따라 특정 시설을 하여 저장고의 면적을 115,000~112,900m²으로 나누고 있다. 지하저장고로 이용되는 대부분의 공동은 5.3~6.0m의 높이에 약 1,000m의 최대 길이를 갖는데 기존 공동의 특성상 공동간의 간격은 15m정도였다. 대부분의 지하 저장고는 냉동실(-25℃~-18℃), 냉장실(-2℃~-4℃), 건조실(14℃~18℃), 저온저장실(15℃~16℃) 등으로 구분하여 저장품의 특성에 따라 소요 습도를 유지하여 선별적으로 이용되고 있다. 저장고 및 적정온도는 냉매(프레온가스)를 이

용한 압축기를 가동하여 유지시키고, 건조 및 저온 저장고의 내부공기는 자연조건인 14℃~16℃를 이용하며, 습도유지를 위하여 저장고에 따라 소형 및 대형 제습기를 설치하고 응축된 공기는 파이프를 통하여 저장실 밖으로 배출토록 하고 있다.

2) 단열 및 상수시설

지하 저장시설에서 내부 암벽에 단열재 시공여부는 구성 암반의 열전도율 및 열전달율에 의한다. 암반의 열전도율은 낮은 것이 지하 저장에 바람직한데 이는 저장의 단열재 역할을 할 뿐 아니라 저장성능에 큰 영향을 주기 때문이다. 암반의 열전도율(W/m℃)은 화강암과 화강암질 편마암의 경우 각기 3.0~3.5W/mK, 3.8~4.0W/mK라고 한다.

노르웨이, 핀란드에서는 별도의 단열재를 시공하지 않고 미국 및 일본에서는 단열재를 시공하고 있으며 시공 예를 보면 다음과 같다. 미국의 경우 기존 공동을 활용한 지하 저장에 단열시스템으로서 polyurethane panel, concrete block 및 foam sealing 등으로 처리하고 있다. 벽측에서 냉동·냉장 저장고의 경우 8인치 concrete block인 haydite나 5~8인치 polyurethane panel를 설치하였으며, 건조실의 경우는 4인치의 polyurethane panel이나 concrete block으로 벽을 차단하여 열손실을 방지하고 있다. 또한 벽측에서 천정과 바닥에 접촉하는 부분의 틈새는 foam sealing으로 처리하고 있다. 방수 시스템으로서는 저장고의 규모에 따라 소형, 대형, 제습기를 설치하여 응축된 공기는 파이프를 통해 저장고 밖으로 배출하고 있다. 중국 저장성의 저산시에 있는 cavern에서는 단열재를 시공한 공동이 있는데 carven내 벽면의 구조는 천정과 측벽에서 air layer/방수 보호제/cork-board/bamboo rapt 등을 설치하였고, 바닥측은 방수층/cork-board/보강콘크리트/시멘트 몰탈 등을 설치하였다.

3) 암반의 특성과 저장 공동내 온도변화

지표면 하부로 굴착하면 계절에 관계없이 일정한 온도를 유지한다고 발표되고 있다. 미국의 미네소타주의 DOE 보고서에서는 지표면 하부 3m에서 연중 11℃를 유지하고 있다고 하였으며, 노르웨이에서는 지하 10m이하로 들어가면 연중 평균온도 14℃가 일정하게 유지된다고 하고 있어 지하에서는 외기 온도에 관계없이 냉동부하가 24시간 일정하다고 할 수 있다.

노르웨이에서 냉동기를 정전 및 고장으로 가동하지 못한다는 가정하에 실제로 냉동기를 8개월 동안 정지시킨 후 cavern내 온도변화를 측정한 결과 carven내 유지온도는 당초 -25℃에서 -15℃로 변하여 실제로 10℃만 상승하였고, 그 후 냉동기를 재가동 2일 후 carven 내 온도는 평균 유지온도 -25℃까지 회복되었다고 보고되고 있다. 또한 cavern내 벽면에서 20m 그라우팅공에 설치한 센서에 의거 벽면으로부터 거리별 유지온도를 측정한 바, 경과 연수에 따라 점차 하강하는 현상을 보이고 있다. 중국 저장성의 저장고 내에 설치한 heat flux meter에 의거 벽면으로부터 심도별 암반내 heat flux를 보면 cavern내 단열재를 설치하는 경우가 설치하지 않은 경우에 비하여 큰 것으로 나타났다.

4) 경제성 분석사례

저장시설의 건설비와 운영관리 측면에서 지하와 지상 저장시설의 경우를 비교한 결과 다음과 같은 결과를 제시하고 있다.

노르웨이 RIEBER A/S에서 베르겐 지역에 설치한 저장고별 냉동부하, 전력소비량 및 건설비 등을 설계와 운영실적 등으로 구분하여 발표한 결과를 보면 화강암질 편마암에 설치한 지하 저장시설(11,000m)이 150m/m polyurethane 단열재를 시공한 지상 저장고에 비하여 냉동부하 및 전력 소모량에서 각기 40.6%, 27%정도 절감되는 것으로 나타났다. 또한 건설비 측면에서 지하 암반저장이 지상 저

장에 비하여 35%정도 절감되는 것으로 되어있으며, 에너지 소요량은 가동 후 3개년간 운영실적 결과 50%정도 저렴하다고 하였다. 핀란드의 경우 운영유지 측면에서 연간 전력 소요량이 냉각횟수 감소, 암반의 축열능력 활용, 태양열 복사나 기후변동에 의한 영향이 없으므로 30% 절감이 가능하다고 하였고 냉각 저장시설에서 정전 및 고장으로 인한 실내온도의 상승이 없고 예비 냉각설비 및 전력설비가 불필요하므로 지상저장에 비해 40~50%의 절감효과가 있는 것으로 발표되고 있다.

중국 저장성의 저산시에 있는 600ton 규모로 두개의 지하저장에서 carven 내부에 단열재를 설치하는 경우와 설치하지 않은 경우의 실내온도를 측정하여 비교한 결과 단열재를 시공하는 경우 실내온도는 -18℃를 유지하고 있으나 단열재를 시공하지 않은 경우는 -14℃를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 미국 미네소타 지역의 DOE 보고서에 의하면 저장고가 아닌 엄개주택에서 냉난방 비용을 30~60% 절감 가능하다고 하였다. 또한 지표면 하부 3m(10feet)에서 온도변화는 계절에 관계없이 11℃에 불과한데 지상온도는 겨울철이 -37℃에서 여름철 38℃까지 약 75℃정도의 편차를 갖고 있는 것으로 나타났다.

III. 여름 무·배추 토굴저장 경제성 분석

1. 국내 토굴저장고 유형별 현황 및 적합성

1) 광산토굴

2015년 기준으로 국내의 광산은 총 5,396개가 있고, 이 중 가행광산이 593개, 휴지광산이 122개이고 86.7%인 4,681개가 폐광산이다. 지역별로 충청권이 1,708개로 가장 많고, 영남권이 1,337개, 강원권이 978개였으며, 호남권과 수도권이 각각 863개와 511개였다. 광산토굴 중 석탄토굴은 갱도가 좁고 불규칙하여 낙반사고의 위험성이 있고 중금속 채굴토굴

의 경우는 안정성에 위험이 있어 실험 대상지에서 제외하였다. 따라서 위물질 발생 및 낙반사고의 위험이 적은 석회암 채굴토굴을 실험대상지로 선정하였다.

2) 터널토굴

터널토굴은 일반도로터널, 고속도로터널, 철도터널 등이 있으며 접근성이 양호하고 견고하다는 장점이 있다. 한국도로공사에 따르면 국내 고속도로 페터널은 충북 황간터널 등 9개소가 있으며 총 길이는 3,850m로 평균 길이는 428m로 주로 경부고속도로 옥천~영동구간과 광주~대구간 고속도로로 남원, 합천, 고령구간에 위치하고 있었다. 또한 철도공사에 따르면 철도 페터널의 경우는 중앙선의 구둔~매곡구간의 지산터널 등 총 71개소가 있으며, 측정 불가능한 3개소를 제외하고 총 68개소로 총 연장길이는 19,522m로서 평균길이는 428m였다. 그러나 철도터널의 경우 사용허가 중인 5개소와 매몰된 4개소를 제외하면 대부분 폐쇄된 상태였다. 철도터널은 폭이 5m이고 높이도 5~6m로서 견고한 편으로 활용 가능성이 상대적으로 높을 것으로 판단된다.

현재 철도페터널의 이용사례는 경남 사천시(길이 230m, 폭 5m)의 와인갤러리와 경북 청도군의 감와인 숙성(500m) 및 판매장(500m)의 경우가 있다. 특히 무주군의 무주와인터널은 무주양수발전소 건설시 굴착작업용 터널을 리모델링하여 활용하고 있는 사례로 와인의 숙성 및 판매 공간으로 활용도가 높은 것으로 조사되었다.

3) 암반토굴

암반토굴은 수입쇠고기의 냉동저장을 위해 곤지암 지하저장 터널(1998년에 완공)이 있으며 광주광역시 김치타운내에 전통발효식품 토굴저장실의 경우는 아직 설계실시 단계에 있다.¹⁾ 해당업체 자료

1) 전통발효식품 토굴저장실은 김치박물관 서편 절개지 암반을 굴착하여 토굴저장실 84㎡를 건설하고

에 따르면 곤지암 지하저장 터미널은 2016년 4월 현재 비슷한 규모의 지상 냉동창고에 비해 육류저장 시 톤당 소비전력량이 11.3% 낮은 수준에서 가동되고 있다. 동 지하저장 터미널은 육류 등 식료품의 장기수급안정을 위해 황강암반을 발파하여 연면적 5,245㎡(창고 3,865㎡)의 암반터널로 1997년 준공사비 6,985백만원을 들여 준공하고 1998년 5월 영하 20℃로 예냉을 완료하고 영업을 개시하였다. 냉동실은 폭 12m, 높이 8~10m, 길이 25~60m의 5개동으로 면적 3,426㎡에 축산물 3,100톤을 저장할 수 있는 규모이다. 암모니아 냉동기 132kw 1대, 100kw 1대, 55kw 2대를 설치하고 22,900볼트 고압전기 600KVA를 수전 받아 사용하였다. 전실과 부대시설 439㎡를 제외한 3,246㎡가 실저장면적이고 4,600팔레트를 3~4단으로 적재하여 저장이 가능하다. 영업을 개시하면서 1998년 7월부터 냉동기를 총 가동하여 월 평균 166천kwh의 전력량이 소비되었고, 1999년 전반기에는 268kwh가 소비되어 비슷한 규모의 지상냉동고에 비해 냉동기 가동시간이 2배 정도 길고 전력비도 3.6~6.2배 많이 소요되었다.

이처럼 전력량이 상대적으로 많이 소요되는 이유는 냉열이 암반으로 계속 방열(축열)되므로 주위 암반이 충분히 냉각될 때까지(1단계 15개월, 2단계 36개월)는 주간에도 냉동기의 2/3 수준으로 야간에는 full로 가동시켜야 하기 때문이었으며, 특히 암반사이로 지하수가 흐르면서 냉기를 계속 빼앗아 갔던 문제가 있었던 것으로 조사되었다. 그러나 일정 기간이 지난 2016년 4월 현재는 전력소비량이 유사 지상저장시설의 121kwh의 88.7% 수준인 108kwh 정도까지 낮아진 것으로 조사되었다.

특히 지하암반저장고는 온도가 14℃로 일정하고(외기온도 하절기 30℃, 동절기 영하 5℃) 습도도

경사면을 절토하여 엄개식 저장체험실 139㎡를 설치할 계획이다.

2) 공사비 6,986백만원은 터널굴착 2,931백만원, 건축공사 1,283백만원, 냉동기 1,684백만원, 전기공사 308백만원, 용지매수비 779백만원으로 구성되었다.

95%로 일정하므로(외기습도 하절기 65% 이상, 동절기 40% 이하) 냉각소비전력이 연중 일정하여 냉각용량이 적아지고 건조현상이 일어나지 않으므로 식료품의 냉동보다는 사과, 배 등 청과물에 냉장저장에 적합하다 하겠다.

4) 엄개토굴

엄개토굴은 경사지를 절개하고 절개지에 콘크리트 구조물로 저장시설을 건축한 다음 다시 흙으로 덮어 만든 지하저장고이다. 엄개토굴은 산지가 많고 시멘트가 풍부한 우리나라에 건축하기 용이한 형태로 토굴안의 연중 온도변화가 13~17℃로 적으므로 젓갈, 된장, 고추장 등 발효식품의 숙성에 쓰인다. 또한 적은 용량의 냉각장치를 설치해도 넓은 공간을 냉각할 수 있고 전력소비량도 지상식 저온창고에 비해서 크게 절약되는 것으로 조사되었다.

사례로는 i) 2010년에 설치된 강원도 인제군의 돌배와인의 숙성저장용의 농임산물 지하저장시설(198㎡(60평) : 투자규모 148억원) 운영 사례 ii) 경북 안동의 마 저장을 위하여 암거용 조립식 콘크리트 박스를 연계하여 엄개토굴을 건축하고 입구에 문을 설치하여 온도변화를 최소화하고 공기순환을 위해 바닥과 천정에 환기덕트를 설치하여 운영하고 있는 사례 iii) 강원도 고성 진부령의 경우 채소저장을 위하여 경사지를 절개하고 70평 규모의 콘크리트 구조물을 2동 건축한 다음 지붕과 한쪽 벽을 흙으로 덮어 반지하 엄개토굴을 설치 운영하고 있는 사례 iv) 전북 순창군의 경우는 장류숙성을 위해 순창장류연구소 내에 엄개형 지하숙성고 순창소스토굴을 4,100㎡(2016. 02. 준공, 국비 63억원) 설치하였다. 부지내 논을 파내고 외벽을 설치하고 바깥면에 콜탈로 방수한 다음 외벽과 150mm를 띄워 내벽(45mm)를 설치하였다. 내벽은 방수와 단열을 하지 않았고 천정은 300mm 두께로 콘크리트를 타설하여 방수하고 단열재를 깎다음 다시 두께 150mm로 콘크리트로 타설하였다. 그 위에 흙을 1~2m 두께로

덮고 잔디를 식재하였다. 지붕에 환풍구를 4개 설치하였다. 내부 중앙에 전시설을 둥글게 설치하고 전 시설 벽쪽으로 33m² 규모의 숙성실을 다수 설치하여 군내 고추장제조업자들에게 임대하여 운영하고 있다. v) 영동와인토굴은 산지 경사면을 절토하고 길이 420m², 폭과 높이 4~12m의 콘크리트 구조물로 건축 후 흙으로 덮어 와인 숙성 및 판매장으로 활용하고 있다.

2. 여름 무·배추 토굴 냉장저장 효과

1) 토굴 냉장시험 설계

(1) 배추·무 저장시설의 개요 및 규모

저장 시설의 설계는 주변 환경 지질조사 및 법규 상 문제점 등 사업검토에 관련된 사항을 조사하고 저장품목 및 규모를 결정한 후 건물구조, 냉동부하, 보냉조건, 시공비 등을 종합적으로 검토하여 경제적 관점에서 타당하도록 한다. 특히 지하암반 저장 공동은 경제적인 건설비용으로 거의 영구적으로 유지되어야 하므로 굴착보강 유지에 따르는 안전성 평가와 저장소내 출수, 단열 및 온습도 조절 등 환경제어기술이 수반되어 종합적으로 검토되어야 한다.

그러나 본 연구는 저장시험에 따른 저장효과를 전제로 추가적인 연구방향 및 연구범위 설정에 필요한 예비 조사이므로 기간 및 설치규모 측면에서 극히 제한적으로 설계되었다. 본 연구는 강원도 정선 소재의 석회석 광물을 room & pillar 방식으로 채광한 후 형성된 지하 공동들 중 별도의 확장과 보수 공사를 최소화하는 방식으로 추진되었다. 지하 공동 내부에 단열시스템으로 조립식 우레탄판넬을 이용한 농가형 저온창고(4m×9m×2.5m)를 설치하고 방수시스템은 소형 제습기를 설치하여 응축된 공기는 파이프를 통해 저장고 밖으로 배출하도록 설치하였다. 동 저장 시설 내 적재 가능한 배추·무는 12톤 규모로 하였다.

(2) 기간 및 범위

저장 유형별 형태는 i) 토굴 냉장저장³⁾ ii) 토굴 야적저장⁴⁾ iii) 지상 냉장저장⁵⁾ 등으로 구분하였고, 강원도 평창 지역 내 여름 배추·무를 이용하여 2016년 7월부터 9월까지 2개월(60일)에 걸쳐 실시하였다. 실증결과를 토대로 저장형태별로 비용 및 효과를 비교하고 이를 통해 경제적 타당성 여부를 파악하는 기초자료가 될 수 있도록 하였다. 다만, 토굴 야적냉장 저장시험의 경우 저장기간 10일 경과부터 무게수율이 크게 감소하고 부패가 심해 처리구에서 제외된 관계로 경제성 비교 대상에서 제외하였다.

2) 토굴 냉장시험 결과

(1) 저장수율

여름 배추의 저장수율은 기간 경과에 따른 저장 배추의 무게수율, 감모율, 건전율 및 부패율을 종합적으로 고려한 총 저장수율을 기준으로 하였으며, 실험결과 저장기간 60일 경과시점의 총 저장수율은 토굴냉장고 저장이 73.5%, 지상냉장고 저장이 68.7%로 저장형태에 따라 차이가 크게 없는 것으로 나타났다. 토굴 야적저장은 저장기간이 10일이 경과 하면서 무게수율이 크게 감소하고 부패 정도가 심해 처리구에서 제외하였다.

(2) 저장배추 품질

저장배추의 품질 평가는 저장 기간별로 김치를 담겨 관능평가를 통해 확인한 결과 토굴저장 배추나 지상저장 배추나 관능적인 품질에 있어서는 큰 차이가 없는 것으로 확인하였다. 여름 배추의 저장 실험결과를 토대로 보면 토굴 야적저장의 경우를

- 3) 토굴 냉장저장시험 : 석회광산굴(강원도 정선 소재) 내부에 조립식 판넬로 냉장창고를 짓고 냉각기를 설치하여 저장시험
- 4) 토굴 야적저장시험 : 석회광산굴(강원도 정선 소재) 내부에 일정공간을 조성하고 야적상태로 저장시험
- 5) 지상 냉장저장시험 : 경기도 소재 냉동설비 전문업체 냉장창고를 이용하여 저장시험

제외하고 토굴냉장고 저장 및 지상저장고 저장은 동일하게 저장수율 및 품질측면에서 동일한 효과를 내는 것으로 확인되었다.

(3) 저장김치 품질평가

여름배추의 저장품질을 평가하기 위하여 지상저장배추와 토굴저장배추를 저장 20일차, 40일차, 60일차에 수집하여 막김치로 담궈 각각 4주간씩 숙성하면서 매주 품질을 평가한 결과 지상 저장배추로 담근 김치와 토굴 저장배추로 담근 김치 간에 관능적, 이화학적 및 미생물학적 품질차이가 없었다.

3. 여름 배추·무 토굴 냉장저장 비용분석

1) 토굴저장 비용 산정

(1) 비용 유형

저장시설과 관련된 총 사업비는 사업추진 단계부터 준공일까지 당해 사업에 소요되는 제 비용을 합산한 금액으로 직접비용과 간접비용으로 구분할 수 있다. 직접경비는 조사 및 설계비, 공사비, 보상비, 운영설비비, 운영비 등으로 구분되나 저장시설에 대한 총 사업비는 대상지역의 여건 및 시공방법에 따라 큰 차이가 있으므로 사업비 산정에 한계가 있을 수 밖에 없다. 따라서 본 연구는 저장 실험 계획에 의거 실험용으로 설치한 실험용 저장시설의 실제 투입비용과 기존의 지상냉장고 저장시설의 설치비용 등을 조사하여 총 비용을 산출하였다.

(2) 비용 항목

기본적으로 배추·무 저장시설의 총 비용 항목은 건설비용과 운영비용으로 구분되고 건설비용은 공사비, 부지구입비(용지보상비), 기계설비비(운영설비비) 등으로 구성되며, 운영비용은 인건비, 유지관리비 등으로 구분된다. 공사비의 범위는 해당 저장 시설, 도로, 철도 등 관련 인프라, 환경문제 저감을 위한 시설 등을 포함하나 일반적으로 환경문제 저감을 위한 시설투자는 해당 저장시설의 공사비 또

는 운영설비비에 포함되므로 별도로 산정하지 않았다.

<표 1> 저장시설의 비용항목

구 분	내 용	
비용 항목	o 건설비용	o 운영비용
	- 공사비	- 인건비
	- 부지구입비	- 유지관리비
	- 기계설비비	

비용 추정은 실증내용 및 기존 사례 등을 토대로 산출하되 우선 i) 토굴냉장고 저장의 경우는 실증 실험에 투입된 투입비용을 기준으로 하고 ii) 지상 냉장고 저장의 경우는 관련 업계견적 및 정부단가를 토대로 산출하였다. 비용항목 중 조사비 및 기간 시설 관련 비용은 비용으로 고려하지 않았다.

(3) 건설비용

공사비는 조사비, 설계비, 부대비, 건축공사비, 기간시설공사비 등으로 구성되나 연구내용 및 범위를 감안하여 다음과 같이 선별적으로 산정하였다. 조사비는 공사시행에 필요한 사업지구의 지형, 지물을 조사하는 측량비와 토질의 상태를 파악하기 위한 토질 조사비 등으로 구성되나 본 연구에서는 비용으로 고려하지 않았다. 설계비는 부지조성, 시설물 건축, 기간시설에 대한 설계로 구성되나 본 연구에서는 비용으로 고려하지 않았다. 부대비는 사업의 시행과 관련된 사업타당성 분석비, 각종 영향평가비, 감리비 및 재원조달을 위한 금융 부대비용 등으로 규정되나 본 연구에서는 비용으로 고려하지 않았다. 공사비는 사업대상지역의 물리적인 환경과 시공방법에 따라 차이가 있을 수 있는데 부지조성 공사비는 토목공사의 시행을 위한 토공, 도로 건설 및 포장, 우수, 오폐수, 상수도, 구조물, 조경, 전기·통신 등 공사에 소요되는 제반공사비로 이들 중 굴착비 및 토목공사비와 전기공사비(인입전기공사 비

용 제외)만을 비용으로 산정하였다⁶⁾.

토굴 저장시설의 경우 굴착비는 저장시설(4m×9m×2.5m) 규모를 감안하여 저장시설까지 인입공간, 공유면적 등을 고려하여 576m³를 굴착하는 기준으로 57,600천원으로 산정하고 별도의 토목공사비 없이 산출하였으며 전기공사비용 3,000천원을 포함하여 총 60,600천원으로 추정된다. 이에 비해 지상저장고의 경우 별도의 굴착공정은 반영하지 않았으며 60% 용적률에 60m² 토목공사를 기준으로 토목공사비는 8,160천원으로 추정하였고 전기공사비용 2,500천원을 반영하여 총 공사비를 10,660천원으로 계산하였다.

건축공사비는 해당 저장건축물 중 주 시설, 관리운영시설, 지원시설 등의 설치에 소요되는 제반 공사비로 규정하며, 이 중 비용은 주 시설인 저장시설에 소요된 금액만을 비용으로 산정하였다. 건축비의 경우 단열시스템으로 동일 규격의 조립식 우레탄 판넬을 기준으로 설치하는 것으로 보고 각기 20,000천원 수준으로 추정된다.

다만, 기간시설 공사비는 사업지구 밖에서 시설 내로 연결되는 도로, 철도, 상수도 등 인입시설 설치에 소요되는 제반 공사비로 규정하며 비용으로 고려하지 않았다. 공사비 총액을 기준으로 총 비용을 비교해 보면 굴착공사를 제외할 경우 토굴 저장시설이나 지상 저장시설이나 큰 차이가 없으나 굴착비를 감안할 경우에는 토굴 저장시설이 80,600천원 정도로 지상 저장시설의 30,660천원에 비해 49,940천원 이상 더 소요될 것으로 나타났다.

<표 2> 공사비 산출내역

구분	항목	규격(공사면적)	금액(천원)	비고
토굴 냉장 저장	굴착 공사	6m×16m×6m (576m ³)	57,600	-100천원/m ³
	전기 공사	-	3,000	
	건축 비	4m×9m×2.5m	20,000	-우레탄 판넬
	합계	-	60,600	
지상 냉장 저장	토목 공사	4m×9m/0.6(60m ²)	8,160	-136천원/m ²
	전기 공사	-	2,500	
	건축 비	4m×9m×2.5m	20,000	-우레탄 판넬
	합계	-	71,260	

부지매입비는 저장시설 건축에 필요한 용지의 매입에 소요되는 비용으로 토굴 저장시설의 경우 인입도로가 통상 2차선 국도 주변의 야산일 경우를 가정하고 지상 저장시설의 경우 4차선 주변도로 인건 부지를 가정하였다. 아래 표에서 보는 바와 같이 지상 저장시설의 입지의 경우 상대적으로 부지구입비 비중이 큰 것으로 보인다.

<표 3> 부지구입비 산출내역

구분	면적	규격	단가(원)	총액(천원)
토굴냉장 저장	96	m ²	6,000	576
지상 냉장 저장	지역 1	60	m ²	360
	지역 2	60	m ²	60,000
	지역 3	60	m ²	100,000

기계설치비는 저장시설의 운영을 위하여 건설 중 또는 사업초기에 투입하는 정보시스템, 장비, 설비, 기자재의 실구입가격으로 규정하며 기계설치비는 이 중 저온시설에 필요한 냉각기 관련 일체의 장비류의 실 구입가만을 감안하였다.

6) 굴착비의 경우 본 연구에서는 실제 굴착공사는 없었으나 별도의 굴착을 통해 저장 공간을 조성할 경우 소요되는 비용을 추산한 것으로 굴착 관련 전문업체의 견적을 토대로 산출하였다.

냉동설비의 경우 토굴과 지상은 온도유지 및 변화조건이 상이하고 이에 따른 냉동설비의 규격이 차이가 있다는 기존의 연구 성과를 토대로 토굴 저장시설은 3kw를 설치하고 지상 저장시설은 5kw를 설치하였으며 이에 따른 설치비용은 다음 표와 같다.

<표 4> 기계설치비 산출내역

구분	항목	규격 (kw)	금액 (천원)	비고
토굴 냉장 저장	냉동설비 등	3	5,000	- 밀폐형 기준
지상 냉장 저장	냉동설비 등	5	7,000	- 밀폐형 기준

총 사업비는 공사비, 부지구입 및 기계설비비로 구분하여 산정하되 비교 가능한 분야를 기준으로 산출하였다. 토굴 냉장저장시설의 경우 공사비 80,600천원, 부지구입비 576천원, 기계설비비 5,000천원 등 총 86,176천원으로 산정되었고, 지상 냉장저장고의 경우 공사비 30,660천원, 부지구입비 3,600천원, 기계설비비 7,000천원 등 총 41,260천원으로 추산되었다.

<표 5> 건설비용 총괄

구분	항목	금액 (천원)	구성비 (%)	비고
토굴 냉장 저장	공사비	80,600	93.5	- 토굴 굴착비 포함
	부지구입비	576	0.7	- 6,000원/m ² 기준
	기계설비비	5,000	5.8	
	계	81,176	94.2.0	
지상 냉장 저장	공사비	30,660	74.3	- 토목공사비 포함
	부지구입비	3,600	8.7	- 60,000원/m ² 기준
	기계설비비	7,000	17.0	
	계	115,436	177.2.0	

(4) 운영비용

운영비는 시설의 운영을 위하여 투입되는 인건비, 일상관리 점검비, 정기 점검비, 수선비, 감가상각비 등의 가액으로 구성되며 이들 중 감가상각비와 전력비만을 비용으로 고려하였다. 감가상각비와 전력비만을 비용으로 고려하였다. 감가상각비는 정액법에 따라 건축물은 내용년수 30년, 기계장치는 10년으로 하고 잔존가액은 10%를 기준으로 산출하였다. 토굴 냉장저장설비는 년 1,267천원이고 지상 냉장저장설비의 경우 년 1,450천원으로 추산하였다.)

<표 6> 운영비용 산출내역

(단위 : 천원)

구분	항목	취득 가격	내용 년수	잔존 가액	감가 상각비
토굴 냉장 저장	건축물	23,000	30	2,300	767
	기계설비	5,000	10	500	500
	계	23,000	-	2,300	767
지상 냉장 저장	건축물	22,500	30	2,250	750
	기계설비	7,000	10	700	700
	계	45,500	-	4,550	1,517

전력소비량은 저장실험 기간동안 사용된 실 전력 사용량을 반영하였으며, 토굴 냉장저장시설의 경우 60일 실험기간 동안 소비전력은 1,480kwh이고 지상 냉장저장시설의 경우 3,328kwh인 것으로 조사되었다. 조사결과를 기준으로 전기료를 산정하면(실험기간 내), 농업용 기준으로 할 경우는 토굴 냉장저장시설(153,738원)이 지상 냉장저장시설(242,254원)에 비해 36.4%정도 절감되는 것으로 나타났다. 산업용 전기를 기준으로 할 경우는 각각 654,660원과 822,380원으로 20.4% 절감되는 것으로 나타났다.

7) 저온저장고에 대한 조달청 내용년수는 10년임. 하지만 규모와 가동률을 고려하지 않은 상태에서 책정된 것으로 판단되어 실제 현지현황과 설치 업체의 제시 내용연수를 고려하여 30년을 기준으로 함.

<표 7> 전력 소비량 및 전력비 산출내역⁸⁾

(단위 kwh, 원)

구 분	실험결과 (60일 기준)		년 기준(추정)		
	전력량	금액	전력량	금액	
농업 용 기 준	토굴 냉장	1,480	153,738	8,880	922,428
	지상 냉장	3,328	242,254	19,968	1,453,524
	차이	△1,848	△88,516	△3,696	△531,096
산업 용 (갑) I 기 준	토굴 냉장	1,480	654,660	8,880	3,927,960
	지상 냉장	3,328	822,380	19,968	4,933,848
	차이	△1,848	△167,720	△3,696	△1,006,320

(5) 총괄비용 분석

건설비의 경우 토굴 냉장저장시설의 경우 별도의 굴착비가 발생하여 상대적으로 지상 냉장시설의 경우보다 44,916천원 추가 소요되는 것으로 나타났다. 다만, 굴착 공사비를 제외하고 이를 토목공사로 대체할 경우에는 오히려 지상 냉장저장시설의 경우 부지구입에 따른 비용 상승으로 인해 토굴 냉장저장시설에 비해 건설비가 상대적으로 더 많이 소요되는 것으로 나타났다.

운영비용은 인건비 등 제반 운영비용은 비슷하게 소요되는 것으로 보고 건축물 및 기계설비에 대한 감가상각비 및 전력비 등을 기준으로 산출되었다. 운영비의 경우 전력비는 토굴 냉장저장시설과 지상 냉장저장시설이 각각 154천원과 242천원으로 토굴 냉장저장시설이 36.4% 절감되는 것으로 나타났고, 감가상각비를 포함할 경우 토굴 냉장저장시설이 16.0% 정도 운영비가 적게 들어가는 것을 나타냈다.

8) 전력비는 한전 전기요금표를 기준으로 농업용, 산업용으로 계산함.

<표 8> 비용 산출 산출내역

(단위 : 천원)

구 분	토굴 냉장저장(a)	지상냉장 저장(b)	차액 (a-b)		
건설비	굴착 공사	57,600	-	57,600	
	1. 토목 공사	-	8,160	-8,160	
	전기 공사	3,000	2,500	500	
	건축비	20,000	20,000	-	
	2. 부지구입비	576	3,600	-3,024	
	3. 기계설비비	5,000	7,000	-2,000	
	합 계	81,176(28,576)*	34,260	46,916	
	운영비	전력비**	154	242	-88
	감가상각비***	1,267	1,450	-183	
	합 계	81,330	34,502	-271	

*건설비 합계()는 굴착공사비를 제외한 금액을말함.
**전력비는 농업용으로 여름 2개월을 기준으로 함.
***감가상각비는 1년치를 기준으로 함.

IV. 결 론

여름 무배추의 토굴저장 에너지 절감효과 및 경제성 분석을 하기 위하여 강원도 정선 소재의 석회석 광물을 room & pillar 방식으로 채광한 후 형성된 지하 공동을 이용하여 지하 공동 내부(토굴)와 지상에 조립식 우레탄 판넬로 저온창고(4m×9m×2.5m)를 설치하고 7월부터 9월까지 2개월(60일)에 걸쳐 배추·무의 저장을 실시하고 관련 투입비용 및 운영비용을 비교분석하였다. 저장효과는 토굴·지상 냉장저장시설 간에 각기 저장수율 및 저장배추의 품질이 비슷한 것으로 확인되었다. 토굴·지상 냉장 저장시설 간 투입비용 및 운영비용에 있어서 우선 건설비의 경우 토굴 냉장저장시설이 별도의 굴착공사비

(57,600천원)가 발생하여 지상 냉장저장시설보다 투입비용이 44,916천원 더 많은 것으로 나타났다. 다만, 굴착 공사비를 제외하고 이를 토목공사로 대체할 경우에는 지상 냉장저장시설이 입지여건에 따른 부지구입비(3,600천원) 상승으로 토굴 냉장저장시설에 비해 더 많이 소요되는 것으로 나타났다.

그러나 이 경우에도 토굴 냉장저장시설의 경우 기존도로에서 토굴까지의 진입도로 개설(1km 개설 시 용지구입비 6천만원과 도로건설포장비 1억25백만원 추가소요)등의 추가비용이 발생된다는 점에서 지상식보다 투입비용이 더 많이 소요된다고 할 수 있다. 운영비의 경우 전력비는 토굴·지상 냉장저장시설이 각각 154천원과 242천원으로 토굴 냉장저장시설이 36.4% 절감되는 것으로 나타났고 감가상각비를 포함할 경우 토굴 냉장저장시설이 16.0% 정도 운영비가 적게 들어가는 것으로 나타났다. 따라서 연구결과 입지여건 및 위치에 따라 전체적인 투입비는 다소 차이가 있다고 하겠으나 토굴 냉장저장시설이 지상 냉장저장시설에 비해 전력비가 36.4%(농업용 기준), 20.4%(산업용 기준) 절감되는 등 전반적으로 운영비 측면에서 경제성이 있는 것으로 판단되었다.

V. 감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 첨단생산기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(316004-02)

VI. 참고 문헌

1. 신희순 외. 1994. 농수산물 및 식품의 지하저장
2. 한국식품연구원. 1992. 농수산물의 지하암반저장기술의 실용화에 관한 연구, 연구보고서.
3. 한국자원연구소. 1992. 지하공간 활용기술 개발 계획 수립연구. 연구보고서 KR-92(T)-24.
4. 한국자원연구소. 1994. 에너지 절약형 지하냉장 및 냉동저장 설계기술 개발사업계획서.
5. 김호영. 1995. 농수산물의 지하저장 기술. 대한화약기술학회지.
6. 김병삼. 2009. 농산물 저온 저장고 설계기준. 설비/공조·냉동·위생 11호.
7. 김영웅 외. 2000. 끈지암 지하저장 운영사례. 한국암반공학회지.
8. 정우철 외. 2009. 지하 저온저장시설의 에너지 효율 극대화를 위한 설계기술. 한국암반공학회지. Vol.4, No.3.
9. 박연준 외. 2002. 절리 및 지하수가 암반의 열전과 특성에 미치는 영향. 한국암반공학회, Vol.12, No.3.