

## 지하냉장 저장기술

### Underground Cold Storage for Food

김 호 영  
H. Y. Kim  
선경건설(주)연구소



· 1958년생  
· 상업용 냉장 및 냉동창고의 지하암반내 건설을 통한 에너지 절감 및 저장품의 장기보존 방안 개발에 관심을 가지고 있다.

박 연 준  
Y. J. Park  
한국자원연구소



· 1959년생  
· 지하공간 이용을 통한 에너지 절약 및 에너지 저장에 관심을 가지고 있다.

박 준 택  
J. T. Park  
한국에너지기술연구소



· 1952년생  
· 흡착 및 막분리 기술의 응용과 폐열회수기술 개발 등에 관심을 가지고 있다.

#### 1. 서 론

우리나라 상업용 대규모 냉장저장고의 시설능력은 1992년 현재 1,509,935톤이며, 이는 앞으로도 꾸준히 늘어날 것으로 전망된다. 또한 냉장저장고는 에너지다소비시설이며, 특히 여름철 전력부하가 매우 크다. 우리나라 전체 상업용 냉장저장고의 연간전력 소비는 약 380,000Mwh, 여름철의 월간 전력소비는 약 60,000Mwh이며, 여름철에 약 300~400Mw의 최대부하가 요구되는 것으로 추정된다. 따라서 이러한 냉장저장시설에 대한 에너지 절약과 최대부하 절감을 위한

기술개발은 우리나라 전력수급체계에 긍정적인 영향을 가져올 것으로 기대된다.

냉장저장고의에너지 절약방안으로서 현재의 냉각공정을 개선하는 방안도 고려될 수 있으나, 현재 지상에 건설되고 있는 냉장저장고를 지하에 건설한다면 지하 암반의 단열성과 축열능력을 활용할 수 있어 전력절감효과를 얻게되며, 또한 냉동설비를 야간에만 운영이 가능하여 심야전력의 활용과 부하평준화를 꾀할 수 있다. 특히 냉장저장고와 같이 창문이 없는 건물은 지하에 건설하여도 운영상 전혀 문제가 없다. 노르웨이, 스웨덴, 미국 등지에서는 20년 전부터 다양

한 규모의 냉장저장고를 지하에 건설하여 운영하고 있으며, 최근에는 일본에서도 다년간 실증시험을 거쳐 지하 농수산물 저장 및 유통시설을 대규모로 운영하고 있다.

국토의 70%가 산지인 우리나라는 기반암이 매우 견고하기 때문에 농어촌지역과 도시근교에 교통이 편리하며 지형과 지질조건이 양호한 지역을 쉽게 찾을 수 있으며, 이러한 지역에 인공적으로 동굴을 굴착하여 지하 냉장저장고를 용이하게 건설할 수 있을 것이다. 특히 최근에는 농수산물 유통시설의 필요성이 크게 대두되고 있으므로 지하공간의 활용을 통해 지상공간이 부족한 문제를 해결하고 환경을 보전하는 부가적 이점을 얻을 수 있다.

본 고에서는 우리나라 냉장저장고 사업의 현황을 파악하고 지하냉장저장기술의 개념과 이점, 지하냉장저장고의 기술적 사항 등에 대하여 검토하였다.

## 2. 우리나라 냉장창고 사업의 현황

식품의 저온저장을 동결점 기준으로 저장온도대에 따라 개략적으로 분류하면 표 1과 같으며, 이러한 저온저장시설을 일반적으로 냉장창고라 부른다.

1975년 이후 20여년간 한국, 일본, 미국의 냉장창고 시설능력 추이를 도표로 나타내면 그림 1과 같다. 우리나라는 1975년에 냉동저장 업체수 181개, 총 저장능력 140,000여톤이던 것이 1992년 현재 업체수 594개, 저장능력 1,013,000여톤으로 년평균 12.3%의

증가를 나타내었으며, 1985년 이후 증가율이 상승하고 있다. 저온저장고는 1973년부터 정부의 농가소득 증대 사업의 일환으로 시설자금 지원이 실시됨에 따라 시설능력이 꾸준히 증가하다가 1983년 공급과잉에 따라 자금지원을 중단하게 되면서 증가세가 둔화되었으며, 1990년부터 다시 시설이 급격히 증가하여 1992년 현재 업체수 630개, 총저장능력 496,935톤에 달하고 있다. 일본과 미국의 경우에도 시설능력이 우리나라보다 월등히 높지만 지난 20년간 냉동창고에 대한 시설투자가 꾸준히 계속되고 있음을 알 수 있다.

냉동창고 저장규모의 변화를 살펴보면 표 2와 같다. 단위 냉동창고의 저장규모는 꾸준히 증가하고 있으며, 최근에는 10,000톤 이상의 대규모 시설이 크게 증가하고 있다.

이와 같은 냉장창고의 증가요인은 국민소득이 증대되고 식생활 패턴이 고급화, 다양화 됨에 따라 신선식품에 대한 수요가 증가한 이유도 있지만, 유통 근대화를 통하여 식품의 계절적 가격 불안정요인을 해소하고자 하는 선진국형 유통산업의 발전에 따른 것이 주된 이유로 분석된다. 이러한 점에서 볼 때 그림 2에서와 같이 1989년 현재 일본이나 미국에 비해 우리나라의 인구비례에 대한 냉장 저장능력은 1/4에 불과한 형편으로서 앞으로는 냉동 및 저온저장시설에 대한 수요는 꾸준히 증가할 것으로 전망된다.

참고로 1989년에 한국농촌경제연구원에서 전망한 바에 따르면 1990년부터 2000년까지 10년간 저장시설의 증설을 위해 총 3,200억 원의 투자가 필요한 것으로 분석되었다. 그러나 이러한 시설투자의 필요성을 개별 저장업체의 경영측면에서 시설투자에 대한 수익성과 결부하여 살펴볼 필요가 있다. 즉, 그림 3과 같이 냉동창고의 연간 운영비용 중에서 건설비에 대한 토지운영비는 20~30%, 감가상각비는 20~25%, 전기료는 10~15%를 차지한다. 이와 같이 초기 투자비와 운영유지비가 과도하다면 저장 농수산물

표 1 식품의 저장온도에 따른 분류

분 류	저장온도	저장기간	저장품목
냉 장 저 장	+10~ -2℃	1주~ 6개월	건어물, 과일, 채소, 육류 등
냉 동 저 장	-10~ -25℃	3~ 12개월	수산물, 육류, 냉동 식품, 동결 야채, 아 이스크림 등
초저온 저 장	-40℃ 이하	6개월 이상	참치, 가다랭이, 참 돔 등

물의 가격상승을 초래하여 수급불안정을 초래할 가능성이 있으며, 가격상승에 따른 수입량 증가를 유발하여 국내 농수산물의 생산기반을 저해할 수 있다. 따라서 냉장창고

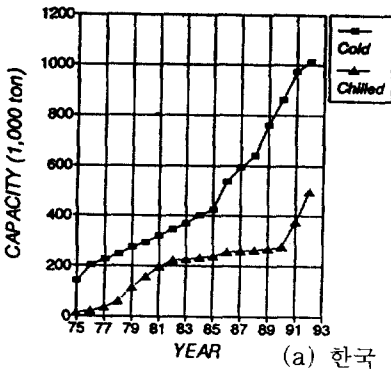
의 수요증가에 대응하여 건설비 절감방안과, 운영유지비를 줄일 수 있는 에너지 절감방안이 모색되어야 한다.

상기와 같은 문제의 해결방안으로서 지하

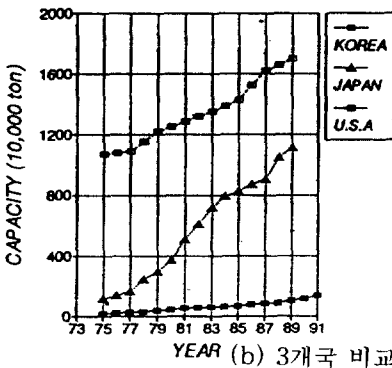
표 2 냉동창고 규모별 업체수 현황

구 모 별	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
50톤미만	12	13	14	20	24	24	24	24	24	27
50~100톤	20	23	22	24	18	21	26	27	28	35
100~500톤	172	177	179	183	198	196	205	195	192	219
500~1,000톤	89	91	97	99	105	102	108	105	124	117
1,000~5,000톤	68	69	74	84	91	113	115	135	155	156
5,000~10,000톤	9	13	14	15	17	13	16	19	22	20
10,000톤 이상	1	1	1	4	7	13	18	20	22	20
합 계	371	387	401	429	460	482	512	525	567	594
업체당평균 규모 (톤)	854	897	937	1,063	1,192	1,325	1,487	1,638	1,719	1,705

\*자료 : 냉동냉장업 시설현황, 냉동물제조수산업협동조합, 1993년



(a) 한국



(b) 3개국 비교

그림 1 년도별 냉장저장 시설능력 추이 (미국은 -18℃ 이하의 시설능력만 고려)

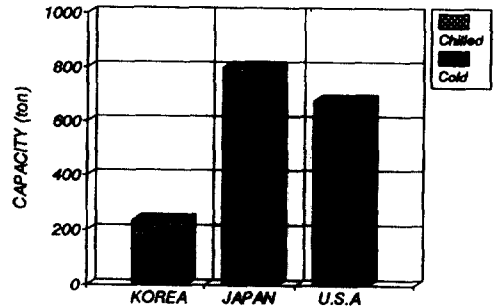


그림 2 인구 10,000명당 냉장저장 시설능력 비교(1989년)

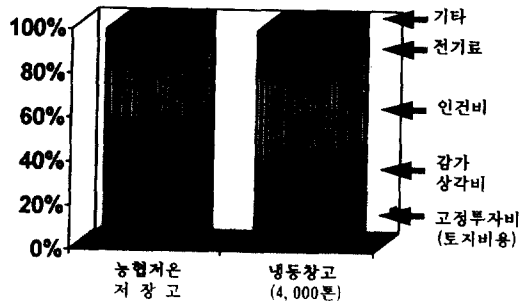


그림 3 냉장저장고 운영비용 구성비 (농경연 1989, 농협 1993)

공간을 활용한 냉장창고의 건설이 필요하다고 하겠다.

### 3. 지하냉장저장 기술의 개념과 지하저장의 이점

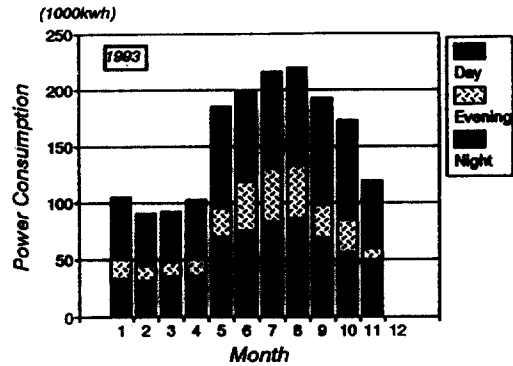
냉장저장에서 저장기간(Time)과 저장온도(Temperature)는 밀접한 관계가 있으며, 품질보존을 위해서는 온도변화의 허용범위(Tolerance)가 중요하다. 온도변화는 식품의 세포 내에 얼음 결정을 성장시켜 세포를 파괴하고 해동 시에 육즙의 탈락(drip loss)을 유발하여 식품의 품질을 저하시킬 뿐만 아니라 에너지 손실의 원인이 된다. 또한 저장물의 표면건조를 방지하기 위해 습도를 매우 높은 상태로 유지하여야 하며, 특히 냉장저장에서 습도유지는 필수적인 조건이다.

지하암반은 연중 온도가 일정하며, 열전도율이 낮고 대규모로 구성되어 있으므로 암반 중에 냉장창고를 건설하면 에너지를 절약하고 저장품의 품질보존을 도모할 수 있다. 또한 암반 자체가 단열재 역할을 함에 따라 단열벽을 시공할 필요가 없으므로 건설비를 절감할 수 있다. 지상창고는 벽면과 실내공기의 온도차이로 인해 열복사 및 대류가 발생하므로 내부의 온습도 분포가 균질하게 유지되지 못하여 결과적으로 저장품의 품질이 저하된다. 그러나 지하에서는 암반의 온도가 안정된 상태이므로 창고벽면은 항상 내부공기와 동일한 온도를 유지하며, 실내온도가 증가하면 천정과 벽면으로부터 빙축열이 발산되어 온도를 안정시키는 역할을 하게 된다. 따라서 항온항습이 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. 외국의 예를 보면 지하냉장창고는 지상창고에 비해 냉각설비용량은 50~75%, 연간 에너지 소비는 25~50%까지 감소하였으며, 습도는 95%

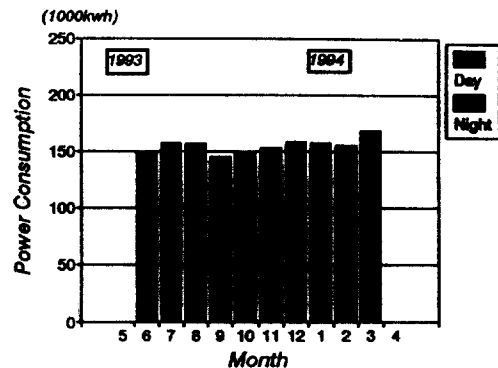
이상으로 년중 변화가 거의 없이 유지가 가능하였다.

지하냉장창고의 에너지보존 효과를 살펴보기 위하여 지상 냉동창고인 국내 S 창고와 스웨덴의 GB 아이스크림 지하저장고의 월별 전력 소비량을 비교하였다. 그림 4와 같이 지상창고는 여름철에 전력소비가 겨울철의 2배 이상 발생하나, 지하창고는 년중 일정한 전력소비를 보이고 있다.

그림 5는 노르웨이와 스웨덴의 경험에 의해 지하냉동창고의 이점을 요약한 것으로서



(a) 지상냉동창고 (국내 S 창고)



(b) 지하냉동창고 (스웨덴 GB 아이스크림 저장고)

그림 4 지상 및 지하 냉동창고의 월별 전력소비 패턴 비교

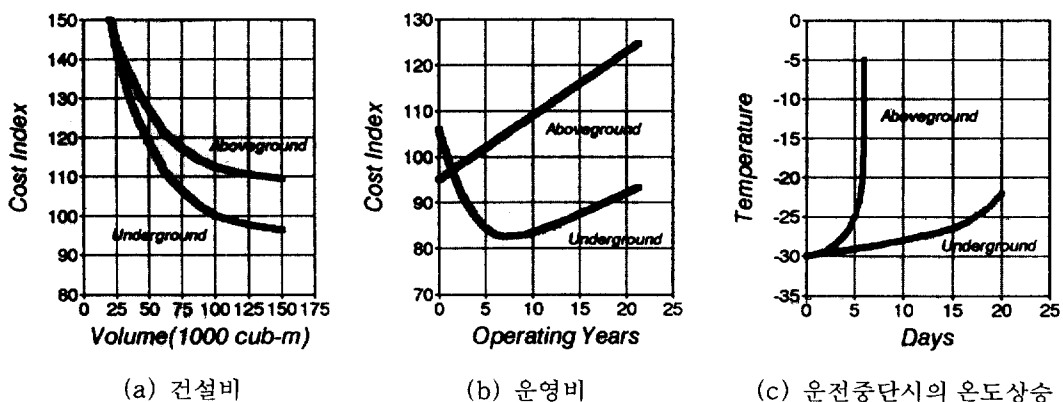


그림 5 지상 및 지하 냉장창고의 비교

지하냉동창고의 건설비 절감과 에너지절감 효과는 물론, 설비 고장시의 실내온도 보존 능력을 잘 나타내 주고 있다.

#### 4. 지하냉동창고의 설계를 위한 기술적 사항에 대한 검토

##### 4.1 설계 구성 요소

지하냉장창고의 설계에 관련된 구성요소를 도식화하면 그림 6과 같다. 즉, 냉장창고 운영의 구성요소인 저장품의 종류, 저장조건 및 저장기간, 그리고 물동량에 대한 설계기준을 충족시키기 위해서 지하공간의 설계, 냉동공조설비의 설계, 그리고 창고의 운영 시스템이 상호 연관성을 가지고 검토되어야

하며, 최종적으로 각 구성요소의 요구조건을 최적화하는 설계가 이루어져야 한다.

##### 4.2 지하냉장창고의 건설방식

일반적으로 냉장창고는 소비지 또는 생산지 부근에 교통에 편리한 곳에 위치하는 것이 유리하다. 지하냉장창고는 이에 부가하여 지질조건이 양호하며 기반암이 견고한 곳에 건설되어야 한다.

지하냉장창고는 폐광산을 이용할 수도 있다. 그러나 우리나라에서 폐광산은 대체로 지역적으로 편중되어 있고 교통이 불편한 곳에 위치한 경우가 많다. 또한 폐광산은 동굴의 규모가 작거나 버려진 지 오래되어 사람이 출입하기에 위험하고, 지하수 유입이 많아 습도제어가 어려운 점 등으로 인해 그대로 냉장창고로 사용하기에는 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 우리나라의 여건에서는 암반 내에 인공적으로 공동을 굴착하여 냉동창고를 건설하는 것이 타당하며 가능성이 큰 것으로 판단된다.

지하에 인공적으로 공동을 구축하는 방법으로는 그림 7과 같은 방안들을 생각해 볼 수 있으며, 이들에 대해 특성을 평가하면 표 3과 같다. 결론적으로 현재 우리나라 조건에는 산지를 이용한 동굴식이 가장 적합한 것으로 판단된다.

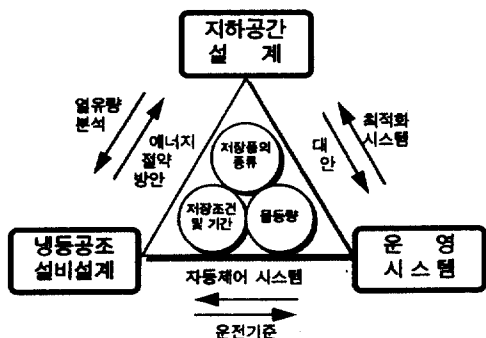


그림 6 지하냉장창고의 설계 구성도

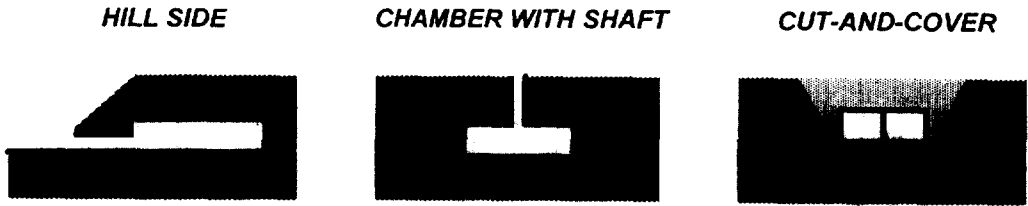


그림 7 지하냉장창고의 건설방식

표 3 건설방식의 특성평가

건설방식	경제성	입 지 용이성	접근성	건 설 용이성	운 영 시스템	에너지 절 약	비 고
동굴실 (Hill-side)	○	△	○	○	○	○	
지하식 (Chamber)	△	○	×	△	×	○	자동화시스템필요
개착식 (Cut-and-cover)	×	○	△	○	△	△	동결팽창지반은 건설 불가

4.3 지하냉장창고의 열설계

냉장창고의 냉동공조설비 설계를 위해서는 먼저 열부하를 분석하여야 한다. 일반적인 열부하 계산과정은 그림 8과 같다. 열부하의 주된 요소는 침입열, 환기열, 냉각열, 발생열의 4가지이며, 여기에 인원의 출입, 조명, 서리제거 등에 의한 기타열이 더해진다. 이 중에서 가장 큰 부분을 차지하는 것은 외기로부터 전도 및 복사에 의한 침입열로서 통상적으로 총열부하의 40~50%를 차지한다. 지하냉장창고가 지상창고에 비해 유리한 점은 침입열이 매우 작다는 것이다. 따라서 냉동공조설비의 설계시 지하 저장고에서 암반 내부로 전도되는 침입열을 정확하게 계산하는 것이 매우 중요하다.

암반을 설계온도까지 냉각하는데는 어느 정도의 에너지와 시간이 소요되지만, 일단 설계온도에 도달하게 되면 암반은 매우 효과적인 온도 및 습도의 차단벽 역할을 수행하게 된다. 지하저장공동은 모양과 크기가 일정하지 않고, 온도분포는 시간에 따라 변화하는 경계조건을 가지는 3차원 비정상 열전달 문제가 되어 수학적으로 복잡하다. 또한

암반은 절리와 같은 불연속면이 산재하며, 지하수의 유동이 있으므로 열계산을 더욱 복잡하게 만든다. 따라서 암반의 열적특성, 저장공동의 형태, 암석과 공기 사이의 열전달 특성, 지하수의 잠열효과, 공기 중 습도에 의한 열특성 등, 제반조건을 고려한 3차원 전산해석 프로그램을 이용하여 열계산을 수행하게 된다.

지하냉장창고의 열계산은 다음 두가지 사항의 결정을 위해 실시된다.

- (1) 초기 냉각기간의 예측,

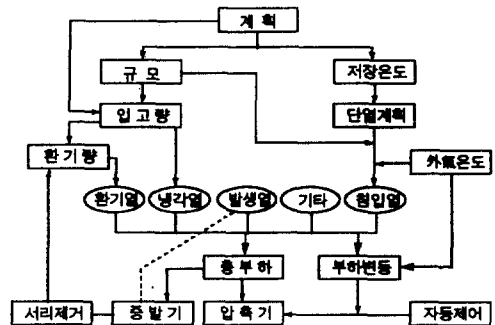


그림 8 냉동창고의 냉동공조설계를 위한 열부하 계산과정

(2) 공동으로부터 유출되는 열량 및 운영 시 에너지 필요량의 계산.

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

열계산으로부터 다음과 같은 사항을 결정한다.

- (1) 암반저장공동의 형태와 규모의 최적화
- (2) 냉동시스템의 설계
- (3) 냉각곡선의 예측
- (4) 연간 에너지 소비곡선 결정 및 비용 산출

암석의 열전도도는 조성광물에 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.

열적인 관점에서 본다면 저장공동의 형태는 구형이 가장 이상적이다. 그러나 저장공동의 단면적이 충분히 크다면 형태 보다는 체적의 영향이 훨씬 크다. 따라서 저장공동의 단면적을 최대한 크게 하는 것이 열설계 측면에서 유리하다. 한편 저장공동이 길어지면 저장품의 이동거리가 늘어나 참고 입출고 시스템에 나쁜 영향을 주므로, 길이를 줄이기 위해서도 단면적이 큰 것이 좋다.

#### 4.4 지질조건과 공동의 규모

지하냉장창고의 규모를 고려할 때 지하공동의 폭이 클수록 경제적으로 유리하며, 운송거리가 짧아지므로 운영에도 유리하다. 그러나 지질 및 암반조건에 따라 보강을 최소화하면서 건설할 수 있는 공동의 폭과 높이는 제한된다. 외국의 사례를 볼 때 일반적인 지하냉동창고에 공동의 폭은 12~20m의 범위를 가진다.

산지를 이용한 동굴식 지하냉동창고를 건설할 경우에 우리나라의 암반에서 최소의

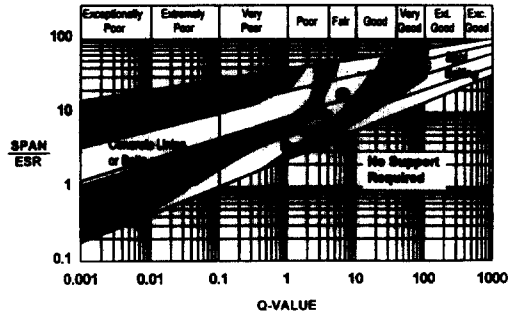


그림 9 Q-system에 의한 보강설계 기준

보강만으로 공동의 안정성을 유지할 수 있는 조건을 터널설계 방법인 암반분류법인 Q-system을 이용하여 살펴보면 그림 9와 같다. Q-system은 암반의 강도, 암반 절리의 상태, 지하수, 지압 등과 관련된 6가지 항목에 대해 암반의 점수를 부여하고 최종적인 등급에 의해 공동의 크기에 따라 보강방식을 추천하는 방법이다. 지하냉동창고가 경제성을 가지기 위해서는 주로 록볼트에 의해서만 보강이 이루어지는 것이 바람직하며, 일부 암질이 불량한 구간에 대해서만 슛크리트를 부가적으로 보강하는 방식이 될 것이다. 따라서 그림에서와 같이 공동의 폭이 20m일 때 이러한 조건을 만족시키기 위해서 암반의 등급은 "GOOD" 또는 "FAIR" 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

농수산물의 시장개방에 따라 국내 농업의 경쟁력 강화를 위해서는 농수산물의 유통 현대화가 시급하며, 이에 따라 저온저장고의 필요성은 더욱 커지고 있다. 따라서 지하냉장창고를 적절한 위치에 적절한 규모로 건설한다면 이에 대한 좋은 해결방안이 될 수 있는 것이다. 그러나 모든 기술이 그러하듯이 외국의 성공사례가 많이 있다 하여도 이를 국내에 적용할 때에는 국내조건에 적합하도록 충분한 기술적 검토와 타당성 분석이 이루어져야 한다.

## 참 고 문 헌

1. 김정옥, 선진국 냉동냉장 어디로 가고 있나?, 농광(1984. 3)
2. 농어촌개발공사, 농수산물 최신저장사업(1984)
3. 한국식품개발연구원, LNG 냉열이용 저온식품사업타당성 검토(1989)
4. 한국농촌경제연구원, 농수산물 저장시설의 적정입지와 규모분석(1989. 12)
5. 한국농촌경제연구원, 지하공간을 이용한 식품저장(1991. 7)
6. 허길행, 지하공간을 이용한 식품저장 가능성에 관한 검토, 농촌경제, 제14권 제4호(1991)
7. 한국식품개발연구원, 농수산물의 지하암반저장사업 검토보고(1991. 7)
8. 냉동물제조수산업협동조합, 냉동냉장업 시설현황(1993)
9. 농림수산부, '93 농산물저온저장고시설현황(1993. 10)
10. 일본냉동협회, 냉장참고(1989)