

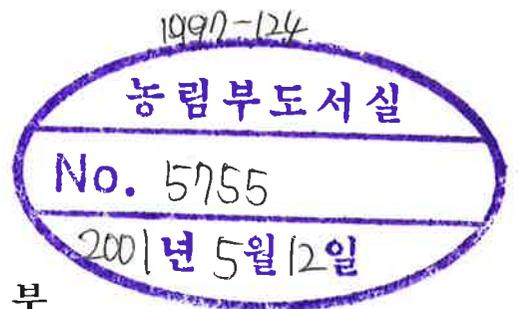
최종보고서

## 농수산물의 지하암반 저장기술 개발연구

A Study on the Technology of Underground  
Storage of Agricultural Food

연구기관

공주대학교



농림부



# 제 출 문

농 립 부 장관 귀하

본 보고서를 “ 농수산물의 지하암반 저장기술 개발연구 ”  
과제의 최종보고서로 제출합니다.

1997. 12. . .

주관연구기관명 : 공주대학교

총괄연구책임자 : 서 만 철

연 구 원 : 김 용 진

박 원 중

김 민 규

이 장 화

# 요 약 문

## I. 제 목

농수산물의 지하암반 저장기술 개발연구

## II. 연구 개발의 목적 및 중요성

1. 농수산물 저장소의 확충은 우리나라에서 매우 시급한 과제이다. 양호한 저장기술에 의한 농수산물의 품질유지 및 적정시기에의 단계적 출하는 안정적 공급과 가격 안정에도 기여하여 소비자와 생산자 모두에게 유익하기 때문이다.

이 연구에서는 농수산물의 지하저장 가능성에 관한 연구를 수행하였으며, 지하저장시설 건설에 필수적인 입지분석, 지질조건, 안전성제고, 지하냉방공조시설 및 농산물의 지하저장조건등에 관한 기본적인 중요 요소들에 관한 연구를 수행하였다.

지하저장시설의 타당성을 에너지 사용, 운영비, 건설비, 국토활용 및 환경보존 측면에서 분석을 시도하였다. 지하공동건설로 인한 인근 지하암반의 변형 및 파괴특성을 해석하고 또한 지하암반내의 열유동을 분석하였다. 지하시설의 안전측면과 지질조건등을 고려하여 지하저장 시설부지의 선정기준을 마련하였으며, 지하저장고의 설계요소를 확립하였다. 또한, 지하저장시설부지에 대한 비파괴조사 기술의 적용에 관한

내용을 다루었으며 지하저장고 건설 이후 사후모니터링 체계에 관한 연구를 수행하였다.

2. 지하암반저장고의 냉방공조기술은 저장고내의 온도 및 습도를 저장물의 저장적정 조건에 맞게 조절하여 저장물의 신선도를 장기간 유지하기 위한 필수적이고 핵심적인 분야로 매우 중요한 분야이다. 이러한 냉동공조설계기술은 오랜 굴반의 역사를 가진 선진국과 비교하여 아직까지 국내 기술로서 확보되어 있지 않다.

지상 냉동(냉장 및 동결) 저장고는 에너지 소비가 큰 시설이며, 특히 여름철 전력부하가 매우 커서 최대부하가 약 400MW 까지 이르는 것으로 조사된 바 있다. 지상에 건설되는 상업용 냉동창고를 지하암반 내에 건설하면 암반의 단열성과 축열능력에 의해 연간 전력소비를 30% 이상 절감할 수 있는 것으로 조사되었다. 또한 여름철에도 냉동설비를 야간에만 운영이 가능하여 심야전력을 활용함으로써 최대부하 절감효과를 얻을 수 있다.

지하저장고는 지상저장고에 비교해 건설비와 운영비가 절감되는 유리한 점 외에도 지상에 비해 온도변화가 적고 고습을 일정하게 유지하는 온습도의 안정적 분포로 인한 온습도 조절의 용이성 때문이다. 그러므로 향후 많은 수요 증가가 예상되는 냉동저장고를 지하에 건설하는 것이 매우 바람직하며, 본 연구에서는 이러한 지하암반의 냉장 및 동결 저장시설의 설계를 위한 기초 자료를 제공하는데 목적이 있다.

3. 지하 저장 시설을 이용하는데 기초 자료로서의 활용성을 검토하여 소규모 지하 저장고의 활용을 유도하며 그에 따른 저장조건을 확립한다. 또한, 환경 변화에 따른 농산물의 저장성 향상과 실용화 방안을

모색한다.

### Ⅲ. 연구 개발의 내용 및 범위

1. 농수산물의 유통과정상 매우 중요한 저장기능에 관하여 지하저장시설의 가능성 및 제반 지질학적 조건, 안정성, 냉방공조기술 및 저장성에 관한 연구를 수행하였다. 지상의 시설은 부지, 환경, 비용의 측면에서 여러 가지의 제한을 갖고 있다. 농수산물의 지하저장은 시공, 운영 등의 여러 측면에서 지상보다 유리하고 우리나라의 지질조건은 지하의 시설을 건설하기에 매우 양호한 조건을 갖추고 있다. 식품저장 공동의 건설에는 암석의 물리적, 열적 성질 등의 여러 지질조건이 충분히 조사되어야 하며 암질과 연약대, 단층, 지하수의 유입 여부 등에 관한 정확한 정보가 필요하다. 또한, 농수산물의 저장에서는 암석의 열성질과 열해석 그리고 저장소의 열설계가 필수적이다.

지하저장시설의 설계요소로서는 공동의 깊이, 방향, 모양, 크기 등이 고려된다. 지하저장시설부지의 선정은 역학적 안전성과 지리적 적합성을 고려하여 열전도율이 낮은 지반을 선택하여 연약대와 굴착면이 교차하지 않도록 하여야 한다. 본 연구에서는 탄성파, 비저항, 지하레이다 탐사등의 비파괴 지반조사 방법을 적용하여 설계전 부지의 선정, 지하공동의 방향, 크기등에 관한 정확한 설계자료를 제시하였다. 지하암반 내의 열유동을 이론적 검토와 실측치를 분석한 결과 기온 연주기에 대한 표층 깊이 이하인 지표면으로부터 약 5m 깊이 이하에만 건설하여도 충분한 효과가 있음이 입증되어 낮은 야산에도 개착식으로 소규모의 지하저장시설 건설이 가능함을 입증하고 있다. 지하공동에 대한 변

형 및 파괴특성 분석 결과 지표면의 불규칙성에 대한 보강대책이 필요하며 상부하중과 지하공동의 모양에 따른 변형 및 파괴지점을 분석하여 설계에서 보강할 필요가 있음을 밝혔다. 지하저장고의 안전성 및 농수산물저장 조건 등을 면밀히 모니터링 하기 위한 상시 온습도 관측, 상시 구조거동 관측, 지하저장고부지인근의 지하수분 관측 등의 사후모니터링체계를 확립하였다.

2. 농수산물을 장기간 신선하게 지하암반저장고에 저장하기 위해서는 저장고를 저장물의 저장조건에 맞게 저장고의 온습도를 조절할 수 있는 냉동 및 공기조화 시설을 갖추어야 한다. 따라서 이 냉동·공기조화 시스템에 대한 최적 설계를 하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 냉동·공기조화 시스템에 대한 최적 설계에 필요한 기본적인 자료를 제공하고자 하며, 그러기 위해서 환기 기술 및 냉동·공기조화 기술, 지하암반저장고의 유리한 특성에 대해 기술하였다. 저장고의 냉동부하 계산은 냉동기 용량을 결정하는데 필수적인 과정이며, 지하암반저장고인 경우 암반을 통한 전열량은 냉동부하에 가장 큰 부분을 차지한다. 따라서 냉동부하에 대한 산정방법을 제시하였고, 저장고의 지하깊이에 따른 온도추이를 예측하기 위해 이론과 수치해석 방법을 이용하여 지하암반의 열전달특성을 파악하였다. 또한 저장고내의 열유동 해석을 위해 지하저장고를 3차원 격자시스템으로 모델화하여 수치계산을 수행하였고, 이를 통해 저장고내의 공기 온도와 유속을 예측하였다. 저장고내의 온도와 유속 분포는 저장물의 저장 위치와 형태를 결정하는데 참고 자료로 사용될 수 있을 것이다. 실제의 지하암반저장고에서 온습도 자료를 측정 수집하였고, 냉장 저장고의 축소모델을 이용하여 모델내의 열환경 측정실험을 수행하여 지상 냉동저장고의 온습도 특성을

조사하였다.

3. 과일(사과), 서류(감자, 고구마), 채소류(마늘, 생강, 쪽파, 배추, 무) 등의 저장 조건에 대한 비교 실험을 행하여 지하 저장 시설의 효율성 있는 설계에 그 이용성을 밝히기 위하여 상온(공주대학교 식품가공학 실험실), 저온( $0\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , 충남 예산군 소재 과일 저장고), 지하( $13\pm 1^{\circ}\text{C}$ , 충남 광천읍 소재 수산물 저장고)에서 각각 실시하였다.

이는 지하 암반저장시 온도와 습도의 조정력에 따라 농산물의 저장성 및 self life를 높이기 위해 실용화를 강구하기 위한 기초 자료로 활용키 위해 각 농산물별로 물리·화학적인 성분 변화와 발생하는 미생물 등에 대한 실험을 실시하였다.

#### IV. 연구 개발의 결과 및 활용에 대한 건의

1. 본 연구를 통하여 얻은 지하저장시설의 타당성 분석 결과를 농수산물 유통 관련 각 기관에 송부하여 각종 물류센터의 저장시설을 지하화 하도록 건의한다. 지하암반의 열유동 분석 결과 얇은 야산의 경우에도 충분히 효과가 있으므로 개착식으로 소규모 지하저장시설을 소단위별로 건설하여 이용도를 높이도록 홍보한다.

또한, 지하공간의 건설로 인한 각종 안정요소 및 부지선정기준을 이용하여 부지를 선정하고 비파괴 조사기술을 이용하여 후보지에 대한 정밀조사를 실시하여 지하공동의 깊이, 방향, 모양, 크기 등의 요소를 설계에 반영한다. 지하저장고를 건설하여 사용 중에는 사후모니터링체계를 구축하여 지하시설의 안전성 및 식품저장조건등을 면밀하게 분석

하도록 권장한다.

2. 에너지절약, 건설비 및 운영비 절감, 저온 고습의 안정된 저장조건 등 지하공간의 많은 유리한 점에도 불구하고 국내에서는 아직까지 냉동저장설비를 갖추고 실용화된 중소규모의 순수 저장용 지하암반저장고는 없는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 냉동기 용량을 결정하는데 필수적인 냉동부하산정 방법을 제시하였으며 특히 냉동부하 중 암반을 통해 전도되는 열전달량을 파악하기 위해서 냉동시 지하수의 빙화현상에 따른 잠열 열전달과정을 고려하여야 하며 이에 대한 기초이론을 제시하였다. 지표면에서의 경계 조건은 지중온도변화에 영향을 주므로 지표면에 입사하는 태양 복사, 주위 하늘에서 오는 적외선 복사, 지표에서 방출되는 적외선 복사, 현열 및 잠열 대류 열전달 현상을 모두 고려하는 것이 정확한 지중온도계산을 위해서 고려될 수 있으나, 건구온도로 표시된 간단한 모델로도 심각한 오류를 범하지 않고 지중온도를 계산할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 지하암반 모델을 2차원 비정상 열전도 방정식을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 지하암반 온도분포를 구하였으며, 3차원 수치해석을 수행하여 지하저장고내의 공기 속도 및 온도 분포를 구하였다. 본 수치해석 및 축소모델을 이용한 실험적 연구를 통하여 지하저장고 및 지상 축소모델 냉장저장고에서 공급냉풍에 의해 형성된 강제대류에 혼합된 층류 자연대류 현상이 나타났음을 알 수 있었고, 이 자연대류 현상에 의한 부력효과가 지상의 축소모델 냉장저장고에서 더 크게 나타났다. 실제의 지하암반저장고 열환경 측정조사 및 축소모델을 이용한 냉장저장고의 열환경 측정 실험을 수행하여 지상 및 지하 저장고의 열환경을 비교하였고 저장고내의 냉풍공급 위치 및 방향에 따른 열환경을 측정 분석하여 동일한 냉

풍공급조건 하에서도 냉풍의 공급 위치 및 방향에 따라 지상저장고내의 열환경이 크게 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

지하저장고를 전국의 각 지역에 건설하고 농촌지도소를 활용하여 지하저장고의 운영 및 관리를 하도록 한다면, 신선한 농수산물을 전국의 모든 지역 소비자에게 항시 공급할 수 있는 농수산물 유통구조를 개선하고 농수산물 가격을 안정시키는데 크게 기여하게 될 것이다. 그리고 본 연구 결과는 기타 지하공간 및 지상 냉동저장시설의 설계에 참고자료로 활용할 수 있으리라 사료된다. 그리고 본 연구의 실험 결과에서 알 수 있듯이 지상 냉동저장고의 경우 운영 및 관리자로 하여금 냉동용 식품을 저장할 때는 저장전 저장고내의 온습도분포도를 파악하고 저장물의 저장조건을 고려하여 저장 후 정기적으로 온습도와 저장물의 신선도를 기록하면서 효율적인 저장고 운영 및 관리를 유지하도록 하여야 한다.

3. 지하 저장 시설을 이용한 농산물의 저장성 실험의 타당성을 조사한 기초 자료를 활용하기 위한 연구 결과이었다. 그리고 각 시설별 저장성 비교 실험으로 농산물의 생산 시기, 계절성, 유통 등의 효율성을 높일 수 있었다. 소규모 지하 저장 시설의 이용성을 높일 수 있는 자료로 활용이 가능하였으며 폐지하 저장시설의 활용에 정부 차원에서 적극 지원이 필요하다고 본다.

# SUMMARY

## I. TITLE OF RESEARCH

A Study on the Technology of Underground Storage of Agricultural Food

## II. PURPOSE AND IMPORTANCE OF THE STUDY

1. It is necessary to increase the number of storage facilities for agricultural and fishery products in Korea. Keeping the quality of agricultural and fishery foods for long term with new storing technology and step supply to the market is very important for keeping constant price and supply. It will also be good for both producer and consumer.

Many parameters like site characteristics, geology, safety, air controlling system, storing conditions of agricultural products were analyzed to study the feasibility of underground storage facilities. Consuming of energy, operating expenses, construction expenses, land use plan, and conservation of environment were also considered.

Characteristics of deformation and failure of rock mass due to

construction of unerground facility should be well understood with heat transfer charateristics in the ground for planning of underground storing facilities. Criteria of site selection for underground storage facilities and necessary parameters to design them are established in this study. Nondestructive exploration techniques for the site of underground storage space and post-monitoring techniques for the safety and control of the underground storage facility were also studied.

2. Ground refrigerated food storages require a vast amount of energy consumption. It has been reported that the peak load amounted to approximately 400 MW in the summer season.

Underground refrigerated storages have received worldwide attention due to their advantages. They have been found to save the energy consumed by the ground refrigerated storages by 30% or more. They also have the advantage that their indoor temperature and relative humidities are maintained very stably all the year around. It serves to control effectively the temperature and relative humidity of the underground storages. Therefore it is desired that the underground refrigerated storages are used for energy savings and effective long-term storage of fresh food. The purpose of this present study is to provide basic data for the design of the refrigerated food storages.

3. The study aims to increase the use of small sized

underground storage facility. Investigation of basic data using underground storage facilities was carried out. Also establishment of storage condition for utilization of small underground storage facilities is the purpose of this research.

### III. CONTENTS OF THE RESEARCH

1. Feasibility study on construction of underground storage space was carried out in terms of geological condition, safety, air controlling techniques, and food storing conditions. Surface storage facilities has some limitations in aspects of site, environment and construction and operating expenses. Underground storing of agricultural products has such merits as easiness of construction, savings of energy and operating expenses, conservation of land surface and environment. In addition to that, geological condition is also good for underground construction.

A detail geological survey is necessary to understand several physical conditions and heat transfer of rock mass before underground construction. Existence of faults and groundwater influx should be considered in design of the underground storage facility. Parameters for design of underground space are depth, direction, shape, and dimension of the space. Site for underground storage facility should be selected with the consideration of

mechanical safety and geographical suitability. Rock mass of low heat conductivity is better site for underground space. The excavation plane should not cross the shear zone. Nondestructive techniques like seismic method, resistivity method, and georadar exploration were studied to collect such parameters as suitability, direction and dimension of underground space. Theoretical and experimental study on heat transfer in underground rock mass results in the most shallow depth of the underground space is about 5 meters which is below the skin depth for annual period of atmospheric temperature variation.. It means that construction of a small underground storage facility under a small mountain is good enough for storage purpose.

Analysis of characteristics of deformation and failure in rock mass due to the construction of underground space represents the needness of reinforcement of walls of the underground space according to the shape and size of the storage space and the irregularity of the surface topography. A post monitoring system which includes automatic measurements of humidity and temperature inside the storage space, deformation of underground wall, influx of groundwater in to the site is recommended to ensure the quality of stored agricultural products and safety of underground structures.

2. The design of refrigeration-air conditioning systems should be laid out efficiently so that fresh agricultural and marine products

should be stored for a long term in underground storages. The current study would provide basic data for the design of the system. A method for the estimation of the refrigeration load of the underground storage was suggested. Especially the amount of the heat transferred into the underground storage through the underground rock from the ground surface is the most one of the items considered to estimate it. The necessity that the latent heat transfer at the moving interface between two phases produced in the underground water should be included in the estimation process was also indicated. Theoretical works reported for the calculation of the temperature profiles varying with the depth in the underground rock have been investigated. They were also predicted by numerical works using the two-dim. heat conduction equation. Three-dim. numerical analyses were also carried out to predict air velocities and temperatures within the underground storage. On-site measurements were made to examine thermal environments in underground storages. Experimental studies on thermal environments in the scaled cold storage model were also conducted.

3. A comparative experiment was conducted on agricultural products (fruits, potatoes, vegetables) at room temperature, low temperature and underground storage in order to investigate utilization of practical design of underground storage facilities.

Physico-chemical component changes and generated microorganism could be investigated to predict the storage of

agricultural products and self life according to the control of temperature and humidity.

#### IV. USE OF THE RESULTS

1. The research results will be recommended for the encouragement to use of underground space to many government agencies and companies related with storage of agricultural and fishery products. with the result that a small underground storage facility in a small mountain is also good enough for the storage purpose, it is recommended to increase the usage of small sized underground space near the production field rather than large size storage facility of far distance. Use of post monitoring system and parameters established in this research is strongly recommended in selection of site, design of underground space, construction and operation of underground storage facility.

2. For many decades underground food storages have been utilized in advanced countries due to their advantages such as the effects of energy savings, the reduction of the cost of construction and maintenance, and etc. Although they offer the various benefits, however, they have not been yet put to practical use in Korea. In the present study a suggestion of the method for the estimation of

the refrigeration load of a underground storage was made, which is of great importance in determining the capacity of the refrigerator. A basic theory on latent heat transfer at a moving interface produced in the process of solidification between the two phases was included, which should be considered to estimate the refrigeration load. The boundary condition at the ground surface have influence on the underground temperature variatons with depth and season. It can be specified by an energy balance that consists of coupled processes of conduction from the ground, convection, evaporation, and radiant exchange in both long(sky and ground infrared) and short(solar) wavelength bands. In the current investigation, however, it has been found out that a simple model, expressed in terms of dry bulb temperatures and angular velocity of the temperature variation, for the ground surface boundary condition can provide reasonable results without significant errors. Underground rock temperature distributions were obtained by the numerical analysis in which the 2-dim. conduction heat transfer equation was considered as a governing equation. It was shown that the temperature variation with season decreased as the underground depth increased. The present numerical and experimental works showed the buoyant effects of laminar free convectons incorporated into the forced convections, which were caused by the cold air supplied in the both storages; the underground and the scaled cold storage model, and they showed that the greater buoyant effects occurred in the scaled cold storage

model. It was also shown by the experimental studies that thermal environments in ground cold storages may be greatly influenced by location and direction of the cold air supplied under the same supply conditions. Data on thermal environment in the underground food storages were obtained by on-site measurements.

Underground food storages, if they are constructed and located in each region over the whole country and operated by the regional guide institutes, will contribute greatly to improve the circulation structure of the agricultural and marine products and stabilize their prices all the year round. The contents of the current study would be able to used to design the refrigeration facilities for both underground and ground food storages. Operators of ground food storages should realize that it is important to figure out the temperature and relative humidity distributions inside them before storing the foodstuffs. It would help them arranging the storing foodstuffs in the possibly better locations to satisfy their own storage conditions. Even after storing them, regularly they should recorded their freshness and check out if the refrigeration and air conditioning system are efficiently operated.

3. The results of experiment are expected to be utilized for underground storage facilities as basic data for agricultural products storage. Each experimental suvey of controlled storage will be helpful to increse of efficiency in terms of product time, season and cirulation. This study can be used as a data for enhancement of

small size underground storage. It is considered that government support is needed for utilization of useless underground storage facilities.

# CONTENTS

## CHAPTER 1. General Aspects of Underground Storage Facility ..... 26

Section 1. Introduction ..... 26

Section 2. Underground Storage of Food ..... 28

1. Background ..... 28

2. Methods of Underground Storage ..... 29

3. Comparison between Surface Storage and Underground Storage ..... 36

## CHAPTER 2. Characteristics of Ground for Underground Storage Facility

Section 1. Properties of Rock Mass ..... 45

1. Density, Porosity, and Seismic Velocity ..... 45

2. Strength and Failure of Rock Mass ..... 46

3. Joint of Rock ..... 50

4. Classification of Rock ..... 54

Section 2. Heat Characteristics of Rock ..... 65

1. Heat Conductivity ..... 65

2. Heterogeneity of Heat Transfer ..... 69

3. Heat ..... 70

4. Measuring Equipment of Heat Conductivity .....	72
<b>Section 3. Groundwater .....</b>	<b>74</b>
1. Permeability .....	75
2. Prediction of Groundwater influx .....	77
3. In-Situ Permeability .....	79
<b>Section 4. Heat Transfer in Underground Space ...</b>	<b>83</b>
1. Basic Principles .....	83
2. Heat Transfer in Sphere .....	86
3. Heat Transfer in Cylinder .....	91
4. Nonlinear Heat Transfer in Cooling Stage .....	96
<b>Section 5. Design of Underground Storage Facility ...</b>	<b>104</b>
1. Keypoints of Design .....	104
2. Geological Survey .....	110
3. Heat Design .....	111
<b>Section 6. Structural Safety of Underground Space ...</b>	<b>119</b>
1. Introduction .....	119
2. Environment and Ground Condition .....	119
3. Estimation of Physical Properties of Rock .....	122
4. Safety of Underground Space .....	125
<b>Section 7. Postmonitoring System of Underground                     Storage Facility .....</b>	<b>144</b>
1. Tilt Monitoring System .....	144
2. Time Domain Reflectometry .....	145

3. Automatic Temperature and Humidity Meter .....	152
4. Cause of Dew in Underground Space .....	154
<b>Section 8. Nondestructive Site Survey .....</b>	<b>164</b>
1. Introduction .....	164
2. Exploration Principles .....	164
3. Application of Site Survey .....	175

## **CHAPTER 3. Technology of Refrigeration and Conditioning of Underground Food Storages .....**

<b>Section 1. Refrigeration and Air Conditioning in Underground Spaces .....</b>	<b>183</b>
1. Investigation of Ventilation Technologies for Underground storages .....	183
2. Current Situation of Underground Storage Facilities ...	196
3. The Facilities for Refrigeration and Air Conditioning of Underground storages .....	201
4. Benrfits of Underground Storages .....	203
5. Refrigeration Load of a Underground Storage .....	204
<b>Section 2. Heat transfer characteristic of the Underground</b>	
1. Heat Transfer at the Ground Surface .....	211
2. Study for the Temperature Distributions of the Underground Rock .....	219
3. Three Dimensional Thermal-flow Analysis of Air inside the	

Underground storage .....	231
<b>Section 3 Experimental Study for the Thermal     Environment of a Cold Storage .....</b>	<b>244</b>
1. Experimental Design and Setup .....	244
2. Experimental Procedure .....	245
3. Results and Discussion .....	254
<b>CHAPTER 4. Storage Condition .....</b>	<b>259</b>
<b>Section 1. Introduction .....</b>	<b>259</b>
1. Introduction of Storage Facility .....	261
<b>Section 2. Storage Experiment of the Crops .....</b>	<b>262</b>
1. Storage Experiment of Apple .....	262
2. Storage Experiment of Potato .....	267
3. Storage Experiment of Sweet Potato .....	271
4. Storage Experiment of Galic .....	274
5. Storage Experiment of Onion .....	277
6. Storage Experiment of Ginger .....	281
7. Storage Experiment of Redish and Cabage .....	283
<b>CHAPTER 5. Conclusion .....</b>	<b>287</b>
<b>REFERENCE .....</b>	<b>295</b>

# 목 차

제 1 장 지하저장시설의 개요 .....	26
제1절 서 론 .....	26
제2절 식품의 지하저장 .....	28
1. 배경 .....	28
2. 식품의 지하저장 방법들 .....	29
3. 지상과 지하의 식품저장 비교 .....	36
제 2 장 지하저장시설을 위한 지반특성 연구 .....	45
제1절 암석과 암체의 성질 .....	45
1. 밀도, 공극률, 탄성과 속도 .....	45
2. 암석의 강도 및 파괴기준 .....	46
3. 암체의 절리 .....	50
4. 암질분류 .....	54
제2절 암석의 열성질 .....	65
1. 열전도율 .....	65
2. 열이방성 .....	69
3. 열팽창 .....	70
4. 열전도율 측정장치 .....	72
제3절 암반의 지하수 .....	74

1. 투수율과 투수계수 .....	75
2. 유입수의 예측 .....	77
3. 현장 투수계수 .....	79
<b>제4절 암반공동에서 열전달 .....</b>	<b>83</b>
1. 기본개념 .....	83
2. 구형(球形) 공동에서의 열전달 .....	86
3. 원기둥의 공동에서의 열전달 .....	91
4. 냉각단계에서 비정상류의 열전달 .....	96
<b>제5절 식품저장용 지하공동의 설계 .....</b>	<b>104</b>
1. 설계의 주안점 .....	104
2. 지질조사 .....	110
3. 열설계 .....	111
<b>제6절 지하공동의 구조안전분석 .....</b>	<b>119</b>
1. 개요 .....	119
2. 주변환경 및 지반조건 .....	119
3. 지반물성치 산정 .....	122
4. 지하공동의 안정성 검토 .....	125
5. 지하공동의 안전성 .....	137
<b>제7절 지하저장고 사후모니터링시스템 .....</b>	<b>144</b>
1. 지하공동의 거동 모니터링시스템 .....	144
2. 지하공동 주위 수분이동 모니터링시스템 .....	145
3. 지하저장고 온·습도 모니터링시스템 .....	152

4. 지하공동내 결로원인 분석 .....	154
<b>제8절 부지 비파괴 사전조사 방법 .....</b>	<b>164</b>
1. 지하저장시설 Site 탐사 개요 .....	164
2. 지하저장시설 부지 탐사 원리 .....	164
3. 지하저장시설 부지 탐사의 적용 .....	175
<b>제 3 장 지하암반저장고 내의 냉동공조기술 연구</b>	
<b>제1절 지하공간에서의 냉동 및 공기조화 .....</b>	<b>183</b>
1. 지하저장고 환기특성 기술조사 .....	183
2. 지하저장시설 현황 .....	196
3. 지하저장고의 냉동·공기조화 시설 .....	201
4. 지하저장고의 필요성과 유리한 점 .....	203
5. 지하저장고의 냉동부하 .....	204
<b>제2절 지하암반의 열전달 특성 .....</b>	<b>211</b>
1. 지표면에서의 열전달 .....	211
2. 지하암반 온도분포에 대한 고찰 .....	219
3. 지하암반저장고내 공기의 3 차원 열·유동 해석 .....	231
<b>제3절 냉장저장고의 열환경 측정실험 .....</b>	<b>244</b>
1. 축소모델의 설계 및 제작 .....	244
2. 실험순서 .....	245
3. 결과 및 고찰 .....	254

<b>제 4 장</b>	<b>농산물의 지하저장조건 확립</b>	259
<b>제1절</b>	<b>서론</b>	259
1.	저장시설의 개요	261
<b>제2절</b>	<b>농산물의 저장성 실험</b>	262
1.	사과의 저장성 실험	262
2.	감자의 저장성 실험	267
3.	고구마의 저장성 실험	271
4.	마늘의 저장성 실험	274
5.	쪽파의 저장성 실험	277
6.	생강의 저장성 실험	281
7.	무·배추의 저장성 실험	283
<b>제 5 장</b>	<b>결론</b>	287
<b>참고문헌</b>		295

# 제 1장 지하저장시설의 개요

## 제 1 절 서 론

식품저장시설은 농수축산물의 유통과정에서 필수적인 시설로 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 특히 계절간의 농수산물 가격변동이 심한 우리나라에서 농수산물 유통시설의 확충 및 가격 안정의 측면에서 더욱 필요한 시설이다. 지하의 암반공동을 식품저장시설로 활용하면 안전, 안정, 밀폐성등이 보장되고 암반의 항온, 항습성은 식품저장에서 필수적으로 요구되는 대기조절에 절대적으로 유리한 조건이 된다. 그리고 설계를 적절히 하면 건설비가 지상보다 유리할 뿐 아니라 시설비가 낮아지고 요구되는 에너지가 작아 운영비가 지상에 비해 훨씬 저렴해진다.

우리나라는 국토의 70%가 산지이며 기반암이 매우 견고하다. 그래서 우리나라에서는 농어촌, 도시, 도시근교를 비롯하여 어디서나 교통, 지형, 지질조건이 유리한 지하식품저장소 부지를 쉽게 찾을 수 있다. 그래서 지하식품저장소는 교통량의 증가, 토지비의 상승, 농경지 및 녹지의 훼손등이 문제가 되고 있는 우리나라의 국토 현실에서 국토활용과 환경보전의 측면에서 매우 유리하고 적합한 시설임을 보장할 수 있다.

암석의 성질은 터널 및 지하공동의 굴착과 거동에 직접적인 영향을 미친다. 물리적인 성질은 밀도, 공극율, 탄성파의 속도, 열전도율 등이 중요하다. 식품저장용 지하공동의 건설 비용은 암석의 물성, 절리, 지하

수 등의 지질조건 등에 따라 많은 차이가 있다. 적합한 지질조건을 선택하여 적절한 공동의 설계와 지보대책을 세울때만이 최대의 경제성을 보장할 수 있고 지상의 저장고보다 유리하다. 그러므로 완벽한 지질조사와 이를 근거한 암석역학적인 설계가 절대 필요하다.

지표면에서의 온도는 외기의 기후에 주로 영향을 받지만 지하에서 온도 분포는 지하를 구성하는 흙이나 암석의 열성질과 지하의 내부에서 작용하는 열흐름의 영향을 받는다. 온도의 변화는 주로 지표면에서 일어나서 지하에 영향을 미친다. 지상의 온도변화나 내부 열원의 변화에 따라서 지하에서 일어나는 온도 변화를 측정하고 해석하려면 지하를 구성하고 있는 흙과 암석의 열성질이 파악되어야 한다. 지하암반의 식품저장소의 설계에서는 열전도율과 같은 암석의 열적성질이 특히 중요하다. 저장소 내의 온도와 습도를 조절하고 냉동부하를 고려하여 적절한 냉동기를 설계할 때 암반의 열적 성질을 이해하고 이를 파악하는 일은 필수적인 선결조건이 된다. 암반은 저장공동의 단열재로 이해하면서 동시에 잠열재로 간주할 수 있다. 이에 대한 열용량과 전도율을 이해하면 저장공동의 초기냉각 조건을 알 수 있고 요구되는 열부하를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 상기한 내용을 보다 구체적으로 기술하여 식품저장과 이에 관련된 암석의 성질, 설계의 요건, 열설계 등에 대한 이해를 목적으로 문헌조사를 하여 이를 분석하고 종합하였다.

## 제 2 절 식품의 지하저장

### 1. 배 경

식품저장의 기본적인 목적은 계절간 혹은 계절 중에 발생하는 수요와 공급의 차이를 없애고 동시에 저장 중 발생하는 폐기량과 취급에 드는 비용을 최소화하는데 있다. 수급간의 균형을 맞추게 되면 가격이 안정되고 지역적으로 분리되어 있는 공급자와 수요자들에게 경제적인 혜택이 돌아간다.

식품저장시설은 식품의 유통구조와 연결하여 고려되어야만 한다. 많은 생산자와 유통업자들이 이용하는 식품저장시설은 자동적으로 중요한 유통 거점이 된다. 생산자나 생산지의 집하장에서 식품저장시설 혹은 가공업자에 이르는 물류의 유통과정에서 수송비와 취급비용은 가능한한 최소 화하며 설비, 장치, 위치가 관련되는 모든 사람들의 욕구를 최대한 충족시킬수 있도록 설계되어야 한다.

식품저장은 다음과 같은 점을 고려해야 한다.

- 1) 식품저장소는 유통선을 고려하여 적합한 곳에 있어야 한다.
- 2) 곤충, 벌레, 쥐 등으로 부터 피해를 받지 않도록 밀폐되어야 한다.
- 3) 세균, 곰팡이 등의 미생물로 부터 변질 혹은 부패되지 않도록 건조 상태를 유지해야 한다.
- 4) 습도나 냉각 온도의 조절이 용이하여야 한다.
- 5) 설비나 장치의 사용이 적합하도록 설계되어야 한다.

식품저장에서 요구되는 이러한 일반적인 사항들은 지하암반저장을

택할 경우 대부분 만족될 수 있다. 암반시설은 일정한 조건이 만족되는 재래적인 어떤 저장시설보다 저렴하다는 것을 여러 연구와 실제 경험에서 보고 있다. 냉장과 냉동 저장을 할 경우에는 지상에 비교하여 에너지와 전력이 적게 든다. 지하 암반은 매우 안정되고 수명이 길며 운영비가 적게 든다. 지하저장 시설은 완벽하게 밀폐될 수 있고 구조적으로 안정되며 낮은 온도를 일정하게 유지하는 특성이 있다. 지하식품저장은 온습도의 변화가 거의 없어 대기조절의 측면에서 훌륭한 장점을 갖고 있다. 비상시에도 뛰어난 안전성을 보인다. 전력의 공급이 중단되는 경우에도 20-30일 동안은 낮은 온도를 잘 유지하여 저장식품이 상하지 않는다고 보고되고 있다.

지하암반의 안정, 밀폐, 항온, 항습성은 다음에 나열하는 것과 유리한 점이 있어 스칸디나비아 반도, 미국 등의 세계 여러 곳에서 지하의 식품저장시설이 지상보다 선호되고 있다.

- 1) 운영의 안정성이 보장된다.
- 2) 온도 및 습도가 균일하고 일정하다.
- 3) 장기간 단전되거나 기계가 고장나도 저장 식품의 안전하다.
- 4) 연간 열요구량의 변화가 없다. (시설용량, 전기료에서 유리함)
- 5) 토지, 시공 및 유지에 필요한 비용이 절감된다.
- 6) 지상의 환경을 보전할 수 있다.

## 2. 식품의 지하저장 방법들

### 가. 흙속의 상온저장

웅덩이, 토굴 등의 흙속의 저장은 옛날부터 매우 흔하게 사용되어 오던 방법이다. 건축과 열효과에 대한 원리들은 이미 잘 알려져 있다. 흙속에서의 최소한의 작은 규모가 경제적이고 장점이 많은 것으로 기대된다. 지표에서 4m 아래로 내려가면 온도는 지상에서의 연중 평균온도와 같게 된다. 그래서 지표면의 온도 영향을 벗어나려면 저장실은 흙속으로 4m 이상 내려가야 한다. 피복된 흙의 두께가 깊지 않더라도 내부의 온도는 매우 잘 보전이 된다. 그러나 흙 속의 시설들은 방수가 잘 되어야 하고 바람의 피해를 받지 않도록 조치를 해야한다.

#### 나. 지하의 곡물저장

곡물은 상온에서 저장된다. 곡물은 살아 있으되 휴면상태를 유지해야 한다. 휴면상태에서도 곡물은 호흡을 하면서 산소를 이용하고 이산화탄소를 생성한다. 저장곡물은 곤충, 진드기, 설치류, 새 및 곰팡이에 의하여 품질이 저하하고 중량이 손실되된다. 이러한 것은 일정한 온도의 유지, 낮은 산소 함유량, 밀폐등으로 방지할 수 있다. 곡물의 저장온도는 13℃인데 이 온도에서는 곤충이 번식하지 못한다. 이 온도를 유지하면 곤충을 죽일 수는 없으나 곤충과 진드기의 증가를 억제할 수 있다. 곤충 및 진드기는 대기의 산소 함유량 2-3%의 대기 조건에서는 살지 못한다. 일반적으로 밀폐저장을 하면 산소함유량은 2-3%를 달성할 수 있다. 이런 산소조건에서는 독소를 생성하고 저장식품의 주된 손실을 일으키는 필라멘트의 곰팡이는 자라지 못한다. 밀폐된 지하 구조물은 상기의 조건을 만족시킬 뿐만 아니라 새, 설치류, 사람들이 접근할 수 없다. 뿐만 아니라 화재, 폭발 등으로 부터 안전하게 보전될 수 있다.

## 다. 지하의 냉동저장

지하암반저장에서는 냉동저장이 가장 많이 선택된다. 냉동저장은 썩기쉬운 식품에 적용되는 방법이다. Table I-1 에 냉동에 적합한 대표적인 식품의 저장 조건을 나열하였다. 냉동저장은  $-25^{\circ}\text{C}$ 까지 급랭을 시킨 후 저장기간 동안 그 온도를 유지하면 된다. 냉동저장은 저장 식품의 질저하가 거의 없다는 것이 장점이다. 정확하게 처리만 되면 식품이 냉동이 된 것인지 아닌지를 구분하기가 어렵게 된다.  $-25^{\circ}\text{C}$ 의 지하 냉동저장고는 건축상의 장점이 많다. 일정한 온도와 높음 습도를 유지할 수 있고 갑작스런 기계의 고장이나 단전에도 그 충격이 느리다. 따라서 에너지가 절약된다.

### 1) 온도

냉동저장을 하는 식품들은 수분을 갖고 있다. 물이 얼기 시작하면 수분이 팽창하면서 결정을 형성한다. 냉동저장에서 얼리는 시간이 길어지면 결정은 그만큼 더 크게 자라나서 식품 내의 세포를 파괴하여 식품을 손상시킨다. 그러나 급속히 냉동을 하게되면 형성되는 결정이 작아져서 식품의 손상을 줄이게 된다. 얼리는 시간이 긴 것은 급속 냉동된 것에 비해 수분의 손실이 더 크다. 수분이 손실은 건조로 인해 식품의 질을 저하시키고 중량을 감소시킨다. 중량 손실은 곧 가격 손실을 의미한다. 저장이 끝나면 해동을 시켜야 한다. 저장 방법은 식품에 따라서는 특수한 해동법이 필요한 경우도 있다.

온도는  $-25^{\circ}\text{C}$ 를 유지해야 한다. 온도의 변화가 가능한 한 없도록 해야한다. 온도의 변화가 커지면 얼음 결정이 커져서 품질을 저하시키게 된다. 지하암반저장에서는 정확한 온도를 맞출 수 있고 냉각된 큰 암

반의 용적으로 인해 주어진 온도를 안정되게 유지할 수 있다.

## 2) 습도

냉장저장에서 상대습도는 가능한 높은 상태를 유지하여야 한다. 허용가능한 습도는 75-99%이다. 저장식품은 습도가 낮을 때보다 상대 습도가 높으면 중량손실이 더 작아진다. 저장고의 습도는 주위의 대기 조건과 관련된 저장고의 기본적인 설계에 의해 조절된다. 냉동고의 단열상태가 불량하면 냉동기의 가동 시간이 길어져야 하고 그 만큼 공기 중의 수분이 제거되어 상대 습도는 보다 낮아진다. 용량이 작은 냉동기는 증발온도가 낮은 만큼 공기 중에서 제거되는 수분이 더 작아진다. 냉동고는 지리적인 위치에도 영향을 받는다. 만일 주위 공기가 해안 지방과 같이 습도가 높으면 문이 열려 있을 때 들어오는 공기가 저장고 내의 습도에 보다 유리하게 작용할 수 있다.

저장실의 단열벽과 냉각기의 표면적이 크면 상대 습도는 높아지고 저장식품의 중량손실이 발생하게 된다. 지하암반저장에서는 둘러싸고 있는 암반이 단열재로 역할을 하게 되고 두께는 지표면에 도달하는 거리가 된다. 따라서 냉각기의 용량은 50% 이상 줄어들고, 공기중의 탈수가 줄어들어 상대습도를 높게 유지할 수 있다. 이것은 냉동 식품에서 중량손실을 줄이는 장점이 된다.

## 3) 안전성

지하저장체서의 암반은 온도적으로 매우 안정하다. 한 달동안 냉각기의 가동이 중단된 경우에 온도 상승은 불과 섭씨 몇도에 지나지 않았고 식품의 변질이 없었다고 보고되어 있다.

#### 4) 위생시설

지하의 냉동저장고에는 높은 위생 기준이 적용되지 않는다. 모든 미생물은 모두 깊게 얼어 있으므로 별도의 hygiene 위생시설을 할 필요가 없다.

#### 라. 지하의 냉장저장

야채 및 과일류 들은 냉동저장이 거의 불가능하다. 따라서 이런 식품들은  $-2$  에서  $+10^{\circ}\text{C}$  사이에서 냉장저장을 하게된다. 냉장저장 식품은 각각 고유한 최적의 저장환경이 있어 식품에 따라 적합한 적합한 상대습도 및 온도를 맞추어야 한다. Table I -1 에 대표적인 냉동저장 식품에 대한 저장조건을 나열하였다. 표에서 처럼 냉장저장 식품들은 대부분이 저장 기간이 짧다. 그래서 저장환경도 저장 식품이 바뀔 때마다 수시로 바뀌어져야 한다. 냉장저장소에서는 각각의 환경조건을 맞추기 위해 목적에 맞도록 여러 격실(隔室)을 갖고 있어야 한다. 저장소의 모든 공간이 저장물로 꽉 차는 경우에는 연중(年中) 내내 저장온도가 같은 식품들을 모아서 같이 저장하여야 한다.

#### 1) 환기

채소와 과일과 같은 냉장 식품들은 환기가 필요하며 하루에 5-6번 정도 공기를 바꾸어 주어야 한다. 손으로 작동되는 여닫이 문을 사용하면 환기의 용량을 줄일 수 있다. 이를 사용할 수 있는냐의 여부는 저장 식품의 종류에 따라 다르다.

#### 2) 청소 및 온습도 조절

냉장실의 표면은 청소하기가 쉬워야 한다. 냉장실은 저장식품이 교환될 때마다 청소를 해야한다. 청소때마다 충분히 공기가 교환되고 언제든지 저장실의 온도와 습도를 조정할 수 있도록 설계되어야 한다. 암석의 열적 성질은 각 저장 격실마다 똑 같은 온도를 유지하는데 유리한 조거을 제공한다.

### 3) 위생시설

지하냉장저장고에서는 필요한 위생 조건을 만족시킬 수 있는 시설을 갖추어야 한다.

Table I -1. 식품류의 저장조건

	온도 ℃	냉장저장		냉동저장	
		습도 %	최대저장 기간 주(week)	습도	최대저장 기간 달(month)
<b>육류</b>					
살코기	0~+1	80~90	1~6	85~95	9~16
지방이 섞인 살코기	0~+1	80~95	1~2	85~95	4~7
지방	+5	80	26	85~95	8~14
<b>조류</b>					
가금류, 닭, 칠면조	-2~0	80~85	1~3	90	10~20
<b>생선류</b>					
살코기	0	100(얼림)	2	90~95	6~12
지방이 섞인 살코기	0	100(얼림)	1	90~95	8~9
소금에 절인 것	-2~+2	70~80	32		
훈제	+4~+8	60	32		
캐비어	-2~-1	85	16		
바다가재, 게, 새우	0	100(얼림)	2	90~95	3~12
대합조개, 굴	0	100	2	90~95	10
<b>우유 및 유가공 식품</b>					
우유(방부제가 없음)	+1~+3	-	1		
크림( " )	+1~+3	-	1		
마가린	+1~+3	80	24	90	12
버터	+4~+6	80	8	85	9
아이스크림	-	-	-	85	10
치즈	+1~+6	65~75	40	(85)	(6)
달걀, 단기저장	+10~+12	85	6		
장기저장	-1~+1	90	24	-	14
빵	+10℃	보다 낮은면 않됨!	절대	85	6
<b>조리된 식품류</b>					
육류 (같은 것, 소금 에 절이지 않음)					2
소시지, 햄버그 등					4~6
피자					12~16
육류 (양념을 친 것)					18
수우프					18
즉석 식품 (TV-dinnes)					12

	냉장저장			냉동저장	
	온도 ℃	습도 %	최대저장 기간 주(week)	습도	최대저장 기간 달(month)
과일, 야채류					
오렌지					
감귤류	+1~+4				
포도	+5~+10	85~90	4~8	-	-
바나나 (익은 것)	0	85~90	4~16	-	-
사과	+12~+1	85~90	12~18	-	-
배	4	85~90	12~18	-	-
딸기 (설탕에 저린 것)	-1~+2	85~90	12~32	-	-
버찌	-1~+2	85	8~24	-	-
건포도	0	80~85			18
	0	80~85			
체리(cherries), 야채류					10~18
오이, 버섯					
완두콩(peas) 토마도 (익은 것)	+1~+4	85~95	1~2	-	-
아스파라거스, 시금치, 셀러드, 대황 (rhubarbs)	0	90~95	1~3	-	-
	0	90~95	2~4	-	-
당근	+10~+1	85	3~5	-	-
토마도 (푸른 것)	2	85	8~12	-	-
멜론	+1~+4	75	12~20	-	-
양파	0~+1	80~90	24	-	-
감자	+4~+10			-	12
냉동감자 (pre-cooked)				-	12
튀긴감자 (french fried potatpes)	0~10	60~70	32~50	-	-
호도					

(from Birger Jansson)

### 3. 지상과 지하의 식품저장 비교

## 가. 노르웨이의 지하냉동저장소

노르웨이 베르겐에 지하냉동창고는 1974년 지어졌는데 G.C. Rieber & Co. A/S 가 소유하고 있는 시설이다. 이 시설에 대한 보고서에서는 지상에 대한 유사건물과의 건설비요이 제시되어 있다. 이 예는 지질조건이 양호한 경우의 비교가 될 것이다. 저장실은 길이 57m, 폭 20m, 높이 10.8m로 저장 용적은 약 11,000m<sup>3</sup> 이며 출입터널의 길이는 12m 이다.

해당 시설은 경사 35도의 산 아래에서 안쪽으로 굴착되어 있으며, 기반암은 프리캠브리안 시대의 화강편마암으로 경암이다. 지질조건이 양호하여 공동의 천정과 벽은 암석에 노출되어 있고 지보는 록크볼트만으로 이루어졌다. 길이 3m의 그라우팅 볼트를 사용했는데 천정에는 305개 ( 5m<sup>2</sup>당 1개), 벽에는 40개의 볼트를 설치했다. 여러곳에서 물이 유입되었지만 적절히 대처를 했다.

### 1) 건설비용

건설에 소요된 비용을 Fig I-1 에 제시하였다. 그림 중의 비용에는 통로터널과 공동에 대한 굴착비와 모든 시설비가 포함되어 있다. 비용은 1975년 1월 1일의 불변가격으로 환율 1US\$ = 5.25NOR 를 적용한 값이다. 해당 시설과 유사한 지상창고의 건설비를 관심있게 비교한 결과는 다음의 Table I-2와 같다.

Table I -2. 노르웨이 Bergen 냉동지하창고와 유사 지장시설과의 건설비 비교

	m <sup>3</sup> 당 비용	유효면적 m <sup>3</sup> 당 비용	비 고
지하저장고	\$32	\$91	- 총비용: \$ 350,500- - 총용적: 11,000m <sup>3</sup> , 유효 용적 3850m <sup>3</sup> - 총용적 중 35%를 유효용 적으로 간주
지상저장고	\$62	\$124	- 총용적의 50%를 유효용 적으로 간주 - 토지비, 기초공사비는 포함하지 않았음

이 비교 결과를 보면, 단열재로 외부와 격리되는 지상창고의 건설비가 암석중의 지하창고보다 35% 정도 높다는 것을 알 수 있다. 이 비교에는 토지의 구입비와 기초공사를 위한 비용은 포함되지 않았다.

## 2) 에너지 소비

인건비, 자재비 등의 운영비는 지상과 지하가 같기 때문에 분석하지 않았다. 그러나 전력비는 서로 차이가 있어 자료를 축척하고 분석하였다. 45kw 의 냉각장치가 하루 18-20시간 가동된다. 5월에서 10월까지의 평균 외기 온도는 11℃이고 11월부터 4월까지의 평균 3℃이며, 연중 평균은 7℃이다. 이 전력비는 용적이 같은 지상창고의 50% 정도이다.

상기의 경우는 구체적인 하나의 실례이지만 노르웨이, 스웨덴, 미국에서 보고된 지하암반저장 경험들을 정리할 때, 초기의 냉각 이후에는

연중 요구되는 에너지가 재래식의 경우와 비교하여 30-50% 수준으로 알려져 있다. 저장고의 냉동기는 외기의 온도 영향을 받지 않기 때문에 부하의 변화가 없다. 그래서 그 용량은 지상의 경우에 비해 50-70% 정도로 줄일 수가 있다고 되어 있다. 또 스칸디나비아에서의 지하냉장저장은 지상에 비교하여 에너지의 소모는 50-75%, 전력소모는 75-80%라고 보고되고 있다. Table I-3은 노르웨이의 냉동저장소를 개략적으로 정리한 것이다.

US\$	%	구성내용	
86,700	25	COOLING MACHINERY	냉각설비
46,700	42	FLOOR, RAILS, RACKS, GATE, MACHINE ROOM, ELECTRO SANITARY	바닥, 레일, 적재차, 출입문, 기계실, 전기위생장치
25,500	7	ROCK SUPPORTING	지보
53,500	15	BLASTING, LOADING, TRANSPORT	굴착; 발파, 경석처리
38,100	11	MOB./DEMOB.	기타 간접비
<u>30,500</u>		VALUE ADD.TAX AND SALARIES ARE NOT INCLUDED	부가세와 간접 인건비는 제외

Fig I-1. 베르겐에 지하냉동창고 건설비의 구성

Table I -3. 노르웨이의 냉장창고

위치	소유자	폭×높이×길이 (m), 부피(m <sup>3</sup> )	암종	온도 (°C)	시공 연도	비고
Ekeberg Kjolelager, Oslo	Oslo Fryseri A/S	14×8×33 3,700	화강편마암	-25	1956	
Gjellerrasen, Oslo	Diplomis A/S	- 10,000	섬장암	-27	1967	
Hamar	Diplomis A/S	- 10,000	편마암	-22	1967	
Jordalen, Bergen	G.C. Reiber & Co. A/S	20×9×60 11,000	편마암	-30	1967	
Jordalen, Bergen	G.C. Reiber & Co. A/S	25×9×50 11,000	편마암	-30	1974	
Kastbrekks, Trondheim	L.B. Opheim	15×8.5×85 10,000	녹암 (greenstone)	-25	1978	
Brevik	Meierienes Fellesfabrikk A/S	불규칙 14,000	석회암	-25	1962	폐광 활용
Stathelle	Brunes Fryselager A/S	불규칙 20,000	석회암	-25	1978	"
Stathelle	Brunes Fryselager A/S	불규칙 30,000	석회암	-25	1982	"
노르웨이의 암반저장 총용량 = 115,000m <sup>3</sup>						

나. 국내의 모델

국내에서는 아직 지하냉동창고가 없어 그 경제성을 비교할 수 없다. 그러나 국내의 S건설에서 지상과 지하냉장창고의 경제성을 비교분석하

기 위한 자료가 있다. 표준모델은 5,000톤 규모의 지상 및 지하냉장창고이며 각각의 시설 규모를 비교하면 다음과 같다.

### 1) 공사비 비교

건축 및 토목 공사비에 냉동설비비와 기타 기계설비비, 전기공사비를 추가하여 총공사비를 구하면 Table I-4와 같다. 이 경우 지하냉장창고는 냉동과 기계 설비비에서 지상보다 유리하다. 총공사비는 지상의 94%로써 6%의 건설비 절감효과가 기대되는 것으로 계산되었다. 본 공사비는 표준 모델에 대해 여러 가지 조건을 가정하였다. 추정의 정확도는  $\pm 15\%$  정도이다. 지하공사는 현장의 지질조건에 따라 토목 공사비가 달라지는 것이 보통이다. 모델에 적용된 기반암은 우리나라의 보통암을 가정한 것이다.

Table I-4. 지상 및 지하 냉동창고의 총공사비 비교

구분		지상	지하	비고
시설용량	실저장용량	5,000 톤	5,000톤	관리실 및 사무실 제외
	총면적	1,770평	1,570평	
	총용적	40,824m <sup>3</sup>	49,573m <sup>3</sup>	
	유효용적을	30%	25%	
공사비	토목 및 건축	3,027	3,041	
	냉동설비비	720	490	
	기타설비비	605	608	
	전기설비비	303	243	
총합계		4,655	4,382	지하/지상; 94%
톤당 단가		0.931	0.876	

## 2) 투자비

총투자비의 결정 요인은 토지구입비이다. 우리나라에서는 냉동창고의 연간 운영비 중에서 토지용역비가 차지하는 비율은 15-20%에 달한다(한국농촌경제 연구원, 1989). 임야를 이용한 지하냉장창고는 이러한 토지비용에서 장점을 가진다. 토지가격은 입지에 따라 큰 차이가 있으므로, 일반적인 비교가 어렵다. 여기서는 경기도 수도권 일원을 대상으로 지상 및 지하냉장창고의 건설이 가능한 부지를 대상으로 가격조사를 하여 지상은 평당 150만원, 지하는 평당 30만원으로 결정하여 토지구입비를 계산하였다.

지상창고 대해서는 일반적인 건폐율인 50%를 적용하였다. 지하창고는 건폐율의 적용을 받지 않는다. 그러나 지하공동 주변에 편입이 불가피한 땅을 건물면적의 50%인 800평으로, 사무실, 주차장 등으로 필요한 지상부지를 500평으로 가정하여 총 1300평을 가장하였다. 지상창고의 부지는 대지로, 지하창고의 부지는 임야로 토지단가를 계산하였다. 계산된 총투자비를 비교하면 Table I-5와 같다. 토지가격을 고려한 총투자비는 지하냉장창고가 지상내동창고 보다 32% 유리한 것으로 계산되었다.

Table I -5. 토지가격을 고려한 총투자비 (단위: 백만원)

구 분	지 상	지 하	비 고
소요부지	건물면적 (1층): 982평 건폐율: 50% 소요부지: 2,000 평	건물면적: 1550평 건폐율: 100% 소요부지: 2,850평	지하의 경우, 추가부지 1,300평 계산
토지비 단가	1.5/평	0.3/평	수도권 기준
토지 구입비	3,000	855	
건설비	4,655	4,382	
합계	7,655	5,237	지하/지상=68%

< 에너지 절감효과 분석 >

지상냉동창고의 용량계산에서는 여름철의 최고온도, +33℃, 지하냉동창고의 운영에는 년중 평균온도, +12℃, 를 적용하고 연간 평균 열부하를 이용하여 전력의 사용량과 비용을 계산하였다. 이 결과 지하창고는 지상창고에 비하여 연간 총전력 사용량에서 34%, 총전력비용에서 37%의 절감효과가 나타났다. 비교를 위하여 적용한 저장 조건은 아래와 같다.

< 저장조건 >

- 저장온도 : -25℃ (RH 80%), 외기온도 +33℃
- 저장용량 : 5,000톤
- 입고량 : 용량의 2.5% (같은 양이 동시에 출고됨)
- 하 역 : 1단위 700kg Fork Lift (5kw) 사용

- 출이문 : 양방향 자동문, 1800W x 2400H, 공기커튼 설치
- 냉각방식 : 수냉식 직팽(直彭)방식
- 서리제거(Defrost) : 가열기(Heater)

### 3) 이집트의 곡물저장

지하식품저장소는 지질조건이 만족되면 건축비가 재래식의 지상에 비해 싸다. SWECO가 이집트 수에즈(Suez)에서의 적용가능성을 검토한 곡물의 암반저장의 경우 건설비가 20-30% 절감되는 것으로 보고하고 있다. 이 시설은 직경 20m, 깊이 50m의 수직형 사일로 12개로 구성되어 있다. 용량은 10만톤이고 시간당 천톤의 입하 능력을 갖고 있다. 곡물은 사일로의 위와 아래 쪽에 있는 두 개의 터널을 통해 컨베이어 벨트로 저장실에 분배된다. 시설은 보통암 속의 것으로 설계되고 발파로 굴착된다. 장비의 투입등 제반 조건이 무난할 겨우 굴착에 소요되는 기간은 18-20 개월, 총 건설기간은 22-24 개월로 추정되었다.

## 제 2 장 지하저장시설을 위한 지반특성 연구

### 제 1 절 암석과 암체의 성질

암석은 광물의 집합체로 정의되어진다. 암석의 성질은 구성 광물의 양에 따라 달라진다. 그리고 구성 광물의 크기, 모양, 배열 방향, 광물 사이의 결합력은 암석의 성질에 크다란 영향을 미친다. 암석은 광물로 구성되므로 불균질하고 이방성을 띄게 된다. 암석이 이방성을 띠는 것은 고려하고자하는 방향에 따라 암석의 성질이 달라지는 것을 뜻한다.

암석의 역학적인 성질을 고려할 때는 암석(rock)과 암체(rock mass)를 구분하는 것이 중요하다. 암체는 결합이 없는 암석 (intact rock), 절리, 여러가지 불연속면들로 구성되는 현장의 암석을 뜻한다.

#### 1. 밀도, 공극율, 탄성과 속도

보통 암석의 밀도는 2.5-3.2 이다. 다공성의 사암은 밀도가 낮고 반려암과 현무암은 밀도가 높다. 화강암의 밀도는 보통 2.65-2.7이다. 밀도는 암석의 응력 계산과 안정성 해석 등에 중요하다.

암석의 유효 공극율은 암석 전체의 부피에서 물로써 채워질 수 있는 부피의 백분율(%) 이다. 보통 공극율은 대단히 작다. 오래된 결정질 암석의 공극율은 1% 미만이다. 현장에 적용에서 그러한 암석들은 공극

이 없는 불투수성으로 간주한다. 퇴적암인 젊은 사암은 공극율이 30%를 넘을 수 있다. 석회암도 공극율이 높다. 석회암을 구성하는 주성분인 방해석은 물에 쉽게 용해된다. 그래서 방해석을 주광물로 하는 암석이 높은 압력의 물과 접촉하게 되면 공극율은 급속히 증가한다.

탄성과 속도는 암석 시편을 통해 측정되어 지는데 암질에 대한 일반적인 정보를 얻는데 사용된다. 탄성과 속도 측정은 비파괴 시험이기 때문에 이용된 시편은 분명한 영향을 미친다. 수분으로 포화가 되면 P-파의 속도가 완전건조된 시료에 비해 거의 두배가 되는 암석도 있다. 공극율이 높은 암석들은 P-파의 속도가 2,000-3,000 m/s 까지 낮아질 수 있지만 공극율이 낮고 완전히 포화된 결정질 암석들은 5,000-6,000 m/s 가 보통이다.

## 2. 암석의 강도 및 파괴기준

암석 공학적인 측면에서 암석의 강도, 탄성계수, 포아송비는 절대적으로 필요한 역학적인 성질이다. 가장 널리 적용되고 있는 암석의 강도 시험으로는 점하중강도, 단축압축강도, 삼축강도 시험이 있다.

### 가. 단축압축강도

국제적으로 단축압축강도 시험은 암석의 물성을 시험하는데 가장 널리 적용된다. 단축압축강도를 측정하는 과정은 다음과 같다.

- ① 암석 시험편을 유압으로 작용되는 시험기의 가압판 사이에 놓는

다.

② 파괴가 될 때까지 시험편의 축방향으로 가압한다.(Fig II-1의 Co)

③ 파괴시의 하중을 시험편의 가압 면적으로 나눈 값이 단축압축강도이다.

단축압축 강도 시험은 이처럼 간단하지만 시험편의 성형이 정확하지 않으면 실험오차가 많고 하중의 가압속도, 시료의 종횡비, 가압판 등이 실험결과에 영향을 미치기 때문에 많은 주의가 필요하다. 시험편은 파괴가 일어나는 시험편의 중심부에서 응력이 균일하게 작용하기 위해서 높이는 지경의 2.5배가 되도록 해야한다. 암석에 따라서 단축압축강도는 매우 다르다. 경암은 단축압축강도가 200 MPa 보다 큰 반면 풍화암은 불과 몇 MPa 밖에 되지 않는다.

영율(Young's Modulus)은 단축시험에서 구하는 응력과 변형을 간의 기울기이다(Fig II-1). 포아송비(Poisson's ratio;  $\nu$ )는 축방향에 대한 직경방향의 변형율의 비로 정의된다. 영율은 암석의 종류에 따라 다양하다. 보통 콘크리트는 영율이 약 25 GPa 정도이다. 암석의 포아송비는 0.10-0.25 사이에 있다.

#### 나. 삼축시험

삼축시험에서 시험편은 직경 방향으로 봉압을 받게 된다. 봉압은 시험편을 둘러싸고 있는 원통형의 고무 바깥에 작용시킨 유압이다. Fig II-2는 암석의 삼축시험에서 가장 널리 사용되는 Hoek의 삼축시험 장치이다.

봉압을 달리하면서 종축으로 가한 하중으로부터 각각의 파괴 강도를 구할 수 있다. 그러면  $\sigma_1/\sigma_3$ -다이아그램에서 파괴점들을 그릴 수 있다.  $\sigma_1$  은 최대주응력, 종축응력이고  $\sigma_3$  는 최소주응력, 봉압이다. 파괴점들을 연결하는 곡선은 실험대상 암석의 파괴기준이 된다.

#### 다. 점하중 강도

압축시험에는 보통 100톤 이상의 힘이 필요하지만 인장시험에는 5톤 정도의 힘이면 충분하다. 점하중 강도는 점하중을 가해 인장 파괴가 일어날 때 이 값으로 압축강도를 환산한 값이다. 점하중 시험기는 원추형의 가압판 끝에 뾰족한 구로 되어 있는 작은 시험장치이다. 무게는 15kg 보다 작아서 쉽게 휴대할 수 있다. 시험편은 시추편이 적당하나 불규칙한 암석의 덩어리에서도 가능하다. 점하중 강도는 엽리면을 기준하여 가압방향 따라 그 값이 달라진다.

점하중 강도 지수  $I_s$  는 Fig II-3과 같이 계산한다. 그림에서 직경이 커지면 점하중 강도는 작아지는 것을 알 수 있다. 그래서 보통 직경 50mm를 표준으로 한다. 경암에서는 직경 50mm의 시추 시험편에 대한 점하중 강도지수는 보통 5-20 MPa의 값을 갖는다. 풍화암에서는 1-2 MPa 의 낮은 값을 나타나는 경우가 많다.

#### 라. 암석에 대한 수분의 영향

암석 시험편의 모양 및 크기가 암석시험 결과에 영향을 미치듯이 시험편에 흡수된 수분도 시험결과에 큰 영향을 미친다. 대부분의 암석에서 흡수된 수분이 많으면 강도는 낮아진다. 공극율이 1% 미만인 암

석에 대해서도 수분을 조금만 흡수하면 강도가 저하하는 것을 분명하게 볼 수 있다. 수분의 흡수에 의한 강도의 저하는 물의 포화도가 25% 이하 범위에서 현저하게 나타난다. 현장의 기술자는 항상 최악의 상태를 가정해야 하므로 암석은 건조한 상태가 아니라 물이 포화된 상태에서 시험을 해야하는 경우가 많다. 이럴 경우에 암석시료를 실험실에서 오랫동안 방치를 하면 건조가 되는 수가 많으므로 이를 유의해야 한다.

#### 마. 응력-변형을 곡선

Fig II-1 은 이상적인 응력-변형을 곡선인데 강성(剛性)의 압축시험기를 사용하면 얻을 수 있는 곡선이다. 현장의 공학적인 측면에서 압축강도를 지나 파괴가 일어난 후에도 변형율이 높기는 하지만 여전히 비교적 높은 응력 아래에서도 시험편이 완전히 분해되지 않고 있는 것을 주목해야 한다. 이것은 파괴이후의 응력에서도 서서히 변형을 받아들이면 깨어진 암석이라도 상당한 지지력을 갖고 있다는 것을 의미한다. 이 현상은 지보(支保)를 논의할 때 매우 중요한 개념이다.

#### 바. 파괴기준

오랫동안 무결함 암석에 대하여 여러 가지의 파괴기준이 설정되어 왔다. 여기서는 그러한 암석의 파괴기준들을 자세히 논의하지는 않겠다. 그러나 점점 더 널리 수용되면서 일반화되어지고 있는 'Hoek & Brown의 파괴기준'을 언급하겠다. 이 실험은 삼축실험에 근거한 것이며 암석의 파괴와 연결된 주응력들 사이에 다음과 같은 경험식이 성립된다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2}$$

여기서,  $\sigma_1$  : 파괴시의 최대주응력

$\sigma_3$  : 시험편에 가해지는 최소 주응력

$\sigma_c$  : 무결함 암석의 단축압축강도

$m, s$  : 암석의 상태에 따른 상수들

$m, s$ 는 암석의 풍화도와 절리면들의 빈도수에 따라 달라지는 상수들이다. 무결함 암석은  $s=1$  이다.  $m$ 의 값은 보통 5-25 사이에 있다. 파괴기준은  $\sigma_1/\sigma_3$ -도식에 의해 Fig II-4 와 같이 그려진다.

### 3. 암체의 절리

현장에 있는 암체의 성질은 절리와 불연속면의 성질에 따라 크게 달라진다. 재료적인 관점에서 압축력과 전단력은 절리를 통해 전달되지만 인장력은 그렇지 않다. 암체의 거동을 이해하기 위해서는 기본적으로 절리를 이해해야만 한다.

#### 가. 절리의 종류와 모양

인장절리는 인장응력에 의해 형성된다. 예를 들면 뜨거운 암체가 식거나 침식에 의해 암석을 덮는 두꺼운 피복층이 제거되는 경우에는 인장응력이 발생하고 인장절리가 생긴다. 인장절리는 흔히 평면을 이루며 표면은 거칠다. 전단절리는 전단응력에 의해 형성된다. 지각에서의

전단응력은 지체력에 의해 발생한다. 전단절리는 흔히 부드러운 평면을 이룬다.

절리는 보통 평행을 이룬다. 평행한 여러개의 절리를 절리군이라고 한다. 여러개의 절리군은 하나의 절리 구조를 만든다. 층리나 엽리가 잘 발달한 암석에서는 하나의 주 절리군이 엽리와 층리면에 평행을 이루게 된다. 보통은 이에 수직되는 방향으로 또 다른 두 개의 절리군이 형성된다. 그러면 이 세 개의 절리군은 직육면체 모양의 암괴를 만들게 된다. 화강암이나 섬록암과 같은 큼직한 암석에서는 직육면체의 절리가 흔하게 발견된다. 용암류의 암석에서는 각기둥 이나 경사진 직육면체를 이루는 절리군을 볼 수 있다. 암체에는 이러한 규칙적인 절리군 외에 불규칙한 방향으로 여러개의 절리들이 분포하는데 이들을 불규칙한 절리라고 한다.

#### 나. 절리 매핑

암체의 특성은 일반적으로 야외에서 조사된다. 지질조사에서는 방향, 간격, 길이, 틈새, 거칠기 등과 같은 절리의 특성을 매핑해야 한다. 절리의 거칠기는 '평평하다', '거칠다' '매우 거칠다' 등과 같이 주관적이며 정량화되지 않은 방법으로 표현된다. 암질의 분류를 위해서는 조직적이고 정량화된 방법을 사용하는 것이 좋다. Q-분류법에서 절리의 거칠기를 구분하는 방법이 이러한 것의 한 예가 될 수 있다. 절리면의 방향은 주향과 경사로 기술되며 이를 측정하기 위해서는 경사계가 달린 나침판이 필요하다. 주향은 절리면이 수평면과 교차되는 선이다. 경사는 수평에 대한 절리면의 기울기이다. 경사의 방향도 지질에서 흔히 사용되는 용어이다.

절리의 조사결과는 조인트로제트, 스테레오그래픽 등의 방법으로 도식화될 수 있다. 조인트로제트는 Fig II-5 와 같이 그려지는데 주향은 뾰족한 장미잎 모양으로 간단하게 그려진다. 주향의 각도 차이가  $5-10^{\circ}$  사이에 있으면 같은 절리는 계산된다. 계산된 수는 동심원의 반경으로 표현된다. 조인트-로제트는 지하공동의 최적 방향을 결정하는데 간편하게 쓸 수 있는 방법이다. 조사를 한 절리의 수가 대단히 많을 때는 스테레오네트 같은 방법으로 이를 도시하면 더욱 편리하다.

#### 다. 절리의 전단 강도

절리면의 전단강도는 절리면의 마찰력과 절리면에 수직으로 작용하는 응력에 의해 결정된다. 절리면의 전단강도로 미끄러짐에 대한 절리면의 저항력을 계산할 수 있다. 마찰력의 크기는 절리면의 거칠기와 충전물의 성질에 따라 달라진다. 울퉁불퉁한 절리면에 전단이 일어나려면 암석 자체의 강도가 중요한 역할을 한다. 전단이 일어나는 동안 절리면의 불규칙함과 팽창으로 인해 거친 전단면에 작용하는 전단강도와 수직응력 사이에는 Fig II-6 과 같이 선형적인 관계가 성립하지 않는다.

절리면의 전단강도를 현장에서 직접할수 있으면 좋기는 하지만 비용이 많이 들기 때문에 특수한 경우가 아니면 현실적이지 않다. 절리의 전단강도를 측정하기 위하여 휴대용 장치를 포함하여 여러 가지의 시험장치들이 개발되어 왔다. 휴대용 시험기에서 전단강도를 측정할 수 있는 최대 면적은 대략  $100\text{cm}^2$  인데 이 시험 결과는 기본적인 마찰각 (basic friction angle) 을 의미할 뿐이며 따라서 현장의 절리면의 조건을 대표한다고 말하기는 어렵다. 절리면의 전단강도는 여러 가지 자료

를 종합하여 직접적이며 경험적인 방법으로 예측할 수도 있다 (Barton, 1974).

#### 라. 시험결과의 평가

자연 상태의 절리에 대한 시험결과는 흔히 Fig II-7 과 같이 전단 변위에 대응하는 전단응력을 좌표상에 연속으로 그려서 도시된다. 도식에서 최대의 강도 점을 지난 이후 이보다 작은 값의 잔류강도가 계속되는 현상을 주목해야 한다.

최대의 전단응력은 절리면의 울퉁불퉁한 면이 깨어지기 직전에 나타난다. 현장에서는 최대 전단응력을 넘어서는 파단이 일어나지 않도록 록크 볼트 등을 지보하여 절리의 최대강도가 유지될 수 있도록 해야한다.

#### 마. 연약대와 단층

연약대는 지하라면 깊이에 관계 없이 어디서나 관찰된다. 지질조사에서는 지표상의 구조선을 엄밀하게 살펴서 연약대의 종류를 밝혀내고 연약대가 터널이나 지하공동과 지하에서 만나는 위치를 파악하여야 한다. 일반적으로 연약대는 특별히 연약한 암석층이 중첩되어 이완이 되거나, 단층과 같이 지체력에 의해 형성되는 불연속의 파쇄대로 이루어진다. 대부분의 파쇄대는 전단력에 의하여 발생한다. 지역마다 작용하는 응력이 다르므로 발견되는 단층들은 발달 단계가 다르다. 그러나 터널을 굴착하다 보면 평행한 단층들은 특징이 같다는 것을 흔히 경험하게 된다.

## 바. 충전물질

연약대의 주된 내용물은 흔히 거친 암석 조각들이다. 파쇄대에서는 그 속으로 순환하는데 물에 의해서 다른 광물들이 파쇄대 속으로 운반되거나 본래 있던 광물이 변질되어서 다른 광물이 될 수도 있다. 파쇄대에 있는 장석은 물과 결합되어 점토광물로 변해간다. 점토광물은 일반적으로 강도가 약하고 smectites와 같은 점토는 물과 접촉하면 팽창하는 성질이 있다. 연약대에서 지보를 설계하는 경우에는 이 현상을 반드시 고려하여야 한다.

## 4. 암질분류

암질분류는 암석 내 공동의 지보 수단을 예측하는데 사용된다. 암석 분류법으로 Terzagi가 1946년 발표한 것이 처음이다. 주로 조인트의 발달 정도(registeration of the degree of jointing)에 근거하여 암질을 9 등급으로 구분하였는데 테르짜기 분류법은 철재로 지보를 할 경우에만 적용이 가능하다. 테르짜기의 방법은 미국과 같이 철재 지보를 하는 나라에서는 아직도 널리 적용되지만 노르웨이와 같이 철재 지보를 거의 하지 않는 나라에서는 상용화되질 못하고 있다. 그러나 국내의 경우는 풍화대가 발달하고 지하수가 유입되는 경우가 많아서 철재지보를 병행하는 수가 많다. 이런 때는 Terzagi의 암반분류가 부분적으로 적용이 될 수 있다.

Terzagi의 아반 분류법은 제한이 적용되어 있지만 일반적으로 암석의 지보 설계에 적용이 가능하려면 안정성에 영향을 미치는 모든 요건

들을 고려해야만 한다. 이를 위해서는 다음의 요인들이 중요하다.

- 역학적 혹은 물리적인 암석의 성질
- 조인트의 정도와 방향
- 조인트와 단층의 마찰에 관한 성질
- 단층과 연약대의 폭, 방향, 특징
- 암석의 응력
- 지하수의 상태

이와 더불어 지하 구조물의 크기와 용도도 고려되어야 한다. 그래서 암석의 지보를 평가하기 위하여 암석분류법을 일반화하려면 상당한 양의 자료가 축적되어 있어야 한다. 현재에는 RMR-분류법과 Q-분류법의 두 방법이 가장 널리 적용된다.

RMR-분류법과 Q-분류법은 몇 가지 유사점이 있고 거의 같은 시기인 1973-74년 에 발표되었다. Q-분류법은 노르웨이에서의 암석 터널과 지하 공동에 대한 경험을 바탕으로 구축된 방법인데 현재는 많은 나라에서 암질의 등급과 지보의 예측을 위하여 널리 적용되고 있다. 국내의 기반암은 노르웨이와 비슷한점이 많고 현재에도 Q-분류법이 주로 사용되고 있다. 그래서 식품저장공동을 위한 암석분류에도 이 Q-분류법을 적요하는 것이 좋으리라 생각된다. Q-분류법은 암체에 대한 터널의 암질 지수(Q-값)를 바탕으로 하고 있다. 이 지수의 값은 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

여기서: RQD = 암질 지수

$J_n$  = 조인트 균의 수

$J_r$  = 조인트의 거칠기

$J_a$  = 조인트의 풍화도

$J_w$  = 지하수의 상태

SRF = 응력 지수

윗 식의 3가지 항은 각각 다음의 값에 대한 대략적인 척도가 된다.

- ① 암괴의 크기 ( $RQD/J_n$ )
- ② 암괴 간의 전단력 ( $J_r/J_a$ )
- ③ 작용하는 실제 응력 ( $J_w/SRF$ )

각 변수들에 대한 값들은 참고문헌 (Barton. et. al., 1974)의 표로부터 구할 수 있다. RQD는 100% 를 10으로 환산하여 Q-값 계산에 그대로 사용된다.  $J_n$  값은 조인트가 거의 없는 견고한 암석에 대하여 0.5-1.0의 값을 갖고 파쇄된 암석은 최대값인 20을 갖는다. 그래서 암괴의 크기를 나타내는 값은 400 배의 차이를 갖는 범위에 있다 (100/0.5 에서 10/20 ).  $J_r$ 의 변수는 불연속적인 조인트에 대한 5에서 미끄러운 평면에 대한 0.5의 범위에서 값을 취하고,  $J_a$ 는 조인트가 서로 치밀하게 붙어 있고 사이의 충전물이 불투수성을 갖는 경우의 0.75에서 두껍고 연속적인 점토층을 충전물로 할 때의 20의 범위에서 값을 갖는다. 그래서 암괴 간의 전단력의 크기는 200배의 차이를 갖는 범위에 있다 (5/0.75 에서 0.5/20).  $J_w$ 는 암반이 완전히 건조할 때의 1.0, 특

이하에 물이 많이 나올 때는 0.05를 적용한다. SRF는 연약대와 암석의 응력에서 기인하는 문제를 기술하는데 0.5에서 20 사이의 값을 취한다. 그래서 '작용하는 실제 응력'에 대한 값은 200배의 차이를 갖는 범위에서 값이 변한다 (0.5/1에서 0.05/20). 그래서 Q-값은 최종적으로 가장 불량한 경우의 0.001에서 극히 좋은 경우의 1000의 사이에서 값을 갖게 된다. 그래서 암체는 암질에 따라 Fig II-8에서의 구분과 같이 9등급을 갖게 된다.

원래 Q-분류법은 공사가 완료된 200개의 터널과 지하 공동에서 수집된 자료를 근거하여 만들어진 것이다. 그래서 Q-값, 공동의 크기와 암석의 지보 사이의 경험적인 관계를 설정하였는데 그림 3.2에 제시된 바와 같이 구간에 따라 38개의 지보 방법이 설정되어 있다. 추천되는 지보 방법은 가장 유리한 경우(1-8의 경우)의 불규칙한 록볼트에서부터 가장 불리한 경우(38의 경우)에 철재빔으로 보강된 콘크리트 라이닝 등의 다양한 방법이 있다. 이러한 지보 방법에 대한 세부적인 내용은 참고 문헌의 표에 나와 있다(Barton. et. al., 1974).

Q-분류법은 암질과 더불어 공동의 크기와 안전율을 고려하고 있다. 공동의 크기와 안전율은 '대응하는 크기'라는 변수에 속해서 고려되어 있다. 변수 ESR(굴착 지보 비율)은 0.8에서 5.0의 값을 취하는데 이 값은 낙반에 대한 안전 수준을 고려한 값이다. 바톤은 ESR의 값에 대하여 수력 발전소의 경우에는 1.0, 접근 터널(access tunnel)과 압력 공동(surge chamber)에 대해서는 1.4, 수력 발전소의 도수로 터널에 대해서는 1.6의 값을 취할 것을 권고하고 있다.

Q-분류법은 1970년대 초기에 도입되었는데 그 이후로 암석의 지보에 대한 상당한 발전이 이루어져 왔다. 1970년대에 없었던 것으로 철침이 보강된 쇼트크리트가 대표적인 예이다. 이러한 최근의 발전을 반

영하기 위하여 Q-분류법은 상당한 수정을 가해졌다. 그래서 최근 10년 동안의 400개에 이르는 자료가 데이터베이스에 포함되었다. 상세하지만 다소 복잡한 지보 도표에 대한 보조 수단으로 Fig II-9 의 간이식 도표가 만들어졌다. 이 도표는 철침이 보강된 쇼트크리트와 같은 최근에 이루어진 암석 지보의 발전을 반영하고 있다.

Q-분류법이 주절리 방향에 대한 공동의 방향을 고려하고 있지 않다는 약점이 있다. 그러나 계산의 변수인  $J_n$ ,  $J_a$ 가 안정성에 가장 불리한 절리군에서 그 값을 취한다는 점을 고려하면 간접적으로 불연속면의 방향이 고려되었다고 할 수 있다. 이외에도 몇 가지의 약점이 없는 바는 아니지만 Q-분류법은 현재에 적용되고 있는 암반분류법 중에서 암질의 등급을 나누고 지보를 예측하는데 있어 가장 훌륭한 방법이라는 것에는 대부분이 동의를 하리라 생각한다. 그러나 Q-분류법도 경험에 의한 암석의 분류라고 하는 점에서 한계가 있음을 명심해야 한다. 그러므로 부분적으로 해석적인 방법 등을 수시로 병용하는 것이 필요하다.

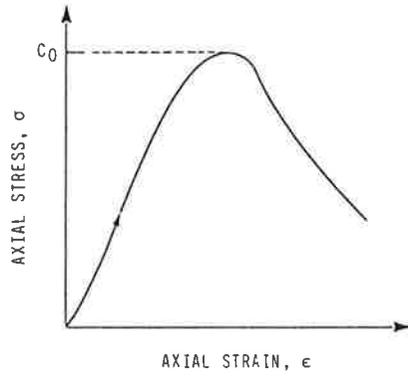


Fig II-1. 전과정 응력-변형률 곡선

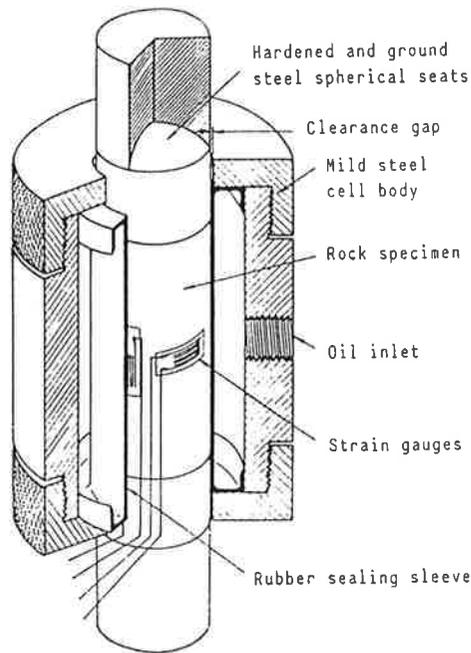


Fig II-2. Hoek과 Franklin에 의해 제작된 삼축시험장치의 개략도.  
원통형의 시험편에 대하여 최고 70 MPa 의 봉압을 가할 수 있다.

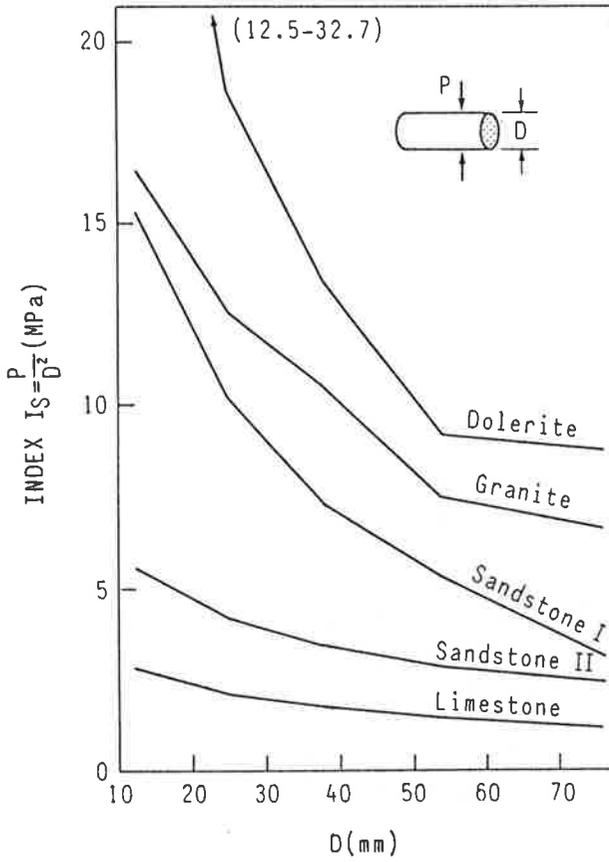


Fig II-3. 직경을 달리하면서 구한 점하중 강도지수  $I_s$ . (after Broch, 1987)

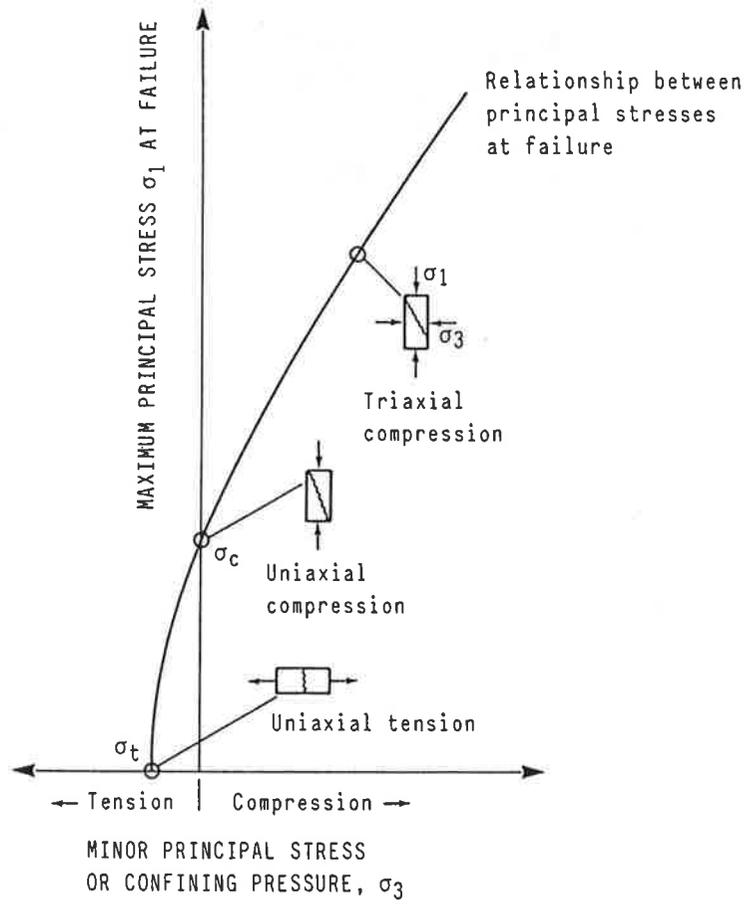


Fig II-4. 파괴 시의 무결합 암석에 대한 응력상태. (after Hoek & Brown, 1980)

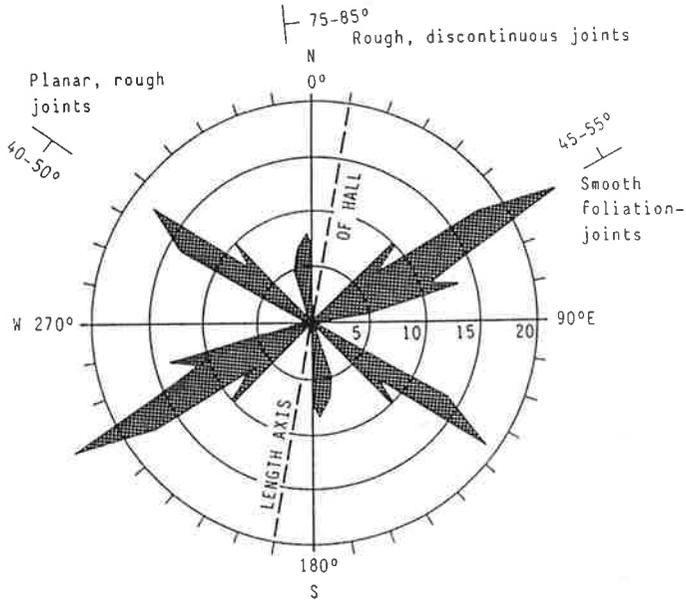


Fig II-5. 조인트-로제트

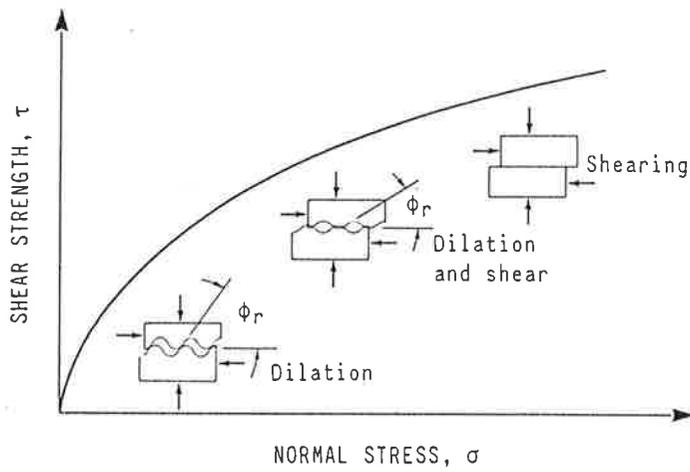


Fig II-6. 거친 절리면에서 전단강도와 수직응력 간의 비선형적인 관계

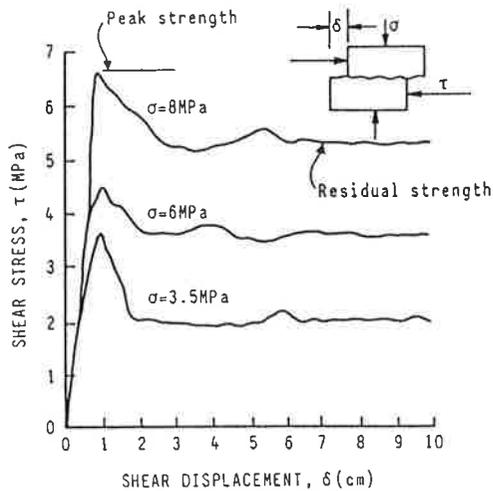


Fig II-7. 수직응력을 변화시킨 전단시험에서 전단변위의 함수로 표시되는 전단응력

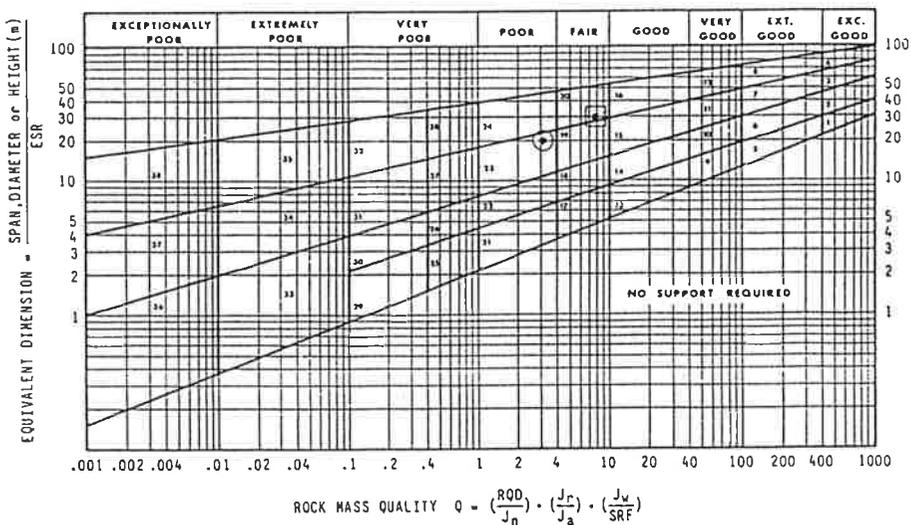


Fig II-8. Q-값에 따라 굴착된 공동에 적용되는 암석의 지보 방법에 대한 도표

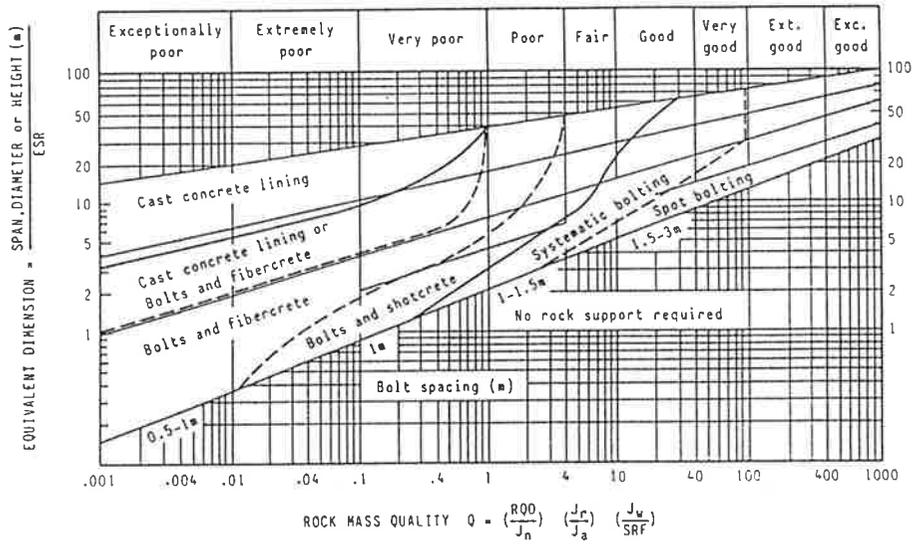


Fig II-9. Q-분류법에 따라 암석 지보를 예측하기 위한 간이 도표

## 제 2 절 암석의 열성질

### 1. 열전도율

암석의 열특성 특히 열전도율은 지하암반 냉동저장에 중요한 영향을 미친다. 지하에서의 열전달은 열전도율  $\lambda$ 에 의해 결정되지만 역으로 열확산은 열확산계수  $\alpha$ 에 의해 지배된다. 두 개의 변수는  $\alpha = \lambda / \rho C$ 의 관계식으로 연결된다. 여기서  $\rho$ 는 밀도,  $C$ 는 재료의 비열이다. 이 식에서 열전도율은 재료의 밀도에 비례하는 것을 알 수 있다. 암석의 열전도율은 구성광물, 밀도, 공극율, 흡수율에 따라서 달라진다. 열전도율,  $\lambda$ 은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$

여기서  $Q$ 는 단위 시간에 면적,  $A$ 를 통과하여 흐르는 열량이다.  $dT/dx$ 는  $A$ 면에 수직인 방향으로의 온도차이다. 단위 시간에 단위 면적을 통과하는 열량을 주변의 온도차이와 열전도율,  $\lambda$ 에 비례하는 것을 알 수 있다. 국제규정 SI에서 정의하는 열전도율의 단위는  $W/m^{\circ}C$  혹은  $W/m^{\circ}K$ 이다. 이 단위는 열전도에 대한 단위들과는 다음과 같이 서로 변환이 된다.

$$1 \text{ cal /cm sec } ^{\circ}C = 418.68 \text{ W/m}^{\circ}C, \quad 1 \text{ Btu/ft hr } ^{\circ}F = 1.731 \text{ W/m}^{\circ}C$$

열전도율은 암석에 따라 다른데 주로 암석의 조성 광물과 조직 등에 지배를 받게 된다. 열성질의 관점에서 가장 중요한 광물은 석영으로서 열전도율은 약 8 W/mK 이다. 장석, 운모, 방해석의 열전도율은 약 2.0-3.0 W/mK 로 가장 그 값이 낮은 광물에 속한다. Table II-1 은 대표적인 여러 광물들의 열전도율이다. 암석의 광물의 집합체이므로 열전도율은 조성광물의 열전율과 조성비에 의해 대략적인 계산이 가능하다. 주요 암석들에 대한 열전도율은 Table II-2 와 같은데 열전도율이 낮은 운모편암이나 석회암이 냉동저장에 가장 좋은 조건이 된다.

Table II-1. 여러 광물들의 열전도율

광 물	밀 도 (g/cm <sup>3</sup> )	열전도율 (mcal/cm sec °C)	산 지
Quartz	2.647	18.37	Jessievillie, Arkansas
	2.655	17.23	Magnet Cove, Arkansas
Olivines	3.328	12.09	New Zealand
	3.312	12.17	Hamilton, Washington
Zircon	4.633	10.85	Australia
Monticellite	2.789	6.33	Crestmore, California
Pyroxene	3.304	11.85	Webster, North California
	3.272	10.34	Kragero, Norway
Muscovite	2.834	5.96	India
	2.851	5.38	Poland, Maine
Biotite	2.886	5.59	North Carolina
	3.075	4.06	Ontario, Canada
Talc	2.820	16.72	Quebec, Canada
	2.804	12.42	
Serpentine	2.601	5.58	Cornewll, England
Feldspar	2.588	5.90	Ontario, Canada
	2.583	5.53	Goodspring Nevada
	2.573	3.95	Tooele Utah
Plagioclase	2.606	5.53	Amelia, Virginia
	2.642	4.73	Hawk, North Carolina
Hematite	5.143	26.95	Itabira, Brazil
Augite	3.275	9.13	Ontario, Canada
Hornblende	3.254	6.07	
Pyrite	4.915	45.89	Rico, Colorado
Calcite	2.721	8.58	Chihuahua, Mexico
Magnesite	2.993	13.94	Bushveldy, Transvaal
Dolomite	2.875	13.16	-
Aragonite	2.827	5.35	Somerset, England
Rhodochrosite	3.584	7.31	Catamarca, Argentina
Siderite	3.811	7.18	Roxbury, Connecticut
Griphite	3.330	2.77	Keystone, South Dakota
Fluorite	3.186	22.72	Rosiclare, Illinois
Monazite	5.100	2.62	San Miguel, New Mexico

Table II-2. 주요 암석의 열전도율 (단위: W/m°C)

규암	화강암	석회암	백운암	운모편암	활석	방해석	자철석
7.0~8.0	3.5~6.0	2.4~3.0	3.0-5.0	2.0~2.5	1.2	2.0~3.0	5.0

열전도율은 일반적으로 공극이 증가하면 감소한다. 이는 공극내의 공기나 물 등의 액체 보다 물체의 고체성분이 열을 더 잘 전달하기 때문이다. Table II-3 은 석회암을 비롯하여 활석, 다철석에 대하여 건조와 흡수시료에 대하여 열전도율을 측정한 결과이다. 건조시료는 공극이 공기로 차 있는 경우이고 흡수시료는 공극이 물로 차 있는 경우이다. 공기의 열전도율은 약 0.025 W/m°C인데 40°C 물의 열전도율은 0.63 W/m°C으로 이보다 약 25배가 크다. 그러므로 대부분의 경우 공극이 공기로 차있는 경우가 물로 차있는 경우보다 열전도율이 작다. 석회암에서 공극이 열전도율에 영향을 미치는 것은 분명하다. 이런 영향은 활석에서 보다 분명하다. 활석의 열전도율은 석회암의 절반에도 미치지 못하는데 이는 활석이 갖는 큰 공극을 때문이다. Fig II-10 은 건조한 석회암에서 공극율과 열전도율과의 관계를 보여준다.

Table II-3. 석회암류의 열전도율

시료 번호	암 종	공극의 체적* (mm <sup>3</sup> /g)	열전도율 (W/m°C, 적용온도40.5°C)	
			건조	흡수
1	Iceland Spar Calcite	0	3.2**	-
2	Translucent calcite spar	0.4	3.1**	-
3	Limestone	4	3.0	3.1
4	Limestone	17	2.9	2.9
5	Limestone	38	2.5	2.9
6	Limestone	53	2.4	2.9
7	chalk	216	1.2	1.7
8	Dolomite	7	5.1	5.5
9	Dolomite	31	3.1	4.2
10	Magnesite	14	5.0	5.1

\* 측정계기는 수은 공극계임

\*\* {1014} 면에 수직인 방향으로 측정된 것임

## 2. 열이방성

광물은 결정의 방향에 따라 이방성을 띤다. 암석도 구성광물 및 기원에 따라 이방성을 띄는 경우가 많다. 따라서 열전도율도 측정의 방향에 따라 달라지는 수가 많다. Table II-4 에서와 같이 Iceland Spar 방해석은 이방성의 단결정체로 시편의 방향에 따라 열전도율이 다르다. 여기서의 값은 결정면 {1014} 면에 수직인 방향의 값이다. Birch와 Clark (1940)은 방해석에서 100 의 온도에서 열전도율을 다음과 같이

구하였다.

실험온도인 40.5°C에서 자료들의 값을 내삽하면 interpolation C-축에 수직인 방향으로 3.15 W/m°C 수평한 방향으로 3.6 W/m°C의 열전도율을 구할 수 있다. C-축과  $\theta$ 의 각을 이루는 임의의 방향에 대한 열전도율은 다음과 같다.

$$\lambda_{\theta} = \lambda_{\perp} \sin^2 \theta + \lambda_{//} \cos^2 \theta$$

다결정 방해석의 열전도율은 40.5°C에서 3.2 Wm<sup>-1</sup>C<sup>-1</sup>을 넘지 못한다. 방해석질 대리석 Calcite marble에서 예외적인 경우가 있었는데 열전도가 측정된 우세한 결정의 방향 appreciable preferred orientation 때문에 열전도율의 차이가 생겼는데 이 경우도 그 값은 방해석에서 최대치를 보이는 C-축과 평행한 방향의 값을 넘지는 못한다.

Table II-4. Iceland Spar 방해석의 결정 방향에 따른 열전도율

	$\lambda_{//}$ to optic or C-axis, W/m°C	$\lambda_{\perp}$ to optic or C-axis, W/m°C
0°C	4.0	3.5
100°C	3.0	2.7

### 3. 열팽창

암석에 열이 작용하면 열응력이 발생하고 열팽창이 일어난다. 열팽창 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_v = \frac{3 \Delta L}{L_0 \Delta T}$$

여기서  $\Delta L$ 은 처음의 길이  $L_0$ 에서 증가한 길이이고  $\Delta T$ 는 주어진 온도에서 증가한 온도이다. 열팽창 계수는 광물에 따라 다르다. 암석은 광물의 집합체이므로 암석의 열팽창은 암석을 구성하는 광물의 결정들로부터 대략적인 계산이 가능하다. 상온과 대기압의 조건아래서는 다음의 식이 적용된다.

$$\alpha_v = \frac{\sum \alpha_i K_i V_i}{\sum K_i V_i}$$

여기서 아랫첨자  $i$ 는 구성 광물을 의미한다

가열 속도가 높으면 열팽창은 대단히 높은 값을 나타낸다. 이 때는 가열에 의해 암석면에 미소한 균열이 발생하기 때문이다. 열팽창을 정확하게 측정하려면 가열 속도가 분당  $2^\circ\text{C}$ 보다 작아야 한다. 암석은 열피로를 받지만 온도가  $250^\circ\text{C}$ 보다 낮으면 그 효과는 거의 무시할 수 있다. 이 범위에서는 열피로에 의해 영구변형이 발생하지 않는다. 그러므로 식품저장용 공동에서는 열팽창에 의한 피로현상은 고려하지 않아도 무방하다.

석영의 열팽창 계수는 약  $3 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 로 다른 광물보다 높다. 방해석의 열팽창 계수는  $1.5 \times 10^{-5}$ 이다. 석영은 암석을 구성하는 가장 중요한 조암 광물이므로 암석의 열성질을 고려할 때는 석영의 조성비를 가장 중요하게 고려할 수 밖에 없다.

#### 4. 열전도율 측정장치

열전도의 측정은 매우 정밀해야하기 때문에 몇몇의 특수한 시설을 갖춘 곳이 아니면 측정을 하기가 쉽지 않다. 열전도율 측정장치는 Fig II-11 과 같다. 이 장치는 King(1979)이 설계하여 발표한 것이다. 이 장치를 사용하면 얼기 전과 얼은 후의 암석과 흙의 시료에 대한 열전도율을 측정할 수 있다. 시료의 단면에서 열의 흐름이 작고 온도 변화가 작아도 측정이 가능하다. 구성 장치들은 일직선 상의 놓여져 원기둥 모양으로 구성되고 각 부분에서 안정성이 매우 높은 열저항기(thermistors) 각 구간의 온도를 측정한다. 열저항기의 안정성을 검증하기 위해 시험단계마다 시험장치의 각 구간의 온도를 열저항기로 측정하고 전체의 온도를 같도록 유지하면서 이들을 서로 비교한다. 열저항기의 저항을 측정장치는 휘트톤 브리지(wheatstone bridge)로 구성된다.

암석과 흙의 시료들은 하중장치 내에 설치되어 일정한 응력을 받도록 되어 있다. 층으로 나뉘어진 막대 모양의 정치는 직경이 3.18cm 이고 위로부터 퍼시펙스(perspex)로 된 실린더 모양의 가압판, 황동의 가열기, 실리카를 녹여 만든 온도기준판, 황동의 상부판, 시료, 황동의 하부판으로 이루어진다. 공극이 액체로 차 있는 시료 내에서 열의 대류 전달이 일어나는데 이를 가능한한 억제하기 위해서는 시료위에 가열기를 놓은 것이 좋다. 시료에 대한 가압은 0.7MPa 이다. 시험 중에는 가열기에는 0.35W의 열을 일정하게 유지한다.

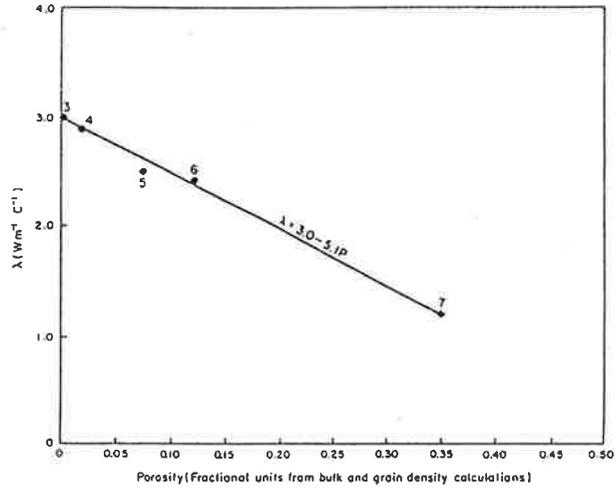


Fig II-10. 건조한 석회암에서 공극율과 열전도율과의 관계

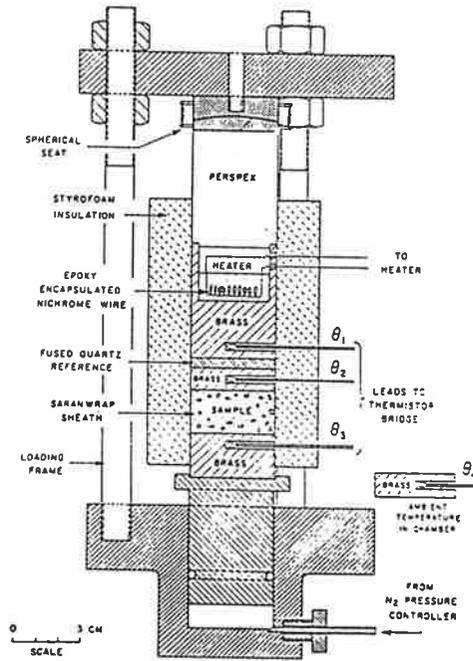


Fig II-11. 열전도율 측정장치

### 제 3 절 암반의 지하수

터널이나 지하공동으로 유입되는 지하수는 공동의 안정성을 해친다. 특히 파쇄대나 연약대에는 팽창성의 점토가 많고 이 점토들은 물과 접촉하면 부피가 팽창하면서 천정이나 벽면의 붕락을 일으킨다. 유입수는 지하의 작업 조건에 큰 영향을 미친다. 유입수가 지나치게 많으면 시공에 지장을 주어 공기(工期)가 그만큼 늦어지는 수가 많다. 식품저장에서는 냉동저장의 경우에는 지하수의 유입이 큰 문제가 아니지만 결빙에 필요한 잠열로 인해 초기냉각이 길어진다. 냉장저장에서는 습도의 조절이 중요하므로 지하수의 유입을 허용하면 안된다. 이럴 경우는 적절히 그라우팅을 하거나 배수관을 설치하여 유입수를 외부로 배수하여야 한다. 암체는 지표면에 가까울수록 절리가 많이 발달하고 절리의 틈새가 넓어지는 경향이 있다. 그러나 지압이 크고 지하의 깊은 곳에 위치한 터널이나 공동에서도 지하수가 심각할 정도로 유입되는 경우가 있다.

일반적으로 지하굴착에서 유입수로 일어나는 문제는 다음과 같다.

- 1) 천공이 어려워져서 작업 조건이 악화된다. 특히 장약이 어려워진다.
- 2) 터널이 경사를 이루고 있으면 별도의 양수비가 필요하다.
- 3) 터널 안의 도로 사정이 악화된다. 극단적인 경우에는 도로에 깔린 골재들이 씻겨나갈 수 있다.
- 4) 암석 강도의 약화로 안정성이 저하된다. 물의 영향으로 노출된 벽면의 풍화가 가속된다.
- 5) 연약대를 구성하는 물질이 녹아들거나 씻겨나가서 흔히 안정성이 저하된다.

- 6) 틈새에서 나오는 수압은 때때로 중대한 안정성의 문제를 일으킨다.
- 7) 다공질의 연약한 사암이나 파쇄대가 물과 결합하면 굴착 조건이 극도로 어려워질 수 있다.
- 8) 지하수면이 낮아지면 지상에서 지반의 안전 문제가 일어날 수 있다.

## 1. 투수율과 투수계수

암석에는 언제나 공극이 존재하지만 물이 흐르는 공극 사이의 통로는 거의 없다. 그래서 절리가 없는 암석의 투수도는 매우 낮다. 투수도 (K)는 지하수의 누수 성질에 가장 중요한 변수이며 다아시(Darcy) 식에서의 비례상수로 표현된다.

$$V = K \cdot i \quad (3.1)$$

여기서, V=유속 ( $m^3/(s \cdot m^2)=m/s$ ), i= hydraulic gradient

물의 투수도의 단위는 m/s 이고 그 값은 암석 및 유체의 성질에 따라 다르다. 투수율의 크기는 암석의 성질에 따라 결정되는데 유체의 성질과는 관계가 없다. 그래서 암체에서 누수의 성질을 지배하는 것은 절리 등의 불연속면의 투수율이다. 투수율과 투수도의 관계는 다음과 같이 정의된다.

$$K = k \cdot \mu / (\rho \cdot g) \quad (3.2)$$

여기서, k = 투수율

$\mu$  = 유체의 동적 점성계수: 순수한 10°C의 물에서는  $9.81 \cdot 10^{-10}$  N/(m · s)

$\rho$  = 유체의 밀도

$g$  = 중력 가속도 (9.81 m/s<sup>2</sup>)

### 가. 한 개의 절리에 대한 투수도

절리를 따라 흐르는 유체는 많은 과학자들에 의해 연구되어 왔다. 이 연구들을 종합하면 절리의 틈새 넓이가 유속에 가장 많이 영향을 끼친다. 그래서 완만한 평면의 절리군에서 유체의 투수도는 다음과 같은 루이스(Louis)의 식에 의해 주어진다. (Louis, C., 1969)

$$k = \frac{g \cdot e^3}{12v \cdot b} \quad (3.3)$$

여기서,  $e$  = 절리의 틈새 넓이

$b$  = 절리 사이의 간격

$v$  = 운동 점성계수 : 20°C의 순수한 물에 대해  $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$

루이스의 식에서 절리의 틈새 넓이가 2배가 되면 유속은 8배가 되는 것을 알 수 있다. 그러나 루이스나 다르시의 식은 평면흐름(laminar flow)의 조건에 적용되며 루이스의 식은 절리모양이 단순히 평행하는 평면으로 구성된다고 가정한 것이다. 실제로 대부분의 절리들은 거칠고 충전물이 있기 때문에 현장 암체에서의 유체는 불규칙하고 굴곡이

있는 평면을 따라 흐르게 된다.

#### 나. 암체의 투수도

암체에서의 지하수 투수도는 주로 절리의 정도, 성질 등에 좌우되며 그래서 Fig II-12 와 같이 대단히 다양한 값을 가진다. Fig II-12 를 보면 절리가 발달한 화강암이나 변성암들은 깨끗한 모래와 비슷한 값을 가질 수 있지만 절리가 없는 경우에는 해양점토보다 낮은 값을 가질 수 있다. 암석은 투수도에 있어서 절리로 인해 이방성을 지닌다. 층리를 갖은 암체에서는 층리와 평행한 방향의 투수도는 층리에 수직인 비해 1.5-2.0 배가 높다. 깊이에 따라 절리의 틈새가 줄어들고 간격이 넓어지므로 지하로 내려갈수록 투수도는 일반적으로 감소한다.

## 2. 유입수의 예측

지하 굴착에서 유입수가 들어올 수 있는 지점과 유입수의 양을 예측하기는 어렵다. 투수시험에서 필요한 정보를 얻거나 비저항 탐사법을 적용하여 가능한 유입수를 평가할 수 있다. 그러나 시험의 결과를 실제로 적용할 때는 크기효과(scale effect)를 적용하여야 하는데 이 크기효과를 결정하는 것이 쉽지 않다. 누수량을 예측하기 위해서는 이론적인 계산, 수치해석적인 모델링 등의 두가지 방법이 이용된다.

#### 가. 기본적인 이론을 적용한 유체 흐름의 계산

유체의 흐름을 이론적으로 계산하기 위하여 오랫동안 여러 가지 방법이 제시되어 왔다. 가능한 누수를 계산하기 위해서는 Tokheim 과 Janbu 가 제안한 다음의 식을 적용할 수 있다.

$$Q_w = \frac{2\pi \cdot K \cdot L \cdot p}{\mu_w \cdot G} \quad (3.4)$$

여기서,  $Q_w$  = 유입율,  $m^3/s$

$K$  = 비투수율,  $m^2$

$L$  = 터널이나 공동의 길이,  $m$

$p$  = 포텐셜; 수두,  $Pa$

$\mu_w$  = 물의 동적 점성도,  $kg/(m.s)$

$G$  = 형상 계수

형상계수( $G$ )는 터널이나 공동의 모양과 지하수가 흐르는 모양에 따라 결정되는데 다음의 식으로 주어진다.

$$G = \ln \frac{(2D-r)(L+2r)}{r[L+2(2D-r)]} \quad (3.5)$$

여기서,  $D$  = 공동의 길이 방향의 축과 지하수면 사이의 거리

$r$  = 굴착 표면적과 똑 같은 표면적을 갖는 원기둥의 반경  
(이상적인 모양임)

$L$  = 지하공동의 길이

지하수 유입식처럼 이 식을 적용하기 위해서는 투수율에 대한 정보가 필요하다. 믿을 수 있는 입력치를 얻기 위해서는 시추공에서 투수시험을 해야한다. 이 식을 적용할 때 불확실한 것은 형상계수(G)이다. 암체에서는 하나의 절리군이 전체 지하수의 흐름을 지배하는 경우가 흔하다. 이방성으로 인한 가능한 오차를 보상하기 위해 형상계수 G를 평가할 때는 항상  $L \gg r$ 을 적용하여야 한다.

#### 나. 수치해석적 모델

수치해석적 모델이 암체에서의 지하수의 흐름을 해석하는데 사용될 수 있다. 보통 유한요소와 유한차분 모델이 적용된다. 실제 구간을 그물 모양의 격자로 나누어, 주어진 초기값에서 반복 계산을 하여 각 절점에서의 근사해를 얻는 것이 유한차분 해석의 원리이다. 여기에 적용되는 수학은 비교적 간단하며 계산을 위해서 PC를 이용하면 된다.

### 3. 현장 투수시험

현장에서 투수시험을 하는 주된 이유는 지하수의 유입과 누수를 평가하는데 필요한 자료를 얻기 위해서다. 이 자료들은 지수(止水)를 위한 그라우팅의 소요량을 계산하는 데도 사용된다. 현장 투수시험은 루전 시험법 (Lugeon test), 수압 측정법, 유입수 측정법 등이 적용된다.

#### 가. 루전 시험법

루전 시험에서는 이정한 구간의 시추공 속으로 압력수를 집어넣고 이 물의 유실량을 측정하게 된다. Fig II-13 에서 처럼 구멍의 양쪽을 고무마개로 막아 시험을 하거나 아랫쪽 고무마개 밑에 있는 나머지 구멍을 사용할 수도 있다. 고무마개의 위치를 단계적으로 옮기면서 모든 시추공에 대하여 차례로 투수시험을 한다. 보통 3m의 시추공 구간이 한 측정 단위길이가 되는데 이 구간 속에 지하수의 압력보다 1 MPa 정도로 더 크게 압력수를 집어 넣고 그 압력을 일정하게 한다. 측정 구간 속의 압력은 시추공의 입구에서 물 호스에 연결된 압력측정 장치로 조절된다. 5분 동안에 발생한 지하수의 유실량을 유량계로 측정한다.

1 Lugeon (1 L)의 단위는 1 MPa 의 과압에서 1m 당 1분 동안의 손실 유량으로 정의된다. Lugeon 값과 지하수의 투수도 사이에는 일정한 관계가 있다. 등방성의 암석 조건을 가정할 때 하나의 시추공에서 얻은 결과를 근거하여 지하수 투수도(K)에 대한 근사값은 다음의 식에 의해 계산된다.

$$K = \frac{1.4q}{L \cdot H_c} \quad (3.6)$$

여기서,  $q$  = 일정한 압력을 유지하기 위한 양수율

$L$  = 시험 구간의 길이

$H_c$  = 과압력 (일정한 수두)

이 식에 의하면 1L의 물 손실량은 지하수 투수도  $K=2.3 \cdot 10^{-7}$  m/s 에 대응한다. 그러나 이 근사법은 아주 이상적인 조건을 가정한 것이다. 복잡한 조건에서는 더욱 정확한 수치가 필요하며 이를 위해서는 정

밀한 분석을 해야만 한다.

#### 나. 수압 측정법

투수도가 높을 때는 루전 시험에서와 같이 시추공의 일정 구간을 막고 압력계를 호스에 부착하여 단순하게 수압을 측정하면 된다. 투수도가 낮은 암체에서는 시추공의 구간에 압력수를 넣고 시간의 경과에 따른 압력의 하강을 측정하여 지하수의 수압을 측정하게 된다.

#### 다. 유입수 측정법

물의 유입이 문제가 되는 공동의 굴착에서는 선진 천공을 할 때가 있다. 그라우팅이 필요한가를 결정할 때는 천공에서 수집되는 자료를 근거한다. 때로는 선진 천공 구멍에서 루전 시험을 하고 이 결과로부터 그라우팅에 대한 결정을 내리기도 한다. 그러나 대부분은 구멍으로 부터 흘러 나오는 지하수의 양을 측정하게 되고 이 양이 일정한도를 넘어 어떤 그라우팅을 하게 된다.

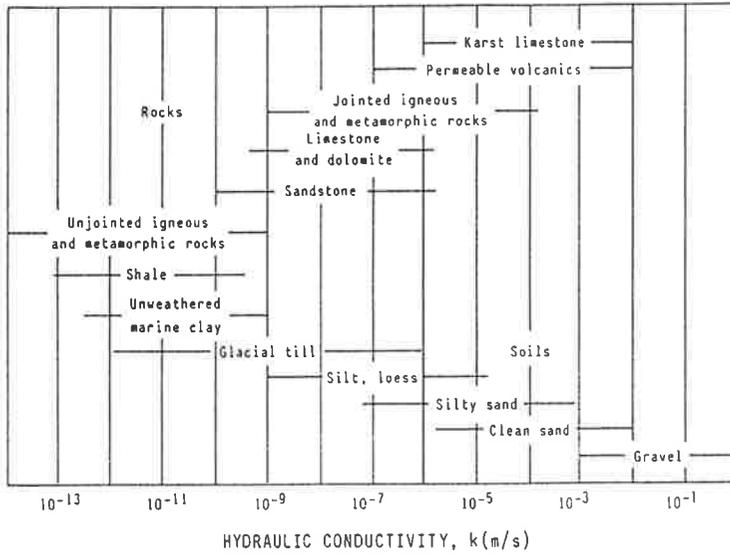


Fig II-12. 여러 종류의 암석과 토양에서 대표적인 지하수의 투수도

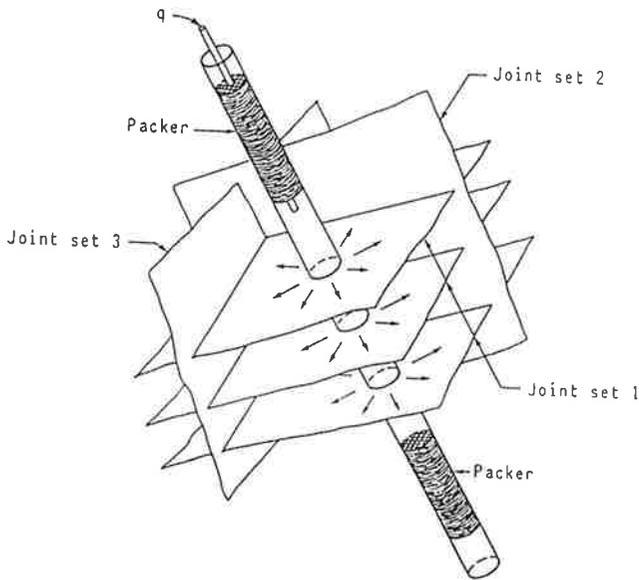


Fig II-13. 루전 투수 시험의 원리

## 제 4 절 암반공동에서 열전달

지하암반공동에서는 암반의 초기 온도, 저장고의 온도, 암반 내부의 열전도, 공동 벽면과 지표면에서 공기와의 접촉에 의한 표면전도에 따라 공동의 각지점 간에 온도차이가 발생하고 이에 따라 열유동이 일어난다. 지하 냉동저장고의 가동 초기에는 주변의 큰 온도 차이로 인해 열유동이 활발하지만 냉각이 진행되어가면서 정상류의 상태로 안정하게 된다.

### 1. 기본개념

#### 가. 열저항

지하냉동저장소 벽면에서의 정상류의 열전달은 다음과 같이 정의되어지는 열저항에 의하여 정의된다.

$$R_r = \frac{T_r - T_*}{q_r} \quad (6.1)$$

$R_r$  : 반경  $r$ 인 등온면에서의 열 저항

$T_r$  : 등온면에서의 온도

$T_*$  : 기준 암석 온도

$q_r$  : 등온면을 지나는 比열유동, specific thermal flow

## 나. 열전도식

열전도식은 Fourier의 식에 의한다.

$$q_i = -\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (4.2)$$

여기서  $q_i$  는  $i$  방향으로의 단위 면적당 열 유동량 ( $w/m^2$ ) 이며,  $\lambda_{ij}$  는 열전도계수 텐서 ( $w/m^\circ C$ ) 이고  $T$ 는 온도이다. 열유동은 매질 자체에 축적되며 매질의 온도 변화를 유발하게 되는데, 온도의 변화와 열 유동량과의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_{net}}{C_p} m = \frac{1}{C_p \rho} \left\{ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right\} \quad (4.3)$$

여기서  $Q_{net}$  는 매질로 유입되는 열량이며  $C_p$ 는 매질의 비열 ( $J/kg^\circ C$ ) ,  $m$ 은 매질의 질량( $kg$ )이다. 이 두식이 전도에 의한 열유동의 기본식이 된다. 상기 두식을 2차원 열전도 문제에 적용하기 위하여 합치면 아래 식이 된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_p \rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) \right\} \quad (4.4)$$

이 식을 열확산 방정식 (diffusion equation) 이라 한다.

만일 매질의 열전도가 등방성이라면  $\lambda_x = \lambda_y = \lambda$  로 되어 (4.4)식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_p \rho} \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right\} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right\} \quad (4.5)$$

$\alpha$ 는 열확산 계수 (thermal diffusivity)라 하여 ( $m^2/sec$ )의 차원을 갖게 되는데 이는 매질의 열전도 속도를 나타내는 척도가 된다.

#### 다. 냉동저장소 벽면의 온도분포

지하냉동저장소 벽면에 대한 온도분포에 따라 열저항에 관한 식은 매우 간단한 모양으로 유도된다.

$$R_r = F \frac{r}{\lambda} \quad (4.6)$$

$r$  : 열저항이 고려되는 등온면에서의 반경

$\lambda$  : 암석의 열전도율

$F$  : 열저항에 대한 수정계수

수정계수  $F$  는 공동의 모양과 지형에 따라 변하는 값으로 각각의

열저장의 공동에 대하여 구해져야하는 값이다. 저장공동의 주변이 여러 암석으로 구성되어 있으면 전체의 열저항은 각각의 암종에서의 열저항을 고려하여 다음과 같이 계산되어 진다.

## 2. 구형(球形) 공동에서의 열전달

가. 깊은 곳에 위치하는 구형의 공동에 대해서:

매질 내부에서 온도가 변하지 않으면서 일정한 상태로 열이 전달되면 경우를 정상류의 열유동이 라고 한다. 무한한 암체 내에 반경  $r$  인 원통형의 지하냉동저장소가 있고, 정상류의 열전달 조건에서 원통형의 등온면을 지나는 열유동이  $Q$ 로 일정하다고 가정하자. 그러면  $q_r$  과  $Q$  사이에 다음과 같은 식이 성립한다.

$$4\pi r^2 q_r = Q \quad (4.7)$$

이 식에서 比 열유동  $q_r$  는 반경  $r^2$  에 반비례함을 알 수 있다. Fourier's의 열전도 법칙에서 암석을 열등방체로 가정을 하면;

$$q_r = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (4.8)$$

(3), (4)식에서 다음의 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{Q}{4\pi\lambda r^2} \quad (4.9)$$

양변을 적분하면, 깊은 곳에 위치하는 구형의 공동에서의 열 분포는 다음과 같이 된다 (Fig II-14).

$$T_r - T_{r'} = -\frac{Q}{4\pi\lambda} \left( \frac{1}{r'} - \frac{1}{r} \right) \quad (4.10)$$

여기에서  $r' \rightarrow \infty$ ,  $T_{r'} \rightarrow T_*$  의 값을 취하게 하고  $\theta_{r*} = T_r - T_*$  로 놓으면 다음의 식을 얻는다.

$$\theta_{r*} = \frac{Q}{4\pi\lambda r} \quad (4.11)$$

이 식에서 온도차이  $\theta_{r*}$  은 거리  $r$  와 열전도율  $\lambda$  에 반비례함을 알 수 있다.

(4.11)식을 적용하면 (4.6)식을 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$q_r = \frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{\theta_{r*}}{R_r} \quad (4.12)$$

여기서

$$R_r = \frac{r}{\lambda} \quad (4.13)$$

구형공동의 벽면에서는,  $r = r_o$ , 그래서

$$R_{r_o} = \frac{r_o}{\lambda} \quad (4.14)$$

이 식은 깊은 곳에 위치하는 구형 공동에서 열저항을 계산하는 기본식이 된다. 우리는 공동의 모양이 달라지더라도 (4.6)식과 유사한 관계식을 구할 수 있다.

나. 얇은 곳에 위치하는 구형의 공동

2h의 거리로 지면을 대칭면으로 하는 두 개의 구형 공동이 있고, Fig II-15 와 같이 하나는 냉동저장 공동이고 또 하나는 열저장 공동이라고 치자. 이 두 공동으로부터 기인하는 열분포를 조합한 것이 얇은 곳에 위치하는 구형 공동의 열분포와 일치한다. 이를 증명하면 다음과 같다. (4.11)식에서 냉동저장 구형의 온도차이는 다음과 같이 주어졌다.

$$\theta_{r*} = \frac{Q}{4\pi\lambda r} \quad (4.15)$$

마찬가지로 열공동에 대하여

$$\theta_{r*} = \frac{-Q}{4\pi\lambda r'} \quad (4.16)$$

온도차이를 조합하면

$$\Theta_{rr'} = \frac{-Q}{4\pi\lambda'} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) \quad (4.17)$$

그러면  $r = r'$ ,  $\Theta_{rr'} = 0$  이 되어 지면의 온도는 일정한 값  $t_*$  가 되는 것을 알 수 있다. Fig II-15 와 같이 좌표값을 취하면, 임의의 점 P  $(x, y, z)$  에서 공동까지의 거리는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2 + (z-h)^2 \\ r'^2 &= x^2 + y^2 + (z+h)^2 \end{aligned} \quad (4.18)$$

(4.18)식을 (4.19)식에 대입하면 다음의 식을 얻는다.

$$\Theta_{rr'} = -\frac{Q}{4\pi\lambda} \left( \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2}} \right) \quad (4.19)$$

냉동저장 구형의 꼭지점  $(0, 0, h-r_0)$  에서 (4.19)식은 다음과 같이 된다.

$$\Theta_{rr'} = -\frac{Q}{4\pi\lambda} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{2h-r_0} \right) \quad (4.20)$$

이 식으로부터 (4.12), (4.13), (4.6), F 의 값을 다음과 같이 구할 수 있

다.

$$q_{ro} = \frac{Q}{4\pi r_o^2} = \frac{\Theta_{ro} r'}{R_{ro}} \quad (4.21)$$

$$\Theta_{ro} r' = T_{ro} - T_* \quad (4.22)$$

(4.22)식으로 부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R_{ro} &= \Theta_{ro} r' \frac{4\pi r_o^2}{Q} = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left( \frac{1}{r_o} - \frac{1}{2h-r_o} \right) \frac{4\pi r_o^2}{Q} \\ &= \frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{r_o} - \frac{1}{2h-r_o} \right) r_o^2 = \frac{r_o}{\lambda} \left( \frac{1}{r_o} - \frac{1}{2h-r_o} \right) r_o \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$R_{ro} = F \frac{r_o}{\lambda} \quad (4.24)$$

(4.23)식과 (4.24)식을 비교하면 F는 다음과 같이 된다.

$$F = \frac{2(h-r_o)}{2h-r_o} = \frac{1}{1 + \frac{r_o}{2(h-r_o)}} \quad (4.25)$$

(4.14), (4.24), (4.25)식들을 비교하면 얇은 곳에 위치하는 냉동저장소의

열저항이 깊은 곳에 위치하는 냉동저장소의 열저항보다 더 작은 것을 알 수 있다.

### 3. 원기둥의 공동에서의 열전달

#### 가. 깊은 곳에 위치하는 원기둥의 공동

만일 우리가 지하에 여러개의 구형 냉동저장소를 붙여서 만든다면 그 모양은 짧은 원통형의 지하냉동저장소가 될 것이다. 이에 대한 이론적인 식을 다음과 같이 구할 수 있다. 짧은 원통형의 공동에 대한 좌표 축을 Fig II-16 과 같이 잡으면 한 점의 좌표는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos \theta, \quad y = \rho \sin \theta, \quad z = z \\ r^2 &= x^2 + y^2 + z^2 = \rho^2 + z^2 \end{aligned} \quad (4.26)$$

(4.11)식에서, 선형적 열원의 세기를  $\sigma$  라고 하면 요소의 열원은  $dQ = \sigma dz$ , 요소의 온도는  $\theta_{r^*} = d\theta$  가 되고 다음의 미분방정식이 얻어진다.

$$d\theta = \frac{\sigma dz}{4\pi\lambda r} \quad (4.27)$$

혹은

$$d\theta = \frac{\sigma dz}{4\pi\lambda\sqrt{\rho^2 + z^2}} \quad (4.28)$$

(4.28)의 미분식을 적분하면 우리는 깊은 곳에 있는 짧은 원통형의 공동에 대한 온도차이를 얻을 수 있다.

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\sigma dz}{4\pi\lambda\sqrt{\rho^2 + z^2}} \quad (4.29)$$

여기서  $z_1, z_2$  는 원기둥의 양쪽 끝이다.

$$z = \rho \sinh u, \quad dz = \rho \cosh u du, \quad z_1 = \rho \sinh u_1, \quad z_2 = \rho \sinh u_2$$

그러면  $u_1 = \sinh^{-1} \frac{z_1}{\rho}$ ,  $u_2 = \sinh^{-1} \frac{z_2}{\rho}$  이 되어 (4.29)식은 다

음과 같이 된다.

$$\theta_2 - \theta_1 = \frac{\sigma}{4\pi\lambda} \left( \sinh^{-1} \frac{z_2}{\rho} - \sinh^{-1} \frac{z_1}{\rho} \right) \quad (4.30)$$

(4.30)의 식에서 다음과 같은 값들을 구할 수 있다.

$$q_{ro} = \frac{\sigma}{2\pi r_o} = \frac{T_{ro} - T_*}{R_{ro}} \quad (4.31)$$

$$R_{ro} = F \frac{r_o}{\lambda} \quad (4.32)$$

$$F = \frac{1}{2} \left( \sinh^{-1} \frac{z_2}{\rho} - \sinh^{-1} \frac{z_1}{\rho} \right) \quad (4.33)$$

이 식들은 깊은 곳에 위치하는 원기둥형 공동에서 열저항을 계산할 때 실제로 사용이 가능한 매우 간단한 식이다.

#### 나. 얇은 곳에 위치하는 원기둥의 공동

얇은 곳에 위치하는 원기둥형 공동에 대한 온도분포는, 얇은 곳에 위치하는 구형 공동에서와 같이 냉동공동과 열공동 두 개를 결합시켜 구할 수 있다. 우리는 (4.30)식으로부터, Fig II-17 과 같은 상태에서의 잔류온도를 구할 수 있다.

$$\Theta_2 - \Theta_1 = \frac{\sigma}{4\pi\lambda} \left( \sinh^{-1} \frac{z_2}{\rho} - \sinh^{-1} \frac{z_1}{\rho} - \sinh^{-1} \frac{z_2}{\rho'} + \sinh^{-1} \frac{z_1}{\rho'} \right) \quad (4.34)$$

여기서  $\rho$  와  $\rho'$  는 원점, 0, 에서 두 공동의 축에 이르는 각각의 거리이다. (4.34)식에서 다음과 같은 값을 구할 수 있다.

$$q_{ro} = \frac{\sigma}{2\pi r_o} = \frac{T_{ro} - T_*}{R_{ro}} \quad (4.35)$$

여기서,

$$R_{r_0} = F \frac{r_0}{\lambda} \quad (4.36)$$

$$F = \frac{1}{2} \left( \sinh^{-1} \frac{z_2}{r_0} - \sinh^{-1} \frac{z_1}{r_0} - \sinh^{-1} \frac{z_2}{2h - r_0} + \sinh^{-1} \frac{z_1}{2h - r_0} \right) \quad (4.37)$$

다. 여러개의 짧은 원기둥형 공동을 중첩할 경우

(4.37)식으로부터, 짧은 원기둥 벽면에서의 온도차이,  $\Theta_{pi}$ , 은 다음과 같이 결정된다.

$$\Theta_{pi} = \frac{\sigma}{4\pi\lambda} \left( \sinh^{-1} \frac{z_{2i}}{\rho_i} - \sinh^{-1} \frac{z_{1i}}{\rho_i} - \sinh^{-1} \frac{z_{2i}}{\rho'_i} + \sinh^{-1} \frac{z_{1i}}{\rho'_i} \right) \quad (4.38)$$

그래서 짧은 원기둥 공동이 중첩이 될 때의 온도차이의 분포는 다음과 같이 계산된다.

$$\Theta_p = \sum_{i=1}^n \Theta_{p_i} = \frac{\sigma}{4\pi\lambda} \left( \sum_{i=1}^n \sinh^{-1} \frac{z_{2i}}{\rho_i} - \sum_{i=1}^n \sinh^{-1} \frac{z_{1i}}{\rho_i} - \sum_{i=1}^n \sinh^{-1} \frac{z_{2i}}{\rho'_i} + \sum_{i=1}^n \sinh^{-1} \frac{z_{1i}}{\rho'_i} \right) \quad (4.39)$$

(4.39)의 식에서 다음과 같은 값을 얻게 된다.

$$q_{ro} = \frac{\sigma}{2\pi r_{oj}} = \frac{T_{roj} - T_*}{R_{roj}} \quad (4.40)$$

여기서,

$$R_{roj} = F_j \frac{r_{oj}}{\lambda} \quad (4.41)$$

$$F_j = \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n \sinh^{-1} \frac{z_{2i}}{\rho_i} - \sum_{i=1}^n \sinh^{-1} \frac{z_{1i}}{\rho_i} - \sum_{i=1}^n \sinh^{-1} \frac{z_{2i}}{\rho'_i} + \sum_{i=1}^n \sinh^{-1} \frac{z_{1i}}{\rho'_i} \right) \quad (4.41)$$

여기서  $i = j$  를 취하며  $\rho_i = r_{oj}$  .

(4.42)식을 보면 지하냉동저장소의 저장실을 묶어서 여러개로 잘 집 단화하면 형상계수  $F_j$ 의 값이 어느 정도까지는 커지는 것을 알 수 있다. 그러므로 지하의 공간에서 열저항값을 조정하여 원하는 값을 얻을 수 있다.

#### 4. 냉각단계에서 비정상류의 열전달

비정상류의 열전달에서는 열유동이 매질 자체의 온도변화를 수반하므로 열저항은 매질 내에서 변하게 된다. 고체에서 열전도에 대한 Fourier의 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \right) \quad (4.43)$$

깊은 구형 공동에서의 표면 온도는 일정하다고 간주할 수 있으므로 (4.43)식은 다음과 같이 간단하게 할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4.44)$$

온도 모멘트  $rt = M$  을 적용하면 (4.44)식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} \quad (4.45)$$

Laplace 의 변환을 이용하여 (4.45)식의 해를 구하면 다음과 같다.

$$\theta = \frac{Ki}{X} \left( \operatorname{erfc} \left( \frac{X-1}{2\sqrt{F_0}} \right) - e^{X-1} e^{F_0} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{F_0} + \frac{X-1}{2\sqrt{F_0}} \right) \right) \quad (4.46)$$

여기서,  $\theta = \frac{T - T_*}{T_*}$

이 식은 깊은 곳에 위치하는 구형 공동벽면에서의 온도 분포이다. Fourier number 푸리에의 수  $F_0 \rightarrow \infty$  이면, (4.46)식은 다음과 같이 된다.

$$\theta = \frac{Ki}{X} \quad (4.47)$$

이 식은 (4.11)식과 동일하다. 계산 시간을 줄이기 위해 (4.45)의 미분 방정식은 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\frac{\Delta M}{\Delta \tau} = a \frac{\Delta^2 M}{\Delta X^2} \quad (4.48)$$

이 식은 도표와 곡선을 활용하여 수치해석적으로 풀 수 있다. 이 때는 Fig II-18 과 같이 시간과 공간을 표시하는 격자망이 만들어 진다. 시간 간격을  $\tau_k - \tau_{k-1} = \tau_{k+1} - \tau_k = \dots = 1$  이라하고 공간 간격을  $x_i - x_{i-1} = x_{i+1} - x_i = h$  라 가정하면 격자점  $(x_i, \tau_k)$ 는 온도 모멘트  $M_{ik}$ 에 대응한다. 그래서 다음과 근사적인 차분 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\Delta M}{\Delta X}\right)_B &= \frac{M_{i+1k} - M_{ik}}{h}; \left(\frac{\Delta M}{\Delta X}\right)_A \\
&= \frac{M_{ik} - M_{i-1k}}{h}; \frac{\Delta M}{\Delta \tau} = \frac{M_{ik+1} - M_{ik}}{1} \\
\frac{\Delta^2 M}{\Delta X^2} &= \left(\frac{\Delta M}{\Delta X}\right)_B - \left(\frac{\Delta M}{\Delta X}\right)_A \\
&= \frac{M_{i-1k} + M_{i+1k} - 2M_{ik}}{h^2}
\end{aligned} \tag{4.49}$$

이 근사식을 (4.48)식에 대입하면 다음식을 구할 수 있다.

$$\frac{M_{ik+1} - M_{ik}}{1} = a \frac{M_{i+1k} + M_{i-1k} - 2M_{ik}}{h^2} \tag{4.50}$$

$M_{ik+1}$ 에 대하여 풀면 다음의 식을 얻는다.

$$M_{ik+1} = \left(1 - \frac{2la}{h^2}\right) M_{ik} + \frac{la}{h^2} (M_{i+1k} + M_{i-1k}) \tag{4.51}$$

a, h 의 적당한 값을 취하여;

$$1 - \frac{2la}{h^2} = 0 \quad \text{혹은} \quad 1 = \frac{h^2}{2a} \tag{4.52}$$

그러면 (4.51)식은 다음과 같다.

$$M_{i, k+1} = \frac{1}{2}(M_{i+1, k} + M_{i-1, k}) \quad (4.53)$$

초기 조건은;

$$M = r t_* \quad (4.54)$$

벽면에서의 조건은 다음과 같다.

$$q = (t_{ai} - t_{ro}) = - \left. \frac{dt}{dr} \right|_{r=r_o} \quad (4.55)$$

(4.55)식은 다음처럼 간단하게 될 수 있다.

$$qr_o = \frac{M_{ai} - M_{ok}}{\frac{\lambda}{\alpha}} = - \frac{M_{lk} - M_{ok}}{h} \quad (4.56)$$

만일 어떤 위치가 벽면에서 공기 쪽으로  $\frac{\lambda}{\alpha}$  의 거리에 있게되면 벽면에서 나오고 들어가는 온도 모멘트는 the temperature moment gardiants out of and in the surface  $\frac{qr_o}{\lambda}$  와 같게된다.

$M_{ai} = r_o t_{ai}$  의 값이 설계된 값에 도달하면 냉각은 종료된다. 계산의

반복 횟수를 알기 위하여 냉각 시간,  $T_{cooling}$ , 은 다음의 식에 의해 계산될 수 있다.

$$T_{cooling} = N \cdot 1 \quad (4.57)$$

여기서  $N$  : 계산의 반복 횟수,  $1$  : 시간 간격

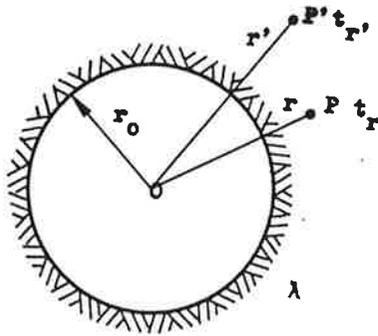


Fig II-14. 구형 공동에서의 열해석에 관한 변수

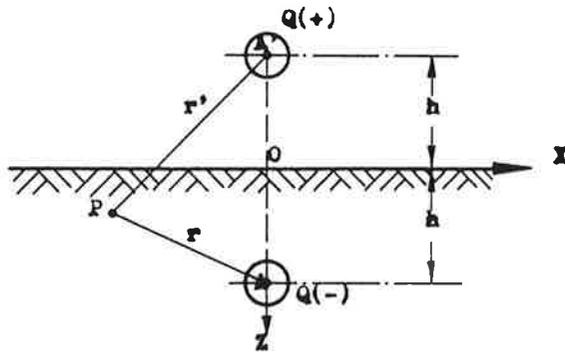


Fig II-15. 두 개의 구형 저장소에 대한 온도분포의 조합

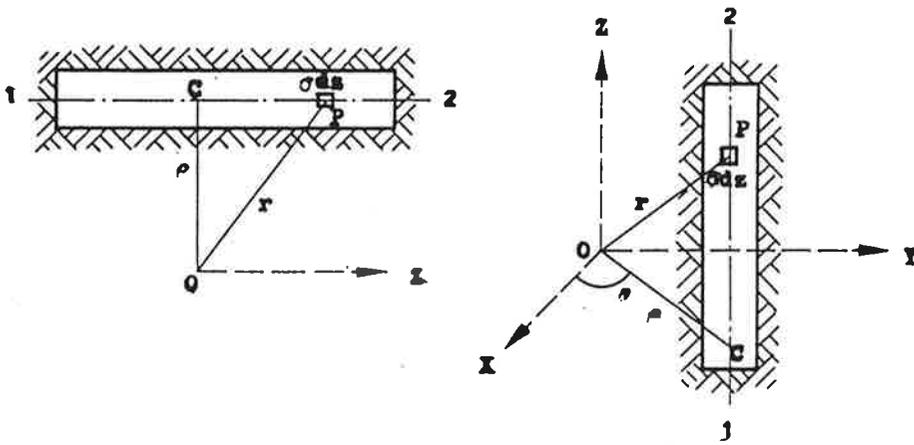


Fig II-16. 짧은 원기둥형 공동에서의 좌표축

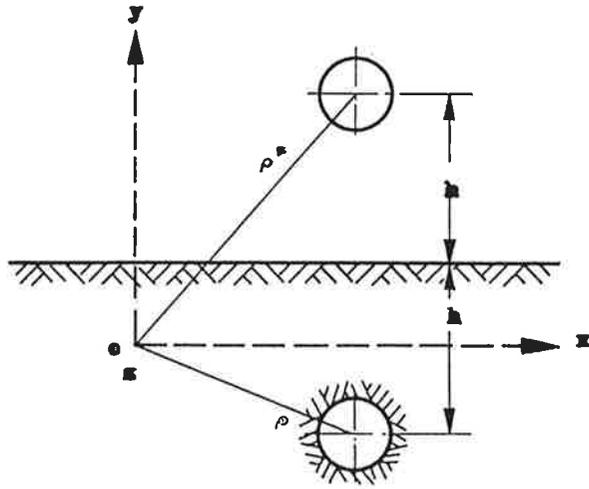


Fig II-17. 얇은 곳에 위치하는 짧은 원기둥형 공동에서의 좌표축

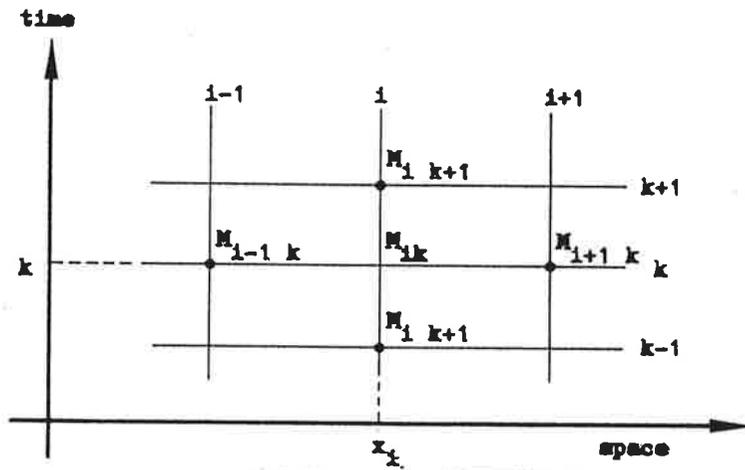


Fig II-18. 유한차분법의 격자망

## 제 5 절 식품저장용 지하공동의 설계

### 1. 설계의 주안점

식품저장용 지하냉동저장소의 건설 비용은 공동의 설계에 따라 크게 달라진다. 따라서 먼저 지질조사를 철저히 하고 이를 바탕으로 설계를 하여야 한다. 식품저장용 지하냉동저장소는 다음과 같은 4가지 면에서 각 변수들이 최대한 만족되도록 설계되어야 한다.

- ① 부지의 선정: 역학적 안정성과 지리적 적합성
- ② 공동의 방향: 역학적 안정성과 굴착의 용이성
- ③ 공동의 모양: 역학적 안정성과 작업의 편리성
- ④ 공동의 크기: 시공성과 경제성

#### 가. 공동의 깊이

얕은 곳에 위치하는 공동은 지표로부터 심도가 얕고 암체의 하중에 의한 응력이 작다. 응력이 작을 경우에는 각각의 암괴들을 결집시키는 힘이 약하고 이 때문에 암체에서 아치를 형성하기가 어려워 암석 자체의 지보 능력이 저하된다. 공동이 지표면에 가까우면 암석의 절리가 보다 많이 발달하게 되어 안정성의 문제가 생기고 지하수의 유입이 많다. 우리나라는 대체로 풍화대가 발달한 편이어서 이러한 점을 잘 고려하여야 한다. 깊은 곳에 위치하는 공동에는 암석에 작용하고 있는 응력이 국부적으로 암석을 강도를 넘어설 정도로 높거나 이방성을 띄는 경우가 있다. 이럴 때는 암석붕락, 팽창파괴 등의 안정성의 문제가 생

기는데 지표하 수백미터 깊이에 위치하는 공동이나 지형적인 원인으로 응력이나 응력의 이방성이 높은 경우에 자주 만나게 된다. 계곡이 깊은 곳에 위치하는 공동은 터널과 지표면 사이의 최단 거리가 불과 수십미터에 불과하지만 지형적인 응력의 작용에 의해 안정성에 문제를 일으키는 수가 있다.

안정성의 측면에서는 적당한 깊이에 있는 공동이 가장 유리하다. 그러므로 가능하다면 지하 공동의 위치를 결정할 때는 적당한 깊이에서 굴착이 가능한 가를 검토하여야만 한다. 식품저장용 지하공동은 지표면에서 깊이 들어가지 않는 것이 보통이다. 식품저장시설은 필수적으로 온도를 고려하여야만 한다. 지표에서 대체로 20-30m 의 깊이로 들어가면 지표로부터의 온도변화에서 오는 영향을 벗어날 수 있다. 이 깊이는 대체로 적당한 깊이에 해당하며 안정성에 유리하다.

#### 나. 부지의 선정

식품저장공동 유통망에서의 적절한 위치를 고려해야 한다는 제한이 따른다. 그러나 암질은 비용에 큰 영향을 미치므로 가능한한 견고한 암반을 찾아야 한다. 온도측면에서는 열전도율이 낮은 기반암이 유리하다

공동이 지표에서 얇은 곳에 위치할 때는 공동의 위쪽에 풍화되지 않은 암석이 적당한 두께를 갖도록 공동을 위치시켜야 한다. 암석의 두께는 절리나 균열면에 작용하는 수직 응력이 암석이 자체의 지지력을 갖기에 충분할 정도가 되어야 한다. 폭이 20미터에 이르기까지는 대략 5미터가 합리적인 두께이다. 두께는 천정 위의 가능한 최대의 과굴 위치에서 풍화되지 않은 암석의 경계면까지로 거리로 계산하여야 한

다.

지하공동의 위치를 결정할 때는 중요한 연약대의 위치와 방향에 대해 주의를 기울여야 한다. 연약대와 굴착면이 교차하지 않는 위치가 가장 좋다. 공동과 교차하는 연약대 사이의 거리가 너무 가까우면 다른 지점을 찾거나 공동과 교차하는 연약대가 가장 적은 곳을 선택해야 한다. 급한 경사의 불연속면은 공동의 측벽 안정에 특히 문제를 일으키고 수평의 불연속면은 주로 천정의 안정에 위협을 주는 요인이 된다.

#### 다. 공동의 방향

불연속면이 부지의 선택에 있어 가장 중요한 반면 상세한 절리면의 분포 상태는 지하공동의 방향을 정하는데 결정적인 역할을 한다. 지질 조사에서 종합적인 매핑을 하고 이를 '조인트 로제트' 혹은 '조인트 다이어그램'으로 분석을 해야한다.

얕거나 중간 정도의 깊이에 있는 공동에 적용되는 원칙은 두 개의 주절리 사이의 최대각을 양분하는 선을 따라 길이의 축 방향이 결정되어야 한다는 것이다. 공동의 축 방향이 제3, 4의 절리 방향과 평행하는 것도 피해야 한다. 절리군을 평가할 때는 절리의 수와 경사 뿐만이 아니라 마찰의 성질과 같은 절리의 성질도 고려하여야 한다. 통로터널에서는 터널의 축 방향과 우세한 절리군이 이루는 각이  $25^{\circ}$ - $30^{\circ}$  보다 작으면 일반적으로 안정성이 낮아지고 과굴이 증가한다.

Fig II-19 의 예에서는 길이의 축 방향에 대해 두 개의 유리한 방향이 제시되고 있다. 얕은 곳에 위치한 공동에서는 이 두 개의 방향 중 어느 것을 선택해도 좋다. 그러나 암석응력이 높은 곳에서는 주응력의 방향을 고려할 필요가 있다. 그림에서의 경우 주응력의 방향은 제2

의 유리한 방향과는 수직을 이루고 있어 깊은 위치에 있는 공동에 대해서는 불리한 선택이 된다.

높은 이방성의 응력이 작용하는 지역에서 응력의 문제에 주로 노출되는 곳은 주응력과 중간 주응력이 놓이는 평면에 접하는 터널의 경계면이다. 그래서 공동의 경계면이 이 응력 평면에 가장 적게 닿도록 공동의 방향을 잡아야 한다. 암석의 응력에 대해서 공동이 가장 안정되는 방향은 지하공동의 축 방향이 주응력이 평면에 투영되는 방향과  $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$ 의 각을 이룰 때이다. 그럴 경우에도 공동의 방향은 엇리나 다른 주요 절리와 평행하지 않도록 해야한다. 주요 절리군에 대하여 불리한 방향의 높은 접선이 작용하는 지하공동에서는 그렇지 않은 평상시의 경우에 비해 2-4배의 높은 과굴이 발생한다.

#### 라. 공동의 모양

암체는 불연속적인 성질 때문에 인장 응력에 매우 약하다. 공동의 안정성은 불연속면의 전단 저항력에 크게 영향을 받는데 이 전단 저항력은 절리면 위에 작용하고 있는 수직응력의 함수이다. 공동 설계에서 모양을 정할 때는 공동의 경계면을 따라 압축응력을 고르게 분포시키는 중요하다. 이를 위해서는 공동의 모양이 간단하면서 아치 모양의 천정을 갖게될 때가 가장 좋다. 일반적으로 구석이나 모서리가 가능한한 튀어나오지 않도록 하는 점이 중요하다. 그런 지점은 응력이 이완되어 발파 중 과굴이 생기거나 발파 후 불안정한 상태에 놓이게 된다(Fig II-20).

식품저장공동은 지표면으로부터의 깊이가 얕거나 중간 정도가 될 때가 많다. 이러한 깊이에서는 절리를 더욱 특별히 고려하여야 한다.

층리면 사이의 간격이 0.5미터 보다 작을 경우에는 천정을 높은 아치 모양으로 하는 것이 보통이다. 폭이 10미터 보다 클 경우에는 천정에 록크볼트를 하여야 한다. 응력이 지나치게 높지 않거나 이방성이 지나치지 않으면 공동이 작은 곡률을 갖지 않도록 설계하는 것이 유리하다. 왜냐하면 곡률이 작으면 불필요하게 응력이 집중되기 때문이다. 그러나 만일 응력 수준이나 이방성이 높아서 급격한 압식의 붕락이나 수풀링을 피할 수가 없다면 불안정한 곳을 집중시켜 지보를 할 지역을 줄이는 것이 경제적이다.

#### 마. 공동의 크기

냉동저장이나 액체가스 저장을 위한 공동은 구(球)형이 가장 좋은 것은 이론적인 계산으로부터 잘 알려져 있다. 그러나 구 모양으로 설계한다는 것은 매우 비현실적이고 시공이 어려워 실제적이지 못하다. 저장공동이 충분한 단면적을 가진다면 열 관점에서 모양은 중요한 변수가 되지 않는다. 그러나 크기는 매우 중요하다.

Fig II-21 은 세가지 크기의 공동에 대하여 시간 경과에 따른 체적 열부하 (volumetric heat load)의 관계이다. 무한히 큰 공동의 경우에는 이 값이 0이다. 열의 관점에서는 공동이 클수록 좋다. 그러나 공동의 크기는 안정성의 제한을 받아 무한히 크게할 수 없다. 이러한 문제는 몇 개의 공동을 가깝게 굴착하면 규모의 혜택을 보장받을 수 있다. 현재 식품의 지하냉동저장에서는 열의 관점뿐만 아니라 설비, 취급 등의 여러측면을 고려할 때 5,000-10,000 m<sup>3</sup>의 용량이 최대의 경제성을 가지는 것으로 보고되고 있다.

암질의 분류에서의 각 구분은 각각 자체 지보의 한계를 갖고 있다.

일반적으로 굴착의 폭이 커지면 불안정성도 높아진다. 그래서 체적을 늘리기 위해서는 폭 보다는 길이를 늘리는 것이 유리하다. 폭이 커지면 천정의 아치를 높게 해서 곡률이 일정하게 유지되도록 해야한다는 것을 명심해야 한다. 이렇게 하면 불필요하게 체적이 추가되지 않는다.

인접한 공동 사이에 있는 벽의 두께는 한계값이 있는데 이 값은 일반적으로 지하 공동의 높이, 암질과 국부적인 응력 조건에 의해 결정된다. 보통의 암질에서 벽의 두께는 높이와 같게하는 것이 대략적으로 통용되는 합리적인 설계의 원칙이다. 그러나 낮은 공동에서 공동간의 벽은 최소한 5m는 되어야 하고 높이가 큰 공동에서는 높이보다 어느 정도 보다 얇은 두께가 수용된다.

지하공동의 설계에서는 한 부분에서는 유리하나 전체 구조에서 다른 부분에는 불리하게 되는 제한을 받는 경우가 가끔 있다. 예를 들어 수평의 층리나 절리는 측벽의 안정에는 유리하지만 천정의 안정에는 불리하다. 설계자는 수집한 필요한 자료와 자신의 경험을 통해 그러한 모든 요소들을 비교하고 최선의 그리고 가장 경제적인 해답을 찾는데 세심하게 노력을 기울여야 한다. 공동의 안정에 영향을 주는 요소들은 많은데 각각의 중요성은 경우마다 달라진다. 복잡한 모든 요소를 수용할 수 있는 일반화된 설계 공식은 너무 복잡하게 마련이어서 실제로는 사용하기 어렵다. 반면에 설계 공식을 너무 간단히 하다보면 중요한 요소가 누락될 위험이 있다. 그래서 각 단계마다 순차적으로 설계를 하며 보완을 해 나가는 것이 최선의 수단이다. 이럴 경우는 각 단계마다 공동의 안정에 영향을 미치는 요소들을 세심하게 평가한다. 그러면서 공동의 위치, 방향, 모양을 최적화하면서 최대의 안정성을 추구할 수 있도록 지질적인 조건들을 잘 고려하여 가장 싸고 안전한 방법을 선택하도록 해야 한다. 설계는 지질조사 결과를 근거하기 때문에 지질공학을

전공한 기술자들이 설계평가에 적극적인 참여를 할 수 있도록 해야한다.

## 2. 지질조사

식품지하저장소를 건설하기 위해서는 사전에 철저한 지질조사가 필요하다. 지질조사 자료는 언제나 설계의 기본적인 자료가 된다. 지하의 공사는 모두 지질조사를 바탕으로 하게된다. 지질조사의 목적은 다음과 같다.

- ① 부지평가와 전반적인 설계의 자료
- ② 안정성의 평가와 지보의 예측
- ③ 비용의 계산

지하공동과 관련된 지질공학 조사는 크게 공사 개시전 조사와 공사 중의 조사로 나누어진다. 공사전 지질조사는 지하의 굴착은 시작되지 않은 시기에 모든 자료는 지상에서 수집된다. 공사중 조사는 공사가 진행되면서 직접 대상이 되는 암반에 접근하여 시료채취 및 필요한 조사와 시험을 하게 된다. Table II-5 에는 지질조사의 단계와 내용이 나와 있다. 각 두 단계의 과정에는 다시 두 단계의 세부과정이 있다. 그러나 반드시 이런 과정을 다 거쳐야 하는 것은 아니고 필요에 따라 과정을 생략할 수도 있고 필요시에는 보다 정밀한 단계를 세분할 수도 있다. 지질조사에서도 지질조건, 공동의 용도와 용량 등의 상황에 따라 융통성이 필요하다.

Table II-5. 지질조사 단계

사전 조사 (1단계)	
타당성 조사 (1-1 단계)	설계 조사 (1-2 단계)
사무실 조사; -지질공학적 문헌 -지형도와 지질도 -항공 사진 토양층, 암석, 절리, 연약면에 대한 매핑을 위한 답사	공동의 위치와 방향 결정을 위한 자료 -암종 및 암질 -절리의 방향, 간격, 특성 -지하수의 상태 -탄성과 조사, 시추 조사 -강도, 탄성계수 등의 실험실 시험
공사중 조사 (2단계)	
지하에서의 정밀 조사 (2-1 단계)	굴착중 조사 (2-2 단계)
-초기 지압 측정 -암체의 투수 시험 -계측 -사전 조사 보고서의 조정 -지보에 대한 조언 -그라우팅에 대한 조언	-암종과 암질 -절리의 방향, 간격과 특성 -연약면의 방향, 두께, 종류 -지하수의 유입 -지보, 라이닝 등의 보강책에 대한 기록 -굴착 평가

### 3. 열설계

식품의 암반저장 열설계는 원칙적으로 모양 및 크기가 일정치 않고, 시간에 따라 경계조건이 달라지는 비정상 열전달 문제를 다루기 때문

에 수학적으로 복잡하다. 그러나 컴퓨터의 발달에 따라서 기후, 공동의 모양 및 크기, 암석의 열성질, 냉동설비의 성능, 저장소 경계면서의 열 전달 등을 고려한 수치해석이 가능하게 되었다.

- ① 초기 냉각기간의 예측
- ② 운영시의 전력소비와 비용의 예측
- ③ 냉장냉동 설비의 설계

설비 용량을 냉동저장 규모와 연계시키기 위해서는 비용량(specific capacity)이란 개념이 도입된다. 이것은 총 설비 용량을 암반저장 공동의 총 내부표면적으로 나눈 값이다.

냉동설비의 여러 가지 크기는 다음과 같은 간단한 식으로 결정된다.

$$P_o = S_F \cdot (15 + 0.75 \cdot T_{air}), W/m^2 \quad (5.1)$$

여기서,  $P_o$  = 냉동설비의 용량

$S_F$  = 냉동설비의 크기를 규정하는 크기 변수

$T_{air}$  = 냉동저장 공간 내의 공기 온도

여러가지  $S_F$ 값에 대한 곡선은 Fig II-22 에 나와 있다. 이 값들은 암반자체를 냉각시키는데 필요한 순수 냉각용량이다. 냉동설비의 총 용량을 구하기 위해서는 조명, 선풍기, 문, 해동, 사람, 트럭, 저장물품 등에 의한 열손실을 추가하여야 한다.

### 가. 암반과 대기간의 열이동

암반과 대기간의 열이동에는 자연대류와 기계대류의 혼합, 공동벽면에서의 습기증발에 의한 잠열의 이동이 있다. 열이동에는 공동의 크기와 암반표면의 모양도 영향을 미친다. 열이동 함수(h)는 이런 모든 점을 고려하여 적용되는데 노르웨이에서는 다음과 같이 정의 된다.

$$h = SIF \cdot (h_o + 1.8 \cdot \Delta T^{0.33}) \cdot (17.5 \frac{\Delta P}{\Delta T} + 1), \text{ W/m}^2\text{C} \quad (5.2)$$

SIF = 암반의 표면확대 계수

$h_o$  = 강제대류(예: 저장공간 내의 공기속도 함수)에 따른 열이동 계수

$\Delta T$  = 암반표면과 찬 공기간의 온도차

$\Delta P$  = 암반표면과 찬 공기간의 증기압차 (누수가 없는 건조암반의 경우는 0임)

Fig II-23 은 (5.1), (5.2)식으로 설계된 실제의 냉동저장 공동에서 3년이 경과한 후 공동 주변의 안정된 온도 분포를 보여주고 있다. Fig II-24 는 냉각곡선에서 잠열이동의 영향을 나타낸 것이다. 이러한 곡선들은 (5.2)식에서 변수들을 체계적으로 변화시킴으로서 얻을 수 있다.

### 나. 초기 냉각 시간

지하의 냉장냉동저장고를 초기에 냉각하는 시간은 4.46식에 의해 유도될 수 있다.  $X=1$ 로 두면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\Theta_{r_0} = Ki (1 - e^{F_0} \operatorname{erfc}(\sqrt{F_0})) \quad (5.3)$$

그러나 벽면에서의 比열흐름에 대한 무차원의 식은 다음과 같이 된다.

$$q = \alpha (T_{ai} - T_{ro}) \quad (5.4)$$

$$\frac{qr_0}{AT_*} = \frac{r_0}{\lambda} \left( \frac{T_{ai} - T_*}{T_*} - \frac{T_{ro} - T_*}{T_*} \right) \quad (5.5)$$

$$Ki = Bi (\Theta_{ai} - \Theta_{ro}) \quad (5.6)$$

여기서 ,

$$Ki = \frac{r_0 q}{\lambda T_*} \quad \text{: Kirpichev's number}$$

$$Bi = \alpha \frac{r_0}{\lambda} \quad \text{: Biot number}$$

$\alpha$  : 열전달 계수

$T_{ai}$  : 저장실의 공기 온도

그래서 (5.3)~(5.6)의 식을 차례로 풀면  $F_0$ 가 들어가는 다음의 수식을

얻게 된다.

$$e^{F_o} \operatorname{erfc}(\sqrt{F_o}) = 1 + \frac{1}{\text{Bi}} - \frac{\Theta_{ai}}{\text{Ki}} \quad (5.7)$$

다음의 근사식 ;

$$e^{F_o} \operatorname{erfc}(\sqrt{f_o}) = 1 - \frac{\sqrt{F_o}}{K} \quad (5.8)$$

를 (5.7)식에 대입하면 다음의 식을 얻게된다.

$$F_o = K^2 \left( \frac{\Theta_{ai}}{\text{Ki}} - \frac{1}{\text{Bi}} \right)^2 \quad (5.9)$$

냉각시간,  $T_{\text{cooling}}$ , 을 계산하는 식은 다음과 같이 주어진다.

$$T_{\text{cooling}} = k^2 \left( \frac{T_{ai} - T_*}{q} - \frac{1}{\alpha} \right)^2 \lambda c \gamma \quad (5.10)$$

여기서 상수  $k$ 는 대략 1.2-1.3 의 값을 취한다.

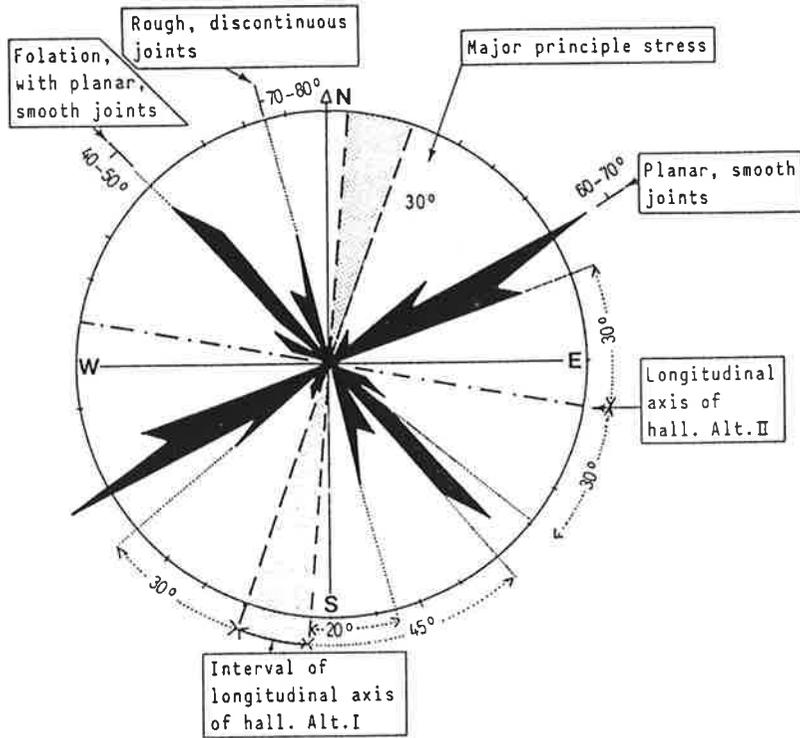


Fig II-19. 공동의 방향을 평가하기 위한 조인트 로제트 (after Selmer-Olsen, 1988)

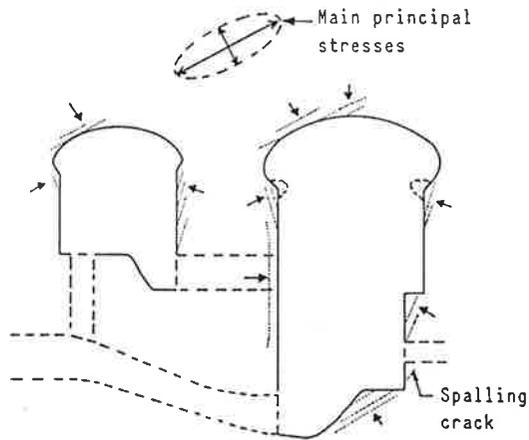


Fig II-20. 높은 이방성의 응력을 받고 있는 지하 공동. 화살표는 불안정한 지점을 가리킨다. (after Selmer-Olsen, 1988)

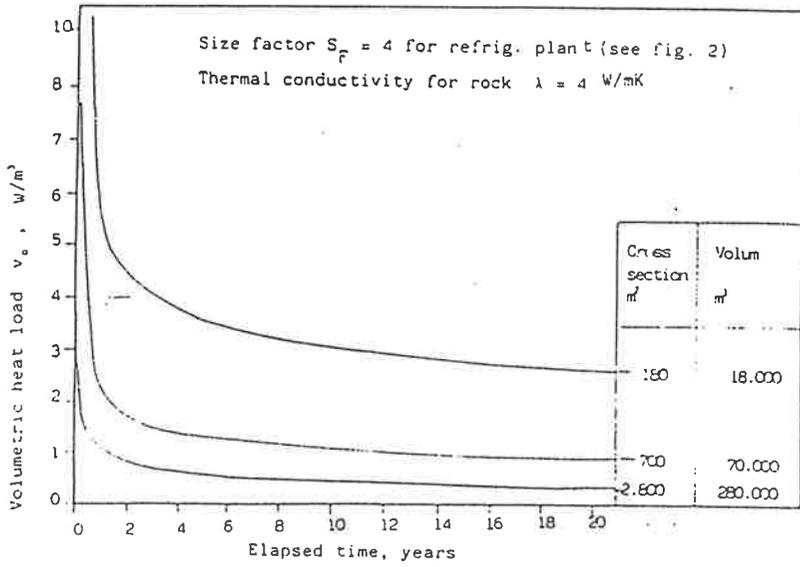


Fig II-21. 여러 가지 크기의 암반내 냉동저장시설에서 시간경과에 따른 체적 열부하

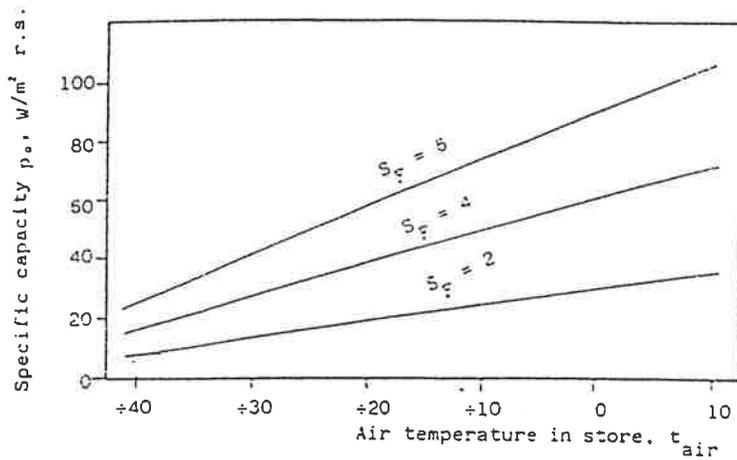


Fig II-22. 냉동저장 시설내 냉동설비들의 전형적인 비용량

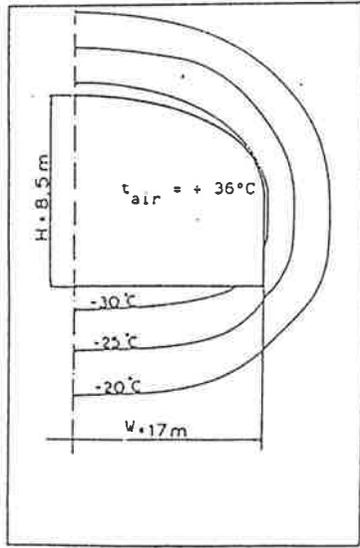


Fig II-23. 냉동저장공동 단면 주변의 등온선 (3년후).  $S_F=4$  ;  $\lambda=4$

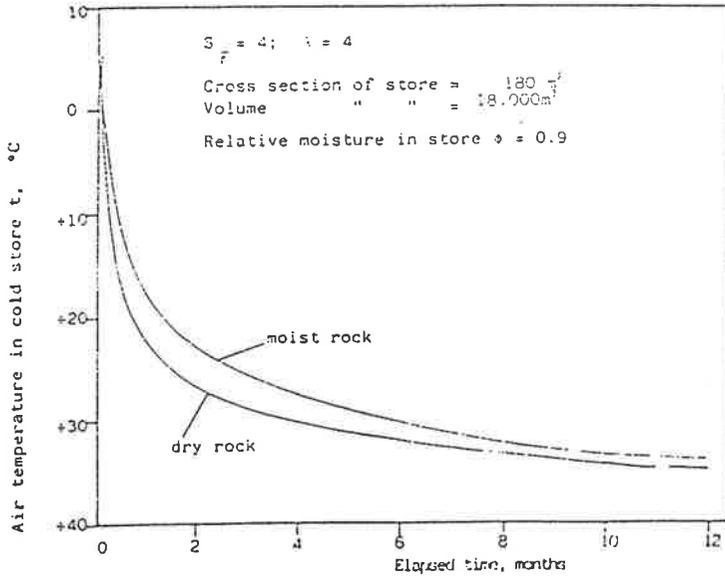


Fig II-24. 암반내 냉동저장시 냉각곡선에 미치는 잠열이동의 영향

## 제 6 절 지하공동의 구조안전분석

### 1. 개 요

지하공동에 대한 안정성 검토를 수행하여 지하저장고 축조 이후의 환경적, 인위적 변화에 대한 지하공동의 거동을 파악하여 지하저장고의 안정성을 검토하고 설계시 보강대책을 제시하기 위한 연구를 수행하였다.

측량결과, 지질 및 토질조사결과 등을 토대로 지하공동에 대한 안정성 검토를 수행하고, 건설 후 인위적인 환경변화(식생제거, 지형변화) 및 강우침투와 배수 영향이 공동 내벽의 응력과 변위에 미치는 영향을 검토하였다. 지하공동의 모델로는 충남 공주시에 존재하는 고분을 선택하여 지형적 위치와 geometry 등을 고려하여 3차원 해석을 수행하였다.

측량결과와 지질 및 토질조사결과 등을 토대로 현장의 지반조사, 하중조건 및 geometry를 모델링한 후 지반공학용 해석프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 이용하여 2차원 및 3차원 수치해석을 실시하였다.

각 토층의 물성치는 표준관입시험 결과와 토질 및 토양물리시험에서 수행한 토성시험결과를 기본으로 산정하였다.

### 2. 주변환경 및 지반조건

본 연구에서 이용된 지하공동으로서의 고분주변현황은 고분의 남쪽

부분에는 접근로의 확보를 위해 석축이 설치되어 있다. 고분입구는 발 굴 후 시공된 콘크리트 구조물이 위치해 있으며, 고분의 상부에는 봉분이 조성되어 있다. 측량결과를 토대로 해석시 고려한 주변현황은 Fig II-25 에 나타낸 바와 같다.

시추조사 및 표준관입시험은 1997년 1월 13일부터 18일까지 지하공동에 인접한 두 개소 및 원지반 1개소에서 수행되었다. 표준관입시험은 지표면에서부터 1.5m 간격으로 실시되었으며, 시추조사중 지하수위가 관찰되지 않은 것으로 보아 지하수위는 시추깊이 이하에 위치하는 것으로 판단된다.

표준관입시험 후 각 시추공마다 현장투수시험이 실시되었으며 실험결과 원지반( $k=7.44 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ )에 비해 고분주변 지반의 투수계수( $k=1.25 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ )가 상대적으로 큰 것으로 확인되었다. 현장 육안조사 결과 고분 내벽에 습기가 가득차 있는 것으로 보아 배수가 거의 이루어지지 않는 것으로 보이며, 따라서 주변 지반의 함수비는 상당히 높을 것으로 사료된다. 시추조사결과 원지반은 성토층, 풍화토, 풍화암의 순으로, 7호분 주변의 지반은 성토층, 다짐층, 풍화암의 순으로 구성되어 있다. 시추주상도에 주어진 자료를 통하여 각 구성토층의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

#### 가. 성토층 (Fill)

본 층은 고분의 복원과정에서 인위적으로 형성된 층으로 지표에서 약 0.2~3.0m의 다양한 분포를 이루고 있으며 이는 봉분 및 원지반의 geometry에 기인한 것으로 판단된다. 점토가 약간 섞인 점토질 모래로 구성되며 상대밀도는 매우 느슨한 것으로 나타났다.

#### 나. 다짐층 (Compacted Soil)

본 층은 과거 고분형성시 이루어진 다짐층으로 추정되며 실트질 모래와 자갈입도의 각력암편등으로 구성되어있다. 암편은 각력암, 집괴암, 응회암질 등의 화산쇄설암질로 구성되어 있으며, 비등립질과 집괴암구조로 인해 원지반층과 구분이 불가능하다.

기반암층 상부에 1.5~6.2m의 불규칙한 분포를 보이며 상대밀도는 매우 조밀 단단하고, 표준관입시험결과 N치는 50이상이다.

#### 다. 풍화토 (Weathered Soil)

본 층은 원지반의 기반암층 상부에 1.8m 내외의 두께로 분포하며, 주로 실트질모래와 자갈입도의 각력암편으로 구성되어 있다. 상대밀도는 매우 조밀하며 표준관입시험결과 N치는 48정도이다.

#### 라. 풍화암 (Weathered Rock)

본 층은 원지반 및 고분주변 지반의 하부에 존재하며 실트질모래와 각력암편등으로 구성되어있고, 원암은 각력암, 집괴암, 응회암 등의 화산쇄설성 퇴적암으로 구성되어 있다. 상대밀도는 매우 조밀하고 단단하며 표준관입시험결과 N치는 50이상이다.

Table II-6. 표준관입시험결과 (타격수/관입거리(cm))

깊이(m)	BH - 1	깊이(m)	BH - 2	깊이(m)	BH - 3
0.1	3/30	0.1	3/30	0.1	33/30
1.5	50/15	1.0	10/30	1.0	48/30
3.0	50/8	2.0	26/30	3.0	50/11
4.5	50/6	3.0	50/26	4.5	50/16
6.0	50/2	4.5	50/10	6.0	50/2
7.5	50/6.5	6.0	50/10		
		7.5	50/10		
		9.0	50/15		
		10.5	50/15		

\* 깊이는 시추위치의 지표면으로 부터 측정

### 3. 지반물성치 산정

각 토층의 물성치는 표준관입시험결과를 이용하여 추정하였으며 성토층은 실내토성시험결과에 근거를 두어 산정하였다. 다짐층은 표준관입시험 및 시료채취결과 원지반과 거의 유사하므로 다짐층의 물성치는 풍화암과 동일하다고 가정하였다.

#### 가. 성토층

성토층의 토질정수는 5개소에서 채취한 시료의 실내토성시험 결과

를 산술 평균하여 산정하였으며 그 결과는 Table II-7 과 같다. 다만 내부마찰각은 실내시험의 결과와 N치를 이용하여 산정한 값과 차이가 있으므로 본 과업에서는 표준관입시험의 결과를 이용하여 산정하였다.

Table II-7. 성토층의 토성시험결과 및 물성치 추정

	TP - 1	TP - 2	TP - 3	TP - 4	TP -5	추정치
$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	1.547	1.562	1.566	1.582	1.567	1.565
$\phi$ (deg.)	-	35.0	-	34.2	37.2	30.0
c (kg/cm <sup>2</sup> )	-	0.54	-	0.15	0.04	0.24

#### 나. 내부마찰각의 산정

풍화토층의 내부마찰각은 Peck, Hanson과 Thornburn(1953)이 제안한  $\phi$ -N 관계로부터 추정하였다(Fig II-26).

#### 다. 탄성계수의 산정

풍화토층의 탄성계수는 표준관입시험결과인 N값을 이용하여 Fig II-27 와 같은 통계분석치인,

$$E = 6.78 \times N^{0.9985} \quad (6.1)$$

를 사용하여 구하였다.

#### 라. 토압계수의 산정

지반이 탄성평형상태에 있을 때에 유효수평응력과 유효수직응력의 비를 정지토압계수  $K_0$ 라고 하며,

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (6.2)$$

로 표현한다.

Jaky의 경험식에 의하면  $K_0 = 1 - \sin(\phi)$ 로 나타낼 수 있으므로, 본 연구의 수치해석 수행을 위해 토사구간에서의  $K_0$ 값 산정은 표준관입시험 결과 값인  $N$ 치를 이용하여  $N - \phi$ 의 상관 관계에서  $\phi$ 값을 도출한 후  $K_0 = 1 - \sin(\phi)$ 에 의거하여  $K_0$ 값을 산출하였다.

풍화암에서의 토압계수는 서울지역 지하철 설계시의 추천치인 0.5를 사용하였다.

#### 마. 포아송비의 산정

포아송비 ( $\nu$ )는 수치해석상에서 수평지반 변형량을 추정하기 위하여 사용된다. 본 연구에서는 토사구간의 포아송비  $\nu$  값을 토압계수  $K_0$  와의 상관관계를 이용한 다음 식에 의하여 구하였다.

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (6.3)$$

$$\text{즉, } \nu = \frac{K_0}{1+K_0}$$

앞서 설명한 방법으로 산정한 각 토층의 물성치는 Table II-8 과 같다.

Table II-8. 각 토층별 대표적인 물성치

	$N_{ave}$	E (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (deg.)	$K_0$	$\nu$
성토층	10	675.7	30	0.5	0.33
풍화토	48	3235	40	0.52	0.34
다짐층	50이상	10,000	42	0.5	0.33
풍화암	50이상	10,000	42	0.5	0.33

#### 4. 지하공동의 안정성 검토

지하공동의 변형 및 응력에 대한 안정성을 검토하기 위하여 유한차분법을 이용하여 2차원 및 3차원 해석을 수행하였다. 본 연구에 이용된 Program은 FLAC과 FLAC-3D로 여러 종류의 지반구조물 해석에 사용할 수 있는 지반공학 전용 Program이다.

##### 가. 유한차분법(Finite Difference Method)

유한차분법은 초기치 또는 경계치가 주어질 경우의 미분방정식으로

표현된 거동을 해석하기 위한 수치해석 방법중의 하나이다.

지반을 node로 연결된 수많은 요소로 구성된 연속체로 모델링하는 점은 유한요소법(Finite Element Method)과 유사하지만, 미분방정식을 푸는 방법에 있어서는 차이점이 있다. 즉 유한요소법이 Implicit approach를 사용하는데 반해서 유한차분법은 Explicit approach를 사용한다(Fig II-28). Explicit Method는 충분히 작은 time step에서는 mesh node에서의 불평형값이 인접한 node에 의해 결정된다는 이론을 기본으로 한다. 따라서 Explicit Method는 node에서의 불평형값이 허용치 이내에 들어올 때까지 반복계산을 통하여 각 node에서의 변형과 응력을 구하며 계산과정은 Newton의 운동법칙과 Constitutive law등이 사용된다.

Explicit approach는 시간의 경과에 따른 문제해결을 매우 용이하게 하며, 유한요소법과 달리 matrix가 생성되지 않으므로 저장용량이 적은 컴퓨터에서도 사용될 수 있으며 동적인 해석에 매우 유용한 장점이 있으나, 정적문제시 대부분의 다른 수치해석법과는 달리 계산시간이 많이 소요된다는 단점이 있다.

### 1) Motion and Equilibrium

가장 간단한 형태의 운동방정식은 가속도, 질량 그리고 역계에 작용하는 힘에 관련이 있으며, 시간에 따라 변한다. Fig II-29 는 가속도, 속도 그리고 변위의 향으로 표시되는 물체의 운동을 일으키는 힘을 표시하고 있다.

Mass-spring system에서의 Newton의 운동법칙은 다음과 같다.

$$m \frac{d\dot{u}}{dt} = F \quad (6.4)$$

식 6.4는 물체에 여러 힘이 작용할 경우 가속도가 0이 될 때, 즉 힘의 합력이 0이 될 때의 정적평형상태를 보여준다. 따라서 FLAC은 정적문제를 해결하는데 있어서 이러한 운동법칙의 특성을 이용한다. 일반적으로 연속체에서 식 6.4는 다음과 같이 일반화된다.

$$\rho \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (6.5)$$

여기서,  $\rho$  = 물체의 질량

$t$  = 시간

$x_j$  = 좌표계의 요소 벡터

$g_i$  = 중력가속도

$\sigma_{ij}$  = stress tensor

## 2) 에너지 보존법칙 (Constitutive Relation)

일반적으로 변형이 발생할 수 있는 물체의 방정식은 constitutive relation 또는 응력-변형률 관계로 표현된다.

$$\dot{e}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6.6)$$

여기서,  $\dot{e}_{ij}$  = strain rate

$\dot{u}_i$  = 속도

역학적 에너지 보존법칙은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\sigma_{ij} := M(\sigma_{ij}, \dot{e}_{ij}, \chi) \quad (6.7)$$

여기서,  $M$  : functional form of the constitutive law

$\chi$  : history parameter

$:=$  : means "replaced by."

일반적으로 비선형의 에너지 보존법칙은 응력과 변형률과의 특별한 관계가 없으므로 증분의 형태로 표현된다. 가장 간단한 에너지 보존법칙은 등방성 탄성체에서의 에너지 보존법칙으로 식 6.8과 같다.

$$\sigma_{ij} := \sigma_{ij} + \left( \delta_{ij} \left( K - \frac{2}{3} G \right) \dot{e}_{kk} + 2G \dot{e}_{ij} \right) \nabla t \quad (6.8)$$

여기서,  $\delta_{ij}$  = Kronecker delta

$\nabla t$  = time step

$G, K$  = 전단 변형 계수, 체적 변형 계수

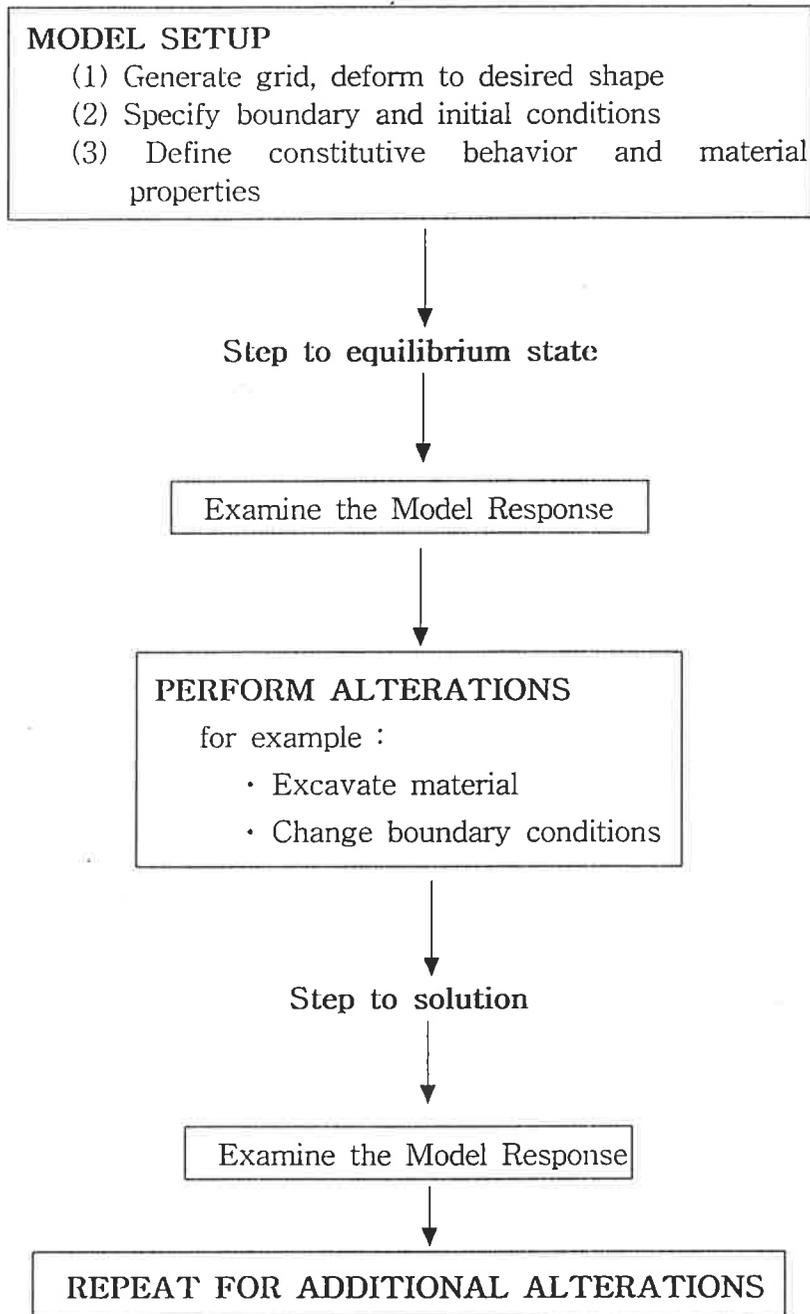
#### 나. Computer Code (FLAC)

FLAC-2D, 3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua)는 미국의 ITASCA CONSULTING GROUP, INC.에서 개발한 Program으로 Version 3.22(2-D)와 1.10(3-D)을 본 연구를 수행하기 위하여 사용하였

다.

FLAC은 지반공학문제를 해결하는 데 필요한 여러 탄소성 Model, 특히 흙과 암반의 거동해석에 가장 일반적으로 사용되는 Mohr-Coulomb Model의 사용이 가능하므로 지하공동 침하 및 응력에 대한 안정성검토에 적합한 Program이라고 할 수 있다.

1) FLAC의 일반적 해석과정



## 2) 지반의 구성모델

본 과업을 수행하기 위하여 Fig II-30과 같은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 이 모델은 Mohr-Coulomb Criteria에 의한 항복응력 ( $\sigma_y$ )내에서는 탄성계수(E)에 따라 탄성거동을 하지만 항복응력을 초과할 경우에는 소성변형을 하게된다. 이 모델의 사용에 필요한 입력치는 elastic bulk modulus (K), cohesion (C), mass density ( $\rho$ ), internal angle of friction ( $\phi$ ), elastic shear modulus (G) 등의 값을 사용하며, K와 G는 식 6.9 및 식 6.10에 의하여 구한다.

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (6.9)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (6.10)$$

### 다. 해석 Model

지하공동의 안정성 검토를 위한 해석절차는 다음과 같으며, 해석단면도는 Fig II-31과 Fig II-32와 같다.

#### 1) 현재 상태

본 연구의 지하공동 모델로 이용된 고분의 발굴당시의 자료에 의하면 각종 식생이 고분 상부에 존재하였으며 식생의 뿌리가 고분내부까지 근입되어 있었던 것으로 판단된다. 고분 주변 지반은 식생 뿌리에

의한 보강효과로 인하여 상당히 안정한 상태를 오랫동안 유지하였을 것으로 판단된다. 또한 강우의 침투로 인한 수분증가량을 뿌리가 적절히 흡수함으로써 지반함수비의 증가를 방지하고 이에 따라 뿌리주변의 간극수압이 음의 값을 유지함으로써 지반의 안정성을 유지할 수 있었던 것으로 판단된다. 발굴 후 식생 및 뿌리의 제거로 인하여 지반의 보강효과가 감소하고 봉분 주변 지반의 함수비가 증가하여 봉분자체가 불안정해지는 원인이 된 것으로 판단된다.

따라서 지하공동 고분 인근 지반의 인위적 환경변화와 우기시 강우 침투와 배수불량으로 인한 영향이 지하공동 내벽의 응력과 변위에 미치는 영향을 고려하였다.

현장조사결과 고분 내벽에는 습기가 가득하였으며 일부분에서는 녹조류가 발견되었다. 이로 미루어 보아 우기시 상당한 양의 강우가 지하공동 내로 유입되었으며, 배수상태도 불량한 것으로 판단된다. 따라서 지하공동 주변지반의 함수비 증가로 인한 지반물성치의 감소가 지하공동의 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2) 상부토량 규모 축소 단계

지반물성치 감소로 인해 지하공동에 상당량의 변위가 발생한 것으로 나타났으며 현재의 geometry를 계속 유지하는 경우 추가적인 변위 가능성에 관한 연구를 수행하였다. 따라서 지하공동에 작용하는 하중의 경감이 응력과 변위에 미치는 영향을 분석하였다.

## 3) 배수구조물 설치단계

배수구조물의 설치를 위한 트렌치 시공이 지하공동에 미치는 영향을 검토하였으며, 배수시설로 인한 강우침투 방지효과로 인하여 지하공

동 내벽 및 주변지반의 함수비의 감소로 인한 지반물성치의 증가가 응력과 변위에 미치는 영향을 검토하였다.

#### 라. 해석결과

지하공동의 해석단면도에 도시된 천정 및 내벽에서의 변위와 응력을 해석단계별로 산정하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다. 지하공동의 변위 및 응력 산정시 고려된  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 의 좌표계는 해석단면도에 나타낸 바와 같다.

지하공동의 천정부와 내벽의 해석단계별 변위를 정리하면 Table II-9와 같다.

Table II-9. 천정부 및 내벽의 변위량 (단위: mm)

		현재 상태	상부토량 축소 단계	배수구 설치 단계
천정1	x-dis.	-1.44	-0.62	-0.53
	y-dis.	-5.80	-8.49	-8.65
	z-dis.	-29.4	-23.3	-20.0
천정2	x-dis.	-1.10	-0.59	-0.51
	y-dis.	-4.71	-6.72	-6.76
	z-dis.	-34.3	-34.3	-31.8
천정3	x-dis.	-1.22	-0.63	-0.54
	y-dis.	-2.78	-4.70	-4.62
	z-dis.	-22.9	-20.3	-17.8
내벽1	x-dis.	-13.2	-12.7	-12.1
	y-dis.	-7.52	-11.0	-10.4
	z-dis.	-6.51	-3.80	-2.08
내벽2	x-dis.	8.60	10.0	9.60
	y-dis.	-7.27	-11.9	-11.4
	z-dis.	-6.08	-4.17	-2.43

한편, 천정부와 내벽의 해석단계별 응력을 정리하면 Table II-10과 같다.

Table II-10. 천정부 및 내벽의 응력 (단위: t/m<sup>2</sup>)

		발굴 이전 단계	현재 상태	봉분 축소 단계	배수구 설치 단계
천정1	x-str.	-4.10	-4.80	-2.81	-2.63
	y-str.	-2.80	-3.00	-2.06	-2.14
	z-str.	-4.79	-4.25	-1.57	-1.03
천정2	x-str.	-4.02	-3.12	-2.63	-2.41
	y-str.	-2.57	-1.55	-1.78	-1.84
	z-str.	-3.19	-1.12	-0.34	-0.37
천정3	x-str.	-3.71	-4.94	-4.08	-3.93
	y-str.	-2.80	-4.43	-3.63	-3.48
	z-str.	-4.06	-5.81	-3.06	-2.44
내벽1	x-str.	-1.16	-0.87	-0.40	-0.25
	y-str.	-3.76	-4.90	-2.48	-1.54
	z-str.	-10.1	-5.49	-2.91	-0.93
내벽2	x-str.	-1.16	-0.81	-0.28	-0.11
	y-str.	-3.64	-4.68	-1.78	-0.84
	z-str.	-9.85	-5.16	-2.12	-0.15

( + : 인장응력, - : 압축응력)

1) 현재 상태

지하공동(고분) 발굴 후 인위적인 환경변화와 지속적인 강우침투의 영향과 배수불량으로 인한 주변지반 및 내벽의 물성치의 저하로 인하여 지하공동 내벽에 일정한 변위가 발생한 것으로 나타났다. 천정부에서 최대 침하량(z-dis.) 34.3mm, 내벽에서 최대 수평변위량 (x-dis.) 13.2mm가 발생하였으며, 입구부의 조성으로 인한 토압의 경감은 횡방

향의 변위(y-dis.)를 가중시킨 것으로 나타났다. 이는 배수불량으로 인한 인접지반 및 내벽의 물성치의 저하와 지속적인 강우침투로 인한 영향 때문인 것으로 판단되며, 지하공동의 안정성을 위해 지하공동 내로 강우가 유입되는 것을 차단하여야 함을 시사하고 있다.

### 2) 상부토량 축소 단계

상부토량의 규모 축소를 검토한 결과, 지하공동의 천정부 및 내벽에서 일정량의 변위가 제거되었으나 그 양은 작은 것으로 나타났다. 이는 지속적인 강우침투의 영향으로 발생한 변위는 오랜 시간에 걸쳐 발생하였으므로 상부토량의 일정량을 제거한다 하여도 기존에 발생한 변위는 남아있는 것으로 판단된다. Table II-10은 상부토량 규모의 축소가 변위보다는 지하공동의 응력상태에 밀접한 관계를 가지는 것을 나타낸다. 즉 상부토량을 축소하면 천정부 및 내벽의 응력은 현재상태와 비교해볼 때 최대 70%정도 경감하는 것으로 나타났다.

위의 결과로 미루어볼 때 지하공동 부지로 수분이 계속 유입되고 상부토량의 하중이 작용하면 추가적인 변위가 지속적으로 발생할 것으로 판단되며 따라서 상부토량의 규모를 축소함과 동시에 지하공동 부지내로의 강우 유입의 차단이 필요하다고 판단된다.

### 3) 배수구 설치 단계

지하공동 부지 내로의 강우침투를 방지하고 우기시 적절한 유도배수를 위한 배수구의 설치에 상부토량 축소 단계와 비교해볼 때 변위와 응력의 변화는 거의 없었으며, 배수구 설치를 위한 트렌치 공사가 지하공동에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 Table II-9, Table II-10의 해석결과에 나타났듯이 기존에 발생한 변위는 지속적인

강우 침투와 배수불량의 영향 때문이다. 따라서 지하공동 부지내로의 강우 유입을 차단하고 우기시 적절한 유도배수를 할 수 있는 배수구를 반드시 설치하여 추가적으로 발생 가능한 변위를 억제해 주어야 한다.

## 5. 지하공동의 안전성

지하공동 상부의 식생에 의한 뿌리는 지반보강효과와 지반의 함수비 감소효과를 가져와 지반의 물성치를 강화시켜주는 것으로 해석된다. 한편, 지하공동 부지내로의 지속적인 강우침투와 배수불량 현상으로 인한 지반 및 지하공동 내벽의 물성치의 저하를 초래하며 이는 지하공동의 천정부 및 내벽에서의 일정량의 변위를 초래하는 것으로 나타났다. 그러므로 저장용 지하공동의 건설시에는 실제로 상부토량의 제거가 불가능하므로 본 연구에서 밝혀진 결과를 적용하여 천정부위와 천정아치와 수직벽이 접하는 부분에 대한 보강설계가 이루어져야만 함을 시사하고 있다.

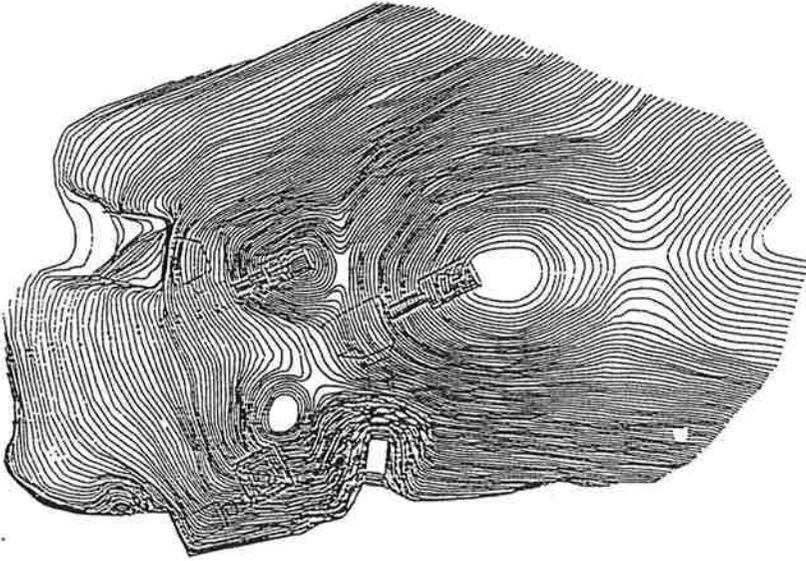


Fig II-25. 검토대상 주변 현황도

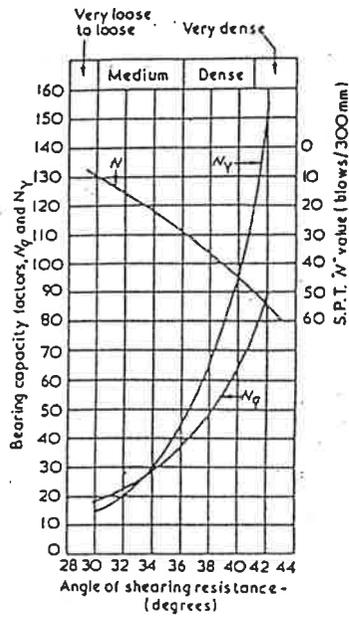


Fig II-26. Relationship between  $N$ ,  $\phi$  (Peck-Hanson-Thornburn, 1953)

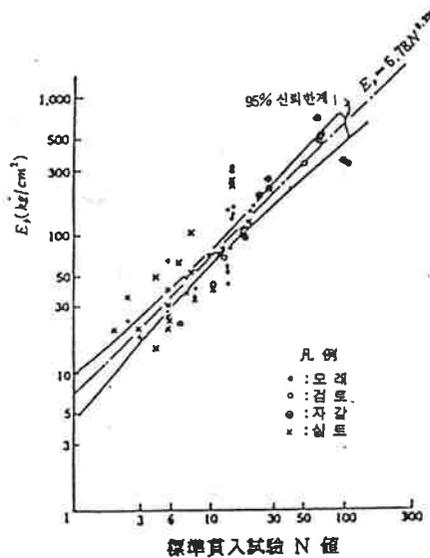


Fig II-27. Relationship between  $N$  and  $E$  (Yoshinaka, 1968)

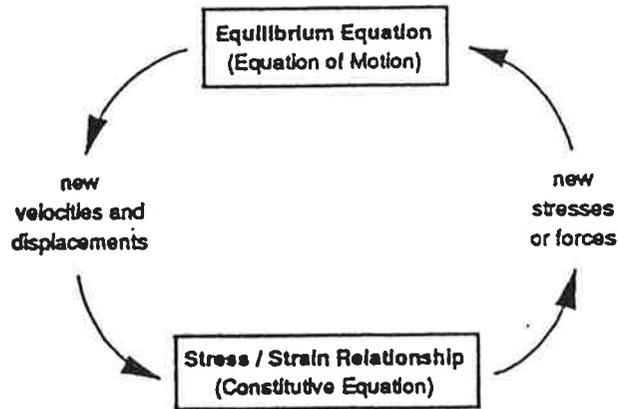


Fig II-28. Basic explicit calculation cycle

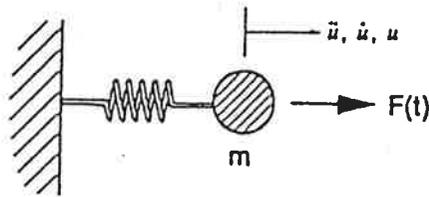


Fig II-29. Application of a time-varying force to a mass, resulting in acceleration( $\ddot{u}$ ), velocity( $\dot{u}$ ) and displacement( $u$ )

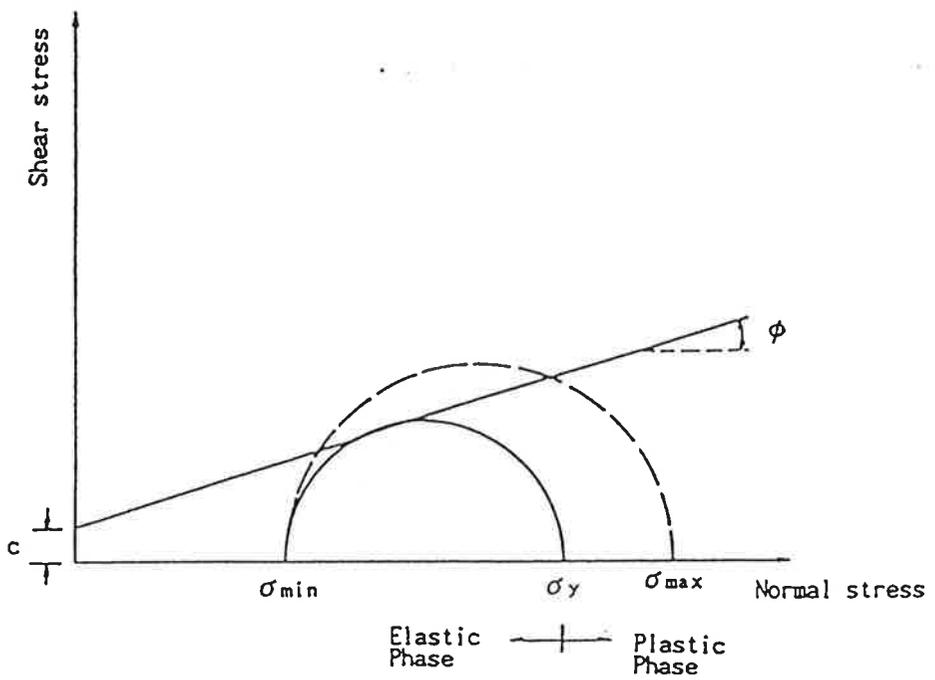


Fig II-30. Mohr-Coulomb Criteria for Elastic-Plastic Model

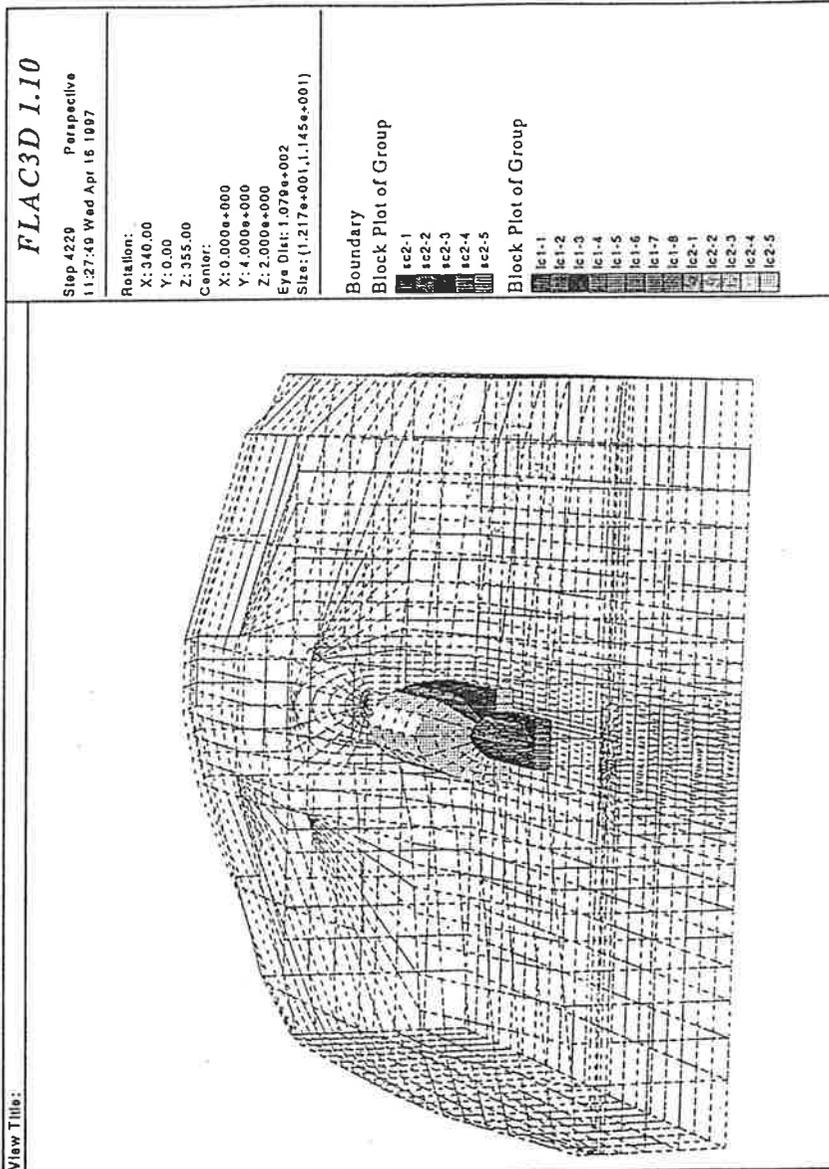


Fig II-31. 지하공동과 주변지반

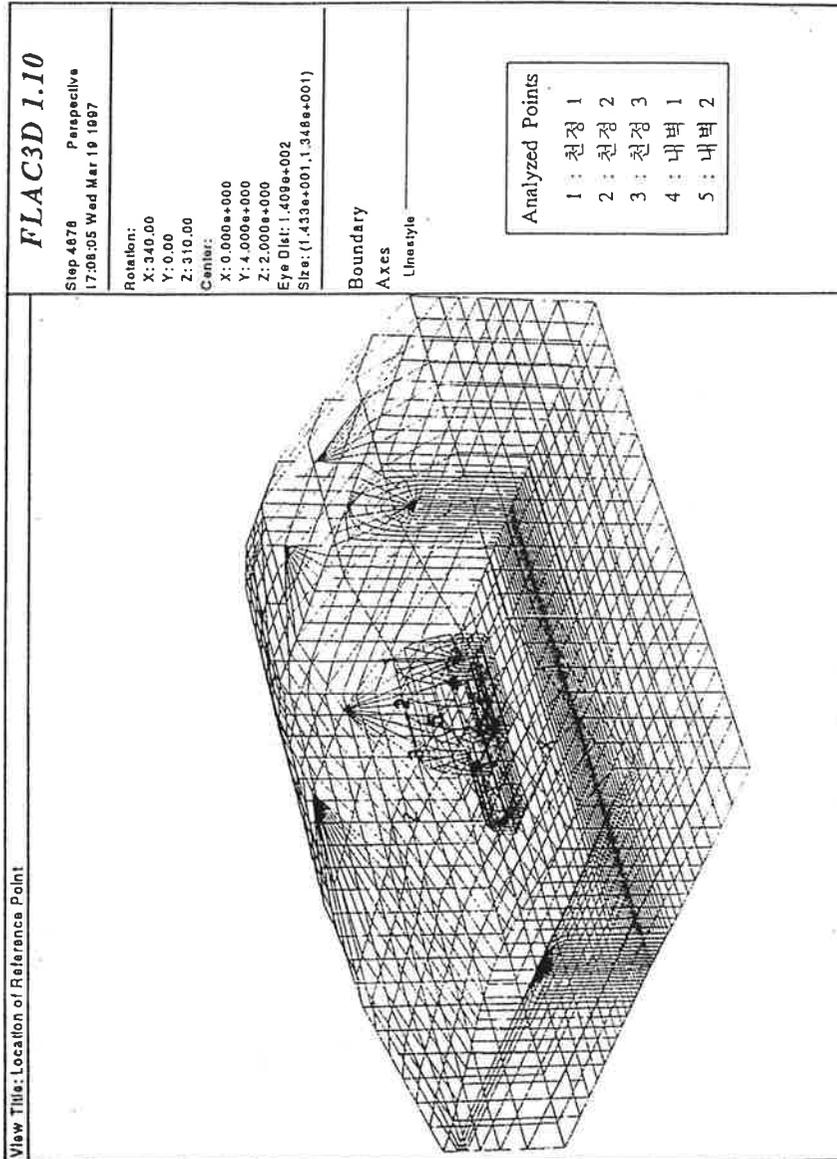


Fig II-32. 지하공동의 해석 mesh

## 제 7 절 지하저장고 사후모니터링시스템

지하저장고의 사후모니터링 시스템은 우선 지하저장고의 안전성과 연관된 지하저장고의 구조자체의 거동감지시스템을 들 수 있다. 둘째로 지하공동 주변의 수분이동 모니터링 시스템을 들 수 있다. 다음으로 지하저장고 내의 저장상태를 좌우하는 온·습도 모니터링 시스템을 들 수 있다.

### 1. 지하공동의 거동 모니터링 시스템

#### 가. Tiltmeter 측정원리

금번 연구에 사용된 벽체 경사변화 계측기는 미국의 AGI(Applied Geomechanics Inc.)사의 모델로써, 지구의 중력방향을 기준으로 하는 고도로 정밀한 센서이다. Tiltmeter의 형식은 전해관식(Electrolytic type)으로 기포관의 원리를 이용한 것이다. 즉, 전해액이 삽입된 기포관의 입력단자로 입력된 전압은 전해액을 통과하면서 출력전압으로 바뀌어 출력되며, 기포관이 수평을 유지할 때, 출력전압은 0이 된다. 구조물이 경사변형을 일으키면 기포관내의 기포가 기울어지게 되며, 이때 동일한 입력전압에서 출력되는 출력전압이 변한다. 이 미소하게 변하는 아날로그 출력전압의 크기는 신호처리기(signal processor)에 의해 디지털 신호로 변환되어 출력된다. 변환계수(calibration factor)는 약  $1.0 \mu\text{radian/mV}$ 이다. Fig II-33 은 Tiltmeter 센서의 구조와 전기적 특성을 나타낸 것이다. Tiltmeter의 Sensor는 측정기준이 지구의 중력방향이므로 기준점의 변동에 의한 오차가 없고, 기계적인 마찰이 발생하

지 않으므로 반영구적이다. 또한 센서의 정밀도가 높고 (정밀도  $1.0 \mu$  radian, [ $0.1 \mu$  radian도 가능]), 센서가 가벼우므로 설치작업에 있어서 지하공동 벽면에 영향을 미치지 않으며 원하는 시간 간격으로 자동계측이 가능하다.

#### 나. 자동계측

지하구조의 거동은 매우 완만하게 발생하므로 가끔 한번씩 측정하는 방법으로는 그 변화를 예측하기가 어렵다. 수동계측에 의한 1회/(1일~2일) 정도의 측정빈도로는 온도의 일주기 영향등의 기타 요소의 변화로 인하여 구조의 변형을 파악하기 어려우므로 자동계측시스템에 의하여 짧은 측정간격으로 장기간 계측하여야 소기의 목적을 이룰 수 있다. 지하공동의 천정부, 벽체의 위험부위, 특히 천정아치와 수직벽이 접하는 인근 부위등에 자동계측 sensor를 여러조 부착하고 이들로부터 나오는 미약한 신호들을 증폭시켜 자동 Data Logger에 저장한 뒤 전화선을 통하여 자료처리 Computer와 연결하여 자료를 취득 분석하는 시스템을 구축하였다(Fig II-34).

## 2. 지하공동 주위 수분이동 모니터링 시스템

지하공동 내로의 강우의 유입을 방지하는 차수 및 배수시설의 시공 후, 효과적인 보수보강이 이루어 졌는지의 여부와 차수시스템의 손상여부, 지하수위의 변동 등을 파악하기 위해서 각 지하공동 주변지반의 함수비의 변화를 연속적으로 모니터링할 필요가 있다. 따라서 본 연구에

서는 함수비 및 지하수위의 변화를 측정할 수 있는 TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 모니터링 시스템을 차수 및 배수시설의 시공 후에 각 지하공동 주변지반과 표준관입시험후 설치된 보링공 3개소에 설치할 것을 제안하였다. TDR시스템은 함수비를 연속적으로 측정할 수 있는 측정기술로서 최근에 국내에 도입되어 적용되고 있다.

## 가. TDR의 원리와 함수비 측정

### 1) TDR의 원리

TDR은 원격감지식 전기측정기술로 원래 전기송전선이나, 전화선, 광케이블이 파손된 경우 그 위치를 파악하기 위해 개발된 전기파형 분석기술이다. TDR은 전기신호를 발생하는 장치, 전기신호를 전달하고 환경의 변화를 감지하는 전달매체(transmission line), 반사신호를 측정하여 분석하는 장치로 구성된다. 일반적으로 전기신호 발생장치와 반사신호 측정장치는 케이블시험기(cable tester)에 내장되어 있으며 케이블시험기에서 발생된 전기신호가 지반에 매설된 전달매체를 따라 전달되면서 전달매체 자체의 형상변화나 전달매체 주변의 물리적/전기적 변화가 있는 경우 신호가 반사되어 케이블시험기로 전달된다. 전기신호를 전달하는 매체는 측정대상에 따라 다르며, 지반이나 암반의 거동을 측정할 때는 동축케이블(coaxial cable)을, 지반내의 수분이동이나 함수비의 변화를 측정할 때는 TDR탐침(TDR probe, waveguide)을 사용한다. TDR신호는 동축케이블의 인장, 전단, 꺾임등의 변형뿐만 아니라 탐침 주변의 유전율(dielectric constant)이나 전기전도도(electric conductivity)의 변화를 감지할 수 있다.

Fellner-Feldegg (1966)는 TDR로 화학적 용매의 유전특성

(dielectric property)변화를 측정하는 방법을 최초로 소개하였다. 그 후 많은 토질관련 연구자들도 지반에 매설된 탐침으로부터 반사신호의 진폭을 측정함으로써 흙의 전기전도도(electric conductivity)와 체적함수비(volumetric water content)를 측정하는데 TDR을 이용하기 시작하였으며, Topp등(1980)은 실내시험을 통해 여러 종류의 흙에 대해 유전율(dielectric constant)과 체적함수비 사이의 관계를 제안하였다.

Topp(1982)는 지반에 매설된 탐침을 이용하여 wetting front의 위치를 결정하는데 TDR기술을 이용하였으며, Topp등(1988)은 동축케이블로, Zegel-in(1989)은 여러 가지 종류의 탐침을 이용하여 물과 공기의 경계면을 측정하였다. 최근에는 핵폐기물이 저장된 지하구조물 인근 지반의 온도변화, 또는 지반이나 지하수의 오염물질의 종류를 알아내고 이동양상을 추적하는데 필요한 TDR기술의 개발에 많은 연구가 진행되고 있으며, 포장구조물 하부에서의 함수비 변화를 지속적으로 모니터링 하는 방법으로도 응용되고 있다.

TDR은 기존의 계측방식에 비해 시스템의 설치가 쉽고 모뎀이나 무선통신으로 데이터의 수집이 가능하므로 원거리에서 지반내부의 변화를 연속적으로 파악할 수 있으며, 작업인력이 매번 현장에서 계측을 실시하는 번거러움이 없고, 최대 64개 시추공까지 1대의 TDR시스템에 연결하여(multiplexing) 자동화 계측을 실시할 수 있다. Fig II-35 는 TDR의 원격-다중송신에 대한 개략도이다.

## 2) 함수비 측정을 위한 TDR 시스템의 구성

지반의 함수비 측정을 위한 TDR 시스템은 케이블시험기, TDR 탐침(probe), 탐침과 케이블을 연결하는 동축케이블로 구성되며 Fig II-36 과 같이 연결된다. 케이블시험기에서 발생한 step pulse가 동축케

이불과 TDR 탐침을 통과하면서 반사신호를 발생한다. 지반의 유전율(dielectric constant)이나 전기전도도(electric conductivity)를 측정하기 위한 TDR 탐침은 2 ~ 3개의 평행한 도선으로 구성되며 도선 사이에 있는 흙의 전자기적 성질에 따라 TDR 반사신호의 형태에 영향을 준다.

### 3) TDR에 의한 유전율(Dielectric Constant)의 측정

TDR은 탐침을 따라 전달/반사되는 전압신호에 의해 탐침 주변지반의 유전율을 측정한다. 유전율은 주변지반의 절연체로서의 능력을 나타내는 척도, 즉 지반이 전자기에너지의 전도를 제지하는 능력을 의미한다. 수분을 함유한 porous material을 통과하는 전자기파는 다음의 두 가지 요인에 의하여 에너지가 소산된다. 첫째, polarization 또는 relaxation으로 인해 흙에 함유된 분자(molecules)나 양극성 이온이 전자기의 변화에 적응하는데 일정시간이 소요되며 이는 전자기파의 작용과 흙의 반응간에 위상차로 나타난다. 이 위상차는 각주파수(angular frequency;  $\omega$ )의 함수이므로 유전율( $K^*$ )은 복소수함수로 표현된다. 두 번째로는 흙의 전기전도도(electric conductivity:  $\sigma$ )로 인한 dielectric loss이다. 전기전도도는 흙입자 표면의 전기적 용량( $\sigma_s$ )과 물에 녹아 있는 전해질에 의한 이온용량( $\sigma_w$ )에 의한 것이다.  $\sigma_s$ 는 흙의 비표면적에 비례하므로 모래에서의  $\sigma_s$ 는 작으나 heavy clay에서는  $\sigma_s$ 가 상당히 크다.  $K^*$ 의 실수부를  $K'(\omega)$ , 허수부를  $K''(\omega)$ 라고 하면 위에서 설명한 두 가지 원인에 의한 에너지 감소에 상응하는 유전율  $K^*$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$K^* = K'(\omega) - i \left[ K''(\omega) + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0} \right] = K'(\omega)(1 - i \tan \delta) \quad (7.1)$$

여기서  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$ =각주파수,  $\sigma_{dc}$ =zero frequency conductivity,  $\epsilon_0$ =free space permittivity ( $8.85418 \times 10^{-12}$  F/m),  $\tan \delta$ =loss tangent이며 모든 dielectric loss의 lump sum이다. 흙의 표면에 정전기적으로 결합된 물은 자유수보다 움직임이 부자유스러워  $K^*$ 가 순수한 물의  $K^*$ 보다 작은 값을 갖는다. 일반적으로 relaxation효과로 인한 에너지 감소는 각주파수가 클수록 증가하는 반면, 전기전도도로 인한 에너지 감소는 각주파수가 적을수록 커진다.

전기전도도의 변화는 반사신호의 감쇠를 야기할 수 있으며 지반의 전기전도도가 작거나 TDR 탐침의 길이가 증가하면 감쇠현상이 증가할 수 있다. Dalton 등(1982)은 이러한 감쇠현상으로부터 전기전도도를 추정하는 방법을 제시하였다. 흙의 전기전도도( $\sigma$ )는 신호의 전달과정에서 발생한 전압의 감쇠( $\alpha$ )를 결정한다. 유전율( $K^*$ )은 흙의 체적함수비( $\theta$ )와 관계되며 TDR 신호의 왕복속도와 흙의 전기전도도( $\sigma$ )에 의해 결정된다. Fig II-35는 전달신호와 반사신호의 경로 및 이상화된 TDR 신호를 보이고 있다.

Topp(1980)와 Arulanandan(1991)에 의하면 GHz나 MHz 범위에서 흙의 유전율은 주파수에 무관하며 허수부( $K''$ )는 무시할 수 있다고 한다. 즉,  $K'' + \sigma_{dc}/\omega \epsilon_0 < K'$ 인 경우 신호의 전달속도와 전압의 감쇠는 다음과 같이 표현된다.

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (7.2)$$

$$\alpha = \frac{60\pi(\omega\epsilon_o K'' + \sigma_{dc})}{\sqrt{K'}} \quad (7.3)$$

식 7.2와 7.3은 각각 TDR로부터 체적함수비(volumetric moisture content;  $\theta$ )와 전기전도도(electric conductivity;  $\sigma$ )를 계산하는 기본식이다. 길이가 L인 탐침을 따라 TDR신호가 왕복하는데 걸리는 시간은

$$\Delta t = \frac{2L}{V} \quad (7.4)$$

식 7.4와 7.2를 조합하면 탐침이 설치된 주변지반의 유전율은 다음 식으로 표현할 수 있다. Topp(1980)은  $K'$ 를  $K_a$ 로 대체하고 걸보기 유전율(apparent dielectric constant)이라고 하였다.

$$K' = K_a = \left(\frac{c\Delta t}{2L}\right)^2 \quad (7.5)$$

TDR과형의 분석으로부터 신호의 왕복시간  $\Delta t$ 나 걸보기 탐침길이 ( $L_a=c\Delta t/2$ )를 구하면 걸보기유전율을 다음과 같이 걸보기 탐침길이의 실제 탐침길이에 대한 비로 나타낼 수 있다.

$$K_a = \left(\frac{L_a}{L}\right)^2 \quad (7.6)$$

#### 4) 체적함수비와 걸보기유전율의 관계

Davis등(1975)과 Topp등(1980)은 다양한 종류의 흙에 대해 실내시

험을 실시하여 겉보기유전율(apparent dielectric constant;  $K_a$ )과 체적함수비(volumetric moisture content;  $\theta$ )간의 경험식을 제안하였다. Topp등(1980)은 TDR로 측정된  $K_a$ 와 오븐건조로 결정한 함수비간의 관계를  $K_a$ 와  $\theta$ 간의 다항식의 형태로 표현하였다.

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (7.7)$$

Topp등(1980)은 위 식이 여러종류의 흙에 적용할 수 있고 흙의 밀도, 온도, 염분함유량에 영향을 받지 않는다고 주장하였다. 식 7.7은 아직 많이 사용되며 여러종류의 흙에 비교적 잘 맞으므로 universal equation이라고 불린다.

Zegelin등(1992)은 식 7.7이 조립토의 경우에 적절하며 유기질흙, 세립토, 조밀한 흙, heavy clay에는 부적절하다고 주장하면서 흙을 물-흙 입자-공기의 혼합물로 고려하는 mixing model을 제안하였다.

$$K = [\theta K_w^\beta + (1 - \phi) K_s^\beta + (\phi - \theta) K_{air}^\beta]^{\frac{1}{\beta}} \quad (7.8)$$

여기서  $K$ 는 혼합물의 유전율;  $\phi$ 는 흙의 간극율;  $K_w$ ,  $K_s$ ,  $K_{air}$ 는 각각 물, 토립자, 공기의 유전율;  $\beta$ 는 혼합물의 배열과 전기장에서의 방향성 등에 지배를 받는 기하학적 요소이며 -1에서 +1까지의 값을 갖는다. Alharthi등(1987), Whalley(1993), Ledieu등(1986)은 식 7.8에  $\beta=0.5$ 로 하고  $K_w$ ,  $K_s$ ,  $K_{air}$ 의 값을 넣어 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\sqrt{K_a} = 7.83\theta + 1.594 \quad (7.9)$$

$$\sqrt{K_a} = 8.546\theta + 0.5698\sqrt{K_s} + 0.43 \quad (7.10)$$

$$\sqrt{K_a} = 8.787\theta + 1.545 \quad (7.11)$$

Fig II-37 은 식 7.7, 7.9, 7.10, 7.11을 함께 도시한 결과이다.

#### 나. 지하공동 주변의 함수비 및 지하수위 변화 monitoring system

지하공동 내로의 강우 유입상태 파악과 차수시설의 손상여부, 지하수위의 변동 등을 수시로 파악하기 위해 함수비를 연속적으로 측정할 수 있는 계측기술로서 TDR System을 들 수 있다.

Fig II-38 과 같이 지하공동 주위에 여러개의 계측지점을 설정하여 TDR 탐침 설치 단면도와 지하수위 측정을 위한 봉을 설치할 필요가 있다. 각 계측지점에서 나오는 케이블은 지하저장고 입구쪽의 사면에 데이터 수집 박스를 설치하여 수집한다.

### 3. 지하저장고 온·습도 모니터링 시스템

지하공동 내부와 외부에 자동온습도계를 설치하여 매 5분 간격으로 온도와 습도를 측정하였다. 여기서 내부는 고분의 현실내 지상 1.8m

상공이며 외부는 고분의 전실로서 외부공기와 통하는 지점을 의미한다. 측정은 1996년 6월 13일부터 시작하여 1997년 4월 22일에 관측을 종료하고 그 동안 기록 저장된 자료를 전산처리하였다. 그 이후는 대기 온도와 지하 6m 온도와 상관성을 밝히기 위하여 시추공을 이용한 온·습도 모니터링을 실시하였다. 각 그래프의 횡축은 측정시각을 월(month)단위로 표기하였으며 종축은 온도를 °C, 습도를 % 단위로 나타내었다.

지하공동 내부의 온도는 제습기가 작동하는 경우에는 제습기에서 발생하는 열 때문에 변화추이를 알기는 어려웠다. 제습기가 작동할 때는 일변화를 감안하여 25~34°C 범위 내에서 온도가 변화하였다. 전반적으로 지하공간 내부의 온도는 6월 중순의 18°C에서 서서히 증가하여 10월 중순에는 25°C를 나타내고 있다. 10월 중순부터 1월 중순까지는 지하공간 내의 제습기가 정상적으로 작동하여 온도추이를 분석하기 어려웠던 것이 사실이다. 1월 중순부터 3월 중순까지는 지하공간 내의 온도가 18~22°C 범위를 보여 연중 변화폭이 대략 7°C 정도임을 보여 주고 있다. 한편, 외기와 통하는 전실공간의 온도는 96년 6월 중순부터 10월 중순까지 20°C부터 점차 증가하여 8월 중순에 28°C까지 서서히 상승하다가 8월 하순까지 온도가 서서히 하강하고 있다.

본 연구에서 이용된 지하공간 내부 온도곡선과 외부 온도곡선이 교차하는 시기는 9월 4일 경이다. 즉, 9월 4일 이전에는 외부온도가 내부 온도보다 높았으나 이 시점을 경계로 이후에는 내부온도가 외부온도보다 서서히 높아지는 경향을 보인다. 97년 1월 중순부터 3월 중순까지 내부의 온도가 외부보다 평균 4°C 정도 높게 유지되었다(Fig II-39).

습도 모니터링 역시 온도와 같은 위치에서 실시되었다(Fig II-40). 지하공간 내부의 경우는 거의 대부분 상대습도가 100% 상태였다. 다

만, 제습기가 정상적으로 작동하였던 96년 10월 중순부터 97년 1월 중순까지는 약 60%의 상대습도를 유지하였다. 그러나, 제습기의 작동이 중단되었던 97년 1월 중순부터 97년 3월 중순까지는 건기임에도 불구하고 또 다시 상대습도 100%를 유지하고 있음이 밝혀졌다. 한편, 외기와 통하는 전실내의 습도는 우기인 96년 6~7월 사이는 85~100%의 상대습도를 유지하였으며 96년 9월~97년 2월까지의 기온변화에 따라 다소 기복이 있지만 대체로 60~70%의 상대습도를 유지하였다. 한편, 97년 3월 이후는 상대습도가 40~50% 정도를 유지하였다. 습도측정은 습도측정기가 정밀 전자식 모델인 관계로 지하공간 내의 상대습도가 100%를 유지하는 경우에는 측정에 있어서 오류를 발생시키기도 하였으나 대체적인 경향은 파악 가능하였다.

본 연구대상이었던 지하공간 내의 온도는 제습기가 자동할 때에는 내부의 온도가 28~34℃의 범위 내에서 일정하게 유지되고 있고, 이 때의 내부습도는 55~60%의 범위를 유지하고 있다. 그러나, 제습기가 작동하지 않을 때의 내부온도는 18~20℃의 범위를 보이고 이 때의 습도는 거의 100%를 유지하여 자동습도계의 작동오류를 일으킬 정도이다. 외부습도는 거의 60%의 범위에서 일정하게 유지되고 있다. 온·습도 모니터링 결과를 분석해 보면 지하공간내에 설치되어 있는 제습기는 열중심으로 되어 내부의 온도를 13℃ 이상 높여주는 효과를 가해주고 상대습도만 하강시킬 뿐 절대습도 저감에는 크게 도움이 되지 않는 것으로 판단된다. 그러므로 지하저장시설을 위한 지하공간의 건설시 제습목적으로 열풍식 제습기를 설치하는 우를 범해서는 안될 것이다.

#### 4. 지하공간내 결로원인 분석

지하의 온도분포 파악을 위하여 1997년 5월 10일부터 9월 30일까지, 지하공간에 가장 가까운 시추공에 지하 6m 되는 깊이에 온도센서를 설치하고 지표의 온도변화에 대한 모니터링을 병행하여 Fig II-41에 동일기간의 지하공간 내부의 온도와 함께 나타내었다. 지표온도의 일평균 기온은 관측기간(97년 5월 10일~97년 9월 30일)동안 최대 40°C(7월 22일), 최저 10°C(5월 17일)의 범위에서 변화하고 있다.

지표로부터 6m 깊이의 지하온도는 97년 5월 14일 15°C에서 97년 9월 20일까지 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 한편, 지표온도는 7월 22일에 최대치를 보인 반면 지하 6m 온도는 약 2개월 지연되어 9월 20일에 최대치가 나타나고 있다. 이는 지표온도가 지하로 전도되면서 지연되는 자연적인 현상으로 해석된다.

지표온도와 지하온도의 변화특성을 분석하여 보면, 지하 6m의 온도는 일변화가 거의 없음을 알 수 있다. 그러나, 9월 20일 이후에는 지하 6m 온도의 경우 온도 변화 폭은 작지만 일변화 경향을 보이고 있다. 지표에서 일변화 주기와 비교하여 볼 때 약 7시간 지연되어 나타나고 있다. 다른 기간동안은 지하 6m 온도에서 전혀 일변화 경향이 발견되지 않다가 9월 20일 이후에만 일변화 경향이 나타나는 원인은 현재로서는 불명확하다.

한편, 지하공간 내부의 온도는 1997년 7월 20일까지는 지하 6m 온도 보다 8~15°C 높게 유지되다가 1997년 7월 20일 공간내부에 향온·향습기를 설치한 이후 2~3°C 높게 유지되고 있다. 지하공간 내부의 온도가 지중 온도보다 크게 높을 때에는 지하공간 벽체에 결로현상이 심했는데, 현실 내부의 온도와 지중온도가 거의 비슷할 때는 지하공간 벽체에 결로현상이 거의 없다. 즉 지하공간 온도와 지중온도가 2~3°C 유지했을 때에 지하공간 내부 벽체에 결로현상이 거의 없었다. 이처럼

지중 온도와 현실 내부의 온도를 일치시키는 일은 지하저장고 내부에 발생하는 결로현상 해결을 위해서도 반드시 필요할 것으로 판단된다.

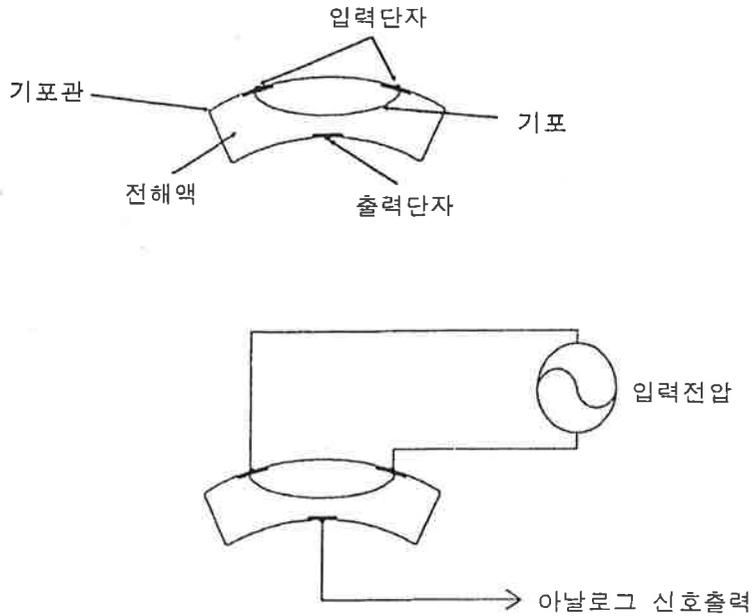


Fig II-33. Tiltmeter 센서의 구조와 전기적 특성

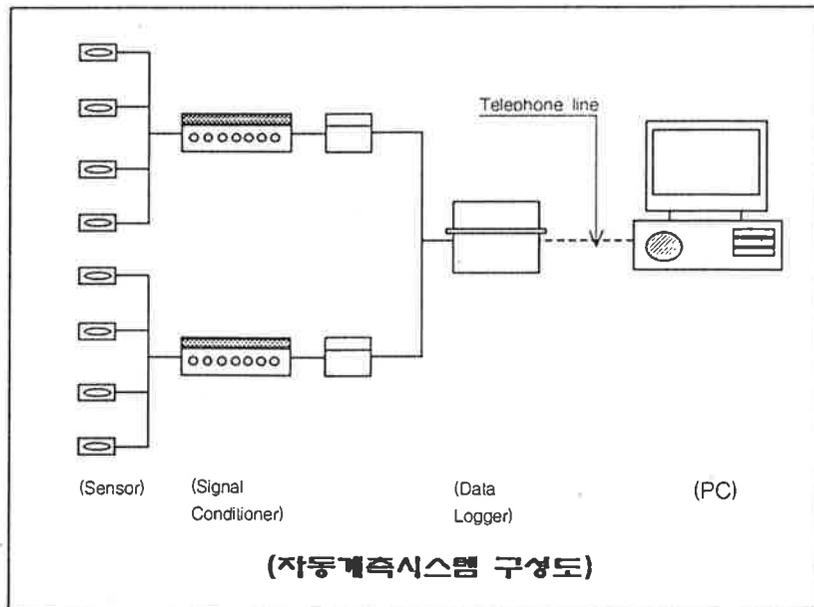


Fig II-34. 지하공동벽체거동 자동계측시스템 구성도

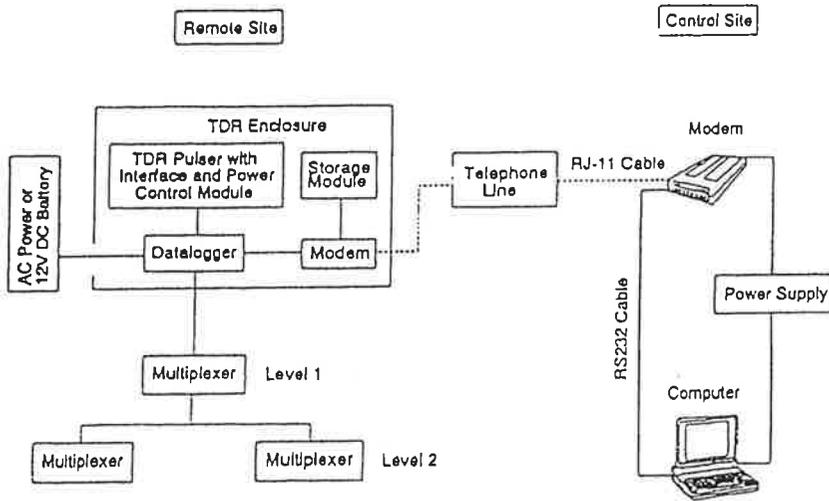


Fig II -35. TDR의 원격-다중송신 개략도

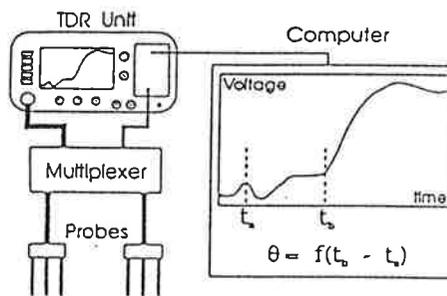


Figure 1.-CSIRO's PyeLab system.

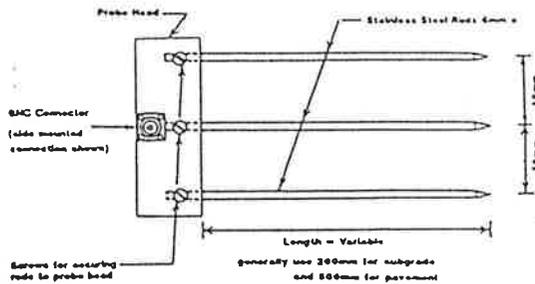


Fig II -36. TDR 시스템의 구성

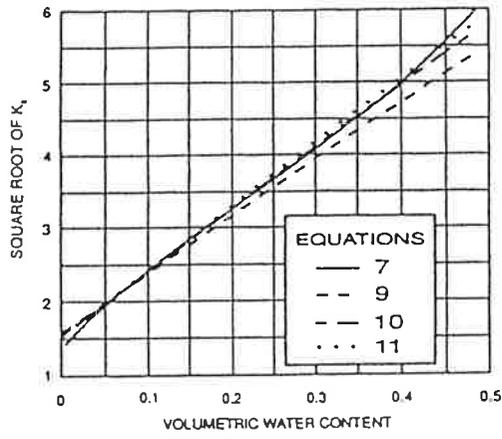


Fig II-37. 결보기 유전율과 체적함수비

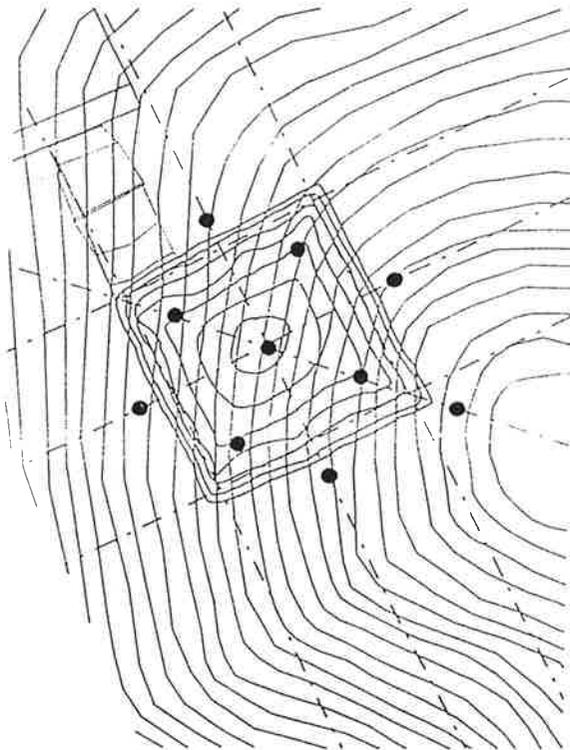


Fig II-38. TDR의 설치 위치도

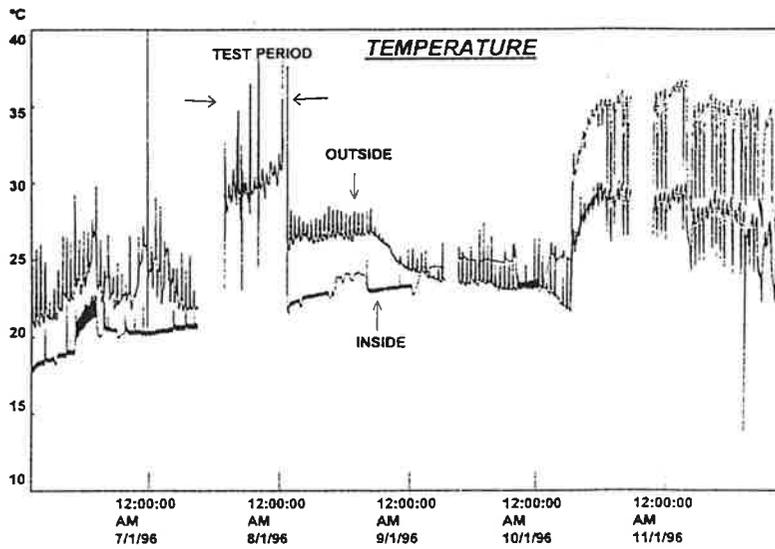
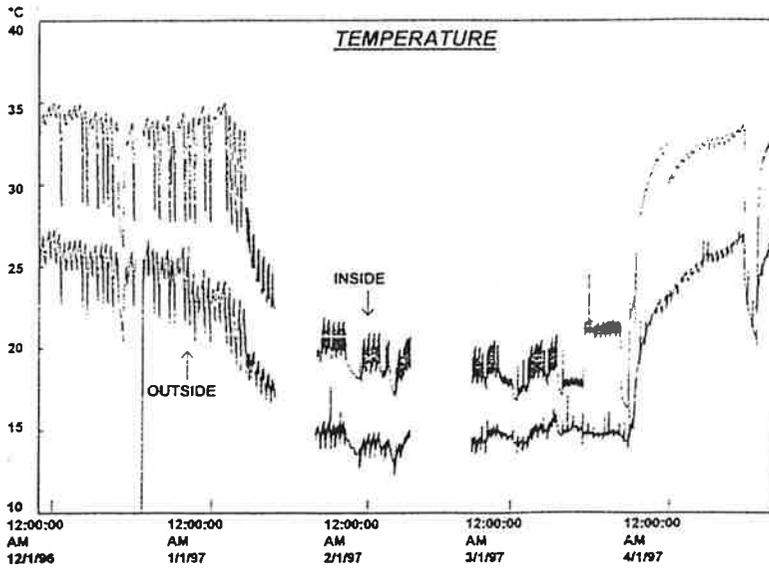


Fig II-39. 지하공간내 온도 변화경향

a) 96/6/3에서 96년 11월 28일까지의 기간



b) 96/11/29에서 97/4/22일까지의 기간

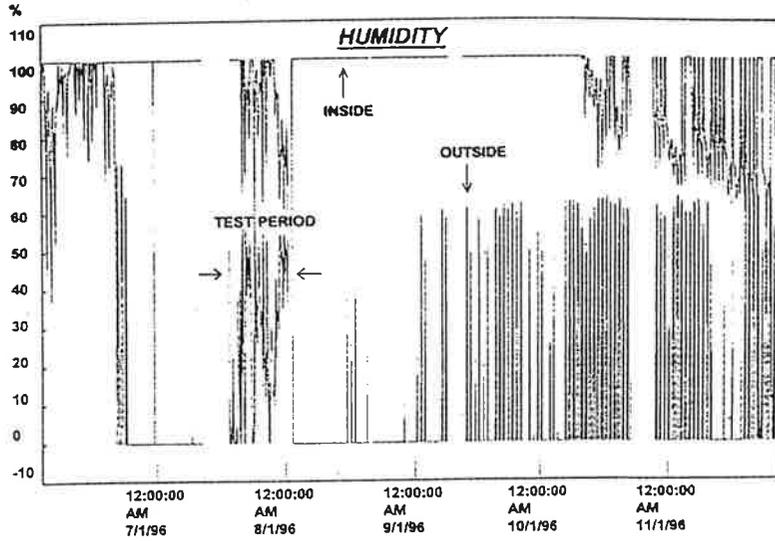
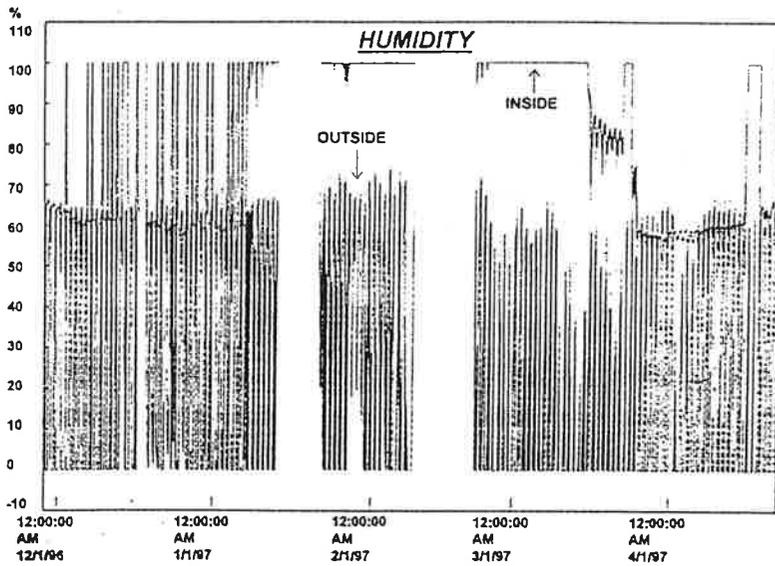


Fig II-40. 지하공간내 습도 변화 경향

a) 96/6/3에서 96년 11월 28일까지의 기간



b) 96/11/29에서 97/4/22일까지의 기간

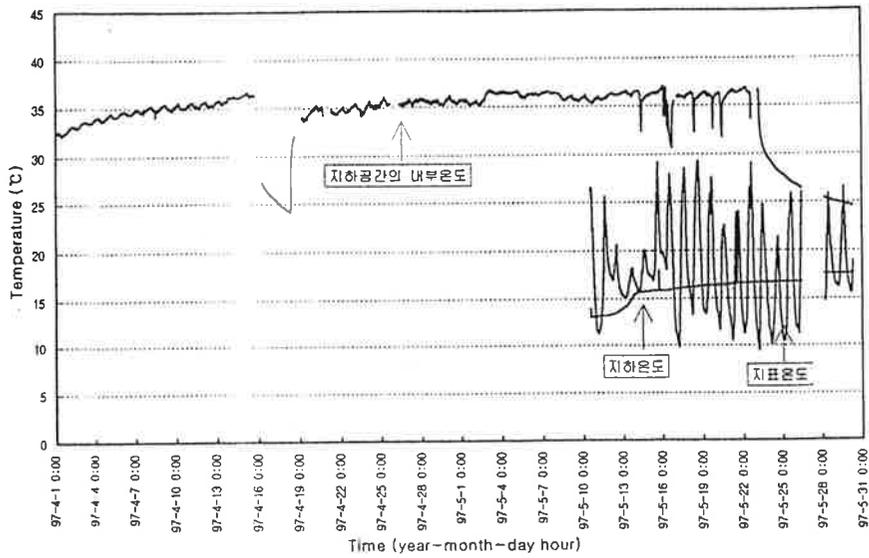
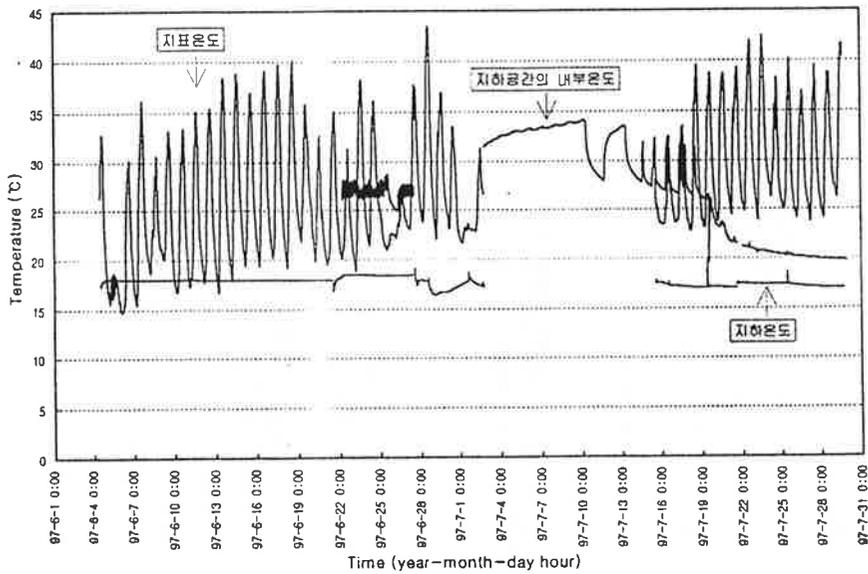
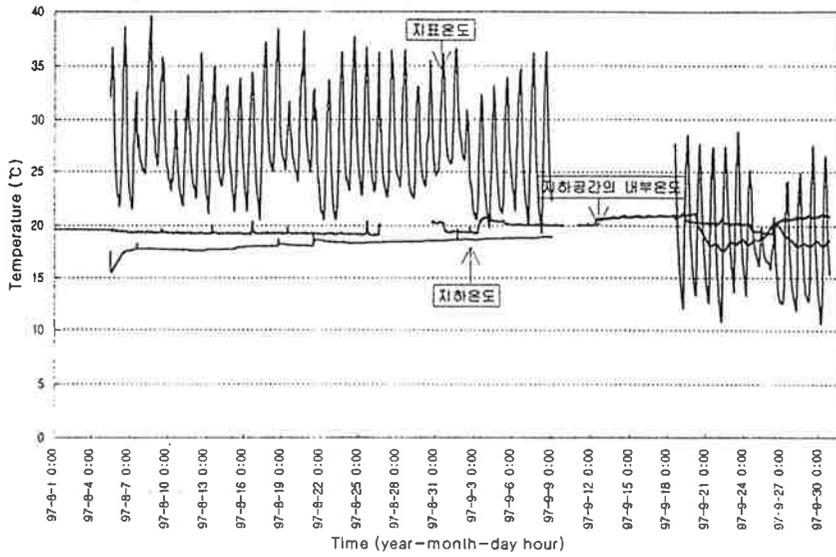


Fig II-41. 지표온도와 지하공간 내부온도와의 비교  
a) 97/4/1에서 97/5/31일까지의 기간



b) 97/6/1에서 97/7/31일까지의 기간



c) 97/8/1에서 97/9/30일까지의 기간

## 제 8 절 부지 비파괴 사전조사 방법

### 1. 지하저장시설 site 탐사 개요

지하암반저장시설을 건설할 경우 예정후보지의 암반상태를 정확히 파악하여야 저장시설의 위치, 방향, 시설의 크기, 지지형태 등의 중요한 결정을 할 수 있게 된다. 본 연구에서는 일단 경제성 및 입지분석을 통하여 지하저장시설 부지가 어느정도 압축되면, 암반의 절개나 굴착을 하지 않은 상태에서 비파괴적 방법을 이용한 암반의 강도 및 등급구분, 암반내의 절리의 발달상태, 지반내의 지하수 분포 및 이동을 예측할 수 있는 탐사기술의 적용에 관한 연구를 수행하였으며, 실제 지반에 적용하여 성공적인 결과를 얻을 수 있었다.

본연구에 이용된 방법은 탄성파 굴절법탐사(seismic refraction method), 지하레이다 탐사 (ground penetrating radar) 및 전기비저항 탐사 (electrical resistivity method) 를 실시하였다. 탄성파 굴절법탐사를 통해서는 화강암으로 이루어진 예정부지 하부의 암반상태를 탄성파 전파속도를 이용하여 풍화토, 풍화암, 연암, 보통암, 경암 및 극경암으로 구분하여 각상태에 따른 암반특성을 연구하였다. 또한 지하레이다 탐사를 통하여 암반내 절리의 상태를 파악할 수 있었다. 전기비저항 탐사를 통해서는 탐사축선하부의 비저항분포를 파악함으로써 상대적인 수분의 분포를 비교적 정확히 파악하였다.

### 2. 지하저장시설 부지 탐사 원리

## 가. 탄성과 탐사 원리

탄성과 굴절법은 지표면에 수진기를 설치한후, 해머 또는 폭발물에 의하여 인공지진을 일으켜 발생한 지진파가 도달하는 시간을 거리별로 측정하여 조사하는 방법으로서 굴절법은 탄성과의 전파과정에서 임계 굴절(굴절각  $90^\circ$ )이 일어날수 있는 경우에만 사용될수 있다. 즉, 속도가 낮은 상부층에서 속도가 높은 하부층에 임계각으로 입사하는 파는 층의 경계면에 평행하게 굴절된다. 이때 에너지는 경계면을 따라 하부층의 속도로 전파하며 에너지의 일부는 연속적으로 상부층으로 재굴절하여 지표면에 도달하게 된다( 민경덕 · 서정희 · 권병두, 1986 ).

지하의 암층경계면에 입사한 탄성파는 반사 또는 굴절을 일으키며 전파되는데 이 중에서 임계각으로 입사한 파는  $90^\circ$ 의 굴절을 일으켜 경계면 하부층의 속도로 전파되어, 상부층으로 전달되는 직접파보다 빨리 수진기에 도착하게 된다. 이러한 파를 선두파라하며, 탄성과 굴절법은 이들 선두파의 신호를 분석하여 지층의 속도와 두께를 알아내는 방법이다. 또한, 주시곡선도에서 직접파와 굴절파의 기울기의 역수를 취하면 각층의 속도를 구할 수 있으며 연구되어진 식을 이용하여 층의 두께(h)와 주시시간을 구해 낼 수 있다(민경덕 · 서정희 · 권병두, 1986 ).

### 1) 수평구조에서의 굴절파

Fig II-42와 같은 지하모델에서 탄성파탐사를 실시하였을 때, 기록되어진 주시시간(T)는 다음과 같다.

$$T = \frac{AB}{V_1} + \frac{BC}{V_2} + \frac{CD}{V_1} = \frac{X}{V_2} + \frac{2h(V_2^2 - V_1^2)^{\frac{1}{2}}}{V_1 V_2} \quad (8.1)$$

이며, 교차거리 ( $X_0$ )에서의 직접파의 도달시간 ( $X_0 / V_1$ )과 굴절파의 도달시간이 같은 점을 이용하여 만들어진 두께( $h$ )를 구하는 식은 다음과 같다( 민경덕 · 서정희 · 권병두, 1986 ).

$$\frac{X_0}{V_1} = \frac{2h\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2} + \frac{X_0}{V_2} \quad (8.2)$$

$$h = \frac{X_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (8.3)$$

지하의 암반이 다층구조일 경우에는, 굴절법 탄성과 탐사는 임계각으로 입사하여 굴절각 90도인 선두파(head wave)를 이용하여 각 층의 속도와 두께를 구하는 방법이다. 지하에 수평한  $n$  개의 층이 존재할 경우 탄성과원-수신기간의 거리  $X$  에 따른 탄성과 도달 시각  $T_x$  는 다음의 함수로 나타낼수 있다.

$$T_x = \frac{X}{V_n} + T_{i_{n-1}} \quad (8.4)$$

$$T_{i_{n-1}} = 2 \sum_{m=1}^{n-1} \frac{Z_m}{V_m} \left[ 1 - \left( \frac{V_m}{V_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.5)$$

식 (8.4)는  $T=f(x)$  형태의 일차 함수인 여러개의 직선식을 나타내며  $1/V_n$  은 각 직선의 기울기를 나타내고 제 2항은 각 일차 함수의 절편을 의미하며 절단시간(intercept time)을 나타낸다.

위의 식을 이용하여  $n = 1, 2, 3 \dots$ 의 경우를 각각 나열하면 1층 구조, 2층 구조, 3층 구조 ... 경우의  $T - X$  관계식이 되며 아래와 같

다.

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{X}{V_1}, & n &= 1 \\
 T_2 &= \frac{X}{V_2} + T_{i1}, & n &= 2 \\
 T_3 &= \frac{X}{V_3} + T_{i2}, & n &= 3
 \end{aligned} \quad (8.6)$$

이들 관계식들은 모두 절단시간과 기울기가 다른 1차 함수들로서 그래프로 나타내면 다음의 Fig II-43 과 같다.

Fig II-43 을 이용하여 각 직선의 기울기를 구하여 역수를 취함으로써 각층의 속도  $V_1, V_2, V_3$  를 구할수 있고 각 직선의 절단 시간과 식 (8.5)을 이용하여 각 층의 두께  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{n-1}$  을 구할수 있게 된다.

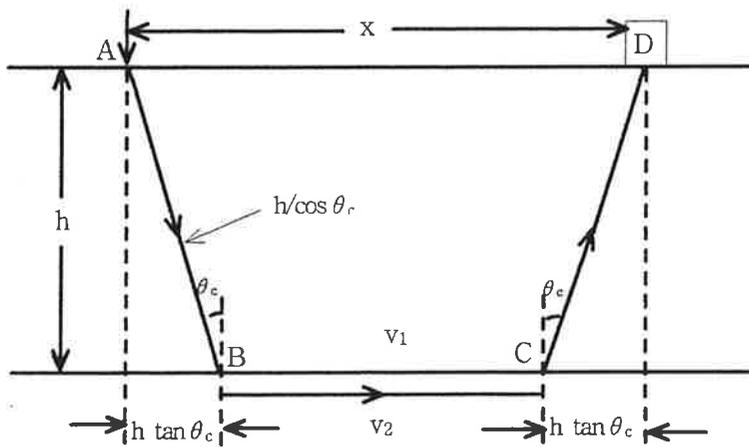


Fig II-42. 수평 2층구조에서의 굴절과 경로

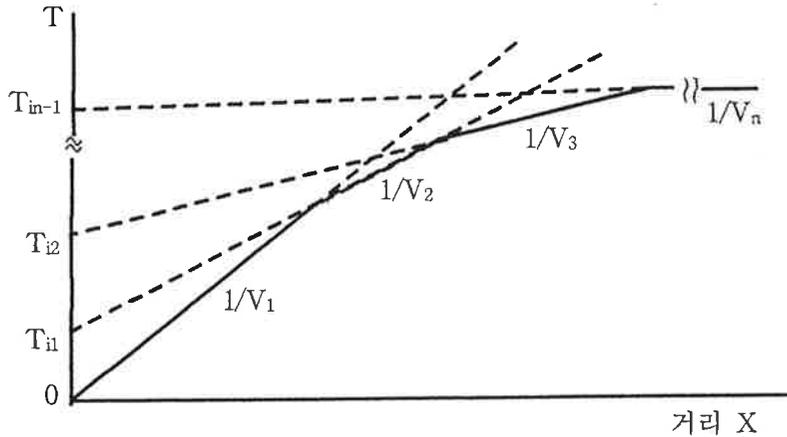


Fig II-43. 수평 N층 구조에서의 T-X Diagram

## 2) 2층 경사구조에서의 굴절과

지층의 경계면이 경사진 경우에는 굴절과 주시곡선의 기울기로부터 직접 구한 속도는 지층의 실제 속도가 아니며, 이를 겉보기속도라고 한다. 이 겉보기속도는 발파점과 수신점의 배열 방향에 따라 다르게 나타나기 때문에 경사2층 구조에서는 왕복측정이 필요하게 된다. 왕복측정이란 탐사축선의 양 끝에서 각각 발파를 하여 축선상의 각 수신기가 양쪽에서 오는 파를 모두 기록하게 하는 방법이다(Fig II-44).

이때 발파가 하향경사(down-dip)의 방향으로 실시될 경우, 발파점으로부터 수신점의 거리가 멀어질수록 상부층 내에서의 파의 전파거리는 길어지므로 굴절층의 겉보기속도는 실제 속도보다 낮게 나타난다. 한편 상향경사(up-dip) 방향으로 발파할 경우에는 겉보기속도가 실제 속도보다 높게 나타난다. 굴절파의 주시  $T_d$ 와  $T_u$ 는 아래식과 같고,

$$T_d = \frac{2 Z_d \cos ic}{V_0} + \frac{X}{V_0} \sin(ic + \alpha)$$

$$T_u = \frac{2 Z_u \cos ic}{V_0} + \frac{X}{V_0} \sin(ic - \alpha)$$

ic,  $\alpha$ 의 각도는 아래식을 이용하여 구하고,

$$ic = \frac{1}{2} (\sin^{-1} V_0 m_d + \sin^{-1} V_0 m_u)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} (\sin^{-1} V_0 m_d - \sin^{-1} V_0 m_u)$$

구한 ic,  $\alpha$ 각도를 Tid와 Tiu 식에 대입하여 이를 구하고 Tid와 Tiu를 각각 Zd와 Zu식에 대입하여 Zd, Zu를 구한다.

$$T_{id} = \frac{2 Z_d \cos ic}{V_0} \rightarrow Z_d = \frac{V_0 T_{id}}{2 \cos ic}$$

$$T_{iu} = \frac{2 Z_u \cos ic}{V_0} \rightarrow Z_u = \frac{V_0 T_{iu}}{2 \cos ic}$$

끝으로, Zd와 Zu를 밑식에 대입하여 각각의 Dd, Du를 구하면 우리가 얻고자하는 심도가 나온다.

$$D_d = \frac{Z_d}{\cos \alpha}$$

$$D_u = \frac{Z_u}{\cos \alpha}$$

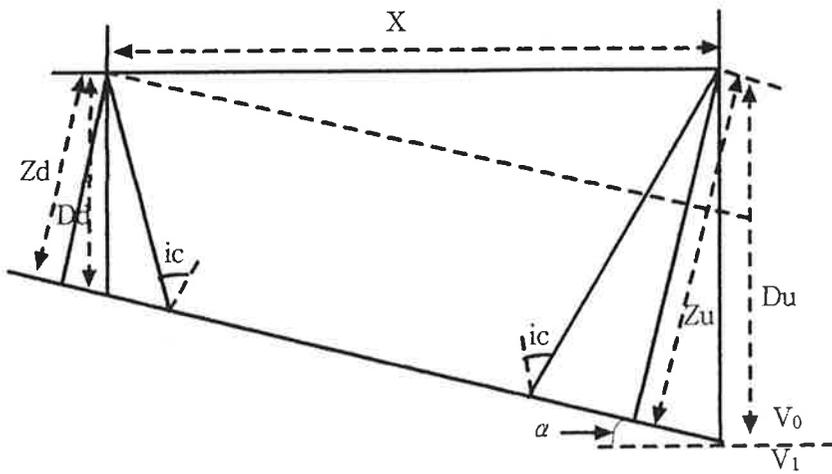
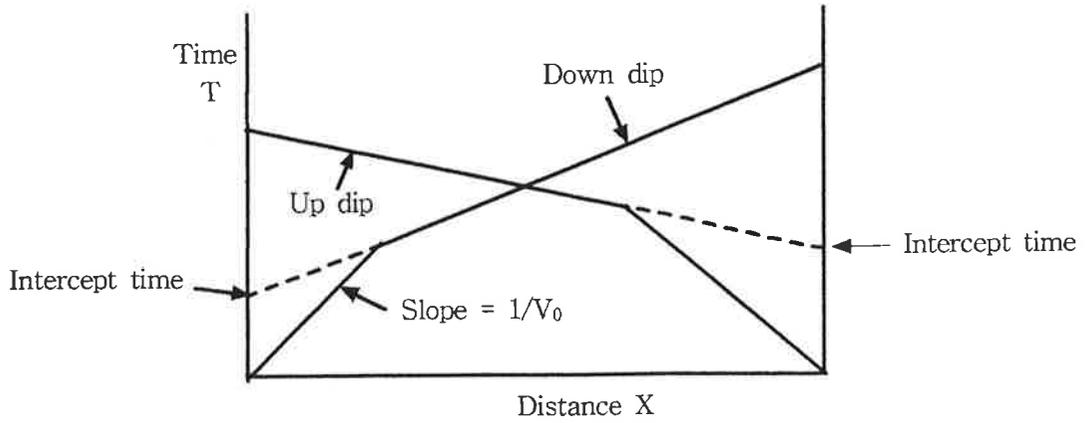


Fig II-44. 2층 경사구조와 주시곡선간의 관계

나. 비저항 탐사 원리

전기비저항 탐사법은 대지에 공급된 전류의 크기와 이에 의해 발생

된 전원의 크기를 측정함으로써 전기비저항치의 변화양상을 탐지하고 이들을 해석하여 지하하부의 지질구조, 광상, 지하수, 지열지대의 보존 여부 및 부존 양상을 탐사하는 것이다. 전기비저항 탐사법은 전류의 크기, 각 전극에서의 전위의 크기 및 각 전극간의 거리 등 정량적으로 측정 가능한 값들을 취급함으로써 정량적인 해석이 가능하다. 전기비저항탐사 기구들은 매우 간단하며 전원, 전류-전위계, 전극 및 전선이 필수품이다. 전기비저항탐사법은 사용하는 전류전극과 전위전극의 종류, 전류전극과 전위전극의 배열 방법, 전극간의 간격등에 의해 여러방법으로 나뉜다. 이 방법 중에는 일정 깊이 이내의 전기 비저항치의 수평적 변화를 조사하는 수평탐사법과 일정지점 하부의 수직적 전기비저항 분포 파악을 위한 수직탐사법이 있다. 본 탐사에서는 수평비저항 탐사를 실시하였다.

대지의 전기비저항 측정은 대지에 2개의 전류전극(Current electrode)을 통하여 인위적으로 전류를 흐르게 한 후 그 전류전극내에 2개의 전위전극(Potential electrode)을 설치하여 전위차를 측정함으로써 이루어진다.

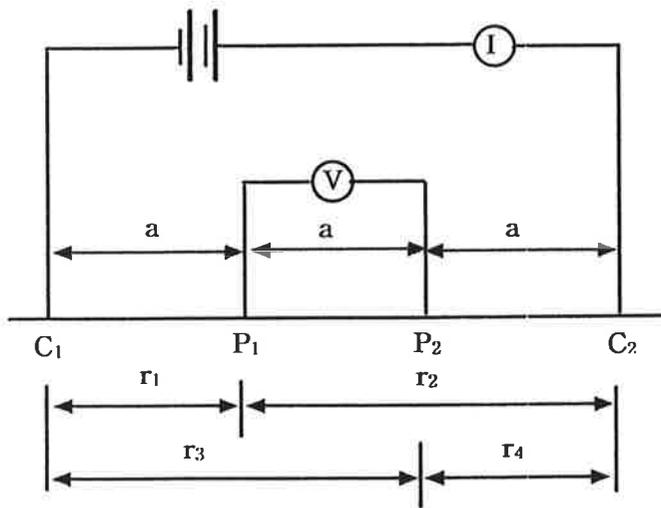


Fig II-45. 전기비저항 탐사에서의 전극배열 Geometry

P<sub>1</sub> 과 P<sub>2</sub> 사이의 전위차 V는 균질 무한한 구형체로 가정하였을 때 오옴(ohm)의 법칙에 의하여 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta V = V_{p1} - V_{p2} = \rho \frac{I}{2\pi} \frac{1}{\left\{ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right\}} \quad (8.7)$$

여기서 전위차 V와 각 전극간의 상대거리 r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>, r<sub>3</sub>, r<sub>4</sub>는 야외측정에 의해 알려지므로 대지의 비저항 ρ를 측정할 수 있게 된다.

$$\rho = 2\pi \Delta \frac{V}{I} \frac{1}{\left\{ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right\}} \quad (8.8)$$

본 탐사는  $r_1=r_4=a$ ,  $r_2=r_3=2a$  인 경우로서, 거리계수  $G=a$ 가 되므로  
 겹보기 전기비저항치는

$$\rho_a = 2\pi a \Delta \frac{V}{I} \quad (8.9)$$

이다. 이 배열에서는 거리계수가  $a$ 이므로, 전기비저항 산출식이 쉬우며,  
 또한 현장작업에서도 전극배열이 쉬운 장점이 있는 반면, 전극 4개를  
 모두 이동시켜야 하는 불편이 있다.

#### 다. Georadar 탐사 원리

GPR(Ground Penetrating Rader) 탐사법은 얇은 심도의 지반을 조  
 사할 수 있는 간편한 지구물리 탐사법의 하나이다. 이는 빛, 음파, 전파  
 등과 같은 성질의 전자기파를 이용한다. 전자기파는 빛이나 음파와 같  
 이 전파하며 반사, 굴절, 회절, 간섭, 감쇠, 발산, 분산, 흡수 등의 일반  
 적인 파동의 성질을 가지고 있다. 지하에서 전자기파의 전파에 영향을  
 미치는 요소로는 지하 매질의 유전율과 투자율 그리고 전기전도도 등  
 이 있다.

매질들은 서로 다른 전기적 성질을 갖는데, 여기서 전기적 특성이란  
 매질의 유전율과 투자율에서 유도되는 고유의 임피던스를 말하며, 이  
 고유임피던스  $Z$ 는

$$Z = \frac{\sqrt{j\omega\mu_r}}{\sqrt{\sigma + j\omega\epsilon_r}}$$

로 나타난다.  $\omega$ 는 각주파수,  $\sigma$ 는 매질의 전기전도도,  $\epsilon_r$ 은 매질의 유전율, 그리고  $\mu_r$ 는 매질의 투자율이다. 서로 나란한 두 매질의 임피던스를 각각  $Z_1, Z_2$ 라고 했을 때, 이 경계를 통과하는 전자기파의 반사계수  $K$ 는

$$K = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

로 나타낼 수 있으며, 이는 두 개의 서로 다른 매질의 경계면에서 입사파와 반사파의 진폭 비를 말한다. 이 때 투과계수는  $1-K$ 이다.  $\mu_r$ 의 투자율과  $\epsilon_r$ 의 유전율을 갖는 매질에서의 전자기파 속도  $V$ 는

$$V = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

이고, 감쇠상수  $\alpha$ 는

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \sigma \mu_r}{2}}$$

가 된다.  $c$ 는 진공에서의 전자기파 속도이다.

GPR 탐사는 전자기파가 지하의 어떤 두 매질의 경계에서 반사되어 돌아온 신호를 받아 지하 지질구조를 영상화하게 되는데, 두 매질 사이에서 반사가 일어나려면 매질간의 고유임피던스의 차이가 커야 한다. 앞의 식에서와 같이 고유임피던스는 유전율, 투자율, 그리고 전기전도

도에 의해 결정되는데, 투자율은 강자성 물질을 제외한 대부분의 유전체에서 거의 1의 값을 가지며, 전기전도도는 보통 매우 작은 값을 가지므로 전자기파의 전파 특성을 좌우하는 요소는 유전율이 된다.

GPR 탐사에서 이용하는 주파수대역(1-1000MHz)에서 대부분의 물질은 낮은 전기전도도를 보인다. 그러나 물로 포화된 점토층은 탐사에 큰 장애물이 된다. 우리나라의 경우 대부분 지표가 점토층으로 피복되어 있는데, 보통 점토층(젖어있는 점토의 전기전도도 1-0.1 mho/m)은 기반암(화강암의 전기전도도 0.00000001 mho/m)에 비하여 전기전도도가 매우 높다. 이렇게 전기전도도가 높으면 전자기파의 감쇠가 심하게 일어난다(Smith and Jol, 1992).

수신된 전자기파 신호에는 전자기파의 주시와 진폭에 대한 정보가 포함되어 있다. 주시로부터 매질의 두께를 유추할 수 있으며, 진폭으로 매질의 감쇠 특성을 파악할 수 있으나, 수신된 신호에는 많은 잡음이 포함되어 정보가 많이 교란되어 있다. 실제 정보를 정확하게 악기 위해서는 잡음을 제거하고 신호이득을 보정해 주는 등 자료처리과정이 따라야 한다.

GPR 탐사의 가장 기본적인 용도는 무엇보다도 지하 지질구조를 밝히는 것이라고 할 수 있다. 그러나 지하 지질구조는 무척 복잡하고 다양하다. GPR 탐사 결과는 지하 매질의 전기적 성질, 즉 암석의 종류, 공극률, 물의 포화정도 등에 따라 심하게 변화하며(Knoll and Knight, 1994), 일반적으로 빙하, 균질한 모래, 그리고 산성암 등에서 좋은 결과를 보여준다고 알려져 있다(Tillard, 1994).

### 3. 지하저장시설 부지 탐사의 적용

## 가. 탄성과 탐사

조사지점 하부의 탄성과 속도와 각 층의 두께를 구하고 기반암까지의 깊이를 구하였다. 탄성과 속도에 따라 암종을 구분하였고 P파속도 및 통계적 방법을 이용하여 지반의 토질 및 암반역학적 요소를 추정하였다. 굴절법 탄성과탐사는 산의 능선과 경사면을 따라 5지점에서 실시하였다.

탄성과탐사에 이용된 에너지원 - 수진기 배열방식은 in spread 방법을 이용하였으며, 지형적 여건에 따라 전체 spread(발파점 - 최종수진기)의 길이를 84 m로 하였다. 수진기(geophone) 간격은 4 m를 유지하였으며 발파점과 최초 수진기간의 거리(offset)는 geophone 간격과 같은 간격인 4m을 사용하였다. 사용된 에너지원은 14kg sledge hammer 이었으며, 1 - 5회 타격후 도달된 파형을 관찰하여 굴절파를 관찰할 수 있는 자료를 기록하였다. 수진기는 natural frequency가 14 Hz인 OYO Geospace사 geophone을 사용하였으며 탄성과기록은 OYO Geospace사의 DAS-1 system(48 channel)을 사용하였다.

현장에서 기록된 탄성과자료는 디지털자료로 저장하여 각종분석을 용이하게 하였다. 실험실내에서 대형크기로 plotting 하여(Fig II-46) 각 채널별 초동시각(first arrival time)을 digitizing 하여 시간 - 거리도표(time-distance diagram)을 작성하였다. 측정별로 작성된 T-D diagram상에서 기울기가 달라지는 구간을 나누어 최소자승법을 이용한 최적직선식을 찾아 각 직선의 기울기와 절편을 구하였다. 기울기의 역수를 취하여 각층의 탄성과전파 속도를 구해진 탄성과 속도와 절편값을 이용하여 구한 각 층의 두께를 갖고 탄성과(P-파)전파 속도를 구한 후 통계적인 자료를 이용하여 나온 측선에 관한 정보를 구하였다(Fig

II-47).

조사지역은 탄성과 속도분포로 볼 때 표토, 풍화토, 풍화암, 보통암, 연암, 경암 및 극경암의 암석이 다양하게 분포하고 있다. 조사지역은 3.0~11.5m 두께의 풍화토와 풍화암이 전체적으로 피복되어 있으며 그 하부에는 대부분 연암이 존재하며 약간의 보통암이 보인다. 연암과 보통암의 하부층에는 경암과 극경암이 존재되는 것으로 판단된다. 제 3 layer로 생각되는 암반은 P파속도 5000m/sec 이상의 경암과 극경암에 해당하는 신선한 암상이 존재될 것으로 생각된다. 측정점 1-1, 1-2, 1-3에서는 미고결층(풍화토)이 4.9~11.5m의 두께로 두껍게 분포하고 있어 지하저장시설 설계시 암반과 구분하여 설계에 유의하여야 한다. 1-4, 1-5에서는 풍화암층으로 우기에 지하수위의 상승으로 인한 수화작용으로 인하여 지내력의 감소가 있을수 있다.

#### 나. 전기비저항 탐사

전기 비저항 탐사는 전류 전극에서 인공적으로 대지에 전류가 공급 되도록 하여 전위 분포를 일으키게 되며, 이 때 대지에 공급된 전류의 크기와 이에 의해 발생된 전위의 크기를 측정함으로써 전기 비저항치의 변화 양상을 탐지하고, 이를 해석하여 주로 지하의 지질구조, 광상, 지하수 그리고, 공동 등의 존재 여부 및 부존 양상을 탐사하는데 이용되고 있다.

본 지역에서 선정된 전극 배열 방법은 수직 탐사를 위해 Wenner 전극 배열이 선정되었다. 대지의 전기 비저항 탐사를 위하여 이용된 탐사기는 미국 Soil Test 사의 Strata Scout EC-6317 이다. 탐사측선에서는 1 m 간격으로 설정된 측정점을 따라 전극간격을 1 m, 2 m, 3 m,

5 m, 7 m, 9 m, 11 m로 하여 323개의 data를 취득하였다.

측선 A의 전기비저항 분포를 보면, 측정점 4에서 측정점 13사이 구간의 겉보기 비저항 값이 다른 측정점들의 구간에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보이며, 측정점 13과 측정점 16사이의 구간에서는 겉보기 비저항 값이 급격히 증가하는 양상을 보인다. 그리고, 측정점 15 이후의 구간에서는 다른 측정점들 구간에 비하여 상대적으로 높은 겉보기 비저항값을 보인다(Fig II-48). 위와 같은 data의 분포는 전극간격(a)값이 증가 할수록 그 상대적인 차는 감소하지만, 비저항의 변화상은 거의 유사한 경향을 보인다. 다만, 측정점 4 - 13사이 구간에서 측정점 7 - 10구간의 겉보기 비저항값이 전극간격(a)값이 증가함에 따라 증가하고 있다.

#### 다. Georadar 탐사

지하저장고 예정부지의 천부층의 상태를 정확히 파악하기 시험측선에 대하여 Georadar 탐사를 실시하였다. 탐사에 이용된 기기는 미국 GSSI 사의 S-2 System으로써 500 Mhz 안테나를 이용하였다. Georadar 단면도를 분석해본 결과 천부에 존재하는 반사도가 강한 반사면이 여러곳에서 단절되어 있음을 알 수 있다. 특히, 측선의 동쪽 부분에는 14개 이상의 소규모 단층이 발달되어 있다(Fig II-49). 만일 이러한 곳에 지하저장시설을 건설한다면 폭우시에는 이들 틈을 타고 강수가 그대로 유입되어 지하수가 되어 많은 어려움을 초래할 것으로 예상된다.

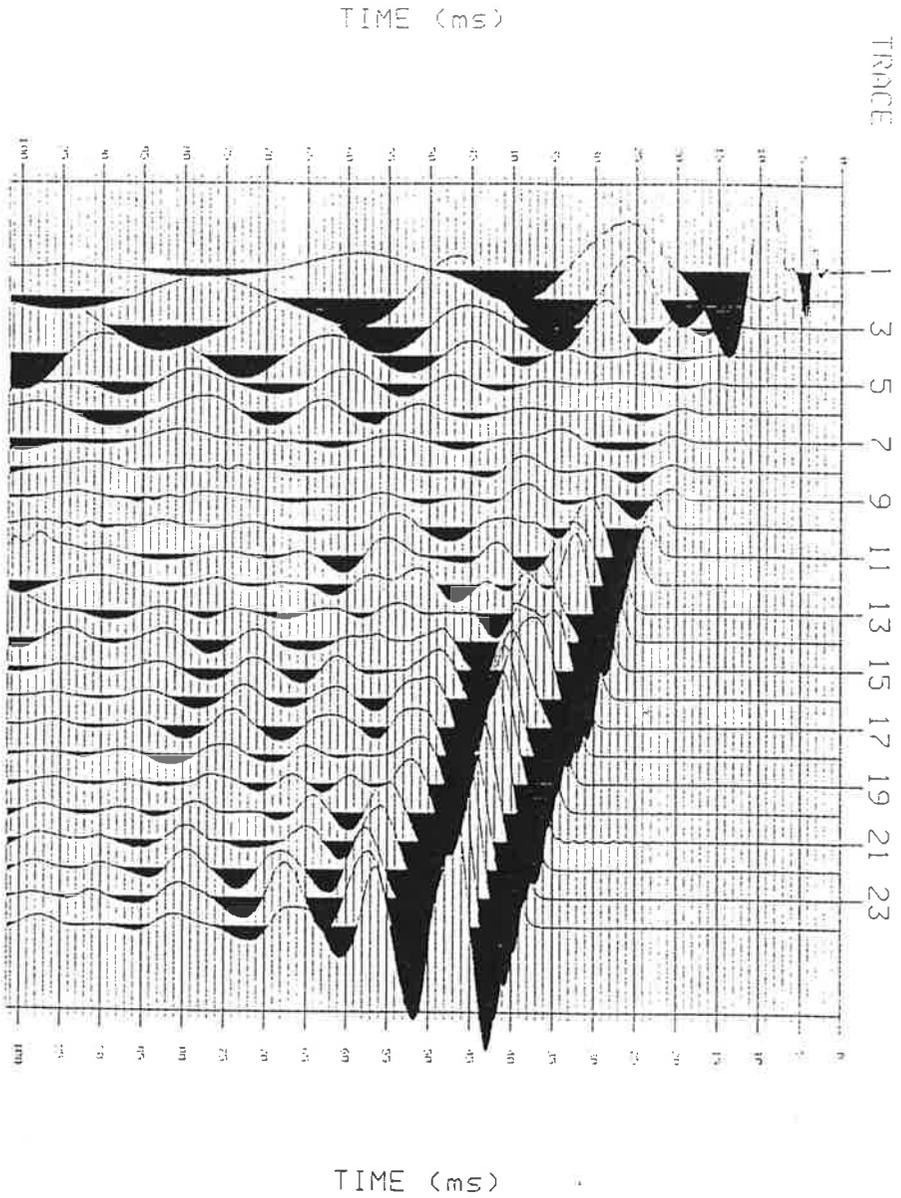


Fig II-46. 24 channel 탄성과 기록 예

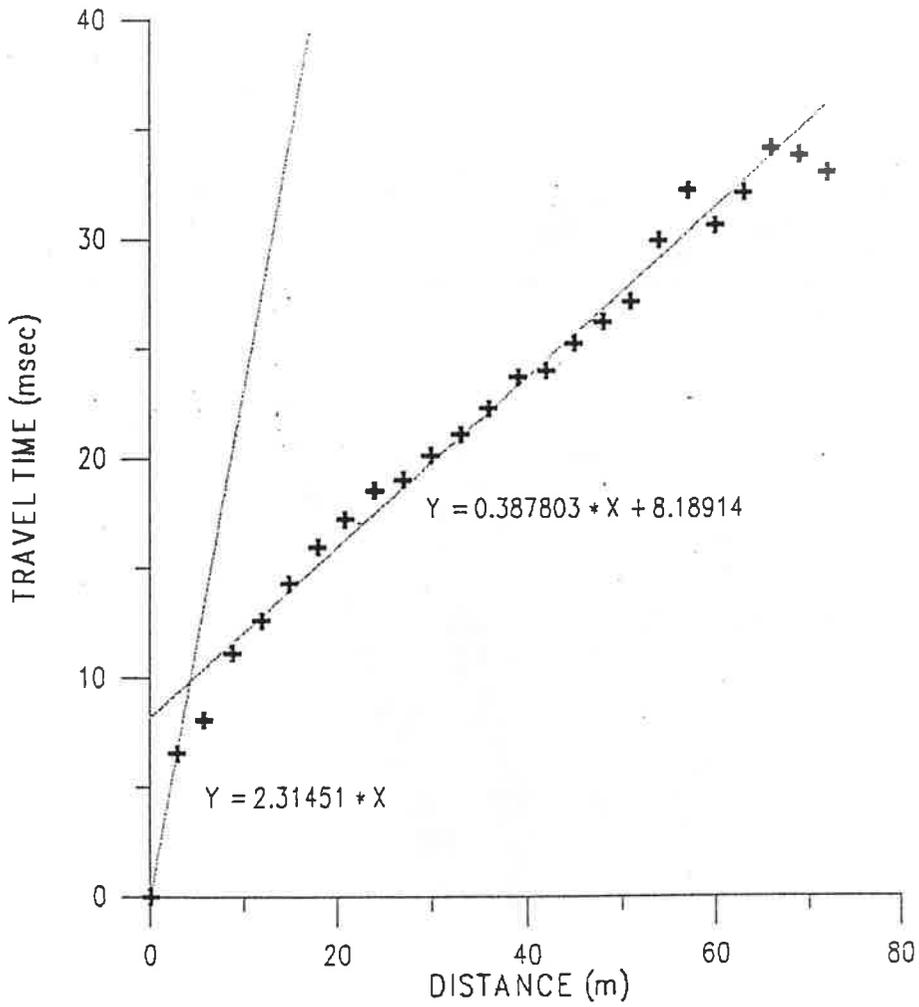


Fig II-47. 굴절법 탄성파 자료 해석

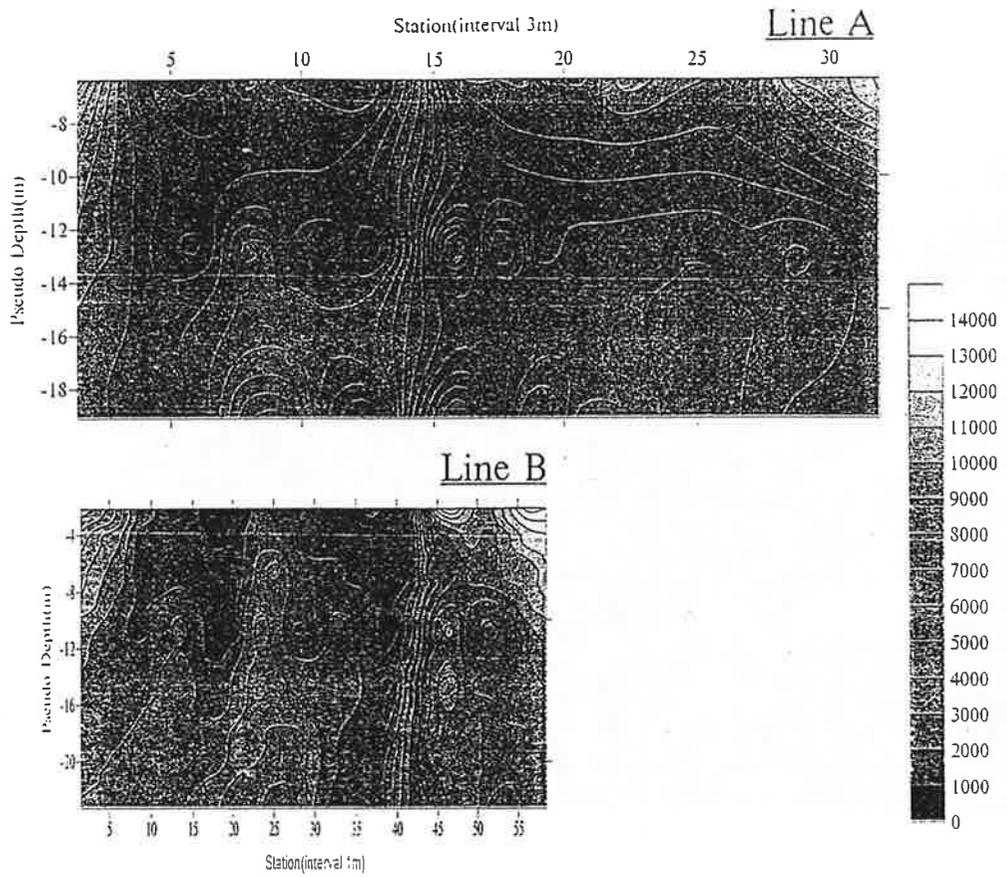


Fig II-48. 지하공동 부지 비저항 단면도 (단위 : ohm-m)

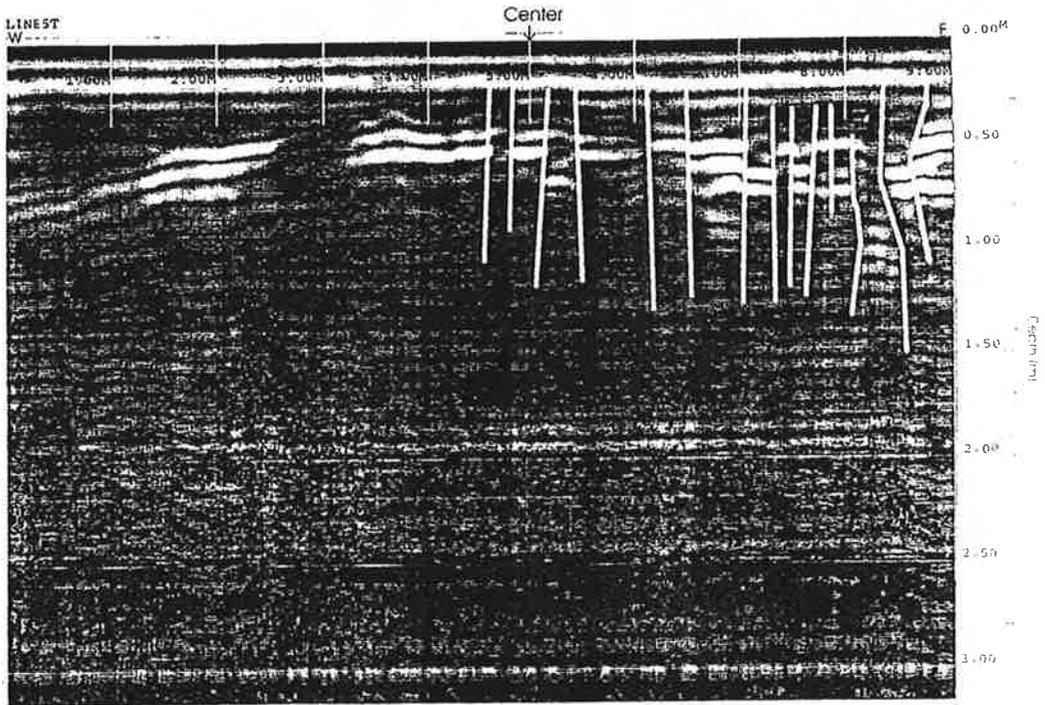


Fig II-49. 지하공동 부지 Georadar 단면도

# 제 3 장 지하암반저장고 내의 냉동공조기술 연구

## 제 1 절 지하공간에서의 냉동 및 공기조화

### 1. 지하저장고 환기특성 기술조사

#### 가. 환기의 목적

지하공간의 환경은 지하공간을 구축하는 과정의 작업환경과 구축된 이후의 생활환경으로 구분할 수 있다. 작업환경은 지하공간을 개발과정에서 근로자들의 건강보호와 작업능률 향상, 재해예방을 목적으로 하고 있으며, 생활환경은 공간내에서 인간이 생활하기에 적합한 조건을 마련해 주는데 목적이 있다. 특히 지하암반저장고의 경우 각종 저장식품의 부패용이성과 자체의 복합된 냄새로 인하여 작업여건의 악화와 식품의 부패를 촉진할 수 있어 환기의 중요성이 크다할 수 있다. 지하공간에 있어서 환기의 기본적인 목적은 다음 세 가지로 요약할 수 있다.

첫째, 지하공간내에서 활동하는 사람 또는 저장물질에 신선한 공기를 공급하고,

둘째, 폭발성 또는 유독성 가스, 연기, 분진, 라돈가스, 각종악취 등을 허용농도 이하로 희석하고,

셋째, 사람이 생활하고 작업하기에 쾌적한 온도 및 습도를 유지하고 저장식품의 부패를 방지하는데 있다.

#### 나. 지하공간의 소요 환기량

지하공간의 소요 환기량은 여러 가지 요소에 의해 결정되지만, 그 중에서 다음의 주요한 세 가지 요소에 의한 산출된 양중 많은 양을 소요 환기량으로 정한다.

- ① 공간내의 최대 체류 인원수
- ② 가연성, 유독, 유해가스, 각종 악취 발생량
- ③ 기온 및 습도

#### 다. 풍도설계

환기량이 결정되면 급배기 풍도의 단면이 결정되어야 하는데 이때는 제한풍속을 참고하여 단면을 설계하여야 한다. 가장 경제적인 설계를 하기 위해서는 전체 환기 소요경비가 최소가 되도록 한다.

#### 라. 환기망 해석

지하공간은 환기라는 측면에서 볼 때 공기가 흐르는 공간의 집합체로 볼 수 있다. 공기가 흐르는 공간을 풍도라 하며, 이러한 풍도들이 서로 유기적으로 연결되어 있는데 이것을 환기망이라 한다.

공기는 송풍기를 사용하지 않아도 공기의 밀도차(자연환기압)에 의해 어느 정도 흐르지만 송풍기를 사용하면 필요한 양만큼 흐르게 할

수 있다. 환기망 해석은 환기망내의 풍도를 흐르는 풍량을 계산하여 필요한 개소에 필요한 만큼의 신선한 공기를 공급하고 유해가스나 호흡성 분진, 악취 등을 희석시키거나 배제하기 위해서 필요한 것이다. Table III-1은 환기방법을 분류한 것이며, 어느 환기방식이 좋은 것인가는 지하공간의 구조와 크기, 지하터널의 형식, 깊이 및 지형 등에 따라 다르므로 이러한 조건을 고려하여 적절한 방식을 선정할 필요가 있다.

#### 마. 비상시의 환기대책

비상시 지하저장시설에서 화재가 발생하면 지하공간 내의 화열 과 매연은 충분히 배출되어야 하며, 지하공간 내에서는 열적 환경을 제어할 수 있는 환기설비가 설치되어야 한다. 이 목적에 맞는 환기 시스템은 지하공간 내의 화재시 이에 대한 매연, 유독가스가 충분히 배출될 수 있는 시스템이어야 한다.

- 환기 시스템은 지하공간 내에서 열적 환경을 유지할 수 있어야 한다.
- 매연 및 유독가스는 시급히 화염원으로 부터 배출되어야 한다.
- 화재시 지하저장시설에서의 활동인원대피, 소방대의 활동이 용이하여야 한다.
- 송풍기는 가역운전이 가능하여야 한다.

#### 바. 외국의 지하구조물별 환기기준 조사

지하공간에서 환기량의 기준은 여러 가지의 요인을 고려하여 용도

에 따라 소기의 목적을 이루도록 설정되어야 하고 이를 위한 연구와 노력이 요구된다. 왜냐하면 실내에 필요한 환기량은 용도, 계절변화, 지중온도의 변동에 따라서 상당한 차이가 있기 때문이다.

외국의 경우, 필요환기량을 정하는데에는 각기 독특한 방법이 있다. 여기에서는 법령을 기준으로 선진 외국의 몇 나라의 예를 소개하고자 한다.

영국의 기준에 따르면, 1인당 실내 점유면적을 6, 9, 12 m<sup>2</sup>으로 구분하고, 이에 따라 필요 외기도입량의 최소값을 14.4 m<sup>3</sup>/h. 인에서 21.6 m<sup>3</sup>/h. 인까지 정하고 있다. 독일 규격(DIN)에서는 외기온도의 변화에 따라서 외기도입량을 정하고 있다. 즉, 외기온도를 -20℃에서부터 0℃까지 5℃ 간격에 따라 필요 외기도입량을 8에서 16m<sup>3</sup>/h 인으로 하고 있다. 특히 외기온도가 26℃까지 상승하면 이에 따라 도입외기량도 상승하지만 외기온도가 26℃를 넘으면 오히려 도입외기량이 감소하는데 주목할 필요가 있다.

ASHRAE(62-73)에서 규정하고 있는 기준의 특징은 Table III-2와 같이 실내의 용도에 따라 세분화하고, 또한 필요한 환기량을 최소량과 권장량으로 구분하여 보다 합리적으로 규정하고 있다.

스웨덴의 기준은 1시간에 1인당 14.4 m<sup>3</sup>의 값을 필요환기량으로 정하고 있다. 한편 일본의 기준은 1시간에 1인당 20 m<sup>3</sup>의 환기량을 최소로 정하고 있다.

상기기준들은 지하공간내 각종 시설물에 대한 기준으로써 실제 지하공동 식품 저장소에 대한 환기기준은 피저장물의 적정 저장조건의 한계를 벗어나지 않는 범위에서 환기가 이루어져야 하며, 저장소에서는 유동인구가 거의 없고 작업인원만이 필요로 하므로 비교적 소요 환기량이 적게 설정될 수 있다.

Table III-1. 환기방법의 분류

분류기준		분류	내용	장단점
동 력		자연 환기	지표와 지하의 공기 온도(밀도)차에 의한 환기	급기구와 배기구의 표고차가 클 때는 동력없이 어느 정도 환기가 가능하나, 지표의 온도변화나 계절의 변화에 따라 기류의 방향이나 풍량이 변화하며 절대풍량의 임의 조절이 불가능함.
		기계 환기	송풍기에 의한 강제적인 환기	동력가동에 의한 경비가 비교적 많이 소요.
환기 계통	환기구 배치	중앙식	급기풍도와 배기풍도를 환기계통의 중앙부에 인접하여 설치	지표시설관리가 용이한 이점은 있으나, 환기회로가 복잡해지고 누설에 의한 손실이 불가피함.
		대우식	급기풍도와 배기풍도를 환기계통의 양단부에 분리시켜 설치	회로가 단순해지고 누풍손실이 적지만 관리가 불편함.
	환기압	흡입식	정압에 의한 환기 (불어넣기)	지표와의 관통구가 많을 때에 적용하는 방법이며, 급기에 송풍기열이 가해짐.
		흡출식	부압에 의한 환기 (빨아내기)	급기에 열이 가해지지 않으며, 압력의 전환가능. 오염된 공기가 송풍기를 통과하여 송풍기수명이 단축됨.
환기분할방법	자연 분할	풍도 저항에 따른 자연분할	동력비가 최소임.	
	인공 분할	개소별 필요한 풍량을 확보하기 위하여 인공적인 저항을 추가시키거나 Booster Fan을 이용	필요한 곳에 풍량을 배분할 수 있는 방면 동력비가 증가함.	

## 사. 국내 지하암반 저장고의 환기 기준조사

국내 건축법 시행 규칙에서는 최소한의 공기조화 설비의 실내환경 기준만을 규정하고 있으며 국내에는 지하암반을 이용한 대규모 식품 저장소가 존재하지 않기 때문에 지하공간의 실내환경 세밀한 기준은 명시하지 않고 있다.

환경처에서 지하공간의 환경기준 권고치 Table III-3을 설정하였는데 이는 지하철 등 지하공간의 환기특성을 고려하여 일반 건축물의 환경기준이나 대기 환경 기준에 비하여 높은 실정이다. 또한 지하공간내 사용하게 될 각종 단열재가 주발생원이 될 수 있는 폼알데피드와 천장재와 바닥재로 이용될 수 있는 석면, 내장내에서 기인되는 석면과 각종 연소과정에서 발생하는 질소산화물 그리고 흙, 시멘트, 콘크리트, 대리석, 모래, 진흙, 벽돌 등의 건축자재 속의 천연 라돈 등 방사성 물질에 대한 실내 허용농도에 대한 규정은 없다. 따라서, 국내 건축법에서 규정하지 않은 환경기준 중에서도 인체에 영향을 끼치는 라돈, 폼알데히드, 석면 등에 대해서는 지하공간의 특성을 감안한 실내환경 관리 기준의 추가설정이 필요하다.

### 아. 환기설비특성 기술

지하생활 공간의 위생적이고 쾌적한 환경을 위해서는 온습도, 기류 속도, 공기농도 등을 적절하게 유지제어 하여야 한다. 지하공간에서 발생된 오염공기는 신선급기의 유동과 확산에 의해 희석되며, 혼합된 공기는 환기설비에 의해서 배출 제거됨으로써 지하공간 이용자들에게 보다 적합한 환경을 제공하게 된다. 지금까지, 효과적인 환기설비를 설계

하기 위해서는 정확한 환기설비의 효율평가에 의한 채택이 요구되어진다.

### 1) 환기효과 분석

지하공간에서는 급·배기구의 위치, 환기형태, 풍속에 따라 실내의 기류분포가 달라지며, 이로 인하여 실내환경은 많은 영향을 받는다. 환기효과 분석법은 이와 같은 다양한 형태의 환기방식을 분석하는 기법이다.

환기효과는 측정되고 계산된 시간상수(Time Constant)를 공칭시간상수(Nominla Time Constant)로 나눈 값으로 나타낸다. 단, 상기 계산 결과는 하나의 지표로서 활용되며, 환기설비의 효율성을 척도하는 기준으로 설명할 수 없다. 왜냐하면 온도나 유속에 대하여는 전혀 고려치 않았기 때문이다.

공칭시간상수는 다음 식 (1.1)에 의하여 구할 수 있다.

$$\tau_n = \frac{V}{q_v} \quad (1.1)$$

$\tau_n$  : 공칭시간 상수

V : 체적 [m<sup>3</sup>]

$q_v$  : 풍량 [m<sup>3</sup>/h]

Table III-2. 환기량 권장치

용도		환기량		재실인원 밀도 (인/m <sup>2</sup> )	필요급기량 (m <sup>3</sup> /h.인)		
					최소치	추정치	
주택건축	독립주택	일반거실		0.054	8.5	12~17	
		주방·욕실·변소		-	34	51~85	
	공동주택	일반거실		0.075	8.5	12~17	
		주방·욕실·변소		-	34	51~85	
상업건축	상점일반	매장 1층		0.32	12	17~25.5	
		매장 2층		0.22	12	17~25.5	
		아케이드		0.43	12	17~25.5	
	이발소			0.32	12	17~25.5	
	미용실			0.22	42.5	51~60	
	사무소	사무실	일반사무실		0.11	25.5	25.5~42.5
			회의실		0.65	42.5	51~68
			제도실		0.22	12	17~25.5
			복사실		0.22	12	17~25.5
	음식점	음식점	공동화장실		1.1	25.5	34~43
식당				0.75	17	25.5~34	
주방				0.22	51	60	
카페·테리아바				1.2	51	60	
극장	극장	로비		1.6	34	42.5~51	
		대강당 (금연)		1.6	8.5	8.5~17	
		대강당 (흡연)		1.6	17	17~34	
		스테이지		0.75	17	20~25.5	
		공동화장실		1.1	25.5	34~42.5	
체육관	체육관	좌석없음		0.54	34	42.5~51	
		대기실		0.22	(51) *	(68~85) *	
		변소		1.6	34	42.5~51	
학교	학교	교대실		0.54	17	17~25.5	
		강당		1.6	8.5	8.5~13	
		체육관		0.75	34	42.5~51	
		사무실		0.11	12	17~25.5	
병원	병원	변소		1.1	25.5	34~42.5	
		호흡실		0.54	34	42.5~51	
		특수실		0.16	34	25.5~34	
		일반병실		0.22	34	25.5~34	
		급수실		0.22	60	60	
호텔·모텔	호텔·모텔	수술실		-	34	-	
		침실		0.054	12	17~25.5	
		욕실		-	34	51~85	
		회의실 (소)		0.75	34	42.5~51	
	회의실 (대)		1.5	25.5	34~42.5		

Table III-3. 지하공간 환경기준 권고치

구분	항 목	환경기준 권고치	설정 근거	측정 방법	현규 제법 (대상공간)
가 스 및 입 자 상 물 질	SO <sub>2</sub>	지하공간 : 0.15 PPM/일  터널 : 0.15 PPM/15분	지하공간: 대기환경 고려기준 고려  터널 : 폭로시간 고려기준치 완화	환경처 환경오염 공정시험법	대기환경보전법 (대기중)  산업안전보건법 (사업장내)
	NO <sub>2</sub>	지하공간 : 0.15 PPM /시간  터널 : 0.5 PPM/15분	지하공간 : 대기환경 기준(단기)  터널 : 폭로시간 고려	환경처 환경오염 공정시험법	대기환경보전법 (대기중)  산업안전보건법 (사업장내)
	CO	지하공간 : 20 PPM/8시간  터널 : 100 PPM/15분	지하공간 : 대기환경 기준(단기)  터널 : 일본의 터널설계 기준치	환경처 환경오염 공정시험법	대기환경보전법 (대기중)  공중위생법 건축법 (실내)
		지하주차장 : 50 PPM/8시간 평균치	지하주차장 : 노동부 작업장 기준		산업안전보건법 (사업장내)
	CO <sub>2</sub>	지하공간 : 1000 PPM/8시간  터널 : 2500 PPM/15분	지하공간 : 일본 실내환경 기준  터널 : 미국 ASHRAE의 실 내 권고치	미 국립산업 안전 보건연구소 공정시험법	공중위생법, 건축법 (실내)  산업안전보건법 (사업장내)
	HCHO	지하공간 : 0.1 PPM/일	미국 등의 실내 환경 기준	환경처 환경오염 공정시험법	산업안전보건법 (사업장내)
	TSP	지하공간 : 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일  터널 : 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일	지하공간 : 대기환경 기준(단기)  터널 : 폭로시간 및 현재 오염 수준 고려	환경처 환경오염 공정시험법	대기환경보전법 (대기중) 공중위생법, 건축법 (실내) 산업안전보건법 (사업장내)

공칭시간상수는 시간당 환기횟수에 반비례하므로 다음 식으로 표기될 수 있다.

$$\tau_n = \frac{1}{n} \quad (1.2)$$

또한 시간상수는 어떤 공간에 투입된 트레이서 가스를 완전히 제거하는데 필요한 시간으로 가스 테크닉과 단위시간당 가스의 농도변화 측정의 결과로서 나타낸다.

Fig III-1은 치환방식과 혼합방식에 있어서 시간변화에 따른 농도의 변화를 나타낸다.

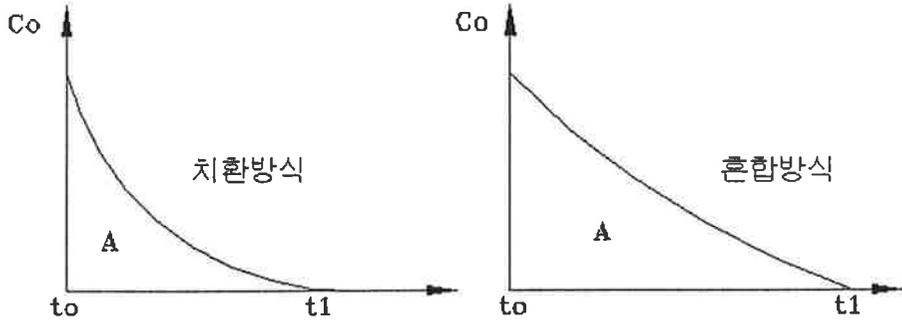


Fig III-1. 방식별 가스농도 곡선

$$\tau = \frac{V}{C_o} \quad (1.3)$$

$\tau$  : 시간상수  
 A : 면적,  $\int C_0(t)dt$   
 $C_0$  : 초기 농도

따라서, 환기효과는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_0 = \frac{\tau}{\tau_n} \quad (1.4)$$

$\epsilon_0$  : 환기효과

위와 같은 측정요령과 계산에 의한 각 유형별 환기형태에 따른 환기효과는 각각 다음과 같다(Fig III-2 참조).

치환방식 :  $\epsilon_0 = 0.5 \sim 1.0$

단순 혼합방식 :  $\epsilon_0 = 0.3 \sim 0.5$

전체 혼합방식 :  $\epsilon_0 = 0.5$



Fig III-2. 환기방식

## 2) 수직온도구배 분석법

인간이 느끼는 열환경에 대한 쾌적감은 인체의 다양한 생리적 구조에 따라 결정되며 개개인에 따라 각기 다르다. 열환경에 대한 인간의 쾌적도에 영향을 미치는 주된 요소들은 다음과 같이 편리하게 구분할 수 있다.

### 개인적 변수

- 1) 활동량
- 2) 착의량
- 3) 나이
- 4) 성별

### 물리적 변수

- 1) 기온
- 2) 표면온도
- 3) 기류
- 4) 습도

물리적 변수에 기인하는 실내온도의 수직구배는 표면온도와 마찬가지로 열환경 쾌적도에 영향을 미치고 급기 시스템에서 온도구배는 종종 온도효과  $E_T$  (Temperature Efficiency)로 나타낸다.

$$E_T = \frac{T_E - T_S}{T_R - T_S} \quad (1.5)$$

$T_E$  : 배기온도

$T_R$  : 실내온도

$T_S$  : 급기온도

열환경을 나타내는 일정 높이에서의 온도는 하나의 중요한 열환경

지표가 된다. 열환경의 지표는 작업공간특성, 수행업무특성, 업무자의 신체적 특성에 따라 달라지나 사무실과 같은 환경에서는 앉아서 근무하는 사람에게 열감응의 영향을 미치며 이와 같은 높이 즉 0.8 m에서의 기온이 실내온도로서 적용된다.

Mathisen과 Skaret(1983)이 다양한 급기구를 이용하여 적은 사무실 공간에서 측정된 온도구배의 정의는 다음과 같다.

$$E_{T_o} = \frac{T_E - T_o}{T_E - T_S} \quad (1.6)$$

$T_o$  : 지상 0.05m, 급기구 0.6m에서의 온도

$T_E$  : 배기온도

$T_S$  : 급기온도

또한, 온도구배에 대한 경험식은 다음과 같다.

$$E_{T_o} = 2.7u_o^{0.47} h_o^{0.45} \quad (1.7)$$

$h_o$  : 급기구 높이

$u_o$  : 급기구 유속

위 식 (1.6)과 (1.7)의 관계에서 온도효과 및 온도구배는 다음과 같다.

$$E_T = \frac{1}{1 - (1 - \frac{h}{H})E_{T_o}} \quad (1.8)$$

h : 실내온도 측정높이  
H : 층고  
E<sub>To</sub> : 온도구배

국토의 효율적인 이용 측면 뿐만 아니라 효율적인 도심지 물류 이동과 냉동 및 냉장의 효율성을 극대화하기 위해서도 식품류의 지하암반 저장고가 활용되어야 하며, 이를 위해서는 먼저 지하공간의 온도 및 상대습도의 조절이 중요하고, 외부의 신선공기를 적절히 공급하여 오염물질과 냄새 등을 동시에 제거시켜야 한다. 일반적으로 지하공간은 지상공간에 비하여 비교적 고른 온도분포를 유지하고 있으나, 환기가 잘 되지 않을 경우 신선공기의 부족으로 인한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 지하생활공간에서의 환기상의 문제에 대한 필요성과 환기 평가기준은 그 무엇보다도 우선되어야 한다.

## 2. 지하저장시설 현황

우리나라는 국토의 70%가 산지이며 기반암이 매우 견고하기 때문에 농어촌 지역과 도시 근교에서 교통이 편리하며, 농수산물 저장을 위한 지하암반저장고 건설에 적합한 지형과 지질조건을 쉽게 찾을 수 있다. 이러한 지역에 인공적으로 동굴을 굴착하여 지하 냉장·냉동창고를 건설한다면 농수산물 유통시설의 확충에 도움이 될 수 있을 것이다. 최근까지 국내에서는 농산물의 지하암반 저장고 건설보다는 지하암반에 유류비축시설이나 지하양수발전소와 같은 구조물 건설에 주력해 왔다. 국내에서도 NATM(New Austrian Tunneling Method)과 같은 최신 굴

착기술을 습득하게 됨에 따라 지하공간을 값싸고 안전하게 건설할 수 있는 기반이 마련되어 있다.

국내에서 식품을 지하에 저장한 사례를 들면 대관령 지역의 반지하 식 감자저장, 가나안 농군학교의 고구마 저장동굴, 제주도 대정 단위농협의 일본군 탄약고 동굴을 이용한 고구마 저장, 서해안 도서 일대의 토굴을 이용한 새우젓 저장 등이 있다. 근래에는 지하암반에 농수산물 저장을 위한 지하 냉장 및 냉동저장 시설의 필요성이 제시되었으며, 현재 한국자원연구소에 실험용 소규모 지하암반 식품저장고가 있고, 상업용으로 경기도 곤지암에 지하암반을 이용한 대규모 냉장 및 냉동 저장 시설을 건설 중에 있다. 충남 천안에는 농수축산물에 물류센타 건설계획 중에 있으며, 센타건물 지하에 냉장·냉동 저장시설이 갖추어 질 예정이다. 그러나 선진국에 비교하여 지하암반 냉장·냉동용 저장고 및 설비시설에 관한 기술적인 know-how가 부족하여, 지하저장고의 활성화를 위해서 앞으로 보다 구체적인 실증연구를 통한 기술축적이 시급히 요구된다.

국외에서 시공되고 있는 공기 밀폐식 저장방법으로서 반지하음의 구조는 용도에 따라 크기를 달리하고 있으나, 대체적인 저장심도는 5.0~12.0m이고 (지하심도 3.4~6.0m, 지면상부 1.5~6.0m) 폭은  $\phi 5\sim 19\text{m}$  정도에 이르고 있다. 지하 저장시설의 크기는 다양하여, 암반굴착의 경우 폭이 4.0~25.0m 높이가 3.0~25.0m, 길이는 20~170m 정도이고 cavern 간격의 이격거리는 굴착폭 이상으로 하고 있다. 폐광된 공동을 활용한 지하저장의 경우 저장시설의 높이는 부존 암층의 두께에 따라 대체로 5.3~7.6m이고, 폭은 저장규모에 따라 정해지며 저장실간의 이격거리는 대체적으로 높이의 2배에 가까운 15m 정도이다. 지하 저장시설의 단면형상은 탄두형으로서 직선부분을 5.0m 이상으로 하고 저장고

의 crown부에는 pipe 및 설비를 하고 있다. 지상저장에서의 차폐설비 역할은 지하암반 냉장, 냉동저장에서는 주위암반이 대신한다. 암반내에 축적되어 있는 기존 열은 저장 이용준비 완료전의 초기 기간 내에 회수되어야 한다. 그러나 설계온도에 도달하게 되면, 암반은 효율적인 열 및 습기 차폐벽으로 작용한다. 이러한 특성으로 인해 암반저장시의 적합한 열설계는 지상저장보다 중요하다. 외국의 지하 암반 저장에 대한 대표적인 예를 들면 다음과 같다.

92년도 조사 보고서에 의하면 이미 노르웨이의 암반내 냉동저장용량은 약 115,000m<sup>3</sup> 이상에 달하며 이는 총 건설용량부피의 약 10% 이상에 해당한다. 이중 50%는 계획적인 설계 하에 건설된 것이고, 나머지 50%는 폐 석회석 채석장을 이용한 것이다. 설계온도는 -22℃에서 -30℃ 사이의 범위이다.

다음으로 스웨덴의 지하암반 중에 건설된 냉동저장고의 예를 보면 너비 16m×높이 8m×길이 75m의 3개의 지하공동을 굴착하여 이중 2개인 약 16,000m<sup>3</sup>를 저장용 공동으로 나머지 1개를 차량주차 및 운반 출입 서비스 공간으로 이용하고 있는데, 냉동 유지온도 영하 27℃에서 냉동기 운전 에너지는 지상 설비에 비하여 18% 이상 감소되었고 일주일간의 냉동기 고장에도 온도는 -20℃로 적게 상승한 기록이 보고되고 있다. 또한 같은 규모의 노르웨이의 지하 냉동 저장소에서도 냉동설비가 지상에 비하여 50% 설비용량으로 만족되고 소비에너지를 25% 절감한 사례가 보고되고 있다.

중국 ZHEJIANG주의 ZHOUSHAN시에는 지하심도 40m에 여러 개의 cavern 공동을 크기 (6.0~9.0mW×6.2mH×13.5~28.0mL)로 건설하였는데 진입터널 양쪽에 배열하였으며 cavern간의 간격은 터널 폭의 1.5배 정도로 하고 있었다.

FINLAND/VALHUA 지역의 지하 저장시설은 폭과 높이가 각기 12m이고 길이가 33m로 평행하게 배열되고 있다. 냉각온도는  $-27^{\circ}\text{C}$ 로 운영되고 있으며 저장은 truck, stacker crane 및 through flow 법을 이용하고 있으며, 방열재는 별도로 하지 않고 암반 자체나 콘크리트 분사 표면이 활용되고 있다.

일본 UDONOMIYA시의 OTANI-CHO 채석적지는 과실저장 시험용으로 2개의 지하 저장고 (1,200~1,500m<sup>3</sup>)를 평균높이 6~10m로 경사지거나 거의 평평하게 설치하였으며, 신규 지하 저장시설은 그 규모를 20mL×4mW×3mH로 하여 굴착하고 방열벽을 설치하였다.

Table III-4. 노르웨이의 지하암반내 냉동저장시설

위치	소유자	규격 W×H×L, m 부피, m <sup>3</sup>	계획건설 또는 기존광산	암종	운영 온도 ℃	운영 년도
Ekeberg Kjolelager, Oslo	Oslo Fryseri A/S	14×8×33 3,700	계획건설	화강편마암	-25	1956
Gjellerasen, Oslo	Diplomis A/S	- 10,000	계획건설	섬장암	-27	1967
Hamar	Diplomis A/S	- 10,000	계획건설	편마암	-22	1967
Jordalen, Bergen	G.C. Rieber & Co. A/S	20×9×60 - 11,000	계획건설	편마암	-30	1967
Jordalen, Bergen	G.C. Rieber & Co. A/S	20×9×50 - 11,000	계획건설	편마암	-30	1982
Kastbrekka, Trondheim	L.B. Opheim	20×8.5×85 - 10,000	계획건설	녹암	-25	1978
Brevik	Meierienes Fellesfabrikk A/S	불규칙 14,000	석회암광산	석회암	-25	1962
Stathelle	Bunes Fryselager A/S	불규칙 20,000	석회암광산	석회암	-25	1978
Stathelle	Bunes Fryselager A/S	불규칙 30,000	석회암광산	석회암	-25	1982
노르웨이의 총 암반저장용량 = 115,000m <sup>3</sup>						

또한 미국 농산물의 50%를 공급하고 있는 미국 중서부에 위치한 Kansas 시의 석회암 광산을 활용한 지하저장시설과 헝가리의 Takajhegyalja 지하동굴을 이용한 포도주 지하저장시설을 들 수 있다. 그리고 편마암내에 61m라는 기록적인 폭을 가진 Gjovik Olympic Mountain Hall이 성공적으로 건설된 이후, 물과 식품의 지하저장을 위

한 새로운 가능성을 열게 되었고, 이외에도 많은 지하저장시설이 선진국에서 활용되고 있다.

### 3. 지하저장고의 냉동·공기조화 시설

냉동·공기조화 설비는 냉열원장치로서 냉동기가 사용되는데 냉동기의 증발기에서의 열교환을 이용하게 되며 냉동기의 용량은 지하저장고 내의 부하에 따라 결정하게 된다. 일반적인 공기조화기와는 달리 지하저장고를 이용하여 냉장할 경우에는 난방용 온열원장치가 필요 없게 되고, 냉장시 저장고 내의 공기에 가습할 수 있는 가습장치, 저장고 내의 오염물질 및 냄새를 제거하기 위한 환기장치, 신선한 외기와 실내로 재순환되는 환기를 혼합시키는 혼합실, 그리고 저장고 내의 상태를 일정하게 유지시키면서 경제적인 운전을 위해 각종 기기의 운전, 정지, 유량조절, 풍량조절을 담당하는 자동제어장치 등으로 구성된다. 농산물을 저장하는 경우 대부분 저온 고습의 상태가 필요하므로 농산물을 적정 온도와 상대습도로 장기간 저장하도록 저장고 냉 온습도를 조절하는 것은 매우 어려운 실정이다. 특히 상대습도를 0℃ 이하의 저온에서 상대습도를 90% 정도 고습으로 장기간 일정하게 조절하는 것은 기술적으로 해결하여 할 숙제로 남아 있다.

우리나라는 국토의 70%가 산지이고 기반암이 매우 견고하므로 농어촌 지역과 도시 근교에서 교통이 편리하며, 농수산물 저장을 위한 지하암반저장고 건설에 적합한 지형과 지질조건을 찾는 것이 어렵지 않다. 이러한 지질구조를 갖춘 곳에 지하암반저장고를 건설할 때에는 건축설계시 시설 설계를 함께 검토하며 병행하는 것이 바람직하다. 냉동

공기조화 설비 설계는 저장품, 저장 조건 및 기간, 저장량이 결정되면 지하공간에서의 열출입량과 에너지 절약기준, 그리고 냉방 공조설비의 운전기준, 자동제어 시스템 운영 등을 고려하여야 하며, 지하저장공간의 설계와 저장고 운영시스템 설계와 연계하여 상호 연관성을 고려하여 설계함으로써 시공 후 설비하자의 가능성을 최대한으로 줄이는 것이 바람직하다. 여기서 설비는 냉장 및 냉동 설비 등의 기계설비, 제상장치, 결로 방지를 위해 보온과 제습을 고려한 덕트, 배관, 방열벽, 방열문, 환기설비, 건축물에 관련된 사항이기는 하나 지하수 유입 방지를 위한 배수 및 방수시설의 설치를 포함한다. 이들의 운전을 위해서 반드시 필요한 전기설비공사도 설비시설설계시 염두해 두어야 한다. 냉방을 위해서는 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기로 구성된 냉동기가 사용되는데, 냉방은 냉동기의 증발기에서 판형, 핀코일, 또는 관코일 열교환기 등을 이용하여 열교환을 하게 되며, 냉동기의 용량은 지하저장고 내의 부하에 따라 결정하게 된다. 일반적인 공기조화기와는 달리 지하저장고를 이용하여 냉장할 경우에는 난방용 온열원장치가 필요 없게 되고, 냉장시 저장고 내의 공기에 가습할 수 있는 가습장치, 증발기에서 공기 중의 수분이 응축 동결되어 서리가 부착됨으로 냉동효과를 감소시키므로 이를 제거하기 위한 제상장치, 냉장실 및 냉동실과 외기와의 열교환을 차단할 수 있는 방열벽 및 방열문, 저장고 내의 오염물질 및 냄새를 제거하기 위한 환기장치, 신선한 외기와 실내로 재순환되는 환기를 혼합시키는 혼합실, 그리고 저장고 내의 상태를 일정하게 유지시키면서 경제적인 운전을 위해 각종 기기의 운전, 정지, 유량조절, 풍량조절을 담당하는 자동제어장치 등이 필요하게 된다.

지하저장고에 저장품을 최적 조건에서 가능한 한 장기간 저장을 하기 위해서는 저장고 내부공간을 적정조건으로 유지할 수 있어야 하며

저하저장고에서 발생할 수 있는 악취나 오염공기를 효과적으로 제거할 수 있어야 한다. 이를 위해 항상 온습도, 기류속도, 공기농도 등을 적절하게 유지 제어하는 환기장치가 필요하다. 지하저장고에서 발생될 수 있는 악취나 오염공기는 신선한 급기의 유동과 확산에 의해 희석되며, 혼합된 공기는 환기설비에 의해서 배출 제거됨으로써 저장품 및 작업자에 적합한 환경을 제공하게 된다. 지하저장공간에서는 급·배기구의 위치, 환기형태, 풍속에 따라 실내의 기류분포가 달라지며, 이로 인하여 저장공간의 환경은 많은 영향을 받는다.

#### 4. 지하저장고의 필요성과 유리한 점

우리나라에서 지하암반을 이용하여 농수산물을 저장하는 경우 다음과 같은 유리한 점을 가지고 활용될 수 있다.

국토의 70%가 산지이며 암반재질이 주로 화강암, 편마암, 석회암 및 녹암층이 80% 이상 분포되어 있어 기반암이 견고한 편이고, 농어촌 지역과 도시 근교에서 교통이 편리하고 농수산물 저장을 위한 지하암반저장고 건설에 적합한 지형과 지질조건을 쉽게 찾을 수 있다. 암반저장은 균일하고 저장고 내의 온도 및 습도를 안정되게 유지할 수 있고 장기간의 단전이나 기계고장시에도 저장물품의 안전이 보장되므로 운영안정성 측면에서도 매우 좋다. 암반자체의 낮은 열전도로 인한 단열 성능과 큰 열용량에 의한 축열성능으로 인해 지상저장고에 비교해 냉동설비용량과 에너지손실이 적게 되며, 특히 여름기간 중의 지하암반저장고 내의 온도가 지상에 비하여 상대적으로 매우 낮으므로 최대동력 수요 감소하게 되어 에너지절약 효과가 높게 된다. 또한 토지, 건설 및

유지에 대한 비용이 절감되고, 외부 잡균의 침투가 어려워 방충효과가 우수하다. 그리고 지상보다 접촉이 한정되므로 도난사고를 방지할 수 있다. 지하암반의 필요성에 있어서도 우리나라는 사계절이 뚜렷하게 구분되어 계절간의 기온차가 심하고, 품목별 수확기에 따른 출하가격의 변동 폭이 커 농수산물의 가격안정과 품질의 최대 보존을 위해서 절실한 실정이다. 인구에 비해 국토가 매우 협소하여 지상공간보존이 절대 필요할 뿐만 아니라 남북의 대치상황에서 지하공간의 효율적 이용과 자연경관의 보존 측면에서도 지하공간의 이용은 활성화되어야 한다.

한편 지하암반 저장고 건설에는 입지선정, 굴착 및 보강, 소방, 환기, 냉난방 등의 기술이 요구되는 만큼 이러한 관련 작업과 기술을 적용하여야 하고, 지하공간에서는 지상보다 저장물품의 취급에 제한을 받고 체적 효율성이 떨어질 수 있으므로 설계과정에서 이러한 점을 충분히 숙지하여 설계하여야 한다. 입지선정시에는 지상저장이 장소의 제한을 별로 받지 않는 반면에 지하암반저장은 암반상태가 적합한 곳에서만 가능하다는 것과 일단 굴착하여 형성된 지하공간은 원상회복이나 변형이 곤란함 점과 저장고는 농수산물의 생산지와 가깝고 교통이 비교적 편리한 곳에 위치하여야 한다는 조건을 충족시켜야 할 것이다.

## 5. 지하저장고의 냉동부하

### 가. 냉동부하 산정방법

냉동기의 용량은 지하저장고 내의 부하에 따라 결정하게 된다. 냉동부하는 일정한 설계치 온도와 습도를 유지하기 위해서 저장 공간에서

제거해야 할 열량이다. 일반적으로 지상 공간의 냉방부하는 시간에 따른 태양열취득, 대류 및 복사에 의해 내부표면에서 공간으로 전달되는 열량, 내부 물체에서의 감열 대류 및 복사에 의한 열전달량, 환기열량, 침입공기에 의한 열량, 공간 내의 잠열, 활동 인원수 및 형태 등에 의해 결정된다. 지중온도는 지표에서 5m 정도의 깊이 이상이면 지표기온 변동에 따른 온도변화가 거의 없는 안정한 온도분포를 나타내며, 암반은 큰 열용량을 지니고 있으므로 지하암반 저장고의 열부하는 이론적으로 지상의 1/5 - 1/10 정도이다. 이와 같이 지하저장고는 지상저온저장고에 비교해 외기온도변화에 거의 영향을 받지 않고 암반의 축열능력으로 인해 태양열복사에 의한 급격한 부하변동이 일어나지 않으며, 또한 틈새를 통한 침기량이 매우 적으므로 냉동기의 용량이 절감된다. 지하저장으로 이용될 수 있는 지하암반 내 연중 온도는 12 ~ 16 °C, 습도는 85 ~ 95 % 범위에서 유지된 것으로 조사되었다. 지하저장고 냉동부하는 지하암반저장고 내의 설계조건을 기준으로 할 때 암반을 통한 전열량, 방열벽을 통한 전열량, 환기열, 냉각열, 그리고 전동기, 제상히터의 기기, 작업시의 하역기계, 조명기구, 작업자의 발열 등 내부발생열, 기타발생열(생체식품인 경우 호흡열)에 의해 결정되는데 이 중 특히 암반을 통해 내부로 전도되는 전열량이 가장 크다. 냉동부하를 정확히 계산하기 위해서는 암반의 축열용량을 계산하는데 필요한 암반의 물성(비열, 밀도, 열전도계수 등)과 암반·공기의 대류열전달계수가 파악되어야 한다. 이 대류 열전달 계수는 암반저장고의 형태와 규모, 저장고내의 공기 유동 특성에 따라 달라진다. 외국에서 농수축산물 지하저장시설의 폭은 14 - 25 m 정도로 하고 있으며, 국내 지하 비축기지 에서 굴착 막장당 굴착장비를 1회 이동함으로 전폭에 대한 천공작업이 가능하도록 하여 경제성과 시공성을 양호하게 하기 위하여 폭을 18m

로 정한 바 있다. 지하저장고 부하계산시 필요한 온습도 설계조건은 저장물에 따라 다르며 냉장인 경우 유속은 0.1 - 0.2 m/sec, 동결저장인 경우에는 유속 0.5 m/sec 이하를 표준조건으로 한다. 지하저장고 내에서 작업시 증대되는 침기량을 고려하여 산정한 최대부하로 냉동기용량을 결정할 수 있으나 보통 작업기간이 저장기간에 비해 상대적으로 짧으므로 일시적인 냉방용량 초과시에는 보조냉동장치를 가동하는 것이 보다 경제적인 것이다.

### 가. 지하암반에서의 이상 열이동

연속체의 부분이 열의방출 또는 흡수 효과에 의해 다른 상으로 연속체 일부가 변하면서 거기에는 두개의 상(Phase) 사이에 이동경계가 존재한다. 이동경계에서의 해석방법은 연속체 안에서 온도 변화와 함께 구할 수 있다. 본 절에서는 물이 얼음으로 변하는 과정으로 액체의 고체화를 고려한다. 지하암반 동결시 암반에 내재되어 고여 있는 경우, 이상(two phases)의 경계에서 일어나는 잠열 열전달 과정을 수반하므로 이에 대한 해석을 통해서 지하암반에서의 열전달 현상을 보다 정확하게 이해할 수 있다. 물론 지하암반 내의 지하수 분포와 유동에 대한 정확한 지질조사가 선행되고 이를 바탕으로 지하수 분포 및 유동이 고려된 지하암반에 대한 형상이 파악된 후 이에 대한 열유동해석을 적용하여야 할 것이다. 여기에서는 물과 얼음과의 경계에서 열전달 특성을 파악함으로써 특정 지하암반저장고의 냉동부하 계산에 필요한 기초지식을 제공하고자 한다.

물과 얼음의 열적 상태량들은 물과 얼음을 각각 밀침자 1과 2로 표시하여 구분한다. 초기상태에서 dt 시간 후 고체로 변화될 유체의 두께

를  $dN_1$ , 고체로 바뀐 상태에서 고체의 두께를  $dN_2$  로 하자. 여기서 주요한 관심은 Fig III-3 에서 나타나 있는 1차원 열이동시  $N_2(t)$ 에서의 경계조건이다. 두상의 밀도( $0^\circ\text{C}$ 에서 물은  $1000\text{kg/m}^3$ , 얼음은  $920\text{kg/m}^3$ )가 같지 않으므로  $dt$  시간 간격에서  $dN_2$  두께의 고체는  $dN_1$  두께의 유체로부터 알 수 있다. Fig III-4 에 나타낸 System에 열역학 제 1법칙을 적용하게 되면 우리는 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\rho_2 u_2 dN_2 - \rho_1 u_1 dN_1 = q_2 dt - q_1 dt - p(dN_2 - dN_1) \quad (1.9)$$

여기서  $p$ 는 연속체에서의 압력이다.  
질량보존법칙에 의하여

$$\rho_2 dN_2 = \rho_1 dN_1 \quad (1.10)$$

그리고 용해의 잠열은

$$h_{sl} = h_1 - h_2 \quad (1.11)$$

알고있는 식 (1.9)를 우리는 다시 쓸 수 있다.

$$- \rho_2 h_{sl} \frac{dN_2}{dt} = q_2 - q_1 \quad (1.12)$$

Fourier's law에 의해  $q_1$ 과  $q_2$ 를 표현하면 우리는 최종적으로 아래와 같은 식을 얻는다.

$$-\rho_2 h_{sl} \frac{dN_2}{dt} = \pm k_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_\sigma - \left[ \pm k_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_\sigma \right] \quad (1.13)$$

여기서 각각의 고체상에 있어서 전도항의  $\pm$ 는 안쪽과 바깥쪽의 직각 방향을 따라 편미분  $\frac{\partial}{\partial n}$ 에 일치하도록 한다

경계 조건은 하나를 택하는 과정에 의해 또한 얻을 수 있다.

$\rho_2 \neq \rho_1$ 이고  $\rho_1 > \rho_2$ 이면 유체에서 속도  $V_1$ 이 증가하면서 주어지는 고체화 과정은 두상의 체적 사이의 변화율에 정비례한다

$$V_1 = \frac{dN_2 - dN_1}{dt} \quad (1.14)$$

연속 방정식 식 (1.10)에 의해서 재정리하면

$$V_1 = \left( 1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \frac{dN_2}{dt} \quad (1.15)$$

간략하게 해석하면, 우리는 관찰자가 이동경계와 함께 유동한다고 추측해 보자. Fig III-4 는 고체화 과정의 양상을 보여준다. 그러므로 열역학제 1법칙은 Fig III-5 의 식 (1.16)은 정지된 경계둘레의 Control Volume에 적용된다.

$$0 = \rho_2(h_1 - h_2) \frac{dN_2}{dt} + q_2 - q_1 \quad (1.16)$$

주어진 식 (1.11)과 식 (1.16)은 식 (1.12)로 정리된다. 고체화의 문제는 액체에서 온도변화가 중요하지 않을 때, 상당히 간단화될수 있다. 이 경우에  $q_1$ 을 열전달계수  $h$ 를 사용하여 표현한다면, 식 (1.13)은 다음과 같이 표현된다.

$$-\rho_2 h_{sl} \frac{dN_2}{dt} = \pm k_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_\sigma - h(T_\sigma - T_\infty) \quad (1.17)$$

여기서,  $T_\sigma$ 는 고체화 경계에서의 온도이고,  $T_\infty$ 는 움직이는 경계로부터 멀리 위치한 액체온도이다.

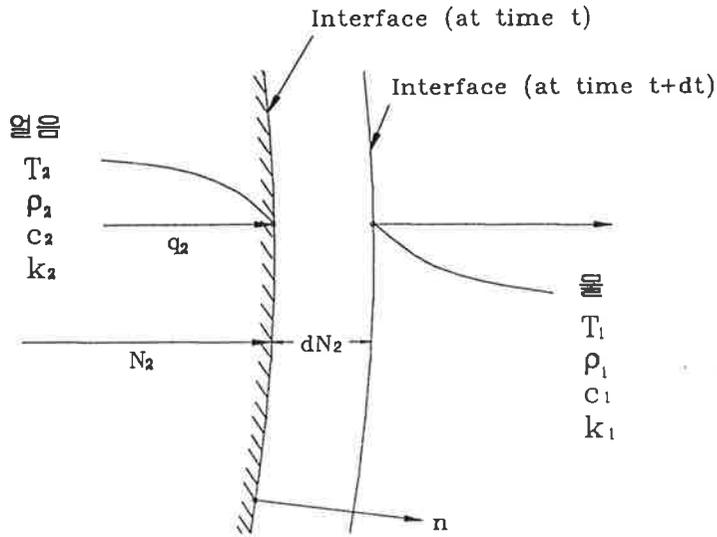


Fig III-3. 물의 빙화 과정

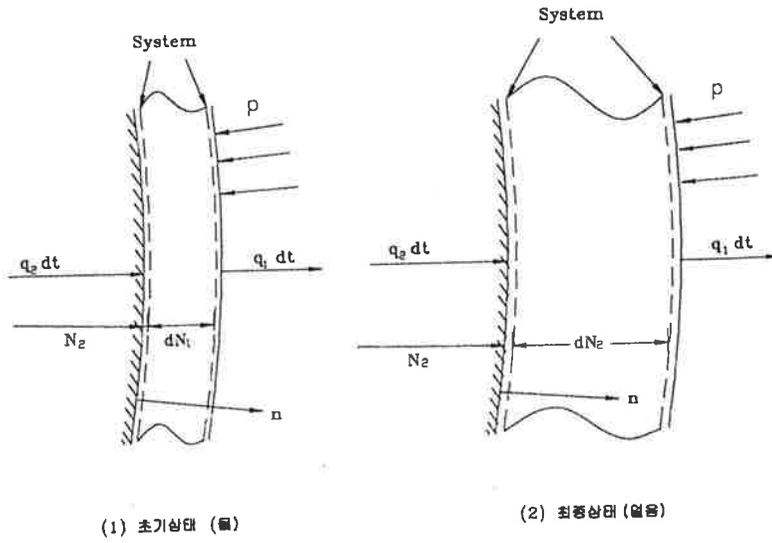


Fig III-4. 물의 빙화 전과 후의 상태

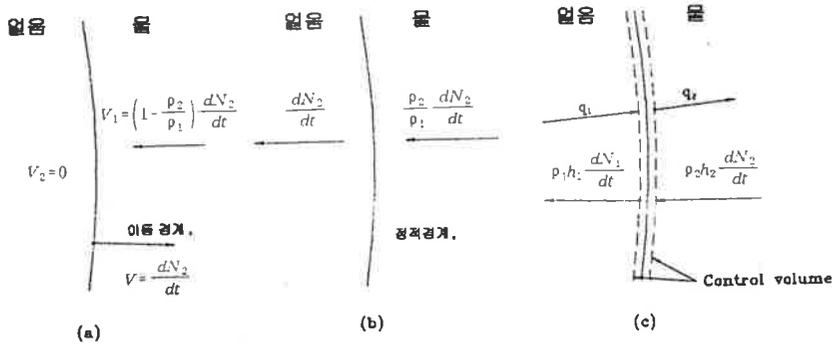


Fig III-5. 물의 빙화 과정 해석을 위한 접근방법

## 제 2 절 지하암반의 열전달 특성

### 1. 지표면에서의 열전달

지표면에서의 열전달현상은 지면에서의 전도, 대류, 증발, 그리고 하늘과 지면의 적외선과 같은 긴 파장과 태양으로부터 짧은 파장 영역에서의 복사 교환이 병합된 과정을 통해서 발생한다. 이 열전달 작용들 사이에서의 평형은 지표의 물성, 지표의 습기 함유, 지표면과 날씨 변화 등을 포함한 많은 변수에 의해 좌우된다. 많은 중요한 연구는 지표 조건들이 흙의 열적인 영역에 미치는 효과를 주로 다루어 왔다. 지표에서의 온도분포는 지표와 연결된 건물 표면에서의 열전달에 큰 영향을 미치기 때문에 어느 정도 자세히 이 연구 결과들을 고려하는 것은 적절하다. 이미 연구되어 보고된 결과들을 살펴보면 다음과 같다.

지표면의 효과를 지표면에서의 계절적인 변화에 근사한 Sine 곡선적으로 변하는 온도표면 열전도로 반영한 경우, 이 일차원적 모델을 이용한 연구에서 연평균 지표면 온도는 전형적으로 평균대기온도보다 약 4°C가량 높게 나타났다. 지표 온도를 감소시키는 경향을 갖게 하는 증발현상은 이 모델에 포함되지 않았으므로 평균지표온도는 항상 대기온도를 초과한다는 이 가설은 이들의 연구결과에 의해 증명되어지지 않았다. 이 들 이론적 연구에 의해 나타난 중요한 점은 지표온도는 본질적으로 대기온도와 다르다는 것이다.

두 개의 주차장과 잔디밭 지역 아래 다양한 깊이에서의 온도를 측정한 실험적 연구에서, 하나는 38×46 m이고 다른 하나는 24×64 m 크기의 주차장을 이용하였다. 주차장의 월평균 표면온도는 여름 동안에 공기 온도보다 15°C 만큼 높은 반면에 잔디밭 온도는 공기온도와

1.7°C 내에서 유지됨을 관찰되었다. 잔디밭에서 낮은 온도가 관찰된 것은 주차장의 아스팔트에 의해 억제되어진 증발 손실의 결과라고 추정하였다. 그리고 겨울에 주차장 일부는 눈을 치우고 나머지는 눈을 그대로 두어 보았다. 눈이 치워지지 않은 주차장에서의 눈의 단열효과와 잔디밭은 이들의 표면 온도를 공기 온도보다 10°C 높게 유지하도록 하였다. 같은 겨울기간 동안 눈이 치워진 주차장은 보다 낮은 표면 열저항 때문에 온도가 공기보다 더 낮게 나타났다. 온도변화는 깊이가 증가함에 따라 감소하였고 6m 깊이에서는 계절에 관계없이 무시될 수 있는 정도였다. 그러나 보다 더 광범위한 지역에 걸쳐서 표면조건이 변화할 때는 훨씬 더 광범위한 지역에 걸친 평균대지온도의 변경을 초래하게 될 수 있음을 지적하고 있다.

각각 50×50 ft 크기를 갖은 5 군데의 지역에서 서로 다른 표면 조건(일반 아스팔트, 하얀 색을 칠한 아스팔트, 아무것도 덮이지 않은 지표, 짧은 잔디, 자르지 않은 잔디)을 준 경우, 일반 아스팔트에서의 온도는 주위 공기온도보다 높게 나타났으며 표면 온도가 상승한 기존 측정 결과와 일치되었다. 잔디밭 월평균표면온도는 평균공기온도보다 약간 떨어졌고, 여름에 잔디를 깎지 않은 곳에서 가장 큰 차이가 났다. 이 연구에서도 깊이가 증가할수록 각 구역에서의 차이는 급격히 감소됨을 보여 주었다.

표면 조건은 땅 속의 온도 층에 주요한 영향을 주거나 줄 수 있다는 광범위한 증거에도 불구하고 빌딩 시뮬레이션 연구에서의 지표모델들은 자주 실제 있을 것 같지 않을 정도로 간단하다. 좀더 복잡한 모델은 표면 경계조건에서의 태양열 이득을 포함하고 증발 효과를 나타낸다. 직접적으로 표면 에너지평형에 확인되어진 모든 영향들을 다뤄 시도한 경우, 인용한 모든 수치적 모델들이 현장 데이터와 비교할 때 이

치에 맞는 결과를 나타내었다.

대표 기상 데이터의 선택은 사용된 표면 열전달의 모델과 밀접하게 연결되어 있다. 일정한 대류열전달계수로 제한된 간단한 모델은 오직 건구온도만을 필요로 한다. 긴 시간 단계가 사용될 때 대기 온도는 자주 Sine함수에 접근한다. 한편, 정밀한 모델은 자주 건구-습구온도, 기압, 태양복사와 바람속도를 포함한 많은 기상 변수를 필요로 한다. 그리고 외기 건구온도에 비슷한 근사값을 사용하는 것은 동일 모델에서 실제 데이터를 사용한 것과 비교할 때에 정확성에 있어서 심각한 오류를 나타내지 않는다는 것을 보여 주었다. 이유는 심지어 얇은 깊이에서도 지표면 흙의 열용량이 상당히 효과적으로 짧은 기간동안의 변화를 완화시켜주기 때문이다. 그러나 특정한 기후 변화가 모델에 포함되어야 하는지 생략되도 되는지의 중요한 과제는 상세하게 조사되지 않았다.

지표면 경계조건은 수학적으로 다음과 같은 열유속 조건으로 나타낼 수 있다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = G(t) \quad (2.1)$$

$G(t)$ 는 지표면에서의 에너지 평형에 의해 결정되어 진다. 표면에너지 평형은 일반적으로 다음의 식으로 표현한다.

$$G = J_t - q_{cs} - q_{et} \quad (2.2)$$

식 (2.2)는 땅속으로 전도되는 열전달율( $G$ )은 지표면에서 흡수된 정

미 복사( $J_t$ )에 의한 값에서 증발( $q_{et}$ )과 현열 대류( $q_{cs}$ )에 의한 값을 뺀 것과 같다. Fig III-6 은 지표면에 control volume을 설정하였을 때의 이들 열유속을 보여준다.  $J_t$ 는 흡수된 태양복사( $J_s$ )와 입사하는 하늘 적외선 복사( $J_{sky}$ )의 합과 지표에서 방출된 적외선복사( $J_g$ )을 뺀 값이다. 즉

$$J_t = J_s + J_{sky} - J_g \quad (2.3)$$

$J_s$ 은 지표면의 흡수율과 입사하는 단파장 복사에 의존하고 모두 계절에 따라 달라질 것이다.

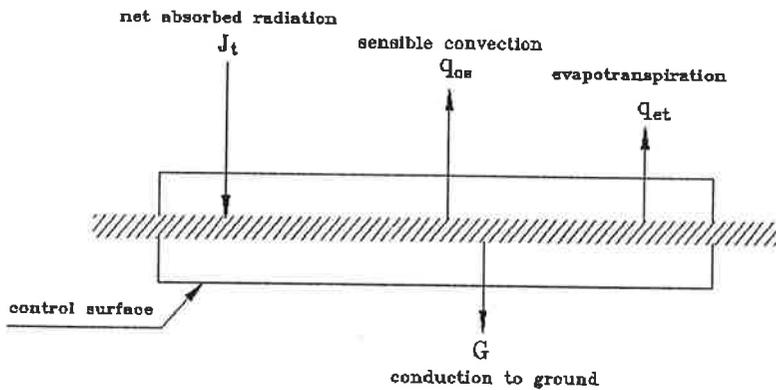


Fig III-6. 지표면 에너지 평형 요소

땅의 반사율  $\phi_s$ 은 땅의 흡수율보다 더 일반적으로 쓰여진다. 그래서  $J_s$ 은 식 (2.4)의 적용에 의해 결정되어진다

$$J_s = (1 - \phi_s) * J_{s,i} \quad (2.4)$$

$J_{s,i}$ 은 평형표면에서의 입사 태양복사의 총합을 가리키고 쉽게 얻을 수 있는 날씨 데이터의 항목이다. Sellers에 의해 요약되어진 측정에 의해서  $\phi_s$ 의 값은 아스팔트포장에 대한 0.05에서 부터 눈에 대한 0.95 까지 표면조건에 따라 달라진다

적외선 복사는 낮동안에 태양복사보다 지표에너지 평형에 훨씬 적은 영향을 미친다. 그러나 밤에는 이 영향은 무시될 수 없으며 대기온도가 빙점 위에서 유지되는 동안에 서리를 형성하는 것과 같은 현상에 영향을 미친다. 하늘복사에 대한 자료는 태양복사에 의한 것처럼 일반적으로 쉽게 구할 수 없다.  $J_{sky}$ 는 Angstorm의 경험식에 의하면 다음과 같다.

$$J_{sky} = \epsilon_{sky} \sigma T_{db}^4 [a - b \cdot \exp(-2.3c \cdot e)] \quad (2.5)$$

주위 건구온도( $T_{db}$ )에서 구해진 꺾쇠괄호 안의 항은 하늘의 회색 방사력에 곱수로 나타나 있는데, 이 수정계수는 주위 증기압  $e$ (milibar)에 의해 표시되는 공기의 습기량에 달려있다. 여기서 하늘 복사는 공기 습도와 함께 증가한다. 하늘의 적외선 방사율(emissivity)은 1로 가정되도 심각한 오류를 유발하지는 않는다. 실험계수  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 각각 0.820,

0.250과 0.094 가 적용된다. 식 (2.5)에 의해 예측된 복사 유속 값은 맑은 하늘 일 때 적용될 수 있고, 원칙적으로 흐린 날씨에 대해서는 교정되어야만 한다. 어쨌든 흐린 하늘에 대한 값들은 이 연구에서 사용된 날씨파일에 기록되어져 있지 않아서 맑은 하늘에 대한 값들이 교정 없이 사용되었다. 지표면 적외선복사는 Stefan-Boltzmann equation에 의해 주어진다.

$$J_g = \epsilon_g \sigma T_g^4 \quad (2.6)$$

$T_g$ 는 지표면 온도이다. 지표면 방사율  $\epsilon_g$ 는 0.9 정도이고 대부분의 자연적인 표면인 경우 더 큰 값을 나타낸다.

지구 표면에서의 대류 전달과정들은 본질적으로 난류이고, 지표층 상태 뿐만 아니라 대기에서 중립적 안정성 상태에서부터 벗어난 정도에 의해 영향을 받는다. 난류의 대기대류에 대한 기본적인 변수는 Richardson 수(Ri)인데, 이 수는 크기와 부호에 의해 부력효과와 안정성을 각각 나타낸다. Richardson수의 전형적 형태는 다음과 같다.

$$Ri = \frac{g\beta(\Delta T)L}{U^2} \quad (2.7)$$

$\Delta T$ 는 표면과 주위공기와의 온도차,  $L$ 는 특성길이(경계층 두께),  $U$ 는 특성속도이다. 만약  $\Delta T$ 가 양수이면(지표가 공기보다 따뜻하면) 부력은 대류를 촉진시키고 비안정적 상태가 존재하게 된다. 반대의 경우에는 body forces(중력)는 난류를 억제시키는 경향이 있다.

현재 일반적인 난류 이론과 공학적 해석을 위한 실제적인 방법과의

차이는 완전히 메워지지 않았다. 분자이동과의 유사성에 의해 얻어진 초기 방법을 넘어서서 확률론적 과정들의 이론에 바탕을 둔 모델의 개념상의 우월은 보편적으로 인정되어져 있다. 그럼에도 불구하고 구식의 이론에 바탕을 둔 난류과정의 공학적 모델들은 실험적 측정치들에 의해 지지된 채 광범위하게 사용되고 있다. 비록 이러한 모델들을 적용하는데 있어서 특별한 경우와 좁은 범위의 조건들에 제한되지만, 그러한 조건 안에서 매우 효과적일 수 있다.

열과 습기의 대류를 시뮬레이션 하는데 대기 경계층 대류의 와류 확산 모델을 경험적 계수들과 함께 표현할 수 있다. 현열과 최대 가능한 잠열의 대류 유속을 각각  $q_{cs}$  와  $q_{cl}$ 로 표시하면, 이들은 다음과 같이 표시되다.

$$q_{cs} = \rho_{air} C_{p,air} D_h (T_g - T_{db}) \quad (2.8)$$

$$q_{cl} = \rho_{air} C_{p,air} D_w (T_{db} - T_{wb}) \quad (2.9)$$

$D_h$ 와  $D_w$ 는 열과 수증기에 대한 난류전달계수 [%] 이고  $T_{wb}$  는 주위의 습구온도이다. 실제보다는 최대 가능한 잠재적인 잠열 대류가 이 모델에 사용되고 있다.

식 (2.2)에서 증발산량( $q_{et}$ )는 잠열의 교환을 수반하는 지표면에서 모든 과정들을 포함하고 있다. 이것들은 식 (2.9)로 표현된 잠열대류, 증발에 의한 현열에서 잠열로의 변화, 그리고 식물에 의한 잠열의 발산을 포함한다. 증발산량은 주위대기의 포화상태에 의해, 경계층의 혼합 효율(mixing efficiency)에 의해, 그리고 표면에 가능한 습기의 공급에

의해 제한된다. 해석상 습기의 공급에 의해 제한되어지는 증발산량과 제한 받지 않는 것을 구별하는 것이 유용하다. 습기 공급에 의해서 제한 받지 않는 후자의 잠재적인 증발산량은 표면에 대한 최대율을 의미하고 기상조건에 의해서만이 제한된다. 실제 증발산량에 대한 모델을 사용하기 위해서는 지표면에서의 포화도를 알아야 하고, 지표면 흙의 습기분포가 모델화 되어야 한다.

비록 이것은 제한된 경우이지만 잠재적 증발산량은 자연적으로 발생하는 수많은 상황에서 근사화될 수 있는데, 아주 자주 식물 작용을 통해서 일어난다. 잔디들과 다른 유사한 지표는, 충분히 물에 적셔 있을 때, 지표면이 상대적으로 건조할 때 조차도 최대 가능한 비율에 가깝게 대기로 습기를 발산시킨다.

위와 같은 내용들을 고려하여 유도된 증발산량에 대한 식을 표현하면 다음과 같다.

$$q_{et} = \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (J_t - G) + \rho_{air} c_{p,air} D_w (T_{db} - T_{wb}) \quad (2.10)$$

식 (2.10)의 오른쪽 첫째 항은 잠열로 변환되는 복사 또는 전도에 의해 전달된 현열을 나타낸다. 무차원 그룹  $[\Delta/(\Delta + \gamma)]$ 은 대기의 물리적 물성이다. 이것은 포화된 표면에 전달된 잠열 속으로 변환되는 현열에 대한 비율을 나타낸다. 변수  $\Delta$ 는 온도에 따른 포화증기압의 변화이고,  $\gamma$ 는 습도계상수로서 단열포화과정 동안 단위온도차이당 증기압 변화이다. 둘째 항은 잠열의 대류를 나타낸다.

지표면 경계 조건에 대한 식은 식 (2.4), (2.5), (2.6), (2.8), (2.10)을 식 (2.1)에 대입함으로써 최종적으로 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
G &= -k \frac{\partial T}{\partial y} = (1 - \phi_{\text{sol}}) R_{\text{sol},i} \\
&+ \varepsilon_{\text{sky}} \sigma T_{\text{db}}^4 [a - b \cdot \exp(-2.3c \cdot e)] - \varepsilon_{\text{g}} \sigma T_{\text{g}}^4 \\
&- \rho_{\text{air}} c_{p,\text{air}} D_{\text{h}} (T_{\text{g}} - T_{\text{db}}) \\
&- \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (J_{\text{t}} - G) - \rho_{\text{p,air}} D_{\text{w}} (T_{\text{db}} - T_{\text{wb}}) \quad (\text{at } y = 0)
\end{aligned} \tag{2.11}$$

여기서  $y$ 는 지표에서 지하로 향하는 축을 의미한다.

## 2. 지하암반 온도분포에 대한 고찰

### 가. 지중온도분포에 대한 이론해석

지하암반온도  $T$ 에 대한 지배방정식을 다음의 1차원 비정상 열전도 방정식으로 표현하였다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2.12}$$

식 (2.12)에서  $\alpha$ 는 열확산계수를 나타내고  $t$ 는 시간,  $x$ 는 지면으로부터의 깊이를 나타낸다. 식 (2.12)의 해를 구하기 위한 경계조건은 다음과 같다.

$$T(0, t) = T_{av} + T_{am} \cos \omega t \tag{2.13}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} T(x, t) = T_{av} \quad (2.14)$$

식 (2.13)에서  $T_{ab}$ 는 지중평균온도,  $T_{am}$ 는 온도진폭,  $w$ 는 온도변화의 각속도를 나타내는데 하루 중의 온도변화를 해석할 경우에는  $w = 2\pi/24$  시간으로 하고 1년의 온도변화를 해석할 경우에는  $w=2\pi/365$ 일로 한다.

에너지방정식을 간편하게 해석하기 위하여  $\theta(x, t) = T(x, t) - T_{av}$ 로 치환하여 주면 (2.13)과 (2.14)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.15)$$

$$\theta(0, t) = T_{am} \cos wt \quad (2.16)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \theta(x, t) = 0 \quad (2.17)$$

이때 식 (2.16)의  $T_{am} \cos wt$ 를 Euler의 공식  $e^{iwt} = \cos wt + i \sin wt$ 를 이용하여  $T_{am} e^{iwt}$ 의 실수부로 나타내기 위하여 식 (2.15)~식 (2.17)에서  $\theta$  대신 다음 식과 같이  $W$ 로 바꾸어 주면 편리하다.

$$W(x, t) = \theta(x, t) + iS(x, t) \quad (2.18)$$

이와 같이 식 (2.15)~식 (2.17)을 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial W}{\partial t} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} W(0, t) &= \theta(0, t) + iS(0, t) \\ &= T_{am} \cos \omega t + iT_{am} \sin \omega t \\ &= T_{am} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} W(x, t) = 0 \quad (2.21)$$

한편 식 (2.19)~식 (2.21)을 허수부 S(x, t)에 관해서 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2.22)$$

$$S(0, t) = T_{am} \sin \omega t \quad (2.23)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} S(x, t) = 0 \quad (2.24)$$

식 (2.19)에서 보는 바와 같이 W는 x와 t의 함수이므로 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$W(x, t) = X(x) e^{i\omega t} \quad (2.25)$$

식 (2.19)에 식 (2.25)를 대입하면 변수분리가 되어 아래와 같은  $X(x)$ 에 관한 상미분방정식이 된다.

$$X''(x) - i\frac{w}{\alpha} X(x) = 0 \quad (2.26)$$

식 (2.25)에 식 (2.20)과 식 (2.21)을 대입하면  $X(x)$ 에 관한 경계조건은 다음과 같이 된다.

$$X(0) = T_{am} \quad (2.27)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} X(x) = 0 \quad (2.28)$$

따라서 식 (2.26)의 일반 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X(x) = A \exp\left(-x\sqrt{\frac{iw}{\alpha}}\right) + B \exp\left(x\sqrt{\frac{iw}{\alpha}}\right) \quad (2.29)$$

식 (2.29)에 경계조건 (2.27), (2.28)을 적용하면  $X(x)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$X(x) = X_{am} \exp\left(-x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}\right) \cdot \exp\left(-ix\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}\right) \quad (2.30)$$

치환된 변수  $\theta(x,t)$ 를 구하여  $T(x, t)$ 에 관하여 정리하면 다음 식과

같다.

$$T(x, t) = T_{av} + T_{am} \exp\left(-x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}\right) \cdot \cos\left(\omega t - x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}\right) \quad (2.31)$$

식 (2.31)은 지중의 깊이  $x$  m, 시간  $t$ 에서의 지중온도를 나타내는 식이다.

기상대가 측정한 온도와 식의 계산 결과는 여현곡선의 위상의 차이 때문에 오차가 생기게 되므로 다음 식과 같이 보정계수  $C$ 를 고려하여 보정해줄 필요가 있다.

$$T(x, t) = T_{av} + T_{am} \exp\left(-x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}\right) \cdot \cos\left(\omega t - x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}} + C\right) \quad (2.32)$$

기상대 통계자료를 참고하여 식 (2.32)를 사용하기 위한  $T_{av}$ ,  $T_{am}$ ,  $\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}$ ,  $C$ 값이 지역별로 조사되어 보고된 바 있다. Fig III-7 은 대전지역의 연중지중온도를 월별, 깊이별로 나타내고 있으며, 깊이가 깊을수록 온도의 변화가 적음을 보여준다.

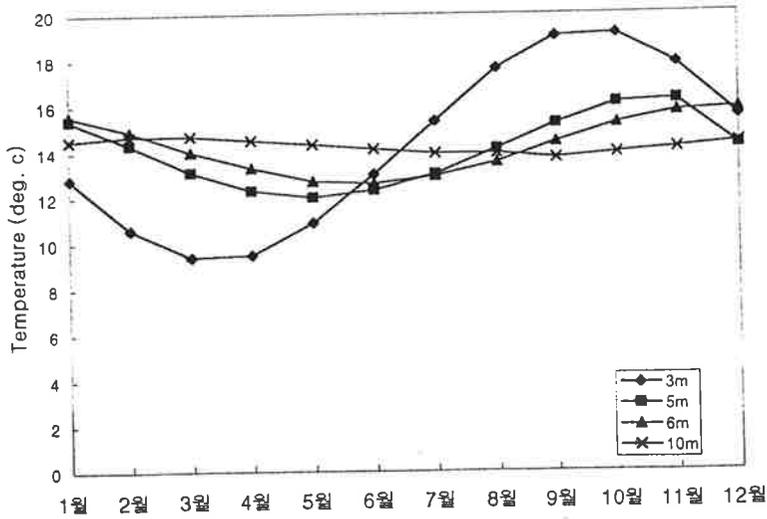


Fig III-7. 대전지역 월별, 깊이별 지중온도의 분포

가. 지하암반온도계산을 위한 수치해석

1) 이론적 배경

비정상 일차원 전도 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.33)$$

$\rho$ 는 밀도,  $C$ 는 비열,  $k$ 는 열전도 계수이다.

편리하게 계산하기 위해  $\rho C$ 를 상수로 가정하고 각격자점에서 시간  $t$ 에서 온도  $T$ 의 과거 온도를  $T_P^0, T_E^0, T_W^0$ 로 정의하고  $t+\Delta t$ 에서 온도  $T$ 의 새로운 온도를  $T_P^1, T_E^1, T_W^1$ 로 정의하고 식 (2.33)을 검사체적과 시간 간격  $t$ 에서부터  $t+\Delta t$ 까지 적분하면

$$\begin{aligned} \rho C \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx &= \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \\ \rho C (T|_{t+\Delta t} - T|_t) \Delta x &= \int_t^{t+\Delta t} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right]_w^e dt \\ \rho C (T_p^1 - T_p^0) \Delta x &= \int_t^{t+\Delta t} \left\{ k_e \frac{(T_E - T_P)}{(\partial x)_e} \right\}_w dt \quad (2.34) \end{aligned}$$

여기서 시간  $t$ 에서  $t+\Delta t$ 까지 어떻게  $T_P, T_E$ 와  $T_W$ 가 변화하는지에 대해서 가정해야만 한다.

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [f T_P^1 + (1-f) T_P^0] \Delta t \quad 0 \leq f \leq 1 \quad (2.35)$$

식 (2.34)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho C (T_p^1 - T_p^0) \Delta x &= \left[ f \left\{ k_e \frac{(T_E^1 - T_P^1)}{(\delta x)_e} - k_e \frac{(T_P^1 - T_E^1)}{(\delta x)_w} \right\} + \right. \\ &\quad \left. (1-f) \left\{ k_e \frac{(T_E^0 - T_P^0)}{(\delta x)_e} - k_w \frac{(T_E^0 - T_P^0)}{(\delta x)_w} \right\} \right] \Delta t \quad (2.36) \end{aligned}$$

식 (2.36)을 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \left( f \frac{k_e}{(\delta x)_e} + f \frac{k_w}{(\delta x)_w} + \frac{\rho C \Delta x}{\Delta t} \right) T_P^1 = & \frac{k_e}{(\delta x)_e} [f T_E^1 + (1-f) T_E^o] + \\
 & \frac{k_w}{(\delta x)_w} [f T_E^1 + (1-f) T_E^o] + \\
 & \left[ \rho C \frac{\Delta x}{(\Delta t)_e} - (1-f) \frac{k_e}{(\delta x)_e} - \right. \\
 & \left. (1-f) \frac{k_w}{(\delta x)_w} \right] T_P^o
 \end{aligned}
 \tag{2.37}$$

위 식에서 위첨자1을 제거하면 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 a_P T_P = a_E [f T_E + (1-f) T_E^o] + a_w [f T_W + (1-f) T_W^o] + \\
 [a_P^o - (1-f)a_E - (1-f)a_w] T_P^o
 \end{aligned}
 \tag{2.38}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 a_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad , \quad a_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \\
 a_P^o = \rho C \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad , \quad a_P = f a_e + f a_w + a_P^o
 \end{aligned}$$

이다.

비정상 1차원 열전도인 경우 식(2.38)을 이용하여 본 지배방정식과

주어진 경계조건을 적용하여 지중온도를 계산할 수 있으며, 본 연구에서는 Conduct라는 상용 수치해석프로그램을 적용하여 비정상 2차원 열전도방정식을 적용하여 지하암반온도분포를 구하여 보았다.

## 2) 지하암반온도 수치해석(Conduct) 프로그램

다음은 비정상 2차원 열전도 미분방정식을 Conduct 프로그램을 이용해 계산한 과정을 설명한다.

지하저장고의 위치는 지하(y축)로 5m 아래에 있고 수평(x축)방향으로 10m 오른쪽에 위치하고 좌우대칭이다. Fig III-8 은 지하저장고의 위치와 경계조건을 나타낸다. 경계조건은 다음과 같이 가정한다.

- ① 표면온도는 365일을 주기로 변화하는 Cosine 함수 값을 갖고, 대류는 발생하지 않는다.
- ② 지중암반의 초기온도는 10°C이다.
- ③ 지하저장고의 벽면에서 단열이다.
- ④ 암반의 밀도( $\rho$ ) : 2,630 kg/m<sup>3</sup>
- ⑤ 암반의 열전도계수(k) : 2.79 W/m·k
- ⑥ 암반의 비열 (Cp) : 775 J/kg·k

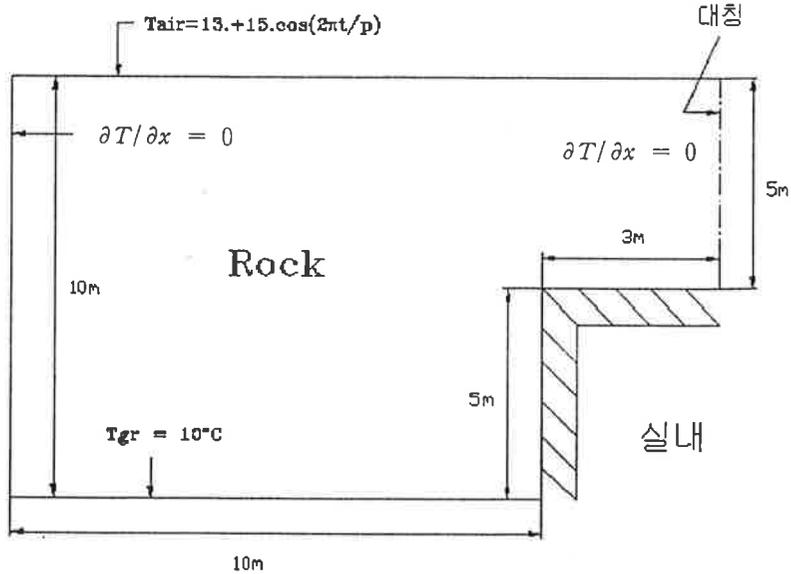


Fig III-8. 경계조건

Table III-5 는 CONDUCT 프로그램을 이용해서 계산한 지중암반 온도이다. 반복횟수는 프로그램 수행반복횟수를 뜻하며 0m, 0.5m, 1.5m, 2.5m, 3.5m, 4.5m는 지표면을 0m로 하고 지표면을 기준으로 아래로, 즉 땅속으로 0.5m, 1.5m, ... 4.5m 깊이를 뜻하는 것이다. Cycle 은 365일(1년)을 1 Cycle로 계산했으며 수렴하는 값을 구하기 위해서 5 Cycle을 반복 계산하였다.  $\Delta t$ (시간변화)는 0.5일 이고 온도는  $^{\circ}\text{C}$ 이다.

Fig III-9 는 매 Cycle 당 30일(1달)의 온도 값이 초기에 임의로 지정한 온도에서 일정한 값으로 변화하여 수렴하는 것을 보여준다. 지표 온도는 1 Cycle에서 30일 일 때  $26^{\circ}\text{C}$ 이고 이 값은 2, 3, 4, 5 Cycle에서

도 변화하지 않고 26°C로 고정된 값을 가지지만 같은 시간(30일) 0.5m 깊이(지표로부터)의 온도는 1 Cycle에서 24°C이지만 2 Cycle에서는 25.1°C로 3 Cycle에서 26.1°C, 4 Cycle에서 26.1°C, 5 Cycle에서 26.1°C를 나타냈고, 30일 때 4.5m에서의 온도는 1 Cycle에서 11.8°C이고 2, 3, 4, 5 Cycle에서 16.2°C를 나타냈다. 이 것은 처음의 임의 온도가 2 Cycle에서부터 수렴된 것을 보여주는 것이다.

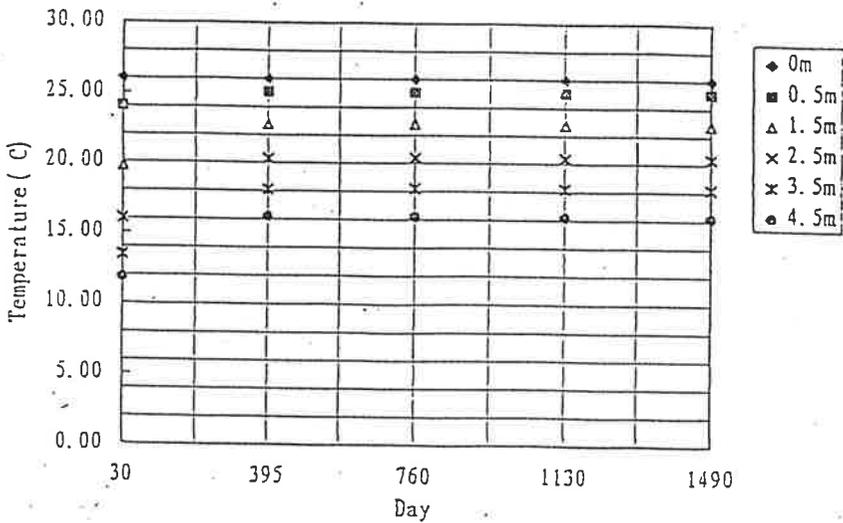


Fig III-9. 지하암반의 깊이별 수렴온도

Fig III-10 은 반복계산에 의해 수렴된 365일(1 Cycle) 동안 시간 변화(日)에 따른 각 깊이별(0m, 0.5m, 1.5m, 2.5m, 3.5m, 4.5m) 지중암

반온도분포이다. 지표면(0m)에서는 큰 진폭으로 온도가 변화되는 반면에 깊이가 4.5m에서는 진폭의 변화가 적음을 볼 수 있다. 이것은 깊이가 깊어짐(0m→4.5m)에 따라 온도변화가 적음을 보여주는 것이다.

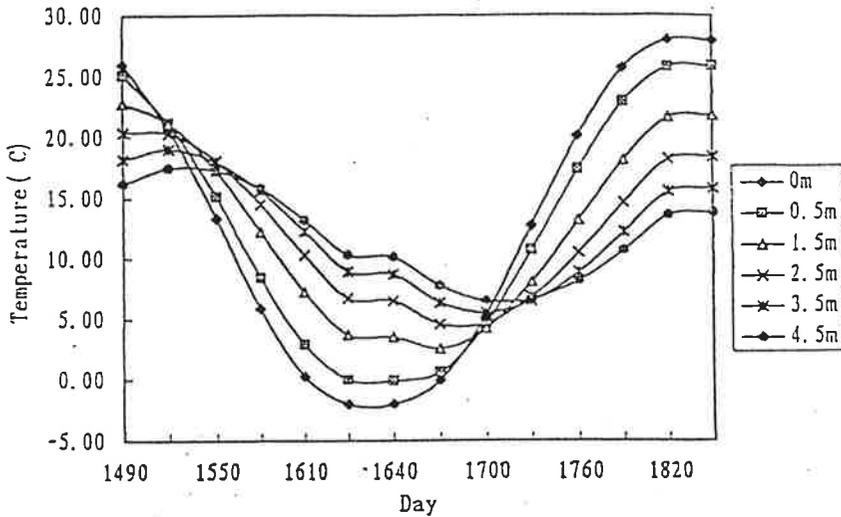


Fig III-10. 지중암반온도

조사된 대전지역 지중온도를 보게되면 지표면을 기준으로 1m 깊이에서의 온도는 8월에 24.2°C(최대값)이고 1월에 -0.7°C(최소값)로 24.9°C의 큰 온도변화를 갖는다. 반면에 깊이 5m에서는 12월에 16.2°C(최대값)이고 3월에 13.1°C(최소값)로 3.1°C의 작은 온도변화를 갖는다. 즉 깊이가 깊어짐에 따라 온도변화가 적어짐을 알 수 있다.

수치해석을 통한 지중암반온도를 보게되면 깊이 0.5m에서의 온도변화는 25.9℃(최대값)에서 -0.0866℃(최소값)로 25.9866℃의 큰 온도변화를 갖지만 깊이 4.5m에서는 17.5℃(최대값)에서 6.47℃(최소값)으로 11.03℃의 작은 온도변화를 갖는다. 이것 역시 깊이가 깊어짐에 따라 연중 온도변화가 적음을 보여주는 것이다.

결과적으로 지중온도분포는 지표를 기준으로 해서 깊이가 깊을수록 온도의 변화가 적음을 알 수 있다. 따라서 이러한 지중온도변화의 특성을 이용한 지중저장고가 지상 저장고에 비해 에너지 절약에 큰 도움이 될 수 있음을 확인할 수 있다.

### 3. 지하암반저장고내 공기의 열·유동 해석

#### 가. 지하저장고내의 3차원 모델화

본 수치해석의 모델화를 위해 한국자원연구소의 소규모 실험용지하저장고에서 측정된 자료를 참고하였다. 초기에는 지하 암반 벽면 및 저장고 실내 온도가 약 12 °C로 일정하나, 저장고내 냉동기를 가동하여 정상상태에 이르러 암반 내벽 온도가 약 2 °C로 유지되었다. 그러나, 출입구 문이 달려 있는 벽면과 다른 벽면 사이에 약 1 °C 정도의 온도차가 존재하고 있으며, 저장고내 미소한 온도 불균형이 저장고내 저장물에 영향을 미칠 수 있으므로 저장고내의 정확한 기류 분포 및 온도 분포를 구할 필요가 있다.

본 연구에서는 지하 저장고에 대한 기초 연구로서 지하 저장고 내의 모델화를 다음과 같이 행하고, 정상상태에서의 저장고 내 기류 분포

및 온도 분포를 예측한다. 해석영역은 지하 저장고반을 대상으로 하고, 저장고내에는 유니트 쿨러 외에 아무 것도 있지 않다고 가정하므로써, 저장물을 고려하지 않는다. 또한 저장고로부터 문을 통해 공기가 새어나가지 않는다고 가정한다. 따라서 유니트 쿨러의 송풍기로부터 취출된 냉풍은 지하 저장고내를 순환하면서 저장고 내의 열을 빼앗은 후 다시 유니트 쿨러로 들어오게 된다. 이와 같은 가정 하에서 보더라도 지하 저장고내 유동은 복잡한 3차원 유동으로 된다.

먼저 지하 저장고는 가로, 세로, 높이가 각각 12 m, 6 m, 4 m 인 직육면체로 가정하고, 냉동기로부터 얻어지는 냉풍을 저장고내로 불어내는 송풍기는 넓은 면적을 가지는 측벽 중앙 바닥면으로 2.8 m, 벽으로부터 1.2 m 떨어진 위치에 수평방향으로 냉풍을 불어 내도록 위치시킨다. 유니트 쿨러로부터의 공급되는 냉기 유량은  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  이고 냉풍 취출속도를  $4.3 \text{ m/s}$  로 하여, 유니트 쿨러의 치수를 구한다. 송풍기가 붙은 유니트 쿨러의 치수는 원통형이나 해석의 편의상 본 연구에서는 가로, 세로, 높이가 각각 0.52 m, 0.52 m, 0.2 m 인 직육면체로 가정한다.

송풍기로부터 취출되는 냉풍 온도는  $1^\circ\text{C}$ 로 하고, 출입문이 붙은 벽면만  $3^\circ\text{C}$ 로 하고, 그외의 벽면은  $2^\circ\text{C}$ 로 가정한다. 이상과 같이 모델화한 지하 저장고내의 기류 및 온도 분포를 수치 해석한 후, 송풍기 취출 속도를 약 50%로 낮춘  $2.0 \text{ m/s}$  인 경우도 수치 해석하여 송풍량에 따른 영향을 살펴본다.

#### 나. 수치해석 방법

계산에 사용된 지배방정식은 정상상태의 비압축성 유체의 연속 방

정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식, 난류에너지 방정식 및 난류에너지 소산율 방정식이다. 본 연구에서는 저장고내 열유동해석을 처음 수행하는 것이므로, 난류모델은 기존의 연구 및 일반 상용 CFD 코드에서 대부분 채택하고 있는 표준  $k-\epsilon$  모델을 공통적으로 사용하였다. 이들 방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

연속방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j] = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j u_i - \tau_{ij}] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

에너지 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j T - \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] = 0 \quad (3)$$

난류에너지 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j k - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = (G + G_B) - \rho \epsilon \quad (4)$$

난류에너지 소산율 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j k \varepsilon - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G + C_{\varepsilon 3} G_B) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

여기서,

$$\tau_{ij} = 2 \mu S_{ij} - \rho \overline{u_i' v_j'}, \quad (6)$$

$$-\rho \overline{u_i' v_j'} = 2 \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (7)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

$$G = 2 \mu_t S_{ij} S_{ij} \quad (10)$$

$$G_B = -g_i \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (11)$$

$$\rho = \frac{\rho_{ref}}{1 + \beta(T - T_{ref})} \quad (12)$$

$$C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, \text{Pr}_t = 0.9 \quad (13)$$

$$C_{\epsilon 3} = 1.44 (G_B > 0), 0 (G_B \leq 0) \quad (14)$$

이들 지배 방정식을 풀기 위해 본 연구에서는 최근 국내에서 개발된 MOSA3D 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 3차원 유동해석이 가능한 유한체적 프로그램으로, 일반좌표계를 사용하고 유한체적법에 기초하여 벡터와 스칼라 값을 같은 제어체적의 중심점에 위치시키는 집중(비엇물림) 격자계를 사용하고 있으며, 미소체적 중심에서의 직교좌표성분의 속도와 압력 및 스칼라 성분을 주요 종속변수로 채용하고 있다. 또한, 집중 격자계를 사용할 때 발생하는 압력의 decoupling 문제를 해결하기 위해서 속도장에 대해서는 운동량 보간방법을, 스칼라장에 대해서는 선형보간을 사용하는 Rhie and Chow의 방법을 채용하고 있다. 대류항 미분으로는 상용 프로그램에서 많이 채용하고 있는 상류차분도식(UDS) 외에, 연구에 많이 사용되는 HDS (Hybrid Differencing Scheme), PDS (Power-law Differencing Scheme) 및 고차 유한차분도식인 SOU(Second-Order Upwind Differencing Scheme) 및 QUICK도식을 모두 사용할 수 있게 하였으며, 운동량 방정식의 압력항 처리를 위하여 연속방정식의 속도와 연관시킨 SIMPLE 알고리즘을 사용하고 있다. 특히 본 프로그램은 이산화된 선형 대수방정식을 풀기 위하여 연속방정식으로부터 유도된 압력보정방정식의 해법은 이전의 CGM보다 수렴 속도가 빠른 것으로 최근 알려진 MCGS를 선택적으로 사용할 수 있으며, 속도장과 스칼라장에서는 SIP(Strongly Implicit Procedure)을 사용하고 있다. 또한, 난류모델로는 표준  $k-\epsilon$  난류모델 외에 RNG  $k-\epsilon$  모델 및 국내외 연구논문에서 사용하고 있는 여러 가지 수정  $k-\epsilon$  모델 등이 내장되어 있다. 이와 함께 부력에 의한 난류 열유동장을 해석할 수 있도록, 일반 상용 열유동 해석 코드에서 많이 채택하고

있는 Boussinesq 근사 및 밀도 구배형태를 선택적으로 사용할 수 있다.

계산에 사용된 격자는 Fig III-8 에 나타난 바와 같이  $33 \times 22 \times 48$  격자시스템으로, 유니트 쿨러 근방에 격자를 집중시키는 비균일 격자계를 채택하였다. 또한 유니트 쿨러는 고체 셀로 보고  $2 \times 6 \times 6$ 의 격자를 사용하여 한쪽으로 냉풍이 나오고, 반대 쪽으로 열을 흡수한 공기가 들어가는 것으로 하였다. 그리고 대류항에 대한 유한차분도식으로는 상류차분도식을 사용하였으며, 자연대류의 영향을 고려하여 혼합 대류 형태인 위의 지배 방정식들을 풀었다.

경계조건으로는 천장, 바닥 및 저장고내 벽면과 송풍기를 내재한 유니트 쿨러 표면에 대해서는 점착 조건을 부여하고, 벽면에 인접한 제어 체적에 대하여는 벽법칙을 이용하여 속도 및 난류에 관계된 값들을 계산하였다. 유니트 쿨러로 들어가는 출구 경계에서는 유동이 국부적으로 포물선형 형태를 가진다고 가정하고 출구 경계면의 계수를 0으로 수정하였으며, 입구속도는 균일속도  $4.2 \text{ m/s}$  와  $2.0 \text{ m/s}$  의 두 경우로 하고, 난류 강도  $I=0.05$  로 하였다. 입구에서의 난류 에너지 및 난류 에너지 소산율은 국부 평형조건으로부터 구하였다. 계산은 IRIS Workstation R10000을 사용하였으며, 수렴 판정조건은 전체 내부 격자에서의 질량 잉여량 및 운동량 잉여량이 입구에서의 질량 유입량, 운동량 유입량의 0.1% 이하가 되면 수렴된 것으로 하였다.

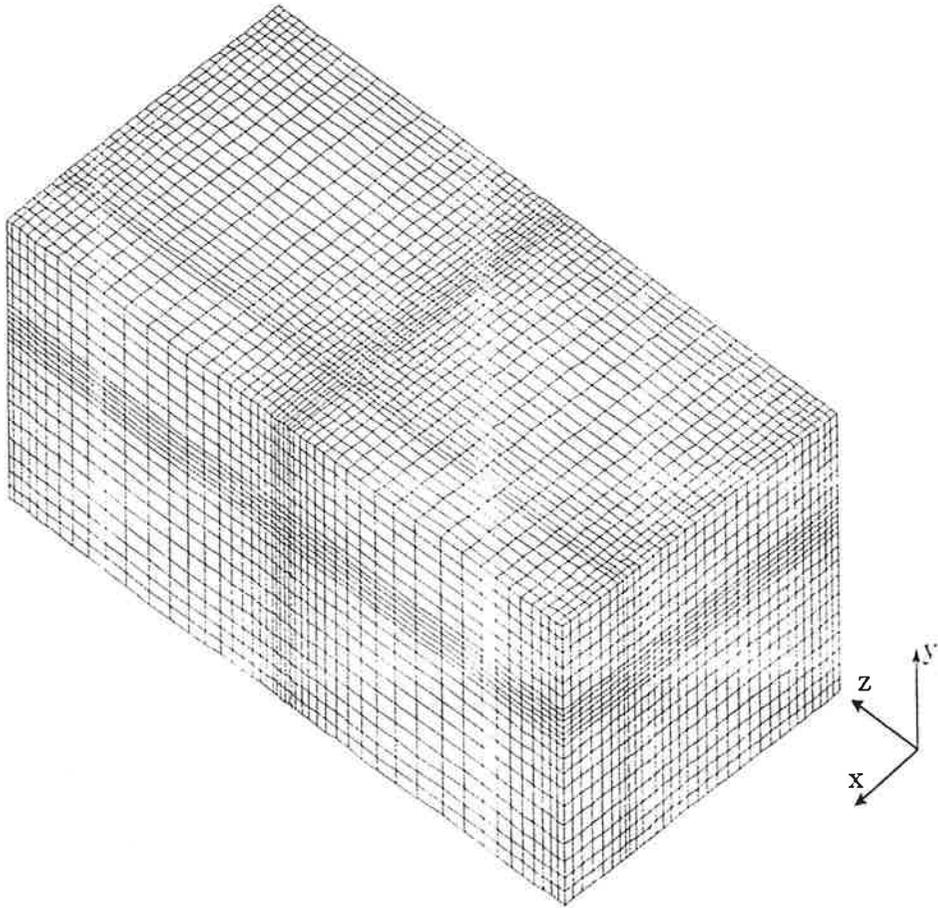
#### 다. 결과 및 고찰

두 가지 다른 냉풍 공급속도의 경우에 대해 다시 제2절에서 고려한 혼합대류로 수치 해석한 결과와 부력의 효과를 고려하지 않고 강제 대

류로 가정하여 계산한 결과를 비교하기로 한다.

먼저 송풍기로부터 공급되는 냉풍 공급속도가  $4.3 \text{ m/s}$  인 경우의 수치해석 결과를 Fig III-12 와 Fig III-13 에 나타냈다. Fig III-12 는 예측된 속도 분포를 나타내고, Fig III-13 은 온도 분포를 나타낸다.

본 계산에서는 부력을 고려하여 자연대류와 강제대류가 병합한 혼합 대류로 가정한 경우와 부력의 효과를 고려하지 않고 강제 대류로만 해석한 경우를 모두 포함하였다. 그러나 수치해석을 수행한 결과, 본 지하 저장고내 열유동은 전체적으로 온도차가  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  이하로 매우 작기 때문에 부력의 영향을 거의 나타내지 않는 것이 확인되었다. 속도분포 결과를 보면 송풍기에 의해 유니트 쿨러로부터 분출된 냉풍 제트는 저장고 공간을 통해 퍼지며 반대편 벽면에서 충돌 제트로 된 후, 사방으로 퍼져 나가는 것을 알 수 있다. 또한 벽면에 충돌된 제트는 상방과 출입문이 있는 벽면쪽으로 상당량이 퍼져 나가고, 공간을 순환한 후, 유니트 쿨러로 유입되는 것을 알 수 있다. 이와 함께 저장고 공간내에서 냉풍 제트가 반대편 벽면에 부딪치는 동안에 제트가 거치는 영역과 제트가 충돌되는 벽면 근방에서는 상당한 속도 크기를 가지고 있으나, 그 외의 영역에서는 속도가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 속도가 크게되는 영역을 가능한 한 줄여 전 영역에 걸쳐 비교적 균일한 속도가 되도록 설계를 할 필요가 있다고 사료된다. 혼합 대류로 가정하여 해석한 온도 분포 결과에서도 앞의 속도 분포 결과에서 기술하였 듯이 전체적으로 온도차가  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  이하로 매우 작기 때문에 부력의 영향이 상당히 작은 것을 알 수 있었다. 온도분포 결과를 보면 송풍기에 의해 유니트 쿨러로부터 분출된 냉풍 제트는 저장고 공간을 통해 퍼지며 반대편 벽면에서 충돌 제트로 될 때까지 저장 공간으로부터 열을 흡수하여 온도가 상승되고, 벽면에 충돌된 후에 사방으로 퍼져 나



33(x) X 22(y) X 48(z) lid : 2(x) X 6(y) X 6(z)

Fig III-11. 격자 시스템

가면서 저장고 공간 주위로부터 열을 흡수하여 온도가 점차 상승되는 것을 알 수 있다. 또한 출입문이 있는 벽면이 그 외의 벽면에 비해 온도가 높기 때문에 이 벽면 부근과 송풍기가 위치해 있는 벽면쪽에서 상대적으로 높은 온도분포를 나타내고 있다. 따라서, 이러한 공간 내 온도분포의 불균일성을 가능한 한 해결하기 위해 유니트 쿨러의 설치 위치 및 출입문이 있는 벽면 근방에 또 다른 벽을 설치하는 등의 설계상의 대책이 필요하다고 사료된다.

송풍기로부터 공급되는 냉풍 공급속도를  $2.0 \text{ m/s}$  로 변경한 경우의 수치해석 결과를 Fig III-14 와 Fig III-15 에 나타내었고, 각각 예측된 속도 분포와 온도 분포를 나타낸다. 결과를 보면 전체적으로 냉풍 공급속도가  $4.3 \text{ m/s}$  로 한 경우와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나, 냉풍의 공급유량이 50% 정도 줄어들었기 때문에 자연대류의 영향이 다소 크게 나타나며, 또한 공간내 온도분포의 불균일성이 더 커지는 것을 알 수 있었다.

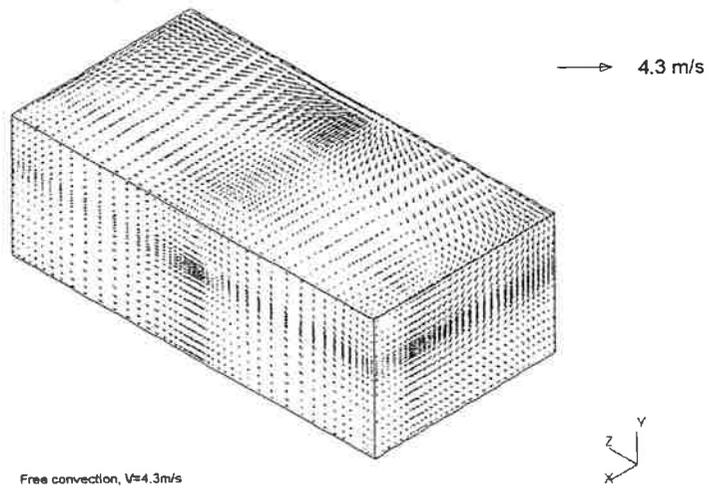
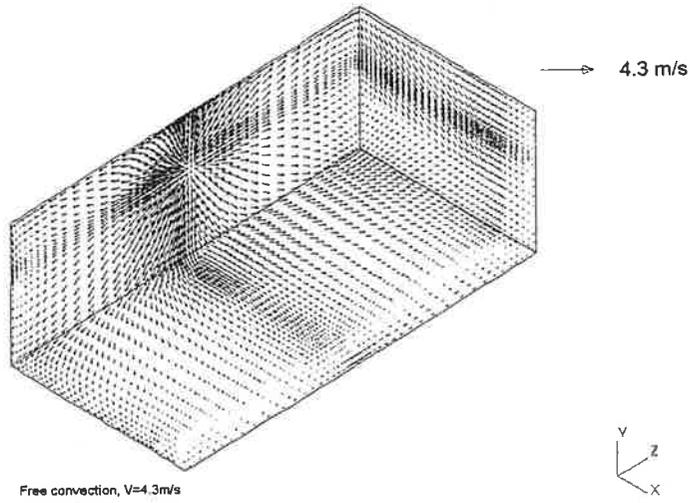


Fig III-12. 지하저장고내 공기유속 분포도(냉풍공급 속도=4.3m/s)

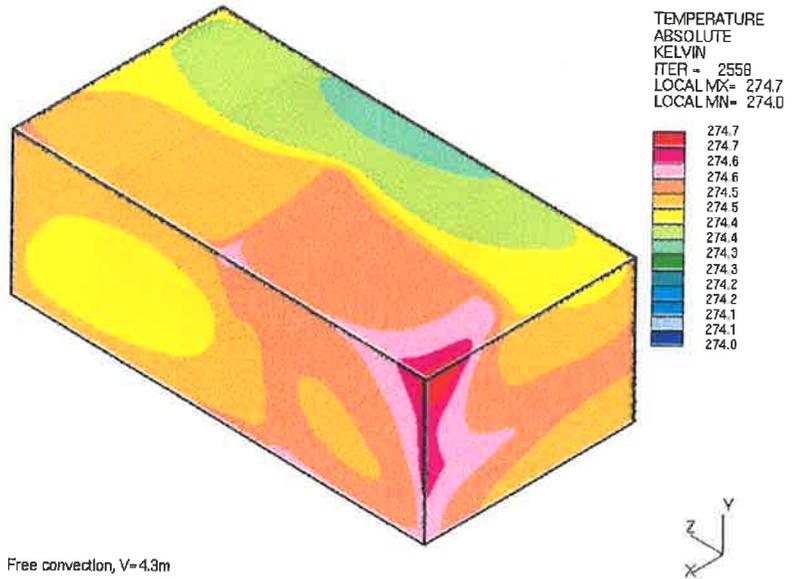
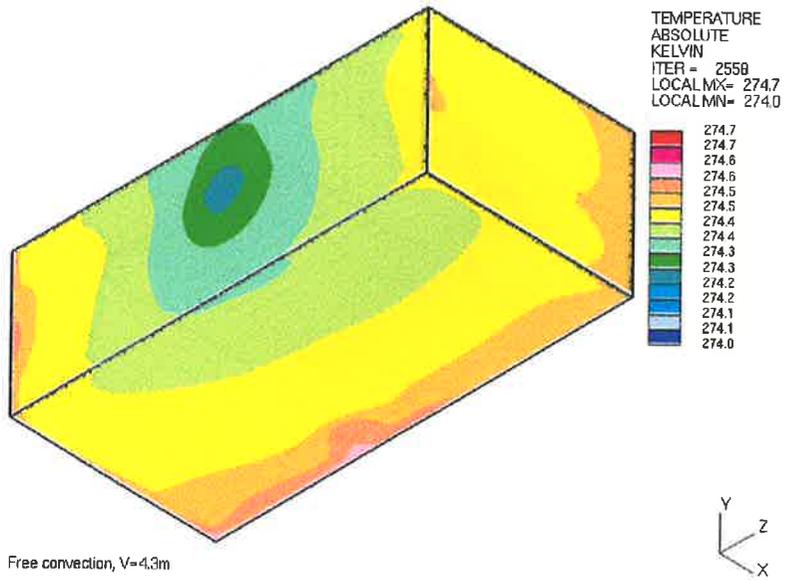


Fig III-13. 지하저장고내 공기온도 분포도(냉풍공급 속도=4.3)m/s

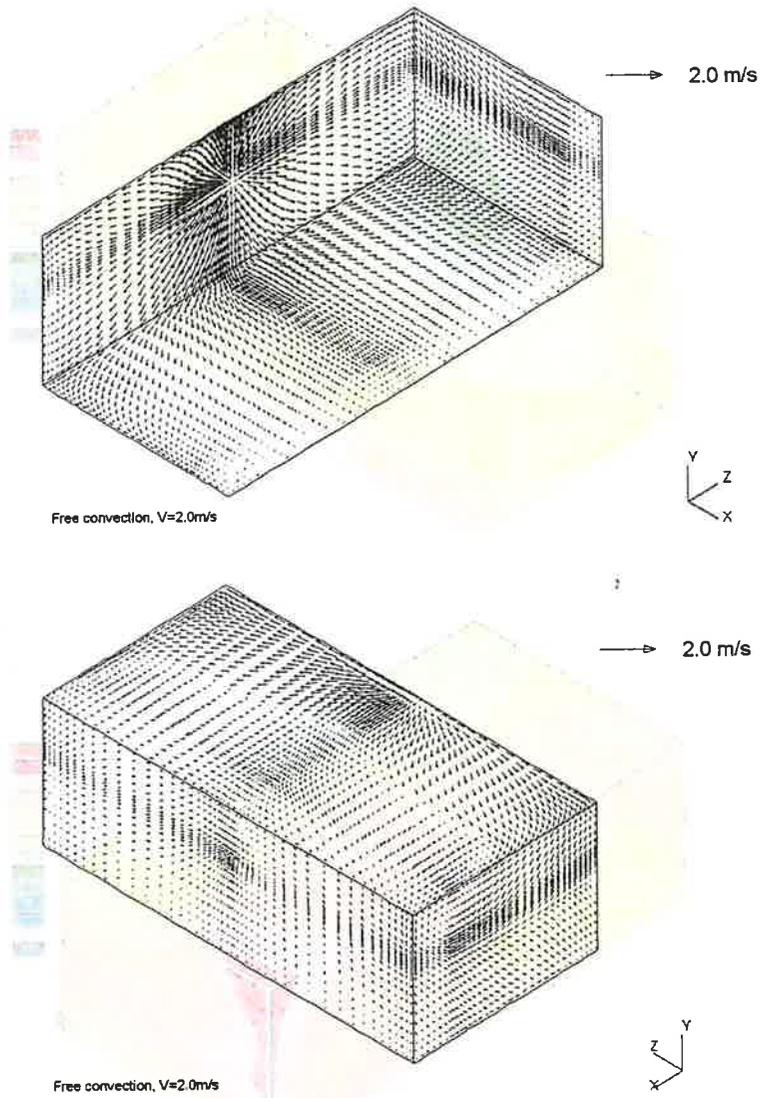


Fig III-14. 지하저장고내 공기유속 분포도(냉풍공급 속도=2.0m/s)

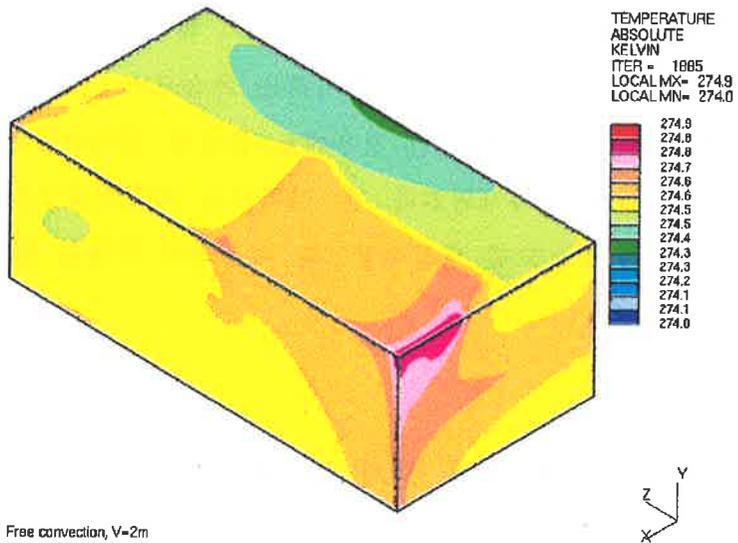
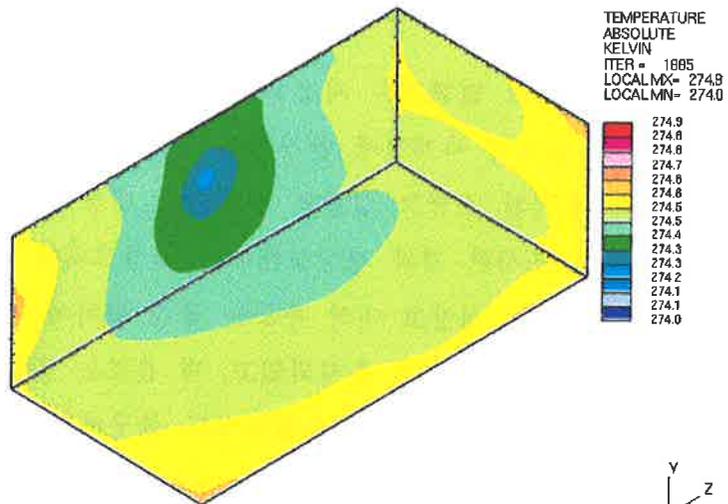


Fig III-15. 지하저장고내 공기온도 분포도(냉풍공급 속도=2.0m/s)

### 제 3 절 냉장저장고의 열환경 측정실험

지하암반저장고의 열환경은 저장고가 지하 5 m 이상의 깊이인 경우에는 온도와 습도가 사계절에 안정적인 추이를 나타내고 있다. 한국자원연구소에 설치된 소규모 실험용 지하암반 냉장고의 실내 및 암반 벽 온도를 측정 조사한 결과 정상상태에서 저장고내에 공급되는 냉풍 온도가 1 °C인 경우, 저장고 내의 온도는 공간 위치에 따라 약간 차이가 나지만 2~3 °C 범위에서 유지되었고, 벽 온도는 출입문이 있는 벽은 단열재를 출입문과 벽에 보강하였음에도 불구하고 나머지 암반 벽에 비해 약 1 °C 이내에서 높은 온도를 나타내었다. 나머지 벽 온도는 2 °C 정도로 측정되었다. 저장고내 공기온도와 벽 온도와의 차이는 매우 미미하였으며, 전체적으로 저장고 공기 및 벽 온도는 일정한 수준을 나타내고 습도는 90%를 항상 유지하는 온습도의 안정성을 견지하였다. 실험용 지하 동결저장고 인 경우에도 온도에 있어서는 안정적 분포를 유지하는 것으로 파악되었다. 본 절에서는 지하저장고의 안정된 열환경과 지상의 축소모델 냉장저장고를 이용하여 측정한 열환경을 비교하고자 한다.

#### 1. 축소모델의 설계 및 제작

저장고의 축소모델은 바닥면, 천정, 측면벽을 10mm 두께의 아크릴판과 27.5mm 두께의 스폰지로 제작하였고, 축소모델의 크기는 1500 \* 750 \* 500 mm로 제작하였다. 냉풍을 공급하기 위해 직경은 111mm, 날개 길이는 25mm 인 송풍기 2대를 좌우 나란히 Fig III-16 에서 보

는 바와 같이 모델의 측벽 중앙상부(송풍기 I의 중심이 바닥으로부터 338 mm, 송풍기 II의 중심이 바닥으로부터 345 mm 지점)에서, 공기가 흡입될 수 있도록 측벽에서 38 mm 거리를 유지하도록 이 송풍기와 증발기로 구성된 열교환기를 설치하였으며, 실험시 축소모델내부의 습도를 90%이상으로 유지하기 위한 작업으로서 축소모델의 전 내벽에 물을 흡수할 수 있는 천을 접착시켰다. 모델공간의 습도측정을 위해 천정 아래 부근에 습도계를 설치하였다.

모델 내부의 온도를 측정하기 위하여 40개의 열전대(T-type)를 설치하였고, 공기유동을 간섭하는 것을 최소화 하기 위해 열전대 wire의 길이를 최단거리로 하여 모델 밖의 자료획득장치와 연결되도록 하였다. 열전대는 Channel Box에 연결되고 Channel Box는 D.A.S.(자료획득장치)에 연결되어 PC에 있는 자료획득 및 처리 소프트웨어인 Hydra Program에 의해서 자료를 해석하게 된다.

모델 바깥에 설치된 냉동기의 냉매는 모델내에 설치된 증발기에 보내져 송풍기에 의해서 차가운 공기가 모델내에 공급되도록 하였다. 전압조절기가 송풍기와 연결되어 있어 공기유량을 조절할 수 있도록 하였고, 냉동기의 압축기는 on-off 방식으로 조절이 되는 온도조절기와 연결시켜 모델내의 온도를 설정온도 근처에 유지할 수 있도록 하였다. 그리고 모델 내부로 외기의 침입양을 최소화하기 위해 모델 모서리 부분과 기기의 설치로 인한 틈새를 실리콘으로 밀폐시켰다. Fig III-16 은 온도측정 시스템, 그리고 Fig III-18 은 모델 저장고내의 온도 측정 지점인 열전대의 위치를 각각 나타내고 있다.

## 2. 실험순서

실험을 시작하기 전에 송풍기, 냉동기, 온도조절기, 습도측정기, 전압조절기 등의 실험장치들이 제대로 작동되는 지를 확인한 후 모델 내부의 열전대와 자료획득장치(D.A.S.)의 연결상태를 확인한 후 다음 절차에 따라 실험을 시작한다.

- ①. 모델 내부의 습도가 90%이상 이 되도록 하기 위해 모델을 밀폐시키고, 외기온도와 모델 내부의 온도 및 습도를 확인한다.
- ② 실험하고자 하는 송풍기와 연결된 냉동기의 밸브를 연다.
- ③ PC Window상에서 Hydra program을 띄운다.
- ④ Program에서 각각의 Options(선택사항)을 설정한다. 본 실험에서는 온도측정 간격을 30분으로 하였다.
- ⑤ 냉동기와 온도조절기가 연결된 코드를 전원에 연결시키고, 송풍기(I, II)와 전압조절기(I, II)가 연결된 코드를 전원에 연결시킨다.
- ⑥ 송풍기의 풍속을 미리 계산된 속도( $U = 0.72\text{m/s}$ )로 설정한 후, 냉동기의 설정온도를  $1^\circ\text{C}$ 로 설정한 다음 실험을 시작한다.
- ⑦ 축소모델내부의 온도가 steady state가 될 때까지 모델내의 공기온도와 습도를 측정·수집한다.

본 실험에서는 전압조절기를 이용하여 송풍기의 풍속을  $U = 0.72\text{m/s}$ 로 유지시켰다. 송풍기 I만 가동 시켰을 경우, 송풍기 II만 가동 시켰을 경우, 송풍기 I, II를 모두 가동 시켰을 경우에 대해 실험을 하였다.

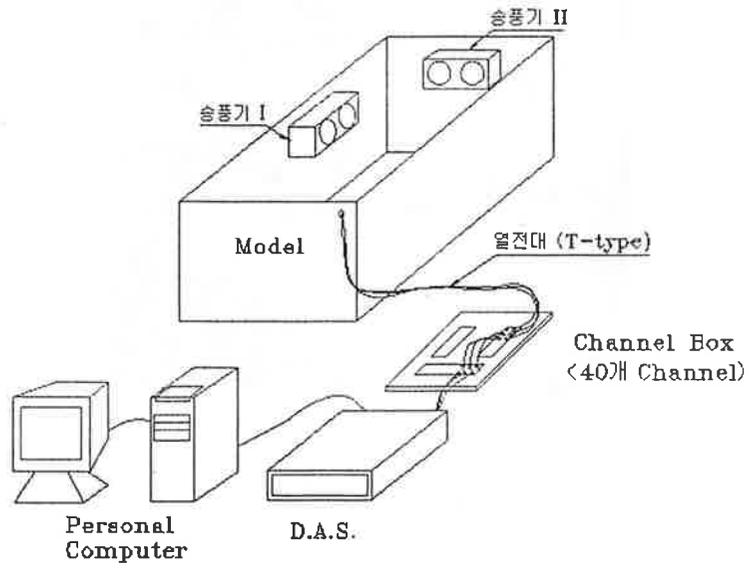


Fig III-16 온도측정 시스템

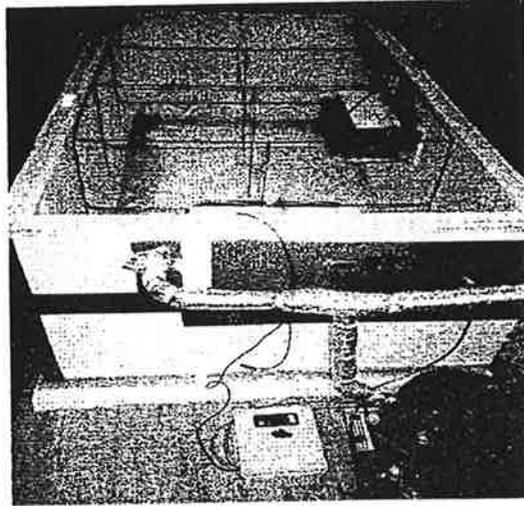


Fig III-17 A. 설치 중인 축소모델



Fig III-17 B. 축소모델실험 장면

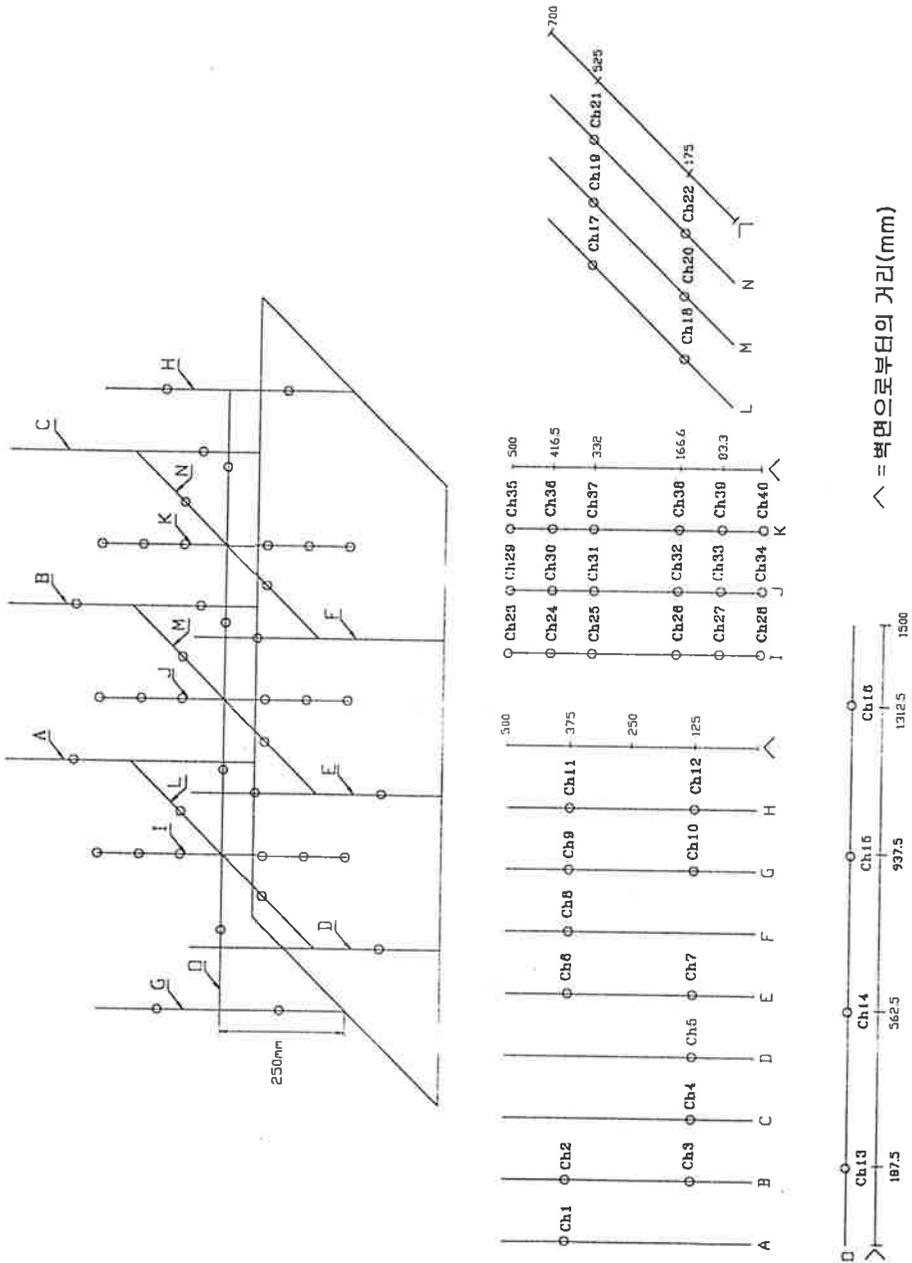


Fig III-18. 모델내 온도측정지점

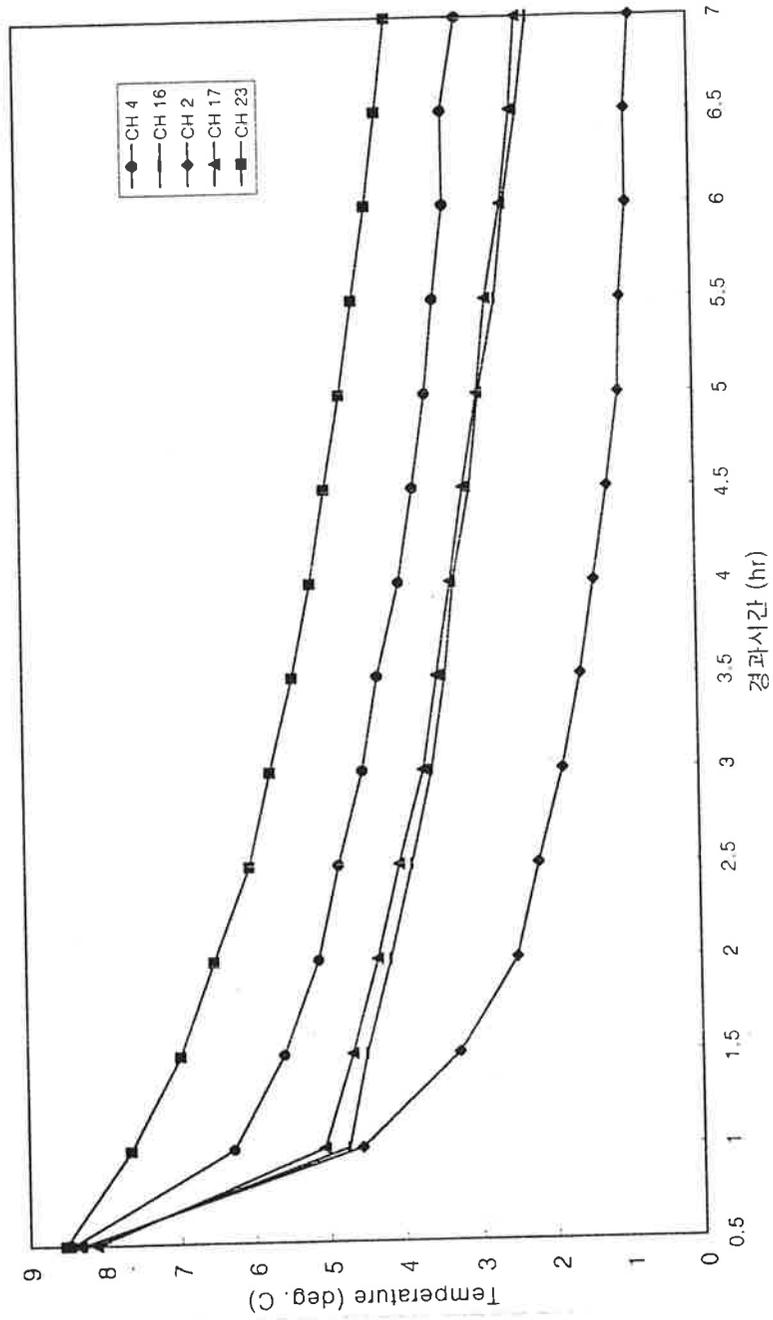


Fig III-19. 정상상태까지의 시간에 따른 모델내의 공기온도변화

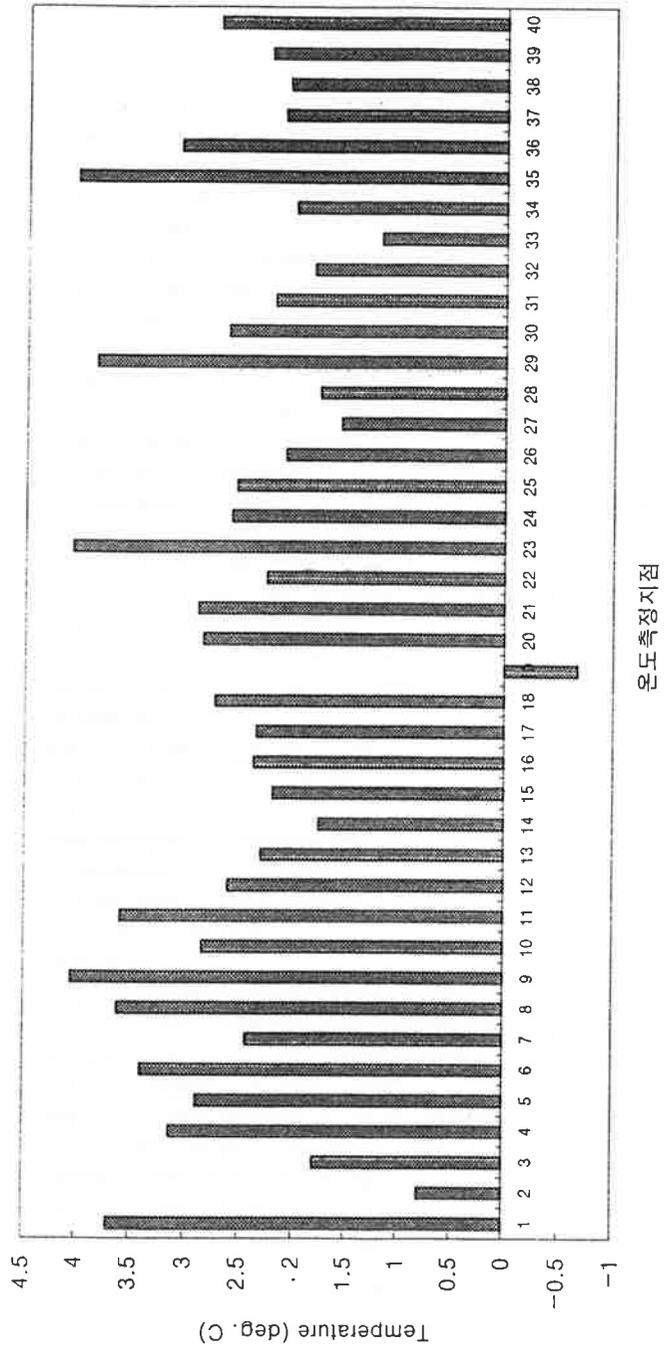


Fig III-20 A. 송풍기 I 가동시 모델내 정상상태 공기온도분포

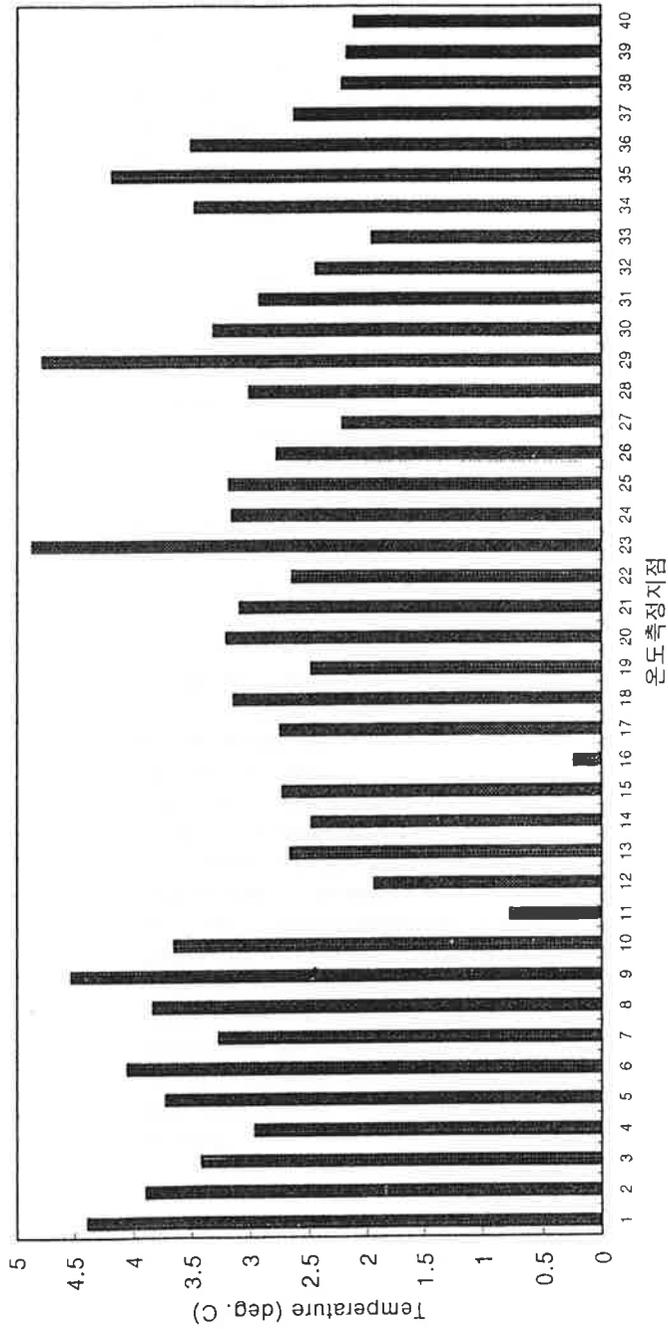


Fig III-20 B. 송풍기 II 가동시 모델내 정상상태 공기온도분포

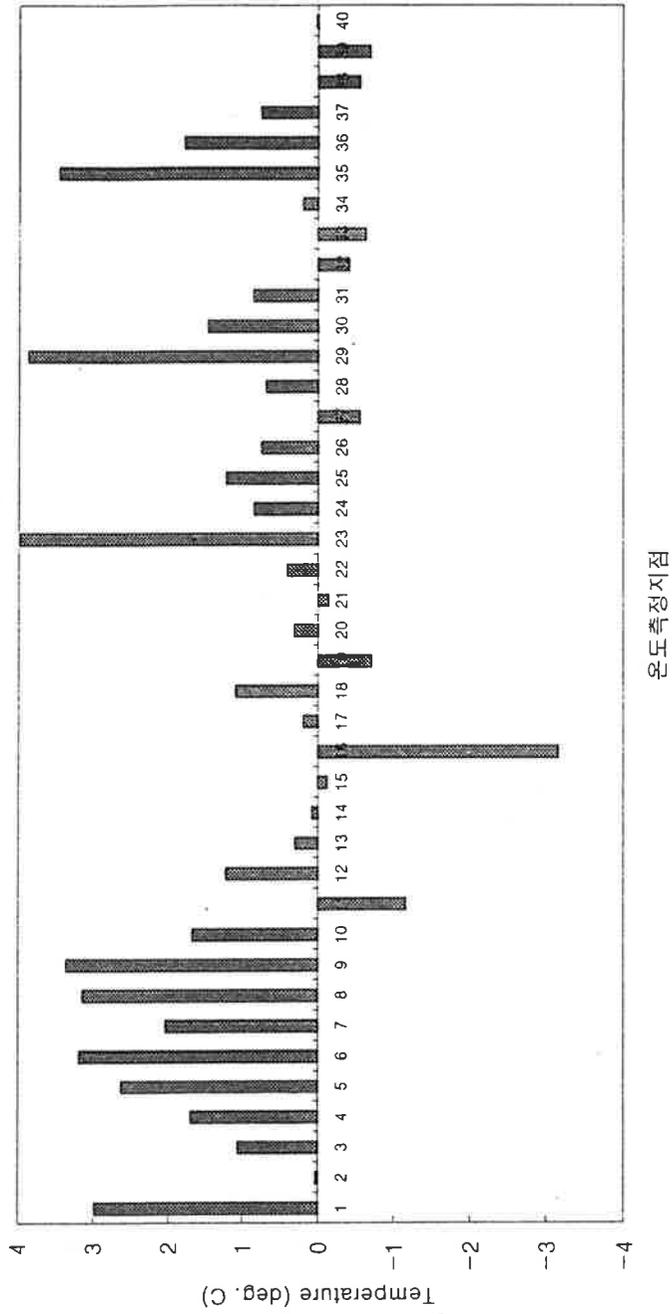


Fig III-20 C. 송풍기 I, II 동시 가동시 모델내 정상상태 공기온도분포

### 3. 실험결과 및 고찰

정상상태까지는 송풍기 I을 가동시킨 경우, 송풍기 II를 가동시킨 경우, 송풍기 I, II를 가동시킨 경우 각각 7시간, 5시간 30분, 3시간 정도의 시간이 소요되었고 Fig III-19 는 송풍기 I을 가동시킨 경우에서 정상상태까지의 선택된 온도측정지점들의 온도추이를 대표적으로 보여주고 있다. 습도는 초기상태에서 각각 99.9 %, 99.9 %, 99 % 였으며 정상상태에 이르러서는 92.2 %, 91.8 %, 84.5 %로 각각 측정되었다.

외기온도 10 °C에서 송풍기 I을 가동시킨 경우, Fig III-20A 에서 I, J, K 축상의 바닥에서 천장까지의 온도 추이를 보면, I 축지점에서는 바닥의 1.8 °C 에서 바닥 바로 위 부근 온도가 1.6 °C 까지 내려가다가 점차 높이 올라 갈수록 온도가 올라가 천장에서 4 °C 온도를 나타내었다. J와 K 축 지점에서든 마찬가지로의 온도 추이를 나타내고 있으며, 바닥 근처에서 최저 온도를 기록하고 있는 것은 바로 이 지역 또는 부근에서 가장 찬 기류가 형성이 되고 있는 것으로 파악된다. 세 축 지점 중에서도 J 축 지점의 바닥부근이 최저온을 나타내고 있는 것은 송풍기에서 나오는 냉풍이 J 축을 향하고 있고 기류가 아래부분으로 유동하는 것으로 해석된다. 벽 온도를 나타내는 E, G, H 축에서의 벽 상부와 하부의 온도를 보면, 상부 측정지점의 온도가 각각 1 °C, 1.2 °C, 1 °C 정도 높게 측정되었다. 이는 냉풍이 도달거리에 이른 후 바닥부근으로 하향하고 운동량이 약해지면서 상반부와 하반부의 공기 밀도차이에 의한 자연대류 효과가 혼합되어 벽 부근의 바닥 쪽에서 천장부근으로 상향 유동함을 나타내는 기류가 형성되는 것으로 해석된다. 또한 바닥으로 하향된 공기의 일부는 열교환기의 흡입부분으로 돌아가는 기류를 형성하고 천장부근으로부터 하향된 기류와 함께 흡입구로 들어

가게 된다. 송풍기를 기준으로 할 때, E 축을 포함하는 맞은 편 벽의 측정온도가 G와 H 축을 포함하는 측벽에서의 측정온도보다 낮게 나타난 것은 송풍기의 설치지점과 냉풍의 공급방향에 기인하는 것으로 생각된다. I, J, K 축 지점의 천장온도에서도 J 축에서 측벽에 가까운 I 및 J 축 보다 더 낮게 나타난 것은 이와 같은 이유로 설명될 수 있다. 송풍기 바로 밑에 위치한 ch 19 지점에서 모든 측정지점 중 최저온도를 나타낸 것은 이 부근에서 타 측정지점에 비해 냉기류에 의해 가장 크고 직접적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 냉기류는 실험 중 증발기 출입관에 생긴 서리의 영향을 받은 것으로 사료된다. 공급냉풍의 직접적인 영향권에서 멀어질수록, 즉 좌우 측벽부근으로 갈수록 자연대류효과가 더 강하게 나타나고, 냉풍의 직접적인 영향권인 중앙부근으로 갈수록 강제대류효과가 더 강하게 작용함을 추측할 수 있다. 대표적인 기류형성과정을 요약해 보면, 송풍기에서 공급된 냉풍은 도달거리에 이르러 바닥으로 하향하여 송풍기 뒤에 설치된 증발기 흡입부에 들어가는 기류가 형성되고, 또한 하향된 바닥근처의 공기는 송풍기가 마주보는 벽쪽으로 기류를 형성하는 현상을 그릴 수 있다. 본 모델실험에서는 Grashof 수가 매우 낮아 층류 자연대류현상으로 나타난 것으로 파악되었다. 따라서 본 모델내의 기류형성은 냉풍에 의한 강제대류에 의해 주로 영향을 받게 되고 송풍기의 설치지점과 냉풍공급 방향 및 온도는 이러한 기류형성과정에 있어서 중요한 변수임을 알 수 있다.

외기온도 9 °C에서 송풍기 II를 가동시킨 경우, Fig III-20B 에서 축 I, J, K 상에서 바닥에서 천장까지의 온도분포는 송풍기 I만을 가동시킨 경우와 유사하였고, 천장지점의 온도는 송풍기 쪽으로 가까이 올수록 온도가 강하하는 경향을 나타내었으며 이는 증발기 흡입부에 근

접할수록 기류의 유속이 증가하는 것에 기인한다고 사료된다. 그리고 I 와 J 축상의 바닥온도가 상대적으로 송풍기 I을 가동시킨 경우에 비해 높게 나타났는데 이는 이 영역에서 냉기류의 직접적인 영향이 미약한 것으로 파악된다. 그러나 바닥 바로 위 부분에서는 냉기류의 영향을 크게 받아 온도가 떨어지면서 점차 높이가 증가할수록 온도가 증가하는 성향을 나타내었다. K 축상에서 바닥온도가 최저온도로 측정되었는데 이는 이 지역에서 공기의 유속이 상부보다 큰 기류에 의한 것으로 이 기류는 바닥과 동쪽벽(송풍기 II가 설치된 벽)을 타고 상향하는 것으로 해석된다. 측벽온도는 상부지역이 하부지역보다 높게 나타나 자연대류에 의한 기류형성을 추측할 수 있고 송풍기가 설치된 측벽의 H측 지점에서는 증발기 흡입부에서 송풍기에 의한 강제대류에 의해 공기 유속이 증대하면서 이 흡입부에 근접한 상부지점의 온도가 낮게 나타난 것으로 설명할 수 있다. H와 G 축을 포함하는 중앙면을 기준으로 송풍기의 냉풍공급 방향에서 좌우 부분의 온도분포를 ch 17 ~ ch 22 지점의 온도로서 살펴보면, 온도분포는 이 중앙면을 기준으로 대칭성을 나타내고 있지 않음으로써 냉풍이 도달거리에 이른 후 기류가 대칭적으로 형성되지 않는 특성을 지니게 됨을 예측할 수 있다. 모델의 중간 높이에서 중앙선 상에서 측정한 ch 13 ~ ch 16에서 송풍기 바로 앞 아래부분인 ch 16 지점의 온도가 상대적으로 매우 낮은 온도를 유지한 것은 공급냉풍과 근처의 증발기 출입관에 발생한 서리의 영향에 기인한 것으로 사료되며, 나머지 지점은 모두 비슷한 온도치를 나타냄으로써 냉풍의 도달거리는 ch 15 지점(동쪽 벽으로부터 563 mm)까지 이르지 못함을 파악할 수 있다.

외기온도가 7 °C에서 송풍기 I, II를 동시에 가동시킨 경우에는 냉동기를 돌린 후 3시간 후에 정상상태에 이르렀으며, Table III-5 에

서 보여주듯이 송풍기 I 또는 II 가동 경우에 비해 전체적으로 저온분포를 나타내고 있음을 나타내 주는 것이다. 송풍기가 설치된 동벽과 북벽을 제외하고는 벽의 상부지점이 하부지점보다, 천장지점이 상대적으로 높은 온도를 나타낸 것은 이 모델실험에서도 자연대류에 의한 기류가 형성되었음을 알 수 있다. I 측상의 온도분포를 보면 바닥에서 영하 0.56 °C, 천장에서 3.98 °C를 나타내고 중간의 실내 공간온도는 1 °C 내외의 비슷한 온도로 유지됨을 나타내고 있다. 그러나 J 와 K 측상에서는 이러한 양상과는 달리 자연대류 효과에 의해 높이에 따라 온도가 증가하는 추이를 읽을 수 있다. 그리고 최저온도가 송풍기 II 바로 전방 아래지역인 ch 16 지점에서 최저온도를 기록하고 있는데 이것은 상기에서 언급한 것과 마찬가지로 이 지점과 근접한 증발기 출입관에 발생한 서리와 냉풍의 기류에 의한 영향으로 이 저점의 온도가 매우 낮게 나타난 것으로 파악된다.

저장고에 저장물의 저장 위치 및 형태를 결정하는 데는 저장전 저장고내의 온습도 분포를 파악하여 최대한 저장고의 효율성을 확보하는 것이 바람직하다. 지상 실험실에 설치된 축소모델 실험에서 알 수 있듯이 저장고 내의 온도분포가 지하암반저장고에 비교할 때 상대적으로 매우 고르지 못함을 알 수 있다. 따라서 이러한 균일치 못한 온도분포에서는 저장고내의 온습도 분포를 고려치 않고 저장할 경우 장소에 따라 저장물 신선도 유지기간에 상당한 차이가 날 수 있음을 예측할 수 있다. 그러므로 지상 저장고에 냉동용 식품을 저장할 때는 저장전 저장고내의 온습도분포도를 파악하고 저장물의 저장조건을 고려하여 저장 후 정기적으로 온습도와 저장물의 신선도를 기록하면서 효율적인 저장고 운영 및 관리를 해주는 것이 중요하다. 본 축소모델에서 세 가지 실험 결과를 비교할 때에 Table III-5 에서 나타났듯이 송풍기 I, II를 동

시 가동하는 것이 송풍기 I 또는 II를 가동하는 것 보다 실내의 온도분포가 상대적으로 저온으로 균일하게 나타남으로써 두 경우에 비해 상당히 유리함을 알 수 있다. 송풍기 I 가동시 경우와 송풍기 II 가동시의 실험 결과는 동일한 송풍기 및 증발기 set 의 열교환기를 사용하여 동일 조건으로 운전한 경우, 송풍기를 북쪽벽(최대 벽면적)에 설치한 경우가 송풍기를 동쪽 벽(최소 벽면적)에 비해 실내온도분포를 볼때에 저온저장고로서 다소 유리함을 알 수 있다. 그리고 송풍기와 증발기로 구성된 열교환기의 출입구와 근접한 지역에서 저온분포를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 따라서 동일한 송풍기의 동일 운전조건에서도 송풍기의 위치, 냉풍 공급방향 및 온도에 따라 저장고내의 온도분포가 달라지게 됨을 알 수 있었다.

Table III-5. 모델 내 정상상태에서의 평균온도분포

실험 평균온도	송풍기 I 가동시	송풍기 II 가동시	송풍기 I, II 가동시
바닥	2.16 °C	2.87 °C	0.29 °C
천정	3.97 °C	4.61 °C	3.77 °C
동벽(송풍기 II 설치)	3.10 °C	1.36 °C	0.03 °C
서벽	3.45 °C	4.09 °C	2.52 °C
남벽	3.08 °C	3.72 °C	2.75 °C
북벽(송풍기 I 설치)	2.36 °C	3.66 °C	1.44 °C
전체벽	3.00 °C	3.21 °C	1.69 °C
실내	2.17 °C	2.70 °C	0.40 °C

## 제 4 장 농산물의 지하저장조건 확립

### 제 1 절 서 론

인간이 원시생활을 시작하며 자연에서 먹이를 구하면서 저장의 개념이 도입되었을것으로 추정된다. 기후의 차이에 따라 식품재료는 물론 제조가공법도 다양하게 발달하였고 이에 저장법도 상당히 차이를 갖게 되었다. 그 한 방법으로 자연적 동굴이나 인공적 구덩이들이 식품 저장고로 사용되어 왔으며 경제성장과 문화수준의 향상등으로 다양한 식품의 공급뿐만 아니라 저장의 조건 확립에 큰 비중을 차지하면서 저온에 의한 식품저장이 발전하게 되었다. 즉, 저온저장은 초기 움저장, 냉장, 냉동법으로 식품의 온도를 낮게하여 부패 매생물의 생육이나 효소작용을 억제시켜 계절이나 품목별 출하 시기조절로 농산물의 가격안정과 품질의 최대 유통기간등을 효율적으로 조절하는 방법이다.

현대적 저온에 의한 저장은 1875년 Lide의 암모니아 냉매 압축식 냉동기가 발명되어 과일, 채소, 육류 등의 냉장에 큰 기여를 하였으며 1916년 Plak의 급속동결 방법 연구와 1929년 Clarence Birdseye가 급속동결장치를 고안하여 큰 발전을 거두게 되었다.

저온저장과 유통 시스템의 도입과 필요성이 대두되면서 저장 품목의 확대와 사용증가에 따라 저온저장 시설이 절대 부족이 예상되고 있다. 또한 시설투자와 에너지 사용의 한계가 있어 지하 공간의 개발 및 활용이 절실히 요구되고 있다.

참고로 냉동, 냉장 창고의 연간운영비용은 건설비에 대한 감가상각

비 20~25%, 토지운용비15~20%, 전기료7~15%을 차지하는 것으로 분석되는데, 투자비와 운용비가 과도해지면 저장식품의 가격상승, 수급 불안정의 가능성이 있고, 이에 따른 농수산물의 생산기반이 저해될 수 있다. 따라서 저온창고의 수요 증가에 대응하고 지상건물의 건설, 운영 유지 등을 효율적으로 이용할수 있는 방법을 모색해야 된다. 이러한 문제점의 해결방안중 하나로 지하 공간을 활용한 저온 식품창고의 건설이 필요하다.

저온저장은 저장기간과 저장온도에 밀접한 관계가 있고, 품질유지를 위하여는 이조건외 허용범위가 중요하다. 지하 암반은 연중 일정온도가 유지되며 열전도율이 낮고 대규모로 구성할 수 있어 에너지를 절약할 수 있으며 지하암반의 항온항습성을 이용하여 식품저온저장의 품질향상을 도모할수 있다. 현재 지하 식품저장 시설은 여러나라에서 곡물의 밀폐식 저장, 두류·과일류 등의 비가공식품저장, 가공식품의 건조저장, 냉동·냉장저장의 형태로 사용되고 있지만 각 식품별 저온저장 형태에 맞는 시설의 한계가 있다.

농촌 소득의 약 30%를 차지하고 있는 과일·채소류는 농촌 경제의 주요인이면서도 소비와 유통의 어려움이 따르고 있으며 신선 상태의 소비형태가 이루어져 이에 대한 품질 관리에 역점을 두어야 한다.

농산물의 저온저장과 유통은 생리작용, 물리 화학적 요인, 환경적 요인 등에 의해 손실이 되는데 이를 방지하기 위하여 그리고 체계적인 공급을 위한 방법이 요구되고있다. 지상 저장시설의 경제성과 한계성을 고려하여 지하 저장시설의 농산물 저장에 이용을 위한 방법을 모색하고자 다음과 같은 실험을 실시하여 각 저장 조건 시설에 따라 사과, 서류, 생강, 쪽파, 마늘, 무, 배추 등의 저장저건을 확립하여 지하 저장 시설에 이용을 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

## 1. 저장 시설의 개요

상온의 저장 시설은 공주대학교 식품가공학 실험실의 일부를 저장 시설로 사용하였고 지하저장 시설은 충남 홍성군 광천읍 소재 수산물 창고(180×150×190cm, 길이 250m의 끝 200m 부근, 연중  $13\pm 1^{\circ}\text{C}$ , RH  $90\pm 1\%$ ), 저온저장 시설은 충남 예산군 대술면 소재 과일저온저장고 (10×15×5m의 농촌 보급형 동화 공업사제(한국),  $0\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , RH  $85\pm 5\%$ )를 이용하여 농산물의 저장성 및 미생물 조사 등의 실험에 사용하였다.

상온에서의 실험기간중 온도·습도 변화는 Table IV-1 과 같다.

Table IV-1. 상온(공주대학교 식품가공학 실험실)의 온도·습도 변화

기간	96.4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	$10\pm 4$	$20\pm 2$	$22\pm 2$	$25\pm 3$	$23\pm 2$	$20\pm 2$	$15\pm 5$	$10\pm 5$	$10\pm 5$
RH(%)	$50\pm 10$	$60\pm 5$	$85\pm 5$	$75\pm 10$	$70\pm 10$	$50\pm 10$	$50\pm 10$	$50\pm 10$	$45\pm 10$
기간	97.1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	$5\pm 3$	$2\pm 2$	$6\pm 3$	$10\pm 5$	$20\pm 2$	$20\pm 5$	$25\pm 2$	$27\pm 2$	$25\pm 2$
RH(%)	$50\pm 5$	$50\pm 5$	$55\pm 10$	$50\pm 5$	$60\pm 5$	$70\pm 10$	$80\pm 10$	$75\pm 10$	$70\pm 10$

또한 각 저장시설별 공기 조성은 저온저장은  $\text{O}_2$  18~19%,  $\text{CO}_2$  1500~1800ppm이었고 토굴의 경우는  $\text{O}_2$  19~20%,  $\text{CO}_2$  500~600ppm이었으며 실온은  $\text{O}_2$  20%,  $\text{CO}_2$  500ppm을 보여주었고 저장 실험과정 중의 공기 조성 변화는 거의 나타나지 않았다.

## 제 2 절 농산물의 저장성 실험

### 1. 사과와 저장성 실험

#### 가. 재료 및 방법

사과는 96년 4월에 충남 예산군 산을 95년 11월에 생산하여 저장중인 후지 품종을 구입하여 선별하여 각 저장시설별로 실시하였다. 시료 채취는 15일을 기준으로 실시하였다. 측정 항목은 중량 변화율(무게 변화율의 백분율), 건전율(시료와 저장중의 물량에 따른 백분율), 당도(HAND REFRACTOMETER 사용), 경도(FRUIT HARDNESS METTER 사용) 이었으며 저장 용기는 40×30×16cm의 plastic바구니를 사용하였으며 비닐 cover로 씌워서 저장하였다.

또한 품종별 비교 실험을 위하여 조생종 품종은 충남 예산군산 아오리 사과를 1996년 9월 말에 수확한 것을, 만생종은 후지 사과를 96년도 11월에 수확한 것을 구입, 선별하여 각 저장시설별로 실시하였고, 시료 채취는 30일을 기준으로 하였다.

측정 항목은 중량 변화율, 건전율, 당도, 경도, 색도(CHROMA METTER사용), 부패 미생물의 분리·동정 등이었다.

#### 나. 결과 및 고찰

과일류를 저장하는 목적은 일정기간 신선도를 유지하고 품질, 맛, 영양 등이 저하되지 않게 하는데 있다. 그러므로 이러한 품질 저하 원인 즉, 자체내 효소작용, 증산작용, 미생물 생육 및 오염등을 파악하여

억제법 등을 강구해야 된다.

과일류에서 재배 면적이 가장 큰 사과는 일부 통조림, 주스, 식초, 잼, 식초 등으로 수비되고 있으나 아직도 생과 형태로 소비를 하고 있는 실정으로 생과 상태의 저장에 많은 연구가 필요하다.

과일류는 수확 후 대사 작용 등으로 자체의 성분 변화를 일으키는데 이를 방지하기 위하여 적당한 온도와 습도 등의 환경적 요소를 제한시켜야 되는데 이는 생물(fresh fruit)의 생장, 생리 작용을 이용하여 장기간 우수한 품질을 보존시키는 적당한 방법의 연구가 필요하다. 사과는 수확 후 저장 기간중 climacteric rise 현상으로 성숙단계에서 호흡작용이 일시 상승하는 대표적인 과일이며 호흡 작용과 더불어 신선도와 감량에 큰 영향을 끼치는 증산작용도 증가한다. 이런 생리 현상을 막기 위하여는 저장온도를 낮추어 호흡 및 증산작용을 감소시키고 성분의 손실도 적게 해야 한다. 또한 저온에 의해 미생물의 번식도 저하되므로 저온 저장의 경우 저장 기간이 상대적으로 길어진다. 그러나 빙결점 이하가 되면 동결에 의한 저온 장해를 일으키므로 저온 내성에 따라 동결에 의한 피해를 막아야 한다. 그리고 증산작용과 밀접한 관계가 있는 저장 습도도 알맞게 선택되어야 건조에 의한 피해와 미생물 번식에 의한 피해 등을 최소화 할 수 있다. 즉, 품질 유지에 필요한 최적의 온도, 습도 관리에 따라 사과의 장기간 저장에 영향을 끼치게 된다.

이러한 여러 문제점을 해결하는 방법으로, 현재 재래식 저장법과, 저온저장, CA저장, 감압저장 등이 이용되고 있으나 상품 가치와 경제적 측면에서도 고려해야 하므로 지하 저장에 의한 온도와 습도의 조절로 과일류의 장기간 저장성을 검토하기 위한 방법도 강구되어져야 된다고 판단된다.

사과의 저장성 실험에서 저장중인 것을 다시 사용하여 실험시기의 선택에 어려움이 있고 선도 유지가 의심스러웠다. 실험결과 Table IV-2 에서 보는 바와 같이 저온저장이외의 실험은 중량 감소율과 건전율이 급격히 낮아졌는데 이는 온·습도 차이에 따른 변화와 저온저장중인 것을 시료로 하여 급격한 생리 작용 등에 의한 부패와 수분증발에 따른 변화를 보여 여러 문제점을 수반하였다고 생각된다. 한편, 당도와 경도는 거의 변화가 없었으나 건전율에 좌우됨을 나타내었다. 이에 품종별 수확시기에 따른 사과저장의 실험을 하여 그 특성을 비교하는 것이 바람직하다고 생각되어 계속적으로 실시한 결과는 Table IV-3, 4 와 같다.

Table IV-2. 저장 조건에 따른 사과의 성분 변화

		96 4.15	4. 30	5. 15	5. 30	6. 15	6. 30	7. 15	8. 15	9. 15
중량변화 (%)	저온저장	100	100	100	100	100	99	97	95	95
	토굴저장	100	100	100	93.3	92				
	실온저장	100	82.5	80.5	74.5					
건전율 (%)	저 온	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	토 굴	100	62.5	40	12					
	실 온	100	50.5	3.5						
당도 (Brix%)	저 온	21	21	20	20	20	18	19	18	17
	토 굴	21	18	19	18					
	실 온	21	17	17						
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저 온	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0
	토 굴	2.3	2.0	2.0	1.8					
	실 온	2.3	1.9	1.6						

조생종과 만생종인 사과의 저장성 비교에서는 Table IV-3, 4와 같이 중량 변화율은 온·습도의 영향에 따라 생리작용과 갈마름 현상에

의해 실온에서는 급격히 저하되었고 토굴에서는 2~3 개월의 저장성을 나타내었으며 저온에서는 상품가치가 저장기간에서 별 차이를 나타내지 않고 유지하였다.

Table IV-3. 저장 조건에 따른 사과외의 변화(아오리)

		96 10.5	11.5	12.5	97 1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
중량변화 (%)	저온저장	100	100	100	100	100	99	99	98	98	95
	토굴저장	100	100	92.5	90	83					
	실온저장	100	98	94	82						
건전율 (%)	저온	100	100	100	100	100	100	99	99	99	96
	토굴	100	100	80	30	5					
	실온	100	85	62	3						
당도 (Brix%)	저온	18.0	18.0	18.0	17.8	17.5	17.0	16.5	16.0	16.0	16.0
	토굴	18.0	17.5	17.0	16.0	15.5					
	실온	18.0	16.5	15.5	15.0						
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저온	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.0	1.8
	토굴	2.3	2.2	2.1	2.0	1.8					
	실온	2.3	2.0	1.8	1.7						

Table IV-4. 저장 조건에 따른 사과 변화(후지)

		96 11.5	12.5	97 1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
중량변화 (%)	저온저장	100	100	100	100	100	100	96	95	95
	토굴저장	100	100	100	95	90	80	75		
	실온저장	100	100	90	80	60	50			
건전율 (%)	저온	100	100	100	100	100	100	100	100	96
	토굴	100	100	100	90	80	50			
	실온	100	100	90	85	60	20			
당도 (Brix%)	저온	21	21	21	21	20	20	20	20	20
	토굴	21	21	20	20	20	19	19		
	실온	21	20	20	19	19	18			
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저온	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.5
	토굴	2.8	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.0		
	실온	2.6	2.6	2.4	2.3	2.0	1.8			

건전율은 저장 시설과 온·습도에 따라 현저한 차이를 나타내었는데 이는 생리장해와 부착 및 오염 미생물에 의한 급격한 하락으로 생각되며 중량 변화율과 비슷한 경향이었고 부패에 관여하는 미생물은 겹무늬썩음병균인 *Botryosphaeria dothidae* Mougeot et Fries와 탄저균인 *Glomerella cigulata* Spaulding et Schrotter 이었다.

당도와 경도의 변화도 중량 변화율과 비슷한 경향이었으며 만생종인 후지가 조생종인 아오리 품종보다 저장성이 좋은 것으로 나타났다. 한편 저장 기간중의 색도 변화는 Table IV-5 와 같이 후숙 작용 등의 영향으로 실온에서는 1~2개월, 저온에서는 5~6개월이 가장 좋은 색도를 형성함을 알 수 있었다.

이 결과는 각 저장 시설에서의 저장 적기와 거의 일치하는 결과이었다.

Table IV-5. 품종별 저장중 색도 변화

			96.10	11	12	97.1	2	3	4	5	6	7	
아 오 리	저 온	L	88.56	88.47	89.60	91.01	91.06	94.59	94.59	93.08	94.11	92.47	
		a	-5.21	-5.23	-5.33	-5.71	-5.91	-6.40	-6.39	-7.24	-6.80	-7.18	
		b	+39.60	+36.70	+35.45	+35.10	+33.19	+25.61	+25.56	+27.71	+27.03	+30.60	
	토 굴	L	88.72	89.16	91.21	93.07							
		a	-5.34	-5.79	-5.70	-6.21							
		b	+36.84	+35.64	+35.76	+35.60							
	실 온	L	88.74	94.72	95.36								
		a	-6.25	-6.40	-6.42								
		b	+35.73	+36.71	+25.97								
후 지	저 온	L		88.90	89.27	89.40	91.84	92.29	92.08	89.48	90.33		
		a		-5.21	-5.36	-6.25	-4.97	-5.04	-6.49	-6.73	-5.63		
		b		+30.97	+30.43	+29.90	+29.31	+29.30	+31.72	+36.4	+34.25		
	토 굴	L		89.10	89.45	90.09	91.23	92.17					
		a		-5.32	-5.73	-6.10	-5.98	-6.23					
		b		+30.97	+31.27	+30.61	+30.55	+31.44					
	실 온	L		88.92	89.13	90.30							
		a		-5.20	-5.70	-5.41							
		b		+31.72	+30.70	+30.72							

이상의 결과로 보아 지하저장시설의 저장성의 조건은 온도  $0^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , RH  $80 \pm 5\%$ 에서 장기간 저장이 가능하였으며 경제성 등을 고려할 때 수확후 7~8개월이 저장 적기인 것으로 생각되었다.

## 2. 감자의 저장성 실험

### 가. 재료 및 방법

감자는 1996년 6월에 생산된 당진산을 시장에서 구입·선별하여 시

료로 사용하였으며 1996년도 제주산 가을 감자를 2월에 구입·선별하여 시기별로 생산된 감자의 저장성 실험을 사과 저장 방법과 같은 조건으로 실험을 실시하였다. 시료 채취는 30일을 기준으로 실시하였다.

측정 항목으로 중량 감소율은 저장중 자연 감량의 무게를 최초 저장량에 대한 백분율로 표기하였다. 건전율 및 발아율은 저장중 부패나 발아등으로 식용 가치가 없는 것을 최초 저장량에 대한 백분율로 나타내었다. 또한 수분 함량은 105℃ 수분측정법으로 실시하였고 경도는 Fruit Hardness Tester(Japan)으로 측정하였다. 그리고 부패된 감자로 부터 미생물을 분리·동정하였다.

#### 나. 결과 및 고찰

감자는 지하 괴경의 덩어리로 전분질을 축적하며 괴경주위에 7~8개의 씨눈을 가지고 있고 배당체의 일종인 solanine 독소가 녹색 및 씨눈 부위에 존재한다. 감자는 주로 원료상태로 조리나 식용으로 소비하고 있으나 전분제조, 냉동제품, 감자칩 등의 가공 식품 개발에 수요가 증가하고 있는 실정이다.

감자 저장은 품종에 따라 저장 방법이 다르지만 일반적으로 재래식으로 움저장과 저온저장 및 냉장저장이 이용되고 있으나 온도 적응과 습도 적응력에 따라 환원당의 증가에 의해 저장성이 좌우되며 발아와 발근작용에 의해 상품성과 식품가치가 하락되고 있다. 6월산 감자의 저장 실험에서 중량 감소율은 저온저장에서 건전율 및 발아율에 비교하여 항울적인 효과를 나타내었으며 토굴 및 실온 저장에서는 초기 및 중기에서는 부패는 거의 일어나지 않았으나 발아에 따른 중량 변화로 오히려 중량이 증가하는 것으로 나타났다.

건전율 및 발아율의 비교에서 저온 저장은 실험 저장 기간동안 거의 변화가 없었으나 토굴 저장에서는 저장 2~3개월부터 발아가 시작되었고 3개월 이후부터는 식품 가치가 없는 것으로 나타났고 실온 저장에서는 발아 시기는 비슷하였으나 급속한 가치 하락과 더불어 부패도 급속하게 나타내었다. 이는 실험기간이 하절기이었고, 토굴 저장은 발아 조건과 온도와 습도가 비슷하여 발아와 부패가 쉽게 나타난 것으로 생각되며 실온에서는 광선 등에 의해 녹변 발생과 걸마름 현상에 의해 건전율 및 발아율에 따라 수분 함량의 차이를 나타내었다.

경도의 변화는 습도와 수분 함량에 따라 차이를 나타내었으나 저장 방법에 따른 변화는 거의 나타나지 않았다.

Table IV-6. 저장 조건에 따른 6월산 감자 성분의 변화

		96 6.30	7.30	8.30	9.30	10.30	11.30	12.30	비 고
중량변화 (%)	저온저장	100	100	98	98	95	94	94	
	토굴저장	100	100	102	105	99	70	50	발아에 의한 중량 증가
	실온저장	100	97	100	105	110	115	120	"
건전율· 발아율 (%)	저 온	100	100	100	100	100	100	100	
	토 굴	100	100	90	60	30	15	10	발아 후 부패
	실 온	100	90	70	40	20	10	5	"
수분함량 (%)	저 온	78	76	76	76	75.5	75.5	75.5	
	토 굴	78	80	80	80	80	79	78	
	실 온	78	67	60	54	52	50	50	
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저 온	3.4	3.4	3.4	3.2	3.2	3.2	3.1	
	토 굴	3.4	3.2	3.1	3.2	3.1	3.0	3.0	
	실 온	3.4	3.3	3.3	3.0	3.0	2.9	2.9	

Table IV-7. 저장 조건에 따른 가을산 감자 성분의 변화

		97 2.10	3.10	4.10	5.10	6.10	7.10	8.10	비 고
중량변화 (%)	저온저장	100	100	100	98	98	96	95	
	토굴저장	100	100	102	105	107	100	95	
	실온저장	100	101	100	100	80	75	70	겉마름 및 발아
건전율· 발아율 (%)	저 온	100	100	100	100	98	98	96	
	토 굴	100	100	90	75	35	20	10	
	실 온	100	85	70	50	10	5	0	
수분함량 (%)	저 온	75	74	74	74	73.5	73.5	73	
	토 굴	75	75	75	75	74	74	74	발아 및 부패
	실 온	75	68	62	56	56	52	52	겉마름, 발아
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저 온	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	3.2	3.2	
	토 굴	3.4	3.2	3.2	3.0	3.0	3.0	2.9	
	실 온	3.4	3.4	3.3	3.2	3.2	3.1	3.0	

또한, 토굴 및 실온 저장에서의 부패는 역병균으로 *Phytophthora infestans* de Bary, 무름병균인 *Erwina carotovora* ver. *carotovora*, 곁둥근무늬병균인 *Alternaria solani* Jones et Grout, 마른썩음병균인 *Fusarium solani* Apple et Wollenwerber 등이 분리·동정 되었다. 한편 가을에 생산된 제주산 감자의 저장 실험도 온·습도에 의한 차이를 나타내어 실온에서는 냉해가 일어났으며 저온 및 토굴 저장에서는 6월 산 감자와 비슷한 경향이었다.

이상의 결과로 보아 감자의 저장은 1~5℃±2℃ 정도의 온도와 80~90%의 상대습도에서 저장력이 5~6개월 정도 유지되어 수급 및 저장에 큰 도움을 줄 것으로 생각된다.

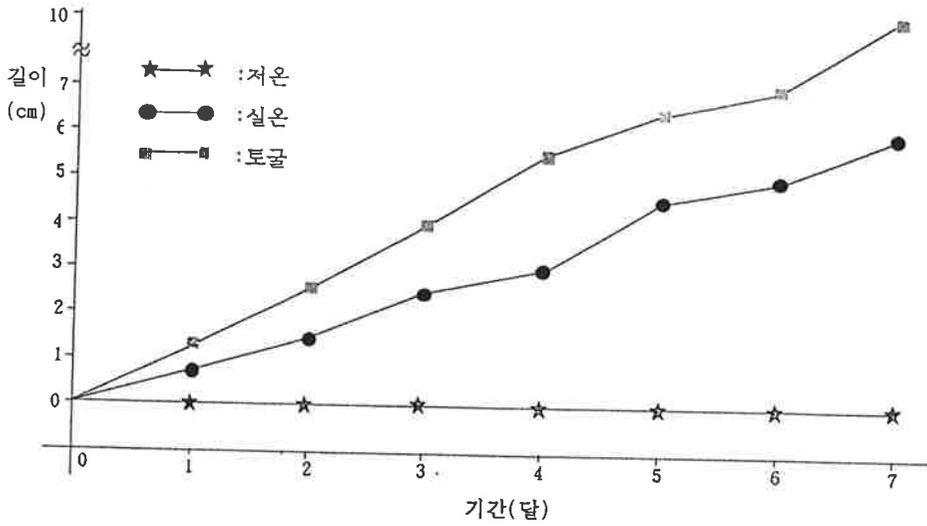


Fig IV-1. 감자의 저장 조건별 발아 비교

### 3. 고구마의 저장 실험

#### 가. 재료 및 방법

고구마는 96년 10월 중순에 생산된 예산산을 구입하여 선별하고 건조시켜 상기의 각 저장 조건별로 저장을 하였으며 시료는 30일 기준으

로 채취하였다.

측정 항목은 감자와 같은 방법으로 중량 감소율, 건전율 및 발아율, 수분 함량, 경도 등을 측정하였고 각 조건에서의 발생 미생물을 조사하여 분리·동정하였다.

#### 나. 결과 및 고찰

고구마는 단위 면적당 생산량이 타작물에 비해 상당히 많으며 구황작물의 개념으로 인식되어 있으나 괴근을 식용으로 이용할 뿐만아니라 줄기등을 이용하여 식품으로의 상품가치가 크다. 주로 생식, 공업원료, 전분가공 등에 쓰이며 차가운곳에서 저장하면 고사, 부패등이 쉽고 상처부위는 부패가 쉽게 일어난다. 부패등을 방지하기 위하여 고구마는 온도 30~35℃, 습도 90%에서 5~7일간 처리한후 저장하면 상처부위등이 표피와 같은 코르크층이 형성되어 병균의 침입을 방지하여 저장성을 높인다. 고구마의 저장 조건은 저온이나 변온감응에 강해야 되며 저장 장소는 항상 청결하고 공기가 잘 통하는 곳이어야 한다. 또한 고구마 저장은 움저장 등으로 12~13℃의 온도에서 과습하지 않는 상태로 저장을 하면 저장중  $\beta$ -amylase작용으로 맛이 증가한다.

고구마 저장에서의 성분 변화는 Table IV-8, Fig IV-2와같다. 이 결과 저온저장에서는 냉온에 의한 피해가 나타나 저장 30~40일 이후에는 거의 전 측정 항목에서 뚜렷한 식품가치의 상실이 있었다. 실온저장에서는 80~90일 이후부터 갈마름 현상과 온도 차이 등으로 상품 가치가 상실되었으며 110~120일 이후부터는 식용 불능 상태이었다.

한편, 토굴 저장에서는 저장 90~120일 까지 중량 및 건전율에 변화가 거의 없었으며 경도와 수분 함량 차이도 거의 나타나지 않았으나

습도에 의한 연부가 나타나기 시작하였다.

미생물 조사에서는 저온저장과 실온저장에서 초기 냉해에 의한 연부병균인 *Rizopus Stolonifer*와 검은무늬병균인 *Ceratocystis fimbriata* Elliott가 발생하였으며 토굴 저장에서는 부패 단계에서는 상기 균들과 주위 오염에 의해 잿빛 곰팡이병원균인 *Botrytis Cinerea* Persoon과 푸른곰팡이균인 *Penicillium italicum* Wehmer가 분리 동정되었다.

이상의 결과로 보아 고구마의 저장은 토굴 저장과 같이 온도 12~14℃와 상대습도 60~70%에서 가장 이상적인 조건인 것으로 판단되었다.

Table IV-8. 저장 조건에 따른 고구마 성분의 변화

		96 10.15	11.15	12.15	97 1.15	2.15	3.15	4.15	5.15	6.15	7.15	비 고
중량변화 (%)	저온저장	100	95	60	0							
	토굴저장	100	100	100	100	96	95	95	90	90	85	
	실온저장	100	100	96	96	90	90	85	70			
건전율· 발아율 (%)	저 온	100	90	40	0							
	토 굴	100	100	100	100	100	100	100	95	95	90	
	실 온	100	100	95	90	88	86	80	65			
수분함량 (%)	저 온	67.1	67.5	69.0								
	토 굴	67.1	67.2	67.2	67.3	67.2	67.2	67.3	67.3	67.4	67.5	
	실 온	67.1	67.0	66.5	66.5	65.2	65.0	65.0	64.2			
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저 온	3.7	3.8	3.7	×							
	토 굴	3.7	3.7	3.8	3.8	3.7	3.7	3.8	3.6	3.6	3.6	
	실 온	3.7	3.8	3.7	3.7	3.5	3.5	3.5	3.4			

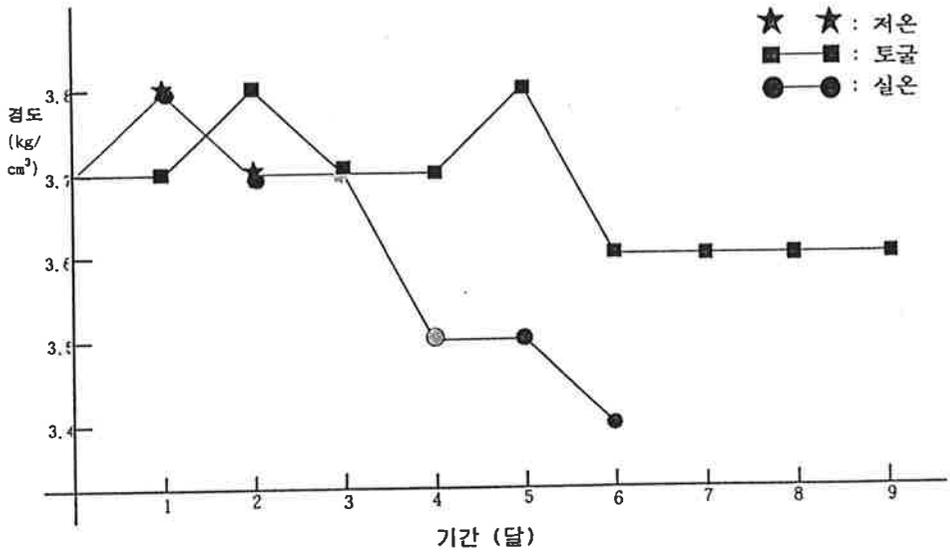


Fig IV-2. 고구마의 경도 변화

#### 4. 마늘의 저장성 실험

##### 가. 재료 및 방법

마늘은 1996년 6월과 1997년 6월에 생산된 충남 예산산을 구입 선별하여 시료로 하였으며 저장 시설은 사과 등의 저장 장소에서 동일한

조건과 방법으로 저장하였다. 시료 채취는 30일 기준으로 하였다.

측정 항목은 감자등과 같은 방법으로 중량 감소율, 건전율, 수분함량, 경도 등이었고 저장 조건별 발생하는 부패 미생물을 분리·동정하였다.

#### 나. 결과 및 고찰

마늘은 특유한 맛과 냄새를 가진 지하의 비늘 줄기를 생식용이나 근미료로 이용하며 잎마늘은 줄기와 잎도 식용하며 기호성은 민족에 따라 이용의 차이를 나타낸다.

마늘의 자극성 향기 성분인 알리신이 체내에서 주요 생리작용과 효소 작용으로 기능성을 발휘하고 우리 식생활에 중요한 향신료를 애용되어 왔으며 최근에는 마늘의 기능성이 많이 알려져 소스류, 육가공 제조 등에 쓰일 뿐만 아니라 저장성이 좋은 분말 제품으로도 가공하여 그 수요량이 늘어나고 있다. 잎마늘은 채소로서의 이용을 하며 주로 비늘줄기인 구는 줄기잎이 황갈색으로 변하면 수확하여 통풍이 잘 되는 그늘진 서늘한 곳에서 자연건조시켜 저장하거나 습도조절 가능한 곳에서 저온으로 저장한다. 저장중의 휴면기간이 경과하면 성숙되지 않는 것은 부패하게 되며 일정온도가 되면 발근 및 발아가 이루어져 상품가치와 저장성이 약해진다.

마늘의 저장 실험에서 전체적인 성분 변화는 96년 산과 97년 산은 저장 조건별 차이가 없이 거의 비슷한 경향이었고 실온에서는 온·습도의 차이에 따라 약간의 차이를 나타내었다. Table IV-9에서와 같이 저온저장에서는 저장 후기까지 성분의 변화는 거의 없었으나, 토굴 저장에서는 초기부터 온도와 결루 수분에 의해 외피의 습윤과 함께 마늘

의 썩음병 미생물인 *Fusarium oxysporum*이 발생되기 시작하여 1달 저장 이후부터는 그 상태가 심해져 저장 불능상태로 나타났다.

이러한 현상은 실온저장에서도 나타났으나 온도 차이가 심한 9~10월부터 나타났고 저장 상태는 대체로 양호하였으나 건조와 생리 현상에 의한 발아 현상이 나타나 저장 4~5개월부터 상품 가치는 현저하게 감소되었다.

이러한 결과로 보아 마늘은 온도 0℃내외, 습도 60~70%에서 6~8개월 저장 기간이 적당하였다. 저온 저장에서의 습도 조절 기능이 가장 중요한 요인으로 판단되었다.

Table IV-9. 저장 조건에 따른 마늘의 저장 실험

		96 6.30	7.30	8.30	9.30	10.30	11.30	12.30	97 1.30	2.30	3.30	4.30	비고
중량변화 (%)	저 온	100	100	100	98	98	98	95	95	93	92	91	
	토 굴	100	95	70									
	실 온	100	96	94	92	90	90	85	80	75	50		
건전율· 발아율 (%)	저 온	100	100	100	98	98	96	96	92	90	86	80	
	토 굴	100	80	50									
	실 온	100	98	90	87	80	72	67	60	50	20		10.30 발아
수분함량 (%)	저 온	57.2	57.2	57.0	57.0	57.0	56.2	57.0	57.1	57.0	56.8	57.0	
	토 굴	57.2	58.2	59.0									
	실 온	57.2	56.5	56.6	55.0	55.1	55.2	55.0	55.1	55.1	55.0		
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저 온	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.0	4.1	4.0	4.0	4.0	4.0	
	토 굴	4.2	3.5	3.4									
	실 온	4.2	4.1	4.2	4.1	4.0	3.8	3.8	3.7	3.7	3.8		

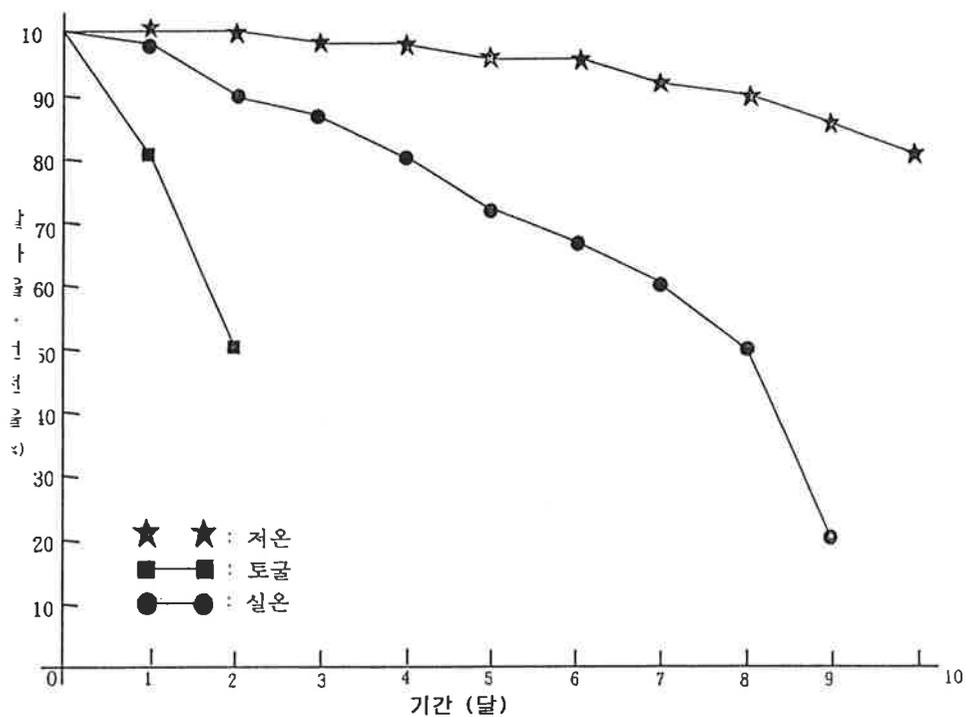


Fig IV-3. 마늘의 발아율 및 건전율의 비교

## 5. 쪽파의 저장성 실험

### 가. 재료 및 방법

실험에 사용한 쪽파는 1996년도 예산군산 쪽파 종실을 구입하여 정선한 후 감자, 마늘등과 같은 방법으로 동 저장 시설에서 동일한 조건

으로 실시하였다. 측정 항목은 건전율과 발아율, 수분함량, 경도 등을 측정하였으며 부패에 관여하는 미생물을 분리·동정하여 조사하였다.

#### 나. 결과 및 고찰

쪽파는 여러 종류의 파중에서 지하경과 잎 부위를 식용으로 하는 채소로 여름에는 성장하지만 겨울에는 성장을 멈추고 잎이 마르며 휴면 상태로 겨울을 지낸다.

일반적으로 파는 독특한 자극적인 냄새와 매운맛을 가지고 있으며 소화액을 분비하여 식욕을 증가시키고 몸을 따뜻하게 하는 등의 작용이 있고 육류나 생선의 비린내를 없애주며 찌개나 국 등에 빼놓을 수 없는 채소이다. 이중에 쪽파는 잎과 줄기를 이용하여 각종 양념류와 김치류로 가공하는데, 구근의 상태로 보관하여 종파로 쓰이고 있으며 기후 등의 조건에 따라 생산량이 결정되지만 종자의 저장에 의해 생산량을 조절할 필요가 있어 쪽파 종자의 저장에도 큰 관심이 대두되고 있다.

쪽파의 저장성실험 결과는 Table IV-10 및 Fig IV-4와 같다.

Table IV-10. 저장 조건에 따른 쪽과 성분의 변화

		96 6.30	7.30	8.30	9.30	10.30	11.30	12.30	97 1.30	2.30	3.30	4.30	비고
건전율· 발아율 (%)	저온	100	100	98	90	85	85	80	80	75	75	60	
	토굴	100	80	10									발아 및 부패
	실온	100	60	50	40	45	40	30	10				10월 발아, 겉마름
수분함량 (%)	저온	75.3	75	76	74	74	74.5	74.5	74.2	74.1	74.0	74.5	
	토굴	75.3	80	80									
	실온	75.3	62	65	65	60	56	60					
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저온	3.2	3.0	2.7	2.6	2.5	2.2	2.5	2.4	2.2	2.2	2.7	
	토굴	3.2	2.7	2.0									
	실온	3.2	3.0	2.0	1.6	1.5	1.5	1.2	1.2				

쪽과의 저장에서는 온도와 습도의 변화에 예민성을 보여주었으며 특히 토굴저장에서는 발아에 필요한 온·습도에 근접하였기에 저장 15일부터 발아가 시작되어 급격하게 부패와 발아가 일어나 50~60일의 저장성을 보였다. 실온저장에서도 초기부터 발아가 시작되었으나 부패는 부실과 에서만 일어났고 온도가 낮은 경우에는 발아가 중지되었다. 저온저장의 경우에는 7~8개월의 저장에도 변화가 거의 없었으며 부실과에서 약간의 부패를 보였고, 그 후에 온도 적응에 대한 예민성과 생육 특성으로 판단되는 발아가 약간씩 일어나기 시작하였다. 이때 부패에 관여하는 미생물을 조사한 결과 역병과 무름병을 일으키는

*Phytophthora macrospora* Itoet Tamaka 와 *Erwinia carotovora* subsp. 인 것으로 나타났다.

경도의 변화는 발아율과 비례하여 떨어졌으며 수분함량의 변화는 저온에서는 거의 나타나지 않았으나 실온에서는 결마음 현상에 의해 초기에는 뚜렷한 변화를 나타내었으나 그 후 비슷한 경향이였다. 쪽파의 저장에서는 이론상의 적온으로 0~1°C와 65~70%의 상대습도를 유지시켜 부패 보다는 발아를 방지시키는 방법이 알맞을 것으로 판단되었다.

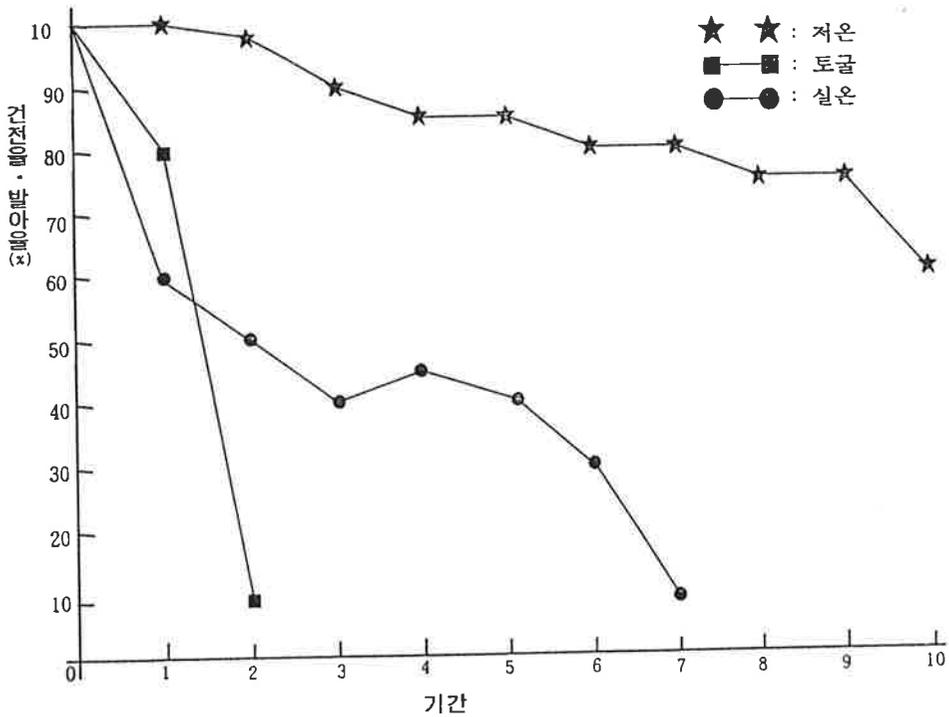


Fig IV-4. 쪽파의 저장 조건별 건전율 · 발아율의 비교

## 6. 생강의 저장성 실험

### 가. 재료 및 방법

시료로 사용한 생강은 96년 10월 중순에 생산된 서산산을 구입하여 선별하여 상기의 각 저장 조건별로 같은 방법으로 실시하였으며 시료는 30일 기준으로 채취하였다.

측정 항목은 쪽파와 같은 방법으로 건전율, 수분 함량, 경도 등을 측정하였으며 발생 미생물을 분리·동정하여 조사하였다.

### 나. 결과 및 고찰

생강은 아열대성 식물로 백리 줄기의 덩이 모양으로 종자로 파종하지만 우리나라에서는 개화가 잘않되어 덩이의 씨눈을 쪼개어 종자로 하고 있다. 독특한 향과 매운맛이 있어 조미채소로 이용되고 있어 김치 제조, 육류 및 어패류의 냄새 제거, 편강, 생강차, 생강주 등에 이용할 뿐만 아니라 커리가루, 소오스류 및 건위제 등의 약용에 원료가 된다. 생강의 저장은 덩이가 담황갈색으로 선명하고 뼈대가 있으며 균일한 굵은 것을 수확하여 30~33℃와 90~95% 수분에서 7~8일간 curing 처리하여 10~13℃의 온도에서 저장한다. 재래식 생강 저장은 건사 저장과 지하 수직줄이나 토굴을 이용하였으나 생리작용에 따른 기술적 저장 방법이 확립되지 않아 발생하는 가스에 의한 안전사고의 위험이 내포되어 있다.

생강의 저장중 성분 변화는 Table IV-11과 Fig IV-5와 같다. 저온 저장은 건전율에서 초기부터 급격히 떨어졌으며 이는 냉해에 의한 저

장 부적합성을 나타낸 결과이었고, 토굴 저장에서는 저장 90일이 경과하였을 때 부패 미생물이 발생하였으나 저장성에는 영향이 없었고 저장 6~7개월후에도 건전율과 수분 함량의 차이는 거의 없었으나 습도의 과다로 인한 피해가 나타났으며, 실온 저장은 온도와 습도의 변화로 인하여 저장 2~3월부터 걸마름 현상과 부패가 발생하였으나 저장 5개월까지 약 50%의 상품가치가 인정되었다.

저장중 발생한 부패 미생물은 생강 뿌리썩음병균으로 *Fusarium oxysporum*, *Pythium zingiberum*, 생강썩음병균으로 *Pseudomonas zingiberi* 등이 분리 동정되었다.

이러한 결과로 보아 이론상의 적정 온도인 11~13°C와 상대습도 65%에서 저장성이 가장 좋다고 하였으나 본 실험의 토굴 저장은 온도는 적당 하지만 습도가 너무 많기 때문에 습도 조절의 조건을 충족시키면 저장 기간이 6개월에서 더 연장할 수 있다고 판단되었다.

Table IV-11. 저장 조건에 따른 생강 성분의 변화

		96	11.15	12.15	97	2.15	3.15	4.15	5.15	6.15	7.15	비
		10.15			1.15							고
건전율 (%)	저 온	100	60	20	0							
	토 굴	100	100	98	95	95	85	80	74	62	50	
	실 온	100	90	80	60	52	50	42	38	33	20	
수분함량 (%)	저 온	81.5	82.0	81.0	82.0							
	토 굴	81.5	82.0	82.0	82.2	82.1	82.2	82.3	82.0	82.3	82.4	
	실 온	81.5	81.2	80.4	80.0	73.5	72.3	71.2	71.0	71.0	70.0	
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저 온	3.5	3.2	3.0	2.7							
	토 굴	3.5	3.6	3.5	3.5	3.3	3.0	3.0	2.9	2.8	2.7	
	실 온	3.5	3.3	3.0	2.9	2.9	3.0	2.8	2.7	2.8	2.7	

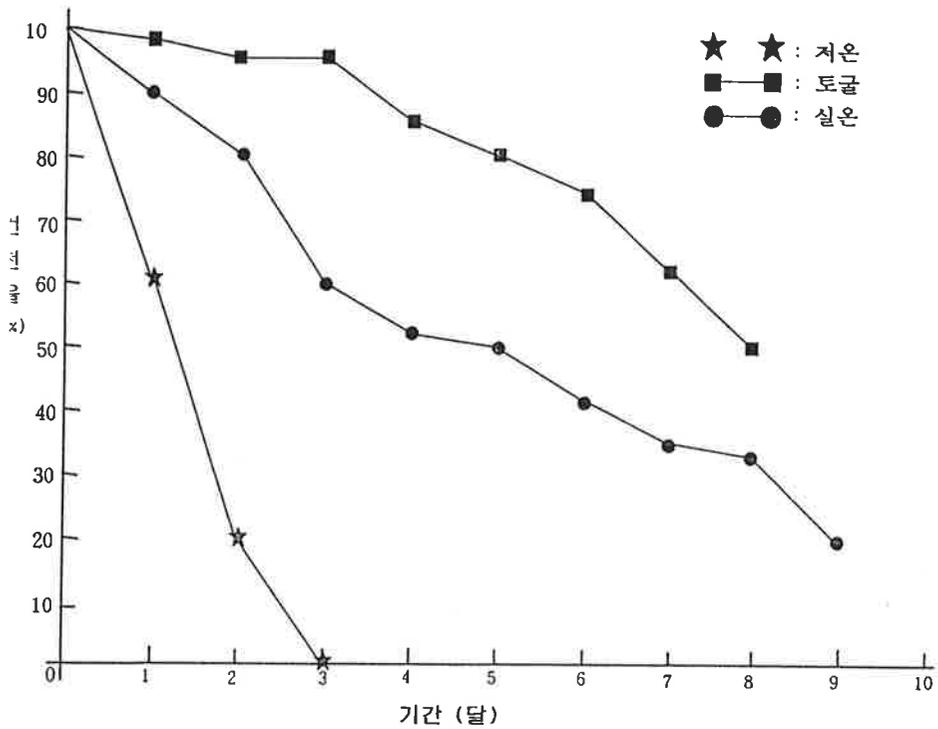


Fig IV-5. 생강의 건전을 비교

## 7. 무우 · 배추의 저장성 실험

### 가. 재료 및 방법

시료로 사용한 무우와 배추는 1996년 11월에 생산된 충남 아산산을 현지에서 직접 구입하여 불용 부분을 제거하고 선별하여 사용하였다.

시료 채취는 30일을 기준으로 하였다.

측정 항목은 감자등과 같은 방법으로 중량 감소율, 건전율 및 발아율, 수분 함량, 경도 등이었으며, 발생 미생물을 분리·동정 조사를 실시하였다.

#### 나. 결과 및 고찰

무우는 배추와 함께 식생활에서 부식으로 이용되는 가장 중요한 채소로 신선한 상태로 소비되는 것은 물론 김치, 깍두기, 동치미, 장아찌, 단무지 등의 절임류와 무말랭이와 같은 건조품, 나물 등의 형태로 소비되고 있으며 식생활 개선에 따라 채소류의 소비가 증가되고 있는 실정이다. 무우는 Vitamin A, C와 무기질이 풍부하며 단백질 중 아미노산은 곡류의 보족효과가 있고 소화효소제와 리느닌이 있어 소화, 대장, 담석, 동맥경화 등에 유용물질을 함유한 건강 식품에 속한다.

품종에 따라 다양하게 가공품으로 이용이 가능하며 계절에 따라서도 여러 종류의 가공품으로 생산할 수 있다. 이에 시설물등을 이용한 재배가 연중 가능하지만 아직 겨울철에는 생산의 한계가 있어 저장에도 관심을 가져야 한다.

무우의 저장 실험결과는 Table IV-12 와 같이 저장성은 2~4개월 정도로 매우 낮았다. 무우 저장에서 실온 저장은 걸마름에 의한 수분 함량의 변화가 현저하였으며 이에 따른 경도의 변화도 같은 경향을 보였고 건전율과 중량 감소율에서도 현저한 변화를 나타내어 30일 이상에서의 저장성은 거의 없었다. 토굴 저장에서는 중량 변화는 서서히 나타났으며 건전율과 발아율에서 저장 80~90일 까지 완만한 저하를 나타내었으나 그 후에 발아가 시작되었고 습도에 의한 부패 현상이 나타

났다. 저온저장의 경우 중량 변화와 건전율 및 발아율은 가장 변화가 적었으나 약간 저온피해 현상이 나타났으며 이에 따른 잿빛곰팡이균과 무름병균, 검은썩음병균 등이 나타났다. 저장실험 시료에서 분리동정한 균류는 *Erwinia carotovora*, *Xanthomonas campestris*, *Botrytis cinerea* 이었다.

이 결과로 보아 무우의 저장은 0~2℃, 상대습도 90%이하 이었으며 포장 처리가 저장성을 향상시키는 것으로 판단되었다.

Table IV-12. 저장 조건에 따른 무우 성분의 변화

		96 11.15	12.15	97 1.15	2.15	3.15	4.15	5.15	비고
중량변화 (%)	저온저장	100	98	95	90	80	40	30	
	토굴저장	100	97	92	85	70	60	40	
	실온저장	100	80	70	40	10	0	0	
건전율· 발아율 (%)	저 온	100	95	90	85	50	0	0	3월 냉해
	토 굴	100	90	85	70	30	10	0	2월 발아
	실 온	100	85	50	10	0	0	0	겉마름, 냉해
수분함량 (%)	저 온	85.0	84.5	84.5	83.2	83.5			
	토 굴	85.0	84.5	84.0	84.2	84.5	84.5	84.3	
	실 온	85.0	80.0	78.0	75.0	0	0	0	
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저 온	3.0	3.3	3.0	3.2	3.2	2.8	2.5	
	토 굴	3.0	3.0	2.8	2.8	2.7	2.0	0	
	실 온	3.0	2.9	2.6	2.1	0	0	0	

배추는 재배 면적이 가장 많으며 겨울철 김장용과 저장용 그리고 봄, 여름, 가을의 김치 재료로 널리 이용되고 있는 중요 채소로 Vitamin A, C와 무기질이 풍부하며 곡류의 단백질 보충 효과가 있고

섭유소는 소화기의 활동을 촉진시켜 준다. 무우와 더불어 식생활 개선 등과 소비가 증가되고 있으며 특히 김치류의 우수성 입증등으로 국제화 식품에 큰 역할이 기대되고 있다. 그러나 배추의 생산은 기후등의 영향으로 예측하기 힘들기 때문에 저장성을 고려해야 한다.

배추의 저장 실험결과는 Table IV-13과 같이 배추의 저장성은 무우보다도 낮았으며 실온에서는 겉마름과 병원균의 오염등으로 거의 저장성이 없었고, 토굴의 경우에는 온도에 의한 부패등으로 1개월 정도 이었고, 저온저장은 약간의 겉마름 현상과 미생물 생육, 과습 등으로 1~2개월 정도로 판단되었으며 각 시료에서 분리 동정된 미생물은 *Alternaria brassicae* Bolle, *Erwinia carotovora* subsp. Bergy이었다. 이 결과로 보아 배추의 저장은 0~2℃, 습도는 85~90%이었고, 배추도 무우와 마찬가지로 포장 처리가 저장성을 향상시킬 것으로 판단되었다.

Table IV-13. 저장 조건에 따른 배추 성분의 변화

		96 11.15	12.15	97 1.15	2.15	3.15	4.15	5.15	비고
증량변화 (%)	저온저장	100	95	80	60	30	0	0	
	토굴저장	100	95	90	80	50	0	0	
	실온저장	100	90	75	40	0	0	0	
건전율 (%)	저 온	100	96	90	70	20	0	0	냉해
	토 굴	100	93	70	40	10	0	0	
	실 온	100	80	60	30	0	0	0	겉마름
수분함량 (%)	저 온	93.4	93.2	93.0	93.2	92.0	0	0	
	토 굴	93.4	93.5	93.3	93.5	93.0	0	0	
	실 온	93.4	92.0	90.0	85.4	0	0	0	
경도 (kg/cm <sup>2</sup> )	저 온	2.2	2.0	2.0	1.9	1.9	0	0	
	토 굴	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	0	0	
	실 온	2.2	2.1	1.7	1.9	0	0	0	

## 제 5 장 결 론

농수산물의 저장시설의 확충은 우리나라의 농수산물 유통에 있어서 매우 시급한 문제이다. 본 연구에서는 지하암반특성 및 지리적 여건에 따른 부지의 선정 및 건설에 관련된 기술, 저장대상 농산물의 특성에 따른 저장조건의 확립 및 지하저장고내의 최적의 냉방공조시스템 구축에 관한 기술의 세 분야의 연구를 수행하였다.

지하암반저장 부지의 선정 및 건설기술에 관한 연구내용으로는 지하저장시설의 타당성 분석, 지하암반내의 열유동 분석, 지하공간 굴착시 암반의 변형 및 파괴특성 분석, 지하저장시설 부지 선정기준 연구, 지하저장 부지에 대한 비파괴 조사기술에 관한 연구, 지하저장시설의 설계요소 연구 및 지하저장고의 사후모니터링 체계에 관한 연구를 수행하였다.

지하암반저장고내의 냉방공조기술에 관한 연구에 있어서는 국내외 지하암반저장 실태 및 관련자료 조사, 지하공간에서의 환기 및 냉방공조기술, 지하암반저장고의 열전달 특성, 냉방공조 설계기술 및 지하암반저장고의 열환경 특성연구 등이 포함되었다.

지하저장대상 농산물의 특성에 따른 저장조건에 관한 연구에서는 각 농산물에서 신선도 유지가 필요한 품목별로 저장실험을 실시하여 저장 중의 물리·화학적 성분변화와 발생하는 미생물들을 분리·동정하여 농산물의 저장성 향상 및 self life 예측 등으로 지하저장시설의 실용화에 관한 연구를 수행하였다. 각 분야별 결과는 다음과 같다.

## 1. 지하암반저장 부지의 선정 및 건설기술에 관한 연구

1) 지하저장시설의 타당성 분석 결과 에너지 절약 및 운영비 절감, 건설비, 국토활용 및 환경보존 측면에서 지하저장고가 유리한 것으로 판단된다. 특히, 토지매입가를 제외한 순수 건설비의 경우 지하건설은 지상건설의 약 94%이며, 토지매입가를 포함할 경우는 68%로서 지하건설이 월등히 경제적이다.

2) 지하암반내 열유동 분석 결과 기온의 년변화량의 75%가 감소하는 표층 깊이(skin depth)는 사암의 경우 3.3 m, 화강암의 경우 3 m, 풍화암의 경우 2.7 m 로 밝혀졌다. 표층 깊이에서의 온도 지연은 1/2 주기이므로 표층 깊이에서는 겨울철에 여름철 지표온도의 영향을 받고, 여름철에는 겨울철 지표온도의 영향을 받음을 의미한다. 한편, 지하 시추공에서의 온도측정 결과 지하 6 m에서 연중 지온변화량은 약 6°C로 관측되어 온도 측면에서 볼 때 지하공동의 깊이를 년주기에 대한 표층 깊이 이하인 지표하 약 5 m 깊이에만 건설하여도 충분히 효과가 있음을 입증한다.

3) 지하공간 상부의 지형의 불규칙성에 대한 응력의 이방성을 분석하여 지하공간의 어느 부위에 응력에 집중되어 변형 및 파괴가 일어나는지 분석한 결과, 암반의 경우 지하저장고 측벽에 대한 지보 및 슛크리트 등의 보강대책이 요구되며, 토사의 경우 높은 지형쪽의 측벽에 대한 보강설계가 필요한 것으로 분석 되었다.

4) 지하저장시설 부지의 선정은 역학적 안전성과 지리적 적합성으로

동시에 고려해야 하며, 역학적 안전성 판단을 위해서는 연약대의 위치와 방향, 절리분석을 통하여 암반의 자체지지력 확보, 지질조건에 따른 적정한 공동의 규모 등을 고려하여야 한다.

5) 지하저장고 예정부지에 대하여 실시설계전에 탄성과 탐사, 지오레이다 탐사, 비저항 탐사 등의 비파괴조사를 통하여 불연속면의 분포, 암반의 강도, 암반등급을 구분하고 지하수 분포 여부를 판단하여 설계에 반영하는 기술을 적용하였다.

6) 지하저장시설의 설계요소로서 공동의 깊이, 방향, 모양, 크기 등에 관한 기준을 확립하였다.

7) 지하저장고 건설 후 사후모니터링 체계로서 자동 온·습도 측정시스템, 공동의 변위 및 벽체경사 변화도를 일정 시간간격으로 자동계측하여 분석·관리하는 시스템과 지하수 분포 모니터링 시스템을 구축하였다.

## 2. 지하암반저장고내의 냉방공조기술에 관한 연구

1) 에너지절약, 건설비 및 운영비 절감 등 지하공간의 많은 유리한 점에도 불구하고국내에서는 대규모 물류센타용 지하암반 저장고를 건설 중에 있는 것 외에는 아직까지 냉동저장설비를 갖추고 실용화된 중소규모의 순수 저장용 지하암반저장고는 없는 것으로 조사되었다. 앞으로 지역 별로 지하저장고를 운영한다면 농수산물의 유통구조를 개선하

고 가격안정을 꾀하는데 일조를 담당할 것으로 기대된다.

2) 지하저장고는 난방기에는 지상보다 높고 냉방기에는 지상보다 낮은 온도분포를 가지며 항시 고습도를 유지하는 연중 안정된 온습도 분포를 나타낸다. 따라서 일반적인 공기조화기와는 달리 난방용 온열원 장치가 필요없다. 그러나 적정 온도와 적정 습도에서 농산물의 신선도를 장기간 유지하며 저장하는 것은 매우 어려운 문제이다. 특히 상대습도를  $0^{\circ}\text{C}$  이하의 저온에서 상대습도를 90% 정도 고습도로 장기간 일정하게 유지하는 것은 기술적으로 해결하여 할 어려운 문제로 남아 있다. 이를 위해서는 획기적인 가습장치의 개발이 절실하다.

3) 냉동기의 용량은 지하저장고의 냉동부하에 따라 결정된다. 지하저장고 냉동부하는 지하암반저장고 내의 설계조건을 기준으로 할 때 암반을 통한 전열량, 방열벽을 통한 전열량, 환기열, 냉각열, 내부 발생열(전동기, 제상히터의 기기, 작업시의 하역기계, 조명기구, 작업자의 발열 등), 그리고 기타발생열(생체식품인 경우 호흡열)에 의해 결정되는데 이 중 특히 암반을 통해 내부로 전도되는 전열량이 가장 크다. 냉동부하를 정확히 계산하기 위해서는 암반의 축열용량을 계산하는데 필요한 암반의 물성(비열, 밀도, 열전도계수 등)과 암반·공기의 대류열전달계수에 대해 먼저 정확히 파악하여야 한다. 이 대류 열전달 계수는 암반저장고의 형태와 규모, 저장고내의 공기 유동 특성에 따라 달라진다. 지하암반에서의 전열해석에 있어서 지하암반 동결시 암반에 내재되어 있는 지하수의 빙화현상에 의해서 이상(two phases) 경계에서 일어나는 잠열 열전달 과정을 수반하므로 이에 대한 해석이 필요하며 이 과정을 냉동부하 계산에 포함시켜야 한다. 물론 이를 위해서는 지하암

반 내의 지하수의 분포와 유동에 대한 자료가 우선적으로 확보되어야 한다.

4) 지표면에서의 경계조건은 지중온도변화에 영향을 주게 된다. 이 경계조건은 지표면에 입사하는 태양복사, 주위 하늘에서 오는 적외선 복사, 지표에서 방출되는 적외선 복사, 현열 및 잠열 대류 열전달 현상을 포함한다. 정확한 지중온도계산을 위해서는 이 모든 경계조건을 포함하는 것이 좋으나, 지하암반의 1차원 비정상 열전도 방정식을 해석적인 방법으로 구한 계산 값과 실측치가 잘 맞은 것으로 보아 건구온도로 표시된 간단한 모델로도 심각한 오류를 범하지 않고 지중온도를 계산할 수 있음을 알 수 있었다.

5) 지하암반 모델을 2차원 비정상 열전도 방정식을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 계산된 지하암반온도는 지표면 온도와 같이 주기성을 가지고 온도분포를 나타내었으며, 1차원 모델의 경우와 같이 연중 온도분포에 있어서 깊이가 증가함에 진폭이 상당히 감소하였다. 지하암반온도 계산을 위한 본 연구의 2차원 수치해석방법은 지표면 온도에 대한 모델과 지하암반의 물성이 정확히 파악된다면 실제 계산에 이용될 수 있다.

6) 본 축소모델실험에서는 Grashof 수가 매우 낮아 층류 자연대류현상이 냉풍에 의한 강제대류에 혼합된 기류가 형성된 것으로 파악되었다. 따라서 본 모델내의 기류형성은 냉풍에 의한 강제대류에 의해 주로 영향을 받았고, 송풍기의 설치지점과 냉풍공급 방향 및 온도는 이러한 기류형성과정에 있어서 중요한 변수임을 알 수 있었다. 본 축소모델의

세가지 실험 결과를 비교할 때에 송풍기 I, II를 동벽과 북벽에서 동시 가동하는 것이 송풍기 I 또는 II를 가동하는 것 보다 실내의 온도분포가 상대적으로 저온으로 균일하게 나타남으로써 두 경우에 비해 상당히 유리함을 알 수 있었다.

7) 지상 냉동저장고 내의 온도분포가 지하암반저장고에 비교할 때 상대적으로 매우 고르지 못함을 알 수 있었다. 따라서 이러한 균일치 못한 온도분포에서는 저장고내의 온습도 분포를 고려치 않고 저장할 경우 장소에 따라 저장물 신선도 유지기간에 상당한 차이가 날 수 있으므로 지상 저장고에 냉동용 식품을 저장할 때는 저장 전 저장고내의 온습도분포도를 파악하고 저장물의 저장조건을 고려하여 저장 후 정기적으로 온습도와 저장물의 신선도를 기록하면서 항상 효율적인 저장고 운영 및 관리를 해주는 것이 중요하다.

### 3. 지하저장대상 농산물의 저장조건 확립

농산물의 지하 저장 조건을 확립하기 위하여 사과, 감자, 고구마, 마늘, 쪽파, 생강, 무우, 배추를 대상으로 각 저장 조건별로 건전율·발아율, 중량 감소율, 수분함량, 경도 및 부패 미생물을 분리·동정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 사과의 저장은 저온저장( $0^{\circ}\text{C}$ ) 조건에서 7~8개월의 저장이 이루어졌으며 이때의 조건은  $0^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , RH  $80 \pm 5\%$ 이었다. 저장중 부패 미생물은 *Botryosphaeria dothidae* Mougeot et Fries와 *Glomerella*

*cigulata* Spaulding et Schrotter 이었다.

2) 감자의 저장은 토굴저장에서  $1\sim 5\pm 2^{\circ}\text{C}$ 와 80~90%의 습도에서 5~6개월의 저장이 되었고, 토굴 및 실온저장에서 부패 미생물은 *Phytophthora infastans* de Bary, *Erwina carotovora* ver. *carotovora*, *Alternaria solani* Jones et Grout, *Fusarium solani* Apple et Wollenwerber 등이 분리·동정 되었다.

3) 고구마의 저장은 저온에서는 냉해가 있어 저장성이 없었고, 실온에서는 갈마름 현상과 온도차이에 의한 상품가치 하락이 있었으며, 토굴 저장 즉 온도  $10\sim 13^{\circ}\text{C}$ , 상대습도 60~70%에서 저장성이 좋았으며, 미생물 조사에서는 저온저장과 실온저장에서 초기 냉해에 의해 *Rizopus Stolonifer*와 *Ceratocystis fimbriata* Elliott가 발생하였으며, 토굴 저장에서는 부패 단계에서는 상기 균들과 주위 오염에 의해 *Botrytis Cinerea* Persoon과 *Penicillium italicum* Wehmer가 분리 동정되었다.

4) 마늘의 저장실험에서는  $0^{\circ}\text{C}\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , RH 60~70%에서 6~8개월의 저장이 적당하였고, 토굴저장은 온도에 따른 발아와 습도에 의한 외피의 습윤과 미생물인 *Fusarium oxysporum*이 발생되기 시작하여 저장 30일 이후부터는 그 상태가 심해져 저장 불능상태로 나타났다.

5) 쪽파의 경우는 온도에 대한 적응이 비교적 잘되어 발아가 이루어졌으나 저온저장과 습도 65~70%에서 발아방지와 저장성이 좋았고, 부패에 관여하는 미생물은 *Phytophthora macrospora* Itoet Tamaka 와 *Erwinia carotovora* subsp. 인 것으로 나타났다.

6) 생강의 저장은 아열대성 식물의 구근으로 저온에 의한 냉해가 발생하였으며 실온에서는 걸마름 현상이 있었고, 토굴저장이 가장 좋았으며 습도는  $60\% \pm 10\%$ 에서 가장 좋은 저장성을 나타내었다. 부패에 관여하는 미생물은 *Fusarium oxysporum*, *Pythium zingiberum*, *Pseudomonas zingiberi* 등이 분리 동정되었다.

7) 무우와 배추의 저장은 실온에서는 걸마름현상과 온도차에 의한 부패가 일어났으며 토굴저장은 습도와 발아온도에 따라 부패와 발아가 일어났고 저온저장은  $0 \sim 2^{\circ}\text{C}$  습도 90%정도에서 저장성이 인정되었으나 저장기간은 2~3개월이었고 포장처리를 실시하면 저장성이 증대되었다. 부패에 관여하는 미생물은 *Erwinia carotovora*, *Xanthomonas campestris*, *Botrytis cinerea*, *Alternaria brassicae* Bolle, *Erwinia carotovora* sabsp. Bergy이었다.

## 참 고 문 헌

- 김호영, 남기천, 박연준, 1994, “육류지하 냉동저장의 타당성 분석” : 곡물 엘리베이터와 농수축산물 지하암반 저장시설, '94 Int. Sym. for Grain Elevator and Underground Food Storage., pp.319-357.
- 공기조화·냉동공학회, 1992, 공기조화·냉동·위생공학편람, 제 3 권 냉동
- 농어촌 진흥공사, 1994, 곡물 엘리베이터와 농수 축산물 지하 암반 저장 시설, 한국 자원공학회 심포지움.
- 박무현, 1994, 과실 채소류의 저장 유통 현황, 농산물 저장 유통 학회 1(1), 67.
- 이동선, 1997, 신선 과채류 포장 설계를 위한 호흡의 측정 및 모델화, 식품과학과 산업, 30(1), 101.
- 통상산업부, 1995, Cool Tube를 이용한 자연에너지 이용기술 연구(I)에 관한 중간보고서
- 통상산업부, 1996, 에너지 절약형 지하 냉장 및 냉동저장 설계기술개발에 관한 중간보고서
- 한국건설기술연구원 : 지하 생활공간 개발 요소기술 연구-환기 및 방재기술 분야(I), 정책연구보고서, 건기연 93-ME-161-1, 1993. 12.
- 한국식품개발연구원, 1992, 농수산물의 지하암반 저장기술의 실용화에

관한 연구

한국식품개발연구원, 1992, 농산물의 지하 암반저장 시설의 실용화에  
관한 연구.

한국지반공학회, 1995. 9. 지속 가능한 개발을 위한 지하공간 기술에  
관한 심포지움 자료집

허길행, 1991, 지하 공간을 이용한 식품 저장 가능성에 관한 검토, 농촌  
경제, 14(4), 111-126.

大久保増太郎, 1988, 野菜の鮮度保持(根菜類の貯藏), 東京, 養賢  
堂, 237.

### < 제 1 & 2장 참고문헌 >

Adv. Tunnel. Technol. & Subsurf. Use. Vol. 2, No. 4, pp. 285-288,  
1982.

Barton, N., 1973, "Review of a new shear strength criterion for rock  
joints". Engineering Geology, Vol. 7, pp. 287-332

Barton, N., Lien, R. & Lunde, J., 1974, "Engineering classification of  
rock masses for the design of tunnel support". Rock  
Mechanics, Vol. 6, No. 4, pp. 188-236

Bieniawski, 1974, "Engineering classification of rock masses and its  
application in tunnelling". Proc. 3rd ISRM-Congress, Denver  
1974, Vol. IIa, pp. 27-32.

Birch, F. and Clark, H., 1940. The thermal conductivity of rocks and

- its dependence upon temperature and composition. *Am. J. Sci.*, 238: 529-558.
- Broch, E., 1987, "Rock and rock masses". Lecture notes prepared for the NORAD-Course "Hydropower Development", University of Trondheim, Dept. of Geology, August 1987, 19p.
- Broch, E., 1993, Use, Planning and design of Underground structures. Proc. Seoul Symp. Underground Space and Construction Technology, 8-9 Oct, 1982, Seoul, p. 31-47
- Clark, Jr., 1966, Handbook of Physical Constants. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 97: 578 pp.
- Debye, P., 1914. Vortrage über die kinetische Theorie der Materie und Elektrizität, Göttinger Wolfskehvortrage, Teubner, Leipzig, 196 pp.
- Frivik, P.-E., 1980, State of the Art Report. Ground Freezing: Thermal Properties, Modellind of Processes and Thermal Design. "Thermal Design of Artificail Soil Freezing Systems", 2nd Int. Sym. on Ground Freezing, Trondheim
- Frivik, P.-E., Thorbergsen, E., 1980, "Thermal Design of Artificail Soil Freezing Systems", 2nd Int. Sym. on Ground Freezing, Trondheim
- Goodall, D.C., Utheim, T., Thorbergsen, E., 1989, Back Analysis of Heat Loads on Selected thermal Storages. Pro. of the Int. Conference on Storage of Gases in Rock caverns, p.229-236.

Trondheim, 26-28

- Grimstad, E. & Barton, N., 1988, "Design and methods of rock support". In: "Norwegian Tunnelling Today". Publ. No. 5, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Tapir, pp. 59-64.
- Hoek, E. & Brown, E.T., 1980, "Underground Excavation in Rock". Institute of Mining and Metallurgy, Londodn, 527 p.
- Johansen, Ø., Frivik, P.-E., 1980, Thermal Properties of Soil and Rock Materials. "Theraml Design of Artificail Soil Freezing Systems", 2nd Int. Sym. on Ground Freezing, Trondheim, 1980.
- Judge, A.S. 1973, The thermal regime of the Mackenzie Valley; observation of the natural state. Information Canada Catalogue No. R72-11973.
- King, M. S., 1979, Thermal conductivity measurements on saturated rocks at permafrost temperatures , Canad. J. Earth Sci. 16, pp. 73-78
- Louis, C., 1969, "A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock massess". Imperial College, London, Rock Mechanics Report No. 10, 90 p.
- Richter, D., and Simmons, G., 1974, Thermal expansion behaviour of igneous rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 11 No. 10, pp. 403-411.

- Selmer-Olsen, R., 1981, "Consideration of large water leakages in deep-seated tunnels". (In Norwegian with summary in English). In: "Fjellsprengningsteknikk /Bergmekanikk /Geoteknikk 1981", Tapir, pp.21.1-21.15.
- Selmer-Olsen, R., 1988, "General engineering geological design procedures". In: "Norwegian Tunnelling Today". Publ. No. 5, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Tapir, pp. 53-58.
- Sugawara, A. and Yoshizawa, Y., 1962, An experimental investigation on the thermal conductivity of consolidated porous materials. J. Appl. Phys., 33(10): 3135-3138
- T.F.Barbo, 1982, Experience from Cold Storage Plant in Rock Cavern, Norwegian Hard Rock Tunnelling
- Terzagie, K., 1946 " Rock defects and loads on tunnel support". In: Proctor and White (ed.): "Rock tunnelling with steel supports". Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, pp. 15-99.
- Weast, R. C., 1972, Handbook of Chemistry and Physics, The Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio, 52nd ed., p. E-5.

### < 제 3 장 참고문헌 >

- Bahnfleth, W. P., 1989, Three-dimensional Modelling of Heat Transfer From Slab Floors, US Army Corps of Engineers,

Construction Engineering Research Laboratory

- Cooper, W. B., 1994, Warm Air Heating for Climate Control
- Incropera and Dewitt, 1996, Introduction to Heat Transfer, 3rd ed.
- Jones, W. P., 1994, Air Conditioning Engineering
- McQuiston and Parker, 1994, Heating, Ventilating, and Air Conditioning
- Patankar, S. V., 1991, Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer, Innovative Research. Inc.
- Sauer, H. J. and Howell, R.H., 1989, Principles of Heating, Ventilating, and Air Conditioning
- Vedat S. Arpacı, 1966, Conduction Heat Transfer
- Wang, S. K. 1993, Handbook of Air Conditioning and Refrigeration, .
- Whiteman, W. C. and Johnson, W., 1995. Refrigeration and Air Conditioning Technology, 3rd/ed

< 제 4 장 참고문헌 >

- Bartali, E.H., 1987, "Underground Storage Pits in Morocco,"  
Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 2, No.  
4, pp381~383, Pergamon Press, Oxford, U.K.
- Bartali, H., F.Vv. Dunkel, A, Said and R.L., 1990, "  
Performance of Plastic Lining for Storage of Barley in

Traditional Underground Structures(Metmara) in Morocco,"  
Journal of Agricultural Engineering Research, Vvol. 47,  
pp.297~314.

Carmody, J. and R. Sterling, Underground Space Design, 1993, A  
Guide to Subsurface Utilization and Design for People in  
Underground Space, Vvan Nostrand Reinhold, N.Y.

Dunkel, F., 1985, "Underground and Earth-Ssheltered Food Storage :  
Historical, Geographic and Economic Considerations,"  
Underground Space, Vol. 9, No. 5/6, pp. 310~315, Pergamon  
Press, Oxford, U.K.

Klein J.D., and S. Lurie., 1990, Prestorage heat treatment as a  
means of improving poststorage quality of apples J. Amer.  
Soc. Hort. Sci. 115(2) : 265~269.

Kwon, H.R. and Lee, D.S., 1994, Respiration characteristics of five  
Korean frish vegetables. Foods Biotechnol. 3(4), 209-211.

Lizard.M.C.C. and S.F.Yang., 1970, A simple and sensitive assay for  
1-aminocyclopropane-1 -carboxylic acid Anal. Biochem. 100 :  
140~145.

Lundstrom, Bertil, 1983, "Demand and Technical Requirements for  
Food Srrorage in Developing Countries, "Underground Space,  
Vol. 7, pp.251~256, Pergamon Press, Oxford, U.K.

Peppelenbos. H.W. and van't Leven, J., 1996, Evaluation of four  
types of inhibition for modelling the influence of carbon

dioxide on oxygen consumption of fruits and vegetables.  
Postharvest Biology Tecchnol., 7, 27-40.

Ranade M.S. and Narayankhedkar K. G., 1982, Thermal characteristics of fruits and vegetables as applied to hydrocooling. Refrigeration Sci. & Technol., 1, 455.

Sartori, M.R., 1987, "Underground Storage of Con and Dry Beans in Brazil," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 2, No. 4, pp. 373~380, Pergamon Press, Oxford, U.K.

Silliker, J.H. Elliott, R. P., Baird-Parker, A.C., Bryam, F.L., Christian, J.H.B., Clark, D.S., Olson, J.C. and Roberts. T. A., 1980, Microbial ecology of foods, Vol. I, Academic press, New York. p.5.

Sterling, R.L., G.D. Meixel, F. Dunkel and C. Fairhurst, 1983. "Underground Storage of Food," Underground Space, Vol. 7, pp. 257~262, Pergamon Press, Oxford, U.K.

Winqvist, T. and K.E. Mellgren,, 1988, Going Underground, Royal Swedish Academy of Eng. Sci., Stockholm, ISBN 91 7082 432.