

## A natural analog study on the cover-layer performance for near-surface LILW disposal by considering the tomb of historical age

### 역사시대 고분을 이용한 중저준위 방사성폐기물의 천층처분 덮개성능 자연유사연구

**Jin-Beak Park, Joo Wan Park, Chang-Lak Kim, Si Eun Yang\* and Sun Bok Lee\***

Nuclear Environment Technology Institute, P.O Box 149 Yuseong Daejeon

\*Seoul National University, San 56-1, Sillim-Dong, Gwanak-Gu, Seoul

[jbpark@khnp.co.kr](mailto:jbpark@khnp.co.kr)

**박진백, 박주완, 김창락, 양시은\*, 이선복\***

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원, 대전시 유성우체국사서함 149호

\*서울대학교 고고미술사학과, 서울시 관악구 신림9동 산 56-1번지

(Received June 7, 2005 / Approved June 28, 2005)

#### Abstract

To support the design concept and the performance assessment of the cover system for low- and intermediate-level radioactive waste(LILW) disposal facility, a pioneering study is conducted for the tomb of historical age. Research status of the art are investigated and the characteristics of tomb cover are summarized based on the preservation status of historical remains. On-site soil samples are prepared and their unsaturated hydraulic conductivities are measured by an one-step outflow method. Visiting the excavation site of historical tomb and communication with Korean archeological society are required for the further understanding and for the extension to the radioactive waste disposal research.

**Key Words** : near-surface disposal facility, tomb, unsaturated soil

#### 요약

중저준위 방사성폐기물 천층처분시설의 처분덮개설계 및 성능평가를 위해 국내 역사시대 고분연구를 수행하였다. 처분덮개 성능과 관련된 국내외 연구현황을 조사하고 삼국시대 고분을 중심으로 봉분의 층상특성을 정리하였다. 국내 고분에 대한 봉토의 시료채취와 시료에 대한 수리

전도도 측정 및 분석을 실시하였다. 고분에 대한 자연유사 연구에서 발굴조사보고서 상에 제시된 봉토의 유사판측기법의 적용, 모세관 방벽현상과 배수로를 이용한 봉분 내 습도조절 여부를 천층처분 시설설계에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 국내 고분발굴현상이 있을 때 현장을 방문하여 필요한 자료수집과 더불어 원자력분야의 관심사와 필요사항에 대하여 국내 고고학계와의 정보교환이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

**중심단어** : 천층처분시설, 고분, 불포화 토양

## I. 서 론

### 가. 개요

우리나라에서는 2005년 5월 현재 총 20기의 원자로가 가동되고 있으며, 전력수요의 증가와 함께 안정적인 전력공급원으로서 그 이용이 지속적으로 증가하고 있고, 향후에도 원자력에 대한 의존도는 계속 증가할 것으로 예상된다.

원자력 에너지는 핵연료 사이클에서 발생하는 방사성폐기물의 처분이 최근 중요한 과제로 부각되고 있다. 현재 원자력발전소 운영 중 발생하는 중저준위 방사성폐기물은 발전소 내에 저장하여 관리되고 있고, 동위원소 이용기관에서 사용한 개봉 및 밀봉선원은 원자력환경기술원에서 관리하고 있다. 이러한 중저준위 방사성폐기물의 처분은 우리나라에서는 향후 회수할 의도가 없이 인간의 생활권으로부터 영구히 격리하는 것으로 규정하고 있다.

우리나라를 비롯한 국외 원자력발전소 운영국가들은 중저준위 방사성폐기물을 지중에 처분하고 있거나 고려하고 있으며, 지중 처분방식으로 천층처분과 동굴처분방식을 각국의 여건을 고려하여 적용하고 있다. 현재 국내에서는 중저준위 방사성폐기물 처분시설의 부지확보를 위한 다각적인 노력이 추진 중에 있으며 2008년 처분시설의 건설 및 운영을 계획하고 있다.

천층처분방식은 지하수위 상부에 위치한 불포화매질 내에 콘크리트 구조물을 설치하고 중저준위 방사성폐기물을 콘크리트 처분고에 적치 후 시멘트로 채우는 방식으로 건설된다. 처분시설의 폐쇄단계에서는 강우침투 및 동식물침입을 방지하기 위해 다중

층상구조의 처분덮개를 설치하고 시설 내 집수 및 배수 관리를 폐쇄 후 제도적 관리기간 동안 실시하게 된다. [1]

지중에 처분되는 중저준위 방사성폐기물은 철제드럼에 고정화되며 다층의 공학적 인공방벽을 설치하여 지표수 및 지하수의 침투 및 핵종 누출을 방지하도록 구성된다. 이러한 천층처분시설에서 지표수 및 지하수의 침투와 핵종누출의 지연을 위한 연구들[1-9]이 원자력환경기술원을 중심으로 진행되어 왔으나, 수백 년 이상의 장기간 동안의 처분덮개 성능실증은 공학적인 방법으로 해결이 불가능한 것이 현실이다.

그러나, 역사시대 고분과 천층처분시설은 방사성폐기물과 인골/부장물품의 장기간 저장과 저장위치의 표시를 위한 시설이다. 궁극적으로는 방사성폐기물의 경우 핵종의 방사성붕괴를 통해 방사성폐기물을 자연 상태로 돌아가도록 하며, 고분내의 인골/부장물품은 침·부식을 동반하여 장기간 보존을 한다는 점에서 공통점을 가지고 있다고 하겠다. 따라서, 본 논문에서는 자연유사 기법의 일환으로 역사시대 고분을 이용하여 봉분의 층상구조에 대한 연구현황 분석과 국내 고분의 층상에 대한 시료채취 및 분석을 통하여 방사성폐기물 천층처분시설의 인공방벽 처분덮개 설계 개선방안을 모색해 보고자 한다.

### 나. 고분을 이용한 국내의 연구현황

역사시대 고분과 관련된 국내외 고고학적 연구들은 고분의 층상재질에 대한 관심보다는 고분 내의 출토 유물 연구나 고분의 구조에 대부분 집중되어 있다. 따라서, 천층처분 인공방벽의 처분덮개 설계나 처분관점에서 참고할 수 있는 국내 고분의 층상구조

분석연구는 전무하며 고분의 발굴조사 보고서에서도 고분의 층상구조와 관련된 자료를 획득하기란 쉽지 않다.

고분의 발굴조사는 봉분에 트렌치를 설치하여 봉분이 어떻게 축조되었는지를 층위라는 개념을 이용하여 살펴보면, 각 층에 대한 기본지질 특성을 기록하지만 이들 층위들은 고분의 축조 단위별로 구분 짓게 되기 때문에 흔히 생각하는 고분의 층상구조와는 다르다. 또한, 삼국시대의 봉분과 같이 그 규모가 상당히 클 경우 봉분을 축조하는 과정이 복잡한 양상을 보이기 때문에 발굴조사 보고서의 검토결과 고분의 축조방식과 층상구조에 대한 상관관계는 나타나지 않았다.

한편, 일반적인 처분관점에서 수행된 와타나베의 연구[10]가 있다. 와타나베[10]는 1,500~1,300년 전 일본에서 축조된 고분내부에 유물들이 남아 있는 것에 착안하여 천층처분 시설과 관련된 자연유사 연구를 실시하였다. 고분들의 토양 구조와 고분 출토유물의 보존 상태를 통계학적인 기법을 사용하여 크게 7분류(흄, 머리카락과 치아, 작은 금속기, 큰 금속기, 청동, 목기, 직물)로 나누어 그 보존 정도를 5단계로 수치화시켜서 분석하였다. 분석결과에서 토양 구조에 의해 제어되는 고분 내의 지하수의 흐름이 유물 보존에 중요한 요인임을 주장하였고, 특히 고분 내부의 건조한 상태가 유물의 보존 상태에 보다 좋은 영

향을 끼치는 것으로 결론지으면서 천층처분 덮개시설을 위한 층상구조를 제시하였다 (See Fig. 1).

그러나 와타나베[10]의 연구를 국내 상황과 직접적으로 연결시키기는 어렵다. 먼저 고분의 내부를 건조한 상태로 유지하는 것이 유물의 보존에 좋은 영향을 미친다는 주장은 경상남도 창원에서 확인된 철기시대의 분묘유적인 다호리 유적[11-13]과 광주광역시 광산구에서 확인된 철기시대 초기에 해당하는 신창동 유적[14-19] 등의 예를 볼 때 일반화시키기는 쉽지 않아 보인다.

이들 유적들에서는 목기, 철기, 토기 등 다양한 유물들이 매우 양호한 상태로 출토되었으며, 특히 붓이나 칠기류 그리고 나무로 된 악기류, 빗자루나 빗과 같은 생활도구류 뿐만 아니라 여러 곡물들이 출토되었는데, 이들 유기물질들은 보통 우리나라와 같은 산성토양에서는 쉽게 발견되지 않는 것들이어서 주목을 받았다. 이들 유적들은 저습지와 같은 매우 습한 보존 환경을 가지고 있어서, 와타나베[10]가 주장한 것처럼 건조한 상태가 유물의 보존에 좋은 영향을 미치는 것과는 상반된 결과를 보여주고 있다. 물론, 모든 저습지 유적에서 유물의 보존 상태가 매우 좋다는 것은 아니며 건조한 상태의 유적에서도 유물의 보존 상태가 양호한 것들도 많이 확인되고 있는 것은 사실이다. 다만 유물의 보존 상태에 대한 일반화는 현재까지는 무리가 따른다는 것이다. 오히려 일정한 습

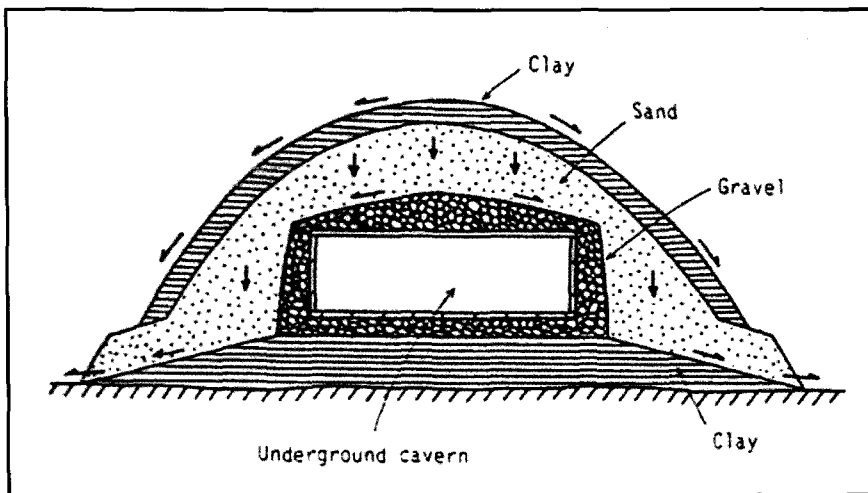


Figure 1. Conceptual diagram suggested by Watanabe's natural analog study [10].

도를 유지하는 것이 유물의 보존 상태를 결정짓는 중요한 요인일 수도 있는 것이다.

와타나베[10]의 연구 결과를 우리나라에 직접적으로 적용시키기 어려운 또 하나의 이유로는 국내 고분과 일본 고분의 상황이 많이 다르다는 점을 들 수 있다. 국내의 경우 산성토양으로 고분 내의 유기물질들이 쉽게 없어지거나 또는 대형 고분의 경우 대부분이 도굴을 당해 실제 유물의 보존 상태를 확인할 수 있는 것들이 많지 않기 때문에 와타나베[10]가 수행한 유사한 연구를 진행하기에는 어려움이 많다. 이 밖에도 와타나베[10]가 제시한 층상구조 모형 자체도 하나의 가설일 뿐이고, 실제 검증되지 않았다는 점도 고려해야만 할 것이다.

천층처분 덮개의 성능과 관련지을 수 있는 국내 연구로 공주 송산리 고분에 대한 인공함양시험[20]을 참고할 수 있다. 이 연구는 여름철 집중 강우 시에 종종 발생하는 고분군 누수 원인분석을 위해 인공함양 시험을 실시하였으며, 함양시험을 모사하는 2차원 불포화 지하수 유동 모델의 개발과 시험 중 측정된 관측정 수위 및 함양량의 변화를 이용하여 모델변수의 보정을 실시하고 보정된 모델변수로 함양시험 모사를 실시하였다. 함양시험 및 수분이동 모사결과 고분군 누수 현상의 주된 원인은 고분군 상부의 석회층으로 설치된 누수방지층에 발생한 균열을 통한 지하수의 직접유입으로 밝혀졌다. 그리고, 장기간 강우가 지속될 경우 고분군 북측의 원지반으로부터 불포화대를 통한 지하수의 유입가능성이 존재하나 고분군 북측 벽체에 10% 내외의 유효포화도 증가만을 일으킬 것으로 정류상태 모사를 통해 분석되었다. 이 연구에서는 빗물이 고분의 봉토를 통해 석실 내부로 침투되지 않는 구조를 갖추고 있음을 단편적으로나마 제시해주고 있으며 이러한 봉토의 층상 구조에 대한 직접적인 연구가 이루어져야 보다 확실한 증거를 제시할 수 있겠다.

#### 다. 국내 고분을 이용한 연구방법

중저준위 방사성폐기물 처분을 위한 이상적인 천층처분 처분덮개의 자연유사연구 방법으로는 처분관점에서 진행된 국내외 연구문헌들의 조사와 연구대

상 고분의 선정 그리고 선정된 고분에 대한 층상 시료채취 및 분석을 통하여 천층처분 인공방벽 처분덮개의 설계개선방안을 도출하여야 하겠다. 그러나 실제로 본 연구를 수행함에 있어서 크게 다음의 두 가지의 문제점들이 발생하였다.

첫째, 처분관점에서 진행된 고분연구 문헌을 찾아보기 어렵다. 고분과 관련된 국내 고고학 연구문헌들에서는 고분의 층상구조와 관련된 부분은 간략히 기술하거나 고분의 축조기술이 대부분이며, 고분 내 출토 유물과 봉토의 층상연구는 전무하며, 유물의 보존과 관련된 층상구조에 대해서는 언급되지 않고 있었다. 이는 국내 고고학 분야의 관심이 고분 출토 유물 자체 또는 고분의 구조 및 형태에 집중되어 있는 것과도 밀접한 관련이 있어 보인다.

둘째, 봉토의 층상 구조를 파악할 수 있는 고분의 수가 절대적으로 부족하였다. 국내에서는 대부분 봉토가 유실되어 지하의 매장주체부 관련 시설들만 남아있는 고분군을 조사하는 경우가 많다. 또한 봉토가 잘 남아있는 고분의 경우 일제시대를 포함하여 몇 십년 전에 조사가 이루어졌으나 발굴보고서가 발간되지 않은 것들이 많다. 또한 발굴조사는 안되었지만 봉토가 남아있는 경우라 할지라도 소위 값어치 나가는 부장품들을 노리는 도굴꾼들로 인해 대부분 도굴되어 실제 유물 보존 정황을 파악하기가 어렵다. 그리고, 일부 유물만이 도굴되었다 할지라도 고분 내의 석실이 외부에 노출되는 순간부터 유물의 보존 정황과 층상구조와의 직접적인 관계는 알 수가 없게 된다.

본 연구에서는 이러한 연구수행에 있어 발생하는 문제점들을 감안하여 기존 발굴조사 보고서를 통한 관련자료의 획득 및 내용분석과 실제 고분의 층상시료를 채취하여 분석하고 이들 결과들을 종합하여 천층처분 처분덮개의 설계 개선에 반영하고자 한다. 연구 대상고분으로는 대략 1,500년 이전의 삼국시대 고분을 그 대상으로 하였다.

## II. 고분의 구조 및 축조방식

### 가. 고분의 구조 [21]

역사시대 고분의 구조는 크게 매장시설(埋葬施

設), 봉분(封墳), 묘역시설(墓域施設)로 나눌 수 있다. 선사시대부터 석관(石棺)이나 목관(木棺)만이 사용되어 왔으며, 이후 사회분화가 심화되면서 관(棺)에서 괵(槨)으로의 변화가 생겨나고, 이처럼 규모가 큰 목괵(木槨)이나 석괵(石槨) 내에 다시 관(棺)을 안치하는 구조가 등장하게 된다. 이후 삼국시대가 되면 지역에 따라 다르긴 하지만 대체로 4~5세기가 되면 중국식 묘제의 영향으로 석실(石室)이 등장하게 된다. 석실은 기본적으로 추가장(追加葬)을 전제로 한 매장시설이기 때문에 기존에 땅을 파서(土壙) 관이나 괵을 설치하던 수혈식(竪穴式)이 아니라, 고분 내의 석실로 드나들도록 방의 한쪽 벽을 헐 수 있도록 하고 통로를 낸 횡구식(橫口式)이거나 통로를 복도처럼 축조한 횡혈식(橫穴式)이다.

한편, 석실의 축조재료에 따라 깎돌(割石)이나 다듬은 돌(切石)을 쌓아 만든 석실분(石室墳)이 대부분이나, 무녕왕릉의 경우처럼 벽돌로 쌓은 전축분(塼築墳)도 있다. 고분의 석실은 천층처분시설의 처분고와 같이 시설의 구조적 안전과 수분침투를 방지하는 역할을 한다.

매장시설에서 봉분의 역할은 매장시설을 밀봉함과 동시에 그 위치와 외관을 표시하는 기능을 가진다. 삼국시대에는 당시 지배자의 권력을 과시하듯이 거대한 규모로 축조된 봉분이 나타나게 되는데, 이 시기의 고분을 고총(高塚)이라 한다. 선사시대의 석관묘나 목관묘의 경우에도 봉분은 원래 존재하였을 것이지만, 시간이 지남에 따라 유실되거나 다져져서 남아 있는 것은 거의 없다. 보통은 토광 단벽의 토층도를 보고 봉분의 존재를 추측할 수 있을 뿐이다. 이들 봉분은 흙으로 쌓는 것이 보통이고, 돌을 이용한 것(積石塚)도 있다. 특히 봉분을 높게 축조하고 자연 유실을 방지하기 위해서는 판축(板築)이라는 흙쌓기 방법을 이용하기도 하고, 계단식으로 돌을 쌓아 올리기도 한다.

한편, 묘역시설이란 것은 하나의 매장시설이나 서로 관련된 둘 이상의 매장시설이 점유한 영역을 표시해 주는 시설로서 봉분 가장자리에 호석(護石)을 둘러거나 주구(周溝)를 파서 묘역을 표시하기도 한다.

또한 도랑 안팎에서 제사를 지낸 유구가 발견되기도 하는데, 이러한 외곽시설물을 통틀어 묘역시설로 볼 수 있다.

#### 나. 삼국시대 석실분의 축조방식 [22]

삼국시대 석실분의 축조 방식은 석실벽체의 축조, 천장 축조 그리고 봉토 마무리 등 세 단계로 나눌 수 있다. 첫 단계는 바닥을 정리한 다음 석실 벽체를 만들면서 그 뒷부분을 봉토로 다지는 과정이다. 여기에서는 두 공정으로 나누어 볼 수 있을 것인데, 먼저 석실 벽체를 만들 때 벽석 뿌리나 벽체의 너비를 맞추기 위해 바깥쪽에 잇대어 놓은 벽석 사이를 흙이나 점토로 메움질하면서 그 뒷부분을 우선적으로 다진다. 이러한 봉토 축조방식은 석실 벽체를 먼저 축조하려는 의도가 내포된 것으로, 석실 벽체와 봉토를 수평으로 축조하는 것에 비해 벽체의 축조와 수정이 용이하다는 장점이 있다.

두 번째 단계로는 천장을 만드는 과정이다. 첫 단계에서 상단 벽석 높이와 주변 토층의 높이가 비슷하게 되면 천장을 만든다. 천장의 경우 삼국 고분의 형태가 다르기 때문에 그 축조 방식도 각기 다르다. 신라나 가야 고분의 경우 벽체가 완성이 되면 그 위에 뚜껑돌 즉 개석을 덮고 점토 등으로 밀폐를 하는 과정을 거친다.

세 번째 단계로는, 천장의 개석 위를 덮고 봉토를 마무리하는 단계이다. 봉분이 대형인 경우는 한 번에 봉분을 만들기가 불가능하기 때문에 분할 축조하는 경우가 많으며, 구간별로 점토와 일반 사질토를 이용하여 교대로 다지는 유사판축을 하며 보통 입구 부분에 유사판축의 흔적이 많이 나타난다. 입구가 아닌 뒷부분에 사용되는 흙은 고분 주위에 있는 사질토를 사용하는 경우가 대부분이다. 일부 고분에는 점토나 사질토의 구별이 없이 일반 사질토로 전체 봉분을 조성하는 경우도 있다. 대략적인 석실분의 축조 방식은 위에 언급한 것과 같지만, 전체 석실의 구조 및 축조 방식이 일반화되어 있는 것은 아니다. 고분이 축조되는 지형 및 지질별로 다르고 세부적으로 축조하는 사람에 따라 매우 다양한 양상을 나타내고 있음을 인식해야 한다.

### III. 고분 발굴조사보고서의 사례분석

국내에서 수행된 삼국시대 고분들의 발굴조사보고서를 조사하였다. 발굴조사보고서의 내용을 처분 덮개와 봉분의 상관관계 그리고 고분의 구조와 유물의 존재여부의 관점에서 구분하였다. 발굴결과 목기, 철기 및 인골들의 보존이 양호한 고분 중에서 고분의 봉분이 존재하는 고분과 봉분이 존재하지 않는 고분으로 분류하여 그 특징들을 정리하였으며 요약된 내용을 Table 1에 제시하였다.

#### 가. 봉분이 존재하며 유물이 발견된 고분

고분의 봉분이 존재하며 유물의 보존상황이 양호한 고분은 1992년 발굴조사가 이루어진 창녕 교동 고분군[23]과 1994년~1995년에 걸쳐 발굴된 고령 지산동 30호분[24]이 대표적이었다.

창녕 교동 고분군[23]은 창녕읍 북쪽 해발 150 m 전후의 목마산 구릉상에 위치하고 있는 5세기대의 것으로 추정된다. 도굴의 흔적이 발견되어 유물의 보존 상태와 봉분의 층상구조를 직접적으로 관련 연결시킬 수는 없지만, 다량의 토기류와 도검, 철모, 철촉, 단갑, 철제관모들과 다수의 철제 마구류 및 농기구류를 포함한 철기류 그리고 인골편이 확인되었다. 창녕 교동 고분군 1호분의 경우 봉토의 평면 지름은 대략 22.5 m의 원형으로, 서쪽의 가장 낮은 곳에는 9~10단 가량, 나머지는 4~5단의 호석을 둘러쌓아 봉

분이 밀려나가는 것을 방지하였고, 호석과 접한 기둥 구멍들이 전면에 배치하고 있다.

석실 주변은 점토로 밀폐하여 빗물이나 다른 흙들이 석실내부로 밀려들어오는 것을 방지하였고, 묘실 입구부에는 점토(흑갈색점토)와 일반 사질토(주변의 산 흙)를 교대로 다진 유사관축기법이 확인되었지만, 입구의 반대쪽 뒷부분은 깨진 돌(할석)과 일반 사질토를 섞어 조잡하게 축조하였다. 봉토 내 수직 점토층의 존재는 봉분을 분할 조성했음을 보여준다 (Fig. 2). 하지만, 이러한 유사관축의 흔적은 봉토 정상부까지는 확인되지 않았으며 다만 서로 다른 점질의 흙으로 블록을 이루면서 쌓았던 것으로 추정된다 (Fig. 3).

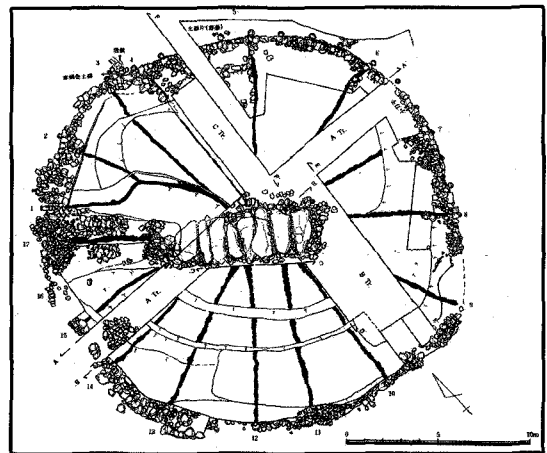


Figure 2. The plane view of ancient tomb [Chang-nyung Kyo-dong #1] [23].

Table 1. Characteristics of the ancient tomb

고분의 명칭	고분/봉토의 특징	기 타
창녕 교동 고분군	- 고분의 분할조성에 따른 수직점토층 - 묘실입구의 유사관축 - 석실의 점토밀폐 - 봉분유지를 위한 호석이 존재	- 도굴 - 토기, 철기 및 인골확인 - 지름 22.5m의 원형고분
고령 지산동 고분	- 개석상단에 점성이 강한 점토 밀폐 - 봉분상층에 마사토와 점토를 이용한 유사관축(50~70cm) - 고분의 구분축조 - 봉분유지를 위한 호석이 존재	- 지름 15-18m의 타원형고분 - 순장곽과 인골 및 금동확인
김해 예안리 고분	- 봉분없음 - 묘실내 폐각층의 석회질 성분	- 가야시대 4-7C 소형 고분 - 봉분이 없이 지표아래 고분매장 주체부 발굴 - 토기, 폐각, 철기 및 인골 확인
김해 대성동 고분군	- 봉분없음 - 구릉에 위치	- 가야시대 고분군 - 목관, 금속기 및 인골 양호

고령 지산동 30호분[24]은 1994년~ 1995년에 걸쳐 발굴된 삼국시대의 고총고분으로 능선 정상부와 경사가 심한 자연지형을 이용하여 축조한 고분이다. 발굴조사 전 상당부분이 훼손된 상태였고, 호석 및 토층 상에서 확인된 봉토의 지름은 약 동서 18 m, 남북 15 m 가량으로, 타원형의 평면형태를 보여주고 있었으며, 석실부 개석 상면에서부터 잔존하는 봉토의 높이는 약 1.5 m 였다.

지산동 30호분[24]에는 순장곽(30-2호)이 확인되었는데, 다른 석곽들이 대부분 훼손된 반면에 30-2호에서는 3~11세 사이의 소아의 두개골 일부와 함께 금동관이 확인되었다. 그러나 주 석실은 도굴로 인해 조사 전 이미 상당부분 훼손되었지만, 석실 내부에서는 각종 토기류와 동자, 철정 등과 같은 철기류들과 금동제품류가 확인되었다.

고분은 능선 정상부를 묘역으로 만들기 위해 정지 작업 후 풍화암반층을 굴착하여 묘광을 파고 암반층

을 바닥면으로 하여 석실을 축조하였다. 특이한 점은 석실 내 하부 석곽을 별도로 설치하였다는 점이다. 석실 및 부곽의 개석 설치 후에 그 상단에 양질의 점성이 강한 회흑색 점토를 덮어 밀폐시켰다. 이후 상층에는 명황색 마사토와 명황색 점토층을 교대로 다져 봉분을 쌓았는데, 약 50~70 cm 가량의 높이까지 확인되었다. 또한 토층상에서 확인된 봉토의 평면상에서 구획별로 흙의 차이를 보여주고 있고, 단면상에서도 지그재그 토층이 확인되는 것으로 보아 구분축조방식에 의한 봉분의 성토가 이루어졌음을 알 수 있다. 한편 호석으로 봉토의 주위를 둘러 봉분이 무너지는 것을 방지하였고, 이후 봉토의 마무리는 황갈색, 회갈색, 회흑색의 점토를 10cm 두께로 번갈아가며 판축상으로 다져 봉토를 견고히 하였다 (See Fig. 4).

창녕 교동고분군과 고령 지산동 고분군은 구릉상에 위치하여 우리나라 몬순기후하에 우기에 지하수 상승으로 묘실을 덮을 가능성을 줄였으며, 석실의 점

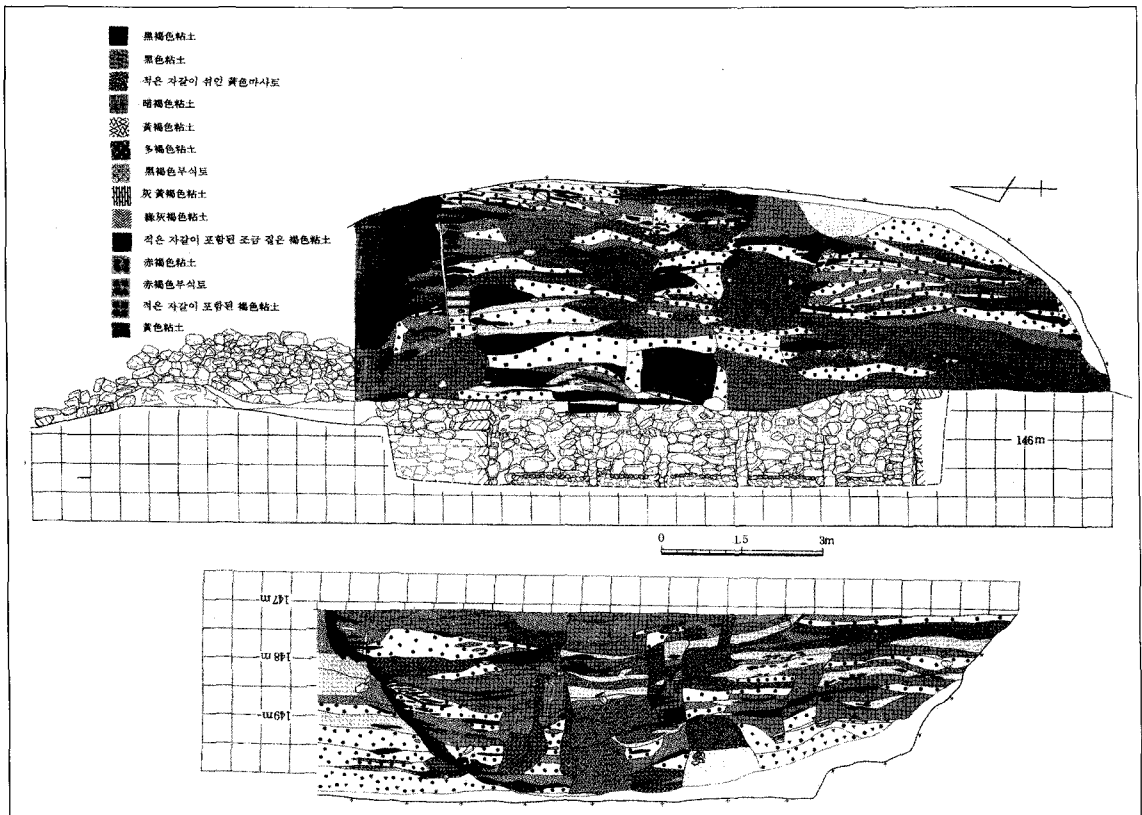


Figure 3. The soil layers of ancient tomb [Chang-nyung Kyo-dong #3] [23].

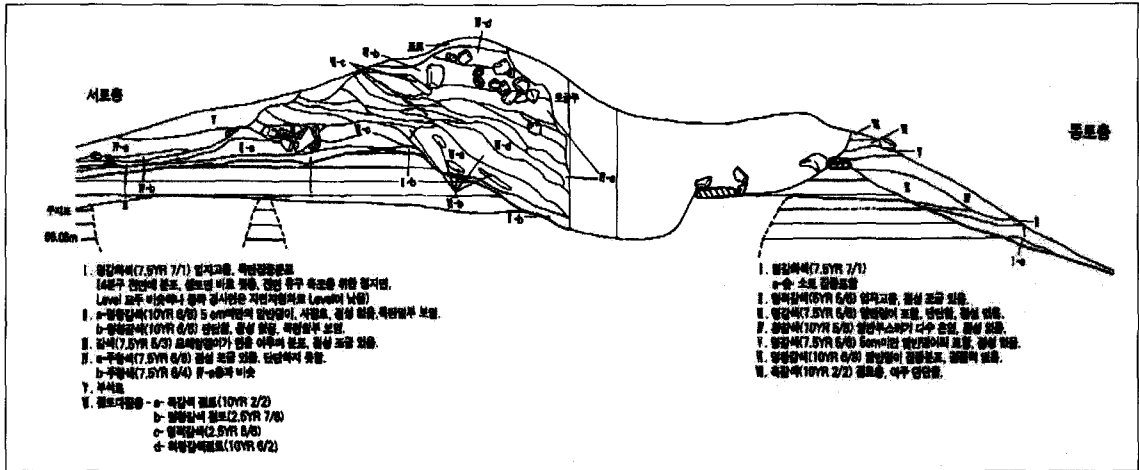


Figure 4. The soil layers of ancient tomb [Koryung Jisan-dong #30] [24].

토밀폐과 호석의 사용 그리고 묘실에 대한 유사관측 기법으로 봉분을 축조하여 지표수의 고분유입을 차단하여 토기, 철기 및 인골편의 보존이 양호하였다.

### 나. 봉분이 없으며 유물이 발견된 고분

창녕 교동 고분군이나 고령 지산동 30호분의 경우에는 모두 봉토가 존재하는 것들이었지만, 봉토가 존재하지는 않음에도 불구하고 인골을 포함한 유물이 잘 남아있는 고분에는 김해예안리 고분[25-26]과 김해 대성동 고분군[27-29]이 대표적이다.

경남 김해의 예안리 고분군[25-26]은 4-7C에 해당되는 가야 고분군으로 북쪽에서 남동쪽으로 완만하게 뻗은 독립구릉과 주변 평지에 형성된 유적으로 목곽묘, 석곽묘, 석실묘, 옹관묘 등 다양한 묘제가 확인되었다. 이들 고분들은 봉분이 없이 지표 바로 아래에서 고분의 매장주체부 시설들이 확인되었고 앞서 살펴본 가야 시기의 대형고분들과는 달리 그 규모도 작다. 하지만, 토기류 뿐만 아니라, 다양한 철기류와 금제, 금동제, 은제, 동제 등의 각종 장신구류들이 출토되었으며, 각 유구마다 예외 없이 인골이 남아 있었다 (See Fig. 5).

김해 대성동 고분군[27-29]은 목곽묘, 목곽묘, 수혈식석실묘 등으로 이루어진 가야시대의 고분군이다. 김해 예안리 고분[25-26]과 마찬가지로 봉분은 남아있지 않지만, 각종 금속기류를 포함한 많은 유기물 질들이 잘 보존된 채 출토되었다. 김해 예안리[25-26]

의 경우 패각들이 주변에 널려있어서 패각층의 석회질 성분 등으로 인해 인골들과 각종 유물들이 잘 남아있었을 가능성도 있지만, 김해 대성동 고분[27-29]은 구릉에 존재하는 유적으로 주변에 패각의 흔적 등은 없었다. 그렇지만 일부 고분에서는 목관의 흔적이 나 뼈 그리고 각종 금속기들이 매우 양호한 상태로 남아있는 경우도 있어, 역시 봉분의 존재와 상관없이 유물들의 보존 상태가 양호한 경우의 대표적인 사례이다.

김해 예안리와 대성동 고분의 경우를 볼 때 봉분을 이용하여 지표수의 침투를 방어하는 것이 유물과 유골을 장기간 보존할 수 있는 유일한 방법은 아니며, 봉분의 구조와는 별개로 고분의 지형 및 지질적 위치와 고분 내부의 배수시설 등도 함께 고려해야 할 것이다.



Figure 5. The excavated view of ancient tomb [Kim-Hae Yeon-ri] [25-26].



#### IV. 고분봉분의 시료분석

##### 가. 고분 봉토의 시료채취

고분봉분의 층상구조 분석의 일환으로 실제 국내 고분에 대한 시료를 채취하고 채취된 시료에 대한 불포화 수리전도도를 측정하였다. 시료 채취를 위한 고분선정은 고분에 대한 발굴조사가 이루어지는 시점에 발굴기관의 협조를 얻어 이루어졌으며, 발굴고분의 원형을 최대한으로 유지하기 위하여 꽃삽(trowel)으로 시료

를 채취하였다. 시료채취는 경남대 박물관에서 발굴한 경상남도 산청군 생초면 어서리의 산청 생초 고분군(山淸 生草 古墳群)에서 이루어졌으며 시료 분석은 경희대학교 원전운영고도화기술센터에서 수행하였다.

산청 생초 고분군(山淸 生草 古墳群)은 경상남도 기념물 제 7호로서 구릉지에 위치하여 지하수면이 묘실에 영향을 미치지 않는 가야시대 중대형 고분으로 추정된다. 고분의 내부는 석실과 개석이 존재하며 입구와 통로가 있는 앞트기식 돌방무덤(橫口式石室



Figure 6. The excavation site of ancient tomb (Sancheong SaengCho).

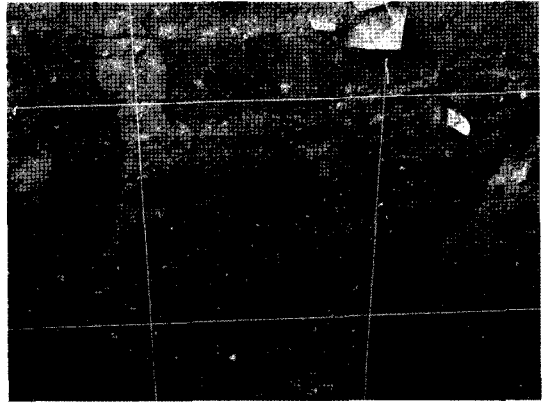


Figure 7. The cut-off view of ancient tomb (Sancheong SaengCho).

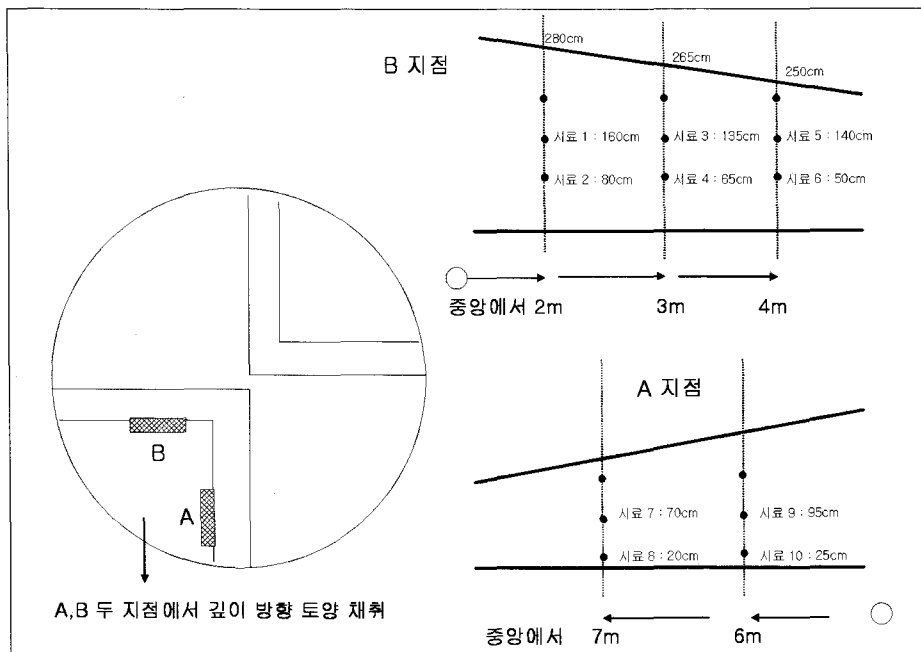


Figure 8. The sampling locations of ancient tomb (Sancheong SaengCho) (See Fig. 6).

墓)으로 추정된다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 고분의 발굴현장 사진과 고분에 설치된 트렌치의 단벽을 나타내었다. Fig. 8에서는 시료채취 위치를 나타내었으며, 고분의 표토와 상단부를 제외한 고분의 단벽에서 방향과 높이에 따라 10개의 위치에서 각각 두 개씩의 시료를 채취하여 총 20개의 시료를 채취하였다. 고분의 표토와 상단부 토양의 경우 식물 뿌리의 영향으로 토질의 변질이 육안으로 확인되어 시료채취에서 제외하였다.

**나. 불포화 매질의 수리전도도**

불포화 매질의 수리전도도 측정은 실험시간이 비교적 짧으며 실험이 용이한 단일단계 유출량 실험법(One-step outflow method)을 이용하였다 [30-33]. 포화수리전도도( $K_s$ )를 적용하여 이론적 불포화 수리전도도( $K(S_e)$ )를 산출하기 위하여 Mualem-van Genuchten 모델(MVG 모델)[30]을 사용하였으며 식 (1)~ 식 (3)에 나타내었다.

$$K(S_e) = K_s S_e^\lambda [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2, m = 1 - 1/n \quad (1)$$

$$S_e = (\theta(h) - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (2)$$

$$h(S_e) = [(S_e^{-1/m} - 1)^{1/m}] / \alpha \quad (3)$$

여기서  $S_e$ 는 불포화 매질의 유효포화도를 나타내며,  $\theta_s$ 와  $\theta_r$ 는 각각 포화함수량과 보유함수량을 나타낸다.  $\lambda, n, \alpha$ 는 실험상수로 결정되는 경험 값이다.

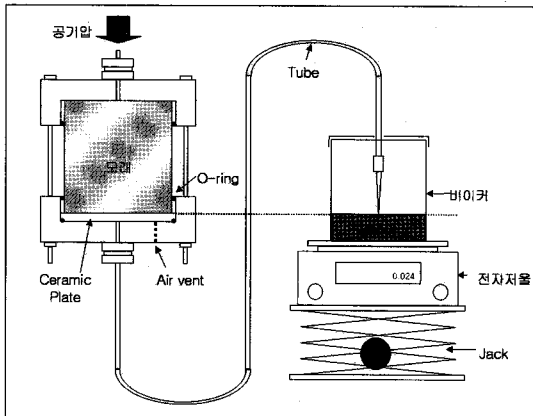


Figure 9. The measurement system for unsaturated soil hydraulic conductivity by one-step outflow method.

단일단계 유출량 실험법을 이용한 불포화 매질의 수리전도도 측정 장치개념을 Fig. 9에 도시하였다.

**다. 불포화 매질의 수리전도도 측정결과**

경남 산청 생초 고분의 발굴현장 10개 지점에서 채취한 시료를 단일단계 유출량 실험(One-step outflow experiment)방법으로 수행한 누적유출량 결과를 Fig. 10에 도시하였으며, 수두에 대한 함수비의 측정결과를 Fig. 11에 각각 나타내었다.

Fig. 11에서 수두에 따른 함수비 측정결과와 시료 채취 위치를 확인하였을 때 시료채취 높이와 방향에 대한 함수비의 상관관계가 있다고 판단할 수 없었다. 이것은 분석대상고분 봉토의 경우 여러 층으로 분할 성토 후 다짐이 진행되었지만, 각 층별로 동일한 토

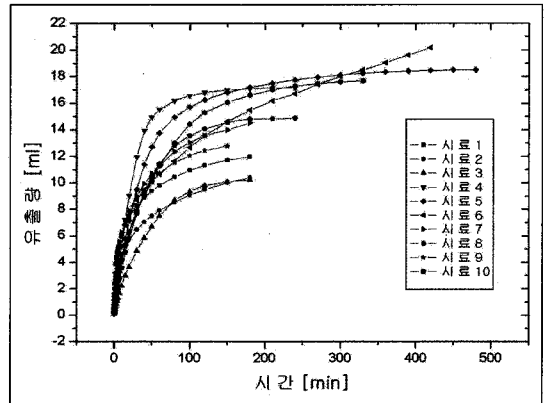


Figure 10. Results of the accumulated outflows with respect to time(See Fig. 8).

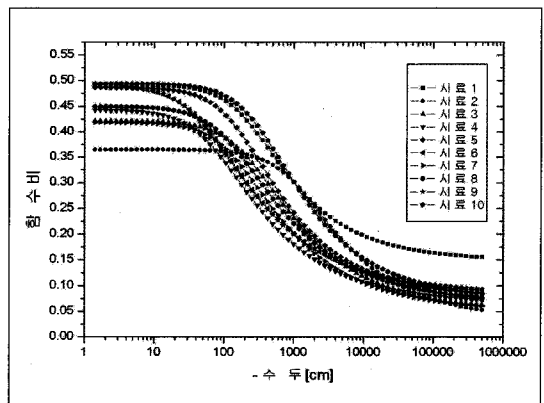


Figure 11. Water content of the unsaturated soil with respect to hydraulic head(See Fig. 8).

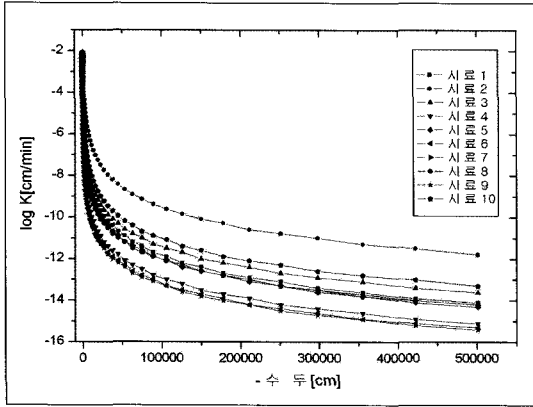


Figure 12. Results of the hydraulic conductivity with respect to hydraulic head(See Fig. 8).

양을 이용하여 성토한 것으로 판단된다. 현장 시료채취 시에도 각 층별 토양의 차이점을 육안으로 구별할 수 없었으며, 봉토 토양은 고분 주변에서 공급한 것으로 판단된다. 따라서, 봉분 성토 시에 배수 및 차수 성능을 극대화하기 위하여 인위적으로 성토하였다고 판단할 수는 없다.

따라서, 고분 봉토시료의 불포화 수리특성은 봉토 전체를 주변의 단일 토양으로 설정하여 평균적 수리특성으로 제시하였다. 실험 결과를 이용한 수리특성 분석에는 HYDRUS 1D 프로그램[34]을 이용하였으며, Table 2에서 시료 측정결과를 평균하여 불포화 토양 수분함수의 최적인자를 제시하였다. 평균화된 고분 봉토의 측정결과를 불포화 시료들의 평균 수리특성은 불포화 토양의 실험적연구[35]와 비교하였을 때 점토와 모래(70:30) 혼합토양과 실트와 모래(70:30) 혼합토양의 중간정도의 특성을 보여주고 있었다.

## V. 결론 및 제언

천층처분 시설에 대한 지표수 침투와 핵종누출 지연을 위한 국내의 연구가 진행되어 왔으나 장기간 수분침투 및 핵종저지능에 대한 문제는 공학적인 방법

Table 2. The Derived optimal parameters of unsaturated soil samples of ancient tomb

$\theta$	$\beta$	$\alpha$ [1/cm]	$n$	$K_s$ [cm/min]
$0.073 \pm 0.031$	$0.455 \pm 0.044$	$0.009 \pm 0.007$	$1.45 \pm 0.033$	$8.04 \times 10^{-3} \pm 3.7 \times 10^{-4}$

으로 해결하지 못하고 있다. 따라서 자연유사 기법의 일환으로 역사시대 고분을 이용한 봉분의 층상구조의 성능분석 연구를 국내 최초로 실시하였다.

국내 최초로 실시된 본 연구에는 연구진행에 있어 많은 어려움이 있었다. 첫째 고분의 발굴조사보고서가 존재하지 않거나 있더라도 고고학 관점에서 수행된 문헌들로 고분의 봉토와 층상구조에 대한 서술이 없는 것이 대부분이었다. 둘째로 고분에 대한 현장시료채취는 고분의 발굴시점에 맞추어 이루어져야 했으며 고분을 훼손하지 않는 범위에서 시료채취가 허용되었고 발굴기관의 협조를 얻는데도 어려움이 있었다.

중저준위 방사성폐기물의 처분과 관련된 국내의 연구로서 와타나베의 연구[10]는 국내 고분의 경우와는 달라 적용하기 어려우며, 국내의 인공함양시험 [20]에서는 고분의 봉토가 석실내부로 빗물이 침투되지 않도록 효과적인 구조를 갖추고 있다는 단편적인 근거를 제시하고 있다.

국내에서 발간된 삼국시대 고분의 발굴조사보고서 중에서 유물의 보존이 양호한 고분에 대하여 검토한 결과, 봉분의 존재여부를 기준으로 봉분이 존재하며 유물의 보존상태가 양호한 고분과 봉분이 존재하지 않지만 유물의 보존이 양호한 고분으로 나누어 볼 수 있었다. 봉분이 존재하며 유물의 보존상태가 양호한 고분들에서는 봉분의 분할조성에 따른 수직점토층의 존재와 봉분의 유사관축 그리고 점토를 이용한 석실의 밀폐흔적이 발견되었다. 또한, 봉분이 존재하지 않지만 유물의 보존이 양호한 경우, 고분의 위치가 구릉지에 위치하거나 석회질 성분의 흔적이 발견된 곳에 위치한 경우가 있었다. 이를 통해 봉분을 이용하여 지표수의 침투를 저지하는 것이 유물과 인골을 장기간 보존할 수 있는 유일한 방법은 아니라는 것을 확인할 수 있었으며, 봉분의 구조와는 별개로 고분의 지형 및 지질적 위치와 고분 내부의 배수시설 등도 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.

또한, 봉분은 거의 남아 있지 않지만 일부 황철석 석실구조의 고분에서 점토밀폐 및 밀봉이 이루어졌지만 인골이나 유기물이 남아있지 않은 경우가 있으며, 인골이 간혹 남아 있는 경우도 있는데 상태가 양호하지 못한 경우도 있으므로 추가적인 발굴조사보

고서의 조사가 필요할 것으로 생각된다. 또한, 고분의 발굴조사보고서를 통하여 조사된 고분 축조방식은 국내 천층처분시설의 처분덮개 폐쇄기술에도 인용할 수 있겠다.

고분 봉분의 층상구조를 위해 경남 산청의 생초 고분군에서 봉토시료를 채취하여 불포화 수리전도도를 측정하였다. 방향과 높이에 따른 총 10개 위치에서 채취한 시료를 분석한 결과 방향과 높이에 따른 수리전도도의 상관관계는 발견할 수 없었으며, 봉토성토 시 토양특성을 고려한 인위적 성토가 이루어지지 않았던 것으로 판단되었다. 평균화된 고분봉토의 측정결과를 점토와 모래 혼합토양과 실트와 모래 혼합토양의 중간정도의 특성을 보여주었다.

역사시대 고분을 통하여 발굴조사보고서 상에 제시된 고분의 축조방식, 다중점토 또는 점토와 사질토를 이용한 유사관측기법의 적용, 자갈 등을 이용한 모세관 방벽현상과 고분 내 배수로 설치를 통한 습도 조절 여부 등을 천층처분 덮개의 설계에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 고분을 이용한 연구를 위해서는 유적 공개회의 등의 고분의 발굴현장이 있을 때 수시로 방문하여 필요한 시료 및 자료를 수집하는 것이 좋겠으며, 원자력분야의 관심사와 필요사항에 대하여 국내 고고학계와의 정보교환이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

**감사의 글**

본 논문은 과학기술부 2005년도 원자력중장기 연구개발계획사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다. 경상남도 생초고분에 대한 시료채취에 협조하여 주신 경상대학교 박물관 여러분과 시료 채취 및 분석을 수행하여 주신 경희대학교 원전운영 고도화기술센터 여러분께도 감사의 뜻을 전합니다.

**참고문헌**

[1] 김창락 외, "천층처분시설의 인공방벽 실증연구- 최종보고서," 2004-환경-단8, TR.A1NC01.S2004.3, 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원(2004)

[2] Jin Beak Park, Se Moon Park and Chang Lak Kim, "Construction and Operational Experiences of Engineered Barrier Test Facility for Near Surface Disposal of LILW," J. of Korean Radioactive Waste Society, 2(1), pp. 23-35(2004).

[3] J. W. Park, C. L. Kim, E. Y. Lee, Y. M. Lee, C. H. Kang, W. Zhou and M. W. Kozak, "Development of a Computer Code for Low-and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Safety Assessment," J. of Korean Association of Radiation Protection, 29(1), pp. 41-48(2004).

[4] J. W. Park, C. L. Kim, J. B. Park, E. Y. Lee, Y. M. Lee, C. H. Kang, W. Zhou and M. W. Kozak, "Development of a Quality Assurance Safety Assessment Database for Near Surface Radioactive Waste Disposal," Journal of the Korean Nuclear Society, 35(6), pp. 567-576(2003).

[5] J. W. Park, K. Chang and C. L. Kim, "A Case Study on the Safety Assessment for Groundwater pathway in a Near-Surface Radioactive Waste Disposal Facility," Journal of the Korean Nuclear Society, 33(1), pp. 62-72(2002).

[6] 이찬구, 이은용, 박세문, 김창락, 염유선, "중저준위 방사성폐기물 천층처분을 위한 처분덮개의 성능실증 시험시설 개념설계," 대한지질공학회지, 11(3), pp. 245-254(2001).

[7] D. W. Lee, C. L. Kim and J. W. Park, "Development of Reference Scenarios Based on FEPs and Interaction Matrix for the Near-Surface LILW Repository," Journal of the Korean Nuclear Society, 33(5), pp. 539-546(2001).

[8] J. W. Park, K. Chang and C. L. Kim, "Important Radionuclides and Their Sensitivity for Groundwater Pathway of a Hypothetical Near-Surface Disposal Facility," Journal of the Korean Nuclear Society, 33(2), pp. 156-165(2001).

[9] K. Chang, J. W. Park, J. H. Yoon, H. J. Choi and C. L. Kim, "Water Balance Evaluation of Final Closure Cover for Near-Surface

- Radioactive Waste Disposal Facility," Journal of the Korean Nuclear Society, 32(3), pp. 274-282(2000).
- [10] K. Watanabe, "Archaeological Evidence Supports A Preferred Soil Cap For LLRW Disposal," Proc. of the 1989 Joint international waste management conference, pp. 567-571, Oct. 22-29, Kyoto(1984).
- [11] 李健茂 外, 義昌 茶戶里遺蹟 發掘進展報告 I, 考古學誌 第1輯, 韓國考古美術研究所(1989).
- [12] 李健茂 外, 義昌 茶戶里遺蹟 發掘進展報告 II, 考古學誌 第3輯, 韓國考古美術研究所(1991).
- [13] 李健茂 外, 義昌 茶戶里遺蹟 發掘進展報告 III, 考古學誌 第5輯, 韓國考古美術研究所(1993).
- [14] 조현종 外, 光州 新昌洞遺蹟-第1次調査概報, 考古學誌 4, 韓國考古美術研究所(1993).
- [15] 國立光州博物館, 光州 新昌洞 低濕地 遺蹟 I (1997).
- [16] 國立光州博物館, 光州 新昌洞 低濕地 遺蹟 II (2001).
- [17] 國立光州博物館, 光州 新昌洞 低濕地 遺蹟 III (2001).
- [18] 國立光州博物館, 光州 新昌洞 低濕地 遺蹟 IV (2002).
- [19] 國立光州博物館, 光州 新昌洞 低濕地 遺蹟 V (2003).
- [20] 구민호, 서만철, "공주 송산리 고분군 누수현상 원인분석을 위한 인공함양시험 및 수치 모델링," The Journal of Engineering Geology, 9(1), pp. 1-15(1999).
- [21] 國立文化財研究所, 韓國考古學事典, pp.63~65(2001).
- [22] 한국토지공사 토지박물관, 연천신답리고분 발굴조사보고서, 토지박물관 학술조사총서, 제16집(2003).
- [23] 東亞大學校 博物館, 昌寧校洞古墳群(1992).
- [24] 嶺南埋藏文化財研究院, 高靈池山洞30號墳, 嶺南埋藏文化財研究院, 學術調査報告 第13冊(1998).
- [25] 釜山大學校博物館, 金海禮安里古墳群 I, 釜山大學校博物館遺蹟調査報告 第8輯(1985).
- [26] 釜山大學校博物館, 金海禮安里古墳群 II, 釜山大學校博物館遺蹟調査報告 第15輯(1993).
- [27] 慶星大學校博物館, 金海大成洞古墳群 I, 慶星大學校博物館 研究叢書 第4輯(2000).
- [28] 慶星大學校博物館, 金海大成洞古墳群 II, 慶星大學校博物館 研究叢書 第7輯(2000).
- [29] 慶星大學校博物館, 金海大成洞古墳群 III, 慶星大學校博物館 研究叢書 第10輯(2003).
- [30] J. B. Kool, J. C. Parker and M. Th. Van Genuchten, "Determining Soil Hydraulic Properties for One-step Outflow Experiments by Parameter Estimation: I. Theory and Numerical Studies," Soil Sci. Soc. Am. J., 49, pp. 1348-1354(1985).
- [31] J. C. van Dam, J. N. M. Stricker and P. Droogers, "Inverse Method for Determining Soil Hydraulic Functions from One-step Outflow Experiments," Soil Sci. Soc. Am. J., 56, pp. 1042-1050(1992).
- [32] 이수홍, "원자력시설 해체와 방사성폐기물 처분의 불포화토양 특성영향평가," 석사학위논문, 경희대학교 원자력공학과(2004).
- [33] 이수홍, 황주호, 이재민, 김창락, "One-Step Outflow Method", 2003 한국 방사성폐기물학회 추계학술발표회 논문집, Vol.1, No. 2, 제주대학교, 11월 27-29일(2003).
- [34] J. Simunek, M. Sejna and van Genuchten, "The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media," U. S. Salinity Laboratory, U. S. Dept. of Agriculture(1998).
- [35] Jin-Beak Park, Joo Wan Park, Chang-Lak Kim and JooHo Hwang, "An experimental study on the hydraulic and transport properties of unsaturated soil for the safety assessment of low- and intermediate-level radioactive waste disposal facility," submitted for publication to J. of the Korean Radioactive Waste Society(2005).