

## 개방된 고분내부의 열 환경 수치모사

이 금 배<sup>†</sup>, 윤 영 목\*, 전 회 호\*, 박 진 양\*, 고 석 보\*  
공주대학교 기계자동차공학부, \*공주대학교 기계공학과 대학원

### Numerical Simulation of the Thermal Environment inside an Opened Tomb

Kum-Bae Lee<sup>†</sup>, Young-muk Youn\*, Hee-Ho Jun\*, Jin-Yang Park\*, Seok-Bo Ko\*

**ABSTRACT:** In recent years the importance of the preservation of cultural artefacts like ancient tombs has been widely accepted domestically and internationally as the quality of life improves. However not much technical attention has been paid for the facilities and systems to preserve those artefacts. Even the general understanding of the preservatory environment of the underground space as tombs is poor. As a part of the present study, the temperature and relative humidity inside a selected artefact, Shinkwan-ri tomb, have been monitored for a year round by the present author to improve the understanding of the indoor thermal environment, is pursued to provide a predictive tool of numerical modelling of Shinkwan-ri tomb the opened underground space thermal environment. In this study, predictive numerical modelling of Shinkwan-ri tomb using the Computational Fluid Dynamics, calculate the velocity and temperature distribution and offer basic data which are necessary for the best fitted design of tomb air-conditioning device.

**Key words:** Conservation(보존), Temperature(온도), Thermal environment(열환경), Tomb(고분), Air-conditioning(공기조화)

#### 1. 서 론

문화재는 예술작품과 고적으로 구분되며 지금까지는 주로 고고학적 가치를 위주로 검토되어 왔으나 최근에는 문화재의 보존에 많은 관심이 집중되고 있다. 대부분의 이동 가능한 문화재의 경우에는 박물관에 수장하고 이동이 여의치 않은 경우에는 현장에 보존하게 된다.

이 중 고분은 독특한 경우로서 대부분의 유물이나 유품들이 고분에서 출토될 뿐만 아니라 고분 그 자체가 역사성과 함께 예술성을 포함하여

보존대상이 된다. 국내의 경우, 경주의 석굴암이나 천마총, 공주의 송산리 고분군, 그리고 부여의 능산리 고분군 등이 각각 신라와 백제시대의 대표적 유적이나 경주 석굴암의 경우 완전개방 상태로 일반에 공개되다가 결로에 따른 석재표면의 열화문제로 인하여 현재 공기조화기를 가동한 상태에서 부분적으로 공개하고 있으며, 무령왕릉의 경우에도 보존상의 문제가 대두되어 현재는 연구용으로만 개방되어 있는 상태이다. 이와 같은 현상은 문화재의 상품성에 치중한 나머지 문화재의 장기보존에 관한 고려, 즉 일반관람객들에게 개방한 이후 계절적 기후 환경변화 및 대기 중의 각종 오염물질의 농도 변화와 출입자의 인체 대사열 및 호흡시 발생하는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 등의 영향에 대한 종합적인 연구가 부족하였기 때문이

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel.: +82-41-850-5812; fax: +82-41-854-1449

E-mail address: kumbea@kongju.ac.kr

다. 고분 내 온도 및 습도를 조절하기 위한 공조 시설은 고분의 물리적인 특징과 대기 유동 조건 등 다양한 변수를 고려하지 못하고 일반적인 공조시설에 준하는 수준으로 시공한 결과, 많은 보완점이 도출되었고 향후 고분의 유지, 보존에 기존의 공조개념은 물론 전산유체역학을 이용하여 고분 내 기류 유동 및 온도, 습도변화에 대한 정밀한 연구와 국내 산업의 발전으로 점차 증가하는 각종 대기오염물질에 의한 고분 내 화학적인 변화 측정 등 다양한 첨단기술이 접목되어 최신의 고분 유지, 보전기술이 개발되어야 할 것이다. 그러므로 본 논문에서는 공주시 신관동에 소재한 고분을 대상으로 실측 자료를 이용하여 기초적인 연구인 고분 내 기류 유동에 따른 기류 및 온도 분포를 전산유체역학을 이용하여 계산 하여 개방된 고분 내부의 온도 및 기류 예측에 관한 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 신관리 고분의 보존 환경 검토

일반적으로 고분의 석실내부 횡혈(橫穴)·동굴 내부의 환경은 대개 바깥공기와 격리되어 있으며, 바깥 기온의 변동에 비하여 내부 변화의 폭은 좁아 내부 쪽이 보다 안정된 보존환경을 유지한다. 대개 석실 내의 온도와 그 변동 폭은 외기 온도, 석실의 깊이 그리고 토양의 열전도율·열용량에 의해서 결정되는 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup>

### 2.1 신관리 고분 개요

본 연구 대상인 신관리 석실고분(시도 기념물 제 7호는 1967년에 발견된 백제시대의 무덤이다<sup>(2,3)</sup>). 구조는 현실의 크기가 남북 273cm, 동서의 너비가 125cm로 장방향을 이루고 있으며, 현실의 경우 북쪽에 상침형식의 5각형 대관석 1매를 세우고 109cm의 높이에서 절각이 이루어져있는데 이곳에 대관석의 천정석을 올려 기대어 묘실의 정부에서 합쳐지는 소위 합장형 천정을 이루고 있다(Fig. 1). 높이는 상면에서 정점까지가 1.5m이다. 남벽의 입구는 동서로 석을 세우고 바닥에는 중방을 설치하고 위에는 삼각의 미석을, 연도는 묘실의 동서 너비에 1매의 천정석을 올려 평천정으로 꾸민 형식이다. 현실입구(높이: 64cm, 폭: 79cm)는 원래 석비로 폐쇄하였으나, 현재는

보존측면에서 돌문을 개방해 놓은 상태이다. 연도의 길이는 1.6m이다. 대부분의 개방된 고분과는 달리 신관리 고분은 입구가 개방된 상태에서 보존되고 있다는 점이 특기할 만한 점이라고 할 수 있다.

### 2.2 온도 및 습도 측정

본 조사에서는 고분내부의 온습도 공간분포를 확인하기 위하여 현실내부 5위치 및 외기에 대하여 온습도를 측정하였으며, 고분 내부의 측정 위치는 Fig. 2 및 Table 1에 나타내었다. 즉, 현실의 남북방향 중심선상에서 입구로부터 1m 및 2m지점에 2개의 스탠드를 설치하고, 바닥으로부터의 높이는 각각 0.1m, 0.7m 및 1.3m로 설정하였다. 한편 외기 기상상태 측정을 위하여 고분의 부에 백엽상을 설치(지상1.5 m)하여 온습도를 측정하였다. 측정센서모듈(제작사 : 이태리 Delta사, 모델명 : HD 9008T) 내에는 온도 및 습도센서가

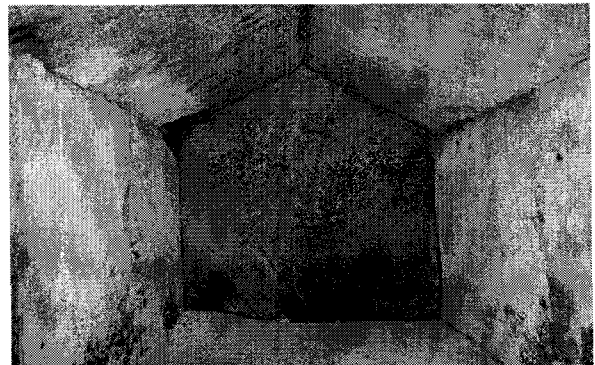


Fig. 1 Inside view of Shinkwan-ri tomb

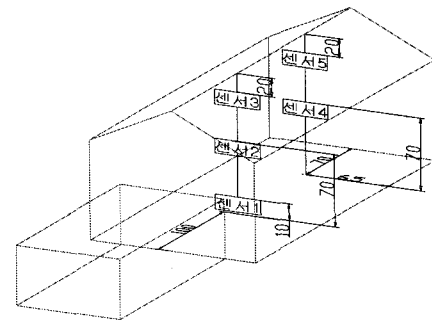


Fig. 2 Measurement locations

Table 1 Measurement locations

Channel No.	Location	
	Depth from the entrance(cm)	Height from the ground(cm)
1	100	10
2	100	70
3	100	130
4	200	70
5	200	130
6	Outdoor	

포함되어 있으며, 한국표준과학연구원의 교정시험을 통하여 정도를 확인하였다.

### 2.3 신관리 고분의 온도 측정결과

#### 2.3.1 연간 온습도 분포

Fig. 3과 Fig. 4는 신관리 고분의 1년(2003년

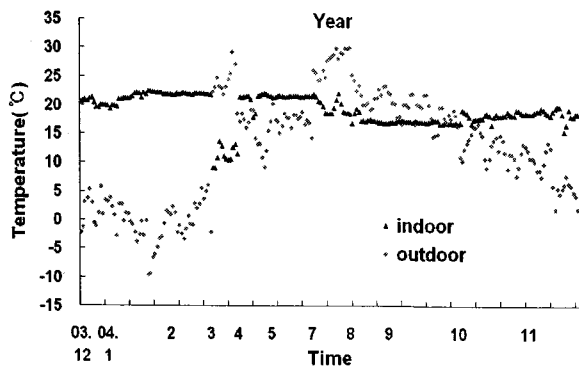


Fig. 3 Year Average Temperature (2003/12-2004/11)

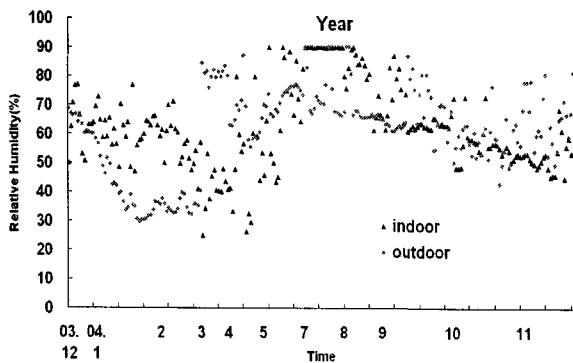


Fig. 4 Year Average Relative Humidity (2003/12 - 2004/11)

12월부터 2004년 11월)간 온·습도 분포이다.

우선 온도 분포는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 외기 온도는 동계에는 낮고 하계에는 높음을 나타냈으나 내기 온도는 17°C에서 23°C로 외기 온도에 비해 편차가 적음을 알 수 있다.

습도분포는 Fig 4에서 보는바와 같이 외기습도 분포는 동계에는 낮고 하계에는 높음을 나타내고 있으며 내기습도 분포는 하계에는 기후의 영향을 받아 습도가 높고 동계 및 간절기에는 하계에 비해 다소 낮음을 알 수 있다.

#### 2.3.2 하절기 및 동절기 온도분포

Fig. 5는 2003년 하절기중 가장 더웠던 8/1일 13시부터 15시까지의 센서별 평균온도 자료이다. Fig 5에서 외기(채널 6)에 따른 고분 내 온도는 바닥근처(채널 1), 중간(채널 2 및 4) 그리고 천정근처(채널 3 및 5)의 순으로 크게 나타났으며 입

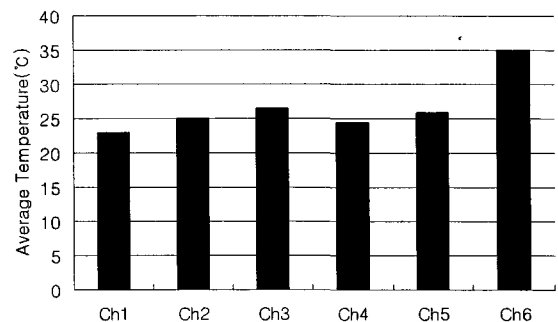


Fig. 5 Measured Temperature in summer season (2003/8/1/13:00 - 8/1/15:00)

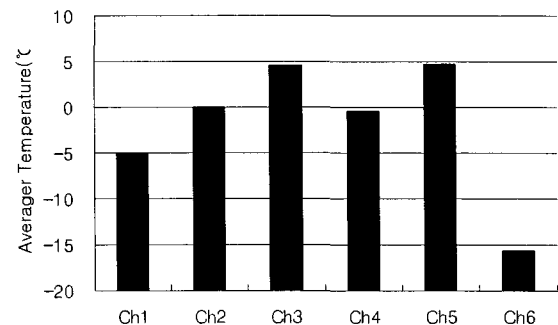


Fig. 6 Measured Temperature in winter season (2003/1/22/1:00 - 1/22/3:00)

구로부터의 거리에 따른 변화(채널 2와 4, 채널 3과 5)는 입구로부터 거리가 멀수록 온도가 더 낮은 것으로 나타났다.(채널 2와 4, 채널 3과 5)

Fig. 6은 2003년 동절기중 가장 추웠던 1/22일 새벽 1시부터 3시까지의 채널별 평균온도 자료이다. Fig. 6에서 외기(채널 6)에 따른 고분 내 온도는 하절기와 마찬가지로 바닥근처(채널 1), 중간(채널 2 및 4) 그리고 천정근처(채널 3 및 5)의 순으로 크게 나타났으며 입구로부터의 거리에 따른 변화(채널 2와 4, 채널 3과 5)는 입구로부터 거리가 멀수록 온도가 더 낮은 것으로 나타났다.(채널 2와 4, 채널 3과 5)

이상의 2개의 자료를 수치모사 결과 비교를 위한 자료로 선정하였다.

### 3. 수치모사

#### 3.1 지배방정식<sup>(4)</sup>

##### 3.1.1 질량보존의 방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

##### 3.1.2 운동량보존의 방정식

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho g_i \beta (T - T_0) \quad (2)$$

##### 3.1.3 에너지보존의 방정식

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} k \frac{\partial T}{\partial x_j} + \dot{q} \quad (3)$$

##### 3.1.4 난류에너지 및 난류소산률 방정식

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_S + G_T - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_S + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (5)$$

### 3.2 수치모사 방법

수치해석을 위하여 범용 열-유체 해석용 코드인 SC/Tetra V.5를 사용하였다.

수치계산을 위한 모형은 Fig. 7의 모형으로 3차원 형상이며, 외기온도와 외벽면(stone)으로부터 50~100cm 안쪽의 온도경계조건을 갖는 자연대류의 문제로 접근하였다. 계산영역은 외기와 고분내부를 포함하는 공기영역과 고분을 둘러싸고 있는 돌(화강암)을 포함하며 대류 및 전도열전달을 함께 고려하였다. 이에 수치계산은 3차원 형상, 고분 내·외부의 온도 차에 따른 자연대류 현상과 화강암에서 전도열전달을 고려하고, 유동장은 정상상태의 난류유동으로 난류모형은 Standard k-ε Equations을 사용하여 계산하였다.

### 3.3 형상 및 격자

개방된 고분 내부의 수치모사를 위해서는 실제 고분의 형상 및 기초 자료가 필요하다. 수치해석을 수행하기 위한 고분모형을 CATIA를 이용하여 실크기의 3차원 모델링으로 하였다. Fig 7에 대한 격자계는 Fig. 8에 나타내었으며, 이는 580,000개의 셀로 구성된다.

### 3.5 경계조건

수치계산의 경계조건은 하절기와 동절기로 나누어, 하절기의 경우에는 외기온도가 가장 높은 오후 1시부터 오후 3시까지의 외기 평균온도 35.5℃로 대표하였고, 고분 내 벽 온도 22℃로 설정하였다. 한편, 동절기의 경우에는 외기온도가 가장 낮은 오전 1시부터 오전 3시까지의 외기 평균온도 -15.5℃로 설정하였고, 고분 내 벽 온도는 10℃로 설정하였다. 또한 고분 내벽을 둘러싸고 있는 화강암의 물성치는 열전도도는 2.79 W/m·K, 비열은 775 J/kg·K로 적용하고, 벽의 두께는 50cm~100cm로 하였다.

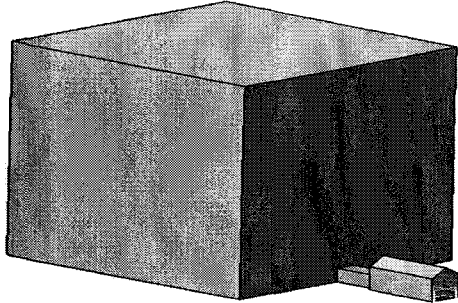


Fig. 7 3D geometry of Shinkwan-ri tomb

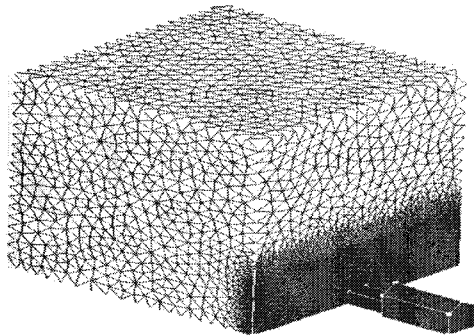


Fig. 8 Mesh with 580,000 cells for Tomb

#### 4. 수치해석 결과 및 분석

Fig. 9부터 Fig. 12는 입구가 개방된 고분 내에서의 온도분포 특성을 검토하기 위하여 수행된 신관리 고분에 대한 수치모사의 결과로서 고분 중앙 단면에서 기류속도 및 온도분포를 나타낸다.

##### 4.1 하절기

하절기의 경우 우선 기류속도 분포(Fig. 9)를 보면 온도차에 의하여 외부의 따뜻한 기류가 연도를 거쳐 현실의 상부까지 도달하며, 상대적으로 낮은 현실내부 벽면의 영향으로 식어진 공기는 현실과 연도의 바닥을 통하여 외부로 빠져나가며, 입구 쪽 벽면에 부딪치는 구조적인 영향과 계속적으로 유입되는 입구 기류에 의하여 출구로 바로 배출되지 못하고 고분 내에서 재순환하게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 기류의 순환상태에 따라 온도분포(Fig. 10)를 보면 고분내부 현실의

온도가 하단의 온도보다 더 높는데 이는 고분을 통하여 나가는 낮은 온도의 기류가, 고분으로 유입되는 상대적으로 높은 온도 기류 밑으로 들어가 순환하기 때문이다. Fig. 10에서 나타난 온도 분포는 측정된 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

##### 4.1 동절기

동절기(Fig. 11) 경우 차가운 외기와 고분내부의 온도차에 의한 기류이동은 연도와 현실의 바닥으로 들어와 현실의 내벽까지 진출한 후 상승하다가 상대적으로 높은 현실내부 벽면의 영향으로 온도가 상승하고 현실과 연도의 상부를 통해 외부로 빠져나가게 된다. 또한 Fig. 9와 Fig 11의 기류속도 분포장에서 알 수 있듯이 고분 입구에서의 유동은 유입되는 기류와 유출되는 기류로 인하여 기류의 속도가 큼을 알 수 있다. 상대적

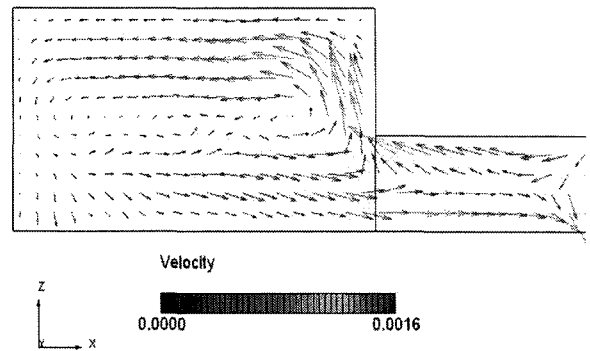


Fig. 9 The velocity distribution at  $y=0$  for Tomb inside in summer season

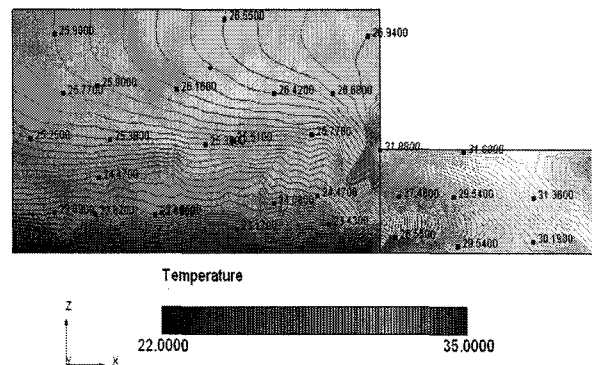


Fig. 10 The temperature distribution at  $y=0$  for Tomb inside in summer season

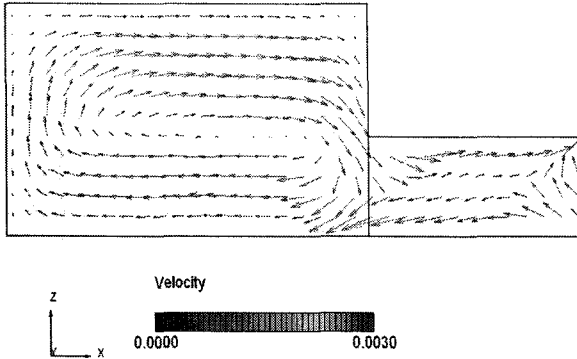


Fig. 11 The velocity distribution at  $y=0$  for Tomb inside in winter season

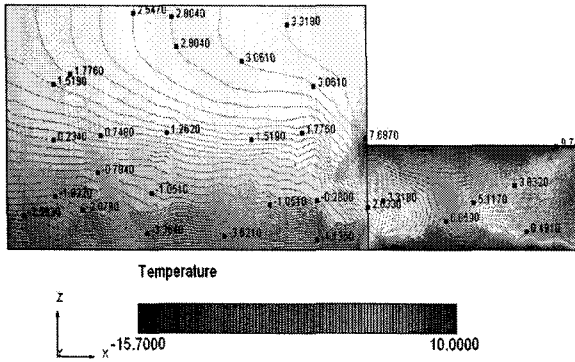


Fig 12 The temperature distribution at  $y=0$  for Tomb inside in winter season

으로 고분 내에서의 기류 유동은 작은 편이다. 이러한 이유로 출구가 열려있는 구조의 고분은 유입되는 기류가 고분 안쪽으로 빠져나갈 수 없는 구조인 경우 다시 출구 쪽으로 빠져 나가야하기 때문에 입구 터널 쪽에서 고분 벽의 건조가 가속화될 가능성이 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10과 Fig. 12의 온도 분포장을 보면 고분 내부에서 상단의 온도가 하단보다 더 높는데 이는 고분을 통과하여 배출되는 낮은 온도의 기류가, 고분으로 유입되는 상대적으로 온도가 높은 기류 밑으로 들어가기 때문이다. 따라서 입구 터널과 고분이 만나는 지점에서도 상단과 하단 사이에 온도차가 발생하게 되고 이로 인하여 고분 내부의 습도 차이가 발생할 수 있는 원인이 될 수 있다.

Table 2와 Table 3은 원격시스템에 의해 측정된 고분 내 온도와 수치모사에 의해 얻어진 온도를 계절별로 비교한 것이다. 하계 온도비교

Table 2 Comparison Measured Temp. with Numerical prediction Temp. in summer season

Channel No.	Temperature(°C)	
	Measured	Numerical prediction
1	22.92	22.94
2	24.94	26.01
3	26.43	26.82
4	24.41	26.13
5	25.95	26.53
6	Outdoor	

Table 3 Comparison Measured Temp. with Numerical prediction Temp. in winter season

Channel No.	Temperature(°C)	
	Measured	Numerical prediction
1	-5.06	-3.65
2	-0.02	-0.84
3	4.60	3.76
4	-0.36	-0.82
5	4.80	3.82
6	Outdoor	

(Table 2)를 보면 측정된 온도 값과 수치 계산된 온도 값의 차이는 최소 0.02°C에서 최대 1.72°C로 거의 일치하는 것으로 나타났다. 또한 동계 온도비교(Table 3)를 보면 측정된 온도 값과 수치 계산된 온도 값의 차이는 최소 0.46°C에서 최대 1.41°C로 하계와 마찬가지로 거의 일치함을 알 수 있다.

## 5. 결론

문화재적 가치를 지닌 고분의 장기보존을 위하여 고분용 공기조화시스템을 설치하는 것을 전제로 고분내부의 실내 환경 자료를 확보하고자 신관리 석실고분에 대하여 원격계측시스템을 구성하여 온도 및 습도를 측정하였다. 측정기간은 2003년 12월부터 2004년 11월까지이며, 측정위치는 고분 내부의 5곳과 외기 1개소로서 총 12채널의 자료를 확보하였다. 이 자료를 바탕으로 기초적 연구인 고분 내 기류 유동에 따른 기류 및 온

도분포를 전산유체역학을 이용하여 계산하여 개방된 고분 내부의 온도 및 기류 예측에 관한 자료를 제공하고자 하며 본 연구를 통하여 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 개방된 상태로 보존중인 신관리 고분의 경우 현실 내부의 위치에 따른 온도 변화가 뚜렷하게 확인되었다.

(2) 고분을 통하여 나가는 낮은 온도의 기류가, 고분으로 유입되는 상대적으로 높은 온도 기류 밑으로 들어가 순환하기 때문에 고분내부 현실의 온도가 하단의 온도보다 더 높은 것이 확인 되었다.

(3) 고분 입구에서의 유동은 유입되는 기류와 유출되는 기류로 인하여 기류의 속도가 커짐을 알 수 있고, 이러한 이유로 출구가 열려있는 구조의 고분은 유입되는 기류가 고분 안쪽으로 빠져나갈 수 없는 구조인 경우 다시 출구 쪽으로 빠져 나가야하기 때문에 입구 터널 쪽에서 고분 벽의 건조가 가속화될 가능성이 있음을 알 수 있다

(4) 고분 내부에서 상단의 온도가 하단보다 더

높은데 이는 고분을 통과하여 배출되는 낮은 온도의 기류가, 고분으로 유입되는 상대적으로 온도가 높은 기류 밑으로 들어가기 때문에 상단과 하단 사이에 온도차가 발생하게 되고 이로 인하여 고분 내부의 습도 차이가 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다.

(5) 고분이 개방되어 있는 경우 고분내의 심한 온도차가 발생하므로 향후 공기조화 장치의 설계 시 충분히 이 점을 고려하여 고분의 보존에 악영향이 없도록 하여야 한다.

(6) 개방형 고분에 대한 수치해석의 예측 기법에 대해 제시하였고, 고분내의 온도차에 의한 습도차이에 대한 연구가 더 필요하다고 사료된다.

#### 참고문헌

1. 사와다 마사야키, 2000, 문화재보존과학개설, 서경문화사, ISBN 89-86931-32-X 93400.
6. 윤용혁, 1995, 공주의 역사와 문화, 공주대학교 박물관·충청남도 공주시.
7. 김기웅, 1995, 고분, 대원사.
4. SC/Tetra V5 User's Guide