



지하공간의 열·수분특성

박경순

동의대학교 건축설비공학과

1. 서론

최근 건축기술의 발달, 도시에서의 토지의 유효 이용, 교통, 주거 및 저장 등과 같은 다양한 이용 목적을 가진 지하공간 또는 지하구조물이 다수 건설되고 있다. 이와같은 지하공간은 내진성, 방음성, 항온성, 고단열성 등의 에너지절약에 유효한 특성을 가지고 있다. 그러나 지하공간은 결로, 지하수에 의한 누수, 고습도 등의 전형적 문제도 동시에 내포하고 있으며, 그 성상또한 단순하지 않다.

지하공간이 가진 열환경적 문제점과 에너지절약적 특성을 제대로 파악하기 위해서 지하공간의 실내 온/습도환경과 열부하에 크게 영향을 미치는 주변지반에 의한 열·수분의 이동을 파악할 필요가 있다. 지반은 다공질체로 강우 및 지하수와 같은 수분의 영향을 크게 받는다. 다시말해, 지반내의 함수상태에 의해 열·수분 이동에 관련된 각 재료의 물성치도 크게 변화하게 된다. 그리고 지표면 경계에서의 증발, 응축 등의 상변화에 의한 영향도 크며, 상태변화에 따른 물성치의 변화로 인한 비선형성도 커지게 된다. 그밖에도 지반으로부터 지하구조물의 구체를 통해 유입되는 열과 수분이 결로발생 및 지하공간의 고습도 환경 조성에 미치는 영향도 크다.

이와같은 지하공간 및 지하구조물의 열·수분 환경을 적절히 파악하기 위해서는 열·수분의 양측의 이동을 동시에 고려할 필요가 있으며, 지하공간을 둘러싼 주변지반과 지하구조물의 구체, 구체와 지하공간을 하나의 연성계로서 취급할 필요

가 있다.

본 지면을 빌어 지하구조물 및 주변지반의 열·수분성상의 연간실측결과를 이용한 단순열전도 해석과 열·수분동시이동 해석결과의 비교를 통해 지하공간의 열·수분특성 및 비선형해석 사례를 소개하고자 한다.

2. 지하공간 및 주변지반의 열·수분 성상

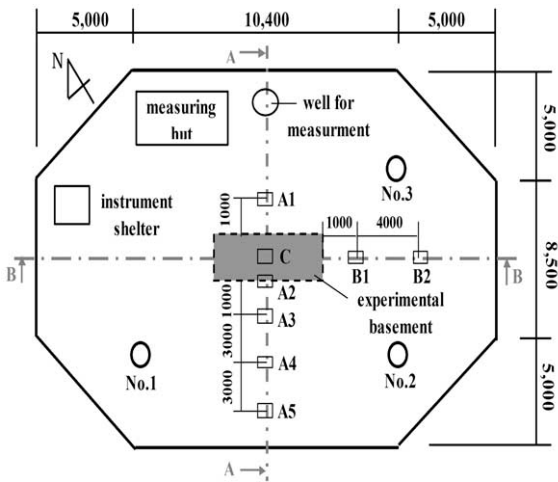
지하공간 및 주변지반내의 열·수분성상을 파악하기 위해 1년간의 장기실측을 수행한 결과를 소개하고자 한다. 표 1과 그림 1~4에 실측대상인 지하구조물 및 실측조건 등을 나타낸다. 각 측정대이터는 1분간격으로 연속취득하였으며, 전기온풍히터를 설치하여 실내온도를 연중 22℃로 유지하는 내부발열조건하에서 실측을 수행하였다. 또한 환기팬을 이용한 환기를 수행하였으며, 이산화탄소를 이용한 트레서가스 저감법을 이용한 환기실측을 주단위로 수행한 결과 평균환기회수는 2.2 회/h 인 것으로 파악되었다. 그외 자세한 실측결과는 참고문헌을 참조 바란다.

2.1 단순열전도 수치해석

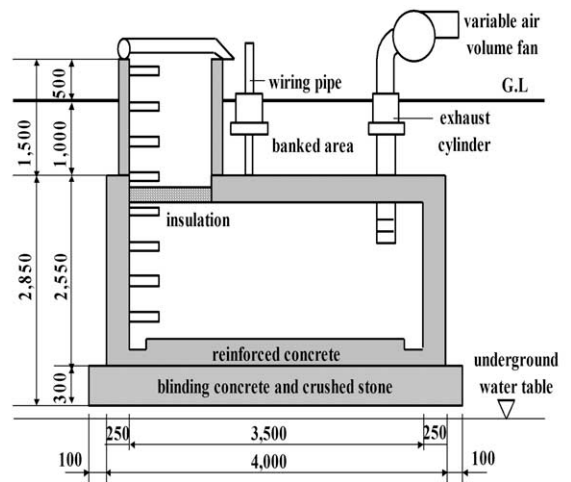
장기실측결과를 바탕으로 건축물의 일반적인 열부하해석에 활용되고 있는 단순열전도 방정식을 활용한 해석을 수행하여 지하구조물 및 주변지반의 열적예측성능을 확인하였다. 그림 5와 표 2에 단순열전도 해석조건을 나타낸다. 표에 나타난 바와같이 일반적으로 콘크리트 및 토양의 물성치는

<표 1> 실측관련 제반조건

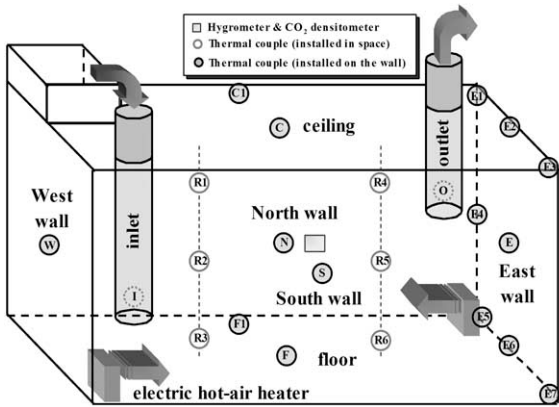
Measurement item	Appliance	Location	
Outdoor air temperature & humidity	Thermal couple & Hygrometer	Instrument shelter	
Indoor air temperature & humidity	Thermal couple & Hygrometer	Basement	
Solar radiation & absorption ratio	Pyrheliometer & Albedometer	Upper part of the ground	
CO ₂ concentration	CO ₂ densitometer	Basement	
Electric consumption	Wattmeter	Basement	
Underground water table	water-level gauge	Well for measurement	
Wind velocity, direction, precipitation	Anemoscope, anemometer & rainfall meter	Vicinity of the experiment area	
Temperature in/on the ground	Thermal couple	Measurement point (See Fig.1)	Depth from ground level [unit: m]
		A1, B1, B2	0.5, 1.0, 2.0, 3.0
		A2, A3, A4, A5	0, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0
Water chemical potential in the ground	Tensiometer	C	0.7
		A1	1.0
		A2, A4, B2	0.1, 1.0, 2.0, 3.0



[그림 1] 실험지하구조물 평면도 (단위:mm)



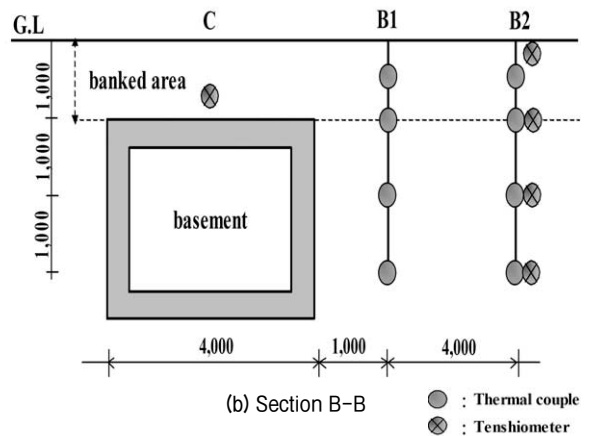
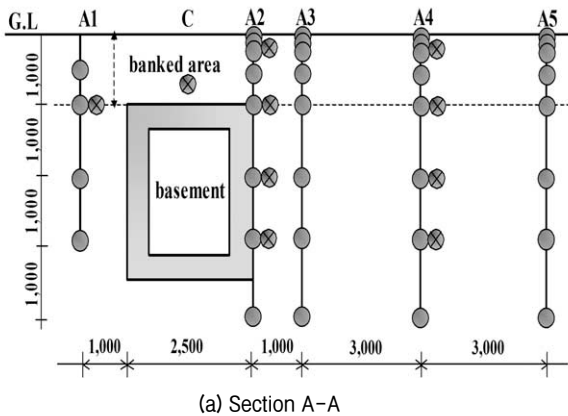
[그림 2] 실험지하구조물의 단면도 (단위:mm)



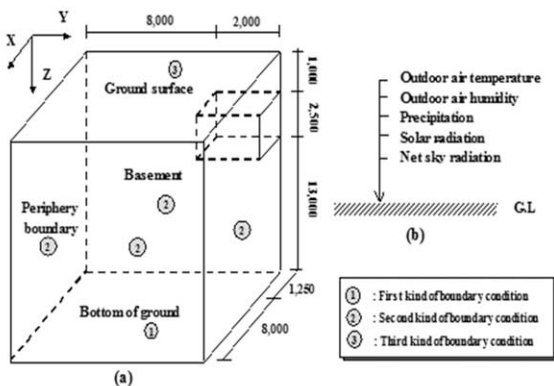
[그림 3] 실험지하구조물내 실측현황

< 표 2 > 단순열전도 해석조건 및 물성치

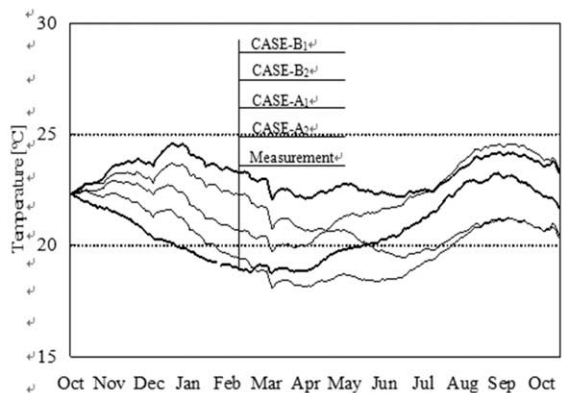
Outdoor condition		Outdoor air temperature and solar radiation (measured value)			
Ventilation rate		2.2 times per hour			
Heat transfer coefficient	Indoor air	9.30 [W/m ² K]			
	Outdoor air	23.26 [W/m ² K]			
CASE	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	
Solar absorption ratio		0.83	-	0.83	-
Emissivity		0.9	-	0.9	-
Thermal conductivity	Soil	3.14 [W/mK]		2.09 [W/mK]	
	Concrete	1.86 [W/mK]		1.50 [W/mK]	
Heat capacity	Soil	2637.7 [kJ/m ³ K]		2351.9 [kJ/m ³ K]	
	Concrete	3140.1 [kJ/m ³ K]		2280.0 [kJ/m ³ K]	
	Air	1256.0 [J/m ³ K]			



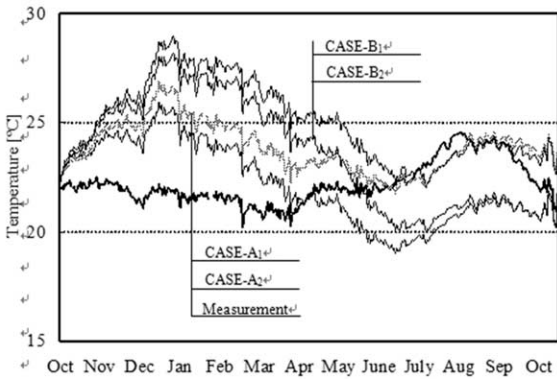
[그림 4] 실험지하구조물 주변지반내 열/수분 실측현황



[그림 5] 수치해석범위 및 경계조건



[그림 6] A2의 G.L.-3m지점의 연간 온도변화 (그림4 참고)



[그림 7] 실험지하구조물의 실내온도변화

Heat capacity of air	$C\gamma$ [J/m ³ K]	1256.0
Moisture capacity of air	$C'\gamma'$ [kg/m ³ Pa]	7.5×10^{-6}
Heat transfer coefficient [W/m ² K]	Indoor air α_i	9.30
	Outdoor air α_o	23.26
Moisture transfer coefficient [kg/m ² s Pa]	Indoor air α'_{mi}	2.85×10^{-8}
	Outdoor air α'_{mo}	1.14×10^{-7}
Solar absorption ratio and emissivity		0.83 [-]/0.9[-]

Subscript *i*: indoor air *o*: outdoor air

[그림 8] 열수분이동계수 및 물성치

20°C/R.H80% 상태의 물성치를 활용하지만, 본 해석에서는 지표면 흡수율, 콘크리트 및 토양이 20°C/R.H80% 경우, 콘크리트 및 토양이 완전 포화상태인 경우로 나누어 각각의 물성치를 적용하여 해석을 수행하였다.

그림 6에 지하구조물 주변지반내의 온도변화 실측치와 단순열전도 해석 결과의 비교를, 그림 7에 지하구조물내 실내온도의 실측치와 계산치의 비교를 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 지상 건축물과 달리 수분의 영향을 크게 받고 비선형성이 강한 지하구조물과 주변지반에 대한 열환경 예측수법으로 단순열전도해석이 적합하지 않은 것을 확인 할 수 있다.

2.2 열·수분 동시이동을 고려한 수치해석

지하구체 및 지반의 물성치의 비선형성에 크게 관계하는 수분(기상, 액상수분)의 영향을 고려하기 위해 1978년 Matsumoto교수가 제안한 열·수분 동시이동 방정식 및 그림 8의 해석조건을 활용하여 수치해석을 수행하였다.

그림 9, 10에 실험지하구조물의 연간실내온도/습도의 실측치와 계산치의 비교를, 그림 11에 동계 대표일 하루동안의 실내온도 실측치와 계산치의 비교를 나타내고 있다. 그림 12는 실험지하구조물의 실내측 벽면에서의 계절별 열류 및 수분

류의 흐름을 나타내고 있으며, 지상에 가까운 상부는 열류의 영향을, 바닥면은 수분류의 영향을 많이 받고 있음을 확인 할 수 있다. 실험지하실 구체를 통한 연평균 흡습량 2.05[kg/day], 방습량 2.88[kg/day]로 분석되었다. 그림 13에 실험지하구조물의 콘크리트 벽체표면에서의 연간 열전도율 변화를 나타내고 있다. 그림에서 같이 나타난 콘크리트가 포화상태 또는 20°C/R.H80% 상태의 물성치와 비교해도 전도율의 변화폭이 크고 비선형성이 강한 것을 확인 할 수 있으며, 이러한 차이가 단순열전도 방정식을 이용한 해석과 비선형 열수분 동시이동방정식을 이용한 해석과의 결과값의 차이를 나타내는 원인으로 판단된다.

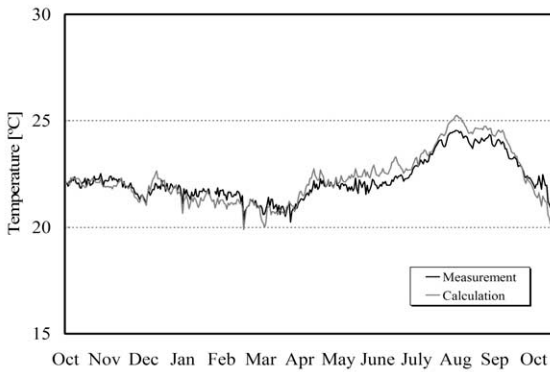
그림 14, 15에 지하실 구체 각 부분의 온도 및 함수율 분포를 나타내고 있으며, 매설깊이 토양내 수분의 영향 및 실내발열 등의 영향으로 계절별 부위별 함수율의 변동폭이 큰 것을 알 수 있다.

그림 16, 17에는 지하구조물 주변 지반내 각 측정지점의 온도 및 함수율 측정치와 수치해석 값과의 비교를 나타내고 있으며, 지하구조물의 실내온/습도 예측과 마찬가지로 상당히 정밀한 예측이 가능함을 나타내고 있다.

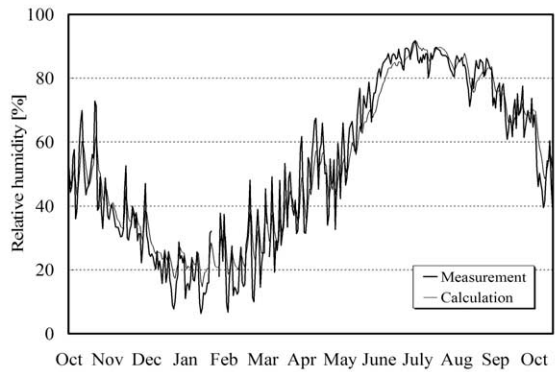
그림 18은 실험지하구조물내에 실내온도유지 목적으로 설치된 오픈전열히터에 의한 월별 전력 사용량의 적산치와 단순열전도 해석 및 비선형 열수분 동시이동을 고려한 해석치와의 비교를 나

타내고 있다. 지하구조체 및 지반의 열환경 예측 결과와 마찬가지로 CASE-A1,A2,B1,B2의 해석 결과는 지하구조물의 열부하 예측수법으로 적용하기 어렵다는 것을 나타내고 있지만, 열수분 동시이동을 고려한 비선형 해석의 경우 연간 정밀 예측이 가능함을 나타내고 있다. 또한, 표 3에 나

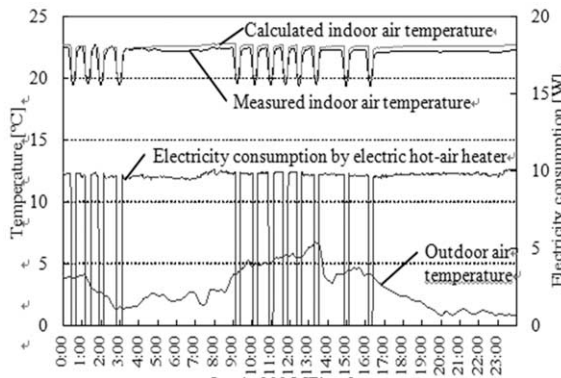
타낸 바와같이 연간 열부하 적산치, 피크부하 및 발생시기의 예측에 있어서도 단순열전도 해석의 결과는 열부하예측의 절대값과 발생시기가 크게 상이함을 나타내고 있으며, 비선형 해석의 결과가 가장 정밀하게 예측가능함을 확인 할 수 있다.



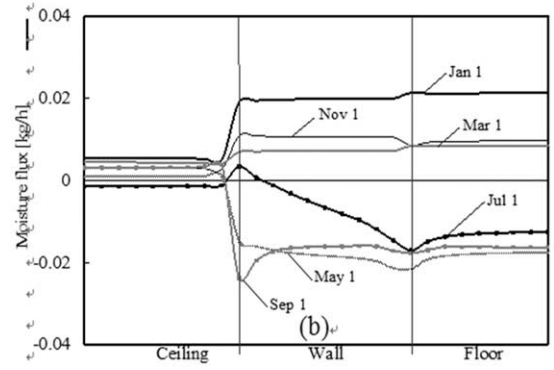
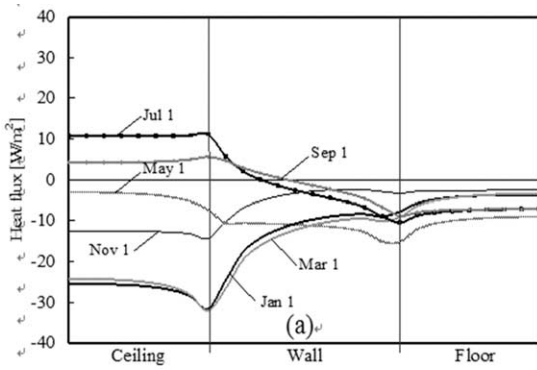
[그림 9] 실험지하구조물의 실내온도비교



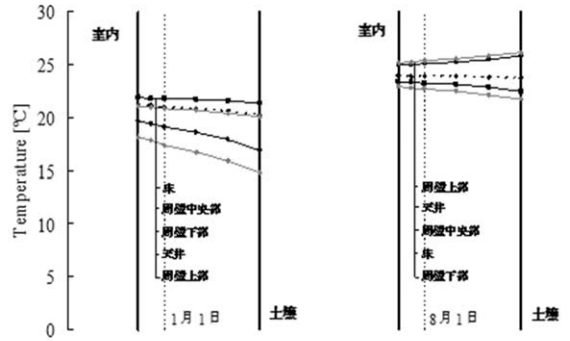
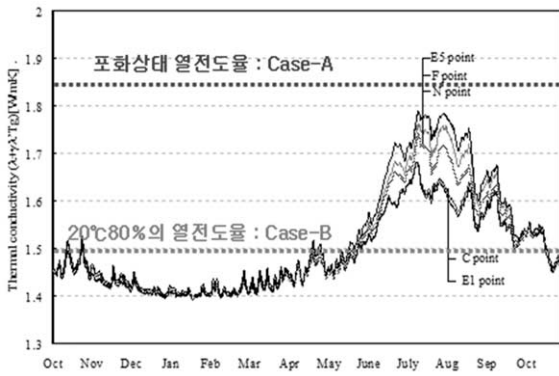
[그림 10] 실험지하구조물의 연간 실내습도비교



[그림 11] 1월 1일 실내온도 변화

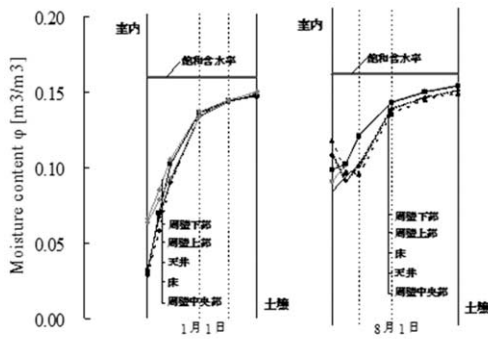


[그림 12] 지하구조를 실내측 벽면의 열류 및 수분류

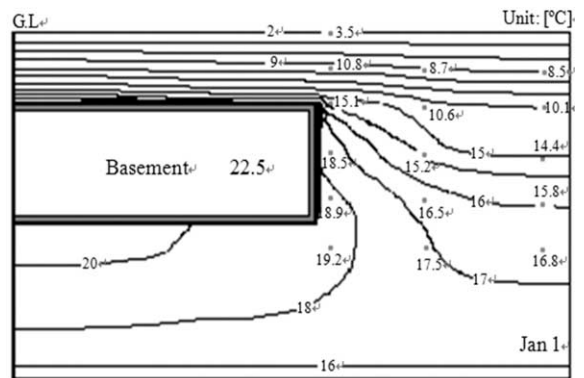


[그림 13] 실험지하구조를 구체 각부분의 연간 열전도율 변동

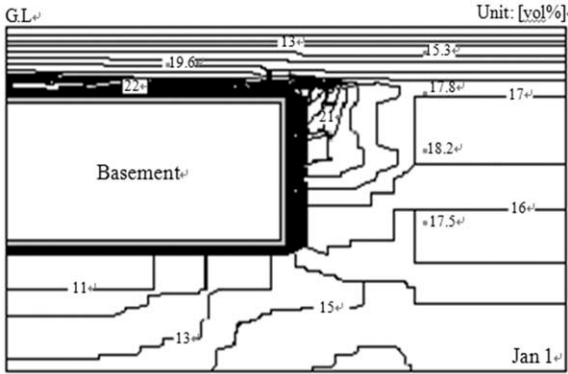
[그림 14] 실험지하실 구체의 동/하계 온도분포



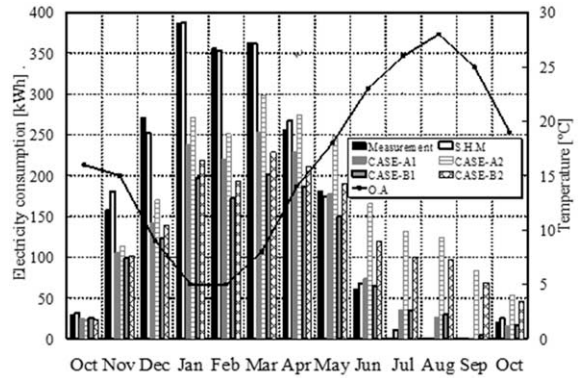
[그림 15] 실험지하실 구체의 동/하계 함수율분포



[그림 16] 지하구조를 주변지반내 온도분포 (*: 측정지점)



[그림 17] 지하구조물 주변지반내 함수율 분포 (■ : 측정지점)



[그림 18] 실험지하구조물의 월별 전력사용량과 각 수치해석 결과 비교(S.H.M.:비선형 열수분동시이동 해석)

<표 3> 열부하 실측치와 계산치 비교

	Annual integrated value[kWh]	Peak load [W]	Outbreak period [Month]
Measurement	2082.0	600.2	1
CASE-A1	1528.5	523.3	4
CASE-A2	2156.4	580.5	4
CASE-B1	1288.0	448.0	4
CASE-B2	1691.2	488.6	4
S.H.M	2112.0	612.0	1

(S.H.M : nonlinear simultaneous heat and moisture transfer)

3. 결론

지상의 건축물과 달리 강우 등 수분의 영향을 지속적으로 받아 비선형성 및 물성치의 변화가 큰 지하공간 및 주변지반의 열부하예측을 위해 단순 열전도 방정식을 이용한 수치해석을 수행하였으나, 실내 열환경, 주변지반의 온도 및 연간 열부하의 예측에 이르기까지 예측틀로서 활용하기에는 정밀도가 결여되어 있음을 확인하였다. 이에 반해 열수분 동시이동을 고려한 방정식을 활용한 비선형 수치해석의 결과는 지하구조물의 실내 온습도 환경의 예측에서 지반내 열수분성장, 열부하 예측에 이르기까지 상당히 높은 예측정밀도를 나타내고 있고, 지하구조물과 주변지반의 열수분 성장

및 열부하 예측틀로서 적합함을 알 수 있다.

지하구조물은 서두에서 언급한 바와 같이 항온성 등의 유용한 측면도 있지만, 주로 수분(기상, 액상, 고상수분)의 영향에 기인하는 고습환경 또는 결로 등의 문제를 포함하여 열부하 또는 열수분 성장 예측시 비선형성을 고려해야만 하는 문제가 있다. 본고에서 소개한 열수분 동시이동을 고려한 비선형 수치해석법은 예측틀로서의 정밀도는 충분히 갖추고 있지만, 막대한 계산시간 및 전문성을 필요로 하므로 실제 실무에서 즉각적인 검토가 어려운 문제가 있다. 그러므로 현재 이러한 부분을 해결하기 위해 지하구조체의 열류/수분류의 단위응답을 계산하여 비선형 방정식을 기선형화(근사화)하는 단계까지 연구를 진행하였으며, 최종 상용프로그램화를 목표로 관련 연구를 진행중에 있다.

참고문헌

1. Matsumoto, M., (1978) Simultaneous Heat and Moisture Transfer, and Moisture Accumulation in Buildings. Doctoral Dissertation, Kyoto National University, Japan.
2. Matsumoto, M. and Kotera, N. (1988) An

- analysis of heat storage in the wet soil solved as a coupled problem. *Energy and Buildings*, 11, 239–247.
3. Mitalas, G.P. (1982) Basement heat loss studies at DBR/NRC, Ottawa. Division of Building Research, National Research Council of Canada, DBR Paper No. 1045.
 4. Park, K.S et al., (2006) Study on the heat load characteristics of underground structure Part 1. Field experiment on an underground structure an internal heat generation condition. *JAABE*, 5(2).
 5. Park, K.S et al., (2007) Study on the heat load characteristics of underground structure Part 2. Computational analysis of the heat/moisture behavior and heat load of underground structures. *JAABE*, 6(1).
 6. Park, K.S et al., (2012) A study on simple calculation method of heat load a using linear approximation indicial response in underground structures. *Proceedings of the 5th IBPC, Kyoto.* 