대한설비공학회 2006하계학술발표대회 논문집 pp.795~800

06-S-127

난방부하와 온수온돌의 방열성능을 고려한 적정 공급온수온도 산출방법에 관한 연구

최 정 민, 이 규 남, 류 성 룡, 김 용 이*, 여 명 석†, 김 광 우**

서울대학교 대학원 건축학과, *군산대학교 건축공학과, **서울대학교 건축학과

A Study on the Method of Estimating Optimum Supply Water Temperature Considering the Heating Load and the Heat Emission Performance of Radiant Floor Heating Panel

Jeong-Min Choi, Kyu-Nam Lee, Seong-Ryong Ryu, *Yong-Yee Kim, Myoung-Souk Yeo**†, Kwang-Woo Kim**

Department of Architecture, Graduate School, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
**Department of Architecture, College of engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea*
***Department of Architecture, College of engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

(Received)

ABSTRACT: A common approach to achieve better thermal comfort with hydronic radiant floor heating system is supply water temperature control. This is the control method through which supply water temperature is varied with outdoor temperature. In this study, a comprehensive, yet simple calculation method to find optimum supply water temperature is evaluated by combining heat loss from the building and heat emission from the hydronic radiant floor heating system. And then the control performance of suggested calculation method is confirmed through experiment. It is shown that indoor air temperature is stably maintained around the set point.

Key word: Hydronic radiant floor heating system (온수온돌난방 시스템), Supply water temperature control (공급온수온도 제어), Optimum supply water temperature(적정 공급온수온도)

기호설명

$\dot{Q}$: 열유속 [W]
T : 온도 [℃ or K]
RR : 외기보상율
C_p : 정압비열 [J/(kg℃)]
$\dot{\forall}$: 환기 및 침기량 [m^3/s]
A : 면적 [m^2]
V : 부피 [m^3]
ΔT_H : 실온과 난방용수의 대수평균온도차[℃]
U : 열관류율 [$W/(m^2℃)$]
$B\prod_i(a_i^{m_i})$: 온돌바닥의 열전달계수[$W/m^2℃$)]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

air : 공기
ad : 인접공간
env : 건물외피
load : 난방부하
out : 실외공기
all : 실내+실외
w : 난방온수
panel : 온수온돌
room : 실내공기
sup : 공급온수
set : 설정실온
int : 실내
ext : 실외

†Corresponding author
Tel.: +82-2-880-7353; fax: +82-2-871-5518
E-mail address: msyeo@snu.ac.kr

1. 서론

현재 국내 개별난방에서 사용되는 공급온수온도는 실

온을 설정실온으로 유지하기 위해 필요한 공급온수온도보다 높기 때문에 온돌난방시스템의 열적관성(thermal storage)과 맞물려 Fig.1에서 보는 바와 같은 실온 overshooting 및 undershooting의 원인이 되며 이로 인해 실내 온열환경의 불쾌적을 초래한다. 이를 방지하기 위해서는 건물의 열손실을 고려한 공급온수온도의 산정이 필요하지만 국내에서는 이에 대한 연구가 미흡하다. 외국의 경우 부하조건의 변화에 따라 공급온수온도를 결정하여 난방하는 방식이 이미 사용되고 있으며 이에 대한 기준[5]도 마련되어 있는 상태이지만, 바닥복사 난방시스템에서 공급온수온도의 산정에 관한 연구는 역시 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 부하조건에 따른 건물의 열손실과 온수온돌의 방열성능, 그리고 실의 열평형(heat balance)등을 고려하여, 설정실온유지에 필요한 적정 공급온수온도를 산정하는 식을 도출하였으며, 실험을 통해 공급온수온도 산정식을 적용한 경우 설정실온 유지 여부 및 실온변화 양상을 살펴보았다. 그리고 이 식의 제약조건을 고찰함으로써 주거용 건물에 대한 본 연구에서 도출된 공급온수온도 산출법의 적용성을 고찰해 보았다.

2. 예비적 고찰

2.1 기존연구 고찰

공급온수온도제어(supply water temperature control)란 실온안정성 및 실내 온열환경의 쾌적성 향상을 목적으로, 방열량을 제어하기 위해서 유량을 일정하게 유지하면서, 공급온수온도를 변화시키는 방법이다. 이 중 외기온이 건물의 난방부하에 영향을 미치는 가장 큰 요소라는 점에 착안하여, 외기온에 따라 공급수온도를 달리하여 공급하는 방식이 많이 적용되고 있으며[3], 이를 다른 말로 외기보상제어(outdoor reset control, 또는 outdoor compensation control)라고 한다. 식(1)과 같이 외기온과 공급온수온도와의 관계를 난방곡선(reset line 또는 heating curve)이라 하고 그 가울기를 외기보상율(reset ratio 또는 compensation ratio)이라 한다.

$$T_{sup} = RR(T_{out} - T_{room}) + T_{room} \qquad (1)$$

Adelman[1]은 난방을 시작하는 외기온에서의 공급온수온도와 외기온, 설계최고 공급수온도과 최저 설계외기온을 식(1)에 대입하여 외기온에 따른 온수온도

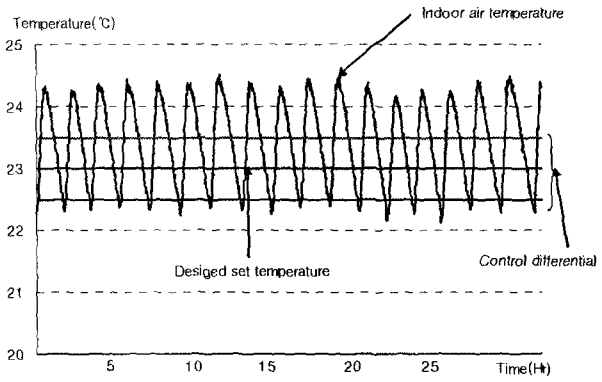

Fig.1 Overshooting and undershooting of indoor air temperature due to the high supply water temperature

관계를 도출하는 방법을 제시하였으며, Z.Liao[2]는 Adelman이 제시한 방법에서, 설계최고 공급온수온도 대신 보일러의 생산가능 최대 공급온수온도를 사용할 것을 제안하였다. 하지만 Z.Liao는 실험결과 이 방법이 실온과열을 유발함을 확인하여 설정실온유지를 위한 외기온-공급온수온도 관계의 중요성을 지적하였다. 현재 외국의 경우, 공급온수온도제어의 현장적용 시 직접 난방운전을 한 후, 시행착오에 의해 미세조정(fine tuning)하여 경험적으로 외기온과 공급온수온도 관계를 찾고 있는 실정이다.[3]

2.2 공급온수온도산정 시 고려해야할 요소

2.2.1 건물의 난방부하

난방부하는 외피전열에 의한 부하와 환기 및 침기에 의한 외기부하로 구성되며, 일사에 의한 열획득과

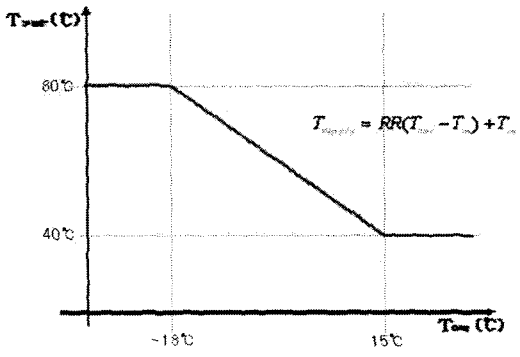

Fig.2 Typical heating curve

내부발열은 고려하지 않는 것이 보통이다. 실제 이 가정은, 운전 시 설정실온과 실온 간 오차의 원인이 될 수도 있으나, 일사나 내부발열에 의한 열 획득을 고려하지 않음으로써 여분의 열량을 확보할 수 있게 된다. 따라서 한 실에 대한 열출입은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\rho_{air} C_{p,air} V_{room} \frac{\partial T_{room}}{\partial t} = -\dot{Q}_{env} - \dot{Q}_{air} + \dot{Q}_{load} \quad (2)$$

이때 환기와 침기를 함께 고려한 실내외 공기이동에 의한 열손실은 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{air} = \rho_{air} C_{p,air} \dot{\forall} \ (T_{room} - T_{out}) \quad (3)$$

한편 보통의 경우 난방부하 산출시 연속난방으로 인해 건물이 열적으로 정상상태(steady state)에 있다고 가정하므로 식(2)의 축열항은 소거되고 따라서 실의 난방부하는 다음 식(4)와 같이 표현된다.

$$\dot{Q}_{load} = \{\sum_{all} U_i A_i + \rho_{air} C_{p,air} \dot{\forall}\ \}(T_{set} - T_{out}) - \sum_{interior} U_j A_j (T_{ad,j} - T_{out}) \quad (4)$$

2.2.2 온수온돌의 방열성능

온수온돌의 방열성능을 해석하는 방법에는 유한요소법 및 유한차분법을 이용한 동적인 계산방법과 간이계산식을 이용한 정적인 계산방법, 그리고 실험에 의한 방법 등이 있으며[5], 본 연구에서는 이 중 EN 1264 기준[5]에 제시된 간이계산식을 이용한 정적인 계산방법을 참고하였다. EN 1264 기준에 소개된 복사패널의 유형은 type A에서 type G까지 크게 7가지로 구분되며 Fig.4는 그 중 type A를 나타내고 있다[5]. 현재 국내에서 사용 중인 온수온돌은 type A에 해당되며, 이 유형의 복사패널에서 실내로 방출되는 열유속(heat flux)은 식(5)와 (6)을 이용하여 계산할 수 있다[5].

$$\dot{Q}_{panel} = A_{panel} B (\prod_i a_i^{m_i}) \Delta T_H \quad (5)$$

$$\Delta T_H = \frac{(T_{sup} - T_{ret})}{ln(\frac{T_{sup} - T_{room}}{T_{ret} - T_{room}})} = \frac{\sigma}{ln(\frac{T_{sup} - T_{set}}{T_{sup} - \sigma - T_{set}})} \quad (6)$$

3. 적정 공급온수온도 산출식

3.1 적정 공급온수온도 산출식 제시

어느 실의 적정 공급온수온도란 설정실온을 유지하기위해 필요한 공급온수온도이다. 외기온을 비롯한 건물의 열손실을 유발하는 인자들은 순간값이므로 어느 실의 적정 공급온수온도 또한 고정된 값이 아니라 부하조건의 변화에 따라 변화하는 값이 된다. 건물이 일정실온을 유지할 때 난방부하와 온수온돌의 방열량, 온수의 열공급량 사이에 식(7.a), 식(7.b)과 같은 열평형(heat balance)이 성립한다.

$$\dot{Q}_{load} = \dot{Q}_w = \dot{Q}_{panel} \quad (7)$$

이때 식(7)의 난방부하와 온수간의 열평형으로부터 식(8)과 같은 온수온도 강하량을 산출할 수 있다.

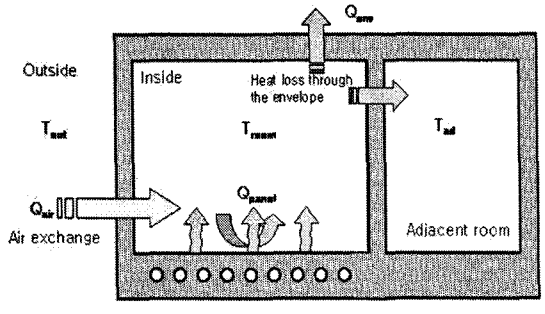

Fig.3 The terms in a load calculation

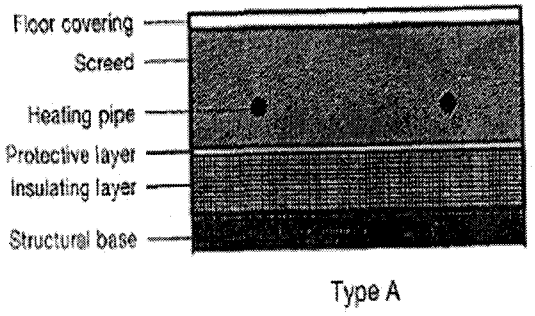

Fig.4 System type A described in EN 1264[5]

$$\sigma = \frac{\{\sum_{all} U_i A_i + \rho_{air} C_{p,air} \dot{\forall}\}}{\dot{m}_w C_{p,w}} (T_{set} - T_{out}) - \frac{\sum_{interior} U_j A_j (T_{ad,j} - T_{out})}{\dot{m}_w C_{p,w}} \quad (8)$$

한편, 식(7)의 난방부하와 온수온돌로부터 방출된 공급열량과의 열평형으로부터 식(9)과 같은 실내공기와 온수의 대수평균온도차(LMTD)의 표현을 얻을 수 있다.

$$\triangle T_H = \frac{\{\sum_{all} U_i A_i + \rho_{air} C_{p,air} \dot{\forall}\}}{\{A_{panel} B(\prod_i a_i^{m_i})\}} (T_{set} - T_{out}) - \frac{\sum_{interior} U_j A_j (T_{ad,j} - T_{out})}{\{A_{panel} B(\prod_i a_i^{m_i})\}} \quad (9)$$

따라서 식(6)과 식(9)을 등치시키고 온수온도강하량에 관한 식(8)의 표현을 이용함으로써, 주어진 부하조건에서 설정실온을 유지하기위해 필요한 적정 공급온수온도 T_{sup}을 산정하는 식(10)을 도출할 수 있다.

$$T_{sup} = -\lambda T_{out} + \mu \quad (10)$$

여기서

$$\lambda = \frac{\frac{\{(\sum_{ext} U_i A_i) + \rho_{air} C_{p,air} \dot{\forall}\}}{\dot{m}_w C_{p,w}}}{1 - exp(-\frac{A_{panel} B(\prod_i a_i^{m_i})}{\dot{m}_w C_{p,w}})} \quad (11)$$

$$\mu = (1 + \frac{\frac{\{(\sum_{all} U_j A_j) + \rho_{air} C_{p,air} \dot{\forall}\}}{\dot{m}_w C_{p,w}}}{1 - exp(-\frac{A_{panel} B(\prod_i a_i^{m_i})}{\dot{m}_w C_{p,w}})}) T_{set} - \frac{(\frac{\sum_{int} U_j A_j T_{ad,j}}{\dot{m}_w C_{p,w}})}{1 - exp(-\frac{A_{panel} B(\prod_i a_i^{m_i})}{\dot{m}_w C_{p,w}})} \quad (12)$$

식(10), (11), (12)에서 연속난방 시 설정실온 및 환기량의 변화가 없는 경우, λ와 μ값을 일정한 상수로 취급할 수 있으므로, 적정 공급온수온도는 외기온의 선형적인 함수로 나타낼 수 있다.

3.2 적정 공급온수온도 산출식의 제약조건 및 적용범위

적정 공급온수온도 산정식(식(10)~식(12))은 난방부하 계산 시, 연속난방가정하의 정상상태 운전을 염두에 두고 유도된 것이므로 축열효과의 영향이 큰 초기 난방가동 시나 간헐난방방식이 적용된 건물의 공급온수온도 산정에 이용되어서는 안 된다. 또한 순간 환기량의 시간평균값과 난방부하 산출시 사용된 환기횟수의 차이가 큰 건물 또는 환기량 예측이 어려운 건물에 대한 적용도 제한된다. 하지만 이러한 제약조건에도 불구하고 대부분의 개별난방방식이나 지역난방방식이 적용된 주거용 건물은 연속난방으로 인해 구조체가 이미 충분히 가열되어 있기 때문에 축열의 영향이 작아서 근사적으로 정상상태에서 운전된다고 볼 수 있다. 또한 Fig. 5에서 보는 것처럼 주거용 건물의 환기량은 그 분산이 작아서 난방부하산출시 사용된 환기량과의 차이가 크지 않다. 한편 난방에서 일사열 획득이나 내부발열의 효과를 무시할 경우, 일사나 내부발열에 의한 열 획득을 고려하지 않음으로써 여분의 열량을 확보할 수 있어 안전성을 기할 수 있기 때문에, 개별난방방식이나 지역난방방식이 적용된 주거용 건물은, 본 연구에서 제시한 공급온수온도 산정식의 적용이 가능하다. 다만 이러한 가정으로 인해 실온과 설정실온의 차이가 발생할 수도 있으므로 추가적인 실온피드백제어와 병행되어야 한다.

4. 적정 공급온수온도 산출식을 이용한 난방실험

4.1 실험모델의 구성

실험모델은 Table 1과 같은 실험조건 및 물성치를

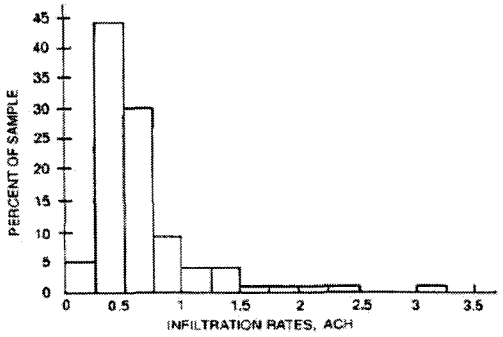

Fig.5 The histogram of infiltration values[10]

Table 1. The properties of the test cell

		Exterior Wall	Wall2	Wall3	Wall4	Ceilng
Wall	U-value(W/m²℃)	1.435	0.383	0.383	0.383	0.383
	Area(m2)	9.02	8.07	8.07	9.02	13.7
Floor structure	Floor area(m2)	13.7				
	Upwards thermal resistance(m2℃/W)	0.337				
	Downwards thermal resistance(m2℃/W)	0.969				
	Floor covering resistance(m2℃/W)	0.0111				
	Heat conductivity of screed(W/m℃)	5.46				
Pipe	Pipe spacing(m)	0.2				
	Internal daimeter(m)	0.015				
	Heat conductivity material(W/m℃)	0.31				

가진 테스트 셀로 구성했으며, 바닥구조체는 기존 공동주택에 적용된 것과 동일하게 구성하였다.

4.2 온도측정 및 공급온수온도 제어장치

본 연구에서는 열전대(thermocouple)를 이용하여 실온, 바닥표면온도, 외기온, 공급온수온도와 환수온도를 측정하고 측정된 데이터는 아날로그 입력장치를 통해 컴퓨터에 저장하였다. 그리고 외기온에 따른 공급온수온도를 제어하기위해 디지털 출력장치(NI SCXI-1001,-1600,-1163)를 제어알고리즘이 내장된 컴퓨터 프로그램(NI LabVIEW 7.1)과 연동하여 제어시스템을 구성하였다.

4.3 실험내용 및 방법

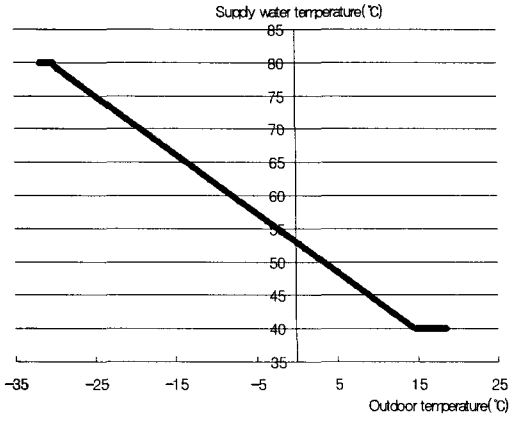

Fig.6 The resultant relationship between outdoor temp. and supply water temp. for the test cell

앞에서 도출한 공급온수온도 산정식을 적용했을 때, 설정실온 유지여부 및 실온변화양상 분석을 목적으로 '06년 2월13일 18시30분부터 '06년 2월 16일 18시30분까지 진행하였다. 이때 정상상태 가정 하에서의 실온유지성능을 확인하기위해, 실험공간을 충분히 축열한 후 실험을 시작하였고 일사유입을 차단하였다. 공급온수유량은 국내 공동주택에 공급되는 유량을 토대로 2 LPM을 공급하였으며, 실내 설정온도를 23℃로 설정하였다. 실온은 바닥으로부터 1.1m 높이에서 측정하였다.

4.4 실험결과 및 분석

Table 1.에 표현된 테스트 셀의 물성치들과 앞서 도출한 공급온수온도산정식을 토대로 테스트 셀에 대한 외기온 -공급온수온도 관계를 산출한 결과, 식(13) 및 Fig.6과 같은 테스트셀에 대한 선형식을 얻을 수 있었다.

$$T_{sup} = -0.8867 \times T_{out} + 53.0 \qquad (13)$$

이 관계를 바탕으로 외기온을 측정한 후 그에 상응하는 온도의 온수를 실에 공급한 결과, Fig.7 과 같은 실온분포를 얻을 수 있었다. 실험결과 실온의 평균값은 23.1℃로써 설정실온 23℃와의 편차가 불과 0.1℃에 지나지 않았으며, 이로써 식(10)~(12)을 통해 구한 공급온수온도가 설정실온유지에 적절함을 확인할 수 있었다. 또한 실온변동폭이 1.7℃정도로 작은 것으로 나타났는데 이는 실에서 필요한 만큼의 열량이 공급됐기 때문이며 따라서 Fig. 1에서 보는 것과 같은 실온 overshooting이나 undershooting 현상이 일어나지 않고 실온이 완만하게 유지되는 온

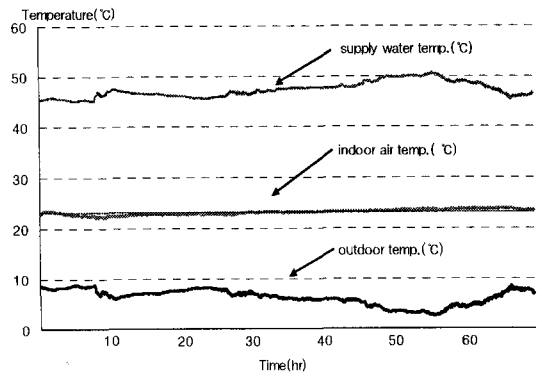

Fig.7 Temperature profiles of the outdoor air, indoor air and supply water

도분포상의 특성을 관찰할 수 있었다.

5. 결 론

온수온돌 난방시스템에서의 공급온수온도는 실내로 방출되는 열량을 결정하는 가장 중요한 요소로서, 실의 열손실에 비해 과다하게 높은 공급온수온도는 실온 overshooting 및 undershooting 현상을 유발하여 실내 온열환경의 불쾌적을 일으키는 주요 원인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는

(1) 건물의 난방부하와 온수온돌의 방열성능을 고려하여 시간에 따라 변화하는 부하조건에 대응할 수 있는 적정 공급온수 온도산정식을 식(10)~(12)와 같이 제시하였다. 그리고 이 식은 축열효과의 영향이 큰 초기 난방가동 시나 간헐난방방식이 적용된 건물, 순간 환기량의 시간평균값과 난방부하 산출시 사용된 환기횟수의 차이가 큰 건물의 적용에는 적합하지 않지만, 대부분의 개별난방방식이나 지역난방방식이 적용된 주거용 건물은 연속난방으로 인해 근사적으로 정상상태에서 운전되는 것으로 볼 수 있으며, 환기량의 분산이 작아서 본 연구에서 제시한 공급온수온도 산정식의 적용이 가능함을 살펴보았다. 다만 이러한 가정으로 인해 실온과 설정실온의 차이가 발생할 수도 있으므로 추가적인 실온피드백제어가 필요함을 언급하였다.

(2) 마지막으로 도출된 공급온수온도 산정식을 이용하여 테스트 셀에 대한 공급온수온도 산정식을 식(13)과 같이 도출하였다. 이에 의거, 난방실험을 실시한 후, 실온유지성능 및 실온변화의 특징에 관해 살펴본 결과, 평균실온이 23.1℃로 설정실온 23℃와의 편차가 불과 0.1℃에 지나지 않음을 확인 할 수 있었고, 실온변동폭이 1.7℃정도에 지나지 않아 실온 overshooting이나 undershooting 현상이 일어나지 않고 실온이 완만하게 유지되는 온도분포상의 특성을 관찰할 수 있었다.

후 기

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C 03A1040001 - 03A 0204-00310)에 의한 것임.

참고문헌

1. Adelman. T. N., 1949, Radiant Heating, The Industrial Press, pp. 163-171
2. Liao. Z., Dexter. A. L., 2005, An experimental study on an inferential control scheme for optimizing the control of boilers in multizone heating system, Energy and Buildings 37 pp.55-63.
3. Twintran, 1989, Twintran Application Mannual, Heatway system p.40
4. Yeo, M. S., Seok, H. T., Kim, K. W., 1998 , A study on the water temperature control method of radiant floor heating system in apartment buildings, Proceedings of AIK, Vol.14, pp. 203-210.
5. EN1264-2. 1999. Floor heating : System and components Parts 2:Determination of thermal output.
6. Siegenthaler. J., 2003, Modern Hydronic Heating : Regsidential and light commercial buildings 2nd ed. THOMSOM-DELMAR LEANING, pp 247-268.
7. Kreider. J. F., Curtiss. P. S., Rabl. A., 2002, Heating and Cooling of Buildings : Design for efficiency 2nd ed. McGraw-Hill, New York, pp.283-322.
8. MacCluer, C. R., 1989, The Temperature Stabilitv of a Radiant Slab-on-grade. ASHRAE Transactions, ASHRAE, 1989a CH-89-17- 1, pp.1001-1009.
9. MacCluer, C. R., 1990. Analysis simulation of outdoor reset control of radiant slab heating system. ASHRAE Transactions, Vol. 96, Part 1.
10. Howell. R. H, Sauer. H. J, Coad. W. J, 2005, Principles of heating ventilating and air conditioning, ASHRAE, pp.107-119