

공동주택 바닥복사 난방시스템의 GRNN 제어 적용에 관한 연구

송 재 엽, 안 병 천**

가천대학교 건축설비공학과 대학원, *가천대학교 건축설비공학과

A Study on GRNN Control Strategies for Floor Radiant Heating System in Residential Apartments

Jae-Yeob Song, Byung-Cheon Ahn**

Department of Building Equipment System Engineering, Gachon University 461-701, Korea

*Department of Building Equipment System Engineering, Gachon University 461-701, Korea

(Received September 14, 2012; revision received October 19, 2012)

ABSTRACT: In this study, the effects of heating control methods on heating control performance and energy consumption in the floor radiant heating control system of residential apartments were research by computer simulation. A general regression neural network(GRNN) control method for reducing indoor temperature overshoot and saving energy in floor radiant heating system is suggested. The GRNN control method shows good responses in comparison with the conventional and outdoor reset control methods for improving indoor thermal environment and reducing energy consumption.

Key words: Floor radiant heating system(바닥복사 난방시스템), General regression neural network(일반화된 회귀 신경망), Outdoor reset control(외기보상제어), Heating control performance(난방제어성능)

기 호 설 명

n	: 입력층의 뉴런 수
I_j	: j번째 패턴층의 입력함수
W_{ij}	: i번째 입력층과 j번째 패턴층의 뉴런 사이의 가중치
X_i	: 입력신호
Y'	: 각 패턴층 뉴런이 가지는 출력 값
$Y(X)$: 입력에 따른 결과 값

그 리 스 문 자

σ : 평활요소

1. 머리말

우리나라 주거용 공동주택에서는 실내 열환경 개선을 위한 수단으로서 여러 가지 난방방식이 사용될 수 있지만 국내 대부분의 공동주택에서는 바닥복사 난방시스템이 널리 사용되고 있다.

이러한 바닥복사 난방시스템은 에너지 절감을 위하여 실내 공기온도에 따라 On-Off 방식의 자동 온도조절밸브를 사용하여 온수 공급을 조절하는 방식이 대부분을 차지하고 있다. 그러나 이러한 방법은 고정된 공급온수 및 실내공기 설정온도에 따라 제어함으로 인하여 불필요한 에너지 소모를 야기시킬 수 있으며, 또한 기존의 On-Off 제어방식의 경우 실내 공기 설정온도에 따라 온수공급이 중단되었음에도 불구하고 축열성능이 큰 바닥복사 난방시스템의 특성으로 인하여 설정온도 이상의 과열현상이 나타나

† Corresponding author

Tel.: +82-31-750-5309; fax: +82-31-750-5314

E-mail address: bcahn@gachon.ac.kr

쾌적하지 못한 실내 열환경이 발생하게 된다.

이 밖에 바닥복사 난방시스템에 있어서 외기온도 등의 환경변수와 공급 온수온도, 공급유량 및 실내 공기온도 등의 제어변수들이 복합적으로 고려되어야 함에도 불구하고 이들을 전체적으로 고려한 최적의 운전방법은 제시되지 못하고 있는 실정이다.

이와 같이 실내 열환경 개선 및 에너지절감에 관련된 바닥복사 난방시스템의 연구들은 환경변수인 외기온도와 제어변수인 공급 온수온도, 공급유량, 실내 공기온도 등의 여러가지 변수들로 대표되는 시스템에 대하여 하나의 입력값과 하나의 출력 값으로 제어하는 SISO(Single Input Single Output) 시스템 경우가 대부분이며, 다양한 변수들의 상호연계성을 고려한 바닥복사 난방시스템의 통합적인 제어방안을 제시하지 못하고 있다.

또한 MIMO(Multy Input Multy Output) 시스템 제어를 수행하였던 연구들은 변수들의 조합에 따라 제어방법을 제시하기 위하여 많은 시뮬레이션과 실험을 통해 데이터를 확보해야 했으며, 이에 따라 연구를 진행하는데 있어서 많은 예비적인 연구가 진행되어야 한다는 문제점을 제시하기도 해 바닥복사 난방시스템의 다중 입출력에 관한 최적제어를 적용하기가 어려움을 나타냈다.

따라서 본 연구에서는 바닥복사 난방시스템의 환경변수인 외기온도와 공급 온수온도, 공급유량 등의 제어변수 들을 고려하여 실내 열환경 개선과 에너지 절감 및 MIMO 시스템의 문제점을 해결하기 위한 방안으로써 다양한 입출력 변수들의 관계에 대하여 확률밀도함수를 근거로 하는 GRNN(General Regression Neural Network)을 적용한 효과적인 제어방법을 제시하였으며, 이를 일정한 설정값으로만 제어를 수행하는 기존제어방법과 외기온도 변화에 따라서 실내 공기온도 및 공급 온수온도의 설정값을 변화시켜 주는 외기보상제어에 각각 적용하여 시뮬레이션을 통해 나타나는 GRNN 제어방법의 특성을 실내 열환경 및 에너지 소모량을 분석하여 살펴보았다.

2. GRNN 제어방안

바닥복사 난방시스템에 있어서 외기온도 등의 환경변수의 변화에 따라 공급 온수온도, 공급유량, 실내 공기온도 등과 같은 제어변수들의 설정값들을 적절히 조절할 경우 실내 열환경 개선 및 에너지 절감효과가 나타나게 된다.

그러나 이러한 제어방법에 있어서 다양한 입출력 변수들의 불규칙적인 함수 관계를 예측하여 제어를 수행하기란 매우 어려울 뿐만 아니라 제어변수들의 설정값들을 결정하고 보정하는데 있어서 정확한 예측을 위해서는 입출력 변수들의 상관관계에 의하여 많은 양의 데이터를 필요로 하고 또한 이러한 데이터를 얻기 위해서는 수많은 시뮬레이션 혹은 실험을 필요로 하게 된다.

이에 따라서 본 연구에서는 다양한 입출력 변수들에 대한 제어에 있어서 효과적이며, 데이터 확보에 따른 시간을 줄여주는 데 있어서 효율적인 GRNN(General Regression Neural Network) 제어방법을 적용하였다.

먼저 GRNN은 신경망제어 방법 중 하나로서 인공신경망은 측정된 변수들 사이의 관계가 알려지지 않거나, 입력값에 대하여 출력 값의 특성이 비선형적으로 변하는 함수 알고리즘과 관련된 문제를 푸는데 많이 사용된다.

GRNN은 4개의 층으로 구성된다.⁽¹⁾ 첫 번째 입력층은 입력패턴을 각각의 패턴 층의 뉴런들에 배분하는 역할을 하며 두 번째 층으로 모두 연결된다. 패턴 층은 학습자료에 있는 각각의 패턴들에 대해 하나의 뉴런을 가지고 있으며 이때의 가중치는 학습자료에 있는 패턴 요소들이 된다. 각각의 패턴층 뉴런들은 가지고 있는 학습자료 들로부터 입력 패턴층 원소들을 빼어 제곱을 하거나 절대 값으로 나타낸다. j번째 패턴층의 입력 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_j = \sum_{i=1}^n |W_{ij} - X_{ij}| \text{ 또는 } I_j = \sum_{i=1}^n (W_{ij} - X_{ij})^2 \quad (1)$$

여기에서 X_i 는 입력신호이고, W_{ij} 는 i번째 입력층과 j번째 패턴층 뉴런 사이의 가중치이며 n은 입력층의 뉴런 수를 나타낸다. 이렇게 계산된 입력값은 아래와 같은 지수함수의 형태를 가지는 비선형 활성화함수로 넘겨지게 된다.

$$f(I_i) = \exp\left(\frac{-I_j}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

함수에서 계산된 패턴유닛의 출력 값은 합산유닛으로 전달된다. 합산유닛에서는 다음과 같은 적분을 실행하여 원하는 결과 값을 계산해낸다.

$$Y(X) = \frac{\sum_{i=1}^n Y' f(I_i)}{\sum_{i=1}^n f(I_i)} \quad (3)$$

여기서 Y' 는 각 패턴층 뉴런이 가지는 출력 값으로서 학습자료에서 결과 값에 해당한다.

역전파에 비해 GRNN이 가지는 가장 큰 장점은 학습자료가 비교적 적게 요구된다는 점이다. Specht²⁾는 역전파와 비슷한 정확도를 얻기 위해 1%의 학습자료 만이 필요하다고 하였다. 또한 학습자료가 많은 경우에는 비슷한 자료들을 군집화시켜 사용할 수가 있다.

따라서 본 연구에서는 바닥복사 난방시스템의 환경변수 및 제어변수들의 다양한 조합에 따른 의하여 제어변수들의 설정치들을 구해내기 위하여 GRNN 방법을 사용하였으며, 이에 따른 GRNN의 구조는 다음 Fig. 1과 같다. 여기서 X_i 값들은 각각 외기온도, 공급 온수온도, 공급유량의 입력 값이 되며 Y_i 값은 실내공기 설정온도 MAX 값의 보정값 및 공급온수 설정온도 값의 보정값의 샘플이 된다. 또한 $Y(X)$ 는 입력값인 외기온도, 공급 온수온도, 공급 유량에 따라 결정되어지는 실내공기 설정온도 MAX 값의 보정값 및 공급온수 설정온도 값의 보정값이 된다.

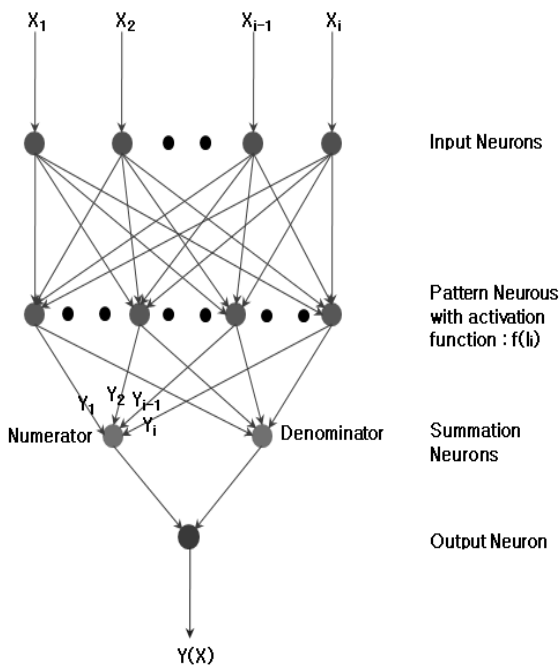


Fig. 1 The structure of GRNN for floor radiant heating system.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 바닥복사 난방시스템의 GRNN 적용에 따른 실내 열환경 및 에너지 소모량 특성을 살펴보기 위한 시뮬레이션 연구를 위하여 세대내의 열전달 해석 등에 필요한 입력자료의 선정방법 및 바닥복사 난방시스템의 시뮬레이션 방법을 설명하면 다음과 같다.

먼저 세대 내에서의 비정상 열전달 현상은 전기적인 등가 R-C 회로를 구성하여, 바닥, 천정 및 각 벽면의 전도 및 대류 열전달계수는 열저항을 고려한 등가 열전달계수를 구하여 사용하였다. 또한 세대 내에서의 복사 열전달량을 계산하여 바닥, 천정 및 각 벽면의 온도 변화를 고려하였는데, 복사열전달 해석을 위하여 실의 각 면적을 고려하여 구한 형상계수와 각 벽면에 대한 반사율, 방사율 등의 특성값을 구해내어 적용하였다.

해석 프로그램은 Visual Fortran 6.5프로그램을 사용하여 구성하였으며, 시뮬레이션 프로그램에 대한 실험적인 검증은 선행연구³⁾를 통하여 외기온도, 공급 온수온도 및 공급유량의 변화에 대하여 환수온도, 실내 공기온도, 바닥표면온도 및 벽면온도의 해석을 실험값과 비교하여 이루어졌으며, 시뮬레이션과 실험값과의 차이가 최대 9.5%이내의 양호한 오차범위를 나타내었다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 해석대상 모델(K사용인소재 건축환경 실험동 3층)을 이용하여 시뮬레이션 모델링을 수립하였다. 시뮬레이션 대상세대의 총 면적은 161.7 m²이며, 7구 분배기를 통해 각 실로 난방수를 공급하도록 설계되어져 있다. 수치해석을 위한 기준실은 침실 2로 선정하였다.

기준실인 침실 2의 면적은 총 14.8 m²로서 난방

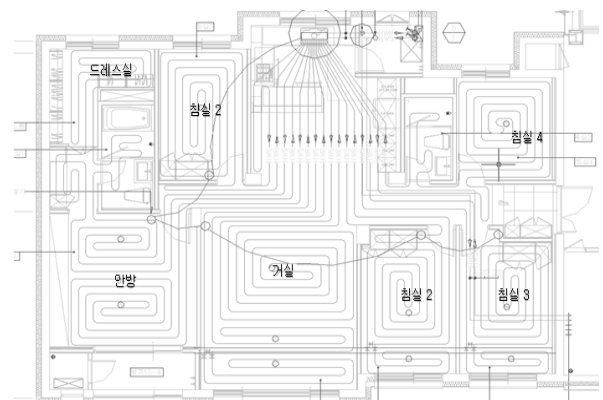


Fig. 2 Floor pipe networks in household.

배관의 길이 70.3 m의 남향 실이다. 기준실인 침실 2의 시뮬레이션 모델링을 위한 실 특성데이터는 Table 1과 같다.

실내설정온도의 경우는 문헌을 참고하여 경우 실내 쾌적온도가 21.1℃(70 °F)~23.8℃(75 °F)인 점을 감안하여 선정하였으며, 국내의 경우 18℃~26℃를 쾌적한 실내온도로 제시하고 난방 최적온도는 18℃~22℃를 제시하고 있으나 보통 20℃~23℃를 쾌적한 온도로 제시하고 있음을 고려하여 선정하였다.⁽⁴⁾

Fig. 3은 GRNN 적용에 따른 바닥복사 난방시스템의 제어흐름도를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 먼저 외기온도에 따라서 실내 공기온도 및

Table 1 Thermal properties of wall

	Thermal conductivity (W/m ² K)	Area (m ²)	Thermal capacitance (kJ/°C)
North wall	0.572	6.69	411.52
East wall	0.572	10.3	478.4
West wall	1.587	10.3	639.2
South wall	Wall : 0.274 Window : 0.640	Wall : 4.6 Window : 4.4	Wall : 681.15 Window : 120.67

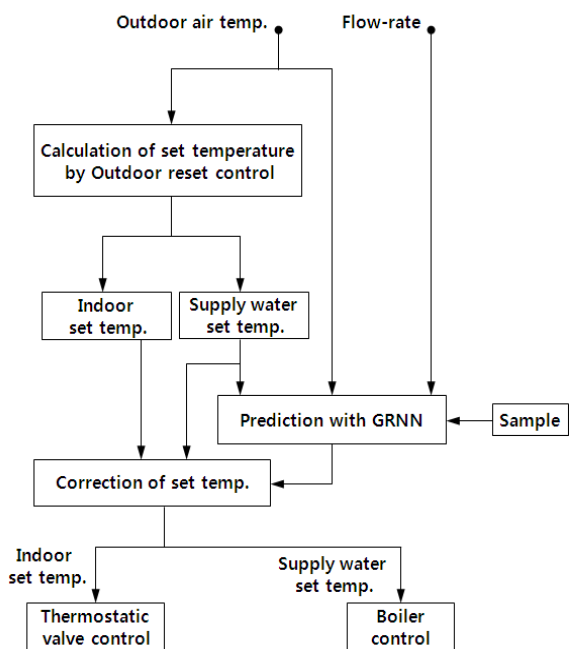


Fig. 3 Flow-chart of GRNN control strategy for radiant floor heating system.

공급 온수온도의 설정값이 외기보상 제어에 의해 구해지며, 이후에 외기온도, 공급 온수온도 및 공급 유량의 입력 값에 따라서 샘플값을 이용해 실내 공기온도 및 공급 온수온도 설정값의 보정이 이루어지고 이 값은 외기온도 변화에 따라 결정되어지는 실내 공기온도와 공급 온수온도 설정값에 가감되어져 나온 최종 설정값에 의해 실내 공기온도에 따라 On/Off 자동 온도조절 밸브가 제어되고, 공급 온수온도에 따라 보일러가 제어된다.

또한 앞서 식(3)에 나타난 바와 같이 GRNN에 있어서 과학습(overtraining)을 줄이기 위해서는 σ (평균요소, Standard deviation or Smoothness parameter)값의 선정이 무엇보다 중요함에 따라 σ 변화에 따른 응답 특성을 우선적으로 살펴 0.5일 경우에 샘플(sample)에 가장 근사하게 추종하는 것을 알아내어 시뮬레이션 프로그램에 적용하였다.

본 연구에서는 외기온도, 공급 온수온도 및 공급 유량 등의 다양한 입력변수의 변화에 따라서 실내 열환경 및 에너지 절감 효과를 가져 올 수 있는 출력변수 값 산정을 위한 GRNN 제어방안을 적용하였을 때 나타나는 특성을 살펴보고자 먼저 일정한 공급 온수온도 및 실내 공기온도로 제어하는 기존 제어방식의 경우에 대하여 GRNN을 적용하여 비교 분석을 수행하였으며, 또한 실시간으로 외기온도의 변화에 따라 공급온수 설정온도와 실내 공기 설정온도가 변화하는 외기보상 제어와 세대의 실별 유량 변화로 인하여 나타나는 실내 공급 유량변화에 따른 시뮬레이션을 수행하여 GRNN 제어방법의 적용에 따라 나타나는 특성을 살펴보았다.

이 때 적용한 외기보상 제어의 변화특성은 다음 Fig. 4와 같으며, 외기온도가 -10℃~10℃으로 변화

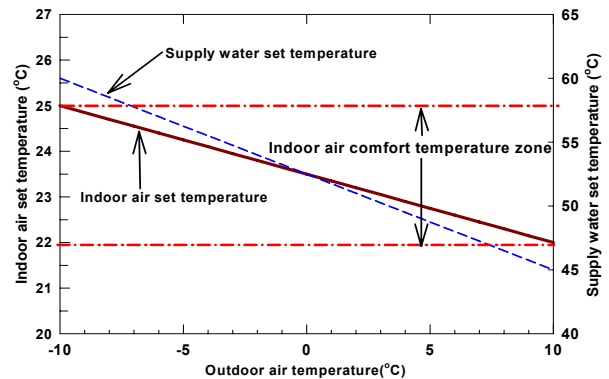


Fig. 4 The changes of indoor air and supply water temperature for outdoor reset control.

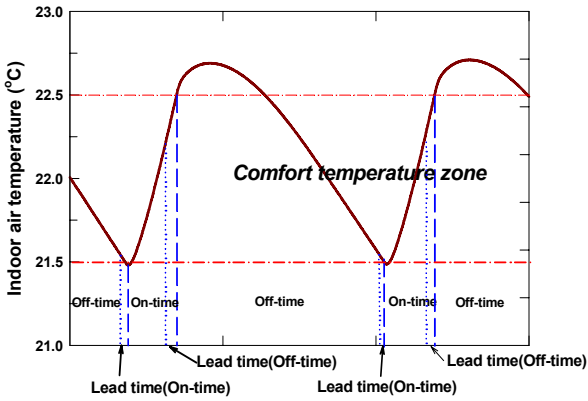


Fig. 5 Application of lead time for indoor air temperature change.

할 때 반비례적인 관계로 실내 공기 온도와 공급 온수온도가 실내 쾌적성을 해치지 않는 범위에서 변화하도록 값을 선정하였다.⁽⁵⁾

또한 GRNN 제어에 있어서는 Fig. 5와 같이 외기 온도, 공급 온수 온도 및 공급유량 변화에 따라서 나타나는 실내 공기온도의 설정온도 값 이상의 오버슈트 현상을 줄여주기 위한 리드타임(Lead time)값을 출력 값으로 선정하였으며, 현장적용성을 고려해 이를 다시 실내공기 설정온도의 상한값의 보정값으로 제어를 수행하였다.⁽⁶⁾

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 공급 온수온도 55°C, 공급유량 4 LPM, 외기 온도 0°C일 때 기존 제어방법과 GRNN 알고리즘을 적용한 방법의 공급온수온도 및 실내공기 온도의 변화특성을 비교한 그림이다.

그림에서 살펴보면 먼저 공급 온수온도의 경우 기존 제어방법의 경우 55°C로 설정되어 있지만 GRNN을 적용했을 경우 보정에 의하여 약 49.5°C 정도로 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 또한 실내 공기온도의 변화특성을 살펴봤을 때 실내 공기온도는 실내공기 설정온도의 상한값과 하한값 사이에서 제어가 이루어져야 정상이나 기존제어 방법의 경우 실내 공기온도가 설정온도 상한값보다 높은 오버슈트 현상이 나타났으나 GRNN을 적용하였을 경우 외기 온도, 공급 온수온도 및 공급유량을 고려하여 실내공기 설정온도의 상한값을 조절해줌으로써 기존 제어방법의 설정온도 상한값을 넘지 않는 제어가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 따라서 GRNN 방법을 적용할 경우 실내공기 열환경에 있어서 실내 공기

온도의 오버슈트를 제거할 수 있으며, 실내 열환경 개선에 있어서 효율적인 제어방안이라 판단된다.

Fig. 7은 공급 온수온도 55°C, 공급유량 4LPM, 외기 온도 0°C일 때 기존제어방법과 GRNN 알고리즘을 적용한 방법의 에너지 소모량 변화특성 및 공급수와 환수온도 차를 나타낸 그림이다. 그림에서 살펴보면 먼저 에너지 소모량을 살펴보면 기존 제어방법에 비해 GRNN 방법은 공급 온수온도 보정에 의해 공급온수온도가 상대적으로 낮음에 따라 공급 온수온도와 환수온도 차이가 작기 때문에 실내로 공급되는 열량이 상대적으로 작게 나타난다. 따라서 기존 제어방법보다 온수 공급시간이 길게 나타나는 특징을 나타내나 전체적인 에너지 소모량에 있어서는 절감되는 특성을 보인다. 이것은 공급유량은 두 제

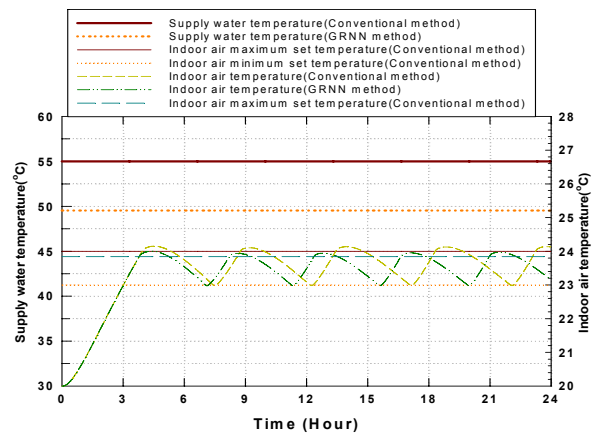


Fig. 6 The responses of temperature with conventional and GRNN control methods.

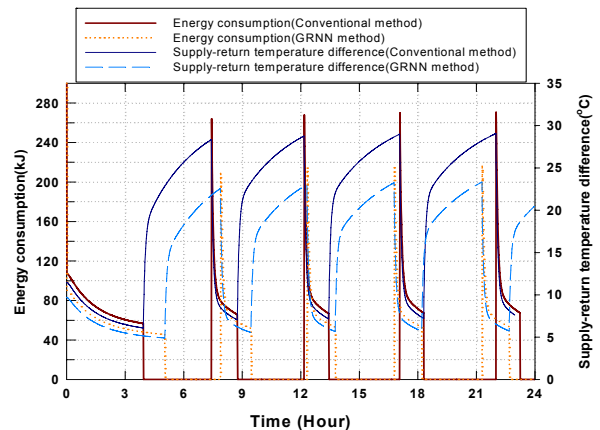


Fig. 7 The responses of temperature difference and energy consumption with conventional and GRNN control methods.

어방법 모두 동일하기 때문에 공급 온수온도 및 환수온도의 온도차에 의한 특성과 실내공기 설정온도의 상한값을 낮춰줌으로써 얻어지는 효과라고 할 수 있다.

Fig. 8은 기존제어방법과 GRNN 제어방법에 따른 각 조건별 에너지소모량을 살펴본 것이다.

먼저 외기온도, 공급 온수온도 및 공급유량 조건이(10°C/45°C/2 LPM)일 경우 GRNN을 적용하였을 경우에 4.2%의 에너지 절감 성능을 나타내었으며, (0°C/55°C/4 LPM)일 경우 5.9%, (-10°C/65°C/6 LPM)의 경우에는 9.1%의 에너지 절감 성능을 나타내었다. 또한 실내 공기온도를 살펴보았을 때 기존 제어방식과 비교하여(10°C/45°C/2 LPM)일 경우 최대 0.2°C, (0°C/55°C/4 LPM)일 경우 최대 0.3°C, (-10°C/65°C/6 LPM)의 경우에는 최대 0.5°C 정도의 오버슈트를 줄여주는 특성을 나타내었다. 이로써 미루어볼 때 바닥복사 난방시스템에 있어서 과도한 에너지가 사용되는 경우에 있어서 GRNN 방안이 더욱 효율적임을 알 수 있다.

Fig. 9~Fig. 11은 공급유량의 변동이 없는 경우와 공급유량이 변동하는 경우에 대하여 외기온도 보상 제어만 수행하였을 경우와 GRNN을 적용하였을 때에 대한 공급 온수온도 및 실내 공기온도 변화특성을 나타낸 것이다. 공급유량의 변화가 없는 경우의 공급유량은 4 LPM이며, 변화하는 경우의 유량은 예비실험을 통해 제시된 바와 같이 2 LPM~6 LPM으로 변화 되도록 하였다.

Fig. 9에서 살펴보면 외기온도의 변화에 따라서 공급 온수온도 및 실내공기 설정온도가 계속적으로 변화하고 있으며, 실내공기 설정온도가 변화함에 불

구하고 기존 제어방법의 경우 설정온도의 상한 값을 넘은 실내 공기온도가 발생하였다. 여기에 GRNN을 적용하였을 경우에 상한 값을 낮춰줌으로써 실내 공기온도가 외기온도 보상제어의 설정 값의 상한 값을 넘지 않는 제어가 이루어졌다. 공급유량이 변화하지 않음에 따라 공급온수 설정온도 및 실내공기 설정온도의 보정값이 큰폭으로 변화하지 않는 것을 알 수 있다.

그러나 Fig. 10에서 살펴보면 실로 유입되는 공급유량이 계속적으로 변화함에 따라서 공급 온수온도 및 실내 공기온도의 설정값이 보정에 따라 큰폭으로 변화하고 있음을 알 수 있으며, 기존 제어방법의 경우와는 대조적으로 GRNN의 경우 실내 공기온도가 상한값과 하한값 사이에서 안정된 제어가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 외기온도 보상제어를 수행하였을 때 실내로 유입되는 공급유량이 변화하는 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 기존 제어방법과 GRNN 적용방법의 총 에너지 소모량을 나타낸 그림이다. 다음과 같이 공급유량이 변화할 경우 공급 온수온도 및 실내 공기온도의 설정값의 보정을 통해서 실내 열환경 개선 및 에너지 절감효과를 바라보는 것이 바람직하다. 그림에서 살펴보면 공급유량이 4 LPM으로 일정할 경우 GRNN 제어방안이 기존 제어방법보다 약 3% 정도의 에너지 절감성능을 나타내었으며, 공급유량이 변화하는 경우 Fig. 10에서 살펴볼 때 평균 공급유량이 4 LPM 이상이 나타남에 따라서 기존 제어 방법보다 GRNN 제어 방안이 약 4%의 에너지 절감성능을 나타내었다.

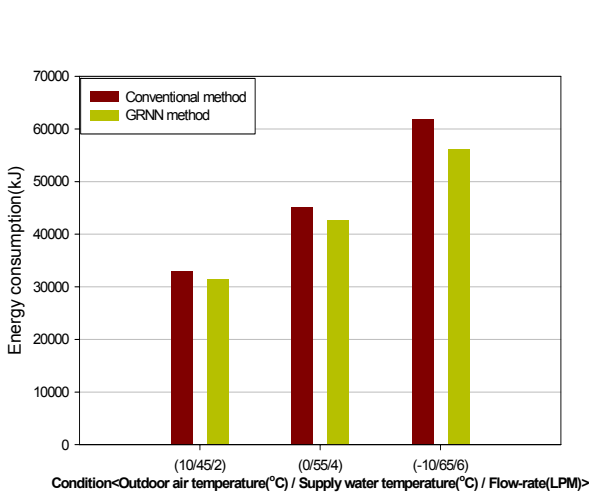


Fig. 8 Energy consumption with conventional and GRNN control methods.

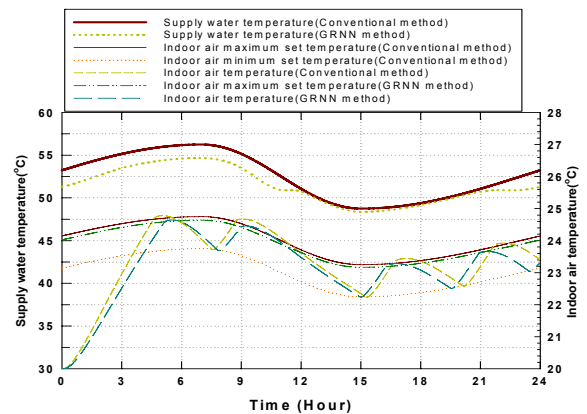


Fig. 9 The response of temperature for outdoor reset and GRNN control methods(In case of no flow rate change).

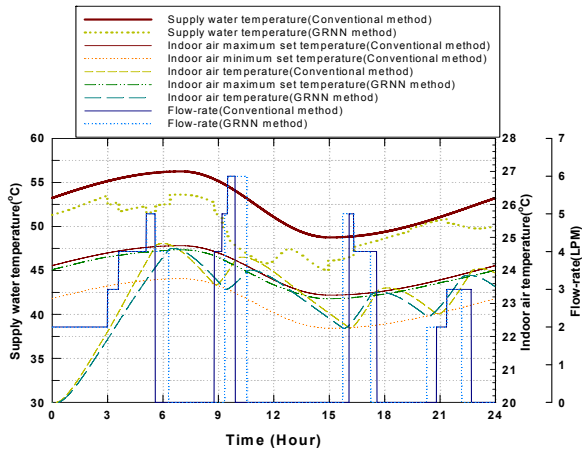


Fig. 10 The response of temperature for outdoor reset and GRNN control methods(In case of flow rate change).

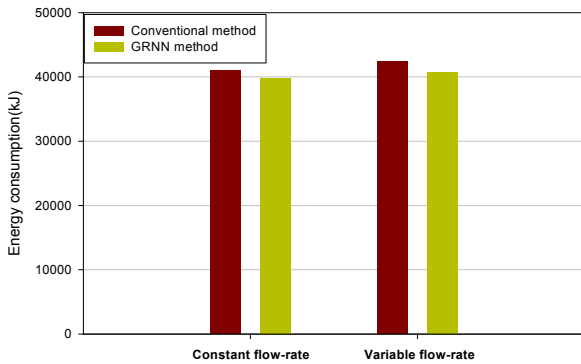


Fig. 11 Energy consumption with outdoor reset and GRNN control methods for flow rate change.

5. 결 론

본 연구에서는 공동주택 바닥난방 시스템에 대해 외기온도 및 제어변수인 공급 온수온도, 공급유량, 실내공기온도의 변화특성을 고려하여 실내공기 설정온도의 상한값을 보정해주는 GRNN 제어방법을 적용해 시뮬레이션 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 바닥복사 난방시스템에 있어서 기존제어방법과 대비하여 GRNN 제어방법을 적용하였을 때 실

내온도의 최대 0.5℃ 정도의 오버슈트를 줄여주었으며, 최대 9.1%의 에너지절감 성능을 나타내었다.

2) 실내 쾌적성 및 에너지 절감에 효과적인 외기 보상제어를 수행하였을 경우에 공급유량의 변동을 고려하여 GRNN 제어방법을 적용하였을 경우 설정온도에 대비해 최대 0.4℃의 정도의 오버슈트를 줄여주는 등 열환경을 개선시켜 주었으며, 에너지 절감에 있어서 더 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 2012년도 가천대학교 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Park, H. S., 2005, A study on real time gaze discrimination system using GRNN, Ph.D. thesis, Kwan-dong university, Korea.
2. Specht, D. F., 1991, A general regression neural network, IEEE Transactions on Neural Networks, pp. 568-571.
3. Ahn, B. C. and Song, J. Y., 2010, Control characteristics and heating performance analysis of automatic thermostatic valves for radiant slab heating system in residential apartments, Energy, Vol. 35, pp. 1615-1624.
4. Korea institute of construction technology, 1995, Thermal performance improvement for radiant floor heating system of apartment housing.
5. Hong, S. S., Song, J. Y., and Ahn, B. C., 2010, Energy saving control strategy for central heating system using outdoor air temperature compensation, Proceedings of the SAREK winter annual conference, pp. 505-510.
6. Song, J. Y., 2012, A study on the optimal operation and GRNN control strategies for radiant floor heating system in residential apartments, Ph.D. thesis, Ga-chon university, Korea.