

## 비정질 강섬유 혼입 바닥난방시스템의 열성능 평가

조 현\* · 방승기<sup>†</sup>

포스코건설 R&D CENTER\*, 경민대학교 건축과<sup>†</sup>

(2016년 3월 2일 접수, 2016년 7월 20일 수정, 2016년 7월 22일 채택)

### Thermal performance prediction of amorphous steel fibers mixed into the floor heating system

Hyun Cho\*, Seung-Ki Pang<sup>†</sup>

\*Research & Engineering Division, R&D CENTER, POSCO E&C

<sup>†</sup>Department of Architecture, Kyungmin College

(Received 3 March 2016, Revised 20 July 2016, Accepted 22 July 2016)

#### 요 약

본 연구에서는 비정질 강섬유 혼입 바닥물탈을 이용한 바닥난방시스템과 일반 물탈을 사용한 바닥난방시스템의 열성능을 비교 평가하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 온수공급온도를 변화시켰으며 다음과 같은 결론을 얻었다. 바닥의 표면온도, 실내의 공기온도 등을 검토 결과 강섬유온돌을 사용할 경우에는 실내공기를 기준으로 하면 강섬유온돌이 일반온돌에 비해 7~9%에 가까운 열효율이 상승되었으며, 바닥의 온도를 기준으로 하면 2~4% 온도상승이 일어나는 것으로 나타났다.

**주요어** : 비정질 강섬유, 열전달, 바닥난방시스템, 전산유체해석

**Abstract** - The thermal performance of amorphous steel fibers mixed floor heating system was evaluated . Analysis of results, depending on the hot water supply temperature changes, the average temperature of the bottom of the hot water supply temperature is an amorphous steel fiber floor heating system is about 2~4% higher. The average temperature of the floor surface to 1.5m air amorphous steel fiber system is 1~2% higher. The amount of heat supplied to indoor air (1.5m) from the bottom surface of amorphous steel fiber floor heating system is about 7~8% higher

**Key words** : Amorphous Steel Fiber, Heat transfer, Floor heating system, CFD

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

온돌은 우리나라 고유의 난방방식으로 바닥 복사난방 방식을 이용하고 있기 때문에 실의 온도 성층화가 거의 없고, 실내의 상하 간에 온도차이가 크게 나지 않는다. 또한 저온 복사열에 의한 난방방식이기 때문에 다른 난방방식에 비해 비교적 우수한 난방방식이라고 평가받고 있다.

온돌난방공간의 열적특성을 파악하기 위한 연구는 주로 난방방법, 공급온수의 온도에 따른 실내의 열환경을 분석한 연구가 많이 이루어져 왔다. 실내의 열환경에 대한 연구(Ahn et al., 1997)에서는 일반 대류난방과는 달리 바닥표면온도의 정도에 따라 공간내 열환경 분포가 달라진다고 하였다. 즉, 바닥표면온도가 높으면 실온이 낮아도 난방효과가 있으며, 실온이 높을 경우에는 반대로 바닥표면온도가 낮아도 유사한 수준의 난방효과를 얻을 수 있다는 결론을 얻었다.

바닥의 표면의 온도는 바닥에 매설된 온수파이프로

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-31-828-7322, E-mail : skpang@kyungmin.ac.kr

부터 온돌층을 구성하는 몰탈에 열전달이 일어나며, 이러한 열전달은 공급온수의 온도뿐만 아니라 바닥을 구성하는 재료의 열전도율, 비열 및 열용량에 영향을 받는다. 바닥을 구성하는 재료의 열전도율을 높이고, 열용량을 크게 할 수 있다면 바닥의 온도는 동일한 공급온수 온도를 이용하여도 효율을 높일 수 있을 것이다. 열효율 향상의 측면 보다는 구조적인 관점에서 바닥의 경량화, 바닥 구성층의 열전도율 향상을 위한 연구는 진행되어 왔지만 열용량을 크게 하는 것은 “열용량 = 비열 × 질량”이기 때문에 온돌층을 구성하는 재료의 비열을 높이거나 질량을 크게 해야 한다. 그러나 질량을 크게 하는 것은 구조 보강 등의 추가적인 문제가 발생되기 때문에 대체로 건설회사의 경우 이 사항에 대해서는 고려하고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 열용량을 높이는 방법을 사용하지 않고 온돌층을 구성하는 재료 중 공급온수파이프가 매설되는 바닥 몰탈의 열전도율을 높이는 방안을 고려하여 “비정질 강섬유 혼입 바닥몰탈”을 사용하는 경우를 대상으로 열적특성을 파악하였다.

실험에 의한 평가와 시뮬레이션을 이용하여 열적특성을 비교 평가하였으며 본 논문에서는 시뮬레이션을 이용하여 비정질 강섬유 혼입 바닥몰탈을 이용한 바닥난방시스템과 일반 몰탈을 사용한 바닥 난방시스템의 열성능을 비교 평가하였다.

## 1.2 기존 연구 결과

시뮬레이션의 경계조건을 결정하기 위하여 기존문헌을 조사하였으며 기존 문헌의 건식온돌과 습식온돌을 대상으로 바닥 구조체에 공급되는 온수의 유속, 공급온도를 조사하였다.

Jung et al (2009)는 건식온돌과 습식온돌을 대상으로 연속난방 실험 및 스케줄 난방실험을 통해서 열전달 특



Fig. 1. Amorphous steel fiber

성을 비교분석하고, 온수의 공급온도는 연속 난방시에는 70℃, 스케줄 난방(간헐난방)에는 70℃, 60℃를 사용하였다.[1]

바닥 난방시스템에서의 적정 유속의 필요성에 대하여 검토한 결과는 (Park et al., 2010) 난방관내의 유속은 0.124~0.166m/sec로 나타났으며, 난방 공급수의 온도는 60℃로 설정하여 실험을 실시하였다. 실험 및 분석결과 난방관의 유속은 0.149m/sec를 확보해야 한다고 결론을 얻었다.

Lee et al.(2013)[2]은 신한옥 바닥난방의 열적특성을 비교하는 것을 목적으로 스티렌폼, 황토바닥재, 히트파이프를 이용하여 시험체를 제작하고 실험실에서 실험을 실시하고, 공급 온수의 온도는 60℃, 50℃, 40℃로 설정하였다.

온돌난방공간의 열적특성을 파악하기 위한 연구는 주로 난방방법, 공급온수의 온도에 따른 실내의 열환경을 분석한 연구가 많이 이루어져 왔다. 실내의 열환경에 대한 연구에서는 일반 대류난방과는 달리 바닥표면온도의 정도에 따라 공간내 열환경 분포가 달라진다. 즉, 바닥표면온도가 높으면 실온이 낮아도 난방효과가 있으며, 실온이 높을 경우에는 반대로 바닥표면온도가 낮아도 유사한 수준의 난방효과를 얻을 수 있다.[3]

국내에서는 온돌을 대상으로 한 쾌적범위를 성정하기 위한 연구가 1980년 초부터 이루어져 어느 정도 그 성과를 거두고 있으나 각 연구자별로 실온의 쾌적 범위는 일반적으로 16℃~26℃까지로 연구결과 사이에 비교적 큰 오차가 있다.

온돌의 열복사 특성을 잘 반영하고 있다고 판단되는 연구는 적정 실온범위를 17.5℃~24.5℃, 적정 바닥온도 범위는 30.6℃~38.8℃를 제안하고 있다.[4]

Chung et al (1998)은 덥거나 추위를 느끼지 않는 바닥의 중립온도는 바닥에 앉은 자세에서는 온돌바닥의 표면온도가 30℃, 의자에 앉은 자세에서는 32℃인 것으로 연구결과를 제시하였다.[5]

실온의 쾌적범위에 대한 연구는 주로 실내온도와 바닥 표면 온도를 조절하는 것을 목적으로 진행되었으며 구조체에 공급되는 온수온도에 대한 조건을 설정하는 경우는 평가되지 않은 것으로 나타났다.

온돌 구조체에 공급되는 온수온도에 대한 연구로 Lim et al(2012)은 구체축열시스템의 방열특성을 평가하기 위하여 온수의 공급온도를 40℃~60℃로 설정하고 운전 조건에 따른 방열량을 산출하였고[6], Choi et al.(2006)은 부하조건에 따른 건물의 열손실과 온수온도의 방열성

**Table 1.** Simulation Case & Conditions

Simulation Case No.	Supply		Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Specific Heat [J/kg-k]	Thermal Conductivity [W/m-K]
	Temp. [°C]	Velocity [m/sec]			
Standard floor heating system	1	40	1,950	0.21	0.39
	2	50			
	3	60			
Amorphous steel fiber heating system	4	40	1,980	0.20	0.52
	5	50			
	6	60			

능 등을 고려하여 공급 온수온도 산정식을 개발하여, 적정 공급온수온도는 “온수의 온도=외기온 × (-0.886)=53.0”으로 표현하는 선형적인 함수로 나타내었다.[7] 또한 Chli et al.(2007)은 시뮬레이션을 이용하여 단일열원을 사용하는 멀티존 난방시스템에서 온수온도의 공급온수에 따른 실온 변동폭, 실온 변화특성을 파악하고 온수의 공급유량은 2 liter/min, 실내설정온도는 23°C로 하고 온수의 온도는 최대값인 80°C로 설정하고 on/off 제어를 실시하였다.[8] Shon et al. (1990)은 온수온도난방시스템의 설계를 위하여 실험을 실시하고 실험조건으로 온수의 공급온도를 37°C와 48°C로 설정하고 실내의 각 표면의 온도, 실온을 측정하였다.[9]

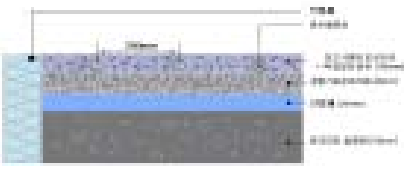
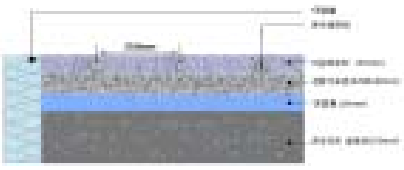

Song (2005)은 바닥온도에 따른 낭심의 온도변화특성을 파악하고 인체의 변화를 측정하기 위하여 바닥에 공급되는 공급수의 온도를 30°C~40°C로 5°C간격으로 공급하여 이에 대한 결과를 얻었으며[10] Oh et al.(1985)은 온돌바닥의 축열재를 변경에 따른 열적특성을 파악할 목적으로 온수의 공급온도를 60°C로 설정하고 실험을 실시하였다.[11]

## 2. 시뮬레이션

비정질 강섬유 혼입 바닥물탈과 일반적인 바닥물탈을 사용한 온돌난방시스템의 열성능을 비교 평가하기 위하여 CFD 해석을 실시하였다.

해석에 사용한 프로그램은 STAR-CCM+이며, 해석 대상 모델이 온수-파이프-바닥구조체-바닥표면 순으로 서로 접촉되어 있으므로 구조체 내부에서는 전도에 의한 열전달을 해석하고 바닥표면과 각 벽체와의 복사

**Table 2.** Simulation Modeling & Section

Section
 <p>Amorphous steel fiber heating system</p>
 <p>Standard floor heating system</p>
 <p>Mesh &amp; Modeling (56,690,053 cells)</p>

열전달, 각 표면으로부터 실내공기로의 열전달은 복사와 대류에 의한 열전달을 동시에 계산하였으며, 온수의 공급온도와 유속은 기존 문헌 조사결과를 사용하였다.

Table 1에 시뮬레이션에 사용한 재료의 물성, 경계조건(온수공급 온도/속도) 및 시뮬레이션 조건을 나타내었다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 바닥표면온도

Fig 2는 바닥에 공급되는 온수의 온도를 40, 50 및 60°C로 한 경우 바닥의 평균 표면온도를 각 케이스별로 비교한 것이다. 공급온수의 온도가 40°C인 case 1과 case 4를 비교하면 case 1을 기준으로 강섬유온돌인 case 4는 102.1%( $\Delta t=0.6^\circ\text{C}$ ) 온도가 높게 나타났다. 온수공급온도가 50°C인 case 4와 case 5를 비교하면 강섬유를 사용한 온돌의 평균 표면온도가 103.1%( $\Delta t=0.9^\circ\text{C}$ ) 높게 나타났다. 공급온수의 온도가 60°C인 경우인 case 6은 일반온돌인 case 3과 비교하면 104.2%( $\Delta t=1.4^\circ\text{C}$ ) 높게 나타났다.

따라서 공급온수의 온도가 높아지게 되면 일반온돌의 평균 표면온도와 강섬유 온돌과의 표면 평균 온도의 차이가 커지는 것으로 나타났다.

Fig 3은 온수공급온도에 따른 강섬유 온돌의 바닥표면

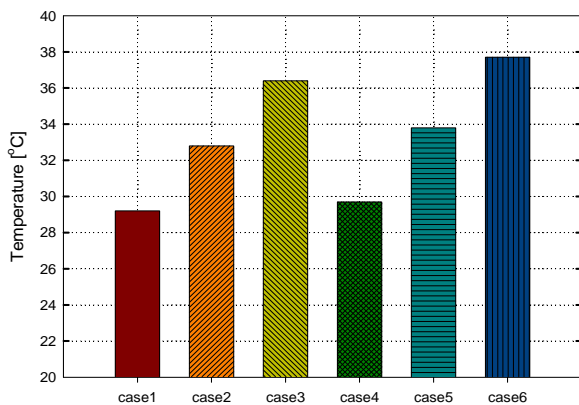


Fig. 2. Surface temperature (Floor, Mean)

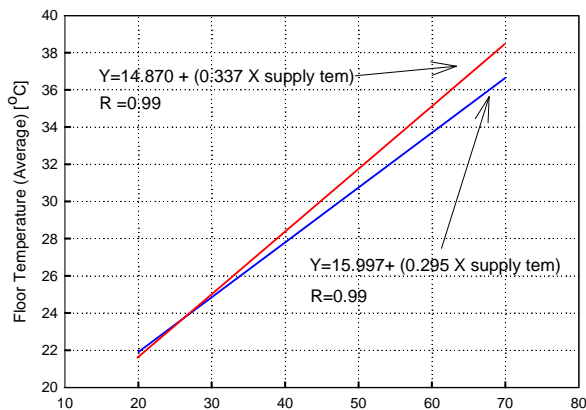


Fig. 3. Prediction floor surface temperature by temperature of hot water supply

온도를 예측한 결과를 나타낸 것으로는 “표면 온도 =  $14.840 \times (0.337 \times \text{온수 공급 온도})$ ”, ( $R^2=0.99$ )로 나타났으며, 일반온돌의 표면 온도는 “표면 온도 =  $15.697 + (0.295 \times \text{온수 공급 온도})$ ”, ( $R^2=0.99$ )로 표현할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 강섬유 온돌의 경우가 온수공급온도에 따라 바닥의 표면온도가 더 높게 나타나는 것으로 판단할 수 있다.

#### 3.2 실내 공기온도 (바닥면 위 1.5m)

Fig 4는 공급 온수의 온도를 40, 50 및 60°C로 한 경우 바닥위 1.5m 위의 기온을 각 케이스별로 비교한 것이다. 바닥위 1.5m 위의 기온을 각 케이스별로 비교한 결과 공급온수의 온도가 40°C인 case 1과 case 4를 비교하면 온수공급온도가 50°C인 case 1과 case 4를 비교하면 강섬유를 사용한 온돌의 평균 표면온도가 100.9%( $\Delta t=0.2^\circ\text{C}$ ) 높게 나타났으며, 공급온수온도가 50°C일 때는 101.4%( $\Delta t=0.4^\circ\text{C}$ ) 높게 나타났다. 또한 공급온수의 온도가 60°C인 경우인 case 6은 일반온돌인 case 3과 비교하면 101.9%( $\Delta t=0.5^\circ\text{C}$ ) 높게 나타났다.

따라서 공급온수의 온도 상승시 일반 온돌에 비해 강섬유 온돌의 실내온도의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다.

Fig 5는 온수공급온도에 따른 바닥면 위 1.5m 지점의 실내의 평균 기온을 예측한 결과를 나타낸 것이다. 강섬유를 사용한 온돌은  $y = 19.028 + (0.120 \times \text{온수 공급 온도})$ , ( $R^2=0.99$ )로 이며 일반온돌의 바닥면위 1.5m 지점의 기온은  $y = 19.378 + (0.105 \times \text{온수 공급 온도})$ , ( $R=0.99$ )로 표현할 수 있는 것으로 나타났다.

따라서 강섬유온돌의 경우가 온수공급온도에 따라 바닥면 위 1.5m 지점에서의 평균기온이 더 높게 나타나는 것으로 판단할 수 있다.

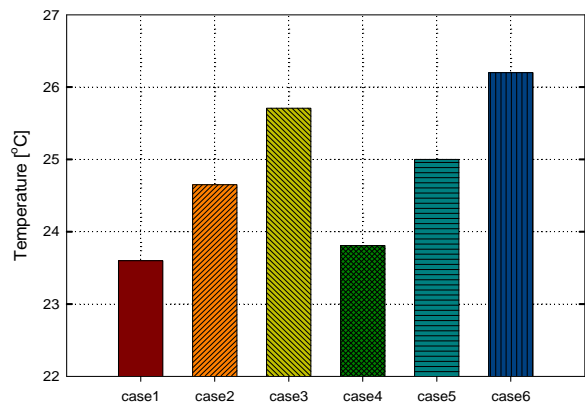


Fig. 4. Indoor air temperature (1.5m)

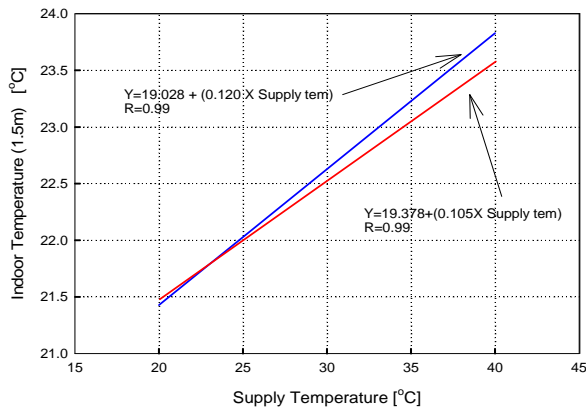


Fig. 5. Prediction indoor air temp. by temp. of hot water supply

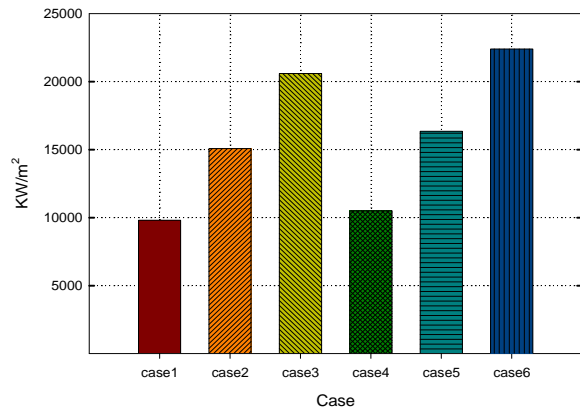


Fig. 7. The amount of heat transferred from the bottom layer in indoor air

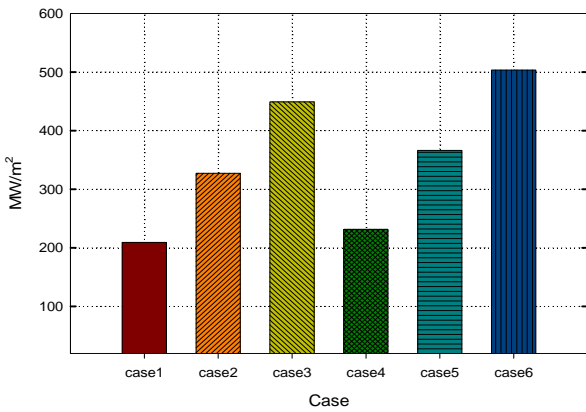


Fig. 6. The bottom layer in the heat transfer from the hot water pipe

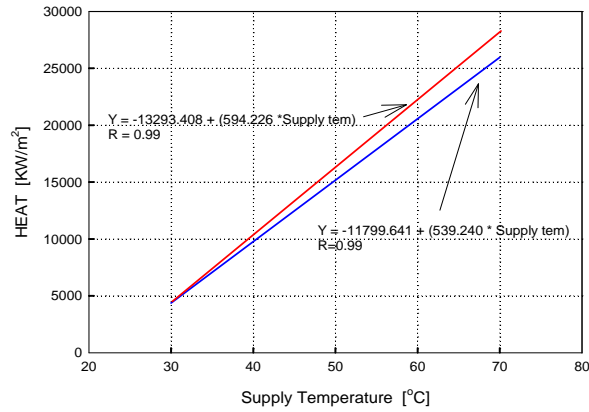


Fig. 8. Prediction heat transferred to indoor air by temp. of hot water supply (1.5m)

### 3.3 전열량

온돌바닥의 표면온도는 바닥에 매설된 온수파이프로 부터 바닥을 구성하는 온돌 구조체로의 공급 열량에 따라 다르게 되며, 그 요소중 큰 비율을 차지하는 것은 바닥을 구성하는 재료의 열전도율과 열용량에 따라 다르게 된다.

Fig 6은 온수공급파이프로부터 바닥층에 전달된 열량을 각 case별로 비교하여 나타낸 결과이다. 그림서 볼수 있는 바와 같이 공급온수의 온도가 40℃, 50℃ 및 60℃로 올라감에 따라서 바닥층에 전달된 열량은 일반온돌에 비해서 강섬유온돌이 10.6%, 12.0%, 12.1% 정도 더 큰 값을 보이고 있다. 이는 일반온돌과 강섬유 온돌의 비열, 밀도, 열전도율의 차이인 것으로 판단된다.

Fig 7은 공급 온도의 변화에 따라 바닥표면으로부터 실내공기에 전달된 열량을 각 케이스별로 비교하여 나타낸 것이다. 동일한 공급온도인 경우 강섬유온돌이 7-8.7%

정도 열량이 많이 전달된 것으로 나타났으며, 이는 비열, 열전도율에 따른 바닥표면온도의 차이인 것으로 판단된다.

또한 Fig 8은 온수의 공급온도 변화에 따른 일반온돌, 강섬유 온돌에서 바닥표면으로부터 바닥면위 1.5m 지점의 공기에 전달된 열량을 계산하여 상관관계를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 선형으로 예측할 수 있었으며, 공급온수의 온도가 올라감에 따라 그 차이는 더 크게 나타났다.

온수의 온도가 40℃인 경우는 그 차이가 7.1%, 온수의 온도가 50℃인 경우에는 8.4%로 나타났으며 공급온수가 60℃인 경우에는 8.7% 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다

### 4. 결론

본 연구에서는 비정질 강섬유 혼입 바닥물탈을 이용한 바닥난방시스템과 일반 물탈을 사용한 바닥난방시스템

의 열성능을 비교평가하기 위하여 온수공급온도를 변화시키는 시뮬레이션을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 공급온수의 온도가 40℃인 case 1(일반온돌)과 case4(강섬유온돌)를 비교하면 case 1을 기준으로 강섬유온돌인 case 4는 102.1%( $\Delta t=0.6^\circ\text{C}$ ) 온도가 높게 나타났다. 온수공급온도가 50℃인 case 4와 case 5를 비교하면 강섬유를 사용한 온돌의 평균 표면온도가 103.1%( $\Delta t=0.9^\circ\text{C}$ ) 높게 나타났으며, 공급온수의 온도가 60℃인 경우인 case 6은 일반온돌인 case 3과 비교하면 104.2%( $\Delta t=1.4^\circ\text{C}$ ) 높게 나타났다.

2) 바닥위 1.5m 위의 기온을 각 케이스별로 비교한 결과 공급온수의 온도가 40℃인 case 1과 case4를 비교하면 온수공급온도가 50℃인 case 1과 case 4를 비교하면 강섬유를 사용한 온돌의 평균 표면온도가 100.9%( $\Delta t=0.2^\circ\text{C}$ ) 높게 나타났으며, 공급온수온도가 50℃일 때는 101.4%( $\Delta t=0.4^\circ\text{C}$ ) 높게 나타났다. 또한 공급온수의 온도가 60℃인 경우인 case 6은 일반온돌인 case 3과 비교하면 101.9%( $\Delta t=0.5^\circ\text{C}$ ) 높게 나타났다.

3) 공급 온도의 변화에 따라 바닥표면으로부터 실내공기에 전달된 열량은 동일한 공급온도인 경우 강섬유온돌이 7~8.7% 정도 열량이 많이 전달된 것으로 나타났으며, 이는 비열, 열전도율에 따른 바닥표면온도의 차이인 것으로 판단되며 공급온수의 온도가 올라감에 따라 그 차이는 더 크게 나타났다.

4) 시뮬레이션에 의해서 바닥의 표면온도, 실내의 공기온도 등을 검토 결과 강섬유온돌을 사용하면 실내공기를 기준으로 하면 공급온수온도에 따라 다르지만 7~9%에 가까운 열효율의 상승을 기대할 수 있으며, 바닥의 온도를 기준으로 할 경우에는 2~4% 온도상승의 효율을 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

## References

1. Jung Hae-Kwon, Cho Dong-Woo, Yu Ki-Hyung, 2009, "Comparative Analysis on the Heat Transfer Characteristics between Dry and Wet Ondol Systems", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 25, No. 11, pp.315-322.
2. Lee Tai-Gang, Lee Ju-Yeob, Song Min-Jeong, Kim Sun-Woo, 2013, "The comparison of thermal characteristics of new Han-ok floor heating for applying modern On-dol system", Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 13, No. 3, pp.61-69.
3. Ahn Byung-Wook, 1997, "Ondol Heated Room & its Indoor Thermal Environment", Journal of the Korean Society of Living Environment System, Vol. 4, No. 3, pp.1-12.
4. Yoon Yong-Jin, Park Sang-Dong, Sohn Jang-Yeul, 1984, "Effect of an Asymmetric Radiation Field on Thermal Sensation with Radiant Heating" Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 4, No. 2, pp.139-142.
5. Chung Kwang-Seop, 1998, "A Study on the Assessment of Local Thermal Sensation in Human Body by Varying Ondol Floor Surface Temperature" Journal of the Korean Society of Living Environment System, Vol. 5, No. 2, pp.33-38.
6. Lim Jae-Han, Song Jin-Hee, Koo Bo-Kyoung, Song Seung-Yeong, Seong Yoon-Bok, 2012, "Characteristic of Thermal Output of Thermally Activated Building System During the Heating Operation According to FDM Analysis", Society of Air-conditioning and refrigerating engineers of Korea, pp.218-223.
7. Choi Jeong-Min, Lee Kyu-Nam, Ryu Seong-Ryoung, Kim Yong-Yee, Yeo Myoung-Souk, Kim Kwang-Woo, 2006, "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" Society of Air-conditioning and refrigerating engineers of Korea, pp.795-800.
8. Choi Jeong-Min, Lee Kyu-Nam, Ryu Seong-Ryoung, Kim Yong-Yee, Yeo Myoung-Souk, Kim Kwang-Woo, 2007, "A Study on the Required Supply Water Temperature Calculating Method for the Control of Multizone Radiant Floor Heating System" Society of Air-conditioning and refrigerating engineers of Korea, Vol. 19, No. 1, pp.77-85.
9. Sohn Jang-Yeul, Chung Kwang-Seop, Ahn Byung-Wook, 1990, "An Experimental Results of the Transient Temperature Response of a Floor Heating Panel according to Varying Pipe Embedding Depth" Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 6, No. 5, pp.185-191.
10. Song Gook-Sup, 2005, "Effects of the Floor Surface Temperature and Metabolism on Scrotal Temperature" Journal of the Korean Society of Living Environment System, Vol. 12, No. 3, pp.185-191.
11. Oh Byoung-Chil, Lee Kun-Young, 1985, "A Study on the Heat Efficiency in Ondol Heating System by different Heat-Accumulation Material" Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 5, No. 2, pp.295-298.