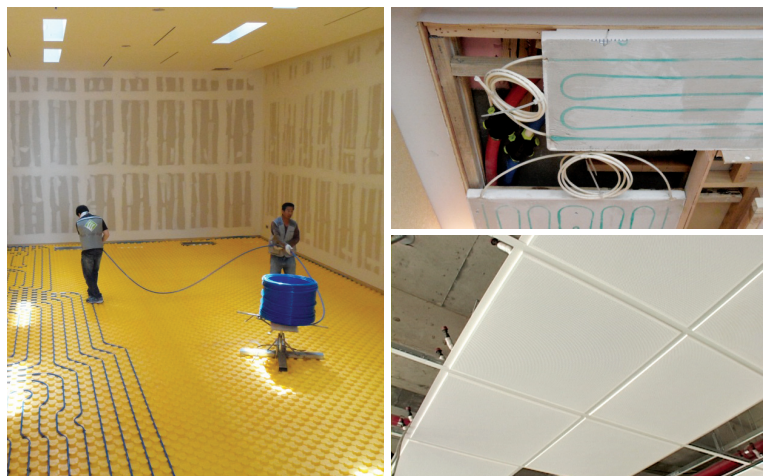


복사냉난방 시스템의 에너지 절감

복사냉난방 시스템의 에너지 효율성을 근본 원리와 실행방법을 통해 소개 하고자 한다.

복사냉난방 시스템은 주로 실내에 설치되는 마감자재에 열을 전달하여 실내 거주자에게 열적 쾌적성을 전달해 주는 시스템이다. 마감자재에 열을 전달하는 매체는 열선, 가스, 물 등 다양한 형태가 있으나 실내 거주자의 안전성과 에너지 효율성을 고려하여 물을 매체로 이용하는 복사냉난방 시스템이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 최근에 고유가 및 저탄소 경제혁명과 더불어 선진국들에서는 기존 공조방식을 대체하는 방편으로 복사냉난방 시스템이 채택되고 있다. 본 고에서는 이미 널리 입증된 복사냉난방 시스템의 에너지 효율성과 그 원리를 재조명하여 설명하고자 한다.



[그림 1] 시공형 복사시스템과 설치형 복사패널

양경삼

(주)에코에너지임

samyang@samyangsys.com

복사의 기본원리

열을 전달하는 방법은 크게 전도, 대류, 복사 현상으로 분류할 수 있다. 전도는 물체 간의 접촉으로 전달되는 열현상이며 주로 물체의 재료성질에 많은 영향을 받는다. 대류는 공기에 의해 전달되는 열현상이며 공기의 온도나 밀도차에 의해 자연적으로 발생한다. 복사는 물체에서 방출하는 전자파 에너지 현상이다. 복사현상은 파장의 일종이며 마이크로(μm)으로 표현한다. 복사는 광범위한 파장을 포함할 수 있으나 본 고에서 다루는 열적 복사파장의 범위는 0.1~100 μm 이다. 참고로 사람 눈이 볼 수 있는 복사파장은 0.4~0.7 μm 이며 이는 태양이 방출하는 빛의 복사파장과 동일한 범위이다. 복사현상은 주로 복사체의 복사율과 복사각도에 영향을 받는다. 복사체의 복사값을 계산할 때 여러 가지 복잡한 수식과 공식을 쓰지만 본 고에 간략하게 표현하기 위해 스테판-볼츠만의 법칙(Stefan-Boltzmann Law)을 이용한 다음과 같은 공식을 참고한다

$$q = q_{\varepsilon\sigma T^4} A$$

$$q / A = \varepsilon\sigma T^4$$

$$= (1) (5.6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4) (5800 \text{ K})^4$$

$$= 6.42 \times 10^7 \text{ W/m}^2$$

열이 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하는 열전달 법칙에 의해 건축물의 실내를 구성하는 면들은 모두 일정한 복사열을 방출하거나 흡수한다. 따라서 실내구성 면 중 한 면이 타 면보다 높은 복사열을 방출하면 인접한 다른 면들이 그 열을 흡수/반사하면서 실내 평균복사온도를 상승시킨다. 실내 공간에 거주자가 있을 경우에는 인체가 직접 실내 면들로부터 복사열을 흡수하거나 방출하게 된다. 즉 복사면체의 존재는 실온과는 다른 열적 쾌감을 거주자에게 선사하게 된다. 이러한 온열감을 평균복사온도라고 표현한다. 평균복사온도는 인체에 직접적인 열적 쾌감을 전해주는 작용온도에 큰 영향을 미친다.

복사 시스템의 원리

복사냉난방 시스템은 실내의 평균복사온도(Mean Radiant Temperature)를 조정하여 궁극적으로 실내 작용온도(Operative Temperature)를 사용자 요구조건에 맞추어 주는 역할을 한다. 미국 ASHRAE Standards-55 에 따르면 인체의 쾌적도는 다음 6가지 요인에 영향을 받는다.

1. 인간 신진대사치
2. 의류 단열치
3. 공기온도
4. 복사온도
5. 공기속도
6. 습도

이 중에서 빌딩 설비가 제어할 수 있는 요인들은 3~6번 요인들일 것이다. ASHRAE

$$q = q_{\varepsilon\sigma T^4} A$$

이때,

q = 단위 시간당 열전달 양 (W)

ε = 물체의 복사율 (완벽한 블랙바디일 경우

1) (보통 물체들은 0~1사이값임)

$\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4)$ - 스테판-볼츠만 상수

츠만 상수

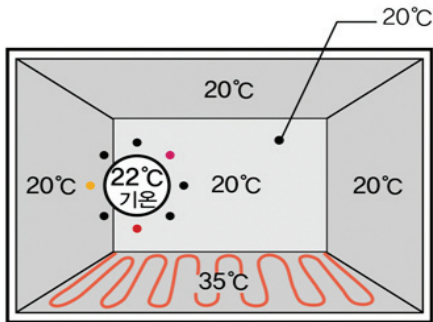
T = 절대 온도 켈빈 (K)

A = 복사체의 면적 (m^2)

*공식을 이용한 예:

태양의 표면온도는 5800 K 이며 태양이 완벽한 블랙바디 복사체라는 가정하에 태양의 복사에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다:

복사난방시

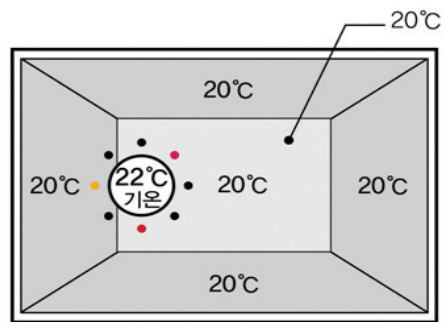


기 온 : 22°C

$$\text{평균 복사온도} : \frac{20+20+20+20+20+35}{6} = 22.5^\circ\text{C}$$

$$\text{작용 온도} : \frac{22+22.5}{2} = 22.25^\circ\text{C}$$

일반 공조난방시



기 온 : 22°C

$$\text{평균 복사온도} : \frac{20+20+20+20+20+20}{6} = 20^\circ\text{C}$$

$$\text{작용 온도} : \frac{22+20}{2} = 21^\circ\text{C}$$

[그림 2] 복사난방과 일반공조와의 작용온도 편차

Standards-55 에 따르면, 신진대사, 의류단열, 공기속도, 그리고 습도가 모두 일정하다면 인간의 쾌적도는 작용온도로 표현된다.

아마 대부분의 실내환경인 공기속도 0.4 m/s 이하 그리고 복사온도 50°C 미만일 때는 공기온도와 복사온도의 평균값이 작용온도를 나타내게 된다. 공기온도는 일반 기온을 나타내며, 복사온도는 평균복사온도로 표현한다. ASHRAE 에서는 이 두 값의 평균을 나타내는 작용온도를 인체의 쾌적감을 평가하는 가장 중요한 지표로 삼고 있다.

평균복사온도

열을 발산/흡수하는 복사체는 그 물체의 면에 일정한 온도를 가지고 있다. 이면은 또한 인접해 있는 다른 물체에 그 온도를 윗글에 설명한 방식으로 열을 복사시킨다. 평균복사온도란 온도를 측정하는 공간을 형성하는 면들이 가지고 있는 온도의 평균치를 뜻한다. 그림 2와 같이 복사난방을 하고 있는 6면체의 공간의 경우 평균복사온도는 각 6면의 다른 온도의 평균치를 나타낸다. 이

는 실내 공기의 온도와는 전혀 다른 계수이며, 인체에게 아주 밀접한 영향을 미친다.

작용온도

우리가 흔히 쓰는 실내온도의 수치는 단순히 실내공간의 공기 온도를 나타낸다. 사실 이것은 실내 거주자의 온열감을 측정하기에는 불완전한 척도이다. 인체가 느끼는 온열감은 사실 작용온도에 더욱 가깝다. 작용온도는 간단히 말해 평균 복사온도와 공기 온도의 평균치를 나타낸다. 예를 들어 6면을 가진 방이 있다. 그림 2와 같이 실내표면의 온도는 각기 다르다. 그리고 이 방 안의 공기 온도 역시 다르다. 실제로 이 방과 같이 6면 중 한 면이 복사체로서 온도가 올라가 있다면, 이 방안 평균복사온도가 올라갈 것이며 이는 실제 기온과 함께 작용온도를 상승시킨다. 즉 실제 공기의 온도보다 실상 실내 거주자는 더욱 따뜻하게 느낄 수 있는 것이다. 예를 들어 같은 실내 공간을 동일한 기온으로 유지시킬 때 실제 복사난방을 할 경우에는 일반 공조방식 난방에 비해 더

〈표 1〉 원천온도보다 낮게 실내온도를 세팅 함에 따라 생기는 난방 부하 절감률(%)

원천 실내 온도 세팅 치, °C	원천실내온도로 부터의 온도 저하치 °C									
	0.6°	1.2°	1.8°	2.4°	3°	3.6°	4.2°	4.8°	5.6°	6.2°
21.1	3.74	7.41	11.02	14.56	18.03	21.42	24.74	27.99	31.16	34.26
20.5	3.81	7.56	11.24	14.84	18.37	21.81	25.19	28.49	31.70	34.85
20	3.90	7.72	11.46	15.13	18.71	22.23	25.65	29.00	32.27	35.46
19.4	3.97	7.87	11.69	15.42	19.07	22.64	26.12	29.52	32.84	36.10
18.8	4.06	8.04	11.92	15.72	19.44	23.06	26.60	30.07	33.46	36.76
18.3	4.14	8.19	12.15	16.03	19.80	23.49	27.10	30.64	34.09	37.44
17.7	4.22	8.36	12.40	16.34	20.19	23.95	27.64	31.24	34.74	38.13
17.2	4.32	8.54	12.65	16.67	20.60	24.45	28.21	31.86	35.41	38.86
16.6	4.41	8.71	12.91	17.02	21.04	24.97	28.87	32.49	36.09	39.61
16.1	4.50	8.90	13.19	17.40	21.51	25.50	29.38	33.15	36.83	40.40
15.5	4.60	9.11	13.51	17.81	21.99	26.05	30.00	33.85	37.59	41.20
15	4.72	9.34	13.85	18.23	22.48	26.62	30.66	34.58	38.36	
14.4	4.85	9.58	14.18	18.65	22.99	27.23	31.34	35.30		
13.8	4.97	9.80	14.50	19.06	23.52	27.84	32.01			
13.3	5.09	10.03	14.83	19.52	24.06	28.45				
12.7	5.21	10.27	15.21	19.99	24.62					

육 높은 평균 복사온도로써 작용온도를 상승시켜 동일한 기온 조건에도 더욱 따뜻하게 공간을 조성할 수 있다. 이것은 즉 실내기온을 조금 낮게 유지 시켜도 복사난방은 공조난방과 동일한 열적 쾌감을 줄 수 있다는 뜻이다. 이는 냉방 시에도 마찬가지로, 복사시스템은 더욱 높은 기온으로도 같은 냉방 온열감을 실내 거주자에게 전달할 수 있다는 의미이다.

복사난방 시 실내 기온과 작용온도는 평균 약 1~2°C 정도 온도 편차(통계적인 수치이며 여러 변수가 있을 수 있다)를 일으키며 운영이 되어 실제로 복사난방 시 좀 더 춥게 난방을 하거나 더 덥게 냉방을 하여도 공조 시스템보다 실내 거주자에게 더욱 높은 온열감을 줄 수 있다.

표 1과 같이 온도 편차를 두고 난방을 할 때에

도 상당한 난방부하율을 줄일 수 있다. 즉 복사난방 시스템은 공조시스템보다 실내 열적부하를 낮추는 데 더욱 효율적인 시스템이다.

복사시스템의 적용

대한민국의 기후 조건은 매우 변화가 심하다. 특히 고온 다습한 여름철, 복사냉방 운전에는 많은 제약이 생긴다. 대표적인 문제가 결로현상이다. 과거 많은 빌딩이 복사냉난방을 시도해왔지만 항상 결로현상의 제어에 큰 어려움을 겪어왔다. 하지만 이제 21세기에 도래해 센서기술과 제어시스템의 비약적 진보로 인해 세밀한 실내공간 노점온도 조절이 가능해 지면서 복사냉난방시스템이 진정한 시스템으로서의 가치를 발휘하고 있다.

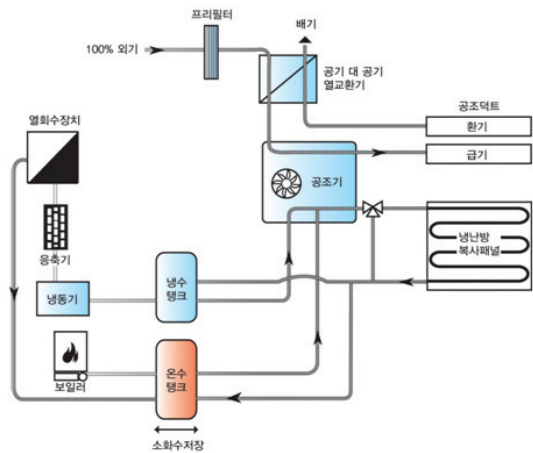
근본적으로 복사시스템을 최적화하려면 외피 단열을 철저히 하여 실내 부하량과 공기누설을 최소화하여야 한다. 그렇지 못할 경우 복사시스템이 감당할 수 있는 부하능력은 현열부하의 일부이기 때문에 대부분의 경우 공조시스템이 같이 운용하여 잠열부하를 처리한다. 쉽게 말해 복사시스템이 실내 작용온도를 제어하고 제습공조시스템이 습도를 제어한다.

복사-공조 하이브리드 시스템

복사-공조 하이브리드 시스템이란 일반적으로 공조시스템이 감당하던 현열부하의 대부분을 복사시스템이 담당하게 설계하는 방법을 말한다. 외국에서는 빌딩냉난방 에너지 소비를 줄이기 위한 대안으로 많이 사용하고 있다. 마치 하이브리드 자동차가 가솔린엔진과 배터리엔진 두 가지를 이용하여 연료소비량을 낮추는 개념과 비슷하다. 하이브리드 자동차에서는 기존 가솔린엔진이 항상 가동하며 배터리엔진을 보조하고 저속에서는 배터리엔진이 차를 구동하고 고속에서 가솔린엔진이 차를 구동하게 하는 시스템이다. 복사-공조 하이브리드 시스템도 마찬가지로 공조기가 항상 잠열부하를 담당하고, 부하량이 적은 일반 운전시 복사냉난방 시스템이 부하를 담당, 부하량이 높을 때 한시적으로 공조시스템이 운행하게끔 설정하는 시스템이다. 역시 하이브리드 시스템이 추구하는 바는 에너지 절감과 더 나은 쾌적도이다. 시스템 계략도는 **그림 3**과 같다.

신재생 저에너지 시스템

복사시스템이 가지고 있는 낮은 부하조건 때문에 많은 경우 제약성이 있는 지열이나 태양열 같은 신재생에너지원과 같이 운영하는 것이 효율을 극대화할 수 있는 방법이다. 복사방열부위에서 요구하는 열원 온도는 다른 공조시스템보다

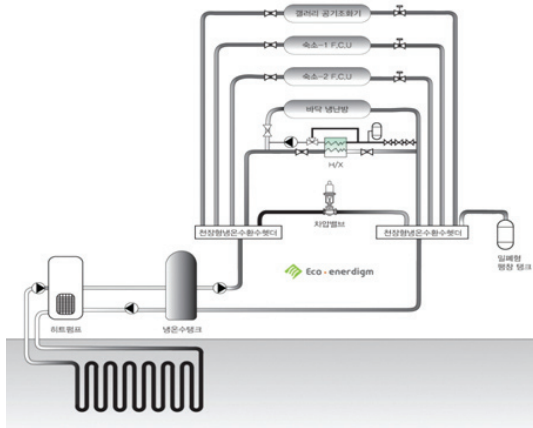


[그림 3] 복사-공조 하이브리드 시스템 계략도

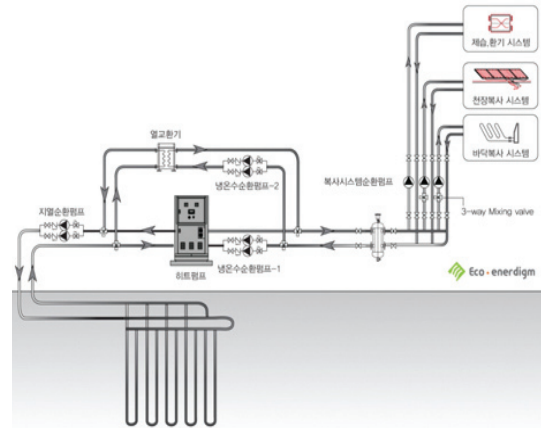
현격히 부하율이 적다. 복사패널에서 요구되는 공급수의 온도는 냉방시 평균 15°C 이며 난방시 평균 38°C 이다. 사용온도는 또한 빌딩외피와도 밀접한 관계가 있지만, 작용온도와 평균복사온도를 생각하면 패널의 저부하가 충분히 이해가 될 것이다. 그리고 실제로 ASHRAE Handbook에서는 복사방식으로 냉난방을 할 때 시스템이 감당해야 하는 빌딩 디자인 현열부하를 4~16%까지 낮추어도 된다고 권고하고 있다.

그림 4는 성북동에 위치한 한 갤러리의 복사열원 설계도이다. 지열을 통해 얻은 순환수를 히트펌프와 함께 운영하여 복사시스템과 공조시스템에 전달하는 방식이다. 이 건물은 바닥형 복사시스템이 잠열과 현열의 일부를 담당하는 공조기와 함께 건물 냉난방 부하를 감당하고 있다. 난방 부하는 100% 복사시스템이 담당하고 냉방부하만 공조시스템과 나누어 운영하고 있다. 보는 바와 같이 복사패널은 공조기 쪽보다 높은 온도로 운영되기 때문에 히트펌프를 통해 공급되는 냉수를 환수와 섞어서 온도를 높여 사용한다.

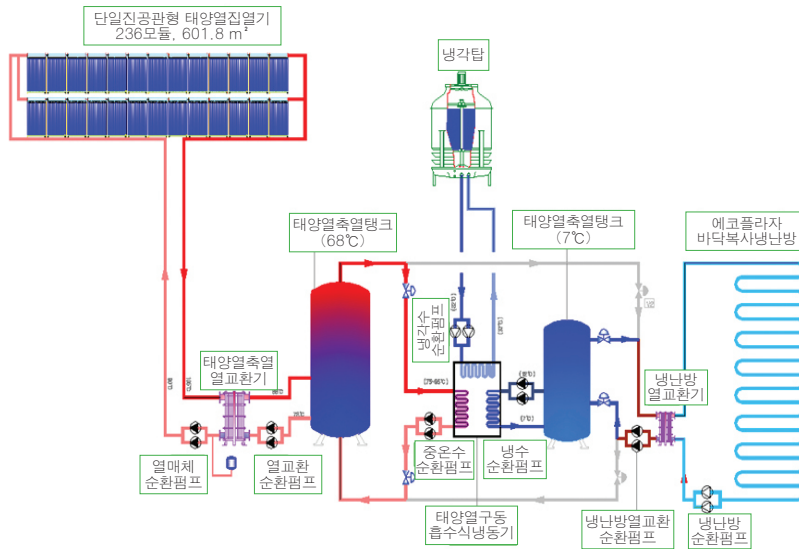
여름철 지열이 생산할 수 있는 저온수(평균 15°C)는 공조기의 냉원으로 쓰기에는 부족하나



[그림 4] 성북동 미술관 지열 복사냉난방 시스템



[그림 5] 지열시스템을 이용한 복사시스템



[그림 6] 서울시청 에코플라자 태양열 복사냉난방 시스템

복사패널이 사용하기엔 충분한 냉원이 된다. 따라서 복사냉난방만을 위한 지열 설계는 그림 5와 같이 경우에 따라 히트펌프를 바이패스 할 수 있는 시스템을 만들면 히트펌프 운영을 최소화하여 더욱 에너지를 절감할 수 있다.

그림 6은 서울시청에 설치한 태양열을 이용한 복사시스템 열원 설계도이다. 이 건물의 복사시스템은 태양열을 전적으로 운용하는 현장이며 시스템의 안정성과 보장성에 큰 중점을 두고 설계

가 되었다. 특히 이 건축물의 경우 극심한 현열부하를 안고 있는 건물이라 복사시스템이 타 공조 시스템보다 저에너지로 더욱 효율적으로 부하를 처리할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 현열부하가 많은 날씨는 태양열로 인해 냉방 용량이 커지며, 태양열이 강하지 않을 때는 현열부하 역시 낮아 지므로 태양열은 복사냉방을 운용하기에 매우 적합한 시스템이다.

이처럼 복사시스템의 저부하 운영조건은 에

너지 절감과 더불어 신재생 에너지의 부하율을 높여 주는 역할을 할 수 있다. 현재 신재생 에너지 원들이 가지고 있는 낮은 효율성과 그로 인한 빌딩 부하량 감당의 한계는 복사냉난방 시스템과 같은 저부하 에너지 운영 시스템을 통해 많은 부분 개선될 수 있다. 복사시스템은 신재생 에너지의 가치를 높일 수 있는 최적의 냉난방 에너지 운영 시스템이다.

맺음말

물은 공기보다 약 3,500 배 높은 에너지 수송 능력을 가지고 있다. 빌딩 내에서 물을 수송하면서 생기는 압력저하까지 생각하더라도 순환수식(Hydronic) 공조방식은 일반 전공조방식의 5% 정도의 수송에너지로 동일한 냉난방을 실행할 수 있다. 복사냉난방 시스템은 물의 에너지 수송 능력을 가장 잘 활용하는 시스템이다.

복사냉난방은 인체에 최상의 쾌적함을 가장 에너지 효율적으로 전달하는 시스템이다.

대한민국은 현재 세계로 뻗어 나가고 있는 중이다. 첨단 반도체부터 산업의 꽃인 자동차, 조선 등 한국의 산업 제품들이 세계인들에게 큰 영향을 주고 있다. 안타깝게도 한국의 빌딩설비는 그렇지 못하고 있다. 외국의 선진 빌딩 문화를 아직 답습 인용하고 있는 실정이다. 하지만 유일하게 전세계를 통틀어서 매우 독특한 빌딩설비문화가 대한민국에 자리잡고 있다. 그것은 90% 이상 우리 주거공간의 난방을 담당하고 있는 복사난방시스템이다. 이 훌륭한 설비문화를 더욱 개선 발전시켜 난방뿐만이 아닌 냉방까지 담당하게 하여 전세계 어느 곳에서나 적용 가능한 세계적인 산업으로 만들어 나갈 수 있는 저력과 합당성이 대한

민국에는 존재한다. 전세계에서 유일하게 한국에서 활성화된 이 복사시스템을 우리는 외면해서는 안된다. 앞으로 한국산업이 발전하려면 한국의 녹색산업을 세계화하여야 하며 이 중에서도 특히 사용 경험이 풍부한 복사시스템을 더욱 보급하고 활용하여 대한민국의 대표 수출품목으로 만들어야 할 의무를 우리는 모두 숙지하였으면 하는 바이다. 앞으로 복사냉난방은 세계적인 관심 속에 퍼져 나갈 것이며 그 중심에 대한민국이 있기를 간절히 소망한다.

참고문헌

1. Mumma S. A. 2001, Ceiling Radiant Cooling Panels as a Viable Distributed Parallel Sensible Cooling Technology Integrated with Dedicated Outdoor Air Systems, ASHRAE Transactions 107(1)
2. Strand, R.K. 2003, Investigation of a condenserlinked radiant cooling system using a heat balance based energy simulation program, ASHRAE Transactions 109 (2):,pp 647-655.
3. Tian, Zhen & Love, James A. 2009, Application of Radiant Cooling in Different Climates: Assessment of Office Building through Simulation p. 2220
4. Watson, R.D. & Chapman K.S 2002, Radiant Heating and Cooling Handbook
5. ASHRAE, ASHRAE Handbook -HVAC Applications 2011, Radiant Heating and Cooling
6. Energy Design Resources, 2003, Design Brief: Radiant Cooling 