



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

Chilled Beam 시스템과 복사냉방 시스템의 에너지 소비 특성 분석

Analysis on an Energy Consumption
Characteristic of Chilled Beam System and
Radiant Ceiling Cooling System

2013 년 2월

서울대학교 대학원

건축학과

이 유 지

국문 초록

본 연구에서는 기존 대류 공조시스템의 큰 설계 풍량의 대안으로 적용되고 있는 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 대안 간 선택을 위한 판단근거를 마련하기 위해 두 시스템의 에너지 소비량 및 시스템 구성요소 별 에너지 소비 특성을 분석하였다.

이를 위해 각 시스템의 설계 및 에너지 시뮬레이션을 수행하여 시스템 구성요소 별 에너지 소비량을 산정하였으며, 시스템 간 에너지 소비 특성에 대한 비교 및 분석을 수행하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 물을 매개로 열을 전달하는 시스템이므로 설계 시 결로 방지에 주의해야 한다. 또한, chilled beam 시스템의 기류속도 및 압력은 draught를 방지하되 chilled beam chamber 내부의 압력을 유지할 수 있도록 산정되어야 한다. 더불어 dry cooling을 위해 pre-operation을 통해 요구되는 습도 수준을 유지해야 한다.

(2) 총 에너지 소비량 분석 결과, 기존 대류 공조시스템의 에너지 소비량이 가장 많았고, chilled beam 시스템, 복사냉방시스템 순으로 에너지를 많이 소비하는 것으로 나타났다. 또한, energy flow chain 분석 결과, 최종적으로 시스템 전체에 걸리는 부하의 값 역시 기존 대류 공조시스템, chilled beam 시스템, 복사냉방시스템 순으로 크게 나타났다. 에너지 소비 항목별로는 chiller, supply fan, condenser pump와 tower fan, circulation pump 순으로 에너지 소비량이 높게 산정되었다.

(3) 기존 대류 공조시스템의 경우, 도입 외기의 냉방을 위해 이용되는 cooling coil에 공급되어야 하는 낮은 냉수를 생성하기 위해 열원 쪽 구성 항목에서의 에너지 사용량이 절대적으로 많은 양을 차지하고, 초기의 큰 설계 풍량으로 supply fan의 에너지 사용량의 비중이 크다. Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 비교적 높은 온도의 냉수를 공급하기 때문에 열원 쪽에서의 에너지 소비량이 기존 대류 공조시스템에 비해 큰 폭으로 감소하며, 공조 풍량이 크게 감소하여 supply fan에서의 에너지 소비량 또한 감소한다. 그 중 복사냉방시스템은 가장 적은 에너지 소비량을 나타내며, 이는 chilled beam chamber 내부의 노즐 압력을 유지하기 위해 fan에 높은 pressure rise 값이 적용되기 때문이다.

(4) 기존 대류 공조시스템과 비교하여 에너지 절감 측면에서 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템 모두 우수한 시스템인 것으로 분석되었다. chilled beam 시스템과 복사냉방시스템 모두 열원에서의 에너지 절감량이 크게 나타나지만, 전체적인 에너지 절감량과 용량 및 적용성을 고려해보았을 때 chilled beam 시스템에 비해 복사냉방시스템이 더 유리한 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 에너지 소비 특성 분석 및 시스템 대안 간 합리적 선택의 기반을 마련하였으며, 연구의 결과를 두 시스템의 국내 도입을 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : chilled beam 시스템, 복사냉방시스템, 에너지 소비량, 에너지 흐름도, 에너지 소비 특성

학 번 : 2011-20606

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 방법	3
제 2 장 Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템 관련 기존 연구 고찰	7
2.1 Chilled beam 시스템의 개념 및 특성	7
2.1.1 Chilled beam 시스템의 개념	7
2.1.2 Chilled beam 시스템의 설계 방법	10
2.1.3 Chilled beam 시스템의 적용	12
2.1.4 Chilled beam 시스템의 연구 동향	14
2.2 복사냉방시스템의 개념 및 특성	15
2.2.1 복사냉방시스템의 개념	15
2.2.2 복사냉방시스템의 설계 방법	18
2.2.3 복사냉방시스템의 적용	23
2.2.4 복사냉방시스템의 연구 동향	24
2.3 Energy flow chain method	26
2.4 소결	30
제 3 장 시스템별 에너지 소비량 평가를 위한 시뮬레이션 개요 및 시스템 설계	32
3.1 시뮬레이션 개요	32
3.1.1 시뮬레이션 프로그램의 선정	32
3.1.2 대상공간의 경계 조건	35
3.2 기존 대류 공조시스템의 설계	39
3.2.1 기존 대류 공조시스템의 구성 및 설계	39
3.2.2 기존 대류 공조시스템의 모델링	41

3.3	Chilled beam 시스템의 설계	45
3.3.1	Chilled beam 시스템의 구성 및 설계	45
3.3.2	Chilled beam 시스템의 모델링	49
3.4	복사냉방시스템의 설계	50
3.4.1	복사냉방시스템의 구성 및 설계	51
3.4.2	복사냉방시스템의 모델링	51
3.5	소결	55
제 4 장	시뮬레이션을 통한 시스템 구성요소별 에너지 소비 특성 분석	57
4.1	기존 대류 공조시스템의 에너지 소비량 분석	57
4.2	Chilled beam 시스템의 에너지 소비량 분석	62
4.3	복사냉방시스템의 에너지 소비량 분석	67
4.4	각 시스템 구성요소 별 에너지 소비 특성 비교	72
4.5	소결	77
제 5 장	결 론	79
참고 문헌	83
ABSTRACT	85

표 목차

<표 2.1> Chilled beam 시스템의 유형	9
<표 2.2> Energy flow의 구성 항목	29
<표 3.1> 대상 공간 설계 조건	38
<표 3.2> 대상 공간 부하 조건	39
<표 3.3> 기존 대류 공조시스템의 설계	42
<표 3.4> Chilled beam 시스템의 설계	47
<표 3.5> 복사냉방시스템의 설계	53
<표 4.1> 기존 대류 공조시스템의 에너지 소비량	59
<표 4.2> Chilled beam 시스템의 에너지 소비량	64
<표 4.3> 복사냉방시스템의 에너지 소비량	69
<표 4.4> 각 시스템의 에너지 소비량 비교	75

그림 목차

[그림 1.1] 연구의 흐름도	6
[그림 2.1] Chilled beam 시스템의 실제 적용 사례	9
[그림 2.2] Design methodology of a chilled beam system	11
[그림 2.3] Case study of chilled beam system	13
[그림 2.4] 복사냉방시스템의 유형	16
[그림 2.5] 복사냉방시스템의 실제 적용 사례	17
[그림 2.6] 복사냉방시스템의 system design procedure (flow chart)	20
[그림 2.7] Yearly primary energy consumption ratio	25
[그림 3.1] 대상 공간의 개념도	36
[그림 3.2] 대상 공간의 평면도	37
[그림 3.3] 기존 대류 공조시스템의 개념도	39
[그림 3.4] Schematic diagram of CAV system	41
[그림 3.5] Schematic diagram of Air loop	43
[그림 3.6] Schematic diagram of HW loop	44
[그림 3.7] Schematic diagram of CW loop	44
[그림 3.8] Schematic diagram of condenser loop	45
[그림 3.9] Chilled beam 시스템의 계통도	46
[그림 3.10] Schematic diagram of chilled beam system	50
[그림 3.11] Schematic diagram of Air loop for chilled beam system	50
[그림 3.12] 복사냉방시스템의 계통도	52
[그림 4.1] 기존 대류 공조시스템의 에너지 소비항목 별 에너지 소비량	58
[그림 4.2] 기존 대류 공조시스템의 energy flow chain	61
[그림 4.3] Chilled beam 시스템의 에너지 소비항목 별 에너지 소비량	63
[그림 4.4] Chilled beam 시스템의 energy flow chain	65
[그림 4.5] 복사냉방시스템의 에너지 소비항목 별 에너지 소비량	67

[그림 4.6] 복사냉방시스템의 energy flow chain	71
[그림 4.7] 각 시스템의 구성항목 별 에너지 소비량 비교	73

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 환경오염과 에너지 고갈 문제가 대두됨에 따라 국내 전체 에너지 소비량의 약 26%를 차지하는 건축분야 역시 에너지 절감에 대한 중요성이 강조되고 있다. 친환경적이고 에너지 절약적인 공간, 즉 지속가능 건물에 대한 요구가 커지고 있는 상황에서, 특히 건물의 에너지 소비 측면에서 많은 비중을 차지하는 냉난방 에너지를 감소시키기 위한 다양한 연구와 노력이 이루어지고 있다.¹⁾

공조시스템을 선정함에 있어 일반적으로 대상 건물의 특성, 입지조건, 경제적 여건, 열원, 기타 여러 사항들이 고려된다. 최근 새로운 환경변화에 따라 사용자의 요구사항이 매우 다양해져 실내 환경의 고급화 (연간공조, 체감온도의 연중 균일화, 자연 환경에 대한 요구), 쾌적성과 에너지 효율성 보장, 유지보수의 용이성 (사후관리 및 개보수 등 관련 설비 시스템의 유지관리) 등 여러 사항이 추가적으로 고려된다.²⁾

기존 대류식 공조시스템은 현재 가장 널리 적용되고 있는 냉난방시스템으로, 시스템의 구성요소가 간단하고 초기투자비가 저렴하다는 장점을 가진다. 반면 설계 공조 풍량이 크고 공기를 매개로 실을 냉난방 하기 때문에 그에 따른 반송 동력 또한 커지게 되므로 전체적인 에너지소비량이 큰 공조 방식이다. 뿐만 아니라 냉방 시 약 12~15℃의 매우 낮은 공기가 실로 바로 취출되므로 draft, 국부적 온도차 등 불쾌적성의 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해

1) 서승직, 『친환경을 고려한 건축설비계획』, 일진사, 2004, p.241

2) op.cit., p.290

결하기 위해 에너지 절약성과 쾌적성 측면에서 보완이 이루어진 다양한 시스템이 등장하였다.

그 중 시스템의 초기의 설계 공조 풍량 저감과 반송동력 저감을 위해 도입된 시스템으로 chilled beam 시스템과 복사냉난방시스템이 있다. 두 시스템은 공조 풍량 설계 시 일반적으로 최소외기도입량이 기준이 되므로 공조 설비의 용량이 줄어들고 냉열을 전달하는 매개체로 물을 이용하므로 그에 따른 반송 동력이 저감되는 효과가 있다. 최근 두 시스템의 국내 도입 및 적용이 시도되고 있으며 이를 위한 다양한 연구가 선행되고 있는 상황이다.

일반적으로 chilled beam 시스템과 복사냉난방시스템은 실내외 온습도 조건 및 냉방부하에 따라 설계 시 전처리를 위한 공조 풍량과 냉각코일의 공급수 온도가 결정된다. 잠열이 높아 제습부하가 클 경우, 두 시스템이 의도한 본래의 장점을 충분히 발휘하지 못할 수 있다. 따라서 고온 다습한 국내 기후 조건에서 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템을 적용할 경우, 각 시스템의 구성요소 별 에너지 소비량의 분석을 통해 시스템 전체의 에너지 소비 특성을 파악하고 이를 바탕으로 시스템 대안간 비교, 분석의 과정이 필요할 것이라고 사료된다.

본 연구에서는 기존 대류 공조시스템과 chilled beam 시스템, 복사냉난방시스템의 시스템의 구성요소 별 에너지 소비량에 대한 정량적인 평가 및 에너지 소비 특성 분석의 필요성을 바탕으로 두 시스템 대안 간 직접적인 비교 분석이 없다는 점을 문제로 상정하였다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 국내의 실존 대상 건물을 선정하고, 설계 시 적용되었던 경계 조건을 바탕으로 chilled beam 시스템과 복사냉난방시스템을 설계하였다. 이를 바탕으로 에너지 시뮬레이션 해석을 통해 시스템 구성요소 별 에너지 소비량을 산정하고, energy flow chain을 이용하여 시스템별

에너지 소비 특성에 대한 비교 및 분석을 수행하였다. 이를 통해 합리적인 시스템 대안 선택을 위한 판단근거를 마련하였다.

본 연구를 통해 chilled beam 시스템과 복사냉난방시스템의 에너지 소비 특성 분석 및 시스템 대안 간 합리적 선택의 기반을 마련함으로써 연구의 결과를 두 시스템의 국내 도입을 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 목적을 달성하기 위하여 chilled beam 시스템과 복사냉난방시스템의 체계화되어 있는 국외의 관련 standard 및 기술 표준 문서(guidebook)를 고찰하여 개념 및 특징, 설계 방법, 적용 시 고려사항, 최근 연구 동향을 분석하였다.

그 후 국내에 실존 대상 건물을 선정하여 설계에 반영된 조건을 고려한 chilled beam 시스템과 복사냉난방시스템의 시스템 설계를 진행하였다. 이를 토대로 에너지 해석을 위한 시뮬레이션 방법과 도구를 선정하였다. 에너지 시뮬레이션 프로그램은 시스템의 세부적인 구성 및 모사가 가능하고 국내외로 그 신뢰성을 인정받아 널리 사용되고 있는 energyplus를 이용하였으며, 열원을 포함한 공조 시스템 전체의 modeling을 진행하였다.

에너지 시뮬레이션을 통해 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 전체 에너지 소비량 뿐 아니라 시스템 구성요소 별 에너지 소비량을 산정하였고, 에너지 소비 특성에 대한 데이터를 구축하기 위하여 시스템 간 정량적인 비교 및 분석을 수행하였다.

또한 energy flow chain을 이용하여 각 시스템 간의 에너지의 흐름을 분석

하여 에너지 소비 특성을 분석하였다.

본 연구의 범위 및 방법을 연구 진행 순서에 따라 정리하면 다음과 같다.

(1) Chilled beam 시스템과 복사냉난방시스템에 대한 예비적 고찰

Chilled beam 시스템과 복사냉난방시스템의 공조시스템 선택 시 대안 선택을 위한 판단근거 마련의 필요성을 제기하였다. 각 시스템의 개념, 설계 방법 및 적용에 관련한 기준 및 표준을 고찰하고, 기존 문헌을 바탕으로 시스템의 연구 동향을 분석하여 시스템 별 에너지 소비 특성을 산정하는 배경이론으로 활용하였다. 또한 기존 연구 사례를 고찰하여 공조 설비 계획에 근거한 연구의 필요성을 재고하였다.

(2) 기존 대류 공조시스템과 chilled beam 시스템, 복사냉난방시스템의 구성 및 설계

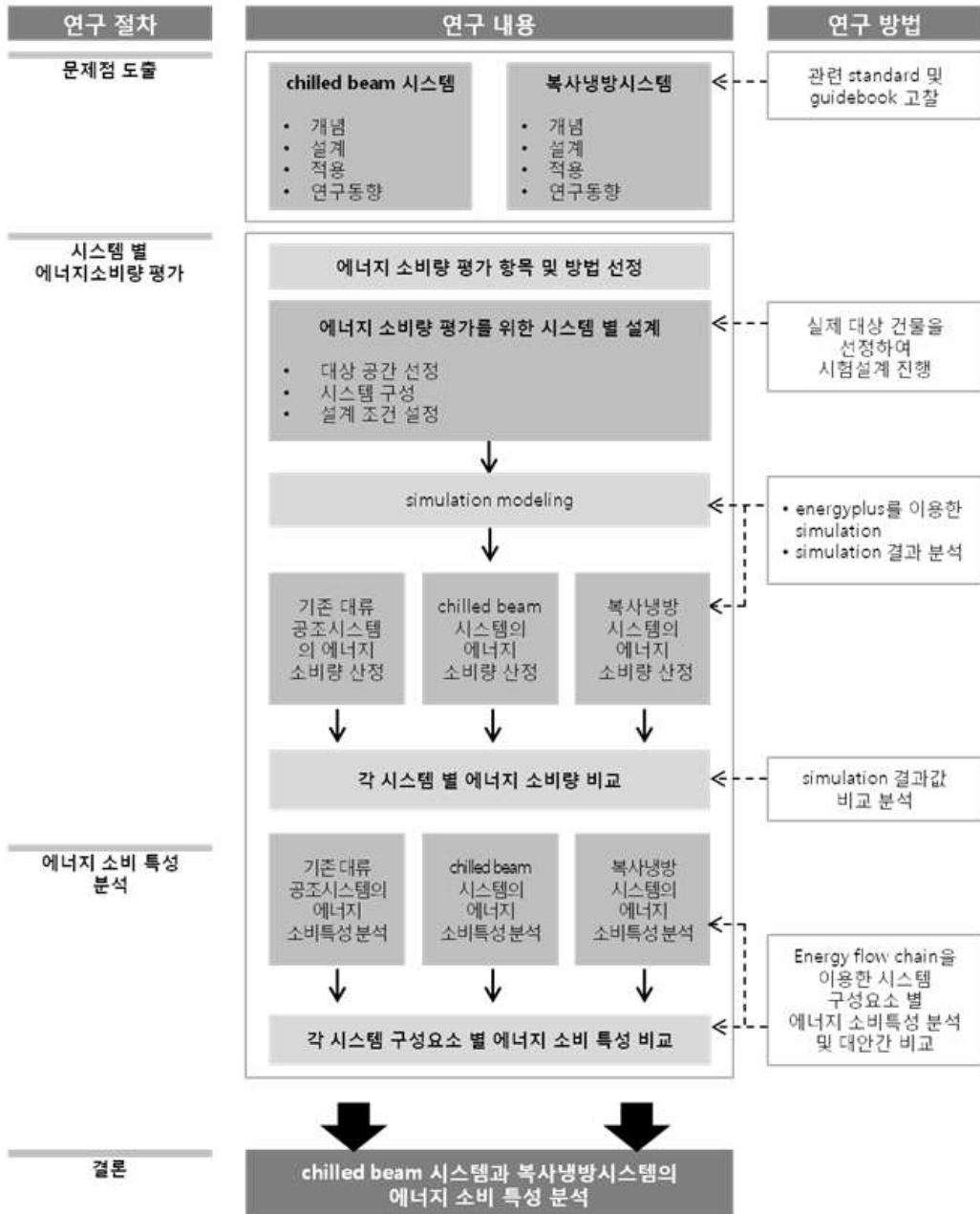
Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 에너지 소비 특성 분석을 위한 시뮬레이션의 개요 작성 및 제시 기준 및 기존의 연구에 근거한 시스템 구성 및 설계를 수행하였다. 에너지 소비량을 평가하기 위한 대상 건물과 에너지 해석 프로그램을 선정하고, modeling을 진행하였다.

(3) 기존 대류 공조시스템과 chilled beam 시스템, 복사냉난방시스템의 에너지 소비 특성 분석

기존 대류 공조시스템 대비 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 설계를 바탕으로 에너지 시뮬레이션 모델링을 진행하였다. 특히, 에너지 소비 항목을 중심으로 용량 산정 및 각 시스템의 세부 설계 값과 실제 에너지 사용량을 비교하였으며, energy flow chain을 이용하여 에너지 소비 특성을 분석하

였다. 이를 통하여 시스템 대안 간 합리적인 시스템 선택을 위한 기반을 마련하여 두 시스템의 국내 도입을 위한 기초 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

본 연구의 연구 진행은 다음 [그림 1.1]의 연구 흐름도와 같다.



[그림 1.1] 연구의 흐름도

제 2장 Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템 관련 기존 연구 고찰

기존 대류식 공조시스템의 큰 공조 풍량 및 반송동력, 쾌적성, 위생 등이 문제가 되면서 그에 대한 대안으로 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템이 제안되었다. 최근 두 시스템의 국내 도입 및 적용이 시도되고 있는 상황에서 각 시스템의 시스템 구성요소 별 에너지 소비 특성에 대한 정량적인 평가가 필요하다고 판단된다.

본 장에서는 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 개념, 설계 방법 및 적용에 관련한 기준 및 표준을 고찰하고 기존 문헌을 바탕으로 연구 동향을 분석하여 시스템 별 에너지 소비 특성을 산정하는 배경이론으로 활용하였다. 또한 기존의 연구 사례 및 문헌을 고찰하여 연구의 필요성을 재고하였다.

2.1 Chilled beam 시스템의 개념 및 특성

2.1.1 Chilled beam 시스템의 개념

Chilled beam 시스템은 기존 대류식 공조시스템의 큰 공조 풍량 및 반송동력, 쾌적성, 위생 등이 문제가 되면서 그에 대한 대안으로 제안된 공조 시스템이다. Chilled beam 시스템은 1990년 유럽 및 북미지역에서 주목받기 시작한 시스템으로, 대류 및 복사에 의한 냉각효과를 이용하여 거주공간의 쾌적성과 에너지 절약을 동시에 만족시킬 수 있는 시스템이다.²⁾ [그림 2.1]³⁾은 실

2) 이규남, “그린 빌딩에서의 칠드빔 시스템 활용 가능성”, (사)한국그린빌딩협회, 2012년 6월호, pp. 39~51.,

3) 문영훈, “복사 냉난방 시스템(3) -TROX의 제품을 중심으로-”, 한국설비기술협회 설비/공조·냉동·위생, 2011년 4월호.

제 chilled beam 시스템의 적용 사례이다.

Chilled Beam 시스템은 <표 2.1>⁴⁾과 같이 크게 passive chilled beam과 active chilled beam으로 구분되는데, passive chilled beam은 냉수 배관만 있고 1차 공기의 취출 및 실내공기의 유입 없이 복사를 통해 냉방되는 형태이다. Passive chilled beam의 열전달은 주로 복사에 의해 발생하며 차가운 표면과 접촉한 뜨거운 실내공기는 beam을 통과해 아래쪽 실내로 흐르며 냉방하게 된다. Passive chilled beam은 환기시스템과 연결되지 않으며 천장 위에 완전히 노출되어 위치하는 것이 일반적이다.

반면 active chilled beam은 중앙공조기의 전처리 (잠열부하 처리) 과정을 거친 공기가 chilled beam 내부에 위치한 노즐을 통해 취출되고 그때의 높은 기류속도 및 압력으로 인해 실내공기가 시스템 안으로 유입되어 냉각코일을 통과한 후 mixing되어 다시 실내로 공급되어 냉방되는 원리를 이용한 것이다. active chilled beam은 외기의 공급과 강제대류로 의해 열전달을 위한 효율적이고 높은 냉방능력 수준을 보장한다. ⁵⁾

Chilled beam 시스템은 공기보다 열용량이 큰 물을 이용하는 수 방식이므로 전공기 방식에 비해 이동 공간 및 반송 동력을 저감시킬 수 있다. 또한 최소 외기 도입량, 잠열처리가 가능한 풍량, 실의 냉각코일이 제거하지 못한 현열을 고려한 풍량 중 가장 큰 값을 기준으로 설계 풍량을 결정하게 되므로 줄어든 풍량만큼 상대적으로 팬 에너지를 절약할 수 있다. 더불어 draft의 위험이 없어 균일한 실내온도 및 기류 분포를 유지할 수 있어 쾌적하다는 장점을 가진다.

4) D. Butler, et al., 『chilled beam application guidebook 2nd ed』. 2007, rehva.

5) Ibid.



(a) passive chilled beam

(b) active chilled beam

[그림 2.1] Chilled beam 시스템의 실제 적용 사례

<표 2.1> Chilled beam 시스템의 유형

	passive chilled beam	active chilled beam
구성		
원리	<p>냉수 배관만 연결된 형태로, 1차 공기의 취출 및 실내공기의 유인 없이 단순 복사를 통해 냉방</p>	<p>Chilled beam 내부에 위치한 노즐로 취출되는 전처리된 공기와 그때의 기류속도 및 압력으로 유인된 실내공기의 혼합 후 실내로 재공급되어 냉방</p>
용량	<p>현열 냉방 요구량(air + water)은 120 W/floor · m² 이하</p>	<p>현열 냉방 요구량(air + water)은 40~80 W/floor · m² 사이</p>

2.1.2 Chilled beam 시스템의 설계 방법

Chilled beam 시스템 설계에 적용할 수 있는 대표적인 기준으로는 rehva에서 출간된 chilled beam application guidebook⁶⁾이 있다.

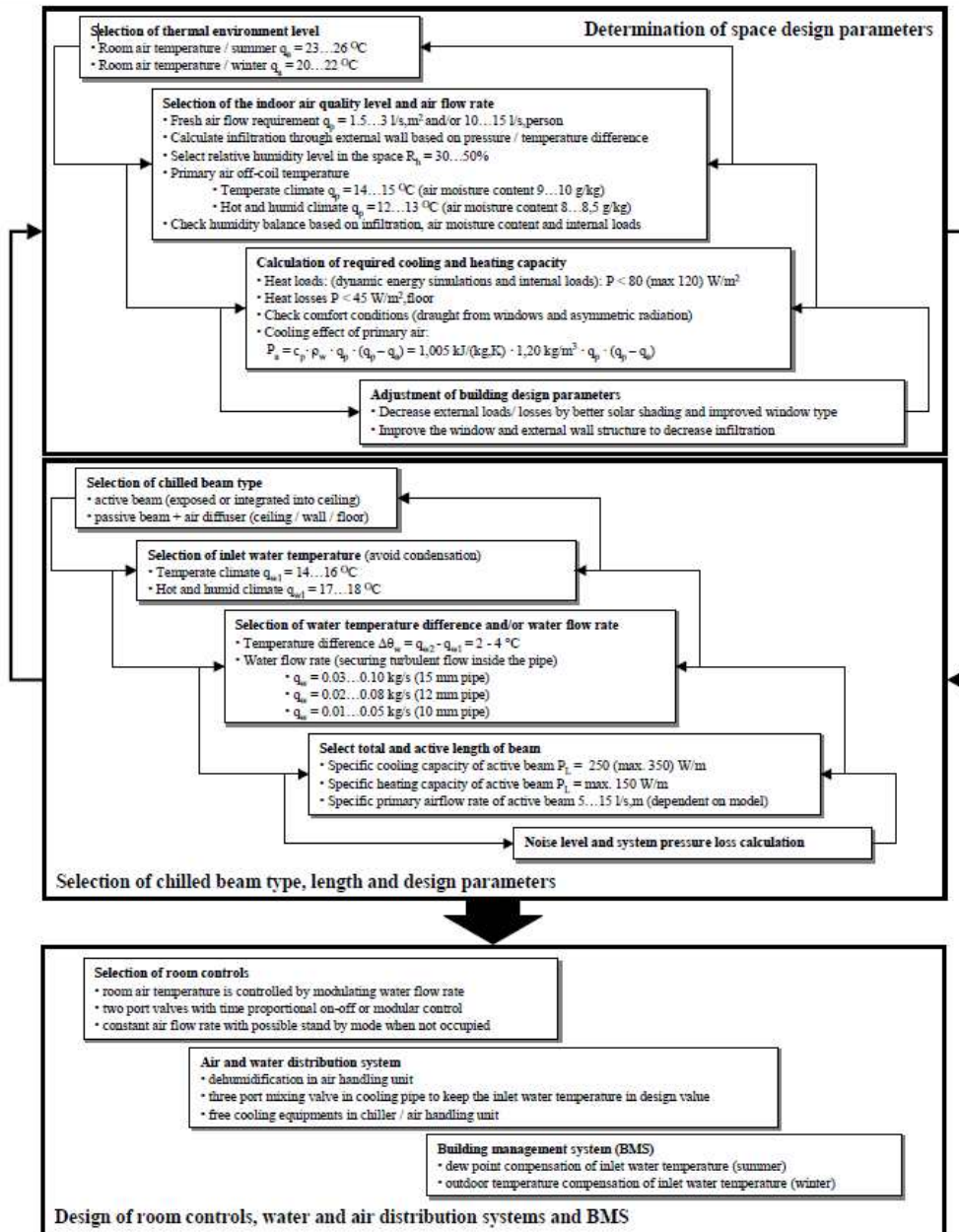
Chilled beam의 시스템 설계는 [그림 2.2]와 같이 크게 세 부분으로 구성되며 첫 번째 부분은 대상 공간의 열적 부하와 경계조건을 고려하여 전체적인 설계조건을 결정하는 것이고, 실제 설치를 위해 chilled beam의 종류와 길이를 선정하고 다른 연관된 설계 파라미터를 결정하는 두 번째 부분, 마지막으로 실의 제어와 물과 공기의 분배시스템, BMS(building management system)에 대한 설계로 나눌 수 있다.

첫 번째 단계에서는 대상 공간의 하절기, 동절기 실내 설정 온도를 결정한다. 그 다음으로 실내 공기 질과 기류 속도를 결정하고 신선외기의 도입량과 압력과 온도차에 의해 외벽에서 발생하는 침기량의 계산, 상대습도 결정, AHU의 1차 공기 냉방을 위한 코일 온도를 결정한다. 또한 요구 냉난방 용량을 계산하고, 차양으로 인한 외부 부하 감소와 침기량 조절을 위해 창과 외벽 구조를 향상시키는 등의 건물의 설계 파라미터를 조절하는 과정을 거친다.

두 번째 단계에서는 chilled beam의 타입과 구성을 선정하고 공급수 온도를 결정한다. 또한 공급수 온도의 입출수 온도 차와 유량을 결정하고 구성 시스템의 전체적인 값을 계산한 후, beam의 길이 및 1차공기의 기류속도를 결정한다. 더불어 소음 수준과 압력 손실도 함께 고려하게 된다.

마지막으로 실내 제어 방법을 선택하고 공기와 물의 분배시스템, 건물 관리 시스템에 대한 세부 사항을 결정하면 chilled beam 시스템의 설계가 완료된다.

6) Ibid.



[그림 2.2] Design methodology of a chilled beam system

2.1.3 Chilled beam 시스템의 적용

앞서 언급한 rehva guidebook에서는 설계 방법과 더불어 chilled beam 시스템 설계 또는 적용 시 다음과 같은 추가적인 고려사항을 언급하고 있다.

Chilled beam 시스템에서 1차 공기의 기류속도는 쾌적 조건, 최소 환기 요구량과 내부 습도에 따라 정의되며 전형적인 사무실에서의 요구 환기량은 6~12 CMH이다. 적정 습도 수준 유지를 위해 1차 air handling unit에 보통 제습을 위한 설비가 요구되며, 1차 공기의 풍량은 실내에서 발생하는 수분을 모두 제거하기에 충분한 양이어야 한다.

Chilled beam 시스템은 일반적으로 정풍량 방식을 이용하며, 계절에 따라 급기 온도를 설정하여 운전한다. 1차 급기 풍량이 너무 크게 설계될 경우 거주 공간에 draught를 유발할 수 있으므로 이를 고려하여 설계해야 한다. 또한 beam chamber 내부의 압력을 유지하고, 냉각 코일의 효율적인 열전달과 공기 확산을 보장하기 위해 최소 운전 풍량 역시 확보되어야 한다. 일반적인 active chilled beam의 풍량은 단위 길이(m)당 5~15 l/s이다.

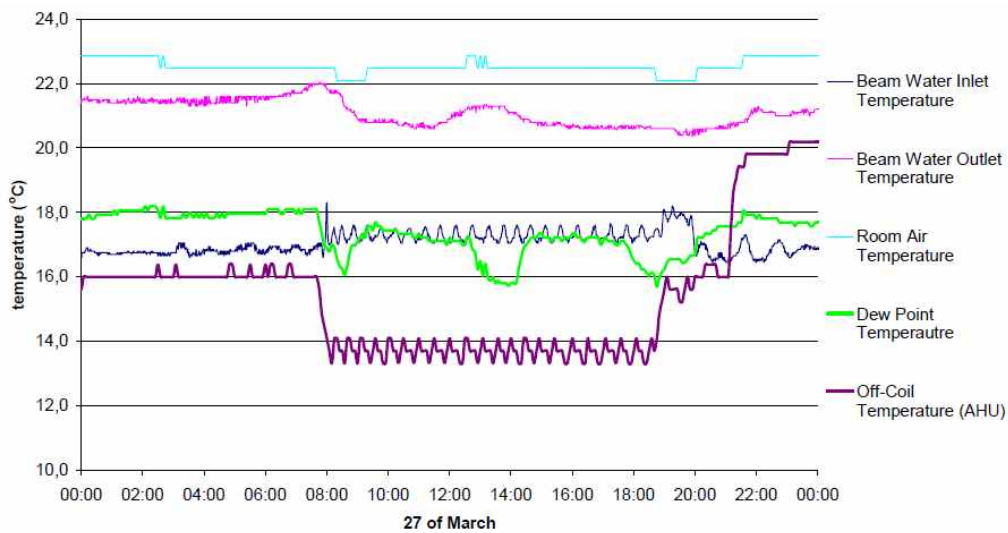
Chilled beam은 일반적으로 평균 공급수 온도와 실내 온도와의 차이를 6~10℃로 설계하며, 입 출수 온도차는 2~4℃로 설계한다. Chilled beam 시스템 자체는 현열 냉방만 가능하므로 공급수 온도를 결정할 때 결로에 대한 고려가 중요하다. 공급수 온도(보통 14℃ 이상)는 공급 냉수 배관의 표면온도가 실내 공기의 노점온도 이상으로 유지될 수 있는 값으로 설계되어야 한다.

Chilled beam 시스템은 main AHU(air handling unit)에 의한 1차 급기 공기를 제습함으로써 습도를 조절해야 한다. 만약 외기온도와 상대습도가 높을 경우, 급기의 제습을 위해 AHU의 냉방코일이 현열과 잠열을 모두 포함한 전체 냉방 요구를 처리할 수 있게 사이징 되어야 하며, 결로가 감지되면 공급수

온도를 상승시키거나 순환펌프를 정지시키거나 부분적으로 설치되어 있는 control 밸브를 닫아 운전을 제어한다.

특히, 고온 다습한 기후에서는 결로 발생의 위험성이 크기 때문에 설계와 적용에 있어 더욱 신중을 기해야 한다. 우선 침기를 최소화해야하며, dry cooling을 위해 운전을 시작하기 전 pre-operation을 통해 요구되는 습도 수준을 유지하는 것이 중요하다. chilled beam 시스템의 냉수 펌프와 팬의 운전 시간을 조절하여, 냉방 약 30분 전에 건조한 공기를 통한 환기를 하면 결로를 방지할 수 있다.

[그림 2.3]은 싱가포르에 실제 설계된 사무소 건물의 1일 기준 온도변화를 나타낸 그래프이다. 이 건물은 설계 시 팬 용량을 작게 산정하여 초기 설계 값보다 급기 속도가 낮게 나타났고, 실의 결국 습도 수준이 높게 나타나 결로가 발생하였다. 하지만 [그림 2.3]과 같이 설정온도를 맞추어 운전한 결과, 결로를 방지하고 dry cooling을 적용할 수 있었던 사례이다.



[그림 2.3] Case study of chilled beam system

2.1.4 Chilled beam 시스템의 연구 동향

Chilled beam 시스템은 기존의 대류식 공조시스템의 풍량을 감소시켜 쾌적성 확보 및 에너지 절감효과를 얻고자 제안된 시스템이기 때문에 주로 그 효과를 검증하기 위한 실험적 연구가 이루어지고 있다. 기존 대류 공조시스템 대비 chilled beam 시스템 적용 시 실내의 기류 분포와 쾌적성 판단에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 일부 에너지 사용량과 경제성을 비교한 연구가 수행되고 있다.

Peter⁷⁾의 연구 결과에 의하면 chilled beam 시스템은 많은 양의 공기를 냉각하는 대신 압축된 냉각수를 이용해 냉방할 수 있어 에너지 절약을 목적으로 하는 시스템으로서 매우 적합하다. Chilled beam 시스템은 환기를 위한 최소한의 외기만을 도입하므로 공조 풍량 및 반송 동력을 감소할 수 있을 뿐 아니라 기존 대류 공조시스템에서 적용되는 reheat energy가 줄어들어 장비의 용량이 감소하고 에너지 비용을 절약할 수 있다.

이처럼 Chilled beam 시스템은 기존 대류 공조시스템에 비해 시공비용과 에너지 비용이 모두 저감 가능한 시스템이다. 결로나 소음, 압력 유지 등 발생 가능한 문제에 대해 추가적으로 고려한다면 활발한 적용이 가능할 것이다.

7) Peter Rumsey, chilled beam in labs: eliminating reheat and savings energy on a budget, ASHRAE Journal Vol. 49, Jan. 2006, pp. 18-25.

2.2 복사냉방시스템의 개념 및 특성

2.2.1 복사냉방시스템의 개념

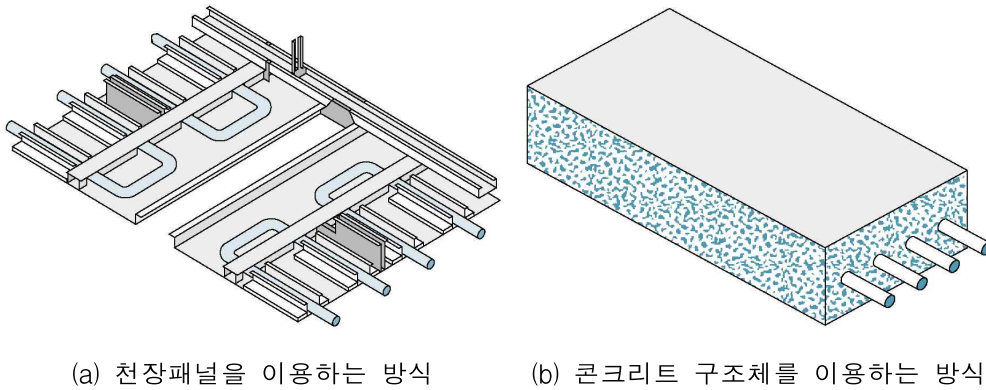
복사냉방시스템이란 열전달 매개체로 물을 이용하여 50%이상의 냉열을 복사의 형태로 전달하는 시스템이며, 실온 제어를 통해 냉방하는 시스템을 말한다. 복사냉방시스템은 복사효과를 이용하므로 평균복사온도(MRT)가 낮아 열전달 특성상 공기를 매개체로 이용하는 기존 대류 공조시스템에 비해 높은 설정온도로도 쾌적성을 확보할 수 있는 냉방시스템이다. 또한 냉방을 위한 공급수온도가 상대적으로 높아 열원으로서 미활용 에너지를 사용하기 용이하다. 8)

복사냉방시스템은 일반적으로 [그림 2.4]⁹⁾와 같이 다음의 2가지 형태로 분류할 수 있다. 먼저 천장패널을 이용하는 방식(suspended ceiling panel system)은 가장 널리 알려져 있는 방식으로 알루미늄 패널에 인접한 금속관으로 냉수를 순환시켜 냉방하는 방식이다. 열전도율이 좋은 재료를 사용할 경우 실부하의 변화에 빠르게 대응할 수 있다는 장점이 있다. 일부 모세관 튜브를 이용하는 방식(capillary tube system)은 냉수관의 간격을 조밀하게 하여 석고나 집성보드에 매몰하거나 천장면에 부착하여 사용하는 방식으로 플라스틱관의 유연성 때문에 개보수시 사용하기 적합한 시스템이다.

콘크리트 구조체를 이용하는 방식(concrete core system 또는 thermally activated building system)은 기존의 바닥 난방 (온돌) 시스템과 동시에 사용이 가능한 방식으로, 축열체인 콘크리트에 의해 축열냉방을 한다. 시간 지

8) 김광우, “복사냉방시스템의 적용”, 대한설비공학회 설비저널 제31권 제8호, 2002년 8월호, pp. 9-14.

9) Corina steti, “Radiant cooling in U.S. office buildings: Towards Eliminating the perception of Climate-Imposed Barriers”, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 1998, pp.24-27.



[그림 2.4] 복사냉방시스템의 유형

연효과 (time-lag)에 의해 실부하의 변화에 빠르게 대응하기 어렵고 실온의 제어가 어렵다는 단점이 있으나 전력의 사용량 분산, 냉난방의 시스템의 일체화 등의 장점이 있다.¹⁰⁾

현재 유럽 등에서 가장 많이 적용되는 방식은 천장에 냉방패널을 부착하는 방식이다. 천장복사패널은 제한적인 기류속도를 형성하며, 복사열을 이용해 냉난방 하므로 열적 쾌적성을 향상시켜준다는 장점이 있으며, 위생측면에서도 우수하다.¹¹⁾ [그림 2.5]¹²⁾는 복사냉방시스템의 실제 적용 사례 건물이다.

복사냉방시스템은 에너지와 쾌적 측면에서 많은 이점을 가지지만 물을 매개로 열전달하는 전수방식이므로 시스템의 설계 시 결로와 수직온도분포의 온도차로 인한 불쾌적 등을 충분히 고려하여 설계에 반영해야 한다.¹³⁾

10) J. miriel, "Radiant ceiling panel heating-cooling system : Experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions", Applied Thermal Engineering, 2002, pp.1861-1873.

11) Ibid.

12) 김영주, "복사 냉난방 시스템(4) -에코·에너지의 제품을 중심으로-", 한국설비기술협회 설비/공조·냉동·위생, 2011년 4월호.

13) 김광우, "복사냉방시스템의 적용", 대한설비공학회 설비저널 제31권 제8호, 2002년 8월호, pp. 9-14.



(a) 메탈형 천장 복사 패널



(b) 석고보드형 천장 복사 패널



(c) 콘크리트 코어 방식



(d) 천장복사패널 방식

[그림 2.5] 복사냉방시스템의 실제 적용 사례

2.2.2 복사냉방시스템의 설계 방법

복사냉방시스템의 설계와 관련한 기준으로는 유럽에서 제정된 EN 1264, Nordtest vvs 127 등이 있으며, 미국의 ASHRAE Handbook- HVAC System and Equipment의 Chapter 6. Panel Heating and Cooling에서도 패널의 설계에 대하여 자세히 다루고 있다. 14)

그 중 EN15377-1, EN15377-2 및 EN14037-2에 근거한 rehva guidebook - Low Temperature Heating and High Temperature Cooling의 설계 방법을 소개하고자 한다.

복사냉방시스템 설계는 [그림 2.6]과 같이 크게 세 부분으로 구성되는데 첫 번째 부분은 시스템을 설계하는 과정으로, 실의 부하를 산정하여 시스템의 종류를 결정한 후, 냉방 용량을 계산하는 과정이다. 쾌적 기준을 고려한 공급수 온도의 적합성, 설계 용량, 요구 냉방 부하의 처리 가능 여부 등을 확인하는 과정이 두 번째 부분, 마지막으로 열원과 분배 시스템을 결정하여 설계하는 과정으로 나눌 수 있다.

첫 번째 단계에서는 대상 공간의 현열 냉방부하와 잠열 냉방부하를 계산하고, 이를 토대로 시스템의 냉방 용량을 결정하게 된다. 용량 산정에 앞서 패널의 구성(패널 재료의 두께, 크기, 열전도율, 마감 방법 등)과 배관의 위치(배관의 매설 깊이, 매설 간격 등)에 따라 적용 가능 시스템의 타입을 결정한다. 타입이 결정되면 실내의 작용온도와 공급수 온도, 환수온도, 최대 방냉량 등에 따라 방냉량을 계산한다. 이를 바탕으로 공급수 온도, 유량, 배관의 길이 및 관경 등을 설계하고, 최종적으로 냉방 용량이 산정된다. 패널의 타입과 용량 산정에 대한 자세한 기준은 chapter4. system types and estimation of

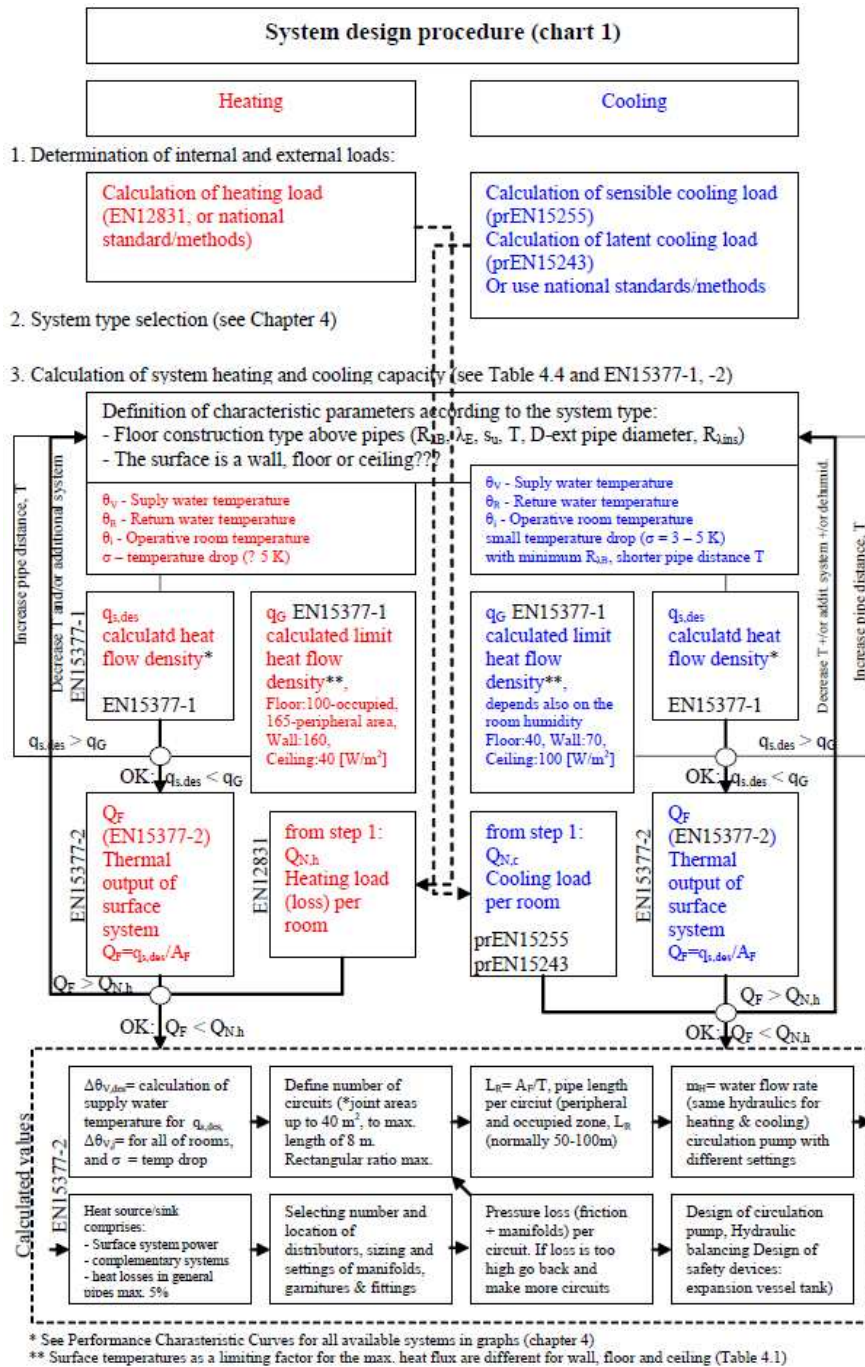
14) 신미수, “방열량과 바닥표면온도를 고려한 바닥난방 패널 설계에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 2008. p.13.

heating/cooling capacity에 제시되어있다.

두 번째 단계에서는 최소 표면 온도와 노점온도를 고려하여 공급수 온도의 적합성을 확인하고 설계한 시스템의 용량이 요구 냉방 부하를 모두 처리 가능한지의 여부를 판단한다. 만약 결로가 발생한다면 제습 시스템을 추가하여 공급수 온도를 조절하고, 추가 용량이 필요하다면 2차 냉방 시스템을 추가 적용하도록 한다.

마지막 단계에서는 열원부터 말단까지의 시스템 전체를 구성하고, 지역과 용량을 고려하여 적용 가능한 연료와 에너지의 종류를 결정한다. 15)

15) Jan Babiak, Bjaren W. Olesen, Dusan Patras, 『Low Temperature Heating and High Temperature Cooling』. 2007, rehva.



[그림 2.6] 복사냉방시스템의 system design procedure (flow chart) (계속)

System design procedure (chart 2)

4. Checking step on hygienic criteria

Maximum surface temperature
EN15377-1, EN 14037-2 and 3
Table 4.1

Minimum surface temperature
EN15377-1, EN 14037-2 and 3
Table 4.1,
Dew-point in zone Table 5.2

5. Does system design capacity (3.) meet the required design load (1.) and hygienic criteria (4.)?

Yes. The system will cover 100% of heat load

Yes. The system will cover 100% of cooling load. No dehumidification

No. A complementary system is needed:

No. Complementary systems are needed:

- Convective system; floor convectors, common radiators
- Radiant surface system; peripheral area, wall heating
- Air heating system

- Additional cooling system
- medium load $>40-60\text{W/m}^2$,
- low humidity $<12-15\text{g/kg}$ ***
- Additional dehumidification,
- medium load $<40-60\text{W/m}^2$,
- high humidity $>15\text{g/kg}$ ***
Then surf temp can be decreased and cooling capacity increased.
- Additional cooling system and dehumidification.
- high load $>60\text{W/m}^2$, high
- humidity $>17\text{g/kg}$ ***

6. Heat source/sink type selection (see flow chart 3, step 6.)

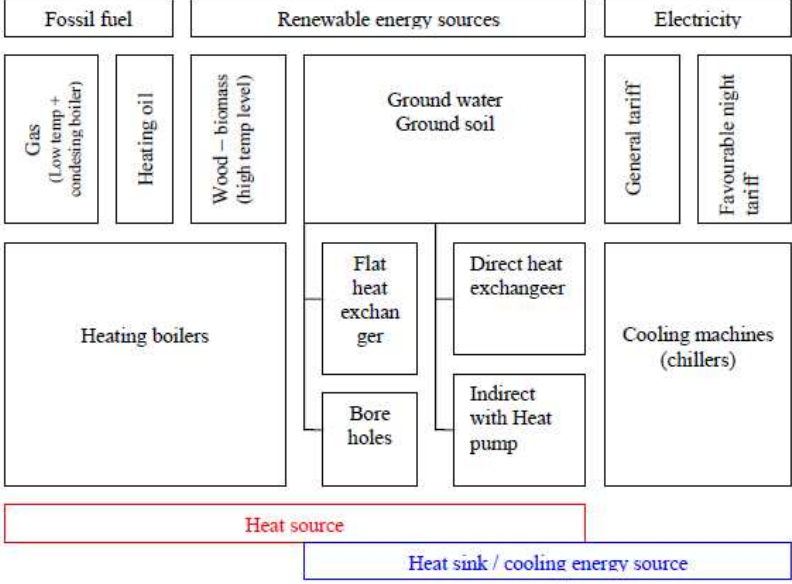
*** Surface temperature should not exceed room dew point. Dehumidification can lower the dew point.

[그림 2.6] 복사냉방시스템의 system design procedure (flow chart) (계속)

Step 6.: Heat source/sink type selection (chart 3)

- A. Total power of a heat source / heat sink comprises:
- installed power of the radiant surface system
 - installed power of complementary heating/cooling systems (convectors, radiators, air heaters/chillers)
 - heat losses in general pipes (max. 5% of usable installed power)

B. Fuel/energy type availability



[그림 2.6] 복사냉방시스템의 system design procedure (flow chart) (끝)

2.2.3 복사냉방시스템의 적용

복사냉방시스템 역시 앞서 2.1절에서 언급한 chilled beam 시스템과 마찬가지로 물을 열전달의 매개체로 이용하기 때문에 결로 및 제어에 대한 고려가 필요하다.

복사냉방시스템에서 잠열 제거를 위한 별도의 장치가 없는 시스템이므로, 냉방용량과 최소환기량을 고려하여 2차 냉방시스템을 선정하거나 별도의 전열교환기 또는 제습시스템의 적용이 필요하다.

복사냉방시스템은 일반적으로 15℃의 공급 냉수 온도를 적용하며 입 출수 온도차는 5℃ 정도로 설계한다. 이때 결로의 위험을 방지하기 위해 공급 냉수 배관의 표면온도가 실내 공기의 노점온도 이상으로 유지될 수 있는 값으로 설계되어야 한다. 무엇보다 실온과 복사면의 온도 차를 되도록 작게 하는 것이 중요하다. 결로가 감지되면 공급수 온도를 상승시키거나 순환펌프를 정지시키거나 부분적으로 설치되어 있는 control 밸브를 닫아야 한다. 고온 다습한 기후에서는 결로 발생의 위험성이 더욱 크기 때문에 침기를 최소화하고 시스템의 설계와 적용에 있어 더욱 신중해야 한다.¹⁶⁾

특히, 구체축열시스템은 냉수 배관이 콘크리트에 묻혀 있는 형태이므로 콘크리트 축열체에 의한 시간 지연효과 (time-lag)가 발생하여 제어가 더욱 중요하다. 건물이 설계 당시 의도했던 조건대로 작동하여 최고의 성능과 높은 에너지 효율을 얻기 위해 중요하게 다루어져야 하는 부분인 만큼 현재 제어에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. ISO/DIS 11855-6에서는 Thermal inertia가 큰 구체축열시스템에서 부하 변동에 따라 즉각적인 제어를 하는 것 보다는 일정 시간 간격을 두고 열원의 공급, 중단을 제어하는 것이 효과적일 수 있다고 언급하고 있다.¹⁷⁾ 이 경우 펌프의 가동 시간을 줄일 수 있으며 이로 인해

16) Ibid.

에너지 성능을 더욱 향상시킬 수 있다.

또한 독일의 SIEMENS는 구체축열시스템의 제어 방법 연구¹⁸⁾의 결과로 일 중 변화하는 heat gain을 upper bound와 lower bound로 그래프화하여 이를 바탕으로 공급수 온도 산정하는 UBB(unknown but bounded) method와 공급수 온도 범위와 펌프 operating mode (on off phase)를 산정하기 위한 PWM(pulse width modulation) method를 제안하였다.

2.2.4 복사냉방시스템의 연구 동향

기존의 대류식 공조시스템과 비교한 복사냉방시스템의 쾌적성 향상 및 에너지 저감 효과에 대한 연구는 이미 많은 연구와 문헌을 통해 검증되어왔다.

Takehito Imanari¹⁹⁾는 유럽과 달리 일본의 특수한 기후 조건을 반영한 radiant ceiling panel system 설계하였다. 대상 지역은 하절기에 매우 덥고 습한 날씨가 지속되므로 표면 결로를 방지하고 제습 기능을 겸할 수 있도록 Radiant ceiling panel system을 설계하였으며, 환기 기능이 없는 복사시스템의 특징을 고려하여 AHU와 적절한 연동을 통해 실내 공기질을 유지할 수 있도록 설계하였다.

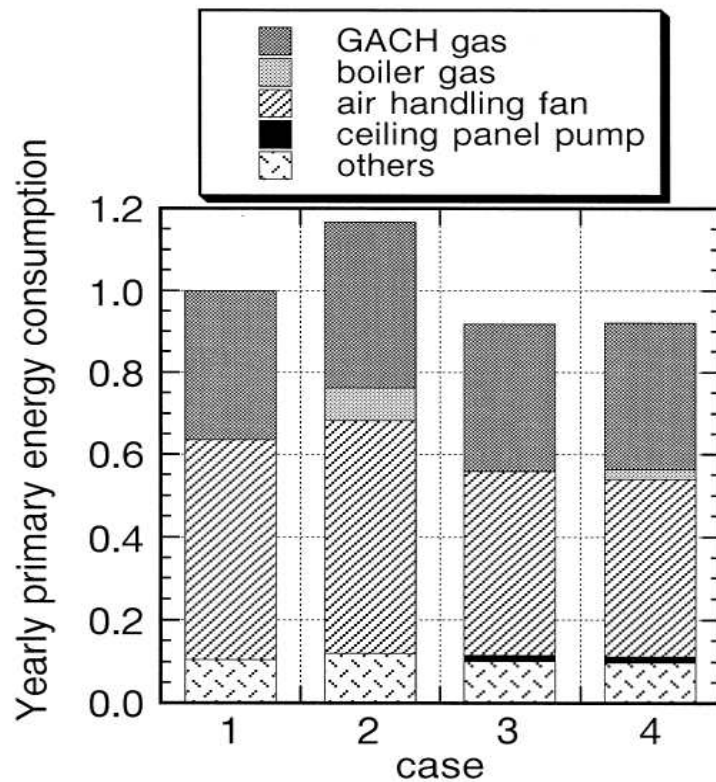
에너지 해석 시스템의 case는 총 4가지이며, case1은 기존 대류 공조시스템, case2는 제습제어 시스템, case3은 천장복사패널시스템+ AHU, case4는 천장복사패널시스템+ DOAS로 구성하였다.

17) ISO, 『ISO/DIS 11855-6 : Building Environment Design - Standards for the design, construction and operation of radiant heating and cooling systems - part 6 : Control』, 2010, ISO.

18) 『Energy-efficient applications: TABS control』, 2004-2007, SIEMENS.

19) Takehito Imanari, Toshiaki Omori, Kazuaki Bogaki, "Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. Comparison with the conventional all-air system", Energy and Buildings, Volume 30, Issue 2, June 1999, pp. 167-175.

연구 결과, 각 case의 연간 에너지 소비량은 [그림 2.7]과 같이 나타났다. 기존의 공조시스템(case 1)의 연간 에너지 소비량을 1로 가정하고, 그 비율을 비교한 결과 천장복사패널시스템을 적용한 경우(case3 과 case4), air handling fan 항목인 반송 동력을 20% 이상 저감시킨 것으로 나타났다. 이로 인해 기존 공조시스템 대비 총 에너지 소비량의 10% 이상 절감되었고, 최종적으로 약 9~10%의 에너지 비용이 감소되었다.



[그림 2.7] Yearly primary energy consumption ratio

2.3 Energy flow chain의 개념 및 적용

Energy flow chain은 Luis Perez-Lombard²⁰⁾가 제안한 에너지 분석 방법으로, 공기조화시스템이 공조되는 공간에 유용한 에너지를 옮기는 에너지변환 장치라 가정하고 분석하는 도구이다. 즉, 냉열 또는 온열이 열원에서부터 실내로 서비스되는 순간까지 에너지 변환 장비들이 에너지를 옮긴다고 가정하고 이를 chain으로 표현하는 방법이다.

공조시스템의 경우, 대상 공간(실내)에서 주변 환경(외부)으로 물 또는 공기를 통해 열을 전달되며, 냉각탑, 응축기, 증발기, cooling coil 등이 매질을 통해 에너지를 변환시키는 장비가 된다. 열원장비로 전달되는 에너지는 말단시스템에 따라 복사 또는 대류 열전달 방식으로 대상공간의 열을 제거하게 된다.

열원에 의해 소비되는 에너지는 제거해야 할 냉방 부하와 그 과정에서의 손실부하를 합한 값으로 표현될 수 있으며, 식 (2.1)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{CG} = Q_{CG} + L_{CG} \quad (2.1)$$

여기서,

C_{CG} : power consumption of coolth generation [kW]

Q_{CG} : thermal load or thermal power of coolth generation [kW]

L_{CG} : power losses of coolth generation [kW]

20) Luis Perez-Lombard, Jose Ortiz b, Ismael R. Maestre, "The map of energy flow in HVAC systems", Applied Energy 88, 2011, pp. 5020 - 5031

물 수송 시 소비되는 에너지는 식 (2.2), (2.3)과 같이 수송해야 할 열원에 수송 시 발생하는 손실부하를 합한 값으로 표현할 수 있다.

$$Q_{CG} = Q_{COIL} + L_{PIP} + Q_{WT} \quad (2.2)$$

여기서,

Q_{CG} : thermal load or thermal power of coolth generation [kW]

Q_{COIL} : thermal load or thermal power of coilwork [kW]

L_{PIP} : power losses of pipework [kW]

Q_{WT} : thermal load or thermal power of water transport [kW]

$$Q_{WT} = C_{WT} - L_{PUMP} \quad (2.3)$$

여기서,

Q_{WT} : thermal load or thermal power of water transport [kW]

C_{WT} : power consumption of water transport [kW]

L_{PUMP} : power losses of pumpwork [kW]

공기 수송과 코일에 필요한 부하는 실 부하와 환기부하 그리고 덕트를 통한 손실과 누기로 인한 손실을 합한 값으로 식 (2.4)와 같다.

$$Q_{COIL} = Q_{SP} + Q_{VEN} + C_{AT} + L_{AT} \quad (2.4)$$

여기서,

Q_{COIL} : thermal load or thermal power of coil [kW]
 Q_{SP} : thermal load or thermal power of space [kW]
 Q_{VEN} : thermal load or thermal power of water ventilation [kW]
 C_{AT} : power consumption of air transport [kW]
 L_{AT} : power losses of air transport [kW]

$$L_{AT} = L_{DUCT} + L_{LEAK} \quad (2.5)$$

여기서,

L_{AT} : power losses of air transport [kW]
 L_{DUCT} : power losses of ductwork [kW]
 L_{LEAK} : power losses of ductwork leakage [kW]

$$Q_{SP} = \dot{m}_{SA}(h_{SA} - h_{RA}) \quad (2.6)$$

여기서,

Q_{SP} : thermal load or thermal power of space [kW]
 \dot{m}_{SA} : mass flow rate of supply air [kg/s]
 h_{SA} : specific enthalpy of supply air [kJ/kg]
 h_{RA} : specific enthalpy of return air [kJ/kg]

$$L_{LEAK} = \dot{m}_{EXH}(h_{EXH} - h_{RA}) + \dot{m}_{LEAK}(h_{LEAK} - h_{RA}) - \dot{m}_{INF}(h_{INF} - h_{RA}) \quad (2.7)$$

여기서,

- L_{LEAK} : thermal load or thermal power of space [kW]
- \dot{m}_{EXH} : mass flow rate of supply air [kg/s]
- h_{EXH} : specific enthalpy of exhaust air [kJ/kg]
- h_{RA} : specific enthalpy of return air [kJ/kg]
- \dot{m}_{LEAK} : mass flow rate of ductwork leakage [kg/s]
- h_{LEAK} : specific enthalpy of ductwork leakage [kJ/kg]
- \dot{m}_{INF} : mass flow rate of ductwork infiltration [kg/s]
- h_{INF} : specific enthalpy of ductwork infiltration [kJ/kg]

이들을 열 부하, 에너지 손실, 에너지 소비 항목으로 분류하여 나타내면 <표 2.2>와 같으며, 이 계산 값들을 바탕으로 energy flow chain을 구성하게 된다.

<표 2.2> Energy flow의 구성 항목

		열부하 Q	에너지 손실 L	에너지 소비 C
열원		에너지 생성	배관 내 손실	냉각탑 팬, 응축수 펌프, 압축기, 냉각수 펌프
수송	물	운송동력	수배관 내 열손실, 펌프의 효율	펌프
	공기	운송동력	침기, 누기	공급공기 팬

2.4 소결

본 장에서는 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 국내 적용을 위한 기초자료 마련을 위해 각 시스템의 시스템 구성요소 별 에너지 소비 특성에 대해 정량적으로 평가하기 위한 사전 고찰 단계를 진행하였다.

Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 시스템 별 개념과 원리에 대해 정리하고, 국외 기준을 바탕으로 한 시스템의 설계 방법 및 적용 시 주의사항, 최근의 연구 동향을 살펴보았다. 또한 에너지 소비 특성 분석의 도구로 사용할 energy flow chain의 개념 및 구성항목에 대해 고찰하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 기존 대류식 공조시스템의 큰 공조 풍량 및 반송 동력, 쾌적성, 위생 등의 문제에 대한 대안으로 제안된 공조 시스템이다. 이는 에너지 저감효과와 더불어 실내 쾌적성을 확보할 수 있다는 장점을 가진다.
- 2) Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 다양한 국외 기준 및 관련 연구 문헌을 바탕으로 설계되어야 하며, 물을 매개로 열을 전달하는 시스템이므로 노점온도를 고려하여 공급수 온도를 결정해야 한다. 특히 고온다습한 환경에서 적용할 경우, 결로 방지를 위한 다양한 제어와 설계 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한 chilled beam의 경우, 소음 발생 및 압력 유지 등의 문제에 대해서도 추가적인 고려가 필요하다.

- 3) 기존 연구 문헌에 의하면 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 기존 대류 공조시스템에 비해 에너지 비용뿐 아니라 쾌적성 측면에서도 매우 우수한 시스템이다. 두 시스템은 에너지를 저감하고, 쾌적성을 확보하는 원리가 유사하여 적용 효과 역시 유사할 것이라고 사료되며, 이에 근거하여 대안 간 정량적인 분석의 필요성을 재고하였다.
- 4) Energy flow chain은 공기조화시스템이 공조되는 공간에 유용한 에너지를 옮기는 에너지의 변환 과정을 분석하는 도구이다. 즉, 냉열 또는 온열이 열원에서부터 실내로 서비스되는 순간까지 에너지 변환 장비들이 에너지를 옮긴다고 가정하고 이를 chain으로 표현하는 방법이다. 이를 사용하여 대상 공간(실내)에서 주변 환경(외부)으로 물 또는 공기를 통해 전달되는 열이 냉각탑, 응축기, 증발기, cooling coil 등이 매질을 통해 전환되는 과정을 표현한 것이 바로 energy flow chain이다.

제 3 장 시스템별 에너지 소비량 평가를 위한 시뮬레이션 개요 및 시스템 설계

본 장에서는 기존 대류 공조시스템과 chilled beam 시스템, 복사냉방시스템의 에너지 소비 특성 분석을 위한 시뮬레이션의 개요 작성 및 시스템 구성 및 설계를 수행하였다. 에너지 소비량을 평가하기 위한 대상 건물과 에너지 해석 프로그램을 선정하고, 앞서 제시한 기준 및 기존의 연구 문헌에 근거하여 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 전체 시스템을 전개·구성하였다. 또한 비교하고자 하는 시스템 구성 요소를 중심으로 용량 산정 및 시스템 세부 설계를 수행하여 에너지 해석 및 분석을 위한 사전 준비 단계에서의 과정을 서술하였다.

3.1 시뮬레이션 개요

3.1.1 시뮬레이션 프로그램의 선정

에너지 소비 특성 분석은 시스템 구성요소 각각의 에너지 소비량 평가를 토대로 이루어진다. Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 에너지 소비량을 산정하기 위해서는 직접적인 방법인 실험과 간접적인 방법인 컴퓨터를 활용한 시뮬레이션(simulation)이 있다.²⁰⁾

실험에 의한 방법은 실물크기로 실험실을 제작하거나 실제 건물을 대상으로 시스템을 적용하고 평가 조건하에서 실험하는 방법으로, 실측을 통해 정확한 시스템 성능을 산정할 수 있고 예측 불가능한 변수에 대한 추가적인 분석

20) 김광우, “이중외피 시스템의 개요와 국내외 현황”, 대한건축학회지, 제47권, 제9호, 2003, pp.28~33.

이 가능하다. 그러나 실험에 의한 방법은 막대한 비용과 시간이 소요된다는 한계가 있다. 이와 달리 컴퓨터를 활용한 시뮬레이션 방법은 시간과 비용을 감소시키고 다양한 조건에 대한 평가가 가능하다는 장점이 있다. 그렇지만 시뮬레이션을 통한 해석 결과를 신뢰하기 위해서는 정확한 modeling을 구현하여 결과를 산출하고, 이를 분석할 수 있는 engineering 능력이 요구된다.²¹⁾

본 연구에서는 기존 대류 공조시스템과 chilled beam 시스템, 복사냉방시스템의 에너지 소비 특성을 분석하기 위해 시뮬레이션에 의한 방법을 선택하였으며, 시뮬레이션 프로그램은 eneryplus 7.0을 이용하였다.

Energyplus는 미국 에너지성 (이하 DOE) 에서 개발한 부하 해석 프로그램으로, 기존의 BLAST와 DOE-2에서의 장점과 추가적인 새로운 기능들을 조합하여 만든 프로그램이다. 건물의 기본 데이터(열관류율, 창면적비 등) 를 입력시키면 창 부분 계산, 지중으로의 열전달, 실제적인 시스템 컨트롤, 존별 기류, 방사열과 냉각시스템, 건축요소들의 수분 흡착성과 탈착성 등을 고려하여 열 유체에너지 해석이 구현되고, 기존의 TRNSYS, SPARK 등을 활용하며 건물 시스템 해석이 이루어진다.

Energyplus는 기본적으로 일관적인 표면온도와 방사, 복사열의 확산과 표면의 반사, 내부 열전도에 대한 가정을 바탕으로 열유체 해석이 이루어지는 알고리즘을 갖추고 있다. 프로그램은 건물외피의 표면과 공기 열 균형 상태를 관리하고, 열평형과 건축시스템 시뮬레이션 간의 인터페이스 역할을 한다. 표면의 열평형모듈은 내외표면 열평형 경계조건, 전도, 대류, 방사, 습기 효과들이 상호 관련성을 나타낸다. ²²⁾

Energyplus에서 실과 시스템의 통합적 이론은 아래의 식 (3.1) 으로 표현

21) 최동희, “블라인드가 이중외피의 열적 특성에 미치는 영향에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 석사 학위 논문, 2004. p.40.

22) 공성훈, “energy plus 부하 해석 프로그램”, 공기조화냉동공학회지 설비저널, 제29권 제7호, 2000. (Drury B. Crawley, ASHRAE Journal, 2000).

할 수 있으며, 이는 열평형 방정식에서 비롯된 것이다.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zone}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_\infty C_p (T_\infty - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (3.1)$$

where:

$$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i = \text{sum of the convective internal loads}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_z) = \text{convective heat transfer from the zone surfaces}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{zone}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) = \text{heat transfer due to inter zone air mixing}$$

$$\dot{m}_\infty C_p (T_\infty - T_z) = \text{heat transfer due to infiltration of outside air}$$

$$\dot{Q}_{sys} = \text{air systems output}$$

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \text{energy stored in zone air}$$

$$\text{where: } C_z = \rho_{air} C_p C_T$$

where:

$$\rho_{air} = \text{zone air density}$$

$$C_p = \text{zone air specific heat}$$

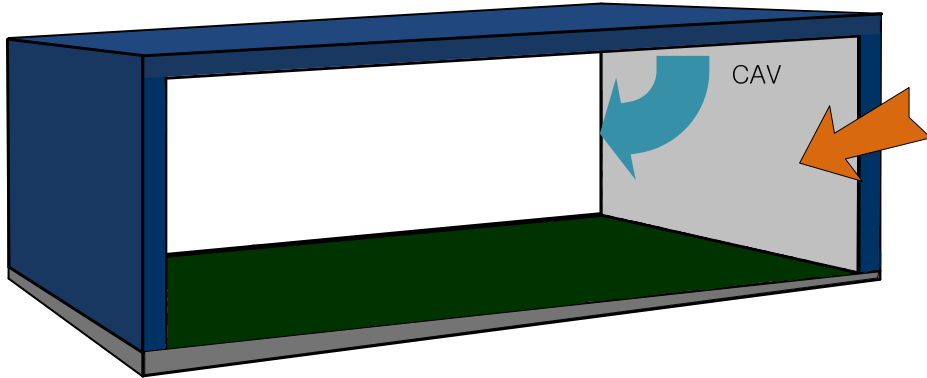
$$C_T = \text{sensible heat capacity multiplier}$$

Energyplus는 세계적으로 그 공신력이 입증된 에너지 해석 프로그램이며 다양한 모듈을 기반으로 하여 상세수준의 해석 결과 값을 도출할 수 있다. 또한 실부하, 시스템부하, 플랜트부하 등의 통합된 시뮬레이션 해석이 가능하며 건물 및 시스템의 동적 거동을 모사하는데 적합한 전열 해석을 프로그램이다. 따라서 본 연구에서는 상세한 시스템 구성이 가능하고, 시스템 구성요소의 정량적인 에너지 소비량 산출이 가능한 energyplus를 시뮬레이션 툴로 선정하는 것이 적합하다고 판단하였다.

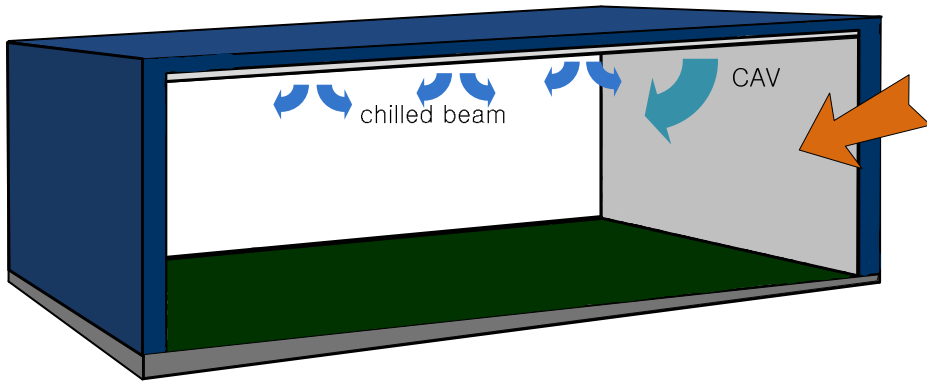
3.1.2 대상 공간의 경계 조건

(1) 대상 건물 선정

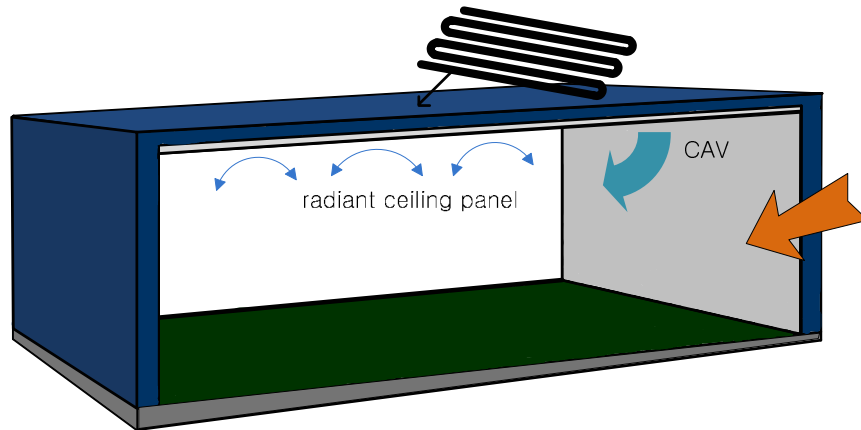
Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 에너지 소비 특성을 분석하기 위한 대상 건물은 서울시 영등포에 위치한 업무시설 용도의 J건물을 선정하였다. 건물의 설계 상 동일한 평면이 연속적으로 반복되고 있음을 고려하여, 기준층에서 남향에 위치한 12m × 45m × 3m (plenum : 0.4m)의 일부 공간으로 규모를 한정하여 에너지 해석을 실시하였다. [그림 3.1]는 각 시스템 구성에 따른 대상 공간의 개념도를 나타낸 것이고, [그림 3.2]는 실제 건물의 평면도이다. 건물의 평면 중 점선으로 표시한 공간이 실제 에너지 해석을 위해 한정된 공간을 의미한다.



(a) 기존 대류 공조시스템의 개념도



(a) chilled beam 시스템의 개념도



(c) 복사냉난방시스템의 개념도

[그림 3.1] 대상 공간의 개념도

〈표 3.1〉 대상 공간 설계 조건

항목	내용	
위치	서울시 영등포구	
규모	12m × 45m × 3m (바닥 면적 540m ² , 약 163평)	
기상데이터	서울	
해석 기간	6월 1일 ~ 9월 30일	
내부 발열	인체	0.1 인/m ²
	조명	16 W/m ²
	기기	40 W/m ²
Schedule	재실자	AM 9 : 00 ~ PM 6 : 00 (주5일)
	시스템	AM 7 : 00 ~ PM 6 : 00 (주5일)
유리창	6mm clear + 13mm air + 6mm clear	
외벽	Concrete 200mm + Rock Wool 100mm + Gypsum 9.5mm	
천장마감	Mortar 45mm + ALC 45mm + Insulation 20mm + Concrete 100mm + Concrete 100mm + Gypsum 9.5mm	
바닥마감	Gypsum 9.5mm + Concrete 100mm + Concrete 100mm + Insulation 20mm + ALC 45mm + Mortar 45mm	

(2) 부하 산정

대상 건물의 설계 외기 조건²³⁾은 건구온도 31.1℃, 습구온도 26.3℃, 상대 습도 68.7%로 설정하였고, 실내 온습도 조건²⁴⁾은 건구온도 26℃, 상대습도 50%로 설정하였다. 주어진 설계 조건을 바탕으로 energyplus를 이용해 기간 내 최대 냉방부하를 정리한 결과 <표 3.2>과 같았다.

냉방부하의 최대값은 8월 21일 오후 1시 30분 경 발생하였으며, 최대 현열 부하는 84.6 W/m², 최대 잠열 부하는 12.3 W/m²로 산정되었다.

23) ASHRAE. 『ASHRAE Handbook-HVAC Systems and Equipment Ch.6 Panel Heating and Cooling』. ASHRAE, 2009. (TAC 2.5%로 계산한 서울지역의 기상 조건)

24) 주무관청, 『건물에너지효율등급인증제도 v2011.04』, 업무용 건축물 용도 프로파일.

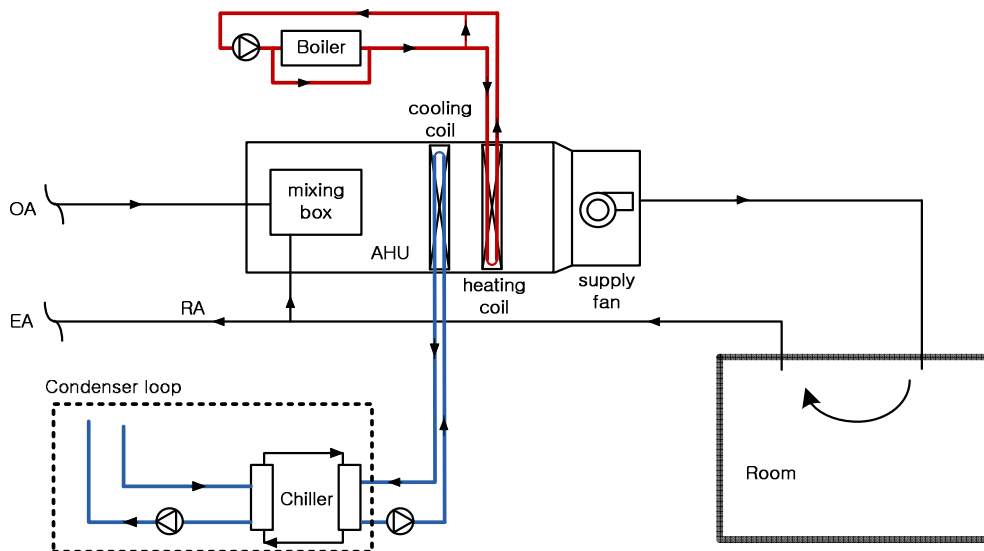
〈표 3.2〉 대상 공간 부하 조건

현열	잠열	전열	SHR
45,672 W	6,659 W	52,331 W	0.87
84.6 W/m ²	12.3 W/m ²	96.9 W/m ²	

3.2 기존 대류 공조시스템의 설계

3.2.1 기존 대류 공조시스템의 구성 및 설계

기존 대류 공조시스템은 대표적인 대류 공조시스템이자 실제 대상 건물에 적용되어있는 CAV 시스템으로 선정하였다. 시스템의 구성은 [그림 3.3]과 같다. Outdoor Air와 Return Air가 AHU 내부의 mixing box에서 혼합되고 이 공기가 cooling coil을 지나 supply fan을 통해 실내로 공급된다. 실내로 유입된 공기는 plenum을 통해 return 되어 배기된다.



[그림 3.3] 기존 대류 공조시스템의 계통도

기존 대류 공조 시스템의 설계의 첫 번째 단계로, AHU에서의 송풍량을 산정하게 되는데, 이는 식 (3.2)를 이용하여 계산된다.

$$G = \frac{q}{c_p \cdot \gamma \cdot \Delta t \cdot 1000/3600} \quad (\text{식 3.2})$$

여기서,

G : 결정 급기 풍량 [CMH]

q : 실내 현열 냉방 부하 [kW]

c_p : 공기의 정압 비열 (= 1.006 [kJ/g°C])

γ : 공기의 비중량 = 1.2 [kg/m³]

AHU에 적용되는 cooling coil의 부하는 식 (3.3)을 통해 산정된다.

$$q_{coil} = G \times \rho \times \Delta h \times 1000/3600 \quad (3.3)$$

여기서,

q_{coil} : 냉각코일 부하 [kW]

G : 송풍량 [CMH]

ρ : 1.204 [kg/m³]

Δh : $\Delta h = h_{MA} - h_{LVG}$

이를 바탕으로 fan 동력은 아래의 식 (3.4)를 이용하여 산정하였으며, pump는 실제 제품을 참고하여 용량을 선정하였다.

$$W = \frac{G \times H_s}{6.120 \times \eta_s} \quad (3.4)$$

여기서,

W : Fan 동력 [kW]

G : 송풍량 [m^3/min]

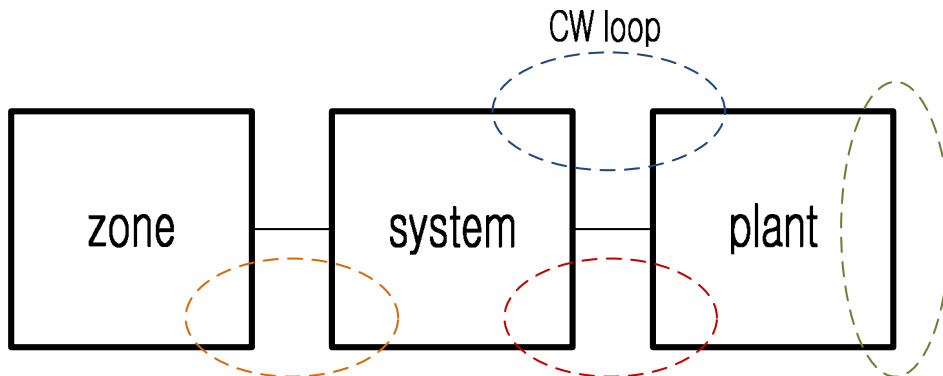
H_s : 송풍기 정압 [mmAg]

η_s : 송풍기 효율 (일반적으로 0.85 적용)

Chiller의 type은 electronic, watercooled type으로 선정하였으며, 용량은 45.2 kW, COP는 3.2로 설계하였다. Tower의 type은 single speed이며, fan power는 2.1 kW, flow rate는 를 적용하였다. 이를 바탕으로 설계 값을 정리한 결과 <표 3.3>과 같다.

3.2.2 기존 대류 공조시스템의 모델링

시스템의 모델링을 위해 먼저, [그림 3.4]와 같이 zone과 system, plant를



[그림 3.4] Schematic diagram of CAV system

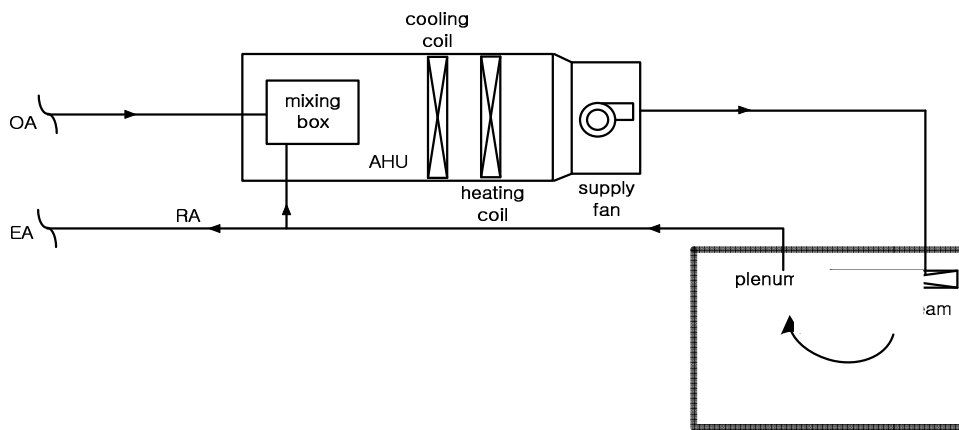
〈표 3.3〉 기존 대류 공조시스템의 설계

	항목	설계 값
tower fan	type	singlespeed
	tower fan power	2.0 kW
	flow rate	353.4 LPM
condenser pump	type	variablespeed, intermittent
	motor efficiency	0.9
	power	1.5 kW
	pump head	179,352 Pa
chiller	type	Electronic, WaterCooled
	sizing	31.6 kW
	COP	3.2
	outlet temperature	7°C
circulation pump	type	variablespeed, intermittent
	motor efficiency	0.9
	power	1.3 kW
	flow rate	299 LPM
	pump head	179,352 Pa
supply fan	fan capacity	2.597 kW
	fan efficiency	0.85
	motor efficiency	0.9
	pressure rise	600 Pa (=61.2 mmAq)
AHU	load	45,672 W
	air flow rate	3.6 m ³ /s (=13240 CMH)
	inlet temperature	7°C
	outlet temperature	12°C
	coil – capacity	124.9 kW
	coil – water flow rate	357.8 LPM

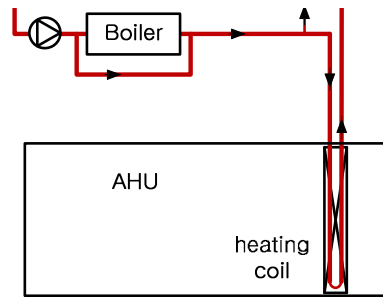
연결하여 각각의 loop을 구성하게 된다. 기존 대류 공조시스템은 CW loop, HW loop, Air loop, condenser loop으로 구성된다. AHU에서 공급되는 공기의 순환을 나타내는 Air loop와 AHU의 cooling coil에 공급되는 냉수의 순환을 나타내는 CW loop, 온도 제어를 위한 재열 (난방 시 AHU의 heating coil에 열을 공급되는 순환 포함)을 위해 heating coil에 온수를 공급하는 HW loop, 마지막으로 열원에서 chiller로 냉열을 공급해주는 condenser loop로 구분할 수 있다.

Air loop는 [그림 3.5]와 같이 표현할 수 있다. 먼저 외기가 mixing box로 유입되고, main cooling coil과 main heating coil을 거쳐 설정 온도를 맞추게 되고, 조절된 공기는 supply fan을 거쳐 실로 공급된다. 그 공기는 다시 plenum을 통해 return 되어 일부는 mixing box로, 일부는 외부로 배기되는 과정을 거친다.

그리고 HW loop는 순환 펌프를 통해 중앙 보일러에서 main heating coil로 열을 전달하는 과정이다. 이때 일부는 Bypass 되어 유량을 조절하며, 순환되는 과정을 정리하면 [그림 3.6]과 같이 나타낼 수 있다.



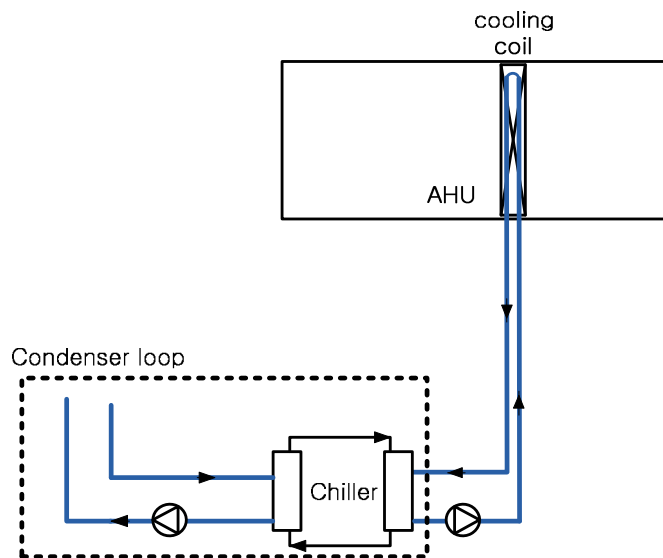
[그림 3.5] Schematic diagram of Air loop



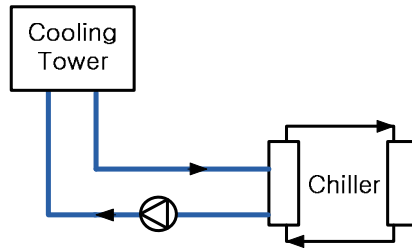
[그림 3.6] Schematic diagram of HW loop

CW loop는 [그림 3.7]과 같이 구성되며, 기본적으로 순환 펌프를 통해 중앙 chiller에서 공급되는 냉열이 외기의 냉각을 위해 main cooling coil에 냉수를 공급한다.

마지막으로 condenser loop는 cooling tower에서 중앙 chiller로 냉열을 생산하여 공급하는 과정이다. 이 과정은 펌프를 통해 순환되며, [그림 3.8]과 같이 표현될 수 있다. 앞서 언급한 4가지 loop를 연결하여 구성하면 기존 대류 공조시스템 전체의 계통도가 된다.



[그림 3.7] Schematic diagram of CW loop



[그림 3.8] schematic diagram of condenser loop

3.3 Chilled beam 시스템의 설계

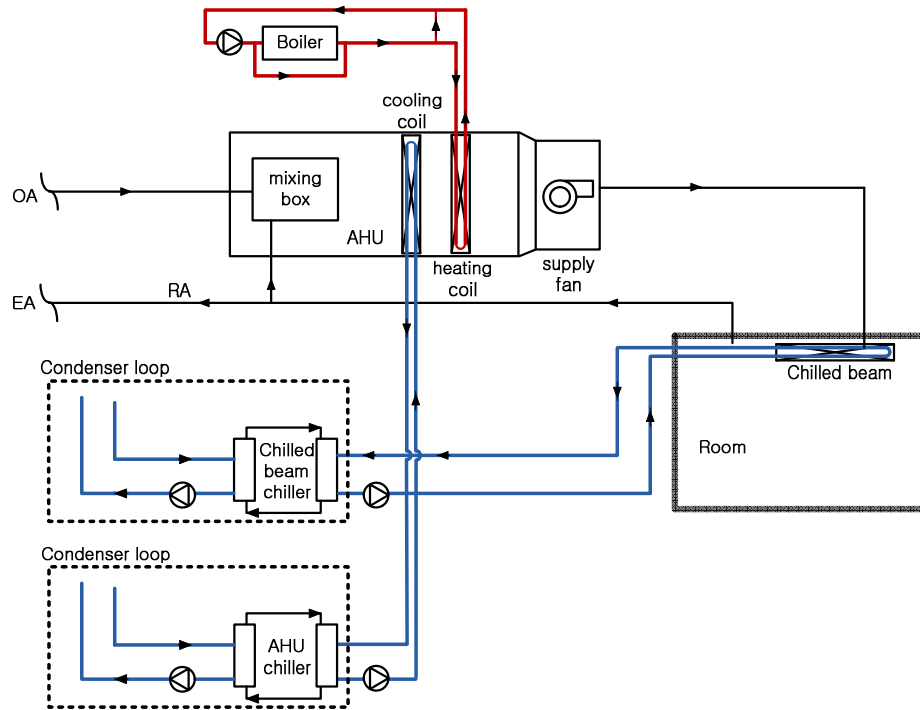
3.3.1 Chilled beam 시스템의 구성 및 설계

Chilled beam의 냉방 용량 확보와 환기시스템의 적용을 위해 active chilled beam 타입을 선정하여 시스템을 구성하였다. Active chilled beam의 경우, 크게 최소 환기 도입량을 공급하기 위한 AHU와 전 처리된 공기와 실내 공기를 혼합하여 실로 재공급하기 위한 chilled beam으로 구성된다. 이는 [그림 3.9]와 같이 나타낼 수 있다.

Chilled beam 시스템의 급기 풍량은 최소외기도입량, 노점온도를 낮게 유지시킬 수 있는 풍량, 잠열부하를 제거할 수 있는 풍량 중 가장 큰 값으로 설계하는데, 일반적으로 사무실 용도의 건물에서는 잠열부하가 크지 않으므로 최소외기도입량이 기준이 된다. 사무용 건물의 최소 외기 도입량인 30 CMH/인 을 적용하여 계산하면 3,240 CMH 가 계산된다.

AHU와 chilled beam은 각각의 cooling tower와 chiller를 통해 coil에 열량을 공급하며, 부하는 식 (3.3)을 이용하여 산정하였다. 각각의 배관에 흐르는 공급수 온도와 유량은 설계 기준과 발생 부하를 고려하여 설계하였다.

공급공기의 절대습도는 아래의 식 (3.5)에 의해 75.8 g/kg 로 계산되며, 공급공기의 노점 온도가 13.2℃이므로 결로 없이 잠열 처리가 가능하다.



[그림 3.9] Chilled beam 시스템의 계통도

$$W_{sa} = W_{sp} - Q_{lat} / (3.0 \times V_{sa}) \quad (3.5)$$

여기서,

W_{sa} : 공급 공기의 절대습도 (g/kg)

W_{sp} : 실내 설계조건에서의 절대습도 (g/kg)

Q_{lat} : 실의 잠열부하 (W)

V_{sa} : 외기 도입량 (L/s)

3.0 : 수증기 증발잠열 (=597.5 cal/g) × 4.1868 J/cal × 0.001 m³/L
 × 공기밀도(=1.226 kg/m³)

이를 바탕으로 fan 동력은 식 (3.4)를 이용하여 산정하였으며, pump는 실제 제품을 참고하여 용량을 선정하였다.

Chiller의 type은 electronic, water cooled로 선정하였으며, AHU chiller의 용량은 5.1 kW, COP는 3.2로 chilled beam chiller의 용량은 19.0 kW, COP는 6으로 설계하였다. Tower의 type은 single speed로 선정하였다.

Chilled beam은 16℃의 공급수온도, 21℃의 환수온도로, 유량은 99.7 LPM으로 설계하였다. 이를 바탕으로 설계 값을 정리한 결과 <표 3.4>와 같다.

<표 3.4> Chilled beam 시스템의 설계 (계속)

항목		설계 값
load	AHU	10,865 W
	chilled beam	34,807 W
AHU tower fan	type	singlespeed
	flow rate	57 LPM
chilled beam tower fan	type	singlespeed
	flow rate	212.8 LPM
AHU condenser pump	type	variablespeed, intermittent
	motor efficiency	0.9
	power consumption	0.53 kW
	pump head	179,352 Pa
chilled beam condenser pump	type	variablespeed, intermittent
	motor efficiency	0.9
	power consumption	0.46 kW
	pump head	123,480 Pa

〈표 3.4〉 Chilled beam 시스템의 설계 (계속)

항목		설계 값
AHU chiller	type	Electronic, WaterCooled
	sizing	5.1 kW
	COP	3.2
	outlet temperature	7℃
chilled beam chiller	type	Electronic, WaterCooled
	sizing	19.0 kW
	COP	6
	outlet temperature	16℃
AHU circulation pump	type	variablespeed, intermittent
	motor efficiency	0.9
	power consumption	0.5 kW
	flow rate	106 LPM
	pump head	179,352 Pa
chilled beam circulation pump	type	variablespeed, intermittent
	motor efficiency	0.9
	power consumption	0.3 kW
	flow rate	58 LPM
	pump head	123,480 Pa
supply fan	fan capacity	2.118 kW
	fan efficiency	0.85
	motor efficiency	0.9
	pressure rise	2,000 Pa (=204.1 mmAq)

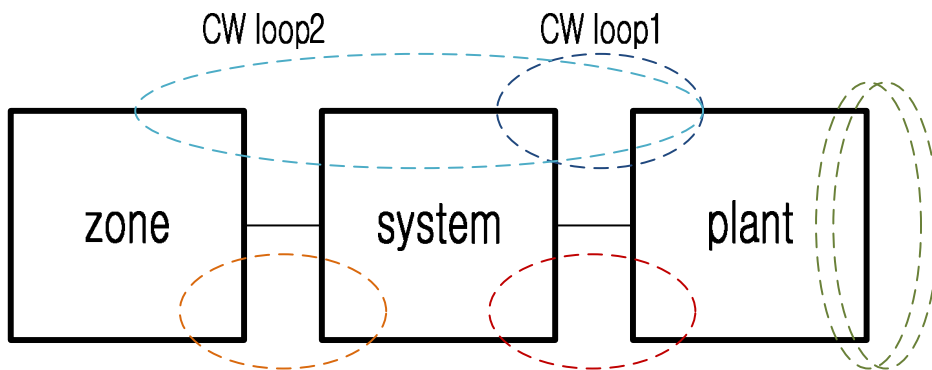
<표 3.4> Chilled beam 시스템의 설계

항목		설계 값
AHU	air flow rate	0.9 m ³ /s (=3240 CMH)
	inlet temperature	7℃
	outlet temperature	12℃
	coil – capacity	30.6 kW
	coil – water flow rate	87.6 LPM
chilled beam	type	active chilled beam
	inlet temperature	16℃
	outlet temperature	21℃
	air flow rate	0.9 m ³ /s
	pipe inside diameter	0.012m
	coil flow rate	99.7 LPM

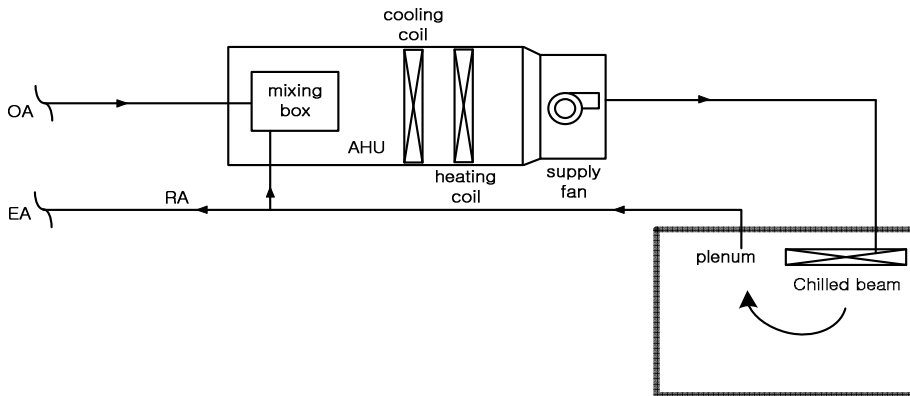
3.3.2 Chilled beam 시스템의 모델링

시스템의 모델링을 위해 앞서 3.2장에서 방법과 마찬가지로 [그림 3.10]과 같이 zone과 system, plant를 연결하여 각각의 loop를 구성하게 된다. AHU에서 공급되는 공기의 순환을 나타내는 Air loop와 AHU의 cooling coil에 공급되는 냉수의 순환을 나타내는 CW loop1, chilled beam의 cooling coil에 공급되는 냉수의 순환을 나타내는 CW loop2, 온도 제어를 위한 재열(난방 시 AHU의 heating coil에 열을 공급되는 순환 포함)을 위해 heating coil에 온수를 공급하는 HW loop, 마지막으로 열원에서 chiller로 냉열을 공급해주는 condenser loop로 구분할 수 있다.

Air loop는 [그림 3.11]과 같이 표현할 수 있다. 먼저 외기가 mixing box로 유입되고, main cooling coil과 main heating coil을 거쳐 설정 온도를 맞추게 된다. 조절된 공기는 supply fan을 거쳐 실에 위치한 chilled beam으로 공급된다. 그 공기는 다시 plenum을 통해 return 되어 일부는 mixing box로,



[그림 3.10] Schematic diagram of chilled beam system



[그림 3.11] Schematic diagram of Air loop for chilled beam system

일부는 외부로 배기되는 과정을 거친다.

HW loop는 냉방 시 기존 대류 공조시스템과 동일한 과정으로 설계된다.

CW loop1,2는 각각의 순환 펌프를 통해 AHU chiller에서 공급되는 냉열은 외기의 냉각을 위한 main cooling coil로, chilled beam chiller에서 공급되는 냉열은 chilled beam 내에 위치한 cooling coil로 공급되는 과정이다.

마지막으로 condenser loop1,2 역시 기존 대류 공조시스템과 동일한 과정으로, cooling tower에서 생산된 냉열을 chiller로 공급해주는 과정이다. 앞서 언급한 4가지 loop를 연결하여 구성하면 chilled beam 시스템 전체의 계통도와 같다.

3.4 복사냉방시스템의 설계

3.4.1 복사냉방시스템의 구성 및 설계

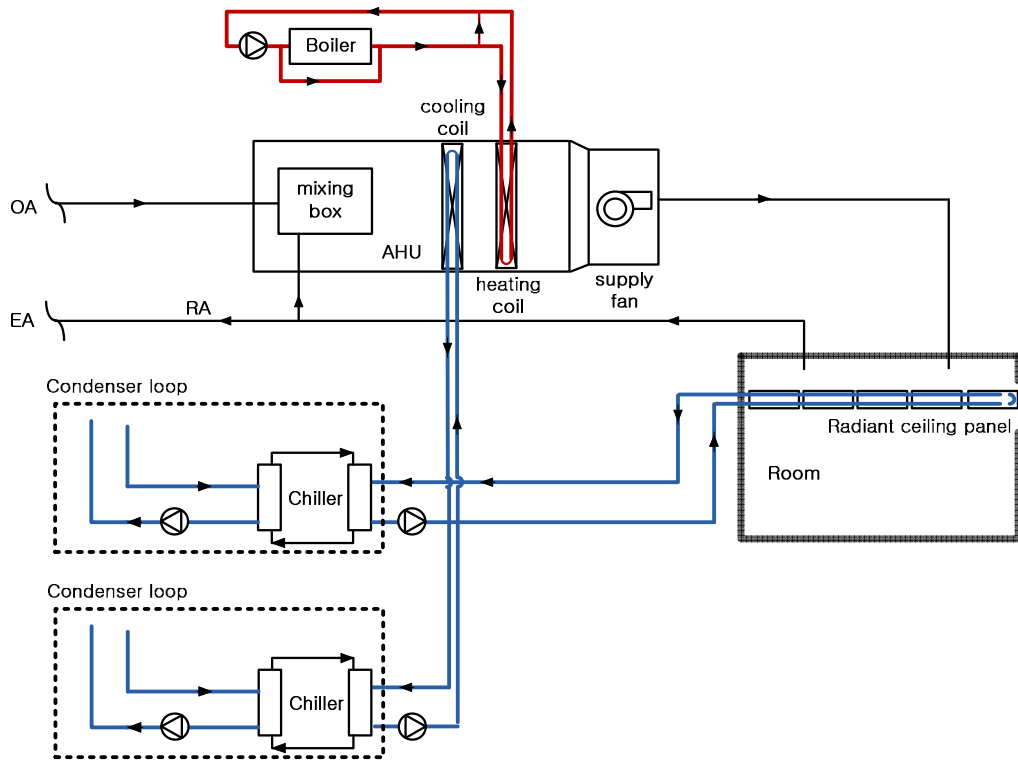
복사냉방시스템은 축열에 의한 시간 지연 효과와 제어방식에 따른 가변성을 배제하고 연구를 진행하기 위해 천장패널시스템 타입을 선정하여 시스템

복사냉방시스템은 축열에 의한 시간 지연 효과와 제어방식에 따른 가변성을 배제하고 연구를 진행하기 위해 천장패널시스템 타입을 선정하여 시스템을 구성하였다. 또한 복사냉방시스템은 잠열 제거가 불가능한 시스템이므로 이를 위해 2차 시스템과의 결합이 필수적이라고 할 수 있다. 이 점을 고려하여 잠열 제거와 동시에 최소 환기 도입량을 공급하기 위한 AHU와 실의 냉방을 위한 천장복사패널로 시스템을 구성하였다. 이는 [그림 3.12]와 같이 나타낼 수 있다.

복사냉방시스템의 급기 풍량은 chilled beam 시스템과 동일한 최소외기도입량이 기준이 된다. 사무용 건물의 최소 외기 도입량인 30[CMH/인]을 적용하여 계산하면 3,240[CMH]가 계산된다.

AHU와 chilled beam 각각에 연결된 coil의 부하는 식 (3.3)을 이용하여 산정하였으며, 공급수 온도와 유량은 설계 기준과 발생 부하를 고려하여 각 coil 별로 설계하였다. 공급공기의 절대습도는 앞서 언급한 식 (3.5)에 의해 계산되었고 노점 온도를 산정 결과, 결로 없이 잠열 처리가 가능하였다.

이를 바탕으로 fan 동력은 식 (3.4)를 이용하여 산정하였으며, pump는 실제 제품을 참고하여 용량을 선정하였다.



[그림 3.12] 복사냉방시스템의 계통도

Chiller와 cooling tower 역시 chilled beam 시스템에서 적용한 것과 동일한 구성으로 설계하였다. 이를 바탕으로 설계 값을 정리한 결과 <표 3.5>와 같다.

3.4.2 복사냉방시스템의 모델링

복사냉방시스템의 모델링을 위한 과정은 앞서 언급한 다른 시스템과의 설계 방법과 동일하게 진행된다.

Air loop은 기존 대류 공조시스템인 CAV시스템과 동일하다. 최소 외기량

의 외기가 mixing box로 유입되면, main cooling coil과 main heating coil을 거쳐 설정 온도를 맞추게 되고, 조절된 공기는 supply fan을 거쳐 실로 공급된다. 그 공기는 다시 plenum을 통해 return 되어 일부는 mixing box로, 일부는 외부로 배기되는 과정을 거친다.

HW loop는 앞서 언급한 두 시스템과 동일하며, 순환 펌프를 통해 중앙 보일러에서 main heating coil로 열을 전달하게 된다. 난방 시에는 radiant ceiling panel의 coil까지 공급수 전달하게 된다.

AHU의 cooling coil에 냉수를 공급하는 CW loop1은 기존 대류 공조시스템과 chilled beam 시스템과 동일하고, 천장 복사 패널에 냉수를 공급하기 위한 cooling coil의 냉수 순환을 나타내는 CW loop2가 추가된다.

<표 3.5> 복사냉방시스템의 설계 (계속)

항목		설계 값
load	AHU	10,865 W
	chilled beam	34,807 W
AHU tower fan	type	singlespeed
	flow rate	57 LPM
radiant tower fan	type	singlespeed
	flow rate	192.8 LPM
AHU condenser pump	type	variablespeed, intermittent
	motor efficiency	0.9
	power consumption	0.3 kW
	pump head	179,352 Pa

<표 3.5> 복사냉방시스템의 설계 (계속)

항목		설계 값
radiant condenser pump	type	variablespeed, intermittent
	motor efficiency	0.9
	power consumption	0.52 kW
	pump head	123,480 Pa
AHU chiller	type	Electronic, WaterCooled
	sizing	5.1 kW
	COP	3.2
	outlet temperature	7℃
radiant chiller	type	Electronic, WaterCooled
	sizing	18.0 kW
	COP	6
	outlet temperature	19℃
AHU circulation pump	type	variablespeed, intermittent
	motor efficiency	0.9
	power consumption	0.5 kW
	flow rate	106 LPM
	pump head	179,352 Pa
radiant circulation pump	type	variablespeed, intermittent
	motor efficiency	0.9
	power consumption	0.5 kW
	flow rate	146.2 LPM
	pump head	123,480 Pa

〈표 3.5〉 복사냉방시스템의 설계

항목		설계 값
supply fan	fan capacity	2.118 kW
	fan efficiency	0.85
	motor efficiency	0.7
	pressure rise	1,000 Pa (=102 mmAq)
AHU	air flow rate	0.9 m ³ /s (=3240 CMH)
	inlet temperature	7℃
	outlet temperature	12℃
	coil - capacity	30.6 kW
	coil - water flow rate	87.6 LPM
radiant panel	type	radiant ceiling panel
	inlet temperature	19℃
	outlet temperature	22℃
	inside diameter	0.008m
	tubing space	0.1m
	pump head	5,000 Pa
	power consumption	100 W
	coil flow rate	166.2 LPM

3.5 소결

본 장에서는 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 에너지 소비 특성 비교 및 분석을 수행하기 위한 에너지 시뮬레이션의 개요, 각 시스템 별 시스템 구성 및 상세 설계를 진행하였다. 에너지 소비량을 평가하기 위한 대상 건

물과 에너지 해석 프로그램의 선정과 기존 대류 공조시스템과 chilled beam 시스템, 복사냉방시스템의 전체 시스템을 구성하였다. 또한 시스템 별 용량을 산정하고 항목 별 세부 설계를 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존 대류 공조시스템과 chilled beam 시스템, 복사냉방시스템의 에너지 소비량 평가를 위한 시뮬레이션 프로그램으로 energyplus를 선정하였다. 이는 다양한 모듈을 기반으로 하여 상세 수준의 시스템 설계 및 해석이 가능하며 zone, system, plant의 통합된 시뮬레이션 해석을 수행할 수 있다.
- 2) 에너지 소비 특성을 분석을 위한 대상 건물을 선정하고, 동일한 평면이 연속적으로 반복되고 있음을 고려하여 일부 공간으로 대상 공간의 규모를 한정하였다. 국내 기준 및 실제 설계 값을 고려하여 경계 조건을 설정하여 하절기동안의 냉방 부하를 산정하여 설계하였다.
- 3) 기존 대류 공조시스템은 CAV, chilled beam 시스템은 active chilled beam, 복사냉방시스템은 천장복사패널 타입을 선정하여 시스템을 구성하였으며, 설계 기준 및 실제 건물에 적용된 설계 값을 고려하여 시스템의 용량 및 세부 설계를 진행하였다.
- 4) 에너지 시뮬레이션을 위한 모델링 과정에서는, AHU에서 공급되는 공기의 순환을 나타내는 Air loop와 공급 냉수의 순환을 나타내는 CW loop, 온도 제어를 위한 재열을 위한 HW loop, cooling tower에서 chiller로 냉열을 공급하는 condenser loop로 구성하였다.

제 4 장 시뮬레이션을 통한 시스템 구성요소별 에너지 소비 특성 분석

본 장에서는 3장에서 구성한 기존 대류 공조시스템, chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 설계를 바탕으로 시스템 구성요소 별 에너지 소비량을 산정하였다. 또한, 시스템 구성요소 별 에너지 소비량을 바탕으로 각 시스템의 에너지 소비 특성을 비교, 분석하였으며, 이를 위한 도구로 energy flow chain을 이용하였다. 이를 통하여 시스템 대안 간 합리적인 시스템 선택을 위한 기반을 마련하여 두 시스템의 국내 도입을 위한 기초 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

4.1 기존 대류 공조시스템의 에너지 소비량 분석

각 시스템의 에너지 소비량 분석은 3장에서 선정한 에너지 시뮬레이션 프로그램인 energyplus를 이용하였으며, 대상 공간(zone) 및 시스템(system), 열원(plant) 각각의 모델링을 수행하였다.

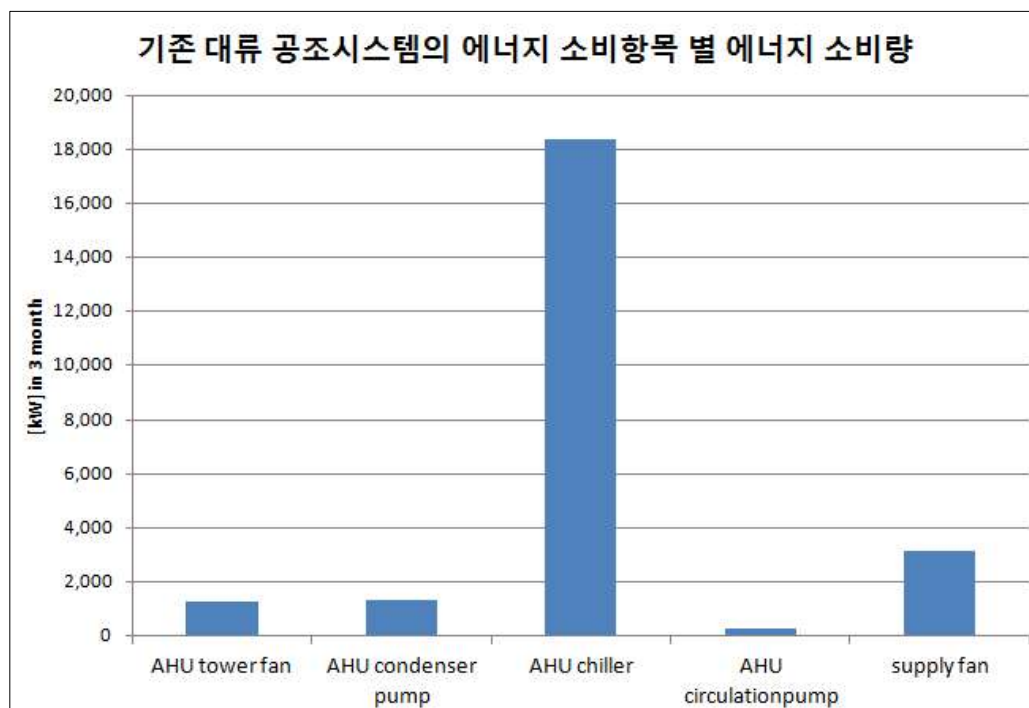
에너지 소비량의 분석에 앞서, 설계한 시스템의 용량으로 충분한 냉방이 가능한지 확인하기 위하여 대상 공간의 실내 설정온도를 26℃를 기준으로, 공조시스템이 가동되는 오전 7시에서 오후 6시 사이의 실내온도를 분석하였다. 그 결과, 26 ± 0.5℃ 내외로 적합한 온도 수준을 유지하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

기존 대류 공조시스템에서 에너지가 소비되는 항목은 cooling tower 내의 fan, 냉수를 생산하는 chiller, AHU의 cooling coil을 거친 공기를 실로 공급하기 위한 supply fan, cooling coil에 냉수를 공급하기 위한 circulation

pump가 있다. 기존 대류 공조시스템의 구성요소 별 에너지 소비 항목을 분류하고, 이들의 에너지 소비량을 산출한 결과 <표 4.1>과 같고, 이를 그래프로 표현하면 [그림 4.1]과 같다.

시뮬레이션 해석 기간인 6월 1일에서 9월 30일까지 3개월 기준, tower fan의 에너지 사용량은 1,274.8 kW, condenser pump의 에너지 사용량은 1,325.3 kW, chiller의 에너지 사용량은 18,382.7 kW, pump의 에너지 사용량은 288.1 kW, supply fan의 에너지 사용량은 3,140.8 kW이다.

Chiller에서의 에너지 사용량이 가장 크게 나타났으며, supply fan의 소비량이 그 다음으로 많은 비중을 차지했다. Condenser pump와 tower fan의 에너지의 에너지 사용량이 그 다음으로 큰 에너지 소비량을 차지했으며, circulation pump에서의 에너지 사용량이 가장 적은 것으로 나타났다.



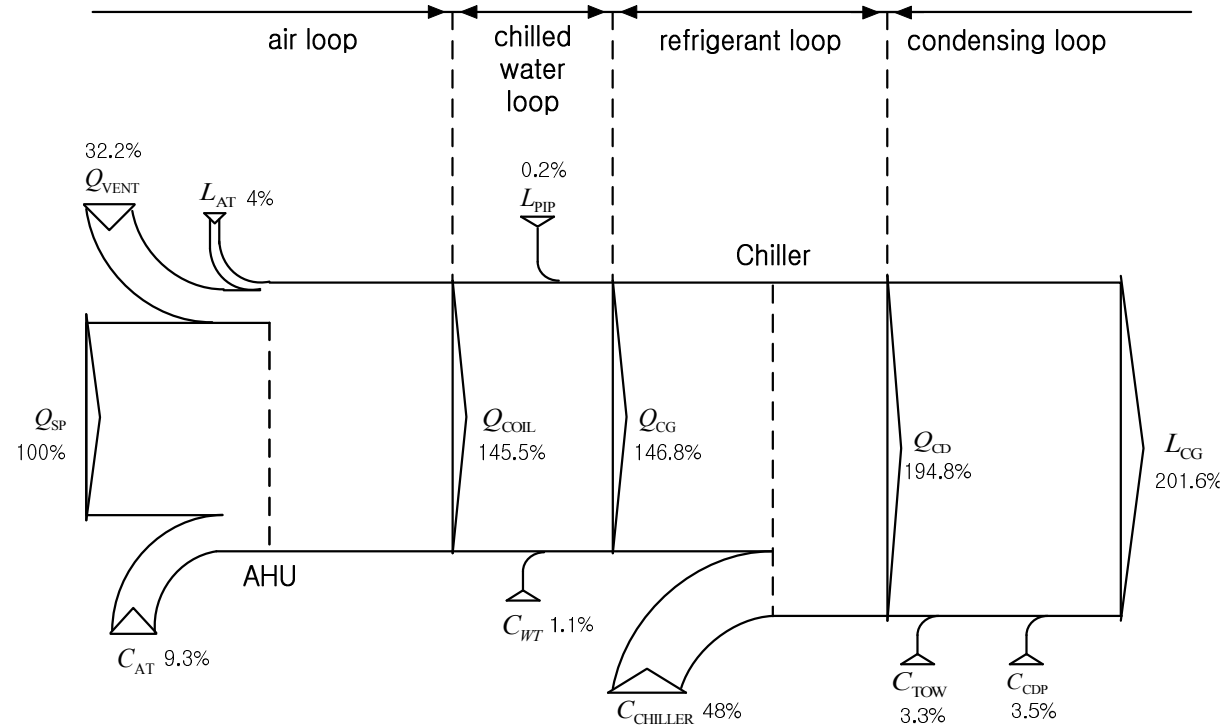
[그림 4.1] 기존 대류 공조시스템의 에너지 소비항목 별 에너지 소비량

<표 4.1> 기존 대류 공조시스템의 에너지 소비량

항목		결과 값 [3개월 기준]
tower fan	tower fan power	2.0 kW
	flow rate	353.4 LPM
	energy consumption	1,274.8 kW
condenser pump	pump power	1.5 kW
	energy consumption	1,325.3 kW
chiller	sizing	31.6 kW
	outlet temperature	7.0 °C
	energy consumption	18,382.7 kW
circulation pump	pump power	1.3 kW
	flow rate	199.0 LPM
	energy consumption	288.1 kW
supply fan	fan capacity	2.6 kW
	energy consumption	3,140.8 kW

이는 도입 외기의 냉방을 위해 이용되는 cooling coil에 공급되어야 하는 7°C의 낮은 냉수를 생성하기 위한 에너지가 많이 사용되기 때문이다. 더불어 기존 대류 공조시스템인 CAV는 초기의 설계 공조 풍량이 매우 크기 때문이며, 냉열을 생성하기 위한 에너지뿐 아니라 많은 양의 공기를 실로 전달하기 위한 supply fan의 에너지 사용량 역시 높게 나타났기 때문이라고 분석된다.

이 과정을 energy flow chain을 이용해 나타내면 다음의 그림 [4.2]와 같으며, 다음의 식으로 정리할 수 있다.



[그림 4.2] 기존 대류 공조시스템의 energy flow chain

$$Q_{COIL} = Q_{SP} + Q_{VEN} + C_{AT} + L_{AT} \quad (4.1)$$

$$Q_{CG} = Q_{COIL} + L_{PIP} + C_{WT} \quad (4.2)$$

$$Q_{CD} = Q_{CG} + C_{CHILLER} \quad (4.3)$$

$$L_{CG} = Q_{CD} + C_{TOW} + C_{CDP} \quad (4.4)$$

여기서,

Q_{COIL} : thermal load or thermal power of coilwork [kW]

Q_{SP} : thermal load or thermal power of space [kW]

Q_{VEN} : thermal load or thermal power of water ventilation [kW]

C_{AT} : power consumption of air transport [kW]

L_{AT} : power losses of air transport [kW]

Q_{CG} : thermal load or thermal power of coolth generation [kW]

L_{PIP} : power losses of pipework [kW]

C_{WT} : power consumption of water transport [kW]

Q_{CD} : thermal load or thermal power of condenser [kW]

$C_{CHILLER}$: power consumption of chiller [kW]

L_{CG} : power losses of coolth generation [kW]

C_{TOW} : power consumption of tower [kW]

C_{CDP} : power consumption of condenser pump [kW]

4.2 Chilled beam 시스템의 에너지 소비량 분석

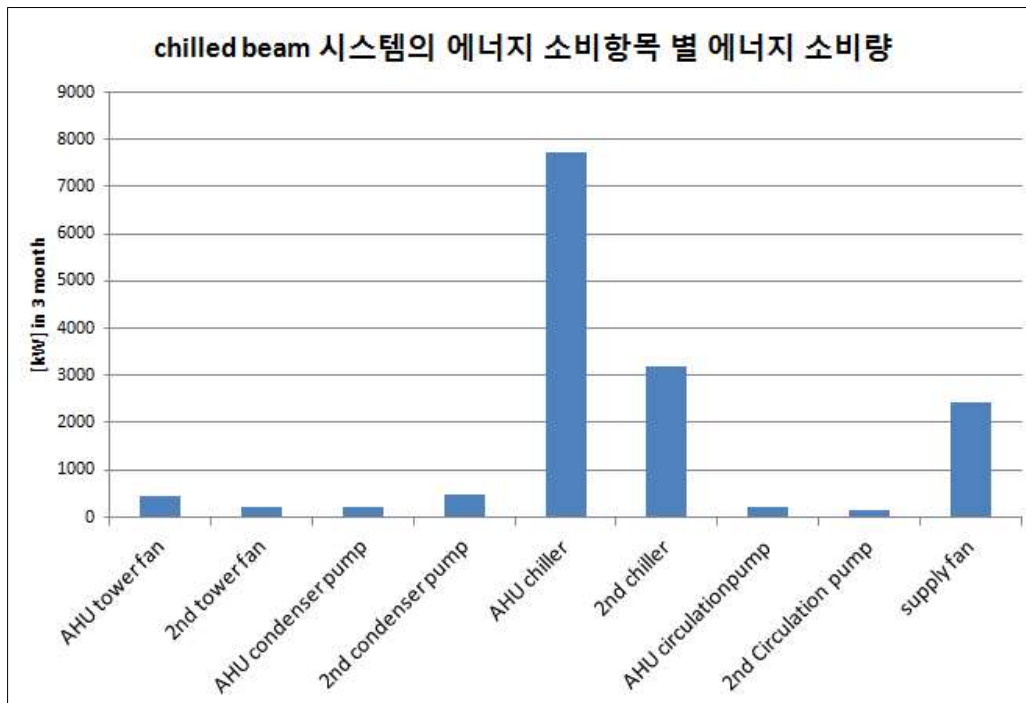
Chilled beam 시스템에서 에너지가 소비되는 항목은 AHU의 냉방을 위한 AHU tower 내의 fan 에너지와 AHU condenser pump, 냉수를 생산하는 AHU chiller, AHU의 cooling coil을 거친 공기를 실로 공급하기 위한 supply fan, cooling coil에 냉수를 공급하기 위한 circulation pump가 있다. 또한, chilled beam 시스템 배관에 냉수를 생산하기 위한 tower의 fan과 condenser pump, chilled beam chiller와 chilled beam에 냉수를 공급하기 위한 circulation pump가 있다.

Chilled beam 시스템의 구성요소 별 에너지 소비 항목을 분류하고, 이들의 에너지 소비량을 산출한 결과 [그림 4.2] 그리고 <표 4.2>와 같다.

시뮬레이션 해석 기간인 6월 1일에서 9월 30일까지 3개월 기준, AHU tower fan의 에너지 사용량은 448.7 kW, chilled beam tower fan의 에너지 사용량은 201.3 kW, AHU condenser pump의 에너지 사용량은 209.3 kW, chilled beam condenser pump의 에너지 사용량은 466.5 kW이다. AHU chiller의 에너지 사용량은 7,721.4 kW, chilled beam chiller의 에너지 사용량은 3,186.3 kW이다.

AHU에서의 circulation pump 에너지 사용량은 203.7 kW, chilled beam의 circulation pump 에너지 사용량은 154.8 kW이며, supply fan 에너지는 2,436.9 kW이다.

에너지 소비량 분석 결과, 기존 대류 공조시스템과 동일한 순서로 각 chiller에서의 에너지 사용량이 가장 크게 나타났으며, supply fan의 소비량이 그 다음으로 많은 비중을 차지했다. Condenser pump와 tower의 fan 에너지의 사용량이 그 다음으로 큰 에너지 소비량을 차지했으며, circulation



[그림 4.3] Chilled beam 시스템의 에너지 소비항목 별 에너지 소비량

pump에서의 에너지 소비량이 가장 적은 것으로 나타났다.

기존 대류 공조시스템과 비교해 보았을 때, 먼저 냉수를 생성하기 위한 열원 쪽, 즉 tower fan과 condenser pump, chiller에서의 에너지 소비량이 큰 폭으로 감소한 것을 알 수 있었다. 이것은 외기온이 높은 하절기에 매우 낮은 7℃의 냉수를 생성하기 위한 에너지가 감소하기 때문으로 사료된다. 더불어 chilled beam으로 공급되는 비교적 높은 16℃의 냉수 생성 시, chilled beam에 연결된 chiller의 COP가 향상되어 에너지 소비량이 감소한 것으로 해석할 수 있다.

또한, 기존 대류 공조시스템에 비해 chilled beam 시스템은 초기의 설계 공조 풍량이 크게 감소하기 때문에 supply fan에서의 에너지 소비량 또한 감소

<표 4.2> Chilled beam 시스템의 에너지 소비량

항목		결과 값 [3개월 기준]
AHU tower fan	flow rate	124.6 LPM
	energy consumption	448.7 kW
chilled beam tower fan	flow rate	55.9 LPM
	energy consumption	201.3 kW
AHU condenser pump	pump power	0.3 kW
	energy consumption	209.3 kW
chilled beam condenser pump	pump power	0.5 kW
	energy consumption	466.5 kW
AHU chiller	sizing	5.1 kW
	outlet temperature	7.0 °C
	energy consumption	7,721.4 kW
chilled beam chiller	sizing	19.0 kW
	outlet temperature	16.0 °C
	energy consumption	3,186.3 kW
AHU circulation pump	pump power	0.5 kW
	flow rate	106.0 LPM
	energy consumption	203.7 kW
chilled beam circulation pump	pump power	0.3 kW
	flow rate	58.0 LPM
	energy consumption	154.8 kW
supply fan	fan capacity	2.1 kW
	energy consumption	2,436.9 kW

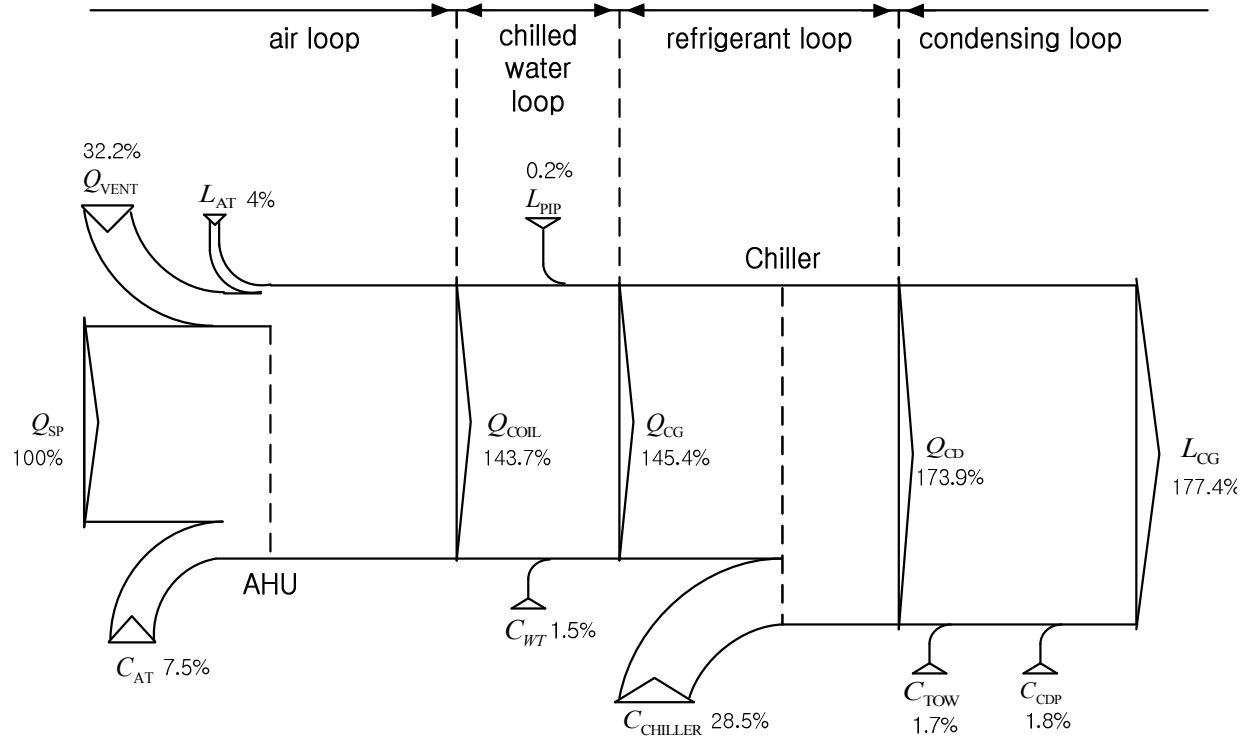
하게 된다. 반면, circulation pump의 경우 실로 공급하기 위한 냉수의 양이 증가하기 때문에 물 수송을 위한 pump 에너지가 증가하게 된다. 이 과정을 energy flow chain을 이용해 나타내면 다음의 그림 [4.4]와 같다.

Energy flow chain에 사용된 식은 앞서 언급한 식 (4.1), (4.2), (4.3), (4.4)와 같으며, 2가지 시스템을 적용함에 따라 아래의 식 (4.5), (4.6), (4.7)을 추가로 적용하였다.

$$C_{WT} = C_{WT-AHU} + C_{WT-CHILLED\ BEAM} \quad (4.5)$$

$$C_{TOW} = C_{TOW-AHU} + C_{TOW-CHILLED\ BEAM} \quad (4.6)$$

$$C_{CDP} = C_{CDP-AHU} + C_{CDP-CHILLED\ BEAM} \quad (4.7)$$



[그림 4.4] Chilled beam 시스템의 energy flow chain

4.3 복사냉방시스템의 에너지 소비량 분석

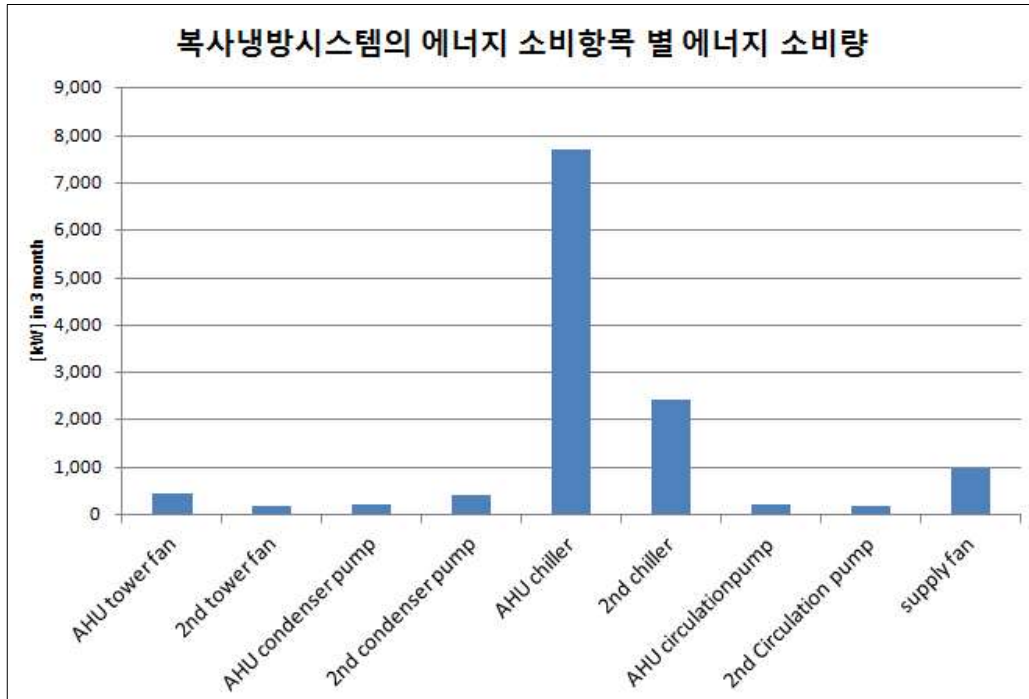
복사냉방시스템에서 에너지가 소비되는 항목은 AHU의 냉방을 위한 AHU tower 내의 fan 에너지와 AHU condenser pump, 냉수를 생산하는 AHU chiller, AHU의 cooling coil을 거친 공기를 실로 공급하기 위한 supply fan, cooling coil에 냉수를 공급하기 위한 circulation pump가 있다. 또한, radiant ceiling panel 배관에 공급하기 위한 냉수를 생산하기 위한 tower의 fan과 condenser pump, radiant ceiling panel의 chiller와 panel에 냉수를 공급하기 위한 circulation pump가 있다.

복사냉방시스템의 구성요소 별 에너지 소비 항목을 분류하고, 이들의 에너지 소비량을 산출한 결과는 <표 4.3>, [그림 4.5]와 같다.

시뮬레이션 해석 기간인 6월 1일에서 9월 30일까지 3개월 기준, AHU tower fan의 에너지 사용량은 448.7 kW, radiant tower fan의 에너지 사용량은 185.1 kW, radiant condenser pump의 에너지 사용량은 209.3 kW, chilled beam condenser pump의 에너지 사용량은 403.4 kW이다. AHU chiller의 에너지 사용량은 7,721.4 kW, chilled beam chiller의 에너지 사용량은 2,417.7 kW이다.

AHU에서의 circulation pump 에너지 사용량은 203.7 kW, radiant ceiling panel의 circulation pump 에너지 사용량은 170.3 kW이며, chilled beam 시스템과 동일하게 냉각된 공기를 실로 공급하기 위한 supply fan 에너지는 2,436.9 kW이다.

에너지 소비량 분석 결과, 앞서 언급한 시스템들과 동일한 순서로 각 chiller에서의 에너지 사용량이 가장 크게 나타났으며, supply fan의 소비량이 그 다음으로 많은 비중을 차지했다. Condenser pump와 tower의 fan 에



[그림 4.5] 복사냉방시스템의 에너지 소비항목 별 에너지 소비량

너지의 사용량이 그 다음으로 큰 에너지 소비량을 차지했으며, circulation pump에서의 에너지 소비량이 가장 적은 것으로 나타났다.

먼저, 기존 대류 공조시스템과 비교해 보았을 때, chilled beam 시스템과 마찬가지로 냉수를 생성하기 위한 열원 쪽, 즉 tower fan과 condenser pump, chiller에서의 에너지 소비량이 큰 폭으로 감소한 것을 알 수 있었다. 이것은 외기온이 높은 하절기에 낮은 온도의 냉수를 생성하기 위한 에너지가 감소하기 때문이며, radiant panel로 공급되는 높은 냉수 생성 시, radiant panel에 연결된 chiller의 COP가 향상되기 때문인 것으로 판단된다.

또한, chilled beam 시스템과 동일하게 최소 외기 도입량을 기준으로 풍량

<표 4.3> 복사냉방시스템의 에너지 소비량

항목		결과 값 [3개월 기준]
AHU tower fan	flow rate	124.6 LPM
	energy consumption	448.7 kW
radiant tower fan	flow rate	51.4 LPM
	energy consumption	185.1 kW
AHU condenser Pump	pump power	0.3 kW
	energy consumption	209.3 kW
radiant condenser pump	pump power	0.5 kW
	energy consumption	403.4 kW
AHU chiller	sizing	5.1 kW
	outlet temperature	7.0 °C
	energy consumption	7,721.4 kW
radiant chiller	sizing	18.0 kW
	outlet temperature	19.0 °C
	energy consumption	2,417.7 kW
AHU circulation Pump	pump power	0.5 kW
	flow rate	106.0 LPM
	energy consumption	203.7 kW
radiant circulation pump	pump power	0.9 kW
	flow rate	146.2 LPM
	energy consumption	170.3 kW
supply fan	fan capacity	2.1 kW
	energy consumption	987.3 kW

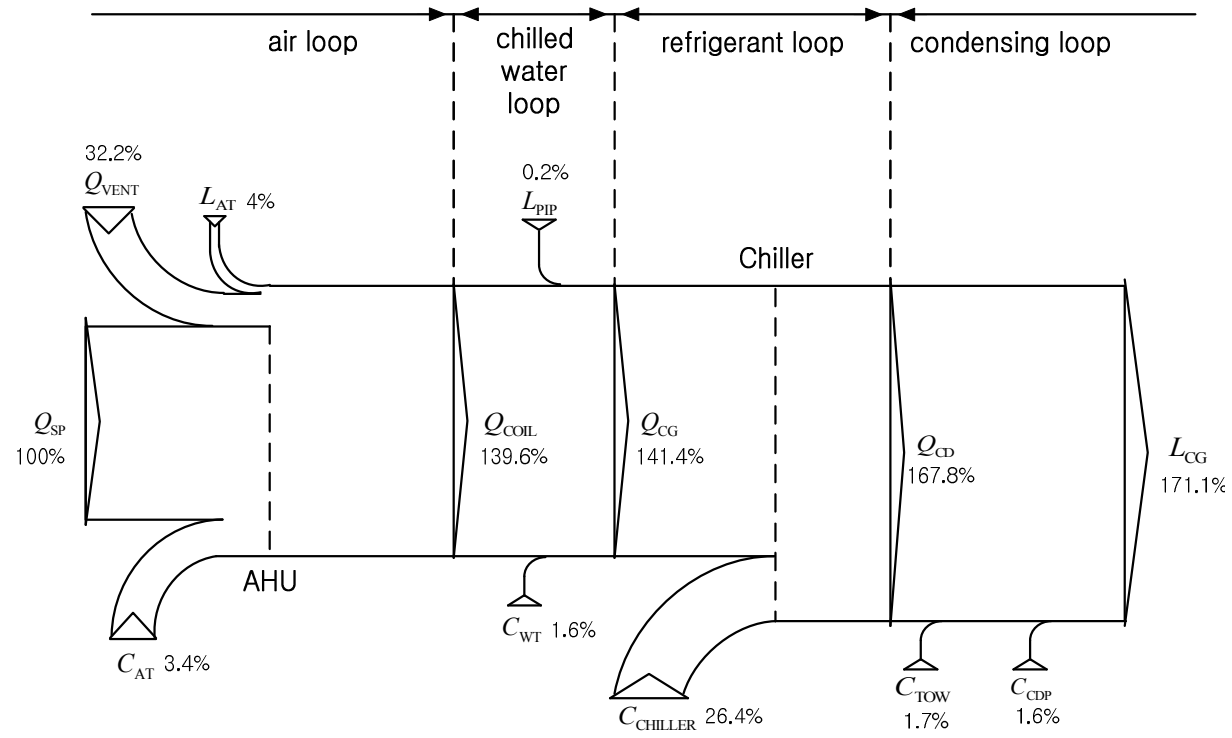
을 산정하므로 공조 풍량이 크게 감소하여 supply fan에서의 에너지 소비량 또한 감소하게 된다. Circulation pump의 경우 실로 공급하기 위한 냉수의 양이 증가하기 때문에 물 수송을 위한 pump 에너지는 증가하게 된다.

복사냉방시스템의 에너지 소비량을 chilled beam 시스템과 에너지 소비 항목별로 비교하면 supply fan에서의 에너지 소비량에서 가장 큰 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 두 시스템의 초기 설계 풍량은 최소 외기 도입량으로 동일하나, chilled beam 시스템보다 복사냉방시스템의 supply fan 에너지 소비량이 매우 적게 나타났다. Chilled beam 시스템의 경우, chilled beam chamber 내부의 노즐 압력을 유지하여 실내공기를 chilled beam 내부로 유인해야 하므로 기존 대류 공조시스템이나 radiant panel보다 시스템 내부를 더 높은 압력으로 유지해야 하기 때문이다.

또한, 열원 쪽의 에너지 소비량 역시 chilled beam 시스템이 복사냉방시스템에 비해 조금 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 chilled beam에 공급되는 냉수 온도가 16℃, radiant panel에 공급되는 냉수 온도가 19℃이기 때문인 것으로 분석된다.

반면, chilled beam과 radiant panel에 연결된 circulation pump의 에너지 소비량은 radiant panel이 조금 더 높게 나타났다. 이는 chilled beam에 비해 천장 전체에 훨씬 더 조밀하게 배치되는 radiant panel의 배관 특성상 발생하게 되는 값이라고 해석할 수 있다.

복사냉방시스템의 전체 에너지 소비과정을 energy flow chain을 이용해 나타내면 다음의 그림 [4.6]과 같다. Energy flow chain에 사용된 식은 앞서 언급한 식 (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7)을 적용하였다.



[그림 4.6] 복사냉방시스템의 energy flow chain

4.4 각 시스템의 시스템 구성요소 별 에너지 소비 특성 비교

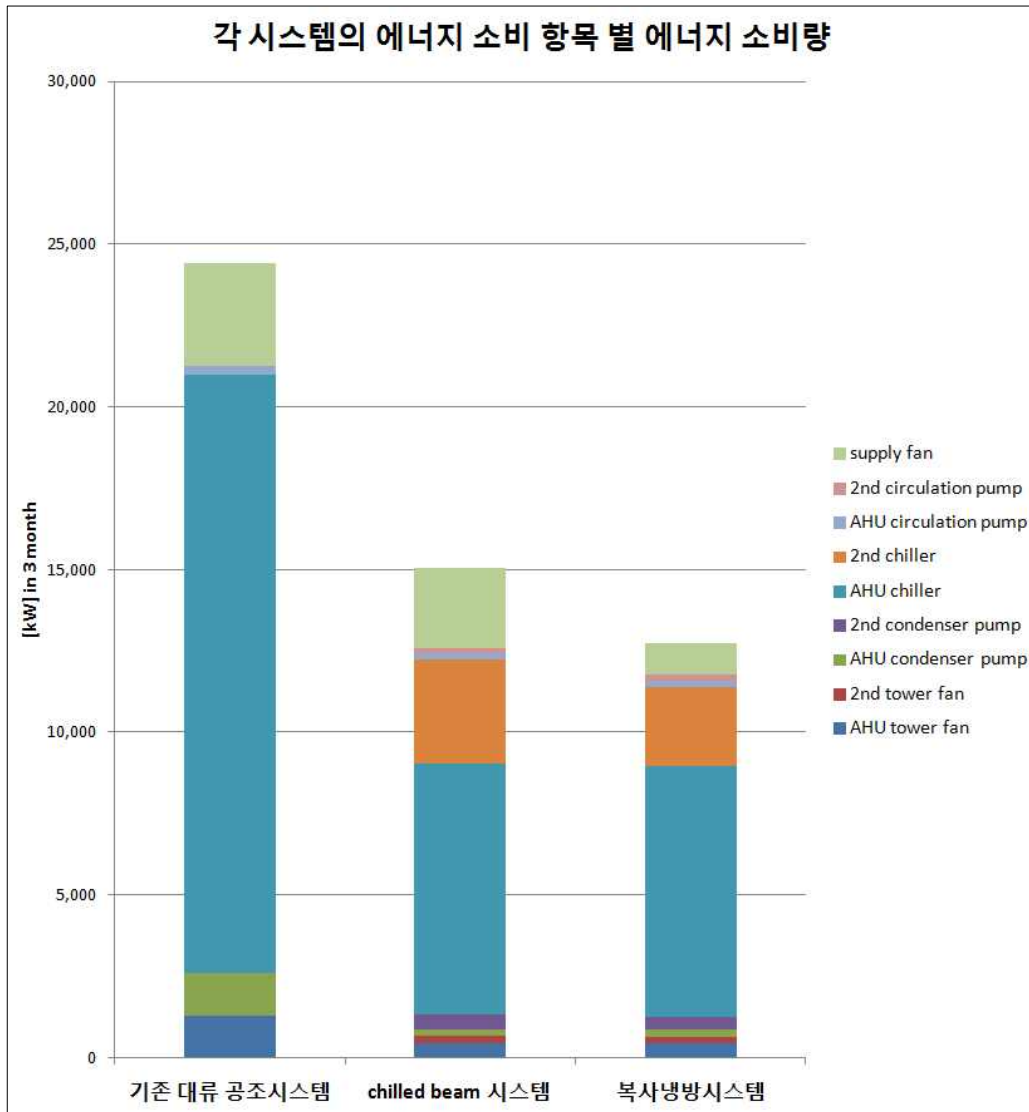
기존 대류 공조시스템, chilled beam 시스템, 복사냉방시스템 각각의 구성 항목 별 에너지 소비량을 정리하면 <표 4.4>와 같고, 이를 그래프로 나타내면 [그림 4.7]과 같다.

시뮬레이션 해석 기간인 6월 1일에서 9월 30일까지 3개월을 기준으로 기존 대류 공조시스템의 경우, 도입 외기의 냉방을 위해 이용되는 cooling coil 에 공급되어야 하는 낮은 냉수를 생성하기 위해 열원 쪽 구성 항목에서의 에너지 사용량이 절대적으로 많은 양을 차지하고 있다. 또한, 초기의 큰 설계 풍량 때문에 많은 양의 공기를 실로 전달하기 위한 supply fan의 에너지 사용량의 비중이 크게 나타났다.

그에 반해 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 비교적 높은 냉수를 공급하기 때문에 상대적으로 chiller의 COP가 향상되어 열원 쪽에서의 에너지 소비량이 기존 대류 공조시스템에 비해 큰 폭으로 감소하였다. 또한, 초기의 설계 풍량이 크게 감소하여 supply fan에서의 에너지 소비량 또한 감소하게 되며, 물 수송을 위한 pump 에너지는 증가하게 된다.

Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 에너지 소비량을 에너지 소비 항목별로 비교하면 supply fan에서의 에너지 소비량이 가장 큰 차이를 나타내는데, 이는 chilled beam chamber 내부의 노즐 압력을 유지하기 위해 fan에 높은 pressure rise 값이 적용되기 때문이다. 공급수 온도의 차이로 열원 쪽의 에너지 소비량이 chilled beam 시스템이 복사냉방시스템에 비해 조금 더 높으며, circulation pump의 에너지 소비량은 천장 전체에 조밀하게 배치되는 radiant panel의 배관 특성상 더 높게 나타난다.

총 에너지 소비량 분석 결과, 기존 대류 공조시스템의 에너지 소비량이 가



[그림 4.7] 각 시스템의 구성항목 별 에너지 소비량 비교

장 많았고, chilled beam 시스템, 복사냉방시스템 순으로 에너지를 많이 소비하는 것을 알 수 있었다. 기존 대류 공조시스템 기준, chilled beam 시스템은 38.4%의 에너지를 절약할 수 있었고 복사냉방시스템은 47.7%의 에너지를 절약할 수 있었다.

Energy flow chain을 이용하여 분석한 결과, 기존 대류 공조시스템에 걸리는 최종 부하는 201.6%, chilled beam 시스템에 걸리는 최종부하는 177.4%, 복사냉방시스템에 걸리는 최종부하는 171.1%로 산정되었다. 마찬가지로 기존 대류 공조시스템 기준, chilled beam 시스템은 12.0%의 부하가, 복사냉방 시스템은 15.1%의 부하가 감소한 것을 알 수 있었다.

<표 4.4> 각 시스템의 에너지 소비량 비교 (계속)

항목		기존 대류 공조시스템 [3개월 기준]	chilled beam 시스템 [3개월 기준]	복사냉방시스템 [3개월 기준]
AHU tower fan	flow rate	353.4 LPM	124.6 LPM	124.6 LPM
	energy consumption	1,274.8 kW	448.7 kW	448.7 kW
chilled beam/ radiant panel tower fan	flow rate	–	55.9 LPM	51.4 LPM
	energy consumption	–	201.3 kW	185.1 kW
AHU condenser pump	pump power	1.5 kW	0.3 kW	0.3 kW
	energy consumption	1,325.3 kW	209.3 kW	209.3 kW
chilled beam/ radiant panel condenser pump	pump power	–	0.5 kW	0.5 kW
	energy consumption	–	466.5 kW	403.4 kW
AHU chiller	sizing	31.6 kW	5.1 kW	5.1 kW
	outlet temperature	7.0 °C	7.0 °C	7.0 °C
	energy consumption	18,382.7 kW	7,721.4 kW	7,721.4 kW

<표 4.4> 각 시스템의 에너지 소비량 비교

항목		기존 대류 공조시스템 [3개월 기준]	chilled beam 시스템 [3개월 기준]	복사냉방시스템 [3개월 기준]
chilled beam/ radiant panel chiller	sizing	–	19.0 kW	18.0 kW
	outlet temperature	–	16.0 °C	19.0 °C
	energy consumption	–	3,186.3 kW	2,417.7 kW
AHU circulation pump	pump power	1.3 kW	0.5 kW	0.5 kW
	flow rate	199.0 LPM	106.0 LPM	106.0 LPM
	energy consumption	288.1 kW	203.7 kW	203.7 kW
chilled beam/ radiant panel circulation pump	pump power	–	0.3 kW	0.9 kW
	flow rate	–	58.0 LPM	146.2 LPM
	energy consumption	–	154.8 kW	170.3 kW
supply fan	fan capacity	2.6 kW	2.1 kW	2.1 kW
	energy consumption	3,140.8 kW	2,436.9 kW	987.3 kW
total energy consumption		24,411.7 kW	15,028.9 kW	12,746.9 kW

4.5 소결

본 장에서는 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 전체 에너지 소비량 및 시스템 구성요소 별 에너지 소비량을 바탕으로 각 시스템의 에너지 소비 특성을 비교, 분석하였다. 시스템간의 구성요소 별 정량적인 에너지 사용량 비교를 통해 시스템 전체 구성 측면에서의 에너지 저감 원리에 대한 분석을 수행하였다. 이를 바탕으로 시스템 대안 간 합리적인 시스템 선택을 위한 기반을 마련하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Energyplus를 이용하여 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 구성요소 별 modeling을 진행하여 시뮬레이션 해석 기간인 6월 1일에서 9월 30일까지 3개월을 기준으로 에너지 소비량 분석을 수행하였다. 이를 바탕으로 각 시스템의 구성요소 별 에너지 소비량을 비교하고, 에너지 소비 특성을 분석하였다.

(2) 에너지 소비량 분석 결과, 기존 대류 공조시스템의 에너지 소비량이 가장 많았고, chilled beam 시스템, 복사냉방시스템 순으로 에너지를 많이 소비하는 것을 알 수 있었으며 energy flow chain 분석 결과, 최종적으로 시스템 전체에 걸리는 부하의 값 역시 기존 대류 공조시스템, chilled beam 시스템, 복사냉방시스템 순으로 크게 나타났다.

에너지 소비 항목별로 살펴보면, chiller에서의 에너지 사용량이 가장 크게 나타났으며, supply fan의 소비량이 그 다음으로 많은 비중을 차지했다. 이어서 condenser pump와 tower fan, circulation pump 순으로 에너지 소비량이 높게 산정되었다.

(3) 기존 대류 공조시스템의 경우, 도입 외기의 냉방을 위해 이용되는 cooling coil에 공급되어야 하는 낮은 냉수를 생성하기 위해 열원 쪽 구성 항목에서의 에너지 사용량이 절대적으로 많은 양을 차지한다. 또한, 초기의 큰 설계 풍량 때문에 supply fan의 에너지 사용량의 비중이 크게 나타났다.

(4) Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 비교적 높은 온도의 냉수를 공급하기 때문에 상대적으로 chiller의 COP가 향상되어 열원 쪽에서의 에너지 소비량이 기존 대류 공조시스템에 비해 큰 폭으로 감소하였다. 또한, 초기의 설계 풍량이 크게 감소하여 supply fan에서의 에너지 소비량 또한 감소하게 되며, 물 수송을 위한 pump 에너지는 증가하게 된다.

(5) 반면 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 supply fan에서의 에너지 소비량이 가장 큰 차이를 나타내며, 이는 chilled beam chamber 내부의 노즐 압력을 유지하기 위해 fan에 높은 pressure rise 값이 적용되기 때문이다. 또한, 공급수 온도의 차이로 열원 쪽의 에너지 소비량이 chilled beam 시스템이 복사냉방시스템에 비해 조금 더 높으며 circulation pump의 에너지 소비량은 천장 전체에 조밀하게 배치되는 radiant panel의 배관 특성상 더 높게 나타난다.

제 5 장 결 론

기존 대류 공조시스템의 초기의 설계 풍량 저감과 반송동력 저감 및 쾌적성 확보를 위해 chilled beam 시스템과 복사냉난방시스템의 국내 도입 및 적용이 시도되고 있는 현재의 상황에서, 각 시스템의 적용 시 에너지 소비 특성 분석과 더불어 동일조건하에서의 시스템 대안간 에너지 사용량의 비교 및 분석 과정이 필요하다.

Chilled beam 시스템과 복사냉난방시스템은 실내의 온습도 조건 및 냉방부하에 따라 설계 시 전처리를 위한 공조 풍량과 냉각코일의 공급수 온도가 결정된다. 그러므로 고온 다습한 국내 기후 조건에서 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템을 적용할 경우, 각 시스템의 구성요소 별 에너지 소비량의 분석을 통해 시스템 전체의 에너지 소비 특성을 파악하고 이를 바탕으로 시스템 대안간 비교, 분석을 수행할 필요성이 있다. 나아가 시스템 대안 간 합리적 선택의 기반을 마련함으로써 두 시스템의 국내 도입을 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

이를 위해 본 연구에서는 대상 건물을 선정하고, chilled beam 시스템과 복사냉방시스템에 동일한 조건을 적용하여 시스템 설계를 진행하였다. 이를 바탕으로 에너지 시뮬레이션을 수행하고, 시스템 구성요소 별 에너지 소비량을 산정하였으며, chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 에너지 소비 특성에 대한 비교 및 분석을 수행하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 기존 대류식 공조시스템의

큰 공조 풍량 및 반송 동력, 쾌적성, 위생 등의 문제에 대한 대안으로 제안된 공조 시스템이다. 두 시스템은 에너지 저감효과와 더불어 실내 쾌적성을 확보할 수 있다는 장점을 가진다. 기존 연구 문헌에 의하면 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 에너지를 저감하고, 쾌적성을 확보하는 원리가 유사하여 적용 효과 역시 유사할 것이라고 사료되며, 이에 근거하여 대안 간 정량적인 분석의 필요성을 재고하였다.

(2) Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 물을 매개로 열을 전달하는 시스템이므로 노점온도를 고려하여 결로 방지에 주의해야 한다. 공급 냉수 배관의 표면온도가 실내 공기의 노점온도 이상으로 유지될 수 있는 값으로 설계되어야 하며, 배관 표면과 실내 표면 온도의 차를 작게 유지해야 한다. Chilled beam 시스템의 1차 공기의 기류속도는 draught를 방지할 수 있는 최대 속도와 beam chamber 내부의 압력을 유지할 수 있는 최소 속도를 고려하여 결정되어야 하며, dry cooling을 위해 pre-operation을 고려해야 한다.

(3) 총 에너지 소비량 분석 결과, 기존 대류 공조시스템의 에너지 소비량이 가장 많았고, chilled beam 시스템, 복사냉방시스템 순으로 에너지를 많이 소비하는 것을 알 수 있었다. energy flow chain 분석 결과, 최종적으로 시스템 전체에 걸리는 부하의 값 역시 기존 대류 공조시스템, chilled beam 시스템, 복사냉방시스템 순으로 크게 나타났다.

에너지 소비 항목별로 살펴보면, 전체적으로 chiller에서의 에너지 사용량이 가장 크게 나타났으며, supply fan의 소비량이 그 다음으로 많은 비중을 차지했다. 이어서 condenser pump와 tower fan, circulation pump 순으로 에너지 소비량이 높게 산정되었다.

(4) 기존 대류 공조시스템의 경우, 도입 외기의 냉방을 위해 이용되는 cooling coil에 공급되어야 하는 낮은 냉수를 생성하기 위해 열원 쪽 구성 항목에서의 에너지 사용량이 절대적으로 많은 양을 차지한다. 또한, 초기의 큰 설계 풍량 때문에 supply fan의 에너지 사용량의 비중이 크게 나타났다.

Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 비교적 높은 온도의 냉수를 공급하기 때문에 열원 쪽에서의 에너지 소비량이 기존 대류 공조시스템에 비해 큰 폭으로 감소하였다. 또한, 초기의 설계 풍량이 감소하여 supply fan에서의 에너지 소비량 또한 감소하게 된다.

Chilled beam 시스템과 복사냉방시스템은 supply fan에서의 에너지 소비량이 가장 큰 차이를 나타내며, 이는 chilled beam chamber 내부의 노즐 압력을 유지하기 위해 fan에 높은 pressure rise 값이 적용되기 때문이다. 또한, 공급수 온도의 차이로 열원 쪽의 에너지 소비량이 chilled beam 시스템이 복사냉방시스템에 비해 조금 더 높으며 circulation pump의 에너지 소비량은 천장 전체에 조밀하게 배치되는 radiant panel의 배관 특성상 더 높게 나타난다.

(5) 기존 대류 공조시스템과 비교하여 에너지 절감 측면에서 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템 모두 우수한 시스템인 것으로 분석되었다. chilled beam 시스템과 복사냉방시스템 모두 열원에서의 에너지 절감량이 크게 나타나지만, 전체적인 에너지 절감량과 용량 및 적용성을 고려해보았을 때 chilled beam 시스템에 비해 복사냉방시스템이 더 유리한 것으로 분석되었다.

(6) 본 연구를 통해 chilled beam 시스템과 복사냉방시스템의 에너지 소비 특성 분석 및 시스템 대안 간 합리적 선택의 기반을 마련하였으며, 연구의

결과를 두 시스템의 국내 도입을 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 각 시스템의 명확한 국내 적용 가능성 판단을 위해 추후 열적 쾌적성에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 공성훈, “energy plus 부하 해석 프로그램”, 공기조화냉동공학회지 설비저널, 제 29권 제7호. 2000.
2. 김광우, “복사냉방시스템의 적용”, 대한설비공학회 설비저널 제31권 제8호, 2002년 8월호, pp. 9-14.
3. 서승직. 『건축설비계획』. 일진사. 2004.
4. 신미수. “온수온돌 바닥복사 난방시스템의 외기보상제어 방안에 관한 연구”. 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 2007.
5. 주무관청. 『건물에너지효율등급인증제도 v2011.04』. 업무용 건축물 용도 프로 필. 2011.
6. ASHRAE. 『ASHRAE system Handbook-Chap.6 Panel Heating and Cooling』. ASHRAE, 2009.
7. CEN. 『EN 1264 Heating system in buildings』. CEN, 1997
8. Corina steti, “Radiant cooling in U.S. office buildings: Towards Eliminating the perception of Climate-Imposed Barriers”, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 1998, pp.24-27.
9. D. Butler, et al., 『chilled beam application guidebook』. rehva, 2007.
10. Frank P. Incropera, David P. DeWitt. 『Fundamentals of Heat and Mass Transfer』. 5th ed. Willey, 2002.
11. ISO. 『ISO/DIS 11855-6 : Building Environment Design - Standards for the design, construction and operation of radiant heating and cooling systems - part 6 : Control』. 2010, ISO.
12. J. Miriel, L. Serres, A. Trombe, “Radiant ceiling panel heating - cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions”, Applied Thermal Engineering vol 22, 2002, pp. 1861~1873.

13. Jan Babiak, Bjaren W. Olesen, Dusan Patras, 『Low Temperature Heating and High Temperature Cooling』 . rehva., 2007.
14. Kenneth J. Loudermilk, Darren S. Alexander, “efficient space humidity control with active chilled beam systems”, ASHRAE Journal, January 2012, pp. 28~38.
15. Kestutis Ciuprinskas, Rasa Kanapienyte, “The analysis of applying different coolants for cooling systems in the office building”, Science-Future of Lithuania, Volume 3, Issue 5, November 2011.
16. Peter Strapp, “Chilled Beams and UFAD: An Energy-Efficient Team, Combining in-floor chilled beams and underfloor air distribution offers a premium perimeter comfort solution” HPAC ENGINEERING, May 2012, pp.34~37.
17. Peter Rumsey, “chilled beam in labs: eliminating reheat and savings energy on a budget”, ASHRAE Journal Vol. 49, Jan. 2006, pp. 18~25.
18. Peter Rumsey, John weale, “practical implementation of chilled beams for offices”, engineered systems, January 2011, pp.30~36.
19. Risto Kosonen, Pekka Saarinen, Hannu Koskela, Alex Hole, “Impact of heat load location and strength on air flow pattern with a passive chilled beam system”, Energy and Buildings, vol.42, 2010, pp.34~42.
20. Takehito Imanari, Toshiaki Omori, Kazuaki Bogaki, “Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. Comparison with the conventional all-air system”. Energy and Buildings, Volume 30, Issue 2. June 1999. pp. 167-175.

ABSTRACT

Analysis on an Energy Consumption characteristic of Chilled Beam System and Radiant Ceiling Cooling Panel System

By Lee, Yu-Ji
Department of Architecture
Masters Course in Graduate School
Seoul National University
Advised by
Professor Yeo, Myoung-Souk
2013. 02.

Chilled beam system and radiant cooling system have been suggested as an alternative system for a conventional air conditioning system. In this study, we analyze energy consumption and characteristic of component for chilled beam system and radiant cooling system. It is for prepare base data for reasonable choice between two systems.

To do this, we designed system and conducted energy simulation. In that order, we calculated energy consumption and then analyzed energy consumption characteristic of each system.

The results of this research are summarized as follows:

(1) Chilled beam system and radiant cooling system use water to transfer heat. Because of that, it needs considering condensation in

design process. Also, chilled beam system has to keep the suitable airflow rate and pressure in chamber for prevent draught and minimum pressure. Furthermore, chilled beam system has demanded proper humidity level through pre-operation for dry cooling.

(2) The result of total energy analysis, the most amount of energy used in case of using conventional air conditioning system and then chilled beam system used the second-most energy and radiant cooling system used the least. And the result of energy flow chain analysis, cooling load of whole system showed also same sequence. The order that components of energy consumption is chiller, supply fan, condenser pump, tower fan, circulation pump.

(3) In case of conventional air conditioning system, the energy consumption of heat source is used to cooling outdoor air and supply fan is also used large amount of energy consumption. On the other hand, the energy consumption of heat source for chilled beam system and radiant cooling system decreased extremely. Radiant cooling system used the least energy because of high pressure for chamber of chilled beam.

(4) Comparing the conventional air conditioning system, chilled beam system and radiant cooling system are efficient system in terms of energy consumption. Considering total amount of energy saving and

applicability, radiant cooling system is more efficient system.

In this paper, we prepared base data about energy consumption characteristic of chilled beam system and radiant cooling system to choice reasonable system and to impose these systems (chilled beam system and radiant cooling system) in Korea.

Keywords: Active Chilled Beam, Radiant Ceiling Cooling Panel,
Design Process, Energy Consumption, Characteristic of
Energy Consumption

Student Number: 2011-20606

감 사 의 글

어느덧 2년의 시간이 지났습니다. 아직 많이 부족하지만 저를 이 자리까지 이끌어주신 소중한 분들을 한 분씩 떠올리며 이렇게 감사의 글을 드립니다.

지도교수님이신 여명석 교수님께 감사드립니다. 제자로서, 또 TA로서 저를 너그러운 마음으로 묵묵히 지켜봐 주시고, 진심어린 조언도 아끼지 않으셨기에 제가 한층 더 성장할 수 있었던 것 같습니다. 그리고 김광우 교수님께 감사드립니다. 진정한 연구자가 갖추어야 할 자세에 대해 늘 고민해야 함을 알게 해주신 교수님의 깊은 가르침을 잊지 않겠습니다. 논문심사과정에서 세심한 조언과 격려를 아끼지 않으셨던 박문서 교수님께도 감사 인사를 드립니다.

연구실 생활의 대부분을 함께 보냈던 연구실 선후배님들께 감사드립니다. 진심을 다해 마음 써 주시고, 격려해주신 덕분에 무사히 졸업할 수 있었습니다. 앞으로 연구실의 이름에 부끄럽지 않은 졸업생이 되도록 노력하겠습니다.

항상 믿음으로 지켜봐주시는 부모님, 철없는 딸을 위해 밤낮으로 기도하시는 그 마음이 헛되지 않도록 더 많이 베풀고 나누는 큰 사람이 되겠습니다.

늘 곁에서 저의 모든 상황과 감정을 함께 나누어준 저의 백작에게도 감사합니다. 한결같은 애정과 배려가 정말 많은 위로와 힘이 되었습니다.

감사한 모든 분들과의 지나온 날보다, 앞으로 함께 하게 될 더 멋진 날들을 기다리며 글을 마칩니다.

2013년 2월

이 유 지