기술논문

최대부하 계산방법으로 RTS법과 열평형법의 비교

본 고에서는 ASHRAE에서 발표한 건물 공조부하계산법인 RTS(Radiant Time Series)법과 열평형(Heat Balance)법을 소개하고 열평형법을 근간으로 개발된 EnergyPlus와 RTS법과의 유사점과 차이점을 정리하고자 한다.

송두삼
성균관대학교 건축공학과
dssong@skku.edu
김강산
(주)플랙트우즈코리아
kang-san.kim@flaktwoods.com
안승현
성균관대학교 글로벌건설ENG학과
shsmart87@naver.com

머리말

효율적인 건물 에너지 절약을 추진하기 위해서는 우선 대상 건물의 냉난방 부하를 정확히 계산하여 건물의 에너지 수요를 정확하게 파악하는 것이 중요하다.

냉난방부하 산정 즉, 냉난방부하 계산은 공조설비의 초기 설치비용이나 재실자의 열적 쾌적성과 업무 효율, 그리고 공조설비의 운영비와 에너지 소비량에 많은 영향을 미친다.

건물의 냉난방부하 계산법과 적용되는 입력데이터 값은 실제 건물에서 발생되는 냉난방부하와 일치되도록 하기 위해 오랜 시간에 걸쳐 연구되고 발전되어 왔다. 그 결과 ASHRAE의 경우 2001년에 열평형법을 단순화한 RTS법을 발표하였으며, 2005, 2009, 2013년 걸쳐 수정, 보완되었다.

최근 국내뿐만 아니라 해외에서도 RTS법을 이용하여 건물 공조설비 설계를 실시하는 사례가 많아지고 있다. 또한, 대학 및 연구기관에서는 건물의 외형과 설비의 수준에 따라 요구되는 최적 공조설계(Right sizing)를 수행하기 위해 열평형법이 근간이 된 EnergyPlus를

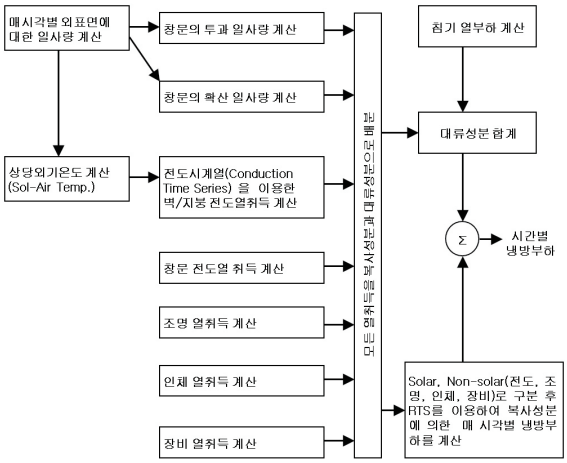
많이 사용하고 있다.

본 고에서는 먼저 RTS법과 열평형법에 대한 개략적인 설명에 이어 공조부하계산에서 차이가 발생할만한 몇 가지 요소를 선택하여 RTS법과 EnergyPlus와의 유사점 및 차이점을 정리하였다. RTS법과 이를 근간으로 개발된 RTS-SAREK에 대한 자세한 설명은 2013년 설비저널 4월호[1]에 게재된 내용을 저자의 승인 하에 일부 발췌하였다.

RTS(Radiant Time Series, 복사시계열)법

ASHRAE Fundamental[2]에 처음 소개된 RTS법은 열평형법에서 파생된, 설계 냉방부하를 단순하게 계산하기 위한 방법이다. RTS법은 TFM, CLTD/CLF법, TETD/TA법과 같은 열평형 방법이 아닌 다른 단순화된 방법을 효과적으로 대체할 수 있다. RTS법은 건물의 각 구성요소가 전체 냉방부하에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 개발되었다. RTS법은 최대 냉방부하 계산을 위해 적당하다. 그 이유는 설계 냉방부하는 정상적이고 주기적인 조건(예를 들어 설계일의 기후, 거주 및 열취득 조건이 그 전날의 조건과 같고, 그 부하들은 동일한 24시간의 주기를 가지고 반복된다)을 가정하기 때문이다. 따라서 특정 시간과 구성요소의 열 취득은 24시간 전의 열취득과 같고, 48시간 전의 열취득과도 같다. 전술한 RTS의 가장 기본적인 가정으로 인해 연간 에너지 시뮬레이션으로는 부적합하다.

RTS법에서 태양 복사, 창문을 통해 투과된 태양 열취득, 상당외기온도, 그리고 침기를 계산하는 방법은 이전의 TFM과 TETD/TA와 동일하다. 그러나 기존의 방법과는 전도 열취득의 계산, 모든 열취득의 복사와 전도부분으로의 분할, 복사 열취득의 냉방부하로의 변환 부분에서 차이가 있다.



[그림 1] RTS 법에 의한 부하계산 개략도[2]

RTS법은 매 시간별 열취득에 대해 24시간 시계열을 곱해서, 전도시간 지연과 복사시간 지연의 영향을 나타낸다. 복사 시간요소와 전도 시간요소라고 불리는 시계열계수(series coefficient)는 열평형 방법을 사용하여 구한다. 복사 시간요소는 총 복사 열취득 대비 현재 시간 동안 냉방부하가 되는 복사 열취득의 백분율을 반영한다. 마찬가지로, 전도 시간요소는 벽이나 지붕 외측면의 열취득 대비 현재 시간 동안 냉방부하가 되는 열취득의 백분율을 반영한다. 이러한 시계열은 서로 다른 건물 구조체에서 발생하는 시간 지연의 효과를 쉽게 비교할 수 있게 해준다. 실제로 엔지니어가 경량, 중간, 중량 벽체에 해당하는 복사/전도 시간요소를 선택했을 때 부하측면에서는 양적 차이가 발생할 수 있다. 따라서 엔지니어가 부하를 추정하는데 보다 적합한 복사/전도 시간요소를 선택해야 할 필요가 있다.

RTS 법 계산 절차

RTS법을 사용하여 건물의 각 부하인자 (전등, 인체, 벽, 지붕, 창문, 기구 등)의 냉방부하를 계산

하는 일반적인 절차는 다음과 같다.

- 설계 일의 부하인자를 통한 열취득을 24시간 도표로 계산한다.
- 열취득을 복사와 대류 부분으로 분할한다.
- 냉방부하로 변환되는 시간 지연을 나타내기 위하여, 열취득의 복사부분에 적당한 RTS를 적용한다.(건물 구조체의 열 특성과 가장 비슷한 RTS Zone 선택)
- 각 부하 인자의 매 시간별 냉방부하는 대류에 의한 열취득 부분과 시간지연 후의 복사 열취득 부분의 합이다.

각 인자의 매 시간별 냉방부하를 계산한 후, 부하들을 더하여 매 시간별 전체 냉방부하를 결정하고 공조시스템 설계를 위해 최대부하를 나타내는 시간을 선정한다. 최대부하가 일어나는 달을 결정하기 위해 여러 달에 걸쳐 이 과정을 반복한다(**그림 1**).

RTS 계산 범위 및 계산식

RTS에서 냉난방 부하계산을 위한 항목과 계산범위 및 계산식은 **표 1**과 같다.

열평형법(Heat Balance Method)

개요

열평형법는 공간의 현열부하를 산정하는 두

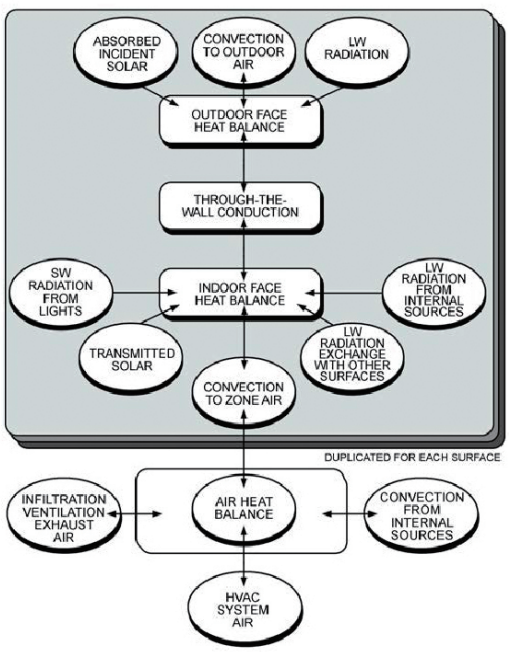
〈표 1〉 RTS 계산범위 및 계산식

No	구분	제한 및 항목	계산 근거 및 계산식
1	일사 관련 계산 - Solar 열취득 - Sol Air Temp.	북, 남반부 전 지역	2009 ASHRAE HoF, Ch.14 te=to+α Et/ho-rad_correction
2	설계 외기 온습도	냉방 : 50 ℃ 이하 난방 : -50 ℃ 이상	냉방 : toh = to-th x D.Range 난방 : 설계기준 값 적용
3	K 값 계산 - Glass - WI / Rf / Pt	Glass : 15 개 R/W/P : 40 개	K = 1/(α i + d1/λ 1 + d2/λ 2⋯ + α o)
4	CTS 계수	Wall/Roof : 35/19 개	2009 ASHRAE HoF Ch. 30, Table 17, 18
5	RTS 계수	Zone : 24 개	2009 ASHRAE HoF Ch. 18, Table 19, 20
6	Glass 열 취득 - SHGC 값 - IAC 값	Direct/Diffuse/Conduction 의 열 취득	Qb = A · ED · SHGC(θ) · IAC Qd = A · (Ed+Er) · 〈SHGC〉D · IAC Qc = K · A · (To-Ti) Q = Qb + Qd + Qc
7	Wall/Roof 열취득	시각별 상당 외기 온도차 / CTS 계수	ql,q-n =K · A · (te,q-n-trc) qq=c0qi,q+c1qi,q-1+c2qi,q-2+c3qi,q-3+⋯
8	내부 열 취득	인체 부하(현열, 잠열) 전등, 기기 부하	Qp=Ufx Pnos x (Psh + Plh) QL=B.Fx Uf x Lld, QE=Eldx Uf
9	복사/대류 열취득	6,7,8 항에 적용	각 인자(내부, GI/Rf/WI)의 열 취득을 복사와 대류로 구분
10	복사 냉방 부하	9항 중 복사열 취득에 적용	Qr,q = r0qr,q + r1qr,q-1 + r2qr,q-2 + r3qr,q-3 + ⋯ + r23qr,q-23
11	Part. 냉방부하	전도식	QpT=K · A · (Tb-Ti)
12	침입외기냉방부하	환기횟수/직접입력	QIF=1.2 x V x (Ento-Enti)
13	전체 냉방부하	복사/대류 부하, 유리의 전도 부하, 간벽 부하, 침입외기 부하의 합	QT=9항 대류 열취득+10항+Qc+QPT+QIF
14	난방부하	외부(G/R/W), 간벽 부하 및 유리 부하	Qh=K · A · (To-Ti) QIF=0.335 x V x (Tout-Tin)

(주) 상세한 계산식에 대한 설명은 ASHRAE Fundamental 2009, Chapter 18 참조

가지 방법(가중계수법, 열평형법) 중에서 더 기본적인 방법이며, 에너지 보존에 관한 열역학 제1법칙과 행렬 대수의 원리로부터 개발된 것이다. 밀폐된 공간에 대해 여러 세트의 에너지 평형방정식을 통해 미지의 표면과 공기의 온도를 동시에 계산한다. 결과적으로, 열전달 과정의 선형성과 시불변 시스템(Time-Invariant) 특성과 같은 방법을 사용할 때 요구되는 중요한 가정은 열평형 방법에서는 필요하지 않다. 또한, 열평형법에서는 한 영역에서 공기온도가 균일하다고 가정한다.

열평형법은 다중 노드(node) 또는 전산유체동적(CFD) 모델까지 확장할 수 있지만, 방사형 천장 취출구가 설치된 사무실 정도(실내 공기가 잘 혼합되는)의 규모에서 냉방부하 계산이 적절한 것으로 연구되었다[3](Fisher and Pedersen 1997).



[그림 2] 실내 열평형법(HBM)과정의 도식화[2]

가정

열평형법의 가장 기본적인 가정은 열적 구역(zone)에서 공기는 잘 혼합되어 있고 온도는 전 구역에서 균일하다는 것이다.

다음의 주요 가정 중 실내 표면(벽, 창, 바닥 등)은 다음과 같이 취급된다.

- 균일한 표면 온도
- 균일한 장파, 단파복사
- 확산 복사표면
- 1차원 내부 열전도

위의 가정을 통해 계산된 관계식을 열평형모델이라고 한다. 이러한 가정들은 일반적이지만 매우 제한적이며 모델로부터 얻을 수 있는 정보에 한계를 갖게 한다.

요소

앞서 언급한 가정에 따라 열평형법의 계산 과정은 아래 4가지의 과정으로 구성된다.

1. 외측 표면 열평형
2. 벽체 내 열전도 과정
3. 내측 표면 열평형
4. 공기 열평형

그림 2는 하나의 불투명벽체에 대하여 이 열평형 흐름을 도식화한 것이다. 그림 윗부분에서 크게 음영처리된 네모상자 부분은 존에 포함된 각 표면들에 적용된다. 투명한 벽체 표면도 유사한 절차로 되지만 태양열의 흡수가 외표면이 아니라 한 단계 아래쪽에 있는 열전도 블록쪽에 표시되어야 한다. 또한 이 흡수된 부분의 일부는 내부로 일부는 외부로 분할되고 표면 열평형에 포함되게 된다.

외측면 열평형

각 외표면의 열평형은 다음의 식으로 표현된다.

$$q''_{a\,sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{KO} = 0$$

$q''_{a\,sol}$: 흡수된 직달, 확산 일사율(q/A), W/m^2
q''_{LWR} : 공기와 주변과 장파복사 순열교환율, W/m^2
q''_{conv} : 외기와 대류 열교환율, W/m^2
q''_{KO} : 벽체로의 열전도율(q/A), W/m^2

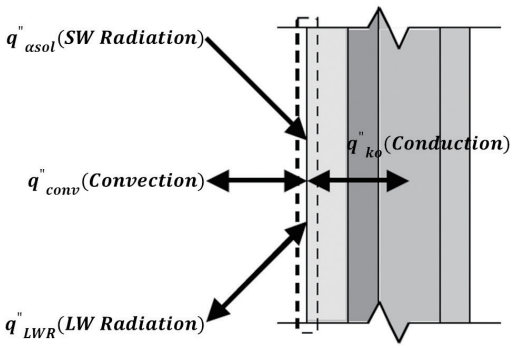
q''_{KO}(전도항)을 제외한 모든 항들은 순열유속(net fulx)이 면을 향할 때 양의 값을 가진다. 관습적으로 q''_{KO}(전도항)은 외벽에서 내벽으로 전달 방향을 가질 때 양의 값을 갖는다. 위 식의 처음 3개의 항은 상당외기온도(sol-air temperature)의 개념을 사용함으로써 간략화할 수 있다.

일반적으로 열평형법은 ASHRAE Fundamental의 내용을 기초로 한다. 하지만 매우 단순한 일사, 열환경 그리고 외표면 대류 모델을 채용한다. ASHRAE에서 사용하고 있는 외표면 열평형 식의 각 항에 대한 설명은 다음과 같다(**그림 3**).

· $q''_{a\,sol}$은 ASHRAE Fundamental의 Solar equation에 근거하여 계산한다.

· $q''_{conv} = h_{co}(T_{air} - T_O)$, 여기서 h_{co}는 MoWiTT model[4](Yazdanian and Klems 1994) 자연대류 계수값을 사용한다. 이 값은 공기온도와 표면온도를 기본으로 하고 ASHRAE의 계수 값(17.8 W/m^{2}K)보다 조금 더 보수적이다.

· q''_{LWR}은 표면과 천공 그리고 지표면 사이의 표준적인 복사 열교환 공식을 이용하여 도출한다. 복사 열유속은 표면흡수율, 표면온도, 천공온도와 지표면온도 그리고 천공과 지표면의 형태계수를 통해 계산된다.



[그림 3] 외측면 열평형

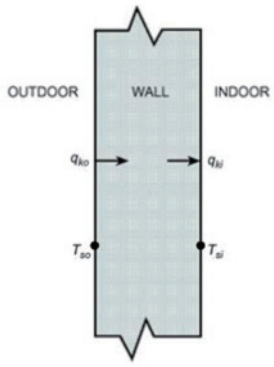
벽체 열전도 과정

벽체의 열전도 과정 해석에 대해서는 수년 동안 많은 사람들의 관심이 집중되었기 때문에 다른 과정들 보다 많이 공식화되어 있다. 이러한 과정들을 모델화할 수 있는 방법은 다음과 같다.

- 유한차분법
- 유한요소법
- 변환법
- 시계열법

이러한 벽체 열전도 과정은 부하계산에서 시간 의존성의 개념을 도입한다.

그림 4는 벽체의 내 · 외부 표면온도와 내벽과



[그림 4] 벽체 열전도 과정

외벽에서의 열유속을 나타낸다. 이 4가지의 변수들은 시간의 함수이다. 이 과정에서의 직접적인 공식화는 내 · 외부 표면온도가 입력 함수, 즉 기지수(旣知數)가 되며 내 · 외벽에서의 열유속이 출력함수(결과 값)가 된다.

RTS법을 포함한 여타 다른 단순한 부하계산 방법들에서 사용하는 표면 열전달계수는 한 개의 고정값으로 표현한다. 이러한 단순화는 풍속의 변화로 인해서 열전달계수가 바뀌는 것을 고려하지 않는다. 또한, 내부 장파복사의 상호교환으로 인한 비선형적인 모델화를 고려하지 않는다.

열평형법은 내외표면의 온도와 열유속 요소들을 포함하기 때문에 반드시 동시에 모든 정량적인 변수들을 계산해내야 한다. 컴퓨터를 사용하여 해를 구하는 관점에서 볼 때 전도전달함수(CTF)의 계산 절차는 수치해법에 비해 해석 속도가 매우 빠르고 보편성 또한 떨어지지 않는다. CTF의 전도 열유속은 현재와 과거의 표면 온도 그리고 과거의 열유속에 대한 함수이다. 내부 열유속에 대한 일반적인 형태는 다음 식과 같다.

$$q''_{ki}(t) = -Z_0 T_{si,\theta} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{si,\theta-j\delta} + Y_0 T_{so,\theta} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{so,\theta-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,\theta-j\delta}$$

그리고 외부 열유속은

$$q''_{ko}(t) = -Y_0 T_{si,\theta} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{si,\theta-j\delta} + X_0 T_{so,\theta} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{so,\theta-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,\theta-j\delta}$$

X_j: 외부 CTF, j=0,1,...nz
Y_j: 크로스 CTF, j=0,1,...nz
Z_j: 내부 CTF, j=0,1,...nz
Φ_j: 열유속 CTF, j=1,2,...nq
θ : 시간
δ : 시간간격
T_{si} : 내측면 온도, ℃
T_{so} : 외측면 온도, ℃
q_{ki} : 내측면 전도 열유속 , W/m^2
q_{ko} : 외측면 전도 열유속 , W/m^2

첨자 중 쉼표 다음의 절이 의미하는 바는 시간간격 δ 의 정량적인 부분에 대한 시간주기를 의미한다. 수식의 첫 항(알파벳 O를 첨자로 가지고 있는 항)이 분리된 이유는 현재 온도에 대한 식으로 정리하기 편하게 하기 위함이다.

두 개의 한계치(nz, nq)로 인해 CTFs를 이용하여 계산할 때 다소 제약이 생길 수 있다. 만약 nq=0이라면, CTFs는 응답요소(response factors)라고 할 수 있다. 이때, 이론적으로 nz는 무한대가 되어버린다. 따라서 nz와 nq값은 계산시간을 최소화 할 수 있도록 설정한다.

내측면 열평형

열평형법의 핵심은 구역의 내측면을 포함하는 내부 열평형이다. 이 열평형은 다음의 4가지의 열전달 요소로 모델화 될 수 있다.

1. 건물요소로부터의 전도
2. 실 공기로의 대류
3. 단파복사 흡수와 반사
4. 장파복사의 상호작용

단파복사는 창을 통해 태양복사가 실로 유입되는 것으로 조명과 같은 내부 발열요소에서도 방출된다. 장파복사는 저온 복사요소(벽면, 기기, 인체)로부터 흡수되거나 방출되는 상호작용을 포함한다. 각 표면의 내측면 열평형은 다음의 식으로 표현된다(**그림 5**).

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0$$

q''_{LWR} : 구역 표면들 사이의 순장파복사 유속, W/m^2

q''_{SW} : 조명으로부터 표면으로 순단파복사 유속, W/m^2

q''_{LWS} : 구역의 장비로부터 장파복사 유속, W/m^2

q''_{ki} : 벽을 통한 전도열유속, W/m^2

q''_{sol} : 표면에 흡수된 투과 태양복사 열유속, W/m^2

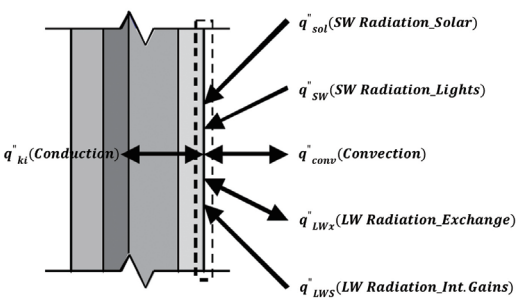
q''_{conv} : 구역 공기로의 대류열유속, W/m^2

1) 실내 표면들 사이의 장파복사 교환

내부 장파복사 교환을 모델화하기 위한 두 가지의 방법은 다음과 같다.

- 실내 공기는 장파복사에 대해서 완전히 투과한다.
- 실내 공기는 실내 표면으로부터의 장파복사를 완전히 흡수한다.

대부분의 열평형 모델은 공기가 완전히 투과하고 실내 표면 사이의 장파복사에 기여하지 않는다고 취급한다. 두 번째 모델의 경우는 부하계산 시 사용되며 일부 에너지 분석 계산에도 사용된다. 또한, 각 표면으로부터 실내 공기로 복사와 대류 열전달계수를 사용하여 장파복사를 공식화하고 실내 표면들 사이의 복사열교환을 없다고 가정하기 때문에 더 편리하다. 그러나 투과 공기 모델은 복사열교환을 허용하는 것으로 더 실제 상황에 가깝다. 그런 면에서 완전흡수를 가정하는 두 번째 모델은 정도가 떨어진다.



[그림 5] 내측면 열평형

실내 가구들은 복사와 대류 열교환에 기여할 수 있는 표면적의 크기를 증가시킨다. 또한 가구들은 실의 열용량을 증가시킨다. 이는 내부발열의 실내 냉방부하로의 발현 시간에 영향을 준다.

2) 조명으로부터의 단파복사

조명으로부터의 단파장 복사는 보통 실내 표면에 규정된 방식으로 분배된다. 많은 경우에서 이 요소는 냉방부하에 영향을 적게 미친다.

3) 내부 열원으로부터의 장파복사

내부 열원에 대한 종래의 모델은 기기(장비)로부터 실내에 유입되는 복사와 대류의 분리개념을 사용한다. 그러나 이 모형은 실제적이 아니며 열평형법에 위배된다. 실제 열평형법에서는 기기 표면을 장파복사 열원으로 취급한다. 그러나 기기의 표면온도에 대한 정보가 매우 부족하기 때문에 각 벽들 사이의 복사 열교환을 무시한 대류와 복사의 분리개념을 사용하는 것이 타당하다.

4) 투과된 일사열 취득

ASHRAE 핸드북의 창을 통한 투과 태양에너지를 산정하는 계산과정은 태양열취득계수(SHGC)를 사용한다. 이 과정에서 어려운 점은 SHGC는 투과된 태양복사와 창문에 흡수된 태양열 복사가 다시 내부로 전달되는 부분 모두를 포함한다는 것이다. 열평형법에서는 후자는 전도요소에 포함되어 내측면 열평형에 포함될 수 있도록 하고 있다.

5) 실내 공기로의 대류 열전달

$$q''_{conv} = h_c(T_a - T_s)$$

대류 열전달계수 h_c는 대부분의 부하계산 과정에서 사용되고 있는(ASHRAE 핸드북에 제시된) 수식 들이 사용되며 이것들은 예전에 실시된 자연대류 실험에 근거하고 있다. 따라서 기계적으로 환기(또는 취출)가 되고 있는 구역에 대한 대류 열전달계수를 정확히 나타내지는 못하고 있다. 이전의 부하계산과정에서는 이 계수들이 계산 과정 속에 포함되어 있었기 때문에 값을 변화시킬 수 없었다. 그러나 열평형 방정식에서는 이 변수들이 가변변수로 되어있다. 이 변수들을 통해 열평형법을 통한 부하계산의 민감도를 판단할 수도 있다.

공기 열평형

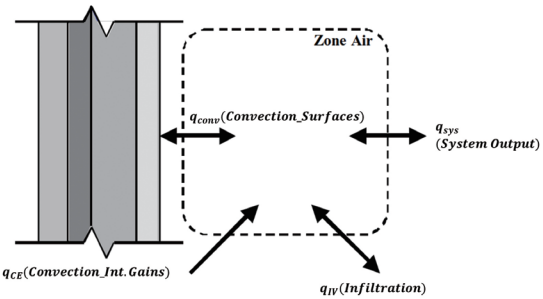
냉방부하를 결정하기 위한 열평형 수식화에서 존의 공기 열용량은 무시된다. 그리고 공기의 열평형은 준정상(Quasi-steady) 평형상태로 가정한다. 공기 열평형에 영향을 미치는 4가지 요소는 다음과 같다.

$$q_{conv} + q_{CE} + q_{IV} + q_{sys} = 0$$

q_{conv} : 표면으로부터의 대류 열전달, W
q_{CE} : 내부발열 부하로부터의 대류열전달, W
q_{IV} : 침기와 환기로부터의 현열부하, W
q_{sys} : HVAC 시스템으로부터의 열전달, W

실 표면으로부터의 대류열전달 q_{conv}는 내표면 열평형으로부터의 모든 대류열전달량의 합이다. 이것은 각 표면들의 대류열전달계수를 통해 공기로 전달된다.

q_{CE}의 대류열전달 부분은 내부발열 부하의 복사를 통해 발현되는 부분도 반영한다. 이 값은 직접적으로 공기 열평형에 추가된다. 이것은 열평형법의 원리에 위배되지만 열평형법에서는 상세한 계산이 무시되고 내부발열 부하가 실 공기로 직접 대류형태로 열전달 된다고 가정한다.



[그림 6] 실내 공기 열평형

q_{IV}는 침기나 환기에 의해서 존으로 유입된 공기가 순간적으로 완전히 혼합된다고 가정한다. 침기의 양은 확정적이지 않으며, 내외부 온도차와 풍속에 관계된다. 그러나 이 값은 적정한 공식으로 결정되어 열평형식에 직접 더해진다. HVAC에 의해서 실내로 들어간 공기는 q_{sys}로 표현되며 역시 실내 공기와 완전 혼합된다고 가정한다 (**그림 6**).

열평형법 계산 과정

열평형의 과정은 **그림 7**과 같이 한 개의 열적 공간에서 이루어진다. 열적 공간은 실내 공기가 설정온도로 제어되는 공간을 의미한다. 공기가 건물 전체에 걸쳐 순환되거나 건물 내 전체 층의 공기가 일정하게 잘 섞여있다면, 건물 전체 혹은 건물의 전체 층은 열적 공간으로 간주될 수 있다. 이에 반해, 각 실이 각기 다른 제어 방법을 가진다면 각 실은 다른 열적 공간으로 간주될 필요가 있다. 열평형법의 구조는 어떠한 공간에서도 충분히 적용될 수 있도록 충분히 유연해야 한다. 그리고 모든 공간은 열평형 상태가 되어야 한다. 아래

그림은 4면의 벽, 천장 혹은 지붕, 바닥 그리고 열용량을 가진 표면으로 구성되어 있다. 각 벽과 지붕은 창을 포함할 수 있다. 이는 12개의 면을 만들며 만약 해당 공간이 없다면 면은 0으로 처리된다. 일반적인 존에 대한 열평형 과정은 24시간 정상-주기 조건으로 간주한다. 변수는 내외부의 12개 표면에서의 온도와 실내공기가 주어진 온도로 유지되기 위한 HVAC 시스템에너지 (또는 시스템용량이 주어진 경우는 실내공기온도) 등이다. 이를 통해 전체 25(12개면에서의 내외측면 온도+HVAC 시스템에너지) 24(시간) = 600개의 변수가 생성된다. 이 변수들을 통해 연립방정식이 구성된다. 하지만 변수들은 연계성이 약하기 때문에 반복적인 계산이 요구된다. 첫 번째 연산에서는 각 시간마다 모든 면에 대해서 열평형을 수행하고, 또 다른 연산에서는 하루 24시간에 대한 열평형 계산을 수행한다. 이때 표면 복사 열교환이나 다른 열유속은 자동적으로 이러한 과정을 비선형화 한다.

열평형법을 통한 부하계산은 전도과정을 거친 변수들을 열평형방정식에 대입하여 전체 열평형을 맞추기 위한 반복적인 연산과정을 통해 도출한다. 열평형법 계산을 수행하기 위한 수학적인 기술은 ASHRAE 핸드북을 참고하기 바란다.

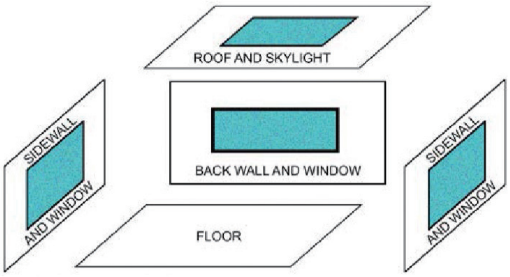
(1) 전체 열평형 반복 계산

열평형 계산을 수행하기 위한 일련의 반복 과정은 다음과 같다.

1. 면적, 상태량, 모든 면의 24시간 표면온도를 초기화한다.

2. 모든 시간, 모든 표면에 대한 태양열 입사와 투과율을 계산한다.

3. 24시간 투과된 태양에너지를 모든 내부 표면으로 분배한다.



[그림 7] 일반적인 열평형 공간의 개략도

4. 24시간 내부발열 부하를 계산한다.

5. 모든 시간에 대한 내부발열 부하로부터 장파복사, 단파복사, 대류에너지로 분배한다.

6. 모든 시간에 대한 침기와 환기부하를 계산한다.

7. 전체 열평형을 반복계산 한다.

8. 결과값을 도출한다.

일반적으로 공간 내에서 4개의 면 혹은 6개의 면에 대한 반복계산은 수렴이 잘 된다. 수렴의 판단은 모든 내 · 외부의 대류 열유속항 사이의 차이가 1% 이내가 되면 수렴한 것으로 판단한다.

RTS법과 열평형법의 유사점, 차이점 고찰

앞서 RTS법과 열평형법의 알고리즘 및 계산절차에 대해서 알아보았다. RTS법은 열평형법을 근간으로 하여 실무자들로 하여금 간단하고 공학적으로 합리적인 방법을 이용해 공조용량 산정을 할 수 있도록 개발된 계산법이다. 따라서 RTS법은 그 계산과정이 순차적이며 계산식들이 많은 유도과정을 거치지 않고도 사용 가능하도록 만들어져있다. 이에 반해 열평형법은 실내 냉난방부하를 결정하는 여러 종류의 발생열량, 열전달에 대한 식들을 동시에 계산하여 공조공간을 설정온도에 도달하도록 하는 열평형값을 반복계산

을 통해 산출해 내는 특징이 있다. 열평형법에 사용되는 수식들은 강제성을 지니지 않고 유연하게 변동하여 적용할 수 있다. 즉, 다시 말하면 똑같이 열평형법을 기본으로 개발된 프로그램이라 할지라도 서로 다른 알고리즘을 차용해 부하 및 에너지를 해석할 수 있다. 여기서는 앞에서 기술한 열평형법과 RTS법의 유사점과 차이점을 정리하고자 한다[5].

RTS와 열평형법과의 유사점

■ 두 가지 방법 모두 계산과정에 ASHRAE 핸드북의 Solar Equation이 포함되므로 위도와 경도, 시간대, 월일을 포함한 날짜, 존의 방위각, 높이(층고) 등 위치관련데이터가 필요

■ 열전달을 대류와 복사성분으로 분리하는 방법에 관해서는 대류에 대해서는 양자간의 계산방식은 동일

■ 기본적인 벽체 열전도 해석은 두 방법 모두 전도전달함수(CTFs)를 사용

■ 실내에서 복사성분의 분배는 두 방법 모두 Solar/Nonsolar Radiant Time Factor를 사용

■ 창을 통한 투과 태양에너지를 산정하는 계산과정에서 EnergyPlus(Heat Balance program)의 Simple Window Model[6]은 RTS의 일사투과열에대한 해석과 같이 열관류율과 태양열취득계수를 사용

RTS와 열평형법과의 차이점

■ RTS법에서는 대류 열전달계수를 고정값으로 사용하지만 열평형법에서는 표면의 거칠기(roughness), 풍속 등 외부환경에 대한 정보를 통해 매 시각별 대류 열전달계수를 산출하여 계산에 반영[6]

- Simple
- TARP
- DOE-2 & MoWiTT
- CeilingDiffuser
- Adaptive Convection Algorithm

■ EnergyPlus(Heat Balance program)에서는 열 및 습기의 평형을 계산하는 방법을 계산 시간과 결과값의 정밀도에 따라 일반 사용자와 연구자/숙련자용으로 제안해 놓았음[6]

일반 사용

- CTF(Conduction Transfer Functions)
- EMPD(Effective Moisture Penetration Depth with Conduction Transfer Functions)

연구자/숙련자용(유한 차분의 개념)

- CondFD(Conduction Finite Difference)
- ConductionFiniteDifferenceSimplified
- HAMT(Combined Heat And Moisture Finite Element)

■ RTS : 도식화된 RTS를 사용

- Solar & Nonsolar RTS 실내 균일하게 분배

■ HB : 사용자가 모델링한 형태에 맞춰 형태계수(View factor)를 생성(ScriptF)하고 입력한 건물 벽체의 열적 특성에 따라 RTF를 생성하여 분배

- 내부발열에 의한 복사부분은 실내 균등하게 분배
- 일사열에 의한 복사부분은 바닥에 가장 많은 부분을 분배 후 형태계수에 따라 벽체 상호간에 재방사 영향 고려

■ 상당외기온도 사용에 대한 여부

- RTS : 상당외기 온도를 이용하여 벽체 전도에 대한 해석 진행
- HB : 외부 환경(일사량, 반사율)을 통해 대류열전달들에 대한 계산

■ 공간과 공간, 벽체와 벽체 사이의 열이동 고려 여부

- RTS : 외부로 들어온 열취득은 외부로의 열

이동 없이 실내에서 처리
- HB : 열평형법에서는 열의 이동이 자유로움

맺음말

지금까지 최대 공조부하를 계산하는 여러 방법들 가운데 현재 주로 사용하고 있는 RTS법과 EnergyPlus에서 채용하고 있는 열평형법의 이론적인 부분에 대해 검토하였다. 이 원고의 내용을 통해 RTS법을 이용한 최대부하계산을 실시하는 기술자나 EnergyPlus를 사용하여 연간에너지 계산 및 최대부하계산을 실시하는 기술자들이 각각의 계산 이론에 대해 조금이라도 이해할 수 있기를 바란다.

참고문헌

1. Kim, K. S., 2013, 습공기선도와 공조부하계산, 설비저널 2013년 4월호 Vol. 42, No. 4, pp. 36-48.
2. ASHRAE Handbook Fundamentals.
3. Fisher, D.E., and C.O. Pedersen. 1997. Convective heat transfer in building energy and thermal load calculations. ASHRAE Transactions 103(2): 137-148. Atlanta, Ga.: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
4. Yazdanian, M. and J. H. Klems. 1994. Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings. ASHRAE Transactions, Vol. 100, Part 1, p.1087.
5. Rees, S.J., J.D. Spitler, M.G. Davies, and P. Haves. 2000. Qualitative comparison of North American and U.K. cooling load calculation methods. International Journal of Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigerating Research 6(1):75-99.
6. EnergyPlus Engineering Reference.