

變風量시스템의 에너지解析에 關한 研究

Energy Analysis for Variable Air Volume System

朴 丙 圭*, 趙 東 佑**, 申 鉉 準***
B. K. Park, D. W. Cho, H. J. Shin

ABSTRACT

This paper presents an energy analysis on the VAV system of 10-story building in Seoul using DOE-2 program and Modified Bin Method.

The use of VAV system is an excellent means of saving energy in new buildings and/or retrofit. The fan control techniques considered are cycling, discharge dampers, inlet vanes, and motor speed control.

The monthly and annual energy consumption is calculated for fan control techniques, components, and chiller types. The results of annual fan electricity use are compared using DOE-2 and Modified Bin Method, and show fairly good agreement. In addition, factors affecting energy consumption are also described.

記 號 說 明

<영 문 자>

a, b, c, d : 부분부하특성계수

COP : 성능계수

COP_{nom} : 공칭성능계수 (콘덴서 온도 37.8 °C)

f : 함수

HP : 마력(horsepower)

HTHS : 최고난방운전온도(°C)

LTCS : 최저냉방운전온도(°C)

P : 압력(mmAq)

PCNTRED : 단위온도감소에 따른 성능계수 감소율(%/°C)

PLR : 부분부하율

Q : 풍량(m^3/h)

q : 열량(Kcal/h)

T : 온도(°C)

W : 절대습도(kg/kg)

x : 외기도입율

<하 첨 자>

B : 보일러

CCEA : 냉각코일입구

CCLA : 냉각코일출구

CH : 냉동기

COND : 콘덴서

design : 설계치

* 韓國建設技術研究院 設備研究室 研究員

** 韓國建設技術研究院 建築研究室 研究員

*** 韓國建設技術研究院 設備研究室 先任研究員

e	: 입구상태
f	: 송풍기
i	: 실번호
l	: 출구상태
LC	: 잠열냉각
m	: 혼합기
MA	: 혼합공기
min	: 최소치
OA	: 외기
PHC	: 예열코일
PHL	: 예열코일출구
RA	: 실환기
RHC	: 재열코일
SC	: 현열냉각
SH	: 현열가열
SA	: 급기
Tot	: 합계
〈회답문자〉	
η	: 효율
Σ	: 합계

1. 序 論

最近 事務所用 建물이 대형화·고급화 함에 따라 에너지 소비량을 豫測하고 管理하는 技術도 現代化·科學化되고 있다. 이러한 趨勢에 따라 建物の 設計初期段階부터 보다 正確하게 냉난방부하를 算出하고 建物の 特性에 맞는 空調시스템을 選定하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션이 널리 利用되고 있다.

美國, 日本을 비롯한 先進國에서는 많은 에너지해석방법이 開發되어 널리 利用되고 있다.

T. Kusuda¹⁾는 DOE 후원으로 개발된 建物 에너지解析 프로그램의 種類 및 內容에 대해 比較·分析하였고, W. F. Stoecker²⁾는 ASH-RAE 후원으로 空調시스템 및 각 시스템구성기기의 性能解析方法을 標準化하였고, C. D. Jones³⁾ 등은 모델건물을 설정하고 實測과 컴퓨터시뮬레이션을 병행하여 에너지해석방법과 알고리즘을 檢證하였으며, D. E. Knebel^{4,5)} 등은 修正 BIN法에 의한 建物에너지解析過程을

詳述하였다. J. D. Spitler⁶⁾ 등은 美國 5개 지역에 대해 대대본부건물과 대형 사무소 건물을 모델로 設定하고 變風量시스템을 採用한 경우에 대해서 送風器制御方式, 制御알고리즘에 따른 送風動力을 계산하였고, P. W. Brothers⁷⁾ 등은 變風量시스템을 採用한 商業用 建물을 모델로 설정하고 미국 5개도시에 대하여 송풍기의 種類, 制御方式, 制御알고리즘에 따른 송풍기에너지 소비량을 算定하였다.

한편, 국내에서는 變風量시스템의 에너지解析과 관련된 研究가 微微한 狀態로 신¹⁰⁾ 등은 修正 BIN法에 의한 에너지 解析結果를 空調 시스템별로 比較하였으며 박¹¹⁾은 變風量시스템을 採用한 단층건물에 대해 미국 도시의 氣象資料를 利用하여 에너지해석을 하였다.

본 연구에서는 變風量시스템을 採用한 서울 소재 10층 사무소 건물을 모델로 設定하여 송풍기制御方式, 構成器機, 冷凍機種類別 에너지해석을 수행하였으며 에너지 사용량 산정에 影響을 미치는 인자들에 대해서도 記述하였다.

2. 理論解析

에너지解析을 위한 모델은 크게 負荷計算모델과 시스템解析모델로 나눌 수 있다. 前者에서는 氣象條件, 建物の 熱負荷特性을 고려하고 後者에서는 시스템構成器機의 性能特性, 制御特性을 고려한다.^{4,10)}

2.1 構成器機 解析모델

空調시스템의 각 과정은 質量保存法則과 에너지保存法則을 적용하여 해석한다. 傳熱量은 에너지평형식에서 定壓·斷熱過程으로 가정하고 공기의 物性値가 일정하다고 가정하여 계산하며, 각 과정의 解析을 통해 코일負荷를 計算하고, 1차시스템해석에서는 이 負荷를 處理하기 위한 보일러, 칠러 및 부속기기의 所要動力을 算出한다.

1차시스템 構成器機의 解析은 定格容量에서의 性能을 決定한 후 部分負荷狀態(off-design condition)에서의 性能을 고려하기 위해

보정함수를 사용하여 모델을 설정한다.

2.1.1. 冷却 및 加熱코일

冷却, 加熱 및 재열코일은 보통 플레이트핀 (plate-fin) 熱交換器로서 가열코일의 供給熱량은,

$$q_{SH} = 0.29 \times Q \times (T_1 - T_e) \dots\dots\dots (1)$$

冷却코일의 현열 및 潛熱除去熱량은,

$$q_{SC} = 0.29 \times Q \times (T_e - T_1) \dots\dots\dots (2)$$

$$q_{LC} = 720 \times Q \times (W_e - W_1) \dots\dots\dots (3)$$

로 나타낼 수 있다. 그러나 冷却코일에서는 熱傳達과 物質傳達이 동시에 일어날 수 있기 때문에 계산시간을 줄이기 위해 作動領域을 세 구역으로 나누어 解析한다(Fig.1).

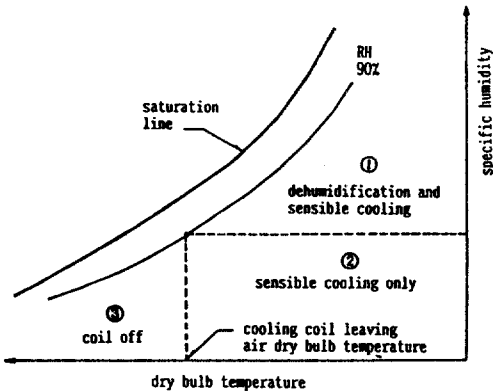


Fig.1 Computation of cooling coil outlet condition as a function of entering air conditions

2.1.2 混合器

混合器는 시스템 導入外氣량을 調節하는 곳이나 damp퍼로써 供給空氣溫度를 조절하는 곳에 사용된다. 混合器出口에서의 空氣溫度(T_m) 및 濕度(W_m)은 다음 식으로 표시된다.

$$T_m = T_1 + (T_2 - T_1) \times Q_2 / Q_m \dots\dots\dots (4)$$

$$W_m = W_1 + (W_2 - W_1) \times Q_2 / Q_m \dots\dots\dots (5)$$

2.1.3 送風機

送風機는 원심형과 축류형이 주로 쓰이며 送風機動力은 다음 식으로 계산한다.

$$HP_f = 3.65 \times 10^{-6} \times P \times Q / \eta_f \dots\dots\dots (6)$$

變風量시스템에서 送風량을 조절하는 방법에는 多段變速制御(cycling), 回轉數制御, 吸入베인에 의한 絞縮, 送風뎀퍼에 의한 絞縮 등이 있다. Fig.2는 制御方式에 따른 送風機의 部分負荷特性曲線⁸⁾을 나타낸다.

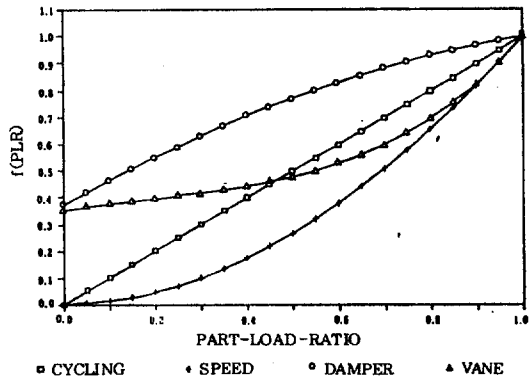


Fig.2 Part load performance curve of fan for flow control techniques

送風機에서 發生한 熱에 의한 溫度上昇은 다음 식으로 계산한다.

$$\Delta T_f = HP_f \times 642 / (0.29 \times Q) \dots\dots\dots (7)$$

2.1.4 보일러

空調用으로는 일반적으로 低壓蒸氣보일러가 많이 쓰인다. 보일러의 定格出力은 최대연속 부하시의 出力이지만 실제 운전에서는 部分負荷運轉狀態가 대부분이므로 이를 고려한 다음 식을 사용한다.

$$q = q_{design} \times f_B(PLR) \dots\dots\dots (8)$$

2.1.5 冷凍機

冷凍機의 所要動力은 다음 식으로 계산한다.

$$PWR_{CH} = CAP_{CH} \times f_{CH}(PLR) / COP \dots\dots\dots (9)$$

Fig.3에 대표적인 冷凍機의 部分負荷特性曲線을 나타냈다. 냉동기의 性能係數는 콘덴서溫度(冷却水溫度)에 따라 다음 식을 사용한다.

$$COP = COP_{nom} \times \left(1 - \frac{PCNTRED}{100} \times (37.8 - T_{COND}) \right) \dots\dots\dots (10)$$

Table 1은 構成器機의 部分負荷特性係數^{5,8)} 를 要約한 것이다.

Table 1. Part-load-ratio coefficients of system components

f(PLR) = a + b x PLR + c x PLR ² + d x PLR ³							
Coefficient		a	b	c	d	COP _{nom}	PCN-TRED
System Component & type							
Fan	cycling speed control	0	1	0	0		
	damper control	0.00153028	0.00520806	1.1086242	-0.11635		
	vane control	0.37073425	0.97250253	-0.3424076	0		
Heating Equip (Boiler)	steam electric & district heat furnace	0.082597	0.996764	0.079361	-		
		1.0	0	0	-		
Cooling Equip (Chiller)	centrifugal	0.222903	0.313387	0.46371	-	5.0	0.81
	recipro	0.1782	0.7386	0.0637	-	-	-
	screw	0.088065	1.137742	-0.225806	-	4.4	7.92
	double bundle	0.349032	0.263871	0.387097	-	4.0	7.20

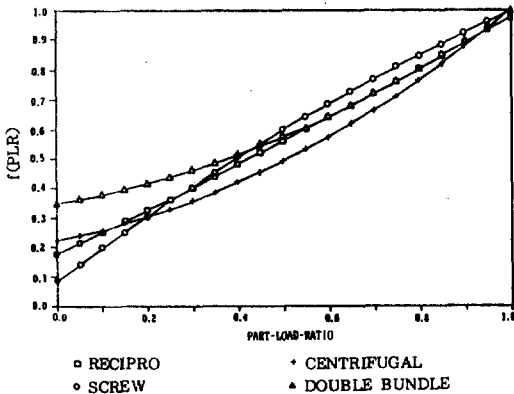


Fig.3 Part load performance curve of cooling equipments

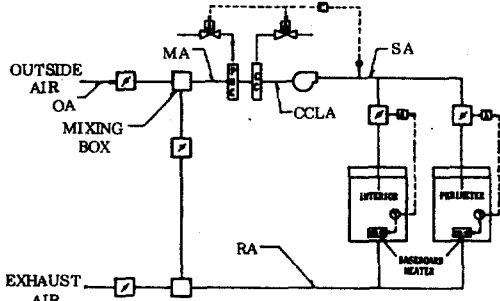


Fig.4 Schematic diagram of single duct VAV system

2.2 2차시스템 解析 順序

Fig.4는 變風量시스템의 系統圖를 나타낸 것이며 2차시스템 해석순서는 다음과 같다.

(1) 制御된 給氣溫度는 送風機下流溫度이므로 冷却코일 出口溫度를 計算한다.

$$T_{CCLA} = T_{SA} - \Delta T_f$$

(2) 各室의 現열부하를 처리하는데 必要한 室給氣量을 計算한다.

$$Q_i = q_i / (0.29 \times (T_i - T_{SA})) \quad (Q_i \geq Q_{min,i})$$

$$Q_i = Q_{min,i} \quad (Q_i < Q_{min,i})$$

$$Q = \sum Q_i$$

(3) 各室의 室內設定溫度와 室還氣熱取得으로부터 各室의 還氣溫度와 平均室排氣溫度를 計算한다.

$$T_{RA,i} = T_i + q_{RA,i} / (0.29 \times Q_i)$$

$$T_{RA} = \sum (T_{RA,i} \times Q_i) / \sum Q_i$$

(4) 外氣導入率은 다음과 같이 計算한다. 이코노마이저가 있는 경우 :

$$x = \text{MAX}(x_{\min}, (T_{\text{CCLA}} - T_{\text{RA}}) / (T_{\text{OA}} - T_{\text{RA}}))$$

이코노마이저가 없는 경우:

$$x = x_{\min}$$

平均室排氣溫度와 外氣導入率로부터 混合空氣溫度를 계산한다.

$$T_{\text{MA}} = T_{\text{RA}} + x \cdot (T_{\text{OA}} - T_{\text{RA}})$$

(5) 실제 冷却코일 出口溫度를 계산한다.

$$T_{\text{CCLA}} = T_{\text{SA}} - \Delta T_f$$

여기서 ΔT_f 는 다음과 같이 계산한다.

1) 送風機의 部分負荷率을 계산한다.

$$\text{PLR}_f = Q / Q_{\text{design}}$$

2) 送風機의 種類와 制御方式에 따라 送風機動力을 計算한다.

$$\text{HP}_f = 3.65 \times 10^{-6} \times P \times Q / \eta_f$$

3) 送風機發生熱에 의한 溫度上昇을 계산한다.

$$\Delta T_f = \text{HP}_f \times 642 / (0.29 \times Q)$$

(6) 混合空氣溫度와 冷却코일 出口溫度로부터 豫熱코일負荷를 계산한다.

$$q_{\text{PHC}} = 0.29 \times Q \times (T_{\text{CCLA}} - T_{\text{MA}}) : T_{\text{PHL}} = T_{\text{CCLA}},$$

$$T_{\text{MA}} < T_{\text{CCLA}}$$

$$q_{\text{PHC}} = 0 : T_{\text{PHL}} = T_{\text{MA}}, T_{\text{MA}} \geq T_{\text{CCLA}}$$

$$(\quad \quad \quad)$$

(7) 冷却코일 현열부하를 계산한다.

$$T_{\text{CCEA}} = T_{\text{PHL}}, q_{\text{SC}} = 0.29 \times Q \times (T_{\text{CCEA}} -$$

$$T_{\text{CCLA}}) : T_{\text{OA}} \geq \text{LTCS}$$

$$T_{\text{CCLA}} = T_{\text{CCEA}}, q_{\text{SC}} = 0 : T_{\text{OA}} < \text{LTCS}$$

(8) 最小外氣導入量에 의해 暖房負荷가 발생할 경우 各室의 暖房負荷를 계산한다.

$$Q_i = Q_{\min, i}$$

$$q_{\text{RHC}, i} = q_i - 0.29 \times Q_i \times (T_i - T_{\text{SA}})$$

(9) 시스템내의 必要한 지점의 絕對濕度를 계산한다.

1) 平均室排氣濕度를 계산한다.

Table2. Calculating conditions of VAV system in building

	Calculating Condition	
Building	south-oriented 10 story building total area : 10,000 m ² height/syory : 3.7 m air conditioning area/story : 823 m ² (interior : 282 m ² perimeter : 550 m ²)	
Room Temperature	cooling period: 26 °C intermediate period: 24 °C heating period: 22 °C night setback temp.: 12.8 °C	
Relative Humidity	40 - 60 %	
System Operating Hours	weekday ; 07:00 - 19:00 saturday ; 07:00 - 13:00	
Fan	design flowrate : 50m ³ /S static pressure : 150 mmAq efficiency : 60 % minimum outside Air: 4.64 m ³ /S	
Boiler	capacity : 800 KW efficiency : 77 %	LTCS(lowest temperature which cooling start) : 16 °C
Chiller	capacity : 1000 KW COP : 3.8	HTHS(highest temperature which heating start) : 21 °C

$$W_{RA} = W_{CCLA} + \sum Q_{LC,i} / (720 \times Q)$$

2) 混合空氣의 絕對濕도를 계산한다.

$$W_{MA} = W_{RA} \times x \cdot (W_{OA} - W_{RA})$$

3) 만약 $W_{MA} < W_{CCLA}$ 이면 冷却코일에서 除濕이 일어나지 않는다. 실제 室排氣絕對濕도를 계산하기 위해서 $W_{CCLA} = W_{MA}$ 라 가정하고

1)로 돌아가서 실제 室排氣絕對濕도가 구해질 때까지 1)~3)의 과정을 反復한다.

$$W_{CCEA} = W_{MA}$$

(10) 冷却코일의 潛熱負荷를 계산한다.

$$q_{LC} = 720 \times Q \times (W_{CCEA} - W_{CCLA}) :$$

$$W_{CCEA} \geq W_{CCLA}$$

$$q_{LC} = 0 : W_{CCEA} < W_{CCLA}$$

(11) 冷却코일 및 加熱코일의 總負荷를 計算한다.

$$q_c = q_{sc} + q_{LC}$$

$$q_H = \sum q_{RHc,i} + q_{PHc}$$

3. 結果 및 考察

3.1 모델 建物 및 解析條件

모델 建物 및 空調시스템 運轉解析條件을 Table 2에 나타냈다.

3.2 解析結果

본 연구에서는 모델 建物에 대해 動的 에너지해석 프로그램과 修正 BIN法으로 에너지使用량을 豫測하였다.

修正 BIN法에서는 建物의 窓을 통한 日射負荷, 外壁에 吸收된 日射성분의 傳導負荷, 室內外 溫度差에 의한 傳導 및 室內發生熱負荷를 外周部와 內周部로 나누어 계산하고, 成分別 負荷는 補間法을 사용하여 外氣溫度의 1차함수로 나타내며 BIN 頻度數를 곱하여 建物의 성분별 부하를 계산한다. 動的 에너지해석 프로그램(DOE-2)은 시각별 定常傳熱解析을 하여 성분별 負荷 및 연간 에너지사용량을 산

출한다.

Fig.5는 修正 BIN法과 動的 에너지해석 프로그램(DOE-2)의 負荷計算結果를 비교한 것으로 성분별 誤差範圍가 ±2% 이내로 나타났으며 年間 總負荷는 修正 BIN法이 193,390 KWH, DOE-2가 209,309 KWH로 誤差가 7% 이내로 비교적 正確한 結果를 나타냈다.

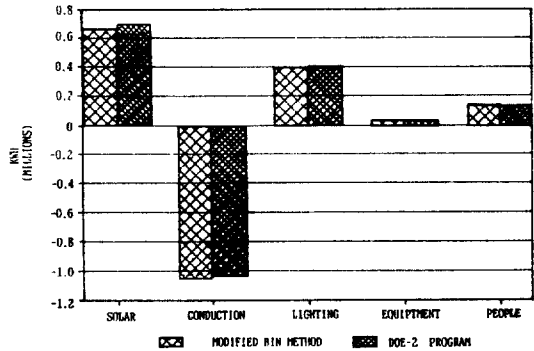


Fig.5 Comparison of various load sources using the modified BIN method and DOE-2 program

Table 3은 배인制御送風機를 사용한 變風量시스템의 사용에너지량을 種類別로 비교한 것이다.

Table 3. Comparison of energy consumption for VAV system with vane control fan

Method	Modified BIN Method	DOE -2 program
Cooling	218.5	228.5
Heating	468.2	447.2
Fan	172.3	204.0

修正 BIN法과 動的 에너지解析法은 해석 알고리즘은 다르지만 본 모델에서는 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig.6은 變風量시스템의 월별 에너지사용량을 나타낸 것이다. 熱源補助器機動力을 계산하기 위해서 냉수순환펌프계수는 0.018, 냉각탑송풍기계수는 0.013, 보일러온수순환펌프계수는 0.006을 사용하였다.^{9,10)}

Fig. 7은 定壓 150 mmAq, 效率 60% 인 送風機를 증기보일러 및 원심식냉동기에 사용

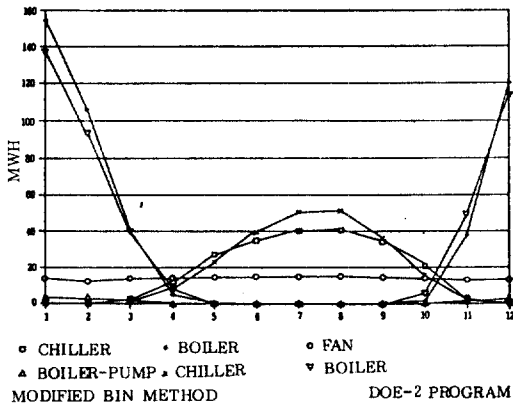


Fig.6 Monthly energy consumption in system components for VAV system

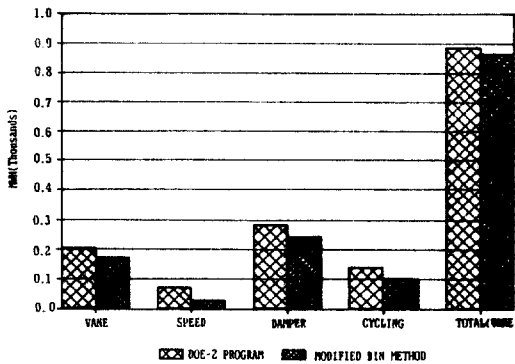


Fig.7 Comparison of annual energy consumption for VAV system with fan control strategies

한 경우 送風機制御方式에 따른 에너지사용량을 비교한 것이다. 에너지소비량은 回轉數制御가 가장 적고, 多段變速制御, 베인制御, 댐퍼制御 순으로 나타났으며 送風에너지가 차지하는 比率를 쉽게 알 수 있도록 베인制御送風機인 경우에 대한 總에너지소비량도 함께 나타냈다.

變風量시스템에서 暖房負荷를 處理하기 위해 採擇하는 加熱方式에 따라 送風機의 電氣消費量은 큰 影響을 받는다. 재열코일을 採擇한 경우에는 非在室時間帶에 暖房熱을 供給하기 위해서 送風機를 最小風量으로 가동해야 하지만 더어 머스텝制御 베이스보드를 採擇한 경우에는 送風機를 停止시킨 채 暖房熱을 供給할 수 있다. 따라서 非在室時間帶의 暖房負荷가 큰 建物은 베이스보드가 確實히 유리하다(Fig.8).

Fig.9는 送風機定壓 150mmAq, 送風機效率

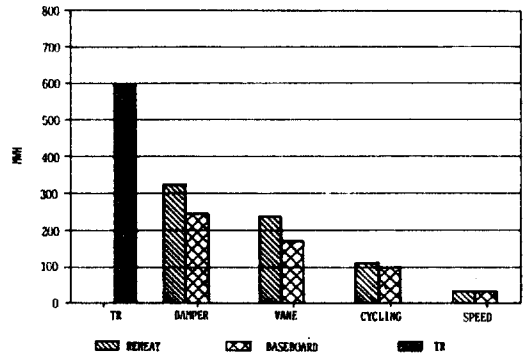


Fig.8 Annual fan electricity use for terminal reheat system, VAV system with reheat, and VAV system with thermostatically controlled baseboard heat with respect to various fan control strategies

70%, 보일러效率 85%, 공칭성능계수 3.8, 콘덴서溫度 30℃일 때 베인制御送風機를 사용한 경우 冷凍機의 種類에 따라 연간 에너지 소비량을 비교한 것이다.

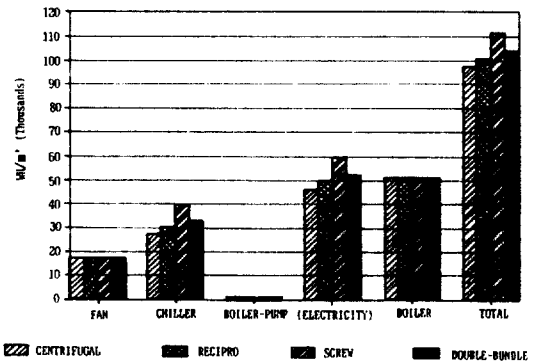


Fig.9 Annual energy consumption of chillers for VAV system in case of vane control fan

스크류식 冷凍機가 에너지소비량이 가장 많고 더블번들冷凍機, 왕복동식냉동기, 원심식냉동기순으로 나타났다.

本 研究에서는 熱源器機의 部分負荷特性係數를 DOE-2와 같은 값을 選擇했지만 실제 建物의 에너지解析에서는 送風機, 보일러, 冷凍機의 型式 및 制御特性에 따라 에너지소비량의 차가 크기 때문에 實驗值를 使用해야 할 뿐만 아니라 送風機, 보일러, 冷凍機의 容量, 外氣導入量, 最低冷房運轉溫度 및 最高暖房運

轉溫도의 影響도 매우 크므로 세심한 注意를 기울여야 한다.

4. 結 論

修正 BIN 法과 動的 에너지解析프로그램 (DOE-2)을 利用하여 變風量시스템을 採用한 모델建物에 대한 에너지소비량을 算定한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 送風機制御方式에 따른 送風機에너지소비량을 比較한 結果 回轉數制御가 가장 적고 多段變速制御, 배인制御, 댐퍼制御 순이며 가장 많이 쓰이는 배인制御方式의 경우 총에너지의 20% 정도를 차지한다.

(2) 加熱方式은 非在室時間帶의 暖房負荷가 클수록 재열코일보다 배이스보드 히터가 유리하다.

(3) 冷凍機의 種類에 따른 에너지소비량을 比較한 結果 원심식냉동기가 가장 적고 왕복동식냉동기, 더블번들냉동기, 스크류식냉동기순이다.

(4) 에너지해석결과는 構成器機의 種類, 容量 및 制御特性 뿐만 아니라 外氣導入量, 最低冷房運轉溫度, 最高暖房運轉溫度 등의 影響을 크게 받는다.

(5) 修正 BIN 法과 動的 에너지解析法은 해석알고리즘의 차이에도 불구하고 본 모델에서는 比較的 잘 일치한다.

(6) 空調시스템 構成器機의 部分負荷特性係數에 대한 國內資料의 定立이 必要하다.

參 考 文 獻

1. Tamami Kusuda, *Review of Current Calculation Procedures for Building Energy Analysis*, NBSIR 80-2068, National Bureau of Standards, 1980.
2. W.F. Stoecker, *Procedures for Simulating the Performance of Components and Systems for Energy Calculations*, ASHRAE Inc., 1976.
3. C.D. Jones and C.F. Sepsy, *Load Profiles and Energy Requirements for Heating and Cooling of Buildings*, ASHRAE report project 66-OS, ASHRAE Inc., 1976.
4. D.E. Knebel and S. Silver, "Upgraded documentation of the TC 4.7 simplified energy analysis procedure", *ASHRAE Transaction*, No.2912(RP-363), pp.354-368, 1985.
5. D.E. Knebel, *Simplified Energy Analysis using the Modified BIN Method*, ASHRAE, 1983.
6. J.D. Spitler, C.O. Pedersen, D.C. Hittle, and D.L. Johnson, "Fan electricity consumption for variable air volume", *ASHRAE Transactions*, Vol.92, pp.5-18, 1986.
7. P.W. Brothers and M.L. Warren, "Fan energy use in variable air volume systems", *ASHRAE Transactions*, Vol.92, pp.19-29, 1986.
8. Lawrence Berkeley Laboratory, *DOE-2.1B Engineers Manual, Reference Manual, Sample Run Book*, 1982.
9. ASHRAE Energy Group, *ASHRAE simplified energy calculation seminar, Professional Development Series V*, ASHRAE Inc., 1987.
10. 申鉉準, 朴丙圭, 趙東佑, 金喆洙, "修正 BIN 法에 의한 空調시스템별 에너지 解析 比較研究", 空氣調和·冷凍工學會 冬季學術大會 論文集, pp.107~111, 1987.
11. 朴相東, "Comparison of energy use estimation methods", 大韓建築學會 論文集, 第2卷, 5號, pp.139~145, 1986.
12. 金孝經, 동적 열부하계산용 표준 기상데이터에 관한 연구, 서울대학교, 1987.
13. 韓國建設技術研究院, 建物에너지解析 프로그램 開發 및 TAB 適用效果分析, 建技研 87-FE-2, 1987.
14. 金英浩, "에너지節約을 위한 VAV 空調方式", 제1회 에너지節約講習會, 空氣調和·冷凍工學會, pp.59~123, 1987.