

냉방열원의 경제성 평가를 위한 건물에너지 회귀식 산출

김 영 섭[†], 김 강 수*

고려대학교 대학원 박사과정, *고려대학교 건축공학과 교수

Energy Regression Analysis for Economic Evaluation of Cooling Plants

Young-Sub Kim[†], Kang-Soo Kim*

Graduate School of Department of Architecture, University of Korea, Seoul 136-701, Korea

*Department of Architecture, University of Korea, Seoul 136-701, Korea

(Received January 14, 2002; revision received March 30, 2002)

ABSTRACT: For economic evaluation of cooling plant equipments, it is necessary to simplify energy prediction method, which should includes efficiency corrected by part-load ratio. This study proposed simplified method with regression equations of time-average partial loads and refrigerator capacity. DOE-2 program was used to carry out a parametric study of twelve design variables. Five input variables were considered to be significant and were used in the regression equations. To test accuracy of simplified method, calculated results were compared with DOE-2 simulated results. Test result shows a good agreement with the simulation result with an error of 5.9~7.6%. It is expected that this method can be used as an easy prediction tool for comparing energy use of different cooling plants during the early design stage.

Key words: Part-load ratio(부분부하율), Condenser water temperature(냉각수온도), Chilled water temperature(냉수온도), Regression analysis(회귀분석)

기 호 설 명

C_{avail} : 용량계수에 의한 장비용량 [W/m^2]	ID : 내부발열부하밀도 [W/m^2]
C_{nom} : 정격장비용량 [W/m^2]	IS : 내부발열부하스케줄
EIR_{avail} : 성능계수에 의한 EIR	OA : 외기도입량 [$m^3/h/m^2$]
EIR_{nom} : 정격 EIR(energy-input ratio)	$P(i)$: 시간별 에너지소요량 [$W-hour/m^2$]
f_{cap} : 용량수정함수	$PL(i)$: i 시의 평균 부분부하 [W/m^2]
f_{EIR} : 성능수정함수	$PLR(i)$: i 시의 평균 부분부하율
FWR : 벽체/바닥면적비(floor-to-wall ratio)	SC : 창호의 차폐계수
$hours$: 시간별 운전시간	T : 실내설정온도 [$^{\circ}C$]
	t_{cold} : 냉수출구온도 [$^{\circ}C$]
	t_{cond} : 냉각수입구온도 [$^{\circ}C$]
	WWR : 창/벽체면적비(window-to-wall ratio)
	y : $PL(9)$ 를 0, $PL(15)$ 를 1로 치환했을 때 $PL(i)$ 의 상대크기

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3744; fax: +82-2-921-7947

E-mail address: sakbi@korea.ac.kr

1. 서 론

1.1 연구의 필요성

열원설비 계획은 초기 계획단계에서 설계자가 설정된 대안들에 대해 다양한 평가를 통해 최적의 시스템을 선정하도록 요구된다. 설계자는 실내온도환경 측면과 법적인 기준에 적합한가를 검토하며, 건축주의 요구사항으로서 경제성 분석을 검토하도록 하여야 한다. 경제성 분석방법으로 초기 투자비, 운전비, 수선비 등을 건물 혹은 설비기기의 총 생애기간에 대해 산출하는 LCC(Life Cycle Cost) 기법이 최근에 널리 사용되고 있다. 열원설비의 LCC 계산항목 중에서는 에너지비용이 가장 큰 비중을 차지하는 것이 일반적이다. 따라서 열원설비의 경제성 분석에 있어서 정확한 에너지비의 산출이 필수 불가결이라 할 것이다.

건물 에너지량의 산정에는 많은 변수가 필요하며, 이들의 영향인자가 시간에 따라 변하므로, 이들을 종합하여 간단한 방법으로 적산하여 산정하기 곤란하다. 현재 사용되고 있는 건물 에너지 해석 프로그램인 DOE-2, BLAST 등은 플랜트에서 소요하는 정확한 에너지량을 산정할 수 있으나, 프로그램의 실행에 있어서 고도의 숙련이 필요하고, 많은 변수의 선택에 따라 시간이 많이 소요되므로, 시간적 제약이 따르는 현 설비설계의 작업현황을 고려할 때 일반적으로 채택되어지기 어렵다.

손쉽게 에너지량을 산출할 수 있는 도일법, BIN법 등의 간이계산법은 결과의 정확성에서 해석 프로그램에 미치지 못하며, 열원장비의 효율특성을 적용하기 어려운 점에서 곤란하다. 경제성 분석을 위한 열원설비의 에너지소요량은 장비의 효율(특히 저부하효율)이 고려되어야 하기 때문이다. 따라서 현재의 설비설계의 여건을 고려할 때, 열원설비의 경제성 분석에 필요한 에너지량 산정방법은 시간이 적게 소요되는 간이계산법으로서, 장비의 효율특성이 고려된 형태로 개발되어야 할 것이다.

1.2 연구배경

건물의 에너지소요량을 산정하기 위해 회귀분석을 이용하는 방법은 국내외의 연구에서 꾸준히 수행되어 왔다. 이들 방법의 정확도는 데이터의

수량과 정확성, 그리고 관계식을 도출하는 통계적인 방법이 적절한가에 따라 결정되게 된다.

Sullivan⁽¹⁾은 많은 입력변수들과 건물 에너지소요량 간의 상관관계를 분석하여 영향도를 분석하였고, Wilcox⁽²⁾와 Lam⁽³⁾은 회귀를 통해 간단한 대수방정식으로 나타내는 방법을 제시하였다. 특히 Lam은 Load, System, Plant로 구분된 회귀식을 산출하고, 이들을 조합한 에너지방정식을 도출하였다. 또한 Ruch⁽⁴⁾와 Reddy⁽⁵⁾는 선형회귀모델에 대해 통계적인 오차를 진단하고 개선하는 방법을 제시하고 있다.

1.3 연구방법 및 범위

위와 같이 회귀분석을 통한 건물 에너지량 예측기법에 대해 다양한 검토와 연구가 이루어져 왔다. 그러나 열원설비의 경제성 분석에 적합한 형태로 제시되지 않은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 냉방열원설비에 한정하여 장치의 성능곡선이 적용 가능한 간이계산식을 제시하고, 부분부하율 산정용 회귀식과 장치용량 산정용 회귀식을 나타내었다. 통계처리를 위한 기본 데이터는 DOE-2.1E의 729회 시뮬레이션을 통해 산출하였고, 기상자료는 설비공학회에서 1990년에 발표한 서울지역 표준기상데이터를 적용하였다. 주요한 연구내용과 범위는 다음과 같다.

- 시평균 부분부하율, 냉각수온도, 냉수온도, 장비용량을 적용하는 냉동기의 에너지소요량 간이계산식을 제시하였다.
- load 및 system의 주요변수 12개의 영향도를 평가하여 회귀식의 입력변수를 결정하였다.
- 회귀분석을 통해 장비용량 및 시평균 부분부하 산정용 회귀식을 나타내었다.
- 간이계산식 결과와 DOE-2 계산값을 원심식 냉동기와 흡수식 냉동기에 대해 비교하여 오차를 제시하였다.

2. 냉방열원 에너지소요량 간이계산식

냉동기의 성능은 제조회사에서 설계시 작동조건을 기준으로 작성된다. 냉수의 온도와 유량이 설계값과 달라지면 성능계수와 용량이 변동하게 된다. 냉수유량이 일정하다면 용량수정계수는 냉각수와 냉수의 온도로 된 함수식으로 표시된다.

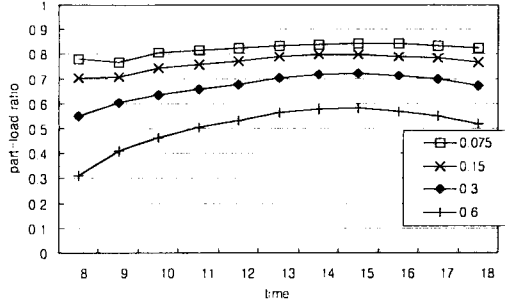


Fig. 1 Part-load ratio by outdoor air flow.

$$C_{avail} = C_{nom} \times f_{cap}(t_{cold}, t_{cond}) \quad (1)$$

또한 정격용량이 아닌 부분부하로 운전하면 성능계수에 영향을 미치게 된다. 냉동기의 성능은 냉각수와 냉수의 온도로 된 성능수정계수 함수식과 부분부하율로 된 성능수정계수 함수식으로 표시된다.⁽⁶⁾

$$EIR_{avail} = EIR_{nom} \times f_{EIR}(t_{cold}, t_{cond}) \times f_{EIR}(PLR) \quad (2)$$

본 연구에서 제시하는 냉방 에너지 간이계산식은 운전시간을 8~18시로 한정할 것이다. 냉방기간 동안 냉동기의 에너지소요량은 시간별 소요량의 합으로 산출된다.

$$P = \sum_{i=8}^{18} P(i) \quad (3)$$

시간별 에너지소요량은 냉수온도가 일정하다고 가정하여, 시평균 부분부하율(PLR(i))과 시평균 냉각수온도($t_{cond}(i)$)를 적용한 다음의 식으로 산출된다.

$$P(i) = C_{nom} \times f_{cap}(t_{cold}, t_{cond}(i)) \times EIR_{nom} \times f_{EIR}(t_{cold}, t_{cond}(i)) \times f_{EIR}(PLR(i)) \times hours \quad (4)$$

시평균 부분부하율은 시평균 부분부하와 냉동기용량으로서 다음과 같이 산출된다.

$$PLR(i) = \frac{P(i)}{C_{nom}} \quad (5)$$

위의 수식(3), (4), (5)에 따라 냉동기의 에너지

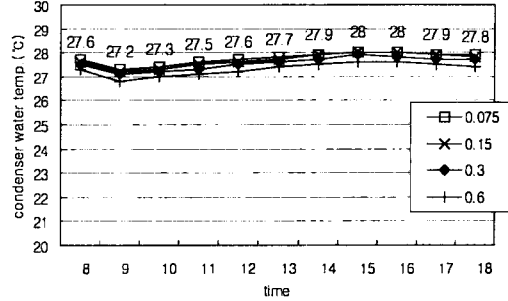


Fig. 2 Condenser water temp. by outdoor air flow.

소요량을 산정하기 위해서는 냉동기용량(C_{nom})과 시평균 부분부하(PL(i)), 시평균 냉각수온도($t_{cond}(i)$)가 필요하다. C_{nom} 과 PL(i)는 회귀식으로 값을 산출하도록 하였으나, $t_{cond}(i)$ 는 계산값에 미치는 영향이 적어서 Fig. 2에 제시된 고정값을 적용하도록 하였다. 이 값은 DOE-2 시뮬레이션 모델에서 모든 입력변수를 기본조건으로 설정하였을 때 산출된 온도이다.

냉각수온도의 영향이 적은 것은 Fig. 1과 Fig. 2의 비교를 통해서 나타난다. 입력변수의 변동에 따라 부분부하율은 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 큰 폭으로 변하지만, 냉각수온도는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 변화폭이 적다. 또한 일반적으로 냉동기의 정격 허용용량은 냉수온도 7℃, 냉각수온도 29℃를 기준으로 정하게 되는데, 냉각수온도가 29℃ 이하가 되면, 용량수정계수는 커지고 성능수정계수는 작아져 서로 상쇄되므로 계산값에 영향을 거의 미치지 못하게 된다.

3. 부분부하 및 냉동기용량 회귀식 산출

3.1 입력변수의 선정

우선 부분부하 및 냉동기용량 회귀식 모델의 입력변수들을 선정하여야 한다. 변수들이 DOE-2 시뮬레이션 결과값에 미치는 영향도를 분석하여 상관관계가 큰 변수들을 선택하였다.

시뮬레이션 모델은 커튼월 벽체로 구성된 1개 층 평면(30×30 m)이며, 벽체/바닥면적비와 창/벽체면적비가 각각 0.5로 설정되었다. 창면적은 평면의 4개 벽체에 대해 동일한 비율로 구성되었다. 공조시스템은 내주부와 외주부에 대해 CAV

Table 1 Summary of base case values and variations

	Input variables	Base case value	Variations	
Building cooling load	Absorptance of wall	0.7	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9	
	Shading	no		
	Building orientation	facing S (0°)	-45°, -30°, -15°, 0°, 15°, 30°, 45°	
	Floor-to-wall ratio	0.5		
	Window-to-wall ratio	0.5		
	U-value of wall	0.5 (w/m ² °C)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9	
	U-value of fenestration	2.0 (w/m ² °C)	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4	
	Shading coefficient of fenestration	0.5	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9	
	Floor-to-ceiling height	3.9 (m)		
	Space air temperature	26 (°C)	24, 24.5, 25, 25.5, 26, 26.5, 27, 27.5, 28	
	Interior load density	Equipment 20 (w/m ²)		
		Occupant 20 (w/m ²)→0.15 (person/m ²)		Total density: 12.5, 25, 37.5, 50, 62.5, 75, 87.5, 100, 112.5
	Interior load density schedule	Lighting 10 (w/m ²)		
Equipment 1.0				
Lighting type	Occupant 1.0		Total schedule: 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1	
	Lighting 1.0			
Infiltration rate	Rec-Fluor-NV			
Floor weight	1 (air-change/hour)		0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2	
	342 (kg/m ²)		147, 195, 244, 293, 342, 391, 440, 489, 537	
HVAC system	Type of air system	CAV+FCU		
	Outdoor air flow	3.66 (m ³ /h/m ²)	1.22, 2.44, 3.66, 4.88, 6.1, 7.32, 8.54, 9.76, 10.98	
	Throttling range	2 (°C)	1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.75, 3	
	Outdoor air control	temp.		
Plant system	Chilled water temperature	7 (°C)		
	Min. entering cooling water temp.	18.3 (°C)		
	Cooling tower water temperature	13.6 (lpm/ton)		
	Number of refrigerators	1		

+FCU로 구성되며, 냉방기간 6월 11일~9월 10일에 대해 운전시간 8~18시에 가동된다.

Table 1은 시뮬레이션 모델의 기본값과 주요변수 12개의 변화값을 나타낸 것이다. 공조팬과 공조펌프의 입력사항은 건물의 부분부하와 냉동기 용량에 영향이 없으므로 나타내지 않았다.

회귀식 모델의 입력변수의 수가 많아지면, 변수들의 조합에 의해 많은 횟수의 시뮬레이션을 실시하여야 한다. 횟수의 절감을 위해서는 동일한 특성을 갖는 여러 개의 변수를 결합하여 변수의 수를 줄여나가는 것이 바람직하다. 다음의 3가지 사항을 적용하여 변수의 수를 최소화하였다.

(1) 벽체/바닥면적비와 창/벽체면적비는 창호 및 벽체의 물성치와 곱의 형태로서 조합이 가능하다. 즉 벽체흡수율×FWR, 벽체관류율×FWR, 창관류율×WWR×FWR, 창차폐계수×WWR×FWR 등으로 나타낼 수 있다.

(2) 내부발열부하밀도는 기기부하(EL), 인체부하(OL: 현열+잠열), 조명부하(LL)의 합의 형태로 나타낸다.

$$ID = EL + OL + LL \quad (6)$$

(3) 내부발열부하스케줄은 기기발열스케줄(ELS), 인체발열스케줄(OLS), 조명발열스케줄(OLS)을 가중 평균하여 산출한다.

$$IS = \frac{EL \times ELS + OL \times OLS + LL \times LLS}{EL + OL + LL} \quad (7)$$

Table 2는 주요 변수 12개의 부분부하 및 냉동기 용량에 대한 회귀분석 결과이다. 선형회귀식의 결정계수 R²가 낮은 것은 2차함수의 회귀식을 함께 나타내었다. 변수의 영향도는 β₁계수의 상대적인 비교를 통해 판단할 수 있다. 이때 변수들이 각기 다른 단위를 갖으므로 β₁계수의 단위도 달라져 비교가 어렵다. 따라서 회귀분석에 나타난 결과값은 변수들의 단위를 표준화(변수의 변화폭을 일률적으로 1로 가정)하여 나타낸 것이다.

창호의 차폐계수, 실내설정온도, 내부발열부하밀도, 내부발열부하스케줄, 외기도입량 등의 영향

Table 2 Summary of regression relationships

Input variables	Average part load							Refrigerator capacity : maximum system load						
	Linear regression ($y = \beta_0 + \beta_1 x$)			Quadratic regression ($y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$)				Linear regression ($y = \beta_0 + \beta_1 x$)			Quadratic regression ($y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$)			
	β_0	β_1	R^2	β_0	β_1	β_2	R^2	β_0	β_1	R^2	β_0	β_1	β_2	R^2
Absorptance of wall	83.996	0.160	1.000					105.390	0.201	1.000				
Building orientation	85.827	0.041	0.013	87.862	-1.315	0.170	0.676	107.205	0.042	0.031	108.559	-0.861	0.113	0.699
U-value of wall	74.247	0.226	0.991					105.119	0.3425	1.000				
U-value of fenestration	75.017	0.123	0.616	76.453	-0.416	0.045	0.863	105.660	0.277	0.895	107.182	-0.294	0.048	0.974
Shading coefficient of fenestration	32.513	2.503	0.979					89.653	3.695	0.971				
Space air temperature	55.132	-2.028	0.999					112.249	-1.070	0.998				
Interior load density	30.189	11.200	1.000					58.904	11.893	1.000				
Interior load schedule	32.947	4.831	0.976					-	-	-				
Infiltration rate	86.721	-0.308	0.916	86.859	-0.383	0.008	0.919	106.844	0.061	0.128	108.046	-0.595	0.066	0.887
Floor weight	87.452	-0.507	0.998					111.161	-0.897	0.995				
Outdoor air flow	70.885	4.569	0.928	60.877	10.027	-0.546	0.996	75.562	10.336	0.988				
Throttling range	85.236	-0.098	0.980					-	-	-				

도가 높은 것으로 나타났으며, 결정계수 R^2 도 0.97 이상으로 회귀식의 적합성이 높다. 따라서 이들 5개 변수를 회귀식의 입력변수로 결정하였다.

건물 방위의 영향도가 낮게 나타난 것은 시뮬레이션 모델이 평면의 4개 벽체에 대해서 동일한 창면적비를 갖도록 설정된 것에 기인한다. 또한 축열성능(floor weight)에 따른 영향은 난방기간에 대해서 높게 나타날 것이지만, 본 연구가 냉방에 국한하고 있으므로 비교적 영향도가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

3.2 부분부하의 시간별 분포

시평균 부분부하는 8~18시의 각각에 대해 산출되어야 하므로 11개의 회귀식이 필요하다. 이때 필요한 시뮬레이션 횟수는 5개의 변수를 3수준으로 변화시켰을 때 $3^5 \times 11$ 회(=2,673회)가 요구된다.

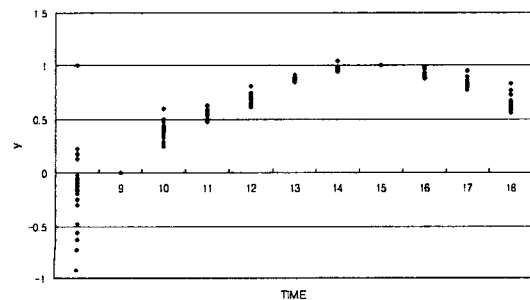


Fig. 3 Relative size (y) of Part load by time.

입력변수의 변화에 따른 시간별 부분부하는 시간변화에 따라 완만한 곡선을 나타낸다. $PL(8)$ 은 일정한 규칙성이 없지만, $PL(9) \sim PL(18)$ 은 $PL(9)$ 를 최소값으로 하고 $PL(15)$ 를 최대값으로 하는 2차함수식의 형태를 나타낸다. 이때 $PL(9)$ 를 0으로, $PL(15)$ 를 1로 치환하여 $PL(i)$ 의 상대적인 크기(y)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \frac{PL(x) - PL(9)}{PL(15) - PL(9)} \quad (8)$$

Fig. 3은 앞서 실시한 12개 변수들의 입력변화에 따른 부분부하 결과값을 y로 변환하여 시간별 분포로 나타낸 것이다. 8시를 제외한 9~18시에 대한 y값은 다음의 회귀식으로 산출되며, 결정계수 R^2 는 0.97으로 모형의 적합성이 높게 나타났다.

$$y = 0.39x - 0.029x^2 - 0.337 \quad (9)$$

본 연구에서는 $PL(8)$, $PL(9)$, $PL(15)$ 의 회귀식 산출을 위해서 $3^5 \times 3$ 회(=729회) 시뮬레이션하였으며, 나머지 시간의 부분부하 회귀식은 $PL(9)$, $PL(15)$ 의 결과에 식(9)를 적용하여 산출하였다.

3.3 회귀식 모델

Table 3은 회귀식 산출을 위한 5개의 입력변수

Table 3 Variables for multiple regression analysis

Input variable	Adoption		Variations
	Part load	Refrigerator capacity	
$SC \times WWR \times FWR$	○	○	0.025, 0.125, 0.225
Space air temp. (T)	○	○	24, 26, 28
Interior load density (ID)	○	○	25, 62.5, 112.5
Interior load schedule (IS)	○	-	0.2, 0.6, 1.0
Outdoor air flow (OA)	○	○	1.22, 6.1, 10.98

와 각각의 3수준 변화값을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과는 통계 프로그램 SPSS 10.0을 이용하여 회귀식으로 정리되었다. 변수의 수가 많으므로 변수의 곱의 형태를 고려하면, 적용 가능한 회귀모델의 수는 상당히 많아진다. 이를 해결하기 위하여 비선형회귀(non-linear regression)와 다중회귀(multiple regression)를 함께 이용하여 회귀식을 확정하였다. 비선형회귀에서는 가장 간단한 형태의 회귀모델에서 시작하여 변수의 곱을 항(a product term of parameters)으로 하는 새로운 변수를 단계적으로 추가하였으며, 결정계수 R^2 가 높아지는 항만을 채택하였다. 채택된 항을 독립변수로 하는 다중 선형회귀분석을 실시하여, 부적합한 변수들은 제거되고 최종적으로 회귀식이 확정되었다.

$$C_{nom} = 25.1OA + 0.903ID + 147.8SC \times WWR \times FWR - 0.522OA \times T + 10.16 \quad (R^2 = 0.956) \quad (10)$$

Table 4 Regression equations of time average part-loads

Equations form: $PL(i) = OA \times [a(IS \times ID)^2 + b(IS \times ID) + cT + d] + OA \times SC \times WWR \times FWR \times [e(IS \times ID) + fT] + SC \times WWR \times FWR \times [g + hT] + iIS \times ID + j$

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
$PL(8)$	0.001163	-0.236	-0.420	21.3	0.379	-0.979	93.2	0	1.153	-6.68
$PL(9)$	0.000984	-0.195	-0.344	18.7	0.266	-0.631	394.8	-11.56	1.025	-1.97
$PL(10)$	0.000935	-0.189	-0.353	19.5	0.275	-0.678	380.4	-10.80	1.037	-1.92
$PL(11)$	0.000899	-0.184	-0.359	20.1	0.282	-0.712	369.8	-10.25	1.045	-1.87
$PL(12)$	0.000872	-0.180	-0.364	20.5	0.288	-0.737	361.8	-9.79	1.053	-1.84
$PL(13)$	0.000852	-0.178	-0.367	20.9	0.291	-0.754	356.2	-9.49	1.057	-1.82
$PL(14)$	0.000842	-0.177	-0.370	21.0	0.293	-0.767	352.9	-9.32	1.060	-1.81
$PL(15)$	0.000836	-0.176	-0.371	21.1	0.294	-0.771	351.2	-9.23	1.061	-1.80
$PL(16)$	0.000846	-0.177	-0.369	20.9	0.292	-0.762	354.6	-9.40	1.059	-1.81
$PL(17)$	0.000862	-0.179	-0.366	20.7	0.289	-0.746	358.8	-9.66	1.055	-1.83
$PL(18)$	0.000885	-0.182	-0.362	20.3	0.285	-0.724	366.0	-10.04	1.049	-1.85

$$PL(8) = OA \times [0.001163(IS \times ID)^2 - 0.236(IS \times ID) - 0.420T + 21.3] + OA \times SC \times WWR \times FWR \times [0.379(IS \times ID) - 0.979T] + 93.2SC \times WWR \times FWR + 1.153IS \times ID - 6.68 \quad (R^2 = 0.927) \quad (11)$$

$$PL(9) = OA \times [0.000984(IS \times ID)^2 - 0.195(IS \times ID) - 0.344T + 18.7] + OA \times SC \times WWR \times FWR \times [0.266(IS \times ID) - 0.631T] + SC \times WWR \times FWR \times [394.8 - 11.56T] + 1.025IS \times ID - 1.97 \quad (R^2 = 0.941) \quad (12)$$

$$PL(15) = OA \times [0.000836(IS \times ID)^2 - 0.176(IS \times ID) - 0.371T + 21.1] + OA \times SC \times WWR \times FWR \times [0.294(IS \times ID) - 0.771T] + SC \times WWR \times FWR \times [351.2 - 9.23T] + 1.061IS \times ID - 1.80 \quad (R^2 = 0.960) \quad (13)$$

$PL(8)$, $PL(9)$, $PL(15)$ 를 제외한 나머지 시간의 시평균 부분부하 회귀식은 식(8), (9)를 이용하여 Table 4와 같이 산출되었다.

4. 회귀식을 이용한 계산결과와 DOE-2 계산값의 비교

회귀식을 이용한 간이계산식의 결과와 동일한 조건으로 입력된 DOE-2 계산값을 비교함으로써

Table 5 Refrigerator performance equations on DOE-2 default values⁽⁷⁾

Equations form: $F(x, y) = a + bx + cx^2 + dy + ey^2 + fxy$, $F(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$

Equation	Independent variables	a	b	c	d	e	f
Two-stage absorption chiller							
f_{cap}	t_{cold}, t_{cond}	-0.816039	-0.038707	0.000450	0.071491	-0.000636	0.000312
f_{EIR}	PLR	0.013994	1.240449	-0.914883	0.660441		
f_{EIR}	t_{cold}, t_{cond}	1.658750	0	0	-0.029000	0.000250	0
Hermetic centrifugal chiller							
f_{cap}	t_{cold}, t_{cond}	-1.742040	0.029292	-0.000067	0.048054	-0.000291	-0.000106
f_{EIR}	PLR	0.222903	0.313387	0.463710			
f_{EIR}	t_{cold}, t_{cond}	3.117500	-0.109236	0.001389	0.003750	0.000150	-0.000375

본 연구에서 제시한 계산식의 정확성을 나타내었다. 냉동기의 유형을 원심식 냉동기와 2중효용 흡수식 냉동기로 구분하였다. 간이계산식에 의한 계산과정은 다음과 같다.

(1) $SC \times WWR \times FWR$, T , ID , IS , OA 등 5개 변수를 결정한다.

(2) 수식(10)에 따라 냉동기용량(C_{nom})을 산출하고, Table 4에 따라 시평균 부분부하($PL(i)$)를 산출한다.

(3) 수식(5)에 따라 시평균 부분부하율($PLR(i)$)을 산출한다.

(4) 냉수온도(t_{cold})와 시평균 냉각수온도($t_{cond}(i)$)를 결정한다. t_{cold} 는 7°C로 하였으며, $t_{cond}(i)$ 는 Fig. 2에 나타난 기본값을 사용하였다.

(5) 냉동기 성능함수 $f_{cap}(t_{cold}, t_{cond})$, $f_{EIR}(PLR)$, $f_{EIR}(t_{cold}, t_{cond})$ 와 정적용량에서의 에너지소요비율(EIR_{nom})을 결정한다. 본 장에서는 DOE-2 프로그램에서 제시하는 default값을 사용하였다. EIR_{nom} 은 원심식냉동기가 0.22, 2중효용 흡수식냉동기가 1.0이며, 성능함수는 Table 5에 나타난 바와 같다.⁽⁷⁾

(6) 수식(3), (4)에 따라 최종적으로 냉동기의 에너지소요량이 산출된다. 6월 11일~9월 10일을 냉방기간으로 설정하면 총 92일이 되므로, 시간별 운전시간(hours)은 92가 적용되었다.

간이계산식의 결과와 DOE-2 계산값의 비교는 다음 2개의 오차율로 계산되었다. MBE(mean bias error)는 계산과정에서 +오차와 -오차가 상쇄되며, RMSE(root-mean-square-error)에서는 상쇄효과가 나타나지 않는다.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_i - P_{DOE,i}}{P_{DOE,i}} \quad (14)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{P_i - P_{DOE,i}}{P_{DOE,i}} \right)^2} \quad (15)$$

이때 P 는 간이계산식 결과이며, P_{DOE} 는 DOE-2 계산값이다.

Fig. 4는 원심식냉동기에 대해서 간이계산식의 결과와 DOE-2 계산값을 비교한 것이다. 회귀식의 변수 5개를 변화시켰을 때 40개의 case에 대해서 비교하였다. 오차율은 MBE이 1.2%, RMSE가 5.9%로 나타났다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 에너지량의 많고 적음에 관계없이 전체구간에서 동일한 수준의 오차를 나타내었다. 또한 회귀식의 5개 변수와 회귀식에 채택되지 않은 7개 변수를 함께 변화시켰을 때 40개의 case에 대해서 비교하였다. 오차율은 MBE가 1.6%, RMSE는 6.6%로 나타났다. 오차율의 증가가 크지 않은 것으로 볼 때 회귀식에 채택되지 않은 7개 변수의 영향이 비교적 적은 것으로 판단된다.

Fig. 5는 2중효용 흡수식 냉동기에 대해서 간이계산식의 결과와 DOE-2 계산값을 비교한 것이다.

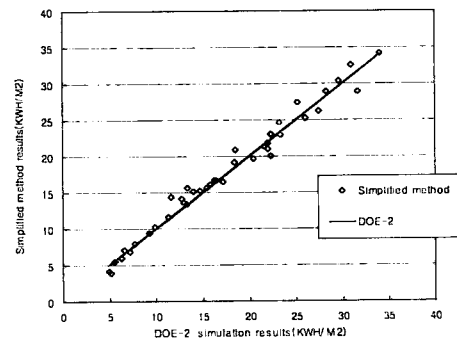


Fig. 4 Comparisons of energy use on centrifugal chiller.

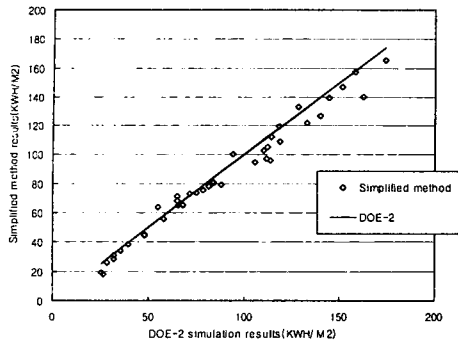


Fig. 5 Comparisons of energy use on two-stage absorption chiller.

회귀식의 변수 5개를 변화시킨 40개의 case에 대한 오차율은 MBE 가 -5.2% , $RMSE$ 가 7.3% 로 나타났다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 에너지량이 많은 구간에서 상대적으로 오차가 크다. 회귀식에 채택되지 않은 7개 변수를 함께 변화시켰을 때 오차율은 MBE 가 -4.8% , $RMSE$ 는 7.6% 로 나타났다.

5. 결론

열원설비의 경제성 분석에 필요한 에너지량 산정방법은 시간이 적게 소요되는 간이계산법으로서, 장비의 효율특성이 고려된 형태로 개발되어야 할 것이다. 본 연구에서는 냉방열원설비에 한정하여 장치의 성능곡선이 적용 가능한 간이계산식을 제시하고, 부분부하율 및 장치용량 산정용 회귀식을 나타내었다. 주요한 연구내용은 다음과 같다.

(1) 시간별 에너지소요량의 합으로 산출되는 냉방에너지 간이계산식을 나타내었으며, 이를 위해서는 시평균 부분부하, 시평균 냉각수입구온도, 장비용량의 산정이 필요하다.

(2) 시평균 냉각수온도는 입력변수의 변동에 따른 변화폭이 적으며, 용량수정계수와 성능수정계수 간의 상쇄효과가 발생하여 계산값에 미치는 영향이 적다.

(3) load 및 system의 변수 12개 중에서 영향도가 높은 차폐계수, 실내설정온도, 내부발열부하밀도, 내부발열부하스케줄, 외기도입량 등을 부분부하 및 장비용량 회귀식의 입력변수로 선정하였다.

(4) DOE-2 시뮬레이션 횟수를 절감하기 위하여 8~18시의 시간변화에 따른 부분부하의 분포를 회귀식으로 산출하였다.

(5) 회귀식을 이용한 간이계산식의 결과와 동

일한 조건으로 입력된 DOE-2 계산값을 비교하였다. 원심식 냉동기와 2중효용 흡수식 냉동기를 적용한 결과 평균 오차율이 MBE 가 $-5.2\sim 1.6\%$, $RMSE$ 는 $5.9\sim 7.6\%$ 로 나타났다.

본 연구에서 제시하고 있는 계산법은 특정지역(서울), 특정한 운전시간대(8~18시)에 국한하고 있으므로, 모든 건물에 적용할 수 없다. 사무실이나 학교와 같이 주간운전을 하는 건물에는 적용이 가능하나, 야간운전이나 24시간 운전을 기본으로 하는 다른 형태의 건물(판매시설, 병원 등)에서는 적용하기 어렵다. 이러한 점에서 본 계산법의 일반화를 위해서는 건물유형별로 운전시간을 구분하여야 하며, 각각에 대한 추가적인 회귀식이 산출되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Sullivan, R., Nozari, S., Johnson, R. and Selkowitz, S., 1985, Commercial building energy performance analysis using multiple regression, ASHRAE Trans.
2. Wilcox, B. A., 1991, Development of the envelope load equation for ASHRAE Standard 90.1, ASHRAE Trans.
3. Lam, J. C., Hui, S. C. M. and Chan, A. L. S., 1997, Regression analysis of high-rise fully air-conditioned office buildings, Energy and Buildings.
4. Ruch, D. K. and Claridge, D. E., 1993, A development and comparison of NAC estimates for linear and change-point energy models for commercial buildings, Energy and Buildings.
5. Reddy, T. A. and Claridge, D. E., 1994, Using synthetic data to evaluate multiple regression and principal component analyses for statistical modeling of daily building energy consumption, Energy and Buildings.
6. ASHRAE, 1993, ASHRAE Handbook of Fundamentals: chapter 28, energy estimating methods.
7. Lawrence Berkeley Laboratory, DOE-2 reference manual, LBL-8706, 1982.
8. Lawrence Berkeley Laboratory, DOE-2 engineers manual, LBL-11353, 1982.