

실험계획법을 이용한 시스템에어컨의 냉매량검지 기술개발

이 수 영[†], Hisashi Takeichi^{*}, 태 상 진, 윤 백

삼성전자 공조솔루션 사업팀, ^{*}삼성요코하마연구소

Refrigerant Amount Detection Technology for System Air-Conditioner Using Design of Experiment

Soo young Lee[†], Hisashi Takeichi^{*}, Sang Jin Tae, Baek Yoon

Air Conditioning Solution Business Team, Samsung Electronics, Co., Ltd., Suwon 443-742, Korea

^{}Samsung Yokohama Research Institute, Osaka 562-0036, Japan*

(Received October 26, 2009; revision received November 26, 2009)

ABSTRACT: This paper is suggesting a new technology for refrigerant amount detection of a system air-conditioner installed under various installation conditions. System air-conditioner was introduced to domestic market first in 2000. It consists of one or a series of outdoor units and a number of indoor units connected with single pipe line to the outdoor unit. The system can vary the capacity from 2.0kW to 186kW. For the system installed under long and high-elevated condition, about 100 kg of refrigerant is charged in the whole system. In this paper, the new technology RAD (Refrigerant Amount Detection) with edge technology of refrigerant cycle control and measurement of a system air conditioner was developed and investigated for its application for the various installation conditions.

Key words: Refrigerant amount detection(냉매량 검지), System air-conditioner(시스템 에어컨)

1. 서 론

최근에 국민의 소득 증대와 생활수준의 향상으로 주거환경과 사무 공간의 쾌적성에 대한 요구 증대에 따라 설치공간과 공사비의 절감 및 에너지 절약 차원에서 다수의 실내·외기가 접속되는 시스템 에어컨의 보급이 계속적으로 증가하고 있다. 이러한 시스템 에어컨은 설비의 대형화에 따라 냉매량이 일반 팩키지 에어컨에 비해 매우 많고 운전조건에 따라 사이클 특성이 크게 달라진다. 그러므로 적정 냉매량의 판별과 현장 설치시 시스템의 냉매 부족 또는 과충전시 이를 실시간

으로 판독하고 대응할 수 있는 기술이 요구된다. 냉동기에 대한 일반적 고장 특성 및 충전량에 관한 연구는 거의 대부분이 실험연구 위주로 진행되어 오고 있으며, 국내에서는 이에 대한 연구가 미진한 실정이고, 국내·외를 통해 충전량에 대한 시뮬레이션 연구 또한 활발히 진행되고 있진 않다. 냉매량 예측 및 냉동기에 대한 고장검출 연구들은 많지는 않으나 1990년대 말부터 Ross and Braun⁽¹⁾과 Breuker and Braun⁽²⁾이 온습도 측정과 통계적인 분석을 통하여 증기 압축식 에어컨의 Rule-based FDD 모델을 연구하였고, Han et al.⁽³⁾은 멀티형 열펌프 시스템의 고장 모사장치를 개발하여 냉매누설, 실내기 팬고장, 응축기 오염고장에 대한 특성을 파악하는 연구가 수행되었다. 이외에도 냉방기에 대한 고장검출을 위하여 다양한 알고리즘을 적용한 연구가 진행되고 있

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-200-6483; fax: +82-31-200-6985

E-mail address: sy71.lee@samsung.com

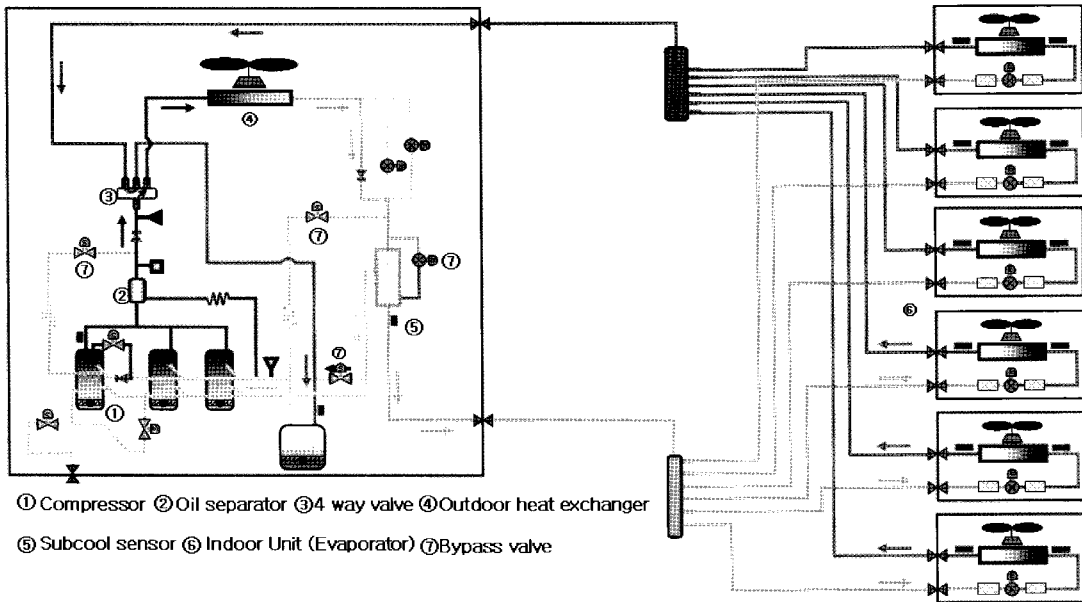


Fig. 1 Schematic diagram of test system.

다.⁽⁴⁻⁸⁾ 그러나 시스템 에어컨은 설계조건 및 운전조건에 따라 그 운전 특성이 매우 다르고, 고장시에 나타나는 시스템의 운전 특성은 고장의 원인 및 현상에 따라 일반화된 알고리즘으로는 그 적용에 한계가 있다.

최근에는 대체냉매(R-410A) 상용화에 따른 냉매 충전량의 절감, 고효율화를 위해 수액기(receiver)를 제거한 사이클 특성에 대한 연구가 국내외적으로 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 R-410A 냉매를 사용한 시스템 에어컨에 대하여 다양한 실내의 온도조건에 대한 냉매량별 운전 특성을 실험적으로 조사하여 냉매량 판독 예측식을 제안하고, 현장 설치 시 적정 냉매량 기준 80~120%에서 10% 이내의 냉매 부족 또는 과충전을 판독하고 대응할 수 있는 기술을 확보하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 냉난방 겸용 히트펌프의 시스템을 나타내고 있다. 실외기는 냉방 16kW, 난방 18kW 용량의 4-way 밸브를 이용한 냉난방 겸용 모델이며, 총 3대의 실내기를 연결하였다. 압축기는 PWM(pulse width modulation)제어에 의해 용량을 조절하는 디지털 스크

롤 압축기를 사용하였다.

실험 조건으로서는 정상적 부하로 설계된 실내의 냉방 가동 시 실내 예상 평형 온도인 20~24℃의 평균값인 22℃를 실내 표준온도로 정하였고, 실외는 냉방 기간 중 실외 온도 범위인 15~32℃의 평균값인 24℃로 설정하였다. 먼저 냉매 량에 따른 시스템 운전 특성을 파악하기 위해 냉매량을 감소 시켜가며 실험을 진행 하였다.

Fig. 2는 최적 냉매량 7.0kg을 기준으로 10~50%까지 냉매량을 줄여가면서 시스템의 냉방능력 감소율을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 냉매량이 40% 이상 감소해야 냉방능력이 급격히 저하되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 냉매량 저 충전시 실제 냉방능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 냉매량이 40% 이하에서는 냉방능력 및 COP의 변화가 크지 않으며 냉매량이 40% 이상 감소해야 시스템 이상 변화를 감지 할 수 있을 것으로 보인다. 이 결과는 실제 시스템 운전 시 고장에 의한 냉매 누설이 30% 이내로 발생 했을 경우에는 냉매량 판독이 어려우며, 시스템의 치명적인 고장을 방치 할 수 있음을 보여 주고 있다. 정확한 냉매량 검지를 위해서는 냉매량에 영향을 받는 각 인자들의 민감도와 정량적 분석이 필요함을 알 수 있었다. 그러므로 실제 냉매량에 의한 큰 영향을 미치는 인자를 분

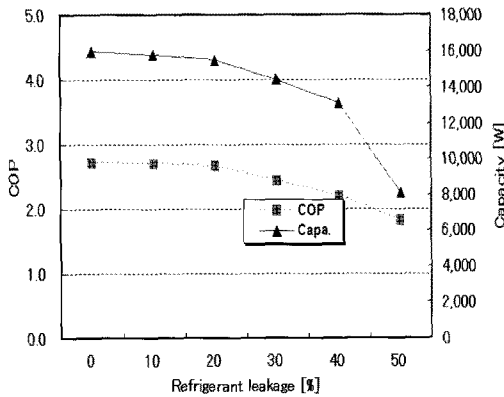


Fig. 3 COP and capacity according to refrigerant leakage.

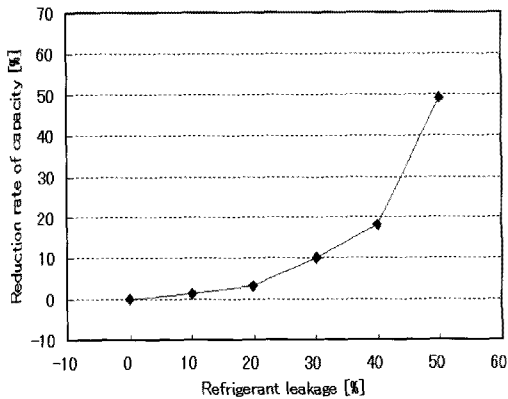


Fig. 2 Reduction rate of capacity according to refrigerant leakage.

식하기 위해서, 실험 기준 변수를 최소화 하고 삭제하여 판정 변수를 극대화 시켜야 한다. 따라서 검토 실험 결과 최적화 된 제어값을 통해 나타난 사이클 특성을 토대로 몇 가지 변수를 고정하기로 하였다. 먼저 용량변이 가능한 압축기 리드타임(lead time)은 20 sec로 동일하게 고정하여 냉매량의 변화에 따른 영향인자를 극대화 시키도록 하였고, 바이 패스되는 냉매유량의 영향을 최소화하기 위해 바이 패스 밸브는 모두 닫아서 실험을 진행 하였다. 실외기 팬은 공기 풍량을 일정하게 하여 냉매량에 따른 고압 및 실외 열교환기 출구 과열도 등의 차이를 극대화 하게 하였고, 실내기 EEV를 통해 과열도 3 ℃를 제어 함으로써 실내기 종류 및 조합에 따른 영향을 최소화하고 동시에 과열기체가 어큐뮬레이터에 유

입되어 액냉매가 쌓이는 것을 방지하도록 하였다. 만약 액냉매가 쌓일 경우, 사이클 실험 데이터를 통한 냉매량의 판독이 어려워진다. 이와 같이 압축기 lead time, 바이패스 류 밸브(closed), 실외기 팬, 실내기 EEV는 변수 영향을 없애기 위해 최적화 하여 고정 후 냉방모드로 실험을 진행 하였다.

3. 냉매량 판정 변수 선정

앞서 기술한 바와 같이 압축기 lead time(20sec), 바이 패스 류 밸브(closed), 실외기 팬(5step), 실내기 EEV(과열도 3 ℃)를 설정하는 것을 냉매량 판독모드로 정하고 냉매량 실험을 수행하였다. 냉매량 판독 관련 변수로는 시스템의 포화증발온도, 포화응축온도, 압축기 흡입, 토출온도, 출구온도, 과열도 등을 중심으로 냉매량 변화에 따른 특성을 분석하였다.

Fig. 4는 냉매량에 따른 포화응축온도, 포화증발온도의 변화를 나타낸다. 포화응축온도는 냉매 량이 많아질수록 점진적으로 증가하는 추세를 보이는 반면, 포화증발온도는 일정한 값을 유지함을 알 수 있다. 일반적으로 냉매량이 증가하면 시스템내의 냉매 유량이 증가하게 되어 증발압력과 응축압력이 선형적으로 증가하게 되나 본 시스템은 과열도를 제어함으로써 증발기의 냉매유량 및 증발압력이 변화되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5는 냉매량 변화에 따른 각 변수들의 민감도를 파악하였다. 사이클의 저압측에 영향이 있는

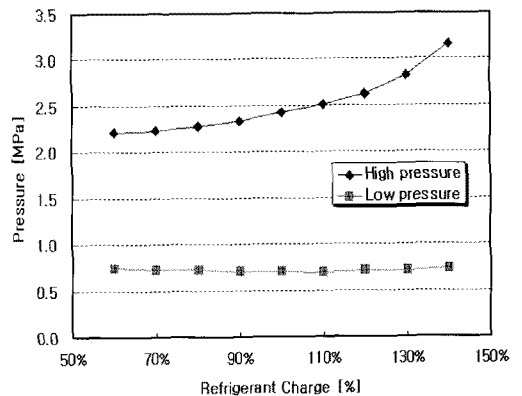


Fig. 4 Effect of charged refrigerant amount on high and low pressure.

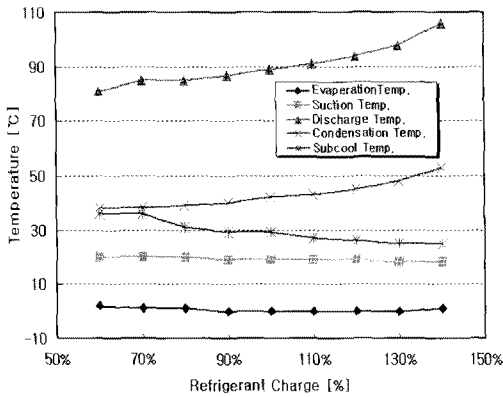


Fig. 5 Effect of charged refrigerant amount on system temperature.

증발포화온도, 압축기 흡입온도는 큰 변화를 보이지 않았으며, 고압부의 압축기 토출온도와 응축포화온도는 냉매량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 과냉도는 감소하는 경향을 보였다. 저압측과 비교하였을 때, 고압측 변수들이 민감도가 우수하게 나타났다. 따라서 냉매량 관측 변수로 응축포화온도, 압축기 토출온도, 과냉도를 선정하였다.

4. 선택 인자에 대한 반응표면법의 적용

냉매량 예측을 위한 관정변수로 응축포화온도, 압축기 토출온도, 과냉도를 선정하였다. 하지만 선택된 인자는 모두 실험자가 직접 제어할 수 없는 인자로서 변량인자로 볼 수 있다. 따라서 냉매량에 민감하게 반응하는 인자들을 제어 가능한 실험인자인 모수인자로 바꾸어 실험하고, 결과 값을 치환하는 방식으로 냉매량 예측 상관식을 얻고자 한다.

관정 변수에 영향을 주면서 제어 가능한 실험 인자는 실내·외 온도, 팬 풍량과 냉매량이다. 이러한 모수인자에 대한 반응표면 실험계획법을 이용한 최적 반응 표면식을 구하고자 Table 1과 같이 4인자 2수준을 정하고 중심합성계획법에 의해 실험을 수행하였다. 실험은 대형샤시(14~16HP급)를 대상으로 진행하였다. 중심합성계획법은 변수의 수준 변화에 따라서 발생하는 반응량의 곡면적인 변화를 감지할 수 없는 2수준의 실험의 단점을 보완하고 적은 횟수의 실험으로 곡면을 추정하고 $k = 3$, 즉 인자가 3이상인 경우 중심점과 축점을 2^k 요

Table 1 Factors and levels

Control factor	Level				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
A Indoor temp.(°C)	10	15	20	25	30
B Outdoor temp.(°C)	5	15	25	35	45
C Ref. amount(kg)	60	80	100	120	140
D Fan (step)	1	3	5	7	9

인실험에 추가시키는 실험계획을 말한다. 중심점은 실험자의 판단에 따라 정확도를 높이기 위해서 실험 횟수를 임의로 정할 수 있다.

본 연구는 앞서 설명한 바와 같이 대형샤시 중 16HP급을 대상으로 4인자 반응표면 실험계획법 중 중심합성계획을 이용하여 요인점 16회, 축점 8회, 중심점 6회로 총 30회의 실험계획법을 Table 2와 같이 수립하였다. 모수인자를 가지고 실험계획법에 의해 실험한 결과를 변량인자로 치환하여 Table 3과 같이 냉매량을 기준으로 정리 할 수 있다. 치환된 냉매량 예측 변수를 보면 앞서 선정했던 변수인 x_1 (응축포화온도), x_2 (압축기 토출온도), x_3 (과냉온도) 및 상관식의 정확도를 높이기 위해 x_4 (증발포화온도)가 포함 된 것을 알 수 있다. 최초 모든 인자에 대한 회귀분석 결과는 Table 4에 나타내었다. 결과를 분석해 보면 주효과(main effect)항 중 x_4 항의 P-value가 매우커서 유의하지 않지만 교호효과에서 사용되므로 생략하지 않았고, 제곱항 중 4개항은 모두 P-value가 매우 크게 나타나서 회귀식에서 생략하고 풀링(Pooling) 하였다. 풀링(Pooling)은 분산분석을 통한 검정결과 오차의 자유도가 작아서 검출력이 좋지 않은 인자를 오차항에 넣어서 새로운 오차항을 만드는 것을 말한다. 교호효과(interaction)항 중 2개항(x_1*x_3 , x_2*x_4)도 마찬가지로 P-value가 매우 커서 유의하지 않으므로 회귀식에서 생략하고 풀링(Pooling)하였다.

분산분석 결과는 Table 5(Analysis of variance)에 나타내었다. 1차항(Linear)은 P-value가 매우 작아 유의함을 알 수 있으나, 제곱항(square)은 P-value가 매우 커서 유의한 인자가 1개도 없다는 것을 보인다. 그래서 4개항 모두 풀링(Pooling) 하였다.

교호효과항(interaction)은 P-value가 매우 작아 유의함을 알 수 있고, 이것은 적어도 유의한 인자가 1개 이상은 있다고 판단 할 수 있다.

Table 2 Design of experiments (RSM)

EXP. NO	Indoor temp.(°C)	Outdoor temp.(°C)	Ref. amount(%)	Fan (step)
1	15	15	80	3
2	25	15	80	3
3	15	35	80	3
4	25	35	80	3
5	15	15	120	3
6	25	15	120	3
7	15	35	120	3
8	25	35	120	3
9	15	15	80	7
10	25	15	80	7
11	15	35	80	7
12	25	35	80	7
13	15	15	120	7
14	25	15	120	7
15	15	35	120	7
16	25	35	120	7
17	20	25	100	5
18	20	25	100	5
19	20	25	100	5
20	20	25	100	5
21	10	25	100	5
22	30	25	100	5
23	20	5	100	5
24	20	45	100	5
25	20	25	60	5
26	20	25	140	5
27	20	25	100	1
28	20	25	100	9
29	20	25	100	5
30	20	25	100	5

Table 4 Results of regression analysis

Parameter	Coef.	SE Coef.	T-value	P-value
Constant	103.620	2.012	51.498	0.000
x_1	90.702	10.959	8.277	0.000
x_2	-16.777	7.277	-2.306	0.036
x_3	-76.669	13.063	-5.869	0.000
x_4	-1.177	12.245	-0.096	0.925
x_1*x_1	-15.740	17.451	-0.902	0.381
x_2*x_2	9.918	8.763	1.132	0.275
x_3*x_3	-25.061	20.805	-1.205	0.247
x_4*x_4	13.302	16.976	0.784	0.445
x_1*x_2	-65.236	27.951	-2.334	0.034
x_1*x_3	36.067	33.203	1.086	0.295
x_1*x_4	59.235	28.590	2.072	0.056
x_2*x_3	83.181	30.343	2.741	0.015
x_2*x_4	-16.242	19.944	-0.814	0.428
x_3*x_4	-74.455	34.206	-2.177	0.046

Table 3 Experimental results (RSM)

EXP. NO	y	x_1	x_2	x_3	x_4
	Ref. amount (%)	H.P. (Sat.) Temp. (°C)	L.P. (Sat.) Temp. (°C)	Subcool Temp. (°C)	Dis. Temp. (°C)
1	80	33	5	32	62
2	80	36	13	35	63
3	80	51	8	50	81
4	80	54	15	53	93
5	120	38	6	27	44
6	120	46	13	28	66
7	120	54	9	49	54
8	120	61	17	51	74
9	80	26	4	25	53
10	80	29	11	28	54
11	80	45	7	44	72
12	80	47	14	47	81
13	120	31	5	22	53
14	120	39	11	21	65
15	120	48	8	42	49
16	120	55	15	43	71
17	100	42	10	37	67
18	100	42	10	37	67
19	100	43	10	37	67
20	100	42	10	37	65
21	100	38	3	37	41
22	100	46	16	38	76
23	100	23	6	15	48
24	100	60	13	56	84
25	60	37	9	37	71
26	140	52	10	32	54
27	100	57	12	52	74
28	100	38	9	32	66
29	100	42	10	37	66
30	100	42	10	38	67

Table 5 ANOVA(Analysis of variance)

Source	DOF	SS	Mean Square	F-value	P-value
Linear	4	8589.11	1162.65	51.12	0.000
Square	4	84.71	21.51	0.95	0.465
Interaction	6	585.03	97.51	4.29	0.010

Table 6 Results of regression analysis

Parameter	Parameter	Estimated	Parameter	Estimated
Constant	Linear		Cross product	
	x_1	1.22232	x_1*x_2	-0.410474
87.2135	x_2	-2.667	x_1*x_4	0.106627
	x_3	0.0556375	x_2*x_3	0.507434
	x_4	-0.377785	x_3*x_4	-0.12365

Pooling 후 최종 회귀분석을 통해 구해진 각 성분 계수를 정리하면 Table 6과 같고, 최소제곱법에 의해 적합된 반응표면식은 다음과 같다.

$$y = 87.2135 + 1.22232x_1 - 2.667x_2 + 0.0556375x_3 - 0.377785x_4 - 0.410474x_1x_2 + 0.106627x_1x_4 + 0.507434x_2x_3 - 0.12365x_3x_4 \quad (1)$$

5. 냉매량 상관식의 결과 비교

Table 7은 시스템 에어컨(16HP급)의 냉매량 예

Table 7 Comparison between predicted and measured refrigerant amount(16HP)

NO	y experiment (%)	y Calc. (%)	error (%)
1	60	73.686	23%
2	80	78.87	1%
3	80	82.654	3%
4	80	75.589	6%
5	80	77.962	3%
6	80	80.843	1%
7	80	79.848	0%
8	80	79.533	1%
9	80	78.33	2%
10	100	97.498	3%
11	100	97.498	3%
12	100	101.759	2%
13	100	98.447	2%
14	100	100.308	0%
15	100	102.253	2%
16	100	109.638	10%
17	100	98.535	1%
18	100	97.972	2%
19	100	94.343	6%
20	100	96.246	4%
21	100	99.737	0%
22	120	122.539	2%
23	120	119.849	0%
24	120	119.574	0%
25	120	120.258	0%
26	120	116.178	3%
27	120	117.564	2%
28	120	117.532	2%
29	120	124.799	4%
30	140	140.157	0%

측 상관식 결과값과 시험값을 비교한 데이터이고, Fig. 6은 비교 데이터 결과 값을 그래프로 표현한 것이다. 이와 같이 상관식을 통해 예측한 냉매량의 값은 실제 냉매량 대비 평균 오차율이 약 3% 이내로 높은 수준의 정확도를 보이고 있다. 그러나 냉매량의 60%에서는 예측 상관식의 오차율이 약 23%로써 정확도가 크게 떨어진다. 이것은 냉매량 80~120%에서의 정확도를 우선적으로 고려했기 때문에 극단적인 60%인 경우 실험 1회당 자유도 1을 주고 분석하여 가중치에 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 얻어진 냉매 충전 예측 상관식의 검증을 위하여 대형사시 중 가장 큰 16HP급 실외기 4대를 연결해서 모듈형 시스템의 최고 마력인 64HP급을 구현하고 연결 배관을 고려한 최적 냉매량을 충전하여 앞서 제안했던 냉매량 검지 모드로 실험을 수행하였다. 실험은 외기온도 조건에 따른 냉매량 예측 인자들의 영향도 및 검지 오차율을 파악하기 위해 랜덤하게 진행하였으며, 실험 결과는 Table 8에 정리되었다. 실험 결과 냉매량 70%에서는 예측 상관식의 평균 오차율이 약 5%, 냉매량 100%에서는 약 6%, 냉매량 120%에서는 약 2%로 본 연구에서 냉매량 예측 기준인 80~120%에서의 예측 상관식의 평균 오차율은 약 6% 이내를 보이면서 대체적으로 만족할 만한 예측값을 제시하고 있다.

Table 8 Comparison between predicted and measured refrigerant amount

Indoor (DB20 ℃/ WB15 ℃)		Outdoor (DB5 ℃/ WB3 ℃)		Ref. amount	70%(77kg)
Set	16HP	16HP	16HP	16HP	64HP(Total)
Calc.	90%	89.3%	94.0%	104.3%	74.8%(Ave.)
Indoor (DB20 ℃/ WB15 ℃)		Outdoor (DB25 ℃/ WB18 ℃)		Ref. amount	100%(110kg)
Set	16HP	16HP	16HP	16HP	64HP(Total)
Calc.	90%	89.3%	94.0%	104.3%	94.4%(Ave.)
Indoor (DB20 ℃/ WB15 ℃)		Outdoor (DB15 ℃/ WB18 ℃)		Ref. amount	120%(132kg)
Set	16HP	16HP	16HP	16HP	64HP(Total)
Calc.	90%	89.3%	94.0%	104.3%	118%(Ave.)

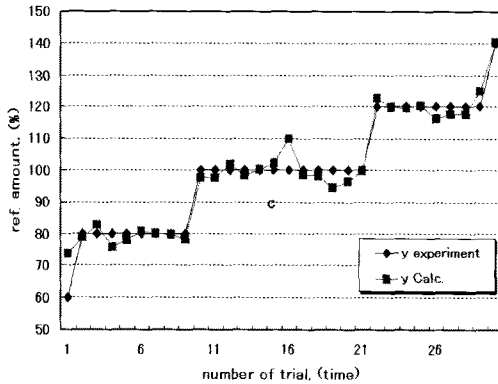


Fig. 6 Comparison between predicted and measured ref. amount(16HP).

6. 결 론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 시스템 에어컨은 냉매량이 30%이상 저 총전되어야 시스템 성능 및 운전 특성이 크게 변화한다. 이 결과는 실제 멀티 시스템 운전 시 고장에 의한 냉매 누설이 30%이내로 발생 했을 경우에는 냉매량 판독이 어려우며, 시스템의 치명적인 고장을 방지 할 수 있음을 보여 주고 있다.

(2) 본 연구에서 제안한 냉매량 검지 모드는 외기온도 약 5℃~45℃ 범위에서 유효 할 것으로 판단된다.

(2) 모듈형 대형사시 64HP급 냉매량 검지 모드에서 실험 결과, 실험계획법을 이용한 냉매량 예측 상관식의 오차율은 약 6% 이내의 결과를 얻었다.

(3) 본 연구에 사용된 실험계획법을 통하여 냉매량 예측 인자들에 관련된 상관식 도출시 유효한 수단으로 활용될 수 있으리라 생각하며 이러한 일련의 과정들이 실제 필드에서의 고장검지 데이터 정확도를 높여줄 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Breuker, M. S. and Braun, J. E., 1998, Common faults and their impacts for rooftop air

conditioners, HVAC&R Research, Vol. 4, No. 3, pp. 303-318.

2. Breuker, M. S. and Braun, J. E., 1998, Evaluating the performance of a fault detection and diagnostic system for vapor compression equipment, HVAC&R Research, Vol. 4, No. 4, pp. 401-425.
3. Han, D. and Ha, S., 2000, A study on the fault detection and diagnosis method for the air conditioner, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference, Vol. 3, pp. 1408-1412.
4. Han, D. and Yoon, T., 2000, Partial fault response of multi-type air-conditioner, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, Vol. 1, pp. 319-323.
5. Han, D. and Lee, H., 2001, Partial fault detection of the air-conditioning system by using curve fitting model, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference, Vol. 2, pp. 670-674.
6. Han, D. and Lee, H., 2002, Partial fault detection of an air-conditioning system by using the model-based method with data preprocessing, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference, Vol. 1, pp. 295-300.
7. Han, D. and Lee, H., 2002, Partial fault detection of an air-conditioning system by neural network algorithm using data preprocessing method, Korean Journal of the SAREK, Vol. 14, No. 7, pp. 560-566.
8. Didion, D. A. and Kelly, G. E., 1979, New testing and rating procedure for seasonal performance of Heat Pump, ASHRAE Journal, pp. 40-44.
9. Murphy, W. E. and Goldschmidt, V. W., 1979, The degradation coefficient of a field Test self-contained 3-ton air conditioner, ASHRAE Trans., Vol. 85, pp. 396-405.