

Fuzzy Clustering 기법을 이용한 Multi-Evaporator Vapor Compression Cycle의 적정 냉매량 판정에 관한 연구

김 성 환*, 최 창 민, 권 기 백, 정 백 영
 LG 전자 HAC 연구소

Studies on Correct Refrigerant Amount Detection for Multi-Evaporative Vapor Compression Cycle using Fuzzy Clustering

Sunghwan Kim, Chang Min Choi, Kibaik Kwon, Baik-Young Chung

ABSTRACT: This study has been conducted on how to determine the multi-evaporator vapor compression cycle system is charged correctly by using sensor readings which are used to control system. In this paper, the characteristics of the multi-evaporator were presented and sensor values were classified using fuzzy clustering. finally classification logic and it's performance were discussed by applying commercial VRF system

Key words: Heat pump(열펌프), Installation(설치), Refrigerant (냉매), Experiment (실험)

1. 서 론

Multi-Evaporator vapor compression cycle 은 VRF (Variable Refrigerant Flow) 라고도 언급되어지며 Chiller에 비해 많은 이점이 있다. VRF system 은 중앙냉난방에 비하여 부하조절이 상대적으로 쉬우며 부분부하 조건에서도 전력소모가 크게 적어 적용하는 건물이 증가하는 추세이다.

VRF는 설치도 비교적 간단하나 최적의 운전 상태를 유지하기 위해서는 적정량의 냉매를 충전하여야 하고, 누설이 없도록 하여야 한다. 이에 LG MultiV system air conditioner 에서는 적정한 냉매량을 설치자가 알기 쉽도록 냉매량 판단 로직을 개발, 제품에 적용하여 쉽게 최적의 성능

을 발휘하도록 하였고, 운전중 만약의 누설시 냉매 부족현상을 판단할 수 있는 로직을 개발 적용하였다. 본 논문에서는 LG VRF system 인 MultiV super II 에 적용된 냉방 운전시의 냉매량 판정 방법을 설명하고자 한다.



Fig. 1 MultiV Super II.

† Corresponding author

Tel.: +82-10-5755-9395; fax: +82-2-6915-1065
 E-mail address: rockdale@lge.com

2. Multi-Evaporator Vapor Compression Cycle의 운전 특성

하나의 응축기에 여러개의 증발기가 있는 시스템의 경우는 각각의 증발조건이 다르기 때문에 증발 특성이 단일의 증발기를 가진 사이클에 비하여 냉매량에 대한 운전특성 예측이 매우 어렵고, 다음과 같은 특성을 지닌다.

2.1 Single-Evaporator Vapor Compression Cycle vs. Multi-Evaporator Vapor Compression Cycle

Single Evaporator cycle 에 비하여 Multi Evaporator Cycle 은 증발기의 개수만큼의 Cycle 이 존재하며 그리고 이 모든 Cycle 이 최적의 상태를 유지하여야 한다. 즉, 하나의 증발기를 갖는 시스템에 비해 증발기의 크기가 커지는 것으로 설명되지만 각각의 증발기에서의 운전시 특성은 각각 다르게 나타나고 매우 복잡하게 된다.

2.1.1. Multi Evaporator

Multi Evaporator 사이클의 경우 각각의 증발기가 각기 다른 실내 환경에 놓이게 되어 증발(온도, 압력) 조건이 다르게 되어 실내 전자 팽창변이 증발기 개수만큼 존재하며 각각의 증발기에 흐르는 냉매유량도 다르게 된다. 이 각각의 전자 팽창변이 유량을 제어하고 각각의 Cycle 을 형성하게 된다. 또한 증발기의 사용 대수에(부분부하) 따라 냉매의 흐름이 달라지므로 전체적인 시스템 특징도 변하게 된다⁽¹⁾.

2.1.2. Evaporator-Condenser 사이의 고저차

각각의 증발기는 설치되는 위치나 크기, 배관의 상태가 같지 않기 때문에 증발기에 들어오는 냉매의 압력차가 다르게 생길수가 있다. 이 압력차는 냉매 유량의 편중을 발생시키기 때문에 냉방시 증발기가 응축기보다 높은 위치에 설치될 경우에는 때에 따라 액냉매가 증발기 입구까지 도달하지 못하고 연결 배관 내에서 기상으로 변화하는 경우(Flashing)도 생긴다. 이러한 증발기 각각에 대한 조건과 상황에 따라 많은 시스템 특징이 생기게 된다.

2.1.3. 배관길이에 의한 효과

싱글 시스템의 경우 대부분 최장 배관길이가 30m 이내로 짧아서 배관길이의 변화에 의한 영향을 작게 받는 반면 멀티시스템의 경우 최장 배관길이가 업체마다 틀리긴 하지만 최대 300m까지 늘어나서 배관길이의 변화에 따른 영향을 크게 받는다. 배관 길이가 길면 고저차의 상황과 비슷한 경우의 배관내 증발이 발생할수도 있으며 냉매량에 대한 관성의 효과도 크게 되며 제어에 대한 시스템의 반응도 늦어지게 된다.

2.2 냉매량에 따른 Multi-Evaporator Vapor Compression Cycle 의 변화

일반적으로 과냉각기를 보유한 LG Super II VRF system의 경우 냉매량의 상태에 따라 아래와 같은 운전 특징을 가진다.

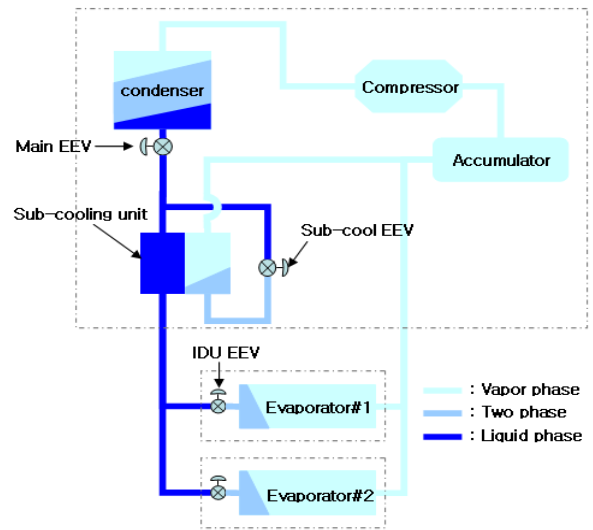


Fig. 2 Refrigerant distributions in multi-evaporator system.

냉방 운전 중 냉매량이 부족할 경우 그림 2 에서 보여지는 응축기 부분에서 액상 구간이 줄어들고 이상과 기상 구간이 늘어나면서 응축기 출구에서의 과냉도가 감소한다.

이와 반대로, 냉방 운전 중 냉매량이 과다할 경우에는 응축기에 쌓이는 액상의 냉매가 증가하여 전체적으로 시스템의 과냉도가 높게 나온다. 다음은 냉매량 변화에 따른 열교환기의 효율, 과냉도, 압축기 토출온도, 그리고 냉매의 누적에 관하여 좀더 자세한 내용을 기술한다.

2.2.1 냉매량 변화에 따른 열교환 효율

응축기에 쌓이는 냉매량이 증가할수록 응축기 전체에서 액상의 냉매가 차지하는 면적이 증가하며 전체적으로 열교환 효율의 감소를 가져오게 된다. 문헌⁽²⁾에 나타나 있는 결과들을 정리하자면 실외온도가 35℃, 실내온도:27℃인 조건에서 기상 냉매의 경우 700~800W/m²K, 이상냉매의 경우 2800~3300W/m²K, 액상 냉매의 경우 900~1100W/m²K 정도의 열전달 계수 값을 나타낸다. 즉 냉매가 정상으로 충전되어 있지 않으면 열교환기 성능은 감소한다.

2.2.2 냉매량 변화에 따른 과냉도의 변화

시스템의 냉매 충전량이 증가할 경우 추가된 냉매들은 Accumulator와 증발기 그리고, 응축기에 쌓이게 된다. 응축기에 쌓이는 냉매는 열교환기에서 액상 냉매가 차지하는 구간을 증가시키고 이는 2.2.1에서 설명한 것과 같이 열교환 효율을 감소시키고 고압 상승을 유도하면서 시스템의 과냉도를 증가시키게 된다.

반대로 냉매량이 부족할 경우 응축기에서의 액상 냉매가 차지하는 구간이 감소하게 되며 또한 기상의 냉매가 빨리 흐르게 되므로 과냉도가 저하하게 된다. 즉 냉매 충전량이 많을수록 과냉도 값은 크게 된다⁽³⁾.

VRF system 에서는 고저차, 장애관등의 경우 배관내 냉매압력 손실 저감을 이유로 과냉각기를 사용⁽⁴⁾하며 과냉도를 조절하므로 이 과냉각기에 대한 과냉도를 아래 그림 3과 같이 실험결과를 일반화 시켜서 사용하여야 한다.

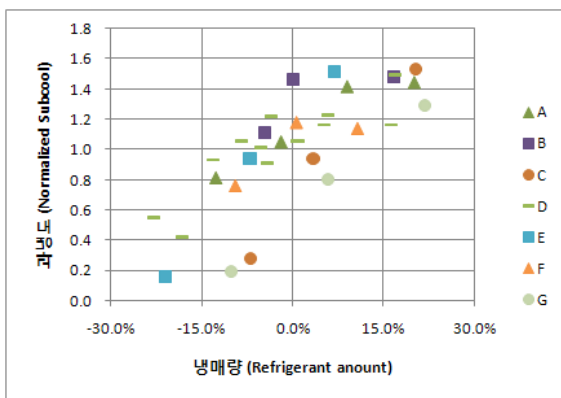


Fig. 3 Refrigerant vs. normalized subcool.

2.2.3 냉매량 변화에 따른 토출 온도의 변화

압축기 토출온도는 냉매량에 많은 관계가 있다. 특히 냉매량이 부족할 경우 토출온도는 많이 올라간다. 이는 시스템의 냉매가 부족하여 응축기의 적정 과냉도가 확보되지 않을 경우 실내 팽창변 전단에서 액상의 냉매가 이상으로 변하므로 증발기에서 적정 냉매량을 확보할 수 없게 된다. 더욱이 냉방 부하가 클 경우, 증발기를 통과한 냉매의 과열도가 높기 때문에 압축기에 공급되는 냉매의 상태는 높은 과열도를 가지며 유량이 적어진다.

냉매의 역할 중 한 가지는 압축기 토출부 및 Motor 냉각이며, 과열된 적은유량의 냉매는 이 역할을 하지 못하게 되어 토출온도의 과다 상승을 유발한다.

이러한 토출온도의 상승은 과도한 냉매량 부족시 발생되나 소량의 냉매 과부족의 경우에는 토출온도가 운전 조건에 영향을 더 많이 받으므로 냉매량이 조금 부족한 경우(10%이하)의 판단에는 사용하기 어렵다.

2.2.4 냉매량 변화에 따른 냉매 누적

이상적인 Multi-evaporator cycle에서 냉매의 분포는 액관에 액상 냉매가 차 있고 기관에는 기상의 냉매가 차 있어야 한다. 증발기와 응축기에서는 적정의 액냉매, 이상 냉매, 그리고 기체 냉매가 분포하고 있어야 한다. 이러한 냉매 분산이 실제 시스템에서는 최적의 상태와는 조금 다르며 어느 정도의 냉매량 과부족은 증발기와 Accumulator에서 완충이 되며 정상적인 사이클로 작동한다. 이러한 냉매누적은 냉매량 판정에 방해가 되며, 냉매량 누적이 판정에 방해가 되지 않도록 하여야 한다.

1. Accumulator에서의 냉매 누적

Accumulator에 냉매가 쌓인 경우에는 시스템의 냉매량 적정 여부를 판단 할 수 없다. 따라서 시스템에서 냉매량의 적정 여부를 판단하기 위해서는 accumulator내부의 냉매를 확실히 비워야 하며 이를 위해서는 증발기의 과열도를 적절히 제어하여 accumulator에 액상 냉매가 쌓이지 않도록 제어를 해주어야 한다.

2. 증발기에서의 냉매 누적

증발기에 쌓이는 냉매는 증발기 과열도를 제어함으로써 제어가 가능하다. 과열도가 작을 경우에는 열교환기 내부에 이상 구간이 증가하면서 열교환기 내부의 냉매 잔류량이 증가하고 과열도가 증가할 경우에는 이상 구간이 줄어들어 냉매 잔류량이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 하지만 증발기에 쌓이는 냉매의 경우 응축기에 쌓이는 냉매에 비하여 매우 작은 냉매가 쌓이기 때문에 전체적인 시스템의 냉매 과다/과소 판단에는 큰 영향을 주지 않는다.

3. 판단로직

본 장에서는 2장에서 전술한, 냉매량에 따른 부분적 특성을 바탕으로, 전체 시스템의 냉매량을 판단하기 위한 로직에 대해 설명하도록 한다.

일반적인 FDD(Fault Detect & Diagnosis) 접근을 위해서는 system의 동적 거동에 대한 완전한 이해를 필요로 한다. 그러나 VRF system의 경우 설치조건, 온도조건에 따른 자유도가 매우 많기 때문에, 모든 동적 거동을 판단하여 FDD를 수행할 수 없다.

일반적인 FDD에서는 예측되는 값과 현재 측정되는 값의 차이를 잔차로 정의하고 이 잔차 Space를 구성하여 현재의 잔차가 어떤 error space에 포함되는지 판별하는 방법이며 이러한 판별 방법은 주로 neural network에 기초한 data clustering과 fuzzy rule에 기초한 data clustering이다^(1,5).

VRF system에서는 위에서 언급한바와 같이 잔차 Space 구성이 어려워 실 Data Space로 space를 구성하였으며 system 특성에 대한 접근성과, 판단의 용이성을 고려하여 fuzzy clustering을 사용하여 VRF에 대한 고장진단 로직을 구성하였다. 로직 구성에 사용된 변수들은 Cycle data중 냉매량의 변화에만 민감한 변수들과 이 변수들의 조합으로 선정되었다. 다음은 input parameter의 선정기준이다.

1. 과도상태의 경우 그 특성의 변화가 매우 크기 때문에, 안정 상태의 Data만 선정.
2. 증발기 data인 경우, 설치조건을 영향을 매우 많이 받기 때문에, 상대적으로 설치조건을 영향을 적게 받는 응축기 data를 기준으로 선정.

3. 냉매량의 변화를 예측할 수 있는 parameter들에 대해 이론적 조합에 의한 data 선정.

4. 위 3번을 통해 선별한 parameter에 대해, 실제 시스템에 적용하여, 설치조건과 냉매량의 변경에 따른 data를 기준으로 판단 parameter들을 선정.

상기 과정을 통해 선정한 input parameter들은 시스템의 과냉도, 압축기 토출온도, 과열도, 고압, 저압 등이 있다.

3.1 Fuzzy Clustering

Fuzzy Clustering이란 데이터 군집을 나눌 때 Crisp 하게 Clustering 하는 것의 반대개념으로 군집의 영역에서 모호한 영역이 있는 Clustering이다.

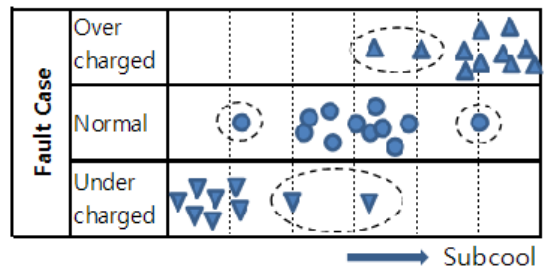


Fig. 4 Parameter classification

이 Fuzzy Clustering은 VRF system의 특성상 모호한 영역이 나타나는 데이터 영역을 표기하기가 매우 용이하다.

위의 그림 4은 parameter classification에 대한 예시로, 과냉도 변수가 냉매량이 부족할 경우 맨 아래 행의 아래 삼각형과 같이 좌측 영역에 주로 존재하며(과냉이 작게 나타나고), 냉매량이 정상일 경우 중간 행의 원형과 같이 중앙 영역에 주로 존재하고, 냉매량이 과다일 경우 첫 번째 행의 위 삼각형과 같이 우측영역에 주로 존재한다(과냉이 많이 나타난다).

이와 같이 냉매량이 변화함에 따라 주로 존재하는 data의 range의 구분이 비교적 확실한 변수들을 사용하여 냉매량의 상태가 정상인지, 또는 부족하거나, 과다인지를 판정할 수 있다.

모호한 영역 즉 냉매량 과다일때 정상인 영역에 표기되는 data 혹은 냉매량 정상일때 비정상적으로 표기되는 이러한 영역은 Fuzzy Clustering

으로 처리되어 "정상일수도 비정상일 수도" 있는 영역으로 처리가 가능하게 된다.

3.2 Fuzzy 냉매량 판단 로직

앞 절에서 선정한 input parameter를 사용하여 판단을 하는 부분에 대해 설명하도록 한다. 그림 8은 FDD에서 사용하는 fuzzy Clustering에 대해 나타낸 그림이다.

먼저 그림 좌측의 input parameter들을 2절과 같은 방법을 통해 선정하고, 그 parameter에 대해 냉매량의 변화에 변수들의 분포를 고장모사 실험을 통하여 구한다. 이 때, 발생가능한 모든 경우를 고려해야만 고장진단 engine의 정확성과 신뢰성을 보장할 수 있다.

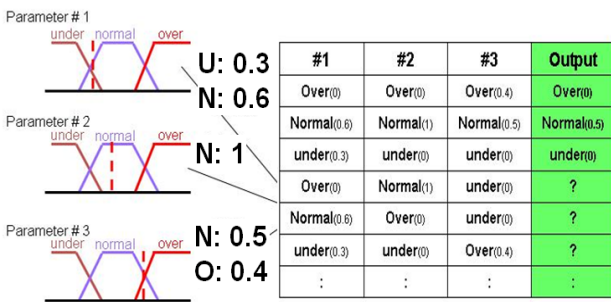


Fig. 6 Rules for fuzzy clustering.

그림 6을 기준으로 Fuzzy Clustering 결과를 상술한다면, parameter 1을 기준으로는 냉매량 부족과 냉매량 정상이 0.3, 0.6이며, parameter 2를 기준으로는 냉매량 정상이 1, parameter 3를 기준으로는 냉매량 부족과 냉매량 정상이 0.3, 0.6이 된다. 이 모든 결과를 조합하여 우측의 output과 같이 전체적으로 냉매가 정상이 0.5로 판단신호중 냉매 정상이 제일 크며 냉매량 정상으로 판정하게 된다.

4. 실험결과

상기의 로직에 따라 simulation과 실 Set 결과를 비교하여 로직의 신뢰성을 검증하였다.

그림 7는 실제 운전 data에 대해, 운전 상황에 따른 냉매량 판단 결과를 보여주는 그림이다.

그림 7에 사용된 data는 냉매량이 정상일때의

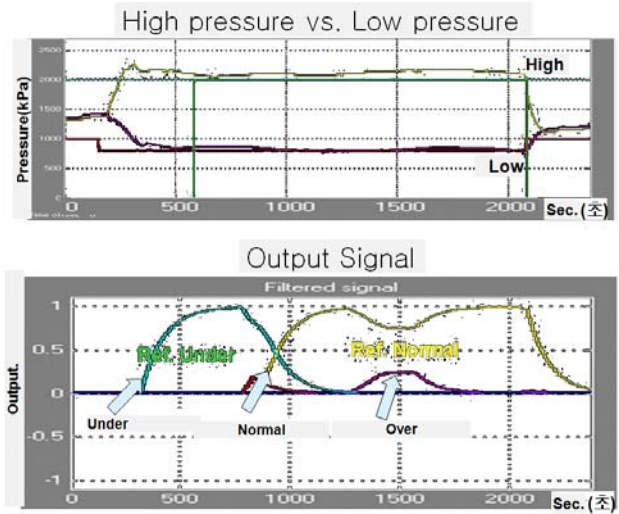


Fig. 7 Logic simulation.

cycle data인데, system의 운전에 따라 초기 과도상태에서는 냉매량 부족으로 판정하지만, cycle이 안정상태에 도달할 경우 냉매량 정상으로 정상적인 판단결과를 보여주고 있다.

Table 1 Result of logic test.

Condition	ODU temp	IDU temp	Set result	Simulation results	Engine output			Engine input			
					normal	Over	Under	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4
A	A	A	Normal	Normal	0.62	0.21	0.17	0	23.7	104	11.75
A	A	B	Normal	Normal	0.85	0	0.15	5.57	28.7	160	10.13
A	B	A	Normal	Normal	0.49	0.3	0.2	3.41	25.8	88	14.37
A	B	B	Normal	unknown	0	0	0	2.96	18.9	56	12.7
A	A	A	Over	Over	0.28	0.4	0.32	3.05	25.8	80	16.05
A	A	B	Over	Over	0.12	0.75	0.13	2.65	27.2	72	18.51
A	B	A	Over	Over	0.09	0.81	0.1	3.45	32.5	112	16.89
A	B	B	Over	Over	0.15	0.69	0.16	2.52	28.6	72	19.86
A	A	A	Under	Under	0.16	0	0.84	0	0	296	5.9
A	A	B	Under	Under	0	0	1	17.71	13.5	248	2.59
A	B	A	Under	Under	0	0	1	0	0	424	1.73
A	B	B	Under	Under	0.02	0	0.98	0	14.5	208	3.26

Table 1은 설치조건 및 온도조건의 변화에 따른 냉매량 판단의 정확성을 검증한 결과 중 일부 data이다. 그림과 같이, 실set 고장모사 실험과 로직의 simulation 판단 결과를 비교하였을 때, 99%의 정확성을 갖는 것을 확인할 수 있었으며, 1%의 오차는 cycle이 안정화 하지 않아서 발생하였다.

5. 결 론

고장 모사 Data를 기반으로 제작된 Fuzzy clustering 방법으로 Multi Evaporator cycle 의 냉매량 판정로직을 구할 수 있었으며, 이의 성능은 Multi Evaporator Cycle의 기준 냉매량 대비 $\pm 10\%$ 이내의 정확성을 가졌다. 이 로직은 설치 조건에 영향을 많이 받지 않지만 사이클이 안정영역에 들어있고, 모든 증발기를 다 사용할 때 판정의 정확도가 개선된다는 것을 알 수 있다. 그러나 처리 Data의 숫자가 많아져 DB가 커지는 단점은 지속 개선이 필요하다.

참고문헌

1. Cho, S., Yang, H., 2005, Transient pattern analysis for fault detection and diagnosis of HVAC systems, Energy Conversion and Management. no.46: p. 3103-3116
2. F.Poggi, H. Macchi-Tejeda, D.Leducq, A. Bontemps, 2008, "Refrigerant charge in refrigerating systems and strategies of charge reduction", International Journal Of Refrigeration, 31, P353-370
3. Langley, B., 2002, Heat Pump Technology, Prentice Hall, New Jersey, 536 p.
4. Yoo, P., 2000, Development and Technical Trend of Multi Air Conditioner, automatic control div. presentation, SAREK, November, p.1~12
5. Sunghwan Kim, Saikee Oh, Il-Nahm Hwang, Byeong-Cheol Lee, Sang-Hun Lee, Byung-Soon Kim, Baik-Young Chung, 2008, "Building Multi Air Conditioner with higher installation flexibility and fault detection function", International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 2435.