

퍼지론을 이용한 멀티형 히트펌프 시스템의 제상 제어

한도영*, 김경훈*

국민대학교 기계공학과, *국민대학교 기계공학과 대학원

Fuzzy Defrost Control of the Multi-Type Heat Pump System

Doyoung Han*, Kyounghoon Kim*

School of Mechanical & Automotive engineering, Kookmin University, Seoul 861-1, Korea

*Graduate School of Mechanical engineering, Kookmin University, Seoul 861-1, Korea

(Received January 26, 2000; revision received June 5, 2000)

ABSTRACT: A fuzzy defrost control algorithm for the multi-type heat pump system was developed. In the fuzzy defrost control algorithm, the air temperature difference at the outdoor unit and the refrigerant pressure difference at the compressor were used as input variables, and the defrost starting time and the defrost time interval were used as output variables. This fuzzy algorithm was applied to the multi-type heat pump system and tested in the five dynamic environmental chambers. Test results show that the newly developed control algorithm is more effective than the conventional control algorithm in the removal of frost formed at the outdoor unit of the heat pump.

Key words: Multi-type heat pump system(멀티형 히트펌프 시스템), Defrost control(제상 제어), Fuzzy control(퍼지 제어), Energy conservation(에너지 절약)

기호 설명

- ΔT : 실외 공기 입출구 온도차 [$^{\circ}\text{C}$]
- ΔP : 압축기 입출구 냉매 압력차 [kgf/cm^2]
- U^{crisp} : 제상지속시간 [sec]
- SM : 언어변수 Small
- MID : 언어변수 Small
- LA : 언어변수 Large
- b_i : 멤버쉽 함수 면적 중심값
- $\mu(i)$: 추론값

1. 서론

멀티형 히트펌프 시스템은 한 대의 실외기에 복수 대의 실내기를 접속한 개별 공조시스템으로 사방절환밸브의 위치에 따라 냉방과 난방 사이클을 구성하며 각 실의 부분부하에 따라 신속하게 대응할 수 있어야 한다. 멀티형 히트펌프 시스템을 개발하는데 있어서는 각 유닛 간의 시스템 매칭 기술과 적절한 제어 기술의 개발이 필요하며 더욱이 대륙성 기후인 국내의 경우에 히트펌프의 적용은 외기온도 저하시 난방 능력의 감소와 적상에 대응한 제상 제어 기술의 개발이 중요하다. 실외 열교환기에 적상이 발생할 경우에는 착상된 서리로 인하여 열교환 효율이 저하되어 난방 능력이 감소됨으로 제상모드를 적절히 가동함으로써 시스템의 성능과 수명을 높일 수 있다. 본 연구에서는 퍼지론을 적용하여 적절한 제상 시기와 제상 지속시간을 결정하는 제상 제어 알고리즘을 개발하였으며 개발된 제상 제어 알고리

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4675; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: dyhan@kmu.kookmin.ac.kr

증을 확인하기 위하여 기존 제어기와 개발된 제어기를 비교 시험하였다.

2. 멀티형 히트펌프 시스템

멀티형 히트펌프 시스템은 Fig. 1과 같이 18000kcal/h 용량의 가변형 압축기, 사방절환밸브, 실외 열교환기, 실외기 팬, 수액기, 액분리기, 유분리기, 전자팽창밸브 등을 포함한 실외기 한대와 전자팽창밸브, 실내 열교환기, 실내기 팬을 포함한 네 대의 실내기로 구성되어 있다.^(1,2)

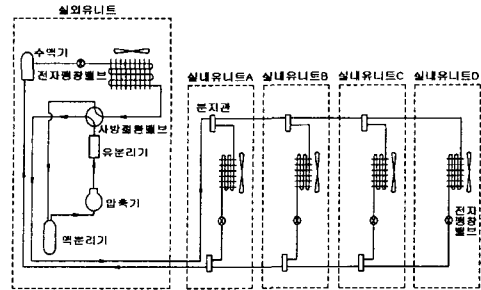


Fig. 1 Multi-type heat pump system.

3. 제상 제어 알고리즘

언어 모델링을 사용한 퍼지 알고리즘^(3,4)은 패턴인식, 의사결정, 자동제어 등 많은 분야에 성공적으로 적용되고 있다. 인간의 제어지식과 경험을 바탕으로 룰 베이스를 구축한 후 퍼지이론을 적용하여 자동제어 시스템을 구현함으로써 보다는 제어 결과를 얻을 수 있다.^(5,6) 퍼지론을 이용한 멀티형 히트펌프 시스템의 제상 제어 알고리즘⁽⁷⁾을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 제상모드는 난방모드 운전 중에 필요에 따라 선택되며 제상모드가 작동되면 사방절환밸브는 난방모드에서 냉방모드 위치로 변환되고 압축기는 빠른 시간 내에 제상을 수행할 수 있도록 60Hz로 작동된다. 또한 실외기 팬과 실내기 팬은 정지되어 실내로 냉풍이 유입되는 것을 방지하고 모든 전자팽창밸브는 열린 상태로 작동된다. Fig. 3은 퍼지 제어기의 구성을 나타낸 것으로 제상 제어를 위한 입력변수로 실외 공기 입출구 온도차 ΔT 와 압축기 입출구 냉매 압력차 ΔP 를 사용하였고 출력변수로 제상 지속시간 U^{crisp} 을 선정하였다.

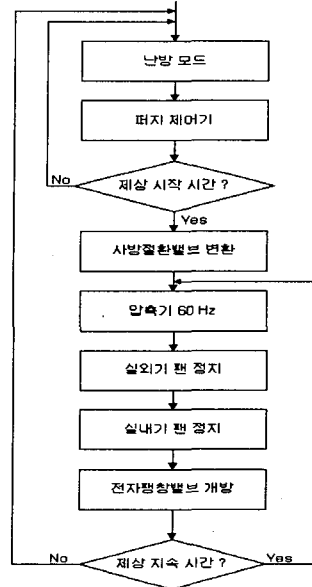


Fig. 2 Defrost mode.

3.1 퍼지화

입력변수인 실외 공기 입출구 온도차와 압축기 입출구 냉매 압력차 그리고 출력변수인 제상 지속시간을 퍼지화하기 위하여 연속 삼각형 멤버십 함수를 사용하였다.

실외 열교환기 표면의 서리층이 성장⁽⁸⁾함에 따라 공기 유동이 감소하고 실외기 입구와 출구의 공기 온도차가 감소한다. 선택된 시스템이 정상적

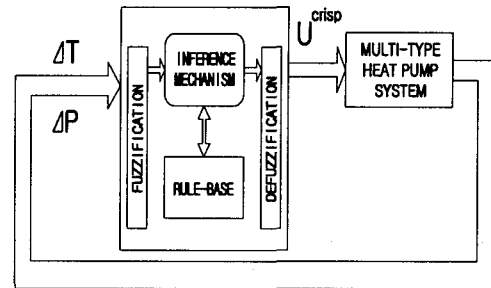


Fig. 3 Fuzzy defrost control block diagram

인 난방운전을 할 경우 실외기 입출구 공기 온도차는 일반적으로 3°C 이상을 유지하지만 착상이 진행됨에 따라 온도차가 점차 감소하여 1.5°C 이하로 감소할 경우 각 실내기에서 요구되는 부하를 만족시키지 못하게 되어 제상이 요구되기 시작함으로 온도차의 크기에 따라 Fig. 4(a)와 같이 SM, MID, LA로 구분하여 입력변수로 사용하였다.

정상적인 난방운전에서의 압축기 입출구 냉매압력차는 9.5kgf/cm² 이상을 유지하지만 착상이 진행됨에 따라 압력차가 점차 감소되어 8.8kgf/cm² 이하로 되면 제상이 요구되기 시작함으로 압력차의 크기에 따라 Fig. 4(b)와 같이 SM, MID, LA로 구분하여 입력변수로 사용하였다.

출력변수로 선택한 제상 지속시간을 최대 9분으로 가정하였고 Fig. 4(c)와 같이 SM, MID, LA로 구분하여 사용하였다.

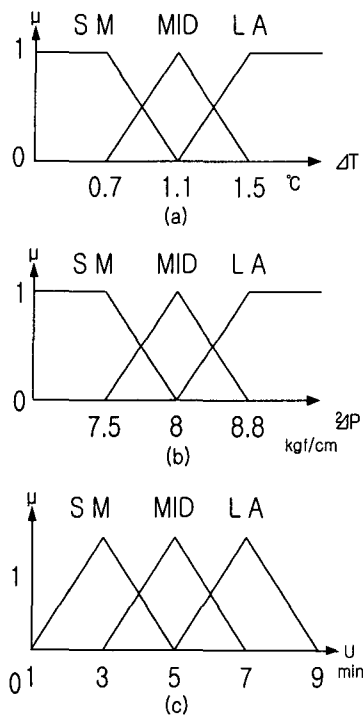


Fig. 4 Fuzzification of input and output variables.

Table 1 Fuzzy rules for defrost control

U		ΔT		
		SM	MID	LA
ΔP	SM	LA	LA	MID
	MID	MID	MID	SM
	LA	MID	0	0

3.2 제어규칙

입력변수들과 출력변수 사이의 퍼지 제어규칙은 전문 지식과 실험에 의하여 Table 1과 같이 결정하였으며 여기서 0은 제상모드가 아닌 정상적인 난방모드를 의미한다.

3.3 추론기

퍼지 제어기의 제어값을 추론하기 위하여 전건부 적합도 중 최소값을 이용하여 각 규칙의 적합도를 구하고 후건부의 퍼지집합에 반영시켜 각각 규칙들의 추론 결과를 구한 후 이들을 모아서 최대 연산을 이용하여 최종적인 추론결과 $\mu(i)$ 를 얻는 방법인 최소-최대법(Min-Max method)을 사용하였다.^(9,10)

3.4 비퍼지화

제상 지속시간을 결정하기 위해서는 추론기로부터 연산된 최종 추론 결과값을 수치값으로 변환하는 비퍼지화 과정이 필요하다. 비퍼지화 방법은 여러 가지가 있으나 여기서는 식(1)과 같은 무게중심법(Center of gravity)⁽¹¹⁾을 사용하였으며

$$U^{crisp} = \frac{\sum b_i \int \mu(i)}{\sum \int \mu(i)} \quad (1)$$

여기서 U^{crisp} 는 수치값으로 변환된 제어값이며 b_i 는 멤버십 함수의 면적 중심값을 나타낸다.

4. 시험결과 및 분석

개발된 퍼지 제상 제어 알고리즘의 유효성을 확인하기 위하여 동적환경조성챔버⁽¹²⁾ 내에 설치된 멀티형 히트펌프 시스템을 사용하여 기존 제상 제어 알고리즘과 개발된 퍼지 제상 제어 알고리즘을 비교 시험하였다. 현재 시판되고 있는 히트펌프에 적용되고 있는 실외 열교환기 입구 냉매 온도가 -5°C 이하로 1분 이상 유지될 때 제상모드가 시작되고 냉매 온도가 25°C 이상으로 1분 이상 유지될 때 제상이 종료되는 알고리즘을 기존 제상 제어 알고리즘으로 가정하였다.

온도 측정을 위하여 T형 열전대를 사용하였고 $0\sim 500\text{psi}$ 측정범위를 가진 전자압력센서를 사용하여 압축기 입출구 냉매 압력을 $\pm 1\%$ 의 정확도로 측정하였으며 실외 챔버내의 상대습도는 $5\sim 95\%$ 측정범위와 $\pm 5\%$ 의 정확도를 가지는 트랜스미터 습도센서를 사용하였다. 시스템의 소비전력 측정은 $0\sim 600\text{kW}$ 측정범위와 $\pm 1\%$ 의 정확도를 가진 다기능 파워 메타를 사용하였으며 풍속 측정을 위하여 $0\sim 40\text{m/s}$ 까지 $\pm 1\%$ 정확도로 측정 가능한 풍속계를 사용하여 측정된 후 적절히 구축된 데이터 처리 시스템을 사용하여 데이터를 수집하고 분석하였다.

실외기용 동적환경조성챔버내의 상대습도는 85% 로 일정하게 유지하였고 온도는 Fig. 5에서 보듯이 난방 표준조건⁽¹³⁾인 7°C 로 유지하다 서서히 온도를 1°C 로 하강시켜 적상 조건을 조성하였으며, 각각의 실내기용 동적환경조성챔버에는 1500kcal/h 의 냉방부하를 지속적으로 공급하였고 멀티형 히트펌프 시스템의 실내기에 의해 실내 온도를 21°C 로 유지하였다.

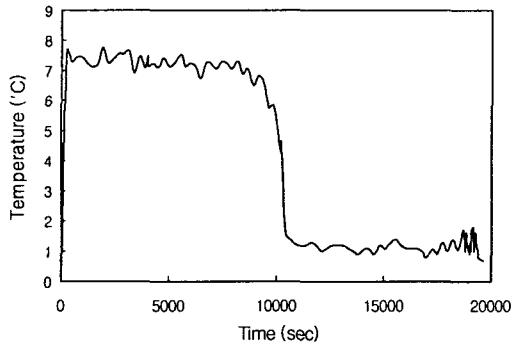


Fig. 5 Outdoor environmental chamber temperature.

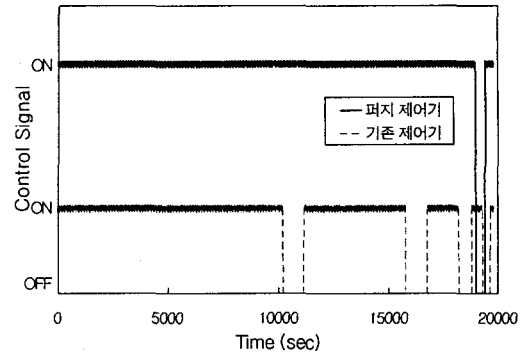


Fig. 6 Defrost control signal.

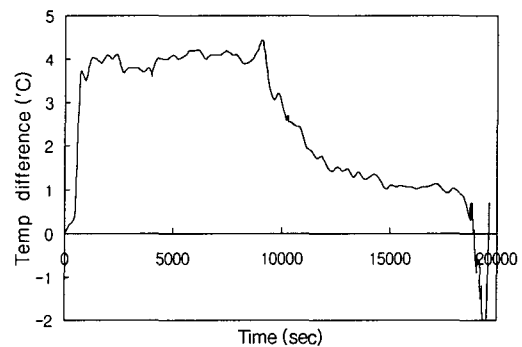


Fig. 7 Outdoor unit air temperature difference.

사방절환밸브에 공급되는 전압을 측정하여 기존 제어기와 퍼지 제어기를 사용한 경우에 대한 실제 제상 시작시간과 제상 지속시간을 Fig. 6에 나타내었다. 실선은 퍼지 제어기를 사용한 결과이고 점선은 기존의 제어기를 사용한 결과이다. 퍼지 제어기를 사용한 경우 Fig. 7에서 보듯이 18753초 경과 후 실외 공기 입출구 온도차가 0.83°C 로 감소되어 입력변수 ΔT 는 SM과 MID에 포함되어 있고 Fig. 8에서 보듯이 압력차가 8.47kgf/cm^2 로 감소되어 입력변수 ΔP 는 MID와 LA에 포함되어 있으며 Table 1과 최소-최대법과 무게중심법을 사용하여 제상 지속시간 U_{crisp} 가 결정되어 312초동안 제상운전이 지속됨을 확인할 수 있었다. 또한 기존 제어기를 사용한 경우는 Fig. 9에서 보듯이 실외 열교환기 입구 냉매 온도가 -5°C 이하로 감소되어 10209초에서 930초간,

15775초에서 973초간, 18210초에서 586초간, 19303초에서 346초간 제상운전이 지속됨을 확인하였다. 동일 조건하에서 퍼지 제어기를 사용한 경우 1회의 제상모드가 작동되었으나 기존 제어기를 사용한 경우 4회의 제상모드가 작동되는 것을 확인할 수 있었으며 따라서 개발된 퍼지 제어기를 사용할 경우 빈번한 제상모드의 작동으로 인한 단점을 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

기존 제어기와 퍼지 제어기를 적용한 시험결과 중에서 Fig. 10에는 실내기 난방용량을, Fig. 11에는 소비전력을, 그리고 Fig. 12에는 시스템의 성적계수를 비교하여 나타내었다. 시험 기간 동안의 평균 소비전력은 기존 제어기의 경우 2.90kW 퍼지 제어기의 경우 2.79kW, 실내기 평균 난방용량은 각각 6286kcal/h, 6402kcal/h 시스템의 평균 성적계수는 각각 2.52, 2.67로 되어 개발된 제어기를 사용할 경우 기존 제어기의 경우에 비해 4% 소비동력 절약과 2% 난방용량 증가로 6%의 효율 향상을 확인하였다. 빈번한 제상모드가 작동될 경우 난방모드시의 실외 열교환기의 저온·저압 냉매와 제상모드 변환시의 고온·고압 냉매가 혼합됨으로 시스템의 비효율성이 증가하고 제상모드 기간 중에는 제상을 위하여 전력을 사용하지만 난방용량은 제공해 주지 못함으로 그에 따라 난방능력이 감소되고 성적계수가 저하됨을 알 수 있었다.

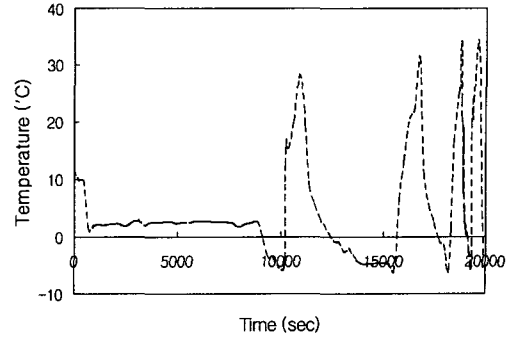


Fig. 9 Outdoor heat exchanger inlet refrigerant temperature.

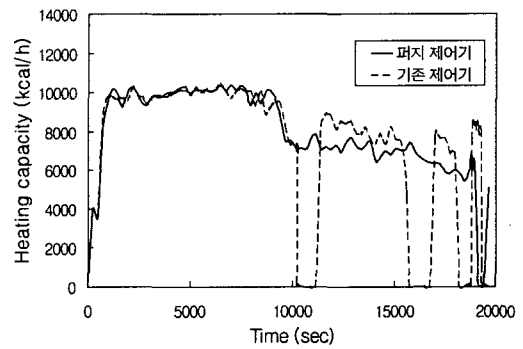


Fig. 10 Indoor unit heating capacity.

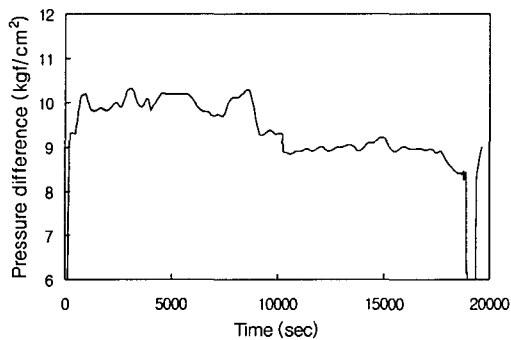


Fig. 8 Compressor refrigerant pressure difference.

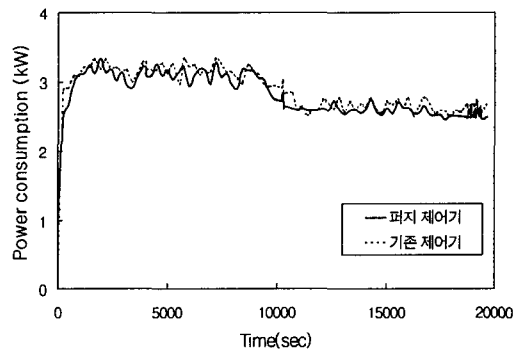


Fig. 11 Power consumption.

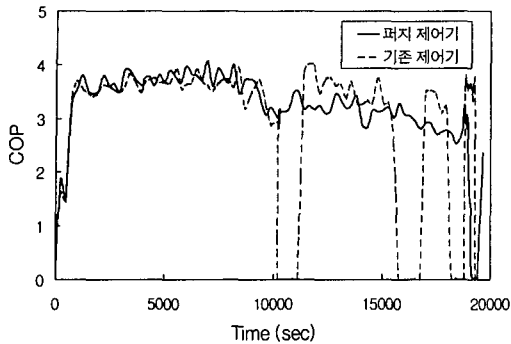


Fig. 12 Coefficient of Performance.

5. 결론

멀티형 히트펌프 시스템의 퍼지 제상 제어 알고리즘을 개발하여 적용한 후 제상시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 퍼지 제상 제어 알고리즘의 입력변수로 실외 공기 입출구 온도차와 압축기 입출구 냉매 압력차를 선택하고 출력변수로 제상지속시간을 선택한 후 퍼지론을 개발하여 적용한 결과 적절한 제상이 이루어짐을 확인하였다.

(2) 퍼지 제상 제어 알고리즘과 기존의 제상 제어 알고리즘을 동일 조건하에서 시험한 결과 퍼지 제상 제어 알고리즘을 적용한 경우 기존 제상 제어 알고리즘을 적용한 경우에 비해 제상 모드 전환 횟수가 현격히 줄어들었으며 평균 난방용량이 증가하였고 평균 성적계수가 향상되었음을 확인하였다.

따라서 개발된 퍼지 제상 제어 알고리즘을 멀티형 히트펌프 시스템의 제상 제어에 적절히 적용하면 시스템의 수명 연장은 물론 평균 난방용량의 증가와 에너지의 효율적인 사용도 기대할 수 있다.

참고문헌

- Han, D., 1998, The development of multi-type air conditioning system, Report #2, Ministry of Commerce, Industry and Energy.
- Han, D., 1999, The development of multi-type air conditioning system, Final report, Ministry of Commerce, Industry and Energy, 1996-E-ID02-P-08.
- Zadeh, L. A., 1968, Fuzzy Algorithms, Information and Control, Vol. 12, pp. 338-353.
- Zadeh, L. A., 1973, Outline of a new approach to the analysis of complex system and decision process, IEEE Transactions, System, Man, and Cybernetics, Vol. 3, No. 1, pp. 28-44.
- Mandani, E. and Assilian, S., 1975, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, International Journal of Man-Machine studies, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13.
- Lee, C., 1990, Fuzzy logic in control system : fuzzy logic controller-parts I - II, IEEE Transactions, Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, pp. 404-435.
- Han, D. and Kim, K. H., 1999, Fuzzy defrost control of multi-type heat pump system, Proceedings of SAREK, pp. 546-550.
- Lee, K. S., 1995, A development of the method for the thermal analysis of finned tubed heat exchanger operated under frosting conditions, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 57-61.
- Sugeno, M., 1985, International Applications of Fuzzy Control, Elsevier Science Publishers, pp. 57-62.
- Kosko, B., 1992, Neural Networks and Fuzzy Systems, Prentice-Hall, pp. 48-56.
- Passino, Kevin M. and Yurkovich Stephen, 1998, Fuzzy Control, Addison-Wesley, pp. 41-46.
- Han, D. and Kim, K. H., 1998, Design and control of dynamic environmental chamber, Proceedings of SAREK, pp. 656-661.
- Korean Standards Association, 1985, KS B 6369 Package Air Conditioner Test Manual, Korean Standards.