

Temperature Control of Greenhouse Using Ventilation Window Adjustments by a Fuzzy Algorithm

Chung, Tae Sang* · Min, Young Bong¹ · Moon, Gyeong Kyu¹

Dept. of Mechanical Engineering, Chinju Nat'l Univ., Chinju 660-758, Korea

¹Faculty of the Agricultural Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ., Chinju 660-701, Korea

Abstract

This study was carried out to develop a fuzzy control technique of ventilation window for controlling a temperature in a greenhouse. To reduce the fuzzy variables, the inside air temperature slop was taken as one of fuzzy variables, because the inside air temperature variation of a greenhouse by ventilation at the same window aperture is affected by the difference between inside and outside air temperature, outside wind speed and the wind direction. Therefore, the antecedent variables for fuzzy algorithm were used the control error and its slop, which was same value as the inside air temperature slop during the control period, and the conclusion variable was used the window aperture opening rate. Through the basic and applicative control experiment with the control period of 3 minutes, the optimum ranges of fuzzy variables were decided. The control error and its slop were taken as 3 and 1.5 times compared with target error in steady state, and the window opening rate were taken as 30% of full size of the window aperture. To evaluate the developed fuzzy algorithm in which the optimized 19 rules of fuzzy production were used, the performances of fuzzy control and PID control were compared. The temperature control errors by the fuzzy control and PID control were lower than 1.3°C and 2.2°C respectively. The accumulated operating size of the window, the number of operating and the number of inverse operating for the fuzzy control were 0.4 times, 0.5 times and 0.3 times of those compared with the PID control. Therefore, the fuzzy control can operate the window more smooth and reduce the operating energy by 1/2 times of PID control.

Key words: fuzzy, greenhouse, ventilation control, temperature control

* Corresponding author

서 론

온실의 실내온도가 작물 생육적온의 범위를 벗어날 때 냉방을 필요로 하며 이때 온실의 온도강하를 위해 환기창을 개폐하여 환기하는 방법이 우선적으로 적용된다. 종래의 환기제어 방법은 단순 On-Off제어였으나 최근에는 PID제어 등이 실용화되고 있다(Chung, 1995). 온실의 환기제어는 환기창을 열어 외부의 찬 공기를 실내로 유입시켜 온실의 온도를 떨어뜨리기 위하여 주로 이용되며 환기속도는 환기창열을량, 실내외 온도차 및 외기풍속의 영향을 받는다. 이 중 실내외 온도차와 외기풍속은 인위적으로 조장이 불가능한 것으로 환기제어에 입력으로 고려하지 않을 경우 외란으로 작용하여 제어성능을 떨어뜨리며, 특히 변화가 심한 외기풍속의 영향은 제어된 실내온도의 변동을 심하게 하

고 환기창의 빈번한 여닫음을 초래하여 작동 에너지 낭비와 작동기의 수명을 짧게 하는 현상이 나타나고 있다. 네델란드 온실에 사용되는 환기제어의 경우 대부분 비례제어와 PID제어를 사용하고 있으며, 풍속의 세기와 실내외온도차에 따라 각 제어게인을 조정하여 환기창의 빈번한 작동을 방지하고 정밀한 온도제어가 가능하게 하고 있다(Kamp and Timmerman, 1996). 일반적으로 환기에 대한 제어계 모형은 비선형으로 나타나며 풍속, 풍향 및 실내외온도차의 영향을 고려하려면 PID제어의 경우 각 제어시점마다 적합한 게인의 조정이 불가피 해진다. 이 경우 PID제어 시스템은 계속요소가 많아져 센서의 수가 4개로 늘어나게 된다. 비선형의 경우 퍼지제어 알고리즘을 도입하면 효과가 좋을 것으로 알려져 있지만, 온실의 환기제어에 퍼지 알고리즘의 간편한 도입을 위해서는 필요한 퍼지변수와 제어

규칙을 적합하게 구성하여야 한다. 실내외온도차와 외기풍속의 세기와 풍향은 실내온도 변화속도에 영향을 미치므로 실내온도의 변화속도를 퍼지 변수의 하나로 고려하면 이들 영향은 자연스럽게 고려될 것이고 계측요소는 실내온도 하나이기 때문에 센서는 하나만 필요하다는 발상으로부터 퍼지제어의 시도를 하게 되었다. 본 연구는 환기창 조작에 의한 온실의 온도제어 시 실내외온도차와 외기풍속을 입력변수로 잡지 않아도 스스로 그 영향을 고려하게되는 퍼지 알고리즘을 도입함으로써 제어정밀성을 높이고, 빈번한 환기창 조작이 일어나지 않는 유연성을 확보하고자 실시하였다. 또한 PID 제어와 비교하여 퍼지제어의 상대적 성능을 평가하므로써 온실의 환기냉방제어의 유리한 제어기법을 확립할 수 있는 기초자료를 얻고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 대상온실

본 연구에 사용한 온실은 단동식 철평유리온실로서 폭×길이×축고×동고가 9.4 m×24 m×3.75×5.5 m이었다. 대상 온실의 천창은 전동식 랙 앤 피니언 방식이며 축창은 권취식 개폐기로 되어있었다. 천창은 폭 1.2 m이고 길이 22.5 m이며, 천창을 완전히 열거나 닫는데 걸리는 시간은 57초로서 일정한 속도로 움직였다. 축창은 길이 22.5 m로 개폐구간이 92 cm이며, 비닐을 감아올리는 부하의 영향으로 축창을 완전히 여는데 걸리는 시간은 181초가 소요되었고, 완전히 닫는데 걸리는 시간은 153초가 소요되었다.

2. 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 컴퓨터 계측제어 시스템

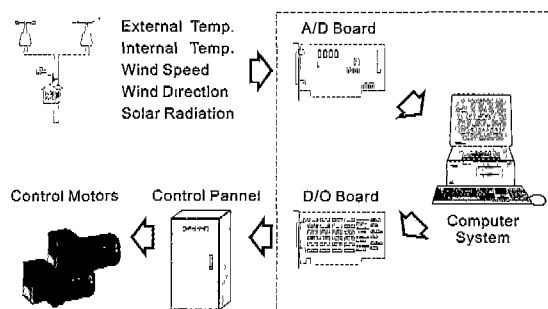


Fig. 1. Experimental system.

으로 구성하였다. 측정대상 환경은 외부의 일사량, 풍향, 풍속 및 외기온도와 실내온도이며, 외부환경 센서는 대상온실 지붕에서 1 m 이상의 높이에 설치하였고, 실내 온도센서는 온실 횡단 중심선에서 양측으로 6 m, 종단중심선에서 2 m되는 6지점에 설치하였다. 논문에 표시된 실내온도는 6점의 온도를 10초간 수집하여 평균치로 하였으며, 퍼지 및 PID 제어시에 이용하는 데이터는 제어주기와 일치하는 시점의 값을 취하였다. 환기창의 개폐는 환기창열음량을 시간으로 환산하여 D/O 보드(Board)의 해당 채널로 출력하여 이루어지게 하였다. D/O 보드의 출력은 릴레이와 전자접촉기를 통해 천창과 축창의 모터를 정회전, 역회전 및 정지가 가능하도록 구성하였다. D/O 보드는 리드릴레이(Reed relay)로 구성하였으며 리드릴레이가 온(On)되면 조작반의 24V DC 릴레이를 구동시키고 다시 전자접촉기를 구동시켜 모터를 움직이게 함으로써 전자파 장해로부터 컴퓨터시스템(Computer system)을 보호하여 동작오차가 없게 구성하였다. 온실에 설치하여 본 실험에 이용한 계측과 제어장치의 규격은 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Specifications of control equipments.

Equipment	Specification
Computer	Intel 80486 DX4 - 100MHz, RAM 16Mb
OS, language	Windows 95, Boland C++ ver 4.5
A/D converter	Resolution : 12bit 32 channel single-ended Reference voltage : ± 5V bipolar
D/O board	32 channel Reed relay output

Table 2. Specifications of sensors.

Sensor	Specification
Temperature	T type thermocouple Range : -130°C-400°C max
Solar radiation	Element : photo silicon diode Range : 0-1500 W · m ⁻² Error : 30 W · m ⁻²
Wind direction	Element : potentiometer (5KΩ) Range : 0-360°
Wind speed	Element : photo coupler (0500Hz pulse) Range : 0.5 m · s ⁻¹ -45 m · s ⁻¹ Error : ± 0.6 m · s ⁻¹

3. 실험방법

1) 기초환기실험

기초환기실험은 퍼지변수와 그 범위의 결정을 위하여 실시하였고, 환기창의 열음정도에 따른 실내온도 변화와 환기창을 일정량 열었을 때 외기풍속의 세기에 따른 실내온도 변화실험으로 나누어 실시하였다. 환기창열음에 의한 온실내 온도변화는 태양복사강도, 온실 벽체 열관류 등에 의한 온실 내 온도변화보다 매우 빠르므로 환기창열음 시에 태양복사 및 열관류에 의한 실내온도 변화량은 무시하였다. 환기창의 열음정도에 따른 실내온도 변화를 조사하기 위한 실험은 9월의 진주지역 대상온실에서 천창과 측창을 모두 닫고 실내외 온도차가 10°C로 일정수준에 달하였을 때 천창만 일정량 열은 경우와 천창을 완전히 열고 측창을 일정량 열은 경우에 대하여 실시하였다. 분석대상 자료는 외기풍속이 $1 \pm 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 수평면 일사량이 400~500 W·m² 사이에서 일정하게 유지 할 때로 한정하였다. 외기풍속은 온실이 남북방향인 것을 고려하여 북동에서 남동풍 사이의 풍향일 때만 실험대상으로 하였다. 외기풍속의 세기에 따른 실내온도 변화실험은 초기 실내외온도차가 10°C일 때 천창 100%, 측창 33%로 열은 경우에 대하여 실시하였다. 이때 분석대상 자료는 평균풍속이 $1 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 사이에서 $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 변동으로 일정하게 유지되고 다른 환경은 환기창의 열음정도에 따른 실내온도 변화실험과 거의 동일한 때로 한정하였다.

2) 현장실험

현장실험은 퍼지제어의 퍼지변수 범위조정과 PID제어의 게인조정 및 제어성능을 비교하기 위하여 환기창 조작에 의한 실내온도 조절이 가능한 9월과 10월 사이에 실시하였다. 제어성능 비교실험은 제어응답성능이 가장 우수하다고 판단한 퍼지변수의 범위와 PID게인을 적용하였다. 기상환경이 일사량 400~500 W·m², 북동에서 남동풍 사이의 평균 외기풍속 1.5~4 m·s⁻¹ 및 외기온 15~23°C 사이의 조건일 때 두 제어를 교대로 반복하여 각 4회의 현장 성능실험을 실시하였다. 각 제어성능의 차이를 알아보려고 실내온도와 설정온도의 차이가 $7 \pm 1^\circ\text{C}$ 일 때 제어를 시작하여, 제어주기 동안의 실내온도 변화가 1°C 이내로 되는 정정시간(Settling time), 정상상태 오차, 제어 시작점에서 60분 경과 시까지 환기창의 조작회수, 환기창 작동방향이 비편

회수(반전조작 회수) 및 누적 조작량을 조사하였다.

3) 제어알고리즘의 구성

가) 퍼지제어

퍼지변수는 입력변수로서 제어오차(실내온도-설정온도, E)와 제어주기 동안의 실내온도 변화량(ΔE), 출력변수로서 환기창열음량 증분(ΔU)으로 결정하였다. 일반적 제환제어방법에서는 환기창열음량은 제어오차만으로 결정하지만 정밀한 제어를 위해서는 실내외온도차와 외기풍속의 크기에 따라 환기창열음량을 보정하는 것이 필요하다. 그러나 실내온도 변화의 속도는 환기창열음량, 실내외온도차 및 외기풍속의 영향을 모두 받는다고 가정할 수 있으므로 본 연구에서는 제어주기 동안의 실내온도 변화량을 대체 퍼지변수의 하나로 정하였다. Table 3은 E와 ΔE에 따른 ΔU를 결정하는 퍼지분할과 소속함수를 나타낸 것이다. Table 3중의 각 기호 ZO=Zero, N=Negative, P=Positive, S=Small, M=Medium 및 B=Big을 뜻하며, 환기창 조작은 P의 경우 환기창 열음, N의 경우 환기창 닫음으로 정하였다.

전건부 퍼지변수가 2개이고 분할수를 7로 하였을 경우 제어규칙은 49개로 되지만 규칙의 이용도가 낮거나 규칙의 적용가능성이 없는 부분을 삭제하여 Table 3과 같이 제어규칙을 19개로 정하였다. 각 변수 및 소속함수 값의 범위와 크기는 기초환기실험을 통해 초기 값을 정하였고 현장실험을 통해 최적 값으로 수정하였다.

나) PID제어

PID제어는 다음과 같은 수식으로 환기창열음량(%)을 결정하는 일반적 방법을 이용하였다. 즉, 환기창열음량 증분 ΔU(k)에 대한 시계열 방정식은 다음 식을 이용하였다.

Table 3. Fuzzy production rules for decision of the opening rate of ventilation window aperture (ΔU) depending on control error (E) and its slope (ΔE).

ΔE \ E	E							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB				PM	PB			
NM					PM			
NS		NM		ZO	PS			
ZO		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS					NS	ZO		PM
PM						NM		

$$\Delta U(k) = U(k) - U(k-1) = K_P\{E(k) - E(k-1)\} + K_I E(k) + K_D\{E(k) - 2E(k-1) + E(k-2)\} \quad (1)$$

위 식에서 각 계인의 최적 값은 $K_P=0.0194$, $K_I=0.0479$, $K_D=0.0338$ 로서 기초환기실험을 실시한 결과 자료로부터 Takabashi(1983)가 제안한 방법에 의하여 초기 값을 부여하고, 현장 조정실험을 통하여 최적화 하였다.

다) 제어출력과 환기창조작

퍼지 알고리즘의 출력, 즉 환기창열음량 증분은 Max-Min 합성중심법(Sugeno, 1988; Hiroda, 1990)에 의하였으며, PID 알고리즘의 출력은 (1)식의 결과를 이용하였다. 환기창의 열음량은 구동하는 모터의 가동 시간에 관계되므로 최종 제어출력인 가동시간은 환기창의 완전 여닫음 시간에 알고리즘의 출력을 곱하여 결정하였다. 기초환기실험에서 천창과 측창의 완전개방 시 환기효과비율은 천창이 25%, 측창이 75%로 나타났다. 환기창의 열음조작은 천창을 먼저 열고, 천창이 100% 열린 이후 측창을 열어가며, 닫음조작은 반대 수순으로 하였다. 따라서 천창과 측창의 열음량은 전체 누적 열음량으로부터 천창에 우선 배분하고 남은 양을 측창에 배분하였다. 예를 들어 퍼지 및 PID출력의 결과 30%의 누적 환기창열음이면 천창 100%, 측창 7% 열음으로 환기창이 조작되도록 하였다. 계산된 환기창의 누적 열음량은 실제로 열린량과는 누적오차가 발생하므로, 계산된 완전 열음과 닫힘단계에서 충분한 여닫음 시간을 주어 오차를 보정하여 환기창 개폐조작의 정확성을 기하였다.

라) 계측제어 프로그램

모든 계측제어 프로그램은 볼랜드(Boland) C를 이용하였다. 기초환기실험과 현장실험 모두 계측과 제어가 동시에 실행되는 프로그램으로 작성하였다. 기초환기실험은 환기창을 모두 닫은 상태에서 실내외온도차가 일정값에 이를 때 환기창을 일정량 열게 하는 전 과정을 컴퓨터로 동작토록 하고 그때의 환기창 조작량과 실내외 환경을 계측하여 파일에 저장하여 분석자료로 활용토록 하였다. 현장실험은 퍼지와 PID제어의 스텝입력에 대한 제어성능을 조사하기 위하여 환경계측, 각 제어알고리즘의 출력계산, 환기창 개폐조작의 순으로 제어프로그램을 작성하고 그 때의 환경과 환기창조작량을 파일에 저장하여 분석자료를 취득하였다.

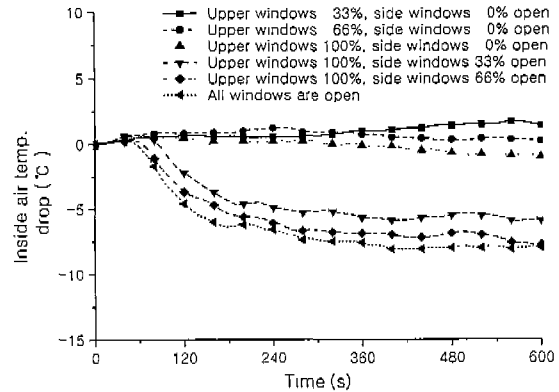


Fig. 2. Inside air temperature history of greenhouse as function of time with the opening size of the window aperture for constant wind velocity of $1 \pm 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

결과 및 고찰

1. 기초환기실험

Fig. 2는 기초환기실험 결과로부터 환기창열음량에 대한 실내온도강하 관계만 나타낸 것이다. 실내온도강하는 환기창열음량(열음폭/환기창완전개폐폭, %)에 비례하여 지수감쇠적으로 이루어지고 온도강하의 정도는 실내외온도차의 범위 내에서 이루어졌다. 실내온도 변화가 1°C 이내로 안정되는 시간으로 정의한 정정시간은 환기창열음량에 관계없이 거의 600초 부근으로 나타났다. 실내온도강하는 환기창열음량에 비례하여 나타났다. 측창을 완전히 닫고 천창을 완전히 열었을 때 실내온도강하는 2°C로 초기 실내외온도차(10°C)의 20% 정도이며 측창과 천창이 완전히 열렸을 때는 실내온도강하가 7.8°C로 나타났다.

환기에 의한 실내온도 제어는 실내온도가 설정온도보다 높을 경우 천창단계적열음 후 측창단계적열음 순으로, 실내온도가 설정온도보다 낮을 경우는 측창단계적열음 후 천창단계적열음 순으로 조작되는 것이 바람직하다고 볼 때 측창열음에 대한 천창열음의 효과는 약 25% 정도로 계산되었다.

Fig. 3은 천창을 100% 열고 측창을 33% 열었을 때 외기풍속 변화에 따른 실내온도강하정도를 나타낸 것이다. 표시한 외기풍속은 실험기간 내에서 풍속변화가 $\pm 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 이내인 평균풍속으로 계산한 것이다. 대체로 정정시간은 400~600초 사이로 환기창을 열어 환기에 의한 실내온도 하강이 일정수준에 달하는 시간

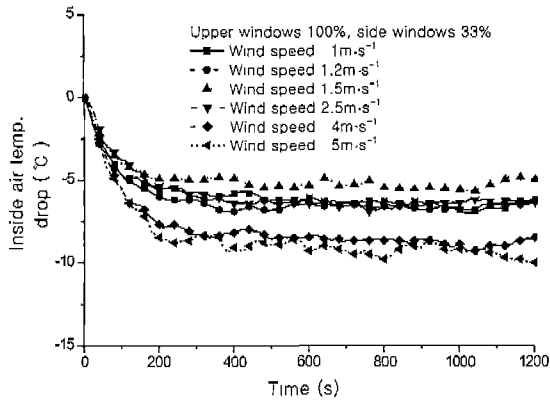


Fig. 3. Effect of wind speed on inside air temperature drop.

은 약 10분이 걸림을 알 수 있었다. 풍속이 1, 1.2, 1.5, 2.5, 4.0, 5.0 $m \cdot s^{-1}$ 로 세어짐에 따라 실내온도강하는 6.2, 6.7, 6.3, 6.5, 8.2, 8.8°C로 풍속 2.5 $m \cdot s^{-1}$ 까지는 풍압의 영향이 없고 그 이상에서 풍압의 영향이 있었던 것으로 나타났다. Fig. 2와 Fig. 3에서 알 수 있듯이 실내온도 변화는 대체로 환기창열유량과 풍속에 비례하여 실외온도 이내로 하강하므로 환기창열유량과 외기풍속은 실내온도 기울기에 영향을 미치는 요인으로 판단되었다.

따라서 퍼지변수는 전건부 입력변수(Antecedent variable)로서 제어오차 E (실내온도-설정온도)와 그 증분 ΔE (실내온도 증분), 후건부 조작변수(Conclusion variable)로서 환기창열유량 증분 ΔU 로 결정하여도 외기풍속과 실내외온도차의 영향을 고려 할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 제어주기는 제어입력이 시작되어 어느 한계 이상의 제어출력이 얻어지는 기간으로 정하여 제어조작 에너지를 줄이고 제어정밀성을 확보하여야 하는데 본 논문에서는 Chung(1995)의 실험에서 어느 정도 확립한 3분을 제어주기로 결정하였는데 3분 이내에 실내온도 강하는 65%로 이루어졌다.

2. 퍼지변수의 범위

기초환기실험 결과 제어주기 3분 동안의 최대 실내온도강하는 환기창 100% 열음에서 7.5°C로 추정되었다. 실제제어에서는 1회의 환기창 열음량을 너무 크게 하면 실내온도의 진동과 큰 진폭을 수반하므로, 1회 제어에서 최대 환기창열유량 증분을 30%로 제한한다면 제어주기 3분내에 최대 실내온도강하는 2.25°C로

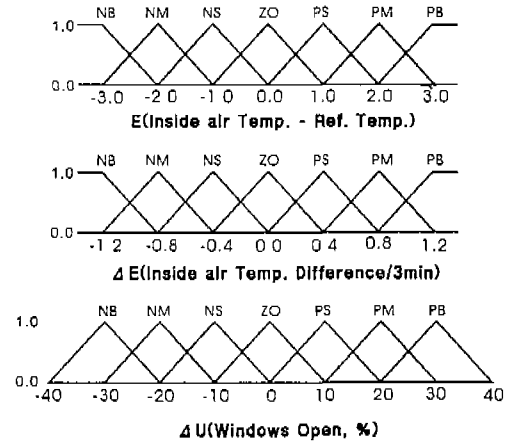


Fig. 4. Optimum partition of fuzzy variables.

계산된다. 퍼지변수의 범위결정을 위한 변수조정실험에서 ΔE 와 ΔU 의 초기값 범위는 -2.25~+2.25°C와 -30~+30%로 잡았다. 그리고 E 는 경험적 수준에서 제어 목표오차($\pm 1^\circ C$)의 3배로 하였다. Fig. 4는 수차례의 조정실험을 실시하여 최적의 퍼지변수 범위를 결정된 결과이다. 초기에 결정한 범위와 달라진 것은 ΔE 로서 초기값 2.25보다 작은 1.2로 나타났다. 이것은 실제의 현장제어시 정상상태에서 일어나는 실내온도 변화폭은 자기 때문인 것으로 판단되며, 제어 목표오차의 1.5배 수준까지는 제어오차의 차이가 거의 없었다. 1회의 최대 환기창열유량 증분은 30%가 최적이었고 계산의 편리함을 위하여 각 소속함수의 분할을 Fig. 4와 같이 조정하였다.

3. 현장 실험

최적의 퍼지변수의 범위결정과 PID 게인 결정을 위한 조정실험을 거친 후 제어성능 평가를 위한 현장실험은 9월과 10월 사이에 8차례 실시하였고 Fig. 5와 Fig. 6은 제어성능이 비교적 우수한 퍼지와 PID제어의 결과를 나타낸 것이다. 제어기간 중 외기온도와 일사량은 완만한 변화를 나타내어 이 두 요인은 제어출력의 변동에 큰 영향을 주지 않은 것으로 생각된다. 제어량인 실내온도의 변화만을 고려할 때 퍼지제어와 PID제어는 비슷한 결과를 나타내었다. 제어가 안정된 상태에서 제어오차는 퍼지제어와 PID제어 모두 1°C 이내로 나타났다. 외기풍속은 퍼지제어가 실시될 때 평균 4 $m \cdot s^{-1}$ 이고 변동폭은 2~7 $m \cdot s^{-1}$, PID제어가 실시될

퍼지제어에 의한 자연환기온실의 온도제어

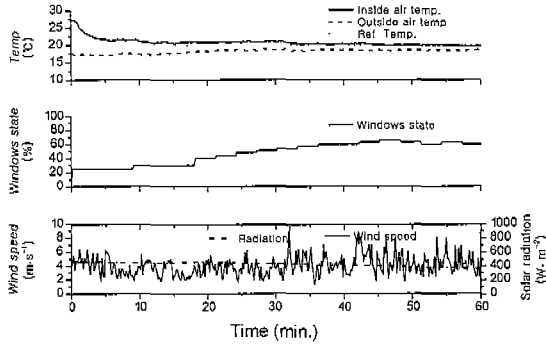


Fig. 5. Result of fuzzy control.

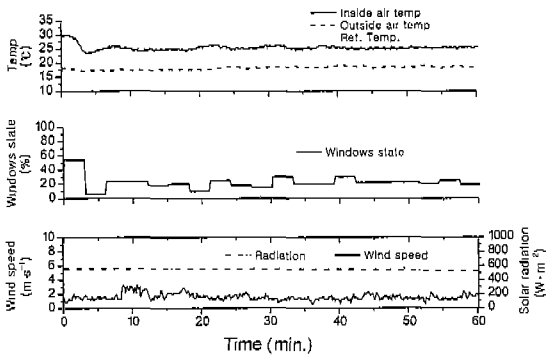


Fig. 6. Result of PID control.

때 평균 $2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 이고 변동폭은 $1 \sim 3\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 퍼지제어에서 풍속의 영향을 많이 받았다. 그러나 실제 제어 오차는 비슷한 결과를 나타내었고, 환기량 조작량 변동은 오히려 퍼지제어의 경우가 적었다. 이것은 퍼지제어의 경우 실내온도 증분을 고려하여 풍속의 영향에 의한 온도변화에 빠르게 대응하여 제어출력을 계산하는 반면 PID제어에서는 고정된 계인을 사용하여 제어출력을 계산하기 때문인 것으로 생각된다. 제어출력에 의한 환기량의 조작량 변동은 초기의 실내외온도차가 큰 과도상태 구간에서 크고 정상상태 구간에서는 작게 나타났으나 PID제어의 경우 실내외온도차가 클 때 환기량의 열음 조작량이 너무 크고 열림과 닫힘의 반복동작이 일어났다. 높은 실내온도를 낮추어야 할 때 환기량조작을 단계적으로 열어가야 환기량조작 에너지가 적게 들어가고, 또한 바람 등에 의한 실내온도 기울기가 갑자기 크게 될 때에도 환기량의 조작변동이 심하지 않게 하여야 바람직한 제어라 볼 때 PID제어는 약간의 문제점이 있다고 판단된다.

Table 4. Control performance.

Control method	Average wind speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Settling time (min.)	Error of steady state ($^{\circ}\text{C}$)	
Fuzzy	1	2.3	6.4	0.6
	2	3.6	16.9	0.8
	3	4.0	10.1	1.1
	4	2.4	18.3	1.3
PID	1	2.2	14.8	1.0
	2	3.7	4.2	2.2
	3	1.5	8.3	1.6

Table 4는 제어기법별 현장실험에서 정정시간과 제어오차를 비교한 것으로 실내온도 변화가 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내로 안정되는 정정시간은 퍼지제어가 길고, 정상상태 제어오차는 작게 나타났다. 최대 제어오차는 퍼지제어가 1.3°C 이며, PID제어는 2.2°C 로 나타나 퍼지제어가 우수한 성능을 나타내었다. 두 제어 모두 풍속의 세기에 따른 제어성능의 차이는 나타나지 않았는데 이것은 동일 풍속이라도 풍향에 따른 환기량의 차이가 실내온도 변화에 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

Table 5는 제어기법별 환기량조작량 변동을 조사한 것이다. 퍼지제어의 경우 제어시작 직후의 과도상태에서는 환기량조작회수가 평균 1.5회, 환기량을 열다가 닫거나 닫다가 여는 반전조작회수가 0회이며 정상상태에서 9.2회 및 2.7회인 것에 비해 PID제어는 각각 3회, 1.5회, 15회 및 9.5회로, 퍼지제어가 PID제어에 비해 환기량 조작회수가 적으며, 반전조작회수도 적은 것으로 나타났다. 환기량의 적산조작량은 과도상태에서 PID제어가 퍼지제어보다 2.83배, 정상상태에서 2.22배로 나타나 동일제어성능에서 볼 때 PID제어는 퍼지제어보다 환기량조작 에너지가 2.5배로 많이 들어가는 것으로 나타났다. 또한 최대 환기량열음량 증분은 퍼지제어의 경우 과도상태에서 18~25%, 정상상태에서 10~22%이며, PID제어의 경우 각각 52~78%, 15~23%로 나타났으며 환기량의 점진적 여닫음은 퍼지제어가 PID제어보다 우수한 결과를 보였다.

이상에서 퍼지변수인 제어오차 ΔE 는 설정온도가 일정할 때 실내온도 기울기와 동일하므로 실내온도 기울기에 큰 영향을 미치는 외기풍속과 풍향의 영향을 대신하는 변수가 될 뿐만 아니라 실내외온도차도 함께

Table 5. Window operating variations.

Control method	Transient state			Steady state			
	Number of operating	Number of inverse operating	Accumulated operating (%)	Number of operating	Number of inverse operating	Accumulated operating (%)	
Fuzzy	1	1	0	30	10	4	51
	2	2	0	50	7	2	38
	3	2	0	30	13	3	48
	4	1	0	25	7	2	26
Average	1.5	0	33.7	9.2	2.7	40.7	
PID	1	7	4	131	12	3	27
	2	1	0	53	17	11	138
	3	2	1	102	14	11	113
	4	2	1	96	17	13	84

고려한 변수로 취급할 수가 있음을 알 수 있었고, 반면에 PID제어는 풍속의 세기와 방향에 따라 각 제어 시점에서 계인의 조정이 필요한 것으로 나타났다. 따라서 퍼지제어는 실내온도 하나만 계속되어도 높은 제어 성능을 발휘하므로 풍속과 풍향에 따라 계인을 조정하는 PID제어보다 대단히 실용적인 제어법으로 판단된다.

퍼지변수는 제어대상의 특성을 잘 아는 전문가의 경험을 주관적 판단에 의해 그 개수와 범위 및 분할을 하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 보다 논리적인 퍼지변수의 개수와 범위 및 분할을 결정하는 과정을 도입함으로써 제어 성능의 향상을 도모하였다. 반복된 현장실험을 통해 Fig. 4와 같은 퍼지변수의 범위와 분할을 결정하였는데, 퍼지변수 E 와 ΔE 의 최적범위는 목표로 하는 정상상태 제어오차의 3배와 1.5배로 하고 ΔU 의 최적범위는 최대 환기량 열림량의 30% 정도로

하였을 때 안정된 제어가 가능하였던 것으로 판단되었다.

Literature cited

1. Chung, T. S. 1995. Ventilation Control by Digital Control Method for Greenhouse. A Doctoral Dissertation, Graduate School of Gyongsang National University (in Korean).
2. Sugeno, Michio. 1988. Fuzzy control. Nitkan-kogyoshinbun. Tokyo. pp.67-96 (in Japanese).
3. Hiroda, Kaori. 1990. Fuzzy Application Note. Kogyochoshakai. Tokyo. pp.6-10 (in Japanese).
4. Takabashi, Yasuhito. 1983. Digital control. Iwanamishoten. Tokyo. p.91-95 (in Japanese).
5. Kamp P.G.H. and G.J. Timmerman. 1996. Computerized Environmental Control in Greenhouses, IPC-Plant, Ede, The Netherlands. pp.176-192.

퍼지제어에 의한 자연환기온실의 온도제어

정태상* · 민영봉¹ · 문경규¹

진주산업대학교 기계공학과, ¹경상대학교 농업공학부

적 요

온실의 환기제어시 외기의 온도와 풍속변화에 보다 유연하게 대처하면서 온도제어성능을 향상시키기 위하여 퍼지제어 알고리즘을 수립하고 제어실험을 실시하였다. 환기창을 열어 환기 시 온실의 실내온도 변화는 실내외온도차 및 외기 풍속의 세기와 방향에 영향을 받으므로 실내온도 기울기를 퍼지변수의 하나로 취급하여 퍼지변수의 수를 줄였다. 설정온도가 일정할 때 제어오차의 증분은 실내온도 증분과 같으므로, 전건부 퍼지변수는 제어오차(실내온도-설정온도)와 그 증분으로 결정하고, 후건부 퍼지변수는 환기창열음량 증분으로 결정하여 실내온도 하나만의 계측으로 제어출력이 가능한 퍼지제어 알고리즘을 구성하였다. 퍼지변수의 범위는 기초환기실험을 통하여 결정한 후 제어주기 3분을 갖는 실제실험 시 최적 값으로 보정하였다. 전건부 퍼지변수인 제어오차와 제어오차 증분의 최적범위는 각각 목표 제어오차의 3배와 1.5배, 후건부 퍼지변수인 환기창열음량 증분의 최적범위는 최대 열립량의 30%로 나타났다. 최적화한 19개의 퍼지규칙을 적용한 퍼지제어 알고리즘을 개발하고 상대적 성능평가를 위하여 최적 계인을 부여한 PID제어와 비교하였다. 퍼지제어와 PID제어의 실내온도 제어오차는 각각 1.3°C, 2.2°C 미만으로 나타났다. 퍼지제어는 PID제어에 비해 환기창 적산열음량, 조작회수 및 반전조작회수가 0.4배, 0.5배 및 0.3배로 적게 나타나 외기풍속과 실내외온도차의 변동에 유연하게 대처하며 환기창의 점진적 여닫음 조장이 가능하고, 조작에너지도 1/2로 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

주제어 : 퍼지, 온실, 환기제어, 온도제어