

# 다중 위상 처리구조를 갖는 온실 복합환경제어 알고리즘 설계

## 방 대 옥\*

### 목 차

#### 요약

#### 1. 서론

#### 2. 복합환경제어 시스템

##### 2.1 시스템 구성

##### 2.2 복합환경제어 알고리즘

#### 3. 온실 환경과 구동기 제어장치 간 관계

##### 3.1 온실 환경요소

#### 3.2 환경조절과 구동제어 장치

#### 3.3 환경요소와 구동제어 장치 간 관계도

#### 4. 다중 위상 처리구조를 갖는 알고리즘 설계

#### 5. 복합환경제어 알고리즘 분석 및 고찰

##### 5.1 알고리즘 분석

##### 5.2 고찰

#### 6. 결론

#### 참고문헌

#### Abstract

## 요약

본 연구는 온실환경의 변화 정도에 따라 환경제어 구동기를 조합하고 제어할 수 있게 하는 다중 위상 처리구조를 갖는 온실 복합환경제어 알고리즘을 설계하고 검증한다. 복합환경제어 시스템은 온실 내외부에 설치된 센서들이 감지한 정보를 복합환경제어기가 분석하여 작물 생육 환경이 유지되도록 각종 구동기를 복합적으로 작동시키는 시스템이다. 복합환경제어기는 복합환경제어 알고리즘으로 제어를 지시하는데, 복합환경제어 알고리즘은 측정장치의 입력값, 구동장치의 상태값, 초기 설정값 등으로 구동기 제어장치 운영에 필요한 결과값을 산출한다. 기존의 알고리즘들은 대부분 반복주기별로 구동기 제어장치들의 제어절차를 단일 위상에서 수행하는데, 산출값의 오차로 인해 온실환경에 이상변화를 일으킬 수 있다. 제안한 알고리즘은 환경통제, 환경조절, 장치운영이라는 다중 위상에 제어절차를 분산하였다. 즉 매 반복주기마다 먼저 환경통제 위상에서 환경변화를 감지하고, 다음으로 환경조절 위상에서 해당 환경을 조절할 수 있는 구동기 제어장치들을 조합하며, 마지막으로 장치운영 위상에서 구동기 제어장치가 제어하는데 필요한 제어값을 산출한다. 제안한 알고리즘은 온실 환경요소와 구동기 제어장치 간의 관계를 분석한 결과를 기반으로 하여 설계되었다. 검증 분석에 의하면, 다중 위상 처리구조는 구동기 제어장치의 설정값을 수정 또는 보완할 수 있는 여지를 제공하고, 관련된 환경요소의 변화를 한꺼번에 반영한 구동기 제어장치의 운영을 가능하게 한다. 또한 이 구조는 기존 조건 기반 복합환경제어 알고리즘 개선에 적용할 수 있어서 최적 온실환경 조성을 목표로 하는 복합환경제어 시스템의 개발에 기여할 것이다.

표제어: 복합환경제어 알고리즘, 다중 위상 처리구조, 구동기 제어장치, 온실 환경, 환경 요소

접수일(2021년 5월 4일), 수정일(1차: 2021년 5월 24일), 게재확정일(2021년 6월 1일)

\*계명대학교 컴퓨터공학전공 교수(dubang@kmu.ac.kr)

## 1. 서론

온실원에는 작물 생산에 최적 조건을 유지하기 위한 시설의 구조, 자재, 부대 장치 등을 필요로 하며, 컴퓨터를 활용한 복합환경제어 시스템의 설치 및 운영이 필수적이다. 복합환경제어 시스템이란 온실 환경을 최적으로 관리하여 목표한 생산량을 달성하기 위하여 급격한 온실의 환경 변화를 피하고, 대상 작물의 최적 광합성 환경을 조성하기 위하여 다양한 환경제어 구동장치로 난방, 환기, 스크린, CO<sub>2</sub> 시비 등을 제어하여 최적의 온도, 습도, 광, CO<sub>2</sub> 농도 등을 조절하는 시스템을 말한다.

복합환경제어 시스템은 주기적으로 환경제어 구동기들의 제어 절차를 반복하는 알고리즘을 수행하여 온실의 환경을 제어한다. 현재까지 알려진 복합환경제어 알고리즘은 조건 기반 또는 예측 기반 처리 절차를 단일 위상으로 구현하여 구동기 제어장치가 구동기를 제어하도록 하고 있다.

조건 기반 제어(Noh et al., 2017; Son et al., 2014)는 외부기상, 온실환경, 장치설정 등을 입력받아 작동 조건을 만족하는 구동기 제어장치를 제어하는 방법이다. 이 방법은 현재 기상 및 온실 환경을 반영하여 작물생장에 필요한 최적 환경 제공을 목표로 하지만, 미래 기상 및 온실 환경의 급격한 변화 등의 요인으로 최적 환경 조성에 실패할 여지가 존재한다. 반면에 예측 기반 제어(Hong et al., 2014; Yang et al., 2012; Jung, 2020; Kim et al., 2018; Revathi et al., 2017)는 현재보다 미래의 기상 및 온실 환경을 예측하여 제어를 미리 실시하는 방법이다. 이 방법은 작물생장에 필요한 최적 환경을 유지할 가능성은 높으나, 외부기상 및 온실 환경 예측의 정확도에 따라 여전히 실패 가능성이 존재한다.

이와 같이 복합환경제어 알고리즘의 단일 위상 처리구조는 제어 방법이 달라도 모두 구동기 제어장치별로 작동조건을 확인하고 구동하게 한다. 이러한 제어구조는 온도, 습도, 광, CO<sub>2</sub> 등의 온실환경 요

소를 직접 통제하기 보다는 구동기 제어장치를 통해 통제하고 있다. 그 결과 설정값이나 예측값에 내포되어 있는 오차로 인해 온실환경에 이상변화, 즉 온실내부에 과온 지속 등의 문제를 발생시킬 수 있다.

본 연구는 온실환경 변화 정도에 따라 구동기 제어장치들을 조합하고 제어할 수 있는 다중 위상 처리구조를 갖는 복합환경제어 알고리즘을 설계하고 검증한다. 다중 위상 처리구조의 알고리즘은 환경통제, 환경조절, 장치운영이라는 위상들에 처리절차를 분산하고, 위상별 처리절차를 순차적으로 수행하게 하여, 환경 변화에 직접 대응하는 복합환경제어를 실현한다.

## 2. 복합환경제어 시스템

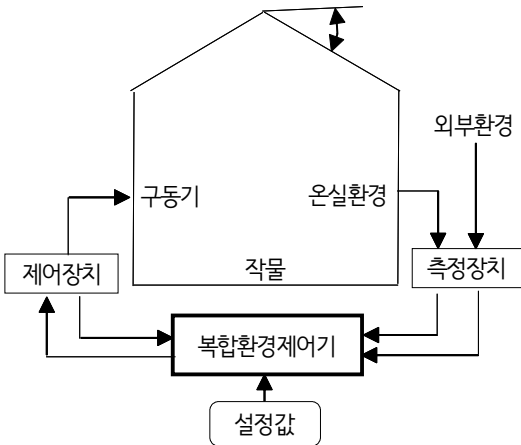
복합환경제어 시스템은 온실 내외부에 설치된 온도, 습도, 강우, 풍속, 풍향, 일사, 탄산가스 등의 센서들이 실시간으로 감지한 정보를 복합환경제어기가 분석하여 작물의 생육에 매우 중요한 광, 온도, CO<sub>2</sub>, 습도, 공기유동 등이 균형있게 유지되도록 온실 내외부에 설치되어 있는 각종 구동기를 복합적으로 작동시켜 최적의 재배환경을 자동으로 구현한다.

### 2.1 시스템 구성

복합환경제어 시스템은 <그림 1>과 같이 측정 장치, 복합환경제어기, 구동기 제어장치로 구성된다. 측정 장치는 온실 내외부의 온도, 습도, 풍향, 풍속, 일사량, 강우, CO<sub>2</sub> 등을 감지하여 복합환경제어기로 보내는 센서장치이다. 온실 내외부의 모든 환경 변화는 측정장치의 센서에서 나오는 신호로 측정된다. 구동기 제어장치는 온실 환경 제어를 실현하는 장치로 난방기, 냉방기, 커튼개폐기, 천창개폐기, CO<sub>2</sub>발생기, 관수장치 등의 구동기를 복합환경제어기의 제어 지시에 따라 작동시킨다.

복합환경제어기는 복합환경제어 알고리즘을 수행

하여 제어를 지시한다. 복합환경제어 알고리즘은 측정장치의 입력값, 구동기의 상태값, 초기 설정값 등으로 제어장치 운영에 필요한 결과값을 산출하여 제어장치로 보내서 구동기를 작동할 수 있게 한다.



<그림 1> 복합환경제어 시스템 구조

## 2.2 복합환경제어 알고리즘

복합환경제어 알고리즘은 구동기 제어장치별로 On/Off 제어방식 또는 비례 제어 방식을 사용한다. 온풍기, 유동팬, CO2 시비기, 조명 등의 구동기는 On/Off 제어를 사용하고, 환기창은 비례제어를 사용한다. 보일러, 스크린 등의 구동기는 두 가지 방식을 동시에 사용하기도 한다.

On/Off 제어는 보통 특정 조건을 만족하면 켜지고(On), 그렇지 않으면 꺼지는 형태(Off)로 작동한다. 이러한 제어는 잦은 켜짐과 꺼지는 스위치의 과도한 반복 동작으로 난방기 또는 스위치가 파손될 수 있다. 이것을 회피하기 위해 시간 지연, 사각 범위, 평균값 이용 등을 알고리즘에 추가로 사용한다.

비례제어에는 P-밴드 제어, PID 제어 등이 있다. P-밴드 제어는 온실제어에서 가장 널리 사용되는 제어기법으로 기준신호와 되먹임신호 사이의 차인 오차신호에 적당한 비례상수 이득을 곱해서 제어신호

를 만들어내는 방식이다. P-밴드 제어는 구성이 간단하여 구현하기가 수월하나 이득의 조정만으로는 시스템의 성능을 여러 가지 면에서 함께 개선시키기는 어렵다. PID 제어는 오차신호를 미분하여 제어신호를 만들어내는 미분제어를 비례제어에 병렬로 연결하여 사용하는 방식이다.

기존 복합환경제어 알고리즘의 처리절차 구조는 반복주기별로 구동기 제어장치의 제어절차를 단일 위상에서 수행하는 구조이다. 그래서 구동기 제어장치별로 제어해야 할 온도, 습도, 광 등의 환경요소의 적정 수준을 미리 지정하고, 제어에 필요한 값은 초기화 후 실시간으로 수정되는 매개변수로 제공하거나 통계분석, 규칙기반, 퍼지, 인공지능망 등을 활용한 예측 방법으로 실시간 제공한다. 하지만 구동기 제어장치의 제어에 제공되는 값의 오차 또는 불확실성은 온실환경에 이상변화를 일으킬 수 있다. 실제로 복합환경제어 시스템을 활용하는 농가에서는 온실 내부의 온도변화가 급격히 일어나 작물에 큰 스트레스를 주어 생산량을 떨어뜨리거나 작물을 약하게 하여 병충해가 쉽게 오는 경우가 발생하고 있다.

제안하는 다중 위상 절차구조를 갖는 복합환경제어 알고리즘은 최상위 위상인 온실통제 위상에서 온실환경 변화에 따른 온실조절 방법을 조합 및 선택한 다음, 중간 위상인 온실조절 위상에서 조절 강도에 따른 구동기 제어장치들을 조합 및 선택하고, 마지막 위상인 장치운영 위상에서 구동기 제어장치의 제어값을 산출한다. 이러한 절차구조는 환경변화에 적극 대처하는 방법으로 온실 내부 이상 변화를 최소화한다.

## 3. 온실 환경과 구동 제어장치 간 관계

### 3.1 온실 환경요소

온실의 내부 환경에서 관리할 수 있는 주요 요소는 식물의 성장 조건 즉, 광합성, 호흡, 증산에 필요

한 온도, CO<sub>2</sub>, 일사량(광량), 습도이다. 작물의 생육 주기에서 적정온도가 유지되지 않으면 개화와 착과, 과실 비육 등의 생육요소들에 부정적인 영향을 미치게 된다. 이산화탄소는 광합성에 필요한 요소로 작물의 광포화점 이전까지의 일사량에서는 적정 CO<sub>2</sub> 농도가 유지될 때 광합성이 원활히 발생할 수 있으며 일사량에 따른 광포화점 이상에서는 더 이상 CO<sub>2</sub> 농도가 높을 필요는 없다. 일사량 또는 광량의 경우 작물의 광합성에 필수적인 요소이며, 일정 기준 이상의 광량은 반드시 필요하나 흐리거나 비 오는 날은 광량이 감소하게 되어 날씨에 영향을 받는 요소이다. 습도의 경우 온실 내부의 습도가 낮으면 작물의 증산작용이 많아지고 수분 필요량이 많아져서 생육에 부정적일 수 있다. 반대로 습도가 높아질 경우 야간에 내부온도가 급격히 떨어지면서 이슬점 이하의 온도로 내려갈 경우 작물에 성애가 끼게 되고 곰팡이 등 병해를 유발할 수 있기 때문에 성애가 끼지 않을 정도로 습도를 관리하는 것이 중요하다.

### 3.2 환경조절과 구동제어 장치

온실 환경요소는 환기, 난방, 보온, 냉방, 공기유동, 차광, 보광, CO<sub>2</sub> 시비 등의 환경 조절에 의해 통제되며, 환경 조절은 환기창, 환기팬, 보일러 등의 구동기 제어장치 운영으로 실현된다.

환기는 온실 내부의 온도와 상대 습도를 작물의 적정 생육 환경 조건으로 관리할 수 있게 하며, 시설 내부의 공기 흐름을 조절하며 CO<sub>2</sub>를 공급하고 유해 가스를 배출할 수 있게 한다. 환기는 필요 환기량을 자연 환기로 충족할 수 있는 조건에는 자연 환기 방식을 채택하고, 자연 환기만으로는 충족이 불가능할 때에는 강제 환기 방식을 채택한다. 자연 환기란 온실 내외부의 온도 차나 대류에 의한 공기 교환으로 온실의 천장이나 측면에 환기창을 개방하여 환기하는 방식이다. 강제 환기는 자연 환기만으로는 온실 내부의 기온을 적정 조건으로 유지하기

힘들 경우에 적용하는 방법으로 환기팬을 이용하여 실내 공기를 강제적으로 배출하고 외부 공기의 유입을 유도한다.

난방, 보온 및 냉방은 계절에 따라 온실 내에 적정 환경, 특히 적정 생육 온도를 유지하기 위해 필요하다. 고온기에는 환기를 해도 시설 내의 온도가 바깥 기온보다 높기 때문에 냉방장치가 필요하고, 한겨울에는 온실 피복에 보온재를 설치하여도 온실 내의 온도를 적은 범위로 유지하기 어려우므로 난방장치를 사용한다. 난방장치로는 다양한 기계적 난방기, 즉 온수 보일러, 온풍기가 있다. 보온은 온실 자체의 보온력을 최대한 향상시켜서 방열을 최대한 줄이는 방법으로 보온 커튼을 이용한다. 냉방은 경제성 문제로 비용이 많이 드는 방식을 이용하기 어려우므로 소극적인 냉각방법인 기화 냉각 방법을 보편적으로 이용하고 있다. 이러한 냉각 장치로는 차광스크린, 팬 냉방장치, 분무 장치 등이 있다. 이외에도 장치 내에서 실내 수증기를 결로시킨 다음에 시설 외부로 배출시켜 제습을 겸하는 냉방기도 있으나 시설비와 전기료가 많이 드는 장치이다.

공기 유동은 온도 분포나 습도 분포의 불균일성을 해소하여 작물의 생육이 고르게 일어나도록 유도해주는 제어방법으로 유동팬 장치를 이용한다. 유동팬은 온실 내 상하 좌우 위치에 따라 다르고, 특히 작물이 성장하여 잎, 줄기가 무성해지면 위치에 따라 농도의 분포가 다른 이산화탄소 농도의 분포를 균일하게도 한다.

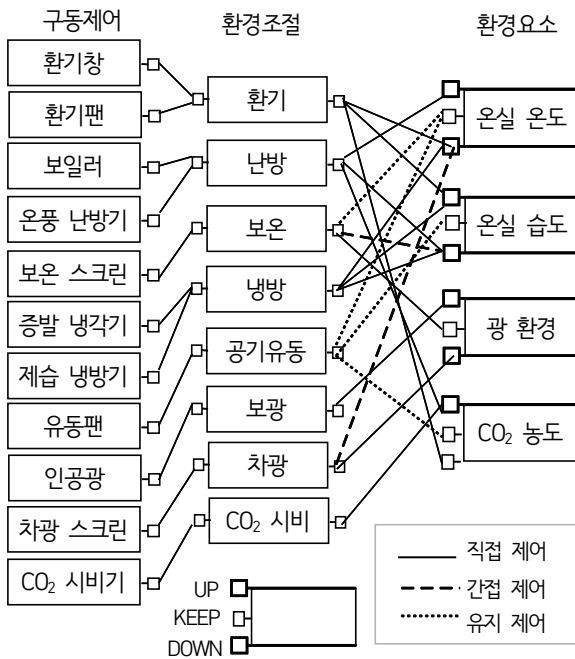
차광과 보광은 온실 내의 광 환경, 즉 광량 감소, 불균일한 광 분포, 일장 조건을 조절하는데 이용된다. 차광은 직접적인 고광에 노출되어 태양 복사열에 의해 식물 조직이 상해를 입는 일소 현상을 줄이는 방법으로 차광 스크린 장치를 사용한다. 보광은 식물 재배에서 부족한 광을 보충해주는 방법으로 온실 내에 백열등, 형광등, 수은등 등의 인공광을 설치하여 광합성을 촉진한다.

CO<sub>2</sub> 시비는 온실 내부의 CO<sub>2</sub> 농도를 높여 작물

의 성장을 향상시키는 방법으로 액체 또는 고체 CO2를 직접 주입하거나 프로판가스 등 각종 연료를 연소시켜서 발생하는 배기가스 중에 포함된 CO2를 이용하는 CO2 시비기를 사용한다.

### 3.3 환경요소와 구동기 제어장치 간 관계도

온도, 습도, 광, CO2 등의 온실 환경요소, 환경요소별 환경조절 방법, 그리고 환기, 난방, 공기유동 등의 구동기 제어장치는 <그림 2>와 같은 관계를 형성한다.



<그림 2> 환경요소와 구동 제어장치 간 관계도

<그림 2>의 관계도에 의하면 온실 온도는 환기와 냉방으로 낮출 수 있고 난방으로 높일 수 있다. 온실 습도는 환기, 난방 또는 보온으로 낮출 수 있고 냉방으로 높일 수 있다. 또한 광도는 차광으로 낮출 수 있고 보광으로 높일 수 있으며, CO2 농도는 시비로 높이고 환기로 낮출 수 있다.

그리고 환기 조절은 환기창으로 자연 환기를 하

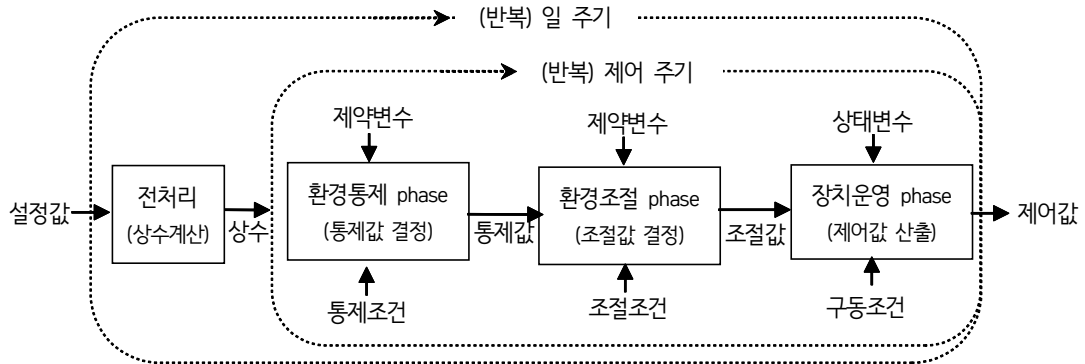
거나 환기팬으로 강제 환기를 하여 실현된다. 난방 조절은 보일러 또는 온풍기로 강제 난방을 실현하는데, 보일러는 연소가스로 CO2 농도 조절이 가능하다. 냉방 조절은 증발 냉각기 또는 제습 냉방기로 강제 냉방을 실현하는데, 냉각기는 가습을 병행하고 냉방기는 제습을 병행 실현한다. 차광과 보온 조절은 스크린 장치 개폐로 실현되고, CO2 시비 조절은 시비기로 가능하다.

### 4. 다중 위상 처리구조를 갖는 알고리즘 설계

조건 기반 복합환경제어는 제약조건을 만족시키는 제어값 즉, 구동기의 구동치를 구하는 절차이다. 이러한 절차는 요소들 간의 관계를 고려하여 수집한 측정값과 사전에 입력한 설정값을 비교하여 제어조건에 부합하는 설정값의 근사값에 맞도록 계산된 값을 구한다, 복합환경제어 알고리즘은 보통 구동제어 장치가 15-60초 간격으로 동작할 수 있도록 제어값을 구하는 과정을 되풀이한다.

제안하는 다중 위상 처리구조를 갖는 복합환경제어 알고리즘은 <그림 3>과 같이 온실 내 환경을 통제하기 위해 2개의 반복주기 내에 3개의 위상, 즉 환경통제, 환경조절, 장치운영이라는 위상에 분산된 제어절차를 순차적으로 처리하여 제어값을 구한다.

다중 위상 처리구조는 매 반복주기마다 다중 위상에 분산된 처리절차를 순차적으로 수행하는데, 먼저 환경변화를 감지하고, 다음으로 해당 환경을 조절할 수 있는 구동제어 장치들을 조합하며, 마지막으로 구동제어 장치가 구동기를 제어하는데 필요한 제어값을 산출한다. 즉, 최초 위상인 환경통제 위상에서 통제가 필요한 환경을 감지하고 환경조절 방법을 결정하고, 다음 위상인 환경조절 위상에서 환경을 조절하는데 가장 적합한 구동제어 장치들을 조합하며, 마지막 장치운영 위상에서 구동제어 장치에 필요한 제어값을 산출한다.



〈그림 3〉 다중 위상 처리구조의 복합환경제어 알고리즘 구성

**(1) 환경통제 위상**

제안하는 알고리즘에서 환경통제 위상은 온실환경 제약변수(온실 온도, 온실 습도, 일사량 등), 외부요인 제약변수(외부 온도, 광도, 풍속, 풍향 등), 상수를 사용하여 코딩된 통제 조건에 실시간 제약변수 값을 반영하여 통제변수 값, 즉 통제값을 결정한다. 통제변수는 온실 내부에서 통제되어야 할 광, 온도, CO2 및 습도 등의 환경별로 존재하며, 해당 값은 다음 위상에서 환경조절 조건으로 조절값을 산출하는데 필요한 값이다.

환경통제 위상에서 온도 통제조건으로 온도 환경요소를 통제하는 환기, 냉방, 난방 등의 조절방법을 결정하는 세부 처리절차는 〈그림 4〉와 같다.

〈그림 4〉의 온도 통제값 결정에는 환기온도선, 난방온도선, 냉방제어 결정 등의 함수가 사용된다.

환기온도선 함수는

$$v(t) = a_1 t + b_1 \text{ where } t_i \leq t < t_{i+1}$$

이며, 계수  $a_1$  및  $b_1$ 의 결정은 기본적으로 주간 난방온도+사각범위, 야간 난방온도+사각범위, 지연시간(야간→주간, 주간→야간), 환기온도 주간 전환점(일출 몇분전), 환기온도 야간 전환점(일몰 몇 분전)으로 결정하며, 일사량에 의존한 제어를 적용하면 광영향의 시작과 종점, 광 영향 환기온도 등을 반영한다.

```

controlTemp(제약변수, 상수) {
    //제약변수 - t0 현재시간, Tc 현재 온도, ...
    //상수 - MC 냉방방법, ...

    //온도 변화율 계산, Vt = (Tc - Tb)/(t0 - t-1)
    //과온도/적장온도/저온도 지속시간 계산, dtv/dtn/dth

    switch(position of Tc)
    case UPPER of v(t0): //과온도
        switch(MC)
        case 환기: //환기조절
            Vent.add(new Crecord(가동, TEMP, Vt, dtv))
            Cool.add(new Crecord(중지, TEMP, 0, 0))
        case 병행: //한계초과시 환기+냉방조절로 전환
            if (v(t0)=="한계초과") //환기조절+냉방조절
                Vent.add(new Crecord(중지, TEMP, 0, 0))
                Cool.add(new Crecord(가동, TEMP, Vt, dtv))
            else //환기조절
                Vent.add(crecord(가동, TEMP, Vt, dtv))
                Cool.add(crecord(중지, TEMP, 0, 0))
        case 냉방: //냉방조절
            Vent.add(new Crecord(중지, TEMP, 0, 0))
            Cool.add(new Crecord(가동, TEMP, Vt, dtv))
        case BETWEEN v(t0) and h(t0): //적정 온도
            Vent.add(new Crecord(중지, TEMP, Vt, dtn))
            Heat.add(new Crecord(중지, TEMP, Vt, dth))
        case LOWER of h(t0): //저온도 - 난방 조절
            Heat.add(new Crecord(가동, TEMP, Vt, dth))
    }
}
    
```

〈그림 4〉 환경통제 위상의 온도 통제값 결정절차

난방온도선 함수는

$$h(t) = c_t t + d_t \text{ where } t \leq t < t_{+1}$$

이며, 계수  $c_t, d_t$ 의 결정은 기본적으로 주간 난방온도, 야간 난방온도, 지연시간(야간→주간, 주간→야간), 난방온도 주간 전환점(일출 몇분전), 난방온도 야간 전환점(일몰 몇 분전), 이슬점으로 결정하며, 일사량에 의존한 제어를 적용하면 광 영향의 시작과 종점, 광 영향 환기온도 등을 반영한다. 이슬점은 더운 공기가 식어감에 따라 수증기 함유량이 낮아져 나머지 수증기가 응결되는 온도이며, 몰리어 다이어그램으로 예측이 가능하다.

냉방조합 결정 함수  $\alpha(t)$ 는 냉방사용 유무, 환기 조절 한계(예, 외부온도 > 내부온도) 등 고려한 부울 값을 구한다.

(2) 환경조절 위상

환경조절 위상은 통제변수, 외부요인 제약변수, 상수로 코딩된 조절 조건에 통제값과 제약변수 값을 반영하여 조절변수 값, 즉 조절값을 결정한다. 조절변수는 온실환경을 조절하는 환기, 난방, 보온, 냉방, 차광 등의 조절방법별로 존재하며, 해당 값은 마지막 위상에서 장치구동 조건으로 구동기 제어장치를 제어하는 값의 산출에 필요한 값이다.

환경조절 위상에서 환기 조절조건으로 환기창, 환기팬 등의 구동기 제어장치의 조합을 결정하는 세부 처리절차는 <그림 5>와 같다.

(3) 장치운영 위상

장치운영 위상은 조절변수, 장치 상태변수, 상수로 코딩된 구동 조건에 조절값과 장치 상태를 반영하여 제어값을 산출한다. 제어값은 구동기 제어장치를 구동하는데 필요한 제어 수치이다.

장치운영 위상에서 환기창 구동조건으로 환기창 제어값을 산출하는 세부 처리절차는 <그림 6>과 같다.

```

adjustVent(Vent, 제약변수, 상수) {
  if (Vent.exists() == true) // 환경조절을 요청
  // 통제값(통제대상/변화율/지속시간) 분석으로
  // 환기량, ventVolume 산출
  ventVolume = Vent.analyze(제약변수, 상수)

  // 통제값에 환기량을 고려한 분석으로
  // 구동 제어장치 조합한 devList 작성
  DevList = Vent.control(ventVolume, 제약변수, 상수)

  // 외부 환경(예, 감우, 강풍)을 고려하여 구동 제어장치
  // 조합을 결정
  ventDevices = DevList.analyze(제약변수, 상수)

  // 구동기 제어장치별 담당 조절 분량, 시간 등 산출
  winRecord = ventDevices(WINDOW).calc()
  fanRecord = ventDevices(FAN).calc()

  if (winRecord == null)
    VentWindow.add(new Precord(중지, VENT, null))
  else
    VentWindow.add(new Precord(가동, VENT, winRecord))

  if (fanRecord == null)
    VentFan.add(new Orecord(중지, VENT, null))
  else
    VentFan.add(new Orecord(가동, VENT, fanRecord))

  else
    VentWindow.add(new Precord(중지, VENT, null))
    VentFan(new Orecord(중지, VENT, null))
}
    
```

<그림 5> 환경조절 위상의 환기 조절값 결정절차

5. 복합환경제어 알고리즘 분석 및 고찰

5.1 알고리즘 분석

다중 위상 처리구조의 효율성, 체계성, 독창성 등을 검증하기 위해 특징 분석, 시나리오 분석, 연구현황 분석을 하였다.

(1) 처리구조에 따른 특징분석

다중위상 처리구조의 알고리즘은 <표 1>에 표시

```

operateVentWindow(VentWindow, WindowStatus, 상수) {
// VentWindow의 조절값과 상태변수의 보정장치
// 상태값으로 장치 운영 유형을 결정
operateMethod = VentWindow.operate(WindowStatus,
                                     상수)

// 장치 운영 유형에 따른 구동기 제어값 산출
switch(operateMethod)
case 가동:
// 비례제어방식(p-band, PID 등에 따른 구동값 산출
params = VentWindow.calc(WindowStatus, 상수)

status = controlVentWindow(작동, params)
case 갱신:
params = VentWindow.calc(WindowStatus, 상수)
status = controlVentWindow(재작동, params)
case 중지: // 구동기를 중지
status = controlVentWindow(중지, null)
case 무시: // 이전 장치 구동시간에 포함
status = null

// 환기창 상태변수인 WindowStatus의 상태정보를 갱신
WindowStatus.update(status)
}
    
```

<그림 6> 장치운영 위상의 구동기 제어값 산출절차

한 바와 같이 단일 위상 처리구조와는 여러 부분에서 대비된다. 다중 위상 처리구조는 온실 환경을 제어하기 위해 구동기 제어장치를 조합하는 반면에, 단일 위상 처리구조는 구동기 제어장치가 고정된 환경요소 변화를 감지하고 구동한다. 그리고 다중 위

<표 1> 알고리즘 처리구조별 특징 분석

구분	처리구조	
	다중 위상	단일 위상
제어 중심	온실 환경요소	보정장치
장치 구동	복합환경 조합 제어	고정 복합환경 제어
장치 선택	환경조건, 조절 조건	환경조건
장치 구동 조건	환경변화 크기 반영	환경변화 유무 반영
환경 통제	제어장치 조합	고정 제어장치

상 처리구조는 환경조절 위상에서 온실 환경요소와 구동기 제어장치 간에 다대다 관계를 형성하므로, 하나의 구동기 제어장치가 여러 환경요소를 제어할 수 있고 그리고 하나의 환경요소 제어에 여러 구동기 제어장치들을 조합할 수 있다.

실제로 온실 환경제어에 환기창과 보일러가 큰 비중을 차지하지만 제어장치의 미세한 오작동이 온실 작물 생장에 큰 영향을 미친다. 가령, 비례제어를 사용하는 환기창에서 P-밴드 값을 너무 작게 잡으면 설정온도로부터 초과된 온도 차이에 비해 환기창이 너무 많이 열리면서, 제거되는 열량이 갑자기 증가하여 급격한 온도 강하를 초래하면서 환기창이 다시 닫히게 된다. 그러면 온도가 상승하고 환기창이 다시 열리는 부적절한 제어가 반복된다. 이러한 부적절한 제어가 설정값에 의존적이기 때문에 환경설정 전문지식을 가진 재배자가 아니면 복합환경제어 시스템의 운영 효과를 반감시킨다. 다중 위상 처리구조는 구동기 제어장치 조합으로 설정값에 의한 부적절한 제어를 반감시킬 수 있어서 재배자의 전문성에 의존적인 단일 위상 처리구조의 한계를 개선할 수 있다.

**(2) 온실환경 변화 시나리오에 따른 비교분석**

복합환경제어 알고리즘의 처리구조에 따른 온실 환경의 통제 효과를 분석하기 위해 두 가지 시나리오를 설정하고 다중 위상 처리구조와 단일 위상 처리구조의 알고리즘을 분석하였다. 단일 위상 처리구조 알고리즘으로는 국내 스마트팜 선도기업인 N사의 복합환경제어시스템(Green Control System Ltd., 2021)의 알고리즘을 사용하였다.

시나리오에 사용된 온실환경과 외부기상은 다음과 같이 가정하였다.

- 적정 온실환경: 온도 22~28℃, 상대습도 60~70%, 광도 200~400W/m<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub> 600~700ppm
- 외부기상: 온도 30℃, 습도 80%, 광도 600W/m<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub> 400ppm



**시나리오 1.** 과온도 상태의 온실환경을 통제하는 구동기 제어장치 운영

시나리오 1은 적정온도를 초과한 온도환경에서 처리구조별 복합환경제어 알고리즘이 작동 결정을 한 구동기 제어장치들을 확인하고, 이들 구동기 제어장치 조합에 의한 제어로 통제된 온실환경을 <표 2>와 같이 분석하였다.

단일 위상 처리구조는 환기창이 환기온도, 상대습도, 일사량을 반영한 제어를 하지만, 환기팬은 지정 가동시간 또는 실내 온습도에 따라 제어하므로 환기창과는 독립적이고, CO2 시비기도 지정 가동시간에만 구동된다. 그 결과 <표 2>에 나타난 바와 같이 환경통제가 제대로 되지 않거나 지연 통제가 되어 다중 위상 처리구조의 환경통제 결과와 대비가 된다. 그리고 단일 위상 처리구조는 고비용으로 인해

냉방기 사용을 배제하고 있어서 최소 가동으로 생육을 촉진하면서도 비용을 최소화하는 옵션을 두지 않아 통제되지 않는 상태가 상당기간 유지될 수도 있다.

**시나리오 2.** 환기로 온실환경을 조절하는 구동기 제어장치의 운영

시나리오 2는 환기 방법으로 온실환경을 조절하는 구동기 제어장치에 의해 통제되는 온실환경을 <표 3>과 같이 분석하였다. 두 가지 알고리즘 모두 온습도를 통제하지만 단일 위상 처리구조는 과온을 낮추려고 하는 추가 장치를 직접 배정하지 않는다. 과온 상태가 지속될수록 작물의 생육이 회복하기 어려운 상태가 될 수 있으므로 과온지속 단축은 매우 중요하다. CO2 통제도 농도가 부족한 시점에 시비가

<표 2> 과온도 환경에서의 가동 제어장치에 의한 환경 통제 분석

절차 구조	온실환경				가동 보정장치					온실 환경통제
	온도	습도	광	CO2	환기창	환기팬	냉방기	차광 스크린	시비기	
다중 위상	36	90	600	300	비례제어			ON		온습도,광,탄산 통제
	32	80	400	400	비례제어	ON		ON		온도 통제시간 단축
	30	90	300	400			ON	ON	ON	온습도 통제
단일 위상	36	90	600	300	비례제어	ON/OFF		ON	ON/OFF	온습도,광,탄산 통제
	32	80	400	400	비례제어	ON/OFF		ON		온도 통제
	30	90	300	400	비례제어	ON/OFF		ON	ON	고온다습 지속

<표 3> 온실환경에 따른 환기조절 보정장치의 환경 통제 분석

절차 구조	온실환경				보정장치		온실 환경통제
	온도	습도	광	CO2	환기창	환기팬	
다중 위상	36	90	600	300	비례제어		온습도,탄산 통제
	32	80	400	400	비례제어	ON	온도 통제 가속
	27	70	400	300		ON	탄산통제
단일 위상	36	90	600	300	비례제어	ON/OFF	온습도,탄산 통제
	32	80	400	400	비례제어	ON/OFF	온도 통제
	27	70	400	300		ON/OFF	환기팬 작동시 탄산 통제

필요하나 단일 위상 처리구조는 지정 작동시간에만 구동되어 다중 위상 처리구조의 통제와는 대비된다.

### (3) 연구현황 분석

단일 위상 처리구조 관련 연구에는 각 구동기, 즉 환기장치, 난방기, 보온 스크린, 차광 스크린 등이 자신의 제어 매개변수에 의해 독자적으로 구동되는 다중변수 제어 스킴 연구(Noh et al., 2017), 기존의 비례제어가 설정온도로부터 초과된 온도 차이에 비해 환기장치가 너무 많이 열리면서 급격한 온도 강하를 초래하여 환기장치가 열리고 닫히는 부적절한 제어가 반복하는 현상을 개선한 정적편차를 고려한 환경제어 알고리즘 연구(Lee et al., 2012)가 있다. 그러나 이들 연구는 개별 구동기 제어장치의 제어 개선을 목표로 하고 있어서 복합환경 제어 개선을 목표로 하는 본 연구와 차별된다.

다중 위상 처리구조 관련 연구에는 온도, 습도 제어, 피드백 선형화 개념을 기반으로 하여 환기, 난방, 가습 등을 제어하는 알고리즘을 제안한 연구(Son et al., 2014)가 있다. 하지만 이 연구의 알고리즘은 환경조절과 장치제어가 동일한 위상에서 처리되어 이중위상 처리구조를 갖는데, 이 구조는 구동기 제어장치의 조합과 복합 환경요소 조합을 담당하는 환경조절 위상이 없는 관계로 구동기 제어장치 조합에 의한 효율적 제어에는 한계를 보인다.

## 5.2 고찰

다중 위상 처리구조에 의한 구동제어 장치의 제어 방법이 구동기 제어장치별 구동여부를 관련 환경의 변화로 파악하고 제어값을 산출하는 단일 위상 처리구조의 제어 방법과 대비된다. 즉, 다중 위상 처리구조의 구동기 제어장치의 제어 방법이 온실 환경 변화 중심으로 구동제어 장치를 제어하는 반면에, 단일 위상 처리구조의 구동기 제어장치 제어방법은 구동기 제어장치의 제어를 중심으로 환경을 제어한

다. 구동기 제어장치의 제어에는 항상 오차 또는 불확실성이 포함되어 있고 복합환경제어의 궁극적인 목표가 최적의 온실 환경을 조성하는 것임을 감안하면 온실 환경 변화 중심 제어가 더 바람직하다.

다중 위상 처리구조의 알고리즘은 구동기 제어장치 설정값과 작동조건 기반으로 제어하는 알고리즘을 개선한 구조이다. 그러므로 부정확한 설정값으로 인해 구동기 제어장치의 제어가 환경변화를 대처하지 못하는 경우, 온실 재배자에게 복합환경제어 설정 전문지식 강요 등의 문제점은 그대로 가지고 있다. 따라서 설정값이 초기값으로 설정되고 이후 최적 제어를 위해 실시간 보정이 필요가 있다. 관련 연구로 인공신경망 학습으로 최적화된 P-밴드 값을 도출하는 연구(kim et al., 2016)와 정적편차 기반으로 P-밴드 보정하는 연구(Lee et al., 2012)가 있었으나, 특정 제어장치 뿐만 아니라 온실환경 조절에 사용되는 모든 제어장치의 설정값을 경험 기반으로 설정하는 것이 중요하다. 그러므로 딥러닝을 포함한 인공지능 학습으로 파라미터를 설정하고 실시간으로 보정하는 연구가 추가로 진행되어야 할 것이다.

## 6. 결론

본 연구는 온실환경 변화 정도에 따라 구동기 제어장치를 조합하여 제어할 수 있는 다중 위상 처리구조를 갖는 온실 복합환경제어 알고리즘을 제안하고 설계하였다. 제안한 알고리즘은 환경통제, 환경조절, 장치운영이라는 위상들에 처리절차를 분산하고, 위상별 처리절차를 연결순서에 따라 순차적으로 수행하여, 환경 변화에 직접 대응하는 복합환경제어를 실현한다.

제안한 알고리즘의 특징 및 시나리오 분석에 의하면, 온실조절 위상에서의 조절대상 환경요소 기반 구동기 제어장치의 조합 및 제어가 단일 위상 알고리즘에서 발생하는 이상 제어를 개선하거나 보완하고 있다. 따라서 기존 복합환경제어 시스템의 제어

알고리즘 구조 개선에 본 연구결과를 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

다중 위상 처리구조 알고리즘은 구동기 제어장치를 설정값과 작동조건 기반으로 제어하는 알고리즘을 개선한 구조이므로 향후 정확한 설정값을 경험기반 학습을 통해 보정하는 연구가 필요하다.

## Reference

- [1] Jung, D. H. (2020), Development of Artificial Intelligence-based Climate Control System for Smart Greenhouse, Ph.D, August 2020, 247.
- [2] Green Control System Ltd. (2021), User Manual of Magma Green house Environment Controller, <http://gcsmagma.com/>
- [3] Hong, S. W., Lee, I. B. (2014), Predictive Model of Micro-Environment in a Naturally Ventilated Greenhouse for a Model-Based Control Approach, Protected Horticulture and Plant Factory, 23(3), 181-191.
- (홍세윤, 이인복 (2014), 자연 환기식 온실의 모델 기반 환기 제어를 위한 미기상 환경 예측 모형, 시설원예식물공장, 23(3), 181-191)
- [4] Kim, B. S., Lee, J. H., Kim, T. G. (2016), Deduction of optimal control parameters through greenhouse environment modeling and simulation, Proceeding of Korean Institute Of Industrial Engineers, 2140-2155.
- (김병수, 이준희, 김탁곤 (2016), 온실 환경 모델링 및 시뮬레이션을 통한 최적의 제어 파라미터 도출, 대한산업공학회 춘계공동학술대회논문집, 2140-2155)
- [5] Kim, S. Y., Park, K. S., Lee, S. M., Heo, B. M., Ryu, K. H. (2018), Development of Prediction Model for Greenhouse Control based on Machine Learning, Journal of Digital Contents Society, 19(4), 749-756.
- (김상엽, 박경섭, 이상민, 허병문, 류근호 (2018), 머신러닝 기반의 온실제어를 위한 예측모델 개발, 한국디지털콘텐츠학회논문지, 19(4), 749-756)
- [6] Lee, H., Moon A., Kim, K. (2012), Design of Environmental Control Algorithm of the Hermetic Greenhouse Considering the Static Deviation, Proceeding of The Institute of Electronics and Information Engineers, 35(1), 902-904.
- (이해동, 문애경, 김규형 (2012), 정적편차를 고려한 폐쇄형 온실의 환경제어 알고리즘 설계, 대한전자공학회 하계학술대회, 35(1), 902-904)
- [7] Noh, D. H., An, S. Y., Kim, J. (2017), "Implementation of optimal greenhouse control: Multiple influences approach," Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 261-265.
- [8] Revathi S, Radhakrishnan T K, and Sivakumaran N (2017), "Climate Control in Greenhouse using Intelligent Control Algorithms," 2017 American Control Conference, May 24-26, 2017, 887-892.
- [9] Son, K. H., Park, D. H., Kim, S. H., Kim, J. H., Jeung, E. T. (2014), Actuator multiple control method for greenhouse environment control system, Journal of information and telecommunication facility engineering, 11(2), 39-45.
- (손교훈, 박대현, 김세한, 김재형, 정은태 (2012), 온실 환경 제어시스템을 위한 액추에이터 복합 제어방법, 정보통신설비학회논문지, 11(2), 39-45)
- [10] Yang, J., Chung, C. D., Hong, Y., Ahn B. I., Hwang S. I., Choi, Y. H. (2012), Implementation of Greenhouse Environmental Control Systems using Intelligence, The Institute of Electronics Engineers of Korea - CI, 49(2), 29-37.
- (양재수, 정창덕, 홍유식, 안병익, 황선일, 최영훈 (2012), 지능을 이용한 온실 제어 시스템, 전자공학회논문지-CI, 49(2), 29-37)

**Bang, Daewook (dubang@kmu.ac.kr)**



Bang, Daewook is a professor in department of computer engineering in the Engineering College of Keimyung University. He received his master's degree in KAIST and Ph.D. in the Graduate School of Seoul National University. His research interests include distributed processing system, context-aware system, IOT and smart farm service.

# A Design of Greenhouse Control Algorithm with the Multiple-Phase Processing Scheme

Daewook Bang\*

## ABSTRACT

This study designs and validates a greenhouse complex environmental control algorithm with a multi-phase processing scheme that can combine and control actuators according to the degree of change in the greenhouse environment. The composite environmental control system is a system in which the complex environmental controller analyzes the information detected by sensors and operates appropriately actuators to maintain the crop growth environment. A composite environmental controller directs control devices driving actuators through a composite environmental control algorithm, which calculates the values necessary for the operation of the control devices. Most existing algorithms carry out control procedures on a single phase by iteration cycle, which can cause abnormal changes in the greenhouse environment due to errors in output. The proposed algorithm distributes control procedures over multiple phases: environmental control, environmental control, and device operation, and every iteration cycle, detects environmental changes in the environmental control phase first, and then combines control devices that can control the environment in the environmental control phase, and finally, performs the controls to derive the actuators in the device operation phase. The proposed algorithm is designed based on the analysis of the relationship between greenhouse environmental elements and control devices deriving actuators. According to verification analysis, the multi-phase processing scheme provides room to modify or supplement the setting value and enables the control devices to reflect changes in the associated environmental components.

*Keywords: complex environment control algorithm, multi-phase processing scheme, control device driving actuator, greenhouse environment, environmental element*

---

\* Professor, Dept. of Computer Engineering, Keimyung University