

# 지역별 기상조건에 따른 증발냉각시스템의 적용성

## Adaptability of an Evaporative Cooling System to the Weather Conditions in Korea

남 상 운 · 김 문 기

안성산업대학교 농촌공학과, 서울대학교 농공학과

Nam, Sang Woon · Kim, Moon Ki

Ansung National University, Seoul National University

### 1. 서 론

증발냉각시스템의 원리는 물이 수증기로 상태변화할 때 필요한 기화열을 주변으로부터 공급받으면서 공기의 온도가 감소하는 것이다. 이것은 덥고 건조한 지역에서는 매우 효과적이지만 상대습도가 높은 지역에서는 냉방효과가 낮다. 따라서 국내의 모든지역에 증발냉각시스템의 적용이 적합한지는 의문이다.

증발냉각시스템의 냉각효율은 보통 80%이상이다. 만일 증발냉각 효율( $\eta$ )이 80%라면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\eta = \frac{T_d - T}{T_d - T_w} = 0.8 \quad (1)$$

여기서, T는 냉각된 공기의 건구온도,  $T_d$ ,  $T_w$ 는 외부공기의 건구온도, 습구온도이다.

식(1)에서 냉각된 공기의 온도(T)와 증발냉각시스템을 통과한 환기공기의 냉각범위는 다음 식에 의해서 계산될 수 있다.

$$T = T_d - 0.8(T_d - T_w) = 0.2T_d + 0.8T_w \quad (2)$$

$$\Delta T = T_d - T = 0.8(T_d - T_w) \quad (3)$$

그러므로 T와  $\Delta T$ 는 건구온도와 습구온도만의 함수로 표현된다. 따라서 어떤 지역에 있어서 환기공기온도와 증발냉각시스템을 통과한 공기의 냉각범위는 그 지역의 기상자료( $T_d$ 와  $T_w$ )만으로 계산될 수 있다. 또한 증발냉각시스템이 가동되는 온실의 기온은 환기시스템의 합리적인 설계에 의해서 조절될 수 있다.

어떤 지역에서 증발냉각시스템의 냉각효과는 여러해 동안의 기상데이터( $T_d$ 와  $T_w$ )를 분석함으로써 구할 수 있다. 또한 증발냉각시스템이 그 지역에 적합한지의 여부도 결정할 수 있다. 그러나 증발냉각시스템의 냉각효과가 좋은지 그렇지 않은지는 퍼지문제이므로 일반적인 수학으로는 정확하게 판단하기가 어렵다. 우리나라 각지역의 20년간(1975~1994) 기상데이터를 이용하여 퍼지수학적 방법으로 증발냉각시스템의 적용성을 포괄적으로 검토해 보았다.

## 2. 재료 및 방법

### (1) 퍼지 판단 방식의 설정

증발냉각시스템의 냉각효과는 다음의 두가지 관점에 의해서 결정될 수 있다. 하나는 증발냉각시스템을 통과한 공기의 냉각범위( $\Delta T$ )이고, 다른 하나는 실내 환경과 만나는 냉각된 공기의 온도( $T$ )이다. 그러므로 판단 영역은 다음과 같다.

$$U = \{\Delta T, T\} \quad (4)$$

$\Delta T$  와  $T$ 는 모두 외기의 건구온도와 습구온도에 의해서 결정되므로 여러해 동안의 기상자료를 이용함으로써 여러 가지의 다른 결과를 얻을 수 있을 것이다. 편리하게 판단하기 위해서  $\Delta T$  와  $T$ 의 인자를 여러개의 작은 요소로 분할할 수 있다. 만일 1975~1994년까지 20년간의 기상데이터가 주어져 있다면 그들은 다음의 관계를 갖는다.

$$\Delta T = \{\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3, \dots \dots \Delta T_{20}\} \quad (5)$$

$$T = \{T_1, T_2, T_3, \dots \dots T_{20}\} \quad (6)$$

그러므로 판단방식은 2단계의 퍼지 종합판단방식이 된다. 판단(의견)의 범위는 다음 V와 같다.

$$V = \{\text{매우적합, 적합, 보통, 부적합}\} \quad (7)$$

### (2) 퍼지 판단의 기준

증발냉각시스템의 냉방효과에 관한 퍼지 판단 기준은 제시된 바가 없다. 본 논문에서는 환경과 생물반응에 관한 문헌들을 참고하여 기준을 설정하였다. 일반적으로 여름철 쾌적한 온도조건으로는 24~28℃가 제시되고 있다. 계사에서는 여름철 최고기온이 28℃ 이하일 때 성장과 산란율, 사료이용율이 가장 좋은 것으로 보고되어 있다. 30℃를 초과하면 닭의 체온이 증가하여 생산효율이 떨어지고, 산란율과 계란의 품질이 저하하며 폐사율이 증가한다. 32℃를 초과하면 고온스트레스를 받게된다. 하지만 온실의 경우에는 일사부하 때문에 30℃이하로 제어하기는 쉽지않다. 작물에 따라서 차이는 있지만 대부분 작물의 광합성 최적온도는 25℃ 내외이고, 생육적온은 25~30℃, 최고 한계기온은 35℃정도이다(김 등, 1997). 증발냉각시스템의 제어에 있어서 32℃에 시스템을 ON하는 경우가 많다(小澤, 1993). 따라서 온실의 실내기온( $T_i$ )을 다음과 같은 4구역으로 구분하였다.

$$T_i \leq 30^\circ\text{C} \quad (\text{매우적합})$$

$$T_i = 30 \sim 32.5^\circ\text{C} \quad (\text{적합})$$

$$T_i = 32.5 \sim 35^\circ\text{C} \quad (\text{보통})$$

$$T_i > 35^\circ\text{C} \quad (\text{부적합})$$

온실에서는 매분 3/4~1회의 공기 교환을 최소 환기율로 권장한다. 온실의 환기시스템에 있어서 청명한날 매분 1회의 공기 교환은 약 5℃의 온도상승을 초래하게 된다(최, 1989). 따라서 증발냉각기를 통과한 공기의 온도( $T$ )와 실내평균온도( $T_i$ )사이에는 다음 식이 성립된다.

$$T = T_i - 5^\circ\text{C} \quad (8)$$

식(8)로부터 증발냉각시스템의 냉방효과와 그것의 기후적인 적용성에 대한 판단기준은 다음과 같이 결정될 수 있다.

- 판단규칙(1) :  $T \leq 25^\circ\text{C}$  (매우적합)  
 $T = 25 \sim 27.5^\circ\text{C}$  (적합)  
 $T = 27.5 \sim 30^\circ\text{C}$  (보통)  
 $T > 30^\circ\text{C}$  (부적합)

증발냉각기를 통과할때의 냉각범위( $\Delta T$ )는 일반적으로  $7^\circ\text{C}$  이상일 때 냉방효과가 매우 좋은 것으로 보고되어있다. 만일 냉각범위가  $3^\circ\text{C}$  미만인 경우에는 냉방효과가 좋지 않은 것으로 되어 있다. 따라서 다음과 같은 또 다른 판단 규칙을 하나 더 얻을 수 있다.

- 판단규칙(2) :  $\Delta T \geq 7^\circ\text{C}$  (매우적합)  
 $5^\circ\text{C} \leq \Delta T < 7^\circ\text{C}$  (적합)  
 $3^\circ\text{C} \leq \Delta T < 5^\circ\text{C}$  (보통)  
 $\Delta T < 3^\circ\text{C}$  (부적합)

판단규칙 (1)과 (2)를 적용하여 종합적인 퍼지 판단으로 우리나라 각지역의 기후조건에 따른 증발냉각시스템의 적용성을 검토하였다.

### 3. 결과 및 고찰

증발냉각시스템의 기후적용성에 관한 퍼지 판단을 위하여 우리나라의 기후구분에 따른 대표적인 지역으로 수원, 대전, 춘천, 강릉, 목포, 광주, 대구, 부산, 제주의 9개 지역을 선발하였다(김 등, 1997). 1975년부터 1994년까지 20년간 6, 7, 8월의 매일 최고기온과 습구온도(최저습도로부터 계산)를 이용하여 분석하였으며, 기온이  $30^\circ\text{C}$  이상되는 것만을 판단자료로 사용하였다.

수원지방을 예로 퍼지판단 과정을 설명하면 다음과 같다. 1975년 수원지방의 기상자료를 가지고 식(2)를 이용하여 판단규칙(1)의 요인  $T$ 를 구해 보면 “매우적합” 10일, “적합” 27일, “보통” 3일이고 “부적합”은 없다. 1975년에  $30^\circ\text{C}$  이상인 날은 총 40일이고, 위의 데이터를 40으로 나누면 각각 0.25, 0.675, 0.075, 0.0이 된다. 이것이 1975년 수원지방에 대한 기후적합성의 하위요소가 된다. 즉,

$$R_{T_1} = (0.250, 0.675, 0.075, 0)$$

같은 방법으로 식(3)을 이용하여 판단규칙(2)의 요인  $\Delta T$ 를 구해 보면 “매우적합” 6일, “적합” 18일, “보통” 16일이고 “부적합”은 없다. 이것을 40으로 나누면 관련된 하위요소가 얻어질 수 있다.

$$R_{\Delta T_1} = (0.150, 0.450, 0.400, 0)$$

같은 방법으로 다른해의 하위요소를 구하여 퍼지 판단을 위한 행렬( $20 \times 4$ )을 구성하면 다음과 같다(계산과정은 생략).

$$R_T = \begin{pmatrix} 0.250 & 0.675 & 0.075 & 0 \\ 0.471 & 0.529 & 0 & 0 \\ 0.379 & 0.621 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.288 & 0.692 & 0.019 & 0 \end{pmatrix} \quad R_{\Delta T} = \begin{pmatrix} 0.150 & 0.450 & 0.400 & 0 \\ 0.176 & 0.588 & 0.235 & 0 \\ 0.379 & 0.552 & 0.069 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.692 & 0.269 & 0.038 & 0 \end{pmatrix}$$

매년 30℃ 이상되는 일수를 20년간 분석에 사용된 데이터수로 나누면 가중치 집합을 만들 수 있다.

$$A = (0.076, 0.032, 0.0550.065, 0.053, \dots, 0.099)$$

이 가중치 집합을 앞의 행렬에 곱해주면 증발냉각시스템의 적용성에 관한 판단 결과를 얻을 수 있다.

$$B_T = A \cdot R_T = (0.304, 0.612, 0.084, 0.0) \tag{9}$$

$$B_{\Delta T} = A \cdot R_{\Delta T} = (0.262, 0.502, 0.230, 0.006) \tag{10}$$

식(9)의 의미는 수원지방에서 기온이 30℃ 이상일 때 증발냉각시스템을 이용하여 30%는 실내온도를 30℃ 이하로 냉방할 수 있고, 32.5℃ 이하로 냉방할 수 있는 것이 90% 이상이라는 것이다. 그리고 오직 8.4%만이 실내온도를 32.5~35℃로 유지할 수 있고, 35℃를 넘는 날은 전혀 없다는 것을 의미한다.

식(10)은 수원지방에서 기온이 30℃ 이상인 날의 약 76%가 증발냉각시스템을 이용하여 5℃ 이상 냉각할 수 있다는 것을 의미한다.

마찬가지 방법으로 다른 지역에 대하여 증발냉각시스템의 적용성을 평가해 보면 표1과 같다.

Table 1. Climatic adaptability of evaporative cooling system in Korea

지역	$T_i$ (°C)				$\Delta T$ (°C)				비 고
	≤30	≤32.5	≤35	>35	≥7	≥5	≥3	<3	
수원	0.304	0.612	0.084	0	0.262	0.502	0.230	0.006	적합
대전	0.371	0.510	0.119	0	0.420	0.440	0.134	0.005	적합
춘천	0.526	0.385	0.087	0.001	0.515	0.403	0.080	0.003	매우적합
강릉	0.370	0.480	0.150	0	0.526	0.353	0.121	0	적합
목포	0.184	0.639	0.177	0	0.161	0.503	0.324	0.012	보통
광주	0.227	0.615	0.158	0	0.256	0.511	0.228	0.005	적합
대구	0.388	0.472	0.132	0.008	0.600	0.327	0.070	0.002	적합
부산	0.061	0.733	0.203	0.002	0.040	0.326	0.624	0.009	보통
제주	0.086	0.757	0.157	0	0.095	0.374	0.520	0.011	보통

실내기온( $T_i$ )에 대해서는 춘천과 수원지방이 가장 적용성이 큰 것으로 나왔으며 대체로 32.5℃ 이내로 제어가 가능하고 다른 지방도 35℃를 넘는 경우는 거의 없다. 냉각범위( $\Delta T$ )는 수원, 대전, 춘천, 강릉, 광주, 대구 등 대부분 지역에서 5℃ 이상을 보인 반면에 목포, 부산, 제주지역에서는 3~7℃의 범위를 나타냈다. 종합해 보면 우리나라의 대부분 지역에서 증발냉각시스템의 적용성은 비교적 큰 것으로 나타났으나 남부서해안과 남해안, 제주도지역은 약간 적용성이 떨어지는 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

우리나라의 기후구분에 따른 대표적인 9개지역의 20년간(1975~1994) 기상자료를 기초로 여름철 고온기(6, 7, 8월) 온실에 대한 증발냉각시스템의 적용성을 퍼지수학적인 방법에 의하여 포괄적으로 평가해 보았다.

남부서해안과 남해안, 제주도 등 일부지역을 제외한 대부분 지역에서 실내온도를 32.5℃ 이내로 제어하는 것이 가능하며, 증발냉각시스템에서의 냉각범위가 5℃ 이상으로 나타났다. 본 논문에서 분석한 결과는 환기시스템이 잘 갖추어진 것을 전제로 한다. 우리나라의 여름철 기후는 고온다습하지만 증발냉각시스템의 적용성은 충분히 큰 것으로 판단되므로 확대보급을 위한 기술의 체계화 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 기상청. 1992. HISS 기상 데이터베이스(1971~1990). 한국건설기술연구원.
2. 김문기 외. 1997. 원예시설의 환경설계기준 작성연구. 농어촌진흥공사. pp. 347.
3. 김종호, 이형엽. 1991. 퍼지의 세계. 소학사. pp. 217.
4. 남상운. 1996. 온실 냉방 기술의 현황 및 과제. 한국첨단농업시설협의회 연구 발표 3 : 57-88.
5. 서원명, 윤용철, 박중춘, 손영걸. 1995. 우리나라 온실의 냉방시스템 도입 검토. 경상대 시설원예 연구 2 : 123-145.
6. 최홍림 역. 1989. 농업시설물의 환기. 대광문화사. pp. 127-144.
7. 三原義秋. 1980. 溫室設計の基礎と實際. 養賢堂, 東京. pp. 160-169.
8. 小澤行雄, 內藤文男. 1993. 園藝施設學入門. 川島書店, 東京. pp. 105-113.
9. Canton, G.H., D.E. Buffington and F.B. Mather. 1983. Evaporative Cooling Effects on Mature, Male Broiler Breeders. Trans. of the ASAE 26 : 1794-1797.
10. Gates, R.S. and M.B. Timmons. 1988. Stochastic and Deterministic Analysis of Evaporative Cooling Benefits for Laying Hens. Trans. of the ASAE 31 : 904-909.