

하절기 유리온실의 증발냉각 설계기준을 위한 VETH 선도 연구

우영희¹, 안윤균¹, 김동억^{1*}

¹한국농수산대학

Studies of VETH Plot for Standard Design of Evaporative Cooling at Summer Glasshouse

Y. H. Woo¹, Y. K. Ahn¹ and D. E. Kim^{1*}

¹*Korea National College of Agriculture and Fisheries, 1515, Kongjwipatjwi-ro, Wansan-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 54874, Korea*

Abstract

Judicious control of high temperature is the most important task for the successful intensive-cultivation of vegetables in glasshouses during the hot summer. Estimation of cooling load and wise selection of suitable equipments and facilities based upon the environmental conditions are essential for the efficient temperature control. A series of experiments were carried out to investigate VETH(ventilation, evapotranspiration, temperature and humidity) plot was prepared for the possible practical application in designing some evaporated cooling methods for the following 9 locations; Seoul, Seosan, Taejeon, Pusan, Cheju, Kwangju, Taegu, Chonju, and Chinju.

Key words : Summer, Glasshouse, Evaporation cooling, Veth, High temperature

* 교신저자 : 한국농수산대학 kdel1206@korea.kr

I. 서론

하절기 온실 최고기온이 45°C를 넘어서는 조건에서는 토마토, 파프리카와 같은 수출용 시설 과채류를 재배하는 것은 불가능하다. 시설 과채류의 최고 생육 한계 기온은 35°C로 약 10°C 정도의 차이가 나므로 온실 기온을 최소한 30°C이하로 낮추어야 어느 정도 정상적인 재배가 가능하다. 하절기 유리온실의 45°C 이상의 극한 고온은(우 등, 2015) 기형과 발생(趙 等, 1994), 낙화 및 낙과, 과색퇴화, 수분수정 불량 등을 초래하여 상품성 및 수량을 떨어뜨리기 때문에 국제경쟁력 제고에 큰 문제가 되고 있다.

하절기 시설 과채류 재배시 차광이나 강제 환기에 의존하여 재배환경을 관리(Albright, 1990)하고 있으나 시설과채류의 최고 생육 한계 기온인 35°C이하로 하강시키기는 역부족이며, 최근 지열히트 펌프 또는 공기열 히트펌프와 같은 냉동기 냉방 장치를 이용 하더라도 냉방용량이 부족하여 평지에서 하절기 시설채소 재배는 상당한 투자와 고도의 기술을 요하는 작형으로 간주되고 있으며, 하절기 시설채소 재배를 위한 과도한 시설투자는 부실경영의 한 원인이 되고 있다. 따라서 대부분 농가는 휴작을 하거나 온실 소독을 하는 등 작물을 재배하지 못하고 있는 실정이다(우 등, 2006). 최근에는 하절기 강원도 철원지역에서 토마토, 파프리카 노지면적이 크게 늘어나고 있어 중남부 지역의 시설채소 재배 농가에 큰 부담이 되고 있는 실정이다.

하절기 온실에서 물의 증발냉각을 이용한 기온 하강은 우리나라의 경우 온실이 연중 과습하다는 오해로 부정적인 인식이 많다. 그러나 국내 온실 습도상황은 하절기 장마철 약 20일을 제외하고는 대부분 50% 이하로 건조하기 때문에 오히려 생육장해(토마토, 파프리카 권엽현상, 엽 경화, 토마토 과실 경화 및 각형 모양)의 원인 및 광합성 효율을 떨어뜨리는 문제로 대두되고 있다.

최근에는 여름철 시설 수시차광에 의한 광 호흡 완화 효과(우 등, 2014), 작물자체 내서성향상을 위한 과산화수소(우 등, 2006)와 탄산시비(우 등, 2015) 처리에 의한 항산화 효소 활성으로 고온적응성 향상 등의 연구결과를 활용하여 여름철 시설 채소 재배에 실제로 사용 되고 있다.

본 연구는 三原(1976, 1980)이 제시한 온실의 증발냉각 설계기준인 VETH(Ventilation, Evapotranspiration, Temperature and Humidity) 선도를 국내 기상환경과 모델식을 일부 수정하여 국내 적용 가능성을 검토하고자 수행하였다.

II. 재료 및 방법

하절기 온실 기온하강을 위하여 이용하는 증발 냉각법의 설계 기준안에 대한 국내연구는 전무한 실정이다. 본 실험은 三原(1976)이 제시한 VETH 선도를 작성하는 열수지식을 기본적으로 이용하였으나 약간의 수정보완이 필요하였다. 그 이유는 하절기 온실의 최고기온은 최대 일사량에 의하여 좌우되므로 월평균 일사량으로는 다소 미흡하기 때문이다. 따라서 국내 각 지역의 외부 일사량은 Iwakiri(1969a, 1969b)의 shooting point 이론에 근거한 (1)식에서 R_f' ((전 수평면 일사량의 최고 flux (ly/sec))를 실측 일조시수를 근거로 하여 최대수평면 일사량을 구하여 적용하였다.

$$\sum_{\text{day}} \circ R_s = R_f' \int_0^{\tau} \sin wt \, dt,$$

$$R_f' = \frac{\pi}{2\tau} \sum_{\text{day}} \circ R_s \text{ ly/sec} \text{ -----(1)}$$

$\sum \circ R_s$: 총 수평면 일사량 (ly/day)

τ : 일조시간, 가조시간(=일조시간/일조율) (sec)

$w = \pi/\tau$ 시각 rad/sec

R_f' : 전 수평면 일사량의 최고 flux (ly/sec)

VETH선도는 다음과 같은 4과정을 거쳐서 작성되었다 (三原, 1980; 農林水産技術委員會, 1980).

- ① 환기량에 의한 온실배기의 엔탈피 결정
- ② 증발산량과 환기량에 따른 절대습도 결정
- ③ 증발산량, 환기량, 절대습도에 의한 온도, 상대습도 결정
- ④ VETH선도 작성

본 연구의 대상 온실은 농가보급형 온실구조인 3-2G-3S, 3연동 유리온실로 하였다. 유리온실의 제반특성은 다음과 같다(박 등, 1994).

유리온실 (3-2G-3S, 양지붕형 3연동)

A_f (상면적)=1255.5 m², A_w (표면적)=1940.7m²,
 M (체적)=5315.0m³, R (방열비, A_w/A_f) =1.67, τ
 (일사투과율)=0.88(3.0mm기준), U (총열전달계수)=6.3 W/m²=0.0903 kcal m⁻²min⁻¹°C⁻¹

연구대상 지역으로 서울, 서산, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산, 진주, 제주 등 9지역을 선정하였다. 본 연구는 재현기간 (return period)을 고려하여 작성하였으며 (岩切, 1980; 坪井 等, 1977) 이들 지역의 7월 평균최고기온을 이용하였다. 농업통계분야에서 광범위하게 이용되고 있는 확률 기상 값을 구하는 방법으로 경험적 재현기간 결정법이 있다(岩切, 1980).

이 방법은 부여된 기상자료를 그 값의 크기에 따라 재배열하여 특정 기상 값의 재현기간을 구하는 것으로 그 공식은 다음과 같다(坪井 等, 1977).

$$T_j = \frac{2N}{2j - 1}$$

j : 부여된 기상자료에서 값의 대소 또는 고저순으로 배열한 특정 값의 순위,

N : 통계연수,

T_j : j 번째의 기상 값의 재현기간 (년).

기상자료는 위 식을 이용한 재현기간을 고려하여 지역별로 33년간^{12,13}의 기상자료에서 7월의 평균최고기온의 제 1순위의 극값을 이용하였다. 일사량과 상대습도는 앞에서 언급한 것처럼 7월의 최고 평균기온 값이 제 1의 극값을 나타낸 시기의 7월평균 수평면일사량과 7월평균 최저 상대습도를 이용하였다.

三原이 제시한 VETH선도에 관련된 방정식은 다음과 같은 과정으로 이루어졌다(三原, 1980; 農林水産技術委員會, 1980).

지중전열량과 작물의 광합성에 의한 고정에너지를 무시하면 온실의 열수지식은 다음과 같이 정의된다.

$$A_f R_n = A_w U(\theta_{in} - \theta_{out}) + A_f \rho q(i_{in} - i_{out}).$$

A_f 와 A_w : 온실의 상면적과 벽면적 (m²),

R_n : 온실내의 순방사(kcal m⁻²min⁻¹),

U : 온실벽면을 통과한 열관류율(kcal m⁻²min⁻¹°C⁻¹),

θ_{in} 과 θ_{out} : 온실내외의 기온 (°C),

$q = Q A_f^{-1}$: 환기율(m⁻³m⁻²min⁻¹),

Q : 환기량 (m⁻³min⁻¹),

ρ : 공기의 밀도(kg m⁻³),

i_{in} 과 i_{out} : 온실 내외의 엔탈피(kcal kg⁻³).

이에 근거하여 온실내부 엔탈피방정식은 다음 정렬식으로 표시할 수 있다.

$$i_{in} = i_{out} + \frac{R_n - A_w A_f^{-1} U(\theta_{in} - \theta_{out})}{\rho q} \quad \text{---(2)}$$

상면 순방사량은 다음과 같다.

$$R_n = a \times S_{out}(1-b) \quad \text{----(3)}$$

여기서 S_{out} : 각지역 외부의 최고수평면일사

량(kcal m⁻²min⁻¹)으로 Rf' 로 대체, a'= 0.65 b'=0.1로서 각각 유리온실에 관련된 상수로서 전자는 온실의 투과율에 후자는 상면 반사율에 관계한다.

각 지역의 외부의 최고온도와 최저상대습도를 가지고 습공기선도표 및 관련된 방정식 (林, 1984; 片山, 1982; 岡田, 1985)을 이용하여 절대 습도(X, kg kg⁻¹, 혼합비), 비체적 (V, m³ kg⁻¹), 밀도 (ρ, 비체적의 역수, kg m⁻³)를 계산할 수 있다. 환기율 q는 인위적으로 일정하게 0.75, 1, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 값을 적용하면 i_{in}와 (θ_{in}-θ_{out})과의 관계가 밝혀지고 (θ_{in}-θ_{out})=0°C, 10°C로 하여 i_{in}을 계산한다. 습공기선도상에서 환기율이 각각 0.75, 1, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0일 때 (θ_{in}-θ_{out})=0°C, 10°C 으로 하여 나온 각각의 i_{in}의 두 점을 습공기선도표에서 연결하여 직선을 그리면 각 주어진 환기율에 있어서 외부기상 조건에 따른 온실의 배기의 온, 습도 상태를 나타내게 된다. 다음에 X_{in} 및 X_{out}을 각 지역별로 부여된 기상조건하에서 증발량 곡선을 구하기 위해 다음 식을 이용하였다.

$$E = \rho q(X_{in} - X_{out}),$$

$$X_{in} = \frac{E}{\rho q} + X_{out} \text{ (kg kg}^{-1}\text{)} \text{ -----(4)}$$

- E : 증발산율 (kg m⁻² min⁻¹),
- X_{in} : 내부의 절대습도 (kg H₂O kg⁻¹),
- X_{out} : 외부의 절대습도 (kg H₂O kg⁻¹).

E의 값을 인위적으로 일정하게 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18로 부여하여 X_{in}을 구한다. 여기에서 각각 q값과 X_{in}값에 대응하는 Q_{in}(온도)과 RH_{in}(습도)를 습공기선도(ASHRAE 1989)에서 구한 다음 그 값을 이용하여서 각각 q와 E에 대응

하는 Q_{in}과 RH_{in}과를 plot를 하면 점선군(환기율)과 실선군(증발산율)의 교점은 주어진 기상조건하에서 환기율 및 증발산율과 어떤 온도조건하에서의 배기(내부기상 상태에 가까이)의 온습도 상태를 나타낸다.

본 연구에서 기상환경 요인분석을 위하여 제시된 모든 모델식과 습공기선도(ASHRAE 1989)에 제시된 값은 SAS(SAS Institute 6.2)를 이용한 프로그램 작성으로 관련된 방대한 양의 모든 수치 계산을 수행하였다. VETH 선도는 Auto Cad를 이용하여 작성하였다.

III. 결과 및 고찰

하절기에 온실의 이용효율을 높이기 위하여 증발냉각법을 이용한 온실 냉방을 할 경우에 대해 지역별 VETH선도 작성을 위한 기준이나 지침이 국내에는 아직 없다. 따라서 본 연구는 하절기 하우스의 기온하강을 위하여 증발냉각법을 이용할 경우 이에 대한 설계기준안을 제시하기 위하여 수행하였다. 외국에서는 三原 等(1976)이 이론적인 모형식을 가지고 VETH선도를 작성하였다. VETH선도는 어떤 기상조건하의 온실 환기율(V), 실내증발산량(E), 배기온도(T), 상대습도(H)의 상호관계를 표시한 선도를 말한다. 증발냉각법 선택 시 VETH선도의 구체적인 용도는 온실의 설정온도 유지를 위한 필요환기율 결정, 세무냉방을 할 경우 필요환기율과 세무발생량의 결정, fan & pad 시스템, mist의 필요환기율 결정, 창환기의 자연환기율 추정 등이 있다.

본 연구는 三原이 제시한 이론적모형식(2, 3, 4 식) (三原, 1980; 農林水産技術委員會, 1980)과 Iwakiri(1969a)의 shooting point 이론에 근거한 (1)식을 접목하여 국내 9지역 (서울, 서산, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산, 진주, 제주)의 VETH선도

Table 1. The exhausted enthalpy calculated by using the equation 2 in Pusan

Ventilation rate (m ³ /m ² /min)		0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
Inside enthalpy (kcal/kg ³)	t _m =31.4°C	28.0934	25.8476	23.6017	22.4788	21.3559	20.7944
	t _m =41.4°C	26.4346	24.6035	22.7723	21.8567	20.9412	20.4834

를 작성하여 제시하였으며 본 연구는 이용한 기상환경자료는 지역별로 33년간^{16,17)} 자료 중 7월의 평균 최고기온의 제 1순위의 극값을 이용하였는데 각각 지역별로 그 이용 값의 재현기간(坪井, 1977)을 보면 서울, 대구, 전주, 광주, 부산, 제주 등은 68년, 서산은 54년, 대전은 52년, 진주는 50년이였다.

본 연구에서는 부산지역(Table 1, 2, 3과 Fig.1)을 중심으로 활용 면을 논하였다. 그 이외의 지역은 Fig. 2, 3, 4, 5에 제시하였다. 부산 지역의 결과는 Table 1, 2, 3과 Fig. 1에 있다.

Table 1, 2, 3은 Fig. 1을 작성하기 위하여 (1), (2), (3), (4)식에 의하여 계산된 값이며 이 값과 습공기선도(ASHRAE 1989)를 이용하여 Fig. 1이 작성된 것이다. Fig. 1에서 부산지역 유리온실을 외기와 같은 수준인 31.4°C, 65%로 유지하기 위해서는 증발산량 약 E=12.5g/m²min이 된다. 예를 들어 하절기 시설 과채류 재배시 온실의 bowen ratio은 약 0.7정도이다(內嶋 等, 1979). 온실내의 증발산 E_T=(R_n-ΔT)/(1+β)이다(坪井 等, 1977). 여기서 ΔT: 온도차(내외 온도차는 0°C), β: Bowen ratio이다. 따라서 E_T=7.6g/m²min 된다. 가슴냉방에 필요한 증발수분량은 A_f×(E-E_T)=1255.5×(12.5-7.6)=6151.95g/m²min ≒ 6.2kg/m²min되므로 매분 6.2ℓ의 물을 증발시키는 것이 좋다. fog and fan법에서 대부분 노즐 분무수량의 약 50%만 세무화되므로 사용수량은 12.4ℓ가된다. pad and fan법에서는 증발분무수량의 약 10배 정도를 pad에 흐르게 하면 되므로 분당 62ℓ의 물을 사용하게 된다. 환기율은

2m³/m²min로 하면(환기량 m³/hr=환기율 m³/m²min×상면적 m²=환기회수 no./hr×온실용적 m³) 환기량은 2511 m³/hr된다. fog & fan법에서 fog 노즐 수는 N=A_f (E- E_T)/G_w이다.

여기서 G_w은 fog노즐의 분무수량(g/m²min)으로 125g/m²min하면 약 49개가 필요하다. 이와 같이 VETH선도는 증발냉각법의 설계에 중요한 자료가 되므로 본 실험결과 VETH선도가 제시된 지역은 냉방장치 설계시 실질적인 지침으로 활용 가능할 것이다.

따라서 본 연구에서 제시된 여름철 유리온실의 증발냉각을 위한 설계기준안 연구는 三原(1976)이 제시한 이론적 모형식(2, 3, 4식)과 Iwakiri (1969a)의 shooting point 이론에 근거한 제 1식을 접목하여 국내 9지역 (서울, 서산, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산, 진주, 제주)의 VETH선도를 작성하였다(Table 1, 2, 3, Fig. 1, 2, 3, 5). VETH선도의 구체적인 용도(三原, 1980)는 온실 설정온도 유지를 위한 필요환기율 결정, 세무냉방시 필요환기율과 세무발생량 결정, pad법과 mist법의 필요환기율 결정, 창환기의 자연환기율 추정 등에 이용되는 중요한 자료로서 그 실용적 가치도 매우 높을 것으로 추정된다.

우리나라 여름철 기후는 야간에 습도가 상당히 높아 평균 상대습도가 높아지는 경향이 있으므로 별 효과가 없을 것으로 보이나 온실내의 최고 기온은 주로 일사강도가 최고에 달하는 정오 때 나타나므로 이 시각에는 보통 습도가 낮고 온도는 높으므로 그 효과는 예상보다 클 것으로 판단된다(中川, 1967; 禹 等, 1994). 또한 장마철 20일

을 제외하고는 연중 온실내 상대습도가 광합성 적정수준보다 낮은 50% 이하로 건조하기 때문에 오히려 생육장애(토마토, 파프리카 권엽현상, 엽경화, 토마토 과실 경화각형 모양)의 원인 및 광합성 효율을 떨어뜨리는 문제로 대두되고 있다.

따라서 본 연구에서 제시된 9개 지역의 VETH 선도는 온실내 적정 상대습도 유지 및 기온하강에 필요한 설계기준이 될 것으로 추정된다. 추후 증발냉각에 관련된 더 많은 지역의 연구 필요할 것으로 판단된다.

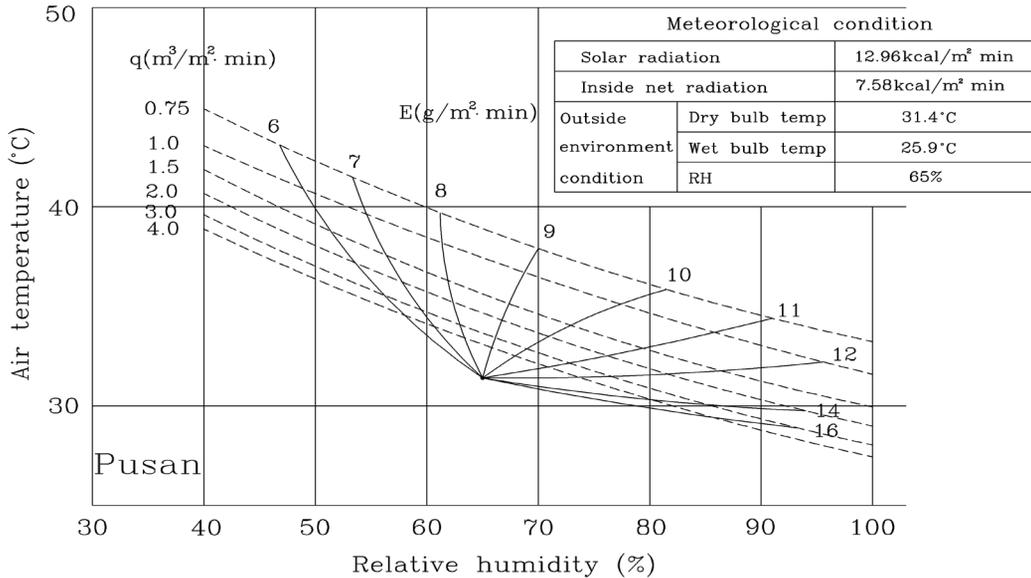


Fig. 1. Ventilation, evapotranspiration, temperature and humidity(VETH) plot of Pusan

IV. 적 요

하절기 하우스 온도환경의 효율적 제어는 온실의 주년재배와 고도 활용을 위한 가장 중요한 당면과제이다. 본 연구는 여름철 지역별 하우스 증발냉각을 위한 설계 기준안으로서 9개 지역(서울, 서산, 대전, 부산, 제주, 광주, 대구, 전주, 진주)의 VETH 선도를 작성하여 제시하였다.

V. 참고문헌

1. 우영희 외 10명. (2006). Hydrogen Peroxide 처리가 여름철 시설오이의 수분 스트레스, 광합성, 내서성에 미치는 영향. 한국생물환경조절학회, 생물환경조절학회지 15(1):39-45.
2. 우영희, 이관호, 강인철, 김동역. (2015). 여름철 시설 토마토 재배 시 Carbon Dioxide 처리가 Water Stress에 미치는 영향. 한국농수산대학 현장농수산연구지. 17(1):93-100.

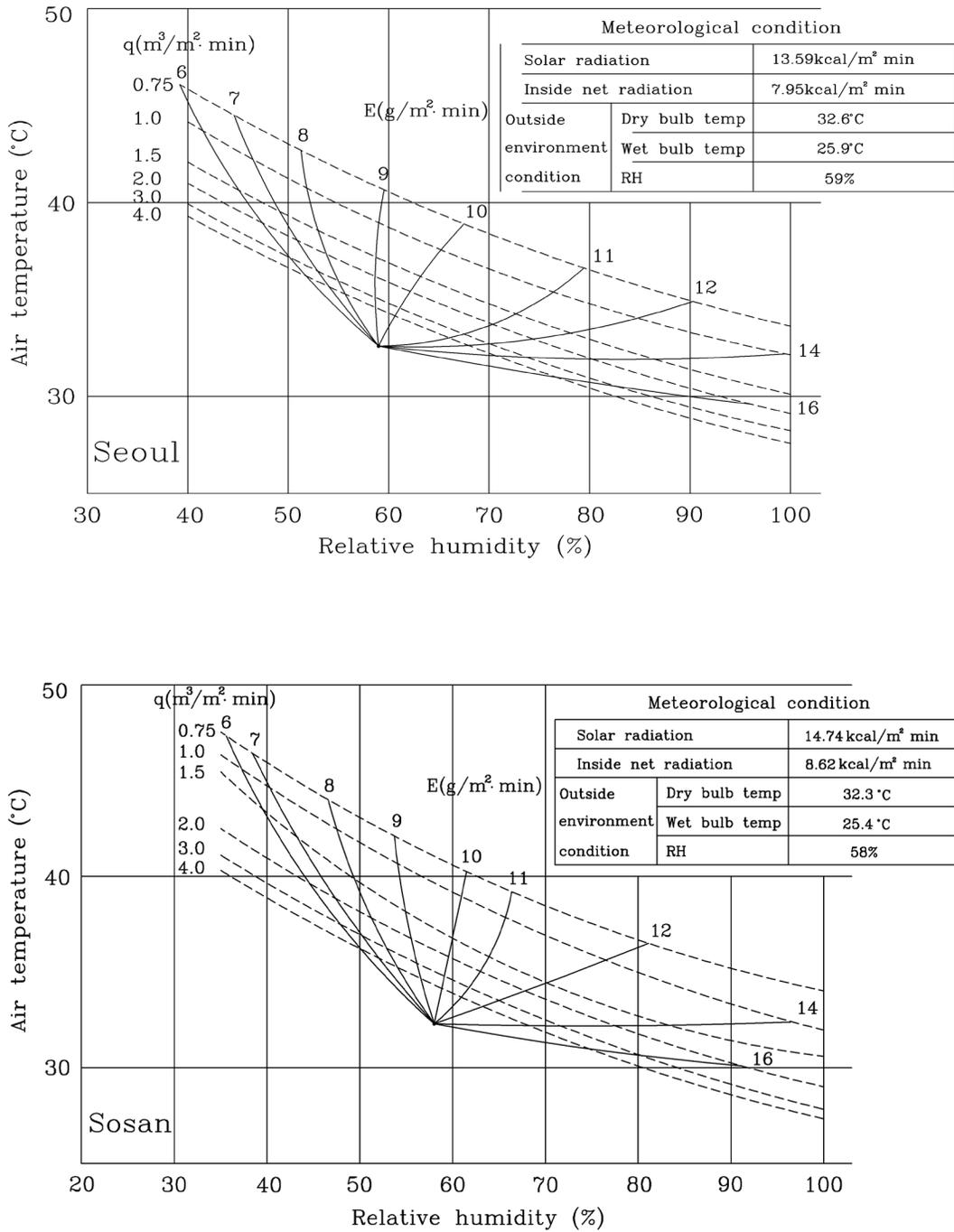


Fig. 2. Ventilation, evapotranspiration, temperature and humidity(VETH) plot of Seoul and Sosan

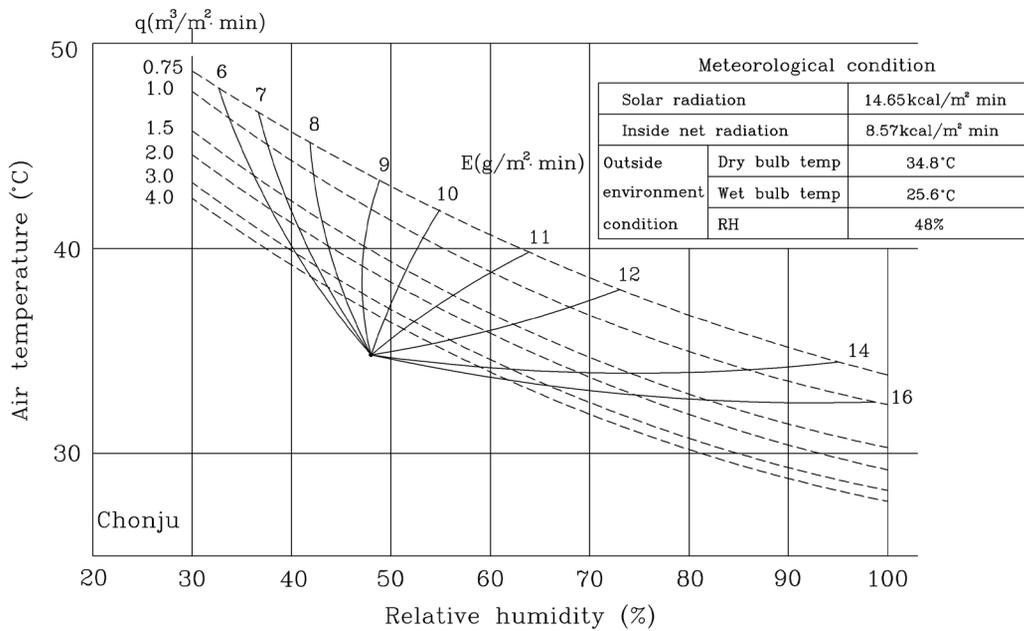
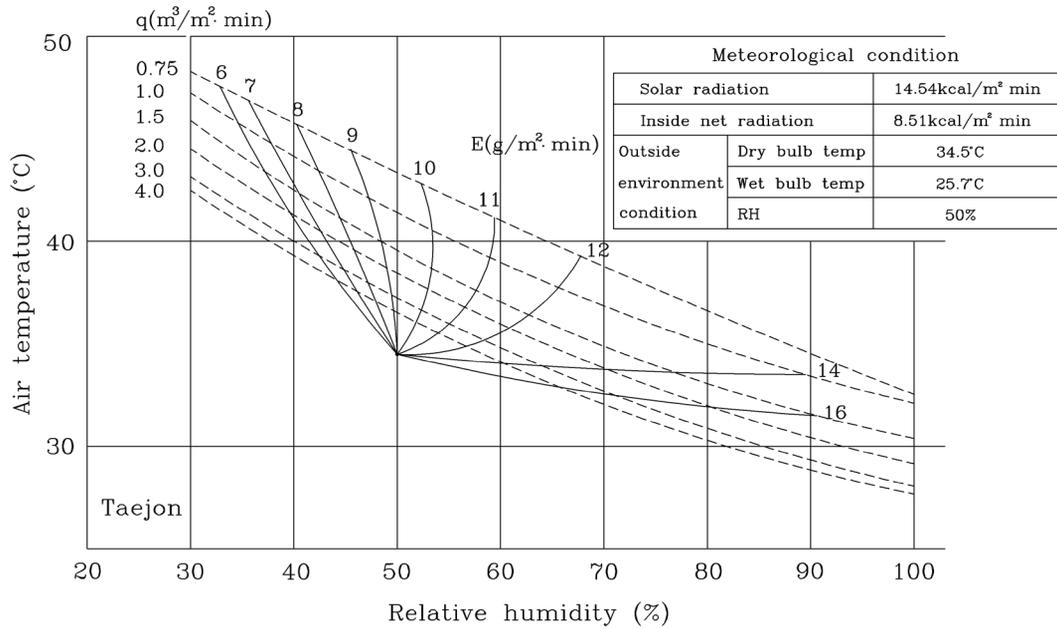


Fig. 3. Ventilation, evapotranspiration, temperature and humidity(VETH) plot of Taejon and Chonju

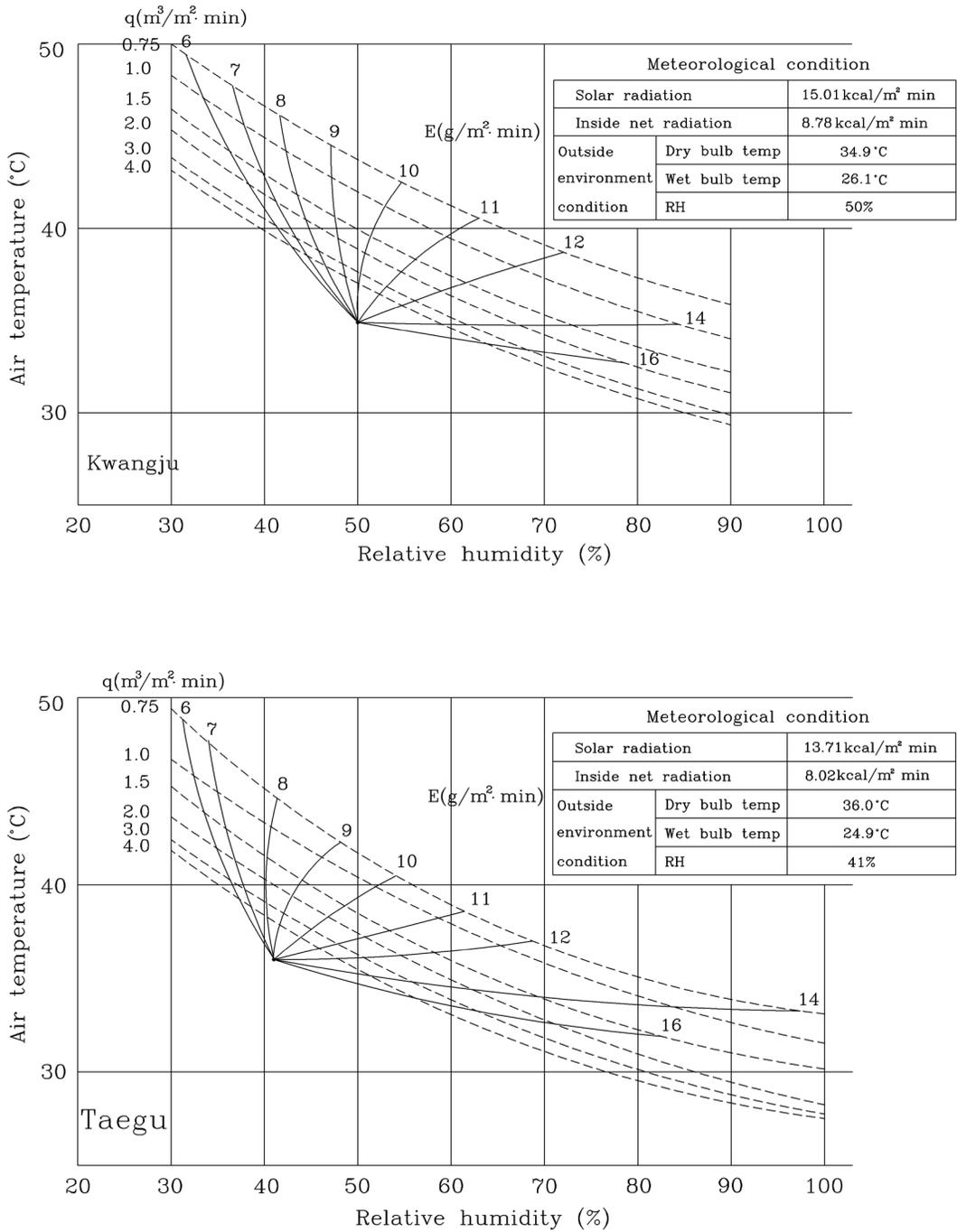


Fig. 4. Ventilation, evapotranspiration, temperature and humidity(VETH) plot of Kwangju and Taegu

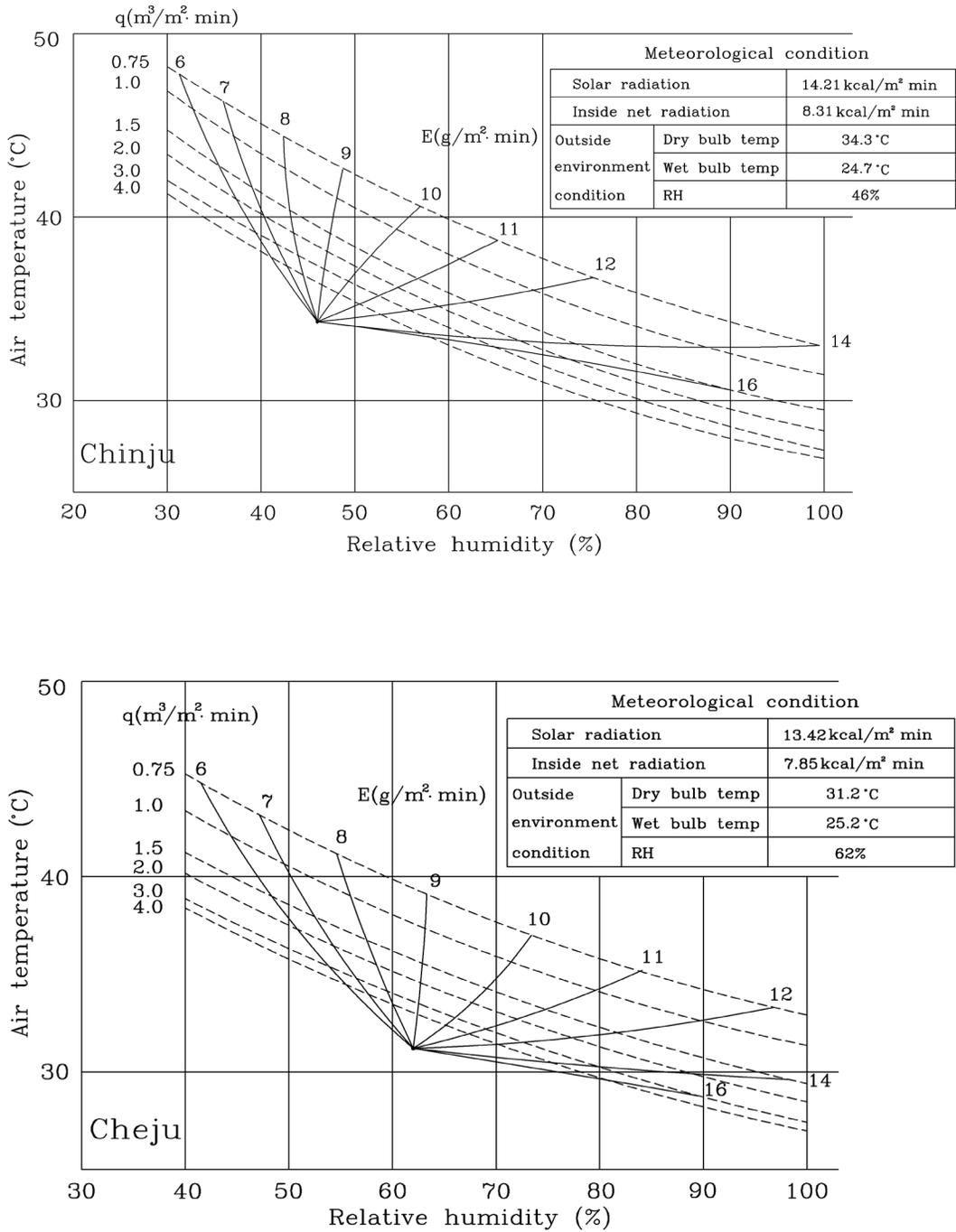


Fig. 5. Ventilation, evapotranspiration, temperature and humidity(VETH) plot of Chinju and Cheju

3. 우영희, 조일환, 이관호, 홍규현, 오대근, 강인철. (2014). 여름철 시설재배에서 일사량에 따른 수시차광이 오이생육에 미치는 영향. 한국농수산대학 현장농수산연구지. 16(1):67-75.
4. 박중춘, 박상근, 민영봉, 이병일, 진영욱. 1994. 시설園藝 現代化 하우스 모델 設定 및 栽培效果에 關한 研究. 農村振興廳 特定課題 第4次年度 完結報告書 pp. 229-292.
5. Albright, L. D. (1990). Environment control for animals and plants. The American Society of Agricultural Engineers. pp. 1-48, 173-203, 319-345.
6. ASHRAE. (1989). Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
7. Iwakiri, S. (1969a). Climate in glasshouse (1), air temperature condition. J. Agr. Met. 24(4): 9-16.
8. Iwakiri, S. (1969b). Climate in glasshouse (2), radiation and humidity. J. Agr. Met. 24(4): 17-23.
9. SAS Institute. (1985). SAS/STAT User's Guide. SAS Institute, Cary, N.C.
10. 岩切 敏. 1980. 平均化日數の異なる氣溫の變動特性と經驗的による再現期間の信賴限界. 農業氣象 36(3): 155-160.
11. 岩切 敏. 內嶋善兵衛. 1970. 하우스內氣候の制御に關する基礎的研究, (3)最高氣溫テグリアワー. 昭和45年度農業氣象學會講演要旨 pp. 40.
12. 坪井八十二, 久保祐雄, 中川行夫, 小澤行雄, 谷 信輝, 內嶋善兵衛. 1977. 農業氣象ハンドブック. 養賢堂 854p.
13. 三原義秋. (1980). 溫室設計の基礎と實際. 養賢堂 pp. 51-17, 145-169.
14. 三原義秋. (1976). VETH線圖と細霧冷房設計. 園藝施設環境制御裝置の計準に關する綜合研究最終報告 pp. 94-106.
15. 農林水産技術委員會. (1980). 高能率施設園藝に關する綜合研究, 高能率園藝施設計劃. 設計基準に關する研究成果. 農林水産技術會事務局 pp. 315- 383.
16. 韓國氣象廳. (1991-1994). 기상연보, 기상월보.
17. 韓國氣象廳. (1991). 한국기후표(I, II), 일별 및 순별 평년값. 월별 평년값(1961-1990).
18. 禹永澮, 南潤一, 宋天鎬, 金亨俊, 金東億. (1994). 夏節期 效率的인 溫度濕 度管理에 關한 研究. 韓國生物生産施設環境學會 3(1): 58-65.
19. 趙日煥, 禹永澮, 仁科弘重, 橋本 康. (1994). 夏期週間の 局所冷房과 토마토 배꼽썩음病發生에 關한 研究. 韓國生物生産施設環境學會 3(1): 36-41.