

## 증발량 관측방법 개선을 통한 자동화 추진 계획(안)

### □ 근거

- 기상관측 자동화 실행계획(관측정책과-3107, 2013.8.26.)
  - 기상관측 자동화 계획(2013~2015) 수립(2013.7.18., 청장결재)

#### [과제 5] 증발량 관측방법 변경

- 증발량 관측 직접 측정에서 산출식을 통한 증발산량 간접 측정으로 변경

- 기상관측 자동화 계획에 대한 의견수렴 회의(2014.4.25.)
  - 증발산량식 대체를 위한 현장시험 운영 및 결과 분석

### □ 현황 및 문제점

- 1964년부터 농업 및 기후관측관서에서 증발량 관측을 수행 중임
  - ※ 근거 : 기상법 제7조 및 관측업무규정 제15조(기후관측), 21조(농업기상관측)

#### ◆ 전일근무관서 22개소 중 기후·농업관측소 16개소 증발량 관측

- ※ 기후관서(11개소): 서울, 부산, 포항, 울릉도, 여수, 목포, 대전, 인천, 강릉, 춘천, 제주
- ※ 농업관서(6개소): 수원, 안동, 전주, 청주, 춘천, 서산(철원, 순천, 진주, 서귀포 미수행)

- 국제연합농업기구(FAO) 및 각국 기상청에서는 증발량의 직접 관측하는 대신 증발산량 산출식으로 증발량 값을 대체하고 있음.

- ※ 증발량 관측 없음 : 유럽(영국, 독일, 프랑스), 일본 등
- ※ 증발량 목적 중지 : 중국(2002년부터 자동관측 실시)
- ※ 증발량 목적 유지 : 미국(위탁 관측), 호주(위탁관측이나 계산식으로 전환 중)

- 일일 수 mm의 관측값에 비하여 강수, 새, 동물, 낙엽 등 다양한 오차요인이 상존하며, 증발량을 기반한 연구나 활용사례가 매우 빈약

1) 국제연합식량농업기구(FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations)

### □ 추진경과

- '12. 6~10월 : 증발량 관측 표준화 및 자동화 방안 연구
- '13. 4월 : 증발량 관측방법 개선안 마련을 위한 워크숍 개최
- '13. 7월 : 기상관측 자동화 계획 수립(청장 결재)
  - 증발량 관측방법을 직접 측정에서 표준 산출식에 의한 방법으로 변경
- '13.11월 : 미국 농업기상 전문가 초청 세미나(자문) 개최
  - 엘리트 교수(오클라호마 주립대학 바이오시스템 및 농공학과 명예교수)
- '13. 9~11월 : 증발량 관측방법 변경을 위한 비교관측 실시
  - 고창기상대 : ' 13.9.12.~11.7. / 수원기상대 : ' 13.9.12.~10.31.
    - ※ 선형 관계가 뚜렷하고, 시계열 변화 경향과 변화값이 유사하게 이동함
- '16. 4월 : 관측값과 산출값 간의 비교 검증 실시(전체 16개 지점)

- ※ 모든 지점에서 상관관계가 0.87~0.95로 매우 높으며, 1:1 선형 관계가 좋음
- ※ 강수시에 무강수보다 오차가 있으며, 시간별 결과가 일별 계산결과보다 선형성이 좋음
- ※ 소형과 대형 증발량 값의 상관관계가 모든 관서에서 0.95 이상이며, 대략 0.7배에 해당됨

- '16. 5월 : 정책간담회 개최(차장 회의주제, 5.24.)
- '16. 5월 : 기상관서(지방청, 지청, 기상대) 및 관련 부서 의견 수렴

### □ 증발량 계산방법

- ◆ Penman-Monteith 증발산량 계산식을 활용하여 증발산량 산출
- ※ 세계농업기구(FAO), 미국 Mesonet, 일본기상청 등에서 사용
- ◆ PM 식으로 계산된 증발산량과 과거자료를 통한 지점별 특성 값으로 팬 계수를 도출하여 소형 증발량 산출
- ◆ 대형증발량은 소형증발량에서 0.7배한 값으로 대신함

### □ 기대효과

- 세계적으로 표준화된 산출식 적용으로 시간별, 일별로 다양한 활용 가능
- 자동 관측요소에서 산출되므로 관측지점 확대가 용이함
- 관측 인원을 자료 품질 관리에 활용하여 자동 관측요소에 대한 품질 향상

### □ 향후계획

- 증발량 직접관측에서 산출식 적용 : 2016.7.1. ~
- 시간별, 일별 증발량 산출 및 제공(7월)
- 지점 확대 병행 : 16개소→38개소(7월)
- 일사계 미설치 지점(여수·울릉도 관측소) 일사계 설치(9월)
  - 여수·울릉도 일사계 설치 이후에도 병행 운영(비교관측자료 확보)

### □ 행정사항

- (관측정책과) : 기상청 고시 및 관측업무규정 등 개정
- (정보통신기술과) : 일조·일사계 MQC 기능 추가
- (국가기후데이터센터) : 자료제공할 때 증발량 관측방법 변경 공지
- (기후·농업 관측소) : 증발량 관측 종료(7. 1. 10시~)
  - 7월 1일자 일기상통계표에 관측방법 변경(목측→계산식) 기입
  - 여수·울릉도 관측소 증발량 목측 유지(12월 31일)
- (한국기상산업진흥원) : 일사계 설치(2개소)

### <참고 1> 시간별 증발산량 계산식

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G_{nr}) + \gamma \frac{C_p}{T_{hr} + 273} u_2 (e^o(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (\text{증발산량 계산식})$$

$ET_o$ 는 증발산량(evaporation, mm/hr)

$R_n$ 는 순복사량(net radiation,  $MJ/m^2/hr$ )

$G_{nr}$ 는 토양열속밀도(soil heat flux density,  $MJ/m^2/hr$ )

$\gamma$ 는 건습계 상수(psychrometric constant,  $kPa/C$ )

$\Delta$ 는 기온에 따른 포화수증기압의 기울기( $kPa/C$ )

$e^o(T_{hr})$ 는  $T_{hr}$ 기온의 포화수증기압(kPa)

$e_a$ 는 1시간 평균 수증기압(kPa)

$T_{hr}$ 는 1시간 평균 기온(C)

$u_2$ 는 2m 높이에 해당하는 1시간 평균 풍속(m/s)

$C_p$ 와  $C_d$ 는 작물의 종류에 따른 계수

(잔디인 경우,  $C_p = 37$ ,  $C_d = 0.34$ )

#### 1. 2m 풍속 계산

$$u_2 = u \times \frac{4.87}{\ln(67.8Ht - 5.42)}$$

$u$ 는 풍속계 높이에서의 풍속(m/s)  
 $Ht$ 는 풍속계의 지상 높이(m)

#### 2. 건습계 상수 계산

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.000665 P$$

$c_p$ 는 specific heat at constant pressure ( $1.013 \times 10^{-3} MJ/kg/C$ )

$\lambda$ 는 수증기 잠열( $2.45 MJ/kg$ )

$\epsilon$ 은 기체상수의 비( $\epsilon = R_v/R_d = 0.622$ )

$P$ 는 현지 기압(kPa)

#### 3. 포화수증기압 계산식(kPa)

$$e^o(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right), \quad T \text{는 기온}(C)$$

#### 4. 기온에 따른 포화수증기압의 기울기 계산

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T}{T+237.3}\right) \right]}{(T+237.3)^2}, \quad T \text{는 기온}(C)$$

## 5. 1시간 총 복사량 계산

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$R_{ns}$ 는 incoming net solar radiation

$R_{nl}$ 은 outgoing net longwave radiation

### 5.1 Net solar radiation for hour

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

$\alpha$ 는 알베도(albedo, 여기서는 풀 위의 값인 0.23을 사용)

$R_s$ 는 일사 관측값( $MJ/m^2/hr$ )

### 5.2. Net longwave radiation for hour

$$R_{nl} = \sigma T^4 (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

$\sigma$ 는 Stefan-Boltzman 상수 ( $2.0413 \times 10^{-10} MJ/K^4/m^2/hr$ )

$T$ 는 기온의 켈빈온도( $K=C+273.16$ )

$e_a$ 는 해당 공기의 수증기압 (kPa)

$R_{so}$ 는 Clear-sky solar radiation ( $MJ/m^2/hr$ )

$\left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$ 는 구름 효과를 반영한 것으로

밤의 경우는 해 지기 2~3시간 전의 값을 사용(여기서는 17시 사용)

### 5.3. Clear-sky solar radiation for hour

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a$$

$z$ 는 해당 지점의 해발 고도(m)

$R_a$ 는 Extraterrestrial radiation ( $MJ/m^2/hr$ )

### 5.4. Extraterrestrial radiation for hour

$$R_a = \frac{12 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))]$$

$G_{sc}$ 는 태양상수( $0.0820 MJ/m^2/min$ )

$d_r$ 은 inverse relative distance Earth-Sun

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

$\phi$ 는 위도(radian),  $\delta$ 는 solar declination(radian)

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$$

$\omega_1$ 과  $\omega_2$ 는 태양 시간각

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi t_1}{24}, \quad \omega_2 = \omega + \frac{\pi t_1}{24}$$

$t_1$ 은 계산할 기간(1시간이면 1.0, 30분이면 0.5)

$\omega$ 는 기간의 중앙에서의 태양 시간각

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t + 0.06667(L_z - L_m) + S_c) - 12]$$

$t$ 는 해당 기간의 중앙에서의 시간값 (14:00~15:00이면 14.5)

$L_z$ 는 지역 시간대의 중앙 경도 (degree)

$L_m$ 은 관측지점의 경도 (degree)

$S_c$ 는 계절에 따른 태양 시간 보정값 (hr)

$S_c = 0.1645 \sin(2b) - 0.1255 \cos(b) - 0.025 \sin(b)$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364}$$

$J$ 는 Number of the day in the year

$\ast$ )  $\omega < -\omega_s$  or  $\omega > \omega_s$ 이면, 태양이 지평선 아래에 있으므로  $R_n = 0$

$\omega_s$ 는 sunset hour angle(radian)

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \tan(\delta)]$$

## 6. 토양 열속 밀도 계산

$$G_{hr} = 0.1 R_n \quad \text{for daylight}$$

$$G_{hr} = 0.5 R_n \quad \text{for nighttime}$$

## 7. 시간별 증발량 계산

$$EV = ET_o / K_p$$

$EV$ 는 증발량(mm/day)

$ET_o$ 는 증발산량(mm/day)

$K_p$ 는 팬 계수로 잔디의 경우

$$K_p = 0.108 - 0.0286 u_2 + 0.0422 \ln(FET) + 0.1434 \ln(RH_{mean}) - 0.000631 [\ln(FET)]^2 \ln(RH_{mean})$$

FET는 지점별 특성값으로 100으로 한다.

## <참고 2> 일별 증발산량/증발량 계산식

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad (\text{증발산량 산출식})$$

$ET_o$ 는 증발산량(evaporation, mm/hr)

$R_n$ 는 순복사량(net radiation,  $MJ/m^2/day$ )

$G$ 는 토양열속밀도(soil heat flux density,  $MJ/m^2/day$ )  $\approx 0$  (for day)

$\gamma$ 는 건습계 상수(psychrometric constant,  $kPa/C$ )

$\Delta$ 는 기온에 따른 포화수증기압의 기울기( $kPa/C$ )

$e_s$ 는 일평균 포화수증기압(kPa)

$e_a$ 는 일평균 수증기압(kPa)

$T$ 는 일평균 기온(C)

$u_2$ 는 2m 높이에 해당하는 일평균 풍속(m/s)

$C_n$ 과  $C_d$ 는 작물의 종류에 따른 계수

(잔디인 경우,  $C_n = 900$ ,  $C_d = 0.34$ )

### 1. 2m 풍속 계산

$$u_2 = u \times \frac{4.87}{\ln(67.8 Ht - 5.42)}$$

$u$ 는 풍속계 높이에서의 일평균 풍속(m/s)

$Ht$ 는 풍속계의 지상 높이(m)

### 2. 건습계 상수 계산

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.000665 P$$

$c_p$ 는 specific heat at constant pressure ( $1.013 \times 10^{-3} MJ/kg/C$ )

$\lambda$ 는 수증기 잠열( $2.45 MJ/kg$ )

$\epsilon$ 은 기체상수의 비( $\epsilon = R_v/R_p = 0.622$ )

$P$ 는 현지 기압(kPa)

### 3. 포화수증기압 계산(kPa)

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2}$$

$$e^o(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T}{T+237.3}\right) \quad : \text{포화수증기압 계산 공식}$$

$T$ 는 기온(C)

### 4. 일 평균 수증기압 계산(kPa)

$$e_a = \frac{e^o(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e^o(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}}{2}$$

### 5. 기온에 따른 포화수증기압의 기울기 계산

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T}{T+237.3}\right) \right]}{(T+237.3)^2}$$

$T$  = 일평균 기온(C) =  $(T_{max} + T_{min})/2$

## 6. Net ratioation 계산

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$R_{ns}$ 는 incoming net solar radiation

$R_{nl}$ 은 outgoing net longwave radiation

### 6.1 Net solar radiation for day

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

$\alpha$ 는 알베도(albedo, 여기서는 풀 위의 값인 0.23을 사용)

$R_s$ 는 일사 관측값( $MJ/m^2/day$ )

### 6.2. Net longwave radiation for day

$$R_{nl} = \sigma T^4 (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

$\sigma$ 는 Stefan-Boltzman 상수 ( $4.903 \times 10^{-9} MJ/K^4/m^2/day$ )

T는 일평균 기온의 켈빈온도(K=C+273.16)  
 $e_a$ 는 해당 공기의 일평균 수증기압 (kPa)  
 $R_{so}$ 는 Clear-sky solar radiation ( $MJ/m^2/day$ )

6.3. Clear-sky solar radiation for day

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_0$$

z는 해당 지점의 해발 고도(m)

$R_0$ 는 Extraterrestrial radiation ( $MJ/m^2/day$ )

6.4. Extraterrestrial radiation for day

$$R_0 = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

$G_{sc}$ 는 태양상수( $0.0820 MJ/m^2/min$ )

$d_r$ 은 inverse relative distance Earth-Sun

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

J는 Number of the day in the year

$\phi$ 는 위도(radian)

$\delta$ 는 solar declination (radian)

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$$

$\omega_s$ 는 sunset hour angle(radian)

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \tan(\delta)]$$

7. 일별 증발량 계산

$$EV = ET_o / K_p$$

EV는 증발량(mm/day)

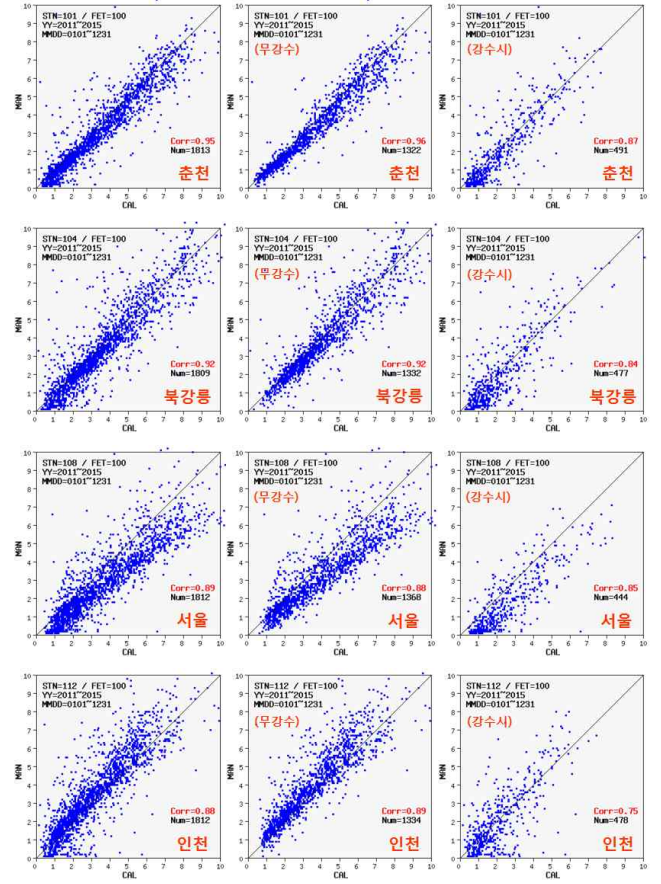
$ET_o$ 는 증발산량(mm/day)

$K_p$ 는 팬 계수로 잔디의 경우

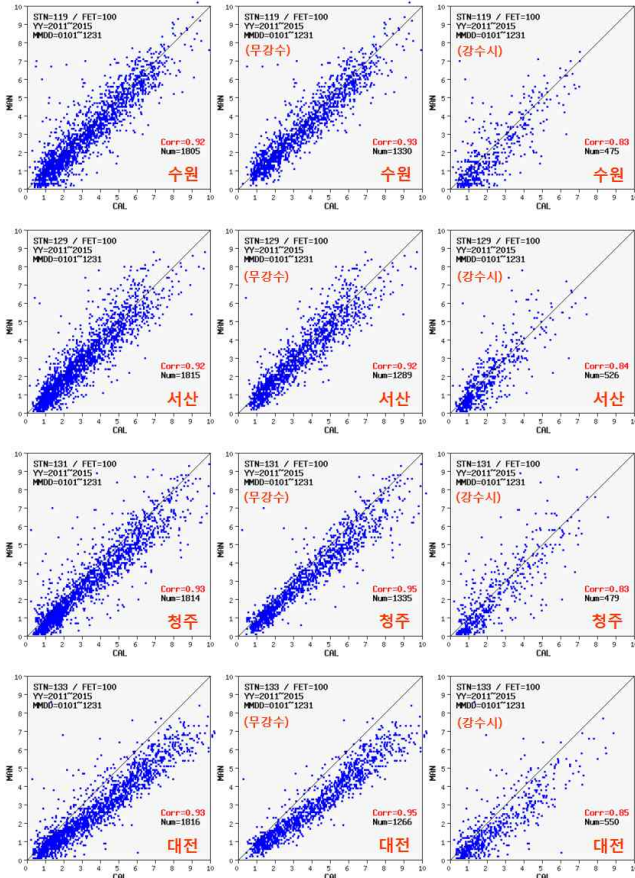
$$K_p = 0.108 - 0.0286 \omega_2 + 0.0422 \ln(FET) + 0.1434 \ln(RH_{mean}) - 0.000631 [\ln(FET)]^2 \ln(RH_{mean})$$

FET는 지점별 특성값으로 100으로 한다.

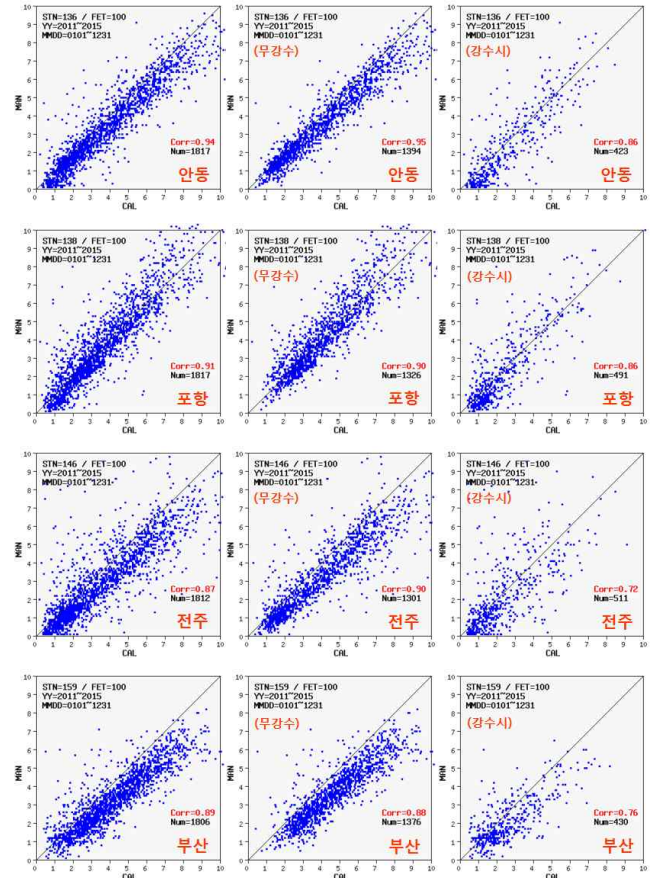
<참고 3> 시간별 자료기반의 증발량 계산결과와 소형 증발계 비교 결과



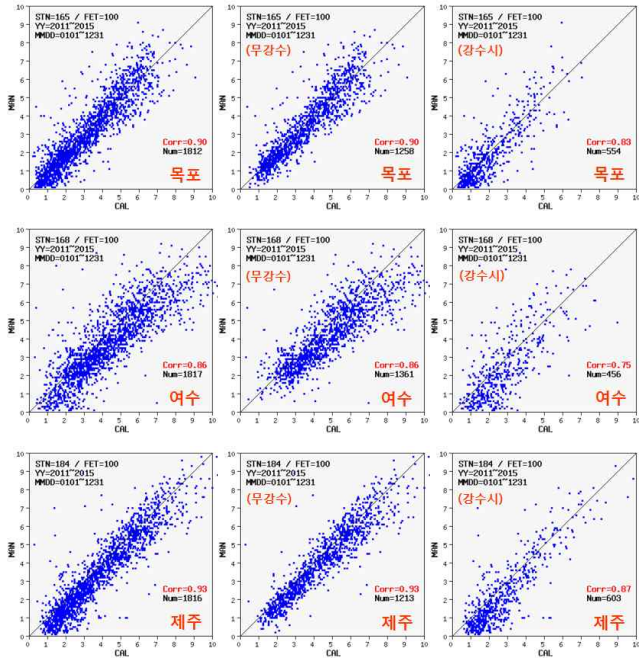
시간별 자료기반의 증발량 계산결과와 소형 증발계 비교 결과 (계속)



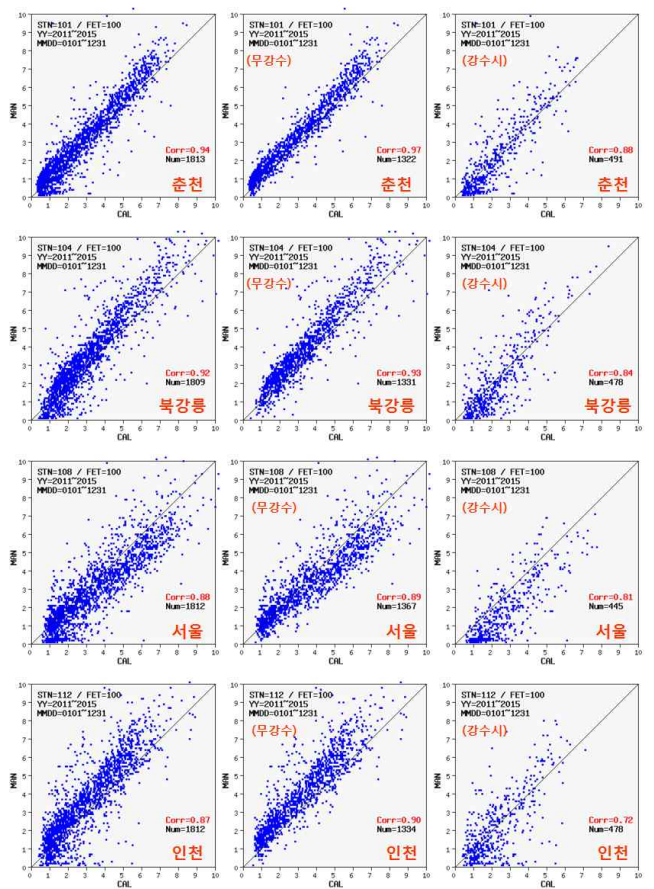
시간별 자료기반의 증발량 계산결과와 소형 증발계 비교 결과 (계속)



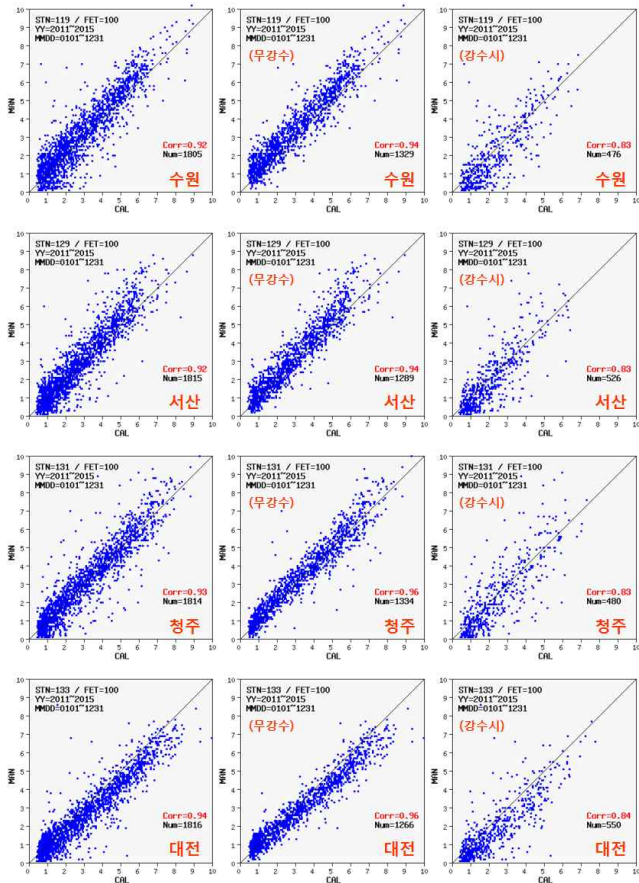
시간별 자료기반의 증발량 계산결과와 소형 증발계 비교 결과 (계속)



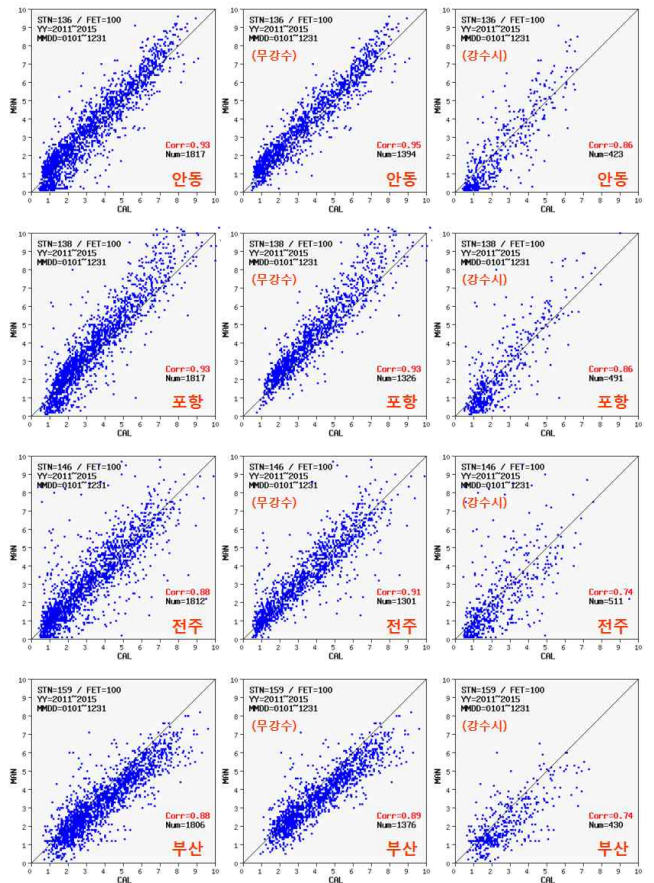
<참고 4> 일별 자료기반의 증발량 계산결과와 소형 증발계 비교 결과



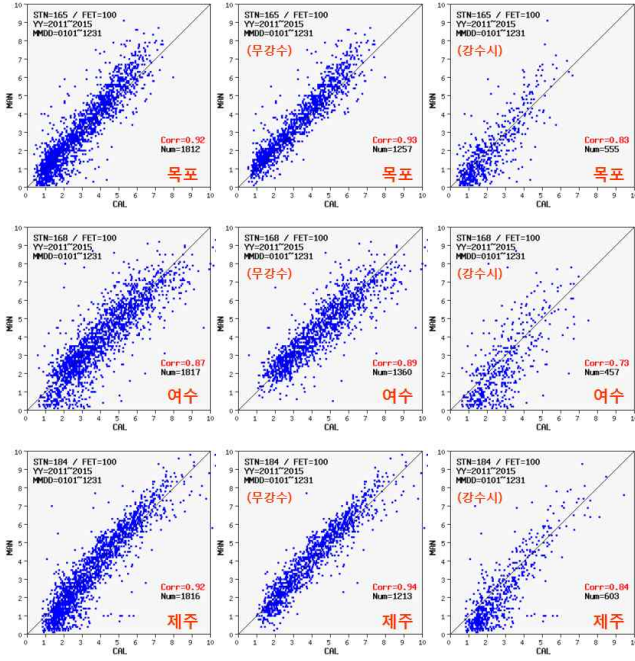
일별 자료기반의 증발량 계산결과와 소형 증발계 비교 결과 (계속)



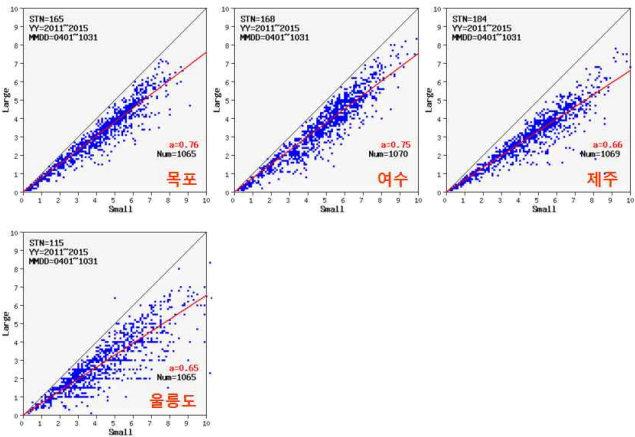
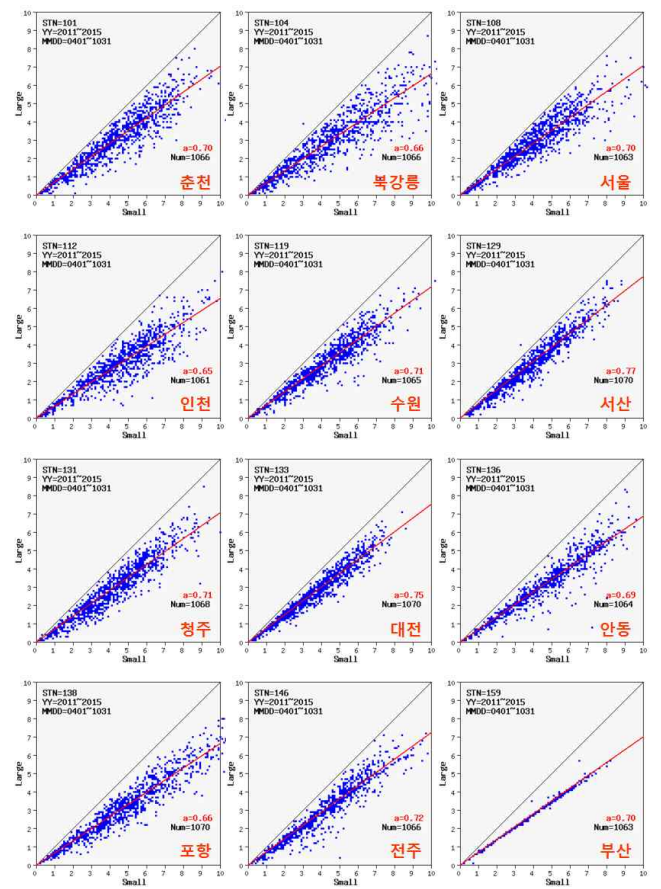
일별 자료기반의 증발량 계산결과와 소형 증발계 비교 결과 (계속)



일별 자료기반의 증발량 계산결과와 소형 증발계 비교 결과 (계속)



<참고 5> 소형과 대형 증발계 관측값의 비교



<참고 6> 증발량 관측방법 개선에 대한 검토의견

검토 의견	검토 결과
○ 본청, 지방청 및 지청에서는 검증이 끝난 새로운 형태의 자동 증발량계(e.g.HQtech(주))를 설치하여 관측 유지 필요 (기상서비스정책과)	○ 시험개발중인 장비가 있으나, 현장 검증이 없고, 고가의 장비를 도입 시 지점 확대가 어려우며, 산출식과의 차이가 크지 않으므로 실효성이 없음