



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

BYL-EV250 수위계를 이용한  
증발의 정밀관측과 추정



2009년 2월

부경대학교 대학원

환경대기과학과

추 성 호

이학석사 학위논문

BYL-EV250 수위계를 이용한  
증발의 정밀관측과 추정

지도교수 변희룡

이 논문을 석사학위논문으로 제출함.



2009년 2월

부경대학교 대학원

환경대기과학과

추 성 호

추성호의 이학석사 학위논문을 인준함.

2009년 2월 25일



주 심 이학박사 권 병 혁 인

위 원 이학박사 김 재 진 인

위 원 이학박사 변 희 룡 인

# 목 차

목차 .....	i
그림 목차 .....	ii
표 목차 .....	iv
Abstract .....	v
1. 서 론 .....	1
2. 자료관측 및 방법 .....	7
가. 관측지점 .....	7
나. 관측기간 및 요소 .....	8
다. BYL-EV250 수위계의 원리와 특징 .....	11
3. 결과 및 분석 .....	12
가. 수위계 관측 오차의 보정 .....	12
(1) 기상 요소들의 일변화 패턴 .....	12
(2) 물질 전달 방법의 고려 .....	15
나. 높이에 따른 ASD의 비교 .....	21
다. 기존 증발 경험식의 검정 .....	23
4. 요약 및 결론 .....	29
참고문헌 .....	32
감사의 글 .....	38

## 그림 목차

- Fig. 1. Satellite imagery of study region. The point in red indicates the location of observation. From Google Earth. .... 7
- Fig. 2. The schematic of BYL-EV250 observation system. .... 11
- Fig. 3. Composite diurnal time-series of (a) observed free-water evaporation in mm, (b) incoming solar radiation in  $\text{ly}$ , (c) air temperature at 1 m height from surface(dashed line), at above the evaporimeter(black solid line), and water temperature(red solid line) in  $^{\circ}\text{C}$ , (d) dew-point at 1 m height from surface(dashed line) and at above the evaporimeter(solid line) in  $^{\circ}\text{C}$ , (e) relative humidity at 1 m height from surface(dashed line) and at above the evaporimeter(solid line) in %, and (f) wind speed in  $\text{ms}^{-1}$ , with 10-min interval. Vertical dotted lines are located at every 6 hours in whole diagrams. .... 14
- Fig. 4. Scatter diagram of ASD vs observed evaporation( $E_o$ ) for 51 data from composite diurnal time-series that the difference between air temperature( $T_s$ ) and water temperature( $T_w$ ) is less than  $0.5^{\circ}\text{C}$ . .... 16
- Fig. 5. Same as Fig. 4 but for 3034 data from whole observed data. .... 16
- Fig. 6. Composite diurnal time-series of (a)  $E_o$ (solid line) and  $E_e$ (dashed line) in mm, (b)  $T_s$ (solid line) and  $T_w$ (dashed line) in  $^{\circ}\text{C}$ . .... 18

Fig. 7. Diurnal time-series of TDWA(dashed line) in °C with an ordinate on the left-side and Eo-Ee(solid line) in mm with an ordinate on the right-side. ....	19
Fig. 8. Scatter diagram of TDWA vs Eo-Ee. ....	19
Fig. 9. Scatter diagram of estimated evaporation vs adjusted evaporation (a) in 10-min evaporation, and (b) in hourly evaporation. ....	20
Fig. 10. Scatter diagram of (a) ASDa vs Ea, and (b) ASDs vs Ea. ....	22
Fig. 11. Composite diurnal time-series of standardized values of (a) adjusted evaporation, (b) air temperature, (c) water temperature, (d) relative humidity, (e) vapor pressure deficit, (f) air saturation deficiency, (g) wind speed, and (h) incoming solar radiation. ....	25
Fig. 12. Correlation coefficients between adjusted evaporation and each component in diurnal variation. The coefficient of RH is inverted. ....	26
Fig. 13. Daily time-series of standardized values of (a) adjusted evaporation, and (b) to (h) other meteorological components same as Fig. 11. Dashed line in each diagram divides observed period into autumn, 2006 and spring, 2007. ....	27
Fig. 14. Same as Fig. 12 but in daily variation. ....	28

## 표 목차

Table 1. Selected 109 days (boldface) from 6 months. ....	8
Table 2. Informations about instruments used for observation. ....	9
Table 3. Notation - the following symbols are used in this paper. ....	10
Table 4. Meteorological components used in several preceding studies. ....	23



# Precise Observation and Estimation of Evaporation with using BYL-EV250

Sung-Ho Choo

Department of Environmental Atmospheric Sciences,  
The Graduate School, Pukyong National University

## Abstract

This study found the recently developed liquid-level observation instrument(BYL-EV250) shows error caused by temperature difference between water and air(TDWA). First, we approached to suggest an adjustment method. And mass-transfer method(MTM) was used to calculate observational error quantitatively. As a result, simple adjustment equation was derived. It became possible to derive closer to the real evaporation by adjustment of observed evaporation by BYL-EV250. And we also found the calculated evaporation with MTM almost consist with adjusted evaporation. Second, this study raised a question from preceding studies based on MTM. Most studies observed air saturation deficiency(ASD), the source of evaporation, at 1, 1.5 m or higher height. Evaporation occurs at interface between water and air. So ASD observed closer to the interface will shows better result to estimate evaporation.

Key-words: free-water evaporation, adjustment analysis, evaporation estimation method, mass-transfer method, interface between water and air

## 1. 서론

오늘날 물 부족 현상과 지구 온난화가 현대의 중요한 두 가지 문제로 대두되었는데(Charles *et al.*, 2000), 특히 물 부족 현상은 인류에게 있어 잠재적인 위험요소라고 할 수 있다(Gleik, 2003; Oki and Kanae, 2006; Yeston *et al.*, 2006). 물 순환의 한 부분을 차지하는 증발은 기상학 및 기후학을 비롯하여 수문학적 순환의 이해와 수자원 계획 및 연구에 있어서 필수적인 요소이다(Xu and Singh, 1998; Tanny *et al.*, 2008). 그러나 호수나 바다 등에서 발생하는 자연 증발은 규모가 크기 때문에 정확한 관측이 어렵고, 주변 환경을 구성하는 다양한 조건과 요소의 복합적인 상호작용으로 인해 분석이 어렵다. 그래서 규격화된 증발계(evaporimeter)에 물을 넣고 일정시간 동안 수위의 변화치를 증발량으로 간주하는 자유 수면 증발(free-water evaporation) 관측이 일반적으로 이루어져 왔다. 관측에 사용되는 증발계로는 소형증발계(E-601 copper pan), 대형증발계(class A pan), 콜로라도 증발계(sunken Colorado pan), Russian GGI pan, IMD standard pan 등 다양하다. 그 중 대형증발계는 지름 120.65 cm, 깊이 25.4 cm로 크고 무거운 편이라서 설치와 관리가 어렵다는 단점이 있지만 관측치에 대한 신뢰도가 높아 세계적으로 가장 널리 사용되고 있다(Duggal and Soni, 1996). 이렇게 관측된 자유 수면 증발량은 경험적으로 도출한 가중치를 이용하여 자연 증발량을 추정하는데에 사용된다(Ferguson *et al.*, 1985). 그 활용 예로 Kohler(1954)는 콜로라도 증발계로 관측한 자유 수면 증발량( $E_s$ )에 대한 호수의 증발량( $E_L$ )의 비( $E_L/E_s$ )는 일반적으로 0.9라고 하였다. 그리고 Turk(1970),

Brutsaert(1982), Sellers(1995)는 대형증발계로 관측한 자유 수면 증발량( $E_p$ )에 대한 호수의 증발량( $E_L$ )의 비( $E_p/E_L$ )가 건조(arid) 혹은 반건조(semi-arid) 지역에서는 약 0.6, 습한(humid) 지역에서는 약 0.8이라고 제시한 바 있다. 이는 비열이 작은 금속 재질 증발계로 인한 영향과 주위 환경이 포함하는 수분의 차이를 경험적으로 감안한 것이다.

현재 세계적으로 세계기상기구(world meteorological organization; WMO)의 관측기준에 따라 1일 1회 00 UTC에 자유 수면 증발량(이하 증발량) 관측이 이루어지고 있다. 대부분의 기상 요소(기온, 노점온도, 풍향, 풍속, 강수량, 운량 등)가 1분 내지 1시간 간격으로 관측되고 있는 것에 비하면 그 관측빈도가 현저하게 낮으므로 증발량과 정밀한 상호비교가 거의 불가능하다. 증발량 관측이 1일 1회에 머물렀던 가장 큰 이유는 증발계 내의 수위를 측정하는 기기가 충분한 정확도 및 분해능을 가지지 못하기 때문이다(이부용, 2001; 이부용, 2002). 기존의 관측방법과 기기는 최소 0.5 mm 이상의 분해능과  $\pm 0.5$  mm 이상의 측정오차를 가졌다. 일반적으로 중위도 지역의 일 증발량은 4~8 mm 범위를 나타낸다(Rose and Chapman, 1968; Hicks *et al.*, 1977; Lafleur and Roulet, 1992; Burba *et al.*, 1999). 그리고 한반도에서 증발이 가장 활발한 5월과 8월의 평균 일증발량은 3.5 mm 미만이다(김광섭, 임태경, 2006). 즉, 단순 계산으로 평균 시간 증발량이 0.2~0.4 mm 정도인 것을 알 수 있는데 이는 기존 관측의 측정오차 한계를 벗어난다. 따라서 이전까지 일단위보다 시간적으로 세분화된 증발량 측정은 불가능했다고 할 수 있으며, 관측하더라도 충분한 신뢰도를 가질 수 없었다. 최근 이부용(2001)이 분해능 0.02 mm, 측정오차  $\pm 0.03$  mm로 크게 개선시킨 BYL-EV250 수위계를 개발하면서 1시간 또는 그 이하의 간격으로 증발량을 측정할 수 있게 되었다. 제작에 사용된 부력을 이용한 액위(liquid level)의 정밀 관측 원

리는 한국, 미국, 일본에서 각각 발명특허를 획득한 바 있다. 이와 같이 이론과 원리는 인정받았지만 제작된 수위계는 특정 환경에서 오차를 가지는 것으로 판단되어 아직 일반화되지 못하고 있다. 그럼에도 불구하고 오차를 유발시키는 조건과 오차의 정량적인 분석은 시도된 바가 없다.

본 연구에서는 오차의 정량화 및 보정 방법 제시를 위해 오차가 나타나는 조건을 찾아보았다. 수개월에 걸쳐 BYL-EV250 수위계를 이용하여 증발량을 관측한 결과, 일사 시작 후에 증발량이 급감하는 형태가 일반적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히 맑은 날에는 감소의 폭이 더 크게 나타나고 음의 값을 보이는 시간대가 짧게는 1시간 내외, 길게는 3시간 이상 지속되었다. 다시 말하면, 일사 시작 후에 증발량의 급감 현상이 나타나며 일사가 원활한 날에 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 확인되었다. 이러한 일변화 형태는 BYL-EV250 수위계를 사용한 Lee *et al.*(2004), 한진수, 이부용(2005) 등의 연구에서도 동일하게 나타났으나 그들은 일반적인 증발의 일변화로 해석했다. 하지만 증발량이 급감하는 시간대에는 일사로 인해 기온, 수온이 상승하고 상대습도가 하강하면서 증발에 용이한 조건이 형성된다. 따라서 해당 시간대의 증발량 급감을 실제 현상으로 인식하기에는 무리가 있다고 판단하고 오차의 원인을 가정하고 정량적인 계산을 위한 분석을 수행하였다. 수위계의 상부는 외기에 노출되어 일사의 직접적인 영향을 받고 하부는 물에 잠겨 있어 수온의 영향을 받는다. 그리고 해당 시간대에는 비열의 차로 인해 기온이 수온보다 빨리 높아진다. 그에 따른 수위계 상하부의 열적 차이가 오차를 유발했을 것이라 가정하고 접근했으며, 실제로 기온과 수온 사이의 온도차와 증발량의 오차 사이에서 높은 선형관계를 확인할 수 있었다. 그 과정에서 아래에 소개할 물질 전달 이론(mass-transfer theory; MTT)을 참고하였다. 기기적인 문제의 보완을 위한 이러한 접근을 통해 정밀성

면에서 뛰어난 BYL-EV250 수위계의 활용도를 높일 뿐만 아니라 증발량 관측의 시간적 세분화의 가능성을 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

앞서 언급한 바와 같이 최근까지 수위 변화의 정밀 측정 능력이 부족했다. 또한 증발량 관측을 위해서는 증발계와 수위계를 갖추고 내부의 물도 정기적으로 관리해야 한다. 이전부터 이러한 관측과 관리의 어려움 때문에 증발량 추정 방법(evaporation estimation method; EEM)을 제시하기 위한 경험적인 연구(Fitzgerald, 1886; Harbeck *et al.*, 1958; Morton, 1968; McGuinness and Bordne, 1972; McGinn and McLean, 1995; Rasmussen *et al.*, 1995; Burba *et al.*, 1999; etc.)가 이루어져 왔다. 증발량보다 관측이 용이하고 일반적으로 증발과 관련이 있다고 생각되는 기상 요소(기온, 수온, 상대습도, 풍속, 일사량 등)를 이용한 경험식을 제시하는 방식이었다. 그 중 Dalton(1802)이 제시한 물질 전달 방법(mass-transfer method; MTM)은 가장 오래된 것이라고 할 수 있는데 간단한 관계식 형태를 갖추어 계산이 용이하며, 높은 정확도를 보인다는 장점이 있다(Singh and Xu, 1997). MTM에 의하면 증발량은 공기의 포화부족분(air saturation deficiency: ASD)에 비례하며, 다음 식으로 나타낼 수 있다(Hine, 1924).

$$E = a(e_{T_w} - e_{T_d}) \quad (1)$$

여기서  $a$ 는 경험적으로 도출 및 변경 가능한 증발 계수(evaporation coefficient; EC)이며,  $e_{T_w}$ 는 물의 수증기압(수온에 대한 수증기압),  $e_{T_d}$ 는 공기의 수증기압(대기 중의 노점온도에 대한 수증기압)을 나타낸다. 따라서 괄호 안의 항을 ASD라고 할 수 있으며, 수온이 대기의 노점온도보다 높은 경우에는 ASD가 양(+),  $E$ 가 양(+)이므로 증발이 발생하고 반대

의 경우에는 응결이 발생한다. 그 외에도 Rosenberry *et al.*(2007)에 의하면 증발 잠열, 일사, 풍속 등의 다양한 요소를 복합적으로 이용한 연구(Stewart and Rouse, 1976; Brutsaert and Stricker, 1979; deBruin and Keijman, 1979; Brutsaert, 1982), 일사 시간과 기온을 결정 요소로 사용한 연구(Hamon, 1961) 등이 있었다.

이후 Fitzgerald(1886), Meyer(1915), Horton(1919), Penman(1948), Harbeck *et al.*(1954), Kuzmin(1957) 등은 ASD만을 포함한 기존의 MTM을 보완하기 위해 풍속 항을 추가했다. 바람은 수면 부근에서 습윤해진 공기를 건조한 상부 공기층과 혼합하여 증발을 촉진시키는 역할을 하기 때문이었다. 연구에 따라 다르지만 ASD의 계산에 사용되는 대기 중의 노점온도는 1 m 이상의 특정 높이에서 측정되었다. 증발이 물과 대기의 접촉면에서 발생하는 현상임을 고려하면 ASD는 수면 가까이에서 측정되어야 할 것으로 생각된다. 그렇게 해야 바람에 의한 수면 부근 공기 특성의 변화가 증발의 원동력인 ASD에 반영될 것이므로 풍속을 따로 고려하지 않아도 실제 증발량에 가까운 값을 계산할 수 있을 것으로 생각되어 이에 대한 비교분석을 수행하였다.

Xu and Singh(1998)은 증발량과 기상 요소(기온, 풍속, 상대습도, 포화 수증기압차(vapor pressure deficit; VPD), 일사량)와의 연관성을 네 가지 시간규모(hourly, daily, 10-day, monthly)에서 분석하고 추가적으로 여러 추정식을 월별 및 계절별로 비교분석한 바 있다. 이에 대한 간단한 비교 분석을 수행하였다. McGinn and McLean(1995)은 기상 요소와 증발량을 매시간 관측하여 상관성을 분석하였다. 주간에는 기온, 야간에는 풍속과 가장 높은 상관관계를 보인다고 하였으나 상관계수 계산에는 일평균 자료가 사용되어 1시간 간격으로 관측한 시계열 자료를 효율적으로 이용하지 못하였다. 증발량 관측에는 potentiometer method가 사용되었는데, 이

는 특정 높이로부터 수면에 떠 있는 부이까지 연결된 줄의 길이 변화에 따라 측정부에 작용하는 전기적 저항을 변하게 하여 수위를 측정하는 방법이다. 이부용(2002)에 의하면 이 방법 또한  $\pm 0.5$  mm 이상의 측정오차를 가지기 때문에 해당 연구의 증발량 자료를 신뢰하기는 어렵다. 그 외에도 다양한 환경에서의 증발의 특성 분석에 관한 연구(Anderson and Jobson, 1982; Warnaka and Pochop, 1988; Abtew, 2001; etc.)가 이루어졌는데 여기에는 선행연구에서 제시한 여러 경험식으로 계산한 추정 증발량이 사용되었다. 마지막으로 본 연구에서는 주요 기상 요소와 증발량과의 관계를 두 가지 시간 규모(diurnal, daily)에 대해 분석하여 지금까지 제시되어 온 다양한 증발량 추정 방법의 활용 가능성과 한계를 알아보았다.



## 2. 자료관측 및 방법

### 가. 관측지점

부경대학교 대연캠퍼스 4호관 옥외관측소(35°08'06"N, 129°06'16"E, 27 MASL)에서 관측을 수행하였다. Fig. 1은 관측지점을 비롯한 주변 지역의 위성사진이다. 건물과 도로가 대부분의 면적을 차지하는 도시 지역이라고 할 수 있으며, 가장 가까운 해안과는 직선거리 약 500 m 정도이다.



Fig. 1. Satellite imagery of study region. The point in red indicates the location of observation. From Google Earth.

## 나. 관측기간 및 요소

2006년 9월 1일부터 11월 30일까지(91일), 2007년 3월 1일부터 5월 31일까지(92일)의 기간 동안 10분 간격으로 관측을 실시하였다. 그 중 0.5 mm 이상의 강수가 있었던 날과 증발계에 물을 보충한 날은 수온, 증발량 등의 요소 관측이 정확하다고 보기 어려우므로 분석 대상에서 제외하였다. 그리하여 2006년 가을에서 63일, 2007년 봄에서 46일, 총 109일이 선택되었으며, 분석에 사용된 날과 월별 일 수를 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Selected 109 days (boldface) from 6 months.

Year	Mon.	Date	Number of selected days
2006	Sep.	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 <b>19 20 21</b> 22 23 24 25 26 27 28 29 30	18
	Oct.	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 <b>19 20 21</b> 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	26
	Nov.	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 <b>19 20 21 22</b> 23 24 25 26 27 28 29 30	19
2007	Mar.	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	15
	Apr.	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	16
	May	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	15

관측에 사용된 기기들과 주요사항을 Table 2에 정리하였다. 증발계 중심부에 BYL-EV250 수위계를 설치하여 수위를 관측하였고 10분 동안의 수위변화를 증발량으로 간주하였다. 하지만 10분 간격 관측치는 수면진동에 따른 변동(fluctuation)이 크게 나타났으며, 이를 보완하기 위해 50분 이동평균을 사용하였다. 기온과 노점온도는 증발계 상부와 지상 1 m 높이에 각각 설치된 Hobo로 관측했으며, 이를 이용하여 상대습도를 계산하였다. 수온은 수위계 옆의 수심 5 cm 깊이에서 Smart Button으로 관측하였으며, 증발계 부근에 설치된 AWS로 일사량과 지상 1.8 m 높이의 풍속을 관측하였다. 그리고 수증기압은 아래 식으로 계산되었다.

$$e_T = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T}{237.3+T}} \quad (2)$$

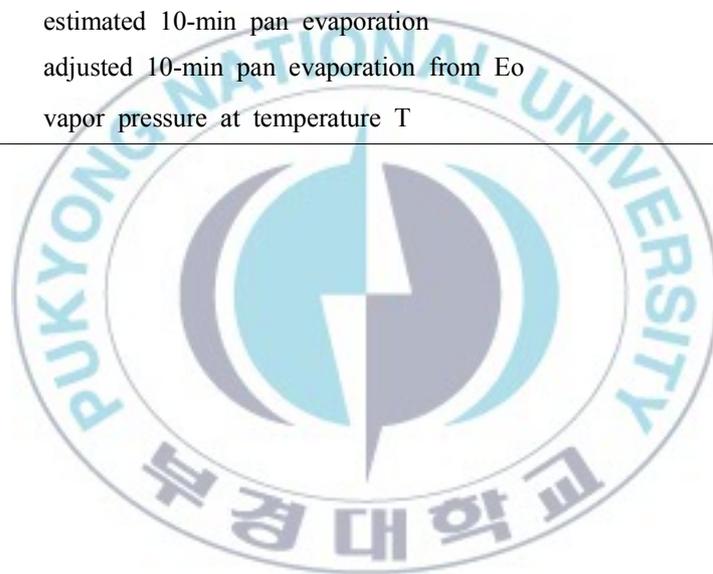
식(2)에서 T는 섭씨(°C) 단위의 온도이며,  $e_T$ 는 T에 대한 hPa 단위의 수증기압이다. Table 3에는 본 연구에서 언급되는 기상 요소들의 표기 방법과 단위 등을 정리하였다.

Table 2. Informations about instruments used for observation.

Instrument	Observed factors	Locations	Observational error
Hobo	air temperature, dew point temperature	above the evaporimeter, 1.0 m height	$\pm 0.4$ °C
Smart Button	water temperature	5 cm depth	$\pm 0.5$ °C
AWS	wind speed, solar radiation	1.8 m height	$\pm 0.4$ ms <sup>-1</sup> $\pm 0.5$ ly
BYL-EV250	evaporation (with observing change in water-level)	center of the evaporimeter	$\pm 0.03$ mm

Table 3. Notation - the following symbols are used in this paper.

Abbr.	Unit	Explanation
Ta	°C	air temperature at 1 m height above the surface
Tda	°C	dew point temperature at 1 m height above the surface
RHa	%	relative humidity derived from Ta and Tda
Ts	°C	air temperature at above the evaporimeter
Tds	°C	dew point temperature at above the evaporimeter
RHs	%	relative humidity derived from Ts and Tds
Tw	°C	water temperature at 5 cm depth
V	ms <sup>-1</sup>	wind speed at 1.8 m height
S	ly	incoming solar radiation
Eo	mm	50-min running mean of observed 10-min pan evaporation
Ee	mm	estimated 10-min pan evaporation
Ea	mm	adjusted 10-min pan evaporation from Eo
$e_T$	hPa	vapor pressure at temperature T



## 다. BYL-EV250 수위계의 원리와 특징

BYL-EV250 수위계의 직경은 10.16 cm, 높이는 51.0 cm, 최대 측정범위는 240 mm 이다. 외부 재질은 산화로 인한 변질 가능성이 낮은 스테인리스 스틸을 사용하였으며 직접적인 태양복사 에너지의 영향을 차단하기 위해 단열재를 사용하였다. 그리고 증발기록계 상하부에 위치한 직경 3 mm 구멍 두 개를 제외하고는 폐쇄형으로 제작하여 수면진동의 영향을 최소화시켰다. 상부의 구멍은 약 31 cm 높이, 하부는 약 2.5 cm 높이에 위치하고 있다. Fig. 2는 BYL-EV250 수위계의 측정 원리에 대한 모식도이다(한진수, 이부용, 2005). 수위변화에 따라 원통형 부력 추에 작용하는 부력의 변화를 미세하게 측정할 수 있는 로드 셀을 사용하였는데, 부력은 물의 질량이 변하지 않는 한 일정하므로 수온에 따른 부피보정의 필요가 없다는 장점이 있다.

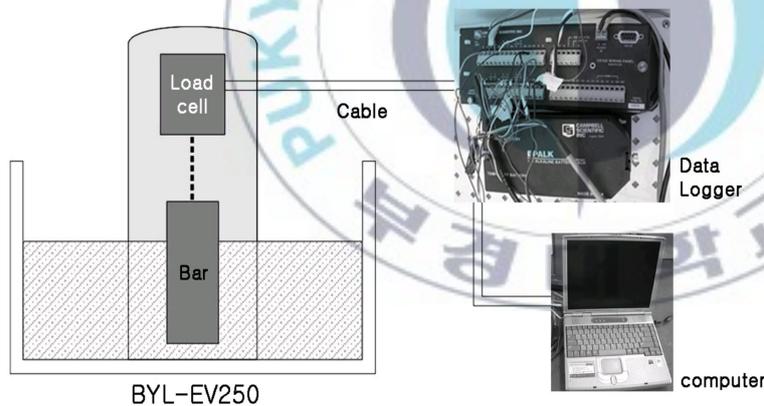


Fig. 2. The schematic of BYL-EV250 observation system.

### 3. 결과 및 분석

#### 가. 수위계의 관측 오차 보정

##### (1) 기상 요소들의 일변화 패턴

Fig. 3은 10분 간격으로 나타낸 기상 요소들의 평균 일변화 시계열이다. 먼저 일사량의 일 최고치가 1220 LST에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 관측지점의 경도는 129°06'16"E 인데, 135°E를 기준으로 하는 시각(GMT+0900)을 사용하기 때문에 발생하는 시간차이다. 실제로 관측 지점에서는 약 12시 24분 25초에 태양이 남중하며, 다른 지역에서 본 연구의 자료를 표준으로 참고하려면 시간차를 감안해야 한다. 다음으로 증발량의 일변화 패턴을 00 LST부터 살펴보면 서서히 감소하다가 0630 LST에 급감하기 시작하여 09 LST에 일 최저치를 나타낸 후에 점차 증가하여 1620 LST에 최고치를 나타내고 감소하는 형태인 것을 알 수 있다. 증발량이 급감하는 시간대는 오전 일사 시작 후에 위치하는데, 이 시간대에는 기온과 수온이 상승하고 바람이 강해진다. 그리고 일사로 인한 기온 상승은 상대습도의 하강으로 이어지는데 이러한 기상 요소들의 변화로 보다 증발이 용이한 조건이 형성된다. 그러나 해당 시간대에 증발량이 급감하는 것으로 관측되었으며, 일사로 인한 환경 조건의 변화가 오차를 일으킨 것으로 가정하였다. 기온은 일사 시작 후에 지표 가열에 따라 빠르게 상승하는 반면, 수온은 물의 비열이 상대적으로 크기 때문에 천천히 상승한다. 수위계의 상부는 외기에 노출되어 있어 기온의 영향을 받지만 하부는 물에 잠겨 있어 수온의 영향을 받기 때문에 상하부

의 열적 차이로 인해 오차가 발생한 것으로 가정하고 분석했다. 실제로 BYL-EV250 수위계의 정밀도 검증은 이부용(2001)에 의해 고정된 조건의 실내에서 이루어진 바 있지만, 옥외의 다양한 조건에서 시험하거나 실제 관측치에 대한 오차를 분석한 연구는 없다.



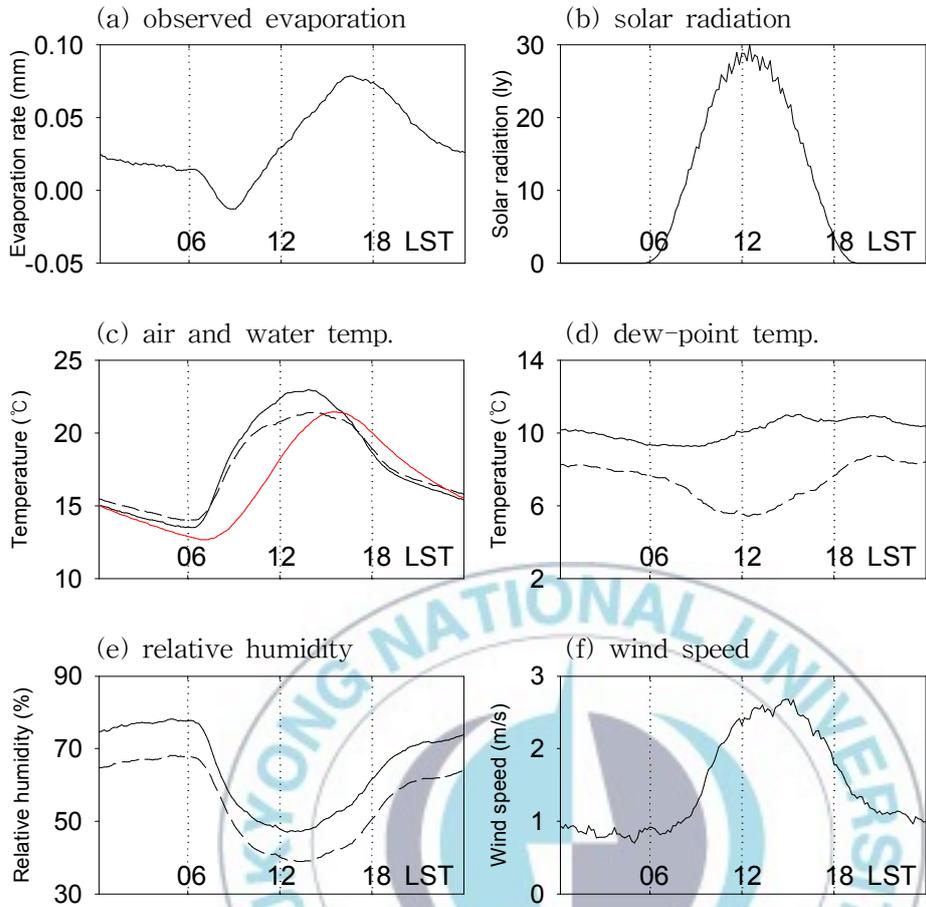


Fig. 3. Composite diurnal time-series of (a) observed free-water evaporation in mm, (b) incoming solar radiation in ly, (c) air temperature at 1 m height from surface (black dashed line), at above the evaporimeter (black solid line), and water temperature (red solid line) in  $^{\circ}\text{C}$ , (d) dew-point at 1 m height from surface (dashed line) and at above the evaporimeter (solid line) in  $^{\circ}\text{C}$ , (e) relative humidity at 1 m height from surface (dashed) and at above the evaporimeter (solid line) in %, and (f) wind speed in  $\text{ms}^{-1}$ , with 10-min interval. Vertical dotted lines are located at every 6 hours in whole diagrams.

## (2) 물질 전달 방법의 고려

증발의 특성에 대해 분석한 여러 선행연구(Dalton, 1802; Fitzgerald, 1886; Meyer, 1915; Horton, 1917; Penman, 1948; Harbeck *et al.*, 1954; Kuzmin, 1957; etc.)에서 다루어 온 물질 전달 방법(mass-transfer method; MTM)은 증발과 응결을 물과 대기 사이의 수증기압 평형을 이루기 위한 현상으로 보는 물질 전달 이론(mass-transfer theory; MTT)에 착안한 증발량 추정 방법이다. MTT에 의하면 증발량은 공기의 포화 부족분(air saturation deficiency; ASD)에 비례하는데 이는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$ASD = e_{Tw} - e_{Td} \quad (3)$$

여기서  $e_{Tw}$ ,  $e_{Td}$ 는 각각 수온, 대기 노점온도에 대한 hPa 단위의 포화 수증기압이다(Hine, 1924). 즉, 수온이 대기 노점온도보다 높을 때 ASD가 양(+)의 값을 가지고 증발이 발생한다. 증발과 응결을 물과 대기 사이의 물질 교환 작용으로 인식한 MTT는 수면에서 일어나는 물 분자의 상변화를 설명하는 이론이며, 이후에 연구된 난류에 의한 2차 순환이나 그에 따른 증발의 촉진 효과 등은 고려하지 않는다.

앞서 BYL-EV250 수위계의 상부와 하부가 각각 기온( $T_s$ )과 수온( $T_w$ )의 영향을 받기 때문에 상하부의 온도 차이가 오차를 유발한 것으로 가정했다. 따라서 TDWA(temperature difference between water and air;  $T_w - T_s$ )가 수온과 기온의 측정오차( $\pm 0.5$  °C) 이내의 범위에 속할 때의 증발량은 신뢰 가능하다고 할 수 있으며, 10분 간격의 평균 일변화 시계열, 총 144개 중에서 해당 조건을 만족하는 51개 시각이 선정되었다.

Fig. 4에는 51개 시각의 ASD에 대한 관측된 증발량( $E_o$ )의 산점도인데, 선형회귀분석을 통해 0.006이라는 회귀계수가 도출되었다.

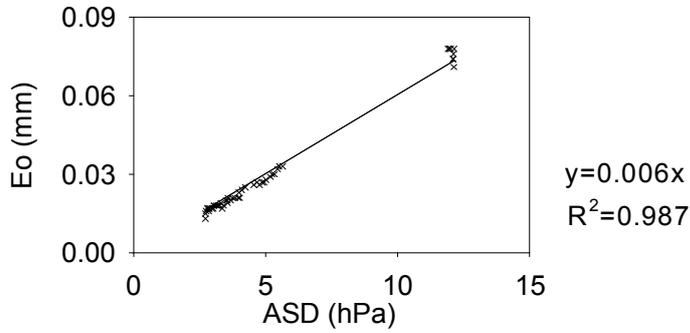


Fig. 4. Scatter diagram of ASD vs observed evaporation( $E_o$ ) for 51 data from composite diurnal time-series that the difference between air temperature( $T_s$ ) and water temperature( $T_w$ ) is less than  $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ .

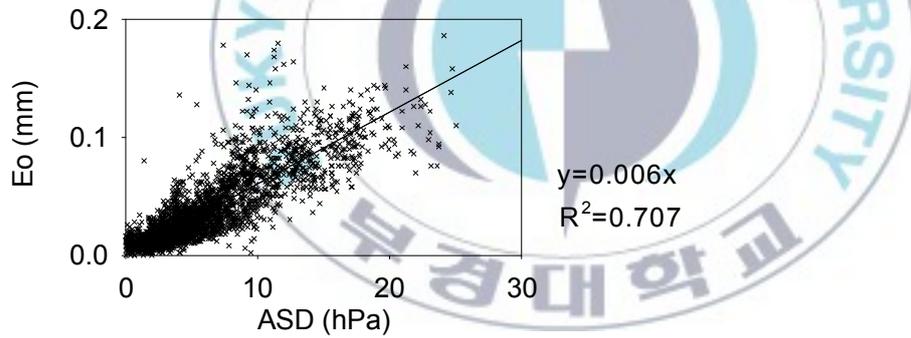
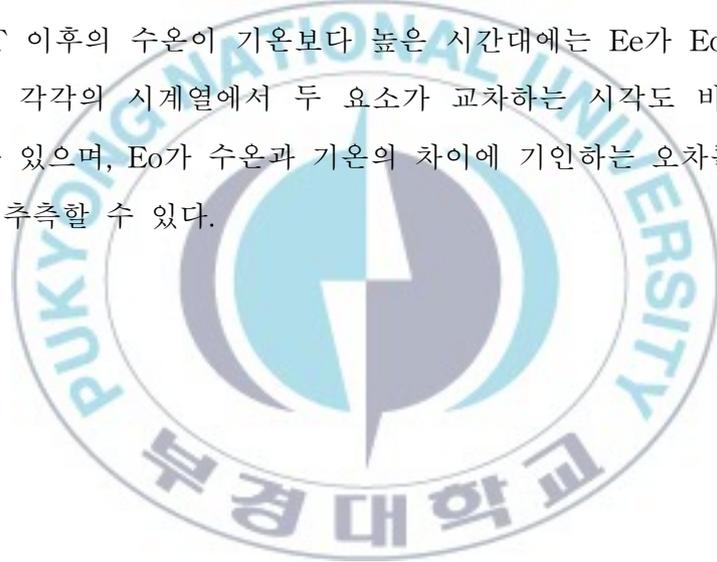


Fig. 5. Same as Fig. 4 but for 3034 data from whole observed data.

Fig. 5에는 Fig. 4와 동일한 기준으로 모든 관측치에 대한 검정을 위해 3034개 관측치에 대한 산점도를 나타냈으며, 선형회귀분석을 통해 동일하게 0.006의 회귀계수가 도출되었다. 이는 증발 계수(evaporation coefficient; EC)로 사용할 수 있으며, 따라서 다음 식을 이용하여 10분 증발량을 추정할 수 있음을 의미한다.

$$E_e = 0.006ASD \quad (4)$$

Fig. 6(a)는 식(4)으로 계산된 증발량( $E_e$ )과 관측된 증발량( $E_o$ ), Fig. 6(b)는 수온( $T_w$ )과 증발계 상부의 기온( $T_s$ )의 평균 일변화 시계열이다. 오전에 기온이 수온보다 높은 시간대에는  $E_o$ 가  $E_e$ 보다 작게 나타나고 반대로 16 LST 이후의 수온이 기온보다 높은 시간대에는  $E_e$ 가  $E_o$ 보다 작게 나타났다. 각각의 시계열에서 두 요소가 교차하는 시각도 비슷한 것을 확인할 수 있으며,  $E_o$ 가 수온과 기온의 차이에 기인하는 오차를 나타내는 것으로 추측할 수 있다.



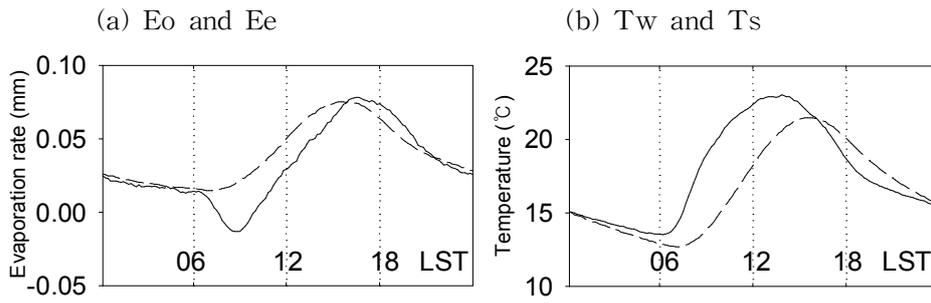


Fig. 6. Composite diurnal time-series of (a)  $E_o$ (solid line) and  $E_e$ (dashed line) in mm, (b)  $T_s$ (solid line) and  $T_w$ (dashed line) in  $^{\circ}\text{C}$ .

측정 오차( $E_o - E_e$ )와 TDWA( $T_w - T_s$ )의 평균 일변화 시계열을 Fig. 7에 나타내고 TDWA에 대한 측정 오차의 산점도를 Fig. 8에 나타냈다. 두 요소 사이의 높은 선형관계가 있음을 쉽게 예측할 수 있으며, 선형회귀분석을 통해 0.006의 회귀계수가 도출되었다. 이 수치는 보정 계수 (adjustment coefficient)로 사용될 수 있으며, BYL-EV250 수위계로 관측한 증발량은 다음 식과 같이 보정하여 사용할 수 있다.

$$E_a = E_o - 0.006TDWA \quad (5)$$

보정한 증발량( $E_a$ )과  $E_e$ 의 비교를 통해 검정을 수행했다. Fig. 9에는 두 요소의 평균시계열에서의 산점도와 총 관측데이터의 산점도를 10분 단위, 1시간 단위 증발량에 대하여 각각 나타냈다. 두 산점도에서 회귀선의 기울기가 1에 가깝고 결정계수( $R^2$ ) 또한 전 신뢰구간에서 유의한 것으로 확인되었다. 따라서 두 증발량은 통계학적으로 유의하다고 할 수 있다.

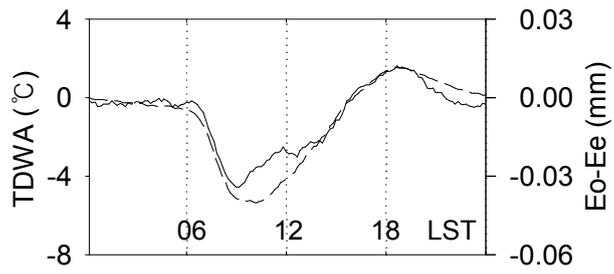


Fig. 7. Diurnal time-series of TDWA(dashed line) in  $^{\circ}\text{C}$  with an ordinate on the left-side and Eo-Ee(solid line) in mm with an ordinate on the right-side.

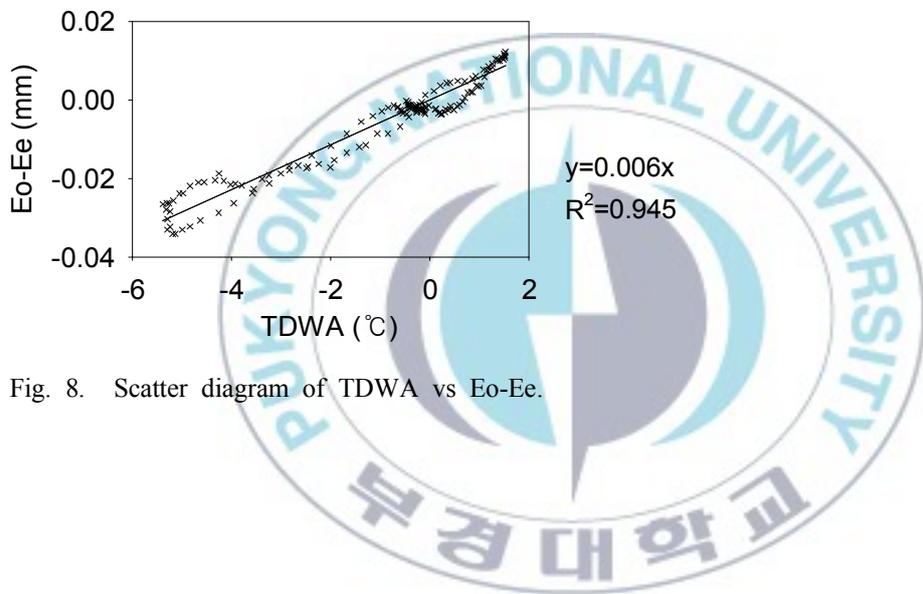


Fig. 8. Scatter diagram of TDWA vs Eo-Ee.

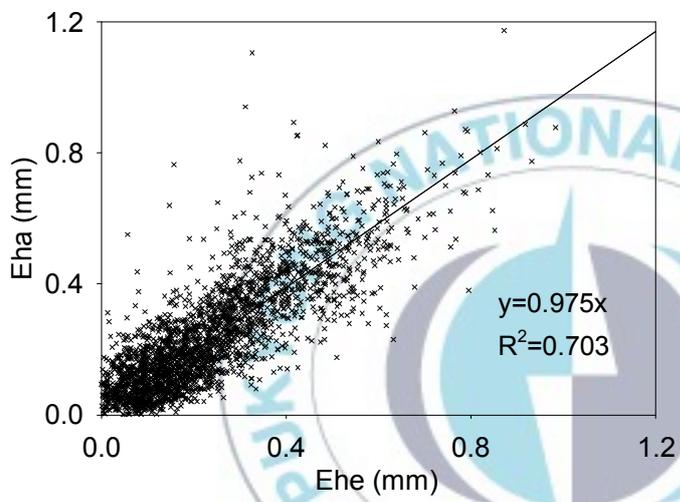
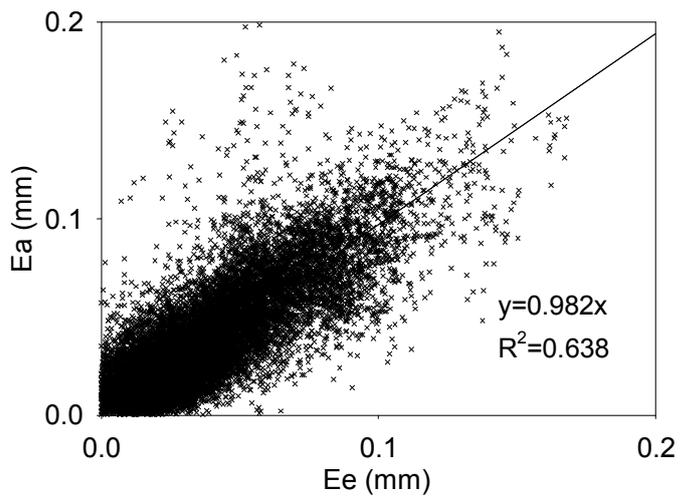


Fig. 9. Scatter diagram of estimated evaporation vs adjusted evaporation (a) in 10-min evaporation, and (b) in hourly evaporation.

## 나. 높이에 따른 ASD의 비교

Fitzgerald(1886), Meyer(1915), Horton(1917), Penman(1948), Harbeck *et al.*(1954), Kuzmin(1957) 등 MTM을 바탕으로 증발 추정식을 다룬 여러 선행연구에서 ASD를 1 m 또는 1.5 m 이상의 대기의 노점온도와 수온으로 계산했다. 또한 이들 연구에서는 바람의 증발 촉진 효과를 고려하여 풍속 항을 추가했다. 그런데 본 연구는 증발이 수면에서 일어나는 대기와 물 사이의 물질 교환 현상인 것에 착안하여 의문을 다음과 같이 제시한다. MTT에서 증발의 원동력이라고 설명되는 ASD는 수면 가까이에서 측정할수록 증발을 보다 잘 설명할 수 있을 것이다. 그렇게 하면 바람에 의한 수면 부근의 공기 특성 변화가 ASD에 반영되기 때문에 풍속을 따로 감안하지 않아도 증발 계산에 문제가 없을 것이다. 이를 증명하기 위해 1 m 높이의 노점온도( $T_{da}$ )와 증발계 상부의 노점온도( $T_{ds}$ )에 대해 각각 수온( $T_w$ )과의 ASD를 아래의 식과 같이 계산하여 비교해 보았다.

$$ASD_a = e_{T_w} - e_{T_{da}} \quad (6)$$

$$ASD_s = e_{T_w} - e_{T_{ds}} \quad (7)$$

Fig. 10의 (a)와 (b)에는 10분 간격의 모든 관측 자료의  $ASD_a$ ,  $ASD_s$ 에 대한 보정한 증발량( $E_a$ )의 산점도와 회귀선을 나타냈다. MTT에 의하면 ASD가 0일 경우, 물과 대기 사이의 수증기압이 평형을 이루어 증발이나 응결이 발생하지 않으므로 회귀선의 y-절편이 0을 보여야 이론에 부합한다고 할 수 있다. 결정계수( $R^2$ )는  $ASD_s$ 보다  $ASD_a$ 에서 약간 높지만 자료의 수가 15696개인 것을 감안하면 둘 다 높은 선형관계를 가

진다고 할 수 있다.  $y$ -절편은 ASDa(-0.007)보다 ASDs(-0.002)에서 0에 가깝게 나타났다. 수치적으로 둘의 차이가 크다고 하기는 어렵지만, 증발량의 미세한 관측에서 오차로 작용할 수 있다. 따라서 수면에 근접해서 측정된 노점온도를 사용하여 ASD를 계산함으로써 보다 실제에 가까운 증발량을 설명할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 Table 2에서 언급한 바와 같이 증발계 상부의 고정된 위치에서 관측한 Tds를 사용하였기 때문에 수위변화와 진동에 따라 수면과의 거리가 유동적으로 작용하였다. 만약 수위의 변화에 따라 움직이면서 경계면에 더욱 근접하여 관측한다면 이론에 보다 가까운 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

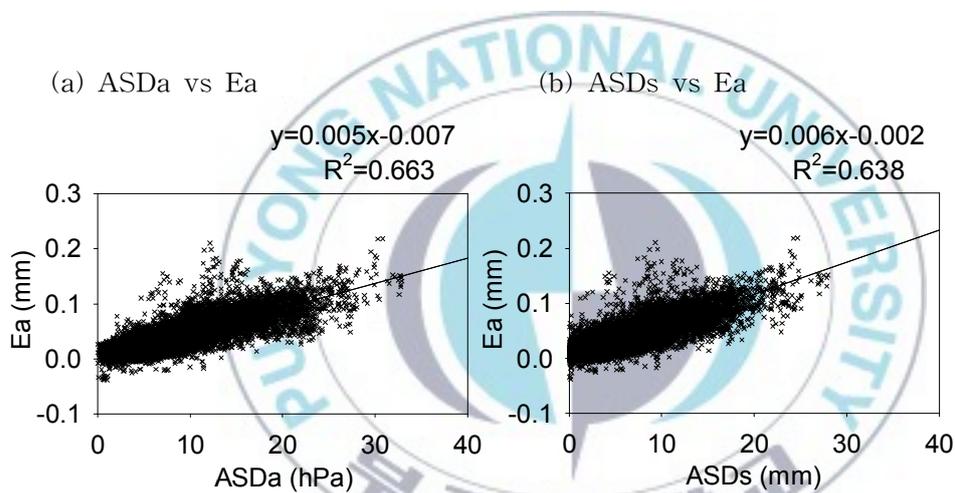


Fig. 10. Scatter diagram of (a) ASDa vs Ea, and (b) ASDs vs Ea.

#### 다. 기존 증발 경험식의 검토

물질 전달 방법(MTM) 외에도 지금까지 증발량 계산을 위한 다양한 연구에서 추정식이 제시된 바 있다. MTM이 공기의 포화부족분(ASD)으로 증발량을 계산한 것처럼 여러 연구에서 기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 포화수증기압차(vapor pressure deficit; VPD) 등의 기상 요소가 사용되었다. Table 4에는 증발량 추정식을 제시한 몇 가지 연구들에서 쓰인 요소들을 정리했다. 이 장에서는 ASD( $T_w$ ,  $T_d$ 로 계산)를 비롯한 여러 기상 요소들이 얼마나 효과적으로 증발량 계산에 사용될 수 있는지 두 가지 시간규모(평균 일변화, 일평균)에서 비교한다.

Table 4. Meteorological components used in several preceding studies.

	Ta	Tw	RH	VPD	ASD	V	S
Dalton(1802)					*		
Fitzgerald(1886)					*	*	
Harbeck <i>et al.</i> (1958)				*		*	
Morton(1968)	*		*	*		*	*
McGuinness and Bordne(1972)	*						*
McGinn and McLean(1995)	*					*	*
Rasmussen <i>et al.</i> (1995)	*			*		*	
Burba <i>et al.</i> (1999)		*		*			*

※ Abbreviations : Ta (ambient air temperature), Tw (water temperature), RH (relative humidity), VPD (vapor pressure deficit), ASD (air saturation deficiency), V (wind speed), S (incoming solar radiation).

모든 요소에 대해 동일한 스케일에서의 비교가 용이하도록 아래 식으로 표준화하여 무차원적인 수치로 나타냈다.

$$Z_i = \frac{(X_i - \mu)}{\sigma} \quad (8)$$

식(8)에서  $X_i$ 는 X라는 변수의 i번째 요소,  $\mu$ 는 해당 변수의 평균,  $\sigma$ 는 해당 변수의 표준편차, 그리고  $Z_i$ 는 해당 변수의 i번째 요소의 표준화된 값이다. Fig. 11은 수위계 기기의 오차를 보정한 증발량(Ea)과 Table 4에 제시된 기상 요소들의 표준화된 평균 일변화 시계열이다. 최저, 최고치의 시간대는 요소별로 차이가 있으나 모두 일사 시작 후에 상승하고 야간에는 하강한다(상대습도는 반대). 따라서 상관계수가 높을수록 증발량과 최저, 최고치를 보이는 시간대가 유사하다고 할 수 있다. 요소별 증발량과의 상관계수를 Fig. 12에 나타냈는데 비교가 용이하도록 상대습도의 상관계수에는 -1을 곱했다. 상관계수가 가장 높은 ASD(0.990)부터 가장 낮은 일사량(0.541)까지 모두 수치상으로도 상당히 높은 상관계수를 보였으며, 전 신뢰구간에서 유의한 결과를 보였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 비교에 사용된 모든 요소가 일사의 영향을 지배적으로 받기 때문에 24시간 주기로 주간과 야간에 반대되는 형태를 나타내기 때문인 것으로 보인다.

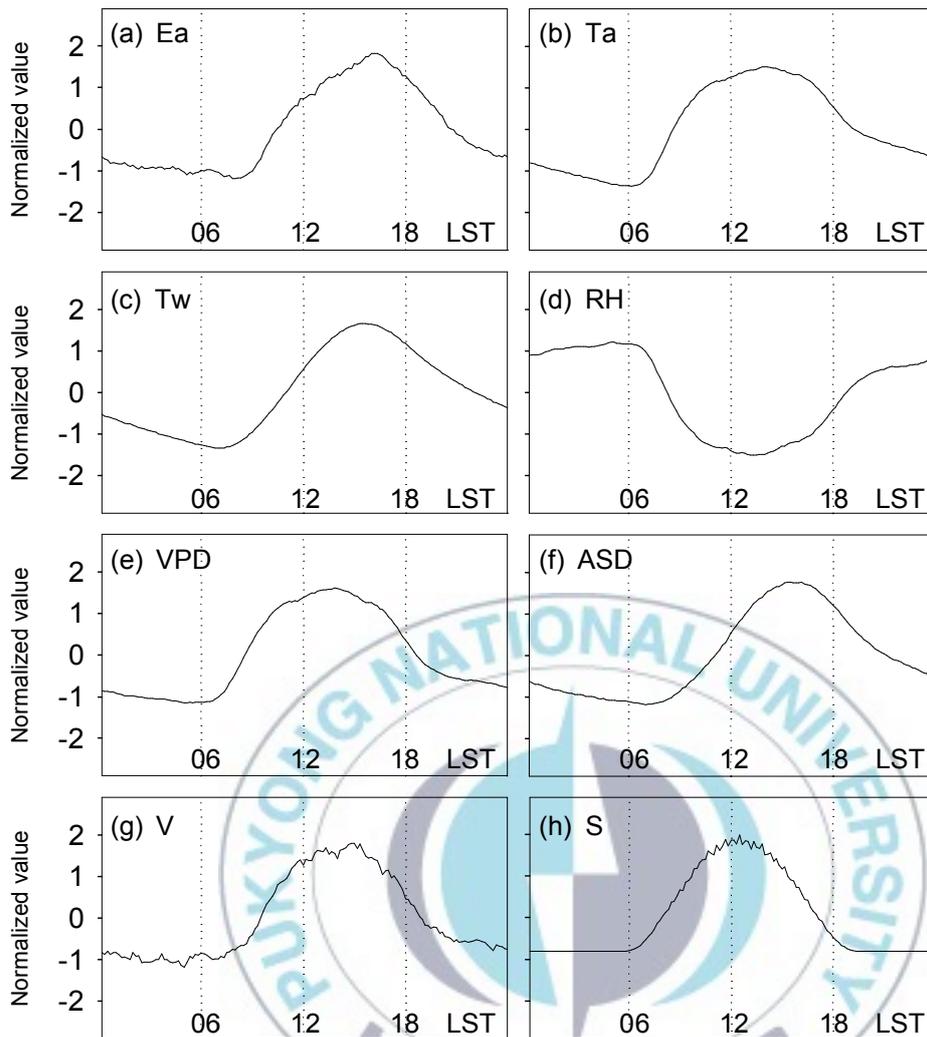


Fig. 11. Composite diurnal time-series of standardized values of (a) adjusted evaporation, (b) air temperature, (c) water temperature, (d) relative humidity, (e) vapor pressure deficit, (f) air saturation deficiency, (g) wind speed, and (h) incoming solar radiation.

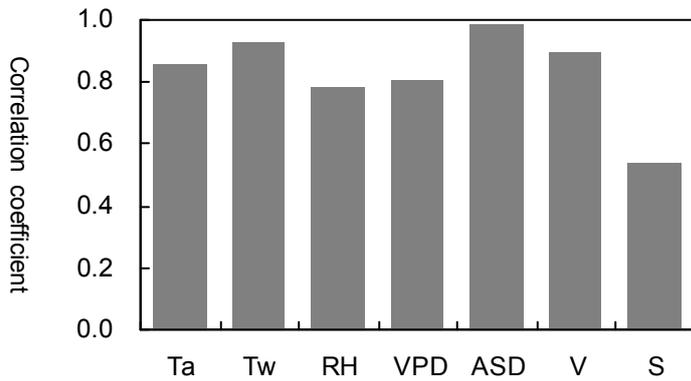


Fig. 12. Correlation coefficients between adjusted evaporation and each component in diurnal variation. The coefficient of RH is inverted.

일변화에서는 ASD가 증발량과 가장 유사한 패턴을 보이는 것으로 나타났다으나 모든 요소들이 상당히 높은 상관계수를 보였다. Fig. 13는 표준화된 요소별 일평균 시계열이다. 먼저 증발량, 기온, 수온, 일사량에서 계절적인 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 증발량과의 상관계수를 요소별로 Fig. 14에 나타냈는데 여기서도 상대습도의 상관계수에 -1을 곱했다. 일변화에서 나타난 결과와 같이 ASD에서 가장 높은 상관계수(0.804)가 도출되었다. 그 다음으로 VPD(0.712), 기온(0.480) 등의 순서로 나타났으며, 수온에서 가장 낮은 상관계수(0.396)가 나타났으나 이 값 역시 모든 신뢰구간에서 유의한 것으로 분석되었다.

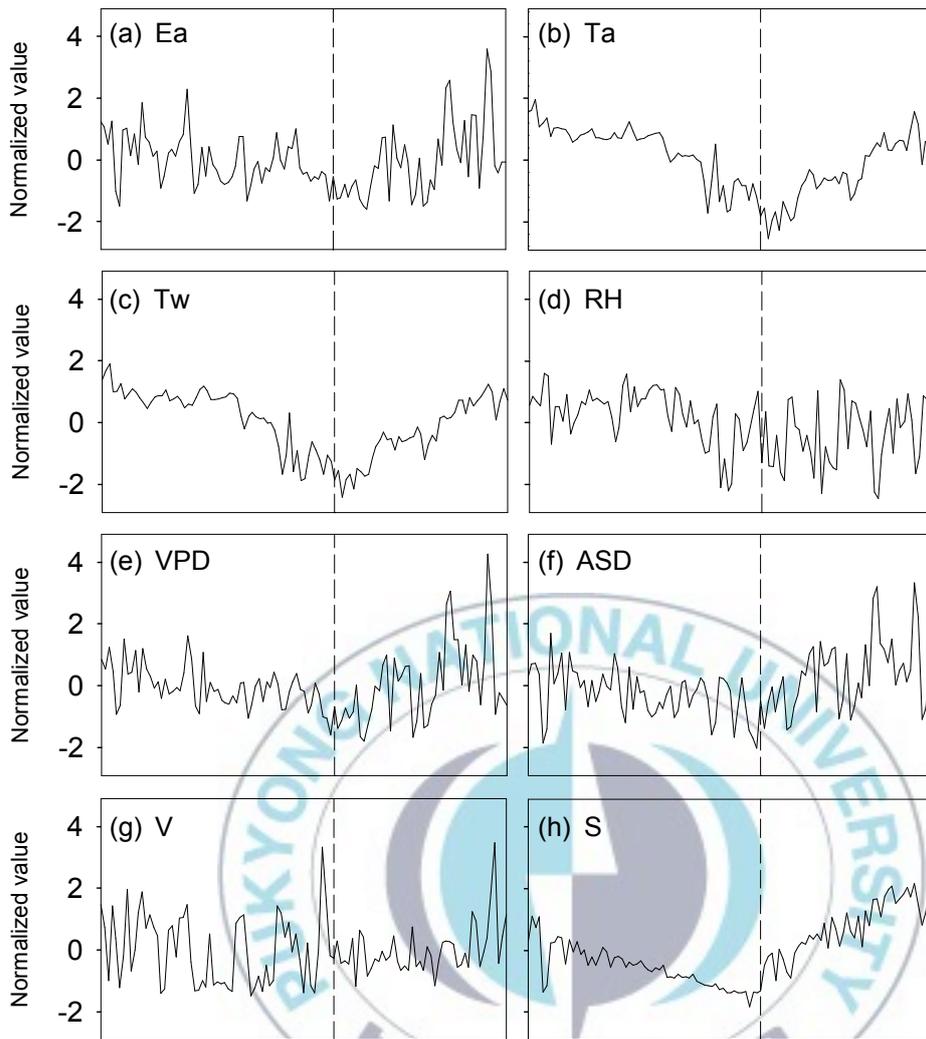


Fig. 13. Daily time-series of standardized values of (a) adjusted evaporation, and (b) to (h) other meteorological components same as Fig. 11. Dashed line in each diagram divides observed period into autumn, 2006 and spring, 2007.

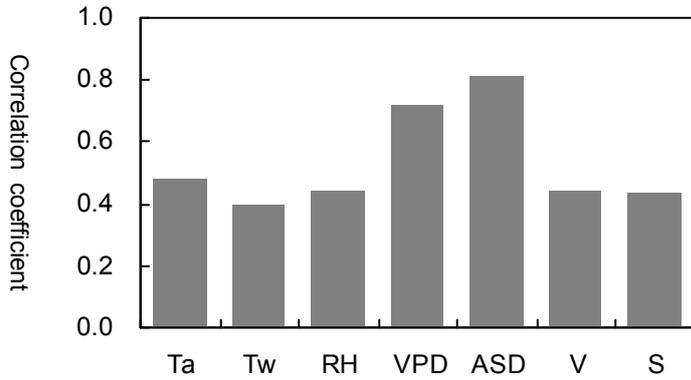


Fig. 14. Same as Fig. 12 but in daily variation.

여러 선행연구에서 증발량 추정을 위해 선택한 기상 요소들(기온, 수온, 상대습도, VPD, 풍속, 일사량)이 통계학적으로 매우 유의한 상관관계를 보이지만 ASD가 두 가지 시간규모(일변화, 일평균)에서 증발량과 가장 밀접한 연관성을 나타내는 것으로 분석되었다. 따라서 다른 기상 요소들로도 증발량을 어느 정도 실측치와 유의하게 계산해낼 수 있지만 ASD 관측을 통해 보다 높은 정확도로 계산하여 추정할 수 있다고 할 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

증발량의 정밀 관측을 위해 개발된 BYL-EV250 수위계는 특정 조건에서 오차를 보인다는 분석이 있어 아직 보급화되지 못하고 있다. 직접 관측한 결과, 수온과 기온의 차에 따른 오차가 발생하는 것으로 분석되었다. 수온이 기온보다 높은 경우에는 증발량이 과대평가되고 반대의 경우에는 과소평가되어 증발이 활성화되는 시간대에 응결이 발생하는 것으로 관측되기도 했다. 이를 정량적으로 보정할 수 있다면 높은 정밀성을 갖춘 해당 수위계를 보다 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 생각되어 6개월 동안 관측한 데이터 중에서 109일을 선정하여 분석을 수행하였다. 수온과 기온의 차이가 이를 관측한 센서의 측정오차인  $\pm 0.5$  °C보다 작은 경우의 증발량은 신뢰할 수 있다고 판단하고 3034개 관측치에 대하여 회귀분석을 실시하여 0.006이라는 증발 계수를 도출했다. 이를 통해 hPa 단위의 공기의 포화부족분(ASD)에 증발 계수를 곱해서 mm 단위의 10분 증발량을 계산할 수 있다. 그리고 구하고자 하는 시간 단위에 따라 계수를 수정하여 다양하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

다음으로는 증발 계수를 이용해 계산된 증발량( $E_e$ )와 관측된 증발량( $E_o$ )의 시계열과 수온( $T_w$ )과 기온( $T_s$ )의 시계열을 비교하였다. 관측오차( $E_o - E_e$ )와 TDWA( $T_w - T_s$ )가 유사한 변화패턴을 가지는 것을 알 수 있었으며 회귀분석을 통해 보정 계수 또한 0.006으로 도출되었다. 따라서 BYL-EV250 수위계로 관측한 증발량은 간단한 계산을 통해 보정이 가능한 것으로 나타났다.

물질 전달 방법(MTM)을 기반으로 수행된 여러 선행연구에서는 1, 1.5 m 또는 그 이상 높이의 노점온도와 증발계 내 수온으로 ASD를 계산하였다. 그리고 풍속 향도 추가되었는데 본 연구는 이에 대해 의문을 제기하였다. 일반적인 기상 요소의 관측은 사람이 생활하는 높이를 비롯하여 몇 가지 기준 고도에서 이루어지고 있지만, 증발과 응결은 물과 대기의 접촉면에서 발생하는 물질 전달 현상이다. 그러므로 증발의 원동력인 ASD는 수면 부근에서 측정된 노점온도와 수온으로 계산하면 실제 증발량에 보다 근접할 수 있을 것으로 예상하였다. 그래서 6개월 동안 관측한 수면 부근과 지상 1 m 높이에서의 노점온도( $T_{ds}$ ,  $T_{da}$ )에 대한 두 ASD를 비교했다. 간단한 회귀분석을 통해  $T_{ds}$ 의 사용으로 이론에 조금 더 가까운 증발량 설명이 가능하다는 것을 알았다. 하지만 만족할 만한 결과는 얻지 못했다. 이는 본 연구에서 사용된  $T_{ds}$ 가 증발계 상부의 고정된 위치에서 측정되었기 때문에 수위변화와 진동에 의해 수면과의 거리가 유동적으로 작용했기 때문인 것으로 사료된다. 만약 수위의 변화에 따라 움직이면서 물과 대기의 경계면에 더욱 근접하여 ASD를 측정한다면 이론에 보다 가까운 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

마지막으로 여러 선행연구에서 증발량 추정을 위해 선택한 기상 요소들(기온, 수온, 상대습도, VPD, 풍속, 일사량)과 증발량의 상관관계를 두 가지 시간규모(일변화, 일평균)에서 분석하였다. 그 결과, 모든 요소들이 두 가지 시간규모에 대해 통계학적으로 매우 유의한 상관관계를 보이는 것을 알 수 있었다. 하지만 ASD가 증발량과 가장 밀접한 연관성을 나타내는 것으로 나타났으며, 따라서 ASD 측정을 통해 증발량을 계산하거나 추정하는 것이 가장 정확도가 높다고 할 수 있다.

본 연구에서 시도한 BYL-EV250 수위계의 보정에 대한 접근방법은 아직은 미미하지만 증발량 관측 분야의 발전에 도움이 되리라 생각된다. 또한 관측이 용이하지 않은 곳에서는 본 연구에서 제시하는 바와 같이 수면에 근접하여 측정할 ASD로 어느 정도 정확도를 가지는 증발량 추정이 가능할 것으로 사료된다.



## 참고문헌

- 김광섭, 임태경, 2006: 1973년부터 2004년까지의 관측된 대형증발량 자료 분석. *대한토목학회논문집*, **26(6B)**, 583-596.
- 이부용, 2001: 대형증발계용 매시간 증발 기록계 개발에 관한 연구. *한국환경과학회지*, **10(5)**, 323-327.
- \_\_\_\_\_, 2002: 대형증발계 증발량의 일 변화. *한국농림기상학회지*, **4(4)**, 197-202.
- 한진수, 이부용, 2005: 해남 농경지에서의 자유 수면 증발 관측과 해석. *한국농림기상학회지*, **7(1)**, 92-98.
- Abtew, W., 2001: Evaporation Estimation for Lake Okeechobee in south Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **127(3)**, 140-147.
- Anderson, M. E. and H. E. Jobson, 1982: Comparison of Techniques for Estimating Annual Lake Evaporation using Climatological data. *Water Resour. Res.*, **18(3)**, 630-636.
- Brutsaert, W., and H. Stricker, 1979: An Advection-Aridity Approach to Estimate Actual Regional Evapotranspiration. *Water Resour. Res.*, **15(2)**, 443-450.
- \_\_\_\_\_, W., 1982: *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications*. D. Reidel Publishing Company, 318pp.

- Burba, G. G., S. B. Verma, and J. Kim, 1999: Energy Fluxes of an Open Water Area in a Mid-Latitude Prairie Wetland. *Boundary-Layer Meteorology*, **91**, 495-504.
- Charles, J. V., P. Green, J. Salisbury and R. B. Lammers, 2000: Global Water Resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, **289**, 284-288.
- Dalton, J., 1802: Experimental essays on the constitution of mixed gases: on the force of steam or vapour from water or other liquids in different temperatures, both in a Torricelli vacuum and in air; on evaporation; and on expansion of gases by heat. *Manchester Lit. Phil. Soc. Mem. Proc.*, **5**, 536-602.
- De Bruin, H. A. R., and J. Q. Keijman, 1979: The Priestley-Taylor Evaporation Model Applied to a Large, Shallow Lake in the Netherlands. *J. Appl. Meteorol.*, **18**(7), 898-903.
- Duggal, K. N., and J. P. Soni, 1996: *Elements of Water Resources Engineering*. New Age Publishers, ISBN: 8122408079. 588pp.
- Ferguson, H. L., G. Den Hartog, and P. Y. T. Louie, 1985: Estimation of shallow lake evaporation using Class A pan data. In: *Casebook on Operational Assessment of Areal Evaporation*. WMO-no. 653.
- Fitzgerald, D., 1886: Evaporation. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **98**(HY12), 2073-2085.

- Gleik, P. H., 2003: Global Freshwater Resources: Soft path solutions for 21st Century. *Science*, **302**, 1524-1528.
- Hamon, W. R., 1961: Estimating Potential Evapotranspiration. *Proc. Amer. Soc. civ. Engrs.*, **87**, 107-120.
- Harbeck, G. E., M. A. Kohler, and G. E. Koberg, 1954: *Water loss investigations, Vol. 1, Lake Hefner studies*. US Geological Survey Paper 269, US Government Printing Office, Washington, D.C. 100pp.
- Hicks, B. B., M. L. Wesely, and C. M. Sheih, 1977: A Study of Heat Transfer Processes above a Cooling Pond. *Water Resour. Res.*, **13**(6), 901-908.
- Hine, T. B., 1924: The Rate of Evaporation of Liquids in a Current of Air. *Phys. Rev.*, **24**, 79-91.
- Horton, R. E., 1919: Rainfall interception. *Month. Weather Rev.*, **47**(9), 603-623.
- Kohler, M. A., 1954: Pan evaporation: Water Loss Investigations: Lake Hefner. *US Geological Survey*. Professional paper no.269, 127-148.
- Kuzmin, P. O., 1957: Hydrophysical Investigations of Land Waters. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.*, **3**, 468-478.
- Lafleur, P. M., and N. T. Roulet, 1992: A Comparison of Evaporation Rates from Two Fens of the Hudson Bay Lowland. *Aquatic Botany*, **44**, 59-69.

- Lee, Y.-G., H.-H. Um, J.-C. Nam, and B.-Y. Lee, 2004: Monitoring Free-water Pan Evaporation Around the Cheonggye Stream in Seoul, Korea for 9 Clear Days in March, 2004. *J. Korean Meteor. Soc.*, **40**(6), 741-749.
- McGinn, S. M., and H. D. J. McLean, 1995: Monitoring Free-water Evaporation at Automated Weather Stations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 1363-1366.
- McGuinness, J. L., and E. F. Bordne, 1972: *A comparison of Lysimeter-derived Potential Evapotranspiration with Computed Values*. Technical Bulletin 1452, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture: Washington. 71pp.
- Meyer, A. F., 1915: Computing Runoff from Rainfall and other Physical data. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **79**, 1055-1155.
- Morton, F. I., 1968: *Evaporation and Climate: A study in cause and effect*. Scientific Series no. 4. Inland Water Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada. 32pp.
- Oki, T. and S. Kanae, 2006: Global Hydrological cycles and World Water Resources. *Science*, **313**, 1068-1072.
- Penman, H. L., 1948: Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proc. R. Soc. Lond.*, **193**, 120-145.

- Rasmussen, A. H., M. Hondzo, and H. G. Stefan, 1995: A test of several Evaporation Equations for water temperature simulations in lakes. *Water Resources Bulletin*, **31**(6), 1023-1028.
- Rosenberry, D. O., T. C. Winter, D. C. Buso, and G. E. Likens, 2007: Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *J. Hydrol.*, **340**, 149-166.
- Sellers, W. D., 1965: *Physical Climatology*. The University of Chicago Press, Chicago, USA. 272pp.
- Singh, V. P., and C.-Y. Xu, 1997: Evaluation and Generalization of 13 Mass-transfer Equations for Determining Free Water Evaporation. *Hydrol. Proc.*, **11**, 311-323.
- Stewart, R. B., and W. R. Rouse, 1976: A Simple Method for Determining the Evaporation from Shallow Lakes and Ponds. *Water. Resour. Res.*, **12**(4), 623-628.
- Tanny, J., S. Cohen, S. Assouline, F. Lange, A. Grava, D. Berger, B. Teltch, and M. B. Parlange, 2008: Evaporation from a Small Water Reservoir: Direct Measurements and estimates. *J. Hydrol.*, **351**, 218-229.
- Turk, L. J., 1970: Evaporation of brine: A field study of the Bonneville Salt Flats, Utah. *Water Resour. Res.*, **6**, 1209-1215.

- Warnaka, K. and L. Pochop, 1988: Analyses of Equations for Free Water Evaporation Estimates. *Water Resour. Res.*, **24**(7), 979-984.
- Xu, C.-Y., and V. P. Singh, 1998: Dependence of Evaporation on Meteorological Variables at different Time-scales and Intercomparison of Estimation Methods. *Hydrol. Proc.*, **12**, 429-442.
- Yeston, J., R. Coontz, J. Smith and C. Ash, 2006: Introduction to special issue, a Thirsty World. *Science*, **313**, 1067.



## 감사의 글

감사의 글을 적으려 하니 이제야 석사 졸업이 실감이 나는 듯합니다. 평소 전하지 못한 부모님, 교수님, 선후배님들에 대한 감사의 마음을 이 지면을 통해 표현하고자 합니다.

무엇보다도 이러한 작은 결실을 맺기까지 격려와 가르침을 아끼지 않으시며, 성실과 노력의 자세로 제자들에게 학자의 본보기가 되어 주신 변희룡 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 아직 교수님의 제자라고 하기에는 부끄러운 저이지만, 계속 발전하는 모습을 보여드리기 위해 학업에 정진하겠습니다. 그리고 발표 때마다 내용 개선을 위한 지적과 방향 제시를 도와주신 정형빈 교수님, 권병혁 교수님, 이동인 교수님, 김재진 교수님, 오재호 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

방재기상연구실에 들어온 것이 얼마 전의 일처럼 기억이 나는데 어느덧 3년 반이라는 시간이 지났습니다. 그 동안 선배들의 가르침과 후배들의 도움이 있었기에 지금 이렇게 석사과정을 매듭짓는 시점까지 올 수 있었다고 생각합니다. 앞으로도 연구실의 구성원이자 선배들에게는 하나의 후배로서, 후배들에게는 하나의 선배로서 의미 있는 존재가 되기 위해 노력할 것입니다.

마지막으로 행여나 신경 쓰일까 싶어 힘들 때에도 내색하지 않고 곁에서 격려와 도움을 주신 부모님께 깊이 감사드립니다. 그리고 타지에서 혼자 생활하면서도 동생 챙기는 마음이 극진한 누나에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 가끔 힘든 일이 있을 때에도 사랑하는 든든한 가족이 있었기에 멈추지 않고 여기까지 올 수 있었습니다. 짧게나마 이로써 감사의 글을 마무리 짓고자 합니다.