

## 해남 농경지에서의 자유 수면 증발 관측과 해석

한진수 · 이부용

대구가톨릭대학교 환경과학과

(2005년 1월 24일 접수; 2005년 3월 29일 수락)

### Measurement and Analysis of Free Water Evaporation at HaeNam Paddy Field

Jin-Su Han and Bu-Yong Lee

Dept. of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Kyeongbuk 712-702, Korea

(Received January 24, 2005; Accepted March 29, 2005)

#### ABSTRACT

Class A evaporation pan has been used throughout the world to measure free water evaporation mainly by manual observation once a day. In this study, a new automatic water level measurement method is used for understanding of free water evaporation and numerical analysis. This new technique measures the weight of buoyancy bar in water, and does not need calibration because it is not affected by water density change with water temperature. Field observations of evaporation were made near Haenam Meteorological Station over paddy field located in southwestern Korea from 20 April to 30 May 2004 and the data from ten clear days (16 - 25 May) were used for this analysis. The observed total evaporation was about 50.7mm during this period whereas the estimated from an empirical equation was 50.4mm. As expected, the pan evaporation is well correlated with wind speed and the vapor pressure deficit between the water surface and the air.

**Key words :** Evaporation, Class A evaporation pan, Automatic measurement

#### I. 서 언

증발은 강수와 더불어 지표 - 대기간 에너지 및 물 순환 이해에 있어 가장 중요한 기상요소 중 하나이다. 강수는 우량계, 위성, 레이더 등의 다양한 강우 측정 방법에 의해 측정되어 강우량 정보가 실시간으로 제공되고 있지만, 지표로부터 발생하는 증발량 정보를 실시간으로 제공하는 것은 매우 어렵다. 대기관측에서 증발량은 옥외에 설치한 용기에 물을 넣어 관측하고, 강수량과 같이 mm 단위로 나타낸다. 외국에서는 상당히 큰 수조를 땅에 묻어 관측하는 곳도 있다. 자연 생태계에서 물의 순환을 조사하거나 저수지 등에서의 증발량을 알려고 할 때, 넓은 지면이나 수면에서의 증발 총량을 알아야 하나, 에디 공분산 방법과 같은 미

기상학적 타워 플럭스 관측을 사용하여 직접 관측하지 않는 한, 용기나 증발계를 이용한 관측결과로 추정할 수밖에 없다.

현재 기상청에서는 WMO의 관측 기준에 따라 대형 증발계로 전날 09시에서 당일 09시까지 24시간 1회 육안으로 측정하여 그 값을 하루 증발량으로 사용한다. 대형증발계 자동관측에 관한 연구는 Lee(2001, 2002)에 의한 것이 국내에서는 유일하며, McGinn and McLean(1995)는 자동기상관측장비에 의한 매시간 증발량 관측 자료와 개별 기상요소와의 관계를 보고한바 있다.

대형증발계 특성에 대한 연구로 내부 온도 변화에 대한 연구가 있으며(Jacob *et al.*, 1997), 자료에 대한 효과적인 활용 방안으로 대형증발계 증발량과

Penman-Monteith 방법 등의 24시간 증발량과 상호 비교한 연구들이 있다(Chiew *et al.*, 1994). 호수에서의 물수지 이해를 위해 기상요소와 증발량에 대한 시공간적인 변화에 대한 관측 연구도 진행되었다(Assouline and Mahrer, 1996; Burba *et al.*, 1999).

본 연구에서는 대형증발계 내부에 국내에서 개발된 증발기록계를 설치하여 증발량을 정밀하게 측정하고 분석하여 농경지에서 증발량에 영향을 주는 기상요소를 확인하고, 상호관계를 나타내는 경험식을 도출하며, 추후 같은 장소에 설치된 타워에서 관측되는 실제 증발산과 자유수면 증발간의 관계를 도출하고자 한다. 이러한 노력은 자료 수거율이 상대적으로 낮은 타워 증발산 자료와 증발계 자료를 상호 보완함으로써 지속적인 증발산 감시의 자료기반을 구축하는데 필요하며, 특별히 오랜 기간 전국적으로 관측되어온 증발계 증발 자료의 활용과 재분석에 중요한 기여를 할 것이다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 대상 지역

전라남도 해남군 해남읍 고수리 소재 기상청 해남 기상관측소 인접 농경지에서는 2002년 7월부터 20m의 플럭스 관측탑을 설치하여 지표-대기 사이의 에너지, 물 및 탄소 순환을 연구하기 위한 현열 및 잠열 플럭스, 이산화탄소 등의 에디공분산(eddy covariance) 플럭스 관측을 수행하고 있다(Kim *et al.*, 2002). 본 연구에서는 같은 연구관측노장에서 2003년 3월부터 2004년 7월까지의 대형증발계의 증발량과 지표면의 기상요소를 관측하였다(Fig. 1).

### 2.2. 측정 방법

본 연구에서 사용한 BYL-EV250 증발기록계는 부력추와 로드셀을 이용한 측정방법에 근거하며(Lee, 2001), 재질은 부식성이 없는 stainless steel 소재로, 지름 101.6mm, 높이 510mm의 크기로 최대 측정범위는 240mm이며 분해 능력은 0.03mm이다(Fig. 2). 부력식 측정방법은 수위변화에 따라 원통형 부력추에 부력의 변화가 있게 하여 그 변화량을 힘의 크기로 측정할 수 있는 로드셀을 이용하여 전기적 신호로 변화시켜 측정하며, 자료의 기록에는 Campbell사의 CR10X 자료 집록기를 사용하였다. 부력추로는 직경

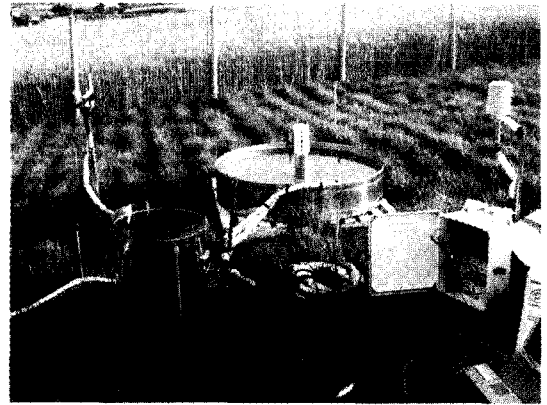


Fig. 1. Evaporation measurements in Haenam paddy field in 2004.

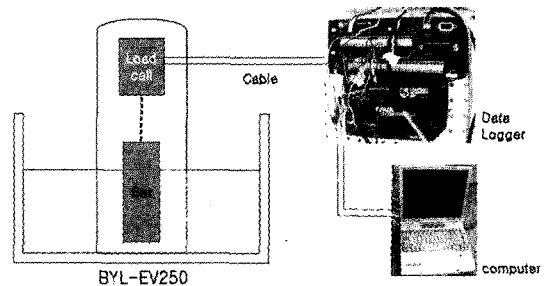


Fig. 2. The schematic of BYL-EV250 observation system.

60mm의 pyrex 유리관을 사용하여, 온도에 따른 부피 변화를 최소화하여 온도보정이 필요하지 않게 하였다. 또한 장기간 사용해도 출력에 변화가 적은 로드셀을 사용하여 관측 정확도를 높였다.

### 2.3. 장비의 설치

기상청에서는 증발량관측을 목적으로 1일 1회 시행하고 있으나, 보다 정밀하게 측정하고자 BYL-EV250 증발기록계를 사용하여 매 1분마다 관측을 하고 매 10분마다 평균하여 그 값을 저장하였다. 아울러 기상요소와 증발량과의 관계를 알아보고자 풍속계(R. M. Young Wind Monitor, Campbell Scientific Inc., U.S.A.), 온도습도계(HMP 35C, CSI, U.S.A.)를 지상 1m 위치에 설치하여 관측하였다. 수온관측은 써미스터(107, CSI, U.S.A.)를 사용하였다. 관측은 2002년 3월에 시작하여 2004년 7월까지 수행되었으며, 매월 1회씩 증발기록계 자료를 수집하고 비교분석하였으며, 해남관측소의 기상 자료를 강수에 대한 확인 자료로 사용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 증발량 관측 자료

관측기간 중 기상상태가 안정되어 현저한 강수현상이 나타나지 않은 기간으로 2004년 5월 16일~5월 25일의 10일간 증발량 자료를 Fig. 3에 나타내었다. 이 기간 중 아래쪽 극대값은 (-)방향으로 대형증발계에 강수, 이슬 등의 물이 유입되었다는 것을 나타낸다. 이 기간 중 해남기상관측소에서 관측된 강수량을 보면 5월 21일 04시 0.5mm, 05시 0.5mm로 총 1mm의 강수량을 보였다. 반면 BYL-EV250 증발기록계 자료

에서는 0.98mm를 기록하였다. 따라서 2004년 5월 16일에서 25일까지의 관측기간 중 강수자료를 제거하여 순수 증발량을 계산하였다.

#### 3.2. 풍속과 수증기압에 따른 증발변화

증발량은 대개 풍속에 비례한다고 알려져 있다. 이러한 관계를 확인하기 위해서 관측된 증발량 자료를 0.2m/s 풍속별 구간으로 나누어 수온에 따른 포화수증기압과 지상 1미터 높이에서 수증기압 차이를 계산하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 풍속이 0에 가까운 경우, 기울기 값이 0.015이지만 풍속이 증가하여

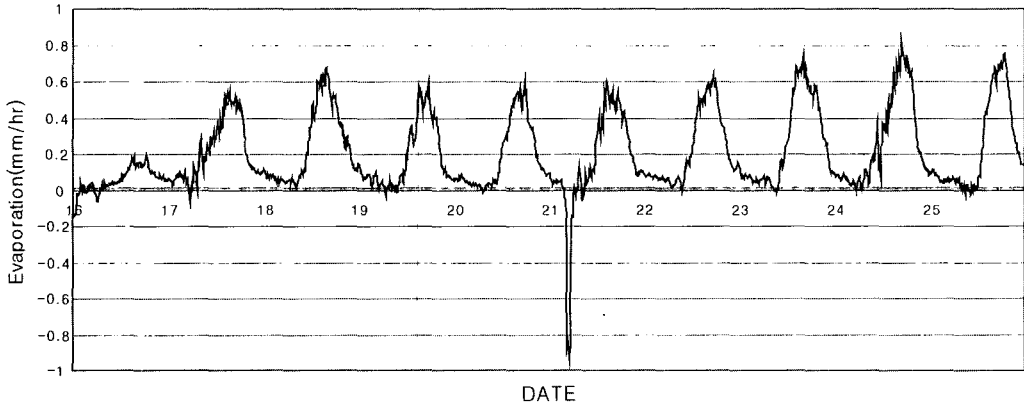


Fig. 3. The observed evaporation from 16 to 25 May 2004.

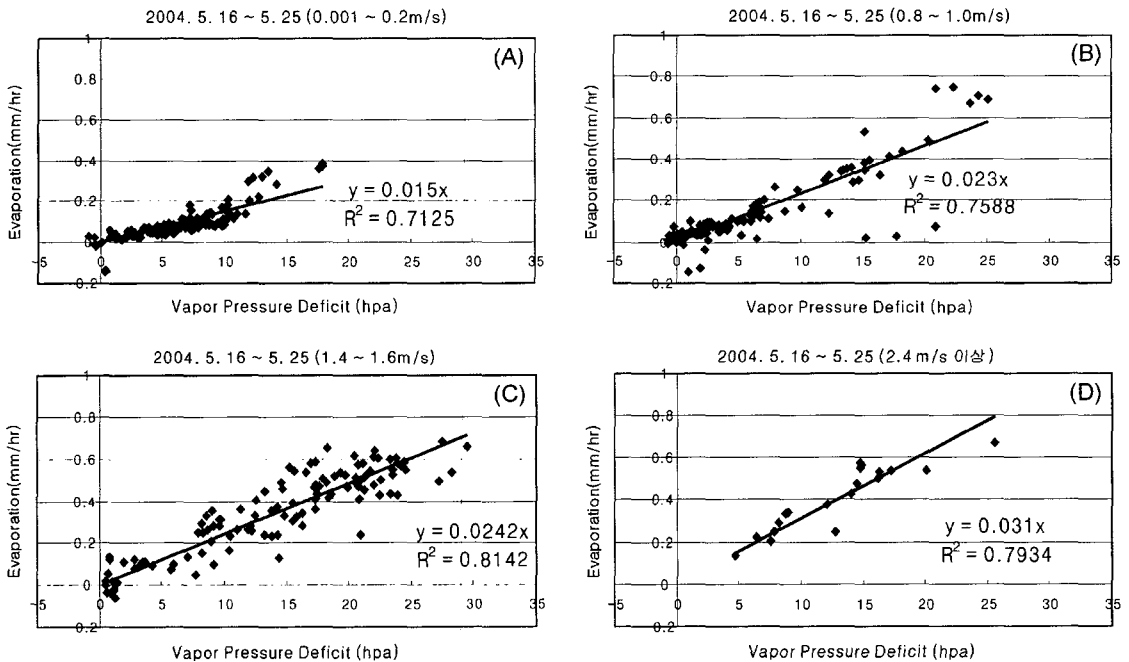


Fig. 4. Relationships between the observed evaporation and the vapor pressure deficit under different wind conditions.

2.6m/s인 경우, 기울기가 두 배정도인 0.031이었다.

이들 기울기 값을 정리해보면 풍속이 증가 할수록 대기건조에 따른 증발량 증가 속도가 빨라짐을 알 수 있다. Fig. 5에 풍속에 따른 기울기 값들을 그래프로 나타내었다.

풍속에 따른 기울기 값 대신 Fig. 5의 관계식을 사용하여 Fig. 4에서 보여준 수증기압차에 따른 매시 증발량 추정식을 만들면 다음과 같다.

$$E = (0.0146 + 0.0063 * U)(e_w - e_a) \quad (1)$$

E: 대형증발계의 매시간 증발량(mm/h)

U: 지상 1m 높이의 풍속(m/s)

e<sub>w</sub>: Class A Pan 수온에서의 포화수증기압(hPa)

e<sub>a</sub>: 지상 1m 높이의 실제 수증기압(hPa)

식 (1)을 이용하면 매시 기상자료로부터 한 시간 동안의 증발량을 계산해낼 수 있다.

### 3.3. 관측된 증발량과 경험식에 의한 증발량

2004년 5월 16일부터 25일까지의 실제 관측된 증발량을 1시간 단위로 Table 1에 나타내었다. 5월 21일 5-6시에 0.00으로 표시 된 것은 위의 3.1에 해남 지역의 강수량을 0으로 한 것이다. 시간당 최대 증발량은 5월 24일 18시에 관측되었는데 0.742mm/h를 기록하였다. 이것을 증발잠열로 환산하면 약 519w/m<sup>2</sup>

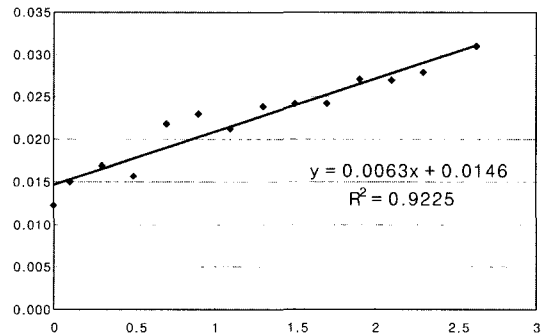


Fig. 5. Relationship between wind speed and the slope coefficient.

Table 1. Hourly evaporation of Class A Evaporation Pan during May 16 to 25, 2004

|       | 05/16 | 05/17 | 05/18 | 05/19 | 05/20 | 05/21 | 05/22 | 05/23 | 05/24 | 05/25 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1:00  | 0.00  | 0.06  | 0.10  | 0.12  | 0.07  | 0.08  | 0.08  | 0.10  | 0.08  | 0.10  |
| 2:00  | 0.01  | 0.05  | 0.08  | 0.07  | 0.07  | 0.04  | 0.08  | 0.08  | 0.07  | 0.09  |
| 3:00  | 0.02  | 0.08  | 0.08  | 0.08  | 0.06  | 0.05  | 0.08  | 0.08  | 0.08  | 0.07  |
| 4:00  | 0.00  | 0.07  | 0.06  | 0.05  | 0.04  | 0.03  | 0.07  | 0.06  | 0.05  | 0.05  |
| 5:00  | 0.02  | 0.07  | 0.06  | 0.07  | 0.03  | 0.00  | 0.06  | 0.05  | 0.04  | 0.05  |
| 6:00  | 0.01  | 0.01  | 0.05  | 0.03  | 0.03  | 0.00  | 0.06  | 0.05  | 0.03  | 0.06  |
| 7:00  | 0.00  | 0.08  | 0.05  | 0.02  | 0.02  | 0.01  | 0.05  | 0.06  | 0.05  | 0.06  |
| 8:00  | 0.02  | 0.11  | 0.05  | 0.03  | 0.00  | 0.06  | 0.03  | 0.07  | 0.07  | 0.05  |
| 9:00  | 0.03  | 0.20  | 0.04  | 0.03  | 0.03  | 0.02  | 0.06  | 0.02  | 0.07  | 0.02  |
| 10:00 | 0.04  | 0.19  | 0.09  | 0.01  | 0.04  | 0.05  | 0.03  | 0.01  | 0.16  | 0.01  |
| 11:00 | 0.04  | 0.25  | 0.13  | 0.06  | 0.04  | 0.09  | 0.11  | 0.12  | 0.24  | 0.00  |
| 12:00 | 0.05  | 0.29  | 0.28  | 0.09  | 0.13  | 0.15  | 0.17  | 0.18  | 0.17  | 0.02  |
| 13:00 | 0.08  | 0.34  | 0.42  | 0.25  | 0.25  | 0.35  | 0.26  | 0.31  | 0.34  | 0.07  |
| 14:00 | 0.10  | 0.38  | 0.53  | 0.31  | 0.32  | 0.35  | 0.44  | 0.51  | 0.40  | 0.28  |
| 15:00 | 0.14  | 0.50  | 0.59  | 0.36  | 0.44  | 0.54  | 0.48  | 0.63  | 0.52  | 0.44  |
| 16:00 | 0.16  | 0.51  | 0.63  | 0.55  | 0.50  | 0.51  | 0.52  | 0.67  | 0.65  | 0.56  |
| 17:00 | 0.15  | 0.49  | 0.60  | 0.47  | 0.54  | 0.50  | 0.58  | 0.67  | 0.70  | 0.64  |
| 18:00 | 0.14  | 0.47  | 0.50  | 0.53  | 0.51  | 0.49  | 0.61  | 0.59  | 0.74  | 0.68  |
| 19:00 | 0.17  | 0.44  | 0.46  | 0.42  | 0.50  | 0.43  | 0.53  | 0.54  | 0.69  | 0.71  |
| 20:00 | 0.11  | 0.26  | 0.35  | 0.39  | 0.35  | 0.38  | 0.39  | 0.56  | 0.63  | 0.65  |
| 21:00 | 0.09  | 0.14  | 0.27  | 0.24  | 0.27  | 0.25  | 0.30  | 0.41  | 0.38  | 0.46  |
| 22:00 | 0.07  | 0.12  | 0.25  | 0.12  | 0.17  | 0.16  | 0.19  | 0.28  | 0.22  | 0.29  |
| 23:00 | 0.07  | 0.10  | 0.15  | 0.08  | 0.12  | 0.09  | 0.13  | 0.20  | 0.16  | 0.21  |
| 0:00  | 0.06  | 0.10  | 0.12  | 0.06  | 0.09  | 0.10  | 0.14  | 0.10  | 0.11  | 0.14  |
| Total | 1.58  | 5.30  | 5.92  | 4.43  | 4.63  | 4.72  | 5.44  | 6.33  | 6.62  | 5.71  |

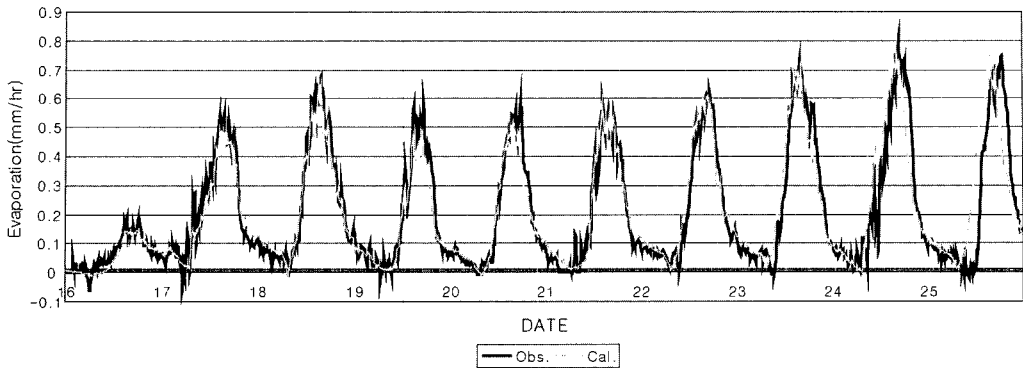


Fig. 6. The observed and estimated evaporation.

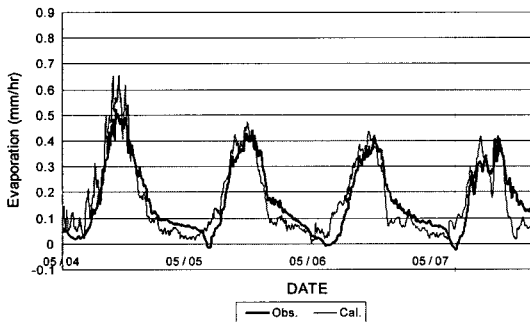


Fig. 7. The observed and estimated evaporation from 4 to 7 May 2004.

Table 2. Comparison of evaporation data between observation and calculation data during May 4 to 7, 2004

|       | Obs.  | Cal. | Diff. |
|-------|-------|------|-------|
| 05/04 | 4.19  | 4.4  | -0.21 |
| 05/05 | 4.13  | 3.9  | 0.23  |
| 05/06 | 3.66  | 3.5  | 0.16  |
| 05/07 | 3.78  | 3.2  | 0.58  |
| Total | 15.76 | 15.0 | 0.76  |

에 해당한다. 식 (1)을 사용하여 2004년 5월 16일부터 25일까지 계산된 증발량을 실제 관측된 증발량과 함께 Fig. 6에 나타내었다. 일변화의 양상과 값들의 크기를 살펴보면 실제 증발량과 경험식에서 계산된 증발량이 잘 일치함을 알 수가 있다.

경험식 (1)의 타당성을 알아 보기위해 맑은 날이 4일간 지속된 2004년 5월 4일에서 7일까지의 관측자료와 경험식을 사용하여 산출된 증발량을 Fig. 7에 비교하였다. Fig. 6에서와 같이 증발의 최대가 나타나는 시간대와 일변화의 양상이 관측값과 잘 일치하고 있다. 일 적산된 증발량을 Table 2에 비교하였다. 4일 동안

관측된 총 증발량은 15.76mm였고, 계산 값은 15.0mm로 약 5%의 오차를 보였다.

### 3.4. 일 단위 증발량 비교

Table 3은 일 단위의 관측된 증발량 값과 식 (1)에서 계산된 값을 비교한 것으로 일일 최대 0.63mm의 차이를 보였다. 그러나 오차가 거의 없는 (<0.1~0.2mm) 날이 6일이나 기록되어 본 연구에서 유도된 경험식의 사용 가능성이 충분히 있다고 사료된다. 10일간의 총 관측 값은 50.7mm이었고 경험식에 의한 계산 값은 50.4mm를 기록하여 그 누적오차는 매우 작았다. 이 기간 동안의 일 적산된 증발량을 막대그래프로 Fig. 8에 나타내었는데, 값의 변화에 다소 차이는 있으나, 전반적으로 일 증발량을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 관측 기간 동안의 증발량의 일변화를 함께 나타낸 것으로 오후 3시~7시에 증발량이 가장 많은

Table 3. Comparison of evaporation data between observation and calculation data

|       | Obs.  | Cal. | Diff. |
|-------|-------|------|-------|
| 05/16 | 1.58  | 1.3  | 0.28  |
| 05/17 | 5.30  | 5.0  | 0.30  |
| 05/18 | 5.92  | 5.8  | 0.12  |
| 05/19 | 4.43  | 3.8  | 0.63  |
| 05/20 | 4.63  | 4.4  | 0.23  |
| 05/21 | 4.72  | 4.9  | -0.18 |
| 05/22 | 5.44  | 5.7  | -0.26 |
| 05/23 | 6.33  | 6.4  | -0.07 |
| 05/24 | 6.62  | 6.8  | -0.18 |
| 05/25 | 5.71  | 6.3  | -0.59 |
| Total | 50.68 | 50.4 | 0.28  |

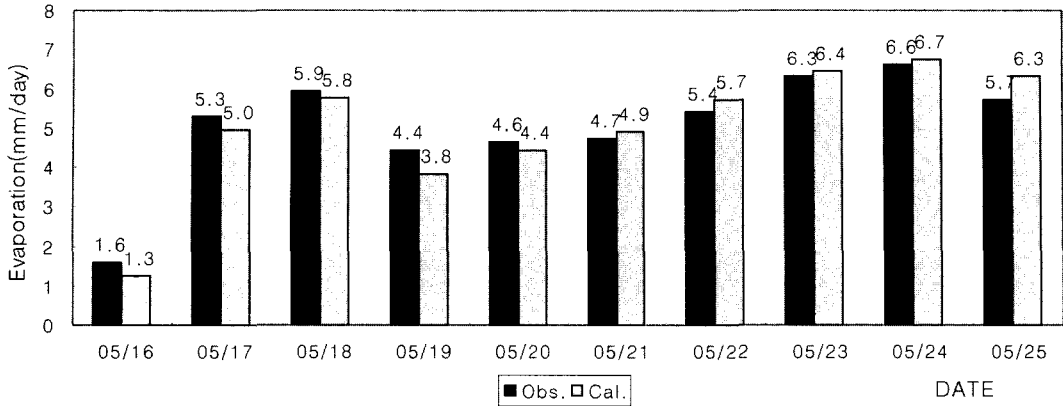


Fig. 8. Comparison between observed and estimated daily evaporation from 16 May to 25 May 2004.

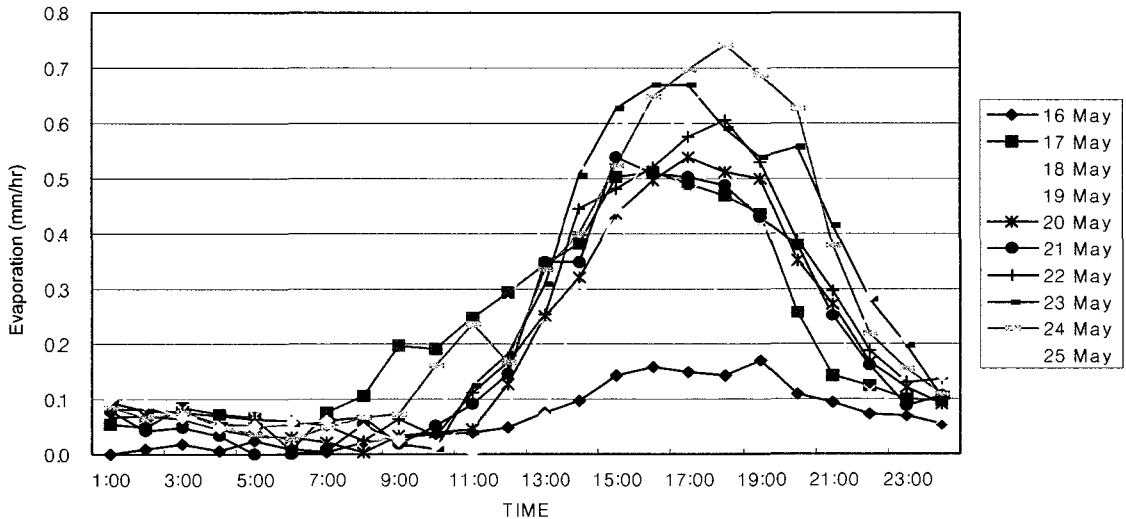


Fig. 9. Time series of daily evaporation 16 to 25 May 2004.

것을 볼 수 있다. 이것은 증발량이 보통 정오에서 오후 3시 사이에 많은 것과 다소 차이를 보이나, 자유 수면에서의 증발이므로 주로 오후에 나타나는 오아시스 현상에 의한 현열 에너지의 이류 때문에 발생할 수 있는 것으로 사료된다.

#### IV. 적 요

BYL-EV250 증발기록계를 이용하여 해남 농경지역의 자유 수면 증발량을 관측하였고, 그 자료를 분석하여, 기상 요소와 증발량과의 관계를 분석하였다. 자연상태에서 증발량을 결정하는 기상요소의 관계를 살펴보고, 그 결과를 바람과 포차의 경험식으로 나타내

었다. 이 식을 이용하여 자유 수면으로부터의 시간당 증발량을 구할 수 있었으며 수온, 기온, 습도, 풍속 같은 기상요소만으로 증발량 추정이 가능했다. 증발량 산출에 대한 신뢰성을 높이기 위해 지속적으로 수면에서의 물수지에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다. 증발량 관측도 다른 기상요소와 같이 매시간 관측 자료 생산 가능성을 시사했다. 부력을 이용한 측정방법은 미소 수위 변화(0.1mm 이하)를 측정할 수 있어 대형증발계를 활용한 자동관측에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 장기간 관측된 자유수면 증발자료와 플릭스 타워에서 동시에 관측된 실제 증발산 자료의 비교분석이 현재 진행 중에 있다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-technopia 21 project)”의 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

- Assouline, S. and Y. Mahrer, 1996: Spatial and temporal variability in microclimate and evaporation over lake Kinneret : Experimental evaluation. *Journal of Applied Meteorology* **35**, 1075-1084.
- 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.
- Chiew, F.H.S., N.N. Kamaladasa, H.M. Malano, and T.A. McMahon, 1995: Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. *Agricultural Water Management* **28**, 9-21.
- Jacob, A.F.G., B.G. Heusinkveld, and D.C. Lucassen, 1998: Temperature variation in a class A evaporation pan. *Journal of Hydrology* **206**, 75-83.
- Kim, J., W. Kim, C.H. Cho, B.C. Choi, H.S. Chung, B.L. Lee, K. Kim, B.Y. Lee, G.W. Lee, J.T. Lee, J.H. Lim, J.H. Oh, E.W. Park, J.S. Shim, J.I. Yun, and C.S. Rho, 2002: KoFlux: A new tool to study the biosphere-atmosphere interactions in Asia, *Ecology of Korea*, D. Lee *et al.* (Eds.) Bumwoo Publisher, 215-229.
- Lee, B.Y., 2001: A study on the development of hourly evaporation recording instrument for Class A Pan. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **10**, 323-327.(in Korean with English abstract)
- Lee, B. Y., 2002: Short-term variation in Class A Pan evaporation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 197-202.(in Korean with English abstract)
- McGinn, S.M. and H.D.J. McLean, 1995: Monitoring free-water evaporation at automated weather station. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **12**, 1363-1366.