

## 고도에 따른 증발산 효과와 라이시메타 관측

이부용\* · 양성기<sup>1)</sup> · 권기훈 · 김재방<sup>2)</sup>

대구가톨릭대학교 환경과학과, <sup>1)</sup>제주대학교 토목공학과, <sup>2)</sup>한국공항  
(2012년 4월 16일 접수; 2012년 6월 14일 수정; 2012년 6월 20일 채택)

## The Effect of Evapotranspiration by Altitude and Observation of Lysimeter

Bu-Yong Lee\*, Sung-Kee Yang<sup>1)</sup>, Ki-Hoon Kwon, Jae-Bang Kim<sup>2)</sup>

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Kyeonbuk 712-702, Korea

<sup>1)</sup>Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

<sup>2)</sup>Korea Airport Service, Jeju 697-911, Korea

(Manuscript received 16 April, 2012; revised 14 June, 2012; accepted 20 June, 2012)

### Abstract

The effect of elevation and meteorological elements is analyzed in Jeju Island for analysis of evapotranspiration with two different height observation station during 3 years data. The slope of temperature gradient recorded 1.30 °C/100 m from the analysis of temperature data. There is much difference evapotranspiration between low elevation and high elevation station because of decrease solar radiation and wind speed with height increase. The evapotranspiration is observed by mini lysimeter at Hankukgonghang. The result of observation is presented 34.2% of global solar radiation changed into evapotranspiration during 4 clear days.

**Key Words** : Evapotranspiration, Evaporation, Lysimeter, Altitude

### 1. 서론

지표면 증발산은 지표면 토양 증발과 식생에 의한 증산 양을 합한 것으로 바람, 기온, 일사, 습도 등의 기상요소에 의해 그 양이 결정된다. 증발산량에 대한 관측은 지표면 물수지 연구에 필수적인 요소로 최근 우리나라에서 이에 대한 필요성이 증가되어 연구가 본격적으로 시작이 되었다. 이것에 대한 예로는 우리나라에서는 정교한 관측을 기반으로 한 에디공분산 방

법의 연구(강 등, 2009; 권 등, 2010)와 전통적인 기상 관측 장비를 활용하는 Bowen Ratio 방법이 있으며, 기상요소로부터 가능증발산량을 추정하는 것으로 세계적으로 널리 사용되고 있는 Food and Agriculture Organization(이하 FAO)의 Penman-Monteith Equation(이하 PM)방법 그리고 대형증발계와 소형증발계를 이용한 연구가 진행되었다(한과 이, 2005; 임, 2010). 특히 증발산은 고도에 의한 지형적인 효과와 기상요소에 크게 영향을 받는 것으로 제주도의 경우 그 중심부에 1950 m 높이의 한라산이 위치하여 내륙과는 다소 상이한 화산섬 형태의 지형으로 해안에서 내륙으로 갈수록 급격히 고도가 증가한다.

본 연구에서는 다양한 증발산량 추정에 대한 방법

\*Corresponding author : Bu-Yong Lee, Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Kyeonbuk, 712-702, Korea  
Phone: +82-53-850-3249  
E-mail: bylee@cu.ac.kr

들 중에서 FAO의 PM방법을 이용하여 고도에 대한 증발산 효과를 알아보는 것으로 그 비교는 제주기상청의 기상자료와 중 산간 지대에 위치한 한국공항 부지 내에 설치된 자동기상관측장비의 자료를 활용하였다. 또한 한국공항 부지 내에 증발산량을 측정할 수 있게 연구용으로 제작한 라이시메타를 설치하여 직접적인 방법으로 증발산량을 관측하였다. 이들 관측 자료로 부터 제주도에서 고도와 기상요소에 따른 증발산량의 영향과 증발산 해석을 위한 기초자료를 제공하는 것과 소형 라이시메타를 필드에 적용하여 증발산의 일변화 특징과 해석의 가능성을 알아보는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. PM방법에 의한 증발산비교

제주도 제주시에 위치한 제주기상청 노장에서 관측한 일단위의 온도, 습도, 바람, 일사량의 기상요소를 FAO 56 PM(Allen 등, 1998)을 기초로 한 증발산량(ET<sub>o</sub>) 산출연구보고서(Dirk, 2009)를 이용하여 관측 자료로 이론적인 가능증발산량을 구하고 소형증발계 증발량 관측 자료와의 관계를 알아보았다. 고도에 따른 증발산의 관계를 알아보기 위해서 해발고도 20 m의 제주기상청 노장 관측 자료와 한국공항 부지 내에 설치된 10 m 높이의 기상 관측탑(동경: 126° 42', 위도: 33° 25', 해발고도 356 m)을 선정하여 두 지점에서의 2009년부터 2011년까지 3년간의 기상 관측 자료를 이용하여 고도에 의한 증발산 효과에 대한 경향을 분석하였다.

### 2.2. 라이시메타 제작과 관측

라이시메타는 토양 무게 변화를 연속적으로 측정하여 시간에 따른 무게 변화량으로부터 단위 시간당의 증발산량을 직접 측정할 수 있는 관측 장비로 다른 측정 방법들과는 달리 증발산량의 절대 값을 측정할 수 있는 장점이 있다. Prueger 등(1997)은 가로, 세로 각각 1.68 m 길이 1.83 m의 대형 라이시메타를 설치하여 관측 방법적인 Bowen의 증발산량과의 비교에서 의미 있는 연구 결과를 도출하였다. 그러나 대형 라이시메타의 설치와 운영에는 매우 많은 운영 경비와 노

력이 필요하여 소규모 연구 적용에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 현실적인 문제점들을 고려하여 일본 쓰쿠바에 있는 기상연구소에서 증발산 연구를 수행한 Lee와 Haginoya(2011)가 연구에 사용한 라이시메타(Fig. 1)와 같이 토양 시료 용기의 크기로 직경 30 cm, 높이 30 cm로 제작하였다. 이 용기 상부 단면적은 706.9 cm<sup>2</sup>로 내부 토양 부피는 21,207 cm<sup>3</sup>로 높은 분해능으로 증발산 관측을 가능하여 제주지역의 중 산간 지역의 증발산 해석에 대한 기본적인 연구를 하고자 한다.

지표면으로 입사하는 강한 태양 복사는 지표면 토양 온도에 영향을 주고 그 온도 변화는 토양 무게 변화를 측정하는 로드셀에 오차를 발생하게 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 일중 온도 변화가 비교적 적은 지표면 40 cm 깊이에 로드셀이 위치하게 하였다. 토양 시료가 완전 포화에서 완전 건조 상태의 전 무게 범위에 대해 충분히 가능할 수 있게 100 kg 용량의 TEDEA HUNTLEIGH사의 로드셀(Table 1 참조)을 적용하였다. 일반적으로 로드셀의 측정 분해능은 0.01%로 100 kg 로드셀을 사용할 경우 분해능은 0.01 kg이 되고 이것을 라이시메타 단면적 706.9 cm<sup>2</sup>에 대해서 적용해 계산해 보면 증발산량에 대한 측정은 매우 높은 분해능인 0.014 mm 까지 측정이 가능하게 된다. 로드셀 아날로그 신호는 Campbell Sci 사의 CR1000 데이터로거를 이용하여 저장하였다.

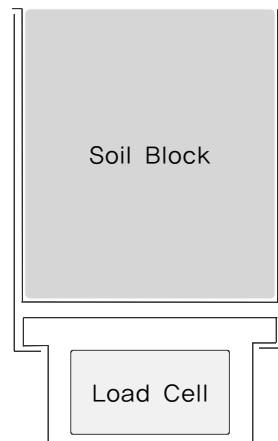


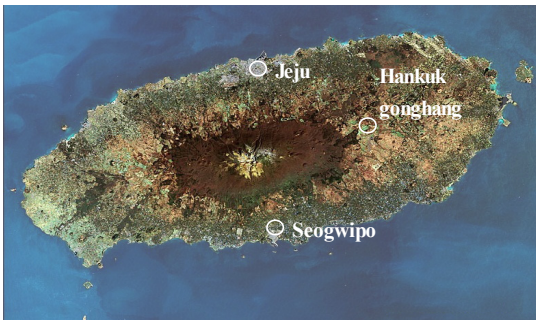
Fig. 1. Diagram of lysimeter.

**Table 1.** Specification of loadcell(Model-1510)

Item	Range
Rated capacity	100 Kg
Resistance excitation	380±10 Ω
Resistance output	350± 3 Ω
Compensated temp. range	-10~40 °C
Operating temp. range	-30~70 °C
Combine error	≤0.02 %
Repeatability error	≤0.017 %

### 2.3. 관측 장소 선정

관측에서 가장 중요한 부분은 자료의 신뢰성과 품질을 확보하고 관측 장비의 효율적인 관리를 위해서 접근성과 효율성이 좋은 장소가 요구된다. 좋은 관측 장소 선정은 야외 관측수행에 있어 중요한 조건으로 이러한 것들이 매우 잘 충족되는 관측 장소로 한국공항의 노장을 선정하였다(Fig. 2). 이곳은 본 연구에서 필요로 하는 넓고 평편하며, 역세 풀들이 평편한 지면을 피복하고 있어 관측 노장으로는 매우 양호한 조건이다. 라이시메타는 Fig. 3의 앞쪽 원형부분으로 최대한 자연 상태에 가깝게 설치하여 관측하였다.

**Fig. 2.** Map of the observation site(from Google map).**Fig. 3.** Photo of lysimeter installed at HangukKonghang.

### 2.4. 라이시메타 관측과 해석

맑은 날씨의 경우 태양복사 중 수평면 일사량은 일출과 함께 점차 증가하는데 태양의 고도가 가장 높은 정오경에 최대가 되고, 오후가 되면서 점차 감소하게 되며 기온의 일교차 또한 크게 나타나고 습도 변화 또한 기온과 같이 일교차가 크게 나타난다. 맑고 청명한 기상 상태에서는 라이시메타에서 관측된 증발산 관측 자료로 부터 직접적인 영향 인자인 복사량과의 정량적인 관계 분석에 많은 도움을 줄 수 있다. 우선 본 연구에서는 라이시메타 관측이 시작된 2011년 10월 15일에서 12월 31일 자료 중에서 위와 같이 맑은 날씨가 연속하여 나타난 2011년 10월 16일(Julian Day 199)에서 2011년 10월 19일(Julian Day 203)의 4일간에 대해 일사량과의 분석을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 고도에 따른 기상 요소의 상관관계

제주도에서 고도에 따른 기온의 분포는 제주기상청 노장(JJ, 해발고도 20 m)와 한국공항(HH, 해발고도 356 m)로 두 지점 사이에는 336 m의 고도차이가 있다. 이들 지점의 고도차에 따른 증발산 자료에 대한 경향을 알아보기 위해 2009 ~ 2011년 3년간의 관측 자료를 사용하였다. 이 기간 동안 계산된 일평균 온도 자료에 대한 상관관계를 살펴보면 Fig. 4와 같이 된다. 기울기 값은 1.02로 지면의 온도에 대해 거의 같은 비율로 변화하는 것을 확인 할 수가 있었다. 그러나 그 함수의 절편 값은 -4.37 °C로 100 m 당의 온도감률을 계산해 보면 1.30 °C/100m로 표준대기감률 0.65 °C/100m건조단열 감률 0.98 °C/100m 보다 크게 나타났다. 이것은 해발고도 상승에 따른 온도의 분포는 연직적인 온도 분포의 경우와는 다르게 나타나 제주도에서는 고도와 지형적인 효과 등이 복합적으로 작용하고 있음을 확인한 것으로 온도 분포에 대해서는 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료되었다.

Fig. 5는 일 누적 일사량에 대한 상관을 나타낸 것이다. 상관관계에서 그 기울기는 0.84이고 상관계수는 0.76으로 비교적 높게 나타났다. 이 기간 동안 일평균 일사량의 값은 제주가 13.70 Mjoule/m<sup>2</sup>, 한국공항이 11.85 Mjoule/m<sup>2</sup>으로 13.5%에 해당하는 1.85

Mjoule/m<sup>2</sup> 적게 관측되었다. 그림에서의 특징은 상관관계선 상단부에 밀집된 형태의 자료가 있으나 하단부에는 자료가 매우 흩어져 나타나고 있다. 이것은 제주도의 산악적인 지형의 효과가 잘 나타난 것으로 고도가 낮은 제주기상청이 맑은 날씨일 때 산 중턱에 위치한 한국공항은 맑은 경우와 흐린 경우가 있다는 것이 된다. 이것은 낮은 고도의 지표면 부근 공기가 한라산 정상 방향으로 상승한 것으로 고도가 낮은 해안가 부근의 지점에는 구름이 없으나 고도가 높은 중산간 지역 상공에는 구름이 형성되는 경우가 있음을 확인한 것으로 제주도에에서의 일사량 분포 해석에 주의가 필요한 것으로 판명되었다. Fig. 6은 일평균 풍속에 대한 값을 나타낸 것으로 제주기상청의 일평균은 3.37 m/s 한국공항은 3.09 m/s로 0.28 m/s 낮게 나타났으며 그 기울기는 0.86이나 상관 계수는 0.26으로 매우 낮게 나타났다. 관측 고도가 높은 한국 공항이 고도가 낮은 제주기상청 보다 평균 풍속이 느린 것은 일반적인 풍속의 연직 분포에서 위로 갈수록 풍속이 증가하는 것

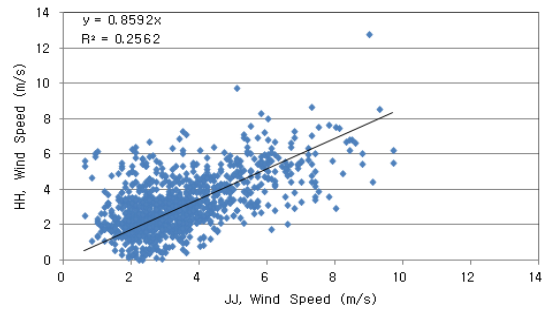


Fig. 6. Same as Fig. 4 but for wind.

과는 달리 제주도 중 산간 지역에서의 고유한 특징으로 해석이 되며 낮은 상관 계수는 바람에 대해서는 국지적인 영향이 강하게 나타난 결과로 해석할 수 있다.

3.2. 팬 증발량과 PM 방법에 의한 증발산량의 비교

Fig. 7은 제주기상청의 3년간의 일 단위의 소형증발계의 증발량과 PM방법에 의한 증발산량의 상관관계를 나타낸 것이다. 두 자료의 상관관계는 0.84로 매우 높게 분석되어 제주에서 PM 방법에 의한 정량적인 해석과 접근이 가능함을 확인하였으며, 제주기상청에서 관측된 증발 팬의 연평균 증발량은 1,240.1 mm이고 PM방법의 증발산량은 1,098.6 mm로 나타나 141.5 mm의 차이가 있었으며, 자유 수면인 소형증발계에서 관측된 증발량은 PM 증발산량보다 약 13% 정도 높게 평가하는 것으로 확인이 되었다. 이러한 결과는 추후 제주지역 증발산의 수치 해석 연구에 보다 정량적인 통계 분석이 필요한 것으로 사료되었다.

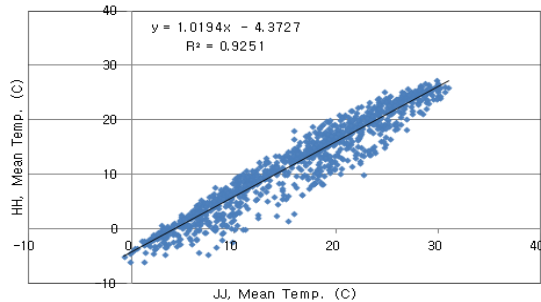


Fig. 4. Relation between temperature Jeju and Hangkuk-gonghang.

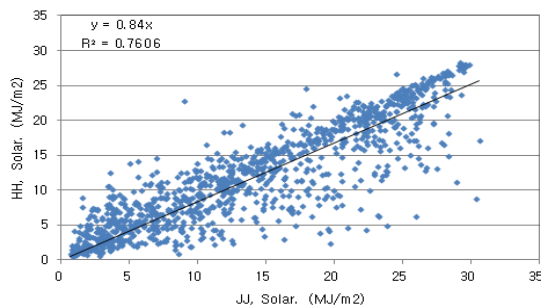


Fig. 5. Same as Fig. 4 but for solar radiation.

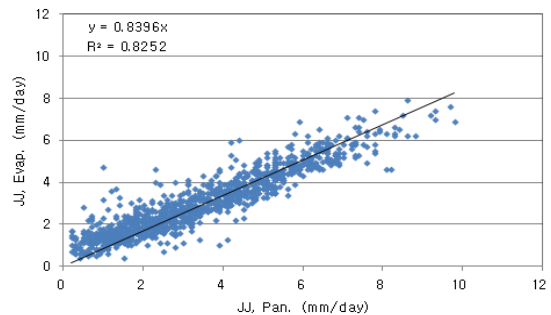


Fig. 7. Relation between Pan evaporation and PM method.

3.3. 고도에 따른 증발산 관계

Fig. 8은 PM 방법으로 제주기상청 노장 관측 자료와 한국공항의 기상 관측 요소로부터 산출한 일 증발산량 값이다. 제주도는 산악이라는 특수한 지형적인 효과의 영향을 많이 받아 온도의 경우 고도에 따라 급격한 감소 현상이 나타나고 일사량은 상대적으로 적게 나타나고 풍속 또한 낮게 나타나 기상요소들 모두가 증발산을 억제하는 “-” 방향으로 되어 있음을 확인할 수가 있었다. 이러한 결과로 증발산량에 대한 상관관계의 기울기 값이 0.76으로 1보다 작게 분석되었다. 한국공항의 3년간의 PM 방법의 증발산량은 834.9 mm로 해석되어 1098.6 mm를 기록한 제주기상청 증발산량의 24%에 해당하는 263.7 mm가 적게 관측되었다. 그러나 해발 고도가 다른 두 관측소임에도 불구하고 그 상관계수는 0.72로 비교적 높게 나타나 추후 연구를 통해 제주도의 증발산량 분포 추정에 대한 개관적인 접근 가능성에 대해서 확인을 할 수 있었다.

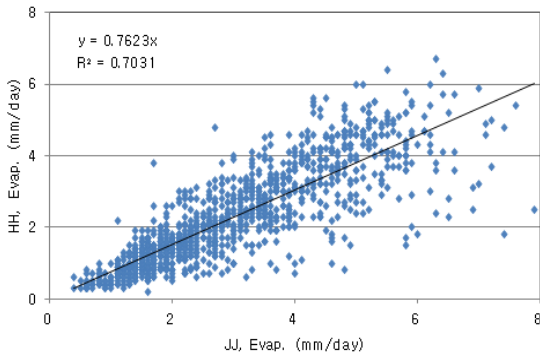


Fig. 8. Relation between evapotranspiration Jeju and Hankuk-gonghang.

3.4. 라이시메타 관측

Fig. 9는 라이시메타 관측이 시작된 2011년 10월 15일에서 12월 31일까지의 자료 중에서 가장 맑은 날이 계속된 2011년 10월 16일에서 20일까지 한국공항에 설치한 라이시메타에서 관측된 증량 변화 자료로부터 에너지 단위로 환산한 증발산값과 한국공항자동 기상관측 장비에서 관측된 단파 복사량을 시계열로 나타내었다.

맑은 날 단파복사의 일변화는 종 모양을 하고 있다. 본 연구의 관측에서도 같은 형태로 아침에 일사량이 급격히 증가하고 이때 증발산은 일시적인 시각 지연이 있는 후 일사와 같이 증가하고, 감소 할 때도 같은 형태로 나타났다. 이러한 관측 결과는 맑은 날에는 일출이 있은 후 지표면에서의 증발산이 일어나기 시작하고 일몰과 함께 증발산이 일어나지 않는다는 것을 알 수 있다. 특히 야간에는 증발산이 매우 미미함을 확인할 수 있었다. 이러한 관측 결과는 추후 제주도 식생에서의 증산량을 추정할 때 적용할 수 있는 주요한 기초 자료로 활용 가치가 매우 높은 것으로 사료되었다. Table 2에 나타난 관측 자료를 살펴보면 4 일간 수평면 복사량의 34.2%가 증발산에너지로 변환한 것으로 계산되었으며, PM 방법에 의한 결과는 49.8%의 증발산에너지로 계산되었다. 이것으로 부터 실제 증발산과 가능 증발산과의 차이에 대한 것을 확인할 수 있었다. Fig. 10은 하향 단파 복사와 증발산과의 관계를 나타내었다. 관계식에서 기울기 값은 0.33으로 나타나

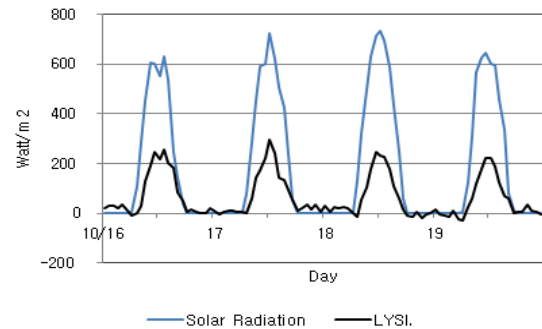


Fig. 9. Daily variation of solar radiation and evapotranspiration of lysimeter.

Table 2. Daily total energy at HankukKonghang

Date	Unit:Mj/m <sup>2</sup> · day		
	Lysi.	PM	Radiation
10/16	6.38	7.98	15.14
17	6.21	9.02	16.48
18	5.30	8.67	18.21
19	4.55	6.94	15.69
Sum	22.44	32.61	65.52
%	34.2	49.8	100.0



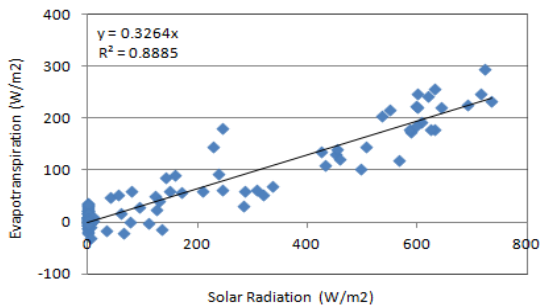


Fig. 10. Relation between solar radiation and evapotranspiration of lysimeter.

으며 상관계수 또한 0.89로 매우 높게 나타났다. 이것은 단파복사의 관측만으로 특정지역의 일정 기간 동안 증발산량을 추정할 수 있을 것으로 확인되었다.

### 3.5. 라이시메타와 PM(ET<sub>0</sub>)의 증발산 비교

다양한 방법의 증발산 추정 방법들 중에서 비교적 간단하고 널리 사용되고 있는 것이 PM 방법으로 바람, 습도 풍속, 일사의 기상요소로부터 구할 수가 있다. 본 연구에서는 2011년 10월 15일에서 12월 31일까지 총 78일 중 강우 등에 의해 자료의 교란이 일어나지 않은 34일간의 관측 자료를 사용하여 Fig. 11을 만들었다. 이 계절은 온도가 낮아지기 시작하는 시기이며 증발산량이 여름에 비해 상대적으로 적은 시기로 실제 관측되는 증발산과 PM방법에 의한 증발산량 간의 검토를 위해 비교하였다. 그림에 나타난 바와 같이 PM 방법에 의한 증발산과 라이시메타에서 관측한 자료의 상관관계에서 기울기는 0.80으로 나타났으며, 그 상관은 0.29로 매우 낮게 나타났다. 그러나 제

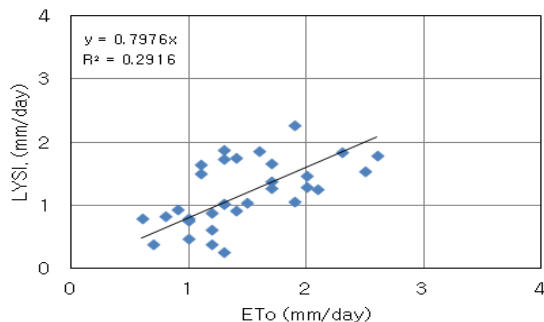


Fig. 11. Relation between PM(ET<sub>0</sub>) and evapotranspiration of lysimeter.

주도라는 지형적인 영향에도 불구하고 그 총량은 PM 방법에 의한 증발산량은 46.6 mm이고 라이시메타는 38.3 mm로 나타나 두 값 사이에는 8.3 mm의 차이가 있었다. 이 값은 약 20% 정도에 해당하는 것으로 상이한 지표면 증발산량 추정 시 각각의 방법이 가지는 계산 결과에 대한 의미의 해석과 장기적이며 지속적인 관측과 연구가 필요한 것으로 사료되었다.

## 4. 결론

본 연구에서 선정된 고도가 다른 제주도의 제주기상청 노장과 한국공항 노장의 관측 자료에 대한 3년간의 분석 결과에서는 고도가 증가할수록 기온, 일사, 풍속이 감소하는 것으로 나타났다. 특히 기온의 상관관계 분석에서 그 함수의 절편 값은  $-4.37^{\circ}\text{C}$ 로 나타나 100 m 당의 온도감률을 계산해 보면  $1.30^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 로 표준대기감을  $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  건조단열 감을  $0.98^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  보다 크게 나타났다. 이러한 것은 제주도의 경우 고도와 지형적인 효과가 복합적으로 나타난 결과로 해석이 되고 온도 분포에 대한 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료되었다. PM 방법에 의한 한국공항의 3년간의 평균 증발산량은 834.9 mm로 해석되어 제주기상관측소의 1098.6 mm에 비해 263.7 mm가 적게 분석되어 제주지역에서 고도 증가에 따른 증발산량은 감소하는 경향임을 확인하였다.

한국공항에서 라이시메타 관측이 시작된 2011년 10월 15일에서 12월 31일 자료 중에서 가장 맑은 날이 계속된 2011년 10월 16일에서 20일까지 연속 4일간의 라이시메타 관측 자료에서 본 연구에서 제작된 장비는 매우 높은 관측 성능으로 안정적인 관측이 이루어졌으며, 증발산량은 단파복사와 매우 높은 상관성이 있는 것을 확인하였다. 그리고 본 관측에서는 단파복사량의 34.2%가 증발산량으로 변환된 것으로 관측을 통해 확인하였다. 특히 일출과 일몰에 따른 단파복사와 증발산량의 시계열은 매우 유사한 패턴을 가지고 있어 추후 계속될 제주지역 증발산 추정 연구에 매우 중요한 연구 결과로 사료되며 라이시메타 관측을 통한 증발산 해석에 대한 충분한 가능성을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업 “제주 수자원 연구단 (10지역기술혁신 B02)”의 지원으로 수행 되었습니다.

### 참 고 문 헌

- 강민석, 권효정, 임종환, 김준, 2009, 광릉 활엽수림과 침엽수림에서 에디공분산으로 관측한 하루 군락의 증발산, 한국농림기상학회지, 11(4), 233-246.
- 권효정, 이정훈, 이연길, 이진원, 정성원, 김준, 2009, 설마천 유역의 혼효림에서 관측된 증발산의 계절 변화, 한국농림기상학회지, 11(1), 39-47.
- 임창수, 2010, 우리나라 증발접시 증발량과 Penman 증발량 추세 비교분석, 대한토목학회논문집, 30(5B), 445-458.
- 한진수, 이부용, 2005, 해남 농경지에서의 자유수면 증발 관측과 해석, 한국농림기상학회지, 7(1), 91-97.
- Allen, R., Pereira, L.S., Racs, D. Smith, M., 1998, Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage paper, 56, Rome, Italy.
- Dirk Races, 2009, The ETo calculator, version 3.1. FAO, via delle Terme di Caracalla, 00153, Rome, Italy.
- Google, 2012, <http://maps.google.co.kr/maps>.
- Lee, B. Y., Haginoya, S., 2011, The latent heat exchange on the ground, J. of the Environmental Sciences, 20(8), 1061-1068.
- Prueger, J. H., Hatfield, J. L., Aase, J. K., Pikul Jr., J. L., 1997, Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration, Agronomy Journal, 89(5), 730-736.