

ORIGINAL ARTICLE

덕유산 flux관측소의 군락 상층부와 지표면에서의 수분이동 관측

김용국* · 이부용¹⁾

대구가톨릭대학교 환경·조경학과, ¹⁾대구가톨릭대학교 환경과학과

Observation of Moisture Fluctuations in the Upper Canopy and the Ground Surface of Deogyusan-Flux

Yong-kuk Kim*, Bu-yong Lee¹⁾

Department of Environmental Science and Landscape Architecture The Graduate School, Catholic University of Daegu, Kyeonbuk 38430, Korea

¹⁾*Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Kyeonbuk 38430, Korea*

Abstract

In this paper, lysimeter was installed to analyze the moisture fluctuations on the surface of a forest. The weight of the soil was measured, and the moisture fluctuations were calculated through the difference in weight over time. The amount of dew condensation on the surface of the ground was about 2-7 mm. January experienced the most dew condensation (7.2 mm). It was found that about 43 mm of dew condensation was generated over one year. To analyze the characteristics of evapotranspiration in the forest, the evapotranspiration on the surface was measured by the lysimeter method and the evapotranspiration on the upper part of the canopy was measured by the eddy covariance method. These results were compared and analyzed. Until mid-October, the evapotranspiration of the forest was active, and the amount of evapotranspiration on the top of the canopy was higher than the amount on the surface. Thereafter, the amount of evapotranspiration on the top of the canopy decreased due to the lowering of temperature and net-radiation. The amount of evapotranspiration on the surface and above the canopy showed the same tendency.

Key words : Condensation, Evapotranspiration, Flux, Lysimeter

1. 서론

증발산은 자연계의 물 순환 과정에 있어 약 70% 정도를 차지하고 있으며, 물과 에너지 순환에 있어서 가장 중요한 성분이다(Yun et al., 2004). 증발산의 시공간적 분포는 식생생장, 온도 등의 계절적 요소 및 토양특성, 토지 피복 등의 공간적 요소에 따라 달라진다(Lee et al.,

2018). 증발산량을 직접 관측하는 방법은 라이시미터를 이용하여 작물의 생육에 사용되는 증발산을 측정하거나 미기상학적 에디공분산 방법 등이 있다. 이중 라이시미터는 실제 증발산량과 강우, 이슬 및 안개에 의한 수분유입량을 직접 측정하는 유일한 방법이다(Lee et al., 2011; Schrader et al., 2013; Peters et al., 2014). 에디공분산 관측 방법은 난류의 연직 플럭스와 수증기 농도를

Received 19 November, 2021; **Revised** 10 December, 2021;

Accepted 16 December, 2021

***Corresponding author:** Yong-kuk Kim, Department of Environmental Science and Landscape Architecture The Graduate School, Catholic University of Daegu, Kyeonbuk 38430, Korea

Phone : +82-53-850-3249

E-mail : yongkukkim@hanmail.net

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

Ⓒ This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

측정하고 보존방정식에 근거하여 증발산량을 계산하는 방법(Baldocchi et al., 1988)으로 비교적 적은 가정을 바탕으로 플릭스를 관측할 수 있는 장점이 있다(Yoo et al., 2021). 이러한 장점으로 에디공분산 관측 방법은 2000년대 이후 국내에 도입되어 많은 연구가 수행되고 있다(Lee et al., 2004; Hong et al., 2009; Kang et al., 2018). 산림에서의 물 순환 중 손실부분은 상부와 하부 군락의 증산과 토양 및 차단강수로부터의 증발, 유입부분은 강수, 결로 및 이슬 등으로 나타낼 수 있다. 하부 군락에서 발생하는 증발산량은 총 증발산량에 대한 기여를 무시할 수 없을 정도로 비교적 많이 발생되며(Kang et al., 2009), 결로량의 경우는 관측조차 이루어지고 있지 않고 있다.

본 연구는 라이시미터를 이용해 산지 지표면에서 발생하는 증발산과 결로를 관측하고 군락 상부에서는 에디공분산 방법을 이용해 관측한 증발산량을 이용해 산림에서의 시공간적 차이에 따른 수분이동량을 분석하고, 산림 지표면에서의 결로량이 지표면의 수분공급에 얼마나 기여하는지 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 관측지점 및 방법

본 연구는 전라북도 무주군 안성면 덕산리에 위치한 덕유산 플릭스 관측소(K-water)를 대상으로 하였으며, 관측소의 표고는 EL. 688.5 m, 침활 혼효림과 낙엽송림이 분포되어 있다(Fig. 1). 에디공분산 시스템으로부터 군락 상부의 증발산량을 관측하고, 라이시미터로부터 지

표면에서 나타나는 증발산량과 결로량을 관측한다(Table 1). 에디공분산시스템은 타워 24 m에 설치되어 있으며, 3차원 풍향 풍속계(CAST3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA)는 X, Y, Z 방향의 풍속자료와 풍향자료를 측정한다. 기체분석기(EC155 CO₂ and H₂O Closed-Path, Campbell Sci.)는 CO₂, H₂O와 대기 온도를 10 Hz간격으로 측정한다. 플릭스관측 자료의 분석기간은 2020년 9월 16일부터 11월 10일까지이며, EddyPro (LI-COR, Inc.)를 활용하여 분석하였다. 라이시미터는 로드셀을 이용해 내부 토양시료의 무게 변화를 관측하여 수분의 변화량을 관측하는 장비이다. 토양시료 상부에는 증발산량관측의 기준 작물인 잔디를 식재하였으며, 관측된 무게 데이터의 시간단위 차이로부터 증발산량과 결로량을 관측하게 된다. 무게의 증가량은 결로를 나타내며, 감소량은 증발산량을 나타낸다. 라이시미터의 수분이동량 분석은 2020년 7월부터 2021년 6월까지의 관측 자료를 활용하였다.

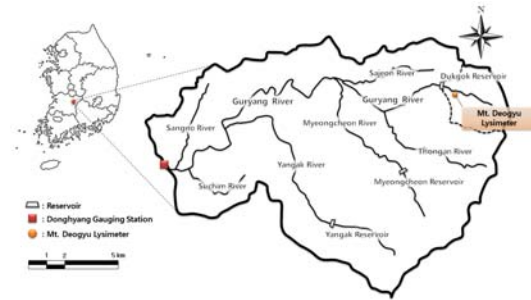


Fig. 1. Location of observation point.

Table 1. Summary of instruments at the measurement locations

Category	Model	Height(m)	Observed data	
Above canopy	3D Sonic anemometer	CSAT3	24	Wind direction & speed, Air temperature
	Gas analyzer	EC155	24	CO ₂ /H ₂ O
Ground surface	Lysimeter	HU-LY60	Ground 0 ~ 0.36	Dew-condensation, Evapotranspiration
etc.	Net radiometer	CNR4	23	Net radiation
	AWS	WXT510	2, 19	Wind speed, relative humidity, temperature, etc.
	Soil temperature	TCAV	Ground 0.05	Soil temperature
	Soil heat flux	HFP01	Ground 0.05	Soil heat flux
	Soil moisture	CS616	Ground 0.1, 0.2, 0.4, 0.8	Soil moisture

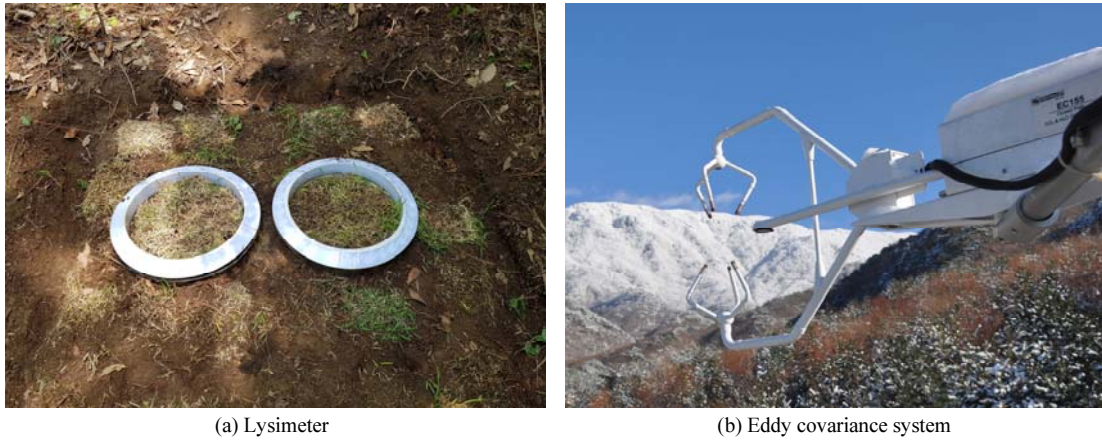


Fig. 2. Observation equipment.

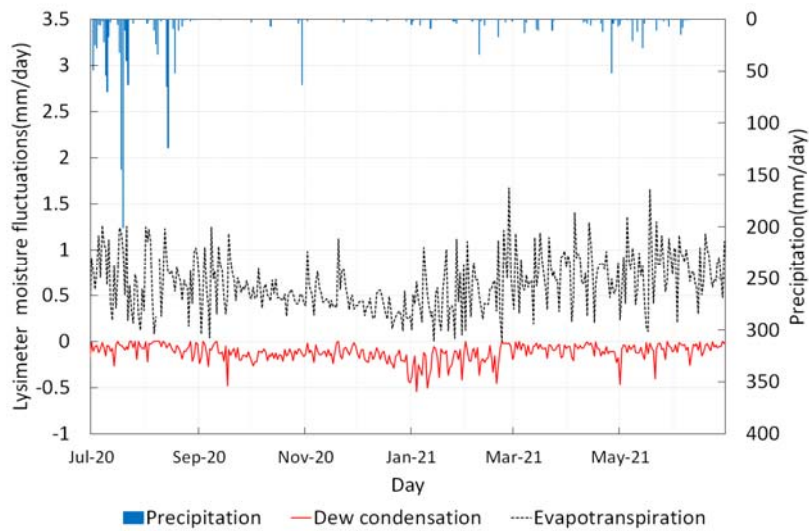


Fig. 3. Daily lysimeter evapotranspiration and dew condensation.

2.2. 기상데이터와의 상관관계 분석

산림 지표면과 군락 상부의 증발산량 발생 특성을 분석하고자 플렉스 관측소의 높이별 기상자료와의 상관관계 분석을 실시하였다. 지표면의 증발산량은 타워의 2 m에서의 자동기상관측자료(Automatic Weather Station, AWS), 군락상부의 증발산량은 19 m에서의 자동기상관측자료를 사용하였다. 그 외 플렉스 관측소의 토양수분, 토양온도 등의 자료를 활용하였으며, 분석도구는 SPSS (IBM, Inc.)를 활용하여 Pearson 상관분석을 실시하

였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산림 지표면에서의 수분이동량

라이시미터를 이용하여 산림 지표면에서의 수분이동량을 관측하였다. Fig. 3은 지표면의 증발산량 및 결로량의 일단위의 그래프이다. 결로의 발생은 봄과 가을, 겨울에 많이 발생되었으며, 낮과 밤의 기온차가 크게 나타나는

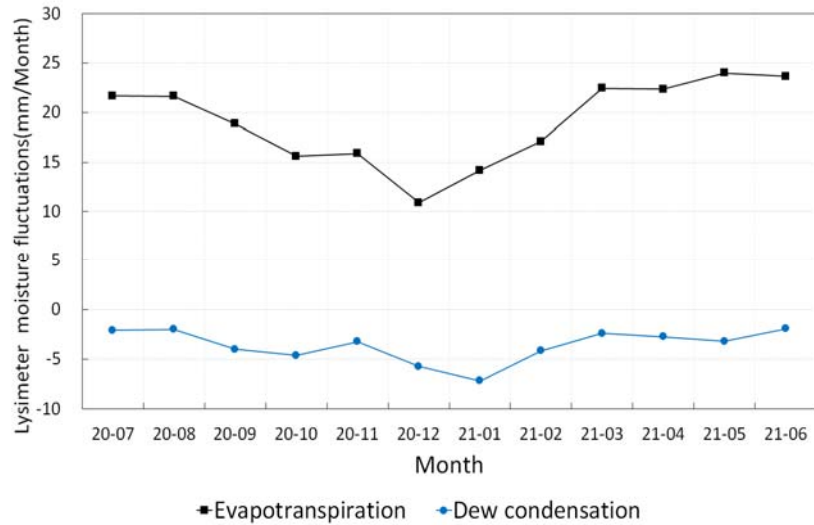


Fig. 4. Monthly lysimeter evapotranspiration and dew condensation.

Table 2. Monthly amount of lysimeter evapotranspiration and dew condensation

Month	Ly-dew condensation(mm)		Ly-evapotranspiration(mm)	
	Total (mm)	Unit area (mL/m ² /day)	Total (mm)	Unit area (mL/m ² /day)
20-Jul	2.102	68	21.665	699
20-Aug	1.999	64	21.656	699
20-Sep	4.009	134	18.844	628
20-Oct	4.622	149	15.613	504
20-Nov	3.246	108	15.901	530
20-Dec	5.750	185	10.917	352
21-Jan	7.195	232	14.181	457
21-Feb	4.174	149	17.105	611
21-Mar	2.416	78	22.462	725
21-Apr	2.753	92	22.354	745
21-May	3.196	103	23.990	774
21-Jun	1.939	65	23.654	788
Avg.	3.620	119	19.030	626

계절에 발생량이 많았다. 증발산의 경우 균락상부와 같이 여름에 많이 발생하였다.

Fig. 4는 월별 지표면 증발산량과 결로량 그래프이다. 산림 지표면의 증발산량은 9월부터 점차 감소하는 추세를 나타냈으며, 12월에 가장 적게 나타났다. 이후 점차

증가되어 3월까지 증가되었으며, 이후 일정한 경향을 보였다. 결로의 경우 증발이 감소되는 9월부터 증가되는 경향을 보이며, 1월에 결로량이 가장 크게 나타났다. Table 2는 지표면에서 발생하는 월별 증발산량 및 결로량과 1 m²의 면적의 지표면에 하루동안 발생하는 증발산 및

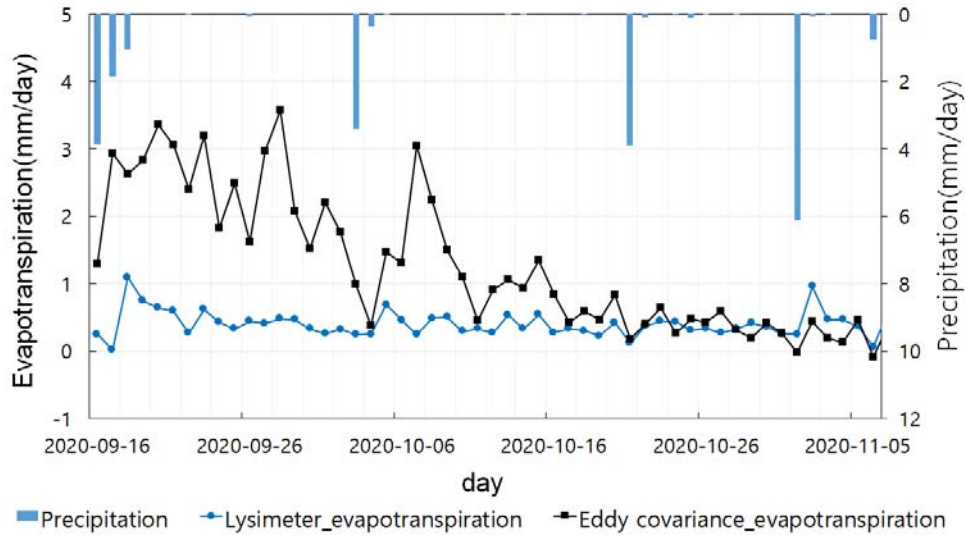


Fig. 5. Evapotranspiration of lysimeter (ground) and eddy covariance (canopy).

결로되는 물의 양이다. 연 평균 119 mL/m²/day의 결로가 발생되었으며, 월 평균 64 ~ 232 mL/m²/day의 분포를 나타냈다. 군락으로 인해 복사량이 대부분 차단되어 증발이 억제된 지역에서 매일 1 m² 면적의 지표면으로 아주 균등하게 약 120 mL의 물이 손실 없이 유입된 것으로 나타났다. 덕유산의 전체 면적은 219 km²으로 덕유산으로 유입되는 결로의 양을 면적으로 환산하면 연간 950 만톤의 물이 유입되는 것을 알 수 있었다. 이는 대구 광역시에서 연간 사용되는 농어업용 지하수 735 만톤보다 많은 양으로 산림은 눈에 보이지 않는 하나의 큰 댐으로 비유 될 수 있으며, 이러한 산림 수자원의 효율적인 활용을 위해서는 장기적이고 지속적인 관측과 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3.2. 산림 군락 상부와 지표면의 증발산량

산림에서의 증발산량 발생 특성을 분석하기 위해 지표면에서 관측한 라이시미터 증발산량과 군락상부에서 관측한 에디공분산 방법의 증발산량을 비교분석하였다 (Fig. 5). 9월의 증발산량은 약 2.5 ~ 3.5 mm/day의 분포를 나타내었으며, 점차 발생량이 감소하여 10월 중순부터는 1 mm/day이하로 감소되었다. 10월 중순부터는 산림의 증발산량이 거의 없고 지표면에서 증발량만 발생하는 것으로 나타났다. 10월 중순은 나뭇잎으로의 수분 공

급이 차단되고 단풍이 드는 시기로 식생의 휴면기가 시작되는 것으로 판단된다. 추후 지표면과 군락상부의 증발산량 비교를 통해 식생 종류에 따른 증발산량 특성은 식생의 휴면기 관련 연구가 가능할 것으로 판단된다.

3.3. 산림에서의 증발산량 인자의 상관관계

덕유산 플릭스관측소에서 관측된 기상관측데이터를 바탕으로 지표면과 군락상부에서의 증발산량의 상관관계를 분석하기 위해 Pearson 상관분석을 실시하여 중요 인자들 간의 상관관계를 분석하였다. Table 3은 라이시미터 방법의 지표면 증발산량과 기상자료와의 상관분석의 결과이다. 지표면 증발산량에 가장 정(+)의 상관을 보이는 변수들은 먼저 순복사($r=0.388, p=0.000$), 토양온도($r=0.325, p=0.001$), 대기온도($r=0.304, p=0.002$) 등의 순으로 높게 나타났고, 부(-)적 상관관계를 보이는 변수는 풍속($r=-0.219, p=0.019$)으로 나타났다. 지표면의 증발산량은 산림의 식생이 무성한 시기에는 바람막이 역할로 풍속이 적고, 증발산량이 적게 발생하는 겨울의 경우 식생의 감소로 바람이 강하게 발생됨에 따라 부(-)적 상관관계를 보였다. 습도, 토양수분, 지중열은 유의한 상관관계가 나타나지 않았다.

Table 4는 군락상부 에디공분산방법의 증발산량과 기상데이터와의 상관분석 결과이다. 군락상부의 증발산량에

Table 3. Correlations between lysimeter evapotranspiration and meteorological data

	Lysimeter -ET	Wind speed	Air temp.	Relative humidity	Soil heat flux	Soil moisture	Soil Temp.	Net radiation
Lysimeter-ET	1							
Wind speed	-0.219*	1						
Air temp.	0.304**	-0.819***	1					
Relative humidity	-0.032	-0.466***	0.599***	1				
Soil heat flux	0.142	-0.497***	0.798***	0.625***	1			
Soil moisture	0.157	-0.078	0.362***	0.541***	0.660***	1		
Soil Temp.	0.325***	-0.787***	0.900***	0.484***	0.537***	0.193*	1	
Net radiation	0.388***	-0.197*	0.368***	-0.048	0.240*	0.090	0.377***	1

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

Table 4. Correlations between eddy-covariance evapotranspiration and meteorological data

	Eddy-ET	Wind speed	Air temp.	Relative humidity	Soil heat flux	Soil moisture	Net radiation	Soil Temp.
Eddy-ET	1							
Wind speed	0.029	1						
Air temp.	0.516***	-0.012	1					
Relative humidity	-0.230***	-0.079	0.103***	1				
Soil heat flux	0.075**	-0.090**	0.759***	0.353***	1			
Soil moisture	0.317***	0.002	0.505***	0.397***	0.313***	1		
Net radiation	0.674***	0.072*	0.366***	-0.347***	-0.134***	0.028	1	
Soil Temp.	0.286***	-0.015	0.708***	0.501***	0.586***	0.812***	-0.039	1

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

가장 정(+)의 상관관계를 보이는 변수들은 먼저 순복사($r=0.674$, $p=0.000$), 대기온도($r=0.516$, $p=0.000$), 토양수분($r=0.317$, $p=0.000$), 토양온도($r=0.286$, $p=0.000$) 등의 순으로 높게 나타났고, 상대습도($r=-0.230$, $p=0.000$)는 부(-)적 상관관계를 나타내, 군락상부의 증발산량과 반비례 관계를 보였다. 지중열과 풍속은 유의한 상관관계가 나타나지 않았다. 지표면과 군락 상부 모두 순복사와 높은 상관관계를 나타냈으며, 그 밖에 인자들과는 다른 상관관계를 나타냈다. 군락상부의 증발산량은 대기온도, 토양수분 인자가 높은 상관성을 보였으며,

식생의 증산작용과 관련된 인자에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 산림의 지표면 증발산량의 경우 토양온도와 대기온도 인자가 높은 상관성을 보였으며, 대기와 지표면의 온도차에 결로가 발생됨에 따라 지표 부근의 온도에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 산림 지표면은 군락에 의해 복사량과 바람이 제한됨에 따라 군락상부와 하부의 공간적 차이로 증발산량 발생 특성이 다르게 나타났다. 산림 수자원의 활용, 물 순환 등 지표면 수분이동량 관련 연구를 위해서는 개별적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 라이시미터를 이용하여 산림 지표면에서 발생하는 결로량을 정량적으로 나타냈으며, 산림 지표면과 군락 상부에서의 증발산량 발생 특성을 함께 분석하였다.

산림 지표면의 결로량은 월 평균 64 ~ 232 mL/m²/day의 분포를 나타냈으며, 연 평균 119 mL/m²/day의 수분이 산림 지표면으로 결로되는 것으로 나타났다. 덕유산으로 연간 약 950 만톤의 물이 지표면으로 결로되어 유입된다는 걸 유추할 수 있었다. 이는 대구광역시의 연간 농어업용 지하수 이용량 735 만톤 보다 많은 양이다. 수분의 유입이 눈에는 보이지 않지만 많은 수자원이 산으로 유입되는 것으로 나타났다. 이처럼 산은 하나의 큰 댐으로 비유 될 수 있으며, 친환경적인 수자원의 개발 및 활용 가능성을 확인하였다.

산림의 증발산량 발생 특성 분석을 위해 각 인자와 Pearson 상관분석을 실시한 결과, 지표면과 군락상부 모두 순복사와 상관성이 큰 것으로 나타났다. 그 외 다른 인자와의 상관성은 보면, 군락상부의 증발산량은 대기온도, 토양수분 인자와 같이 식생의 증산작용과 관련된 인자가 상관성이 높게 나타났으며, 산림의 지표면 증발산량의 경우 토양온도와 대기온도와 같이 결로 발생과 관련된 지표부근의 온도 인자가 높은 상관성을 나타냈다. 증발산량은 공간적 차이에 따라 다른 특성을 나타내는 것을 알 수 있었으며, 정확한 물 순환 연구를 위해서는 개별적인 관측이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 산림의 수자원적 가치를 정량적으로 확인하였으며, 친환경적이며 지속가능한 산림 수자원의 활용과 개발을 위해서는 수목의 종류, 배치 등 관련분야의 연구가 병행되어야 할 것이며, 라이시미터 방법의 지표면 수분이동관측이 중요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

Baldocchi, D. D., Hincks, B. B., Meyers, T. P., 1988, Measuring biosphere atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods, *Ecology*, 69, 1331-1340.

Hong, J. K., Kwon, H. J., Lim, J. H., Byun, Y. H., Lee, J. H., Kim, J., 2009, Standardization of KoFlux eddy-covariance data processing, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 11, 19-26.

Kang, M. S., Kim, J., Lee, S. H., Kim, J. H., Chun, J. H., Cho, S. S., 2018, Changes and improvements of the standardized eddy covariance data processing in KoFlux, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 20, 5-17.

Kang, M. S., Kwon, H. J., Lim, J. H., Kim, J., 2009, Underatory evapotranspiration measured by eddy-covariance in gwangneung deciduous and coniferous forests, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 11, 233-246.

Lee, B. Y., Haginoya, S., 2011, The latent heat exchange on the ground, *J. Environ. Sci. Int.*, 20, 1061-1068.

Lee, H. C., Lee, B. Y., Kim, J., Shim, J. S., 2004, Tower-based Flux measurement using the eddy covariance method at Ieodo Ocean Research Station, *Ocean Polar Res.*, 26, 145-154.

Lee S. J., Kim, K. J., Kim, Y. H., Kim, J. W., Park, S. W., Yun, Y. S., Kim, N. R., Lee, Y. W., 2018, Deep learning-based estimation and mapping of evapotranspiration in cropland using local weather prediction model and satellite data, *Journal of the Korean Cartographic Association*, 18, 105-116.

Peters, A., Nehls, T. Schonsky, H. Wessolek, G. 2014, Separating precipitation and evapotranspiration from noise-a new filter routine for high resolution lysimeter data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 1189-1198.

Schrader, F., Durner, W., Fank, J., Gebler, T., Putz, S., Hannes, M., 2013, Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements, *Procedia-Environ. Sci.*, 19, 543-552.

Yoo, C. S., Song, S. U., Lee, M. S., Kim, S. E., 2021, Comparison of actual evapotranspiration amounts estimated using water balance and Eddy-Covariance methods: Applications to Seolmacheon and Cheongmicheon basins, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 21, 171-182.

Yun, J. I., Nam, J. C., Hong, S. Y., Kim, J., Kim, K. S., Chung, U., Chae, N. Y., Choi, T. J., 2004, Using spatial data and land surface modeling to monitor evapotranspiration across geographic areas in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 6, 149-163.

- Doctor's course. Yong-kuk Kim
Department of Environmental Science and Landscape
Architecture The Graduate School, Catholic University of
Daegu
yongkukkim@hanmail.net

- Professor. Bu-yong Lee
Department of Environmental Science, Catholic University
of Daegu
bylee@cu.ac.kr