물수지방법과 에디공분산방법에 의한 실제증발산 추정량의 비교: 설마천, 청미천 유역을 대상으로

Comparison of Actual Evapotranspiration Amounts Estimated Using Water Balance and Eddy-Covariance Methods: Applications to Seolmacheon and Cheongmicheon Basins

유철상* · 송성욱** · 이문석*** · 김소은****

Yoo, Chulsang*, Song, Sunguk**, Lee, Munseok***, and Kim, Soeun****

Abstract

In this study, actual evapotranspiration data estimated using the water balance and eddy-covariance methods were compared. Two different basins, i.e., the Seolmacheon and Cheongmicheon basins, were selected, and the actual evapotranspiration was observed using the eddy-covariance method. The rainfall, runoff depth, and actual evapotranspiration data between 2010 and 2018 were collected and analyzed. Daily evapotranspiration data and 10-minute rainfall and runoff data were then accumulated to analyze the annual data. The results showed that the annual actual evapotranspiration amount obtained using the eddy-covariance method was somewhat close to that using the water balance method. This result is interesting, as the monthly variation between the two methods was high. The difference between the actual monthly evapotranspiration and the total loss was not influenced by monthly temperature and rainfall. This tendency was the same throughout the year, but the variation increased during the summer rainy season. In conclusion, both the actual evapotranspiration data estimated using the water balance and eddy-covariance methods can be used as representative annual values for the basins, regardless of the difference between the two data sets.

Key words : Evapotranspiration, Water Balance, Eddy-Covariance Method, Seolmacheon, Cheongmicheon

요 지

본 연구에서는 물수지방법에 근거한 실제증발산량과 에디공분산방법으로 관측된 실제증발산량을 비교하였다. 연구의 대상 지역은 에디공분산방법으로 실제증발산량의 관측이 이루어지고 있으며, 상이한 지역 특성을 갖는 설마천 유역과 청미천 유역을 선정하였다. 분석에 사용된 수문기상 자료는 2010년부터 2018년 사이의 10분 단위 강수량, 유출고, 실제증발산량으로 수집된 모든 자료는 연단위로 합산하여 분석에 이용하였다. 분석 결과, 연단위의 분석에서 에디공분산방법으로 관측된 실제증발산량과 물수지방법에 근거한 실제증발산량이 상당히 유사한 값을 갖는 것을 확인하였다. 월단위 손실량과 실제증발산량의 차이는 연중 변동성이 매우 큰 것으로 나타나는데, 그럼에도 불구하고 연단위에서는 유사한 값을 갖게 된다는 것은 의외의 결과이다. 월단위 손실량과 실제증발산량의 차이는 월평균기온이나 월강수일수에 크게 영향 받지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 연중 동일하게 나타났다. 다만 여름철 우기에 다가갈수록 그 변동성이 아주 커짐을 확인할 수 있었다. 결론적으로, 두 자료 사이의 차이가 분명 존재하기는 하지만 연단위에서는 두 자료 사이의 유사성이 상당히 유역을 대표하는 실제증발산량으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 실제증발산량, 물수지, 에디공분산방법, 설마천, 청미천

*교신저자, 정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수(Tel: +82-2-3290-3912, Fax: +82-2-3290-3912, E-mail: envchul@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

**정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사과정(E-mail: ssu0103@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

***정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사과정(E-mail: ans918@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

****정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정(E-mail: rlatdms0297@korea.ac.kr)

Member, Master's Course, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

1. 서 론

실제증발산을 측정하는 것은 간단하지 않다. 유역을 대표하는 값을 도출하는 과정은 더욱 쉽지 않은 문제이다. 증발량과 관련해서 물수지방법, 에너지수지방법, 동역학적방법 등이 제시되어 있으나 이를 실제 유역에서의 실제증발산량까지 확장하는 과정은 체계적이지 못하다. 물론 관련 사례도 흔치 않다. 최근에는 에디공분산방법을 이용한 실제증발산량 관측이 국내에서 이루어지고 있으나 이를 유역의 대푯값으로 가정할 수 있는 지에는 의문의 여지가 있다.

국내의 증발산 관련 연구를 보면 대체로 FAO Penman-Monteith 방법의 적용과 관련이 깊다(Hwang et al., 2000; Kim and Kim, 2004; Hur et al., 2006; Kang et al., 2008; Rim, 2008; Kim et al., 2017). 물수지분석을 통한 증발산량 산정도 있으나 산정 그 자체에 목적이 있는 것은 아니고 관련 영향인자의 분석(Rim et al., 2011) 또는 다른 방법으로 추정한 증발산량과의 비교(Park et al., 2012) 등 다른 목적인 경우가 많았다. 증발접시 증발량 관련 연구(Rim et al., 2009), 기후변화로 인한 증발산량의 변화 관련 연구(Moon, 2018) 등도 찾아볼 수 있다.

에디공분산방법(eddy-covariance method)을 이용한 증발산량 산정은 2000년대 이후 국내에 도입되어 많은 연구성과를 남기고 있다(Lee et al., 2004; Lee et al., 2005; Hong et al., 2009; Kang et al., 2018). 관련 연구는 에디공분산방법으로 관측한 증발산량의 검증문제(Sur et al., 2012; Lee et al., 2013; Kang et al., 2014)에서부터 불확실성 또는 관측오차문제(Lee et al., 2016; Lim et al., 2016) 등 연구의 폭도 다양하다. 논(Lee et al., 2005), 산림(Yuan et al., 2007; Gwak et al., 2013; Kang et al., 2014; Moon and Lim, 2016), 도시지역(Lee et al., 2016) 등 다양한 지역에서의 측정도 시도되었다. 광릉수목원(Ryoo and Kim, 2000; Kang et al., 2009), 설마천유역(Kwon et al., 2009), 용담시험유역(Kim et al., 2012), 낙동강유역(Lee et al., 2013) 등 지역 또는 유역을 대상으로 한 연구도 살펴볼 수 있다.

그러나 이상과 같은 연구들에도 불구하고, 유역을 대표하는 증발산량의 산정문제는 여전히 요원한 문제이다. 최근 연구가 활발한 에디공분산방법으로 관측한 실제증발산량도 물론 유역을 대표할 수 있는지에 대해서는 다양한 의견이 있을 수 있다. 에디공분산방법으로 관측한 증발산량은 주변 지역을 대표하는 값이므로 유역을 대표하는 것이 어려운 것은 사실이다. 보다 구체적으로 살펴보면, 먼저, 유역의 식생과 증발산 측정지역의 식생이 얼마나 일치하느냐의 문제가 발생한다. 측정지점의 식생이 유역의 식생과 전혀 다르다면 당연히 그 대표성에 문제가 있을 수밖에 없다. 두 번째는 수분 공급의 문제이다. 증발산 자체가 식생에 대한 수분공급에 크게 의존적이므로 관측지점의 토양수분 변동이 유역의 토양수분 변동을 상당히 대표할 수 있어야

한다. 이러한 조건이 만족된다고 하더라도, 다양한 기상조건, 지형조건 등이 증발산량에 영향을 미칠 수 있어 관측자료에 유역의 대표성을 부여한다는 것은 단순한 일이 아니다.

현실적으로 보면 국내 유역의 실제증발산량 추정은 강수 및 유출자료를 이용한 물수지방법이 유일하다. 만일 에디공분산방법이 유역의 실제증발산량 산정의 대안이 될 수 있다면 향후 수문순환해석에 상당한 도움이 될 수 있을 것임에 틀림없다. 사실 에디공분산방법은 지형적으로나 식생도 균질한 지역에서 효과를 발휘하는 것으로 알려져 있다. 우리나라와 같은 불규칙한 산지지형에 또한 식생마저도 균질하지 않은 지역에서 에디공분산방법이 얼마나 큰 효과를 발휘할 것인지에 대한 의문도 있었으나 현재까지의 성과로 보면 상당한 역할을 할 수 있는 것으로 보인다. 그러나 아직 에디공분산방법을 유역단위에 보편적으로 적용하기에는 무리가 있는 것도 사실이다. 먼저 에디공분산방법으로 관측한 실제증발산의 영향 범위가 명확하지 않아 얼마나 큰 유역에 적용 가능한 것인지도 모호하다. 유역이 공간적으로 비균질한 경우에는 어떻게 해야 하는지도 정해진 바 없다. 이외에도 매우 다양한 질문이 있을 수 있으나 현재 그 해답은 없다.

본 연구에서는 이와 관련한 기초연구로 두 개의 상이한 유역에서 물수지방법에 근거한 실제증발산량과 에디공분산방법으로 관측한 실제증발산량을 비교해 보고자 한다. 대상 유역은 설마천 유역과 청미천 유역이며, 두 자료의 비교는 연단위로 수행할 것이다. 일단위의 비교는 일유출자료가 일강수량자료에 잘 대응하지 않는 경우가 있어 어렵다. 이런 문제는 월단위에도 동일하게 발생하는데, 특히 6월 이후 우기에 이런 문제가 크게 나타나는 경우가 있다. 기저유출 문제도 일단위 또는 월단위의 비교를 어렵게 하는 원인이기도 하다. 이런 문제는 유역이 커질수록 더욱 커지게 된다.

2. 실제증발산량의 측정 방법

증발량, 특히 저수지의 증발량을 추정하는 방법으로는 물수지법, 에너지수지법, 공기동력학적인 방법 등이 있다. 그러나 유역단위의 실제증발량과 증산량을 모두 고려하는 실제증발산량을 추정할 수 있는 현실적인 방법은 물수지법이 유일하다. 최근에는 에디공분산방법이라고 하는 방법을 동원하여 실제증발산량을 측정하고 있다.

먼저, 물수지방법은 일정한 기간 동안 저수지(또는 유역)로 유입되는 물의 양과 저수지로부터의 유출되는 물의 양, 그리고 저수지의 저류량 사이의 관계로부터 단위 시간 동안의 증발량을 산정하는 방법이다(Yoon, 2007). 유입량은 강수량과 하천을 통한 유입량을 의미하며 유출량은 저수지의 수로로 방출되는 양, 토양으로 침투되는 양, 증발산량을 모두 포함하는 양이다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E = (S_1 - S_2) + I + P - O - Q_g \quad (1)$$

여기서, P 는 강수량, I 는 하천을 통한 유입량, O 는 저수지 유출량, O_g 는 토양으로 침투되는 양, E 는 증발량, S_1 , S_2 는 각각 시간 1, 2에서의 저류량을 나타낸다. 이 식을 유역에 적용한다고 하면 유입량은 강수량이 되고, 유출량으로는 유역유출량 O , 토양으로 침투되는 양 O_g 및 증발산량으로서의 E 가 고려될 수 있다. 유역이 크거나 고려하는 시간 단위가 작은 경우에는 유역 저류량의 변화, 즉, $(S_1 - S_2)$ 도 고려할 필요가 있다. 그러나 연단위와 같이 장기적인 관점에서 평가하는 경우에는 토양으로 침투되는 양과 저류량의 변화는 무시할 수 있어 최종적으로 강수량, 유출량의 차이를 실제증발산량으로 판단할 수 있다.

에디공분산방법은 난류의 연직 플럭스와 수증기 농도를 측정하고 보존방정식에 근거하여 증발산량을 계산하는 방법이다(Baldocchi et al., 1988). 에디공분산방법은 비교적 적은 가정을 바탕으로 플럭스를 관측할 수 있는 방법이다. 에디공분산방법 적용을 위한 기본식은 다음과 같다.

$$F = \overline{\rho_a \omega s} \quad (2)$$

여기서 F 는 난류에 의한 평균 연직 플럭스라고 부른다. 또한, ρ_a 는 대기의 밀도, ω 는 풍속, s 는 대기 중 측정하고자 하는 기체(즉, 수증기)와 공기의 비율을 의미한다. 위 식의 각 항들을 평균과 편차의 합으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \overline{(\rho_a + \rho_a')(\omega + \omega')(\overline{s} + s')} \quad (3)$$

에디공분산방법은 관측 장소가 수평적으로 균질하고 편평하여 이류의 효과를 무시할 수 있으며, 측정변수의 시간에 따른 변화를 무시할 수 있다는 가정을 전제로 한다(Baldocchi et al., 1988). Eq. (3)을 전개하였을 때 $\overline{\rho_a} = 0, \overline{\omega} = 0, \overline{s} = 0$ 과 곱해지는 항들을 제거하고, 밀도의 변동 폭이 큰 값은 제거하는 가정에 따라 다음과 같이 수직플럭스를 유도하여 유역의 수증기 플럭스 농도를 산정할 수 있다.

$$F \simeq \overline{(\rho_a)} \overline{(\omega s')} \quad (4)$$

3. 대상유역 및 자료

3.1 대상유역

본 연구의 대상유역으로 설마천 유역과 청미천 유역을 선정하였다. 이들 두 유역은 그 규모가 작고, 아울러 에디공분산방법을 이용한 실제증발산량의 측정이 이루어지고 있어 본 연구의 목적에 잘 부합하는 곳이다. 그러나 두 유역의 특성은 크게 달라서 설마천 유역은 산지유역의 특성을 보이는 반면, 청미천 유역은 농업지역의 특성이 많이 반영된 유역이다.

먼저 설마천 유역은 경기도 파주시 적성면의 마지리와

설마리에 위치한 유역이다. 설마천은 임진강의 제 1지류인 지방 2급 하천이며, 설마천 중류부에 위치한 영국군 전적비교를 출구로 하는 상류 유역이다. 아울러 설마천 유역은 전형적인 급경사 산지 사행하천의 형태를 보인다. 설마천 유역의 면적은 8.5 km², 유로연장 5.8 km에 달한다. 유역의 평균 폭은 1.5 km, 유역평균표고는 해발 247.6 m 정도로 나타난다(KICT, 2013). 유역 평균 경사는 34% 정도이다. 설마천 유역은 대부분이 산악 지형으로 구성되어 있으며, 증발산 관측은 중류부에서 이루어지고 있다.

청미천 유역은 경기도 여주군에 위치한 유역이다. 청미천은 서쪽의 산지로부터 발원, 동쪽으로 흘러 하류의 남한강으로 유입된다. 청미천 유역의 면적은 569.6 km²(유량관측지점을 기준으로 보면 519.5 km²), 유로연장은 60.9 km에 달한다. 유역의 평균 폭은 9.2 km, 유역평균표고는 해발 141.0 m 정도로 나타난다(MOLIT, 2017). 유역 평균 경사는 17% 정도로 특히 동쪽 지역의 사면경사도가 크다. 청미천 유역의 상류부와 하류부는 산악 지형으로 구성되어 있으나, 증발산 관측이 이루어지고 있는 중하류부는 농경지로 구성되어 있다.

Fig. 1은 설마천 유역과 청미천 유역의 위치를 나타내 주고 있다. 참고로, 이 그림에서의 유역은 본 연구에서 고려한 유출관측지점을 기준으로 구분한 것이므로 실제 유역과는 다소 차이가 있을 수 있다. 이 그림에서 속빈 원은 우량계의 위치를 나타내며 속이 검은 원은 유출관측지점을 나타낸다. 실제증발산 측정을 위한 플럭스 타워의 위치는 속이 검은 삼각형으로 나타내었다. 설마천 유역과 청미천 유역의 토지이용 구성을 비교하면 설마천 유역은 산지의 비율이 92.7%로 매우 크며, 청미천 유역은 산지 48.5%, 농지 43.1%로 비교적 농업지역의 비율이 크게 나타난다. 설마천 유역은 대부분 산림으로 구성되나 청미천 유역은 산지와 농지가 비슷한 비율로 존재하는 유역이다. 특히, 청미천 유역의 증발산측정은 농지의 영향이 크게 반영되는 특징이 있다.

3.2 자료의 시계열그림 및 기본 통계분석

본 연구에서는 가용한 우량계 자료를 이용하여 티센망을 구축한 후 면적평균강수량을 산정하였다. 먼저, 설마천 유역 내에는 6개의 우량계와 2개의 수위관측계가 존재한다. 본 연구에서는 건설기술연구원에서 제공하는 10분 단위 수위, 강수 자료를 사용하였다.

청미천 유역에는 유역 내외에 다수의 우량계가 존재한다. 본 연구에서는 국토교통부 산하 총 9개의 우량관측소 자료를 이용하였다. 이들 중 3개는 유역 내에 나머지 6개는 유역 인근에 위치한다. 본 연구에서는 이들 총 9개의 우량관측소를 고려하여 티센망을 작성하고 면적평균강수량을 산정하였다. 유량자료는 한강홍수통제소(<http://www.hrfco.go.kr/>)로부터 수집하였다. 자료 기간은 모두 가용한 실제증발산량의 자료기간과 동일한 2010년부터 2018년 사이로 하였다.

Fig. 1. Location of Seolmacheon Basin (left) and Cheongmicheon Basin (right) (Blank Circles indicate the Precipitation Gages, Solid Circles the Runoff Gages and Solid Triangle the Flux Tower)

Fig. 2. Times Series Plots of Daily Precipitation and Daily Runoff Depth

Fig. 2는 분석 대상기간인 2010년부터 2018년 사이 설마천 유역과 청미천 유역의 (유역평균)일강수량자료와 일유출고 자료의 시계열을 보여준다. 일유출고는 일유출량을 유역면적으로 나눈 값이다. 이들 자료는 한반도의 기후특성인 계절성을 명확히 보여주고 있다. 평균 연강수량의 60% 이상이 우기에 해당하는 6~9월에 집중되고 있으며, 나머지 계절에는 강수량이 매우 적은 건기의 특성을 보인다.

본 연구에서 사용한 실제증발산량자료는 모두 플렉스 타워에서 에디공분산방법을 적용하여 측정한 것이다. 설마천 유역의 플렉스 타워는 경기도 파주시 적성면의 마지리와 설마리에 위치한다. 설마천 관측소의 증발산량자료는 산지의 특성을 보이며, 설마천 유역의 90% 이상이 산림으로 이루어진 만큼 증산에 의한 영향을 크게 받는다. 청미천 유역의 플렉스 타워는 경기도 여주군 점곡면의 경기도 농업기술원 종자관리소의 논에 자리잡고 있다. 청미천 관측소의 증발산량자료는 논에 증발산 특성을 보이며, 모내기의 영향을 받는다(MOLIT, 2017). 플렉스 타워를 기준으로 반경 500 m 이내는 논이 대부분을 차지하고 있으며, 반경 1 km로 넓힌다면 산림과 논에 면적이 각각 절반 정도에 이른다.

Fig. 3에서 살펴볼 수 있는 것처럼, 증발산량자료는 모두 연단위의 주기성을 갖는다. 이는 강수량이나 유출고가 갖는 연주기성과 같다. 두 유역의 자료를 비교할 경우 설마천 유역의 증발산량자료가 청미천 유역의 경우보다 변동성이 큼을 알 수 있는데 그 원인이 무엇인지는 아직 판단할 수 없다. 이에 반해 청미천 유역의 경우에는 상대적으로 높은 증발산량 측정 결과를 보여준다. 이 그림에서 살펴볼 수 있듯이 일단위 증발산량은 여름철에 최대 4.0 mm를 약간 상회하는 수준으로 나타난다. 증발산량의 연중 분포를 삼각형으로 가정하면 연간 증발산량은 대략 500.0 mm 정도가 될 수 있음을 판단할 수 있다.

이렇게 수집한 일자료는 모두 연단위로 합산하여 분석에 이용하였다. 먼저, 설마천 유역에서 관측 기간 중 상대적으로 적은 강수량이 관측된 2014년~2015년의 연강수량은 652.7~835.8 mm에 불과했으며, 이 기간 동안의 연유출고도 매우 작은 값으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 상대적으로 큰 강수량이 기록된 2011년의 강수량은 2,044.7 mm에 달하며, 연유출고도 이에 비례하여 가장 큰 값을 보인다. 그러나 연증발산량은 연강수량과의 상관성을 살펴보기 어려울 정도로 무작위

(a) Seolmacheon Basin

(b) Cheongmicheon Basin

Fig. 3. Time Series Plots of Daily Actual Evapotranspiration

하게 나타났다. 강수량이 가장 작게 나타난 2014년의 연증발산량은 360.9 mm로 기록되었으나, 2014년보다 연강수량이 약 2.5배 큰 2011년의 연증발산량은 387.0 mm로 큰 차이를 보이지 않는다. 관측 기간 중 연강수량, 연유출고 및 연증발산량의 평균은 각각 1,339.8 mm, 894.9 mm, 429.3 mm이다. 연유출고의 변동계수가 0.55로 가장 높았으며, 연강수량이 0.33, 연증발산량이 0.23으로 비교적 낮게 나타났다. 연강수량과 연유출고 사이의 상관계수는 0.98로 가장 크게 나타났으며, 연강수량과 연증발산량 사이의 상관계수는 -0.16, 연유출고와 연증발산량 사이의 상관계수는 -0.13으로 크게 유의하지 않은 상관을 나타냈다.

청미천 유역에서 관측 기간 중 상대적으로 작은 강수량이 관측된 2014년~2016년의 연강수량은 877.4~946.7 mm에 불과했으며, 이 기간 동안의 연유출고도 모두 작게 나타나는 것으로 확인하였다. 상대적으로 큰 강수량이 기록된 2011년의 강수량은 1,920.0 mm에 달했으며, 연유출고도 이에 비례하여 크게 나타났다. 연강수량이 작았던 2015년 600.0 mm를 넘는 연증발산량이 기록되었으나, 이와 반대로 연강수량이 가장 많았던 2011년에는 단지 500.0 mm를 약간 상회하는 연증발산량만이 기록되었다. 관측기간 동안 연강수량, 연유출고 및 연증발산량의 평균은 각각 1,272.1 mm, 645.6 mm, 525.7 mm로 나타났다. 변동계수를 비교하여 보면 연유출고의 변동계수가 0.59로 가장 높았으며 연강수량이 0.26, 연증발산량은 0.15로 비교적 낮은 것으로 확인되었다. 연강수량과 연유출고 사이의 상관계수는 0.97로 1에 가까웠다. 이에 반해, 연유출고와 실제증발산량 사이의 상관계수는 0.11로 가장 낮았으며 연강수량과 실제증발산량 사이의 상관계수 역시 0.22로 낮은 값으로 나타났다.

4. 결 과

4.1 연강수량 자료와 연유출고 자료 사이의 관계

본 연구에서는 먼저 연강수량 자료와 연유출고 자료를 비교하였다. 단순히 판단하면 연유출고는 연강수량의 크

기에 비례하는 것이 당연하다. 물론 강수의 패턴, 강수일수, 강우강도, 강수지속기간 등 다양한 인자가 고려되어 연강수량과 연유출고 사이의 상관정도가 달라질 수 있다. 그러나 이러한 차이는 연단위의 변동 정도로 취급할 수도 있을 것이다. 가장 중요한 점은 연강수량과 연유출고 사이의 기율 기이다. 둘 사이의 상관성이 높을 것은 분명한데, 둘 사이의 기율기가 어떠한지 또 다른 의미를 갖는다. 예를 들어, 기율기가 1보다 작다면 강수량의 증가에 따라 손실량의 증가가 더 커진다는 의미이고, 반대로 기율기가 1보다 크다면 강수량의 증가에 따라 손실량의 증가는 더욱 작아져 결국 유출고가 더욱 증가한다는 의미이다. 다음 Fig. 4는 설마천 유역과 청미천 유역에서 관측된 연강수량과 연유출고의 산점도를 나타낸다.

앞서 예상한 것과 같이, 연별로 합산한 강수량과 유출고는 뚜렷한 양의 상관관계를 보인다. 두 자료의 상관관계를 나타내는 상관계수는 설마천과 청미천에서 각각 0.98, 0.97(결정계수는 각각 0.97, 0.94)로 매우 높게 나타나며, 직선의 기율기는 각각 1.08, 1.11로 1에 가까운 값으로 나타난다. 이 결과는, 연강수량이 높은 해에는 연유출고가 그에 비례하여 증가하는 경향을 다시 한 번 확인시켜 주는 것이기도 하다. 그러나 기율기가 1에 가깝다는 것은 연강수량에 관계없이 연손실량(즉, 연강수량과 연유출고의 차이)이 일정한 것인 가라는 의문을 갖게 한다.

이에 본 연구에서는 먼저, 연강수량과 연유출고 사이의 기율기를 1로 가정할 수 있는지 판단해 보기 위하여 가설검정을 수행하였다. 연강수량과 연유출고 사이의 기율기가 1이라면 연강수량의 증감에도 불구하고 연강수량과 연유출고의 차이인 연손실량이 크게 변하지 않는다. 본 연구에서는 연강수량과 연손실량 사이의 기율기가 0이 되는지를 판단하는 방식으로 연강수량과 연유출고 사이의 기율기를 1로 가정할 수 있는지를 판단하였다. 사용된 귀무가설은 $H_0: \beta = 0$, 대립가설은 $H_1: \beta \neq 0$ 이다. 여기서 β 는 기율기를 나타낸다.

본 연구에서는 총 9개의 자료를 이용하므로 자유도가 7인 t -검정을 수행할 수 있다. t -검정 통계량은 아래와 같이

Fig. 4. Scatter Plots of Annual Precipitation versus Annual Runoff Depth

계산된다.

$$t = \frac{\hat{\beta}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n-2}\right) \left(\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (x_i - \hat{x}_i)^2}\right)}} \quad (5)$$

위 식에서 n 은 자료의 개수이며, x_i, y_i 는 각각 연강수량, 연손실량을 나타낸다. 위 식을 이용하여 산정된 t -검정 통계량은 설마천의 경우는 1.82, 청미천의 경우는 1.18이다. 자유도가 7인 경우 유의수준 5%에 대한 t -검정 통계량이 2.37로 나타나므로 본 가설검정의 귀무가설은 기각할 수 없는 것으로 나타난다. 즉, 연손실량의 기울기는 0으로 판단할 수 있으며, 결과적으로 연강수량과 연유출고 사이의 기울기를 1로 가정하여도 무리는 없다.

연강수량과 연유출고의 관계를 나타내는 기울기가 1이라는 사실은 중요한 의미를 가진다. 먼저, 연강수량의 증가분이 연유출고의 증가분으로 그대로 반영됨을 나타낸다. 이는 반대로 연강수량의 증감이 유역의 연손실량의 변동에 별다른 영향을 미치지 못함을 의미한다. 위 Fig. 4에서, 기울기를 1로 가정하면 설마천 유역의 결정계수는 0.96, 청미천 유역의 결정계수는 0.92로 나타나는데 당초 결정계수 0.97, 0.94보다는 약간 작지만 여전히 매우 큰 값을 나타낸다. 즉, 기울기가 1인 직선의 대표성이 상당히 유효하다는 의미이다. 이때 y -절편은 설마천 유역이 556.6 mm, 청미천 유역이 626.5 mm로 나타나는데, 이 값은 두 유역에서 연손실량의 평균에 해당한다.

연강수량과 연유출고의 차인 연손실량은 연강수량이나 연유출고와는 다른 변동성을 보인다. 먼저, 설마천 유역에서 분석기간 중 연손실량의 평균은 444.9 mm, 표준편차는 92.7 mm로 나타난다. 기간 중 최대 손실량은 2018년에 관측된 590.5 mm, 최저치는 2011년의 318.6 mm이다. 참고로 2011년은 조사 기간 중 가장 높은 연강수량(2,044.7 mm)이 관측된

해이며, 2018년은 평년수준의 연강수량(1,402.4 mm)이 기록된 해이다. 9년간 연손실량의 변동계수는 0.21이며, 이 값은 연강수량의 변동계수인 0.33이나 연유출고의 변동계수인 0.55와 비교한다면 상당히 낮은 수준이며, 연증발산량의 변동계수인 0.23과는 비슷한 수준이다.

청미천 유역의 2010년부터 2018년까지 연손실량의 평균은 637.5 mm, 표준편차는 113.2 mm로 나타난다. 기간 중 최대 손실량은 2018년에 관측된 780.3 mm, 최저치는 2011년의 385.9 mm이다. 참고로 2011년의 연강수량은 조사 기간 중 가장 높은 강수량이 관측된 해이며 2018년은 평년수준의 연강수량이 기록된 해이다. 9년간 연손실량의 변동계수는 0.18이며, 이 값은 연강수량의 변동계수인 0.26이나 연유출고의 변동계수인 0.59와 비교한다면 상당히 낮은 수준이며 연증발산량의 변동계수인 0.15보다는 약간 큰 수준이다.

4.2 연실제증발산량과 연손실량 자료의 비교 평가

물수지분석에 의하면 총강수량과 총유출고의 차이가 바로 실제증발산이다. 특히 장기간의 자료를 고려하는 경우 침투나 침류, 지하수 유출 등의 과정이 포괄되어 물수지분석에 의한 실제증발산량 산정은 더 큰 정확성을 담보할 수 있다(Zhang et al., 2001; Lu et al., 2005). 본 연구에서도 연단위의 강수, 유출 및 실제증발산을 분석하고 있으므로 연단위 총손실량과 실제증발산 사이에 상당한 유사성이 있을 것으로 추측할 수 있다.

본 연구에서는 이를 증명하기 위해 먼저 연실제증발산량과 연손실량의 관계를 산점도로 나타내 보았다(Fig. 5). 먼저 설마천 유역의 경우는 뚜렷한 양의 상관관을 보인다. 그 기울기도 1에 가까워 두 자료사이의 일관성이 상당함을 확인할 수 있다. 물론, 상대적으로 연실제증발산량이 큰 경우(2017년)와 작은 경우(2012년)에 대한 추가적인 검토는 필요해 보인다. 이에 반해, 청미천 유역에서는 두 자료사이의 뚜렷한 양의 상관관은 보이지 않는다. 오히려 음의 상관관이 있는 것으로 보이기도 한다. 양의 상관관을 강조하려면 실제증발산이 작았

Fig. 5. Scatter Plots of Annual Loss versus Annual Actual Evapotranspiration

던 3개년의 자료에 대한 설명이 필요하고, 반대로 음의 상관관을 설명하려면 이를 뒷받침 할 수 있는 이론적 근거가 필요하다. 그러나 이론적인 근거를 고려하면 양의 상관관이 정당성을 가지므로, 결과적으로 양의 상관 판단을 저해하는 특히 3개년(2013, 2017, 2018년) 자료에 대한 추가적인 설명이 필요하다. 이 문제는 다음 절에서 구체적으로 살펴볼 예정이다.

Fig. 5를 좀 더 세밀하게 살펴보면, 먼저, 설마천 유역에서는 1:1 선에서 비교적 벗어난 2017년(실제증발산량 과대)과 2012년(실제증발산량 과소)의 자료를 제외하면, 연손실량과 연실제증발산량은 서로 잘 대응하고 있는 것으로 보인다(상관계수 0.29). 이에 반해 청미천 유역에서는 손실량이 극히 작았던 2011년 자료를 제외하면 연손실량의 자료범위(range)는 상대적으로 좁고 반대로 연실제증발산량의 자료범위는 상대적으로 넓게 나타난다. 2011년 자료를 제외하면 연손실량의 자료범위는 200.0 mm 정도이다(2011년 자료를 포함하면 약 400.0 mm). 이에 반해 연실제증발산량은 300.0 mm 정도로 나타난다. 만일 연실제증발산량이 작은 3개년 자료를 제외하면 연실제증발산량의 자료범위도 200.0 mm가 된다. 이 경우에 두 자료 사이의 상관계수는 0.46 정도가 된다.

추가로 설마천 유역과 청미천 유역 차이에 대해 좀 더

생각해 볼 필요가 있다. 먼저, 유역규모의 차이가 있어서 과연 관측된 실제증발산량이 유역을 얼마나 대표할 것이냐의 문제가 있다. 당연히 청미천 유역이 설마천의 경우보다는 훨씬 커서 그 대표성이 상당히 약해질 가능성을 부인할 수는 없다. 두 번째는 식생의 차이에서 오는 문제일 수 있다. 농경지의 비율이 상당한 청미천과 주로 산림으로 구성된 설마천의 차이일 수 있다. 특히 농경지의 경우는 봄철 관개용수의 공급이 많으므로 강우-유출 자료로부터 도출한 손실량에 오차가 더 클 여지도 있다.

4.3 특이년 검토

특이년 검토에 앞서 연손실량과 연실제증발산량이 유사한 경우를 먼저 비교해 보는 것이 필요하다. 이를 기반으로 특이년으로 분류된 해의 이상 상황을 판단해 볼 수 있을 것이기 때문이다. 본 연구에서는 설마천 유역의 경우 연실제증발산량이 상대적으로 크거나 작았던 2개년(2012, 2017년), 청미천 유역의 경우에는 연실제증발산량이 상대적으로 작았던 3개년(2013, 2017, 2018년)을 특이년으로 선정하였다. 추가로 강수량이 가장 컸던 2011년 자료를 제외하고, 설마천 유역의 경우에는 총 6개년, 청미천 유역의 경우에는 총 5개년 자료를 월별로 평균하여 도시하였다(Fig. 6).

Fig. 6. Monthly Distribution of Loss and Actual Evapotranspiration for Those Years with Their Similar Amounts

Fig. 6에서 확인할 수 있는 것처럼 연손실량과 연실제증발산량이 비슷한 해의 경우 그들의 월별분포도 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 먼저, 설마천 유역의 경우에는 7월, 8월, 10월, 11월에 실제증발산량이 작게 관측된 것으로 나온다. 우기인 7, 8월의 경우에는 물론 강수일수의 영향이 크게 작용한 것으로 보이나, 10월, 11월의 차이는 사실 설명하기 힘든 결과이다. 이에 반해, 청미천 유역의 경우에는 7월에 실제증발산량이 상대적으로 작게 관측되는 것은 동일하나, 8월 이후에는 실제증발산량과 손실량의 차이가 거의 없는 것으로 나타난다. 오히려 5월의 경우에는 실제증발산량이 손실량보다 크게 관측되는 결과를 보이는데, 이는 농업지역의 면적이 상대적으로 큰 청미천 유역의 특성으로 판단된다.

본 연구에서는 앞서 언급한 특이년에 대한 검토를 수행하였다. 먼저, 설마천 유역의 경우 연손실량과 연실제증발산량의 차이가 큰 해는 2012년과 2017년이다. 2012년의 실제증발산량은 387.0 mm이며, 2017년에 591.3 mm를 기록하였다. 2017년의 실제증발산량은 분석기간 중 가장 큰 값이다. 강수량은 2012년에 1,553.0 mm이며, 2017년은 1,004.5 mm를 기록하였다. 즉, 강수량과 실제증발산량의 상관을 찾는 것은 무리이다. 청미천 유역의 경우도 유사하다. 연실제증발산량이 작았던 3개년은 각각 2013, 2017, 2018년이며, 실제증발산량이 총 500.0 mm를 넘지 못했다. 이들 3개년의 경우 강수량은 모두 1,100.0 mm 이상이며, 2018년에는 1,400.0 mm 이상을 기록하여 역시 실제증발산량을 강수량의 규모에 연결시키는 것은 의미가 없는 것임을 확인할 수 있다. Fig. 7은 이 두 유역의 특이년이 공통적으로 나타난 2017년의 경우를 비교한 것이다.

Fig. 7에서 살펴볼 수 있는 것처럼 손실량이나 실제증발산량도 계절성을 반영하는 정상적인 경향을 보이고 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 그럼에도 불구하고 두 자료 사이의 차이가 크게 나타난 것이다. 먼저, 설마천 유역의 차이는 7월을 제외하면 나머지 모든 월에서 실제증발산량이 손실량보다 크게 관측되는 문제를 보인다. 즉, 실제증발산량이

일관되게 크게 산정되었을 가능성을 보여주는 것이다. 반대로 청미천 유역의 경우에는 특히 가을철에 실제증발산량이 작게 산정된 문제를 보인다. 나머지 월에서는 앞서 살펴본 전체적인 경향에서 크게 벗어나지는 않는다. 결과적으로 이 두 자료 사이의 차이는 관측된 실제증발산량, 관측자료에 기반한 손실량의 적정성의 문제로 연결될 수 있다. 궁극적으로 두 자료는 모두 어느 정도의 관측오차 또는 추정오차 문제를 가질 수밖에 없는 한계를 가진다. 그럼에 나타내지는 않았지만 다른 특이년의 경우도 확정하기 힘든 유사한 문제 점을 보여 주었다.

추가로, 강수량이 가장 많았던 2011년의 실제증발산량과 손실량 자료를 비교하였다(Fig. 8). 이 자료는 앞서의 자료들보다 더욱 큰 변동성을 보여준다. 이 자료를 보고 실제증발산량과 손실량의 유사성을 판단하는 것은 무리이다. 기본적으로 월말에 발생한 강수의 영향이 다음 월로 이전되어 손실량이 음으로 나타나는 경우가 공통적으로 발생하였다. 실제증발산량이 전체적으로 안정되게 관측된 것으로 보이지만 청미천 유역의 경우에는 7월 실제증발산량이 너무 작게 관측되었다. 그러나 이 자료에서 확인할 수 있는 가장 놀라운 결과는 이러한 월별 차이에도 불구하고 연단위에서는 두 자료가 상당히 유사하게 나타났다는 점이다. 즉, 2011년에는 설마천 유역과 청미천 유역 모두에서 연실제증발산량과 연손실량이 유사하게 나타났다.

4.4 월평균기온과 월강수일수에 대한 민감도 분석

본 연구에서는 월손실량과 월실제증발산량의 차이에 영향을 줄 수 있는 인자 중 월평균기온과 월강수일수를 선정하였다. 강수량, 강우강도, 풍속, 일조시간 등 다른 인자들도 중요하게 고려될 수 있을 것이나, 본 연구에서는 특히 증발산량에 많은 영향을 줄 것으로 판단되는 두 인자를 선정하였다. 이 절에서의 분석은 4.3절에서 살펴본 월별 변동성이 과연 어디서 기인하는지 하는 문제와 또한 특이년으로 지정한 해가 과연 다른 해에 비해 다른 거동을 보이고 있는 것인지를 확인해 보기 위함이다.

Fig. 7. Same as Fig. 6, but for the Year of 2017

Fig. 8. Same as Fig. 6, but for the Year of 2011 with Highest Annual Precipitation

Fig. 9. Effect of Monthly Mean Temperature and Monthly Rainy Days on Monthly Loss and Monthly Actual Evapotranspiration (January)

이러한 분석은 모든 월에 대해 수행하였으나, 그림으로는 동절기에 해당하는 1월, 우기에 해당하는 7월만을 나타내었다. 나머지 월의 경우는 이 두 그림을 통해 유추할 수 있을 것이다. 먼저, 1월의 경우를 살펴보면 월평균기온과 월강수일수가 손실량과 실제증발산량의 차이에 영향을 주지 않고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 9). 이는 기본적으로는 손실량이나 실제증발산량이 워낙 작아 그 차이도 유의하게 나타나지 않기 때문이다. 이러한 경향은 물론 우기로 가면서 크게 달라진다. 특이년으로 검토했던 해들의 경우에도 다른 해와 구분 없이 무작위하게 산재되어 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 7월의 경우를 보여준다. 이 그림에서도 월평균기온의 영향은 거의 없는 것으로 나타난다. 7월 월평균 기온의 차이가 미미한 탓도 있으나, 그보다는 손실량과 실제증발산량의 차이가 월등하게 크게 나타나기 때문이다. 이에 반해 월강수일수의 영향은 유의한 것처럼 보인다. 특히 청미천 유역은 강수일수에 따라 둘 사이의 차이가 증가하는 경향을 나타내는 것으로 보인다. 그러나 특이년을 제외하면 이러한 경향은 거의 사라진다. 즉, 설마천 유역이나 청미천 유역 모두 손실량과 실제증발산량의 차이는 월평균기온이나 월강수일수에 영향 받지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10. Same as Fig. 9 but for July

5. 결과 및 토론

본 연구에서는 특성이 다른 설마천 유역과 청미천 유역을 대상으로 물수지방법에 근거한 실제증발산량과 에디공분산방법으로 관측한 실제증발산량을 비교하였다. 두 자료의 비교는 연단위로 수행하였으며 이는 물수지방법을 적용함에 있어 일단위 또는 월단위의 경우 강수량과 유출고를 정확히 대응시키기 어렵기 때문이다. 기저유출 문제도 일단위 또는 월단위의 비교를 어렵게 하는 원인이기도 하다. 에디공분산방법으로 관측한 실제증발산량은 절대적인 측정값이 아닌 산정과정에서 보정을 거치는 값이며, 또한 관측 위치도 유역을 대표한다고 확정할 수 없는 한계가 있다. 그럼에도 본 연구에서는 관측된 실제증발산량이 유역을 충분히 대표한다고 가정하였다.

본 연구에서는 두 유역 모두 2010년에서 2018년까지의 총 9개년에 대한 분석을 수행하였다. 분석은 먼저, 연강수량과 연유출고의 비교, 이 둘의 차이인 연손실량 평가, 연손실량과 에디공분산방법으로 관측한 실제증발산량의 비교 순서로 진행하였다. 이상적으로 보면 연손실량과 연실제증발산량은 같아야 하는 데 그렇지 못한 경우도 있어, 이들 해의 경우에는 월단위 분석을 추가로 수행하였다. 마지막으로 월단위의 손실량과 실제증발산량의 차이가 기상인자, 특히 강수일수와 평균기온에 영향을 받는지를 검토하였다. 이들

분석을 통해 유도한 결과는 다음과 같다.

먼저, 에디공분산방법으로 추정된 연단위의 실제증발산량은 강우-유출 자료에 근거한 연단위 손실량과 상당히 유사한 값을 갖는 것으로 확인되었다. 즉, 물수지방법을 적용하여 추정하는 실제증발산량은 상당한 신뢰도를 가질 수 있다는 점을 확인할 수 있었다. 추가로, 연단위 실제증발산량이나 손실량은 강수량의 변동에 크게 영향 받지 않고 일정한 값을 갖는다는 점을 파악할 수 있었다. 이는 물론 분석 대상 기간에 한정된 결과이기는 하지만 중요한 의미를 갖는다. 즉, 이들 두 유역의 경우에는 실제증발산의 추세에 영향을 미칠 정도로 강수량이 적은 경우가 없었다는 것을 의미할 수도 있다.

월단위로 살펴보았을 때 우기에는 손실량이 크고 반대로 봄, 가을에는 실제증발산량이 큰 경향을 보인다. 그러나 이러한 경향이 모든 해에 일정하게 나타나는 것은 아니다. 실제로 월단위 손실량과 실제증발산량의 차이는 연중 변동성이 매우 큰 것으로 나타나는데, 그럼에도 불구하고 연단위에서는 유사한 값을 갖게 된다는 것은 의외의 결과이다. 추후 연구에서는 일단위의 분석을 통해 이 문제를 좀 더 세밀하게 분석해 보아야 할 것이다.

월단위 손실량과 실제증발산량의 차이는 월평균기온이나 월강수일수에 크게 영향받지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 연중 동일하게 나타났다. 다만 여름철 우기에

다가갈수록 그 변동성이 아주 커짐을 확인할 수 있었다. 이러한 큰 변동성의 원인으로는 먼저 관측오차 문제를 들 수 있다. 유출량 관측이나 증발산량 관측 모두 어느 정도의 오차를 수반하므로 그 정도가 여름철에 더 커지는 것은 당연하다. 추가로 월말에 발생한 강수의 영향으로 유출이 다음 월에 기록되는 경향도 무시할 수 없을 것이다. 본 연구의 대상 유역이 모두 작기는 하지만 직접유출뿐만 아니라 중간 유출, 지하수 유출의 경우는 다음 월로 전이되어 나타날 가능성이 크므로 여름철의 큰 변동성에 대한 원인으로 충분히 고려할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 성과는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A2C2008714).

References

- Baldocchi, D.D., Hincks, B.B., and Meyers, T.P. (1988). Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, Vol. 69, No. 5, pp. 1331-1340.
- Gwak, Y.S., Kim, S.H., and Kim, S.J. (2013). Comparison of soil evaporation using equilibrium evaporation, Eddy-covariance and surface soil moisture on the forest hillslope. *Journal of Environmental Science*, Vol. 22, No. 1, pp. 119-129.
- Hong, J.K., Kwon, H.J., Lim, J.H., Byun, Y.H., Lee, J.H., and Kim, J. (2009). Standardization of KoFlux eddy-covariance data processing. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 1, pp. 19-26.
- Hur, S.O., Jung, K.H., Ha, S.K., and Kim, J.G. (2006). Evaluation of meteorological elements used for reference evapotranspiration calculation of FAO Penman-Monteith model. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 39, No. 5, pp. 276-281.
- Hwang, S.J., Kim, J., Nam, J.C., Yun, J.I., and Lim, J.H. (2000). Evaluation of evapotranspiration using Penman-Monteith (PM) combination equation in forests. *In Proceedings of the Korean Society of Crop Science Conference*, KSCS, pp. 112-113.
- Kang, M.S., Kim, J., Kim, H.S., Thakuri, B.M., and Chun, J.H. (2014). On the nighttime correction of CO₂ flux measured by eddy covariance over temperate forests in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 16, No. 3, pp. 233-245.
- Kang, M.S., Kim, J., Lee, S.H., Kim, J.H., Chun, J.H., and Cho, S.S. (2018). Changes and improvements of the standardized eddy covariance data processing in KoFlux. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 20, No. 1, pp. 5-17.
- Kang, M.S., Kwon, H.J., Lim, J.H., and Kim, J. (2009). Understory evapotranspiration measured by eddy-covariance in Gwangneung deciduous and coniferous forests. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 4, pp. 233-246.
- Kang, M.S., Park, S.B., Kwon, H.J., Hong, J.K., Lim, J.H., Kim, K.H., et al. (2008). Evapotranspiration analysis on Korean forest and cropland based on the radiatively coupled Penman-Monteith combination equation. *Proceedings of the Autumn Meeting of the Korean Meteorological Society*, KMS, pp. 344-345.
- KICT (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology). (2013). *Hydrological survey for flood forecasting of the mountainous river basin*, KICT, Korea
- Kim, N.W., and Kim, C.G. (2004). Comparison of Penman-Monteith method and Morton CRAE method for estimating areal evapotranspiration. *In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 1077-1081.
- Kim, S.J., Kim, M.I., Lim, C.H., Lee, W.K., and Kim, B.J. (2017). Applicability analysis of FAO56 Penman-Monteith methodology for estimating potential evapotranspiration in Andong dam watershed using limited meteorological data. *Journal of Climate Change Research*, Vol. 8, No. 2, pp. 125-143.
- Kim, Y.K., Lee, H.S., Chae, H.S., and Kim, Y.S. (2012). Evapotranspiration estimation by the eddy-covariance in the Yongdam dam experimental basin. *In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 274-274.
- Kwon, H.J., Lee, J.H., Lee, Y.K., Lee, J.W., Jung, S.W., and Kim, J. (2009). Seasonal variations of evapotranspiration observed in a mixed forest in the Seolmacheon catchment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 1, pp. 39-47.
- Lee, D.I., Lee, J.H., and Lee, S.H. (2016). Uncertainty analysis of the eddy-covariance turbulent fluxes measured over a heterogeneous urban area: A coordinate tilt impact. *Atmosphere*, Vol. 26, No. 3, pp. 473-482.

- Lee, H.C., Lee, B.Y., Kim, J., and Shim, J.S. (2004). Tower-based flux measurement using the eddy covariance method at Ieodo ocean research station. *Ocean and Polar Research*, Vol. 26, No. 2, pp. 145-154.
- Lee, J.T., Lee, Y.S., Kim, G.Y., and Shim, K.M. (2005). CO₂ and water vapor flux measurement by eddy covariance method in a paddy field in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 7, No. 1, pp. 45-50.
- Lee, Y.H., Lee, B.J., Kahng, K.A., Kim, S.J., and Hong, S.O. (2013). Quality control and characteristic of eddy covariance data in the region of Nakdong river. *Atmosphere*, Vol. 23, No. 3, pp. 307-320.
- Lim, H.J., Lee, Y.H., Cho, C., Kim, K.R., and Kim, B.J. (2016). Estimation of the random error of eddy covariance data from two towers during daytime. *Atmosphere*, Vol. 26, No. 3, pp. 483-492.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G., and Amatya, D.M. (2005). A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern united states. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 41, No. 3, pp. 621-633.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport). (2017). *Hydrological Survey Report*, MOLIT, Korea
- Moon, D.Y., and Lim, K.S. (2016). Correlation analysis between evapotranspiration and soil water in flux tower of Deogyu mountain. *Proceedings of the KSCE Conference*, KSCE, pp. 55-56.
- Moon, J.W. (2018). Analysis of reference evapotranspiration change in Korea by climate change impact. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 7, pp. 71-81.
- Park, J.H., Kim, T.K., Moon, M.K., Ryu, D.W., Cho, S.S., and Kim, H.S. (2012). Comparison of evapotranspiration estimated by sap-flow method and water budget method. *Proceedings of the Korean Forest Science Conference*, KSFS, pp. 42-42.
- Rim, C.S. (2008). Trends of annual and monthly FAO Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 1B, pp. 65-77.
- Rim, C.S., Lim, G.H., and Yoon, S.E. (2011). A study on the hydroclimatic effects on the estimation of annual actual evapotranspiration using watershed water balance. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 915-928.
- Rim, C.S., Yoon, S.E., and Song, J.I. (2009). Evaluation of equations for estimating pan evaporation considering regional characteristics. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 1B, pp. 47-62.
- Ryoo, S.B., and Kim, Y.A. (2000). Variation of evapotranspiration over forest site at Kwangneung: From fall to early winter. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 36, No. 1, pp. 43-50.
- Sur, C.Y., Han, S.J., Lee, J.H., and Choi, M.H. (2012). Estimation of satellite-based spatial evapotranspiration and validation of flux tower measurements by eddy covariance method. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, pp. 435-448.
- Yoon, Y.N. (2007). *Hydrology – Basic and Application*, Cheongmoongak, Korea
- Yuan, R., Kang, M.S., Park, S.B., Hong, J.K., Lee, D.H., and Kim, J. (2007). The effect of coordinate rotation on the eddy covariance flux estimation in a hilly KoFlux forest catchment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 9, No. 2, pp. 100-108.
- Zhang, L., Dawes, W.R., and Walker, G.R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 701-708.

Received	January 26, 2021
Revised	January 27, 2021
Accepted	February 8, 2021