

## 에디공분산 방법 기반의 플럭스 타워 순 복사에너지 검증: 설마천, 청미천 유역

### Validation of Net Radiation Measured from Fluxtower Based on Eddy Covariance Method: Case Study in Seolmacheon and Cheongmicheon Watersheds

변 규 현\* / 신 지 예\*\* / 이 연 길\*\*\* / 최 민 하\*\*\*\*

Byun, Kyuhyun / Shin, Jiyae / Lee, Yeon-Kil / Choi, Minha

#### Abstract

The necessity of clear understanding of water and energy cycles has been attracted recently due to the climate change. The micrometeorological flux tower networks play a role of cornerstone of the hydrological and ecological analyses. Although the eddy covariance techniques used for flux tower have been proven to be applicable for estimation of latent heat flux, the raw data are often underestimated and needs to be corrected. Among several methods, the Bowen ratio is recognized as the most useful method in which the net radiation and other flux data (Ground heat flux, Sensible heat flux) are used and needed to be validated. In this study, in order to validate the net radiation from flux tower in Seolmacheon and Cheongmicheon watersheds, we compare it with two version of calculated net radiation: (1) FAO 56 Daily net radiation proposed by Allen et al. (1998). (2) Instantaneous net radiation proposed by Bastiaanssen (1995). The results showed that the net radiation from the flux data had similar tendency with those calculated based on physical theory. In addition, after it was applied to Bowen ratio method, the corrected latent heat flux was considerably improved with making the energy balance much more closed.

**Keywords** : flux tower, eddy covariance method, Bowen ratio method, net radiation

#### 요 지

최근 들어 기후변화로 인해 물과 에너지 순환에 관한 정확한 이해가 요구되고 있다. 현재 미기상학적 플럭스 타워 네트워크는 수문학적, 생태학적 분석에 있어서 주춧돌역할을 하고 있다. 하지만 플럭스 타워의 에디공분산 방법을 활용한 잠열 플럭스 측정에는 여러 가정사항에 따른 시스템적 오류를 내포하고 있고 이에 따라 과소평가된 잠열 플럭스 원시자료의 보정이 필요하다. 몇몇의 보정방법 중 보엔비를 활용한 방법이 가장 유용한 방법 중 하나로서 여기에는 플럭스타워에서 측정된 순 복사에너지 및 기타 플럭스(현열, 지열) 등이 요구되며 이러한 자료에 대한 정확한 측정 및 검증이 필요하다. 본 연구에서는 설마천, 청미천 유역의 플럭스타워에서 측정된 순 복사에너지를 검증하기 위해 두 가지 형태의 이론적으로 계산된 순 복사에너지와의 비교검증을 실시하였다-(1) FAO 56 기반의 일평균 순 복사에너지 (2) Bastiaanssen (1995)가 제안한 순간 순 복사에너지. 본 연구의 결과는 플럭스타워에서 측정된 순 복사에너지는 이론적으로 계산된 순 복사에너지와 상당히 비슷한 경향성을 보인다는 것을 제시했다. 또한, 측정된 순 복사에너지를 이용하여 관측된 잠열플럭스를 보엔비

\* 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (e-mail: khbyun@hanyang.ac.kr)  
Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

\*\* 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (e-mail: starzee@hanyang.ac.kr)  
Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

\*\*\* 유량조사사업단 유수량조사실장 (e-mail: sugawon@hsc.re.kr)  
Hydrological Survey Center

\*\*\*\* 교신저자, 한양대학교 건설환경공학과 조교수 (e-mail: mchoi@hanyang.ac.kr, Tel: 02-2220-0324)  
Corresponding Author, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

보정방법에 적용시킨 결과 에너지수지에 더욱 부합하는 것을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 플럭스타워, 에디공분산 방법, 보엔비 방법, 순 복사에너지

## 1. 서 론

기후변화에 맞물려 수자원 문제 및 생태 순환의 문제가 대두되고 있는 시점에서 수문학적 인자의 정확한 해석이 더욱 절실히 요구되고 있다. 최근까지 국내에서는 수문학적 인자(강수, 유출량, 침투, 증발산, 토양수분 등)에 대한 정량적 해석이 대부분 물수지 방법에 의해 주도 되었다. 그러나 물 수지 방법에서는 수문순환 과정에서 중요한 부분인 증발산에 대한 해석이 직접적인 관측에 바탕을 두고 있는 것이 아니라, 주로 가정 사항이나 경험식에 입각해 도출되는 경우가 많다(Kim and Kim, 2004). 국외의 경우 에너지수지 방법에 입각한 증발산의 해석이 주를 이루며, 이에 맞물려 에디공분산 방법(Eddy covariance method)은 지표와 대기간의 수분 및 CO<sub>2</sub> 플럭스의 관측을 통해 수문순환 및 에너지 순환의 주요 인자에 대한 귀중한 정보를 제공하고 있다(Baldocchi et al., 1988; Wilson et al., 2002).

국내의 경우, AsiaFlux 네트워크의 발족으로 광릉, 해남 등의 플럭스타워 (Flux tower) 설치 및 유지 관리되고 있으며 이를 활용하여 다양한 모델링과 위성 알고리즘을 검증하는 연구들이 보고되고 있다(Kwon and Kim, 2010). 이러한 플럭스타워를 활용한 연구는 다음과 같이 다양하게 진행되고 있다. Choi et al. (1999)은 에디 공분산 방법의 이론적인 배경과 더불어 자료의 검·보정을 통해 농림 생태계에서의 적용 가능성을 살폈고, Kang et al. (2009)은 광릉의 수림지역에서의 균락하부 증발산이 총 증발산에 기여하는 정도를 평가하였으며, Jeong et al. (2009)은 동아시아 지역의 플럭스 네트워크에 대한 평가를 MODIS 위성 기반의 증발산을 활용하여 실시하였다.

하지만 에디공분산 방법에는 관측 대상지의 균질함 및 발달된 난류장 혹은 정상성 난류 플럭스 산정을 위한 몇 가지 중요한 가정 사항이 존재하며, 이에 따른 시스템적 오류는 검증작업을 필요로 한다(Baldocchi, 2003). 특히 에디공분산 방법에 의해 추출된 잠열 플럭스의 경우, 과소 산정되는 경향이 있으며 이를 보정하기 위해 여러 방법이 시행되고 있다. 보정 방법에는 Bowen ratio 방법과 Residual 방법 등이 있으며 보다 품질 높은 플럭스 자료 생산을 위해 다양한 방법들이 제시되고 있다(Twine et al., 2000). 이와 같은 보정 방법에 필요한 중요한 인자로서의 복사에너지(Radiation)

는 플럭스타워의 순복사계(Radiometer)를 통해 측정이 가능하며 현열, 토양열, 잠열 플럭스 등과 함께 제공된다.

복사에너지는 모든 자연계 에너지의 근원으로서 유입 또는 반사되는 단파 복사에너지와 대기로부터 유입 또는 지표로부터 방출되는 장파 복사에너지의 형태로 이루어져 있으며, 이 네 가지 성분을 통해 지표와 대기간의 에너지 순환 해석에 필수적으로 관여하는 순 복사에너지를 산정할 수 있다. 순 복사에너지에 관한 연구는 물리적 혹은 경험적 배경을 바탕으로 다양하게 진행되어 왔으며, 새로운 모델을 통한 연구도 활발히 진행되고 있다(Kim et al., 2011). 플럭스타워의 순복사계에서는 단파 및 장파에 대한 두 가지의 순 복사에너지를 제공하고 있으며, 플럭스 성분(현열, 잠열, 토양열 등)을 활용하여 에너지수지 기반으로 플럭스 자료의 정확성을 평가하고 있다(Lamaud et al., 2011; Wilson et al., 2002).

본 연구에서는 에디공분산의 잠열플럭스의 보정에 활용되는 순 복사에너지에 대한 검증을 실시하고자 한다. 이를 위해 설마천, 청미천 유역의 플럭스타워에서 관측된 2010~2012년 일부자료에 해당하는 순 복사에너지를 추출하였으며, 다음 두 가지 순 복사에너지 성분의 산정을 실시하였다. 1) Food and Agricultural Organization (FAO) Irrigation and Drainage Paper No. 56을 바탕으로 계산된 일 순 복사에너지(Daily net radiation)와 2) Bastiaanssen (1995)이 제안한 순간 순 복사에너지(Instantaneous net radiation)를 바탕으로 플럭스타워에서 추출된 순 복사에너지에 대한 검증을 실시하였으며, 플럭스 타워의 순 복사에너지를 활용한 Bowen ratio 잠열플럭스 보정 방법을 적용하여 보다 품질 높은 잠열 플럭스 생산을 위한 순 복사 에너지의 활용가능성에 대해 평가하였다. 이를 통해 앞으로 수자원 분야에서 플럭스타워 자료를 활용하여 공간적인 증발산의 분포를 효과적으로 파악하고 정량적인 데이터 베이스 구축할 수 있는 계기를 마련하고자 한다.

## 2. 연구대상 지역 및 자료 개요

### 2.1 설마천 유역

관측 대상 지역인 설마천 유역은 경기도 과천시 적성면 마지리에서 설마리 사이에 위치한 임진강 하구에서 4.6

km 떨어진 임진강의 제1지류 하천유역이다. 설마천의 유로연장은 5.8km, 유역의 면적은 8.5km<sup>2</sup>이며 임진강 전체 유역면적의 약 0.2%를 차지하고 있다. 설마천은 전형적인 급경사 산지 사행사천의 특성을 보이며, 본 유역에는 90% 이상은 침엽수와 활엽수로 구성되어 있고 플렉스타워 주변 북서쪽에는 굴참나무, 졸참나무가 남동쪽에는 잣나무가 주종을 이루고 있다. 표토는 수분함량이 매우 낮고, 주로 자갈과 돌로 구성되어 있다(Kwon et al., 2009). 연평균 온도와 강수량은 각각 11.5°C 및 1,332mm이며, 이 지역에 설치되어 있는 에디 공분산 기반의 플렉스타워는 해발 고도 269m의 산지에 위치하고 있다.

플렉스타워에는 에디 공분산 관측 시스템과 미기상 관측 시스템이 설치되어 있으며, 순 복사 에너지 관측에 사용되는 CNR2 Net Radiometer (순복사계)는 지표면에서 19.2m의 높이에 위치해 있다. 순복사계를 이용하여 순 단파복사에너지, 순 장파복사에너지와 순 복사에너지를 측정할 수 있다. 또한 플렉스타워에서 관측된 잠열과 현열플럭스 자료는 다음에 설명할 에디공분산 방법에 의거해 삼차원 초음파 풍향풍속계(CSAT3) 및 고속반응 기체 분석기(CS-155) 등을 통해 얻어지며, 토양열 플럭스 센서(HFT), 자동기상시스템(WXT510)를 비롯하여 기상과 플럭스를 측정하기 위한 여러 기기가 설치되어 있다.

## 2.2 청미천유역

관측 대상 지역인 청미천은 남한강으로 유입되는 지방 2급 하천으로서 유역면적 596.6km<sup>2</sup>, 유로 연장 60.8km의 하천유역이다. 이 유역의 연평균 기온 및 강수량은 11.5°C 및 1,107mm이며 플렉스타워는 농업기술원 종자관리소 논지에 위치하고 있다. 설마천과 마찬가지로 침엽수 및 활엽수가 혼재되어 있는 혼합림의 분포를 이루며 토성은 사양토가 주를 이룬다. 플렉스 타워 높이 9.7m 지점에

CNR2 Net Radiometer가 설치되어 있어 순 복사에너지를 비롯하여 순 단파, 순 장파에너지의 측정이 가능하고 설마천의 경우와 마찬가지로 삼차원 초음파 풍향풍속계, 고속반응 기체분석기, 토양열 플럭스 센서, 자동기상시스템 등이 설치되어 있다.

## 2.3 관측 자료

본 연구에서는 산림지형을 대표하는 설마천 유역 및 농림지형을 대표하는 청미천 유역의 플렉스타워에서 추출된 자료를 활용하였다. 활용한 자료의 기간은 Table 1과 같으며, 2011년 청미천 유역에서는 낙뢰로 발생한 플렉스타워의 고장 및 기계 교체로 여름철 기간에 해당하는 자료가 결측되었다.

## 3. 기본 이론 및 연구 방법

### 3.1 에디 공분산법(Eddy covariance method)

에디 공분산법은 수평의 균질한 표면과 대기 사이에서 열, 질량, 운동량 교환을 측정하는 방법으로서 Montgomery (1948), Swinbank (1951), Obukhov (1951)에 의해 제안되었다. 에디 공분산법에서 플럭스는 연직 바람속도와 측정하고자 하는 기체 농도의 순간편차의 공분산을 평균하여 계산한다(Baldocchi et al., 1988).

대기의 흐름은 에디(Eddy)라고 불리는 서로 다른 크기의 무수한 난류 소용돌이의 수평흐름이 모여 구성되어 있다. 바람의 일종인 에디는 무질서해 보이지만 각각 에디의 움직임은 X, Y, Z축을 활용하여 삼차원적인 모형으로 나타낼 수 있다. 에디 공분산 관측타워(플렉스타워)의 한 점에서 에디를 관측할 때, 한 점에서 모이는 여러 에디 각각을 삼차원 축으로 나타내어 반대방향의 에디들을 상쇄시킬 수 있다. 이를 바탕으로 한 점에서의 에디의 순수한

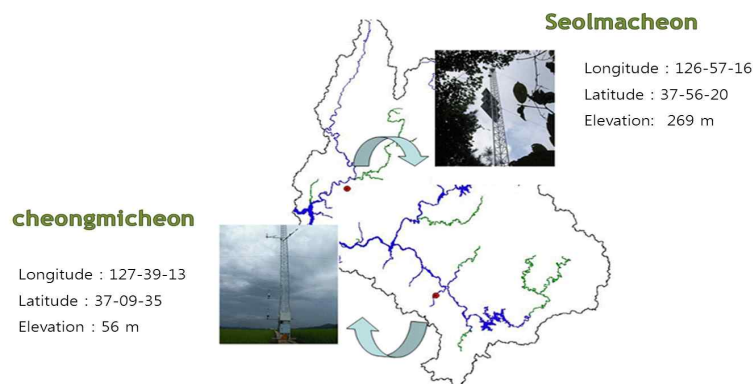


Fig. 1. Study Area

Table 1. The Time Coverage of Data Used in this Study

	2010	2011	2012
설마천	02.01 ~ 12.31	02.01 ~ 12.31	01.01 ~ 05.31
청미천	02.01 ~ 12.31	09.01 ~ 12.31	01.01 ~ 05.31

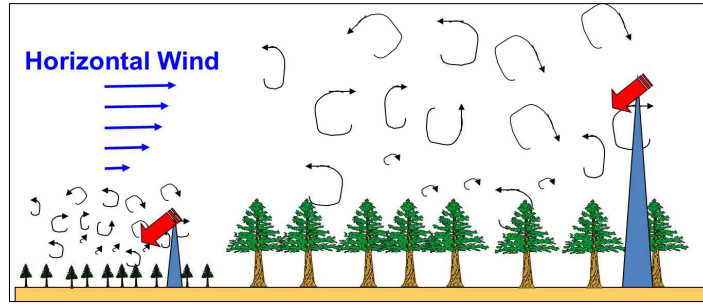


Fig. 2. Concept of Eddy Flux

움직임을 계산하여 대기 안에서 관심 있는 기체의 농도와 연직 풍속 사이의 공분산을 산정한다.

에디 공분산을 위한 계산식의 유도과정에서 소용돌이 난류에서 수직 플럭스는 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \overline{\rho_a \omega s} \quad (1)$$

여기서,  $\rho_a$ 는 공기밀도,  $\omega$ 는 공기의 풍속,  $s$ 는 대기 중의 관심 있는 임의의 기체 C와 공기의 혼합 비율을 의미한다. Reynold decomposition을 이용하여 각각의 항들을 평균과 편차의 합으로 Eq. (2)와 같이 나타낸다.

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a + \rho'_a)(\bar{\omega} + \omega')(\bar{s} + s')} \quad (2)$$

여기서,  $\bar{\rho}_a$ ,  $\bar{\omega}$ ,  $\bar{s}$ 는 평균값,  $\rho'_a$ ,  $\omega'$ ,  $s'$ 는 순간편차이다. Eq. (2)를 전개한 후 평균이 0으로 계산되는 분산 값을 제거하고, 밀도의 변동 폭이 큰 값을 제거한다는 가정에 따라 인자를 제거하면 아래와 같은 Eq. (3)을 유도할 수 있다.

$$F \approx \overline{\rho_a \omega s} \quad (3)$$

### 3.2 Daily net radiation ( $R_N$ )

플럭스타워의 자료에서는 순 복사에너지 값이 30분 단위로 평균화 되어 기록된다. 본 연구에 이 자료를 일별 평균화하여 경향성을 파악하고 이를 검증하기 위해 FAO56 (Food and Agriculture Organization Irrigation and Drainage Paper No. 56: Allen et al. in 1998)에서 제안한 일 순 복사 에너지를 산정하고 비교작업을 수행하였다. FAO56에 기반된  $R_N$ 을 산정하는 방법은 아래와 같다.

$$R_N = R_{ns} - R_{nl} \quad (4)$$

여기서,  $R_N$ 은 일 순 복사에너지( $MJ/m^2/day$ ),  $R_{ns}$ 은 단파에 의한 순 복사에너지( $MJ/m^2/day$ ),  $R_{nl}$ 은 장파에 의한 순 복사에너지( $MJ/m^2/day$ )이다. 지구 내부로 유입하는 순 단파복사에너지는 아래 Eq. (5)를 통해서 계산한다.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 는 지표면 반사율(albedo; 알베도)이다. 본 연구에서는 FAO56에서 제안하는 값 0.23을 사용하였다.  $R_s$ 는 실제 입사하는 태양 복사에너지( $MJ/m^2/day$ )이다.  $R_s$ 는 Angstrom formula를 통해서 산정할 수 있다.

$$R_s = (a_s + b_s (\frac{n}{N})) R_a \quad (6)$$

$R_a$ 는 대기권 밖에서 발생하는 복사에너지( $MJ/m^2/day$ ),  $a_s$ ,  $b_s$ 는 경험적 상수이기 때문에 지역마다 다른 값을 가진다. 설마천, 청미천 유역에서  $a_s$ ,  $b_s$  값이 정해지지 않았으므로 FAO56에서 제안하는  $a_s = 0.25$ ,  $b_s = 0.5$  임을 가정한다.  $n$ 은 실제 일조시간(hour),  $N$ 은 최대 가능 일조 시간(hour)이다. 설마천, 청미천 유역의  $\frac{n}{N}$  값은 국가수자원관리시스템(WAMIS)에서 추출하였다.

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \sin(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (7)$$

여기서,  $G_{sc}$ 는 태양상수로  $0.0820 MJ/m^2/day$ 이라는 고정 값을 사용한다.  $d_r$ 은 태양과 지구 사이의 거리의 상대적인 역수 값으로 Eq. (8) (Allen et al., 1998)을 활용한다.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos(\frac{2\pi J}{365}) \quad (8)$$

Eq. (7)에서  $\omega_s$ 는 일몰시간 태양의 각도(rad)의 각도로, Eq. (9)로 산정할 수 있다.

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (9)$$

여기서,  $\varphi$ 는 위도(rad),  $\delta$ 는 태양적위(rad)이며, Eq. (7)에서도 마찬가지로 적용된다.  $\delta$ 은 Eq. (10)을 통하여 그 값을 구할 수 있다.

$$\delta = 0.409\sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad (10)$$

여기서,  $J$ (Day of year)는 1년을 365일 혹은 366일로 나타낼 때, 해당하는 날짜의 순번을 의미한다.

$$R_{ni} = \sigma\left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2}\right](0.34 - 0.14e_a^{0.5})(1.35\frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) \quad (11)$$

여기서,  $\sigma$ 는 stefan-Boltzmann 상수( $5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$ ),  $T_{\max}$ 는 일 최고온도( $^{\circ}K$ ),  $T_{\min}$ 는 일 최저온도( $^{\circ}K$ ),  $e_a$ 는 실제 수증기 값(kPa),  $R_{so}$ 는 맑은 날 측정된 순 태양복사 에너지( $MJ/m^2/day$ )이다.  $e_a$ 는 상대습도 자료를 이용하여 Eq. (12)에 의해 추출하고,  $R_{so}$ 는 Doorenbos and Pruitt (1977)이 제안한 식을 활용한다.

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{\min})\frac{RH_{\max}}{100} + e^{\circ}(T_{\max})\frac{RH_{\min}}{100}}{2} \quad (12)$$

$e^{\circ}(T_{\max})$ 는 일 최대 수증기압(kPa),  $e^{\circ}(T_{\min})$ 는 일 최소 수증기압(kPa),  $RH_{\max}$ 는 일 최대 상대습도(%),  $RH_{\min}$ 는 일 최소 상대습도(%)로서 플릭스타워 미기상 자료를 활용하여 일별 해당 값을 추출하였다.

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5}Z)R_a \quad (13)$$

$R_{so}$ 은 Doorenbos and Pruitt (1977)가 제안한 Eq. (13)을 통해 얻어지며, 여기서  $Z$ 는 해수면으로부터의 높이(m),  $R_a$ 는 대기권 밖에서 발생하는 복사에너지( $MJ/m^2/day$ )이다.

### 3.3 Instantaneous Net Radiation ( $R_{ni}$ )

플릭스 타워에서 관측된 순 복사에너지는 삼십분 간격의 측정값으로서 FAO 56에서 제안한 daily net radiation과는 차이가 존재한다. 이에 따라 본 연구에서는 데이터의 개별 비교를 위하여 Bastiaanssen (1995)이 제안한 Instantaneous net radiation을 활용한 값을 추출하여 플릭스타워 복사에너지 관측값( $R_n$ )과 비교, 분석하였다.

순간 순 복사에너지( $R_{ni}$ ) 산정 식(Bastiaanssen 1995)은 아래와 같다.

$$R_{ni} = (1 - \alpha)R_{si} + RL \downarrow - RL \uparrow - (1 - \varepsilon_0)RL \downarrow \quad (14)$$

여기서,  $R_{ni}$ 는 순간 순 복사에너지량( $W/m^2$ ),  $R_{si}$ 는 지표면으로 향하는 순간 단파 복사 에너지양( $W/m^2$ ),  $RL \downarrow$ 은 지표면으로 향하는 순간 장파 복사에너지양( $W/m^2$ ),  $RL \uparrow$ 은 지표면에서 대기로 향하는 순간 장파 복사에너지양( $W/m^2$ )이다.  $\alpha$ 는 표면 알베도(albedo),  $\varepsilon_0$ 는 표면 방사율(emissivity)이다. 본 연구에서는  $\alpha$ 와  $\varepsilon_0$ 를 각각 0.23, 0.98로 가정하였다.

$$R_{si} = G_{sc}\cos\theta d_r\tau_{sw} \quad (15)$$

$G_{sc}$ 는 태양상수  $1,367 W/m^2$ ,  $\theta$ 는 태양 입사각(solar incidence angle)이다. 본 연구에서는 Solar incidence angle 값을 MIDC Solar Position and Intensity (SOLPOS) Calculator를 활용하여 30분 간격의  $\theta$  값을 추출하였다.  $d_r$ 은 태양과 지구 사이 거리의 상대적 역수 값을 의미하며 Eq. (8)을 이용하여 구할 수 있다.  $\tau_{sw}$ 는 해발고도  $Z$ (m)에서의 대기 투과율로 Eq. (16) (Allen et al., 1998)를 활용한다.

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5}(Z) \quad (16)$$

$$RL \downarrow = \varepsilon_a\sigma T_i^4 \quad (17)$$

Eq. (17)에서  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzman 상수값  $5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$ ,  $T_i$ 는 지표면 근처에서의 대기의 온도( $^{\circ}K$ )이다.  $\varepsilon_a$ 는 대기의 방출량으로 Eq. (18) (Bastiaanssen, 1995)을 사용한다.

$$\varepsilon_a = 0.85(-\ln\tau_{sw})^{0.09} \quad (18)$$

$$RL \uparrow = \varepsilon_0\sigma T_s^4 \quad (19)$$

Eq. (19)에서  $\varepsilon_0$ 는 대기의 방출량으로 본 연구에서는 0.98로 가정하여 계산한다.  $T_s$ 는 지표면의 온도( $^{\circ}K$ )이다.

### 3.4 Energy Balance with Bowen ratio(EBBR)

에너지 보존 법칙에 의해 표현되는 지표근처의 에너지 수지에 관한 식은 다음과 같다.

$$R_n - G = LE + H \quad (20)$$

여기서,  $R_n$ 은 순 복사에너지,  $G$ 는 토양열 플릭스(Soil heat flux),  $LE$ 는 잠열 플릭스(Latent heat flux),  $H$ 는 현열 플릭스(Sensible heat flux)이다.

Bowen ratio ( $B$ )란 잠열플럭스와 현열 플럭스간의 비 ( $\frac{H}{LE}$ )로 정의되며 이를 Eq. (21)에 도입하여 잠열 플럭스( $LE$ )를 새롭게 유도할 수 있다.

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + B} \quad (21)$$

이론적으로는 Eq. (20)의 양변의 값이 서로 같아야 에너지 수지가 균형을 이루지만 실질적으로 대부분의 플럭스 타워의 관측 값은 좌변 항의 값이 과대 산정되는 경향을 보인다. 따라서 Eq. (21)을 활용하여 잠열 플럭스를 새롭게 보정하는 방법이 주로 사용된다(Twin et al., 2000).

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 Daily net radiation (RN) 비교

Fig. 3은 일 평균화 된 에디공분산 플럭스타워의 순 복사에너지와 FAO56에 기초하여 산정된 일평균 순 복사에너지의 시계열이다. 청미천의 2010년 자료(Fig. 3a)의 경

우 전체적으로 두 값의 경향성이 비슷한 것을 알 수 있으며, 플럭스타워의 값의 변동 폭이 FAO56 기반 자료보다 더 큰 것을 알 수 있다. 설마천의 2011년 자료(Fig. 3b)에서도 전체적인 경향성이 비슷한 것을 알 수 있으며, 특히 연 중 복사 에너지양이 큰 여름(6~8월)에 해당하는 기간의 일치성이 두드러진다. 반면 초겨울(10~11월)에는 플럭스 자료의 값이 FAO56 기반으로 산정된 값보다 상대적으로 적으며 편차가 크다는 것을 알 수 있다.

두 지역의 자료에서 공통적으로 약 DOY 180~210 기간의 자료의 값이 이전 기간의 자료 값보다 작은 것을 알 수 있다. 이는 실질적으로 장마에 해당하는 기간으로서 구름 및 일조시간의 감소 영향으로 인해 일 평균 복사에너지가 감소되는 것으로 파악된다. 이는 FAO56 기반의 일 평균 복사 에너지 산정 과정에서 도입된 일조시간 자료에서도 확인할 수 있었으며, 이 기간에 해당하는 최대 일조가능시간에 대한 실제 일조시간 비( $n/N$ )의 값이 상대적으로 작고 이에 따라 일평균 복사 에너지 값이 감소하는 결과를 초래했다고 볼 수 있다.

실질적으로 일 평균 복사에너지 값이  $0 \sim 250 \text{ W/m}^2$  으

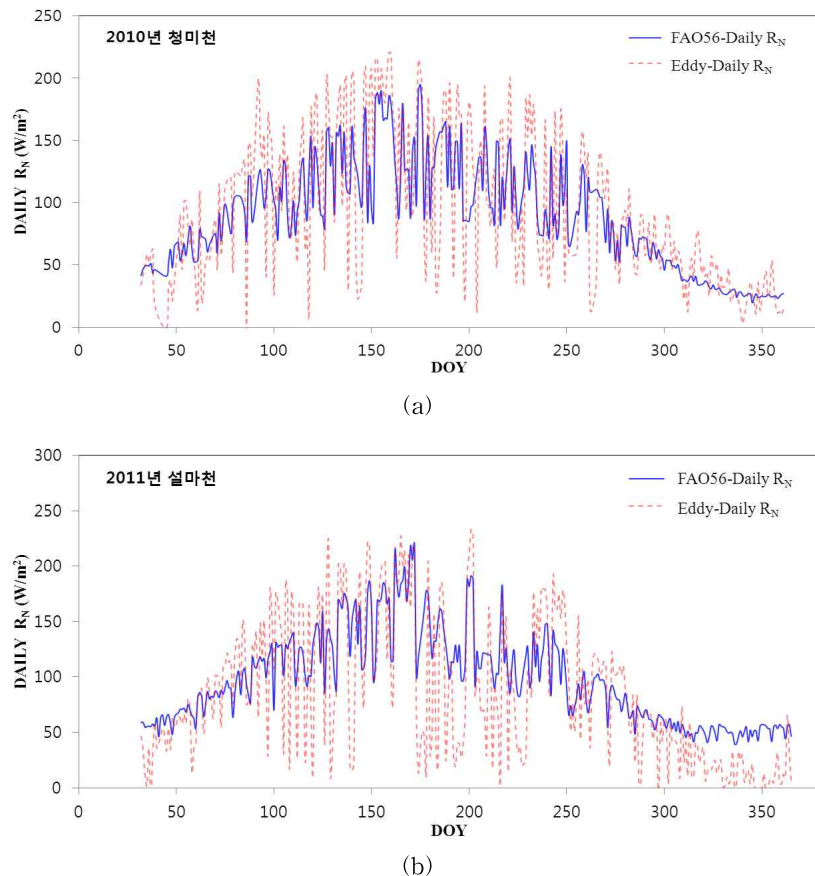


Fig. 3. The Time Series of Daily Net Radiation (a) 2010 Cheongmicheon (b) 2011 Seolmacheon

로 분포하는 것(Fig. 3)으로 보았을 때, Table 2의 결과는 두 지역 플럭스 자료 값이 상당히 높은 신뢰성을 갖고 있는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 설마천의 플럭스 자료 값이 FAO56 기반의 값보다 다소 과소평가되는 반면 청미천의 경우 설마천의 자료보다 더욱 높은 신뢰성을 보여주고 있다. 2012년 자료의 경우, 두 지역 모두에서 종전과는 달리 오차가 약간 크다는 것을 알 수 있다. 2010, 2011년과는 달리 2012년에는 1월 자료가 포함되어 있는데, 1월에는 순 복사에너지가 상대적으로 작고 오차가 다른 기간보다 더 크다고 알려져 있다(Kim et al., 2003).

Fig. 4는 두 자료의 선형회귀분석 자료로서 Table 2와 더불어 양적비교의 결과를 보여준다. 두 지역 모두에서 결정계수 값이 0.6 이상이며 기울기 값이 1에 상당히 근접하는 것을 알 수 있다. 특히 청미천 2010년(Fig. 4a) 경우 추세선의 y절편 값이 0에 가까운 결과 값으로서, 두 자료의 선형성이 비교적 뚜렷하게 나타난다고 볼 수 있다.

#### 4.2 Instantaneous net radiation ( $R_{ni}$ ) 비교

각 30분 단위로 제공되는 플럭스 순 복사에너지 자체의

검증을 위해 Batiannsen (1995)가 제안한  $R_{ni}$  (Instantaneous net radiation)을 도입하였다.

Fig. 5는 매 30분 측정된 플럭스타워 순 복사에너지( $R_n$ )와 계산된  $R_{ni}$  값의 시계열이다. 데이터의 손실 발생 부분을 제외하고는 Figs. 5(a) and 5(b)의 전체적인 경향성이 매우 유사하다고 볼 수 있으며, 데이터의 범위 또한 상당히 유사하게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 한편 데이터의 최대치는 대부분의 구간에서 플럭스 자료의 값이 계산된 값보다 더 크고 산발적으로 분포되어 있는 것을 알 수 있다.

Daily net radiation (Fig. 3)과 Instantaneous net radiation (Fig. 5)의 차이점으로는 구름의 영향에 따른 일조시간의 고려여부이다. Daily net radiation의 경우 일조시간이 고려된 반면, Instantaneous net radiation의 계산과정에서 알베도는 고정 값(0.23)으로서 장마기간에 높은 알베도에 따른 radiation의 감소경향이 나타나지 않고 전체적인 종 모양 형태의 시계열을 나타냈다.

Table 3은 계산된 Instantaneous net radiation과 플럭스타워에서 추출된 값의 비교결과이다. Daily net

Table 2. Data Comparison of Daily Averaged Flux Net Radiation with Daily Net Radiation Based on FAO56

Year	청미천		설마천	
	Bias ( $W/m^2$ )	RMSE ( $W/m^2$ )	Bias ( $W/m^2$ )	RMSE ( $W/m^2$ )
2010	5.26	37.03	-14.80	38.95
2011	2.78	24.42	-13.36	44.07
2012	-3.81	37.14	-33.63	63.04

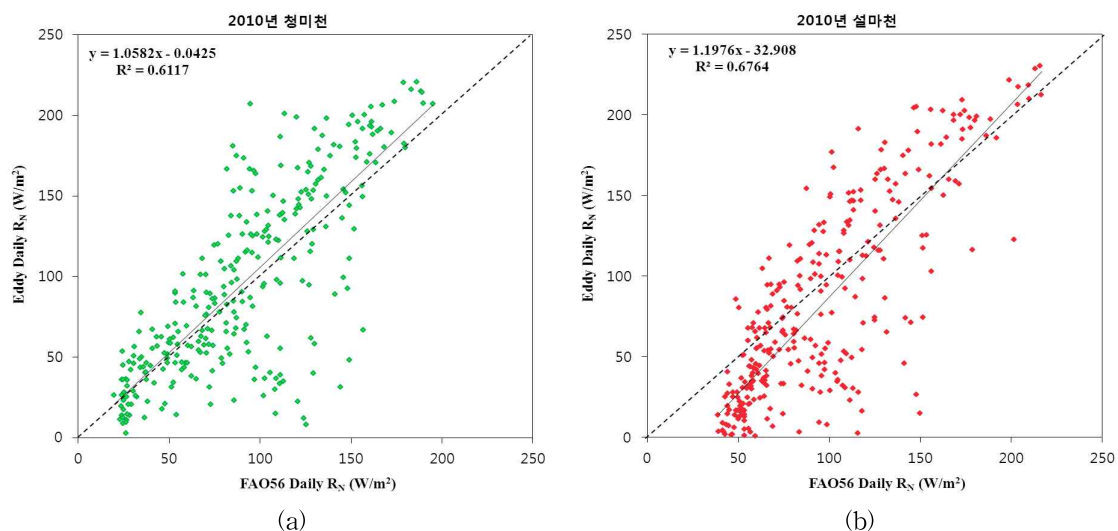


Fig. 4. 1 on 1 Plot of FAO56 Daily Net Radiation VS Daily Averaged Flux Net Radiation (a) 2010 Cheongmicheon (b) 2010 Seolmacheon

radiation의 비교결과(Table 2)와 마찬가지로 두 지역의 결과 값이 상당한 유사성을 지니고 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 Fig. 5에서 보이는 데이터 범위( $0 \sim 750 \text{ W/m}^2$ )를 고려해볼 때 Bias 값이 작다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 두 지역의 1 대 1 plot이 상당한 유사성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 데이터의 분포도에 있어서 대부분의 플럭스 실측값이 계산된 값보다 과대평가되어 있으며, 데이터 값이 커질수록 반대로 과소평가되는 경향이 보인다. 이는 여름철 장마전선의 영향에 따른 알베도 증가가 계산된 Instantaneous net radiation에

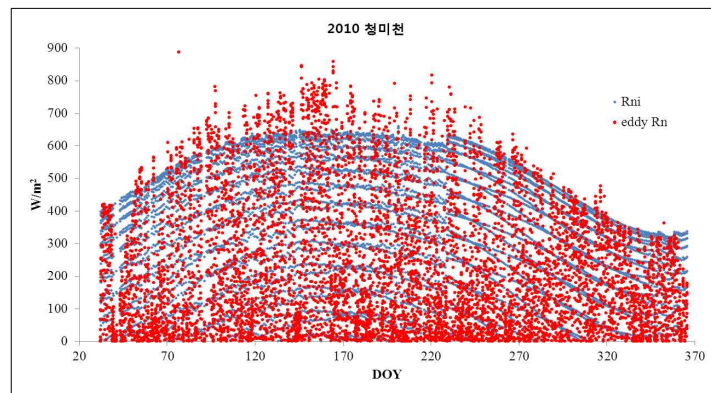
서 반영되지 못한 결과로서 해석될 수 있다.

#### 4.3 에너지수지 분석 및 Bowen ratio을 활용한 잠열 플럭스 보정

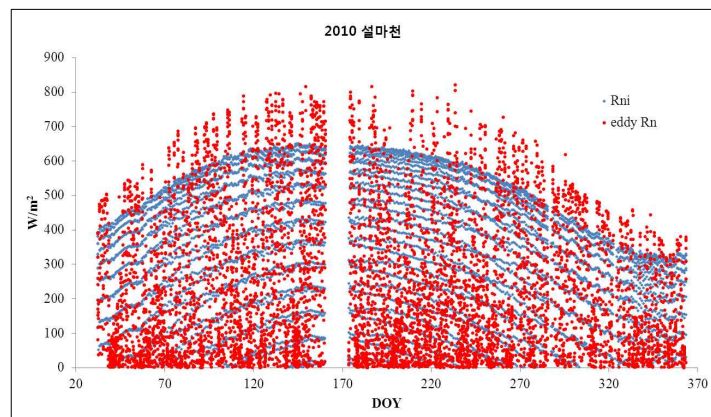
Eq. (20)에서 에너지 수지가 정확히 들어맞기 위해서는 좌변항의 값이 우변항 값과 같아야 하며 이를 에너지수지 닫힘이라 한다. 본 연구에서는 플럭스타워에서 측정된 순 복사에너지( $R_{n\_eddy}$ )와 계산된 순간 순 복사에너지( $R_{ni}$ )를 각각 활용하여 에너지수지 닫힘에 대한 분석을 실시하였다(Fig. 7).

Table 3. Data Comparison of Instantaneous Flux Net Radiation ( $R_n$ ) with Instantaneous Net Radiation ( $R_{ni}$ ) Proposed by Batiannsen (1995)

Year	청미천		설마천	
	Bias ( $\text{W/m}^2$ )	RMSE ( $\text{W/m}^2$ )	Bias ( $\text{W/m}^2$ )	RMSE ( $\text{W/m}^2$ )
2010	25.24	169.98	21.32	181.25
2011	54.66	159.76	25.28	179.87
2012	32.34	152.79	29.69	154.92



(a)



(b)

Fig. 5. The Time Series of Instantaneous Net Radiation (a) 2010 Cheongmicheon (b) 2010 Seolmacheon



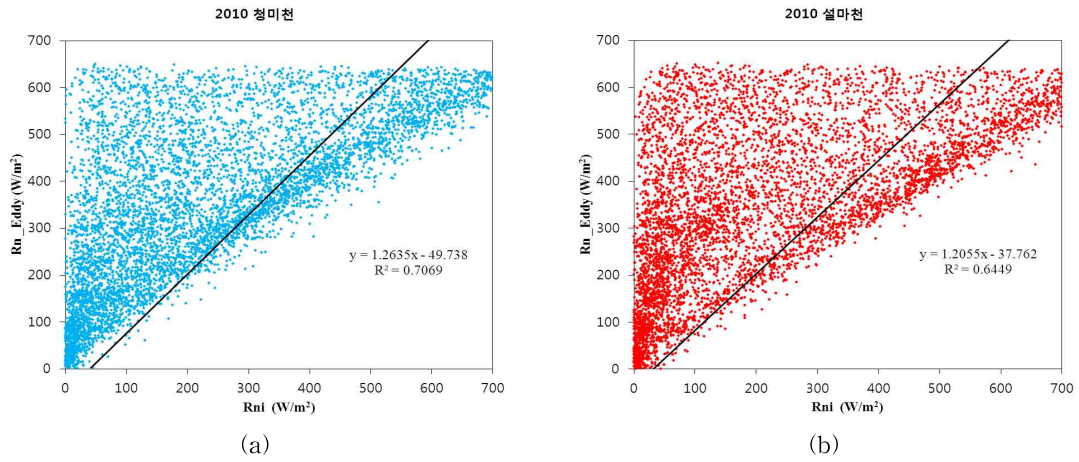


Fig. 6. 1 on 1 Plot of Calculated Instantaneous Net Radiation VS Measured Instantaneous Net Radiation (a) 2010 Cheongmicheon (b) 2010 Seolmacheon

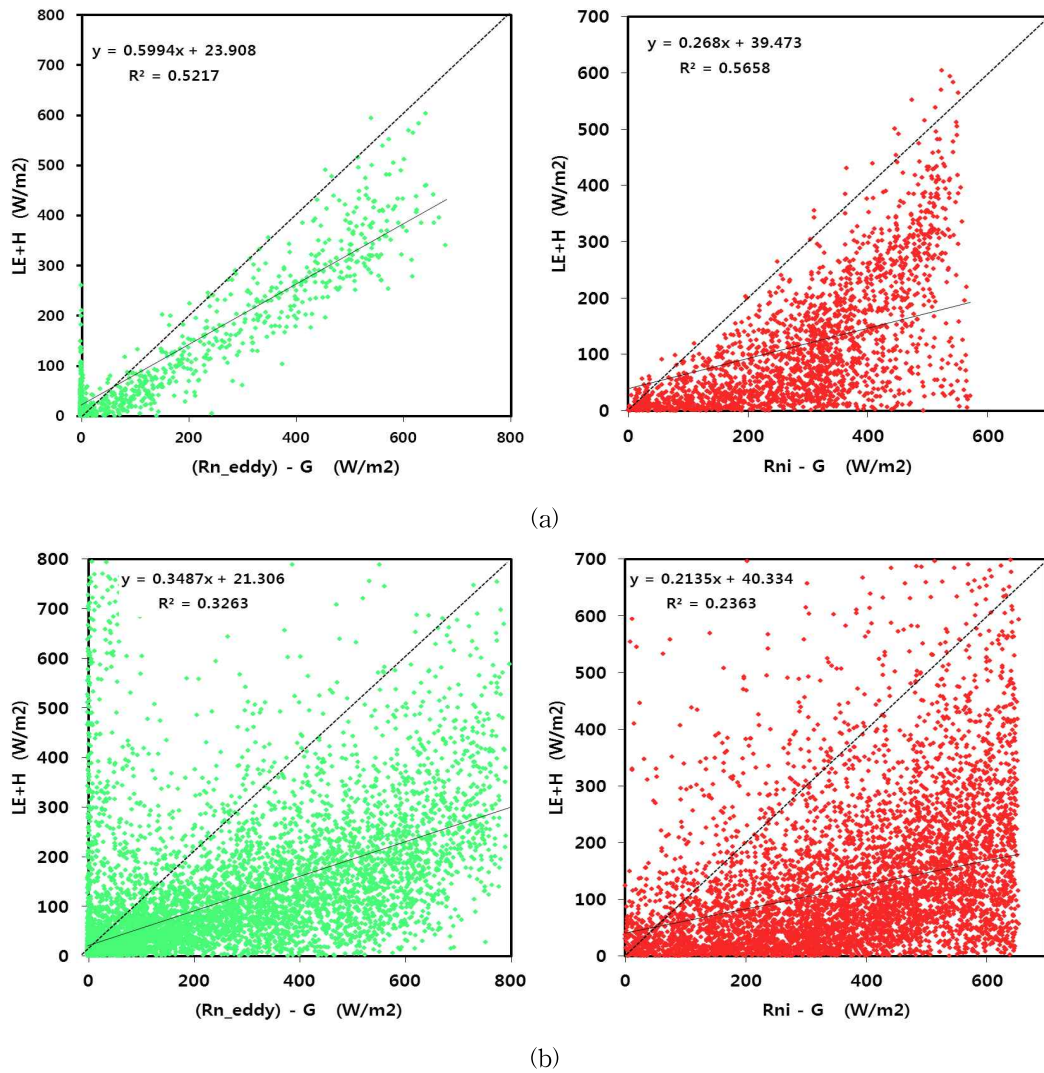


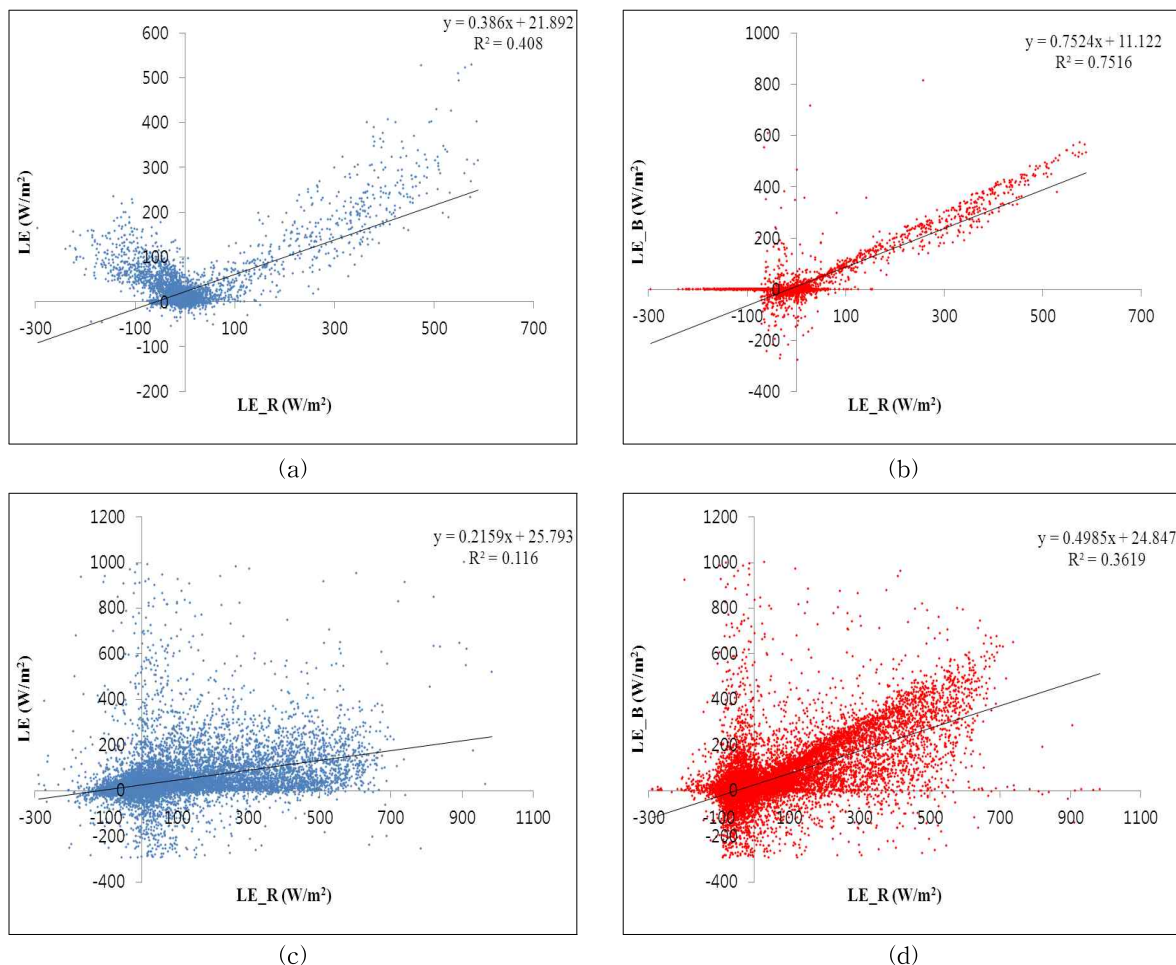
Fig. 7. Energy Balance Closure Analyses using Measured Instantaneous Net Radiation VS Calculated Instantaneous Net Radiation (a) 2011 Cheongmicheon (b) 2011 Seolmacheon

Fig. 7에서 알 수 있듯이 두 지역의 모두에서 플럭스 타워에서의 관측값( $R_{n\_eddy}$ )을 사용하였을 때(왼쪽그림) 에너지수지에 더욱 부합하는 결과를 나타내었다. 이 또한 역시 관측된 순 복사에너지 값에 대한 신뢰성을 입증하는 하나의 결과라고 해석할 수 있다. 전반적으로 청미천의 데이터가 설마천의 경우보다 에너지수지 닫힘에 더 근접한 결과를 보였으며, 두 지역의 데이터에서 공통적으로 Eq. (20)의 우변의 성분(LE+H)이 좌변의 성분보다 과소평가되는 점을 알 수 있다. 실제로 선행 연구(Twin et al., 2000)에서 에디공분산 기법의 잠열플럭스 성분이 다소 과소 산정되는 경향을 보였으며 이와 마찬가지로 유사한 결과로서 해석될 수 있다.

일반적으로 순 복사에너지( $R_n$ ), 현열 플럭스(H), 토양 열 플럭스(G)가 알려져 있을 때 에너지수지 닫힘에 부합하는 잠열 플럭스 값을 산정할 수 있으며 이를 Residual latent heat flux (LE\_R)로 정의한다. 하지만 앞서 설명했

듯이 실질적으로 에디공분산에 의한 측정값은 LE\_R보다 과소평가되는 경향을 보이므로 Bowen ratio 등을 활용하여 이를 보정하며 보정된 값을 Latent heat flux with bowen ratio method (LE\_B)로 정의한다(Twin et al., 2000).

Fig. 8은 플럭스타워에서 측정된 latent heat (LE)를 앞서 검증했던 net radiation ( $R_n$ )을 활용하여 Bowen ratio method 보정을 실시한 결과이다. 이론적으로 에너지수지에 부합하는 Residual latent heat flux (LE\_R)과의 1:1 plot을 살펴보면 적용 후의 결과가 두 지역 모두에서 확연하게 개선된 점을 알 수 있다. 무엇보다도 Eq. (21)에서 net radiation 값에 따라 보정되는 LE\_B 값이 상당한 차이를 보일 수 있기 때문에 이에 대한 확실한 검증이 필요하다는 것을 알 수 있으며, Fig. 8은 앞서 검증했던 순 복사에너지 값의 중요성을 판단할 수 있는 결과라고 볼 수 있다. 따라서 검증된 순 복사에너지의 값은 신뢰성 높은 잠열플럭스 산정에 중요한 역할을 할 것이다.



**Fig. 8. The Correction of Latent Heat Using Bowen Ratio Method**  
 (a) before Correction 2011 Cheongmicheon (b) after Correction 2011 Cheongmicheon  
 (c) before Correction 2010 Seolmacheon (d) after Correction 2010 Seolmacheon

## 5. 결 론

본 연구에서는 설마천, 청미천 유역의 플럭스타워에서 추출된 순 복사에너지에 대한 검증작업을 실시하였다. 이론적인 배경을 바탕으로 산출된 Daily net radiation 및 Instantaneous net radiation과의 비교를 통해 플럭스타워의 순 복사에너지의 값의 정확성을 평가하였다. 두 지역 모두에서 결과 값이 상당한 신뢰성을 갖는 것으로 파악되었으며, 특히 일 평균화 된 Daily net radiation의 경우 구름의 영향에 대한 부분이 실질적으로 반영되어 유사한 경향성이 더욱 두드러졌다.

플럭스 타워에서 추출된 순 복사에너지에 대한 검증과 더불어, 이를 활용하여 에디공분산으로 추출된 잠열플럭스에 대한 보정을 실시하였다. Bowen ratio 방법에 의해 보정된 잠열플럭스(LE\_B)값은 보정 전의 값(LE)보다 에너지수지에 입각한 잠열플럭스에(LE\_R)와 더욱 선형적인 관계가 있는 것으로 나타났다.

이를 바탕으로 에디공분산 잠열플럭스의 검정 및 보정 작업에서 순 에너지복사의 활용가능성이 충분히 입증된 것으로 사료된다. 현재 설마천, 청미천 유역의 플럭스 타워에 설치되어 활용되고 있는 CNR 2 모델은 순 단파복사 에너지( $R_{ns}$ ) 및 순 장파복사에너지( $R_{nl}$ ) 두 성분으로 순 복사에너지를 산정하는 방식이다. 하지만, 최근 이보다 발전된 형태의 CNR 4는 알베도를 추가적으로 제공하며, 입사, 방출되는 단파 혹은 장파 복사 에너지에 대한 모든 정보를 제공함으로써 더욱 수준 높은 정확성을 기대할 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 유량조사사업단의 “인공위성자료를 이용한 증발산 및 토양수분의 공간적 mapping 작성 기반 구축 및 증발산량 산정 품질관리” 과제와 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(0002516).

## 참고문헌

- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Baldocchi, D. (2003). “Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future.” *Global Change Biology*, Vol. 9, No. 4, pp. 479-492.
- Baldocchi, D., Hicks, B., and Meyers, T. (1988). “Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods.” *Ecology*, Vol. 69, pp. 1331-1340.
- Bastiaanssen, W.G.M., (1995). *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates*. Ph.D. Dissertation, Landbouwniversiteit Wageningen, The Netherlands.
- Choi, T., Kim, J., and Yun, J. (1999). “On using the eddy covariance method to study the interaction between agro-forest ecosystems and the atmosphere.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-15.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W.O., (1977). “Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24, (rev.)” *Food and Agricultural Organization of the United Nations*, Rome, Italy.
- Jeong, S., Jang, K., Kang, S., Kim, J., Kondo, H., Gamo, M., Asauma, J., Saigusa, N., Wang, S., and Han, S. (2009). “Evaluation of MODIS-derived evapotranspiration at the flux tower sites in East Asia.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 4, pp. 174-184.
- Kang, M., Kwon, H., 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.
- Kim, D., Lim, Y.J., Lee, S., and Choi, M. (2011). “Validation of energy and water fluxes using Korea Land Data Assimilation and flux tower measurement: Haenam KoFlux site’s hydro-environment analysis.” *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 285-291.
- Kim, N.W., and Kim, C.K. (2004). “Comparison of Penman-Monteith method and Morton CARE method for estimating areal evapotranspiration.” *2004 Korea*

- Water Resources Association Conference*, Incheon, Korea, 14-15 May, 2004. (In Korean with English abstract)
- Kim, Y., Cho, K., Kim, H., Um, H., and Choi, B. (2003). "Characteristics of the seasonal variation of the radiation in a mixed forest at Kwangneung arboretum." *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 19, No. 3, pp. 285-296.
- Kwon, H., and Kim, J. (2010) "KoFlux's progress: background, status and direction." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 12, No. 4, pp. 241-263.
- Kwon, H., 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.
- Lamaud, E., Ogee, J., Brunet, Y., and Berbigier, P. (2001). "Validation of eddy flux measurements above the understory of a pine forest." *Agric. Forest. Meteorol.*, Vol. 106, pp. 187-203.
- Montgomery, R.B. (1948). "Vertical eddy flux of heat in the atmosphere." *J Meteorol*, Vol. 5, pp. 265-274.
- Obukhov, A.M. (1951). "Characteristics of the micro-structure of the wind in the surface layer of the atmosphere." *Izv. AN SSSR ser Geofiz*, Vol. 3, pp. 49-68.
- Swinbank, W.C. (1951). "The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere." *J Meteorol.*, Vol. 8, pp. 135-145.
- Twine, T.E., Kustas, W.P., Norman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J., and Wesely, M.L. (2000). "Correcting eddy-covariance flux underestimates over grassland." *Agric. Forest. Meteorol.*, Vol. 103, pp. 279-300.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B.E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R., and Verma, S. (2002). "Energy balance closure at FLUXNET sites." *Agric. Forest. Meteorol.*, Vol. 113, pp. 223-243.

논문번호: 12-081	접수: 2012.07.14
수정일자: 2012.09.13/10.02	심사완료: 2012.10.02