

KoFlux 관측지에서 에디 공분산 자료의 품질관리 및 보증

권효정¹ · 박성빈¹ · 강민석¹ · 유재일¹ · 렌민 유안² · 김 준^{1*}

¹연세대학교 대기과학과/지구환경연구소

²중국과학기술대학 지구/우주과학대학

(2007년 11월 13일 접수; 2007년 12월 13일 수락)

Quality Control and Assurance of Eddy Covariance Data at the Two KoFlux Sites

Hyojung Kwon¹, Sungbin Park¹, Minseok Kang¹, Jaeil Yoo¹, Renmin Yuan² and Joon Kim^{1*}

¹*Biometeorology Laboratory & Global Environment Laboratory, Dept. of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*

²*School of Earth and Space Sciences, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui Province 230026, China*

(Received November 13, 2007; Accepted December 13, 2007)

ABSTRACT

This research note introduces the procedure of the quality control and quality assurance applied to the eddy covariance data collected at the two KoFlux sites (i.e., Gwangneung forest and Haenam farmland). The quality control was conducted through several steps based on micrometeorological theories and statistical tests. The data quality was determined at each step of the quality control procedure and was denoted by five different quality flags. The programs, which were used to perform the quality control, and the quality assessed data are available at KoFlux website (<http://www.koflux.org/>).

Key words : Quality check, Quality assurance, Quality flag, Eddy covariance, KoFlux

I. 서 론

에디 공분산 기술은 지표에서의 에너지와 물질의 순환을 측정할 때 가장 널리 사용되는 방법이다 (Baldocchi *et al.*, 1988; Wilson *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2006). 이 에디 공분산 기술을 기반으로하여 다양한 육상생태계를 대표하는 플럭스관측 지역 네트워크(예를 들면, AmeriFlux, CarbonEurope, AsiaFlux)가 대륙별로 활성화되어 있다. 에디 공분산은 관측대상지의 균질함과 잘 발달된 난류장 및 정상성(stationarity)을 만족하는 경우에 장기적으로 넓은 지역을 대표하는 연속 관측이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 실제로는

에디 공분산 관측에서 항상 이러한 조건을 만족시키기 어렵고(Baldocchi, 2003; Finnigan *et al.*, 2003; Lee, 1998; Yuan *et al.*, 2007), 이러한 가정들이 충족되지 않을 때 얻어진 자료는 관측 오차와 불확실성이 커서 자료의 질이 좋지 않을 수 있다. 이렇게 좋지 않은 자료를 제거한 양질의 에디 공분산 자료를 얻기 위해서는 미기상학적/통계학적 분석에 근거한 자료의 품질 관리가 필요하다(Foken and Wichura, 1996; Aubinet *et al.*, 2000; Foken *et al.*, 2004; Ruppert *et al.*, 2006). 이 연구노트 단보에서는 KoFlux 관측지인 광릉 산림지(2004년 10월~2007년 9월)와 해남 농경지(2004년 1월~2006년 12월)에서 관측된 30분 평균 자

료를 이용하여, 1) 에디 공분산 자료의 품질을 관리·보증하는 방법을 소개하고, 2) 품질 보증된 자료의 예를 보여주고, 3) 품질 관리 및 보증 과정에서 발견된 문제점과 향후 연구 방향을 제시하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 관측 기기와 관리

광릉 산림지와 해남 농경지의 플럭스 타워에서는 3차원 초음파 풍향·풍속계(Model CSAT3, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA)를 이용하여 유선 속도(u), 측면속도(v), 연직속도(w)와 온도(T_s)를 측정하고, 고속반응 적외선 기체분석기(Model LI-7500, LICOR Inc., Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 이산화탄소(ρ_c)와 수증기(ρ_w)의 농도를 측정하였다(자세한 정보는 Choi, 2003; Hong *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2003; Yuan *et al.*, 2007을 참고). 에디 공분산 관측은 광릉 산림지의 경우 지상 40 m, 해남 농경지의 경우 20 m에서 관측된 에디 공분산 자료를 사용하였다. 에디 공분산 자료와 함께 기상변수(예를 들면, 복사, 온도, 습도, 토양 온도, 토양 수분 등)도 측정되었다. 정기적인 관측 기기의 관리에 관한 정보는 관측지 야장에 기록되었으며, 관측시 상황을 추정하는데 자료의 품질 검증 단계에서 매우 중요한 역할을 한다. 또한 3차원 초음파 풍향·풍속계의 영점 점검과 같은 기기의 오차 측정과 보정(예를 들면, 기체분석기의 영점과 범위 보정)은 정확한 자료를 얻기 위한 필수 조건으로, 전자는 실험실에서, 후자는 관측지에서 각각 수행하였다.

2.2. 자료의 품질 관리 및 분류

KoFlux에서 관측된 에디 공분산 자료는 미기상학적/통계학적 분석을 근거로 Fig. 1의 단계를 거쳐 처리되었다. 품질 관리는 크게 두 부분으로 나누어지는데, 정확한 플럭스값을 산출하기 위한 계산 과정과 자료의 질의 등급을 결정하고 표시(flag)하는 과정으로 이루어져 있다. 품질 관리를 거치는 동안 품질의 정도에 따라 5단계(G: Good, D: Dubious, B: Bad, M: Missing, FA: Further Analysis)로 구분된다(Table 1). G는 양질의 자료, D는 의심스럽고 판단의 근거가 모호한 자료, B는 저질의 자료로 사용할 수 없는 자료, M은 기록이 되지 않는 자료, 그리고 FA는 의심스럽지만 나쁘다고 판정할 근거가 없는 자료로서 필요시 심층분

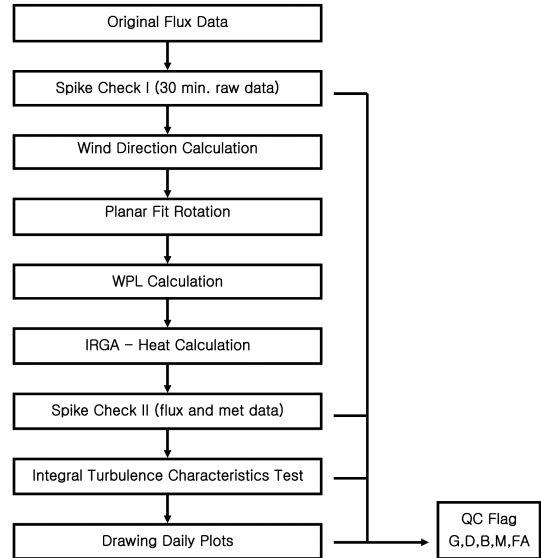


Fig. 1. Schematic chart of quality control (QC) process. G, D, B, M, and FA indicate good, dubious, bad, missing, and further analysis, respectively.

석이 요구되는 자료를 말한다. 이렇게 분류된 품질 등급은 자료와 함께 기록된다. 품질 관리의 각 단계의 간략적인 이론적 배경과 필요성은 다음과 같다.

2.2.1. 튀는 자료(Spike) 1차 점검

집록된 30분 자료(u , v , w , $T_{s,s}$, ρ_c 와 ρ_w)는 플럭스 계산에 사용되기 때문에 플럭스 계산 이전에 자료의 질을 먼저 점검해야 한다. 주어진 자료 기간(예를 들면, 1개월 혹은 1년)동안 각각의 변수에 대해 자료의 평균과 표준편차를 계산하였다. 주어진 기간에서 각 자료의 평균의 차이가 표준편차의 4배 이하이면 품질이 G로 표시하고 4배 이상이면 품질이 D로 표시하였다. 이 단계에서 Table 1에 제시된 것과 같이 M과 B 등급의 자료들이 결정된다.

2.2.2. 풍향 계산

풍향은 플럭스자료의 발원(source)을 알려주기 때문에 정확한 풍향을 계산하는 것이 중요하다. 3차원 초음파 풍향·풍속계에서 관측된 바람성분(u 와 v)과 기기가 가리키는 방향과 진북 방향 사이의 각으로부터 풍향을 계산할 수 있다(<http://www.campbellsci.com/documents/manuals/csats3.pdf>). 관측 기간동안 3차원 초음파 풍향·풍속계의 진북으로부터의 각도는 광릉은 96°, 해남은 175°였으며, 이를 고려하여 풍향을 계산하였다.

Table 1. Data quality flag description with cases and examples

Flag	Case	Example
M [‡]	No measurement	
	No value recorded in the data	NAN and NA
	Unreasonable value of the recorded data	INF, -6999, and -99999
B [‡]	N_Tot [§] criterion	N_Tot < *18000
	CSAT3_Warning_Tot [*] criterion	CSAT3_Warning_Tot > *18000
	IRGA_Warning_Tot [*] criterion	IRGA_Warning_Tot > *18000
	Data collected during instrument maintenance and/or repair	Refer to field notebook for this information
	Large change of automatic gain control of IRGA CO ₂ flux data showing carbon sink at night after density corrections [†]	
D [‡]	N_Tot criterion	*18000 < N_Tot < ¹⁹ / ₂₀ *18000
	CSAT3_Warning_Tot criterion	*18000 < CSAT3_Warning_Tot < ¹⁹ / ₂₀ *18000
	IRGA_Warning_Tot criterion	*18000 < IRGA_Warning_Tot < ¹⁹ / ₂₀ *18000
	Data showing over > 4 standard deviation from a mean value during a given period	*18000 < N_Tot < ¹⁹ / ₂₀ *18000
	Ambiguous data	Ambiguous data with no concrete reason to assess the error of the data
FA [‡]	Data collected over rainy conditions	
	Data required for further analysis	Data seemed to have obvious error, but the phenomena of the data can be possibly explained with other micrometeorological variables
G [‡]	Data passed after filtering above all flags	

[‡]M, B, D, FA and G indicate missing, bad, dubious, further-analysis, and good, respectively.

[§]N_Tot is the total sampling number (i.e., 18000 points) collected with 10Hz sampling rate during 30 minutes.

^{*}CSAT3_Warning_Tot and IRGA_Warning_Tot indicate the total warning numbers collected from a sonic anemometer (Model CSAT3) and an infrared gas analyzer (IRGA), respectively.

[†]Density corrections include Webb-Pearman-Leuning (WPL) and IRGA heat corrections.

2.2.3. 평면 맞추기 회전(Planar Fit Rotation)

에디 공분산 방법을 이용한 플럭스 관측에 좌표 회전이 미치는 효과를 이해하는 것은 필수적이다. 좌표 회전은 바람이 평평한 지역위로 분다는 전제아래 두 바람성분이 0이라고 가정한다($\vec{v} = \vec{w} = 0$). 실제 관측지에서는 이러한 가정을 만족하기 어려우므로, Wilczak *et al.*(2001)이 제시한 평면 맞추기 회전(planar fit rotation, PFR)을 적용시켰다(Yuan *et al.*, 2007). 관측 타워 주위의 지형 기록이 일정하지 않은 광릉의 경우, 바람 방향을 30° 구간으로 나누어 PFR 계수를 계산하였고 이를 좌표회전에 적용하였다. 관측지가 비교적 완만한 해남의 경우, 관측된 전체 자료에 대해 PFR 계수를 산출하여 좌표 회전에 적용하였다.

2.2.4. Webb-Pearman-Leuning(WPL) 계산

낮 동안 현열과 잠열이 대기로 수송될 때, 가열된 공기는 밀도가 낮아져 상승한다. 반면, 밤에는 현열과

잠열이 지표로 수송되고, 냉각된 공기의 밀도가 높아져 하강한다. 이러한 공기 밀도의 차이로 인해 공기가 상하로 움직이면서 연직바람이 생긴다. 에디 공분산 방법은 플럭스를 두 성분의 공분산(예를 들면, $\overline{w'p_c'}$)으로만 계산하기 때문에, 이러한 열수송에 의한 밀도 차이의 변화로 생기는 연직바람의 효과를 고려하지 못한다(Webb *et al.*, 1980). WPL 계산은 밀도 차이에 의한 연직바람성분으로 생길 수 있는 플럭스를 정량화하여 에디 공분산으로 관측된 플럭스에 감안해 주는 것이다. 이 연구에서는 WPL 효과를 고려하여 수증기와 이산화탄소 플럭스를 산출하였다.

2.2.5. 적외선 기체분석기의 가열 계산

고속반응 적외선 기체분석기가 일사에 의해 가열되거나 기기내부의 전기시스템(예를 들면, 광선 단속 장치 모터)에 의해 자체적으로 가열될 경우, 생성된 열에 의해 기기를 지나가는 공기가 더워져 팽창하고 부

력이 생겨 연직바람이 생긴다. 위의 WPL 계산과정에서 설명되었듯이, 이 밀도 변화로 생성된 연직바람은 플럭스 계산에 영향을 미치게 되므로 이에 따른 보정이 필요하다(Grelle and Burba, 2007). 본 연구에서는 Grelle and Burba(2007)의 방법에 따라 관측된 플럭스 자료를 보정하였다.

2.2.6. 튀는 자료 2차 점검

2차 점검에서는 1차에서 점검된 30분 평균 자료의 공분산 값으로 계산된 플럭스 자료중에서 튀는 값들을 점검한다. 1차 점검과 같이 주어진 자료의 기간 동안 플럭스 값에 대해 평균과 표준편차를 계산하고, 계산된 평균 자료로부터 플럭스 값이 4배 이하의 표준편차를 보이면 G, 4배 이상의 표준편차를 보이면 D로 품질을 분류하였다.

2.2.7. 적분 난류 특성 점검 (Integral Turbulence Characteristics Test)

에디 공분산 기술은 활성화된 난류 조건을 전제로 한다. 그러나 실제 상황에서 난류가 약하거나 발생하지 않는 경우, 관측된 플럭스 값은 불확실성이 높아진다. 난류 발생정도를 평가하는 방법으로 적분 난류 특성(Integral Turbulence Characteristics, ITC)점검이 널리 사용되며, 주로 연직 풍속과 온도에 적용된다(Wyngaard *et al.*, 1971; Kaimal and Finnigan, 1994; Foken and Wichura, 1996). 이 연구에서는 에디 공분산 시스템으로 관측된 난류 통계량을 Kaimal and Finnigan (1994)이 제시한 것과 같이 대기안정도($(z-d)/L$, 여기서 z 는 관측 높이, d 는 영면 변위 길이, L 은 Obukhov 길이)에 따라 불안정($-2 < (z-d)/L < 0$), 중립($0 < (z-d)/L < 1$), 안정($1 > (z-d)/L$)으로 구분하였다. 각 안정도 구간별로 자료를 bin-average를 취하고 연직 풍속만을 사용하여 Kaimal and Finnigan(1994)에서 제시된 방정식으로부터 각 안정도 구간에 맞는 경험상수를 계산하였다. 얻어진 경험상수를 방정식에 도입하여 계산한 ITC와 실제 ITC의 차이가 40% 이하인 경우에는 ITC 평가를 만족, 즉 난류가 잘 발달된 것으로 간주하고 이때의 자료는 G로, 나머지 자료는 B로 분류하였다.

2.2.8. 시계열 그리기

품질표시가 D인 경우, 플럭스 자료와 기상 자료가

함께 고려되어 D 자료의 최종품질(D, B, 혹은 FA)이 결정된다. 이를 위하여 엑셀 및 Visual Basic for Applications(VBA) 프로그램을 사용하여 일 또는 월 단위의 그래프를 그리고, 연구자가 일일이 시계열 자료의 변화 패턴과 크기를 점검하였다. 이 과정을 걸쳐 최종 품질 보증된 자료 중 D, M과 B로 표시된 자료는 최종 자료보고에서 삭제되고 G와 FA로 표시된 자료만 남게 된다.

자료 품질 관리의 한 방법으로 에너지 수지의 닫힘을 점검할 수도 있다(Aubinet *et al.*, 2000). 그러나 이러한 점검이 제대로 이루어지려면, 발원지가 서로 다른 관측 기기들로부터 생기는 샘플링 오차, 기기 자체의 오차, 일반적인 에디 공분산 계산에서 고려되지 않은 저류항과 이류항 등이 먼저 심도 있게 다루어져야 한다(Wilson *et al.*, 2002; Foken *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006).

III. 결과 및 고찰

Fig. 2는 광릉에서 관측된 플럭스(증발산, 현열, 이산화탄소)의 일변화를 품질 보증 전과 후로 나누어 비교한 것이다. 6:00~12:00 사이에 관측된 플럭스 값은 위에 기술된 방법에 의해 G를 받지 못했고(Fig. 2A, 2C, 2E), 이런 값들은 품질 관리 및 보증 과정에서 제거되었다(Fig. 2B, 2D, 2F). G로 분류되지 못한 자료 중 50~57%의 자료는 ITC 평가에서 B로, 30~40%의 자료는 2차 튀는 자료 점검에서 B로 분류되었다. 최종 자료에서 두 관측지에서의 G 등급 자료는 전체의 38~67%를 차지하였으며 광릉이 해남보다 상대적으로 낮았다(Fig. 3). B 등급의 경우, 광릉이 해남에 비해 높는데, 광릉의 B 등급 자료의 약 30%가 ITC 평가에서 B 등급으로 분류된 것이었다. 이는 복잡지형인 광릉에서 자료의 품질을 결정하는데 대기안정도가 중요한 요소임을 보여 준다.

복잡지형인 광릉에서는 심층분석(FA)이 요구되는 자료가 약 2%를 차지한다. 비교적 짧은 시간(Case1과 Case2 구간에 이산화탄소 플럭스가 크게 변화(예를 들면, 발원에서 흡원으로 변화)함을 볼 수 있다(Fig. 4A). 난류가 잘 발달되고 복사가 크게 변하지 않는 경우(Fig. 4B), 이산화탄소 플럭스의 변화는 풍향과 지형의 변화와 관련이 있다고 여겨진다. 풍향이 변하면 에디 공분산이 관측하는 발자국(footprint), 즉 플럭

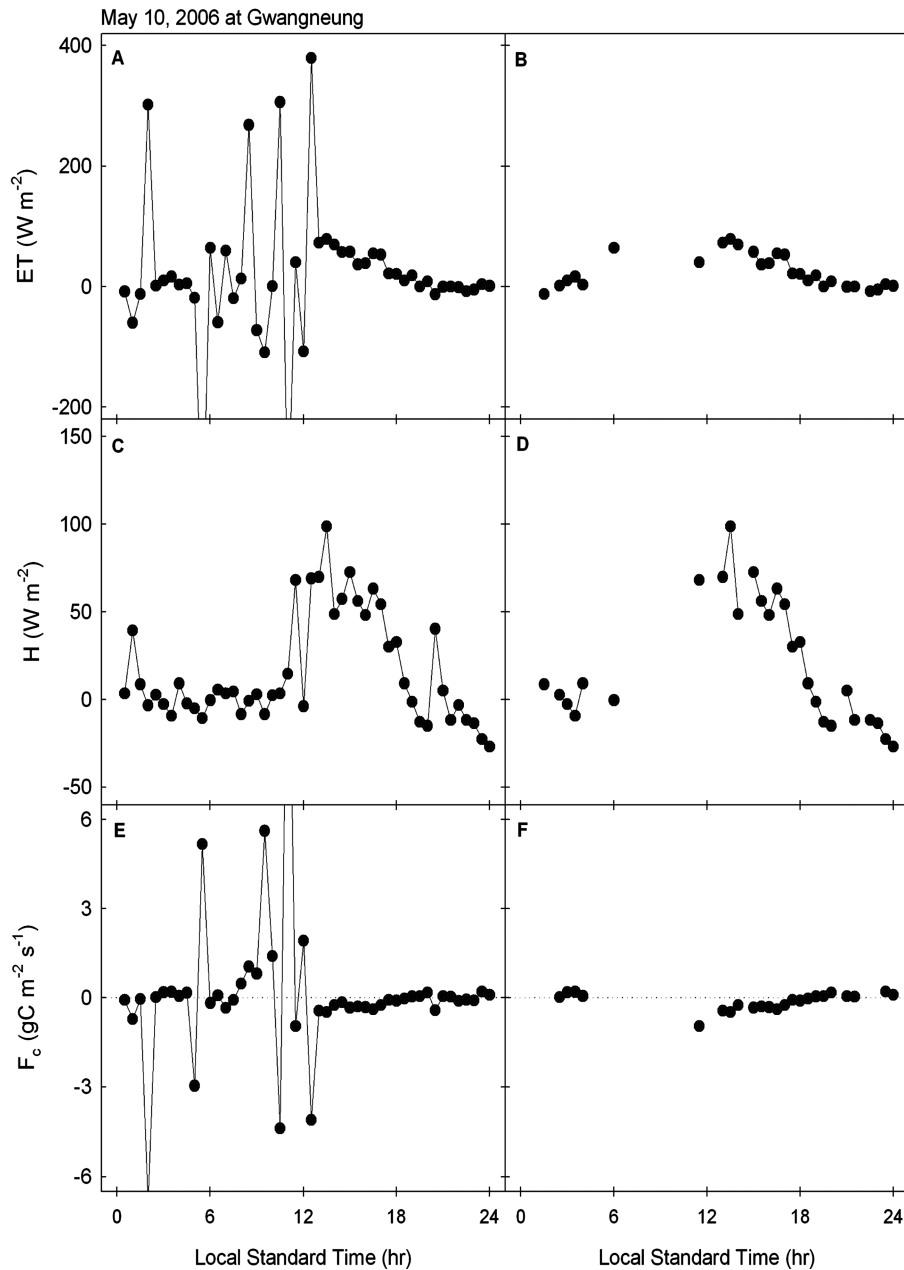


Fig. 2. Diurnal patterns of evapotranspiration (ET), sensible heat flux (H), and carbon flux (F_c) before (A, C, and E) and after (B, D, and F) the quality control on May 10, 2006 at Gwangneung.

스의 발원지가 달라지게 된다. 풍향이 90° 에서 180° 로 변할 때(Case1) 플럭스 발원지는 활엽수에서 침엽수림과 활엽수가 섞인 혼합림으로 변하게 된다. 풍향이 180° 에서 360° 로 변할 때(Case2) 플럭스 발원지는 혼합림에서 활엽수로 바뀌게 된다. 관측 타워로 불어오는 바람은 풍향이 변하면서 신축면에서 산정상에서

불어오는 바람으로 변한다. 이러한 경우, 식생과 지형의 변화로 플럭스의 수평변화(예를 들면, 이산화탄소 농도의 경우 10 ppm 차이)를 보였다. 이러한 결과는 위에서 설명한 미기상학 이론에 근거한 정량적 자료의 품질 보증과 더불어 관측지의 특성을 고려한 주관적 해석이 동시에 수반되어야 함을 제시하여 준다.

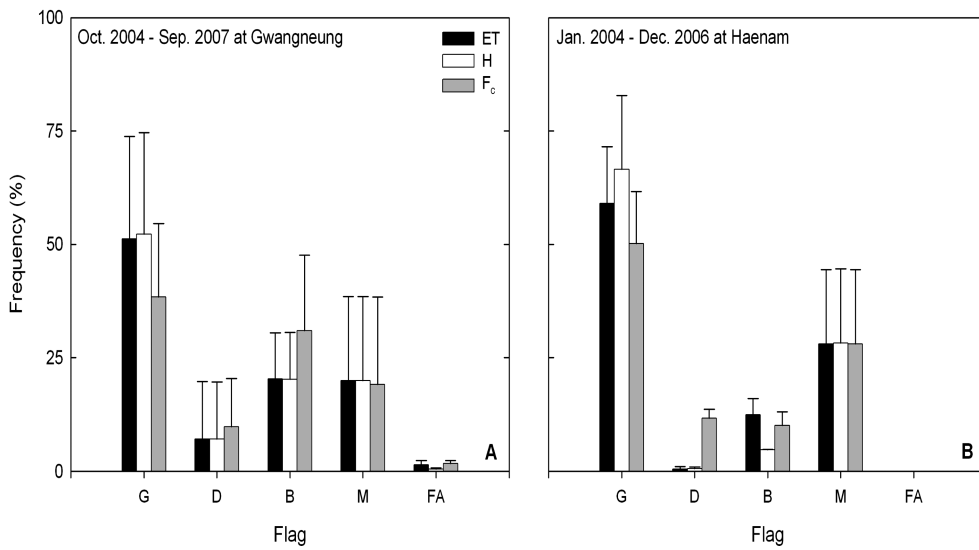


Fig. 3. Frequency of the data quality flag for evapotranspiration (ET), sensible heat flux (H), and carbon flux (F_c) after the quality control. G, D, B, M, and FA indicate good, dubious, bad, missing, and further analysis, respectively.

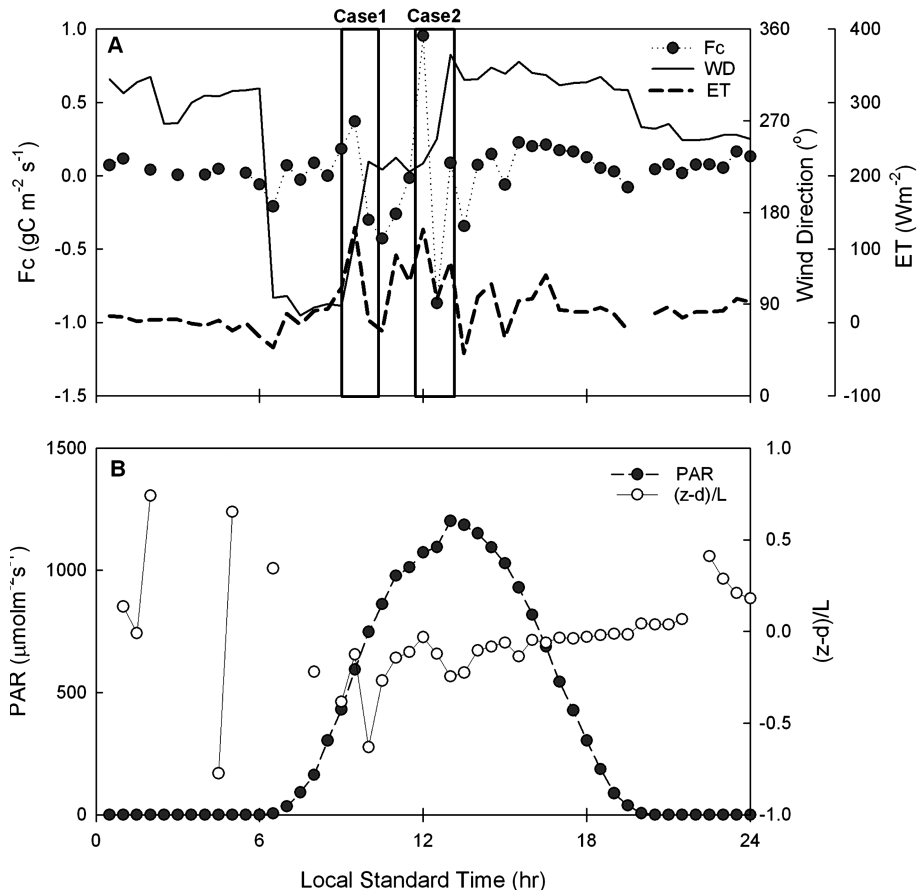


Fig. 4. Example of further analysis (FA) case in the data collected at Gwangneung in April 24, 2006. ET, F_c, WD, PAR, and (z-d)/L indicate evapotranspiration, carbon flux, wind direction, photosynthetically active radiation, and atmospheric stability, respectively.

IV. 결 론

본 연구에서는 30분 평균 에디 공분산 자료의 품질 관리와 보증 방법을 제시하였다. 복잡지형의 경우에는, 관측지의 지형과 지표피복 상태를 고려한 발원지 분석을 병행해야 함을 확인하였다(Gockede *et al.*, 2004; Rebmann *et al.*, 2005). 30분 자료를 사용하는 품질 관리는 생자료(예를 들면, 10Hz 자료)를 이용한 난류의 정상성 평가나 스펙트럼 분석을 할 수 없기 때문에 현재 30분 자료와 생자료의 품질 관리와 보증을 접목하는 방법이 진행중에 있다. 이 연구에서 사용된 품질관리 프로그램과 최종 자료는 KoFlux 웹사이트에서 이용 가능하다(<http://www.koflux.org>).

적 요

이 연구노트에서는 KoFlux 관측지인 광릉 산림과 해남 농경지에서 관측된 에디 공분산 자료의 품질을 관리하고 보증하는 방법을 소개하였다. 자료의 품질 관리는 미기상학적/통계학적 분석을 기반으로 8 단계의 과정을 거쳐 이루어졌고 자료의 품질에 따라 5 등급으로 분리되어 표시되었다. 품질관리를 위해 사용된 프로그램과 품질 보증된 최종 자료는 KoFlux 웹사이트(<http://www.koflux.org>)에서 내려 받을 수 있다.

감사의 글

이 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호:1-8-3), 한국과학재단의 지원을 받은 A3 Foresight Program 및 교육인적자원부 BK21사업의 지원으로 수행되었습니다. 논문의 질을 높여주신 두 분의 심사자들에게 감사드립니다.

REFERENCES

- Aubinet, M., A. Grelle, A. Ibrom, U. Rannik, J. Moncrieff, T. Foken, A. S. Kowalski, P. H. Martin, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Clement, J. Elbers, A. Granier, T. Grunwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini, and T. Vesala, 2000: Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research* **30**, 113-175.
- Baldocchi, D. D., B. B. Hicks, and T. P. Meyers, 1988: Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology* **69**, 1331-1340.
- Baldocchi, D. D., 2003: Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* **9**(4), 479-492.
- Choi, T., 2003: CO₂ and energy exchange over a Kwangneung broadleaf deciduous forest in a complex terrain. Ph. D. Dissertation, Yonsei University, 142pp.
- Finnigan, J. J., R. Clement, Y. Malhi, R. Leuning, and H. Cleugh, 2003: A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part 1: Averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorology* **107**, 1-48.
- Foken, Th. and B. Wichura, 1996: Tools for quality assessment of surface-based flux measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* **78**, 83-105.
- Foken, T., M. Gockede, M. Mauder, L. Mahrt, B. Amiro, and W. Munger, 2004: Post-field data quality control. *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*, X. Lee, W. Massman, and B. Law (Eds), Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 181-208.
- Foken, T., F. Wimmer, M. Mauder, C. Thomas, and C. Liebethal, 2006: Some aspects of the energy balance closure problem. *Atmospheric Chemistry and Physics* **6**, 4395-4402.
- Gockede, M., C. Rebmann, and T. Foken, 2004: Use of footprint modeling for the characterization of complex meteorological flux measurement sites. *Agricultural and Forest Meteorology* **127**, 177-188.
- Grelle, A. and G. Burba, 2007: Fine-wire thermometer to correct CO₂ fluxes by open-path analyzers for artificial density fluctuations. *Agricultural and Forest Meteorology* **147**, 48-57.
- Hong, J., H. C. Lee, J. Kim, B. Kim, C. Cho, and S. Lee, 2003: Inferring regional scale surface heat flux around FK KoFlux site: From one point tower measurement to MM5 mesoscale model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 138-149.
- Kaimal, J. C. and J. J. Finnigan, 1994: *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*, Oxford University Press, New York, 249 pp.
- Kim, J., D. Lee, J. Hong, S. Kang, S. J. Kim, S.-K. Moon, J.-H. Lim, Y. Son, J. Lee, S. Kim, N. Woo, K. Kim, B. Lee, B.-L. Lee, and S. Kim, 2006: HydroKorea and CarboKorea: cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea. *Ecological Research* **21**, 881-889, doi10.1007/s11284-006-0055-3.
- Lee, H. C., J. K. Hong, C. H., Cho, B. C. Choi, and J. Kim, 2003: Tower CO₂ measurements in farmland (Haenam/

- Korea). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(2), 61-69.
- Lee, X., 1998: On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* **91**, 39-49.
- Rebmann, C., M. Göckede, T. Foken, M. Aubinet, M. Aurela, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, A. Carrara, A. Cescatti, R. Ceulemans, R. Clement, J. A. Elbers, A. Granier, T. Grünwald, D. Guyon, K. Havránková, B. Heinesch, A. Knohl, T. Laurila, B. Longdoz, B. Marcolla, T. Markkanen, F. Miglietta, J. Moncrieff, L. Montagnani, E. Moors, M. Nardino, J.-M. Ourcival, S. Rambal, U. Rannik, E. Rotenberg, P. Sedlak, G. Unterhuber, T. Vesala, and D. Yakir, 2005: Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modeling. *Theoretical and Applied Climatology* **80**, 121-141.
- Ruppert, J., M. Mauder, C. Thomas, and J. Lüers, 2006: Innovative gapfilling strategy for annual sums of CO₂ net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* **138**, 5-18.
- Webb, E. K., G. I. Pearmann, and R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* **106**, 85-100.
- Wilczak, J. M., S. P. Oncley, and S. Stage, 2001: Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology* **99**, 127-150.
- Wilson, K., A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Ceulemans, H. Dolman, C. Field, A. Grelle, A. Ibrom, B. E. Law, A. Kowalski, R. Valentini, S. Verma, T. Meyers, J. Moncrieff, R. Monson, W. Oechel, and J. Tenhunen, 2002: Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology* **113**, 223-243.
- Wyngaard, J. C., O. R. Cote, and Y. Izumi, 1971: Local free convection, similarity, and the budgets of shear stress and heat flux. *Journal of Atmospheric Sciences* **28**, 1171-1182.
- Yuan, R., M. Kang, S. Park, J. Hong, and J. Kim, 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* **9**(2), 100-108.