

개회로 CO₂/H₂O 적외선 기체 분석기 보정 인자의 변동성과 장기 플럭스 관측에 미치는 영향

최태진¹ · 윤진일² · 임종환³ · 박은우⁴ · 김 준¹

¹연세대학교 대기과학과 & 지구환경연구소

²경희대학교 생태시스템 공학과, ³임업연구원 산림생태과

⁴서울대학교 농업과학공동기기센터

(2002년 4월 15일 접수; 2002년 6월 4일 수락)

Variability of Calibration Factors for Open-Path CO₂/H₂O Infrared Gas Analyzer and Its Effect on Long-Term Flux Measurement

Taejin Choi¹, Jin I. Yun², Jong-Hwan Lim³, Eun-Woo Park⁴ and Joon Kim¹

¹Department of Atmospheric Sciences and Global Environment Laboratory, Yonsei University,
Seoul 120-749, Korea

²Department of Ecosystem Management and Engineering, Kyung Hee University, Suwon 449-701, Korea

³Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

⁴National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University,
Suwon 441-744, Korea

(Received April 15, 2002; Accepted June 4, 2002)

ABSTRACT

Calibration experiments were executed to document pertinent calibration methods for open-path infrared gas analyzer (OP-2) in field operations and to quantify their performance characteristics in continuous long-term flux measurements. Based on our results, we concluded: (1) flow rate of 2.0 L min⁻¹ can be used for calibration instead of the recommended 0.5 L min⁻¹. Such faster flow rate brings the sampled air in the calibration hood at equilibrium within 5 min for CO₂ and 10 min for H₂O; (2) after reaching equilibrium, two-minute average sampling for related variables per each concentration may be sufficient; (3) use of four concentration is needed to derive the nonlinear calibration equation for water vapor with 1% uncertainty of flux measurement; and (4) the resultant calibration interval for OP-2 for both CO₂ and H₂O is approximately one month.

Key words : long-term flux measurement, open-path infrared gas analyzer, calibration factors

I. 서 론

2002년 1월 구축된 코리아 플럭스 네트워크 (즉, KoFlux)의 목적 중의 하나는 국내 및 아시아 지역의 주요 생태계에서 이산화탄소 및 에너지의 교환량을 정량화 하고, 그 교환 과정을 이해하는 것이다(<http://www.koflux.org>). 이를 위해 국내외의 주요 생태계에서 이산화탄소 및 에너지 플럭스 관측이 진행 및 준

비되고 있다(Kim *et al.*, 2002). 이러한 생태계에서 앞으로 2년 동안 연속적으로 고품질의 플럭스가 측정 및 데이터 베이스화 된다면 Fluxnet에 공식 관측지로의 등재가 가능하며, 이것은 국내에서 개발 및 개선 중인 생권 또는 중규모 및 지역 규모 모형의 검증에 필요한 실측 자료를 다양한 지역으로부터 확보할 수 있음을 의미한다. 그리고, 유엔 기후변화협약과 교토 의정서에 대응하기 위한 정부의 전략적 도구로 심본

활용될 수 있고, 잠정적인 기후 변화에 따른 국내의 생태계 반응 예측을 위한 모형의 검증 및 개선에 중요하게 사용될 수 있다. 이런 점에서 장기적이면서 연속적으로 고품질의 이산화탄소 및 에너지 플럭스를 관측하는 것은 매우 중요하다.

에디 공분산 방법으로 이산화탄소 및 잠열 플럭스 측정을 위해 국내에 도입된 고속반응 이산화탄소/수증기 측정 장비는 개회로 적외선 기체 분석기(OP-2, Data Design Group; LI7500, Licor Inc.)와 폐회로 적외선 기체 분석기(LI6262, Licor Inc.)가 있다. 각각의 기기는 비용과 사용 목적에 따라 장·단점이 있다(예, Leuning and Moncrief, 1990; 홍 등, 2000). 성공적인 이산화탄소 및 에너지 플럭스 관측을 위해서는 사용되는 기기가 환경의 변화에 정확하게 반응하는 것이 가장 기본적이면서도 중요하다. 따라서 기기의 반응을 확인할 수 있는 기기 보정은 필수적이다. 에디 공분산 시스템에서 함께 이용되는 삼차원 초음파 풍속계의 경우와는 달리 스칼라 기기는 측정 환경(온도, 습도, 압력)과 기기의 사용 기간에 따라 수행 특성이 크게 변할 수 있기 때문에 기기 사용 기간에 따른 주기적인 보정이 필요하다(예, 박 등, 2000). LI-7500의 경우, 주기적(예, 일주일~한달, Licor, 2000)으로 영점 보정과 범위 보정이 필요한 반면에, OP-2의 경우 구체적으로 알려진 보정 주기는 없다. 따라서 사용자가 주기적인 보정을 수행하여 그 주기를 결정해야 한다. 한편, 이산화탄소 분석기의 경우 수증기도 동시에 측정하도록 되어 있으며, 이산화탄소 플럭스를 정확하게 측정하기 위해서는 대기로의 현열과 잠열의 동시 수송에 대한 보정이 필요하다(Webb *et al.*, 1980). 기기 제조 과정에서 보정 식을 이끌어 내기 위해 표준 기체 주입 속도를 0.5 L min^{-1} 으로 하고 이산화탄소의 경우 세 농도, 수증기의 경우 7~9개의 농도를 이용하였다. 제시된 표준 기체 주입속도로 보정할 경우 이산화탄소의 경우 한 농도 당 10분 이상, 수증기의 경우 20~30분 이상이 소요되었다. 특히, 수증기의 경우, 보정 식을 이끌어 내기 위해 사용했던 7~9개의 농도를 고려하면 기기의 예열(warming up) 시간을 제외하고도 총 보정 시간은 3~4시간 이상 소요된다. 이러한 보정 실험은 일반적으로 관측 현장에서 수행되므로 효율적인 현장 관측을 위해서는 보정 시간의 단축이 절대적으로 요구된다. 특히 교류 전원을 사용할 수 없는 경우라면 배터리 등의 제한된 전원을 이용하여 OP-2,

집복기, 수증기 보정을 위한 이슬점 생성기 등을 가동시켜야 하기 때문에 보정 시간은 더욱 제한적이다. 짧은 보정 시간은 자료의 연속성을 위해서도 중요하다. 위와 같은 관점에서 보정은 매뉴얼에 제시된 방법보다는 보정 시간을 획기적으로 줄일 수 있는 대안이 필요하다. 본 연구에서는 1) 보정 시간을 단축시킬 수 있는 실질적인 대안을 제시하고, 2) 사용 기간에 따른 보정 계수의 변동성을 확인하여 최소한의 보정으로 고품질의 자료를 연속적으로 생산하는데 그 목적이 있다. 끝으로, 보정된 OP-2를 이용하여 실제 야외 실험에서의 적용된 예에 대해 논의하고자 한다.

II. 작동 원리 및 보정식의 도출

2.1. 작동원리

OP-2의 모습은 Fig. 1에 있으며, 기본적인 특성은 Table 1에 요약되어 있다. 농도 측정을 위해 OP-2는 이산화탄소와 수증기가 잘 흡수하는 파장인 $4.3 \mu\text{m}$ 과 $2.6 \mu\text{m}$ 와 두 스칼라에 의해 흡수되지 않는 $3.9 \mu\text{m}$ 의 적외선을 이용한다. 각 파장은 이산화탄소 및 수증기의 파장대가 서로 겹치지 않도록 선택되어 교차 민감도에 의한 플럭스 손실을 무시할 수 있다(예, 최 등, 1999; Kohsiek, 2000). $3.9 \mu\text{m}$ 의 적외선의 역할은 다음과 같이 이해될 수 있다. 발신부에서 송신된 적외선이 수감부에 도달하는 동안 적외선 강도에 영향을 미치는 것으로 경로 내의 스칼라의 밀도, 발신부에서의 적외선의 강도, 광학창의 투명도의 저하 등을 들 수 있다. 단일 파장을 사용할 경우 적외선 강도가 약해지거나 광

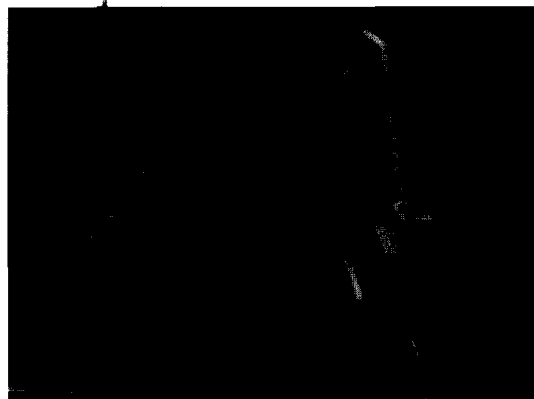


Fig. 1. Eddy covariance measurement system: OP-2(left) and three-dimensional sonic anemometer(right).

Table 1. Physical characteristics of OP-2

Physical path length (Optical path length)	Absorption wavelength bands	Output voltage	Cross sensitivity	Power requirements
0.2 m (0.8 m)	CO ₂ : 4.3 μm H ₂ O: 2.6 μm	± 5 V	Negligible	12 VDC/1.4 A (i.e. 17 W)

학 창이 먼지 등으로 인해 더러워질 경우 수감부에 도달하는 적외선의 강도도 약해져 스칼라 농도는 과대평가될 수 있다. 이런 효과는 스칼라에 흡수되지 않는 파장의 적외선을 사용하고 흡수 파장과 흡수되지 않는 파장을 이용해서 그 비율을 취한다면 아래의 예와 같이 농도 변동 이외의 적외선 감소 효과는 제거될 수 있다.

$$\text{Voltage} = \Delta\text{CO}_2 / \Delta\text{Ref} \quad (1)$$

여기서 ΔCO_2 는 발신부에서의 적외선 강도와 수감부에서의 적외선의 강도와의 차이로 여기에는 이산화탄소 농도의 변동, 발신부 적외선 강도의 변동, 광학 창 투명도의 저하 등의 효과가 들어가 있으며, ΔRef 는 기준 파장 적외선의 양쪽에서의 차이로 이산화탄소 농도 효과를 제외한 나머지 효과를 포함하고 있다. 이 비율은 기기 자체의 온도 변동(4.1절 참조)에 의한 적외선의 변동 효과를 고려하여 전압 값으로 산출되는데 이산화탄소의 농도가 크면 신호가 커진다. 수증기에 대한 측정 원리도 이와 같다. 기기의 물리적 경로 길이는 0.2 m이나 측정 분해능을 높이기 위해 반사 거울이 사용되어 실제 경로 거리는 0.8 m로 길어진다. 즉, 발신부에서 송신된 적외선은 세번 반사된 후 수신부에 도달하는데 이때 총 이동 거리(즉, 광학적 경로 거리)는 0.8 m가 된다. 발신부와 수감부가 같은 곳에 위치해 있기 때문에 배경 대기 적외 복사로 인한 측정 오차도 무시할 수 있다(e.g. Auble and Meyer, 1992). 기기를 운영하기 위해 소모되는 전력 요구량은 17 W로, 초음파 풍속계나 크립톤 습도계(KH20, Campbell Scientific Inc.)의 전력 요구량보다 3~4배 이상 크다.

2.2. 보정식의 도출

OP-2에서 산출되는 이산화탄소와 수증기의 신호는 전압의 형태로 산출된다. 산출된 전압에 적절한 보정 계수를 취하면 물리 단위로 바꿀 수 있다. 관측하고자 하는 환경의 이산화탄소 농도(예, 250-450 ppm) 및 수증기 농도(예, 2~30 mb)에 해당하는 표준 기체를 사용하여 농도에 대한 전압 값을 대응시킨다. 일반적

으로 이산화탄소는 1차 선형 보정식을, 수증기는 2차 비선형 보정식이 적용되어 전압이 물리 단위로 환산된다. 이 관계식은 대기 중에 예상되는 농도 변화가 작을 경우 선형 관계식이, 변화가 클 경우 비선형 2차 관계식이 적용됨을 의미한다. 따라서 지면에서 높은 고도까지 이산화탄소 농도를 측정하는 경우처럼 이산화탄소의 농도 변화 폭이 큰 경우라면 이산화탄소 보정식도 2차 비선형 보정식이 적용되어야 한다.

보정을 하기 위해 흡입구와 배기구가 있는 전용 보정 후드를 기기에 씌운다. 그러면 기기는 흡입구와 배기구를 제외하면 외부와 차단되게 된다. 흡입구로 흘러 들어간 기체가 보정 후드 내부에서 평형을 이루면 그 때의 농도가 전압 값에 대응된다. 보정 후드 내부의 기체 농도를 결정하는 방법은 두 가지가 있다. 하나는 알고 있는 표준 기체를 주입시키는 방법이고, 다른 하나는 임의의 혼합 기체를 주입시킨 후 나오는 기체의 농도를 측정하는 방법이 있다. 본 연구에서는 전자의 방법을 채택하였다. 이산화탄소의 경우 ppm 단위의 기체를 사용하고, 수증기의 경우 이슬점 생성기(LI610, Licor Inc.)로부터 생성되는 mb 단위의 기체를 사용한다. 임의의 농도의 기체가 흘러 들어가면 보정 후드 내의 변하는 농도에 대해 OP-2가 반응한다. OP-2가 산출하는 전압 값이 변하는 이유는 보정 후드 내의 기체가 평형이 안된 상태이기 때문이다. 평형이 안 되는 경우는 새로운 기체가 보정 후드를 완전히 채우지 못한 경우이거나 내부 온도가 변하는 경우이다. 내부 온도가 변하는 경우는 기기를 가동시켰을 때 기기 자체가 발산하는 열(적외선을 만들어 내는 내부 전구가 가열됨)과 외부 온도의 변화로 인한 열적 차이가 발생하여, 전도에 의해 열이 전달되기 때문이다. 상태 방정식에 근거하면, 내부 온도가 올라(내려)가면 내부 압력은 높아(낮아)지고, 밀도는 낮아(높아)진다. 결과적으로 전압 값은 감소(증가)를 하게 된다.

한편, 밀도 단위의 이산화탄소 및 수증기 플럭스를 계산하기 위해서는 OP-2로부터 산출되는 전압 값을 밀도 단위로 바꿔야 한다. 보정 후드 내의 기체가 평

형을 이룬 상태라면 ppm 단위의 표준 이산화탄소 기체와 mb 단위(이슬점 생성기 사용 시 이슬점 온도로 부터 환산됨)의 수증기는 아래의 식에 의해 밀도 단위로의 전환이 가능하다.

$$mgm^{-3} = 1.964 \times PPM \times \left[\frac{273.16}{(T+273.16)} \right] \times \frac{P}{101.3} \quad (2)$$

여기서 T 는 보정 후드 내의 표준 기체의 온도($^{\circ}C$), 그리고 P 는 대기압(kPa)이다. mb 단위의 수증기는 아래의 식에 의해 밀도 단위로 바꿀 수 있다.

$$gm^{-3} = 0.622 \times 10^{-5} \times mb / [(T+273.16) \times R_d]$$

여기서 R_d 는 건조 표준 기체에 대한 보편 기체상수이다. 기기의 매뉴얼에 의하면 보정 기체의 주입 속도는 $0.5 L min^{-1}$ 이다. 이 주입 속도로 보정하면 보정 후드 내의 압력은 대기압과 같다고 가정할 수 있다. 따라서 식 (2)에서 기압은 대기압을 사용한다. 이슬점 생성기의 경우, $0.5 L min^{-1}$ 보다 빠른 속도로 내보내진 표준 기체를 다른 기기로 측정할 경우 농도가 과소 평가된다(Licor, 1991). 따라서 표준 기체 주입 속도는 $0.5 L min^{-1}$ 가 권장되지만 이에 대한 내용은 결과에서 다시 논의하기로 한다.

III. 방법 및 재료

실험 기간 및 관련된 사항은 Table 2에 요약되어 있다. 이산화탄소 및 수증기 보정에 이용된 장비는 (1) 표준 이산화탄소 기체, (2) 이슬점 온도 생성기(LI610, Licor Inc.), (3) 집록기(CR23X, Campbell Scientific Inc.), (4) 휴대용 컴퓨터, (5) 열전대 그리고 (6) 튜브(Bev-a-line)이다. 이산화탄소 통(또는 이슬점 생성기)와

OP-2 보정 후드의 입구를 튜브로 연결하고, 보정 후드의 출구에도 튜브를 연결한다. 보정 후드 내의 온도를 측정하기 위해 보정 후드의 출구 쪽 튜브 안에 열전대를 설치하여 온도를 측정하고, 이 온도가 보정 후드 내의 온도와 같다고 가정하였다. 이산화탄소(또는 수증기)의 전압, 보정 기체 온도의 신호는 10 Hz로 측정되어, 1분 평균된 값이 기록되도록 하였다. 1분 평균된 전압과 표준 가스 농도와의 회귀 관계로부터 보정 계수가 산출되었다.

한편, 보정에는 정확한 농도의 표준 기체가 필요하다. 본 연구에서 사용된 이산화탄소 및 수증기에 대한 정확성은 아래에 요약되어 있다.

3.1. 표준 이산화탄소 기체

정확한 표준 기체는 비싸기 때문에 일반적으로 상업용 이산화탄소 기체를 이용한다. 대체로 이런 표준 기체의 농도의 오차 범위는 $\pm 5\%$ 이다. 하지만 드문 경우, 제시된 농도와 실제 농도간의 차이가 큰 경우가 있다. 상업용 이산화탄소의 정확한 농도를 알아내기 위해 휴대용 광합성 측정기(LI6400, Licor Inc.)를 안면도 배경 대기 관측소에 있는 세계 기상기구 권장 표준 기체로 보정한 후 상업용 이산화탄소 기체의 농도를 정확히 평가하였다. 이 과정에서 확보된 상업용 이산화탄소 기체를 실험의 표준 기체로 사용하였다.

3.2. 이슬점 생성기의 보정

이슬점 생성기로부터 생성된 습윤 공기가 보정에 사용되었다. 이 기기는 앞에서 언급한 휴대용 광합성 측정기와 함께 2001년 5월 서울대학교 농업생명과학대 공동기기 센터(NICEM)에서 표준 기기와 비교실험을 통하여 정상적인 작동 상태가 확인되었다.

Table 2. Summary of OP-2 calibration experiments

Place	Period	Serial number	Concentration of CO ₂ and H ₂ O	Flow rate (L min ⁻¹)
Outdoor	6. 12~6. 22	2012	CO ₂ : 297, 400, 488 (ppm)	0.5
Laboratory	8. 4~8. 17	2012	CO ₂ : 298, 391, 487 (ppm)	0.5, 1.0, 2.0
		2016	H ₂ O: 11~25 (mb)	
Laboratory	8. 21~8. 24	2012	CO ₂ : 298, 391, 447, 487(ppm)	0.5, 1.0, 2.0
		2016	H ₂ O: 11~25 (mb)	
Field	9. 7~12. 3	2016	CO ₂ : 298, 391, 447 (ppm)	2.0
		2008	H ₂ O: 6~18 (mb)	
Laboratory	12.3~3. 20	2008	CO ₂ : 298, 350, 391, 447 (ppm)	2.0
			H ₂ O: 6~10 (mb)	

증가가 수량의 증가에 크게 영향을 주었고, 1999년에는 1수립수의 증가가 수량증가에 크게 기여하였다.

다음으로, 지난 27년간 올보리 품종의 수량이 평균 (1974~2000년)보다 헥타르(ha)당 1톤 이상 증가한 연도(1979, 1989, 1993, 1995, 1999년) 중에 수량증가에 기여한 주요 수량구성요소가 다른 연도(1989: 천립중, 1995: 수수와 1수립수, 1999: 1수립수)의 각 생육단계의 지속일수와 생육단계별 주요기상의 변화 및 수량구성요소에 대해 살펴보았다(Table 3). 1995년에는 SI 기간(파종기~파종후 10일)에 기온이 높게 경과하였으며, 월동전에 파종기부터 생육정지기까지의 기간(SI

~SII)이 길었다. 또한, 이 기간의 강수량과 일조시간도 많아 종자의 지상부 출현기간이 짧았고, 발아율도 높아져 월동전에 분얼수가 증가하였고, 짧은 월동기간과 평균보다 긴 분얼기간(SIV)으로 m² 당 수수의 확보가 증가한 것으로 판단된다. 반면에, 1999년에는 유효기간(SII)이 짧고 월동기간(SIII)이 상대적으로 길어서 m² 당 수수의 확보는 감소하였으나, 평균보다 길었던 SIV 기간과 이 기간의 적당한 강수량이 1수립수를 증가시켰으며, 1989년에는 등숙기간 동안 낮게 경과한 온도가 천립중을 높였을 것으로 해석된다.

다음으로, 27년 평균보다 헥타르(ha)당 1톤 이상 감

Table 4. Parameters relevant to the yield of barley cultivar Olbory for two years of bad harvest and 27 years(1974~2000) mean.

Growth stage	Parameter	1977	1980	1974~2000 mean
SI : sowing date to 10 days after sowing date	Period (day)	10	10	10
	Mean air temperature (°C)	14.9	14.1	14.8
	Precipitation (mm)	19.3	0	22.3
	Sunshine hour (hr)	66.8	58.3	60.3
	Saturation deficit (hPa)	3.3	3.6	4.3
	Potential evapotranspiration (mm)	15.3	15.0	18.0
SII 10 days after sowing date to end of growing season of year of sowing	Period (day)	30	28	39
	Mean air temperature (°C)	8.4	12.7	9.3
	Precipitation (mm)	67.4	18.6	64.8
	Sunshine hour (hr)	180.6	197.1	217.9
	Saturation deficit (hPa)	2.9	3.7	3.1
	Potential evapotranspiration (mm)	51.2	48.4	64.3
SIII : winter rest	Period (day)	121	125	105
	Mean air temperature (°C)	-2.8	-1.5	-1.2
	Precipitation (mm)	68.2	87.4	83.1
	Sunshine hour (hr)	696.5	736.5	582.4
	Saturation deficit (hPa)	1.8	1.7	1.8
	Potential evapotranspiration (mm)	156.6	150.8	131.5
SIV beginning of growing season to heading date	Period (day)	61	57	57
	Mean air temperature (°C)	11.0	9.3	9.4
	Precipitation (mm)	300.5	274.4	128.4
	Sunshine hour (hr)	449.7	370.5	393.5
	Saturation deficit (hPa)	3.6	3.7	4.1
	Potential evapotranspiration (mm)	109.2	111.3	117.9
SV : heading date to maturity date	Period (day)	36	37	36
	Mean air temperature (°C)	19.3	18.6	17.9
	Precipitation (mm)	71.3	173.2	113.1
	Sunshine hour (hr)	296.9	278.6	260.1
	Saturation deficit (hPa)	6.1	5.6	6.2
	Potential evapotranspiration (mm)	75.5	78.8	81.0
Yield component	No. of spikes per m ²	307	304	609
	No. of grains per spike	52	61	49
	1000-grain weight (g)	39.2	35.1	33.2
	Yield per ha (ton)	2.13	1.47	3.71

Table 3. Difference of calibration coefficients and flux with averaging time(OP-2016, flow rate: 0.5 L / min., $gm^3 = a+bV+cV^2$)

Date	Calibration coefficients (gm^3)	Averaging time (minutes)				Difference of fluxes
		5	4	3	2	
Aug. 6, 2001	a	13.411	13.410	13.409	13.409	< 1%
	b	4.959	4.959	4.960	4.960	
	c	0.405	0.406	0.405	0.405	

서 야외에서 관측된 수증기의 전압 자료에 각각의 보정 계수를 적용시켜 계산하였다. 그 결과 평균 시간의 차이(2~5분)에 따른 플럭스의 차이는 1% 이내였다. 이산화탄소의 경우도 유사한 결과를 얻었다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 보정 후드 내의 표준 기체가 평형에 도달했다고 판별하는 시점이 사람마다 조금씩 다르다 하더라도 그로 인한 차이가 작음을 보여준다. 따라서 2분의 평균 시간은 충분하며, 보정이 많이 수행되는 곳이 온도가 통제가 안 되는 야외라는 점을 감안하면 평균 시간을 짧게 하려는 목적과 잘 부합된다.

4.3. 표준 기체의 주입 속도에 따른 차이

표준 기체의 주입 속도를 0.5 L min⁻¹으로 하면 보정 후드 내의 압력이 대기압과 같다고 가정할 수 있다. 그런데 이 속도로 표준 기체를 주입할 경우 이산화탄소는 10분 이상, 수증기는 약 20~30분 이상 소요되었다. 수증기의 평형 도달 시간이 상대적으로 긴 것은 수증기가 보정 후드 내의 벽에 접촉되기 때문이다(참고로 이 효과를 줄이기 위해 후드 안을 왁스로 칠하는 연구진들도 있음). 그리고 수증기의 경우, 이슬점 생성기의 농도를 변화시킬 경우 새로운 농도의 수증기를 만들어 내는데 2°C 당 약 1분 30초~2분이 걸린다. 따라서 보정 시간 단축을 위해서는 표준 기체 주입 속도를 빠르게 할 필요가 있다. Fig. 4-1과 4-2는 이산화탄소와 수증기의 표준 기체 주입 속도 차이(0.5, 1.0, 2.0 L min⁻¹)에 따른 보정 계수의 변화이다. ppm 단위의 표준 이산화탄소 기체를 밀도 단위로 전환하기 위해 주입 속도와 관계없이 보정 후드 내부의 압력이 대기압과 같다고 가정하였다. mb 단위의 수증기 농도 역시 이슬점 생성기가 생산하는 농도와 OP-2가 측정하는 농도가 같다고 가정하였다. 보정 결과, 표준 기체 주입 속도에 따른 보정식은 거의 변화가 없었다. 이산화탄소의 경우 기울기의 변화는 1% 이내였으며, 수증기의 경우도 구해진 보정 계수를 이용하여 플럭스

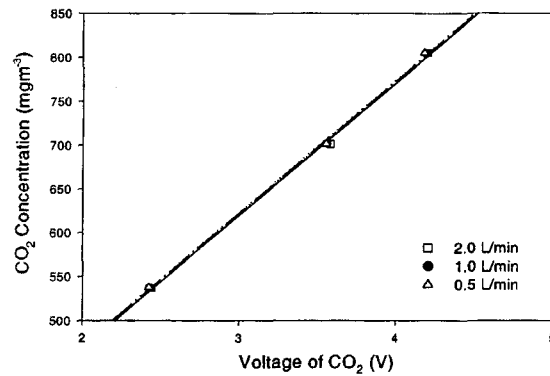


Fig. 4-1. Linear regressions for standard CO₂ gas with different flow rates.

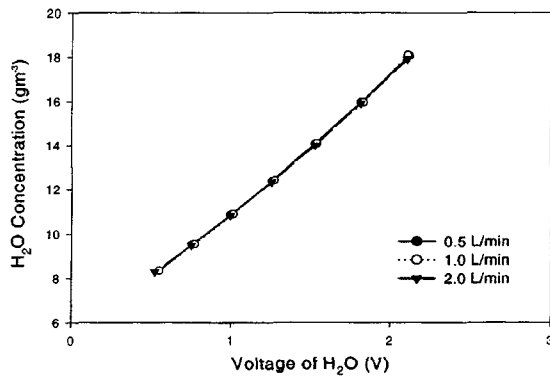


Fig. 4-2. Non-linear regressions for standard H₂O gas with different flow rates.

를 계산한 결과 플럭스의 차이는 1% 이내였다. 다만, 표준 기체 주입 속도가 달라지면 같은 농도에 대한 전압 값이 커졌다. 이것은 보정 후드 내의 표준 기체의 운동 에너지가 커져 내부 압력이 증가하고, 이때 내부 온도 변화가 일정하거나 상대적으로 그 변화가 작다고 가정하면 밀도도 증가하기 때문이다. 하지만 각 농도에 대해 표준 기체 주입 속도에 따른 전압차이는 약 5 mV이며, 또한 각 농도마다 그 차이가 거의 일정하기 때문에 결과적으로 이산화탄소의 기울기나 수증

기의 1차 및 2차 보정 계수의 차이는 없다. 이것은 에디 공분산 방법이 절대 농도가 아닌 절대 농도로부터의 변동분으로 플럭스를 계산하는 방법인 것을 감안하면 받아들일 수 있는 결과이다. 따라서 표준 기체 주입 속도를 2.0 L min⁻¹ 하여 보정 시간을 단축시킬 수 있다. 그러면 표준 기체의 주입 속도를 더 빠르게 할 수는 없을까? 이산화탄소의 경우 2.0 L min⁻¹로 주입하면 4~5분이면 평형에 도달한다. 수증기의 경우 약 10분이면 평형에 도달하는데 여기에는 이슬점 생성기의 농도 적응 시간이 포함되어 있다. 이슬점 생성기의 경우 표준 기체 주입 속도를 최대 2.5 L min⁻¹으로 할 수 있다. 하지만 2.0 L min⁻¹ 이상으로 수증기를 생산하는 경우 수증기가 건조 공기와 충분히 혼합이 일어나지 않을 수 있다(Licor, 1991).

4.4. 농도 수에 따른 보정 계수의 차이

이산화탄소에 대한 보정 계수를 산출하기 위해서는 최소한 세 점의 농도가 필요하다. 반면에 2차 함수의 보정식을 갖는 수증기의 경우 최소 네 지점의 농도가 필요하다. 수증기에 대한 공장 보정은 8~10개의 농도에 대해 이루어졌다. 보정 농도수가 많다는 것은 많은 보정 시간을 많이 요구함을 의미한다. 따라서 최소한의 보정 농도 수를 파악하는 것도 보정 시간 단축에 중요한 역할을 한다. 이를 위해 표준 기체 주입 속도가 2.0 L min⁻¹ 였던 두 번의 보정 실험의 결과를 이용하였다. 우선 21, 19, 17, 15, 13, 11, 9°C의 7개의 이슬점 온도를 사용한 경우와 그 중에서 21, 17, 13, 9°C의 네 개만을 사용한 경우의 보정 계수의 변동성 및 플럭스의 차이를 분석하였다. 결과적으로 플럭스의 차이는 1% 이내로 나타나 수증기 보정에 필요한 농도 수는 네 지점이면 충분하였다.

4.5. 표준 기체 농도의 선택

앞에서 이산화탄소에 대한 보정식은 1차 선형 관계식이 적용됨을 언급하였다. 그러면 어떤 농도의 표준 기체를 사용해야 할까? 간단히 말하면, 측정하고자 하는 대기의 이산화탄소 농도와 그 농도 변화의 범위를 고려한 표준 기체를 사용하면 된다. 여기서는 보정 기체의 농도 범위가 다를 경우, 플럭스에 미치는 영향이 얼마나 되는가를 논의하고자 한다. Table 2에서 세번째 실험의 경우, 사용된 표준 기체의 농도는 298, 391, 447 그리고 487 ppm 이다. 매 실험마다 네 농도에

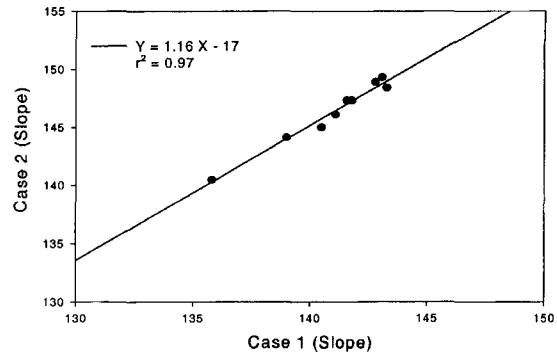


Fig. 5. Relation of slopes with different concentration ranges of standard CO₂ gas.

대해 보정을 한 뒤, 두 가지 경우 [Case 1(298, 391, 447 ppm)과 Case 2(298, 391, 487 ppm)]에 대해 기울기를 산출하였다. Fig. 5는 두 경우에 대한 기울기를 비교한 것이다. Case 2의 기울기가 Case 1의 기울기보다 약 4% 컸다. 반면에 실험 기간 동안 Case 1과 Case 2 기울기의 시간 변화에 따른 차이는 3% 이내였다. 즉, 보정 기체의 선택에 따라 기울기의 차이는 나타나지만 그 차이는 일정하였다. 대기 중의 이산화탄소 농도 및 그 변동 범위, 그리고 보정식의 선형 관계를 고려하면 CASE 1의 경우로 보정하는 것이 타당하다.

한편, 수증기에 대해서는 이슬점 온도가 4~21°C(즉, 6~18 gm⁻³) 사이에서 보정이 수행되었다. 보정에 사용된 이슬점 농도의 범위가 플럭스에 미치는 영향을 살펴보기 위해 OP-2016의 9월 6일과 9월 29일 보정 결과를 이용하였다(실험실 내에서의 보정은 실험 당시의 기온이 비슷하여 비슷한 범위의 이슬점 온도에 대해 보정되었음). 야외 관측이 시작되기 전인 9월 5일에 21, 17, 13, 9°C의 이슬점 온도에 대해 보정하였고, 관측이 진행된 후 약 24일 후인 9월 29일에 16, 12, 8, 4°C의 이슬점 온도에 대해 보정하였다. 두 날에 대해 보정에 사용된 이슬점 농도가 다른 것은 관측기간 동안 대기 중 수증기 농도가 감소된 것을 고려하였기 때문이다. 보정 농도의 범위 차이에 따른 플럭스의 차이는 2% 이내였다.

4.6. 보정과 관련된 주의 사항

수증기 농도가 커지면 산출되는 전압값이 작아지는 크립톤 습도계(KH20, Campbell Scientific Inc.)와는

달리 대기 중의 기체의 농도가 높아지면 산출되는 OP-2의 전압값은 비례하여 높아진다. 일반적으로 실내는 사람들의 호흡으로 이산화탄소의 농도가 매우 높다. 따라서 OP-2의 이산화탄소의 전압값은 5 V를 훨씬 넘어가게 된다. 그런데 이산화탄소의 신호를 집록하는 집록기가 받아들이는 전압은 대체로 ± 5 V 사이이다. 따라서 수증기 보정을 할 경우 고농도의 이산화탄소가 이슬점 생성기(이 기기는 외부의 공기를 빨아들인 후 보유하고 있는 증류수로부터 수증기를 섞어 이슬점 온도에 맞는 수증기압의 표준 기체를 내 보냄)를 통해 보정 후드 안으로 흘러 들어가게 된다. 그럴 경우 고농도의 이산화탄소에 해당되는 높은 전압이 집록기에 흘러 들어가 집록기는 오작동을 일으키게 된다. 예를 들면, CR23X 집록기를 사용한 본 실험에서 우선 열전대의 온도 및 집록기의 기준 온도가 비정상적으로 높아졌으며(예, $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$ 이상), 집록기의 전원 상태를 보여주는 값도 매우 불안정한 값을 보였다. 그런 후 모든 신호가 -99999가 되었다. 따라서 수증기 보정을 이슬점 생성기를 이용하여 하는 경우 이산화탄소 신호선을 집록기에 연결하지 않는 것이 권장된다. OP-2의 이러한 특성은 야외에서 OP-2의 광학 창을 세척하는 경우도 해당된다. 창을 세척하기 위해 손을 집어넣을 경우 역시 신호는 +5 V를 넘어가게 되고 같은 문제가 발생할 수 있다.

4.7. 잠열 플럭스의 비교

Fig. 6은 9월 7일부터 30일까지 광릉 활엽수림에서 OP-2016과 크립톤 습도계를 이용하여 측정된 잠열 플

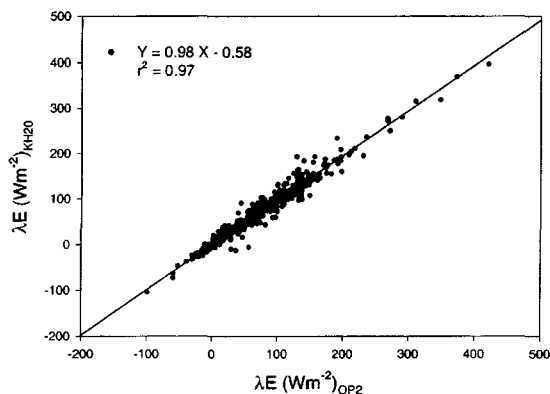


Fig. 6. Comparison of latent heat flux using OP-2 with that using KH20.

럭스를 비교한 것이다. 실험 전에 두 스칼라 기기에 대한 보정을 수행하였으며, OP-2의 경우 9월 29일에 보정을 수행하였다. OP-2 보정 결과 보정 계수의 변동에 의한 플럭스의 차이는 약 2% 였기 때문에, 보정 오차를 고려하면 관측기간 동안 보정 계수는 거의 일정한 것으로 볼 수 있다. 두 기기로부터 측정된 잠열 플럭스는 2% 오차 이내에서 잘 일치하여 보정이 잘 수행되었음을 알 수 있다.

4.8. 이산화탄소 플럭스 예비 자료

Fig. 7은 같은 관측지에서 2001년 9월 13일 OP-2를 이용한 에디 공분산 방법으로 관측된 일 중 이산화탄소 플럭스의 변동이다. 이산화탄소 플럭스는 밀도 변동 보정이 적용되었다(Webb *et al.*, 1984). 그럼에서 “-” 값은 대기 중의 이산화탄소가 식물 군락으로 수송되는 것(즉, 광합성)을 가리키며, “+” 값은 식물 군락으로부터 이산화탄소가 대기로 수송되는 것(즉, 호흡)을 가리킨다. 에디 공분산 관측에 의한 이산화탄소 플럭스는 뚜렷한 일 변동을 보여준다. 하루 동안 식물 군락과 대기간에 주고받은 순 교환량은 관측된 플럭스의 일 적산을 통해 평가할 수 있으며, 장기간 적산할 경우 식물 군락이 대기 이산화탄소에 대해 발원 또는 흡원인지를 평가할 수 있다. 하지만 에디 공분산 방법만으로 이산화탄소 교환량을 정량화 하기에 이상적이지 못한 현재의 관측지의 경우, 연직 에디 공분산항 이외의 저류항이나 이류항 등이 중요해질 수 있다(예, Massman and Lee, 2002). 따라서 장기적으로 식물 군락, 특히 산림과 대기간의 이산화탄소 교환량을 정량화 하기 위해서는 이 항들에 대한 추가적인 관측이 수행되어야 한다.

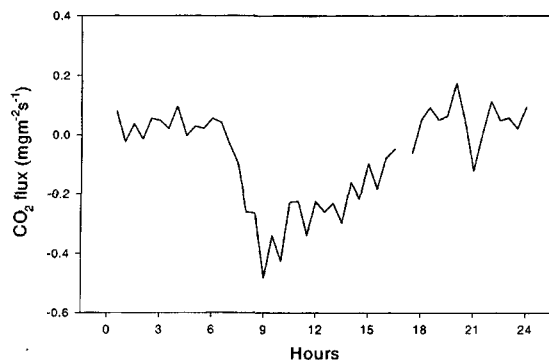


Fig. 7. Diurnal variation of CO_2 flux at a broadleaf deciduous forest in Kwangneung research forest.

4.9. 사용 기간에 따른 보정 인자의 변동성

여기서는 보정 실험과 실제 야외실험에서 사용된 세대의 OP-2(2008, 2012, 2016)로부터 각각의 보정 계수의 특성을 살펴보고, 사용 시간에 따른 보정 계수의 변동성 그리고 공장 보정 계수와와의 차이를 살펴보고자 한다. 특히, 장기 사용된 OP-2008의 보정 계수의 변동성으로부터 보정 주기를 제안하고자 한다.

실험실 내의 OP-2의 보정 실험에서, 6~10일의 연속 운영 동안 이산화탄소의 기울기의 변화는 2012의 경우 3%, 2016의 경우 1% 이내였다. OP-2016의 수증기 보정의 경우 비록 보정 계수는 변하였지만 플럭스에 미치는 영향은 1% 이내였다(Table 2). 이 실험 결과는 6~10일 동안 보정 계수의 변동은 무시할 수 있음을 가리킨다. 따라서 OP-2의 보정 주기를 잠정적으로 10일로 결정하여 장기 관측에 사용된 OP-2008을 보정하였다. Table 4에 OP-2008의 장기 사용에 따른 보정 계수의 변동성과 그로 인한 플럭스의 차이가 요약되어 있다. 사용된 기간은 2001년 10월 6일부터 2002년 1월 16일까지 세 달 이상이였으며, 이 기간 동안 관측 전, 관측 시점으로부터 10일, 19일, 30일, 47일, 54일, 75일, 98일 경과 후 보정을 수행하였다. 10월 6일 보정 결과를 기준으로 살펴보면, 이산화탄소(기울기)와 수증기 플럭스의 차이는 양쪽 모두 7% 이

내였으며, 한 달 동안의 보정 계수의 변동성은 무시할 수 있음을 보여준다. 이 결과는 다른 야외 실험의 결과와도 잘 일치한다. OP-2016의 경우 일본 북해도 토마코마이 산림에서 수행된 한국과 일본의 이산화탄소 플럭스 측정 시스템의 비교 실험(Kim *et al.*, 2001)에서 약 15일간 사용되었다. 실험 전과 도중 그리고 실험 후 보정을 수행하였는데 이산화탄소 기울기의 변화는 1% 이내였다. Auble and Meyer(1992)는 OP-2의 prototype을 800시간 이상 연속 가동하여 그 수행 특성의 안정성을 확인한 바 있다.

한편, 본 보정 실험에서의 실험 결과는 공장 보정 실험 결과와 차이가 있음을 확인하였다.

이산화탄소의 경우, 2012는 첫번째 실험과 두번째 실험의 기울기(Table 2)는 공장 보정과 비교하면 기울기는 10%가, 2008의 경우, 공장 보정과 비교하면 6% 컸다. 수증기 플럭스의 경우, 보정 실험에서 결정된 계수를 사용한 경우가 공장 보정 계수를 사용한 경우보다 OP-2016은 18%, OP-2008은 20% 컸다. 이런 결과는 보정 방법에 따라 다소 결과가 차이가 있을 수 있거나 기기를 일정 기간 사용하지 않으면 보정 계수가 변할 수 있음을 보여 주기 때문에 관측 전에 반드시 보정이 수행되어야 함을 의미한다. 보정 계수 변동의 원인이 무엇인지 밝혀내기 위해서는 추가적인

Table 4. Variability of slopes and fluxes with operating time of OP-2008 (Flow rate: 2 L min⁻¹, Two-minute averaged)

Date	CO ₂ (mg/m ³)		H ₂ O (g/m ³)			Operated time (Days)	Difference of latent heat flux
	Slope	Offset	a	b	c		
Oct. 6, 2001	122.48	399.03	7.191	3.539	0.391	·	0(Reference)
Oct. 20	122.56	365.33	7.689	3.544	0.339	10	+2%
Oct. 29	122.54	372.93	7.223	3.532	0.351	19	+1%
Nov. 9	125.85	374.72	7.136	3.214	0.288	30	-7%
Nov. 16	123.79	374.07	7.285	3.210	0.240	47	-6%
Dec. 3	128.03	366.41	7.141	3.272	0.338	54	-7%
Dec. 24	129.48	356.96	7.072	3.192	0.257	75	-6%
Jan. 16, 2002	131.26	369.22	7.049	3.448	0.328	98	0%
Replacement of OP2008 with OP2016 (Jan. 25, 2002)							
Jan. 31	130.35	340.05	6.984	3.296	0.353	112	-6%
Replacement of OP2016 with OP2008 (Feb. 1, 2002)							
Feb. 8	131.02	335.02	7.121	3.369	0.438	7	-8%
Replacement of OP2016 with OP2008 (Feb. 22, 2002)							
Mar. 20	125.74	366.73	7.249	3.504	0.422	26	-2%

연구가 필요하지만, 그 보다는 적절한 주기마다 보정을 수행하여 기기의 수행 특성을 확인하는 것이 더 중요한 것으로 사료된다. 본 연구에서는 한 달에 한번의 보정을 권장한다.

V. 요약 및 결론

장기 이산화탄소 플럭스 측정을 위해 국내에 도입된 개회로 CO₂/H₂O 적외선 기체 분석기 중의 하나인 OP-2에 대한 보정 실험을 수행하였다. 실험 목적은 보정 시간을 줄이는 실질적인 대안을 제시하고, 기기의 사용 기간에 따른 보정 계수의 변동성을 확인하는 것이다. 특히, 수증기 보정의 경우, OP-2의 사용 설명서에서 권장된 0.5 L min⁻¹의 표준 기체 주입 속도와 기기에서 산출되는 전압과 보정 기기 간의 관계식을 구하기 위해 필요한 8~10개의 농도의 사용은 3~4시간 이상의 보정 시간을 요구한다. 3대의 OP-2를 이용한 실험실 및 실제 야외 관측 동안의 보정 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 기기의 안정된 반응을 위해서는 약 100분의 예열 시간이 필요하다.
2. 보정용 표준 기체의 주입 속도는 2 L min⁻¹이 가능하다.
3. 한 농도에 대한 평균 시간은 2분 평균이면 충분하다.
4. 수증기 보정의 경우 네 개의 농도 수로 2차 비선형 보정식 도출이 가능하다.

이와 같은 관측 결과를 이용하면, 이산화탄소와 수증기 보정에 소요되는 시간은 예열 시간을 포함하여 약 2시간 30분이 소요된다.

5. 이산화탄소의 경우 보정에 사용되는 표준 기체의 농도 범위에 따라 기율기의 차이가 생길 수 있으나, 수증기의 경우 농도 범위에 따른 보정 계수의 차이는 무시할 수 있다.
6. 세 달 이상 연속 사용에 따른 이산화탄소와 수증기 보정 계수의 변동성은 모두 7% 이내였으며, 한 달 동안의 보정 계수의 변동성은 무시할 수 있다.
7. 보정에 의한 각 기기의 보정 계수는 공장 보정 계수 값과 다를 수 있기 때문에 관측 전 반드시 보정이 수행되어야 한다.

본 연구는 관측지 방문 시 보정 시간을 줄여 자료

의 연속성을 높이고, 보정과 관련된 관측지의 방문을 최소화하면서 고품질의 이산화탄소 및 수증기 플럭스 자료를 생산하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 환경부의 2001년도 “차세대핵심환경기술 개발사업”과 한국 과학 재단이 지원하는 목적기초 (1999-2-221-002-5), 임업 연구원 자체 사업(산림생물 다양성 및 생태계 변화연구)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이산화탄소 기체 보정 실험에 도움을 준 기상청 배경 대기 관측소의 최재천 연구관과 김정식 연구사에게 감사의 말을 전합니다. 그리고 이슬점 생성기를 대여해 준 건국대 송기철 교수님께 감사의 말을 전합니다. 끝으로 실험에 참여해 준 채남이, 박운호, 이병렬, 김보라, 명광민에게도 고마움을 전합니다.

인용문헌

- 박운호, 김준, 이희춘, 임종환, 권원태, 2000: 증발산 장기 관측에 따른 크립톤 습도계의 흡수 계수의 변화와 이슬점 생성기를 이용한 기기 보정, 한국농림기상학회지, 2(3), 75-79.
- 최태진, 김준, 윤진일, 1999: 농림생태계와 대기간의 상호 작용 연구를 위한 에디 공분산 방법의 사용에 관하여, 한국농림기상학회지, 1(1), 60-71.
- 홍진규, 김준, 최태진, 윤진일, B. Tanner, 2000: 폐회로 습도계를 이용한 수증기 플럭스 관측시 관의 감쇠 효과에 관하여, 한국농림기상학회지, 2(3), 80-86.
- Auble, D. and T.P. Meyer, 1992: An open path, fast response infrared absorption gas analyzer for H₂O and CO₂, *Boundary-Layer Meteorology*, 59, 243-256.
- Data design group, 2000: OP-2 Open-Path CO₂/H₂O Analyser.
- Kim, J., Y. Harazono, S. Yamamoto, A. Miyata, N. Saigusa and T. Choi, 2001: Flux measurements in a Complex Landscape: How reliable and Consistent Are Fluxes from Single Eddy Covariance Tower? *Proceedings of the International Workshop on GAME-AAN/Radiation*, Phuket, Thailand, 7-9 March.
- Kim, J., W. Kim, C. Cho, B. Lee, D. Lee, E. Park, J. Lee, J. Lim, J. Oh, J. Yun and C. Rho, 2002: KOFLUX: A New Network of Reference Sites for AsiaFlux/FLUXNET and CAMP/CEOP. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation*, Jeju, Korea, 9-11 January.
- Kohsiek, W., 2000: Water Vapor Cross-Sensitivity of Open Path CO₂/H₂O Sensors, *Journal of Atmospheric and*

- Oceanic Technology*, **17**, 299-311.
- Leuning, R. and J. Moncrief, 1990: Eddy covariance CO₂ flux measurements using open-path and closed-path CO₂ analyzer-Corrections for analyzer water vapor sensitivity and damping of fluctuations in air sampling tubes. *Boundary-Layer Meteorology*, **53**, 63-76.
- Licor, 1991: LI610 Portable Dew Point Generator: Instruction Manual.
- Licor, 2001: LI7500 Open-Path CO₂/H₂O Analyser: Instruction Manual.
- Massman, W.J. and X. Lee, 2002: Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long term studies of carbon and energy exchange, *Agricultural and Forest Meteorology*, in press.
- Webb, E.K., G.I. Perman and R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water transfer. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*, **106**, 85-100.