

## 증발산 장기 관측에 따른 크립톤 습도계의 흡수 계수의 변화와 이슬점 생성기를 이용한 기기 보정

박윤호<sup>1</sup> · 김 준<sup>1,2</sup> · 이희춘<sup>3</sup> · 임종환<sup>4</sup> · 권원태<sup>5</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 대기과학과/대기모형연구실, <sup>3</sup>기상청,

<sup>4</sup>임업연구원 산림 생태과, <sup>5</sup>기상연구소 기후연구실

(2000년 7월 26일 접수)

## Changes in Absorption Coefficient of Krypton Hygrometer in Long-term Monitoring of Evapotranspiration and Its Calibration Using a Dew Point Generator

Yunho Park<sup>1</sup>, Joon Kim<sup>1,2</sup>, Heechoon Lee<sup>3</sup>, Jonghwan Lim<sup>4</sup> and Wontae Kwon<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Atmospheric Sciences, <sup>2</sup>National Laboratory of Atmospheric Modeling Research, Yonsei University

<sup>3</sup>Korea Meteorological Administration, <sup>4</sup>Forest Ecology, KFRI

<sup>5</sup>Korea Meteorological Research Institute, Climate Research Laboratory

(Manuscript received July 26, 2000)

### ABSTRACT

Calibrations of fast-response krypton hygrometers were carried out using a dew-point hygrometer to investigate the changes in their absorption coefficients due to long-term field operation. Absorption coefficients changed proportionally with the number of hours of field operation. The increase in absorption coefficient indicates that the water vapor flux, calculated with the original absorption coefficient, would underestimate the true flux in the field. To minimize the uncertainty in quantifying evapotranspiration and surface energy budget studies, frequent calibrations (for example, every 1500 hours of field operation) of krypton hygrometer are recommended.

**Key words :** Calibration, Hygrometer, Dew point generator, Evapotranspiration

### I. 서 론

최근에 들어서 국내에서도 지표 잠열 플럭스나 증발산을 측정하기 위해 에디 공분산 방법을 많이 활용하고 있다(Choi *et al.*, 1999; 류상범과 김영아, 2000). 이 시스템의 경우, 연직 속도의 변동분을 측정하는 일차원(또는 삼차원) 초음파 풍속계와 수증기 농도의 변동분을 측정하는 고속반응 습도계가 기본적으로 필요하다. 일반적으로, 수증기 농도를 측정하기 위해 개회로(open-path) 크립톤 습도계(Krypton hygrometer, Model, KH20, Campbell Scientific, Inc.)가 많이 이용되고 있다. 크립톤 습도계는 기기에 내장된 크립톤

발원을 소모하여 수증기의 농도를 측정하게 되는데, 기기를 장기간 사용할 경우 크립톤의 소모로 인해 농도 계산에 이용되는 흡수 계수가 변하게 된다. 흡수 계수의 변동은 잠열 플럭스 계산에 직접적으로 영향을 미치므로 정확한 잠열 플럭스를 구하기 위해서는 사용 기간에 따른 흡수 계수를 재 산출하여 플럭스 계산에 고려해주어야 한다. 국내의 경우, 크립톤 습도계를 보정하려면 미국의 제작사로 돌려보내야 하는데 그 비용이 매우 비싸다. 반면에, 이슬점 생성기(Dew point generator, Model, LI-610, LICOR Inc.)와 알루미늄으로 제작된 보정 상자를 이용할 경우 적은 비용으로 비교적 간단히, 보정을 반복 수행하여, 정확한 흡수

계수를 구할 수 있다. 본 연구에서는 이슬점 생성기를 이용하여 크립톤 습도계를 보정하는 방법을 소개한다. 또한, 정확한 잠열 플럭스의 계산을 위해서, 흡수 계수의 변화가 플럭스 계산에 미치는 영향을 정량화하고, 이에 따른 적절한 습도계의 보정 주기에 대해 논의하고자 한다.

## II. 이론적 배경

크립톤 습도계는 고속반응(반응시간 0.1초 이내) 기기이며, 대기 중에 존재하는 수증기의 밀도( $gm^{-3}$ )의 변화를 측정할 수 있다. 기기에 내장된 크립톤을 이용하여 송신부에서 수신부(경로 길이, 약 15 mm)로 파장이 123.58 nm와 116.47 nm인 복사를 내보낸다(Kaimal and Finnigan, 1994). 송신부에서 방출된 이 파장의 복사는 수증기 및 산소에 의해 흡수된 후 수신부에 도달하는데, 간단히 수증기에 의해 흡수만을 고려할 경우, 크립톤 습도계의 출력 전압과 수증기 밀도와의 관계는 아래와 같이 표현된다(Campbell Scientific Inc., 1989).

$$V = V_0 \exp(xK_w \rho_v) \quad (1)$$

여기서,  $V_0$ 는 수증기에 의해 흡수가 전혀 없을 경우 크립톤 습도계의 출력 전압,  $V$ 는 흡수가 있는 경우의 출력 전압이다.  $x$ ,  $K_w$ ,  $\rho_v$ 는 각각 경로 길이(cm), 흡수계수( $m^3 g^{-1} cm^{-1}$ ), 그리고 수증기 밀도( $gm^{-3}$ )를 나타낸다. 식(1)에 자연로그를 취하면

$$\ln V = (xK_w) \rho_v + \ln V_0 \quad (2)$$

식 (2)로부터  $\rho_v$ 와  $\ln V$ 에 대한 일차 회귀 방정식을 통해 기울기 ( $xK_w$ )와 절편( $V_0$ )을 구할 수 있다 (Campbell Scientific, Inc., 1989). 경로 길이는 정해져 있기 때문에 기울기로부터  $K_w$ 가 얻어진다. 본 보정 실험에서는 이슬점 생성기를 이용하여, 알고 있는 입자의 농도의 수증기에 대한 출력 전압 값을 측정하여 흡수 계수를 구하였다. 한편, 크립톤 습도계로 출력되는 전압과 연직 속도의 변동분의 공분산을 이용하면 아래의 식을 통해 잠열 플럭스를 산출할 수 있다.

$$\lambda E = -\lambda \frac{w' \ln m V'}{x K_w} \quad (3)$$

식 (3)은  $K_w$ 가 잠열 플럭스를 계산하는데 직접적으로 관여함을 나타내며, 습도계를 장기간 사용할 경우,  $K_w$ 의 값이 점차적으로 변하는 것으로 알려져 있다. 만약,  $K_w$ 가 10% 감소하게 되면, 원래의 흡수 계수 값을 이용하여 계산한 잠열 플럭스는 실제 값보다 10% 과소 평가된다. 예를 들면, 관개가 잘된 논인 경우, 대개 한 낮의 잠열 플럭스가 약  $300-400 Wm^{-2}$ 이므로, 흡수 계수의 변화를 고려하지 않을 경우 관측된 잠열 플럭스는 약  $30-40 Wm^{-2}$ 가 과소 평가된다. 이러한 오차는 증발산이 활발히 일어날 때 관측되는 현열 플럭스와 거의 같은 크기이므로 에너지의 배분을 나타내는 보웬비(현열 플럭스와 잠열 플럭스의 비)는 과대 평가됨에 주의하여야 한다.

## III. 실험 과정

보정 실험을 위해 사용 기간이 각각 다른 3개의 크립톤 습도계를 사용하였다. 이슬점 생성기, 양쪽으로 구멍을 뚫은 알루미늄 보정 상자, 미세선 열전대, Bev-a-line 튜브를 사용하여 Fig. 1과 같이 배치하고, 자료의 저장과 처리는 집록기(CR 21X, Campbell scientific Inc.)와 586급 노트북 컴퓨터를 사용하였다. 보정을 위해 크립톤 습도계의 송신 및 감지부의 창 표면을 증류수와 면봉을 이용하여 세정하였고, 두 창 사이를 알루미늄 보정 상자로 감싸 고정시켰다. 외부 공기와 차단되도록 보정 상자와 크립톤 습도계의 접촉

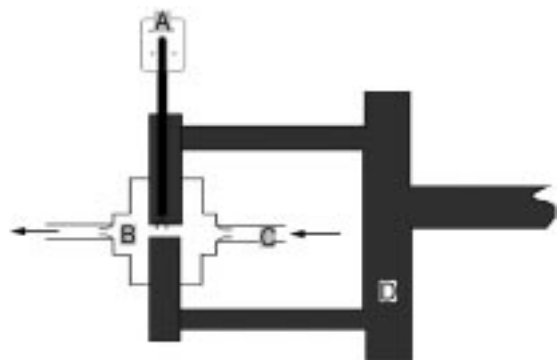


Fig. 1. Schematic of calibration system. A) fine-wire thermocouple, B) calibration box, C) Bev-a-line, D) krypton hygrometer.

부분을 실리콘을 이용하여 밀봉하였다. 보정 상자 양쪽에 뚫어 놓은 구멍에 Bev-a-line 관을 각각 연결한 후, 한쪽은 이슬점 생성기에 연결하고 다른 한 쪽은 열어 놓아 상자 내부 공기가 빠져나가도록 하였다. 이슬점 생성기로부터 보정 상자를 통과하는 공기의 양은 약  $500\text{cc min}^{-1}$ 이 되도록 속도를 조절하였다. 크립톤 습도계의 출력전압 측정을 위해 집록기와 컴퓨터를 연결하여, 습도와 온도의 변화를 실시간으로 관찰하였다. 절대 습도는 약  $5\text{ gm}^{-3}$ 에서  $10\text{ gm}^{-3}$  사이의 범위가 되도록 이슬점 온도를 조절하였고, 자료의 집록 속도는  $1\text{ Hz}$ 였으며, 매 1분마다 출력 전압이 집록기에 저장되도록 하였다. 절대 습도를 변화시킬 때에는, 컴퓨터 화면을 통해 보정 상자 안의 공기가 새로운 수증기 밀도를 갖는 공기로 완전히 교체되어 출력 전압이 일정해짐을 확인하였다. 안정된 출력 값이 지속된 3분 동안의 자료를 평균하여, 보정 상자 내의 온도와 이슬점 온도 자료를 사용하여 상자 내의 절대 습도를 각각 계산하였다.

IV. 결과 및 논의

Fig. 2는 일련 번호가 1259인 크립톤 습도계(이하: KH20-1259)에 대한 보정 결과를 나타낸다. KH20-1259는 1997년 8월 제작사에서 보정( $K_w = -0.172$ )된 후 두 번의 실험(경기도 병점 및 강화도 하리 논에서의 잠열 플럭스 측정 실험)에 사용되어 2개월 이상(약

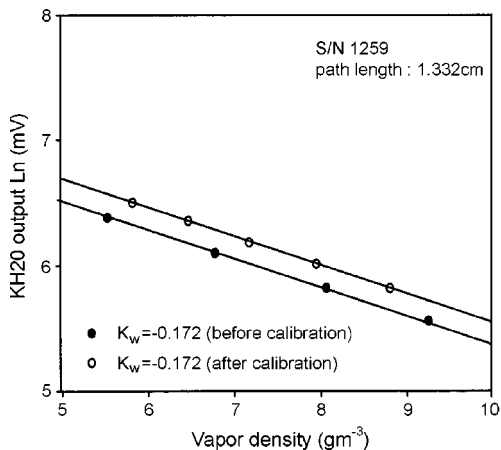


Fig. 2. Relationship between vapor density and voltage output for KH20-1259.

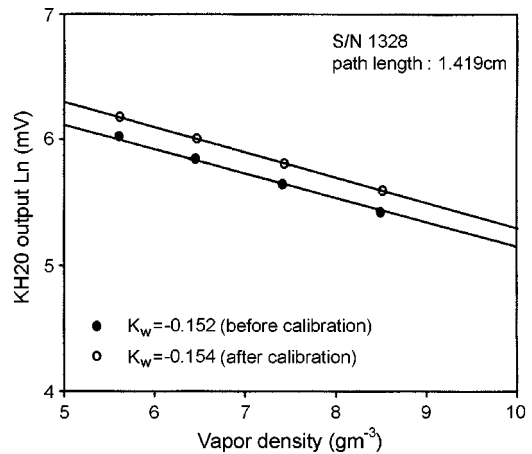


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for KH20-1328.

1500 시간) 사용되었다. 보정 실험으로부터 얻은 흡수 계수,  $K_w = -0.172$ 로서 보정 전의 값과 일치하였다. Fig. 3은 KH20-1328에 대한 보정 결과이다. KH20-1328은 경기도 광릉수목원 내의 임업 연구원의 플럭스 관측 타워에서 플럭스 측정을 위해 사용되었는데 사용 기간은 KH20-1259와 비슷하였다. 실험 결과, KH20-1328의 보정된  $K_w = -0.154$ 는 제작사의 사용전 보정 계수( $K_w = -0.152$ )보다 그 절대값이 약 1.3% 증가하였다.

Fig. 4는 KH20-1342에 대한 보정 결과이다. KH20-1342는 광릉수목원의 기상 연구소 타워에서 1999년 6월부터 2000년 4월까지 10개월(약 7,200 시간)의 장

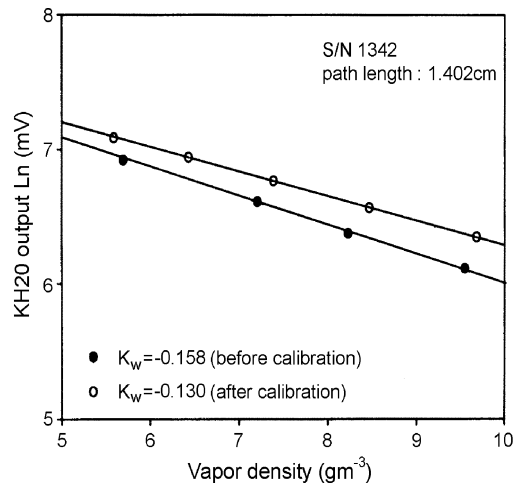


Fig. 4. Same as Fig. 2 except for KH20-1342.

기 연속 관측에 사용되었다. 제작사에서 보정한 사용 전 흡수계수( $K_w = -0.158$ )에 비해 보정 실험에서 구한 새로운 흡수계수( $K_w = -0.130$ )는 약 17.7%의 차이를 보였다. 이 실험 결과들로부터 습도계를 단기간 사용한 경우(약 2개월 이내) 흡수 계수의 변동은 대략 1% 내외이어서 증발산 관측에 미치는 그 변화 효과를 무시할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 장기간 사용할 경우, 흡수계수의 변화는 무시할 수 없을 정도로 컸으며, 그 변화에 비례해서 증발산은 과소 평가되게 된다. 따라서, 정확한 지표 에너지 및 물 수지 연구를 위해서는 흡수 계수에 대한 정기적인 보정이 필수적이다. 적어도 3개월(약 2,000 시간)에 한번씩은 보정하여서 사용 기간과 흡수계수와의 관계를 정량화 할 필요가 있다. 그 관계가 거의 선형적이기 때문에 내삽에 의해 흡수계수의 변동에 따른 잠열 플럭스의 보정은 할 수 있다.

보정 실험 결과를 살펴보면, 흡수계수의 기온기뿐만 아니라 절편 값도 수시로 변하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 절편 값의 변화는 증발산 계산에 영향을 미치지 않는다. 왜냐하면 에디 공분산 방법에 의한 플럭스 측정은 평균값으로부터의 편차를 이용하기 때문에 절편 값의 상대적으로 느린 점차적인 변화는 30분을 평균시간으로 하는 플럭스 계산에 영향을 미치지 않는다(식 3 참조). 그러나, 이러한 절편 값의 변화는 크립톤 습도계가 수증기압의 절대값 관측, 특히 장기 관측에는 적절하지 못함을 암시한다. 한편, Fig. 5는 Fig. 2에 사용된 KH20-1259의 보정과 같은 실험이었

으나, 이슬점 생성기 내의 이슬점 온도가 주변 온도보다 높아져서 이슬점 생성기로부터 나온 공기가 관과 보정 상자를 지나는 동안 이슬이 맺힌 경우의 보정 결과를 나타낸다. 실험 중 관에 이슬이 맺히는 것을 눈으로 확인할 수 있었는데 Fig. 2의 결과와 비교해 볼 때 보정 계수가 매우 많이 달라짐을 알 수 있다. 따라서 높은 이슬점 온도에서 실험을 수행할 경우, 실험 장소의 온도가 신중히 고려되어야 한다.

## V. 요약 및 결론

이슬점 생성기를 이용하여 사용 기간이 각기 다른 크립톤 습도계들의 보정을 수행하였다. 보정 실험은 비용이 상대적으로 저렴하고, 소요시간은 기기 당 약 4-6시간 정도였다. 새로이 보정된 흡수 계수와 제작사의 사용 전 흡수 계수를 비교하였다. 실험 결과에 의하면, 사용시간이 1,500시간 이내인 KH20-1259와 KH20-1328의 경우, 흡수계수의 변화는 1% 내외였으나, 7,000시간 이상 사용된 KH20-1342의 경우 약 18%의 감소를 보였다. 이러한 흡수계수의 감소는 플럭스 계산에 직접적으로 영향을 주기 때문에 잠열 플럭스를 과소 평가하게 된다. 정확한 증발산 산출과 에너지 수지 연구를 위해서는, 약 2,000시간(연속 관측의 경우 약 3개월)마다 주기적인 보정을 실시하여 흡수계수의 변화를 플럭스 계산에 고려해 주어야 한다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-221-002-5)의 지원을 받아 수행하였습니다. 이 연구에 사용된 KH20-1259는 과학기술부 국가지정연구실 사업(차세대 수치모형 개발), KH20-1328은 임업연구원 자체 사업(산림-생물다양성 및 생태계 변화연구), KH20-1342는 과학기술부의 중점 국가 연구개발 사업(자연재해 방재 기술 개발)의 지원을 각각 받았으며, 이희춘은 Brain Korea 21의 지원을 받았습니다.

## 인용문헌

류상범, 김영아, 2000: 광릉수목원에서의 증발산량 변화 :

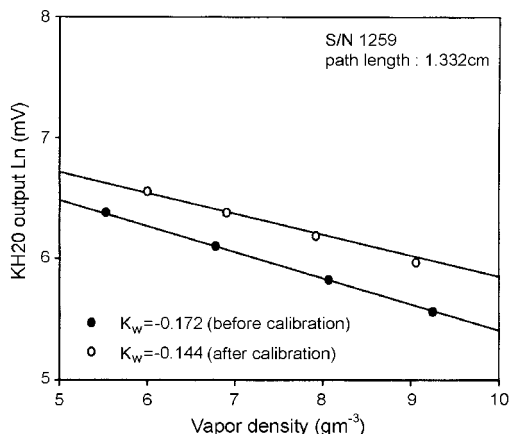


Fig. 5. Same as Fig. 2 except for under higher dew-point temperature than ambient temperature.

가을에서 초겨울까지. 한국 기상학회지 **36**, 1, 43-50.  
Campbell Scientific, Inc. 1989: Instruction manual KH20  
Krypton Hygrometer Revision: 11/89.  
Choi, T., J. Kim, and J. Yun, 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, 1, 60-71  
Kaimal, J. C. and J. J. Finnigan, 1994: Atmospheric Boun-  
dary Layer Flows: *Their Structure and Measurement*.  
Oxford University Press, 215-227.