

정규기상관측자료를 이용한 주간 현열 플럭스 추정

이 중 범 · 김 용 국 · 박 철 용
강원대학교 환경학과
(1999년 5월 10일 접수)

Estimation of Daytime Sensible Heat Flux using Routine Meteorological Data

Chong-Bum Lee, Yong-Goog Kim, and Chol-Yong Park

Dept of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea
(Manuscript received 10 May, 1999)

The purpose of the present study is to develop the estimation scheme for sensible heat flux by semi-empirical approach using routine meteorological data such as solar radiation and air temperature. To compare observed sensible heat flux with estimated sensible heat flux, the sensible heat fluxes were measured by three dimensional sonic anemometer-thermometer. The field observation was performed during 1 year from December 1, 1995 to November 30, 1996 on a rice paddy field in Chuncheon basin. The heat fluxes were measured at a heights of 5m and mean meteorological variables were obtained at two levels, 2.5m(or 1.5m) and 10m. Since condition of rice paddy field such as, wetness of the field, roughness length, vary widely, we divided annual data to 5 periods. Comparing with two sensible heat fluxes, the results showed that the correlation coefficients were more than 0.86. Thus, we can conclude that the estimation method of sensible heat fluxes using routine meteorological data is practical and reliable enough.

Key words sensible heat flux, routine meteorological data, 3-D sonic anemometer-thermometer

1. 서 론

주간에 지표면에서의 현열 플럭스는 지표면과 대기의 온도차이에 의해서 발생한다. 실제로 대기경계층에서의 온도는 고도에 따라 변화하고 연직 온도기울기는 보통 감소한다. 대기와 지표의 경계면에서 열전달은 분자교환을 통한 전도에 의해서 이루어지고 그보다 수 mm 위에서는 대기중의 난류의 유동에 의한 대류에 의해서 이루어진다. 현열 플럭스는 보통 지표면이 대기보다 따뜻한 주간에는 지표면에서 대기 중으로, 야간에는 그 반대가 된다.

지표면에 흡수되는 태양복사 에너지의 일부는 현열의 형태로, 일부는 지표에 포함된 수분 증발에 관계하여 잠열의 형태로 공기 중으로 전달되고, 그 나머지는 지중열의 형태로 토양 속으로 전달된다. 이 과정은 다음과 같은 열평형 방정식으로 표현 할 수 있다.

$$R_n = H + LE + G \quad (1)$$

여기서 R_n 은 순복사량, H 는 현열 플럭스, LE 는 잠열플럭스, G 는 지중열플럭스이다. 전형적으로 주간에는 H , LE 및 G 는 모두 양의 값을 갖게 된다. 이러한 지표면 열평형 방정식을 구성하고 있는 요소들의 변화는 토양수분, 식물, 토양의 특성, 지형, 날씨, 계절 등 많은 요

인에 의해서 변화될 수 있다.

현열 플럭스의 실제 측정을 위해서는 난류의 변동량을 직접 측정할 수 있는 관측장비가 필요하다. 초음파풍속은 도계는 난류의 변동량을 직접 측정할 수 있다는 장점은 있으나 관측장비가 고가이고 야외에서 장기간 관리 및 유지하기 어려운 단점이 있다. 이 때문에 두 고도 이상의 풍속, 기온 등 평균 기상자료의 연직분포로부터 구하는 경도법(gradient method)이나 지표면에서의 열수지식을 기초로 하여 계산하는 열수지적 방법이 흔히 이용된다.

본 연구에서는 춘천시 근교의 평탄한 농경지에 기상탑을 설치하고 3차원 초음파풍속은도계를 이용하여 장기간 현열 플럭스를 측정하였다. 또한 일기상관측소에서 관측되고 있는 기상자료 중 현열 플럭스와 밀접한 관계가 있는 일사량 및 기온 자료를 측정하여 주간 현열 플럭스를 추정하고 실제 측정된 자료와 비교함으로써 현열 플럭스 추정방법의 유용성을 평가하고자 한다.

2. 방 법

2.1. 기상측정

춘천은 해발고도가 100m이고 약 300~400m의 낮은 산들로 둘러싸여 있는 전형적인 분지지역이다. 본 연구

를 위해서 설치한 기상탑의 위치는 Fig 1과 같이 평탄한 농경지를 이루고 있는 춘천분지의 중앙부이며 약 2km 거리에는 의압호가 위치하고 있다

기상탑의 구조는 Fig. 2와 같으며 25m 높이에서는 풍속, 일사량이 측정되고 10m에서는 풍향, 풍속, 상대습도가 측정된다. 또한 기온은 1.5m, 10m에서 각각 측정되도록 하였다. 각 센서로부터 측정된 신호는 펄스나 저항, 전압의 신호형태로 나오게 되며, 이 신호는 자동수록장치(CR-10, 미국 Campbell사)에서 디지털의 형태로 변화되어 지정된 시간마다 각 측정값들의 평균 및 표준편차등이 계산되어 저장된다. 자동수록장치에 저장되는 자료는 표본채취시각이 1초이며 매 1초간의 자료는 평균화시간 10분 자료로 계산되어 저장되도록 하였다.

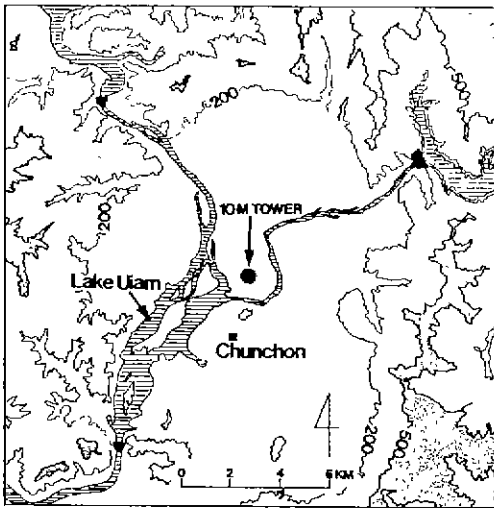


Fig. 1. Map of the observation site and surroundings of Chuncheon basin.

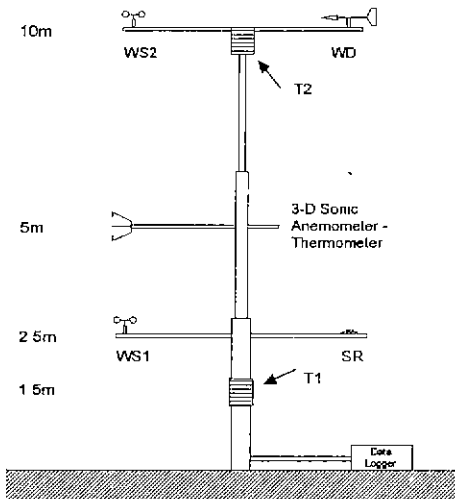


Fig. 2. Schematic diagram of meteorological tower observation system.

한편 기상탑 5m지점에 3차원 초음파풍속온도계(three dimensional sonic anemometer-thermometer), (미국 AT사)를 설치하였다. 이 측기는 3차원 방향인 동서, 남북, 연직 방향의 풍속성분 및 온도를 측정한다. 각 축의 센서를 사이의 거리는 15cm이며 양 센서에서 음파를 발생시켜 이동시간을 측정함으로써 풍속을 계산할 수 있다. 초음파풍속 온도계의 표본채취율은 10Hz로서 0.1초마다 측정되는 3방향의 풍속성분 및 온도로부터 와상관법(eddy correlation method)을 이용하여 의하여 매 10분 간격으로 현열 플럭스를 계산하여 컴퓨터에 저장하였다. 본 연구에서는 1995년 12월부터 1996년 11월까지 1년간의 측정자료를 분석에 사용하였다.

2.2. 현열 플럭스 측정

현열 플럭스를 직접 측정하는 방법으로서, 초음파풍속 온도계에 의하여 측정되는 연직풍속과 우위의 변동량을 이용하면 다음과 같은 와상관법에 의하여 현열 플럭스를 계산할 수 있다

$$H = C_p \rho (w' \theta')$$

여기서 C_p 는 정압비열, ρ 는 공기밀도, w' 은 연직풍속변동량, θ' 은 우위변동량이다. 본 연구에서 고도 5m에서 0.1초 간격으로 측정되는 w' 및 θ' 자료를 이용하여 매 10분마다 현열 플럭스를 산출하였다.

2.3. 현열 플럭스 추정방법

잠열 플럭스(LE)는 순복사량(Rn)과 지중열 플럭스(G)를 이용한 간단한 형태로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다(Presley and Taylor).¹⁾

$$LE = \frac{a}{1 + (\lambda/s)} (Rn - G)$$

여기서 a 는 토양수분 상태에 따른 계수, s 는 기온에 따른 포화비습의 기울기($s = \partial q_s / \partial T$), λ 는 건습도계상수이다. De Bruin과 Holtslag²⁾은 식 (3)에 상수 b 를 추가하면서 a 대신 a' 를 사용하여 다음과 같이 수정하였다.

$$LE = \frac{a'}{1 + (\lambda/s)} (Rn - G) + b$$

따라서 식 (1)에 식 (4)를 대입하여 현열 플럭스를 나타내면 다음 식과 같다.

$$H = \frac{a'' + (\lambda/s)}{1 + (\lambda/s)} (Rn - G) - b$$

여기서 $1 - a' = a''$ 이다. Holtslag와 Van Ulden³⁾은 네덜란드에서 1년간 측정된 H 와 식 (5)를 이용해 추정된 H 의 관계를 통하여 $a'' = 0$, $b = 20 \text{ Wm}^{-2}$ 라는 결과를 제시하였다. 그러나 토양수분 상태가 계절에 따라 현저히 변화한다면 식 (5)에서 a'' 값을 1년 동안의 상수값으로 간주하기는 부적절하다. 따라서 일반적으로 기상자료만을 이용하여 H 를 산출하는 경험식을 만들기 위해서는 토양수분 상태에 대한 자료가 없으므로 a'' 를 결정하기 위한 매개변수화 과정이 필요한데 식 (4)로부터 a'' 을 나타내면 다음과 같다.

$$a'' = 1 - \frac{1 + (\lambda/s)}{(Rn - G)} (LE - b)$$

계절별 a'' 값의 변화를 조사하기 위하여 Lee⁴⁾는

1978년 일본의 Tsukuba 대학 내 환경연구소(Environmental Research Center, ERC)에서 측정된 증발산량 자료와 ERC에서 남쪽으로 8km 떨어진 Tateno Aerological Station에서 측정된 Rn 과 온도 자료로 식 (6)에서 상수 b 를 20 Wm^{-2} 으로 하고 G 는 Rn 의 10%라고 가정하여 월평균 α'' 값을 계산하였다. 그 결과는 Table 1과 같으며, α'' 과 λ/s 사이의 상관계수는 0.94였다. 이러한 과정을 통해 α'' 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha'' = c_1 + c_2(\lambda/s) + B \quad (7)$$

여기서 c_1 과 c_2 는 상수이고, B 는 토양수분의 일변화를 나타내는 항으로서 추가 되었다.

De Bruin과 Keijman⁵⁾은 맑은 호수의 증발 자료로부터 식 (3)을 이용하여 α 의 일변화와 계절변화를 나타내었다. 또한 Yu⁶⁾는 1967년 7월부터 8월사이 호수에서 수행된 Wangara 실험 자료를 이용하여 α 의 일변화를 나타내었다.

Table 1. Comparison between monthly mean α'' and λ/s . Values of Rn , LE , and T used for calculation of α'' and λ/s are monthly mean values for daytime observed at Tsukuba Science City, Japan. Units of Rn and LE are W/m^2 , and unit of T is $^{\circ}\text{C}$ ⁴⁾

Month	T	Rn	LE	λ/s	α''
JAN.	4.6	155	47	1.07	0.60
FEB.	5.7	169	54	0.97	0.56
MAR.	9.5	235	92	0.82	0.38
APR.	14.9	286	125	0.60	0.35
MAY.	18.0	320	154	0.51	0.30
JUN.	20.2	244	162	0.43	0.08
JUL.	26.8	336	223	0.32	0.11
AUG.	26.6	324	195	0.33	0.20
SEP.	21.8	250	156	0.41	0.15
OCT.	17.7	201	96	0.52	0.36
NOV.	10.1	127	55	0.79	0.45
DEC.	7.3	112	44	0.93	0.54

α 값이 일변화하는 이유중의 하나는 다음과 같이 설명할 수 있다. 일출 후에 Rn 은 증가하고 온도 또한 높아짐에 따라 증발산량도 증가하게 된다. 그러나 지표는 건조해지기 때문에 증발산량의 증가율은 Rn 의 증발율에 비하여 작으므로 일몰전까지 α 값은 점차 감소한다 따라서 α 값의 최대치는 일출 경에, 최소치는 일몰 경에 발생한다고 추측할 수 있다. 이러한 추론을 통하여 식 (7)에서 B 는 시간의 \sin 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = A \sin \tau \quad (8)$$

여기서 $\tau = (t - t_1)\pi / t_d - \pi / 2$ 이고, A 는 B 의 진폭, t_r 은 일출시간, t_d 는 낮의 길이이고, t_r , t_d 는 아래와 같은 식으로부터 간단히 구할 수 있다.

$$t_r = b \cos(2\pi \frac{d}{365}) + q \quad (9)$$

$$t_d = 2(t_1 - t_r) \quad (10)$$

여기서 d 는 동지이후 부타의 날수이고, t_1 는 태양의 남중시간, b 는 연진 일출시간 변화의 진폭, q 는 춘분의 일출시간이다. 우리 나라는 몬순 지역으로 겨울에는 건조하고 춥고, 여름에는 고온 다습하여 A 는 λ/s 에 비례한다고 간주하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = c_3(\lambda/s) \quad (11)$$

여기서 c_3 는 상수이다. 결국 최종적인 α'' 의 계절 및 일변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha'' = c_1 + c_2(\lambda/s) + c_3(\lambda/s)\sin \tau \quad (12)$$

따라서 식 (12)를 식 (5)에 대입하여 H 를 산출하기 위한 경험 식은 다음과 같다.

$$H = \frac{c_1 + (1 + c_2 + c_3 \sin \tau)(\lambda/s)}{1 + (\lambda/s)} (Rn - G) - b \quad (13)$$

여기서 c_1 , c_2 , c_3 , b 는 상수로서 경험적으로 결정되어야 하고, τ 는 t_r 로 계산되고, H 는 Rn , G 및 온도로부터 식 (13)을 이용하여 산출하게 된다. 순복사량은 일반적인 측후소에서 측정하지 않으므로 식 (13)을 그대로 이용할 수는 없으나 Rn 이나 G 는 일사량과 대체로 직선적인 관계(Lee⁴⁾)가 있으므로 본 연구에서는 식 (13)의 $Rn-G$ 대신 다음 식과 같이 일사량(I)으로 대체하였다.

$$H = \frac{a_1 + (1 + a_2 + a_3 \sin \tau)(\lambda/s)}{1 + (\lambda/s)} I - b \quad (14)$$

여기서 I 와 H 의 단위는 Wm^{-2} 이다. a_1 , a_2 , a_3 , b 는 상수로서 초음파풍속온도계로부터 측정된 현열 플릭스와 기상탑의 일사량 및 기온자료를 이용하여 중회귀분석의 다단계분석법(Stepwise selection method)에 의하여 $\sin \tau$, λ/s , I 를 독립변수로 하고 H 를 종속변수로 하는 중회귀식을 결정하였다.

분석에 사용한 자료의 기간은 1년간이며 지표면의 상태에 따라 1년을 5개의 기간으로 나누어서 각 기간별로 중회귀식을 구하였다. 대상지역은 농경지로서 11월부터 4월까지의 비가 배어진 휴경지의 형태로 존재하나, 5월부터는 관개가 시작되어 물이 고여 있는 논외의 형태로 존재한다. 5월 중순경에 모내기를 실시하여 6월부터 비가 성장하기 시작하여 7월과 8월에 걸쳐 비의 활발한 성장으로 인해 비의 길이는 8월과 9월에 최고에 다다르고 비의 추수는 10월초에서 중순경에 실시되어 추수이후에는 비가 없는 휴경지의 형태로 존재한다. 절지층의 상태는 지표면의 수분상태와 거칠기 길이에 크게 좌우되므로 다음과 같이 기간을 구분하였다. 1995년 12월부터 1996년 2월까지를 겨울, 1996년 3월과 4월을 초봄, 1996년 5월부터 7월까지를 초여름으로 하였으며 1996년 8월과 9월을 초가을, 1996년 10월과 11월을 늦가을로 하였다. 이렇게 구분한 5기간에 대하여 실제 측정된 현열 플릭스를 종속변수로 하고 그외에 일사량과 기온으로부터 구해지는 λ/s 등을 독립변수로 하여 식 (14)의 경험계수 a_1 , a_2 , a_3 , b 를 결정하였다.

중회귀분석에 사용한 자료는 아침 9시부터 오후 16시

까지의 때시간 자료로서 측정된 매 10분간 자료로부터 1시간 평균값을 구하였다.

2.4. 현열 플럭스의 평가

오차를 표현하기위한 통계적인 방법에는 *RMSE*(root mean square error), *NMSE*(normalized mean square error), *FB*(fractional bias), *FS*(fractional variance or fractional error) 등 여러 가지(Hanna)⁷⁾가 있지만 본 연구에서는 식 (15)와 식 (16)에 제시한 것과 같이 비교적 많이 사용되고 있는 *RMSE*, *NMSE* 및 상관계수를 이용하여 계산된 현열 플럭스의 결과를 평가하였다

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_e - H_o)^2} \quad (15)$$

$$NMSE = \frac{(H_e - H_o)^2}{(H_e \cdot H_o)} \quad (16)$$

여기서 H_o 는 초음파풍속온도계로 측정된 현열 플럭스, H_e 는 계산된 현열 플럭스, n 은 자료의 수를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 현열 플럭스의 일변화 특성

Fig. 3은 1996년 4월 14일부터 16일까지 초음파풍속온도계로부터 측정된 대기중의 현열 플럭스와 기상탑에서 측정된 일사량의 일변화 특성을 나타낸 것으로서 매 10분간의 자료를 사용하였다.

Fig 3에서 보는 바와 같이 일사량이 최대가 나타나는 시간의 경우 14일은 14:20LST에 832.17 Wm^{-2} , 15일은 12:10LST에 763.0 Wm^{-2} , 16일은 13:40LST에 760.0 Wm^{-2} 로 나타났으며 현열 플럭스가 최대가 나타난 시간은 13:40LST, 12:00LST, 12:30LST에 329.5 Wm^{-2} , 252.6 Wm^{-2} , 320.0 Wm^{-2} 로 각각 나타났다 현열 플럭스가 음의 값을 갖게 되는 시간을 살펴보면 14일과 15일은 일사량이 0이 되기 약 2시간 전인 17:40LST, 17:10LST, 16일은 일사량이 0이 되기 약 1시간 전인 18:10LST부터 음의 값으로 나타나기 시작했다. 이처럼 오후가 되면서 현

열 플럭스가 일사량보다 먼저 음의 값을 나타내는 이유는 일사량이 있음에도 불구하고 공기보다 지면의 냉각이 크므로 지표면 부근의 접지역전층 형성으로 현열 플럭스는 대기중에서 지표면으로 향하기 때문이다.

3.2. 현열 플럭스의 실측값과 추정값의 비교

Table 2는 1995년 12월 1일부터 1996년 11월 30일까지 기상탑에서 측정된 시간별 현열 플럭스와 일사량, 기온 자료를 이용하여 중회귀식을 작성하여 각 기간별로 계산된 계수 및 상수들이다. 각 계절별 자료의 수는 겨울철에 685시간으로 가장 많으나 10월과 11월의 경우 다소 적은 86시간이 사용되었다

Table 2. Multiple regression coefficients for each period(Dec 1995 - Nov. 1996) in Eq.(14)

Period	n	Coefficient			Intercept
		a1	a2	a3	
Dec. - Feb.	685	0.161	0.310	0.044	-12.68
Mar - Apr	252	0.244	0.237	0.094	-15.10
May - Jul	654	-0.070	0.541	0.094	-10.64
Aug. - Sep.	170	-0.247	1.317	0.079	-20.07
Oct - Nov	86	0.113	0.602	0.018	-21.63

또한 현열 플럭스 추정결과의 평가를 위하여 회귀분석을 통한 상관계수(*CORREL*) 및 *RMSE*, *NMSE*를 계산하여 각각의 결과를 비교하였다. *RMSE*, *NMSE*는 실측값과 추정값사이의 분산정도를 나타내는 척도로 그중 *RMSE*는 *NMSE*에 비하여 값이 큰 부근에서의 오차를 더 많이 반영하는 특징이 있으며 각각의 계산한 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타난 바와 같이 모든 기간에 대하여 상관성이 높게 나타났고 *RMSE*가 높게 나타난 기간은 3월~4월, 12월~2월로 각각 30.09, 23.23였다 그러나 두 기간에 대하여 *NMSE*를 살펴보면

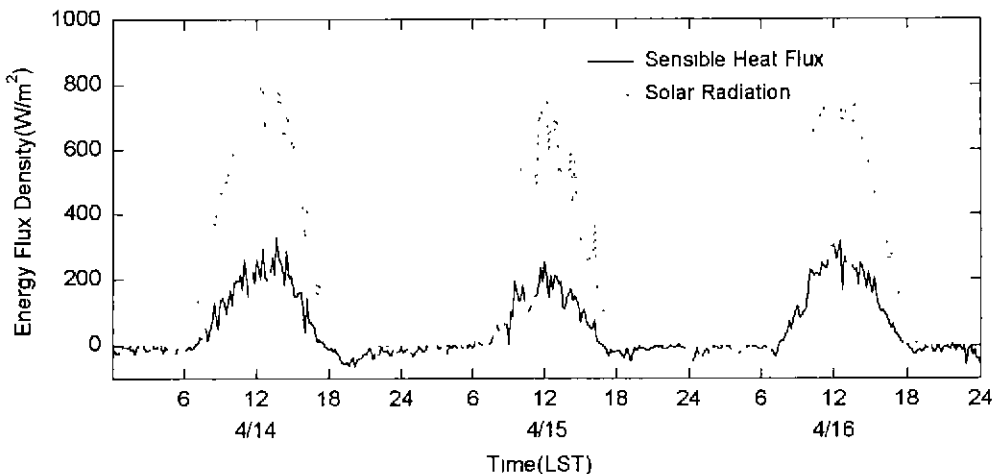


Fig. 3. Diurnal variations of solar radiation and sensible heat flux during 14-16 Apr., 1996 at Chunchon basin.

Table 3. Error analysis for sensible heat flux estimations for 5 periods from Dec. 1995 to Nov. 1996

Parameter	Period				
	Dec - Feb.	Mar. - Apr.	May - Jul.	Aug. - Sep.	Oct - Nov.
RMSE	23.23	30.09	16.38	22.50	16.05
NMSE	0.005	0.003	0.007	0.004	0.001
CORREL	0.861	0.863	0.863	0.872	0.962
N	685	252	654	170	86

12월~2월에 0.005로 3월~4월의 0.003보다 더 큰 값을 나타냈다 이것은 3월~4월에 큰 값에서 분산이 크게 나타났기 때문이다. 모든 기간에 대하여 NMSE를 살펴보면 대부분이 0에 가까운 값을 나타내 실측값과 추정값이 1:1관계를 잘 나타내고 있다.

Fig 4는 초음파풍속은도계로 측정된 현열 플럭스와 Table 2에 제시한 상수값을 기초로 하여 만들어진 경험식으로부터 추정된 현열 플럭스를 기간별로 비교한 것이다. 각 기간별 상관계수를 살펴보면 12월~2월에는 0.86,

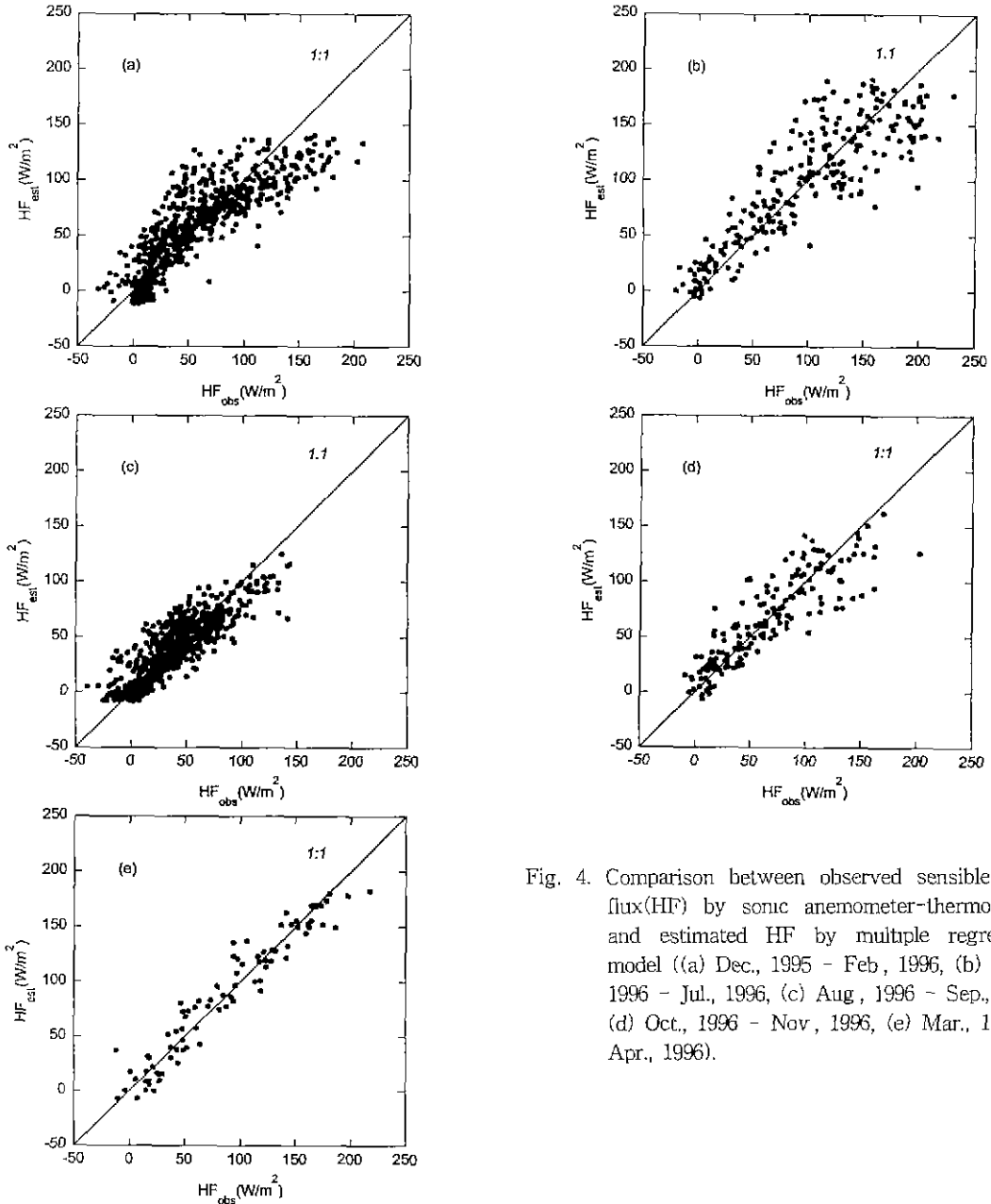


Fig. 4. Comparison between observed sensible heat flux(HF) by sonic anemometer-thermometer and estimated HF by multiple regression model ((a) Dec., 1995 - Feb., 1996, (b) May., 1996 - Jul., 1996, (c) Aug, 1996 - Sep., 1996, (d) Oct., 1996 - Nov., 1996, (e) Mar., 1996 - Apr., 1996).

3월~4월에는 0.86, 5월~7월에는 0.86, 8월~9월에는 0.87, 10월~11월에는 0.96으로 나타났다. 이 가운데 10월~11월에 0.96으로 가장 높게 나타났고 다른 계절들도 0.86이상으로 높은 상관성을 나타냈다.

4. 결 론

현열 플럭스는 대기확산구조에 영향을 미치는 주된 요소로서 주간에는 혼합층고도를 발달시키고 야간에는 역전층 형성에 영향을 미치게 된다. 따라서 정확한 현열 플럭스의 산출은 대기오염 확산모델의 실행에 있어 매우 중요하다. 초음파풍속온도계를 이용하여 순간 순간의 난류운동량을 측정하여 난류자료를 산출하고 이로부터 현열 플럭스를 계산하는 것은 가장 직접적인 방법이지만 측기가 고가의 장비이고 야외에서 장기간 측정·관리하기에는 어려움이 있어 일반적으로 널리 사용되지는 못하고 있다. 따라서 일반적으로 사용할 수 있는 일기상관측 자료중 일사량과 기온자료를 이용하여 실측에 가까운 현열 플럭스를 추정하는 것은 매우 중요하다

본 연구에서는 1996년 4월 14일부터 16일까지 초음파 풍속온도계로부터 측정된 현열 플럭스와 기상탑에서 측정된 일사량자료를 이용하여 실제 대기중에서의 현열 플럭스와 일사량의 일반화 특성을 알아 보았다. 맑은 날 주간의 경우 평균 최고 현열 플럭스는 일사량에 비하여 33.1% ~ 42.1% 정도로 측정되었다. 한편 1995년 12월부터 1996년 11월까지 1년간 초음파풍속온도계를 이용하여 실측한 현열 플럭스와 일기상관측자료중 일사량과 기온자료를 이용하여 추정한 현열 플럭스를 기간별로 비교한 결과 상관계수가 0.86이상으로 비교적 유사한 것으로 나

타났다. 따라서 본 연구에서 이용한 일기상관측자료로부터의 현열 플럭스 추정은 매우 유용한 방법이라고 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) Priestley, C. H. and R. J. Taylor, 1972, On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 81~92.
- 2) De Bruin, H A and A. A. M. Holtslag, 1982, A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-Monteith concept. *J. Appl Meteor.*, 21, 1610~1621
- 3) Holtslag, A. A. M. and A P Van Ulden, 1983, A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. *J. Clim. Appl Meteor.*, 7, 79~89
- 4) Lee, C. B., 1985, Modeling and climatological aspects of convective boundary layer, Ph.D dissertation, The university of Tsukuba, 19~22pp.
- 5) De Bruin, H A and J Q. Keijman, 1979, The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large shallow lake in the Nehterlands, *J. Appl Meteor.*, 18, 898~903.
- 6) Yu, T W., 1977, Parameterization of surface evaporation rate for use in numerical modeling. *J. Appl Meteor.*, 16, 393~400
- 7) Hanna, S. R. 1988, An quality model evaluation and uncertainty, *JAPCA*, 38, 406~412.