

## 현열 플럭스 추정에 의한 대류 혼합층 고도의 산출

김 용 국  
강원대학교 환경학과  
(1998년 5월 8일 접수)

### Calculation of the Convective Mixed Layer by Estimation of Sensible Heat Flux

Yong-Goog Kim  
Dept. of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea  
(Manuscript received 8 May 1998)

A Jump model was evaluated for the calculation of hourly mixing height and mean potential temperature within the height. The Jump model was modified for estimation of downward heat fluxes by mechanical convections and surface heat fluxes. The surface heat fluxes were estimated from routine weather data such as solar radiation and air temperature. Total of 8 upper-air data observed at 0000UTC and 0600UTC in Osan station during April 23 to 26, 1996 were analyzed, and compared to the model results in detail. The calculated mixing heights and potential temperatures within the height were comparable to the observations, but some differences were showed. The calculated mixing heights were generally higher than observations. And, when variations of wind directions were large, the large difference of potential temperature was occurred. From the results, it was important to note that vertical motions and advections of air masses would affect to the growth of the mixing height.

Key words : Mixing height, Jump model, surface heat fluxes, routine weather data, convective boundary layer

#### 1. 서 론

대기중으로 배출된 오염물질은 대기의 수평적인 이류에 따라 풍하측으로 이동되면서 난류에 의하여 혼합, 희석되며 주간에는 태양에 의한 지면 가열에 의해 오염물질의 연직혼합이 더욱 활발해진다. 이때 대기경계층(atmospheric boundary layer) 상부에 존재하는 기온역전층은 강한 안정층으로서 연직적인 혼합을 억제하므로 대기오염물질의 분포는 기온역전층 하부에 국한되게 된다. 이 기온역전층까지의 높이를 혼합층고도(MH: Mixing Height)라 하며, 대류가 활발한 경우에 혼합층고도는 상부 역전층의 높이와 같게 된다. 이러한 혼합층의 높이는 시간에 따른 높이변화가 커서 대기오염물질의 농도를 결정하는데 중요한 요소가 되기 때문에 대부분의 대기확산모델에서는 모델실행을 위한 입력자료로서 혼합층고도를 요구하고 있다. 따라서 대기경계층 내의 여러 가지 기상요소들에 대한 연직구조의 자세한 파악은 물론 정확한 혼합층의 높이를 결정해야할 필요가 있다.

Holzworth(1972)는 아침의 수직 기온분포 측정자료와 지표부근의 일 최저 및 최고기온을 이용하여 일 최저 및 최고 MH를 구하여 미국 전역의 MH를 산출한 바 있

으나 이 방법은 간단한 반면 실측된 MH와 비교하여 보면 오차가 크다(Lee, 1986). 김유근 등(1997)은 대기경계층 내에서 기상변수들의 변화를 모사할 수 있는 1차원 모델을 개발하고 경계층의 측정결과와 비교함으로써 만족할 만한 결과를 보인 바 있다. 더욱 정확한 혼합층고도의 시간변화 및 공간분포 계산을 위해서는 SAIMM(SAI, 1995) 등과 같은 3차원 기상 예측모델을 이용하는 것이 바람직 하지만 계산과정이 복잡하고 입력자료의 양이 방대하므로 실용적으로 활용하기에는 어려운 점이 많다.

혼합층고도의 발달은 1차적으로 지면으로부터의 현열 플럭스에 의하여 결정되므로 정확한 현열 플럭스의 추정은 중요한 관건이 된다. 현열 플럭스는 기상관측소에서 일상적으로 관측하는 기상요소가 아니며 실제 측정을 위해서는 초음파풍속은도계와 같은 복잡한 난류측정장치가 필요하다. 이 방법은 난류의 변동량을 직접 측정할 수 있다는 장점이 있으나 관측장비가 고가이고 다루기 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 이용된

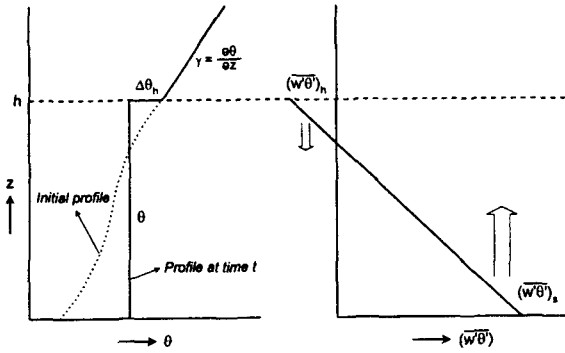


Fig. 1. Schematic diagram of profiles of potential temperature and heat flux distribution of the Jump Model(after Lee, 1986).

다. 이종범 등(1997)은 우리 나라의 평탄한 농경지에서 초음파풍속온도계를 이용하여 약 1년 동안 현열 플럭스를 측정하였으며, 이 측정자료를 이용하여 기상대의 측후소에서 측정하고 있는 기온, 일사량 등의 일상 기상관측 자료만으로 현열 플럭스를 추정하는 경험식을 작성하였다.

소위 0-Order Jump Model(Jump 모델)은 지표면 현열 플럭스로부터 MH의 발달을 계산하는 모델로서, 비교적 정확하고 실용성이 있는 장점이 있으며, Carson(1973), Tennekes(1973)등이 개발한 후 대기확산모델의 입력자료제공을 위하여 많은 연구자들에 의하여 사용되어 왔다(Paine, 1987; Paumier et al., 1986 등). Lee(1986)는 Jump 모델을 개선하고, 일본 동경만 근처의 넓은 평지에서 측정된 자료와 계산결과를 평가한 바 있다. 또한 이종범(1991)은 우리 나라 중부지방을 대상으로 혼합층고도를 산출하고 이로부터 대기오염잠재력을 조사한 바 있다.

본 연구에서는 우리 나라의 기상관측소에서 관측하고 있는 일상적인 기상자료만으로 현열 플럭스를 추정하고 이로부터 혼합층고도를 산출할 수 있도록 Jump 모델을 개선하였으며, 이를 이용하여 주간의 혼합층고도를 산출하고 라디오존데로부터 측정된 자료와 비교 검토하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 혼합층 고도 산출모델

대기경계층 내에서 온위, 습도 및 풍속 등의 연직분포는 실제 불규칙과정을 나타내지만 혼합층 내에서는 일정하다고 가정할 경우 혼합층고도의 발달을 보다 쉽게 계산할 수 있다. Jump 모델은 이러한 장점 때문에 혼합층고도를 산출하기 위하여 널리 사용되어 왔다. 그림 1은 Jump 모델에서 다루고 있는 온위와 현열 플럭스의 연직분포를 개략적으로 나타낸 그림이다.

지표면으로부터 현열 플럭스 공급이 시작되면 지면 위의 공기가 가열되고, 가열된 공기는 부력이 생겨 상승하게 된다. 이때 상승하는 공기는 상부에 존재하는 역전층 하부의 일부까지 관입(entrainment)되고, 이로 인하여 상부의 현열 플럭스 일부가 지표방향으로 유입되면

서 온위를 증가(Jump)시킨다. 시간(t)에 따른 혼합층고도(h)의 발달은 식 (1)과 같다.

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{(\overline{w'\theta'})_h}{\Delta\theta_h} \quad (1)$$

여기서  $(\overline{w'\theta'})_h$ 는 혼합층 상부에서 유입되는 현열 플럭스로서  $w'$ 은 연직풍속의 변동성분,  $\theta'$ 은 온위의 변동성분이다. 또한  $\Delta\theta_h$ 는 혼합층 상부에서의 온위의 증가를 말하는 것으로 시간에 따른 온위의 증가는

$$\frac{d\Delta\theta_h}{dt} = \gamma \frac{dh}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

와 같고, 여기서  $\gamma$ 는 혼합층 상부에서의 온위의 기울기이다. 대기경계층 내에서 시간에 따른 온위의 발달은 식 (3)과 같은 현열 플럭스의 기울기로 표현할 수 있으며, 이 기울기는 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\partial(\overline{w'\theta'})}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\overline{w'\theta'})}{\partial z} = -\frac{(\overline{w'\theta'})_s - (\overline{w'\theta'})_h}{h} \quad (4)$$

여기에서  $(\overline{w'\theta'})_s$ 는 지표면의 현열 플럭스이며,  $z$ 는 고도이다. 따라서 식 (3)은 다음의 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{(\overline{w'\theta'})_s - (\overline{w'\theta'})_h}{h} \quad (5)$$

한편, 풍속이 약한 대류의 경우에 혼합층 상부에서 유입되는 현열 플럭스는 지표면에서 방출되는 현열 플럭스와 비례하는 것으로 가정한다. 즉,

$$(\overline{w'\theta'})_h = -Ce(\overline{w'\theta'})_s \quad (6)$$

이며, 여기서  $Ce$ 는 관입 비율로서 보통 0.2(Yamada and Berman, 1979)를 사용한다. 그러나 풍속이 커서 역학적 난류가 클 경우에 현열 플럭스의 유입이 증가되며, Tennekes(1973)는 다음의 식 (7)과 같이 제안하였다.

$$(\overline{w'\theta'})_h = -B \frac{u_*^3 T}{gh} \quad (7)$$

여기에서  $u_*$ 는 마찰속도,  $T$ 는 기온,  $g$ 는 중력가속도이다. 상수  $B$ 는 Paine(1987)이 제안한 2.5를 사용하였으며, 마찰속도는 위에서 계산된 현열 플럭스 및 지표에서 측정된 풍속으로부터 Holtslag와 Van Ulden(1983)의 방법으로부터 구할 수 있다. 따라서 혼합층 상부로부터의 전체 유입량은 식 (8)과 같다.

$$(\overline{w'\theta'})_h = -\left(0.2 + \frac{2.5u_*^3 T}{gh(\overline{w'\theta'})_s}\right)(\overline{w'\theta'})_s \quad (8)$$

한편, 종관기상 규모의 대규모기단의 침강이나 상승운동이 존재할 경우 이러한 연직운동( $W_h$ )이 혼합층의 상부의 온위구배를 변화시켜 MH의 성장률이 달라질 수 있으며(Lee,1986), 이 과정은 식 (9)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{(\overline{w'\theta'})_h}{\Delta\theta_h} + W_h \quad (9)$$

본 연구에서는 이상과 같은 모델을 이용하여 주간의 MH를 산출하였다.

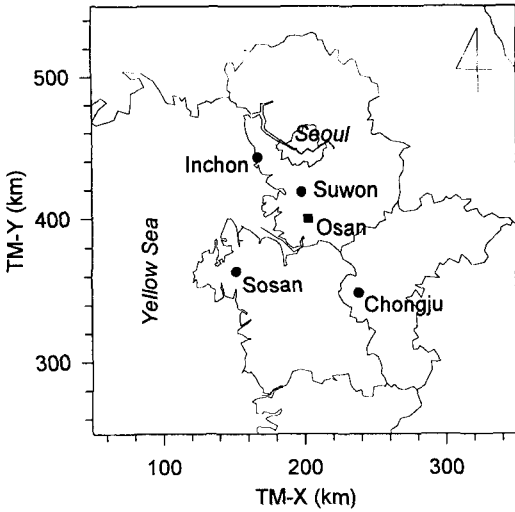


Fig. 2. Location of upper-air(filled rectangle) and surface(filled circle) meteorological sites.

2.2 현열 플럭스의 추정

De Bruin과 Holtslag(1982)는 지표면에서의 증발잠열에 의한 잠열 플럭스(LE)를 순복사 플럭스(Rn)와 지중열 플럭스(G)로부터 구하는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$LE = \frac{a}{1 + (\lambda/s)} (Rn - G) + b \quad (10)$$

여기서 a와 b는 상수이며, λ는 전습상수, s는 기온에 따른 포화비습의 기울기( $s = \partial q_s / \partial T$ )이다. 이종범(1991)은 주간측정한 일사량( $I_s$ ) 및 기온(T)자료로부터 현열 플럭스(H)를 산출하기 위하여 지표면 열수지식과 위에서 제시한 잠열 플럭스 산출식을 이용하여 다음과 같은 경험식을 제시하였다.

$$H = \left( \frac{a_1 + (a_2 + a_3 \sin \tau) (\lambda/s)}{1 + (\lambda/s)} \right) I_s - b \quad (11)$$

여기서,  $a_1, a_2, a_3$  및 b는 상수이며, τ는 일출후의 시간 경과 함수로서 해당 일의 일출시간( $t_r$ ) 및 낮의 길이( $t_d$ )로부터

$$\tau = (t - t_r) \pi / t_d - \pi / 2 \quad (12)$$

와 같이 계산된다. 위의 식 (11)에 대한 상수를 결정하기 위하여 이종범 등(1997)은 1995년 12월부터 1996년 10월까지 약 1년간 우리 나라 중부지방에 위치한 춘천 지역의 평탄한 농경지에서 난류측정장치인 초음파풍속 온도계를 이용하여 현열 플럭스를 측정하였으며, 일사량 및 기온자료를 이용하여  $\sin \tau, \lambda/s$  및  $I_s$ 를 독립변수로 하고, H를 종속변수로 하는 중회귀식을 작성한 바 있다. 본 연구에서는 측정자료 중 1996년 4월의 자료만을 이용하여 위와 같은 방법에 의하여 주간의 현열 플럭스를 산출하였으며 이 과정을 Jump 모델에 추가하였다. 이때 일사량 및 기온 자료는 현열 플럭스 측정장소와 근접해 있는 춘천기상대에서 같은 기간동안 매시간 측정된 자료를 이용하였다. 식 (13)은 본 연구에서 작성된 현

열 플럭스 산출식을 나타낸 것으로 자료의 수는 156시간이며 증상관계수(R)는 0.85였다. 여기서 현열 플럭스 및 일사량의 단위는  $W/m^2$ 이다.

$$H = \left( \frac{0.24 + (1.25 + 0.09 \sin \tau) (\lambda/s)}{1 + (\lambda/s)} \right) I_s - 16.18 \quad (13)$$

2.3 자료 및 대상기간

본 연구에서는 우리 나라 중부지방에 위치한 오산 상층기상 관측소에서 측정된 상층 기상자료중 혼합층의 발달이 전형적인 형태를 나타냈던 1996년 4월 23일부터 26일까지 4일간의 자료를 분석하고 이 기간에 대한 Jump 모델의 계산결과와 측정자료를 비교하였다. 오산 관측소는 북위 37° 06', 동경 127° 02'에 위치해 있으며, 관측소로부터 서쪽으로 약 20km 거리에는 황해가 있다.

혼합층고도의 계산은 매일 0900LST부터 1500LST까지 10초 간격으로 6시간동안 계산하였으며, 계산을 위한 초기 입력자료로서 오산 고층기상관측소에서 라디오존데로 측정된 0000UTC(0900LST)의 고도별 기압, 기온, 습도 자료를 이용하였다. 또한 계산 시작시의 초기 혼합층고도는 50m, 초기 온위 증가는 0.5℃로 하였으며, 모든 온위는 대기중에 존재하는 수증기의 양을 고려할 수 있도록 가온위(virtual potential temperature)로 계산하였다. 한편, 대상기간 동안 주변지역으로부터의 이류에 의한 영향, 대규모 기단의 침강이나 상승운동 등은 없는 것으로 간주하였다.

주간의 현열 플럭스 자료는 상층기상의 관측지점과 동일한 지점에서 측정하거나 이를 추정할 수 있는 자료의 이용이 바람직하다. 그러나 오산 관측소의 지상기상 자료 사용이 불가능하였으므로 오산 관측소와 비교적 인접해 있는 수원기상대에서의 같은 기간에 측정된 0900LST부터 1500LST까지의 기온, 풍속, 일사량 자료를 이용하여 현열 플럭스를 추정하였다. 수원기상대는 오산 관측소로부터 북쪽으로 약 19km 떨어진 북위 37° 16', 동경 126° 59'에 위치하고 있다. 오산관측소를 중심으로 한 주변 지상기상관측소들의 위치를 그림 2에 제시하였다.

오산의 상층기상 관측은 실제 해당시각의 30분전에 시작되므로 0900LST의 연직분포자료의 경우 하층부는 0830LST의 상태를 나타낸다. 또한 수원기상대의 지표 관측자료중 일사량은 해당시각까지의 1 시간 평균을 의미하므로 이 경우에도 0900LST 자료는 0830LST를 의미한다. 따라서 0900LST부터 1500LST까지의 모든 계산 결과는 30분전인 0830LST부터 1430LST까지의 결과에 해당되나 상층자료를 나타내는 시각과 일치시키기 위하여 편의상 0900LST부터 1500LST까지로 표현하였다. 한편, 수원기상대의 풍속자료는 10분전부터 해당시각까지의 평균값이며, 기온은 해당시각에 측정된 값이다.

본 연구에서는 오산에서 0600UTC(1500LST)에 라디오존데로 측정된 자료를 판독하고 Jump 모델로부터 계산된 동일한 시간의 혼합층고도, 온위 등의 결과와 비교하였다. 온위의 측정자료를 살펴보면 어느 높이까지는

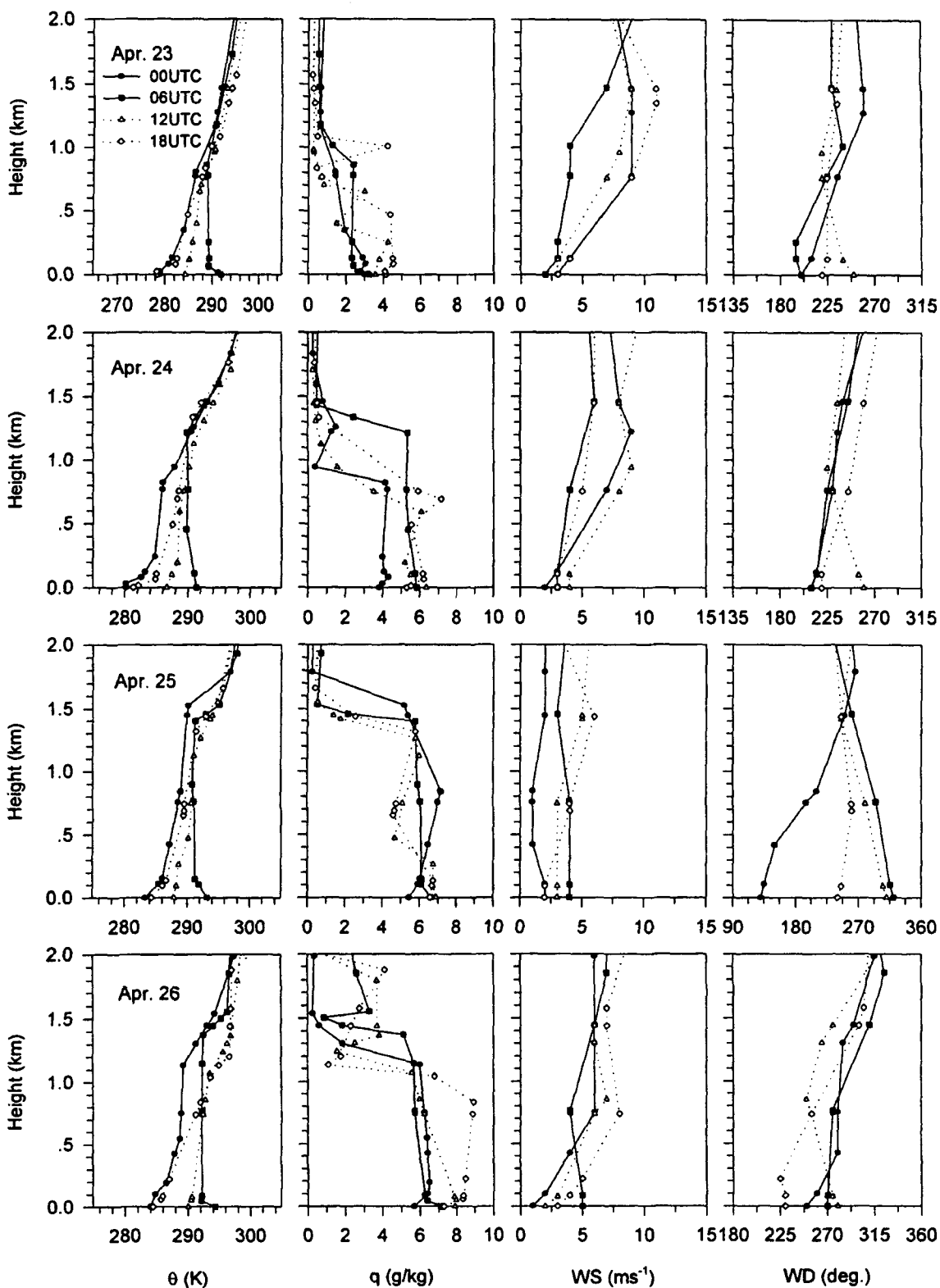


Fig. 3. Vertical profiles of potential temperature( $\theta$ ), specific humidity( $q$ ), wind speed(WS) and wind direction(WD) during Apr. 23-26, 1996 at Osan upper-air observation site.

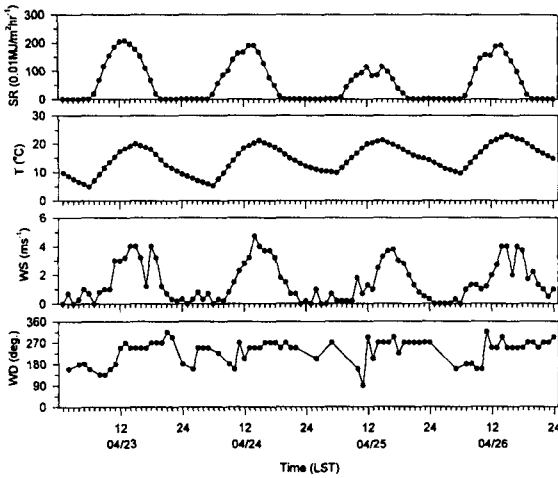


Fig. 4. Diurnal variation of solar radiation(SR), air temperature(T), wind speed(WS), and wind direction(WD) during Apr. 23-26, 1996 at Suwon meteorological station.

대체로 일정하다가 급증하는 영역이 존재한다. 반면, 비습은 이 부근에서 급격히 감소하는 특징을 나타낸다. 이 영역은 지표면 현열이 수직 상승하다가 상부 역전층으로의 관입에 의해 열교환이 이루어지는 전이층(transient layer)으로서, Jump 모델에서는 이 구간의 중간높이에서 온위가 불연속적으로 증가하는 것으로 계산한다. 따라서 본 연구에서는 이 층의 중간높이를 혼합층고도로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 대상기간의 기상 특성

대상기간 동안 오산관측소에서 1일 4회(0000UTC, 0600UTC, 1200UTC, 1800UTC) 관측한 자료를 이용하여 고도별 온도, 비습, 풍속 및 풍향을 그림 3에 나타내었다. 4일간 6시간 간격으로 측정된 온위 및 비습의 고도분포는 전형적인 일변화 과정을 나타내고 있으며, 특히 주간의 혼합층고도 판독이 비교적 쉬운 특징을 나타냈다.

4월 23일 0000UTC에는 지표부근에 역전층이 발달되어 있으나 0600UTC에는 지표부근의 강한 불안정층과 함께 고도 약 850m까지 일정한 온위분포를 나타내고 있다. 또한, 0000UTC의 비습은 약 1200m 높이까지 비교적 일정한 감소추세를 나타냈으나 0600UTC에는 약 850m까지 일정한 분포를 나타냈다. 비습의 분포가 대체로 일정하다가 급격히 감소한 지점까지의 중간높이를 판단하면 이 시각의 혼합층고도는 약 1000m로 볼 수 있다. 1200UTC의 상층의 온위는 주간에 비하여 약간 증가하나 혼합층고도 하부에서는 지표의 장파복사 냉각에 의해 기온이 감소되면서 역전층이 형성되고 다음날 새벽 3시(1800UTC)에는 더욱 강한 지표역전을 나타냈다. 한편, 0600UTC의 풍속은 혼합층 내에서 2-4m/sec 내외의 약한 풍속을 나타냈으며, 대체로 남서풍의 일정한 풍향을 나타냈다.

4월 24일 0000UTC에는 지표로부터 약 250m 높이까지 강한 역전층이 형성되어 있으며, 이로부터 상부 약 800m 높이까지는 약한 혼합층이 발달되어 있다. 0600UTC의 혼합층고도는 약 1350m까지 발달하였으며, 혼합층 내의 풍속 및 풍향은 전날과 유사하다.

4월 25일과 26일 0000UTC의 지표부근의 역전강도는 전날들에 비해 비교적 약한 편이며, 이로 인해 0600UTC의 혼합층고도는 이를 모두 1450m까지 높게 발달된 특징을 볼 수 있다. 특히 25일의 풍속은 상층까지도 약한 편이나 지표부근의 풍향은 시간에 따라 변화가 큰 특징을 나타냈다.

한편, 수원기상대에서 4월 23일부터 26일까지 관측한 지상기상자료중 기온, 일사량, 풍속 및 풍향의 시간변화를 그림 4에 나타내었다. 4월 23일은 맑은 날로 일사량은 1300LST에 최대를 나타냈으며 일 최고 기온은 2시간이 지난 1500LST에 20℃를 나타냈다. 또한 최저 기온은 0600LST에 4.8℃를 나타냈다. 이러한 구름이 없는 맑은 날의 야간에는 지표에서 장파복사냉각이 활발하므로 지표부근에 강한 역전층이 발달하기 쉬우며, 기온의 일교차가 크다. 가장 큰 일교차를 나타냈던 날은 24일로 15.9℃였다. 그러나 날씨가 다소 흐렸던 25일의 경우 일 최고 기온은 21.2℃였으나 최저 기온을 나타냈던 0600LST와의 일교차는 11.5℃를 나타냈다. 4일간의 풍향은 대체로 오전에는 남풍계열의 바람이 불다가 오후가 되면서 서풍계열의 해풍으로 바뀌는 경향을 나타냈으며, 일중 1500LST를 전후로 하여 4m/sec 내외의 풍속을 나타냈다.

#### 3.2 혼합층 고도 및 온위

그림 5는 0900LST부터 1500LST까지 Jump 모델로부터 계산된 혼합층고도 및 혼합층내의 평균온위를 한 시간 간격으로 나타낸 것이다. 여기서 수직 실선의 높이는 매시간 혼합층고도에 해당되며, 수평 실선의 길이는 해당 혼합층고도에서의 온위 증가를 표현한 것이다. 또한 1500LST에 라디오존데로부터 측정된 가운데위의 연직분포를 함께 도시하였다.

4월 23일부터 26일까지 Jump 모델로 계산한 매일 1500LST의 혼합층고도는 각각 1356m, 1381m, 1519m, 1593m로 나타났다. 이를 그림 3에 제시한 비습의 연직분포로부터 판독한 혼합층고도(1000m, 1350m, 1450m, 1450m)와 비교하면 24일부터 26일까지는 대체로 100m 내외의 오차범위 내에서 유사한 결과를 나타냈으나 4월 23일에는 실측값에 비하여 약 350m 이상 높게 예측하였다.

일반적으로 시간에 따른 혼합층의 발달은 주변지역으로부터의 이류에 의한 영향이나 상부의 대규모 하강기류가 없는 한 초기의 고도분포에 비하여 높게 되며, 또한 Jump 모델에서도 이러한 개념을 기본으로 하고 있다. 그러나 전체 4일간의 1500LST의 혼합층고도는 0900LST에 상부에 존재하던 혼합층고도와 비슷하거나 낮아진 형태를 나타내고 있다. 본 연구의 대상기간이 포함된 1996년 4월 하순전반에는 전국이 동서고압대에 들어 있었으므로(기상청, 1996) 이 기간 중에는 고기압

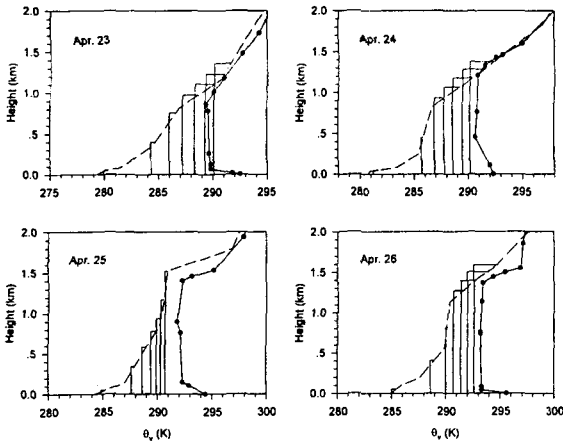


Fig. 5. Calculated mixing height(top of each vertical solid line) and temperature jump (length of horizontal solid line) at the height every 1 hour by the Jump model from 0900LST to 1500LST for Apr. 23-26, 1996. Dashed lines represent initial profile at 0900LST and solid lines with filled circles represent observed profile at 1500LST. All profiles were presented as virtual potential temperatures.

권 하에서 발생하는 대규모 기단의 침강에 의한 영향이 다소 있었던 것으로 판단된다.

한편, 23일부터 26일까지 계산된 1500LST의 혼합층 내의 평균 가온위는 각각 289.9K, 290.0K, 290.5K, 292.5K였으며, 23일과 24일, 26일에는 실측값과 유사하나 25일에는 약 2K 정도 낮게 계산되었다. 25일의 이러한 차이는 라디오존데 관측지점과 지상기상자료의 관측지점이 다른 점을 들 수 있다. 즉, 수원지역에서 측정된 25일의 일사량은 매우 적었으며, 이로 인해 현열 플럭스가 실제보다 작게 추정되었기 때문으로 판단된다. 또한 주변지역으로부터의 이류에 의한 영향이 고려되지 못한 점도 생각할 수 있다. 본 연구에서 혼합층고도 계산을 위하여 지상기상 입력자료로 이용한 수원기상대의 일사량과 그 주변 지역에서 측정된 4월 25일의 일사량 자료를 그림 6에 나타내었다. 일사량은 청주지역이 가장 많으며, 다음이 서산, 인천 순으로 적게 나타났고 수원지역이 가장 적다. 청주기상대는 수원기상대를 중심으로 남동쪽으로 63km 거리에 위치하고 있으며, 서산기상대는 남서방향으로 62.5km, 인천기상대는 북서방향으로 55km 거리에 위치하고 있다(그림 2 참조). 한편, 그림 3에 제시한 4월 25일의 0000UTC와 0600UTC의 풍향분포를 살펴보면 상부 약 1500m 부근에서는 서풍을 나타내고 있으나 지표부근에서는 0000UTC에는 남동풍, 0600UTC에는 북서풍이 불고 있다. 따라서 오산관측소로부터 가장 가까운 지역에 수원기상대가 위치하고 있긴 하지만 일사량이 많았던 청주 및 서산지역으로부터의 이류에 의한 영향도 포함된 결과로 판단된다.

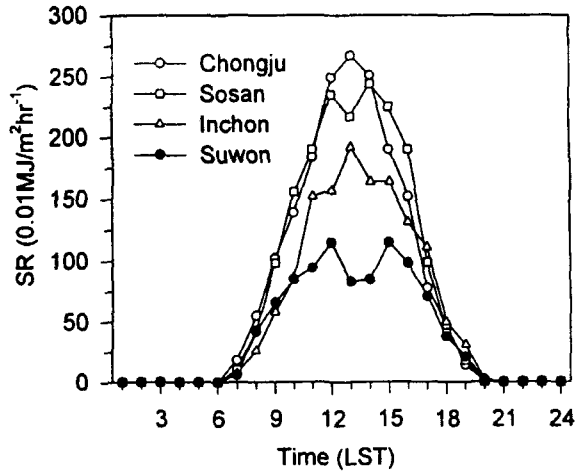


Fig. 6. Hourly solar radiation measured at four surface meteorological stations for Apr. 25, 1996.

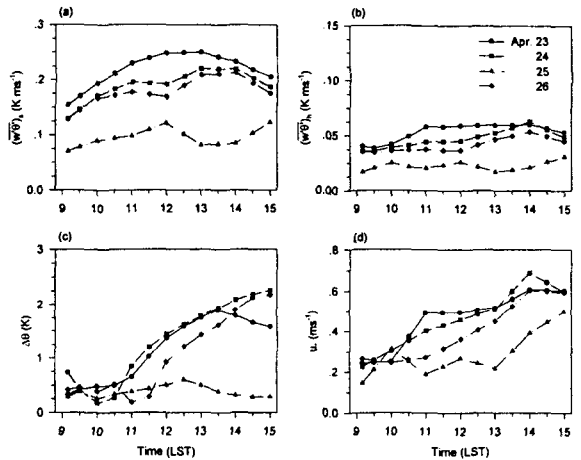


Fig. 7. Calculated surface heat flux(a), downward heat flux(b) and temperature jump(c) at the top, and friction velocity(d) from 0900LST to 1500LST for Apr. 23-26, 1996.

그림 7은 대사가간동안 지표면과 혼합층 상부에서의 현열 플럭스, 혼합층 상부에서 온위의 증가, 그리고 마찰속도에 대한 계산 결과를 1500LST까지 30분 간격으로 나타낸 것이다. 단 0900LST는 초기 입력자료의 값에 해당되므로 10분 후의 결과를 제시하였다. 1030LST까지 온위의 증가는 0.3℃ 내외를 나타냈으며 이후 서서히 증가하여 1600LST에는 4월 24일에 최고 2.4℃를 나타냈다. 그러나 25일에는 1500LST까지 0.6℃ 이하의 작은 값을 나타냈다. 상부 역전층부근에서는 온위의 기울기가 크므로 온위의 증가가 크게 나타나며, 온위의 증가가 클 수록 혼합층고도의 발달이 느리게 진행된다. 한편, 현열 플럭스는 23일이 가장 많으며, 혼합층 상부로의 관입에 의하여 지표방향으로 향하는 현열 플럭스는 지표면 현열의 약 20-30% 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 또한 마찰속도는 풍속이 강했던

1400LST 경에 최대로 나타났다.

4. 결 론

오산 상층기상관측소에서 1일 4회 관측한 고도별 기온 및 습도분포를 분석한 결과 1996년 4월 23일부터 26일까지 혼합층의 일변화 과정이 전형적인 상태를 나타냈으며, 1500LST의 혼합층고도는 각각 1000m, 1350m, 1450m, 1450m로 분석되었다.

대상 기간 동안 Jump 모델로부터 계산된 1500LST의 혼합층고도는 실측 자료와 비교하여 대체로 유사하며, 31m에서 최고 356m 높은 계산결과를 나타냈다. 실제보다 높게 혼합층고도를 계산하는 이유로는 고기압권 하에서 발생되는 대규모 기단의 침강에 의한 영향이 고려되지 못한 것으로 판단되며, 이러한 정보의 이용이 가능할 경우 모델의 계산결과는 더욱 정확해 질 수 있을 것이다. 한편, Jump 모델로부터 계산된 1500LST의 혼합층 내의 평균 온위는 실측값과 비교하여 1K 내외의 작은 오차를 나타냈으나 4월 25일은 약 2K 이상의 오차를 나타냈다. 이것은 상층기상관측 지점과 지상기상관측 지점이 다르므로 그 지역의 실제 상태를 나타내지 못했거나 주변지역으로부터의 이류에 의한 영향이 고려되지 못한 점으로 판단된다.

본 연구에서 사용된 Jump 모델은 오전에 관측된 연직 온위분포 자료와 일상 기상관측소에서 측정되는 시간별 일사량, 기온 및 풍속자료만을 이용하므로 기상대가 위치한 여러 지역에 대한 장기간 혼합층고도의 산출이 가능하다. 또한 비교적 정확한 혼합층고도를 결정할 수 있는 장점이 있으므로 대기확산모델의 입력자료를 준비하기 위한 실용적인 모델이라 판단된다.

참 고 문 헌

기상청, 1996, 기상연보-월별기상개요, pp.6-7.  
 김유근, 문승의, 안중배, 1997, 대기혼합층 모사를 위한 1차원 수치모형 : 득량만에서의 적용. 한국환경과학회지, 6(5), 425-435.  
 이종범, 1991, 중부지방 각지의 대기오염 잠재력에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 7(1), 41-47.  
 이종범, 김용국, 조창래, 박세영, 1997, 기상관측자료를

이용한 heat flux 추정방법. 1997년도 한국대기보전학회 춘계학술대회 요지집, 26-27.  
 Carson, D.J., 1973, The development of a dry inversion-caped convectively unstable boundary layer. Quart. J. R. Met. Soc., 99, 450-467  
 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. Applied Meteorology, 21, 1610-1621.  
 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. Climate Applied Meteorology, 7, 79-89.  
 Holzworth, H.C., 1972, Mixing heights, wind speeds, and potential for urban air pollution throughout the contiguous United States. US EPA Report AP-101, 130pp.  
 Lee, C.B., 1986, Simple model and climatological aspects of the structure of the convective boundary layer. Atmospheric Environment, 20, 705-714.  
 Paine, R.J., 1987, User's guide to the CTDM meteorological preprocessor(METPRO) program. U.S. EPA, 149pp.  
 Paumier J., D. Stinson, T. Kelly, C. Bollinger, and J.S. Irwin, 1986, MPDA-1: Meteorological preprocessor for diffusion analysis - User's Guide, US EPA, EPA/600/8-86/011, 192pp.  
 SAI, 1995, User's guide to the Systems Applications International Mesoscale Model. SAI, SYSAPP-95/070.  
 Tennekes, H., 1973, A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer. J. Atmospheric Science, 30, 558-567.  
 Yamada, T. and S. Berman, 1979, A critical evaluation of a simple mixed layer model with penetrative convection. J. Applied Meteorology, 18, 781-786.