한국환경과학회지 제11권(제12호), 1195~1204, 2002
J. of the Environmental Sciences

복사전달방정식을 이용한 조사율 추정

문 윤 섭 · 김 유 근* · 이 영 미*
***부산대학교 대기과학과 · 기상연구소 국가지정연구실**
(*2002*년 *4*월 *23*일 접수; *2002*년 *8*월 *5*일 채택)

Estimation of dose rate using radiative transfer equations

Yun-Seob Moon, Yoo-Keun Kim* and Young-Mi Lee*
Applied Meteorology Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Seoul 156-010, Korea
**Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*
(Manuscript received 23 April, 2002; accepted 5 August, 2002)

We calculated dose rate using radiative transfer equations to consider radiative processes distinctly. The dose rate at Pohang(36° 02'N, 129° 23'E) was calculated using measured ozone and meteorological data and two-stream approximations(quadrature, Eddington, delta Eddington, PIFM(practical improved flux method), discrete ordinate, delta discrete ordinate) are used in solving equation. The purpose of this study is to determine the most compatible radiative transfer approximation for simulating the radiative and photochemical processes of atmosphere through comparision between calculated and measured values. Dose rate of the biologically effective irradiance in the region 0.28-0.32 μm showed the highest value when quadrature and Eddington was used and lower value on condition that delta scaling was applied. Correlation coefficient between dose rate at surface using radiation transfer equation and measured UV-B at Pohang was 0.78, 0.79 and 0.81 when detla Eddington, PIFM and delta discrete ordinate were used. Also, in case of above approximations were used, MBE(Mean Bias Error) was within -0.3MED/30min and RMBE(Relative Mean Bias Error) was below 10% between 1200 LST and 1400 LST. Approximations which are compatible in estimating radiative process are detla Eddington, PIFM and delta discrete ordinate. Especially, in case that radiative process is considered more detail, delta discrete ordinate increased the number of stream is proper.

Key words : Radiation transfer equation, Two-stream approximation, Dose rate

1. 서 론

최근 지표에 도달하는 유해자외선의 양이 증가하고 이로 인한 피해가 커짐에 따라 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1~3]. NASA의 인공위성인 Nimbus7/TOMS 관측자료로 전구 자외선 복사를 분석한 결과 파장별 피부 반응도를 고려한 유해자외선의 증가율은 봄에 위도 45 °N에서 10년동안 300nm, 310nm, 320nm의 파장에 대해 각각 8.6%, 9.8%와 5.1%였다[4]. 유해자외선은 성층권의 오존에 일부 흡수되고 일부는 지표에 도달하는데 이는 지표대기의 광화학반응을 증가시켜 O_3를 비롯한 광화학오염물질을 증가시킬 뿐만 아니라 피부에 닿으면 홍반이 발생함은 물론 비타민 D의 감소와 피부암을 일으킨다[5]. 오존전량이 1% 감소하면 피부암 환자는 중위도 지방에서 4~8%가 증가한다는 연구결과도 있다[6]. 따라서, 이를 예방하기 위해 UV-B의 양을 결정짓는 요소들을 분석하고 자외선의 양을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다.

대기의 복사과정을 고려할 때 일반적으로 복사전달방정식을 이용하는데, 복사전달방정식의 해를 구하는 과정이 다소 복잡하므로 몇가지 가정을 두어 근사적으로 모수화된다. 이 중 가장 널리 이용되고 있는 것이 두 흐름(two-stream, 이하 two-stream이라 한다.) 근사인데, 적용하는 two-stream 근사의 종류에 따라 복사과정을 다르게 묘사한다[7~9].

Corresponding Author : Yun-Seob Moon, Applied Meteorology Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Seoul 156-010, Korea
Phone : +82-2-842-0940
E-mail : ysmoon@metri.re.kr

따라서, 각 적용근사에 따른 대기의 복사과정과 광화학과정을 분석하고, 그에 따른 적합한 근사를 추정하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 오존과 기온 및 기압의 연직분포가 관측되고 있는 포항(36° 02'N, 129° 23'E)을 대상으로 맑은 날을 선정하여 파장별 피부 반응도를 고려한 자외선량인 조사율(dose rate)을 계산하였다. 복사전달방정식의 해를 구하기 위해 일반적으로 사용하는 two stream 근사 중 quadrature, Eddington, delta Eddington, PIFM(practical improved flux method), discrete ordinate, delta discrete ordinate를 적용하여 조사율을 추정하고, 관측값과 비교하여 한반도의 대기 유해자외선 추정에 적합한 근사를 선별하고자 한다.

2. 연구내용

2.1. 입력자료

본 연구에서는 오존의 연직분포와 전량, 그리고 기온, 기압, 습도, 조사율이 관측되고 있는 포항을 대상으로 조사율을 추정하였으며 기상청 오존관측연보[10]의 자료를 이용하였다. 자외선 영역(280~320 nm)을 중심으로 파장간격은 1nm로 하였고, 포항의 연직오존 및 기상이 관측된 날 중 맑은 날을 선택하여 비교하였다. 선정된 날짜는 각 계절을 대표하는 날로 춘계가 1998년 4월 7일, 하계는 1998년 7월 23일, 추계는 1998년 9월 15일 그리고 동계는 1998년 2월 11일이다. 관측값과의 비교를 위한 날짜는 1996년 5월 22일, 1997년 3월 26일, 10월 8일, 1998년 2월 11일, 2월 26일, 6월 11일, 7월 23일, 7월 30일, 9월 2일, 9월 9일, 9월 25일, 그리고 10월 2일로서 총 12일이다.

대기외기권에 도달하는 파장별 태양상수의 경우 0.275μm이하의 파장은 Wood *et al.*[11], 0.275이상 0.85μm이하의 파장은 Nicolet[12]의 자료를 이용하였다. 오존 및 기상요소의 값은 기상청의 오존관측연보(1995, 1996, 1997, 1998)를 이용하였으며, 지표알베도는 0.2로 하였다.

2.2. 복사전달방정식의 분석적 해

복사전달방정식은 해를 구하기가 매우 어려우므로 여러 가지 근사를 두는데, 방정식의 해를 구하기 위한 근사의 종류에 따라 여러 가지 방법으로 해를 구할 수 있다. 가장 대표적인 근사는 복사를 상, 하향으로 나누어 해를 구하는 two-stream 근사인데, 이는 다시 다양한 종류의 two-stream 근사로 나누어진다.

본 연구의 수치적분모델에 이용된 복사전달방정식은 직달(direct) 및 산란(diffuse)항으로 나누어지며 다음과 같다.

$$\mu \frac{\partial I_D}{\partial \tau}(\tau, \mu_0, \phi) = I_D(\tau, \mu_0, \phi) \tag{1}$$

$$\mu \frac{\partial I}{\partial \tau}(\tau, \mu, \phi) = I(\tau, \mu, \phi) - J(\tau, \mu, \phi) \tag{2}$$

$$J(\tau, \mu, \phi) = \frac{\omega_0}{4\pi} \pi F_0 P(\mu, \mu_0; \phi, \phi_0) e^{\frac{-\tau}{\mu_0}} + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} P(\mu, \mu'; \phi, \phi') I(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' \tag{3}$$

여기서, I는 파장에 따른 복사강도(wavelength-dependent radiance field), J는 원천함수(solar source function), τ는 광학적 두께(optical depth), μ는 관측 천정각의 코사인(cosine of observer zenith angle), μ_0는 태양 천정각의 코사인(cosine of solar zenith angle), ϕ는 관측자 방위각(azimuth angle of observer), ϕ_0는 태양의 방위각(azimuth angle of sun), πF_0는 태양 복사속 밀도(solar irradiance), P는 대기의 산란위상함수(scattering phase function of atmosphere), 그리고 ω_0는 단일산란알베도이다.

식 (1)은 직달일사 식 (2)는 산란일사를 나타내며, I_D, I는 각각 μ_0 및 μ 방향으로 진행하는 직달일사와 산란일사의 복사강도(intensity or radiance)를 나타낸다. 산란항인 식 (2)의 우변 첫째항은 흡수와 산란에 의한 μ방향의 복사감쇠를 나타낸다. 둘째항을 더 자세히 나타낸 식 (3)의 우변 첫째항은 직달일사가 산란에 의해 μ방향의 산란일사로 되는 것을 나타내며 우변 둘째항은 μ' 방향의 산란광이 방향을 바꾸어 μ방향의 산란광으로 되는 μ방향의 증가분이다.

일반적으로 복사전달방정식은 평형대기(plane-parallel atmosphere)를 가정하는데, 상향일 경우 μ는 0보다 크고 하향일 경우 μ는 0보다 작다. 즉, 입사광의 하향성분을 계산할 때는 $-\mu$가 사용된다.

파장별 복사강도(spectral radiance)는 다음식을 사용하여 파장별 복사속(spectral irradiance)으로 표현할 수 있다.

$$F^+ = 2\pi\mu I^+ \tag{4}$$

$$F^- = 2\pi\mu I^- \tag{5}$$

따라서, 식 (4)와 (5)를 상, 하향의 복사속으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{dF^+}{d\tau} = \gamma_1 F^+ - \gamma_2 F^- - \pi F_0 \omega_0 \gamma_3 e^{-\tau/\mu_0} \tag{6}$$

$$\frac{dF^-}{d\tau} = \gamma_2 F^+ - \gamma_1 F^- + \pi F_0 \omega_0 \gamma_4 e^{-\tau/\mu_0} \quad (7)$$

입사광은 대기상단으로부터 어느 고도까지 하향하면서 통과한 대기의 거리가 길수록, 대기 중 입자들의 흡수율이 클수록 감쇄량이 커진다. 즉, 통과거리와 대기 중 입자가 입사광의 감쇄량에 영향을 주는데, 이 효과를 나타낸 것이 광학적두께 τ 이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = \int_{z_1}^{z_2} k\rho dz \quad (8)$$

여기서, k는 물질의 흡수계수이고, ρ 는 물질의 밀도, z는 고도이다.

위 (6)과 (7)을 이용하여 산란과정의 계산을 행하는 방법을 두 흐름(two stream) 근사라 하는데, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$의 값에 따라 다양한 two-stream 근사를 이용할 수 있고 근사의 종류에 따른 계수를 다음표에 나타내었다(Table 1).

식 (6)과 (7)에서 F_+ , F_-는 다음과 같이 표현되어진다.

$$F^+ = vKe^{kr} + uHe^{-kr} + \varepsilon e^{-\tau/\mu_0} \quad (9)$$

$$F^- = uKe^{kr} + vHe^{-kr} + \gamma e^{-\tau/\mu_0} \quad (10)$$

$$k^2 = \gamma_1^2 - \gamma_2^2 \quad (11)$$

$$v = \frac{1}{2}[1 + (\gamma_1 - \gamma_2)/k] \quad (12)$$

$$u = \frac{1}{2}[1 - (\gamma_1 - \gamma_2)/k] \quad (13)$$

$$\varepsilon = [\gamma_3(1/\mu_0 - \gamma_1) - \gamma_2(1 - \gamma_2)]\mu_0^2 \omega F_0 \quad (14)$$

$$\gamma = -[(1 - \gamma_3)(1/\mu_0 + \gamma_1) + \gamma_2\gamma_3]\mu_0^2 \omega F_0 \quad (15)$$

K와 H는 경계조건에 의해 결정되어지는 상수인데, 경계조건은 다음과 같다.

$$F^-(0) = 0 \quad (16)$$

$$F^+(\tau^*) = \alpha[F^-(\tau) + F_0\mu_0 e^{-\tau^*/\mu_0}] \quad (17)$$

여기서, α는 지표의 알베도이고, τ^*는 지표에서의 광학적두께이다. 위의 경계조건에 의해 결정되어진 상수 K와 H는 다음과 같다.

$$K = \frac{(\alpha v\gamma - \varepsilon v + \alpha v F_0\mu_0)e^{-\tau^*/\mu_0} + (\gamma u - \alpha v\gamma)e^{-k\tau^*}}{(v^2 - \alpha uv)e^{k\tau^*} - (u^2 - \alpha uv)e^{-k\tau^*}} \quad (18)$$

$$H = \frac{(\alpha u\gamma - \varepsilon u + \alpha u F_0\mu_0)e^{-\tau^*/\mu_0} + (\gamma v - \alpha u\gamma)e^{k\tau^*}}{(u^2 - \alpha uv)e^{-k\tau^*} - (v^2 - \alpha uv)e^{k\tau^*}} \quad (19)$$

광학적 두께 τ 에서의 직달 하향 복사속은 대기 외기권에 도달하는 태양복사 및 천정각과 관계 있으며 다음과 같다.

$$F_d = \mu_0 F_0 e^{-\tau/\mu_0} \quad (20)$$

따라서, 전파장영역에서의 고도별 총 상향 및 하향 복사속은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F^+(z) = \int_0^\infty F^+(\tau)d\lambda \quad (21)$$

$$F^-(z) = \int_0^\infty (F^-(\tau) + F_d(\tau))d\lambda \quad (22)$$

총 하향복사속과 상향복사속이 계산되면 고도별 순복사량(F_n)은 다음과 같이 표현된다.

$$F_n(z) = F^-(z) - F^+(z) \quad (23)$$

2.3. 조사율

본 연구에서는 복사전달방정식에 6가지 two-stream 근사들을 적용하여 자외선의 양을 추정한 후, 각 적용근사들을 이용한 조사율과 관측값과의 비교를 통하여 가장 적합한 근사를 선별하였다.

자외선의 조사율을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{dD}{dt} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda)F^-(\tau, \lambda)d\lambda \quad (24)$$

조사율(dose rate)이란 파장별 피부반응도를 고려한 자외선의 양이며, A(λ)는 파장별 피부반응도(action spectrum)이다. 조사율을 시간에 대해 적분을 하면 total dose를 구할 수 있다. 파장별 피부반응도는 각 파장이 생물에 주는 영향을 상대적으로 나타낸 값으로서, 본 연구에서 사용한 파장별 피부반응도(A(λ))는 다음 그림과 같다(Fig. 1).

Table 1. Coefficients for the two-stream approximations

Method	γ_1	γ_2	γ_3
Quadrature	$\frac{1-\omega(1+g)/2}{\mu_1}$	$\frac{\omega(1-g)}{2\mu_1}$	$\frac{1-3g\mu_1\mu_0}{2}$
Eddington	$\frac{7-\omega(4+3g)}{4}$	$-\frac{1-\omega(4-3g)}{4}$	$\frac{2-3g\mu_0}{4}$
Delta-Eddington	$\frac{7-\omega'(4+3g')}{4}$	$-\frac{1-\omega'(4-3g')}{4}$	$\frac{2-3g'\mu_0}{4}$
PIFM	$\frac{8-\omega'(5+3g)}{4}$	$\frac{3\omega'(1-g')}{4}$	$\frac{2-3g'\mu_0}{4}$
Discrete Ordinates	$\frac{\sqrt{3}}{2}[2-\omega(1+g)]$	$\frac{\sqrt{3}}{2}[\omega(1-g)]$	$\frac{1}{2}(2-\sqrt{3}g\mu_0)$
Delta Discrete Ordinates	$\frac{\sqrt{3}}{2}[2-\omega'(1+g')]$	$\frac{\sqrt{3}}{2}[\omega'(1-g')]$	$\frac{1}{2}(2-\sqrt{3}g'\mu_0)$

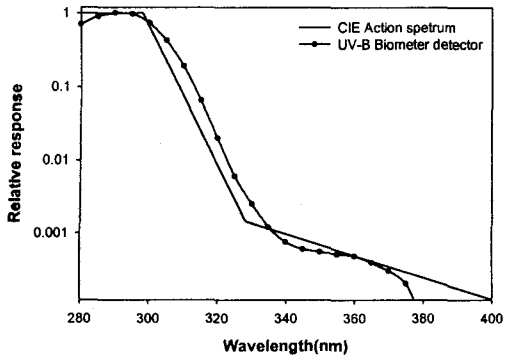


Fig. 1. Spectral response function of the UV-B biometer and the CIE action spectrum.

3. 연구결과

본 연구에서는 포항지역의 실제대기를 적용하여 고도별 및 지표의 조사율을 추정하였는데 구름의 효과를 제외하기 위해 고도별 기온, 기압, 습도 및 오존이 관측된 날 중 구름과 강수가 없는 맑은 날을 선정하였다. 선정된 날짜는 1996년 5월 22일, 1997년 3월 26일, 10월 8일, 1998년 2월 11일, 2월 26일, 6월 11일, 7월 23일, 7월 30일, 9월 2일, 9월 9일, 9월 25일, 그리고 10월 2일로서 총 12일이다.

3.1. 근사에 따른 고도별 조사율

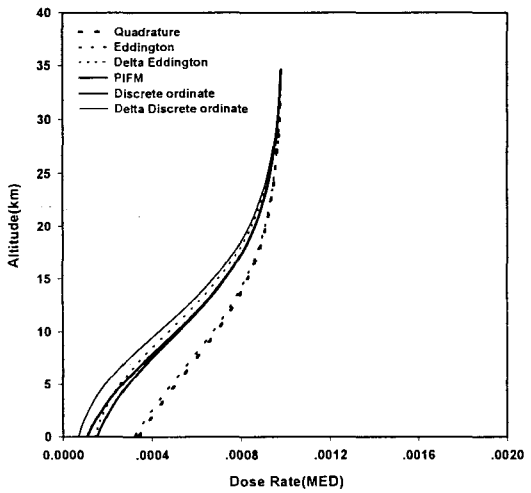
본 연구에서는 포항의 연직기상 및 오존 관측자료를 적용하여 고도별 조사율을 추정하였다. 선정된 날 중 각 겨울과 여름을 대표하는 1998년 2월 11일과 7월 23일을 선택하여 그림에 나타내었다(Fig. 2). 성층권상부에서의 조사율은 계절에 따른 차이는 있으나, 30km이상의 고도에서 근사간 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. 하지만, 고도가 감소하여 오존층을 통과하면 근사간의 차이가 커지는 것을 볼 수 있는데, 이는 자외선이 오존에 의해 받는 영향이 크고, 각 적용근사가 오존에 의한 자외선의 감소를 다르게 추정하고 있기 때문이다.

모든 선정날짜에 대하여 quadrature와 Eddington이 가장 큰 값을 나타내었고, 다음이 discrete ordiante, 그리고 PIFM, delta Eddington이 비슷한 값을 나타내었으며 delta discrete ordinate가 가장 낮은 값을 나타내었다. 조사율의 경우, detla 함수를 적용하면 값을 낮게 추정하였으며, 고도감소에 따른 조사율의 감소율은 모든 근사가 거의 유사한 경향을 나타내었다.

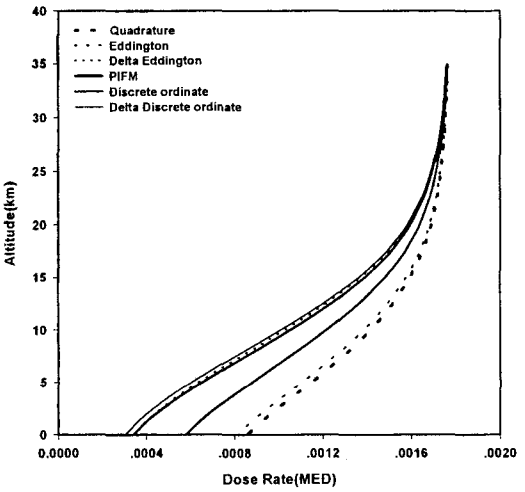
3.2. 근사에 따른 파장별 조사율

본 연구에서는 피부반응도를 적용한 조사율의 파장별 특징을 알아보기 위하여 2월 11일과 7월 23일의 지표에서의 조사율을 파장별로 계산하였다(Fig. 3).

그림을 보면 2월 11일과 7월 23일 모두 0.28μm에서 0.29μm까지는 파장이 증가함에 따라 조사율이 급격도 급격히 증가하고 0.298μm가지는 서서히 증가하여 조사율이 최대가 된 후, 그 이상의 파장에서는 파장에 따라 조사율이 급격히 감소하는 유사한 경향을 보였다. 적용근사간의 차이를 보면 quadrature과 Eddington이 다른 근사에 비하여 상대적으로 매우 높은 값을 나타내었고, delta Edding-

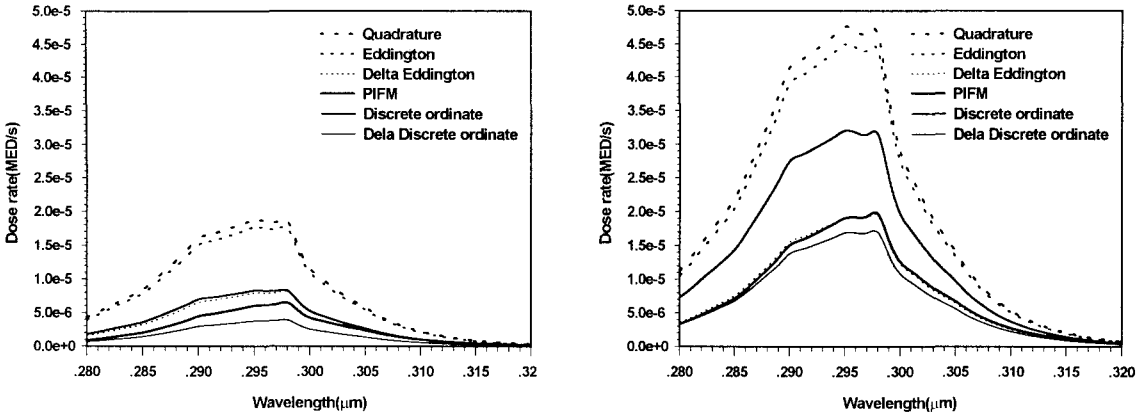


(a) 11 February 1998



(b) 23 July 1998

Fig. 2. Dose rate, intergrated over 0.28~0.32μm, as a function of height on selected days at Pohang for (a) 11 February 1998 and (b) 23 July 1998.



(a) 11 February, 1998 (b) 23 July, 1998

Fig. 3. Dose rate from 0.28 to 0.32 μm as a function of wavelength on selected day at Pohang for (a) 11 February 1998 and (b) 23 July 1998.

ton과 discrete ordinate가 다음으로 높은 값을 나타내었다. PIFM은 0.29 μm이하의 파장에서는 dleta Eddington보다 30%이상 낮은 값을 보였으나, 그 이상의 파장에서는 감소율이 점점 작아져서, 0.315 μm이상의 파장에서는 거의 비슷한 값을 타나내었다. 가장 낮은 값을 나타내는 것은 delta discrete ordiante로서, 0.28 μm에서는 PIFM보다 약 20% 작은 값을 보였으나, 파장이 증가함에 따라 PIFM과의 차이가 더 커져 0.3 μm이상의 파장에서는 40% 이상 낮은 값을 나타내었다.

하계인 7월 23일에는 파장별 조사율의 근사들간 차이가 2월 11일과 다른 결과를 나타내었다. 동계에는 delta Eddington과 discrete ordinate가 비슷한 값을 나타내었으나 하계에는 discret ordiante가 상대적으로 높은 값을 나타낸 반면, dleta Eddington과 PIFM이 거의 같은 값을 나타내어 10% 이내의 차이를 보였다. 동계와 마찬가지로 delta discrete ordiante가 가장 작은 값을 나타내었다.

3.3. 지표 조사율과 관측값의 일변화 비교

본 연구에서는 6가지 two stream 근사 중 어느 근사가 대기의 복사과정을 묘사하는데 가장 적합하지 알아보기 위해 각 근사를 적용하여 추정한 조사율과 지표에서의 자외선 관측값을 비교하였다. 0700 LST에서 1700 LST까지 30분 간격으로 측정된 피부반응도를 적용한 자외선(MED/30min)과 복사전달방정식을 이용하여 30분 간격으로 추정한 고도별 조사율의 지표에서의 값을 비교하였다. 선정된 날짜 중 6일을 선택하여 관측값과 계산값의 시간별 변화를 다음 그림에 나타내었다.(Fig. 4).

모든 날짜에 대해 quadrature가 가장 높은 값을 나타내었고, 그 다음이 Eddington, 그리고 discrete ordinate가 높은 값을 보여, 이 3가지 근사는 모두 관측값보다 비교적 높은 결과를나타내었다. 나머지 근사들은 관측값과 유사한 값을 나타내었는데, 전반적으로 1200 LST이전보다 정오가 지난 1200 LST이후의 값이 관측값과 더 유사한 것을 알 수 있다.

3.4. 지표 조사율과 관측값의 상관 및 오차분석

각 근사를 적용하여 추정된 계산값과 관측값과의 상관성을 비교, 분석하기 위해 모든 선정날짜를 대상으로 상관분석을 실시하였다(Fig. 5).

분석결과를 보면, 모든 근사가 $R^2=0.75$이상의 높은 상관성을 보이고 있으나, quadrature과 Eddington 및 discrete ordinate는 관측값보다 계산값이 높았다. Delta Eddington과 PIFM 및 delta discret ordinate는 모두 관측값과 계산값의 잘 일치하였고, 결정계수는 delta discrete ordinate가 0.807인 것을 비롯하여 모두 0.78이상의 높은 상관성을 보였다.

계산값과 관측값의 구조적 오차와 상대오차 백분율인 MEB(Mean Bias Error)와 RMBE(Relative Mean Bias Error)를 이용하여 각 근사에 따른 오차분석을 실시하였다(Fig. 6). MBE와 RMBE 및 RRMSE를 구하는 식은 다음과 같다.

$$MBE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i-M_i) \tag{25}$$

$$RMBE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{(P_i-M_i)}{M_i} \tag{26}$$

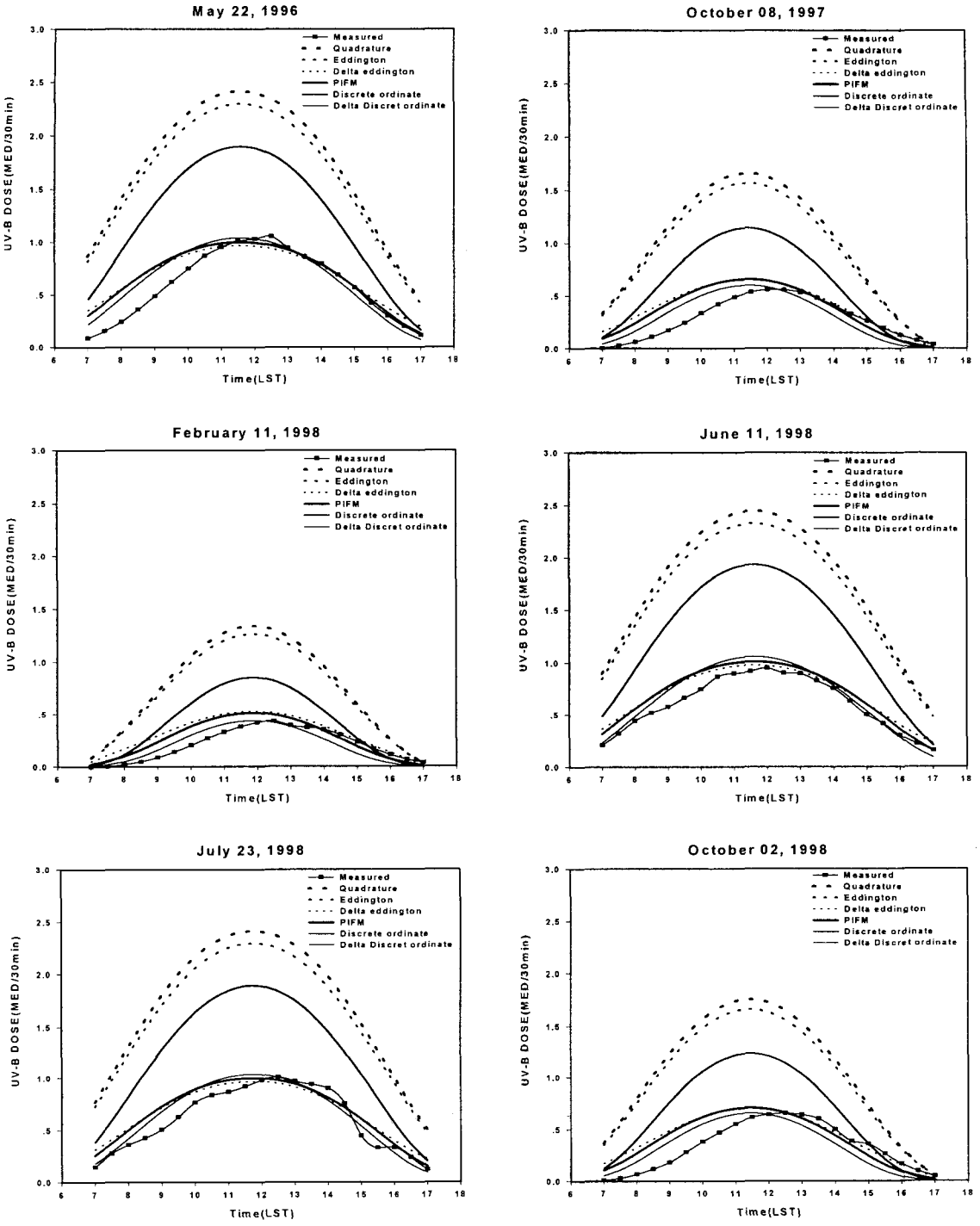


Fig. 4. Comparison of hourly variation between measured and calculated total dose on selected days at Pohang

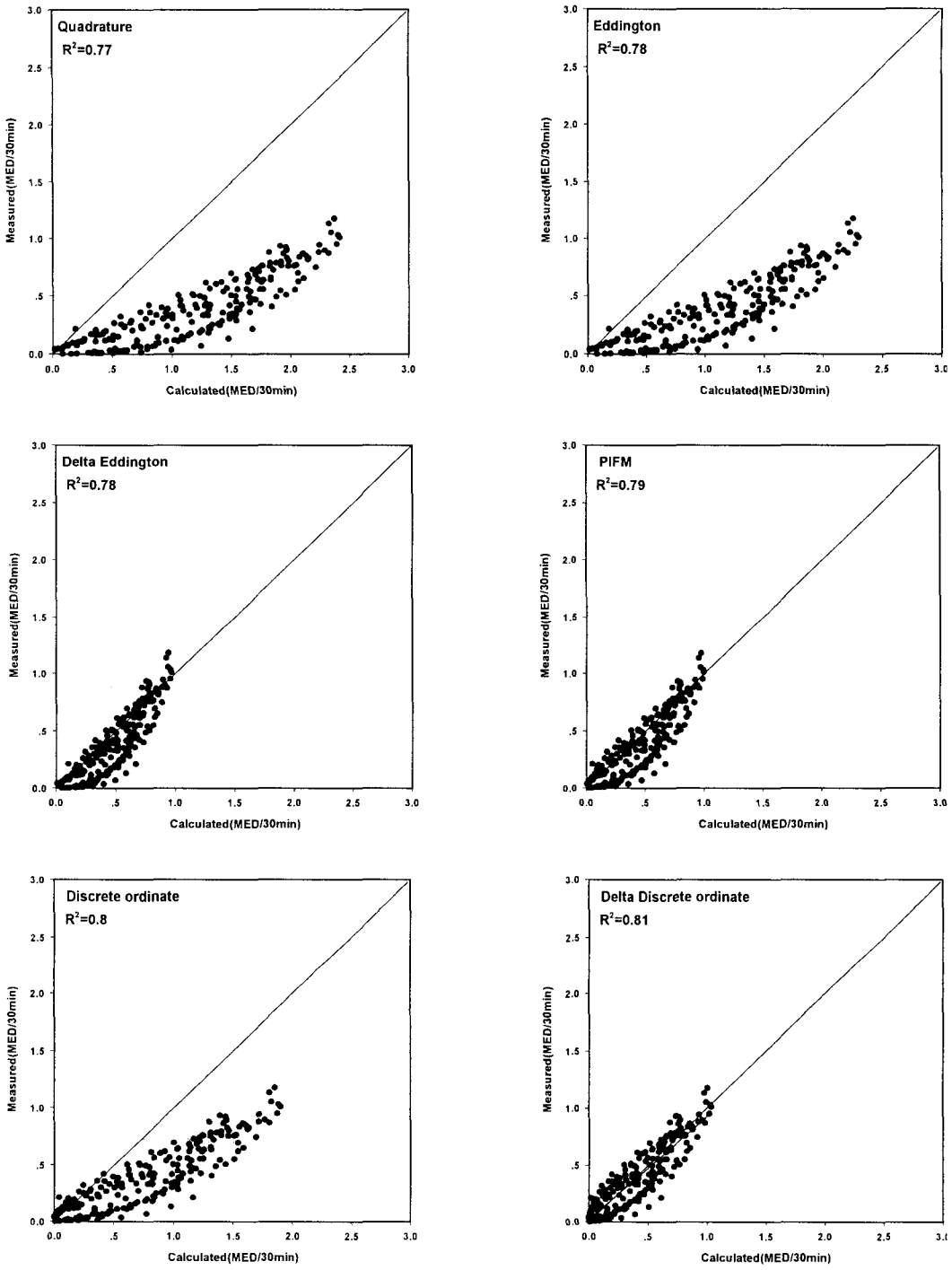


Fig. 5. Correlation between measured and calculated total dose on selected days at Pohang.

모든 근사가 1200 LST이전의 시간에 대하여 관측값보다 계산값이 낮은 결과를 나타내었으며, 1200 LST 이후에는 MBE와 RMBE가 0에 가까운 값을 보여 관측값과의 오차가 크지 않은 것을 알 수 있다. Quadrature과 Eddington은 시간별 오차가 거의 유사하였는데, MBE는 1000 LST와 1100 LST사이에 -1.3MED/30min으로 이 시간에 관측값과 계산값의 차이가 가장 컸으며, 이후 시간이 지날수록 오차가 줄어드는 결과를 나타내었다. RMBE는 -50%에서 -100%사이의 값을 보이며 하루 중 거의 비슷한 값을 나타내고, 이것도 역시 1200 LST에 오차가 감소하여 오후에는 -50%의 상대오차를 유지하였다. Delta Eddington과 PIFM은 1200 LST 이전에 MBE가 약 -0.2에서 -0.4MED/30min를 나타내어 quadrature과 Eddington에 비해 작은 오차를 보였으며, 1200 LST 이후에는 계속 오차가

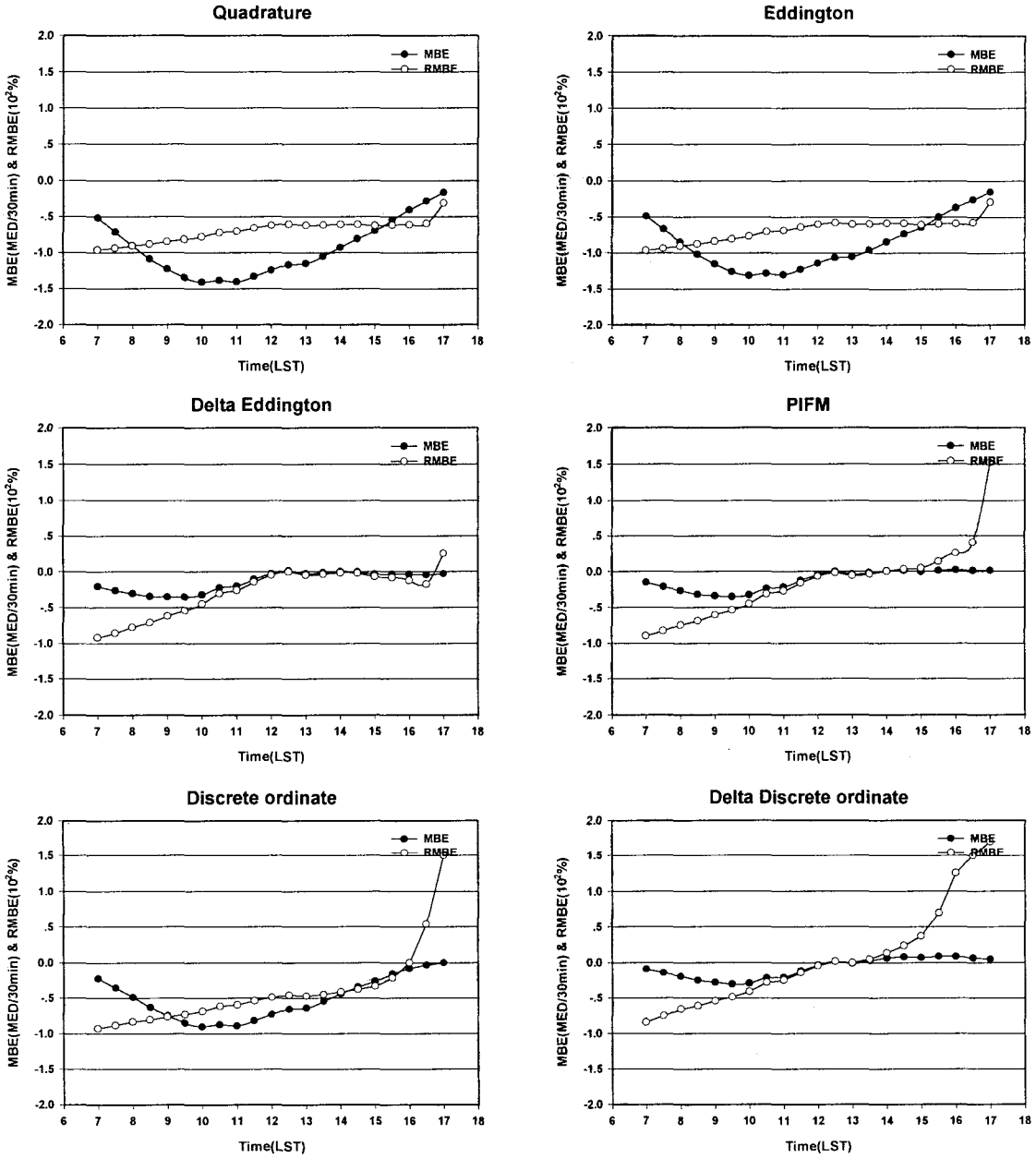


Fig. 6. Hourly variation of MBE and RMBE between measured and calculated total dose at Pohang.

0에 가까워 관측값과 계산값이 거의 일치함을 볼 수 있다. 특히, 하루 중 자외선의 양이 가장 강한 1200 LST와 1500 LST사이에는 RMBE도 0에 가까운 값을 나타내어 이 두가지 근사는 복사과정 중 유해자외선의 추정에 적합함을 알 수 있다. Discrete ordinate는 오차의 시간별 변화가 quadrature 및 Eddington과 유사한 경향을 보이지만, 오차는 조금 감소하였다. 1000 LST와 1100 LST사이에 MBE가 가장 커 -0.9MED/30min이 되고, 이후 감소하는 경향을 나타내나, 1600 LST이후에 RMBE가 갑자기 증가하여 50%이상이 되어 계산값의 상대적 오차가 아주 컸다. Delta discrete ordinate의 경우, MBE는 delta Eddington 및 PIFM과 유사한 값을 나타내어 0.4MED/30min이내의 오차를 보였고, 1200 LST 이후에는 0.1MED/30min이내의 오차를 보여 계산값과 모델값이 거의 일치하나 PIFM보다는 약간 큰 오차를 보였다. 조사율의 경우, delta 함수를 적용하면 관측값과의 오차가 감소하여 대기의 복사과정을 더 잘 묘사함을 알 수 있다.

본 연구에서 지표자외선의 관측값과 복사전달방정식에 6가지 two stream의 근사를 적용하여 추정한 조사율을 비교, 분석한 결과, 적용 근사 중 delta Eddington과 PIFM 및 delta discrete ordinate의 결정계수가 가장 높고, 오차가 가장 적어 대기의 복사과정을 묘사하는데 가장 적합함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 대기 오존장을 결정하는 세가지 과정(복사과정, 광화학과정, 대기역학) 중 복사과정인 조사율을 보다 자세히 추정하기 위해 복사전달방정식을 이용하였다. 복사전달방정식의 해를 구하기 위해 일반적으로 사용하는 two stream 근사 중 quadrature, Eddington, delta Eddington, PIFM, discrete ordinate, delta discrete ordinate를 적용하여 조사율을 추정하였고, 포항의 실제 대기를 입력자료로 하여 각 적용근사에 따른 추정 결과 분석 및 관측값과의 비교를 통하여, 복사전달방정식에 적용되는 근사 중 한반도의 조사율 추정에 가장 적합한 근사를 선별하였다.

피부반응도를 고려한 자외선(UV-B, 0.28~0.32μm)의 조사율을 연직적으로 추정한 결과, 모든 적용근사가 오존층 이상에서는 거의 비슷한 값을 나타내었으나 오존층 이하의 대기에서는 급격히 감소하기 시작하여 근사간 차이가 커지는 결과를 보였다. 전 고도에서 quadrature과 Eddington이 가장 높은 값을 나타내었고, delt Eddinton, PIFM, delta discrete ordiante가 낮은 값을 보였다.

한반도내 복사전달방정식을 이용한 조사율의 지표값과 포항의 지표자외선 관측값을 비교한 결과, delta Eddington과 PIFM 및 delta discrete ordinate가 각각 결정계수 0.78, 0.79, 0.81로 높은 상관성을 나타내었다. 오차분석을 실시한 결과, 세가지 근사 모두 MBE가 -0.3MED/30min 이내로 작은 오차를 보였고, 특히 자외선이 가장 강한 1200 LST에서 1400 LST사이에는 RMBE가 10%이내로서 포항의 복사과정 추정에 비교적 적합한 근사로 나타났다. 따라서, 복사전달방정식을 이용하여 한반도의 복사과정을 추정시, delta Eddington과 PIFM 및 delta discrete ordinate를 적용하는 것이 바람직하며, 복사과정을 보다 자세히 고려할 경우에는 stream의 수를 증가시킬 수 있는 detla discrete ordinate가 적합하다.

향후 한반도 내에서 오존 및 기상요소의 연직적 관측이 더 정밀히 이루어져 신뢰성 있는 입력자료를 확보할 수 있다면 본 연구에서 추정한 복사과정을 이용하여 유해자외선 추정을 위한 모델을 개선할 수 있으며, 이를 이용하여 유해자외선에 의한 피해를 최소화할 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 학술연구조성비(4년과제)에 의한 연구이며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1) Bojkov, R. D., 1995, The changing ozone layer, WMO/UNEP, Genava, ISBN 92-63-10828-5, 25.
2) WMO/EPA, 1998, Scientific assesment of ozone depletion.
3) 김성균, 김병선, 1995, 포항상공의 오존량 관측, 오존세미나, 기상청, 39-53.
4) Herman, J. R., P. K. Bhartia, Z. Ahmad, and D. Larko, 1996, UV-B increases (1979-1992) from decreases in total ozone, Geophys. Res. Lett., 23, 2117-2120.
5) Kezyscin, J. W., J. Jaroslawski, and P. Sobolewski, 2001, On an improvement of UV index forcast; UV index diagnosis and forecast for Belsk, Ploand, in Spring/Summer 1999, J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys, 63, 1593-1600.
6) Ilyas, Mohammad, 1991, Ozone depletion. USM and UNEP, 373pp.
7) Joseph, J. H. and W. J. Wiscombe, 1976, The Delta-Eddingt on Approximation for Radiative

Flux Transfer, J. Atmos. Sci., 33, 2452-2459.
8) Liou, K. N., 1974, Analytic two-stream and four-stream solution for radiative transfer, J. Atmos. Sci., 31, 1473-1475.
9) Shettle, E. P. and J. A. Weinman, 1970, The Transfer of Solar Irradiance Through Inhomogeneous Turbid Atmospheres Evaluated by Eddington's Approximation, J. Atmos. Sci., 27, 1048-1055.
10) 기상청, 오존관측연보, 1996, 1997, 1998, 1999, 오존관측연보, Ⅰ,Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ.
11) Wood, T. N., D. Prinz, G. J. Rottman, J. London, P. C. Crane, R. P. Cebula, E. Hilsenrath, G. E. Bruecker, M. D. Andrews, O. R. White, M. E. VanHoosier, L. E. Floyd, L. C. Herring, B. G. Knapp, C. K. Pankratz, and P. A. Reiser, 1996, Validation of the UARS solar ultraviolet irradiances, Comparision with the ATLAS 1 and 2 measurements, J. Geophys. Res., 101, 9541-9569.
12) Nicolet, M., 1989, Solar spectral irradiances with their diversity between 120 and 90nm, Planet. Space Sci. 87, 1249-1289.