

## 대기-3 연안배출 대기오염물질의 내륙 중거리 수송과 연관된 대기유동장 수치실험

이화운, 김유근, 정우식\*  
부산대학교 대기과학과

### 1. 서 론

연안지역에 위치한 여러 공단과 대도시들은 한국의 초기 경제개발과 산업발전이라는 기치아래 수많은 경제효과를 만들어내는 역할을 한 것이 사실이지만 이들 지역이 대기오염물질의 주요 배출원으로 작용하여 주변지역까지 대기질의 악화를 초래한 것 또한 사실이다. 이에 대해 최근까지 지속적인 관심과 저감방안 등이 제시되어 왔는데 최근에 들어서 더욱 많은 관심을 가지는 것은 이들 지역에서 배출된 오염물질이 지역적으로 형성되는 각각의 국지순환계와 더불어 내륙지역으로 중거리 수송된다는 점이다.

대기오염물질의 중거리 수송에 대한 관측적 연구는 많은 연구자들에 의해서 이루어져 왔는데(Edinger *et al.*, 1972; Blumenthal *et al.*, 1978; Carroll and Baskett, 1979; Kurita, 1986; Ueda *et al.*, 1988) 이들 연구를 통해 야간에 내륙지역의 고농도 현상이 연안지역 대도시와 공업지역에서 배출된 대기오염물질들의 중거리 수송과 연관되어 있다는 것을 보였다.

현 시점에서 대기오염물질의 중거리 수송을 정확히 분석하고 예측하기 위해서는 지역적 특성을 파악할 수 있는 충분한 관측소의 설치와 이를 통한 관측자료의 수집이 필수적이지만 이러한 것은 여러 많은 요인에 의해 상당히 제한적일 수밖에 없을 뿐만 아니라 우리나라와 같이 삼면이 바다를 끼고 있으면서 내륙지형이 굴곡과 경사가 심한 경우에는 지역적인 지리적 특성에 따라 발생 가능한 각각의 국지순환계의 영향을 직접적으로 받기 때문에 지금과 같이 넓은 지역을 대표하는 관측소의 자료만으로는 정확한 분석이나 이를 통한 예측에는 한계가 있으므로 대기유동장을 정확히 표현할 수 있는 중규모 대기유동장 수치모형이 우선적으로 필요한 것이다(Kikuchi, 1975; Kimura and Kuwagata, 1993). 이에 본 연구에서는 우리나라 남동지역을 대상으로 중거리 수송의 특징과 수송경로를 자세히 살펴보기 위한 수치모의를 수행하였다.

### 2. 국지순환모형

본 연구에서 사용한 모형(Local Circulation Model, 이하 LCM)의 기초방정식과 격자계는 Kikuchi 등(1981)이 개발하여 Kimura 와 Arakawa(1983)가 개선한 것으로 지형좌표계를 고려한 Boussinesq 정역학 방정식계를 채택하고 있다.

모형에서 사용한 운동방정식은

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huu}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} + \frac{\partial huw^*}{\partial z^*} \\
&= -h\Theta \frac{\partial \Pi'}{\partial x} + h \frac{Z_T}{Z_T - Z_G} \frac{\partial Z_G}{\partial x} \frac{\partial \Pi'}{\partial z^*} + \frac{\partial}{\partial x} (hK_H \frac{\partial u}{\partial x}) \\
&\quad + \frac{\partial}{\partial y} (hK_H \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} (K_v \frac{\partial u}{\partial z^*})
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hvu}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} + \frac{\partial hvw^*}{\partial z^*} \\
&= -h\Theta \frac{\partial \Pi'}{\partial y} + h \frac{Z_T}{Z_T - Z_G} \frac{\partial Z_G}{\partial y} \frac{\partial \Pi'}{\partial z^*} + \frac{\partial}{\partial x} (hK_H \frac{\partial v}{\partial x}) \\
&\quad + \frac{\partial}{\partial y} (hK_H \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} (K_v \frac{\partial v}{\partial z^*})
\end{aligned} \tag{2}$$

으로 나타낼 수 있으며 연속방정식은

$$\frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} + \frac{\partial hw^*}{\partial z^*} = 0 \tag{3}$$

이고, 열역학 방정식은

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial h\theta'}{\partial t} + \frac{\partial h\theta' u}{\partial x} + \frac{\partial h\theta' v}{\partial y} + \frac{\partial h\theta' w^*}{\partial z^*} \\
&= \frac{\partial}{\partial x} (hK_H \frac{\partial \theta'}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (hK_H \frac{\partial \theta'}{\partial y}) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} (K_v \frac{\partial \theta'}{\partial z^*})
\end{aligned} \tag{4}$$

으로 나타낼 수 있다.

### 3. 계산영역과 경계조건

수치모의의 대상영역은 경상남북도를 중심으로 지리산 일대와 전라도 일부지역을 포함하고 있으며(Fig. 1) 수평방향( $x, y$ )으로는 격자간격 4km로 하여 각각 90격자점을 사용하였고 연직방향으로는 40개 층으로 나누어 지표부근에서는 최소 5m 간격에서 상층으로 갈수록 넓어지도록 두었다. 측면경계조건으로는 Orlanski(1976)의 복사경계조건을 사용하였고 상면경계조건으로는 저층에서 형성되어 상층으로 진행되는 내부중력파를 반사하지 않고 효과적으로 흡수할 수 있는 Klemp 와 Durran(1983)이 사용한 복사조건을 사용하였으며 지표면 온도는 force-restore 방법(Bhumralker, 1975)을 이용하여 구하였다.

### 4. 수치모의 결과 및 토의

Fig. 2는 수치모의 결과중 1800LST의 결과를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 연안지역에서 시작된 해풍과 내륙 열적저기압의 영향으로 인해 내륙으로 진행되는 흐름을 뚜렷이 볼 수 있다. 또한 Fig. 3에 나타낸 유선분포를 보면 연안지역에서 시작된 흐름이 내륙에 위치한 대구 부근까지 이어져 있음을 볼 수 있다.

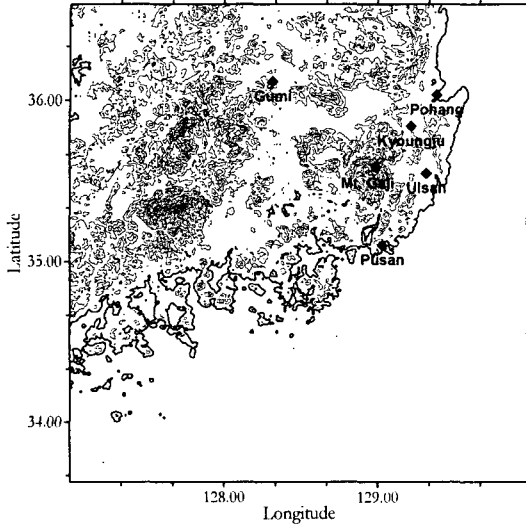


Fig. 1 Calculation domain for numerical simulation.

이상과 같은 대기유동장 수치모의를 통해 우리나라 남동지역에서 나타나는 국지순환계를 상세히 살펴볼 수 있었고 이를 바탕으로 이 지역에서 대기오염물질의 장거리 수송과 관련하여 그 뚜렷한 특성과 수송경로를 자세히 파악할 수 있었다.

이상에서 우리나라 남동지역을 대상으로 수치모의한 결과값과 관측값이 좋은 일치를 보임으로써 연안지역에서 형성되는 대기유동장을 수치모의하고 대기오염물질의 중거리 수송을 살펴보는 데 본 연구에서 사용한 LCM이 정확한 결과값을 제시할 수 있다는 것을 보여주었다.

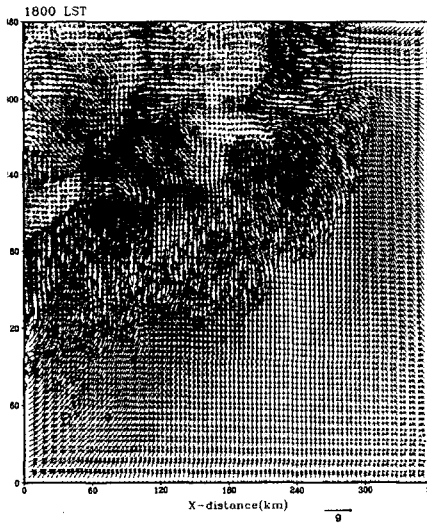


Fig. 2 Distributions of simulated wind field(unit : m/s) on 1800LST,

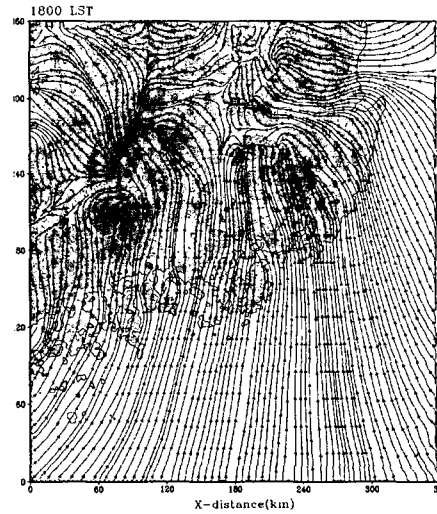


Fig. 3 Same as Fig. 2 except for streamline.

## 참고문헌

- Blumenthal, D. L., W. H. White and T. B. Smith, 1978, Anatomy of a Los Angeles smog episode : Pollutant transport in the daytime sea breeze regime, *Atmo. Environ.*, 12, 893-907.
- Carroll, J. J., and R. L. Baskett, 1979, Dependence of air quality in a remote location on local and mesoscale transports : A case study, *J. Appl. Meteor.*, 18, 474-486.
- Edinger, J. G., M. H. McCutchan, P. R. Miller, B. C. Ryan, M. J. Schroeder and J. V. Behar, 1972, Penetration and duration of oxidant air pollution in the south coast air basin of California, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 22, 882-886.
- Kikuchi, Y., 1975, Kairikufu no suchi simulation (Numerical simulation of land and sea breeze), *Kisho-Kenkyu Note*, 125, 21-49.
- Kimura, F. and T. Kuwagata, 1993, Thermally Induced Wind Passing from Plain to Basin over a Mountain Range, *J. Appl. Meteor.*, 32, 1538-1547.
- Kurita, H., and H. Ueda, 1986, Meteorological conditions for long-range transport under light gradient winds, *Atmos. Environ.*, 20, 687-694.
- Ueda H., S. Mitsumoto and H. Kurita, 1988, Flow mechanism for the long-range transport of air pollutants by the sea breeze causing inland nighttime high oxidants, *J. Climate Appl. Meteor.*, 27, 182-187.