

김유근, 이화운, 전병일

부산대학교 대기과학과

## 1. 서론

연안 지역에 위치한 대부분의 대도시는 주요한 인공오염원과 인구밀집지역이 집중되어 있는 양상을 가지고 있고, 특히 이런 지역에 해륙 분포와 산악 분포에 의한 해륙풍과 산곡풍 같은 중규모 국지순환이 일어난다면, 해안지역에서 발생한 오염물질이 수렴·정체되면서 연안도시의 특정지역에 대기오염농도를 급속히 상승시키는 현상이 발생될 수 있다. 또 해안부근에 높은 공장 굴뚝이 있을 경우에는 해풍의 영향으로 fumigation 현상이 발생하여, 고농도의 오염물질이 지상부근까지 하강하여 단시간내에 인체나 동식물에 심각한 고농도 피해를 나타낼 수도 있다.

연안도시에서의 대기오염의 일반적인 일변화를 보면, 야간의 역전층이 오염물질의 확산을 억제함에 따라 SO<sub>2</sub>, NO 등의 1차오염물질의 농도가 높아지면서, 상층에 오염기괴가 형성될 수 있다. 오전 중에 태양복사에너지의 영향으로 지표의 온도가 상승하면서 혼합층이 성장하고 기온역전층의 고도가 상승하므로 농도는 낮아진다. 그에 따라 하층에 체류하고 있던 1차오염물질도 상층으로 확산됨과 동시에 광화학반응이 진행되어 광화학 오염기괴로 변질되고, 10~11시경에는 1000m전후의 두께로 발달한 광화학 오염기괴는 해풍 및 해풍전선에 의해 내륙쪽으로 이동하게 된다. 보통 이러한 공기덩어리는 해풍전선에서 내륙쪽으로 이동하기 때문에 농도분포상으로 내륙쪽과 바다쪽에 2개의 고농도역이 출현하게 되는데, 내륙쪽의 것은 육상에서 형성된 오염기괴이고 바다쪽의 것은 해상에서 형성된 것으로 해풍에 의해 수송된 오염기괴이든가 아니면 해풍이 육상으로 들어오기 때문에 오염물질의 공급을 받고 형성된 오염기괴와 양자의 복합으로 생성된 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 복잡한 지형의 효과와 지표면의 상태가 고려되는 3차원 국지풍모델을 이용한 광화학 대기오염 수치모델을 부산연안역에 적용시켜 국지풍에 의한 오존농도의 시·공간적 변화 및 수송과 확산을 수치모의하여 광화학 대기오염물질에 대한 효율적인 대기질 관리방안과 대책을 수립하는데 기여하도록 하였다.

## 2. 수치모델

본 연구에서 사용한 수치모델은 국지풍모델과 광화학 대기오염모델로 나눌 수 있는데, 국지풍모델의 기초방정식은 Boussinesq 근사와 정역학평형 근사를 가정한 기상역학 방정식계로서 비직교좌표계인  $z^*$  좌표계를 사용하였다. 부산 연안을 중심으로 한 계산영역은 수평방향으로 각각(x와 y) 84km를 선택하였고, 격자간격은 2km로 42×42격자점을 이용하였다. 연직방향으로는 15, 50, 120, 235, 350, 500, 700, 900, 1100, 1400, 1800, 2200, 2800, 3600, 4400, 6000m의 16층으로 나누어서 계산하였으며, 적분시간간격은 15sec이며, 0600LST부터 48시간동안 적분하여 2일째의 값을 취하였다. 광화학 반응 모델은 미국의 S.A.I.(System Application International)에서 개발한 CBM(Carbon-Bond Mechanism)이며, 탄화수소분자를 그룹화하지 않고 비슷한 화학결합을 가진 탄소원자를 그룹화(lumped structure)하는 것이 CBM의 개념이다. CBM은 다양한 비메탄탄화수소(NMHC)를 탄소결합 형태에 따라 4종류의 그룹으로 탄소 환산하고 개개의 반응종에 의한 반응속도의 차를 동일한 기준으로 취급한다. 또한, 이 모델에서 취급하는 NMHC의 반응종으로서 단일결합 탄소원자(PAR), 반응성이 높은 이중결합 탄소원자(OLE), 반응성이 낮은 이중탄소원자(ARO), 그리고 카르보닐결합 탄소원자(CAR) 등 4가지 형태가 있다. PAR은 파라핀분자 뿐만 아니라 올레핀, 아로마틱 그리고 알데히드과 같은 단일결합 탄소원자를 포함하고 있으며, 이중

결합은 한쌍의 탄소원자를 취급하고, 활성화된 아로마티고리는 반응성이 낮은 세개의 이중결합 탄소원자로서 처리되고 있으며, 에틸렌은 ARO그룹으로 분류된다. 그리고 알데히드와 케톤과 같은 카르보닐 그룹은 CAR로 취급하며, 프로피렌이 한개의 빠른 이중결합 탄소원자와 한개의 파라핀 결합으로 구성되기 때문에 프로피렌 1ppm은 빠른 이중결합 탄소원자 1ppm과 파라핀 결합 1ppm을 산출한다. 그리고 비슷한 방법으로, 톨루엔은 한개의 파라핀 결합과 세개의 느린 이중결합으로 구성되어 있으며, 한개의 카르보닐그룹과 한개의 부가적인 탄소원자로 구성된 아세트알데히드는 carbon-bond mechanism으로 한개의 카르보닐그룹과 한개의 파라핀 결합으로 구성되어 있다. CBM의 반응종은 17개이고 32개의 반응식을 포함하고 있다.

### 3. 계산결과

수치실험의 입력자료는 1km×1km 격자안에 ton/km<sup>2</sup>/year단위로 NO<sub>x</sub>배출량을 각 격자에 입력하였으며, 계산적분간격은 2분간격으로 초기치의 영향을 고려하여 48시간 수치적분하여 2일째의 24시간 계산 결과를 검토의 대상으로 하였다.

먼저 0900LST경에는 부산도심부를 중심으로 20ppb정도의 낮은 농도를 나타내고 있으나, 1200LST경에는 차량의 통행이 많은 도심지역에 일사량의 증가에 의해 오존농도가 증가하여 120ppb에 달하고 있으며, 또한 해풍과 함께 오존의 기인물질인 NO<sub>x</sub>나 VOC가 풍하측으로 수송되면서 광화학반응에 의해 고농도 오존이 생성되었을 것으로 볼 수 있다. 그리고 해안지역은 강한 해풍에 의해 청정대기가 유입되면서 발생원지역의 하층에서는 오존농도가 낮게 나타났다. 1500LST경에는 농도 중심이 해안에서 내륙으로 향하는 해풍에 의해 영역 북쪽으로 이동하고 있으며, 고농도의 분포 면적도 점차 확대되어 있는 것을 알 수 있으며, 계산영역을 넓혀 수치모의한다면 장거리수송에 의해 영역 북부의 풍하측에서도 고농도 오존이 발생하리라고 생각된다(Figs. 1~2). 1800LST경의 농도는 일사량의 감소에 의해 농도감소가 매우 빠르게 진행되었으며, 고농도 오존역도 해풍의 영향으로 북쪽으로 많이 치우쳐 있다. 2100LST이후에는 오존농도가 급격히 감소하여 영역의 북부에 저농도의 오존이 조금 잔존해 있는 실정이며, 0600LST경에는 오존농도가 거의 존재하지 않는 상태를 나타내고 있다. 따라서, 오존농도는 이른 아침의 자동차 증가와 산업시설에서 배출되는 NO<sub>x</sub>와 HC에 의해 증가되며, 시간의 경과에 따라 해풍에 의해 내륙으로 수송·확산되면서 NO<sub>x</sub>와 HC는 희석되어 농도가 낮아지나, 오존 농도는 상대적으로 상승하고 고농도지역도 확대되는 것을 알 수 있다.

하루 중에서 일사량이 가장 높고 해풍의 영향을 가장 많이 받는 1500LST의 고도에 따른 오존농도 분포를 보면, 지상 40m에서 고농도 오존이 나타나 있으며, 200m에서의 농도분포는 40m의 분포와 거의 유사한 모습을 하고 있으나, 1000m에서는 상층에 나타나는 육풍의 영향으로 오존 분포가 해양쪽으로 많이 확산되어 있는 양상을 띄고 있으며, 이것이 해풍에 의해 재상륙하는 것 같은 현상은 아직 볼 수 없다. 1900m에서도 1000m와 같이 상층에서의 육풍의 영향으로 해양으로 치우쳐 있는 모양을 하고 있으며, 오존농도가 지상보다 다소 높은 경향을 나타내고 있는데, 이는 전날 배출된 오염물질이 상층에 존재하기 때문이라고 사료된다. 주간의 혼합고도가 1500m정도라고 한다면 혼합층위에서의 낮시간 동안의 오존농도는 대체로 배경농도가 지상농도보다 높아, 상층에서 고농도의 오존이 존재한다는 것이 여러 관측에 의해 실제로 확인된 바 있다.

### 4. 결론

부산 연안역의 국지풍과 광화학 대기오염물질의 이류확산과의 관계를 조사하기 위해 바람장과 연직확산계수가 계산되는 3차원 국지풍모델과 광화학 반응 모델(CBM: Carbon-Bond Mechanism)을 이용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

일반풍이 없는 상태의 부산 연안역의 바람장은 전형적인 해륙풍 순환을 나타내었으며, 1200LST부터는 영역북부에서 수렴역이 발생하여 점차로 북쪽으로 이동하였으며, 해풍에 앞서 곡풍이 먼저 발생하였고 곡풍과 해풍이 합쳐져 강한 국지순환을 나타내었으며, 1500LST에서의 연직분포로 보아 해풍의 상층 경계는 900m정도이고 반환류는 1800m정도로 나타났다.

국지풍을 이용한 부산연안역에서의 광화학 반응모델에 의한 오존농도분포를 보면, 오전에 연안부근에 분포하던 고농도역이 오후가 되면서 내륙 깊숙이 진입하고 있는 것으로 보아, 국지풍에 의해 큰 영향을 받고 있는 것으로 나타났으며, 야간에 오염원부근의 상층에는 다량의 오존이 남아 있지만, 지상에는 0에 가까운 농도를 나타냈으며, 낮동안의 상층의 오존농도는 육풍의 영향으로 해양으로 이동하고 있는 것으로 보아 국지풍에 의한 오존의 수송과정이 명확하게 나타났다.

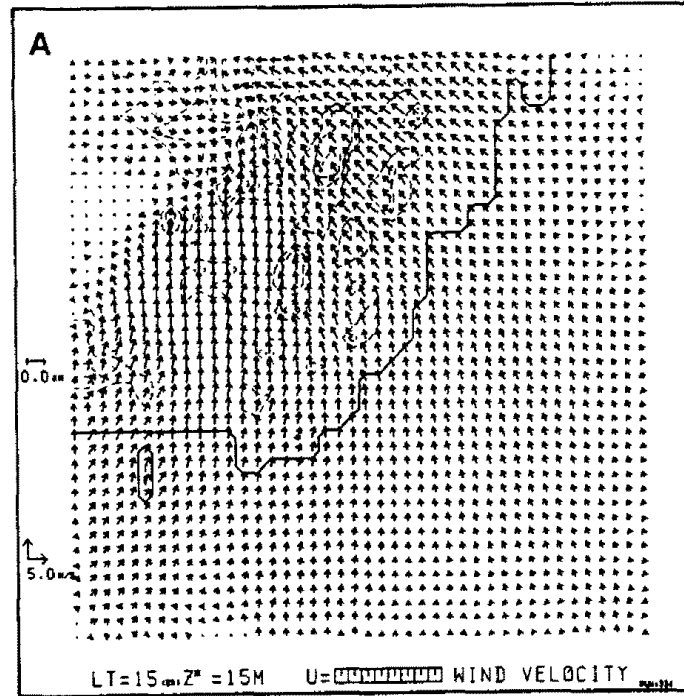


Fig. 1. Horizontal wind distributions obtained from the 3-D local wind model at 1500LST.

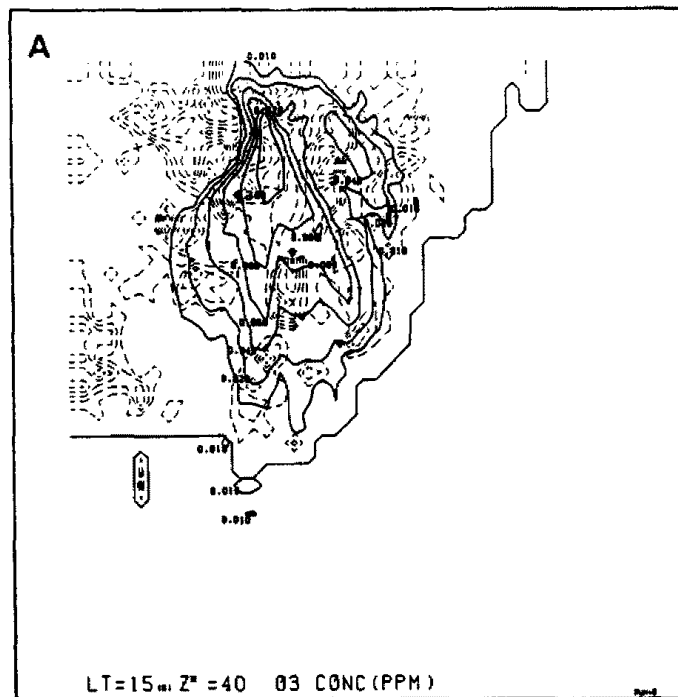


Fig. 2. Distribution of ozone concentration calculated from CBM in Pusan area at 1500LST.