

## 1C3) 선박배출 플룸을 위한 반응 퍼프 모델의 개발

### Development of Reactive Puff Model for Ship Plume

김 현 수 · 송 철 한

광주과학기술원 환경공학과

#### 1. 서 론

해양을 운항하는 대형 선박의 오염 배출은 국가 간의 교역 증가로 인해 그 배출량이 점차 증가하고 있으며, 해양 대기질과 기후변화의 관점에서 그 중요성은 매우 크다. 최근 연구에 따르면 선박에 의한 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>2</sub>의 배출은 2.8-3.5(TgN/year)와 2.5-4.2(TgS/year)로 전지구 화석연료 사용에 의한 오염물질 배출량의 14%와 4%를 차지하고 있으며, BC(Black carbon)와 CCN(Cloud Condensation Nuclei) 등의 입자상물질 배출은 albedo에 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 선박의 배출에 의한 기후 변화는 global scale의 모델을 이용한 이론적 연구 들이 진행되었으며, Endersen et al.(2003)에 의해 선박의 배출에 의한 기후강제력은 -0.11 (Wm<sup>-2</sup>)으로 산출되었다. 또한 Capaldo et al.(1999)에 따르면 선박에서 배출되는 SO<sub>2</sub>는 해양대기의 NSS (Non-Sea-Salt) sulfate aerosol의 주요한 배출원으로 대형 선박 배출 물질의 중요성을 강조하기도 하였다. 본 연구에서는 대형선박 배출 오염 플룸의 난류 확산 및 플룸 내의 화학 변환 과정을 동시에 고려 할 수 있는 Lagrangian reactive puff 모델을 개발하였으며, 모사능력의 평가를 위해 ITCT(International Transport and Chemical Transformation) 2K2 field campaign의 관측결과를 이용하였다.

#### 2. 연구 방법

본 연구에서 개발된 reactive puff 모델은 해양 대기중 화학적 변환과정의 고려를 위해 NMHCs(Non Methane HydroCarbons) 관련 대기화학 메커니즘이 modified된 Lurmann et al.(1986)의 chemical mechanism을 적용하였으며, 해양 대기 중 난류확산 과정은 Briggs(1972)과 Hanna et al.(1982, 1985)의 parameterization에 기초하였다. 배출된 오염물질은 Gaussian puff equation을 통해 난류확산 되며, 오염물질의 농도는 플룸은 중심선을 따라 식(1)를 통해 표현된다.

$$\frac{C}{Q} = \frac{1}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \quad (1)$$

여기서 Q는 emission rate(g/s), u는 풍향과 선박 이동 방향을 고려한 resultant velocity,  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 는 lateral 및 vertical concentration distribution의 standard deviation이며,  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 는 오염 물질의 이동거리에 따른 함수이다. 선박 배출 플룸의 난류확산 과정과 화학적 변이과정에 의한 오염물질 *i*의 net change는 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta C_i^N = \Delta C_i^D + \Delta C_i^R \quad (2)$$

또한 ITCT 2K2 field campaign의 관측결과와 모델 예측결과와의 비교를 통해 개발된 reactive puff 모델의 모사능력을 검증 하였다.

#### 3. 결과 및 고찰

ITCT 2K2의 선박 배출 플룸의 거동과 플룸 측정을 위한 항공기(WD-3D)의 측정 track을 아래 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서와 같이 선박에서 배출된 플룸은 A지점을 통과하여 H지점으로 이동하며 난류확산 과정과 대기 중 화학적 변환 과정을 거치게 된다. A지점과 H지점에서의 plume의 aging은 39.8(min)과 176(min)이며, 모델의 구동을 위한 배경 조건 역시 항공 관측을 통해 획득 하였다. 측정을 통해 획득된

NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 배경농도는 0.15, 40, 130, 0.16, 0.37(ppbv)이며, 풍향과 선박의 진행 방향을 고려하여 14(m/s)의 resultant velocity가 획득되었다.

그림 2에서는 오염 플룸의 plume aging에 따른 A, C, H에서의 primary pollutants의 모델예측결과와 항공관측의 비교 결과를 나타내었으며, 그림 3에서는 primary pollutants의 변환 과정에 따라 생성되는 secondary pollutants의 예측결과를 나타내고 있다. Primary pollutants의 예측결과는 resultant velocity가 14(m/s)이고 stability class가 neutral과 stable인 case I과 II사이에서 측정결과와 가장 유사한 농도 범위에 위치하였으며, Frick and Hoppel(2000)의 연구결과와 같이 해양에서의 주된 stability class가 neutral과 stable 사이라는 점에서 볼 때 개발된 reactive ship puff 모델의 난류확산 과정의 정확성을 나타낸다고 할 수 있다.

Secondary pollutants 예측결과 역시 case I과 II사이에서 관측결과와 유사한 농도 범위의 농도 분포를 나타내었으며, 그림 3의 O<sub>3</sub> 예측결과는 초기 배출된 플룸의 주된 NO<sub>x</sub> 성분인 NO의 산화과정에 의한 O<sub>3</sub>의 titration과 NO<sub>2</sub>의 농도 상승에 회복구간을 잘 묘사하고 있으며, HNO<sub>3</sub>와 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 역시 배출 플룸 근방에서는 농도가 감소하다가 다시 점차 상승하는 결과를 나타내었다. 특히 HNO<sub>3</sub>와 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 예측결과는 case I의 결과와 가장 유사한 결과를 나타내고 있다. 선박 배출 플룸 내의 오염물질의 검증결과는 본 연구에서 개발된 모델 모사능력의 정확성을 나타내고 있다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 선박 배출 플룸 모델은 향후 대형 선박의 배출에 대한 대기 환경적 영향성과 기후변화 기초 연구의 중요한 방법론으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

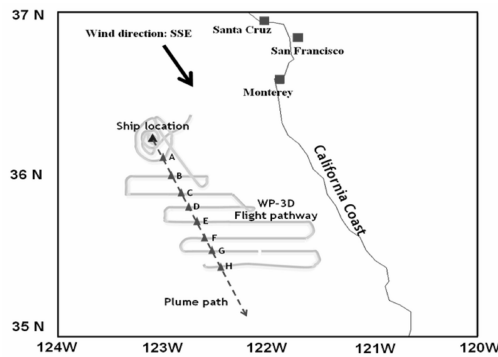


Fig. 1. ITCT 2K2 ship plume sampling, showing both plume path and WP-3D flight track.

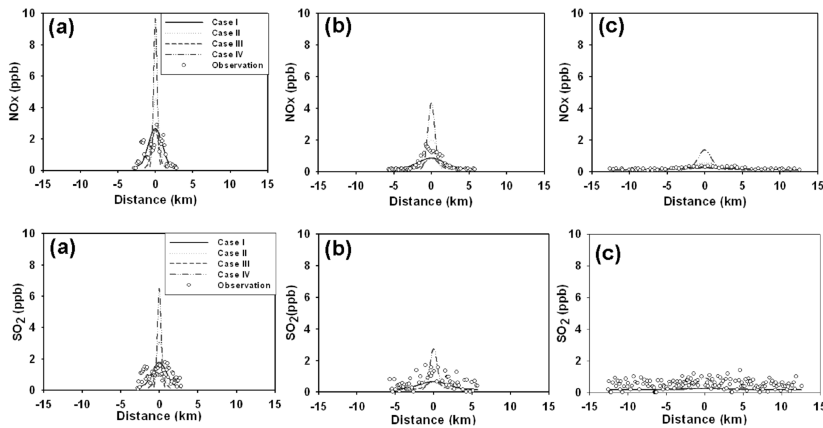


Fig. 2. Comparisons between predicted and observed primary pollutants at locations: (a) A, (b) C, and (c) H.

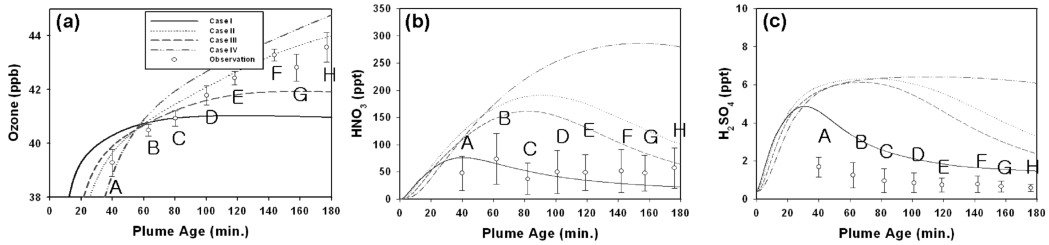


Fig. 3. Comparisons between predicted and observed secondary pollutants: (a) O<sub>3</sub>, (b) HNO<sub>3</sub>, and (c) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

### 사 사

본 연구는 한국환경기술진흥원의 차세대 핵심환경기술개발사업(121-081-055)의 지원과 산업자원부에서 주관한 전력산업 연구개발사업(R-2005-7-089)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- Briggs, C.A. (1972) Discussion: Chimney plumes in neutral and stable surroundings, *Atmos. Environ.*, 6, 507-510.
- Capaldo, K., J.J. Corbett, P. Kasibhatla, and S.N. Pandis (1999) Effects of ship emissions on sulphur cycling and radiative climate forcing over the ocean, *Nature*, 400, 743-746.
- Endresen, Ø., E. Sørgård, J.K. Sundet, S.B. Dalsøren, I.S.A. Isaksen, T.F. Berglen, and G. Gravir (2003) Emission from international sea transportation and environmental impact, *J. Geophys. Res.*, D17, 4560.
- Frick, G.M. and W.A. Hopel (2000) Airship measurements of ship's exhaust plumes and their effect on marine boundary layer clouds, *J. Atmos. Sci.*, 57, 2625-2648.
- Hanna, S.R., G.A. Briggs, and R.P. Hosker, Jr. (1982) *Handbook on Atmospheric Diffusion*, DOE/TIC-11223. Department of Energy, Washington, DC, 102pp.
- Hanna, S.R., L.L. Schulman, R.J. Paine, J. Pleim, and M. Baer (1985) Development and evaluation of the Offshore and Coastal Dispersion Model, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 35, 1039-1047.