

**PC7) 선박배출 플룸 모델을 이용한 SO<sub>2</sub>의 화학적 변환과정에 관한 특성 연구**

**Investigation of Sulfur Chemistry Using a Ship-plume Model**

김용훈 · 김현수 · 송철한

광주과학기술원 환경공학과

**1. 서 론**

해양 운항하는 선박으로부터 배출되는 오염물질의 배출량은 국제 무역의 성장과 맞물려 점차 증가해 왔으며, 대기 환경적 측면과 기후변화 측면에서의 중요성은 매우 크다. 이러한 중요성은 1990년대 말을 기점으로 많은 학자들에 의해 인지되기 시작하였으며, 최근 Corbett and Koehler(2003)의 emission factor estimation에 따르면 선박의 운항에 의한 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>2</sub>의 배출량은 전 지구적 인위적 배출의 ~21%와 ~7%를 차지하는 것으로 보고된 바 있다. 선박 배출 오염물질 중 SO<sub>2</sub>는 그 배출량이 7%에 불과하지만, MBL(Marine boundary Layer) 환경에서 nss-sulfate(non sea-salt sulfate)의 지배적인 소스로 작용하여 CCN(Cloud Condensation Nuclei)의 형성을 촉진시키게 되고(Carpaldo et al., 1999), CCN의 생성 증가는 global radiation budget에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 선박으로부터 배출되는 오염물질의 비선형적 화학변이과정을 모사할 수 있는 ship-plume model을 활용하여 SO<sub>2</sub> lifetime 및 새로운 입자의 형성에 관한 화학적 변환과정의 특성을 연구하고자 한다.

**2. 연구 방법**

본 연구에서 적용된 ship-plume model은 오염 플룸의 난류확산과 대기 중 광화학 반응을 동시에 고려할 수 있는 모델로서, 모델에 적용된 chemistry scheme은 Lurmann et al.(1996)의 chemistry mechanism이다. 오염물질의 난류 확산 과정은 Briggs(1972)와 Hanna et al.(1985)에 의해 제안된 parameterization이 적용되었다. 본 연구에서는 ship-plume 모델을 이용하여 각 transect 별 대기 안정도에 따른 SO<sub>2</sub>의 모델 예측 결과와 ITCT 2K2 field campaign의 관측 결과의 비교를 통해 모델의 모사 능력을 검증하였으며, AMVER ship traffic density map을 기초로 산정된 운항정보를 토대로 선박의 운항이 가장 많은 지역들에서의 sulfur chemistry의 특성을 분석하였다. Sulfur chemistry의 분석을 위해 chemical SO<sub>2</sub> lifetime을 산출하였으며, instantaneous SO<sub>2</sub> lifetime은 아래의 식 (1) 및 (2)와 같이 SO<sub>2</sub>의 농도를 instantaneous SO<sub>2</sub>의 loss rate ( $L_{SO_2}^i$ )로 나누어 줌으로써 계산되어 진다.

$$L_{SO_2}^i = k_1[OH][SO_2] + k_{t,SO_2}[SO_2] + \frac{\nu_{d,so_2}}{H}[SO_2] \quad (1)$$

$$\tau_{SO_2}^i = \frac{[SO_2]}{L_{SO_2}^i} = \frac{1}{k_1[OH] + k_{t,SO_2} + \frac{\nu_{d,so_2}}{H}} \quad (2)$$

여기서  $\tau_{SO_2}^i$ 는 instantaneous SO<sub>2</sub> lifetime,  $\nu_{d,so_2}$ 는 SO<sub>2</sub>의 dry deposition velocity, H는 mixing height를 나타낸다. SO<sub>2</sub>는 OH 라디칼과의 산화 반응을 통해 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 생성시키는 homogeneous 반응과 입자 표면에 scavenging되어 상변화하게 되는 heterogeneous 반응을 통해 대기 중에서 제거되게 된다. 본 연구에서는 다양한 SO<sub>2</sub>의 emission 조건 하에서 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 생성량은 변화하게 되고, 이러한 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 농도 변이는 nucleation에 영향을 미친다. 본 연구에서는 새로운 입자의 생성 기작인 nucleation에 대해 UCN(Ultra-fine Condensation Nuclei)이 nucleation indicator로서의 역할을 하며, nucleation rate( $J_{nuc}$ )를 통해 입자 생성의 특성을 분석하였다.  $J_{nuc}$ 은 아래의 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\log_{10} J_{nuc} = \log_{10}(k_n) - (64.24 + 4.7RH) + (6.13 + 1.95RH)(\log_{10}[H_2SO_4] + (298 - T)/25) \quad (3)$$

여기서  $k_n$ 은 실험적 scaling factor인 “nucleation tuner”, RH는 상대습도, T는 켈빈온도를 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

ITCT 2K2의 NOAA WP-3D의 항공측정과 ship-plume model의 모사를 통해 산출된 SO<sub>2</sub>의 농도 비교를 그림 1에 나타내었다. 시간에 따른 선박에서 배출된 플룸의 거동 특성을 알아보기 위해 transect A부터 H까지의 8개 플룸과 항공기의 교차점에서의 비교가 실시되었으며, 본 결과를 통해 ship-plume의 모사 능력이 매우 우수함을 알 수 있다. 또한 그림 2는  $\tau_{SO_2}^i$ 과 OH 라디칼의 농도를 비교한 결과로 오염 플룸 내의 SO<sub>2</sub>의 농도 분포를 Gaussian 분포로 가정했음에도 불구하고 secondary pollutant인 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 농도 구배는 Non-Gaussian로 나타났으며, 이는 비선형적 plume chemistry에서 기인한 것이다.

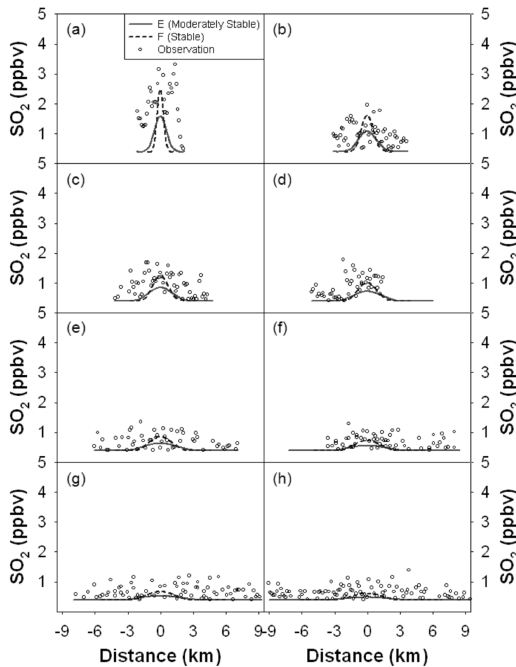


Fig. 1. Model-predicted vs. observed SO<sub>2</sub> concentrations across the eight ship-plume transects (A-H) under the stability classes of moderately stable (E) and stable (F).

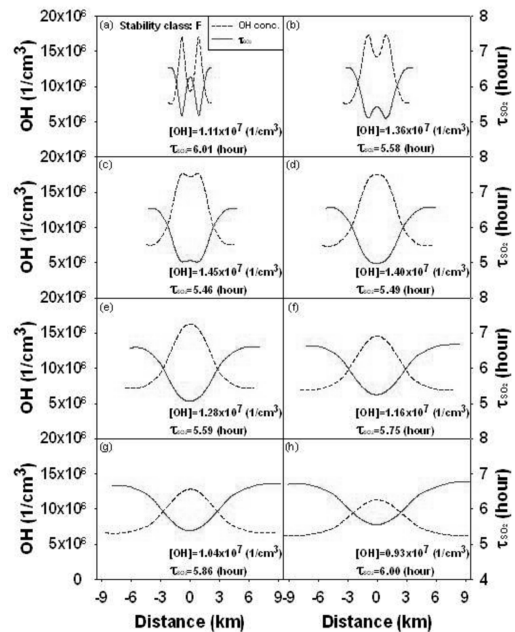


Fig. 2. OH radical concentrations and SO<sub>2</sub> lifetimes across the ship-plume transects A-H.

### 사 사

본 연구는 한국연구재단의 도약연구지원사업(NO.R17-2008-042-01001-0)의 지원과 2010년도 광주과학기술원의 재원인 기본연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- Kim, H.S., C.H. Song, R.S. Park, G. Huey, and J.Y. Ryu (2009) Investigation of ship-plume chemistry using a newly-developed photochemical/dynamic ship-plume model, Atmos. Chem. Phys., 9, 7531-7550.
- Song, C.H., G. Chen, and D.D. Davis (2003b) Chemical evolution and dispersion of ship plumes in the remote marine boundary layer: Investigation of sulfur chemistry, Atmos. Environ., 37, 2663-2679.