

## 오리멀전 연소시 발생하는 백연의 연기거리 전산모사

곽병규, 김종호, 주지봉, 이정진, 김진수, 김영훈<sup>†</sup>, 이종협<sup>\*</sup>

서울대학교 화학생물공학부  
151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1

<sup>†</sup>광운대학교 화학공학과  
139-701 서울시 노원구 월계동 447-1

(2008년 3월 21일 접수; 2008년 6월 10일 채택)

### Simulation of Plume Length Induced by Orimulsion Combustion

Byoung Kyu Kwak, Jong Ho Kim, Ji Bong Joo, Jeongjin Lee, Jinsoo Kim,  
Younghun Kim<sup>†</sup>, and Jongheop Yi<sup>\*</sup>

School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University,  
San 56-1, Sillim-dong, Kwanak-gu, Seoul 151-742, Korea

<sup>†</sup>Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University,  
447-1, Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea

(Received for review March 21, 2008; Revision accepted June 10, 2008)

#### 요 약

본 연구에서는 오리멀전(orimulsion)을 연소하는 발전소에서 배출되는 가시백연의 가시도 증가를 확인하고, 그 원인을 파악하고자 하였다. 오리멀전을 연료로 사용하는 발전소에서는 미세 먼지입자와 황화합물이 포함된 연기를 발생한다. 발전소 공정데이터를 바탕으로 미세 먼지입자의 영향에 대해서는 모니터링을 통한 로그정규분포로 배출입자의 입도분포를 대입하였고, 황화합물 에어로졸 2차 입자의 주성분(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 생성 화학방정식을 고려하였다. 연기에 의한 가시도를 정량적으로 평가하고자 미국의 EPA에서 개발된 대표적 시정모델인 PLUVUE-II 모델을 응용하였다. PLUVUE-II 모델이 단과장에만 모사되는 문제를 개선하여 가시광선 전 영역에서 계산이 가능하도록 하여 가시도에 따른 최대 연기거리를 광학적 방법으로 계산하였다. 모델링 결과로써 미세입자의 분포와 황화합물의 농도에 따른 최대 연기거리의 변화를 평가하였다. 연구 결과로 오리멀전의 연소로 발생된 가시백연이 미세입자와 황화합물의 2차 입자에 의해 유발될 수 있음을 확인하였으며, 이러한 가시백연의 저감을 위해서는 미세입자의 크기와 황 화합물의 배출에 대한 제어가 필요하다고 판단된다.

**주제어** : 명암 대조값, 오리멀전, 연기거리, PLUVUE-II, 입자크기분포

**Abstract** : The objective of this study is to investigate the visibility of plume at the Y power plant stack, which fires the orimulsion as a fuel. The plume contains numerous primary particles under 1 μm size and inorganic ions possibly inferred by the chemicals of secondary aerosol formation. We evaluated the visibility of the plume using the modified PLUVUE-II model. The monitoring data on the particle size distribution (PSD) and secondary aerosols of sulfate were applied to estimate and evaluate the main factors of plume opacity. The chemical reactions were applied to the model for the secondary aerosol formation of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(s). The maximum plume length was estimated by an optic method using threshold contrast. The results showed that the plume length was strongly dependent upon the PSD and (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(s) concentration of the plume emitted from the stack.

**Key words** : Contrast, Orimulsion, Plume length, PLUVUE-II, Particle size distribution (PSD)

\* To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: jyi@snu.ac.kr

## 1. 서 론

산업의 급속한 발달과 함께 대기 오염물질의 양이 증가하고, 그 물질들은 대기 중에 부유하면서 태양 빛을 흡수, 산란시켜 사람들에게 시정장애를 일으키고 있다. 이러한 물질들은 배출원에서 직접 배출되는 1차 입자와 대기 중에서 형성되는 2차 입자로 구성되며 각 입자의 양이 많아짐에 따라 대기 혼탁도가 커져 시정에 더 큰 장애를 발생시킨다. 시정장애 현상은 대기오염을 가시적으로 직접 확인할 수 있는 체감지표 중의 하나이며, 주로 대기질 내에서 오염물질의 광, 화학 및 기상학적 분석을 통하여 예측할 수 있다.

국제적으로도 시정장애에 대해 많은 관심을 갖고 지속적으로 연구를 진행하고 있다. 대표적으로 미국의 IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments) 프로젝트, 북미대륙(미국, 캐나다, 멕시코) 공동연구인 NARSTO (North American Research Strategy for Tropospheric Ozone and Aerosols), 유럽대륙의 EURO-TRAC II (The EUREKA Project on the Transport and Chemical Transformation of Environmentally Relevant Trace Constituents in the Troposphere over Europe-second phase) 등이 있다[1]. 또한 시정장애를 이해하기 위해 다양한 모델이 개발되었다. 미국 EPA (Environmental Protection Agency)의 PLUVUE-II 모델이 대표적이며, 몬테카를로 방식을 이용하고 있는 VASM (Visibility Assessment Scoping Model) 모델과, 연기의 분산에 2차 종결방식이론을 사용하여 물질들의 농도를 계산하는 ROME (Reactive and Optics Model of Emissions) 모델 등이 있다[2-4].

현재 국내의 Y 발전소에서는 연료로 오리멸전을 사용하였다. 이러한 오리멸전은 천연 역청을 물에 분산시킨 에멀전으로서 타 연료를 대신할 대체연료로서 주목받고 있다. 그 배경으로 오리멸전은 수분 함유량이 높아 연소시에 화염의 온도가 비교적 낮고, 질소의 함유량이 적기 때문에 NO의 발생이 적은 장점을 가지고 있다[5]. 그러나 오리멸전을 연료로 사용한 대부분의 경우에 가시백연이 발생하는 문제가 제기되고 있다. 국내 Y 화력발전소에서도 가시 백연의 발생으로 인해 주변 지역에서 환경민원이 증가하고, 오리멸전을 연료로 사용하는 것이 제한되고 있다.

가시백연의 발생에 대한 주요 원인으로 미세입자의 입도분포와 황산화물의 2차 입자의 재성장이 주요 원인으로 보고된 바 있다[6]. 본 연구에서는 미세입자의 입도분포와 황산화물에 의한 2차 입자의 영향에 의한 가시백연의 연기거리를 통해 시정장애 정도를 정량적으로 평가하기 위하여 PLUVUE-II 모델을 변형하여 이용하였다. 모델의 입력 자료로 Y 화력발전소에서 실

측된 미세입자의 입도분포를 활용하였고, 기존의 모델에서 사용되는 단파장 550 nm에서의 연기의 대조값 외에 전 가시광선 영역의 파장을 고려한 연기의 대조값을 계산하였다. 또한 2차 입자의 영향을 고려하기 위하여  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$ 의 생성 화학방정식을 도입하였다. 대조값을 이용한 광학적 방법을 통해 발전소에서 발생하는 가시백연의 최대 연기거리를 계산하였다[7]. 이러한 연기거리의 계산을 통해 오염물질에 의한 시정장애 정도를 정량화하여 나타낼 수 있었고, 미세입자의 입도분포와 황산화물의 농도 변화를 통한 연기거리의 변화를 예측하였다.

## 2. 연구 배경

### 2.1. 오리멸전의 특성

오리멸전은 베네수엘라 오리노코(Orinoco)강 북부지역의 지하 600~1500 m에 매장되어 있는 천연 역청탄에 물과 계면활성제를 첨가해 만든 연료로, 석탄과 석유의 중간성질을 나타내며 새로운 대체 연료로 주목받고 있다. 오리멸전은 중유에 비해 발열량은 70%이지만, 경제적인 면에서 가격이 40%이고, 가체 매장량(410억 톤)이 커서 발전소나 공장에서의 사용이 점차 늘고 있다. 오리멸전은 석탄-물 슬러리, 석탄-오일 슬러리, 에멀전과 같은 다성분계 연료로서, 연속적인 액상(물)에 고상(탄화수소)이 분산되어 있다. 일반적으로 사용되는 고체 또는 액체 연료를 연소시키는 것과는 달리 연료 내에 수분이 많이 포함되어 있고, 배출가스 내에서 황, 니켈, 바나듐의 함량이 높게 나타나는 특징이 있다[5].

### 2.2. 가시백연의 발생 원인

오리멸전 연소로 발생하는 배출 물질의 성상을 알아보기 위하여 본 연구의 대상인 화력발전소의 굴뚝자료모니터링시스템(TMS, Telecommunications Management System) 자료를 분석하였다. 또한 배출물질 중 입자상 물질의 입도분포(PSD)를 파악하기 위하여 Cascade Impactor (Andersen Ambient, 400 holes/stage, 28.3 L/min 유속, 0.4-9.0  $\mu\text{m}$   $d_{50}$ )를 사용하여 실측하였다. 입자상 물질들의 성분은 국가인증기관인 화학시험연구원을 통하여 분석하였고, 그 결과를 Table 1에 나타냈다. 1호기, 2호기 보일러 모두에서 입자들의 크기는 대부분 1  $\mu\text{m}$  크기 이하로 형성되었으며, 그 구성 성분으로 바나듐, 나트륨, 니켈 등의 이온입자들이 많이 검출되었다[6].

미세입자의 크기와 가시백연의 상관성은 입자 크기에 따른 광산란효율의 차이로 해석할 수 있다. Mie 이론에 따르면 입자의 광산란효율은 입자의 크기, 특성, 빛의 입사각도 등에 따라

Table 1. Organics and dust concentration in stack 1 and stack 2

Unit	Dust (mg/Sm <sup>3</sup> )	SOx (ppm)	NOx (ppm)	NH <sub>3</sub> (ppm)	V ( $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ )	Na ( $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ )	O <sub>2</sub> (%)
Stack 1	39	37	200	5	52	75	5
Stack 2	46	85	100	11	45	190	6

Table 2. Aerosol properties for PLUVUE-II[2]

Particle Type	Size median diameter ( $\mu\text{m}$ )	Sigma	Density ( $\text{g/cm}^3$ )	Index of real	Index of imaginary
Background accumulation mode	0.3	2.0	1.5	1.5	0.0
Background coarse mode	6.0	2.2	2.5	1.5	0.0
Plume secondary	0.2	2.0	1.5	1.5	0.0
Plume primary	2.0	2.0	2.5	1.5	0.0
Carbonaceous	0.1	2.0	2.0	2.0	1.0

달라진다. 다음 식 (1)은 Mie 이론에 따른 광산란 효율에 관한 계산식을 나타낸다[8].

$$B_{ext}(\lambda) = \int_0^{D_p^{MAX}} \frac{\pi D_p^2}{4} Q_{ext}(m, \alpha) n(D_p) dD_p \quad (1)$$

여기서,  $D_p$  는 입자의 지름,  $b_{ext}$ 는 전체소멸계수,  $\lambda$ 는 빛의 파장,  $m$  는 입자의 복합굴절지수,  $n(D_p)$ 는 입자수 크기 분포,  $Q_{ext}$ 는 Mie이론의 소멸효율인자,  $\alpha (= \pi D_p / \lambda)$ 는 입자와 빛의 파장과 관련된 무차원 상수를 나타낸다. 식에서와 같이 광산란 효율은 빛의 복합굴절지수와 빛의 파장, 입자의 크기에 의해 나타나게 된다. 광산란효율은 입자들의 크기가 작아질수록 높아지며, 실제 대기 중에는 0.1 - 1  $\mu\text{m}$  크기 사이의 입자의 양이 1  $\mu\text{m}$  이상의 크기를 갖는 입자의 양보다 시정장애에 큰 영향을 미친다[9].

가시백연의 또 다른 주요 원인으로 황, 암모늄 등의 이온입자들에 의한 2차 입자의 영향을 들 수 있다. 이러한 이온입자들은 직접 배출된 1차 입자들과 화학적으로 반응하여 대부분 고체로 이루어진 2차 입자를 생성하며, 이 때 생성된 2차 입자들은 대기의 시정장애에 큰 영향을 일으킨다[10]. 여기서 1차 입자란 발생원에서 직접 대기 중으로 배출된 입자를 말하며, 2차 입자는 1차 입자 중 가스상 물질의 광화학 또는 열화학반응으로 생성된 황산염, 질산염 및 유기물질과 같은 고체입자들을 말한다. 본 연구에서는 황화합물이 2차 고체입자로 생성되면서 에어로졸이 형성되고 이에 의해 가시백연이 발생하는 것으로 해석하였다. 황 이온과 반응하여 생성되는 2차 입자들 중  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$  입자의 영향을 계산하였다.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$ 은 황산이온과 암모늄이온이 반응하였을 때, 생성되는 대표적인 2차 고체입자로, 대기 중에서도 쉽게 형성되며 백색분말 형태를 나타낸다. 이러한  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$ 는 연기 내에 황산이온이 충분히 존재할 경우, 암모늄 이온의 양이  $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상인 조건에서 많이 생성된다고 알려져 있다[8]. Table 1에서와 같이 실제 측정된 암모늄이온의 양은 약  $2,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나며 문헌에서 제시한  $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  보다 매우 큰 값을 보이므로 화학반응에 의해 2차 입자인  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$ 가 생성될 수 있음을 유추할 수 있다.

### 3. PLUVUE-II 모델

다음의 Figure 1은 PLUVUE-II 모델의 전체적인 구조와

모사과정을 나타낸다. 모델은 하나의 점 오염원으로부터 배출된 1차 입자,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , 먼지입자들을 주요 배출원으로 하고, 관찰자의 위치를 고려하여 연기의 각 위치에서 입자들의 태양빛에 대한 흡수와 산란량을 계산한다. 배출입자들의 이동은 기상 조건에 따른 확산 및 이동을 Gaussian 정규분포를 사용하여 계산하고, 입자들에 의한 광화학반응을 고려하였다. 그리고, 모델의 결과값으로 배출된 연기로 인한 대기의 시정장애영향을 시정거리의 감소율, 연기 감지력, 대조값이 계산된다[2].

#### 3.1. 입자와 빛의 산란

PLUVUE-II 모델에서는 입자들에 대해 배출되는 연기 내의 입자와 대기 중의 배경입자로 구분하고 있다. 입자의 분류는 Table 2와 같이 연기 내 입자의 분류는 오염원에서 직접 방출되는 1차 입자와 주위 입자들과의 반응을 통한 2차 입자, 그 외의 먼지입자로 나타낸다. 배경입자에 대해서는 입자의 크기가 작은 입자와 큰 입자로 분류하고 있다.

모델은 각 입자에 의한 태양 빛의 산란 및 흡수량을 Mie이론과 Rayleigh이론을 통해 계산한다. 입자의 크기가 0.01~1  $\mu\text{m}$ 의 범위로 빛의 파장과 비슷할 경우에는 주로 Mie이론을 사용하고, 입자의 크기가 0.1~1 nm의 범위로 빛의 파장보다 작은 경우에 Rayleigh이론을 사용하고 있다. 모델에서는 입자의 크기, 입자의 광학적 특징, 광산란각의 3 가지 요소와 빛의 파장에 의한 빛의 산란량을 계산한다. 입자의 크기 및 광학적 특징들은 Table 2와 같이 나타나며, 광산란각에 대한 계산은 Figure 2에서와 같이 연기의 이동과 관찰자의 위치에 대한 정보를 통해 각 위치에서 태양빛의 산란각을 결정한다. 이러한 이론을 바탕으로 입자에 의한 산란된 빛의 밀도에 대한 계산에는 다음 (2)

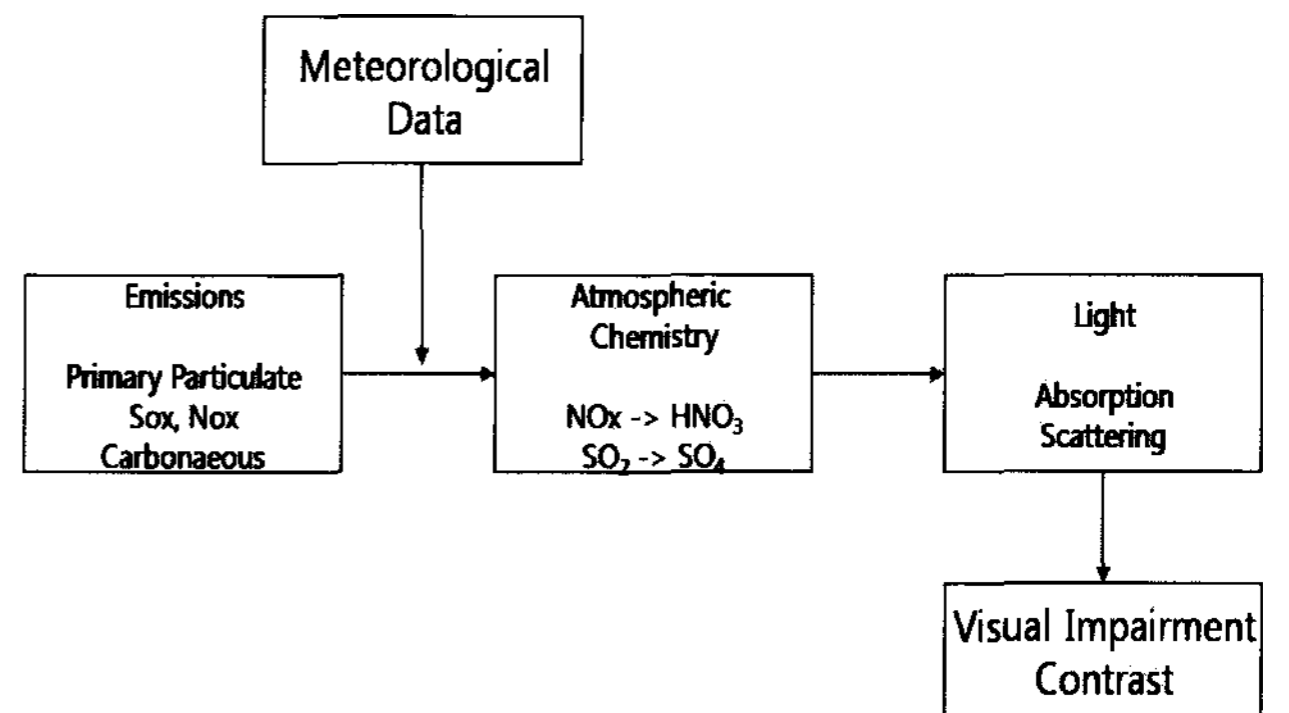


Figure 1. Flow-chart for PLUVUE-II model.

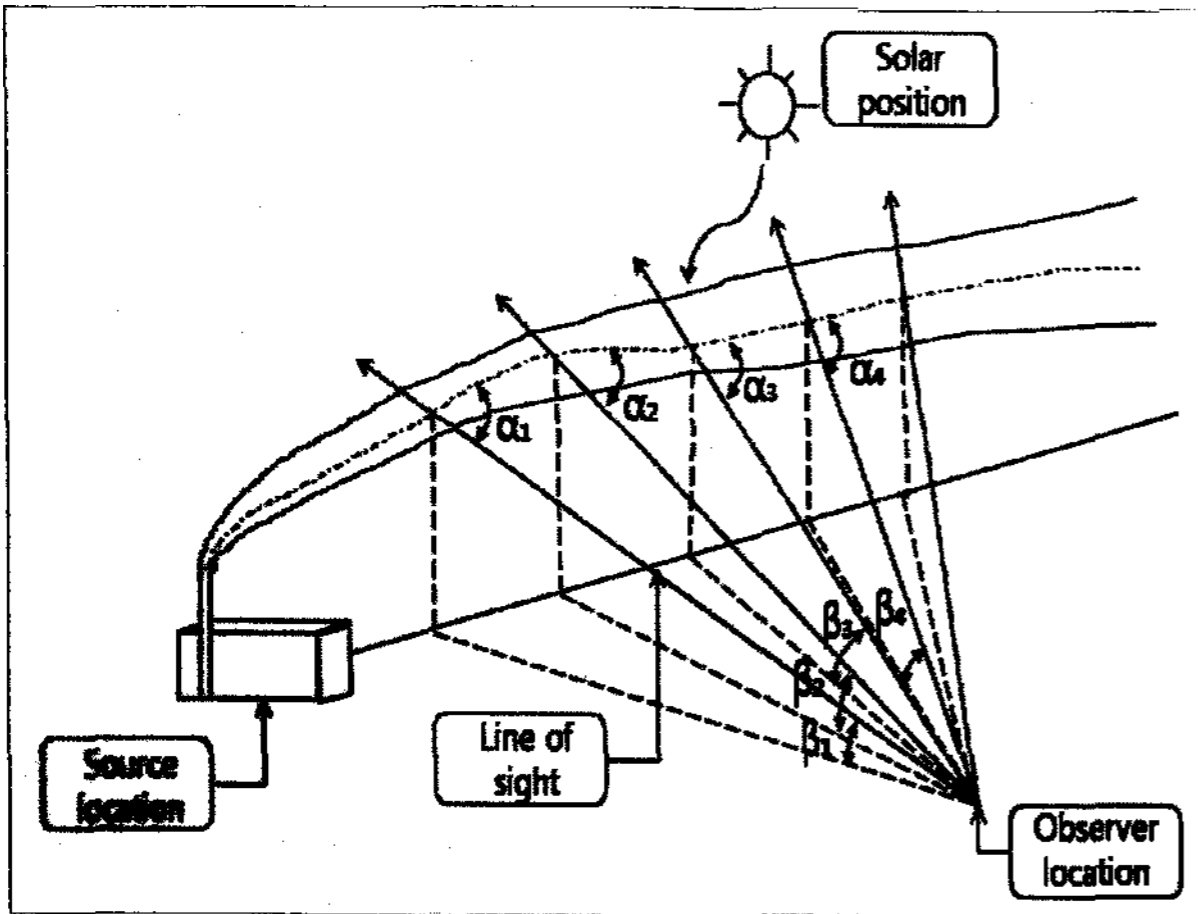


Figure 2. Geometry used for observer-based calculations for non-horizontal view[2].

식이 사용된다[2].

$$I_p(\Omega) = I(\Omega)e^{-\tau} + F \frac{W}{4\pi} \int_0^\tau e^{-\tau'/\nu} e^{-\tau'} d\tau' + G(\Omega, \tau) \quad (2)$$

여기서,  $\tau$ 는 연기와 관찰자간의 광학적 거리,  $F$ 는 대기에 입사하는 파장별 태양 플러스,  $G(\Omega, \tau)$ 는 산란각에 대한 산란 분포를 의미한다.

### 3.2. 연기의 확산 및 농도

PLUVUE-II 모델에서는 연기의 이동과 확산을 계산하기 위하여 가우시안 플럼(Gaussian plume)모델을 이용한다. 다음 (3)식은 가우시안 플럼 모델의 지배방정식을 나타낸다[2].

$$X = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H+z}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H-z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (3)$$

여기서,  $X$ 는 대상 오염물질 농도,  $Q$ 는 연기에 포함된 오염물질의 배출량,  $\sigma$ 는 가우스 분포에서 표준편차,  $H$ 는 연기 중심의 유효 높이를 나타낸다.

그리고 점배출원에 많이 포함되어 있는  $SO_x$ 와  $NO_x$ 에 대한 영향을 살펴보기 위하여  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ ,  $O$ ,  $SO_2$ ,  $HNO_3$ ,  $H_2SO_4$  등에서의 광화학반응을 고려한다. 일반적으로  $NO_x$ 와  $SO_x$ 의 화학반응식은 여러 단계의 광화학반응을 포함한 복잡한 화학반응식을 지닌다. 그러나 모델에서는 기상의 오존의 농도 및  $OH$  이온의 농도를 정상상태로 가정하여 연기 내에서의 광화학반응에 대해 다음의 (4)식, (5)식과 같은 반응식으로 간단하게 정리할 수 있다[11].

$$\frac{1}{[SO_2]} \frac{d[SO_2]}{dt} = K_1[OH\cdot] \quad (4)$$

$$-\frac{1}{[NO_2]} \frac{d[NO_2]}{dt} = K_2[OH\cdot] \quad (5)$$

여기서  $K_1$  과  $K_2$  는 각각의 반응 속도 상수를 나타내며 각각  $2.0 \times 10^6 \text{ ppm}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ,  $1.4 \times 10^4 \text{ ppm}^{-1} \text{ min}^{-1}$  의 값을 가진다.

### 3.3. 모델의 결과값

모델에서는 시정장애영향을 알아보기 위해 가시거리의 변화, 연기 감지력, 연기의 대조값을 계산한다. 본 연구에서는 결과들 중 연기의 대조값을 이용하였다. 대조값이란 주위 배경에 대해 어떠한 물질을 인식할 수 있는 정도를 수치적으로 나타낸 값을 말하며, 연기의 대조값은 하늘의 색을 배경으로 한 연기의 색 인식 정도를 말한다. 이러한 대조값은 다음 식(6)과 같이 연기에서의 빛의 밀도( $I_p$ )와 배경인 하늘에서의 빛의 밀도( $I_b$ ) 차이로 계산된다.

$$C = \frac{I_p - I_b}{I_b} \quad (6)$$

이러한 대조값 중, 사람이 눈으로 보았을 때 물체를 인식할 수 있는 최대 대조값을 경계대조값(threshold contrast)이라 한다. 경계대조값은 실험적으로 보았을 때 0.018 - 0.03 정도로 알려져 있고, 일반적으로 0.02를 많이 사용한다[8].

## 4. PLUVUE-II 모델을 이용한 연기거리 계산

### 4.1. PLUVUE-II 모델의 변형

모델에서는 대조값을 계산하는 과정에서 빛의 파장영역을 550 nm의 단파장에서의 결과만을 사용하고 있다[2]. 단파장에서의 대조값은 거리에 따른 각 위치에서의 농도 비교값으로는 사용될 수 있지만, 연기거리를 구하기 위해서는 가시광선영역

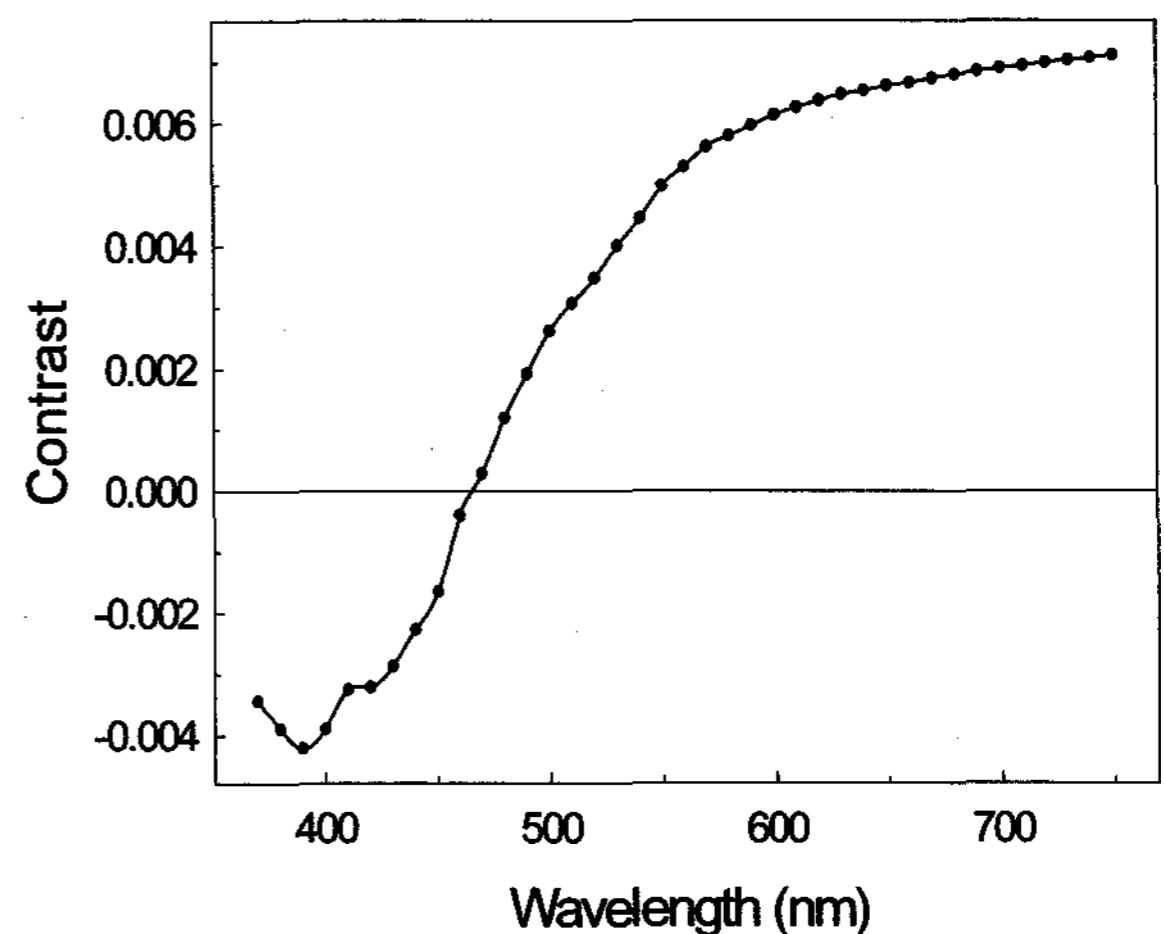


Figure 3. Contrast versus wavelength at a position 400 m apart from the stack.

(370-750 nm) 전체파장들에 대한 대조값들이 필요하다. 이에 가시광선영역의 파장을 총 39개의 영역에 대해 적분하여 대조값을 구하였다. Figure 3은 발전소로부터 거리가 400 m인 지점에서 각 파장에 따른 연기의 대조값을 나타낸다. 본래의 PLUVUE-II 모델에서 단파장 550 nm에서의 대조값은 0.005로 나타났지만, 전체 가시광선영역을 고려한 연기의 대조값을 구한 경우에 대조값은 0.127로 나타났다.

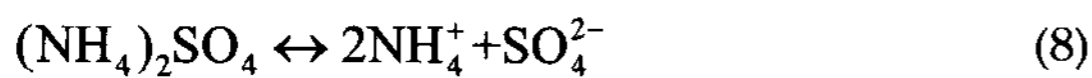
모델을 통해 가시백연의 원인 중 미세입자의 분포에 따른 영향을 알아보기 위하여 실측된 미세입자의 입도 분포를 로그정규 분포화시켜 모델에 대입하였다. 로그정규분포는 기상학, 통계학 등에서 주로 사용되는 식으로 평균( $\mu_1$ )과 분산( $\sigma_1$ )이 다음 (7)식과 같이 나타내어진다.

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (7)$$

$$\mu_1 = \ln\left(\frac{u^2}{\sqrt{\sigma^2 + u^2}}\right), \sigma_1 = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma^2 + u^2}{u^2}\right)} \quad (7a)$$

실측한 미세입자의 입도 분포를 로그정규분포로 추산한 결과, 평균과 분산값은 Figure 4와 같이 나타났으며 그 값은 평균값이 약 1.1  $\mu\text{m}$ , 분포값이 2로 나타났다.

또한, 황화합물의 2차 입자인  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$ 의 영향을 알아보기 위해 모델에 (8)식과 같은 조건으로  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$ 에 대한 화학반응식과 그 반응속도 상수를 대입하였다[12].



$$K = K(298) \times \exp\left(a \times \left(\frac{298}{T} - 1\right) + b \times \left(1 + \ln\left(\frac{298}{T}\right) - \frac{298}{T}\right)\right) \quad (8a)$$

여기서  $K(298) = 1.425$ ,  $a = -2.65$ ,  $b = 38.55$  이다. 계산

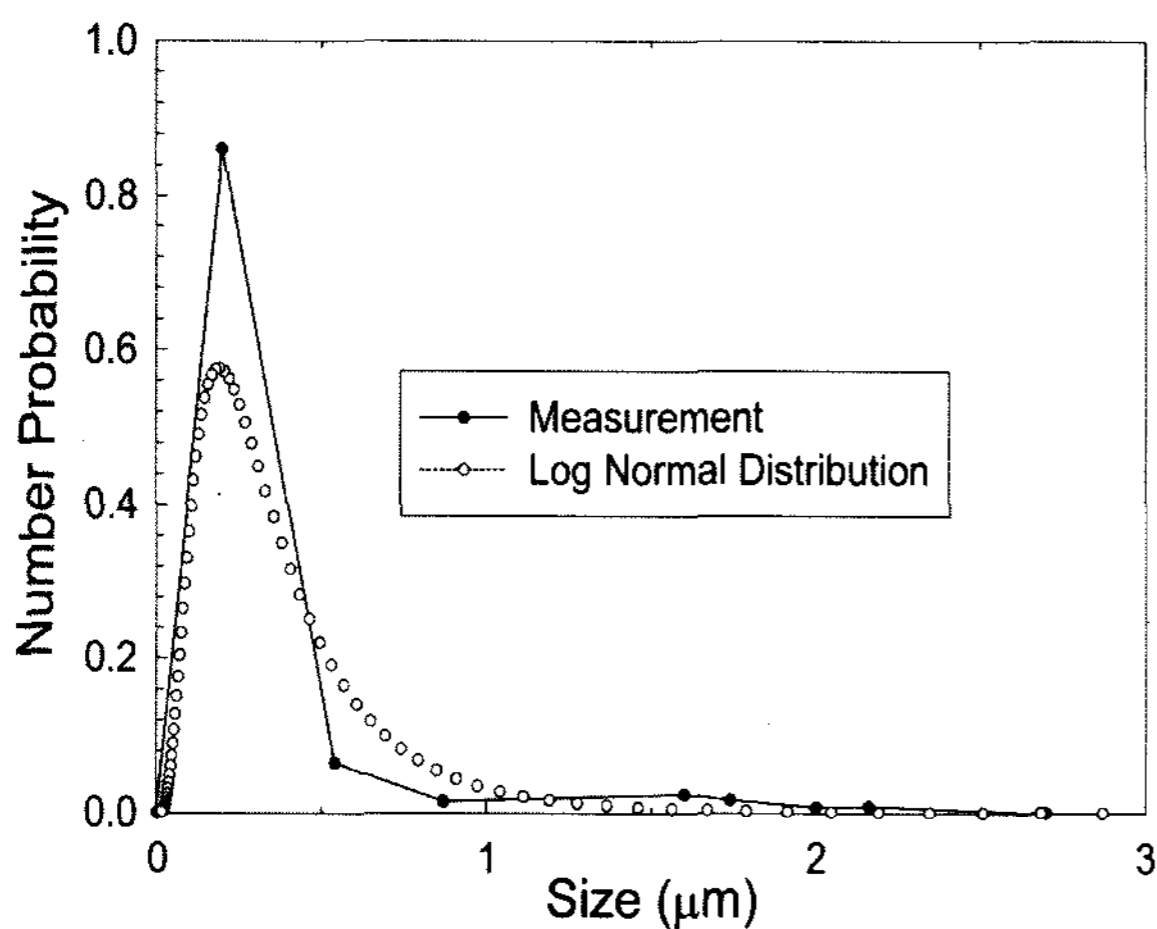


Figure 4. Measured PSD (solid line) and log-normal size distribution (dotted line) of emitted particles.

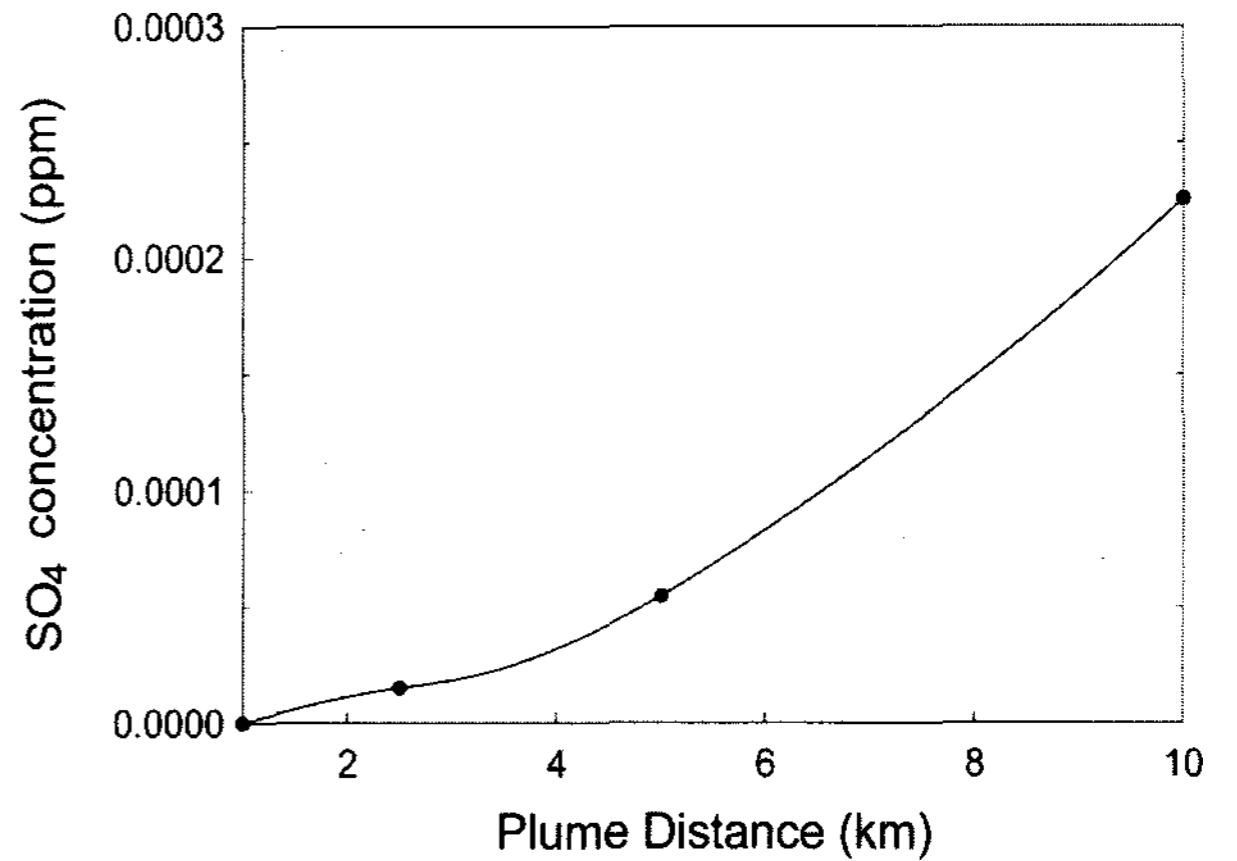


Figure 5. Change of  $\text{SO}_4$  concentration versus plume distance from the stack.

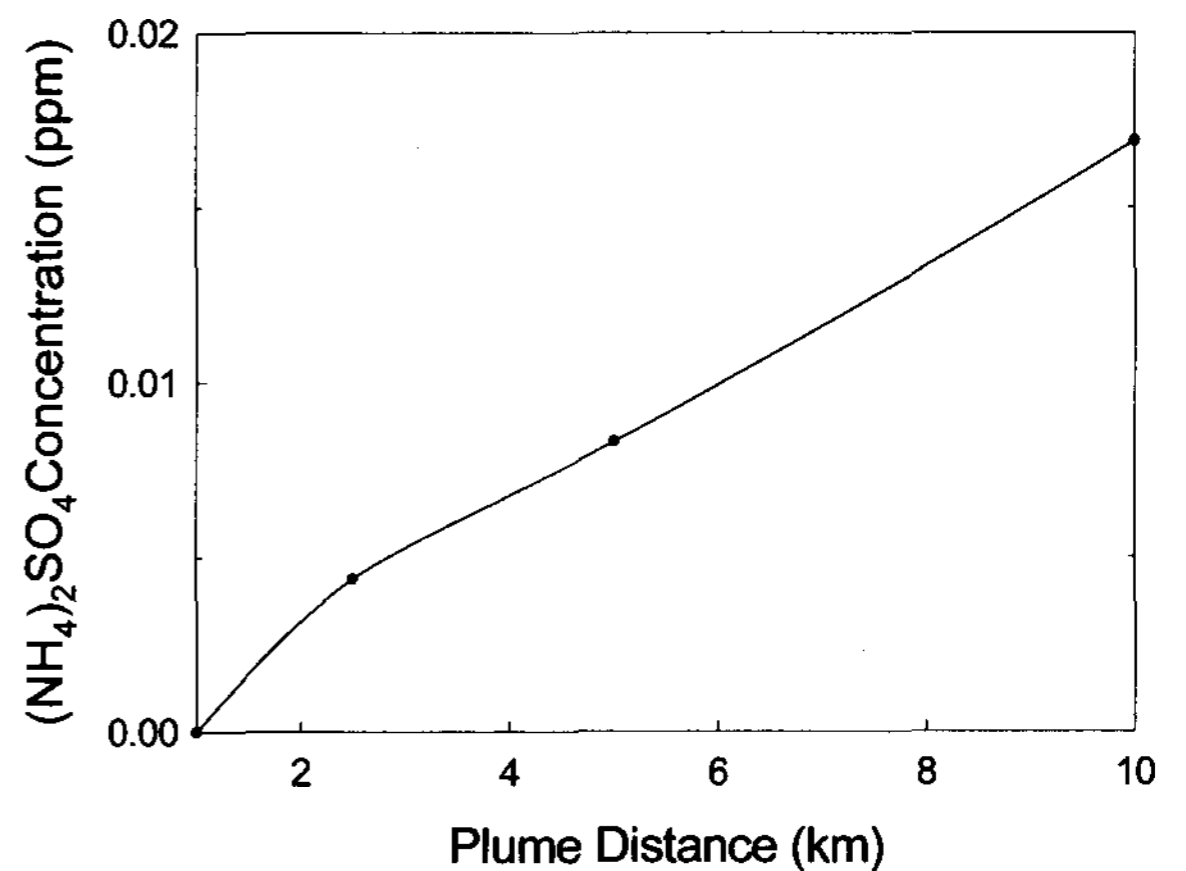


Figure 6.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  Concentration versus plume distance from the stack.

결과 Figure 5와 Figure 6에서와 같이  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$ 의 화학반응식을 고려하여 보았을 때, 연기의 이동거리가 증가함에 따라 발생하는 총 황화합물의 농도와 생성된 2차 입자  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$ 의 농도가 증가하는 것을 알 수 있다.

#### 4.2. 연기거리 계산

본 연구에서는 PLUVUE-II 모델을 이용하여 각 거리에 따른 연기의 대조값을 구하였고, 대조값이 경계대조값인 0.02보다 작아질 때를 사람이 볼 수 있는 최대 연기거리로 가정하여 전산모사를 하였다. 전산모사의 초기 기준값을 구하기 위해 화력발전소의 공정데이터를 통해  $\text{SO}_x$ 와  $\text{NO}_x$ 의 배출량을 입력하였고, 미세입자의 입도분포는 미국 EPA의 IMPROVE에 보고된 자료를 참조하여 입자의 평균 크기가 1.5  $\mu\text{m}$ , 분산이 2인 입도분포를 사용하였다[13]. 기상조건으로 실측한 기간에 대한 평균값들을 입력하였으며, 관찰자의 위치를 발전소로부터 남쪽으로 약 500 m 떨어진 곳으로 설정하였다. 모델의 입력 배출량 및 기상 자료는 Table 3에 나타내었다. 연기의 대조값은 연기가 배출원으로부터 멀어짐에 따라 배출물질의 농도가 감소하

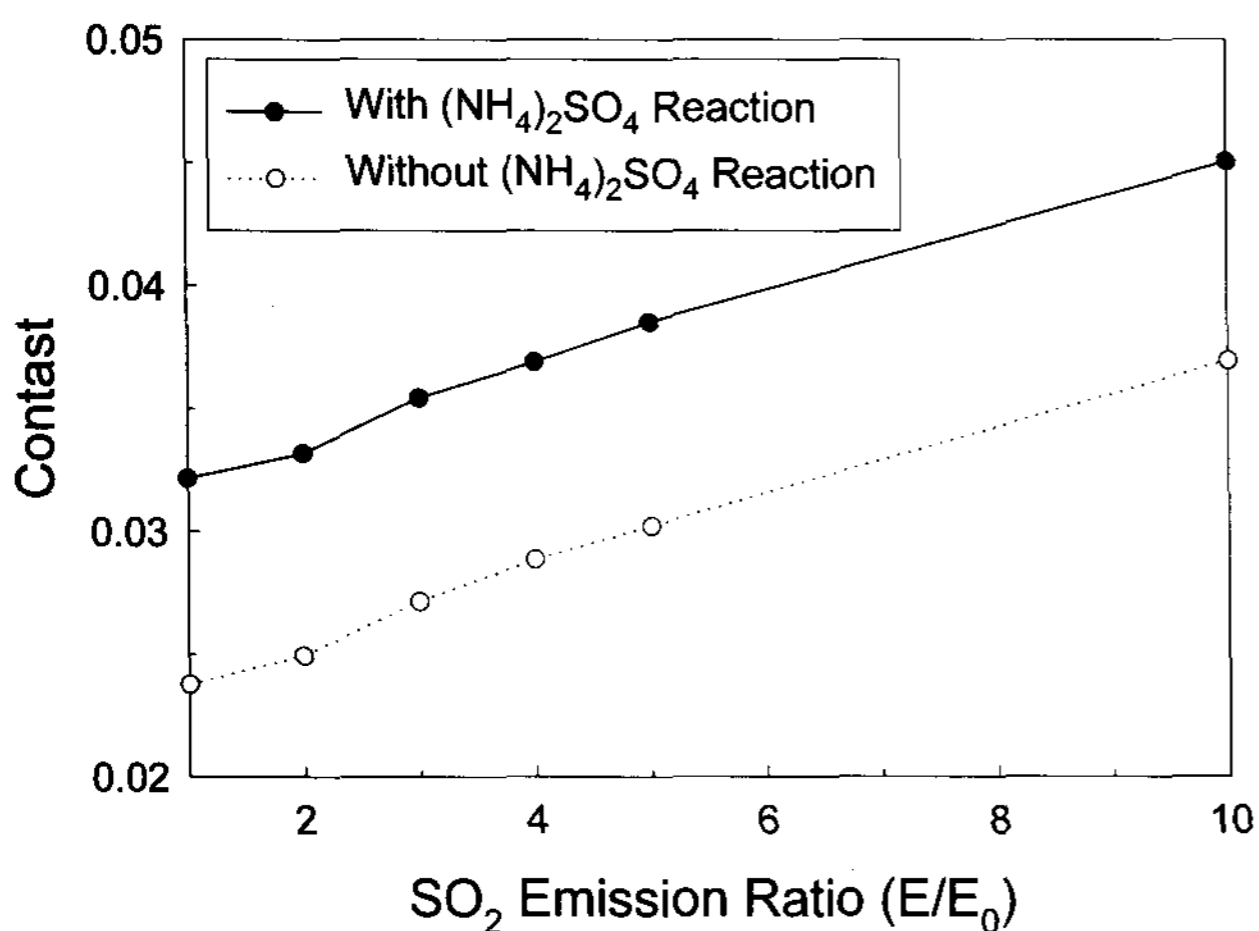
**Table 3. Input data in PLUVUE-II model**

List	Input data
SO <sub>2</sub> emission	1.34 ton/day
NO <sub>2</sub> emission	2.52 ton/day
TSP emission	0.38 ton/day
Wind speed	3 m/s
Pasquill stability class	Moderately stable
Wind direction (360)	270
Relative humidity (%)	32

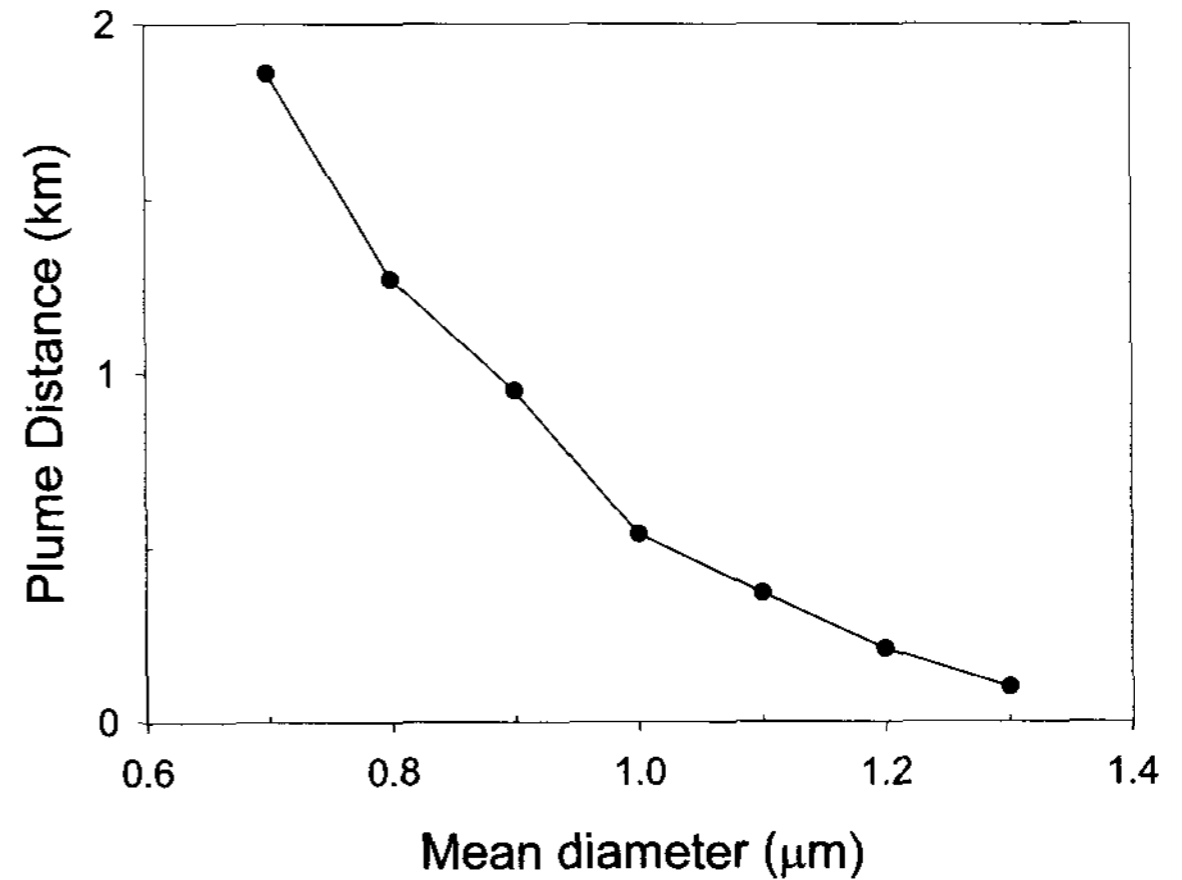
게 되어 그 값이 줄어든다. 이러한 기준값에서의 전산모사 결과 가시 백연이 보이는 연기의 최대거리는 약 20 m로 나타났다.

연기의 가시거리는 연기 내 황화합물의 함량에 영향을 받게 된다. 이 영향을 알아보기 위해서 우선 모델에 황화합물의 배출량의 변화에 따른 대조값의 변화를 알아보았다. 배출원으로부터 거리가 10 m 떨어진 지점에서의 대조값을 사용하였고, 배출원으로부터 황화합물의 배출량( $E_0$ ) 1.34 ton/day에 대해 황화합물의 배출량 ( $E$ )을 0.5배, 2배 등의 비율( $E/E_0$ )로 변화시켰다. 다음 Figure 7은 황화합물의 배출량에 따른 대조값의 변화를 나타낸 것이다. 황화합물의 배출량이 늘어남에 따라 대조값이 증가하는 것으로 나타났지만, 그 증가 강도에 있어서는 크지 않았다. 이는 연소를 통해 배출되는 물질이 대부분 SO<sub>x</sub>와 NO<sub>x</sub>에 의한 기체상 물질로 이루어져 있고, 이러한 기체상 물질들이 빛의 산란에 크게 영향을 미치지 않았기 때문이다.

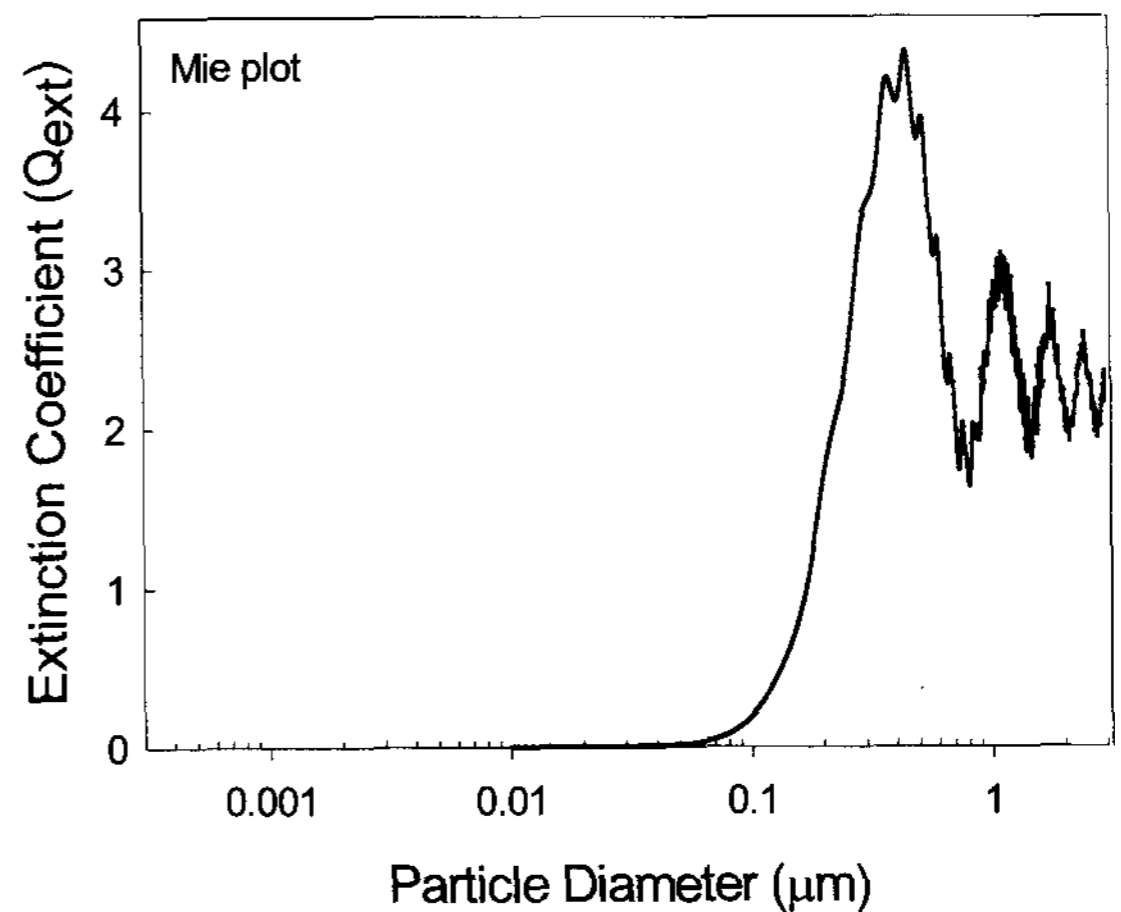
또한, 2차 고체입자인 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(s)의 생성에 관한 화학반응을 도입한 후, 황화합물의 배출량에 따른 대조값의 변화를 알아보았다. 황화합물의 배출량에 대한 변화는 위와 동일하게 0.5 배, 2 배로 값을 변화시켰다. 그 결과 2차 입자에 대한 화학반응이 있을 때가 없을 때보다 대조값에서 더 큰 값을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 배출된 황화합물이 2차 입자인 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(s)를 생성시키고, 빛의 산란에 효과적인 입자크기로 자라게 되어



**Figure 7. Effect of SO<sub>2</sub> emission ratio ( $E/E_0$ ) on plume contrast with (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(s) reaction (solid line) and without reaction (dotted line).**



**Figure 8. Plume length and particle mean diameter.**



**Figure 9. The computational result of extinction coefficient versus particle diameter (Mie plot).**

연기의 대조값에 영향을 미치는 것으로 보인다.

Figure 8은 미세입자의 입도 분포에 의한 영향을 알아보기 위해 미세입자의 평균 크기의 변화에 따른 최대 연기거리의 변화를 나타낸 것이다. 입자의 평균 크기가 작아질수록 연기거리가 크게 증가되는 것으로 나타났으며, 그 값은 입자의 평균 크기가 0.7  $\mu\text{m}$  에서 약 1.8 km, 1.3  $\mu\text{m}$  에서 약 0.1 km 로 연기거리가 크게 변하는 것으로 나타났다. 이는 입자의 크기에 따라 빛의 산란효율이 다르게 되어, 연기를 통과하는 빛의 양을 변화시키게 되기 때문이다. 실제 입자의 크기에 따른 Mie산란효율은 Figure 9와 같이 나타나며 입자의 크기가 0.7  $\mu\text{m}$  에서 입자의 산란효율이 크기가 1.3  $\mu\text{m}$  에서의 입자의 산란효율보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

위와 같은 결과를 바탕으로, PLUVUE-II 모델에 발전소에서 실측한 입자의 입도 분포를 대입하고, 2차 입자에 대한 화학반응식을 도입하였을 때, Figure 10과 같은 연기거리를 구할 수 있었다. 초기 대입값에서의 최대 연기거리는 약 20 m 로 작은 값을 나타내었다. 그러나 측정된 미세입자의 입도분포(평균

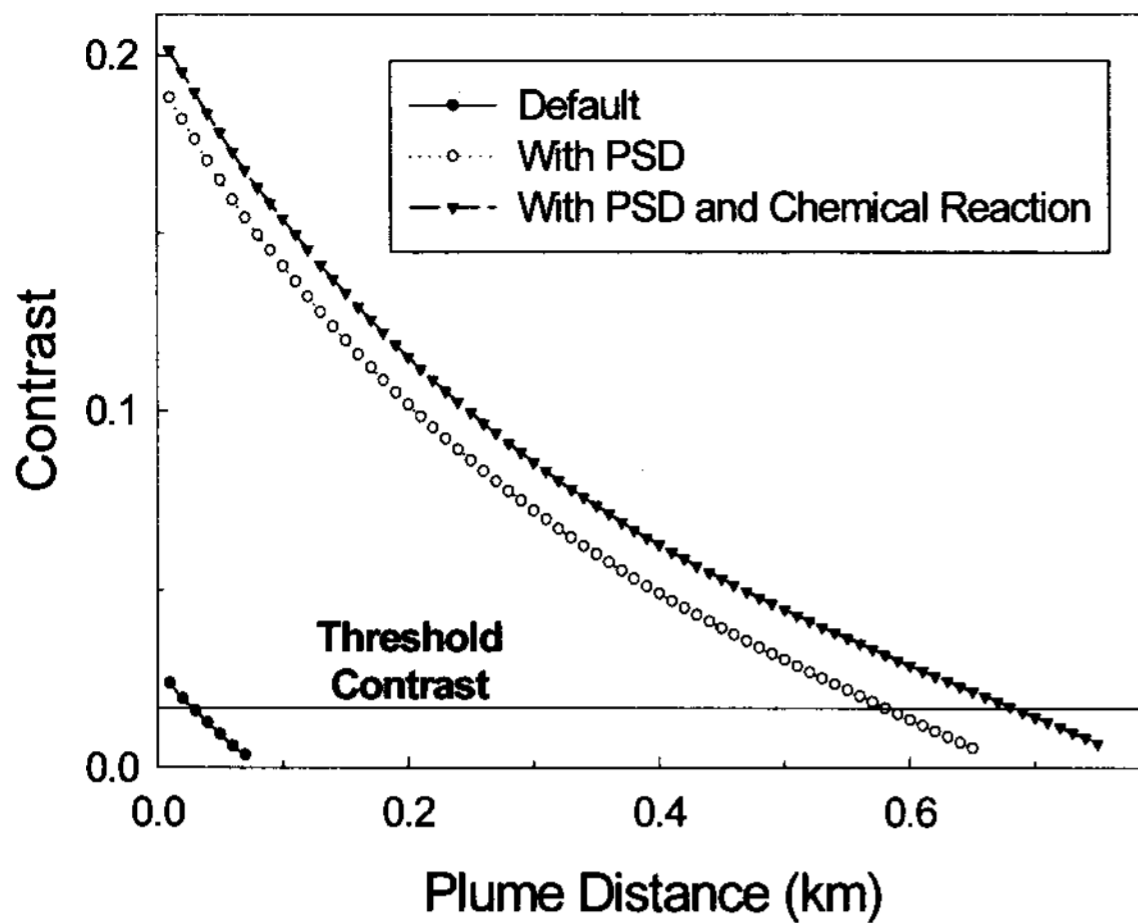


Figure 10. The comparison of contrast and plume distance with default (solid line), PSD (sphere dotted line), and PSD, chemical reaction (triangle dotted line) from the stack.

1.1  $\mu\text{m}$ , 분산 2)를 모델에 대입하여 계산하니 가시백연의 최대 연기거리가 약 570 m 로 급격히 늘어났다. 또, 2차 입자인  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$ 이 형성되는 화학반응식을 입자분포와 함께 대입한 경우에는 연기거리가 약 570 m 에서 약 670 m 로 증가하였다. 실제 발전소에서 배출되는 가시백연의 연기거리가 약 700m 까지 나타나는 것으로 보아 본 PLUVUE-II 모델을 통한 가시백연의 거리 예측이 비교적 잘 맞는 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터, Y 발전소에서 발생한 가시백연의 주요 원인이 배출되는 입자의 입도분포와 황과 암모늄 이온의 화학반응으로 생성된  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$  2차 고체입자임을 유추할 수 있었다.

### 5. 결 론

오리멸전의 특징과 실측치를 통해 가시백연의 발생 원인을 미세입자의 분포와 황화합물의 2차 입자인  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$ 의 생성으로 판단하고, 시정모델인 PLUVUE-II 모델을 이용하여 정량적으로 평가하였다. 이 때 PLUVUE-II 모델의 전산모사 결과값인 대조값이 0.02 이하인 부분은 사람의 눈으로 볼 수 없다고 가정하여 가시백연의 최대 연기거리를 예측하였다.

미세입자의 영향을 알아보기 위하여, 입도분포를 모니터링 하였으며 모니터링 결과값을 로그정규분포로 가공하여 모델의 입력값으로 대입하였다. 기존의 모델이 550 nm 인 단파장에서만 모사되는 문제를 개선하여 가시광선 전 영역을 이용하여 모사하였다. 2차 입자의 생성에 의한 가시도 증가를 고려하기 위하여, 주요 2차 입자인  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$  생성 화학방정식을 모델에 추가하였다. 초기값을 모델에 대입하였을 때에는 최대 연기거리가 20 m 로 나타났지만, 미세입자의 입도분포에 의해 연기거리가 570 m 까지 늘어났으며, 황화합물의 2차 입자의 생성에 따른 영향으로 연기거리가 670 m 까지 증가하였다. 또한, 발전소에서 배출되는 황의 양이 많아질수록 가시백연의 연기거리가 늘어남을 볼 수 있었고, 미세입자의 평균 크기가 작아짐에

따라 연기거리가 크게 증가함을 볼 수 있었다.

이러한, 전산모사 결과를 통해 미세입자의 입도 분포와 황화합물에 의한 2차 입자가 가시백연의 주요원인임을 정량적으로 증명하였다. 연구 결과, 광학적 방법을 통한 연기거리에 대한 모델링은 오염물질의 배출에 의한 연기의 시정영향을 정량화할 수 있으며, 최대 연기거리를 예측하는 한 방법으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 오리멸전의 연소로 인한 가시백연의 연기거리가 멀리까지 나타나게 되는 것으로 보아 오리멸전을 연료로 사용하기에 앞서 미세입자 및 황화합물에 대한 저감 방안이 있어야 할 것으로 생각된다.

### 사용기호

- C : Contrast
- F : Light Flux ( $\text{watt}/\text{m}^2/\mu\text{m}$ )
- $G(\Omega, \tau)$  : Multiple Scattering Term
- H : Plume Height (m)
- I : Light Intensity (watt)
- $I_b$  : Background Light Intensity (watt)
- $I_p$  : Plume Light Intensity (watt)
- X : Plume Concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- $b_{\text{ext}}$  : Extinction coefficient ( $\text{m}^{-1}$ )
- m : Complex Refractive Index of Particles
- $n(D_p)$  : Number Size Distribution Function
- u : Wind Speed (m/s)
- $u_1$  : Average Diameter ( $\mu\text{m}$ )

### 그리스 문자

- $\lambda$  : Wavelength of the Incident Light (m)
- $\sigma_1$  : Variance
- $\sigma_y$  : Diffusion Coefficient of y-direction ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $\sigma_z$  : Diffusion Coefficient of z-direction ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $\tau$  : Optical Depth (m)
- $\Omega$  : Line of Sight

### 참고문헌

1. Kim, K. W., and Kim, Y. J., "Opto-Chemical Characteristics of Visibility Impairment Using Semi-Continuous Aerosol Monitoring in an Urban Area during Summertime", *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **19**(6), 647-661 (2003).
2. EPA, "Addenda to the User's Manual for the Plume Visibility Model (PLUVUE-II)", EPA-600/8-84-005, U. S. Environmental Protection Agency, 1984.
3. Shannon, J. D., Trexler, Jr., E. C., and Sonnenblick, R. "Modeling Visibility for Assessment", *Atmos. Environ.*, **31**(22), 3719-3727 (1997).
4. Gabruk, R. S., Sykes, R. I., Seigneur, C., Pai, P., Gillespie, P., Bergstrom, R. W., and Saxena, P., "Evaluation of the Reactive

- and Optics Model of Emissions (ROME)", *Atmos. Environ.*, **33**, 383-399 (1999).
5. Miller, C. A., and Srivastava, R. K., "The Combustion of Orimulsion and its Generation of Air Pollutants", *Progr. Energy Combust. Sci.*, **26**, 131-160 (2000).
  6. Kim, Y., Kim, J. H., Joo, J. B., Lee, J., Kim, J., Kwak, B. K., Jeong, J. H., Park, S. K., and Yi, J., "Investigation of Plume Opacity induced by the Combustion of Orimulsion", *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **29**(3), 297-303 (2007).
  7. Jarman, R. T., and De Turville, C. M., "The Visibility and Length of Chimney Plumes", *Atmospheric Environment*, **3**, 257-280 (1969).
  8. Seinfeld, J. H., and Pandis, S. N., *Atmospheric Chemistry and Physics*, John Wiley&Sons, Inc., 1998.
  9. Bang, S. Y., and Lee, J. B., "Size Distribution of Suspended Particle affected to Visibility Degradation", *Proceedings of Autumn Conference on Korean Society for Atmospheric Environment*, **2**, 115-117 (1995).
  10. Baik, N. J., Lee, J. H., Kim, Y. P., Moon, K. C., and Joe, Y. I., "Trend of Visibility Impairment caused by Smog Phenomenon in Seoul", *Korea J. of Chem. Eng.*, **12**(3), 300-305 (1995).
  11. Baulch, D. L., Drydale, D. D., and Horne, D. G., *Evaluated Kinetic Data for high Temperature Reactions, Volume 2 - Homogeneous Gas Phase Reactions of the H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> System*, CRC Press, Cleveland, 1972.
  12. Seigneur, C., Saxena, P., and Hudischewskyj, A. B., "Formation and Evolution of Sulfate and Nitrate Aerosols in Plumes", *The Science of the Total Environment*, **23**, 283-292(1982).
  13. EPA, "Visibility Monitoring Guidance Document", Air Quality Strategies and Standards Division Visibility and Ecosystems Protection Group, U. S. Environmental Protection Agency, 1998.