

대단위배출원에서 기인한 입자상오염물질의 확산·추적을 통한 ISCST3모델과 수용모델의 비교연구

The Study on the Comparison of the ISCST3 Model and Receptor Model by Dispersion Tracing of Particulate Matter from Large Scale Pollution Sources

전 상 기* · 이 성 철 · 박 경 선¹⁾
한양대학교 화학공학과, ¹⁾한국전력기술(주)
(2003년 10월 15일 접수, 2003년 12월 9일 채택)

Sang Ki Chun*, Sung Chul Yi and Kyungsun Park¹⁾
Department of Chemical Engineering, Hanyang University,
¹⁾KOPEC

(Received 15 October 2003, accepted 9 December 2003)

Abstract

The purpose of this study is to compare the usefulness between Gaussian dispersion model and receptor model with the experimental result of the dispersion tracing of the particulate pollutants from Taean coal-fired power plants. For this purpose, the component analysis of the collected PM 10 samples was performed. In order to trace the pollution sources, factor analysis was done with the result of the component analysis. As a result of the correlativity analysis of the fifteen power plants' profiles offered by US EPA, the correlativity of No.11202 source profile showed highest rate up to 84.5%. Thus it was adopted as proper one and the contribution rate by each pollution source was calculated by Chemical Mass Balance (CMB)-8 model. The contribution rate, which was the effect rate of the power plants on each measuring point, were calculated with a range of 24~52% and the standard error was below $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. This indicates the selection of the source profile was appropriate. Also, the concentrations of each point were calculated by the ISCST3 which is suggested by US EPA as one of the regulatory Gaussian dispersion model. The calculation result showed that the predicted concentration was $50\sim 58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, comparing with the measured result of $9\sim 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. It was found that the concentration calculated by ISCST3 was underpredicted. It was thought that the receptor model was more favorable than the Gaussian dispersion model in estimating the effect of the particulate matter on a certain receptive point.

Key words : PM10, Coal Power Plant, Fly Ash, CMB8 modeling, ISCST3 modeling.

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-3456-8306, E-mail : junsgg@kewp.com

1. 서 론

대형 석탄화력발전단지 주변에는 발전소에서 사용한 화석연료의 연소후 굴뚝으로 배출되는 일차적 오염물질 이외에도 저탄시설과 회처리장 등에서 바람에 의하여 날리는 석탄분진과 비산회 등 여러 종류의 입자상오염물질이 함께 부유하거나 침적되어 있다. 최근 배연탈황설비(FGD: Flue gas desulfurization) 및 질소산화물저감설비, 전기집진기(EP: Electrostatic precipitator)의 설치로 굴뚝에서 배출되는 대기오염물질로 인한 직접적인 영향은 급감하고 있으며 관련연구는 오랫동안 계속되어 왔다.

그러나 저탄시설에서 날리는 석탄분진과 회처리 과정과 회사장에서 배출되는 비산회 등은 방풍림식재, 살수설비 설치 등의 대책에도 불구하고 미량이지만 주변지역으로 비산되고 있으며 이로 인한 1차적, 2차적인 영향에 대한 연구 또한 미진한 실정이다.

대기오염물질의 확산 및 침적을 연구하는 방법으로는 크게 분산모델(dispersion model)과 수용 모델(receptor model)의 두가지 방법으로 분류할 수 있는데, 오염원으로부터 오염물질의 발생량을 산정하여 운동방정식이나 통계적인 분포식을 이용하여 확산을 추정하는 오염원 모델링에 대한 연구는 오랜 기간 많은 연구가 이루어졌다.

반면 어떤지점에서의 입자상 물질의 기원을 연구하는 방법으로 수용모델(receptor model)을 이용하는 오염원의 추정 및 기여에 관한 연구는 분석기술의 발달 및 각 지역 특성에 맞는 오염원분류표(source profile)의 개발이 선행되어야 하므로 상대적으로 연구가 부족한 실정이다. 미국 환경청(US EPA)에서는 수십년간 각 지역별 특성에 맞는 오염원 분류표를 분석·개발하여 공개적으로 지원하며, 동시에 수용모델로 화학질량수지법(CMB: Chemical Mass Balance)모델을 추천하고 있다.

CMB모델을 이용한 연구로는 가정연료로 사용하는 석탄의 연소로 발생한 PM10의 기여도를 CMB모델을 이용하여 추적한 연구(Johann *et al.*, 2002)와 Los Angeles에서 측정된 PM10 자료에 수용모델의 하나인 SAFER을 적용하여 오염원을 추정(Kim and Ronald, 2000)하는 등 PM10 오염원의 기원을 추적하기 위하여 CMB모델과 같은 receptor model을 이

용하는 것이 널리 사용되고 있으며, 미국 환경청(US EPA)에서도 이 방법을 권고하고 있다.

우리나라에서도 수용모델을 이용한 연구로 입경 분류에 입각하여 목표변환인자분석법을 이용한 수원 지역 분진 오염원의 정량적 기여도 추정(김동술과 이태정, 1993)과 대기분진의 무기화학적 조성분석과 Chemical Mass Balance에 의한 오염원 기여도 산출(서영화와 구자공, 1992), 서울시 PM10오염원의 정량적 기여도 추정(유정석 등, 1995) 등이 있으며 최근에는 인자분석을 이용하여 잠재적인 오염원을 확인하고 확인된 오염원을 CMB에 적용할 수 있는 가능성이 제시된 바 있다(김관수 등, 2001).

본 연구에서는 석탄화력발전소 인근의 4개 지점에서 시료를 채취하여 PM10 물질의 성분을 분석하고, 미국 환경청에서 제공하고 있는 석탄화력발전소 관련 오염원분류표중 국내 석탄화력발전소에 적합한 오염원분류표를 제안하고자 하였다. 또한 이와 같이 선정된 석탄화력발전소의 오염원분류표와 CMB8의 모델링 결과를 이용하여 발전소 인근지역의 대기에 미치는 발전소의 기여정도를 추정코자 하였으며, 석탄화력발전소의 저탄시설에서의 비산탄진 발생량을 실험식을 이용하여 추정하고 이를 ISCST3모델을 이용, 확산농도를 예측함으로써 발전소 주변에서의 입자상 오염물질의 확산 연구에 적합한 방법을 제시코자 하였다.

2. PM10의 시료채취 및 분석

2.1 시료채취

PM10 시료의 채취는 화력발전소 인근의 4개 지점인 학암포해수욕장(a-1), 방갈리마을(a-2), 이원방조제안의 죽도(a-3), 이원방조제 뚝위(a-4)에서 이루어 졌으며, 발전소로부터 남서쪽으로 14.7 km 떨어진 환경부 측정지점(파도리)의 측정결과와 비교 분석하였다. 측정지점 및 화력발전소의 위치는 그림 1과 같다. 시료는 각 지점에서 1회, 4시간 연속채취 하였으며, 채취장치로는 High-volume PM10 sampler(KIMOTO, JAPAN)을 이용하였다. 이때 사용한 필터로는 테플론필터와 탄소성분분석을 위해 석영필터(Wattman, USA)를 이용하였다. 평균 포집 유량은 1.2 m³/min으로 포집하였다. 표 1에는 시료의 채취일

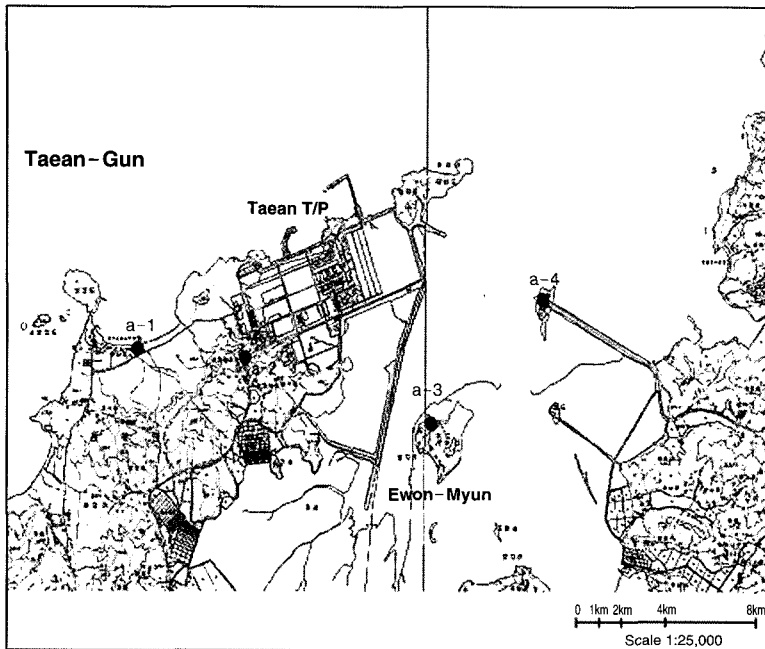


Fig. 1. The location of measurement points & power plant.

Table 1. Measuring date and conditions.

Sites	Sampling time				Temperature				Flow rate	Weather condition
	Start		End		Start		End			
	Date	Time	Date	Time	Dry	Wet	Dry	Wet		
a-1 Hakampo	02. 11. 27.	14:10	11. 28.	14:17	7.5°C	5.8°C	11°C	8°C	1.2 m ³ /min	clear
a-2 Banggalri	03. 1. 12.	14:10	1. 13.	12:25	8.5°C	6°C	16°C	12°C	"	"
a-3 Jukdo	02. 11. 28.	15:34	11. 29.	14:38	10.5°C	8.5°C	12.6°C	11°C	"	"
a-4 Ewonbangjoje	02. 11. 28.	16:10	11. 29.	15:10	9.5°C	7.5°C	11.5°C	9°C	"	"

과 채집당시 기온을 요약하여 나타내었다.

2. 2 성분분석방법

PM10의 총질량은 Tapered Element Oscillating Micro-balance (TEOM)을 이용하여 분석하였다. TEOM은 시료채취부, 유량분류부, 먼지포집 및 검출부, 유량조절부, 연산제어부, 샘플링 펌프 등으로 구성되어 있으며, 시료채취부에서 PM10만을 선별하여 30분 간격으로 질량농도를 측정하였다.

무기원소성분 (V, Ce, Mn, Cu, Zn, Mg, Cd, Ni, Ca, Si, Cr, Co, Al, K, Na, Pd, Se, Fe, Ba, Ti)을 분석하기 위하여 포집에 사용한 테플론 필터를 60 ml의 저압 teflo digestion vessel에 넣고 4시간 동안 150~180°C 까지 가열한 뒤 상온까지 식히고 물을 증발시켜 1%의 질산-염산을 첨가하여 원자방출분광법 (ICP-AES: DRE ICP, Leeman Labs Inc.)로 성분분석을 하였다. 수용성이온의 성분분석은 이온크로마토그래피 (ion chromatography; IC: Dionex사, Model DX-400)를 이

Table 2. Analysis method for each chemical component.

Chemical component	Analysis method
Total mass	Tapered element oscillating mineral elements
Micro-Balance	ICP-AES (DRE ICP, Leeman Labs Inc.)
Ion (Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺)	Ion-chromatography (Dionex사, Model DX-400)
Elementary/Organic carbon	Elemental analyser (Fisons, model-EA 1108) TCD (Thermal Conductivity Detector) Thermal-Optical Analyzer (TOA)

용하여 분석하였고 이온의 검출은 전도도계 (conductivity detector)를 이용하였다

탄소성분 분석을 위하여 약 550°C에서 12시간 가열 처리한 석영필터를 이용, 24시간동안 채집하였다. 입자상 물질의 탄소성분을 정량화하기 위해서 가열에 의해 유기탄소 (OC: organic carbon)와 원소탄소 (EC: elemental carbon)를 분리하는 열 분리법을 이용하였으며, 분석기기로는 원소 분석기 (Elemental Analyser, Fisons사제, model-EA 1108)를 사용하였다.

입경별로 포집된 입자상 물질의 탄소 분석은 포집면을 직경 12mm의 펀치로 각각 2개씩 타출 (OC 2개와 EC 2개) 하였다. 타출된 것 중 하나는 350°C로 조정된 전기로 (Syboron사제, model-48000)에서 5분간 가열하여 OC를 산화분해 제거한 후, 원소분석기에 도입하여 EC를 측정하였다. 나머지 하나는 그대로 분석기에 도입시켜 TC를 구하였다. 그리고 나서 TC와 EC의 농도차로 OC를 구하였다. 탄소성분분석을 위하여 약 550°C에서 12시간 가열처리한 석영필터를 이용, 24시간 동안 시료를 포집하였다. 탄소성분은 원소분석기와 Thermal-Optical Analyzer (TOA)를 사용하여 Selective Thermal Manganese dioxide Oxidation 방법으로 분석하였다. 표 2에는 분석에 사용한 기기를 요약하여 나타내었다.

3. 성분분석결과 및 오염원분류표

3.1 성분분석결과의 요인분석

발전소주변 4개지점에 대한 무기원소, 수용성이온, OC, EC 등에 대한 성분분석결과를 보면 타 성분에

비하여 OC, EC의 비율이 월등히 많이 분석되었으며, 특히 a-2지점의 경우는 탄소성분이 34.8%를 차지하고 있다. 이는 인근 발전소의 영향인 것으로 추정된다. 반면 발전소로부터 약 14.7 km 떨어진 파도리 지점의 경우 해염의 영향으로 Na⁺와 SO₄²⁻와 같은 이온성분이 가장 많아 각각 12% 정도이며, 탄소 성분은 타 지점에 비하여 비교적 적었다.

각 성분별로 질량비를 분석한 결과를 표 3과 그림 2에 나타내었다. 발전소 인근지점은 골목에서 배출되는 SO₂와 NO_x 등의 대기오염물질이 직, 간접적인 영향을 미친다. 또한, 대규모 석탄화력발전소이므로 저탄시설에서 날리는 탄진과, 회처리장의 노출면에서 발생하는 비산회가 에어로솔에 포함되어 나타나고 있다고 볼 수 있다. 본 연구에서 PM10을 채집한 지역은 화력발전소 이외에는 뚜렷한 오염원이 없는 청정한 해안지역으로서, 교통량도 매우 적은 지역이며, 특히 대기중에 EC를 배출할 만한 오염원으로는 석탄화력발전소가 유일하다. 성분분석 결과도, 화력발전소 인근 지점에서 무기탄소의 성분이 높게 나타난 것으로 보아 저탄장 등에서 발생한 비산탄진의 영향으로 유추 해석할 수 있다.

요인분석 (factor analysis)은 통계분석용으로 널리 알려진 SPSS-6라는 software를 사용하였다. SPSS (Statistical Package for the Social Science)는 원래 사

Table 3. The concentration ratio of each element.

	(Unit : %)				
	Padori	a-1	a-2	a-3	a-4
Cl ⁻	4.12	N.D	N.D	N.D	N.D
NO ₃ ⁻	9.36	N.D	N.D	N.D	N.D
SO ₄ ²⁻	12.19	N.D	N.D	N.D	N.D
Na ⁺	12.29	1.76	1.00	5.25	3.87
NH ₄ ⁺	9.04	14.29	13.24	46.36	14.99
K ⁺	5.47	4.30	5.17	7.40	3.74
Mg ²⁺	1.84	0.21	0.13	0.49	0.54
Ca ²⁺	8.78	2.09	0.67	3.09	3.03
Zn	0.28	0.37	0.22	0.43	0.21
Cd	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Ni	0.13	0.02	0.01	0.00	0.02
Pb	0.06	0.00	0.27	0.00	0.16
Fe	1.22	0.70	0.38	1.02	0.54
Cr	0.04	0.04	0.02	0.06	0.06
Cu	0.06	0.04	0.05	0.24	0.01
Al	1.77	0.80	0.49	2.06	1.24
Ca	1.21	0.69	0.31	0.19	0.22
OC	6.63	9.70	24.61	9.41	3.14
EC	2.09	18.57	10.22	16.47	22.01

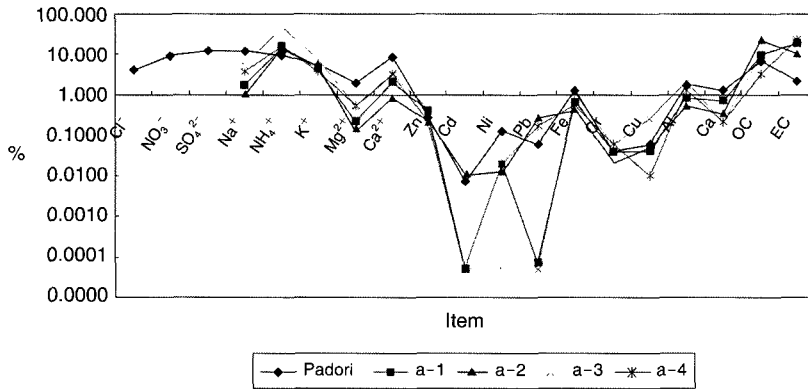


Fig. 2. Concentration ratio for each point.

Table 4. Factor analysis.

	MASS	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Zn	Cd	Ni	Pb	Fe	Cr	Cu	Al	Ca	OC	EC
MASS	1.0000	0.7934	0.9531	0.9312	0.7429	0.7949	0.9419	0.8902	0.7123	0.7768	0.9599	0.8766	0.9063	0.9152	0.8907	0.7495	0.8688	0.9438	0.6835	0.4949
Cl ⁻	0.7934	1.0000	0.6319	0.6941	0.8666	0.4884	0.7463	0.9393	0.6070	0.5598	0.7072	0.6850	0.4712	0.7769	0.7436	0.5914	0.8500	0.8791	0.2696	0.0438
NO ₃ ⁻	0.9531	0.6319	1.0000	0.9801	0.5254	0.9302	0.9689	0.8066	0.8186	0.6202	0.9909	0.9274	0.9716	0.9409	0.8679	0.8222	0.8502	0.9013	0.8699	0.7269
SO ₄ ²⁻	0.9312	0.6941	0.9801	1.0000	0.5424	0.9544	0.9965	0.8420	0.9071	0.5121	0.9853	0.9326	0.9143	0.9715	0.9090	0.8265	0.8878	0.9217	0.8747	0.7350
Na ⁺	0.7429	0.8666	0.5254	0.5424	1.0000	0.2703	0.6029	0.7179	0.3181	0.7778	0.5514	0.4073	0.4505	0.5379	0.7541	0.2332	0.5601	0.6749	0.1030	-0.0816
NH ₄ ⁺	0.7949	0.4884	0.9302	0.9544	0.2703	1.0000	0.9304	0.7022	0.9390	0.2904	0.9263	0.9122	0.8781	0.9187	0.7878	0.8473	0.8103	0.8087	0.9690	0.8804
K ⁺	0.9419	0.7463	0.9689	0.9965	0.6029	0.9304	1.0000	0.8688	0.9023	0.5317	0.9797	0.9212	0.8920	0.9732	0.9306	0.8070	0.8990	0.9369	0.8354	0.6865
Mg ²⁺	0.8902	0.9393	0.8066	0.8420	0.7179	0.7022	0.8688	1.0000	0.7501	0.5591	0.8737	0.8889	0.6643	0.9262	0.7593	0.8281	0.9752	0.9828	0.5115	0.2824
Ca ²⁺	0.7123	0.6070	0.8186	0.9071	0.3181	0.9390	0.9023	0.7501	1.0000	0.1156	0.8485	0.8634	0.6964	0.9102	0.7861	0.8078	0.8423	0.8097	0.8585	0.7635
Zn	0.7768	0.5598	0.6202	0.5121	0.7778	0.2904	0.5317	0.5591	0.1156	1.0000	0.5941	0.4422	0.6725	0.4669	0.5890	0.2959	0.4442	0.5897	0.2166	0.0480
Cd	0.9599	0.7072	0.9909	0.9853	0.5514	0.9263	0.9797	0.8737	0.8485	0.5941	1.0000	0.9620	0.9334	0.9759	0.8599	0.8714	0.9133	0.9485	0.8374	0.6735
Ni	0.8766	0.6850	0.9274	0.9326	0.4073	0.9122	0.9212	0.8889	0.8634	0.4422	0.9620	1.0000	0.8384	0.9780	0.7185	0.9713	0.9585	0.9448	0.8058	0.6310
Pb	0.9063	0.4712	0.9716	0.9143	0.4505	0.8781	0.9187	0.6643	0.6964	0.6725	0.9334	0.8384	1.0000	0.8356	0.8086	0.7229	0.7115	0.7870	0.8670	0.7554
Fe	0.9152	0.7769	0.9409	0.9715	0.5379	0.9187	0.9732	0.9262	0.9102	0.4669	0.9759	0.9780	0.8356	1.0000	0.8341	0.9112	0.9703	0.9735	0.7970	0.6224
Cr	0.8907	0.7436	0.8679	0.9090	0.7541	0.7878	0.9306	0.7593	0.7861	0.5890	0.8599	0.7185	0.8086	0.8341	1.0000	0.5381	0.7331	0.8188	0.7024	0.5830
Cu	0.7495	0.5914	0.8222	0.8265	0.2332	0.8473	0.8070	0.8281	0.8078	0.2959	0.8714	0.9713	0.7229	0.9112	0.5381	1.0000	0.9243	0.8715	0.7422	0.5727
Al	0.8688	0.8500	0.8502	0.8878	0.5601	0.8103	0.8990	0.9752	0.8423	0.4442	0.9133	0.9585	0.7115	0.9703	0.7331	0.9243	1.0000	0.9820	0.6456	0.4376
Ca	0.9438	0.8791	0.9013	0.9217	0.6749	0.8087	0.9369	0.9828	0.8097	0.5897	0.9485	0.9448	0.7870	0.9735	0.8188	0.8715	0.9820	1.0000	0.6508	0.4392
OC	0.6835	0.2696	0.8699	0.8747	0.1030	0.9690	0.8354	0.5115	0.8585	0.2166	0.8374	0.8058	0.8670	0.7970	0.7024	0.7422	0.6456	0.6508	1.0000	0.9665
EC	0.4949	0.0438	0.7269	0.7350	-0.0816	0.8804	0.6865	0.2824	0.7635	0.0480	0.6735	0.6310	0.7554	0.6224	0.5830	0.5727	0.4376	0.4392	0.9665	1.0000

회화학분야의 자료분석을 위한 컴퓨터 프로그램들의 모음집이었으나, 현재에는 과학 뿐 아니라 전 분야에서 자료의 통계적분석을 위하여 사용하는 프로그램이다. 요인분석이란 많은 변수의 상호관계를 소수의 기본적인 인자로 집약하는 방법의 하나로써, 어떤 집단의 특성을 기술하는 변수가 여러 종류가 있을 경우, 이들 사이에 어느정도의 상관관계가 있는지를 분석하는 방법이다. 즉, 전체 변수에 공통적인 인자가 있다고 가정하고 이 인자를 찾아내어, 각 변수가 어느정도 영향을 받고 있는지, 그 정도를 산출하고 그

집단의 특성이 무엇인가를 기술하려는 다변량분석의 대표적인 통계적 분석방법이다.

성분별 질량비를 분석한 결과는 표 4에서 보는 바와 같이 질량의 경우 분율이 높은 것은 NO₃⁻, SO₄²⁻, K⁺ 등의 이온성분과 분자량이 큰 Cd, Ca, Fe 등의 금속성분이었다. 또한 탄소의 질량에 대한 5개 지점 전부에 대한 분율은 비교적 낮게 나왔으나, 발전소 인근의 4개 지점에 대하여 전체 탄소량(Total carbon)과 일차탄소(Primary Carbon)에 대한 질량의 상관도를 분석한 결과, 0.9 이상의 높은 상관도를 보였

다. 이온 성분별로 보면, Cl⁻의 경우 Na⁺와 Mg²⁺와 높은 상관도를 보여 이들은 주로 해염에서 기인된 것으로 판단할 수 있다.

탄소성분의 경우에는 타 원소와는 상관도가 낮으며, OC와 EC간에 서로의 상관도가 높았으므로, 일차적인 에어로솔 형태로 별도의 화학반응없이, 존재하고 있음을 보여주며, 이들은 주로 화력발전소로부터의 다양한 오염원에서 유래되었음을 추정할 수 있다.

3.2 오염원 분류표

3.2.1 석탄발전소의 오염원 분류표

미국 환경청 (US EPA)에서 제공하는 오염원의 성분에 관한 DB프로그램인 Speciate에는 석탄화력발전소의 석탄먼지 (Fly coal dust)와 관련된 오염원 분류표 (Source Profile) 15가지지를 제공하고 있는데 표 5에서는 이를 소개하였다. 각 오염원분류표에서 제공되는 항목과 본 연구에서 분석한 시료의 분석성분을 비교하여 상관도를 표 6에 나타내었는데 상관도가 84.5% 정도인 No.11202번의 오염원분류표가 국내 석탄화력발전소의 오염원분류표로 적합한 것으로 판단되어 선정하였다.

국내에서 석탄화력발전소 오염원분류표의 선정관련 연구 및 응용사례는 없었으며, 본 연구에서 이를

채택한 것은 발전소 주변의 4지점에서 측정, 분석한 오염원의 성분비 분석결과와 유사한 오염원분류표가 No.11202번이라는 것이고, 향후 이를 검증하려면 이와 같이 발전소 주변에서의 PM10 측정 및 성분의 분석연구가 수행되어야 할 것이기 때문이다.

그리고 No.11202번의 오염원분류표를 이용, 각 원소의 성분비를 구한 것은 그림 3과 같으며 각 지점에 대하여 상관도를 구한 결과, 표 7에서 보는 바와 같이 a-2 (방갈리)지점의 경우, 상관도가 60% 정도이었으며, 그 이외에는 90% 정도의 상관도를 보였다. 이것은 다른 지점의 경우에는 석탄화력발전소 기인의 성분과 뚜렷이 구별되는 항목이 해염이외에는 다른 오염원에 의한 영향은 적은 반면, a-2지점은 석탄화력발전소 기인의 오염원 성분외에 주거지역에 인접하고 있기 때문에 동식물폐기물 (Biomass)에 의한 영향이 직, 간접적으로 작용한 때문인 것으로 판단된다.

그림 4-7에는 각 지점별로 성분비 분석결과를 나타내었다. 그림에서도 알 수 있듯이 모든지점에서 탄소성분이 80% 이상 분석되었으며, a-2지점을 제외한 다른 지점은 특히 비산탄진에서 기인된 EC 성분이 가장 많이 분석되어 30% 이상의 함유율을 보이고 있다. 또한 그림에서도 알 수 있듯이 본 연구에서 국내 화력발전소의 오염원분류표로 제안한 No. 11202번의 성분분포와 매우 유사하였다.

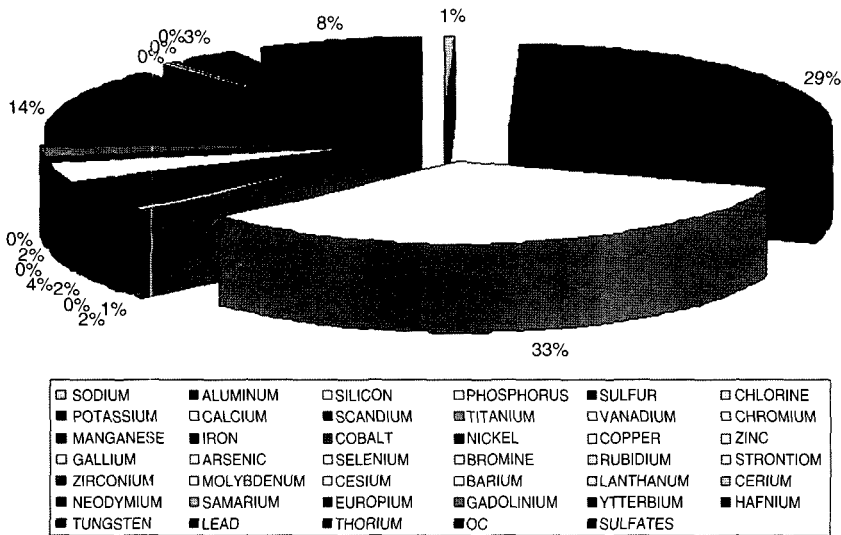


Fig. 3. The concentration ratio of element for coal power plant (11202).

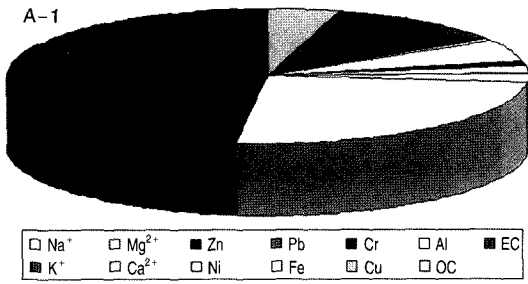


Fig. 4. The mass ratio by component at a-1.

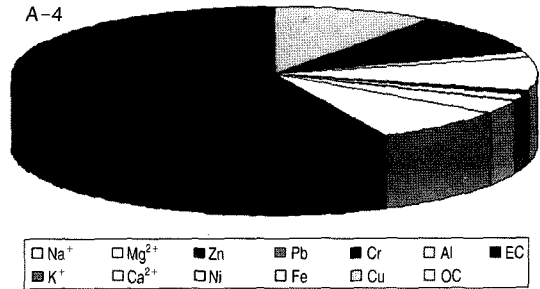


Fig. 7. The mass ratio by component at a-4.

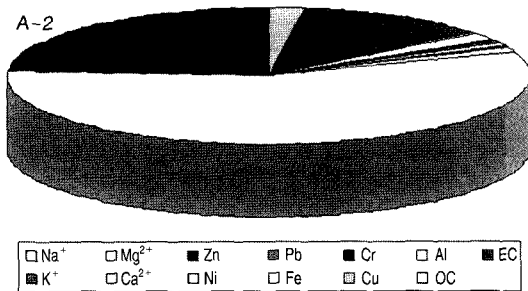


Fig. 5. The mass ratio by component at a-2.

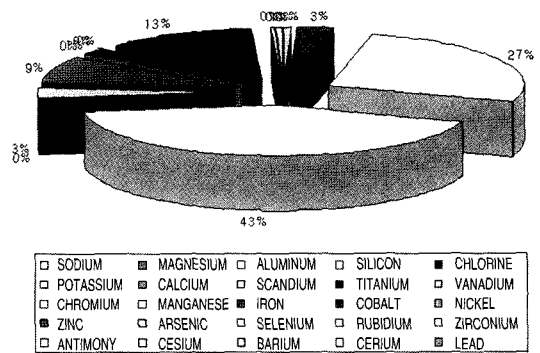


Fig. 8. The concentration ratio of element for fly ash of coal power plant.

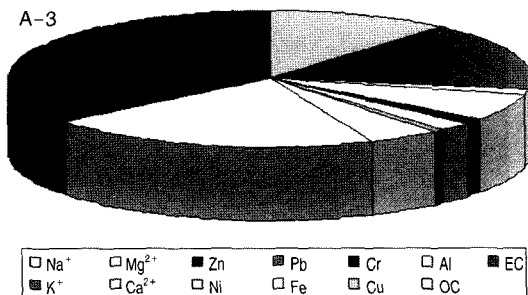


Fig. 6. The mass ratio by component at a-3.

4. CMB모델링 결과

4.1 CMB모델의 이론적 개요

수용모델은 수용체 (receptor)에서 오염물질의 크기, 모양, 색, 입경분포, 유기 무기 화학성분 및 성질, 시공간 변수 등, 오염물질의 고유특성을 분석한 후, 특정 오염원의 정량적 기여도를 각종 응용통계를 이용하여 추정하는 방법이다. 오염물질의 고유특성을 확인하기 위한 기본적인 방법으로는 입자별 분석을 위한 현미경적 방법과 전자분석을 위한 화학적 방법 등이 있다. 화학적 방법 중 가장 널리 이용되는 수용모델은 화학질량 수지법 (chemical mass balance: CMB)이다. CMB모델은 대기분진의 화학적 조성의 합은 각 오염원이 기여한 질량의 합과 같다는 가정 하에, 다중회귀분석 (multiple regression) 등의 방법을 이용하여, 각 오염원의 기여도를 산출하는 방법이다. 그러나 CMB모델을 이용하기 위해서는, 먼저 오염원

3.2.2 석탄회의 오염원 분류표

미국 환경청 (US EPA)에서 제공하는 오염원의 성분 에 관한 DB프로그램인 Speciate의 석탄화력발전소와 관련된 오염원 분류표 15가지 중 No.90012번을 이용하여 석탄회 (Fly ash)에 대한 성분별 질량을 분석하여 그림 8에 나타내었다. 석탄회의 경우에는 Si (42.0%), Al (26.4%), Fe (12.4%), Ca (8.4%), K (3.2%) 순으로 주요 성분이 구성되어 있다.

Table 5. Coal-fired power plants' source profiles of PM10 offered by US EPA.

POLLUTANT \ EPA No.*	90012	11201	11202	11203	11204	11205	11206	11207	11208	11209	11210	11211	11212	21204	43303
ALUMINUM	0.382	14.845	17.096	16.633	11.584	17.439	7.857	13.796	9.2	7.4	19.7	9.325	7.576	6.462	13.2
ANTIMONY				0.004	0.002				0.002	0.002	0.007		0.005	0.013	0.001
ARSENIC		0.055	0.031	0.128	0	0.044	0.016	0.016	0.015	0.028	0.048	0.003	0.044	0.006	0.006
BARIUM		0.056	0.148		0.545						0.16	0.19	0.075	0.023	0.27
BERYLLIUM				0.005											
BROMINE	0		0.001												
CADMIUM		0.005		0.003	0								0.005	0.012	
CALCIUM	13.613	1.393	2.065	4.111	7.586	0.674	0.313	0.594			2.6	2.883	3.182	3.34	4.2
CERIUM			0.018		0.014						0.035	0.009	0.012		0.015
CHLORINE	0.495	0.099	0.081				0.035							0.098	0.004
CHROMIUM	0	0.054	0.023	0.192	0.022	0.065	0.03	0.032			0.061		0.089	0.004	0.013
COBALT			0.008	0.01	0.003						0.013		0.007	0.667	0.004
COPPER	0.017	0.029	0.025	0.032	0.011	0.027	0.016	0.022	0.032	0.029	0.021			0.006	
DYSPROSIUM											0.003				
EC	1.392														
EUROPIUM			0.001								0.001				
FLUORINE	0														
GADOLINIUM			0												
GALLIUM		0.024	0		0.009							0.004			
GERMANIUM					0.015										
HAFNIUM			0.001		0.001							0.001			
INDIUM											0.001			0.009	
IRON	0.201	9.077	7.865	14.575	10.62	3.007	1.768	2.975	7.4	4.9	11.7	2.761	15.152	0.418	6.2
LANTHANUM			0.013		0.009						0.013	0.005	0.004		
LEAD	0.001	0.03	0.03	0.147	0.092	0.021		0.024	0.013	0.034	0.011		0.065	0.034	0.007
MAGNESIUM	0.82			0.804		2.855	1.227	2.591			3.3				1.5
MANGANESE	0.019	0.045	0.024	0.033	0.086	0.027	0.016	0.016			0.074	0.023	0.043	0.004	0.051
MOLYBDENUM			0.01						0.006	0.011					
NEODYMIUM			0.007												
NICKEL	0.011	0.039	0.034	0.106	0.014	0.022	0.017	0.021			0.017				0.009
NIOBIUM									0.002	0.002					
NITRATES	0.097														
OC	2.725		1.71											0.117	
PHOSPHORUS		0.427	0.324											0.63	1.6
POTASSIUM	0.371	1.379	1.296	4.111	1.833	1.728	0.696	1.472			1.2	0.423	2.424	0.019	0.013
RUBIDIUM		0.011	0.013		0.012				0.006	0.003			0.019		
SAMARIUM			0.002		0.001						0.004	0.001	0.001		
SCANDIUM			0.004		0.002						0.015	0.001	0.004		0.002
SELENIUM		0.018	0.008	0.004	0	0.009	0.004	0.004	0.006	0.044	0.031	0.001	0.009		0.001
SILICON	1.382	23.29	19.361	29.674	20.18	30.114	12.89	24.103						14.617	21
SILVER		0.011													
SODIUM	0.298		0.381		0.915	0.291	0.116	0.308			0.28		1.129		0.34
STRONTIUM		0.144	0.125		0.141				0.247	0.247	0.18	0.135		0.015	
SULFATES	0.85		4.878												
SULFUR	0.45	1.8C3	1.286	24.011	2.352	0.447	0.314	0.342						0.461	
THALLIUM				0.006											
THORIUM			0.003		0.002						0.005	0.002	0.003		
TIN		0.006		0.001	0.002									0.008	
TITANIUM	0	0.95	1.248	1.21	0.79	1.08	0.447	1.015			1.8	0.429	0.985	0.197	0.73
TOTAL C				0.656											
TUNGSTEN			0.002		0.001										
URANIUM				0.001											
VANADIUM	0.003	0.072	0.045	0.036		0.06	0.022	0.036			0.062	0.009	0.121		0.025
YTTERBIUM			0.001		0										
YTTRIUM									0.006	0.003					
ZINC	0.003	0.055	0.031	1.038	0.175	0.066	0.023	0.028			0.037	0.06	0.591	0.01	0.022
ZIRCONIUM		0.053	0.047						0.019	0.008					0.03

* EPA No & source profile name

EPA No.	Source profile name	EPA No.	Source profile name
90012	Clay And Fly Ash Sintering - Average	21204	Coal Dust
11201	Coal-Fired Power Plant	11203	Coal-Fired Power Plant
11204	Coal-Fired Power Plant	11205	Coal-Fired Power Plant
11206	Coal-Fired Power Plant	11207	Coal-Fired Power Plant
11208	Coal-Fired Power Plant	11209	Coal-Fired Power Plant
11210	Coal-Fired Power Plant	11211	Coal-Fired Power Plant
11212	Coal-Fired Power Plant	11202	Coal-Fired Power Plant
43303	Coal-Fired Power Utility Fly Ash (Srm 1633)		

Table 6. The correlativity among each profile.

Source profile No.	90012/43303	21204	11201	11203	11204	11205	11206
Correlativity	0.54	0.672	0.728	0.456	0.503	0.411	0.339
Source profile No.	11207	11208	11209	11210	11211	11212	11202
Correlativity	0.467	0.456	0.365	0.328	0.681	0.115	0.845

Table 7. The correlativity between No.11202 source profile at each point.

Point	Correlativity
a-1	0.96
a-2	0.60
a-3	0.89
a-4	0.93

에 대한 정보, 즉 오염원의 수와 화학적 조성을 알아야 한다.

수용모델의 또 다른 방법으로 다변량 통계분석법이 있다. 이 중 인자분석법(factor analysis)은 수용모델 개발 초기부터 광범위하게 이용되어 왔지만, 이 모델은 일반 대기 시료 중 오염원을 확인 하는 데는 큰 역할을 하였지만, 오염원의 기여도를 정량적으로 추정할 수는 없었다. 그리고 CMB모델과 유사한 Hopk and Alpert (1980)의 목표변환 인자분석법(target transformation factor analysis; TTFA)은 오염원의 수 또는 특성에 관한 초기정보가 필요하지 않으며, 일반 인자분석 법과는 달리, 오염원 성분표(source profile)를 추정할 수 있어, 오염원의 기여도를 정량적으로 계산할 수 있다. 현재, 인자분석법은 2차원 자료를 이용하는 방법에서, 시공간의 3차원 변수를 동시에 이용하는 3-극 인자분석법(three-model factor analysis; TMFA)으로 한 단계 발전하고 있다(김동술과 이태정, 1992).

본 연구에서 사용한 CMB-8모델은 미국 환경성에서 추천하고 있는 대표적인 수용모델로서 다변량 회귀분석 방법을 이용하여 한 수용점에 영향을 주는 각 오염원의 기여율과 분석오차를 계산하는 모델인데 기본적으로 다중 변수에 대한 회귀 분석과 이로부터 구한 최소자승식을 이용하여 각 오염원의 기여 정도를 계산하는 방법으로 기본 방정식은 식 (1)과 같다.

$$C = [A]npSpl + Enl \tag{1}$$

여기에서 C는 성분 측정값을, [A]는 성분별 기여 정도, S는 각 오염원의 질량, E는 측정오차를 n은 성분수, p는 오염원수, l은 측정자료수를 의미하며, 각 요소([A], S, E들은 행렬로 표현된다. 식 (1)을 S에 대하여 풀면 식 (2)와 같아진다.

$$S = ([A]' [W][A])^{-1} [A]' [W]C \tag{2}$$

여기에서 [W]는 diagonal matrix with effective variance on the diagonal이다.

위에서와 같이 오염원의 기여율을 계산하는 수용모델은 통계적인 모델이 아니라 행렬식을 반복적으로 풀어 가장 적당한 해를 찾아가는 모델이다.

4. 2 모델링 결과

US EPA에서 추천하는 수용모델인 CMB8모델을 이용하여 각 오염원에서 기인된 오염물질이 주변 환경농도에 미치는 영향을 분석하였다. 모델에 필요한 오염원분류표를 선정하기 위하여 인자분석을 실시, 각 성분별 상관도를 분석하여 오염원을 추정하고, 추정된 오염원에 대하여 Speciate에서 제공하는 오염원별 오염원분류표를 각기 적용하여 CMB8모델링을 수행하였다. 모델링후 결과의 타당성을 검토하여, 결과가 타당하지 않을 경우 다른 오염원분류표를 적용하는 반복적 분석 방법으로 한 오염원에 대하여 가장 적합한 오염원분류표를 결정하였다. 오염원으로는 요인분석결과를 참고하여 (NH₄)₂SO₄와 NH₄NO₃와 같은 이온염과, 이동오염원(Mobile source; move), 발전소(Coal power plant), 석탄회(Fly ash), 해염(Marine), 토양(Geological source), 동식물성폐기물(Biomass burning)을 선정하였다.

표 8과 그림 9에서는 각 측정 지점별로 오염원별 질량농도와 질량비를 분석한 모델링결과를, 보여주고 있는데 각 지점에서 석탄화력발전소의 기여율은 24~52% 정도로 계산되었으며, 표준오차(Standard error)는 0.38~0.89 µg/m³로서 신뢰성 높은 분석결과를 보이고 있다.

Table 8. The result of CMB8 modeling.

Site	Item	(NH ₄) ₂ SO ₄	NH ₄ NO ₃	Move	Coal power plant	Fly ash	Marine	Biomass burning	Geological source	Total
a-1	mass (μg/m ³)	4.01	4.30	1.60	18.96	0.69	0.78	4.85	1.57	36.78
	STD ERR	2.50	0.96	0.11	0.89	0.09	0.13	2.98	1.05	
	contribution (%)	10.91	11.70	4.35	51.58	1.88	2.12	13.19	4.27	100
a-2	mass (μg/m ³)	11.52	12.04	0.86	14.50	0.66	1.04	15.74	4.23	60.59
	STD ERR	2.56	4.21	0.08	0.38	0.03	0.12	1.11	1.07	
	contribution (%)	19.01	19.87	1.42	23.93	1.09	1.72	25.98	6.98	100
a-3	mass (μg/m ³)	12.56	11.23	0.98	18.65	0.76	1.62	4.35	2.61	52.76
	STD ERR	3.01	2.35	0.03	0.07	0.03	0.21	1.14	0.58	
	contribution (%)	23.81	21.29	1.86	35.35	1.44	3.07	8.24	4.95	100
a-4	mass (μg/m ³)	3.25	2.54	0.98	11.63	0.86	0.98	5.76	2.91	28.91
	STD ERR	1.05	0.87	0.11	0.56	0.09	0.10	0.34	0.09	
	contribution (%)	11.24	8.79	3.39	40.23	2.97	3.39	19.92	10.07	100

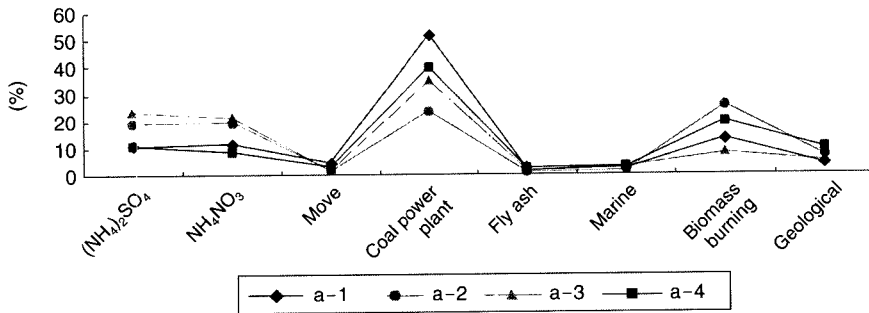


Fig. 9. The contribution ratio by each measuring point and pollution source.

지점별 발전소로 인한 기여율을 보면, a-1지점이 가장 높아 52% 정도를 보이고 있으며, 다른 지점들에서도 35% 이상의 높은 기여율을 보이나 a-2지점의 경우에는 24% 정도로 다소 낮은 분포를 보였다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 a-2지점의 경우 주거지역과농경지에 인접하여 상대적으로 동식물성 폐기물의 기여율이 높기 때문일 것으로 추정되나 Si의 분석이 이루어지지 않아 단언하기는 어렵다.

또한, 화력발전소 인근 4개 지점의 시료에서 수용성 이온성분이 적게 검출되어 이온염 분석시 상대적으로 표준오차가 커졌으며, 본 연구에서 사용한 분석 항목 중 Si이 누락됨에 따라, 석탄회(Fly ash) 기여율이 가장 낮은 것으로 모델링되었으며, 토양(Geological source)의 비율도 10% 미만으로 분석되었다. 그리고 해염(Marine source)의 경우에는 4% 미만의 기여정도를 보이고 있으며 a-3지점과 a-4지점은 다른

두 지점에 비하여 다소 높은 기여정도를 보이고 있다. 발전소로 인한 기여농도는 a-1과 a-3지점에서 각각 18.96 μg/m³와 18.65 μg/m³로 비슷하게 분석되었지만 기여도에 있어서는 a-1지점이 약 52%, a-3지점이 약 31%로서 큰차이를 보이고 있는데 이는 a-3지점이 (NH₄)₂SO₄와 NH₄NO₃와 같은 이온염의 기여도가 상대적으로 높기 때문이다.

5. ISCST3모델링

5.1 발생량추정방법

화력발전소의 저탄시설에서 비산탄진의 발생의 기인력 및 이의 운동해석에 대한 연구는 아직 이루어진 바가 없으며, 현재 황사의 기인력 해석과 관련된 유사한 연구가 태동되고 있다. 본 연구에서는 일

본의 Ichikawa (1990)는 운탄 및 저탄과정, 저탄시설에서의 발진과정에 대한 수직실험과, 저탄장에서의 발진계수 및 운탄기에서의 발진계수와 관련된 풍동 실험 결과 등을 이용하여 실험식을 만들었는데 이를 한국전력기술 (1996)에서 BPDM (Blowing Particle Dispersion Model)로 개발하였는데 이를 이용하여 화력발전소 저탄시설에서의 비산탄진 발생량을 추정하였다. BPDM에서는 비산탄진의 발생을 크게 석탄 하역시의 발진, 저탄작업시의 발진, 석탄 운반시의 발진, 석탄 저장시의 발진 및 상탄시의 발진과 기기 작업시 발생하는 발진으로 분류하여 계산하고 있다. 각 발진량 계산식은 다음과 같다.

$$\eta_0 = \alpha \times (0.019 \times U - 0.113) \quad (3)$$

$$\eta_s = 0.019 \times U - (0.013 + 0.027 \times \Delta W) \quad (4)$$

$$Q_c = 8.1 \times 10^{-4} \times \rho \times P \times (|u + V \cos \theta|^{4.3}) \quad (5)$$

$$Q_p = 1.1 \times 10^{-3} \times \rho \times P \times U^{4.3} \quad (6)$$

$$Q_R = 7.8 \times 10^{-4} \times \rho \times P \times U^{4.3} + 0.15 \times \eta_s \times Q_T \times P/100 \quad (7)$$

$$Q_B = a_s \times Q_C \quad (8)$$

여기에서, η_0 는 하역시 낙하거리 1 m당 발생하는 발진률 (%/m · s)을, U는 발진유발 풍속 (m/s)을, α 는 hopper 주위에 방풍판 설치 유무에 따라 변하는 계수로 방풍판이 있을 경우에는 0.8을, 방풍판내에 방풍판이 있을 경우 0.1을 사용한다. 한편, η_s 는 저탄작업시 1 m당 발진률 (%/m · s)을, ΔW 는 저탄작업시 추가로 뿌리는 습분 (%)을, Q_c 는 Conveyor 표면 발진량 (mg/m/s)을, ρ 는 석탄의 밀도 (g/cm³), P는 500 μ m 이하의 입자 존재비율, u는 평균 풍속 (m/s)을, V는 conveyor 이동속도를, θ 는 풍향과 conveyor 진행방향 사이의 각도를, Q_p 는 저탄과일 표면 발진량 (mg/m²/s)을, Q_R 은 reclaimer 총 발진량 (mg/s)을, η_s 는 stacker, tripper 발진률을, Q_T 는 1회 낙탄량을, Q_B 는 불도우저에서 발진되는 총 발진량 (mg/s)을, Q_C 는 컨베이어의 표면 발진량 (mg/s)을, a_s 는 실험계수로서, 불도우저 주행시에는 10³를, 불도우저 작동시에는 2 × 10³를 사용한다. 태안화력발전단지에서의 석탄분진 발생량

Table 9. The input data for calculation of fly coal dust.

Item	Content		Unit	Value	
	Variable				
Coal	P	Ratio of coal particles under 500 μ m	mg/g		3.00
	ρ	Specific gravity of coal particles	kg/m ³		800
	V_t	Falling velocity of coal particles	m/s	50 μ m 110 μ m 175 μ m	0.060 0.292 0.740
Coal stacker	Q_{is}	Loading capacity	TON/H	2,000 × 2SET	
	H_s	Total height	m	41.9	
	ΔH_s	Average height of bucket	m	34.5	
Coal reclaimer	T_s	Operating time	hr times	APP. 300 hr/mon. 6 times/mon.	
	Q_{r1}	Loading capacity	TON/H	4,000	
	H_s	Total height	m	27.6	
	A_r	Operating range of reclaimer	m ²	484.5 × 98	
	Q_{r2}	Loading capacity of bucket	g/s	-	
Truck	T_s	Operating time	hr times	APP. 300 hr/mon. 6 times/mon.	
	Q_b	Capacity of dump truck	g	43 × 10 ⁶	
	N_w	Number of wheel	ea	16	
L	Size of coal yard (assumption : a regular square)		m × m	700 × 510	
H_p	Height of coal pile		m	16	
U_g	Maximum wind velocity		m/s	21.9	
conveyor	Maximum capacity		m ³ /hr	5	
	Rotating velocity		rpm	25	
	Diameter × length		m × m	250 × 3.0	

계산을 위한 입력자료는 표 9와 같다.

5.2 확산 계산 방법

5.1절에서 계산한 비산탄진 발생량의 확산 후 농도 계산을 위하여 미국 환경청에서 Gaussian 확산모델로 추천하고 있는 ISCST3 모델을 이용하였다. ISCST3 모델에서 사용하는 기본 확산식은 Pasquill-Gifford의 확산식을 이용하여 풍하측(x, m 단위) 및 직각방향(y, m 단위)의 매시간농도를 식(9)와 같이 계산한다.

$$\chi = \frac{QKVD}{2\pi U_s \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad (9)$$

여기에서, Q는 단위시간당 오염물질의 배출량 (질량/단위시간)을, K는 단위환산계수 (기본값: 1×10^6 (Q 단위가 g/s이며, 농도단위로 $\mu\text{g}/\text{m}^3$))를, V는 연직항이며, D는 감쇄항 (일반적으로 감쇄항은 고려치 않음), U_s 는 배출고도에서의 평균풍속 (m/s)을 의미한다. 연직항은 식(10)과 같이 계산하는데, 이 경우 침적효과는 없는 것으로 가정한다.

$$V = \exp\left[-0.5\left(\frac{Z_r - h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{Z_r + h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \exp\left[-0.5\left(\frac{H_1}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{H_2}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{H_3}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{H_4}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (10)$$

여기에서 h_e 는 유효연돌고이며, $H_1 = z_r - (2iz_i - h_e)$, $H_2 = z_r + (2iz_i - h_e)$, $H_3 = z_r - (2iz_i + h_e)$, $H_4 = z_r + (2iz_i + h_e)$ 로 계산하고, i 는 배출증기의 반사횟수를, z_r 은 수용점의 높이 (m)를, z_i 는 혼합고 (m)를 의미한다.

혼합고는 배출증기가 혼합 가능한 상층경계의 높이를 말한다. ISCST3는 유효연돌고를 계산하고, 이를 이용하여 오염물질의 연직혼합과 침적을 계산하는 방법을 이용하는데, 매시간 기상자료를 이용하므로, 사용된 기상자료가 모델대상 지역의 기상을 대표할 수 있다면, ISCST3로 계산한 오염물질 농도는 다른 기후학적인 Gaussian형 대기확산 모델보다는 실제적인 농도를 계산할 수 있다.

또한, 모델에서는 이루어지는 바람의 크기에 반비례하여 오염물질이 침적되는 것으로 가정하고 있으며

로, 풍속이 1.0m/s 이하인 경우에는 비사실적으로 높은 농도가 계산된다. 이러한 경우, 미국 환경성에서는 1.0m/s 이하의 풍속은 1.0m/s로 간주하여 계산하도록 권고하고 있다. 한편, ISCST3에서는 지형자료를 입력할 수 있도록 구성되어 있어 본 연구에서는 국립지리원에서 제공하는 1 : 25,000의 수치지도를 읽어 작성한 200m 간격의 지형고도 자료를 이용하였다. 그리고 기상자료로는 태안화력발전단지 인근의 이원 자동기상관측소(AWS)에서 1992년 2월부터 2001년 12월까지 측정된 자료를 일평균하여 사용하였다. 이 기간동안의 기상자료를 분석한 결과, 표 10 및 그림 10에서 보는 바와 같이 평균풍속은 2.0 m/s이며, 겨울철에는 북풍이, 봄, 여름철에는 북서풍이, 가을철에는 동풍이 우세하였다.

5.3 모델링 결과

5.1절과 5.2절에서 언급한 방법으로 계산한 비산탄진 발생량과 각 지점에서 계산된 농도를 표 11에 나타내었다. 태안화력발전소의 저탄시설에서 연평균 비산탄진 발생량은 4.8 g/s로서 이를 이용하여 각 지점에서의 확산농도를 계산한 결과 49.8~57.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도분포를 보이는 것으로 계산되었다. 이는 표 12에서 보는 바와 같이 정값과 비교할 경우 상관도가 30% 미만으로 낮게 예측되었으며, 저탄시설에서의 발전량을 가정하고 예측한 결과임에도 불구하고, 측정값보다 2배 이상 높게 계산되어 Gaussian 확산모델을 이용하여, 발전소로 인한 에어로졸의 대기

Table 10. The average monthly temperature, wind velocity and precipitation at Ewon.

Item	Temp (°C)	Wind velocity (m/s)	Main wind direction	Precipitation (mm)
Monthly				
1	-0.8	2.6		19.0
2	0.2	2.4	N	12.8
3	4.3	2.4		37.3
4	10.6	1.9	NW	33.2
5	15.7	1.6		92.2
6	20.4	1.5		102.6
7	24.7	1.8	NW	184.1
8	25.8	1.6		253.0
9	21.0	1.7		107.1
10	15.2	1.8	E	67.8
11	7.8	2.2		30.4
12	1.8	2.4	N	13.2
연간	12.2	2.0	NW	952.6

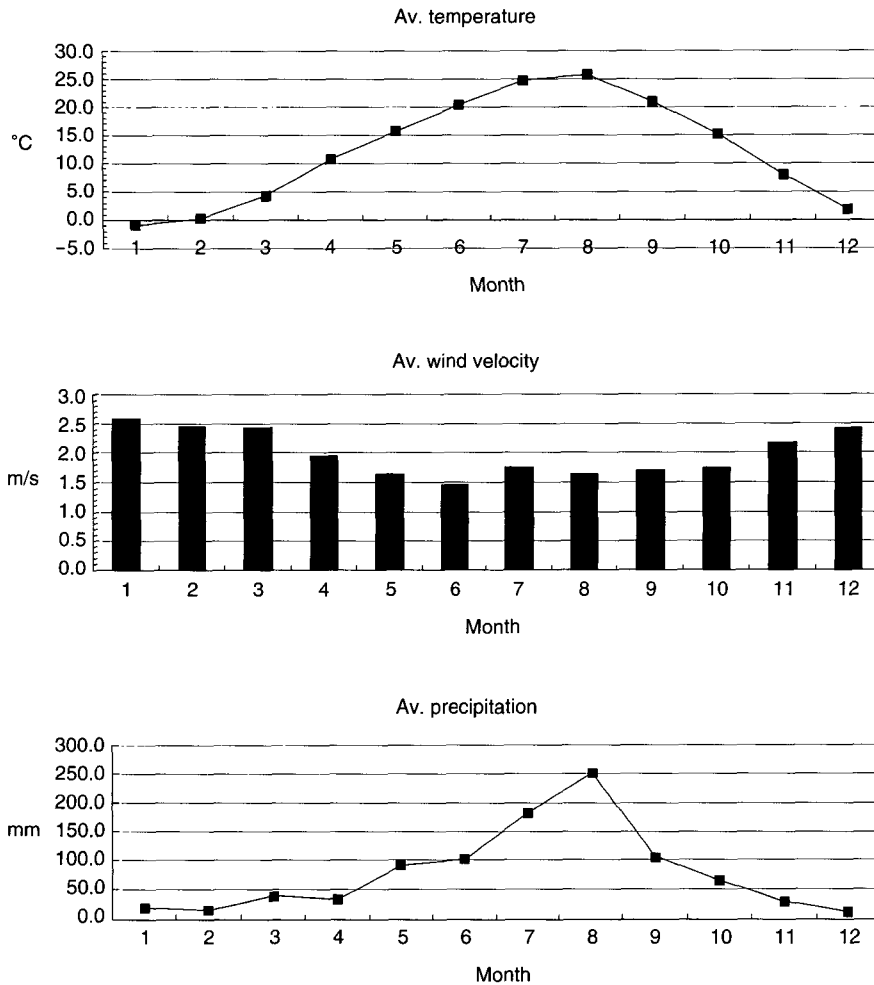


Fig. 10. The average monthly temperature, wind velocity and precipitation.

영향평가를 할 경우 지나치게 높게 확산농도가 예측될 우려가 있음을 보여준다.

이와 같이 상관도가 낮게 계산된 것은 발전량 계산과정의 오류 역시 주요 인자로서, 각 지점에서의 PM10농도에는 화력발전소 저탄시설에서 기인된 것 이외에 연돌에서 배출되는 PM10에 의한 영향과 기체상물질의 2차 반응에 의하여 생성된 에어로솔, 회처리장에서 기인된 에어로솔 및 기타 해염, 도로들 주변 환경에서 배출된 오염물질 등이 복합적으로 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 배출지점에서 배출량을 산정하여 이를 Gaussian 확산모델을 이용, 수용

점에서의 농도를 예측할 경우에는 오염원의 배출량 산정과정, 기상, 지형 등의 자료입력 등에 포함된 오류가 증폭되어 나타남에 따른 것으로 판단되며 통상 실측치보다는 상당히 높게 예측되는 것으로 알려져 있다.

따라서, 현재와 같이 입자상물질의 발생과정에 대한 역학적 사실이 명확히 연구되지 않은 시점에서 실험식을 이용하여 발생량을 추정하고 Gaussian 확산모델을 이용하여 대단위 배출원에 의한 주변 대기 오염에 미치는 영향을 평가하는 방법은 그 결과가 지나치게 높게 평가되고 있으며 배출량자료의 불확

Table 11. The monthly amount of fly coal dust and deposition density after dispersion by each measuring point.

Monthly	Emission velocity of Fly coal ash (g/s)	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		a-1	a-2	a-3	a-4
1	5.4	56.7	52.3	58.5	49.3
2	5.6	59.8	54.6	61.3	52.7
3	5.8	57.5	53.9	59.5	50.6
4	5.3	55.3	51.0	57.3	48.8
5	3.7	48.1	49.9	53.2	45.7
6	5.6	59.2	54.1	60.9	51.9
7	5.1	53.1	52.7	51.4	48.0
8	4.9	55.3	51.2	57.1	49.9
9	3.8	53.9	52.9	57.9	49.2
10	3.9	54.1	53.5	59.2	50.5
11	4.4	55.7	54.3	60.1	51.6
12	4.1	54.0	53.9	58.8	49.1
Average	4.8	55.2	52.9	57.9	49.8

Table 12. The comparison between measurement and calculation. (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Point	a-1	a-2	a-3	a-4	Average
Measuring value	23.7	64.5	8.5	15.9	28.1
Calculation value	55.2	52.9	57.9	49.8	53.9

실성 등의 문제가 있으므로 평가하고자 하는 지역에서 1~2회의 입자상 물질의 농도를 측정하고 성분 분석을 하여, 수용모델로 배출원별 기여도를 평가하는 방법이 보다 타당할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 석탄화력발전소 인근의 4개 지점에서 측정된 PM10의 성분분석결과와 발전소로부터 남서쪽으로 14.7 km 떨어진 파도리지점에서 측정된 PM10의 성분분석자료를 이용한 요인분석을 통해 오염원을 산정하고, 그리그 CMB-8모델을 활용하여 각 오염원의 기여정도를 분석하였다.

수용모델링을 위한 오염원분류표를 결정하기 위하여 미국 환경청에서 제시한 15가지의 화력발전소 오염원분류표에 대하여 각기 상관도 분석을 한 결과,

No.11202번의 상관도가 84.5%로 높게 분석되어 이를 채택하고, CMB8모델로 오염원별 기여도를 계산하였다. 그 결과, 각 지점별로 화력발전소에 의한 기여율은 23.9~51.6%를 보이고 있으며, 이 경우 표준 오차는 $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만으로 낮게 나타나, 화력발전소의 오염원분류표의 선택이 유의함을 보여주었다.

한편, Ichikawa의 비산탄진 발생량 실험식을 이용하여 화력발전소 저탄시설에서 발생하는 비산탄진량을 계산하고 미국환경청에서 추천하는 Gaussian 확산모델인 ISCST3를 이용하여 각 지점에서의 확산농도를 계산한 결과, $49.8 \sim 57.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 계산되어 실제 측정값의 평균치 $28.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비하여 약 2배 이상 높게 계산되었다.

본 연구는 대단위 배출원의 기여정도를 예측하는 방법을 고찰한 것으로서 특정 수용점에서의 기여정도를 평가하기 위해서는 배출량 산정 및 확산 해석상 부정확도가 많이 내포된 Gaussian 확산모델보다는 수용 모델을 이용할 경우보다 타당한 결론을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한양대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 대해 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김관수, 황인조, 김동술 (2001) 수원지역 대기 중 PM-10 오염원의 정량평가를 위한 수용방법론의 개발, 한국 대기환경학회지, 17(2), 119-131.
- 김동술, 이태정 (1993) 입경분류에 입각하여 목표변환인자분석법을 이용한 수원지역 분진 오염원의 정량적 기여도 추정, 한국대기보전학회지, 9(1), 44-50.
- 서영화, 구자공 (1992) 대기분진의 무기 화학적 조성 분석과 chemical mass balance에 의한 오염원 기여도 산출, 한국대기보전학회지, 8(2), 112-120.
- 신혜정, 김지영, 최병철, 오성남, Jianzhen Yu, Keith Bower (2002) ACE-Asia 집중관측기간에 측정된 대기오염물질의 농도 분포특성, 한국대기환경학회지, 18(6), 487-501.
- 유정석, 김동술, 김윤신 (1995) 서울시 PM-10 오염원의 정량적 기여도 추정 11(3), 279-290.

- 한국전력기술(주)(1996) “비산탄진 확산예측시스템 개발 기술개발 최종보고서”
- 한국전력기술(주)(1997) “방진 및 방풍벽 기본설계 기술개발 기술개발 최종보고서”
- 국립환경연구원(2002) Long Range Transport of Toxic Trace Substances : Identification and impact analysis(1).
- Ahuja, M., J. Paskind, J.E. Houck, and J.C. Chow (1989) “Design of study for the chemical and size characterization of particulate matter emissions from selected sources in California”, Air and Waste Management Assosiation, Pittsburgh, PA, pp. 145-158.
- Chow, J.C. and J.G. Watson(1998) Guideline on speciated particulate monitoring, Third Draft Report. Prepared for US EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC, Desert Research Institute Reno, NV. August.
- Chow, J.C., C.S. Liuy, J. Cassmassi, J.G. Watson, Z. Lu, and L.C. Prichett (1992) A neighborhood-scale study of PM10 source contributions in Rubidoux, California. Atmos. Environ. 26A, 693-706.
- Ichikawa, Y. and K. Asakura (1986) 碧南火力發電所豫定地點からの炭塵 飛散量豫測, エネルギー研究所.
- Ichikawa, Y. and K. Asakura (1990) “Development of an environmental assessment method for coal particle dispersion caused by coal-handling facilities”, Komae Research Laboratory Rep. No. T89025.
- Johann P. Engelbrecht, LeonSwanepoel, Judith C. Chow, John G. Weston, and Richard T. Egami (2002) The comparison of source contributions from residential coal and low-smoke fuels, using CMB modeling, in South Africa, Environmental Science & Policy 5, 157-167.
- Kim, B.M. and Ronald C. Henry (2000) Application of SAFER model to Los Angeles PM10 data, Atmospheric Environment, 34, 1747-1759.
- US EPA (1998) AP-42 Compilation Factor Fifth edition, Vol. 1, Chap. 1, External Combustion source.
- US EPA (1990) EPA-450/4-90-004, “Receptor model technology series, volume III”.
- US EPA (2002) 40 CFR Ch. 1 Part 41, App. W to Part 51, “Guideline on Air Quality Models”,
- Weston, J.G., N.F. Robinson, and J.C. Chow (1990) The USEPA/DRI Chemical Mass Balance Receptor Model. CMB 7.0, Environmental Software, 5(1), 38-49.