

국내 대기오염모델링의 현황과 과제

Review of air pollution modeling in Korea

장 영 기 · 송 동 웅¹⁾

수원대학교 환경공학과

¹⁾ 상지대학교 환경공학과

Young-Keel Jang, Dong-Woong Song¹⁾

Dept. of Environmental Engineering, Suwon University

¹⁾ *Dept. of Environmental Engineering, Sangji University*

1. 서 론

우리 사회는 1970년대 이후 급속한 공업화와 대도시 인구 집중을 겪어왔다. 공업화는 필연적으로 대기오염배출시설의 증가를 가져왔고 도시의 인구집중은 연료의 사용과 자동차의 증가를 가져와 이들 지역의 대기오염을 증가시켰다. 이에 따라 대기오염배출시설을 관리하고 주변 지역의 영향을 분석하며 도시의 대기질을 개선하기 위하여 우리나라에서도 1970년대 후반부터 대기오염 모델들이 이용되기 시작하였다. 우리나라에서 이 분야에 대한 연구와 활용은 외국에 비하여 늦게 시작되었지만 지난 15년간 대기오염모델은 많은 분야에서 활용되어 왔고 연구도 점차 활발하여 지고 있다.

대기오염은 대기오염물질이 발생원으로부터 배출되어 기상조건에 따라 확산, 이동됨으로써 대기중의 농도를 형성하고 주위에 피해영향을 주게 된다. 실제 존재하고 있는 배출원으로부터 주위 몇 지점에 미치는 현재의 오염농도를 확인하기 위해서는 해당 지점에서 농도를 실측하는 방법이 가장 효과적일 것이다. 그러나 앞으로 건설될 배출시설로부터의 영향을 미리 예측하거나, 배출원 주위 전 지역의 농도분포를 분석하거나, 대기오염관리대책의 효과를 미리 비교평가하기 위해서는 대기오염확산이라는 자연현상을 설명할 수 있는 도구가 꼭 필요하게 된다. 바로 이점이 여러 가지 불확실성을 가지고 있는데도 불구하고 대기오염모델이 많이 이용되고 있고 또한 필요한 이유이다. 이러한 오염물질의 확산현상을 배출원

중심으로 설명하는 방법을 대기오염확산모델이라고 한다.

대기오염확산모델은 오염물질의 배출조건을 설명하는 부분, 대기 중에서 확산, 이동을 설명하는 부분 그리고 대기오염물질의 대기중에서의 변화를 설명하는 부분으로 이루어진다. 배출조건을 설명하기 위하여 일반적으로 배출조건에 따라 대기오염배출원을 먼저 고정오염원과 이동오염원으로 나누고 고정오염원은 다시 화력발전소, 대형연소시설, 산업시설과 같이 비교적 높은 굴뚝과 많은 배출량을 갖는 점오염원(point source)과 가정난방 시설과 같은 소규모의 배출원이 많이 모인 면오염원(area source, 지역오염원)으로 나누며 자동차, 배, 항공기 등 움직이는 오염원을 이동오염원(mobile source) 또는 선오염원(line source)으로 구분한다. 본 논문에서는 그동안 우리나라에서 진행된 대기오염확산모델에 대한 연구결과와 지역대기관리, 환경영향평가에서 대기오염모델이 어떻게 활용되었는지 정리, 검토하고 발전을 위한 과제에 대하여 살펴보고자 한다. 자료는 대기보전학회지와 환경분야 연구논문초록집에 실린 문헌들을 중심으로 하였고, 장거리확산모델에 대해서는 다른 논문에서 다루게 되므로 이를 제외한 대기확산모델분야를 범위로 하였다.

2. UNAMAP 대기오염모델

가우스 계산식에 의한 대기오염확산은 초기 Robert (1923)의 연구로부터 시작하여 Taylor(1921, 1935)의 통

계적 이론에 기초한 Sutton(1932, 1953), Frenkiel (1953)의 연구에 의하여 발전되었다. Singer와 Smith (1953), Cramer(1957), Hay와 Pasquill(1957, 1961, 1962), Gifford(1961) 등은 기상관측을 통하여 확산을 설명하는 간편한 방식을 사용함으로써 가우스 계산식에 의한 대기오염 확산연구를 촉진하였다. 이후 야외에서의 오염확산실험이 여러 학자들에 의하여 수행되었다. Barad(1958)에 의하여 평지에서서의 확산실험인 Project Prairie Grass의 연구결과가 보고되었고, Taylor(1965)에 의하여 사막에서의 확산실험인 Project Sand Storm의 연구결과가 보고되었고, Bowne(1969)에 의하여 삼림지역의 확산실험결과가 보고되었으며 도시지역에 대하여 Pooler(1966)와 McElory(1969)에 의한 확산실험 결과가 보고되었다.

도시지역 대기오염에 대한 연구는 배출량자료의 부족과 수많은 계산을 수행하는데 따른 어려움 등으로 초기에는 부진하였다. 도시지역에 대한 대기오염연구는 Pooler(1961)의 Nashville에 대한 연구를 시작으로 하여 Turner(1961, 1964)의 단기모형 적용이 있었고, Miller와 Holzworth(1967)는 도시지역의 평균농도를 산출하는 간편한 방법을 고안하였다. 그후 Martin과 Tikvart(1968)는 AQDM(Air Quality Dispersion Model)이라 불리는 장기모형을 개발하여 널리 쓰이게 되었다. 그 밖에도 도시지역에 대한 대기오염모델링연구는 Koogler 등(1967)에 의한 Jacksonville에 대한 연구, Davidson과 Shieh(1967)에 의한 New York에 대한 연구, Robert 등(1970)에 의한 Chicago에 대한 연구, Fortak 등(1970)에 의한 독일 Bremen에 대한 연구 등이 있었다. 또한 먼오염원에 의한 농도계산을 위한 간편한 방식(ATDL모형)들이 Hanna와 Gifford(1971, 1973, 1974)에 의하여 개발되어 도시지역의 대기오염연구에 많은 기여를 하였다. 그 밖에도 Shir와 Shieh(1974)의 St. Louis에 대한 유한차분모형 연구, Knox(1974)의 San Francisco지역에 대한 다상자모형 연구, Bringfelt 등(1974)에 의한 Stockholm에 대한 수치모형 연구 등 많은 연구들이 뒤를 잇게 되었다.

이러한 대기오염연구에 있어서 대기오염모델의 유용성이 높아지자 미국 NTIS(National Technical Information Service)에서는 점증하는 대기오염모델링 작업의 편의를 위하여 1973년 6개의 모델을 전국 컴퓨터 네트워크에 넣어 사용자에게 공급하기 시작했고, 이어서 FORTRAN으로 작성된 이 전산 프로그램들을 마그네틱 테이프에 담아서 배급하기 시작했는데 이 프로그램 시스템을 UNAMAP(User's Network for Applied Mo-

delling of Air Pollution)이라 한다. 1973년 처음 UNAMAP에 수록된 6개의 모델은 PTMAX, PTDIS, PTMTP, APRAC, CDM, HIWAY였다. PTMAX는 단일 점오염원으로부터 최대착지농도가 발생하는 풍하거리와 최대착지농도를 기상조건별로 산출하고 PTDIS는 단일 점오염원으로 부터 풍하거리별 농도를 산출하고 PTMTP는 25개 까지의 점오염원으로 부터 30개 지점의 농도를 산출할 수 있는 모델이다. 이후에 PTMAX는 여러 고려사항이 더 보완된 PTPLU로 발전하였다. APRAC은 도시지역에서 자동차로부터의 장단기 오염농도를 산출하고 CDM은 도시지역의 장기농도를 AQDM과 유사한 방식으로 산출하며 HIWAY는 도로변에서 풍하거리별 단기농도를 산출할 수 있는 모델이다.

이후 이 시스템은 1978년에 CDMQC, CRSTER, PAL, RAM, VALLEY 등 5개의 모델이 추가된 Version 3가 나왔다. CDMQC는 CDM에 착지점에서 각 오염원들로부터의 기여율을 산출하는 기능이 추가되었고, CRSTER은 화력발전소와 같은 점오염원으로부터 연중 기상자료에 의하여 단기농도와 24시간 최고농도를 산출한다. PAL은 도시 소구역의 점, 면, 선오염원을 모두 고려할 수 있는 모델로 HIWAY가 단일 선오염원을 고려하는 반면 여러개의 선오염원과 커브길, 고가도로와 같이 높이의 차이가 있는 도로 등을 고려할 수 있고, RAM은 도시지역의 점, 면오염원으로부터의 단기농도를 산출할 수 있다. VALLEY는 굴뚝높이 보다 높은 지형을 고려하여 16방위 방사형으로 지도와 같은 척도의 단기농도 지도를 산출할 수 있다. 이후 UNAMAP시스템은 1980년에 Version 4, 1982년에 Version 5, 1986년에 Version 6가 보급되면서 새로운 모델들이 추가되거나 기존의 모델들이 수정, 보완되며 발전되고 있다.

Version 3 이후에 보완되거나 추가된 모델을 살펴보면 TCM과 TEM은 먼오염원 계산에 Hanna와 Gifford의 ATDL방식을 채택하고 농도계산과정의 중간계산값을 미리 계산하여 내장함으로써 계산속도를 대폭 줄이고 산출결과를 농도지도(concentration map)형태로 출력할 수 있는 장기, 단기모델이다. ISCLT와 ISCST는 종전의 CDM, CRSTER방식에 입자상물질의 침강(dry deposition)과 건물와류현상(building downwash), 굴뚝와류현상(stack-tip downwash)을 고려할 수 있도록 하여 공단지역에 적합한 장기, 단기모델이다. 초기의 CDM을 보완한 CDM-2는 7개의 오염확산계수를 내장하여 이를 대상지역의 특성에 따라 선택하여 쓸 수 있도록 하였다. 자동차와 같은 선오염원을 고려하는 모델은 HIWAY와 PAL, APRAC 이후에 CALINE과 RO-

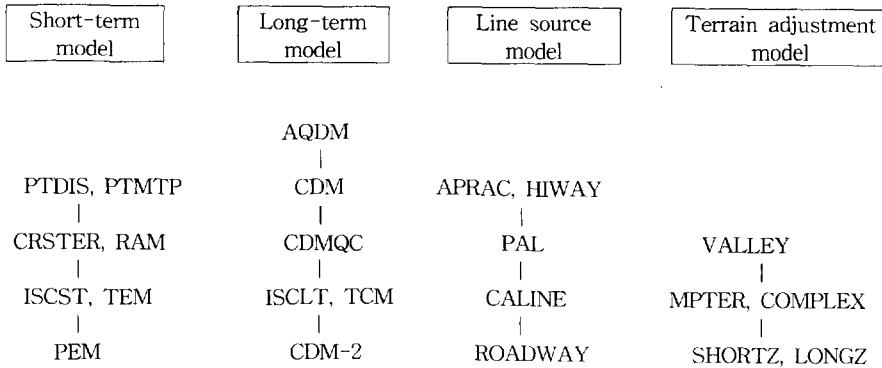


Fig. 1. Developments of air quality models in UNAMAP.

ADWAY가 추가되었다. 또한 BLP는 알루미늄 제련공장과 같은 고정된 선오염원을 고려할 수 있는 모델이다.

초기의 모델들은 대상지역을 단순한 평면으로 가정하므로 지형을 고려하지 못하였다. 이를 보완하기 위하여 산악지형의 영향을 고려한 VALLEY가 개발되었고 이후에 MPTER, COMPLEX, SHORTZ, LONGZ 등 지형고려모델이 추가되었다. CRSTER, RAM, ISC등도 지형을 고려한다고 하나 이들 모델은 단순히 착지점의 높이를 고려하는 방식이었다. 대기오염모델에서 고려하는 지형은 굴퓍높이 보다 낮은 지형을 단순지형(simple terrain, rolling terrain), 굴퓍높이 보다 높은 지형을 복잡지형(complex terrain)으로 구분하는데 MPTER은 대기안정도에 따라 지형의 영향정도를 달리하여 단순지형의 영향을 고려하는 모델이고 VALLEY, COMPLEX, SHORTZ, LONGZ는 복잡지형까지 고려할 수 있는 모델이다. 또한 도시지역의 광화학반응을 고려하기 위하여 개발된 UAM은 3차원 grid type의 수치모델로 광화학반응 mechanism을 이용하여 질소산화물과 휘발성 유기물질에 의한 단기적인 오존의 농도를 분석한다. 이상 UNAMAP모델의 발전과정을 유형별로 정리하면 그림 1과 같다.

미 환경청은 UNAMAP에 수록된 여러 대기오염모델들 중에서 대기오염 규제에 우선적으로 이용할 수 있는 대기오염모델을 선정하여 우선적인 사용을 추천하고 있다. 이 선정모델(preferred model, guideline model)은 BLP, CALINE-3, CDM, RAM, ISC, MPTER, CRSTER, UAM이다. 이들 모델은 적용대상의 오염배출원 특성, 지역특성, 오염물질특성 등을 고려하여 사용하여야 한다. 이들 선정모델의 특성을 비교정리하면 표 1과

같다.

표 1의 모델들은 UAM을 제외하고는 모두 gaussian plume model로써 교외지역(rural)에 대해서는 Turner가 보완한 Pasquill의 확산계수를 사용하고 도시지역(urban)에 대해서는 Briggs가 보완한 McElroy와 Pooler의 확산계수를 사용함으로써 교외지역과 도시지역을 고려하고 있다. 그리고 점오염원을 고려하는 모델들의 경우는 연기상승(plume rise)은 Briggs에 의한 연기상승식을 이용하고 있고, Bjorklund와 Bowers에 의한 굴퓍와류현상(stack-tip downwash) 고려방식을 채택하고 있다. ISCLT와 ISCST는 여기에 입자상물질의 침강(dry deposition)과 Huber와 Snyder에 의한 건물와류현상(building downwash, building wake effect) 고려방식을 더 갖고 있다.

UNAMAP모델들은 대기오염관리에 편리하도록 작성되었으며 당시의 대기오염모델링에 관한 기술수준의 많은 부분을 반영하고 있다. Version 6에는 새로운 모델로 TEM을 더욱 보완한 PEM-2, 고도에 따라 다른 풍향, 풍속조건을 고려할 수 있는 TUPOS-2, 국지적인 확산을 고려할 수 있는 puff모델인 INPUFF, 장거리확산을 고려할 수 있는 puff모델인 MESOPUFF-2, 광화학반응을 고려하기 위한 수치 상자모델인 PBM, 가시도를 예측하기 위한 PLUVUE-2 등이 실려 있다. 초기에는 주로 gaussian plume model이 대부분 이었던 UNAMAP모델은 점차 puff모델과 광화학 반응을 고려하기 위한 수치모델로 다양해지고 있다. 대부분 머리글자의 약자로 되어있는 모델명은 전체이름속에 모델의 특성을 반영하고 있다. Version 6에 수록된 모델의 특성을 정리하면 표 2와 같다.

Table 1. Comparison of preferred air quality models in UNAMAP.

Model	Source type ¹⁾	Landuse ²⁾	Terrain ³⁾	Meteorological data ⁴⁾	Chemical decay	Remarks
BLP	L	rural	simple	short	linear	
CALINE-3	L	u/r	simple	short	non	
CDM, CDMQC	P, A	urban	flat	long	half-life	
RAM	P, A	urban	simple	short	half-life	
ISCST	P, A	u/r	simple	short	half-life	downwash
ISCLT	P, A	u/r	simple	long	half-life	
MPTER	P	u/r	rolling	short	half-life	
CRSTER	P	u/r	simple	short	half-life	
UAM	P, A, L			short	numerical	numerical

1) L : line, P : point, A : area source

2) u/r : urban and rural

3) flat : no terrain adjustment, simple : by receptor height, rolling : by terrain adjustment factor

4) short : hourly data, long : meteorological joint frequency function

3. 국내 대기오염모델의 이용현황

3.1 지역 환경관리에서의 대기오염모델

국내에서는 연세대 공해문제연구소의 권숙표, 정용 등(1977, 1978, 1979, 1981, 1982)에 의하여 Miller-Holzworth모델, ATDL모형이 이용되었고, 한국과학기술연구소의 신용배 등(1979)이 화력발전소 주변의 대기오염도를 분석하기 위하여 CDMQC를 신용배, 조병환, 김정욱 등(1979, 1980)이 지역별 대기관리연구에 CDMQC를 이용하면서 대기오염모델이 활용되기 시작하였다. 또한 국립환경연구소의 옥치환, 최덕일 등(1980, 1982)에 의하여 서울지역에 대하여 CDMQC가 이용되었고, 김준용 등(1979, 1980)에 의하여 선오염원모델인 HIWAY가, 신용배 등(1982, 1984)에 의하여 CRSTER, RAM, TCM, TEM이 소개되었다.

이후 국내에서는 미국 환경청의 UNAMAP모델들을 중심으로한 가우스모델들이 널리 사용되기 시작하였다. 대기오염모델이 적용된 연구사례를 살펴보면 신용배 등(1982, 1983, 1984, 1985, 1986)에 의하여 울산공단지역의 대기오염에 따른 농작물 영향조사 및 기여도 산출을 위하여 CDMQC가, 권태준, 김정욱 등(1984)에 의하여 울산지역에 대하여 TCM, TEM이, 김양균, 최덕일 등(1985)에 의하여 서울지역에 TCM, CDMQC, ISCLT가, 정용, 장재연 등(1986)에 의하여 서울지역에 Hanna-Gifford모형과 AQDM이, 김신도, 김정욱, 김희강 등(1986)에 의하여 TCM, CDMQC, ISCLT가 서울지역에 적용된 바 있다. 또한 1983년에는 환경청 용역으로 미국

Engineering Science사가 국내 현대엔지니어링, 효성엔지니어링과 한강유역 환경종합계획연구(1983)에서 서울을 중심으로한 수도권 지역에 대하여 ISC, APRAC, IMPACT, VISIBILITY모델, RECEPTOR모델 등을 이용하여 폭넓은 대기오염연구를 수행한 바 있다. 이후 환경청의 낙동강유역지역 환경보전종합계획사업(1985)에 현대엔지니어링이 ISCLT를 이용하였고, 서남해권 환경보전종합계획사업(1986)에는 일본에서 개발된 CDM과 Miller-Holzworth모델이 이용되어 앞의 한강유역에 대한 연구성과가 다른 지역에 대한 후속 연구로 이어지지 못하는 실정이었다. 지역 대기질관리를 위한 연구에서는 CDMQC, TCM, ISCLT 등의 장기대기오염모델이 많이 활용되었다. 최근에 조석연 등(1993)은 인천지역의 대기오염 배출원자료를 작성하고 STEM(Sulfur Transport Eulerian Model)을 발전시킨 Eulerian 모델을 인천에 적용하여 대기질 보전대책 연구에 활용하였다.

3.2 환경영향평가에서의 대기오염모델

환경영향평가는 앞으로 진행될 사업으로 인하여 환경이 받게 될 영향을 사전에 예측평가하여 이를 최소화하기 위한 주요한 제도적 장치이다. 환경영향평가가 제대로 이루어지기 위해서는 사업시행에 따른 환경영향을 가능한 한 정확하게 예측해야 한다는 것은 두말 할 필요가 없다. 우리나라도 1980년대에 들어서면서 대기질을 예측하기 위하여 많은 모델들이 이용되어 왔다. 특히 환경영향평가에서는 대기질을 예측하기 위하여 대기오염모델들이 많이 적용되었다. 우리나라에서는 1982년부터 1992년까지 996건의 환경영향평가가 이루어졌으며

Table 2. Description of UNAMAP, Version 6.

MODEL	DESCRIPTION
Guideline model	
BLP	Buoyant Line and Point source dispersion model
CALINE-3	(California) LINE source model
CDM-2	Climatological Dispersion Model -Version 2
RAM	Gaussian plume multiple source Air quality Model
ISCST	Industrial Source Complex Short-Term model
ISCLT	Industrial Source Complex Long-Term model
MPTER	Multiple Point source model with TERrain adjustment
CRSTER	Single source model
New model	
INPUFF	INtegrated PUFF model
PEM-2	Pollution Episodic Model, Improvement of TEM-8
TUPOS-2	Multiple point source model using on-site turbulence data
PLUVUE-2	PLUme Visibility model
PBM	Photochemical Box Model
MESOPUFF-2	Lagrangian variable-trajectory PUFF model
Revised model	
PAL-2	Point, Area and Line source model
PTPLU-2	Single point source screening model, Improvement of PTMAX
HIWAY-2	HIWAY air pollution model
MPTDS	Modification of MPTER to account for deposition
ROADWAY-2	A finite-difference model for highway
APRAC-3	Mobile source and urban diffusion model
Terrain model	
VALLEY	Complex terrain model
SHORTZ	Complex terrain SHORT-term model
LONGZ	Complex terrain LONG-term model
COMPLEX-1	COMPLEX terrain model

이들 대부분의 환경영향평가서에서 대기질을 예측 평가하기 위하여 대기오염모델이 적용되었다는 점을 생각한다면 환경영향평가는 대기오염모델이 실제로 가장 많이 활용되고 있는 분야라고 할 수 있다. 이 기간동안 작성된 환경영향평가서 중 가장 많은 비중을 차지하는 것이 에너지개발사업(24.5%)이고 다음으로 도시개발사업(20.2%), 공단조성사업(14.6%), 체육시설(10.4%), 관광지개발(6.5%)로 이 다섯 분야에 대한 환경영향평가가 전체 환경영향평가의 76%를 차지하고 있다. 에너지개발사업은 일부 화력발전시설을 제외하면 대부분 송전설비나 변전 시설에 대한 것이고, 체육시설의 경우는 대부분이 골프장이어서 이들 환경영향평가 중 대기질예측의 중요성이 상대적으로 높은 사업분야는 도시개발(특히 택지개발)

과 공단조성에 관한 사업이다. 따라서 환경영향평가에 이용된 대기오염모델을 분석하기 위하여 택지개발과 공단조성에 관한 환경영향평가서들을 검토하였다. 이 기간에 작성된 택지개발과 공단조성에 관한 환경영향평가서는 모두 303건으로 이 중에서 확인이 가능한 214편의 환경영향평가서를 검토하였다. 이 결과 공사중과 사업완료 후 시설이용시의 대기질을 예측하기 위하여 적용된 대기오염모델은 표 3과 같았다.

이 결과를 살펴보면 확인된 214건의 환경영향평가서 중 공사중 발생되는 대기오염을 예측하기 위하여 Miller-Holzworth모델을 사용한 평가서가 167건으로 78%에 달하였다. 또한 사업완료 후 이용시의 대기오염을 예측하기 위하여 TCM을 사용한 평가서가 153건으

Table 3. Air quality models used for Environmental impact assessment(1982-1992).

Model	On construction	After construction
TCM	—	153
Miller-Holzworth	167	17
TEM	16	—
BOX model	3	6
CDMQC	2	6
Gauss' equation	2	6
Sutton's equation	—	13
others	4	5
No model	20	8

로 검토평가서 중 71%에 달하였다. 이밖에 TEM, CDMQC 등이 소수의 환경영향평가서에 이용되고 있으며 상자모형식(Box model)이나 Gauss 또는 Sutton 식에 의한 간단한 계산을 이용한 평가서들도 일부 있었다. Miller-Holzworth모델과 TCM의 사용비율이 매우 높았는데 이 비율은 전수조사가 되지 못하여 실제와 차이가 있을 수는 있으나 전체 환경영향평가서에 이용된 대기오염모델의 사용 경향을 설명하기에는 충분하다고 생각된다. 즉 우리나라 대기부문 환경영향평가에 사용된 대기오염예측모델은 공사시에는 Miller-Holzworth모델, 사업이 완료된 후 이용시에는 TCM이 대부분을 차지하고 있었다. 그러나 Miller-Holzworth모델은 먼오염원으로 부터 발생하는 대기오염물질의 먼오염원내에서의 평균농도를 산출하는 모델이며 대기안정도가 불안정 상태일 때를 고려하므로 공사시 단기적인 영향을 고려하는데 적합한 모델은 아니다(장영기(1994)). 또한 TCM도 평탄한 지형에 적합한 모델로 대도시지역이나 비평탄지역에는 적합하지 않으며 기존의 프로그램내에 오류가 있는 것이 발견되었으므로 수정된 모델을 이용하거나 다른 모델을 적용하여야 할 것이다(장영기, 조경두(1993)).

그동안 시행된 환경영향평가 대상사업들은 모두 환경에 미치는 영향이 큰 사업들이었고 여기에는 많은 사업체와 평가대행업체 등이 관련되어 있다. 그런데 그동안의 대기부문 환경영향평가에 소수의 모델만이 거의 천편일률적으로 이용되어 왔고 그 모델 조차도 오류들이 있었다는 사실은 그동안의 평가가 제대로 이루어지기 어려웠을 것이라는 것을 예상하게 한다. 학계에서는 대기오염모델에 대한 소개나 연구들이 미흡하나마 계속되어 왔다. 그러나 그것 조차 실제의 환경영향평가작업에는 제대로 연결되지 못했다는 점은 관련업계나 학계의

반성이 필요한 부분이라고 생각한다. 앞으로 대기부문 환경영향평가가 제대로 이루어지기 위해서는 평가확인된 대기오염모델을 추천, 보급하여 대상사업과 대상지역의 특성에 적합한 모델을 적용할 수 있도록 하며 이를 계속 보완해 나갈수 있도록 “한국 대기오염모델 연람망”(Korean UNAMAP)을 구성하고, 새로운 모델의 사용법을 보급할 수 있는 교육프로그램, 환경영향평가 작업시 구체적인 평가작업지침과 이에 의한 평가서 검토체계 등을 갖추어야 할 것이다.

4. 대기오염모델의 입력자료와 연구 동향

4.1 대기오염모델의 기상자료

Gaussian 확산식에 의해 산출되는 농도는 대기안정도와 이에 따른 확산계수에 크게 좌우된다. 기존 대기오염모델에 적용하기 위한 대기안정도의 결정방법에는 Pasquill에 의한 풍속과 일사량에 의한 분류방법이 있는데 이는 후에 Turner에 의하여 풍속과 일사각, 운량, 운고에 의한 방법으로 보완되었다. 다른 방법으로는 풍향의 변동정도(wind fluctuation)에 의한 분류방법이 있다.

수직, 수평확산표준편차(σ_y, σ_z)는 대기안정도와 풍하거리의 함수로 $\sigma_z = aX^b, \sigma_y = cX^d$ 형태로 표현된다. 여기서 X는 풍하거리이며 a, b, c, d는 각각 계수 및 지수들이다. 수평, 수직 확산표준편차는 여러 지역에서 추적자(tracer gas)에 의한 확산실험, 풍향의 변동성분에 의한 방법 등에 의하여 많은 연구결과가 보고되어 있다(Weber(1985)). 이들 확산계수식은 그 실험의 환경조건 즉 배출높이, 풍하거리, 지면거칠기에 따라 큰 차이가 있다. 국내에서는 박옥현(1979, 1980)에 의하여 수평확산표준편차식이 연구된 바 있으며 국내 지역에 대한 실험은 나진균 등(1986)에 의하여 서울지역에서 풍향의 변동성분을 조사하여 대기안정도에 따른 수평, 수직 확산표준편차를 산출함으로써 처음 이루어졌다(Table 4, Table 5).

그후 이종범과 강인구(1989)는 춘천의 평탄한 농경지에서 SF₆에 의한 추적자실험을 통하여 수평확산표준편차를 산출하고 이를 이용하여 CRSTER을 보정하였다. 이종범과 김용국(1990)은 두 고도에서 기온과 풍속을 측정하여 구하여지는 Monin-Obukhov length에 의한 대기안정도 분류가 풍속과 일사량에 의한 Pasquill에 의한 분류보다 현지의 기상특성을 더 정확하게 반영하므로 해당지역에서의 기상측정자료를 이용한 확산계수 추정의 필요성을 보여주었다. 기존의 여러 연구에 의하여 보고된 확산계수식들과 그 실험환경을 표 6에 정리하였다.

Table 4. Power law exponents and coefficients for σ_z of Seoul.

Stability Class	Downwind distance, m					
	100 < X < 500		500 < X < 5000		5000 < X	
	a	b	a	b	a	b
A	0.7642	0.9047	0.7507	0.9138	0.453	0.97
B	0.6530	0.8638	0.2754	0.9968	0.043	1.21
C	0.5953	0.8523	0.2766	0.9755	0.201	1.01
D	0.6833	0.7729	0.1905	0.9746	0.222	0.96
E	0.5255	0.7347	0.0876	1.0142	0.055	1.066
F	0.1538	0.7437	0.0422	1.0266	0.013	1.16

* $\sigma_z = aX^b$

Table 5. Power law exponents and coefficients for σ_y of Seoul.

Stability Class	Downwind distance, m					
	100 < X < 500		500 < X < 5000		5000 < X	
	c	d	c	d	c	d
A	13.8368	0.5048	0.6309	1.0139	0.034	1.34
B	53.8027	0.5944	0.2618	1.0678	0.017	1.40
C	2.4168	0.7019	0.4849	0.9641	0.223	1.05
D	1.4924	0.7101	0.2827	0.9851	0.092	1.11
E	1.9260	0.5921	0.1593	0.9930	0.291	0.92
F	0.2182	0.8374	0.0612	1.0253	0.180	0.90

* 나진균 외(1986) 대기오염예측모형의 개발에 관한 연구 (I), 국립환경연구원.

* $\sigma_y = cX^d$

UNAMAP으로 보급된 초기의 대기오염모델에는 Pasquill의 확산계수가 많이 사용되고 있으며, 나중에 개발된 도시형모델에는 McElroy의 오염확산계수가 적용되고 있다. 또한 ATDL모델과 TCM, TEM의 면오염원 계산에는 모두 Singer와 Smith의 확산계수가 적용되고 있다. 그런데 표 6의 여러 확산계수식의 실험환경을 살펴보면 도시지역의 경우 지면저철기가 크고, 면오염원이 대부분이며 배출높이가 낮다는 점을 고려한다면 Pasquill의 확산계수나 Singer와 Smith의 확산계수가 적용된 모델을 도시지역에 그대로 적용하는 것은 적합치 않음을 알 수 있다. 현재 TCM, TEM 같은 모델을 도시지역에 적용할 때는 대기안정도 A일때를 제외한 나머지 등급에 대하여는 입력된 안정도등급을 한 단계씩 낮추어 계산하도록 하는 방법이 사용되고 있다.

대기안정도에 따른 확산계수와 함께 대기오염모델에 중요한 변수는 지표면에서 기온역전층까지의 높이 즉, 혼합고(Mixing height)이다. 특히 도시 또는 공업단지

와 같이 넓은 지역의 평균오염도는 혼합고의 영향을 크게 받게 된다. 이종범(1991)은 Jump model을 이용하여 중부지방 7개 도시의 혼합고를 산출하고 이를 이용하여 각 도시의 대기오염잠재력을 비교하였다.

장기간의 대기오염농도를 계산하기 위해서는 수많은 시간단위의 계산을 행하여야 한다. 그러나 Gaussian 계산식을 이용하는 장기확산모델에서는 매시간별 계산을 반복하는 대신 각 시간단위를 일정조건외의 정상상태로 보아 일정기간 동안의 기상상태의 발생빈도를 이용하여 각 기상조건에 따른 계산을 수행한 다음 이를 합산하여 평균농도를 산출하는 기법을 사용하고 있다. 여기서 특정한 풍향, 풍속, 대기안정도인 기상조건외의 발생가능성, 즉 일정기간동안의 상대적인 발생빈도를 기상결합빈도함수(Meteorological Joint Frequency Function)라 하며 이를 이용하여 반복계산을 대신한다. 이 방식은 처음 AQDM에 이용되었으며 이후에 개발된 CDM, CDMQC, TCM, ISCLT 등 장기 대기오염모델에 모두 이러한 기법이 사용되고 있다. 이들 모델의 기상결합빈도함수는 풍향 16방위, 풍속 6등급, 안정도 6등급의 총 576(16×6×6) 경우의 기상조건에 대한 발생빈도로 되어 있다. 풍향은 360도를 16으로 나눈 22.5도로 구분하고 풍속은 6등급으로 구분한다. 안정도는 Pasquill에 의한 대기안정도 분류에 따라 CDM, CDMQC, TCM은 A, B, C등급과 D등급을 밝과 낮으로 구분한 DN, DD등급, 그리고 E등급과 F등급을 합친 6개의 등급을 사용하고, ISCLT는 A, B, C, D, E, F등급 6개로 구분한 기상결합빈도함수를 사용하고 있다.

기존 장기 대기오염모델의 풍속등급구분은 미국 29개 대도시의 평균풍속이 7.0 m/sec로 풍속등급 4등급에 해당된다는 점을 생각한다면 미국에서 적용하기에는 적절하다고 할 수 있다. 그러나 우리나라 10대도시의 연평균풍속은 2.4 m/sec로써 풍속 1등급과 2등급의 발생빈도가 70~80%에 달하고 있어서 이러한 등급구분이 적절하지 못함을 알 수 있다. 풍속등급의 중심풍속으로 농도계산을 하는 기존 기상결합빈도함수는 결과적으로 높은 오염도(저풍속)보다 낮은 오염도부분(고풍속)을 더 세분하게 되어 실제로 평균농도계산에 큰 영향을 미치는 고농도부분을 적절히 고려하지 못하게 된다. 따라서 우리나라의 기상조건을 고려한다면 기상결합빈도함수의 풍속등급은 저풍속부분이 적절히 고려될 수 있도록 수정될 필요가 있다(장영기(1990)).

어느 지역의 대기오염모델링을 위해서는 그 지역을 대표할 수 있는 풍향, 풍속, 혼합고 등의 기상자료가 필요하며 장기적인 경우에는 이를 이용하여 작성된 기상

Table 6. Experimental conditions for dispersion parameters.

Researcher	Emission height(m)	Downwind Distance (Km)	Surface roughness	Remarks
Singer & Smith	108	10	medium	Brookhaven Lab., 1966
Klug	0	6	low	1969
McElroy & Pooler	0	16	large	St. Louis, 1968
Pasquill	0	1	low	Prairie Grass Test, 1961
Vogt	50	11	large	1977
Nester	60	8	large	1979
Smith, F.B.	0		urban, rural	Numerical solution, 1973
Briggs			urban, rural	1976
NIER			large	Seoul, 1985

결합빈도함수가 이용된다. 현재 기상자료는 기상청에서 운영하는 측후소와 대기오염 자동측정소에서 측정되는 자료를 주로 이용하고 있다. 그러나 대기오염 측정소에서 측정되는 자료는 측정기기의 설치위치, 주변 환경 등이 그 지역의 기상을 측정하기에 적합치 않은 곳이 많아 자료의 질이 떨어지고 있는데 이러한 사실은 이태영 등(1990)의 연구에서도 지적되고 있다. 앞으로 대기오염 정보제나 보다 세밀한 모델의 개발 등을 위해서는 많은 기상자료들이 뒷받침되어야 한다. 이를 위해서는 기존 측정자료의 질을 높이기 위한 조치가 우선적으로 필요하며 공항, 군사시설 등 여러 기관에서 측정되는 자료들도 함께 이용할 수 있는 체계가 필요하다. 또한 현재 기존의 기상요소만을 측정하는 현행 기상측정은 대기질관리를 위하여 필요한 자료를 생산한다는 개념을 더하여 대기오염모델링에 필요한 3방향 풍속과 풍향, 고도별 기온 등의 측정항목을 추가하는 노력이 필요하다고 본다. 현재 많은 환경영향평가와 지역 대기관리연구에서 단기간의 기상자료만 이용되거나 제대로 이용되지 못하는 경우도 발견되고 있다. 또한 기상자료를 작성하는데 드는 노력이 연구마다 중복되거나 일회적으로 이용되고 마는 경우가 많다. 앞으로 자료의 신뢰성을 높이고 중복작업에 드는 노력을 절약하기 위해서는 지역별 장기 기상자료를 일부기관에서 또는 공동작업을 통하여 데이터베이스화하고 필요한 사용자에게 공급하는 방안도 필요하다고 본다.

Gaussian plume모델은 대상지역을 평면으로 가정하고 있으나 우리나라의 많은 지역들은 낮은 구릉 또는 산악지형이다. 이러한 지역특성을 고려하기 위해서는 지형이 기상에 미치는 영향이 고려되어야 한다. 박일수와 김정우(1991)는 수치모델을 이용하여 서울지역 지형특

성에 의한 바람장의 변화를 분석하였다. 산악지형이 확산에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 물리적모델(physical model)이 이용되기도 하는데 경남호, 김영성, 손재익(1992)은 풍동(Wind tunnel)실험을 통하여, 정상진(1993)은 수조(Water channel)실험을 통하여 분석을 시도하였다. 수치모델에 의한 접근은 김선태(1993)가 스펙트로법에 의해, 정상진(1994)이 E-ε 난류모델을 이용하여 산지지형에 의한 영향을 고려하고자 하였다.

4.2 대기오염모델의 오염배출자료

대기오염모델의 예측결과는 입력자료에 의하여 좌우됨은 두말할 필요가 없다. 대기오염모델이 대기질을 잘 설명할 수 있도록 평가, 보정하기 위해서는 모델에 입력되는 오염배출자료와 기상자료 그리고 농도실측자료가 제대로 갖추어져야만 비로소 가능하다. 점오염원의 경우는 배출시설별, 사용연료별 배출가스를 실측하여 배출계수를 산출하고 이를 같은 경우에 적용함으로써 배출자료를 작성할 수 있다. 면오염원이나 선오염원으로부터의 배출실태를 정확하게 조사하기는 현실적으로 매우 힘든 일이다. 국내에서는 윤명조 등(1980), 옥치완 등(1981), 최덕일 등(1987, 1988, 1989)에 의하여 배출시설별 대기오염 배출계수 산정을 위한 연구가 수행되었으며, 이동오염원에 대해서는 조강래 등(1987)(1993)에 의하여 배출계수산정 연구가 행하여졌다.

지역의 대기질관리연구를 위해서는 배출자료작성이 선행되어야 하는데 1980년대에 들어서면서 대도시지역에 대한 대기관리연구가 수행되는 과정에서 대상지역에 대한 배출자료가 작성되었다. 권숙표, 정용 등(1977, 1978, 1979, 1981, 1982)에 의하여 서울지역에 대하여, 신용배, 조병환, 김정욱 등(1979, 1980, 1982)이 서울,

부산 등 대도시지역에 대하여, 옥치완, 최덕일 등(1980, 1982)과 김양균, 최덕일 등(1985) 그리고 김신도, 김정욱, 김희강 등(1986)이 서울지역에 대하여, 권태준, 김정욱 등(1984)이 울산지역에 대하여 연구를 수행하면서 지역의 배출자료를 작성하였다. 환경저의 환경종합계획 연구를 수행하면서 전국 각 도시지역의 배출자료가 조사되었다.

그후 본격적인 배출량조사를 위한 연구는 국립환경연구원에서 1989년부터 1991년까지 도시대기질 개선을 위한 3차년도 연구를 수행하면서 이루어졌다. 김양균, 나진균 등(1989, 1990, 1991)은 서울과 광주지역의 고정오염원에 대한 배출자료를 작성하였고, 조강래 등(1989, 1990, 1991)은 이동오염원에 의한 지역별 배출량을 추정하였으며 배출계수에 대한 연구도 진행하였다. 또한 박준대와 김정욱(1990)은 먼오염원으로부터의 배출량을 격자별로 산출할 수 있는 모델을 개발하여 서울지역에 적용하였고 박순웅 등(1993)은 서울지역의 1991년 배출자료를 작성하였다. 이밖에도 국내 여러 지역에 대한 배출자료의 작성은 많은 사례연구과정에서 이루어졌을 것이다. 그러나 이러한 배출자료는 기초자료가 부실하고 연구자간에 서로 교류되거나 검증되지 못하여 많은 시간과 노력이 소요되었는데도 일회적인 연구에 이용되거나 경우가 많았으며 공인받는 배출원조사자료로 발전되지는 못하였다. 한편 환경부에서는 1989년부터 매년 연료사용량과 배출계수를 이용하여 SO₂, TSP, CO, NO₂, HC 등 5개 오염물질의 배출량을 난방, 산업, 수송, 발전부문별로 6개 직할시와 9개 도시단위로 발표하고 있다. 그러나 연료사용량이 아닌 판매량을 근거로 하며 배출계수를 확실적으로 적용하는 등 추정방법이 세밀하지 못하며 시간적 공간적 해상도가 낮아 관련 연구나 평가에 사용하기에는 제한이 있다.

대기오염 배출자료는 대기질의 평가, 환경영향평가, 연료규제, 총량규제, 오염경보제와 같은 대기오염관리정책 등에 없어서는 안될 중요한 기초자료이다. 이러한 배출자료가 제대로 작성되기 위해서는 많은 관련기초자료 특히 배출계수에 대한 확인작업이 절대 필요하며 이를 위해서는 많은 인력과 지속적인 노력이 필요하다. 앞으로 자료의 신뢰성을 높이고 활용도를 높이기 위해서는 정부 주도하에 공동연구 등을 통하여 배출자료관리체계가 조속히 갖추어져야 할 것이다. 한국환경기술개발원에서는 1994년부터 국가 대기오염물질 배출원자료체계 구축에 관한 연구(김용준(1994))를 수행 중이다.

4.3 대기오염모델의 평가와 과제

대기오염모델의 감응도분석이나 모델간의 비교와 같은 평가는 모델만을 이용하여 할 수 있으나 정합도평가와 같은 경우는 배출자료, 기상자료, 농도실측자료가 제대로 갖추어져야 가능하다. 장기 모델의 경우는 이러한 정합도평가에 의하여 보정을 함으로써 좀더 실측치에 가까운 예측을 할 수 있을 것이다. 그러나 여러가지 불확실성이 높은 단기모델의 경우 현실적으로 모델에 대한 정합도평가나 보정은 어렵다. 김선태 등(1989)은 HIWAY2, PAL, CALINE3에 대한 감응도분석을 통하여 이동오염원모델을 비교하였고 최일경 등(1990)은 ISCST, MPTER, VALLEY 등 지형고려모델을 평가하였다. 송동웅, 김원만(1991)은 울산지역을 대상으로 하여 CDM2와 TCM2의 정합도를 비교하였고 김영성, 손재익(1992)은 서울지역을 대상으로 하여 ISCLT의 정합도를 평가하였다. 이밖에도 앞에서 살펴본 바와 같이 여러 지역의 대기관리와 환경영향평가를 위하여 적지않은 사례연구가 수행되었는데 그 과정에서 적용모델에 대한 많은 평가와 보정이 이루어졌다. 모델에 대한 평가는 대상지역의 특성에 따라 개별적일 수 밖에 없고, 그러한 평가가 제대로 이루어졌는지에 대해서 검토하기도 어렵다. 일부 환경영향평가의 경우 무리한 보정에 의하여 오히려 예측치가 왜곡되는 결과를 낳기도 한다. 대기오염모델의 설명력을 높이기 위해서는 평가기법의 개발 그리고 보다 많은 평가가 활성화 되어야 할 것이다.

모델에 의한 예측치와 실측치의 정합도를 분석하기 위해서는 대기오염 측정망에 의한 농도실측자료가 활용되는데, 측정소가 몇차례 이전을 하였거나 TM표범이 실제의 위치와 틀리게 작성된 경우가 발견되므로 정합도 작업시에는 확인을 권한다(환경과 공해연구회(1990)). 전의찬 등(1994)은 서울지역의 대기오염측정망의 운영현황과 토지이용 등 주변환경특성을 상세히 분석하였다. 상시 농도측정자료는 대기오염모델의 평가, 대기관리정책의 수립 뿐만아니라 관련 연구분야의 기초자료가 될 수 있는 중요한 자료이다. 현재 1980년대 후반 이후의 측정자료는 잘 관리되어 있으나 그 이전의 자료는 정리가 되어 있지 못하다. 측정이 이루어진 이후의 모든 자료는 지속적으로 관리되고 평가될 필요가 있다. 농도측정자료는 raw data형태로 측정방법, 분석방법, 측정지점에 대한 자료와 함께 관리되어야 하며, 분석방법에 대한 연구, 측정자료의 질에 대한 평가가 보다 활성화되어야 한다. 또한 현재 운영되고 있는 자동측정망에 의한 상시 농도측정자료는 보다 신속하게 연구자가 이용할 수 있는 체계를 갖출 필요가 있다.

국내의 기상특성과 지형특성을 고려한 대기오염예측

모델의 개발은 국립환경연구원에 의한 일련의 연구로 시도되었다. 나진균 등(1986)은 1985년 서울지역에서 산정한 대기오염확산계수를 TCM-2 모형에 이입하여 SCM-1을 개발하였다. 이덕길, 운순창 등(1987)은 CDM-2에 차지점의 고도를 고려할 수 있는 SHORTZ/LO-NGZ모형의 방식과 1985년 서울지역에서 산정한 확산계수를 도입하여 서울지역특성을 고려하기 위한 모델 SCM-2를 개발하였다. 이 모델에 의한 예측치와 실측치에 의한 상관분석결과 SCM-2에 의한 예측치는 CDM-2의 결과보다 개선되었다. 그러나 분석과정에서 CDM-2에 적용한 확산계수는 Pasquill-Gifford의 확산곡선에 기초하여 Busse와 Zimmerman(1973)이 작성한 확산계수였고, SCM-2에 적용한 확산계수는 1985년 서울지역에서 산정한 확산계수였는데 이들 확산계수는 크게 달라서 SCM-2에 의한 개선효과는 확산계수 차이에 따른 효과가 큰 비중을 차지했을 것으로 판단된다. 이후 나진균(1990)은 앞서 개발된 SCM에 지형보정기법을 추가하여 이를 SCM-3로 발전시켰다. 이러한 노력들은 단순히 외국의 대기오염예측모델을 그대로 적용하는 것에서 대상지역의 지역적 특성을 반영하기 위한 노력으로 한걸음 나갔다고 할 수 있다.

이종범(1988)은 장기모델인 TCM에 단기간 농도의 고농도 순으로 임의번체의 농도를 산출할 수 있는 기능을 추가하였다. 장영기(1992)는 서울지역의 오염도변화를 통계적으로 분석하여 면오염원에 의한 단기농도를 고려할 수 있는 SBM모형을 개발하였다. 장영기와 조정두(1993)는 기존 TCM-2의 계산과정에 오류가 있음을 발견하여 이를 수정하고 도시지역에 적용할 수 있도록 변수들을 대체하여 도시형 TCM을 개발하였다. 복잡한 지형의 영향과 대기 중에서 화학반응을 고려할 필요성이 높아지면서 수치모델에 대한 연구도 점차 증가하고 있다. 김진태 (1991)(1993), 심상규와 박영산(1992), 정상진(1994)은 수치모델에 대한 연구결과를 보고 하였다. 1994년 강원대에서 열린 세미나(이종범 등(1994))에서는 앞으로 대기오염모델의 개발 방향에 대한 학계의 논의가 있었다. 이 자리에서는 국지대기오염 확산모델의 발전을 위해서는 대기오염 배출자료의 데이터베이스화, 확산계수의 개선, 복잡한 지형과 해안지역 등을 고려할 수 있는 기상모델의 개발, 반응성물질을 고려할 수 있는 수치모델의 개발, 유해물질의 유출사고와 같은 사고시의 평가 필요성 등이 제기되었다.

5. 맺는 말

본 논문에서는 그동안 우리나라에서 진행된 대기오염확산모델에 대한 연구결과와 지역대기관리연구, 환경영향평가 등에 대기오염모델이 어떻게 활용되었는지 정리, 검토하고 앞으로 발전과제에 대하여 살펴보고자 하였다.

우리나라에서는 1970년대 후반부터 대기오염모델이 대기관리연구에 활용되기 시작하였다. 지역 대기오염관리를 위해서는 CDMQC, TCM, ISCLT 등의 장기대기오염모델이 많이 활용되었고 환경영향평가에서는 Miller-Holzworth모델과 TCM이 대부분을 차지하고 있었다. 그러나 Miller-Holzworth모델은 현재 주로 이용되고 있는 것과 같이 공사시 단기적인 영향을 고려하는데 적합한 모델이 아니며 TCM도 대도시지역이나 비평탄지역에는 적합하지 않으며 기존의 프로그램에 오류가 있는 것이 지적된 모델이다. 그동안 적지않은 대기오염관리 연구에 대기오염모델이 활용되었으나 소수의 한정된 모델을 이용하는데 머물렀고 특히 환경영향평가에서는 일부 모델만이 천편일률적으로 이용되어 왔으며 그 모델조차도 오류들이 있었다는 사실에 대해서는 이 분야의 분발이 필요하다고 생각한다. 앞으로 대기오염모델이 대기오염관리에 제대로 활용되기 위해서는 다음과 같은 사항이 필요하다고 본다.

첫째 평가확인된 대기오염모델을 추천, 보급하며 이를 계속 보완해 나갈수 있도록 “한국 대기오염모델 연락망”(Korean UNAMAP)을 구성한다.

둘째 대기부문 환경영향평가가 활성화될 수 있도록 “한국 대기오염모델 연락망”을 적극 활용하여 산학협동체계를 갖추고, 전문인력 확보를 위한 지속적인 교육프로그램, 환경영향평가 작업시 이용할 수 있는 현실적이고 구체적인 평가작업지침과 평가서 심의체계 등을 갖춘다.

셋째 대기오염 배출자료는 대기오염모델의 연구, 활용 뿐만 아니라 전반적인 대기오염관리에 없어서는 안될 중요한 기초자료이다. 배출자료가 제대로 작성되기 위해서는 먼저 많은 관련기초자료와 배출계수에 대한 확인작업이 필요하다. 배출자료의 신뢰성을 높이고 활용도를 높이기 위해서는 정부 주도하에 공동연구를 통하여 배출자료관리체계의 구성을 서두른다.

넷째 대기오염관리를 위하여 대기오염모델이 제 역할을 다하기 위해서는 기상자료와 농도측정자료가 뒷받

침되어야 한다. 기상자료의 활용도를 높이기 위해서는 현재 여러 기관에서 측정되는 기상자료를 관리, 활용할 수 있는 체계와 측정자료의 질을 높이기 위한 노력이 필요하다. 또한 농도측정자료는 측정이 이루어진 이후의 모든 자료에 대한 지속적인 관리와 평가가 활성화되어야 한다.

다섯째 국내의 특성들을 반영하기 위하여 앞으로 복잡한 지형과 해안지역 등을 고려할 수 있는 기상모델의 개발, 광화학 오염물질을 고려할 수 있는 수치모델의 개발, 유독물질의 누출사고와 같은 긴급상황을 고려할 수 있는 모델개발 등이 필요하고 이러한 모델들을 지속적으로 평가, 보완할 수 있는 작업도 활성화되어야 한다.

참 고 문 헌

강인구 외(1988), 대기오염 예측모델 개발에 관한 연구(III) 수치모델을 중심으로, 국립환경연구원.
 강인구 외(1989), 도시지역 대기질 개선에 관한 연구(I)-기상특성 및 대기질분석을 중심으로, 국립환경연구원.
 경남호, 김영성, 손재익(1992) 복잡한 지역내 오염물질의 대기확산 풍동실험, 한국대기보전학회지, 8(3), 169-178. 국립환경연구원(1983, 1985, 1987, 1989, 1991, 1993), 환경분야 연구논문초록집 제1-6집, 국립환경연구원.
 권숙표, 정 용 외(1977, 1978, 1979, 1981, 1982) 도시의 대기오염모델과 환경기준설정에 관한 연구(I)(II)(III)(IV)(V), 연세대 환경공해연구소.
 권숙표, 정 용, 임동구(1980) Hanna-Gifford 모델에 의한 서울시 대기오염도 추정, 환경보전협회지, 제 1권, 제 1호, 25-38.
 권태준, 김정옥 외(1984) 울산 온산공단 공해피해주민 이주대책을 위한 조사연구, 환경청.
 김선태(1993) 의사스펙트로법에 의한 대기 확산 현상의 수치 모델(2), 한국대기보전학회지, 9(3), 242-246.
 김선태, 김병태, 김정옥(1989) 이동오염원에 대한 대기확산 모형의 감응도 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 5(1), 1-10.
 김선태, 장영기(1991) 의사스펙트로법에 의한 대기확산 현상의 수치모델(1), 한국대기보전학회지, 7(3), 189-196.
 김신도, 김희강, 김정옥(1986) 서울특별시 대기오염 감축대책 연구, 서울특별시.
 김양균, 나진균 외(1989, 1990, 1991) 도시지역 대기질 개

선에 관한 연구(I)(II)(III) -고정배출원의 오염물 질배출 부하량 산정을 중심으로, 국립환경연구원.
 김양균, 최덕일 외(1982) 고체연료연소에 의한 오염물질배출에 관한 조사연구, 국립환경연구원.
 김양균, 최덕일 외(1983) 대기의 복합오염에 관한 연구, 국립환경연구원.
 김양균, 최덕일 외(1984) 주요 대도시 대기오염 배출원별 오염물질 배출부하량 산정에 관한 조사연구, 국립환경연구원.
 김양균, 최덕일, 이민희, 조강래, 나진균, 정장해(1985) 대기오염확산모델 개발에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 1(1), 53-70.
 김영성, 손재익(1988) 대기확산모델링의 최근동향과 한국형 모델개발연구, 한국동력자원연구소.
 김영성, 손재익(1992) ISCLT에 의한 서울 지역의 SO₂오염도 조사, 한국대기보전학회지, 8(2), 128-137.
 김영성, 손재익(1993) 점오염원과 면오염원의 대기환경영향 분석, 한국대기보전학회지, 9(2), 168-173.
 김용국, 이종범(1992) 대기안정도와 지형조건에 따른 풍향 변동폭의 특성, 한국대기보전학회지, 8(2), 138-145.
 김용준(1994) 국가 대기오염물질 배출원자료체계 구축에 관한 연구(I), 한국환경기술개발원.
 김준용 외(1979, 1980) 자동차 배출가스의 공해방지대책 수립을 위한 조사연구, 보건사회부.
 김태형, 김정옥(1987) 지역대표성과 오염피해를 고려한 대기오염 측정망 배치기법의 개발에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 3(1), 47-54.
 김필수(1982) 지구 대기경계층내 오존 및 대기오염물의 일변화 모형에 관한 연구, 한국과학재단연구결과 보고서.
 나진균(1990) 복잡한 지형에서의 대기오염 확산모델에 관한 연구, 인하대 박사학위논문.
 나진균 외(1984) 대기오염예측을 위한 대기안정도와 혼합고분석에 관한 연구, 국립환경연구원.
 나진균 외(1985) 대기오염 예측모델 개발을 위한 수치, 수평확산계수산정을 위한 연구, 국립환경연구원.
 나진균 외(1986) 대기오염예측모형의 개발에 관한 연구(I), 국립환경연구원.
 동종인, 조강래, 김양균, 유 완(1986) 도시교통계획모델과 대기오염확산 모델을 이용한 도시지역 대기오염 예측, 한국대기보전학회지, 2(2), 31-40.
 박순용, 전종갑, 윤순창(1993) 장기대기오염 예측을 위한 오염배출량 산정에 관한 연구, 한국환경과학연구협의회.
 박옥현(1979) 횡방향 오염물질 농도분포 정규성의 거리에 따른 변화, 화학공학회지, 17(5).
 박옥현(1981) 기온역전시의 풍하 10 내지 200 km 거리에서

- 의 횡방향 확산계수의 수정, 대한토목학회지, 29(2).
- 박일수, 김정우(1991) 서울지역 SO₂농도 분포에 미치는 지형의 영향, 한국대기보전학회지, 7(2), 105-113.
- 박준대, 김정욱(1990) 대기오염 예측을 위한 면오염원배출량 산정모형의 개발에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 6(1), 43-50.
- 백남호, 이영복(1981) 도시형 대기오염 모델링에 관한 연구, 화학공학, 19(6), 431-438.
- 송기유, 임홍재, 윤명조(1986) 특정지역의 대기오염 확산모델 개발에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 2(2), 19-30.
- 송동웅, 김면섭, 신용배(1987) 대기오염 예측에서 TCM과 CDMQC의 비교, 한국대기보전학회지, 3(1), 34-40.
- 송동웅, 김원만(1991) 장기예측모델의 정확도 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 150-155.
- 신용배 외(1979) 발전소 주위 환경보전 및 공해연구, 한국과학기술원.
- 신용배 외(1979) 영동화력발전소 인근 대기오염 영향조사 연구, 한국과학기술원.
- 신용배 외(1982) 부산시 일원의 대기관리에 관한 연구, 한국과학기술원.
- 신용배 외(1982, 1983, 1984, 1985, 1986) 울산공업단지지역의 대기오염에 따른 농작물 영향조사 및 기여도 산출에 관한 연구, 한국과학기술원.
- 신용배 외(1982, 1984) 대기-수질 환경관리 전산모델연구(1차)(2차), 한국과학기술원.
- 신용배, 조병환, 김정욱 외(1979) 전국 특별대책지역 대기관리에 관한 연구, 한국과학기술연구소.
- 신용배, 이은호, 김정욱 외(1980) 전국 지역별 대기관리에 관한 연구, 한국과학기술연구소.
- 심상규, 박영산(1992) 대기오염모델에서의 이류방정식에 대한 수치적 방법의 비교, 한국대기보전학회지, 8(3), 162-168.
- 옥치완 외(1981) 오염물질 배출시설별 배출계수 산정에 관한 조사연구, 국립환경연구소.
- 옥치완, 최덕일 외(1980) 서울시내의 대기오염확산현황과 환경기준에 관한 연구, 국립환경연구소.
- 옥치완, 최덕일 외(1982) 대기 중 부유분진의 확산모델과 환경기준에 관한 연구, 국립환경연구소.
- 윤명조 외(1980) 대기오염물질 배출계수에 대한 조사연구, 환경청.
- 이덕길, 윤순창 외(1987) 대기오염예측모델 개발에 관한 연구(II), 국립환경연구원.
- 이종범(1988) Texas Climatological Model에 의한 단기 대기오염농도 발생빈도의 추정, 한국대기보전학회지, 4(2), 67-71.
- 이종범(1991) 중부지방 각지의 대기오염잠재력에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(1), 41-48.
- 이종범, 강인구(1989) 단일배출원 대기오염 단기모델에 관한 연구(Tracer Gas에 의한 확산실험), 한국대기보전학회지, 5(2), 84-96.
- 이종범, 김용국(1990) Pasquill 안정도계급의 평가와 안정도 Parameter 추정방법의 개발, 한국대기보전학회지, 6(2), 168-175.
- 이종범, 김신도, 심상규, 변대원(1994) 대기확산모델 연구의 발전방향 모색에 관한 학술세미나, 강원대 환경연구소.
- 이태영, 김정우, 박순용(1990) 대기오염예보체계 개발연구, 한국환경과학연구협회.
- 이화은, 박종길(1992) 대기오염 물질의 광화학반응 모델에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 8(1), 74-83.
- 장성기 외(1991) 도시지역 대기질 개선에 관한 연구(III)-미기상 조사 및 대기질 예측, 국립환경연구원.
- 장영기(1990) 장기 대기오염확산모형의 국내적용을 위한 기상결합빈도함수의 풍속등급 수정에 관한 연구, 수원대 이공학연구소 논문집 제5집.
- 장영기(1992) 서울지역의 면오염원에 의한 대기오염 단기 예측모형 개발, 서울대 박사학위논문.
- 장영기(1994) 국내적용을 위한 Miller-Holzworth모델 수정, 제 19회 한국대기보전학회 학술대회.
- 장영기, 조경두(1993) 도시형-TCM 개발에 관한 연구, 한국대기보전학회지 9(2), 132-139.
- 전의찬 외(1994) 대기질 측정방법의 효율화 방안에 관한 연구, 서울시정개발연구원.
- 정상진(1993) 수로장치 내에서 공동영역 주변의 확산에 관한 실험적 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), 295-302.
- 정상진(1994) E-ε 모델을 이용한 삼각 봉우리 주변의 유동과 확산 수치해석(I), 한국대기보전학회지, 10(2), 116-123.
- 정 용, 장재연(1986) 대기오염모델의 정확도에 관한 연구(서울특별시 대기오염추계에 있어 Hanna-Gifford Model과 AQDM의 적용에 대하여), 한국대기보전학회지, 2(1), 81-90.
- 조강래 외(1989, 1990, 1991) 도시지역 대기질 개선에 관한 연구(I)(II)(III) -이동배출원의 오염물질배출 부하량 산정을 중심으로, 국립환경연구원.
- 조강래, 김양근, 동종인, 엄명도(1987) 자동차에 의한 오염물질 계수 및 배출량 산정에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 3(1), 55-64.
- 조강래, 엄명도, 김종춘, 홍유덕, 김종규, 한영출(1993) 자동차에 의한 오염물질 배출계수 및 배출량 산출에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(1), 69-77.
- 조석연 외(1993) 인천지역의 대기질 보전대책 수립을 위한 실태조사 용역보고서, 인천직할시.

최덕일 외(1987, 1988, 1989) 배출시설별 대기오염물질 배출 계수 산정에 관한 조사연구(I)(II)(III), 국립환경연구원.

최일경, 전의찬, 김경욱(1990) 지형을 고려한 단기 대기확산모형의 평가에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 6(2), 125-134.

현대엔지니어링(1985) 낙동강유역 환경보전종합계획사업-대기부문보고서, 환경처.

현대엔지니어링, 효성엔지니어링, Engineering-science (1983) 한강유역 환경종합계획-대기편, 환경청.

홍민선, 우완기, 최종인(1993) 대도시 교통신호 시스템에 따른 대기오염물질 배출량 변화에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(1), 93-100.

환경과 공해연구회(1990) 서울시 대기오염 자동측정망의 현황 및 문제점에 관한 조사연구.

환경처(1986) 서남해권 환경보전종합계획사업 -대기부문보고서, 환경처.

Barad, M. L.(ed)(1958), Project prairie grass, A field program in diffusion, Geophysical research papers No. 59. Benarie, M. M. (1980), Urban Air Pollution Modelling, Cambridge : MIT Press.

Bowers, J. F., Bjorklund, J. R. and Cheney, C.S.(1979), Industrial Source Complex Dispersion Model User's Guide, Vol. 1 and Vol. 2, U.S.EPA.

Bowne, N. E.(ed)(1969), Aerosol diffusion over woodlot complexes, TRC.

Burt, E. W.(1977), Valley model User's guide, U.S. EPA.

Busse, A. D. and Zimmerman, J.R.(1973), User's guide for the Climatological Dispersion Model, U.S.EPA.

Christiansen, J. H. (1976), User's Guide to The Texas Episodic Model, Texas Air Control Board, NTIS.

Christiansen, J. H. and Porter, R.A.(1976), User's Guide to The Texas Climatological Model, Texas Air Control Board, NTIS.

Dobbins, R. A.(1979), Atmospheric Motion and Air Pollution, New York : John-Wiley & Sons.

Downton, M. W. and Dennis R.L.(1985), Evaluation of Urban Air Quality Models for Regulatory Use, Journal of Applied Meteorology, Vol. 24, 161-173.

Gifford, F. A.(1961), Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric diffusion, Nuclear Safety 2(47).

Gifford, F. A. and Hanna, S. R.(1973), Modeling urban air pollution, Atmospheric Environment, Vol. 7, 131.

Golomb, D., Batterman, S. and Gruhl, J.(1983), Air Quality Screening Model with Long-Term Averaging, JAPCA, Vol. 33, No. 3, 215-219.

Hanna, S. R.(1971), A simple method of calculating dispersion from urban area sources, JAPCA, Vol. 21, No. 12, 774-777.

Haugen, D. A.(ed)(1975), Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses, American Meteorological Society.

Irwin, J. S.(1979), A Theoretical Variation of the Wind Profile Power-law Exponents as a Function of Surface Roughness and Stability, Atmospheric Environment, Vol. 13, No. 1, 191-194.

Irwin, J. S. and Brown, T. M.(1985), A Sensitivity Analysis of the Treatment of Area Sources by the Climatological Dispersion Model, JAPCA, Vol. 35, No. 4, 359-364.

Landsberg, I. E.(1981), The Urban Climate, New York : Academic Press.

Miller, C. W.(1978), An application of the ATDL simple dispersion model, JAPCA, Vol. 28, No. 8, 798-800.

Miller, M. E. and Holzworth, G. C.(1967), An atmospheric diffusion model for metropolitan areas, JAPCA, 17 : 45.

Novak, J. H. and Turner, D. B.(1976), An Efficient Gaussian-Plume Multiple-Source Air Quality Algorithm, JAPCA, Vol. 26. No. 6, 570-575.

Panofsky, H. A. and Dutton, J. A.(1984), Atmospheric Turbulence : Models and Methods for Engineering Applications, Wiley-Inter science.

Pasquill, F.(1961), The estimation of the dispersion of windborne material, Meteorol. Mag. 90, 33-49.

Pasquill, F.(1974), Atmospheric Diffusion, 2nd ed, New York: John Wiley & Sons.

Peterson, W. B.(1978), User's Guide for PAL : A Gaussian-Plume Algorithm for Point, Area, and Line Sources, U.S. EPA.

Pierce, T. D. and Turner, D. B.(1980), User's guide for MPTER, U.S. EPA.

Pooler, F.(1966), A tracer study of dispersion over a city, JAPCA, Vol. 16.

Schere, K. L. and Demerjian, K. L.(1984), User's guide for the Photochemical Box Model(PBM), U.S.

- EPA.
- Schulman, Lloyd L. and Joseph, S.(1980), Buoyant line and Point source(BLP) dispersion model User's guide, U.S.EPA.
- Seinfeld, J. H.(1976), Air Pollution : Physical and Chemical Fundamentals, New York : McGraw-Hill.
- Shir, C. C. and Shieh, L. J.(1974), A Generalized Urban Air Pollution Model and Its Application to the Study of SO₂ Distributions in the St. Louis Metropolitan Area, Journal of Applied Meteorology, Vol. 13, No 2, 185-204.
- Singer, I. A. & Singer, M. E.(1953), Relation of gustiness to other meteorological parameter, Journal of Meteorology, Vol. 10, No. 2.
- Stern, A. C.(1977), Air Pollution, Vol. 1-8, New York : Academic Press.
- Stern, A. C.(ed)(1984), Fundamentals of Air Pollution, 2nd ed, New York : Academic Press.
- Sutton, O. G.(1953), Micrometeorology, New York : McGraw Hill.
- Taylor, J. H.(ed) (1965), Project sand storm -An experimental program in atmospheric diffusion, U.S.AF Res. Lab.
- Turner, D. B.(1964), A diffusion model for an urban area, Journal of Applied Meteorology, Vol. 3, 83-91.
- Turner, D. B.(1979), Atmospheric Dispersion Modelling : Critical Review, JAPCA, Vol. 29, No. 5, 502-519.
- Turner, D. B. and Novak, J. H.(1978), User's Guide for RAM, U.S.EPA.
- U.S.EPA(1977), User's manual for single-source(CRSTER) model.
- U.S.EPA(1984), Guideline on the air quality models (revised).
- Wark, k. & Warner, C. F.(1981), Air Pollution : Its Origin and Control, New York : Harper & Row Publishers.
- Weber, E.(ed)(1985), Air pollution : Assessment methodology and modeling, NATO committee on the challenges of modern society, New York : Plenum Press.
- Wispelaere, C. D.(ed)(1985), Air pollution Modelling and its application I-IV, NATO committee on the challenges of modern society, New York : Plenum Press.