

## 환경영향평가시 대기확산모델의 사용현황과 개선방안

### Review on Air Quality Modeling in Environmental Impact Assessments

김 석 철 · 이 영 수  
한국환경정책·평가연구원

(1999년 10월 24일접수, 1999년 11월 26일 채택)

Seogcheol Kim and Young-Soo Lee  
*Division of Environmental Impact Assessment, Korea Environment Institute*  
(Received 24 October 1999; accepted 26 November 1999)

#### Abstract

The air quality simulation models in wide use for air quality impact assessments are reviewed. After an intensive survey and comparative study upon the environmental impact assessment reports submitted to Ministry of Environment during 1990~1998, we could identify the major common problems with the air quality impact assessment procedures. Several remedies are presented here, including use of the screening models applicable to the complex terrain.

**Key words :** air quality model, environmental impact assessment, complex terrain

#### 1. 배 경

대기확산모델은 사업예정지의 대기질 현황을 분석하고 사업시행으로 인한 장래의 대기질 영향을 예측하기 위한 수단으로 국내 대기질 환경영향평가에 널리 이용되어 왔다. 1990년부터 1998년 4월까지 본 연구에서 조사한 총 679건의 사업 가운데서 대기확산모델이 사용되지 않는 경우는 전체의 3% 미만에 불과했다(김석철 외, 1998). 모델이 사용되지 않는 사업 가운데는 대기질이 주요 평가항목에 해당하지 않는 사업도 포함되어 있음을 고려할 때, 이는 지금까지 이루어진 국내 대기질 환경영향평가(이하 대기질 평가로 약칭)에 있어서 대기확산모델

이 거의 항상 사용되어 왔음을 말해준다.

계획된 사업의 추진이 대기환경에 미치는 영향을 제대로 평가하기 위해서는 적합한 대기확산모델을 적용하는 것이 대단히 중요하다. 적정한 저감방안이 수립되기 위해서는 영향예측이 제대로 이루어져야 함을 감안할 때, 대기질 평가에서 대기확산모델의 중요성은 절대적이다. 1982년 국내에서 환경영향평가제도가 시행되기 시작한 이후 대기질 평가를 위한 대기확산모델은 나름대로 꾸준히 발전해 왔다. 그러나, 대기확산모델이 일관성 있는 평가수단으로서의 중요한 역할을 해왔지만, 한편으로는 간편일률적인 모델적용으로 인하여 문제점이 지적되기도 하였다(장영기와 송동용, 1995). 오염물질의 대기 중 확산에는 사업지의 국지적인 기상특성이 중요한 영

향을 미친다. 사업지 주변지형이나 오염부하의 크기나 배출오염물질의 특성을 적절히 고려하지 않은 채 획일적으로 모델링이 이루어질 때, 대기질 평가는 부실할 수밖에 없다.

대기질평가와 관련한 모델사용의 각종 문제점들을 파악하기 위해서 본 연구에서는 사업특성별로 지금까지의 대기확산모델의 사용현황을 폭넓게 조사하였다. 구체적인 문제점들을 분석한 후 그 유형별로 개선방안을 제시하였다. 이러한 개선방안은 향후 보완연구와 비판적인 검토를 거쳐 국내 대기질 환경영향평가를 위한 타당한 대기질 모델링의 기준을 정립하는 데 기초적인 자료로 활용 가능하리라 생각한다.

## 2. 환경영향평가와 대기확산모델

대기확산현상이 지나는 복잡성으로 인하여 주어진 상황에 대한 최적의 모델조차도 그 모델링 결과의 정확도는 기대에 미치지 못하는 경우가 빈번하다(US EPA, 1984, 1996). 모델이 지니는 이러한 한계에도 불구하고 대기확산모델은 대기질 환경영향평가에 있어서 거의 필수적인 도구로 사용되어 왔다. 대기확산모델이 빈번히 사용되고 있는 주된 이유는 대기질 환경영향평가가 장래의 영향에 대한 예측을 요구하기 때문일 것이다. 현재 존재하고 있는 배출시설이 주변 대기질에 미치는 영향은 현장 측정을 통해서도 가능하다. 특히 지형적인 조건이 복잡하여 대기확산모델을 적용하여 분석하기에 불확실한 요소가 많은 경우에는 실측은 신뢰도 높은 영향분석의 유일한 방법이 될 수도 있다. 그러나, 환경영향평가는 계획중인 따라서 현존하지 않는 배출원이 장래의 대기질에 미칠 영향예측을 필요로 하기 때문에 실측을 통해 이러한 작업을 하는 것은 대부분 불가능하다(장영기와 송동웅, 1996).

대기질 평가에 모델이 필요한 또 다른 이유로 실측이 지니고 있는 한계를 들 수 있다(US EPA, 1996). 배출시설로 인하여 고농도의 대기오염도가 발생하는 지역은 좁은 지역에 국한되는 경우가 빈번하다. 예컨대(야간의 안정적인 대기상태 하에서) 소각장 연돌에서 배출된 연기가 인근의 높은 지역의 주택단지나 고층아파트에 부딪히는 연기층들(plume impaction)이 발생하는 경우. 반경 수 미터 혹은 수

십 미터의 층돌구역 내에서는 대기오염물질이 높은 농도로 검출되지만 그 좁은 지역을 벗어난 지역의 대기오염농도는 거의 배경농도수준을 유지하게 된다. 따라서 소각장에서 배출된 오염물질이 주변지역에 미치는 영향을 제대로 측정하기 위해서는 매우 많은 수의 측점이 요구된다. 이는 대규모 오염물질 배출시설이 주변지역에 미치는 영향을 실측을 통해 정확히 평가하고자 할 때 불가피하게 나타나는 일반적인 상황으로, 많은 수의 측정으로 인하여 막대한 측정경비가 요구된다. 경우에 따라서는 접근이 어려워 직접측정이 불가능한 상황도 있다. 따라서, 실측만을 통하여 배출시설 영향을 평가하는 것은 충분한 지점에서의 측정치가 제시되지 않은 경우 바람직하지 않으며, 실측을 하는 경우에도 적절한 모델링을 실시하여 실측결과를 보완 분석하는 것이 필요하다.

그 외에도 대기확산모델은 적용이 쉽고 비용이 적게 소요되는 예측방법이다. 특히 국내 대부분의 환경영향평가에 사용되고 있는 가우시안 모델의 경우, 입력인자만 간단하게 변경하여 동일한 모델로써 수많은 사업에 대한 영향예측결과를 얻을 수가 있다. 모델알고리즘의 거의 대부분이 대수방정식으로 이루어진 가우시안 모델의 경우, 모델입력인자와 모델출력간의 관계는 견고하게 정의되어 있기 때문에 영향예측을 위한 모델링 과정은 입력변수와 간단한 모델파라미터를 지정하는 것이 전부다. 예측결과를 얻기 위하여 모델을 조작하는 작업은 대기전문가가 아니라도 충분히 가능하다. 모델조작이 이렇게 간편하다는 점은 가우시안 모델의 특징이다. 그러나 누구나 쉽게 모델을 조작할 수 있다는 점이 장점이기도 하지만, 동시에 이것이 가우시안 모델의 가장 큰 문제가 될 수 있다. 모델이 남용될 여지가 크기 때문이다. 대기확산모델을 적용하여 결과를 얻는 작업 자체보다도 그 결과가 얼마나 정확한 것인지를 검토하는 작업이 더 중요한 경우가 많다. 정확성에 대한 집중이 수반되지 않은 예측결과는 무의미한 수치에 불과할 뿐 아니라, 부적절한 오염방지 대책을 유도할 수도 있다. 사업시행에 따른 대기환경 보호대책의 수립은 대기확산모델에 의한 장래영향에 대한 예측결과에 의존한다. 따라서, 저감대책이 제대로 수립되기 위해서는 사업시행으로 인한 대기질 영향예측이 최대한 정확하게 이루어져야 한다.

### 3. 모델적용 사례조사

#### 3.1 조사방법

본 연구에서는 두 가지 방법으로 국내 환경영향평가서의 대기질 모델링의 현황을 조사하였다. 환경영향평가 용역업체를 대상으로 1990년 이후 시행된 환경영향평가 대상사업에 대하여 설문조사를 실시했다. 동시에 최근('97.9~'98.5)에 작성된 대기질 중점사업에 대한 환경영향평가서를 직접 검토하였다. 설문조사는 환경부 및 지방환경청에 등록된 104개 용역업체를 대상으로 실시했다. 설문문의 내용은 환경영향평가를 시행한 1990년 이후의 사업이름과 사업특성을 파악하는 데 필요한 질문, 단기 및 장기 모델에 대한 질의로 구성하였다. 조사대상기간은 평가서 작성년도를 기준으로 1990년 1월부터 설문조사를 완료한 1998년 4월에 해당한다. 총 64개 업체가 설문에 응했으며, 이 설문조사를 통하여 파악된 사업의 수는 679건이었다. 1990년 이후 1998년 11월까지 협의완료된 사업총수는 약 1300여건임을 고려할 때, 설문을 통하여 조사된 사업은 전체 사업의 52%에 해당한다.

설문조사만으로는 사업별로 적용된 모델의 종류 등과 같은 전반적인 현황파악 외에는 불가능하므로 모델적용현황에 대해서는 보다 심층적인 분석이 필요하다. 본 연구에서는 1997년 9월 한국환경정책·평가연구원(KEI) 설립 이후 1998년 5월 말 현재까지 접수된 환경영향평가서 250여건 중에서 대기질 영향이 큰 사업 30건에 대한 환경영향평가서의 내용을 따로 검토하였다. 사업입지, 오염물질 배출량, 종류 및 주변지역현황 등의 작성내용을 검토함으로써 대기확산모델의 적용현황과 공통적인 문제점을 자세히 분석하였다. 여기서 조사대상으로 설정한 대기질중점사업은 소각장, 공단, 발전소 등이었으며 배출량을 기준으로 선별하였다. 선별된 대기질중점사업의 대부분을 차지하는 소각장의 경우 밀치리용량이 200 ton인 경우에 연돌로부터 배출되는 총먼지량은 약 70 g/sec로 추정된다(저감시설 설치이전). 참고로, 하루 교통량 10만대인 고속도로에서 차량의 배기가스에 포함되어 대기 중으로 방출되는 총먼지(TSP) 추정량은 1 km 구간에 대해서 대략 0.7 g/sec에 불과하다. 설문조사된 자료는 전체 건수의 절반

가량이었고, 자세한 분석에 이용된 평가서는 같은 기간에 접수된 전체건수의 약 12%에 해당하고 있지만, 이러한 자료를 통해 분석된 문제점은 국내 대기질 환경영향평가의 전반적인 문제점을 잘 대변하는 것으로 분석되었다

#### 3.2 조사자료의 검증

설문 조사된 사업(표본)이 같은 기간에 협의가 완료된 전체사업(모집단)을 얼마나 균형 있게 나타내고 있는지 확인하기 위해, 사업종류별 완료된 평가건수에 대한 환경부의 내부자료를 이용했다. 그림 1은 사업별 평가건수의 비를 표본(본 연구의 설문조사자료)과 모집단(환경부 내부자료)을 비교한 것이다. 표본과 모집단은 그 사업별 구성비에 있어서 매우 유사한 분포를 보인다. 적어도 사업별 구성비에 있어서 부분 조사된 본 연구의 설문조사자료는 전체 자료를 잘 대표하는 것으로 나타난다.

설문 조사된 모델사용비율의 불확실성은 비교적 간단하게 분석할 수 있다. 설문조사결과에 나타난 특정모델의 사용횟수가 Ms일 때 협의 완료된 전체 사업 가운데 실제로 이 모델이 M번 사용되었을 확률은 다음과 같다.

$$P(M) = \frac{M! C_{Ms, (N-M)} C_{(N-M), (N-M)}}{\sum_{K=Ms}^{N-(N-M)} K! C_{Ms, (N-K)} C_{(N-K), (N-M)}} \quad (1)$$

여기서, N은 협의 완료된 전체 건수이고, Ns는 설문 조사된 건수이다. 본 연구에 있어서 N과 Ns는

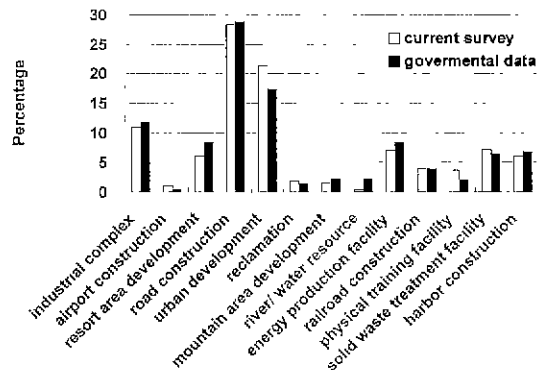


Fig. 1. The survey results compared with governmental data.

**Table 1. Statistics on the short-term models in use.**

Subject	D	H	I	K <sub>D</sub>	K <sub>R</sub>	M	P	C	E	V	No	Total		
												No.	%	
Airport Construction	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5	0.7	
Energy Production Facility Construction	2	0	3	1	0	3	1	1	24	2	6	43	6.3	
Harbor Construction	5	0	7	0	0	1	1	1	28	0	2	45	6.6	
Industrial Complex Construction	2	0	1	2	0	26	0	1	42	0	0	74	10.9	
Landfill/ Reclamation	1	0	1	0	0	11	0	0	12	0	1	26	3.8	
Military Facility Construction	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	4	0.6	
Mine Development	1	0	1	0	0	3	0	0	4	0	1	10	1.5	
Mountam Development	0	0	0	0	0	1	1	0	4	1	0	7	1.0	
Physical Training Facility Const	1	0	3	0	0	15	3	0	16	1	2	41	6.0	
Railroad Construction	0	4	0	0	1	0	0	0	20	0	0	25	3.7	
Resort Area Development	3	0	0	1	0	6	2	0	33	2	2	49	7.2	
River Development	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0.6	
Road Construction	0	27	4	0	3	0	11	0	118	4	2	169	25.9	
Solid Waste Treatment Facility	0	0	10	1	0	7	0	0	25	0	1	44	6.5	
Urban Development	5	0	5	3	0	23	7	0	82	1	4	130	19.1	
Water Resource Development	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0.4	
Total	No.	21	31	35	8	4	97	26	3	422	11	21	679	100
	%	3.1	4.5	5.2	1.2	0.6	14	3.8	0.4	62	1.6	3.1	100	

주) D DIF, H HIWAY-2, I ISCST-3, K<sub>D</sub> KDM, K<sub>R</sub> KRA M Miller-Holtzworth, P PEM-2 C TCM-2, E TEM-8 V VALLEY No No model used

각각 1298과 679이다. TEM은 설문 조사자료 가운데 가장 빈번히 사용된 단기모델로 설문 조사된 679개 사업 중에서 약 62%인 422개 사업에 적용되었다. 위 식을 이용해서 TEM이 1990년 이후 현재까지 협의 완료된 사업 1298건 중에서는 몇 건이나 사용되었을 지를 추정해보자. 신뢰도 95%로 추정할 때(즉 추정구간에 속할 확률이 0.95인 경우) TEM

이 적용된 사업은 774건(60%)부터 838건(65%)인 것으로 나타났다. 즉, 1990년 이후 협의 완료된 전체사업에 대한 TEM 모델의 사용비율은  $62 \pm 3\%$ 일 것이며, 3% 추정범위를 벗어날 확률은 0.05이다. 장기모델인 TCM의 경우는  $45 \pm 3\%$ 이며, 단기모델로 최근 그 사용추세가 증가하고 있는 ISCST3의 경우에는  $5 \pm 1\%$ 로 나타났다. 결론적으로, 본 연구의 설

Table 2. Statistics on the long-term models in use.

Subject	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	D	H	I <sub>L</sub>	I <sub>S</sub>	K <sub>D</sub>	K <sub>R</sub>	M	S	T	V	No	Total		
														No	%	
Airport Construction	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	5	0.7	
Energy Production Facility	0	3	0	0	2	2	3	0	0	0	18	1	14	43	6.3	
Harbor Construction	0	1	1	0	0	0	4	0	0	0	8	0	31	45	6.6	
Industrial Complex Construction	0	3	1	0	2	0	3	0	3	0	59	0	3	74	10.9	
Landfill/ Reclamation	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	7	0	18	26	3.8	
Military Facility Construction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	4	0.6	
Mine Development	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	0	6	10	1.5	
Mountain Development	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	1	0	7	1.0	
Physical Training Facility Const	0	2	0	0	0	1	1	0	7	0	20	2	8	41	6.0	
Railroad Construction	0	0	0	5	0	0	0	1	0	0	9	0	10	25	3.7	
Resort Area Development	0	1	0	0	0	0	4	0	0	2	35	1	6	49	7.2	
River Development	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	4	0.6	
Road Construction	28	0	0	127	0	0	0	3	0	0	9	2	0	169	24.9	
Solid Waste Treatment Facility	0	2	0	0	9	2	1	0	0	0	28	0	2	44	6.5	
Urban Development	0	4	0	0	5	1	8	0	0	2	99	1	10	130	19.1	
Water Resource Development	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0.4	
Total	No.	28	17	4	132	19	6	24	5	10	4	306	8	116	679	100
	%	4.1	2.5	0.6	19	2.8	0.9	3.5	0.7	1.5	0.6	45	1.2	17	100	

주) C<sub>L</sub> CALINE3, C<sub>D</sub> CDM2, D- DIF, H HIWAY2, I<sub>L</sub> ISCLT-3, I<sub>S</sub> ISCST-3, K<sub>D</sub> KDM, K<sub>R</sub> KRA, M. Miller-Holtzworth, S SCM-3, T. TCM-2, V VALLEY, No No model used

문조사를 통해 파악된 모델사용비율은 실제 값(전체사업에 대한 모델사용비율)과 약 3% 범위 내에서 동일하다고 볼 수 있으며, 3% 이상 차이가 날 확률은 0.05 미만이다. 이러한 분석은 그림 1에 제시한 비교자료와도 부합된다. 설문조사를 통해 나타난 사업별 모델사용경향은 정확도가 높은 것으로 판단된다.

### 3.3 조사결과

표 1과 표 2는 설문조사를 바탕으로 사업별로 사용된 단기 및 장기 모델 적용현황을 나타낸 것이다. 그림 2~그림 5는 30여건의 대기질 중점사업과 설문 조사된 사업에 대하여 장기 및 단기모델의 적용현황을 나타낸 것이다. 대기질 중점사업과 기타 사

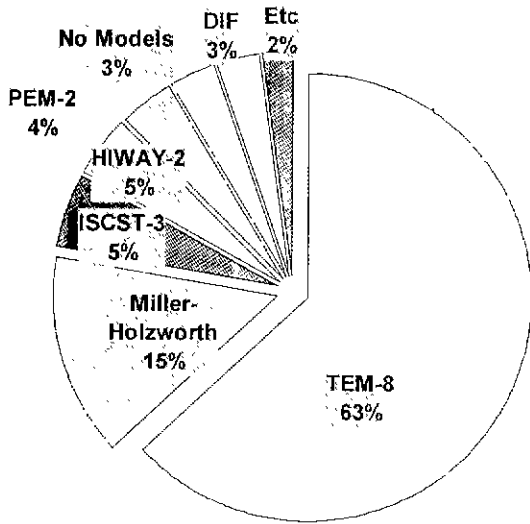


Fig. 2. Statistics on the short-term models in use (based on the survey).

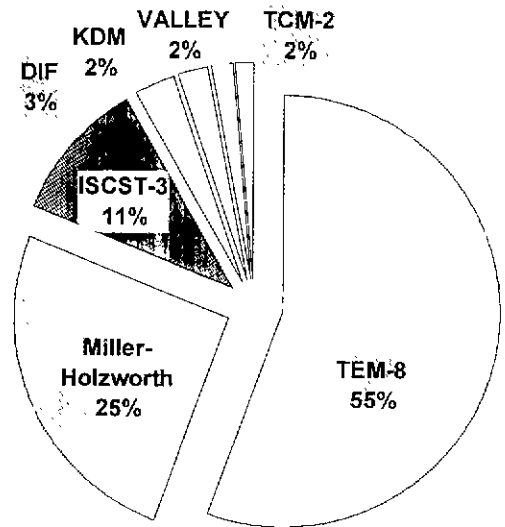


Fig. 4. Statistics on the short-term models in use (for projects with significant impact).

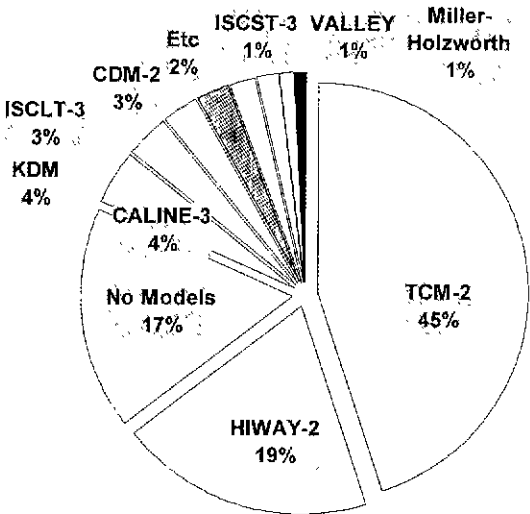


Fig. 3. Statistics on the long-term models in use (based on survey).

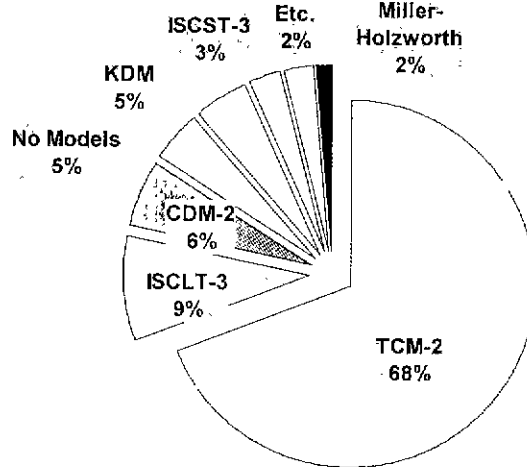


Fig. 5. Statistics on the long-term models in use (for projects with significant impact).

업간에 모델사용에 있어서 구별은 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다. 가우시안 계열의 모델이 조사된 모델의 전부를 차지한다. 보다 정교하고 정확한 결과를 산출할 수 있는 수치모델 (numerical model) 이나 모형모델 (physical model) 등의 적용된 것은 전무

한 것으로 조사되었다. 가우시안 계열의 모델 가운데에서도 한 두 개의 모델이 거의 대부분의 사업에서 집중적으로 사용되어 왔다. 장기모델 TCM과 단기모델 TEM이 절반이상의 사업에서 적용된 것으로 조사되었다.

그림 6과 그림 7은 설문조사를 통해 파악된 연도

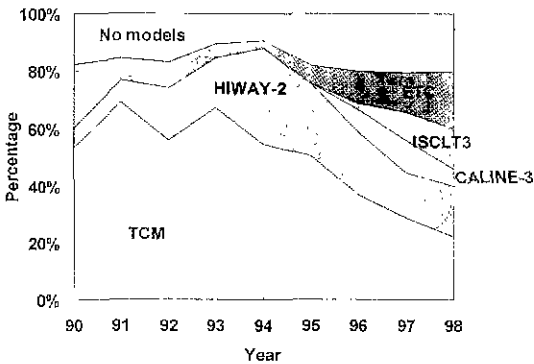


Fig. 6. Annual trend of the long-term model use.

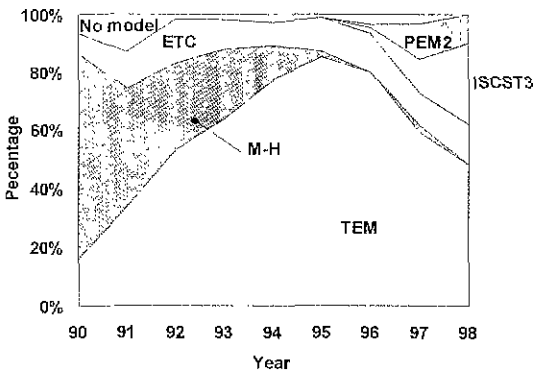


Fig. 7. Annual trend of the short-term model use.

별 장기 및 단기 모델사용현황을 나타낸 것이다. 주로 사용되고 있는 모델의 경우 연도별 사용빈도의 변화가 뚜렷하다 국내에서 이루어지는 대부분의 환경영향평가에 부적절한 것으로 평가되는 box모델의 일종인 Miller-Holtzworth 모델은 한 때 많이 사용되었으나 최근 거의 사용되지 않았다. TEM과 TCM은 꾸준히 많은 비중이 차지하고 있으나 근년에 오면서 ISC모델로 점차 대체되는 추세이다.

그림 8과 그림 9는 설문조사를 통해 파악된 사업의 종류와 적용모델간의 상관관계를 나타낸 산포도이다. 격자 안의 점의 개수는 해당 사업에 그 모델이 적용된 빈도를 나타내는 것으로 표준화된 횟수이다. 표준화된 횟수라 함은 각 사업별로 해당모델이 사용된 횟수를 전체 횟수로 나누어 30을 곱한 값이다. 예로서 에너지개발사업에서 TEM-8 모델에 대한 표준횟수를 구해보자. 표 1로부터 에너지개발

사업분야에서 전체모델적용 건수는 43건이고, TEM-8이 사용된 횟수는 24건이므로, TEM-8의 표준사용횟수는  $17(=24/43 \times 30)$ 이다. 여기서 30을 곱한 것은 산포도의 격자 내에 표시되는 점의 최대개수를 식별 가능한 범위로 제한하기 위한 것이므로 특별한 의미는 없다. 모델적용 횟수로 실제 건수 대신 표준화된 건수를 사용한 이유는 각 사업별 모델 사용비율을 각 사업별 사용빈도의 영향을 배제한 채 기시화하기 위해서였다. 격자 내에서 점의 위치는 무작위로 선정했는데, 이는 동일한 위치에 두 개의 점이 찍히는 일을 피하면서 산포도에 격자선정으로 인한 인위적인 규칙성을 없애기 위해서이다.

그림 8과 그림 9에서 볼 수 있듯이 모델사용에 대한 표준횟수를 나타내는 점의 때가 사업종류를 나타내는 x축과 거의 평행하게 형성되어 있다. 이것은 모델의 선정에 사업의 종류가 미미한 영향을 미치고 있음을 의미한다. 단기모델, TEM과 장기모델, TCM이 사업의 종류와 무관하게 많이 사용되고 있어, 이 모델들의 사용빈도가 높은 현상은 사업의 종류와도 거의 무관한 것으로 나타난다. 예외적으로 특정사업에 국한되어 사용된 모델이 있는데, 도로사업에서 Caline과 HIWAY 모델이다. 그러나, 이 모델들은 원래 도로교통에 적용하기 위하여 개발된 것으로 (Benson, 1979) 타 사업에 적용하기는 곤란한 모델들이다. 전반적으로 사업의 종류와는 무관하게 거의 확률적으로 모델이 적용되어 왔음을 알 수 있다.

#### 4. 문제점

국내 환경영향평가시 대기질 모델링에 있어서 두드러진 특징은 모델의 선정 및 적용과정이 지극히 확률적이라는 점이다. 그림 2~그림 5에 나타난 바와 같이 대기질 증점사업과 전체사업에 대한 모델 사용현황을 비교해 볼 때, 사업으로 인한 대기질 영향정도와 사용된 모델의 종류는 거의 무관한 것으로 드러난다. 그림 8과 그림 9에 사업별로 나타난 모델적용빈도에 대한 현황에서도 이러한 특징은 동일하게 나타난다. 결국, 국내 대기질 평가에 있어서 대기확산모델은 사업이 대기질 환경에 미치는 중요도나, 사업의 특성과는 거의 무관하게 확률적으로 선정되어 적용되고 있다.

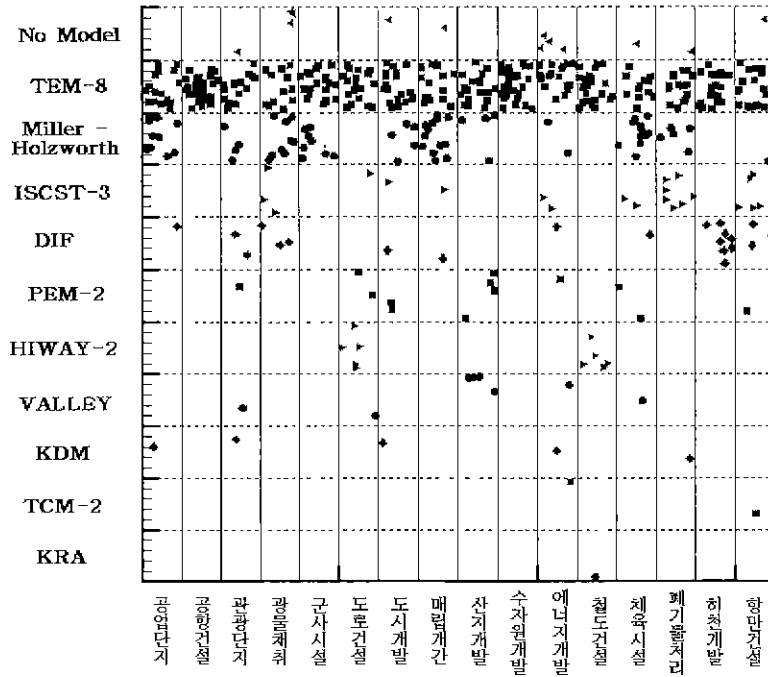


Fig. 8. Scatter diagram of the short-term models in use.

이러한 획일성은 모델의 선정에만 국한되는 현상은 아니다. 대기질 중점사업에 대한 평가서의 내용을 비교 분석한 결과, 모델을 적용하는 과정도 모델 선정 만큼이나 대단히 획일화되어 있는 것으로 나타났다. 동일한 모델이라도 구체적인 적용방법에 따라 매우 다른 결과를 산출할 수 있다. 어떤 모델을 적용했는가 하는 점도 중요하지만 어떻게 적용했는가 하는 점도 예측결과의 정확도에 미치는 영향에 있어서는 동일하게 중요하다. 모든 경우에 적용할 수 있는 전천후 대기확산모델은 아직 없다. 오히려 많은 모델이 다양하게 존재하고 또한 필요한 이유는 각 모델마다 적합한 경우가 다르기 때문이다. 또한 적절하게 선정된 모델이라 할지라도 신뢰성 있는 예측결과를 얻기 위해서는 그 적용과정에 세심한 주의를 요한다. 따라서, 지금까지 모델이 획일적으로 선정되어 적용되어 왔다는 사실은 대기질 평가에 많은 문제점이 있으리라는 점을 시사한다.

**4.1 지형특성무시에 따른 농도의 과소 예측**  
지형특성이 제대로 고려되지 않은 현행 대기질

평가의 가장 심각한 문제점은 대기질 영향이 실제로 발생 가능한 것보다 과소 평가될 수 있다는 점이다. 우리나라에서는 환경영향평가 대상사업의 입지가 평탄한 지역보다는 지형변화가 심한 곳이나 해안에 위치하는 경우가 많다. 이것은 삼면이 바다이고 산지가 국토의 대부분을 차지하는 지형여건상 불가피한 현상이다. 또한 소각장과 같은 일부 사업은 도시인접지역에 위치함으로써 고층 빌딩 숲과 같은 인공구조물의 영향권에 위치하는 경우가 빈번하다. 지형은 대기의 흐름이나 대기혼합도의 발달형태 등에 강한 영향을 주기 때문에 대기오염물질의 확산은 사업지의 지형특성에 상당히 민감하게 영향을 받는다. 따라서 모델의 선정과 사용에 있어서 지형적인 영향을 적절히 고려하는 것이 매우 중요하다. 특히, 국내 사업의 경우 지형적인 영향이 클 때가 빈번함을 고려할 때 지형적인 특성을 제대로 고려하는 것이 대기 모델링에 있어서 가장 중요한 요소가 된다. 그럼에도 불구하고 지금까지 이루어진 대기질 평가에 있어서 복잡 지형이 대기오염물질의 확산에 미치는 영향을 적절히 고려한 경우는 많지



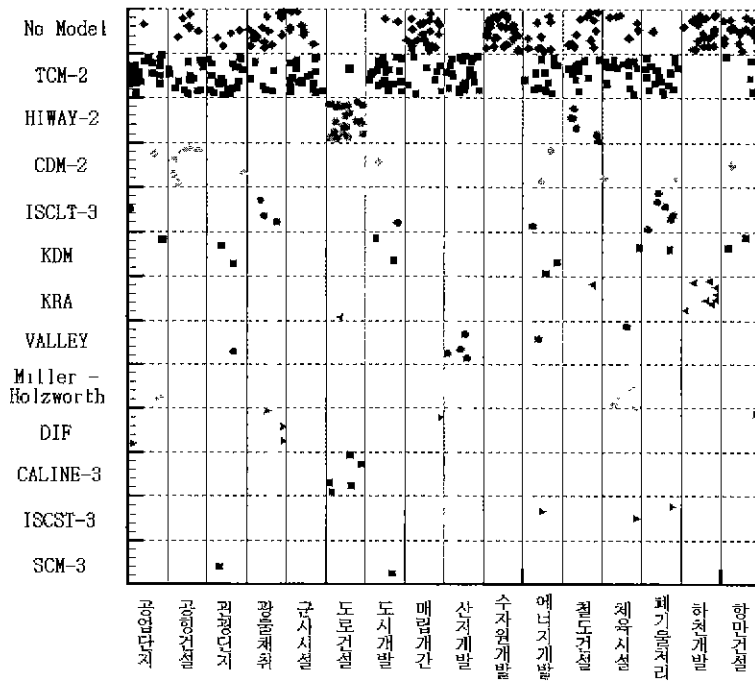


Fig. 9. Scatter diagram of the long-term models in use.

않았다. 지형이 복잡한 곳에서 고농도의 영향이 나타나는 경우가 빈번함을 감안할 때, 이에 대한 적절한 고려가 없었다는 것은 예측농도가 상당히 과소 평가될 수 있음을 의미한다.

대기 모델링에서(특히 가우시안모델의 경우) 배출원의 높이를 기준으로 지형을 단순지형(simple terrain)과 복잡지형(complex terrain)으로 구분한다(US EPA, 1996). 배출원의 높이와 비교해서 영향권 내에 위치한 주변지역의 높이가 낮은 경우에는 단순지형으로 분류된다.

반면 복잡지형은 주변지역이 배출원보다 높은 경우에 해당한다. 이러한 구분은 광범위하게 적용되고 있으나 모델적용상의 편의를 위한 인위적인 것으로, 실제 현상은 이와 같이 단순하고 명확하게 양분되지는 않는다. 지형의 변화는 지면에 인접한 기류에 큰 영향을 미치는데 상층으로 갈수록 이러한 지형적인 영향은 감소하여 어느 고도 이상에서는 사라진다. 오염물질의 확산에 영향을 주는 기상환경이 지형의 영향을 강하게 받는다는 것은 유선(streamline)의 형태가 단순히 지형을 따라 유사하게 변형

되기도 하는 것 이상이다(Batchelor, 1973). 대기 중 오염물질의 확산에 결정적인 영향을 주는 대기의 난류강도가 지형조건에 따라 큰 영향을 받게 됨으로써 확산형태가 크게 달라질 뿐 아니라, 많은 경우 유선의 형태도 지형만으로는 파악이 불가능할 정도로 크게 변형된다. 그러나, 지형변화를 고려할 수 있도록 개발된 가우시안 모델들의 대부분은 연기중심선이 지형의 영향을 받아 지형과 유사한 형태로 변형되는 것으로 지형영향을 단순하게 근사하고 있다. 따라서, 지형이 미치는 영향이 커질수록 가우시안 모델이 상당한 오류를 포함할 가능성이 그만큼 커진다.

복잡한 지형이 대기오염물질의 확산에 미치는 영향은 매우 다양하고 지역에 따라 독특하게 나타난다. 따라서, 복잡지형으로 인한 모든 영향을 유형화하는 데는 한계가 있다. 특별히, 복잡한 지형으로 인하여 발생하는 대기질 영향이 평탄지형에 대한 혹은 단순한 연기중심선변형으로 통한 가우시안 모델링에 의한 예측치를 크게 초과하는 경우에는 중요하게 고려되어야 한다. 이러한 관점에서, 국내 대기

질평가지 고려해야 할 복잡지형에서의 현상들은 △연기충돌(plume impaction), △연기감힘(trapping), △빌딩 혹은 산지후면의 세류(downwash), △연기하강(fumigation)이 있다. 국내 환경영향평가와 관련하여 각 현상의 중요성에 대해서는 김석철 등(1998)이 보다 자세히 고찰한 바 있다. 각각의 현상에 대한 상세한 내용은 관련연구를 참조할 수 있다. 세류(US EPA, 1995a, 1985; Hosker, 1984; Huber, 1977; Huber and Snyder, 1976; Snyder and Lawson, 1976). 연기충돌 및 연기감힘(US EPA, 1995a, 1989,

1985; Pery, 1991; Briggs, 1985; Hunt and Snyder, 1980; Lamb, 1979; Brighton, 1978; Briggs and McDonald, 1978, Riley *et al.*, 1976; Willis and Deardroff 1981, 1978, 1976; Drazin, 1961), 연기하강(DiCristofaro and Hanna, 1989. PEI Associates, 1988; Stunder and SethuRaman, 1986; Misra, 1980; Raynor *et al.*, 1980; Lyons and Cole, 1973).

복잡한 지형의 영향으로 발생하는 이러한 현상의 공통점은 일단 발생할 경우에 평탄지형과 비교해서 현저히 높은 지상농도영향이 수반될 수 있다는 점

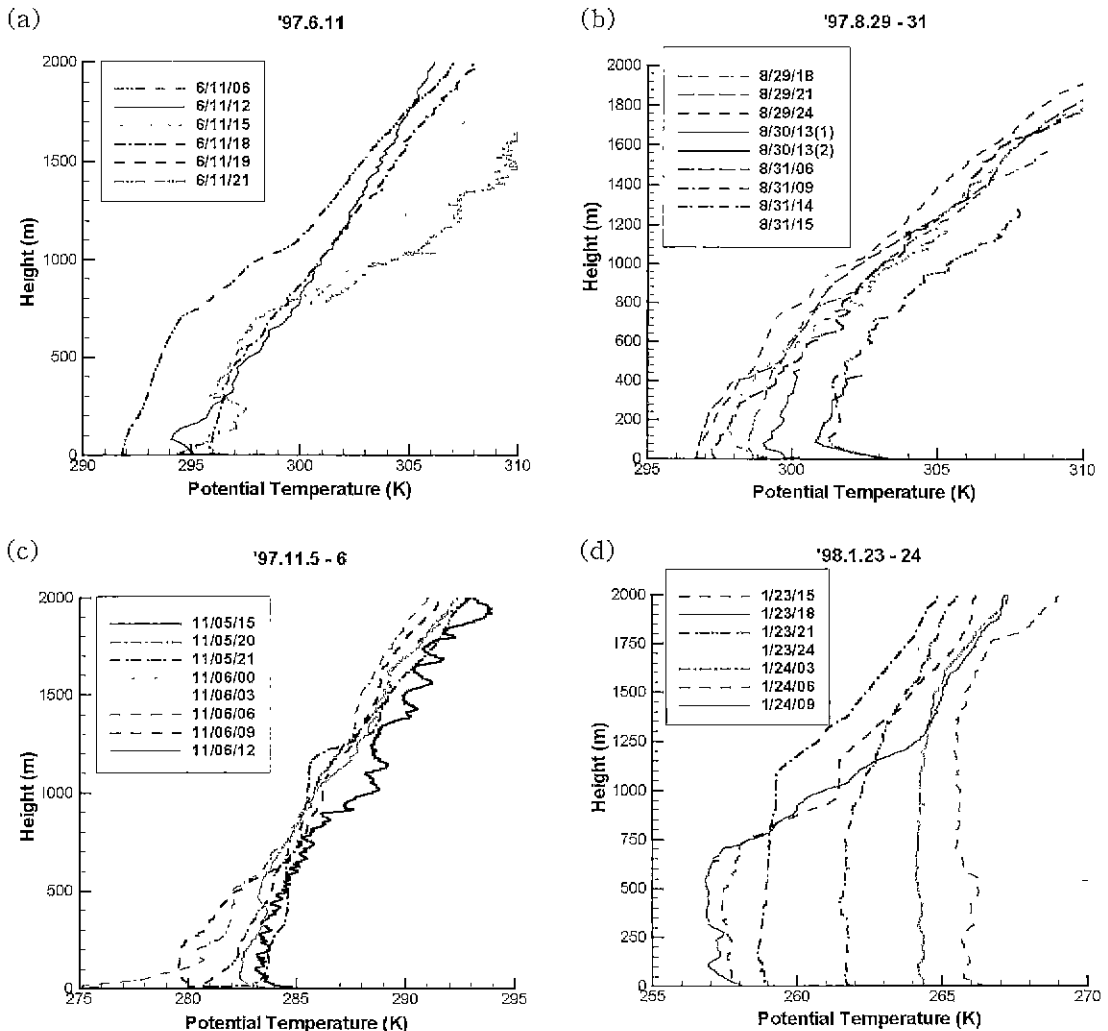


Fig. 10. The vertical profile of potential temperature. (a) June 11, 1997; (b) August 29~31, 1997; (c) November 5~6, 1997; (d) January 23~24, 1998.

이다. 국내 대기질 평가에서 연기층돌, 연기간힘 및 세류현상에 대해서는 어느 정도 그 중요성이 인식되고 있는데 반해, 연기하강은 전혀 고려되지 않고 있는 실정이다. 그림 10은 서해안에서 이루어진 한 사업에 대한 환경영향평가 자료를 나타낸 것이다. 평가서에 제시된 상층기상자료인 온도와 압력자료를 이용하여 고도별 온위 (potential temperature)를 계산한 것이다. 그림 10의 상층기상 측정자료는 연기하강이 발생할 수 있음을 보여주는 것이다. 1월의 관측자료는 [그림 10(d)] 지표경계층 내에서 왕성한 대류활동에 의한 전형적인 대기혼합고의 발달양상을 나타낸다 (竹内清秀 등, 1993). 명확히 구별되는 동온위 기층(온위가 균일한 고도 이하의 공기층)은 강력한 대류현상으로 인하여 공기층이 활발하게 혼합되고 있음을 나타낸다. 대기혼합고는 오후 3시경에 가장 높이 성장하여 최대치(1500 m 가량)에 달하는데, 이것은 대류에 의한 대기혼합고 성장의 전형적인 패턴이다. 여기서 흥미로운 사실은 야간에 대기혼합고가 최대로 낮아진 시점에도 동온위 기층이 존재하며, 대기혼합고는 700 m 이하로 내려오지는 않고 있다는 점이다. 이것은 통상적으로 바다의 영향이 없는 내륙지역에서 통상적으로 관측되는 현상과 상당히 다르다. 내륙지역에서는 일몰이후 지상역전층의 발달과 함께 주간에 형성된 동온위 기층은 신속히 붕괴되는 것이 일반적이다. 8월과 11월의 관측자료는 대기혼합고의 시간별 발달형태나 계절별 변화양상에 있어서 통상적인 내륙지역과 더욱 구별된 특성을 보인다. 두 경우 모두 하루 중 최대혼합고(약 200 m)가 내륙에서의 전형적인 값(1000 m 이상)에 비해 상당히 낮고, 대기혼합고의 일변화가 크지 않은 것이 특징적이다. 이 지역의 대기혼합고가 인접한 해수면의 영향을 받고 있기 때문인 것으로 추측된다. 이 사업의 경우 계획된 굴뚝높이가 100 m 이상인데, 굴뚝에서 배출된 연기는 굴뚝보다 더 높이 상승하여 200 m를 초과할 수도 있다. 이 사업의 경우 연기하강현상의 발생가능성을 배제할 수 없다. 여기에서 제시한 한가지 예를 통해서 연기하강현상에 대한 일반적인 거동을 논하는 것은 불가능한 일이다. 연기하강현상의 발생빈도나 지속시간 등을 제대로 분석하기 위해서는 보다 장기적으로 빈밀한 관측을 수행해야 할 것이다. 그러나 여기서 살펴본 예는 국내 해안지역에서 이루어지는 사업에

있어서 연기하강이 중요할 수 있다는 점을 나타낸다고 하겠다. 전술한 바와 같이 외국에서는 많은 연구가 이루어졌지만, 국내에서는 이 분야에 대해서 아직 심도 깊은 연구가 수행된 바가 없는 실정이다 (심숙경, 1995).

#### 4.2 부적절한 기상자료의 적용

대기확산 모델링이 정확하기 위해서는 기상자료가 절대적으로 중요하다. 모델링에 사용한 기상입력자료는 모델링의 정확도에 직접적인 영향을 주기 때문이다. 지형이 복잡해질수록 (즉 복잡지형의 경우) 대기질 모델링에 있어서 기상자료의 중요성은 더욱 증가한다 (US EPA, 1987). 바람장, 대기혼합고 등의 확산모델링에 필요한 기상인자는 지형이 복잡해질수록 지형의 영향을 많이 받기 때문이다 (US EPA, 1987).

국내 지형여건은 평활한 지역에 해당하는 경우가 많지 않다. 지형변화가 크거나 해안에서 인접한 경우가 많아 기상현상이 지형에 밀접하게 연관되어 나타나는 것이 특징이다. 사업예정지가 복잡지형에 위치한 경우 대기질 영향평가를 위한 최적의 기상자료는 사업지에서 관측한 것이다. 그러나 지금까지의 국내 대기질 평가에서는 사업지에서 상당거리 이격된 기상관측소의 관측자료를 타당성에 대해 충분한 검증 없이 대기질 모델링에 그대로 적용한 사례가 대부분이다. 최적의 기상자료를 확보하기 위하여 사업지에서 직접 기상관측을 실시할 경우, 관측장비의 적절한 설치 외에 또 다른 어려움은 사업지의 기상특성을 단시일 내에 파악할 수 없다는 점일 것이다. 타당한 대기질 모델링을 위해서 즉 모든 극단적인 기상현상을 온전히 파악하는 데 요구되는 지표기상관측 기간은 최소한 5년이 필요하다는 연구결과가 보고된 바 있다 (Burton *et al.*, 1983). 참고로, 미국 환경청 (US EPA)에서는 사업예정지에서 기상관측을 할 경우 최소한 1년 이상의 연속관측을 요구하고 있다.

모든 사업에 대해 장기간의 기상측정을 수행하여 대기질 모델링에 반영하는 것은 비현실적인 것이다. 모든 사업에 대한 대기질 모델링이 동일한 수준의 정확도를 요구하는 것이 아니기 때문이다. 하지만, 대기질 중점사업이 복잡한 지형에서 이루어질 경우, 신뢰성 있는 평가를 위해서는 사업지의 국지

기상특성을 파악할 수 있도록 충분한 기간 동안의 지표 및 상층기상관측이 이루어져야 한다. 최근의 소각장 건설시에 라디오존데 등을 이용한 상층기상관측이 확대되어 가는 추세는 정확한 대기질 평가를 위해서 바람직한 일이다. 그러나, 지표기상관측이 없이 또한 정교한 관측자료를 제대로 이용할 수 있는 모델이 없는 상태에서 단지 수일에 걸쳐 측정된 상층기상자료의 효용성은 실질적으로 높지 않다. 고가의 장비를 사용하여 측정된 상층기상자료가 실질적으로 대기질 모델링에 충분히 활용되지 못하는 경우가 대부분이다. 활용되지 않은 데이터가 형식적으로 수집되는 점에 대해서는 개선방안이 요구되며 이를 위해서 좀 더 체계적인 연구가 필요하다.

### 5. 개 선 방 안

몇 개의 가우시안 모델에 확일적으로 의존하여 이루어지고 있는 현행 대기질 환경영향평가 모델링의 문제점을 단번에 해결할 수 있는 쉬운 방안은 없다(이종범, 1995). 여기에는 현재의 모델링 기술이 극복하지 못한 근본적인 한계가 있기 때문이다. 현재 활용할 수 있는 최고성능의 컴퓨터로도 연기충돌, 세류, 연기하강 등의 주요 현상에 수반된 모든 크기의 난류 에디(turbulent eddy)를 추적하는 것은 불가능하다. 따라서 장기적이고 지속적인 연구는 불가피하게 요구된다.

현재 가우시안 계열의 모델에 편중되어 있는 환경영향평가용 모델은 복잡한 지형에서 우수한 모델링 결과를 산출하는 보다 정교한 모델들로 보완될 필요가 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 복잡한 지형 하에서 가우시안 모델은 그 예측정확도에 있어서 심각한 한계에 부딪힌다. 또한 점점 다변화되어 가는 모델링의 필요성을 가우시안 모델만으로 충족시키기는 불가능하다. 이러한 문제들을 극복하기 위해서는 국내 필요에 부합되는 오일러리안(Eulerian) 모델 혹은 라그랑지안(Lagrangian) 모델 등의 수치 모델이 요구된다. 이러한 수치모델의 개발과 정작은 단시일에 달성 가능한 과업은 아니며 오히려 충분한 기간을 두고 지속적으로 추진되어야 할 것이다. 그러나, 환경영향평가의 현실은 연기충돌이나 세류, 연기하강 등의 복잡한 현상들에 대한 합리적인 답을 지금 당장 필요로 하는 것이 사실이다. 여기에

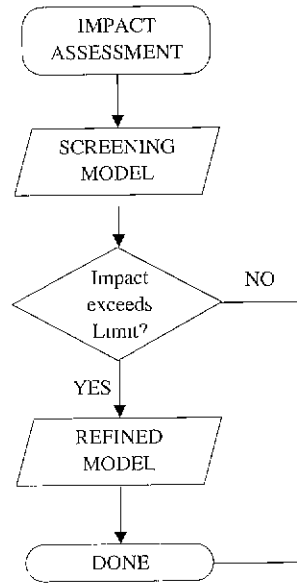


Fig. 11. Screening model in the process of impact assessment.

대해서 예비검토모델(screening model)을 제안한다. 정확한 예측결과를 위해 복잡지형의 영향을 깊이 있게 분석하는 것은 기술 및 경제적인 측면에서 부담스러운 뿐 아니라 경우에 따라서는 불가능할 수도 있다. 따라서 복잡한 지형에서 이루어지는 모든 사업에 대해서 동일한 수준으로 심도 깊은 대기질 평가를 하는 것은 비현실적이다. 깊이를 더하기 이전에 우선 지금까지 천편일률적으로 시행되어온 대기질 평가방식을 적절한 형태로 차등화하는 것이 더 필요하다. 평가를 차등화하는 주된 이유는 대기질에 미치는 영향이 큰 사업에 대해서는 정확한 영향예측이 이루어져야 하기 때문이다. 그림 11은 예비검토모델을 이용한 대기질 평가과정을 나타낸 것이다.

사업의 시행이 대기질에 미치는 영향정도를 먼저 간단한 형태로 사전에 검토한 후, 대기질 영향이 심각할 것으로 판단되는 경우에 한해서 보다 세부적인 대기질 평가를 시행하여야 한다. 사전검토에 이은 세부적인 대기질 평가는 복잡한 지형영향을 제대로 검토할 수 있도록 기존의 확일적인 평가방식에서 탈피하여 심도 깊게 진행되어야 한다. 예비검토모델은 사전검토를 목적으로 개발된 것이다. 예비

검토모델의 주 기능은 사업시행으로 발생할 수 있는 최악의 대기질 영향을 간편하게 제시하는 데 있다. 간편한 방법을 적용한 만큼 모델링 결과의 정확도는 떨어진다. 그러나, 예비검토모델을 통해 예측된 대기질 농도는 매우 보수적 (conservative)인 값을 지니도록 고안되어 있다. 따라서, 예비검토모델에 의한 대기질 영향이 근소할 것으로 예측되었다면 더 이상의 정교한 모델링은 불필요하다.

예비검토모델이 지닌 큰 장점 가운데 한가지는, 복잡한 지형에서 발생하는 대기확산현상을 분석함에 있어서 예비검토모델만이 유일하게 실질적 대안이 되는 경우가 많다는 점이다. 실제로 복잡지형에서 발생할 수 있는 연기충돌, 세류, 연기간섭, 연기하강 등을 분석하기 위한 목적으로 지금까지 다양한 예비검토모델이 제시되어 있다 (US EPA, 1992a, c, 1995b, 1996; Paine *et al.*, 1987; Bjorklund and Bowers, 1982; Burt, 1977). 이러한 기존 모델들을 국내에 적용을 위해서는 각 모델이 가정하고 있는 조건을 면밀하게 분석하고 적합한 형태로 수정하는 등의 기술적인 검토가 필요하다. 우리 나라에 적합한 형태로 국내용 예비검토모델을 독자적으로 개발하는 노력도 요구된다.

## 6. 맺 음 말

현재 국내에서 대기확산모델이 가장 활발하게 사용되고 있는 분야는 환경영향평가이다. 1998년 한 해 동안 KEI에 접수된 평가서의 수는 총 784건에 달한다 (KEI 내부자료). 그 가운데 극히 일부를 제외하고, 대부분 평가서에서 대기확산모델이 사업시행에 따른 대기질 영향을 예측하고 대기오염방지대책의 적정성 여부를 검토하기 위한 수단으로 사용되었다. 그러나 이러한 폭넓은 모델사용빈도에 비해서 적용모델의 종류와 모델사용방식은 지금껏 제한되어 있는 실정이다. 여기에는 지금까지 자주 지적된 모델사용자의 전문성결여 문제 외에도 여러 가지 요인이 있다.

개별 사업의 특이성이 제대로 고려되지 않은 획일적인 모델링은 불가피하게 여러 가지 문제점들을 야기한다. 이러한 문제점들은 결국 변화가 심한 국내지형 조건하에서 오염물질의 확산현상을 정확히 계산해야한다는 난제와 결부되어 있어, 이에 대한

근본적인 개선방안은 많은 연구를 요구한다. 이러한 궁극적이고 장기적인 대책과 병행하여 단시일 내에 적용 가능한 개선방안으로 본 연구에서는 예비검토모델의 사용을 제시하였다. 예비검토모델은 정확한 결과를 산출하는 대신, 단순한 예측과정을 통해 발생 가능한 최악의 경우를 고려한다. 정확도가 높은 결과를 얻기 위해 어렵고 복잡한 계산작업을 수행하기 이전에, 보다 간단한 방식으로 최악의 경우를 예측하는 것은 외국에서는 이미 보편화된 방식이다. 국내 대기질 환경영향평가에 있어서도 이러한 이분화된 모델링 방식을 도입하기 위하여 제반 기술적 사항에 대한 검토가 시급하다.

## 참 고 문 헌

- 김석철, 김강주, 박석순, 박영민, 이상돈, 이영수, 이찬호, 정경태, 정원우, 조홍연, 진재율, 채장원, 최준규 (1998) 사업특성별 환경영향평가를 위한 모델의 비교연구, 한국환경정책·평가연구원 연구보고서 KEI/1998/RE-28, 서울
- 심숙경 (1995) 해안경계층을 고려한 대기오염도 평가, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문, 서울
- 이종범 (1995) 우리나라에 적합한 국지확산모델의 개발방향, 한국대기보전학회지, 11(1), 15-28.
- 장영기, 송동웅 (1995) 국내 대기오염모델링의 현황과 과제, 한국대기보전학회지, 11(1), 1-14.
- 竹内清秀, 近藤純正: 한영호 역 (1993) 미기상학, 지구문화사, 서울, 91-92.
- Batchelor, G.K (1973) *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, pp. 329.
- Benson, P.E. (1979) CALINE2-A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets. Interim Report, Report Number FHWA/CA/TL-79/23. Federal Highway Administration, Washington, D.C (NTIS No. PB 80-220841).
- Bjorklund, J.R. and J.F. Bowers (1982) User's Instructions for the SHORTZ and LONGZ Computer Programs, Volumes I and II. EPA Publication No. Environmental Protection Agency-903/9-82-001a and b, US Environmental Protection Agency Region III, Philadelphia PA, (NTIS Nos PB 83-146092 and PB 83-146100).
- Briggs, G A. and K.R McDonald (1978) Prairie Grass revisited: optimum indicators of vertical spread. Proceedings of the Ninth International Meeting on Air

- Pollution Modeling and its Applications. No.103, NATO, 209-220.
- Briggs, G.A (1985) Analytical parameterization of diffusion: the convective boundary layer. *J. Climate Appl. Meteor.*, 24, 1167-1186
- Brighton P.W.M.(1978) Strongly stratified flow past three-dimensional obstacles. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 104, 289-307.
- Burt, E.W.(1977) Valley Model User's Guide. EPA Publication No EPA-450/2-77-018. Research Triangle Park, NC
- Burton, C.S , T E Stoeckenius, and J P Ordin (1983) The Temporal Representativeness of Short-Term Meteorological Data Sets: Implications for Air Quality Impact Assessments Systems Applications, Inc., San Rafael, CA. (Docket No A-80-46, II-G-11).
- DiCristofaro, D.C. and S R Hanna (1989) OCD: The Off-shore and Coastal Dispersion Model, Version 4. Volume I: User's Guide, and Volume II Appendices. Sigma Research Corporation, Westford, MA. (NTIS Nos. PB 93-144384 and PB 93-144392).
- Drazin, P.G.(1961) On the steady flow of a fluid of variable density past an obstacle. *Tellus*, 13 239-251
- Hosker, R P.(1984) Flow and Diffusion Near Obstacles. In: *Atmospheric Science and Power Production*. Randerson, P (ed.), DOE/TIC-27601, U.S. Environmental Protection Agency, Department of Energy, Washington, D.C.
- Huber A.H and W.H. Snyder (1976) Building Wake Effects on short Stack Effluents. Preprint Volume *Third Symposium on Atmospheric Turbulence, Diffusion and Air Quality*. published by American Meteorological Society, Boston MA, 235-242.
- Huber, A H. (1977) Incorporating Building/Terrain Wake Effects on Stack Effluents. Preprint Volume *AMS-APCA Joint Conference on Application of Air Pollution Meteorology*, November 29- December 2, 1977. Salt Lake City, UT.
- Hunt, J C R and W.H. Snyder (1980) Experiments on stably and neutrally stratified flow over a model three-dimensional hill. *J. Fluid Mech* , 96, 671-704
- Lamb R.G.(1979) The effect of release height on material dispersion in the convective boundary layer Preprints, *Fourth Symposium on Turbulence, Diffusion, and Air Pollution*. American Meteorological Society, Reno, NV.
- Lyons, W.A and H.S. Cole (1973) Fumigation and Plume Trapping on the Shore of Lake Michigan During Stable Onshore Flow. *J Applied Meteo.*, 12, 494-510.
- Misra, P.K.(1980) Dispersion from tall stacks into a shoreline environment. *Atmos. Environ* . 14, 397-400.
- Paine, R J., D.G. Stimatis, M.G Dennis, R J. Yamartino, M.T. Mills and E.M. Insley (1987) User's Guide to Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations (CTDMPLUS). Volume I EPA Publication No EPA-600/8-87-058a Research Triangle Park, NC
- PEI Associates (1988) User's Guide to SDM-A Shoreline Dispersion Model. EPA Publication No. EPA-450/4-88-017. US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- Perry, S.G.(1991) CTDMPLUS A Dispersion Model for Sources Near Complex Topography, Part I Technical Formulations. National Oceanic and Atmospheric Administration, Research Triangle Park, NC
- Raynor, G S , P. Michael, and S. Sethuraman (1980) Meteorological measurement methods and diffusion models for use at coastal nuclear reactor sites, *Nuclear Safety*. Vol. 21. No. 6.
- Riley, J.J , H T Liu, and E.W. Geller (1976) A numerical and experimental study of stably stratified flow around complex terrain. EPA Publication No EPA-600/4-76-021, Research Triangle Park, NC.
- Snyder, W.H. and J C R. Hunt (1984) Turbulent diffusion from a point source in stratified and neutral flows around a three-dimensional hill, Part II--Laboratory measurement of surface concentrations. *Atmos. Environ.*, 18, 1969-2002
- Snyder, W.H. and R.E. Lawson Jr (1976) Determination of a Necessary Height for a stack close to a Building-A wind Tunnel study. *Atmos. Environ* . 10, 683-691
- Stunder, M and S SethuRaman (1986) A statistical evaluation of coastal point source dispersion models. *Atmos. Environ.*, 20, 301-315
- U.S Environmental Protection Agency (1984) Interim Procedures For Evaluating Air Quality Models (Revised), EPA Publication No. EPA-450/4-84-023, Research Triangle Park, NC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1985) Guideline for Determination of Good Engineering practice Stack Height (Technical Support Document for the Stack

- Height Regulations) (Revised), EPA Publication No. EPA-450/1-80-023R, Research Triangle Park, NC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1987) On-Site Meteorological Program Guidance for Regulatory Modeling Applications. US EPA Publication No EPA-450/4-87-013, Research Triangle Park, NC
- U.S. Environmental Protection Agency (1989) User's Guide to the CTDMPPLUS (complex terrain dispersion model plus algorithms for unstable situations): Volume 1 Model description and user instructions. EPA Publication No. EPA-600/8-89-041, Research Triangle Park, NC
- U.S. Environmental Protection Agency (1992a) Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources (Revised). EPA Publication No. EPA-454/R-92-019, NC
- U.S. Environmental Protection Agency (1992b) Guideline for Modeling Carbon Monoxide from Roadway Intersections, EPA Publication No EPA-454/r-92-005, Research Triangle Park, NC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1992c) Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources (Revised) (1992), EPA Publication No. EPA-454/R-92-019, Research Triangle Park, NC
- U.S. Environmental Protection Agency (1995a) SCREEN3 Model User's Guide, EPA Publication No. EPA-454/B-95-004, Research Triangle Park, NC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1995b) SCREEN3 Model User's Guide. EPA Publication No. EPA-454/B-95-004, Research Triangle Park, NC
- U.S. Environmental Protection Agency (1996) Guideline on Air Quality Models (Revised). EPA Publication No EPA-450/2-78-027R, Research Triangle Park, NC.
- Willis, G.E. and J.W. Deardroff (1976) A laboratory model of diffusion into a convective planetary boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 427-445
- Willis, G.E. and J.W. Deardroff (1978) A laboratory study of dispersion from an elevated source in a convective mixed layer. *Atmos. Environ.*, 12, 1305-1313.
- Willis, G.E. and J.W. Deardroff (1981) A laboratory study of dispersion in the middle of the convectively mixed layer. *Atmos. Environ.*, 15, 109-117