

대기오염 예측에서 TCM 과 CDMQC 의 비교

A Comparison between the TCM and the CDMQC on Air Quality Prediction

송 동 응* 김 면 섭** 신 응 배*

Dong-Woong Song, Myun-Sup Kim, Eung-Bai Shin

ABSTRACT

The Texas Climatological Model (TCM) Predicts long-term pollutant concentrations for a rectangular array of receptors defined by the user.

This paper describes the TCM and compares predictions from TCM with predictions from the Climatological Dispersion Model (CDMQC). A number of model runs have been made with the TCM and CDMQC using the same source inventories and sets of climatology.

The concentrations predicted by these two models are compared and the result of several types of statistical analyses are reported. In most cases, the TCM predicts concentrations that are equivalent to those predicted by the CDMQC. However, in certain cases, the CDMQC tends to predict concentrations that are unrealistically high.

In the computer time, the TCM requires about one-eighths of the computer time used by the CDMQC.

1. 서 론

환경영향평가제도가 도입되고 이에 따른 대기 오염관리대책을 수립함에 있어 오염부하가 대기 질에 미치는 영향정도를 예측하는 기법이 정확해야만 적절한 영향평가가 가능하며 또한 성공적인 대기오염관리대책을 수립할 수가 있다.

이와 같이 대기중에서 오염물질의 농도분포를 예측하는 대기질확산모델은 크게 Gaussian, Numerical, Statistical 혹은 Empirical 과 Physical 모델로 분류할 수 있으며 이 중에서 사용이 간편하고 전산입력자료의 획득 및 가정에 무리가 없어 사용자 개인차에 의한 오차가 거의 없는 Gaussian 모델이 가장 널리 사용되고

있다. 이 모델은 오염물질의 농도를 Gauss 공식, 즉 정규분포공식을 사용하는 데, 대기중 어느 지점에서의 농도건 단순히 Gauss 공식으로 풀 수 있을 만큼 여러가지 많은 가정으로서 자연현상을 단순화시켰다. 이러한 모델들의 사용범위가 늘어감에 따라 1973년에 이르러 미국 NTIS (National Technical Information Service) 에서는 모든 사용자들을 위하여 6개의 모델을 전국 컴퓨터 네트워크에 넣어 공급하기 시작했고 그 다음해에 이 전산프로그램을 마그네틱 테이프에 수록하여 배급하기 시작했는데 이 프로그램 시스템을 UNAMAP(User's Network for Applied Modeling of Air Pollution) 이라고 한다.¹⁾

* 한국과학기술원 환경공학연구소 Environmental Engineering Lab., KAIST, Seoul 131, Korea
한양대학교 공과대학 화학공학과 Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Han Yang Univ. Seoul 133, Korea

처음 6개의 모델은 APRAC, CDM, HIW-AY, PTMAX, PTDIS, PTMTP로서 모두 장기성 Gauss 모델로 평탄한 지역에서 적용되도록 개발되었으며 이후 단기성 모델과 지형조건을 고려한 모델들이 개발되어 1978년에 CDMQC, CRSTER, PAL, VALLEY, RAM의 5개 모델이 추가되었으며 현재는 UNAMAP 시스템에 총 31개의 모델이 수록되어 사용목적과 범위에 따라 각기 달리 사용되고 있다.

본 연구에서는 지금까지 널리 사용되어 오던 CDMQC를 보완. 계산속도가 빠르고 결과분석이 용이하도록 개발된 TCM을 선정하여 울산공업단지를 대상으로 대기오염도를 예측하고 예측결과를 실측치, CDMQC에 의한 예측결과와 비교, 분석하므로써 모델의 신뢰성을 검토하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 TCM의 특성

TCM은 1985년에 Texas Air Control Board에서 개발되어 1980년에 수정된 모델로 Briggs 연 기상승식, Pasquill-Gifford의 확산계수식, 오염물의 반감식과 Gaussian 확산식에 근거를 두고 있으며 지상에서의 장기농도를 예측하도록 고안되었다.²⁾

이와 같이 개발된 TCM은 주로 다음과 같은 목적에 사용되고 있다.

- 1) 연돌 설계
- 2) 새로운 오염원에 대한 영향평가
- 3) 연료대체계획
- 4) 측정망 설계
- 5) 대기오염 통제기술 평가
- 6) 대기오염 통제전략 평가
- 7) 급격한 오염의 방지

2.2 TCM의 수학적 원리

Gaussian 확산식에 근거를 둔 TCM에서 k 번째 풍향 sector에서 임의 착지점의 지상농도는 다음과 같이 표시된다.

$$C\rho(k, \rho) = \frac{32 \times 10^6 Q}{(2\pi)^{3/2} \rho} \left\{ \frac{\phi(k, m)}{U^*(H, m)\sigma_z(m)} \exp\left[-\frac{H^2}{-2\sigma_z(m)^2}\right] \right\} \dots\dots\dots(1)$$

여기에서,

- Q : 오염물 배출량 [g/sec]
- ρ : 연돌에서 착지점까지의 거리 (m)
- $\phi(k, m)$: 기상종합빈도계수
- k : 풍향 sector
- m : 대기안정도
- $U^*(H, m)$: 안정도 m일 때 연돌높이 H에서의 평균풍속 (m/sec)
- $\sigma_z(m)$: 수직확산계수 (m)
- H : 유효 연돌고 (m)

3. 모델링

3.1 배출원 조사

1) 점오염원

연구대상지역은 울산공업단지를 대상으로 하였으며 본 연구의 배출원자료는 한국과학기술원 환경공학연구실에서 수집한 울산공업단지 환경관리를 위한 설문서³⁾에 근거를 두고 있다.

울산공업단지내 1984년말 현재 등록된 공장수는 162개로 이중 87개의 대규모 업체를 점오염원 대상업소로 선정하였으며 설문서 및 배출원 관련자료 조사결과, 1984년도에 이들 업체에서 사용한 연료의 종류와 양은 표 1과 같다.

Table 1. Fuels used in 87 sources.

(unit: tℓ)

B-C	B-B	B-A	Die-sel	Kero-sene	Naph-tha
2,360,670	5,701	1,755	19,592	1,103	99,903

각 오염원에서 배출되는 대기오염물의 양을 추정하기 위해 각 업소의 제품생산량, 원료 및연료 사용량, 연료내의 유험합량, 연돌자료, 대기오염물 배출조건 (배출속도 및 온도 등), 방지기의 종류와 가동상태 및 효율 등의 각종 관련자료를 조사검토하고 종합하여 문헌⁴⁾에 수록되어 있는 대기오염 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하였다.

2) 면오염원

면오염원에 속하는 배출원으로는 87개 대규모 업소를 제외한 소규모 업소와 난방연료의 사용

그리고 차량운행 등을 들 수 있다.

1984년 울산시의 민수연탄 소비량은 총 399,602 ton⁶⁾으로 한국과학기술연구소에서 측정 한 결과⁶⁾인 민수용탄 3.3 kg당 (by dry weight) 13.0 g의 SO₂가 배출되는 것으로 계산하여 오염물 배출량을 산정하였고 차량운행에 의한 오염물 배출량 산정은 표 2의 울산시 차량운행현황을 기준으로 차량운행으로 인한 연료별 대기오염 배출계수⁴⁾를 이용하여 차종별, 연료별 대기오염물의 배출량을 산정하였다.

Table 2. Motor vehicle transportation in Ulsan, 1984^{5), 7)}

Vehicle	Fuel	No. of vehicle	Ave. speed (km/hr)	Consumption of fuel (l/km)	Ave. transported distance (km/yr)
Passenger car					
Private	Gasoline	4,410	60	0.08	12,000
Commercial	LPG	1,352	60	0.07	120,000
Bus	Diesel	1,369	60	0.30	120,000
Truck	Diesel	6,026	60	0.30	40,000

점오염원과 면오염원에 의해 배출되는 대기오염물의 지역별 배출현황을 인구밀도, 도로분포 및 차종별 통과대수 등을 고려하여 면오염원을 grid에 분포시키고 점오염원을 해당 grid에 추가하여 배출량에 따라 5등급으로 구분한 emission density map을 그림 1에 도시하였다. (그림 1).

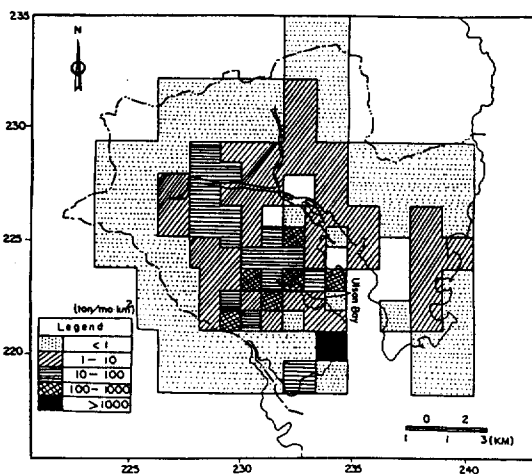


Fig. 1. SO₂ emission density (ton/mo.km²) map(Ulsan, 1984)⁷⁾

3.2 기상조건

TCM에 입력되는 기상자료로 대기온도와 안정도별 풍향, 풍속의 발생빈도를 구하기 위해 중앙기상대에서 1984년의 울산측후소자료를 입수하여 전산처리하였다. 그 결과는 표 3, 4, 5와 같으며 표 3에서와 같이 울산지역은 안정도 6등급의 발생빈도가 약 36%로서 대기가 매우 안정한 상태로 나타났고 따라서 오염물의 확산에 매우 불리한 조건이었음을 보여주고 있다. 표 4에서 풍속별 발생빈도는 미풍인 1등급의 발생빈도가 약 53%로 가장 높게 나타나 이 또한 울산지역이 대기오염물의 확산에 불리한 것으로 나타났다. 표 5의 풍향별 발생빈도는 북풍이 12%, 북북동풍이 11%로 높은 빈도를 보였다.

3.3 모델링 결과

TCM을 이용하여 울산지역의 1984년 SO₂ 연평균 농도를 예측한 결과는 그림 2와 같다. 그림 2는 TCM의 output의 일부로서 오염도 분석이 용이하도록 착지점별로 농도값이 프린트되며 이 값들을 CALCOMP PLOTTER로 도시한 것이 그림 3이다. 또한 CDMQC의 모델링 결과는 그림 4와 같다. 모델링 결과를 보면 그림 3, 4에서와 같이 울산시 전지역이 1984년에 연평균 SO₂ 농도가 10ppb를 넘는 것으로 나타났고 북쪽동, 고사동지역은 TCM의 경우 20ppb, CDMQC의 경우 30ppb를 넘는 것으로 예측되었다. (그림 2, 그림 3, 그림 4).

4. 결과 및 고찰

TCM이 CDMQC에 기초한 모델이지만 크게 다음 3가지의 다른 점을 가지고 있다. 첫째, TCM은 계산속도를 빠르게 하기 위해 농도계산식 중의 지수항을 미리 계산하여 입력시켰으며 또한 6등급의 풍속을 가중평균풍속으로 대신하였다. 둘째, CDMQC에서는 50 m 이하인 연돌에 대해서 σ_z 의 초기치를 지정하게 되어 있다. 셋째, CDMQC에서는 도시지역에서는 다른 지역에서처럼 안정한 상태가 발생되기 어렵다는 이유로 5, 6등급의 σ_z 값 대신에 4등급의 값을 사용한다는 점이다.

Table 3. Monthly joint frequency for each stability classes (Ulsan, 1984)

Stability	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
1	0.0000	.0072	.0067	.0195	.0755	.0236	.0228	.0336	.0070	.0027	.0028	0.0000	.0126
2	.0363	.0402	.0658	.1056	.1397	.1042	.1102	.1357	.1195	.1129	.0695	.0564	.0916
3	.1774	.1423	.1330	.1403	.2271	.1625	.1801	.1895	.1306	.2204	.1945	.1451	.1706
4	.2070	.2687	.2916	.2764	.2029	.3348	.2997	.1975	.2639	.1304	.1625	.2150	.2371
5	.1169	.1480	.1599	.1778	.0887	.1570	.1600	.0927	.1306	.0551	.1000	.1787	.1302
6	.4624	.3937	.3427	.2806	.3158	.2181	.2271	.3508	.3486	.4784	.4709	.4045	.3579

Table 4. Monthly joint frequency for each wind speed classes(Ulsan, 1984)

Wind speed class	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
1	.3910	.3836	.4180	5764	5739	6056	5860	5792	6390	4972	5917	4609	.5252
2	.2782	.3247	.2875	2473	2620	2904	2822	3064	2751	3212	2959	2782	.2874
3	.2634	.2055	.2338	1625	1545	1014	1250	1034	0834	1680	1084	2016	.1595
4	.0672	.0833	.0605	0139	0094	0028	0067	0108	0028	0134	0042	0591	.0277
5	0.0000	.0029	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	.0002
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

	226.00	228.00	230.00	232.00	234.00	236.00	238.00
228.00	13	14	15	15	13	14	15
227.00	14	15	18	20	16	18	18
226.00	16	17	20	22	22	22	26
225.00	17	20	21	27	31	32	32
224.00	18	22	24	29	37	45	39
223.00	18	22	29	30	36	50	45
222.00	18	23	32	36	40	50	56
221.00	19	23	30	35	45	51	51
220.00	20	24	31	37	41	49	46
219.00	19	24	29	35	42	45	45
218.00	21	25	29	37	40	42	39
217.00	20	25	27	34	36	37	37
216.00	19	23	28	30	32	33	34
	226.00	228.00	230.00	232.00	234.00	236.00	238.00

Fig.2. Annual average SO₂ concentration in Ulsan($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Table 5. Monthly joint frequency for each wind direction(Ulsan, 1984)

Wind direction	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
N	.1183	.0977	.1357	.1042	.0672	.0958	.0954	.0699	.1111	.1263	.1667	.2876	.1232
NNE	.0390	.0977	.0739	.1528	.0860	.0875	.1048	.0726	.0792	.1398	.1861	.1506	.1056
NE	.0175	.0287	.0591	.0764	.1053	.0917	.0927	.0927	.0778	.0605	.0834	.0578	.0703
ENE	.0161	.0359	.0296	.0736	.0900	.0889	.0900	.0753	.0847	.0605	.0542	.0228	.0601
E	.0148	.0158	.0296	.0611	.0538	.0625	.0551	.0497	.0528	.0403	.0500	.0323	.0432
ESE	.0202	.0244	.0188	.0570	.0658	.0833	.0578	.1075	.0542	.0349	.0403	.0255	.0492
SE	.0121	.0359	.0712	.1167	.1304	.0584	.0578	.0578	.0431	.0282	.0458	.0215	.0566
SSE	.0107	.0259	.0322	.0500	.0269	.0334	.0296	.0269	.0208	.0242	.0306	.0118	.0275
S	.0161	.0144	.0417	.0361	.0336	.0722	.0739	.0618	.0417	.0161	.0250	.0161	.0375
SSW	.0255	.0224	.0349	.0486	.0349	.0653	.0726	.0336	.0500	.0228	.0208	.0175	.0376
SW	.0484	.0172	.0659	.0459	.0470	.0528	.0659	.0753	.0514	.0470	.0403	.0242	.0486
WSW	.0417	.0431	.0538	.0333	.0820	.0375	.0430	.0591	.0695	.0591	.0528	.0269	.0502
W	.0538	.0359	.0605	.0250	.0470	.0639	.0591	.0807	.0792	.0927	.0778	.0591	.0614
WNW	.1479	.0819	.0349	.0208	.0376	.0264	.0175	.0336	.0403	.0416	.0333	.0322	.0456
NW	.1801	.1940	.1505	.0389	.0322	.0472	.0403	.0538	.0653	.0807	.0570	.1223	.0883

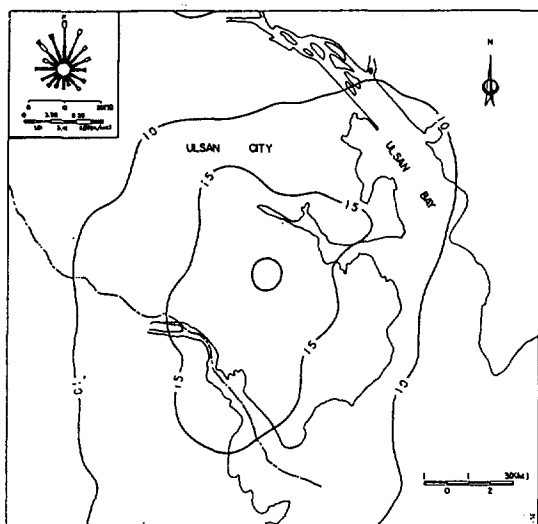


Fig. 3. Isopleth of SO₂ by TCM run(ppb)

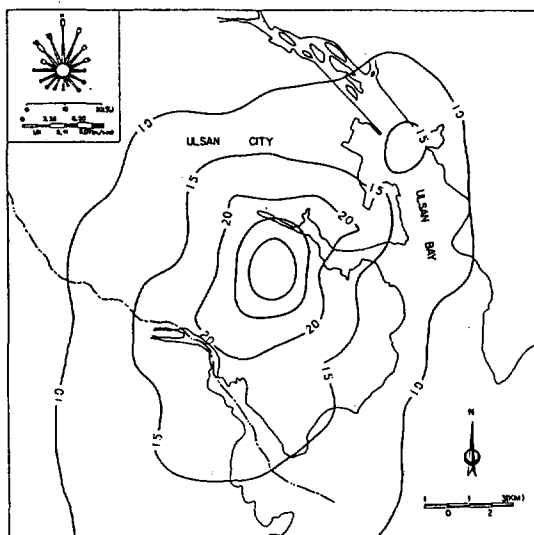


Fig. 4. Isopleth of SO₂ by CDMQC run(ppb)

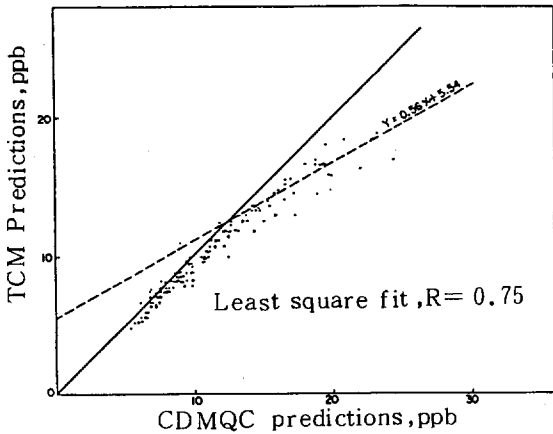


Fig. 5. TCM and CDMQC predictions for SO₂ sources in Ulsan

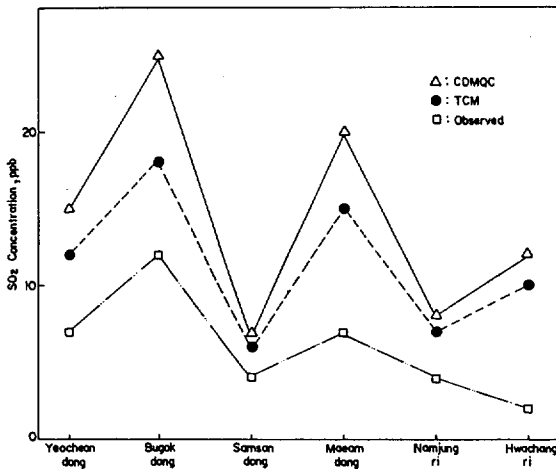


Fig. 6. Predicted and observed annual average SO₂ concentration for 6 stations in Ulsan

따라서 본 연구에서는 이와 같은 두 모델의 차이로 인한 결과를 분석하기 위해 앞에서 설명한 배출원 자료와 기상자료를 이용하여 모델링을 실시하였다. 모델링 결과, 그림 3, 4에서와 같이 분포양상이 비슷하게 나타났으며 단지 CDMQC의 예측치가 TCM에 비해 중심부에서 비교적 높게 나타났다. 그림 5는 울산지역 169개 착지점에서 TCM과 CDMQC 예측치를 통계분석한 것으로 상관계수가 0.75로 높았다.(그림 5)

그림 6은 예측치와 실측치를 비교하기 위한 것으로서 울산지역 6개 실측지점에서 연평균 농도

를 비교해 보면 전 지점에서 CDMQC 예측치가 제일 높았고 다음이 TCM 예측치이고 실측치는 대체로 2~12ppb로 낮게 나타났다. 참고로 환경청에서 조사한 1984년 울산지역의 연평균 SO₂ 실측농도가 24ppb인 것을 보면 실측치가 다소 낮은 것으로 판단된다(그림 6).

CDMQC가 TCM에 비해 높게 예측된 원인은 CDMQC에서 5, 6등급의 σ_z 값 대신에 4등급의 σ_z 값을 사용한다는 점과 50 m 이하인 연돌에 대해 σ_z 의 초기치를 사용함에 따라 오염원과 가까운 거리에서 예상외의 고농도 예측이 발생될 수 있다는 것이다. 한편, 두 모델의 계산속도면에서는 TCM이 28.252초, CDMQC가 235.279초로 TCM이 약 8배 이상 빠른 것으로 나타났다.

5. 결 론

TCM은 지금까지 대기오염도 예측에 널리 사용되어 오던 CDMQC를 개선한 모델로 울산시의 1984년 배출원자료와 기상자료를 이용하여 모델링을 실시한 결과, 두 모델의 상관계수가 0.75로 높게 나타났으며 오히려 CDMQC에서는 σ_z 의 초기치 사용으로 인하여 예상외의 고농도 예측이 발생되어 TCM의 예측치가 더 신뢰성이 높은 것으로 판단된다. 한편, 두 모델의 계산속도면에서는 TCM이 CDMQC에 비해 약 8배 이상 빠르고 출력형태도 오염도분석이 용이하도록 되어 있어 사용하기에 매우 편리하다.

따라서 앞으로 지형조건을 고려하는 등 우리 실정에 맞게 모델을 개선, 발전시켜 나간다면 매우 편리하고 경제적인 모델이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Turner, D.B.,(1979), Atmospheric Dispersion Modeling-A Critical Review, JAPCA, 29,502.
2. Texas Air Control Board, (1980), User's Guide to the Texas Climatological Model, Texas.
3. 한국과학기술원, (1985), 울산공업단지 환경관리를 위한 설문서(대기분야)

4. U.S.EPA.(1977), Compilation of Air Pollution Emission Factors, OAP Publication No. AP-42, Research Triangle Park, N.C.
5. 울산시, (1985), 울산통계연보.
6. 한국과학기술연구소, (1980), 고온공정연구실 자료.
7. 신응배 외, (1986), 울산공업단지 지역의 대기오염에 따른 농작물 영향조사 및 기여도 산출에 관한 연구, KAIST보고서.