

강우분석과 모델링에 의한 원주시 대기오염물질(SO₂) 이동과 침적에 관한 연구

권영식[†] · 송동웅^{*} · 강경호
연세대학교 보건과학대학 환경과학과
^{*}상지대학교 환경공학과
(1995. 12. 21. 접수)

Studies on the Transportation and Wet Deposition of Air Pollutant(SO₂) by Modeling and Precipitation Analysis in Wonju City

Young Sik Kwon[†], Dong Woong Song^{*} and Kyung Ho Kang

^{*}Department of Environmental Science, Yonsei University, Wonju, Korea

[†]Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju, Korea

(Received Dec. 21, 1995)

요약 : 대기확산 모델 TCM(Texas Climatological Model)을 이용하여 SO₂ 오염도를 예측하였으며 강우분석에 의한 SO₂의 침적에 관하여 연구하였다. 원주시의 월별 SO₂ 실측치와 모델예측치의 상관계수는 높은 편이었으며 SO₂는 강우에 의해 세척되어 제거되는데, SO₂ 총배출량에 대한 제거율이 여름철이 가을, 겨울보다 높게 나타났으며, 이는 여름철에 강우량이 많기 때문이고 강우량과 제거율과의 상관계수는 0.68로 나타났다. 강우량이 많은 달은 SO₂ 실측치가 모델예측치보다 상당히 낮아지는 경향을 보였다.

Abstract : The concentration of sulfur dioxide in Wonju City was predicted using TCM (Texas Climatological Model). We have studied the transportation and wet deposition of SO₂ using the TCM and the analysis of rainfalls. The results are as follows :

At the Hak-Sung Dong site in Wonju city, the correlation coefficient between the measured and calculated concentrations were 0.904.

Sulfur dioxide was washed out by wet deposition. The wet deposition ratio to total amount of emitted sulfur dioxide was higher in summer than in autumn and winter seasons due to heavy rainfall in summer. The correlation coefficient between the precipitation and wet deposition of sulfur dioxide was 0.68. The months with greater rainfall showed that the measured concentrations of sulfur dioxide were much lower than the predicted ones.

Although the amount of precipitation in April was smaller than in summer, the wet deposition ratio in April was much higher than any other months, due to the sulfur dioxide that was adsorbed on particulate matter and moisture was transported during the period of yellow sand phenomena from China.

Key words : Acid deposition, Air quality modeling

1. 서론

복잡해진 산업활동, 도시로의 인구밀집 등으로 대기 오염이 날로 심해지고 있어서 대도시 뿐만 아니라 중소 도시에서도 환경기준치를 초과하는 날이 많아지고 있다. 현재 원주시도 SO₂의 경우 환경기준치를 초과하는 날이 많으며 앞으로 영동고속도로의 확장, 중앙고속도로의 개통 등으로 도시규모가 팽창하게 되어 대기 오염이 악화될 가능성이 크다.

SO₂는 인간의 건강문제, 동·식물에 대한 피해문제, 산성미스트 형성으로 인한 스모그와 연무(haze) 문제, 그리고 물질의 부식과 관계가 있다.

건성침적(dry deposition)은 비가 오지 않을 때 발생하는데, 기체상 오염물질인 SO₂, NO₂, HNO₃, 그리고 산성 에어로졸 등은 물 표면이나 식물, 토양, 기타 다른 물질의 표면에 접촉하거나 달라붙어 침적한다. 그 표면에 습기나 물기가 있다면, 가스는 직접 용해되어 산성화되고 마치 산성비가 내린 것과 똑같은 역할을 한다. 구름이 형성되고 빗방울이 만들어질 때는 미세한 입자나 산성입자들이 빗물의 응결핵으로 작용한다. 이것이 황산이 액적으로 혼합되는 하나의 과정이고, 구름 속의 액적은 기체상 SO₂와 NO₂를 충돌 흡수하여 이미 용해된 H₂O₂나 다른 산화제에 의해 산화되므로 결국 빗방울의 pH는 떨어지게 된다. 그리고 빗방울이 구름 아래로 떨어질 때 대기 중의 산성가스나 분진들을 또한 혼입할 수 있으므로 역시 pH는 떨어진다.

SO₂의 가장 심각한 영향 중의 하나는 이러한 과정으로 형성된 산성침적물(acid deposition)이다. 산성침적물은 스칸디나비아, 캐나다, 그리고 미국에 있는 많은 호수의 수중생태계를 파괴해 왔다. 산성침적물은 북아메리카 뿐만 아니라 북유럽의 수천 헥타아르의 산림을 파괴해 왔고 전세계 산업중심지 소재 인공물과

건축물을 부식시켜 왔다. SO₂ 배출량의 감소와 산성침적물의 감소 사이에 정확한 관계가 논의되고 있지만, SO₂ 배출제어가 산성비 문제를 완화하는 데 중요한 역할을 한다는 점에는 의심할 여지가 없다.

본 연구에서는 배출원에서 배출된 오염물질이 대기 중에서 확산, 이동하는 과정을 대기오염확산모델링을 이용하여 추적하였다. 이용된 대기확산모델은 비교적 평탄한 지역에서 널리 적용되고 있는 장기 예측모델인 TCM(Texas Climatological Model)을 선정하였으며 이를 이용해 SO₂ 오염도를 예측하였고 실측치와 비교함으로써 모델의 정확도를 분석하였고 강우에 의한 영향도 검토하였다. 또한 강우 중의 SO₄²⁻ 이온을 정량하여 대기 중에서 SO₂가 습식침적(wet deposition)에 의해 제거되는 양을 조사하였다.

2. 연구내용 및 방법

2. 1. 기상자료 및 측정자료

TCM 모델링에 사용한 기상자료는 원주기상대의 자료를 기초로 6등급으로 구분된 안정도와 16방위로 구분된 풍향 및 6등급으로 구분된 풍속을 조합함으로써 발생할 수 있는 576 가지의 기상변화를 발생빈도수로 계산하여 기상종합빈도계수로 입력하였다. 안정도별 발생빈도는 Turner(1964)의 안정도분류방법에 의해 산출하였으며 Table 1과 같이 원주지역은 대기가 안정한 6등급의 발생빈도가 연간 약 36%로 높게 나타나 대기오염물질의 확산에 불리한 조건임을 알 수 있었다. 또한 풍속별 발생빈도는 Table 2와 같이 미풍인 1등급(1.5m/sec 이하)의 발생빈도가 연간 약 81%로 바람이 매우 약한 것으로 나타났다. 풍향별 발생빈도는 Table 3과 같이 연간 북풍의 발생빈도가 약 15%로 가장 높고 다음이 남서풍으로 약 11% 순이며 계절별로

Table 1. Monthly frequency table for each stability class in Wonju(1992)

STABILITY	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	ANNUAL
1	.0000	.0119	.0295	.0528	.0712	.0806	.0349	.0658	.0389	.0255	.0097	.0000	.0354
2	.1277	.0893	.0914	.1486	.1357	.1153	.0618	.1465	.0750	.1640	.1236	.0712	.1127
3	.1613	.1622	.1290	.1750	.1734	.2181	.1680	.2056	.1861	.2003	.2028	.1236	.1753
4	.1062	.1949	.2433	.1653	.2258	.2111	.3602	.1384	.2305	.0685	.0889	.1801	.1845
5	.1183	.1503	.1787	.0459	.1048	.1014	.1626	.1250	.1181	.0605	.0820	.3118	.1302
6	.4865	.3914	.3279	.4125	.2889	.2736	.2123	.3158	.3514	.4812	.4931	.3132	.3618

Table 2. Monthly frequency table for each wind speed class in Wonju(1992)

WIND SPEED CLASS	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	ANNUAL
1	.8346	.7426	.7311	.6792	.6922	.8209	.8037	.9166	.9237	.8467	.8584	.8508	.8088
2	.1424	.1831	.2136	.2264	.2136	.1445	.1639	.0806	.0750	.1236	.1097	.1250	.1500
3	.0228	.0655	.0510	.0862	.0766	.0334	.0309	.0027	.0014	.0255	.0306	.0242	.0373
4	.0000	.0089	.0040	.0070	.0175	.0014	.0013	.0000	.0000	.0040	.0014	.0000	.0037
5	.0000	.0000	.0000	.0014	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0001
6	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000

Table 3. Monthly frequency table for each wind direction in Wonju(1992)

WIND DIRECTION	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	ANNUAL
N	.1653	.1429	.1613	.1125	.1250	.1305	.1223	.1734	.1653	.1573	.1583	.2213	.1533
NNE	.0645	.0506	.0780	.0820	.0578	.0278	.0363	.0753	.0445	.0470	.0375	.0403	.0536
NE	.0497	.0342	.0484	.0486	.0309	.0264	.0255	.0564	.0417	.0497	.0389	.0336	.0404
ENE	.0417	.0268	.0215	.0264	.0269	.0264	.0336	.0403	.0431	.0403	.0458	.0309	.0337
E	.0470	.0417	.0457	.0459	.0390	.0236	.0376	.0457	.0444	.0511	.0625	.0349	.0433
ESE	.0565	.0461	.0390	.0417	.0470	.0347	.0363	.0417	.0375	.0349	.0458	.0296	.0409
SE	.0349	.0327	.0457	.0333	.0417	.0334	.0484	.0363	.0431	.0484	.0361	.0390	.0395
SSE	.0282	.0432	.0390	.0347	.0376	.0347	.0484	.0363	.0528	.0323	.0333	.0269	.0372
S	.0309	.0372	.0296	.0264	.0403	.0431	.0484	.0430	.0500	.0390	.0361	.0403	.0387
SSW	.0336	.0461	.0632	.0375	.0457	.0820	.1411	.0645	.0653	.0618	.0694	.0578	.0642
SW	.1075	.0923	.1196	.1223	.1398	.1570	.1290	.0887	.0833	.1102	.1070	.1210	.1149
WSW	.0927	.1458	.0941	.1125	.1223	.0931	.0578	.0672	.0597	.0994	.0875	.0820	.0925
W	.0968	.0997	.0658	.0778	.0658	.0861	.0538	.0645	.0764	.0806	.0875	.1035	.0799
WNW	.0618	.0893	.0605	.0847	.0726	.1000	.0860	.0564	.0861	.0632	.0695	.0618	.0741
NW	.0511	.0461	.0443	.0625	.0591	.0611	.0497	.0537	.0486	.0457	.0444	.0376	.0503
NNW	.0376	.0253	.0443	.0514	.0457	.0403	.0457	.0564	.0583	.0390	.0403	.0376	.0436

는 겨울에 북풍계열, 여름에 남풍계열의 바람이 많이 분 것으로 나타났다.

1992년도 원주시 학성동의 SO₂ 측정자료를 모델링 예측치와 비교분석하기 위하여 사용하였다.

2. 2. 우수의 채취 및 분석

1992년 1월부터 12월까지 연세대학교 건물 옥상에서 수동채취기를 이용하여 우수를 채취하였다. 대기 중의 입자상물질이 강수현상에 의하여 세정되는 초기 강우를 채취하여 화학반응 등에 의한 성분의 변화 가능성을 막기 위해 짧은 시간 내에 분석을 하였으며 이것이 어려울 때에는 밀봉하여 냉암소에 보관 후 분석하였

다.

우수의 pH는 pH meter(Orion 720A형)을 사용하여 측정하였으며 pH 4.0, 7.0의 표준용액으로 기기보정을 한 후 사용하였다. SO₄²⁻ 농도 측정방법은 glycerine-alcohol, turbidimetric, thorn method, ion chromatography 등이 있는데, 이 중에서 가장 신뢰도가 높은 ion chromatography로 측정하였다. 강우량은 원주 기상대(1992)의 자료를 사용하였다.

2. 3. SO₂ 배출량 산정

본 연구에서는 원주시의 1992년도 SO₂ 배출원 조사와 기상자료를 분석하여 모델링의 입력자료로 이용하

Table 4. The number of house and consumption calorie for each heating system in Wonju city(1990).

구 분	가구수	소비열량 (10 ³ kcal/가구)
갈탄아궁이(갈탄)	1,194	14,463
연탄아궁이(무연탄)	30,965	14,612
석유보일러(경유)	7,482	18,742
중양난방(B.C)	2,044	18,274
가스보일러(LPG)	1,087	13,445
계	43,496	

였다.

SO₂ 발생원은 가정난방과 취사에 의한 면오염원, 공장에 의한 점오염원, 자동차에 의한 이동오염원으로 구분하여 각각 조사하였으며 연구 대상지역인 원주권을 TM 좌표상에서 1km씩 분할하여 격자별로 배출량을 입력하였다.

면오염원에 의한 배출량은 Table 4의 1990년 원주시 난방시설별 가구수와 연료별 소비열량을 기준으로 전체 연료 사용량을 산출하였고 연료별 배출계수(U.S. EPA, 1988)와 가구증가율 등을 적용하여 원주시 총 SO₂ 배출량을 추정한 결과 연간 평균 배출량은 54.5g/sec로 추정되었다. 이를 원주시 통계자료 및 행정구역을 참조(원주시, 1993)하여 각 격자의 주거인구비율에 따라 SO₂ 총 배출량을 분포시켰으며 월별 발생량 비율은 월별 가구당 연료사용량(에너지 총조사 보고서, 1990)을 기준으로 배분하였다.

이동오염원 배출량은 차량 주행에 따른 배출량 산정을 위해 MOBILE2 차량분포식을 국내실정에 맞게 변형시켜 LDGV(경량 휘발유 차량), LPGV(경량 LPG 차량), LDDV(경량 경유 차량), LDDT(경량 경유 트럭), HDDV(중량 경유 차량), HDDT(중량 경유 트럭)의 6등급으로 분류하였다(원주시, 1993). Table 5는 1990년 원주시의 등급별 차량대수와 SO₂ 배출계수(원주시, 1993)로 여기에 자동차 증가율, 차종별 장거리 운행비율, 평균 주행거리 등을 고려하여 이동오염원에 의한 SO₂ 배출량을 추정한 결과 총 21.8g/sec로 추정되었으며 이를 원주시 일일통행자료(원주시, 1993)를 이용하여 각 격자별로 배분시켰다.

점오염원에 의한 오염물질배출량은 원주시 대기오염물질 배출업소카드의 연료사용량을 근거로 산출하

Table 5. Volume of vehicle and SO₂ emission factor in 1990.

	LDGV	LPGV	LDDV	LDDT	HDDV	HDDT
차량대수	6,060	682	893	347	701	1,033
배출계수 (g/km)	0.43	-	0.68	0.80	2.34	2.04

였다. 원주시에 소재한 삼양식품, 금성콘크리트공업 등 18개 대규모 배출업소를 선정하여 오염원별 연료사용량, 굴뚝높이 및 직경, 배출가스의 속도와 온도 등을 조사하였으며 오염물질 배출계수(U.S. EPA, 1988)를 적용하여 SO₂ 배출량을 산정한 결과 원주지역의 점오염원에 의해 배출되는 SO₂ 배출량은 연간 평균 70.4g/sec로 추정되었다. 위와 같이 추정된 원주지역의 점, 면, 이동오염원에 의해 배출되는 SO₂ 배출량을 격자별로 배분하여 도시하면 Fig. 1과 같으며 시내 중심부인 중앙동 일대와 서북방향 우산공단지역에서 발생량이 많은 것을 알 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3. 1. 모델 예측치와 실측치의 비교

면오염원에 의해 SO₂를 가장 많이 배출하는 지역은 중평동이고 점오염원에 의해 가장 많이 배출하는 지역은 우산동이다. 가장 높은 농도를 나타내는 지역은 학성동으로 연간 평균 농도가 101ppb로 예측되었는데, 장기환경기준치 30ppb를 훨씬 초과하고 있다. Fig. 2는 SO₂ 자동측정소가 위치한 학성동의 실측치와 모델링 예측치를 월별 농도로 나타낸 것이다. 실측치의 연평균 농도는 28ppb이고 모델링 예측치의 연평균 농도는 40ppb로 실측치보다 다소 높게 나타났다. Fig. 3은 학성동의 24시간 단위로 측정된 월평균 실측치와 월평균 예측치의 상관관계를 알기 위해 회귀분석을 한 결과이다. 회귀분석을 한 결과의 상관계수는 0.904로 두 값의 월별 상관은 비교적 좋은 것으로 나타났다.

3. 2. 강우에 의한 SO₂ 제거

SO₂는 대기에서 산화되어 sulfate 화합물을 형성한다. 이 산화과정은 homogeneous와 heterogeneous 경로를 둘 다 포함한다. 탄화수소나 오존의 분해로 생성되는 자유메디칼은 가스상에서 SO₂와 쉽게 반응한다. 광

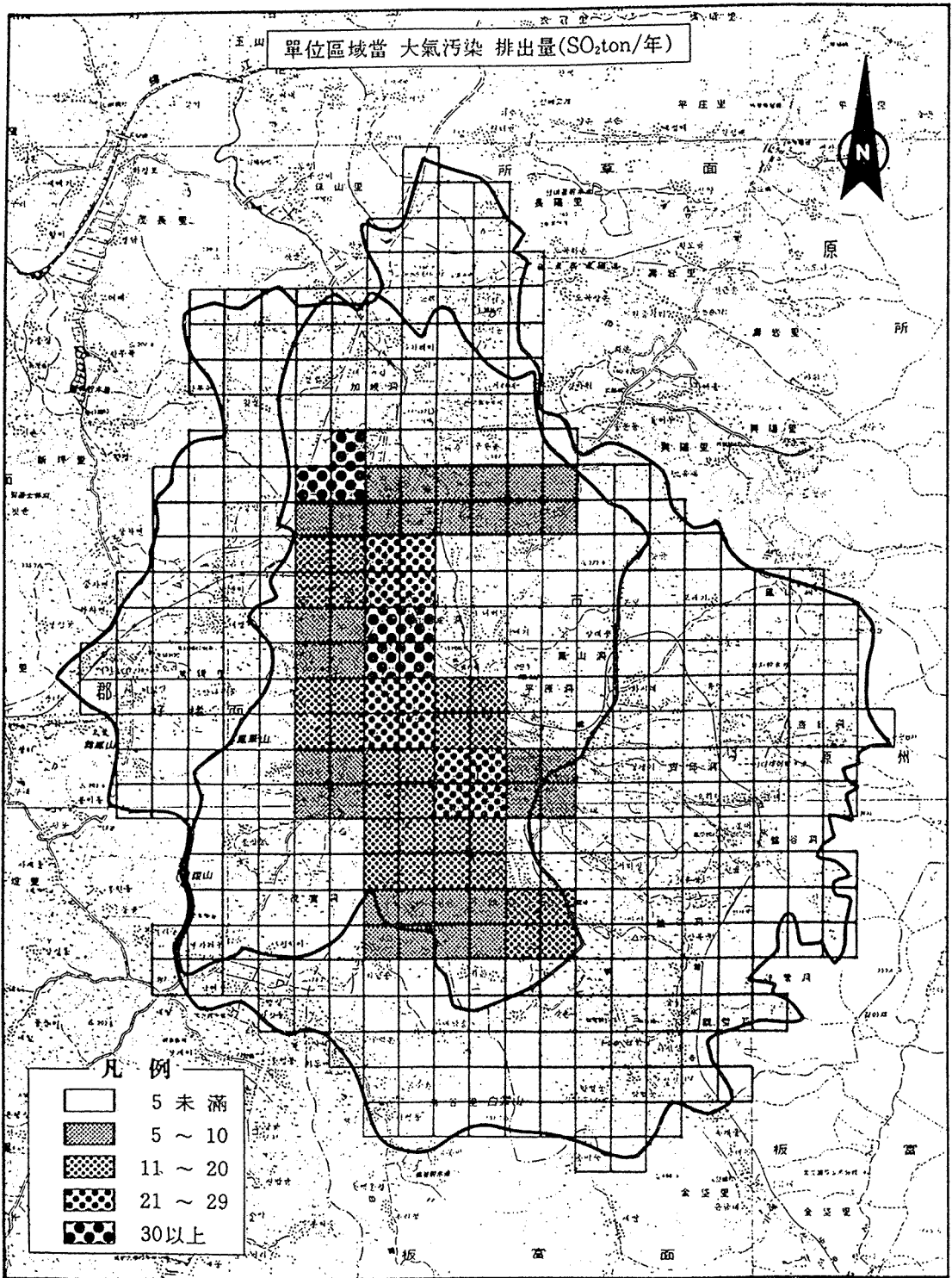


Fig. 1. SO₂ emission density(ton/yr · km²) map (Wonju, 1992)

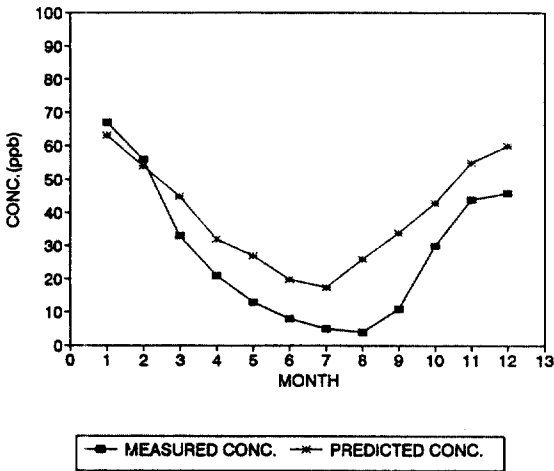


Fig. 2. Monthly variation of measured and predicted SO₂ concentrations at Hak-Sung Dong, Wonju in 1992.

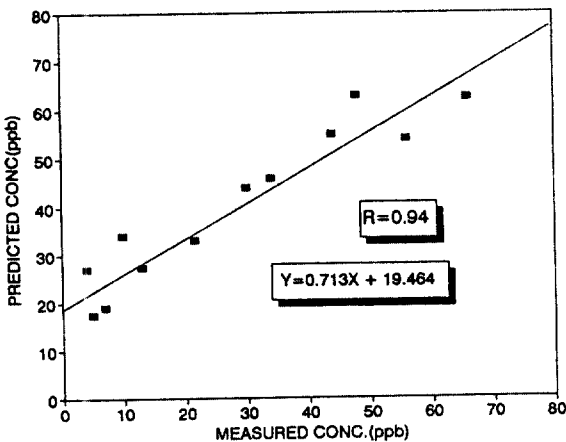


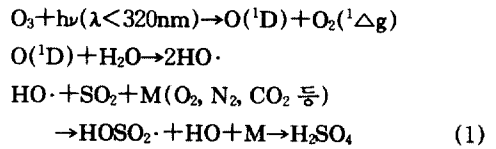
Fig. 3. Regression line of measured vs. predicted SO₂ concentrations at Hak-Sung Dong, Wonju in 1992.

화학반응 중간물질인 OH와 HO₂는 SO₂와 반응하여 HSO₃와 SO₃와 같은 반응성이 큰 중간물질을 생성하여 대기에서 수분과 반응하여 황산에어로졸을 형성한다 (Bufalini, 1971). Heterogeneous 반응은 물방울이 SO₂를 녹여서 액체상에서 황산을 형성한다. 이것이 강우와 함께 포함되어 강우는 산성을 띠게 되고 SO₂는 습식침적에 의해 제거되는 것이다.

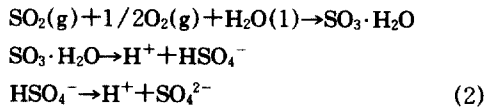
대기 중에서 SO₂의 반응 메커니즘을 살펴보면 다음과 같다.

- 금속촉매에 의해 SO₂의 액체상 산화(Foster, 1969)
- 검댕입자에 흡착된 SO₂의 촉매 산화(Novakov, et al., 1974)
- OH 라디칼에 의한 기체상산화(Calvert, et al., 1975)
- 오존, NO_x, 탄화수소의 광화학반응 중간물질에 의한 기체상 산화(Cox, et al., 1972)
- HO₂, RO₂, RO 등의 중간물질에 의한 기체산화(Cox, et al., 1972).

대표적인 반응은 다음과 같다.



여기서, M은 반응물의 과잉 에너지를 제거하여 생성물을 안정화시키는 역할을 한다.



(2)의 첫번째 반응은 활성화 에너지가 커서 매우 느리게 진행되는데, MnSO₄나 FeSO₄, MgO, Fe₂O₃, Mn₂O₃ 등의 금속산화물이 있으면 촉매작용을 하여 산화반응이 매우 빨라진다. SO₂가 SO₃로 되면 입자의 크기는 그리 크지 않으나 SO₃에서 H₂SO₄나 황산염 또는 황산미스트가 침전하게 되거나 강우시 강우에 포함되어 침전하게 된다.

Table 6은 강우량과 SO₄²⁻ 이온의 농도로 원주시에서의 '92년도 SO₂ 발생량 및 강우에 의한 SO₂ 제거량과 제거율을 나타낸 것이다. 강우 중의 SO₄²⁻ 농도는 겨울철이 평균 16.7ppm으로 여름철의 2.7ppm보다 훨씬 높지만 SO₂ 총배출량에 대한 강우에 의한 대기 중의 SO₂의 제거율은 여름철이 12.6%, 겨울철이 6.1%로 여름철이 오히려 많이 제거되어 Fig. 2에서 예측치와 비교해 볼 때 여름철의 실측치가 겨울철보다 상당히 감소했음을 알 수 있다. 1992년도 원주시에서 SO₂는

Table 6. Monthly SO₂ wet deposition by precipitation in 1992(Wonju city area : 84.18km²)

월	원주시 SO ₂ 발생량(kg)	강수량(mm)	SO ₄ ²⁻ 농도 (g / m ³)	단위 면적당 SO ₄ ²⁻ 제거(g / km ²)	원주시 강우에 의한 SO ₂ 제거량(kg)	습식 제거율 (%)
1	55,3893	17.2	18.329	315,264	17,693	3.19
2	500,049	32.1	16.255	375,484	21,072	4.21
3	494,792	21.5	43.696	939,461	52,723	11.59
4	375,840	76.0	48.553	3,690,025	207,084	55.10
5	322,212	102.0	13.190	1,348,010	75,650	23.48
6	221,616	108.5	3.670	398,204	22,347	10.08
7	226,593	227.4	2.430	552,637	31,014	13.69
8	238,110	267.3	1.996	533,616	29,947	12.58
9	307,411	150.1	4.212	632,293	35,484	11.54
10	404,974	84.0	6.488	544,965	30,583	7.55
11	467,597	29.5	10.506	309,920	17,393	3.72
12	541,037	78.6	15.851	1,245,892	69,919	12.92
계	4,614,124	1185.4			610,909	

외부로의 오염물질 유출입량을 무시할 경우 강우에 의해 SO₂ 배출량의 7.6%인 약 61만 kg이 제거되는 것으로 나타났으며, 이것이 산성 침적물이 되어 강우의 pH를 떨어뜨리는 주된 원인이 되고 있다. 여름철과 겨울철의 SO₂ 배출량비는 1 : 2.4이고 SO₄²⁻ 농도비는 1 : 6.3으로 강우량이 적고 강우빈도도 적은 시기인 겨울철이 같은 양의 강우로 비교할 때 배출량비보다 SO₂를 더 많이 흡착하여 강우의 pH를 여름철보다 더 떨어뜨리는 것을 알 수 있다. 강우량의 pH를 측정할 결과 여름철 강우의 평균 pH는 6.36이었고, 겨울철은 4.60이었다.

Fig. 4는 SO₂ 배출에 대한 강우에 의한 SO₂ 제거율을 월별로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 4월이 다른 달에 비해 월등히 제거율이 많은데, 그것은 SO₂ 발생원이 원주시외에 황사시 중국에서 배출된 SO₂가 황해를 이동하면서 분진과 수분에 의해 흡착되어 황산염의 형태로 장거리 이동을 한 것을 알 수 있다(정용승, 김태균, 1991 : 권영식, 허원범, 1993). 그밖에 5월도 제거율이 다른 달보다 높고 3월은 SO₄²⁻ 이온의 농도가 상당히 높은 것을 볼 때 역시 황사의 영향을 받은 것으로 판단된다. SO₂가 앞에서의 반응을 일으킨 후 분진이나 물방울에 흡착되어 황산염, 황산미스트, 황산에어로졸

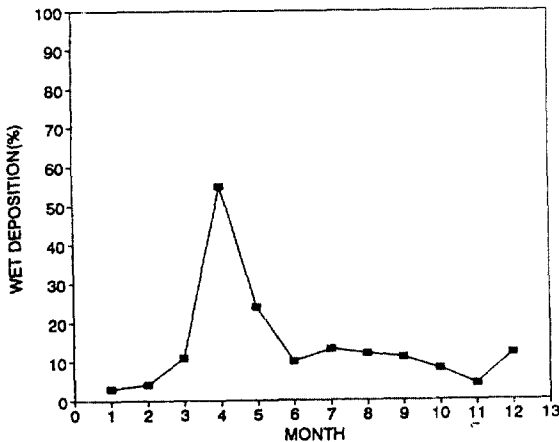


Fig. 4. Monthly wet deposition rate for total SO₂ emissions in 1992.

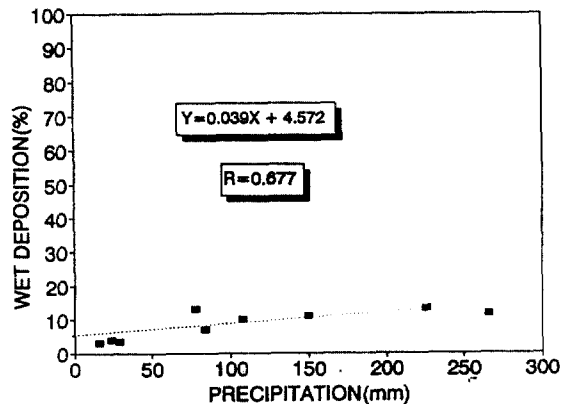


Fig. 5. Regression line of precipitation vs. wet deposition rate by precipitation in 1992.

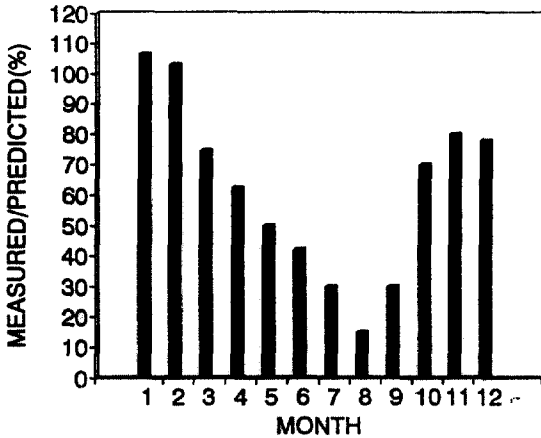


Fig. 6. Monthly percentage of measured concentrations to the predicted ones in 1992.

상태로 장거리 이동을 하는 것이다.

Fig. 5는 강우량과 강우에 의한 대기오염물의 제거(wash out)율을 회귀분석한 결과이다. 단, 3, 4, 5월은 황사의 영향을 받는 것으로 생각되어 데이터에서 삭제했다. 상관계수값은 0.68이었고 강우량이 많을수록 제거가 많이 되는 것을 보여 주나 세척효과는 강수량, 오염농도, 용해도의 함수이므로 정확한 비례관계는 성립하지 않았다.

Fig. 6은 월별로 예측농도에 대해서 측정농도를 백분율로 나타낸 것인데, Table 6의 강우량과 비교해 볼 때 강우가 많은 달이 예측했던 농도보다 상당히 SO₂ 농도가 감소함을 알 수 있다. Fig. 7은 강우량과 예측농

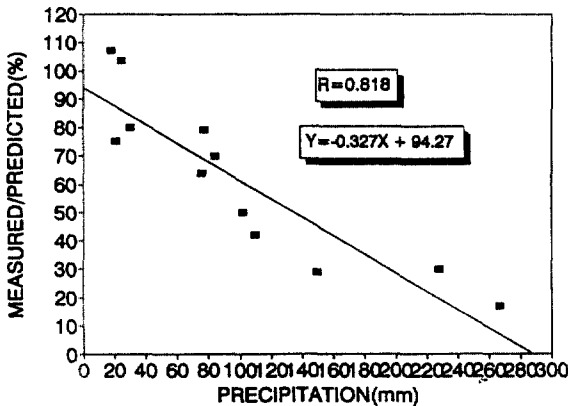


Fig. 7. Regression line of precipitation vs. percentage of measured concentrations to the predicted ones in 1992.

Table 7. Seasonal averaged SO₂ concentrations for the following days of precipitation event and the days except for rainy day

계절	강우다음날 SO ₂ 농도 (ppb)	비강우시 SO ₂ 농도 (ppb)
봄	18	24
여름	5	6
가을	22	30
겨울	44	62
연평균	20	32

도에 대한 측정농도의 백분율을 회귀분석한 결과인데, 상관계수는 0.82이었고 역상관관계를 나타내었다.

박일수(1990)에 의하면 극소농도 발생일의 하루 전에 강수가 나타난다고 하였는데, 강우에 의한 세척효과와 영향을 알기 위해 비가 온 다음 날의 SO₂ 농도와 비강우시의 계절별 평균치를 비교해보았다. Table 7은 1992년도 강우 다음 날과 비강우시의 학성동지점의 SO₂ 농도를 계절별 평균값으로 나타낸 것이다. Table 7에서 보면 강우시가 비강우시보다 연평균농도가 약 38%(12ppb) 이상 낮은 것을 알 수 있다.

4. 결론

TCM 모델링과 강우분석을 이용하여 원주지역에서 SO₂의 이동 및 습식침적에 관한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 학성동의 실측치와 모델링예측치와의 월별 상관은 비교적 높았으며($r=0.904$) 시내중심지역은 연평균 예측치가 장기환경기준치인 30ppb를 훨씬 초과하였다.
- 2) 강우의 SO₄²⁻ 이온의 농도는 겨울철이 16.8ppm, 여름철이 2.7ppm으로 SO₂ 배출량이 많은 겨울철이 훨씬 높았다. 여름철과 겨울철의 배출량비도는 1:2.4인데, SO₄²⁻ 농도비는 1:6.3으로 강우량이 적고 강우빈도도 적은 겨울철이 같은 양의 강우로 비교할 때 배출량에 의한 차이보다 SO₂를 더 많이 흡착하여 SO₄²⁻ 이온의 농도가 높아지고 따라서 강우의 산성도를 증가시킨다. 강우의 pH를 측정 한 결과는 여름철은 평균 6.36, 겨울철은 4.60이었다.

- 3) SO₂는 강우에 의해 세척되어 제거(wash out)되는데, SO₂ 총배출량에 대한 제거율이 여름철이 가을, 겨울보다 높다. 이것은 여름철이 강우량이 많기 때문이고 강우량과 제거율과의 상관계수는 0.68로 나타났으며, 강우량이 많은 달은 SO₂ 실측치가 모델링예측치보다 상당히 낮아지는 경향을 보였다.
- 4) SO₂ 발생량에 대한 강우에 의한 제거율을 볼 때 강우량이 여름보다 적음에도 불구하고 4월의 제거율(55.1%)이 유난히 높은 것은 원주권 밖에서 오염물질이 유입되었다고밖에 볼 수 없는데, 황사시 SO₂가 분진과 수분에 흡착되어 장거리 이동하는 것으로 생각된다.
- 5) '92년도 1년간 강우 다음 날의 농도평균값이 비강우시보다 연평균농도가 약 38% 정도 낮았는데, 이것을 보면 강우가 상당한 양의 SO₂를 습식제거함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 권영식, 허원범, "원주지역의 산성강우현상에 관한 연구", *한국기상학회지*, 29권 2호, 127-132(1993).
2. 박일수, "서울지역 겨울철 SO₂ 농도의 지배인자에 관한 연구", *연세대학교 천문대기과학과 박사학위논문*, 40pp, (1990).
3. 원주기상대, *기상월보*, 1992년 1월-2월, 10pp, (1992).
4. 원주시, *통계연보*, (1993).
5. 원주시, 원주시 환경보전 종합계획, (1993).
6. 원주시, 교통정비 기본계획, (1993).
7. 정용승, 김태군, "대기오염의 장거리 이동 사례연구: 황사, TSP, Sulfate의 발원지 추적", *한국대기보전학회지*, 7권 3호, 197-202(1991).
8. Bufalini, M., "Oxidation of Sulfur Dioxide in Polluted Atmospheres-A Review", *Environ. Sci. Tech.*, 5, 685-700(1971).
9. Calvert, J. G. and R. D. McQuigg., "Computer Simulation of the Rates and Mechanisms of Photochemical Smog Reaction", *Int. J. Chem. Symp.*, 1, 113-154(1975).
10. Cox, R. A. and S. A. Penkett., "Aerosol Formation from Sulphur Dioxide in the Presence of Ozone and Olefinic Hydrocarbons", *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, 68, 1735-1753(1962).
11. Foster, P. M., "The Oxidation Of Sulphur Dioxide in Power Station Plumes", *Atmos. Environ.*, 3, 157-175(1969).
12. Novakov, T., S. G. Chang and A. B. Harker., "Sulfates as Pollution Particulates: Catalytic Formation On Carbon(Soot) Particles", *Science.*, 186, 259-261(1974).
13. Turner, D. B., "A Diffusion Model for on Urban Area", *J. of Applied Meteorology*, 3, 83-91(1964).
14. U. S. EPA, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. OAP Publication No. AP-42, Research Triangle Park, N. C(1988).