

## 미세입자 (PM<sub>2.5</sub>) 측정시 발생하는 질산염 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 휘발에 관한 연구 A Study on the Volatilization of Particulate Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) During Fine Particle (PM<sub>2.5</sub>) Measurement

강 병 옥\* · 이 학 성<sup>1)</sup>

국립청주과학기술대학 환경공학과, <sup>1)</sup>서원대학교 환경과학과  
(2002년 1월 11일 접수, 2002년 6월 20일 채택)

Byung-Wook Kang\* and Hak Sung Lee<sup>1)</sup>

Dept. of Environmental Industry, Chongju National College of Science and Technology

<sup>1)</sup>Dept. of Environmental Science, Seowon University

(Received 11 January 2002, accepted 20 June 2002)

### Abstract

Fine particles ( $d_p < 2.5 \mu\text{m}$ ) were measured using an annular denuder system (ADS) in Chongju. The data set was collected on fifty-eight different days with a 24-hr sampling period from October 27, 1995 through August 25, 1996. Particulate nitrate in the ADS was also measured on teflon and nylon filters in series behind denuders to collect HNO<sub>3</sub>, HNO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub>. From this study, the mean concentration of particulate nitrate of PM<sub>2.5</sub> in the ADS were seen with the following order: winter (5.05) > fall (4.36) > spring (3.92) > summer (1.10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Nitrate losses, which calculated from the ratio of nylon filter nitrate to the sum of teflon and nylon filter nitrates, varied in the following manner: summer (72.2%) > spring (42.6%) > fall (23.5%) > winter (0.4%). Especially, gaseous nitric acid was dominant at temperature higher than 8°C while particulate nitrate was major species in total nitrate below that temperature. This indicates the particulate nitrate loss is strongly correlated rather with ambient temperature.

**Key words** : Nitrate, volatilization, teflon filter, nylon filter, PM<sub>2.5</sub>, annular denuder system, dichotomous sampler

### 1. 서 론

미국 EPA는 현재의 대기환경기준(NAAQS: National Ambient Air Quality Standard)인 PM<sub>10</sub>의 시행 결과 기준치 이하인 경우에도 호흡기 관련 질병의 발생률 등이 감소되지 않고 있다는 인체보건학적인

연구에 기초하여 1997년 추가적으로 PM<sub>2.5</sub>에 대한 새로운 기준을 설정함에 따라 PM<sub>2.5</sub>를 측정하기 위한 새로운 측정방법(Reference method)으로 제시된 것이 2.5  $\mu\text{m}$  cut-diameter를 가진 사이클론을 통하여 16.7 L/min 유량으로 24시간 동안 테프론 여과지에 시료를 채집하는 것으로 규정하고 있다(U.S. EPA, 1997).

미세입자에 대한 중요성이 인식되면서 국내에서도 PM<sub>2.5</sub>에 대한 활발한 연구가 수행되고 있으며

\* Corresponding author  
Tel : 043-820-5275, E-mail : bwkang@cjnc.ac.kr

대기 중 미세먼지의 농도 및 화학적 특성연구에 테프론 여과지를 이용하여 시료를 채취하고 있다(김창환 등, 2000; 박승식 등, 2000; 여현구 등, 2000; 김병화와 김동술, 1999; 강병욱 등, 1997). 미세먼지의 화학적 성분 중 이온성분인 질산염( $\text{NO}_3^-$ )은 미세먼지를 구성하는 주요 성분이며 특히, 도시지역의 경우 자동차 등의 지속적인 증가로 전구물질인 질소산화물의 농도가 증가하고 있는 추세이기 때문에 질산염의 농도 또한 계속적으로 증가할 가능성이 크다. 그러나, 위와 같은 측정방법에 의한 미세먼지 측정시 수용성 성분의 중요 물질인  $\text{NO}_3^-$ 의 정량에 많은 문제점을 내포하고 있다. 일반적으로 미세먼지의 시료채취시  $\text{NO}_3^-$ 는 여과지의 종류 및 대기조건(기온, 상대습도 등)에 따라서 부의 오차(negative artifact) 및 정의 오차(positive artifact)가 발생할 수 있으며, 황산화물, 질소산화물 그리고 수분 등으로 인하여 필터상에서 발생하는 정의 오차는 중성인 테프론 여과지를 이용함으로써 최소화 시킬 수 있으나,  $\text{NO}_3^-$ 의 시료 채취시에는 여과지상에 포집된 후 휘발에 의해  $\text{NO}_3^-$ 의 손실을 초래하는 부의 오차는 현재의 측정시스템으로는 상당한 손실을 유발하는 것으로 알려져 있다(Chang *et al.*, 2000; Brook and Dann, 1999; Hering and Cass, 1999; Kim *et al.*, 1999; Matsumoto and Okita, 1998; Tsai and Perng, 1998). 여과지상에서  $\text{NO}_3^-$ 가 휘발되는 가장 주요한 원인으로는 온도와 상대습도를 들 수 있으며 기온이 높고( $30^\circ\text{C}$  이상) 상대습도가 낮은(40% 이하) 경우 여과지상의 입자상  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 가 휘발성이 크기 때문에 쉽게 휘발되어 손실이 발생하게 되며 온도가 낮거나 상대습도가 높은 경우에는 휘발손실이 감소하거나 발생하지 않는다. 예를 들어 캘리포니아에서 측정된 바에 따르면 온도가 높은 여름철에  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 의 대부분인 30~60%가 휘발되는 것으로 보고되었다(Chow *et al.*, 1994a). 여과지상에서의 화학적 반응에 의해서도 영향을 받을 수 있는데 즉, 다른 산성물질(입자상 황산, 가스상 염산 등)에 의해 산성도가 증가하면  $\text{NO}_3^-$ 는 쉽게 휘발되어 손실이 발생하기도 한다(Koutrakis *et al.*, 1992; Appel and Tokiwa, 1981). 위의 여러 가지 요인으로 인하여 현재 미세먼지 중  $\text{NO}_3^-$ 의 농도는 실제 농도보다 과소 평가되고 있다고 볼 수 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는  $\text{PM}_{2.5}$ 의 시료채

취시 테프론 여과지에서 휘발되는  $\text{NO}_3^-$ 의 휘발손실(nitrate loss)과 온도와의 관계를 계절별로 정량화하여 대기정체수립에 필요한 정확한 기본자료를 확보하고 보다 정확한 정량을 위한 측정방법을 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

본 연구는 1995년 10월 9일부터 1996년 8월 25일까지 1년 간에 걸쳐서 수행하였으며, 가을(95년 10월 9일부터 11월 18일까지), 겨울(96년 1월 6일부터 2월 14일까지), 봄(96년 4월 1일부터 5월 22일까지)과 여름(96년 7월 24일부터 8월 25일까지)까지 총 58회에 걸쳐서 미세먼지( $\text{PM}_{2.5}$ )의 화학적 특성을 파악하기 위하여 이루어졌다(강병욱 등, 1997). 질산염 휘발손실을 정량하기 위한 자료는 시료채취 전기간에 걸쳐 이루어진 디누더 측정기(University Research Glassware)의 분석결과를 이용하였다. 디누더 측정기는 10 L/min의 유량으로 2.5  $\mu\text{m}$  절단입경을 가진 싸이클론을 통하여 조대입자(입경 > 2.5  $\mu\text{m}$ )를 제거한 후에 산성가스들과  $\text{NH}_3$ 는 디누더를 이용하여 채집하고, 가스성분과 분리된 미세먼지(입경 < 2.5  $\mu\text{m}$ )는 47 mm 직경의 테프론 여과지(1  $\mu\text{m}$  pore size, Gelman Science)에 채집하였다. 시료 채취 중 테프론 여과지에서 휘발되는 입자상  $\text{NO}_3^-$ 는 테프론 여과지의 후단에 위치한 47 mm 직경의 나일론 여과지(1  $\mu\text{m}$  pore size, Gelman Science)에 의하여 채집된다. 측정시간은 측정 당일 오전 8시부터 다음날 8시까지 24시간 동안 채집하였으며 측정에 사용된 온도와 상대습도 등 기상자료는 측정지점으로부터 1 km 북북서쪽에 위치한 청주시 기상관측소 자료를 이용하였다. 시료 채취에 사용된 디누더 장치, 시료 채취 장소, 시료 정량을 위한 전처리 방법 및 분석방법에 대하여는 이학성과 강병욱(1996)에 상세히 기술하였다. 테프론 여과지와 나일론 여과지를 동시에 사용하는 디누더 측정기를 이용하여 채집된 입자상  $\text{NO}_3^-$ 의 결과를 비교하기 위하여 한 개의 테프론 여과지(37 mm, 1  $\mu\text{m}$  pore size, Gelman Science)만 사용하는 Dichotomous sampler(Graseby Andersen, Model 241)도 시료 채취 전 기간에 걸쳐 동시에 가동하였다. 미세먼지 측정을 위

한 Dichotomous sampler의 유량은 16.7L/min이다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 측정된 사계절에 대한 측정자료는 강병욱 등(1997)의 논문에서 미세입자의 농도, 산성 가스상 물질 및 이온성분의 농도를 요약하여 상세히 나타내었다. 표 1에는 디누더 측정기를 이용하여 측정된 테프론 및 나일론 여과지에서 측정된 질산염의 농도, 총 질산염의 농도, 질산염 손실률과 측정기간의 평균온도 등을 계절별로 요약하여 나타내었다. 여기에서 총 질산염의 농도는 테프론 여과지에 채집된 질산염의 농도와 나일론 여과지에 채집된 질산염의 합으로 식 (1)과 같으며, 시료 채취시의 질산염 손실은 총 질산염농도에서 나일론 여과지에 채집된 비율을 의미하며 식 (2)와 같다.

$$Total\ nitrate = Teflon\ filter\ nitrate + Nylon\ filter\ nitrate \quad (1)$$

$$Nitrate\ loss = (Nylon\ filter\ nitrate / Total\ nitrate) \times 100 \quad (2)$$

테프론 및 나일론 여과지에서 채집된 총 질산염의 평균농도는 3.63 µg/m<sup>3</sup>이며 계절적으로는 겨울 (5.05 µg/m<sup>3</sup>) > 가을 (4.36 µg/m<sup>3</sup>) > 봄 (3.92 µg/m<sup>3</sup>) > 여름 (1.10 µg/m<sup>3</sup>)의 순서로 나타났다. Kim *et al.* (1999)이 LA 시내지역에서 측정한 연평균 질산염의 평균농도가 7.7 µg/m<sup>3</sup>이었고, Chow *et al.* (1994b)이 배경지역을 제외한 캘리포니아 8개 지역에서 측정한 질산염 농도인 4.97~28.84 µg/m<sup>3</sup>과 비교하면 국내의 질산염 농도는 매우 낮은 것을 알 수 있다. 시료채취 중 테프론 여과지에서 휘발되어 나일론 여과지에 채취된 평균농도는 0.87 µg/m<sup>3</sup>으로 Kim *et al.* (1999)이 LA 시내지역에서 측정한 평균 2.33 µg/m<sup>3</sup>에 비하여 낮은 값을 보였으며 이는 질산염 농도가 외국에 비하여 상대적으로 낮은 농도이기 때문이다. 나일론 여과지에 채집된 질산염 휘발의 계절별 경향은 봄 (1.69 µg/m<sup>3</sup>) > 가을 (0.97 µg/m<sup>3</sup>) > 여름 (0.77 µg/m<sup>3</sup>) > 겨울 (0.06 µg/m<sup>3</sup>) 순서로 나타났으며, 질산염 농도의 계절변동과는 다른 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 겨울의 경우에는 전체 15회 측정치 가운데 질산염 손실은 1회의 경우

**Table 1. Seasonal variations of nitrate loss on teflon filter.**

Category	Season	Concentration (µg/m <sup>3</sup> )			N <sup>b</sup>
		Average	SD <sup>a</sup>	Range	
Teflon filter nitrate	Fall	3.39	3.35	0.48~11.90	15
	Winter	4.99	3.54	1.50~13.69	15
	Spring	2.22	1.20	0.83~4.92	15
	Summer	0.32	0.36	0.00~1.13	13
Nylon filter nitrate	Fall	0.97	1.16	0.00~4.01	15
	Winter	0.06	0.23	0.00~0.90	15
	Spring	1.69	1.01	0.59~4.15	15
	Summer	0.77	0.50	0.15~1.51	13
Total nitrate <sup>c</sup>	Fall	4.36	4.09	0.96~15.91	15
	Winter	5.05	3.70	1.50~14.59	15
	Spring	3.92	1.64	2.09~7.54	15
	Summer	1.10	0.78	0.21~2.48	13
Nitrate loss <sup>d</sup> (%)	Fall	23.5	26.2	0.0~72.1	15
	Winter	0.4	1.5	0.0~6.1	15
	Spring	42.6	16.1	20.6~83.2	15
	Summer	72.2	15.0	18.9~100.0	13
Temperature (°C)	Fall	10.6	4.5	1.4~16.3	15
	Winter	-2.4	4.3	-9.5~8.1	15
	Spring	12.1	4.8	4.0~20.0	15
	Summer	27.7	1.6	24.0~30.2	13
Relative humidity (%)	Fall	62.9	7.7	45.9~74.8	15
	Winter	64.7	11.4	44.8~91.5	15
	Spring	54.5	12.4	37.5~81.1	15
	Summer	70.1	6.3	54.5~80.3	13

<sup>a</sup> Standard deviations

<sup>b</sup> Number of samples

<sup>c</sup> Total nitrate = Teflon filter nitrate + Nylon filter nitrate

<sup>d</sup> Nitrate loss = (Nylon filter nitrate / Total nitrate) × 100 (%)

에만 나타났다. 총 질산염 농도에 대한 테프론 여과지에서 휘발되어 나일론 여과지에 채취된 비율인 질산염 손실률은 평균 34%를 보였으며 이는 Tsai and Perng (1998)이 대만에서 측정한 21% 질산염 손실률에 비하여 높았으며, Brook and Dann (1999)이 캘리포니아 지역에서 측정한 10~50% 질산염 손실률과는 유사함을 알 수 있다. 손실률의 계절변동은 여름 (72.2%) > 봄 (42.6%) > 가을 (23.5%) > 겨울 (0.4%)의 순서로 나타났다(표 1). 이는 측정기간 중 계절별 평균온도가 여름 (27.7°C) > 봄 (12.1°C) > 가을 (10.6°C) > 겨울 (-2.4°C)의 순서로 나타나 계절별 질산염 손실률과 온도경향이 정확히 일치하는 것을 알 수 있으며 위와 같은 사실은 질산염 손실이 온도와 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것이다. 또한

봄철과 가을철의 온도차이는 평균온도를 기준으로 2°C 이내이었음에도 불구하고 손실률의 차이는 봄철이 가을철에 비하여 20% 정도 높은 값을 보였다. 이는 질산염의 휘발과 관련하여 온도 다음으로 상대습도가 상당한 영향을 주는 인자로서 상대습도가 낮으면 낮을수록 휘발손실률은 증가하는 것으로 알려져 있다(Forrest *et al.*, 1980). 본 측정기간 중 봄과 가을철의 상대습도는 각각 54%, 63%로 평균 9%의 차이를 보이는 것으로 보아 봄철의 경우 가을에 비하여 상대습도가 낮았기 때문에 휘발손실이 더욱 크게 나타난 것으로 보여진다.

그림 1에는 전체 측정자료의 휘발손실을 알아보

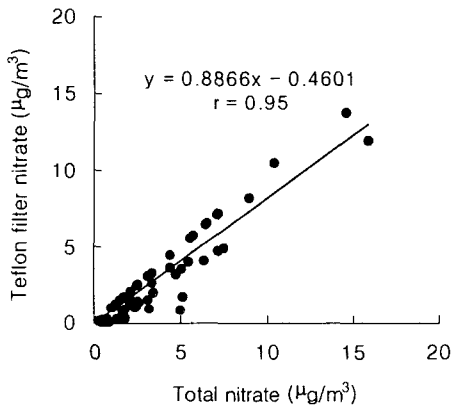


Fig. 1. Comparison of teflon filter nitrate and total particulate nitrate (sum of teflon and nylon filter nitrates).

기 위하여 테프론 여과지에서 측정된 질산염과 총 질산염에 대하여 나타내었고, 그림 2에는 여름과 겨울에 대하여 나타내었다.

그림 1에 의하면 전체 측정자료의 66%가 테프론 여과지에서 휘발손실이 발생하여 1:1 대응직선의 아래쪽에 위치하는 것을 볼 수 있다. 질산염 휘발손실이 발생하지 않은 경우는 총 20회로 겨울과 가을에 각각 14회, 6회 발생하였다. 전체 측정자료에 대한 직선식을 구해본 결과 기울기가 0.88 ( $y = 0.88x - 0.46$ )로 1 이하의 값을 나타내었으며 이는 대만에서 Tsai and Perng (1998)이 본 연구와 같은 시료채취장치를 이용하여 평균 온도 23°C에서 측정한 결과 얻은 질산염 손실률 기울기가 0.88 ( $y = 0.88x - 0.2$ )로 유사한 값을 나타내었다. 그림 2에서 여름철의 경우에는 전체 13회 측정치에서 질산염의 휘발하고 있음을 알 수 있고, 겨울의 경우 전체 15회 측정치 중에서 총 질산염의 농도가 가장 높은 (14.6 µg/m³) 측정치에서 총 질산염의 6.2%의 휘발손실을 나타내어 여름과 겨울의 질산염 손실은 극단적인 결과를 보였다. 특히 겨울철의 휘발손실은 15회 측정 중 1회(96년 2월 13일)에만 발생하였는데, 이는 측정당일의 시간별 기온은 -0.7~17.7°C (평균 8.1°C)로 일반적인 겨울날씨 보다 기온이 높았기 때문에 휘발손실이 발생한 것으로 볼 수 있다. 일반적으로 시료채취 중 발생하는 질산염의 손실은 질산염 결합 형태의 대부분을 차지하는 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>의 분해(decomposition)에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으며, Stelson *et al.* (1979)에 의하면 그 반응식은 (3)과 같

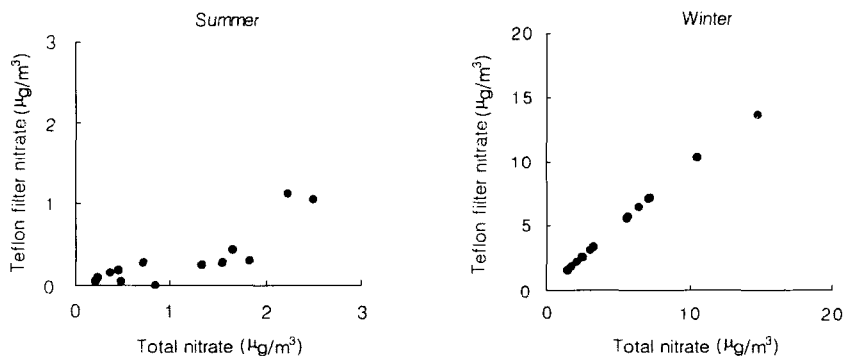
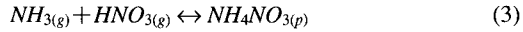


Fig. 2. Comparison of teflon filter nitrate and total particulate nitrate (sum of teflon and nylon filter nitrates) for summer and winter.

고, (3) 식의 평형은 온도에 크게 의존하는 것으로 알려져 있다.



또한, Forrest *et al.* (1980)은 식 (3)의 평형에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나로서 상대습도가 60% 이하일 경우 질산암모늄의 휘발손실이 증가한다는 보고가 있다.

표 1 및 그림 1~2에서의 결과를 볼 때, 현재와 같이 테프론 여과지를 이용한 미세입자 측정시 겨울철을 제외한 전 계절에 걸쳐서 상당한 양의 질산염의 휘발손실이 발생하고 있음을 알 수 있다. 특히, 여름철의 경우에는 대부분의 질산염(72.2%)이 시료채취시 테프론 여과지에서 휘발되어 질산염 정량에 부의 오차를 유발하고 있음을 알 수 있다. 또한 위와 같은 경향은 테프론 여과지를 이용하는 미세입자 뿐만 아니라 우리나라 대기환경기준 항목인 PM<sub>10</sub> 측정시에 사용하는 석영 섬유재 여과지(quartz fiber filter)를 이용한 시료채취시에도 동일한 현상이 발생하기 때문에 질산염 정량에 있어서 심각한 문제점임을 알 수 있다.

표 2에는 디누더에서 측정된 질산염 농도결과와

**Table 2. Comparison of PM<sub>2.5</sub> particulate nitrate collected by dichotomous and ADS.**

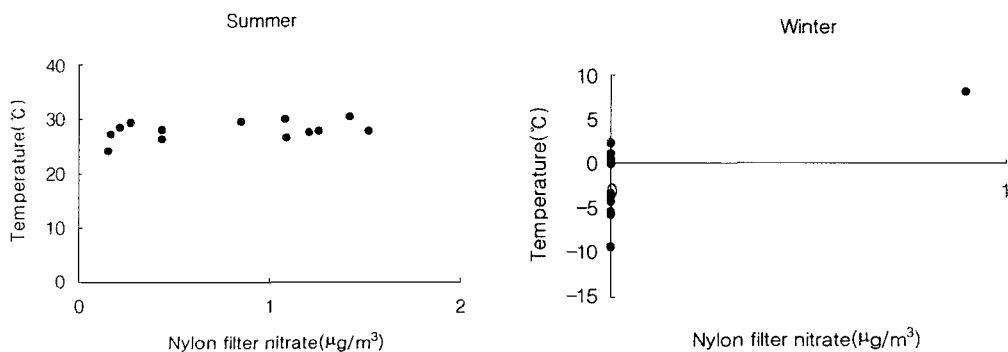
Sampler	Fall	Winter	Spring	Summer	Average
Dichotomous (µg/m <sup>3</sup> )	2.95	4.66	2.03	0.73	2.59
ADS (µg/m <sup>3</sup> )	4.36	5.05	3.65	1.10	3.54

현재 국내외에서 미세입자 측정에 사용되고 있는 Dichotomous sampler를 이용하여 동시에 측정된 질산염 결과를 비교하여 나타내었다. Dichotomous sampler는 디누더 측정기와는 달리 테프론 여과지만을 사용하여 미세입자의 농도를 측정하기 때문에 질산염 휘발에 대한 실질적인 비교자료를 제공할 수 있다.

표 2에서 Dichotomous sampler와 디누더 측정기를 이용한 평균 농도는 각각 2.59와 3.54 µg/m<sup>3</sup>으로 디누더 측정기로 측정된 질산염 농도가 Dichotomous sampler로 측정된 농도보다 약 1 µg/m<sup>3</sup> 높게 나타났으며, Dichotomous sampler와 디누더 측정농도간의 계절별 농도경향은 같은 양상을 보였다. 계절별 Dichotomous sampler와 디누더 측정치 사이의 상대적 농도차이는 여름>봄>가을>겨울의 순으로 낮게 나타내어 테프론 여과지상에서 발생하는 손실률의 순서와 일치하는 경향을 보임으로서 테프론 여과지에서 질산염의 휘발손실이 상당히 큼을 실증적으로 입증해주고 있다.

그림 3에는 테프론 여과지에서 휘발되어 나일론 여과지에서 채취된 질산염 농도와 온도와의 관계를 알아보기 위하여 여름과 겨울에 대하여 나타내었다.

그림 3에서 보는 바와 같이 여름의 측정기간 중 시간별 온도는 24~30.2°C로 전체 시료에서 질산염의 휘발이 나타나고 있음을 알 수 있었고, 겨울 측정기간 중 시간별 온도는 -10.2~17.7°C로 96년 2월 13일 시간별 온도가 17.7°C로 높았던 단 1회의 경우에만 질산염 휘발손실이 발생하였다. 이는 앞에



**Fig. 3. Relationship between nitrate loss and temperature for summer and winter.**

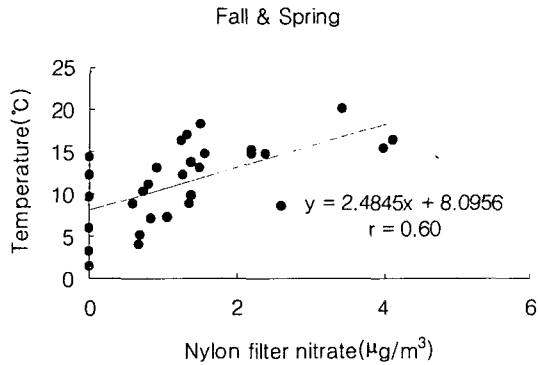


Fig. 4. Temperature dependence of nitrate loss for spring and fall.

서 언급한 바와 같이 식(3)에서 평형이 온도에 의해 좌우되고 있음을 알 수 있다.

Russell *et al.* (1983)의 연구결과에 의하면 질산염 모눈이 질산염으로 존재하는 경계를 15°C인 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서 질산염 휘발이 발생하는 온도를 추정하기 위해서 온도가 극단적인 겨울과 여름의 자료를 제외하고 15°C 부근의 온도가 유지되는 봄과 가을의 측정자료를 이용하여 온도와의 관계를 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 봄과 가을 측정치에 의해 추정된 결과 질산염 휘발손실은 측정기간 평균 온도가 8°C ( $y = 2.48x + 8.09$ )를 기점으로 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 Russell *et al.* (1983)에 의하여 추정된 15°C에 비하여 낮은 온도 값으로 추정된 것은 표 1에 나타난 바와 같이 봄과 가을철 시간별 최저 및 최고온도는 각각 4.0~20.0°C, 1.4~16.3°C로 그림 4의 직선식에서 얻은 온도는 평균 온도이기 때문에 질산염 휘발이 주로 기온이 높은 주간에 발생한다는 점을 고려한다면 유사한 결과를 나타낸 것으로 생각되며, 질산염 휘발은 주로 주간에 발생하는 것으로 추정된다.

#### 4. 결 론

미세입자 측정시 발생하는 질산염 휘발손실을 정량화하기 위하여 1995년 10월 9일부터 1996년 8월

25일까지 1년간에 걸쳐 디누더 측정기를 이용하여 측정된 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 총 질산염 농도는 겨울(5.05 µg/m³) > 가을(4.36 µg/m³) > 봄(3.92 µg/m³) > 여름(1.10 µg/m³)의 순서로 높게 나타났다.

2) 테프론 필터에서 발생하는 질산염 손실률 크기의 계절변동은 여름(72.2%) > 봄(42.6%) > 가을(23.5%) > 겨울(0.4%)의 순서로 나타났으며, 질산염 손실과 온도가 밀접한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3) 질산염의 휘발손실은 겨울을 제외한 봄, 여름, 가을에 큰 것으로 나타났다.

4) 미세입자 측정방법인 Dichotomous sampler의 테프론 여과지에서 질산염 휘발손실이 상당히 크게 발생하고 있음을 동시 측정결과에서 입증되었다.

5) 테프론 여과지에서 발생하는 질산염 휘발손실은 평균 온도가 8°C를 기점으로 발생하는 것으로 추정되었다.

#### 참 고 문 헌

강병욱, 이학성, 김희강(1997) 청주지역 산성 가스상물질과 미세입자의 계절 변동 특성, 한국대기보전학회지, 13(5), 333-343.  
 김병화, 김동술(1999) 수원지역 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 화학적 특성, 한국대기환경학회 1999 춘계학술대회, 21-23.  
 김창환, 김정호, 안준영, 김병곤, 한진석, 최양일(2000) 서울 지역의 시정과 입자상 물질과의 관계 분석, 한국대기환경학회 2000 춘계학술대회, 78-79.  
 박승식, 이권호, 김영준, 김상우, 윤순창(2000) 시화지역 PM<sub>2.5</sub> 분진의 화학적 조성 및 오염원 특성, 한국대기환경학회 2000 춘계학술대회, 294-296.  
 여현구, 조기철, 최민규, 김희강(2000) 강화도 지역에서 겨울철 PM<sub>2.5</sub>의 화학적 성분 특성, 한국대기환경학회지, 16(4), 309-316.  
 이학성, 강병욱(1996) 디누더 측정기를 이용한 여름철 청주시의 산성오염물질 측정과 분석, 한국대기보전학회지, 12(4), 441-448.  
 Appel, B.R. and Y. Tokiwa(1981) Atmospheric particulate nitrate sampling errors due to reactions with particulate and gaseous strong acids, Atmos. Environ., 15, 1087-1089.

- Brook, J.R. and T.F. Dann (1999) Contribution of nitrate and carbonaceous species to PM<sub>2.5</sub> observed in Canadian cities, *Air & Waste Management Association*, 49, 193-199.
- Chang, M.C., C. Sioutas, S. Kim, H.G. Jr, and W.S. Linn (2000) Reduction of nitrate losses from filter and impactor samplers by means of concentration enrichment, *Atmos. Environ.*, 34, 85-98
- Chow, J.C., E.M. Fujita, J.G. Watson, Z. Lu, D.R. Lawson, and L. Ashbaugh (1994a) Evaluation of filter-based aerosol measurements during the 1987 southern California air quality study, *Environmental Monitoring and Assessment*, 30, 49-80.
- Chow, J.C., J.G. Watson, E.M. Fujita, Z. Lu, D.R. Lawson, and L. Ashbaugh (1994b) Temporal and spatial variations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> aerosol in the southern California air quality study, *Atmos. Environ.*, 28(12), 2061-2080.
- Forrest, J., R.L. Tanner, D. Spandau, T. D'Ottavio, and L. Newman (1980) Determination of total inorganic nitrate utilizing collection of nitric acid on NaCl<sup>-</sup> impregnated filters, *Atmos. Environ.*, 14, 137-144.
- Hering, S. and G. Cass (1999) The magnitude of bias in the measurement of PM<sub>2.5</sub> arising from volatilization of particulate nitrate from teflon filters, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 49, 725-733.
- Koutrakis, P., K.M. Thompson, J.M. Wolfson, J.D. Spengler, G.J. Keeler, and J.W. Butler (1992) Determination of aerosol strong acidity losses due to interactions in collected particles: results from laboratory and field studies, *Atmos. Environ.*, 26A, 987-995.
- Kim, B.M., J. Lester, L. Tisopulos, and M.D. Zeldin (1999) Nitrate artifacts during PM<sub>2.5</sub> sampling in the south coast air basin of California, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 49, PM-142-153.
- Matsumoto, M. and T. Okita (1998) Long term measurement of atmospheric gaseous and aerosol species using an annular denuder system in Nara, Japan, *Atmos. Environ.*, 32(8), 1419-1425.
- Russell, A.G., G.J. McRae, and G.R. Cass (1983) Mathematical modeling of the formation and transport of ammonium nitrate aerosol, *Atmos. Environ.*, 17, 949-964.
- Stelson, A.W., S.K. Friedlander, and J.H. Seinfeld (1979) A note on the equilibrium between ammonia and nitric acid and particulate ammonium nitrate, *Atmos. Environ.*, 13, 359-371.
- Tsai, C.-J. and S.-N., Perng (1998) Artifacts of ionic species for hi-vol PM<sub>10</sub> and PM<sub>10</sub> dichotomous samplers, *Atmos. Environ.*, 32(9), 1605-1613.
- U.S. EPA (1997) National Ambient Air Quality Standards For Particulate Matter; Final Rule, Code of Federal Regulations, Part 50, Title 40, 62(138).