

튜브의 종류에 따른 환원황화합물들의 흡착손실 비교 연구

김기현* · 안지원 · 최여진

143-747, 서울시 광진구 군자동 98 세종대학교 지구환경과학과

Comparative Study on the Adsorptive Loss of Reduced Sulfur Compounds (RSC) by the Selection of Tubing Materials

Ki-Hyun Kim*, Ji-Won Ahn and Ye-Jin Choi

Atmospheric Environment Laboratory, Department of Earth & Environmental Sciences,
Sejong University, Seoul 143-747, Korea

Abstract: To collect or transfer samples of gaseous pollutants, various types of tubing are used. Hence, to analyze the uncertainties associated with the use of tubings, a series of comparative test were designed and conducted using the RSC standards with different concentration ranges. For the purpose of this study, we prepared tubings made of six different types of material which include: [1] silco-steel (S1), [2] stainless steel (S2), [3] silicone (S3), [4] PTFE Teflon (T1), [5] tygon (T2), and [6] brass (B). The patterns of RSC loss on to tubing walls, when compared on the basis of the least reactive material S1, exhibited that the extent of RSC loss varied dynamically. It was found that Teflon is highly stable. However, other materials tend to exhibit contrasting patterns of loss. S2 and B show significant loss of light RSC (H_2S and CH_3SH), while S3 and T2 experience notable loss of heavy RSC (DMS and DMDS).

Keywords: Reduced Sulfur Compounds (RSC), adsorption, loss, tubing, Teflon

요약: 대기환경 중에 존재하는 여러 가지 가스상 성분들을 채취 및 이송시키고자 할 때, 다양한 종류의 튜빙을 사용한다. 이와 같은 튜빙의 사용과 연계된 여러 가지 오차를 분석하기 위해, 약취항 성분들을 이용한 비교분석을 시도하였다. 이를 위해 45 cm 길이로 6가지 재질의 튜빙을 선택하여, 각 튜빙별 손실특성을 평가하고자 하였다. 이를 위해, 10 ppb 농도의 표준시료를 준비하고, 이를 튜빙에 통과시켜 준 후, 튜빙을 통과한 전후에 검출되는 농도를 비교하는 방식으로 손실율을 산출하였다. 이러한 비교의 목적상, 환원황 성분에 가장 우수한 회수율을 보이는 Silco Steel 튜빙을 통과한 결과를 기준 검량선으로 설정하고 여타 튜빙에 대한 회수율을 비교하였다. 그 결과 Teflon 튜빙에서는 4가지 황화합물 모두 90% 이상의 높은 회수율을 보일 정도로 양호한 결과를 보였다. 이에 비해 스테인레스나 브래스 재질의 경우, 저분자 황성분에 해당하는 H_2S , CH_3SH 에서 상당한 손실을 보였다. 반면 실리콘 튜빙의 경우, 고분자 성분에 해당하는 DMS, DMDS에서 큰 손실을 보였다. 결과적으로 황화합물의 종류나 튜빙의 재질에 따라 RSC의 손실은 다양한 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

주요어: 황화합물, 저분자 물질, 고분자 물질, 튜빙, H_2S , CH_3SH , DMS, DMDS

서론

산업화를 증시하던 근대 사회에서 현대의 시점으로 넘어오면서, 사람들은 심심 삶의 질을 향상시키기 위한 개선 방향을 다양도로 모색하게 되었다. 특히, 대

기질과 연계된 측면에서 보면, 생활 환경에서 경련하는 여러 가지 약취 문제도 중요한 관심사안으로 부각되고 있다. 특히 도심화에 따른 원천적인 부산물로 볼 수 있는 쓰레기 배출량의 증가에 주목할 필요가 있다. 이러한 현상은 약취에 대한 관리적 측면에서도 여러 가지 대책을 상구해야 할 필요성을 제기하고 있다. 폐기물의 부패에 의해 황화수소를 위시한 환원 황가스(Reduced Sulfur Compounds: RSC) 성분들이 발생한다. 만약 이들이 환경관역에서 고농도(ppb 수

*Corresponding author: khkim@sejong.ac.kr
Tel: 82-2-499-6151
Fax: 82-2-499-2354

준 이상)로 존재할 경우, 악취의 주요 원인 물질로 작용한다(최여진 외, 2004). 또한 밀폐된 공간에 고농도로 존재할 경우, 이들은 단순히 악취로서만이 아니라, 인체에 심각한 문제를 초래하는 유해물질로 작용하기도 한다. 이런 점으로 인해, 환경보건학적 측면에서도 중요한 관리대상으로 간주되기도 한다(김기현 외, 2003).

환경대기 중의 환원황 성분들(RSC)은 악취와 연계된 분석기술의 개발 및 견장에서 가장 집중적으로 조사가 이루어진 성분들의 부류에 속한다(김기현과 최여진 2005a). 이들은 대상으로 정밀 분석을 시행하고자 할 경우, 여러 가지 기술적 측면을 동시에 고려해 주어야 한다. 황화합물은 분석하는데 가장 널리 이용하는 기술로는 FPD를 장착한 GC기법을 들 수 있다. 일반 환경 대기 중에서 RSC는 ppb 수준의 극단적인 낮은 농도 영역에서 존재한다. 따라서 이들을 분석하는데, 이들이 함유된 시료를 단순히 GC에 바로 주입하는 분석 기법으로 분석하는 것은 곤란하다. 특히 이들 중에서도 상대적으로 저분자 물질인 H₂S와 CH₃SH는 강한 반응성으로 인해, 채취와 관련된 시료손실이 상당하다는 사실이 확인되고 있다(Kim et al., in press). 그렇지만 비교적 최근에 도입된 고감도의 PFPD 분석 기술을 적용할 경우, 기존의 FPD 방식에 비해 더욱 안정하고 정밀하게 악취황 성분을 분석하는 것도 가능하다(Cheskis et al, 1993). 이러한 방법을 적용 할 경우, 황화수소, 이메틸황 등을 위시한 주요 황성분들을 수 pg의 영역에서 검출할 수 있다(Kim, 2005a).

상온 조건에서 환경대기 중의 황성분을 채취할 때, 테들러백을 이용한 용기채집방법이 비교적 안정한 방법으로 간주되고 있다(전선주와 허귀석, 1999). 황성분의 분석을 위한 시료의 채취를 분석방식과 연계시켜 주는 여러 가지 정도 관리 기법이 개발되었다(Kim 2005a, b). 그러나 아직까지 시료를 채취하거나 분석할 때 시료의 이송에 사용하는 류빙의 재질별 손실율 등에 대한 선행연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 주요 악취 관리 대상으로 선정된 4가지 황화합물 악취 성분(H₂S, CH₃SH, DMS, DMDS)을 이용하여, 여러 가지 류빙들에 대한 시료의 회수율을 비교 분석할 수 있는 실험을 수행하였다. 이를 위해 류빙의 유로로 직경량의 시료를 통과시킨 후, 류빙의 재질에 따라 황화합물의 흡착 손실이 얼마 만큼 발생하는지의 여부를 다양한 관점에서 비교 평가하였다.

연구방법

분석시스템의 구성

본 연구에서는 황성분을 고감도로 검출하는데 적합한 PFPD(Pulsed Flame Photometric Detector, O.I. Co., Model 5380)형 검출기를 장착한 GC 시스템(Donam Instruments, Model DS 6200)을 황성분의 분석에 이용하였다. RSC의 분리는 BP-1 칼럼(SGE사, 60m×0.32mm, 5.0µm)으로 매회 분석의 소요 시간은 20분 주기로 설정하였다. 그리고 저농도 시료의 분석에 적합한 저온 농축형 열탈착 시스템(Thermal desorption(TD): UNITY, Markes, Ltd., UK)에 GC/PFPD를 결합시킨 조건에서 여러 가지 분석을 시도하였다. 저농도 모드 시스템은 분석대상 시료를 TD 안의 Coldtrap으로 통과시키면서, 1차적으로 저온 농축을 유도하고, 2차적으로 300°C까지 급속가열하여 농축된 성분들의 열탈착을 유도할 수 있다. 이렇게 열탈착된 성분들을 GC 칼럼으로 이동시켜 주므로 GC에 의한 황화합물의 개별 분석을 유도할 수 있다. 이 실험에 사용한 Coldtrap은 Carboxpak B와 Silicagel을 적정량 혼합하는 방식으로 제조한 것이다. 이러한 시스템을 이용하면, 분석대상이 함유된 공기 시료의 양을 수-수십리터 수준까지 농축하는 것이 용이하다(김기현 외, 2003).

본 연구에서는 류빙에 따른 황성분의 손실율을 확인하기 위해서, 6가지 재질의 류빙을 각각 45cm의 길이로 준비한 후, 비교실험에 활용하였다. 이들 6가지 각각의 재질의 면면을 보면, [1] 황성분에 대하여 가장 안정적이며 손실이 작게 일어난다고 알려진 Sileo Steel(이하 S1), [2] 일반적으로 화학반응성이 낮은 것으로 알려진 Teflon(T1), [3] 어느정도 안정성이 확인된 Stainless Steel(S2), [4] 황성분의 손실이 가장 크다고 알려져 있는 Brass(B), [5] 손실율에 대한 정확한 정보는 부족하지만, 흔히 류빙과 류빙사이를 연결할 때 사용빈도가 높은 Silicone(S3), [6] Silicone과 유사하지만 탄력성이 약한 Tygon(T2)을 준비하였다. 또한 본 연구에서 손실율을 평가하기 위해 사용한 표준시료는 4가지 황성분(H₂S, CH₃SH, DMS, DMDS)이 함유되어 있는 10ppm의 고농도 시료를 10L Tedlar Bag으로 1000배 희석하여 10ppb 농도에서 사용하였다(Ri gas, Korea).

분석방법

분석대상으로 선정된 각각의 45 cm 길이 튜빙의 한쪽 끝부분을 TD의 시료 유입구 부분에 연결하고, 분석대상 표준시료를 담은 Tedlar Bag을 튜빙의 반대쪽 부분에 연결시켰다. 이렇게 연결이 된 상태에서, 백에 담긴 표준시료를 적정량 만큼 튜빙을 통해 TD 시스템으로 유입되도록 에어서브유닛의 유량과 유속을 조절하는 방식으로 실험을 진행하였다. 이들 시료를 유입시켜주는 유속은 50 ml/min으로 고정하였다. 유속을 고정한 상태에서 동일한 시료를 1, 2, 3 분간 부하를 걸어 주므로써, 각각의 채취유량을 50, 100, 150 ml로 유지하였다(즉, Table 1에 제시한 바와 같이 모든 성분들이 각각의 유속에서 21.4, 42.8, 64.2 pmol씩 만큼 주입되도록 하였다). 이렇게 함량을 다르게 표준시료를 주입해주므로써, 검량선 작성에 필요한 3점 검량자료로 활용하였다. 동일한 Bag에 담겨있는 10 ppb 농도의 시료를 준비한 6개의 튜빙 각각에 대해 번갈아가며 연결하고, 각각의 검량특성을 파악하는 방식으로 실험을 진행하였다. 기타 분석에 적용한 작동 조건은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- Detector temp of PFPD: 210°C
- Flow rate (ml/min): Air(1)=10, Air(2)=10, H₂=11.5
- Carrier gas N₂, 20 psi
- Coldtrap: low=-15°C, high = 300°C,

- hold time = 5.0 min
- Outlet split: 15 ml/min (13.5:1 split ratio)
- Flow path temp: 80°C

RSC와 튜빙간의 접촉으로 인해 발생가능한 시료손실의 가능성이 가장 작은 silco steel(S1)로부터 확보한 검량선을 모든 비교의 기준선으로 활용하였다(Sulyok et al, 2002). 모든 튜빙들에 대한 RSC의 손실율에 대한 평가는 각 튜빙별로 확보한 검량선들의 기울기(감도)를 비교하는 방식으로 평가하였다(Fig 1). 이를 토대로 각 튜빙의 상대적인 손실율의 비교뿐만 아니라 S1의 결과에 대비하여 나머지 5가지 재질의 튜빙에 대한 손실율을 절대적 및 상대적 관점에서 평가하였다.

결과 및 토론

본 연구에서는 저농도 황성분의 검출에 용이한 PFPD를 장착한 GC와 저온농축 및 열탈착이 용이하게 제작된 UNITY TD(Markes International, Ltd) 시스템을 동시에 활용하는 방식을 구성하여 활용하였다. 그리고 회수율을 평가하기 위한 6 유형의 비교 대상 튜빙은 모두 외경 1/8인치 S2 관과 동일한 내경(약 2 mm)을 가지는 크기로 준비하였다.

튜빙에 의한 손실량 계산은 2가지 방법으로 수행

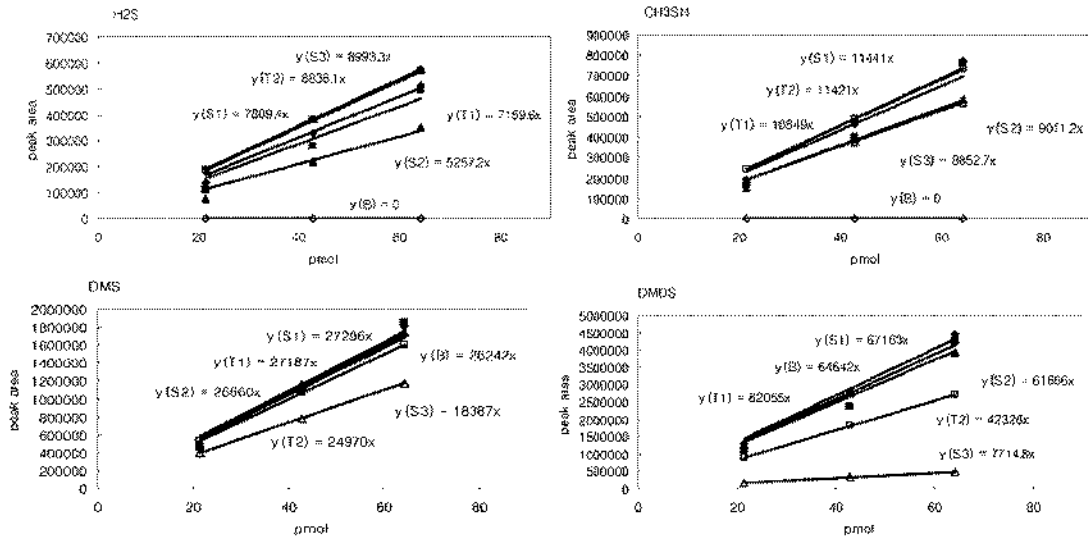
Table 1. Comparison of RSC standards (ng) detected prior to and after passing through six different types of tubing.

Tubing type	I-Vol-ume (ml)	STD Amt. pmole	(1) Tubing을 통과한 이론량 (ng)				(2) Tubing 통과후 실제 검출량 (ng)				(3) Tubing 내벽 흡착량 (이론치-검출량: ng)			
			1[S	Cl[S1]	DMS	DMD6	1[S	Cl[S1]	DMS	DMD6	1[S	Cl[S1]	DMS	DMD6
T1	50	21.4	0.73	1.03	1.33	2.02	0.49	0.69	1.06	1.55	0.24	0.34	0.27	0.47
	100	42.8	1.46	2.06	2.66	4.04	1.22	1.69	2.44	3.33	0.24	0.37	0.23	0.71
	150	64.3	2.19	3.09	3.99	6.05	2.15	3.20	4.21	5.97	0.04	(0.11)	(0.22)	0.09
S2	50	21.4	0.73	1.03	1.33	2.02	0.34	0.63	1.11	1.64	0.39	0.40	0.22	0.38
	100	42.8	1.46	2.06	2.66	4.04	0.97	1.65	2.64	3.85	0.49	0.41	0.02	0.18
	150	64.3	2.19	3.09	3.99	6.05	1.54	2.48	3.94	5.53	0.65	0.61	0.06	0.52
B	50	21.4	0.73	1.03	1.33	2.02	0.00	0.00	1.02	1.65	0.73	1.03	0.31	0.37
	100	42.8	1.46	2.06	2.66	4.04	0.00	0.00	2.56	3.94	1.46	2.06	0.10	0.10
	150	64.3	2.19	3.09	3.99	6.05	0.00	0.00	3.92	5.89	2.19	3.09	0.07	0.16
T2	50	21.4	0.73	1.03	1.33	2.02	0.51	0.69	0.90	0.82	0.22	0.34	0.43	1.19
	100	42.8	1.46	2.06	2.66	4.04	1.73	2.05	2.41	2.43	(0.27)	0.01	0.25	1.60
	150	64.3	2.19	3.09	3.99	6.05	2.53	3.20	3.78	4.04	(0.34)	(0.11)	0.22	2.01
S3	50	21.4	0.73	1.03	1.33	2.02	0.46	0.62	0.59	0.07	0.27	0.41	0.74	1.95
	100	42.8	1.46	2.06	2.66	4.04	1.62	1.56	1.66	0.35	(0.16)	0.50	1.00	3.69
	150	64.3	2.19	3.09	3.99	6.05	2.69	2.47	2.88	0.83	(0.50)	0.62	1.11	5.23

T1, T2 등의 부호 명칭은 Fig. 1의 상단을 참조할 것.

Fig. 1. Comparison of S gas loss rate by tubing types.

Symbol	Tubing Type	Symbol	Tubing Type
◆	S1 (silco steel)	◇	B (brass)
■	T1 (Teflon)	□	T2 (tygon)
▲	S2 (stainless steel)	△	S3 (silicone)



하였다. 첫번째 모든 시료는 튜빙을 통과한 상태로 분석이 이루어지기 시스템이 구성되어 있다는 점을 감안해야 한다. 특히 모든 비교의 기준으로 설정한 S1의 경우, 다른 튜빙과 달리 시료가 튜빙을 통과한 후 단계에도 농도가 불변하다고 가정하였다. 따라서 튜빙별 손실율에 대한 절대적인 기준을 S1 재질로 설정하고, 이로부터 확보한 검량선은 손실율을 0으로 가정하였다(Fig. 2). Fig. 2에는 모든 튜빙에 각각 50, 100, 150 ml 판공의 표준시료를 주입한 후, 이로부터 확보한 검량선을 성분별로 비교하였다. 이러한 비교를 할 때, 모든 검량선은 강제로 0점을 통과시킨 상태에서 기울기를 구하였다(참고로 0점을 통과시키도, 대부분의 검량선에서 상관계수가 0.97 이상의 높은 값을 나타낼 정도로 양호한 검량선을 확보하는 것이 가능하다).

튜브를 통과하기 전의 농도를 S1의 결과로부터 가정할 후, 5개의 비교대상 튜빙을 통과한 후의 검출량을 산정하였다. Table 1에는 각 튜빙별로 4가지 황 성분 값에 대한 각각의 절대량(ng)을 (1) 통과전, (2) 통과후, (3) 통과 전후의 차이값 등으로 비교 제시하였다. 그리고 Table 2에는 양자의 차이를 시간(min)과 면적(m²)으로 나누어 각각의 튜빙에 대한 RSC

흡착 손실율의 형태로 비교결과를 산출하였다(이와 같은 계산에서는 본 연구에서 사용한 튜빙의 내경은 모두 동일한 크기로 간주하였다). 흡착 손실을 구할 방법은 아래 수식과 같다.

이미 알고 있는 표준시료의 절대량에서 튜빙을 통과한 후 검출된 양과의 차이 값을, 시료를 채취한 유속(50 ml/min)으로 곱하였다. 그리고 구한 값을 내경이 2 mm, 길이가 45 cm인 튜빙의 단면적과 채취한 총 유량(50, 100, 150 ml)의 곱으로 나누어주면, 우리가 구하고자 하는 RSC의 흡착 손실율을 Flux의 형태로 구할 수 있다.

Table 3에는 모든 결과를 회수율의 형태로 제시하였다. 이 결과를 보면, H₂S나 CH₃SH 같은 저분자 물질은 S2와 B 튜빙에서 심각한 손실이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 반면 DMS, DMDS같은 고분자 물질은 T2와 S 튜빙에서 손실이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 튜빙의 종류에 따라 RSC의 흡착손실이 일어나는 상대적 경향성이 다르게 나타나는 현상은 상당히 흥미롭다. Table 4에 제시된 상대손실율의 경향을 보면, T1 튜빙에서는 4가지 황 성분 모두 S1과 거의 비슷한 90% 이상의 회수율을 보였다. 그러나 나머지 4개의 튜빙에서는 성분 별 차이도 크고,

Table 2. RSC adsorbed loss amount by tubing types (ng/m³·min)

	Total Volume (ml)	H ₂ S	CH ₃ SH	DMS	DMDS
T1	50	86.4	120	95.5	165
	100	42.3	66.0	39.8	125
	150	5.05	-13.3	-25.4	10.4
S2	50	139	140	79.1	133
	100	87.3	73.2	3.62	32.4
	150	77.0	72.4	6.66	61.7
B	50	258	365	110	131
	100	258	365	17.8	17.5
	150	258	365	8.20	19.4
T2	50	76.9	120	153	423
	100	-47.1	2.38	44.9	284
	150	-40.4	-13.4	25.4	238
S3	50	96.9	146	263	690
	100	-28.2	88.6	177	652
	150	-59.1	72.8	131	616

Table 3. Relative withdrawal rate by tubing types (%)

Slope	H ₂ S	CH ₃ SH	DMS	DMDS
S1	100	100	100	100
T1	91.7	94.8	99.6	92.4
S2	67.3	78.8	97.7	91.8
B	0.00	0.00	96.1	96.2
T2	113	99.8	91.5	63.0
S3	115	77.4	67.4	11.5

손실도 상당 수준 이상으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. S2 튜빙에서는 H₂S, CH₃SH가 67.3, 78.8%의 회수율을 보이는 반면, DMS, DMDS는 90% 이상의 회수율을 보였다. B 튜빙에서는 H₂S와 CH₃SH에서 회수율이 0%이라는 점에서, 본 연구의 무하조건에서 2가지 성분이 완전하게 흡착 손실이 이루어졌음을 알 수 있었다. 그러나 DMS, DMDS에서는 90% 이상의 회수율을 기록하여, 성분간 손실율의 차이가 뚜렷하다는 것을 명확하게 보여주었다. T2 튜빙의 경우, H₂S, CH₃SH, DMS에서는 90% 이상의 회수율을 보였지만, DMDS에서는 63%로 낮은 회수율을 나타내었다. 그리고 S3 튜빙은 H₂S에 대해 양의 회수율을 나타냈지만, 이를 제외한 나머지 CH₃SH, DMS, DMDS 성분에서는 77.4, 67.4, 11.5%라는 낮은 회수율을 보였다. 황화합물을 중심으로 결과를 보면, 특히 황화수소에 대한 여러 가지 튜빙의 결과는 여러 가지 흥미로운 특성을 시사한다. 비록 T2나 S3의 결과가 S1의 최초 실험시점보다 약간의 시차가 있기 때문에 정확한 경향성에 대한 의미를 제시하기

는 곤란하다. 그렇지만, 이러한 결과에 의하면 황화수소의 튜빙내 손실은 상당히 재질에 선별적으로 가능하다는 점을 알 수 있다.

황화합물의 유실에 대한 선행연구의 사례를 살펴보면, 공기시료를 채취할 때 이용하는 튜빙의 종류에 따라 황화합물의 손실이 발생하는 현상을 조사한 사례를 확인할 수 있다. 황성분들을 대상으로 한 튜빙별 회수율을 비교한 Sulyok et al.(2002)의 선행연구 사례를 보면, 테플론 튜빙에 의한 손실은 5% 이내로 적은 반면, PVC와 실리콘 튜빙에 의한 고분자 황화합물들의 손실은 15-20% 수준 이상으로 크게 일어나는 것으로 보고한 바 있다.

결론

반응성이 강한 가스상 오염물질들의 시료를 채취 및 분석할 때 사용하는 튜빙의 종류나 재질에 의해 얼마 만큼 가스상 시료의 손실이 발생하는가를 객관적으로 확인하고자 본 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 튜빙의 사용으로 인해 발생하는 여러가지 오차의 특성을 객관적으로 설명하기 위해, 6가지 재질의 튜빙을 동일한 조건에서 동일한 표준시료를 통과시키면서 시료의 손실량을 분석하였다.

본 연구에서는 시료채취와 분석단계에 이용하는 튜빙의 재질에 따라 분석에 좌급되는 오차를 평가하고자 하였다. S1을 기준으로 T1, S2, B, T2, S3를 위시한 총 6가지 재질의 튜빙을 비교평가하였다. 그 결

과, T1 투병에서 90 % 이상의 안정적인 회수율이 확인되었다. 그 외 나머지 4개의 투병에서는 황화합물의 성분에 따라 다른 경향을 보였다. H₂S와 CH₃SH와 같이 비교적 저분자 물질의 경우, S2와 B 투병에서 모두 큰 손실이 나타났다. S2 투병에서 67, 79%의 회수율을 보였고, B 투병에서는 두 성분 모두 100% 손실이 일어났다. 이에 반하여 T2와 S3 투병의 경우, 상대적으로 안정된 DMS, DMDs와 같은 고분자 물질의 손실이 큰 것으로 확인되었다. 특히, T2 투병은 DMDs가 63%, S3 투병에서는 DMS, DMDs가 67.4, 11.5%로 낮은 회수율을 보였다. 결과적으로 저분자 물질에 오차가 발생하는 투병은 고분자 물질에서 상대적으로 안정적인 반면, 고분자 투병에 오차가 생기는 투병은 반대로 저분자 물질에 안정적인 결과를 보였다.

본 연구에서는 투병의 재질에 따른 황화합물의 손실량을 각 성분별로 구분한 후 체계적인 비교 분석을 시도하였다. 특히, 저분자 물질로서 반응성이 강한 H₂S, CH₃SH에서만이 아니고, 고분자 물질인 DMS, DMDs에서도 투병의 종류에 따라 상당한 손실이 일어나는 현상을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과를 감안하면, 시료의 손실이 다양하게 발생하는 황화합물의 시료를 채취, 분석하는 방법에 있어서 투병에 따른 손실정도를 정확히 이해하고, 이를 보대로 실험을 설계하거나 진행하는 것이 중요하다는 것을 강조하지 않을 수 없다.

감사의 글

본 연구의 일부는 학술진흥재단의 선도과학자 연구사업(KRF 2005-201-C00045)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

김기현, 임계규 (2004) 테들러 백을 이용한 대기 중 황성분의 채취: 보정인자의 적용을 위한 예비연구, 한국지구과학회지, 25(4), 265-269.

김기현, 최이진 (2005) GC의 주입방식에 차에 따른 고농도 인위황 성분의 검량오차 연구: 주입부티의 고정방식 대비 주입농도의 고정방식 간 비교연구, 한국대기환경학회지, 21(2), 269-274.

김기현, 최이진, 김성현 (2005) GC 분석시스템의 설정과 그에 따른 감도의 차이: 열탈착 방식 대비 루프주입방식에 의한 황성분의 분석, Analytical science & technology, 18(1), 66-73.

김기현, 오상인, 최이진, 신의찬, 사재환, 선우영 (2004) 환원황 화합물을 중심으로 한 메틸가스의 조성에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 20(1), 77-85.

신선주, 허귀석, 1999, 케니스터와 Tedlar-bag 시료채집법을 이용한 대기 중의 휘발성유기화합물의 측정, 한국대기환경학회지, 15(4), 417-428.

최이진, 김기현, 오상인, 손장호, 2004, 연속추정방법을 이용한 도심권 대기질 내 저농도 황화합물의 관측에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 20(2), 195-204.

Cheskis, S., Atar, L., and Amirav, A. (1993) Pulsed-flame photometer: a novel gas chromatography detector. Anal. Chem. 65, S39,313-323.

Kim K.-H. (2005a) Performance characterization of the GC/PPPD for H₂S, CH₃SH, DMS, and DMDs in air. Atmospheric Environment 39, 2235-2242.

Kim K.-H. (2005b) Some insights into the gas chromatographic determination of reduced sulfur compounds (RSC) in air. Environ. Sci. & Technol. 39, 6765-6769.

Kim, K.-H., Choi, G.-H., Choi, Y.-J. and Song, H.N. (2005) The effects of sampling materials selection in the collection of reduced sulfur compounds in air. Talanta. In Press.

Sulyok, M., Haberbauer-Troyer, C., and Rosenberg, E. (2002) Observation of sorptive losses of volatile sulfur compounds during natural gas sampling, Journal of chromatography A, 946, 301-305.

2005년 7월 25일 원고 접수
 2005년 8월 22일 수정원고 접수
 2005년 8월 22일 원고 채택