

서울 관악산 대기 중의 SF₆에 관한 연구

이정현¹ · 김경렬^{2,*}

¹한전 전력연구원 전략기술연구소

²서울대학교 지구환경과학부

(2008년 6월 2일 접수; 2008년 9월 12일 승인)

Atmospheric Sulfur Hexafluoride (SF₆) near the Kwanak Mountain, Seoul

Junghyun Lee¹ and Kyung-Ryul Kim^{2,*}

¹Strategic Technology Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

²School of Earth and Environmental Science/RIO, Seoul National University

(Manuscript received 2 June 2008; in final form 12 September 2008)

Abstract

Sulfur hexafluoride (SF₆), man-made compound, has been paid attention as a potent greenhouse gas. After Kyoto Pototcol on Climate Change in 1997, nations established the policy aimed at minimizing release of SF₆ to atmosphere. We have developed and operated an automatic analytical system for monitoring atmospheric SF₆ using gas chromatography with electron capture detector (GC-ECD) and packed separate-column. Here, we report and discuss 4-month record of atmospheric SF₆ concentrations monitored at Seoul National University (SNU) pilot station near the Kwanak Mountain, Seoul. Most of observed SF₆ concentrations were excessively high compared with Northern Hemisphere (NH) background trend obtained from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory (ESRL) monitoring stations. And the observed SF₆ showed extremely wide variability ranging from 4.6 pptv to 1.1×10³ pptv, which may be affected by local sources placed nearby. Simultaneous wind data with SF₆ measurements show that relatively high values of SF₆ correspond to weak wind as well as southerly. There are many engineering installations to the south of the station. The regional value of the atmospheric SF₆ estimated from the data selection by wind conditions is about 6.8 pptv. This value, which is similar to concentrations of urban areas, is higher than NH background concentration.

Key words: sulfur hexafluoride (SF₆), Kyoto Protocol, greenhouse gas, GC-ECD

1. 서론

최근 우리나라를 비롯한 세계 각지에서 극심한 가뭄 또는 국지적인 집중호우 등의 이상기후 현상의 원인 중 하나인 ‘지구온난화(Global Warming)’는 ‘오존층이 감소하는 것’과 함께 대표적인 환경문제의 하나이다.

미국 Scripps 해양 연구소의 Keeling 교수가 1957년 Mauna Loa에서 시작한 CO₂ 관측을 효시로 하여 (Keeling *et al.*, 1989), 인간의 활동이 지구시스템을 교란시킬 수 있음을 보여주는 많은 관측 자료 산출과 분석이 활발하게 이루어지고 있다. 지속적으로 전 지구적 차원에서 환경과 조화되는 에너지정책 수립의 중요성이 제기되었으며, 그 결과 92년 6월 리우에서 채택된 기후변화협약은 지구온난화를 유발하는 온실기체의 배출을 억제하여 기후의 안정성을 확보하는 것을 목표로 하고 있다. 이는 단순한 환경문제로서 그치는 것이 아니라 온실기체가 주로 에너지 사용에서 발생되기 때문에 각국의 경제, 산업구조에 대한 수정을 요구하는

*Corresponding Author: Kyung-Ryul Kim, School of Earth and Environmental Science/RIO, Seoul National University, Seoul, Korea.

Phone: +82-2-880-6751, fax: +82-2-885-7164

E-mail: krkim@snu.ac.kr

심각한 문제이다. 97년 12월 일본 교토에서 열린 제 3차 당사국총회에서 CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆ 등 6대 온실기체에 관하여 배출 감축 목표율을 90년 기준, 선진국 평균 5.2% 감축으로 하는 것을 골자로 하는 교토의정서(Kyoto Protocol)가 채택되었다. 과거 기후 변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernment Panel on Climate Change: IPCC) 보고서(Climatic Change 2001: The Scientific Basis)에서 지구온난화의 가장 강력한 요인은 산업혁명 이후 급격히 증가한 온실기체라는 과학적 논의와 최근 IPCC 보고서(Climatic Change 2007: The Physical Science Basis)에서 보고된 최근까지도 6대 온실기체를 포함한 미량 온실기체의 급격한 증가 추세를 볼 때, 이러한 세계적 합의는 매우 합리적인 것으로 생각된다.

SF₆는 대부분 인간에 의해 방출된 기체이며(Harnish, 1998), 1970년대 이후 본격적으로 전기산업에서 절연 기체(insulated gas)로 이용되기 시작하면서 대기 중 SF₆의 농도는 급격히 증가하였으며, 현재까지 금속산업, 방음창, 자동차 타이어 산업 등 그 응용폭 또한 지속적으로 넓어지고 있다. 이러한 산업과정에서 배출된 SF₆는 지속적으로 대기 중에 축적되어서 1953년에 거의 존재하지 않았던 대기 중 적재량이 1996년에는 약 92,000톤에 이르게 되었다(Maiss and Brenninkmeijer, 1998). 현재 북반구에는 약 6 pptv의 농도로 지난 30년 동안 약 7-8%/년의 비율로 급격히 증가하였으나 최근에는 조금 둔화된 증가추세를 보이고 있다(Maiss and Brenninkmeijer, 1998, 2000; IPCC, 2007; NOAA ESRL, 2008). 그러나 SF₆는 대기 중에서 약 800-3,200년이라는 긴 체류시간을 가지고 있기 때문에(Ravishankara *et al.*, 1993), 당분간 대기 중의 농도 증가는 계속될 것으로 보인다. 현재까지도 SF₆의 총배출량은 CO₂를 비롯한 다른 온실기체와 비교하여 그 비율이 약 0.1%로 매우 낮음에도 불구하고, 과학자들이 주요 온실기체에 SF₆를 포함시키고 이에 대한 감축논의를 서두르는 이유는 바로 이러한 긴 체류시간 때문이다. SF₆는 물리적, 화학적 반응성이 거의 없고 용해도 또한 매우 낮기 때문에 한번 대기 중으로 방출되면 약 3,200년 동안 대류권에 머무를 것으로 추정하고 있다. 온실기체는 화합물의 구조에 따라 열을 축적할 수 있는 능력의 차이가 있고, 이로 인해 온실효과를 일으키는 잠재력이 달라진다. 이를 비교하기 위하여 지구 온난화 지수(GWP: Global Warming Potential)라는 개념을 사용하며, CO₂의 GWP를 1로 기준할 때 SF₆는 약 22,200배 더 크다는 점에 주

목하여 대표적인 온실기체로 다루어지고 있다(Ko *et al.*, 1993; Fenhann, 2000).

이러한 국제적인 추세 속에서 한반도 대기 중에서의 주요 온실기체들에 대한 체계적 모니터링의 필요성이 인식되어 본 연구에서는 우리나라에서는 처음으로 온실기체 중 SF₆에 관하여 서울대학교 관악 캠퍼스 내에 시험관측점을 설치하고 연속적인 관측을 수행하였다. 특히 서울대학교 관악 캠퍼스 관측정점은 대학 내에 존재하는 오염원으로 인한 영향이 상당할 것으로 예상되어 풍향, 풍속 등의 기상 자료를 이용하여 국지적 영향으로 인한 오염을 제거한 지역적 대표값을 얻을 수 있는 관측 장문을 선정하여 이를 통한 자료의 선별작업이 가능할 수 있도록 하였다. 이러한 관측 자료들은 경제협력개발기구(Organization for Economic Cooperation and Development) 가입 이후 기후변화협약을 이행해야 하는 국제적 요구 속에서 우리나라 대기 중 SF₆ 농도 변화에 대한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구방법

우리나라에서 교토의정서에 의해 규제되고 있는 온실기체 중 하나인 SF₆ 모니터링 체계 확립을 위하여 2002년 3월부터 관악산지역 서울대학교에 시험관측점을 설치하고 SF₆의 연속관측을 수행하였다.

2.1 연구지역개관 (서울대학교 관측점: 37° 27' N, 126° 57' E)

서울대학교 캠퍼스 내 관측점의 북쪽은 도심과 연결되어 있고, 남쪽에는 관악산이 위치하고 있다. 그러나 배출원(emission sources)과 밀접한 관련이 있는 서울대학교 캠퍼스 내부시설을 살펴보면, 관측점과 500m 이내의 남쪽에는 SF₆ 절연개폐장치(SF₆-GIS: SF₆-Gas Insulated Switchgear)와 회로차단기(circuit breaker) 등이 사용되고 있는 공과대학과 공정과정에서 SF₆를 이용하는 반도체 연구소 등 많은 공학기술연구소가 위치하고 있어서 서울대학교 대기 중 SF₆ 농도변화에 직접적인 영향을 줄 것으로 예상된다.

2.2 분석방법

SF₆ 분석시스템에는 전자포획검출기(Electron Capture

Detector)가 부착된 기체 크로마토그래피(Gas Chromatography)를 사용하였으며, 시스템에 포함된 모든 밸브와 검출기에는 실험용 PC를 연결하여 30분 간격으로 데이터를 얻을 수 있도록 자동화하였다. 제작된 분석시스템의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다.

SF₆ 분석을 위한 본 시스템은 크게 네 부분으로 나눌 수 있다 (Fig. 1).

(1) 운반기체 정화(Carrier gas purifying part): 운반 기체는 초고순도 질소(ultra high purity nitrogen)를 사용하였으며, 분석시스템으로 들어가기 전 운반기체에 극미량 함유되어 있는 수분 및 다양한 미량 화합물

(trace compounds) 제거를 위한 정화장치(purifier)인 MS 5A 충전관(indicating Drierite/Molecular Sieve 5A, Alltech)과 흑연필터(activated charcoal filter, Alltech)를 통과하도록 하였다(Maiss *et al*, 1996).

(2) 시료채취(sampling part): 서울대학교 자연과학 동 옥상에 설치된 7m 타워의 시료 흡입구로부터 대기 중 기체 시료가 실험실로 공급되게 하였다. 아크릴 재질의 시료 흡입구는 내부를 유리섬유로 채워 고체 입자들이 시료 흡입구로 들어오는 것을 방지하였다. 시료 흡입구로부터 실험실 내에 설치된 기체펌프(Cole-Parmer, air cadet pressure pump)까지 약 100m 길이의 데카본

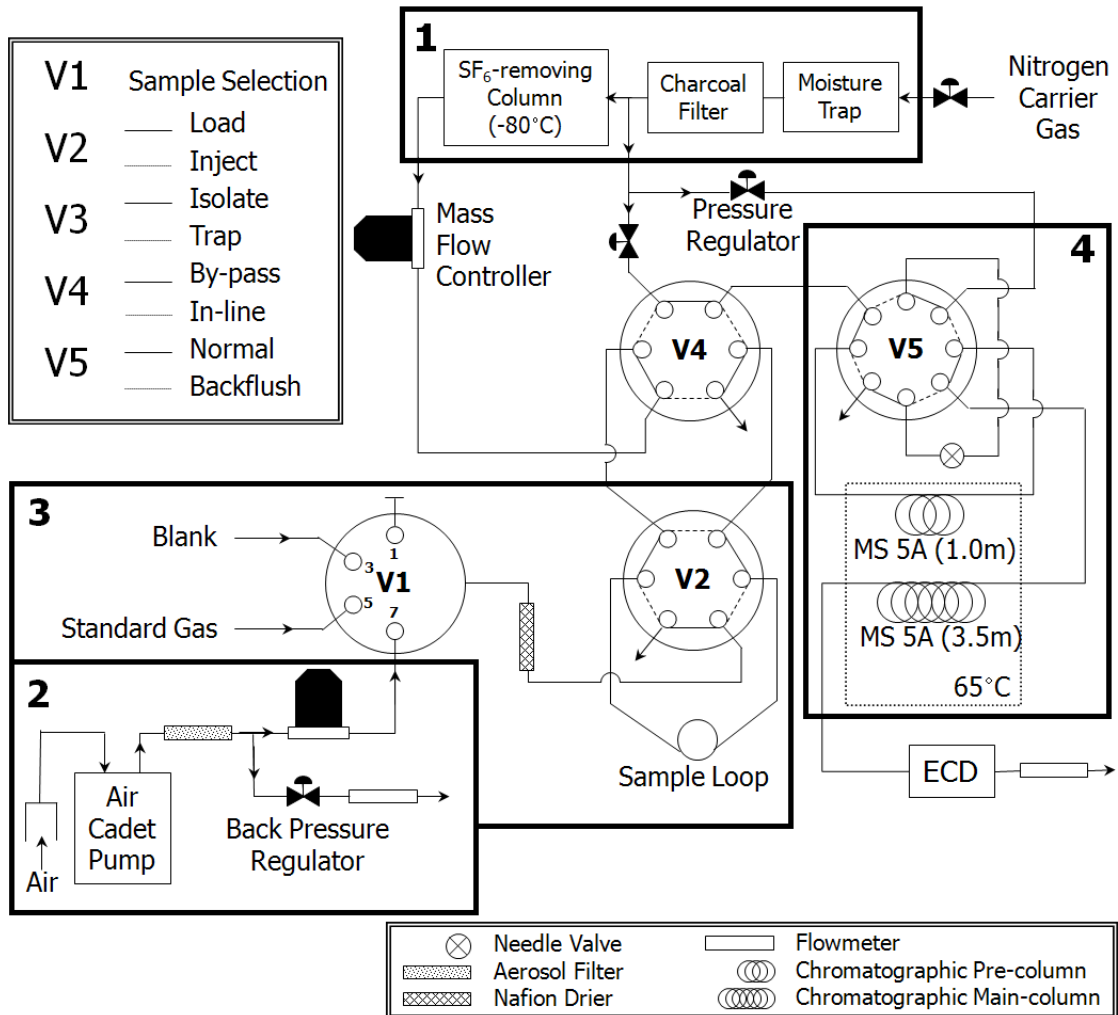


Fig. 1. Diagram of SF₆ analytical system: This system consists of four functional parts; (1) Carrier gas purifying part; (2) Air sampling part; (3) Sample selection and injection part; (4) The chromatographic separation and detection part. All valves are electrically actuated under program control, and measured data are stored on a computer.

튜브(Dekoron 1300, 3/8"O.D.)를 연결하여 대기 시료를 약 7.5L/min의 속도로 실험실로 끌어들었다. 이 때 기체펌프를 지난 시료는 수분 및 미세한 입자 제거를 위하여 5 μ m 에어로졸 필터(SMC, AF2000)를 통과한 후 역압력조절기(backpressure regulator)를 거쳐 약 15 psi의 압력으로 조절된다. 기체펌프 특성상 일정한 압력으로 기체 흐름 속도를 정밀하게 조절할 수 없기 때문에 기체 시료는 다시 질량유량조절기(mass flow controller, Tylan)를 통하여 약 30ml/min의 흐름 속도로 조절된다. 이렇게 일정한 흐름 속도를 가진 대기 시료는 Nafion 건조관(drying column, Perma Pure: MD-250-72S)을 통과한 후 V1 (4-port selection valve, VICI)과 연결된다.

(3) 시료선택 및 주입(Sample selection and injection part): V1은 표준기체(standard gas, SIO 1994), 블랭크(blank) 시료 그리고 일반 시료를 분석 순서에 맞게 V2 (6-port switching valve, VICI)에 부착되어있는 시료관(sample loop)에 채운다. 이 때 시료관 끝 부분의 배출구(vent)는 약 2m 길이의 코일을 두어 충분히 시료를 흘려준 뒤 역류를 방지하면서 시료관에 갇힌 시료의 압력이 대기압과 평형을 이루도록 약 10초간 기다렸다가 V2를 전환(switching)하여 분리관(separation column) 및 검출기(detector)로 주입(injection)되도록

한다. SF₆는 대기 중 수 pptv (10^{-12} moles/mole) 존재하기 때문에 이를 분석하기 위해서는 CH₄, N₂O, CFCs와 같은 다른 미량기체를 분석할 때보다 많은 부피의 시료가 필요하다. 본 연구에서는 부피가 4.936 ml인 시료관을 사용하였다.

(4) 크로마토그래픽 분리 및 검출(Chromatographic separation and detection part): 대기 시료 중의 SF₆는 65 $^{\circ}$ C로 유지된 MS 5A (80/100mesh)로 채워진 전처리분리관(pre-column, 1.5m \times 1/8"O.D.)과 주분리관(main-column, 2.0m \times 1/8"O.D.)을 이용하여 분리하였다(Law *et al*, 1994; Maiss *et al*, 1996). 보유 시간(retention time)이 가장 짧은 SF₆가 전처리분리관을 통과하는 순간 V5를 정상(normal)상태에서 역흐름(backflushing)상태로 전환하여 SF₆를 제외한 나머지 성분들은 전처리분리관에서 역방향으로 배출시켰다. 이 때 두 개의 분리관을 통과하여 검출기로 들어가는 운반기체의 유속이 변하지 않도록 하기 위하여 V5 (8-port switching valve, VICI)에 니들밸브(needle valve)를 부착하여 조절하였다. 그리고 주분리관에서 재분리되어 SF₆가 가장 먼저 검출기(ECD, HP5890)에 도달하고, SF₆와 함께 전처리분리관을 통과한 성분인 CFC-12 일부가 SF₆ 다음으로 검출기에 도달한다. 본 분석시스템의 분석조건은 Table 1에 자세히 나타내었으며, 분석한 대표적인

Table 1. The specifications of GC-ECD system for SF₆ analysis.

	Ultra High Purity N ₂ (99.9999%)	
Carrier Gas	Purifying step	1. Drierite/MS 5A Column
		2. Activated Charcoal Filter
		3. SF ₆ -removing Col.(1/4" OD \times 1.5 m) packed with Porapak-Q 80/100 mesh)
Sample Loop	4.936 ml	
Pre-Concentration Trap	0.3 m \times 1/8"O.D.	
	packing material: Porapak-Q (80/100 mesh) temperature: -80 $^{\circ}$ C~100 $^{\circ}$ C	
Pre-Column	1.0 m \times 1/8" O.D.	
	packing material: Molecular Sieve 5A (80/100 mesh) temperature: 65 $^{\circ}$ C	
Main-Column	3.5 m \times 1/8" O.D.	
	packing material: Molecular Sieve 5A (80/100 mesh) temperature: 65 $^{\circ}$ C	
Main Flow Rate	30 ml/min	
Backflush Flow Rate	30 ml/min	
Trapping Flow Rate	100 ml/min	
Backflushing Time	70 sec after injection	
Detector	ECD (10mCi Ni ⁶³)	
	temperature : 330 $^{\circ}$ C	

SF₆ 크로마토그램을 Fig. 2에 나타내었다.

SF₆의 표준기체와 일반시료 및 블랭크 기체를 30분마다 연속적으로 분석하였다. 분석순서에 따른 각종 밸브의 조작과 검출기에서 주는 전압의 기록 및 피크면적 적분은 PC를 사용해 자동으로 수행하였다(Fig. 3). 분석시스템에 사용된 일련의 밸브(V1-V5) 조작은 컴퓨터의 RS-232C를 통해 연결된 SVI (Serial Valve Interface, VICI)를 거쳐 전달되는 신호로 제어하였다. 각 밸브를 분석순서에 따라 제어하기 위하여 LabVIEW (National Instruments)로 작성된 프로그램을 이용하였다. 그리고 분석성분의 검출과 피크면적을 계산하기 위해서는 검출기로부터 데이터전송모듈을 거쳐 다른 하나의 RS-232C를 통해 컴퓨터로 전달되는 신호를 크로마토그램 작성 및 적분 프로그램(Autochro-WIN 2.0)을 통해 피크면적을 비롯한 다양한 자료를 얻었다.

2.3 분석자료의 보정(Calibration)

시료 분석 및 정량의 정밀도 확인과 유지를 위하여 표준대기시료(SIO, 1994 scale)을 이용하였으며, 분석된 각 시료의 농도를 정량적으로 계산하기 위하여 시료 분석 전후로 표준기체와 블랭크 시료를 교대로 분석하였다. 모니터링 과정 중 하루 동안 동일한 표준기체를 48회에 걸쳐 분석한 자료로부터 확인한 시스템의 정밀도는 0.5%로 매우 좋은 결과를 보였다. 이와 함께 분석

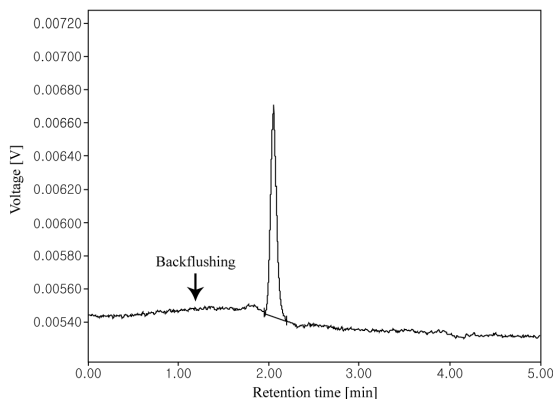


Fig. 2. Chromatogram of SF₆: This chromatogram was obtained by analyzing air sample with 1.2 fmol SF₆. SF₆ elutes at about 2 minutes after injection. The arrow mark points the time to switching valve V5 for backflushing. The baseline slope, during the time when SF₆ elutes, is a reproducible feature caused by a change in flow rate due to valve switching.

시스템의 선형성 확인을 위하여 부피가 다른 시료관 2개(4.936 ml, 10.008 ml)를 준비하여 SF₆의 농도가 3.531 pptv인 표준기체와 블랭크 시료를 반복적으로 측정하였으며, 이에 대한 분석결과로부터 얻은 선형성에 대한 R²값이 0.999로 매우 좋은 결과를 얻었다.

대기 중 SF₆ 측정값의 보정을 위해 사용한 표준기체는 국제표준대기시료(SIO, 1994 scale)이며, 이를 독일 하이델베르크 대학(Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg) 환경물리연구소(Institute für Umweltphysik)에서 분석하여 정확한 SF₆ 농도값을 얻어 사용하였다. 하이델베르크 대학의 환경물리연구소는 전 지구적인 범위의 측정지역에서 SF₆ 모니터링을 최초로 발표하여 꾸준히 지속해오고 있으며(Maiss and Levin, 1994), 자료의 정확성에 관해서는 국내외에서 신뢰도가 높다(Maiss and Levin, 1994; Maiss *et al.*, 1996; Maiss and Brenninkmeijer, 1998, 2000). 서울대학교 대기 측정에 사용될 표준기체의 농도는 3.531 ± 0.006 pptv로 측정되었으며, 이를 SF₆의 농도를 결정하기 위한 표준값으로 사용하였다. SF₆의 농도는 대기시료 전후로 분석한 블랭크 시료와 표준기체의 각각 평균값으로 구한 보정곡선(calibration curve)으로 대기 시료의 농도를 내삽(interpolation) 또는 외삽(extrapolation)하여 산출하였다.

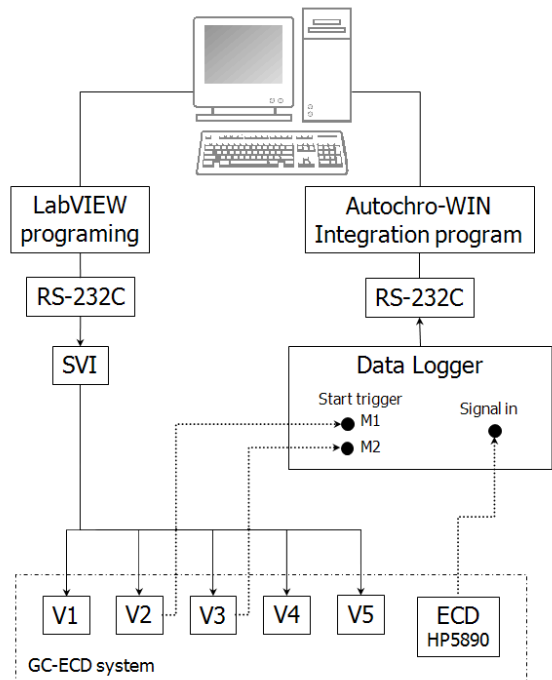


Fig. 3. Schematic diagram for system automation

3. 결과 및 토의

3.1 관악산 대기 중의 SF₆ 농도(mixing ratio) 관측 결과

2002년 3월부터 8월까지 서울대학교 관측점으로부터 30분 간격으로 총 5269개의 자료를 얻었으나, 3월-4월은 해양야외조사 및 해수시료분석으로 인하여 잦

은 공백이 있어서 본 논문에서 이 자료는 제외하였다. 분석과 동시에 시료 채취구 옆에 설치되어있는 자동기상 관측장치(AWS: Automatic Weathering System, Campbell)를 통하여 풍향과 풍속을 관측하였다. 약 4개월간 관악산 서울대학교 관측점에서 측정된 대기 중 SF₆ 농도의 범위와 분포를 명확하게 파악하기 위하여 월별 평균값, 표준편차, 최소값, 최대값 및 자료의 개수를 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Mean and variability in SF₆ mixing ratios at SNU
^aMonthly mean and standard deviation(σ) of SF₆ mixing ratios given in pptv ^bNumber of data

	Mean	σ^a	Min	Max	N ^b
May 2002	35.1	93.4	5.2	1142.9	985
Jun 2002	45.8	93.7	4.9	1052.8	1157
Jul 2002	33.2	83.1	5.0	827.5	951
Aug 2002	13.8	17.0	4.6	237.5	1311

Fig. 4(a)는 2002년 5월에서 8월까지 약 4개월간의 서울대학교 관측점의 대기 중 SF₆의 모니터링 결과를 모두 도시한 것이다. 아울러 그림에는 비교를 위하여 NOAA ESRL의 플라스틱 시료채취 정점들(flask sampling sites)에서 얻은 자료로부터 추정된 북반구 배경 농도를 점선으로 표시하였다. 서울대학교 관측점의 대기 중 SF₆의 농도 변화에서 분명하게 정의되는 최소 측정값들은 NOAA ESRL에서 얻은 북반구 평균 농도자료와 유사한 값을 가진다. 이러한 큰 폭의 농도 변화는

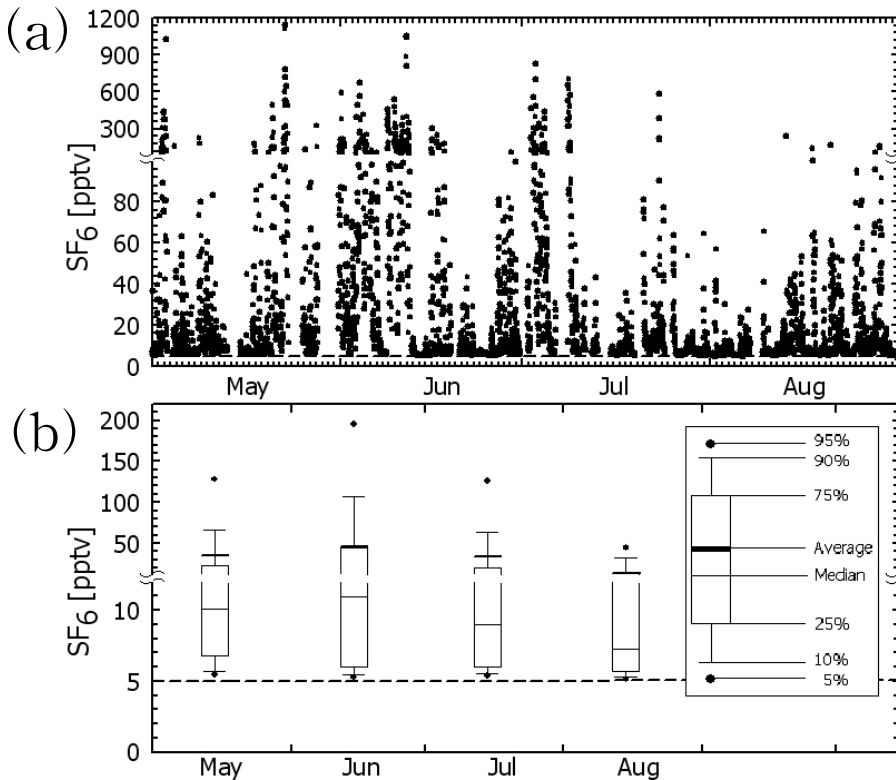


Fig. 4. (a) Time series of SF₆ at SNU pilot station from May through August 2002: SF₆ were measured every 30 minutes. Gaps in the graph are due to experiments for field works and water sample analysis. A dotted line indicates Northern Hemisphere background mixing ratios. (b) A percentile box-plot for arrangement of monthly data: The mean was 29±79 pptv and the baseline was about 5.0 pptv at SNU station. A dotted line indicates Northern Hemisphere background mixing ratio.

서울대학교 캠퍼스 내에 직접적인 영향을 주는 국지적인 SF₆ 공급원들이 많이 존재하고 있기 때문이라 생각된다. 또한 Fig. 4(b)에서는 이를 이용하여 월별 농도 분포를 백분위 상자 도표(percentile box plot)로 나타내었다. 측정자료 전체를 도시한 Fig. 4(a)에서는 측정값이 중복 도시됨으로써 측정 빈도가 낮은 고농도의 측정값이 상대적으로 많은 것처럼 보였으나, 이를 상자도표로 나타내 본 결과 100 pptv 이상의 고농도 측정값은 전체 관측 자료의 10% 이내임을 알 수 있었다. 전체

측정값의 90%가 존재하는 범위는 약 4.5-100 pptv이었으며, 중간값(median)은 약 6-12 pptv의 범위에 존재하였다.

연속관측 결과 관측정점의 대기 중 SF₆는 매우 큰 변화폭을 가지고 있으며 그 평균도 매우 높음을 알 수 있었다. 이러한 변화 경향의 원인을 살펴보기 위하여 SF₆의 농도가 20 pptv 미만인 경우와 20 pptv 이상인 경우로 나누어 풍배도(wind rose)를 통하여 바람의 패턴을 알아보았다(Fig. 5). 물리적인 대기 혼합을 일으키는

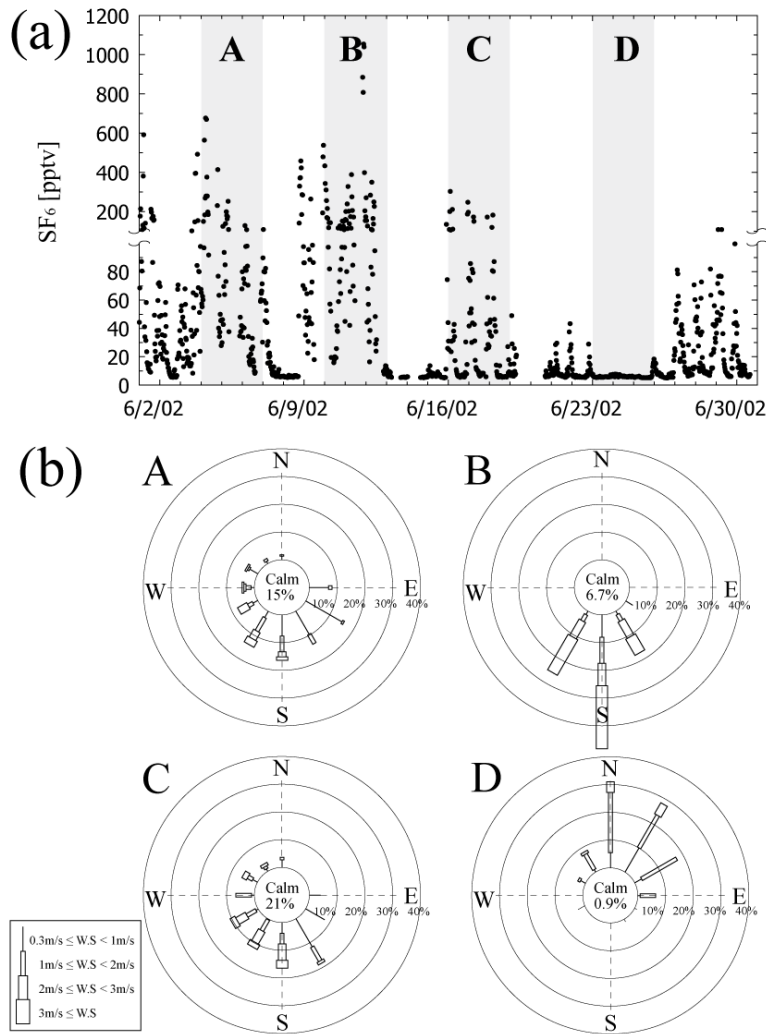


Fig. 5. Atmospheric SF₆ mixing ratios with wind frequency graph during shading periods marked at (a) in SNU station in June 2002 as an example for data selection: Low wind speed caused excessively high concentrations (shading area A and C) and southerly wind with high speed also caused extremely high mixing ratios (shading area B). Very low SF₆ mixing ratios, however, were monitored with northerly winds (shading area D). These relationship makes it possible to select data for removing very local effects.

바람의 영향에 의해 풍속이 작아지면 SF₆의 높은 농도가 많이 관측되었으며, 풍속이 증가하면 SF₆의 농도가 낮아지는 경향을 볼 수 있었다. 이는 서울대학교 관측점과 매우 인접한 SF₆ 공급원의 방출이 지속적으로 일어난다는 것을 알 수 있다. 그리고 높은 농도의 SF₆가 자주 관측되었을 때에는, 이는 남동-남서풍이 우세할 때 높은 농도를 보였다(Fig. 5(b)). 관측점과 인접한 남부에 반도체연구소를 비롯한 다양한 공학기술연구소와 공과대학이 위치하고 있기 때문이라고 생각된다.

풍향과 풍속에 따른 농도 경향이 뚜렷한 자료를 선별하여 서울대학교 내에 있는 국지적인 SF₆ 공급원에 기인한 높은 농도의 관측값을 상당히 제거할 수 있을 것으로 예상된다.

3.2 인접 공급원의 영향을 제거하기 위한 자료의 선별

서울대학교 대기 중 SF₆ 농도 연속관측의 결과로부터 풍속이 2m/s 이하로 낮거나 풍속이 높더라도 남동-남서의 풍향을 가지고 있을 경우에는 100 pptv 이상의 높은 농도가 자주 나타나며, 이들은 인접한 공급원의 영향을 그대로 반영하는 것임을 알 수 있었다. 따라서 인접 공급원의 직접적인 영향을 제거하기 위하여 풍향, 풍속에 따라 자료를 선별할 필요성이 있으며, 그 기준을 정하였다.

우선 풍속에 따른 대기 중 SF₆ 농도변화에 대해서 알아보았다(Fig. 6). 풍속이 2m/s 이하인 경우에는 인접 공급원의 영향을 그대로 받으면서 대기의 혼합이 활발히 일어나지 않기 때문에 SF₆의 높은 농도가 많이 관측되었으며, 2m/s 이상인 경우는 활발한 대기 혼합으로 인하여 100 pptv 이상의 높은 농도의 관측 빈도는 많이 줄어들었다. 그러나 풍속이 2m/s 이상인 경우에도 100 pptv 이상의 높은 농도를 종종 보이고 있는데, 이는 Fig. 5에서도 예측할 수 있었던 SF₆ 공급원의 위치에 따른 풍향과 관계가 있을 것이라 생각된다.

대기 중 SF₆의 지역대표값(regional values)을 선별하기 위하여 제거해야 할 풍향을 명확하게 하기 위하여, 우선 풍속 2m/s 이상에서의 SF₆ 농도 자료들을 30° 간격으로 분리한 풍향에 대하여 백분위값으로 나타낸 극좌표백분위 그래프(polar percentile plot)를 Fig. 7에 나타내었다. 높은 농도의 SF₆가 관측될 때의 풍향은 Fig. 7의 밝은 부분(unshaded area)으로 판단되었다. 즉, 극도로 높은 농도값을 보인 경우의 풍향, 풍속은 2m/s 이하의 풍속이거나 남동-남서풍이 우세한 경우였다.

서울대학교 관측점과 매우 인접한 SF₆ 공급원의 직접적인 영향을 제거하기 위하여 남동-남서에서 바람이 불어오는 경우의 자료를 모두 제외하고, 어두운 부분(shading area)의 자료만을 취하였다(Fig. 7 참조). 풍속이 2m/s 이하의 관측 자료도 제외하였다(Fig. 6 참

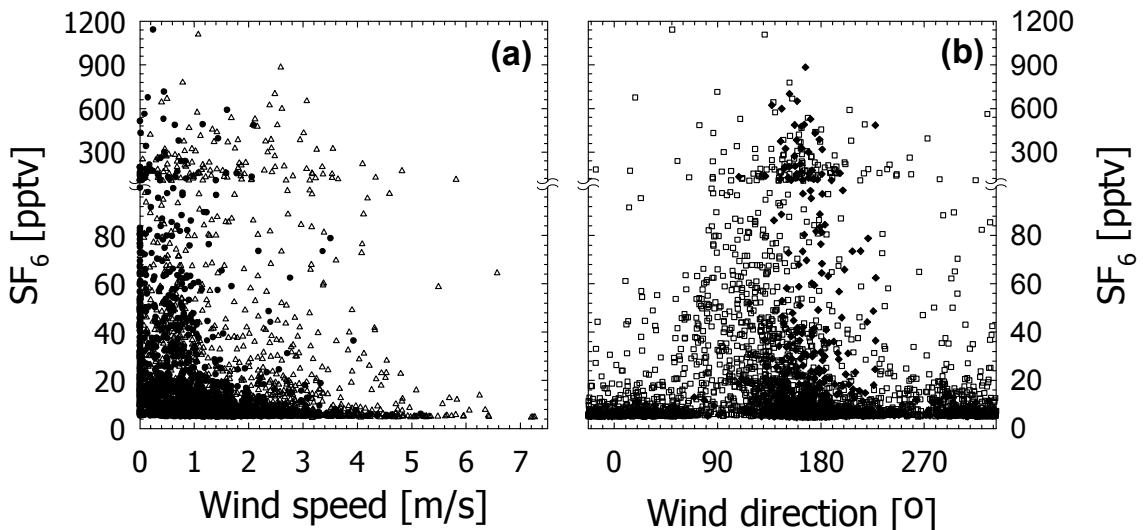


Fig. 6. (a) A graph showing the relationship between SF₆ mixing ratios and wind speed: circles are data with northerly wind (wind direction: 255°~105°) and open triangles are data with southerly wind (wind direction: 105°~255°). As for this division of wind direction, see figure 7. (b) A graph showing the relationship between wind direction and SF₆ mixing ratios: Open squares are data with wind speed lower than 2 m/s and diamonds are data with wind speed higher than 2 m/s.

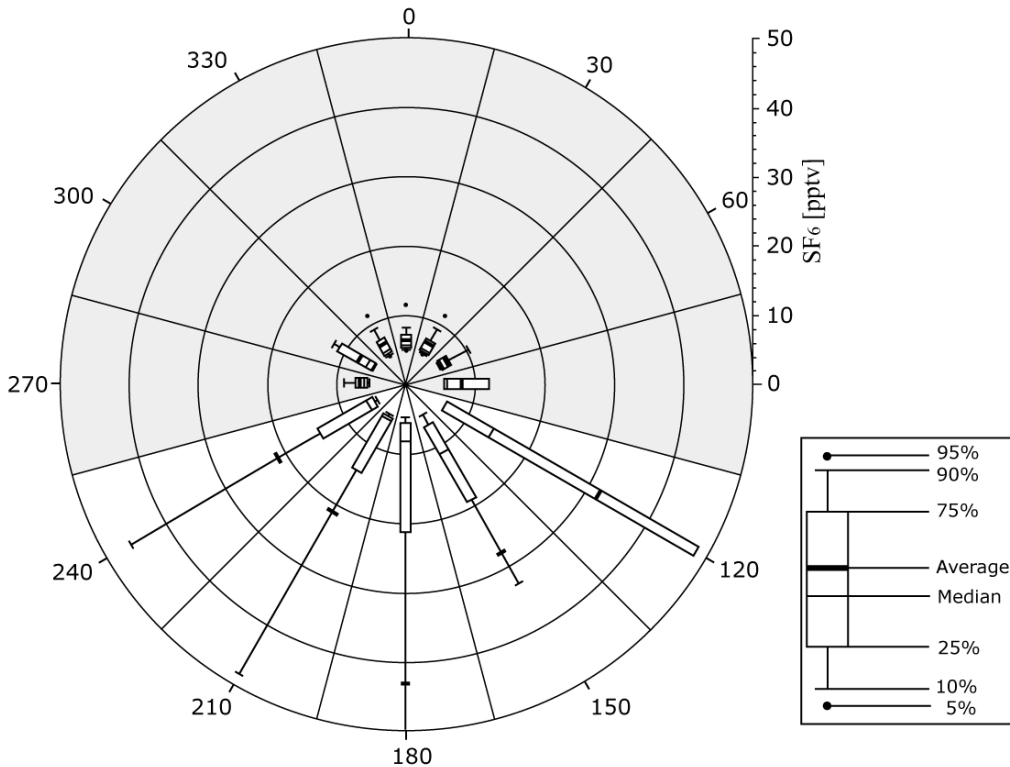


Fig. 7. The graph shows percentiles of SF₆ mixing ratios with more than 2m/s wind speed that is divided by wind directions per 30 degrees. As the graph indicates, extremely high SF₆ concentrations are caused by southerly winds. Data with wind directions from 105° to 255° are excluded from estimation of atmospheric background concentration.

조). 인접한 공급원의 영향을 제거한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이는 전체 자료와 비교하였을 때 서울대학교 내의 국지적 공급원의 영향이 상당히 제거되었음을 알 수 있으나, 북방구의 배경농도와 비교하여 월 평균값이 약 40%-130% 높게 관측되었는데, 이러한 결과는 도심지역의 영향을 반영한 일반적인 결과라고 생각된다(Ho and Schlosser, 2000). 2008년부터 관측을 시작한 제주도 고산 관측점의 SF₆ 농도는 북반구 배경농도(NOAA ESRL 자료)에 비해 다소 높은 평균값을 가진다(Fig. 8 참조). 이는 도심지역이 아닌 제주도 고산의 자료 또한 중국, 한국 등에서 배출된 SF₆의 영향을 받을 것이라는 예상을 가능하게 한다. 제주도 관측점에서의 장기 모니터링 자료는 기상자료와 함께 자료 선별을 통하여 한국에서의 SF₆ 배경농도 관측이 가능할 것으로 예상된다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 인접 공급원의 영향을 제거한 자료의 하한 10%값을 취한 결과 북반구의 배경농도에 가까운 값을 얻을 수 있었다(Geller *et al.*, 1997,

NOAA ESRL). Geller 등(Geller *et al.*, 1997)이 1987년부터 1996년까지의 SF₆ 관측결과로부터 예측한 SF₆ 농도변화추이에 따르면 2008년 북반구의 SF₆ 배경농도는 7.3 ± 0.38 pptv로 예상되었다. 그러나 2008년 8월 북반구의 SF₆의 배경농도 관측값은 6.6 ± 0.019 pptv(NOAA ESRL)로 과거의 예상값과 비교하여 월등히 낮게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 다양한 배출규제노력에 의하여 실제 농도증가가 완화된 때문이라 생각된다.

서울대학교 관측점에서 약 6개월에 걸쳐 분석한 자료는 도심지역에서 국지적으로 SF₆가 배출되었음을 예측할 수 있고, 농도 및 기상자료의 분석을 통하여 도심지역의 평균 농도를 측정할 수 있는 가능성을 보여주었다. 우리나라에서는 매년 CO₂를 비롯한 CH₄, N₂O, SO₂ 등의 온실기체의 배출 통계 보고를 하고 있지만, SF₆와 HFCs(Hydrofluorocarbons) 등의 최근에 주목받기 시작한 온실기체에 대한 조사는 거의 이루어지지 못하고 있다. 과거 산업자원부에 의하면 1995년 한해

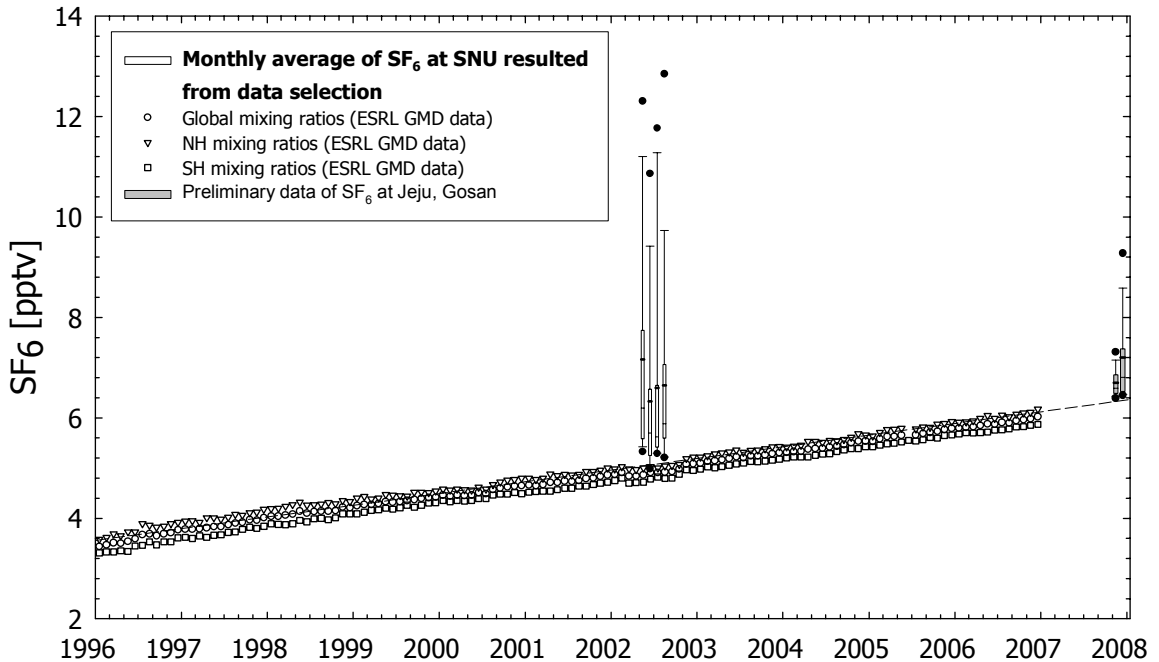


Fig. 8. Atmospheric SF₆ mixing ratios at SNU station with global trend (NOAA ESRL GMD): SNU points are monthly means with standard deviation error bars from data selection by wind condition. Shown open marks are monthly means analyzed from the NOAA ESRL sampling stations, and another percentile plots filled with gray color means preliminary SF₆ data measured in November and December, 2007 at Gosan station, Jeju. The dashed line is a linear fit of NH mixing ratios from NOAA ESRL GMD data for extrapolation.

동안 국내에서 배출된 SF₆는 약 120톤 정도라는 보고 자료가 있지만, 농도 분포는 물론이고 산업별 사용 및 배출 현황에 관한 자료는 전무한 실정이다. 이러한 대기 중 SF₆ 농도 관측과 배출에 관한 지속적인 연구는 공급원 분석과 온실기체 농도변화에 대한 구체적이고 정량적인 자료해석에 중요한 기여를 할 것이라 생각된다.

4. 결론

1997년 교토의정서(Kyoto Protocol) 채택과 함께 강력한 미량온실기체의 하나로 주목받기 시작한 SF₆의 체계적 모니터링의 필요성이 인식되었다. 이에 우리나라에서 처음으로 서울대학교 관악캠퍼스 내에 시험관측점을 설치하고 2002년 3월부터 8월까지 약 6개월간 서울대학교 관측점에서 대기 중 SF₆ 농도를 관측하였다. 넓은 변화폭을 가지고 있는 SF₆ 농도의 최소 측정값들은 비교적 분명하게 정의되며, 이러한 최소값들은 NOAA ESRL의 플라스크 시료채취 정점의 자료들로부터 얻은 북반구 배경농도와 거의 일치하고 있다(Geller

et al, 1997; NOAA ESRL). 서울대학교 관측점의 자료들 중 서울대학교 캠퍼스 내에 산재하고 있는 SF₆ 공급원의 직접적인 영향을 제거한 농도값을 얻기 위하여 풍속 및 풍향의 기상자료와 SF₆ 농도변화를 다양하게 비교 분석하였다. 그 결과, 서울대학교 내의 인접 공급원의 영향을 제거한 자료로서 풍속 2m/s 이하의 자료와 남풍이 불 때의 자료를 제거한 후 얻은 평균값은 약 6.8 pptv였다. 이는 조금 더 멀리 떨어진 도심지역의 오염원의 영향을 받고 있는 값이라 생각되며(Ho and Schlosser, 2000), 도심지역의 공급원에 대한 분석과 이해가 요구된다.

서울대학교 시험관측점은 다양한 양상의 공급원이 영향을 미치고 있으므로 기상자료 및 CO₂를 비롯한 다양한 온실기체들의 농도를 함께 관측하여 이들의 관계를 분석한다면 도심대기의 오염 공급원과 대기질의 변화 등에 대한 구체적이고 정량적인 자료해석에 도움을 줄 수 있으리라 생각한다. 또한 한반도 온실기체의 배경농도 연속 관측을 위해서는 현재 제주도 고산 관측점과 같은 국지적인 오염원의 영향에서 비교적 자유로운

관측지역의 연속 관측정점 및 플라스크 시료정점의 확대가 요구되며, 체계적이고 연속적인 관측이 이루어져야 할 것이다. 본 연구를 통하여 지구온난화의 주범인 온실기체의 중요성에도 불구하고 국내에서는 연구가 부진한 SF₆와 같은 미량기체에 대한 이해를 높이고 그 연구의 기본이 될 수 있는 관측 장치와 시험관측점에서의 모니터링을 통해 대기환경 연구에 중요한 자료로 활용되길 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 정부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2004-041-C00414).

참고문헌

- 이정현, 2003: 관악산 대기 및 동해 해수 중의 SF₆에 관한 연구. 서울대학교 이학석사학위논문, 113 pp.
- Fenhann, J., 2000: Industrial non-energy, non-CO₂ greenhouse gas emissions. *Technological Forecasting and Social Change.*, **63**, 313-334.
- Geller, L.S., Elkins, J.W., Lobert, J.M., Clarke, A.D., Hurst, D.F., Butler, J.H. and Myers, R.C., 1997: Tropospheric SF₆: Observed latitudinal distribution and trends, derived emissions and interhemispheric exchange time. *Geophys. Res. Lett.*, **24**(6), 675-678.
- Harnish, J. and Eisenhauer, A., 1998: Natural CF₄ and SF₆ on earth. *Geophys. Res. Lett.*, **25**(13), 2401-2404.
- Ho, D.T. and Schlosser, P., 2000: Atmospheric SF₆ near a large urban area. *Geophys. Res. Lett.*, **27**(11), 1679-1682.
- IPCC, 2001: Houghton, J.T. et al. (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 2007: Solomon, S. et al. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Keeling, C.D., Bascastow, R.B., Carter, A.F., Piper, S.C., Whorf, T.P., Heimann, M., Mook, W.G. and Roeloffzen, H., 1989: A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed wind: Observational data and preliminary analysis, Appendix A, in aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas. *Geophysical Monograph*, American Geophysical Union, **55**
- Ko, M.K.W., Sze, N.D., Wang, W.-C., Shia, G., Goldman, A., Murcray, F.J., Murcray, D.G. and Rinsland, C.P., 1993: Atmospheric sulfur hexafluoride: source, sink and greenhouse warming. *J. Geophys. Res.*, **98**(D6), 10, 499-507.
- Law, C.S., Watson, A.J. and Liddcoat, M.I., 1994: Automated vacuum analysis of sulphur hexafluoride in seawater: derivation of the atmospheric trend (1970-1993) and potential as a transient tracer. *Marine Chemistry.*, **48**, 57-69.
- Maiss, M. and Levin, I., 1994: Global increase of SF₆ observed in the atmosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 569-572.
- _____, Steele, L.P., Francey, R.J., Fraser, P.J., Langenfelds, R.L., Trivett, N.B.A. and Levin, I., 1996: Sulfur hexafluoride - a powerful new atmospheric tracer. *Atmos. Environ.*, **30**, 1621-1629.
- _____, and Brenninkmeijer, C.A.M., 1998: Atmospheric SF₆: trends, sources, and prospects. *Environ. Sci. Technol.* **32**, 3077-3086.
- _____, and _____, 2000: A reversed trend in emission of SF₆ to atmosphere? In: van Ham, J., Baede, A.P.M., Meyer, L.A., Ybema, R. (Eds.), *Non-CO₂ Greenhouse Gases: Scientific Understanding, Control and Implementation: Proceedings of the Second International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. 199-204.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Earth System Research Laboratory (ESRL), Global Monitoring Division (GMD), 2008: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd>>
- Ravishankara, A.R., Solomon, S., Turnipseed, A.A. and Warren, R.F., 1993: Atmospheric lifetimes of long-lived halogenated species. *Science.*, **259**, 194-199.