

오존 간이측정기에 대한 연구 (I) - 필터의 민감도

A Study of Ozone Passive Sampler (I) - Sensitivity on Filter Substrate

정 상 진

경기대학교 토목환경공학부 환경공학전공
(2002년 3월 19일 접수, 2002년 8월 19일 채택)

Sang Jin Jeong

Department of Environmental Engineering, Kyonggi University

(Received 19 March 2002, accepted 19 August 2002)

Abstract

Six types of ozone passive samplers were fabricated with three different filter substrates and two colorants, and tested for their feasibility on atmospheric monitoring. These passive samplers are based on a colorant which fades (indigo carmine and ChromAir (K&M environmental Inc.)) or produces color (mixture of 3-methyl-2-benzothiazolinone acetone azine and 2-phenylphenol colorant) upon reaction with ozone, whose concentration can be determined by reflectance measurement of the color change. Three filters, namely Whatman No.1 paper, SG81 chromatography paper and Silica Gel coated on polyester (TLC Plates), were prepared and coated with two colorants. The response of these passive samplers in ozone chamber were tested and compared with ChromAir (K&M environmental Inc.) passive sampler. The response of Silica Gel filter impregnated with indigo carmine was the best at the constant concentration exposure.

Key words : ozone monitoring, passive sampler, color method, ozone chamber test

1. 서 론

국내에서 대기 중의 오존을 측정하는 방법은 환경부의 대기오염공정시험법에서 추천하는 자동연속 측정법과 수동측정법이 있다. 자동연속측정법에는 자외선광도법, 화학발광법, 중성요드화칼륨법이 있다. 수동측정법으로는 중성요드화칼륨법, 알카리성 요드화칼륨법이 있다.

이 중에서 대기오염공정시험법에서는 자외선광도법을 주 시험법으로 하고 있으며, 실험실에서는 수동법으로 중성요드화칼륨법을 많이 사용하고 있다 (김기현 등, 2000).

국내에서 주 시험법으로 사용하는 자동측정법은 기기의 가격이 고가이고 오존 측정망의 계획에 따라 특정 위치에 설치된 측정소에서 주로 사용하므로 측정소의 개수가 한정되어 공간적 해상도가 낮다. 수동측정법인 중성요드화칼륨법은 화학적인 전처리작업과 현장 자료를 실험실에서 화학적 분석을 해야 하는 등 시간과 인력이 많이 드는 측정법이다.

* Corresponding author
Tel : 031-249-9734, E-mail : sjjung@kyonggi.ac.kr

오존과 반응하는 색도의 변화를 분석하여 대기 중 오존 농도를 측정할 수 있는 간이측정기는 실험실에서 별도의 화학분석이 필요하지 않고 현장에서 농도를 직접 확인할 수 있는 경제적인 방법이다. 따라서 간이측정법을 사용하면 공간적 해상도가 높고 경제적으로 다량의 측정 자료를 구할 수 있는 장점이 있다. 또한 간이측정기를 사용하면 자동측정기의 설치가 곤란한 산악지형이나, 지하 공간 등에서도 쉽게 오존 농도를 측정할 수 있고, 오존농도를 단기간의 오존 측정법 보다 장기간 오존의 노출로 인한 누적농도를 측정할 수 있는 장점이 있어서 인체의 건강, 산림의 피해, 농작물의 피해 등을 평가할 수 있는 측정방법이다.

간이측정기에 대한 연구는 실내공기 오염의 연구에서 인체가 작업장에서 실내 대기오염물에 노출되는 정도를 평가하기 위하여 개발되었다. 처음에는 주로 포름알데히드나 이산화질소를 측정하기 위하여 개발되었으나, 최근에는 오존 등 다른 오염물을 측정하는 방법으로 개발되어 가는 실정이다. 대기 중 오존 측정을 위한 간이측정기로는 측정된 결과를 분석하는 방법에 따라 Ion Chromatography, UV/Vis Spectrophotometer, Spectrofluorimeter, Spectrometer (reflection)방법 등을 들 수 있으며(Geyh *et al.*, 1997; Zhou and Smith, 1997), 이 중 Spectrometer (reflection)를 이용하는 방법이 가장 간단한 방법이다.

간이측정기는 가스를 수동확산 원리에 의하여 포집하고 포집된 공기의 농도는 Fick의 확산법칙에 의하여 구할 수 있다(Palmes *et al.*, 1976). 간이 측정기의 종류에는 튜브형태 및 배지 형태가 일반적으로 사용된다. 간이측정기로 측정할 수 있는 오염물은 NO₂, CO, SO₂, VOC, O₃, 포름알데히드, 암모니아 등이 있으며 샘플링 시간은 보통 수일에서 주 단위이다. 현재, 간이측정기는 작업장, 실내공기, 지역규모의 대기오염을 포함하는 실외공기 모두에서 대기질을 측정하기 위하여 사용되고 있다(Krupa and Legge, 2000).

국내에서 간이측정기를 이용한 최근의 연구로는 양원호 등(2001), 양원호 등(2000)의 연구가 있으며 양원호 등(2001)은 서울시 Y구청 직원과 그 가족을 대상(142명)으로 약 28시간 동안 NO₂에 노출되었을 경우 노출에 대한 평가를 간이측정기를 이용하여 실시하였다. 양원호(2000)에서는 NO₂ 간이측

정기의 정확도를 고정측정소에서 관측치와 비교하였다. 국내에서 오존 간이측정기에 대한 최근의 연구로는 박민수 등(2001), 김한수 등(2001), 정상진(2001)이 있다. 박민수 등(2001)은 대기 중 오존과 반응하는 Nitrate의 변화를 이용한 오존 간이측정기의 성능을 평가하였고, 김한수 등(2001)은 형광광도법을 이용하여 대기 중 오존을 측정하는 간이측정기를 개발하였다. 정상진(2001)에서는 Whatman No.1 필터에 Indigo Carmine과 3-methyl-2-benzothiazolinone acetone azine 착색제를 이용하여 비교 분석한 결과가 있다. 정상진(2001)에서는 간이측정기의 노출을 3가지 형태(naked(보호막이 없는 상태), Small sampler(테프론 필터를 보호막으로 사용한 작은 샘플러), Large sampler(테프론 필터를 보호막으로 사용한 큰 샘플러) 상태의 노출)로 나누고 노출농도를 비교적 고농도인 0.35, 0.52, 0.75, 1.0 ppm으로 하여 실험한 결과 naked 상태에서 감도가 우수한 것으로 판명되었으며, Whatman No.1 필터를 사용하는 경우 3-methyl-2-benzothiazolinone acetone azine 착색제를 사용한 sampler가 indigo carmine을 사용한 sampler 보다 오존 노출에 대한 응답성이 더 좋은 것으로 나타났다.

본 연구는 정상진(2001)의 연구를 확장한 연구로 다양한 착색 필터를 사용하고 착색제로 indigo carmine과 3-methyl-2-benzothiazolinone acetone azine을 이용하여 제작한 간이측정기를 실제 대기 와 유사한 저농도(0.015~0.1 ppm)에 비교적 단기간 노출시(4.5시간에서 9시간) 성능 평가를 하였다. 이를 위하여 제작된 간이측정기를 naked 상태로 오존 발생 챔버에 넣고, 동일한 오존 노출 조건에서 오존의 농도를 변화와 노출시간에 따른 색도의 변화를 관측한다. 다음으로 관측된 결과를 컴퓨터에 입력하고 자료를 분석하여, 최적의 착색제와 최적의 함침필터를 찾아내고자 하였다.

2. 간이측정기의 제작과 실험 방법

2.1 간이측정기의 제작

실험 대상의 간이 측정기는 1회용으로 기존 시판되고 있는 K&M Environmental사의 측정기(Model: ChromAir 이하 CA)와 본 연구실에서 제작한 두 가

지 착색제 (indigo carmine (이하 indigo))과 3-methyl-2-benzothiazolinone acetone azine (이하 azine))을 3가지 필터 (Silica Gel filter, Whatman No.1 filter, SG81 filter)에 착색한 6종류의 간이측정기를 이용하였다. ChromAir는 오존노출에 따라 청색에서 백색으로 탈색하는 측정기이다. 이 측정기는 크기가 74 × 41 × 1 mm이고, 무게 1.5 g, 최저검지한계는 0.006 ppm이고, 최대 노출시간 24시간이다.

본 실험실에서 제작한 indigo carmine 착색제를 사용한 간이측정기는 오존 노출에 따라 청색에서 흰색으로 탈색되는 간이측정기이다. indigo carmine을 이용한 간이측정기용 착색제는 indigo carmine 1.6 g과 glycerol 1 mL를 100 mL의 HPLC-grade methanol에 넣어서 초음파 처리로 준비하였다. indigo carmine을 사용한 간이측정기는 indigo carmine 착색제에 각각 크기 1.5 × 1.5 cm의 Whatman No.1 필터 (이하 IW), Silica Gel 필터 (이하 IS) 그리고 SG81 필터 (이하 IG)를 20분간 함침하여 제작하였다. 3-methyl-2-benzothiazolinone acetone azine을 이용한 간이측정기는 오존에 노출되면 흰색에서 핑크색으로 착색되는 간이측정기이다. 이 간이측정기의 착색시약은 Lambert and Paukstelis (1989)에 따라 3-methyl-2-benzothiazolinone acetone azine 1.10 g (0.05 mol)과 2-phenylphenol 3.4 g (0.02 mol)을 포함하는 acetone 용액 50 mL을 제작하고, 동일 크기의 Whatman No. 1 필터 (이하 AW), Silica Gel filter (이하 AS) 그리고 SG81 filter (이하 AG) 필터에서 20분간 함침하여 제작하였다.

Table 1. Ozone passive sampler used in this study.

Lab. code	Filter type	Colorant	Remarks
CA	Colorant on Polyester	Unknown	Polyester
IW	Whaman No. 1 paper	Indigo Carmine	Paper
IS	Silical Gel on Polyester	Indigo Carmine	TLC Plates
IG	Whatman SG81	Indigo Carmine	Chromatography Paper
AW	Whaman No. 1 paper	Azine	Paper
AS	Silical Gel on Polyester	Azine	TLC Plates
AG	Whatman SG81	Azine	Chromatography Paper

표 1에서는 본 연구에서 사용된 7가지의 간이측정기를 나타내었다. 표 1의 참고 (Remarks)에서는 필터의 용도 및 재질을 나타낸다.

2.2 오존 챔버

간이측정기의 오존 노출에 대한 응답 색도의 변화를 알기 위하여 대상으로 하는 간이측정기를 일정한 오존 농도 상태를 유지하는 오존 챔버 내에 노출하는 실험을 하였다. 그림 1에서는 간이 측정기의 오존 노출을 위한 실험 장치를 나타내었다.

그림 1에서 나타낸 바와 같이 오존 발생기에서 나온 오존은 Mass Flow Meter (MKS instruments)에 의하여 제어되어 목적농도 희석되고 오존 챔버 내로 도입된다. 본 연구에서 사용한 오존 측정기는 OZ BIO CO. Ltd. (Model Oz300A) 제품을 사용하였고, 희석공기는 전처리 필터를 통하여 입자상 물질과 다른 오염물의 방해를 최소화하였다. 챔버내의

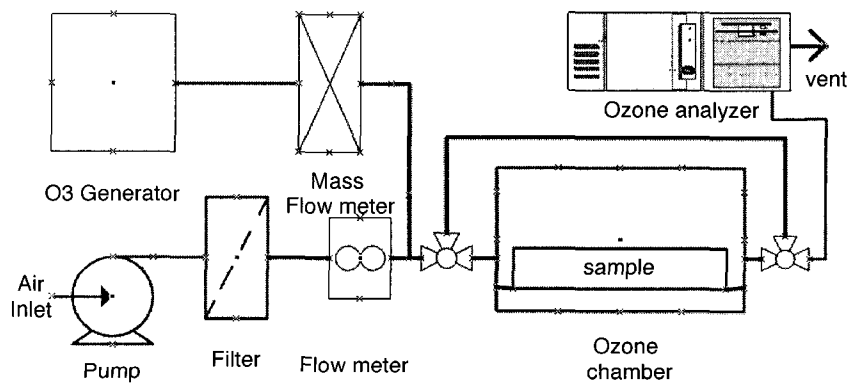


Fig. 1. Schematic diagram of ozone exposure chamber.

오존 농도는 오존 자동측정기(Thermo Environmental Instruments Inc. Model 49C, UV Photometric O₃ Analyzer)를 사용하여 연속 측정하였다. 표 2에서는 자동 오존 측정기의 검량 조건과 오존 챔버 실험 조건을 나타내었다. Lambert and Paukstelis (1989)에 따르면 azine 방법 시약은 상대습도와 빛에서 안정하지만 시약의 물 비에는 민감하다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 시약의 물 비를 Lambert and Paukstelis (1989)에 따라 정확히 맞추어 실험을 하였다. 오존챔버는 직경 10 cm, 길이 60 cm인 아크릴로 제작하였으며, 챔버내 오존 노출 실험은 Mass Flow Meter로 오존공기를 제어하여 챔버 내의 오존 농도가 정상상태가 된 이후에 실험을 시작하였다.

Table 2. Experimental condition of Ozone chamber.

Experimental condition	Temp. (°C)	Relative humidity (%)	Exposure time (min)
Experimental range	15~20	15~24	270~540

실험 전과 실험 후 챔버 내의 오존 농도를 측정하여 평균농도를 노출 농도로 하였다(오존 농도 변화 범위가 10%였음).

표 2에서는 본 연구에서 사용한 챔버내의 조건을 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 실험 중 챔버 내의 온도범위는 15~20°C이고 상대 습도는 15~24%이었다. 챔버내 간이측정기의 노출시간은 270분(4.5 시간)에서 540분(9시간)으로 하였다.

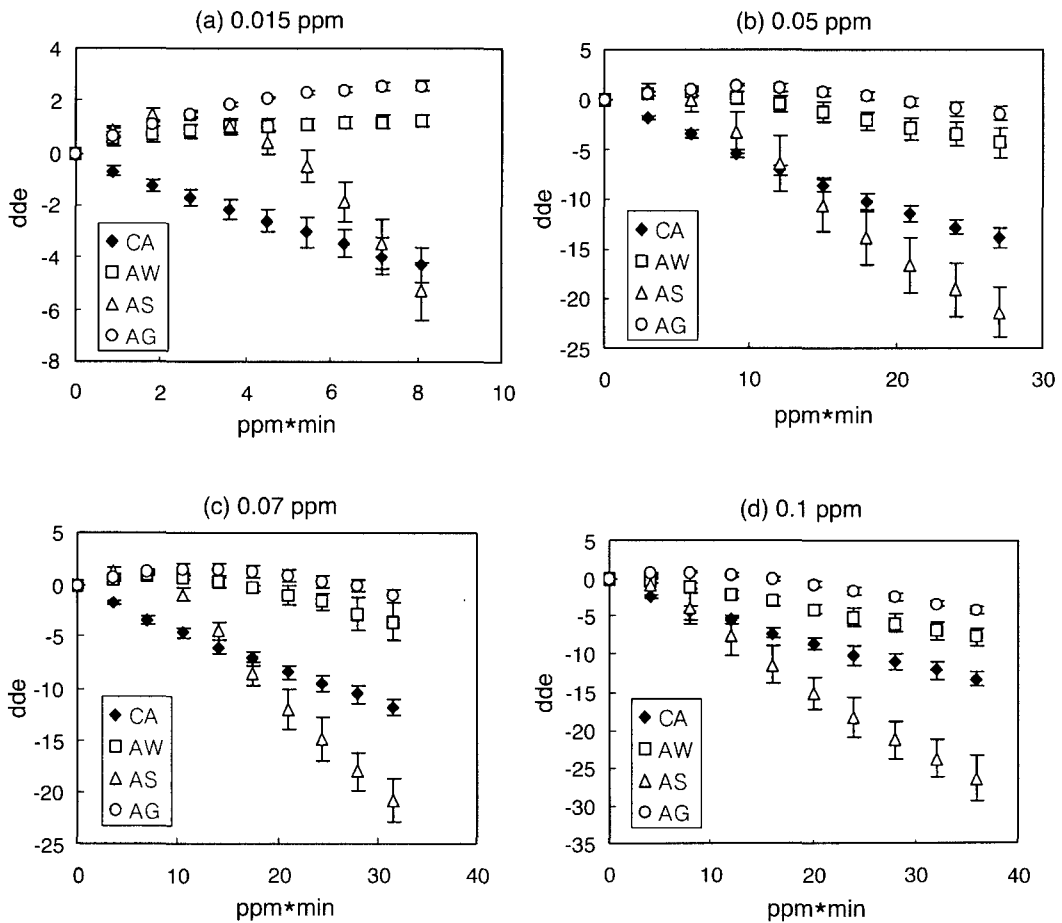


Fig. 2. Ozone response for the various filters impregnated with azine and ChromAir.

2.3 간이측정기의 색도 측정

오존에 노출 후 변색된 간이측정기의 농도를 평가하기 위하여 오존 노출 농도에 따른 색도변화를 관측하였다. 색도 변화는 이동식 색도 분석기(Minolta Chroma Meter model CM-508i)를 사용하여 반사분광법으로 측정하였다. 색도의 변화는 $d_e = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2}$ 로 주어진다. 여기서 L, a, b는 표준 CIE 좌표계로 색도(a, b)와 명암(L)을 나타낸다. 색도계는 흰색 reflection plate standard를 사용하여 calibration 하였다.

3. 결과 및 고찰

챔버내 오존 노출 농도는 실제 대기 중 농도와

유사한 저농도인 0.015, 0.05, 0.07, 0.1, 0.2 ppm의 5가지 경우로 하였으며, 챔버내 오존 간이측정기는 오존 발생기에서 나온 오존과 희석공기의 혼합 공기 농도가 정상상태가 된 이후에 노출시켰다. 색도 변화는 일정시간 노출된 간이측정기의 필터를 색도계를 사용하여 노출 시간(min)별 d_e 자료를 측정하여 기록하였다. 기록된 시간별 d_e 자료를 이용하여 $dde = d_{e_i} - d_{e_s}$ (d_{e_i} : 초기색도, d_{e_s} : 임의시간의 색도)를 계산하고 누적 노출 농도(노출시간×농도)를 x축 dde 을 y축에 두고 표시하였다.

그림 2에서는 azine에 함침된 3가지 필터와 ChromAir (CA의 dde 값은 오존 노출에 따라 증가하므로 본 그림에서는 정량적 비교를 위하여 -1을 곱하여 나타내었음)의 오존 노출 응답을 비교해 보

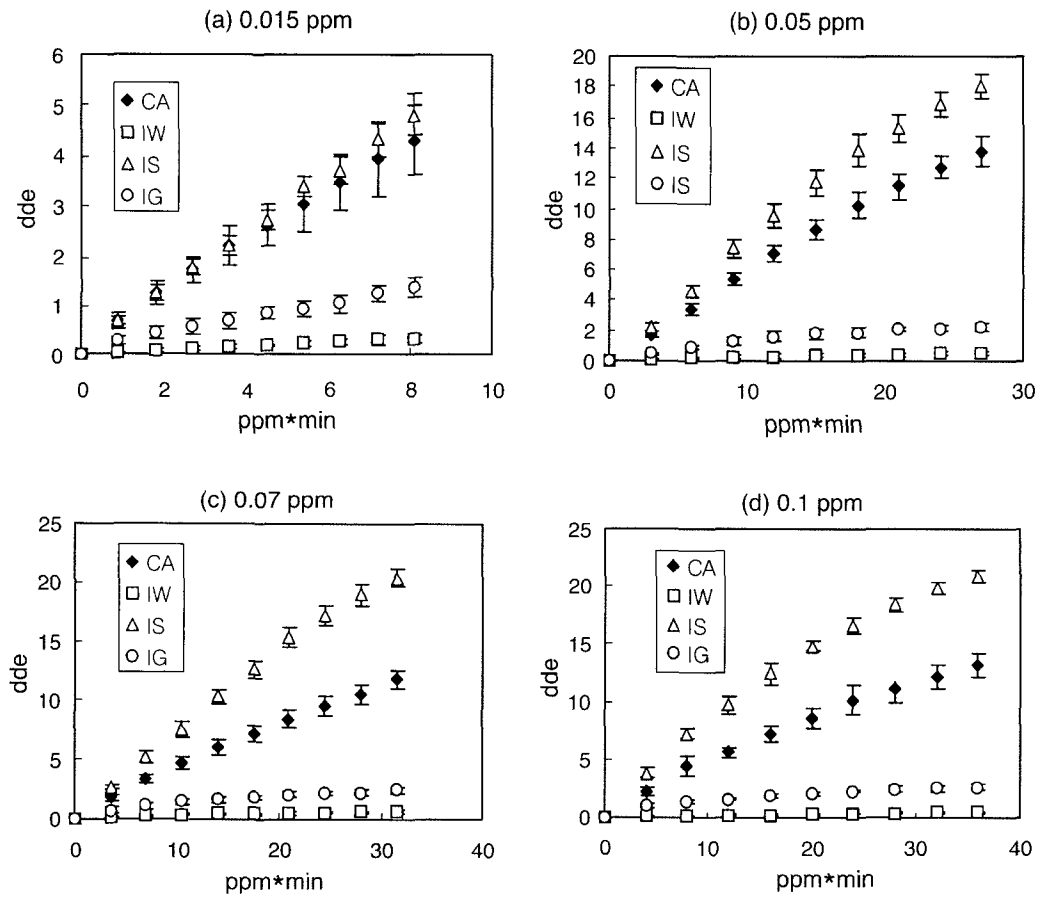


Fig. 3. Ozone response of various filter impregnated with indigo carmine and ChromAir.

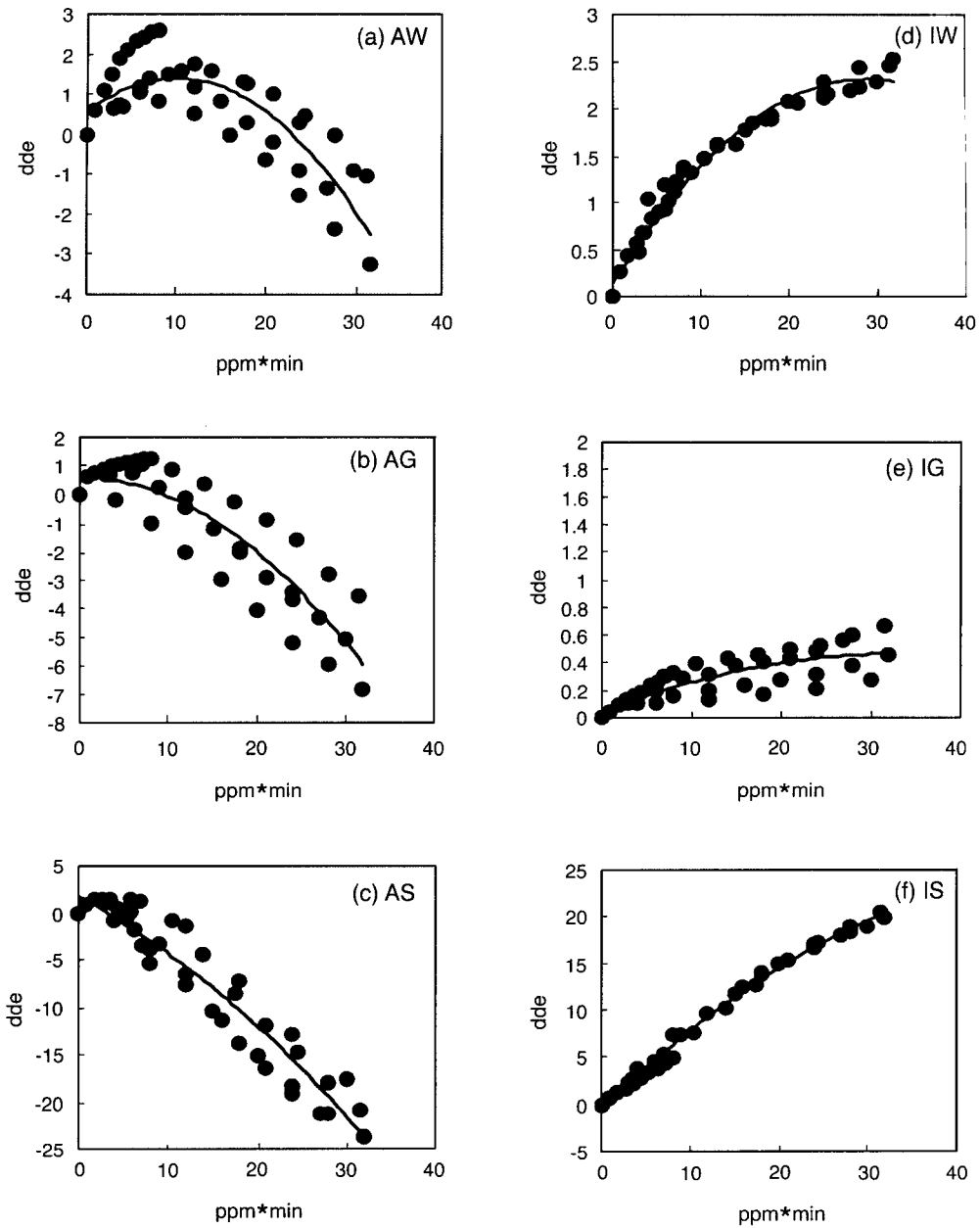


Fig. 4. Comparison of azine colarant to indigo colarant.

기 위하여 동일 농도에 노출한 결과(0.015에서 0.1 ppm의 실험 결과)를 나타내었다. 각 그림에서 그림 위의 숫자는 노출농도를 나타내고 그림의 자료점은 표준편차(각 시료별로 5개의 샘플을 실험하고 평균

과 표준편차를 구하였음)와 함께 나타내었다. 범례에서 CA, AW, AS, AG는 표 1에서 표시된 샘플러를 나타낸다. 전체적으로 azine 함침 필터의 노출 응답은 초기에 역으로 변화하는 경향을 나타고 있으

며 일정 시간 노출 후 정상상태를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Silica Gel 필터를 사용한 경우 응답성이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 다음으로 Whatman No.1 필터 그리고 SG81 필터 순으로 나타났다. Silica Gel 필터의 경우 노출 농도가 높을수록 응답성이 더 좋아지는 것으로 나타났으며, 특히 0.07 ppm 이상의 노출에서는 Silica Gel 필터(그림의 삼각형)의 경우가 상용제품인 ChromAir보다 더 나은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 실리카겔 필터는 다른 여지(종이 필터)와 달리 폴리에스터 필름위에 분말 실리카겔이 도포되어 있어 공극 사이로 공기의 이동이 용이하여 공기 중 오존과의 접촉이 빈번한 것이 부분적인 이유로 생각된다.

그림 3은 indigo에 함침된 필터와 ChromAir의 응답 결과(0.015에서 0.1 ppm의 실험 결과)를 비교해 보기 위하여 나타내었다. indigo에 함침된 필터는 전체적으로 azine에서와 같은 초기 역현상은 나타나지 않았으며, 오존 노출에 응답도 더 나은 것으로 나타났다. 필터별 응답성은 Silica Gel이 가장 좋은 것으로 나타났으며 다음으로 azine함침 필터의 경우와 달리 SG81, Whatman No.1의 순서였다. Silica Gel 필터의 경우 모든 노출 농도에서 ChromAir 보다 응답성이 더 나은 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 노출 농도가 높을수록 뚜렷한 경향을 나타내었다.

그림 4에서는 본 연구에서 사용한 제작한 간이측정기의 착색제 및 필터별 전체 노출 농도(0.015에서 0.2 ppm 사이)에 대한 응답 경향을 살펴보기 위하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 노출 응답의 경향은 착색제보다는 필터에 좌우되는 경향을 나타내었다. 각 필터에 대한 응답 범위는 Whatman No.1 필터의 경우 dde의 범위가 3 정도로 유사하게 나타났으며, SG81 필터의 경우는 azine(dde의 범위 8)이 indigo(dde의 범위 0.3)보다 더 좋은 것으로 나타났다. Silica Gel 필터의 경우 azine(dde의 범위 25)이 indigo(dde의 범위 20)보다 나은 것으로 나타났다. 그러나 azine의 경우 indigo의 경우보다 자료의 분산은 큰 것으로 나타났다.

표 3에서는 그림 4에서 나타낸 응답특성을 구체적으로 보기 위하여 사용된 2차회귀식과 상관계수 그리고 사용된 자료수를 비교해 보기 위하여 나타

Table 3. Regression equation of passive sampler.

Sampler	Equation	Correlation coefficient	Number of sample
IW	$y = -0.0004x^2 + 0.0255x + 0.04$	0.812	50
IS	$y = -0.0079x^2 + 0.9031x - 0.40$	0.996	50
IG	$y = -0.0026x^2 + 0.150x + 0.147$	0.988	50
AW	$y = -0.0060x^2 - 0.012x + 0.640$	0.891	50
AS	$y = -0.0088x^2 + 0.5143x + 1.78$	0.960	50
AG	$y = -0.0081x^2 + 0.1624x + 0.58$	0.807	50

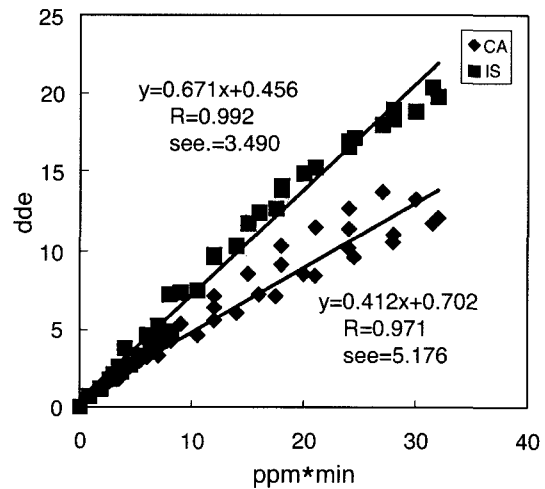


Fig. 5. Comparison of ChromAir to Silica Gel filter impregnated with indigo carmine.

내었다. 표에서 알 수 있듯이 2차식으로 회귀식을 사용하는 경우 상관계수는 0.807에서 0.996의 범위에 있고, indigo에 함침된 Silica Gel 필터의 경우 상관계수가 가장 큰 것(0.996)으로 나타났다.

그림 5에서는 본 연구에서 제작된 샘플러 중 가장 응답성이 좋은 indigo에 함침된 Silica Gel(그림의 IS) 필터와 ChromAir(그림의 CA)의 응답성능(0.015에서 0.1 ppm의 실험 결과)을 비교해 보기 위하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 누적노출(ppm × min)이 클수록 IS는 CA보다 응답성이 좋은 것(누적노출 30에서 2배)으로 나타났다. 전체 자료를 1차회귀식으로 표시한 결과 IS는 상관계수가 0.992로 CA의 0.971보다 나은 것으로 나타났으며, 평가표준오차(standard error of estimate: 그림 5의 see)도 작은 것으로 나타났다.

그림 6에서는 제조된 필터의 실험실 내에서 보관

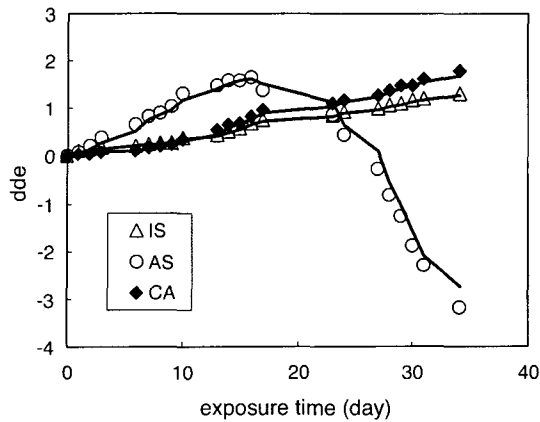


Fig. 6. Comparison of shelf life for three passive sampler.

성을 보기 위하여 나타낸 것이다. 보관성을 검토하기 위하여 두 가지 시약에 함침된 Silica Gel 필터와 ChromAir를 35일간 실험실내 데시케이트에 보관하고 일정 시간 간격으로 색도 변화를 관측한 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 azine에 함침한 Silica Gel 필터(그림에서 AS)는 15일까지 탈색 현상(본래는 착색되어야 함)이 나타나고 이 후에는 비교적 큰 폭으로 착색(dde의 범위 5)되고 있다.

Indigo에 함침된 필터(그림에서 IS)와 ChromAir(그림에서 CA)는 모두 점진적으로 탈색이 일어나고 있으며, 35일 보관기간 중 탈색의 범위는 Indigo(dde의 범위 1)이 ChromAir(dde의 범위 2)보다 작은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 단기간(4.5에서 9.0시간) 노출용 오존 간이측정기에 적합한 필터 성능을 평가하기 위하여 3가지 필터(Whatman No.1 paper, SG81 chromatography paper 그리고 Silica Gel coated on polyester(TLC Plates))와 두 가지 착색제(indigo carmine 과 3-methyl-2-benzothiazolinone acetone azine)을 사용하는 6종류의 간이측정기를 제작하였다. 제작된 간이측정기의 성능 평가를 위하여 K&M environmental 제품(ChromAir)과 함께 오존 챔버 내에서

오존에 노출시키고 성능 비교를 하였다.

전체적으로 azine 함침 필터의 노출 응답은 초기에 역으로 변화하는 경향을 나타고 있으며 일정 시간 노출 후 정상상태를 나타내었다. azine 함침 필터는 Silica Gel 필터를 사용한 경우 응답성이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 다음으로 Whatman No.1 필터 그리고 SG81 필터 순으로 나타났다. indigo에 함침된 필터는 전체적으로 azine과 같은 초기 역현상은 나타나지 않았으며, 오존 노출에 응답도 더 나은 것으로 나타났다. 필터별 응답성은 Silica Gel 필터에서 가장 좋은 것으로 나타났으며 azine 함침 필터의 경우와 달리 SG81, Whatman No.1의 순서였다. 간이 측정기의 착색제 및 필터별 응답 경향은 착색제보다는 필터에 좌우되는 것으로 나타났다. 두 가지 시약을 사용한 각 필터에 대한 응답 범위는 Whatman No.1 필터의 경우 dde가 3 정도로 유사하게 나타났으며, SG81 필터의 경우는 azine(dde의 범위 8)이 indigo(dde의 범위 0.3)보다 더 좋은 것으로 나타났다. Silica Gel 필터의 경우 azine(dde의 범위 25)이 indigo(dde의 범위 20)보다 나은 것으로 나타났으나 azine의 경우는 indigo의 경우보다 분산이 큰 것으로 나타났다.

제조된 필터를 실험실 데시케이트에 보관하는 경우 보관성은 azine에 함침한 Silica Gel 필터는 15일까지 탈색 현상이 나타나고 이 후에는 비교적 큰 폭으로 착색(dde의 범위 5)되었고, indigo에 함침된 필터와 ChromAir는 모두 점진적으로 탈색이 일어나고 있으며, 35일 보관기간 중 탈색의 범위는 indigo에 함침된 필터가 ChromAir 보다 적게 변화되었다.

이상의 결과에서 본 연구에서 제작한 indigo carmine 착색제에 함침한 Silica Gel 필터가 챔버내 오존 노출에서 가장 응답성이 좋은 것으로 나타났으며 결과의 편차도 적은 것으로 나타났다. 또한 데시케이트에 보관하는 경우 다른 간이 측정기보다 색도 변화가 작았다. 그러나 본 연구의 결과는 실험실 오존 챔버내에서 한정된 농도에서 노출한 결과이므로 현장 사용을 위해서는 1) 현장에서 간이 측정기와 자동 측정기의 관측결과 비교 작업 2) 다른 화학종의 간섭현상 등에 대한 향후 연구가 있어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2001학년도 경기대학교 학술연구비 (일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었으며 연구비 지원에 대하여 감사드립니다.

참 고 문 헌

김기현 외 30인 (2000) 환경분석을 위한 대기환경시험법, 동화기술, 514pp.
 김한수, 김선태, 윤은영, 김신도 (2001) 형광광도법을 이용한 오존 passive sampler의 개발, 한국대기환경학회 2001 추계학술대회 논문집, 245-246.
 박민수, 우진춘, 박선태 (2001) Chamber test를 통한 대기환경 중 오존측정을 위한 Passive sampler의 성능평가, 한국대기환경학회 2001 추계학술대회 논문집, 243-244.
 양원호, 이선화, 백도명 (2001) 시간가중치 평균모델을 이용한 이산화질소의 노출평가 및 예측, 한국대기환경학회지, 17(3), 251-258.
 양원호, 이기영, 백도명 (2000) 실내 및 실외 공기 중 이산화질소의 개인 노출량 측정을 위한 수동식 시료채취기의 성능평가, 한국대기환경학회지, 6(6),

625-631.
 정상진 (2001) 오존 간이측정기의 챔버내 성능 평가에 관한 연구, 경기대학교 산업기술융합연구소 논문집, 22, 47-56.
 정상진 (2001) 대기 중 오존측정을 위한 간이측정기에 대한 연구, 한국대기환경학회 2001 추계학술대회 논문집, 241-242.
 Geyh, A.H., J.D. Mulik, and E.L. Avol (1997) Development and Evaluation of a small active ozone sampler, *Env. Sci. & Technol.*, 31(8), 2326-2330.
 Krupa, S.V. and A.H. Legge (2000) Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective, *Environmental pollution*, 107, 31-45.
 Lambert, J.L. and J.V. Paukstelis (1989) 3-Methyl-2-benzothiazolinone acetone Azine with 2-Phenylphenol as a Passive Monitoring Reagent for ozone, *Env. Sci. Technol.*, 23, 241-243.
 Palmes, E.D., A.F. Gunnison, J. DiMatto, and C. Tomczyk (1976) Personal sampler for nitrogen-dioxide, *Journal of American Industrial Hygiene Association*, 10(37), 570-577.
 Zhou, J. and S. Smith (1997) Measurement of ozone concentration in ambient air using a badge-type passive monitor, *J. Air & Waste Manage. Associate*, 47, 697-703.