

단기 측정용 오존 간이 측정기의 실험 챔버 내에서 성능에 관한 연구

정 상 진

경기대학교 공과대학 환경공학전공
(2007년 6월 18일 접수; 2007년 7월 13일 채택)

A Study on the Performance of a Short Term Ozone Passive Sampler in Experimental Chamber

Sang Jin Jeong

Department of Env. Eng. Kyonggi University, Kyonggi-Do 442-760, Korea
(Manuscript received 18 June, 2007; accepted 13 July, 2007)

Passive sampler is a simple and cost-effective measuring equipment for ambient and indoor air pollution. We studied the performance of a short term (1 hour mean concentration) ozone passive sampler which was coated with a colorant (indigo carmine) to a filter substrate. Acetone and sulfamic acid added ozone passive sampler was investigated to measure short term mean ozone concentration. Ozone response and interference of criteria air pollutant(SO₂, NO₂, CO) on a short term ozone passive sampler was tested through experimental chamber. The results show sulfamic acid added passive ozone sampler have good response in ozone exposure. Interference of NO₂ gas is larger than other two criteria gases.

Key Words : Short term passive sampler, Ozone, Interference, Indigo carmine

1. 서 론

대기 중의 오염물을 측정하기 위한 간이측정기는 경제적이고, 조작이 간단하여 많이 사용되고 있는 농도 측정방법이다. Krupa와 Legge¹⁾에 따르면 간이 측정기로 측정할 수 있는 대기오염물은 NO₂, CO, SO₂, VOC, O₃, HCHO, NH₃ 등이 있으며 샘플링 시간은 보통 수일에서 주 단위이다. 국내에서 간이측정기를 이용한 대기 중 오염물질을 분석하는 방법에 대한 최근의 연구로는 천 등²⁾, 우 등³⁾, 양 등⁴⁾, Kim and Kim⁵⁾, Kim and Maeda⁶⁾, 정과 장⁷⁾, 임 등⁸⁾, 최와 장⁹⁾, 김 등¹⁰⁾, 김 등¹¹⁾의 연구가 있다. 대기 중 NO₂의를 측정하기 위한 간이 측정기에 대한 연구로는 천 등²⁾, 우 등³⁾, 양 등⁴⁾, Kim and Kim⁵⁾ 그리고 김 등¹¹⁾이 있다. 정과 장⁷⁾, 김 등¹⁰⁾은 포름알데히드를 측정하는 간이 측정기에 대한 연구를 하였다. 최와 장⁹⁾은 간이측정기를 이용하여 잔류성 유기오염물질을 측정하였다. 간이측정기를 이용한 오존 측정에

관한 연구로는 임 등⁸⁾과 정¹²⁾의 연구가 있다. 임 등⁸⁾은 형광물질을 이용한 대기 중 오존 측정을 위한 간이 측정기를 개발하였으며 정¹²⁾은 색도법을 이용한 오존 간이 측정기의 개발을 하였다.

착색여지를 이용하여 색도법으로 대기 중 오염물질의 농도를 측정하는 외국의 연구로는 Kizil 등¹³⁾, Shan 등¹⁴⁾, Grosjean and Hisham¹⁵⁾이 있다. Kizil 등¹³⁾은 색도법을 이용하여 오스트레일리아에서 탄광광도 내에 불연석탄입자의 성분을 모니터링 하였다. Shan 등¹⁴⁾은 식품산업 분야에서 감자스낵의 표면에 부착된 양념 성분의 농도 분석을 위하여 색도법을 사용하였다. Grosjean and Hisham¹⁵⁾은 실내외 오존을 측정하기 위하여 색도법을 사용하였다. 국내에는 색도법을 이용하여 대기 중 오염물을 측정한 예로는 장¹⁶⁾, 정¹²⁾, 정과 양¹⁷⁾의 연구가 있다. 장¹⁶⁾은 대기 중 실내공기중의 포름알데히드를 색도법으로 측정하였으며, 정¹²⁾과 정상진과 양¹⁷⁾은 오존을 색도법을 이용하여 측정하였다.

현재 대기 중 오존 농도에 대한 평균 시간은 1시간, 8시간 평균 농도로 설정 되어 있어서 단시간 오

Corresponding Author : Sang Jin Jeong, Department of Env. Eng. Kyonggi University, Kyonggi-Do 442-760, Korea
Phone: +82-31-249-9734
E-mail: sjjung@kyonggi.ac.kr

존 농도를 측정할 수 있는 간편하고 경제적인 간이 측정기의 개발이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 색도법을 이용한 단기 측정용(1시간)오존 간이 측정기를 개발하고자 하였다. 또한 개발된 간이 측정기의 성능 평가를 위하여 대기 중 다른 오염물질의 간섭 현상을 실험하고 제작된 간이 측정기를 보관하는 경우 변색에 대한 실험을 하였다. 단기 오존 농도 측정용 간이측정기는 이전의 연구(Grosjean and Hisham¹⁵⁾, 정¹²⁾)를 참조로 착색시약과 여지를 선택하여 착색여지를 제작하였다. 제작된 착색여지는 실험실 챔버 내에서 일정 농도의 오존에 노출하여 응답 특성을 관찰하였다. 대기 중에 존재하는 기준성오염물(CO, SO₂, NO₂)에 대한 간섭 현상을 관찰하기 위하여 실험실에서 제작된 간이측정기를 기준성 오염물질의 환경 기준 농도에 노출하고 간섭 실험을 실시하였다. 착색여지의 보관성을 측정하기 위하여 비닐팩에 보관된 간이측정기의 색도 변화를

관측하고 결과를 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 장치

오존간이측정기 농도 측정을 위한 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 실험 장치는 노출 농도 측정을 위한 자동측정기 부분과 함침필터를 각종 가스에 노출시키는 반응 챔버로 나눌 수 있다. 오존 가스는 Thermo사의 Dynamic gas calibrator NO.146으로 오존을 발생시켜 제로 가스로 희석하여 농도를 조절하였다. 다른 기준성 가스(NO₂, SO₂, CO)는 시판하는 고순도가스를 희석하여 사용하였다. Table 1에서는 본 연구에서 사용된 대상 오염물질별 분석기기의 모델과 제작사를 나타내었다.

제작된 함침필터를 각종 가스에 노출시키기 위한 챔버는 지름×길이(53 mm×280 mm)인 아크릴로 만들었다. 원통형 챔버는 유입 가스가 충분히 혼합될

Table 1. Summary of Experimental Analyzer

Pollutant	Analyzer	Producer
O ₃	Model 400E	Teledyne Instruments
NO ₂	Model 200E	Teledyne Instruments
CO	Model 48	Thermo Environmental Instruments
SO ₂	Model 43A	Thermo Environmental Instruments

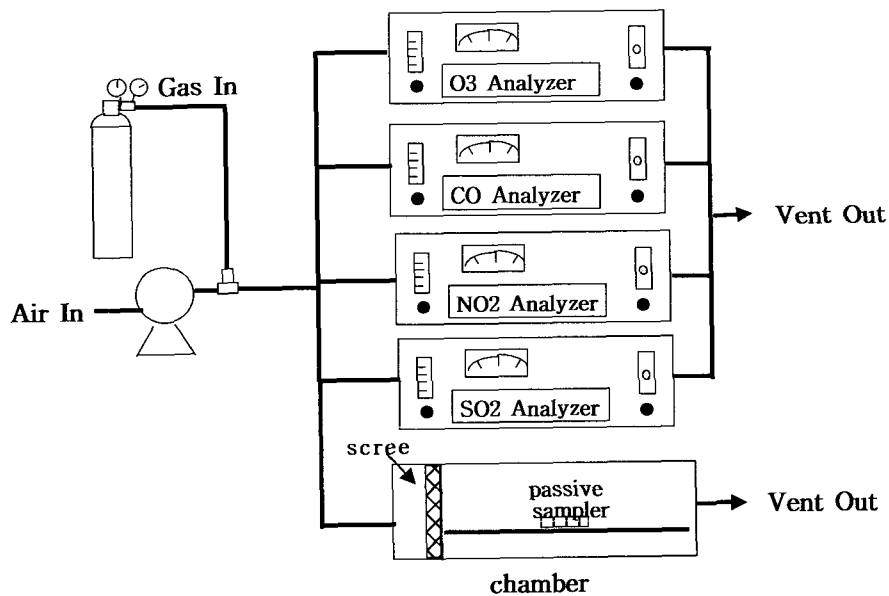


Fig. 1. Schematic diagram of experimental system.

수 있도록 가스 유입부에 스크린을 설치하였다.

2.2. 실험 방법

오존 간이 측정기는 Grosjean and Hisham¹⁵⁾과 정^{12,18)}의 연구를 참고로 착색시약을 제조하고 제작된 착색 시약을 TLC plate에 함침하여 제작하였다. 착색 필터의 크기는 가로(1.5 cm)×세로(1.2 cm)이고 필터 상부를 지름 8 mm의 홀이 있는 보호용 테이프를 부착하였다. 보호용 테이프는 상면이 폴리프로필렌으로 코팅되고 반대편은 아크릴계 접착제가 도포된 종이이다.

본 연구에서는 단기 측정용 오존 간이측정기 개발을 위하여 착색시약은 Grosjean and Hisham¹⁵⁾이 제안한 Indigo carmine(1.6 g)과 Methanol (100 ml)의 혼합액으로 이 용액에 Glycerol (1 mL)을 첨가하는 경우와 첨가하지 않는 경우에 대한 응답 특성을 조사하였다. 모¹⁹⁾에 따르면 NO₂를 측정하는 그리스-살츠만법에서 아세톤을 첨가하면 SO₂의 간섭을 저지하는 효과가 있고, 동화기술편집부²⁰⁾에 따르면

SO₂를 측정하는 파라로자닐린법에서 설파민산은 NO₂의 간섭을 저지하는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이들 시약을 첨가하여 간이측정기의 간섭을 저지하는 효과를 관측하였다. 착색여지는 정¹²⁾에 따라 TLC plate 필터를 사용하였다. 착색시약을 여지에 부착시키기 위하여 착색시약에 여지를 5분간 함침 시킨 후 실온에서 20분간 건조하였다.

Table 2에서는 간섭물질 제거용으로 1% 설파민산 용액(각각 0, 2, 4, 6, 8, 10 mL를 첨가)과 1% 아세톤 용액(각각 0, 2, 4, 6, 8, 10 mL첨가)을 첨가하여 제조한 22종의 함침여지에 대한 착색 시약의 샘플 코드별 사용 시약의 첨가량을 나타내었다.

제작된 간이 측정기는 챔버 내에서 오존에 의하여 충분한 변색을 관측할 수 있도록 평균농도 약 0.4 ppm으로 345분(5.75시간) 동안 노출하였다. 이때 챔버 내 유입유량은 1 L/min로 하였으며, 오존 가스에 노출시킨 후 색도가 변화된 필터의 영상 획득, 저장 및 분석을 위하여 상용시스템인 엡슨사의 스캐너(Model : EPSON PERFECTION 1250, 1200

Table 2. Sampler code and reagent conditions

Sampler Code	Reagent	Indigo Carmine + Methanol Solution(mL)	Glycerol (mL)	1% Sulfamic Acid(mL)	Acetone (mL)
IMS0(=IMA0)		50	0	0	0
IMS2		48	0	2	0
IMS4		46	0	4	0
IMS6		44	0	6	0
IMS8		42	0	8	0
IMS10		40	0	10	0
IMA2		50	0	0	2
IMA4		48	0	0	4
IMA6		46	0	0	6
IMA8		44	0	0	8
IMA10		42	0	0	10
IMGS0(=IMGA0)		50	1	0	0
IMGS2		48	1	2	0
IMGS4		46	1	4	0
IMGS6		44	1	6	0
IMGS8		42	1	8	0
IMGS10		40	1	10	0
IMGA2		48	1	0	2
IMGA4		46	1	0	4
IMGA6		44	1	0	6
IMGA8		42	1	0	8
IMGA10		40	1	0	10

dpi)를 사용하였다. 획득된 영상을 분석하기 위한 소프트웨어는 Adobe Photoshop 7.0을 사용하였다. 획득된 영상의 색도 분석은 RGB(Red, Green, Blue) 색도 좌표계를 사용하였으며, 색도분석을 위해 영역 크기를 $W \times H = 0.51 \times 0.51$ (60 pixel \times 60 pixel = 3600 pixels)로 고정하여 평균 색도를 구하고 분석하였다. 정상진과 양¹⁷⁾에 따르면 스캐너의 색도 재현성은 $dRGB = \sqrt{dR^2 + dG^2 + dB^2}$, $dR = R_e - R_i$, $dG = G_e - G_i$, $dB = B_e - B_i$, 여기서 첨자 e는 최종값, i는 초기값을 각각 나타낸다.)가 10에서 102 범위의 9개의 시료를 각각 8회씩 스캔한 결과 dRGB가 10이상에서 변동계수는 2%이하로 스캐너의 재현성은 양호한 것

으로 나타났다.

간섭현상 실험을 위하여 농도 발생은 SO₂(200 ppm), NO₂(400 ppm), CO(80 ppm) 가스를 공기로 희석하여 사용하였다. 간섭가스의 노출 농도는 환경기준 부근 농도를 설정하였으며 노출 농도는 평균적으로 SO₂(0.148 ppm), NO₂(0.172 ppm), CO(25.5 ppm)이었다. Table 3에서는 오존 및 간섭 실험 조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오존간이측정기의 응답특성

Fig. 2에서는 22종(IMS0=IMA0, IMGS0=IMGA0로 동일 조건임)의 착색시약을 사용하여 챔버에 노

Table 3. Summary of Experimental Condition

Pollutant	Concentration(ppm)			Temp.(°C)			Humidity(%)		
	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.
O ₃	0.404	0.401	0.405	20.1	17.0	22.0	27.8	19.0	32.0
CO	25.5	24.7	26.1	16.5	11.0	21.0	22.1	18.0	28.0
SO ₂	0.148	0.142	0.156	18.7	20.0	17.5	40.7	38.0	44.0
NO ₂	0.175	0.148	0.216	16.9	13.0	19.0	40.1	39.0	42.0

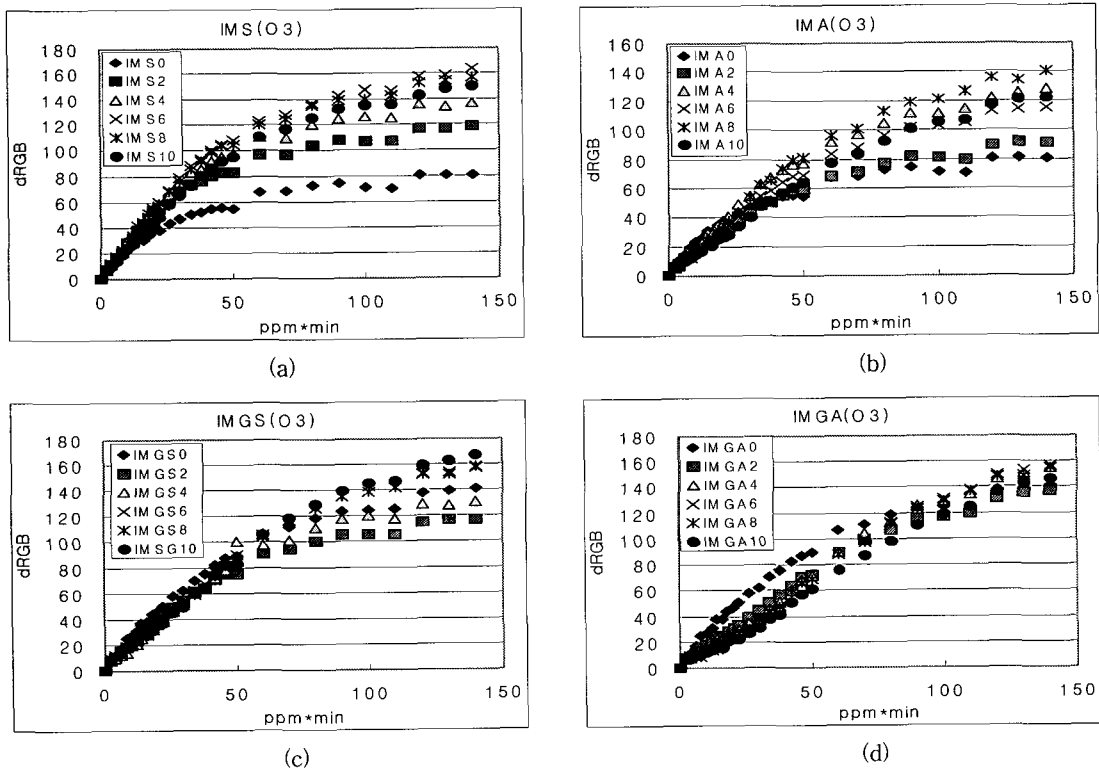


Fig. 2. Long term cumulative color change of short term O₃ passive sampler. (a), (b); non-glycerol case, (c), (d); added glycerol case.

출된 오존 간이 측정기의 장기간(140 ppm*min; 0.15 ppm에서 15.6시간 노출하는 경우에 해당) 응답 특성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 오존에 대한 노출은 40 ppm*min(1시간 환경기준 농도(0.15 ppm)에 266분(약 4.4시간) 노출되는 경우)까지 선형 변화를 나타내고 있으며 그 이상에서는 비선형적으로 변화하였다.

Fig. 3에서는 단기간 응답 특성을 자세히 보기 위하여 Fig. 2에서 나타낸 결과 중 x축에서 40 ppm*min 이하 단기간의 경향을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 글리세롤을 첨가하지 않고 설파민산만 첨가한 경우(Fig. 3의 (a))는 첨가한 설파민산의 양이 증대함에 따라 변색범위가 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 그 외의 경우(Fig. 3의 (b), (c), (d))는 변색범위가 감소하는 경향을 나타내었다. 4가지 경우 중 글리세롤을 첨가하지 않고 설파민산을 첨가한 경우(Fig. 3의 (a))가 가장 좋은 응답 특성을 나타내고 있다. 글리세롤을 넣지 않고 설파민산을 첨가한 경우 좋은 선형성(Fig. 3(a)에서 IMS6 경우로 결정계수; 0.995)과 넓은 변색범위(dRGB=0~90)를 나타내고 있으며 설파민산을 더

많이 첨가하는 경우(IMS8(8 mL 첨가), IMS10(10 mL 첨가)) 변색 범위가 다시 줄어드는 것으로 나타났다. 글리세롤을 첨가하고 설파민산을 첨가한 경우(Fig. 3의 (c), (d))는 설파민산을 첨가하지 않는 경우(IMGS0=IMGA0)가 가장 넓은 변색범위를 나타내어 글리세롤을 첨가하는 경우에는 설파민산과 아세트산을 첨가하지 않는 것이 오존에 대한 응답성이 좋은 것으로 확인되었다.

3.2. NO₂ 간섭현상 실험결과

Fig. 4에서는 NO₂에 노출시킬 때(평균농도 0.175 ppm) 각 착색여지의 응답 특성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 NO₂는 글리세롤을 포함하지 않은 경우 dRGB 30(Fig. 4의 (a), (b)) 정도 그리고 글리세롤을 포함하는 경우 dRGB를 35(Fig. 4의 (c), (d)) 정도 변화시키는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 글리세롤을 첨가하지 않는 경우가 NO₂에 노출될 때 영향을 적게 받는 것을 나타낸다. 두 가지 경우 10 ppm*min까지는 노출시간 증대에 따라 NO₂의 영향이 증대하다가 그 이후는 감소하는 것으로 나타났다. 이 경우 간이측

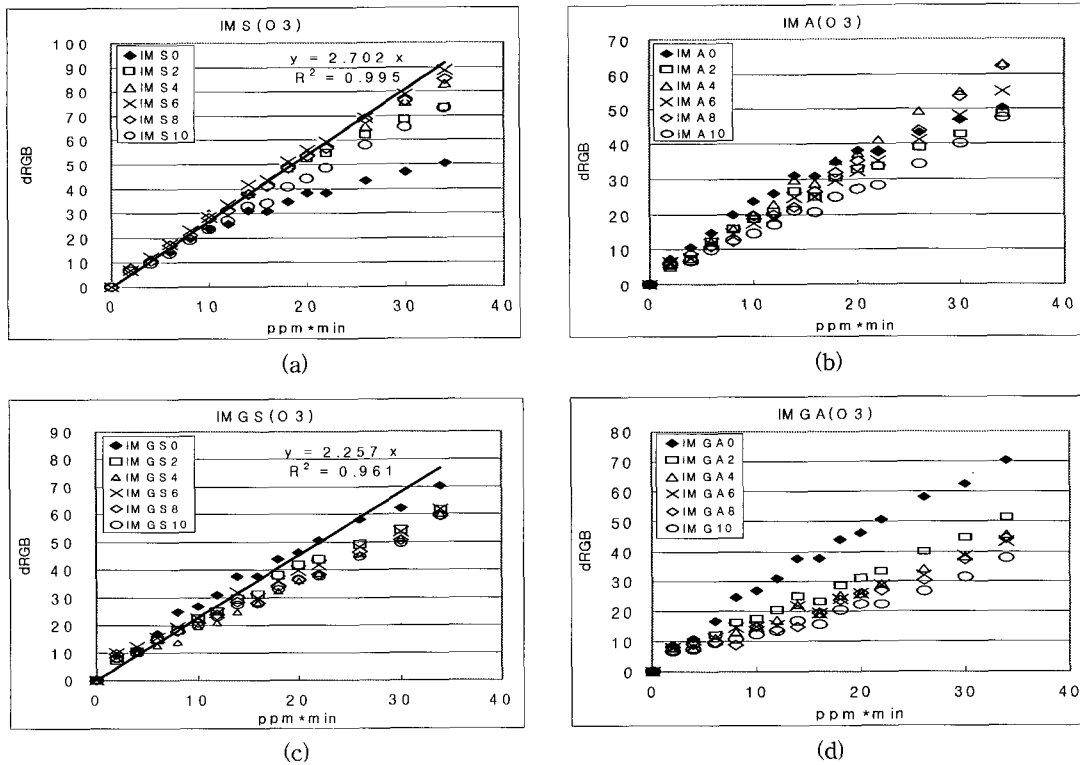


Fig. 3. Short term cumulative color change of O₃ passive sampler. (a), (b); non-glycerol case, (c), (d); added glycerol case.

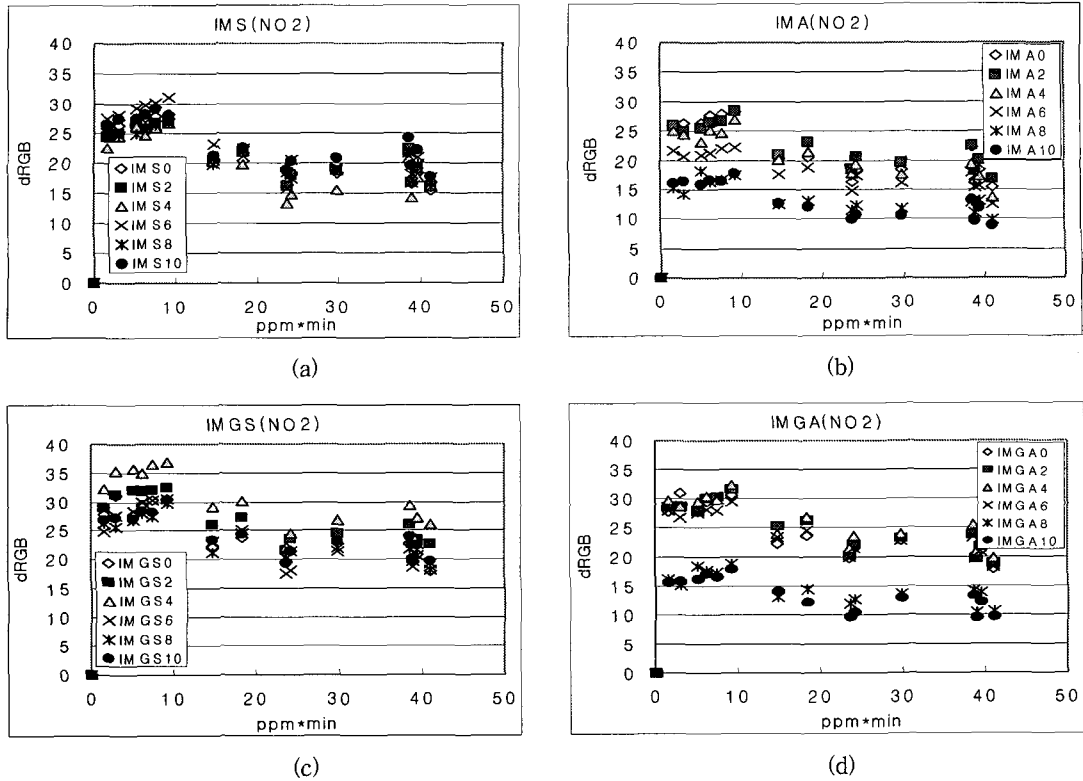


Fig. 4. Cumulative color change fraction of NO₂ interference gas. (a), (b); non-glycerol case, (c), (d); added glycerol case.

정기가 NO₂에 노출될 때 초기(10 ppm*min 까지)만 영향을 받고 그 이후로는 영향이 없음을 의미한다. 글리세롤을 첨가하지 않고 설파민산을 첨가한 경우 (Fig. 4의 (a)) 설파민산의 첨가량이 많을수록 NO₂의 영향을 많이 받는 경향을 나타내어 설파민산이 NO₂의 간섭을 제거하는 효과가 미미한 것으로 나타났다. 글리세롤을 첨가하고, 설파민산을 첨가한 경우 (Fig. 4의 (c)) 설파민산 첨가량 증대에 따라 NO₂의 영향을 감소시키는 효과가 일관성이 없는 것으로 나타났다.

3.3. SO₂ 간섭현상 실험결과

Fig. 5에서는 SO₂ (평균농도 25.5 ppm)에 노출되는 경우 응답 특성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SO₂는 글리세롤이 첨가되지 않은 경우 dRGB를 12에서 8(Fig. 5의 (a), (b))정도 변화시키고 글리세롤이 첨가된 경우 dRGB 9에서 10(Fig. 5의 (c), (d))까지 변화시켰다. 글리세롤을 포함하지 않고 아세톤을 첨가한 경우(Fig. 5의(b)) 아세톤 첨가량의 증대에 따른 SO₂ 저지 효과는 초기에는 첨가량 증대에 따라 저지 효과가 있으나 10 ppm*min 이상에서는 일관성이 있는 경향을 나타내지 않았다. 글리세

롤을 첨가하고 아세톤을 첨가한 경우(Fig. 5의 (d)) 초기 아세톤의 첨가량이 작을 경우에만 SO₂ 저지 효과가 있는 것으로 나타났다.

3.4. CO 간섭현상 실험결과

Fig. 6에서는 CO(평균농도 0.175 ppm)에 노출되는 경우 응답 특성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 CO는 글리세롤이 첨가되지 않은 경우(Fig. 6의 (a), (b)) dRGB를 10에서 14정도 변화시켰으며 글리세롤이 포함된 경우(Fig. 6의 (c), (d)) dRGB를 10에서 13까지 변화시켰다. 이와 같은 결과는 CO의 간섭은 글리세롤의 유무와는 관계가 없음을 의미한다. 아세톤을 첨가한 경우 (Fig. 6의 (b), (d)) 첨가량 증대에 따라 영향이 감소하는 경향을 나타내고 있으나 설파민산을 첨가한 경우는 영향이 불규칙한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 CO의 영향도 NO₂에서와 유사하게 초기 변화(10 ppm*min 까지 변화)가 지배적임을 의미한다.

3.5. 착색여지의 보관성

착색여지의 보관성을 관측하기 위하여 제작된 착색여지를 비닐 팩에 밀봉하여 보관하고 21일간 일

단기 측정용 오존 간이 측정기의 실험 챔버 내에서 성능에 관한 연구

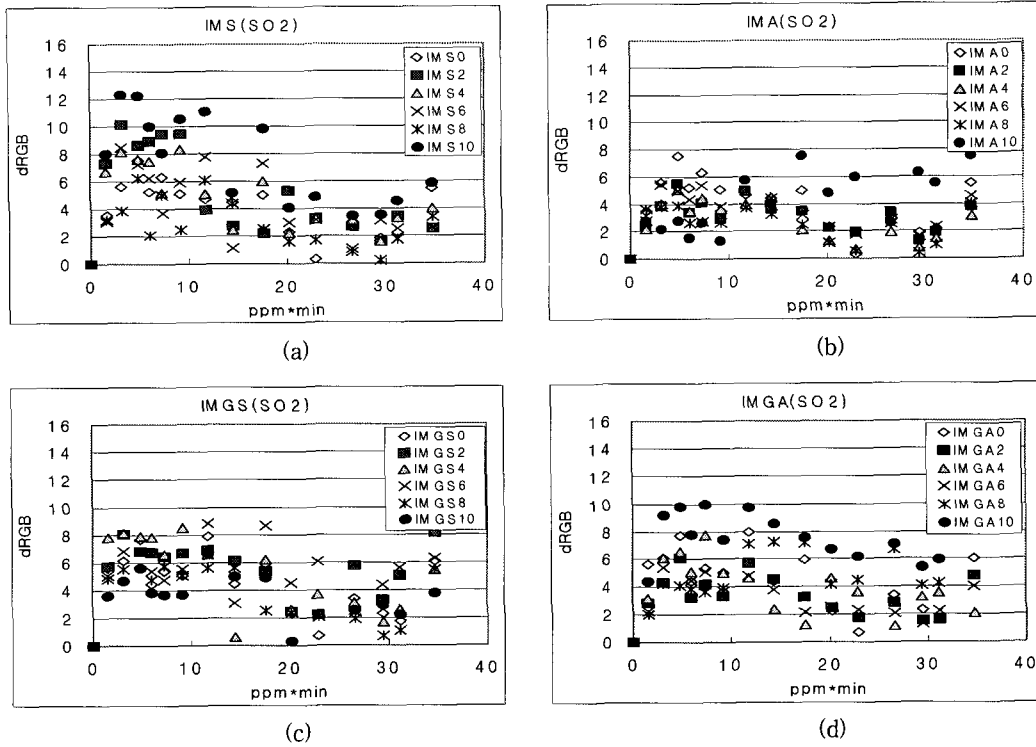


Fig. 5. Cumulative color change fraction of SO₂ interference gas. (a), (b); non-glycerol case, (c), (d); added glycerol case.

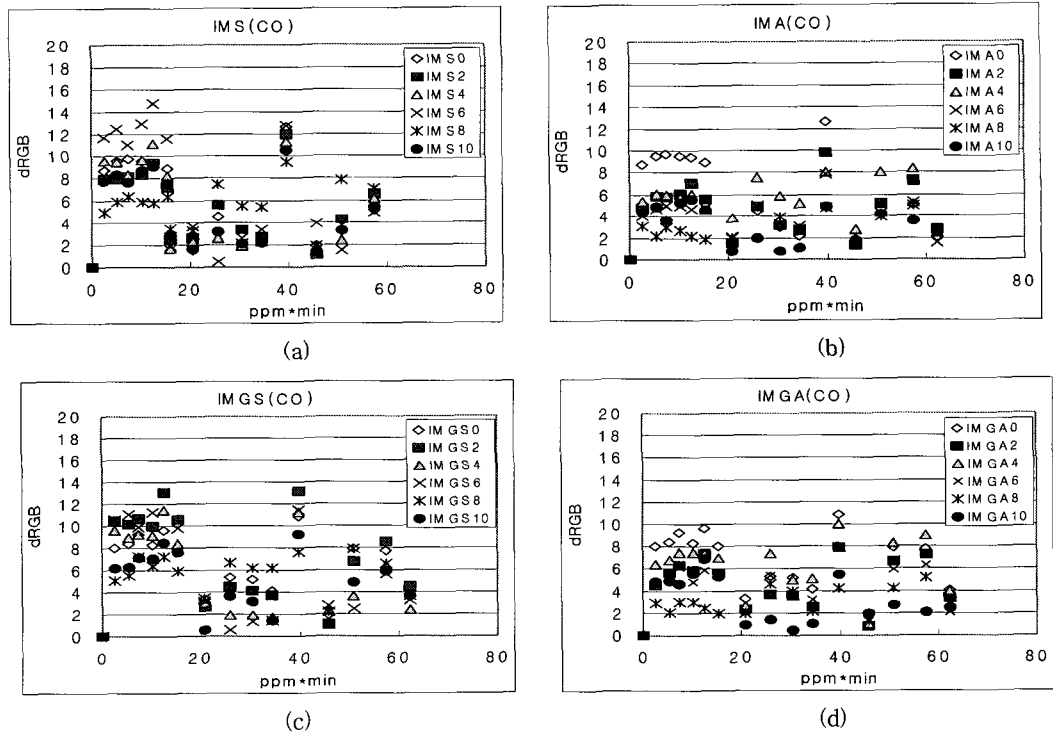


Fig. 6. Cumulative color change fraction of CO interference gas. (a), (b); non-glycerol case, (c), (d); added glycerol case.

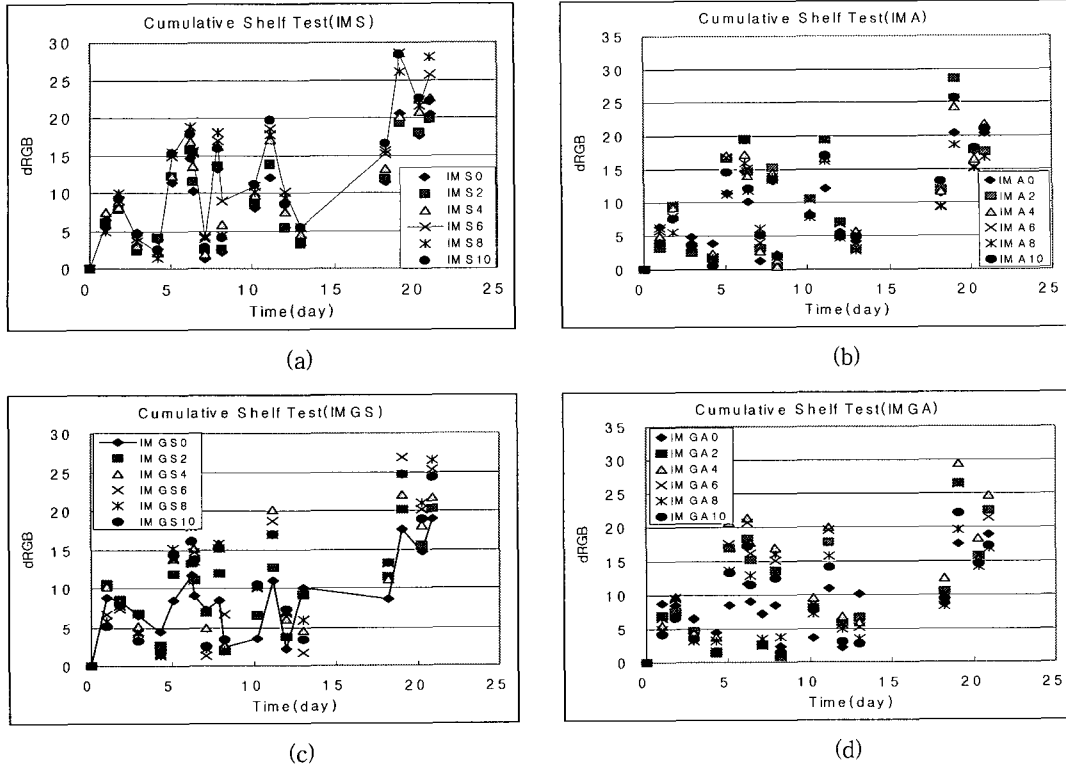


Fig. 7. Shelf life of Various short time passive sampler. (a), (b); non-glycerol case, (c), (d); added glycerol case.

별 단위로 스캔하여 분석하였다. Fig. 7에서는 21일간 보관 도중 색도 변화를 관측한 결과를 나타내었다. 글리세롤이 첨가되지 않은 경우(Fig. 7의 (a), (b))의 최종 변색 범위는 글리세롤이 첨가된 경우(Fig. 7의 (c), (d)) 변색 범위와 유사하게 나타났다. Fig. 7의 (a)와 (c)에는 실선으로 표시한 것은 응답 특성이 가장 좋은 글리세롤을 첨가하지 않은 경우 IMS6 와 글리세롤이 첨가된 경우 IMGS0이다. IMS6는 5일내에 10 dRGB의 변화를 나타내고 IMGS0는 비교적 장기간 15일 정도까지 색도변화 dRGB가 10 이하를 나타내고 있다. 응답성이 좋은 두 가지에 대한 이러한 결과는 착색여지를 비닐팩에 보관하는 경우 글리세롤이 첨가되지 않은 경우보다 글리세롤이 포함된 경우가 보관성이 우수함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 실외 오존의 농도를 관측하기 위한 색도법을 이용한 단기측정용(1시간) 오존 간이측정기를 제작하여 응답특성을 실험하고 실외 기준성 오염물질의 간섭현상 및 제작된 간이측정기의 보관성을 실험한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 제작한 인디고 카민 함침시약을 사용하는 단기 측정용 오존 간이측정기 중 변색범위가 가장 넓은 것은 글리세롤을 첨가하지 않고 1% 설파민산 용액을 0.6 mL첨가하는 경우로 나타났으며 이 경우 선형 응답 특성은 40 ppm*min 까지 dRGB가 90정도의 변색범위를 나타내었다. 글리세롤을 첨가하는 경우에는 설파민산과 아세톤을 첨가하지 않는 것이 오존에 대한 응답성(dRGB가 70)이 좋은 것으로 확인되었다.

2) 환경기준에 가까운 농도로 기준성 가스(NO_2 , SO_2 , CO)에 단기 측정용 간이측정기가 노출되는 경우 오존 간이 측정기에 영향을 가장 많이 주는 가스는 NO_2 (최대 dRGB가 30으로 이는 오존 만에 의한 변색범위 dRGB가 90으로 할 경우 20% 기여)이고 그 다음으로 CO(최대 dRGB가 14로 오존 만에 의한 영향의 13%), SO_2 (최대 dRGB가 12로 오존 만에 의한 영향의 12%) 순으로 나타났다.

3) 본 연구에서 개발한 착색여지를 비닐팩에 보관한 실험에서 dRGB가 10까지 변화하는데 글리세롤 없이 1% 설파민 용액을 0.6 mL 첨가한 착색여지는 약 5일 걸리고 글리세롤을 포함하고 다른 시약을 첨가하지 않은 착색여지는 약 15일이 걸리는

것을 확인하였다.

4) 이상의 결과에서 본 연구에서 개발한 단기 측정용 오존 간이 측정기의 현장 적용을 위해서는 현장 측정에 대한 검증이 필요하며 기준성 오염물의 다른 오염물질(예, PAN 등)에 대한 간섭현상에 대한 실험과 실외 기상현상(예; 풍향, 풍속, 온도 등)의 영향 검토에 대한 이후의 연구가 필요한 것으로 생각된다. 또한 제작된 간이 측정기의 장기간 보관을 위한 저장법이나 풍화 방지를 위한 처리 방법에 대한 장래 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구의 실험에 도움을 주신 경기도 보건환경연구원 관계자들과 이종필, 이경숙 학생에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Krupa S. V., Legge A. H., 2000, Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective, *Environmental Pollution*, 107, 31-45.
- 2) 천만영, 장공연, 김희강, 1992, NO₂ 간이포집기의 정도에 관한 연구, *한국대기보전학회지*, 8(2), 93-99.
- 3) 우정현, 김선태, 김정욱, 1997, 수동측정기에 의한 대기오염 자동측정망의 지역대표성 조사 및 보완방법에 대한 기초연구, 13(6), 415-426.
- 4) 양원호, 이기영, 백도명, 2000, 실내 및 실외공기 중 이산화질소 개인 노출량 측정을 위한 수동식 시료채취기의 성능평가, 16(6), 625-631.
- 5) Kim S. T., Kim H. S., 2002, The Nationwide NO₂ Monitoring with Passive Sampler in Korea, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, 18(E2), 69-77.
- 6) Kim S. T., Maeda Y., 2003, The Study on the effects of air pollution on the material damages in northeast Asia, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(E2), 51-61.
- 7) 정상진, 장재철, 2004, Methyl Yellow와 Methyl Orange 지시약을 이용한 실내공기중의 포름알데히드 간이측정기에 대한 연구, *한국대기환경학회지*, 20(6), 793-801.
- 8) 임봉빈, 정의석, 김선태, 2004, 형광물질을 이용한 대기중 오존 Passive sampler의 개발, *한국대기환경학회지*, 20(4), 483-491.
- 9) 최성득, 장윤석, 2005, Passive Air Sampler를 이용한 잔류성 유기오염물질의 대기 모니터링, *한국대기환경학회지*, 21(5), 481-494.
- 10) 김선태, 임봉빈, 정재호, 2005, 4-Amino-3-hydrazino-5-mercapto-1,2,4-triazole을 이용한 실내 포름알데히드 측정용 passive sampler 개발, *한국대기환경학회지*, 21(6), 593-603.
- 11) 김선규, 임봉빈, 정의석, 김선태, 2006, 대기중 이산화질소의 단기 측정을 위한 बै지형 passive sampler의 개발 및 평가, *한국대기환경학회지*, 22(1), 117-126.
- 12) 정상진, 2002, 오존 간이측정기에 대한 연구(I)-필터의 민감도, *한국대기환경학회지*, 18(5), 383-391.
- 13) Kizil M. S., Peterson J., English W., 2001, The effect of coal particle size on colorimetric analysis of roadway dust, *J. of Loss Prevention in the process industries*, 14, 387-394.
- 14) Shan Y., Normand N. D., Peleg M., 1997, Estimation of the surface concentration of adhered particles by color imaging, *Powder Technology*, 92, 147-153.
- 15) Grojean D., Hisham M. W., 1992, A passive sampler for atmospheric ozone, *Journal of Air & Waste Management Association*, 42, 169-173.
- 16) 장재철, 2004, 색도법을 이용한 대기 중 HCHO 측정법에 대한 연구, 석사학위논문, 환경공학과, 경기대학교. 수원.
- 17) 정상진, 양희준, 2006, 오존간이측정기에 대한 연구(II)-간섭현상 및 현장 적용성, *한국대기환경학회지*, 22(6), 904-911.
- 18) 정상진, 2001, 오존 간이측정기의 챔버내 성능평가에 관한 연구, *경기대학교 산업기술종합연구소 논문집*, 22, 47-56.
- 19) 모세영, 1996, 대기오염공학실험, 동화기술, 426pp.
- 20) 동화기술편집부, 2005, 대기오염·소음·진동 공정시험방법, 동화기술, 894pp.