

이중 채널 유리코일 샘플러를 이용한 대기 중 포름알데하이드 측정

Measurement of Formaldehyde in the Atmosphere using a Dual-channel Glass Coil Sampler

박승식* · 홍상범¹⁾ · 이재훈¹⁾ · 조성용 · 김승재
전남대학교 환경공학과, ¹⁾광주과학기술원 환경공학과
(2005년 7월 22일 접수, 2006년 3월 2일 채택)

Seung Shik Park*, Sang Bum Hong¹⁾, Jai Hoon Lee¹⁾,
Sung Yong Cho and Seung jai Kim
Department of Environmental Engineering, Chonnam National University
¹⁾*Department of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of
Science and Technology*

(Received 22 July 2005, accepted 2 March 2006)

Abstract

A dual-channel glass coil sampling technique was used to measure hourly formaldehyde concentration in the ambient air. The dual-channel coil sampling assembly consists of three parts; an all-pyrex 28-turn coil made of 0.2-cm internal diameter glass tubing for gas-liquid contact and scrubbing of soluble gases, an inlet section upstream of the coil for introducing sample air and scrubbing solution, and a widened glass section downstream of the coil for gas-liquid separation. The scrubbing solution used was a dilute aqueous DNPH (dinitrophenylhydrazine) solution. Hourly concentration of formaldehyde was determined at a Gwangju semi-urban site during two intensive studies between September and October using the dual channel glass-coil/DNPH sampling technique and HPLC (High Performance Liquid Chromatography) analysis. The mean concentration was 1.7 (0.4~4.7) and 3.0 (0.5~19.1) ppbv for the September and October intensives, respectively, which are considerably low, compared to those measured in polluted urban areas around the world including several urban areas of Korea. The diurnal variation showed significant increase of formaldehyde in the daytime suggesting the dominance of formation of formaldehyde due to photochemical oxidation of methane and other hydrocarbons. An increase in the formaldehyde sometimes in the night might be due to an increase in primary source, i.e. traffic emissions. It was also found that rapid increase in formaldehyde levels from 3.0 to 19.1 ppbv in the afternoon on October 20 was due to plumes from burning of agricultural wastes such as rice straw and stubble. It is expected from the measurement data that the constructed dual-channel glass coil sampling system can be utilized for measuring atmospheric concentration of the formaldehyde with high time resolution.

Key words : Formaldehyde, A dual-channel glass coil sampler, Agricultural wastes burning

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)62-530-1863, E-mail : park8162@chonnam.ac.kr

1. 서 론

포름알데하이드는 대류권의 가장 풍부한 카르보닐 화합물로 대기의 광화학현상을 이론적으로 이해하는데 중요한 역할을 하며, 저 농도라도 사람에게 노출되게 되면 급성 및 만성적인 건강영향을 초래할 수 있으며 인간의 발암가능성이 의심이 되므로 포름알데하이드의 정확한 측정이 요구된다 (Staffelbach *et al.*, 1991). 포름알데하이드는 화석연료와 바이오매스의 연소를 통해, 산업공정으로부터 일시적인 가스 및 식물에 의해 대기에 직접 배출되며(1차 생성; Carlier *et al.*, 1986) 석유화학 생산으로부터 플라스틱, 페인트, 및 광택 제조공정, 및 오수 처리까지 다양하게 분포되어 있는 인위적 1차 오염원들도 존재한다. 포름알데하이드의 자연적인 1차 오염원 중 동물 배설물이 주요 오염원이지만 전체적으로 보면 기여율은 별로 크지 않다. 포름알데하이드는 또한 탄화수소의 대기 광화학 산화반응을 통해서도 생성된다(2차 생성; Atkinson, 1994; Hoekman, 1992; Grosjean *et al.*, 1990; Finlayson-Pitts and Pitts, 1986). 그리고 아이러니컬하게도 천연가스와 같은 청정연료 역시 상당한 포름알데하이드를 생성하는 것으로 확인되어, 포름알데하이드 생성이 미래의 청정발전기술의 저해요소가 될 수 있다고 지적되었다 (Alzueta and Glarborg, 2003; Mitchell and Olsen, 2000).

자동차 배기가스는 도시지역에서 관측한 포름알데하이드의 중요한 1차 오염원으로 알려져 있다 (Granby *et al.*, 1997). 여름철 미국 덴버 중심가에서 측정된 포름알데하이드 농도는 정오 전에 최고치를 나타내는데 이는 자동차 오염원이 지배적임을 제시하고 있다 (Anderson *et al.*, 1996). 또한 Anderson *et al.* (1996)은 연료 내 산소첨가제의 함량이 증가될 때 포름알데하이드 농도 역시 증가한다고 지적하였다. 그러나 전체적으로 보면 1차 오염원은 대기 포름알데하이드의 소량을 차지하며, 북 아메리카에서 관측된 포름알데하이드의 5% 정도를 차지하고 있으며 나머지는 탄화수소의 대기 광화학 산화반응에 의해 생성된 것으로 조사되었다 (Li *et al.*, 1994).

포름알데하이드의 소멸은 광분해 및 화학반응을 통해 대부분 이루어지는데 (Granby *et al.*, 1997), 주간에는 대기 중에 존재하는 포름알데하이드의 광분해

를 통해 일산화탄소 및 HO₂· 또는 H₂를 생성하며 정오의 맑은 날 조건에서 광분해 반응의 45% 정도가 HO₂· 생성에 기여하고, 나머지 55%는 H₂와 CO로 분해반응이 일어나는 것으로 알려져 있다 (Seinfeld and Pandis, 1998). 대기화학에 가장 중요한 내용은 포름알데하이드가 HO₂·를 생성하여 오존 및 OH· 생성에 중요한 역할을 수행하는 것이다 (Jacob *et al.*, 1996; Sillman, 1994; Logan *et al.*, 1981). 빛이 있는 대류권에서 포름알데하이드의 대기수명은 2~4시간으로 알려져 있어 낮 시간에 상승한 포름알데하이드 농도는 휘발성 유기화합물의 최근 산화를 확인할 수 있는 좋은 지표종의 역할을 한다 (Wert *et al.*, 2003a). 그리고 야간에는 건성침착 및 NO₃⁻ 입자와의 반응을 통해 소멸된다.

대기 중 포름알데하이드 측정은 2,4-DNPH (Dinitrophenylhydrazine)와 같은 유도체화 반응시약 (derivatization reagents)을 흡착제에 코팅하거나 흡수용액으로 사용해 시료를 채취한 후 HPLC로 DNPH 유도체를 분석하는 방법이 기존에 주로 활용되어 왔으나 (Viskari *et al.*, 2000; Grosjean *et al.*, 1990; Grosjean, 1982), 카르보닐 화합물의 대기화학에 미치는 영향 또는 생성 메커니즘을 올바로 이해하기 위해 실시간 측정기법들이 개발되어 현재 사용되고 있는 추세이다 (Li *et al.*, 2005). 짧은 시간 분해도가 가능하고 대기환경 연구에서 광범위하게 사용되어 온 방법들은 기상 분광학적인 기법인 TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) (Wert *et al.*, 2003a, b, 2002)와 차등 광흡수법 (DOAS, differential optical absorption spectroscopy) (Harder *et al.*, 1997; Stutz and Platt, 1997; Perner and Platt, 1980)이 있으며, PTRMS (Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry) 역시 포름알데하이드의 검출한계가 1~2 ppb로 상당히 떨어지지만 매우 빠른 시간 분해도로 포름알데하이드를 측정하는데 사용가능하다 (Karl *et al.*, 2003). 다른 실시간 측정방법으로는 효소를 활용한 형광검출법 (EFD, enzyme-based fluorescence detection) (Heikes *et al.*, 1996), 한쯔 반응법 (Hantzsch reaction) (Cardenas *et al.*, 2000), 다공성 멤브레인 확산 스크러버 (porous membrane diffusion scrubber)/1, 3-Cyclohexanedione (CHD)법 (Fan and Dasgupta, 1994)이 있고, 준 실시간 측정법으로 2,4 DNPH 유도체화-HPLC법 (Zhou *et al.*, 1996; Lee and Zhou, 1993) 등이 있다.

이와 같은 방법들은 대기 중 포름알데하이드를 채취하기 위해 단일 유리코일 형태의 샘플러 또는 확산 스크러버를 사용하고 있다.

대기 중 포름알데하이드의 시간에 따른 변동 특성이 대기화학(예로, 대도시 고농도 오존 발생 현상)을 이해하는데 매우 중요하므로 실시간 측정기법을 이용한 연구가 많은 선진 연구자들에 의해 선행되었으며 현재도 활발한 연구가 진행되고 있지만, 국내의 경우는 DNPH 카트리지법이나 임핀저 방법을 통한 연구가 몇몇 도시지역에서 수행된 것이 전부(여현구 등, 2002, 2000; 황윤정 등, 1996)로서 시간 분해도가 뛰어난 포름알데하이드 측정방법에 대한 개발 및 이를 활용한 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 대기 포름알데하이드의 배출오염원 규명 및 생성 메커니즘을 더 잘 이해하는데 효과적인 1시간 기준의 포름알데하이드 농도를 측정할 수 있는 이중 채널 유리코일-DNPH 측정시스템을 구축하고 시스템의 대기 측정 활용가능성을 평가하고자 광주지역에서 2001년 9월과 10월사이의 두 번의 집중측정기간을 통해 대기 포름알데하이드 농도분포를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 포름알데하이드 측정

대기 포름알데하이드 측정은 광주과학기술원 삼성 환경동 건물 3층 옥상(약 10 m)에서 이중채널 유리코일 샘플러에 의해 수행되었다. 측정위치는 그림 1에 나타나 있으며 농경지(agricultural lands)로 둘러싸인 준 도시지역에 속하며 광주시 중심가로부터 북서쪽으로 약 20 km에 위치하고 있다. 측정위치로부터 가장 가까운 도로는 북동쪽으로 대략 1.0 km에 놓여 있으며 호남고속도로가 서쪽으로 3 km에 위치해 있다.

본 연구에서 대기 중 포름알데하이드를 1시간 기준으로 측정하기 위해 이중채널 유리코일(two-channel glass-coil) 포집장치(sampler)를 구축하였다. 구축한 유리코일 샘플링 장비의 개략도가 그림 2에 도식화되어 있으며 사용된 유리코일 샘플러는 이중코일/DNPH(Dinitrophenylhydrazine) 시스템을 제외하고는 본질적으로 다른 연구자에 의해 사용된 시스

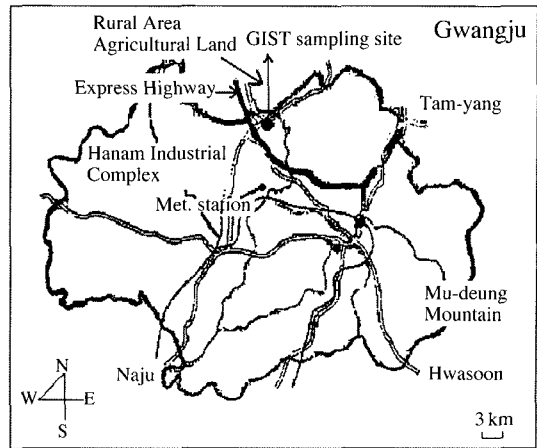


Fig. 1. A map of sampling location.

템과 유사하다(Lee *et al.*, 1993; Lee and Zhou, 1993). 유리코일/DNPH 측정방법은 카르보닐화합물과 2,4-DNPH와의 반응의 장점을 이용하며 측정방법에 대한 자세한 설명은 다른 문헌에 잘 나타나 있다(Lee and Zhou, 1993).

유리코일을 이용한 포름알데하이드 측정 샘플러는 크게 세 부분으로 구성되어 있다(그림 2 참조); ① 기체-액체 접촉 및 포름알데하이드 흡수를 위해 0.2 cm 내경의 유리관으로 이루어진 28회전 유리코일(helix 직경 ~2 cm, 총 길이 ~120 cm), ② 샘플공기 및 흡수용액 도입을 위한 코일 상류의 입구부분, 및 ③ 기체-액체 분리를 위한 유리코일 하류의 폭넓은 유리관 부분으로 되어있다. 샘플공기 유입부(②)의 유입라인에 극성이 높은 HCHO(g)의 불균일 손실 가능성 때문에 테플론 재질의 T자 형태의 작은 구멍(pinholes: cole-parmer instrument co, 06365-90, 1/16" × 1/16" × 1/16")이 사용되었다.

포름알데하이드 채취를 위해 사용된 흡수용액(scrubbing solution)은 물로 희석한 DNPH 용액이다. 흡수용액은 정제된 DNPH 결정(Sigma, D-2630) 0.247 g를 50 mL 용액(HCl 5 mL + H₂O 20 mL + CH₃CN 25 mL)에 용해하여 만든 원 용액(stock solution)을 희석시켜 만들어 사용하였다. 흡수용액의 농도는 대략 pH가 2.4인 100 μM DNPH 용액이다. DNPH 결정에 적용한 정제절차는 Keiber and Mopper(1990)에서 언급된 방법이 사용되었다. DNPH 용액

은 peristaltic 펌프(16채널 Ismatec IPC-N-16)에 의해 좁은 테플론 튜브(cole-parmer instrument co, 06417-31)를 통해 유리코일까지 수송된 후 유리 코일을 통과하면서 동시에 샘플공기로부터 헨리 법칙에 따라 포름알데하이드를 흡수한다.

대기샘플은 두 번째 유리코일 조립품(그림 2의 C₂)의 기체-액체 분리기에 연결된 진공펌프에 의해 첫 번째 코일 조립품(그림 2의 C₁)을 통해 흡입된다. 흡수용액은 각각의 유리코일을 통해 공기 중의 카르보닐 화합물을 흡수한 후 자동 샘플러에 위치한 각각의 유리병(20 mL)에 채취된다. 공기유량은 질량흐름조절기로 보정이 된 유량계로 조절된다. 공기 및 DNPH 흡수용액의 유량은 각각 2.0 L/min 및 0.2~0.3 mL/min로 유지된다. 60분의 대기 샘플링 시간에 채취된 샘플용액의 부피는 측정 전 후의 유리병 무게측정을 통해 계산되며 평균적으로 약 12.0 mL이다. DNPH 흡수용액은 휘발 및 변질을 방지하기 위해 아이스 팩이 들어있는 아이스박스에 보관하여 박스내의 온도를 어느 일정온도 이하로 유지하면서 사용하였다. 대기시료 채취 중 유리코일 샘플러 및 테플론 튜브는 적절한 절연체(insulator)로 감싼 후 알루미늄 호일을 이용하여 태양광선으로부터 차단될 수 있도록 하였다.

유리코일 샘플러의 채취효율(collection efficiency)은 이론적으로 기체-수용액 평형상태에서 기체-수용액 상의 분배인자(기체상 및 수용액상의 질량농도비)를 이용하여 평가될 수 있지만(Seinfeld and Pandis, 1998), 본 연구에서는 유리코일에서 DNPH 용액에 의한 포름알데하이드 채취효율($\beta = 1 - C_2/C_1$)은 연속으로 연결된 두 개의 동일한 유리코일을 이용하여 각각의 흡수용액에 의해 채취된 포름알데하이드 물질의 농도를 측정함으로써 계산되어진다(Lee and Zhou, 1993). 본 시스템에서 대기의 포름알데하이드 농도는 각 시료의 실험적인 채취효율을 이용하여 C₁(그림 2 참조; 첫 번째 코일 샘플러에서 채취된 포름알데하이드 농도)이 C₂(두 번째 코일 샘플러에서 채취한 포름알데하이드 농도)로부터 계산된 후 $(C_2/(1-\beta))$ 가스상 농도로 변환된다. 유리코일 샘플러에서 채취된 시료들은 몇몇의 간섭유발가스(SO₂, H₂O₂, NO_x 등)에 의해 쉽게 영향을 받을 수 있는데, 첫 번째 코일의 시료 중 측정농도가 상대적으로 두 번째 코일의 시료 중 농도보다 영향을 받기 쉽다. 따

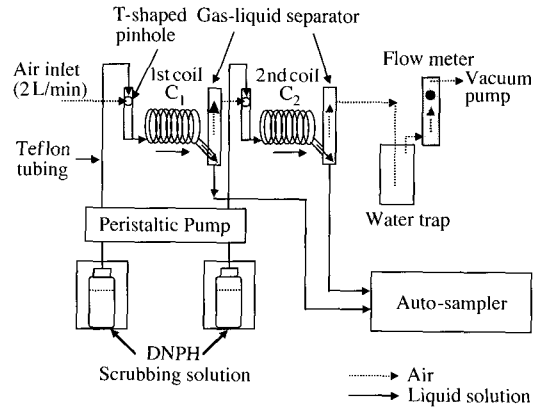


Fig. 2. Schematic diagram of a dual-channel glass coil sampler.

라서 이와 같은 간섭가스에 의한 측정어려움을 최소화하기 위해 본 연구에서는 야외측정 시 연속으로 연결된 이중 채널 유리코일 시스템을 사용하였다.

구축한 이중채널 유리코일 샘플러의 대기 포름알데하이드 측정 활용가능성을 평가하기 위해 1시간 기준의 포름알데하이드 측정이 두 번의 집중측정기간(2001년 9월과 10월)에 이루어졌다. 측정기간은 9월 22~27일과 10월 17~25일이며 두 번째의 측정기간 중 측정지역 주변의 농지에서 농업폐기물의 소각이 이루어졌다.

2.2 포름알데하이드 농도분석

이중 채널 유리코일 샘플러로부터 채취한 시료는 HPLC(Waters, USA) UV/visible 검출기(검출파장 360 nm)로 분석하였다. Lee and Zhou(1993)에 의하면 유리코일/DNPH 방법에서 DNPH 용액에 존재하는 하이드라존(hydrasones)의 수명은 대략 24시간 정도로 알려져 있어, 채취한 시료는 4°C 이하로 냉장 보관하고 시료의 변질을 막기 위하여 12시간 이전에 HPLC로 분석하였다. 분석 시 사용된 칼럼은 C₁₈ 칼럼(카트리지 형, Waters RCM 8×10, 4 μm Bondapak)이고 이동상은 CH₃CN:H₂O를 부피기준으로 7:3의 비율로 혼합하였고 유속은 0.8 mL/min이다. 분석을 위한 시료의 주입량은 대략 500~700 μL이다. 기기 보정은 원 용액(~37%, Aldrich)으로부터 희석한 포름알데하이드 수용액 표준액을 사용하여 수행되었다. 표준용액의 저장용액은 원 용액으로부터 대략

1,000 ppm 수준으로 희석한 후 Na₂SO₃ (EPA method 8315A)에 의해 표준화 (%RSD: <0.03%)한 후 사용되었다. 본 유리코일 시스템에서 포름알데하이드 검출한계는 공 시료의 농도에 대한 표준편차의 3배에 해당하는 농도로서 나타내었다. 본 시스템의 검출한계는 현재 적용되어진 조건 (28회전 코일, 기체상 흐름 속도: 2 L/min, 액상 흐름속도: 0.20~0.25 mL/min)에서 0.40 ppbv (95% 이상의 신뢰수준)이다. 또한 도심지 대기의 일반수준인 4~5 ppbv 수준에 대응하는 액상 표준 시약 34.1 ppb를 이용한 분석 재현성 (Repeatability, %RSD)은 0.8~4.1%, 분석 불확도는 약 10%가 실험결과 얻어졌다.

3. 결과 및 고찰

이중채널 유리코일 시스템을 통해 1시간 기준의

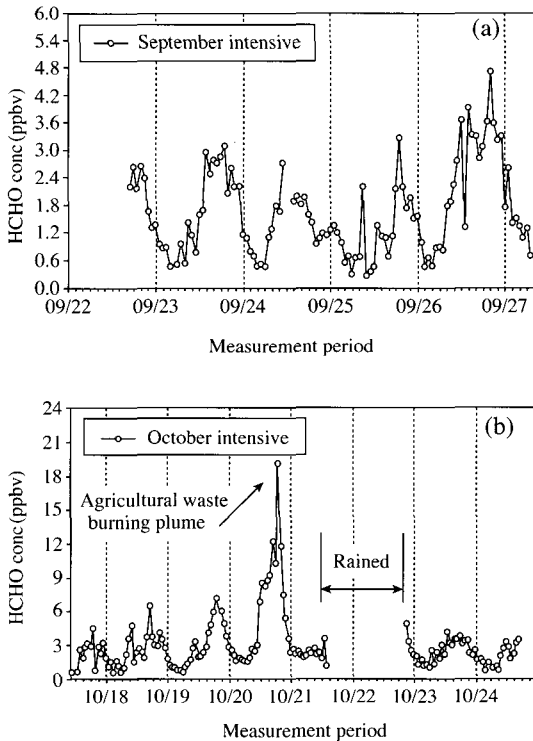


Fig. 3. Time series of the ambient concentrations of formaldehyde during two intensive sampling periods.

대기 중 포름알데하이드 농도가 광주지역에서 두 번의 집중측정기간을 통해 측정되었다. 그림 3(a) 및 (b)는 두 번의 집중측정기간 중 얻은 포름알데하이드 농도의 시간에 따른 경향을 보여준다. 9월 및 10월 집중측정기간 중 포름알데하이드의 평균 농도(ppbv)는 각각 1.7 (0.4~4.7) 및 3.0 (0.5~19.1) 이었으며 수도권권의 서울(광화문; 10.4 ppbv) 및 인천(부천시 심곡동; 10.9 ppbv)에서 가을에 측정한 농도에 비해 상당히 낮게 관측되었다(여현구 등, 2002).

또한 포름알데하이드 농도의 강한 낮-밤 변화가 측정기간 중 관측되었으며, 오존 농도가 증가하고 태양복사에너지 강도가 큰 낮 시간대에 높은 농도를 보여 주었으며 가끔 저녁시간에도 높은 수준을 나타내었다. 낮 시간대 (07:00~19:00)와 저녁 시간대 (19:00~07:00)의 포름알데하이드 농도를 비교해볼 때(그림 4), 낮 시간대의 농도가 저녁 시간대의 농도보다 대부분 높게 측정이 되었으며 이는 메탄 및 다른 탄화수소화합물의 광화학 산화반응을 통해 생성된 2차 발생원에 의한 영향이 포름알데하이드 생성 분포에서 지배적임을 알 수 있고, 가끔 밤 시간대의 포름알데하이드 농도가 높게 측정될 때도 존재하였다. 이는 저녁시간대에 자동차 배출가스 및 연료의 불완전 연소에 의한 직접적인 포름알데하이드의 배출(1차 발생원)의 영향이 대기 중 탄화수소 화합물의 광화학 반응을 통해 생성된 2차 발생원의 영향보다 크게 기여했을 것으로 판단된다.

저녁시간 및 이른 아침시간대를 나타내는 저녁시

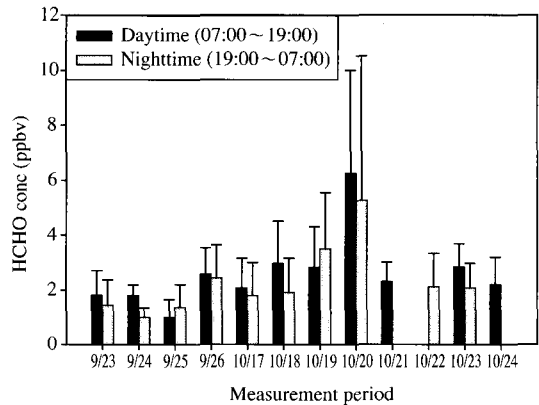


Fig. 4. Comparison of day- and nighttime formaldehyde concentrations.

간 대 (19:00~07:00)의 포름알데하이드 농도는 9월에는 0.4~4.7 ppbv에 분포되어 있으며 10월에는 0.5~19.1 ppbv로 분포되었다. Bacz *et al.* (1995)와 Anderson *et al.* (1996)의 알데하이드 측정결과에 의하면 오전시간대 (08:00~12:00)에 최대농도를 보여 주었는데 이는 측정지점이 차량통행이 빈번한 위치여서 자동차에 의해 배출된 포름알데하이드의 영향 때문에 증가한 것으로 조사된 반면에 본 연구에서는 오전시간대에는 포름알데하이드 농도의 별다른 특성을 나타내지 않았다. 그리고 여현구 등 (2002)의 결과에서도 본 측정결과와 유사하게 오후시간대에 포름알데하이드 농도가 최대치를 보였다.

그림 3(b)에서 보는 바와 같이 10월 20일에 측정된 포름알데하이드 농도는 3.0 ppbv (12:00시)에서 19.1 ppbv (20:00시)까지 급격하게 증가하였다. 포름알데하이드 농도가 급격하게 증가한 이유는 당일에 측정지역을 둘러싸고 있는 농경지 (agricultural lands)에서 엄청난 양의 농업 폐기물 (짚 밀집, 그루터기 등)을 노천 소각함으로써 발생된 것으로 판단된다. Park *et al.* (2004)에 의하면 동일 측정지역 주변에서 바이오매스 연소 에피소드가 확인된 10월 20일에 다른 오염물질들 (PM_{10} , HONO (g), K^+ , Cl^- 등)의 농도 역시 상당히 증가하였다.

여러 연구자 (Lee *et al.*, 1998, 1997; Carlier *et al.*, 1986)에 의하면 포름알데하이드는 1차적으로 산불과 같은 바이오매스 연소에 의해서도 발생하는 것으로 알려져 있어 본 연구에서 측정한 결과 역시 다른 연구자들에 의해 얻어진 결과와 비슷한 경향을 얻을 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 짚 밀집이나 그루터기 폐기물 등의 농업 폐기물의 연소로 인해서도 포름알데하이드가 상당량 배출된다는 사실을 발견할 수 있었다. Tang *et al.* (2003)의 연구에 의하면 바이오매스 연소의 비 복사 (non-radiative) 및 복사영향 (radiative influence)이 포름알데하이드 농도를 증가시키는 데 기여하는 것으로 조사되었다. 비복사과정이 포름알데하이드 농도를 증가시키는 이유는 바이오매스 연소가 상당한 양의 휘발성 유기화합물을 배출하여 휘발성 유기화합물의 산화에 의해 포름알데하이드가 생성되기 때문으로 본 연구에서 10월 20일에 관측한 고농도의 포름알데하이드는 비 복사과정을 통해 생성되었을 것으로 판단된다.

4. 결 론

대기 중 실시간 포름알데하이드 농도를 측정하기 위해 이중 채널 유리코일 샘플러가 구축되었다. 이중 채널 유리코일 샘플러는 SO_2 , H_2O_2 , NO_x 등의 간접 가스에 의해 유발될 수 있는 포름알데하이드 농도의 측정어러를 최소화하기 위해 채택되었다. 유리코일 샘플러는 기체-액체 접촉 및 포름알데하이드 흡수를 위한 28회전의 유리코일, 샘플공기 및 흡수용액 도입 부분 및 기체-액체 분리를 위한 분리기로 이루어져 있다.

이중 채널 유리코일/DNPH 용액-HPLC 시스템을 활용해 광주지역에서 두 번의 집중측정기간 (2001년 9월과 10월) 동안 대기 포름알데하이드 농도가 조사되었다. 한 시간 기준의 포름알데하이드 농도 측정결과에 의하면 명확한 포름알데하이드 농도의 시간별 변동특성, 예를 들어 낮 시간대에 최고치를 보이며 밤 시간대에 점차적으로 감소하는 경향이 관측되었으나 간혹 밤 시간대에도 포름알데하이드 농도가 증가했다 감소하는 경우도 확인이 되었는데 이는 측정 지역의 주변 자동차 배출가스로부터 직접적인 포름알데하이드의 발생에 의한 것으로 추정된다. 또한 짚 밀집 (rice straw)이나 그루터기 (stubble) 같은 농업폐기물의 소각에 의해서도 상당한 양의 포름알데하이드가 발생될 수 있음이 한 시간단위로 대기측정이 가능한 이중 채널 유리코일 샘플러에 의해 확인이 되었다. 따라서 본 연구에서 구축된 이중 채널 유리코일 샘플러는 대기 중 실시간 포름알데하이드 농도를 관측하여 배출오염원 및 생성 메커니즘을 조사하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (과제번호 R01-2005-000-10775-0) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

여현구, 조기철, 임철수, 최민규, 임종억, 지동영, 김희강

- (2000) 서울지역에서 대기 중 카르보닐 화합물 농도에 대한 1,2차 발생원 기여율 산정, 한국대기 환경학회지, 16(4), 317-325.
- 여현구, 조기철, 임철수, 최민규, 선우 영 (2002) 수도권지역에서 포름알데하이드와 아세트알데하이드의 계절별 발생원 특성, 한국대기환경학회지, 18(1), 11-23.
- 황윤정, 박상곤, 백성욱 (1996) DNPH 카트리지와 HPLC를 이용한 대기 중 카르보닐화합물의 농도 측정, 한국대기보전학회지, 12(2), 199-209.
- Alzueta, M.U. and P. Glarborg (2003) Formation and destruction of CH₂O in the exhaust system of a gas engine, Environmental Science and Technology, 37, 4512-4516.
- Anderson, L.G., J.A. Lanning, R. Barrel, J. Miyagishma, R.H. Jones, and P. Wolfe (1996) Sources and sinks of formaldehyde and acetaldehyde: an analysis of denver's ambient concentration data, Atmospheric Environment, 30, 2113-2123.
- Atkinson, R. (1994) Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds, J. Phys. Chem. Ref. Data, Monogr., 2.
- Baez, A.P., R. Belmont, and H. Padilla (1995) Measurements of formaldehyde and acetaldehyde in the atmosphere of Mexico City, Environmental Pollution, 86, 166-187.
- Cardena, L.M., D.J. Brassington, B.J. Allan, H. Coe, B. Alicke, U. Platt, K.M. Wilson, J.M.C. Plane, and S.A. Penkett (2000) Intercomparison of formaldehyde measurements in clean and polluted atmospheres, Journal of Atmospheric Chemistry, 37, 53-80.
- Carrier, P., H. Hannachi, and G. Mouvier (1986) The chemistry of carbonyl compounds in the atmosphere-A review, Atmospheric Environment, 20, 2079-2099.
- Fan, Q. and P.K. Dasgupta (1994) Continuous automated determination of atmospheric formaldehyde at the parts per trillion level, Analytical Chemistry, 66, 551-556.
- Finlayson-Pitts, B.J. and J.N. Pitts, Jr. (1986) Atmospheric Chemistry: Fundamentals and experimental techniques, John Wiley and Sons, New York.
- Granby, K., S.C. Carsten, and C. Lohse (1997) Urban and semirural observations of carboxylic acids and carbonyls, Atmospheric Environment, 31, 1403-1415.
- Grosjean D. (1982) Formaldehyde and other carbonyls in Los Angeles Ambient, Environmental Science and Technology, 16, 254-262.
- Grosjean, D., A.H. Miguel, and T.M. Tavares (1990) Urban air pollution in Brazil: acetaldehyde and other carbonyls, Atmospheric Environment, 24B, 101-106.
- Harder, J.W., A. Fried, S. Sewell, and B. Henry (1997) Comparison of tunable diode laser and long path ultraviolet/visible spectroscopic measurements of formaldehyde concentrations during the 1993 OH photochemistry experiment, Journal of Geophysical Research, 102, 6267-6282.
- Heikes, B., B. McCully, X. Zhou, Y.N. Lee, K. Mopper, X. Chen, G. Mackay, D. Karecki, H. Schiff, T. Campos, and E. Atlas (1996) Formaldehyde methods comparison in the remote lower troposphere during the Mauna Loa Photochemistry Experiment 2, Journal of Geophysical Research, 101, 14741-14755.
- Hoekman, S.K. (1992) Speciated measurements and calculated reactivities of vehicle exhaust emissions from conventional and reformulated gasolines, Environmental Science and Technology, 26, 1206-1216.
- Jacob, D.J., B.G. Heikes, S.-M. Fan, J.A. Logan, D.L. Mauze-rall, J.D. Bradshaw, H.B. Singh, G.L. Gregory, R.W. Talbot, D.R. Blake, and G.W. Sachse (1996) The origin of ozone and NO_x in the tropical troposphere: A photochemical analysis of aircraft observations over the South Atlantic Basin, Journal of Geophysical Research, 101, 24235-24250.
- Karl, T., T. Jobson, W.C., Kuster, E. Williams, J. Stutz, R. Shetter, S.R. Hall, P. Goldan, F. Fehsenfeld, and F. Lindinger (2003) Use of proton-transfer-reaction mass spectrometry to characterize volatile organic compound sources at the La Porte supersite during the Texas Air Quality Study 2000, Journal of Geophysical Research, 108, 4508.
- Kieber, R.J. and K. Mopper (1990) Determination of picomolar concentrations of carbonyl compounds in natural waters, including seawater, by liquid chromatography, Environmental Science and Technology, 24, 1477-1481.
- Lee J.H., D.F. Leahy, I.N. Tang, and L. Newman (1993) Measurement and speciation of gas phase peroxides in the atmosphere, Journal of Geophysical Research, 98, 2911-2915.
- Lee, M., B.G. Heikes, and D.J. Jacob (1997) Hydrogen peroxide, organic hydroperoxide, and formaldehyde as primary pollutants from biomass burning, J. Geophys. Res., 102, 1301-1309.
- Lee, M., B.G. Heikes, and D.J. Jacob (1998) Enhancements of hydroperoxides and formaldehyde in biomass burning impacted air and their effect on atmospheric

- oxidant cycles, *J. Geophys. Res.*, 103, 13201-13212.
- Lee, Y.N. and X. Zhou (1993) Method for the determination of some soluble atmospheric carbonyl compounds, *Environmental Science and Technology*, 27, 749-756.
- Li, J., P.K. Dasgupta, and W.T. Luke (2005) Measurement of gaseous and aqueous trace formaldehyde. Revisiting the pentanedione reaction and field applications, *Analytica Chimica Acta*, 531, 51-68.
- Li, S.-M., K.G. Anlauf, H.A. Wiebe, and J.W. Bottenheim (1994) Estimating primary and secondary production of HCHO in eastern North America based on gas-phase measurements and principal component analysis, *Geophysical Research letter*, 21, 669-672.
- Logan, J.A., M.J. Prather, S.C. Wofsy, and M.B. McElroy (1981) Tropospheric chemistry: A global perspective, *Journal of Geophysical Research*, 86, 7210-7254.
- Mitchell, C.E. and D.B. Olsen (2000) Formaldehyde formation in large bore natural gas engines. Part I: Formation mechanisms, *J. Eng. Gas Turbine Power*, 122, 603-610.
- Park, S.S., S.B. Hong, Y.G. Jung, and J.H. Lee (2004) Measurement of PM10 aerosol and gas-phase nitrous acid during fall season in a semi-urban atmosphere, *Atmospheric Environment*, 38, 293-304.
- Perner, D. and U. Platt (1980) Direct measurements of atmospheric formaldehyde, nitrous acid, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide by differential optical absorption in the near UV, *Journal of Geophysical Research*, 85, 7453-7458.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) Atmospheric chemistry and physics; *From air pollution to climate change*, 343-344.
- Sillman, S. (1994) The use of NO_y, HCHO, H₂O₂, and HNO₃ as empirical indicators for ozone-NO_x-ROG sensitivity in urban locations, *Journal of Geophysical Research*, 100D(7), 14175-14188.
- Staffelbach, T., A. Neftel, B. Stauffer, and D. Jacob (1991) Formaldehyde in polar ice cores: a possibility to characterize the atmospheric sink of methane in the past?, *Nature*, 349, 603-605.
- Stutz, J. and U. Platt (1997) Improving long-path differential optical absorption spectroscopy with a quartz-fiber mode mixer, *Applied Physics*, 36, 1105-1115.
- Tang Y., G.R. Carmichael, J.H. Woo, N. Thongboonchoo, G. Kurata, I. Uno, D.G. Street, D.R. Blake, R.J. Weber, R.W. Talbot, Y. Kondo, H.B. Singh, and T. Wang (2003) Influences of biomass burning during the Transport and Chemical Evolution Over the Pacific (TRACE-P) experiment identified by the regional chemical transport model, *Journal of Geophysical Research*, 108, 8824.
- Viskari, E.-L., M. Vartiainen, P. Pasanen (2000) Seasonal and diurnal variation in formaldehyde and acetaldehyde concentrations along a highway in Eastern Finland, *Atmospheric Environment*, 34, 917-923.
- Wert, B.P., M. Trainer, A. Fried, T.B. Ryerson, B. Henry, W. Potter, W.M. Angevine, E. Atlas, S.G. Donnelly, F.C. Fehsenfeld, G.J. Frost, P.D. Goldan, A. Hansel, J.S. Holloway, G. Hubler, W.C. Kuster, D.K. Nicks Jr., J.A. Neuman, D.D. Parrish, S. Schauffler, J. Stutz, D.T. Sueper, C. Wiedinmyer, A. Wisthaler (2003a) Signatures of terminal alkene oxidation in airborne formaldehyde measurements during TexAQS 2000, *Journal of Geophysical Research*, 108, 4104.
- Wert, B.P., A. Fried, S. Rauenbuehler, J. Walega, B. Henry (2003b) Design and performance of a tunable diode laser absorption spectrometer for airborne formaldehyde measurements, *Journal of Geophysical Research*, 108, 4350.
- Wert, B.P., A. Fried, B. Henry, S. Cartier (2002) Evaluation of inlets use for the airborne measurement of formaldehyde, *Journal of Geophysical Research*, 107, 4163.
- Zhou, X., Y.-N. Lee, L. Newman, X. Chen, K. Mopper (1996) Tropospheric formaldehyde concentration at the Mauna Loa Observatory during the Mauna Loa Observatory Photochemistry Experiment 2, *Journal of Geophysical Research*, 101, 14711-14720.

정오정정

제 22권 1호(2006년) p.73~84에 게재된 “유해 대기오염물질의 난류확산 수치모의에서 침적항과 부력항 추가에 따른 효과”의 논문 그림 9, 10번을 정정합니다.
 Tel : +82-(0)51-510-2291, E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

수정 전

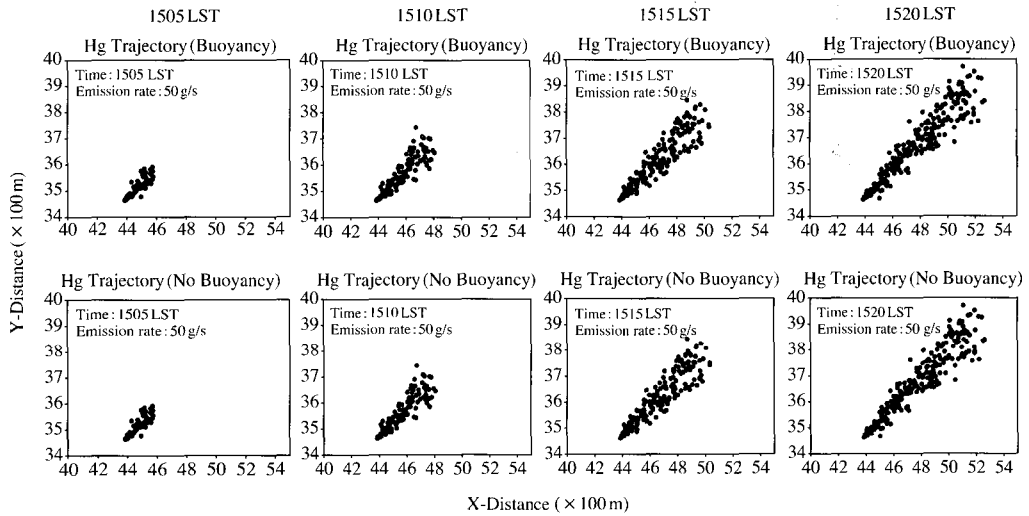


Fig. 9. Lagrangian particles distribution patterns projected horizontally on the x-y plane according to the RAMS wind field at the 10 m level.

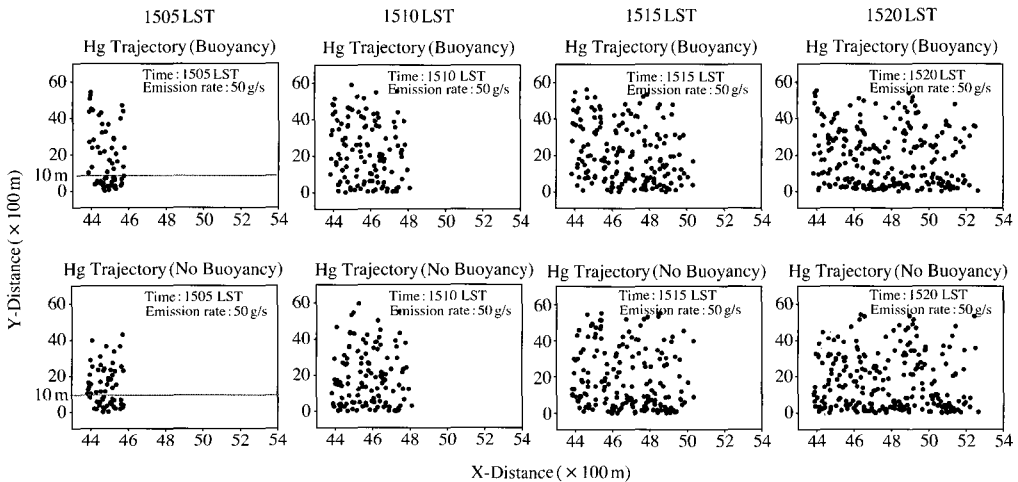


Fig. 10. Lagrangian particles distribution patterns projected vertically on the x-z plane.

수정 후

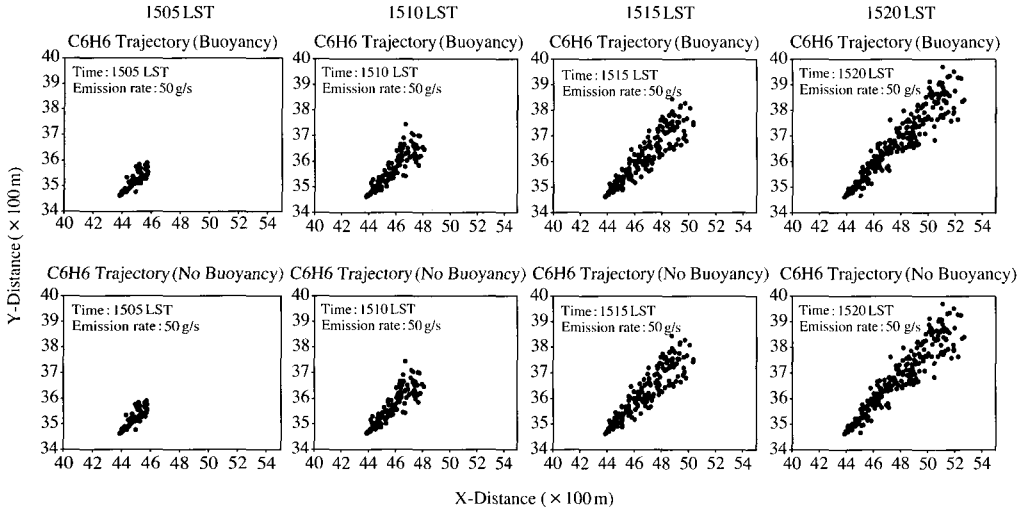


Fig. 9. Lagrangian particles distribution patterns projected horizontally on the x-y plane according to the RAMS wind field at the 10 m level.

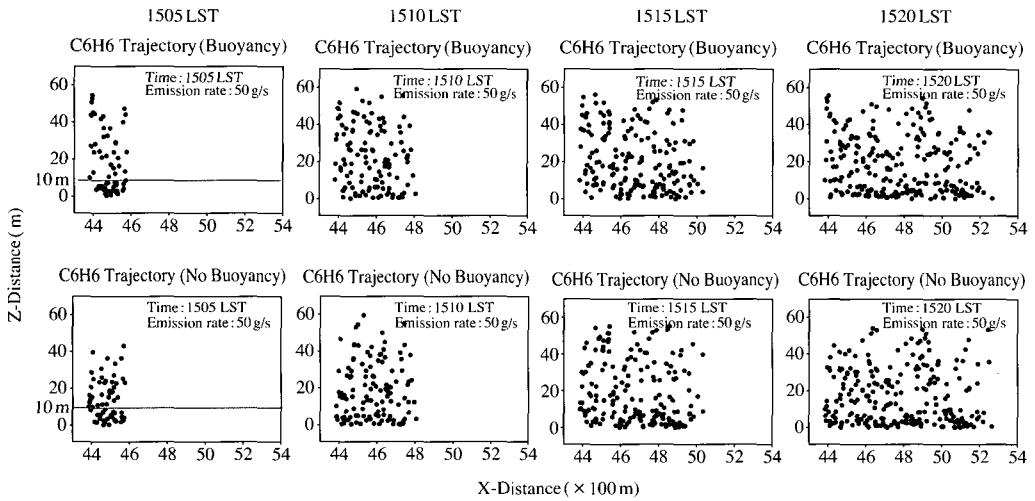


Fig. 10. Lagrangian particles distribution patterns projected vertically on the x-z plane.