

기술자료

Isocratic 조건하에서 HPLC를 이용한 산업시설 배출가스 중 포름 알데하이드 분석

An Analytical Method of Formaldehyde in Exhaust Gases from Industrial Facilities using a HPLC under Isocratic Conditions

김준표^{1),2)}, 박승식^{1)*}, 배민석³⁾

¹⁾전남대학교 환경에너지공학과, ²⁾전라남도 환경산업진흥원

³⁾국립목포대학교 환경공학과

Jun-Pyo Kim^{1),2)}, Seung-Shik Park^{1)*}, Min-Suk Bae³⁾

¹⁾Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University

²⁾Jeollanam-do Environmental Industries Promotion Institute

³⁾Department of Environmental Engineering, Mokpo National University

접수일 2018년 8월 3일
수정일 2018년 8월 20일
채택일 2018년 8월 21일

Received 3 August 2018
Revised 20 August 2018
Accepted 21 August 2018

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

Abstract In this study, a previous DNPH (2,4-dinitrophenylhydrazine) coupled with high performance liquid chromatography (HPLC) method to measure the concentration of formaldehyde in ambient and source environments has been improved. To improve the disadvantage of the previous HPLC method, an appropriate composition ratio of mobile phase (water: acetonitrile (ACN)) was determined and an isocratic analysis was conducted. Furthermore, limit of detection (LOD), limit of quantitation (LOQ), accuracy, and precision were investigated to verify the reliability of the analytical conditions determined. Finally, samples of exhaust gases from five different industrial facilities were applied to HPLC analytical method proposed to determine their formaldehyde concentrations. The appropriate composition ratio of the mobile phase under the isocratic condition was a mixture of water (40%) and ACN (60%). As the volume fraction of the organic solvent ACN increases, retention time of the formaldehyde peak was reduced. Detection time of formaldehyde peak determined using the proposed isocratic method was reduced from 7 minutes (previous HPLC method) to approximately 3 minutes. LOD, LOQ, accuracy, and precision of the formaldehyde determined using standard solutions were 0.787 ppm, 2.507 ppm, 93.1%, and 0.33%, respectively, all of which are within their recommended ranges. Average concentrations of the formaldehyde in five exhaust gases ranged from 0.054 ppm to 1.159 ppm. The lowest concentration (0.054 ppm) was found at samples from waste gas incinerator in a bisphenol-A manufacturing plant. The highest was observed at samples from the absorption process in manufacturing facilities of chemicals including formaldehyde and hexamine. The analytical time of the formaldehyde in ambient air can be shortened by using the isocratic analytical method under appropriate mobile phase conditions.

Keywords: Formaldehyde, HPLC, Mobile phase, Isocratic method, Exhaust gases

1. 서 론

알데하이드 (aldehyde)와 케톤 등의 카르보닐화합물은 인체에 미치는 보건학적 영향과 광화학스모그 생성의 중요한 원인물질로서 많은 관심을 받고 있다. 특히, 포름 알데하이드는 강한 자극성 냄새를 가진 무색투명한 기체로 수용성이 강하고 살충, 살균제, 합

성수지 원료 등으로 사용되며 급성독성, 피부자극성, 발암성 등의 인체 유해성을 가지고 있어 국제 암 연구 센터에서 “발암 우려 물질”로 분류하고 있다 (Zhang *et al.*, 1994; Altshuller, 1993; Grosjean *et al.*, 1993; Staffebach *et al.*, 1991). 대기 중에 존재하는 포름 알데하이드 성분은 자동차 및 소각로의 연소과정, 섬유 옷감, 담배연기, 건축자재(방부제, 접착제 등) 등

의 1차 오염원(Yeo *et al.*, 2002; Anderson *et al.*, 1996; Carlier *et al.*, 1986)과 탄소수소화합물의 광화학 산화 반응을 통해 생성되는 2차 발생원(Seinfeld and Pandis, 2006; Atkinson, 1997; Grandby, 1997; Li *et al.*, 1994; Altshuller, 1993; Hoekman, 1992)으로 구성되어 있다. 경기도 부천과 서울의 두 도심에서 측정된 포름 알데하이드는 여름에 높고 겨울에 낮은 뚜렷한 계절적 특성을 보이며 여름에는 2차 생성에 의한 영향이 우세한 반면 겨울에는 자동차 배기가스와 같은 1차 오염원의 영향이 지배적인 것으로 보고되고 있다(Yeo *et al.*, 2002). 포름 알데하이드의 주간 및 야간의 농도 추이에 의하면 시간 변화에 따른 1차 오염원과 2차 생성의 차이 때문에 최고 농도는 낮 시간에 최저 농도는 밤 시간에 나타난다(Yeo *et al.*, 2002). 지하상가, 백화점, 종합병원, 버스터미널, 독서실 등의 다중이용시설을 대상으로 오전, 오후 및 저녁에 측정된 포름 알데하이드의 농도는 실외보다는 실내 공간에서 훨씬 높게 나타났다(Lee, 2008; Hwang *et al.*, 1996). 현재까지 대기 환경(Park *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2005; Yeo *et al.*, 2002)과 다중이용시설에서 포름 알데하이드의 화학적 특성에 대한 연구(Lee, 2008; Hwang *et al.*, 1996)는 많이 이루어졌으나 특정한 산업 배출시설 등을 통해 배출되는 포름 알데하이드에 대한 정보는 전무한 실정이다.

환경부에서 대기오염공정시험법으로 규정하고 있는 포름 알데하이드의 측정은 발색법과 화학적 유도체화법이 결합된 크로마토그래피법이 있다(Ministry of Environment, 2016a). 발색법에는 크로모트로핀산법과 파라로자닐린법이 있으며 이 중 크로모트로핀산법이 광범위하게 사용되나 페놀, 포름 알데하이드 이외의 다른 종류의 알데하이드 등에 의해 간섭을 받는 것으로 알려져 있다. 특히 이 방법은 검출한계가 높기 때문에 정량화를 위해서는 시료 채취 시간이 길어야 하는 단점이 있다(Humberto *et al.*, 1991). 파라로자닐린법의 경우는 흡광도가 온도에 의해 크게 영향을 받기 때문에 정확한 측정을 위해서는 채취한 시료를 일정 온도로 유지시켜야 한다(Georghiou *et al.*,

1983; Vanderwal, 1982). 발색법의 이와 같은 단점들을 보완하기 위해 현재는 화학적 유도체화법을 결합한 크로마토그래피법이 주로 활용되고 있다(Viskari *et al.*, 2000; Grosjean *et al.*, 1990; Grosjean, 1982). 2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH) 유도체화법은 시료 채취 시 알데하이드뿐만 아니라 케톤과도 쉽게 반응하여 안정한 DNPH 유도체를 형성하게 되므로 카르보닐 화합물에 대한 측정이 가능하다(Ministry of Environment, 2016a; Hwang *et al.*, 1996). 그러나 HPLC로 DNPH 유도체를 분석하는 방법은 HPLC의 기기 구성이나 분석 칼럼의 종류에 따라 분석법이 달라지기 때문에 공정시험법으로 확정된 분석법이 없는 실정이다. 기존의 일반적인 HPLC의 분석 조건은 역상모드 분석으로서 고정상은 비극성 칼럼(C18, 4.6 mm × 150 mm)과 이동상은 water/tetrahydrofurna (8/2, v/v)와 Acetonitrile의 두 종류가 사용된다. 그리고 이동상 조성비에 변화를 주는 Gradient 분석을 실시한다. HPLC의 칼럼 유량 1.5 mL/min, 칼럼 온도는 40°C 및 검출기의 흡수 파장 365 nm의 조건하에서 분석한 포름 알데하이드의 피크는 7.2분에 검출된다(Ministry of Environment, 2016b). 기존에는 gradient 프로그램 분석법을 사용함으로써 포름 알데하이드의 피크 분리도를 향상시키고 분석 시간을 단축하였으나, 분석이 한번 끝난 후 다음 시료의 분석을 위해서는 처음의 이동상 조성비로 안정화시키는데 상당한 시간이 요구되는 단점이 있었다.

본 연구에서는 기존의 DNPH 유도체화법이 결합된 HPLC 분석법의 단점을 개선하고자 이상적인 이동상 조성비를 결정된 후 isocratic 분석을 실시함으로써 이동상 조성비의 초기 안정화에 소요되는 시간을 단축시키고 이동상 조성비를 포함한 최적의 분석 조건을 결정하였다. 게다가 분석 조건에 대한 신뢰성을 검증하고자 검출한계, 정밀도 및 정확도를 조사하였다. 마지막으로 5종의 산업시설 배출가스로부터 포름 알데하이드를 분석하고자 도출된 최적의 분석조건을 적용하였다.

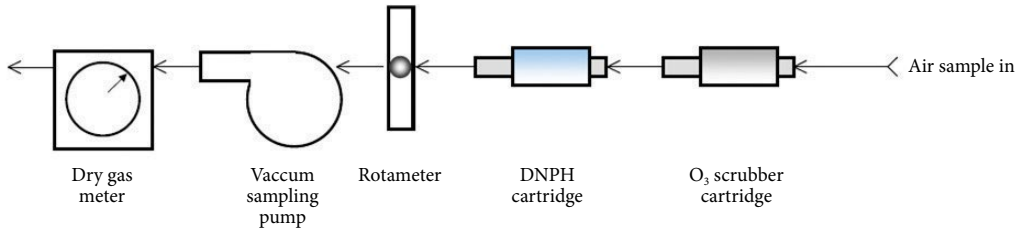


Fig. 1. A schematic diagram of the sampling apparatus.

2. 실험 방법

2.1 배출시설 사업장 시료 채취 및 추출

본 연구에서는 350 mg의 DNPH-실리카로 충전한 DNPH 카트리지를 이용하여 시료를 채취하였다. 오존의 방해 요인을 제거하기 위하여 KI로 충전되어 있는 오존 스크리버를 DNPH 카트리지 전단에 장착하고 25°C, 767 mmHg하에서 유량 조절이 가능한 진공 펌프(Shibata, Japan)를 이용하여 0.2 L/min의 유량으로 총 1.26 L의 시료를 채취하였다(그림 1).

포름 알데하이드 분석을 위한 시료의 채취는 여수 국가산업단지 내에 위치한 5개 사업장에서 사업장별로 20분 간격으로 3회씩 실시하였다. 5개 사업장에 대한 배출시설의 정보는 표 1에 나타내었다. A 시료는 BPA (bisphenol A) 제조 공장의 폐가스 소각시설(1종 사업장: 연간 배출량 >80톤), B 시료는 HDPE (high density polyethylene)를 생산하는 시설(5종 사업장: 연간 배출량 <2톤), C 시료는 카본블랙을 제조하는 시설(1종 사업장), D 시료는 건축자재 중 MDF (medium-density fibreboard)를 생산하는 시설 중 압착 시설(5종 사업장), 그리고 E 시료는 포름 알데하이드, 디펜타에리스리톨, 펜타에리스리톨, 헥사민 등의 화학 약품을 제조하는 공정에 설치된 흡수 시설(5종 사업장)에서 채취하였다. A 시설에서 생산하는 BPA는 대표적인 환경호르몬으로서 우리가 일상생활에서 자주 접하는 플라스틱, 컵라면 용기, 금속 캔 등에서 쉽게 발견되며 열 또는 산성에 녹아 인체에 유입되며 화학구조가 여성호르몬인 에스트로겐과 비슷하여 성조숙증 및 불임, 탈모 등을 일으킨다고 알려져 있다.

Table 1. Information on exhaust gases from industrial facilities for sample collection.

Sample	Source of exhaust gas
A	Waste gas incinerator in a BPA manufacturing plant
B	HDPE production facility
C	Carbon black manufacturing facility
D	Crushing process in MDF production facility
E	Absorption process in chemical manufacturing facilities

B 시설에서 생산하는 HDPE는 환경호르몬인 비스페놀, 프탈레이트 및 멜라민이 검출되지 않는 무독성 친환경 플라스틱이다. C 시설에서 생산하는 카본블랙은 천연가스 내지 액상 탄화수소의 불완전 연소 또는 열분해에 의해 얻어지는 검은색 가루 분말로 그 주성분은 콜로이드 범위 1~500 nm의 평균 입자크기를 가지고 있다. D 시설에서 생산되는 MDF는 목질 재료를 원료로 하여 얻은 목 섬유를 접착제와 함께 고온, 고압으로 압착 성형한 판재이다.

5개 사업장에서 포름 알데하이드 분석을 위한 시료 채취가 완료된 카트리는 밀봉 후 빛을 차단하기 위해 호일로 감싸서 분석 전까지 4°C로 냉장 보관하였다. 그 후 시료 카트리는 acetonitrile (ACN) 5 mL를 통과시켜 포름 알데하이드 화합물을 추출한 후 갈색 바이알에 넣고 테플론 테이프를 봉한 후 분석 전까지 냉장 보관하였다.

2.2 기기분석

포름 알데하이드 분석을 위해 사용한 HPLC 시스템(Agilent 1200 series)은 기본적으로 탈기 장치, 펌프, 시료 주입부, 칼럼온도 조절부, 검출기, 데이터 처

리 프로그램 등으로 구성된다. 탈기 장치는 펌프 유속 10 mL/min까지 처리가 가능하며 대부분의 용매에 적용 가능한 표준 vacuum degasser를 사용하였으며, 펌프는 0.01~10 mL/min의 유속 범위에서 조절이 가능하며 최대 4개의 용매를 분석법에 적합한 비율로 정확히 혼합하여 일정한 유속으로 이동시킬 수 있는 quaternary pump를 사용하였다. 시료 주입부는 0.1~100 µL 주입이 가능하며 100개의 시료를 자동으로 분석할 수 있는 자동 샘플러를 사용하였으며, 칼럼온도 조절부는 온도 조절 범위가 -10~80°C인 것을 사용하였다. 검출기는 광원으로 텅스텐 램프와 중수소 램프를 조합하여 190~850 nm 파장 범위의 빛을 방출하며 포토다이오드를 사용하여 특정 파장 또는 동시에 여러 파장에서의 흡광도를 측정할 수 있으며 미지의 물질에 대한 라이브러리 서치가 가능한 DAD (diode array detector)를 사용하였다. 데이터 처리 프로그램으로는 Agilent의 ChemStation (04.03 version) 소프트웨어를 사용하였다.

표 2에 HPLC의 분석 조건을 정리하였다. 분석 칼럼으로는 가장 많이 사용되고 비교적 길이가 짧은 역상 모드용 C18 무극성 칼럼 (Agilent, 4.6 mm × 150 mm)을 사용하였고, 이동상 용매의 조성은 최종적으로 물 40%, ACN 60%로 고정하여 isocratic 분석을 실시하였다. 이동상 용매의 최적의 조성을 결정하기 위하여 물과 ACN의 조성 비율을 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 칼럼 유량은 분석 칼럼에 최적인 1.0 mL/min으로 하였고 칼럼 오븐 온도는 일반적인 40°C로 고정하였다. DAD의 분석 파장은 포름 알데하이드 유도체에 가장 뚜렷한 반응을 나타내는 360 nm를 선택하였으며 시료 주입량은 분석 칼럼이 충분히 분리할 수 있는 10 µL로 정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이동상 조성의 결정

HPLC 분석 이론 중 역상 모드를 이용하여 무극성 칼럼과 극성 용매를 사용하는 경우, 용매의 조성비에

Table 2. HPLC analytical conditions.

Column	C18 (4.6 mm × 150 mm)
Mobile phase	A : water B : Acetonitrile
Isocratic program	A (40%) : B (60%)
Flow rate	1.0 mL/min
Oven Temperature	40°C
Detection wavelength	360 nm
Injection volume	10 µL

Table 3. Change in retention time with composition ratio of mobile phase.

Water% : ACN%	Retention time (min)	Area
30 : 70	2.268	432.794
40 : 60	2.985	436.676
50 : 50	4.519	436.125

서 유기 용매의 비율이 높을수록 분석 물질 피크의 머무름 시간 (retention time)이 감소한다. 유기 용매의 종류에 따라서 차이가 있지만 대략 유기 용매의 비율이 10% 증가 시 머무름 시간은 약 2배 감소한다. 이 이론을 바탕으로 이동상 용매의 조성비를 3단계로 3회씩 반복 실험하여 그 결과를 표 3에 정리하였다.

그림 2는 이동상 조성비의 변화에 따른 머무름 시간의 변화를 보여준다. 그림 2에서 유기 용매 (ACN)의 비율이 높을수록 머무름 시간이 빨라짐을 알 수 있었다. 그러나 이동상 조성비의 변화에 따른 포름 알데하이드의 피크 면적은 큰 변화가 없었다. 따라서 분석 시료 내에서 포름 알데하이드가 다른 물질들과 피크가 중첩되어 정량에 영향을 주지 않는 한 ACN의 비율을 높임으로서 분석 시간을 단축시킬 수 있을 것이다. 본 실험에서는 최적의 분석조건으로서 물과 ACN의 조성비를 40 : 60으로 고정시키고 모든 분석을 진행하였다.

3.2 최적 분석 조건에서 포름 알데하이드의 검출 및 정량한계, 정확도 및 정밀도

포름 알데하이드의 분석 조건에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 사용한 표준 시료는 시판용 표준 시약 (Supelco, formaldehyde-DNPH 100 µg/mL in ACN)을

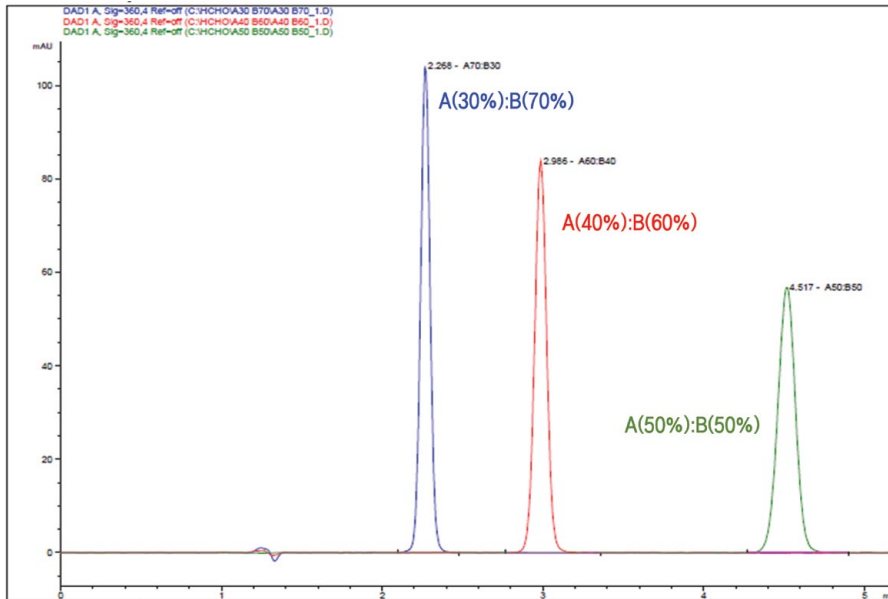


Fig. 2. Change in chromatogram with composition ratio of mobile phase. Blue, red, and green curves indicate composition ratio of A (30%):B (70%), A (40%):B (60%), and A (50%):B (50%), respectively.

Table 4. LOD and LOQ of formaldehyde determined using standard solution (0.05 ppm).

Standard sample #	1	2	3	4	5	6	7
Retention time (min)	2.982	2.982	2.977	2.984	2.983	2.984	2.982
Area	34.584	34.262	34.898	34.413	34.746	34.584	34.527
Concentration (ppm)	0.0529	0.0525	0.0532	0.0526	0.0531	0.0529	0.0528
Standard deviation				0.00025			
LOD (ppb)				0.787			
LOQ (ppb)				2.507			

ACN으로 희석하여 0.05~1.00 ppm 범위 내에서 농도별로 제조 (0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.0 ppm)한 것이다. 농도별 표준 시료의 분석 값을 이용하여 작성한 검량선의 상관관계수 (R^2)는 0.9996으로 공정시험법상의 권고치 (≥ 0.99)를 만족하였다. 표준 용액을 이용하여 포름 알데하이드의 검출한계 (limit of detection, LOD)와 정량한계 (limit of quantitation, LOQ)를 결정하여 표 4에 나타내었다. LOD와 LOQ의 결정은 공정시험법에서 제시한 검출한계 농도인 0.05 ppm에 대해 7개의 표준 시료를 조제한 후 분석한 값의 평균치와 표준편차를 이용하였다. 포름 알데하이드의 LOD는 0.787 ppb이고 LOQ는 LOD의 3.3배인 2.507

ppb로 조사되었다. 포름 알데하이드의 LOD와 LOQ의 각 측정치 (0.787, 2.507 ppb)는 공정시험법상 권고치 (≤ 50 ppb)를 만족하였다 (Ministry of Environment, 2016c).

포름 알데하이드의 정확도와 정밀도 평가를 위해서는 0.1 ppm의 표준 용액 5세트를 제조하여 24시간 동안 냉장 보관 후 환경 시료와 동일하게 ACN으로 추출하여 분석하였다. 표 5는 정확도와 정밀도의 실험 결과를 나타낸 것으로 정확도는 0.1 ppm의 농도 수준에서 평균 93.1%를 보였으며 이 결과는 공정시험법에서 규정하고 있는 평가 기준 (75~125%)을 충분히 만족하였다. 정밀도는 실험에 대한 재현성을 나

Table 5. Accuracy and precision of formaldehyde determined using standard solution.

Standard sample #	1	2	3	4	5
Retention time (min)	2.981	2.982	2.984	2.980	2.978
Area	70.298	70.053	69.810	70.044	70.459
Concentration (ppm)	0.0933	0.0930	0.0927	0.0930	0.0935
Average (ppm)	0.0931				
Standard deviation	0.0003082				
Accuracy (%)	93.1				
Precision (%)	0.33				

타내며 0.1 ppm의 농도 수준에서 평균 0.33%로 매우 뛰어난 재현성을 보여주었다. 이 결과 역시 공정시험법에서 규정하고 있는 평가 기준 ($\leq 25\%$)을 충분히 만족하였다.

3.3 5종 사업장 배출가스의 포름 알데하이드 분석

5종의 산업시설 배출가스 시료를 시설별로 3회씩 채취하여 분석한 결과를 표 6에 정리하였다. 그림 3에 배출가스 5종 시료의 분석 크로마토그램을 나타내었다. 사업시설 배출가스 중 가장 낮은 포름 알데하이드 농도는 BPA 제조공정에서 폐가스를 소각하는 시설 (A 시료)에서 조사되었으며 평균 농도는 0.054 ppm이었다. 반면에 가장 높은 포름 알데하이드 농도는 다양한 화학약품을 제조하는 시설의 흡수시설 (E 시료)에서 측정되었으며 평균 농도는 1.159 ppm이었다. E 시설에서 측정된 최고 농도는 시설로부터 포름 알데하이드 성분이 직접적으로 영향을 주었기 때문으로 생각된다. 그리고 D 시료에서 측정된 포름 알데하이드의 농도는 0.643 ppm으로 비교적 높은 수준이었다. 이는 목질 재료의 접착제등에서 발생하는 포름 알데하이드 성분이 영향을 준 것으로 판단된다.

그림 3의 크로마토그램에서 2.05분에 검출되는 것은 DNPH 피크를 나타낸다. 저농도 시료에서는 알데히드류와 거의 반응하지 않아 큰 피크가 나타난 반면에 고농도 시료에서는 포름 알데하이드와 충분히 반응하므로 거의 나타나지 않았다. 포름 알데하이드의 피크는 2.98분에 검출되며 모든 시료에서 검출됐으나, 아세트알데하이드의 피크는 3.73분에 검출되는데

Table 6. Analysis results of exhaust gas samples.

Sample type	Sample #	Retention time (min)	Area	Concentration (ppm)
A	1	2.980	41.647	0.054
	2	2.981	41.207	0.053
	3	2.981	41.364	0.054
	Mean	2.981	41.406	0.054
B	1	2.981	110.541	0.143
	2	2.979	110.383	0.143
	3	2.980	110.564	0.144
	Mean	2.980	110.496	0.143
C	1	2.979	215.951	0.280
	2	2.980	215.232	0.279
	3	2.979	215.273	0.279
	Mean	2.979	215.485	0.279
D	1	2.979	494.267	0.642
	2	2.979	494.522	0.642
	3	2.979	496.946	0.645
	Mean	2.979	495.245	0.643
E	1	2.980	891.801	1.158
	2	2.981	893.982	1.161
	3	2.979	891.003	1.157
	Mean	2.980	892.262	1.159

HDPE를 생산하는 시설인 B 시료에서만 나타났다. 5종의 배출가스 시료에서 포름 알데하이드의 피크는 주변 피크들과 전혀 중첩되지 않았고 모든 포름 알데하이드 피크들이 기준선(baseline)에서 시작하여 기준선으로 끝나는 형태의 높은 분리도(분해능 1.5 이상)를 보여주었다(그림 3). 또한 크로마토그램 상의 머무름 시간과 피크 면적에 대한 재현성도 매우 우수하였다.

4. 요약 및 결론

논문에서는 포름 알데하이드 분석법 중의 주 공정

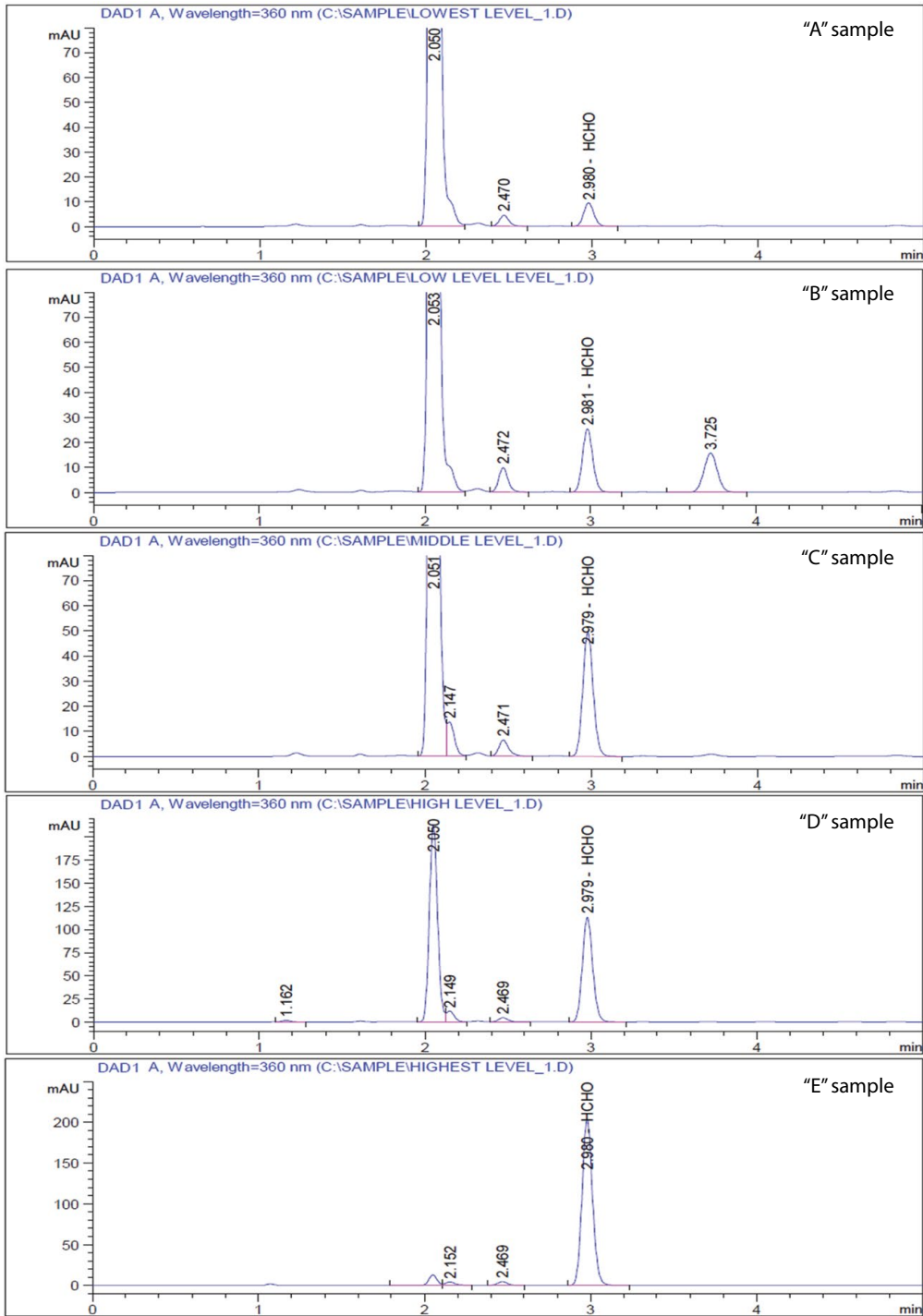


Fig. 3. Chromatograms of five exhaust gas samples.

시험법인 DNPH 유도체화법이 결합된 HPLC 분석법의 단점을 개선하고자 역상모드 분석 이론 하에서 이동상의 최적의 조성비(물 40%, ACN 60%)를 결정하였다. 최적의 분석 조건을 이용하여 분석법에 대한 포름 알데하이드의 검출한계, 정량한계, 정확도 및 정밀도를 구하였다. 그리고 5종 산업시설 배출가스에 대해 시설별로 시료를 채취하여 이동상 조성비를 고정시킨 후 isocratic 분석법을 적용하였다.

실험 결과에 의하면 이동상의 조성비(물과 ACN 용매 비율) 변화에 따라 포름 알데하이드의 머무름 시간이 변하였으며 ACN 유기 용매의 조성이 증가할수록 머무름 시간이 현저히 감소하였다. 그러나 피크 면적은 유기 용매의 조성 변화에 따라 거의 변화하지 않았다. 최종적으로 이동상 조성비를 물 40%와 ACN 60%로 고정시킨 후 isocratic 분석법으로 분석한 결과에 의하면 포름 알데하이드 피크의 검출 시간이 기존의 7분에서 3분으로 단축되었으며 다음 시료의 분석을 위한 안정화 소요시간이 필요 없었다.

5종의 산업시설 배출가스의 시료를 적절한 이동상 조성비를 갖는 isocratic 분석법에 적용시킨 결과, 포름 알데하이드 피크는 2.98분에 검출되었으며 2.05분에 검출되는 DNPH 피크와 3.72분에 검출되는 아세트알데하이드 피크와 전혀 중첩되지 않았다. 또한 이들의 머무름 시간의 차이가 뚜렷하게 나타났다. 게다가 배출가스 종류별 시료의 분석 결과에 따르면 모든 시료의 머무름 시간과 면적에 대한 재현성이 매우 뛰어나다. 배출가스의 포름 알데하이드 농도는 BPA 제조 시설의 폐가스 소각 시설에서 가장 낮은 0.054 ppm이 측정되었으며 MDF 생산시설(0.643 ppm)과 포름 알데하이드 제조시설(1.159 ppm)에서 비교적 높은 수준의 농도가 측정되었다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2017R1D1A3A03000511).

References

- Althuller, A.P.(1993) Production of aldehydes as primary emissions and from secondary atmospheric reactions of alkenes and alkanes during the night and early morning hours, *Atmospheric Environment*, 27, 21-32.
- Anderson, L.G., Lanning, J.A., Barrel, R., Miyagishima, J., Jones, R.H., Wolfe, P.(1996) Sources and sinks of formaldehyde and acetaldehyde: an analysis of denver's ambient concentration data, *Atmospheric Environment*, 30, 2113-2123.
- Atkinson, R.(1997) Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds: 1. Alkanes and Alkenes, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 26, 215.
- Carlier, P., Hannachi, H., Mouvier, G.(1986) The chemistry of carbonyl compounds in the atmosphere - A review, *Atmospheric Environment*, 20, 2079-2099.
- Georghiou, P.E., Harlick, L., Winsor, L., Snow, D.(1983) Temperature dependence of the modified pararosaniline method for the determination of formaldehyde in air, *Analytical Chemistry*, 55, 567-570.
- Granby, K., Carsten, S.C., Lohse, C.(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., Miguel, A.H., Tavares, T.M.(1990) Urban air pollution in Brazil: acetaldehyde and other carbonyls, *Atmospheric Environment*, 24B, 101-106.
- Grosjean, E., Williams, E.L., Grosjean, D.(1993) Ambient levels of formaldehyde and acetaldehyde in Atlanta, Georgia, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 43, 469-474.
- 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.
- Humberto, B.A., Rosaura, C.C., Guadalupe, R.O.R.(1991) Analysis of the change in atmospheric urban formaldehyde and photochemistry activity as a result of using methyl-t-butyl-ether (MTBE) as an additive in gasolines of the metropolitan area of Mexico city, *Atmospheric Environment Part B*, 25, 285-288.
- Hwang, Y.J., Park, S.K., Baek, S.O.(1996) Measurement of carbonyl compounds in ambient air using a DNPH cartridge coupled with HPLC method - Evaluation of

- analytical method and application, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 12(2), 199-209.
- Lee, D.S. (2008) A study on indoor air quality in the new apartment house in Gwang-ju area, A master's thesis, Industrial gradual school of Chonnam National University.
- Li, J., Dasgupta, P.K., Luke, W.T. (2005) Measurement of gaseous and aqueous trace formaldehyde. Revisiting the pentanedione reaction and field applications, *Analytica Chimica Acta*, 531, 51-68.
- Li, S.-M., Anlauf, K.G., Wiebe, H.A., Bottenheim, J.W. (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.
- Ministry of Environment (2016a) Air pollution process test standard, High Performance Liquid Chromatography, ES 01207.
- Ministry of Environment (2016b) Air pollution process test standard, Among the exhaust gases, formaldehyde and aldehydes, ES 01501.
- Ministry of Environment (2016c) Air pollution process test standard, Accuracy guarantee management, ES 01001.
- Park, S.S., Hong, S.B., Lee, J.H., Cho, S.Y., Kim, S.J. (2006) Measurement of formaldehyde in the atmosphere using a dual-channel glass coil sampler, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(2), 259-266. (in Korean with English abstract)
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Staffelbach, T., Neftel, A., Stauffer, B., Jacob, D. (1991) Formaldehyde in polar ice cores: a possibility to characterize the atmospheric sink of methane in the past?, *Nature*, 349, 603-605.
- Vanderwal, J.F. (1982) Formaldehyde measurements in dutch houses, schools and offices in the years 1977-1980, *Atmospheric Environment*, 16(10), 2471-2487.
- Viskari, E.-L., Vartiainen, M., Pasanen, P. (2000) Seasonal and diurnal variation in formaldehyde and acetaldehyde concentrations along a highway in Eastern Finland, *Atmospheric Environment*, 34, 917-923.
- Yeo, H.G., Cho, K.C., Lim, C.S., Choi, M.K., Sunwoo, Y. (2002) Characteristics of seasonal source for formaldehyde and acetaldehyde in metropolitan areas, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 18(1), 11-23. (in Korean with English abstract)
- Zhang, J., He, Q., Li, P.J. (1994) Characteristics of aldehydes: Concentrations, sources, and exposures for indoor and outdoor residential microenvironments, *Environmental Science and Technology*, 28, 146-152.