

## HPLC와 Fluorescence Derivatization 기법을 이용한 극미량 NDMA의 수질분석

차우석 · Peter Fox\* · Brijesh Nalinakumari\* · 최희철<sup>†\*\*</sup>

광주과학기술원 불연구센터 · \*Arizona State University, 토목환경공학과 · \*\*광주과학기술원 환경공학과

(2005년 11월 23일 접수, 2006년 2월 16일 채택)

### Trace-level Determination of *N*-nitrosodimethylamine(NDMA) in Water Samples using a High-Performance Liquid Chromatography with Fluorescence Derivatization

Woosuk Cha · Peter Fox\* · Brijesh Nalinakumari\* · Heechul Choi<sup>†\*\*</sup>

Center for Water R(CWR), Gwangju Institute of Science and Technology(GIST)

\*Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University

\*\*Department of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology(GIST)

**ABSTRACT :** High-performance liquid chromatography(HPLC) and fluorescence derivatization were applied for a trace-level *N*-nitrosodimethylamine(NDMA) analysis of water samples. Fluorescence intensity was optimized with the excitation wavelength of 340 nm and the emission wavelength of 530 nm. pH adjustment after denitrosation was necessary to get a maximum intensity at pH between 9 and 12. Maximum intensity was found with a dansyl chloride concentration of 330 to 500 mg/L. Percentile error in the water sample analyses through solid phase extraction was 12-162% and 6-23% for the lower concentration level(10-200 ng/L NDMA) and the higher level(100-1000 ng/L NDMA), respectively, showing more discrepancy in lower level. However, the average ratios of estimated NDMA to the standard NDMA were close to 1 for both concentration ranges, presenting this HPLC method could detect from tens to hundreds nanograms NDMA per liter. Accurate determination of NDMA, which was injected to a wastewater effluent, revealed the selectivity of fluorescence derivatization for the target compound(NDMA) in the presence of complex interfering compounds. The HPLC with fluorescence derivatization may be applicable for determining NDMA of water and wastewater samples for various research purposes.

**Key Words :** *N*-nitrosodimethylamine(NDMA), HPLC, Fluorescence Derivatization, Dansyl Chloride, Water Reuse

**요약 :** 본 연구에서는 fluorescence derivatization 기법과 HPLC를 이용하여 수중에 nanograms per liter로 존재하는 극미량 *N*-nitrosodimethylamine(NDMA)를 분석하고자 하였다. 이를 위해 먼저 다양한 조건 하에서의 fluorescence intensity를 측정함으로써 derivatization 기법을 최적화하였는데, fluorescence detector의 excitation/emission wavelength는 340 nm(excitation)과 530 nm(emission)에서, denitrosation 후 용액의 pH는 9-12의 범위에서, 그리고 dansyl chloride의 농도는 330-500 mg/L 범위에서, 최대 fluorescence intensity를 보여주었다. 용매추출을 통한 수질 시료의 분석에서, 표준농도와 검출농도의 차이는, 저농도(10-200 ng/L) 범위에서 12-162%, 고농도(100-1000 ng/L) 범위에서 6-23%를 보여, 저농도 범위에서 더 많은 차이가 나는 것으로 나타났으나, 두 농도 범위 모두 표준농도와 검출농도의 평균 대비율이 1에 매우 근접해 있어, 수실에서 수백 nanograms NDMA per liter의 분석이 가능함을 보여주었다. 하수처리장 처리수에 주입한 NDMA의 분석에서도 다른 물질에 의한 간섭없이 정확한 농도 검출이 가능했는데, 이는 목적물질을 선별적으로 분석해내는 derivatization 과정에 의한 것으로 나타났다. HPLC와 fluorescence derivatization 기법을 이용한 NDMA의 분석은 상수 및 하수를 사용하는 다양한 실험 연구에서 NDMA를 분석하는 방법으로 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

**주제어 :** *N*-nitrosodimethylamine(NDMA), HPLC, Fluorescence Derivatization, Dansyl Chloride, 용수재이용

## 1. 서론

*N*-nitrosodimethylamine(NDMA)는 0.7 ng/L에서 백만분의 일의 암발생 확률을 보일 만큼 발암 가능성이 높은 물질로, 다양한 종류의 음식, 음용수, 하수 등에 존재하는 것으로 알려져 있다.<sup>1~4)</sup> 수처리 공정 후에 존재하는 NDMA로 인해, 많은 수처리 시설에서 NDMA는 새로운 이슈가 되고 있는데,

특히 처리수를 지하대수층으로 주입하는 남부 캘리포니아의 여러 재이용 시설들에서 더욱 큰 문제로 부각되었다.<sup>4)</sup> 현재, 음용수에서 NDMA에 대한 규제는 없으나 미국 캘리포니아의 경우에는 NDMA의 발생량이 많아 10 ng/L를 action level로 정하고 있다.<sup>5)</sup> 따라서 이러한 극미량(trace-level) NDMA에 관한 연구를 수행하기 위해서는 적절한 분석방법의 활용이 매우 중요한 문제가 된다.

비록, chemical ionization mode와 tandem mass spectrometry를 이용한 gas chromatography 분석방법(GC/CI/MS/MS)으로 최대 1 ng/L까지 NDMA의 분석이 가능하지만,<sup>6)</sup> 고가

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: hcchoi@gist.ac.kr  
Tel: 062-970-2441

Fax: 062-970-2434

의 분석장비와 분석의 상대적인 어려움으로 인해 아직까지 많은 실험 연구들이 micrograms per liter 또는 milligrams per liter 농도 범위에서 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 분석이 쉽고 저가의 장비인 high-performance liquid chromatography(HPLC)와 fluorescence detector를 이용하여 수질 시료에 존재하는 nanograms per liter 농도 범위의 NDMA를 분석하는 것을 목표로 하였다. HPLC와 fluorescence derivatization을 이용한 NDMA의 분석은 기존의 ultra-violet (UV) detector나 UV spectrometer를 이용한 분석방법보다 한 단계 나은 검출한계(detection limit)를 보여주는 것을 나타냈으나 주로 음식, 담배연기 중에 포함되어 있는 NDMA의 분석에 사용되어왔지만 수질분석에는 사용된 바가 없다.<sup>7-10)</sup>

Fluorescence derivatization 기법은 Fig. 1과 같은 과정을 통해 NDMA를 분석하게 된다. 먼저 denitrosation의 과정을 통해 NDMA가 secondary amine(dimethylamine, DMA)으로 환원되고 이렇게 생성된 DMA를 derivatizing reagent인 dansyl chloride와 반응시켜 fluorescence detector에서 검출하게 된다. 한편, fluorescence derivatization 기법을 이용한 NDMA의 분석방법은 연구자들마다 분석 조건들에 차이가 있어서 이 방법을 사용하기 위해서는 먼저, 다양한 조건에서의 fluorescence intensity를 측정, 비교함으로써 최적 분석 조건을 찾는 것이 필요하다.

최종적인 NDMA의 검출한계(detection limit) 농도는 기기의 검출한계와 시료의 전처리 과정에서의 농축 정도에 좌우된다. 따라서 물 속에 존재하는 목적물질을 얼마나 효과적으로 추출하느냐에 따라 검출한계 농도가 결정되게 된다. 수중에 존재하는 NDMA의 분석을 위해서는 유기용매추출(solvent extraction)이 필요한데, 일반적으로 많이 사용되는 liquid-liquid extraction은 사용되는 유기용매의 사용량에 비해 회수율(recovery rate)이 낮은 것으로 알려져 있다. 따라서, 여러 가지 다양한 추출 방법 또는 매질(media)들이 개발되고 상품화 되어 왔는데, 본 연구에서는 상대적으로 많은 양(0.5-2 liters)의 시료를 연속적으로 적절한 흡착 매질에 접촉시킴으로써 목적물질을 추출할 수 있고 상대적으로 적은 양의 유기용매를 사용하는 solid phase extraction(SPE) 방법을 사용하였다.

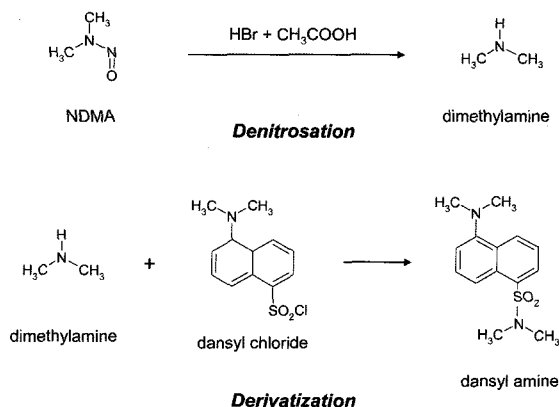


Fig. 1. Reactions in NDMA analysis with fluorescence derivatization.

본 연구에서는 극미량으로 존재하는 NDMA의 분석을 위해 고가의 분석장비 대신에 비교적 경제적이고 장비의 구성이 쉬운 분석방법으로 fluorescence derivatization 기법과 HPLC를 이용한 방법을 평가하고자 하였다. 또한 수질 시료를 이용한 전처리 과정과 기기분석을 통해 수중에 nanograms per liter 농도로 존재하는 NDMA의 분석이 가능한지를 알아보 고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시약 및 장비

본 연구에서 사용된 NDMA, DMA, dansyl chloride(5-dimethylamino-1-naphthalenesulfonyl chloride)는 Sigma-Aldrich에서 구매하여 별도의 처리없이 사용하였다. NDMA 농축액(1 g/L)은 dichloromethane을 용매로 하여 준비하였으며 필요한 농도로 희석하여 사용하였다. 수질 분석을 위한 희석 용매로는 methanol을 사용하였다. Denitrosation reagent는 10 mL volumetric flask에서 48% aqueous hydrobromic acid 1 mL와 glacial acetic acid를 함께 혼합하여 준비하였다. Dansyl chloride reagent는 다양한 양(5~100 mg)의 dansyl chloride를 50 mL의 acetone에 녹여서 준비하였으며 농도 범위는 100~2000 mg/L가 되도록 하였다. Dansyl chloride와 반응시키기 전에 시료의 pH를 조정하기 위해 1 M NaOH와 0.5 M NaHCO<sub>3</sub>를 사용하였다.

Dansyl chloride와 반응한 시료는 Waters HPLC에 장착된 Nova-Pak<sup>®</sup> C-18 칼럼(3.9×150 mm, 입경 4 μm)을 통해 Waters 2475 Multi λ Fluorescence detector에 의해서 검출되었다. 이동상(mobile phase)으로는 HPLC-grade acetonitrile과 deionized water(DI water)를 2:1의 부피비로 혼합한 용액을 사용하였으며 이동상의 유속은 1 mL/min으로 하였다.

### 2.2. Denitrosation

NDMA를 secondary amine인 DMA로 환원하기 위해, 일정 농도의 NDMA를 포함하고 있는 표준용액(in dichloromethane) 100 μL를 1-mL HPLC vial에 넣은 후 10 μL의 denitrosation reagent를 주입하고 30분간 반응시켰다. 다음에 Vial을 heating block(60°C)에 넣은 후 20분 동안 방치하여 유기용매(dichloromethane)를 휘발시키고 다시 40°C의 heating block에서 1시간 동안 방치하여 잔류 용액(hydrobromic acid와 acetic acid)을 모두 휘발시켰다. 이렇게 함으로써, 시료의 pH 조정을 정확하게 할 수 있었다.

### 2.3. Dansylation

Denitrosation을 통해서 생성된 DMA와 fluorescence derivatizing reagent인 dansyl chloride를 반응시키는 과정을 dansylation이라고 한다. Dansylation은 일정한 pH에서 반응이 일어나므로 적절한 pH의 조정이 필요하다. 이를 위해 200 μL의 0.5 M NaHCO<sub>3</sub>와 적정량의 1 M NaOH를, denitrosation이 끝난 1-mL vial에 주입하였다. pH 조정된 시료에 150 μL의

dansyl chloride reagent를 주입한 후 40°C의 heating block에서 30분 동안 반응시킨 후 다시 100  $\mu$ L의 증류수(DI water)를 첨가한 후, HPLC와 fluorescence detector로 분석하였다. Dansylation의 과정은 연구자들마다 달라서 dansylation의 최적조건을 찾는 것이 필요하였다. 이를 위해 시료의 pH, dansyl chloride의 농도 그리고 fluorescence detector의 excitation/emission wavelength 대한 fluorescence intensity의 변화를 관찰하고 이를 토대로 최적 조건을 도출하였다.

#### 2.4. Solid phase extraction(SPE)

수질 시료 중의 NDMA를 추출하기 위해 본 실험에서는 Supelco 12-port Visiprep Solid Phase Extraction Vacuum Manifold를 사용하였다. SPE tube는 유기용매와 반응으로 인한 추출을 방지하기 위해 비반응성 유리 재질을 사용하였으며, 시료는 NaHCO<sub>3</sub> 2 g/L를 주입하여 pH를 약 8.2로 조정 한 후 Teflon tubing을 통해 vacuum manifold에 장착된 SPE tube로 주입되었다. 추출 매질로는 NDMA에 비교적 잘 반응하는 것으로 알려진 mesh size 20-50(입경 297-840  $\mu$ m)의 Ambersorb 572를 사용하였으며 각 SPE tube에 1500 mg씩 충전하였다. Ambersorb 572의 전처리에는 hexane, dichloromethane, methanol, DI water의 순서로 각각의 용액 15 mL를 사용하여 이루어졌다. 시료(100 또는 500 mL)는 약 -1.2 psi의 진공(vacuum)을 가하여 1 또는 5 mL/min으로 주입하여 총 주입시간이 약 100분이 되도록 하였다. 시료의 주입이 끝난 후 약 -4.9 psi의 진공(vacuum)을 가하여 Ambersorb 572에 남아있는 대부분의 수분을 제거하였다. 유기용매의 추출을 위해 7 mL의 dichloromethane을 약 1시간 동안 연속적으로 SPE tube로 주입하였다. 얻어진 추출액에 포함된 미량의 수분은 5 g anhydrous sodium sulfate를 사용하여 제거하였다. Anhydrous sodium sulfate에 잔류하는 추출액을 회수하기 위해 추가적으로 3 mL의 dichloromethane을 통과시켜, 각 시료로 부터의 총 추출액은 10 mL가 되었다.

추출액은 초순수 질소를 이용하여 약 40°C의 heating block에서 1 mL까지 농축하였으며, 1-mL HPLC vial에 옮긴 후 다시 200  $\mu$ L까지 농축하였다. 농축된 시료는 denitrosation과 dansylation을 거친 후 HPLC에서 검출되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. Fluorescence derivatization의 최적화

##### 3.1.1. Excitation/emission wavelengths

Derivatized DMA는 excitation 파장에서 에너지를 흡수하고 emission 파장에서 형광(fluorescent) 특성을 나타낸다. Fluorescence detector의 최적 조건을 찾기 위해 다양한 excitation/emission 파장을 적용하여 보았다. Fluorescence intensity는 340 nm의 excitation 파장과 530 nm의 emission 파장에서 최대값을 나타내었는데(Fig. 2), 이는 단지 하나의 예이며 다른 파장 조건을 이용한 실험에서도 동일한 최적 파장이 관찰되었다. 비록 최대 intensity가 340 nm(excitation)와 530 nm

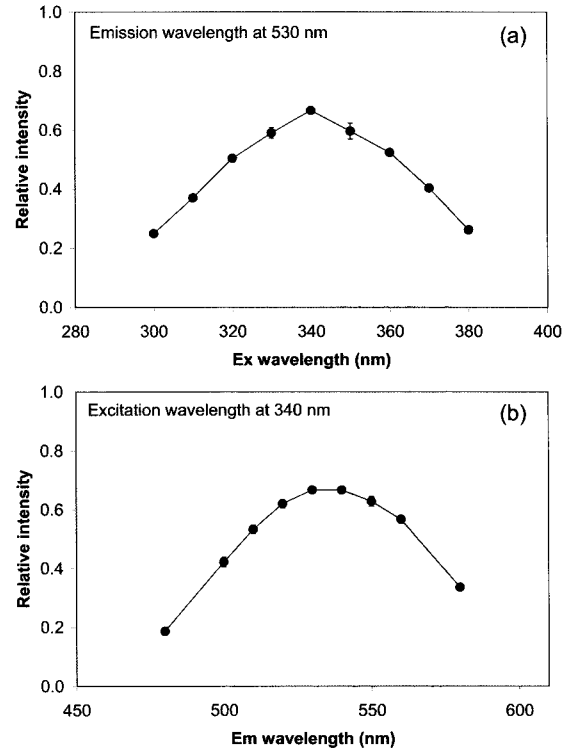


Fig. 2. Fluorescence intensity at different wavelengths of excitation(Ex) and emission(Em). (a) emission wavelength was fixed at 530 nm, (b) excitation wavelength was fixed at 340 nm.  $n=3$ .

(emission)의 파장에서 얻어졌다 하더라도,  $\pm 10$  nm의 파장이 fluorescence intensity에 주는 차이가 크지 않으므로 본 연구에서 얻어진 최적 파장에서  $\pm 10$  nm까지의 범위는 최적 파장이라고 할 수 있을 것이다. 이러한 결과는 이전 연구들에서 사용된 파장이 약간의 차이를 보이는 것을 설명할 수 있을 것이다.<sup>7,9,10</sup> 본 연구에서는 340 nm(excitation), 530 nm(emission)를 fluorescent detector의 최적 조건으로 사용하였다.

##### 3.1.2. pH

Derivatization에서 dansyl chloride를 사용할 때, 일반적으로 pH를 9-10으로 조절하는데 이는 dansyl chloride가 약알칼리 상태에서 DMA와 반응하기 때문이다.<sup>11</sup> 그러나 용액의 부피가 500  $\mu$ L 이하인 상태에서 pH를 조정하기는 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 시료에 첨가하는 1 M NaOH의 양을 조절함으로써 용액의 pH를 조정하고자 하였다. 실험결과, secondary amine(DMA)의 derivatization은 용액의 pH에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이, 80  $\mu$ L의 NaOH를 첨가할 때까지 fluorescence intensity는 거의 차이를 보이지 않다가 90  $\mu$ L와 100  $\mu$ L의 NaOH를 첨가하면서 intensity가 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3(b)의 x축은 Fig. 3(a)의 NaOH 첨가량에 대한 각각의 pH를 나타낸다. 각 시료의 pH를 측정하기 위해 시료의 부피를 다섯 배로 늘려서 pH를 측정하였다. 여기에서 용액의 pH가 13에 도달했을 때 fluorescence intensity는 급격하게 감

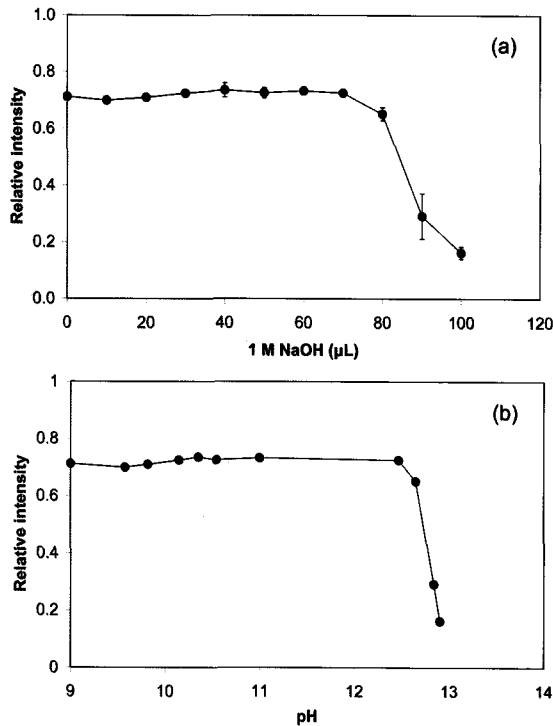


Fig. 3. pH dependence of fluorescence intensity in derivatization of DMA upon (a) addition of 1 M NaOH, (b) corresponding pH to NaOH addition. n = 3.

소하는 것을 알 수 있다. 이를 통해, intensity를 최대로 하기 위해서는 용액의 pH가 9-12의 범위에 있어야 함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 50 μL의 NaOH를 첨가하여 최적 pH 조건을 만들었다.

3.1.3. Dansyl chloride의 농도

서로 다른 농도(100-2000 mg/L in acetone)의 dansyl chloride를 이용한 DMA의 derivatization을 통해 dansyl chloride의 최적 농도를 알아보았다. 330 mg/L 이상의 농도에서 fluorescence intensity는 거의 같은 정도로 유지되었다(Fig. 4(a)). 그러나, blank 시료에서는 dansyl chloride의 농도가 증가함에 따라 intensity가 증가하는 것을 볼 수 있었다(Fig. 4(b)). Blank 시료의 intensity가 증가하면 그만큼 HPLC의 detection limit은 높아지게 된다. 따라서 330-500 mg/L가 dansyl chloride의 최적농도로 채택되었다. 이상에서 최적화된 조건은 이후의 수질 시료 분석에 동일하게 적용되었다.

3.2. 수질 시료에 포함된 NDMA의 분석

3.2.1. Denitrosation 효율

HPLC와 fluorescence detector를 이용한 NDMA의 분석에서 NDMA는 먼저 denitrosation의 과정을 거치게 되는데, 이 과정에서 N-NO결합이 깨지면서 NDMA는 DMA로 바뀌게 되고 이렇게 생성된 DMA가 dansyl chloride와 반응하여 fluorescent derivative를 형성하게 된다. Denitrosation의 효율은 denitrosated NDMA의 fluorescence intensity를

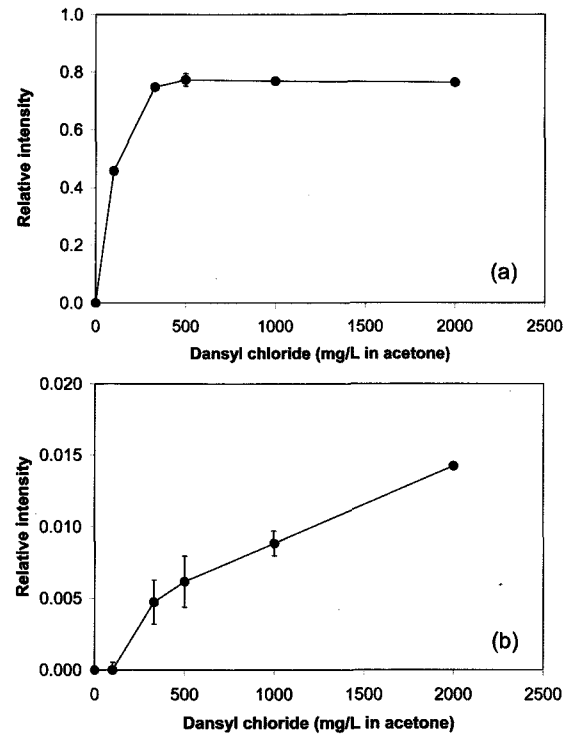


Fig. 4. Fluorescence intensity of derivatives at various concentrations of dansyl chloride. (a) standard solution, (b) blank sample. n = 4.

Table 1. Transformation of NDMA to DMA(denitrosation) (n = 6)

NDMA(ng)	Theoretical DMA formation(ng)	Transformed DMA(ng)*	Denitrosation efficiency(%)
100	61	59.2 ± 1.7	97.1 ± 2.8

\* calculated from the fluorescence intensity of denitrosated NDMA using DMA calibration curve

DMA의 농도로 바꾸고 그 값을 이론적인 DMA 생성 농도와 비교함으로써 계산할 수 있다. Table 1에 정리한 결과에서처럼, 본 실험에서 denitrosation 과정에서의 NDMA 손실은 거의 없는 것으로 나타났다.

3.2.2. 수중의 극미량 NDMA 분석

수질 시료에 극미량의 NDMA를 주입한 후, 시료의 전처리 과정(solid phase extraction)을 거쳐 NDMA를 유기용매로 회수하고 이를 분석함으로써 극미량(nanograms per liter)의 NDMA의 검출이 가능한지 알아보았다. 이를 위해 NDMA의 농도 범위를 두 단계로 나누어서 분석을 하였는데, 저농도 범위(10-200 ng/L)의 시료는, 회수되는 NDMA의 양(mass)을 고려하여 500 mL의 부피를 사용하였고, 고농도 범위(100-1000 ng/L)의 시료는 같은 이유로 100 mL의 부피를 사용하였다.

Fig. 5에 표준농도(standard NDMA)와 검출농도(estimated NDMA)를 비교하여 나타내었다. 검출농도를 구하기 위해,

먼저 HPLC fluorescence intensity에 대한 NDMA 표준시료 (in dichloromethane)에 대한 calibration curve를 만든 다음, 이를 이용해 solid phase extraction 과정을 통해 추출된 유기용매 중의 NDMA의 양(mass)을 알아낸다. 각 농도 범위에서 회수된 NDMA의 양(mass)에, 여러 번의 반복 실험에서 얻어진 각 농도 범위의 평균 회수율(recovery rate) 60.9% (저농도 범위), 75.6%(고농도 범위)를 적용하여, 수질 시료 중의 NDMA의 양(mass)을 알아낸 후, 이를 초기 부피(100 또는 500 mL)로 나누어서 NDMA의 검출농도를 산정하였다.

각 농도 범위에서의 표준농도와 검출농도의 차이를 살펴보면, 저농도 범위에서 12-162%, 고농도 범위에서 6-23%를 보여, 저농도 범위에서 더 많은 차이가 나는 것을 알 수 있다. 저농도 범위에서의 보다 큰 농도차이는 시료의 전처리 과정(solid phase extraction)이 저농도 범위 NDMA 검출에 미치는 영향을 보여준다. 그러나, 이러한 농도 차이에도 불구하고 표준농도와 검출농도의 평균 대비율이 1.04(저농도 범위)와 0.94(고농도 범위)로 1에 매우 근접해 있어, 수실에서 수백 nanograms NDMA per liter의 분석이 가능함을 보여주었다. 한편, 100~1000 ng/L의 고농도 범위에서의 NDMA 검출은 매우 안정적으로 나타났다. 본 실험에서 signal to noise ratio 3을 이용한 HPLC에서의 instrument detection limit은 113 pg이었다. 표준시료는 10 ng/L에서도 fluorescence intensity를 보이지만 그 값이 blank 시료의 noise 범위에 있어 signal to noise ratio 3을 적용하면 30 ng/L까지 측정이 가능하다고 할 수 있다.

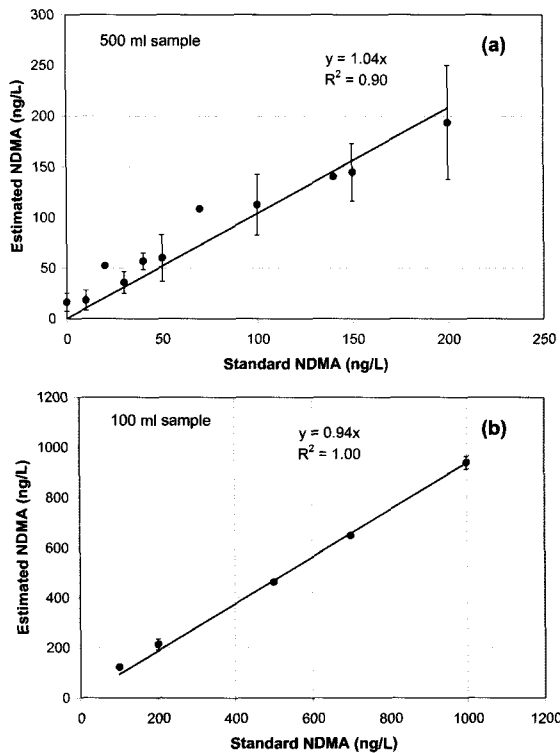


Fig. 5. NDMA detection in the water samples through solid phase extraction for (a) lower-concentration level and (b) higher-concentration level.

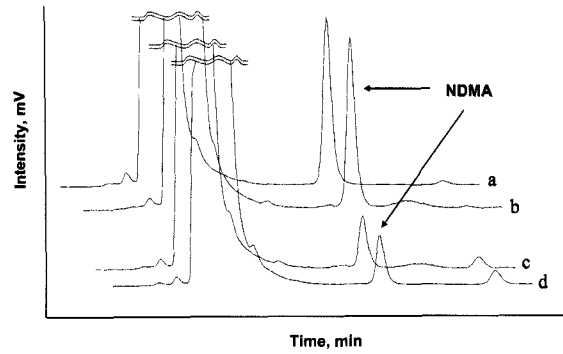


Fig. 6. Chromatograms of NDMA: a. 1000 ng/L in wastewater effluent, b. 1000 ng/L in DI water, c. 200 ng/L in wastewater effluent, d. 200 ng/L in DI water. sample volume: 100 mL.

Fluorescence derivatization 기법과 HPLC를 이용한 NDMA의 분석이 가지는 또 다른 의미는 선별적 분석(selective analysis)이라는 점이다. 일반적으로 하수 처리수 내에는 수많은 간섭물질(interference)이 존재하고 있어 GC 등을 이용할 때 목적물질의 선별(selectivity)에 많은 어려움을 겪는다. 하지만 본 연구에서 사용된 derivatization 기법을 이용할 경우, derivatization을 통해 목적물질을 먼저 선별할 수 있는 장점을 가지고 있어서 다른 물질의 간섭에 의한 분석의 어려움을 피할 수 있다. 실제 하수처리장 처리수에 NDMA를 주입한 후, 용매추출과 derivatization을 거쳐 HPLC를 통해 얻은 크로마토그램(Fig. 6)에서 알 수 있듯이, 하수처리장 처리수를 이용한 분석에서도 NDMA peak 외에 다른 peak이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 크로마토그램 초기에 나타나는 큰 영역의 peak은 hydroxide와 반응한 잔류 dansyl chloride에 의한 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 fluorescence derivatization 기법과 HPLC를 이용하여 수중에 nanograms per liter로 존재하는 극미량 NDMA를 분석하고자 하였다. 이를 위해 먼저 다양한 조건 하에서의 fluorescence intensity를 측정함으로써 fluorescence derivatization 기법을 최적화하였고 이를 용매추출을 통한 수질 시료의 분석에 적용하였다. 저농도(10-200 ng/L) 범위의 NDMA 분석에서 다소 높은 차이(percentile error)를 보이기는 했으나 표준농도와 검출농도의 평균 대비율이 1에 가까와 수실에서 수백 nanograms per liter 범위의 NDMA 분석이 가능한 것으로 나타났다. 또한, GC 분석 방법에 비해, 본 연구에서 사용된 HPLC 분석방법은 상대적으로 간단하고 사용하기 쉬운 장점을 가지고 있는 것으로 나타났는데, 이는 derivatization 과정을 통해 목적물질인 NDMA를 하수 처리수와 같은 혼합수에서도 선별적으로 분석할 수 있기 때문이었다. HPLC와 fluorescence derivatization 기법을 이용한 NDMA의 분석은 상수와 특히 하수를 사용하는 다양한 실험 연구에서 NDMA를 분석하는 방법으로 효과적으로 사용될

수 있을 것이다.

## 사 사

본 연구는 2005년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-214-D00121)과 Water Reuse Foundation/West Basin Municipal Water District(USA)의 공동지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. U.S. Environmental Protection Agency Home Page, <http://www.epa.gov/IRIS/subst/0045.htm>, January(2006).
2. Lijinsky, W., "N-nitroso compounds in the diet", *Mutat. Res.*, **443**(1-2), 129~138(1999).
3. Barrett, S., Hwang, C., Guo, Y., Andrews, S., and Valentine, R., "Occurrence of NDMA in drinking water: A North American Survey, 2001 2002," *Proceedings of 2003 AWWA Annual Conference*, Anaheim, CA(2003).
4. Najm, I. and Trussell, R., "NDMA formation in water and wastewater", *J. AWWA*, February, 92~99(2001).
5. California Department of Health Services Home Page, <http://www.dhs.ca.gov/ps/ddwem/chemicals/AL/actionlevel.pdf>, November(2004).
6. Mitch, W., Sharp, J., Trussell, R., Valentine, R., Alvarez-Cohen, L., and Sedlak, D., "N-nitrosodimethylamine(NDMA) as a drinking water contaminant: a review", *Environ. Eng. Sci.*, **20**(5), 389~404(2003).
7. Wang, Z., Xu, H., and Fu, C., "Sensitive fluorescence detection of some nitrosamines by precolumn derivatization with dansyl chloride and high-performance liquid chromatography", *J. Chromatogr.*, **589**, 349~352(1992).
8. Cardenes, L., Ayala, J., Gonzalez, V., and Afonso, A., "Determination of N-nitrosodimethylamine by HPLC with fluorescence detection: A survey of N-nitrosodimethylamine in commercial beers", *J. Liq. Chrom. & Rel. Technol.*, **25**(6), 977~984(2002).
9. Cardenes, L., Ayala, J., Gonzalez, V., and Afonso, A., "Fast microwave-assisted dansylation of N-nitrosamines analysis by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection", *J. Chromatogr. A*, **946**, 133~140(2002).
10. Komarova, N. and Velikanov, A., "Determination of volatile N-nitrosamines in food by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection", *Anal. Chem.*, **56**, 359~363(2001).
11. Lawrence, J. F., "Prechromatographic chemical derivatization in liquid chromatography," *Chemical derivatization in analytical chemistry Volume 2. Separation and continuous flow techniques*. Frei, R. W. and Lawrence, J. F. (Eds), Plenum Press, New York, pp. 191~242 (1982).