

## 고도산화공정(UV공정)을 이용한 NDMA의 효율적인 처리와 독성 평가

송원용 · 장순웅<sup>†</sup>

경기대학교 환경공학과

### Effective Treatment of N-Nitrosodimethylamine using Advanced Oxidation Process (UV Process) and Toxicity Evaluation

Won-Yong Song · Soon-Woong Chang<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Kyonggi University

(Received 22 September 2008, Revised 5 November 2008, Accepted 10 November 2008)

#### Abstract

This study investigates the oxidative degradation of N-nitrosodimethylamine (NDMA), a probable human carcinogen, by advanced oxidation process (i.e., UV process). The experiments were performed with various pH, initial concentration, UV intensity, and addition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> or TiO<sub>2</sub> on UV process. The results showed that the direct UV photolysis was the most effective treatment method. The lower pH, initial concentration and higher intensity of UV stimulated higher NDMA removal. However, addition of oxidant (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>) slows down photochemical treatment of NDMA since the oxidant can filter out the UV light and block it to reach the NDMA molecules. Dimethylamine (DMA) and nitrite were found to be a major byproduct from NDMA oxidation. To evaluate the chronic toxicity effects of UV-treated NDMA on the growth of microalgae, "Skeletonema costatum", was studied as long term experiments. Results demonstrated that after the 13 days exposure the chronic toxicity was decreased about 15% with application of UV process on NDMA degradation.

**keywords** : Dimethylamine (DMA), GC-NPD, N-nitrosodimethylamine (NDMA), Solid phase microextraction (SPME), Toxicity, UV

## 1. 서론

N-Nitrosodimethylamine(NDMA)는 동물에서는 발암성이지만 인간에게는 아직 확인되지 않은 매우 유력한 인체 발암가능성의 B2등급의 화합물이다. NDMA는 물속에서 질소화 전구체의 반응으로부터 생성되는 2차오염물이고(Patai, 1982), 아질산이온이나 그 다양한 화합물과의 반응으로부터 dimethylamine(DMA)의 니트로화반응에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다. 또 액체로켓연료의 성분인 unsymmetrical dimethylhydrazine(UDMH)의 산화에 의해서도 NDMA가 생성된다. 여러 연구자들은 염소소독을 하는 물에서의 NDMA의 생성의 새로운 기작을 밝혀냈다(Choi and Valentine, 2002; Mitch and Sedlak, 2002). NDMA는 UDMH를 사용하는 로켓연료시험장 주변에서 검출되었고, 최근에는 맥주, 우유, 훈제 생선, 고기 등의 음식물, 그리고 담배에서도 발견된다. 1994년 스페인에서 생산되는 21종의 맥주를 대상으로 NDMA 농도를 조사한 결과에 의하면, 조사한 맥주의 52%에서 검출한계농도(50 ng/kg) 이상의 NDMA가 검출되었다(Izquierdo-Pulido et al., 1996). 미국과 브라질을 대상으로 한 조사도 유사한 결과를 나타내었다(Gloria et al., 1997).

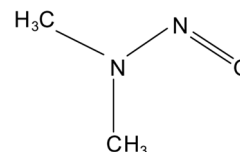


Fig. 1. Chemical structure of NDMA.

NDMA는 물에 매우 잘 용해되고 헨리상수가 낮아서 생물학적 처리나 활성탄, air-stripping 등 기존의 재래식 처리 방법으로는 제거 효율이 낮다. 또한 분자량이 작기 때문에 역삼투막으로도 잘 제거되지 않는다(Mitch et al., 2003). 현재 NDMA 제거의 유일한 대안은 UV처리이다. UV가 NDMA를 제거하는 것은 낮과 밤에 측정된 NDMA 농도가 다른 것으로도 알 수 있다. 하루 중 NDMA 농도의 변화를 조사하면 햇빛이 있는 낮에는 UV에 의한 제거가 이루어져서 NDMA농도가 감소하고, 해가 지는 밤이 되면 다시 증가한다. 미국 캘리포니아주 오렌지 카운티의 수도국에 있는 Water Factory 21도 NDMA 문제를 해결하기 위하여 최근 UV처리공정을 추가하였고, 그 결과 NDMA 농도를 성공적으로 낮추고 있다(김승현과 유이중, 2002).

우리나라에서의 NDMA에 대한 규제는 아직 없지만 미환경청에서 복원기준으로 0.7 ng/L를 설정하였고, 몬타리오는 9 ng/L, 캘리포니아는 20 ng/L에서 10 ng/L로 action level

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

swchang@kyonggi.ac.kr

로 낮추었다(DHS, 2002; MOE, 2000; US EPA, 2001).

기존 연구에서 Lee 등(2007)은 오존/과산화수소공정으로 NDMA의 제거를 시도하였고, Stefan and Bolton(2002)는 직접적인 UV를 이용하여 비교적 고농도인 1 mM의 초기 농도에서 NDMA를 광분해하고 그 동력학계수를 연구하였다. 또 Plumlee 등(2007)은 NDMA처리를 위해 Reverse Osmosis(RO)와 UV공정을 결합하여 NDMA처리를 연구하였다.

본 연구에서는 NDMA의 처리에 가장 효과적인 UV공정에 다양한 인자를 설정하여 실험하고, 비교적 저농도인 50  $\mu$ M이하의 농도를 SPME(Solid-phase microextraction)를 이용하여 GC/NPD로 분석하고 광촉매( $\text{TiO}_2$ )와 과산화수소를 첨가하여 그 제거 특성을 연구하였다. 또 그 생태 유해성을 파악하기 위해 NDMA의 독성을 조류를 이용하여 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 시약 및 반응기

분해 대상물인 N-Nitrosodimethylamine(NDMA)는 Aldrich사에서 구입하였고 광촉매로 Degusa의 P-25를 구입하여 사용하였다. pH 조절에는 0.1 N의  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 와 NaOH를 사용하였다. UV 램프는 저압 수은램프로 Philips의 TUV 6W(G6 T5)와 TL 6W/05를 사용하였다. SPME는 Supelco의 holder와

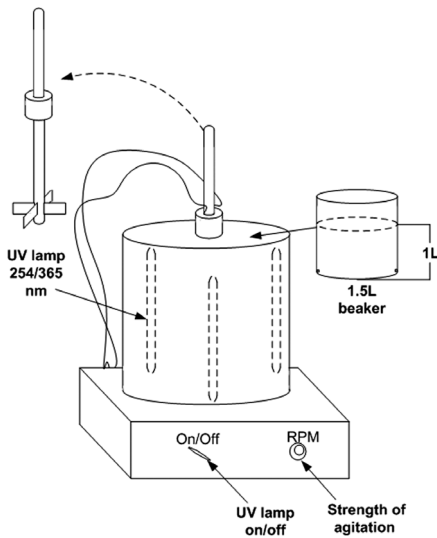


Fig. 2. Photolysis batch reactor.

Table 2. Experiment condition

No.	UV	NDMA Con. <sub>0</sub>	pH	Additive
1	UV-A, C 3 W/L	50 $\mu$ M	5	×
2	UV-C 3 W/L	50 $\mu$ M	3, 5, 7, 9	×
3	UV-C 3 W/L	10, 40, 70, 100 $\mu$ M	5	×
4	UV-C 1.5, 3, 4.5 W/L	50 $\mu$ M	5	×
5	UV-C 3 W/L	50 $\mu$ M	5	$\text{H}_2\text{O}_2$ 25, 50, 100 mM
6	UV-C 3 W/L	50 $\mu$ M	5	$\text{TiO}_2$ 0.01, 0.2 g/L
7	UV-C 3 W/L	100 $\mu$ M	5	×

75  $\mu$ m carboxen<sup>TM</sup>-PDMS fiber를 사용하였다. 제작한 반응기의 형태는 Fig. 2와 같다.

### 2.2. NDMA와 그 부산물의 분석

NDMA와 DMA는 SPME(75 $\mu$ m carboxen<sup>TM</sup>-PDMS)를 사용하여 GC-NPD로 분석하였다. Fiber의 흡착시간과 탈착시간은 간단한 예비실험을 통해 가장 효율적이라고 판단되는 각각 30분, 5분으로 수행하였다. SPME를 사용하기 때문에 별도의 추출과정은 생략하고 반응기로부터 샘플링한 샘플을 2 mL병에 넣고 바로 GC-NPD로 분석하였다. 자세한 분석 조건은 Table 1과 같다.

$\text{NO}_2\text{-N}$ 는 HACH사의 DR-2800을 이용하여 분석하였다.

Table 1. GC/NPD operating parameters

Gas chromatograph	Agilent 6890N gas chromatograph
Detector	NPD (nitrogen-phosphorus detection)
Column	HP-5 (5% Phenyl Methyl Siloxane, Capillary, 50.0 m $\times$ 200 $\mu$ m $\times$ 0.33 $\mu$ m film)
Carrier gas	$\text{N}_2$ (1.0 mL/min)
Injection port system	Splitless mode
Injector temp.	280 $^\circ$ C
Detector temp.	300 $^\circ$ C
Oven temp.	40 $^\circ$ C (1 min hold), heating to 100 $^\circ$ C at 5 $^\circ$ C/min

### 2.3. 조류 독성실험

사용조류는 부경대학교 미세조류은행에서 *Skeletonema costatum* NFUP D-24를 분양받아 사용하고, F/2배지를 부경대학교 미세조류은행에서 구입하여 사용하였다. 배양은 shaking incubator를 사용하여 교반하며 조도 5,000 Lux, 온도 약 20 $^\circ$ C로 고정하였다. 마지막으로 접종밀도는 10<sup>4</sup> cells/mL가 되도록 하였고, 실험기간은 만성독성을 측정하기 위하여 13일간 배양하였다. 성장의 측정은 optical density-750 nm(OD)와 세포수를 측정하여 상관관계를 구한 후 OD로 측정하였다.

### 2.4. 실험 조건

각 실험조건은 Table 2에 나타내었다. 1번실험은 NDMA 제거에 대한 UV-A와 UV-C의 효율을 비교하기 위한 실험이고 2번은 pH의 영향, 3번은 NDMA 초기농도의 영향, 4번은 광량의 영향, 5번은 과산화수소의 영향, 6번은 광촉매( $\text{TiO}_2$ )의 영향, 그리고 7번은 NDMA의 분해 주부산물과

그 독성을 평가하기 위한 실험이다. 각 실험조건에 설정은 적은 에너지로 최고의 효율을 찾기 위하여 기초 실험과 문헌고찰을 통하여 설정하였다. 또한 고정되는 값들은 설정한 수치 중의 중간값을 취하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. UV-A와 UV-C의 NDMA 제거효율 비교

NDMA 제거에 UV를 적용하기 위해 50 µM의 초기농도에 pH 5로 조정하고 UV-A와 UV-C 3 W/L로 하여 총 30분간 실험을 실시하였다. 또 휘발등의 실험 외적인 요인으로 제거되는 경우를 비교하기 위해서 control 실험으로 UV 램프 없이 실험을 추가하였다. 그 결과 Fig. 3과 같이 UV-A 램프의 경우는 총 30분의 반응시간 동안에도 약 20% 제거된 반면에 UV-C 램프의 경우는 단 9분 만에 거의 100%가 제거되었다. 또 유사일차반응으로 구한 반응속도상수를 보면 UV-A는 0.002 min<sup>-1</sup>으로 UV-C의 0.571 min<sup>-1</sup>에 비하여 매우 낮았다. 따라서 NDMA의 제거에는 UV-A보다 UV-C가 월등하게 효율이 높다. Table 3에 NDMA와 비교 가능한 유기화합물질들의 광분해 속도 상수, 몰흡광계수, 광분해 수율을 나타내었다. Table 3의 표과 같이 NDMA의 254 nm에서의 몰흡광계수가 다른 화합물에 비해 압도적으로 크고(ε=7378) 광분해 수율도 가장 큰 것을 알 수 있다 (Kang and Lee, 1998; Plumlee and Reinhard, 2007).

이 결과는 NDMA의 주 광 흡수파장이 228 nm인 UV-C 영역이라는 기존의 연구(Stefan and Bolton, 2002)와 유사한 결과이다. 기존연구에 의하면(Stefan and Bolton, 2002)

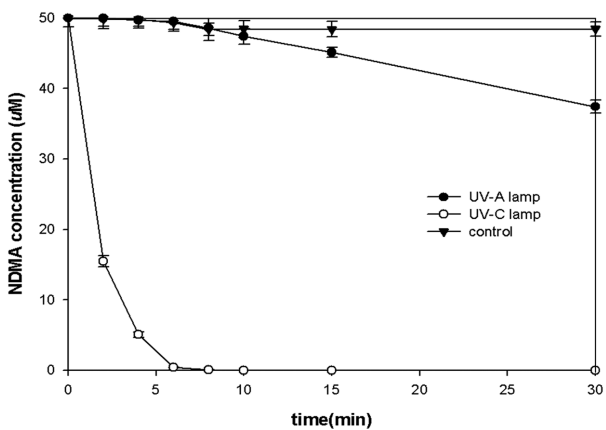


Fig. 3. The effect of UV-A and UV-C on NDMA degradation by photolysis.

Table 3. Direct photolysis rate, molar extinction coefficient and quantum yield of each organic compounds

Compound	$k_{M,UV}S^{-1}$	$\epsilon_{254nm}$	$\phi_M$
NDMA	$9.5 \cdot 10^{-3}$	7378	0.41
TCE	$1.1 \cdot 10^{-4}$	8	0.12
PCE	$5.7 \cdot 10^{-3}$	181	0.31
Benzene	$5.1 \cdot 10^{-4}$	160	0.075
Toluene	$25. \cdot 10^{-4}$	169	0.08

NDMA의 광흡수 스펙트럼은 228 nm( $\epsilon=7378 M^{-1}cm^{-1}$ )를 정점으로 가장 강하게 흡수하고 332 nm( $\epsilon=109 M^{-1}cm^{-1}$ )를 정점으로 약하게 흡수한다. 첫 번째 흡수대역은 분자내부의 전하이동에 관련되어 있는 반면에 두 번째 흡수대역은 전이대역(transition band)에 관련되어 있다. UV가 조사되면 NDMA분자의 N-N본드가 떨어지고 추가제거과정을 포함한 활성라디칼이 생성된다. 하지만 최근 연구결과(송원용 등, 2008)의 의하면 UV-C보다 비교적 안전한 UV-A에 광촉매(TiO<sub>2</sub>)를 첨가(최대 0.2 ppm)함으로써 UV-C에 의한 직접 광분해 보다는 낮은 효율(30분 후 100%제거)이지만 UV-A만을 단독으로 조사한 경우보다 향상된 효율을 얻을 수 있었다. 이는 UV-A의 몰 흡광계수가 UV-C에 비하여 약 70 배정도 낮기 때문에 UV에 의한 광분해보다는 주로 OH라디칼에 의한 분해로 보인다. 본 연구에서는 효율의 극대화를 위해 UV-C를 이용하여 실험을 실시하였다.

#### 3.2. pH 변화에 따른 NDMA의 제거효율 비교

NDMA 제거 시 pH의 영향을 파악하기 위해서 pH 3, 5, 7, 9에서 NDMA 초기농도 50 µM, UV-C 3 W/L의 조건에서 실험을 실시하였다. 또 실험외적인 요인을 확인하기 위하여 램프없이 control실험을 추가하였다. Fig. 4의 결과를 보면 pH 9일 경우에는 총 15분의 반응시간동안 약 50%의 NDMA가 제거되었지만 pH가 낮아질수록 제거 속도가 더 빨라져 pH 3, 5에서는 6분만에 거의 100% 제거되었다. 또 유사일차반응으로 구한 반응속도상수를 보면 pH 3, 5, 7, 9에서 각각 0.932, 0.651, 0.078, 0.050 min<sup>-1</sup>으로 pH가 낮을수록 점점 반응속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 기존연구(이창하, 2006)에서 제시된 NDMA의 분해경로를 보면 분해가 되기 위해서는 UV에 의하여 광여기 상태의 양자화가 선행되어야 한다. 이 때문에 pH가 높으면 NDMA의 제거율이 떨어지고 pH가 낮을수록 양자화가 잘 이루어져 제거효율이 향상된다. 이는 pH 8.5에서의 분해율의 급격한 하락으로 pKa값을 8.5로 산정하였지만 본 연구에서는 pH 8.5보다는 pH 5와 pH 7사이에 분해율의 급격한 하락이 발생하였지만 높은 pH에서는 분해율이 감소하는 점에서는 일치하였다.

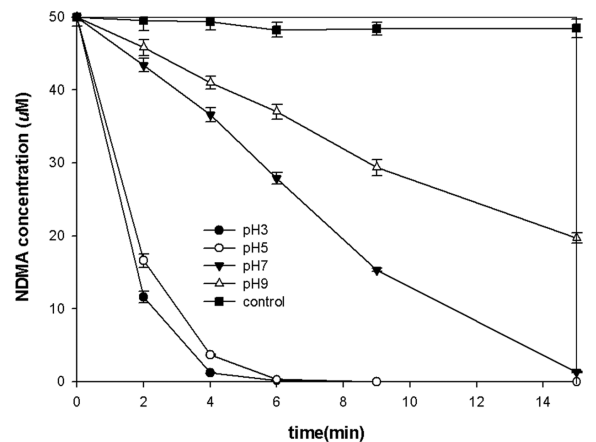


Fig. 4. The pH effect on NDMA degradation by photolysis.

3.3. NDMA 초기농도별 제거효율 비교

NDMA의 광분해시 초기농도의 영향을 조사하기 위해서 각각 100, 70, 40, 10 uM로 변화를 주고 pH 5, UV-C 3 W/L로 고정하고 실험을 실시하였다. 또한 실험외적인 요인을 확인하기 위하여 램프없이 control실험을 추가하였다. Fig. 5에 그 결과를 나타내었다. 유사일차반응으로 구한 반응속도상수를 보면 NDMA의 초기농도가 100, 70, 40, 10 uM로 줄어들수록 반응속도상수는 0.450, 0.470, 0.703, 1.060 min<sup>-1</sup>으로 실험범위에서 점차적으로 상승하였다. 이는 일반적으로 자연이나 먹는 물에 존재하는 NDMA의 농도가 비교적 낮을 것을 볼 때, 간단한 UV처리장치로도 NDMA를 성공적으로 제거할 수 있음을 나타낸다.

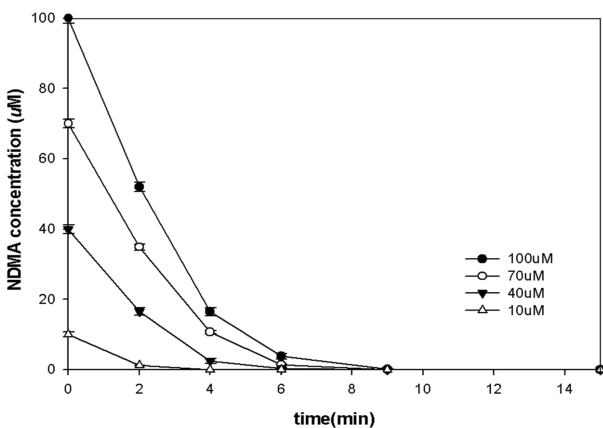


Fig. 5. The effect of initial NDMA concentration on NDMA degradation by photolysis.

3.4. UV-C 광량에 따른 NDMA 제거효율 비교

광량이 NDMA의 제거에 미치는 영향을 조사하기 위해 pH 5, NDMA의 초기농도를 50 uM로 고정하고 반응기의 UV-C를 0, 1.5, 3, 4.5 W/L로 조정하면서 실험을 실시하였다. 또한 실험외적인 요인을 확인하기 위하여 램프없이 control실험을 추가하였다. Fig. 6에 그 결과를 나타내었다. 유사일차반응으로 구한 반응속도상수를 보면 UV-C의 광량이 0, 1.5, 3, 4.5 W/L로 늘어나면서 각각 0.008 min<sup>-1</sup>,

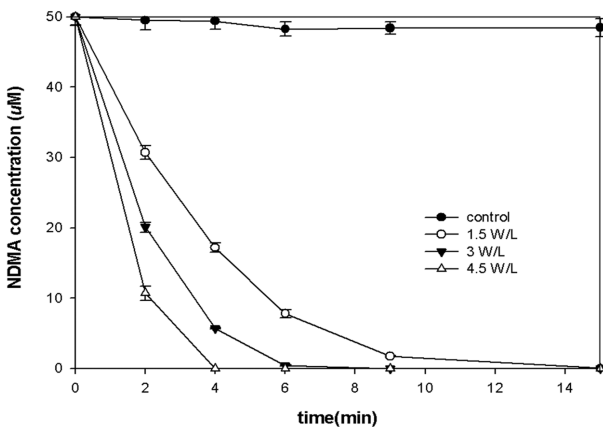
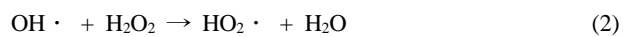
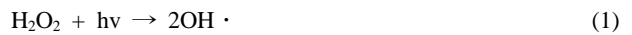


Fig. 6. The effect of UV intensity on NDMA degradation by photolysis.

0.267 min<sup>-1</sup>, 0.543 min<sup>-1</sup>, 0.771 min<sup>-1</sup>로 선형으로 증가되었다. 광량이 1.5 W/L경우 약 15분이 지나야 거의 100% 제거되는 반면에 4.5 W/L경우 약 4분만에 100% 제거되었다. 이 결과로 NDMA 제거에 UV-C 광량이 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

3.5. 과산화수소 첨가에 따른 NDMA 제거 변화

과산화수소 첨가에 따른 NDMA 제거에 대한 영향을 조사하기 위해 공실험으로 pH만 5로 조정하고 램프가 없는 실험(control)과 pH 5, NDMA 초기농도 50 uM와 UV-C 3 W/L로 조정된 실험을 설정하였다. 과산화수소만의 영향을 조사하기 위해서 0 W/L에 과산화수소만 100 mM 첨가하였고, UV-C 3 W/L로 조정된 실험에는 과산화수소를 25, 50, 100 mM 첨가하였다. Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 유사일차반응으로 구한 반응속도상수를 보면 과산화수소만 100 mM, 과산화수소 100 mM과 UV-C 3 W/L, 과산화수소 50 mM과 UV-C 3 W/L 그리고 과산화수소 없이 UV-C 3 W/L일 때 각각 0.046, 0.071, 0.096, 0.118 0.543 min<sup>-1</sup>으로 관측되었다. 결과를 보면 과산화수소를 첨가할수록 오히려 효율이 낮아졌다. UV-C 3 W/L에 과산화수소를 25 mM, 50 mM을 첨가한 경우의 반응속도상수가 각각 0.118, 0.096 min<sup>-1</sup>이고, 거기에 과산화수소를 100 mM 첨가한 경우는 반응속도상수가 0.071 min<sup>-1</sup>로 오히려 더 낮아졌다. 기존연구(Malik and Sanyal, 2004)를 보면 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 반응은 UV-C 범위의 빛에너지에서 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>를 OH라디칼로 식 (1)과 같이 분해한다고 보고하고 있다. 하지만 식 (2)와 같이 과산화수소가 광량으로 존재하면 오히려 그 자체가 OH라디칼을 소모시키는 scavenger의 역할을 하기도 한다.



하지만 NDMA의 경우 OH라디칼에 의해서 경제적으로 처리되는 모든 화합물 중에서 가장 반응성(k=3.3×10<sup>8</sup> L·mol<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>)이 적다(Wong, 2002). 따라서 본 연구에서는 과산

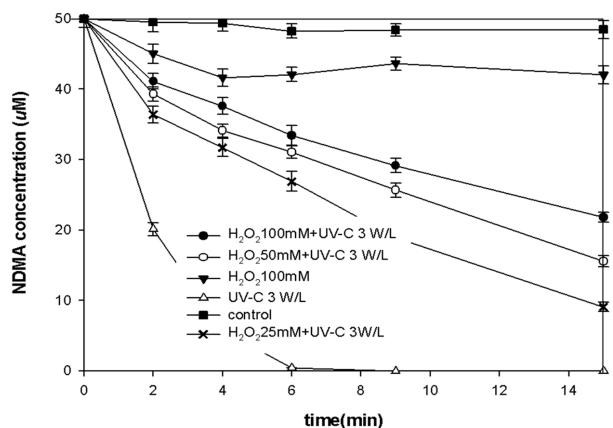


Fig. 7. The effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on NDMA degradation by photolysis.

화수소를 첨가할수록 OH라디칼에 의한 제거보다는 과산화수소에 의한 UV-C 차단효과가 더욱 커서 NDMA의 제거효율이 과산화수소의 첨가량이 증가함에 따라 감소하였다. 하지만 NDMA만 단독으로 존재하는 것이 아니라 다른 오염물질과 복합적으로 존재한다면 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>공정도 고려할 수 있다(Wong, 2002).

3.6. 광촉매(TiO<sub>2</sub>) 첨가에 따른 NDMA 제거 변화

광촉매(TiO<sub>2</sub>) 첨가가 NDMA 제거에 미치는 영향을 조사하기 위해서 NDMA 초기농도 50 uM에 공실험으로 광촉매(TiO<sub>2</sub>)를 첨가하지 않은 실험과 첨가(0.01 g/L, 0.2 g/L)한 실험을 비교하였다. 다른 조건은 UV-C 3 W/L와 pH 5로 동일하였다. 또한 실험의적인 요인을 확인하기 위하여 램프 없이 control실험을 추가하였다. Fig. 8에 그 결과를 나타내었다. 유사일차반응으로 구한 반응속도상수를 보면 UV-C 3 W/L와 광촉매 0.2 g/L, UV-C 3 W/L와 광촉매 0.01 g/L, 그리고 UV-C 3 W/L일 때 각각 0.056, 0.132, 0.543 min<sup>-1</sup>이었다. 결과를 보면 광촉매를 첨가한 실험(0.056 min<sup>-1</sup>, 0.132 min<sup>-1</sup>)이 공실험(0.543 min<sup>-1</sup>)에 비하여 오히려 첨가량이 많아질수록 제거속도가 느려지는 것으로 나타났다. 이는 과산화수소와 마찬가지로 OH라디칼보다는 NDMA제거에는 직접적인 광분해가 더욱 효율적이고 UV-C의 자외선이 광촉매(TiO<sub>2</sub>)에 의하여 차단되어 NDMA 분자에 도달되는 것을 방해하기 때문에 NDMA제거가 둔화되는 것으로 사료된다. UV-C의 자외선은 석영관이 아니라면 투과조차 되지 않는다. 따라서 광촉매를 첨가하면 혼탁해진 용액을 자외선이 투과할 수 없다.

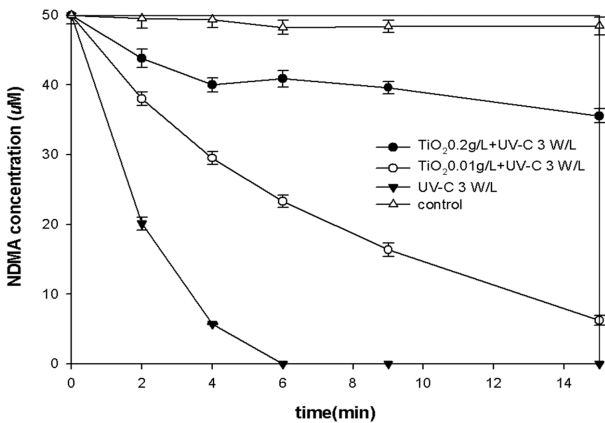


Fig. 8. The effect of TiO<sub>2</sub> on NDMA degradation by photolysis.

3.7. NDMA 광분해시 주 부산물과 생태독성

부산물을 더 확실하게 관찰하기 위해서 NDMA 초기농도를 높여서 100 uM에 UV-C 3 W/L와 pH 5로 조정하고 주 부산물로 알려진 DMA와 NO<sub>2</sub>-N을 같이 분석하였다. 그 결과 Fig. 9와 같이 NDMA가 급격하게 제거되면서 아질산성 질소가 약 40 uM까지 생성되었고 DMA가 약 60 uM까지 생성되었다. 반응시간을 20분까지 길게 반응시켜도 주 부산물인 아질산성 질소와 DMA는 축적되는 양상을 보였다.

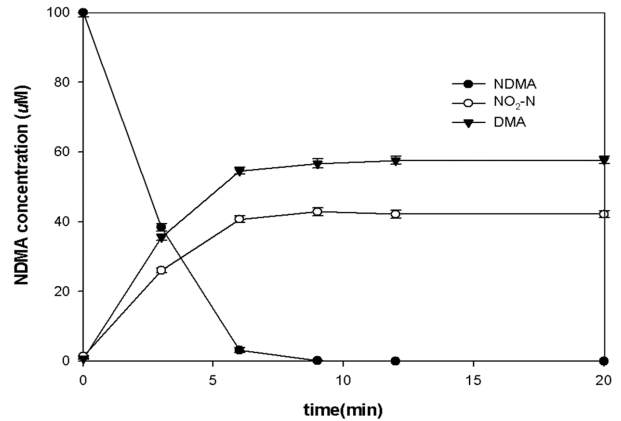


Fig. 9. Variations of NDMA, DMA, NO<sub>2</sub>-N concentration during NDMA photolysis.

아질산성 질소는 질산성 질소로 산화되고 이러한 질산성 질소는 유아청색증(Methemoglobinemia)의 주원인 물질이며, 더욱이 인체에서는 질산성 질소가 위산과 반응하여 니트로사민(nitrosamine)을 형성함으로써 위암을 유발시킨다(김승준 등, 2006). 또 특정조건에서 아질산성 질소와 DMA는 다시 NDMA를 생성하기 때문에 이를 해결하기 위한 연구가 필요하다. 이창하(2006)는 ferrate, 오존, ClO<sub>2</sub>를 이용하여 DMA의 처리를 시도하였지만, ferrate는 반응 후 색도를 유발하고 가격이 매우 고가이기 때문에 추가적인 연구가 더욱 필요하고 이산화염소는 효과가 적었고, 오존은 DMA의 모두 산화시켰다.

위 실험의 시료를 식물성 플라크톤인 “Skeletonema costatum”을 이용하여 생태독성실험을 실시하였다. 그 결과를 Optical density(OD)와 세포수 사이의 상관관계(Fig. 10)를 한번 구하고 뚜렷한 상관관계를 보임에 따라 다음의 실험부터는 OD값만으로 나타내었다. 상관관계에 대한 피트커브를 실시한 결과 R값은 0.9968로 계산되었고 수식은 “Y=0.0004X+0.0166”로 계산되었다. OD값으로 조류의 성장 저해를 측정은 NDMA를 첨가한 조류와 NDMA를 첨가하지 않은 control조류의 성장차이로 계산하였다. 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 결과를 살펴보면 초기농도인 100 uM에서 EC<sub>50</sub>% 값은 51.8%이었다. 이는 초기용액의 약 51.8%가 포함된 용액에서 Skeletonema costatum의 50%가 독성에 영향을 받는 정도의 독성을 가지고 있음을 의미한다. 광분해시간이 지남에 따라서 각 시간대의 EC<sub>50</sub> 값은 각각 60.9, 65.5, 66.9, 66.9, 67.2%를 나타내었다. 같은 시간의 측정농도를 보면 NDMA의 농도는 약 6분후에는 거의 100% 제거되지만 그 독성은 크게 감소하지 않는다. 이 이유는 NDMA의 주 부산물로 축적되는 DMA가 생태독성을 가지고 있기 때문이라고 사료된다. 이러한 이유로 부산물처리에 대한 연구가 더 필요하다. 기존의 NDMA의 관한 보고서(Canadian EPA, 1999)를 보면 “Selenastrum caricornutum”과 “Anabaena flos-aqua”조류를 사용하여 생태독성을 평가했을때 각각의 EC<sub>50</sub> 값이 13일의 배양일을 기준으로 4 ppm, 5.1 ppm으로 기술하고 있다. 조류의 종은 다르지만 본 연구와 다소 유사한 결과를 보이고 있다.

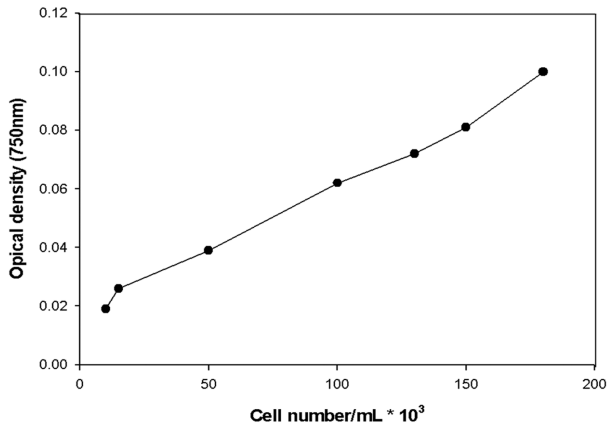


Fig. 10. Relationship among the cell number, optical density.

Table 4. The result of the *Skeletonema costatum* toxicity test

Reaction time (min)	EC <sub>50</sub> (%)					
	0	3	6	9	12	20
UV-C 3 W/L	51.8 (48.3~ 55.2)	60.9 (58.4~ 63.4)	65.5 (62.3~ 68.7)	66.9 (64.7~ 69.1)	66.9 (64.6~ 69.1)	67.2 (64.6~ 69.8)

#### 4. 결론

UV공정을 이용하여 NDMA를 제거하기 위해서 다양한 실험을 진행하였다. 그 결론은 다음과 같다.

- 1) NDMA의 제거에는 UV-A보다 UV-C가 더 효과적이고 pH가 낮을수록 효율이 증가되었다. 또 UV-C 광량이 늘어남에 따라 NDMA가 더 빠른 시간에 100% 제거되었다.
- 2) NDMA의 효율적인 제거를 위해 과산화수소와 광촉매(TiO<sub>2</sub>)첨가했지만 오히려 과산화수소와 광촉매(TiO<sub>2</sub>)첨가량이 늘어남에 따라 NDMA의 UV-C의 흡수를 방해하여 제거효율을 떨어뜨렸다.
- 3) NDMA 제거 시에 독성측정결과 NDMA가 제거되어도 측정되는 주부산물인 DMA 때문에 그 생태독성이 100% 제거되지 않는 양상을 보였다.

#### 사 사

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-521-D00257).

#### 참고문헌

- 김승준, 최용수, 배우근(2006). 고농도 질산성질소와 Ca<sup>2+</sup>을 함유한 산세폐수의 효과적인 처리를 위한 SBR공정의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(2), pp. 215-221.
- 김승현, 유이종(2002). NDMA; 새로운 도전. *대한환경공학회지*, **24**(4), pp. 743-746.
- 송원용, 조일형, 이시진, 장순웅(2008). UV/TiO<sub>2</sub> 공정을 이용한 NDMA의 광촉매분해. *공동춘계학술발표회 논문집*,

- 한국물환경학회 · 대한상하수도학회, pp. 487-488.
- 이창하(2006). 직접 광분해 및 산화 기술을 이용한 수중 NDMA의 효율적인 제어. 박사학위논문, 서울대학교.
- Canadian Environmental Protection Act (1999). Priority substances list assessment report (NDMA).
- Choi, J. and Valentine, R. L. (2002). Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from reaction of monochloramine: a new disinfection by-product. *Water Research*, **36**, pp. 817-824.
- DHS (2002). California Department of Health Services; NDMA in California Drinking Water; March 15, <http://www.dhs.ca.gov/ps/ddwem/chemicals/NDMA/history.htm>.
- Gloria, M. B. A., Barbour, J. F., and Scanlan, R. A. (1997). N-Nitrosodimethylamine in Brazilian, U.S. Domestic. and U.S. Imported Beers. *J. Agric. Food Chem.*, **45**, pp. 814-816.
- Izquierdo-Pulido, M., Barbour, J. F., and Scanlan, R. A. (1996). N-Nitrosodimethylamine in Spanish Beers. *Food Chem. Toxicol.*, **34**(3), pp. 297-299.
- Kang, J. W. and Lee, K. H. (1998). A kinetic model of the hydrogen peroxide/UV process for the treatment of hazardous waste chemicals. *Environ. Eng. Sci.*, **17**(4), pp. 183-192.
- Lee, C. H., Yoon, J. Y., and Gunten, U. V. (2007). Oxidation degradation of N-nitrosodimethylamine by conventional ozonation and the advanced oxidation process ozone/hydrogen peroxide. *Water Research*, **41**, pp. 581-590.
- Malik, P. K. and Sanyal, S. K. (2004). Kinetics of decolourisation of azo dyes in wastewater by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. *Sep. Pur. Technol.*, **36**(3), pp. 167-175.
- Mitch, W. A. and Sedlak, D. L. (2002). Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from dimethylamine during chlorination. *Environ. Sci. Technol.*, **36**, pp. 588-595.
- Mitch, W., Sharp, J., Trussell, R., Valentine, R., Alvarez-Cohen, L., and Sedlak, D. (2003). N-Nitrosodimethylamine (NDMA) as a drinking water contaminant: a review. *Environ. Eng. Sci.*, **20**(5), pp. 389-404.
- MOE (2000). Ontario Ministry of the Environment and Energy. Regulation Made Under the Ontario Water Resources Act: Drinking Water Protection—Larger Water Works, August 26, [www://www.ene.gov.on.ca/envision/WaterReg/Reg-final.pdf](http://www.ene.gov.on.ca/envision/WaterReg/Reg-final.pdf).
- Patai, S. (1982). The Chemistry of Amino, Nitroso and Nitro Compounds and their Derivatives. Interscience, Wiley, London, New York.
- Plumlee, M. H., Mesas, M. L., Heidlberger, A., Ishida, K., and Reinhard, M. (2007). N-nitrosodimethylamine removal by reverse osmosis and UV treatment and analysis via LC-MS/MS. *Water Research*, **10**, pp. 347-355.
- Plumlee, M. H. and Reinhard, M. (2007). Photochemical attenuation of N-Nitrosodimethylamine and other Nitrosamines in surface water. *Environ. Sci. Technol.*, **41**, pp. 6170-6176.
- Stefan, M. I. and Bolton, J. R. (2002). UV direct photolysis of N-nitrosodimethylamine: Kinetic and product study. *Helvetica Chimica Acta*, **85**, pp. 1416-1426.
- U.S. EPA (2001). Record of Decision for the Western Groundwater Operable Unit OU-3, Aerojet Sacramento Site, July 20.
- Wong, J. M. (2002). Treatment technologies for removal of NDMA from contaminated groundwater. *Hydro Visions*, **11**(2), pp. 4-5.