

표준활성슬러지 공정의 Acetaminophen과 Sulfamethoxazole 노출에 대한 적응성 평가

박재은¹ · 김민욱² · 이건주³ · 백지원³ · 이석기^{4,†}

¹한국기초과학지원연구원, ²서울시립대학교 에너지환경시스템공학과,
³서울시립대학교 환경공학부, ⁴우석대학교 응용화학과

Evaluation of Behavior of Activated Sludge Systems Exposed to Acetaminophen and Sulfamethoxazole

Jae Eun Park¹, Min Wook Kim², Gunjoo Lee³, Jiwon Baek³, and Seok-ki Lee^{4,†}

¹Korea Basic Science Institute, Daejeon 169-148, Korea

²Dept. of Energy and Environmental System Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

³Dept. of Environmental Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

⁴Dept. of Applied Chemistry, Woosuk University, Wanju, Korea

Received May 20, 2016/Revised June 3, 2016/Accepted June 7, 2016

Since significant amounts of pharmaceuticals are discharged into sewer systems daily, their impacts on the biological process of a wastewater treatment system are becoming a cause of increasing public concern. In this study, therefore, two lab-scale activated sludge systems were constructed, and the impacts of influent pharmaceuticals on their performances were investigated. More specifically, one system was step-fed with 1 mg/L acetaminophen and the other with 1 mg/L sulfamethoxazole. In the former case, the activated sludge system was slightly affected by the chemical in the initial phase. In the latter case, the system was severely affected, with effluent DOC and sulfamethoxazole concentrations exceeding over 40 and 800 mg/L, respectively. Nonetheless, both systems could degrade the pharmaceutical compounds when they were exposed for longer than 100 h.

Key words: Pharmaceuticals, Acetaminophene, Sulfamethoxazole, Wastewater treatment, DOC

1. 서 론

과거부터 국내 주요 하천에서 환경생태계에 영향을 미치는 항생제, 소염진통제, 호르몬제 등 의약품질이 다량 검출되고 있다.¹⁾ 환경에서 검출되는 의약품의 주요 유입원은 하수처리장이며, 이와 관련된 연구도 많이 보고되고 있다.²⁾ 예를 들면, Uhm et al. (2012)³⁾은 Acetaminophen, Sulfamethoxazole 외 28종, Kim et al. (2012)⁴⁾은 Painkiller, Antibiotic 외 2종, Kim et al. (2012)⁵⁾은 Clarithromycin, Cylophosphamide 외 28종, Marius Majewsky et al. (2011)⁶⁾은 Caffeine, Carba-

mazepine 외 3종, Seo et al. (2009)⁷⁾은 Sulfamethazine, Sulfamethoxazole 외 11종, Stackelberg et al. (2004)⁸⁾은 Carbadox, Chlortetracycline 외 45종을 모니터링하였다. 의약품질은 기존에 환경오염물질로 인식하고 있는 다이옥신, PCBs, 농약류 등의 잔류성 유기오염물질(POPs; Persistent Organic Pollutants)에 비해 생물체에 대한 흡수가 아주 크다.

또 생물체에 대한 급성 독성보다는 만성적인 노출에 따른 독성과 내성 발현 등과 같은 문제가 심각하여 적절한 처리가 필요하다.

인간이 의약품을 소비하면, 그 중 40-60%는 대사되고

[†]To whom correspondence should be addressed.

일부는 대사되지 않은 채, 분비물을 통해서 하수에 유입이 된다. 또는 유통기한 내 사용되고 않고 하수도에 폐기되는 의약품질의 양도 상당한 것으로 알려져있다.⁹⁾

의약품이 하수 관로를 통해서 하수처리장으로 유입되면, 일부는 액상에서 다른 오염물들과 함께 처리된다. 하수처리공정에서 처리되어지지 않은 화합물들은 고농도로 하천에 유입되어 하천수의 심각한 오염을 유발하게 된다.

2011년 말 기준으로 전국의 가동 중인 공공하수처리 시설은 총 496개(시설규모 500 m³/일 이상)이다. 이 중 표준화성슬러지법은 53개소로 전체 11.8%를 차지하고 있으며, 이들은 확충·개선을 통해 고도처리공법으로 전환하는 추세이다.¹⁰⁾

따라서 하수에 배출된 의약품질들이 가장 일반적으로 사용되는 하폐수 처리공정인 생물학적 처리 방법에 분해될 수 있는가와 처리공법의 효율에 미치는 영향을 조사할 필요가 있다. 또한 전통적인 생물학적 처리 방식에 의한 의약품질들의 처리가능성 및 생물반응조 효율저하 가능성에 대한 자료를 확보함으로써 향후 처리장 방류수 내 의약품질을 관리방안 구축 시 기초자료로서의 활용이 가능할 것이다.

본 연구에서는 인체 또는 가축에 의해 배출된 의약품질 중 대표적인 항생/진통 소염제인 Acetaminophen, Sulfamethoxazole의 표준화성슬러지법 공정 내 거동을 조사하고 이를 통해 의약품질의 노출을 저감시키기 위한 관리 방안 구축에 필요한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사대상 물질의 선정 및 특성

2종의 의약품질을 일반적인 하수처리에 가장 많이 응

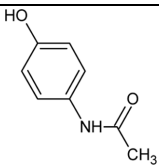
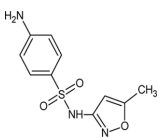
용되고 있는 생물학적 처리공정인 표준화성슬러지공정에 유입시키고, 반응조 내에서 거동을 조사하였다. 이를 통해서 각각의 의약품질들이 하수처리 시스템의 성능에 미칠 수 있는 잠재적 영향을 파악하였다.

먼저, 선정된 의약품질들의 물리/화학적 특성을 파악하기 위해서 water solubility와 K_{OW}를 조사하였다. QSARs 모델예측¹¹⁾을 통해 확인한 2종 의약품질의 K_{OW} 값과 생태독성 및 특성을 Table 1에 정리하였다. 선정된 2종의 화합물은 대부분 낮은 K_{OW}값을 나타내기 때문에 생물농축(bio-accumulation)이 적을 것으로 예상되었으며, 실측되거나 예측된 생태독성 또한 높지 않을 것으로 예상되었다.

2.2. 생물학적 처리 공정의 의약품질 분석방법

생물학적 처리공정 과정에서 의약품질은 여러 가지 물리화학적인 메커니즘이나, 생물학적인 대사, 분해 등에 의해 제거된다. 여기서, 제거란 흡착, 여과, 분배, 휘발 등의 다양한 경로를 거쳐 액체 상태에서 다른 상태로 이동하는 단순한 상변화와 광분해(photolysis), 가수분해(hydrolysis), 산화(oxidation), 환원(reduction), 또는 대사과정(metabolism)과 같은 화학적/생물학적 반응에 의한 분해를 포함한다. 여기서 분해과정은 여러 가지 형태의 부산물을 생성하기도 한다. 이렇게 생성된 부산물들은 모분자의 독성이나 물리화학적인 거동과는 다른 형태로 미생물들에 영향을 줄 수 있기 때문에 궁극적으로 수처리 과정에 영향을 줄 수도 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 부가적인 생성물들의 경로(pathway)로 분석하고 정량분석이 가능한 고분해능 액체크로마토그래프-비행시간형 질량분석기(LC-IT-TOF/MS)를 이용하여 대상 화합물에 대한 분석을 수행하였다. LC-IT-TOF/MS의

Table 1. Physical and chemical properties of Acetaminophen and Sulfamethoxazole

| PPCPs | Structure | M.W. | Water | | Fish | Daphnia | Algae | Efficacy |
|------------------|---|--------|---------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--|
| | | | Solubility (mg/L) | Log K _{ow} * | LC50* (mg/L) | LC50* (mg/L) | EC50* (mg/L) | |
| Acetaminophen |  | 151.17 | 6.0*10 ⁴ | 0.27 | 258 | 41 | 2567 | Anodynia or antipyretic for human or animal |
| Sulfamethoxazole |  | 253.28 | 3942 | 0.48 | 890 | 4.5 | 51 | Antimicrobial administrated to both human and animal |

*; QSAR model (EPI Suite)

Table 2. Process for the pretreatment

| Pretreatment process | |
|----------------------|---|
| Filtration | Centrifugate sample 500 mL / Vacuum filtration |
| pH adjustment | Add EDTA after adjust pH 3 |
| Solid extraction | HLB+MCX |
| Concentration | Nitrogen concentration 2.0 mL |
| Final filtration | 0.2 μ m PTFE after add I.S |

Table 3. Configurations of LC-IT-TOF/MS

| Configuration | Parameter |
|-----------------------|--|
| Instrument | Shimadzu LCMS-IT-TOF |
| Ionization | Electrospray ionization, positive & negative mode |
| Nebulizing gas flow | 1.5 L/min |
| Drying gas flow | 15 L/min |
| Interface temperature | 200°C |
| Spray voltage | positive +4.5 kV, negative -3.5 kV |
| Mass range | m/z 50-1000 |
| Ion accumulation time | 30 msec. |
| TOF mass accuracy | within 5 μ g/mL |
| TOF resolution | over FWHM 12,000 |

분석 조건을 Table 2에 요약하였다.

2.2.1. 기구 및 시약

표준물질인 Acetaminophen, Sulfamethoxazole은 Sigma-Aldrich사(Palo Alto, USA)의 고순도 시약을 사용하였다. 대체표준물질은 Cambridge isotope laboratories사의 ^{13}C 로 치환된 $^{13}\text{C}_6$ -Sulfamethazine을 사용하였고, 정량용내부표준물질 2종(Terbutylazine, Fenoprop)은 Fluka사의 고순도 시약을 사용하였다. 본 실험에 사용된

표준시약과 대체표준물질(surrogate), 정량용내부표준물질은 메탄올을 이용하여, 1000 $\mu\text{g/mL}$ 표준용액으로 만든 후, 희석하여 교정용 표준용액을 만들어 사용하였다.

2.2.2. 시료 전처리

시료 500 mL를 취하여 0.1 $\mu\text{g/mL}$ $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 0.5 mL와 10 $\mu\text{g/mL}$ 대체표준물질 설파메타진-6- ^{13}C 25 μL 를 첨가한 후, 3.5 M 황산을 사용해 pH를 3으로 조절하였다. Oasis HLB (200 mg, 6 cc)와 Oasis MCX (150 mg, 6 cc) 카트리지를 vacuum manifold에 장착한 후 증류수 2 mL와 메탄올 2 mL를 흘려주고, 다시 5% 암모니아수-메탄올 용액 2 mL, 증류수 2 mL, pH 3.0인 증류수 2 mL를 차례로 통과시켜 컨디셔닝하였다. 그리고 HLB와 MCX 카트리지를 HLB가 위에 위치하도록 연결한 이후 시료를 10 mL/min의 속도로 적재하였다 (Fig. 2-4). 시료가 통과된 카트리지를 분리하여 HLB는 증류수 1 mL로 씻어준 다음 메탄올 8 mL로 용리시키고 MCX는 증류수 1 mL로 씻어준 후에 두 카트리지를 다시 연결하여 메탄올 2 mL을 적재한 다음 계속해서 메탄올 6 mL로 용리시켰다. 위층의 HLB 카트리지는 제거하고 MCX는 5% 암모니아수-메탄올 용액 4 mL로 다시 용리시켰다. 이 용리액을 질소농축기로 농축한 후, 정량용내부표준물질인 10 $\mu\text{g/mL}$ terbutylazine 25 μL 를 넣고, 20 mM 암모늄아세테이트(pH 9) 2.0 mL로 잔사를 녹인 후, 0.2 μm 여과지를 가지고 여과시킨 후, 2 mL 갈색 바이알에 옮겨 LC-IT-TOF/MS로 분석하였다.

2.2.3. 정도관리

LC-IT-TOF/MS로 측정된 본 연구의 대상물질인 Acetaminophen, Sulfamethoxazole의 방법검출한계는 각각 1

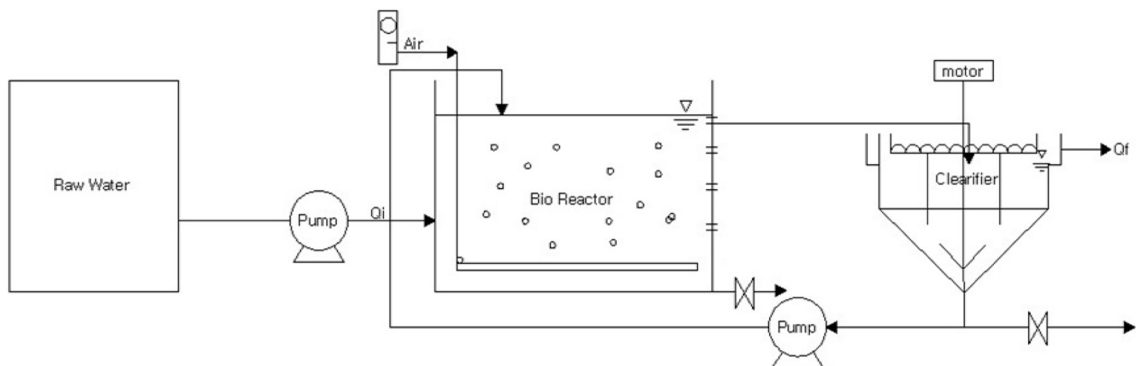
**Fig. 1.** Schematic diagram of conventional activated sludge process.

Table 4. Quality control result of LC-IT-TOF/MS

| Compound (ng/mL) | MDL* | Fortified Level | | Recovery test result (high level, %) | | | Recovery test result (low level, %) | | |
|---------------------|-------|-----------------|-----|---|--------|------|--|--------|------|
| | | High | Low | average | stdev. | %RSD | average | stdev. | %RSD |
| Acetaminophen | 0.684 | 20 | 2 | 69.4 | 3.5 | 5.1 | 71.2 | 7.3 | 10.3 |
| Sulfamethoxazole | 0.026 | 4 | 1 | 103.8 | 5.0 | 4.8 | 72.8 | 6.4 | 8.8 |

*MDL; method detection limit

ng/mL 이하의 값으로 생물학적 처리 공정의 평가에 적합한 수준으로 확인되며, 검출한계는 각각 0.684 ng/mL, 0.026 ng/mL이었다. 또한 2개의 농도 수준으로 실시한 첨가회수율 평가 결과는, 2개 성분에 대해서 평균 86.6%, 72.0% 수준으로 비교적 양호한 것으로 확인되었다(Table 4). 또한 대체표준물질의 평균 회수율은 95%를 나타냈다.

2.3. 생물학적 처리공정 내 의약품질 거동조사 방법

2.3.1. 반응조 설계 및 제작

생물학적 처리공정 내 의약품질 거동 조사를 위해 실험실 규모의 반응조를 제작하였다. 반응조를 통해 모사된 처리공법은 일반적으로 유기물 분해를 위해 적용되는 표준활성슬러지 공법으로 하였다. 2개의 반응조를 병렬로 구성하여 Acetaminophen과 Sulfamethoxazole을 각각 유입시켰다. 정상적으로 가동되고 있는 하수처리장의 슬러지를 각 반응조에 동일하게 투입하였고, 미생물의 안정화 및 기존 슬러지 내 흡착 또는 농축되어 있는 의약품질의 배제를 위하여 2-3 SRT의 의약품질 주입 없이 운영을 하였다.

본 연구의 실험을 위해 설치된 반응기 구조를 Fig. 2

에 나타내었다. 반응기는 의약품질의 반응기로의 흡착, 화학적 반응성 등을 고려하여 내화학성이 뛰어난 Stainless Steel (SUS-304) 재질로 제작되었다. 표준활성슬러지공법의 반응조는 유기물의 제거를 주 목적으로 하므로 유입호기조(활성슬러지조)침전조유출의 공정으로 구성되었고, 외부반송 유량은 유입유량 대부 100%로 설정하였다. 반응조 용적 및 공정도를 아래에 제시하였다.

2.3.2. 인공폐수를 이용한 생물반응조 안정화

본 연구에서 이용된 LC-IT-TOF/MS의 질량분석조건 및 동일 장비에 대한 분석방법의 유효성 평가 결과는 다음과 같다.

특정물질의 생물반응기에 대한 영향을 확인하기 위해서는 반응조로 유입되는 유입수의 성상이 일정해야 한다. 유기물 및 영양염류에 의한 부하량 및 입자성 물질과 같은 요인들에 의해서 발생하는 경로간의 오차를 줄일 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 인공적으로 폐수를 제조하여 실험에 이용하였다.

인공폐수는 정상적으로 운영되고 있는 하수처리장의 최종 처리수를 멤브레인(0.45 μm) 필터를 거쳐 입자성 물질의 영향을 배제하였다. Fig. 3은 0.45 μm Micro-

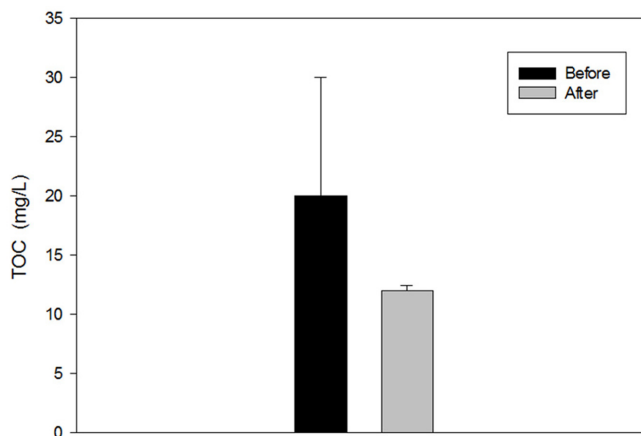


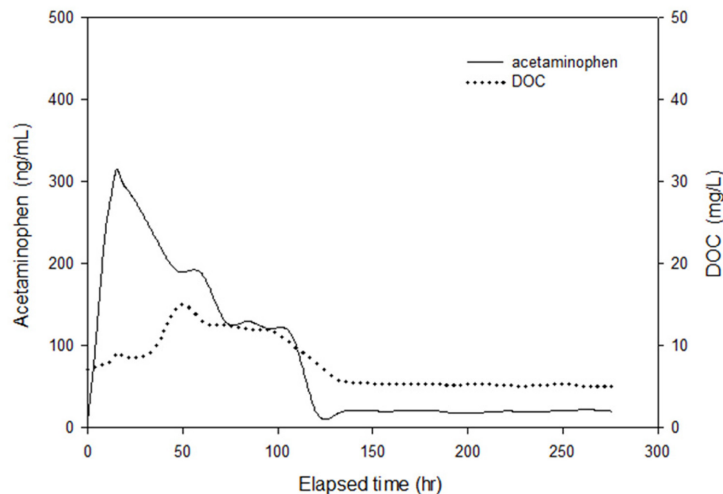
Fig. 2. Comparison of standard deviation before and after membrane filtering.

Table 5. Design parameters for activated sludge process design

| Reactor Design | Clarifier Design |
|---------------------------|--------------------------------|
| Q: 10 L/d | Q: 10.5 L/d (5% Sludge return) |
| HRT: 8 hr | HRT: 4 hr |
| Effective volume: 5,000 L | Effective volume: 1,750 L |

Table 6. Composition of artificial wastewater

| Constituent | Concentration (mg/L) |
|---|----------------------------|
| Glucose | 200 (as COD) |
| Methanol | 50 (as COD) |
| (NH ₄) ₂ SO ₄ | 20 (as NH ₄ -N) |
| K ₃ SO ₄ | 5 (as PO ₄ -P) |

**Fig. 3.** Acetaminophen and DOC concentration in activated sludge process.

filter로 원수를 여과하기 전과 후, 인공폐수의 TOC 농도 차이를 나타내었다. 또한 Table 6에 제시한 바와 같이 Glucose, Methanol, (NH₄)₂SO₄, K₃SO₄를 적당량 투입하여, COD_{cr} 250 mg/L, TN 20 mg/L, TP 5 mg/L가 되도록 유입수를 제조하였다.

2.3.3. 반응조 유입수에 의약품물질 spiking에 따른 샘플링 방법

제작한 반응기의 유입수에 Acetaminophen, Sulfamethoxazole을 각각 spiking하여, 각 유입수 중 투입 의약품물질의 농도가 1 µg/mL이 되도록 하였다. 이후 의약품물질이 투입된 원수가 공급된 반응조의 최종 유출수 중 의약품물질 잔류농도를 분석하였다. 최종 유출수를 처음 24시간은 3시간 간격, 24시간 이후부터는 12시간 간격으로 채수 및 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

1 µg/mL의 의약품물질이 함유된 원수를 급수 받은 표준

활성슬러지공정의 유출수 변화를 분석하였다. 주입된 의약품물질에 하수처리공법의 유기물제거 기능에 대한 영향을 평가하기 위해서 측정하였다. 유기물 지표는 생물학적 공법에 있어 기본이 되는 항목으로 의약품물질에 의해 미생물의 활성이 저감될 경우 유출수 중 농도가 높아질 것으로 예상되었다. 이를 통해 의약품물질의 미생물의 활성도 분해능에 대한 영향을 간접적으로 확인할 수 있을 것으로 기대했다. 이를 위하여 유기물 분석이 비교적 용이한 TOC 분석기기를 활용하였으며, 입자성 물질에 의한 측정오차를 최소화하고자 DOC를 측정하였다.

3.1. Acetaminophen

1 µg/mL Acetaminophen을 함유한 유입수가 공급되기 시작한 이후 spiking이 시작된 처음 30시간 동안 유출수 내의 농도가 약 300 ng/mL까지 증가하였다. 하지만 이후 유출수 중 Acetaminophen 농도는 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 약 100시간 이후에는 유출수 중 Acetaminophen의 농도가 수 ng/mL 이하로 검출되어 뛰어난 제거효율을 보였다. 또한 유출수의 DOC 농

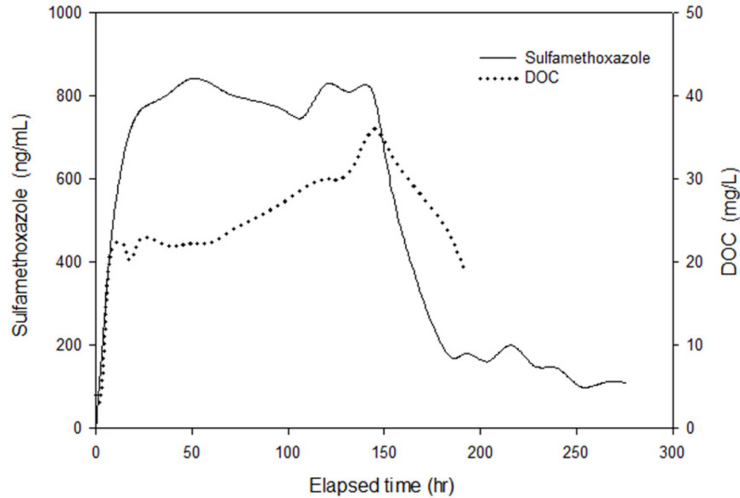


Fig. 4. Sulfamethoxazole and DOC concentration in activated sludge process.

도도 Acetaminophen의 거동과 비슷한 경향을 보였다.

Acetaminophen이 반응조로 200 ng/mL DOC 농도가 유입됨에 따라 유출수를 살펴보면, 초기 약 50시간 동안은 반응조 내에서 농도가 증가하는 경향을 나타내었으나, 최고치에 달한 시점에서 유입농도 기준 약 80% 이상 제거되는 경향을 나타내었다. 약 50시간 후에는 유출수 내에서 감소하는 경향을 나타내었다가 100시간 이후로는 Acetaminophen이 유입되기 이전의 유출수 중 DOC 수준으로 떨어졌다. 이상의 결과에서 Acetaminophen은 호기조건에서 운영되는 표준활성슬러지 공법의 유기물 처리기능에 영향을 주지 않은 것으로 판단되었다. 또한 Acetaminophen의 경우도, 일정시간만큼의 적응시간 후(약 50시간)에는 미생물에 의해서 쉽게 분해되는 것으로 파악되었다. Acetaminophen은 QSAR을 이용한 생분해에 대한 평가에서도 쉽게 분해될 수 있는 것으로 예측되었다. 이는 상대적으로 분해되기 쉬운 분자 구조에서 기인하는 것으로 판단된다. 1 µg/mL의 높은 농도로 주입이 시작된 이래, Acetaminophen의 농도는 300 ng/mL 수준까지만 상승하였다. 이는 유입초기부터 상당 부분이 미생물에 의해서 분해되었음을 의미한다.

3.2. Sulfamethoxazole

1 µg/mL Sulfamethoxazole을 함유한 유입수가 공급되기 시작한 이후 spiking이 시작된 처음 30시간 동안 유출수 내의 농도가 약 800 ng/mL까지 증가하였다. 이후 유출수 중 Sulfamethoxazole 농도는 150시간까지 유

출수 농도가 감소하지 않고, 800 ng/mL의 농도를 유지하다가 150시간 이후 급격히 낮아지는 것으로 확인되었다. 약 180시간 이후에는 유출수 중 Sulfamethoxazole의 농도가 수 ng/mL 이하로 검출되어 뛰어난 제거효율을 보였다. 또한 유출수의 DOC농도 역시 Sulfamethoxazole의 거동과 비슷한 경향을 보였다.

Sulfamethoxazole이 반응조로 200 mg/L DOC 농도가 유입됨에 따라 유출수를 살펴보면, 초기 약 20시간 동안은 반응조 내에서 농도가 급격하게 증가하는 경향을 나타내었으나, 그 이후에는 서서히 증가하여 150시간에 40 mg/L까지 상승하였지만 유입농도 기준 약 70% 이상은 제거되는 경향을 나타내었다. 이상의 결과 Sulfamethoxazole의 경우, 일정 시간만큼의 적응시간 후(약 150시간)에는 미생물에 의해서 쉽게 분해되는 것으로 파악되었다.

Sulfamethoxazole은 QSAR을 이용한 생분해도(biodegradability) 평가에서도 쉽게 분해될 수 있는 것으로 예측되었다. 1 µg/mL의 높은 농도로 주입이 시작된 이래, Sulfamethoxazole의 농도는 800 ng/mL 수준까지 상승하였다. 이는 초기엔 미생물들이 Sulfamethoxazole을 분해할 수 있었음을 의미한다.

위의 결과에서 보이는 바와 같이 실험대상이 된 2종의 의약품질은 표준활성슬러지 공정에 유입되는 경우, 미생물이 적응하는 시간은 서로 상이하지만, 일정시간의 적응 후에는 미생물이 정상적인 유기물 분해를 수행하여 분해하는 것으로 파악되었다.

4. 결 론

1000 ng/mL을 기준으로 2가지 의약품질이 투입된 생물반응조의 유출수중 잔류 농도를 분석한 결과, Acetaminophen은 처음부터 50시간 동안 유출수 내의 농도가 증가하였다. 50시간 이후 급격히 낮아져서 100시간 이후의 농도는 수 ng/mL 이하로 떨어지는 제거효율을 보여주었다. DOC 농도도 의약품질거동과 비슷한 경향을 보였다. 또 Sulfamethoxazole를 모니터링한 결과, 200시간까지 유출수 농도가 제거되지 않고, 800 ng/mL까지 유지되다가, 그 이후에 제거되는 것을 관찰할 수 있었다. DOC 농도 역시 의약품질거동과 비슷한 경향을 보였다.

결론적으로 실험대상이 된 2종의 의약품질이 투입되었을 때, 표준활성슬러지 공정 내 미생물은 각 물질에 대한 적응 시간에서는 차이를 보였으나, 일정시간의 적응기 이후에는 정상적으로 유기물을 분해하는 것으로 파악되었다. 따라서 투입된 의약품질의 농도(1 ng/mL)와 미생물의 적응시간을 고려할 때, 대상물질들은 하수처리장의 생물 공정에 유입될 경우, 반응조의 정상적인 유기물 분해 작용에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 환경부, “주요 하천수에서 항생제 등 일부 의약품질 검출”, **2008**.
2. Kumar, V., Nakada, N., Yasojima, M., Yamashita, N., Johnson, A. C., and Tanaka, H., “Rapid determination of free and conjugated estrogen in different water matrices by liquid chromatography-tandem mass spectrometry”, *Chemosphere*, **2009**, 77(10), 1440-1446.
3. 임정훈, 장태수, 홍영민, 박재은, 김현욱, “전통적인 생물학적 하수처리공정에 의한 의약품질 처리”, *한국환경분석학회지*, **2012**, 15(2), 98-106.
4. 김분수, 김영석, 이병호, “하수처리 과정에서의 잔류 의약품 처리 연구”, *공동 춘계학술발표회*, **2012(단일호)**, 604-605.
5. Kim, J. W., Yoon, S. M., Lee, S. J., Narumiya, M., Nakada, N., Han, I. S., and Tanaka, H., “Occurrence and fate of PPCPs wastewater treatment plants in Korea. In 2nd International Conference on Environment and Industrial Innovation”, *Singapore*, **2012**, Vol. 35, pp. 57-61.
6. Majewsky, M., Gallé, T., Yargeau, V., and Fischer, K., “Active heterotrophic biomass and sludge retention time (SRT) as determining factors for biodegradation kinetics of pharmaceuticals in activated sludge”, *Bioresource Technology*, **2011**, 102(16), 7415-7421.
7. 서천규, 김병주, 조현우, 남윤구, 김택현, 이면주, 명승운, “LC/ESI-MS/MS를 이용한 축산폐수처리장의 의약품질 모니터링”, *한국환경분석학회지*, **2009**, 12(4), 273-282.
8. Stackelberg, P. E., Furlong, E. T., Meyer, M. T., Zaugg, S. D., Henderson, A. K., and Reissman, D. B., “Persistence of pharmaceutical compounds and other organic wastewater contaminants in a conventional drinking-water-treatment plant”, *Science of the Total Environment*, **2004**, 329(1), 99-113.
9. 명승운, “국내 환경 중 의약품질 분석방법 연구 및 노출 실태”, *한국환경농학회 학술발표논문집*, **2008**, 2, 43-50.
10. 환경부, “2011년도 공공하수처리시설 운영관리실태 분석결과”, **2011**.
11. 장태수, 신선경, 김현욱, “QSAR(정량적구조활성관계)를 이용한 환경 중 잔류의약품류의 물리화학적 특성 및 독성 예측”, *한국환경분석학회지*, **2010**, 13(1), 45-53.