

# 한강 상수원수계의 유기물 오염도 지표간 상관성 연구

연구총괄자	수질연구부장	한선희
연구책임자	수질조사과장	강성욱
연구담당자	지방보건연구소	허영봉
	지방환경연구소	정종순
	지방공업연구소	정일용
	지방환경연구소	박창민
	지방기계8급	조익수

# 요 약 문

## I. 제 목

한강 상수원수계의 유기물 오염도 지표간 상관성 연구

## II. 연구기간 : 2011년 1월 ~ 2011년 12월

## III. 목 적

원수 수질분석에 있어 유기물지표가 수질평가에 있어 가장 중요한 요소이며 한강상수원의 평가에서도 유기물의 지표가 발암물질의 전구물질인 난분해성 유기물을 지표하는 항목으로 변화될 필요가 있고 현재 유기물 평가지표인 BOD, COD의 경우 측정자의 경험이나 사전지식에 의해 그 측정결과가 크게 달라질 수 있어 이를 대체 할 수 있는 항목으로 재현성 및 정밀성이 높은 TOC가 제안 되어지고 있다. 따라서 한강상수원 수계의 과거 수질자료를 통하여 유기물 오염 지표간 상관성을 분석하고, BOD와 COD, TOC의 상호관계를 정량화하여 한강 상수원 유기물 오염 지표로서 TOC의 적용성을 검토 하고자 하였음.

## IV. 내 용

1. 2004년~2010년 수질자료를 이용한 유기물 오염 지표의 변동특성 조사
2. 최근 7년간 한강 상수원수계의 BOD 및 COD, TOC 의 상관성 분석
3. 2011년 한강 상수원에서의 유기물 지표간 상관식 적용성 검토
4. 한강 상수원 유기물 오염 지표로서 TOC의 활용 검토

## V. 연구결과

본 연구는 서울시 한강 상수원수계 취수장 6개소를 대상으로 조류발생량에 따라 3단계로 구분하여 BOD, COD, TOC의 유기물 오염도 지표간 상관성을 분석하고 지표간 일반식을 도출하여 일반화된 상관식의 실제 적용성을 검토하였다. 본 연구의 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 최근 7년간(2004~2010년) 서울시 6개 취수원에서의 월별 유기물 변동을 조사한 결과 1~4월 월평균 총조류개체수 10,000 cells/mL 이상 발생시 유기물 농도는 크게 증가하며 7~9월 월평균 총조류개체수 5,000 cells/mL 이하로 발생하는 강우기에는 COD와 TOC가 다소 증가하는 경향이 나타나 조류발생량에 따라 I 단계(월평균 총조류개체수 5,000 cells/mL 이하), II단계(월평균 총조류개체수 5,000~10,000 cells/mL 이하), III단계(월평균 총조류개체수 10,000 cells/mL 이상)로 구분하여 유기물 지표간 상관성을 분석하였다.

2. 최근 7년간(2004~2010년) 서울시 6개 취수원에서의 유기물 지표간 지점별 상관성 분석결과 I 단계에서는 팔당을 제외한 모든 지점에서 COD와 TOC의 상관관계( $R=0.379\sim0.690$ )가 높게 나타났으나 전체 유기물 지표간 상관계수( $R$ ) 값은 모두 0.6 이하로 높은 상관성은 나타나지 않았다. II 단계에는 I 단계과 마찬가지로 팔당에서의 BOD와 TOC의 상관계수( $R=0.736$ )를 제외하면 모두 0.6 이하로 낮게 나타났으며 III단계에는 전체 유기물 지표간 상관계수가 모두 0.7 이상으로 높게 나타났고 특히 BOD와 TOC의 상관계수( $R$ )는 0.750~0.844로 높은 상관성을 나타내어 조류발생량이 증가하는 시기에는 COD보다 생분해성유기물을 나타내는 BOD와 TOC간의 상관성이 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

3. 2011년 단계별 조류발생량에 따른 6개 지점별 유기물 지표의 실제 측정값과 유기물 지표간 상관식 중  $R$ 값이 0.7 이상인 상관식을 이용하여 얻은 예측값간의 상관관계를 조사한 결과 III단계의 경우 모든 지점에서 TOC를 이용한 BOD 예측값과 측정값 사이의 상관계수가 0.725~0.859로 높게 나타나 III단계에는 TOC와 BOD의 적용 상관식( $y=1.3033x-0.9417$ )을 사용하여 BOD 예측이 가능한 것으로 나타났다.

4. 2011년 III단계에서 TOC를 이용한 BOD 예측값과 측정값의 상관계수가 0.7 이상일 뿐만 아니라 평균 상대정확도는 5.0~22.9% 로 BOD 자동측정기의 성능기준인 상대정확도 30% 이하를 만족하여 TOC를 이용한 상관식의 적용 가능성을 확인하였으며 I 단계와 III단계에서 TOC를 이용한 COD 예측값의 경우 실제 측정값과의 상관계수는 0.599~0.650, 상대정확도는 8.4~22.7%로 높은 상관관계도 나타나지 않았으며 COD 자동측정기의 성능기준인 상대정확도 20% 이하도 만족하지 못하였다.

5. 조류발생량이 수질에 큰 영향을 미치는 시기(총조류개체수 10,000 cells/mL 이상)에는 TOC와 BOD의 높은 상관관계( $R>0.7$ )를 나타내어 BOD를 대체 할 수 있는 유기물 지표로 TOC가 사용 가능하다고 판단되며 TOC와 COD의 상관성은 총조류개체수 10,000 cells/mL 이상 증가시  $R>0.7$ 의 상관성을 나타내었으나 상관식을 이용한 예측값 적용시 낮은 상관성( $R<0.7$ )과 측정값에 대한 상대정확도가 20% 이상 높게 나타나 난분해성유기물질 관리를 위한 지표로서 COD와 TOC를 병행 사용하여야 할 것으로 사료된다.

## VI. 활용방안

한강 상수원에서의 BOD와 COD, TOC의 유기물 지표간 상관성 분석을 통해 기존 유기물 지표 항목인 BOD와 COD를 대체하기 위한 TOC의 적용성을 검토하고 TOC를 이용한 상수원의 수질관리 목표 및 기준 설정을 위한 기초자료 활용.

# 총인 측정방법 비교 및 적합성 평가

연구총괄	수질연구부장	한 선 희
연구책임자	수질분석과장	박 현
책임연구원	지방공업연구소	정 관 조
공동연구원	지방공업연구소	송 만 식
	지방공업연구소	정 의 선
	지방공업연구소	임 희 아
	지방공업연구소	이 경 우
	지방환경주사보	이 길 화
	지방공업주사보	천 대 기
	지방환경연구소	정 종 순

# 요 약 문

## I. 제 목

총인 측정방법 비교 및 적합성 평가

## II. 연구기간

2011년 1월 ~ 2011년 12월

## III. 연구목적

ICP/AES (inductively coupled plasma atomic emission spectrometer)와 ICP/MS (inductively coupled plasma mass spectrometer)를 이용한 인 분석조건 설정하고 서울시 취수원수, 한강·팔당수계 지류천 및 아리수정수센터 정수를 대상으로 습식법(아스코르빈산 환원법)과 비교를 통해 적합한 인 분석방법을 도출하고자 하였다.

## IV. 연구내용

인 분석조건 설정을 위해 ICP-AES의 경우, 플라즈마 및 분무 가스조건, 파장 선택 등을 고찰하였으며 ICP-MS의 경우, 반응기체로 산소를 DRC (dynamic reaction cell)에 주입하여 플라즈마에서 생성된 인이온( $P^+$ )과 반응시켜 기존의 질량위치  $m/z = 31(P^+)$ 가 아닌  $m/z = 47(PO^+)$ 로 변형, 측정하는 분석조건을 최적화 하였다. 또한 원수, 정수 및 지류천을 대상으로 과황산칼륨( $K_2S_2O_8$ ) 분해(습식법)처리와 질산 처리(ICP-AES, ICP-MS 분석) 후 UV/Vis를 이용한 습식법과 ICP-AES와 ICP-MS를 이용한 분광 및 질량 분석방법으로 인을 측정, 비교하여 적합성을 검토하였다.

## V. 연구결과

원수, 정수 및 지류천에서의 총인 측정방법의 적합성을 검토하고자 습식법, ICP-AES법, ICP-MS법에 의한 인 측정방법을 고찰한 결과,

1. ICP-AES을 이용하여 인 측정 조건을 실험한 결과, 파장은 213.6 nm, 플라즈마 가스는 12.0 mL/min, 코팅 가스는 0.15 mL/min, 분무 가스는 0.98 mL/min이 가장 적합한 인 측정 조건으로 나타났다.

2. ICP-MS의 경우, 반응기체로 산소를 DRC에 주입하여 플라즈마에서 생성된 인이온( $P^+$ )과 반응시켜 기존의 질량위치  $m/z = 31(P^+)$ 가 아닌  $m/z = 47(PO^+)$ 로 변형하여 인을 측정하였으며, 반응기체의 주입량이 0.4 mL/min일 때 가장 적합한 인 분석조건으로 나타났다.
3. 회수율 및 검정곡선 측정결과, 습식법, ICP-AES법, ICP-MS법 모두 95% 이상의 우수한 회수율과  $r^2 = 0.99$  이상의 우수한 검정곡선을 나타냈다.
4. 시료 분석결과, 원수, 정수 및 지류천에 대해 습식법과 ICP-AES법은 유사한 농도를 나타냈으나 ICP-MS의 경우 1.2~5.0배 정도 높게 나타남을 알 수 있었으며 이는  $PO^+$ 와 동일한 질량 위치를 갖는 다원자 분자( $NO_2^+$ ,  $SiO^+$ )의 생성에 의한 간섭의 영향으로 판단된다.
5. 정수처리 공정별 인 제거율을 고찰하기 위한 인 분석방법 선택시 침전지 이후 낮은 인 농도로 인하여 습식법 및 ICP-AES법을 이용한 인 측정이 불가능했다. 따라서 비록 다원자분자의 영향을 고려하더라도 정수처리공정별 인 제거 경향만을 고찰하고자 ICP-MS를 이용하여 인을 측정하였으며, 측정결과, 원수 대비 약 60%가 제거됨을 알 수 있었으며 침전공정에서 약 55% 인이 제거되었다.

위의 3가지 측정방법을 이용하여 인 측정시 전처리방법, 측정시간 및 측정감도를 고려할 때 비록 낮은 농도( $50 \mu\text{g/L}$  이하)의 인 측정은 불가능하지만 원수, 지류천에 대해 ICP-AES 방법이 가장 적합한 방법이라 판단되며,  $50 \mu\text{g/L}$  이하의 낮은 농도에서 단순 경향 비교를 위한 분석방법으로는 ICP-MS 방법이 유용한 방법이라 판단된다.

## Ⅵ. 활용방안

인 농도가  $50 \mu\text{g/L}$  이상 함유된 원수, 지류천 및 하수 중의 인 분석에 ICP-AES 분석방법을 활용하고,  $50 \mu\text{g/L}$  이하의 낮은 농도에서 단순 경향 비교를 위한 연구과제 수행시 ICP-MS 분석방법 활용

# 이산화탄소 주입에 따른 정수 수질개선 연구

연구총괄	수질연구부장	한 선 희
연구책임자	수질분석과장	박 현
책임연구원	지방공업연구소	이 경 우
공동연구원	지방공업연구소	정 관 조
	지방공업연구소	송 만 식
	지방공업연구소	정 의 선
	지방공업연구소	임 희 아
	지방공업연구소	김 상 은
	지방보건연구소	허 영 봉
	지방공업연구소	장 도 일
	지방공업연구소	경 규 선
	지방공업연구소	김 성 재
	지방공업연구소	이 승 제

# 요 약 문

## I. 제 목

이산화탄소 주입에 따른 정수 수질개선 연구

## II. 연구기간

2010년 1월 ~ 2011년 12월

## III. 연구목적

서울시 6개 아리수정수센터에 설치되어 있는 이산화탄소 투입설비는 가압용해 주입과 가스직접 주입 방식으로 되어 있다. 각각의 주입방식으로 원수 pH를 조절한 후 공정별 수질변화를 고찰하여 아리수의 수질개선 방안을 도출하고, 이산화탄소 투입설비의 운영조건을 설정하기 위하여 본 연구를 실시하였다.

## IV. 연구내용

가압용해 주입방식(구의, 영등포 아리수정수센터), 가스직접 주입방식(떡도 아리수정수센터)을 대상으로 pH를 조절한 후 공정별 수질변화를 고찰하였다. 분석항목은 pH, 알칼리도, 탁도, 입자수, 알루미늄, TOC,  $\text{KMnO}_4$  소비량, THMs, 2-MIB, Geosmin을 선정하였다.

## V. 연구결과

가압용해 주입방식과 가스직접 주입방식을 이용하여 착수정 원수 pH를 조절한 후 공정별 수질변화를 고찰한 결과,

1. pH 조절에 따른 공정별 수질변화는 이산화탄소 주입방식에 관계없이 유사한 경향을 나타내었다.
2. 이산화탄소 주입으로 pH 조절시 정수처리에 영향을 미치는 pH 복원현상은 없었으며, 알칼리도는 큰 변화없이 유지됨을 알 수 있었다.
3. pH 조절에 의한 혼화, 응집 효율 향상으로 입자성 물질인 탁도, 입자수와 무기물질인 알루미늄은 pH 조절에 따른 저감 효과가 있었지만 유기물질과 관련있는 TOC,  $\text{KMnO}_4$  소비량, THMs, 2-MIB, Geosmin은 pH 조절에 따른 저감 효과가 나타나지 않았다. 이는 유기물질 대부분이 용존 상태로 존재하기 때문인 것으로 판단된다.
4. 착수정 원수 pH가 8.0 미만 일 때 이산화탄소를 주입하여 pH를 7.4 이하로 조절하면 정수의 탁도, 입자수, 알루미늄을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

## VI. 활용방안

이산화탄소 투입설비의 운영조건 설정을 위한 자료로 활용



# 유전자분석법을 이용한 병원성미생물의 활성 평가

연구총괄	수질연구부장	한 선 희
연구책임자	미생물과장	이 만 호
연구원	지방환경주사보	조 은 주
	지방보건연구사	이 은 속
	지방보건연구사	차 소 양

# 요 약 문

## I. 연구제목

유전자분석법을 이용한 병원성미생물의 활성평가

## II. 연구기간

2010년 4월 ~ 2011년 12월

## III. 연구목적

현재 병원성 미생물 활성평가 방법은 배양 가능한 미생물의 경우 배양시간이 수일에서 수개월이 소비되어 분석시료에 대해 신속한 대응이 어려우며, 비배양 또는 난배양성 미생물의 경우 검출이 어렵거나 불가능한 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 최근에 mRNA를 이용한 유전자분석법이 사용되고 있으나 mRNA의 수명이 수분 이내로 짧아 분석에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 신속하고 간편하게 난배양성 병원성미생물의 활성을 평가하기 위하여 프로피디움 모노아자이드라는 염료와 유전자분석법을 도입하여 적용성을 평가하고자 하였다.

## IV. 연구내용

1. 세균에 대한 PMA-real time PCR 적용성 평가
  - 대장균
  - 마이코박테리아
2. 바이러스에 대한 PMA-real time PCR 적용성 평가
  - 장아데노바이러스
3. 원생동물에 대한 PMA-real time PCR 적용성 평가
  - 크립토스포리디움
  - 지아디아

## V. 연구결과

### 1. 대장균 및 마이코박테리아 대한 PMA-real time PCR 적용성 평가

- 대장균에 대한 PMA-real time PCR 적용성을 검토한 결과, 적정 농도는 30  $\mu$ M 이었으며, 염소, 열처리의 소독처리를 실시한 결과 활성 평가에 효과적인 것으로 나타났다.
- 마이코박테리아에 대한 PMA-real time PCR 적용성을 검토한 결과, 적정 농도는 30  $\mu$ M 이었으며, 소독처리(염소, 열처리, 오존, 자외선)를 실시하였을 때 활성 평가에 매우 효과적

인 것으로 나타났다. 그러나 환경시료에서 고탁도 시료 (45.9 NTU)는 제한적이었으나, 저탁도 시료 (0.90 ~3.40 NTU)에는 적용이 가능한 것으로 나타났다.

- 본 연구결과에서 PMA-real time PCR기법은 배양이 어렵고 배양기간이 긴 마이코박테리아의 신속 검출 및 활성평가에 활용 가능한 것으로 판단되었다.

### 2. 장아테노바이러스에 대한 PMA-real time PCR 적용성 평가

- 장아테노바이러스에 대한 PMA-real time PCR 적용성을 검토한 결과, PMA 적정 농도는 50  $\mu$ M 이었으며, 소독공정(열처리, 오존, UV)을 실시하였을 때 소독에 의한 바이러스의 불활성화(capsid의 손상)가 확인되어 활성 평가에 효과적인 것으로 나타났다.

### 3. 크립토스포리디움 및 지아디아에 대한 PMA-real time PCR 적용성 평가

- 크립토스포리디움에 대한 PMA 적정농도는 80  $\mu$ M이었으며, 소독공정(오존, 자외선, 가열)에 의한 불활성화처리 결과를 PMA-real time PCR 기법으로 확인한 결과 생사판별을 효과적으로 판정할 수 있는 것으로 나타나 소독능 평가에 적용 가능한 것으로 나타났다. 또한 세포배양-PCR(CC-PCR) 기법과 비교했을 때 선형관계( $r^2 > 0.97$ )를 나타내 CC-PCR 기법을 대체할 수 있는 것으로 나타났고, 환경시료 적용시 고탁도(10 NTU 이상) 시료의 경우 shading 현상이 있어 PMA-real time PCR 기법 적용은 제한적이지만, 취수원수 또는 먹는물 시료의 경우 PMA-real time PCR 적용으로 살아있는 크립토스포리디움 검출이 가능할 것으로 판단된다.
- 지아디아에 대한 평가 결과, 소독공정(염소, 자외선)에 대한 소독능 평가에 사용가능하며, 환경시료의 경우 죽은 세포를 충분히 배제하였고, 살아있는 지아디아의 존재를 부분적으로 확인할 수 있었다.
- 본 연구결과에서 크립토스포리디움의 활성평가에 PMA-real time PCR기법을 적용하면 기존의 세포배양방법에 비해 소요 노동력 및 검사기간을 약 10일에서 2일 정도로 단축할 수 있고, 지아디아의 경우 동물감염시험 외의 활성평가방법으로 PMA-real time PCR 기법이 사용가능할 것으로 판단된다.

## VI. 활용방안

- 본 연구결과를 통해 난배양성 및 비배양성 병원성미생물의 활성평가에 PMA-real time PCR 기법이 효과적으로 나타났으며 이를 통해 저탁도의 원수, 정수 및 아리수 등의 현장 시료에 대한 안전성 평가를 신속하게 적용할 수 있을 것으로 판단됨.
- 병원성미생물에 대한 소독제의 성능평가를 위한 효과 분석에 활용가능할 것으로 판단됨.

# **중대형 막분리 고도정수처리시스템 개발 및 상용화**

# 요 약 문

## I. 연구제목

중대형 막분리 고도정수처리시스템 개발 및 상용화

## II. 연구기간

2004년 12월 1일 ~ 2011년 5월 31일 (6년 6개월)

## III. 연구목적

한강원수에 적합한 막여과 정수처리 공정을 개발하여 처리대상물질인 탁질 물질 및 병원성미생물을 제거하기 위하여 막여과 고도정수시설과 연계하여 세계 최고 수준의 수처리 기술과 시스템을 개발하고 상용화하여 깨끗하고 안전한 수돗물 생산 공급으로 국민의 삶의 질을 향상시키고 국가경쟁력을 확보하고자 한다.

## IV. 연구결과

단계	연구 개발 목표	연구내용
3	효율적인 중대형 막여과 정수장 시공기술개발	· 중대형 막여과 시범정수장 공정 조합, 설계 및 건설공사 시행 · 중대형 막여과 시스템의 운영 기술 개발
	중대형 막여과 시스템의 운영 및 유지관리 기술개발	· 막 파단과 감지기술 개발 · 막여과 공정 최적 운영기술개발 · 막 완결성 시험의 현장 적용성 분석 및 운전지침 확보 · 막여과 공정의 성능분석 및 막 완결성 시험의 프로토콜 확립
	막여과 실증플랜트 운영 효율 분석	· 막여과 전처리시스템 처리효율 및 안정성 분석 · 막여과 실증플랜트의 운영효율 분석
4	중대형 막여과 시범 정수장의 효율적인 시공 및 유지 관리 기술개발 (50,000m <sup>3</sup> /일)	· 막여과 시범정수장의 건설공사 시행 · 시범정수장 시운전 및 시범운영 · 막여과 시범정수장의 유지관리기술개발 및 매뉴얼 작성

# 소독부산물 저감을 위한 정수공정 운영연구

연구총괄	기술개발부장	최영준
연구책임자	수처리과장	한정무
책임연구원	지방보건연구소	최연규
공동연구원	지방공업연구소	조완선
	지방공업연구소	박석주
	지방공업연구소	김태균
	지방환경연구소	심미희
	지방시설주사	이시우
	지방공업주사	이혜원
	지방공업주사보	김재흥

# 요 약 문

## I. 연구제목

소독부산물 저감을 위한 정수공정 운영연구

## II. 연구기간

2009년 3월 ~ 2011년 3월 (3년)

## III. 연구목적

전염소 처리에 의해 생성된 소독부산물은 이후 오존/활성탄 공정에서도 제거가 어려운 상황으로, 수돗물의 소독부산물 저감을 위해서는 전염소 처리의 최소화가 중요하다. 이를 위해 원수와 전염소 반응을 연구하였고 전염소 최소화 및 중간염소 처리의 현장 적용성을 평가하였다.

## IV. 연구내용

1. 전염소 최소화를 위한 염소반응 연구
  - 전염소 주입 후 시간에 따른 잔류염소 및 THMs 생성 변화
  - 전염소 주입량에 따른 응집효율 변화연구
  - 전염소에 의한 암모니아 파괴반응 연구
  - 염소요구량과 수질인자와의 관계파악
2. 상수원 이전에 따른 소독부산물 생성변화 예측
3. 중간염소 현장 적용성 평가
  - 중간염소 처리가 정수처리 공정에 미치는 영향 평가
  - 중간염소 처리에 의한 소독부산물 저감효과 평가
  - 중간염소처리가 배급수계 잔류염소 및 소독부산물 생성에 미치는 영향 평가
  - 중간염소 처리 경제성 평가
4. 염소에 의한 민물담치 제어연구
  - 전염소 최소화시 도수관로에 부착할 수 있는 민물담치에 대한 염소 농도별 사멸률 평가

## V. 결 과

1. 원수에 염소 주입시 초기 10분 이내에 철, 망간 등 무기성 성분이 염소와 반응하여 급격한 염소소모가 발생하였고 이후 유기물과 천천히 반응하여 THMs를 생성하였다. 초기 10분을 기준으로 잔류염소는 60~66%가 감소한 반면, THMs는 25%가 생성되었다. 즉 남은 34~

40%의 잔류염소가 75%의 THMs을 생성하는 것으로 소독부산물 최소화를 위해서는 급격한 염소소모 반응이 끝나는 10~30분 지점에서 잔류염소를 0.1~0.3 mg/L 로 관리하여 유기물과 반응할 수 있는 잔류염소를 최소화해야 한다.

2. 현재 많은 정수센터에서는 착수정까지 잔류염소를 유지하도록 전염소를 운영하고 있는데 이런 조건에서는 도수시간동안 유기물이 지속적으로 염소와 반응하여 소독부산물이 증가한다. 구의, 뚝도 정수센터의 취수장 상류 이전 시에도 양질의 원수를 확보할 수 있다는 장점이 있지만, 착수정까지 잔류염소 유지시 소독부산물은 오히려 증가하게 된다. 따라서 소독부산물이 높게 생성되는 하절기에는 구의, 뚝도 정수센터 착수정까지 잔류염소를 유지하지 말고, 강북 정수센터 착수정의 잔류염소 값을 참고하여 전염소 주입 후 첫 잔류염소 측정지점(체류시간 약 7분)에서 잔류염소 목표값을 설정,관리하되 강북 정수센터와 동일하거나 조금 낮게 유지하고 중간염소를 병행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
3. 동절기 전염소에 의한 암모니아 과과반응은 매우 느린 반응으로 착수정과 침전수에는 유리잔류염소가 존재하고 있음에도 결합잔류염소 형태가 공존하였다. 과과반응이 완료되고 유리잔류염소가 안정되기 까지는 약 3시간 정도의 시간이 필요한 것으로 나타나 동절기 암모니아가 높게 검출되는 시기에는 오존과 후염소 공정의 안정적인 운영을 위해서 전염소 처리시 충분한 접촉시간의 확보가 필요할 것으로 판단된다.
4. 전염소 처리시 염소 주입량에 비례하여 응집·침전 효율의 증가가 관찰되었다. 전염소의 응집보조 효과의 원리는 확실하지 않지만, 단순한 pH 강하효과라고 볼 수는 없으며, 염소의 산화력에 의한 유기물의 특성변화가 영향을 준 것으로 사료된다.
5. 계절별 염소요구량의 변화 및 이에 영향을 주는 수질인자를 조사하였다. 염소요구량은 암모니아 유입이 높은 동절기와 고탁도가 유입되는 강우기에 높은 경향을 나타내었다. 원수의 수질인자들과 염소요구량의 상관관계를 조사한 결과 유의적인 상관을 나타낸 인자는 암모니아와 TOC, Chl.a 로 나타났다.
6. 소독부산물이 높게 생성되는 하절기, 전염소 주입 후 약 10분 경과지점에서 유리잔류염소를 0.1~0.3 mg/L로 유지하여 전염소를 최소화하고 소독부산물 전구물질이 저감된 침전지 후단에 염소를 보충하는 중간염소 처리를 운영한 결과 전염소만으로 운영한 경우보다 THMs 15.8%, HAAs 30.5%, HANs는 32.7%, CH는 25.0% 감소하였다. 특히 잔류염소 존재시 지속적으로 증가하는 THMs 보다 초기에 빠르게 생성되는 HAAs가 전염소 최소화와 중간염소 병행으로 인한 저감효과가 높은 것으로 나타났다.
7. 중간염소 처리시 전염소 최소화로 인해 착수정의 pH가 다소 높게 유지되었으나 이로 인한 응집·침전효율은 큰 차이를 나타내지 않았으며, 이후 송수 잔류염소와 배급수계에서의 잔류염소 농도도 안정적으로 유지되었다. 반면 중간염소 병행시 전-후염소만 주입하는 경우보다 총 염소 사용량이 약 16.8% 저감되는 것으로 나타났다. 따라서 중간염소 처리는 하절기



다른 정수처리 공정에 영향을 미치지 않으면서 소독부산물과 염소사용량을 저감할 수 있는 좋은 방법으로 판단된다.

8. 민물담치는 겨울철 저수온시 염소에 대한 강한 내성을 나타내었으며 완전사멸까지는 11주 이상이 소요되었다. 민물담치는 하절기 산란형으로 전염소 중지시 도수관로에 부착,증식할 수 있으므로 담치 유생제어를 위해 하절기에도 최소한의 전염소 운영이 필요하며 이미 부착된 민물담치는 동절기 지속적인 전염소 처리 및 하절기 간헐적인 염소처리 강화를 통해 제어가 가능할 것으로 판단된다.

## VI. 활용방안

강북원수를 대상으로 도수시간별 염소요구량 및 소독부산물 변화를 평가함으로써 구의, 뚝도 취수원 상류 이전시 전염소 운영을 위한 자료로 활용될 수 있으며, 암사 정수센터를 대상으로 전염소 최소화 및 중간염소 병행처리의 현장 적용성을 확인함으로써 향후 다른 정수센터에서 소독부산물 저감을 위해 중간염소 도입 검토시 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

# **광촉매를 이용한 정수처리 연구개발**

# 요 약 문

## I. 연구제목

광촉매를 이용한 정수처리 연구개발

## II. 연구기간

2010년 4월 ~ 2011년 12월 (1년 9개월)

## III. 연구목적

광 에너지를 이용한 친환경적인 정수처리 기술개발을 위하여 수중 오염물질의 제거에 적합한  $\text{TiO}_2$  광촉매 코팅조건을 선정하고 정수장 현장의 광 조건에서 광촉매 효율 및 반응특성을 평가하여 광촉매의 정수처리 적용성 평가

## IV. 연구내용

1.  $\text{TiO}_2$  용사코팅을 위한 적정 조건설정
2.  $\text{TiO}_2$  광촉매의 반응특성 및 광원별 효율 비교
3.  $\text{TiO}_2$  광촉매의 미생물 소독효과 및 회복능에 미치는 영향
4.  $\text{TiO}_2$  광촉매를 이용한 침전지 트라프 부착조류제어 방안

## V. 연구결과

물의 흐름이 있는 정수처리 공정에서  $\text{TiO}_2$  광촉매 적용을 위해서는 부유성이 아닌 고정상으로 코팅하는 기술이 필요하며, 쉽게 탈착되지 않고 안정적으로 유지될 수 있는 플라즈마 용사코팅을 이용한 광촉매 적용성 연구결과는 다음과 같다.

1. 용사코팅시 입자의 크기, 분사가스의 종류, 전기 Arc volt는 광촉매 효율에 큰 영향을 미쳤으며, 나노 입자,  $\text{N}_2/\text{H}_2$ , 80V에서 가장 높은 효율을 나타내었다. 하지만 용사코팅 후 원 재료인  $\text{TiO}_2$  분말보다 아나타제 상이 크게 감소하는 문제점이 나타났다. 광촉매 효율은 아나타제 상의 비율과 밀접한 관계를 가지며 광촉매 효율을 높이기 위해서는 아나타제 상의 비율을 높일 수 있는 용사거리, 열원의 온도 등 다양한 요인들을 고려한 심도있는 코팅조건 설정연구가 필요할 것으로 판단된다.

2. 소독을 위한 낮은 UV 조사량 범위( $10\sim 80\text{ mJ/cm}^2$ )에서도  $\text{TiO}_2$ 의 광촉매 효율은 나타났으나 유기염료 제거율은  $11.2\sim 16.4\%$  로 조사량 증가에 따른 광촉매 효율증가 경향은 뚜렷하지 않았다. 반면 조사량을 일반 소독범위 이상인  $400\text{ mJ/cm}^2$  까지 크게 높였을 경우 제거율은  $33.8\%$ 까지 증가해 조사량에 비례하여 광촉매 효율도 증가하는 경향을 나타내었다. 높은 조사량의 UV 조사시  $\text{TiO}_2$  광촉매에 의해 오염물질이 효과적으로 제거될 가능성이 있으나 일반적으로 실제 정수장에서 적용하는 조사량 범위에서는  $\text{TiO}_2$  광촉매 효율이 낮은 수준에서 유지될 것으로 예상된다.
3. 광원별  $\text{TiO}_2$ 의 광촉매 효율은 저압UV, 중압UV, 가시광선의 순으로 나타났다. 가시광선 조사시에도 유기염료 제거율 및 대장균의 소독능이 확인되었으나, 이때 필요한 광량은 일반 소독용 UV 조사량의 수천배 높은 값으로 효과적이지는 못했다.  $\text{TiO}_2$  만으로는 가시광선을 이용한 광촉매 효율이 높지 않은 것으로 판단되며, 친환경적 에너지인 태양광을 이용하기 위해서는 가시광선에 효과적으로 반응할 수 있는 광촉매 소재개발 연구가 필요할 것으로 판단된다.
4. 저압UV와  $\text{TiO}_2$  조합처리시 UV의 불활성화 효과와 함께 광촉매로 인한 소독능의 상승효과가 나타났으며 UV 소독의 단점이었던 미생물 회복현상이 억제되었다. 연마처리된 스테레스 UV 반응기 벽면에  $\text{TiO}_2$  코팅시 반사광 감소에 의한 소독능의 감소는 무시할 수 있을 것으로 판단되며,  $\text{TiO}_2$  코팅을 통해 미생물 안전성을 더욱 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
5. 태양광 조사시  $\text{TiO}_2$  코팅 스테레스가 일반 스테레스에 비해 부착조류 생물량이  $57.5\%$  낮게 나타나 침전지 트라프 부위에  $\text{TiO}_2$  코팅시 부착조류 억제 가능성을 나타내었다. 하지만  $\text{TiO}_2$  코팅시 표면의 검은색과 거칠기의 증가로 오염물이 쉽게 제거되지 않고 눈에 잘 띄는 단점이 나타났다.
6. 본 연구를 통하여  $\text{TiO}_2$  용사코팅에 UV와 가시광선 조사시 광촉매 효율이 확인되었으나, 현재의 광촉매 기술 및 정수장 여건을 고려할 때 아직은 광촉매의 정수장 적용이 효과적이지 않을 것으로 판단된다. 실 공정에서 표면부하율은 실험조건에 비해 훨씬 높으며 처리수 중 NOM을 비롯한 다양한 물질들에 의한 표면오염을 고려할 때 정수장 현장에 광촉매 적용시 효율은 높지 않을 것으로 예상된다. 광촉매의 현장 적용을 위해서는 표면오염의 영향을 고려한 실규모에서의 장기적인 효과검증이 필요할 것으로 판단된다.

## VI. 활용방안

광촉매는 빛이 필요하다는 특성상 현재 정수처리에 적용할 수 있는 공정은 제한적이며 향후 UV소독 도입시 반응기 내부에 코팅함으로써 미생물 재증식을 억제할 수 있을 것으로 기대된다. 광촉매는 현재 활발한 연구가 진행되고 있는 기술분야로 아직 대용량 정수시설에서 효과가 검증된 제품은 없으며 광촉매 기술의 상용화를 위해서는 가시광선을 이용할 수 있는 광촉매 소재개발과 쉽게 벗겨지지 않고 표면 오염에 강한 코팅기술의 정립이 필요한 상태이다. 본 연구는 광촉매의 정수처리 적용성에 대한 기초연구로 향후 광촉매 도입검토 및 실용화를 위한 추가 연구시 기본자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

# 동관 사용 주택에서 동 용출 특성 조사연구

연구총괄 : 기술개발부장 최 영 준

연구책임자 : 배 급 수 과 장 박 인 섭

책임연구원 : 지방공업연구소 최 제 호

공동연구원 : 지방공업연구소 안 제 찬

지방공업연구소 박 영 복

지방환경연구소 한 금 석

# 요 약 문

## I. 제 목

동관 사용 주택에서 동 용출 특성 조사연구

## II. 연구기간

2009. 7 ~ 2011. 6

## III. 연구의 목적

수도용 동관에서 수질인자 및 정체시간에 따른 동의 용출 특성을 파악하여 동관을 사용할 경우 발생할 수 있는 관련 민원에 대처하고 시민들에게 올바른 정보를 제공함으로써 수돗물에 대한 막연한 불신감을 해소하여 신뢰도 향상에 기여하고자 하였다.

## IV. 연구내용

본 연구에서는 수도용 동관으로 모의 옥내배관을 설치하여 통수시간 경과에 따른 동의 용출농도 변화와 주요 수질 인자인 pH, 알칼리도, 잔류염소, 수온 등이 동 용출에 미치는 영향을 검토하였다.

옥내 급수관을 동관으로 설치한 공동주택에서 고무장갑의 변색 등이 발생할 수 있는지 알아보기 위하여 수온, 주방용 세제의 영향 등 다양한 조건에서 실험을 실시하고 표면분석을 통해 고무장갑의 표면에 동 화합물이 존재하는지 확인하였다.

또한 동관이 설치된 공동주택에 입주 후 수돗물 사용 경과 연수 및 배관 내 수돗물 정체 시간에 따라 동 용출 특성을 파악하였다.

## V. 연구결과

### 1. 모의 옥내배관에서 동 용출

공동주택 2개소의 옥내배관 환경 및 길이를 조사하고 유사한 조건으로 실험실에 모의 옥내배관 2조를 설치하여 동 용출 특성을 조사하였다.

모의 옥내배관 1은 환경이 15 mm, 길이가 9.4 m 이고, 모의 옥내배관 2의 환경

은 모의 옥내배관 1과 같고 길이는 2.2 m 수도용 동관을 설치하였다.

실험기간에 모의배관에 공급된 수돗물은 상수도연구원으로 공급되는 수돗물로서 1회에 200 L씩 1일 3회 모의 배관을 통과시킨 후 퇴수시켰다. 시험기간에 시험수의 수질은 pH 7.1~7.4, 알칼리도 25~31 mg/L, 잔류염소 0.27~0.38 mg/L, 수온은 17~23 °C 범위에서 시험을 실시한 결과 동이 불검출 됨을 확인하였다.

- 모의 옥내배관 1, 2에 수돗물이 통수된 후 20일(10~30일), 145일(130~150일) 경과한 시점에서 일상생활 중 옥내배관에 수돗물이 정체되는 시간을 가정하여 정체시킨 후 정체수 시료를 채취하여 동의 용출 농도를 비교하였다.

모의 배관에 수돗물을 통수 후 20일이 경과한 동관에서 수돗물을 4~5시간 정체 후 채취한 정체수에서의 동의 평균 농도는 0.35 mg/L (0.32~0.37 mg/L)이었고, 통수 후 145일이 경과한 동관의 평균 농도는 0.24 mg/L (0.22~0.26 mg/L)로서 통수 20일 경과 동관의 정체수 시료에 비하여 동의 농도는 30.4% 낮았다.

수돗물을 14~15시간 정체 후 채취한 정체수의 동 농도는 각각(20일, 145일) 평균 0.59 mg/L (0.52~0.66 mg/L)과 평균 0.38 mg/L (0.34~0.42 mg/L)로 통수 145일 경과 동관의 정체수 시료에서 동 농도가 35.0% 낮았다.

모의 옥내배관 실험에서 신관인 동관에 수돗물을 통수한 초기의 정체수 중 동의 최고 농도는 0.66 mg/L로서 먹는물 수질기준 1 mg/L 미만이었다.

아울러 본 실험에서 통수 후 약 4~5개월 경과하면 통수 초기보다 정체수 동의 농도가 약 30% 정도 낮아지므로 옥내배관이 동관으로 신축된 건물에서 수돗물 사용기간이 경과 될수록 동관 표면에 피막이 형성되어 동 용출이 감소되는 것으로 예상된다.

- 모의 옥내배관 내부에 수돗물을 장시간(14시간, 38시간) 정체시킨 후 동이 용출된 정체수를 완전히 배출되도록 하여 동이 불검출 되는 퇴수량을 산출하였다.

모의배관 1 (φ15, 9.4 m)에서는 동의 초기 농도가 0.83 mg/L (38시간 정체), 0.51 mg/L (14시간 정체)인 정체수의 경우, 모두 3.0 L 퇴수 후에 동이 불검출 되었다. 즉 모의배관 1의 부피가 1.41 L이므로 내부 부피의 2.1배를 퇴수했을 때 동이 용출된 정체수가 모두 배출되었다.

모의배관 2 (φ15, 2.2 m)에서는 동의 초기 농도가 0.87 mg/L (38시간 정체), 0.34 mg/L (14시간 정체)인 정체수의 경우, 각각 1.2 L, 0.9 L 퇴수 후 동이 불검출 되었다. 따라서 모의배관 부피(0.33 L)의 3.6배 및 2.7배를 퇴수했을 때 동

이 용출된 정체수가 모두 배출되었다.

모의배관 1의 관 길이가 9.4 m로 모의배관 2의 2.2 m 보다 길어 퇴수량은 많았지만 관 길이 당 소요된 퇴수량은 모의배관 2가 많았다.

따라서 옥내배관 부피의 약 3배 정도의 물을 퇴수시키면 동이 용출된 정체수를 모두 배출시킬 수 있음을 알 수 있었다. 옥내배관의 관 길이와 수압 1.0 kg/cm<sup>2</sup>, 1.5 kg/cm<sup>2</sup>, 2.0 kg/cm<sup>2</sup>에 따라 퇴수시간을 산출한 결과, 하나의 예로 관 길이가 10 m인 경우에 퇴수량은 4.51 L이고 수도꼭지 50% 개방시 수압 1.0 kg/cm<sup>2</sup>, 1.5 kg/cm<sup>2</sup>, 2.0 kg/cm<sup>2</sup>에 따라 퇴수시간은 각각 38.8초, 30.8초, 23.5초 이었고, 수도꼭지 100% 개방시에는 각각 22.8초, 16.1초, 13.4초 동안 퇴수하면 되는 것을 확인하였다.

## 2. 동 용출 영향인자 평가

- pH가 7.4에서 7.9, 8.4로 상승될 경우 24시간 정체된 수돗물 시료에서 동 의 농도는 평균 0.81 mg/L에서 0.47, 0.34 mg/L로 각각 41.9%, 58.7% 감소되어 pH가 높을수록 동 의 용출농도가 낮음이 관찰되었다. 하지만 pH가 8.0 정도로 높아지면 염소소독 효과가 현저히 감소될 수 있다(용수처리, 2004).

- 알칼리도를 27.1 mg/L에서 54.7 mg/L 및 88.0 mg/L로 증가시켰을 때 동 의 농도가 0.75 mg/L에서 0.58 mg/L과 0.46 mg/L로서 각각 22.6%, 38.8%가 감소되어 알칼리도가 높을수록 동 용출농도가 낮아졌다.

정수장 정수의 알칼리도는 보통 연간 20~50 mg/L 범위이고 평균 40 mg/L 정도임을 감안하면 알칼리도를 높이는 것은 어느 정도 동 용출 저감효과는 예상되나 크지는 않을 것으로 판단된다.

- 초기 잔류염소 농도 0.37 mg/L에서 0.77 mg/L, 1.24 mg/L로 각각 조정하여 24시간 정체시킨 후 동 의 농도는 각각 0.72 mg/L, 0.99 mg/L, 1.52 mg/L로 높아져 소독제인 잔류염소의 농도가 0.1 mg/L 증가할수록 용출되는 동 의 농도는 약 0.09 mg/L 증가되었다.

2010년 정수장 송수에서 평균 잔류염소 농도가 0.56 mg/L이고 관말에서는 0.28 mg/L 이었으므로 잔류염소로 인하여 동관으로부터 동이 용출되어 먹는물 수질기준을 초과할 가능성은 낮은 것으로 보인다.

- 수온이 동 의 용출에 미치는 영향을 알아보기 위하여 15 mm, 32 mm 동관을



각각 1 m 취하고 수돗물을 채워 3, 18, 33 °C에서 24시간 정체시킨 후 각 정체수의 동 농도를 측정하였다.

15 mm 동관의 정체수에서 동의 농도가 각각 수온별로 0.52 mg/L, 0.71 mg/L, 0.85 mg/L로서 3°C와 비교해 18°C에서는 36.5%, 33°C에서는 63.5% 증가하였다. 32 mm 동관 시편의 경우 동의 농도는 수온별로 각각 0.39 mg/L, 0.51 mg/L, 0.61 mg/L로 3°C와 비교해 18°C에서는 30.8%, 33°C에서는 56.4%의 동의 농도가 상승하여 수온의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있었다. 특히 여름철에 수온이 25°C까지 높아지고 건물의 온도가 상승하여 옥내배관의 정체수 온도 또한 상승될 수 있으므로 여름철에 장기간 집을 비운 후에는 퇴수한 후 수돗물을 음용하도록 시민들에게 홍보할 필요성이 있다

### 3. 동관 사용이 고무장갑 변색에 미치는 영향

- 옥내배관으로 동관을 사용할 경우, 가정에서 사용하는 고무장갑을 변색시킬 수 있는지 확인하기 위해 여러 가지 영향인자(동 이온, 세제, 동관, 수온 등)에 의한 변색 여부를 평가하였다.
- 동이 불검출된 수돗물(20°C)과 여기에 동 이온을 0.5 mg/L, 1.0 mg/L, 3.0 mg/L 투입한 수돗물에 고무장갑을 4주간 침지시킨 결과, 동 이온을 투입한 경우에는 고무장갑이 모두 변색되었다.
- 47°C 온수에 동 이온을 0.5 mg/L, 1.0 mg/L, 3.0 mg/L 투입하여 4주간 침지시킨 경우에도 고무장갑이 변색되었다.
- 동이 불검출된 수돗물에  $\phi 15$ 의 동관을 절단하여 동관의 내부 표면적 대 침지용 수돗물의 부피비가 각각 110 cm<sup>2</sup>/L, 220 cm<sup>2</sup>/L, 330 cm<sup>2</sup>/L 되도록 고무장갑과 함께 4주간 침지시킨 결과, 고무장갑이 모두 변색되었다.  
이때 동관을 침지시키지 않은 수돗물에서는 변색이 일어나지 않았다.
- 세제가 불검출된 수돗물에 주방용 세제를 1.0 mg/L, 3.0 mg/L 투입하고 고무장갑을 4주간 침지시킨 경우에는 변색되지 않았다.
- 대기 중, 정체수 중, 동이 불검출된 수돗물에 고무장갑을 같은 기간 보관한 경우에도 변색이 되지 않았다.
- 변색이 되지 않은 고무장갑과 변색된 고무장갑의 표면 시편을 광전자분광법으로 분석한 결과, 변색된 고무장갑의 표면에서만 동 성분이 검출되어 동에 의

해 고무장갑이 변색되었다는 것을 확인하였다. 그리고 동 농도가 0.1 mg/L 정도로 낮은 경우에도 고무장갑에 동 이온이 침착되면 변색이 일어날 수 있음을 확인하였다.

- 따라서 동관을 옥내배관으로 사용한 신축 건물에서 이러한 변색현상이 발생될 수 있으므로 특히 입주가 개시된 공동주택 등을 대상으로 직접 홍보하거나 상수도 홈페이지, 아리수 품질보고서 등에 관련 내용을 게재하여 수돗물의 수질에 대한 오해를 예방할 필요가 있을 것이다.

#### 4. 동관 사용 공동주택의 정체수 수질조사

- 물 사용량이 적은 야간에 배관에 정체되었다가 오전 06~07시에 채취된 수돗물(야간 정체수) 시료와 수돗물 사용량이 많아 상대적으로 정체시간이 짧은 12~13시에 채취된 시료의 동 농도를 비교한 결과, 야간 정체수의 동 농도가 오후에 채수한 동 농도보다 0.02~0.49 mg/L 더 높았다.
- 1년 정도 경과된 공동주택에서는 정체시간이 긴 아침에 채취한 시료와 정체시간이 짧은 오후에 채취한 시료의 동 농도가 각각 0.23~0.63 mg/L과 0.08~0.40 mg/L로서 편차가 크고 각 가구에 따라서도 차이가 컸으나 모두 먹는물 수질기준 이내였다.
- 2년 정도 경과된 공동주택에서는 야간 정체수의 동 용출농도가 0.1 mg/L 정도로 현저히 감소된 결과를 얻을 수 있었다.

따라서 공동주택 등 2년 미만의 동관사용 건축물에 대해서는 퇴수량, 퇴수방법 등 관리요령에 대해 홍보를 강화하여 수돗물에 대한 신뢰도를 높이는 것이 필요하다.

## VI. 활용방안

동 용출에 영향을 미치는 인자에 대한 실험결과, 정상적인 수돗물 사용 환경에서는 동 용출 농도가 먹는물 수질기준(1 mg/L)을 초과하지는 않았으나, 옥내배관으로 동관을 시설하여 처음 사용할 경우 일정기간 동안 동 용출에 따른 수돗물에 대한 불신의 오해가 일어날 수 있으므로 이를 사전에 예방하기 위하여 처음 입주하는 입주민을 상대로 동 용출농도 및 정체수 퇴수요령 등에 대하여 안내할 필요성이 있다. 따라서 본 연구결과를 수돗물 홍보자료로 활용함으로써 수돗물의 신뢰도 제고에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.