

1



Hi Seoul
SOUL OF ASIA

유해성 조류독소 조사 및 수질 안전성 확보방안 연구

연구 총괄	수질연구부장	한 선 희
연구 책임자	수질조사과장	윤 창 진
책임연구원	지방공업연구소	권 학 선
공동연구원	지방환경연구소	박 창 민
	지방환경연구소	최 인 철
	지방환경연구소	백 영 애
	지방공업연구소	이 호 원

요 약 문

I. 제 목

유해성 조류독소 조사 및 수질 안전성 확보방안 연구

II. 연구기간

2003. 1. ~ 2010. 12.

III. 연구목적

한강 상수원 및 취수원에서 유해성 물질을 발생시키는 남조류 발생현황을 조사하고, 이를 바탕으로 남조류에 의해 생성되는 독성물질에 대한 처리법 및 최적 처리 방안을 제시함으로써 수돗물의 수질 안전성을 확보하고자 하였다.

IV. 연구내용

본 연구에서는 한강상수원에서 발생한 남조류 현황을 조사하고, 남조류에서 발생하는 유독성 독성물질 중에 서울시에서 감시항목으로 지정하여 관리하고 있는 microcystins에 대해 정수처리 공정별로 최적처리방안을 제시하고자 하였다. 연구내용은 다음과 같다.

- 조류 독성물질 문헌조사

- LC-MS/MS를 이용한 Microcystins, nodularin 동시분석
- 취수원(상수원)의 조류 발생 및 microcystins 발생 현황 분석
 - 연도별 · 지점별 발생현황
 - 조류경보제 발령현황
 - 연도별 조류독소 조사 결과 (2003~2010년)
- 과거 남조류 다량발생시 자료 추적 (1998~2002년)
- 남조류 발생과 microcystins 생성 농도와의 관계
- 조류독소 제거효율 향상 방안
 - 염소처리에 의한 마이크로시스틴 제거효율
 - 염소주입율, pH, 접촉시간에 따른 제거율
 - 마이크로시스틴의 안정성 및 염소에 의한 제거기작 고찰
 - 실공정에서 염소처리에 따른 마이크로시스틴 제거율 추정
 - 오존처리에 의한 마이크로시스틴 제거효율
 - 오존주입율에 따른 제거율
 - pH에 따른 제거율
 - 접촉시간에 따른 제거율
 - 유기물함량에 따른 제거율

V. 연구결과

본 연구에서는 한강 상수원 및 취수원에서의 수질안전성을 확보하기 위하여 유독성 남조류 발생현황을 조사하고, 남조류가 생성하는 독성물질 중에 서울시 감시항목인 microcystins에 대한 최적처리방안을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) UPLC-MS/MS를 이용하여 microcystins 및 nodularin을 분석결과 정량한계(LOQ)는 MC-RR, MC-YR, MC-LR, MC-LA, nodularin에 대해 각각 0.07, 0.11, 0.13, 0.15, 0.08 ug/L였으며, 회수율은 83~102%로 양호하였다. 기존 HPLC-UV검출 방

식에 비해 정량한계를 낮출 수 있었으며, 분석시간을 줄임으로써 신속한 분석이 이루어지게 하였다.

- 2) 1996년부터 2010년까지 15년간 발생한 총조류수 평균은 8,347 세포/mL였다. 1996년에 평균 7,696 세포/mL를 나타낸 이후 점진적으로 증가하여 2006년에 13,010 세포/mL로 정점에 도달한 후, 이후 감소하여 2010년에 8,091 세포/mL를 나타내었다. 우점조류는 규조류로서 90%이상을 차지하였다.
- 3) 최근 10년동안 총 57~70개의 조류屬이 발생하였으며, 이중 남조류는 매년 5~9개의屬이 발생하였다. 한강수계에서 발생하는 남조류에서 *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Merismopedia*, *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Phormidium*의 6개屬이 주로 관찰되어 왔다.
- 4) 최근 15년 동안의 연평균 남조류 발생량은 37 ~ 703 세포/mL의 범위로, 2010년 연평균 발생량이 1998년 발생량의 $\frac{1}{19}$, 2006년 발생량의 $\frac{1}{13.6}$ 의 수준으로 연도별로 비교적 큰 편차를 나타내었다. 특히 1998년~2002년 5년동안에는 팔당호내 경안천에서 남조류가 대량발생하였는데, 1999년 7월에 *Microcystis*가 경안천에서 최고 13만 세포/mL가 발생하였고, 9월에는 분원리에서 *Microcystis*가 최고 140만 세포/mL를 초과하여 발생하여 물꽃을 형성하였다. 취수원수에서 남조류가 가장 많이 발생한 경우는 1999년 7월 광암정수장의 원수로 사용되는 팔당 12단계 취수원수에서 17,055 세포/mL (*Microcystis* 65%, *Anabaena* 35%)였으며, 2006년 10월에는 취수원수 평균 8,892 세포/mL, 팔당에서 최고 12,257 세포/mL를 나타내었다. 이 시기에 *Anabaena*가 평균 8,488 세포/mL로 95~95% 우점하여 발생하였고 *Microcystis*는 발생량이 적어 마이크로시스틴은 검출되지 않았다.
- 5) 조류독소중 마이크로시스틴은 2000년 7월부터 서울시에서 감시항목으로 지정하여 관리하는 항목으로, 매주 수요일 서울시 6개 취수원수 조류조사를 통해 남조류가 4,000 세포/mL (~2006년까지) 또는 5,000 세포/mL (2007년부터) 이상되는 시기에 팔당호내 상수원의 4개지점(북한강, 남한강, 경안천(광동교), 팔당34단계 광역취수구)를 추가 채수하여 분석하였다. 본 연구기간인 2003~2010년 기간의 연도별 마이크로시스틴 조사 결과 2006년 단 한 차례만 광동교와 팔당 34단계 지점에서 마이크로시스틴이 검출되었다.

2006년 10월에 경안천(광동교) 지점과 팔당3·4단계 지점에서는 총 조류 세포수는 각각 165,050 세포/mL, 12,090 세포/mL로서 *Anabaena affinis*가 대부분 우점하였고, *Microcystis*는 각각 4,500 세포/mL, 810 세포/mL가 발생하였다. 조류독소인 microcystins은 각각 0.903 µg/L, 0.585 µg/L가 세포성으로 검출되었고, 용존성 microcystins는 검출되지 않았다. 또한, 6개 취수원수 및 정수장 정수를 분석한 결과에서도 microcystins는 모두 검출되지 않았다. 2007년 부터 시행된 서울시 25개 자치구의 수도꼭지수를 분석한 결과, 배급수 과정에서도 microcystins이 검출되지 않았다.

- 6) 1998년~2002년 5년간 팔당호내 경안천에서의 남조류 발생현황은 *Microcystis*가 경안천에서 최고 132,603 세포/mL가 발생하였고(1999.7월), 분원리에서 *Microcystis*가 최고 140만 세포/mL 발생하였다(1999.9월). 이때 발생한 microcystins의 농도는 각각 456,809 ng/L, 214,093 ng/L로서 남조류 세포내에 함유되어 있는 세포성 마이크로시스틴이 대부분이었고, 세포밖으로 용출되어 물속에 녹아있는 용존성 마이크로시스틴은 6,137 ng/L, 3,141 ng/L 로서 1.5%에 불과하였다. 한강상수원에 존재하는 마이크로시스틴의 종류는 대부분 MC-RR과 MC-LR이었으며, MC-YR은 10% 이내의 소량이, MC-LA는 전혀 검출되지 않았다.
- 7) 조류경보제의 대발생 상황이 발령되는 시나리오 가정하에 6)번 경안천과 같은 최고농도의 조류독소가 한강본류에서 발생된다면, 재래식 정수처리과정에서는 남조류 세포가 파괴되지 않도록 전염소처리를 중지하고 고도응집 등을 실시하여 응집·침전공정 효율을 극대화하여 세포성 마이크로시스틴을 최대한 제거해야 한다. 특히 용존성 마이크로시스틴 제거를 위해 후염소를 3.0 mg/L 이상의 고농도로 1시간 이상 반응시키면 대부분 제거된다. 그러나, 이는 강한 염소취 뿐만 아니라 소독부산물 등을 유발하므로 조류독성물질과 소독부산물의 위해성을 평가할 필요성이 있다. 따라서 조류독성물질과 소독부산물의 안전성 뿐만 아니라 남조류 대량 발생시에는 맛냄새물질까지 발생하므로, 이의 효율적 제거를 위해서는 오존처리 시설 및 입상활성탄 시설 등 고도처리가 필요하다고 판단된다.
- 8) 한강상수원에서 1998년~2002년까지 5년간 남조류 다량발생시 자료 분석 결과, 원수속에 *Microcystis*가 80% 이상 우점하는 경우에는 회귀식은 $\ln(y) = 0.8559 \times$

$\ln(x) - 0.2478$ ($R^2 = 0.8117$) 였으며, 이로부터 서울시 감시 기준인 microcystins 1.0 ug/L에 해당하는 남조류 세포수는 4,280 세포/mL로 추정되었다.

x : *Microcystis* 세포수 (세포/mL)

y : microcystins(MC-RR,-YR,-LR,LA)의 농도 (ng/L)

그러나, 한강상수원에서 *Microcystis*가 2,000 세포/mL 이하에서는 측정횟수의 40%~55%가 마이크로시스틴이 검출되지 않았으며, *Microcystis*가 3,000 세포/mL 이상 존재시에는 마이크로시스틴이 모두 검출되었다. 또한 한강에 발생하는 *Anabaena* 세포수는 마이크로시스틴 형성에 상관성을 보여주지 못하였으며, *Aphanizomenon* 도 마이크로시스틴 생성과 관련이 적은 것으로 판단되었다. 5년간 자료를 분석한 회귀식 결과를 이용하여 상수원수에 발생한 *Microcystis* 세포수와 이때 세포내 함유하고 있는 마이크로시스틴의 독성량을 신속히 파악할 수 있도록 조건표를 만들었으며, 서울시 정수장에서 조류경보제와 연계하여 이를 활용하게 함으로써 원수에 발생한 독성물질을 효과적으로 제거할 수 있도록 하고, 정수처리 공정에서 선제적 대처가 가능토록 하였다.

- 9) 염소처리에 의한 용존성 마이크로시스틴 제거효율 실험을 위해 접촉시간 20분에서 염소농도 범위 0.3~3.0 mg/L에서 반응시킨 결과, 염소주입율이 1.2 mg/L에 도달할때까지 마이크로시스틴의 제거율은 선형적으로 증가하였다. 증류수 시료의 경우 1.2 mg/L 염소 주입시 유리잔류염소농도는 0.72 mg/L을 나타내었고, 취수원수 시료의 경우에는 3.0 mg/L 염소주입시 유리잔류염소농도가 0.72 mg/L으로 동일하였다. 이때 MC-RR과 MC-LR의 제거율은 증류수인 경우 각각 82%, 77%였으며, 취수원수인 경우 각각 79%, 78%가 제거되었다. 따라서, 수중에 존재하는 유리잔류염소농도에 따라 마이크로시스틴 제거율이 결정되어지며, 본 연구에서는 0.72 mg/L의 유리잔류염소 존재시 접촉시간 20분, pH 8이하일 때 마이크로시스틴은 약 80% 제거되었다. 특히 강북취수원수의 경우 염소주입율이 1.2 ~ 2.0 mg/L 범위의 주입율에서는 오히려 제거율이 감소하는 특이한 경향을 나타내었는데, 이는 수중 암모니아 존재시 파과점 염소처리를 실시하는 경우와 비슷한 형태를 나타내었다.

- 10) 염소주입율 1.5 mg/L, 접촉시간 20분에서 pH 4.0 ~ 11.0 범위에서 마이크로시스

틴 제거율 실험 결과, pH가 감소할수록 제거율은 증가하였고 취수원수에서보다 증류수에서의 제거가 용이한 것으로 나타났다. pH 5 ~ 9 범위에서 마이크로시스틴 제거율은 증류수 시료는 70~80%, 취수원수 시료는 60~70% 제거율을 보였으며, MC-RR이 MC-LR보다 제거가 조금 더 용이하였다.

- 11) 염소주입을 1.5 mg/L, 접촉시간 2분~120분의 범위에서 마이크로시스틴과 노들라린 제거율 실험 결과, 증류수 시료에서는 마이크로시스틴과 노들라린은 모두 반응 1시간 경과후에는 80% 이상 제거율을 보였고, 취수원수에서는 70% 이상 제거율을 나타내어 마이크로시스틴과 노들라린은 염소 접촉시간과 밀접한 관련이 있음을 보여주었다. 또한 마이크로시스틴 제거순서는 종류별로 MC-YR > MC-RR > nodularin > MC-LA 순으로 제거율이 용이하였으며, 독성이 가장 강한 MC-LR이 제거되는데 가장 긴 시간이 소요되는 것으로 나타났다.
- 12) MC-LR의 경우 염소처리시 부산물 6종이 확인되었는데, 이중 최종생성물은 2종으로서 monochloro-dihydroxy-microcystin은 2분 이내, dichloro-dihydroxy-microcystin의 경우는 30분 이내 점진적으로 생성되며, 지금까지 이들 염소부산물의 위해성은 없는 것으로 보고되었다.
- 13) 남조류 세포가 1시간 동안 염소처리에 의해 본격적으로 파괴되기 시작하는 염소농도는 *Microcystis*의 경우 1~2 mg/L 이며, *Anabaena macrospora*의 경우 0.6 mg/L 으로 조사되었다.
- 14) 현재 서울시 각 정수센터에서 운영하고 있는 전염소처리 조건을 토대로 전염소주입율과 접촉시간, 유리잔류염소 농도 등을 고려하여 마이크로시스틴 제거율을 고찰한 결과, 전염소처리에 의한 마이크로시스틴 제거율은 암사정수센터의 경우 20~30%, 그 외 정수센터는 70%이상 가능한 것으로 판단되었다. 후염소처리에 의해서도 70% 정도가 제거될 것으로 판단되어 전체 공정에서 암사는 75%, 나머지 정수센터는 90%이상 제거가 가능한 것으로 판단되어 진다. 특히 구의정수센터에서와 같이 맛냄새 물질인 geosmin의 동시 제거를 고려하여 전염소를 중지하고 중염소로 전환하는 경우, 염소주입농도 0.25mg/L, 접촉시간 20분으로 감소되어 마이크로시스틴 제거율은 20~30%로 낮아지게 되나, 후염소 처리에 의한 목표잔류염소 0.53 mg/L 적용시 마이크로시스틴 제거율은 70% 이상으로 추정되

어 전체공정은 약 75%이상 제거가 가능한 것으로 나타났다.

- 15) 오존처리에 의한 용존성 마이크로시스틴 제거효율 실험을 위해, 4 ug/L 농도의 마이크로시스틴 혼합표준물질이 함유된 증류수 바탕시료(100 mL)에 오존농도 0.0~2.0 mg/L 가 되도록 포화오존수(27.78 mg/L)를 주입하고 20분간 반응시킨 결과, 오존 최소주입농도인 0.3 mg/L에서 모두 제거되었다.

오존주입농도를 1.0 mg/L로 고정하고 pH를 5~11 범위로 조정한 실험 결과, pH 7 이하에서는 100% 제거되었으나 pH가 9.7보다 크면 제거율이 급격히 감소하는 것으로 나타나 pH가 오존산화에 매우 중요한 인자임을 파악할 수 있었다.

오존접촉시간을 2분~60분 범위로 달리하여 마이크로시스틴 제거율 실험 결과, 2분이내에 모두 100% 제거되다. 특히 Rositano 등(1998)의 연구에서는 15초 이내에 99%의 microcystin-LR이 제거되고, 잔류오존농도를 0.05 mg/L 를 유지하는 경우에는 완전히 제거할 수 있는 것으로 보고되었다.

오존과 마이크로시스틴의 제거에 미치는 유기물 영향을 파악하기 위해, 증류수에 오존주입농도 1.0 mg/L 으로 고정하고 humic acid를 이용하여 유기물 농도 0.5~10 mg/L, 오존접촉시간 20분으로 실험하였다. 그 결과 유기물 농도가 3 mg/L 에서부터 조류독소 제거율이 감소하기 시작하여, 유기물 농도 5 mg/L 에서 약 85%, 10 mg/L 에서 약 70%까지 제거율이 감소하였다.

VI. 활용방안

한강 상수원에서 발생하는 남조류 세포수와 마이크로시스틴 생성량에서 회귀식 결과를 산출하였으며, 원수에서의 독성농도를 예측하여 선제적 정수처리 대응에 활용될 수 있다.

또한 남조류 독소로부터 수질안전성을 확보하기 위해 표준 정수처리공정에서 전염소투입 또는 중염소 전환 등의 운영기술을 확보하는데 중요한 자료로 이용될 수 있으며, 고도정수처리의 오존처리시설을 운영하는 기초자료로 활용될 수 있다.

2



조류종류별 세포수와 클로로필-a 측정기의 상관관계 연구

연구 총괄	수질연구부장	한 선 희
연구책임자	수질조사과장	윤 창 진
책임연구원	지방공업연구소	권 학 선
공동연구원	지방환경연구소	박 창 민
	지방공업주사	정 종 기
	지방공업주사	최 진 수
	지방환경연구소	최 인 철
	지방공업연구소	경 규 선
	지방공업주사보	박 준 진

요 약 문

I. 제 목

조류종류별 세포수와 클로로필-a 측정기의 상관관계 연구

II. 연구기간

2009. 1. ~ 2010. 12.

III. 연구목적

효율적인 취수원의 수질관리와 정수처리를 위해 여과장애 및 맛냄새 문제를 발생시키는 조류의 발생특성을 파악하는 것이 중요하며, 조류 발생시에는 서울시 6개 정수센터에 설치되어 있는 온라인 클로로필-a 자동측정기를 활용하여 신속한 대응체계를 구축할 필요성이 있다.

본 연구에서는 취수원수의 조류 세포수 및 개별 조류종 분포, 클로로필-a 농도 등을 조사하여 조류세포수에 따른 클로로필-a와의 상관 관계를 조사하고, 실험실에서 측정하는 흡광광도법에 의한 클로로필-a 값과 자동측정기의 현장 측정 결과를 비교분석하였다. 특히 취수원에서 남조류 대량 발생시 맛냄새물질인 geosmin에 대해 클로로필-a 자동측정기를 이용하여 즉각적인 모니터링이 가능한 지를 연구하여 맛냄새물질 발생 시 선제적 즉각대응에 기여코자 하였다.

IV. 연구내용

본과제의 연구내용 및 범위는 다음과 같다.

- 취수원수의 조류 발생 및 클로로필-a 농도
- 취수원수의 조류 세포수와 클로로필-a의 상관관계
- 취수원수 클로로필-a의 연간변화
- 아세톤추출법과 클로로필-a 자동측정기의 측정값 비교
- 한강취수원에서의 남조류 및 geosmin 발생 현황
- 남조류에 대한 클로로필-a 자동측정기의 측정감도 비교
- 남조류에서 생성되는 지오스민의 농도 추정
- 클로로필-a 자동측정기를 이용한 geosmin 농도 모니터링 실시

V. 연구결과

본 연구에서는 조류세포수에 따른 클로로필-a와의 상관 관계를 조사하고, 실험실에서 측정하는 흡광광도법에 의한 클로로필-a 값과 취수원수 수질변화를 상시 모니터링 하는 클로로필-a자동측정기의 현장 측정 결과를 비교분석하였다. 특히 취수원에서 클로로필-a자동측정기를 이용하여 geosmin 발생 모니터링이 가능한지를 연구하였으며, 결론은 다음과 같다.

1) 취수원수의 조류 발생 및 클로로필-a 농도

한강 취수원수중 조류발생량이 가장 많은 곳은 풍납취수원수로서, 2009년 총조류발생량은 연평균 11,644 세포/mL, 발생범위는 170~51,390세포/mL로서 계절적 변화가 매우 심했다. 특히 규조류가 96%로 대부분을 차지하였으며, 녹조류 2.2%, 남조류 0.9%였다. 이때 클로로필-a의 농도는 연평균 38.9 mg/m³였으며, 발생범위는 3.3~97.0 mg/m³를 나타내었다.

2) 취수원수의 조류 세포수와 클로로필-a의 상관관계

2007년~2010년까지 6개 취수원수에서 *Cyclotella*가 우점하는 봄철 시기에 조류 세포수가 20,000 세포/mL 이상 발생하는 경우에는 조류세포수가 증가하더라도 클로로필-a 농도는 선형적으로 증가하지 않았다. 조류 세포수가 20,000 세포/mL 이하의 자료에 대해 다음과 같은 상관관계를 얻었다.

$$\ln(y) = 0.7039\ln(x) - 1.3374 \quad (R^2 = 0.7543, n = 209)$$

x : 조류 세포수 (cells/mL)

y : 총 클로로필-a 농도 (mg/m³)

3) 취수원수에서의 클로로필-a의 연변화

2008.1.1~ 2009.5.15까지 500일동안 구의취수원수를 측정 분석한 결과, 클로로필-a 자동측정기는 조류 세포수 현존량의 변동과 유사한 분포를 보였다. 현미경 분석시 조류 그룹별 기여도는 규조류가 94%로 가장 높았으며 녹조류 4.4%, 남조류 0.8%, 기타 0.6%였다. 그러나 클로로필-a 자동측정기가 측정한 조류분류군은 규조류가 77%로 가장 높았으며 녹조류 15%, 남조류 0.2%, 갈색편모조류 5.2%로 차이가 발생하였다. 이는 규조류나 녹조류에 속하는 조류 속(genus)에 따라 세포내 함유하고 있는 클로로필-a 양의 차이로 판단되어 진다.

4) 아세톤추출법과 클로로필-a 자동측정기 값의 비교

2008.1.1~ 2009.5.15까지 500일동안 구의취수원수를 측정분석한 결과, 클로로필-a 자동측정기 측정값과 아세톤추출법에 의한 클로로필-a 농도의 상관관계는 상관식 $y = 0.771x$ 관계를 나타내었다($R^2 = 0.7412$, $n = 66$). 이는 아세톤추출법에 의한 클로로필-a 농도를 100%로 보았을 때 클로로필-a 자동측정기는 77.1% 만큼을 측정한다는 의미이다. 이는 Katarzyna 등(2009)이 클로로필-a 자동측정기로 분석시 분광광도계 측정값의 71.4%에 해당되었다는 보고와 유사한 결과이다.

조류의 분류군을 나타내는 해상력(분별력)은 조류 속별 특성 및 계절적 변이로 인하

여 기술적인 한계를 보였다. 이는 자동측정기가 다양한 조류가 발산하는 형광색소를 어느 정도 분리할 수 있지만, 탁도 등 환경요인에 의한 간섭으로 인하여 해상력 감소가 일어날 수 있고, 원수에 함유되어 있는 조류 세포수가 현저히 감소할 경우에도 해상력 감소가 불가피한 것으로 판단되었다.

5) 한강취수원에서의 남조류 및 geosmin 발생 현황

2009년의 경우 한강본류에 조류주의보는 발령되지 않았지만, 2009.6.9~7.10까지 32일 동안 최대값은 조류주의보 수준이상으로 발생하기도 하였다. 광암의 경우 남조류가 6/17일 최대 2,975 세포/mL 발생하였고, 이때 geosmin 농도는 252ng/L이었다. 구의 취수원수의 경우 남조류가 6/16일 최대 750 세포/mL 발생하여 geosmin의 농도는 102ng/L를 나타내었다. 발생한 남조류는 대부분 *Anabaena macrospora*였으며, geosmin 물질이 다량 발생되었다.

6) 남조류에 대한 자동측정기의 측정감도 비교

남조류인 *Anabaena*, *Microcystis*, *Phormidium* 등 3개 속에 대하여 클로로필-a 자동측정기의 측정감도를 확인한 결과, *Phormidium*은 감도가 매우 낮아 모니터링이 불가능하였으며, *Anabaena*가 *Microcystis*보다 약 7배 높은 측정감도를 나타내어 남조류 발생 감시는 *Anabaena* 속 위주로 모니터링하는 것이 타당할것으로 판단되었다.

클로로필-a 자동측정기의 남조류 최소감지농도는 *Anabaena*는 120 세포/mL, *Microcystis*는 750 세포/mL로써, *Microcystis*는 조류주의보 발령단계(500 세포/mL 이상)부터 모니터링이 가능할 것으로 평가되었다.

7) 남조류에서 생성되는 지오스민의 농도 추정

2009년 서울시 6개 취수원수에서 발생한 *Anabaena*와 geosmin 발생현황 (1일 자료)에서 유도된 상관식은 $y=0.0935x$ ($R^2=0.4984$)였다.

최인철 등(2009)은 남조류 세포내 geosmin 함량과 염소처리에 의해 남조류 세포밖으

로 유출된 geosmin 함량 연구에서 *Anabaena macrospora*에 의해 생성되는 geosmin 함량은 $y=0.0745x$ 라는 관계를 도출하였다.

8) 클로로필-a 자동측정기를 이용한 geosmin 농도 모니터링 실시

구의 취수원수를 대상으로 클로로필-a 자동측정기로 geosmin 생성 농도를 모니터링한 결과, 2009.6.12일에 geosmin 농도가 7~8 ng/L에서 1~2일 짧은 시간에 100 ng/L까지 급격히 증가할 때 자동측정기의 남조류 클로로필-a 농도도 2~3 mg/m³에서 7~8 mg/m³로 가파른 상승을 보여 수시로 변하는 geosmin 농도 변화를 적시에 감시하였다.

또한 남조류 세포수와 geosmin의 농도, 클로로필-a 자동측정기의 클로로필-a 농도와의 상관관계를 종합하여, 한강취수원을 이용하는 서울시 6개 정수센터에서 맛·냄새물질인 geosmin 발생에 대한 클로로필-a 자동측정기를 효율적으로 운영할 수 있도록 기본 자료를 활용하여 조건표를 구축하였다.

VI. 활용방안

정수센터에서는 기존에 설치되어 있는 온라인 자동측정기의 클로로필-a 측정값을 이용하여 조류 그룹별 발생 여부를 즉각 판단할 수 있고, 특히 맛·냄새 물질 geosmin이 짧은 순간에 급격히 발생하는 경우 클로로필-a 자동측정기와 조건표를 이용하여 geosmin 농도와 남조류 세포수 등을 추정하는데 활용할 수 있다.



생물원인 맛·냄새 물질조사 및 제어방안 연구

연구 총괄	수질연구부장	한 선 희
연구 책임자	수질조사과장	윤 창 진
책임연구원	지방환경연구사	최 인 철
연구 원	지방보건연구사	이 인 숙
	지방공업연구사	이 호 원
	지방공업 6급	정 종 기
	지방환경연구사	박 창 민
	지방공업연구사	권 학 선
	지방환경연구사	최 예 덕
	지방환경연구사	정 종 순
	지방공업연구사	이 준 호
	지방기능 8급	조 익 수
	지방보건연구사	허 영 봉
	지방공업연구사	정 일 용

요 약 문

I. 제 목

생물원인 맛·냄새 물질조사 및 제어방안 연구

II. 연구기간

2003년 1월 ~ 2011년 2월

III. 연구목적

수돗물에서 발생하는 맛·냄새의 원인물질을 밝히고 그 물질을 감지농도 이하로 저감하기 위한 효과적인 처리방안을 모색하는데 연구의 목적이 있다.

IV. 연구내용

1. 서울 상수계통에서 발생하는 맛·냄새의 확인
 - 실용적인 관능분석법 정립
 - 원·정수에서 발생하는 맛·냄새 확인
2. 맛·냄새 물질의 실용적인 분석법 개발
 - 흙·곰팡내 유발물질의 분석법 정립(2-MIB, Geosmin, IPMP, IBMP, TCA)

- 황화합물 냄새물질 분석법 정립(DMS, DMDS, DMTS)
- 3. 원·정수에 대한 맛·냄새 물질 모니터링
- 4. 한강상수원에서 맛·냄새 물질의 발생원인 확인
 - 맛·냄새 물질과 수질인자간 상관성 분석
 - 환경시료 분석에 의한 발생원인 확인
 - 생물배양에 의한 발생원인 확인
- 5. 정수처리 공정별 맛·냄새 물질 거동 연구
- 6. 맛·냄새 물질 제거효율 향상 방안 연구
 - 2-MIB와 Geosmin 제거를 위한 분말활성탄 공정 최적화 연구
 - Geosmin 제거효율 향상을 위한 최적 염소처리 연구
 - 여과공정에서 분말활성탄을 이용한 2-MIB와 Geosmin 제거 연구
 - 과망간산칼륨(KMnO₄)를 이용한 2-MIB와 Geosmin 제거 연구
 - 초음파를 2-MIB와 Geosmin 제거 연구

V. 연구결과

FPA(Flavor Profile Analysis)법을 정립하여 원·정수 및 수돗물에서 발생하는 맛·냄새를 확인하고 그 원인물질의 신속한 감시를 위해 실용적인 SPME-GC/MS 분석법을 개발하였다. 그리고 원·정수 및 수돗물을 모니터링하여 맛·냄새 유발물질의 발생특성을 파악하였으며, 맛·냄새 유발물질의 발생원을 규명하기 위해 취수원수의 조류와 방선균을 모니터링 하였고 실험실에서 배양하여 맛·냄새 유발물질의 생성 유무를 확인하였다. 또한, 맛·냄새 유발물질이 부착조류와 토양으로부터 수계로 유입되는지 조사하였다. 그리고, 서울시 정수처리 공정에 의한 맛·냄새 유발물질의 처리효율을 파악하기 위해 공정별로 조사를 실시하였으며, 맛·냄새 유발물질의 효과적인 처리를 위해 기존 처리공정의 효율적인 운영방법과 분말활성탄에 의한 처리효율 향상방안에 대하여 연구하였다. 이 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 취수원수(KU)와 처리수(여과수, 수돗물)를 대상으로 FPA법을 사용하여 관능분석을 실시한 결과, 원수에서 발생하는 주요 냄새는 흙·곰팡내, 풀냄새, 비린내, 부패냄새, 하수냄새 등이며 흙·곰팡내는 평균적으로 비교적 높은 강도로 발생하고 정수처리 과정에서 잘 제거되지 않아 수돗물에서 맛·냄새를 유발하는 것으로 나타났다.

일반적인 후각능력이 양호한 사람 7명을 선발하여 냄새 최소감지농도(threshold)을 평가한 결과, 2-MIB는 평균 7 ng/L, Geosmin은 평균 8 ng/L이었으며, Weber-Fechner 법칙을 이용하여 냄새표준물질의 농도와 실측한 FPA강도의 관계에서 얻은 최소감지농도는 2-MIB가 3 ng/L, Geosmin이 4 ng/L로 나타나 2-MIB와 Geosmin의 관리목표 농도를 5~10 ng/L로 설정하였고 정립해야 할 기기분석법의 정량한계 목표값을 1 ng/L로 설정하였다.

2. SPME-GC/MS를 이용하여 흙·곰팡내 유발물질 5항목(2-MIB, Geosmin, IPMP, IBMP, TCA)의 동시분석법을 개발하였다. 분석법은 10 mL의 시료량을 사용하여 방법검출한계(MDL)가 모두 0.3 ng/L 이하로 후각 감지농도보다 상당히 낮으며, 적은 시료를 사용하여 농축·추출 과정을 자동화함으로써 신속하고 효율적인 분석이 가능하였다. 2-MIB, Geosmin, IPMP, IBMP, TCA에 대해 정제수 바탕시료(n=24~29)에서 회수율 96~105%, 상대표준편차(RSD) 7~10 ng/L, 수돗물 바탕시료(n=8~10)에서 회수율 92~112%, 상대표준편차(RSD) 4~8%, 원수 바탕시료(n=8~15)에서 회수율 98~106%, 상대표준편차(RSD) 7~15%로 양호하였다.
3. SPME-GC/MS를 이용하여 황화합물 냄새물질 3항목(DMS, DMDS, DMTS)의 동시분석법을 개발하였다. 분석법은 10 mL의 시료량을 사용하여 방법검출한계(MDL)가 모두 4 ng/L 이하로 후각 감지농도보다 낮다.
4. 2004년 1월~2010년 12월까지 한강의 6개 취수원수를 대상으로 흙·곰팡내 물질을 주 1회 모니터링한 결과, 2-MIB는 연평균 2.7~10.0(최고 51.3) ng/L, Geosmin은 연평균 3.7~6.6(최고 226.2) ng/L였으며, IPMP, IBMP, TCA는 거의 발생하지 않아 한강 상수원에서 흙·곰팡내를 유발하는 주요 원인물질이 2-MIB와 Geosmin으로 밝혀졌다.
5. 취수원에서 2-MIB는 주로 겨울~봄철에 지속적으로 10 ng/L(최소감지수준)를 초

- 과하였고, Geosmin은 여름과 가을철에 간헐적으로 10 ng/L를 초과하였으며, 2-MIB는 연간 80~130일(2004년~2008년) 정도, Geosmin은 연간 20~50일 정도 10 ng/L를 초과하여 발생하는 것으로 나타났다. 2-MIB는 연도별 감소추세를 보였으며 2009년부터 거의 10 ng/L를 초과하지 않았고 Geosmin은 증가추세를 보였다.
6. 2004년 1월~2010년 12월까지 서울의 6개 정수를 대상으로 흙·곰팡내 물질을 월 1~2회 모니터링하여 취수원수 대비 제거율을 산정한 결과, 일반 정수처리 공정(분말활성탄 투입)에 의한 제거율은 2-MIB가 평균 14%, Geosmin이 평균 53%로 높지 않았으며 Geosmin에 비해 2-MIB의 제거율이 훨씬 낮은 것으로 나타났다.
 7. 2004년 1월~2007년 12월까지 서울의 1개 수도꼭지수를 주 1회 모니터링한 결과, 2-MIB와 Geosmin은 배급수계통에서 전혀 저감되지 않는 것으로 나타났다.
 8. DMS, DMDS, DMTS는 한강상수원에서 수~수십 ng/L 수준으로 검출되었지만, 정수에서는 검출되지 않아 정수처리공정에서 잘 제거되며 수돗물의 맛·냄새에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
 9. 한강수계에서 2-MIB는 주로 겨울~봄철(1~4월), Geosmin은 주로 여름과 가을철에 발생함에 따라 두 물질의 발생원인이 다른 것으로 나타났다.
 10. 한강 상수원에서 Geosmin의 주요 발생원인 생물은 *Anabaena macrospora*와 *Anabaena spiroides*이고 수환경 중에서 이들의 Geosmin 생성능은 평균 74.5×10^6 ng/cell인 것으로 확인되었으며(1 mL 당 134세포의 출현으로 Geosmin이 10 ng/L 정도 생성), 방선균도 Geosmin 발생의 한 원인인 것으로 나타났다. 2-MIB의 주요 발생원인 생물은 *Oscillatoria* spp.와 *Phormidium tenue*인 것으로 생각된다.
 11. 취수원수에서 2-MIB와 Geosmin의 존재형태를 분석한 결과, 주요 발생시기에 2-MIB는 대부분 용존성으로 존재하고, Geosmin은 대부분(80% 정도) 세포성(조류 세포내)으로 존재하는 것으로 나타났다.
 12. 정수처리공정에서 2-MIB와 Geosmin의 거동을 살펴본 결과, 주요 발생시기에 대부분 세포성으로 존재하는 Geosmin은 전염소처리공정(취수구~착수정)에 의해 거의 세포외로 유출되어 용존성으로 존재하는 것으로 나타났다. 이를 통해 전염소처리공정을 개선함으로써 Geosmin의 제거효율을 크게 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

13. 정수센터별 알맞은 전염소주입량 가이드라인 설정을 위해 jar-test를 이용하여 염소처리에 의한 *Anabaena*의 세포파괴 및 Geosmin의 유출량 파악 실험 결과, 염소 농도와 접촉시간에 비례하여 Geosmin의 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 염소를 1.5 mg/L 농도로 주입한 경우에 40분 접촉 후 73%가 유출되었고 1시간 접촉 후에는 대부분이 유출되는 것으로 나타났으며, 20~40분 사이에 *Anabaena* 세포에 가장 치명적인 손상이 일어나는 것으로 해석되었다.
14. 염소에 의한 *Anabaena*의 세포파괴를 억제하기 위해서는 전염소를 모두 중간염소로 대체하는 것이 바람직하지만 전염소를 줄임으로써 응집·침전 효율 감소(조류포함), 암모니아에 대응이 어려운 점을 고려하면, *Anabaena*의 세포파괴를 최소화 하면서 응집·침전 효율을 유지할 수 있는 전염소량을 주입하는 것이 Geosmin의 제거에 가장 효율적인 것으로 판단되었다. 한강원수의 수질변동 및 서울시 정수센터의 상황을 고려할 때, 전염소주입량 설정에서 가장 중요한 인자는 접촉시간(취수장~침전지 도달시간)인 것으로 고찰되어 이를 바탕으로 적정 전염소주입량을 산정한 결과, 모든 정수센터에서 0.3~1.0 mg/L 이하로 나타났다. 따라서 *Anabaena*에 의한 Geosmin의 고농도 발생시에 전염소를 정수센터별 상황에 맞게 줄이고 중간염소로 대체하는 것이 필요한 것으로 판단된다. 전염소 감소에 의한 응집효율의 감소분은 CO₂의 적정주입에 의한 응집·침전효율 향상으로 상쇄할 수 있으며, 전염소 감소에 의해 소독부산물의 생성감소와 분말활성탄의 효율증대 효과도 얻을 수 있을 것으로 기대된다.
15. 분말활성탄은 저농도의 상시주입방법(2~7 mg/L)을 지양하고, 흙·곰팡내 발생시기에 집중 주입하는 방법으로 개선이 필요하며, 2-MIB와 Geosmin의 제거효율 향상을 위해 품질지표 중 요오드가나 페놀가보다는 메틸렌블루탈색력이 우수한 분말활성탄을 사용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 또한, 2-MIB와 Geosmin의 흡착용량과 제거율이 분말활성탄 종류별로 많은 차이를 보여 적합한 분말활성탄의 선택이 매우 중요한 것으로 나타났다. 따라서 활성탄 선정 시 세심한 주의가 필요하고 적합한 활성탄을 선정하기 위해 추가적인 기준이 마련되어야 할 것으로 생각된다.

VI. 활용방안

이 연구결과의 활용을 통해 궁극적으로 아리수에 대한 소비자 만족도 향상이 기대된다. 맛·냄새 물질 발생의 예측, 신속한 검출, 정수처리공정의 과학적인 운영, 시의 적절한 수처리제 준비, 비용 대비 효용성 있는 수처리제 선택을 통해 맛·냄새 물질의 종합관리 및 예산절감에도 기여할 것으로 생각된다. 또한, 맛·냄새 물질에 대한 수년간의 기초자료는 고도정수처리공정의 설계 및 맛·냄새 관련 상수도정책 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

원·정수 및 정수처리공정에서 바륨의 분포 및 거동

연구 총 괄	수질연구부장	한 선 희
연구 책임자	수질분석과장	박 현
책임연구원	공업 연구사	이 경 우
공동연구원	공업 연구사	정 관 조
	공업 연구사	송 만 식
	공업 연구사	정 의 선
	공업 연구사	김 현 희
	공업 연구사	임 희 아
	환경 주 사 보	권 오 정
	환경 주 사 보	이 길 화

요 약 문

I. 연구제목

원·정수 및 정수처리공정에서 바륨의 분포 및 거동

II. 연구기간

2010년 1월 ~ 2010년 12월

III. 연구목적

바륨의 분석방법을 정립하고 한강 상수원, 취수원수, 정수 및 정수처리 공정수를 대상으로 바륨의 분포 및 거동을 조사하여 아리수의 안전성을 확보하고자 하였다.

IV. 연구내용

유도결합플라즈마-원자발광분광기(ICP-AES)를 이용하여 바륨의 분석방법 정립 및 한강 상수원, 취수원수 및 정수를 대상으로 실태조사를 실시하였고, 표준 및 고도정수처리공정에서 바륨의 거동을 조사하였다. 그리고 급수과정별 시설에서 바륨의 거동을 살펴보기 위해 정수장, 배수지 전·후, 배수구역 유입부, 관말 수도꼭지 지점을 대상으로 조사하였다.

V. 연구결과

바륨의 분석방법을 정립하고 실태조사를 실시하였으며 정수처리공정 및 급수과정별 시설에서의 거동을 살펴본 결과는 다음과 같다.

1. 유도결합플라즈마-원자발광분광기(ICP-AES)를 이용하여 바륨을 분석하였으며, 파장은 455.403 nm를 선택하였다. 방법검출한계와 정량한계는 각각 0.00005 mg/L, 0.0002 mg/L 로 산출되었다.
2. 한강 상수원에 대한 실태조사 결과, 남한강, 북한강, 한강 수계의 본류에서 0.010 ~ 0.024 mg/L, 경안천 및 남한강, 북한강, 한강 수계의 지류에서 0.014 ~ 0.101 mg/L 범위로 나타나 본류보다 지류에서 높게 검출되는 경향을 보였다.
3. 서울시 취수원수에서 0.014 ~ 0.026 mg/L, 정수 및 병물 아리수에서는 0.012 ~ 0.021 mg/L 범위로 검출되었다. 이는 세계보건기구(WHO) 수질기준 0.7 mg/L 및 미국 환경보호청(US EPA) 수질기준 2 mg/L 보다 매우 낮은 수준으로 아리수의 안전성을 확인할 수 있었다.
4. 혼화, 응집, 침전, 모래여과, 염소소독을 사용하는 표준정수처리공정과 표준정수처리공정에 추가로 오존, 입상활성탄을 사용하는 고도정수처리공정에서 공정에 따른 큰 농도 변화는 없었다. 이는 바륨 대부분이 용존성으로 존재하기 때문인 것으로 판단된다.
5. 급수과정별 시설에서의 거동을 조사한 결과, 바륨의 농도는 큰 변화가 없는 것으로 나타나 정수가 관말 수도꼭지까지 도달하는 동안 급수과정별 시설에 영향받지 않음을 확인할 수 있었다.

VI. 활용방안

한강 상수원, 취수원수 및 정수에 대하여 실태조사를 실시하여 아리수의 안전성 확보 및 향후 우리연구원 항목확대 등의 자료로 활용하고자 한다.

5



Hi Seoul
SOUL OF ASIA

클로라이트와 클로레이트 분석방법 정립 및 한강수계 실태조사

연구 총괄	수질연구부장	한 선 희
연구 책임자	수질분석과장	박 현
책임연구원	공업 연구사	임 희 아
	공업 연구사	김 현 희
공동연구원	공업 연구사	정 관 조
	공업 연구사	송 만 식
	공업 연구사	정 의 선
	공업 연구사	이 경 우
	환경 주 사 보	이 길 화

요 약 문

I. 제 목

클로라이트와 클로레이트 분석방법 정립 및 한강수계 실태조사

II. 연구기간

2010년 1월 ~ 2010년 12월

III. 연구목적

클로라이트(ClO_2)와 클로레이트(ClO_3)의 분석방법을 정립하고, 서울시 취수원수와 정수에서 실태조사를 통하여 서울시 수돗물에서의 안전성을 확보하고자 하였다.

IV. 연구내용

○ 클로라이트(ClO_2)와 클로레이트(ClO_3)의 분석방법 정립

- 이산화염소 및 차아염소산나트륨 등, 염소소독제의 무기부산물로 알려져 있는 클로라이트와 클로레이트에 대하여 이온크로마토그래피법(ion chromatography, IC)을 이용하여 분석방법을 정립하였다.

○ 한강수계 본류·지류, 서울시 취수원수 및 정수 실태조사

- 정립한 분석법을 적용하여 한강수계 본류·지류, 서울시 6개 정수센터의 취수원수 및 정수에 대해 실태조사를 실시하였다.

V. 연구결과

클로라이트와 클로레이트 분석방법을 정립하고, 한강수계 본류·지류, 서울시 취수원수 및 정수에 대한 실태조사를 실시하였다.

○ 클로라이트(ClO_2)와 클로레이트(ClO_3^-)의 분석방법정립

- IC를 이용하여 클로라이트와 클로레이트를 분석한 결과, 클로라이트의 평균회수율은 90.5~109.6 %, 상대표준편차는 4.2~7.1 %, 방법검출한계는 2.0~3.0 $\mu\text{g/L}$ 로, 클로레이트의 평균회수율은 100.0~102.8 %, 상대표준편차는 3.2~6.8 %, 방법검출한계는 1.7~3.1 $\mu\text{g/L}$ 로 나타났다.

○ 한강수계 실태조사

- 한강수계 본류 및 지류에 적용시켜본 결과, 클로라이트는 정량한계(10 $\mu\text{g/L}$) 이하 모두 불검출로 나타났고, 클로레이트는 불검출에서 82 $\mu\text{g/L}$ 범위로 나타났다. 그리고, 서울시 취수원수, 정수 및 병물아리수에서는 클로라이트와 클로레이트 모두 정량한계 이하 불검출로 나타났다.

VI. 활용방안

정립한 클로라이트와 클로레이트의 분석방법을 이용하여, 한강수계, 서울시 원·정수에서 분포조사를 실시하고, 서울시 수돗물의 안전성확보의 자료 및 2011년부터 감시항목으로 관리하여 활용할 예정이다.

흐름전위 측정에 의한 응집제 주입률 최적화 연구

연구 총 괄	수질연구부장	한 선 희
연구 책임자	수질분석과장	박 현
책임연구원	공업 연구사	정 의 선
공동연구원	공업 연구사	송 만 식
	공업 연구사	정 관 조
	공업 연구사	김 현 희
	공업 연구사	임 희 아
	공업 연구사	이 경 우
	환경 주 사 보	권 오 정
	환경 주 사 보	이 길 화

요 약 문

I. 연구제목

흐름전위 측정에 의한 응집제 주입률 최적화 연구

II. 연구기간

2009년 4월 ~ 2010년 12월

III. 연구목적

서울시 6개 아리수 정수센터 중 유일하게 맥동식 침전방식을 적용하고 있는 광암아리수정수센터의 응집제 주입률 결정방법에 대해 흐름전위측정(SCD, Streaming Current Detector)에 의한 신속·정확한 결정방법의 적용가능성을 검토하고, 효율성 및 경제성을 평가하여 고품질 아리수 생산 자동화시스템 구축의 기초자료로 활용하고자 광암아리수정수센터와 공동으로 본 연구를 실시하였다.

IV. 연구내용

Jar test에 의해 결정된 응집제 주입률과 응집제 투입 전·후 흐름전위(SC, Streaming Current) 측정결과를 비교·평가하여 응집제 투입률과 수질인자의 상관관계를 평가하

였다. 상관관계 평가결과 상관성이 높은 수질인자들을 선정하고 반응속도식을 모델링하여 SC 측정값으로 응집제 주입률을 신속·정확하게 결정할 수 있는 연산식을 도출하였다. 도출된 연산식의 적합성을 검토하기 위해 연산식에 의한 응집제 예측 주입률과 jar test에 의해 결정된 응집제 실제 주입률을 비교·고찰하였다.

V. 연구결과

서울시 6개 아리수 정수센터 중 유일하게 맥동식 침전방식을 적용하고 있는 광암아리수정수센터의 응집제 주입률 결정방법에 대해 흐름전위측정(SCD, Streaming Current Detector)에 의한 신속·정확한 결정방법의 적용가능성을 검토하고, 효율성 및 경제성을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 가. 응집효율을 향상시키기 위해 분배수로를 얇게거나 되도록 짧게 만들어야 함
- 나. 혼화지에서 낙차를 이용하여 응집제를 주입할 경우 혼화효율과 응집제 비용 측면에서 훨씬 더 유리함
- 다. 응집제 주입률 결정에 관계되는 주요 수질인자는 취수원수 TOC, 착수정수 탁도, 착수정수 Al, 혼화수 흐름전위 등 4개 인자였으며 전통적 주요변수인 취수원수 alkalinity와 pH는 최적응집을 위해 착수정에서 알칼리제 및 산제(황산, CO₂ 등)의 주입으로 조정되며 흐름전위가 이를 반영하므로 연산식에서 배제하였음
- 라. 혼화수 흐름전위는 신뢰수준 95%를 적용하였을 경우 95% 하한값이 약 -39 mV, 95% 상한값이 약 -21 mV, 평균이 약 -30 mV, 정규확률도 $R^2 = 0.9647$ 로 정규확률분포를 형성함
- 마. 혼화수 흐름전위의 정규확률분포를 바탕으로 상관성 분석에서 선정된 취수원수 TOC, 착수정수 탁도(T), 착수정수 Al, 혼화수 흐름전위 등 4개 인자의 측정결과를 적용하여 회귀분석을 실시한 결과, $P(\text{응집제 주입률}) = 10.6814 \times \text{TOC}^{0.5874} \times T^{0.1077} \times \text{SC}^{-0.1310}$ 와 같이 응집제 주입률과 흐름전위가 직접관계되는 연산식을 도출하였음

- 바. 연산식에 의한 예측 주입률과 jar test에 의한 실제 주입률을 비교·검토한 결과 상당부분 유사한 경향으로 나타나 현재 정수센터에서 적용하고 있는 jar test에 의한 응집제 주입률 결정방법이 적합함을 확인함
- 사. 본 연구를 통하여 대규모 시설변경 없이 흐름전위 측정만으로도 응집제 주입률을 신속하고 정확하게 결정할 수 있음을 확인할 수 있었음

Ⅵ. 활용방안

향후 흐름전위 측정에 의한 응집제 자동주입 시스템 구축 및 정수장 자동화 관련 기초 연구 자료로 활용



색도 측정방법 비교 및 적합성 평가

연구 총괄
연구 책임자
책임 연구원
공동 연구원

수질 연구부장
수질 분석과장
공업 연구사
공업 연구사
공업 연구사
공업 연구사
공업 연구사
환경주사보
화공주사보

한 선 희
박 현
정 관 조
송 만 식
정 의 선
임 희 아
이 경 우
이 길 화
천 대 기

요 약 문

I. 제 목

색도 측정방법 비교 및 적합성 평가

「Comparison of color measurement methods and feasibility tests」

II. 연구기간

2010년 1월 ~ 2010년 12월

III. 연구목적

본 연구에서는 우리나라와 일본에서 사용하고 있는 색도 단위인 도(°)와 국제적으로 사용하고 있는 색도 단위인 CU, TCU, H와의 상관관계를 비교하여 합리적인 색도 단위를 도출하고, 지표수와 정수, 하수 등 다양한 시료를 대상으로 색도 측정방법에 따른 적합한 색도 측정방법을 제시하며 수질인자와의 상관성을 검토하고자 본 연구를 실시하였다.

IV. 연구내용

색상성분을 포함하지 않은 표준용액과 색도 유발물질이 주로 천연유기물질, 즉 휴믹

물질인 6개 취수원수 그리고 색의 주요 유발물질이 유·무기물질인 한강·팔당 지류천, 중랑 및 구리물재생센터의 유입 및 방류수를 채취하여 먹는물수질공정시험기준의 색도 측정방법인 비색법과 수질오염공정시험기준의 색도 측정방법인 분광학적 색도 측정방법 즉, 단일 및 다중파장-색도측정방법을 비교 검토하여 원수, 정수, 하수 등의 다양한 시료에 가장 적합한 색도측정방법을 제시하였다. 또한 시료의 색도 변화에 영향을 미치는 수질인자로 pH, TOC, TDS, 전기전도도와와의 상관성을 고찰하였으며, 우리나라와 일본에서 사용 중인 색도 단위인 도(°)와 국제적으로 사용하고 있는 색도 단위인 CU, TCU, H와의 상관관계를 비교, 검토하여 합리적인 색도 단위를 도출하였다.

V. 연구결과

우리나라와 일본에서만 사용하고 있는 색도 단위인 도(°)와 국제적으로 사용하고 있는 색도 단위인 CU, TCU, H와의 상관성을 검토하고, 지표수와 정수, 하수 등 다양한 시료를 대상으로 색도 측정방법에 따른 적합한 색도 측정방법 도출 및 수질인자와의 상관성을 고찰한 결과,

1. 색도 단위인 1 도(°) = 1 mgPt/L = 1 TCU [CU] = 1 H로 동일한 농도로 표시되므로 국제단위인 TCU나 H로 변경, 사용이 가능한 것으로 나타남
2. 먹는물수질공정시험기준의 색도 측정방법인 비색법의 경우, 시험자의 육안에 의한 단순비교 방법으로 측정결과의 객관성 및 신뢰성이 부족한 것으로 나타남
3. 비색법에 의한 색도 측정에 있어 5 TCU 이하의 색은 구별하기 불가능 하는 것으로 나타났으며 우리나라 색도 수질기준을 고려할 때, 향후 1 도(°)까지 측정이 가능한 분광학적 색도측정방법으로 변경이 필요한 것으로 나타남
4. 수질오염공정시험기준의 색도 측정방법인 다중파장-색도측정방법의 경우, 한강원수, 정수, 하수, 지류천에 관계없이 적합한 측정결과를 나타냈으나 1개의 시료 측정에 있어 X, Y, Z축에 대해 각각 30회, 90회 파장을 측정해야 하며 측정 후에도 복잡한 계산을 실행해야 하므로 실제 시료의 색도 측정에 적용하기에는 어려움이 있음

5. 그러나 다중과장 프로그램이 내장되어 있는 색도계의 경우, 3~4초 이내에 색도 측정이 가능하며 원수, 정수, 하수 등 다양한 시료에 적용이 가능한 가장 적합한 색도측정방법인 것으로 나타남
6. 단일과장-색도측정방법의 경우, 한강 원수와 같이 색상성분이 천연유기물질(휴믹 물질)에 기인한 경우, 적절한 분석결과를 나타냈으나 하수나 한강 지류천과 같이 색도 성분이 무기·유기화합물질에 기인한 경우, 색도측정이 불가능한 것으로 나타남
7. 색도와 수질인자와의 상관성을 조사결과, 시료의 pH를 5~10 조정한 후 색도 측정을 실시해야 적합한 측정결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났으며, 시료 중의 TOC와 TDS는 색도와 유의한 상관성을 갖는 것으로 나타남

VI. 활용방안

서울시 원수, 정수, 하수 등의 색도 측정 및 관련 연구에 적극 활용하며, 환경부에 색도 단위 및 색도 측정방법의 변경 또는 추가를 건의하고자 함



정수지 내 정체지역 개선방안

연구 총괄	기술개발부장	최영준
연구책임자	수처리과장	한정무
책임연구원	지방공업연구소	김태균
공동연구원	지방보건연구소	최연규
	지방공업연구소	조완선
	지방환경연구소	서민정
	지방시설6급	이시우
	지방시설7급	김정호

요 약 문

I. 제 목

정수지 내 정체지역 개선방안(정수지 소독능 인증을 위한 CFD 표준화)

II. 연구대상

암사아리수정수센터(2정수장) 정수지

III. 연구기간

2010. 1. ~ 2010. 12.

IV. 연구내용

미국의 지표수처리규칙(Surface Water Treatment Rule, 1989)에 따르면 정수처리공정에서 바이러스는 99.99%(4log), 지아디아 포낭은 99.9%(3log)의 불활성화비를 요구하고 있다. 불활성정도를 판단하는 지표로 CT값을 이용하는 데 이 때 C는 잔류소독제의 농도(mg/L)이고, T는 추적자의 10%가 유출되는 시간(t_{10} , min)을 의미한다. 정수지 내 소독능을 증가시키기 위해 지내 도류벽을 설치하고 있으나 정수지 구조가 사각형이라 각 모서리 및 도류벽과 측면벽이 만나는 부분에서 정체지역이 발생하고 있다. 이러한

정체지역 즉 고인물이 있는 곳에는 흐름이 진행되지 않아 소독능이 저하되며, 소독능 저하는 수질에 영향을 미치게 된다. 지금까지 연구결과는 정체지역의 문제점만을 분석하고 해결방안을 제시하지 못하고 있어, 본 연구를 통해 정수지 내 정체지역 개선방안을 제시하려고 한다. 구체적인 연구절차는 다음과 같다. 연구방법에서는 추적자 실험 방법에 대해 설명한 후 정수지에 적용된 CFD의 해석범위, 난류모델 및 해석방법을 제시하였다. 연구결과 및 고찰에서는 암사아리수정수센터(2정수장) 정수지를 대상으로 불소농도, 체류시간, 환산계수, 소독능에 대하여 추적자 실험과 CFD의 상관관계를 분석하였으며, CFD의 신뢰성을 바탕으로 정수지 내 유속분포를 해석하였다. 또한, 정수지 내 정체영역(m^3)과 정체지역의 위치를 분석한 후 『ㄱ, ㄴ』 또는 『사선』 모양의 내부도류벽을 적용하여 길이에 따른 정체지역 개선비율을 평가하였으며, 이에 대한 효과적인 내부도류벽 구조와 길이를 제안하였다.

V. 결 론

추적자 실험과 CFD의 상관성을 분석한 결과 추적자 실험의 체류시간은 87분, CFD의 체류시간은 89분으로 나타났으며, 체류시간을 이용하여 환산계수를 평가한 결과 추적자 실험의 환산계수는 0.77, CFD의 환산계수는 0.79로 나타나 CFD의 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 또한, 추적자 실험과 CFD의 소독능을 평가한 결과에서도 바이러스 불활성화비는 각각 44.1, 45.3으로 나타났으며, 지아디아 포낭의 불활성화비는 각각 6.5, 6.6으로 나타나 모사된 소독능과 실제 소독능 사이에는 차이가 없는 것으로 밝혀졌다.

CFD를 이용하여 정수지 내 정체지역을 분석한 결과, 기존 정수지 구조에서의 정체지역은 $130m^3$ 으로 산출되었으며, 정체지역이 발생된 영역에 『ㄱ, ㄴ』 모양의 내부도류벽(가로×세로) 길이를 $0.25m \times 0.25m \sim 2.0m \times 2.0m$ 적용한 결과 기존대비 정체지역 개선비율은 53 ~ 67%로 향상되었으며, 내부도류벽 길이를 $1.0m \times 1.0m$ 적용하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 또한, 정체지역이 발생된 영역에 사선의 길이를 0.4 ~ 2.8m까지 적용한 결과 정체지역 개선비율은 35 ~ 77%로 나타나, 효율 대비 비용을 고려하면 사선의 길이는 1.1m를 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 이상에서 설명한 바와 같

이 정체지역에 『ㄱ,ㄴ』 또는 『사선』 모양의 내부도류벽 설치로 정체되어 있는 물을 흐르게 하여 정체영역을 줄일 수 있기 때문에 정체지역 감소로 소독효과는 증대되어 수질을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Ⅵ. 활용방안

정수지 내 정체지역 개선방안은, 정수지 뿐만 아니라 배수지에 재건설을 하지 않고 내부도류벽 설치만으로 시공이 가능하며 다양한 재질(PE판넬, 콘크리트, STS 등)의 도류벽을 활용할 수 있다. 본 연구에서 개발된 정체지역 개선방법은 현재 공무원 직무발령으로 승계되었으며, 향후 서울시 뿐만 아니라 타 지방자치단체 정수센터에도 적용가능하기 때문에 활용도가 높을 것으로 기대된다.



입상활성탄 처리수 염소소독 연구

연구 총괄	기술개발부장	최영준
연구 책임자	고도정수처리과장	이도우
책임연구원	지방환경연구소	백영애
공동연구원	지방공업연구소	조우현
	수도조무7급	홍병익
	지방공업주사	박명호
	지방시설주사보	장병철
	지방보건연구소	이은숙
	지방공업연구소	장현성
	지방공업연구소	안치화

요 약 문

I. 연구제목

입상활성탄 처리수 염소소독 연구

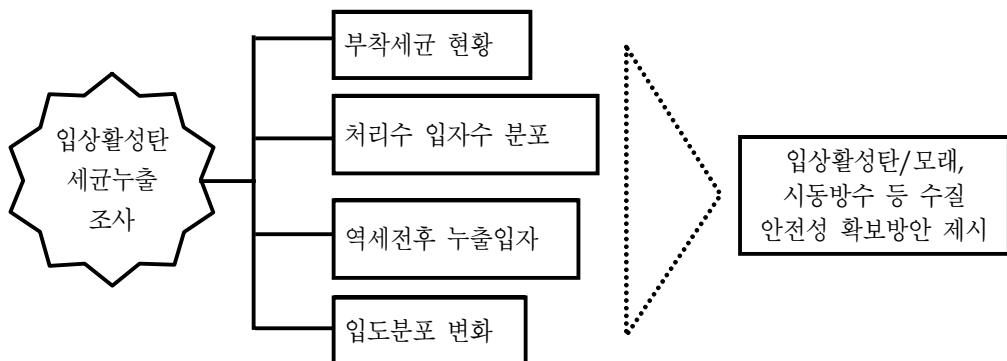
II. 연구기간

2010. 6 ~ 2010. 12

III. 연구목적

서울시 고도정수처리 도입에 따른 입상활성탄 처리수에서의 누출세균에 대한 염소소독효과를 평가하고 처리수 수질의 안전성 확보 방안을 마련하고자 함

IV. 연구내용



V. 연구결과

2014년까지 서울시 6개 아리수 정수센터의 입상활성탄 공정 도입으로 적절한 운영방안이 필요한 실정이다. 따라서 입상활성탄 공정 처리수 수질의 안전성 확보방안을 마련하고자 구의 고도실증플랜트와 영등포 아리수 정수센터의 2정수장 입상활성탄지를 대상으로 시험하였으며 연구결과는 다음과 같다.

1. TOC 제거에 있어서 부착세균의 역할은 매우 중요하다고 할 수 있다. 구의 고도실증플랜트에서 운영된 입상활성탄과 영등포 아리수 정수센터의 입상활성탄 표면에 세균들이 $10^5 \sim 10^7$ CFU/g GAC 정도 서식하고 있으며 이러한 결과는 곧 입상활성탄 처리수에서의 세균누출 가능성을 나타내고 있다.
2. 영등포 아리수 정수센터의 2정수장 입상활성탄 1지(250시간)를 역세하여 역세직후 염소소독효과를 평가한 결과 온도에 관계없이 모든 경우에 세균이 검출되었다. 그러나 실제로 입상활성탄지 10지가 통합되어 나가는 통합수의 염소소독후 세균수는 일반·저온세균 모두에서 zero이므로 위생적인 면에서는 크게 문제되지 않고 있다. 다만 병원성 세균 누출시는 염소소독에 저항성이 강하므로 주기적으로 처리수에 대한 세균동정이 필요하다. 또한 입상활성탄 처리수에서 입자수를 실시간으로 측정하여야 하며 송수에서 잔류염소를 적절히 유지하여 배급수관 계통에서의 세균증식을 사전에 방지하여야 한다.
3. 역세직후 입자누출은 $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 의 범위가 거의 90% 이상을 차지하고 있었으며, 이러한 입자들은 과도한 공기 역세적이거나 잔류오존에 의해 산화된 입상활성탄 분탄, 탈리세균 균집, 미세플러크 등이 원인일 수 있다. 또한 염소 소독시 소독제 사용량 증가, 염소 미주입시 위생문제 발생, 분탄유출시 급수배관내 2차 오염을 유발할 수 있어 이에 대한 제거대책 마련이 필요하다.
4. 영등포 아리수 정수센터 2정수장의 입상활성탄 1호지와 8호지를 대상으로 역세직후 각 지별 및 통합수의 탁도, 입자수를 측정한 결과 탁도 0.06NTU, 총입자수 50개/mL이하로 안정되는데 약 1시간 이상이 소요되었으며, 통합수 수질에도 영향을 주는

것으로 나타났다. 따라서, 최종 처리수로서 입상활성탄 공정에 시동방수 시설을 도입하여 통합수 수질을 안정적으로 유지할 수 있도록 하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

5. 입상활성탄 컬럼 하부에 모래를 30cm 포설하여 모래포설 전·후 처리수에 대한 세균수 저감효과를 평가한 결과 평상시 운영결과는 활성탄 단독인 경우보다는 입상활성탄/모래로 처리했을 때, 일반세균 약 93%, 저온일반세균 약 46%를 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 역세직후 가동개시에 따른 초기누출 입자수가 최고일 때 입상활성탄/모래부분의 일반세균 저감효과는 약 95%인데 비해 저온일반세균은 약 17%에 불과하였다.

따라서 초기 가동시 누출입자 제어를 위해 탁도보다는 총입자수가 100 ~ 200개/mL 이하(10지 통합시 약 20개/mL 이하 유지될 정도의 수준)가 될 때까지 시동방수하여 그 배출수를 이중여재로 보내 처리하는 방안을 검토할 필요가 있다.

6. 8개월간 운영된 영등포 아리수 정수센터의 2정수장 입상활성탄지 층별 입도분포를 평가한 결과 입상활성탄 층 하부로 갈수록 유효경이 커져 전체적으로 층분리가 잘 되어 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 상부의 입상활성탄 입자크기가 0.32~0.95mm이며 유효경이 0.45mm로 매우 작아져 재생 결정시에는 상층부의 일부 입상활성탄은 손실분에 해당될 수 있다.

7. 향후 6개 아리수 정수센터의 입상활성탄 운영관리와 재생 또는 교체 결정을 위해서는 수질인자로서 TOC, 맛·냄새, 탁도, 입자, 세균 뿐만 아니라, 물성인자로서 입도분포, 비표면적, 세공용적, 회분 등을 분석하여 기초자료로 활용해야할 것이다.

VI. 활용방안

서울시 아리수 정수센터에 도입되고 있는 입상활성탄 처리수의 누출세균에 대한 염소소독효과를 평가하고 누출입자 저감을 위한 입상활성탄/모래방법을 제시하여 건강하고 맛있는 서울의 수도물 생산에 기여할 수 있는 것으로 판단된다.

10



HiSeoul
SOUL OF ASIA

가압장과 배수지 운영에 있어서 관망해석기술 적용방안 조사

연구 총괄	기술개발부장	최영준
연구책임자	배급수과장	박인섭
책임연구원	지방보건연구소	장현정
공동연구원	지방공업연구소	안재찬
	지방공업주사	안규문

요 약 문

I. 제 목

가압장과 배수지 운영에 있어서 관망해석기술 적용방안 조사

II. 연구기간

2009. 1 ~ 2010. 10 (22개월)

III. 연구의 목적

컴퓨터 관망해석 기법을 활용하여 혼합방식으로 운전하고 있는 상계 및 우이 가압장과 배수지 운영방식에 따른 배급수계통의 수리학적 특성을 진단하고, 현장 여건에 맞는 개선안을 단계적으로 마련하여 배급수시스템 운영방식에 따른 전력사용량과 배수지 유출수의 체류시간, 잔류염소 농도 변화, 수압분포를 비교함으로써 배급수시스템의 최적 운영방안을 모색하고자 하였다.

IV. 연구내용

1. 가압장과 배수지 급수구역의 체류시간 분포에 따른 정체지역을 파악하고 이를 개선하기 위해 배수지 수위에 따라 운전 범위를 변경하여 비교하였다.

2. 가압장과 배수지 급수구역의 수압 분포 및 누수와 관련성을 조사하고 이를 개선하기 위해 감압밸브를 설치하고 적정 수압을 설정하였다.
3. 가압장과 배수지 급수구역의 잔류염소 농도를 파악하여 수질 모니터링 필요성 여부를 판단한 다음, 배수지 수위에 따른 운전방식 변경 등에 의한 정체지역 해소 방안을 적용할 경우 잔류염소 농도에 미치는 영향을 비교하였다.
4. 기존 펌프 운전 방식에 따른 전력 사용량과 동력비를 비교하고, 이를 개선하기 위해 인버터를 설치한 경우 에너지 비용 절감 효과를 분석하였다.

V. 연구결과

서울시에서 운영하고 있는 대형 배수지(지역 배수지 및 1차 배수지)는 대부분 정수장이나 가압장에서 배수지로 전량 공급한 다음 배수지에서 수요가로 공급하는 간접방식이다. 그러나 관말지역의 일부 고지대의 경우에는 가압장과 배수지 운영에 있어서 가압장에서 일부는 수요가로 직접 공급하고 나머지는 배수지를 경유해서 공급하는 혼합방식으로 운전하고 있다. 이럴 경우, 가압장 직송구역은 수압이 높아 누수가 많이 발생하게 되고, 배수지 공급구역에서는 배수지에서의 체류시간 증가로 잔류염소 농도가 낮아지게 되므로 유지관리에 어려움이 있다. 따라서 이러한 가압장과 배수지 공급지역에 대한 개선방안을 마련하기 위하여, 혼합방식으로 운전하고 있는 상계 및 우이 가압장과 배수지 공급계통을 대상으로 관망해석 기법을 적용하여 운영상의 문제점을 파악하고, 이를 해결하기 위해 3가지 단계별 개선안을 마련하였다. 먼저 상계 배수지 급수구역의 긴 체류시간을 해소하기 위해 ①안은 배수지 수위에 따른 전동밸브의 자동개폐 범위를 기존 방식보다 좁게 낮추어 운전하는 방식이고, ②안은 ①안과 같이 배수지 수위를 밸브와 연동하여 자동으로 조작하는 기존의 방식을 배제하고, 배수지를 사용하지 않고 직송으로 전환한 다음, 배수지 인근 고지대는 증압펌프를 설치하여 증압하여 공급하는 방식이며, ③안은 직송구역의 높은 수압을 낮추고 전력비를 절감하기 위해 ②안과 같이 배수지를 사용하지 않고 직송으로 전환한 다음 증압하여 공급하되, ②안과 다른 점은 가압장에서 두 대의 펌프를 병렬로 연결하여 공급하는 기존방식을 배제

하고, 가압장 공급 구역을 두개로 분리하여 150마력과 75마력 펌프로 각각 공급하는 방식이다. 이때 두 펌프 모두 인버터를 설치하여 토출 수압을 일정하게 조절한다.

개선안에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 배수지 수위의 운전범위 폭을 좁고 낮게 변경한 ①안의 평균 체류시간은 8시간으로 기존 11시간에 비해 3시간 감소하였다. 반면 잔류염소 평균 농도는 0.15 mg/L로 기존 운전방식보다 0.01 mg/L 증가하였으나 큰 차이는 없었다. 배수지를 사용하지 않고 직송으로 전환한 다음, 인근 고지대를 증압하여 공급하는 ②안과 ③안의 평균 체류시간은 약 7시간으로 ①안인 8시간보다 양호하였고, 잔류염소 농도도 취약지점에서 0.11 mg/L까지 유지되어 기존 0.07 mg/L과 비교 할 때 증가하였다. 그러나 ②안의 경우 직송구역의 수압이 높게 나타났고, 증압펌프 설치로 인해 전력 사용량이 1.9% 상승하였다. 반면 ③안은 펌프로 공급하는 급수구역을 분리하고 인버터를 설치하여 토출압을 평균 2 kgf/cm² 가량 낮춤으로써 전력 사용량이 32.9% 감소하였다. 이때 전력비는 1년 기준으로 25,614,851원(70,178원/일)이 절감되었다.

다음은 우이 가압장 및 배수지 공급시스템의 운영상 문제점을 해결하기 위한 단계별 개선안으로 ①안은 감압밸브를 설치하여 누수 발생이 많은 기존 직송구역의 수압을 낮추고, 배수지 수위를 펌프와 자동으로 연동하여 운전함과 동시에 배수지 수위의 운전폭을 기존(1.7~3.2 m)보다 줄여서 낮게(1.5~2.5 m) 운전하는 방식이고, ②안은 ①과 동일 조건에서 배수지 수위의 운전범위만 기존 방식에 비해 넓게(가동 및 정지 범위, 1.2~3.5 m) 운전하는 방식이며, ③안은 ①, ②안과 같이 기존 직송구역에 감압밸브를 설치하여 운용하되, 배수지를 사용하지 않고 직송으로 전환한 다음, 배수지 인근 고지대는 감압펌프로 증압하여 공급하는 방식이다.

이상 3가지 개선안에 대한 시뮬레이션 결과, 배수지 운영수위에 따라 펌프의 가동 및 정지 범위를 좁고 낮게 유지한 ①안보다 ②안과 같이 운전범위를 넓게 운전하는 방식이 체류시간 감소 측면에서 효과적이었다. 그러나 수위 조절 방식은 잔류염소나 전력 사용량에는 큰 차이를 나타내지 않았다. 한편 배수지를 사용하지 않고 직송으로 전환한 다음, 인버터를 사용하여 공급하는 ③안은 기존 방식에 비해 전력사용량이 30.4% 감소하였다. 이때 전력비는 1년 기준으로 25,527,014원(69,937원/일)이 절감되었다. 체류시간도 5시간으로 기존 취약지점 21시간 보다 대폭 감소하였고, 잔류염소 농도는 평균

0.13 mg/L로 모든 시간대에서 0.1 mg/L 이상 안정적으로 유지하였다. 따라서 상계와 우이 가압장 및 배수지 공급계통 모두 기존의 혼합 운전방식 보다는 인버터를 사용하여 가압장에서 수용가로 직접 급수하는 방식이 전력 사용량을 절감하고, 적정 수압을 유지할 뿐만 아니라 체류시간을 단축시켜 잔류염소 농도를 적정하게 유지시켜 안전한 수돗물 공급에 효과적인 것으로 나타났다.

Ⅵ. 활용방안

본 연구결과, 관망해석기법은 상계 및 우이 가압장과 배수지 운영에 따른 배급수관망의 수리학적 특성, 수질 변화, 전력 사용량 등을 시뮬레이션하여 현재 운영상의 문제점을 개괄적으로 파악하는데 유용하였으며, 현장 여건을 고려한 운영방법 개선을 통해 배급수시스템 최적관리에 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

특히 상계 및 우이 공급계통은 현장 여건을 고려할 때, 배수지를 사용하지 않고 직송으로 전환한 다음, 기존 펌프에 인버터를 설치하여 직접 공급하는 변경방식이 에너지 절감과 배급수계통 유지관리 측면에서 효과적임을 제시하였다. 따라서 향후 해당 지역의 가압장과 배수지 운영방법 개선 시 참고자료로 활용할 수 있다.



HiSeoul
SOUL OF ASIA

11

대형 수도계량기의 유량관련 고장원인 조사분석

연구 총 괄	기술개발부장	최 영 준
연구책임자	배 급 수 과 장	박 인 섭
책임연구원	지방공업연구소	김 효 일
공동연구원	지방공업주사	안 규 문
공동연구원	지방기능8급	박 태 준

요 약 문

I. 연구제목

대형 수도계량기의 유량관련 고장원인 조사분석

II 연구기간

2009. 7 ~ 2010. 6

III 연구목적

본 연구는 문헌조사 및 현장조사를 통해 대형 수도계량기의 고장원인을 분석하여 체계적인 자료를 구축하고, 이를 통해 대형 수도계량기 고장발생을 저감시키기 위한 개선방안을 수립하는 것을 목적으로 하였다.

IV 연구내용

대형 수도계량기의 유량관련 고장 현황을 파악하기 위해 2007년부터 2010년 상반기 까지 대형 수도계량기의 유량관련 고장건수를 조사하였다. 유량관련 고장의 원인을 분석하기 위한 자료로 2007년부터 2010년 상반기 중 개최된 수도계량기 하자심사위원회에서 실시한 대형 수도계량기의 하자심사 결과를 토대로 조사 분석하였다.

유량관련 고장의 유형을 현장에서 확인하기 위해 실제로 유량관련 고장이 발생한 80mm~250mm 대형 수전 21개소에 대하여 계량기 교체 용역업체와 동행하여 지침의 정상 회전 여부, 임펠러 파손 여부, 스트레이너의 이상 여부 및 고장 전후 일일 평균 물 사용량을 비교분석 하였다.

유량관련 고장의 주요 원인 중 하나가 계량기의 측정범위를 초과하는 유량의 통수이므로 최근 3년간 유량관련 고장이 2회 이상 발생했거나, 최근에 발생한 대형 수전 11개소에 대하여 물 사용 패턴조사를 실시하였다.

또한 연구기간을 통해 기계식 계량기의 고장 빈발에 대한 대안으로 떠오르고 있는 전자기식 수도계량기의 국내외 보급현황을 조사하고, 기존 기계식 계량기의 성능과 비교분석하였다.

이상과 같은 과정을 통해 현장 조건에 적합한 대형 수도계량기 선정 및 설치방법을 검토하고, 유량관련 고장률 감소를 위한 대형 수도계량기 개선 대책을 제시하였다.

V 연구결과

- (1) 우리시의 대형 수도계량기 성능개선 노력에 의해 대형 수도계량기의 유량관련 고장발생 현황은 2007년 1,025건에서 2010년 상반기 233건으로 매년 감소 하고 있으나, 전체 고장건수 대비 비율은 76.1%~80.9%로 매년 거의 비슷한 비율로 발생하고 있어 유량관련 고장발생 건수의 저감이 시급한 문제임을 알 수 있다. 2007년부터 2010년 상반기까지 수도계량기 하자심사 결과를 종합하면 유량관련 고장으로 판명된 대형 계량기의 고장 원인별 비율은 이물질 유입 23%, 임펠러 파손 8%, 조립 및 부품 불량 7%의 순으로 나타났다.
- (2) 유량관련 고장으로 계량기를 교체하는 80mm~250mm 대형 수전 21개소에 대한 현장 조사 결과, 지침 회전에 이상이 없는 수전은 13개소(61.9%)였고, 구경축소 수전 1개소에서 과대유량으로 인한 임펠러 파손을 확인하였으며, 계량기 철거 전에는 지침이 회전하지 않았으나, 철거 후 지침이 회전한 사례도 1개소에서 확인하였다. 계량기 유입 측에 설치된 스트레이너에 대한 조사 결과, 스트레이너 여과

망과 몸체사이 틈새의 이물질 유입 가능성 및 스트레이너 일부가 막힌 사례도 발견되어 유량관련 고장의 원인이 될 수 있음을 확인하였다. 또한 철거 시 지침 값을 검침하여 일일 평균사용량을 비교한 결과 고장 확인 후 철거 시까지 일일 평균 사용량이 정상인 사례들이 확인되었는데, 이는 비정상적으로 계량기를 작동 시키는 요인(이물질에 의한 회전멈춤, 카운터 걸림 등)에 의해 일시적으로 계량기가 비정상적으로 작동하였다가 이후에는 정상적으로 작동되었기 때문인 것으로 판단된다.

- (3) 최근 3년간 유량관련 고장이 2회 이상 발생했거나, 최근에 발생한 대형 수전 11개소에 대하여 물 사용 패턴조사를 실시한 결과, 저수조+전동밸브 급수방식의 3개소에서 계량기의 최대유량을 초과하는 유량이 통수되는 것을 확인하였으며, 과대유량 통수를 고장의 원인으로 판단할 수 있다. 목욕탕 수전의 경우 저수조+볼탑 급수방식은 지속적인 물 공급으로 인해 회전 내구성이 떨어지는 계량기의 경우 고장이 발생할 수 있으며, 저수조+전동밸브 급수방식은 단시간에 대유량이 통수되는 패턴이 짧은 주기로 반복되어 고장 발생 가능성이 높다고 판단되므로 급수방식에 관계없이 내구성이 우수한 계량기 설치가 필요하다. 학교 수전의 경우, 순간 유량의 최대값이 학교별로 18.24 ~ 25.69m³/h로 나타나 큰 차이를 보이지 않았으나, 80mm 계량기의 최대유량 100m³/h보다 훨씬 작으므로 미감지울 개선을 위해 50mm 월트만 계량기로 구경 축소를 검토할 필요가 있다.
- (4) 현장 조건에 적합한 대형 수도계량기 선정 및 설치방법 검토 결과, 현재 우리시에서는 인입관 구경에 맞추어 대형 수도계량기를 설치하고 있으나, 선진국 사례와 같이 계량기 구경 선정을 위한 실무적인 기준이 필요하며, 계량기 고장발생으로 인한 교체 시에는 물 사용 패턴조사를 통해 이에 적합한 계량기 구경을 선정하여야 한다. 저수조+전동밸브 급수방식 대형 수전의 과대유량 통수문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 우리시 수도자재관리센터에서 개발한 관 삽입형 유량 제어장치를 도입하거나 일본 교토시의 사례와 같이 우리시 자체 규정을 통해 수용가에서 저수조 유입 측에 정유량 밸브를 설치하는 방안을 검토할 필요가 있다.
- (5) 유량관련 고장률 감소를 위한 대형 수도계량기 개선 대책들은 다음과 같다. 상수도시설기준에서 규정하는 바와 같이 고장발생 수전에 대해 사용량 실사(Load

Survey)가 필요하며 이를 위해 유량관련 고장이 발생한 수전에 대하여 물 사용 패턴조사를 실시하고 요금관리시스템 등에 데이터베이스화하여 향후 계량기 유지관리 및 교체 시 활용하는 시스템을 구축할 필요가 있다. 대형 수도계량기 회전부품들의 내구성을 현장 설치 전에 검증하기 위해서는 내구성 시험이 필수적이며, 우리시 수도자재관리센터에서는 그동안 시행하지 못했던 대형 계량기의 내구성 시험을 2010년 8월부터 시행하고 있으므로 향후에는 유량관련 고장 발생률을 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 관로 내 이물질은 회전불량 또는 회전멈춤 고장의 원인이 될 수 있고, 여과망과 스트레이너의 틈새 간극을 통해 이물질이 유입될 수 있으므로 납품검사 시 스트레이너 틈새간극을 실제 측정하는 등 검사를 강화하여 이물질 유입에 의한 고장발생에 대처해야 할 것으로 판단된다. 전자기식 수도계량기는 인천광역시의 연구 분석 결과, 물 사용량이 많은 수용가에서 미감지율 개선 효과가 크고 경제성 역시 상대적으로 우수하며, 일본 동경도에서도 150mm 이상에서 운영 중이므로, 우리시에서도 도입을 검토하는 것이 필요하며, 도입 검토 시 150mm 이상 구경의 물 사용량이 많은 수용가 중 유량관련 고장이 잦은 곳을 선정하는 것이 필요하다.

VI 활용방안

본 과제를 통해 대형 수전의 물 사용 패턴조사 필요성을 도출했으므로 과대유량 통수에 따른 고장의 감소와 미감지율 개선을 위해 물 사용 패턴조사를 실시하고 데이터베이스를 구축하는데 활용될 수 있다. 현장 조건에 적합한 대형 수도계량기 선정 및 설치방법 검토 결과와 유량관련 고장률 감소를 위한 대형 수도계량기 개선 대책은 대형 수도계량기 개선을 위한 기초 자료로 활용되어 고장률 감소에 기여할 수 있을 것이다.

12



Hi Seoul
SOUL OF ASIA

수도계량기 원격검침 성능개선 및 표준화 연구

연구 총괄	기술개발부장	최 영 준
연구책임자	배 급 수 과 장	박 인 섭
책임연구원	지방공업연구소	김 효 일
공동연구원	지방공업주사	안 규 문
	지방기능8급	박 태 준

요 약 문

I. 연구제목

수도계량기 원격검침 성능개선 및 표준화 연구

II 연구기간

2010. 1 ~ 2010. 12

III 연구목적

본 연구의 목적은 원격검침 기술의 표준화를 위해 상수도 원격검침 환경에 적합한 통신 프로토콜을 설계하고, 원격검침 통신 성공율 저하 요인에 대한 개선방안을 연구하는 것이다. 이를 통해 상수도 원격검침 도입에 따른 시행착오를 최소화하고, 상수도 원격검침 표준화 및 원격검침기기의 현장 설치에 활용할 수 있을 것이다.

IV 연구내용

한전 전력연구원과 통합원격검침 공동연구를 통해 전자식 수도계량기 프로토콜과 무선통신 프로토콜 중 상수도 관련 데이터 포맷을 설계하였다. 프로토콜 설계 과정은 양 기관의 프로토콜 설계안을 검토하고 기술협의회를 통해 설계안을 수정보완 하였다.

공동연구의 성과물인 프로토콜 설계안의 유효성을 검증하기 위해 수도계량기 원격검침 시뮬레이터를 활용하여 프로토콜 실증시험을 실시하였다.

상수도 검침환경에서 통신 성공률에 영향을 미치는 요인들을 정량적, 정성적으로 평가하기 위해 원격검침 통신성능시험을 실시하였다. 통신성능시험은 원격검침에서 사용 가능한 424MHz대역과 2.4GHz 대역의 검침단말기로부터 수신되는 수신신호강도(RSSI, Received Signal Strength Indication)를 측정하여 최대 통신거리 및 각 장애요인과 설치환경이 수신신호강도에 어떤 영향을 주는지를 평가하였다.

또한 원격검침 통신 성공률에 가장 악영향을 미치는 요인이 원격검침기기의 내구성임을 감안하여 최근 개발 된 원격검침기기에 대해 소모전력 측정시험 및 방수성능 시험을 시행하고 내구성 검증에 정확성을 높이고자 각 시험방법을 수정보완하였다.

V 연구결과

- (1) 전자식 수도계량기 프로토콜은 OSI 7계층 모델에 따라 물리 계층, 데이터 링크 계층, 응용 계층에 대하여 설계하였으며, 검침정보 요청 시와 회신 시 크기는 각각 5 Bytes와 21 Bytes로 하였다. 검침값 뿐 아니라 수돗물 사용 및 계량기 상태와 관련한 각종 정보를 담기 위해 응용 계층에서 1 Byte의 크기로 계량기 상태 정보 필드(Status Field)를 정의하였으며 상태정보 필드의 구성으로 각각 1 bit의 최대유량(Q₄) 초과, 역류, 옥내 누수, 통신 에러, 배터리 경고, 동파 경고를 할당하고 경고발생 기준을 정의하였다.
- (2) 무선통신 프로토콜의 설계와 관련하여 통신망 구성, 통신시간 결정 및 검침단말기를 식별하는 ID 필드의 세부적인 코드 구성을 설계하였다. 수도계량기 원격검침 정보를 전송하기 위해 최초 검침단말기 현장 설치 시 서버 등록을 위한 기기 등록 프레임, 12시간 주기의 검침정보 전송을 위한 검침정보 전송 프레임, 동파 등 긴급 상황 발생 시 서버로 전송하는 기기 이상발생 전송 프레임을 설계하고 세부적인 코드 구성을 정의하였다.
- (3) 프로토콜 설계안의 유효성을 검증하기 위해 수도계량기 원격검침 시뮬레이터에

프로토콜을 적용하여 프로토콜 실증시험을 실시한 결과, 검침단말기의 최초 등록 관련 정보가 서버까지 이상 없이 전송되는 것을 확인하였고, 계량기 프로토콜과 무선통신 프로토콜의 데이터 연계도 이상 없음을 확인하였으며, 운영 기간동안 검침값 및 통신에도 이상이 없음을 확인하였으므로, 본 프로토콜을 현장에 적용하여도 이상이 없을 것이라 판단된다.

- (4) 424MHz 대역과 2.4GHz 대역의 검침단말기에 대해 원격검침 통신성능시험을 시행한 결과, 가시거리(LOS)상에서 424MHz 대역과 2.4GHz 대역의 수신강도 차이는 없었으며 800M 거리에서도 통신이 가능함을 확인하였다. 플라스틱재질의 수도계량기 보호통 덮개의 수신강도가 가장 양호하였고, 철판내장 플라스틱 재질과 주철 재질의 수신강도는 비슷하게 나타났으며, 20M 이격거리에서 세 종류의 덮개 모두 -80dBm 이내의 수치를 보이고 있어 통신거리가 상대적으로 짧은 통합원격검침 시에는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다. 장애물의 경우, 담장이나 지하실과 같은 건축물 조건에서 20 dBm 전후의 감쇄효과가 있어 가장 큰 장애 요인으로 나타났다. 장애물 환경에서는 회절 특성이 상대적으로 우수한 424MHz 대역의 수신강도가 큰 것으로 나타났다. 차량 주차의 경우는 감쇄가 약 3~4 dBm으로 크지 않고, 변대주의 경우는 거의 영향이 없었으나, 장애물에 대해서는 다양한 조건에서 보다 정교한 시험이 필요하다고 판단된다. 보호통 내 검침단말기 설치 위치에 따른 수신강도 측정결과를 덮개 천공($\phi 12\text{mm}$)후 측벽에 부착 설치하는 방법, 측벽에 부착 설치하는 방법, 보호통 바닥에 설치하는 방법 순으로 수신강도가 큰 것으로 나타났다.
- (5) 통신성능시험을 통해 상수도 원격검침의 통신 환경이 열악하고 지속적으로 변화함을 확인하였으며 무선통신 프로토콜의 자동 경로 탐색 기능(Automatic Path Scan Process)은 주기적으로 통신 환경의 변화에 유연하게 대응할 수 있도록 설계되었으므로 상수도 검침환경에 최적의 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (6) 최근 개발된 전자식 수도계량기 3개사 제품과 검침단말기 2개사 제품에 대하여 소모전력 측정시험 및 방수성능 시험을 시행한 결과, 소모전력 측정시험에서는 5개사 중 2개사가 기준을 만족하지 못하였고, 방수성능 시험에서도 5개사 중 2개사가 기준을 만족하지 못하였으나 원인 분석 결과 개선 방안을 제시할 수 있었다.

- (7) 소모전력 측정시험에서 디지털 멀티미터의 샘플링 주기는 1/100초 이하로 하고 측정 시간은 5초 이상으로 하는 것이 적절한 것으로 판단되며, 방수성능 시험에는 최종 단계에서 수도계량기의 지시부, 검침단말기의 외부 케이스, 수도계량기와 검침단말기를 연결하는 커넥터 또는 이에 준하는 연결부에 대해 분해 검사를 추가하여 침수 여부를 확인하는 것이 필요하다. 따라서, 이와 같은 절차를 시험 방법에 추가하여 향후 원격검침기기 내구성 검증에 적용하고자 한다.

VI 활용방안

본 과제를 통해 설계한 전자식 수도계량기 프로토콜과 무선통신 프로토콜은 향후 수도계량기 원격검침 시범사업에 적용할 수 있을 것이다. 또한 현재까지 표준화되지 않은 원격검침 프로토콜의 표준화에도 본 연구의 프로토콜 설계 결과를 기본안으로 적용할 수 있어 원격검침의 국내 보급 시에도 활용할 수 있다. 원격검침 통신성능시험을 통해 상수도 검침환경에 대한 정량적, 정성적인 평가 결과를 얻었으므로 원격검침 통신망 설계 시 활용이 가능하고, 현장 설치 시 설치방법을 결정하는 데도 참고자료가 될 수 있을 것이다. 본 연구를 통해 수정 보완된 원격검침기기 소모전력 측정시험 및 방수성능 시험은 원격검침기기 현장 설치 전 내구성 검증의 유용한 도구가 되어 초기 도입과정의 시행착오를 줄이는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

13



Hi Seoul
SOUL OF ASIA

SWN 수질데이터를 활용한 수돗물 수질개선 연구

연구 총 괄	기술개발부장	최 영 준
연구책임자	수 운 용 과 장	이 종 규
책임연구원	지방보건연구사	신 풍 식
공동연구원	지방환경주사	한 상 각
	계 약 라 급	류 동 경

요 약 문

I. 제 목

SWN 수질데이터를 활용한 수돗물 수질개선 연구

II. 연구기간

2008. 1. ~ 2010. 12.

III. 연구목적

서울시의 수돗물 수질자동감시시스템인 서울워터나우(Seoul-Water Now)의 수질자료를 활용한 수질개선 연구목적은 아래와 같다.

- 정수장 송수 잔류염소 목표농도 산정을 통한 과학적인 잔류염소 관리 및 최적화
- 수질자동감시시스템의 데이터 필터링을 통한 수질 데이터의 신뢰성 제고
- 휘발성 유기물질 자동감시시스템 구축 및 운영자료 분석 등을 통한 정수와 배급 수계통의 수질관리에 활용

IV. 연구내용

1. SWN 소개

2. 정수장 송수 잔류염소 목표농도 산정에 관한 연구
3. 수질자동감시시스템의 데이터 필터링 방안
4. 휘발성 유기물질 자동감시시스템 구축 및 운영자료 분석

V 연구결과

서울시의 수돗물 수질자동감시시스템인 서울워터나우(Seoul-Water Now)의 축적된 운영 자료를 조사 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 서울워터나우시스템은 서울 시민이 이용하는 수돗물을 원수에서 수도꼭지까지 24시간 자동 감시함으로써 수질사고를 사전에 예방하고, 시민 고객에게 측정된 수질자료를 공개하는 시스템으로, 2010년 현재 서울시내 154개 지점(원수 6, 정수 6, 배수지 69, 가압장 11, 수도꼭지 62)을 감시하고 있다.
2. 정수장의 송수 잔류염소 목표농도 산정은 배급수 계통에서 바이러스 및 원생동물 등의 미생물에 대한 안정성을 확보할 수 있는 수준에서 산정되어야 하는데, 강북 아리수정수센터의 2008년도 자료를 이용해 송수 잔류염소 목표농도를 산정한 결과, 동절기의 잔류염소 목표농도를 0.11~0.18mg/L를 더 낮출 수 있는 것으로 나타났다.
3. 수질자동감시시스템의 수질 데이터에 대한 신뢰성을 제고하기 위해서 감시시스템은 데이터 필터링 없이 Row 데이터를 직접 사용하면서 적절한 지속시간(5분, 10분)을 설정하여 운영하고, 공개시스템은 실제 데이터와 가장 근접한 Robust filter를 사용하는 것이 적합 하였다.
4. 휘발성 유기물질 자동측정기의 성능평가(정밀도, 편의, 직선성, 상대평가 등) 결과, 실험실 장비와 성능이 동등하므로 배급수 계통에 설치하여 사용하는데 문제가 없

으며, 트리할로메탄은 먹는물 수질기준(0.1mg/L 이하)에 적합하였고 디클로로메탄 등의 휘발성 유기물질(산업용 화학물질)은 불검출 수준으로 나타났다.

VI. 활용방안

서울워터나우(Seoul-Water Now)의 수질자료를 이용한 연구결과는 수질 예측 및 효과적인 수질 관리에 활용할 수 있을 것이다.

- 정수장의 송수 잔류염소 목표농도 산정방안 연구결과는 사업소 등의 담당자에게 전파하여 과학적인 송수 잔류염소 관리에 활용
- 휘발성 유기물질의 변화 및 특성 등을 분석하여 소독부산물에 대한 안전성을 판단하는 자료로 활용