배수시스템에서의 잔류염소농도 저감화대책의 검토

에나츠 테루유키 _ 일본 요코하마시 수도국 인재개발과, 기술연수계장
와타베 마사히토 _ 일본 요코하마시 수도국, 서부배수관리소장

조사의 목적과 순서

이 연구는 안전을 유지하면서 잔류염소농도를 줄여 맛있는 물을 공급하기 위해 배수시스템의 잔류염소농도 저감화대책을 검토한 것이다. 연구는 2001년부터 2003년까지 3년에 걸쳐 일본수도협회와 요코하마시 수도국의 공동연구로 실시되었으며, '수도시스템에서의 이상한 냄새 및 맛 등의 저감화대책에 관한 공동연구 추진에 관한 검토위원회' (위원장: 국립보건의료과학원 쿠니카네 쇼이치수도공학부장)를 설치하여 검토했다.

1. 목적

이 연구는 배수시스템에서 제어 가능한 잔류염소 목표치에 대한 검토를 목적으로 한다. '제어 가능한 잔류염소 목표치' 란,
① 염소소비억제대책을 행해야 하는 수도관의 파악
② 소비억제대책 후의 잔류염소농도 파악으로
이에 기초하여 잔류염소농도 저감화대책을 마련하여 적절한 잔류염소 목표치를 검토하는 일이다.

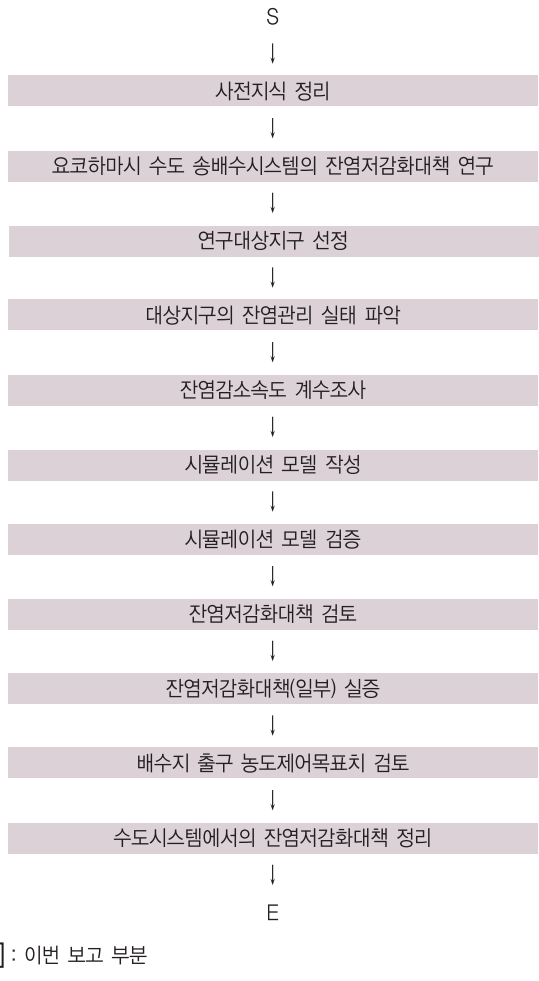
2. 조사 순서

우선, 수도시스템 전반에 걸친 석회 냄새의 원인과 대책을 정리했다. 다음으로 요코하마시의 두 군데 배수블록(노게야마 배수지저구, 타카츠카 배수지저구)을 모델로 배수관망의 시뮬레이션과 실제 측정조사를 하고, 구체적인 잔류염소농도 저감화대책을 검토했다. 이 보고문에서는 타카츠카 배수지저구에서의 연구에 대해 소개한다.

연구대상지구의 현황

타카츠카 배수지저구는 바뉴강을 수원으로 하는 코스즈메정수장에서 정수처리를 한 후에, 정수장 외 배수지인 타카츠카 배수지(배수키용량 28,000m³)에 송수하여 염소를 보급하고, 배수지 유출 시의 잔류염소농도를 조정하여 자연 흐름으로 이즈미구 · 토츠카구의 교외 주택구역에 배수하고 있다. 2002년의 배수 가구수는 47,305호이고 하루 최대급배수량은 40,912m³/d이다.

그림 1 조사 순서



잔류염소농도 시뮬레이션 방법

1. 잔류염소농도 감소속도계수의 설정

잔류염소농도 시뮬레이션은 통상의 수리해석에 기초하여 잔류염소농도를 해석한다. 수돗물 속의 잔류염소농도 감소 경향은 다음 일차반응에 가까운 것으로 알려져 있다.

$$Ct = Co \cdot \exp(-K \times t) \cdots ①$$

Co : 잔류염소의 초기농도(mg/ℓ)

Ct : t시간 경과 후의 잔류염소농도(mg/ℓ)

K : 잔류염소농도 감소속도계수(hr−1)

t : 경과시간(hr)

잔류염소농도 해석으로는 관망(수리) 계산의 결과를 이용해서 잔류시간과 관계식 ①에서 관망 내의 잔류염소농도를 구한다. 잔류염소농도 감소속도계수(K 수치)에 대해서는 단순히 정수와 염소의 반응에 의해 염소농도가 저하되는 것(수질유래, Kw 수치)과 관로 내면 등의 접촉에 의해 염소농도가 저하되는 것(관유래, Kd 수치)으로 나누어 생각한다.

Kw 수치는 실험실 레벨의 실측치('4. 잔염감소속도계수조사(수질유래)' 참조)를, Kd 수치는 고토에 의한 실험식 ②, ③을 사용한다.

$$\text{모르타르라인이관} : Kd = \exp(-5.4408 \times D + 0.0706T - 5.4245) \cdots ②$$

$$\text{무라이닝관} : Kd' = \exp(-5.4408 \times D + 0.0706T - 2.3574) \cdots ③$$

Kd : 잔류염소농도 감소속도계수(관유래, 모르타르라이닝관) (hr−1)

Kd' : 잔류염소농도 감소속도계수(관유래, 무라이닝관) (hr−1)

D : 관구경(m)

T : 수온(℃)

잔류염소농도는 관 직경이 작을 경우에는 관 내면과의 접촉률이 커진다는 이유로, 경연관의 경우에는 관 내면에 생긴 녹 때문에 감소하게 된다. 이 연구에서는 소구경관(ϕ 300㎜ 이하)에서 관유래의 Kd가 Kw 수치보다 커질 경우는 ②식 또는 ③식(경연관의 경우)에 의한 Kd 수치를 사용한다. 대구경관(ϕ 400㎜ 이상) 등 수질유래의 영향 요인이 클 경우에는 Kw 수치를 적용한다.

2. 잔류염소농도 해석의 계산 과정

해석 방법으로 관로 내의 수괴 중 하나를 주목하여 그것의 이동에 따른 수질 변화를 조사하면서, 동시에 관망모델과의 접점에서 분기 · 합류에 의해 수질도 혼합 · 분배되는 것으로 해석하는 방법을 택한다. 또한 잔류염소농도 해석에는 정적해석(시간적으로 물의 흐름이 변하지 않을 경우의 해석)과 시간경과별 해석이 있는데, 이 연구에서는 시간경과별 해석에 따라 잔염농도를 추정한다.

시간경과별 해석은 배수량이나 배수거점에서의 출구농도의 시간적 변동을 경계조건으로 한 다음 배수관망 내의 잔류염소농도의 시간적인 변화까지 해석하는 방법이다. 해석방법으로서는 접점과 시간이라는 두 개의 파라미터 중 하나를 축으로 해석한다.

요코하마시는 기본적으로 배수블록마다 배수지가 한 군데에서 배수하고 있으며, 수량 변화가 배수블록에서 일률적으로 발생한다(시간배수량의 변화에 따른다)고 가정했을 때, 해석대상시간 내에서 흐름의 방향이 변하지 않는다는 조건하에서는 잔류염소농도의 해석을 접점순서로 해석할 수 있기 때문에 〈그림 1〉과 같이 접점순서로 해석한다.

잔류염소감소속도 계수조사(수질유래)

1. 조사 조건

(1) 조사 조건

실내실험이며, 다음 조건으로 잔류염소농도 감소속도계수 Kw수치를 측정한다.

① 채수 후, 1시간 이내에 온도조절을 완료하고, Kw수치 조사를 개시한다.

② 수온은 10℃, 20℃, 30℃의 3조건으로 한다. 채수 시 수온이 설정온도에 가까울 경우에는 그 수온으로 한다.

③ 온도 조절은 아이스박스로 운반한 것을 플라스틱병에 넣고, 약 50℃의 흐르는 물속에 넣고 온도 관찰용 플라스틱병에 온도계를 꽂아서 실시한다. 그 다음, 각각 설정온도가 된 후에 플라스틱 용기에 보존한다.

④ 잔류염소농도의 측정은 0시간, 1시간, 2시간, 4시간, 7시간, 24시간, 48시간으로 한다.

⑤ 잔류염소농도의 측정은 DPD 발색에 의한 흡광광도법을 이용한다.

⑥ 측정결과가 제각각으로 편차가 심한 것을 보정하기 위해 1개의 샘플을 측정하여 평균치를 택한다.

(2) 조사 시기 · 정수 수질

조사는 2월(2002년도 조사), 6월, 10월(2003년도 조사)의 3회 배수지 유출수를 채수하여 실시했다. 또한 당초에는 8월에 측정할 예정이었으나 상정하고 있던 수온(25℃ 이상)까지 올라가는 날이 적어서 실시할 수 없었다. 그리고 측정일의 정수수질을 〈표 1〉에 수록했다.

2. 조사 결과의 정리

타카츠카 배수지를 나온 배수본관(φ400mm 이상)에서의 잔류시간은 대개 10시간 정도이므로 경과시간을 7시간으로 한 경우의 1차 반응식을 작성했다(〈그림 3〉 참조).

3회에 걸친 측정결과를 통해서 6월 측정결과가 2월과 10월의 측정결과보다 잔류염소농도의 감소 경향이 큰(Kw 수치가 크다) 것을 알 수 있다. 조사일의 정수 수질은 배수지의 잔류염소농도와는 차이가 있으나, 그 밖의 수질 항목에는 큰 차이가 없다(〈표 1〉 참조).

3회에 걸친 조사 결과로부터 각 수온조건의 Kw 수치와 수온 T와의 관계식 ④, ⑤, ⑥식을 작성했다(〈그림 4〉 참조). Kw 수치는 잔류염소지도(Map) 조사나 시뮬레이션 결과를 바탕으로 ④식 또는 ⑤식을 채용한다.

그림 2　시간경과별 해석의 계산 과정

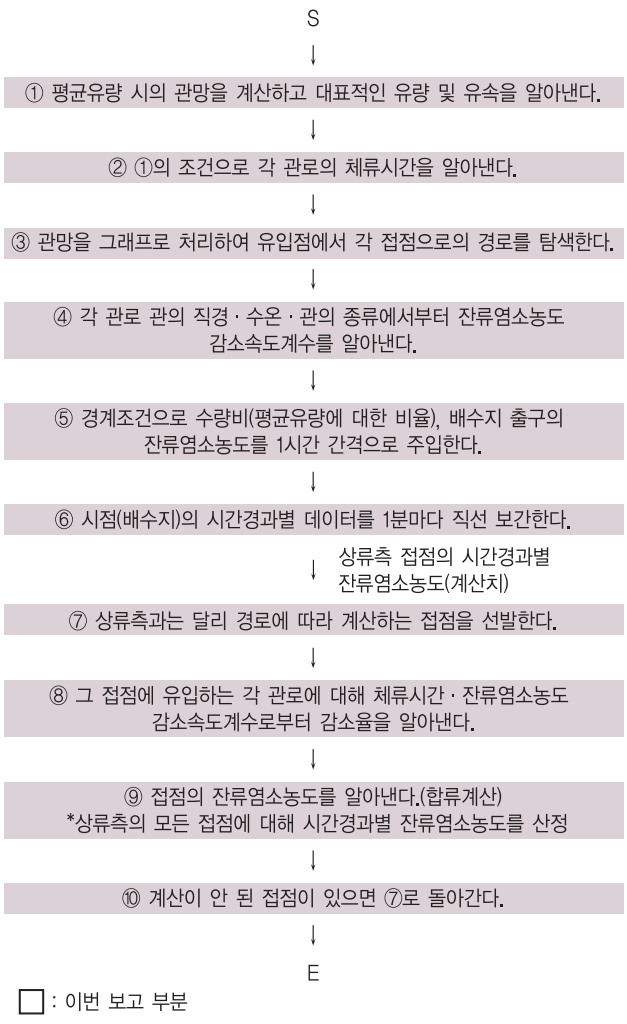
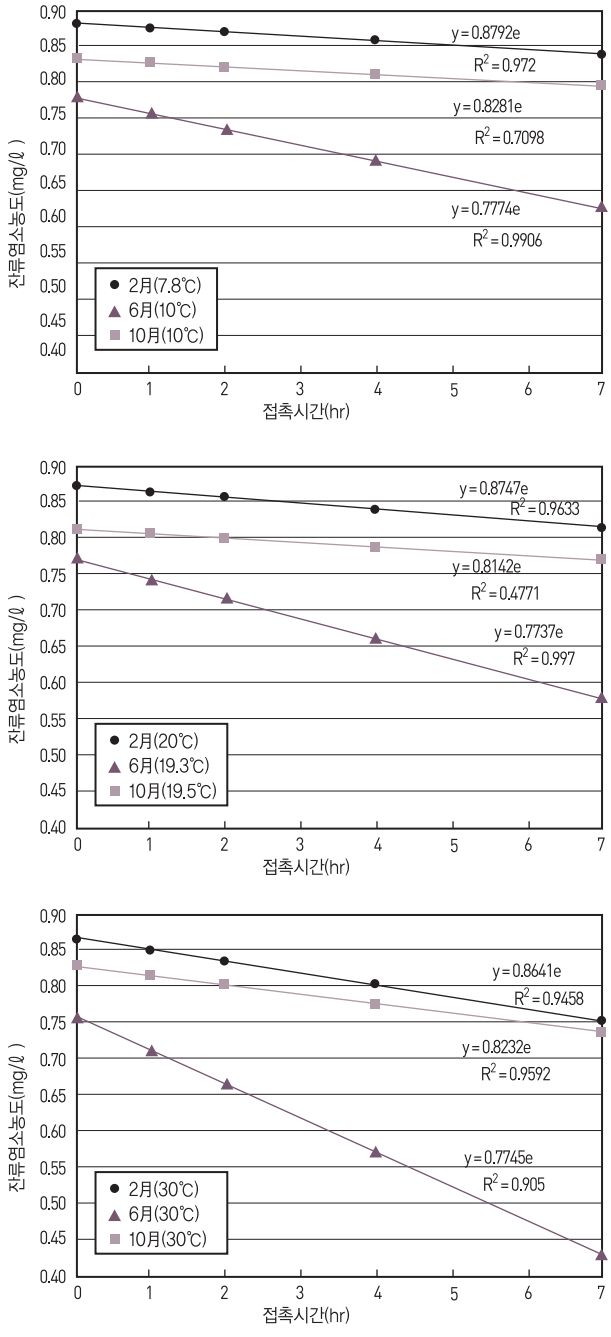


그림 3　잔류염소농도의 측정 결과



Kw = exp(0.04968 × T + 1.3933)/1000 ····· ④
(2월 조사 결과로부터 작성)

Kw = exp(0.0470 × T + 1.3428)/1000 ····· ⑤
(2월 · 10월 조사 결과로부터 작성)

Kw = exp(0.0509 × T + 2.8150/1000 ····· ⑥
(6월 조사 결과로부터 작성)

주) 6월 조사에서는 보통 때(2월과 10월 조사)보다도 원수의 탁도가 높은 것으로 나타났다. 게다가 하천이 흐르는 상황에 따라 원수 수질에 차이가 생겨나고 이것이 정수에도 영향을 미칠 수 있으므로 앞으로 이점에 대해 더 많이 검증할 예정이다.

시뮬레이션 모델의 작성

잔류염소농도 변화를 시뮬레이션할 관망 모델은 머핑시스템에서 연구대상지구의 배수관 구경 75mm 이상의 관망데이터(2001년 하기시점)를 사용했다. 시뮬레이션 배수조건 등의 입력정보와 제약조건은 〈표 2〉와 같다.

또한, 관망 모델의 타당성은 관망분석에 의한 수압계산치와 수압측정 데이터(연속측정)를 비교하는 것으로 확인했다.

그림 4 Kw 수치와 수온 T와의 관계

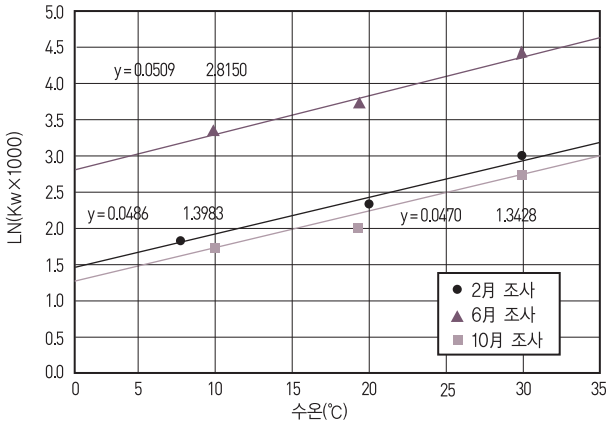


표 2 잔류염소시뮬레이션의 입력정보 · 제약조건

관망모델	절점수량(2001년도의 마을별 수량과 연간사용수량 20,000㎥/y 이상의 대량 수요자의 사용수량에 기초하여 설정), 지반 높이, 관의 직경, 관로의 길이, 관의 종류(경연관을 구분), 유속계수(110, 경연관은 100)
배수조건	배수위치(평균배수위치), 시간당 배수량, 시간평균출구농도, 일평균수온
제약조건	중간 블록에서 일률적으로 수량 변화가 생긴다.(시간당 배수량의 변화에 의한다) 분석대상은 실험시간 동안 흐름의 방향이 변하지 않는다. 시간당 배수량, 시간당 평균배수지출구농도는 온라인의 실측시간 데이터를 이용해서 순회계산한다.

표 1 정수 수질의 측정 결과

채수 장소			타카츠카 배수지 유출수	
채수 월일		2003년 2월 25일	2003년 6월 2일	2003년 10월 1일
채수 시간		10:15	10:00	9:55
날씨	당 일	맑음	맑음	맑음
	전 날	비	구름	맑음
원수 탁도	당 일	6.0	10.9	6.0
	전 날	2.0	22.3	6.2
기온	(℃)	5.5	23.9	21.5
수온	(℃)	7.8	19.3	19.5
염소이온	(mg/ℓ)	8.9	11	9.2
칼슘, 마그네슘 등(경도)	(mg/ℓ)	57	56	62
유기물 등(과망간산칼륨 소비량)	(mg/ℓ)	1.1	1.3	1.0
pH값		7.41	7.44	7.65
맛		이상 없음	이상 없음	이상 없음
냄새		이상 없음	이상 없음	이상 없음
색도	(도)	0	0	0
탁도	(도)	0.0	0.0	0.0
잔류염소	(mg/ℓ)	0.90	0.80	0.84
총알칼리도	(mg/ℓ)	45	42	45
전기전도율	(mS/ℓ)	19.5	15.6	16.7

시뮬레이션 모델의 검증

1. 계산조건

2001년도 매쉬(250×250m)별 잔류염소농도조사(이하, '잔류염소지도(Map)조사'라고 한다)일(H13. 7. 16~7. 3 중의 9일간)의 시간별 배수조건(배수량, 배수위치, 배수지 출구농도)에 따라 시뮬레이션의 계산조건을 설정하고 조사일마다 잔류염소농도 해석을 행한다. 또한 수질유래의 잔류염소농도 감소속도계수(Kw수치)는 ④식을 사용하고 있다.

2. 해석결과

〈그림 5〉에는 시뮬레이션에 의한 계산치와 잔류염소지도(Map)조사의 측정치를 나타낸 그래프를, 〈그림 6〉에는 계산치와 측정치의 차이를 막대그래프로 나타냈다. 계산치와 잔류염소지도 조사결과의 지역적인 차이 상황을 알아보기 위해 〈그림 7〉에 매쉬마다 계산치와 측정치의 차를 나타냈다.

계산치는 측정치에 비해 전체적으로 높은 듯한데, 시뮬레이션에서는 물의 흐름에 따른 잔류염소농도의 정보를 대체로 파악할 수 있다. 그러나 막힘관 등에서 발생되는 국소적인 잔류염소농도의

그림 5 계산치와 H13 잔류염소지도조사 측정치의 관계

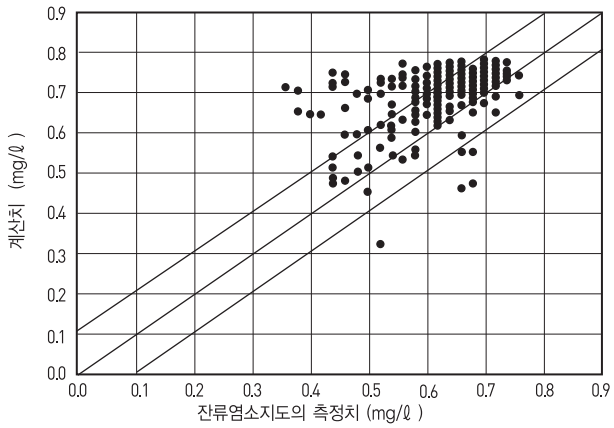


그림 6 계산치와 H13 잔류염소지도조사 측정치의 비교

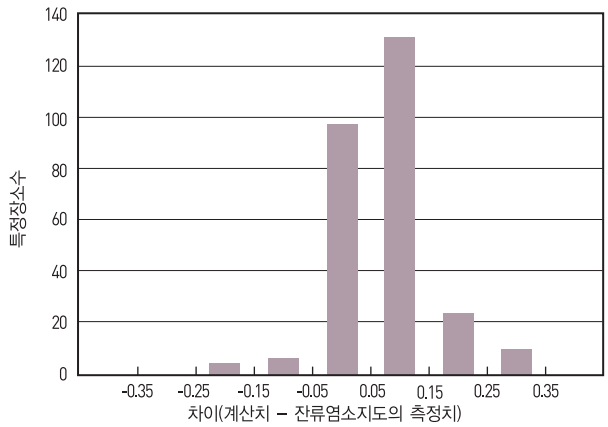
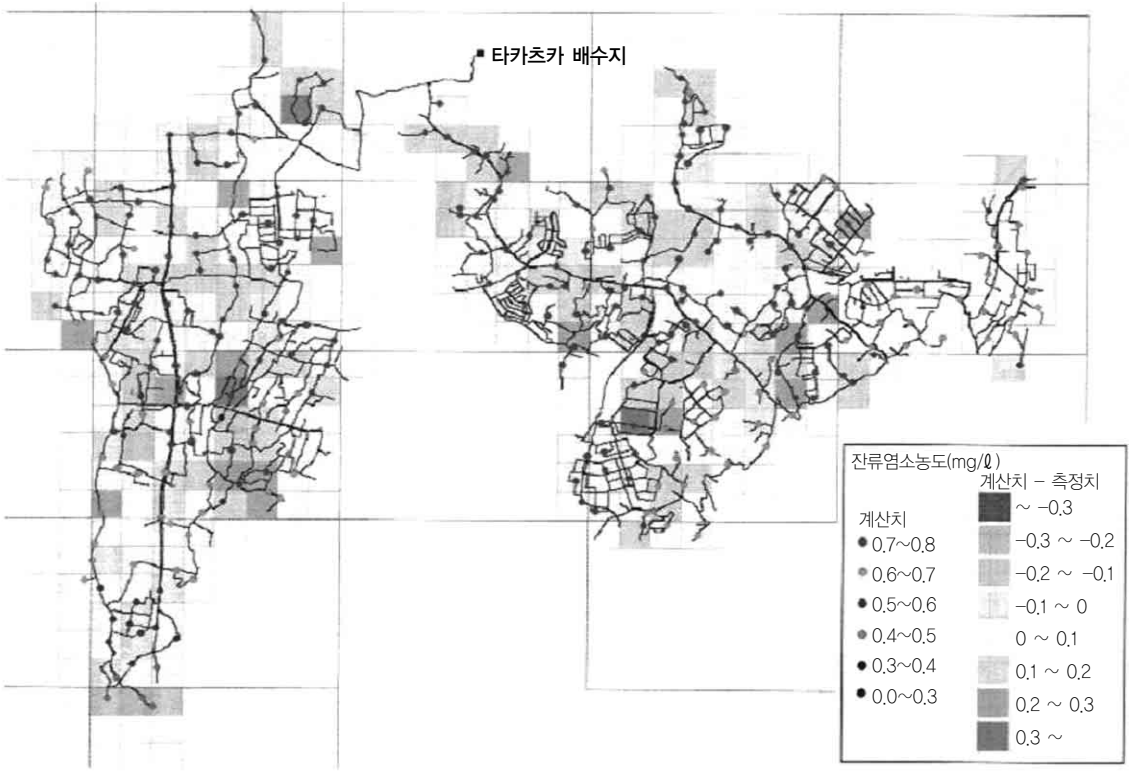
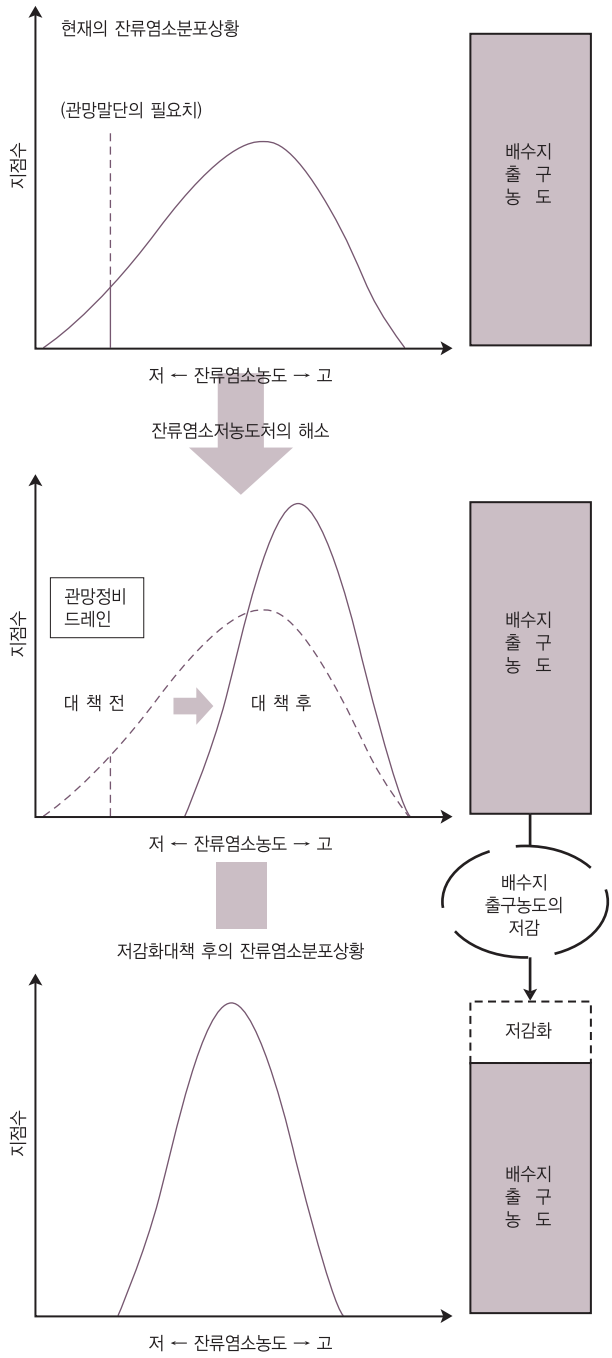


그림 7 계산치와 H13 잔류염소지도조사 측정치의 차이



저하를 예측하기는 어렵다. 따라서 시뮬레이션의 평가는 실측조사결과와 조합하여 검증할 필요가 있다.

그림 8　배수지 출구농도 저감화의 방식



제어목표치 저감의 검토

1. 배수지 출구농도 저감화의 전제조건

이 연구에서는 배수관망 내 잔염 저감화대책으로 배수지 출구농도의 제어목표치 저감 시도를 검토한다.

실제로 배수지 출구농도의 제어목표치를 줄이기 위해서는 정기적인 수질감시와 잔류염소농도의 극단적인 저하가 나타나는 장소에서 관망 정비 등 정기적인 드레인 조작에 의해 잔류염소가 회복될 것을 전제로 한다.

2. 제어목표치의 산출

관망 말단 급수전에서 0.1mg/ℓ 이상의 잔류염소농도를 확보할 수 있도록 〔급수전〕 → 〔급수장치〕 → 〔배수관망〕 → 〔배수지출구〕와 같은 시점으로 배수지 출구에서의 염소농도 제어목표치를 산출한다. 또한 염소 소비량은 수온에 따라 변동하므로 제어목표치는 수온마다 설정한다. 제어목표치의 산출순서를 〈그림 9〉에 나타냈다.

(1) 급수장치에서의 소비량

사이토에 따르면 저수탱크 수도에서는 하절기에는 0.25mg/ℓ, 동절기에는 0.17mg/ℓ 정도의 잔류염소농도가 감소한다. 저수탱크 수도의 급수전에서 0.1mg/ℓ 이상의 잔류염소농도를 확보하기 위한 배수관의 최저필요 잔류염소농도는 하절기 0.35mg/ℓ, 동절기 0.27mg/ℓ 이다.

요코하마시 배수관의 잔류염소농도 관리목표 하한치(0.34mg/ℓ)와 사이토에 의한 저수탱크 수도에서의 염수소비량으로부터 설정된 필요치(하절기)가 비슷한 수치이므로 아래와 같이 염소소비량을 설정한다.

하절기 배수관에서의 최저치

= 급수장치에서의 소비량 + 급수전에서의 필요치

= 0.25mg/ℓ + 0.1mg/ℓ = 0.35mg/ℓ

동절기 배수관에서의 최저치

= 급수장치에서의 소비량 + 급수전에서의 필요치

= 0.17mg/ℓ + 0.1mg/ℓ = 0.27mg/ℓ

(2) 관망 내에서의 소비량

잔류염소의 감소 경향은 시뮬레이션으로 설정한다. 관망 말단에서의 잔류염소농도 소비량은 배수량(체류시간)과 수온에 따라 변한다. 따라서 배수량의 변동을 염두에 두고 수온별 소비량을 산정한다.

〈그림 10〉은 배수지출구 농도의 제어목표치에 대해 수온별로 관망 내에서의 염소 소비를 추정 계측한 결과이며, 체류시간에 대한 잔류염소농도의 대표수치를 지수곡선으로 나타낸 것이다. 실제 염소 소비는 관망 형태(배수과정에서의 관의 직경)의 차이에 의해 대표수치±0.05mg/ℓ 정도의 오차가 생긴다. 때문에 관망 내에서의 최대염소소비량 설정은 지수곡선에서 알아낸 염소소비량의 대표수치로 0.05mg/ℓ 를 가산하고 〈표 3〉과 같이 설정한다.

(3) 제어목표치의 산출

잔류염소의 감소와는 별도로 배수지 출구에서의 제어치의 시간변동을 ±0.05mg/ℓ 로 한다. 이상으로 배수지 출구에서의 제어목표치를 수온별로 산출한 결과가 〈표 4〉, 〈그림 11〉이다. 현행 설정은 0.80~0.90mg/ℓ (여름)이며, 제어목표치를 0.20mg/ℓ 정도 줄일 수 있다.

[계산조건]

① 배수지출구 농도 : 관망 말단에서의 필요치를 확보할 수 있는 출구 농도를 역산했다.

② 배수조건 : 25℃ · 30℃는 H13 잔염지도 조사기간 중에도 가장 잔염이 저하하는 것으로 생각되는 조사일(7/23)의 시간 배수량으로부터 설정. 10~20℃는 7/23의 시간변경 패턴과 월

표 3 관망 내에서의 최대염소소비량의 설정치

수온	최대체류시간	최대염소소비량(mg/ℓ)
	43시간	
	36시간	
	38시간	
	30시간	
	30시간	

표 4 시점 잔류염소농도와 제어목표치의 산출 결과 (단위 : mg/ℓ)

설정수온	
관망 말단의 필요치	
관망 내 소비량	
시점 잔류염소농도	
설정과의 변동폭	
제어목표치	

그림 9 제어목표치의 산출 순서

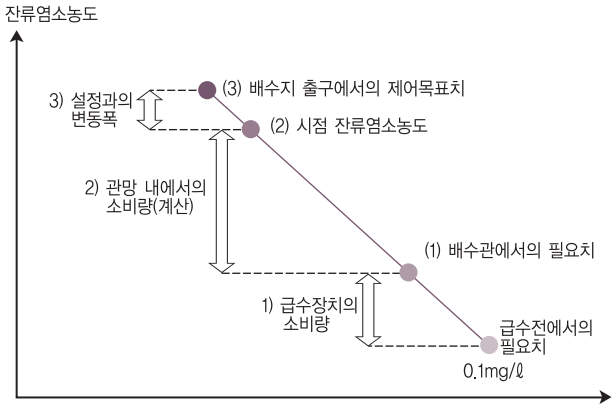


그림 10 제어목표치의 산출 순서

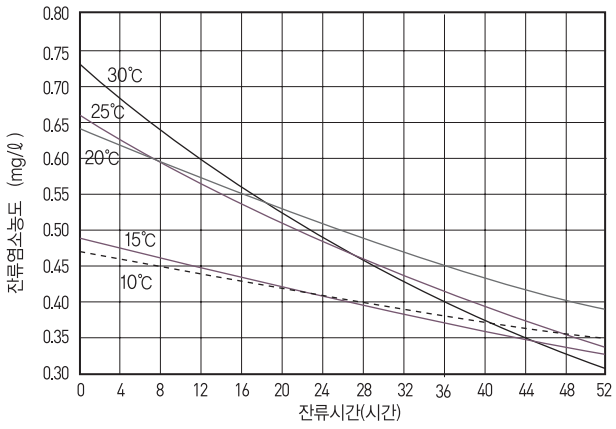
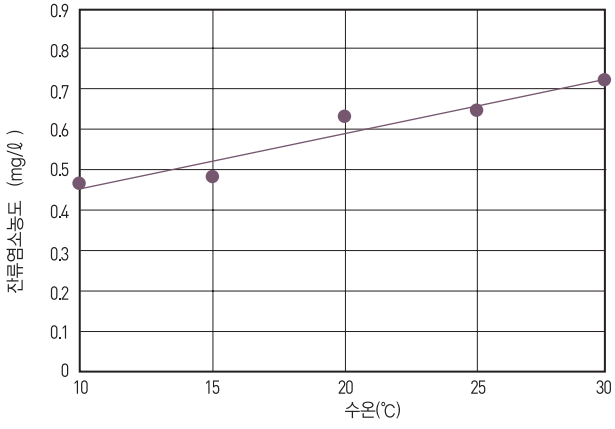


그림 11 제어목표치의 설정



별 유수수량 데이터로부터 각 수온의 배수조건을 설정했다.

③K수치 : 수질유래를 나타내는 Kw=exp(0.0470×T+1.3428)/1000 ⑤식과 관유래를 나타내는 Kd=exp(-5.4408×D+0.0706×T-5.4245) ②식을 사용해서 잔류염소농도를 확정했다.

3. 수질감시지점 및 잔염회복조작지점

수질감시지점와 잔염회복조작지점이 〈그림 12〉에 나타나 있다. 잔염회복조작지점은 실측조사를 통해 잔류염소 상황을 파악한 후, 필요에 따라 관망 정비나 상시 드레인을 실시하도록 한다. 수질감시지점에 있어서도 잔류염소농도가 저하 또는 부족한 경우에는 잔류염소회복조작지점으로 한다.

(수질감시부분의 구분)

A랭크 : 몇 년에 걸쳐 계속적으로 감시할 필요가 있는 지점

B랭크 : 하절기에 감시가 필요한 지점. 정기적인 실측조사를 통해 잔염 동향을 파악한다.

C랭크 : 제어목표치를 다시 검토한 후, 실측조사를 통해 확인이 필요한 지점. 잔염이 낮은 것으로 확인된 경우에는 계속적인 감시로 이행한다.

결론

이 연구에서는 요코하마시의 노게야마(野毛山) 저지대와 타카츠카(高塚) 저지대에서 실측조사와 시뮬레이션을 통해 배수블록 내의 잔류염소농도를 검증하고 배수시스템으로 대응 가능한 잔류염소 저감화대책 및 대책을 실행하기 위한 계획을 제시했다. 앞으로 다른 배수블록의 저감화대책을 확대해 나가기 위해서는 아래와 같은 과제가 있다.

① 정수처리방법의 개량(고도처리의 도입 등)을 포함한 시설 정비를 수반한 근본적인 대책을 검토한다.

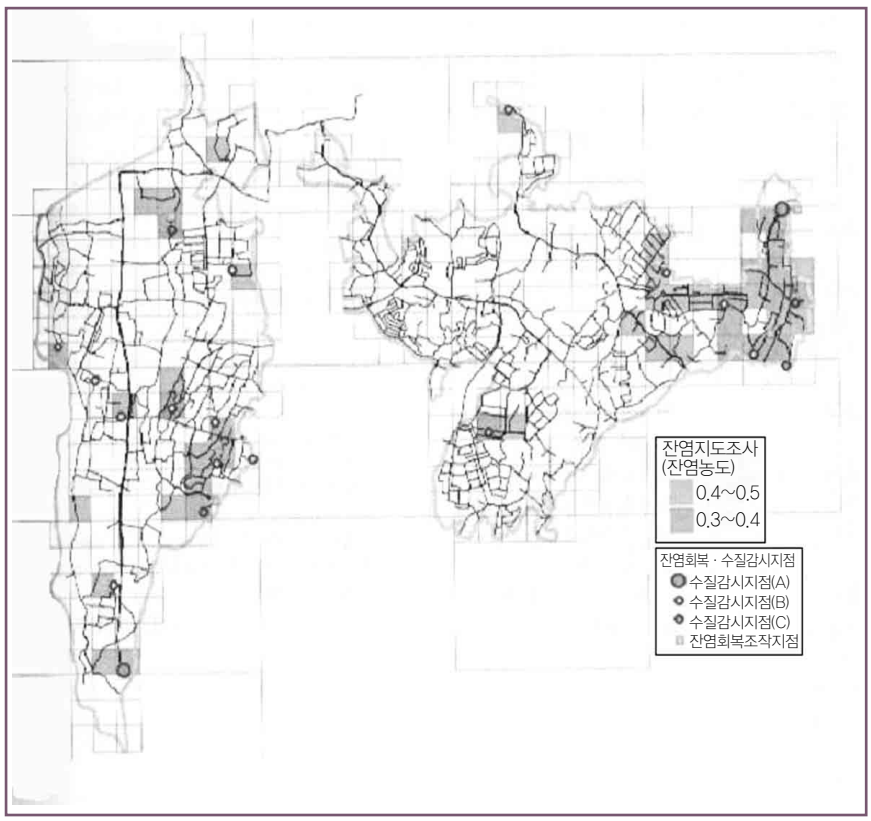
② 실측조사를 통해 급수장치부분에서의 염소소비를 파악한다.

③ 잔류염소 변동은 수질의 영향을 많이 받으므로 염소요구량 등 이 연구에서 검토하지 않았던 수질항목을 고려하여 Kw 수치의 추정식을 산출한다.

④ 날짜나 시간별 변동이 크다고 추측되는 지점, 잔류염소농도의 변동이 불명확하다고 생각되는 지점에서 연속측정을 한다.

⑤ 염소 냄새의 억제효과와 염소주입량 및 비용절감효과를 고려하여 잔류염소저감화의 실시계획을 모색한다.

그림 12 수질감시지점 및 잔류염소회복조작지점



요코하마시에서는 이 연구 성과를 수용하여 시내 전역에 대한 시뮬레이션으로 해석함과 동시에 정수, 배수, 급수에 대한 실효성 있는 잔류염소농도의 저감 · 균등화 대책을 체계적으로 마련하여 수도시스템 전체를 통해 대책을 강구해 나갈 예정이다.

*이 글은 일본수도협회(JWWA)誌 2005년 5월호에 실린 논문을 발췌, 번역한 것입니다.