

論 文

상수도 배관망에서의 수질변화에 관한 연구
(수질악화의 영향인자 분석과 잔류염소 모델링)

**A Study on Water Quality Changes in Distribution System
(Factor analysis of deterioration of water quality & Modelling of
free chlorine)**

이현동* · 정원식** · 문숙미**

Lee Hyun Dong* · Chung Won Sik** · Moon Sook Mi**

Abstract

Although it produces well-treated water in water treatment plant, water quality at the tap can be changed depending on the state of pipes. It is because water quality deteriorates as plant water passes through pipeline networks. Therefore, the improvement of not only water treatment technology but also O & M of water pipelines is required to supply good water to consumers.

The purpose of the study was to obtain the basic data of control technology for water quality in pipes through investigating water quality in distribution system. We selected 11 sampling sites and investigated water quality from plant to endpoint of distribution system. we also simulated decreasing tendency of free chlorine through pipeline network.

As the result of water quality test, all parameters were below allowable levels, but some parameters had the possibility of being over levels. So there must be more work to set up proper countermeasure for violable parameters.

1. 연구배경 및 목적

우리나라의 상수도는 '95년말 현재 전국 보급율 82.9%, 시설용량은 21,844천톤/일로서, 양적인 면에서는 괄목할만한 성장을 하였으나, '89년 수도물의 중금속 검출사건, '90년 폐놀

유출사건, '94년 맛 냄새문제가 발생한 낙동강 수질오염사건에 이르기까지 질적으로는 많은 문제를 내포하고 있다. 정부는 '98년까지 전국 18개 정수장을 대상으로 고도정수처리시설의 보급과 상수원 보호구역의 확대 및 강화를 통해 질적인 측면에서 고급화를 추진하고 있다. 안전한 물을 안정적으로 소비자에게 공급하기 위한 송·배·급수시설의 운영 및 유지관리는 매우 중요한 문제이며, 최근들어 더욱 양질의 수도물을 공급받기를 원하는 소비자에 의하여

* 한국건설기술연구원 환경연구실 신입연구원

** 한국건설기술연구원 환경연구실 연구원

수돗물의 송·배·급수과정에서 발생하는 2차 오염의 중요성은 더욱 더 부각되고 있다. 그러나, 이미 90여년의 상수도역사를 가진 국내 송·배·급수시설의 경우 대부분 지역에서 시설의 노후화와 함께 수질문제가 두드러지게 나타나고 있으며, 누수 등에 의한 유수율의 저하로 지사체 상수도사업의 재정적자는 누적되고 있으며, 이에 따른 경제적 손실도 막대한 실정이다.

국내의 현실정에 비추어 깨끗하고 맛있는 수돗물을 요구하는 소비자들의 욕구와 기대를 충족시키고, 용수부족을 효율적으로 이용하기 위해서는 상수원의 수질보전 및 정수처리기술의 개선뿐만 아니라 상수도관로의 운영 및 유지관리에도 상당한 노력이 요구되고 있으나, 상수도관로에 대한 연구는 미진한 실정이다. 특히 관로내 수질변화 및 수질악화에 따른 2차오염을 제어하기 위한 수질변화의 예측 및 2차오염의 현황과 원인 파악이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 현장조사 연구를 통하여 정수된 물이 관로를 거치는 동안에 발생할 수 있는 송·배·급수계통내 수질변화의 현황 및 원인을 조사·분석하고, 컴퓨터 모의분석을 통하여 관로내 잔류염소 변화를 예측하고자 하였으며, 그 세어기술을 개발하기 위한 요소기술을 제공하는데 목적을 두고 있다.

2. 연구방법

2.1 수질분석

송·배·급수계통 내에서의 수질변화를 조사하고, 그 원인을 효율적으로 파악하기 위해서, 잠실수중보 하류부에서 취수하여 Y정수사업소에서 생산되는 정수와 송·배·급수시설을 대상으로 선정하였다. 채수지점은 정수지를 포

함하여 배수지, 배수지관, 가압상, 가성저수조와 가정수도전까지 11개지점으로, 송 관로연장은 14.2km이다. 각 지점별로 1월부터 10월까지 총 25회의 시료채수를 수행하여 월별, 계절별 변화, 그리고, 주간변화와 일간변화를 파악하였다.

분석항목은 먹는물수질기준의 43개 항목과 잔류염소, 수온, 미생물의 탄소원인 TOC, DOC, 그외 TDS, Ca, Mg, 산도, 일칼리도 등을 측정하였다. 이중 pH, 수온, 잔류염소는 현장에서 측정하였고, 나머지 항목들은 적절한 전처리를 하여 실험실로 운반한 뒤에 분석하였으며 분석방법은 「먹는물수질기준 및 검사 등에 관한 규칙」 및 Standard Methods에 준하였다.

2.2 컴퓨터 모의(Simulation)분석

송·배·급수관망내의 수리학적인 흐름 특성이나 관내 정체 및 체류시간에 따른 수질변화, 그리고 환경적 요인에 의한 수질변화를 해석하기 위한 방법의 하나로 Computer Simulation Model을 이용할 수 있는데, 본 연구에서는 미국 EPA에서 만든 EPANET 모델을 선정하여 적용하였다. 모델링 대상지역은 수질조사를 실시한 시료채취지점을 포함하는 행정구역상의 9개동이다. 1996년인 1차년도는 모형분석의 시작단계로 대상지역의 관망을 입력하여 송·배·급수관망에서의 잔류염소 농도분포를 모의하여 실측농도와 비교하였다.

이 모델을 운영하기 위한 입력자료는 Input Data와 Map Data의 두가지가 있다. Map Data는 관망의 절점들(Nodes)에 대해서 번호와 좌표를 정한 것인데, 1/3,000축적관망도(상수도사업본부발행)의 TM좌표를 가로 25구간, 세로 20구간으로 세분하여 읽었다. Input Data는 각 절점에서의 수돗물 수요량, 관로

표 1. 조사대상지역의 수도진수

구 분	A	B	C	D	E	F	G	H	I
수 도 전 수	4,237	3,749	3,075	2,246	2,842	2,136	5,112	5,258	1,754

표 2. 배수지 입력자료

배수지	용 량	HWL(m)	LWL(m)
SJ	64 × 43 × 6m (3지)	60.8	55.0
SA	11 × 10 × 5m 500ton	60.0	55.4
YB	11 × 10 × 4.5m 500ton	63.8	59.5
KB	12.5 × 10.5 × 4m 500ton	63.7	60.0
OR1	10 × 15 × 3.5m 500ton	93.7	90.7
OR2	7.5 × 4 × 4m 120ton	68.7	65.0
OS1	14 × 18 × 4.5m 1,000ton	93.7	90.0
OS2	14 × 10 × 4m 500ton	68.7	65.0

표 3. 펌프 입력자료

설치배수지	설계유량(m ³ /min)	설계압력(m)	소요동력(Hp)
SA	1.0	60	25
YB	2.2	57	40
KB	3.6	75	100
OR1	2.0	75	60
OR2	0.45	45	10
OS1	0.76	62	25
OS2	1.9	40	40

표 4. 조도계수 입력자료

구 분	1976년 이전	1976~1985	1986~1995	1996년
조도계수	100	110	120	130

(Pipes)에 대해서 번호, 관로 양끝의 절점번호, 길이, 관경, 조도계수를 입력하고 기타, 배수지현황과 펌프사양, 물의 사용유형 등을 입력했다. 각 동별 수도전수 현황은 표 1과 같고, 배수지 현황 및 펌프사양은 각각 표 2와 표 3에 나타내었다. 그리고, 조도계수는 표 4와 같이 관의 매설년수에 따른 값을 입력하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질조사 결과

정수지부터 가정수도전까지의 거리별, 위치별 특성을 고려하여 송·배·급수계통을 대표하는 11개 지점에서의 수질변화를 조사한 결

과, 분석한 대부분 항목이 거리별, 시간별, 계절별로 일관성 있는 경향을 보이지 않았다. 황산이온, 염소이온, 질산이온과 같은 무기물질들은 정수장에서 관말까지 일정한 농도를 유지했으나, 계절별로 각 지점에서 많을때는 2배 이상의 차이를 보이며, 계절에 따른 영향이 높은 것으로 사료된다. 심미적인 영향물질중 소비자에게 가장 민감한 반응을 나타내는 맛·냄새의 항목에서는 대부분 무미, 무취로 나타났다.

주요항목별 수질분석결과는 다음과 같다. 그림 1은 지점별 잔류염소의 농도변화를 나타내었는데, 정수지에서 0.48~1.02mg/l의 농도를 나타내었고, 거리별로 점차적으로 감소하여 관말지점에서는 평균 0.21mg/l의 농도를 나타내고 있어 대부분의 문헌과 비슷한 결과를 나타

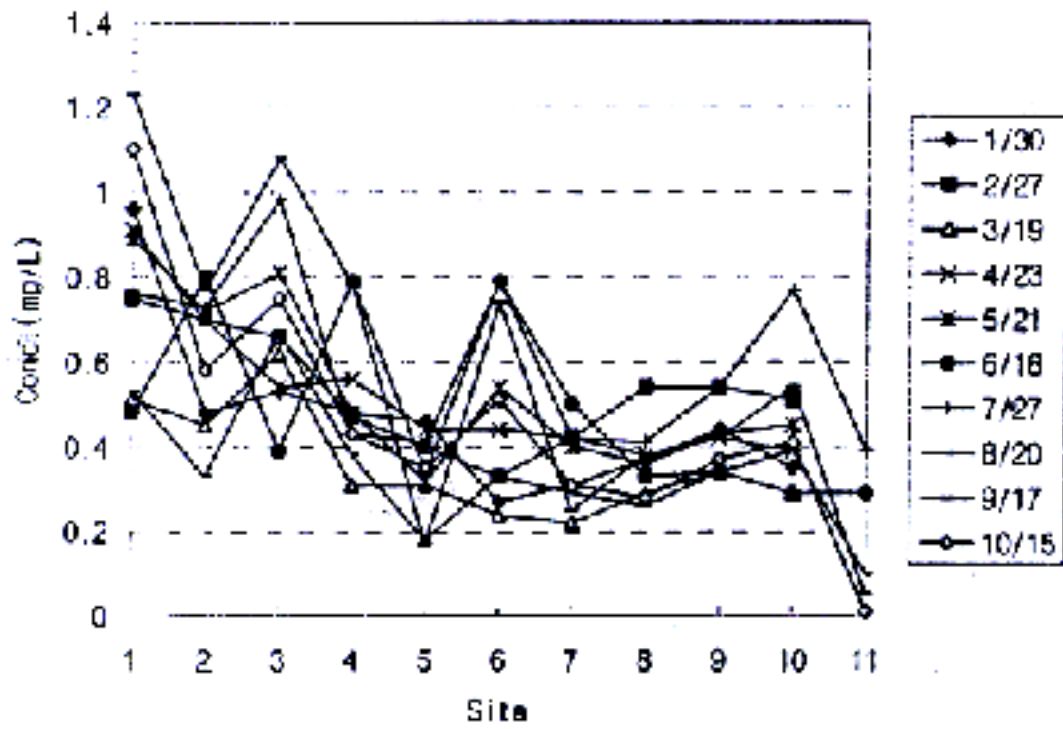


그림 1. 지점별 질류염소의 농도변화

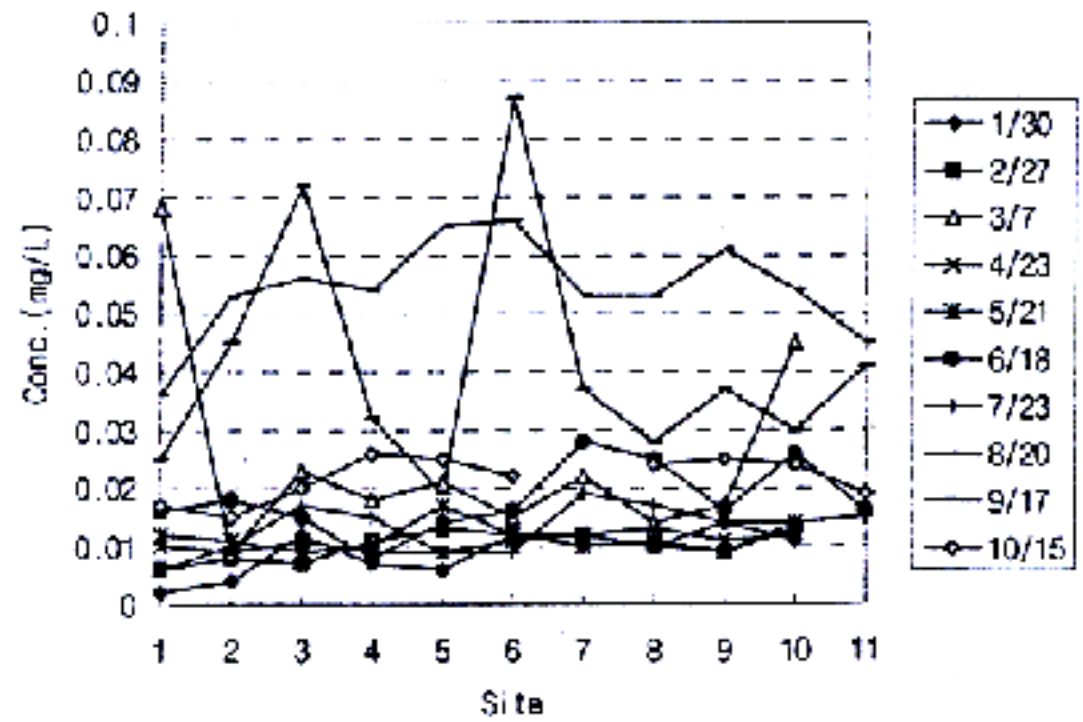


그림 3. 지점별 THMs의 농도변화

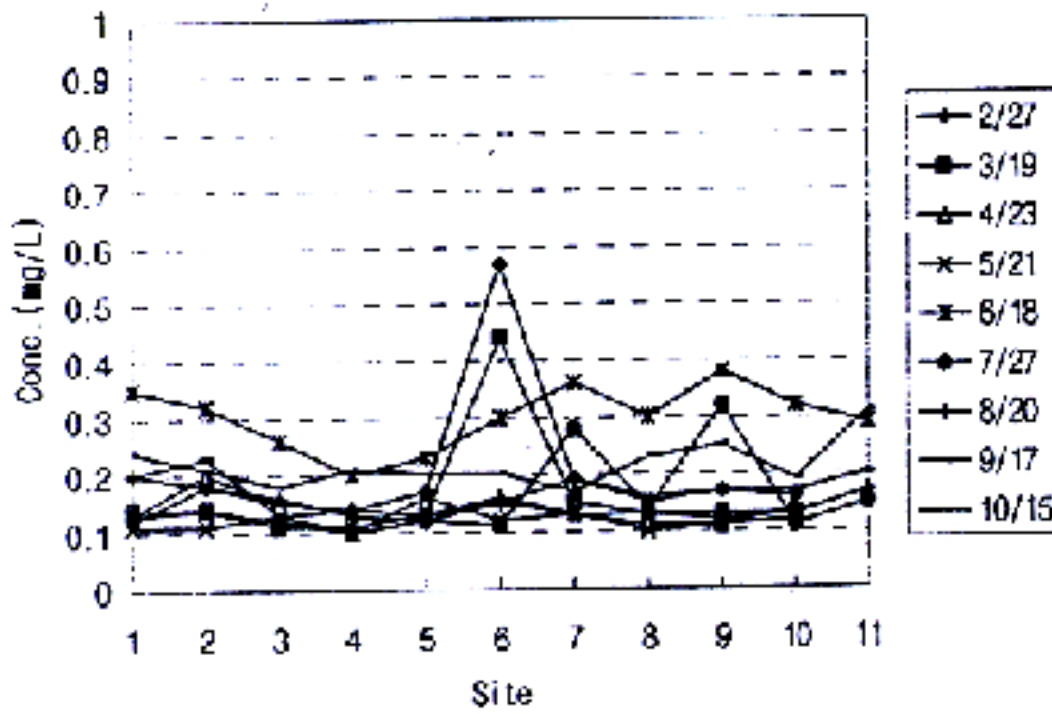


그림 2. 지점별 탁도의 농도변화

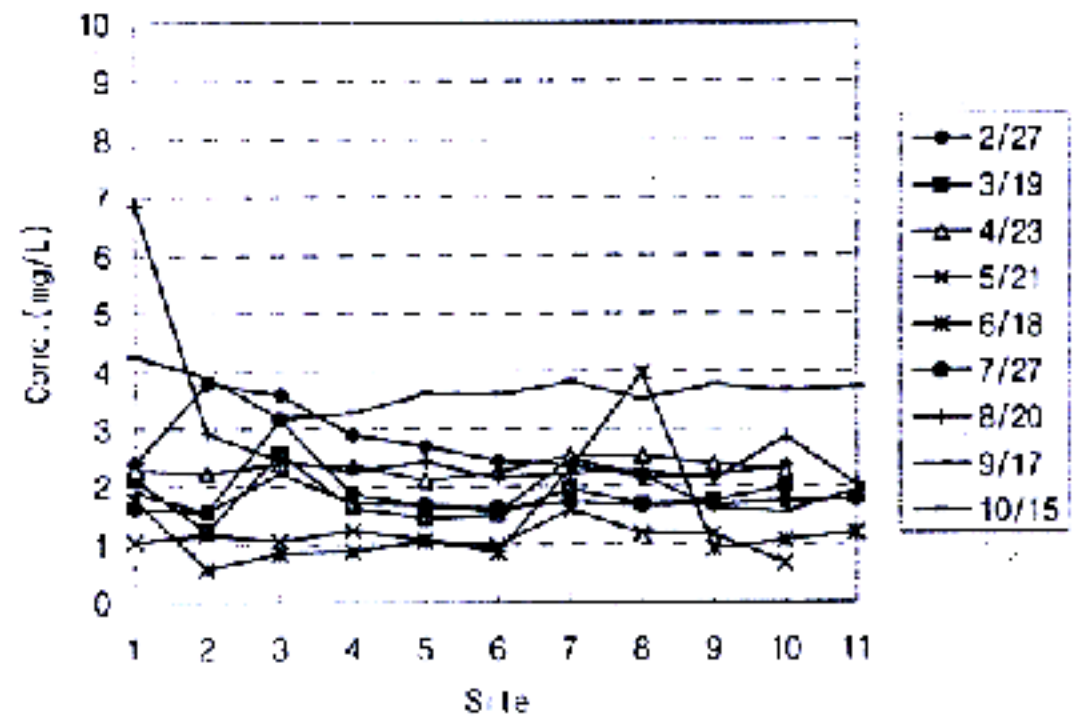


그림 4. 지점별 TOC의 농도변화

내었으나, 0.1mg/l 이하로 떨어지는 경우도 많아, 특히 수온이 높은 여름철에 미생물 재생장(Regrowth)의 가능성이 높은 것으로 판단되므로 배·급수계통에서의 2차적인 소독이나 정수장에서의 염소농도를 제어해야 할 것으로 사료된다.

지점별 탁도의 농도변화를 그림 2에 나타내었다. 특히 농도가 높게 나타난 6번지점은 일정하게 운전되지 않는 가압장으로 충분한 양의 물을 흘렸음에도 불구하고, 철농도와 함께 탁도가 높게 나타났다. 이처럼 부식이나 관내침전물의 경우는 정체구간의 영향을 받는 것으로 사료된다.

그림 3에 지점별 총트리할로메탄(THMs)의 농도변화를 나타내었는데, 전체적으로 0.002~0.087mg/l의 농도범위를 나타내어 수질기준인 0.1mg/l에 근접한 경우도 있었다. 총

트리할로메탄은 관말로 갈수록 농도가 높아지는 경향을 보이고 있어, 관로내에서 완전하게 처리되지 않은 유기물질과 잔류염소가 계속하여 반응하고 있는 것으로 생각되며, 또한 정수의 잔류염소가 높은 여름철에 채수한 시료의 농도가 높게 나타나 잔류염소 농도가 중요한 영향인자임을 알 수 있다.

총유기탄소(TOC)는 수돗물의 미생물학적인 영양인자로 2.4mg/l 이상의 농도에서 미생물의 재증식이 일어날 우려가 높다고 보고되고 있으나, 현재의 먹는물수질기준에 포함되어 있지 않다. 총유기탄소의 농도는 1.2 ~ 6.84mg/l의 분포를 보이고 있어 수온이 높은 여름철에는 미생물 재증식이나 후성장(Aftergrowth)의 발생가능성이 높은 것으로 판단되므로 이에 대한 적절한 대책이 필요한 것으로 사료된다.

결과적으로, 전체적인 수질은 먹는물수질기준을 잘 만족하는 편이나, 총트리할로메탄 등이 수질기준을 초과할 가능성을 가지고 있어 이에 대한 대책이 필요하고, 총유기탄소와 같이 기준에 포함되지 않은 항목 또한 적절한 제어가 필요하다. 관로내에서 반응하거나, 생성되어 정수장의 농도보다 높아질 수 있는 항목으로는 산류염소의 감소에 따라 직접 수온과 영양원에 의해 재성장할 수 있는 일반세균 및 대장균군, 잔류염소와 유기물질이 반응하여 생성되는 총트리할로메탄 등의 소독부생성물(DBPs), 부식(Corrosion)이나 관재료에 의해 용출되는 철(Fe), 아연(Zn), 망간(Mn) 등 금속물질과 관내침전물에 의한 탁도(Turbidity) 등 심미적 항목 등이다. 그러므로, 기준초과 가능항목에 대하여 현장조사나 모니터링

(Monitoring) 등을 통하여 각 송·배·급수계통에 맞는 운영 및 유지관리대책을 세워야 할 것이다.

3.2 관로 내에서의 잔류염소농도 모의결과
3월과 4월의 수돗물 사용량으로 각 절점에서의 수요량을 정하고, 시점인 배수지에서의 잔류염소농도 0.57mg/l를 입력하여 모델을 운영하였다. 50시간제의 각 절점에서의 수요량현황과 관로내의 잔류염소를 모의한 결과를 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 모의결과를 가정지수소와 수도전, 입력 관망에 포함되지 않은 지점 등 비교하기 어려운 지점을 제외한 여섯지점에서 비교한 결과를 그림 7에 나타내었다.

배수지관으로 선정된 정은주유소와 오류파출소에서는 실측값보다 모델링값이 높은 반면,

1996년 3,4월 반응 (50:00 hrs)

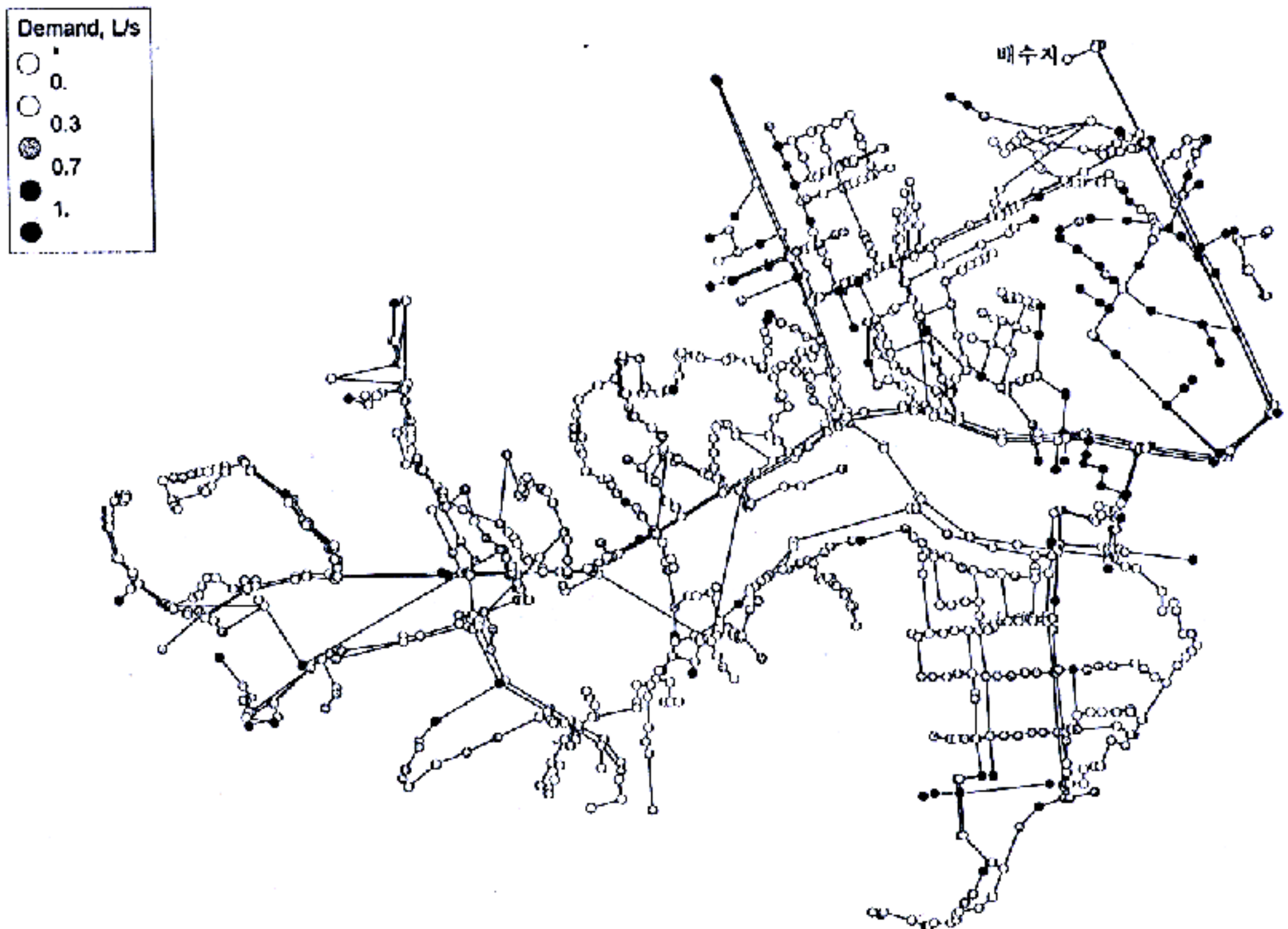


그림 5. 각 절점에서의 수요량(Demand)

1996년 3,4월 반응 (50:00 hrs)



그림 6. EPANET 모델 모의결과

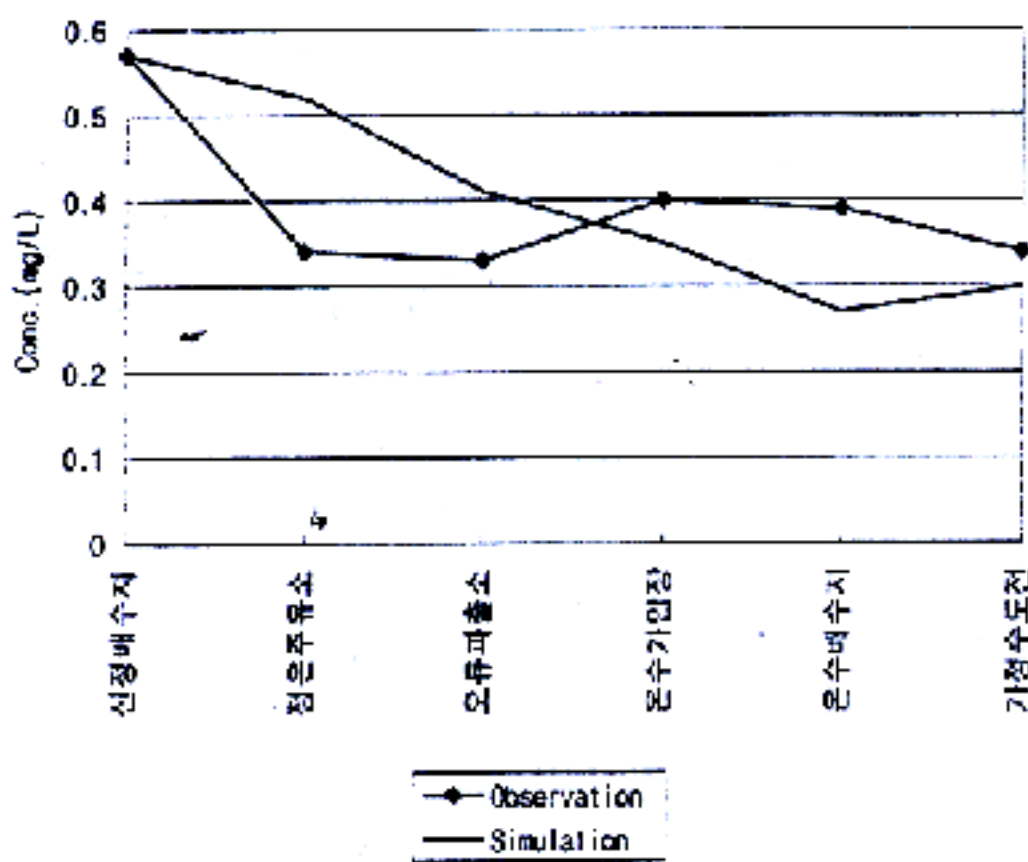


그림 7. 실측결과의 컴퓨터 모의결과와의 비교

관말부분인 가압장, 배수지, 가정수도전에서 실측값보다 모델링값이 더 낮게 나타나, Computer Simulation을 통하여 나타난 잔류염소농도의 감소경향과 실측자료와의 상관계수는 $r^2 = 0.27$ 로 상관성이 아주 낮았다. 모의결과와 실측값의 차이가 많은 지역은 수질변화를 일으키는 관의 구조적인 영향이자, 관내부의 환경인자 등을 파악하는 것이 향후 연구계획수립과 모델수정에 필요한 것으로 사료된다. 1차년도 조사에서는 Sediment의 분석이 이루어지지 않아 정확한 원인을 파악하기 어려우나 실제 시료채취시 물을 많이 소비하지 않는 야간인 새벽 02:00경, 배수지내 정체수에서의 강한 잔류염소 냄새로 보아, Free Surface가 있는 배수지 정체수에서 잔류염소농도의 감소경향이 커서, 결과의 차이를 유발하는 것으로도 판단

된다.

또한, EPANET 모델을 효율적으로 운영하기 위해서는 시간에 따른 유량의 분포와 시간에 따른 유속의 분포를 구하고, 실측자료와 Model Simulation을 통하여 얻어진 값과의 초기일치를 위한 반응상수의 보정이 필요하며, 반응상수의 결정과 더불어 해당지역의 소비량 유형을 정확하게 파악하여야 한다. 따라서 비교결과, 값의 차이가 나는 이유는 위와 같은 초기일치 작업 및 불소비량유형(Demand Pattern)에 대한 자료준비가 부족하였기 때문이라고 판단된다.

그 밖에 모델 운영과정에서 결과의 차이를 유발하는 인자는 다음과 같고, 향후 연구시 추가되어야 할 사항들이다.

① 모델에 입력된 물의 수요량은 월평균값으로, 일별 또는 시간별 차이를 고려하지 못했다.

② 관의 실제고도를 고려하지 못했으며, 조도계수는 실측이 불가능하므로 매설년수에 따라 가정 하였다.

③ 모델의 관망에는 100mm 이상의 관경까지 입력이 되었지만, 시료채취시점은 주로 수도꼭지(15mm)로, 모의지점과 실측지점이 반드시 일치하는 것은 아니다.

향후 연구에서 이와 같은 점들을 보완하고, 각 수질항목의 반응속도를 구하여 좀더 정확한 자료를 입력한다면, 관망내에서 잔류염소뿐만 아니라, 해당 수질항목의 값에 대해서 모의(Simulation)할 수 있으며, 관내에서 정체구간 및 체류시간에 따른 수질변화나 환경요인도 파악할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

상수도시설의 송·배·급수계통에서 일어나는 2차오염의 제어기술을 확립하기 위한 기초연구로, 서울시의 한 송·배·급수계통의 11지점을 선정하여 수질현황을 파악하고, 관로를 거치는 동안의 잔류염소농도의 감소추이를 모의한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 선정한 송·배·급수계통에서의 수질변화는 거리별, 시간별, 계절별로 일관적인 경향을 보이지 않는 것으로 나타났으며, 전체적으로 먹는물수질기준을 잘 만족하였다.

(2) 총유기탄소 및 과망간산칼륨소비량 등은 거리별 농도변화에 일관성이 없이 환경적인 영향, 즉 구조적 및 시설적 측면에 따라 높은 영향을 받는 것으로 사료된다.

(3) 총트리할로메탄은 관로 내에서의 농도변화가 심한 것으로 보아, 원수의 유입농도 변화가 크고, 전체적으로는 관말로 갈수록 농도가 증가하는 것으로 보아 부식질과 잔류염소와의 반응이 관로를 따라 지속적으로 일어나는 것으로 판단된다.

(4) 관로 내에서의 잔류염소 감소추이를 모의한 결과, 실측결과와의 상관계수가 0.27로 나타나 상관성이 낮았고, 지역특성에 따른 여건이 매우 다르기 때문에 장래 보다 더 자세한 자료로 관의 매설고도, 절점에서의 정확한 수요량 파악 등을 보완하면 관내에서 정체구간 및 체류시간에 따른 수질변화나 환경요인도 파악할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 1995년도 선도기술개발사업(G-7 프로젝트) 연구개발비의 지원에 의해 이루어졌으며 감사의 뜻을 표합니다.

4. 참고문헌

1. 이현동, 김갑수, "상수관 부식방지 기법 연구", KICT 기본연구보고서, 1990.12
2. Mark W. Lechevallier, et al, "Examining the Relationship between Iron Corrosion and the Disinfection of Biofilm Bacteria", J.AWWA, 1993. 7
3. R.A. Ryder, "The Costs of Internal Corrosion in Water Systems", J.AWWA, 1980. 5
4. Steven J. Medlar, et al., "Corrosion Control in Small Water Systems", Annual Conference

Proceedings, AWWA, 1993

5. EPANET Manual, Ver.1.1c, EPA

6. Robert M. Clark and Judith A. Coyle, "Measuring and Modeling Variations in Distribution

System Water Quality", J.AWWA, 1990. 8

7. 日本水道協會 및 日本 水道管路技術센터 발행 보고서 다수.