



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

제주지역 수돗물의 잔류염소 균등화를
위한 관망모델적용

濟州大學校 大學院

環境工學科

韓 贄 安

2014 年 2 月

제주지역 수돗물의 잔류염소 균등화를 위한 관망모델적용

指導教授 金 鎮 瑾

韓 贊 安

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2014 年 2 月

韓 贊 安의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 甘 相 奎 印

委 員 趙 恩 一 印

委 員 金 鎮 瑾 印

濟州大學校 大學院

2014 年 2 月

Application of pipe network model for the equalization of
residual chlorine in tap water of Jeju

Ji-An Han
(Supervised by professor JinKeun Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of
Master of Engineering

2014 . 2

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Sang-Kyu Kam, Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Eun-Il Cho, Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Jin-Keun Kim, Prof. of Environmental Engineering

February. 2014

Department of Environmental Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT	V
1. 서 론	1
2. 이론적 배경	4
2.1 염소소독	4
2.1.1 상수처리 소독의 특성	4
2.1.2 잔류염소 감소 특성	7
2.1.3 재염소 주입	14
2.2 급배수관망 수질 모델링	15
2.2.1 관망해석 목적	15
2.2.2 관망해석 형태	15
2.2.3 EPANET 프로그램	17
3. 연구 방법	22
3.1 연구 대상	22
3.2 연구 절차	25
3.3 EPANET 2.0 모델링	28
3.3.1 현장조사	28
3.3.2 수체감소계수	30
3.3.3 관벽감소계수	30
3.3.4 재염소 지점 및 주입농도 결정	31
4. 결과 및 고찰	33
4.1 EPANET 2.0 모델 적용	33
4.1.1 현장조사 결과	33

4.1.2 수체감소계수 산정	35
4.1.3 관벽감소계수 보정 및 검증	39
4.2 재염소 지점 및 주입량 산정	45
4.2.1 어승생 동부관로	49
4.2.2 어승생 서부관로	51
4.3 재염소 효과	53
5. 결 론	57
참고문헌	59
감사의 글	62

List of Tables

Table 1. Advantages and disadvantages of each disinfectant	5
Table 2. Pipe head loss formulas	18
Table 3. Types of valves	19
Table 4. Characteristics of surveyed 3 water treatment plants	22
Table 5. Network analysis options	27
Table 6. Analysis method and installations	28
Table 7. Assumed methods of chlorine wall decay coefficients	30
Table 8. Residual chlorine concentration of water supply systems	32
Table 9. Sampling points	32
Table 10. Water treatment plant pipeline Eoseungsaeng survey point	33
Table 11. Survey of the 2012 monthly water purification plant tests	34
Table 12. Water quality characteristics for bulk test	35
Table 13. Bulk decay coefficient	38
Table 14. Pipeline present condition	39
Table 15. Correction of chlorine decay coefficient	41
Table 16. Verification of chlorine decay coefficient	42

List of Figures

Fig. 1. Water treatment plant Eoseungsaeng pipe network	24
Fig. 2. Modeling procedures of chlorine residual in water distribution system	26
Fig. 3. The survey point	29
Fig. 4. Chlorine decay at different temperature	37
Fig. 5. Arrhenius equation used at different temperature of decay coefficient	38
Fig. 6. Predicted bulk decay coefficient	43
Fig. 7. Predicted wall decay coefficient	44
Fig. 8. Residual chlorine simulated result at the worst condition	46
Fig. 9. Rechlorination sites	48
Fig. 10. East pipeline re-chlorine dosage	49
Fig. 11. Residual chlorine at different temperature(East pipeline)	50
Fig. 12. West pipeline re-chlorine dosage	51
Fig. 13. Residual chlorine at different temperature(West pipeline)	52
Fig. 14. Concentration distribution after rechlorination(East pipeline)	53
Fig. 15. Concentration distribution after rechlorination(West pipeline)	54
Fig. 16. Rechlorination with equalization	55

Summary

To supply clean tap water from a purification plant to a faucet at home, water quantity and quality in distribution pipes should be stable and drinking-water distribution system should be optimally managed.

Three filtration plants in Jeju island whose source water has different features from that of mainland of Korea are selected for this study. They are Eoseungsaeng, Namwon and Gangjeong purification plants. To find out the reduction properties of residual chlorine by features of source water, the lab test is carried out.

Eoseungsaeng purification plant uses surface water, Namwon uses underground water and Gangjeong uses springwater as source. The experiment to determine the decay constant in the each source water indicates that Eoseungsaeng water shows a sharp decrease of the decay constant in the early stage of chlorine injection. It declines gradually 20 hours later.

As the temperature of water goes up, the decrement of residual chlorine increases. The experiment shows clear distinctions in the decay constant by water quality. At 5°C, the decay constants are -0.003hr^{-1} , -0.002hr^{-1} and -0.001hr^{-1} for Eoseungsaeng, Gangjeong and Namwon respectively. The decay constant of Eoseungsaeng is three times higher than that of Namwon, and 1.5 times higher than that of Gangjeong.

The surface water at Eoseungsaeng contains more organic matters than other source water. It is verified that there are clear distinctions in the decrement of organic matters by properties of source water.

To predict the concentration of residual chlorine by water supply channels, the supply area of the Eoseungsaeng purification plant is chosen as the study area. The hydraulic analysis for the lines is first carried out. Based on the result, the worst-case simulation experiment is done. It shows that water of four spots is

below the water quality standard. They are E5(0.03mg/L) and E6(0.02mg/L) spots in the eastern lines and W21(0.02mg/L) and W25(0.03mg/L) spots in the western lines.

If chlorine is injected at water purification plants to maintain adequate amount of residual chlorine, at least 1.9mg/L of chlorine is needed. So rechlorination can be a good tool in controlling adequate residual chlorine in a large distribution system.

The effect of rechlorination is analyzed through research into changes in residual chlorine. For introducing rechlorination system at the study area, the appropriate spots are before the main water pipes which diverge into E5 and E6 in the east and before the main water pipes which diverge into E21 in the west. Under the present condition, the adequate injection concentrations of rechlorination are 0.42mg/L for the east and 0.27mg/L for the west.

The simulation experiment indicates that the chlorine injection concentration can be reduced to 0.4mg/L at purification plants by introducing rechlorination system. And spots with excessive residual chlorine can have stable water quality.

After the rechlorination, the concentration of residual chlorine at the first point of junction is lowered by 0.27mg/L from 0.63mg/L to 0.36mg/L. The concentration of spots of 0.5mg/L or over is lowered to below 0.4mg/L. And the concentration of spots of under the standard increases up to 0.1mg/L or over.

To conclude, rechlorination can maintain even concentration of residual chlorine and stable water quality from purification plants to end-pipes.

1. 서론

상수처리에 사용되는 소독제는 원수 중에 존재하는 유해 미생물을 불활성화(inactivation)하여 수돗물의 공급과정에서 발생할 수 있는 수인성질병을 막기 위해 이용된다. 일반적으로 원수는 정수처리 후 배·급수계통으로 송수되기 전에 최종 소독 단계를 거친 후 정수지에 저장된다. 수돗물은 정수지로부터 배수지로 송수되고 배·급수 관로를 통해 각 가정에 공급된다(Ahn et al., 2005).

상수처리에서 실시하는 대표적인 소독의 방법에는 염소, 오존, 자외선 등이 있으며 현재까지 정수처리에서 염소소독은 안정적 소독효과, 우수한 잔류성 및 경제성으로 국내뿐만 아니라 국외에서도 가장 보편적으로 적용되고 있다(Vasconcelos et al., 1996).

수돗물은 배·급수 계통에서 병원성 미생물에 의한 오염을 최소화하기 위하여 정수장에서 최종 소비자에게 공급되는 과정에서 적정 잔류염소 농도를 유지해야 한다. 국내의 경우 수도법에 의하여 잔류염소의 농도를 수도꼭지에서 0.1 mg/L 이상(수질오염 우려 시에는 0.4 mg/L 이상)부터 4.0 mg/L 이하로 유지하도록 규정하고 있다(환경부, 2009).

정수장에서 공급되는 수돗물의 잔류염소 농도가 높을 경우 정수장에서 가까운 지역에서는 높은 염소 냄새로 수돗물 음용 기피의 원인으로 작용할 수 있으며, 가정의 수도꼭지까지 수돗물이 공급되는 과정에서 관로 내 체류시간이 긴 경우에는 잔류염소 농도의 저감이 크게 되어 관말에서 적정 잔류염소 농도가 유지되지 않는 사례가 발생하기도 한다.

급배수계통에서 수돗물을 화학적, 미생물학적으로 안전하게 유지하기 위해서는 최소한의 잔류염소농도를 유지해야한다. 그러나 배수지에서 배수관망에 유입된 후 염소소모성 물질과의 반응과 그 외의 다른 물질과의 반응으로 분해를 가속화할 수 있는 문제점이 있고 이렇게 분해된 염소는 환원되어 금속류와 반응하여 부식을 촉진하기도 한다(Clark et al., 2010).

따라서 적정 잔류염소 유지를 위해 정수장에서 공급되는 잔류염소의 관리농도는 소독능(CT 값) 만족을 위한 최소농도로 유지하도록 하고 급배수 관망에서 부

족한 잔류염소 농도는 재염소(Re-chlorination)를 통하여 추가할 수 있도록 하는 조치가 필요하다. 더불어, 수돗물 공급과정에서 잔류염소 저하 원인을 파악하여 관 경쟁 및 염소의 추가 투입 등의 조치가 필요할 것으로 판단된다. 또한 급수체계 조정 및 연계, 수돗물 사용패턴에 따라 변화될 수 있는 급배수 관망에서의 잔류염소 농도는 배수지를 중심으로 관리 농도를 설정하여 정수지 유출수 잔류염소 농도를 탄력적으로 운영할 수 있는 시스템을 구축하는 것이 필요하다.

최근 잔류염소 농도에 대한 연구는 활발하게 이루어 지고 있다. 안재찬 등(2007)은 배급수계통에서 잔류염소 및 THMs(Trihalomethanes) 분포 예측에 관한 연구에서 배급수계통에서 잔류염소의 적정관리를 위해서는 관로내의 잔류염소 분포, 시간적인 잔류염소변화를 조사하고 분석하여 감소요인을 파악하는 것이 중요하며, 결과에 따라 잔류염소 농도가 많이 감소하는 관로에 대해서 플러싱, 경쟁, 관교체, 또는 퇴수 등의 적절한 대책을 실시해야 한다고 하였다. 그리고 이목영 등(2010)은 환경부에서 제안한 “맛있는 물” 권고기준의 하나인 ‘잔류염소 0.1~0.4 mg/L’로 균등화하기 위한 정책을 추진해온 서울시의 잔류염소 변화 경향에 대해 정리, 평가한 결과, 서울 수도꼭지 잔류염소 연평균이 2009년 0.34 mg/L 까지 낮아지고 월평균도 0.30~0.39 mg/L로 균일화되었으며, 맛있는 물 권고기준 이내 수돗물비율이 2007년 58.9%에서 2009년 85.4%로 향상된 것으로 나타났다고 고찰하였다. 손진식 등(2006)은 전국 정수장 유출수의 잔류염소 농도에 대한 분포조사와 통계학적인 분석을 수행하여 잔류염소농도에 대한 기본적인 지식과 정수처리기준의 시행으로 인한 잔류염소농도에 미치는 영향을 분석함으로써 수질기준의 개정과 수돗물 수질관리에 대한 방안을 제시하였다.

정수장에서 가정의 수도꼭지까지 깨끗하고 안전하게 수돗물을 공급하기 위해 관리하고 있는 대표적인 수질항목인 잔류염소 농도의 변화와 거동을 예측하기 위한 잔류염소 감소 실험을 안재찬 등(2005)이 실행하였으며 그 결과 정수장에서 후염소를 주입한 후 정수지에서의 체류시간을 늘리면 빠른 1차 반응시간이 감소되고 배급수계통에서는 느린 1차 반응시간이 늘어나 적정 잔류염소 관리에 유리할 것으로 판단된다고 하였다. 이종민 등(2005)은 광역화된 배급수망에 있어서는 배수지 위주로 재염소를 주입하여 잔류염소를 관리할 수 있으며, 배수지 이하의 배관망에서 잔류염소관리는 재염소 주입점을 선정한 후 소규모 지역별로 관리하

는 것이 유리하다고 하였다.

이처럼 배급수관망에서 수량 및 수질의 안전성을 확보하고 배급수관망의 최적 관리를 위한 관망구축 등 다양한 연구가 지속적으로 필요하다.

본 연구에서는 급수계통별 잔류염소 농도를 예측하기 위하여 제주도 일부 지역에 수리해석 관망도를 구축한 다음 잔류염소 농도 변화를 모니터링 하였다. 연구 대상지역인 제주도는 대부분 지하수를 수원으로 하고, 지표수를 사용한다하여도 사실상 용천수를 이용하는 것이므로 지하수와 성상이 유사하다고 볼 수 있다. 이미 선행되어진 안재찬 등(2007)의 여러 연구에서는 지하수에 비해 상대적으로 오염도가 높은 지표수를 사용하는 육지부가 연구대상이었으므로 실제 제주에 적용되기는 어려울 것으로 판단되어 제주도 실정에 맞는 연구를 하고자 하였다.

대상지역의 관경 및 관의 길이 등 관로에 대한 수리해석을 시행하여 그 결과를 바탕으로 EPANET 2.0으로 관망도를 구축하였다. 구축된 관망도에 잔류염소 농도 수체감소계수와 관벽감소계수를 입력하여 실제 용수공급량과 수온에 따른 주요 지점별 잔류염소 농도를 예측함으로써 대상지역의 재염소 시설 설치의 필요성과 재염소 시설 설치에 따른 잔류염소 농도변화에 대해서 확인하고자 하였다.

그리고 상수도관망에서 급수계통별 잔류염소 변화 예측을 통해 적정 잔류염소 농도의 유지관리 방안을 제시하여 수돗물의 안전성을 확보하는데 기여하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 염소소독

2.1.1 상수처리 소독의 특성

소독은 물속의 세균(Bacteria), 바이러스, 원생동물(Protozoa) 등의 병원성 미생물을 불활성화하여 수요자를 병원성 미생물에 의한 질병으로부터 보호하는 것으로, 미생물 실험이나 병실의 병원성 미생물에 의한 오염을 막기 위해 실시하는 멸균과는 구별된다.

상수처리시 침전, 여과를 한 물의 병원성 미생물은 많이 제거되나 사람의 건강에 해를 입히지 않을 정도로 충분히 제거가 되지 않는다. 또 완전히 제거되었다 하더라도 배수, 급수과정에서 관의 불안정한 이음부의 틈새나 부식한 곳에서 세균이나 오염물이 침입할 우려가 있으므로 여과수에 소독제를 첨가하여 급수전까지 그 효과를 유지시켜 무해한 음용수를 공급해야 한다.

소독의 주요 방법으로는 (1) 가열법, (2) 광선에 의한 방법, (3) 산화제에 의한 방법, (4) 산과 알칼리에 의한 방법 등이 있으나 정수처리에서는 산화제를 사용하는 것이 일반적이다. 산화제로는 염소(Cl_2), 이산화염소(ClO_2), 클로라민(Chloramine), 오존(O_3) 등이 있으며 주요 산화제의 장단점은 Table 1과 같다.

Table 1. Advantages and disadvantages of each disinfectant(이정수, 2005)

	advantage	disadvantage
Chlorine (Cl ₂)	The medicine price is cheap. It can be liquefied easily and stored comfortably. It has an easy injection.	It has a residual substance after using and a smell of its own. There is dangerous of a gas leak. It has a less effect of disinfection than other.
Chlorine Dioxide (ClO ₂)	It has effect on removing of a bad smell and chromaticity. There is a strong disinfection effect. It has powerful virus sterilization. It is available for using wastewater reuse system.	It is expensive. You may be dangerous explosion when you handle. It has to make in particular places. It is hugely fallen efficiency of disinfection.
S o d i u m Hypochlorite (NaClO)	The cost of maintenance is comparative cheap. It has an effects on removing of chromaticity and turbidity. It relatively has a high disinfection effect.	It is demanded a desalination plant.
Ozone (O ₃)	It has strong oxidizing power and a very wide application. It isn't residual products and nasty smells. There isn't second-hand contamination according to over addition.	It is very expensive and needs a complicated ozone apparatus.
Ultraviolet (UV)	It isn't residual toxicity and is safe because it has less chemical side effects. It can install easily and spend contact time shortly.	The cost of maintenance is expensive. It is demanded cyclical clean of the lamp. When you use wastewater reuse system, you need rechloric(재염소) disposal facilities. If it has high chromaticity or turbidity, it falls the disinfective power markedly.

염소가스는 1774년에 Scfeele에 의해서 최초로 사용되었으며, 19세기 이후 상수 처리에 실제 염소가 사용되기 시작하였다. 1908년 이후부터 장티푸스 등 수인성 전염병이 급격히 감소하였는데 이는 시카고, 뉴욕, 밀워키 등 미국 여러 정수장에서 염소소독 방법이 급속히 확대되었기 때문이다. 1912년에는 미국 Boston시의 정수장에 염소가스를 직접 주입하는 장치가 설치되기도 하였다.(김동하 등, 2004)

소독에 관한 기술이 많이 축적되어 있는 염소가 현재 소독제로 가장 많이 사용되고 있으나 소독과정에서 발암물질로 의심되는 THMs을 생성한다는 단점을 가지고 있다(Kawamura, 2003).

일반적으로 염소는 액체염소용액으로 처리수에 주입되며, 염소가스는 암모니아가 존재하지 않는 물속에서 가수분해되어 차아염소산(HOCl)과 차아염소산이온(OCl⁻)을 생성하며 둘의 합을 일반적으로 유리잔류염소라고 한다(Kawamura, 2003).

염소(Cl₂)는 압축가스상태로, 또는 Ca(OCl)₂나 NaOCl과 같은 상태로 사용될 수 있으나, 어떠한 형태이든 화학적으로 동일한 염소화합물을 생성하게 된다. 가스상태의 염소를 물속에 주입하면 용존상태의 염소를 얻게된다.

$$Cl_2(g) = Cl_2 \times H = [Cl_2(ag)/P_{Cl_2}]$$

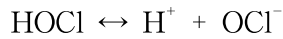
여기서, H = 헨리상수(Henry's law constant, mol/L-atm)

P_{Cl₂} = 대기에서의 염소의 부분압력

용존염소는 물과 반응하여 차아염소산(hypochlorous acid)과 수소이온(H⁺), 그리고 염소이온을 발생시킨다.



차아염소산은 약산으로 차아염소산이온(hypochlorite ion)으로 해리된다.



여기서, 평형상수 $K_a = 2.5 \times 10^{-8}$ (25°C)으로 상온에서 pKa는 약 7.6이 되어 pH가 pKa보다 높은 상태에서는 차아염소산이온(OCl⁻)이, pH가 pKa보다 낮은 상태에서는 차아염소산(HOCl)이 주생성물이 된다.

차아염소산(HOCl)과 차아염소산이온(OCl⁻)은 같은 유효염소지만 소독력에 있어서 차아염소산(HOCl)이 약 80배 정도 강하며 차아염소산은 pH가 낮아질수록 존재비율이 높아지고 소독효과도 커진다. 이 반응은 가역반응이므로 물의 수온이나 수소이온농도에 따라 변화한다.

수중의 암모니아화합물과 반응한 염소는 클로라민을 생성한다. 클로라민은 pH 및 반응 정도에 따라 모노클로라민, 디클로라민 및 트리클로라민으로 존재하며, 모노클로라민과 디클로라민을 결합잔류염소라 한다. 유리염소와 결합염소와의 소독력에는 차이가 있다. 따라서 같은 양으로 동등한 효과를 나타내기 위해서는 유리잔류염소에 비해 결합잔류염소가 약 100배의 접촉시간과 약 25배의 추가량이 필요하다(홍성호 등, 2002).

2.1.2 잔류염소 감소 특성

1994년에 Rossman은 일반적인 질량이동에 기초하고, 전체 관망모델링 적용에 잘 맞는 염소 감소 모델을 개발하였으며 이 모델은 급수계통에서 관로를 통과하면서 반응에 의한 물질의 손실(또는 증가)을 고려한 적용원리를 설명한다. 이것은 1차 반응 동역학에 기초하고, 수체(bulk flow)와 관벽(wall)의 재질 두 가지 모두에서 반응이 일어나는 것으로 가정한다. 식2-1은 수체와 관벽에서 염소감소에 대한 일반적인 식이다.

$$\frac{dC}{dt} = -k_f C - (C - C_w) \quad (\text{식2-1})$$

여기서, dC/dt = 잔류염소 감소속도(mg/L/day)

k_f = 물질전달계수(m/day)

C = 수체(bulk flow)에서 잔류염소 농도(mg/L)

t = 시간(day)

C_w = 관벽에서 잔류염소 농도(mg/L)

상기 식의 첫 번째 항은 수체 반응이고 두 번째 항은 관벽 반응으로 k_f 와 C_w 에 의한 수체와 관벽의 반응 지점 사이에서 염소가 이동될 때의 속도를 나타낸다. 그러므로 관벽에서의 반응속도인 C_w 가 1차 반응이고 염소가 축적되지 않으면서 관벽으로 이동한다고 가정하면, 다음의 물질수지식이 성립된다.

$$k_f(C - C_w) = K_w C_w \quad (\text{식2-2})$$

여기서, K_w = 관벽 감소계수(m/day)

C_w 에 대해 풀고 (식2-1)로 치환하면 다음의 반응속도식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dC}{dt} = -k_b C - \frac{k_w k_f C}{rb(k_w + k_f)} \quad (\text{식2-3})$$

여기서, rb = 관의 수리학적 반지름(관의 지름/2)(m)

물질전달계수 k_f 는 Sherwood number(Sh)를 이용하여 계산한다.

$$k_f = Sh \frac{D}{d} \quad (\text{식2-4})$$

$$Sh = 0.023 Re^{0.83} Sc^{0.33} \quad (Re \geq 2300) \quad (\text{식2-5})$$

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0668(d/L)Re \cdot Sc}{1 + 0.04[(d/L)Re \cdot Sc]^{0.57}} \quad (Re < 2300) \quad (\text{식2-6})$$

여기서, D = 수중에서 염소의 확산계수(20℃에서 $0.10 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{day}$)

d = 관 지름(m)

L = 관 길이(m)

식 2-5와 식 2-6에서 Re는 레이놀즈수이다.

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (\text{식2-7})$$

여기서, u = 유속(m/day)

d = 관 지름(m)

ν = 동점성 계수(20℃에서 $0.09 \text{m}^2/\text{day}$)

Schmidt number(Sc)는 다음 표현으로 주어진다.

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (\text{식2-8})$$

상기 식들의 관계를 이용하여, 잔류염소 감소계수(K)를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$K = k_b + \frac{0.66 \times 10^{-3} u^{0.83} r^{-0.17} k_w}{0.33 \times 10^{-4} u^{0.83} r^{0.83} + r k_w} \quad (Re \geq 2300) \quad (\text{식2-9})$$

$$K = k_b + \frac{A k_w}{Br^2 k_w + (1/2) r A} \quad (Re < 2300) \quad (\text{식2-10})$$

여기서, $A = 4.75 \times 10^{-3} L + 9.23 \times 10^{-4} u^{0.67} r^{1.34} L^{0.33} + 0.27 \times u r^2$

$$B = L + 19.458 \times u^{0.67} r^{1.2} L^{0.33}$$

따라서 관로 내에서 흐름이 정상이라면 잔류염소의 1차 반응식은 식 2-11과 같이 된다.

$$C_t = C_o \exp(-kt) \quad (\text{식2-11})$$

여기서, C_t = 시간 t에서 잔류염소 농도(mg/L)

C_o = 초기염소 농도(mg/L)

k = 감소계수(day⁻¹)

Sharp 등(1991)은 잔류염소 감소계수가 유량, 관 지름, 배관 재질 등에 따라 변화한다고 하였고, Saunier와 Jarrige(1990)는 잔류염소 감소계수를 수온, 관 내부 접촉면적, 내부 코팅의 종류별로 나타냈고, Gotoh(1988)는 잔류염소 감소계수가 수온, 수질, 유속, 배관, 배관의 접촉면적, 재질 등에 따라 변화한다고 하였다.

금속배관에서 잔류염소 농도를 안정적으로 제어하는데 부식이 지배적인 역할을 한다고 밝혀낸 Turssell(1992)은 관로 내에서 염소와 부식속도와의 관계를 정량적으로 나타낸 다음의 식 2-12을 제안하였다.

$$\frac{dC}{dt} = -R - kC \quad (\text{식2-12})$$

여기서, R = 부식에 의한 관벽의 염소요구량(mg/L · d)

한편, 미국수도협회연구재단(AWWARF)에 의한 연구에서는 6개 급배수관망에서 11회의 잔류염소의 수체 감소계수실험을 실시하였다. 수체에 대한 잔류염소 감소계수실험에서 관찰된 수체 감소곡선을 4개의 식으로 모델링 하였는데 이 식들은 Hass와 Karra(1984)가 하수처리수에서 총 잔류염소(Total residual chlorine)감소계수를 모델링하기 위해 적용하였던 잔류염소 감소식으로 다음과

같다.

1) 1차 반응식

$$\frac{dC}{dt} = -k_b C \quad (\text{식2-13})$$

또는

$$C = C_0 \exp(-k_b t) \quad (\text{식2-14})$$

2) n차 반응식

$$\frac{dC}{dt} = -k_b^n C^n \quad (\text{식2-15})$$

또는

$$C = [k_b^n t (n-1) + C_n^{-(n-1)}]^{-1/(n-1)} \quad (\text{식2-16})$$

3) 제한 1차 반응식

$$\frac{dC}{dt} = -k_b (C - C^*) \quad (\text{식3-17})$$

또는

$$C = C^* + (C_0 - C^*) \exp(-k_b t) \quad (\text{식2-18})$$

4) 병렬 1차 반응식

$$\frac{dC}{dt} = -k_{b,fast}C_{fast} - k_{b,slow}C_{slow} \quad (\text{식2-19})$$

또는

$$C = C_0 Z \exp(-k_{b,fast}t) + C_0(1-Z)\exp(-k_{b,slow}t) \quad (\text{식2-20})$$

여기서, C^* = 제한 잔류염소 농도(mg/L)

n = 반응차수(무차원, $n \neq 1$)

k_b^n = n 차 수체감소계수(L/[h(mg/L)⁽ⁿ⁻¹⁾])

$k_{b,fast}$ = 빠른 반응의 수체감소계수(L/hr)

$k_{b,slow}$ = 느린 반응의 수체감소계수(L/hr)

C_{fast} = 빠른 반응의 잔류염소농도(mg/L)

C_{slow} = 느린 반응의 잔류염소농도(mg/L)

Z = 빠른 반응과 느린 반응의 비(무차원)

1992년 Jadan-Hecart 등은 잔류염소의 감소계수를 분석하기 위해 세느강을 수원으로 하는 파리시의 한 정수장의 시료를 채취하여 실험을 하였다. 총 15개의 시료에 잔류염소 농도의 초기 값을 4 mg/L 로 되도록 염소를 주입한 다음 시간에 따른 농도 변화를 관찰하여 초기 4시간까지는 염소가 빠르게 감소하며 4시간 후에는 느린 감소반응을 나타냈다고 발표한 바 있다.

$$-\frac{dX}{dt} = k'_b(A-X)^\alpha(B-\frac{X}{S})^\beta \quad (\text{식2-21})$$

여기서, X = 시간 t 에서 잔류염소 감소량(mg/L)

k'_b = 2차 수체 감소계수(L/mg/h)

A = 4시간 후 총 잔류염소 농도(mg/L)

B = 4시간 후 반응물질의 농도(mg/L)

α = 염소에 대한 반응 차수(무차원)

S = stoichiometry(무차원)

β = 반응물질에 대한 반응 차수(무차원)

Hua 등(1999)은 잔류염소 농도가 0.11~0.52 mg/L 일 때 초기염소농도 C_0 와 수체감소계수 k_b 에 대한 실험결과를 다음과 같이 제시하였다.

$$k_b \approx \frac{0.018}{C_0} - 0.024 \quad (\text{식2-22})$$

S. A. Arrhenius(1989)는 수온에 따른 수체 감소계수를 식2-23과 같이 지수함수로 표현하였다. 화학반응속도는 온도가 높아질수록 지수항 만큼 커진다. 이 식을 선형화 하면 $\ln k = \ln A + E_a/RT$ 이고, 여기서 $\ln A$ 와 E_a/RT 는 상수이므로 온도(T)와 $\ln k$ 사이에는 선형상관관계가 성립한다.

$$k_b C_0 = A \exp(-E/RT) \quad (\text{식2-23})$$

여기서, A = 빈도인자(frequency factor)

E = 활성화 에너지

R = 기체상수

T = 절대온도

k_b = 반응속도상수

상기 식을 토대로 결합 1·2차 반응식을 아래와 같이 제시하였으며, 이 식에는 초기염소농도, 수온, 유기화합물의 농도를 고려하여 1차 반응식보다 좋은 결과를 보였다. k_1 은 염소와 반응물질의 초기 농도와 관련이 있으며, k_2 는 반응물질(예, 휴믹산)과 관련이 있다.

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C - k_2 C^2 \quad (\text{식2-24})$$

또는

$$\frac{1}{C} + \frac{k_2}{k_1} = \left(\frac{1}{C_0} + \frac{k_2}{k_1} \right) \exp(k_1 t) \quad (\text{식2-25})$$

여기서, C_0 = 초기염소 농도(mg/L)

C = 잔류염소 농도(mg/L)

k_1 = 결합 1·2차 반응식의 감소계수(hr^{-1})

k_2 = 결합 1·2차 반응식의 감소계수($L/mg \cdot hr^{-1}$)

2.1.3 재염소(Rechlorination) 주입

재염소 시설은 관로상이나 배수지 등에 관말 잔류염소 확보를 위해 추가적으로 염소를 주입하는 시설이다. 정수장에서 후염소 처리에만 의존할 경우, 관말에서 기준치 이상의 잔류염소 농도를 확보하기 위해서는 관로상에서 큰 잔류염소 농도 편차를 보이지만 재염소 주입기법의 적용에 의해 어느 정도 균등화할 수 있는 것으로 나타났으며, 정수장의 후염소 투입에만 의존하는 경우보다 재염소 주입기법을 잘 적용시켰을 경우 총 염소투입량의 감소효과를 보이는 것으로 나타났다(환경부, 1999).

재염소 투입시설의 설치는 정수장에서 잔류염소 상한기준(1.0 mg/L)을 적용하여 수도물 공급할 경우 배수지 또는 수용가에서 잔류염소 농도를 법적 잔류염소 농도(0.1 mg/L)이상 유지가 어려운 경우 설치한다(정창호, 2008).

재염소 투입시설 설치 판단 기준으로,

1. 관말 잔류염소 유지 강화가 필요한 경우(수인성 전염병 우려 시, 기타 비상시)에는 관말 잔류염소 유지목표를 달성할 수 있도록 정수장 잔류염소 유지농도를 강화한다.
2. 지자체 배수지 유출수에서 적정 잔류염소 유지가 안 될 경우 지자체와 협의하여 배수지 수위조정 등의 조치를 취하는 등의 배수지 운영관리를 강화하여 적정 잔류염소를 유지하도록 한다.
3. 지자체 배수지를 거치지 않고, 직접 수용가로 공급되는 지역은 수용가 잔류염소 농도를 기준으로 한다.

2.2 관망 수질 모델링

2.2.1 관망해석 목적

관망해석이란 수학적 표현방법을 통해 실제 상수도 관망에서 물의 흐름을 모의하는 과정이라고 정의할 수 있다. 관망해석에서 말하는 관망은 폐합관로(Loop)가 있는 망(Network)형태와 광역상수도 관로와 같은 수지(Branched)형태의 관로 모두를 포함한다(김성한, 2009).

관망해석은 장래 수도 시스템의 거동을 미리 예측하고자 할 때나 실제 상수도 시스템에서 여러 가지 제약조건으로 인해 직접 실험을 할 수 없는 경우에 일반적으로 시행한다. 관망해석의 목적은 관로내 각 지점에서 관경, 관길이, 펌프의 운전 상태, 유속계수, 밸브상태 등을 알고 있는 조건하에서 유량 및 동수두를 계산하여 관로를 통하여 흐르는 물이 안정하게 공급되고 있는가를 확인하기 위함이다.

관망해석에 있어서 가장 결정적인 요소는 실제 관로시스템의 구성요소들을 적절하게 조합하고 단순화 하여 모델화 한 후 수리적 기법들을 적용하여 방정식을 풀어 만족할 만한 해석결과를 얻을 수 있도록 하는 것이다. 관로에서의 수리적 모델을 다룰 때 모델에는 컴퓨터 프로그램뿐 아니라 관로의 구성요소들을 나타내는 자료도 함께 포함된다. 관로에서의 입력 자료의 정확도가 매우 중요하며, 예를 들어 입력 자료의 정확도가 20%라면 모델링에서 그 이상의 정확도를 얻기는 힘들다.

관망해석은 관로상의 각 지점에 있어서 유량과 동수두를 확보하여 관말까지 상시 공급체계를 갖추기 위해 절점수압과 유출유량과의 관계를 명확히 하고자 하는 것이다. 또한 관망내의 잔류염소의 변화와 체류시간과 같은 계산을 수행하여 수질의 안전성을 검토하기 위함이다.

2.2.2 관망해석의 형태

예측하고자 하는 목적과 수행하고자 하는 의도에 따라 관망해석의 형태는 달라진다. 가장 기본적인 모델의 형태는 정상상태모델(Steady-state simulation) 과 시간

변화모델(Extended period simulation, EPS)이다.

가) 정상상태 모델

정상상태는 시간에 따라 변화하지 않는 시스템으로 장시간에 걸쳐 시스템의 동작이 일단 평형상태를 이룬 것을 말한다. 저수지와 탱크의 수위, 펌프와 밸브의 가동 상태 및 계통내 공급량은 일정하게 유지되게 하여 관로 내 모의를 위한 경계조건을 결정한다. 정상상태모의는 평형상태의 수압, 유량과 특정한 상태의 경계조건과 수요량에 대하여 관망의 상태를 결정하고자 할 때 유용하다.

정상상태의 개념은 수학적 이론구축에 있다. 실제 관망시스템에서는 정상상태가 거의 없는데 이는 관망내의 탱크의 수위와 수요량은 지속적으로 변화하며 펌프는 가동과 정지를 반복하기 때문이다. 그러나 비상시 공급이나 목표연도의 일 최대수요량등과 같은 특수한 수리조건에 대한 대응을 예측하고자 할 때는 정상상태의 수학적 정립은 유용하게 사용될 수 있다. 정상상태모의는 모든 다른 유형 모의의 기본이 된다.

나) 시간변화모델

정상상태 해석에 의해 얻어진 결과도 수리학적 모델링에서 광범위하고 유용하게 적용될 수 있지만 현실적으로는 시간에 따른 물 사용량 변화의 영향, 탱크의 주기적인 채움과 비움, 펌프와 밸브의 작동 조건 등을 이해하기 위해서는 시간변화모델이 더 필요하다.

정상상태의 해석이 만족할 때 EPS의 과정을 진행하는 것이 수월하다. 이는 모델을 수행하는 사람이 가능성이 있는 시스템 거동의 수와 보정, 해석 및 설계의 과정에서 바꾸고 입력하여야 할 자료의 양이 많으므로 시간변화 모델을 수행하기 전에 반드시 정상상태 모델을 완료하여야 한다.

대부분의 수요량과 가동의 패턴이 하루를 단위로 변화하기 때문에 일반적으로 모의 시간은 24시간의 배수를 기준으로 한다. 그러나 짧은 시간내에 특정 관로를 정지해야 할 경우와 단수사고 같은 비상시에는 특정 시간 단위로 모의시간을 정해 즉각적으로 관로내 압력의 변화나 탱크의 수위를 예측할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 또한 수질상태의 안정화를 위해 모의시간을 수일단위로 조정하는 것이 수질변화

해석에 유리하다(주혜은, 2010).

2.2.3 EPANET 프로그램

상수도의 급배수시스템 내에서 수리 및 수질변화를 예측할 수 있는 EPANET은 미국의 환경청(US Environmental Protection Agency)에서 개발된 것으로 시간변화 모의를 바탕으로 수리학적 특성인 유량, 유속, 수압, 체류시간, 손실수두를 예측하여 전체 관망의 수질변화를 모의할 수 있는 프로그램이다.

EPANET은 크게 물리적 구성요소와 가동요소로 나눌 수 있으며 물리적 구성요소로는 관로(Pipe), 펌프(Pump), 밸브(Valve), 저수지 또는 배수지(Reservoir), 탱크(Tank), 절점(Junction) 등의 자료가 포함되고, 가동요소는 관망의 운영 및 가동을 위하여 필요한 자료로 곡선(Curve), 패턴(Pattern), 제어(Control), 해석옵션(Option) 등을 의미한다(Rossman, 1994).

관로는 한 지점에서 다른 지점으로 물을 이동시키는 역할을 하며 유체의 이동은 수두가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 흐르게 된다. 임의의 관로를 이동하는 유체와 연관된 손실수두는 식 2-26과 같다.

$$h_L = a \times q^b \quad (\text{식2-26})$$

여기서, h_L = 손실수두(L)

q = 유량(m^3/sec)

b = 유량지수

a = 저항계수

수리조건은 Table 2와 같은 식을 이용하여 계산 될 수 있으며 본 연구에서는 배수관망에서 가장 일반적으로 사용되는 Hazen-Williams 공식을 적용하였다. 층류(laminar flow)와 다른 유체에 적용이 용이한 Darcy-Weisbach 공식과 개수로 흐름에 많이 적용하는 Chezy-Manning 공식이 있다(채용석, 2002).

Table 2. Pipe head loss formulas

Formula	Resistance Coefficient(a)	Flow Exponent(b)
Hazen-Williams	$4.72 \times C^{-1.85} \times d^{-4.87} \times L$	1.85
Darcy-Weisbach	$0.0252 \times f(\varepsilon, d, q) d^{-5} \times L$	2
Chezy-Manning	$4.66n^2 \times d^{-5.33} \times L$	1

여기서, C = Hazen-Williams roughness coefficient

ε = Darcy-Weisbach roughness coefficient

f = friction factor(dependent on ε , d, q)

n = Chezy-Manning roughness coefficient

d = Pipe diameter(m)

L = Pipe length(m)

펌프는 물의 수리수두(hydraulic head)를 올리기 위해 사용되고, 펌프 선정시에는 펌프를 통한 유량과 양정과의 관계를 나타내는 펌프특성곡선과 마력 등을 고려해야 한다.

밸브는 관로에서의 유량과 압력을 조절하는 장치로 관로내에 있는 밸브를 제외하고는 모두 열려 있거나 닫혀 있으며, EPANET은 관망의 특정 지점에서 압력이나 유량을 조절하는 밸브들을 나타낼 수 있다. 밸브의 종류는 Table 3에 표시하였다. 펌프와 밸브는 연결요소(Link)이므로 관로를 작성하고 다시 펌프와 밸브를 연결하면 안되며, 관로를 연결하지 말고 절점과 절점사이를 연결하여야 한다.

Table 3. Types of valves

PRVs(pressure reducing valves)	to maintain constant outlet pressure on one leg of the hydraulic system
PSVs(pressure sustaining valves)	to maintain a minimum set pressure upstream of the valve
PBVs(pressure breaker valves)	to prevent pressure loss when water flows
FCVs(flow control valves)	to regulate the flow or pressure of water
TCVs(throttle control valves)	to simulate partially closed valve by adjusting minor headloss coefficient of valves

EPANET에 사용된 수리예측모델은 절점 s(저수지나 탱크)에 대해 다음과 같은 식을 적용하여 수리변화를 모의한다.

$$\frac{\partial y_s}{\partial t} = \frac{q_s}{A_s} \quad (\text{식2-27})$$

$$q_s = \sum_i q_{is} - \sum_j q_{js} \quad (\text{식2-28})$$

$$h_s = E_s + y_s \quad (\text{식2-29})$$

$$h_i - h_j = f(q_{ij}) \quad (\text{식2-30})$$

$$\sum_i q_{ik} - \sum_j q_{jk} - Q_k = 0 \quad (\text{식2-31})$$

여기서, y_s = 절점 s에 저장된 물의 높이(m)

q_s = 절점 s로 유입되는 유량(m^3/day)

q_{ij} = 절점 i와 j를 연결하는 관로내 유량(m^3/day)

h_i = 절점 i에서의 수두(m)

A_s = 절점 s의 단면적(m^2)

E_s = 절점 s의 높이(m)

Q_k = 절점 k에서 소비되거나 공급되는 유량(m^3/day)

f = 관로내 수두손실과 유량사이의 관계함수

식 2-27 절점 s에 대한 유량을 나타내고, 절점 s에 대한 물수지는 식 2-28, 관로 교차점에서의 물수지는 식 2-31로 나타낸다. 식 2-30은 관로내에서 유체로 인한 에너지손실이나 이득을 나타내고, 시간이 0(zero)일 때 초기 절점의 높이(y_s)를 알면 식 2-30과 2-31은 경계조건(boundary condition)으로 식 2-29를 이용하여 유량(q_{ij})과 수두(h_i)를 구할 수 있다. 관망에서의 수리를 해석한 후 식 2-28을 이용하여 각 절점에서 유입·유출량을 계산하고, 식 2-27을 이용하여 일정시간간격 이후에 새로운 절점의 표고를 찾는다. 이 과정은 나머지 시물레이션 기간에 대해 일정시간간격 이후로 반복하여 연장기간수리해석(extended period hydraulic simulator)을 얻게 된다(김경록, 2000).

동역학적 수질예측모델은 시간의 경과에 따라 관로속을 흐르는 용존물질의 변화가 가능하며 각 관로에 연결된 절점 i와 j내에서 물질의 질량보존방정식을 풀기 위해 수리학적 모형으로부터 얻어진 유체를 이용한다.

$$\frac{\partial c_{ij}}{\partial t} = \frac{q_{ij}}{A_{ij}} \times \frac{\partial c_{ij}}{\partial x_{ij}} + \theta(c_{ij}) \quad (\text{식2-32})$$

여기서, c_{ij} = 관로 i, j에서의 물질 농도(mass/m³)

x_{ij} = 관로 i, j사이의 거리(m)

q_{ij} = 시간 t에서 관로 i, j사이의 유속(m/s)

A_{ij} = 관로 i, j사이의 단면적(m²)

$\theta(c_{ij})$ = 관로 i, j사이의 용질반응속도(mass/m³/day)

이 식은 시간이 0일 때 알고 있는 초기조건과 각 관로의 경계조건(node i에서 $x_{ij}=0$)으로 계산하여야 한다.

$$c_{ij}(0, t) = \frac{\sum_k q_{ij} c_{ki}(L_{ki}, t) + M_i}{\sum_k q_{ki} + Q_{si}} \quad (\text{식2-31})$$

여기서, L_{ki} = 관로 k, i 사이의 길이(m)

M_i = node I에서의 외부 유입물질(mass)

Q_{si} = 유입원의 유량(m^3/day)

관로 i, j에 대한 경계조건이 관로 i, j로 흐름을 전달하는 모든 관로 k, i의 하위 절점(end node)의 농도에 따라 달라진다는 것에 주의해야 한다(유희중, 2002).

EPANET의 반응속도모델(Reaction rate model)에서는 수체와 관벽을 따른 물질과의 반응이 일어나며, 이 두 가지의 형태의 반응은 1차 반응을 가정하며 이에 따른 감소반응식은 2.1.2절을 따른다.

3. 연구방법

3.1 연구 대상

실험 대상지역은 제주도내 3곳의 정수장으로 어승생, 남원, 강정 정수장이 해당된다. 각 정수장은 서로 다른 원수의 특성을 지니고 있어 원수의 성상별로 잔류염소 변화를 모의하기 유리할 것으로 판단되었다.

어승생 정수장은 지표수를 원수로 하여 2012년도 평균유량을 기준으로 하루에 약 5,506 m³/d의 정수를 생산하고 있으며, 남원정수장은 지하수를 원수로 26,769 m³/d 생산 공급하고 있고, 마지막으로 강정정수장은 용천수를 원수로 하여 12,374 m³/d 생산 공급한다.

Table 4. Characteristics of surveyed 3 water treatment plants

Division	Eoseungsaeng	Namwon	Gangjeong
Source	surface water	groundwater	spring water
Capacity(m ³ /d)	15,000	37,000	25,000
Water Treatment Process	slow filtration	disinfection	rapid filtration
Disinfectant	calcium hypochlorite	calcium hypochlorite	calcium hypochlorite

어승생 정수장은 현재 공급가구수에 비해 관로가 길며 다른 수계에서의 유입이 없으며 자연유하방식을 이용하고 있고 여름철 초기 유입 염소량이 높아 정수장 근접지역에선 높은 잔류염소농도를 나타내며 거리가 먼 관말지역에서의 잔류염소농도는 현저히 낮게 나타나 EPANET 2.0을 통해 잔류염소 예측 및 재염소 지점선정에 유리할 것으로 판단되어 선정하게 되었다.

대상지역은 동부 26.8 Km의 간선관로와 서부 21.4 Km의 간선관로로 나누어져 있으며 DCIP관(Ductile Iron Pipes) 으로 매설되어 있다. 동부 간선에는 PE관

(Polyethylene pipes)의 와산지선과 교래지선이 있으며 서부 간선에는 DCIP관의 해안지선, 새마을 연수원지선이 있으며 PE, SP(Steel Pipes), HI-3P(3중벽구조)가 혼합된 금악지선으로 나뉘어 있다.

정수장이 하나의 배수지 역할을 하며 간선과 지선을 거쳐 각 가정으로 공급되는 시스템을 갖추고 있으며 따로 감압밸브는 설치되지 않아 압력이 매우 높게 나타난다.

본 연구에서는 각 지선이 끝나는 지점을 수질모의 지점으로 선정하였다.



Fig 1. Water treatment plant Eoseungsaeng pipe network.

3.2 연구 절차

관망구축을 위해서는 우선적으로 관망의 수리학적 해석이 이뤄져야 수질예측의 정확도를 높일 수 있다. 수리해석이 이뤄진 모델을 기초로 하여 수질변화를 예측하는데 본 연구에서는 잔류염소 예측용으로 수질해석을 시도하였다. 일반적으로 관망해석 모델을 적용하는데 있어서 대부분 EPANET을 이용하고 있으며, 200 mm 이상의 배수관을 위주로 관망해석이 이루어지는 EPANET 모델은 배·급수관로의 수리해석, 잔류염소 예측모의에 적합하다고 하겠다. EPANET은 시뮬레이션하는 동안 각 절점의 압력, 농도, 관로에서의 흐름, 체류시간, 배수지의 수위, 다른 수계의 혼합 등을 예측할 수 있다. 관망 수질 모델링 절차는 Fig. 2와 같다. 우선적으로 수리해석 및 수질모델링을 하기 위한 대상지역을 선정하고, 도면과 현장조사를 통해 지역적인 특징을 파악하여 관망데이터를 수집하고 물의 유통과정을 파악한다. 대상 지역 내에서 농도 변화를 가장 잘 파악할 수 있는 곳으로 측정지점을 선정한다. 현장실험과 Lab실험을 통해 구해진 수질인자와 관망데이터를 입력하여 관망도를 작성한다.

본 연구에서는 관망구축을 위해 EPANET 2.0을 이용하였으며 어승생 정수장의 공급관로를 대상으로 선정하였다. 현장조사는 2013년 11월 5일과 12월 6일 두 차례에 걸쳐 이루어 졌으며, 잔류염소는 두 번 측정하여 평균값을 사용하였으며 관말 수도꼭지에서 측정하였으며 현장조사 외 3곳 정수장의 여과수를 채취하여 실험실로 옮겨 수온변화에 따른 수체감소계수 도출 실험을 하였다. 관망도를 구축하기 위해 어승생 관로의 CAD파일을 이용하여 절점을 결정했으며 등고선과 표고 값을 읽어 Elevation값을 결정하였다. 유량과 수압패턴은 실제 어승생 정수장의 1개월(2013년9월) 동안 시간별 측정값을 이용하여 24시간동안 1시간 단위로 값을 입력하여 6시간을 한 구간으로 설정하였다. 관망구축에 사용된 옵션은 Table 5와 같다

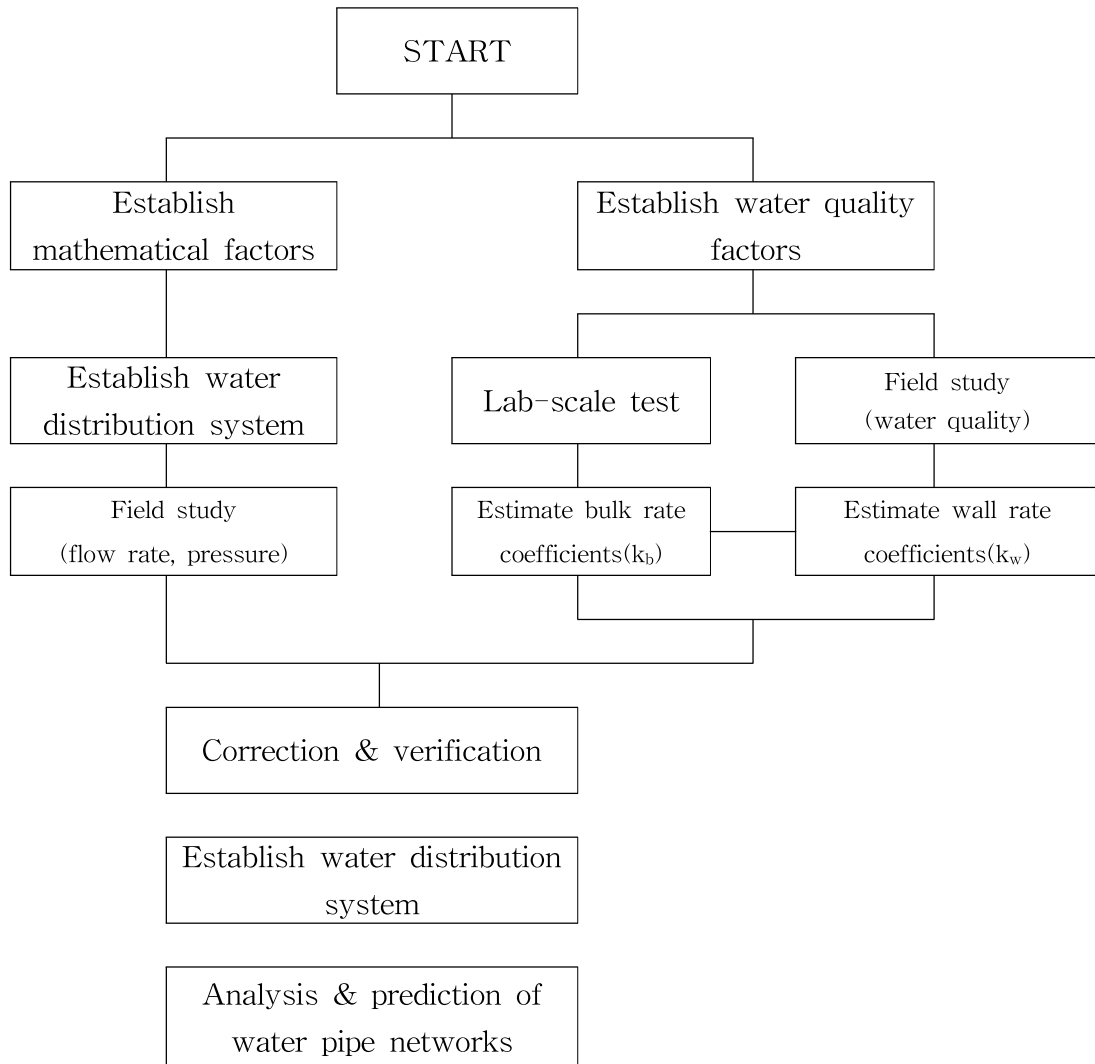


Fig. 2. Modeling procedures of chlorine residual in water distribution system.

상수관망의 수리해석 및 수질 예측에 대한 검증과 보정의 적합성은 예측의 목적에 따라 차이가 발생할 수 있으며, 상수관망의 특성상 관망을 골격화(skeleton) 하는 범위에 따라 예측치의 적정범위가 달라질 수 있다. Mays(2000)는 수리해석의 경우 수두손실의 15% 범위내로 예측한다면 수용가능하다고 제안한 바가 있으며, 일반적으로 수리해석에 비해 수질의 변동성이 더 큰 것으로 판단하여 본 연구에서는 검증 및 보정 과정을 통하여 예측치와 실측치 농도의 표준오차가 20% 범위 내에 들도록 완성하였다(김도환, 2010).

Table 5. Network analysis options

Flow Unit	(m ³ /day)
Headloss	Hazen-Williams equation
Specific gravity	1
Relative Viscosity	1
Maximum Trials	40
Accuracy	0.001
If Unbalanced	Continue
Default Pattern	1
Demand Multiplier	1
Quality	Chlorine (mg/L)
Relative Diffusivity	1
Quality Tolerance	0.01

3.3 EPANET 2.0 모델링

3.3.1 현장조사

모델링을 위한 현장조사지점을 Fig. 3에 표시하였으며, 어승생 정수장의 주요 간선은 진입이 불가능한 관계로 측정에서 제외하였으며, 대상지역의 관말 수도꼭지에서 모델링에 필요한 수질을 측정하는 것을 목적으로 하여 각 지점의 잔류염소 농도를 측정하였으며 측정지점은 각각의 지선이 끝나는 곳으로 선정하였다. 현장의 잔류염소 농도는 11월 5일, 12월 6일 두 번 측정하였다.

수온 변화에 따른 수체감소 도출을 위해 어승생, 남원, 강정 정수장 원수의 채취와 함께 수질측정을 하였다. 수질 측정에 사용된 방법은 Table 6으로 나타내었다.

Table 6. Analysis method and installations

Items	Methods	Instruments
Free Chlorine	DPD	Pocket Chlorimeter (HACH)
Temperature		Portable Meter HQ40D(HACH)
pH		Portable Meter HQ40D(HACH)
DO		Portable Meter HQ40D(HACH)
Conductivity		Portable Meter HQ40D(HACH)

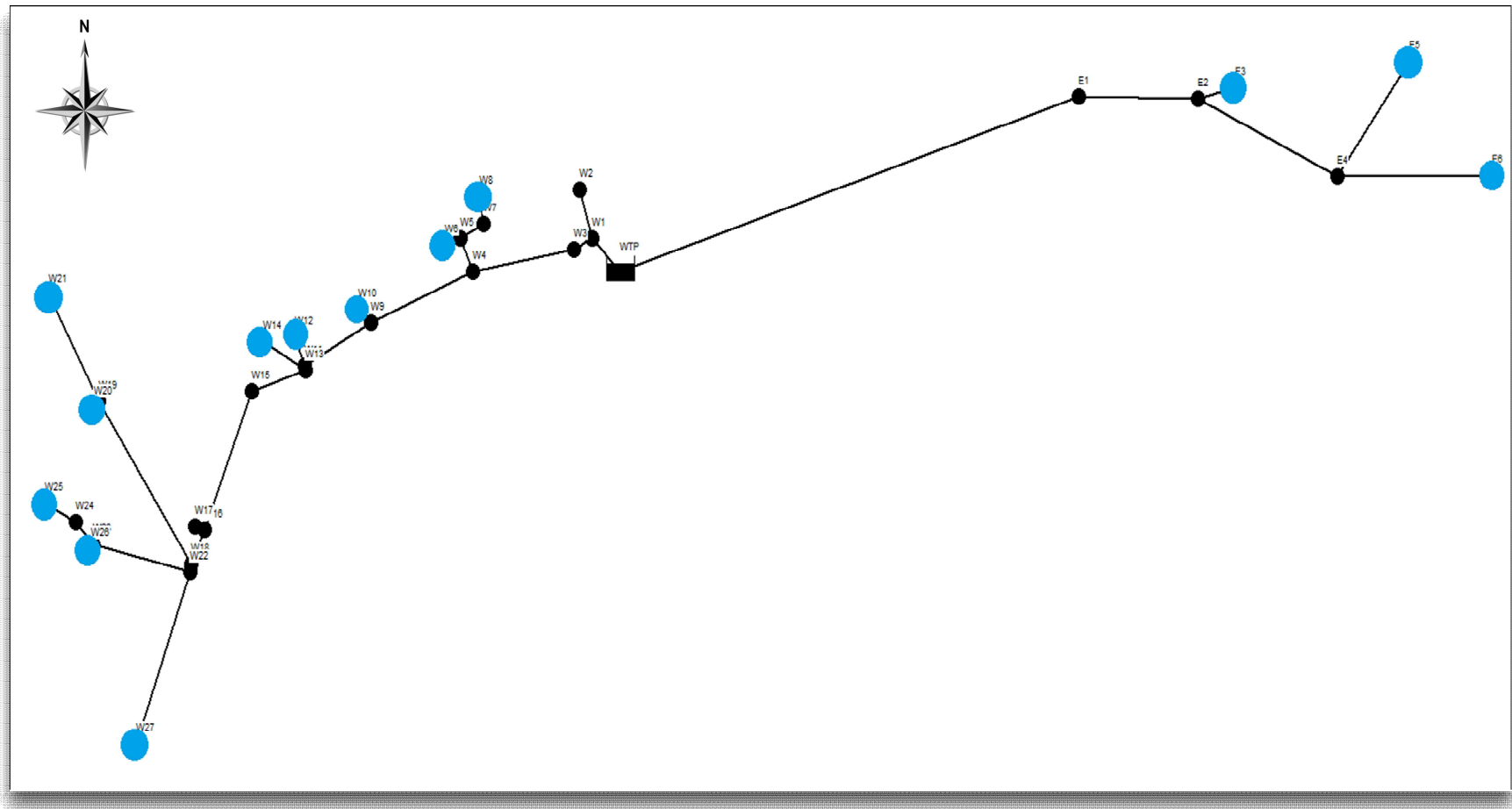


Fig. 3. The survey point.

3.3.2 수체감소계수

수체감소는 수중에 존재하는 피산화물에 의해 소모되는 염소량을 의미하며, bottle test 또는 jar test를 통하여 시간에 따른 감소량을 1차 반응식을 통하여 산정한다 (AWWA, 1996).

수체감소계수 도출을 위해 serum bottle(70 mL)과 테프론 코팅이 되어있는 실리콘 마개를 사용하여 bottle test를 실시하였다. 실험상의 오차를 줄이기 위해 실험에 사용한 시료병은 질산세척 후 초순수로 깨끗이 씻고 120°C에서 2시간 건조 후 사용하였다.

시료는 3개 정수장의 여과수를 사용하였으며 세럼병에 기포가 생기지 않도록 시료 59 mL를 채웠다. 1개의 병에 59 mL씩 담아서 총 20개의 병을 준비하였다. 초기 염소농도가 1 mg/L가 되도록 차아염소산나트륨을 주입한 후 밀봉하여 온도조건을 5, 15, 25°C로 설정한 배양기에 보관하였다. 각 온도별로 0 hr, 0.5 hr, 1 hr, 2 hr, 3 hr, 5 hr, 7hr, 10 hr, 13 hr, 19 hr, 25 hr, 35 hr, 45 hr, 60 hr, 75 hr, 95 hr, 115 hr, 145 hr 간격으로 잔류염소 농도를 측정하였다.

반응시간이 증가함에 따라 잔류염소 감소가 완만해지므로 24시간 이전에는 측정 간격을 짧게 하였고, 24시간 이후부터는 측정간격을 늘려가면서 최종 145시간까지 잔류염소를 측정하였으며 측정법은 시약발색법(DPD법)을 이용하였다. 이렇게 구해진 온도별 수체감소계수 값을 Arrhenius equation에 대입하여 수온과 수체 잔류염소 감소계수의 상관관계를 평가하였다.

3.3.3 관벽감소계수

수체 및 관벽의 잔류염소 감소계수를 추정하는 방법은 Table 7과 같다.

Table 7. Assumed methods of chlorine wall decay coefficients(김도환, 2010)

Informal adjustment	The modeler may informally adjust the parameters relying upon experience and judgment to lead to an acceptable set of parameters. This method was most successful in systems dominated by the bulk
---------------------	--

	decay where there was little wall demand.
Relationship between pipe characteristics and wall reaction rate constant	It may be postulated that certain physical pipe characteristics lead to increased wall demand. For example, pipes of a particular age or material may be more susceptible to uptake of chlorine at the wall or a relationship may exist between the roughness coefficient and wall demand.
Geographically zoned wall reaction rate coefficients	Pipe location may also serve as a surrogate for various factors that affect wall demand. Methods for grouping pipes and assigning and testing alternative wall demand parameters were used to derive best-fit parameters.
Heuristic method	The method starts at the point of entry of the water into the system with a bulk reaction rate coefficient based on bottle tests and first determines the best fit values for the pipes in the vicinity of the entry point. the method then moves downstream in an orderly manner determining best fit values along the way. Distribution systems with multiple sources or flow reversals are not very amenable to this approach.
Systematic analysis method	The chlorine decay bottle test data is analyzed using a nonlinear least squares regression software package to determine which kinetic model best describes the bulk decay reaction and to estimate bulk reaction rate coefficients for each water. In most cases, first order decay kinetics gave the best fit. A network modeling simulation is then performed using the bulk decay rate coefficient determined in bottle test. If the model over predicts the observed chlorine concentration, this is an indication that there is significant wall decay going on in the system.

본 연구에서는 조건의 제약을 적게 받으며 적용가능 범위가 비교적 넓은 추정법인 Systematic analysis method를 이용하여 관벽감소계수를 도출하였다.

3.3.4 재염소 지점 및 주입농도 결정(재염소 이후의 수체감소계수)

EPANET 2.0을 이용하여 해당지역에 관망도를 구축하고 구축된 관망도에 수체와 관벽의 감소계수를 적용시킨 후 잔류염소 조절이 가장 어려운 최악의 조건으로 설정하여 수질을 예측한다. 예측된 수질이 기준 값을 만족하지 못하게 나타났을 때 이를 해결하기 위하여 주송수관로상에 추가적으로 염소를 주입하는 방안과 매설된 관경을 축소하는 방안, 송수량을 증가시키는 방법 등을 검토하게 되

는데 본 연구에서도 이와 같은 과정을 거쳐 재염소 지점을 선정하였으며 주입농도를 산정하였다. Table 8은 어승생 정수장의 2012년 급수계통별 수도꼭지 수질 검사결과이며, 잔류염소농도가 높은 지역은 최대 0.83 mg/L까지 나타났으며 낮은 지역은 0.11 mg/L로 심한 편차를 보였다. Table 9에 Table 8의 측정지점을 표시하였다.

Table 8. Residual chlorine concentration of water supply systems(제주 수자원본부)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
2012.12	0.52	0.52	0.4	0.3	0.45	0.15	0.2	0.25
2012.11	0.55	0.51	0.55	0.3	0.4	0.15	0.25	0.3
2012.10	0.43	0.69	0.37	0.25	0.43	0.2	0.31	0.2
2012.09	0.4	0.6	0.4	0.2	0.4	0.2	0.3	0.2
2012.08	0.48	0.62	0.45	0.15	0.45	0.15	0.31	0.15
2012.07	0.5	0.6	0.5	0.2	0.5	0.2	0.3	0.2
2012.06	0.51	0.59	0.42	0.21	0.46	0.2	0.31	0.25
2012.05	0.6	0.5	0.4	0.2	0.5	0.2	0.3	0.3
2012.04	0.62	0.52	0.4	0.54	0.32	0.3	0.3	0.3
2012.03	0.6	0.55	0.41	0.55	0.3	0.3	0.3	0.3
2012.02	0.5	0.6	0.4	0.6	0.2	0.2	0.3	0.2
2012.01	-	-	-	0.83	0.11	0.11	0.25	-

*. -는 미측정

Table 9. Sampling points

A1	San 180-3, Odeung-dong, Jeju-si, Jeju-do, Korea
A2	683, Wolpyeong-dong, Jeju-si, Jeju-do, Korea
A3	1286-1, Wasan-ri, Jocheon-eup, Jeju-si, Jeju-do, Korea
A4	1930-2, Bonggae-dong, Jeju-si, Jeju-do, Korea
A5	1039-1, Wolpyeong-dong, Jeju-si, Jeju-do, Korea
A6	893-3, Yeongpyeong-dong, Jeju-si, Jeju-do, Korea
A7	1156-1, Doryeonil-dong, Jeju-si, Jeju-do, Korea
A8	639-1, Sogil-ri, Aewol-eup, Jeju-si, Jeju-do, Korea

4. 결과 및 고찰

4.1 EPANET 2.0 모델 적용

4.1.1 현장조사 결과

모델링을 위한 현장조사 결과를 Table 9에 나타내었다. 11월 5일 측정된 서부의 경우 금약(0.03 mg/L), 봉성(0.03 mg/L), 새마을연수원(0.06 mg/L), 유수암(0.02 mg/L), 광령지선(0.09 mg/L)이 기준치 미달로 측정됐으며, 동부의 경우 송당지선에 서 0.02 mg/L로 기준치에 미달되는 것으로 나타났다. 이렇게 측정된 잔류염소농도는 관벽감소계수를 구하기 위한 시행착오법에 적용하였다.

Table 10. Water treatment plant pipeline Eoseungsaeng survey point(2013년11월5일)

Sampling points Measuring	Andeok police station	Geumak	Bongseo ng	New Communit y Institute	Yusam	Gwangn yeong	W a t e r Treatme nt Plant	Gyora	Wasan	Songdan g
Number of pipeline	W27	W25	W21	W12	W10	W8	WTP	E3	E5	E6
Pipe length from the water treatment plant(m)	21,459	21,805	24,524	12,543	9,753	8,754	-	18,797	27,176	26,649
Residual chlorine(mg/L)	0.21	0.03	0.14	0.06	0.02	0.09	0.62	0.19	0.11	0.02

Table 10에는 각 정수장의 2012년도 월간 수질검사 결과를 정리하였으며 각 각의 값들은 전체 값의 평균치이며 최대값과 최소값을 함께 표시하였으며, 먹는물 수질기준 항목 중에서 1년 동안 검출된 적이 한 번도 없는 항목에 대해서는 제외하였다. 세 개의 정수장에서 대부분 비슷한 값을 나타냈으며 지표수를 사용하는 어승생 정

수장의 경우만 과망간산칼륨소비량이 검출됐다. 이는 다른 정수장에 비해 상대적으로 유기물 함량이 높다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

Table 11. Survey of the 2012 monthly water purification plant tests (제주 수자원본부)

Sampling points Test items	Eoseungsaeng	Namwon	Gangjeong
Nitrate nitrogen	0.325(0.2~0.6)	2.108333(1.5~3.1)	1.733333(1~2.8)
Total Trihalomethane	0.004909(ND~0.009)	0.001333(ND~0.002)	0.004833(0.001~0.008)
KMnO ₄	0.6(ND~0.7)	ND	ND
Hardness	14.25(13~16)	36.5(34~38)	27.16667(22~36)
Hydrogen ion concentration (pH)	7.6(7.4~7.8)	7.8(7.5~8)	7.6(7.4~7.8)
Zinc(Zn)	0.002(ND~0.002)	ND	0.006(ND~0.009)
Chlorine ion	3.5(3~4)	8.166667(8~9)	6.333333(5~9)
Evaporation residue	40.25(39~43)	79.41667(74~83)	63.58333(56~83)
Turbidity	0.166667(0.1~0.31)	0.075(0.06~0.11)	0.166667(0.1~0.19)
Sulfate ion	2(ND~2)	2.4(ND~3)	2.363636(ND~3)
Aluminium (Al)	ND	ND	0.025(ND~0.003)
Residual chlorine	0.570833(0.48~0.69)	0.545833(0.48~0.64)	0.575(0.51~0.68)
Chloroform	0.002222(ND~0.005)	ND	0.001(ND~0.001)
Chloral hydrate	0.0044(ND~0.0063)	0.0007(ND~0.0007)	0.0009(ND~0.0012)
Dibromoacetonitrile	0.0005(ND~0.0005)	0.0007(ND~0.0009)	0.000667(ND~0.0008)
Dichloroacetonitrile	0.0008(ND~0.001)	ND	0.0005(ND~0.0005)
Haloacetic acid	0.008667(ND~0.14)	0.0015(ND~0.001)	0.0105(ND~0.004)
Bromo dichloromethane	0.001889(ND~0.003)	ND	0.0014(ND~0.002)
Dibromochloromethane	0.001222(ND~0.002)	0.001(ND~0.001)	0.002167(0.001~0.003)
1,4-dioxane	0.001(ND~0.001)	0.001(ND~0.001)	0.001(ND~0.001)

4.1.2 수체감소계수 산정

잔류염소의 수체감소계수는 어승생, 남원, 강정 정수장의 여과수에 차아염소산 나트륨(NaOCl)을 주입하여 잔류염소 농도를 1 mg/L 로 조절한 후 측정하였다. 시료채취는 남원·강정정수장 2013년 9월 10일, 어승생정수장 2013년 9월 26일에 각각 이루어졌다. 원수의 수질측정결과는 Table 11에 나타내었다. 국내 먹는물 수질기준에서 pH는 5.8~8.5로 규정하고 있으며 일반적인 천층지하수의 경우는 토양 내 유기물이 미생물에 의해 분해되어 용존 carbon dioxide(CO_2) 농도가 높아지게 되고 이러한 반응으로 인해 토양수의 carbonic acid(H_2CO_3) 농도가 증가함에 따라 pH가 낮아지게 된다. 그러나 남원정수장의 경우 일반적인 반응과 다르게 pH가 기준치 이상으로 높게 나타났다.

Table 12. Water quality characteristics for bulk test

Sampling points Measuring item	Eoseungsaeng	Namwon	Gangjeong
Measurement date	2013.09.26	2013.09.10	2013.09.10
Temperature(°C)	19.9	19.2	23
pH	7.96	8.81	7.08
DO(mg/L)	8.55	8.87	6.31
Conductivity($\mu\text{s/cm}$)	103.4	110.6	82.3
Residual chlorine(mg/L)	0.69	0.52	0.68

수체감소계수 도출을 위한 실험 결과는 Fig. 4에 나타내었는데, 잔류염소의 감소를 보면 초기에 급격한 감소를 보이는데, 이는 원수에서 초기 염소요구량이 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 또한 온도가 높을수록 감소량이 크게 나타나는 것을 볼

수 있다. 염소는 초기반응의 급격한 감소 후에 완만한 기울기 변화를 보이며 감소하였는데, 실제 정수장을 통해 나온 정수들은 정수지의 체류시간으로 인하여 어느 정도는 초기반응을 거친 상태라 할 수 있다(이동석 외, 2004).

어승생 정수장의 경우 초기 급격한 감소경향이 매우 뚜렷하게 나타났으며 강정 정수장의 경우도 적은 농도지만 유사한 초기반응을 보였다. 두 정수장은 염소를 소비할 만한 피산화물을 어느 정도 함유하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 그래프를 비교하면 어승생 정수장의 경우 곡선형으로 25℃에서 절반의 잔류염소 소비까지 120시간이 걸렸으며 초기 20시간 전에 급격한 잔류염소 소모가 이루어졌다. 그러나 남원과 강정 정수장의 경우에는 직선형의 그래프를 나타내며 100시간에 도달할 때까지 염소감소량이 초기염소의 50%에도 미치지 못했다. 이는 어승생 정수장에 비해 유기물 함량이 비교적 낮기 때문이며 남원 정수장의 원수인 지하수는 토양층을 통과하며 어느 정도의 정화가 일어났기 때문에 염소를 소비할 만한 물질의 함량이 매우 낮으므로 급격한 변화를 일으키지 않기 때문이다. 실험을 통해 얻어진 수체감소계수는 Table 12와 같다.

안재찬 등(2005)의 연구에서는 한강을 수원으로 하는 정수장의 수체감소계수가 25℃에서 평균 0.0184 hr⁻¹로 어승생 정수장에 비해 3배 높은 값을 보였으며, 김도환 등(2010)의 연구에서의 수체감소계수는 25℃에서 0.024 hr⁻¹로 4배 높은 값을 나타냈다. 이는 제주도 정수장의 원수가 육지부의 원수에 비해 상대적으로 유기물의 함량이 낮음을 의미한다.

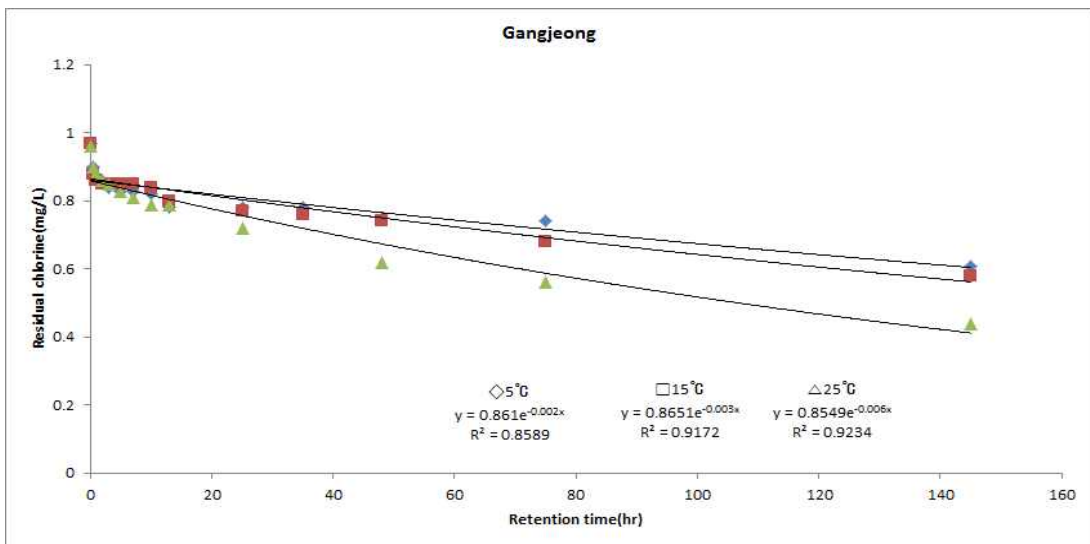
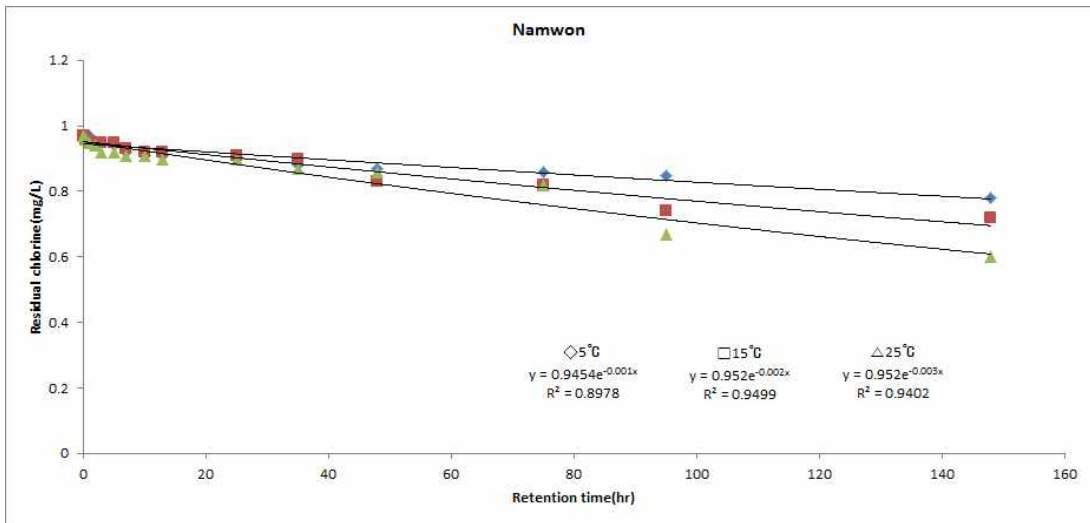
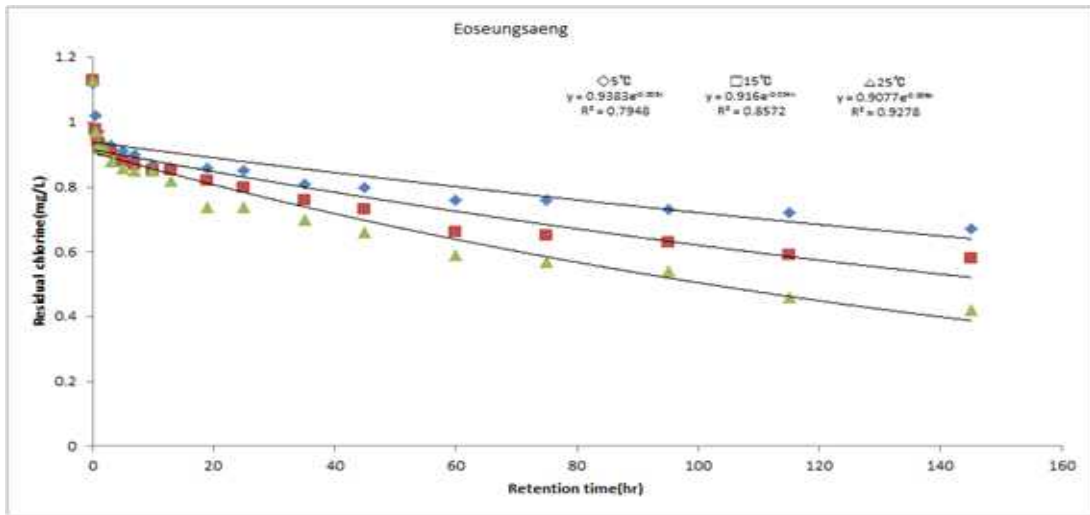


Fig. 4. Chlorine decay at different temperature.

Table 13. Bulk decay coefficient

	5°C	15°C	25°C
Eoseungsaeng	-0.003hr ⁻¹	-0.004hr ⁻¹	-0.006hr ⁻¹
Namwon	-0.001hr ⁻¹	-0.002hr ⁻¹	-0.003hr ⁻¹
Gangjeong	-0.002hr ⁻¹	-0.003hr ⁻¹	-0.006hr ⁻¹

수체반응(bulk reaction)을 통한 잔류염소 감소는 화학적인 산화반응을 따르기 때문에 온도가 상승할수록 반응속도가 증가하는데, Pewell et al(2000)은 Arrhenius equation을 통하여 온도변화에 대한 수체 잔류염소 감소계수의 증감을 적절하게 예측할 수 있음을 보고한 바 있다.

수온과 수체 잔류염소 감소계수의 상관관계를 평가하기 위하여 Arrhenius equation을 이용하여 온도에 따른 감소계수 상관관계식을 도출하면 Fig. 5와 같다.

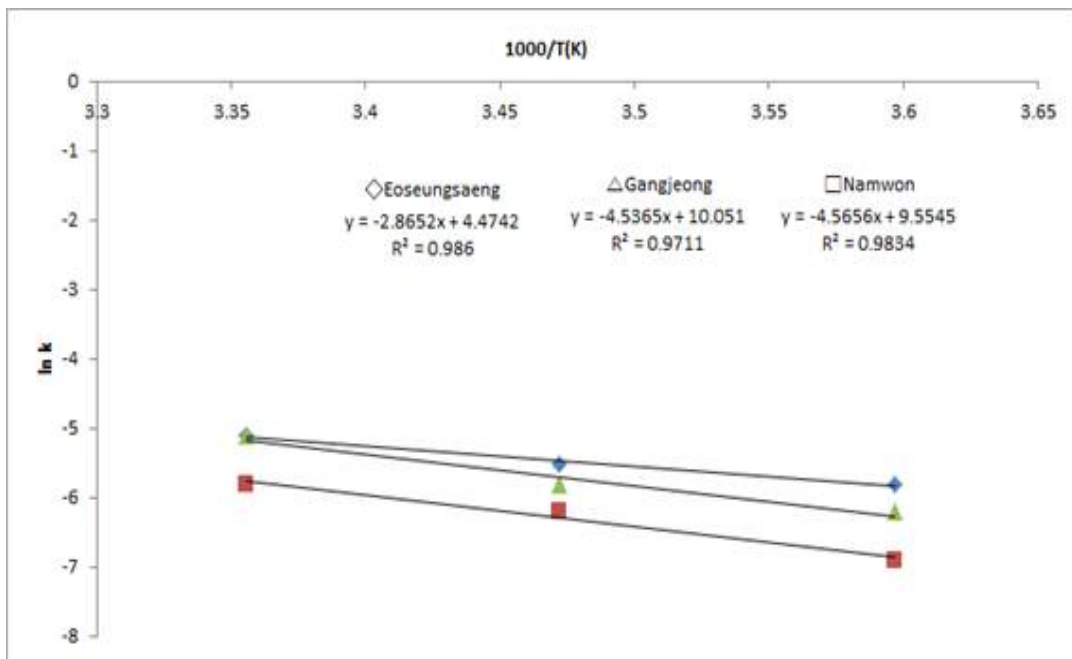


Fig. 5. Arrhenius equation used at different temperature of decay coefficient.

4.1.3 관벽감소계수 보정 및 검증

대상지역인 어승생정수장은 11개 마을 2,377세대(8,627명)에 수돗물을 공급하고 있으며 50개의 목장과 42개의 시설에도 용수를 공급하고 있으며, 현재 동부와 서부로 나뉘어 각각에 보내지고 있다. 동부 26.8 km와 서부 21.4 km의 간선을 중심으로 여러 지선들로 나뉘어 흐른다. 수체감소계수도출을 위한 정수장현장조사가 이뤄진 9월의 일 평균 용수공급량은 11,602 m³/d이다.

일반적인 정수장과는 다르게 어승생 정수장은 따로 배수지가 없는 관계로 배수지의 역할을 함께하며 펌프나 밸브 없이 자연 유하식으로 운영되고 있으며 현재 물의 유통 조건에 맞게 관망도를 구축하였다. 관망구축을 위해 사용된 관로 현황은 Table 13과 같다.

Table 14. Pipeline present condition

Pipes ID	Node1	Node2	Types of pipe	Diameter (mm)	Length(m)	note
1	WTP	E1	DCIP	450	14,367	Main line
2	E1	E2	DCIP	350	3,737	Main line
3	E2	E3	-	100	692	Gyoraeline
4	E2	E4	DCIP	350	4,505	Main line
5	E4	E5	PE	100	4,565	Wasan line
6	E4	E6	DCIP	350	4,038	Songdang line
7	WTP	W1	DCIP	450	1,064	Main line
8	W1	W2	DCIP	200	2088	Haean line
9	W1	W3	DCIP	350	575	Main line
10	W3	W4	DCIP	300	2,839	Main line
11	W4	W5	-	100	1,295	Gwangnyeong line
12	W5	W6	-	100	454	Gwangnyeong line

13	W5	W7	-	100	686	Gwangnyeong line
14	W7	W8	-	100	2,293	Gwangnyeong line
15	W4	W9	DCIP	300	2,839	Main line
16	W9	W10	-	100	2,435	Yusuam line
17	W9	W11	DCIP	300	2,839	Main line
18	W11	W12	-	150	2,386	New community institute line
20	W11	W13	DCIP	300	160	Main line
21	W13	W14	-	100	1,072	Wondong line
22	W13	W15	DCIP	300	1,478	Main line
23	W15	W16	DCIP	300	3,973	Main line
24	W16	W17	-	100	571	Saebyeoloreum line
25	W16	W18	DCIP	300	624	Main line
26	W18	W19	-	100	5,420	Bongseong line
27	W19	W20	-	100	1,195	Bongseong line
28	W19	W21	-	100	2,710	Bongseong line
29	W18	W22	DCIP	300	377	Main line
30	W22	W23	PE	150	2,770	Geumak line
31	W23	W24	PE	80	721	Geumak line
32	W24	W25	SP	80	1,542	Geumak line
33	W23	W26	HI-3P	150	2,613	Geumak line
34	W22	W27	DCIP	250	4,687	Main line

현장조사시의 수온인 19.9℃를 바탕으로 Arrhenius equation으로 추출해 낸 잔류염소 수체감소계수(k_b) -0.1188 d^{-1} 를 적용하여 모의한 다음, 보정과정을 통하여 관벽감소계수(k_w)를 도출하였다. 도출한 관벽감소계수는 Table 14와 같다. Table 14에서 Measured value는 현장 조사를 통해 측정된 잔류염소 값이며 Predicted value는 시행착오법으로 관벽계수를 도출하여 EPANET을 통해 보정한 값이다.

Table 15. Correction of chlorine decay coefficient(19.9°C)

Section	Chlorine decay coefficient		Measured value (mg/L)	Predicted value (mg/L)	Retention time(hr)	Error(%)
	$k_b(d^{-1})$	$k_w(m/d)$				
WTP	-0.1188	-	0.62	0.62	-	-
W25		-1.44	0.03	0.03	10.67	-
W21		-0.17	0.03	0.03	18.97	-
W12		-0.23	0.06	0.06	15.22	-
W8		-0.63	0.09	0.09	5.22	-
E3		-0.012	0.19	0.19	35.91	-
E5		-0.014	0.11	0.11	52.26	-
E6		-1.62	0.02	0.02	46.99	-

W25지점의 경우 DCIP재질의 관경이 300 mm인 주 송수관로에서 분기되면서 150 mm 관경의 PE관으로 관로가 변경되고 다시 관경이 80 mm로 바뀌고 마지막으로 80 mm의 SP관으로 바뀌게 된다. 이처럼 관로의 변화를 거치면서 관벽감소계수 값이 커지게 되면서 비교적 높은 -1.44 m/d로 추정되었으며 E6지점의 경우 관중이나 관경의 변화가 없었음에도 가장 높은 계수 값을 나타내었다.

Table 15에서는 관벽감소계수의 검증을 위해 보정된 잔류염소 관벽감소계수와 잔류염소 수체감소계수를 도입하여 2013년 12월의 일별 평균용수공급량 12,623 m³/d와, 수온 3°C 조건을 기준으로 잔류염소 실측값과 EPANET을 통해 예측한 값을 비교하였다. 제주지역의 누수율 조사는 정수장 계통별로 정확한 자료가 없어 상수도통계(환경부, 2001)상의 제주도지역 평균 누수율인 15%를 적용하였다.

실제온도 3°C를 Arrhenius equation에 의한 상관관식을 통해 도출한 -0.0651 d⁻¹를 수체감소계수로 놓고 검증한 결과, 동부관로의 경우 체류시간이 가장 긴 E5지점에서 오차율이 19.05%로 가장 크게 나타났으며 서부관로의 경우 W12지점에서 가장 큰 오차율을 나타냈으며, 모든 지점에서의 오차율은 20% 미만이었다. 수리해석에 비해 수질의 변동성이 더 큰 점을 감안할 때 수용 가능한 오차율이라 판단하여 이를 기초로 모의를 시작하였다.

Table 16. Verification of chlorine decay coefficient(3.0°C)

Section	Chlorine decay coefficient		Measured value (mg/L) (A)	Predicted value (mg/L) (B)	Retention time(hr)	Error(%) ($\frac{A-B}{A} \times 100$)
	$k_b(d^{-1})$	$k_w(m/d)$				
WTP	-0.0651	-	1.04	1.04	-	-
W25		-1.44	0.08	0.07	11.09	12.5
W21		-0.17	0.06	0.05	19.39	16.66
W12		-0.23	0.21	0.17	15.64	19.05
W8		-0.63	0.19	0.16	5.64	15.79
E3		-0.012	0.51	0.47	36.33	7.84
E5		-0.014	0.42	0.34	52.68	19.05
E6		-1.62	0.13	0.11	47.41	15.38

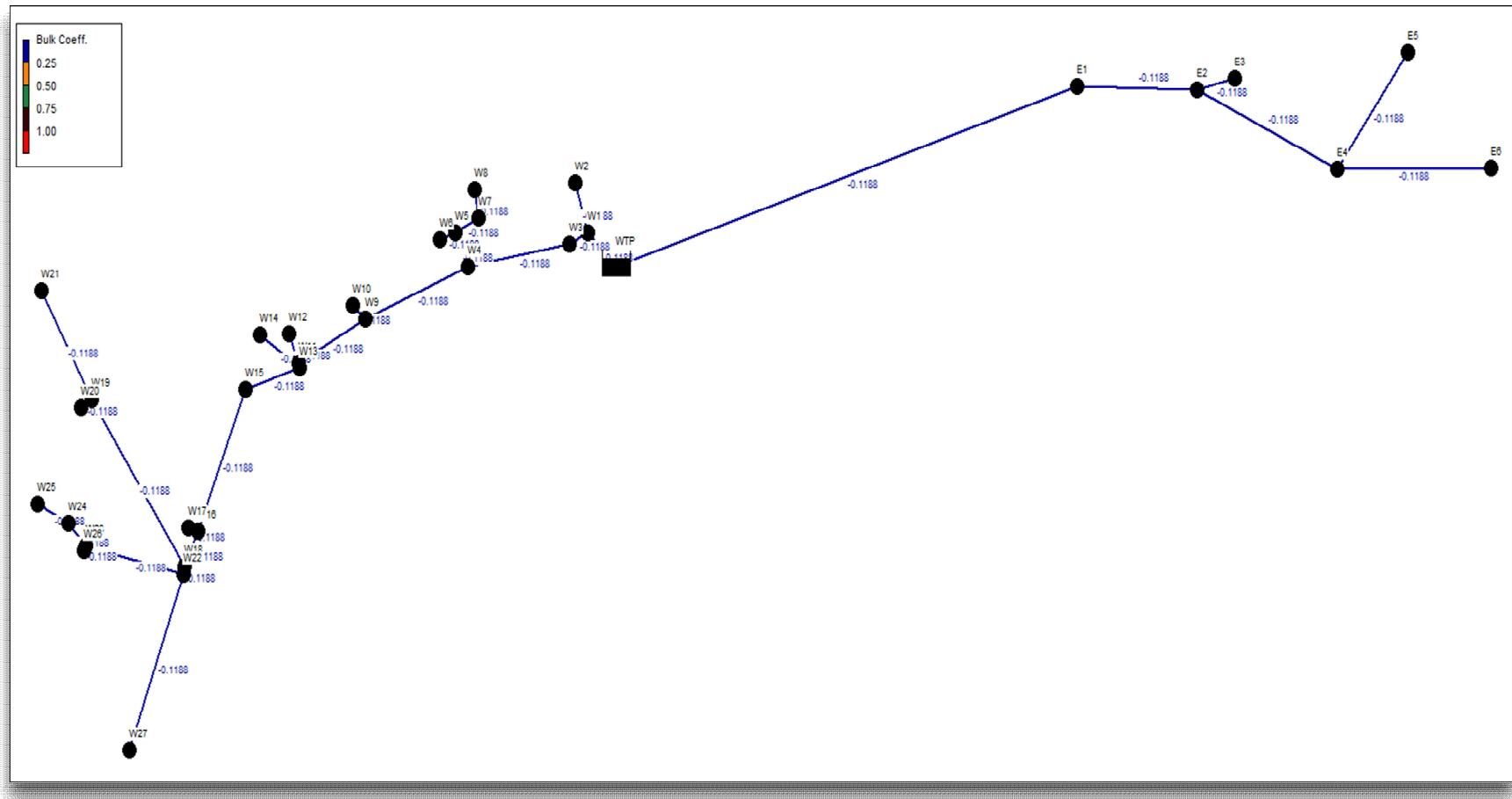


Fig. 6. Predicted bulk decay coefficient.

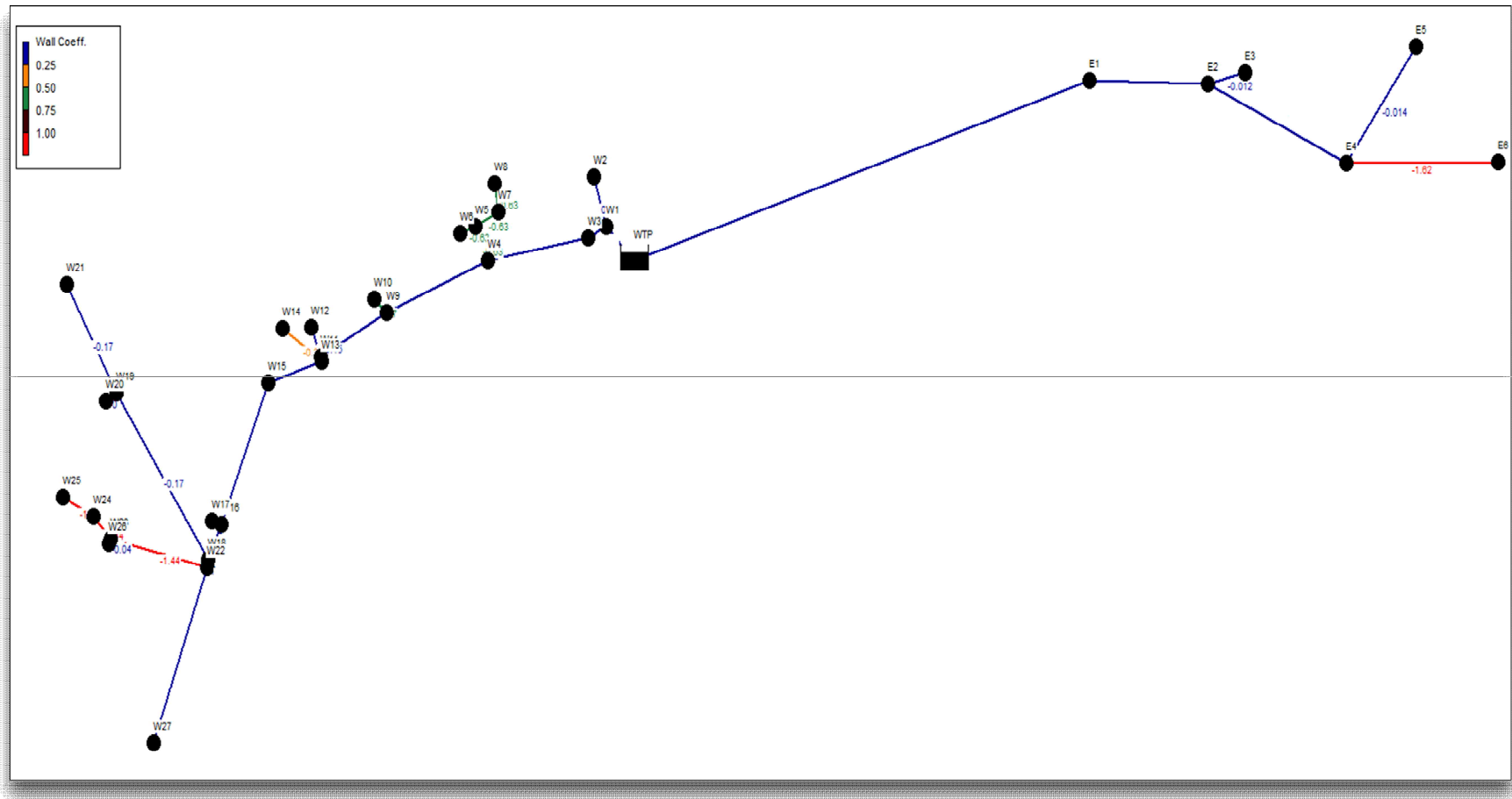


Fig. 7. Predicted wall decay coefficient.

4.2 재염소 지점 및 주입량 산정

재염소 시설은 관로상이나 배수지 등에 관말 잔류염소 확보를 위해 추가적으로 염소를 주입하고자 하는 목적으로 설치된다. 적절한 관말 잔류염소의 관리를 위한 모의 조건으로는 잔류염소 조절이 가장 어려운 최악의 조건으로 설정하여 예측하고 이를 해소할 수 있는 방안을 도출하는 것이 바람직하다.

배수지의 유입관로 내에서 잔류염소농도는 환경부에서 2006년 제시한 맛있는 물의 가이드 라인을 참고하여 0.1~0.4 mg/L 이하로 유지하는 것을 목표로 설정하였고, 이를 달성하기 위한 적정 재염소지점 및 주입농도를 도출하고자 하였다. 모의 대상 조건을 설정하기 위하여 2012 1월부터 2013년 9월사이의 잔류염소 모니터링결과와 유량공급조건을 기준으로 용수공급량은 각 년도 6월부터 9월의 평균값(13,053 m³/d)으로 설정하였다. 관로내 잔류염소감소에 큰 영향을 미치는 수온의 경우 열악한 조건 반영하기 위하여 하절기 최고 온도 25℃로 모의하였다.

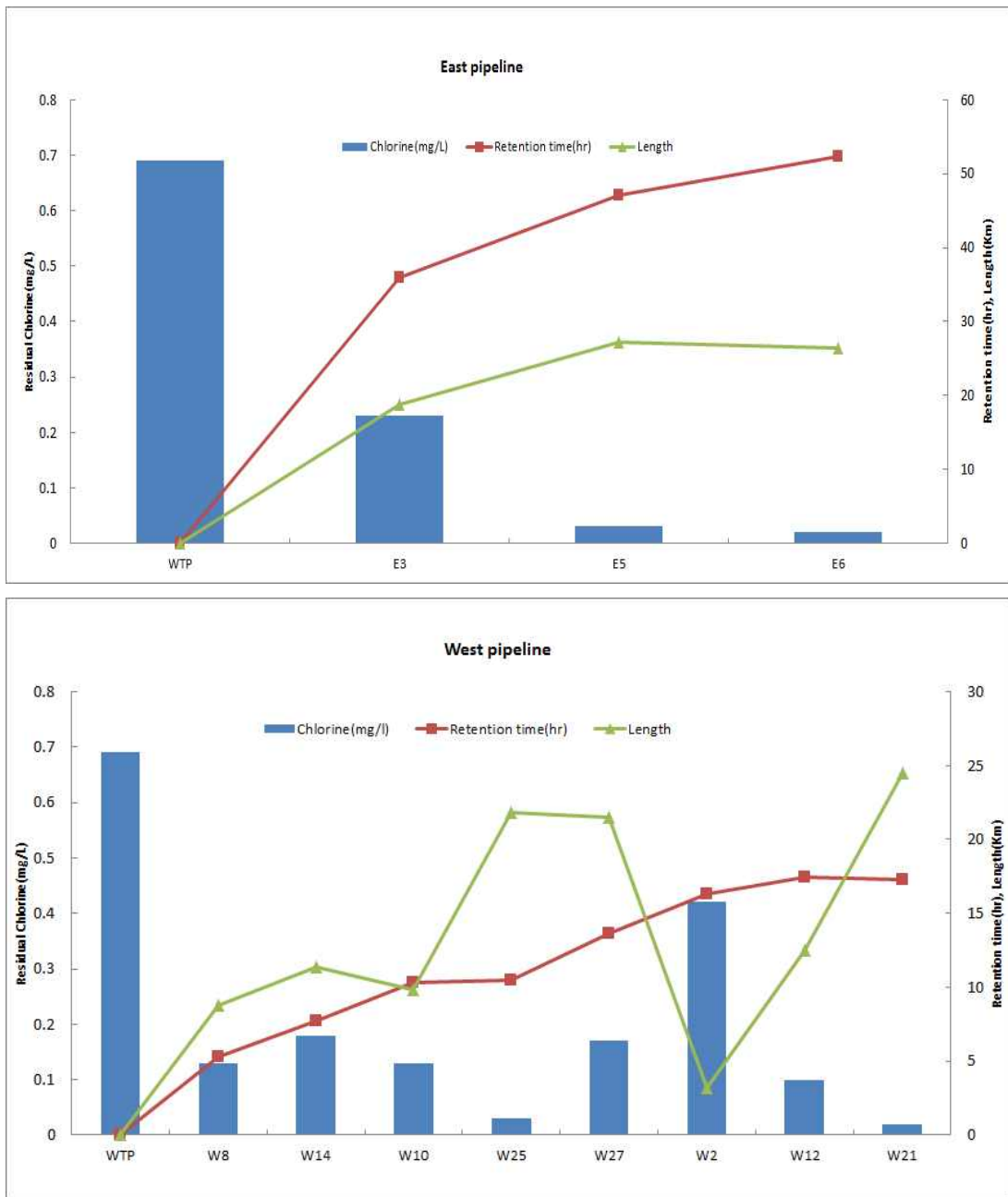


Fig. 8. Residual chlorine simulated result at the worst condition.

수도법 수도시설의 청소 및 위생관리 등에 의한 규칙 2조 2항에 의하여 수도꼭지에서 먹는 물 유지 잔류염소는 항상 0.1 mg/L 이상이 되도록 정하고 있으며, 병원성 미생물에 의하여 오염되었거나 오염우려가 있는 경우에는 0.4 mg/L 이상이 되도록 규정하고 있다. Fig. 8에 현재의 용수공급현황에서 최악 조건으로 모의한 결과

를 나타냈으며, 서부관로에서는 W21, W25지점에서 잔류염소 기준인 0.1 mg/L 이하로 나타났으며, 잔류염소농도는 각각 0.02, 0.03 mg/L 이다. 동부관로에서는 E5, E6 지점이 각 0.03, 0.02 mg/L로 기준에 미치지 못하는 것으로 나타났다.

기준에 미치지 못하는 각 지점들의 잔류염소를 기준을 모두 만족하는 농도까지 높이기 위해 정수장의 잔류염소를 조정한다고 가정할 경우에는 정수장에서 최소 1.9 mg/L 이상을 유지해야하는 것으로 모의되는데 실제 그렇게 적용을 한다면 주송수관로에 인접한 지역은 극심한 냄새로 인해 음용할 수 없는 수준에 이르게 된다. 따라서 동부관로에서는 잔류염소 확보가 가장 취약한 E5, E6지선이 분기되는 절점앞에 재염소시설을 설치하는 것이 효율적이며 서부관로에서는 W21지선이 분기되는 지점에서 재염소를 하면 W25지점까지 잔류염소 농도를 적정 범위 안에 들도록 조절이 가능할 것으로 모의되었다.

실측치 자료 및 모의결과와 관망도를 이용하여 Fig. 11과 같이 재염소 주입이 적절한 두 지점을 설정하였다.

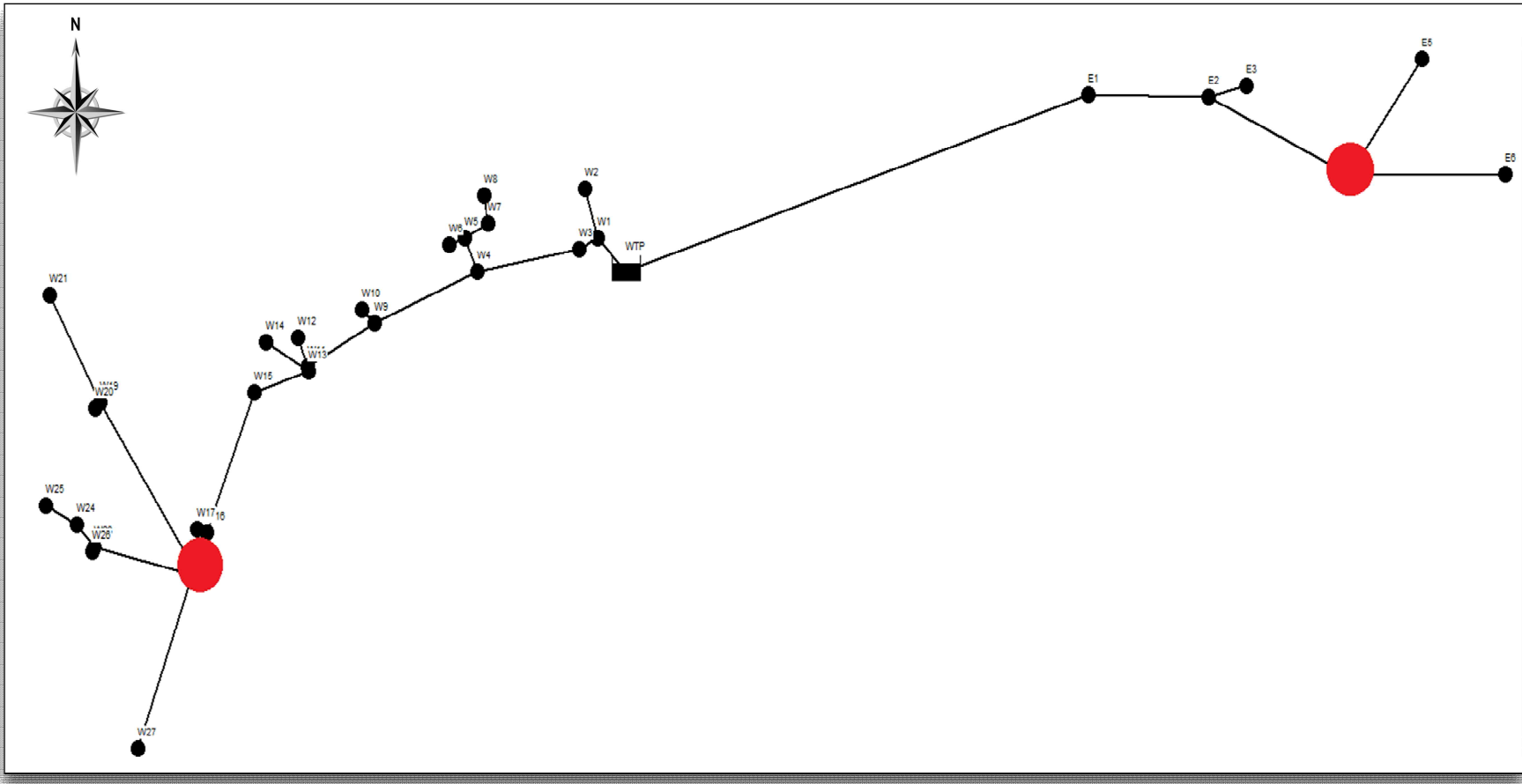


Fig. 9. Rechlorination sites.

4.2.1 어승생 동부관로

현재 운영조건에서 동부관로에서는 긴 체류시간과 적은 수요량으로 인해 대부분 관로에서 적정 잔류염소를 유지하고 있으나 E6지선이 분기되는 주송수관로 끝에서는 기준치에 많이 미달되는 0.02 mg/L로 나타났으며 E5지선도 0.03 mg/L로 약간의 기준치 미달로 나타났다. 이 지점의 잔류염소를 0.1 mg/L 이상으로 유지시키기 위하여 정수장의 잔류염소를 0.4 mg/L로 낮추고 E5, E6지선이 분기되는 지점 앞에 재염소 시설을 설치할 경우 모든 지점에서 기준을 만족시킬 수 있었으며 추가적으로 주입해야 할 염소 농도는 0.42 mg/L의 추가 염소주입이 필요할 것으로 산정되었다. 재염소 주입 전과 주입 후의 농도변화를 Fig. 10에 나타내었다.

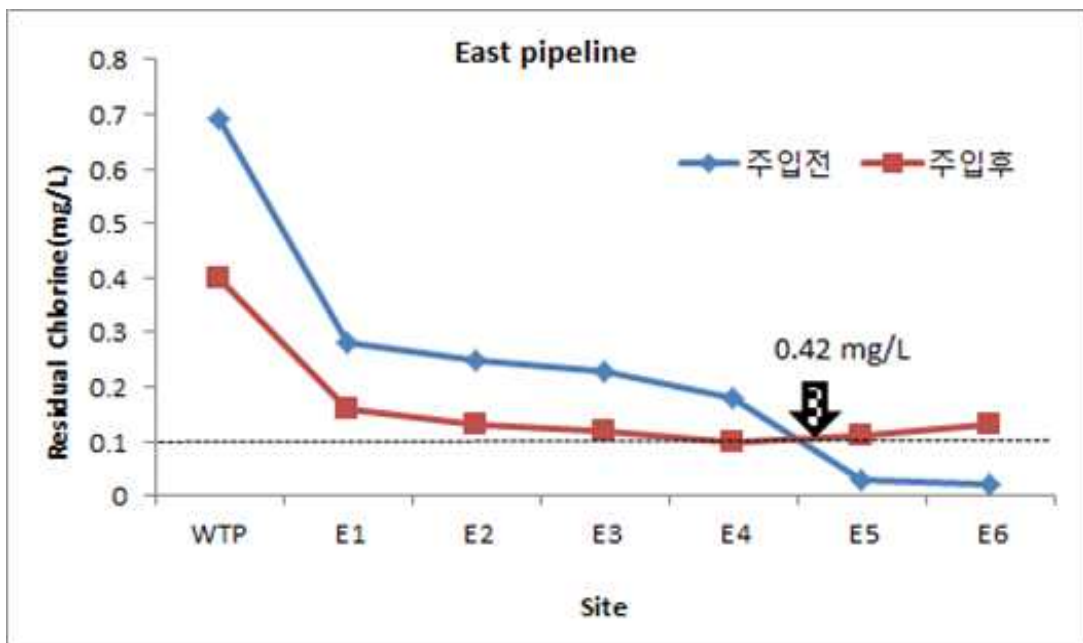


Fig. 11. East pipeline re-chlorine dosage.

어승생 정수장 관로에 대해 구축한 관망도를 이용하여 재염소가 필요한 시기를 예측해 보았다. 온도 10, 15, 20, 25°C 조건에서 평균 유량은 최악의 조건과 동일한 13,053 m³/d로 하여 잔류염소 농도에 대해 예측 하였다.

어승생 동부관로의 경우에는 모든 온도에서 재염소가 이루어져야 된다고 모의되었

다. E6이 모든 온도에서 기준치에 도달하지 못하였으며 E5은 25℃에서만 기준에 미달되었다. 동부관로에 대한 온도별 예측농도를 Fig. 11에 나타내었다.

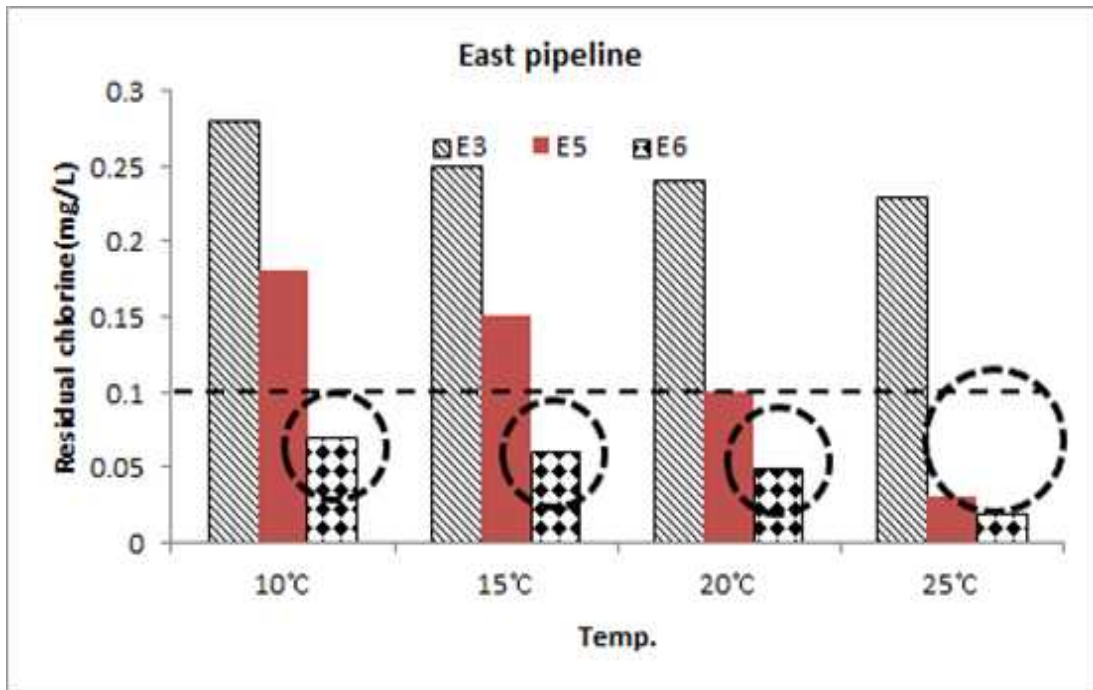


Fig. 12. Residual chlorine at different temperature(East pipeline).

4.2.2 어승생 서부관로

Fig. 12는 어승생 서부관로에서 최악의 조건으로 가정하여 모의한 결과로 W18지점까지 잔류염소가 0.4 mg/L 이상으로 높게 유지되는 것으로 나타났으며 W21과 W25지점에서 기준 미달인 0.02, 0.03 mg/L로 나타났다. 서부관로의 경우 적정잔류염소 농도를 초과하는 지역이 많은 것으로 모의되어 정수장의 수질조절이 더 필요한 것으로 보여진다. 이를 토대로 정수장의 잔류염소농도를 동부관로와 마찬가지로 0.4 mg/L 로 조정하여 정수장 인근 지역의 잔류염소 농도를 0.4 mg/L 이하로 유지되도록 조정하였다. 재염소는 W21지선으로 분기되기 전에 투입하는 것으로 모의하였으며 모든 지점에서 적정 잔류염소를 유지하기 위해 투입하여야 할 재염소 농도는 0.27 mg/L로 예측되었다.

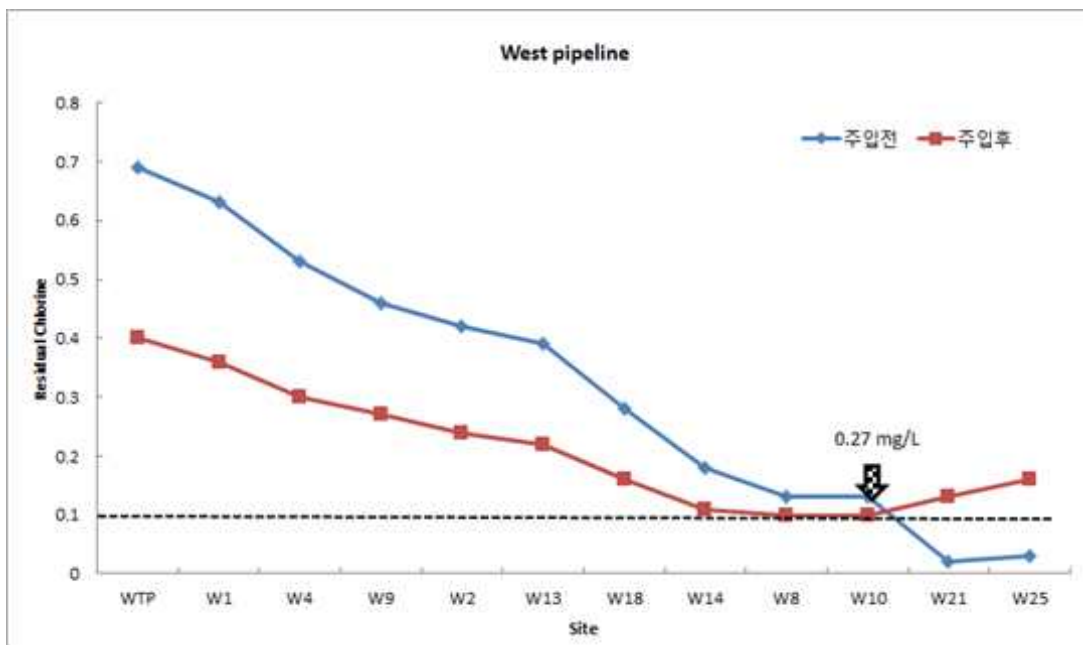


Fig. 13. West pipeline re-chlorine dosage.

Fig 13는 어승생 서부관로에 대한 수온에 따른 잔류염소농도를 나타냈으며, 10°C에서는 모든 지점에서 만족하는 값을 보였으나 15°C 이상부터 W25과 W21지점에서 잔류염소 부족이 나타났으므로 15°C부터 재염소를 시행하여야 하며 평균적인 수온을 기준으로 하였을 때 4월말~11월초사이에 일시적으로 재염소를 주입하면 관말

에서 잔류염소 농도가 확보될 것으로 예측되었다.

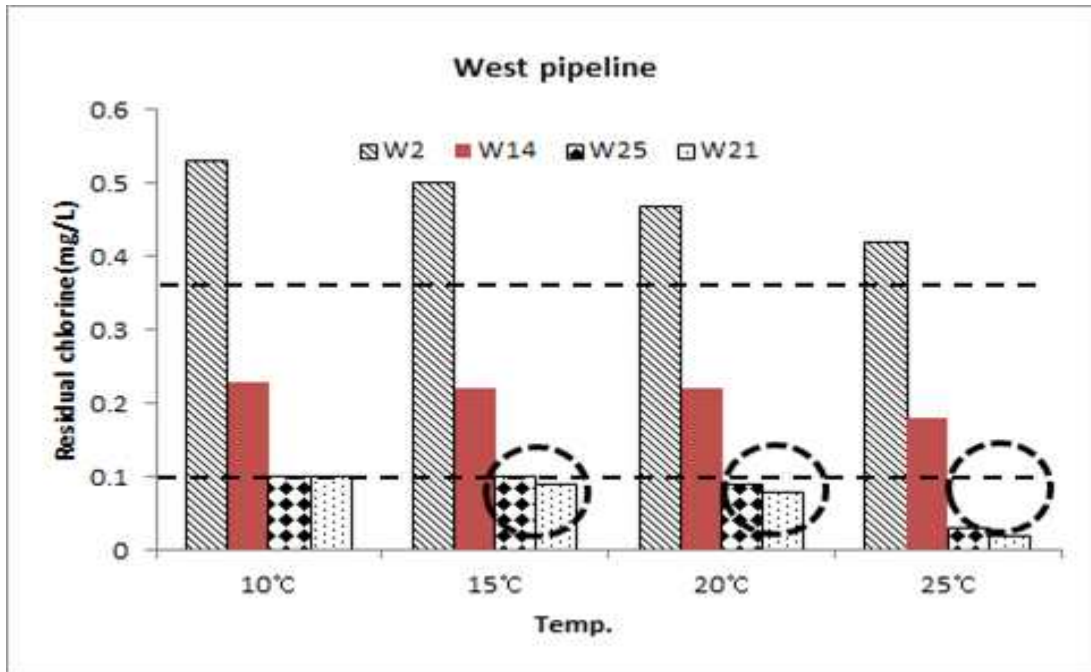


Fig. 14. Residual chlorine at different temperature(West pipeline).

4.3 재염소 효과

재염소 주입은 정수처리장과 가까운 곳의 높은 잔류염소 농도에 비해 관 말단부의 잔류염소 농도가 상대적으로 너무 낮아 2차적으로 오염이 있을 경우에 시행할 수 있으며 수질도 균등하게 하여 안정적인 수질을 유지하기 위해서도 이용할 수 있는 방법이다. 또한 주입염소의 절감 뿐 아니라, 잔류염소 농도의 시간적, 공간적 균등화를 이룰 수 있다. Fig 14는 최악의 조건으로 모의하였을 때 동부관로의 잔류염소 농도를 나타낸 것이다. 재염소를 시행하기 전보다 시행하고 난 후 잔류염소 농도가 안정적으로 변화된 것을 알 수 있다.

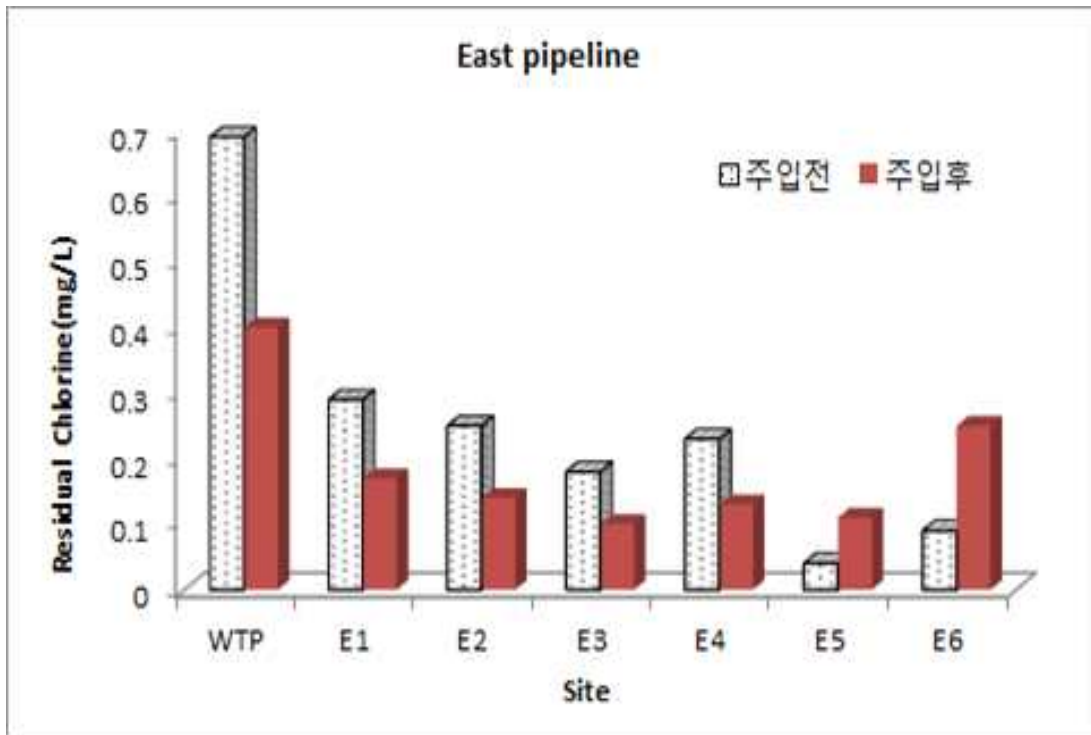


Fig. 15. Concentration distribution after rechlorination(East pipeline).

Fig. 15는 서부관로에 대한 재염소 시행 전과 후를 그래프로 나타낸 것인데 동부관로에 비해 서부관로가 더욱 안정적인 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 서부관로가 동부관로에 비해 7.8 Km가 짧지만 수요량은 대략적으로 2배가량 많다. 이로

인해 체류시간도 빨라지므로 수체의 유통 과정에서 복잡한 화학반응의 빈도가 떨어지기 때문인 것으로 판단할 수 있다.

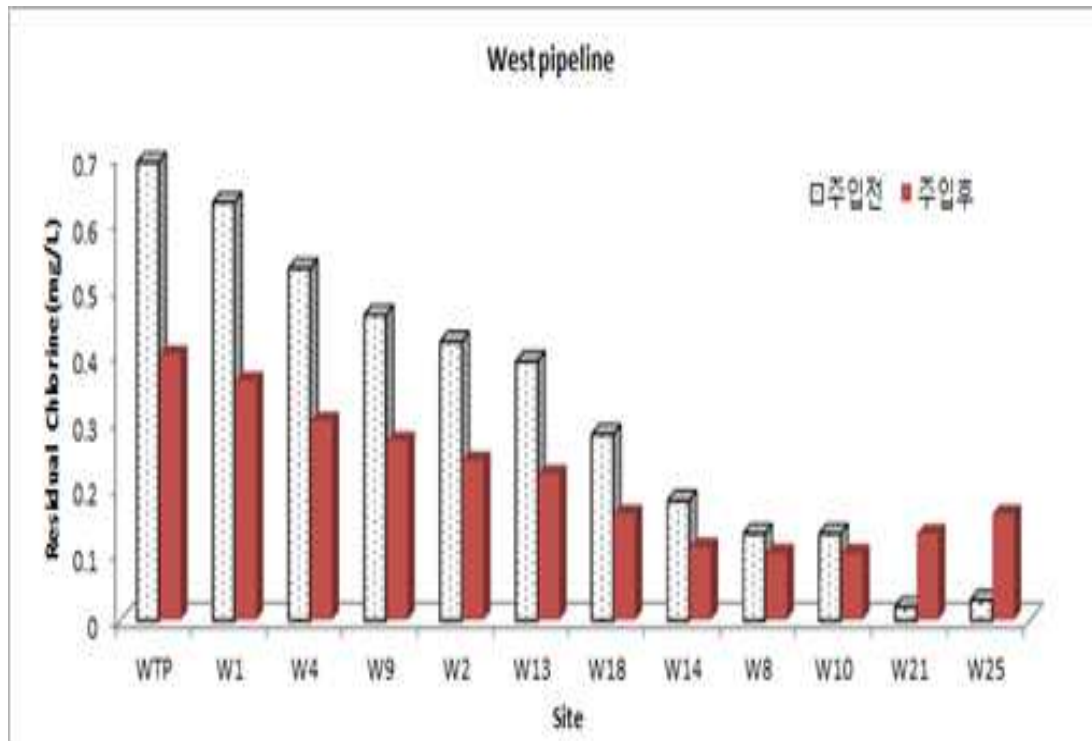


Fig. 16. Concentration distribution after rechlorination(West pipeline).

재염소 주입 후 균등화된 잔류염소 농도 분포도를 Fig. 16에 표현하였다. 주입 전과 후를 비교하였을 때 재염소 후 동부와 서부관로 모두에서 지향하는 권고 수질인 0.1~0.4 mg/L 범위 안에 들 수 있게 되었다.

한편, 본 연구를 시행하는 과정에서 해당지역의 관로조사 및 유량, 수압, 수요량 등의 조사가 명확하게 이루어져있지 않아 어려움을 겪었다. 향후 더 세밀한 조사를 통해 대상지역의 실제 관말 수도꼭지까지 정확한 관망도를 구축하여 신뢰성이 높은 수질 예측이 이루어져야 할 것이다. 그리고 재염소 시설이 설치된 후 시뮬레이션의 현장검증이 이루어져야 할 것이며 관망해석 소프트웨어의 보편화된 사용으로 급수 관망의 수질의 예측 및 안정성확보가 필요할 것으로 판단된다.

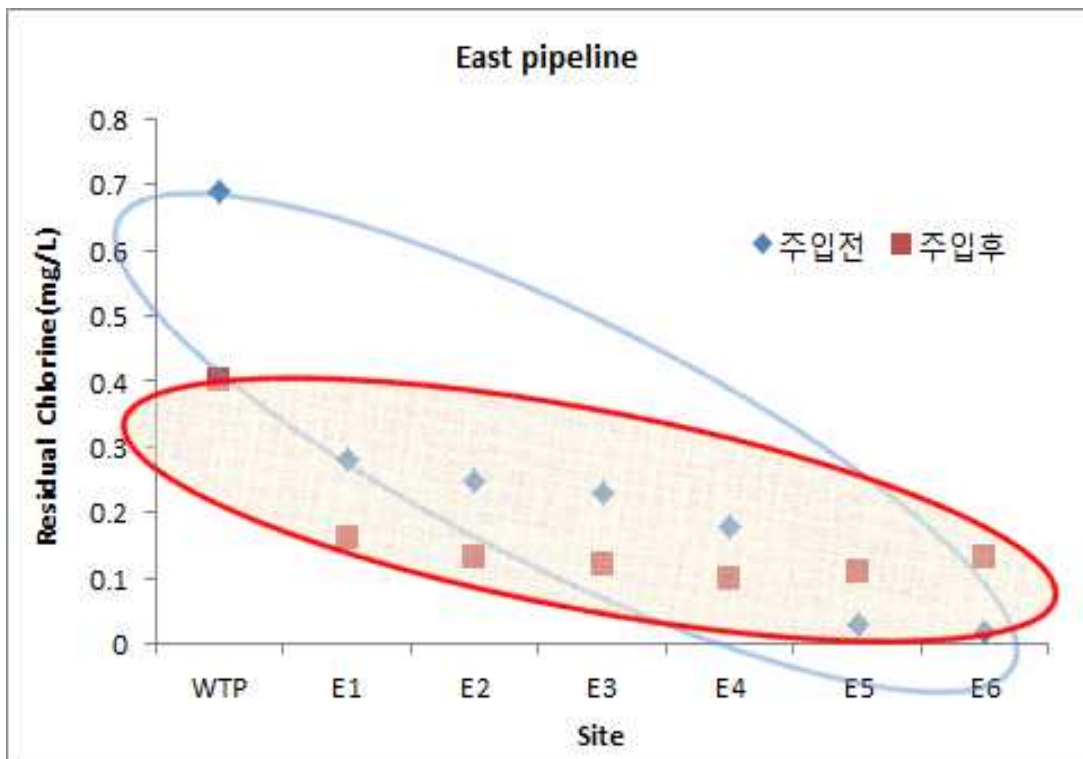
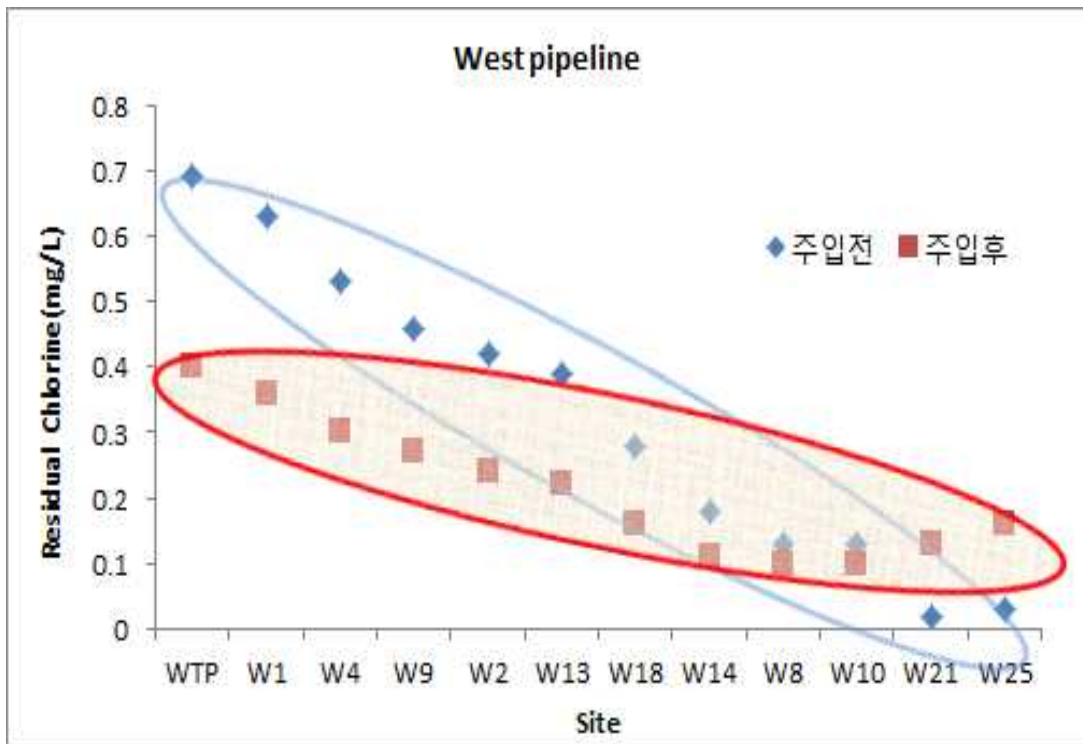


Fig. 17. Rechlorination with equalization.

본 연구에서는 수돗물을 깨끗하고 안전하게 수도꼭지까지 공급하기 위해 대상지역의 재염소 시설 설치의 필요성과 재염소 시설 설치에 따른 잔류염소 농도변화를 예측하였다. 육지부와는 다른 독특한 수계를 형성하고 있는 제주지역에서 연구가 미비한 실정인 급수관망에 대해 수리해석을 바탕으로 관망을 구축함으로서 잔류염소 농도 및 재염소 주입 농도와 시기를 예측할 수 있다는 것을 제시한 것에 의의가 있으며 향후 정수장이나 관련 사업소등에 적용하여 관망 내 잔류염소 거동을 적절하게 관리할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

정수장에서 가정의 수도꼭지까지 안전하고 깨끗한 수돗물을 공급하기 위해서는 배급수관망에서 수량 및 수질의 안전성을 확보하고 배급수관망의 최적관리가 이루어 져야 한다. 본 연구에서는 육지부와 다른 원수의 특성을 가지고 있는 제주도내 3개의 정수장을 선정하여 원수성상에 따른 잔류염소의 감소특성을 파악하기 위해 어승생, 남원, 강정정수장을 선정하여 Lab Test를 실시하였다. 그리고 급수계통별 잔류염소 농도를 예측하기 위해 제주도 어승생 정수장의 급수구역을 연구대상지역으로 선정하여, 해당 관로에 대한 수리해석을 우선 수행하였으며, 이를 바탕으로 수질의 모의하여 재염소 주입에 따른 잔류염소 거동에 관한 연구를 통해 재염소 효과에 대해 분석하고 재염소 주입시기를 예측하여 같은 결론을 얻었다.

1) 어승생 정수장은 지표수를 원수로 사용하고 있으며 남원 정수장은 지하수, 강정 정수장은 용천수를 원수로 이용하고 있다. 3곳 정수장에 대해 수체감소계수 도출 실험을 한 결과 어승생 정수장의 경우 초기 염소주입 후 급격한 감소를 보이고 20시간이 지난 후로는 완만한 감소를 보여주고 있다. 또한 수온이 높을수록 잔류염소의 감소량이 증가하는 것을 알 수 있다. 원수의 수질에 따라 수체감소계수의 차이를 보였으며 5℃의 경우 어승생 정수장이 -0.003hr^{-1} 로 남원 정수장 -0.001hr^{-1} 에 비해 3배 크게 나타났고 강정 정수장 -0.002hr^{-1} 에 비해 1.5배 큰 값을 나타냈다. 지표수를 원수로 하는 어승생 정수장의 경우 다른 정수장에 비해 유기물함량이 크다는 것을 알 수 있으며 원수의 성상에 따라 감소량에 분명한 차이가 있는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

2) 관벽감소계수를 추정된 결과 서부관로의 경우 W25지점이 -1.44 m/d 로 가장 높게 나타났으며, W21, W12, W8지점에서 각각 -0.17 , -0.23 , -0.63 m/d 의 분포를 보였으며 W25지점의 경우 300 mm DCIP관의 주송수관로에서 분기되면서 2.8 Km의 150 mm의 PE관, 0.7 Km의 80 mm PE관, 1.5 Km의 80 mm의 SP관, 2.6 Km의

150 mm의 HI-3P관을 거치게 된다. 재질과 관경이 다른 관을 수차례 거쳐야 하기에 관벽 손실이 크게 나타나게 된다. 동부관로의 경우에는 E3, E5, E6지점에서 각각 -0.012, -0.014, -1.62 m/d로, 관경이나 관종의 변화가 없는 E6지점에서 관벽손실이 -1.62 m/d로 매우 크게 나타났다.

3) EPANET 2.0에 도출된 계수 값을 적용하여 최악의 조건으로 수질을 모의한 결과 맛있는 물 권고기준에 미달되는 지점이 동부관로에서 E5, E6지점이 0.03, 0.02 mg/L로 나타났고, 서부관로에서는 W21, W25지점이 0.02, 0.03 mg/L로 나타났다. 모든 지점에서 적정 잔류염소를 유지하기 위해 정수장에서 주입농도를 높일 경우 최소 1.9 mg/L 이상이 필요하므로 재염소 시설 설치가 필요할 것으로 판단되었다.

4) 대상지역에 재염소 주입시설을 도입할 경우, 재염소 적정 지점은 동부의 경우 E5과 E6지점이 분기되는 주송수관로 이전이며 서부의 경우 W21지점으로 분기되기 전 주송수관로가 적절할 것으로 예측됐으며, 현재 운영조건에서 지점에 따른 재염소 주입농도는 동부 0.42 mg/L, 서부 0.27 mg/L로 산정되었다. 그리고 재염소를 주입함으로써 정수장에서의 잔류염소 주입농도를 0.4 mg/L로 낮출수 있어 과량의 잔류염소 농도 분포를 보이던 지점들의 수질을 안정적으로 유지할 수 있는 것으로 모의되었다. 그리고 재염소 후 최초 절점의 잔류염소 농도가 0.63 mg/L에서 0.36 mg/L로 0.27 mg/L 감소하였으며 0.5 mg/L 이상을 유지하던 지점들도 잔류염소가 기준치인 0.4 mg/L 이하로 낮게 유지되었다. 최소 유지 기준미달인 지점들도 모두 0.1 mg/L 이상으로 유지되는 것으로 나타났다. 따라서 재염소를 통해 정수장으로부터 관말 분기점까지 잔류염소 농도가 균등하게 분포되는 수질의 안정화 효과를 얻을 수 있다.

5) 온도에 따른 재염소 주입 시기를 예측한 결과, 서부관로의 경우 15℃에서 W25 지점 0.09 mg/L, W21지점 0.08 mg/L로 잔류염소의 부족현상이 나타나기 시작하였으므로 수온이 15℃이상인 4월말에서 11월초에 재염소가 필요할 것으로 예측되었으며, 동부관로의 경우 E6지점을 제외한 모든 지점에서는 20℃까지 만족하는 잔류염소 농도분포를 보였지만 E6지점이 모든 온도에서 잔류염소가 부족한 것으로 나타나 해당관로에서는 계절에 관계없이 지속적인 재염소가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김경록, “EPANET을 이용한 수형시 음용수 특성 파악 및 예측,” 경기대학교 석사학위논문(2000).
2. 김도환, 이두진, 김경필, 배철호, 주혜은, “배·급수관망의 잔류염소 확보를 위한 적정 재염소 주입량 산정 및 효과분석,” 대한환경공학회지 32(10), 916~927(2010).
3. 김동하, 강선홍, 구자용, 독고석, 손진식, 송지현, 이형집, “상수도공학,” 사이텍미디어, p.238, p.240, p.252(2004).
4. 김성한, 양승경, 김동홍, 우형민, “유수율 제고를 위한 관망해석 및 진단”, 흥릉과학출판사, p.99-101, p.125-127(2009).
5. 손진식, 강효순, “국내정수장의 잔류염소농도에 대한 조사연구,” 상하수도학회지, 20(2), 281~287(2006).
6. 안재찬, 박창민, 구자용, “배급수계통에서 잔류염소 감소 특성 및 적용연구,” 상하수도학회지, 19(4), 487~496(2005).
7. 안재찬, 이수원, 노방식, 최영준, 최재호, 김효일, 박태준, 박창민, 박현, 구자용, “배급수계통에서 잔류염소 및 THMs 분포 예측에 관한 연구,” 대한환경공학회지, 29(6), 706~714(2007).
8. 유희중, “상수도관망에서 EPANET을 이용한 잔류염소 예측,” 서울대학교 석사학위논문(2002).
9. 이동석, 민병섭, 박선구, 김정화, 류재근, “정수장에서 소독부산물의 생성특성,” 한국물환경학회지 20(1) 55~62(2004).
10. 이복영, 김세철, 이진효, 이동식, 오승룡, 이정기, 이은숙, 한선희, 박용상, “수돗물 잔류염소에 대한 새로운 접근-최근 3년간 서울 수돗물 잔류염소 변화경향 고찰,” 한국물환경학회·대한상하수도학회(2010).
11. 이정수, “상하수도공학”, 신광문화사(2005).
12. 이종민, 김현순, 손진식, 이영규, “배수관망내 적정 잔류염소 결정을 위한 모델링,” 한국물환경학회·대한상하수도학회(2005).
13. 이종민, “재염소주입에 따른 관망내 잔류염소 및 트리할로메탄의 거동에 관한 연구,” 국민대학교 석사학위논문(2004).
14. 정창호, “배수관망에서 잔류염소 제어 및 소독부산물 예측기법 개발,” 국민대학교 석사학위논문(2008).
15. 주혜은, “EPANET 2.0을 이용한 재염소 농도 예측 및 효과분석,” 대전대학교 석사학위논문(2010).
16. 채용석, “EPANET 모형을 이용한 상수관로내 잔류염소 농도변화에 관한 연구,” 전남대

- 학교 석사학위논문(2002).
17. 환경부, “상수도시설기준,”(2004).
 18. 환경부, “수도시설의 청소 및 위생관리 등에 의한 규칙,” (2009).
 19. 환경부, “수돗물 2차오염 방지기술(3차년도),” (1999).
 20. 홍성호, 김성진, 구교영, 이현주, “배급수과정에서의 수질 변화 조사-잔류염소 및 탁도의 특성을 중심으로,” 서울특별시 수돗물 수질평가위원회, 2~4(2002).
 21. Ahn, J.C., Lee, S.w., Lee, G.S., Koo, J.y, “Predicting water pipe breaks using neural network, Proc. Conf. on Efficient use and Management of urban water, Santiago Chile,” 15-17 March 2005, IWA, 472-481(2005).
 22. AWWA, “Internal Corrosion of Water Distribution System,” 2nd Edition(1996)
 23. Clark, R. M., Yang, Y. J., Impellitteri, C. A., Haight, R. C., Schupp, D. A., Panguluri, S. and Krishnam, E. R., “Chlorine fate and transport in distribution systems: Experimental and modeling studies,” J. AWWA, 105(2), 144~155(2010).
 24. Hass, C.N. and Karra, S.B., “Kinetics of Wastewater Chlorine Demand Exertion”, JWPCF. 56:2:170, (1984).
 25. Hua, F., West, F. R., Baker, R. A., and Forster, C. F., “Modeling of chlorine decay in municipal water supplies,” *Water Research*, 33(12), 2735-2746(1999).
 26. Jadan-Hecart, A., El Moher, A., Stitou, M., Bouillot, P., and Legube, B., “The chlorine demand of a treated water,” *Water Research*, 26(8), 1073-1084(1992).
 27. Kawamura, S., “Integrated design and operation of water treatment facilities” 대한상하수도학회(2003).
 28. Kim, J. S., Chung Y., Shin D. C., Kim M. S., Lee Y. H., Lim Y. W. and Lee D. H., “Chlorination by-products in surface water treatment process,” *Desalination*, 151(1), 1~9(2003).
 29. Mays, L. W., “water distribution systems handbook,” Mc-Graw-Hill(2000).
 30. Powell, J. C., West, J.R., Hallam, N.B., Forster, C.F., and Simms, J, “Performance of various kinetic models for chlorine decay.” *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 126(1), 13-20(2000).
 31. Rossman, L. A., Clark, R.M., and Grayman, W.M., “Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution-systems.” *J. Environ. Eng.*, 120(4), 803-820(1994).
 32. Rossman, L. A., “EPANET user manual,” Risk Reduction Eng. Lab., U. S Envir. Protection agency(EPA), Cincinnati, Ohio(1994).
 33. Saunier, B. M., and Jarrige, P.A., “Evolution of water quality in portable water distribution networks: Diagnosis and modeling“, *Jounees Information Eau*, Poitiers, France(1990).

34. Sharp, W. W., Pfeffer, J., and Morgan, M., "Insitu Chlorine Decay Rate Testing", Proc. of AWWARF/EPA Conf. on water quality modeling in distribution system, Cincinnati, OH: AWWARF, EPA(1991)
35. Turrsell, J.M., "the impact, of corrosion on chlorine decay in distribution systems memorandum presented at the project advisory committee for the AWWARF project," 815-92: Characterization and Modeling of Chlorine decay in distribution systems, Toronto Canada(1992).
36. Vasconcelos, J. John, Boulos, F., Paul et al., "Characterization and Modeling of Chlorine Decay in Distribution system," AWWARF(1996).

감사의 글

지난 2년간의 대학원 과정은 저에게 어쩌면 학문의 길보다는 인격수양의 과정에 더 가깝지 않았나 하는 생각이 듭니다. 이제 비로소 모든 과정을 마치고 논문의 마지막 마무리를 글로 남기려 하니 그동안의 일들이 스치면서 베풀기보다는 받기만 하며 지내온 시간을 반성하게 됩니다. 지난 시간동안 물심양면으로 아낌없는 격려 보내주신 모든 분들 직접 찾아뵙지 못하여 이렇게 지면으로나마 감사의 인사를 전합니다.

부족한 첫 제자를 위해 항상 격려해 주시고 정성으로 지도해 주신 김진근 교수님, 마지막 논문을 마치기까지 변함없는 관심과 격려를 아끼지 않으셨던 교수님께 진심으로 존경과 감사의 마음을 올립니다. 그리고 바쁘신 가운데 부족한 논문을 맡아서 열과 성으로 심사해주신 감상규 교수님과 조은일 교수님의 세심한 배려에 감사드리며 대학원 생활 전 과정을 통해 큰 귀감이 되어 주신 허철구 교수님, 이기호 교수님, 허목 교수님께도 머리 숙여 감사드립니다.

이 논문이 완성되기까지 많은 자료와 도움을 주신 제주특별자치도 수자원본부의 김우찬 주무관님, 서울시립대 최태호 박사님께도 감사드리며 낯선 곳에서의 대학원 생활을 잘 마칠 수 있도록 도와준 범석이와 성록이, 함께 논문 준비하며 여러모로 힘이 되어준 은석이, 명찬이 그리고 우리 상하수도실험실의 정훈, 종환이와 후배들 모두 고맙습니다.

유년시절부터 지금까지 언제나 한결같은 마음으로 곁에 있어주고 힘이 되어준 내 친구 승은이와 인생을 살면서 어떠한 일이 닥치더라도 걱정하지 말고 다 잘 될 것이라는 믿음으로 손해 본 듯 살라고 늘 가르치시고 보듬어 주시는 옥희 이모, 새로운 도전을 두려워하는 나에게 꿈을 이룰 수 있도록 용기를 북돋아주며 묵묵히 옆에서 큰 힘이 되어준 신옥씨, 그리고 언제나 씩씩한 우리 은경언니 사랑합니다.

존경하고 사랑하는 어머니, 항상 조용히 뒤에서 믿음이 되어주시는 아버지, 언제나

내 편이 되어주는 오빠, 부족한 누나를 믿음으로 지켜주는 동생 그리고 아낌없는 응원 보내주신 모든 가족 분들 진심으로 사랑하고 감사드리며, 모두 건강한 모습으로 오랫동안 제 곁에서 지켜봐 주시길 기도드립니다.

많은 도움을 주신 모든 분들의 이름을 하나하나 되새기지 못함을 송구스럽게 생각하며 여러 분들이 베풀어 주신 마음 가슴 깊이 새기고 이 세상에 필요한 사람이 되 고자 최선을 다해 열심히 살겠습니다.

마지막으로 하나님 감사합니다.

2014년 1월
한 지 안 올림