

論 文

불소를 이용한 상수관망 수리해석의 검증 및 보정

Verification and Calibration of Hydraulic Analysis of Water Supply System Using Fluoride Tracer

주대성* · 박노석* · 박희경** · 오정우***

Dae-Sung Joo* · No-Suk Park* · Heekyung Park** · Jung-Woo Oh***

Abstract

It is necessary to calculate the accurate velocity from the hydraulic model for the reliable prediction of water quality changes in water supply system. To verify the hydraulic analysis of the water supply system, fluoride was used as a tracer to calculate the travel time from the injection point to the sampling points.

Results from this field experiment indicate that fluoride can be a good conservative tracer while it showed a little longitudinal dispersion along the pipe lines. And the velocity from the model was verified by these travel times and calibrated by changing the ratio of the unaccountable water. When the ratio of the unaccountable water was 20%, the error between the estimation of hydraulic model and the real travel time was minimum.

1. 서 론

최근 상수공급관로내에서의 수질변화를 추적하기 위한 효과적인 수단으로 컴퓨터 기술에 기초한 수학적 모델링 기법이 급격히 발달하고 있다. 상수공급시스템을 분석하기 위한 수학적 모델이 사용되기 시작한 것은 1930년대까지 거슬러 올라간다(Cross, 1936). 모델은 Hardy-Cross 방법에 의해 손으로 유량을 계산하던 시점에서 1970년대와 1980년대 초반의 컴퓨터에

기초한 수리해석용 모델의 개발과 활용(Wood and Raves, 1981) 그리고 1980년대 중반에 들어와서 관로내 수질 모델의 출현에까지 이르렀다(Chun and Selznick, 1985, Clark and Males, 1986). 오염물질이동을 예측하는 수질 모델은 수리학적 모델과 연계되어 관로내에서 일어나는 화학반응, 생물반응, 그리고 수리적 변화를 모사하여 관로시스템내 오염물질의 시공간 분포를 예측할 수 있도록 한다(Clark and Coyle, 1990, Clark et al, 1991, Clark et al, 1993). 현재는 모델링 시스템과 맵핑 시스템이 통합되어 관로내 수리 및 수질 변화를 해석하고 그 결과를 그래픽으로 표현해 주는 사용자 편의 위주의 시스템으로까지 발전했다(Deininger, 1992). 이러한 모델은 다양한 운

* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
 ** 한국과학기술원 토목공학과 교수
 *** 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

전 방식과 설계 인자를 결정하고 관로내로 오염물이 유입되었을 때 오염물의 거동을 파악하는 데 사용되어지며 개선된 수질 분석용 시료 채취 프로그램의 계획에도 활용할 수 있다.

본 연구에서는 관로내 수질 모델링 프로그램을 이용하여 수질 인자의 거동을 정확히 예측하기 위해 선행되어야 할 수리 모델의 검증 및 보정 과정을 제시한다.

2. 상수관로내 수리 모델링

수리 모델을 이용해 상수관망내의 유속을 정확히 해석해 내는 것은 수질 모델링에서 오염물의 농도를 예측하는 예비단계로 올바른 오염물 농도 분포를 얻기 위해서는 필수적이다.

본 실험에서 사용한 EPANET은 미국 환경부(US EPA)에서 개발한 동적 수질 예측 모델이다(USEPA, 1994). EPANET은 관망을 따라 흐르는 용존물질의 변화를 추적한다. 이는 수리해석의 결과 얻어진 유량을 이용하여 각 절점을 잇는 각 관로내의 용존물질의 물질수지 식 (1)을 풀게 된다:

$$\frac{\partial c_{ij}}{\partial t} = \frac{q_{ij}}{A_{ij}} \frac{\partial c_{ij}}{\partial x_{ij}} + \theta(c_{ij}) \quad (1)$$

여기서, c_{ij} = 거리와 시간의 함수로서 관로 i, j 간의 용존물질 농도

x_{ij} = 관로 i, j 간의 이동거리

q_{ij} = 시간 t 에서 관로 i, j 간의 유량

A_{ij} = 관로 i, j 의 단면적

$\theta(c_{ij})$ = 관로 i, j 내의 용존물질의 반응 속도

그러므로 대상관로에 대한 수리해석의 결과로 얻어진 유속과 수압이 실측치와 비교하여 유사한 결과를 얻지 못한다면, 유속(q_{ij}/A_{ij})을 근거로 푼 물질 수지식의 결과는 신뢰성을 잃게 된다.

EPANET에 적용된 수리 모델은 각 절점에 대한 식과 각 절점과 절점사이의 관로에 대한 식을 푸는 연장기간 수리해석 모사방식

(extended period hydraulic simulator)을 구현한다.

식 (2), (3), (4)은 각 저장 절점에 대한 식이다.

$$\frac{\partial y_s}{\partial t} = \frac{q_s}{A_s} \quad (2)$$

$$q_s = \sum_i q_{is} - \sum_j q_{sj} \quad (3)$$

$$h_s = E_s + y_s \quad (4)$$

식 (5), (6)은 각 관로와 절점에 대한 식이다.

$$h_i - h_j = f(q_{ij}) \quad (5)$$

$$\sum_i q_{ik} - \sum_j q_{kj} - Q_k = 0 \quad (6)$$

여기서 미지의 값은:

y_s = 저장 절점 s 에 저장된 물의 높이

q_s = 저장 절점으로 유입되는 유량

q_{ij} = 절점 i 와 j 를 연결하는 관로의 유량

h_i = 절점 I 에서의 수리 경사선 높이

그리고 기지의 상수:

A_s = 저장 절점 s 의 단면적

E_s = 저장 절점 s 의 높이

Q_k = 절점 k 에서 소비되거나 공급되는 유량

$f(\)$ = 관로상의 유량과 수두손실간의 관계식

식 (3)은 저장 절점에서의 물수지를 나타내고 식 (6)은 절점에서의 물수지를 표현한다. 식 (5)은 관로내의 유량에 의한 에너지 손실이나 이득을 나타낸다. 시간 0에서 초기 저장 절점 수위 y_s 에 대하여 경계조건으로 식 (4)를 사용하여 모든 유량 q_{ij} 와 수두 h_i 에 대하여 식 (5)와 (6)을 푼다. 이때 관련된 비선형방정식을 풀기 위하여 "gradient algorithm"을 이용한다.

관망의 수리해석이 얻어지면, 각 저장 절점으로의 유량 q_s 가 식 (3)으로부터 구해지고 식

(2)를 사용하여 시간 간격(dt)후의 새로운 저장 절점 수위를 얻게된다. 이와같은 과정을 모사기간동안 남은 모든 시간 간격에 반복하여 연장 기간 수리해석을 얻게 된다.

3. 불소를 이용한 유달시간 측정

대상관로의 수리학적 해석에 필요한 관망 구성 자료와 각 절점에서의 수요량 등을 이용하여 수리모델을 이용해 구한 수리해석 결과가 현장에서 실측한 자료와 일치하는지를 확인해야 한다. 이때 관로내의 유속을 직접 잴 수 없는 경우 몇 개의 시료 채취 지점을 정하고 시료 채취 지점간의 유달 시간을 측정함으로써 간접적으로 유속을 검증하는 방법을 취한다 (Mark, et al., 1991). 상수관망의 유달시간은 tracer 연구를 통해 측정된다. Tracer 연구는 정수장에서 관망으로 유입되는 유입수의 tracer 물질 농도를 조절하여 수도전에서의 농도를 측정하여 수행한다. 유입되는 유입수의 trace 물질 농도 조절은 Pulse 혹은 step-tracer input과 같은 두가지 방법이 가능하다. 유달시간 측정에 사용되는 이상적인 tracer는 보존성 물질이며 투입지점에서 농도의 조절이 가능하여야 한다. 특히 상수관망의 경우 공중보건상 위해가 없는 물질이어야 한다. 본 실험에서는 상수관망의 현재 조건에서 비교적 보존적이고 앞에서 언급한 조건들에 부합되는 불소를 tracer로 이용한다. 불소는 구강 보호를 위해 필요한 물질로서 일시적인 농도 변화는 위생상 문제가 없는 것으로 알려져 있다.

4. 실험 절차

4.1. 연구대상관로 선정

지방자치단체의 협조를 얻어 관망도가 잘 갖추어져 있고 시설의 유지관리가 잘 되고 있는 연구대상지역을 설정하여 모델의 입력 자료로 필요한 관망도 및 운전인자, 수리학적 특성 자료 즉 연구대상지역의 일일 평균 상수 수요량 파악, 일일 상수수요 패턴 파악 등을 준비

한다.

파악되어야 할 주요 내용은 다음과 같다 (Clark, 1991):

- 인구, 면적, 수요량, 원수 수질, 관로 및 부속시설, 수요자 구성(대용량 수요자 분석)
- 일반적인 수질 시료 채취
- 주된 수질 문제 분석
- 수도 요금 산정표 확보
- 상수공급시스템의 수리적 특성 파악
- 상수공급시스템의 수질, 시스템 운영 정보 입수

본 연구는 충북 청원군 K면을 연구대상관로로 정하였다. K면은 다른 지역에 비해 비교적 양호한 관로체계 및 관망도를 보유하고 있으며, 관로가 수리 및 수질거동 해석에 필요한 수지상, 환상이 혼재되어 있어, 수리해석과 수질변화를 다양한 각도에서 분석할 수 있다. 충북 청원군 K면의 상수도 급수전 및 수용가 현황은 표 1에 제시하였다.

K면의 배수조는 대청광역상수도중 대청계통의 청주정수장의 송수관으로부터 정수를 공급받아 K면 15개 부락 387개 수도전에 상수를 공급한다. 387개 수도전의 업종별 현황을 보면 가정용으로 324전, 영업용으로 39전, 업무용으로 24전이 사용되고 있다.

K면의 상수관로 총연장 13,638m 가운데 주철관이 2,926m를 차지하는데 주철관의 직경은 배수조 가까운 곳에서는 250mm, 그리고 관말에 이르면서 80mm까지로 줄어든다. PVC관의 직경분포는 100mm에서 75mm까지이다.

4.2. 대상 관로에 대한 수리 해석

K면 상수관망도를 기초로 관길이, 관직경, 관재질과 매설년한을 기초로 산정한 Hazen-William 식의 C-계수를 관로 자료로 입력하고 각 절점의 위치수두와 예상 수요량을 각 절점 자료로 입력하여 수리해석을 하였다.

1) 설계 수요량에 기초한 수리해석

K면의 배수지에 공급되는 7월중 일일평균공

표 1. K면 상수관로 구성

내 용	구 성
수원지 저수조	2개소/660톤
상수도 급수전	15개부락/387전
총급수 가구수	15개부락/856가구
관로수(Number of Pipes)	69
절점수(Number of Nodes)	59
관로 총연장	13.638m (주철관 2.926m, PVC관 10.912m)

표 2. K면 상수관로 수리해석 결과(설계 수요량)

내 용	평 균	최 대	최 소
유량(l/sec)	2.714	23.34	-1.3
유속(m/sec)	0.3025	1.06	0.01
수두손실(/1000m)	2.61	15.95	0.00

급량을 상수관망 설계시 사용된 각 절점에서의 수요량에 따른 비율로 각 절점별 수요량을 할당하고 관로 수리해석을 하였다.

관로 수리해석 결과, 유속은 평균 0.3025 m/sec, 최대 1.06m/sec, 최저 0.01m/sec로 배수지에서 가까운 지역은 비교적 유속이 빠르게 나오는 반면 배수지에서 멀리 떨어진 관말로 갈수록 유속이 떨어져 0.1m/sec 이하인 구간이 13 구간이었다. 수압의 경우 거의 모든 절점에서의 수두가 20m 이상으로 나왔으며 유속의 경우와 마찬가지로 관말에서 수압이 다소 낮게 나오는 경향을 보였다.

2) 상수도 요금표를 기준으로 각 절점 수요량을 할당한 후 수리해석

상수도 요금표상의 K면 리(里)단위별 수요량 표 3을 반영하여 각 절점별로 수요량을 할당하여 수리해석을 하였다. K면의 97년 8월분 상수도 사용료 총괄표에 의하면 97년 7월중 K면의 상수도 사용량은 27,481m³이다. 배수지로 공급되는 송수관의 계량기 검침결과와 97년 7월 10일부터 7월 20일까지 이틀간격으로 계량기를 검침하여 구한 배수지로의 인입량은 약 49,272m³이다. 이는 배수지로 공급된 상수가

운데 약 44.5%가 불명수임을 알 수 있다.

상수도 요금표를 기준으로 각 절점별로 할당된 수요량을 이용하여 수리해석한 결과 표 4를 보면 유속은 평균 0.124m/sec, 최대 0.64m/sec, 최저 0.01m/sec로 설계 수요량으로 수리해석한 결과보다 유속이 약 59% 정도 느려졌다.

수리해석한 결과가 현장 관로의 상황을 제대로 반영한다면 관로내 유속이 너무 낮아 상수중의 불순물이 침전되고 정체로 인한 체류시간의 증가로 잔류염소가 결핍되어 미생물에 의한 2차 오염의 우려가 클 것으로 생각된다. 그러나 44.5%에 달하는 불명수가 배수구역내 관로 전역에 걸쳐서 발생할 것임으로 불명수가 차지하는 비율을 44.5% 범위내에서 조정하면서 배

표 3. 리단위별 월간 상수 수요량

지역	수전수	사용량(m ³)
K 1구	15	409
K 2구	12	2,404
O 1구	13	303
O 2구	107	5,152
O 3구	42	4,486
O 4구	12	1,033
D 1구	1	15
D 2구	18	1,050
D 3구	1	30
S 1구	31	2,213
S 3구	40	1,905
B 1구	38	976
B 2구	4	110
B 3구	48	3,987
B 4구	7	134
J 3구	36	3,274
총 계	425	27,481

표 4. K면 상수관로 수리해석 결과(설계 수요량 이용)

내 용	평 균	최 대	최 소
유량(l/sec)	1.10	10.6	-1.56
유속(m/sec)	0.124	0.64	0.01
수두손실(/1000m)	0.655	6.25	0.00

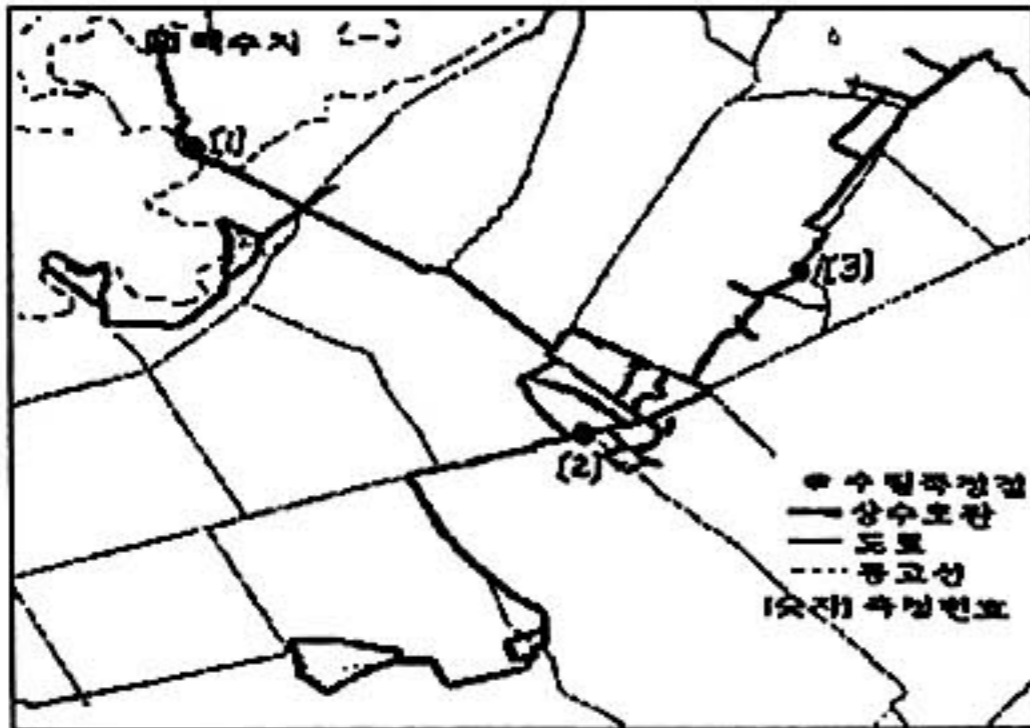


그림 1. K면 배수구역내 관망도

수구역 전체에 걸쳐 각 절점별 수요량을 재할 당하여 수리해석할 필요가 있다.

4.3. 불소를 이용한 유달시간 측정

청주정수장에서 불소화사업을 시행하여 청주 정수장의 상수를 공급받는 K면 배수지에서의 불소 농도는 약 0.75mg/L이다. 배수지에서 배수구역으로 나가는 관의 입구에 불소 주입 장치를 설치하여 불소를 pulse-input 방식으로 추가 주입하여 시료채취지점에서 불소 농도가 증가하는 시점을 두 지점간의 유달시간으로 간주 하였다. K면 배수구역내 관망도 그림 1를 이용하여 3곳의 시료 채취 지점을 정하였다.

1번 지점은 배수지에서 약 450m 떨어진 위치에 있는 마을 구판장이다. 2번 지점은 K면 사무소의 옥외 수도전이다. 3번 지점은 2번 지점과는 반대 방향으로 뻗어있는 오송 4구의 가정 수도전이다.

배수지에서의 불소 추가 주입은 3분 동안 주입하였다. 주입후 1번 지점에서 약 1분 간격으로 측정하였다. 1번 지점에서 유달시간을 확인 하고 2번 지점으로 옮겨 다시 약 1분 간격으로 측정하여 유달시간을 확인하였다. 시료채취지점중 배수지에서 가장 먼 거리에 있는 3번 지점에서 약 1분 간격으로 불소 농도를 측정하여 유달시간을 확인하였다.

그림 2, 그림 3, 그림 4는 불소를 추가 주입 한후 각 시료채취지점에서 불소농도를 측정한

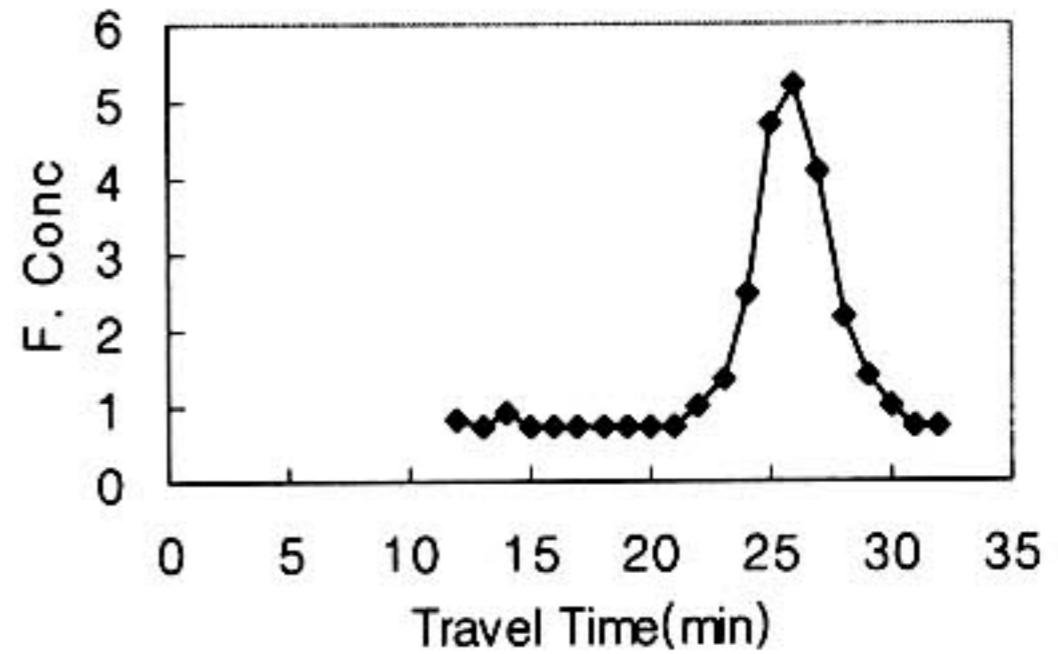


그림 2. 시료채취지점 1에서의 불소 농도 변화

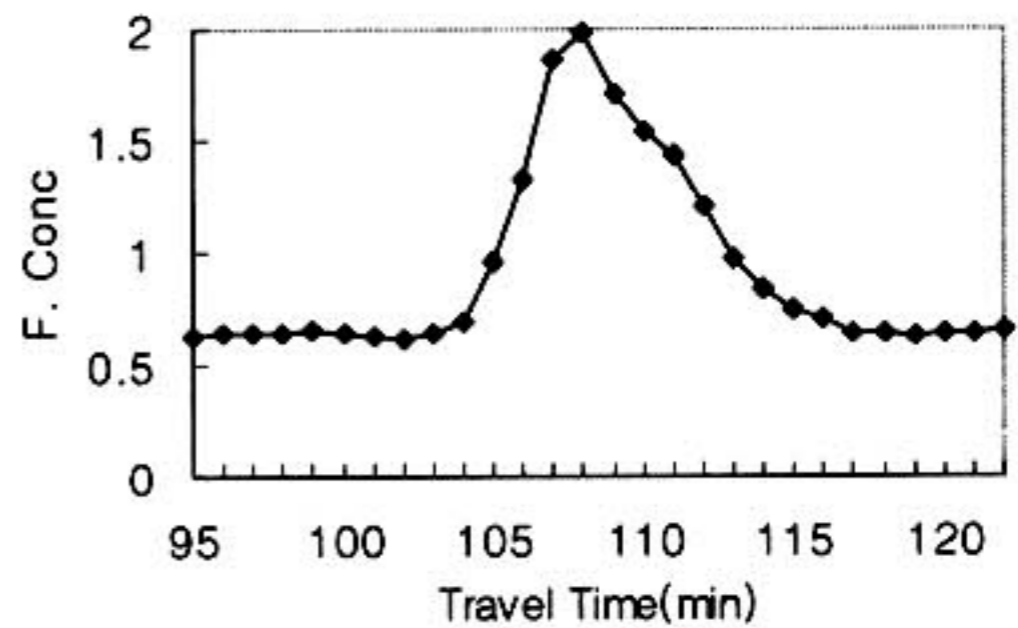


그림 3. 시료채취지점 2에서의 불소 농도 변화

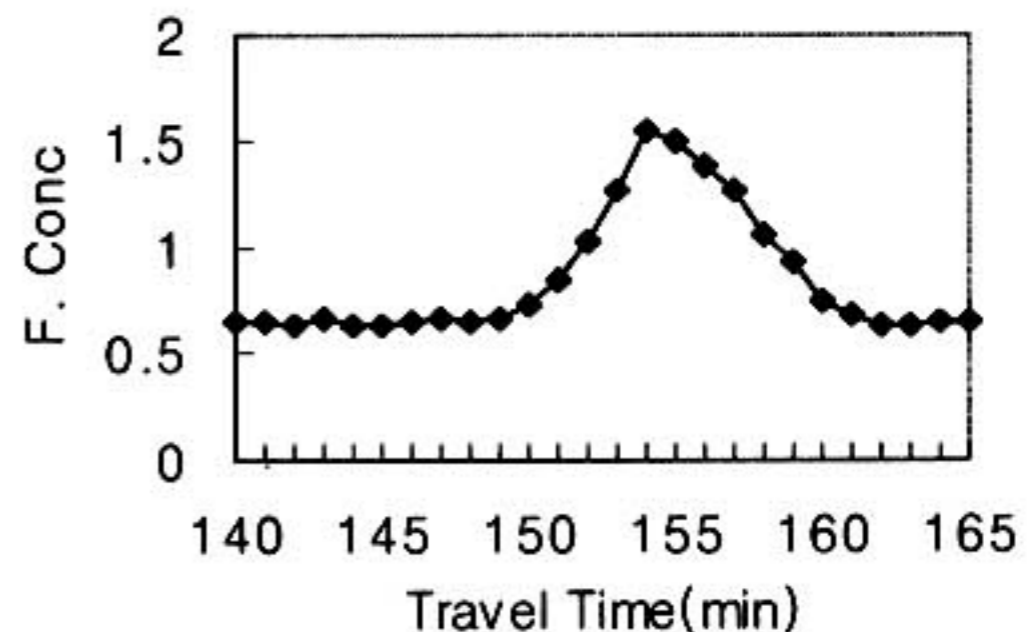


그림 4. 시료채취지점 3에서의 불소 농도 변화

결과를 보여준다.

배수지에서 3분동안 불소를 추가로 주입하였으므로 1번 시료채취지점까지 이송되어 오는 동안 확산 효과에 의해 불소의 기저농도에서 농도 증가 구간이 경과시간 약 23분에서 29분 동안 약 6분에 걸쳐 나타난다. 1번 지점까지의 유달시간은 농도가 증가하기 시작하는 시점에

서 가장 정점에 이른 시간까지의 중간 지점 즉 24분을 잡았다. 2번 시료채취지점에서의 농도 증가 구간은 103분에서 115분 사이로 약 12분에 걸쳐 나타나는데 유달거리가 멀어지면서 확산효과 역시 증가함을 보인다. 유달시간은 105분 즉 1시간 45분 정도로 산정된다. 3번 시료채취지점에서의 농도 증가 구간은 149분에서 164분 사이로 약 15분에 걸쳐 나타난다. 유달시간은 152분 즉 2시간 32분 정도 소요되었다.

4.4. 수리 해석 자료의 보정

수리적 모델로부터 얻은 각 관로내의 유속에 대한 수리해석 결과값과 현장에서 실측하여 얻은 유달시간을 비교하여 그 차이가 클 경우 모델의 보정인자인 각 절점에서의 수요량과 일간 수요량 변화 패턴 등을 보정하고 다시 검증하는 단계를 밟는다.

설계수요량을 기준으로 수리해석한 결과를 이용하여 각 시료채취지점까지의 유달시간을 계산하였다. 배수지에서 1번 지점까지는 15분 37초, 2번 지점까지는 1시간 23분, 3번 지점까지는 약 2시간 6분정도 소요되는 것으로 나타났다. 불소를 이용하여 각 지점까지의 유달시간을 실측한 결과와 비교하면 표 5와 같다.

수도요금표를 이용하여 각 절점별 수요량을 재할당하고 각 시료채취지점까지의 유달시간을 계산하였다. 배수지에서 1번 지점까지는 34분 7초, 2번 지점까지는 2시간 38분, 3번 지점까지는 4시간 2분이 소요되는 것으로 계산되었다. 불소를 이용하여 유달시간을 실측한 결과와 비교하여 표 5에 나타내었다.

유달시간의 비교에서 수요량 1은 K면 상수로 설계시 사용된 설계 수요량을 근거로 각 절점별 수요량을 할당하여 수리해석한 결과이고 수요량 2는 K면의 월간 상수도 사용 요금표를 기준으로 각 절점별 수요량을 할당하여 수리해석한 결과이다. 표 5에서 나타내는 것처럼 설계 수요량을 근거로 수리해석한 결과는 실측한 유달시간과 비교하여 약 30% 정도 더 빠른 유속을 나타내었다. 이는 배수지에 공급되는 일일 평균 공급량을 설계 수요량 비율로 할당함으로써 각 절점에서의 실제 수요량보다 많은 양이 할당되고 이에 따라 관로내 유속이 더 빠른 것으로 수리해석된 결과로 판단된다. 상수도 사용 요금표를 기준으로 수리해석한 수요량 2의 경우는 실측한 유달시간보다 약 50% 이상 연장된 유달시간을 보인다. 이는 배수지에서 배수구역으로 공급된 상수가운데 불명수가 차지하는 비율이 44.5%나 되는 반면 각 절점에

표 5. 유달시간의 비교

	수요량 1	수요량 2	실측 유달시간
시료채취지점 1	15분 37초(-36.1%)	34분 7초(+42.6%)	24분
시료채취지점 2	1시간 23분(-20.9%)	2시간 38분(+50.5%)	1시간 45분
시료채취지점 3	1시간 51분(-27%)	4시간 02분(+59.2%)	2시간 32분

표 6. 불명수 비율에 따른 유달시간 비교

불명수 비율	지점1의 유달시간	지점2의 유달시간	지점3의 유달시간
불명수 10%	19분 15초(-21%)	1시간 29분(-15%)	2시간 17분(-9.9%)
불명수 20%	21분 30초(-10%)	1시간 39분(-5.7%)	2시간 32분(0%)
불명수 30%	25분 12초(+5.4%)	1시간 55분(+9.5%)	2시간 55분(+15%)
불명수 40%	28분 40초(+20%)	2시간 12분(+26%)	3시간 27분(+36%)
불소 실험	24분	1시간 45분	2시간 32분

서의 수요량 할당에는 전혀 반영이 되지 않음으로서 공급된 상수가 관로내에서 정체되는 결과를 가져온 것으로 판단된다.

결국, 수리해석한 결과와 불소를 이용한 유달 시간 실측값간의 차이를 줄여주기 위해서는 불명수가 차지하는 비율을 44.5% 범위내에서 조절하는 방법을 사용하였다. 표 6은 불명수가 차지하는 비율을 조절해 가며 각 절점별 수요량을 재할당하고 수리해석하여 각 관로의 유속으로부터 세 곳의 시료채취지점까지 도달하는 데 걸린 시간을 실측한 유달시간과 비교하였다.

표 6의 괄호속에 백분율로 나타낸 것은 실측한 유달시간과 비교한 비율을 나타낸다. 불명수의 비율이 줄어들면서 각 절점의 수요량은 비례하여 증가하고 이에 따라 각 시료채취지점까지의 유달시간은 짧아진다. 불명수가 차지하는 비율중에서 불명수가 20%인 경우가 실측한 유달시간에 가장 가까운 유달시간을 예측할 수 있었다.

5. 결 론

상수관망내 수질인자들의 변화 양상을 파악하기 위한 수질 예측 모델 구축시 정확한 예측값을 얻기 위해 반드시 선행되어야 할 모델의 수리해석 결과에 대한 검증과 보정 단계를 보였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 유달시간 측정을 위해 tracer로 사용한 불소는 관로내에서 이동하는 동안 확산에 의해 농도는 주입지점보다 약간 희석되는 효과를 보이지만 시료채취지점까지의 유달시간을 쉽게 파악할 수 있는 보존성 물질임을 확인하였다.

2. 배수지로 인입되는 수량과 배수지역내의 각 수전에서 검침한 수량을 합한 실수요량을 비교했을 때 불명수의 비율이 약 45%에 달해 급배수관로에서 누수가 많이 발생함을 알 수 있었다.

3. 불명수의 비율이 높을 경우, 급배수관로를 대상으로 실측값과 유사한 수리해석 결과를 얻기 위해서는 상수도 요금표상의 사용량을 기준

으로 각 절점별 수요량을 할당하고 불명수의 비율을 조절하면서 실측값과의 오차를 줄여 가는 시행착오법을 사용하여야 할 것으로 판단 된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경연구원의 '96 G-7 "수돗물의 2차오염 방지기술"에 의한 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Chun, D. G., and Selznick, H. L. (1985) Computer modeling of distribution system system water quality, *Computer Applications in Water Resources*, ASCE, New York, N. Y., 448-456.
- Clark, R. M., Grayman, W. M. Goodrich, J. A., Deininger, R. A. and Hess A. F. (1991). Field-testing distribution water quality models, *J. AWWA*, 83(7), July, 67-75.
- Clark, R. M., Grayman, W. M., Males, R. M. and Hess A. F.(1993), Modeling contaminant propagation in drinking water distribution systems, *J. Environ Eng ASCE*, 119(2), 1-16.
- Clark, R. M., and Coyle, J. A. (1990) Measuring and Modeling variations in distribution system water quality, *J. AWWA*, 82(8), Aug., 46-53.
- Clark, R. M., and Males, R. M. (1986) Developing and applying the water supply simulation model, *J. AWWA*, 78(8), Aug., 61-65.
- Cross, H. (1936) Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors, Univ. of Ill. Eng. Experiment Station Bulletin 286, Urbana, IL.
- Deininger, R. A., Clark, R. M., Hess, A. F. and Bernston E. V. (1992) Animation and visualisation of water quality in distribution systems, *J. AWWA*, 84(7), July, 48-52.
- Kennedy, S. M, Sarikelle, S., and Suravallopp, K. (1991), Calibrating Hydraulic Analyses of Distributin Systems Using Fluoride Tracer Studies, *J. AWWA*, July, 54-59.
- USEPA Risk Reduction Eng. Lab. (1994) EPANET Users Manual, Cincinnati, Ohio, Jan.
- Wood, D. J., and Raves, A. G. (1981) Reliability of algorithms for pipe network analysis, *J. Hydr. Div., ASCE*, 107(110), 1145-1161.