

배수지 수질영향을 고려한 상수관망에서의 오염물질 전파해석

한건연* · 최혁준** · 박재홍***

1. 서론

최근 들어 여러 개의 배수지를 가진 대규모 상수관로 시스템에서 오염물질의 전파와 관로 이송 도중에 발생하는 2차적 오염 등으로 인한 수질악화는 불분명한 오염물질의 공급원과 복잡한 수리 및 수질해석 과정 등으로 인해 상수 관리분야의 커다란 어려움 중의 하나로 등장하고 있다. 상수관로 시스템에서 관로내의 수질은 수리학적 이송-확산 과정에 의해 변화된다. 따라서 수질을 악화시키는 오염물질의 전파해석은 상수 관리분야에서 유량 및 수두 해석을 위한 수리학적 모형과 연계되어야 한다. 일단 수리학적 모형과 오염물질의 전파모형이 연결되면 수리학적 및 생·화학적인 오염물질 농도변화 해석이 가능하다. Murphy(1985)는 상수관로 시스템에서의 정상상태 흐름에서 염소 농도의 공간적인 분포를 예측하기 위한 계산 모형을 연구 개발하였다. 물이 관로를 통해 유동됨에 따라 염소의 지수함수적 감쇠가 모형화되었다. Clark 등(1988)은 상수관로 시스템에서 수질 매개변수의 정상상태와 동역학적 전달을 위한 수질 모형을 개발하였다. Boulos와 Altman(1991)은 직접계산법을 제안하였고 Elmaalouf(1992)는 행렬을 이용한 직접계산을 모형화하였다. 본 연구는 크게 상수관로 시스템에서의 흐름해석과 이를 바탕으로 한 관로내 수질해석으로 구성하였다. 수질해석의 기본이 되는 정상상태 흐름해석은 선형화기법을 사용하여 해석하였다. 수질해석을 위해서 정상상태 흐름해석 결과를 도입하여 오염물질의 농도, 수령 및 수원 추적에 대한 해석이 가능한 계산 모형을 개발하였고 개발된 모형의 결과를 범용 프로그램인 EPANET의 결과값과 비교하였다.

2. 상수관로 시스템에서의 흐름해석

상수관로 시스템은 펌프와 그 밖의 부속물들을 포함하는 여러 개의 일정한 지름을 가진 관로로 구성된다. 각 관로의 끝 부분을 절점이라 하는데 이 절점은 고정수두절점과 교차절점으로 나누어진다.

* 경북대학교 토목공학과 교수

** 경북대학교 토목공학과 박사과정

*** 세명대학교 토목공학과 조교수

상수관로 시스템의 정상상태 흐름을 나타내는 연속방정식과 에너지방정식은 식 (1)과 (2)로 구성될 수 있다.

$$\sum Q_i - \sum Q_o = q \quad (1)$$

$$\sum h_i - E_p = 0 \quad (2)$$

여기서 Q_i 와 Q_o 는 교차절점에서 유입·유출되는 유량, q 는 교차절점에서의 외부 수요·공급량, $\sum h_i$ 은 관로에서 에너지손실의 합이고 E_p 는 펌프에 의해 물에 가해지는 에너지이다.

식 (2)를 식 (3)과 같이 변형하고 Taylor 급수 확장에 의해 선형화하여, 반복적인 기법을 통하여 식 (1)과 (2)를 연립적으로 해석한다.

$$f(Q) = kQ^n + k_m Q^2 - \mu P_u / Q \quad (3)$$

이 경우 비선형항에 대한 기울기 G_i 를 이용한, 에너지 방정식의 선형화 된 식은 식 (4)와 같고 식 (4)와 (1)을 반복적으로 계산하면 관로내 유량을 계산할 수 있다(Wood 와 Funk, 1993).

$$\sum G_i Q = \sum G_i Q_i - \sum F_i \quad (4)$$

$$\text{여기서, } G_i = f'(Q_i) = nkQ_i^{n-1} + 2k_m Q_i + \mu P_u / Q_i^2$$

3. 상수관로 시스템에서의 수질해석

일반적으로 정상적인 운전이 수행되고 있는 상수관로 시스템의 경우 염소와 같은 주입제들은 정수단계에서 거의 같은 농도로 주입되고 있어 유량의 시간적 변화가 발생하지 않는다면 정상상태를 유지하게 된다. 본 연구에서는 먼저 정상상태에 기초한 상수관로 시스템의 수질해석 모형을 개발하고자 하였으며 이를 이용하여 관로내 동역학적 수질해석을 위한 토대를 구축하고자 하였다.

3.1 수원 기여도

여러 개의 배수지로 구성된 상수관로 시스템의 경우 시스템내의 각 교차절점은 각 수원지로부터 일정량의 물을 공급받게 된다. 기존의 상수관망 유량해석의 경우 각 수원지에서 교차절점에 공급되어지는 수원지별 유량을 판단할 수 없어 수원지별로 교차절점에 미치는 유량 및 오염물질 농도의 영향을 파악할 수 없었다. 이러한 각 배수지나 수원지가 교차절점에 미치는 유량을 수원 기여도(source contribution)라 정의하며 이 수원 기여도를 이용하면 각 수원지에서 교차절점에 대한 오염물질의 수질영향을 판단할 수 있다. 수원 기여도의 문제는 식 (5)와 같이 수식화될 수 있다.

$$[Q_{sc}] \cdot f_c = [Q_{fo}] \quad (5)$$

여기서 $Q_{sc} = \sum Q_i + q$ 는 수원의 흐름기여 행렬, f_c 는 수원 기여도이고 $[Q_{fo}]$ 는 수원의 유출 행렬이다. Q_i 는 교차절점에서 관로를 통한 유출량이고 q 는 외부 수요량이다.

3.2 오염물질의 농도

수원 기여도 결정을 위한 수원의 흐름기여 행렬 $[Q_{sc}]$ 의 정확한 조합이 이루어졌다면 각 절점에서 오염물질 농도 해석을 위한 수식이 결정될 수 있다.

$$[Q_{sc}] \cdot C_c = [C_s] \quad (6)$$

여기서 C_c 는 교차절점에서 오염물질의 농도이고 C_s 는 배수지로부터 유입되는 오염물질의 농도이다.

일반적으로 많은 오염물질이 비보존적이며 일정한 감쇠율이나 증가율로 하나의 물질로부터 다른 물질로 변화되기도 한다. 이러한 비보존 물질에 대한 임의의 관로 제어체적(control volume)내에서 오염물질의 농도변화를 위한 1차 지배방정식은 식 (7)과 같이 유도된다.

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C \quad (7)$$

식 (7)을 적분하고 지수함수로 정리하여 오염물질 확산 방정식으로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$C_E = C_o e^{-k_1 T} \quad (8)$$

여기서 k_1 은 1차 반응계수(감쇠 또는 증가율) $[T^{-1}]$, C_E 는 관로의 하류단에서 오염물질 농도 (mg/l), C_o 는 관로의 상류단에서 오염물질 농도 (mg/l)이고 T 는 관로에서의 체류시간이다.

식 (8)을 식 (5)의 흐름기여 행렬내에 결합함으로서 비보존성 물질에 대한 기여도를 해석할 수 있게된다.

3.3 수령의 해석

물이 배수지에 있을 때나 관로를 통하여 하나의 교차절점에서 다른 교차절점으로 이동할 때 체류시간의 개념과 유사한 水齡(water age)을 가지게 된다. 수령의 해석은 식 (9)와 같이 나타난다.

$$[T_{ave}] \cdot t_{ave} = [\omega] \quad (9)$$

여기서 $[T_{ave}]$ 는 평균 수령 행렬, t_{ave} 는 교차절점에서의 평균 수령이고 $[\omega]$ 는 수령-흐름 기여 행렬이다.

$$T_{ave} = Q_s(k) + \sum f_{ci} \cdot Q_{i,j} \quad (10)$$

$$[\omega] = \begin{bmatrix} \sum f_{ci} \cdot Q_{i,j} \cdot t_{i,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 $Q_s(k)$ 는 배수지 k 에서 교차절점 j 까지의 유량, f_{ci} 는 교차절점 i 에서의 수원 기여도, $Q_{i,j}$ 는 교차절점 i 에서 j 에 이르는 관로내의 유량이고 $t_{i,j}$ 는 교차절점 i 에서 j 까지 연결된 하나의 관로를 통한 체류시간이다.

4. 모형의 적용 및 검토

본 연구에서 개발한 알고리즘을 검증하기 위해서 네 개의 배수지에서 유량의 유입과 염소 잔류물의 유입이 있는 대도시에서 흔히 볼 수 있는 다중오염원을 가진 상수관로 시스템을 제시하였다.

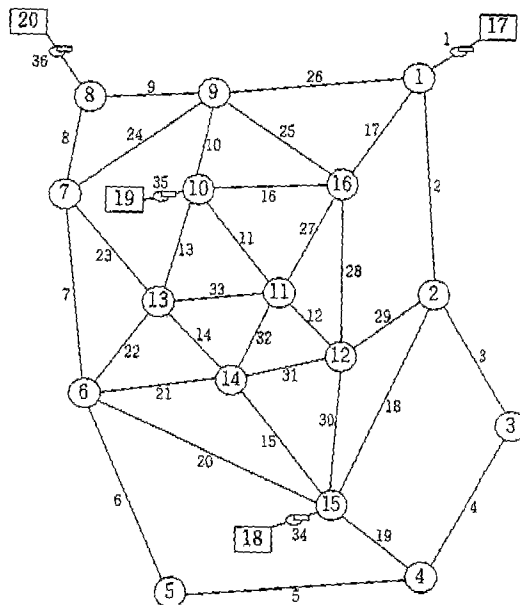


그림 1. 다중오염원을 가진 상수관로 시스템

이 상수관로 시스템은 네 개의 고정수두절점에서 유입이 일어나고 있으며 고정수두절점에서 오염물질의 농도는 17번 절점과 20번 절점에서 1.9 mg/l , 18번 절점과 19번 절점에서 1.6 mg/l 이다. 감쇠를 고려하지 않은 경우와 감쇠계수 $k=1.0/\text{day}$ 를 고려한 경우의 결과값에 대한 비교와 수령에 대한 결과값이 표 1에 나타나 있고 수원 추적에 대한 결과값이 표 2에 나타나 있다.

표 1. 오염물질 농도의 비교와 수령에 대한 결과값

| 교차 절점 | 감쇠를 고려하지 않은 오염물질의 농도 (mg/l) | | $k=1.0/\text{day}$ 를 고려한 오염물질의 농도 (mg/l) | | 평균수령 (hrs) | 최대수령 (hrs) | 최소수령 (hrs) | 발산지수 |
|----------|---|--------|--|--------|---------------|---------------|---------------|-------|
| | 본모형 | EPANET | 본모형 | EPANET | | | | |
| 1 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.89 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.00 |
| 2 | 1.86 | 1.86 | 1.68 | 1.68 | 2.44 | 4.31 | 2.18 | 0.98 |
| 3 | 1.73 | 1.73 | 1.61 | 1.61 | 1.70 | 4.65 | 0.67 | 5.96 |
| 4 | 1.60 | 1.60 | 1.58 | 1.57 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.00 |
| 5 | 1.65 | 1.65 | 1.54 | 1.54 | 1.62 | 13.53 | 0.64 | 20.28 |
| 6 | 1.72 | 1.72 | 1.57 | 1.56 | 2.16 | 12.78 | 0.67 | 18.04 |
| 7 | 1.90 | 1.90 | 1.83 | 1.83 | 0.89 | 10.07 | 0.32 | 30.17 |
| 8 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.89 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| 9 | 1.89 | 1.89 | 1.79 | 1.80 | 1.23 | 8.63 | 0.36 | 23.18 |
| 10 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.59 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.00 |
| 11 | 1.70 | 1.70 | 1.56 | 1.56 | 2.13 | 15.50 | 0.76 | 19.39 |
| 12 | 1.72 | 1.72 | 1.61 | 1.61 | 1.65 | 11.19 | 0.61 | 17.36 |
| 13 | 1.75 | 1.75 | 1.65 | 1.65 | 1.35 | 10.96 | 0.91 | 11.01 |
| 14 | 1.70 | 1.70 | 1.51 | 1.52 | 2.74 | 13.96 | 0.75 | 17.69 |
| 15 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.59 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| 16 | 1.83 | 1.83 | 1.72 | 1.72 | 1.52 | 10.33 | 0.98 | 9.55 |

표 2. 수원 추적에 대한 결과값 비교

| 교차 절점 | 수원 추적(% (절점 17)) | | 수원 추적(% (절점 18)) | | 수원 추적(% (절점 19)) | | 수원 추적(% (절점 20)) | |
|----------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| | 본모형 | EPANET | 본모형 | EPANET | 본모형 | EPANET | 본모형 | EPANET |
| 1 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 87.67 | 87.49 | 12.33 | 12.51 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 43.01 | 43.15 | 56.99 | 56.85 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | 1.42 | 1.41 | 75.05 | 74.95 | 8.09 | 8.27 | 15.45 | 15.38 |
| 6 | 3.26 | 3.22 | 42.51 | 42.57 | 18.63 | 18.96 | 35.60 | 35.25 |
| 7 | 8.35 | 8.32 | 0.00 | 0.00 | 0.61 | 0.69 | 91.04 | 90.99 |
| 8 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 9 | 34.68 | 34.67 | 0.00 | 0.00 | 2.54 | 2.88 | 62.77 | 62.45 |
| 10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 |
| 11 | 21.08 | 21.25 | 3.83 | 3.69 | 61.58 | 61.84 | 13.51 | 13.21 |
| 12 | 37.27 | 37.41 | 51.11 | 50.98 | 7.74 | 7.75 | 3.88 | 3.86 |
| 13 | 4.17 | 4.11 | 0.00 | 0.00 | 50.31 | 50.94 | 45.52 | 44.95 |
| 14 | 10.46 | 10.42 | 36.51 | 36.39 | 29.56 | 29.93 | 23.46 | 23.26 |
| 15 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 16 | 66.06 | 66.37 | 0.00 | 0.00 | 22.61 | 22.46 | 11.33 | 11.17 |

표에 나타난 바와 같이 본 연구에 의한 결과와 범용 프로그램 EPANET에 의한 결과값이 일치함을 볼 수 있다. 결과값에 대한 약간의 오차는 흐름해석의 결과값에 의한 차이와 본 연구와 EPANET의 수질해석 방법의 차이에서 비롯된 것으로 생각되어지는데 이를 고려하더라도 상당한 부분이 접근하는 것을 볼 때 본 연구의 계산결과가 검증됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 상수관로 시스템에서 수질 매개변수들을 쉽게 효과적으로 해석하기 위한 포괄적인 계산 모형을 개발하여 상수도 관리자들이 편리하게 사용할 수 있는 수질 평가 프로그램을 구축하였으며 그 연구 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 상수관로 시스템에서 유량에 대한 정상상태 흐름해석 모형을 개발하여 오염물질의 수질해석 프로그램의 기본자료를 제공하였다.
- (2) 행렬을 이용한 직접 대입법을 사용하여 상수관로 시스템에서 오염물질의 정상상태 해석을 실시하였고 1차적인 감쇠를 고려한 오염물질의 전파 해석 프로그램을 개발하여 가상관망에 적용하여 EPANET와 비교함으로써 본 모형의 적용성을 검증하였다.
- (3) 상수관로 시스템에서 수령을 계산할 수 있는 기법을 개발하여 물의 체류 전달시간을 계산하였고 임의 절점에서 수질 오염물질의 농도를 해석하였다. 또한 최대 및 최소 수령의 계산을 수행함으로써 본 모형의 실용성을 입증하였다.
- (4) 본 연구는 상수관로 시스템의 정상상태 오염물질의 전달특성을 해석하기 위해 수원 추적, 오염물질의 농도, 수령의 문제에 대한 일반적인 해를 구할 수 있는 포괄적인 수질해석 모형을 제시하였다.

6. 참고문헌

- Bolous, P.F., Altman, T., and Vasconcelos, J.J. (1991). *Explicit Graph-Theoretic Algorithms for Mixing Problems in Multiple-Source Networks*. Univ. of Colorado Computer Science and Engineering Technical Report, No. 4.
- Clark, R.M., Grayman, W.M., and Males, R.M. (1988). "Contaminant Propagation in Distribution Systems." *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 4, pp. 929-943.
- Elmaalouf S.G. (1992) *A Comprehensive Steady State Quality Model for The Assessment of Contaminants Behavior in Water Distribution Systems*, California State University, Los Angeles.
- Murphy, S.B. (1985). *Modeling Chlorine Concentrations in Municipal Water Systems*. Master's Thesis, Montana State University, Bozeman, Montana.
- Wood, D.J. and Funk, J.E. (1993). "Hydraulic analysis of water distribution systems." in *Water Supply Systems - State of the Art and Future Trends*, Cabrera, E. and Martinez, F. eds, Computational Mechanics Publications, pp. 43-85.