기술강좌

최적화 이론의 수자원공학에의 적용(Ⅱ)

김 중 훈*

지난 호에서는 OR및 수자원시스템공학의 유래에 대해 알아본 다음 이어서 최적화 기법중 선형계획법과 비선형계획법을 소개하였다. 이번 호부터는 최적화 이론이 수자원공학분야에 어떻게 적용될 수 있는지 알아보기로 한다. 적용예는 이해를 돕기위해 간단한 예제를 위주로 할 계획이며 더욱 복잡한 실제 적용예를 위해서는 참고문헌에 나열된 논문들을 보기 바란다.

1. OR 및 수자원시스템공학의 유래
2. 최적화 기법의 소개
3. 관망 시스템에의 적용
4. 댐 운영에의 적용
5. 지하수 펌핑계획에의 적용
6. 도시 배수설계에의 적용

3. 관망시스템에의 적용

관망시스템은 크게 분기형(branched)시스템과 회로형(looped)시스템으로 나뉘어 해석이 되는데 두 시스템의 대표적인 차이점은 분기형시스템에서는 각 관에서의 유량이 정해져 있는데 반하여 회로형시스템에서는 각 관에서의 유량이 변수로 취급되어야 하기 때문에 그 해석과정이 더 복잡하다 할 수 있다. 최적화기법의 적용에 있어서도 두 시스템을 나누어 고찰해 보는 것이 이해에 더 도움이 되리라 생각된다.

3.1 분기형 관망 시스템(Branched Pipe Network System)

3.1.1 해석/설계절차

분기형 관망시스템은 말단부에서의 수요유량(water demand)이 정해져 있어 각 관에서의 유량은 말단부의 관으로부터 역으로 합산해 나가면 쉽게 구해진다. 따라서 각 절점 또는 분기점에서의 연속방정식인 절점방정식(각 절점에서 들어오는 유량과 나가는 유량은 같다)은 이미 충족이 되어 있는 상태라 할 수 있다. 일단 어떤 한 관에서의 유량이 주어지면 관의 길이, 조도와 함께 어떤 실험관경에 대해서 그 관에서의 손실수두를 Darcy-Weisbach공식 또는 Hazen-Williams공식으로부터 계산할 수 있게 된다. 각 관에서의 손실수두가 계산되면 전체 노선에서의 손실수두의 합을 구하여 주어진 펌핑(양수)시설의 양정고가 이 손실수두의 합을 제외하고도 말단부에 충분한 수압을 전달하는지 확인해야한다. 만약 수압조건이 만족되지 않으면 실험적으로 취했던 각 관의 관경을 다시 조정하거나 펌핑시설을 늘려서 다시 위의 계산과정을 만족스러울 때까지 반복하여야 한다.

3.1.2 최적설계이론

위에서 소개된 설계절차는 많은 시행착오를 거쳐야 하며 특히 분기된 노선이 많을 경우 요구되는 작업량은 방대해진다. 많은 시행착오과정을 통해 조금씩 나은(수리학적으로 안정되고 경제적인)시스템의 설계가 가능하지만 투자되는 많은 시간과

* 고려대학교 토목환경공학과 조교수

노력에도 불구하고 최적조건의 설계라고는 할 수 없다. 따라서 일찍부터 분기형관망시스템의 최적설계를 위한 연구가 있어왔다. Karmeli등(1968), Gupta(1969), Calhoun(1971), Gupta등(1972)은 분기형 관망시스템의 최적설계를 선형계획법(linear programming)으로 수식화하였다. Schaake와 Lai(1969), Liang(1971)은 비선형계획법(nonlinear programming)을 이용한 분기형 관망의 최적설계를 시도하였으나 선형계획법을 이용한 방법에 비해서 더 나은 결과나 계산상의 이점을 보여주지는 못하였다. 본 기고에서는 선형계획법을 이용한 분기형 관망시스템의 최적설계의 한 예를 소개하기로 한다.

일반적으로 관망시스템의 기능은 각 수요지에서 요구되는 유량을 충분한 수압으로 도달시키는 것이며 설계자는 이 유량 및 수압조건을 만족시키면서도 경제적인 시스템을 찾아야 하는 것이다. 최적화설계는 선형계획법과 같은 수학적 도구를 이용하여 설계자가 많은 시행착오를 거치지 않고도 최소비용의 시스템을 설계할 수 있도록 해준다. 따라서 최적화모형의 목적함수는 관망시스템 전체의 시설비를 최소로 하는 것이다. 목적함수를 식으로 나타내면

$$\text{Min } Z=\sum_{(i,j)\in I}\sum_{m\in M_{i,j}} C_{i,j,m}X_{i,j,m} + \sum_{k} CP_k\ XP_k \tag{3.1}$$

여기서 $C_{i,j,m}$은 단위길이당 관비용이며, I는 전체 관망시스템내의 관의 집합, 지수(i,j)는 절점 i와 j 사이의 관을 나타내고, m은 어떠한 상업용 규격관경, $M_{i,j}$는 절점 i와 j사이의 관으로 선택될 수 있는 상업용 규격관경의 집합을 나타낸다. $X_{i,j,m}$는 m의 관경을 가지는 관의 길이이며, CP_k는 펌프 k의 단위양정고당 설치비용이며, XP_k는 펌프 k의 양정고이다.

제약조건으로는 관의 길이에 대한 제약조건, 필요압력수두에 관한 제약조건, 결정변수값이 음수일 수 없다는 비음조건 등이다. 관의 길이에 관한 제약조건식은

$$\sum_{m\in M_{i,j}} X_{i,j,m}=L_{i,j} \qquad (i,j)\in I \tag{3.2}$$

으로 주어지는데 여기서 $L_{i,j}$는 (i,j)구간의 관의 총길이를 말한다. $X_{i,j,m}$은 (i,j)구간의 관의 전체길이가 아니라 각각의 관경을 가진 관길이를 나타낸다. 예를 들어 10개의 상업용 규격관경을 고려한다면 (i,j)구간내의 각각의 규격관경을 가진 10개의 관이 조합을 이루고 있다고 보면 된다. 따라서 위의 제약조건은 그 10개의 관의 총길이는 (i,j)구간의 길이와 같다는 의미이다. 이론상으로는 한 구간내에서 10개관경 각각에 대한 길이가 다 구해질 수 있지만 실제 최적결과로는 대개의 경우 한 구간에 1개의 관경이 선택되며, 간혹 두 개의 관경이 선택되는 경우도 있으나 실무적인 입장에서도 한 구간에서 두 관경의 관을 각각 어떤 길이로 시공하는 데는 어려움이 없다고 본다.

압력수두에 관한 제약조건은 용수를 공급하는데 있어서 용수의 사용성을 향상시키기 위해서 각 수요절점에서 일정 압력수두 이상을 유지시켜 주어야 한다는 것으로서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$H_{D,n}+H_{\min,n}\le H_s+\sum_k XP_k\ IV_k-\sum_{(i,j)\in I_n}\sum_{m\in M_{i,j}} J_{i,j,m}X_{i,j,m} \qquad n=1,\ \cdots\cdots,\ N \tag{3.3}$$

$H_{\min,n}$은 수요지점 n에서 요구되는 최소압력수두이며, H_s는 배수지(source)에서의 위치수두, $H_{D,n}$은 수요지점 n의 표고이다. $J_{i,j,m}$은 (i,j)구간에서 사용가능한 관경별 관에서의 단위길이당 손실수두이며 Darcy-Weisbach공식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$J=\frac{8\,f\,Q^2}{\pi^2\,g\,D^5}$$

여기서 f는 관의 마찰계수, Q는 유량, g는 중력

가속도, D는 관경을 나타낸다. 이 식에서 f, Q, π, g 등은 각 관에 대하여 이미 주어진 값이며, 관경 D도 상업용 규격관경으로 정해져 있으므로 각 관경별로 $J_{i,j,m}$은 미리 구해지는 값이다.

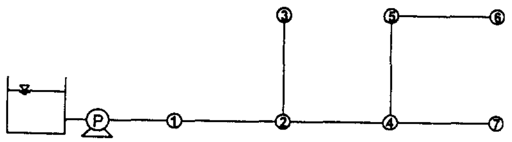
마지막으로 결정변수인 관길이와 펌프양정고의 값은 음수일 수 없다는 비음조건(non-negativity)은 다음과 같다.

$$X_{i,j,m} \geq 0 \qquad (3.4a)$$

$$XP_k \geq 0 \qquad (3.4b)$$

3.1.3 최적설계의 예

그림 3.1과 같은 분기형 시스템에 대하여 최소비용의 관경과 양수시설을 결정하는 선형계획법모형을 만들어 보기로 한다. 전체 관로구간의 갯수는 7개이고, 양수시설의 위치는 절점 0의 직하류이며, 절점 3, 6, 7은 수요절점이다. 관로구간의 길이는 각각 1000m씩이며, 상업용 규격관경은 5개만 고려하기로 하고 표 3.1에 예시한 관경별 단위길이당 관의 비용을 사용하기로 한다. 각 관의 관마찰계수 f는 0.02로 한다. 배수지의 수위는 100m, 각 수요절점에서의 표고는 110m이며 수압조건은 0.5kg/cm^2(수두로는 5m)이다. 수요절점에서의 요구유량은 각각 0.1m^3/sec이고, 양수시설의 1m 양정고당 비용은 3,500,000원으로 하기로한다.



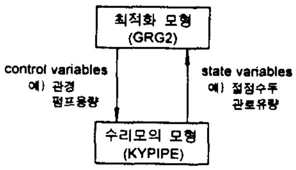


그림 3.1 분기형 관망시스템의 예

표 3.1 상업용 PE 일반관의 관경별 총공사비용

관경(mm)	재료비 (원/m)	설치비 (원/m)	총비용 (원/m)
200	9,080	6,680	15,760
250	12,830	7,460	20,290
300	16,560	8,230	24,790
350	26,810	9,020	35,830
400	34,710	9,810	44,520

우선 선형계획법으로 수식화하면

$$\begin{aligned}
\text{Min } Z = \ & C_{0,1,1}X_{0,1,1} + C_{0,1,2}X_{0,1,2} + \cdots + C_{0,1,5}X_{0,1,5} \\
& + C_{1,2,1}X_{1,2,1} + C_{1,2,2}X_{1,2,2} + \cdots + C_{1,2,5}X_{1,2,5} \\
& + C_{2,3,1}X_{2,3,1} + C_{2,3,2}X_{2,3,2} + \cdots + C_{2,3,5}X_{2,3,5} \\
& + C_{2,4,1}X_{2,4,1} + C_{2,4,2}X_{2,4,2} + \cdots + C_{2,4,5}X_{2,4,5} \\
& + C_{4,5,1}X_{4,5,1} + C_{4,5,2}X_{4,5,2} + \cdots + C_{4,5,5}X_{4,5,5} \\
& + C_{5,6,1}X_{5,6,1} + C_{5,6,2}X_{5,6,2} + \cdots + C_{5,6,5}X_{5,6,5} \\
& + C_{4,7,1}X_{4,7,1} + C_{4,7,2}X_{4,7,2} + \cdots + C_{4,7,5}X_{4,7,5} \\
& + 3{,}500{,}000XP_1
\end{aligned}$$

Subject to

(a) 관길이에 대한 제약조건

$X_{0,1,1}+X_{0,1,2}+X_{0,1,3}+X_{0,1,4}+X_{0,1,5}=1000$ (0–1구간)
$X_{1,2,1}+X_{1,2,2}+X_{1,2,3}+X_{1,2,4}+X_{1,2,5}=1000$ (1–2구간)
$X_{2,3,1}+X_{2,3,2}+X_{2,3,3}+X_{2,3,4}+X_{2,3,5}=1000$ (2–3구간)
$X_{2,4,1}+X_{2,4,2}+X_{2,4,3}+X_{2,4,4}+X_{2,4,5}=1000$ (2–4구간)
$X_{4,5,1}+X_{4,5,2}+X_{4,5,3}+X_{4,5,4}+X_{4,5,5}=1000$ (4–5구간)
$X_{5,6,1}+X_{5,6,2}+X_{5,6,3}+X_{5,6,4}+X_{5,6,5}=1000$ (5–6구간)
$X_{4,7,1}+X_{4,7,2}+X_{4,7,3}+X_{4,7,4}+X_{4,7,5}=1000$ (4–7구간)

(b) 필요압력수두에 관한 제약조건

(수요절점 3)

$$\begin{aligned}
100 + XP_1 - J_{0,1,1}X_{0,1,1} - J_{0,1,2}X_{0,1,2} - \cdots - J_{0,1,5}X_{0,1,5} \\
- J_{1,2,1}X_{1,2,1} - J_{1,2,2}X_{1,2,2} - \cdots - J_{1,2,5}X_{1,2,5} \\
- J_{2,3,1}X_{2,3,1} - J_{2,3,2}X_{2,3,2} - \cdots - J_{2,3,5}X_{2,3,5} \\
\geq 115
\end{aligned}$$

(수요절점 6)

$$
\begin{aligned}
100+XP_1&-J_{0,1,1}X_{0,1,1}-J_{0,1,2}X_{0,1,2}-\cdots\cdots-J_{0,1,5}X_{0,1,5}\\
&-J_{1,2,1}X_{1,2,1}-J_{1,2,2}X_{1,2,2}-\cdots\cdots-J_{1,2,5}X_{1,2,5}\\
&-J_{2,4,1}X_{2,4,1}-J_{2,4,2}X_{2,4,2}-\cdots\cdots-J_{2,4,5}X_{2,4,5}\\
&-J_{4,5,1}X_{4,5,1}-J_{4,5,2}X_{4,5,2}-\cdots\cdots-J_{4,5,5}X_{4,5,5}\\
&-J_{4,6,1}X_{4,6,1}-J_{4,6,2}X_{4,6,2}-\cdots\cdots-J_{4,6,5}X_{4,6,5}\\
&\geq 115
\end{aligned}
$$

(수요절점 7)

$$
\begin{aligned}
100+XP_1&-J_{0,1,1}X_{0,1,1}-J_{0,1,2}X_{0,1,2}-\cdots\cdots-J_{0,1,5}X_{0,1,5}\\
&-J_{1,2,1}X_{1,2,1}-J_{1,2,2}X_{1,2,2}-\cdots\cdots-J_{1,2,5}X_{1,2,5}\\
&-J_{2,4,1}X_{2,4,1}-J_{2,4,2}X_{2,4,2}-\cdots\cdots-J_{2,4,5}X_{2,4,5}\\
&-J_{4,7,1}X_{4,7,1}-J_{4,7,2}X_{4,7,2}-\cdots\cdots-J_{4,7,5}X_{4,7,5}\\
&\geq 115
\end{aligned}
$$

(c) 비음조건

$$
\begin{aligned}
X_{i,j,m} &\geq 0\\
XP_1 &\geq 0
\end{aligned}
$$

위에서 수식화된 선형계획법문제를 GAMS (Generalized Algebraic Modeling System)패키지를 이용하여 풀이한 결과 표 3.2와 같은 최적관경과 관길이를 구할 수 있었다. 이 결과에 의하면 (0,1), (1,2), (2,4)구간에서는 400㎜관을 각각의 총구간길이인 1000m씩 시공하고 (4,5), (5,6)구간에서는 300㎜관을 1000m씩 시공하고 (2,3)구간은 250㎜관을 910m, 200㎜관을 90m로 선택하고 (4,7)구간은 300㎜관을 330m, 250㎜관을 670m로 선택한다. 아울러 이때 양정고는 64.2m로 하면 최적설계가 된다.

이상에서 살펴본 분기형관망의 최적설계는 시공비를 위주로 한 예이다. 그러나 완공후 이 관망시스템의 유지관리비까지 고려하려 한다면 위에서 수식화된 문제를 약간 변경할 필요가 있게 된다. 그 대표적인 예가 펌프운영에 필요한 전기비용이라 할 수 있는데 이를 고려하기 위해 목적함수에 펌프양정에 필요한 전기비용항을 추가해야 한다. 그 결과 대개의 경우 최적의 관경은 커지는 반면 최적양정고는 낮게 되는 결과를 보이게 된다. 이는 더 큰 관경을 통하여 마찰수두손실을 줄임으로써 필요한 양정고를 줄이게 되어 펌프운영비를 절약하는 효과에 기인한다.

표 3.2 분기형 관망예의 최적관경, 관길이, 양정고

(단위 : m)

관경(㎜) / 구간	200	250	300	350	400
(0,1)					1000
(1,2)					1000
(2,3)	90.3	909.7			
(2,4)					1000
(4,5)			1000		
(5,6)			1000		
(4,7)		671.9	328.1		
최적양정고 = 64.2m					
최적(최소)공사비 = 449,504,400원					

3.2 회로형 관망 시스템(Looped Pipe Network System)

3.2.1 기본이론

분기형 관망의 최적설계예에서는 각 관에 대해 여러 상업용 규격관경에 대한 관길이를 변수로 하였으나 비선형계획법을 쓰게 되는 폐합회로형 관망의 최적설계에서는 변수의 갯수에 제한이 크므로 각 구간에서의 관경을 변수로 하게된다. 이에따라 목적함수에 포함되는 관의 시공비용은 관경에 따른 비선형함수로 주어지게 된다. 분기형 관망의 경우와는 달리 폐합회로형 관망에서는 각 관에서의 유량이 미지의 값이므로 손실수두를 계산하는 Darcy-Weisbach 공식이나 Hazen-Williams 공식은 Q에 대해 비선형으로 주어진다. 따라서 한 회로내에서의 손실수두의 합은 0이라는 폐합회로 방정식 역시 비선형으로 나타내진다.

위에서 언급된 바와 같이 회로형 관망시스템의 최적설계는 비선형문제로 주어지게 되는데 이 문제를 선형화시켜서 해석하려는 다양한 형태의 모형이 있어왔다. 그 대표적인 것들로는 Alperovits과 Shamir(1977), Shamir(1979), Quindry등(1981), Morgan과 Goulter(1985)등이 있으나 이 모형들은 최적관경의 선택에만 촛점이 맞추어져 있는 단점이 있었다. 다음절에서는 일반적인 비선형계획법을 이용한 방법을 소개해 보기로 한다.

3.2.2 비선형계획법을 이용한 최적설계

폐합회로형(Looped) 관망 시스템의 최적화모형을 위한 목적함수는 다음과 같은 형태로 주어진다.

$$\text{Min } Z=\sum_{j=1}^{n} L_j \ (a+b\,D_j^c)+\Sigma_{k=1}^{K} CP_k\, XP_k \tag{3.5}$$

여기서 L_j, D_j는 관로길이 및 관경이고 a, b, c는 상수이며, CPk와 XPk는 펌프 k의 양정고당 설계비용과 양정고이며, n은 관의 총갯수, K는 펌프의 갯수이다.

목적함수와 함께 고려해야 할 제약조건은 교차점방정식에 의한 제약조건, 폐합회로방정식에 의한 제약조건, 손실수두방정식에 의한 제약조건, 수요절점에서 잔류수압 기준에 대한 제약조건, 결정변수의 값이 음일 수 없다는 Nonnegativity 제약조건 등 5가지이다.

(a) 교차점방정식에 의한 제약조건

$$\sum_{j\subset I_i} q_j \ \geq \ Q_i \tag{3.6}$$

여기서 q_j는 j번 관을 통해 흐르는 유량, Q_i는 수요절점 i에서의 수요유량, Ii는 수요절점 i와 연결된 관의 조합이며 각각의 수요절점에 대하여 관로를 통한 유량의 합이 수요유량을 충족시켜야 한다는 조건으로 가장 기본적인 식이다.

(b) 폐합회로방정식에 의한 제약조건

$$\sum_{j\subset J_s} h_{Li} \ = \ 0 \tag{3.7}$$

관망시스템의 폐합회로(loop) 각각에 대하여 손실수두의 합이 항상 0이라는 제약조건으로 여기서 J_s는 폐합회로 s에 속한 관의 조합이며, 각 관의 손실수두는 식(3.8)과 같다.

(c) 손실수두방정식에 의한 제약조건

$$h_{Li}=\frac{10.66L_iQ^{1.85}}{C^{1.85}D_j^{4.87}} \tag{3.8}$$

모든 관로 각각에 대해 Hazen-Williams 공식을 만족시켜야 하며 결정변수가 되는 관로에 대한 손실수두, 관경 및 유량의 항으로 표시된다.

(d) 잔류수압기준에 대한 제약조건

$$\underline{H} \ \leq \ H \ \leq \ \overline{H} \tag{3.9}$$

각 수요절점에서의 잔류슈압이 설계기준이 되는 하한치($\underline{H}$)와 상한치($\overline{H}$) 사이에 존재해야 된다는 제약조건으로 상수도 설계기준에 의해 하한치는 15m, 상한치는 40m로 주어진다.

(e) Nonnegativity 제약조건

$$\begin{aligned} D_i &\ \geq\ 0 \\ q_i &\ \geq\ 0 \\ h_{Li} &\ \geq\ 0 \\ XP &\ \geq\ 0 \end{aligned} \tag{3.10}$$

결정변수가 되는 관로의 관경, 유량, 손실수두, 펌프양정고 값은 양수의 값을 가지므로 이 조건을 만족시켜야 한다.

위에서 보면 목적함수는 관경 및 펌핑수두에 따른 비용으로 나타내지며 5가지의 제약조건항에는 모형에 필요한 제반조건들을 모두 포함하고 있어서, 이 식들을 GAMS/MINOS를 이용하여 풀이하면 설계기준을 만족시키는 범위에서 결정변수(손실수두, 관경, 관로유량 등)를 구할 수 있다. 특히 각 관에 대한 최적관경이 구하고자 하는 설계변수이다.

3.2.3 복잡한 관망시스템설계의 최적화기법

앞에서 언급되었다시피 비선형계획법의 해석에서는 다룰 수 있는 결정변수의 갯수가 제한적이어

공적으로 적용되리라 예상이 되어왔으나 실제로는 국내에서는 물론 외국에서도 실무에 널리 쓰이지 않고 있는 실정이다. 그렇다면 왜 최적화모형이 실무에서 아직 쓰이지 못하는지 몇가지 가능한 유추를 해 볼 필요가 있다.

첫째, 상식밖의 결과나 실무적용이 불가한 결과를 준다. 이 문제는 Walski 등(1987)이 수없이 많은 모형을 비교분석한 결과 대부분의 최적화모형이 좋은 결과를 보여주고 있으며, 실제로 최종결과는 아니더라도 관망해석모의기법(simulation techniques)으로 마무리만 하면되는 좋은 결과(지표)를 제공해 줄 수 있음을 보여주었다.

둘째, 기존의 관망해석모의기법과 오랜 경험에 의한 결정에 비해 더 나은 결과를 주지 않는다. 이 문제는 첫째 문제보다 더 심각한 것이다. 아직도 최적화모형들과 기존의 방법들중 어느 편이 나은 결과를 제공하는지 광범위하고 철저한 비교연구는 되지 않은 실정이라 단언할 수는 없으나 비슷한 결과를 더 짧은 시간에 더 작은 비용으로 얻을 수 있다면 이것만으로도 최적화모형의 가치가 있다 하겠다.

셋째, 실무자들은 최적화기법을 이용한 접근방식에 익숙치 않다. 대부분의 토목실무자들은 최적화이론에 대해 정규적으로 배울 기회를 가지지 못하였으며 따라서 경우에 따라서는 약간의 거부감을 가지고 있을 수도 있다. 그러나 이 점이 진정한 걸림돌이라 여겨지지는 않는다. 왜냐하면 기존의 관망모의기법을 사용하고있는 실무자중에도 상당수는 그 모의기법에서 쓰이는 예를들어 Newton-Raphson을 이용한 해석알고리듬을 완전히 이해하면서 쓰고 있는 것은 아닐 것이기 때문이다.

넷째, 사용하기에 너무 어렵다. 이 문제는 셋째 문제와 상당부분 관련이 있는 문제로 볼 수 있다. 실제로 최적화기법을 이용한 모형중 상당수는 사용하기가 쉽지 않은데 주된 이유는 복잡해서라기 보다는 입출력을 위한 접속형태가 형편없기 때문일 경우가 많다. 이 모형들은 대개의 경우 입출력형태보다는 알고리듬 그 자체를 중요시하는 학교에서 연구용으로 개발되었기 때문이다. 이 연구용 최적화 모형들이 잘 안쓰이는 이유의 또 하나는 학교밖의 실무자가 구하기 어렵다는 것이다. 만약 최적화 모형들이 구하기 쉽고 또 입출력이 기존의 KYPIPE(Wood, 1980)와 같은 모의모형과 같은 정도로 개발된다면 실무에서도 받아들여지리라 예상된다.

이상에서 최적화모형의 실무적용에의 문제점을 살펴 보았는데, 이는 관망시스템뿐만 아니라 모든 수자원시스템공학분야에 해당하는 문제점으로 볼 수 있다. 그러나 위에서 언급된 문제들은 적어도 분기형 관망시스템의 최적설계에는 해당되지 않음을 밝혀둔다. 3.1절에서 소개된 분기형시스템의 최적화모형은 간단명료하여 GAMS라는 상용패키지를 이용하여 쉽게 결과를 도출할 수 있다. 폐쇄회로형 관망시스템의 경우에도 비선형계획법을 해석해야하는 어려움은 있으나 기존의 모의모형을 이용한 설계에 적어도 초기해 또는 지표를 제공할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

건설부(1992), 상수도 시설기준.

김정환, 김태균, 김중훈, 윤용남(1994), "비선형계획법을 이용한 상수도 관망설계에 관한 연구", 한국수문학회, 한국수문학회지, 제27권, 제4호.

김종우(1995), 분기형 관로시스템의 최적설계에 관한 연구, 고려대학교 석사학위논문.

김중훈, 김한주, 이현동, 김성한(1995), "배수시설의 최적 관개량 시기 의사결정모형에 관한 연구", 한국수자원학회, '95년 한국수자원학회 학술발표회 논문집.

안태진, 박정응(1994), "논관개용 관수로시스템의 최적설계", 한국수문학회, 한국수문학회지, 제27권, 제4호.

전환돈, 김태균, 김중훈, 윤용남(1994), "선형계획법을 이용한 분기형 관망시스템의 최적 설계", 한국수문학회, 한국수문학회지, 제27권, 제3호.

현인환(1987), "배수관망의 최적설계법에 관한 연구", 서울대학교 박사학위논문.

Alperovits, E., and Shamir, U.(1977), "Design of optimal water distribution systems", Water Resour. Res., 13(6), 885-900.

Brion, L. M., and Mays, L. W.(1991), "Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems." J. Hydr. Engr., ASCE, 117(11), 1551-1569.

Calhoun, C.(1971), "Optimization of Pipe Systems by Linear Programming", Control of Flow in Closed Conduits, J. P. Tullis, ed., Colorado State Univ., Ft. Collins, pp. 175-192.

David Kendrick et al(1992), *GAMS a User's Guide, Release 2.25*, The Scientific Press.

Goulter, I. C.(1992), "Systems Analysis in Water -Distribution Network Design: From Theory to Practice", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 118, No. 3, ASCE, pp. 238-248.

Gupta, I.(1969), "Linear Programming Analysis of a Water Supply System", AIIE Trans. 1 (1), pp. 56-61.

Gupta, I., M. S. Hassan and J. Cook(1972), "Linear Programming Analysis of a Water Supply System with Multiple Supply Points", AIIE Trans. 4(3), pp. 200-204.

Karmeli, D., Gadish, Y., and Meyers, S.(1968), "Design of optimal water distribution networks", J. Pipeline Div., ASCE, 94(1), 1-9.

Kim, J. H. and Mays, L. W.(1994), "Optimal Rehabilitation/Replacement Model for Water Distribution Systems", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 120, No.5, pp.674-692, ASCE.

Lansey, K., Duan, N., Mays, L., and Tung, Y-K. (1989), "Water Distribution Design under uncertainties", J. Water Resour. Planning and Mgmt., ASCE, 115(5), 630-645.

Lansey, K. E., Basnet, C., Mays, L. W., and Woodburn, J.(1992), "Optimal Maintenance Scheduling for Water Distribution Systems", to be published in Civil Engineering Systems, England.

Liang, T.(1971), "Design of conduit system by dynamic programming", J. Hydr. Div., ASCE, 97(3), 383-393.

Mantell, J. B. and Lasdon, L. S.(1978), "A GRG Algorithm for Econometric Control Problems", Annuals of Economic and Social Management, Vol.6, No.5.

Mays, L. W. and Tung, Y. K.(1992), Hydrosystems Engineering and Management, McGraw-Hill, Inc.

Morgan, D., and Goulter, I.(1985), "Optimal urban water distribution design", Water Resour. Res., 21(5), 642-652.

Ormsbee, L., and Lansey, K.(1994). "Optimal control of water supply pumping systems." J. Water Resour. Plng. and Mgmt., 120(2), 237-252.

Quindry, G., Brill, E., Leibman, J., and Robinson, A.(1979), "Comments on 'Design of optimal water distribution systems' by Alperovits and Shamir", Water Resour. Res., 15(6), 1651-1656.

Schaake, J., and Lai, D.(1969). "Linear programming and dynamic programming -application of water distribution network design", Report 116, MIT Press, Cambridge, Mass. Shamir, U. (1979), "Optimization in Water Distribution Systems Engineering", Mathematical Programming, no.11, pp. 65-75.

Walski, T., Brill, E., Gessler, J., Goulter, I., Jeppson, R., Lansey, K., Lee, H-L., Liebman, J., Mays, L., Morgan, D., and Orsmbee, L. (1987), "Battle of the network models: Epilogue", J. Water Resour. Planning and Mgmt., ASCE, 113(2), 191-203.

Wood, D.(1980), *Computer Analysis of Flow in Pipe Networks Including Extended Period Simulation - KYPIPE User's Manual*, Office of Engineering, Continuing Education and Extension, University of Kentucky.

Wood, D. J.(1991), *KYPIPE2 User's Manual*, University of Kentucky.