

다단계 반복기법을 이용한 관로시스템의 최적관경 결정

Determination of Optimum Pipe Diameter Using Multi-Stage Iterative Method in Water Distribution System

한 건 연* / 박 재 홍** / 김 상 호***

Han, Kun Yeun / Park, Jae Hong / Kim, Sang Ho

Abstract

The distribution network is an essential part of all water supply systems. The cost of this portion of any sizable water supply system may amount to most of the entire cost of the project. This study tried to reduce the cost of the distribution system through optimization in system design. To determine pipe diameter considered in water distribution system design, a iterative procedure linked the flow analysis model and optimization model was used. Linear theory was introduced to analyze flowrate and revised-simplex method based on linear programming is used to optimize pipe diameter. This model was applied to water distribution system with 22 and 35 pipes, and rapidly determine optimized commercial pipe diameters.

keywords : water distribution system, revised simplex method, optimum pipe diameter

요 지

상수관망은 상수공급시스템에서 핵심적인 부분이다. 주어진 상수공급시스템에서 배수관망에 대한 비용은 사업 전체 비용에 대한 대부분을 차지하고 있다. 관망에 대한 설계과정 중에서 최적화기법을 사용하여 비용을 절감하기 위한 연구가 시도되었다. 주어진 상수관망 시스템의 설계시 고려되는 관경의 결정을 위해 유량해석과 최적화 기법이 연계되어 해석하는 반복기법이 적용되었다. 유량해석을 위해서 선형화기법이 도입되었고 관경의 최적화를 위해서 선형계획법에 기초한 개정 단체법을 이용하였다. 22개 관로와 35개 관로를 가진 실제관망에 본 모형을 적용한 결과 짧은 계산시간으로 최적화된 상용관을 결정할 수 있었다.

핵심용어 : 상수공급시스템, 개정 단체법, 최적관경 결정

* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 세명대학교 산업건설환경공학부 토목공학과 전임강사

*** 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

1. 서 론

배수관망은 상수공급시스템에서 핵심적인 부분이다. 주어진 상수공급시스템에서 배수관망에 대한 비용은 사업전체 비용에 대해서 60% 이상을 차지하고 있다. 관망에 대한 설계과정중에서 최적화기법을 사용하여 비용을 절감하기 위한 노력이 시도되고 있다.

상수관망 설계에 있어서의 초기의 모형들은 Karmeli 등(1968), Schaake와 Lai(1969)에 의한 수지상 관망에 대해 개발되었다. 이러한 모형들은 밸브와 같은 부속물은 고려하지 못하였으나 수리학적 거동과 비용에 관한 부속물의 영향은 일단 관로배치에 의한 관망구조와 환경이 결정되어지면 쉽게 나타내어 질 수 있음을 보여주었다. 이러한 방법은 전체최적값(global optimum value)을 보장하였지만 수지상 시스템에 한해 적용될 수 있었기 때문에 도시 상수관망 설계와 같은 실제 공학적 문제에는 유용하지 못하였다. Alperovits와 Shamir(1977)는 주어진 상수관망시스템에 대한 폐합관로 설계시 최소비용을 허용하는 흐름형태를 찾기 위해 경사추적법을 도입하였고, Morgan과 Goulter(1985)는 다부하 경우에 대한 요구조건을 만족하며 모형의 두 단계 사이에서 반복적인 상호관계가 요구되는 과정들을 선형계획법에 의해 기초한 Heuristic 접근법을 제안하였고 관망에서 절점수 만큼의 부하를 가진 관로의 경우에 동시에 많은 부하를 고려할 수 있었다. Lansley와 Mays(1989)는 다부하 조건하에서 상수관망설계에 대한 2단계 과정에 대한 개발을 연구하였다. 그러나 이 과정 역시 각 단계에서 고려되어지는 경사향을 가지고 최적화 모형과 모의모형사이에 많은 수의 반복을 요구함으로써 과도한 계산량을 필요로 하였다.

최근에는 관망내의 구성요소(예를 들어, 관로, 밸브 등)들의 파괴 및 고장, 또는 실제 물 수요량이 설계수요치를 초과하게 되는 경우 등에 대해 신뢰도 개념을 도입한 연구가 이루어지고 있으며 상수 시스템내에 존재하는 불확실성들의 고려를 위해 유전자 알고리즘, 퍼지이론, 엔트로피 이론, 혼돈 이론 등이 도입되어 최적화 기법이 발전하고 있다(Goulter, 1992).

배수관망의 최적화에 대한 국내의 연구는 전환돈 등(1994)이 관개배수를 위한 수지상의 관로에 대해 선형계획법을 이용하였고 김정환 등(1994)은 비선형계획법을 이용하여 상수관망 폐합형 회로망에 대해 적용한 사례가 있다. 이와 같은 연구의 경우는 모두 최적화 프로그램에 의한 단순해석으로서 실제 복잡한 관로해석을

위해서는 최적 제어이론에 의한 2단계 반복과정이 필요하다고 연구된 바 있다(Mays와 Tung, 1992)

이와 같이 관망설계에 대한 최적화기법의 적용에 관한 연구가 국내외에서 많이 이루어지고 있으나 실무에서는 널리 쓰이지 않고 있는 실정인데 이에 대해서는 여러가지 이유가 있으나 다음과 같이 요약될 수 있다(Goulter, 1992).

- (1) 상식밖의 결과나 실무적용이 불가능한 결과의 도출.
- (2) 기존의 설계기법이나 오랜 경험에 의한 결정에 비해 더 나은 결과를 주지 않음.
- (3) 실무자들의 최적화 기법에 대한 기피.
- (4) 적용상의 어려움.

이와 같은 문제들은 실무자들이 최적화 기법에 대한 이해 및 접근이 용이하지 않아 주로 발생하고 있으며 최적화모형이 구하기 쉽고 입출력자료가 KYPPIPE2 등과 같은 기존의 유량모의 프로그램과 같은 정도로 구성되어지며 최적화 기법의 결과를 유량해석 모형을 통해 검증한다면 해결되어질 수 있는 문제들이라고 연구되어진 바 있다.

본 연구에서는 보다 복잡한 시스템에 적용가능하도록 국내에서는 연구되어진 바 없는 유량해석과정과 최적화과정이 서로 연계되어 해석되는 다단계 해석과정을 적용하였고, 선형화기법을 이용하여 도시상수관망의 폐합관로에 대한 최적값이를 가진 상업용관경을 결정할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 또한 개발된 프로그램은 기존의 유량모의 모형과 입력자료의 수가 거의 대등하고 최적화과정과 유량모의 과정이 한 프로그램내에서 동시에 계산함으로써 실무자들이 쉽게 접근할 수 있도록 구성하였다.

2. 다단계 반복기법에 의한 상수관망의 최적화

2.1 유량해석 기법

관로내의 유량해석을 위해서는 여러 가지 기법들이 연구되어졌다. 그 가운데서 선형화기법이 수렴성, 일관성, 안정성 등으로 인해 선택되었다. 선형화기법(linear theory)에 의한 관로내 유량해석 방법은 다음과 같다.

관망해석에 있어 각 접합절점에 대한 연속방정식은 식 (1)과 같다.

$$\sum (\pm) Q_j - Q_e = 0 \quad (1)$$

여기서 첨자 j 는 절점에 연결된 관로들을 나타내고 Q_e 는 집합절점에서의 외부 유입이나 유출을 나타낸다. (±) 기호는 가정된 흐름방향에 따라 결정되는데, (+) 부호는 절점으로의 유입을 나타내며 (-) 부호는 절점에서의 유출을 의미한다.

각 폐합관로나 유사폐합관로에 대한 에너지방정식은 식 (2)와 같다.

$$\sum (\pm)_i [W_i - (H_p)_i] + \Delta E = 0 \quad (2)$$

여기서 첨자 i 는 폐합관로나 유사폐합관로를 구성하는 관로를 나타내고, W_i 는 i 관로구간에 대한 동수경사선의 하강치로서 $W = \overline{RQ}^x$ 이다.

여기서 \overline{R} 은 관로상수로서 Hazen-Williams 식의 경우 $\overline{R} = 10.59L/C^{1.85}D^{4.87}$ 이며 L 은 관로의 등가길이, C 는 Hazen-Williams의 마찰계수, D 는 관경, x 는 지수로서 '2' 값이다.

H_p 는 펌프나 터빈 등과 같은 관로 구성물로 인한 수두변화를 나타내고 ΔE 는 유사 폐합관로에서 가상 관로를 따라 시계방향에 따르는 고정수두 절점간의 총 수두의 차이를 나타내며 폐합관로에 대해서는 '0'의 값이다. 식 (2)에서 만약 관로 흐름이 시계 방향이면 (+) 부호가 사용되고 시계 반대방향이면 (-) 부호가 사용된다 (Potter와 Wiggert, 1991).

연속방정식과 에너지방정식은 유량의 향으로 이루어진 식 (3)과 같은 p 개의 연립방정식을 구성하게 된다.

$$p = j + k \quad (3)$$

여기서 p 는 관로의 갯수, j 는 절점의 수(연속방정식), $k = l + f - 1$ (에너지방정식), l 은 폐합관로의 수, f 는 고정 절점수두의 수이다. 선형화기법에 서는 j 개의 연속방정식과 k 개의 에너지방정식을 모두 p 개의 연립방정식속으로 포함한다. 이러한 p 개의 연립방정식의 해는 직접적인 계산이 가능하며 각 관로에서 유량이 된다.

2.2 관경의 최적화기법

최소비용을 위한 상수관로시스템의 최적화를 위해 상용관의 직경을 선형계획법에 의해 결정하는 방법을 도입하였다. 선형계획법(linear programming) 문제를 해석하기 위해 SLATEC (Sandia, Los Alamos, Air

Force Weapons Laboratory Technical Exchange Committee)의 일반수학함수, CML(Common Mathematical Library)을 사용하였다(Fong 등, 1993). 최적화기법으로는 단체법(simplex method)을 개선한 개정 단체법(revised-simplex method)을 이용하였으며 개정 단체법과 기존의 단체법과의 차이는 다음과 같이 기술될 수 있다 (Hiller와 Liebermann, 1996).

기존의 단체법은 순수한 대수적 절차로서 컴퓨터 사용을 위하여 가장 효율적인 계산방법이 아닌데 이 알고리즘은 불필요한 많은 수의 계산과 저장을 요구하기 때문이다. 각 반복 단계에서 꼭 필요한 정보의 비거변수의 계수, 다른 등식들에서 진입 기저변수의 계수, 그리고 등식의 우변이다. 다른 계수를 계산, 저장함이 없이 필요한 정보만 효율적으로 구할 수 있는 절차가 있으면 대단히 유용할 것이다. 이와 같은 사항을 고려하여 개정 단체법이 개발되었다. 이 방법은 기존의 단체법과 같은 역할을 하도록 고안되었지만 단지 컴퓨터 상의 실행을 위하여 더 효율적으로 만들어졌다. 이는 각 단계에서 필요한 정보만을 계산, 저장하며 필수적 자료를 더 간결한 형태로 유지한다.

이와 같은 개정 단체법의 장점은 첫째 계산횟수가 적다는 점이다. 특히 제약조건식의 계수행렬에 '0'이 많이 포함될 때 그러하다. 둘째는 각 반복단계에서 저장할 정보의 양이 적다. 셋째는 컴퓨터상에서 통상 발생하는 근사오차를 조정할 수 있다. 이는 주기적으로 직접 기저변수의 계수벡터의 역벡터를 얻음으로써 가능하다. 이러한 이유들로 개정 단체법이 기존의 단체법보다 더욱 널리 적용되고 있다. 특히 폐합관로의 최적화를 위해 발생하는 계수매트릭스는 분산도가 큰 이산형 매트릭스가 발생되는데 본 연구에서 사용된 최적화 기법은 이산형 매트릭스의 효율적인 처리를 위하여 계수 매트릭스의 '0'이 아닌 계수의 행과 열에 대한 계수 매트릭스 번지를 프로그램내에 인식시킴으로 '0'이 아닌 계수만 저장 및 계산이 가능한 Harwell Research Group에서 개발된 이산형 매트릭스 처리기법을 도입하여 해석된다.

본 연구에서 개발된 모형은 유량해석모형으로 사용된 선형화기법의 빠른 수렴특성과 최적화기법으로 사용된 매트릭스 처리능력으로 인하여 컴퓨터의 작은 기억 용량으로 대규모시스템에서도 적용이 가능하며 해석속도가 빠르고 수렴성이 우수한 프로그램이 될 수 있었다.

2.3 유량해석모형과 선형화 모형의 연계

그림 1에서와 같이 관망해석모형과 최적화모형이 연계되어 본 과정들이 이루어졌다. 모형의 관망해석 과정이 흐름과 압력의 균형을 조절할 동안 최적화 과정은 관망의 크기를 수정하거나 설계하는데 사용되어진다.

본 과정의 첫 번째 단계는 초기흐름의 양상, 관로의 배치와 주어진 부하 형태에 대한 구성요소의 크기에 대한 가정이다. 관로의 배치는 관망내에서 이론적으로 매우 다양한 형태가 가능하지만 물리적 조건들 즉 가로, 지형 등으로 인해 가능한 관로의 실제적인 수가 작은 부분집합으로 제한되기 때문에 결정되어 있는 것으로 가정을 하였다.

주어진 관로배치와 기지의 수요로부터 결과되는 관망의 실제적 흐름들이 결정된다. 이러한 흐름해석을 위해 가능한 방법중에서 계산의 용이성, 수렴성 등으로 인해 선형화기법이 선택되었다. 그러나 만약 관이나 다른 조건들이 보장되어지면 선형화기법 대신 다른 해석 기법을 대치하는 것도 가능하다.

관망해석 모형에 의해 제공된 흐름양상은 관로설계 과정으로 넘겨진다. 관로결정 과정은 관로의 어느부분이 최소비용하에서 허용되는 최소치의 압력을 위해 결정한다. 반대로 만약 압력이 최소압력치 위에 있다면 관로의 부분들이 보다 작은 관경으로 대체되어야 한다. 이 경우의 결정은 다른 곳에서 최소 압력요구조건을 유지하는 동안 최대 이익을 어느부분에서 가지고 오는 것이다. 이전의 반복과정에서 대체관로로써 선택되거나 혹은 초기에 가정된 관경들은 '설계관경'이라고 언급된다. 일반적으로 이런 설계관경의 대체는 어떤 지역에서는 과소 설계되었고 다른 지역에서는 과대 설계되었기 때문에 좀더 크거나 작은 관경이 필요되어진다. 나머지 관로의 관경이 줄어들 수 있도록 한 관로의 관경을 증가시킴으로써 비용에서의 전체적인 감소가 이

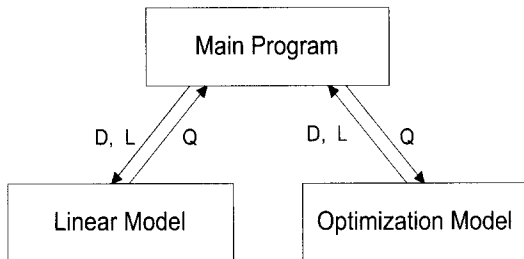


그림 1. 유량해석모형과 최적화모형의 연계

루어질 수 있다. 새로운 관경의 구성들이 압력과 유량을 새로이 계산하기 위해 관망해석 모형으로 되돌려진다. 새로운 유량이 관로수정 단계로 새로이 되돌려진다. 이 과정이 그림 1에서 보는 바와 같이 반복적으로 최적해에 수렴할때 까지 이루어진다. 본 연구에서 사용된 최소비용을 위한 목적함수, 제약조건식 및 수렴 조건은 다음 장에 기술되었다.

3. 최적화 조건식

상수관망의 시설비용은 크게 관로시설비와 펌프장 시설비로 나눌 수 있으며 최소비용을 위한 목적함수는 식 (4)와 같다(Mays 등, 1992).

$$\text{Minimize } Z = \sum_{(i,j) \in I} \sum_{m \in M_{i,j}} C_{i,j,m} X_{i,j,m} + \sum_k CP_k Q(k) XP_k \quad (4)$$

여기서 $C_{i,j,m}$ 는 단위길이당 상업용 관 비용으로 자재비와 공사비를 포함한 금액이며 표 2와 같다. I 는 전체 관망시스템내의 관의 집합, (i, j) 는 절점 i 와 j 사이의 관, m 은 상업용 규격관경, $X_{i,j,m}$ 는 m 의 관경을 가지는 상업용 관의 길이, $M_{i,j}$ 는 i, j 절점 사이의 관로를 대체할 수 있는 상업용 규격 관경의 집합, CP_k 는 단위유량당 단위수두의 양정비용과 유지비용으로써 본 연구에서는 유지비용으로 전력비만을 고려하였으며 XP_k 는 펌프 k 의 양정고, $Q(k)$ 는 펌프 k 가 존재하는 관로의 유량이다. 폐합 관로에서는 모형이 반복수행함에 따라 유량 $Q(k)$ 가 변화하기 때문에 본 연구에서는 펌프비용을 유량과 양정고에 대한 함수로 고려하였다.

식 (4)에 대한 제약조건식은 다음과 같다.

(1) 길이 제약조건으로서 선형계획법이 주어진 관로보다 더 긴 관을 대체하지 않기 위해서 사용되어지며 식 (5)와 같다.

$$\sum_{m \in M_{i,j}} X_{i,j,m} = L_{i,j} \quad (i, j) \in I \quad (5)$$

여기서 $L_{i,j}$ 는 절점 (i, j) 간의 관로 길이를 나타낸다.

(2) 압력수두에 관한 제약조건식으로서 각 수요절점에서 적절한 압력을 보장하는 것으로 각 절점에서 화재수요를 대비한 적정압력이 요구되어진다.

$$H_{D,n} + H_{\min,n} \leq H_s + \sum_k XP_k$$

$$- \sum_{(i,j) \in I_n} \sum_{m \in M_{i,j}} J_{i,j,m} X_{i,j,m} \leq H_{D,n} + H_{\max,n}$$

(6)

여기서 $H_{\min,n}, H_{\max,n}$ 는 수요지점 n 에서 요구되는 최소 및 최대 압력수두, H_s 는 배수지에서의 위치수두, $H_{D,n}$ 는 수요지점 n 의 표고, $J_{i,j,m}$ 는 (i, j) 구간에서 사용가능한 관경별 관에서의 단위길이당 손실수두로써 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{10.86 Q^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.87}}$$

(7)

여기서 C 는 Hazen-Williams 조도계수, D 는 관경, Q 는 유량을 나타낸다.

(3) 관길이와 펌프양정고의 비음 조건으로서 관길이와 펌프양정고는 음의 값을 가져서는 안된다.

$$X_{i,j,m} \geq 0$$

(8)

$$XP_k \geq 0$$

(9)

그러나 폐합관로에서는 식 (6)에 의해 나타낸 선형가정은 관내의 유량은 관경들이 변경됨에 따라 상수로 남아 있지 않기 때문에 압력에서의 변화들에 의해 발생한 효과에 대해 근사적인 값을 가진다. 그러므로 최적화된 관경에 대한 정확한 압력과 흐름을 재해석하기

위해 유량해석 모형을 통해 반복계산이 필요하게 된다.

선형계획법이 제공한 관경으로 선형화기법은 새로운 흐름양상을 해석하고 관망은 다시 선형계획모형에 의해 해석되어진다. 이 과정은 그림 1에서 나타난 바와 같이 최적해에 수렴할 때까지 반복수행된다. 최적조건으로는 총비용의 변화가 없을 경우로 가정하였으며 반복과정에 대한 수렴조건을 식 (10)과 같이 총비용의 비가 0.005% 이하일 경우로 하였다.

$$\epsilon = \left| \frac{Cost^j - Cost^{j-1}}{Cost^j} \right| \times 100 \leq 0.005$$

(10)

여기서 ϵ 은 허용오차한계, $Cost^j$ 는 j 번 반복때의 총비용, $Cost^{j-1}$ 는 $j-1$ 번 반복때의 총비용을 나타낸다.

폐합시스템의 해석에 대한 본 모형과 최적화모형만을 사용한 방법과의 차이는 각 폐합회로를 따른 수두 손실의 대수적인 합이 '0'을 보장하는 제약조건식이 없다는 것이다. 많은 최적화 모형들에서 이 제약조건식은 관망내에서 수리학적 일관성을 유지하기 위하여 요구되어졌고 관망에서 압력이나 흐름의 변화에 사용되는 경사추적법을 위해 필요한 이중의 변수들을 요구하였다. 그러나 본 모형에서는 이와 같은 제약조건식이 사용되지 않았으며 최적화 모형에 대한 과도한 기억용량을 요구하지 않으므로 대규모 시스템의 최적화가 이루어질 수 있다.

수리학적 일관성은 선형화 관망해석기법을 다음과 같이 사용함으로써 유지되었다. 만약 최적화 모형이 반복단계에서 관경을 변경시키면 시스템은 수리학적으로

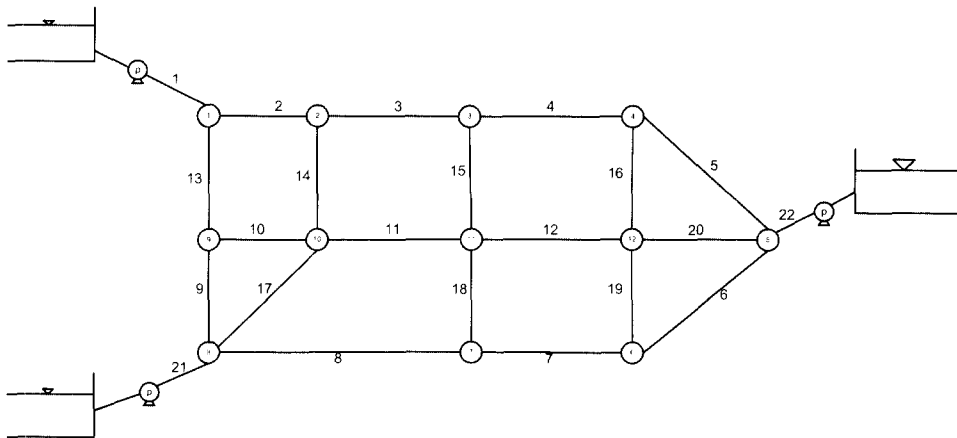


그림 2. 22개 관로를 가진 관망시스템

일관성이 결여된다. 그러면 선형화 기법이 유량을 재분배하기 위해 사용되어진다. 일관성이 있는 새로운 유량 분포는 최적화 기법에 넘겨지고 관경 변경가능성이 고려된다.

실제적인 반복에 대한 목적함수는 최적 결과에 도달했을 경우 즉 시설비에 대한 최소비용의 경우이다. 관

망내에서 최소비용을 위한 관경들의 변화가 없을 경우의 해가 최적이다. 그리고 최적화 모형에 앞서 유량해석기법이 먼저 수행되기 때문에 해는 항상 수리학적으로 일관성이 있다.

4. 적용 및 검토

4.1 22개 관로시스템에 대한 적용

본 모형의 적용성을 검토하기 위해 그림 2와 같은 22개 관로와 3개의 저수지에 각각의 가압장이 설치된 관로시스템에 모형이 적용되었다. 주어진 상업용 관경의 종류는 표 2에서의 80~450 mm 사이의 5개 관경으로 제한하였고 각 관경에 대한 관 매설비용과 단위수두당 펌프비용은 임의로 주어졌다. 최대반복횟수는 50회로 제한하였고 식 (4)~(9)에서 나타난 목적함수와 제약조건식을 사용하여 본 모형을 가상 관로시스템에

표 1. 22개 관로시스템에 대한 최적화 결과

관로 번호	관로길이 (m)	초기관경 (cm)	H-W 조도계수	최적화된 관로길이 (m)	최적화된 상업용 관경(cm)
1	1000.0	28.	100	1000.0	30.
2	400.0	28.	100	400.0	20.
3	300.0	28.	100	300.0	20.
4	400.0	28.	100	400.0	20.
5	600.0	28.	100	600.0	20.
6	850.0	28.	100	850.0	25.
7	400.0	28.	100	400.0	20.
8	300.0	28.	100	300.0	20.
9	760.0	28.	100	760.0	20.
10	420.0	28.	100	420.0	20.
11	300.0	28.	100	300.0	20.
12	400.0	28.	100	400.0	20.
13	240.0	28.	100	240.0	20.
14	350.0	28.	100	350.0	20.
15	400.0	28.	100	400.0	20.
16	420.0	28.	100	420.0	20.
17	550.0	28.	100	550.0	20.
18	550.0	28.	100	550.0	20.
19	550.0	28.	100	550.0	20.
20	850.0	28.	100	9.1	20.
20			100	840.9	25.
21	1000.0	28.	100	1000.0	30.
22	80.0	28.	100	80.0	30.

표 2. 상업용 관경에 따른 시설비 (한국수자원공사, 1996)

관 경 (mm)	관 자체비 (원/m)	관 부설비 (원/m)	공사비 (원/m)
80			
100	13,000	39,000	52,000
150	20,000	45,000	65,000
200	26,000	50,000	76,000
250	34,000	55,000	89,000
300	43,000	62,000	105,000
350	51,000	73,000	124,000
400	60,000	79,000	139,000
450	71,000	86,000	157,000
500	82,000	98,000	180,000

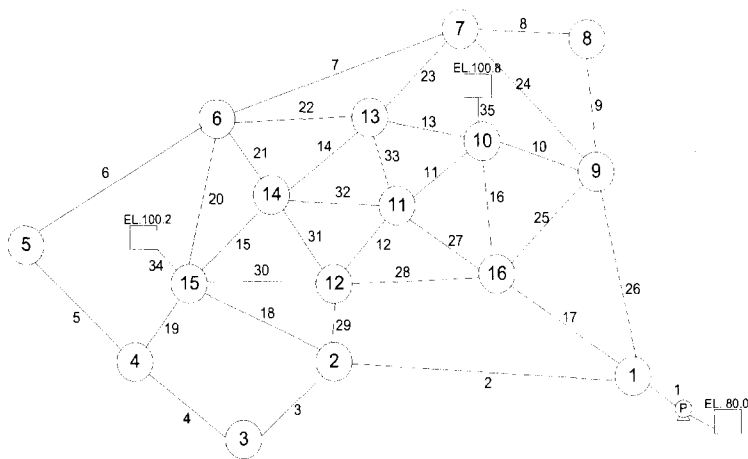


그림 3. 35개 관로를 가진 관망시스템

적용한 결과는 표 1과 같다. 본 모형의 가상시스템 적용결과를 통하여 본 모형이 빠른 계산속도로 최소비용에 대한 최적관경 및 최적양정고를 선택하고 있다고 판단되었다.

4.2 실제 관로시스템에 대한 적용

그림 3과 같은 관망시스템에 대해 개발된 최적화모

형이 적용되었다. 관로 35개, 절점 16 개, 수원지 3개, 가압장 1 곳으로 시스템이 구성되어있다. 제한조건으로 각 절점에서 화재수요에 대비하여 충분한 잔류수두가 존재할 수 있도록 각 절점에서 압력수두가 15m 이상이 되도록 하였으나 과도한 압력수두의 방지를 위해 40m 이하의 수두를 유지하도록 하였으며 수리학적 일관성을 위해 폐합경로를 따른 손실수두의 합이 '0'이라

표 3. 35개 관로시스템에 대한 최적화 결과

관로번호	초기조건		최적화 결과			KYPIPE2
	관로길이 (m)	초기관경 (cm)	관로길이 (m)	상업용관경 (cm)	유량 (l/sec)	유량 (l/sec)
1	200.0	40.0	200.0	25.0	48.968	48.78
2	3657.0	40.0	789.8	15.0	15.329	15.33
2			2867.2	20.0	15.329	15.33
3	1830.0	20.0	1830.0	15.0	11.598	11.59
4	1830.0	20.0	1830.0	8.0	0.902	0.91
5	1830.0	20.0	1150.1	20.0	11.959	11.96
5			679.9	25.0	11.959	11.96
6	3656.0	20.0	3656.0	8.0	0.541	0.54
7	3656.0	20.0	3656.0	8.0	0.546	0.55
8	1830.0	25.0	1830.0	8.0	0.184	0.17
9	1830.0	25.0	1830.0	8.0	0.184	0.17
10	1830.0	25.0	1830.0	8.0	1.563	1.57
11	1830.0	25.0	1830.0	25.0	21.456	21.51
12	1830.0	25.0	1830.0	8.0	1.022	1.03
13	1830.0	30.0	1793.0	20.0	12.849	12.89
13			37.0	25.0	12.849	12.89
14	1830.0	25.0	1830.0	8.0	1.042	1.04
15	1830.0	20.0	1830.0	8.0	1.527	1.53
16	1830.0	30.0	1830.0	8.0	0.381	0.31
17	3657.0	40.0	3657.0	20.0	23.607	23.45
18	1830.0	25.0	1830.0	8.0	1.549	1.55
19	1830.0	25.0	1830.0	20.0	12.861	12.86
20	1830.0	20.0	1830.0	8.0	1.258	1.26
21	1830.0	20.0	1830.0	8.0	0.798	0.80
22	1830.0	25.0	1830.0	8.0	0.627	0.63
23	1830.0	25.0	1830.0	20.0	11.535	11.58
24	2743.0	25.0	2743.0	8.0	0.215	0.20
25	2743.0	30.0	2743.0	8.0	1.304	1.29
26	3657.0	40.0	325.1	10.0	10.033	10.01
26			3331.9	15.0	10.033	10.01
27	1830.0	25.0	1830.0	8.0	1.153	1.13
28	1830.0	30.0	1830.0	15.0	8.269	8.21
29	1830.0	20.0	1830.0	8.0	2.181	2.19
30	1830.0	30.0	1830.0	8.0	1.449	1.46
31	1830.0	30.0	1830.0	8.0	0.422	0.39
32	1830.0	25.0	552.0	15.0	8.712	8.75
32			1278.0	20.0	8.712	8.75
33	1830.0	25.0	1830.0	8.0	0.375	0.36
34	100.0	30.0	100.0	25.0	15.546	15.56
35	150.0	30.0	150.0	30.0	35.486	35.66

는 제약조건식은 필요하지 않았다. 사용된 상용관은 덕타일 주철관으로 자재비 및 시설비는 표 2와 같다. 여기서 80 mm 관에 대한 실무자료가 충분치 않아 선형회귀분석한 값을 사용하였다. 펌프의 효율은 70 %로 가정하였고 단위유량당 단위양정비용은 36,407,392원을 사용하였다(한국수자원공사, 1996).

프로그램의 간편한 사용을 위해 상업용 관경 및 관로 시설비 등 기타 필요한 자료는 프로그램내에 내장하여 최적화 기법에서 요구되어지는 제약조건식들이 자체내에서 해결되어지도록 구성하였다. 가정된 초기 관경과 관로의 제원 및 모형의 적용결과는 표 3과 같다. 표 3에서 보여지는 바와 같이 대부분의 관로에서 하나의 상업용 관경을 사용하여 설치할 수 있었으나 5개의 관로에서 두 종류의 상업용관을 사용하는 결과가 도출되었다. 이는 실무자들이 현장여건에 따라 하나의 관로에 대해 두 종류의 관경의 사용여부를 결정할 수 있리라 생각되며 비용에는 큰 차이를 발생시키지는 않는다.

모형의 검증용 위해 본 모형의 결과인 각각 관로의 관경 및 길이를 상용 유량해석 프로그램인 KYPIPE2 모형에 대입하여 각 절점에서 압력과 유량을 확인하였다. 4개의 관로에서 두 종류의 상업용관의 사용된 관로는 두 종류의 상업용관의 사이에 절점을 추가하여 계산하였다. 본 모형의 유량결과와 KYPIPE2 모형의 유량결과는 표 3에서 나타낸 바와 같이 각 관로에서 잘 일치하고 있었으며 각 절점에서의 잔류수두 또한 대부분의 절점에서 제한조건식으로 주어진 압력수두 15 m 이상으로 존재하고 있었다(표 4). 몇개 절점에서 15 m 이하의 잔류수두를 나타내고 있으나 이것은 수렴조건내의 허용오차의 영향때문인 것으로 판단되며 최소 잔류수두 15 m와 계산된 절점수두와의 차가 작기 때문에 이는 극복되어질 수 있다고 판단된다.

또한 그림 4에서 보는바와 같이 본 모형은 반복횟수가 증가함에 따라 최소비용에 점진적으로 접근하는 것을 볼 수 있어 모형이 안정성있게 수렴함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발된 모형은 폐합관로를 가진 상수관망시스템에서 주어진 관로배치에 대해 상용관을 사용하여 최소비용을 위한 최적관경을 효율적으로 선택하고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

상수관망 시스템의 설계시 고려되는 관경의 결정을 위해 유량해석과 최적화기법이 연계되어 해석하는 반복

표 4. 각 절점에서의 잔류수두

절점번호	절점유량 (l/sec)	절점지반고 (m)	잔류수두 (m)
1	0.0	80.0	39.59
2	0.0	80.0	25.41
3	12.5	80.0	15.06
4	0.0	80.0	17.03
5	12.5	80.0	14.99
6	0.0	80.0	16.51
7	12.5	80.0	14.96
8	0.0	80.0	15.05
9	12.5	80.0	15.14
10	0.0	80.0	20.57
11	12.5	80.0	17.87
12	12.5	80.0	15.36
13	0.0	80.0	17.51
14	12.5	80.0	14.96
15	0.0	80.0	20.12
16	12.5	80.0	20.82

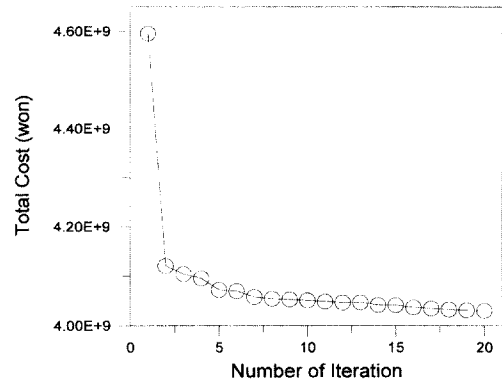


그림 4. 반복횟수에 따른 최적비용

기법이 적용되었다. 유량해석을 위해서 선형회귀법이 적용되었고 관경의 최적화를 위해서 선형계획법에 기초한 개정 단체법을 이용하였다. 실제 관망에 본 모형을 적용한 결과 선형회귀법의 유량해석 특성과 최적화모형에서 사용되어진 이산형 매트릭스 해석기법 등으로 인하여 짧은 계산시간으로 최적화된 상용관을 결정할 수 있었다. 선형회귀법과 개정단체법이 연계되어 폐합관로에 대한 반복해석 과정동안 선형회귀법이 수리학적 일관성을 보장하였으며 개정단체법으로 최적관경을 선택할 수 있었다.

본 모형은 최적화 프로그램만으로 수리학적 일관성을 고려할 때 보다 제약조건식이 감소함으로써 큰 시스템에 적용가능한 해석과정이 되었다. 본 연구모

형의 검증을 위해 본 모형의 계산된 관경을 상용 유량해석모형인 KYPIPE2 프로그램에 역대입하여 본 모형의 유량결과와 KYPIPE2의 유량결과가 일치하였으며 각 절점에서 충분한 잔류수두를 유지하고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 최적화에 필요한 자료들이 프로그램 자체에 내장되어 있으므로 최적화 기법에 익숙치 않은 상수관로 실무자들도 쉽게 본 모형을 사용할 수 있도록 하였다.

본 모형은 아직 국내에서는 연구된 바 없는 유량 해석모형과 최적화모형이 연계되어 해석하는 다단계 반복기법에 의한 상수관망의 최적화 모형으로서 좀 더 많은 실제자료에 의해 적용성이 검증되면, 상수관로 설계에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

김정환, 김태균, 김중훈, 윤용남 (1994). "비선형계획법을 이용한 상수도 관망설계에 관한 연구." 한 국수문학회지, 제27권, 제4호. pp. 59-67.

전환돈, 김태균, 김중훈, 윤용남 (1994). "선형계획법을 이용한 분기형 관망시스템의 최적 설계." 한 국수문학회지, 제27권, 제3호. pp. 135-143.

한국수자원공사 (1996). 상수도계획을 위한 의사결정 지원시스템 연구(3차년도)-관로계획을 중심으로. 한국수자원공사, pp. 160-175.

Alperovits, E., and Shamir, U. (1977). "Design of optimal water distribution systems." *Water Resources Research*, Vol. 134, No. 6, pp. 885-900.

Fong, K.W., Jefferson, T.H., Suyehiro, T., and Walton, L. (1993). *Guide to the SLATEC common mathematical library*, Energy

Science and Technology Software Center.

Goulter, I.C. (1992). "Systems analysis in water-distribution network design: From Theory to Practice." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 118, No. 3, pp. 56-61.

Hiller, F.S., and Lieberman, G.J. (1996). *Introduction to operations research*. 6th ed. McGraw-Hill, pp. 165-195.

Lansley, K.E., and Mays, L.W. (1989). "Optimization model for water distribution system design." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 10, pp. 1401-1418.

Karmeli, D., Gadish, Y., and Meyers, S. (1968). "Design of optimal water distribution networks." *Journal of Pipeline Division*, ASCE, Vol. 94, No. 1, pp. 1-9.

Mays, L.W., and Tung Y.K. (1992). *Hydro-systems engineering and management*. McGraw-Hill, Inc., pp. 354-384.

Morgan, D., and Goulter, I.C. (1985). "Optimal urban water distribution design." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 21, No. 5, pp. 642-652.

Potter, M.C., and Wiggert, D.C. (1991). *Mechanics of fluids*. Prentice-Hall, pp. 505- 548.

Schaake, J., and Lai, D. (1969). *Linear programming and dynamic programming : application of water distribution network design*. Report 116, MIT Press, Cambridge, Mass.

<최종본 접수일 : 1998년 5월 4일>