

상수관망의 관로파열 영향 해석

Analysis of Pipe-Burst effect in Water Distribution Network

박재홍*

Park, Jae Hong

Abstract

It is very closely related with the reliability of the pipe network to predict pipe burst and diminish burst effect in water distribution system. Most of the engineers have not consider pipe layout and the effect of pipe burst in conservative pipe network design. In this study, The effect of pipe burst in the network is analyzed with respect to pipe network geometric topology and the method of increasing the system reliability is presented by reducing pipe-burst effect. In existing pipe system, it is only designed to the closed loop system but in case of each pipe burst, it cannot transmit appropriate water to consumers and occurs severe hydraulic head drop in many nodes. The techniques developed in this study allow proper pipe diameter and pipe layout to pipe system through the analysis of pipe-burst effect. Thus, when each pipe is bursted, pipe system is prevented from severe pressure head drop in demand nodes and can supply stable flowrate to consumer.

Keywords : pipe burst, reliability, water distribution system, pressure head drop

요 지

상수관망에서 관로파열을 예측하고 파열영향을 감소시키는 작업은 관망의 신뢰도와 밀접한 관계가 있다. 기존의 상수관망의 설계에서는 관로의 배치 및 각 관로에 대한 수리학적 능력 및 파열에 대한 영향이 고려되지 않았다. 본 연구에서는 도해를 이용하여 상수관망의 기하학적 구성상태에 따른 관로 파열에 대한 영향을 예측하고 영향을 감소시켜 상수관망의 신뢰도를 증가시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 기존의 상수관망은 폐합관로를 이루고 있지만 특정관로가 파열되었을 경우 적절한 유량공급이 불가능하여 관망의 대부분의 절점에 심각한 수두감소와 같은 부작용이 발생할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 관로파괴 영향해석 기법을 이용하여 관망 설계시 적절한 관경 및 관로를 배치를 구성하여 관로 파괴시 발생하는 수요절점에서의 극단적인 수두감소를 극복할 수 있었고 사용자들에게 안정적인 유량공급이 가능하여 보다 신뢰성 있는 상수관망 시스템이 될 수 있었다.

핵심용어 : 관로파열, 신뢰도, 상수관망, 압력수두 강하

* 세명대학교 건설공학부 조교수
Assistant Prof., Dept. of civil engrg., Semyung Univ., Jecheon, Chungbuk 390-230, Korea
(E-mail : jhpark@semyung.ac.kr)

1. 서론

일반적으로 대도시 상수관망은 여러 종류의 길이와 관경을 가진 관로들과 밸브, 펌프 등과 같은 각종 부속 물들로 복잡하게 구성되어 있으며 사용기간이 경과함에 따라 여러 관로에서 관경의 증대, 관로의 갱생, 교체, 보수와 관망의 확장 등과 같이 다양하게 수정되어 진다. 이렇게 변경되어지는 상수관망은 계획적 혹은 비계획적인 구성물의 교체와 설치를 통해 시스템이 개선되어 왔다. 그러나 아무리 시스템이 개선된다 할지라도 관망의 사용년수가 경과함에 따라 관로파열(pipe burst)과 같은 부작용이 나타나게 된다. 이러한 상수관로의 파열은 관로의 물리적 노후화로 인해 누수량의 증가를 야기하며 지속적(진행적) 혹은 돌발적으로 나타난다. 지속적(진행적) 누수는 미세한 지표운동으로부터 발생할 수 있는 관로의 joint 나 부식성이 강한 지반조건에 설치된 주철관에서 발생하는 부식된 조그만 구멍의 누수 등과 같은 곳에서 나타날 수 있다. 이 경우 누수율은 비교적 일정한 값을 나타내며 지역적으로는 적은 양이 될 수 있으나 전체 지역에 걸쳐 누수가 발생할 경우 누수량은 심각할 수 있다.

돌발적인 관 파열은 관망의 역할을 제대로 수행하지 못하는 상태인 관망파괴(network failure)를 발생시켜 관망의 유량 및 급배수 압력손실을 야기하는 기대치 않은 사고로서 관망거동의 주요한 변화를 일으킬 수 있다. 소비자들에 대한 공급 압력의 즉각적인 손실이 발생하여 관망의 일부 절점으로 유량공급이 불가능하게 되기도 한다. 관로파열로 인한 수요절점의 영향도는 파열의 크기와 발생한 관의 사용목적 및 중요도에 따라 다르게 나타나며 누수지점에서의 범람과 그에 따른 부정적인 결과들이 발생하여 사용자로 하여금 유량공급에 대한 불신감을 조장하고 공급업자에 대한 전반적인 신뢰도의 저하로 이어질 수 있다.

상수관망의 유지관리에 중요한 요소인 관로 파열은 파열이 발생한 관망의 구성조건과 여러 가지 외부적인 요인 및 지형적, 물리적 특성들에 달려 있기 때문에 파열이 발생할 관로를 예측하는 것은 불가능하다. 그러므로 상수관망 관리자는 상수관로의 파열이 발생할 경우 그 영향을 최소화하기 위해 발생가능한 관로의 파괴 사상에 대해 관망 영향도 해석을 실시하여 특정 관로의 파괴시 파괴영향의 감소 및 적절한 유량 공급을 위해 시스템 설비의 추가가 필요한 곳이나 서비스 구역내 파괴에 대해 취약한 지역을 파악하고 파열발생시 피해복

구 및 경감대책을 계획하는 것이 필요하다.

일반적인 도시관망의 관로파열인 경우 배수지에 저류된 물이나 수원지로부터 수요 절점에 이르는 다양한 경로의 존재 등과 같이 폐합회로로 구성된 관망의 기하학적 특성에 의해 관로 파괴의 영향이 감소되어 어느정도 복원력을 제공한다. 만약 관망이 관로파열에 대비하여 충분한 복원력을 갖춘 관망으로 설계되어 있다면 관로파괴시 관망 일부에 용수공급이 불가능한 상황과 같은 운영상의 문제는 발생하지 않을 것이다. 상수관망이 관로 파열에 대한 복원력이 큰 기하학적인 구성으로 이루어지기 위해 먼저 관망 구성형태에 따른 관로파열시 각 절점에서 발생할 수 있는 수리학적 조건들을 해석하고 이를 토대로 관로파열 영향을 최소화할 수 있도록 복원력이 큰 관망을 구성할 수 있는 기법을 개발하여 이를 설계과정에 도입하는 것이 요구된다. 그러나 관망의 구성형태에 대한 수리적 특성과 관로 파열시 관망에서 발생하는 관망구성의 기하학적인 영향 및 복원력 산정에 대한 연구가 이루어지지 않았고 파괴영향 및 복원력을 정량적으로 규정하는 방법이 개발되지 않아 폐합회로의 복원력 극대화를 이용한 관로파괴시 파괴효과의 감소 및 상수의 신뢰성 있는 공급은 적극적으로 이용되지 못하고 있다.

정상상태에서의 상수관망의 수리학적 연구는 국내에서는 관망흐름해석 및 비용최소화를 위한 최적화분야에 주로 수행되었다. 박재홍과 한건연(1996,1998)에 의해 선형화기법을 이용한 계수매트릭스의 효율적 처리기법 및 도하이론(Graph theory)을 통한 선형독립적인 폐합관로의 생성기법 등을 연구하였고 박재홍(1998)은 상수관망의 신뢰도 해석의 소개 및 필요성을 주장하였으며 상수관망의 파괴영향도 평가기법을 제시하였다(박재홍 외 4, 2002). 선진외국에서는 관망의 유량해석과 함께 비용최소화를 위해 최적화기법을 이용한 관로의 배치 및 관경의 결정(Lansey 와 Mays, 1989), 관로내 수질해석(Clark 와 Sivaganesan, 2002), 상수관망의 신뢰도 해석(Shinstine 외 2, 2002)과 같은 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 특히 Jowitt(1995)는 Micro-flow 이용하여 상수 관로파열의 영향을 근사적으로 해석하여 파열로 인한 관망거동을 예측하고자 시도하였으나 정확한 흐름해석과 관망 구성의 특성 등을 고려한 파열의 영향 해석은 수행되지 못하였다.

본 연구에서는 관로의 갑작스런 파열시 발생하는 상수관망의 거동을 분석하고 파열의 영향을 최소화 할 수 있는 상수관망의 설계 및 영향을 최소화 할 수 있는 대

안을 모색하기 위한 연구이다. 이를 위해 선형화기법을 이용한 상수관로 파괴를 모의하여 정상상태하의 관망과 파괴시 관망거동을 파악하고 파괴영향을 최소화할 수 있는 관로의 배치 및 관경선택의 기준을 마련할 수 있는 기법을 제시하여 신뢰성 있는 상수관망의 설계가 될 수 있도록 하고자 한다.

2. 관로의 파열 및 관망의 거동모의

2.1 관망의 파열 및 파열영향

관로파열의 탐지는 대개 물 사용자에게 의한 누수의 신고 혹은 압력의 불만으로부터 수행된다. 도심에서 대부분의 관로파열 지표는 누수된 물의 존재나 누수지점에 인접한 절점의 상대적으로 낮은 수압이다. 이때 누출된 물이나 공급된 물의 압력측정을 통해 잘못된 관을 파악하고 사용자들의 불편을 최소화하기 위하여 가능한 빨리 밸브를 이용하여 누수되는 관을 폐쇄하고 보수를 시작한다.

관로 파열시 파열된 관로는 일정한 보수과정을 거쳐 다시 정상적인 역할을 수행한다. 일단 관로에서 파열이 발생하면 파열이 발생한 지점의 유량 손실로 인해 관로 내 압력의 저하로 유량공급의 문제가 발생하게 되며 관로보수는 시작된다. 관망내의 밸브를 이용하여 파열된 관로를 폐쇄하면 파열관으로 유량공급이 중단되며 관망구성 요소에서 분리된다. 파열된 관로가 분리되면 유량손실은 중단되지만 폐쇄된 관로를 통하여 유량공급이 이루어지지 못하기 때문에 관망의 구성이 변경되어지며 파열이 발생한 관로의 보수가 완전히 이루어 질 때까지 관망내 일부에서 폐쇄된 관로로 인해 거동의 장애를 겪게된다. 파열이 발생한 관로가 완전히 보수된 후 관망은 다시 처음상태 혹은 수정된 상태로 구성되며 다시 정상적인 서비스가 재개된다. 관로의 파열 및 보수 주기동안 관망 수행능력의 기준은 절점에서의 수요가 이루어지고 있는 상태에서 수요절점에서의 압력수두 혹은 누수되고 있는 상태하에서 공급되는 물의 양에 의해 판단될 수 있다.

관로 파열시 관망 일부의 물 공급 중단상태를 예방하고 이용 가능한 수두로 최소한의 서비스 수준을 제공하는 물 공급을 보장하기 위해 관 파열의 영향과 결과들을 예측하여야 한다. 물공급에 대한 안정적 보장과 수요자들의 요구 충족과 같은 것은 관망 설치 및 관리계획의 근본 목표이며 관망 개선을 위해 계획된 투자와 서비스 정도를 고려한 기준치 설정의 기본과정이다. 관

로파열에 대한 관망의 영향도를 평가하기 위해 관망해석 모형이 이용될 수 있으며 관망모형을 이용하여 관로 파괴 영향을 분석할 경우 가장 비용효과적으로 관망 신뢰도를 증가시키기 위해 자본투자순서, 특정 위험지구를 결정할 수 있다고 제안된 바 있다(Jowwit 와 Coelho, 1994). 또한 관망모형은 관망내에서 소비자사에서 서비스 수준의 지도를 작성하는데 이용될 수 있으며 관망 운영자들을 훈련하는데 사용될 수 있는 것으로 보고되어 있다. 이와같이 관망해석모형은 관망의 파괴영향 및 조건, 관망의 상태, 운영자의 교육 등 관망의 유지 및 설계 등 다양한 분야에서 이용될 수 있으며 비용적인 측면에서도 가장 효율적인 방법으로 파악되고 있다. 본 연구에서도 상수관망의 파괴 영향해석을 통한 상수관망의 신뢰도를 개선하기 위해 상수관망 모의를 실시하였고 관망모의를 위해 선형화기법을 이용한 관망 해석 기법을 도입하였다(박재홍과 한건연, 1998)

2.2 상수관망의 파열모의

주어진 상수관망에 대해 관로파열이 발생할 관을 예측하는 것은 불가능하다. 본 연구에서는 각 관로의 파괴영향을 파악하여 어느 한 관로의 파괴가 발생할 경우 파괴된 관로의 폐쇄로 인한 관망의 영향을 분석하고 영향을 최소화 할 수 있도록 후회경로를 통한 복원효과를 극대화 시킬 수 있는 시스템을 설계하여 파열의 영향에 보다 안정적인 시스템 즉 보다 신뢰성 있는 시스템을 구축하고자 하였다. 먼저 각 관로의 파열로 인한 관망시스템의 전체적 영향을 파악하기 위해 시스템 각각의 관로를 순차적으로 파괴시켜 각 관로의 파괴에 대한 관망의 정상상태 반응을 파악하였다. 본 연구에서 도입된 선형화기법을 이용한 관망해석모형은 빠른 수렴성 뿐만 아니라 관로유량 해석의 정확도를 지니고 있어 대규모 관망의 경우에도 짧은 계산시간에 각 관로의 파괴영향을 해석할 수 있다. 그러나 선형화기법을 이용한 관로해석을 위해 주어진 상수관망에 대하여 연속방정식의 적용을 위해 절점과 연결된 관로들의 정보와 에너지방정식을 위한 폐합회로를 구성하는 관로들의 정보가 요구된다. 그러나 본 연구에서와 같이 순차적으로 관로의 파괴가 이루어지는 관망에 대한 절점과 폐합회로 정보의 구성을 위해서 파괴된 관로를 고려한 새로운 폐합회로 자료의 공급이 계속적으로 요구된다. 또한 절점에 연결된 관로들에 대한 정보는 사용자에게 의해 주어진 관로정보를 이용하여 각 관로와 연결된 절점을 검색을 통하여 쉽게 해결할 수 있도록 자료를 구성할 수 있으나

사용자에 의해 임의로 구성된 폐합관로 정보는 폐합관로들이 서로 독립적인 보장이 없으며 계수매트릭스 구성시 ill-condition 매트릭스 발생의 원인이 될 수 있다. 본 연구에서는 입력자료 추출의 어려움이 발생하는 폐합회로의 계속적 생성을 위해 도학(Graph Theory)을 이용하여 서로 독립적인 폐합회로 관로망을 찾는 기법을 도입하였고 이 기법을 이용하여 관로파열시 파열된 관로를 제외한 나머지 관로들을 사용하여 폐합관로를 구성하였다.

폐합회로 생성에 대한 자세한 내용은 참고문헌(Tutte, 1963, 박재홍 과 한건연, 1998)에 의해 제시되어 있으므로 본 고에서는 생략하고자 한다.

2.3 순차적 관로파열 발생 알고리즘

상수관망에서의 관로파괴의 영향을 파악하기 위해 각각의 관로 파열에 대한 모의를 통해 관망의 거동을 파악하였다. 이는 관로파열이 발생할 관로를 예측할 수 없기 때문에 모든 관로가 파괴가능성이 있는 것으로 가정하였다.

관로파열 영향을 모의하기 위해 도학을 이용한 폐합회로 생성기법과 선형화 기법이 도입되었다. 도입된 폐합회로 생성기법은 자동으로 에너지방정식의 적용이 이루어지는 폐합회로를 구성할 수 있으므로 각 관로의 파괴효과를 고려하기 위해 폐합회로 구성시 순차적으로 파괴된 관로를 관망구성에서 제외시켜 폐합회로를 구성하고 유량 모의를 실시하여 관망 보수기간중의 파열관로의 관로분리효과를 상수관망해석에 고려할 수 있도록 하였다. 모든 관로의 순차적 파괴영향 해석에도 불구하고 본 모의에서는 도입된 폐합회로 구성 알고리즘으로 인해 자료입력 과정이 자동화 될 수 있었으며 작업자가 편리하게 파괴 영향을 해석할 수 있다. 도입된 기법을

이용한 관로파열 모의해석에 대한 흐름도는 그림 1과 같다.

3.1 관로파열 영향 분석

2장에서 개발된 순차적 파열해석기법을 이용하여 가상관망에 대하여 관로파열로 인한 영향을 분석하였다. 적용된 가상관망은 그림 2에서 나타난 바와 같이 12개 절점, 22개의 관로로 이루어진 가상관망을 고려하였다. 주어진 관로 및 절점자료의 구성은 관로 유량해석을 위해 주로 이용되고 있는 KYPIPE 모형의 자료의 순서와 동일하도록 구성하였으며 관로의 길이는 그림에서 나타난 바와 같으며 관경은 모두 20 cm 이고 관로마찰계수는 120 로 설정하였다. 절점 수요량은 항상 일정한 것으로 고려하였으며 각 관로는 파괴가 일어나면 파괴된 관로는 밸브의 폐쇄로 인해 관망으로부터 분리된다고 가정하였으며 파열의 영향도는 관로파열이 발생할 경우 절점에서 충분한 수요가 이루어지고 있을 때 절점수두의 강하량으로 파악하였다.

주어진 관망의 파열해석 결과가 표 1에 나타나 있다. 표 1의 행은 파열이 발생한 관로번호를 나타내며 첫 번째 행의 0 으로 나타난 관로는 관로의 파열이 발생하지 않았을 경우이다. 열은 관로파열을 고려하여 해석할 경우 절점에서의 계산된 수두값을 나타낸다. 관로파괴의 모의는 앞에서 기술된 도학을 이용하여 자동화되었으며 사용자에게 의한 추가적인 관망의 재구성이나 자료의 입력은 수행되지 않았다. 표의 첫 번째 행은 관로의 파열이 발생하지 않은 상태의 각 절점수두이다. 표에서 나타난 바와 같이 관망에서 관로파열이 발생하지 않은 정상운영 상태에서의 절점수두는 주어진 수요하에서 충분한 압력으로 공급되고 있다. 파열해석 결과 대부분의 관로에서 파열로 인해 수요절점에서 큰 수두강하는 나

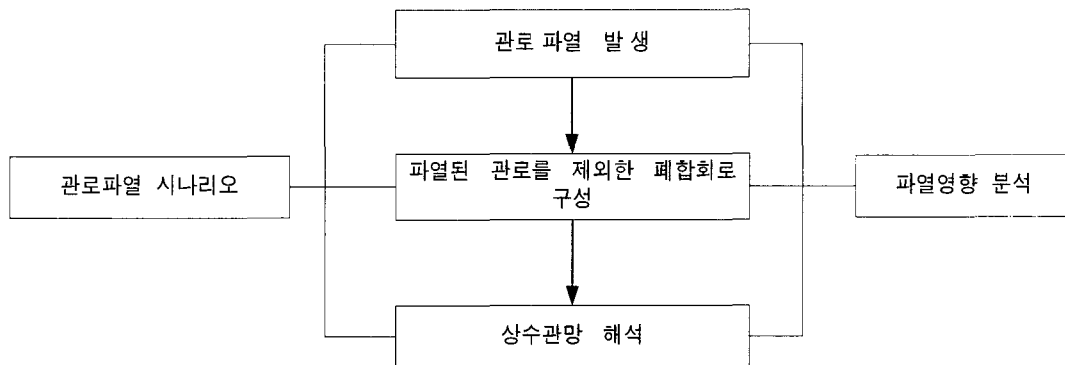


그림 1. 관로파열 영향해석 흐름도

타나지 않았지만 1, 2, 22번 관로가 파괴되었을 경우 각 절점의 수두 강하가 비교적 크게 나타났다. 이러한 결과는 1, 2, 22번 관로가 대상 관망의 유량공급에 큰 역할을 하고 있음을 나타내며 실제로 대상 상수관망은 이들 관로에 유량공급을 전적으로 의존하고 있다. 특히 22번 관로 파괴의 경우 거의 모든 절점에서 기준치 이하의 절점수두를 나타내어 22번 관로에 대한 관망의 유량공급 의존도가 너무 큰 것을 알 수 있었다. 유량 의존도가 큰 관로가 관망내에 존재하면 이 관로의 파괴시 상수관로의 대부분 수요절점의 압력수두강하로 인해 해당지역 수요자들에게 물 공급의 중단 혹은 낮은 압력의 용수공급과 같은 불편이 해당지역 수요자들에게 발생할 수 있다. 소수의 특정한 관로에 유량공급을 주로 의존하게 되는 관망의 관로의 배치는 비록 형태상으로 그물망 모양을 형성하고 있을지라도 수리학적으로는 하나의 특정한 관로에 유량공급을 의존하는 수지상 관로와 같이 거동한다고 할 수 있다. 소수 관로에 과다하게 유량공급을 의존하는 관망은 관망의 구성의 변경을 통해 우회경로를 활성화할 수 있으며 과다하게 의존되던 관로의 파괴시 활성화된 우회경로의 유량공급을 통해 수요절점에 유량공급을 기대할 수 있다.

3.2 우회경로 활성화를 통한 신뢰도의 증가

주어진 관망의 구성하에서는 22번 관로에 대한 의존도가 커 22번 관로의 파열시 전체적 관망의 수두저하

및 유량 공급이 불안정해 진다. 그러므로 22번 관로에 대한 의존성을 감소시키고 이를 보완할 수 있는 관로에 대해 유량공급을 증가시켜 각 수요절점에 이르는 경로들에 대해 유량공급을 균형있도록 만들기 위해 관망조건을 약간 변경하였다. 22번 관로에 대한 의존도를 감소시키기 위해 22번 관로의 관경을 20cm에서 15cm로 감소시켰고 줄어든 공급능력을 보충하기 위해 1, 2번 관로의 관경을 20 cm에서 25 cm로 증대시켰으며 나머지 조건은 동일하게 설정하였다. 변화된 관망구성을 이용한 파괴해석 결과는 표 2에서 나타나 있다. 표 2의 결과에서와 같이 변화된 관로구성을 가진 관망에서는 순차적인 관로 파열의 영향에도 각 관로의 절점수두는 크게 감소되지 않고 있으며 특히 22번 관로 파열의 경우 각 절점에서 약간의 수두감소가 발생하고 있지만 모든 절점에서 일정한 기준치 이상의 수두를 유지하고 있고 관망구성 변경전과 비교하여 각 절점에서의 수두가 크게 증가하여 22번 관로파괴에 대한 파괴영향은 크게 감소하였고 수요자의 요구를 충족할 수 있는 수두로 유량이 공급될 수 있음을 파악할 수 있었다. 또한 관로파괴가 발생하지 않았을 경우 정상적인 운영상태의 절점에서의 수두 편차 즉 절점수두의 최대 및 최소치의 차이는 관망구성 변경전과 비교하여 관망 변경후의 편차가 줄어들었다.

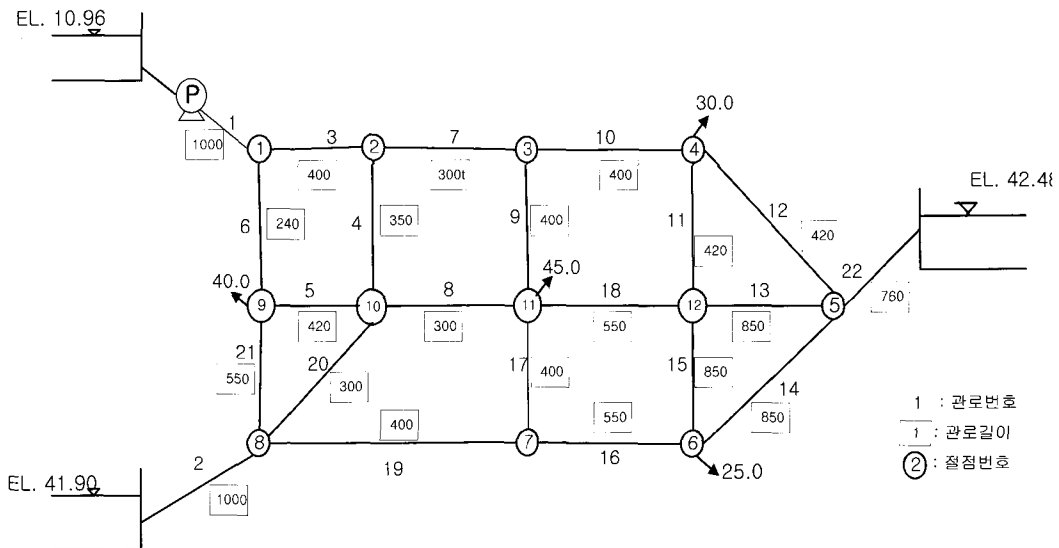


그림 2. 본 연구모형이 적용된 가상관망

표 1. 주어진 관망의 관로파열 영향 해석결과

절점수두 파괴관로	절점수두											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	38.8	37.8	37.6	37.6	40.3	37.7	37.7	37.9	37.5	37.6	37.3	37.7
1	31.3	31.6	31.8	32.6	38.1	32.8	32.5	32.6	31.1	31.6	31.6	32.8
2	35.3	34.4	34.3	34.5	38.9	34.4	34.0	34.0	33.9	34.0	33.8	34.6
3	40.7	37.4	37.4	37.4	40.3	37.6	37.6	37.8	37.7	37.5	37.1	37.6
4	38.9	38.2	37.7	37.7	40.3	37.6	37.6	37.8	37.4	37.4	37.2	37.8
5	38.6	37.9	37.7	37.7	40.3	37.7	37.7	37.9	37.3	37.7	37.3	37.8
6	42.9	38.4	37.6	37.6	40.2	37.3	37.2	37.3	35.7	37.1	37.0	37.6
7	39.2	38.5	37.3	37.4	40.2	37.6	37.6	38.0	37.8	37.9	37.2	37.6
8	39.0	38.0	37.5	37.5	40.2	37.5	37.5	38.1	37.8	38.0	36.8	37.6
9	38.8	37.9	37.8	37.8	40.3	37.6	37.6	37.8	37.5	37.5	37.0	37.7
10	38.7	37.8	37.5	37.7	40.3	37.6	37.6	37.8	37.5	37.5	37.2	37.7
11	38.7	37.7	37.5	37.4	40.3	37.7	37.7	37.9	37.5	37.6	37.3	37.9
12	36.6	35.5	35.0	34.6	40.7	35.7	35.7	35.9	35.4	35.4	35.0	35.6
13	37.3	36.3	36.1	36.1	40.6	36.1	36.1	36.5	36.1	36.1	35.7	36.0
14	37.3	36.3	36.2	36.2	40.7	35.4	35.8	36.3	36.0	36.0	35.7	36.2
15	38.8	37.8	37.7	37.7	40.3	37.5	37.6	37.8	37.5	37.6	37.3	37.9
16	38.8	37.8	37.6	37.6	40.3	37.7	37.7	37.9	37.5	37.6	37.3	37.7
17	38.7	37.7	37.5	37.6	40.3	37.7	37.9	37.9	37.5	37.5	37.0	37.7
18	38.6	37.6	37.5	37.6	40.4	37.7	37.6	37.7	37.3	37.4	36.8	38.0
19	38.9	37.9	37.5	37.5	40.2	37.3	37.2	38.4	37.7	37.7	37.1	37.5
20	38.6	37.7	37.5	37.5	40.3	37.7	37.7	38.0	37.4	37.4	37.2	37.7
21	38.5	37.7	37.5	37.6	40.3	37.7	37.7	38.0	37.1	37.5	37.2	37.7
22	12.9	10.5	8.8	7.8	7.9	8.0	9.4	12.0	10.9	10.5	8.5	8.0

표 2. 관로조건의 변경후 관로파열 영향 해석결과

절점수두 파괴관로	절점수두											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	39.6	38.2	37.6	37.4	38.6	37.5	37.8	38.6	38.1	38.1	37.3	37.5
1	30.2	30.3	30.4	30.6	33.5	31.0	31.3	32.5	30.1	30.4	30.3	30.9
2	31.4	29.6	29.3	29.3	32.3	29.2	29.1	29.1	29.1	29.1	28.8	29.4
3	42.2	37.2	37.0	36.9	38.2	37.0	37.4	38.4	38.3	37.6	36.8	37.0
4	39.7	38.6	37.7	37.4	38.6	37.4	37.7	38.5	37.9	37.9	37.3	37.5
5	39.7	38.2	37.6	37.4	38.6	37.4	37.7	38.6	38.1	38.0	37.3	37.5
6	44.6	38.8	37.5	37.2	38.4	37.1	37.3	37.8	36.0	37.4	37.0	37.2
7	40.4	39.4	36.9	36.8	38.3	37.1	37.5	38.7	38.5	38.5	36.9	37.1
8	40.1	38.6	37.2	37.0	38.2	37.0	37.4	38.8	38.6	38.6	36.5	37.0
9	39.7	38.3	37.9	37.5	38.6	37.4	37.7	38.5	38.1	38.1	37.1	37.5
10	39.8	38.4	38.0	37.0	38.5	37.4	37.8	38.6	38.2	38.2	37.4	37.4
11	39.6	38.1	37.5	37.1	38.6	37.6	37.8	38.6	38.1	38.1	37.3	37.6
12	39.0	37.5	36.7	36.1	39.2	36.9	37.2	38.0	37.4	37.4	36.6	36.8
13	39.2	37.8	37.1	36.9	39.0	37.0	37.3	38.2	37.7	37.6	36.8	36.9
14	39.3	37.8	37.2	37.0	39.1	36.6	37.2	38.2	37.7	37.6	36.9	37.0
15	39.7	38.2	37.6	37.4	38.6	37.4	37.7	38.6	38.1	38.1	37.4	37.5
16	39.7	38.2	37.5	37.2	38.4	36.9	38.2	38.8	38.1	38.1	37.3	37.3
17	39.5	38.0	37.4	37.3	38.5	37.4	38.1	38.6	38.0	37.9	37.0	37.4
18	39.5	38.1	37.5	37.4	38.7	37.6	37.7	38.5	38.0	37.9	37.1	37.7
19	39.5	37.8	36.8	36.4	37.8	36.3	36.3	39.3	38.0	37.8	36.3	36.5
20	39.2	37.7	37.3	37.1	38.4	37.2	37.6	38.8	37.7	37.5	37.0	37.2
21	39.2	37.9	37.4	37.2	38.5	37.3	37.7	38.7	37.6	37.7	37.1	37.3
22	31.8	29.6	27.9	26.9	27.0	27.1	28.5	31.2	29.9	29.6	27.6	27.1

관망구성이 변경된 관망에서는 수두절점에 이르는 각 경로의 부하율이 고르게 할당되어 관로를 통하여 적절한 유량이 공급되고 있으며 일부 관로의 과도한 유량 부하로 인해 관로마찰로 인한 과도한 수두손실이 발생하지 않고 있다는 것을 나타내고 있다. 또한 관망에서의 비교적 일정한 압력분포는 특정 관로에서 과잉 및 과소 압력 발생으로 인한 관망관리의 어려움의 발생과 같은 문제점을 감소시킬 수 있어 관망관리상의 부차적인 효과가 기대된다.

3.3 실제관망에의 본 기법의 적용

본 연구에서 개발된 관로의 파열 영향 해석기법을

그림 3와 같은 모 광역시 상수관망에 적용하였다. 대상 관망은 인근 도시에 용수를 공급하기 위한 광역상수관로의 건설과 도시팽창에 따른 관망의 확장, 대체작업이 이루어졌으나 관망의 파괴영향해석 및 신뢰도해석 등의 기법적용은 이루어지지 않았다. 적용 관망은 그림과 같이 관로 26 개, 절점 16, 고정 절점 2 곳으로 이루어졌고 관망에 자세한 자료는 참고문헌(박재홍과 한건연, 2001)에 나타나 있다. 주어진 자료를 이용하여 관로파열 영향을 분석하였고 모든 파정은 가상관망의 적용과정과 동일하였다. 해석결과 관로 파열이 발생하지 않았을 경우에는 표 3의 첫 번째 행에서 보여지듯이 모든 절점에서 적정수두가 유지되고 있었다. 그러나 관망의

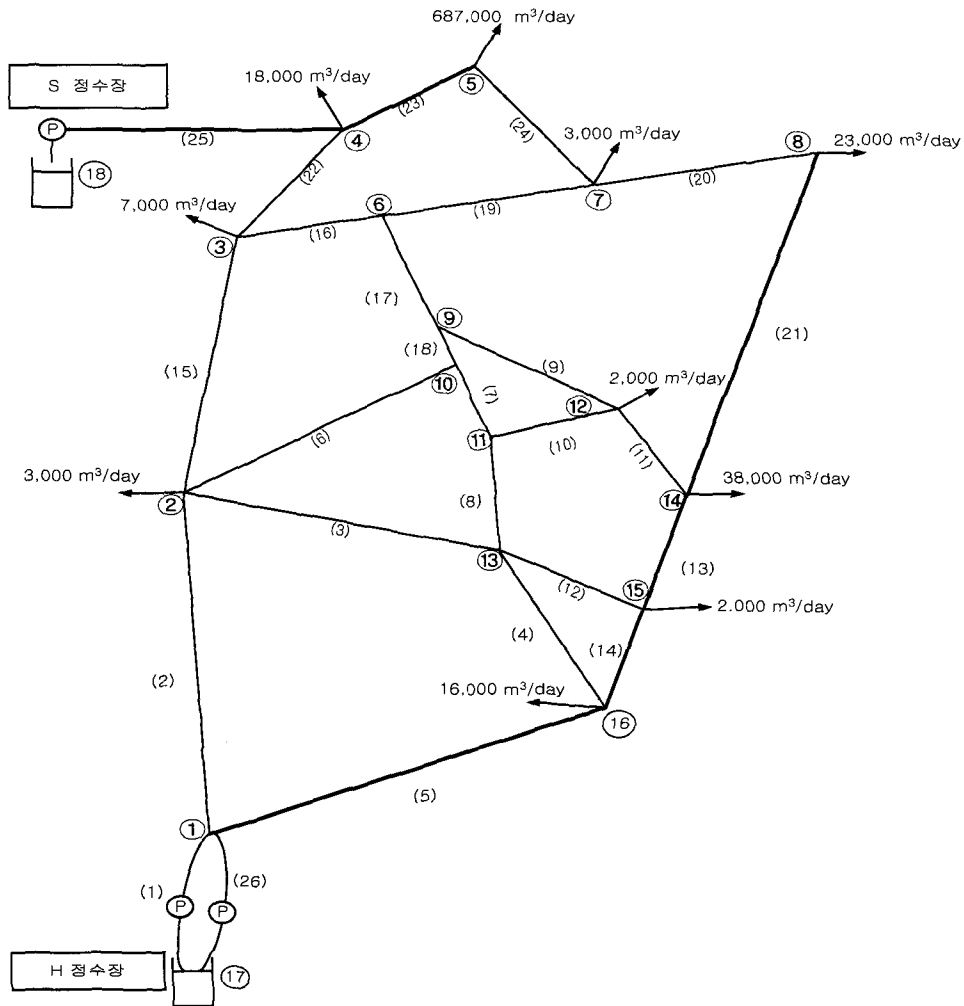


그림 3. 본 모형이 적용된 실제관망도

표 3. 실제관망의 파열 영향 모의결과

파괴 관로	절점 수두															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	83.6	71.4	40.7	40.6	34.8	48.6	37.3	39.7	50.6	50.9	51.0	50.2	52.9	49.7	54.0	58.5
1	46.5	37.4	20.9	21.0	13.2	21.4	13.7	14.3	21.7	21.8	21.8	21.1	23.2	20.5	23.7	27.0
2	85.3	38.2	33.8	33.8	27.7	39.4	29.8	31.7	40.9	41.0	41.4	41.1	43.1	41.1	46.6	52.5
3	83.8	74.9	40.1	39.9	34.0	47.3	36.4	38.6	49.1	49.5	49.5	48.9	50.9	48.4	52.8	57.4
4	83.9	70.8	39.7	39.6	33.8	46.7	36.2	38.5	48.5	48.7	48.7	48.4	49.0	48.3	53.6	59.4
5	100.6	30.0	-93.8	-91.8	-115.7	-134.2	-133.8	-146.5	-139.5	-139.6	-143.4	-145.4	-143.4	-147.7	-147.7	-147.8
6	84.0	78.3	39.1	39.0	32.9	45.3	35.1	37.2	46.9	47.1	47.4	46.9	49.9	46.7	51.4	56.4
7	83.6	71.4	40.6	40.5	34.7	48.3	37.3	39.7	50.3	50.5	51.2	50.3	53.1	49.8	54.1	58.5
8	84.0	71.7	39.2	39.1	33.2	45.6	35.5	37.7	47.3	47.4	47.4	47.4	59.4	47.4	53.9	59.5
9	83.6	71.4	40.7	40.6	34.8	48.8	37.3	39.7	50.9	51.1	51.1	50.1	53.0	49.7	54.0	58.5
10	83.7	72.1	40.5	40.4	34.4	50.4	36.7	38.7	52.9	53.9	54.5	48.3	55.1	48.2	53.5	58.4
11	83.7	72.8	40.6	40.3	34.1	53.3	36.1	37.9	56.4	56.6	56.6	56.6	56.8	46.8	52.8	58.1
12	83.6	71.3	40.6	40.5	34.7	48.4	37.3	39.7	50.4	50.7	50.8	50.1	52.4	49.7	54.2	58.5
13	90.7	65.6	5.5	5.5	-6.3	8.2	-6.9	-7.4	9.3	10.2	10.3	2.0	29.0	-5.7	79.3	79.5
14	92.0	62.0	-3.5	-3.4	-15.5	-3.8	-16.3	-16.9	-3.8	-3.4	-3.4	-9.6	7.0	-15.4	-15.3	83.3
15	84.3	75.8	38.0	38.0	32.6	48.0	35.8	38.6	50.4	50.8	50.8	50.0	52.9	49.5	54.0	58.5
16	84.4	72.4	38.0	38.1	33.0	53.0	36.9	40.1	53.3	53.4	53.4	52.4	55.1	51.6	55.8	60.1
17	84.5	72.6	37.0	37.1	32.0	36.8	35.7	39.6	54.3	54.4	54.3	53.1	55.9	52.1	56.3	60.6
18	83.8	71.8	40.1	40.0	34.3	45.7	37.0	39.5	47.2	52.5	52.1	50.3	53.8	49.8	54.3	58.8
19	83.7	71.6	40.4	40.2	34.2	49.9	36.5	39.3	51.1	51.4	51.4	50.6	53.3	50.0	54.3	58.7
20	86.6	75.0	28.8	27.7	18.5	52.9	18.2	55.7	59.0	59.5	59.7	59.3	61.3	59.2	62.5	66.0
21	91.1	80.9	5.9	2.7	-13.4	58.0	-18.0	-23.0	71.2	72.1	72.7	72.7	73.8	72.8	74.8	76.9
22	84.0	72.3	47.6	39.3	33.8	50.5	36.9	39.7	51.6	51.9	51.9	51.1	53.8	50.4	54.7	59.1
23	72.5	60.7	62.9	70.9	-132.4	18.5	-79.8	-40.5	17.3	17.3	16.7	13.5	19.6	10.5	19.6	28.5
24	86.7	75.2	28.5	27.3	17.8	55.8	55.1	55.1	59.6	60.0	60.1	59.6	61.7	59.4	62.7	66.2
25	54.8	19.8	-156.9	-166.0	-166.0	-56.1	-119.4	-83.2	-35.6	-33.9	-33.3	-34.8	-27.1	-35.3	-22.5	-9.5
26	46.5	37.4	20.9	21.0	13.2	21.4	13.7	14.3	21.7	21.8	21.8	21.1	23.2	20.5	23.7	27.0

각 관로를 순차적으로 파열시켜 영향을 모의했을 경우 일부관로의 파열시 대부분의 절점수두가 설계기준값 이하로 내려가는 것을 확인할 수 있었다. 특히 5, 13, 14, 21, 23, 25번 관로파열의 경우 거의 모든 절점에서 압력수두가 급격히 강하하였다(표 3). 이는 대상관망의 설계 및 확장시 비록 폐합관로 형태로 관망을 구성하였지만 각 관로의 수리학적 소통능력 및 파괴시 우회경로를 통한 복원능력에 대한 검증이 없었기 때문에 일부관로에 의존적인 관망인 구성된 것으로 판단된다.

주어진 관망을 관로파열에 대한 적정한 신뢰도를 갖는 관망으로 변화시키기 위해 관로구성의 변경이 고려

되었다. 관로파열시 모든 절점에서 수두강하로 인해 문제가 되는 관로들은 그림 3에서 굵은 실선으로 나타나는 관로들이며 21 번 관로는 1100 mm 이고 나머지 관로들은 1200 mm 대구경 관로로써 타지역으로 유량을 공급하는 광역상수관로이었다. 그러므로 문제가 되는 관로를 단일 대구경 관로로 건설하는 것이 아니라 보다 작은 직경을 가진 복수관로로 건설하는 방안이 고려되었다. 이러한 방안에 따라 대구경 단일관로를 통수 단면적을 감산하여 5, 13, 14, 21, 23 관로를 900 mm, 25 번 관로를 1000 mm 두 개의 관을 가지는 2 개의 관로로 구성하였고 이들 관로의 파열은 각각 독립적이

표 4. 관망의 관로조건 변경후의 관로파일 영향해석 결과

절점 수 과 관 로	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	90.1	82.2	70.6	71.6	62.7	68.5	62.9	63.1	68.4	68.5	68.4	67.5	69.4	66.8	69.6	72.4
1	65.2	59.6	55.7	57.6	46.1	49.6	45.9	45.8	49.2	49.2	49.0	48.2	49.6	47.6	49.6	51.7
2	91.3	61.8	64.3	66.5	57.5	62.1	57.6	57.8	62.0	62.0	62.0	61.6	63.1	61.3	64.9	68.6
3	90.2	84.5	70.2	71.1	62.0	67.6	62.2	62.4	67.5	67.5	67.4	66.6	68.1	65.9	68.8	71.7
4	90.2	81.8	69.9	71.0	62.0	67.1	62.2	62.4	67.0	67.0	66.9	66.4	67.2	66.0	69.4	73.1
5	93.1	78.5	56.6	57.9	46.0	49.6	45.5	45.3	49.1	49.1	48.7	47.7	49.1	46.9	48.5	50.1
5-1	93.1	78.5	56.6	57.9	46.0	49.6	45.5	45.3	49.1	49.1	48.7	47.7	49.1	46.9	48.5	50.1
6	90.4	86.7	69.4	70.4	61.2	66.1	61.3	61.4	66.0	66.0	66.0	65.4	67.4	64.9	67.9	71.1
7	90.0	82.4	71.0	71.8	62.7	69.8	62.8	63.0	69.8	70.0	67.8	67.2	69.0	66.5	69.3	72.2
8	90.3	82.3	69.5	70.6	61.6	66.2	61.7	62.0	66.1	66.1	65.8	65.7	73.1	65.6	69.6	73.2
9	90.1	82.2	70.7	71.6	62.6	68.9	62.8	63.0	68.8	68.8	68.5	67.3	69.5	66.6	69.5	72.4
10	90.1	82.8	71.0	71.5	62.0	70.7	62.0	62.1	70.8	71.2	71.3	65.3	71.4	65.2	68.9	72.2
11	90.1	83.1	71.3	71.5	61.4	71.7	61.4	61.4	72.1	72.1	72.1	72.1	72.1	64.0	68.3	72.1
12	90.1	82.2	70.6	71.6	62.7	68.4	62.8	63.1	68.4	68.4	68.3	67.5	69.2	66.8	69.6	72.4
13	90.5	82.0	68.7	69.7	60.2	66.5	60.3	60.4	66.4	66.5	66.4	64.9	68.5	63.6	71.6	74.0
13-1	90.5	82.0	68.7	69.7	60.2	66.5	60.3	60.4	66.4	66.5	66.4	64.9	68.5	63.6	71.6	74.0
14	90.6	81.7	68.4	69.4	60.0	65.7	60.0	60.2	65.6	65.6	65.5	64.4	66.9	63.4	65.7	74.3
14-1	90.6	81.7	68.4	69.4	60.0	65.7	60.0	60.2	65.6	65.6	65.5	64.4	66.9	63.4	65.7	74.3
15	90.3	84.3	69.1	70.6	61.9	68.1	62.2	62.5	68.1	68.1	68.0	67.1	69.1	66.4	69.3	72.2
16	89.9	82.0	71.9	72.3	62.9	67.4	62.9	63.0	67.5	67.6	67.6	66.8	68.7	66.2	69.0	71.9
17	90.0	82.1	71.2	71.9	62.7	70.2	62.8	63.0	68.0	68.1	68.0	67.2	69.1	66.6	69.3	72.2
18	90.1	82.3	70.4	71.5	62.6	67.8	62.8	63.1	67.7	68.8	68.6	67.5	69.6	66.8	69.6	72.5
19	90.1	82.3	70.6	71.4	62.4	68.9	62.5	62.9	68.7	68.7	68.6	67.6	69.6	66.8	69.6	72.5
20	90.6	82.7	69.3	69.6	59.2	69.3	59.2	66.1	69.5	69.6	69.6	69.0	70.7	68.5	71.0	73.7
21	90.6	82.7	69.3	69.6	59.2	69.3	59.2	59.2	69.5	69.6	69.6	69.0	70.7	68.5	71.1	73.7
21-1	90.6	82.7	69.3	69.6	59.2	69.3	59.2	59.2	69.5	69.6	69.6	69.0	70.7	68.5	71.1	73.7
22	89.5	80.7	61.8	73.6	63.2	65.7	63.2	63.2	66.5	66.7	66.7	66.1	67.9	65.7	68.5	71.4
23	88.5	80.5	75.0	77.4	51.4	64.6	53.4	55.3	64.1	64.1	63.9	62.6	64.9	61.5	64.9	68.4
23-1	88.5	80.5	75.0	77.4	51.4	64.6	53.4	55.3	64.1	64.1	63.9	62.6	64.9	61.5	64.9	68.4
24	90.5	82.6	69.5	69.9	59.9	69.4	65.4	65.4	69.4	69.5	69.5	68.8	70.5	68.2	70.8	73.5
25	81.1	66.6	27.5	27.2	22.3	39.0	27.2	31.6	41.6	42.0	42.1	41.2	44.5	40.6	45.8	51.2
25-1	81.1	66.6	27.5	27.2	22.3	39.0	27.2	31.6	41.6	42.0	42.1	41.2	44.5	40.6	45.8	51.2
26	65.2	59.6	55.7	57.6	46.1	49.6	45.9	45.8	49.2	49.2	49.0	48.2	49.6	47.6	49.6	51.7

라고 가정하였다.

수정된 관망을 이용하여 다시 파열영향을 해석하였고 결과는 표 4와 같다. 표에서와 같이 단일관로를 대체한 복수관로들의 영향으로 대구경 단일관로로만 구성 되어진 관망보다 순차적인 관로파열로 인한 모든 절점

에서의 수두강하는 크지 않았고 적절한 압력범위에서의 유량공급이 이루어 질 수 있었다. 이것은 임의 관로의 파열로 인해 관망의 거동변화가 발생할 경우 개선된 관망시스템은 충분한 우회경로를 통하여 적절한 압력으로 모든 절점에 유량을 공급할 수 있으며 관로파열에 대해

서는 주어진 관망이 만족할 만한 신뢰도를 가졌음을 판단할 수 있었다.

그러나 본 연구에서 적용된 복수관로의 도입은 여러 가지 적용가능한 대안 중의 하나이다. 보다 실제적 목적을 위해 도입될 수 있는 여러 가지 대안들이 제안될 수 있으며 제안된 여러 가지 대안들은 최적화기법을 통해 가장 효율적인 방안이 평가될 수 있다. 이와 같은 최적 대안선정과 관련된 과제는 본 연구와 연관된 상수관망의 정량적인 신뢰도의 산정과 더불어 관망의 신뢰도 기반 최적설계기법에 도입될 수 있을 것으로 예상되며 좀 더 확장된 연구가 필요하여 차후의 연구과제로 남겨 두고자 한다.

4. 결 론

상수관망에서 관로파열을 예측하고 파열영향을 감소시키는 작업은 관망의 신뢰도와 밀접한 관계가 있다. 기존의 상수관망의 설계에서는 관로의 배치 및 각 관로에 대한 수리적 부하 및 파열에 대한 영향이 고려되지 않았다. 본 연구에서는 도학을 이용하여 상수관망의 기하학적 구성상태에 따른 관로 파열에 대한 영향을 예측하고 영향을 감소시켜 상수관망의 신뢰도를 증가시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

본 기법을 이용하여 상수관망에 적용한 결과 관로구성면에서는 폐합관로를 이루고 있지만 어느 특정한 관로에 유량공급을 지나치게 의존하는 수리학적 수지상관로배치는 일부 관로파열의 경우 적절한 유량공급이 불가능하여 관망의 대부분의 절점에 심각한 수두감소와 같은 부작용이 발생할 수 있었다. 이를 지양하기 위한 방법으로 관망구성시 적절한 관경의 선택 및 관로를 배치하여 특정한 관로에 대한 과대한 의존도를 줄이고 관로 부하량을 균형있게 부여함으로써 과대하게 의존되는 관로의 파괴시 발생하는 수요절점에서의 극단적인 수두감소를 극복할 수 있었고 안정적인 유량공급을 할 수 있게 되어 사용자들에게 좀 더 신뢰성 있는 유량공급이 될 수 있었다.

본 연구에서 적용된 기법을 이용하여 관로 파괴영향을 고려한 우회경로의 활성화를 통한 복원력을 증대시키는 관로설계가 이루어질 경우 임의의 관로에서 파열이 발생하여 관로 분리가 이루어지더라도 활성화된 우회경로의 존재로 말미암아 기준치 아래로 절점수두가 내려가는 것을 최소화 할 수 있고 이는 관망의 신뢰도를 증대하기 위해 폐합관로로 구성하려는 의도에 충실

하는 것으로 객관적인 폐합관로의 구성방법을 제시하는 기법이 될 수 있을 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 박재홍, 한건연. (1998). "상수관망해석을 위한 도학의 적용." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 31, No. 4, pp. 439-448.
2. 박재홍, 한건연(1996). "Frontal 기법을 이용한 상수관망의 흐름해석 모형." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 31, No. 1, pp. 141-150.
3. 박재홍(1998). "상수관망에서의 신뢰도 해석을 위한 해석 및 모의모형." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, Vol. 32, No. 1, pp. 95-104.
4. 박재홍, 한건연(2001). "상수관망의 수격현상 모의를 위한 외부 유출입 유량의 효율적 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 34, No. 5, pp.427-438.
5. 박재홍, 하성룡, 오건주, 김인섭, 김주환(2002). **상수관망의 관로 파열영향을 고려한 신뢰성 있는 설계기법의 도입**. 2001년도 한국수자원학회 기초과제 연구보고서, 한국수자원학회, No. 6, pp. 205-222.
6. Clark, R. M., Sivaganesan, M. (2002). "Predicting Chlorine Residuals in Drinking Water : Second Order Model." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 2, pp. 152-161.
7. Lansey, K.E., Mays, L. W. (1989). "Optimization Model for Water Distribution System Design." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 10, pp. 1401-1418.
8. Jowwit, P. W., Coelho, S. T. (1994). "Performance Analysis of Water Distribution System," in *Water Pipeline Systems*, ed D. S. Miller, BHR Group Conference Series Publication, No. 10.
9. Jowwit, P. W. (1995). "Effects of Pipe Failures on Water Distribution Network, in Improving Efficiency and Reliability." in *Water Distribution Systems*, ed E. Cabrera and A. F.Vela. Kluwer Academic Publishers.
10. Shinstine, D. S., Ahmed, I, Lansey, K. E. (2002). "Reliability/Availability Analysis of Municipal Water Distribution Networks: Case Studies."

Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 2, pp. 140-151.

11. Tutte, W. T. (1963). "How to draw a graph."

Proc. London Math. Soc., Vol. 13, pp. 743-767.

(논문번호:02-32/접수:2002.05.16/심사완료:2002.10.07)