

## 상수관망의 통합신뢰도 산정을 위한 해석모형의 개발

### Development of the Computational Model to Evaluate Integrated Reliability in Water Distribution Network

박재홍\* / 한건연\*\*

Park, Jae Hong / Han, Kun Yeon

---

#### Abstract

The computation model which evaluates combined hydraulic and mechanical reliability, is developed to analyze the integrated reliability in water distribution system. The hydraulic reliability is calculated by considering uncertain variables like water demand, hydraulic pressure, pipe roughness as random variables according to proper distribution type. The mechanical reliability is evaluated by analyzing the effect of pipe network with sequential failure of network components. The result of this study model applied to the real pipe network shows that this model can be used to simulate the uncertain factors effectively in real pipe network. Therefore, The pipe-line engineers can design and manage the network system with more quantitative reliability, through applying this model to reliable pipe network design and diagnosis of existing systems.

**Keywords** : water distribution, reliability analysis, Monte Carlo simulation, uncertainty

---

#### 요 지

본 연구에서는 상수관망의 신뢰도해석을 위해 수리적 신뢰도와 기계적 신뢰도를 통합적으로 해석할 수 있는 통합신뢰도 해석모형을 개발하였다. 수리적 신뢰도는 불확실성을 가진 변수들에 대하여 적절한 변동계수를 가진 확률분포형을 적용시켜 임의변수로 고려하였고 기계적 신뢰도는 관망의 각 구성물에 대해 순차적 고장을 발생시켜 각 고장에 대한 영향을 해석하여 신뢰도를 산정하였다. 본 연구모형을 실제관망에 대한 적용결과 본 모형은 실제관망에 대한 불확실한 요소를 고려한 신뢰도를 잘 모의하고 있었다. 앞으로 신뢰성있는 상수관망 설계 및 기존 관망의 신뢰도 판정에 본 모형이 적용된다면 기계적 및 수리적으로 객관성이 있는 신뢰도를 가진 상수관망의 건설 및 유지관리가 될 수 있다고 판단된다.

**핵심용어** : 상수관망, 신뢰도 해석, Monte Carlo simulation, 불확실성

---

\* 세명대학교 건설공학부 토목공학전공, 조교수  
Assistant professor, Dept. of Civil Eng. Semyung University  
(e-mail: jhpark@semyung.ac.kr)

\*\* 경북대학교 공과대학 토목공학과, 교수  
Professor, Dept. of Civil Eng. Kyungpook University  
(e-mail: kshanj@knu.ac.kr)

## 1. 서 론

근대적인 상수도 공급사업의 역사가 오래된 구미 선진국에서는 도시화 및 인구의 증가와 함께 사회기반시설인 상수관망의 규모가 급속도로 확장되어 관로, 펌프 및 밸브 등이 조합된 매우 복잡한 네트워크 시스템으로 구성되었다. 그러나 이렇게 대규모로 확장된 상수관망 시스템에서는 어느 한 구성요소의 고장(failure)은 다른 구성요소에 영향을 미치지 때문에 시스템의 효율적 운용 및 관리를 위해서 시스템 전체에 대한 정확한 이해와 분석을 요구하게 되었다.

따라서 1990년대 중반부터 단순히 상수관로 자체만을 해석하려는 시도에서 벗어나 용수공급시스템(water distribution system) 전체를 하나의 연관된 결합체라 생각하고 관망의 전체적 운영효율 향상, 수질의 개선, 노후관로의 갱생 등을 통합적으로 관리하고 있다. 또한 상수관망 운영의 목적을 소비자의 요구를 만족시키는 동시에 경제적으로 효율적인 시스템의 유지관리로 설정하고 관망운영의 목적을 충족시키기 위하여 시스템 요소들의 기능을 수리적(hydraulic), 수질적(water quality) 및 기계적(mechanical)인 측면에서 적정성, 효율성 및 신뢰성에 대하여 평가하고 있다. 이에 따라 상수관망의 신뢰도 및 효율성에 대한 중요성을 파악하고 이에 대한 집중적 연구가 진행되고 있으며 저수조에 유입된 상수의 체류시간(detention time) 증가로 인한 수질악화의 평가, 소망용수의 공급을 위한 관망의 과다산정으로 인한 과도한 수령(water age)의 문제, 수압의 시·공간적 분포의 평활화(smoothing), 누수방지를 위한 관로와 부속물의 구조적 안정성 보장, 신뢰성 향상을 위한 수원으로부터 수요자에 이르는 경로의 다양성 등의 전체적인 상수관로의 문제에 초점을 맞추어 연구되고 있다. 이러한 상수관망의 종합적인 연구를 통해서 수요자의 만족도 개선을 최종적인 목표로 신뢰도에 기초한 관로유량, 절점압력 등이 해석하고 있다.

상수관망의 적절한 신뢰도의 보장을 위해 기존에는 폐합형 상수관로를 구성함으로써 신뢰도를 어느 정도 보장하고자 노력하였으나 객관적인 신뢰도의 크기를 나타낼 수 없었기 때문에 신뢰의 정도를 수학적으로 나타낼 수 있는 신뢰도 해석모형의 개발을 위해 여러 가지 기법들이 제안되었다(Goulter, 1995). 특히 상수관망의 비용최적화를 위해 설계과정에서 신뢰도 개념을 포함시킴으로써 기존의 최적화 결과로서 제안되던 수지형 관망을 지양하고 설계초기에 신뢰도에 기초한 상수관망이

될 수 있는 신뢰도 기반최적화 모형(reliability-based optimization Model)을 개발하고 있다(Lansey 와 Mays, 1989). 특히 시스템의 수리적 고장(hydraulic failure)과 기계적 고장(mechanical failure)을 고려한 시스템의 설계기법을 연구하고 있으며 화재발생시 관로 내 흐름(fire flow) 및 이와같은 흐름과 조합된 기계적 및 수리적 고장시 시스템의 거동을 해석하고 신뢰도를 산정함으로써 전체 상수관망의 효율성을 판단하고 시스템의 파괴시 발생할 수 있는 시나리오를 분석하여 이에 대한 피해를 최소화하고자 목적하고 있다(Duan 등 1990, Xu 와 Goulter, 1999).

국내의 상수관망의 연구로는 최적화 기법을 이용한 상수관망 건설의 최소비용을 위한 관망의 최적화 연구가 주로 이루어졌으며 박재홍과 한건연(1996)이 선형화 기법을 이용한 정상상태 유량해석을 위한 모형을 Frontal 기법을 도입하여 개발하였으며 박재홍과 한건연(1998)은 상수관망의 기하학적 특성의 해석을 위해 도하이론을 접목하여 상수관망을 해석하는 기법을 제시하였다.

관망의 신뢰도 개념에 의한 연구사례로는 윤재홍(1993)에 의해 Performance Index 에 의한 상수도 배수관망의 신뢰도 분석이 발표된 바 있으나 추가적인 연구는 없는 상태이며 발표된 논문 또한 관로 자체에 대한 신뢰도를 가정하고 유량을 고려한 네트워크 시스템의 신뢰도를 산정하였고 박재홍(1999)은 상수관망시스템의 신뢰도해석을 도입 필요성을 제기하고자 선진국들의 신뢰도 해석 연구결과를 소개하였을 뿐 상수관망의 신뢰도 해석 및 효율성 판단, 노후관로의 대체에 관련된 연구는 거의 전무한 상태이다.

국외의 연구개발 사례에서 보듯이 선진국에서는 상수관망에 대한 안정성 및 효율성에 대한 관심이 반영되어 이에 대한 연구개발 및 유지관리 기술의 발전이 급속히 이루어졌으며 이러한 기술의 발전은 양질의 용수의 공급 및 배분기능을 원활히 수행할 수 있는 원동력이 되고 있다. 그러나 국내에서는 관망의 전문가 시스템 및 진단시스템 구축을 위한 상수관망의 수리학적 해석 및 신뢰도 해석 분야의 연구는 거의 이루어지지 않고 있으며 기존의 연구도 최적화기법을 이용한 비용최소화 분야에 주로 이루어지고 있어 신뢰도 해석을 통한 상수관망의 안정성 분석 및 관망의 유지관리를 위한 프로그램의 개발이 시급한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 관망 시설의 진단 및 관리를 효율적으로 수행할 수 있도록 관망의 수리적 및 기

계적 신뢰도를 통합적으로 해석할 수 있는 컴퓨터 계산 모형을 개발하고자 한다. 개발된 신뢰도 해석모형을 이용하여 수리적 및 기계적 관망 파괴에 대한 상수관망의 신뢰도를 계산하고 관망 구성물의 구성상태에 대한 적절성 평가 및 관망 구성물의 고장에 따른 관망의 결과를 파악함으로써 관망 운영자가 좀 더 편리하고 과학적으로 관망을 운영할 수 있도록 한다.

## 2. 상수관망의 신뢰도 해석기법

### 2.1 신뢰도의 정의

상수관망의 신뢰도 해석에는 두 종류의 고장 즉 기계적 고장과 수리적 고장이 연관이 있다. 기계적 고장은 예상치 못한 정전, 사고 등으로 인해 발생하는 관로 파괴, 펌프 파괴, 동력공급의 중단, 유량조절 밸브 파괴 등과 같은 상수시스템 구성물의 고장으로 야기된다. 수리적 고장은 하나 혹은 여러 수요절점에 부적절하게 공급되어지는 유량과 압력수두로 인해 발생하는 것으로 절점에서의 수요량과 압력수두의 변화, 부적절한 관경, 노후된 관로에서의 변화된 조도계수, 불충분한 펌프용량, 배수지의 저장용량의 부족 혹은 이런 원인들의 조합으로 인해 발생할 수도 있다. 관망 시스템의 신뢰도는 기계적 혹은 수리학적 신뢰도와 같이 단독으로는 관망의 전체적 신뢰도를 판단할 수 없기 때문에 시스템의 수요절점에서 충분한 압력수두를 가지고 만족스러운 유량을 공급받을 수 있는 확률로써 신뢰도를 정의함으로써 수리학적 및 기계적 고장에 대한 상수관망 시스템의 전체적 신뢰도를 나타낼 수 있다.

### 2.2 신뢰도 산정기법

#### 2.2.1 절점신뢰도 (nodal reliability)

절점신뢰도(Rn)은 주어진 절점에서 요구되는 압력수두로 충분한 유량을 공급받을 수 있는 확률이다. 그러므로 절점신뢰도는 주어진 절점에서 만족되어지는 유량과 압력수두의 결합확률이다. 그러나 주어진 절점에서 유량과 압력수두는 항상 독립적이 아니기 때문에 결합확률을 수학적으로 유도하고 계산하기는 어렵다. 본 연구에서 도입된 방법은 유량수요가 만족되어지는 규정된 최소수두 이상 유지되는 절점수두의 조건부 확률이거나 혹은 그 반대의 경우이다. 즉 절점신뢰도는 식 (1)에서 보여지는 것과 같이 주어진 절점에서 수요량이 충족되는 경우에 공급되어지는 유량의 압력수두(Hs)가 요구되는 최소압력수두(Hd)보다 크거나 같을 확률이다

(Duan 등, 1990).

$$R_n = P[H_s > H_d^l | Q_s = Q_d] \quad (1)$$

$$= \int_0^\infty f_s(H_s) \left[ \int_0^{H_s} f_{d^l}(H_d^l) dH_d^l \right] dH_s$$

여기서,  $f_s()$ 는 공급의 확률밀도함수를 나타내고  $f_{d^l}()$ 는 주어진 절점에서 압력수두의 요구되는 최소압력수두,  $H_d^l$ 는 요구되는 압력수두의 최소한계,  $Q_s$ 는 시스템에 공급되는 유량,  $Q_d$ 는 요구되는 유량을 각각 나타낸다.

#### 2.2.2 시스템 신뢰도(system reliability)

절점신뢰도는 상수관망 시스템의 신뢰도를 개략적으로는 나타낼 수 있으나 관망의 전체적인 영향을 나타내기 위해 시스템 신뢰도 같은 전체적 지표를 사용하는 것이 편리하다. 그러한 종합된 지표는 계산된 절점신뢰도를 이용하여 결정할 수 있으며 다음과 같이 세가지 시스템 신뢰도가 고려될 수 있다. 첫 번째로 식 (2)와 같이 전체 관망에 대해 절점신뢰도의 최소값(Rsm)을 시스템신뢰도로 결정하는 방법이다.

$$R_{sm} = \min\{R_{ni}\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, I \quad (2)$$

여기서,  $R_{ni}$ 는 절점 i에서 절점신뢰도(Rn)이고 I는 관심되는 수요절점의 수이다.

두 번째 시스템신뢰도는 절점신뢰도의 산술평균( $R_{sa}$ )이 될 수 있다.

$$R_{sa} = \frac{\sum_{i=1}^I R_{ni}}{I} \quad (3)$$

세 번째 방법은 절점에서의 유량공급에 비해 가중치가 주어지는 모든 절점신뢰도 대한 가중평균인 유량가중평균치로서 시스템의 신뢰도를 정의할 수 있다.

$$R_{sw} = \frac{\sum_{i=1}^I R_{ni} \bar{Q}_{si}}{\sum_{i=1}^I R_{ni}} \quad (4)$$

여기서,  $\bar{Q}_{si}$ 는 절점 i에서의 용수공급량의 평균값이다.

### 3. 신뢰도 해석 모형의 개발

#### 3.1 수리적 신뢰도 해석모형

상수관망 설계에서 각 절점에서 장래의 용수 사용량을 예측하는 것은 매우 어렵다. 심지어 기존의 상수관망 시스템에 대해서도 절점에서의 수요량은 새로운 수요자 혹은 기존 사용자들의 수요증가 등과 같은 많은 요소들로 인해 변한다. 이런 요소들의 임의성 혹은 불확실성으로 인해 수요와 압력수두들은 임의변수(random variable)로 고려될 수 있다. 이러한 임의변수로 나타낼 수 있는 인자들은 물 수요량, 절점수두, 관로조도 등이 있다. 이러한 임의변수인 물 수요량의 인한 수리학적 불확실성은 주어진 일정기간 동안 물 수요량과 압력수두의 변화를 나타낼 수 있는 적절한 확률분포형과 불확실도를 대표하는 인자들을 포함하여 해석함으로써 나타낼 수 있다. 마찬가지로 조도계수 역시 장기간에 걸쳐 변화하는 불확실성을 가진 인자로 포함할 수 있으므로 난수발생모형에서 불확실한 인자에 대해 적절한 분포형을 할당함으로써 불확실도를 포함하여 해석할 수 있다.

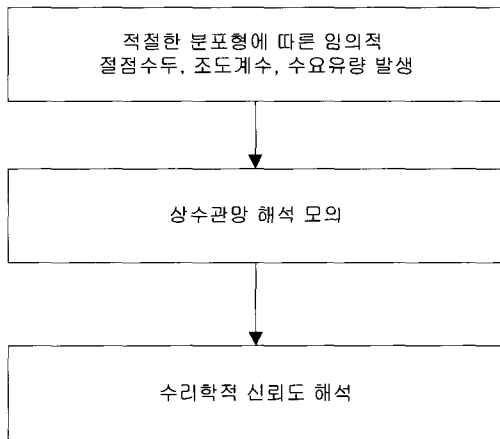


그림 1. 수리학적 신뢰도해석 흐름도

상수관망 시스템의 신뢰도는 시스템이 요구되는 압력수두로 충분한 필요수량을 제공할 수 있는 확률로 정의되어진다. 관로의 조도, 수요유량, 요구되어지는 압력수두의 임의적인 특성으로 인하여 상수관망 시스템 신뢰도의 산정은 불확실성을 포함하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 Monte Carlo 모의를 사용하여 상수시스템에서의 절점과 시스템의 수리학적 신뢰도 산정방법을

제시하였다.

본 기법에 대한 기본적 흐름도가 그림 1에서 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 수리적 신뢰도해석은 3 가지 주요한 구성단계로 이루어진 반복적 모의에 기초하고 있다. 수리적 고장은 Monte Carlo 모의에 기초하여 수요량 Qd, 압력수두 Hd와 관로조도에 대한 Hazen-Williams 계수 C의 임의변수에 대한 값을 발생시켜 수행된다. 발생되어진 Qd, Hd와 C의 값에 대한 각 집합에 대해 유량해석 모형은 상수관망 시스템 전체의 절점에 대해 공급되어지는 압력수두를 결정하기 위해 사용되어진다. 주어진 수의 반복계산후 절점 혹은 시스템의 신뢰도가 계산된다.

#### 3.2 기계적 신뢰도 해석모형

주어진 상수관망에서 기계적 고장이 일어날 관망 구성물을 예측하는 것은 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 각 구성물의 고장이 발생할 경우에 대한 모든 사상의 모의를 수행하여 신뢰도를 산정하였다. 각 구성물의 고장으로 인한 관망 시스템의 신뢰도를 산정하기 위해 시스템내의 각각의 구성물을 순차적으로 파괴시켜 각 구성물의 파괴에 대한 관망의 정상상태에 대해 해석하고 절점수두값을 이용하여 신뢰도를 산정하였다. 이것은 상수관망의 관로파열의 경우 파열이 발생할 관로를 예측할 수 없기 때문에 모든 관로가 파괴가능성이 있는 것으로 가정하여 각 관로파열에 대한 결과를 해석하여 시스템 전체에 미치는 영향을 파악하고 이를 이용하여 신뢰도를 해석하였다. 이러한 방법은 수리적 신뢰도 해석기법과 같이 반복적 기법에 기초하고 있지만 수리적 신뢰도 해석은 발생할 수 있는 사상의 수가 무한대이지만 기계적 파괴의 사상의 수는 확률적으로 발생 가능성이 희박한 2개 이상의 구성물의 동시적인 파괴를 제외하면 기계구성물의 수와 동일하기 때문에 발생할 사상의 수가 한정되어 있어 전수모의가 가능하다 (Jowwit, 1995). 모든 구성물의 순차적 파괴를 통한 신뢰도해석은 본 연구의 유량해석모형에 도입되는 폐합회로, 펌프, 밸브 등의 다양한 자료가 요구된다. 그 중에서도 폐합회로자료는 각 관로의 고장시 관로 고장을 고려한 관망의 유량공급 능력 해석을 위해 새로 구성해야 되는 어려움이 있다. 그러나 본 연구에서는 도입된 폐합회로 구성 알고리즘으로 인해 폐합회로 자료입력 과정이 자동화 될 수 있어 작업자가 편리하게 파괴 영향을 해석할 수 있다(박재홍과 한건연, 1998). 도입된 폐합회로 구성기법은 자동으로 에너지방정식의 적용이

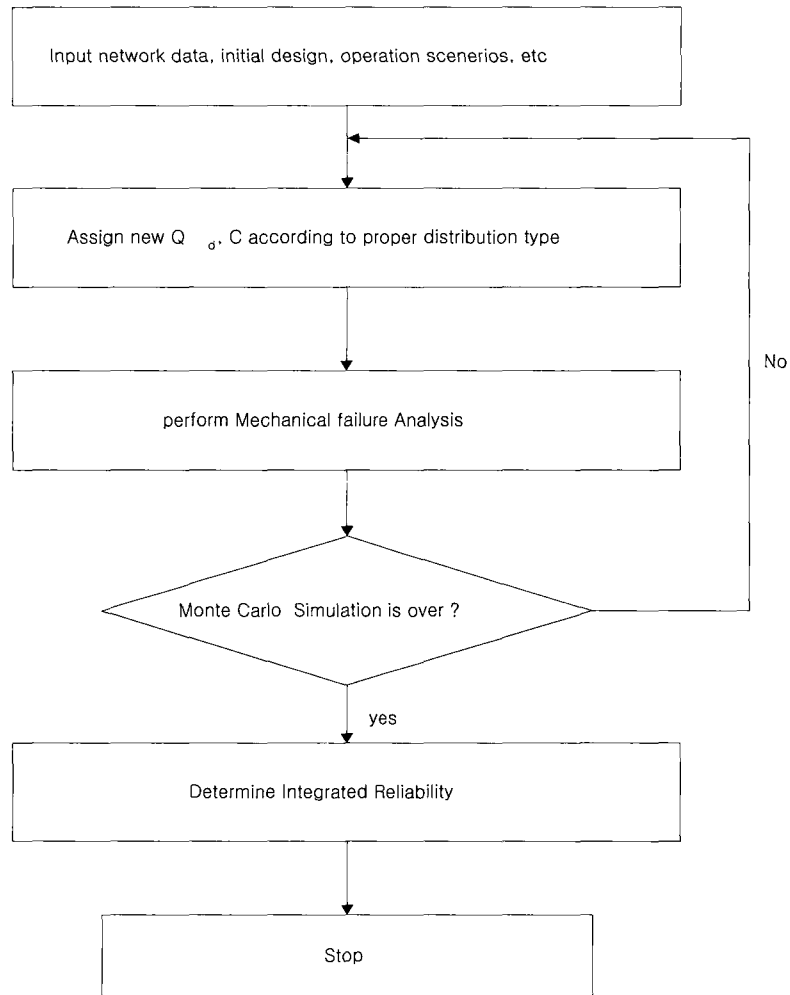


그림 2. 통합신뢰도 해석을 위한 흐름도

이루어지는 폐합회로를 구성하는 알고리즘을 자체내에 보유하고 있어 관로의 파괴효과를 고려하기 위해 폐합회로 구성시 순차적으로 파괴된 관로를 관망구성에서 제외시켜 폐합회로를 구성하고 유량 모의를 실시하여 파열관로 영향을 상수관망해석에 고려할 수 있도록 하였다.

### 3.3 통합 신뢰도 해석모형

위에서 설명된 수리학적 및 기계적 신뢰도 산정 기법이 결합된 통합적 신뢰도 산정모형을 개발하였다. 먼저 불확실성을 가진 수리학적 인자들에 대해 적절한 분포형에 발생된 불확실성을 가진 값이 주어지면 그 인자

들을 이용하여 주어진 기계적 조건들을 이용하여 기계적 신뢰도 해석이 수행된다. 즉 수리학적 불확실성에 기계적 고장에 대한 해석이 부가되어진다. 이 과정이 Monte Carlo 모의기간동안 수행되어지게 되며 계산과정에 대한 알고리즘은 다음과 같다.

1. 적절한 분포형을  $Q_d$ ,  $H_d^l$  과  $H_d^u$  그리고 C에 할당한다.
2. Monte Carlo 모의를 통하여  $Q_d$  와 C 값을 발생시킨다.
3. 발생된  $Q_d$  와 C 값을 이용하여 시스템내의 모든 구성물의 고장의 경우에 적용한다.
4.  $Q^d$  가 만족되어졌다고 가정하고 유량해석모형을

이용하여 모든 절점에서 Hs를 계산한다.

5. 1, 2, 3, 4, 과정을 Monte Carlo 모의기간 동안 반복한다.
6. 절점 및 시스템 신뢰도를 계산한다.

위에서 주어진 알고리즘을 이용한 본 연구모형의 흐름도가 그림 2에서 주어졌다. 그림 2의 흐름도에서 나타난 바와 같이 통합 신뢰도해석은 수리적 신뢰도가 한

번 모의될 동안 기계적 신뢰도 해석이 각각 수행되도록 모형이 구성되어 수리적 불확실성이 주어지면 기계적 고장으로 발생하는 상수관망의 불확실성이 관망에 부가되어 해석될 수 있도록 하였다.

#### 4. 신뢰도 해석모형의 적용

앞 장에서 개발된 신뢰도 해석모형을 이용하여 실제 관망시스템에 대한 신뢰도 해석을 실시하였다. 그림 3

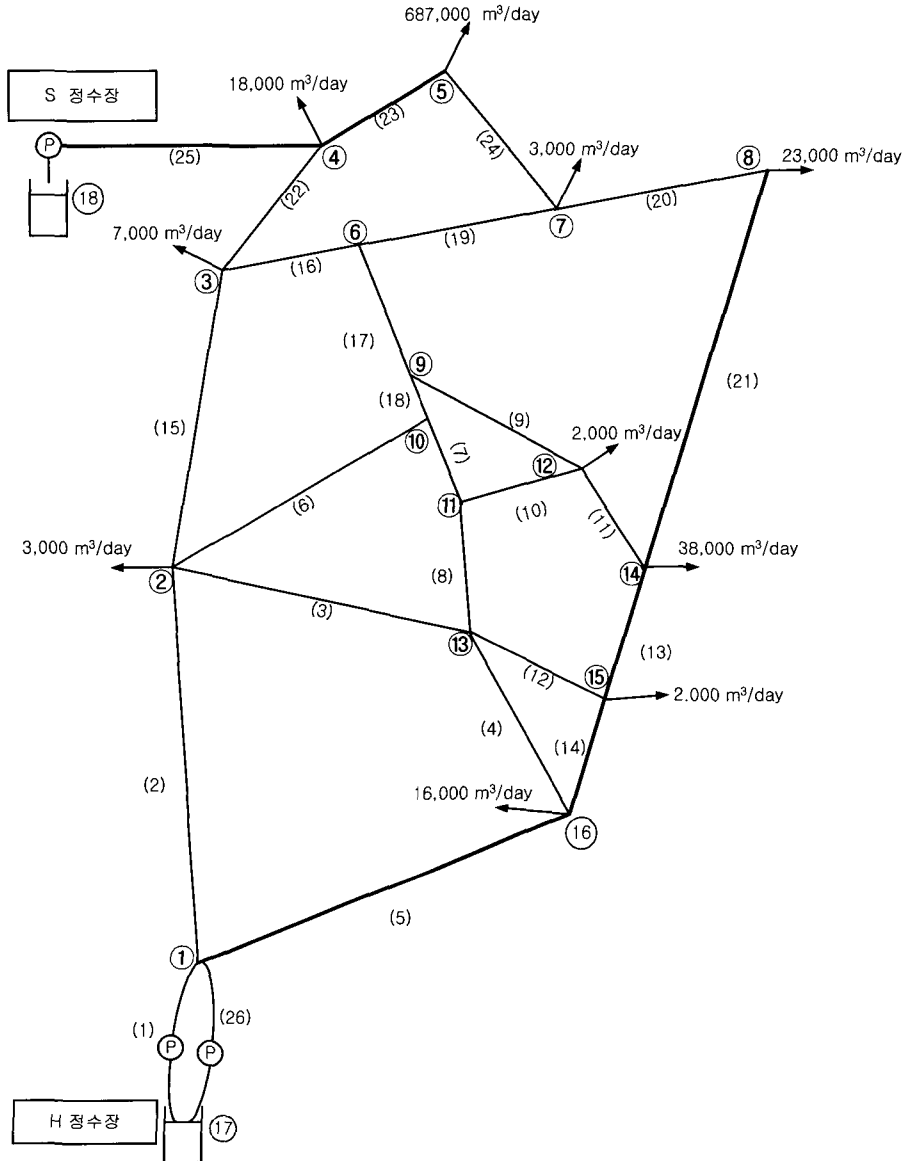


그림 3. 통합 신뢰도 해석모형의 적용을 위한 관망시스템

과 같이 본 연구모형이 적용된 관망은 절점 16 개, 관로 26 개, 고정절점수두 2 개로 이루어진 상수관망이다 (박재홍과 한건연, 2001). 대상 상수관망은 수차례에 걸쳐 확장 및 보수되었고 신뢰도 해석과 같은 신뢰성 증대를 위한 설계와 시공은 이루어지지 못하였다. 이러한 대상 관망에 대해 본 연구모형을 이용하여 수리적, 기계적, 통합신뢰도 해석이 수행되었다.

#### 4.1 수리적 신뢰도 해석

주어진 상수관망에 대해 본 연구모형을 이용하여 수리적 신뢰도해석이 수행되었다. 본 연구에서는 절점수요량을 일정한 값으로 가정하여 관망조도계수를 임의변수로 고려하여 수리적 신뢰도 해석을 수행하였다. 관망조도계수에 대한 적절한 분포연구가 현재까지 이루어지지 않았고 이에 관한 자료도 불충분하여 관망조도계수는 정규분포로 가정하였고 변동계수를 0.05, 0.1, 0.2로 설정하였다. 본 모형을 이용한 신뢰도 해석 결과 식 (1)을 이용하여 계산한 절점신뢰도는 표 1과 같고 이를 이용해 계산된 시스템 신뢰도는 그림 4와 같다. 그림 4에 나타난 바와 같이 절점신뢰도 값중에 최소값인  $R_{sm}$  은 그래프의 가장 아래에 위치하고 있으며 유량가중 평균된  $R_{sw}$  는 산술평균값  $R_{sa}$  보다 낮은 신뢰도 값을 가지고 있다. 이는 수요유량이 시스템 외부로 유출됨에 따라 수요절점에서 수요유량이 존재하지 않는 절점보다 낮은 압력수두를 나타내기 때문이다. 또한 그림 4와 표 1에서 보여지듯이 변동계수(Cv)가 증가할수록 신뢰도는 감소되고 있으며 특히 절점 5와 같은 시스템내의 절점중 가장 낮은 신뢰도를 나타내는 한계적 절점(critical junction)에서는 불확실도가 증가할수록 신뢰도의 감소는 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 관망의 한계적 절점에서 압력수두 및 용수공급의 관리가 더욱 중요하다는 것을 나타내며 상수관망의 사용연한이 증가할수록 시스템의 변동계수가 커지게 되고 불확실도가 증가할수록 시스템의 신뢰도는 감소됨에 따라 오래된 시스템일수록 신뢰도가 감소한다는 것을 보여준다.

이와 같은 결과를 통하여 수리적 불확실성이 포함된 관망의 임의적 변수가 존재할 경우 수리적 불확실성은 임의변수의 적절한 분포형에 따라 변동계수를 도입하여 불확실성을 모의할 수 있으며 임의적 변수로 인한 관망의 신뢰도 해석을 위해 본 연구모형이 적용될 경우 합리적 수리적 신뢰도 값을 산정하고 있음을 알 수 있었

다.

#### 4.2 기계적 신뢰도해석

기계적 신뢰도 해석을 위해 조도계수는 일정한 값으로 설정하였고 각 관망 구성물에 대한 순차적 고장이 발생한다고 가정하였다. 관망 구성물은 펌프, 밸브, 관로 등 다양하게 구성되어 있으나 펌프의 경우는 펌프장 내에 예비펌프가 항상 배치되어 있어 충분히 신뢰도가 보장되고 있으며 밸브의 경우 밸브자료 및 밸브설치 위치등의 자료가 충분치가 못하다. 그러므로 본 연구에서는 관로파손이나 폐쇄의 경우로 인해 발생하는 관로 고장으로 인한 관망의 신뢰도만을 산정하였다. 각 관로에 대한 조도계수 C 값은 관경에 대한 대표조도값을 이용하였으며(김주환과 최두용, 1996) 유량해석시 도입된 선형화기법의 적용을 위해 도학(graph theory)을 이용하여 관로의 순차적 제거를 통해 관로폐쇄 및 고장효과를 모의하였다. 도입된 도학으로 인해 관로 제거는 자동적으로 이루어져 관로고장으로 인한 기계적 신뢰도의 산정은 일괄적으로 처리될 수 있었다. 기계적 신뢰도 해석결과 각 관로의 제거로 인한 각 절점에서의 압력수두와 식 (1)을 이용한 절점신뢰도는 표 2와 같고 시스템신뢰도  $R_{sm}$ ,  $R_{sa}$ ,  $R_{sw}$  는 각각 80.77, 92.30, 88.85 로 나타났다. 표 2에서 보는 바와 같이 절점신뢰도는 관로 고장으로 인해 일부 절점에서 매우 낮은 신뢰도를 나타내고 있으며 시스템 신뢰도 역시 수리적 시스템 신뢰도보다 낮게 나타났다. 표 2의 일부 절점에서 압력수두값이 음(-)의 값을 나타내는 것은 식 (1)을 이용하여 절점수두를 계산할 경우 공급유량은 수요유량을 충족할 수 있도록 충분히 공급되어야 한다는 제약조건 하에서의 압력수두값을 나타내기 때문으로 실제 관망에서는 압력이 감소하면 수요량이 감소하지만 본 연구에서는 수요량이 일정하다고 가정하였다. 표의 결과와 같이 일부 관망에서 신뢰도가 낮게 나타나고 있는 것은 현재 이루어지고 있는 상수관망의 설계는 폐합관로를 이용한 신뢰도를 부여하고자 노력하고 있으나 객관적 신뢰도를 산정할 수 있는 기법이 개발되지 않았고 관로 고장 및 폐쇄로 인해 일부 관로에서 유량을 공급하지 못할 경우에 대한 해석이 불가능하기 때문에 작업자의 임의적 관로배치에 의한 설계가 이루어지고 있고 관로 고장 및 폐쇄와 같은 구성물의 고장시 이를 대체 할 수 있는 적절한 우회경로 및 여유관경이 주어지지 않은 것으로 판단된다.

본 모형을 이용하여 관로 고장으로 인한 기계적

표 1. 수리적 신뢰도 해석결과로 인한 절점신뢰도

(단위 : %)

Cv \ 절점	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.05	100.0	100.0	99.7	99.7	93.6	100.0	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
0.1	100.0	100.0	92.0	90.7	75.9	100.0	92.9	97.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
0.2	100.0	100.0	72.8	72.0	58.0	95.9	71.6	81.3	97.2	97.5	97.5	97.2	97.9	97.0	97.9	98.2

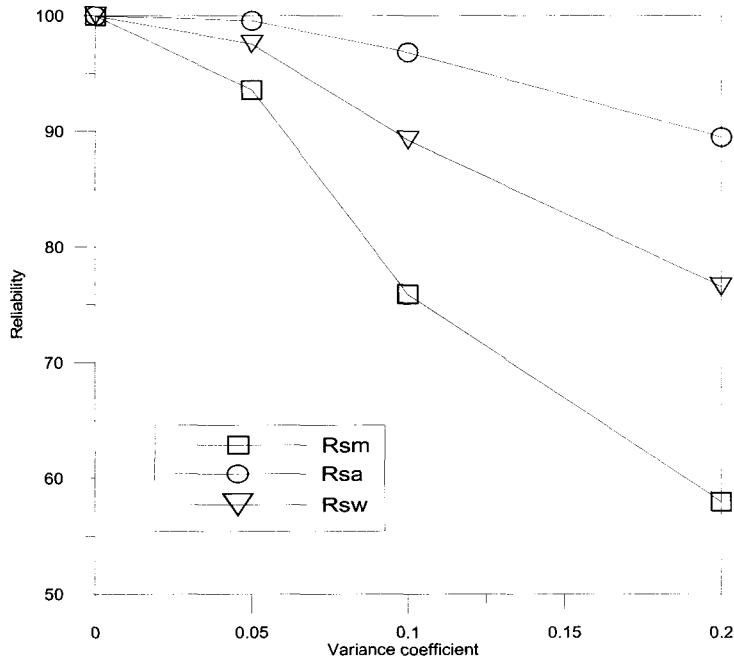


그림 4. 적용관망에 대한 시스템 신뢰도

신뢰도해석의 경우에도 순차적 구성물의 고장으로 인한 관망의 유량 공급에 대한 영향을 모의할 수 있었고 이 결과를 이용하여 기계적 신뢰도를 합리적으로 산정할 수 있었다. 이를 통해 관로의 다른 구성물 또한 같은 방법으로 모의될 수 있음을 파악할 수 있었고 본 모형에 추가적인 구성물의 고장(failure)에 대한 정보가 주어질 경우 역시 추가적인 구성물로 인한 기계적 신뢰도 해석이 적용 판단되었다.

### 4.3 통합적 신뢰도 해석

그림 2의 흐름도에서 보인 해석과정을 이용하여 수리적 및 기계적 신뢰도가 통합된 신뢰도가 산정되었다. 먼저 변동계수  $Cv = 0.05, 0.1, 0.2$  인 정규분포형을 따르는 임의적인 조도계수가 각 관로에 할당되었고 이

조도계수를 가진 관망에 대해 관로의 순차적인 고장모의를 통하여 통합적 신뢰도 해석이 수행되었다. 본 모의는 Pentium-4 500Mhz 노트북 컴퓨터에서 수행되었고 계산시간은 약 87 초 정도이었다. 이와 같은 계산시간은 수리적 모의를 위한 Monte Carlo 모의 1000회, 관망 구성물의 파괴모의를 위한 기계적 신뢰도 모의가 26 회가 수행되며 유량해석모의는 Monte Carlo 모의 1 회당 기계적 신뢰도 모의가 26 회가 이루어져 총 26,000회의 모의 횟수를 감안하면 비교적 빠른 시간에 본 신뢰도 해석이 수행되었다고 판단된다. 통합신뢰도해석 결과는 그림 5와 같다. 변동계수  $Cv = 0.0$  인 경우는 기계적 신뢰도해석만 있는 경우이다. 수리적 불확실성이 존재하는 경우 기계적 신뢰도만 있는 경우에 비해 수리적 불확실성으로 인해 시스템의 신뢰도가



표 2. 기계적 신뢰도 해석결과로 인한 절점수두 및 절점신뢰도

(단위 : m, %)

절점 과과 관로	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	56.1	49.6	31.9	31.9	27.3	35.0	28.0	28.7	35.6	35.7	35.7	35.4	36.6	35.1	37.2	39.9
2	87.0	48.8	42.3	42.3	38.8	51.6	41.6	43.9	53.1	53.2	53.6	53.5	54.5	53.5	57.1	61.6
3	86.0	79.6	46.6	46.4	43.0	57.2	46.1	48.7	58.9	59.1	59.1	58.8	60.0	58.6	61.4	65.0
4	86.0	77.2	46.5	46.3	42.9	57.0	46.1	48.7	58.7	58.8	58.8	58.7	59.1	58.7	62.0	66.2
5	100.7	52.7	-60.3	-58.6	-72.3	-95.5	-92.2	-104.3	-99.2	-99.3	-102.5	-103.9	-102.5	-106.0	-106.1	-106.1
6	86.2	82.1	46.0	45.8	42.3	55.7	45.2	47.6	57.2	57.3	57.6	57.3	59.1	57.3	60.3	64.2
7	85.9	77.5	47.0	46.8	43.4	58.0	46.7	49.4	59.7	59.9	60.2	59.7	61.4	59.5	62.2	65.7
8	86.1	77.7	46.3	46.1	42.7	56.5	45.8	48.3	58.1	58.2	58.2	58.2	66.1	58.2	62.0	66.1
9	85.9	77.5	47.0	46.8	43.4	58.1	46.7	49.3	59.9	60.1	60.1	59.7	61.3	59.4	62.2	65.7
10	85.9	77.9	46.9	46.7	43.3	59.4	46.4	48.9	61.4	62.1	62.5	58.8	63.0	58.7	61.9	65.6
11	85.9	78.3	47.0	46.7	43.2	61.6	46.1	48.5	63.9	64.1	64.1	64.1	64.3	58.0	61.5	65.4
12	85.9	77.4	46.9	46.8	43.4	58.0	46.7	49.3	59.7	60.0	60.0	59.7	61.0	59.4	62.3	65.7
13	92.5	73.4	14.9	14.8	7.8	17.6	6.7	6.1	18.3	18.8	18.8	14.0	32.7	7.8	83.7	83.9
14	93.6	71.3	7.4	7.5	.1	7.2	-1.6	-2.6	7.3	7.6	7.4	3.6	16.0	-1.3	-1.3	86.8
15	86.5	80.8	44.5	44.6	41.4	57.7	45.3	48.5	59.7	60.0	60.0	59.7	61.3	59.3	62.2	65.8
16	86.5	78.1	44.5	44.6	41.6	61.7	46.1	49.6	61.9	62.0	61.9	61.4	62.9	60.9	63.6	66.9
17	86.6	78.3	44.0	44.1	41.0	44.1	45.1	49.1	62.5	62.6	62.5	61.9	63.5	61.3	63.9	67.3
18	86.0	77.7	46.6	46.5	43.1	55.7	46.5	49.3	57.1	61.0	60.7	59.8	61.8	59.5	62.4	65.9
19	86.0	77.6	46.7	46.4	43.0	59.1	46.0	49.0	60.2	60.4	60.4	60.0	61.6	59.7	62.5	65.9
20	88.9	80.9	35.2	34.0	28.5	63.0	28.5	64.4	67.7	68.0	68.2	68.0	69.1	68.0	70.1	72.7
21	92.9	85.6	15.5	12.3	3.1	68.5	-2.2	-6.8	77.6	78.2	78.8	78.8	79.4	78.9	80.1	81.8
22	86.2	78.3	54.7	45.7	42.5	59.5	46.3	49.3	60.6	60.8	60.8	60.4	61.9	60.0	62.8	66.2
23	76.0	67.6	67.7	73.9	-93.7	33.4	-46.5	-14.6	32.8	32.8	32.3	30.8	34.1	29.0	34.6	41.2
24	88.9	80.9	35.2	33.9	28.3	65.0	63.7	63.7	68.0	68.3	68.3	68.1	69.3	68.0	70.1	72.8
25	63.7	41.5	-110.4	-119.0	-119.0	-14.6	-74.1	-43.1	-1.1	.0	.4	-2	3.7	-4	7.1	16.4
26	56.1	49.6	31.9	31.9	27.3	35.0	28.0	28.7	35.6	35.7	35.7	35.4	36.6	35.1	37.2	39.9
절점 신뢰도	100.0	100.0	92.3	92.3	88.5	92.3	80.8	80.8	92.3	96.2	96.2	92.3	96.2	88.5	92.3	96.2

감소하고 있으며 수리적 신뢰도의 경우와 마찬가지로 변동계수가 증가할수록 신뢰도의 감소는 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 그림 6에서는  $C_v = 0.1$  일 경우 산술평균 시스템신뢰도에 대한 기계적 신뢰도, 수리적 신뢰도, 통합 신뢰도를 나타내었다. 기계적 신뢰도는 수리적 불확실성을 나타내는 변동계수와 관계가 없어 일정한 값을 나타내고 있으며 수리적 신뢰도는 변동계수에 증가함에 감소하고 있다. 그러나 통합신뢰도는 기계적 신뢰도에 수리적 요소가 부가됨에 따라 급격하게 신뢰도가 감소하고 있으며( $C_v = 0.05$ ) 전반적인 신뢰도 감소량도 수리적 신뢰도 감소량에 비해 큰 값을 나타내고

있다. 이것은 기계적 불확실도와 수리적 불확실도의 결합된 영향으로 전체 관망의 큰 신뢰도 감소를 가져왔다고 판단된다.

통합신뢰도 해석모의 결과를 통하여 본 모형을 이용한 관망의 통합적 신뢰도 해석 역시 합리적으로 해석이 가능함을 보여주고 있었으며 기존에는 정량적으로 나타낼 수 없었던 상수관망의 신뢰도를 정량적으로 나타낼 수 있었다. 이것은 본 모형이 상수관망의 설계 및 진단 시 합리적인 관망의 신뢰수준을 나타내는 데 사용될 수 있으며 관망 관리자가 관망의 신뢰수준을 파악하는데 자료를 제공함으로써 효율적인 관망관리가 이루어 질

수 있을 것이라고 기대된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 상수관망의 신뢰도해석을 위해 수리적 신뢰도와 기계적 신뢰도를 통합적으로 해석할 수 있는 통합신뢰도 해석모형을 개발하였다. 수리적 신뢰도는 불확실성을 가진 변수들에 대하여 적절한 변동계수를 가진 확률분포형을 적용시켜 임의변수로 고려하였고 기계적 신뢰도는 관망의 각 구성물에 대해 순차적 고장을 발생시켜 각 고장에 대한 영향을 해석하여 신뢰도를 산정하였다. 본 연구모형을 실제 관망에 적용시킨 결과는 다음과 같다.

1. 실제관망에 대해 수리적 신뢰도 해석결과 변동계수가 클수록 신뢰도가 감소하고 있으며 이것은 상수관망의 사용연한이 증가할수록 신뢰도가 감소한다는 것을 나타낸다. 또한 관망의 사용연한의 증가에 따라 한계절점(critical junction)에서의 신뢰도가 더욱 크게 감소하여 한계절점의 상수공급의 유지관리가 시스템의 사용기간이 증가하면 더욱 중요하다는 것을 보여주었다.
2. 기계적 신뢰도 해석결과 일부 절점에서 매우 낮은 신뢰도를 나타내고 있었고 이것은 기존의 관망설계시 관망 구성물의 파괴에 대한 고려없이 작업자의 임의적인 설계로 인한 영향으로 판단되었고 폐합관로를 통한 신뢰도를 가진 관망이 될 수 있도록 설계하고 있으나 객관적인 설계방법이 없이 임의적으로 구성된 폐합관로는 신뢰도 증가에 크게 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있었다.
3. 통합신뢰도 해석결과 기계적 혹은 수리적 신뢰도 해석과 같은 단일의 신뢰도 해석보다 통합신뢰도 값이 기계적 불확실성과 수리적 불확실성의 복합된 결과로 인해 크게 감소하고 있었으며 밸브나 펌프의 고장 및 수요유량의 변동과 같은 또 다른 불확실한 요소가 발생할 경우 신뢰도는 더욱 감소할 것으로 예상된다.
4. 본 연구모형의 실제관망에 대한 적용결과 본 모형은 실제관망에 대한 불확실한 요소를 고려한 신뢰도를 잘 모의하고 있었다. 앞으로 신뢰성있는 관망 설계 및 기존 관망의 신뢰도 판정에 본 모형이 적용된다면 기계적 및 수리적으로 객관성이 있는 신뢰도를 가진 상수관망의 건설 및 유지관리가 될 수 있다고 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원(과제번호: KRF-2001-003-E00416)에 의하여 연구되었으며 이에 깊이 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

김주환, 최두용(1996), “최적화기법을 이용한 경제적 관망설계연구(1차년도),” 한국수자원공사 수자원연구소 연구보고서.

박재홍, 한건연 (1996). “Frontal 기법을 이용한 상수관망의 흐름해석 모형.” 한국수자원학회 논문집, 제 29권, 제1호, pp. 129-139.

박재홍. (1999), “상수관망에서의 신뢰도해석을 위한 해석 및 모의모형”, 한국수자원학회지, Vol. 32, No. 1, pp. 95-104.

박재홍, 한건연. (1998). “상수관망해석을 위한 도학의 적용.” 한국수자원학회논문집, Vol. 31. No. 4, pp. 439-448

박재홍, 한건연(2001) “상수관망의 수격현상 모의를 위한 외부 유출입 유량의 효율적 해석”, 한국수자원학회논문집, Vol 34, No. 5, pp. 427-438.

윤재홍. (1993). “Performance Index에 의한 상수도 배수관망의 신뢰도 분석”, 대한상하수도학회지, V -ol. 7. No. 1. pp. 25-35.

Duan, N., Mays, L.W., and Lansey, K. E. (1990). “Optimal reliability-based design of pumping and distribution systems.”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116(2), 249-268.

Goulter, I. (1995) “Analytical and simulation models for reliability analysis in water distribution systems.”, *Improving efficiency and reliability in waer distribution systems*, E. Cabrera and A. F. Vela, eds., Kluwer Academic Publishers, London, U.K., 235-266.

Jowwit, P. W. (1995), “Effects of Pipe Failures on Water Distribution Network”, in *Improving Efficiency and Reliability in Water Distrubution Systems*, ed E. Cabrera and A. F.Vela. Kluwer Academic Publishers.

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.
- Xu, C., Goulter, I. C. (1999), "Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 125, No. 6. pp. 352-362.
- (논문번호:02-83/접수:2002.10.12/심사완료:2003.01.30)