

상수관망의 신뢰도 기반 최적설계

Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Network

박재홍*, 한건연**1)
PARK Jae Hong, HAN Keun Yeon

요 지

본 연구에서는 상수관망의 신뢰도 기반 최적화설계에서 시스템 구성물의 기계적 고장의 영향뿐만 아니라 관로의 수리학적 능력과 절점수요에서의 불확실성이 결합되어 인식할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 수질과 연관된 신뢰도 문제는 고려하지 않았고 단지 수량의 향으로 수요자들의 요구량을 충족시키기 위해 급수관망의 공급능력을 고려하였다. 수량의 관점에서 관망의 신뢰도의 측정은 절점 수요량들이 항상 만족되어진다고 가정한 상태에서 불충분한 수두의 정도를 이용한다. 따라서 절점신뢰도는 공급되는 절점수두가 미리 규정된 최소수두를 상회하거나 충족시키는 확률로 정의되어진다. 이 모형에 의해 설계된 상수관망은 정상관망 상태구성(구성물의 고장이 발생하지 않았을 경우)와 미리 정해진 고장 시나리오의 범위와 연관된 관망의 악화된 구성상태 모두에서 절점에서의 임의의 수요량과 임의의 수리학적 능력하에서 상수공급량의 향으로 규정된 수준의 서비스의를 제공할 수 있다. 본 모형은 다양한 관망구성에 대해 상수관망의 신뢰도의 정도를 결정하기 위해서 Monte-Carlo 모의를 이용하였다. 실제 상수관망에 대해 본 연구모형을 이용하여 신뢰도 및 최적화 해석이 수행되었다. 해석결과 본 모형은 합리적으로 관망 전체에 대해 합리적인 범위의 신뢰도를 유지하면서 관망의 건설비용의 최적화가 수행될 수 있었다.

핵심용어 : 신뢰도기반 최적화해석, GA 알고리즘, 상수관망, Monte-Carlo 기법

1) 정회원 · 세명대학교 토목공학과 · E-mail : jhpark@semyung.ac.kr

** 정회원 · 경북대학교 토목공학과 · E-mail : kshanj@knu.ac.kr

1. 서론

지난 수 십년간 상수관망 설계를 위한 최적화 기법과 모형의 개발을 위해 많은 연구자들의 노력이 있었다. 연구 모형들의 주된 목적은 대부분의 경우 관망의 건설 및 운영비용의 최소화이었다. 그러나 실제로 상수관망의 최적설계는 관망 비용과 그의 신뢰도가 서로 상충되는 복잡한 다목적 과정이다. 상수관망에서 신뢰도에 대한 용어는 정확하게 정의되어지지 못하다. 그러나 일반적으로 신뢰도는 관망의 정상적 및 비정상적인 상태하에서 소비자들에게 적절하게 유량을 공급할수 있는 관망의 능력이라고 정의할수 있다(Goulter, 1995). 소비자들에게 적절한 공급은 일반적으로 소비자들이 공급받는 상수의 양과 질의 함수인 서어비스의 정도의 향으로 측정될 수 있다. 그러므로 신뢰도는 요구되는 물의 양에 대해 공급되어지는 유량과 그러한 유량이 공급되어지는 경우에 주어지는 압력의 범위로써 정의되어진다. 그러나 실제적인 상수관망의신뢰도 해석은 시스템구성물들의 고장, 수요의 변동성과 수요자들에게 공급되어지는 적절한 서어비스를 유지하기 위한 관용량의 불확실성 등의 인자들의 변동가능성의 영향을 반드시 고려해야 된다는 점에서 상당히 복잡한 과정이다.

이러한 복잡성의 결과로 도시상수관망의 신뢰도기반 비용최적화 설계를 위한 범용적인 해석기법이 개발되지 못하고 있다. 최근까지 개발된 대부분의 신뢰도-기반 최적화모형은 종래의 최소비용 최적설계 수식화 모형속에 양해적 혹은 음해적으로 제약조건식들을 통하여 관망신뢰도를 포함시킬려고 시도하는 것이다. 신뢰도 문제를 연구한 많은 기존의 모형들은 정상적인 작동조건하에서 모든 수요지점에 우회 공급경로의 보장을 위해 폐합회로나 이와 동등한 시스템 구성물의 설치나 화재흐름이나 구성물의 고장과 같은 극단적인 상황하에서 수요를 만족시키기 위해 수요절점에 충분한 유량을 공급할 수 있는 여유있는 공급용량의 설치 등을 통하여 소비자들에게 대한 만족할만한 서어비스 수준을 보장하는 방법이 주로 연구되었다.

본 연구에서는 상수관망의 신뢰도 기반 최적화설계에서 시스템 구성물의 기계적 고장의 영향뿐만 아니라 관로의 수리학적 능력과 절점수요에서의 불확실성이 결합되어 인식할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 수질과 연관된 신뢰도 문제는 고려하지 않았고 단지 수량의 향으로 수요자들의 요구량을 충족시키기 위해 급수관망의 공급능력을 고려하였다. 수량의 관점에서 관망의 신뢰도의 측정은 절점 수요량들이 항상 만족되어진다고 가정한 상태에서 불충분한 수두의 정도를 이용한다. 따라서 절점 신뢰도는 공급되는 절점수두가 미리 규정된 최소수두를 상회하거나 충족시키는 확률로 정의되어진다. 이 모형에 의해 설계된 상수관망은 정상관망 상태구성(구성물의 고장이 발생하지 않았을 경우)와 미리 정해진 고장 시나리오의 범위와 연관된 관망의 악화된 구성상태 모두에서 절점에서의 임의의 수요량과 임의의 수리학적 능력하에서 상수공급량의 향으로 규정된 수준의 서어비스의를 제공할 수 있다. 본 모형은 다양한 관망구성에 대해 상수관망의 신뢰도의 정도를 결정하기 위해서 Monte-Carlo 모의를 이용하였다.

2. 상수관망의신뢰도해석

본 장에서는 상수관망의 신뢰도를 근사화 할 수 있는 효율적인 알고리즘을 나타내었다. 위에서 나타낸 수리학적 및 수요변동 고장과 밀접하게 연관된 신뢰도는 임의의 수요와 임의의 관로조도하에서 일정한 관망구성에 대해 규정된 최소압력이상으로 절점수요를 충족시킬수 있는 확률로써 정의되어 졌다. 수리학적 용량을 정의하는 방법을 개발함에 있어서 절점수요와 관로조도 값의 불확실성 때문에 각각의 개별 절점에서의 수압은 역시 확률적이라는 것을 인식하는 것이 중요하다. 절점수두의 불확실성과 절점수요와 관로 계수 등의 불확실성 사이의 관계는 확률론적 수리모형에 의해 나타내어 졌다. 이

확률론적 수리모형화의 핵심은 수학적 모형에서의 인자들의 단일값을 평균, 분산, 그리고 확률분포 등으로 그 인자들의 참값에 대한 불확실성의 정도를 나타낼 수 있도록 대치하는 것이다. 상수관망의 확률론적 수리학적 모형화의 경우 절점수두들의 확률값에 대한 정보는 통계학적 정보인 절점수요와 관로계수를 이용한 추계학적 비선형 수리방정식의 해를 통하여 얻어질 수 있었다.

$$F(H, X) = 0 \quad (1)$$

여기서, $F(\cdot)$ 는 각 절점에서의 질량 균형을 나타내는 함수들의 벡터, $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)^T = (X_D, X_C)$ 는 기본적인 임의변수 즉 절점수요 X_C 와 관로계수 X_D 의 임의 발생값, H 는 임의적인 절점수두들의 벡터, $K = N + M$ 는 임의변수들의 수, N 과 M 은 관망내에서 미지의 수두를 가진 절점들의 수와 관로들의 수이다. H_L 을 관심이 있는 특별한 절점에 대한 임의 절점수두라고 정의하고 $F_{HL}(\cdot)$ 은 그 절점수두에서의 누가확률함수로 정의하며 미리 정해진 최소수두 H_L^{\min} 에 대하여 절점 공급고장확률은 다음과 같이 주어진다.

$$PF_L [\text{Node Failure}] = P(H_L < H_L^{\min}) = F_{HL}(H_L^{\min}) \quad (2)$$

그러므로 정의에 의해 실제절점 L 에서의 신뢰도는 식 (3)과 같이 주어진다

$$R_L = 1 - PF_L \quad (3)$$

PF_L 의 정확해(exact solution)은 다중적분식의 적분을 요구한다

$$PF_L = \int_{H_L < H_L^{\min}} f_x(X) dx \quad (4)$$

여기서 $f_x(X)$ 는 X 의 결합확률밀도함수이다. 일반적으로 이런 다중 적분의 해는 결합확률함수가 거의 알려져 있지 않기 때문에 매우 복잡하다. 근사해를 얻는 하나의 방법은 Monte-Carlo 기법이다. 절점수두와 관로계수값들은 유사-임의 수(pseudo random number)들에 의해 임의적으로 발생될 수 있으며 관망전체의 절점수두와 같은 관망거동이 수리관망해석모형에 의해 결정될 수 있다(Bao 와 Mays, 1990). 그러므로 절점의 고장확률은 충분한 수의 모의나 수행을 통해 통계학적 기법을 이용하여 유도되어 질 수 있다.

이론적으로는 Monte-Carlo 모의기법에는 제약조건식이 없다. 예를들어 응급상황에 대처하여 피해의 심각성을 약화시키기 위해 사용자에게 의해 도입된 복구행위는 관망해석모형내의 적당한 입력인자의 수정을 통해 쉽게 도입될 수 있다. 그러나 Monte-Carlo 모의기법은 합리적인 정확도를 가진 결과의 보장을 위해 많은 수의 시행(trial)이 필요하다. Monte-Carlo 모의의 각 반복과정에서 비선형 관망수리 방정식이 해석되어야 하기 때문에 많은 계산수행을 요구하지만 근래의 컴퓨터 하드웨어조건의 비약적인 발전으로 이러한 어려움은 쉽게 극복되어 진다.

3. 신뢰도기반최적화설계

신뢰성 있는 상수관망은 정상적인 작동조건 뿐만 아니라 관망의 중요한 구성물인 수원지의 고장과 같이 미리 정해진 고장 시나리오하에서도 소비자들에게 요구되는 서비스 수준으로 충분한 유량을 공급할 수 있어야 한다. 사고에 대비한 여유있는 상수관망의 설계를 위해 신뢰도 기반 최적화는 다음과 같이 일반적인 형태로 식 (5)와 같이 수식화 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } FC(d) \\
 & \text{subject to} \\
 & \beta_j(x, d) \geq \Phi^{-1}(R_j), j = 1, 2, \dots, NC \\
 & d^L \leq d \leq d^H
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 d 는 파이프, 물 탱크 크기와 양수용량과 같은 설계변수 벡터, $FC(d)$ 는 최소화 되어야 할 목적함수, X 는 기본 임의변수 즉, 미리 정해진 분포속의 임의 절점수요와 관로 조도의 임의값, d^L 과 d^U 는 설계변수들에 대한 하한값과 상한값, $\beta_j(x, d)$ 와 R_j 는 각각 절점수요와 관 용량의 불확실성을 가진 j 번째 시스템 작동구성 조건에 대한 시스템의 신뢰도 지수와 규정된 신뢰도 요구치, NC 는 최적설계에 부과된 신뢰도 제약조건식의 수, $\Phi^{-1}(\cdot)$ = 표준정규누가분포함수의 역이다.

본 연구에서 도입된 수식화의 두드러진 특징은 수리학적 요구량들이 직접적으로 포함되지 않았다. 그러나 확률론적 수리모형을 사용하여 산정된 신뢰도 제약조건식들을 통하여 간접적으로 포함하였다. 구성물 고장의 신뢰도 영향은 다양한 고장 시나리오에 대한 신뢰도 제약식의 포함을 통하여 역시 간접적 포함하였다. 그러나 이것은 모든 가능한 관로고장을 포함하기 위해 심지어 중규모의 크기의 시스템에 대해서도 계산이 불가능하거나 적절하지 못하다. 합리적 수준으로 계산노력을 줄이기 위해 제약조건으로 단지 제약된 수의 심각한 고장 사상들만 부과되었다.

GA를 이용한 최적화 과정은 기존의 많은 연구들 가운데 자세히 나타나 있으므로 본 연구에서는 자세한 기술을 생략하였으며 신뢰도 기반 최적화 알고리즘은 그림 1 과 같다.

4. 신뢰도기반최적화모형의 적용

개발된 신뢰도 기반 최적화모형을 이용하여 실제 관망에 대하여 최적설계 해석을 실시하였다. 그림 2 와 같이 본 연구모형이 적용된 관망은 절점 16 개, 관로 26 개, 고정 절점수두 2 개로 이루어진 상수관망이다. 대상 상수관망은 수차례에 걸쳐 확장 및 보수 되었고 신뢰도 및 최적화 설계는 이루어지지 않았다. 이러한 대상 관망에 대해 본 연구모형을 이용하여 신뢰도 및 최적화 해석이 수행되었다. 해석 결과 본 모형은 합리적으로 관망 전체에 대해 합리적인 범위의 신뢰도를 유지하면서 관망의 건설비용의 최적화가 수행될 수 있었다.

5. 결 론

1. GA 기법을 이용한 신뢰도 기반 최적화 모형에 실제 관망에 적용한 결과 대상관망은 적절한 신뢰도를 정상 및 비정상 운영상태하 에서도 적절한 신뢰도를 유지할 수 있는 관망구성이 될 수 있었다.
2. 설계 대상관망에 대한 불확실성은 기계적 및 수리적 불확실성을 모두 고려할 수 있도록 수리인자에 Monte-Carlo 기법에 기초한 불확실성 수리학적 해석기법을 적용하였다.

참 고 문 헌

- 박 재홍, 한 건연(2003), “상수관망의 통합신뢰도 산정을 위한 해석모형의 개발”, 한국수자원학회논문집, 3권, 1호, pp. 105-115.
- 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.
- Lansley, 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 Plann-ing and Management, Vol. 125, No. 6. pp. 352-362.

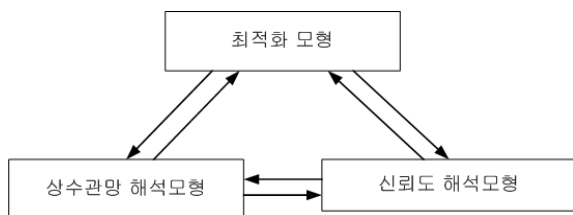


그림 1.신뢰도기반최적화모형의 알고리즘

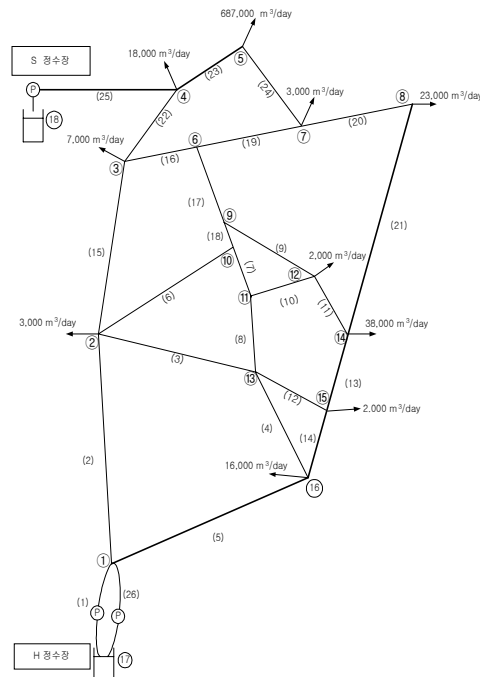


그림 2. 본모형이 적용된 실제상수관망