

상수관망에서의 신뢰도 해석을 위한 해석 및 모의모형

박재홍 (세명대학교 토목공학과 전임강사)

1. 서론

상수관망시스템의 설계와 운영에 있어서 두 가지 주요한 목적은 용수 공급 비용의 최소화와 용수 공급에 있어서 신뢰도의 최대화이다. 여기서 용수 공급에 대한 신뢰도의 증가는 대개 시스템 비용이 증가된다는 점에서 이 두 가지 목적들은 서로 상충하고 있으며 상수 관망의 설계와 운영의 어려움은 이런 상수관망의 다목적(multi-objective)적인 성질에 있다.

상수 관망에서 신뢰도를 정의하고 제공하는 문제가 지난 십여년 동안 크게 주목을 받았지만 도시용수관망의 설계에서 폐합회로를 구성함으로써 신뢰도와 비용의 문제를 음성적으로 고려한 것은 수세기를 걸쳐 올라간다. 순수하게 비용효과 측면에서는 폐합관망은 가장 효율적인 방법이 아니다. 폐합관망 내 만약 어떤 구성물이 임의의 장소에서 파괴되었을 경우 파괴된 구성물에 의해 정상적으로 제공되었던 유량이 대체관로를 통해 수요절점까지 이동될 수 있으므로 여유용량(redundancy) 혹은 초과용량(excess capacity)을 보유하고 있다. 관로 자재비용 등과 같은 경제적 측면을 고려한 비용 최소화과정에서 초과 용량의 제거는 상수관망설계에 관한 한 이론적 최소비용 해인 수지상 관로로 귀착하게 된다. 도시 상수관망에서 수지상 관로는 일반적으로는 받아들여지지 않는다. 만약 수지상 관로시스템의 모든 구성 요소가 항상 효율적으로 작동할 수 있고 구성물의 파괴가 거의 발생하지 않을 경우 어느 정도 신뢰할 수 있지만 이와같은 조건은 실제적으로 불가능하다. 수지상 관로에서 어떤 하나의 구성물 파괴 시 적어도 관망의 한 부분은 반드시

용수 공급을 받을 수 없게 된다. 그러나 폐합관망에서 대체관로의 보유는 하나 혹은 여러 개의 구성물의 파괴가 발생했을 때 계속해서 용수 공급을 할 수 있는 하나의 방법이며 그러므로 신뢰도의 증가를 기대할 수 있다.

기술자들은 상당 기간동안 상수관로 설계에서 실제로 신뢰도를 고려하여 왔다. 그러나 한가지 부족한 것은 신뢰도의 측정을 위한 명확하고 쉽게 이해되는 과정이나 측정기법의 부재이다. 이런 문제로 인하여 상수 관망을 위한 허용되는 신뢰도의 수준을 규정할 수 없었거나 규정하고자 하지 않았다. 신뢰도의 허용정도를 결정하는 것은 사용되는 신뢰도 측정기법에 달려 있다. 또한 동일한 신뢰도기법에 대한 허용 신뢰수준은 특별한 상황 즉 도시의 크기와 위치 등이 고려된 상태에서 달라질 수 있다. 그러므로 여기서는 신뢰도의 허용정도나 적절한 수준을 결정하고자 하는 것이 아니라 상수 관망에서 신뢰도의 특성을 연구하고 관망에서의 신뢰도를 정의하고 접근하는데 사용된 기법과 방법들을 살펴보고자 한다.

2. 신뢰도의 정의

상수관망에서의 신뢰도는 수요 지점에서의 공급되는 유량 및 유량이 충분히 공급되어지는 조건아래에서 압력의 향으로 나타나는 수요를 만족시킬 수 있는 관망 시스템의 능력으로 정의된다. 즉 "비정상적인 조건에도 불구하고 중단 없이 허용될 수 있는 수준으로 서비스를 제공할 수 있는 시스템의 능력" 이라고 다르게 설명될 수 있다. 이러한 정의는 관망이 수요를 충

족할 수 없는 기간들이 신뢰도의 중요한 관건이 된다 는 것을 의미한다. 또한 관망의 파괴는 수요를 충족하 지 못한 유량이나 수요는 충족되었지만 최소 허용 압 력 혹은 최소 규정압력 이하의 압력으로 주어졌을 때 발생한다. 즉 파괴는 일반적으로 비정상적인 조건 즉 구성물의 파괴와(혹은) 비정상적으로 많은 수요와 관 련이 있다.

상수 관망에서 파괴가 발생할 수 있는 경우의 수들 의 조합은 상수 관망의 설계나 운영에서의 사용을 위 한 적당한 신뢰 정도를 발견하고자 하는데 많은 어려 움의 원천이 되고 있다. 이러한 문제점들과 이것을 해 결 가능한 모의 및 해석해들이 다음 장에서 나타나 있 다.

3. 상수 관망에서의 파괴특성

상수 관망에서의 파괴는 두 가지 이유에 의해 발생 한다. 첫 번째 경우는 관망에 부과된 실제 수요량 (Q_a)이 관망의 설계 수요량(Q_d) 혹은 만약 관망이 오랫동안 사용되었다면 현재 관망의 능력보다 클 경 우이다. 이러한 형태의 파괴는 "수요 변동 파괴"로 나 타난다(어떤 연구자는 역시 수리학적 능력 파괴라고 정의한다). 수요 변동 파괴의 고려를 위해서는 유량 수요는 추계학적이므로 단정적인 확정론적 하나의 값 보다는 적당하게 정의된 하나의 확률 분포로써 정의 될 수 있다

관망 설계자들은 관망의 설계치를 20년 최대 평균 일유량이나 10년 최대 시유량을 사용함으로써 이런 추계학적인 성질들을 음성적으로 혹은 무의식적으로 인식하고 있었다. 통계적 값을 이용한 설계치의 선택 은 관망에서 설계치보다 더 큰 수요가 일어날 수 있으 며 실제로 어느 정도의 확률을 가지고 발생하고 있다. 예를 들면 평균 매 50년마다 한 번씩 발생하는 50년 최대 일수요는 20년 최대 일수요보다 크다. 20년 최 대 일수요 유량을 사용하여 설계된 관망은 50년 최대 수요와 같은 유량 요구와 압력을 충족할 수 없게 되고 관망은 그런 수요에 직면하게 될 때 파괴된다.

관망의 설계 혹은 실제 관망능력을 초과하는 수요

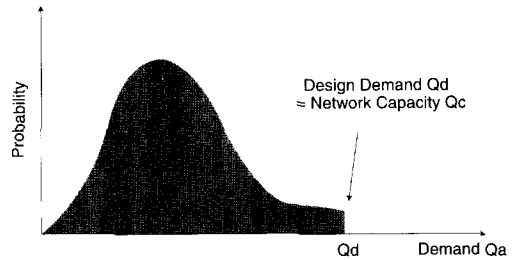


그림 1. 유량수요에 대한 확률분포

가능성은 반드시 정제적이 아니라

시간에 따라 변할 수 있다. 시스템의 계획된 값을 기초로 설계수요량이 결정되었다 할지라도 수요량은 예상하지 못한 인구의 증가나 생활 습관의 변화로 인 해 이 값들을 초과할 수 있다. 이 경우 그림 1에서 보 여지는 수요의 확률 분포는 오른쪽으로 이동하게 되 지만 Q_d 는 수평축 위의 곡선 지점에 남아 있게 됨으 로 실제 수요량은 설계 값보다 커질 수 있는 증가된 확률을 가지게 된다. 만약 수요량이 설계 조건으로 유 지되거나 초과되지 않는 경우에도 관망 자체의 용량 은 노후화로 인해서 감소한다. 이 경우 수요분포의 확 률은 원래의 위치에 남아 있지만 확률 분포 내의 Q_c 의 위치는 왼쪽으로 이동하게 되고 수요가 관망의 용 량을 초과할 수 있는 확률이 증가하게 된다.

두 번째 파괴형태는 관, 펌프, 밸브 등과 같은 관망 구성물의 파괴이다. 이 경우 관망에서 유량이나 압력 요구량이 충족되지 않는 것은 파괴된 구성물이 정지 되어 보수되어야 할 때 발생하는 관망의 감소된 수 리적 능력으로부터 발생한다. 만약 충분한 여유용량 과 신뢰도가 시스템 내에 설계되었다면 구성물의 파 괴는 관망의 파괴를 야기하지 않는다. 구성물 파괴 역 시 이미 알려진 혹은 최소한 역사적인 자료를 통하여 추정할 수 있는 확률을 가지고 발생한다. 그러므로 구 성물의 파괴로 인한 관망의 파괴도 계산될 수 있으며 수요 변동에서처럼 구성물의 고장으로 인한 관망의 파괴 역시 확률적 개념을 가지고 있다.

이러한 두 파괴 형태의 확률적인 특성으로 인해 신 신뢰도와 연관된 여러 인자들의 비확정론적인 면을 반 영할 수 있는 신뢰 수준을 필요로 한다. 신뢰 수준은

관망에서 서비스의 손실이나 파괴를 일으키는 사상의 확률과 파괴로 인한 영향의 크기 예를 들면 공급될 수 없는 유량요구량이나 유량은 충족되었지만 감소된 압력의 정도를 포함하고 있어야 한다. 파괴의 가능성과 영향을 계산하기 위해 도입된 것은 관망 인자에 대한 기대값을 이용한 신뢰도의 측정이다. 상수 관망에 대한 신뢰도 측정을 위한 문제점들은 다음 장에서 설명한다.

4. 관망 파괴의 영향

앞장에서 주어진 관망 파괴의 정의는 유량 수요를 충족하지 못하거나 최소의 압력으로 수요를 공급할 수 없을 경우이다. 신뢰도를 측정할 수 있는 모형들이 해석 혹은 모의모형인가를 구분하기 위해 관망의 파괴나 서비스의 손실을 야기하는 사상을 관망에 실제적으로 발생시켜 어떻게 계산되는지를 상세히 조사하는 것이 필요하다. 유량과 압력은 서로 연관되어 있으므로 관망의 파괴는 관망의 모든 혹은 일부에서 최소 허용 압력 이하의 유량공급 혹은 최악의 경우 주어진 압력에서 수요유량만큼 공급하지 못하는 것에 의해 수요 파괴가 나타난다. 즉 파괴는 유량의 부족 혹은 압력 부족에 의해 발생된다.

구성물이 파괴되었을 경우에도 역시 유사한 조건이 발생한다. 그리고 파괴부 주의의 유량 손실을 최소화 할 수 있도록 밸브같은 구성물이 설치되어 있는 관의 파괴시 보수를 위해 밸브 등에 의한 파괴된 구성물의 고립은 시스템 내에 충분한 여유를 가지도록 설계되어 있지 않다면 관로의 수리적 용량 감소로 인해 어느 지점에서 감소된 압력으로 유량이 공급되게 된다. 그러나 관 파괴의 경우 반드시 설명되어야 할 다른 문제가 있다. 관이 파괴되었을 때 파괴 지점이 포함된 관의 일부분이 파괴된 관로의 양단의 밸브에 의해 분리되어지며 보수가 진행되어진다. 그러므로 파괴가 일어나고 밸브에 의해 고립된 관로 부분에 연결된 소비자들은 파괴가 보수되어질 때까지 서비스를 받지 못하게 되며 나머지 관망에 연결된 경우에도 관이 파괴되고 보수가 순차적으로 진행될 때 어느 정도의 유

량 공급감소가 발생한다.

위의 예에서 관망 거동에 대한 파괴 영향을 설명하는 어려움은 다음의 경우들에 의해 나타낼 수 있다.

경우 1 : 허용압력 이상으로 유량 수요가 95 % 기간으로 충족되었으나 요구되는 유량의 5 % 기간동안 허용 한계 압력 이하로 공급된 경우

경우 2 : 100 % 기간동안 허용압력 이상으로 95 %의 유량만 공급된 경우

경우 3 : 100 %의 유량이 100 % 기간동안 공급되었으나 압력이 최소 허용 기준의 95 %로 공급된 경우

경우 4 : 100 %의 유량과 압력이 100 %의 기간동안 95 %의 절점에 공급되고 5 %의 절점에는 전혀 공급되지 않은 경우

네가지 경우 중 어느 것이 가장 신뢰성 있는 관망인가? 모두가 동일한 신뢰도를 가진 것으로 생각될 수 있다. 경우 4는 실제 존재할 수는 없지만 다른 경우들 가운데서 구별하는 것은 어려운 일이다. 위의 경우에서 관망에서 수요를 충족하는 시간의 비율이 신뢰도를 나타내는 것임을 알 수 있다.

5. 신뢰도 평가의 접근 방법

공급된 용수 용량 부족에 근거하여 측정된 신뢰도 먼저 고려해 보자. 1) 수요 파괴와 구성물 파괴 둘 모두 포함시킬 필요성, 2) 수요들이 관망 해석과 설계에서 정상적으로 가정된 절점의 위치에서 수요가 발생하지 않을 경우, 3) 파괴를 발생시키는 확률적 특성 등을 고려하여 신뢰도 측정 방법이 수식화 될 수 있다.

5.1 수요 변동 파괴로부터 발생하는 용량 부족

$$ED_d^{\eta} = K \int_{Q_{dc}^{\eta}}^{\infty} \eta(Q^{\eta} - Q_{dc}^{\eta}) p(Q^{\eta}) dQ^{\eta} \quad (1)$$

여기서, ED_d^{η} 는 절점 η 에서 설계치 유량 Q_{dc}^{η} 보다 큰 수요로부터 발생하는 절점 η 에서의 기대되는 부족 용량, Q^{η} 은 절점 η 에서 단위 시간당 수요, K 는 기대유량을 기대체적으로 변환시키는 변수, Q_{dc}^{η} 은 절점 η 에서

설계 수요량, $P(Q^\eta)$ 절점 η 에서 수요 유량 Q^η 의 확률 밀도이다.

5.2 구성물(관) 파괴로 인해 발생하는 용량 부족

$$ED_f^s = qd \text{ } t_f E(NF) \tag{2}$$

여기서, ED_f^s 는 파괴된 관로와 보수를 위해 고립된 관 으로부터 발생하는 용량 부족의 기대치, q_d 는 고립된 관로부분에서의 단위 시간당 평균수요량, t_f 는 보수를 위한 평균시간, $E(NF)$ 관로구간의 단위 시간당 평균 파괴 횟수(이것은 관의 단위길이당 단위시간당 평균 고장 횟수 곱하기 밸브 사이의 관로 구간의 길이이다)이다.

이제 구성물(관로)파괴와 수요파괴로 인한 용량 부족에 대한 기대 부족량은 같은 단위를 가진다. 그러므로 그것들은 관망에 대해 기대되는 전체 부족 용량을 계산하기 위해 직접적으로 합해질 수 있다.

$$TND = \sum_{\text{all links } s} ED_f^s + \sum_{\text{all nodes } \eta} ED_\eta^d \tag{3}$$

여기서, TND 는 구성물의 파괴와 수요 변동 파괴로 인한 기대되는 전체 체적부족량이다.

식 (3)을 이용한 신뢰도의 계산은 구성물들 중 하나의 파괴로 인한 관망의 수리학적 용량의 감소에 의해 발생한 관망의 나머지 부분들에 대한 영향을 설명할 수 없다는 것을 알 수 있다. 같은 이유로 펌프나 밸브 파괴의 영향을 조사해야 한다(밸브 파괴는 밸브를 포함한 관망중 일부를 분리하여 보수되는 밸브를 요구하며 이것은 관 파괴처럼 어느 정도 같은 특성을 가지고 있다). 이 접근의 중요한 면은 확률적인 의미에서 수요 변동 파괴와 구성물의 파괴 둘 모두를 고려했다는 것이다. 그러나 이 기법은 단지 순수하게 용량 부족만 고려하였고 감소된 압력에서 유량 수요를 충족하는 관망의 능력을 고려할 수 없다.

압력에 대한 신뢰도 측정을 위한 접근은 다음 식 (4),(5)를 이용하여 수식화되고 적용될 수 있다. 이 방법은 일정하게 미리 정해진 값 이하의 관망에서의 압력의 시간의 비율로 정의되는 이용률의 개념에 기

초하고 있다. 절점의 경우 이용률은 일정하게 미리 정해진 수준 이하로 내려가는 절점에서의 압력의 시간 비율을 나타낸다. 즉

$$A_j = \sum_{i=1}^M \frac{A_i t_i}{T} \tag{4}$$

A_j 는 절점 j 에서의 절점 이용률, A_i 는 시간기간 (time period) i 동안 이용률, t_i 는 시간기간 i 의 길이, M 은 T 에서의 시간기간의 수, T 는 모의되는 시간 (신뢰도 해석을 위한 시간축)이다.

절점이용률을 바탕으로 관망에서는 다음과 같이 정의된다.

$$A = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{N} \tag{5}$$

여기서, A 는 관망이용률, N 은 전체 절점의 수이다.

이러한 측정은 구성물(기계적)과 수요 변동 파괴를 모두를 고려할 수 있다. 이 기법은 다음과 같은 수식을 통하여 기계적 및 수요 변동 파괴의 확률적 면을 포함할 수 있도록 확장 가능하다.

$$AE_{ji} = R_{ji} A_{ji} + Q_{ji} A_i \tag{6}$$

여기서, AE_{ji} 는 구성물 I 에 대한 절점 j 의 기대 절점이용률, R_{ji} 는 구성물 I 가 작동 중일 확률, Q_{ji} 는 구성물 I 가 작동 중이지 않을 확률, A_{ji} 는 구성물 I 가 작동 중일 때 절점 j 의 이용률, A_j 는 구성물 I 가 작동 중이지 않을 경우 절점 j 의 이용률이다.

이러한 측정기법의 중요한 점은 "시스템 운영자와 설계자의 판단과 경험은 시스템 평가에 있어서 절대적이다"라는 연구 결과이다.

미리 규정된 압력을 충족하는 파괴는 수요 파괴로부터 발생하는 조건들을 통해 오직 일어날 수 있기 때문에 수요 변동 파괴는 R_{ji} , A_{ji} 항을 통해서 식(6)에서 포함되어졌다. 다른 한편으로 구성물 파괴와 수요 파괴는 Q_{ji} , A_j 항으로 고려되었다. 그러나 식(6)은 수요 파괴의 확률적인 면을 명확하게 고려하지 않는다. 확률적인 면의 고려는 식 (7)과 같이 수정을 통하

여 얻어질 수 있다.

$$AE_{jl}^T = \int_0^\infty (R_{jl}A_{jl} + Q_{jl}A_j) p(Q^j) dQ^j \quad (7)$$

여기서, AE_{jl}^T 수요 변동과 기계적 파괴를 고려한 절점 j에서의 기대 이용률이며 이외의 항들은 앞에서 설명되었다.

비록 식(7)이 관망 파괴를 정의하는데 있어서 부족 압력이 인자로서 설명되었다고 할지라도 최소 허용 압력 이하로 감소시키는 비교적 작은 영향을 끼치는 수많은 파괴들이 포함한 파괴 조건들과 허용 압력 이하의 심각한 원인이 되는 작은 수의 파괴를 포함한 파괴 조건들을 이 방법은 구분할 수 없다. 예를 들면 압력 수두를 전달하는데 있어 어느 절점에서 30 m에서 10 m로 감소시키는 원인이 되는 관 파괴는 같은 기간동안 압력 전달에 있어 30 m에서 29 m로 감소의 원인이 되는 관 파괴 보다 훨씬 심각하다. 식 (7)은 이러한 파괴들의 차를 구분할 수 없다. 이 문제에 대한 하나의 해결방법은 다음 일반적 형태의 측정기법을 사용하는 것이다.

$$ND = \sum_{i=1}^N q^i H_{min} - \sum_{i=1}^N q_a^i H_{aj} \quad (8)$$

$$= Q^*_T H_{min} - \sum_{i=1}^N q_a^i H_{aj} \quad (9)$$

여기서, q^i 는 절점 j에서의 수요, h는 절점들의 전체 수 Q^*_T 는 전체 관망 수요, q_a^i 는 절점 j에 공급되는 실제 유량, H_{aj} 는 절점 j에서 실제 전달되는 압력 (만약 $H_{aj} > H_{min}$ 이면 $H_{aj} = H_{min}$ 로 설정), ND 는 관망 부족량이다.

이러한 측정 기법은 수요의 체계학적인 특성을 고려하지 못하고 단지 미리 알고 있는 확정적인 절점 수요에 대해 적용되어진다는 것에 주의해야 한다. 그러나 이 측정기법의 주요한 장점은 흐름과 압력 사이의 관계를 명확하게 인식할 수 있다. 만약 수요유량이 만족되었다면 관망의 파괴는 전적으로 공급 압력의 부족으로 인한 것이다. 만약 모든 수요 압력이 만족되었다면 파괴는 공급이 유량 수요를 충족하지 못하기

때문이다. 이 두 경우에서 부족량의 크기는 충족되지 못한 유량이나 압력요구량이 증가함에 따라 증가하게 된다. 그러나 만약 유량이나 압력요구량 모두가 동시에 충족되지 않았다면 즉 유량요구량보다 적은 유량이 공급되어지고 이런 유량들도 단지 최소 허용 압력 이하로 공급될 수 있다면 식 (9)에서의 q 와 H의 항의 곱은 수요의 한 측면이 충족되지 못한 것 보다 훨씬 작아질 것이다. 이러한 의미에서 이 식은 신뢰도의 해석에 있어서 매우 설득력이 있다.

그러나 신뢰도 측정의 단위는 체적-압력 즉 $(m^3/hr)(m)$ 이고 기술자들이 신뢰도를 파악하거나 평가하고자 할 때 곧바로 반영할 수 없게 된다. 이와 같은 이유로 이 기법에 의해 계산된 파괴의 정도는 시스템의 신뢰도를 감소에 영향을 미치게 되어 간접적인 신뢰도 해석기법인 자기발견적 측정기법 (heuristic measure)으로 수식들이 분류되어진다. 부가적으로 이러한 수식은 요구량보다 적은 공급 유량이나 압력을 발생시키는 사건의 확률이나 기간들을 고려할 수 없다.

절점에 의해 분해된 식(9)의 우편항들에 의해 A_j 와 A_{j1} 항으로 대체된 식(7)에서 기대 이용률에 대한 것과 같은 기법으로 이러한 파괴들은 포함될 수 있다. 즉,

$$ED_{jl} = R_{jl} [q^i H_{min}] + Q_{jl} [q_a^i H_{aj}] \quad (10)$$

$$TND' = \sum_{i=1}^N ED_{jl} \quad (11)$$

여기서, ED_{jl} 는 유량과 압력 부족량의 곱에 의해 계산된 절점 j에서의 기대 부족량, TND' 는 수요량의 체계학적인 고려 없이 유량과 압력 부족량의 곱에 의해 측정된 전체 기대 관망 부족량이다.

수요변동량의 도입은 식 (12)에 의해 각 절점에 대해 구성될 수 있다.

$$ED_{jl}^T = \int_0^\infty ED_{jl} p(Q^j) dQ^j \quad (12)$$

이와 같이 확률적인 면들이 도입될 때 측정값은 단

지 평균 조건을 나타낸다. 이것은 평균값을 주위로 부족량이 얼마나 변화하는지에 대한 어떤 자료를 제공하지 않는다. 즉 다시 말하면 이것은 평균값이 매우 크고 허용될 수 없는 부족량의 적은 수에 의한 것인지 혹은 허용될 수 있는 부족 분의 많은 수에 의한 것인지를 알려주지 않는다. 그러한 문제는 신뢰도를 설명하는데 중요하며 신뢰도 해석에 대한 모의모형에 관한 장에서 완전하게 토의되어진다.

이런 문제는 제쳐 두고 위에서 토론된 상수 관망에서의 신뢰도 측정과 평가에 대한 문제는 핵심적인 것은 해결될 수 있다는 것을 알려준다. 그러나 이것은 분명히 모든 경우는 아니다. 다음 장에서는 상수 관망에서 신뢰도 평가를 위해 현재 이용 가능한 모의 및 해석모형들을 토의하고 그러한 방법들에 대한 장점과 단점을 조명한다.

6. 관망 신뢰도 평가를 위한 모형과 기법

앞장에서는 상수 관망에서의 신뢰도 평가를 위해 진행 중인 측정 방법들에 대해 주된 고려 사항들을 살펴보았다. 그러나 그러한 측정 방법이 어떻게 계산되는지는 설명하지 않았다.

신뢰도 평가를 위해 두 가지 접근이 이용 가능하다.

i) 관망의 요구를 나타내는 기본적 급수 조건으로부터 발생된 '사상' 들의 time series 혹은 개개의 case-by-case 를 기초로 한 시나리오의 범위안에서 관망을 평가하는 모의 기법

ii) 관망에서의 부하(수요)를 정의하는 인자와 그런 수요들을 충족하는 관망의 능력으로부터 직접적으로 유도되는 신뢰도에 대한 고전적 해를 이용한 해석적 접근

두 가지 접근 모두 두 가지 기본적 문제들은 고려되어야 한다.

i) 관망에서 유량과 압력 수두, 환경, 관에서 유량, 관로에서의 동수경사, 관로와 정점에서의 압력 같은 인자들에 의한 수리적 거동의 파악

ii) 절점 특히 수요절점과 수원지 사이의 연결 상태, 관망의 형태, 예를 들면 폐합회로의 수 및 존재 여

부 혹은 수지상 관로 존재 등과 같은 것을 이용한 관망 구성의 파악하고 관망의 수리적 거동은 신뢰도 해석을 위한 모의 및 해석적 방법에서 두 방법 모두 중요하다. 그러나 수리적 거동의 계산은 모의모형에서 주된 고려대상이지만 관망의 구성은 신뢰도를 위한 해석적 접근에서 보다 주목을 받아 왔다.

6.1 모의모형 (Simulation Model)

모의모형에 의해 신뢰도의 결정은 대개 case-by-case 나 시나리오에 의해 수행되어지기 때문에 모의모형에서 구성물 파괴의 영향 역시 항상 case-by-case 나 시나리오에 의해 평가되어진다. 신뢰도 평가를 위한 모의모형은 수요 변동 파괴 영향을 충분히 고려해야 한다.

case-by-case 접근에서는 일련의 사건들 즉 수요량이나 수요 형태의 집합과 관망의 구성이 정의된다. 그런 다음 관망이 모형화되고 이러한 조건들의 결과로써 시스템에서 발생하는 압력과 유량을 결정하는 각 경우들에 대해 모의된다. 관망에 공급되어야 할 화재유량 같은 절점수요에 대한 각 경우의 임의적 조합을 사용하여 전체집합에 대해 수요를 충족할 수 있는 관망의 능력의 향으로 관망의 거동이 평가된다.

펌프, 관, 밸브 같은 관망 구성물의 파괴는 수리적 모의에 앞서 관망으로부터 적절한 구성물의 제거를 통해 고려될 수 있으며 제거된 구성물로 인해 모형에서는 관망구성물의 수정이 필요하며 수정된 관망 모의에 의해 파괴된 구성물의 영향이 고려된 관망의 신뢰도가 평가될 수 있다.

수요 변동의 영향을 평가할 때 관망 설계 용량 보다 큰 비정상적인 수요로부터 발생하는 관망에서의 압력과 유량을 결정하기 위해 구성물의 파괴를 포함하는 것이 일반적으로 필요한 것은 아니다. 그러나 비정상적인 수요의 기간동안 구성물의 파괴 가능성은 충분히 크고 이런 결합된 파괴의 영향은 대단히 막대할 경우 구성물의 파괴와 수용 변동의 결합된 고려가 되어야 한다고 판단된다.

각 경우에서 포함될 수 있는 부하 형태와 구성물의 파괴의 실제적 조합의 결정과 결정될 관망 거동의 경

우의 수는 결정되기 어려운 양상을 나타낸다. 비정상적인 부하나 수요 형태와 같이 이상적으로 고려되어지는 구성물 파괴는 관망 거동에 있어서 가장 결정적 즉 가장 최악의 시나리오 형태이다. 이러한 모의에서 한계적인 구성물은 규정된 수요를 만족할 수 있는 관망내에서 문제가 발생하는 구성물이다. 하나의 부하 형태에 대한 한계적 구성물은 다른 부하형태에 대해 달라질 수 있다. 즉 한 지역의 화재에 대해 한계적 구성물은 다른 지역에 대한 한계적 구성물과 다를 수 있다.

관망 거동은 한 번에 대표적인 하나의 구성물 파괴 조건에서 이 평가기법이 설명되었다. 이런 단일 구성물의 파괴로의 제한은 송전망의 신뢰도 평가와 비교하여도 일관성이 있으며 k-1 해석으로 알려져 있다. 여기서 k는 관망에서의 구성물의 수이다. 한 경우에 한 구성물의 파괴에 대한 해석으로 제한하는 이유는 두 개 혹은 여러 개의 동시적 파괴(즉 다른 구성물이 보수되기 전에 하나의 구성물의 파괴)의 가능성은 너무 작아 고려 대상이 되지 않는다. 이런 관계적인 조항의 예외 경우는 두 구성물의 파괴의 영향이 너무 치명적이어서 그러한 발생이 고려되어야 하는 경우이다. 이와 같이 구성물의 동시적으로 파괴가 일어날 수 있는 중요하고 심각한 예외 상황은 지진 조건 아래에서의 상수 관망 시스템의 해석이다.

단일 구성물의 파괴를 사용한 해석의 제한에도 불구하고 있는 관망 거동의 모습을 얻기 위해 조사되어야 할 수요 형태와 구성물 파괴의 조합은 여전히 많이 존재한다. 많은 파괴조건들과 연관된 관망의 유량과 압력을 결정하기 위해 각 경우에 대해 각각의 수리적인 모의가 필요하다. 실제로 관망기술자는 조사되어야 할 이런 조합들의 부분집합을 제한해야 한다. 이런 부분집합에 속하게 되는 조합들의 결정은 아마 시방서나 도시 규범을 바탕으로 한 설계자의 경험에 의해서이다. 그러나 이런 방법을 사용하는 모의되는 전체 조합들의 부분집합의 제한은 많은 문제들을 포함하고 있다. 먼저 그리고 아마 가장 중요한 문제는 모의되는 전체 조합에 대한 부분집합이 모든 극단적인 경우들을 포함하고 있으나 이지만 거의 대부분 실제적으로

가장 최악의 경우를 포함하고 있게 된다. 경험 있는 실제 기술자에게는 사실 모든 최악의 조합이 정의되고 조사된다고 가정하는 것이 합리적이다.

또 다른 문제는 유량이나 압력 부족이 발생할 때 신뢰도의 설명과 연관되어 있다. 만약 모든 경우나 시나리오 아래에서 관망의 수요가 만족되면 즉 수요가 다양한 파괴 조건 아래에서 압력과 유량의 항들이 충족된다면 관망은 신뢰성이 있다(물론 모든 한계적인 경우들이 적용되어졌다고 가정한다). 이런 경우 부족량의 발생이 없기 때문에 구성물의 파괴로 인한 기대 부족량의 계산을 할 필요가 없다. 그러나 모든 경우의 수 가운데 수요가 충족되지 않을 경우에도 관망은 적당하다고 고려될 수 있다. 즉 부족량과 그와 연관된 관망 파괴 발생 가능성이 발생허용범위 이내에 있으면 더 이상의 평가를 요구하지 않게 된다. 이처럼 수요가 충족되지 못하는 정도와 관망 파괴 확률을 아는 것이 충분하지 못할 수 있다. 최소한 기대부족량 혹은 부족량의 분포는 평가되어야 할 필요가 있다. 만약 어떤 한계적 조합에서 모의 결과 부족하다는 결과를 나타낸다면 처음의 모의된 부분집합에서 고려되지 않았던 수요와 구성물 파괴의 다른 조합이 역시 부족의 결과를 나타내었다고 할 수 있다. 그러한 부족은 가장 극단적 한계조건들로 인한 부족량만큼 크지는 않지만 역시 존재하고 있다. 경우의 각 사상들은 조합한 부분적인 모의결과의 기초위에서 계산된 구성물 파괴로 인한 기대 부족 양은 진정한 모습의 기대 부족량이나 부족량 배분을 제공하지는 못한다.

적절한 부족량의 분포를 결정하기 위한 전체 집합에 대한 부족량의 계산은 매우 큰 경우의 수에 대한 평가와 수리적인 모의 그리고 그와 연관된 과대한 계산적 노력을 요구하고 있다. 이런 신뢰도 평가를 위한 과대한 계산적인 문제는 모의기법에서는 극복할 수 있으나 해석적 방법에서는 특히 어려운 문제이다. 현재상태에서 계산기의 증가된 능력이 문제의 크기를 줄이고 있다는 것 외에는 달리 문제를 해결할 수 있는 쉬운 방법은 없는 것처럼 보인다.

이런 모의 접근법의 중요한 모습은 time series에서 발생하는 조건들이나 경우들의 각각에 대해 관망

의 수리적 거동을 모형화/모의 하는 것과 time series 를 발생시키는 것이다. 이런 필요성은 심각한 계산적 요구를 부과하기 때문에 이와 같은 기법의 심각한 단점이다. 그러나 앞서 토의된 관망 신뢰도 모의 해석을 위한 case-by-case 접근법에서도 발생하는 유사한 어려움이다. 그러나 case-by-case 접근법보다는 좀더 심각한 계산적인 문제를 발생시키지만 time series 접근법은 좀더 넓은 경우의 고려를 통하여 어떻게 관망이 수행되는지를 파악함으로써 일반적으로 좀더 완전한 파악을 할 수 있도록 한다.

모든 모의 접근법의 중요한 특징은 관망의 수리적 거동으로부터 유도될 수 있는 어떤 신뢰도측정기법의 사용이라도 허용한다는 것이다. 이것이 해석적 접근법과는 다른 모의 접근법의 능력이며 해석기법보다 큰 장점을 나타내는 것이다.

6.2 해석적 접근 (Analytic Model)

해석적 접근은 관망의 완전한 수리적 모의없이 단일 혹은 여러 신뢰도 측정기법속으로 관망배치나 부하특성 같은 관망과 연관된 모든 인자를 포함시키려는 기법으로 구분될 수 있다. 해석기법의 중요한 점은 절점간 특히 수원지 절점과 수요 절점의 연결상태와 관망형태의 향으로 관망의 잠재적인 거동을 나타내기 위하여 도학이론(graph theory) 사용이다.

상수관망 신뢰도 해석에서 사용되어지는 가장 일반적인 도학이론의 형태는 다음과 같다.

1) 도달가능성 - 주어진 수요 절점에서 수원지 절점으로의 연결

2) 연결상태 - 모든 수요절점은 적어도 하나의 수원지와 연결되어져야 한다.

3) cut-set - 관망으로부터 제거되어질 경우 관망의 나머지로 부터 하나 혹은 여러개의 절점들이 완전히 분리되는 관로들의 집합

수원지로의 절점의 연결상태는 필요하지만 수요를 만족하기 위한 충분조건은 아니다. 만약 수원지와외의 연결이 너무 작은 관경으로 구성되어 있다면 혹은 시스템에서의 압력이 전체적으로 낮다면 절점은 수원지와 연결되어 있다할지라도 상수를 공급받을 수 없게

된다. 이런 수리학적 거동양상을 도학이론속에 포함시키는 가장 효과적인 방법들의 개발은 관망 신뢰도의 접근을 위한 해석기법이 직면한 주요한 문제이다. 해석기법을 이용하여 상수관망의 신뢰도를 평가할 경우 시나리오를 바탕으로 한 해석보다는 차라리 각 절점과 연결된 관로의 수, 관경, 절점의 위치, 수요 등과 같은 근본적 관망인자의 해석에 기초한 신뢰도 해석 방법을 사용하는 것은 중요하다.

신뢰도 평가를 위해 여러가지 해석기법이 적용되었을 때 계산될 양은 관망 크기에 지수적으로 증가한다는 것을 나타내는 NP 단계의 어려움을 나타낸다. 심지어 해석기법을 사용하여 신뢰도를 평가할 때 관망에 대한 너무 혹독한 가정들과 요구들을 요구한다. 그러므로 이런 기법을 사용한 결과들은 신뢰도의 정확한 해석이라기 보다는 전체적인 경향을 나타낸다. 그리고 한 관망에서 사용된 기법과 결과를 다른 관망으로 일반화하여 사용할 수 없다. 그럼에도 불구하고 상수관망에서 신뢰도평가를 위한 원론적 형태나 혹은 수정된 형태의 도학이론 사용은 점점 증가할 것으로 기대된다.

6.3 자기발견적 기법(Heuristic Techniques)

상수관망에서의 신뢰도기법에 있어서 최근의 발달은 신뢰도를 평가하고 설계자에게 관망의 신뢰도를 개선하는데 도움을 줄수 있는 자기발견적(heuristic) 기법의 사용이다. 여기에서 자기발견적 기법의 정의는 전통적인 신뢰도기법의 정량적인 면을 가진 향의 실제적인 의미를 가지는 것이 아니라 자기발견적 기법에 의한 결과치 변화정도를 신뢰도의 변화에 반영시키는 간접적인 기법으로 나타낼 수 있다.

이 기법은 비교적 간단한 수식으로 표현가능하여 최적화 기법에서 많이 이용되고 있으며 신뢰도 기법속으로 도학이론의 포함이 용이하다. 자기발견적 기법은 관망에서의 조건들을 정확하게 반영하지 못하고 해석기법과 같이 심각한 계산적 문제를 포함하고 있지만 하나의 신뢰도 기법속으로 도학이론과 수리학적 거동문제를 통합하려는 시도를 나타내고 있다는 점에서 중요성이 있다.

상수관망에서의 신뢰도 평가의 장래의 발달은 수리학적 이론과 도학이론의 좀 더 밀접한 결합을 통하여 이루어질 것이라고 본 연구에 앞부분에서 설명되었다. 수리적 이론과 도학이론의 원칙을 결합하기 위한 수단으로서 자기발전적 기법 사용전략은 신뢰도 기법을 계산적으로 과중한 방법에서 평가기법이 적용력있고 실제적인 표현을 가지면서 신뢰도 평가기법의 현재의 접근방법을 개선하는 것뿐만 아니라 좀 더 쉽게 최적화 모형속으로 신뢰도 기법을 포함시키고자 하는 것이라는 것을 인식해야 한다.

6.4 여유용량 기법(Redundancy Measures)

상수관망의 신뢰도 평가와 고려에서 또 다른 최근의 기법은 엄밀한 의미의 신뢰도에 반대되는 여유용량(redundancy)의 사용증가이다. 여기에서의 여유용량은 정상적인 조건에서 작동해야 할 하나 혹은 여러개의 구성물이 파괴될 때 사용될 수 있는 대체경로의 존재 혹은 정상적 작동조건에서 요구되어지는 용량의 초과량으로 정의된다. 여유용량에 대한 새로운 관심은 관망 신뢰도가 관망의 형상과 배치에 의해 나타나는 과대한 경우의 수와 각 경우에 내재된 여유용량의 현실화로부터 발생하였다.

7. 신뢰도 기법의 고찰

지금까지의 자기발전적 혹은 여유용량에 기초한 기법은 해석적 혹은 모의기법으로 분류되는 기법들과 비교하여 사용과 개발의 낮은 수준으로 인하여 예외의 경우로 생각하여 해석기법과 모의기법에 대하여 일반적 장점과 단점에 대한 얼마의 결론을 확립할 수 있다. 이러한 접근방법들은 표 1에서 요약된 대로 일반적이고 다른 장점과 단점을 가지고 있다.

표 1에서 요약된 대로 그 기법들의 장점과 약점을 살펴보면 상수관망의 신뢰도 개선의 고려와 평가에 있어서 대안이라기보다는 동반자로 보여진다. 이 두 기법의 형태의 결합은 해석기법은 관망의 연결상태와 수원지 절점으로서의 도달가능성 수준 결정과 같은 초기 계산을 위한 사용에서는 최선의 방법이라고 생각

표 1. 상수관망에서 신뢰도 평가를 위한 해석기법과 모의기법의 장단점

일반적 성질	단 점		장 점	
	계산부하가 과대			
모형별 성질	해석기법	모의기법	해석기법	모의기법
	· 신뢰도해석의 간략성	· 고려된경우의 수에 포함된 표본 조 건들에 대한 평가	· 표본보다는 관망 전체 고려	· 신뢰도추정을 위한 많은 경우의 수 고려가능 · 신뢰도의 실제적 해석

되어진다.

8. 요약 및 결론

앞에서 설명된 내용을 통하여 (1) 상수관망에서의 신뢰도 평가를 위해 반드시 고려되어야 할 문제 (2) 신뢰도 평가를 위해 사용되어지거나 사용되어지는 수식과 수학적 기법의 형태 (3) 이러한 수식과 기법을 사용하여 현재 신뢰도를 계산할 수 있는 계산기법 특히 모의기법과 해석기법 (4) 신뢰도 평가를 위한 현재 기법이나 접근방법의 상대적인 장점 및 단점 (5) 신뢰도 평가를 위해 개선된 방법이나 기법들에 대한 잠재적인 장래의 방향 등을 살펴봄으로써 보다 발전적인 상수관망의 신뢰도 해석을 위한 기초가 될 수 있도록 하였다. 관망용량을 초과하는 수요에 대한 신뢰도의 고려와 구성물 파괴시 신뢰도의 고려에 대해 설명하였고, 둘 모두에 대한 고려의 필요성을 두 시스템 파괴형태의 확률적 양상에 대한 도입 필요성과 연결시킴으로 부각하였다.

이전의 상수관망설계의 고찰들은 신뢰도 해석이 실제적인 적용면에서 적용성이 떨어지는 기법이라는 것을 확인시켰다. 지금까지도 계속되는 이와같은 문제는 계산기 계산능력의 급속한 발전과 신뢰도 평가를 위해 최근의 도학이론의 사용으로 문제의 크기를 크게 감소시키고 있다.

신뢰도를 평가하는 현재 중요한 특징은 신뢰도를 평가하는데 모의기법과 해석기법의 장단점을 인식하고서 두 기법 모두 사용된다는 것이다. 해석기법은 계산초기의 예비단계(screening)를 위해 사용되고 모의

기법은 좀 더 자세한 해석을 위해 사용된다. 이런 방법의 사용이유는 신뢰도의 해석기법의 적용을 위해 요구되는 심각한 가정사항과 관망의 신뢰도 거동의 모든 측면을 포함하는 신뢰도 추정방법의 많은 경우의 수를 계산하는 모의기법에서 한계 때문이다.

신뢰도 해석의 장래에 대해 많은 의견들이 있을 수 있다. 먼저 구성물 파괴 혹은 비정상적 수요의 파괴에 대한 피해를 완화시킬 수 있는 시스템 운영자의 능력에 대해 점차적으로 인식이 커지고 있으며 신뢰도의 장래의 추정기법은 관망의 신뢰도 평가에 있어 관망 운영의 유연성을 고려해야 할 것이다.

신뢰도를 정량적이거나 정확하고 명확한 설명을 하

지 않는 자기발견적 기법에 대해 좀더 연구를 해야될 것이다. 만약 자기발견적 기법이 상대적 신뢰도를 평가하거나 신뢰도를 증가시키기 위한 지침으로서 이용된다면 유용한 가치가 있다.

끝으로 신뢰도의 중요한 특징으로 여유용량은 아마도 신뢰도를 위한 자기발견적 기법의 연구의 개선된 모형의 개발과 연관되어 더욱 주목을 받을 것이다. 신뢰도 추정기법에서 여유용량의 도입에 대한 가능성과 더불어 관망에 대해 성취될 수 있는 신뢰도 수준에의 관망모양이나 배치의 효과를 고려하기 위한 수단으로써 도학이론에 대한 중요성이 커지고 있다. ●●

〈참고문헌〉

I. Goulter, (1995). "Analytical and simulation models for reliability analysis in water distribution systems", in *Improving Efficiency and Reliability*

in *Water Distribution Systems*, E. Cabrera and A. F. Vela, Eds. Kluwer Academic Publishers.