

상수관망의 안정적 유지관리를 위한 의사결정시스템



박수완 ▶

부산대학교 사회환경시스템공학부 조교수
swanpark@pusan.ac.kr

1. 머릿말

상수관로는 노후될수록 누수 및 파손율은 커지며, 관망의 도수능력은 감소되기 마련이다. 또한 노후된 상수관로가 파손될 경우에는 파손 인근 지역의 침수를 유발하고 보수작업에 따른 교통 혼잡을 유발하며, 즉각적인 보수가 이루어지지 않을 경우 관로파열 부위를 통하여 오염물질이 유입되어 관망 내의 수질을 악화시키는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 관로 노후화에 따른 문제들은 양질의 물을 안정적으로 사용자에게 보급해야 하는 상수도의 근본 목적을 달성하기 어렵게 만든다. 따라서 상수도의 근본 목적을 충실히 달성하기 위해서는 상수도의 구성 요소들이 안정적으로 운영되어야 하며, 상수도의 가장 중요한 요소의 하나로 볼 수 있는 관로에 대한 적절한 갱생(rehabilitation) 및 교체(replacement)를 통하여 상수관망이 수리 및 수질적으로 안전하게 유지관리되어야 한다.

이러한 상수관로의 중요성에 따라 정부와 지방자치단체에서는 노후수도관 개량사업의 일환으로 1997년부터 2011년까지 3조 8천억 원을 투입하여 노후관 42,000km를 교체하는 방안을 수립하였다. 노후된 상수관로와 관련된 문제는 비단 우리나라만의 문제가 아닌 전 세계적인 문제점으로 대두되고 있는데, 예를

들어서 미국의 경우 상수관로와 그 부속시설의 교체를 위해 소요될 비용은 2030년까지 2500억 달러에 이를 것으로 보고되고 있다(AWWA, 2001). 이와 같이 노후관개량사업에는 막대한 비용이 소요되므로 관로의 경제적 최적교체 방안을 이용하여 관로교체 사업을 시행하는 것이 바람직하다.

상수관로의 경제적 최적교체 방안을 수립하기 위해서는 관로의 노후도와 교체의 경제성을 동시에 고려하여야 한다. 그러나 현재까지 우리나라의 노후관 교체사업은 관로의 매설위치와 주변 환경에 따라 달라질 수 있는 관로의 노후도 변화를 고려하지 않은 채 관로의 사용연수 만에 의한 물량적 목표 달성위주로 진행되어 예산 낭비가 많다는 점이 학계와 지자체 담당자들 사이에서 제기되어 왔다. 본고에서는 상수관로 교체 방안의 수립을 위해 개발된 관로 노후도 산정 및 예측 방법론과 이를 응용한 관로교체를 위한 의사결정시스템의 개발 현황에 대하여 소개하고, 이를 우리나라 관망의 유지관리에 활용하고자 할 때 요구되는 상수관로 유지관리와 관련된 자료구축 방안에 대하여 논하고자 한다.

2. 상수관로의 노후도 산정 방법론

상수관로의 교체와 관련된 결정은 다음과 같이 대별할 수 있다.

- 교체비용과 새로운 관로의 유지관리 비용을 감수하고 노후관로를 교체한다.
- 계속해서 발생할 것이 예상되는 노후된 관로의 보수비용을 감수하고 노후된 관로를 교체하지 않는다.

그러나 의사결정자의 관로교체를 위한 최종적인 결정은 관로의 교체비용과 보수비용 이외에 단수로 인한 사용자의 피해, 관로의 통수능, 신뢰도 및 수질 문제와 관로 파손으로 인한 침수피해 및 교통혼잡 등과 제반사항을 통합적으로 고려한 후 수입되어야 한다. 한편, 관로교체와 보수비용 등과 같은 직접적인 비용만을 고려하든 혹은 관로파손으로 발생하는 부가적인 비용을 함께 고려하든, 이러한 결정을 보조하기 위해서는 관로의 구조적 노후도에 대한 분석이 필연적으로 요구된다.

상수관로의 노후도를 산정하기 위한 방법론적 접근은 관로에 작용하는 내·외부적 하중(load)이 관로의 구조적 성능에 미치는 영향을 산정하여 관로의 파손을 예측하고자 하는 물리적 모델링 방법과 관로에 발생한 파손사건에 관한 자료, 즉 파손시간과 위치에 대한 자료와 관로의 내재된 인자 및 외부환경간의 통계학적 상관성을 분석하여 관로의 파손을 예측하는 통계적 모델링 방법으로 크게 나눌 수 있다(Kleiner et al., 2001).

상수관로의 노후도 산정 및 예측을 위한 물리적 모델링 방법은 관로의 재질, 구조적 특성, 토양과의 상호작용 및 매설상태와 수압, 교통하중, 결빙하중 등과 같은 내·외부적 하중, 그리고 생화학 및 전기화학적 작용에 의한 재질의 노후화 등과 같은 관로 파손에 직접적인 영향을 주는 인자에 대한 영향을 산정할 수 있는 반면에 이러한 다양한 파손 영향인자에 대한 매우 정확한 자료가 요구되므로 자료의 획득 및 수집에 많은 비용이 소요된다. 한편 통계적 모델링 방법은 물리적 모델링 방법에 사용되는 것과 같은 관로의 파손과 관련된 직접적인 요인뿐만 아니라 비례 위험모형과 같은 다변수 확률모형을 이용하여 여러 가지 직접적인 요인을 총괄적으로 대표할 수 있는 간접적인 요인들에 대한 영향도 산정이 가능하나, 통계학적으로 의미 있는 모델링을 위해서는 오랜 시간 동안 구축되어온 관로 파손자료가 요구된다(박수완 등, 2007). 그러나 통계적 모델링 방법은 일정 기간 동안

구축되어온 파손자료가 존재할 경우 관로 파손과 관련된 물리적 자료 수집을 위한 추가적인 비용없이 다양한 통계분석 기법을 통하여 관로의 파손율과 같은 통계치들을 산정할 수 있는 장점이 있다.

이러한 상수관로의 노후도를 산정 및 예측하기 위한 물리적 및 통계적 방법론을 적용하기 위해서는 상수관로의 유지관리와 관련된 자료, 특히 누수 혹은 파손 시기 및 위치와 같은 자료가 필요한데, 이러한 자료가 구축될 경우 다양한 물리적 및 통계적 방법론을 이용하여 관로의 파손과 노후화에 영향을 미치는 인자들에 대한 분석이 가능하게 되며, 관로파손으로 인해 손실된 물의 가치, 침수로 인한 손해, 교통 혼잡 비용 및 단수로 인한 사업체의 수익 감소 등과 같은 사회적 비용을 산정하는 것이 가능하게 된다. 따라서 관로의 교체 및 개량 사업시 상대적으로 노후화가 많이 진행되었고 큰 사회적 비용을 유발할 수 있는 관로를 우선적으로 교체할 수 있게 되며, 그렇지 않은 관로는 사용기간을 연장할 수 있으므로 경제적인 관로의 유지관리가 가능하게 된다. 또한 이러한 과학적이며 합리적인 관로 유지관리 계획의 수립을 통하여 노후된 관로를 선별적으로 교체함으로써 관로의 노후로 인한 수질 문제를 미연에 방지할 수 있다.

3. 상수관로의 효율적인 유지관리를 위한 의사결정시스템

관로의 노후도를 산정하기 위한 방법론은 상수관로의 갱생 혹은 경제적 최적교체를 위한 선행계획(proactive plan)의 수립에 유용한 도구로 사용되어 왔으며, 최근에는 상수관망의 유지관리에 미치는 영향을 분석하고 관로교체 사업의 효과를 파악할 수 있는 통합자산관리시스템(comprehensive asset management system) 혹은 의사결정시스템(decision support system)의 한 부분으로 사용하고자 하는 연구가 진행되어 오고 있다.

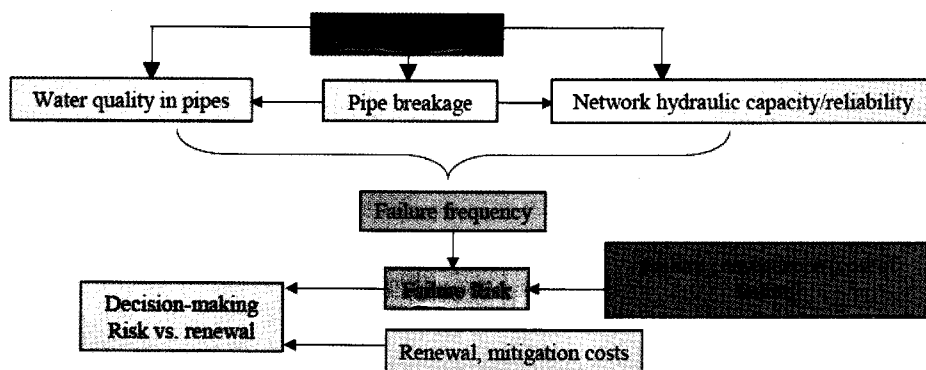


Fig 1. 상수관로의 갱생과 교체를 위한 의사결정 과정 (Rajani et al., 2004)

Fig 1은 상수관로의 갱생과 교체를 위한 의사결정 시스템의 작동 과정을 개괄적으로 보이고 있다. 이와 같은 의사결정을 간략하게 정리하면, 관로 자체의 특성과 외부환경은 관체 외부의 부식을 야기한다. 한편, 관로 자체의 특성과 관로를 통해 공급되는 물의 특성은 관체 내부의 부식을 일으킨다. 관로의 노후도를 산정하기 위한 물리적 및 통계적 방법론을 이용하여 이러한 관체 내·외부의 부식이 관로 내의 수질과 관로의 통수능에 주는 영향을 산정하고 관로의 파손율을 산정 및 예측한다. 관로의 갱생과 교체를 위한 결정은 예측된 관로의 수질, 수리학적 성능 및 파손율과 같은 관로의 물리적 상태와 관로의 갱생과 교체에 관련된 비용, 관로의 성능 목표, 다른 사회기반시설의 유지관리 계획 등과 같은 제반적인 여건을 고려하여 수립되게 된다. 갱생 혹은 교체되어야 할 관로를 결정할 후, 그 시기와 방법 그리고 수단에 대한 계획도 반드시 수립되어야 한다.

위와 같은 관로의 갱생과 교체에 따른 의사결정을 위해 현재까지 개발되었거나 개발 중에 있는 의사결정시스템들에 포함된 기능을 의사결정 과정에 필요한 개별 모델별로 살펴보면 다음과 같다. 우선 의사결정시스템은 관로의 물리적 및 구조적 상태를 파악하고 교체를 위한 우선순위를 결정하기 위해 다음과 같은 기능을 포함한다.

- 관측된 관로의 결함을 노후도 점수의 형태로 부

여하는 노후도 점수 평가 모델

- 매설상태인 관로의 파손율을 산정하기 위한 관로파손모델
- 매설상태인 관로의 통수능과 파손 취약도를 산정하기 위한 수리모의 모델
- 관로의 자산가치, 유지관리비용과 교체비용을 산정하기 위한 경제성 분석 모델
- 관망내의 오염물질의 농도를 산정하기 위한 수질모델
- 관로교체의 우선순위를 산정하기 위한 모델

또한 의사결정시스템은 관로교체계획의 실행이 관망시스템에 미치는 영향을 산정하기 위한 다음과 같은 기능을 포함한다.

- 교체된 관로의 파손율과 교체시기를 산정하기 위한 관로파손모델
- 미래의 유지관리비용과 교체비용을 산정하기 위한 경제성 분석 모델
- 관로교체 후 관로의 통수능과 파손 취약도를 산정하기 위한 수리모의 모델
- 관로교체 후 관망내의 오염물질의 농도를 산정하기 위한 수질모델
- 관로교체 계획의 효과를 비교하기 위한 관로교체 시나리오 분석모델

상수관망의 유지관리를 위한 대표적인 의사결정시

시스템으로는 균일한 특성을 가지는 관로군의 수명에 대한 통계적 연구를 통하여 관재질의 종류에 따른 연간 관로교체 길이를 결정하는 Herz(1998)의 KANEW, 비동질적 포아송 파손횟수 산정(non-homogeneous Poisson burst count) 모형을 이용하여 상수관망의 파손횟수와 비용을 산정하고 관로교체의 우선순위를 결정하는 Burn et al.(2003)의 PARMs-PLANNING과 Moglia et al.(2005)의 PARMs-PRIORITY, 포아송 회귀분석과 GIS 소프트웨어의 공간분석 기능을 이용하여 관로군에 대한 파손을 예측, 교체 대상 관로군 선정 및 교체 대안에 따른 분석을 실시하는 Malandain et. al(1998)의 AssetMap, 주철관과 덕타일 주철관로의 물리적 노후도 모형을 이용하여 관로의 잔존수명을 예측하고, 관로의 수리학적 거동, 수질의 변화 및 신뢰성을 통합적으로 고려하여 관로의 교체우선순위를 결정하는 Hadzilacos et al. (2000)의 UtilNets 등이 있다. 이러한 모델들 중에서 UtilNets가 가장 통합적인 모델이라고 할 수 있으나, UtilNets는 관로의 물리적 노후도를 산정하기 위해 필요한 자료의 방대함과 관로의 첫 번째 파손만이 모델링 된다는 점, 그리고 현재까지는 주철관로에 대한 분석만을 실시할 수 있다는 점 등의 한계를 가지고 있다.

4. 의사결정시스템의 활용 사례

위에서 살펴본 상수관로의 갱생 및 교체를 위한 의사결정시스템과 비슷한 개념인 통합자산관리시스템에 대한 효용성을 검토하기 위한 노력의 일환으로 미국 회계감사원(General Accounting Office, GAO)은 2003년 3월부터 2004년 3월까지 미국, 호주 및 뉴질랜드의 50개 상수도 관리회사(water and wastewater utilities)에 대한 설문 조사를 실시하였으며, 이 중 15개의 회사가 상수관로 통합자산관리 개념을 도입함으로써 관로의 누수횟수 감소 및 유지관리 비용을 절감하였다고 미국 상원에 보고하였다

(US GAO, 2004). 이 보고서에서 미 회계감사원은 상수관로 통합자산관리 개념의 도입으로 상수도 관리회사의 자본자산관리(capital assets management)를 위한 효율적인 의사결정이 이루어졌으며, 회사의 감독기관과 수도 사용자 납부자들에 대해 관로를 포함한 수도 시스템의 유지관리 상의 문제점들을 납득시키므로써 그들과 보다 생산적이며 원만한 이해관계를 수립할 수 있었다고 밝히고 있다. 또한 이 보고서는 이러한 유지관리 방안의 도입으로 인해 필요한 자료의 수집 및 관리를 위해 해결해야 할 문제점들, 그리고 이러한 새로운 의사결정 과정을 수행하기 위한 정보의 통합방법과 의사결정 방식의 변경으로 인해 바뀌어져야 할 부처 간의 업무 방식에 대해서도 논하고 있다.

이 보고서에서 인용된 상수관로 의사결정시스템의 활용사례를 소개하면 다음과 같다. 켄터키 주의 루이스빌 상수도 회사(Louisville Water Company)는 루이스빌 카운티 내 800,000명이 이용하는 상수도의 유지관리를 담당하고 있는데, 이 회사는 1990년대에 관로평가모델(Pipe Evaluation Model)이라고 하는 상수관로 유지관리를 위한 의사결정시스템을 개발하여 3,300mile(약 5,311km)의 관로에 대한 교체 및 갱생 우선순위를 결정하였다. 이 모델을 이용하여 관령(pipe age)과 유지관리 및 누수이력 자료를 통합적으로 분석한 결과 1926년부터 1931년 사이에 매설된 관로와 1862년부터 1865년 사이에 매설된 관로들이 노후되었음이 밝혀졌으며, 따라서 루이스빌 상수도 회사는 이들 관로를 교체하기로 결정하였다. 또한 이 모델로부터 1866년부터 1925년 사이에 매설된 관로는 비교적 신뢰도가 높은 것으로 나타나 이들 관로들에 대해서는 관내벽을 시멘트로 라이닝하는 갱생 공법을 적용하였다. 결과적으로 이러한 상수관로 유지관리를 위한 의사결정시스템을 이용함으로써 루이스빌 상수도 회사는 100mile(약 161km)당 26회 발생하였던 관로 파손사고를 22.7회로 줄일 수 있었고, 100mile 당 8.2회 발생하였던 관로연결 부분의 누수횟수를 5.6회로 줄일 수 있었다. 이외에도 시애틀 상

수도 회사가 비슷한 상수관로 의사결정시스템을 이용하여 노후된 상수관로를 선별적으로 교체 및 갱생함으로써 2004년도 유지관리 비용의 8%를 절약한 사례 등이 있다.

5. 맺음말

본고에서 밝힌 바와 같이 상수관로의 경제적이며 효율적인 유지관리를 위해서는 관로의 노후도와 교체의 경제성을 동시에 고려하여야 하며, 이는 양질의 물을 안정적으로 국민에게 보급해야 하는 수도도의 근본 목적과 밀접한 관계가 있다. 이와 관련하여 안정적인 상수관로의 유지관리를 위하여 현재까지 전세계적으로 개발된 유용한 방법론들이 본고에서 언급한 바와 같이 많이 존재하고 있으나, 이러한 과학적인 방법론을 우리나라에 적용하기 위해서는 관망도와 같은 기초적인 상수관로 관련자료 뿐만 아니라 상수관로의 누수 혹은 파손과 연관된 유지관리 자료를 구축하는 것이 필수적으로 요구된다.

우리나라의 일부 지방자치단체에서는 이러한 관로의 기록을 유지 관리해 오고는 있으나 자료구축의 표준화가 이루어지지 않아 통합적인 자료 관리에 어려움을 겪고 있는 상황이다. 또한 관로의 유지관리를 위한 방대한 자료를 효율적으로 처리하기 위해서는 이러한 자료를 기 구축된 지리정보시스템(GIS) 혹은 도시정보시스템(UIS)과 연계하여 전산화하는 것이 반드시 필요하다. 수도사업의 민영화가 이루어진 선진외국의 경우 이러한 상수관로 유지관리 자료의 전산화 및 지리정보시스템과의 연계가 상당 부분 진행되고 있으나, 우리나라는 이에 대한 정부와 지자체의 관심 부족으로 인하여 이러한 노력이 거의 진행되지 않고 있는 실태에 있다. 따라서 막대한 예산이 소요되는 노후수도관개량사업의 경제적이며 효율적인 수행을 위해서는 정부와 지자체가 상수관로의 유지관리와 연관된 누수 및 파손 자료의 중요성에 대한 인식을 제고하여 자료 구축의 표준을 수립하고 체계적

인 전산화를 추진하여야 한다. 또한 상수관로 유지관리 자료의 전산화를 위한 기술은 기 구축된 무선통신망과 지하시설물 자료체계를 기반으로 개발될 수 있으므로 상수관로 유지관리 자료의 전산화는 관련 정보통신산업의 활성화에도 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 박수완, 김정욱, 전환돈 (2007). "상수도 배수관로의 특성에 따른 개별관로 정의 방법을 이용한 파손사건 사이의 비례위험모델링." 수질보전 한국물환경학회지, 한국물환경학회, 제23권, 제1호, pp. 87-96.
- American Water Works Association(AWWA) (2001), Dawn of the Replacement Era: Reinvesting in Drinking Water Infrastructure, Water Industry Technical Action Fund, Denver, CO.
- Burn, L. S., Tucker, S. N., Rahilly, M., Davis, P., Jarrett, R. and Po, M. (2003). "Asset planning for water reticulation systems—the PARMS model." Water science & technology: Water Supply, Vol. 3, pp. 55-62.
- Hadzilacos, T., Kalles, D., Preston, N., Melbourne, P., Camarinopoulos, L., Eimermacher, M., Kallidromitis, V., Frondistou-Yannas, S. and Saegrov, S. (2000). "UtilNets: a water mains rehabilitation decision-support system." Computers, environment and urban systems Vol. 24, pp. 215-232.
- Herz, R. K. (1998). "Exploring rehabilitation needs and strategies for water distribution networks." J. Water SRT -Aqual, Vol. 47,

- pp. 275-283.
- Kleiner, Y. and Rajani, B. (2001). "Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models." *Urban Water*, Vol. 3, pp. 131-150.
- Malandain, J., Le Gauffre, P., and Miramond, M. (1998). "Organizing A Decision Support System For Infrastructure Maintenance: Application To Water Supply Systems." *Proceedings. First International Conference on New Information Technologies for Decision-making in Civil Engineering*, Montreal, Canada, 11-13 Oct. 1998, pp. 1013-1024. ISBN 2-921145-14-6.
- Moglia, M., Burn, S. and Meddings, S. (2006). "Decision support system for water pipeline renewal prioritisation." *ITcon Vol. 11, Special Issue Decision Support Systems for Infrastructure Management*, pp. 237-256, <http://www.itcon.org/2006/18>
- Rajani, B. and Kleiner, Y. (2004). "Alternative strategies for pipeline maintenance/renewal." *International Overview of Pipeline Design, Installation, and Maintenance Practices*, AWWA 2004 Annual Conference, Orlando, Florida, June 13-17, NRCC-45353, pp. 1-16.
- United States General Accounting Office(U.S. GAO) (2004), *WATER INFRASTRUCTURE-Comprehensive Asset Management Has Potential to Help Utilities Better Identify Needs and Plan Future Investments*, GAO-04-461, Report to the Ranking Minority Member, Committee on Environment and Public Works, U.S. Senate, pp. 26-30. ●