수정 간접 평가 방법 개발을 활용한 상수도 관망 노후도 예측모델 연구

Study of Deterioration Prediction Model of Water Distribution System Using the Development of Method of the Amend Indirect Condition Assessment

박미연* · 소병춘** · 박재학** · 김광호*** · 심재호***

Park, MiYun*, Sho, ByungChoon**, Park, JaeHak**, Kim, KwangHo***, Sim, JaeHo***

Abstract

Korea's rapid urbanization development has changed the country, water and waste water facilities also has been continuously increased. Especially in the 80's and 90's, a lot of Pipe had been installed and Pipe network has rapidly extended, and those are over 40~50 years old. The concurrent increase of the replacement arrival period makes a large of national financial burden on government and society. For this reason, to build the appropriate and reasonable budget investment strategy, the determination of introduction of asset management system about water treatment and wastewater facilities is desperately needed. Thus, in this study, a pilot area for a particular technology to assess the current state of the diagnostic evaluation and safety inspection of the facility safety analysis to compare the result to derive the correlation between the two diagnostics, environmental characteristics, and tend to apply the aging of Water Distribution System the aging of the proposed prediction model. To assess the level of the facilities at the present time, and it's based on the long-term national plan for infrastructure asset management is a very important part seems to be able to be utilized.

Key words : Infrastructure, Asset management, Deterioration Model, Regression analysis, Condition evaluation

요 지

우리나라의 상·하수도 시설의 경우 도시발달과 더불어 지속적으로 확충되어 왔다. 특히 80년대와 90년대 많은 관망들이 설치되었으며, 이들의 설치수명이 많게는 4~50년에서 달하고 있어, 노후관들의 교체에 따른 국가 재정 부담이 발생하고 있다. 따라서 이에 대한 적절하고 합리적인 예산투입시기 및 비용규모결정을 위한 상·하수도 자산관리체계 도입이 절실히 필요하다. 이를 위해, 본 연구에서는 특정 시범대상지역의 현재 상태를 평가한 기술진단과 시설물의 안전성을 평가한 안전진단의 결과값 비교 분석을 통해 두 진단간의 상관성을 도출하여, 환경적 특성 및 노후도 경향을 적용한 상수도 관망의 노후화 예측 모델을 제시하였다. 이를 바탕으로 장기적인 국가 기반시설 자산관리 플랜 수립에 매우 중요한 부분으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기반시설, 자산관리, 노후화 모델, 회귀분석, 상태평가

1. 서 론

우리나라의 상·하수도 시설의 경우 도시가 발달함에 따라 지속적으로 확충되어 왔다. 특히 도시로의 인구 집중과 더불어

80년대와 90년대 많은 관망들이 설치되었으며, 이들의 설치수명이 많게는 4~50년에 도달하고 있다. 이에 따라 지속적으로 노후관 교체사업이 이루어지고 있으며, 이에 대한 예산 또한 막대한 규모를 차지하고 있다. 이는 발전 및 개발시대

*교신저자. 정회원. (주)승화기술정책연구소 연구소장(Tel: +82-2-2057-2210, Fax: +82-2-2057-2290, E-mail: momo6238@hanmail.net)

Corresponding Author. Member. Head, S. H. Tech&Policy Institute

** (주)승화기술정책연구소 연구원

Researcher, S. H. Tech&Policy Institute

*** 한국수자원 공사

Department of Management Water Pipe, K-Water

의사결정 방법인 설치 위주의 관점에서만 바라보다 보니 유지관리 중심의 시설 관리 관점이 부재한 결과라고 해도 과언이 아니다. 계속적으로, 그리고 동시다발적으로 증가하고 있는 노후관들의 교체시기 도래는 우리나라 국가 재정에 큰 부담으로 작용하고 있으며, 이에 대한 적절하고 합리적인 예산 투입시기 및 비용규모결정을 위한 상·하수도 자산관리체계 도입이 절실히 필요하게 되었다.

최근, 국내·외에서는 국가 기반시설에 대해 자산관리(Asset Management)개념을 적용하여 현재 관망의 상태(Condition)를 파악하고, 장기적인 관망 노후도를 예측하여 보수·보강의 적정시기를 결정하는 포괄적인 의미의 관리 프로세스를 정립하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

이러한 상수도 관망에 대한 자산관리 개념은 현재 상태를 다양한 평가지표를 활용하여 제시하고, 경과기간에 따른 시설 노후도를 예측하여 유지보수 시점 및 중·장기적인 개·대체 비용예측을 가능케 하는 프로세스이다. 특히, 관망에 대한 노후도 추정 모델 개발은 포괄적인 개념보다는 지역적 환경특성과 사용특성이 반영된 모델 개발이 매우 중요하며, 해당 시설물의 시공 환경적 영향요소와 현재 조건을 바탕으로 미래 시점의 상태를 예상하는 시설 노후화 모델 개발이 매우 필요한 실정이다.

이를 위해 본 연구에서는 특정 시범대상지역의 안전/기술진단의 자료를 활용하여 환경적 특성 및 노후도 경향을 적용한 상수도 관망의 노후화 모델을 개발하기 위한 방법론을 연구하였다.

2. 국내·외 연구사례

2.1 국외사례

국외에서는 관로 시설에 대한 상태평가 및 노후도 평가모델 개발을 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 일부 국가의 경우 개발된 노후도 예측 모델을 활용하여 비파괴 안전진단기술에 활용하고 자체적인 모델의 결과만으로 관로시설의 보수·보강공사 현장에 적용하여 긍정적인 결과를 보이고 있다. 이런 방법론을 적용한 대표적인 노후도 평가 회귀모델의 개발 사례로는 미국의 Iowa주의 Des Moines 수도국이 개발한 것과 EPA가 개발한 모델이 있다.

Des Moines 수도국에서 개발의 모델의 경우, 지반의 조건과 부식도를 측정하여 관망의 사용년수를 예측하는 것으로 비파괴 상태에서 관에 대한 평가가 가능한 부분이 있지만, 관에 대한 직접적인 노후도를 예측 하기는 불가능한 모델로 판단된다.

또한, EPA 모델 경우는 관경, 관중, 수압, 토양, 파손이력 등 다양한 요소를 고려하여 최초 파손년수와 추가적인 보수건수 등을 예측할 수 있는 모델이지만 파손시점이 아닌 현재 상태를 평가하여 시간경과에 따른 상태변화를 추정 할 수 없는 문

제점을 가지고 있다.

2.1.1 Des Moines Water Works의 모델

$$AGE = 65.78 + (0.028 \times SR) - (6.338 \times pH) - (0.049 \times ORP) \quad (a)$$

여기서, AGE: 최초의 파손까지의 년수(년), SR: 포화토양저항(O₂-cm), pH: 토양의 pH, ORP: 산화환원전위(Redox Potential, millivolts).

2.1.2 EPA(Environmental Protection Agency)의 모델

최초 파손 발생 시까지의 년수를 추정하는 회귀모델

$$NY = 4.13 + 0.338D - 0.022P - 0.265I - 0.0983RES - 0.0003LH + 13.28T \quad (\text{결정계수 } R^2 = 0.23) \quad (b)$$

여기서, NY: 매설후 최초 보수까지의 년수(년), D: 관경(inch), P: 관내 절대수압(lb/inch²), I: 관 매설 지역에서의 공업지역의 비율(%), RES: 관 매설 지역에서의 주택지역의 비율(%), LH: 부식성이 높은 토양의 관의 연장(mile), T: 관중(금속: 1, 철근콘크리트: 0).

최초 파손이후의 보수건수를 추정하는 회귀모델

$$REP = (0.1721) \cdot (e^{0.7197}) \cdot (e^{0.0044})^{PRD} \cdot (e^{0.0865}) \cdot A \cdot (e^{0.0121})^{DEV} (SL)^{0.014} (SH)^{0.069} \quad (\text{결정계수 } R^2 = 0.47) \quad (c)$$

여기서, REP: 수리건수(건), PRD: 수압차 (lb/inch²), A: 최초 파손으로부터 경과년수(년), DEV: 관매설지역에서 개발지역의 비율(%), SL: 부식성이 낮은 토양의 관 표면적(inch²), SH: 부식성이 높은 토양의 관 표면적(inch²), T: 관중(금속: 1, 철근콘크리트: 0)

2.1.3 그 외 연구사례

앞서 언급한 사례의 다양한 연구보고서 및 학위논문(HUU, 2007)에서 최소 파손년수 산정 뿐만 아니라, 경과년수에 따른 노후화 정도를 추적할 수 있는 회귀모델을 제시하여 현 관망에서 상태를 평가하고, 공용년수에 따른 노후도를 예측할 수 있는 모델을 제시하고 있다.

여기에는 Markov chain, Fuzzy method, Artificial Neural network 등과 같은 예측 기법들을 활용한 다양한 형태를 제시하고 있다.

또한, 일본의 경우는 ‘관로시설 진단법의 체계화 조사 보고서’에서 제시하는 간·직접진단법을 통해 관로시설의 건전성을 평가하였다. 이는 현재 상태를 파악하여 사용성을 평가하는 방식으로 국내의 간·직접 관망상태평가와 유사한 형태를 보이고 있다.

하지만 이렇게 제시된 다양한 연구결과에서도 기존 상태평가 자료(계측, 진단등)를 활용하여 노후화를 예측할 수 있는

방법론을 제시한 경우는 전무한 상태이다. 실질적인 진단을 통해 제시되는 자료를 활용하여 해당지역의 특성을 접목한 정확하고 신뢰성 있는 모델 개발이 필요할 것으로 보인다.

2.2 국내사례

국내에서 관망에 대한 노후도 평가 기술 개발에 대한 연구 사례는 수도관 개량을 위한 의사결정 시스템 개발(이현동, 1995), 상수도관로의 부식 및 노후도 예측모델 개발(한국건설기술연구원, 2002), 에너지절약 건물 내 노후급수관의 상태진단 및 평가를 위한 안전진단기술 개발(한국건설기술연구원, 2002), 상수도관망의 최적 관리 시스템 개발(한국건설기술연구원, 2002), 상수로로 상태평가를 통한 개대체 우선순위 결정 기법 개발(한국수자원공사, 2004) 등이 있다.

“수도관 개량을 위한 의사결정시스템 개발”의 경우는 실측 자료의 미비로 인한 실적용의 한계가 있으며, 지역적 특성을 적용한 노후도 평가에 집중하고 있어 다양한 분야의 적용성이 떨어진다. 또한 “상수도관로의 부식 및 노후도 예측모델 개발”에서는 노후도 평가방법이 제시되어 있지만, 육안 조사 시 주관적인 평가가 포함될 수 있는 방법으로 적용하는데 무리가 있을 것으로 보인다.

“에너지 절약 건물 내 노후 급수관의 상태 진단 및 평가를

위한 안전진단기술 개발”은 건물내 급수관의 부식 및 노후화의 상태를 평가하고, 이를 개량공사에 적용하기 위한 공법을 개발하는 연구지만, 급수관의 특성상 노후화로 인한 보수·보강 개념보다는 문제가 발생하였을 때 갱생 및 교체단계로 적용되는 현 유지관리 체계와는 일치하지 않는 방법으로 판단된다.

“상수도 관망의 최적 관리 시스템 개발”은 상수도 관망의 최적 시설운영 및 유지관리를 위하여 SCADA(Supervisory-Control And Data Acquisition) 시스템을 적용하고 이를 통해 유수율 관리가 가능하게 설계하여 누수 수량 분석 및 관리하도록 하였다. 이러한 누수 정보는 관망에 대한 노후화로 인해 발생하는 사례보다는 초기 시공 과정에서 발생하는 외부 충격에 의한 균열 및 파손으로 발생하는 것으로 관련 자료를 활용하여 현 관망에 대한 관리 상태를 결정하는 것은 다소 한계성을 보일 수 있을 것으로 보인다.

특히 “상수로로 상태평가를 위한 개대체 우선순위 결정기법 개발”에서는 한국수자원공사가 관리하는 광역상수도에 대하여 주로 사용하는 강관과 주철관에 대한 현장조사 및 개발된 노후도 평가체계를 검증하고, 소구경의 다양한 관종으로 매설되어 있는 지하체를 선정하여 갱생관, 에폭시 강관, 스테인레스관, PEP 등의 노후도 추정체계(식 (d), (e))를 제시하였다.

Fig. 1. Process of KWI'S Deterioration Model.

$$\begin{aligned} \text{강관 노후도} = & 1.50 + (0.297 \cdot \text{관로구분}) - (0.184 \cdot \text{관경}) \\ & - (0.203 \cdot \text{내면피복}) - (0.190 \cdot \text{매설년도}) \\ & - (0.398 \cdot \text{매설깊이}) + (0.209 \cdot \text{토양종류}) \\ & - (0.294 \cdot \text{주변도로}) - (0.0379 \cdot \text{전기방식}) \\ & + (0.0486 \cdot \text{누수, 파손기록}) \end{aligned} \quad (\text{수자원 공사, 2004}) \quad (d)$$

$$\begin{aligned} \text{주철관 노후도} = & 0.758 - (0.153 \cdot \text{관경}) + (0.329 \cdot \text{내면피복}) \\ & - (0.109 \cdot \text{매설년도}) + (0.130 \cdot \text{매설깊이}) \\ & - (0.0929 \cdot \text{토양종류}) + (0.0020 \cdot \text{주변도로}) \\ & - (0.0091 \cdot \text{누수, 파손기록}) \end{aligned} \quad (\text{수자원 공사, 2004}) \quad (e)$$

3. 상수도 관망에 대한 상태평가 현황 및 문제점 분석

3.1 진단 방법별 대상시설 검토 및 특성 분석

수도 관망에 대한 진단은 안전진단과 기술진단으로 구분할 수 있다. 안전진단에서는 도수관과 송수관을 대상으로 하며 (시설안전공단, 2011) 기술진단의 경우는 광역상수도와 지방상수도로 구분하여 광역상수도의 경우는 도수관, 송수관을, 지방상수도의 경우는 송수관, 배수관, 급수관을 대상으로 하고 있다. 또한, 안전진단은 안전점검 및 정밀안전진단 세부지

Table 1. Period and Object Pipe for Condition Evaluation Method

Classification	Water Facility Safety Inspection		
	Periodic Inspection	Precision inspection	Precision Safety Inspection
Related Requiration	The Special Act on Safety Management of Facilities		
Inspection Period and Schedule	- Periodic Inspection : A half one time - Precision inspection : 2~4 year per building levels 1 time Others 1 time per 1-3 year - Precision Safety Inspection : 1 time per 4~6 year according to levels ※ The Special Act on Safety Management of Facilities Enforcement Decree_attached table 2.1		
Facilities	Intake facility, pipeline facilities (Intake pipe, Conveyance water pipe, water distribution and channel tunnel), Clean water facilities, pump station, controlled reservoir, pond, other facilities (periodic inspection only)		

침 해설서에서 제시하는 방법을 활용하여 진단하고, 기술진단은 광역상수도의 경우는 도·송수 진단 가이드를, 지방상수도의 경우는 상수도 관망진단 매뉴얼을 활용하고 있다(Table 1. 참조).

이렇게 진단 방법별로 시설물 상태평가 방법이 분류되어 있어 각 진단 결과에 따른 보수·보강 적용 개념도 상이하게 적용되게 된다. 안전진단의 경우, 시설물의 안전관리에 관한 특별법에서 제시하는 상태평가 후 C등급($2.5 \leq \text{상태지수} \leq 3.5$)에 해당하는 시설에 대해서 보수·보강을 실시하도록 하고 있으며(Table 2참조) 반면에 기술진단의 경우는 일반기술진단 후 ‘보통이하’(우수, 양호, 보통, 불량, 심각: 5단계로 평가)의 경우, 전문기술진단을 실시하도록 하고 있다. 평가방법 또한 간접평가 방법과 직접평가 방법을 적용하여 관망에 대한 사전 정보(관중, 관경, 매설년도 등)를 활용하여 시설물의 개략적인 상태를 판단할 수 있는 간접평가 실시 한 후 평가점수에

따라 직접평가 유무를 결정하게 된다. 직접평가는 간접평가에 의한 노후도 정도가 ‘주의 관찰’ 대상시설(간접평가 점수 4.5~6.0에 해당)에 해당할 경우 굴착 후 물리적인 상태(실측 내경, 관두께, 도복장두께, 외면부식깊이 등)를 측정하도록 하여 관에 대한 갱생 또는 교체 여부를 판단하도록 하고 있다 (Table 3 참조).

3.2 진단(안전진단/기술진단)방법별 문제점 분석

안전진단에서는 관로 내·외부 부식환경조사(토양비저항, 관대지전위차, 토양 pH, 함수율 등), 강재시험, 밸브실 조사를 통해 상태평가를 실시하고 여기서 산출되는 상태지수에 따른 상태등급을 제시하여 안전등급별로 시설물의 보수·보강 여부를 판단하게 된다. 이를 통해 관망에 대한 실질적인 현재 관망상태를 측정할 수 있으나, 단수 및 해당지역 통제 후 굴착하여 관망에 직접 진단해야 되는 방식으로 주민들의 불편 및 진단구간의 지반 교란으로 인한 시설 불안정을 초래할 수 있다.

또한, 보수·보강 수준으로 제시하고 있는 C등급($2.5 \leq \text{상태지수} \leq 3.5$)의 경우는 길이별로 구분되어 있는 관에 대한 적용 등급이 아닌 전체적인 대상지역 전체 시설에 대한 평가등급이 해당될 때 우선 보수·보강 시설을 선정하여 이를 진행하는 형태로 해당 관망시설에 대한 세부등급이 C등급에 해당된다고 하여도, 교체 및 갱생 대상에 포함되지 않을 수 있다.

반면 기술진단의 간접평가의 경우는, 사전 정보를 활용한 평가를 거친 후 해당시설에 대해서 직접평가를 진행하도록 하고 있어 안전진단 방법보다는 현 구조물의 상태를 변화시키지 않는 상태에서도 개략적인 관망 상태를 파악할 수 있는 이점이 있다.

하지만 이러한 간접평가의 경우, 실질적인 관망 상태를 평가하는 것이 아니기 때문에 직접평가 대상으로 분류되기 전까지의 관망시설에 대한 관리는 조건값을 활용한 상태평가를 통해 산출되는 평가결과만을 적용하는 방법 외에는 없어 일차적인 관리만 가능해진다.

Table 2. Condition Evaluation Criteria in Safety Inspection

Level	Condition
A (Excellence)	In excellent condition with no problems
B (Good)	Minor defects, in need of some maintenance
C (Normal)	The main element minor defects, in need of repair
D (Pool)	The main element defects, state emergency maintenance needs
E(Bad)	The main element serious defects unusable state

Table 3. Condition Evaluation Criteria in Technology Inspection

Division	Range	Condition
Evaluation result	<0.45	Replacement/rehabilitation
	0.45~0.60	Progression
	0.60<	Good

Fig. 2. Ratio Evaluation Graph Related to Condition Analysis Method.

또한 간접평가 방법은 초기 시공시점에서 조차도 평가점수 자체가 최고점수인 1.0을 나타내지 못하는 특징이 있다. 즉, 강관(SP)의 초기 시공 상태가 상태점수 최적 점수인 1.00점에서 시작되는 것이 아니라 Fig. 2와 같이 0.8443에서 시작되는 것을 볼 수 있다. 이는 다른 모든 조건을 최상상태로 적용한다고 해도 관종별로 조건값(Ministry of Environment, 2007)을 차등 적용하게 하는 간접평가 기준식에 의해 표출되는 것으로 시간변화에 따른 노후진행 과정을 민감하게 표현하는 데는 큰 한계성을 나타내게 된다.

따라서, 본 연구에서는 안전진단이 가지는 문제점과 기술진단이 가지고 있는 한계성을 보완할 수 있는 방법을 제시하기 위해 시범대상지역의 안전진단 및 기술 진단자료를 근거로 두 방법론간의 노후도 모델 상관성을 분석하고 이를 보정할 수 있는 노후화 평가모델을 개발하였다.

4. 도수관 노후화 평가 모델 개발

4.1 노후화 평가 모델 개발 기본 방향

관망시설에 대한 기본방향은 다음 Table 4 순서와 같다.

우선 (1)각 진단자료(안전진단/기술진단)를 확보하고 (2)현재 확보 중인 안전진단 상의 상태평가지수를 분석하여 노후화 경향을 파악하고 (3)이를 활용하여 기술진단 간접평가 결과간의 상관성 분석을 위해 상대안전진단 추정식을 제시한다. (4)관망의 특성정보를 활용하여 기술진단 간접평가 후 동일하게 관망 상태 변화 회귀식을 산출한다.

이후 (5)제시된 진단 결과를 분석하여 제시된 상관성(patten)을 도출한다. 그리고 최종적으로 (5) 상관성을 기술진단 회귀식에 매칭하여 최종 관망 노후화 모델을 제시하고 이를 지방공기업 시행규칙에서 제시하는 기준과 적용할 수 있는 방안을 제시한다.

Table 4. Process of Development Deterioration Model

(1) Obtain the data of Inspection (Safety/ Indirect Techical Inspection)
(2) Confirm the trend of Deterioration Slope
(3) Develop Relative Condition Curve Based Safety Inspection Regression Curve
(4) Appear Regression Curve based on Indirect Inspection
(5) Conduct trend analysis of the correlation between Relative Condition Curve and Indirect Inspection
(6) Applicability and the proposal of the Deterioration model to Pipe network

4.2 안전진단 자료의 상태평가 결과 분석

관망에 대한 안전진단은 A-Line과 B-Line으로 구분하여 상태평가를 진행하였으며, 관에 대한 정보 및 안전진단 결과는 다음 Table 5, Table 6과 같다.

A-Line의 경우, 강관(SP)으로 관경은 1650 mm, 설치년도

Table 5. Condition Evaluation through Safety Inspection(A-Line)

Section	Distance (m)	Top of the structure	Condition	Condition Ratio
a1	825	Road	b	3.64
a2	9	Non-Road	b	3.6
a3	186	Road	b	3.6
a4	391	Non-Road	b	3.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a21	13	Non-Road	b	3.6
a22	660	Non-Road	b	3.6
a23	74	Non-Road	b	3.6
a24	437	Non-Road	b	3.6

Fig. 3. Deterioration Trend in Safety Inspection(A-Line).

는 1999년인 도수관이며 B-Line의 경우는 동일 관종으로 관경은 600 mm, 설치년도는 1991년이다. A-Line 경우는 약 12년, B-Line은 20년 정도 사용한 관으로.(안전진단 2011년 진행) 매설지역은 도로와 나대지에 주로 설치되어 있으며, X축은 경과년수, Y축은 상태지수로 Table 5의 상태지수를 그래프로 나타내면 Fig. 3과 같이 나타 낼 수 있다.

진단 결과 A-Line과 B-Line 모두 몇몇 구간을 제외하고는 동일한 구간에 설치되어 있으며 양호한 상태를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

제시된 상태평가 자료를 활용하여 초기 상태지수를 5(최적적의 상태)로 설정하여 노후도 경향을 파악하면 식 (f), (g)을 도출할 수 있다. 식 (f), (g)의 경우 지수 형태의 회귀식으로 선형식이나 다항식보다 데이터의 신뢰성이 높게 산출되었으며, 그 결정계수 또한 높게 제시되었다($R^2=0.894$).

이렇게 제시된 노후도 추정식의 경우는 안전진단 자료를 바탕으로 도출한 것으로 그 지역의 환경적 특성 및 시설의 설치 지역의 다양한 외부적 요소들(토질, 외부 하중 여건, 내부 부식 정도 등)이 고려되어 노후도 예측 시 중요자료로 활용된다.

$$Y = 5e^{-0.028X} \quad (R^2=0.894) \quad (f)$$

여기서, Y: 평가점수, X: 경과년수(year)

관경 D1650와 D600에 대한 회귀식에서 특이한 점은 관경

Table 6. Condition Evaluation through Safety Inspection(B-Line)

Section	Distance (m)	Top of the structure	Condition	Condition Ratio
b1	173	Road	b	3.75
b2	47	Non-Road	b	3.6
b3	102	Road	b	3.6
b4	221	Non-Road	b	3.75
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
b13	270	Non-Road	b	3.66
b14	931	Road	b	3.6
b15	401	Non-Road	c	3.09
b16	232	Road	b	3.6

Fig. 4. Deterioration Trend in Safety Inspection(B-Line).

이 작은 D600이 노후화 수준이 더 느리게 나타나고 있는데 이는 2002년 D1650 이 설치, 운영된 이후 사용을 거의 안하게 되어 상태등급의 변화가 느리고 양호한 것으로 안전진단에서 평가되었다.

$$Y = 5e^{-0.018X} \quad (R^2=0.5909) \quad (g)$$

여기서, Y: 평가점수, X: 경과년수(year)

4.3 기술진단 자료의 상태평가 결과

기술진단의 경우는 기술 진단 보고서에서의 이력 자료 (2013년)와 운영기관이 보유한 기초 Data를 바탕으로 간접평가(Ministry of Environment, 2007)를 실시하여 노후도 평가를 진행하였다. 안전진단에서 수행한 동일한 관종에 대하여 간접평가를 수행한 결과 노후도 점수가 0.7297~0.8872로 산출되었고, 평가결과는 양호한 것으로 나타났다. 이는 안전진단 결과와 유사한 결과이다. 하지만 초기 상태를 최상의 상태로 가정한 안전진단의 경우와는 상이하게 초기 노후도 값이 0.8443으로 시작되는 부분은 앞서 기술진단의 문제점으로 제시한 관종에 대한 조건값의 제약에 의한 결과이다.

Table 7과 Fig. 5는 시범지역을 대상으로 한 강관(SP) 관경 1650 mm의 노후도 경향을 표현한 것이다.

Table 7. Condition Evaluation through Indirect Evaluation (D1650)

Diameter	Type	Install	Top of the structure	Condition Ratio
1650	SP	1999	Streets	0.8347
1650	SP	1999	Streets	0.8727
1650	SP	1999	Road	0.7297
1650	SP	1999	Road	0.8057
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1650	SP	1999	Road	0.7297
1650	SP	1999	Road	0.8057
1650	SP	1999	Road	0.8057
1650	SP	1999	Road	0.7297

Fig. 5. Deterioration Trend in Indirect Evaluation(D1650).

Table 8. Condition Evaluation through Indirect Evaluation (D600)

Diameter	Type	Install	Top of the structure	Condition Ratio
600	SP	1991	Road	0.6776
600	SP	1991	Road	0.6161
600	SP	1991	Road	0.7301
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
600	SP	1991	Road	0.6921
600	SP	1991	Road	0.6921
600	SP	1991	Road	0.6921

Fig. 6. Deterioration Trend in Indirect Evaluation(D600).

$$Y = 0.8443^{e^{-0.004X}} \quad (R^2=0.834) \quad (h)$$

여기서, Y: 평가점수, X: 경과년수(year)

Table 8과 Fig. 6은 동일지역의 SP(D600)을 분석하여 노후도 경향을 표현한 것이다.

$$Y = 0.8383^{e^{-0.011X}} \quad (R^2=0.4705) \quad (i)$$

여기서, Y: 평가점수, X: 경과년수(year)

기술진단 기준에서의 간접평가방법은 누수나 민원이 발생한 것에 대한 고려를 중심으로 관경, 관중, 매설년도, 토양조건 등 관망에 대한 기본적인 정보를 통해 조건값에 해당하는 가중치를 부여하고 있어 직접적인 진단과 비교하면 현재의 관 상태를 실질적으로 분석했다고 보기에는 다소 미약한 부분이 있다.

하지만, 기존의 관의 특성이나 성질을 반영한 물리적인 조건을 일차적으로 충분히 고려하는 것은 시설 자산의 최적의 관리조건을 제시하는 자산관리 개념에서는 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 안전/기술진단의 비교분석을 통한 관망 특성을 반영한 노후도 모델 개발

앞서 분석한 결과를 바탕으로 기술진단의 간접평가 방식이 가진 이점(비파괴 평가)과 한계성(직접적인 현장 상태가 적용되지 않음)을 보완하기 위하여 안전진단 상태지수를 통해 산

Fig. 7. Residual Analysis(D1650).

Fig. 8. Residual Analysis(D 600).

출한 노후화 경향을 기술진단 결과와 매칭 시켜 기술진단의 간접평가 방법의 한계성을 보완할 수 있는 노후도 예측 모델을 제시하고자 하였다.

이를 위해 안전진단 노후화 경향과 기술진단 간접평가 노후화 경향을 경과년수 변화에 따라 산출하고, 이에 대한 상관성을 분석하였다. 먼저 안전진단 평가 결과지표를 기술진단에서 사용하고 있는 절대 단위 기준으로 변환하여 동일한 기준으로 비교할 수 있도록 구성하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 D1650과 D600관망의 두 가지 진단 결과(안전진단과 기술진단)에 따른 절대 단위기준에 의한 노후도 경향을 그래프로 표현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 노후도지표가 상이하게 출발하고 있으며 각각의 기울기의 경향 또한 매우 상이하게 표출되는 것을 확인할 수 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위해서는 진단 초기치 값이 동일하게 조정되어야 하며 각각이 갖고 있는 기술진단의 결과에 큰 영향이 없도록 조정 및 방법론이 필요하다. 이를 위해 두 그래프의 갭을 먼저 분석하였으며 갭 분석에서 도출된 값의

Table 9. Deterioration Prediction through Correlation Analysis and Conversion(D1650)

Year	SI	SIM	IE (1)	RA (2)	(1)+(2)
0	5.00	1.00	0.84	0.14	0.99
1	4.86	0.97	0.84	0.12	0.96
2	4.73	0.95	0.84	0.10	0.94
3	4.60	0.92	0.83	0.08	0.92
4	4.47	0.89	0.83	0.06	0.89
5	4.35	0.87	0.83	0.04	0.87
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
45	1.42	0.28	0.71	-0.42	-0.41
46	1.38	0.28	0.70	-0.42	0.28
47	1.34	0.27	0.70	-0.42	0.28
48	1.30	0.26	0.70	-0.42	0.27
49	1.27	0.25	0.69	-0.42	0.27
50	1.23	0.25	0.69	-0.43	0.26
S-I : Safety Inspection S-I-M : Safety Inspection modify			I-E : indirect evaluation R-A : Residual analysis		

Table 10. Deterioration Prediction through Correlation Analysis and Conversion(D600)

Year	SI	SIM	IE (1)	RA (2)	(1)+(2)
0	5.00	1.00	0.93	0.064	1.00
1	4.91	0.98	0.91	0.061	0.98
2	4.82	0.96	0.90	0.058	0.96
3	4.73	0.95	0.89	0.056	0.95
4	4.65	0.93	0.87	0.054	0.93
5	4.56	0.91	0.86	0.050	0.87
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
45	2.22	0.44	0.46	-0.017	0.44
46	2.18	0.44	0.45	-0.018	0.43
47	2.15	0.43	0.44	-0.019	0.42
48	2.11	0.42	0.43	-0.020	0.42
49	2.07	0.41	0.43	-0.020	0.41
50	2.03	0.41	0.42	-0.021	0.40

잔차를 회귀식으로 재구성하였으며 이를 간접평가 지수에 부가함으로써 직접평가의 결과 값으로 변환을 추진하여 그 결과를 직접평가의 결과치와 상관성 분석을 수행하였다. Table 9는 이러한 과정을 절차에 따라 제시한 것이다.

$$Y = 0.0002X^2 - 0.0214X + 0.1437 \quad (R^2=0.998) \quad (j)$$

여기서, Y: 상태평가점수, X: 경과년수(year)

$$Y = 0.00002X^2 - 0.0027X + 0.064 \quad (R^2=0.999) \quad (k)$$

여기서, Y: 상태평가점수, X: 경과년수(year)

Fig. 9. Deterioration Predict Model.

제시된 식 (j), (k) 경우는 관경 1650 mm과 600 mm의 강관 (SP)에 해당되는 것으로 Table 12, 13에 제시되어 있는 기준을 바탕으로 제시하면 양호 상태기준인 0.6에 해당되는 경과년수는 18년 정도, 교체 및 갱생 상태기준인 0.45는 약 29년 정도로 분석되었다. 그리고 동일한 방법을 진행하여 제시한 강관 600 mm에 해당되는 식은 양호상태 28년, 이며 교체 및 갱생은 40년 이상 경과되는 것으로 분석되었다.

따라서, 제시된 관망에 대한 노후화 예측 개발 방법론의 경우 기술진단이 가지고 있는 한계성을 일정부분 보완하고 있는 것으로 판단되며, 추후 기간경과에 따른 안전진단 자료가 확보될 경우 보다 신뢰성 있는 노후화 예측 모델의 제시가 가능할 것으로 보인다.

(1) 강관 D1650 노후화 모델식

$$Y=(0.8443e^{-0.004X})+(0.0002X^2-0.0214X+0.1437) \quad (l)$$

여기서, Y: 상태평가점수, X: 경과년수(year)

(2) 강관 D600 노후화 모델식

$$Y=(0.8383e^{-0.011X})+(0.00002X^2-0.0027X+0.064) \quad (m)$$

여기서, Y: 상태평가점수, X: 경과년수(year)

4.5 제시된 노후도 모델 타당성 및 적용성 검토

4.5.1 노후도 모델 적용 타당성 검토

개발된 노후도 모델의 경우는 강관에 대한 것으로 지방공기업법 시행규칙에서 상하수도관 중 강관은 30년으로 규정하고 있다. 이 기준을 활용하여 30년에 갱생 및 교체를 한다는 가정하에 제시된 노후도 모델과 비교하면 Fig. 10과 같다. 비교 결과 지방공기업법과 노후화 모델의 경향이 유사하게 형성되는 것으로 제시되고 있으며, 본 연구에서 제시한 노후화모델이 적용된 지역의 도수관의 경우 오히려 보다 보수적 경향을 보이는 것으로 나타났다. 갱생 및 교체 기준에서는 1년 정도의 차이를 보여 본 연구에서 개발한 해당 모델을 이 지역의 도수관 노후화 모델로 적용하더라도 지방공기업법에 기반한 법적 타당성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10. Predictive Model Validation

Fig. 12. Applicability of Deterioration Predict Model.

4.5.2 노후도 모델 적용 확대방안 검토

연구를 통해 제시된 노후도 모델의 적용성을 극대화 하기 위해 현장 진단자료(안전진단 결과)가 미비된 경우에 노후화 모델을 적용할 수 있는 방안을 제시하였다.

방법은 우선 기술진단 간접평가 방식(Ministry of Environment, 2007)을 활용한 관종별 비율을 도출하고, 이를 활용하여 앞서 개발한 노후화 모델에 적용하여 다양한 관종에 적용할 수 있는 방법론을 제시한다. 여기서 관종별 비율은 특정 대상지역의 기술진단 보고서상에 제시된 주요 조건값(내·외부 피복조건, 접속방법(Table 11 참조))을 적용하고 관종 조건값(STS: 1, DCIP: 0.75, SP: 0.5, PVC, CIP: 0)과 매설년도 변

Table 11. Pipe Type Ratio Analysis through Technology Inspection

Type		STS	DCIP	SP	PVC	CIP
Condition value	Inner sheath	1.0	0.5	1.0	0.0	0.0
	Outer sheath	1.0	1.0	0.75	0.0	0.0
	Connection type	1.0	0.5	1.0	0.5	0.5
Pipe type ratio		0.960	1.0670	1.000	1.365	1.407

Fig. 11. Ratio Analysis of Pipe Type.

화를 변화시켜 상태지수를 산출한다. 이렇게 적용하여 그래프로 나타내면 Fig. 11과 같다. 이는 앞서 Fig. 2에 나타나는 경향과 동일한 것으로 매설년수와 관종이 조건값 변화에 따라 일정하게 축으로 이동하여 나타나며, 이들 간의 관계성을 바탕으로 관종별 비율을 산출하고 그 결과를 노후화 모델에 적용한다.

제시된 관종에 따른 비율을 활용하여 관종별로 노후화 모델을 제시할 수 있다. 우선 노후화 모델 개발 시와 동일하게 안전진단/기술진단의 노후화 경향을 분석하여 제시한다. 제시된 식의 경우, 기존에 확보하고 있는 강관의 노후화 경향으로 위에서 분석한 관종별 비율을 일정하게 적용하여 각 관종별 노후화 모델을 제시한다.

따라서, 본 노후화 모델의 경우 기술진단 간접평가의 경향인 관종에 따른 노후화 추세가 일정부분 적용되어 나타나고 있으며, 초기에 제시한 초기 상태에 대한 가정값을 안전진단 자료를 활용하여 수정 보완하여 제시하였다.

또한 분석된 노후화 경향과 관종간의 관계성을 도출하여 현재 국내에서 관망에 주로 시공되고 있는 관종(STS, DCIP, SP, PVC, CIP)에 대한 적용 가능한 노후화 모델을 제시하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 국가기반시설 중 관망 대한 자산관리 개념을 적용하기 위하여 노후화 예측 모델에 대한 연구를 진행하였다. 이를 위해 기존 국내·외 연구사례 조사 및 진단방법별 특성을 검토하였다. 이를 통해 국내·외 연구에서 관망에 대한 노후도 예측모델을 제시하였으나 기초자료에 대한 타당한 검토에 대한 명확한 기준을 제시하거나 개념을 정리하는 사례는 없는 것으로 파악되었으며, 두 진단방법(안전진단/기술진단)을 분석하여 각 방법에서 나타나는 특성 및 문제점을 도출하였다.

이를 바탕으로 안전진단자료에서 경과년수에 따른 상태지수 경향을 파악하여 현장의 상태를 직접적으로 평가한 결과

를 제시하고, 해당 지역 자료를 활용한 기술진단 간접평가 후 안전진단과 동일하게 노후화 경향을 도출하였다. 이를 통해 진단별 노후화 경향 상관성 분석 결과를 간접평가 회귀식에 접목시켜 기술진단이 가진 한계성을 보완하였다.

또한, 제시된 노후화 모델에 대하여 지방공기업 시행규칙에서 제시하는 기준과 비교분석하여 법적 타당성에 대하여 검토하였으며, 개발된 노후화 모델을 활용하여 국내 관망에 사용되는 다양한 관중에 대한 노후화모델을 개발하여 적용성을 제시하였다.

여기서 제시된 모델의 경우는 기술진단 간접평가 가지고 있는 문제점 및 한계성을 보완하기 위해 안전진단 자료를 활용하였으며, 한정된 진단자료 내에서 시설물의 노후화를 예측할 수 있는 노후화 모델 개발 방법론을 제시하였다.

따라서, 제시된 관망에 대한 노후화 모델의 경우 일정 주기로 계획하고 있는 시설물 상태 진단 활동을 통해 발생하는 누적 자료를 활용하여 보다 정확하고 신뢰성 있는 노후화 모델을 제시할 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 연구를 통해 상하수도 관망에 대한 자산관리 개념 적용을 위한 초석이 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013 산업융합원천기술개발사업으로 발주된 “도시 인프라 자산관리 플랫폼과 서비스 모델”의 연구 수행을 통해 산출된 결과를 활용하여 작성되었습니다.

References

- HUU DUNG TRAN (2007) Investigation of Deterioration model for Stormwater pipe systems, Victoria University.
- K-water (2004) Prioritizing water Mains Rehabilitation base on the field Evaluation.
- KICT (2002) Development of integrated nondestructive diagnosis technique for the state diagnosis and evaluation of deteriorated service pipe in the building.
- KICT (2002) Development of Prediction Model of Corrosion Status and Pipe Deterioration in Water Distribution Systems.
- Lee, H.D. (1995) Development of decision support system for improving water pipes.
- McMullen, L.D. (1982), Advanced concept in soil evaluation for exterior pipeline corrosion, In proceedings of the American Water Works Association Annual Conference, Miami, FL.
- Ministry of Environment (2007) Water Distribution System Diagnostics Manual.
- Robert, M. (1982) Water distribution systems : A spacial and cost evaluation, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 108, No. 3, pp. 243-256.

Received	Received February 21, 2014
Revised	Revised March 7, 2014
Accepted	Accepted April 17, 2014