

상수도 관로의 물리적 상태평가 기준 개선

Improvement of Physical Condition Assessment in Water Mains

김주환*, 배철호*, 안효원**, 황진수**, 최두용**

Juhwan Kim, Doojin Lee, Cheolho Bae, Hyowon Ahn, Jinsoo Hwang, Dooyong Choi

Abstract

Service life of water pipes buried in the underground is considerably affected from various factors such as environmental characteristics, pipe characteristics, operation and maintenance, etc. Therefore it is difficult to determine their service life as uniformly the same value assigned by related laws and ordinances. As a result, the service life should be determined by the technical judgement based on the assessment for the condition of water pipes.

In this study, It was established that the methodology could predict present and future failure risk, and plan short and long-term strategies for replacement/rehabilitation through the assessment for the physical deterioration and economical values of buried water pipe. The methodology was applied for the verification and reliability to several sites selected in multi-regional transmission pipelines. The proposed method could helps to support reasonable and economical decision of rehabilitation/replacement in the present and future.

To improve conventional assessment method of aged water pipes, affecting factors are simplified based on the statistical analysis results from the measured data in the field and the physical deterioration mechanism for better reliability. Also, the guide-line is developed to carry out the reasonal rehabilitation planning through water pipe condition assessment.

Key words: Aged water pipes, Service life, Deterioration, Rehabilitation

요 지

상수도시설은 운영관리 환경, 사용범위, 빈도 등 특성에 따라 수명이 달라지며, 현행 법률에서 일률적으로 정하고 있는 내용연수와 차별된 접근이 필요함에 따라, 시설의 파손, 보수이력 등 관리현황 및 시설의 경시적인 변화 상태를 조사 분석하여 기술적 판단을 토대로 한 수명평가 방안이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내외 내용연수 적용현황과 시설별 내용연수 산정 방안, 외국의 상수도시설물 관리 방법, 기존 관로 상태평가 기준 수립을 위한 현황 등을 조사하고, 매설 상수관로에 현장조사를 수행하여, 상수관로의 물리적인 파손위험성과 사고이력을 기반으로 경제적 가치 기준에 의한 잔존수명 평가 기법을 개발하였다. 또한 기존 우리 공사의 노후도 기법을 물리적인 노후진척에 따른 상태변화와 실측 데이터를 활용하여 통계적인 분석을 통하여 평가항목은 축소하고, 신뢰도는 제고하였으며, 관 상태평가를 통해서 합리적인 개량계획 수립을 추진할 수 있도록 관 상태평가 가이드라인을 개발하였다.

핵심용어 : 노후관, 내용연수, 열화, 개량

* 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 · E-mail : juhwan@kwater.or.kr
* 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 · E-mail : chbae@kwater.or.kr
* 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 · E-mail : ahnwon@kwater.or.kr
* 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 · E-mail : jshwang@kwater.or.kr
* 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 · E-mail : dooyong@kwater.or.kr

1. 서론

수도관은 정수시설과 더불어 수도시설의 중요한 역할을 수행하며 수돗물의 수송기능과 더불어 수질유지 기능 등을 담당하고 있다. 수도관도 다른 수도시설과 마찬가지로 시간이 경과하거나 내·외부적인 원인에 의해 그 기능을 열화되는 등의 문제점이 발생한다. 이러한 문제점이 발생하는 원인으로서는 내외부 압력, 매설환경, 부식 등의 여러 가지 요소들이 있으며, 발생하는 문제들에 대해 각각의 원인에 따른 대책이 필요하다. 이러한 기능적 열화의 정도를 ‘노후도’라는 용어로 사용되어 왔으며 서울시의 우수율 대책 백서(서울특별시 상수도사업본부, 2000)에서는 ‘노후 상수도관이란 관의 내용연수가 지나 내외부가 부식하여 관파손 사고와 빈번한 누수, 적수 등의 문제를 일으키는 상수도관과 내용연수가 지나지 않은 관중에서도 비내식성 관의 내부 스케일로 적수를 일으키는 상수도관을 말한다.’고 정의하고 있다. 이와 같이 ‘노후’라는 의미는 관이 제 기능을 발휘하지 못하는 수준, 즉 요구된 서비스 수준을 만족하지 못하는 상태를 의미한다고 할 수 있다. 따라서 일반적으로는 만족할만한 기능을 발휘하지 못하고 있는 노후관에 대해서 노후의 정도와 원인에 따라서 교체대상이 되는 관과 개량대상이 되는 관으로 분류하여 그 대책을 진행시키는 것이 바람직하며 일부의 지자체에서는 이와 같은 방법으로 대책을 수립하고 있는 것으로 알려지고 있다. 이와 같은 노후관의 정의에도 불구하고 일반적으로는 수도관의 노후도가 갖고 있는 의미에 따라서 제대로 의미전달이 되지 않는 경우도 있다. 경우에 따라서는 노후라는 의미를 ‘매설 연수가 오래된 관’의 의미만이 강조되어 실제에 있어서는 경과연수만을 근거로 수도관의 노후 여부를 판단하는 사례도 있을 수가 있다. 이와 더불어 실제에는 각종 원인을 분석하고 수도관의 노후 여부를 판정하고 있으면서도, 그 결과를 정리함에 있어서 매설년수를 최종적인 분류항목으로 채택하는 경우에는 단순히 매설년수로 노후 여부를 판정하고 있다고 인식될 수도 있어 이에 대한 정의와 분류방법에 대해 체계적인 검토가 필요하다.

2. 상수도관 노후상태 평가기법 개선

수돗물 공급을 위한 상수도 관로는 시간이 경과하면서 각기 다른 운영관리환경, 사용범위, 빈도 등의 특성에 따라 기능의 열화가 발생된다. 특히 상수도관로의 물리적 특성이 건설 초기단계에서 시간이 지나면서 불가피하게 발생하는 물리적 열화는 지금까지 노후도에 의해 정의되어 수압과 같은 내부 환경과 및 매설된 위치의 외부환경인자들을 조사, 분석하여 평가가 이루어져 왔다. 노후관의 상태평가방법은 1995년 점수평가법을 시작으로 2002년 평가단계를 간접평가, 직접평가 및 원인분석을 위한 평가 등 세 가지 단계로 구분하여 시행되어 왔으며, 지금까지 광역상수도 관로를 대상으로 노후관 개량계획 수립시 활용되어 왔다. 현재까지 2002년도 개발된 평가항목에 대한 현장자료의 축적 등 각종 노후관의 상태를 나타내는 DB의 구축이 이루어져왔고 노후관의 물리적 상태를 나타내는 조사 및 분석방법이 지속적으로 연구되어 왔는 바 현재의 시점에서는 구축된 자료를 좀 더 과학적으로 활용함으로써 신뢰성 높은 결과를 도출하기 위한 시도가 필요한 시점이다. 따라서 본 연구에서는 지금까지 구축된 자료를 좀 더 과학적이고 객관적인 분석을 통하여 노후관의 상태를 평가하기 위한 개선모델을 제시하고자 하였다. 상수도관의 재질에 따라 노후 메커니즘이 다른 특성을 나타내므로 기존의 영향인자들을 분석하여 관종별로 영향인자를 설정하고 또한 노후화 단계에 따라 보이는 특성을 반영하여 과학적인 평가가 이루어질 수 있도록 개선하였다.

2.1 직접평가방법 개선

본 연구에서는 상수관로의 파손 메커니즘을 토대로 관종별 직접평가항목을 토대로 관 개량결정 기준 도출하고, 세부적인 개량방안을 도출할 수 있는 결정조건 수립하고자 하였다. 특히 직접평가는 관체에 대한 정밀하게 평가하는 과정으로 정밀평가라 명명하였다. 이는 관의 상태를 육안으로 조사하고, 분석을 통해서 개량에 대한 대안을 제시하는 단계이므로, 각 노후진척 상태에 따른 적절한 대안의 제시가 가능해야 한다. 따라서 현장조사를 통하여 수집된 실측자료를 토대로 관 노후진척 상태별로 적절한 기준과 개량방안 수립이 가능한 개량결정 체계를 구현코자 하였다. 관이 파손에 이르는 경우에는 관내외부로부터의 하중과 관체의 물리적 강도와와의 비를 나타내는 안전계수를 도입하여 파손위험성을 평가하였다. 파손위험성 평가는 관 모체의 건전성 여부에 따라 관 모체를 이용한 갱생을 할 것인가 또는 교체를 할 것인가의 주요한 판단기준이 된다. 현재 관 모체의 파손위험성은 안전계수로 하며, 안전계수가 1이하이면 물리적인 파손상태에 도달하는 것으로 간주하고 있다. 관재질별, 노후진척단계별 상태평가를 다음 표 1과 같이 구분하였으며 단계별 관상태의 변화를 나타낸 것은 그림 1과 같다.

표 1 관종별 노후진척 단계와 영향인자

노후진척단계	관종	주요내용	주요 평가인자	비 고
정상단계	SP, D(C)IP, CIP, PVC, PE 등	관 내·외면이 관체 제작시와 비교하여 기능적 차이가 없는 상태	-	
제1단계 (이물질 축적단계)	SP, D(C)IP, CIP, PVC, PE 등	관 내부의 침전물(deposit) 또는 슬라임(slime)이 과도하게 축적되어 수질악화를 유발할 수 있는 상태	- 내부 이물질 상태	
제2단계 (도장 손상단계)	SP, D(C)IP	관 내면 또는 외면의 도장이 열화, 손상, 또는 실트랙 등이 진행되고, 시멘트 모르타 라이닝이 중성화 되는 상태	- 내부 이물질 상태 - 도장재 상태	
제3~4단계 (관 모체손상 초기와 진행단계)	SP, D(C)IP, CIP,	도장재 박리 또는 시멘트모르타 중성화로 관내면의 결절(tubercle)이 생성 또는 관외면의 부식으로 인하여 관 모체의 극히 일부가 손상으로 구조적 안전성이 감소하는 단계	- 내부 이물질 상태 - 도장재 상태 - 내·외면 부식, 강도, 안전계수 등	
제5단계 (구조적 파손 단계)	SP, D(C)IP, CIP, PVC, PE 등	관 모체의 극히 일부가 손상으로 완전 파손에 도달하는 단계	- 내부 이물질 상태 - 도장재 상태 - 내·외면 부식, 강도, 안전계수 등	

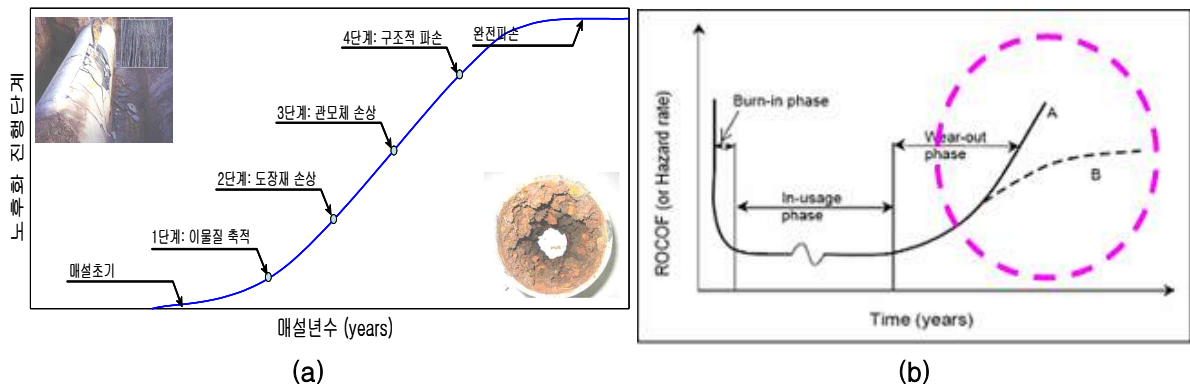


그림 1 매설년수에 따른 노후진행단계(a)와 관로의 Hazard rate 곡선(b)

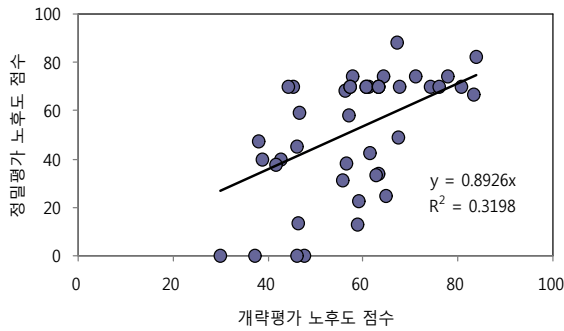
2.2 간접평가방법 개선

일반적으로 상수관로는 매설 후 매설년수, 시공·매설 또는 운영환경 등에 따른 영향으로 서로 다른 노후상태에 도달하게 된다. 이를 그림 1의 (b)에서 도시된 bathtub곡선 즉, hazard rate 곡선에서 보면 실제 사고위험도 측면에서 보면 초기에는 큰 영향을 미치지 않으나 매설 후 일정기간이 지난 후에는 이러한 환경적 요인에 의해서 급속(A)히 노후화 되거나 또는 완만한 경로(B)를 거치게 된다. 따라서 본 연구에서는 정밀평가 방법을 토대로 새로이 산정한 노후도 점수를 토대로 매설년수에 따른 분포를 통하여 급격히 노후상태에 도달하는 추세와 완만히 도달하는 추세곡선을 도출하고, 이를 토대로 간접평가의 신뢰도를 높이기 위하여 항목의 매설년수에 따른 영향력을 보정하는데 이용하였다. 평가모델의 개선절차는 우선 먼저 간접평가항목과 정밀평가 항목간 상관성 검토를 검토하여 평가항목을 선정하고, 각 항목에 대한 가중치 설정하였다. 다음으로 정밀평가 결과에 대한 Bathhtub 곡선을 도출하여 간접평가항목의 영향력을 분석하였으며 간접평가를 개략평가로 명명하여 정밀평가와 구분하였다.

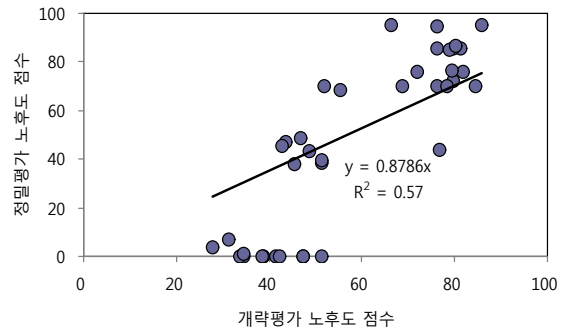
표 2에서 개략평가 항목과 새로운 정밀평가 기준에 따른 노후도 점수에 대해서 가중치를 분석한 결과는 그림 2에 나타내었다. 이때 정밀평가 노후도 점수와 개략평가에 따른 노후도 점수에 대한 결정계수는 0.32~0.57로 나타났다.

표 2 개략평가 항목과 조건값

평가항목	강관		주철관종	
	평가범위	조건값	평가범위	조건값
수중	정수	1.00	정수	1.00
	침전수	0.50	침전수	0.50
	원수	0.00	원수	0.00
관경	1200mm 이상	1.00	800mm 이상	1.00
	800~1200	0.70	500~800	0.70
	500~800	0.35	300~500	0.35
	500mm 미만	0.00	300mm 미만	0.00
CML			있음	1.00
			없음	0.00
수압 (정수압)	3kgf/cm ² 미만	1.00	3kgf/cm ² 미만	1.00
	3~5	0.85	3~5	0.75
	5~7	0.45	5~7	0.50
	7~9	0.15	7~9	0.25
	9kgf/cm ² 이상	0.00	9kgf/cm ² 이상	0.00
매설심도	1.0m 이하	0.1	1.0m 이하	0.1
	1.0~2.0	1.0	1.0~2.0	1.0
	2.0~3.0	0.75	2.0~3.0	0.75
	3.0m 이상	0.00	3.0m 이상	0.00
매설위치	이면도로(보도 등)	1.00	이면도로(보도 등)	1.00
	편도1차선	0.70	편도1차선	0.70
	편도2차선 이상	0.50	편도2차선 이상	0.50
	고속도로	0.00	고속도로	0.00
토양종류	모래	1.00	모래	1.00
	모래+자갈	0.70	모래+자갈	0.70
	점토+자갈	0.35	점토+자갈	0.35
	점토	0.00	점토	0.00
전기방식	있음	1.0		1.00
	없음	0.0		0.00



(a) 강관



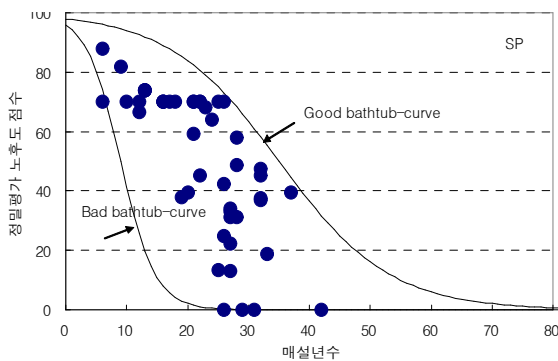
(b) 주철관종

그림 2 정밀평가와 개략평가 노후도 점수간 상관성

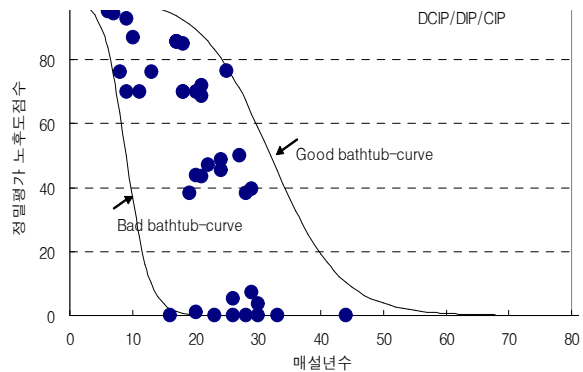
3. 평가결과의 신뢰도 향상

본 연구에서는 정밀평가 결과를 토대로 산정된 노후도 점수를 이용하여 매설년수에 따른 Bathtub curve를 추정하였고, 그 결과를 그림 3에 도시하였다. 여기에서, 정밀평가 노후도 점수가 매설년수에 따라 일정한 범위내에서 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있으며 정밀평가에 따른 Bathtub 곡선은 매설년수에 따른 노후도 점수 중 상한계와 하한계에 위치한 노후도 점수를 통과하는 곡선의 기울기를 토대로 사용연수가 가장 길다고 판단되는 상한계 곡선, 사용연수가 가장 짧다고 판단되는 하한계 곡선으로 간주하였으며 식 (1)로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{수명곡선(Bathtub curve)} = \frac{\alpha}{1 + e^{-\beta(t-\gamma)}} \quad (1)$$



(a) 강관



(b) 주철관종

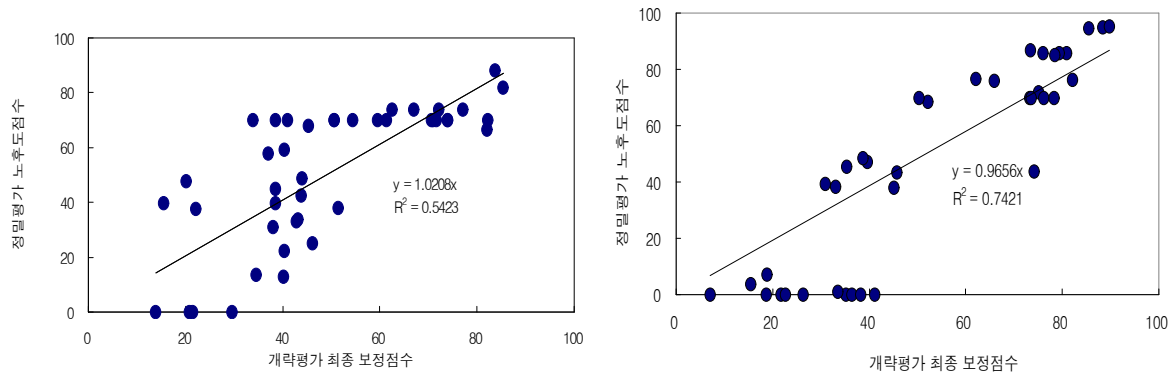
그림 3 정밀평가에 따른 노후도 분포와 한계곡선

또한 상한계 곡선에서 하한계 곡선과의 차이를 통하여 매설년수에 따른 개략평가 항목의 전체적인 영향력을 알 수 있으며, 그 결과를 그림 4에 도시하였으며 이는 매설년수에 따른 개략평가의 오차한계를 정규분포곡선으로 나타낼 수 있어 이를 식 (2)의 분포함수로 표현하였다. 따라서 다음

의 식 (2)를 토대로 개략평가에 따른 전체적인 노후도 점수는 다음과 같은 절차를 통해서 산정 가능하다.

$$\text{매설년수에 따른 오차범위} = \frac{a}{t} \exp \left[-0.5 \left(\frac{(t/x_o)}{b} \right)^2 \right] \quad (2)$$

또한 식 (2)를 통해서 개략평가 항목에 대한 영향범위를 고려한 개략평가 노후도 점수의 보정값으로 사용하여 노후도 예측의 신뢰도를 증진시킬 수 있었으며 강관과 주철관에 대하여 개략평가에 의한 노후도 점수와 정밀평가에 의한 노후도 점수간의 상관성을 그림 4에 도시하였다.



(a) 강관

(b) 주철관종

그림 4 개략평가결과와 정밀평가결과의 상관성 분석 결과

4. 결론

본 연구에서는 지금까지 상수도관로의 노후도 평가모형을 개선하기 위하여 기존에 적인 간접과 직접평가 모형에 대한 문제점을 분석하여 평가항목과 점수부여방식과 평가항목에 대한 가중치 설정 및 평가결과의 보정을 위한 오차분석 등을 포함한 노후도 평가방식을 개선하였다. 또한 현장에서 노후상태와 관련된 자료의 구축과 수집된 데이터를 분석하여 신뢰성이 높은 개략평가와 정밀평가 체계를 구축하였다. 특히 정밀평가는 노후진척에 따른 물리적인 관 상태에 따라 기준을 설정하고 개량방안이 결정되도록 하였고, 수집된 자료의 통계적 분석을 통하여 개략평가항목을 기존의 10~16개 항목에서 8개 항목으로 축소함으로써 현장 자료수집의 한계를 극복하고자 하였다. 또한 정밀평가와의 상관성 향상을 통한 가중치 산정, 그리고 bathtub 곡선으로 나타내는 관로시설의 수명곡선 개념을 도입하여 개략평가결과를 매설년수에 따라 보정함으로써 평가결과에 대한 신뢰도를 향상시키고자 하였다. 따라서 상수도관의 노후상태를 좀 더 과학적이고 객관적으로 평가할 수 있었으며 이를 근거로 더욱 합리적인 노후관로의 장단기 개량계획수립과 의사결정이 가능할 것으로 판단된다.