

대구경 관로의 노후도 평가 연구(I) : 평가모형 개발

김응석¹, 이승현¹, 윤기용^{1*}
¹선문대학교 토목공학과

Assessment of the Deterioration of Large-Diameter Pipe Networks (I) : Development of an Assessment Model

Eung-seok, Kim¹, Seung-hyun, Lee¹ and Ki-yong, Yoon^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Sunmoon University

요약 본 연구(I)의 목적은 현재 K-water에서 실시하는 대구경 노후관로 개량사업시 매설관의 노후도를 판단할 수 있는 방법을 제시하였다. 대구경 관로의 노후도 평가모형을 개발하기 위해 국내의 대표적 평가기법 중 1995년 평가법, 2002년 평가법, 상태평가법 등 3개를 분석하였다. 대구경 관로의 노후도를 평가하기 위하여 기존의 3가지 평가방법별 인자의 우선순위를 바탕으로 공통 인자와 대구경 관로의 특성을 고려할 수 있는 인자를 함께 고려하여 10개 인자를 선정하였다. 또한 개발모형의 인자별 가중치는 국내의 대구경 관로의 실험 및 분석 값을 바탕으로 한 회귀식과 전문가 의견과 관리경험 등을 고려하여 산정하였다. 따라서 기존의 3가지 모형의 특성을 고려하여 개발된 평가모형은 대구경 관로의 노후도를 평가하기에 보다 신뢰성 있는 모형으로 판단된다.

Abstract The purpose of this study (I) is to provide a new methodology for evaluating deterioration of buried pipe networks for the large-diameter old pipe improvement project currently performed by K-water. To develop a new assessment model for large-diameter pipe deterioration, this study has investigated the three representative methods for the pipe deterioration assessment such as evaluation methods 1995 and 2002, and the state evaluation method through literature reviews. The ten assessment factors were selected by considering large-diameter pipe characteristics as well as common factors with high priority in the three methods. Also, the weighting of the factors was estimated by a regression equation from experiments and analysis on domestic large-diameter pipelines and expert survey data. It is expected that the new assessment model developed by analysing the existing three models is more reliable to assess the deterioration of large-diameter pipe networks.

Key Words : Large-diameter pipe, Assessment of deterioration

1. 서론

우리나라의 상수도 시스템은 1백여년의 역사를 가지고 있으며 1960년대 산업화 및 도시화로 인한 물수요의 증대로 다목적댐건설 및 광역상수도 등 공급인프라를 구축하기 시작하였다. 제1차 경제개발5개년 계획의 일환으로 1962년 울산공업용수도 건설을 시작하여, 제2차 경제개발5개년 계획으로 1967년 창원공업용수도를 건설, 1970년도 수도권의 인구 증가와 물수요 증가로 팔당호를

취수원으로 하는 수도권광역상수도 1단계를 후 2008년에는 수도권 6단계까지 지속적으로 광역상수도를 건설하였다.

현재 수자원공사에서 관리 중인 광역상수도는 1960년대 공업용수도를 시작으로 1970년도 수도권광역상수도 1단계 등 매설년도가 30년이 넘는 관로가 대부분이며 관로 연장은 2008년 기준 4,100km로 강관 및 주철관이 전체의 94.2%를 차지하고 있다. 그 중 매설년도가 30년 이상 경과된 관로는 전체관로의 9.1%이다. 수자원공사의

*Corresponding Author : Ki-Yong Yoon(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-41-530-2326 email: kyyoon@sunmoon.ac.kr

Received November 26, 2013 Revised December 10, 2013 Accepted January 9, 2014

소유의 매설관로를 기준으로 2015년에는 30년 이상 경과 되는 관은 전체관로의 32%로 증가할 것으로 조사되어 매설년도가 증가함에 따라 관로사고의 추세는 2002년 이후 지속적으로 증가하는 것으로 예측된다.

따라서 노후관로를 정량적으로 예측하고 이에 따른 적절한 대처(교체, 갱생 등)에 관한 연구가 필요하다. 기존의 국내외 상수관로의 노후도 평가와 관련된 문헌을 살펴보면 다음과 같다.

외국의 관로의 노후도에 관한 연구를 살펴보면 [1]은 미국의 주요도시를 대상으로 수도 데이터베이스를 기초로 노후도에 영향을 미치는 항목별 인자를 이용하여 관 파손사고의 발생을 설명하는 회귀식을 제안하였다. [2]은 관의 부식상태 지표, 부식공의 깊이, 관벽 두께를 이용한 관이 부식상태를 수치화하여 노후도를 분석하였다.

국내에서 이뤄진 관로의 노후도에 관한 연구를 살펴보면 [3]는 수도관 개량을 위한 의사결정 시스템을 만들어 노후도 인자를 평가하여 예측하는 방법을 만들었다. [4]은 상수도관 노후도 추정을 위해 확률적 신경망을 이용한 추정방법을 통해 기존의 점수평가법 모형의 일부를 새로운 알고리즘을 이용하여 개선하고 특정 개체 및 집단을 분류함에 있어 비선형적 경계를 결정할 수 있는 확률론적 신경망(PNN) 알고리즘을 이용하여 노후도의 정도에 따라 노후된 상수도관의 교체와 갱생의 우선순위를 판단할 수 있는 모형에 대한 연구를 수행하였다. [5]은 상수도관로의 노후도 예측에 근거한 최적 개량모형 개발에 확률론적 신경망 이론을 이용하여 노후도 예측모형을 구축하였다. [6]는 상수도 관로의 노후도 평가방법 개선에 관한 연구에서 광역상수도 시설에 적합한 평가인자를 도출하여 적용 방안에 대해 분석하였다.

기존의 노후도 평가방법은 대부분 배수관로 중심의 개발 및 적용되었으나 대구경 관로에 관한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현재 국내에서 주로 사용되고 있는 평가방법으로 수자원공사에서 개발한 1995년 평가방법, 2002년 평가방법 및 정밀안전진단시 사용하는 상태평가법의 인자에 대해 필요인자를 분류하고 대구경 상수도관로 노후도 평가에 적용 가능한 인자를 조정하였다. 또한, 각 평가방법의 인자 중 중복되는 인자를 우선 선정하였으며 각 평가인자의 가중치는 회귀분석을 이용하여 산정하였다. 따라서 대형관로에 맞는 평가 모형을 개발하여 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 노후관의 정의

환경부에서는 상수도 우수유출제 업무처리규정(안)을 통해 노후수도관에 대해 아연도 강관, 비내식성 금속관, 매설 후 16년 이상 경과한 수도관 중 관석(Scaling) 및 부식이 심한 수도관 등 교체 또는 갱생이 필요한 수도관으로 정의하고 있다. 한국수자원공사는 관노후도 평가관리 업무 매뉴얼을 통해 관의 내용연수가 지났거나 혹은 내용연수가 지나지 않은 관 중에서도 부식, 스케일 등 관의 노후로 인하여 제 기능(요구되는 서비스 수준)을 발휘하지 못하는 관으로 정의하고 있다. 서울시에서는 노후상수도관이란 관의 내용연수가 지나 내외부가 부식하여 관파손 사고와 빈번한 누수, 적수 등의 문제를 일으키는 상수도관과 내용연수가 지나지 않은 관중에서도 비내식성 관의 내부 스케일로 적수를 일으키는 상수도관으로 정의하고 있다.

2.2 노후도 평가방법별 특징

2.2.1 1995년 평가방법

1995년 평가방법은 한국수자원공사에서 개발한 ‘수도관 개량을 위한 의사결정시스템 개발 보고서(한국수자원공사, 1995)’를 통해서 만들어 진 것으로 기본 모형은 미국의 Denver시와 Louisville시 모형을 이용해 대구경 관로의 노후도 평가 방법에 대해 개발하였다. 한국수자원공사의 광역상수도 사고 및 보수기록을 전반적으로 분석하여 만들었으며 누수 및 파손기록, 내부 용접 후 도장방식, 내부부식(C값), 최대수압, 매설지역, 도로상태, 매설년수 등의 순으로 중요 인자를 결정하였다.

1995년 평가방법의 노후도 인자 항목 총 16개 항목(최대수압, 매설지역, 도로상태, 매설년수, 관중, 파손기록, 무수율, 외부부식(토양저항률, 토양의 pH, Rebox 전위, 황화물 또는 염화물), 내부부식(C값), 기초공, 되메움 토양, 관경, 방식 유무, 접속방식, 밸브·분기관, 접속관 부속관)으로 구성되어 있다.

따라서 16개 항목을 바탕으로 광역상수관로에 1995년 평가방법을 적용하기 위해서는 16개 항목 중 관중은 전관로가 강관이므로 분류 의미가 없으며, 무수율도 5%미만으로 분류의 의미가 없다. 내부부식(C값)도 전구간 매설년도가 같고 측정구간의 유량계 유무, 분기유무, 동시측정 등의 어려움에 따라 측정이 불가능한 구간이 많아 삭제를 하였으며, 관경 항목은 가중치 조정이 필요하다. 전기방식은 전 구간 방식이 완료되어 의미가 없다. 접속방식은 전 관로에 대해 내부 용접 후 도장을 하므로 의미가 없으며 접속관 부속관도 평가점수가 동일하여 의미가 없어진다.

2.2.2 2002년 평가방법

1995년 평가방법에서 개선한 평가방법으로 매설관의 내외부 실사를 통한 관노후도 평가기준 개선 연구에 따른 평가방법(이하 2002년 평가방법)은 직접평가, 간접평가는 기존의 평가법의 정밀도를 높이기 위해 세부 평가내용이 추가되었으며 구조적 안정성 평가도 하고 있어 의사결정시 신뢰성을 향상시켰다.

기존 1995년 평가방법도 엄밀히 따지면 직접평가, 간접평가 및 수질토양부식성평가 등으로 나눌 수 있으나 2002년 평가방법에서는 간접평가항목에서 관로 내외면 피복, 매설심도 등이 추가되었고, 직접평가항목에서는 관체상태, 외면 내면상태, 수리적특성, 물리적강도, 화학적 조성 등 19개 항목이 추가되었다. 수질토양부식성 평가항목에서도 15개 항목을 추가하여 세분화 하였다.

따라서 광역상수관로의 노후도 평가를 위해서는 2002년 평가방법에서 간접평가 인자로 관로구분, 관종, 매설심도, 접속방식, 밸브분기관, 접속관, 수질수압 등 민원발생 등 6개 항목은 의미가 없어 조정이 필요하며, 직접평가 인자에서는 CML중성화, CML손상, H-W값, 지하수침투 등 4가지 인자 조정이 필요하다.

2.2.3 상태평가방법

관로의 외관조사를 통해 얻어진 결과를 기초로 상태평가를 실시함에 있어 정량적이고 객관적인 상태평가를 하기 위해서 「안전점검 및 정밀안전진단 세부 지침」(건설교통부, 2003.12)에 의거(이하 상태평가방법) 상태평가

기준을 설정하며 이의 기준을 토대로 상태평가방법 및 절차에 따라 상태평가를 수행한 후 각 부재 및 시설물별 상태평가등급을 부여하는 평가방법이다.

상태평가방법의 경우 총 16개의 항목(사고이력, 관내·외면의 방식도장 유무, 사용년수, 관내·외면의 방식도막, 배관의 부식, 잔존 관두께, 관체 변형, 배관의 누수, 노면하중, 내부수압, 되메움 토양, 토양비저항, 토양 pH, 황화물 및 염화물 함량, 관대지전위차, 수질부식성)으로 구성되어 있다.

정밀안전진단에 사용된 상태평가방법 중 수도권 광역상수도 1단계 시설을 기준으로 평가할 경우 광역상수도에서의 평가인자 중 도막 및 도장과 같이 이미 알고 있는 값의 경우 삭제 할 필요가 있다. 배관의 누수도 사고시 바로 조치하는 사항으로 사고이력과 흡사하므로 다른 인자로 조정할 필요가 있다.

광역상수도의 노후도 평가방법을 개발하기 위해 기존의 대표적 3가지 평가방법별 인자 및 가중치 산정의 수정할 내용에 관해 기술하였다. 기존의 3가지 평가방법별 조정된 인자는 1995년 평가방법의 경우 총 16개 평가인자 중 10개로 수정하였으며, 2002년 평가방법의 경우 간접 평가인자 총 16개 평가인자 중 9개, 직접 평가인자 총 24개 평가인자 중 20개로 수정하였다. 상태평가방법의 경우 총 16개 평가인자 중 14개로 평가인자를 수정하였다. Table 1은 각 평가방법별 수정한 평가인자 및 가중치를 나타내었다.

[Table 1] Comparison of modified base model by each assessment method

1995 Assessment method			2002 Assessment method			State assessment method			
Priority	Factor	Weight	Priority	Factor	Weight	Priority	Factor	Weight	
1	Water leak/ Record of damaged	14	1	Pipe vintage	0.30	1	Corrosion of pipe	5	
2	Maximum pressure	8	2	Internal coating	0.10	2	Remaining pipe thickness	5	
3	Laying area	6				3	Pipe body transformation	5	
4	Road	6				4	Redoc dis	5	
5	Pipe vintage	6	3	Type of soil	0.06	5	Accident record	5	
6	Foundation engineer	5	4	Water leak, Damaged, Valve change record	0.06	6	Internal pipe film of paint	5	
7	Backfilled soil	5				7	Road surface load	5	
8	Pipe diameter	5	5	External coating	0.06	8	Internal water pressure	5	
9	Electrical method	5	6	Pipe iameter	0.02	9	Pipe vintage	5	
10	External corrosion	Moment of soil resistance				4	7	Road circumstance	0.02
		pH	2	8	Foundation engineer	0.02	11	Soil resistivity	5
		Redox dislocation	2				12	Soil pH	5
		Sulfuric acid /Chlorine ion	2	9	Electrical method	0.01	13	Sulfide and chloride content	5
						14	RSI	5	

3. 모형개발

3.1 평가인자 선정

새로운 노후도 평가모형을 제시하기 위해 3가지의 노후도 평가방법에서 중복되는 인자와 중복되지 않지만 실측값이 있어 새로운 모형의 가중치를 산정하는데 도움이 되는 인자를 위주로 선정하였다. 3개 평가방법 모두 중복되는 인자 4개(누수/파손기록, 매설년수, 되매움 토양, 매설지역) 인자를 우선 적용하였다. 나머지 6개 인자는 2개 평가방법 이상 중복되는 인자인 최대수압, 외부부식 등 2개 인자와 실측값이 있고 중요한 인자로 판단되는 내부피복, 내부부식, 잔존관 두께, 관체변형 등 4개 인자를 선정하여 Table 2에 나타내었다.

3.2 평가인자별 가중치 선정

국내에서 사용하고 있는 1995년 평가방법, 02년 평가방법과 정밀안전진단시 사용하는 상태평가방법을 살펴보면 평가인자 선정, 평가인자별 기준 및 인자별 가중치 설정시 특정한 기준을 만들기 위해 그 동안 유지관리 이력, 시설물 유지관리 전문인력의 가중치에 대한 의견을 정리하고 직접 측정하는 값에 대해 파손에 이르는 값에 대해 일정한 기준을 마련하여 노후도 평가를 위한 기초 인자

의 가중치에 적용하였다. 각 평가방법별 가중치는 주로 전문가의 의견과 관리 경험상 중요하다고 판단되는 인자의 순서대로 가중치를 부여하고 방법별 평가기준과 특성이 조금씩 차이가 나지만 대구경 관로에 적합한 새로운 모형에 적용할 인자 구성에 적합한 가중치가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 새로운 모형에 적용할 평가인자별 가중치를 실측치(실험 및 분석결과)를 이용하여 기존 평가방법으로 평가한 결과 값을 활용하여 다중회귀분석을 통해 가중치를 산정하여 Table 2에 나타내었다.

3.3 평가인자별 세부기준

대구경관로에 적합한 노후도 평가모형의 항목 및 가중치 선정 후 이에 따른 항목별 세부기준은 Table 2와 같이 나타내었다. 항목별 세부기준을 살펴보면 1995년 평가방법, 2002년 평가방법과 상태평가방법에 사용된 조건값 중 대구경 관로의 특성상 고압에 적합하게 설계되어 있어 수압, 매설년수, 잔존관두께의 조건값을 기존 평가법보다 상대적으로 높게 선정하였다. 10개 항목의 각각에 대한 세부 구분하여 살펴보면 다음과 같다.

누수/파손기록의 경우 매설관의 구역별 년간 사고기록 및 과거 조사결과를 바탕으로 구분하여 나타내었다. 매설년수는 대구경 관로의 수명년수에 대해 수자원공사의 기

[Table 2] Assessment Model of factor and weighting value

Factor	Standard in detail	Condition value	Weight	Factor	Standard in detail	Condition value	Weight
Water leak/ Record of damaged	None	1.00	0.110	Internal coating	Coal-tar enamel	0.75	0.096
	1~3th/5year-50km	0.50			Epoxy	1.00	
	3~5th/5year-50km	0.25			None	0.00	
	5th/5year-50km excess	0.00					
Pipe vintage	30year Excess	0.00	0.109	External corrosion depth	20% Excess	0.00	0.095
	25~30year	0.25			20~15%	0.25	
	20~25year	0.50			15~10%	0.50	
	15~20year	0.75			10~5%	0.75	
	15year Below	1.00			5% below	1.00	
Backfilled soil	Sand quality	1.00	0.101	Internal corrosion depth	20% Excess	0.00	0.094
	Sand+gravel, Loam,	0.50			20~15%	0.25	
	Clay+gravel, Silt	0.25			15~10%	0.50	
	Clay	0.00			10~5%	0.75	
Max. pressure	5.0kg/cm ² Excess	0.00	0.099	Remaining pipe thickness	50% Excess	0.00	0.094
	5.0~3.0kg/cm ²	0.25			49~30%	0.25	
	3.0~2.0kg/cm ²	0.50			29~20%	0.50	
	2.0~1.0kg/cm ²	0.75			19~10%	0.75	
	1.0kg/cm ² Below	1.00			10% Below	1.00	
Laying area	An industrial road, Expressway	0.00	0.094	Pipe body transformation	5~10% Excess	0.00	0.108
	A four-lane road over	0.25			5~3%	0.25	
	A two-lane road	0.50			3~2%	0.50	
	Backside road	0.75			2~1%	0.75	
	Sidewalk and the bare ground	1.00			1% Below	1.00	

준으로 적용하여 30년 이상일 경우 0점이 나오도록 결정하였고, 15년 이내의 관은 1점으로 배치하였다. 되메움토양은 매설된 관의 주변 토양에 따른 외부 부식의 항목으로 토양에 따라 함수비가 달라지며, 이에 따른 배수도 원활히 이루어지는 토양으로 구분하여 나타내었다. 최대수압은 대구경관로의 압력이 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하일 경우 안정적인 것으로 보고 1점을 부여하였고 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상일 경우 높은 수압으로 인한 관 파손이 우려되는 것으로 조건 값을 결정 하였다. 매설지역은 교통하중을 주로 고려한 것으로 전용부지, 보도 및 노지를 1점으로 배분하고 고속도로 및 산업도로를 0점으로 배분하여 하중을 고려하였다. 내부 피복종류는 콜타르에나멜, 에폭시, 없는 경우로 나누어 각각 0.75, 1, 0점으로 배분하였다. 외면부식 깊이와 내면부식깊이는 모든 면적을 대입하기 어려우나 비교적 많은 측정값 균을 형성하는 조사 결과를 바탕으로 조건 값을 배분하였고 실제 사고 위험 가능성이 높은 30-50% 부식이 골고루 분포된 경우 0점을 배분하였다. 잔존관 두께는 대형관로의 관체 두께가 두겹게 설계되고 시공된 관체로 부식깊이와 비슷한 경향의 조건 값으로 배분하여 50%이상 두께가 국부적으로 발생된 경우 0점으로 배분하였다. 관체변형은 기존의 2002년 평가방법에서는 4%, 상태평가방법에서는 10% 이상일 경우 0점으로 조건 값을 두고 있으나 수도권광역상수도 1단계 관 중 최대 변위 지점의 값이 10%이며 구조적으로 문제는 없는 것으로 검토되어 최저값을 10% 이상일 경우 0점으로 배분하였다. 개발모형의 각 조건 값은 대구경 관로에 적합하게 조정하였고 가중치의 합이 1이다.

4. 결론

본 연구는 대구경 관로의 노후도 평가를 위해 국내의 문헌을 바탕으로 국내에 개발된 대표적 상수관로의 노후도 평가기법으로 1995년 평가방법, 2002년 평가방법, 상태평가방법 등을 비교 및 검토하였다.

기존 노후도 평가 방법별 대구경 관로의 적용을 위해 1995년 평가방법은 16개인자 중 10개인자로, 2002년 평가방법은 간접평가법 16개 인자를 9개인자로, 상태평가법에서는 16개 인자를 14개 인자로 조정하였다.

기존의 각 평가방법의 조정된 인자 중 3가지 평가방법에 중복되는 인자를 우선시 하여 4개의 인자를 선정하였다. 또한 2개 이상의 평가방법에 중복되는 인자를 6개를 선정하여 모형개발 인자로 최종 10개(누수/파손기록, 매설년수, 되메움 토양, 최대수압, 매설지역, 내부피복 종류, 외면부식깊이, 내면부식깊이, 잔존관 두께, 관체변형)를

선정하였다.

선정된 10개 인자의 가중치의 경우 실측치(실험 및 분석결과) 및 기존 평가방법으로 평가한 결과 값을 활용하여 다중회귀분석을 통해 가중치를 산정하였다.

기존의 많은 인자를 이용하여 평가한 평가방법의 경우 평가 시간 및 경제적 비용이 소요되는 단점이 있다. 본 연구에서 개발한 모형의 경우 기존 평가방법의 인자를 바탕으로 10개의 평가인자를 선정하여 개발하였기 때문에 평가시 시간적 단축 및 경제적으로도 우수하다고 판단된다. 또한 전문가 의견 및 실측치, 다중회귀분석 등을 통하여 가중치를 배분하였기 때문에 기존 평가방법 보다 신뢰성이 높다고 판단되며, 실무적 사용에 적용이 가능한 모형으로 판단된다.

References

- [1] Clark, R. M., Stsfford, C. L. and Goodrich, J. A, "Water distribution system : A spatial and cost evaluation", *Journal of Water Resources Planning and Management Div. ACSE Vol. 108*, pp. 243-257, 1982.
- [2] U.S. Army Corps of Engineers, "Engineering and Design-Evaluation of Existing Water Distribution Systems", *Engineer Technical Letter, Washington, D.C.* 20314 May. 16. No. 1110-2-278, 1983.
- [3] Korea Water Resources Corporation, "Development of decision support system for improving water pipes", 1995
- [4] C.Y. Lee, E.S. Kim, H.S. Shin, J.H. Kim, "A Study of Deterioration estimation Model for Drinking Water Pipe Using Probabilist Neural Network(PPN)", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, No. 2-B, pp. 197-210, 2000
- [5] E.S. Kim, "Development of Optimal Model for Water Distribution Systems Based on Prediction of Pipe Deterioration", *doctorate thesis, Korea university*, 2002
- [6] Korea Water Resources Corporation, "Through the inside and outside of pipe deterioration due diligence ratings improve study", 2002

김 응 석(Eung-Seok Kim)

[정회원]



- 1995년 2월 : 동국대학교 토목공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (공학석사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>

수자원시스템, 상하수도 관망시스템

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학

윤 기 용(Ki-Yong Yoon)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 합성구조, 강구조, 내진설계