

상수관로의 노후도 평가 : (II) 영향인자 및 가중치 산정

○김용석¹⁾ · 김중훈²⁾ · 이현동³⁾ · 정원식⁴⁾ · 박필재⁵⁾

1. 서론

국내에서 상수도 관로의 상태 및 평가, 파손이나 누수의 원인에 대한 조사 및 연구실적은 현재 미미한 실정이며, 유지관리 실무에 활용한 경우는 전무한 상태이다. 따라서 관로사고를 사전에 예방하고 운영 및 유지관리를 효율적으로 수행하기 위해서는 관의 노후도의 파손 영향인자를 철저히 분석하는 작업이 필수적이라고 할 수 있다.

기존의 연구를 살펴보면 국내의 경우는 황규대 등(1996)은 수도관 부식과 방식대책 연구에서는 국내 수도관 사용현황, 국내 수도관 특성, 수도관 부식에 대한 원인 및 평가방법, 급·배수관 방식대책의 경제성 등의 포괄적 연구를 수행하였다. 정해룡 등(1998)은 수질인자가 부식의 촉진과 억제에 미치는 영향에 대한 연구에서 상수도 관로의 부식원인 중에서 원수 수질이 악화됨에 따라 정수과정 중 투입되는 약품량의 증가에 따라 일어나는 수질변화로 인한 관의 부식을 촉진시키는 수질인자에 대해 연구하였다. 외국의 경우 D. Kelly 등(1982)은 미국 환경청과 미국수도협회연구기금(AWWARF)의 공동연구에서 관로파손의 구조적 원인으로 원주방향의 힘, 길이방향의 힘, 접합부에서 납(Pb)접합부 팽창 등의 구조적 문제를 분석하였다. Recharad 등(1985)은 필라델피아시 수도국에서는 수도관의 노후도와 관련된 인자 연구에서 크게 외부하중, 내부하중, 기초공사, 외부부식, 내부부식, 전식, 관의 특성 등의 자료를 언급하였다. 이와 같이 상수관로의 노후도에 영향을 미치는 연구는 대부분 주변환경 또는 내·외부 부식 인자를 기준으로 대부분 연구되었으며, 인자별 가중치 산정은 정량적 방법 아닌 정성적인 방법을 통해 산정되었다.

따라서 본 연구에서는 우리나라의 관로연장 중에서 가장 많은 부분을 차지하고 있으나 상대적으로 중요성이 낮게 평가되었던 배수관을 중심으로 관로의 노후 및 파손과 관련된 여러 복합적인 인자들을 분석하여 관로의 노후도에 영향을 미치는 인자를 산정하고, 정량적인 방법으로 각 인자별 가중치를 산정하였다. 또한 본 연구에 산정한 노후도 인자 및 인자별 가중치를 확률적 신경망이론을 응용한 노후도 평가모델에 적용하여 본 연구의 결과를 검증하였다.

2. 노후도 영향인자 및 가중치 산정방법

2.1 영향 인자 산정 방법

본 연구에서는 노후도 인자 산정 방법은 기존의 문헌 및 연구결과를 바탕으로 대상지역의 관로를 채취하여 매설환경, 육안분석, 토양분석, 관체분석, 설문조사 등의 5개 자료를 수집 및 분석하여 이를 바탕으로 인자를 산정하였다. 또한, 인자의 산정 기준은 골착 및 실험분석이 필요한 자료와 그렇지 않은 자료로 나뉘어 각각 산정하였다.

2.2 인자별 가중치 산정 방법

노후도 인자 항목별 가중치 산정 방법은 크게 2가지로 중선형회귀모델(multiple linear regression-model)을 이용한 방법과 선형계획법(linear programming)을 이용하여 인자별 가중치를 산정하였다.

1) 고려대학교 부설 방재과학기술연구소 선임연구원

2) 고려대학교 토목환경공학과 교수

3) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원

4) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원

5) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원

중선형회귀모델은 총체적인 관의 노후도를 나타낼 수 있는 자료를 선정하여 이를 종속변수하며, 노후도에 영향을 미치는 인자를 독립변수로 가정하여 각 인자의 가중치를 산정하였다. 선형계획법은 중선형회귀모델의 실험 및 분석이 필요한 인자와 그렇지 않은 인자의 가중치 결과의 범위를 제약조건식으로 가정하여 가중치를 산정하였다.

2.3 산정된 인자 및 인자별 가중치의 검증 방법

노후도 인자 및 인자별 가중치를 산정한 후 실제 노후도 평가모델에 이를 적용하여 본 연구에서 산정한 결과를 검증하였다. 노후도 평가모델은 이창용(1999) 등이 기존의 점수평가 모델의 일부를 확률론적 신경망(probabilistic neural network)을 이용하여 개선한 노후도 평가모델을 사용하였다.

3. 적용 및 결과

3.1 노후도 영향인자 산정

본 연구에서는 연구대상지역에서 채취한 85개의 배수관을 중심으로 노후도 인자 산정을 위해 수집 항목은 매설환경, 육안분석, 토양분석, 관체분석, 설문조사 자료를 바탕으로 각 인자의 유사성을 고려해 그룹화 하여 비교하였다. 총 50개 자료로 항목별 노후도 인자 분류를 다음<표 1>에 나타내었다.

<표 1> 자료별 노후도 인자 및 세부분류

구분	매설환경	육안분석	토양분석	관체분석	설문조사
• 하 중	- 최대수압 - 매설지역 - 도로폭	-	-	-	- 교통량 - 매설지역 - 수압변동 - 유량변동
• 관특성	- 관중 - 매설년도	-	-	- 인장강도 - 연신율 - 경도 - C - Si - Mn - P - S - Mg	- 관중 - 매설년도
• 노후화	- 매설년수 - 파손 기록	-	-	-	- 누수·파손기록
• 부식	-	• 내면부식 - 부식형태 - 부식생성물의 축적비율 - 최대 부식생성물의 크기 - 통수단면 감소율 • 외면부식 - 녹 발생 정도 - 부식생성물의 축적 비율 - 점도부착비율	- 함수량 - 토양 pH - 알카리도 - 염소이온 - 황산이온 - 산도 - 산화환원전위 - 입도분석	-	- 방식도장 유무 - 갱생공법 유무 - 통수능 (C값)
• 공사 숙련도	- 관기초공사 - 되메움 - 토양 - 관경	-	-	-	- 관 기초공사 - 되메움 토양 - 매설심도
• 수질	-	-	-	-	- 관내 수질
• 관로	- 관 접합 형태	-	-	-	- 접합부 형식
항목개수	11개	7개	8개	9개	15개

본 연구에서 노후도 인자 산정 기준은 매설된 관을 굴착하지 않는 상황에서 노후도를 평가하기 위해서 실험 및 분석을 필요로 하는 자료를 제외한 현장 및 수도사업소의 관로대장에서 수집 가능한 자료를 중심으로 인자를 산정하였다. 이는 특정 노후도 평가모델을 이용하여 노후도를 평가할 때 굴착 및 실험분석을 필요로 하는 자료의 경우 국내 현장 여건상 시간 및 경제적 어려움이 가지고 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서 크게 먼저 굴착 및 실험 분석이 필요한 인자와 그렇지 않은 인자로 구분하여 2 가지 경우의 노후도 인자를 산정하였다. 또한, <표 1>의 자료를 바탕으로 필요한 포괄적 노후도 인자 항목을 7개 항목으로 관 특성 인자, 외부부식 인자, 내부부식 인자, 내·외부하중 인자, 관로 기록자료 인자, 공사관련 인자, 접합밸브 인자를 산정하여 다시 이를 세부인자로 분류하였다. 다음 <표 2>는 굴착 및 실험의 필요 유·무에 따라 14개와 9개 인자별 자료에 대해 정리하여 나타내었다.

<표 2> 노후도 인자 산정

성격 구분	굴착 및 실험분석 필요	굴착 및 실험 분석 불 필요
(1) 관의 특성 인자	- 관종	- 관종
(2) 관 내부부식 인자	- 통수능 (C 값)	-
(3) 관 외부부식 인자	- 황산이온, 염소이온 - 토양 pH	-
(4) 내·외부하중 인자	- 최대수압 - 매설지역 - 도로 폭	- 매설지역 - 도로 폭
(5) 관로 기록 인자	- 매설년수 - 누수 및 파손 기록	- 매설년수 - 누수 및 파손 기록
(6) 공사 관련 인자	- 되메움 토양 - 관 기초 공사 - 관경	- 되메움 토양 - 관 기초 공사 - 관경
(7) 접합 밸브 인자	- 밸브, 분기관, 연결관 수 - 접속부 형식	- 접속부 형식
항 목 개 수	14개	9개

위 <표 2>에서 14개 인자와 9개 인자 선정에 가장 큰 차이는 관 내·외부 부식 인자의 유무이다. 상수도 관로의 내부부식 원인 중 하나인 수질에 따른 부식생성물을 발생이며, 이는 곧 통수 단면적의 저하로 인해 통수능에 직접적인 영향을 미친다. 내부부식의 원인이 되는 수질에 따른 통수단면적의 변화에 대한 연구가 아직까지는 많지 않으나, 관종, 관경, 매설년수와 함수관계임을 기존의 문헌을 통해 알 수 있다. 그리고, 외부부식에 가장 큰 영향을 미치는 토양의 경우 대상지역을 조사한 결과 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 9개 인자 선정에서 제외된 내·외부 부식 관련 인자는 다른 인자를 이용하여 이를 극복 할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 노후도 항목별 가중치 산정

회귀모델을 이용한 산정방법에서 종속변수는 실제 노후도의 영향을 보여 줄 수 있는 결과를 크게 2가지로 구분하여, 육안분석 자료 1개만 사용한 경우와, 육안분석, 토양분석, 관체분석 3개 자료의 총합을 사용한 경우로 나누어 분석하였다. 기본적인 회귀식은 다음과 같다.

$$D(OA) = f(LZ, LW, PT, LY, LB, FW, S, PD, J) \quad (\text{식 1})$$

$$D(OA + SA + PCA) = f(LZ, LW, PT, LY, LB, FW, S, PD, J) \quad (\text{식 2})$$

<식 1>에서는 종속변수가 육안분석결과(OA)이며 <식 2>에서는 육안분석(OA), 토양분석(SA), 관체분석(PCA)의 총합이 종속변수가 된다. 독립변수로는 매설지역(LZ), 도로 폭(LW), 관종(PT), 매설년수(LY), 누수 및 파손기록(LB), 기초공사(FW), 되메움 토양(S), 관경(PD), 접속부 형식(J)를 독립변수로 사용하여 분석하였다. 또한, 인자별 가중치의 산정은 통계프로그램(SPSS)을 이용해 각 인자별 t-검정을 통해 적합한 인자를 산정하였다. 다음 <표 3>의 결과에서 가중치 1(rw1), 2(rw2)는 각각 (식 5)와 (식 6)을 이용한 결과이다. 결과에서 2가지 종속변수에 따른 가중치 값의 차이는 전체적으로 크지 않았다.

<표 3> 회귀모델을 이용한 가중치 산정 결과

인자 가중치	매설 지역	도로 폭	관종	매설 년수	누수 파손	기초 공사	되메움 토양	관경	접속부 형식	총 합
1 (rw1)	0.087	0.038	0.211	0.009	0.128	0.146	0.154	0.090	0.056	1.000
2 (rw2)	0.102	0.023	0.212	0.089	0.125	0.184	0.112	0.087	0.006	1.000

선형계획법을 이용한 가중치의 산정은 회귀식에서 산정한 인자별 가중치 값의 범위를 각 인자별 제약조건으로 가정하여 육안분석 결과만을 사용한 경우와 육안, 토양, 관체분석 결과 3개의 총합을 사용한 경우로 나누어 산정하였다. 선형계획법의 목적함수와 제약조건식은 다음과 같다.

Objective function :

$$\text{Min} = \sum_{j=1}^K (U_j + V_j) \quad (\text{식 } 3)$$

Subject to :

$$\sum_{j=1}^K W_j F_{ij} - U_j + V_j = OA_{ij} \text{ or } (O+S+P)_{ij} \quad \text{for all } j=1, \dots, K \quad (\text{식 } 4)$$

$$\sum_{j=1}^K W_j = 1.0 \quad \text{for all } i=1, \dots, n \quad (\text{식 } 5)$$

$$Lw_i \leq W_i \leq Uw_i \quad \text{for all } Lw_i \geq 0, W_i \geq 0, Uw_i \geq 0 \quad (\text{식 } 6)$$

여기서, W_j 는 각각 노후도 인자의 가중치, U_j 와 V_j 는 인자별 여유변수, OA_{ij} 는 관의 육안분석 결과, $(O+S+P)_{ij}$ 는 육안분석 토양분석 관체분석 결과의 총합, F_{ij} 는 각각의 관의 노후도 인자, Lw_i 와 Uw_i 는 각각 회귀식에서 산정한 각 인자별 가중치1과 가중치2의 범위, K 는 관의 총 개수이다. 이 방법의 목적은 구하고자 하는 가중치 값의 편차를 최소화하기 위한 것이다. 다음 <표 4>는 각 인자별 가중치 결과를 나타내었다. 가중치 결과 1과 2는 제약조건식 중 (식 4)에서 육안분석결과를 사용한 경우와 육안, 토양, 관체분석 결과의 총합을 사용한 각각의 결과이다. 결과에서 매설지역, 도록폭 인자를 제외하고 나머지 인자는 같은 값의 결과를 보였으며, 회귀식모델의 가중치 2의 결과와 전체적으로 비슷한 결과를 나타내었다.

<표 4> 선형계획법을 이용한 가중치 산정 결과

인자 가중치	매설 지역	도록 폭	관중	매설 년수	누수 파손	기초 공사	퇴메움 토양	관경	접속부 형식	총 합
1 (Lw1)	0.078	0.034	0.222	0.089	0.133	0.189	0.111	0.100	0.044	1.000
2 (Lw2)	0.089	0.023	0.222	0.089	0.133	0.189	0.111	0.100	0.044	1.000

3.3 인자 및 인자별 가중치 산정의 검증

3.3.1 모델의 입력자료 구축

앞에서 산정한 노후도 인자 및 가중치 값을 이용하여 기본 모형에 필요한 영향인자 및 세부구분과 조건 값은 <표 5>와 같이 정리하였다. 14개 항목에 대한 가중치 집단은 기존의 한국수자원공사(1995)에서 수행한 보고서를 참고하였다. 또한 본 연구의 대상지역의 분석자료 및 수도관 개량사업의 전문가를 대상으로 설문조사 결과를 바탕으로 임의의 가중치 집단을 만들어 각 항목에 대한 가장 큰 값과 작은 값을 제약조건으로 하여 선형계획법을 이용하여 산정하였다. <표 5>에서 W1의 가중치는 보고서 및 현장 자료를 고려하여 임의로 산정한 가중치 값이며, W2, W3는 각 인자별 가중치의 범위를 제약조건으로 하여, 육안총합 및 육안, 관체, 토양 값의 총합을 이용하여 각각 산정한 결과 값이다.

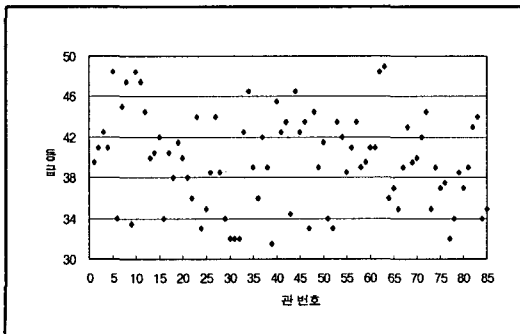
영향인자에 따른 세부구분은 연구지역의 배수관망에 적합하도록 자료를 분석하여 분류하였다. 본 연구에서는 적용하려는 모델이 확률론적 신경망을 이용하므로 조건 값으로 사용하는 입력자료를 노후도에 영향을 미치는 인자의 상태 조건을 구분하기 위하여 1.0, 0.75, 0.5, 0.25, 0.0의 5개 조건 값을 사용하였다. 즉, 노후도의 영향이 가장 큰 값을 1.0으로 하며, 가장 적은 영향을 미치는 값을 0.0으로 하여 분류하였다.

3.3.2 모델의 적용 및 결과 분석

대상지역인 A시의 85개 관로를 대상으로 현장에서 굴착 및 실험을 통해 산정한 14개 항목과 굴착 및 실험을 필요로 하지 않는 9개 항목에 대하여 각각에 대해서 노후도 평가모델에 적용하였다.

<표 5> 항목개수별 가중치 조건

번호	영향인자	세부구분	조건값	14개 항목			9개 항목			
				W1	W2	W3	Rw1	Rw2	Lw1	Lw2
1	최대수압 (kg/cm ²)	1. 7 이상 2. 6 3. 5 4. 4 5. 3 이하	1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	1.100	0.995	0.996	-	-	-	-
2	매설지역	1. 공장, 매립, 해안지대 2. 도로변(지하철, 공사장) 3. 상가밀집지역(시장) 4. 아파트 단지 5. 주택가	1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	1.100	0.995	0.996	0.785	0.914	0.703	0.802
3	도로폭	1. 산업도로/고속도로 2. 4차선 도로 3. 2차선 도로 4. 이면도로 5. 보도 및 노지	1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	0.900	0.505	0.506	0.338	0.204	0.298	0.199
4	관종	1. ST 2. CI, CP 3. CIP, DT 4. PFP, EP 5. DTC, STC	1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	1.800	1.499	1.500	1.902	1.914	1.999	1.999
5	매설년수	1. 21년 이상 2. 16 - 20년 3. 10 - 15년 4. 5 - 9년 5. 4년 이하	1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	1.000	0.995	0.996	0.811	0.805	0.802	0.802
6	누수 및 파손기록	1. 4회/5년 이상 2. 3회/5년 3. 2회/5년 4. 1회/5년 5. 무/5년	1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	1.600	1.303	1.304	1.151	1.125	1.198	1.198
7	토양 pH	1. 5 이하 2. 5 ~ 7 3. 8 이상	1.00 0.50 0.00	0.500	0.505	0.506	-	-	-	-
8	황화물 (mg/kg)	1. 황화물 500 이상, 염화물 250이상 2. 황화물 200~500, 염화물 100~250 3. 황화물 200 이하, 염화물 100이하	1.00 0.50 0.00	0.500	0.505	1.934	-	-	-	-
9	C 값	1. 75 이하 2. 89 이하 3. 97 이하 4. 108 이하 5. 120 이상	1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	1.400	1.093	1.094	-	-	-	-
10	기초공	1. 바닥 기초 2. 모래 기초 3. Conc. 기초, Pile 기초	1.00 0.50 0.00	0.800	0.603	0.604	1.313	1.653	1.702	1.702
11	뒤메움양토	1. 점토 2. silt/loam 3. 모래질(사질토)	1.00 0.50 0.00	1.100	3.403	0.096	1.387	1.005	1.000	1.000
12	관경	1. 80 mm 이하 2. 81~100 mm 3. 100~150 mm 4. 151~250 mm 5. 300 mm 이상	1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	0.800	0.603	1.570	0.086	0.784	0.901	0.901
13	Valve, 분기, 연결관	1. 없음 2. 보통 3. 있음	1.00 0.50 0.00	0.700	0.603	0.604	-	-	-	-
14	접속형태	1. 용접(납) 2. 고무링 3. 메카닉, 타이프 이음	1.00 0.50 0.00	0.700	0.393	0.394	0.508	0.598	0.397	0.397

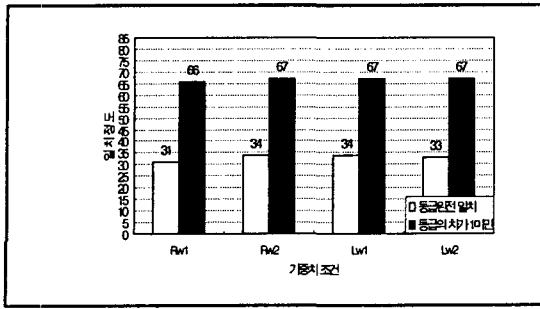


<그림 1> 관별 육안·토양·관체의 등급

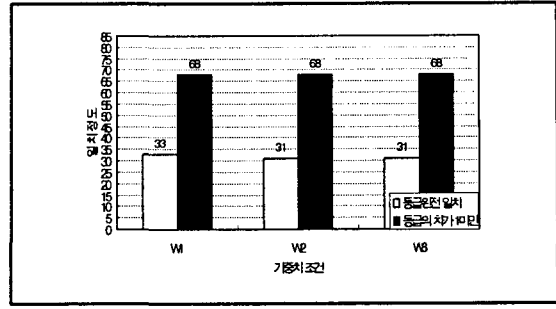
안, 토양, 관체의 총합의 등급을 비교해 보면 등급이 완전히 일치하는 최고 개수는 34개이며, 등급의 차가 1미만인 것은 최고 67개로 다음 <그림 3>에 나타내었다.

구축된 모델의 결과를 검증하기 위하여 본 연구에서는 육안, 토양, 관체의 실험분석 결과를 이용하여 각 항목별 점수를 합산하여 총점을 산정 본 연구의 노후도 평가 모델과 같은 5등으로 분류하여 <그림 1>에 나타내었다.

노후도 인자 항목별 결과를 보면 9개 항목의 경우 실제 모형의 수행결과와 육안, 토양, 관체의 총합의 등급과 비교해 보면 등급이 완전히 일치하는 최고 34개이며, 등급의 차가 1미만인 것은 최고 67개로 다음 <그림 2>에 나타내었다. 14개 항목의 경우 실제 모형의 수행결과와 육



<그림 2> 9개 인자의 가중치별 등급평가 비교



<그림 2> 14개 인자의 가중치별 등급평가 비교

실제 노후도를 예측하기 위해 굴착 및 실험을 통해 얻을 수 있는 자료와 그렇지 않은 자료를 이용한 결과를 비교하면 9개 인자를 이용한 결과가 14개 인자의 결과와 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 즉, 전체 85개 관로에서 9개 항목에 대하여 78.8% 이상의 신뢰성을 얻을 수 있었다

4. 결론

본 연구는 현재 각 지방자치단체에서 수행하는 수도관개량사업에서 교체 결정의 판단기준이 되는 노후도의 주요 영향 인자 및 가중치를 산정하기 위한 효율적인 방법을 도출하고자 하였다. 또한 산정된 결과를 바탕으로 기존의 노후도 평가모델에 적용하여 본 연구의 결과를 검증하였다.

노후도 영향인자 결과에서 굴착 및 실험이 분석이 필요한 하지 않은 9개 인자의 경우 14개 인자와 비교해서 내·외부 부식에 관련된 인자가 없기 때문에 이를 대신하기 위해 채취한 자료의 실험분석 결과와 기존 문헌을 바탕으로 인자를 산정하였다. 즉, 내부부식 인자는 관경, 매설년도, 관중으로 산정하였으며, 외부부식 인자는 되메움 토양, 관 기초공사 인자를 산정하였다. 노후도 인자별 가중치 산정 결과에서는 선형계획법을 이용한 가중치 산정 방법은 일반적으로 알고 있는 노후도 인자의 대략적인 가중치 범위 정도만을 알고 있을 경우, 이를 제약조건식으로 이용하여 실무에서 노후도 인자의 가중치를 산정할 수 있는 방법으로 적용이 가능하다고 판단된다.

노후도 영향인자 및 인자별 가중치 산정의 검증 방법으로 제시한 노후도 평가모델의 적용 결과에서는 14개 인자와 9개 인자의 결과가 거의 비슷하게 산정되었으며, 특히 모형의 검증을 위해 육안·관측·토양 자료의 분석결과의 총합을 노후도 등급과 같이 5개 등급으로 분포시킨 결과 비교에서 9개 인자 결과와 14개 인자의 결과가 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구의 서론에서 밝힌바와 같이 상수관은 지역적 특성에 따라 다양한 노후도 인자를 가지고 있으므로, 본 모델은 특정 대상지역인 A시를 대상으로 조사한 노후도 항목 및 가중치를 이용한 모형이므로 추후 다른 지역의 노후도를 평가하기 위해서는 대상지역에 대한 많은 자료의 수집 및 실험 분석이 필요하다.

6. 참고문헌

- 이창용, 김용석, 신현석, 김중훈(1999). “확률적 신경망을 이용한 상수도 노후관 추정에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제20권 제2-B호, pp.197~210.
- 정해룡, 서규태, 이택순, 김운지, 이현동, 정원식(1997) “상수도관 부식에 미치는 수질인자의 복합적 상호작용”, 대한환경공학회 1997년 추계학술발표회, pp.271~274
- 한국수자원공사(1995), “수도관 개량을 위한 의사결정 시스템 개발”, 한국수자원공사
- 황규대(1996) “수도관의 부식과 방지대책”, 경희대학교 환경연구소
- D. Kelly, O'Day(1982) “Organizing and Analyzing Leak and Break Data for Making Main Replacement Decisions”, J. AWWA, Vol 74, No.11 pp.589~597
- Recharad A. Wess, et al(1985) “Philadelphia Water Supply Infrastructure Study, 1985