



Modified indirect evaluation method for deterioration assessment of drinking water pipes

Kwon, Hyuk Jae^{a*}

^aProfessor, Department of Civil Engineering, Cheongju University, Cheongju, Korea

Paper number: 23-062

Received: 15 September 2023; Revised: 13 October 2023; Accepted: 17 October 2023

Abstract

In this study, a modified indirect evaluation method was developed to predict the deterioration level of water pipes. The accuracy of the modified method was verified by comparing it with the direct method. The weights of index were adjusted by reducing the weight of water quality corrosion, soil corrosion, lay depth and road type according to the importance of the existing evaluation factors and adding the weight of pipe thickness. In the results, the weight of pipe thickness was determined to be 0.1530. Comparing with the direct evaluation method, the accuracy of the modified indirect evaluation method increased by 31.03% compared to the indirect evaluation method. The modified indirect evaluation method will be able to select relatively old pipes more accurately and efficiently than the existing indirect evaluation method when prioritizing the improvement of old water pipes.

Keywords: Modified indirect evaluation method, Indirect evaluation method, Direct evaluation method, Pipe thickness, Analytic hierarchy process

상수도 노후도 평가를 위한 수정 간접평가법

권혁재^{a*}

^a청주대학교 토목공학과 교수

요 지

본 연구에서는 부식에 의한 관두께 감소를 예측하여 수정 간접평가법을 개발하였다. 수정 평가법과 직접평가법과 비교를 통해 노후상수관을 선정함에 있어 정확도를 확인하였다. 가중치 조정은 기존 평가항목의 중요도에 따라 수질부식성, 토양부식성, 매설깊이, 도로형태의 가중치를 낮추고 관두께의 가중치를 추가하는 방법으로 가중치를 산정하였고 그 결과 관두께의 가중치는 0.1530으로 결정하였다. 직접평가법과 비교한 결과 기존 간접평가법에 비해 수정 간접평가법의 정확도가 31.03% 상승한 것으로 분석되었다. 수정 간접평가법을 통해 노후 상수관의 개량 우선순위 선정 시 기존 간접평가법보다 정확하고 효율적으로 노후관을 선정할 수 있을 것이다.

핵심용어: 수정 간접평가법, 간접평가법, 직접평가법, 관두께, 계층화분석법

1. 서 론

최근 상수관의 노후화로 인해 상수도 사고가 빈번하게 발생하고 있으며 사고 원인으로는 관부식, 관파손, 지반 함몰, 용수공급 중단, 수질사고 등이 있다. 이러한 사고를 해결하기

위해서는 상수관 실태조사를 통해 노후상수관을 개선하여야 한다. 간접평가법은 조사대상 구간의 노후도 평가항목에 따라 분할 또는 그룹화하여 노후도 평가를 진행하며 이를 통해 노후도를 판단하고 노후된 상수관으로 추정된 관로에 대해 지자체에서 조사한 수도관에 관련된 현안문제 등을 기초로 하여 직접평가를 위한 조사대상을 결정한다. 그러나 노후상수관에 대해 직접조사를 실시하게 되면 조사에 따른 막대한 예산과 단수로 인해 주민들의 불편이 발생하게 되며 간접평가

*Corresponding Author. Tel: +82-43-229-8473
E-mail: hjkwon@cju.ac.kr (Kwon, Hyuk Jae)

법에서는 노후관으로 파악되었지만 직접조사 시 관 상태가 좋은 경우가 발생하게 된다. 따라서 간접평가법의 정확도를 높인다면 직접평가법에 의한 시간적, 경제적 부담을 대폭 해소할 수 있을 것이다.

Kim *et al.* (2002)은 상수관의 노후도 주요 인자를 굴착 및 실험분석이 필요한 14개 인자와 굴착 및 실험분석이 불필요한 9개 인자로 구분하여 노후도 평가모형을 개발하였다. 개발한 모델로 노후도를 평가하면 굴착 및 실험분석이 필요한 14개 인자와 불필요한 9개 인자를 이용한 모델의 결과는 큰 차이가 없는 것으로 판단하였다. 노후도 항목과 가중치 산정을 체계적이고 정량적으로 제시하였으며 추후 노후도 평가 모델 개발 시 많은 도움이 된다고 판단하였다.

Choi *et al.* (2012)은 관 내시경을 통해 침적물 두께, 스케일 크기, 박리정도, 접합부 상태를 조사하여 간접적으로 관의 노후도 평가하였다. 간접평가인자와 관 내시경 조사결과로 상관관계를 분석한 결과 매설년수, 도장재질, 도로구분, 누수건수, 평균유속 순으로 관 노후도에 영향을 미치지만 관중, 관경, 평균수압은 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다. 하지만 유속 변화량, 수압변화량과 같은 다양한 자료가 추가되면 보다 정확한 노후도 평가를 수행할 수 있다고 판단하였다.

Kim *et al.* (2014)은 대구경 관로의 노후도 평가를 위해 1955년 평가법, 2002년 평가법, 상태평가법을 비교하여 노후도 평가모형을 개발하였다. 3가지 노후도 평가방법 인자 중 중복되는 인자 4개와 2개 이상의 평가방법에서 중복되는 인자 6개를 선정하여 총 10개의 인자를 선정하였다. 이때 가중치는 실측치와 기존 평가방법을 이용하여 다중회귀분석을 통해 산정하였다.

Park *et al.* (2014)은 경과년수에 따른 상태지수를 통해 노후상태를 파악하였고 간접평가법과 상관성분석으로 상대안전진단 추정식을 제안하였다. 또한 관망의 특성을 적용하여 관망 상태 변화 회귀식을 산출하고 관종별 노후화 모델을 제시하였으며 간접평가법의 노후화 경향을 비교하여 신뢰성을 확인하였다.

본 연구에서는 기존에 사용중인 간접평가법의 평가항목 변경과 가중치 조정을 통해 수정 간접평가법을 제안하고 실제 상수관망에 적용하여 직접평가법에 의한 결과와 비교 분석하였다.

2. 수정 간접평가법

2.1 평가항목

상수관로 정밀조사 매뉴얼(ME, 2020)의 평가항목은 Table 1과 같이 11개 항목을 조사하게 된다. 간접평가 항목은 관종별

로 다르며, 본 연구에서는 관 내부에 부식이 발생할 수 있고 가장 많이 사용되고 있는 DCIP (Ductile Cast Iron Pipe)를 대상으로 연구를 진행하였다. 부식으로 인한 관두께 감소로 관파손이 발생할 수 있고 부식으로 인한 적수와 흑수로 수질사고 발생 등 관 노후화에 영향을 미치는 중요한 평가항목으로 판단하였다. 그리고 DCIP에 대한 평가항목 중 강관 평가항목인 전기부식과 플라스틱관 평가항목인 토양종류를 제외하였다.

2.2 관두께 예측

관두께는 매설 경과년수가 경과함에 따라 부식이 발생하여 관두께가 감소하게 된다. 관두께를 예측하기 위해 Nahal and Khelif(2014)은 아래 Eq. (1)의 관 부식으로 인한 관두께

Table 1. Evaluation factors of the indirect evaluation method

Pipe type	Indirect evaluation method		
	Factor	Unit	Note
DCIP	Pipe diameter	mm	○
	Service year	Year	○
	Water quality corrosion	LI	○
	Soil corrosion	Ω-cm	○
	Electron-Chemical protection	-	-
	Lay depth	m	○
	Road type	-	○
	Maximum water pressure	kgf/cm ²	○
	The number of damages	Case/km/year	○
	Valve/Waterworks density	Count/100m	○
	Soil type	-	-
Pipe thickness	mm	-	

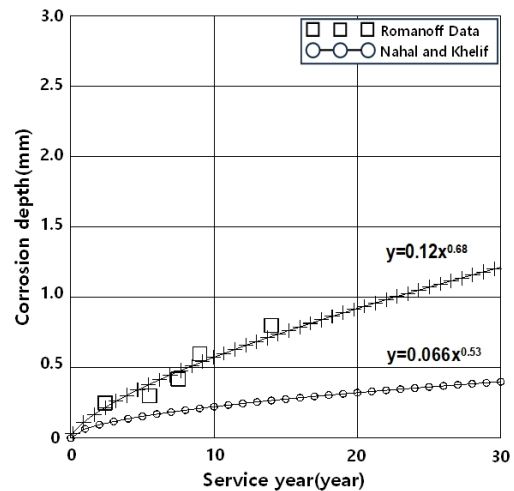


Fig. 1. Corrosion depth according to service year

변화식을 제안하였다.

$$d = k_c t^n \tag{1}$$

여기서, d 는 관의 부식깊이(mm), k_c 는 부식속도(0.066), t 는 경과년수, n 은 부식상수(0.53)이다. 또한, Romanoff (1957)는 15년동안 지속적으로 부식깊이를 실측하였으며 Fig. 1과 같이 Nahal and Khelif (2014)의 관두께 변화식과 Romanoff (1957)의 실측한 데이터를 그래프로 나타내고 있다. 본 연구에서는 Romanoff(1957)의 경과년수에 따른 부식깊이 실측

치를 사용하여 관두께 변화를 예측하였다.

2.3 점수산정 방법

각 개별관로의 점수산정 방법은 평가항목 조건 값에 가중치를 곱한 값의 합을 가중치 합으로 나눈 후 매설년수에 따른 노후도 보정계수를 곱하여 점수를 산정한다. 개별 관로 점수 계산방법은 아래 Eq. (2)와 같다.

$$DP = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (f_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \times C_c \tag{2}$$

여기서, DP 는 관종별 개별관로의 상태점수, f_i 는 관종별 평가항목의 조건 값, w_i 는 관종별 평가항목의 가중치, C_c 는 매설년수에 따른 관상태 보정계수, n 은 관종별 평가항목수이다. 관상태에 따른 보정계수는 경과년수에 따라 Table 2와 같이 결

Table 2. Correction coefficient (C_c) according to service year

Service year	Correction coefficient
0 ~ 10 years	100
10 ~ 20 years	90
20 ~ 30 years	80
More than 30 years	75

Table 3. Range of indirect evaluation factors

Indirect evaluation method					
Factor	Range	Value	Factor	Range	Value
Pipe diameter (mm)	Less than 300	0.00	Road type	Expressway, industrial road	0.00
	300~500	0.35		2 lanes one way	0.50
	500~800	0.70		1 lane one way	0.70
	800 or more	1.00		Side road	1.00
Service year (Year)	More than 30	0.00	Maximum water pressure (kgf/cm ²)	More than 7.0	0.00
	20~30	0.35		5.0~7.0	0.35
	10~20	0.70		3.0~5.0	0.70
	10 or less	1.00		3.0 or less	1.00
Water quality corrosion (LI)	Less than 2	0.00	The number of damages (Case/km/year)	More than 1.0	0.00
	-2~-1	0.35		0.75~1.0	0.25
	-1~0	0.70		0.5~0.75	0.50
	0 or more	1.00		0.25~0.5	0.75
Soil corrosion (Ω-cm)	700 or less	0.00	Valve/ Waterworks density (Count/100m)	0.25 or less	1.00
	700~1,000	0.20		More than 5.0	0.00
	1,000~1,200	0.50		3.0~5.0	0.35
	1,200~1,500	0.80		1.0~3.0	0.70
	1,500~2,000	0.90		1.0 or less	1.00
More than 2,000	1.00	Soil type	-	-	
Electron-Chemical protection	-	-	Pipe thickness (%)	More than 10	0.00
Lay depth (m)	More than 3.0	0.00		10~7.5	0.25
	2.0~3.0	0.75		7.5~5	0.50
	1.0~2.0	1.00		5~2.5	0.75
	1.0 or less	0.10		2.5 or less	1.00

Table 4. Grade of aging condition

Pipe type	Status grade	Indirect evaluation method	Pipe aging condition prediction
DCIP	1	More than 45	Good condition
	2	35 ~ 45	Old age progress
	3	less than 35	Old age estimation

Table 5. Weights of indirect evaluation method and modified indirect evaluation method

Pipe type	Indirect evaluation method		Modified indirect evaluation method	
	Factor	Weight	Factor	Weight
DCIP	Pipe diameter	0.0520	Pipe diameter	0.0520
	Service year	0.2360	Service year	0.2360
	Water quality corrosion	0.0340	Water quality corrosion	0.0054
	Soil corrosion	0.0710	Soil corrosion	0.0113
	Electron-Chemical protection	0.0000	Electron-Chemical protection	0.0000
	Lay depth	0.0380	Lay depth	0.0061
	Road type	0.0390	Road type	0.0062
	Maximum water pressure	0.1250	Maximum water pressure	0.1250
	The number of damages	0.2490	The number of damages	0.2490
	Valve/Waterworks density	0.1560	Valve/Waterworks density	0.1560
	Soil type	0.0000	Soil type	0.0000
	Pipe thickness	0.0000	Pipe thickness	0.1530
	Total	1.0000	Total	1.0000

정하며 관종별 평가항목의 조건 값은 범위에 따라 Table 3과 같이 결정한다. 관두께의 범위에 따른 조건값은 직접평가법의 평가항목에서 관두께 점수 산정방법을 사용하였다.

각 개별관로의 점수 산정 후 Table 4와 같이 노후상태 등급을 3단계로 구분한다. 1등급인 경우 양호한 상태로 계속 사용하거나 세척이 필요하고 2등급은 노후진행 상태로 세척 또는 갱생을 실시해야 하며 3등급의 노후추정은 교체까지 검토가 필요한 수준으로 판단할 수 있다.

3. 가중치

3.1 가중치 조정

수정 간접평가법에 관두께의 가중치를 배분하기 위해 실제 현황 반영이 어려운 항목들의 가중치를 조정하였다. 수질 부식성은 배수지가 동일한 관망일 경우 모든 관이 동일한 값을 적용하기 때문에 하향 조정하였다. 토양부식성은 대부분 자료가 부족하며, 직접평가 시 선정된 관로의 토양부식성을 조사하여 간접평가법에 적용하기 때문에 하향 조정하였다. 매설깊이는 매설깊이 기준을 준용하여 값을 결정하거나 GIS자료에 수록된

Table 6. Assessment results according to evaluation method

Evaluation method	Assessment grade
Indirect evaluation method	9.060
Modified indirect evaluation method	9.495

매설깊이를 사용하기 때문에 하향 조정하였고 도로형태 또한 대부분 공통된 값으로 반영하기 때문에 하향 조정하였다. Table 5와 같이 기존 DCIP 간접평가 9개 항목 중 수질부식성, 토양부식성, 매설깊이, 도로형태의 가중치 비중을 낮추고 수정 간접평가법에 추가된 관두께의 가중치를 추가하였다.

본 연구에서 적용한 계층화분석법(Analytic Hierachy Process)은 각 평가인자의 중요도를 도출하는 분석 방법으로 쌍대비교를 통해 각 요인 간의 상대적인 가치를 측정함과 동시에 설정한 중요도를 토대로 일관성을 판단하기 위한 분석 방법이다. 본 연구에서는 기존 간접평가법의 9개에서 수질부식성, 토양부식성, 매설깊이, 도로형태, 관두께 평가항목의 가중치를 변경한 5개를 평가인자로 선정하였고 이때 가중치를 중요도로 선정하여 분석을 진행하였다. 그 결과 Table 6과 같이 수질부식성, 토양부식성, 매설깊이, 도로형태, 관두께 평가항목만 변경했을 때 평가인자 점수가 9.495로 기존 간접평가법의 9.060

보다 높은 점수로 분석되어 관두께의 가중치를 0.1530으로 결정하였다.

4. 분석결과

4.1 수정 간접평가법 적용

본 연구에서는 칠곡군(ME, 2023a) 5개, 청도군(ME, 2023b) 6개, 포항시(ME, 2021) 6개, 성주군(ME, 2023c) 4개, 영천시(ME, 2022) 8개, 총 23개의 자료를 통해 수정 간접평가법으로 등급을 재평가하였다. Table 7은 각 지역을 간접평가법으로 노후상태를 평가한 결과로 칠곡군은 541.98 km중 30년 경과한 관이 14.810 km, 노후관으로 추정된 관이 79.139 km이며 성주군은 430.180 km중 30년 경과한 관이 0.970 km, 노후관으로 추정된 관이 40.263 km이고 청도군은 652.220 km중 30년이 경과한 관이 12.600 km, 노후관으로 추정된 관이 41.294 km이다. 영천시는 958.740 km중 30년이 경과한 관이 4.666 km, 노후관으로 추정된 관이 106.455 km이고 포항시는 1,842.253 km중 30년이 경과한 관이 157.826 km, 노후관으로 추정된 관이 289.747 km으로 나타났다. 본 연구에서 재평가를 진행한 관의 종류는 DCIP관이며 관경은 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm관을 대상으로 평가를 진행하였다. Table 8은 직접평가법에 의한 실측 관두께 측정치이다. Table 9는 수정 간접평가법으로 등급을 재평가했을 때 기존 간접평

Table 7. Pipe length according to service year by region

Region	Pipe aging condition prediction	Pipe length (km)	Ratio (%)
Chilgok	Good condition	376.85	69.53
	Old age progress	85.99	15.87
	Old age estimation	79.14	14.60
Cheongdo	Good condition	562.91	86.31
	Old age progress	48.02	7.36
	Old age estimation	41.29	6.33
Pohang	Good condition	1,220.670	66.26
	Old age progress	331.837	18.01
	Old age estimation	289.747	15.73
Seongju	Good condition	371.11	86.27
	Old age progress	18.81	4.37
	Old age estimation	40.26	9.36
Yeongcheon	Good condition	707.06	73.75
	Old age progress	145.23	15.15
	Old age estimation	106.45	11.10

가법과 직접평가법의 등급 변화를 비교하였다. 간접평가법에서 개량방안으로 1등급은 상태양호 또는 세척, 2등급은 세척 또는 갱생, 3등급은 교체 또는 갱생으로 판단하였고 직접평가법에서 개량방안으로 1등급과 2등급 그리고 3등급은 상태양호 또는 세척, 4등급은 세척 또는 갱생, 5등급은 교체 또는 갱생으로 판단한다. 수정 간접평가법과 직접평가법의 정확도를 비교할 때 간접평가법 1등급을 직접평가법 1등급, 2등급, 3등급과 일치하고 간접평가법 2등급을 직접평가법 4등급과 일치하며 간접평가법 3등급을 직접평가법 5등급과 일치한 것으로 판단하였다.

Table 8. Actual measurements of corrosion depth of each pipes

Region	Pipe No.	Pipe type	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Corrosion depth (mm)	Corrosion rate (%)
Chilgok	00691	DCIP	100	7.00	0.95	13.57
	00848	DCIP	100	7.00	0.86	12.29
	00322	DCIP	150	7.10	0.76	10.70
	02189	DCIP	150	7.10	1.24	17.46
	00177	DCIP	150	7.10	1.18	16.62
Cheongdo	003181	DCIP	100	7.00	1.33	19.00
	003602	DCIP	100	7.00	1.06	15.14
	003496	DCIP	100	7.00	0.71	10.14
	00781	DCIP	100	7.00	0.60	8.57
	004708	DCIP	150	7.10	0.83	11.69
	003077	DCIP	200	7.30	0.81	11.10
Pohang	01587	DCIP	100	7.00	0.76	10.86
	00072	DCIP	150	7.10	0.79	11.29
	11405	DCIP	150	7.10	0.89	12.54
	11346	DCIP	200	7.30	0.82	11.23
	17855	DCIP	200	7.30	1.47	20.14
Seongju	11801	DCIP	250	7.40	0.92	12.43
	159	DCIP	100	7.00	0.70	10.00
	201	DCIP	150	7.10	0.60	8.45
	297	DCIP	200	7.30	0.57	7.81
Yeongcheon	214	DCIP	250	7.40	0.51	6.89
	003548	DCIP	100	7.00	1.48	21.14
	007085	DCIP	100	7.00	0.97	13.86
	006929	DCIP	100	7.00	0.97	13.86
	008041	DCIP	150	7.10	0.98	13.80
	002253	DCIP	150	7.10	1.23	17.32
	007755	DCIP	150	7.10	0.56	7.89
	008215	DCIP	200	7.30	0.57	7.81
	004262	DCIP	250	7.40	1.04	14.05

Table 9. Evaluation results of each pipes

Region	Pipe No.	Indirect evaluation method	Modified indirect evaluation method	Direct evaluation method
Chilgok	00691	3	3	4
	00848	3	3	5
	00322	1	3	5
	02189	3	3	3
	00177	3	3	2
Cheongdo	003181	3	3	5
	003602	3	3	5
	003496	3	3	5
	00781	3	3	5
	004708	3	3	5
	003077	1	1	5
Pohang	01587	3	3	5
	00072	2	3	5
	11405	3	3	5
	11346	3	3	5
	17855	2	3	5
	11801	1	3	5
Seongju	159	2	3	5
	201	2	3	5
	297	2	3	5
	214	2	3	4
Yeongcheon	003548	2	3	5
	007085	3	3	5
	006929	3	3	3
	008041	1	3	1
	002253	1	3	5
	007755	1	3	5
	008215	2	3	5
	004262	1	1	5

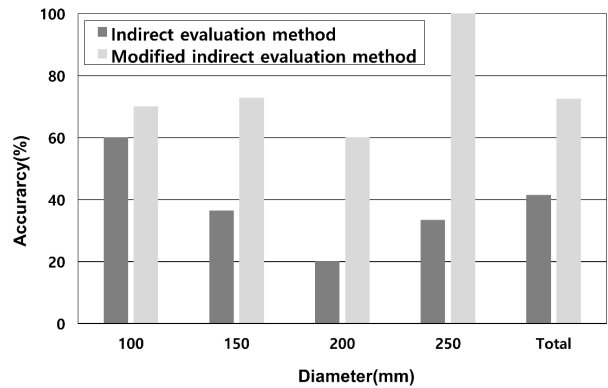


Fig. 2. Match accuracy of indirect evaluation method and modified indirect evaluation method

4.2 직접평가법과 비교

기존 간접평가법과 직접평가법의 정확도를 분석한 결과 Table 10과 같이 29개의 관로 중 12(41.38%)개 관로가 일치한 것으로 분석되었다. 100 mm관이 60.00%(6개)로 정확도가 가장 높았으며 200 mm관은 20.00%(1개)로 정확도가 가장 낮았으며 수정 간접평가법으로 분석한 결과 29개의 관로 중 21(72.41%)개 관로가 일치한 것으로 분석되었다. 250 mm관이 100.00%(3개)로 정확도가 가장 높았으며 200 mm관은 60.00%(3개)로 정확도가 가장 낮게 나타났다.

수정 간접평가법과 직접평가법을 분석한 결과 노후상수관로의 평가결과에 대한 정확도는 41.38%에서 72.41%로 기존 간접평가법보다 31.03% 높게 분석되었고 모든 관에서 정확도가 상승한 것으로 분석되었다. Fig. 2는 간접평가법과 수정 간접평가법의 정확도를 비교한 그래프이다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 간접평가법과 수정 간접평가법을 칠곡군, 성주군, 청도군, 영천시에 적용하여 노후도 평가를 진행하였다. 기존 간접평가법에서 관두께 항목을 추가하고 10

Table 10. Comparison of indirect evaluation method and modified indirect evaluation method

Diameter (mm)	Indirect evaluation method			Modified indirect evaluation method		
	Number of pipe	matching pipe	accuracy (%)	Number of pipe	matching pipe	accuracy (%)
100	10	6	60.00	10	7	70.00
150	11	4	36.36	11	8	72.73
200	5	1	20.00	5	3	60.00
250	3	1	33.33	3	3	100.00
Total	29	12	41.38	29	21	72.41

개의 평가항목으로 분석을 진행하였다. 가중치는 실제 현장에 반영하기 어렵거나 동일한 값을 반영하는 항목인 수질부식성, 토양부식성, 매설깊이, 도로형태의 가중치를 낮추고 관두께의 가중치를 추가하였다. 계층화분석법을 통해 기존 간접평가법과 수정 간접평가법에서 가중치가 변경되는 항목들과 분석을 진행한 결과 평가인자 점수가 9.495로 기존 간접평가법보다 높게 분석되어 관두께 가중치를 0.1530으로 결정하였다. DCIP관 중 관경 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm관을 대상으로 기존 간접평가법과 수정 간접평가법을 직접평가법과 비교를 통해 정확도를 분석하였다. 기존 간접평가법은 23개 중 9개 관이 일치하여 39.13%의 정확도를 나타냈고 수정 간접평가법은 23개 중 15개 관이 일치하여 65.22%의 정확도를 나타내면서 정확도는 26.09%가 상승했다. 관 매설율이 높은 100 mm관과 150 mm관의 정확도는 각각 55.56%에서 66.67%로 11.11%상승했고 33.33%에서 66.67%로 33.34% 상승했다. 기존 간접평가는 부식원인 인자인 수질부식성, 토양부식성, 매설깊이, 도로형태를 주요 평가항목으로 반영 하지만 수정 간접평가법은 관부식의 결과인 관두께 변화를 예측하고 반영하여 정확성과 활용성이 향상되었다고 판단된다. 향후 수정 간접평가법을 통해 노후 상수관로 개량 우선 순위 선정 시 제한이 많은 직접조사법의 문제들을 보완하여 보다 정확하고 효율적으로 노후관을 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Choi, T.H., Kang, S.J., Choi, J.H., and Koo, J.Y. (2012). "A study on adequacy of pipe deterioration evaluation methods using the endoscope of water distribution pipe." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 26, No. 5, pp. 669-683.
- Kim, E.S., Kim, J.H., and Lee, H.D. (2002). "Estimation of deterioration and weighting factors in pipes of water supply systems." *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 16, No. 6, pp. 686-699.
- Kim, E.S., Lee, S.H., and Yoon, K.Y. (2014). "Assessment of the deterioration of large-diameter pipe networks (I): Development of an assessment model." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 1, pp. 482-487.
- Ministry of Environment (ME) (2020). *Water supply pipeline improvement evaluation manual*.
- Ministry of Environment (ME) (2021). *Retirement constant water pipeline maintenance basic plan. Pohang*.
- Ministry of Environment (ME) (2022). *Retirement constant water pipeline maintenance basic plan. Yeongcheon*.
- Ministry of Environment (ME) (2023a). *Retirement constant water pipeline maintenance basic plan. Cheongdo*.
- Ministry of Environment (ME) (2023b). *Retirement constant water pipeline maintenance basic plan. Chilgok*.
- Ministry of Environment (ME) (2023c). *Retirement constant water pipeline maintenance basic plan. Seongju*.
- Nahal, M., and Khelif, R. (2014). "Failure probability assessment for pipelines under the corrosion effect." *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 15-20.
- Park, M.Y., Sho, B.C., Park, J.H., Kim, K.H., and Sim, J.H. (2014). "Study of deterioration prediction model of water distribution system using the development of method of the amend indirect condition assessment." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 2, pp. 67-76.
- Romanoff, M. (1957). "Underground corrosion." *National Bureau of Standards Circular 579*, US Government Printing Office, Washington DC, U.S.