

AHP를 이용한 상수도관의 위험요인 및 개량 우선순위 결정 기법

Evaluation of Risk Factors and Decision Making for Rehabilitation of Water Supply Network using AHP

김용삼, 박진일, 이대종, 전명근

충북 청주시, 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부

E-mail : mgchun@chungbuk.ac.kr

요 약

본 논문에서는 다기준 의사결정방법 중에 하나인 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 이용하여 상수도관의 개량 우선순위 결정 및 노후화에 영향을 가장 많이 주는 위험요인을 평가할 수 있는 기법을 제안한다. 제안된 방법은 3단계의 계층구조로 구성되어 있으며, 1단계에서는 AHP를 이용하여 우선순위를 예측하고자 하는 관망에 대해서 평가 인자들에 대한 출력값을 산출한다. 2단계에서는 1단계에서 계산된 값들을 이용하여 물리적 척도와 환경적 척도 값을 산출하고, 최종 3단계에서 산출값들을 이용하여 우선순위를 결정하도록 구성되어 있다. 제안된 방법은 FCP에 의한 기존 연구와 비교함으로써 타당성을 검증하였다.

Key Words : AHP, FCP, 상수도관, 다기준의사결정

1. 서 론

상수도 시스템은 국가의 중요한 기간시설로서 수질을 관리하는 정수시설과 물의 공급을 담당하는 상수도관으로 구성되어 있다. 최근 진보된 정수기술에 의하여 정수장에서 공급되는 수질의 상태는 안정하고 위생적이지만, 수도물의 수송기능을 담당하는 상도수관이 노후되어 수질이 악화되거나 오염물질이 수도꼭지에서 배출될 경우 수도물에 대한 불신은 가중될 것이다. 일본의 수도 관로기술센터에서 연구된 “관로시설 진단법의 체계화 및 조사보고서”에 의하면, 관로의 진단은 수집된 정보를 기초로 하는 직접진단법과 통계적 처리결과로부터 관로의 상태를 추정하는 간접진단법이 적용될 수 있다고 보고되고 있다[1,2]. 직접 진단법은 현실적인 어려움이 존재하므로 간접진단법중 다기준 의사결정방법중에 속하는 AHP는 평가기준이 다른 여러 가지 평가요소에 대하여 전문가들의 의견을 반영하여 각 평가요소에 대하여 가중치를 결정하여 의사결정을 하는 방법이다. 이 방법은 Vargas [3]에 의하여 관리기법에 관한 연구에 폭넓게 시행되고 있으며, Satty [4]에 의해 다기준 의사결정방법으로의 적용 연구가 이루어졌다.

본 연구에서는 다기준 의사결정방법 [5] 중에 하나인 AHP(Analytic Hierarchy Process)를

이용하여 상수도관의 개량 우선순위 결정 및 노후화에 영향을 가장 많이 주는 위험요인을 평가할 수 있는 기법을 제안한다. 제안된 방법은 3단계의 계층구조로 구성되어 있으며, 1단계에서는 AHP를 이용하여 우선순위를 예측하고자 하는 관망에 대해서 성능평가 인자들에 대한 출력값을 산출한다. 2단계에서는 물리적 척도와 환경적 척도 값을 산출하고, 최종 3단계에서 종합적인 산출값들을 이용하여 우선순위를 결정하도록 구성되어 있다.

2. AHP에 의한 상수도관의 평가 기법

AHP는 다기준 의사결정 기법 중 가장 널리 응용되고 있는 방법으로 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 이 방법은 목표값들 사이의 중요도를 계층적으로 나누어 파악함으로써 각 대안의 중요도를 산출하는 기법으로, 다수의 목표, 평가기준 및 의사결정 주체가 포함되고 있는 의사결정 문제를 계층화하여 해결하는데 적합하다 [6, 7]. 즉, 최종적인 목적아래 하위기준을 계층화한 후, 각 평가 기준의 관점에서 대안들의 상대적 중요도와 평가 기준들 간의 상대적 중요도를 쌍대비교(Pairwise comparison)에 의해 측정한다. 이러한 방식을 통해 AHP는 최하위 계층에 있는 대안들의 가중치 또는 우선순위를 구할 수 있도록 한다. 요소들간의 중

요도를 판단하는 기준이 되는 비교척도는 표 1에서 나타난 9점 척도법이 이용된다. 중요도의 척도에 따라 쌍대비교를 통해 식 (1)의 행렬을 구할 수 있다. 식 (1)에서 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 이며, 대각선의 원소들이 모두 1이 되는 역수행렬이다.

표 1. 9점 척도 판단기준에 의한 두 요소 쌍대비교

수치	정 의
1	동등하게 중요
3	비교대안보다 약간 중요
5	매우 중요
7	강하게 중요 또는 확실히 중요
9	절대적 중요
2,4,6,8	상기 척도의 중간값

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

쌍대행렬 A의 각 열(Column)에 대한 합 S_j 을 식 (2)과 같이 구한 후에 정규화된 행렬값 V_{ij} 를 식 (3)과 같이 얻는다.

$$S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

$$V_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j} \quad (3)$$

정규화된 행렬 V의 각 행별로 행의 합을 구한 후, 각 행의 합을 산술평균하면 노후도 평가인자에 대한 선호도 지수 P가 식 (4)와 같이 구해진다. 여기서 선호도 지수값을 모두 더하면 1이 되어야 한다.

$$P_i = \sum_{j=1}^n \frac{V_{ij}}{n} \quad (4)$$

앞서 제시된 쌍대행렬의 각 열에 대해 그 열에 해당하는 선호도지수 값을 곱한 후, 모두 더하면 행렬 B를 얻을 수 있다. 이와 같이 계산된 행렬 B의 각 요소값을 선호도 지수 P의 요소값으로 나눈 후 산술평균하면 λ_{max} 가 식 (5)와 같이 얻어진다.

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{n P_i} \quad (5)$$

일관성 지수 CI(Consistency Index)는 다음

식 (6)에 의해 구해진다.

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (6)$$

일관성 비율 CR(Consistency Ratio)을 계산하면,

$$CR = CI / RI \quad (7)$$

여기서, RI(Random consistency Index)는 무작위 일관성지수를 말하며, 1에서 9까지 정수들을 무작위 추출하여 역수행렬을 작성한 후 이로부터 일치지수를 구한 것을 말하며, 표본 500개로부터 무작위 지수를 구하여 평균한 값은 표 2와 같다. 즉, 쌍대비교를 통해 상대적 중요도를 산정하고자 하는 요소들의 개수에 따른 무작위 일관성 지수 RI값을 표 2로부터 구할 수 있다. CR값이 0.1 이하일 경우에는 일관성이 있다고 말하고, 0.10~0.20 사이일 경우에는 일관성을 인정하는 정도이다. 만약 0.20을 넘으면 일관성이 없다고 보고 다시 설문을 해서 보거나 그룹 설문일 경우에는 중요도 산정에서 제외시켜야 한다.

표 2. 평균 난수지수(RI)

n의 수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI 값	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.51

본 논문에서는 그림 1에서 보는 바와 같이 AHP를 이용한 상수도관의 개량 우선순위 결정기법을 제안한다. 제안된 방법은 상수도관별로 입력된 자료를 이용하여 상대비교행렬을 작성한 후, 인자들에 대한 AHP에 의해 산출된 출력값과 평가기준에 대한 가중치값을 이용하여 물리적 척도와 환경 척도에 대한 출력값과 우선순위를 결정한다. 마지막 단계에서는 물리적 척도와 환경 척도별로 산출된 출력값과 가중치값을 이용하여 최종 상수도관의 개량 우선순위를 결정한다. 즉, i 번째 관망에 대한 2단계의 물리적 척도 Z_{i1} 과 환경적 척도 Z_{i2} 는 식 (8)에 의해 구해지며, 최종 출력값 Y_i 는 식 (9)에 의해 얻을 수 있다.

$$Z_{i1} = (\sum_{k=1}^5 P_{ik} \cdot V_k) / 5 \quad (8)$$

$$Z_{i2} = (\sum_{k=6}^{10} P_{ik} \cdot V_k) / 5$$

$$Y_i = (\sum_{j=1}^2 Z_{ij} \cdot W_j) / 2 \quad (9)$$

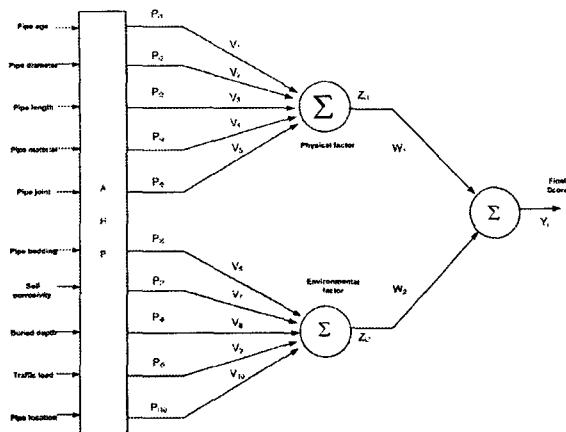


그림 1. 최종 평가를 위한 평가 과정

3. 실험 및 결과

AHP에 의한 상수도관의 개량 우선순위 결정을 위해 본 논문에서는 그림 2 및 표 3에 나타난 계층구조 및 데이터를 이용하였다[5].

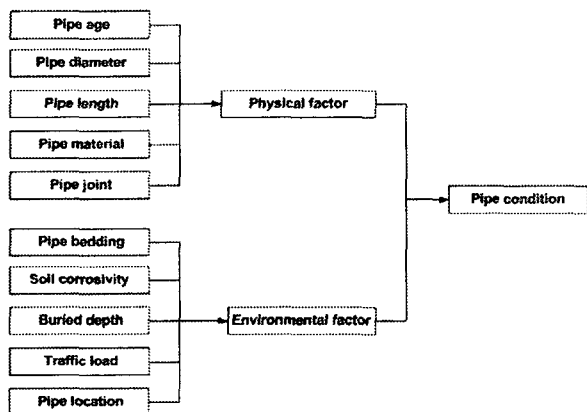


그림 2. 관망 평가를 위한 데이터 구성도

표 2. 상수도관 평가를 위한 데이터

First level indicators	Value of pipe condition indicator				
	Pipe 1	Pipe 2	Pipe 3	Pipe 4	Pipe 5
Pipe diameter(mm)	400	300	300	600	500
Pipe age	1953	1964	1978	1988	1992
Pipe material	CI	CI	DI	ST	PVC
Pipe length(m)	600	400	800	400	300
Pipe joint	lead	leadite	rubber	rubber	rubber
Traffic loads	very quite	very busy	busy	normal	very busy
Soil condition	clay	gravel	clay	sand	sand
Location	poor	medium	excellent	excellent	good
Bedding condition	clay	gravel	clay	sand	sand
Buried depth(m)	2.5	2.0	1.8	1.2	1.5

이전 연구인 Yan 등은 FCP을 이용하여 상수도관 개량 우선순위 방법을 제안하였으며, 성능평가를 위해 가중치의 변동에 따른 성능을 비교하였다. 따라서 본 논문에서도 Yan 등의 연구결과와 동일하게 가중치의 변동에 따른 성능을 비교하였으며, 표 3에 5명의 전문가관점에서 설정차이가 나타나는 가중치값을 나타냈다.

그림 3 및 표 4에서는 쌍대비교 행렬값을 이용하여 AHP에 의해 각각의 평가인자별 출력값을 나타냈다. 그림 3 및 표 4에서 보는 바와 같이 Pipe 1인 경우 다른 Pipe에 비해 매설지역, 매설년수, 매설깊이 순으로 노후화에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. Pipe 2인 경우는 관점속 인자가 관의 노후화에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. Pipe 3인 경우는 관 길이, 바닥조건이 가장 열악한 것으로 분석되었다. Pipe 4와 Pipe 5는 다른 관망에 비해 모든 평가척도에서 안정적인 것으로 분석되었으나, Pipe 4 보다는 Pipe 5가 토양 부식이 더 열악한 것으로 분석되었다.

표 3. 5개의 가중치 값

Pipe condition indicators	Weights				
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4	Trial 5
Level 1 indicators					
Pipe diameter	0.2	0.3	0.2	0.25	0.2
Pipe material	0.3	0.2	0.4	0.2	0.25
Pipe age	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3
Pipe length	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15
Pipe joint	0.1	0.1	0.1	0.15	1
Traffic Loads	0.2	0.2	0.15	0.2	0.15
Soil condition	0.3	0.2	0.2	0.15	0.3
Pipe location	0.1	0.3	0.3	0.2	0.2
Bed condition	0.2	0.2	0.2	0.15	0.25
Buried depth	0.2	0.1	0.15	0.3	0.1
Level 2 indicators					
Physical	0.5	0.6	0.8	0.6	0.7
Environmenta	0.5	0.4	0.2	0.4	0.3

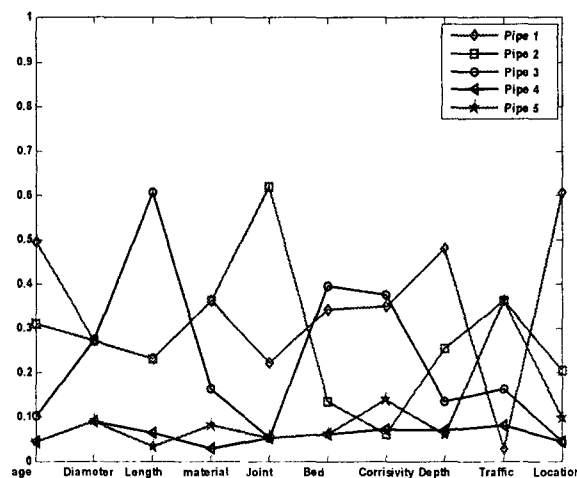


그림 3. AHP에 의해 산출된 인자별 출력값

표 4. AHP에 의해 산출된 평가인자별 출력값

(a) Physical factor

	Physical factor				
	Age	Diameter	Length	Material	Joint
Pipe1	0.4954	0.2732	0.2315	0.3632	0.2223
Pipe2	0.3115	0.2732	0.2315	0.3632	0.619
Pipe3	0.1026	0.2732	0.6071	0.164	0.0529
Pipe4	0.0452	0.0902	0.0642	0.0284	0.0529
Pipe5	0.0452	0.0902	0.0328	0.0813	0.0529

(b) Environment factor

	Environment factor				
	Bedding	Corrivsity	Depth	Traffic	Location
Pipe1	0.3437	0.3494	0.4796	0.0287	0.6062
Pipe2	0.1363	0.0625	0.2551	0.3624	0.206
Pipe3	0.3967	0.3754	0.1362	0.164	0.0441
Pipe4	0.0617	0.0719	0.0698	0.0816	0.0441
Pipe5	0.0617	0.1407	0.0592	0.3624	0.0995

표 5에서는 기존 연구인 FCP 방법과 제안된 AHP에 의한 상수도관 진단결과를 비교하여 나타냈다. 표 5에서 보는 바와 같이 FCP 방법의 경우 5경우의 가중치 변동에 대해서 1번째 가중치값들에 대해서 우선순위가 관망 2가 높게 나타난 반면에 다른 가중치값들에 의한 결과는 관망 1번이 우선순위가 가장 높게 나타났다. 또한 3, 4, 5의 가중치 값들은 모두 모든 우선순위에서 동일한 결과를 얻은 반면에 1번과 2번 가중치 값들에 대해서는 다른 결과를 나타냈다. 한편, AHP에 의한 결과는 5경우의 가중치 값들에 대해서 모두 동일한 결과를 얻어 안정된 관망의 우선순위 값들을 산출 하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 적용된 사례의 경우 AHP 방법이 FCP에 의한 방법보다 일관된 결정을 판단할 수 있음을 알 수 있다.

표 5. FCP와 AHP의 결과 비교

(a) FCP 결과

	FCP				
	Trail(1)	Trail(2)	Trail(3)	Trail(4)	Trail(5)
Rank	2	1	1	1	1
	1	2	2	2	2
	5	5	3	3	3
	3	3	5	5	5
	4	4	4	4	4

(b) AHP 결과

	AHP				
	Trail(1)	Trail(2)	Trail(3)	Trail(4)	Trail(5)
Rank	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	3
	5	5	5	5	5
	1	1	1	1	1

4. 결론

본 연구에서는 다기준 의사결정방법 중에 하나인 AHP를 이용하여 상수도관의 개량 우선 순위 결정 및 노후화에 영향을 가장 많이 주는 위험요인을 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. 제안된 방법의 타당성을 비교하기 위하여 FCP에 의한 기존 연구와 비교한 결과 5경우의 가중치 값들의 변동에 상관없이 동일한 우선순위를 판단하여 안정적인 결과를 도출하였다. 또한 1단계에서 AHP에 의해 산출된 출력값들을 비교하여 관망별로 노후화에 영향을 미치는 주요 인자의 판별방법도 제안 및 그 타당성을 검증하였다. 이러한 결과로부터 적용된 사례의 경우 AHP 방법이 FCP에 의한 방법보다 일관된 결정을 판단할 수 있음을 알 수 있다. 추후 대용량 관망 데이터를 이용하여 제안된 방법의 타당성을 검증할 필요성이 요구된다.

5. 참고문헌

- [1] 일본 수도관로 기술센터, "관로시설 진단법의 체계화 조사 보고서", 1996
- [2] 한국수자원공사, "수도관 개량을 위한 의사결정시스템 개발", 1995.
- [3] L. G. Vargas, "An overview of the analytic hierarchy process & its applications", *European Journal of Operational Research*, Vol. 48, pp. 2-8. 1990.
- [4] Thomas L. Saaty, "Highlights and critical points in theory and application of the analytical hierarchy process", *European Journal of Operational Research*, Vol. 74, pp. 426-447, 1994.
- [5] J. M. Yan, K. Vairavamorthy, "Prioritizing water mains rehabilitation under uncertainty", *Advances in Water Supply Management*, pp. 237-246, 2003.
- [6] Mujgan S. Ozdemir, Thomas L. Satty, "The unkonwn in decision making. What to do about it", *European Journal of Operational Research*, Vol. 174, pp. 349-359, 2006.
- [7] S. C. Cheng, T. C. Chou, C. L. Yang, H. Y. Chang, "A semantic learning for content-based image retrieval using analytical hierarchy process", *Expert Systems with Applications*, Vol. 28, pp. 495-505, 2005