

연구논문

## 물공급시설의 노후 위험도 평가를 통한 개선 우선순위 결정

채수권\* · 이대종\*\* · 김주환\*\*\*

을지대학교 보건환경과학부 교수\*, 충북대학교 전자정보대학 강의교수\*\*, 한국수자원공사 수석연구원\*\*\*  
(2009년 10월 07일 접수, 2009년 12월 21일 승인)

### Decision Making of Improvement Priority by Deterioration Risk Assessment of Water Supply Infrastructures

Soo-Kwon Chae\* · Dae-Jong Lee\*\* · Ju-Hwan Kim\*\*\*

School of Human & Environmental Sciences., Eulji University, Seongnam, Gyeonggi, Korea\*

School of Electrical Information, Chungbuk University Cheongju, Chungbuk, Korea\*\*

K-water Research Institute, Korea Water Resources Corp., Daejeon, Korea\*\*\*

(Manuscript received 7 October 2009; accepted 21 December 2009)

### Abstract

This paper proposes an application methodology of AHP(Analytic Hierarchy Process) based decision making theory for improvement priority by assessment of various risk factors affecting on deterioration of water supply systems, as major social infrastructure. AHP method is organized with three level of hierarchy which is introduced for multi-criteria decision making in this study. In the first level, assessment outputs are calculated by AHP for each affecting factor. In the second level, criteria are estimated by using assessment results with respect to structural and environmental factors. Consequently, ranking decision is performed in the third level. In order to present the effectiveness, a proposed method is compared with FCP(Fuzzy Composite Programming) for decision making. Since the results of the proposed method show better performance with consistent results, it can be applied as an efficient information for the determination for improvement priority of the study infrastructure.

Keywords : AHP, FCP, Water Supply Systems, Risk Analysis, Multi-Criterion Decision Making

## 1. 서론

국가의 중요한 기간시설로서 물공급시스템은 수질을 관리하는 정수시설과 물의 공급을 담당하는 관로시설로 구분될 수 있다. 최근 진보된 정수기술에 의하여 정수장에서 공급되는 수질의 상태는 안정하고 위생적이지만, 공급기능을 담당하는 관로시설은 시간의 경과에 따라 노후화 되어 이로 인한 수질의 악화나 2차오염으로 인한 이물질이 수도꼭지에서 배출될 경우 수도물에 대한 불신은 더욱 가중될 것이다. 즉, 관로시설은 다른 설비들과 마찬가지로 시간이 경과함에 따라 파손, 부식 등에 의한 전체적인 물공급시스템의 기능을 저하시켜 수질측면뿐만 아니라 누수 및 파손으로 인한 경제적인 손실은 막대하다. 경제발전이 급속하게 이루어짐으로써 사회기반시설이 급속하게 건설, 확대된 국내의 현실을 감안해 볼 때, 노후화된 물공급시설의 체계적이고 과학적인 평가와 진단 등 유지관리의 효율화를 위한 연구가 절실히 요구된다 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 사회기반시설로서 물공급기능을 저하시키는 관로시설의 노후화 상태를 노후 위험도로 정의하고 이를 평가함에 있어 다기준 의사결정기법을 도입, 적용하고자 하였다.

물공급시설의 노후 위험도와 관련된 연구로서 일본 수도 관로기술센터에서는 시설의 진단을 통하여 위험도를 평가하고자 하였으며, “관로시설 진단법의 체계화 및 조사보고서”에서 수집된 정보를 기초로 하는 직접진단법과 통계적 처리결과로부터 관로의 위험도 상태를 추정하는 간접진단법이 적용될 수 있다고 보고된 바 있다[한국수자원공사, 1995, 일본 수도관로 기술센터, 1996]. 이 중에서 직접진단법은 관로의 시편을 직접 채취하여 관체의 부식상태, 결절(tubercle)로 인한 스케일 발생 및 토양의 부식성 등을 조사 및 분석함으로써 간접진단법에 비해 정확한 관로시설의 위험도로서 노후화 상태를 진단할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 굴착과 단수를 필요로 하고 상대적으로 비용도 많이 들기 때문에 모든 관로시설에 이를 적용하는 것은 현실적으로 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서

효과적인 개선을 위해서는 우선적으로 고려 대상시설들을 간접진단법인 통계적 방법을 이용하여 노후 위험도 상태에 의해 우선순위를 결정한 후 우선순위가 높은 시설부터 정비를 시행하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

이를 위해 Najjarian, Sadiq 등은 토양특성을 이용하여 물공급 관로시설의 부식정도 (CoP : Corrosivity Potential)을 판단하기 위한 IF-THEN 법칙에 근거한 퍼지모델을 제안하였으나[H. Najjarian, 2004, H. Najjarian, 2006, R. Sadiq, 2004], 이 방법은 전문가 시스템을 구축하는데 있어 필수적인 퍼지규칙을 결정하는데 어려움이 있다. 또한 단순히 물공급시설이 매설된 지역의 토양특성만을 이용하여 현재 상태를 진단하는 데는 한계가 있다. Yan 등은 정확한 물공급시설의 상태를 진단하기 위해서 직경, 매설년수 등을 고려한 물리적 척도와 토양조건, 매설깊이 등을 고려한 환경적 척도인자 등 다수의 평가기준을 이용하여 물공급시설을 위험도를 진단하기 위한 방법을 제안하였다 [J.M.Yan, 2003]. 이와 같이 다수의 평가기준을 고려한 종합적인 평가를 위해 다기준 의사결정방법에 의해 최선의 의사결정을 시행하는 방법이 보편적으로 사용된다.

여러 가지 대안을 평가 분석하여 최적의 대안을 결정하는 의사결정 문제를 해결하기 위해 다양한 방법이 사용되고 있다. 그러나 서로 상반된 의견이 대립되는 경우 의견 조정이 쉽지 않고 객관적인 평가 또한 어려운 사실이다. AHP는 평가기준이 다른 여러 가지 평가요소에 대하여 전문가들의 의견을 반영하여 각 평가요소에 대하여 가중치를 결정하여 의사결정을 하는 방법이다. 이 방법은 Vargas에 의하여 관리기법에 관한 연구에 폭넓게 시행되고 있으며[L.G.Vargas, 1990], Satty에 의해 다기준 의사결정방법으로의 적용 연구가 이루어졌다 [Thomas L. Satty, 1994]. AHP를 이용한 관로시설의 평가에 대한 국내 연구를 살펴보면, 관로시설의 최적 개량 의사결정 시스템의 개발-구역별 우선순위를 결정한 연구도 진행되었으나, 여기에서는

물공급시설의 노후 위험도 상태를 평가하기 보다는 경제적, 수리학적 영향을 고려한 물분배 시스템의 최적 계획 수립을 위한 의사결정시스템을 제안하였다[김석우, 2004]. 또한, 물공급시설의 노후 위험도 평가를 위하여 AHP기법과 중회귀분석을 이용한 방법도 제안되었으나, 다수의 전문가 의견이 고려되는 가중치의 변화에 따른 제안된 방법의 타당성 검증과 시설 노후 위험도에 영향을 가장 많이 주는 위험인자에 대한 평가는 이루어지지 않았다[성권식, 2003].

본 연구에서는 다기준 의사결정방법 중에 하나인 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 이용하여 물공급시설의 개선을 위한 우선순위를 결정하기 위하여 파손 등에 의한 시설의 위험도에 영향을 가장 많이 주는 요인을 평가할 수 있는 기법을 제안하고자 하였다. 이는 3단계의 계층구조로 구성되어 있으며, 1단계에서는 AHP를 이용하여 우선순위를 예측하고자 하는 물공급시설에 대해서 성능평가 인자들에 대한 출력값을 산출한다. 2단계에서는 물리적 척도와 환경적 척도 값을 산출하고, 최종 3단계에서 종합적인 산출값들을 이용하여 우선순위를 결정하도록 구성되어 있다. 노후 위험도에 영향을 주는 위험요인은 1단계에서 AHP에 의해 산출된 출력값들을 비교하여 판별한다. 제안된 방법은 FCP에 의한 기존 연구와 비교함으로써 적용방안 및 이에 따른 타당성을 제시하고자 하였다.

이를 위하여 기존의 연구에서 적용된 FCP이론과 본 연구에서 적용된 AHP 방법에 대하여 고찰하고 이를 물공급시설의 위험도 평가에 적용하여, 분석하였으며 적용결과로부터 일관성 있는 결론을 도출하여 제시하였다.

## II. FCP와 AHP에 의한 다기준 의사결정 방법

### 1. FCP에 의한 다기준 의사결정 방법

다기준 의사결정을 하는 과정에서 평가 기준값이 정량화된 수치값만으로 표현하기 어려운 불확실성

이 존재할 경우 최종적으로 선택된 의사결정의 신뢰성이 저하될 위험성이 있다. 이러한 경우에 평가 기준값이 포함하고 있는 불확실성의 정도를 표현하기 위하여 불확실한 평가기준값은 퍼지숫자(Fuzzy number)로 표현 가능하다. 퍼지 숫자란 소속함수(Membership function)의 어떤 값을 가지고 어느 퍼지 집합에 속하는 정도를 표현하는 숫자이다.

퍼지 집합은 집합에 속하는 원소에 대해 소속정도로 표현됨으로 퍼지 집합의 특성함수는 주어진 집합에서 0과 1사이의 값으로 소속도를 표현한다. 전체 집합  $X$ 에서 퍼지 집합  $A$ 는 식 (1)과 같이 순서된 쌍의 집합으로서 정의된다.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \tag{1}$$

여기서  $\mu_A(x)$ 는  $A$ 에서  $x$ 의 소속도라 하며, 이것은  $X$ 에서 소속공간  $M(M = [0, 1])$ 으로 사상된다.

자주 사용되는 여러 형태의 소속함수 중에서 식 (2)와 같이 표현되는 삼각형 소속함수를 고려하자. 식 (2)에서 파라미터  $\{a, b, c\}$ 는  $a < b < c$ 를 만족하며 삼각형 소속함수의 세 코너의  $x$ 축 좌표값으로 결정된다.

$$\Delta(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x < c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \tag{2}$$

수학적인 표현을 위하여  $Z_i(s)$ 가  $i$ 번째 평가기준에 대한 대안  $s$ 의 퍼지숫자라 하고, 이것의 소속함수가 삼각형 형태라고 가정하자. 소속함수의 삼각형 형태는 어떤 기준값이 실제로 존재할 가능성이 있는 최대 구간값 (Largest likely interval)과 존재할 가능성이 가장 높은 값(Most likely value)을 한정함으로써 그림 1과 같이 만들 수 있다. 이 때 퍼지의 구간도 소속함수의 값이 변화됨에 따라 달라진다. 즉, 그림 1에서 보는 바와 같이 소속함수의 값이  $u_1$ 일 때 퍼지숫자  $Z_i(s)$ 의 구간은  $a$ 에서  $b$ 까지 한정된다.

FCP는 대안평가를 위해 설정된 평가기준들의 대안별 산출값이 불확실하지 않은 경우에 불확실성을 고려하지 않는 다른 방법들에 비해 더 합리적이고

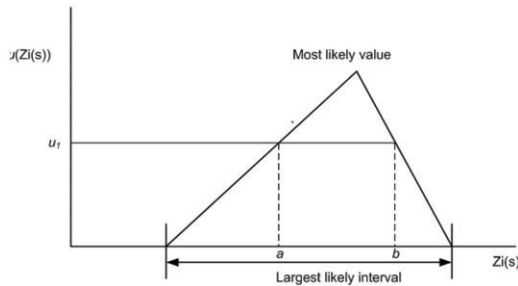


Figure 1. Interval of fuzzy numbers

현실성 있는 최적안을 도출해 낼 수 있는 다기준 의사결정방법이다 [J.M. Yan, 2003]. FCP 방법에 따른 의사결정방법은 크게 3단계로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 평가기준의 항목을 선정하고, 두 번째는 기본항목들을 서로 묶어 더 일반적인 뜻을 가진 그룹별로 합성하는 과정이며, 마지막 세 번째는 다수의 대안들을 평가하고 최적의 순위를 결정하는 단계이다. 여기서, 두 번째 단계인 합성과정(Composite procedure)이란 평가기준으로 선정된 다수의 기준들을 서로 특성이 유사한 것끼리 단계적으로 묶어가면서 최종적으로 하나의 기준이 되게 만드는 과정을 말한다.

평가기준의 불확실성을 고려한 다기준 의사결정 방법인 FCP는 다계층구조에 의해 최종 선택안을 결정한다. 보편적으로, 1단계인 평가기준 항목들의 입력은 정규화 된 수치값 또는 퍼지 소속함수가 사용된다. 수치 입력값의 정규화된 값  $S_{ji}$ 는 식 (3)에 의해 얻어진다.

$$S_{ji} = \frac{f_{ji} - f_{ji}^w}{f_{ji}^b - f_{ji}^w} \quad (3)$$

여기서,  $S_{ji}$ 는 대안  $j$ 내에 포함된  $i$ 번째 퍼지 인자값 (indicator)을 나타내며,  $w$ 는 인자값의 가중치를 의미한다. 또한,  $f^w$ ,  $f^b$ ,  $f$ 는 최악의 값 (worst value), 최상의 값(best value) 및 실제 입력값을 각각 나타낸다.

최종적으로 대안  $j$ 에 대한 거리 행렬값  $L_j$ 는 식 (4)로부터 얻어진다.

$$L_j = \left[ \sum_{i=1}^{n_i} w_{ji}^{p_j} S_{ji}^{p_j} \right]^{1/p_j} \quad (4)$$

식 (4)에서  $w_{ji}$ 를 가중치 인자(weight factor),  $p_j$  값을 밸런스 인자 (balance factor)라 한다. FCP는 이러한 두 개인 인자  $w_{ji}$ 와  $p_j$ 의 변동에 의해 최종 결정안이 서로 다른 결과를 초래한다는 문제점이 있다.

## 2. AHP에 의한 다기준 의사결정 방법

AHP는 다기준 의사결정 기법 중 가장 널리 응용되고 있는 방법으로 Vargas에 의하여 관리기법에 관한 연구에 폭넓게 시행되고 있으며, Satty에 의해 다기준 의사결정방법으로의 적용 연구가 이루어졌다. 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[Mujgan S. Ozdemir, 2006, S.C. Cheng, 2005]. 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.

$n$ 개의 물공급시설의 노후에 따른 위험도를 평가하기 위하여 AHP 계층도를 구성한다면, 일반적으로 최하위 계층에는 의사결정들의 대상인  $n$ 개의 관로들이 자리 잡게 되며, 최상위 계층에서 최종목표인 노후 위험도에 대한 우선순위가 결정된다. 최상위계층과 최하위계층 사이에는 노후 위험도를 평가하기 위한 평가기준들이 존재한다. 여기서, 평가기준은 더 세부적으로 분류할 수 있으며 전체가 4~5층으로 될 수도 있다. 일반적으로 각 단계별 요인의 점수는 문제의 복잡성에 따라  $7 \pm 2$  이내로 구성하는 것이 바람직하다.

AHP에 의해 관로시설의 노후 위험도를 평가하기 위한 계층도를 구축한 후, 노후화가 가장 많이 진행된 관로의 순위결정을 위해 의사결정 요소들의 쌍대비교행렬 작성, 정규화된 행렬 계산, 선호도 지

수계산, 일관성 검토 등의 과정을 수행한다. 우선, 평가기준별 쌍대비교 행렬 작성 단계에서는 평가기준들 간의 쌍대비교로 행렬을 작성한다. 일반적으로, 여러 개의 대안들을 평가하는 방법보다 두 개의 서로 다른 요소 또는 대안들 간의 중요도를 상대적으로 평가하는 쌍대비교 방법이 용이함으로, 이 비교방법에 의해 특정 계층 내에 있는 요소들간의 중요도에 대한 의사 결정자의 선호도를 나타내는 쌍대비교행렬을 작성한다.

요소들간의 중요도를 판단하는 기준이 되는 비교 척도는 표 1에서 나타낸 9점 척도법이 이용된다. 중요도의 척도에 따라 쌍대비교를 통해 식 (5)의 행렬을 구할 수 있다. 식 (5)에서  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 이며, 대각선의 원소들이 모두 1이 되는 역수행렬이다.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

쌍대행렬 A의 각 열(Column)에 대한 합을 식 (6)과 같이 구한 후에 정규화된 행렬값  $V_{ij}$ 를 식 (7)과 같이 얻는다.

$$S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (6)$$

$$V_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j} \quad (7)$$

정규화된 행렬 V의 각 행(Row)별로 행의 합을 구한 후, 각 행의 합을 산술평균하면 노후도 평가인자에 대한 선호도 지수 P가 식 (8)과 같이 구해진다. 여기서 선호도 지수값을 모두 더하면 1이 되어야 한다.

$$P_i = \sum_{j=1}^n \frac{V_{ij}}{n} \quad (8)$$

Table 1. Pairwise comparison by 9 point scale based decision criteria

수 치	정 의	비 고
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	

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  $\lambda_{max}$ 가 식 (9)와 같이 얻어진다.

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=0}^n b_i}{P_i} \quad (9)$$

일관성 지수 CI(Consistency Index)는 다음 식 (10)에 의해 구해진다.

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (10)$$

일관성 비율 CR(Consistency Ratio)을 계산하면,

$$CR = CI/RI \quad (11)$$

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.

Table 2. Average Random Index (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

### III. 적용 및 결과

노후된 물공급시설의 개량 우선순위를 결정하기 위한 계층구조를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보는 바와 같이 3단계의 계층구조에 의해 최종적으로 우선순위를 결정하도록 되어 있다. 1단계에서는 상수도관별로 입력된 자료를 이용하여 상대비교행렬을 작성한다. 2단계에서는 인자들에 대한 AHP에

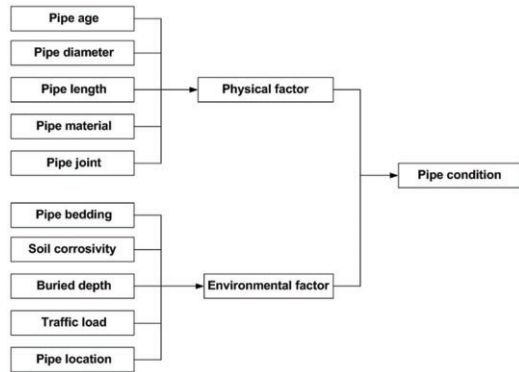


Figure 2. Data structure for pipe condition assesment

의해 산출된 출력값과 평가기준에 대한 가중치를 이용하여 물리적 척도와 환경 척도에 대한 출력값

과 우선순위를 결정한다. 3단계에서는 2단계에서 산출된 출력값과 가중치를 이용하여 최종 개선하여야 할 우선순위를 결정한다.

AHP에 의한 개선 우선순위 결정을 위해 본 연구에서는 표 3에 나타난 Yan에 의해 측정된 자료를 이용하였다. 표 3에 주어진 자료를 이용하여 전문가의 관점에서 쌍대비교를 작성하였으며 그 결과를 표 4에 나타냈다. 이전 연구인 Yan 등은 FCP를 이용하여 관로시설 개선을 위한 우선순위 결정 방법을 제안하였으며, 성능평가를 위해 가중치의 변동에 따른 성능을 비교하였다. 즉, 그림 2에서 보는 바와 같이 최종 결정을 위해서는 1단계인 평가인자들에 가중치들과 2단계인 물리적 척도와 환경적 척도

Table 3. Values of first-level indicators for illustrative case study

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

Table 4. Weights and balance factor for 5 trials

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
	Environmental	0.5	0.4	0.2	0.4	0.3

에 대한 가중치의 결정이 요구된다. 이러한 가중치는 보는 관점에 따라 전문가마다 가중치의 설정에 차이가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서도 Yan 등의 연구결과와 동일하게 가중치의 변동에 따른 성능을 비교하였으며, 표 4에 5명의 전문가 관점에서 설정차이가 나타나는 가중치를 수록하였다.

표 5에서는 표 3에서 주어진 평가 인자값을 이용

하여 작성된 쌍대비교 행렬값을 나타냈다. 표 5에 나타난 쌍대비교 행렬값을 이용하여 AHP에 의해 각각의 평가인자별 출력값을 표 6 및 그림 3에 나타냈다. 그림 3에서 보는 바와 같이 Pipe 1인 경우 다른 Pipe에 비해 매설지역, 매설년수, 매설심도 순으로 노후화에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. Pipe 2인 경우는 관접합 인자가 관로 노후화에 가

Table 5. Pairwise comparison matrix for each evaluation factor

Age	Pipe1	Pipe2	Pipe3	Pipe4	Pipe5
Pipe1	1	3	5	7	7
Pipe2	0.33	1	5	7	7
Pipe3	0.2	0.2	1	3	3
Pipe4	0.14	0.14	0.33	1	1
Pipe5	0.14	0.14	0.33	1	1

Length	Pipe1	Pipe2	Pipe3	Pipe4	Pipe5
Pipe1	1	5	0.2	5	7
Pipe2	0.2	1	0.11	1	3
Pipe3	5	9	1	9	9
Pipe4	0.2	1	0.11	1	3
Pipe5	0.14	0.33	0.11	0.33	1

Joint	Pipe1	Pipe2	Pipe3	Pipe4	Pipe5
Pipe1	1	0.2	5	5	5
Pipe2	5	1	9	9	9
Pipe3	0.2	0.11	1	1	1
Pipe4	0.2	0.11	1	1	1
Pipe5	0.2	0.11	1	1	1

Corrosivity	Pipe1	Pipe2	Pipe3	Pipe4	Pipe5
Pipe1	1	5	1	5	3
Pipe2	0.2	1	0.2	1	0.33
Pipe3	1	5	1	3	5
Pipe4	0.2	1	0.33	1	0.33
Pipe5	0.33	3	0.2	3	1

Traffic load	Pipe1	Pipe2	Pipe3	Pipe4	Pipe5
Pipe1	1	0.11	0.14	0.2	0.11
Pipe2	9	1	3	5	1
Pipe3	7	0.33	1	3	0.33
Pipe4	5	0.2	0.33	1	0.2
Pipe5	9	1	3	5	1

Diameter	Pipe1	Pipe2	Pipe3	Pipe4	Pipe5
Pipe1	1	1	1	3	3
Pipe2	1	1	1	3	3
Pipe3	1	1	1	3	3
Pipe4	0.33	0.33	0.33	1	1
Pipe5	0.33	0.33	0.33	1	1

Material	Pipe1	Pipe2	Pipe3	Pipe4	Pipe5
Pipe1	1	1	3	9	5
Pipe2	1	1	3	9	5
Pipe3	0.33	0.33	1	7	3
Pipe4	0.11	0.11	0.14	1	0.2
Pipe5	0.2	0.2	0.33	5	1

Bedding	Pipe1	Pipe2	Pipe3	Pipe4	Pipe5
Pipe1	1	3	1	5	5
Pipe2	0.33	1	0.2	3	3
Pipe3	1	5	1	5	5
Pipe4	0.2	0.33	0.2	1	1
Pipe5	0.2	0.33	0.2	1	1

Buried Depth	Pipe1	Pipe2	Pipe3	Pipe4	Pipe5
Pipe1	1	3	4	6	5
Pipe2	0.33	1	2	5	5
Pipe3	0.25	0.5	1	3	2
Pipe4	0.16	0.2	0.33	1	2
Pipe5	0.2	0.2	0.5	0.5	1

Location	Pipe1	Pipe2	Pipe3	Pipe4	Pipe5
Pipe1	1	5	9	9	7
Pipe2	0.2	1	5	5	3
Pipe3	0.11	0.2	1	1	0.33
Pipe4	0.11	0.2	1	1	0.33
Pipe5	0.14	0.33	3	3	1

Table 6. Output value for each assessment factor calculated by AHP

(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	Corrosivity	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

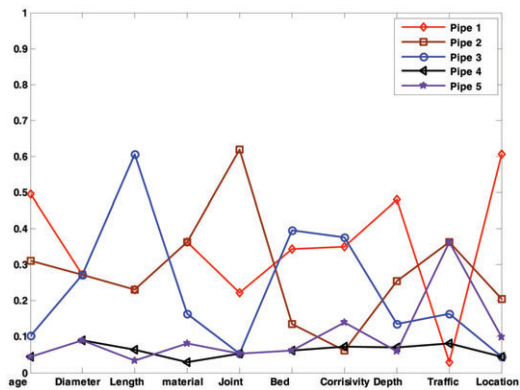


Figure 3. Output value for each evaluation factor in first-level

장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. Pipe 3인 경우는 관 길이, 바닥기초 조건이 가장 열악한 것으로 분석되었다. Pipe 4와 Pipe 5는 다른 관로에 비해 모든 평가척도에서 안정적인 것으로 분석되었으나, Pipe 4 보다는 Pipe 5가 토양 부식이 더 열악한 것으로 분석되었다.

표 6에 나타난 AHP에 의해 평가 인자별로 산출된 예측 관로별 상대적인 계산값을 이용하여 2단계인 물리적인 척도와 환경적 척도에 관련된 출력값을 산출한 후 최종적으로 관로별 노후도에 대한 우선순위를 결정한다. 그림 4에서는 계산과정을 나타냈다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 *i*번째 관로에 대한 2단계의 물리적 척도  $Z_{i1}$ 과 환경적 척도  $Z_{i2}$ 는 식 (11)에 의해 구해지며, 최종 출력값  $Y_i$ 는 식 (12)에 의해 얻을 수 있다.

$$Z_{i1} = (\sum_{k=1}^5 P_{ik} \cdot V_k) / 5 \tag{11}$$

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

$$Y_i = (\sum_{r=1}^2 Z_{ir} \cdot W_r) / 2 \tag{12}$$

식 (11) 및 (12)에서 가중치  $V_i$ 와  $W_i$ 는 전문가에 의해 인자별로 중요도를 가해주는 값이다. 이러한 가중치들은 전문가라 하더라도 중요도에 대한 관점의 차이로 일치하지는 않는다. 본 연구에서도 Yan의 연구의 결과와 마찬가지로 표 4에서 보는 바와 같이

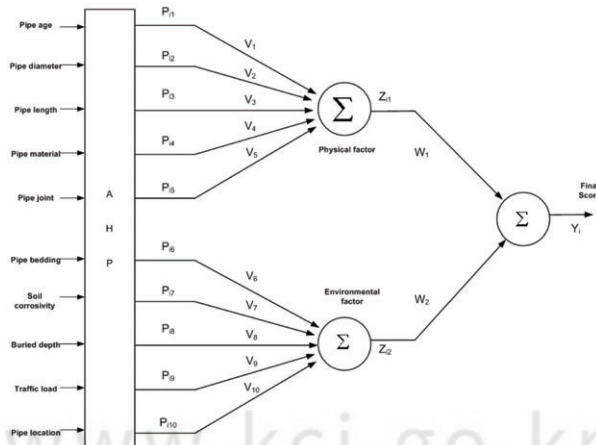


Fig. 4. Composite process for final assesment

Table 7. Comparison of ranking results by FCP and AHP

Pipe No.	Ranking by FCP					Ranking by AHP				
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4	Trial 5	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4	Trial 5
Pipe1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pipe2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Pipe3	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3
Pipe4	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5
Pipe5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

다섯 가지 경우의 가중치의 변화에 따른 성능평가를 분석하였다. 표 7에서는 기존 연구인 FCP 방법과 제안된 AHP에 의한 적용결과를 비교하여 나타냈다. 표 7에서 보는 바와 같이 FCP 방법의 경우 5경우의 가중치 변화에 대해서 1번째 가중치들에 대해서 우선순위가 관로 2가 높게 나타난 반면에 다른 가중치들에 의한 결과는 1번 관로의 우선순위가 가장 높게 나타났다. 또한 3, 4, 5의 가중치들은 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 관로의 우선순위 값들을 산출 하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 적용된 사례의 경우 AHP 방법이 FCP에 의한 방법보다 일관된 결정을 판단할 수 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결론

물공급시설인 관로는 대부분 지하에 매설되어 일상적인 방법으로 측정 및 평가가 곤란할 뿐만 아니라 측정시에도 단수나 굴착 등 많은 비용이 소요되며 측정자료가 획득되었다 할지라도 여러가지 불확실성을 포함하고 있기 때문에 현재 위험도 상태를 정확하게 판단하기에는 많은 한계성을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 다기준 의사결정방법 중에 하나인 AHP를 이용하여 물공급시설의 개선을 위한 우선순위 결정 및 노후 위험도에 영향을 가장 많이 주는 요인을 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. 여기서 도입한 AHP 방법은 3단계의 계층구조로 구성

되어 있으며, 1단계에서는 우선순위를 예측하고자 하는 물공급시설에 대해서 성능평가 인자들에 대한 출력값을 산출한다. 2단계에서는 물리적 척도와 환경적 척도 값을 산출하고, 최종 3단계에서 종합적인 산출값들을 이용하여 우선순위를 결정하도록 하였다.

제안된 방법의 타당성을 비교하기 위하여 FCP에 의한 기존 연구와 비교한 결과 다섯가지 경우의 가중치 값들의 변동에 상관없이 동일한 우선순위 값을 판단하여 안정적인 결과를 도출하였다. 또한 1단계에서 AHP에 의해 산출된 출력값들을 비교하여 관로시설별로 노후화에 영향을 미치는 주요인자의 판별방법을 제안하였다.

이러한 결과로부터 적용된 사례로부터 AHP 방법이 FCP에 의한 방법보다 일관된 결정을 제시하고 있음을 알 수 있었다. 이를 토대로 물공급시설의 내부적 조건과 외부적환경 등 기능을 열화시키는 영향인자들을 이용한 위험도 평가시 불확실성을 저감시킬 추가적인 연구의 필요성이 요구된다.

#### 참고문헌

김석우, 2004, 상수관망의 최적 개량 의사결정 시스템 개발-구역별 우선순위 결정, 고려대학교 석사학위논문.

성권식, 김주환, 김재학, 2003, AHP기법과 중회귀 분석을 이용한 관 노후도 평가모델, 한국물 환경학회 · 대한상수도학회 공동총계학술대회 논문집, 509-512.

일본 수도관로 기술센터, 1996, 관로시설 진단법의 체계화 조사 보고서, 일본 수도관로 기술센터.

- 한국수자원공사, 1995, 수도관 개량을 위한 의사결정시스템 개발, 한국수자원공사.
- H. Najjaran, R. Sadiq, and B. B. Rajani, 2004, Modeling pipe deterioration using soil properties - an application of fuzzy logic expert system, ACSE International Conference, 1-10.
- H. Najjaran, R. Sadiq, and B. B. Rajani, 2006, Fuzzy expert system to asses corrosion of cast/ductile iron pipes from backfill properties, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21(1), 67-77.
- J. M. Yan, and K. Vairavamoorthy, 2003, Prioritizing water mains rehabilitation under uncertainty, *Advances in Water Supply Management*, 237-246.
- L. G. Vargas, 1990, An overview of the analytic hierarchy process & its applications, *European Journal of Operational Research*, 48, 2-8.
- Mujgan S. Ozdemir, and Thomas L. Satty, 2006, The unknown in decision making. What to do about it, *European Journal of Operational Research*, 174, 349-359.
- R. Sadia, B. Rajani, and Y. Kleiner, 2004, Fuzzy-based method to evaluate soil corrosivity for prediction of water main deterioration, *Journal of Infrastructure System*, 10(4), 149-156.
- S. C. Cheng, T. C. Chou, C. L. Yang, and H. Y. Chang, 2005, A semantic learning for content-based image retrieval using analytical hierarchy process, *Expert Systems with Applications*, 28, 495-505.
- Thomas L. Satty, 1994, Highlights and critical points in theory and application of the analytical hierarchy process, *European Journal of Operational Research*, 74, 426-447.

최종원고채택 09. 12. 24