

# PROMETHEE와 ANP 기법을 활용한 상수도관망의 위험요소 평가

홍성준<sup>1</sup> · 이용대<sup>1</sup> · 김승권<sup>1\*</sup> · 김종훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 산업시스템정보공학과 / <sup>2</sup>고려대학교 사회환경시스템공학과

## Evaluation of Risk Factors in Water Supply Networks using PROMETHEE and ANP

Sungjun Hong<sup>1</sup> · Yongdae Lee<sup>1</sup> · Sheung-Kown Kim<sup>1\*</sup> · Joonghoon Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

In this study, the priority of risk factors in supplying water through water supply pipeline network was evaluated by PROMETHEE and ANP multi-criteria decision analysis. We chose 'corrosion', 'burst' and 'water pollution' in pipe as major reference criteria and selected eight risk factors to evaluate the priority, and then we compared the results of PROMETHEE with those of ANP. We also analyzed the results of the sensitivity analysis by changing the weights and parameters of preference functions in PROMETHEE. We investigated the possibility of integrating two methods by using the results of ANP as the weights of preference function in PROMETHEE. The priority of risk factors for supplying municipal water which is evaluated by this study may provide basic data to establish a contingency plan for accidents, or to establish the specific emergency response procedures.

**Keyword:** PROMETHEE, ANP, supply water, Multi-Criteria Decision Making

### 1. 서론

상수도시스템은 도시의 가장 기본이 되는 시설로서 인간의 삶의 질을 향상시키기 위해 반드시 필요한 물을 공급하는 생명선과 같은 역할을 하고 있다. 그 중에서 상수도관망시스템은 수원으로부터 정수처리된 양질의 수돗물을 가정급수전까지 안전하고 안정적으로 공급하는 역할을 담당하고 있기 때문에 용수공급 전반에서 차지하는 비중은 매우 크다. 그러나 관이

매설된 지 오래되어 노후정도가 심하고 잦은 도로공사로 파손이 되며, 수질오염이나 테러위협 등과 같은 내/외부의 위험요인들로 인하여 우리의 상수도관망의 안전은 매우 취약한 실정이다. 특히 상수도망의 광역화로 인하여 빈번하게 발생하는 사고와 재해, 재난에 대해 우리의 용수공급시스템은 무방비로 노출되어 있으므로 광역상수도망의 사고 파급효과는 상당할 것이다. 따라서 용수공급시설의 안전성 확보와 효율적인 관리를 위해서 상수도관망의 오염예방 및 위험관리를 위한 통합시스템

\*연락처 : 김승권 교수, 136-701 서울시 성북구 안암동 5가 1번지 고려대학교 산업시스템정보공학과, Tel : 02-924-3864, Fax : 02-929-5888, E-mail : kimsk@korea.ac.kr

2005년 9월 접수, 2회 수정 후 2006년 3월 게재확정

구축이 절실하며, 상수도관망의 이상징후를 신속하게 관정할 수 있도록 위험요소들의 평가가 선행되어야 한다. 위험요소들 간의 중요도나 우선순위를 산출하는 것은 상충(trade-off)되는 복수의 기준이 존재하는 상황에서 최적의 대안이나 순위를 산정해주는 다기준 의사결정(Multi-Criteria Decision Making, MCDM) 문제로 구성할 수 있다.

기존의 다기준 의사결정기법에는 각 기준들의 효용함수(utility function)를 구하여 각 대안들의 점수(score)를 효용도(utility)로 전환하는 MAUT(Multi-Attribute Utility Theory; Keeney and Raiffa, 1976)와 계량적 수치로 나타내기 어려운 요소들을 고려하여 구조화, 계층화함으로써 평가요소의 가중치를 설정하는 기법으로 Saaty가 제안한 AHP(Analytic Hierarchy Process)가 있다(Zahedi, 1986; Vargas, 1990). ANP(Analytic Network Process)는 AHP를 종속성과 피드백(feedback)을 가진 네트워크 문제로 확장한 모델이다. AHP 기법이 각 동일 계층내 구성요소들이 상호 독립적이어야 한다는 가정이 필요한 반면, ANP는 각 구성요소 간의 상관관계가 존재하는 경우에도 적용할 수 있다(Saaty, 1996). Brans와 Vincke는 순위선호(outranking)개념을 바탕으로 기준별 선호함수(preference function)와 선호의 유출량(leaving flow) 및 유입량(entering flow)의 개념을 이용하여 대안들간의 우선순위를 도출하는 PROMETHEE(Preference Ranking Organization METHod Enrichment Evaluations) 기법을 개발하였다(Brans and Vincke, 1985). Roy는 순위선호개념을 바탕으로 각 대안들의 선호도에 대한 일치성(concordance index) 및 비일치성 지수(discordance index)를 이용하여 열등한 대안을 체계적으로 제거하면서 비교대안의 순위를 결정하는 ELECTRE I, II, III, IV, IS(Elimination Et Choix Traduisant la Réalité)기법을 소개했다(Hokkanen and Salminen, 1997; Maystre, 1999; Roy, 1968; Roy and Hugonnard, 1982; Park, S-Y et al., 2005).

본 연구에서는 원활한 용수공급을 위협하는 요소들의 중요도를 산정하기 위하여 유럽과 미국에서 널리 활용되는 다기준 의사결정기법인 PROMETHEE와 ANP 기법을 적용하였고, 상수도관망에서 모니터링되는 데이터항목을 대상으로 각각의 의사결정기법을 적용하여 우선순위 결과를 비교해 보았다. 2장에서는 상수도관망의 오염을 예방하고 위험을 관리하기 위한 통합시스템을 제안하였으며 3장에서는 PROMETHEE와 ANP 기법의 특징과 적용사례를 설명하였다. 4장에서는 두 기법의 결과를 분석하였으며 결론은 5장에 수록하였다.

## 2. 상수도관망의 오염예방 및 위험관리를 위한 통합시스템

기존의 상수도시스템은 관망에 설치된 계측기로부터 데이터를 수집하고 모니터링하는 것이 주된 역할이었다. 하지만 상수도관망시스템이 광역화됨에 따라 사고의 파급효과가 증대되는 상황에서 조기에 사고의 위험성을 파악하여 파급효과를

줄이고, 신속히 실무자들에게 경고하여 사고를 최소화 시키며, 위험상황별로 적절한 대처방안을 제시할 수 있는 통합시스템의 필요성이 대두되고 있다. 용수공급의 안전성 확보와 시설의 효율적 관리를 위한 통합의사결정시스템은 상수도관망의 계측기를 통하여 현장의 데이터를 실시간(real time)으로 모니터링하고 정보를 분석하여 이상징후 발생시 효과적으로 대처하기 위한 시스템이다. <Figure 1>은 이러한 통합의사결정시스템의 기본구조를 나타낸다.

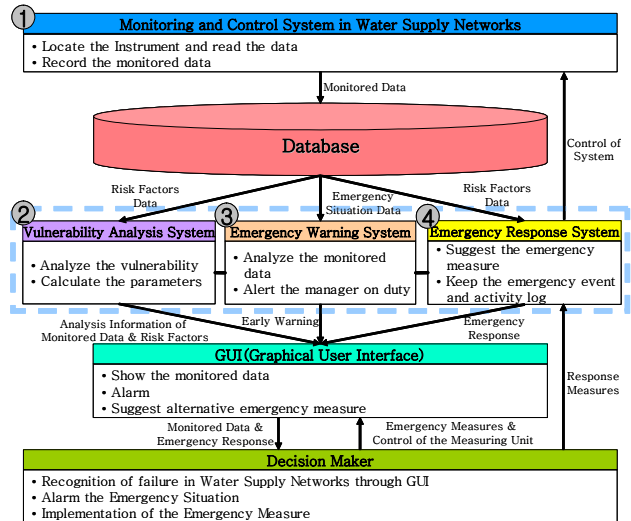


Figure 1. Layout of Integrated Decision Support System.

① 모니터링시스템에서는 상수도관망에 설치된 계측기로부터 누수 및 수질오염 등의 데이터를 실시간으로 모니터링하여 DB에 저장하고 ② 위험성/취약성 분석시스템에서는 모니터링되는 데이터의 위험성과 취약성을 사전에 분석하고 의사결정매개변수를 제시한다. ③ 위험상황 조기경보시스템에서는 수집된 데이터를 바탕으로 위험요소의 분석정보를 종합하여 조기경보를 발령하고 ④ 위기상황 대처방안시스템에서는 모든 분석정보와 데이터를 토대로 위험상황별 대처방안을 수립하여 의사결정자에게 제시하고, 상황중료시 평가결과 보고를 기록으로 남긴다. 의사결정자는 위험상황을 즉각적으로 인지한 후 GUI 혹은 위기상황 대처방안시스템을 통해 시스템을 통제하게 된다.

상수도관망의 오염예방 및 위험관리를 위한 통합시스템을 개발하기 위해서는 위험요소들에 대한 평가가 선행되어야 한다. 왜냐하면 모니터링 되는 항목간에 우선순위를 부여하거나 중요도 순서에 따라 상수도관망의 취약성을 분석하면 평상시와 비교하여 이상치의 반응에 대해서 사고 가능성이나 위험성 여부를 신속하고 합리적으로 판단할 수 있기 때문이다. 그리고 사고의 특성에 따라 피해를 최소화시킴으로써 용수공급시스템을 효율적으로 관리할 수 있다. 용수공급의 위험요소에 대한 평가결과는 향후 상수도관망의 통합의사결정시스템 구축시 모니터링 되는 항목들 간의 가중치 설정과 위험상황에

대한 대응방안 제안시 기초 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

상수도관망의 위험요소에는 관 종류, 관의 매설년도나 매설 주변토양, 매설심도, 접합부 형식, 교통량, 누수 및 파손 기록 등 많은 인자들이 있으나, 본 연구에서는 관로에 설치된 계측 기로부터 모니터링되는 위험요소만을 대상으로 하였다. 왜냐 하면 모니터링 되는 위험요소별 중요도는 통합의사결정시스템의 가장 기본이 되는 자료로서, 위기상황에 대처하기 위한 제어알고리즘 설계시 각 데이터 항목의 우선순위를 설정하고, 사전사고를 예방하거나 최소화시키기 위한 위험상황 의사결정시스템 설계에 활용되기 때문이다. 특히 위험요소가 동시다발적으로 모니터링 될 경우 효과적인 대응책을 마련하기 위해서도 위험요소들간의 우선순위는 평가되어야 한다. 따라서 계측기로부터 수집되는 다수의 평가항목을 단일 기준이 아닌 서로 상충되는 기준들로 평가하는 본 문제는 다기준 의사결정(Multi-Criteria Decision Making)기법의 적용대상이 된다.

한국건설기술연구원(2004)은 대구시에 구축된 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템으로부터 대구시의 6개 지점에서 실시간으로 모니터링 되는 데이터인 pH, 잔류염소 농도, 유량, 수압, 전기전도도, 탁도, 블록누수량, 수온을 자료 항목으로 선정하여 상수도관망의 최적 관리시스템 개발 연구를 진행하였다(Korea Institute of Construction Technology, 2004). 본 연구에서도 국내에서 가장 최근에 모니터링시스템이 갖춰진 대구시 SCADA 시스템의 모니터링 항목들을 평가항목으로 선정하였고, 건설교통부 시설안전기술공단의 수도시설유지관리 매뉴얼(Korea Institute of Construction Technology, 2001)에서 제시한 도수 및 송·배수시설의 부위별 결함의 종류인 관부식, 관파열, 관내수질오염을 평가기준으로 선정하여 문제를 구성하였다.

### 3. PROMETHEE와 ANP 기법의 적용

본 연구는 3개의 평가기준을 고려하여 8개의 위험요소를 평가하는 전형적인 다기준 의사결정문제로 구성되며 순위선호개념에 기반을 둔 PROMETHEE와 네트워크 구조를 이용한 ANP 기법을 적용하였다. 일반적으로 가장 널리 활용되는 AHP 기법은 평가항목간의 독립성이 보장되고 문제가 계층구조로 구성되어야 하며, 방대한 설문 양을 필요로 한다는 점에서 본 연구에는 부적절하다고 판단된다. 본 문제에는 수량과 유압 간의 관계처럼 종속성을 가지는 항목들이 다수 존재하며, 항목들 간의 피드백도 가능하기 때문에 ANP의 네트워크 구조가 문제를 표현하는데 적합하다. 한편, 의사결정자의 애매모호한 선호성향도 반영할 수 있고 평가기준에 적합한 선호함수를 선택할 수 있는 PROMETHEE 기법을 적용하여 결과를 비교해 보았다.

#### 3.1 PROMETHEE와 ANP 기법의 비교

<Table 1>은 PROMETHEE와 ANP 기법의 특징을 비교한 것이다.

Table 1. Comparison between PROMETHEE and ANP

	PROMETHEE	ANP
Type of Preference Function	Mathematical Function	Not applied
Determination of Weights	DM's Subjective assessment	Use Supermatrix method
Evaluation of Alternative	Pairwise Comparison in the Algorithm	Pairwise Comparison by DM's Subjective Judgment
Determination of Priority	Use Outranking Method	Use Supermatrix method
Hierarchy of Problem Structure	Not reflected	Network Structure
Disadvantage	Determination of Weight and Parameters in the Preference Function	Too many Questionnaires, Complexity of Problem, Difficulties of Calculation

ANP는 선호함수의 형태를 결정하고 대안들을 평가하기 위하여 의사결정자의 주관적 판단에 의존(9점척도)하면서 일관성비율을 벗어나는 정보를 제외하여 중요도 관계를 규명한다. 그러나 PROMETHEE는 6가지의 수학적 선호함수로 평가기준별 선호성향을 표현한다. 예를 들어, 두 대안에 대해서 a가 b대안보다 더 선호되는 경우 b가 a대안보다 같은 정도(비율)로 덜 선호된다고 말할 수는 없다. 왜냐하면 PROMETHEE에서는 각 평가기준마다 적용되는 선호함수가 다를 수 있으며, 설정되는 파라미터(선호임계치)에 의해서도 결과에 큰 차이를 보이기 때문이다. 그리고 평가자료의 차이가 양수이면 해당 평가함수의 값이 되지만, 음수이면 AHP/ANP에서처럼 역수의 룰(rule)을 따르는 것이 아니라 무조건 0을 취하기 때문이다. 또한 PROMETHEE는 3.2절에서 단계별로 설명한 내부 알고리즘에 의하여 수치적 이원비교를 수행하고, 평가기준별로 동일한 가중치가 적용되기 때문에 두 가지 방법에 따른 분석결과가 경향은 비슷할 수 있지만 정확히 일치하기는 쉽지 않을 것이다.

본 연구에 필요한 데이터는 한국건설기술연구원의 연구원 2명, 성북수도사업소·영등포수도사업소의 실무자 5명, 관련학과 교수 1명, 상수도관련 프로젝트 경험이 있는 전문가 2명을 대상으로 조사한 설문결과를 활용하였다. 그리고 PROMETHEE와 ANP 기법이 적용되면서 계산되는 중간 결과는 생략하였다.

#### 3.2 PROMETHEE 기법의 특징과 적용

PROMETHEE는 순위선호개념에 기반을 둔 유럽의 대표적인 다기준 의사결정기법으로서 비슷한 유럽의 기법인 ELECTRE에 비하여 대안들의 선호강도도 직관적이며 계산과정이 단순하여 의사결정자가 쉽게 이해할 수 있다. 또한 최대 2개까지의 파라미터만 결정하면 되는 단순함으로 더욱 선호되는 방법론이다(Brans and Vincke, 1985). 그리고 선호의 유출량과 유입량으

로 부분적인 우선순위(partial preorder)를 구하는 과정에서 평가 기준간 상충관계 때문에 평가하기 애매한 대안들은 비교 불가능(incomparable) 대안으로 분류해주는 특징이 있다. 실제로 이러한 비교불능한 대안들은 문제의 크기(size)가 커져서 의사결정자가 문제의 구조를 정확히 파악하지 못해 판단력이 흐려지는 경우, 평가기준에 의한 대안들의 정보나 데이터가 부족하여 신뢰도가 떨어지는 경우, 평가항목의 기대치에 대한 불확실성으로 인해 의사결정자가 선호의 표현을 명확히 하기 어려운 경우에 나타난다. PROMETHEE의 선호함수(preference function)는 확실성과 불확실성하에서 사람마다 다른 위험 성향을 반영한다는 점에선 MAUT의 효용함수(utility function)와 유사할지 모르나, PROMETHEE의 선호함수가 쌍대비교(pairwise comparison)에 기초하고 있다는 점에서는 다르다. 의사결정자가 평가함수와 파라미터를 결정하면 내부 알고리즘에 의해 대안들간의 쌍대비교가 자동적으로 수행되므로 비교대안의 수가 많고, 새로운 대안이 추가 또는 삭제되는 경우, AHP보다 효율적으로 쌍대비교를 할 수 있다(Park, S-Y et al., 2005; Min and Song, 2003). <Figure 2>는 Brans와 Vincke(1985)가 제안한 PROMETHEE의 수행절차이다.

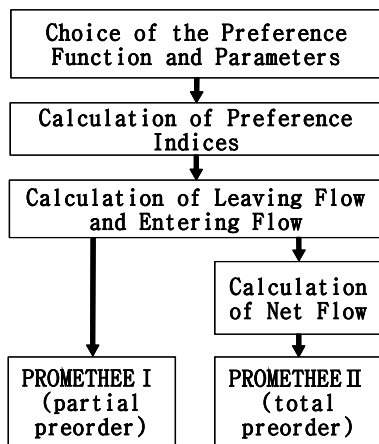


Figure 2. Procedure of PROMETHEE.

(1) 단계 1 : 선호함수 및 파라미터 설정

각 평가기준에 부합하는 선호함수를 선정하고 선호함수에 요구하는 파라미터를 설정한다. 선호함수는 <Figure 3>과 같이 6가지로 정의된다.

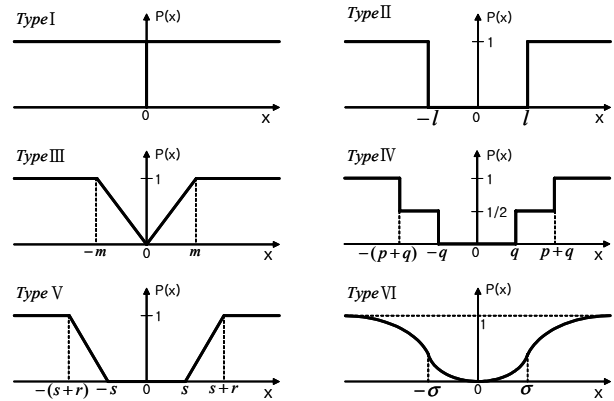


Figure 3. Type of Preference Functions in PROMETHEE.

이 때, 모든 평가기준은 6가지의 선호함수 중에서 하나의 함수를 선택하여 정의되어야 하고, 해당되는 파라미터를 설정해야 한다. <Figure 3>의 선호함수 중에서 관부식은 관의 재질이 물리·화학적 방법에 의해 침식되는 것으로서 위험요소의 증가량에 따라 관의 부식방지처리에 의해 안정적이다가 특정 시점부터 부식이 완만히 진행되는 특성에 맞추어 Type V 로 선택하였고, 관파열은 일정강도까지는 안정적이다가 관의 강도를 초과하는 위험요소의 증가에 따라 1차파열과 2차파열이 진행되므로 Type IV를 선택했다. 관내수질오염은 관내로 오염원이 침투하여 발생하는 것으로서 위험요소의 증가에 따라 처음에는 완만하다가 특정 시점에서 급격히 진행되므로  $\sigma$ 를 변곡파라미터로 하는 가우시안(Gaussian) 분포인 Type VI가 적합하다고 판단된다. 각 평가기준별 선호함수의 선택은 상수도관망시스템 전문가들의 조언을 참고하여 결정하였다.

<Table 2>의 평가자료는 평가기준별로 모니터링되는 항목의 중요도를 나타낸다. 따라서 값이 클수록 더 위험한 요소이기 때문에 최대화(maximization) 문제로 정의된다.

(2) 단계 2 : 선호지수(preference index) 계산

$\pi(a, b)$ 는 대안  $b$ 에 대비하여 대안  $a$ 의 선호도를 지수화한 것으로서, 선정된 선호함수와 가중치, 파라미터를 기반으로 식 (1)을 통해 <Table 2>의 평가자료를 계산하면 선호지수를 구할 수 있다.

$$\pi(a, b) = \sum_{h=1}^3 w_h p_h(a, b) \quad (1)$$

Table 2. Evaluation Data to detect the Tendency toward the Failure

Item	Max/Min	pH	Residual Chlorine	Discharge	Pressure	Electrical Conductivity	Turbidity	Leakage	Water Temperature	Preference Function	Weight	Parameter
Corrosion	Max	0.076	0.131	0.151	0.140	0.085	0.256	0.101	0.059	V	0.333	$s=0.075$ $r=0.150$
Burst	Max	0.032	0.044	0.228	0.183	0.043	0.077	0.355	0.038	IV	0.333	$q=0.110$ $p=0.200$
Water Pollution	Max	0.143	0.268	0.033	0.034	0.174	0.259	0.044	0.045	VI	0.333	$\sigma=0.090$

식 (1)에서 평가기준은 관부식, 관파열, 관내수질오염이고  $w_h$ 는 평가기준  $h$ 의 가중치를 나타내며  $p_h(a, b)$ 는 대안  $a$ 와  $b$ 의 평가자료 차이에 대한 의사결정자의 선호성향을 반영한 함수값이다.

(3) 단계 3: 선호의 유출량과 유입량 계산

선호의 유출량(leaving flow,  $\phi^+(a)$ )은 다른 대안들을 선호 혹은 지배하는(dominating) 정도를 나타내는 수치이고, 선호의 유입량(entering flow,  $\phi^-(a)$ )은 다른 대안들로부터 선호 혹은 지배되는(dominated) 정도를 나타내는 수치이다.

$$\phi^+(a) = \sum_{x \in K} \pi(a, x) \quad (2)$$

$$\phi^-(a) = \sum_{x \in K} \pi(x, a) \quad (3)$$

<Table 3>은 2단계에서 구한 선호지수를 바탕으로 식 (2)와 식 (3)을 이용해 선호의 유출량과 유입량을 계산한 것이다.

Table 3. Leaving Flow and Entering Flow

	pH	Residual Chlorine	Discharge	Pressure	Electrical Conductivity	Turbidity	Leakage	Water Temperature
Leaving Flow	0.648	1.627	0.870	0.679	0.918	2.735	1.836	0.005
Entering Flow	1.312	0.777	1.290	1.309	1.139	0.335	1.176	1.981

탁도의 선호유출량(2.735)은 잔류염소농도(1.627)와 블록누수량(1.836)보다 크고, 탁도의 선호유입량(0.335)은 잔류염소농도(0.777)와 블록누수량(1.176)보다 작기 때문에 선호의 유출량과 유입량 관점에서 탁도가 잔류염소농도와 블록누수량 항목보다 우월한 관계에 있다고 할 수 있다. 하지만 잔류염소농도와 블록누수량의 경우 선호유출량은 블록누수량이 더 크고 (1.836 > 1.627) 선호유입량은 잔류염소농도가 더 작기(0.777 < 1.176) 때문에 두 평가항목은 비교불능한(incomparable) 관계로 나타난다. 이는 평가기준간의 상충관계로 인하여 주어진 선호함수와 선호임계치의 범위에서 두 대안의 우선순위를 명확히 판단할 수 없기 때문이다.

(4) 단계 4: PROMETHEE I

<Table 3>을 바탕으로 순위선호관계를 도시하면 <Figure 4>와 같은 부분적인 우선순위(partial preorder)로 나타낼 수 있다.

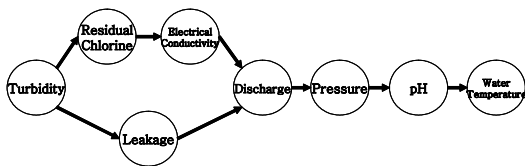


Figure 4. Partial PROMETHEE I Relation.

<Figure 4>에서 화살표의 시작점에 있는 항목은 관부식, 관파열, 관내수질오염에 대한 이상징후를 판정하는데 있어서 화살표의 종점에 있는 항목보다 더 중요한 항목임을 의미한다. 탁도는 잔류염소농도와 블록누수량 항목보다 위험요소로서 우선순위가 높음을 의미하고 잔류염소농도와 블록누수량은 화살표가 이어지지 않으므로 서로간에 우월함을 판정할 수 없다.

(5) 단계 5-1: 순흐름량 계산

식 (4)의 순흐름량(net flow,  $\phi(a)$ )은 선호의 유출량에서 유입량의 차를 나타낸다.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (4)$$

<Table 4>는 PROMETHEE II를 적용하기 위해 <Table 3>의 선호유출량과 유입량을 가지고 식 (4)를 이용해 선호의 순흐름량을 계산한 것이다.

Table 4. Net Flow

	pH	Residual Chlorine	Discharge	Pressure	Electrical Conductivity	Turbidity	Leakage	Water Temperature
Net Flow	-0.664	0.850	-0.420	-0.629	-0.221	2.401	0.660	-1.976

각 위험요소의 순흐름량을 비교하여 수치가 높을수록 우월한 항목으로 판단할 수 있다.

(6) 단계 5-2: PROMETHEE II

<Table 4>를 바탕으로 순위선호관계를 도시하면 <Figure 5>와 같은 전체적인 우선순위(total preorder)로 나타낼 수 있다.

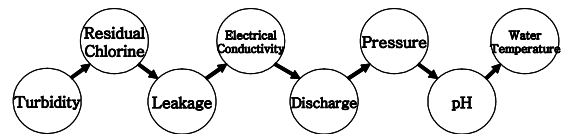


Figure 5. Total PROMETHEE II Relation.

결국, PROMETHEE 분석결과 우수공급의 안정성을 해결 위함이 클 것으로 판단되는 위험요소들 간의 전체적인 우선순위(total preorder)는 탁도, 잔류염소농도, 블록누수량, 전기전도도, 유량, 수압, pH, 수온의 순서임을 알 수 있다. PROMETHEE II에서는 의사결정자의 선호성향으로는 비교불능 했던 대안들에 대해서도 우선순위를 선정했다는 점에서 의미가 있다.

3.3 ANP 기법의 특징과 적용

ANP는 AHP 기법을 일반화시킨 것이다. 구성요소들이 네트워크(network) 구조를 형성하므로 단순히 계층(hierarchy)구조를 갖는 AHP 기법에 비하여 구조가 매우 복잡하다. 따라서 해를 구하는 시간이 많이 드는 단점이 있으나, 현실 세계에서 비교

분석하고자 하는 시스템의 대다수가 구성요소 간에 상관관계가 존재하기 때문에 ANP를 적절하게 이용한다면 오히려 더 만족스러운 결과를 얻을 수 있다(Meade and Sarkis, 1998). 실제로 AHP의 계층구조에서 한 계층을 구성하는 요소들은 상위계층이나 하위계층의 요소들과 영향을 주고 받거나 동일한 계층을 구성하는 요소간에도 영향을 주고 받는 경우가 있을 수 있다. 이처럼 AHP는 구성요소간에 독립성과 피드백이 없는 단방향 흐름을 가정한 반면, ANP는 이들간의 내부종속성(inner-dependence), 외부종속성(outer-dependence), 계층간 피드백(feedback)까지 고려하는 차이가 있다. AHP는 피드백이나 내부종속성이 없기 때문에 각 계층별로 쌍대비교하여 가중치를 구한 후 결과를 곱해서 결과를 쉽게 도출할 수 있지만, 모든 현실적인 의사결정 문제를 계층구조로 모형화 함과 동시에 계층별 구성요소간에 독립성이 유지되도록 해야 한다. 이를 위해서는 AHP 가정에 충실하도록 세심한 설문을 작성하여 평가해야 한다. 또한 평가기준간 애매한 상충관계를 고려하기는 어렵다. 따라서 무리하게 계층구조를 고집하여 분석하면 의사결정 현실을 왜곡할 수도 있다. 반면에 ANP에서는 네트워크 형태로 문제를 구성하고 대행렬(Supermatrix)을 활용해서 관계를 설정, 분석하므로 외부종속성 뿐만 아니라 내부종속성, 피드백까지 고려하여 의사결정문제를 분석할 수 있다. <Figure 6>은 Saaty(1996)가 제안한 ANP의 수행절차이다.

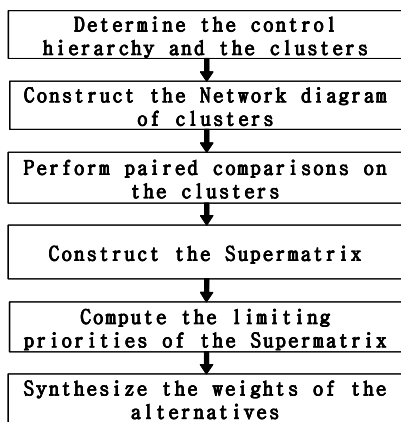


Figure 6. Procedure of ANP.

(1) 단계 1: 문제의 군집(cluster) 형성

앞서 PROMETHEE를 이용하여 분석한 동일한 문제를 대상으로 문제를 구성하되 관부식, 관파열, 관내수질오염을 결합으로, 모니터링되는 평가항목 중에서 유량, 수압, 블록누수량을 물리적 요인으로, pH, 전기전도도, 탁도, 잔류염소농도를 화학적 요인으로, 수온을 기타 요인으로 군집(cluster)하여 세분화하였다.

(2) 단계 2: 문제의 네트워크화

본 문제를 구성함에 있어 수압과 수량, 블록누수량과 수압과 같이 각 항목들의 독립성이 보장되지 않는 경우가 있기 때

문에 모니터링되는 항목들간의 외부종속성과 내부종속성 그리고 피드백을 고려하여 <Figure 7>과 같이 문제를 네트워크화 하였다.

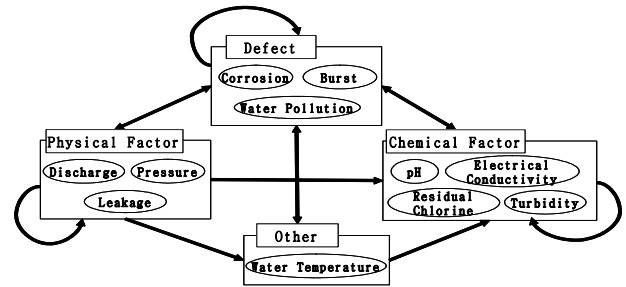


Figure 7. Feedback Network

(3) 단계 3: 쌍대비교행렬 작성

ANP를 수행하기 위한 쌍대비교행렬을 작성하기 위해 군집 비교와 노드비교를 통하여 군집행렬(Cluster Matrix)과 Unweighted Supermatrix를 구성한다. 군집행렬은 군집간의 쌍대비교행렬을 계산하여 상대적 가중치를 구한 후에 그 값들을 열벡터(column vector)에 입력한 것이고, Unweighted Supermatrix는 요소들간의 쌍대비교행렬을 계산하여 상대적 가중치를 구한 후에 그 값들을 열벡터(column vector)에 입력한 행렬이다.

Table 5. Cluster Matrix

	Defect	Physical Factor	Chemical Factor	Other
Defect	0.31569	0.28200	0.16798	0.53900
Physical Factor	0.30769	0.40101	0.00000	0.00000
Chemical Factor	0.29071	0.21400	0.83202	0.46100
Other	0.08591	0.10300	0.00000	0.00000

이 때 평가자들의 판단에 대한 논리적 일관성을 검증하기 위하여 일치성 지수(consistency index, CI)를 이용하였으며, 유효 일관성비율(10%이내)에 들지 못하는 정보는 제외하였다(Saaty, 1996).

(4) 단계 4: 대행렬 작성

역승법(power method)을 사용하여 대행렬을 수립시키기 위해서는 대행렬이 확률행렬(Stochastic Matrix)의 조건을 만족해야 한다. 이 조건을 만족하려면 행렬의 모든 열(column)의 합이 1이어야 하는데, 이를 위하여 Unweighted Supermatrix에 군집행렬을 곱한 후 열의 합을 1로 만든다. 이러한 행렬을 Weighted Supermatrix라고 한다.

(5) 단계 5: 대행렬 수립

Saaty가 제시한 6가지 극한계산모델 중에서 본 문제는 Case A가 적용된다(Hong, S-J et al., 2006). Weighted Supermatrix를 16번 제곱하면 <Table 8>과 같이 소수 5자리까지 동일한 결과를 얻을 수 있다.

Table 6. Unweighted Supermatrix

		Defect			Physical Factor			Chemical Factor				Other
		Water Pollution	Corrosion	Burst	Leakage	Pressure	Discharge	pH	Residual Chlorine	Electrical Conductivity	Turbidity	Water Temperature
Defect	Water Pollution	0.00000	0.83400	0.34900	0.18600	0.00000	0.00000	0.51600	0.81700	0.47101	0.67700	0.69600
	Corrosion	0.66301	0.00000	0.65100	0.00000	0.00000	0.00000	0.48400	0.18300	0.52899	0.18300	0.00000
	Burst	0.33700	0.16600	0.00000	0.81400	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.14000	0.30400
Physical Factor	Leakage	0.00000	1.00000	0.44600	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Pressure	0.00000	0.00000	0.20700	0.34900	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Discharge	0.00000	0.00000	0.34700	0.65100	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Chemical Factor	pH	0.11511	0.27700	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.16801
	Residual Chlorine	0.35836	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.64698
	Electrical Conductivity	0.17417	0.15900	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Turbidity	0.35235	0.56400	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.18501
Other	Water Temperature	1.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Table 8. Limited Supermatrix

	Defect			Physical Factor			Chemical Factor				Other
	Water Pollution	Corrosion	Burst	Leakage	Pressure	Discharge	pH	Residual Chlorine	Electrical Conductivity	Turbidity	Water Temperature
Weight	0.23768	0.16026	0.12289	0.09261	0.04522	0.04511	0.02883	0.06974	0.04948	0.10655	0.04163

Table 9. Relative Weights

	Turbidity	Leakage	Residual Chlorine	Electrical Conductivity	Pressure	Discharge	Water Temperature	pH
Weight	0.22236	0.19328	0.14553	0.10325	0.09437	0.09415	0.08688	0.06017

(6) 단계 6: 요소간 상대적 중요도 산출

<Table 9>는 물리적/화학적/기타 요인에 해당하는 요소들만 선택하여 정규화한 후 새로운 가중치를 구한 것이다.

기법의 결과에서는 전체적으로는 유사한 결과를 보이나 잔류 염소농도와 블록누수량, 유량과 수압, pH와 수온의 선호관계가 다르게 나타난다. 이것은 PROMETHEE가 기본적으로 선호 판단의 전환(transitivity)을 가정하고 있지 않기 때문이다(Min and Song, 2003).

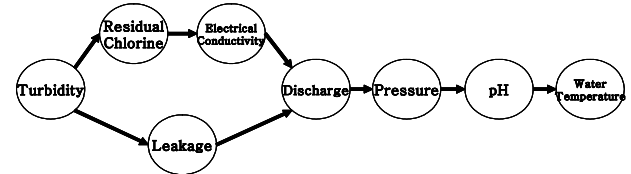
4. 결과분석

4.1 PROMETHEE와 ANP의 결과 비교

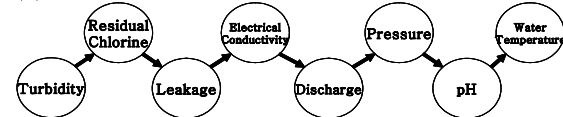
PROMETHEE와 ANP를 이용하여 상수도관망에서 모니터링 되는 위험요소들의 우선순위는 <Figure 8>과 같다.

PROMETHEE I, PROMETHEE II, ANP 결과에서 모두 탁도가 가장 우선순위가 높은 항목으로 선정되었으며 위험요소간 우선순위는 전체적으로 유사하게 나타남을 알 수 있었다. PROMETHEE I에서는 잔류염소농도와 블록누수량, 전기전도도와 블록누수량을 비교불능한 대안으로 분류하였다. PROMETHEE 기법은 의사결정자의 선호성향을 반영한 선호함수와 파라미터를 기준으로 판단이 애매한 대안에 대해서 비교불능한 대안으로 분류해주는 특성이 있다. ANP 기법에서는 비교불능한 대안으로 분류해주는 기능은 없지만 외부종속성, 내부종속성, 피드백을 이용하여 모든 Node를 네트워크 구조로 구성하여 유기적으로 구성요소들을 판단해 준다. PROMETHEE II와 ANP

(a) PROMETHEE I



(b) PROMETHEE II



(c) ANP

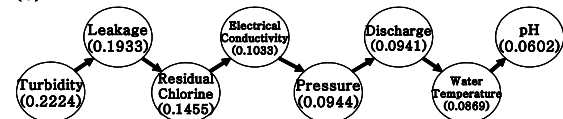


Figure 8. Results of each method.

Table 10. Results of PROMETHEE II by Changing the Weight

No.	Weight			PROMETHEE II Results(Priority)							
	Corrosion	Burst	Water Pollution	1	2	3	4	5	6	7	8
①	0.333	0.333	0.333	Turbidity	Residual Chlorine	Leakage	Electrical Conductivity	Discharge	Pressure	pH	Water Temperature
②	0.2	0.4	0.4	Turbidity	Residual Chlorine	Leakage	Electrical Conductivity	Discharge	pH	Pressure	Water Temperature
③	0.4	0.2	0.4	Turbidity	Residual Chlorine	Electrical Conductivity	Leakage	pH	Discharge	Pressure	Water Temperature
④	0.4	0.4	0.2	Turbidity	Leakage	Discharge	Residual Chlorine	Pressure	Electrical Conductivity	pH	Water Temperature
⑤	0.5	0.25	0.25	Turbidity	Residual Chlorine	Leakage	Discharge	Electrical Conductivity	Pressure	pH	Water Temperature
⑥	0.25	0.5	0.25	Leakage	Turbidity	Discharge	Residual Chlorine	Pressure	Electrical Conductivity	pH	Water Temperature
⑦	0.25	0.25	0.5	Turbidity	Residual Chlorine	Electrical Conductivity	Leakage	pH	Discharge	Pressure	Water Temperature
⑧	0.2	0.3	0.5	Turbidity	Residual Chlorine	Electrical Conductivity	Leakage	pH	Discharge	Pressure	Water Temperature
⑨	0.2	0.5	0.3	Leakage	Turbidity	Residual Chlorine	Discharge	Pressure	Electrical Conductivity	pH	Water Temperature
⑩	0.3	0.2	0.5	Turbidity	Residual Chlorine	Electrical Conductivity	pH	Leakage	Discharge	Pressure	Water Temperature
⑪	0.3	0.5	0.2	Leakage	Turbidity	Discharge	Pressure	Residual Chlorine	Electrical Conductivity	pH	Water Temperature
⑫	0.5	0.2	0.3	Turbidity	Residual Chlorine	Leakage	Electrical Conductivity	Discharge	pH	Pressure	Water Temperature
⑬	0.5	0.3	0.2	Turbidity	Leakage	Residual Chlorine	Discharge	Pressure	Electrical Conductivity	pH	Water Temperature

4.2 PROMETHEE의 민감도분석

(1) PROMETHEE의 선호함수별 가중치에 따른 민감도분석

<Table 10>은 선호함수별로 동일한 가중치(①)와 서로 다른 12가지의 가중치 조합(②~⑬)을 사용할 경우의 PROMETHEE II의 우선순위 결과를 보여준다.

PROMETHEE는 선호함수의 가중치 변화에 따라 결과가 민감하게 반응함을 알 수 있다. 이것은 PROMETHEE가 자체적으로 평가기준들 간의 가중치를 산정하지 못하므로 의사결정자의 직관이나 경험에 의존하여 가중치를 설정해야 한다는 것을 의미하며, 이 부분에 대한 합리적 선택 방안에 대한 연구가 필요함을 말해준다.

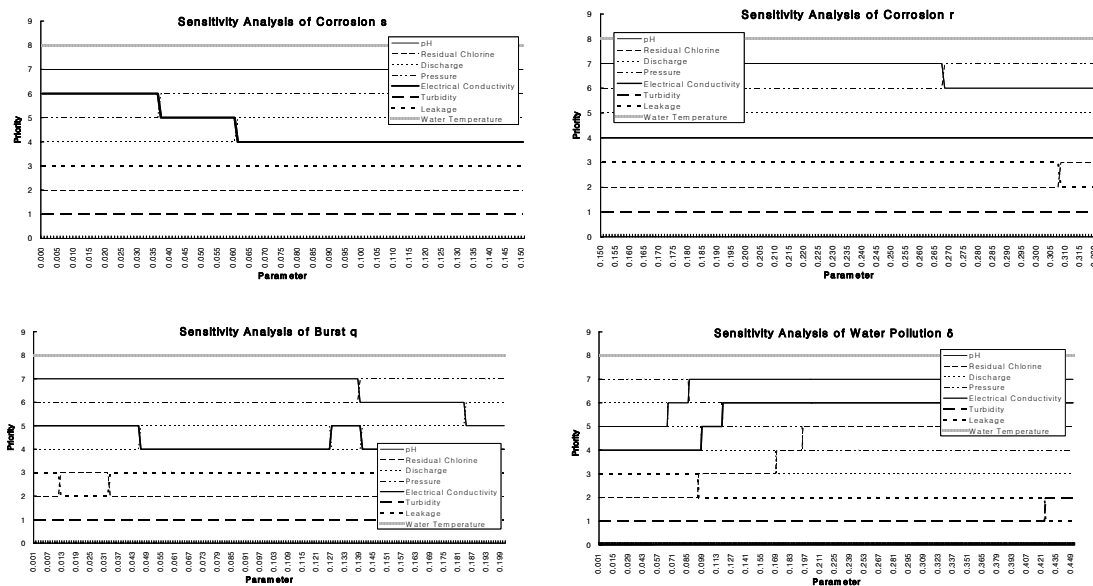


Figure 9. Sensitivity Analysis of Each Parameter



(2) PROMETHEE의 선호함수별 파라미터에 따른 민감도분석 <Figure 9>는 각 선호함수의 파라미터가 변함에 따라서 우선순위의 민감도를 분석한 것이다.

이 결과를 볼 때 탁도와 잔류염소농도, 블록누수량은 파라미터의 변화에 따라 항상 높은 우선순위를 보이기 때문에 다른 항목과는 별도로 지속적인 관측이 필요하다고 판단된다. 그리고 <Figure 9>에서 보여주듯이 PROMETHEE를 적용함에 있어서 파라미터의 설정이 선호함수의 선택과 가중치 선정만큼 중요함을 알 수 있다. PROMETHEE는 수학적 선호함수를 기본으로 하는 순위선호이론에 근거한 기법이기 때문에 선호함수별 파라미터에 아주 민감하게 반응한다. 따라서 이 기법은 평가기준의 중요도를 명확히 정의할 수 있는 문제에 유용하며, 다양한 의사결정 환경에서 합리적으로 평가함수의 파라미터를 설정하는 연구가 필요하다고 판단된다.

4.3 PROMETHEE와 ANP의 통합모형 결과해석 및 한계

<Table 11>은 선호함수별 가중치가 동일할 경우 PROMETHEE II의 결과이고, <Table 12>는 ANP 결과를 PROMETHEE의 선호함수 가중치로 적용하여 산출된 결과이다. <Table 12>를 <Table 11>의 결과와 비교해 보면 탁도가 가장 중요한 요소임은 일치하지만, 블록누수량이 잔류염소농도 보다 더 중요하고, 유량과 수압이 전기전도도보다 중요한 것으로 판정이 되었는 바, 이는 ‘관부식’ 기준에 다른 두 평가 기준들에 비하여 더 큰 가중치가 반영된 결과인 것으로 생각된다. 통상 평가기준들 간의 가중치를 모를 경우 동일하게 적용할 수 밖에 없기 때문에 가중치 설정을 위한 연구가 필요하다.

PROMETHEE 기법은 평가기준에 적합한 선호함수를 선정하여 비교불능인 대안들도 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, ANP와 같이 논리적 흐름에 따라서 평가기준들 간의 가중치를 자율적으로 산출하지 못하고 최종 의사결정자의 경험에만 의존하여 가중치가 사전에 결정되기 때문에 문제 구성 단계에서 구체화되는 기준들 간의 상호 의존성을 종합적으로 반영하지 못한다. 따라서 PROMETHEE의 가중치 설정과 관련하여 Cathy Macharis(2004)는 AHP를 이용하는 방법을 제시하였고,

민재형(2003)은 <Table 1>에서 제시한 PROMETHEE의 난해점을 보완할 수 있는 통합모형개발의 필요성을 시사하였다. 본 연구에서는 AHP 보다 유연하고 단점을 보완할 수 있는 ANP 기법을 이용하여 가중치를 설정하고, 그 가중치를 PROMETHEE에 적용하여 결과를 도출해 PROMETHEE의 단점을 보완해 보고자 했다. PROMETHEE 기법은 최대 2개까지의 파라미터 설정만으로 간단하고 쉽게 적용할 수 있는 의사결정기법이지만 선호함수별로 가중치를 사전에 설정해야 하는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 단점은 ANP의 선호판단의 전환성(transitivity)과 일관성 비율에 근거한 가중치를 적용함으로써 어느 정도 극복될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 ANP 기법을 PROMETHEE의 평가기준의 가중치 선정을 위해서만 활용할 것이라면, ANP의 단점인 과도한 설문 양과 문제구조의 복잡성, 계산과정의 어려움을 덜어 줄 수 있을 것이다. 따라서 평가기준에 대해서만 ANP 분석을 수행하고, 그 결과를 PROMETHEE 기법에 적용함으로써 PROMETHEE와 ANP를 통합하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

4.4 기법별 결과 검증 및 추후연구과제

본 연구의 결과들은 향후 상수도관망의 오염예방 및 위험관리를 위한 통합시스템의 구성요소 중 하나인 모니터링시스템으로부터 수집되는 항목들 간의 가중치 설정에 적용될 수 있을 것이다. <Figure 1>에서 제시한 통합의사결정시스템은 현재 연구가 진행 중인 관계로 추후에 본 분석결과에 대한 검증이 이루어 질 수 있을 것이다. PROMETHEE와 ANP 외에도 많은 다기준 의사결정기법들이 있지만 모든 문제에서 합리적이고 올바른 결과를 제시해 주는 기법은 현실적으로 존재하지 않는다. 따라서 각 기법들의 장단점과 기본 가정들을 염두에 두고, 문제의 특성에 적합한 기법을 선택하여 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 본 논문에서는 다기준 의사결정기법으로 널리 활용되는 순위선호 기반의 PROMETHEE와 네트워크 구조를 이용하는 ANP, 두 기법의 단점이 보완될 수 있도록 ANP의 결과를 PROMETHEE의 가중치에 적용한 통합모형을 제시하고, 그 결과를 도출하였다. 모니터링시스템으로부터 취득될

Table 11. Results of PROMETHEE II

Weight			PROMETHEE II Results(Priority)							
Corrosion	Burst	Water Pollution	1	2	3	4	5	6	7	8
0.333	0.333	0.333	Turbidity	Residual Chlorine	Leakage	Electrical Conductivity	Discharge	Pressure	pH	Water Temperature

Table 12. Results of PROMETHEE II using Weights obtained by ANP

Weight			PROMETHEE II Results(Priority)							
Corrosion	Burst	Water Pollution	1	2	3	4	5	6	7	8
0.456	0.308	0.236	Turbidity	Leakage	Residual Chlorine	Discharge	Pressure	Electrical Conductivity	pH	Water Temperature

데이터에 각 기법별 결과를 적용하여 추후 제시될 통합의사결정시스템이 제공하는 대처방안들의 타당성을 판단해 봄으로써 본 논문에서 제시한 통합모형의 적절성을 검증할 수 있을 것이다. 즉, 항목별 가중치가 설정되지 않았던 과거 실적 데이터들에 비하여 관망의 이상 징후와의 상관관계 분석을 통하여, 본 연구의 통합시스템이 제시하는 대안들이 얼마나 더 적절한가를 비교함으로써 기법별 결과 검증은 진행할 수 있다. 따라서 본 연구에 참여하지 않은 관련분야 전문가들을 대상으로 복수의 이상징후 데이터가 모니터링 된 경우, 통합시스템이 제시하는 대안의 적합성을 판단케 함으로써 기법별 가중치에 대한 검증 연구를 추후 연구과제로 제안한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 다기준 의사결정기법 중에서 구미에서 널리 활용되고 있는 PROMETHEE와 ANP 기법을 비교 분석하였으며, 용수공급시설의 안전성 확보와 효율적 관리를 위하여 상수도관망에서 모니터링 되는 위험요소들의 우선순위를 선정하는데 적용해 보았다. PROMETHEE 기법은 평가기준의 선호함수 형태를 명확히 부여할 수 있고 각 평가기준의 가중치와 파라미터의 설정이 용이한 상황에서 유용하며, ANP 기법은 구성요소간의 종속성과 상호작용으로 문제구조가 복잡하고 비교대안의 수가 많아서 대안들 간의 평가에 일관성을 유지하기가 힘든 상황에 적합할 것이다. 그리고 본 연구에서는 PROMETHEE와 ANP 기법이 서로의 단점을 보완해 줄 수 있는 통합모형의 가능성을 제시하였다. 본 연구의 결과를 토대로 모니터링 되는 항목들 간에 우선순위를 부여하여 상수도관망의 취약성을 분석하면 평상시와 비교하여 이상치의 반응에 대해서 사고 가능성이나 위험성 여부를 신속하고 보다 합리적으로 예측할 수 있을 것이다. 그리고 향후 상수도관망의 통합의사결정시스템 구축시 모니터링 되는 항목들 간의 가중치 설정과 사고대응 제어 알고리즘 설계를 위한 기초 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구의 연구과제(과제번호: R01-2004-000-10362-0)에 의해 수행되었으며 연구를 위해 설문

에 응해주신 한국건설기술연구원, 성북수도사업소, 영등포 수도사업소 관계자에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- Brans, J. P. and Vincke, PH.(1985), A Preference Ranking Organisation Method, *Management Science*, 2(6), 647-656.
- Cathy, M., Johan, S., Klaas D. and Alain V.(2004), PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP, *European Journal of Operational Research*, 153, 307-317.
- Hokkanen, J. and Salminen, P.(1997), ELECTREIII and IV Decision Aids in an Environmental Problem, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6, 215-226.
- Hong, S-J., Lee, Y-D., Kim, S-K. and Kim, J-H.(2006), Evaluation of Risk Factors to Detect Anomaly in Water Supply Networks-Based on the PROMETHEE and ANP-, *Journal of the Korea Water Resources Association*, 39(1).
- Keeney, R. and Raiffa, H.,(1976), Decision with Multiple Objectives: Preference and Value Trade off, John Wiley & Sons, Now York.
- Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation(2001), Water Supply Facility Maintenance & Management Manual, Ministry Construction & Transportation.
- Korea Institute of Construction Technology(2004), Development of Optimal Management System for Water Pipeline Network, Ministry of Environment.
- Mastre, L. Y.(1999), ELECTRE and Decision Support: Methods and Applications in Engineering and Infrastructure Investment, Kluwer Academic, Boston.
- Meade, L. M. and Sarkis, J.(1998), Strategic Analysis of Logistics and Supply Chain Management Systems using the Analytical Network Process, *Transport Res-E(Logistics and Transpn Rev.)*, 34(3), 201-215.
- Min, J-H. and Song, Y-M.(2003), A Comparison of MAUT, AHP and PROMETHEE for Multicriteria Decisions, 2003 The Korean Operations and Management Science Society Conference, 2, 229-232.
- Park, S-Y., Kim, J-H. and Kim, S-K.(2005), A Mixed-Integer Programming Model to Draw the Concordance Level and the Kernel Set for the Implementation of ELECTRE IS, *Journal of the Korean of Industrial Engineers*, 31(4), 265-276.
- Roy, B.(1968), Classement et choix en presence de points de vue multiples(la method ELECTRE), *Revue Informatique et Reserche Operationnelle*, 8, 57-75.
- Roy, B. and Hugonnard, J. C.(1982), Ranking of Suburban Line Extension Projects on the Paris Metro System by a Multicriteria Method, *Transportation Research*, 16(4), 301-312.
- Saaty, T. L. (1996), Decision making with dependence and feedback the analytic network process, RWS Publisher, USA.
- Vargas, L. G.(1990), An overview of the analytic hierarchy process & its applications, *European Journal of Operational Research*, 48, 2-8.
- Zahedi(1986), The Analytic Hierarchy Process - A Survey of the Method and its Applications, *INTERFACES*, 16(4), 96-108.

**홍성준**

경희대학교 산업공학과 학사  
 고려대학교 산업시스템정보공학과 석사  
 현재: 삼성SDI 경영혁신실 PI팀  
 관심분야: Advanced Planning & Scheduling, Factory  
 Planning, SCM, 다기준 의사결정 분석

**이용대**

고려대학교 산업공학과 학사  
 고려대학교 산업공학과 석사  
 고려대학교 산업시스템정보공학과 박사수료  
 현재: 고려대학교 공학기술연구소 연구원  
 관심분야: Stochastic Programming, 수자원시스  
 템, 의사결정지원 시스템

**김승권**

서울대학교 기계공학과 학사  
 Stanford University 산업공학과 석사  
 UCLA 시스템공학과 박사  
 현재: 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수  
 관심분야: 다기준 의사결정 분석, SCM, 수자  
 원시스템 분석 등의 시스템 분석 기법의 현  
 실적용 분야

**김중훈**

고려대학교 토목환경공학과 학사  
 VPI & SU 토목과 석사  
 U. of Texas (Austin) 토목과 박사  
 현재: 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수  
 관심분야: 수자원시스템, 상하수도, 하천 및  
 수자원