

상수도관망의 이상징후 판정을 위한 위험요소 평가 - PROMETHEE와 ANP 기법 중심으로 -

Evaluation of Risk Factors to Detect Anomaly in Water Supply Networks - Based on the PROMETHEE and ANP -

홍성준* / 이용대** / 김승권*** / 김종훈****

Hong, Sungjun / Lee, Yongdae / Kim, Sheung-Kown / Kim, Joong-Hoon

Abstract

In this study, we proposed a layout of the integrated decision support system in order to prevent the contamination and to manage risk in water supply networks for safe and smooth water supply. We evaluated the priority of risk factors to detect anomaly in water supply networks using PROMETHEE and ANP techniques, which are applied to various Multi-Criteria Decision Making area in Europe and America. To develop the model, we selected pH, residual chlorine concentration, discharge, hydraulic pressure, electrical conductivity, turbidity, block leakage and water temperature as the key data item. We also chose pipe corrosion, pipe burst and water pollution in pipe as the criteria and then we present the results of PROMETHEE and ANP analysis. The evaluation results of the priority of risk factors in water supply networks will provide basic data to establish a contingency plan for accidents so that we can establish the specific emergency response procedures.

keywords : PROMETHEE, ANP, Water Supply Networks, Multi-Criteria Decision Making

요 지

본 연구에서는 안전하고 원활한 용수공급을 목적으로 하는 상수도관망시스템의 오염예방 및 위험관리를 위한 통합의사결정시스템의 기본구조를 제시하고 유럽과 미국에서 널리 사용되고 있는 다기준 의사결정기법인 PROMETHEE와 ANP를 적용해 상수도관망의 이상징후 판정을 위한 위험요소들의 우선순위를 평가하였다. 문제 구성을 위하여 pH, 잔류염소농도, 유량, 수압, 전기전도도, 탁도, 블록누수량, 수온을 자료항목으로 선정하였고 관부식, 관파열, 관내수질오염을 평가기준으로 하여 PROMETHEE와 ANP의 결과를 비교 분석하였다. 본 연구에서 제시한 상수도관망의 위험요소 평가결과는 위기상황 대처방안시스템 구축시 사고대응 제어알고리즘 설계의 기초자료가 될 수 있을 것이다.

핵심용어 : PROMETHEE, ANP, 상수도관망, 다기준 의사결정기법

* 고려대학교 공과대학 산업시스템정보공학과 석사과정 (e-mail: sjhong101@korea.ac.kr)

** 고려대학교 공과대학 산업시스템정보공학과 박사과정 (e-mail: ydlee@syslab.korea.ac.kr)

*** 고려대학교 공과대학 산업시스템정보공학과 교수 · Corresponding Author (e-mail: kimsk@korea.ac.kr)
Professor, Dept. of Industrial Systems & Information Eng., Korea Univ. Seoul 136-701, Korea

**** 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수 (e-mail: jaykim@korea.ac.kr)

1. 서 론

아프리카와 중동 등지에서는 이미 약 3억명이 심각한 물부족을 겪고 있으며 2050년이 되면 전세계 인구의 3분의 2가 물부족 사태에 직면할 것이라는 보고가 있다. 그리고 UN 산하기구인 국제인구행동연구소(PAL, Population Action International)의 발표에 따르면 한국은 물부족국가로 분류되어 향후 물기근국가군으로 전락할 위기에 놓여 있다. 상수도시스템은 국가의 중요한 기간시설로서 국민의 삶의 질을 향상시키기 위해 필수적인 물을 공급하는 역할을 담당하고 있음에도 불구하고 빈번하게 발생하는 사고와 재해, 재난에 대해 우리의 용수공급시스템은 노출되어 있으며, 특히 상수도망의 광역화로 인하여 광역상수도망의 사고 파급효과는 그 위험성이 증대되고 있다. 이러한 상수도망의 위험성으로부터 용수공급시설의 안전성 확보를 위하여 국내에서 많은 연구들이 진행되고 있다.

이현동 등(2004)은 원격감시 및 자료획득 시스템의 자료분석 및 제어를 통합한 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) 시스템 구축을 위해 국내의 배수관망 분석에 적용할 수 있는 자료획득과 분석의 틀을 제시하였고 김응석(2002)은 국내 실정에 적합한 상수관로의 노후도 조사방법을 통해 현재의 관의 노후도를 확률론적 신경망 모형을 이용하여 등급을 산정하는 연구를 진행하였다. 윤재홍 등(2000)은 상수관망 관리시스템의 개발을 통해 효율적인 자료관리 및 상수관망 운영의 합리화를 추진하기 위한 전문가시스템(Expert System)을 소개하였으며 김중훈 등(1996)은 기존 상수도 노후관망의 개량 및 관리기법을 개발하였다.

영국의 수도사업체에서는 지리정보시스템(GIS, Geographic Information Systems)을 이용하여 용수공급시설들을 관리하고 RCM(Reliability Centered Maintenance)을 개발하여 유지관리에 적용하고 있으며, 벨기에 수도국은 모니터링 시스템과 급수 및 송수제어시스템을 통해 UNIX기반의 제어실 워크스테이션으로 자료를 전송하여 용수공급시설을 관리하고 있다. 그리고 타이완의 모니터링/제어센터는 7개의 정수장과 53개의 모니터링/제어센터, 19개의 감시실을 통제함으로써 효율적이고 경제적인 처리장관리를 시행하고 있다(한국건설기술연구원, 2004).

상수도망의 안전성을 확보하여 하기 위하여 먼저 상수도관망의 위험성과 취약성을 분석해야 한다. 이를 위해서 관망의 위험요소들을 규명하고 중요도를 산정하는 것이 선행되어야 하는데, 위험요소들간의 우선순위를 산출하는 것은 상충되는 복수의 기준이 존재하는 상황

에서 최적의 대안이나 순위를 산정하는 다기준 의사결정(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)문제로 볼 수 있다. 한국수자원공사(2002)의 기존댐 합리적 용수배분을 통한 수리권 조정 방안 연구보고서와 한국개발연구원(2005)의 수자원부문사업의 예비타당성조사 표준지침 연구보고서는 국내 수자원 분야에 다기준 의사결정 기법을 적용한 대표적인 연구들이다. 국내 수자원 분야의 주요 적용 사례로 이정호 등(2004)은 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 이용하여 도시유출시스템에서 불명수량을 산정하였고 심정보 등(2004)은 강변여과수 개발지역 선정을 위해 AHP를 적용했다. 이현재와 심명필(2002)은 가뭄시 한정된 물을 공급할 때 발생하는 분쟁을 해결하기 위하여 AHP 기법을 이용하였으며 박태선(2002)은 AHP를 이용하여 하천의 중요도를 평가하였다. 이처럼 수자원 분야의 다기준 의사결정문제에서 AHP 기법이 많이 이용되었는데 AHP 기법은 이론이 간단하고 사용하기 편리한 반면에 단방향적인 구조와 구성요소간의 종속성을 인정하지 않고 애매모호한 대안들간의 평가가 힘들며 무리한 계층구조를 고집할 경우에 현실을 왜곡할 수 있다는 단점이 있다. 본 연구에서는 AHP 기법의 단점을 보완할 수 있는 유럽과 미국의 다기준 의사결정기법인 PROMETHEE(Preference Ranking Organization METHod Enrichment Evaluations)와 ANP(Analytic Network Process) 기법을 소개하고 상수도관망에서 모니터링되는 위험요소 사이의 우선순위 평가문제에 적용하여 각 기법의 특징과 결과를 비교 분석하였다.

다음 장에서는 다기준 의사결정기법을 소개하고 3장에서는 PROMETHEE와 ANP 기법을 적용하여 상수도관망의 이상정후를 판정하기 위한 위험요소를 평가하며 결론은 4장에 수록하였다.

2. 다기준 의사결정기법

K개의 기준을 가진 다기준 의사결정문제(Multi-Criteria Decision Making problem)의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$\text{Max} \{f_1(a), \dots, f_h(a), \dots, f_k(a) \mid a \in K\} \quad (1)$$

다기준 의사결정문제에서 최대의 과제는 상충하는 기준들간의 절충(trade-off)이기 때문에 대부분의 현실 문제에서 $f_h(\tilde{a}) \geq f_h(a), \forall a \in K, \forall h$ 를 만족시키는 최적해 \tilde{a} 는 거의 존재하지 않는다. 이와 같이

평가기준이 다수이고 각 기준 하에서 고려되는 대안들의 선호도를 객관적으로 측정하거나 이를 종합하여 최선의 대안을 선택하는 문제를 다기준 의사결정문제(Multi-Criteria Decision Making problem)라고 한다.

기존의 다기준 의사결정기법에는 각 기준들의 효용함수(utility function)를 구하여 각 대안의 점수(score)를 효용도(utility)로 전환하는 MAUT(Multi-Attribute Utility Theory, Von Neumann and Morgenstern, 1947; Keeney and Raiffa, 1976)와 계량적 수치로 나타내기 어려운 요소들을 고려하여 조직화, 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 문제로 확장한 모델로서 AHP 기법이 각 구성요소간에 상호 독립적이어 한다는 공리가 필요한 반면, ANP 기법은 각 구성요소간의 상관관계가 존재하는 경우에도 적용할 수 있다(Saaty, 1996). Brans와 Vincke는 순위 선호(outranking)개념을 바탕으로 기준별 선호함수(preference function)와 선호의 유출량(leaving flow) 및 선호의 유입량(entering flow)의 개념을 이용하여 대안들간의 선호를 도출하는 PROMETHEE(Preference Ranking Organization Method Enrichment Evaluations) 기법을 개발하였으며(Brans and Vincke 1985), B. Roy는 순위선호(outranking)개념을 바탕으로 각 대안들의 선호도에 대한 일치성(concordance index) 및 불일치성 지수(discordance index)개념을 이용하여 열등한 대안을 체계적으로 제거하여 비교대안의 순위를 결정하는 ELECTRE I, II, III, IV(Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) 기법을 소개했다(박석영, 2005; Roy, 1968).

기존의 다기준 의사결정기법 중에서 유럽과 미국에서 많은 분야에 적용되고 있는 PROMETHEE와 ANP 기법의 특징과 수행절차는 다음과 같다.

2.1 PROMETHEE의 특징과 수행절차

PROMETHEE는 순위선호(outranking)개념을 기반으로 하는 유럽의 대표적인 다기준 의사결정기법으로서 동일한 유럽의 기법인 ELECTRE에 비하여 계산과정이 단순하고 의사결정자가 쉽게 이해할 수 있으며 대안들의 선호 강도도 쉬운 개념으로 나타난다. 또한 최대 2개까지의 파라미터(선호임계치)를 결정해주면 되기 때문에 더욱 선호되는 방법론이다(Brans and Vincke, 1985). 그리고 선호의 유출량과 유입량으로 부분적인 우선순위(partial preorder)를 구하는 과정에서 평가기준간 상충

관계 때문에 평가하기 애매한 대안들에 대하여 비교불가능한(incomparable) 대안으로 분류해 주는 특징이 있다. 실제로 이러한 비교불가능한 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 나타나는데, PROMETHEE는 이러한 의사결정자의 애매한 성향도 표현이 가능하다. PROMETHEE의 선호함수(preference function)는 확실성(certainty)과 불확실성(uncertainty)하에서 사람마다 다른 위험 성향을 반영하는 MAUT의 효용함수(utility function)와 유사할지 모르나, PROMETHEE의 선호함수가 쌍대비교(pairwise comparison)에 기초하고 있다는 점에서 MAUT의 효용함수와 다르다. 의사결정자가 평가함수와 파라미터(선호임계치)를 결정하면 내부 알고리즘에 의해 대안들간의 쌍대비교가 자동적으로 수행되므로 비교대안의 수가 많고, 새로운 대안이 추가 또는 삭제되는 경우 AHP보다 효율적으로 쌍대비교를 할 수 있다(박석영, 2005). Fig. 1은 Brans and Vincke (1985)가 제안한 PROMETHEE의 수행절차이다.

여기서 선호의 유출량(leaving flow)과 선호의 유입량(entering flow)을 이용하여 부분적인 순위선호(partial preorder)를 구하는 것이 PROMETHEE I 이고, 순흐름량(net flow)를 이용하여 전체적인 우선순위(total preorder)를 구하는 것을 PROMETHEE II 라고 한다.

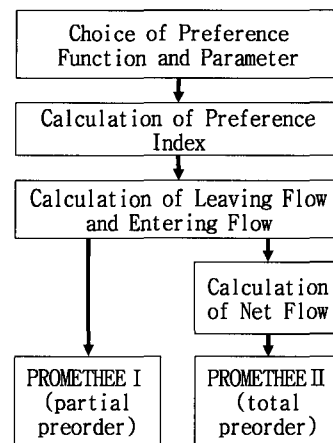


Fig. 1. Procedure of PROMETHEE

2.2 ANP의 특징과 수행절차

ANP 기법은 AHP 기법을 일반화시킨 것으로서 구성요소들이 네트워크(network) 구조를 형성하기 때문

에 단순히 계층화(hierarchy) 구조를 갖는 AHP 기법에 비하여 구조가 매우 복잡하며, 해를 구하는 시간이 많이 드는 단점이 있으나, 현실 세계에서 비교 분석하고자 하는 시스템의 대다수가 구성 요소 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 주고받거나 동일한 계층을 구성하는 요소 간에도 영향을 주고받는 경우가 있을 수 있다. 이처럼 AHP가 기준과 대안간의 상호독립성과 이들 간의 피드백이 없는 단방향 흐름을 가정한 반면, ANP는 이들 간의 내부종속성(inner-dependence), 외부종속성(outer-dependence), 계층간의 피드백(feedback)까지 고려하는 차이가 있다. 따라서 AHP는 피드백이나 내부종속성이 없기 때문에 각 계층별로 쌍대비교하여 가중치를 구한 후 결과를 곱해서 결과를 쉽게 도출할 수 있지만, 모든 현실적인 의사결정문제를 계층구조로 모형화 함과 동시에 계층별 구성요소 간에 독립성이 유지되도록 해야 한다. 이를 위해서는 AHP 가정에 충실하도록 세심한 실문을 작성하여 평가해야 한다. 또한 AHP에서는 평가기준 간 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. Fig. 2는 Saaty(1996)가 제안한 ANP의 수행절차이다.

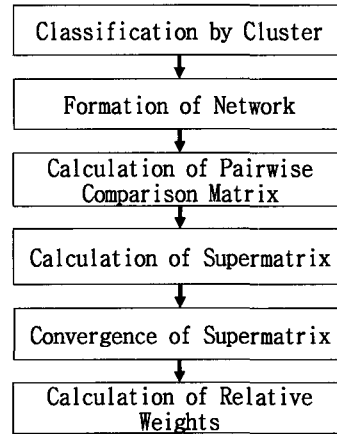


Fig. 2. Procedure of ANP

3. 상수도관망의 이상징후 판정을 위한 위험요소 평가

안전하고 원활한 용수공급을 위한 상수도관망시스템의 오염예방 및 위험관리를 위해서 Fig. 3과 같은 통합 의사결정시스템의 기본구조를 제시한다.

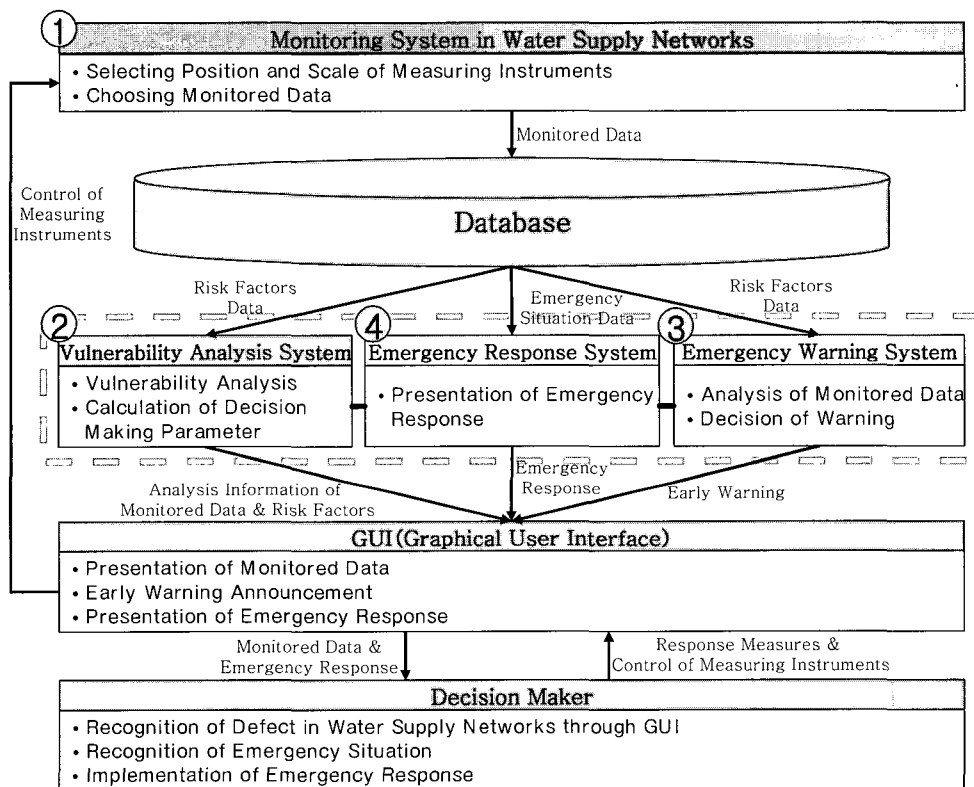


Fig. 3. Layout of Integrated Decision Support System

① 상수도관망에서 발생하는 누수 및 수질오염 등의 데이터를 계측기로부터 모니터링하여 DBMS에 저장하고 ② 위험성/취약성 분석시스템에서는 모니터링되는 데이터의 위험성과 취약성을 분석하고 의사결정매개변수를 제시한다. ③ 위험상황 조기경보시스템에서는 수집된 데이터를 바탕으로 위험요소의 분석정보를 종합하여 조기경보를 발령한다. ④ 위기상황 대처방안시스템에서는 모든 분석정보와 데이터를 토대로 위험상황별 대처방안을 수립하고 GUI를 통해 의사결정자에게 제시한다.

각 시스템들을 연계한 통합의사결정시스템 개발을 위해 상수도관망 위험성/취약성 분석시스템에서 각 위험요소들을 평가하는 연구가 선행되어야 할 것이다. 위험요소에는 관중, 관의 매설년도나 매설주변토양, 매설심도, 접합부 형식, 교통량, 누수 및 파손 기록 등 많은 인자들이 있으나, 본 연구에서는 관로에 설치된 계측기로부터 모니터링되는 위험요소만을 대상으로 하였다. 왜냐하면 상수도관망 위험성/취약성 분석시스템으로부터 DB에 저장되는 정보들이 통합의사결정시스템의 가장 기본이 되는 자료이고 위기상황에 대처하기 위한 제어알고리즘 설계시 각 데이터 항목의 우선순위를 선정하고 위험상황 의사결정시스템을 설계하여 사전사고를 예방하거나 최소화 시킬 수 있기 때문이다. 특히 동시다발적으로 위험요소가 모니터링될 경우 효과적인 대응책을 마련하기 위해서도 위험요소들간의 우선순위는 평가되어야 한다.

한국건설기술연구원(2004)는 대구시에 구축된 SCADA 시스템으로부터 실시간으로 모니터링되는 데이터인 pH, 잔류염소농도, 유량, 수압, 전기전도도, 탁도, 블록 누수량, 수온을 자료항목으로 선정하여 상수도관망의 최적 관리시스템 개발 연구를 진행하였다(한국건설기술연구원, 2004). 본 연구에서도 이 항목들을 평가항목으로 선정하였고 건설교통부 시설안전기술공단의 수도시설유지관리매뉴얼(시설안전기술공단, 2001)에서 제시한 도수 및 송·배수시설의 부위별 결함의 종류인 관부식, 관파열, 관내수질오염, 관피복손상, 신축관의 기능상실

중에서 관피복손상과 신축관의 기능상실은 그 원인이 관부식 또는 신축관 설치시 부주의와 같이 실시간 모니터링되는 항목으로 판단하기에 적합하지 못하기 때문에 관부식, 관파열, 관내수질오염 만을 평가기준으로 선정하여 문제를 구성하였다. 각 평가기준별 징후와 원인은 다음의 Table 1과 같다.

상수도관망에서 모니터링되는 항목들을 관부식, 관파열, 관내수질오염의 평가기준 하에서 위험순위를 선정하는 것은 다수의 대안에 대해서 다면적인 평가기준과 다수 주체에 의한 문제이기 때문에 다기준 의사결정기법(Multi-Criteria Decision Making)으로 분석할 수 있다. 이어서 유럽과 미국에서 널리 활용되는 다기준 의사결정기법인 PROMETHEE와 ANP를 소개하고, 각 기법을 이용하여 상수도관망 위험요소의 우선순위를 선정하여 결과를 비교하였다. 본 연구를 위하여 한국건설기술연구원의 연구원, 성북수도사업소·영등포수도사업소의 실무자, 관련학과 교수, 상수도관련 프로젝트 경험이 있는 전문가를 포함하여 총 10명을 대상으로 조사한 설문결과를 활용하였다.

3.1 PROMETHEE를 활용한 위험요소 평가

Fig. 1에서 제시한 PROMETHEE의 수행절차에 따라 상수도관망의 이상징후 판정에 영향을 미치는 위험요소의 우선순위를 선정하는 구체적인 과정은 다음과 같다.

3.1.1 선호함수 선정 및 파라미터 설정

각 평가기준에 부합하는 선호함수를 선정하고 선호함수에서 요구하는 파라미터를 설정한다. 선호함수와 해당 파라미터는 Fig. 4와 같이 6가지로 정의된다.

의사결정자의 선호판단행위는 PROMETHEE에서 제시하는 6가지 선호함수로 대부분 현실문제에서의 선호성향을 나타낼 수 있다(Brans and Vincke, 1985). 예를 들면, Fig. 4의 선호함수 중에서 관부식은 관의 재질이 물리·화학적 방법에 의해 침식되는 것으로서 위험요소의 증가량에 따라 관의 부식방지처리에 의해 안정적이다가 특정 시점부터 부식이 완만히 진행되기 때문에

Table 1. Anomaly and Cause of Criteria

Criteria	Anomaly	Cause
Corrosion	Occurrence of Leakage, Decrease of Carrying Capacity, Occurrence of Rust Stain	Oxidation of Water, Low pH, Excess Residual Chlorine after Chlorination
Burst	Increase of Leakage, Decrease of Water Pressure	Anomaly Water Pressure, Excess Load, Ice Formation in Winter
Water Pollution	Occurrence of Stink, Occurrence of Chromaticity, Mixture of Alien Substance	Occurrence of Corrosion, Occurrence of Scale, Occurrence of Cross Connection

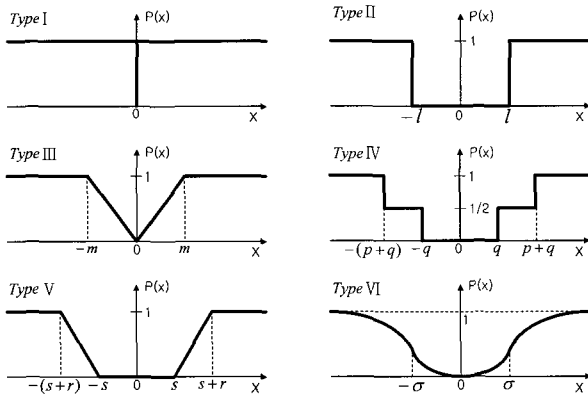


Fig. 4. Type of Preference Functions in PROMETHEE

Type V로 선정하고, 관파열은 일정강도까지는 안정적이다가 관의 강도를 초과하는 위험요소의 증가에 따라 1차파열과 2차파열이 진행되므로 Type IV를 선택하였다. 관내수질오염은 관내로 오염원이 침투하여 발생하는 것으로서 위험요소의 증가에 따라 처음에는 완만하다가 특정 시점에서 급격히 진행되므로 σ 를 변곡파라미터로 하는 가우시안(Gaussian) 분포인 Type VI가 적합하다고 판단된다. Type VI의 함수식은 Eq. (2)와 같다.

$$P(x) = 1 - e^{-x^2/2\sigma^2}, \quad \forall x \quad (2)$$

선호함수 선정 및 파라미터 설정은 전문가들이 관부식, 관파열, 관내수질오염을 유발하는 물리/화학적 원인과 근거를 바탕으로 각 평가항목들을 쌍대비교하기 때문에 Table 2와 같이 문제를 구성할 수 있다. 이 때 선호함수별 파라미터를 의사결정자가 주관적으로 결정하여 대안들간의 우선순위를 평가하고, 만약 대안들간의 순위가 선정되지 않거나 납득하기 어려운 결과 도출시 파라미터의 조정이 필요하다.

Table 2의 평가자료는 관부식, 관파열, 관내수질오염이 상수도관망의 이상징후를 판정함에 있어서 각각의 평가항목들이 얼마나 중요한가를 전문가에게 물어 쌍대

비교(pairwise comparison)를 통해 의견을 정량화하였다. 이 때 일치성 지수(consistency index, CI)를 계산하여 유효 일관성비율(10%이내)에 들지 못하는 2명의 정보는 제외하여 기하평균법으로 종합하였다(Saaty, 1996). 기하평균법은 정량적인 정보 이외에 정성적인 정보에 대한 전문가들의 가중치를 종합하는 방법으로서 우수하다고 평가된다(유수현과 김승권, 2000). 이 문제는 상수도관망에서 모니터링되는 평가항목의 우선순위를 선정하는 것으로서 Table 2의 평가자료가 평가기준별로 상수도관망에서 모니터링되는 평가항목의 중요도를 나타낸다는 점에서 값이 클수록 더욱 위험하고 중요한 요소이므로 최대화(maximization) 문제로 볼 수 있다.

3.1.2 선호지수 계산

$\pi(a, b)$ 는 대안 b 에 대비하여 대안 a 의 선호도를 지수화한 것으로서 선정된 선호함수와, 선호임계치를 기반으로 Eq. (3)을 통해 Table 2의 평가자료를 계산하면 Table 3과 같은 선호지수(preference index, $\pi(a, b)$)를 구할 수 있다.

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

Eq. (3)에서 평가기준은 관부식, 관파열, 관내수질오염 3개이고 $p_h(a, b)$ 는 두 대안 a 와 b 의 평가자료의 차이에 대한 의사결정자의 선호성향을 반영한 함수값을 의미한다.

pH의 유량대비 선호지수는 Table 2에서 pH와 유량의 평가자료 차이가 관부식은 $-0.075(=0.076-0.151)$, 관파열은 $-0.196(=0.032-0.228)$, 관내수질오염은 $0.110(=0.143-0.033)$ 이 된다. 따라서 평가기준별 평가함수와 파라미터에 의한 선호지수는 각각 0, 0, 0.526 ($= 1 - e^{-0.110^2/2(0.09)^2}$)이 되므로 유량대비 pH의 선호지수 합은 0.526이 된다. 유량의 pH대비 선호지수는 Table 2에서 유량과 pH의 평가자료 차이가 관부식은

Table 2. Data to Evaluate the Priority of Risk Factors

Data Item Criteria	Max/ Min	pH	Residual Chlorine	Disch arge	Press ure	Electrical Conductivity	Turb idity	Leak age	Water Temperature	Preference Function	Parameter
Corrosion	Max	0.076	0.131	0.151	0.140	0.085	0.256	0.101	0.059	V	$s=0.075$ $r=0.150$
Burst	Max	0.032	0.044	0.228	0.183	0.043	0.077	0.355	0.038	IV	$q=0.110$ $p=0.200$
Water Pollution	Max	0.143	0.268	0.033	0.034	0.174	0.259	0.044	0.045	VI	$\sigma=0.090$

Table 3. Preference Index to Evaluate the Priority of Risk Factors

a \ b	pH	Residual Chlorine	Discharge	Pressure	Electrical Conductivity	Turbidity	Leakage	Water Temperature
pH	-	0.000	0.526	0.520	0.000	0.000	0.454	0.447
Residual Chlorine	0.619	-	0.967	0.966	0.420	0.005	0.955	0.954
Discharge	0.500	0.500	-	0.000	0.500	0.500	0.000	0.613
Pressure	0.500	0.500	0.000	-	0.500	0.000	0.000	0.540
Electrical Conductivity	0.058	0.000	0.707	0.702	-	0.000	0.648	0.642
Turbidity	1.264	0.333	1.157	1.229	1.000	-	1.476	1.754
Leakage	1.000	1.000	0.507	0.506	1.000	0.500	-	1.000
Water Temperature	0.000	0.000	0.009	0.007	0.000	0.000	0.000	-

0.075(=0.151-0.076), 관과열은 0.196(=0.228-0.032), 관내 수질오염은 -0.110(=0.033-0.143)이 된다. 따라서 평가 기준별 평가함수와 파라미터에 의한 선호지수는 각각 0, 0.5, 0이 되므로 pH대비 유량의 선호지수 합은 0.500가 된다.

3.1.3 선호의 유출량과 유입량 계산

Table 4는 PROMETHEE I 을 적용하기 위해 Table 3의 선호지수를 바탕으로 Eq. (4)와 Eq. (5)를 이용해 선호의 유출량(leaving flow, $\phi^+(a)$)과 유입량(entering flow, $\phi^-(a)$)을 계산한 것이다. 여기서 K 는 대안 a 를 제외한 모든 평가항목들의 집합을 의미한다.

$$\phi^+(a) = \sum_{x \in K} \pi(a, x) \tag{4}$$

$$\phi^-(a) = \sum_{x \in K} \pi(x, a) \tag{5}$$

따라서 $\phi^+(a)$ 는 Table 3에서 행(row)의 합이고 $\phi^-(a)$ 는 열(column)의 합을 나타낸다. 예를 들어, $\phi^+(pH)$ 값은 pH를 제외한 나머지 항목보다 선호 혹은 지배하는(dominating) 정도를 나타내는 수치이고 $\phi^-(pH)$ 값은 pH를 제외한 나머지 항목보다 선호 혹은 지배되는(dominated) 정도를 나타내는 수치이다.

탁도의 선호유출량은 8.214로 잔류염소농도와 블록누수량의 선호유출량 4.885, 5.514보다 크고, 탁도의 선호 유입량은 1.005로 잔류염소농도와 블록누수량의 선호유입량 2.333, 3.532보다 작기 때문에 탁도가 잔류염소농도와 블록누수량 항목보다 상수도관망의 이상징후를 판정하는데 있어서 더 위험하고 중요한 항목이라고 할 수 있다. 하지만 잔류염소농도와 블록누수량의 경우 선호 유출량은 블록누수량이 더 크고(5.514>4.885) 선호유입량은 잔류염소농도가 더 작기(2.333<3.532)때문에 두 평가항목은 비교불가능한(incomparable) 관계로 나타난다. 이는 평가기준간의 상충관계로 인하여 주어진 선호함수와 선호임계치의 범위에서 두 대안의 우선순위를 명확히 판단할 수 없기 때문이다.

3.1.4 PROMETHEE I

Table 4를 바탕으로 순위선호관계를 도시하면 Fig. 5와 같은 부분적인 우선순위(partial preorder)로 나타낼 수 있다.

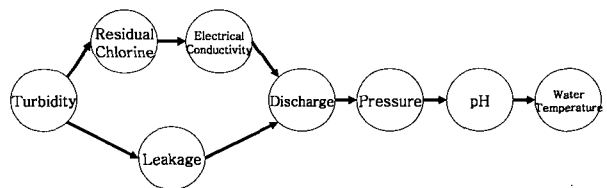


Fig. 5. Partial PROMETHEE I Relation

Table 4. Leaving Flow($\phi^+(a)$) and Entering Flow($\phi^-(a)$)

	pH	Residual Chlorine	Discharge	Pressure	Electrical Conductivity	Turbidity	Leakage	Water Temperature
$\phi^+(a)$	1.947	4.885	2.613	2.040	2.756	8.214	5.514	0.016
$\phi^-(a)$	3.941	2.333	3.874	3.930	3.420	1.005	3.532	5.950

Fig. 5에서 화살표의 시작점에 있는 항목은 관부식, 관과열, 관내수질오염에 대한 이상징후를 판정하는데 있어서 화살표의 종점에 있는 항목보다 더 중요한 항목임을 의미한다. 탁도는 잔류염소농도와 불록누수량 항목보다 위험요소로서 우선순위가 높음을 의미하고 잔류염소농도와 불록누수량은 화살표가 이어지지 않으므로 서로간에 우월함을 판정할 수 없다. 만약 이들간의 우선순위를 선정하고자 한다면 의사결정자가 새로운 평가 기준을 추가하거나 평가함수의 파라미터를 조정해야 한다. 상수도관망을 위협하는 많은 인자들 중 관망에서 모니터링되는 요소들의 이상징후를 판정함에 있어서 중요도를 선정하여 시스템을 운영한다면 상수도관망에 위험 발생시 신속하고 합리적으로 상황을 판단하는데 도움을 줄 것이다.

3.1.5 순흐름량 계산

Table 5는 PROMETHEE II를 적용하기 위해 Table 4의 선호유출량과 유입량을 가지고 Eq. (6)을 이용해 선호의 순흐름량(net flow, $\phi(a)$)을 계산한 것이다.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (6)$$

탁도의 순흐름량은 7.209, 잔류염소농도는 2.552, 불록누수량은 1.981로 각 위험요소의 순흐름량을 비교하여 수치가 높을수록 우월한 항목으로 판단할 수 있다.

3.1.6 PROMETHEE II

Table 5를 바탕으로 순위선호관계를 도시하면 Fig. 6과 같은 전체적인 우선순위(total preorder)로 나타낼 수 있다.

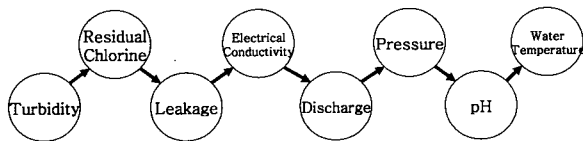


Fig. 6. Total PROMETHEE II Relation

위험요소의 전체적인 우선순위(total preorder)는 탁도, 잔류염소농도, 불록누수량, 전기전도도, 유량, 수압, pH, 수온의 순서임을 알 수 있다. PROMETHEE II에서는 의사결정자의 선호성향으로는 비교불가능 했던 대안

들에 대해서도 우선순위를 선정했다는 점에서 의미가 있다.

3.2 ANP를 활용한 위험요소 평가

Fig. 2에서 제시한 ANP의 수행절차에 따라 상수도 관망의 이상징후 판정에 영향을 미치는 위험요소의 우선순위를 선정하는 구체적인 과정은 다음과 같다.

3.2.1 문제의 군집(cluster)형성

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

3.2.2 문제의 네트워크화

각 군집에 해당하는 요소들간의 외부종속성(outer-dependence)과 내부종속성(inner-dependence) 그리고 군집간의 상호작용(feedback) 관계를 이용하여 Fig. 7과 같이 네트워크화 하였다.

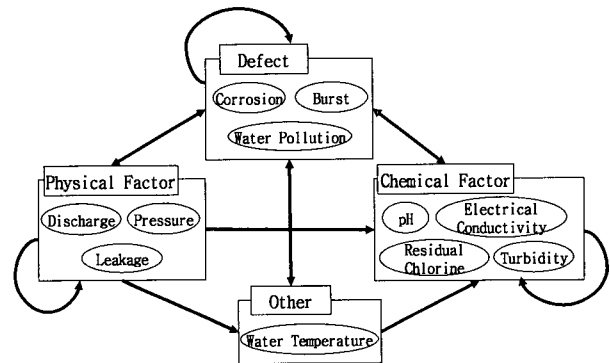


Fig. 7. Feedback Network

AHP 기법에서는 구성요소간에 독립성이 보장되고 요소간에는 단방향으로만 영향을 주어야 하며 반드시 계층구조로 문제를 구성해야 하는 가장 때문에 현실을 왜곡할 수 있다. 하지만 ANP 기법으로 문제를 구성할 경우 Fig. 7과 같이 결합, 물리적 요인, 화학적 요인, 기타 요인을 구성하는 요인들은 자신의 군집 내의 요인 뿐만 아니라 다른 군집의 요인에게도 영향을 주기 때문에 내부종속성과 외부종속성을 가지고 있으며 요인들간

Table 5. Net Flow($\phi(a)$)

	pH	Residual Chlorine	Discharge	Pressure	Electrical Conductivity	Turbidity	Leakage	Water Temperature
$\phi(a)$	-1.994	2.552	-1.260	-1.890	-0.664	7.209	1.981	-5.934

에는 단방향과 양방향으로 영향을 줄 수 있는 인자들도 있으므로 상호작용의 특성을 반영하였다. 예를 들어, 관부식이 되면 관내수질오염에 영향을 줄 수 있고, 누수량이 많아지면 수압에 영향을 줄 것이며, pH 농도에 따라 전기전도도에도 영향을 줄 수 있기 때문에 각 요인간의 상호작용을 감안하여 문제를 구성하였다.

3.2.3 쌍대비교행렬 작성

ANP를 수행하기 위한 쌍대비교는 군집간의 비교인 군집비교(Cluster Comparison)와 요소간의 비교인 노드비교(Node Comparison)로 분류된다. 대행렬(Super-matrix)을 작성하기 위하여 우선 군집비교를 통하여 군집행렬(Cluster Matrix)을 구성한다. 이 때 평가자들의 판단에 대한 논리적 일관성을 검증하기 위하여 Eq. (7)의 일치성 지수(consistency index, CI)를 이용하였으며 유효 일관성비율(10%이내)에 들지 못하는 정보는 제외하였다(Saaty, 1996).

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (7)$$

Eq. (7)에서 λ_{\max} 는 쌍대비교행렬의 최대 고유값을

나타내고 n 은 구성요소의 개수이다.

Table 6의 군집행렬(Cluster Matrix)은 군집간의 쌍대비교행렬을 계산하여 상대적 가중치를 구한 후에 그 값들이 열벡터(column vector)로 입력된 것이다.

Table 7은 노드비교를 통해 계산한 Unweighted Supermatrix를 나타낸다. Unweighted Supermatrix는 요소들간의 쌍대비교행렬을 계산하여 상대적 가중치를 구한 후에 그 값들이 열벡터(column vector)로 입력된 것이다.

3.2.4 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 한다. 따라서 Unweighted Supermatrix는 열의 합이 1이 아니기 때문에 Unweighted Supermatrix에 군집행렬(Cluster Matrix)을 곱하여 열의 합을 1로 만들어 준다. 이런 과정을 거쳐 새로 형성된 행렬을 Weighted Supermatrix라고 한다. Table 8은 Table 6과 Table 7을 이용하여 구한 Weighted Supermatrix이다.

Table 6. 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

Table 7. 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. Weighted 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	0.28803	0.12053	0.06673	0.00000	0.00000	0.08668	0.81700	0.47101	0.67700	0.37515
	Corrosion	0.30232	0.00000	0.22483	0.00000	0.00000	0.00000	0.08131	0.18300	0.52899	0.18300	0.00000
	Burst	0.15367	0.05733	0.00000	0.29204	0.31438	0.31438	0.00000	0.00000	0.00000	0.14000	0.16386
Physical Factor	Leakage	0.00000	0.33661	0.15013	0.00000	0.44705	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Pressure	0.00000	0.00000	0.06968	0.17806	0.00000	0.44705	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Discharge	0.00000	0.00000	0.11680	0.33213	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Chemical Factor	pH	0.04834	0.08810	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07745
	Residual Chlorine	0.15048	0.00000	0.00000	0.00000	0.23857	0.23857	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.29826
	Electrical Conductivity	0.07314	0.05057	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.83202	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Turbidity	0.14796	0.17937	0.31803	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.08529
Other	Water Temperature	0.12410	0.00000	0.00000	0.13104	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

3.2.5 대행렬 수렴

Weighted Supermatrix가 Irreducible, Primitive와 같은 극한특성(limiting properties)에 따라 Saaty가 제시한 6가지 수렴식을 이용하여 수렴시킨 행렬을 Limited Supermatrix라고 한다(Saaty, 1996). Fig. 7의 피드백 네트워크 구조가 강연결(Strongly Connected)이고 주기(Cycle)의 최대공약수가 1이기 때문에 Irreducible하면서 Primitive하다. 11차원의 Weighted Supermatrix(W)가 $(I+W)^{10} > 0$ 을 만족하며, 양수 m 에 대하여

$W^m > 0$ 이고 n 차원의 W 대하여 $m \leq n^2 - 2n + 2$ 를 만족하기 때문에 수학적으로도 증명이 된다. 따라서 Saaty가 제시한 6가지 극한계산모델 중에서 Case A를 이용하여 Weighted Supermatrix를 극한으로 수렴시키면 Limited Supermatrix를 구할 수 있다. Table 8의 Weighted Supermatrix를 16번 제곱하면 Table 9와 같이 소수 5자리까지 동일하게 수렴한다. 더 자세한 논의는 Saaty(1996)의 참고문헌을 참조하면 된다.

Table 9. Limited 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	0.23768	0.23768	0.23768	0.23768	0.23768	0.23768	0.23768	0.23768	0.23768	0.23768	0.23768
	Corrosion	0.16026	0.16026	0.16026	0.16026	0.16026	0.16026	0.16026	0.16026	0.16026	0.16026	0.16026
	Burst	0.12289	0.12289	0.12289	0.12289	0.12289	0.12289	0.12289	0.12289	0.12289	0.12289	0.12289
Physical Factor	Leakage	0.09261	0.09261	0.09261	0.09261	0.09261	0.09261	0.09261	0.09261	0.09261	0.09261	0.09261
	Pressure	0.04522	0.04522	0.04522	0.04522	0.04522	0.04522	0.04522	0.04522	0.04522	0.04522	0.04522
	Discharge	0.04511	0.04511	0.04511	0.04511	0.04511	0.04511	0.04511	0.04511	0.04511	0.04511	0.04511
Chemical Factor	pH	0.02883	0.02883	0.02883	0.02883	0.02883	0.02883	0.02883	0.02883	0.02883	0.02883	0.02883
	Residual Chlorine	0.06974	0.06974	0.06974	0.06974	0.06974	0.06974	0.06974	0.06974	0.06974	0.06974	0.06974
	Electrical Conductivity	0.04948	0.04948	0.04948	0.04948	0.04948	0.04948	0.04948	0.04948	0.04948	0.04948	0.04948
	Turbidity	0.10655	0.10655	0.10655	0.10655	0.10655	0.10655	0.10655	0.10655	0.10655	0.10655	0.10655
Other	Water Temperature	0.04163	0.04163	0.04163	0.04163	0.04163	0.04163	0.04163	0.04163	0.04163	0.04163	0.04163

Table 10. 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

3.2.6 요소간 상대적 중요도 산출

Table 9의 결과를 바탕으로 상수도관망에서 모니터링되는 위험요소들간의 우선순위를 구하기 위하여 물리적, 화학적, 기타 요인에 해당하는 요소들만 선택하여 정규화한 후 새로운 중요도를 구한다.

3.3 PROMETHEE와 ANP의 결과 비교 분석

PROMETHEE와 ANP를 이용하여 상수도관망에서 모니터링되는 위험요소들의 우선순위는 Fig. 8과 같다.

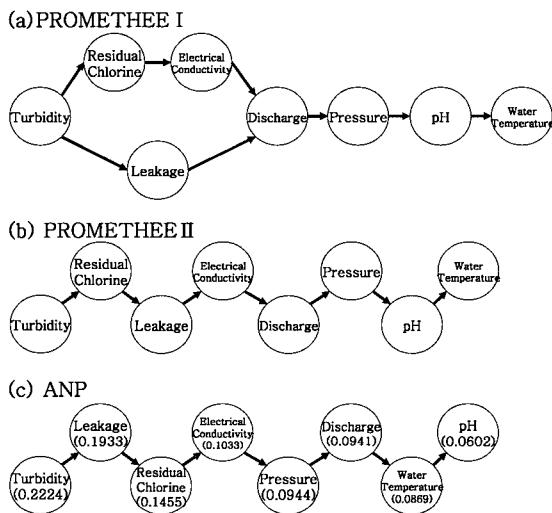


Fig. 8. Results of each method

PROMETHEE I, PROMETHEE II와 ANP 결과에서 모두 탁도를 가장 우선순위가 높은 항목으로 선정되었으며 위험요소간 우선순위는 전체적으로 유사하게 나타남을 알 수 있다. PROMETHEE I에서는 잔류염소농도와 블록누수량, 전기전도도들 간의 우선순위를 비교 불가능한 것으로 평가하였다. 이것은 PROMETHEE 기법의 특성상 의사결정자의 선호성향을 반영한 선호합수와 선호임계치를 기준으로 판단이 애매모호한 대안에 대해서 비교불가능한 대안으로 분류해 주는 기능이 있기 때문이고, ANP 기법에서는 비교불가능한 대안으로 분류해 주는 기능은 없지만 외부중속성, 내부중속성, 상호작용을 이용하여 모든 Node를 네트워크 구조로 구성하여 유기적으로 구성요소들간의 중요도를 판단해 준다. ANP 최종결과의 상대적 가중치는 상수도관망의 이상징후를 판정하기 위하여 모니터링되는 항목들간의 중요도가 탁도의 경우에는 블록누수량보다 약 1.15배, 잔류염소농도

보다 1.52배, 전기전도도보다 2.15배, 수압보다 2.35배, 수량보다 2.36배, 수온보다 2.55배, pH보다 3.69배 중요함을 의미한다. PROMETHEE II와 ANP 기법의 결과에서는 전체적으로는 유사한 결과를 보이나 잔류염소농도와 블록누수량, 유량과 수압, pH와 수온의 선호관계가 다르게 나타난다. PROMETHEE 기법에서는 각각의 평가기준별 특성에 맞는 선호합수를 이용하여 의사결정자의 선호성향을 반영하였고 평가기준별로 동일한 가중치를 적용하였으며 기준간의 종속성을 고려하지 못하는 특성 때문에 ANP 결과와 약간의 차이를 나타냄을 알 수 있다. 일반적으로 두 분석기법 특성의 차이로 인하여 결과에 차이가 발생하는 것은 불가피할 것으로 생각된다. 그러나 극심한 차이가 발생할 경우에는 모형 수립의 과정으로 되돌아가 모형 적용상의 문제는 없는가 재점검을 하여야 할 것이다. 결국 어느 정도의 차이는 존재할 것이므로 그 차이는 최종 의사결정자의 경험과 판단에 따라서 조정하거나 결정되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 상수도관망의 오염예방 및 위험관리 통합시스템의 개발을 위하여 상수도관망의 통합의사결정시스템의 기본구조를 제시하였고 PROMETHEE와 ANP 기법을 이용하여 수많은 위험요소 중에서 관망으로부터 모니터링되는 항목들을 대상으로 우선순위를 평가하였다. 모니터링되는 항목간에 우선순위를 두고 상수도관망의 위험도와 취약성을 분석하면 평상시와 비교하여 이상치의 반응에 대해서 사고가능성이나 위험성 여부를 신속하고 합리적으로 판단할 수 있을 것이다. 상수도관망의 효율적인 관리를 위해서는 실시간으로 모니터링되는 데이터를 분석하여 신속히 사고여부에 따라 피해를 최소화할 수 있는 사고대응시스템이 구축되어야 한다. 이 때 본 연구의 결과가 사고대응 제어알고리즘 설계시 각 데이터 항목의 우선순위를 선정하고 위험상황 의사결정시스템을 설계하여 사전사고를 예방하거나 최소화시키기 위한 기초자료가 될 것이다. 그리고 동시다발적으로 위험요소가 모니터링될 경우 효과적인 대응책을 마련하는데도 활용이 가능하고 통합의사결정시스템을 구축할 경우 통합시스템에서 상수도관망의 위험성과 취약성을 진단하기 위한 의사결정매개변수 모듈 구성에도 적용될 수 있다. 따라서 통합시스템의 조기경보 시스템과 모니터링시스템을 연계하여 모니터링 정보를

위험도에 따라 선별적으로 위기상황 대처방안시스템에 전송함으로써 합리적인 의사결정방안을 제시할 수 있다. PROMETHEE와 ANP 기법은 본 논문에서 제시한 것보다 더 복잡한 구조를 가진 문제도 분석할 수 있으므로 우선순위에 대한 전체적인 그림을 그리기 어려운 많은 분야에도 적용될 수 있을 것이다. 향후 상수도 분야 외에도 환경 문제, 교통 문제, 지역 및 도시 계획 문제, 항만 및 해양 관리 문제, 댐 입지 선정 및 운영 등 다양한 분야에서 발생할 수 있는 다기준 의사결정문제를 분석해야 할 때 문제의 특성에 따라 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구의 연구과제(과제번호 : R01-2004-000-10362-0)에 의해 수행되었으며 한국건설기술연구원, 성북수도사업소, 영등포수도사업소 관계자와 설문에 응해주신 모든 분들께 감사드립니다.

참고 문헌

김용석 (2002). 상수관로의 노후도 예측에 근거한 최적 개량 모형 개발. 박사학위논문, 고려대학교, pp. 24-33.

김중훈, 김종우, 이현동, 김성한 (1996). "기존 상수도 노후관망의 개량 및 관리기법의 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제3호, pp. 197-205.

박석영 (2005). ELECTRE IS의 구현시 일치판정 기준 비율 도출과 핵심대안 선정을 위한 혼합정수계획 모형. 석사학위논문, 고려대학교, pp. 1-3.

박태선 (2002). "계층분석법을 이용한 하천의 중요도 평가기법." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제6호, pp. 685-692.

시설안전기술공단 (2001). 수도시설유지관리매뉴얼. 건설교통부, pp. 233-234.

심성보, 김병찬, 이상일 (2004). "AHP를 이용한 강변여과수 개발지역 선정." **2004년 한국수자원학회 학술대회지**, 한국수자원학회, pp. 161.

유수현, 김승권 (2000). "지능형 빌딩 시스템의 등급 결정을 위한 ANP 모형." **대한산업공학회지**, 대한산업공학회, 제13권, 제2호, pp. 234-245.

윤재홍, 최두용, 우형민, 김주환 (2000). "상수도 배수관망의 진단 및 관리 시스템." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, pp. 153-156.

이정호, 김중훈, 김형수, 김용석, 조덕준 (2004). "최적 도시유출시스템의 개발: 도시유출시스템에서의 AHP

를 고려한 불명수량 산정에 대한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 195-206.

이현동, 주충남, 곽필재, 황재운, 전해복 (2004). "SCADA 시스템을 이용한 상수도관망의 누수관리에 대한 연구." **한국물환경학회/대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집**, 한국물환경학회/대한상하수도학회, pp. 569-572.

이현재, 심명필 (2002). "계층분석과정(AHP)에 의한 가목시 용수배분 우선순위 의사결정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제6호, pp. 703-714.

한국건설기술연구원 (2004). **상하수도관망의 최적 관리시스템 개발**. 환경부, pp. 20, 101.

한국개발연구원 (2005). **수자원부문사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판)**.

Brans, J.P. and Vincke, P.H. (1985). "A Preference Ranking Organisation Method." *Management Science*, Vol. 2, No. 6, pp. 647-656.

Keeney, R. and Raiffa, H. (1976). *Decisions with Multiple Objective: Preferences and Value Tradeoffs*, John Wiley & Sons, New York.

Meade, L.M. and Sarkis, Joseph (1998). "Strategic Analysis of Logistics and Supply Chain Management Systems using the Analytical Network Process." *Transpn Res-E(Logistics and Transpn Rev.)*, Vol. 34, No. 3, pp. 201-215.

Roy, B. (1968). "Classement et choix en presence de points de vue multiples(la method ELECTRE)." *Revue Informatique et Resherche Operationnelle*, Vol. 8, pp. 57-75.

Saaty, T. L. (1996). *Decision making with dependence and feedback the analytic network process*, RWS Publisher, USA, pp. 118-127.

Vargas, L. G. (1990). "An overview of the analytic hierarchy process & its applications." *European Journal of Operational Research*, Vol. 48, pp. 2-8.

Von Neumann, J. and Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Econometric Behavior*, Princeton University Press, New Jersey.

Zahedi, F. (1986). "The Analytic Hierarchy Process: A Survey of the Method and its Applications." *INTERFACES*, Vol. 16, No. 4, pp. 96-108.

(논문번호:05-121/접수:2005.09.01/심사완료:2005.11.03)