

# 유효유량 개념을 도입한 상수관망 Subsystem 별 중요도 산정

## Evaluation of Subsystem Importance Index considering Effective Supply in Water Distribution Systems

서민열\* · 유도근\*\* · 김중훈\*\*\* · 전환돈\*\*\*\* · 정건희\*\*\*\*\*

Seo, Min yeol · Yoo, Do Guen · Kim, Joong Hoon · Jun, Hwan Don · Chung, Gunhui

### Abstract

The main objective of water distribution system is to supply enough water to users with proper pressure. Hydraulic analysis of water distribution system can be divided into Demand Driven Analysis (DDA) and Pressure Driven Analysis (PDA). Demand-driven analysis can give unrealistic results such as negative pressures in nodes due to the assumption that nodal demands are always satisfied. Pressure-driven analysis which is often used as an alternative requires a Head-Outflow Relationship (HOR) to estimate the amount of possible water supply at a certain level of pressure. However, the lack of data causes difficulty to develop the relationship. In this study, effective supply, which is the possible amount of supply while meeting the pressure requirement in nodes, is proposed to estimate the serviceability and user's convenience of the network. The effective supply is used to calculate Subsystem Importance Index (SII) which indicates the effect of isolating a subsystem on the entire network. Harmony Search, a stochastic search algorithm, is linked with EPANET to maximize the effective supply. The proposed approach is applied in example networks to evaluate the capability of the network when a subsystem is isolated, which can also be utilized to prioritize the rehabilitation order or evaluate reliability of the network.

**Key words** : Effective Supply, Water Distribution System, Serviceability, Subsystem Importance Index (SII), Harmony Search

### 요 지

상수관망의 용수는 수용가가 사용하기에 불편함이 없는 적절한 유량과 압력으로 사용성이 충분히 만족된 상태에서 공급되어야 한다. 상수도 시스템의 수리학적 해석 방법으로 사용되는 Demand Driven Analysis (DDA) 방법은 관망의 수리학적 상태가 변화했을 때 부압이 발생하는 등 비현실적인 결과를 발생시킬 수 있다. Pressure Driven Analysis (PDA) 방법은 비정상상태에서의 압력 및 공급량의 변화를 알기 위하여, 절점수두-용수공급량 관계 (Head-Outflow Relationship, HOR)를 이용하는데, 이는 실측자료의 부족으로 인하여 대부분의 연구에서는 HOR이 가정되어 사용되었다. 본 연구에서는 PDA 분석에서 단점을 가진 HOR 대신, 절점에서 실제 사용성을 만족시키면서 공급이 가능한 용수량인 유효유량을 제안하였다. 그리고 Subsystem이 격리되었을 때 유효유량의 변화를 산정함으로써 격리된 부분의 관망에 대한 영향을 평가하여 이를 Subsystem 중요도 지수 (Subsystem Importance Index, SII)로 정의하였다. 이를 위해 최적화 기법 중 하나인 Harmony Search와 상수관망 해석 프로그램인 EPANET을 결합하여 모형을 구축하였다. 제안된 모형을 대규모 상수관망에 적용하였으며, 본 모형은 상수관망의 유지, 보수 시에 관거 혹은 밸브 등의 처리 우선순위 산정 및 상수관망 신뢰도 평가로 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한 유효유량 산정을 통하여 상수관망이 실제로 사용함에 불편함이 없을 정도로 용수공급이 얼마나 가능한가를 종전에 비하여 보다 정량적으로 산정 가능하다.

**핵심용어** : 유효유량, 상수관망, Subsystem, 사용성, Subsystem 중요도 지수, Harmony Search

### 1. 서 론

상수도의 기본법인 「수도법」은 그 첫 머리에 “공중위생의 향상과 생활환경의 개선에 이바지함을 목적으로 한다”고

명시하고 있으며, 이러한 목적을 달성하기 위하여 ‘깨끗하고 저렴한 물을 풍부하게 이용할 수 있도록 공급하는 것’이 상수도의 기본적인 사명이다. 상수도시설기준(환경부, 2004)에 따르면 상수도 시설을 계획 할 때에는 여러 가지 고려해야

\* (주) 건화 수도사업본부 사원 (E-mail: amourbleu@gmail.com)

\*\* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사과정

\*\*\* 정희원 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수(교신저자)

\*\*\*\* 정희원 · 서울산업대학교 건설공학부 조교수

\*\*\*\*\* 고려대학교 방재과학기술연구센터 연구교수

할 사항이 있는데, 그 중 “평상시의 급수는 물론 지진, 가뭄, 홍수 등의 재해 시 및 사고 등의 비상시에도 급수의 안정성을 확보해야 한다. 이를 위해서는 상수도 시설 전체로서 균형을 유지하는 여유시설을 확보하고 시스템으로서 대응력을 향상시켜야 한다.”고 하였다. 이에 따라 최근 설계 및 시공되는 관망들은 비교적 위기 대처능력이 좋다고 볼 수 있다. 그러나 기존의 관망을 구성하는 관거들은 설치된 지 10년 이상된 것들이 많아 이들에 대한 유지 보수 필요성이 증대되고 있고, 이러한 작업을 수행하기 위해서는 관망의 일부, Subsystem을 격리시킬 필요가 있다.

Subsystem이란 관망의 구성요소들로 이루어진 부분 집합과 같은 것으로, 이는 관거 하나로 이루어질 수도 있고, 여러 개의 관거와 절점 및 기타 관망 요소들이 포함 된 집합일 수도 있다. 이러한 Subsystem은 격리되었을 시에 관망의 수리학적 상태를 변화시키며, 각 Subsystem에 의한 영향 정도는 그 Subsystem의 구성 요소 및 위치 등에 따라서 다르게 나타날 것이다. 과거의 관망 신뢰도 연구에서 격리영역은 주로 개별 관을 기준으로 하는 경우가 많았으나, Walski(1993)는 개별 관거에 누수 혹은 파괴가 발생했을 시 해당 관거와 제수밸브로 함께 차단되는 다른 관거 및 절점들의 집합인 Segment라는 개념을 도입하였고, Jun(2005)은 상수관 파괴로 인해 수원으로부터 비의도적으로 고립되는 지역인 Unintended Isolation이라는 개념을 도입하여, 실제 시스템에서 밸브로 인해 차단되는 영역을 제대로 반영할 수 있는 기반을 마련하였다.

한편 Subsystem의 격리로 인해 발생하는 수리학적 상태의 변화란 수원으로부터 수요절점으로 용수가 공급되는 경로가 변경됨에 따라 발생하는 수도 손실의 증가, 그리고 이에 따른 절점 압력의 변화 등 다양한 상황으로 설명될 수 있다. 이러한 수리학적 상태의 변화는, 앞서 언급했던 상수관망의 목적, 즉 ‘깨끗하고 저렴한 물을 풍부하게 이용할 수 있도록 공급하는 것’을 달성하지 못하게 할 수 있다. 따라서 관망의 부분적 격리로 인한 수리학적 상태 변화를 미리 해석해봄으로써 격리된 해당 영역이 관망에 미치는 영향의 정도를 산정해 볼 필요가 있다.

상수도 시스템의 수리학적 해석 방법에는 크게 두 가지가 있는데, 하나는 주로 정상상태의 시스템 해석에 사용되는 Demand Driven Analysis (DDA)이고, 다른 하나는 비정상상태 시스템 해석에 사용되는 Pressure Driven Analysis (PDA) 이다. 기존에 수리해석 시 사용되던 DDA는 각 수요지점의 수요량은 항상 100% 만족시킨다는 가정 하에 연속방정식과 순환방정식을 이용하여 지점의 압력수두를 계산하는 기법으로, 이 방법은 시스템이 정상상태일 경우에는 해석에 무리가 없다. 하지만 비정상상태, 즉 어떠한 원인으로 관망의 수리학적 상태가 변화했을 때에는 DDA로 해석을 할 경우 부압이 발생하는 등 비현실적인 결과를 발생시킬 가능성이 있다 (Gupta and Bhawe, 1996 ; Tanyimboh and Tabesh, 1997 ; Mays, 2003). 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 새로 연구된 기법이 PDA 이다. PDA는 절점의 압력 및 공급량을 모두 미지수로 하여 수치계산을 통해 비정상상태에서의

압력 및 공급량의 변화를 알아보는 분석 기법이다. 하지만 실질적인 수치해석상 문제로 인해, 절점수두-용수공급량 관계 (Head-Outflow Relationship, HOR)를 이용하여 공급량을 압력의 함수로 표현하는 방식이 연구되어 왔다.

Bhave(1981)가 PDA의 원형인 Nodal Flow Analysis를 제안한 이래 많은 연구자들이 PDA를 연구해 왔으나, 그 기본 가정은 대부분 HOR 식을 사용하는 것이었다. HOR은 각 절점별로 압력에 따른 공급유량을 나타내는 식으로, 이는 절점별로 혹은 시스템별로 다를 것이다. 따라서 이를 정립하기 위해서는 해당 관망의 각 절점별 공급량과 압력에 대한 방대한 실측자료가 필요하나 현실적으로 이러한 자료를 갖춘 곳은 거의 없다(Mays, 2003). 이런 까닭에 현재까지 진행된 PDA 연구에서는 HOR을 전부 가정하여 해석을 수행하였다. 기존 연구자들이 제안한 HOR 정립방법은 여러 가지가 있으나 어느 것이 더 나은지는 판단이 불가능하다. 따라서 관망 해석에 PDA 기법을 사용한다면, 어떤 HOR을 사용할 것인지 전적으로 해석하는 사람의 결정에 달려있으며, HOR에 따라 관망의 수리학적 상태가 크게 바뀔 수도 있음을 생각한다면 해석 결과에 불확실성이 남아있음을 무시할 수 없을 것이다. 또한 PDA의 해석 결과는 실제 절점에서 발생 가능한 압력과 공급량을 나타내 주지만, 계산된 압력이 낮아 사용성을 만족시키지 못할 정도가 된다면, 공급이 되더라도 실제로는 사용하기 너무 불편하여 공급이 되지 않는 것과 마찬가지로 인 상태가 될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 단점이 있는 PDA 해석 대신, 절점에서 실제 사용성을 만족시키면서 공급이 가능한 용수량인 유효유량을 제안하고 Subsystem이 격리되었을 때 유효유량의 변화를 산정함으로써 격리된 부분의 관망에 대한 영향을 평가하였다. 이를 위해 메타휴리스틱 알고리즘 기법중 하나인 Harmony Search와 정상상태 상수관망 해석 프로그램인 EPANET을 접목하여 모형을 개발하고, 이를 통해 각 Subsystem이 격리 되었을 때의 수요량 대비 공급 유량 부족분을 산정하여 해당 Subsystem이 관망에 미치는 영향 정도를 파악하고 이를 Subsystem 중요도 지수 (Subsystem Importance Index)로 나타내었다.

## 2. Subsystem 격리에 따른 상수관망 영향성 평가

### 2.1 유효유량 (Effective Supply)

유효유량 (Effective Supply)은 각 수요절점에서 최소한의 사용성을 확보 가능한 기준압력 (Minimum Pressure Threshold)을 만족시키는, 즉 기준 압력 이상의 압력을 갖는 상태에서의 최대 공급량을 뜻한다. 수요절점의 압력이 이 기준보다 낮아진다면, 유량이 공급되더라도 실제 사용하기에 불편함을 느끼게 됨을 뜻하는 것이다. 관망의 용수 공급 능력을 산정할 때 각 절점의 공급유량과 압력을 동시에 고려하는 것이 실제 상황에 가장 근접한 분석이 될 것이라는 점은 자명하다. 만일 공급량은 많으나 압력이 너무 낮다면 이는 실제로 공급이 불가능한 상황이거나, 아니면 공급이 되더라도 실제 용수 사용처에서 사용하기에 불편함이 따를 수 있을 것이다. 기존의

PDA 해석에서는 HOR을 이용하여 절점 공급량을 압력에 대한 함수로 표현한다. 그런데 이러한 HOR들은 주로 유량이 공급되도록 하는 최소 압력 기준은 갖고 있으나, 사용성을 고려한 압력 기준은 갖고 있지 않다. 따라서 공급이 안 될 정도로 압력이 저하된 절점에서 공급량을 낮춰 압력을 증가 시킴에 따라 수요량을 100% 만족시키지 못하는 상황을 모의 할 수는 있으나, 대신 절점 압력이 충분히 높아지지 못해 사용성을 저해하는 결과가 나올 수도 있다. 이러한 계산 결과는 공급 유량은 있으나 실질적으로 사용이 힘들다는 점에서 공급이 되지 않는 것과 크게 다르지 않다. 그러므로 직접적인 수리학적 해석에 의존하여 Subsystem의 격리에 의한 영향을 평가하기 보다는 적정 압력을 유지하며 공급 가능한 유량의 변동으로 Subsystem 격리에 의한 영향을 평가하는 것이 상수관망 운영자나 수요자 입장에서 더욱 현실적인 영향에 대한 평가가 될 것이다.

## 2.2 Subsystem 중요도 지수 (SII)

각 Subsystem 차단시의 유효유량을 산정한 뒤, 관망의 기본 수요량과 비교하여 공급 부족량이 큰 Subsystem이 해당 관망에서 차단되었을 때 시스템 전체에 더 큰 영향을 미친다고 할 수 있을 것이다. 따라서 수요량 대비 Subsystem 차단시의 공급 감소량의 비율을 Subsystem 중요도지수 (Subsystem Importance Index, SII)로 정의하였다. 이 지수가 클수록 해당 Subsystem는 관망에 끼치는 영향이 큰 곳이라고 볼 수 있다. 다음 식(1)은 SII 산정 방법을 나타낸다.

$$SII_k = \frac{Q_{normal} - Q_k}{Q_{normal}} \quad (1)$$

여기서,

- $SII_k$  = Subsystem의 Subsystem 중요도 지수 (SII)
- $Q_{normal}$  = 정상상태하의 총 기본 수요량
- $Q_k$  = Subsystem  $k$ 가 격리되었을 때의 총 유효유량 (Effective Supply)

위 식에 따르면  $k$  Subsystem이 차단된 상태에서의 관망 공급량이 0 일 경우  $SII_k$ 는 1이 되고, 공급량이 정상상태 공급량과 같을 경우  $SII_k$ 는 0이 된다. 이렇게 SII는 모두 0에서 1 사이의 값을 갖게 되고, 이것은 각 Subsystem이 관망에 미치는 영향을 서로 비교하는데 사용될 하나의 기준이 될 수 있을 것이다.

## 2.3 Harmony Search

Harmony Search는 메타휴리스틱 알고리즘의 하나로 기존의 최적화기법에 비해 최적해 탐색에 있어 우수한 결과를 나타내는 것을 알려져 있으며, 최근 국내·외에서 연구가 활발히 진행 중이다.

Geem et al.(2001, 2002)은 화음 (Harmony)이라는 인공적인 현상에서 영감을 얻어 탐색하고자 하는 각 매개변수를 악기, 매개변수의 값을 악기의 음조로 간주하고 가장 잘 어울리는 악기 소리의 조합, 즉 최적화음을 탐색하는 과정을 통

해 최적해를 탐색하는 새로운 개념의 최적화 기법인 화음탐색법을 제안하였다. 화음탐색법은 3가지 기본 인자인 HM (Harmony Memory), HMCR (Harmony Memory Considering Rate) 및 PAR (Pitch Adjusting Rate)를 기본으로 작동된다. 여기서 HM이란 연습과정을 통해 경험한 화음 중에서 좋다고 생각되는 화음들을 모은 집합을 의미하며, HMCR이란 새로운 화음을 만들 때, HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어 낼 것인가 아니면 전체 정의영역에서 무작위로 만들어 낼 것인가 하는 확률이다. 마지막으로 PAR는 좋은 화음을 만들기 위해 각 악기의 음조 (Pitch)를 조절하는 것과 같이 우수한 해를 찾기 위해 기존 해와 이웃하는 값을 고려함으로써 HS의 성능을 향상시키는 인자이다.

## 3. 모형의 구축

### 3.1 Subsystem 산정

기존의 상수 관망 신뢰도 산정 연구에서 주로 사용되었던 격리 영역 기준은 개별 관이 차단되는 경우, 혹은 개별 관의 파괴 확률을 고려하여 산정한 minimum-cutset이 차단되는 경우였다. 그러나 minimum-cutset 방법도 관의 파괴 조합을 고려하기는 하지만, 두 개 이상의 관이 동시에 파괴 될 확률은 극히 낮기 때문에 결국은 관 하나의 파괴 상황만을 고려하는 것과 크게 차이가 나지 않는다. 이렇게 격리영역을 관 하나로 제한하기 위해서는 개별 관의 양단에 모두 제수 밸브가 설치되어 있다는 가정이 필요하나, 실제로는 예산이나 설치 위치 등의 문제로 인하여 모든 관의 양 끝에 제수 밸브가 설치되어 있지는 않다. 따라서 실제 관망과 근접한 비정상상태 관망 해석을 실시하기 위해서는 개별 관거 보다는 현실적인 격리영역을 산정하는 기준이 먼저 정립되어야 한다.

### 3.2 실제 관망 상태를 반영한 Subsystem 산정 기준

#### 3.2.1 Segment

실제 관망에서는 모든 설치 가능 지점에 밸브가 설치되어 있지 않고, 가능한 예산의 범위 안에서 설치 가능한 개수만큼의 밸브들이 주요 지점들에 설치되어 있다. 따라서 밸브들로 차단되는 구역은 관 하나로 국한되지 않고, 두 개 이상의 관과 그 사이의 수요 절점들이 포함되는 경우가 많다. Walski(1993)는 이러한 구역을 관망의 부분적 격리 (Segment)로 정의하였다. 그림 1은 Segment의 예를 보여주고 있다. 만일 관거 P4나 P5에서 누수 혹은 관의 파괴 등이 발생하면 절점 N1, N3, N4에 있는 제수밸브를 차단하고 조치를 취해야 한다. 이 때 관거 P4, P5, 그리고 절점 N3은 함께 차단되는 지역이므로 하나의 Segment로 정의된다. 물론 앞서 말했듯이 모든 밸브가 항상 작동한다는 보장은 없다. 따라서 이런 Segment를 고려할 때에도 밸브의 오작동으로 인해 두 개 이상의 Segment를 동시에 차단해야 할 수도 있을 것이다. 하지만 이 연구에서는 밸브의 오작동 확률은 고려하지 않고 필요할 때에 모든 밸브는 100% 동작한다고 가정하였다.

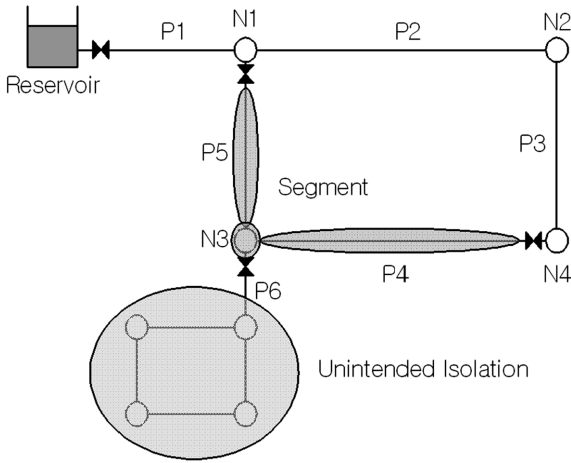


그림 1. Segment와 Unintended Isolation.

### 3.2.2 비의도적 유역고립 (Unintended Isolation)

Jun(2005)은 관거나 Segment의 차단으로 인하여, 수원(Source)과 연결되는 유일한 경로가 비의도적으로 단절되어 고립되는 지역을 비의도적 구역고립(Unintended Isolation)이라고 정의하였다. 이 지역은 직접적인 파괴는 발생하지 않았지만, 다른 구역에 파괴가 일어남으로써 간접적으로 용수의 공급이 차단되는 것이다. 비의도적 구역고립의 구성요소는 절점 하나가 될 수도 있고, 절점 하나와 관거 하나, 혹은 그 이상의 요소들의 집합이 될 수도 있다. 그림 1을 보면 위에서 설명한 Segment의 차단으로 인하여 관거 P6로 연결된 하단 지역이 수원으로부터 차단되어 비의도적 구역고립이 발생한 모습을 볼 수 있다.

### 3.2.3 최적화 기법을 기반으로 한 유효유량 산정모형

본 연구에서 제안하는 접근방법은, 각 절점에서 용수를 불편함 없이 사용할 수 있도록 해주는 기준 압력을 만족시킬 때 최대로 공급 가능한 유량들의 조합을 찾아내되, 이를 최적화 기법을 통해 탐색하는 것이다. PDA는 사용하는 HOR에 따라 다르겠지만, 대체로 용수를 공급할 수 있는 최소 압력과, 수요량을 모두 만족시키는 적정압력의 두 가지 기준 압력이 있고, 절점 압력이 이 두 기준 사이에 있을 때 압력에 따른 유량을 관계 곡선식에 따라 계산하는 것이다. 따라서 경우에 따라서는 유량이 공급되더라도 압력이 낮아 사용성이 떨어질 수도 있다. 반면 본 연구에서 제안하는 방법은 사용성을 보장하는 최소 압력만을 기준으로 하여, 산정되는 공급량은 경우에 따라서는 PDA에 비하여 좀 작아질 수도 있으나, 그 대신 신뢰도를 산정할 때 공급량뿐만 아니라 사용자들의 편의도 고려하고자 하였다. 다만 이 방법은 HOR과 같이 절점의 공급량과 압력 사이의 관계를 정의하는 것이 없기 때문에 절점의 수리학적 상태를 정확하게 계산하는 것은 아니다. 그러나 실제 관망에서 어떠한 비상상태가 발생하였을 때, 각 절점에서 용수 공급 변화가 항상 동일하게 일어난다고는 보기 힘들고 오히려 때 상황마다 어떤 절점에 용수가 더 공급되고 덜 공급되는지 다르게 나타날 가능성이 높다는 것을 감안한다면 이러한 접근방법은 타당성이 있다고 볼 수

있다.

용수 사용성을 보장하는 압력은 물론 관망에 따라, 그리고 절점에서 용수의 사용 양상에 따라 다르게 산정되어야 하겠지만 기본적으로 상수도 시설기준의 규정대로 관망 분기점에서의 최소 동수압인 150 kPa (약 15.4 m)를 반영하여 15 m를 기준으로 하되  $\pm 0.5$  m의 허용범위를 두었다.

위의 가정들을 기반으로 한 최대 유량을 탐색하기 위하여 최적화 기법중 하나인 Revised Harmony Search (백천우, 2002)를 이용하였고, 수리학적 계산을 위해 EPANET Toolkit을 이용하였다. 모든 과정은 Visual Basic 6.0으로 코딩되어 하나의 프로그램으로 구성되었다. Revised Harmony Search는 Harmony Search의 가장 발전된 형태의 최적화 기법이며, Harmony Search는 기존 최적화 기법의 하나인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)과 비교 하였을 때, 2진수 코딩이 불필요하여 탐색속도가 향상된다는 장점을 가지고 있으며, Harmony Memory를 사용하여 과거 경험한 모든 화음에서 새로운 화음을 획득한다는 강점을 가지고 있다.

모형의 기본적인 흐름은 다음과 같다.

- 1) 각 절점의 공급 유량을 가정하여 HM (Harmony Memory)을 작성한다.
  - 2) 이를 EPANET의 입력자료로 하여, DDA 해석을 수행한다.
  - 3) HM마다 각 절점의 계산 압력을 체크하여 최소 기준 압력을 만족시키는지 확인하고, 모든 절점이 기준을 만족시킨 HM들을 유량의 합이 큰 순서대로 정렬한다.
  - 4) 유량의 총합이 최대인 HM이 반복계산의 종결조건을 만족시킬 경우, 그 때의 절점 유량들이 찾고자 하는 최대 유량이 되고, 조건을 만족시키지 못할 경우 Harmony Search의 HMCR (Harmony Memory Considering Rate) 및 PAR (Pitch Adjusting Rate)을 적용하여 유량을 재 가정 후, 2번 과정으로 돌아간다. 다음 그림 2는 모형의 흐름도를 나타낸다.
- 본 모형은 각 절점이 최소 기준압력보다 큰 압력을 갖는다는 조건을 만족시킬 때, 각 절점의 공급 가능 유량이 최대가 되도록 하는 절점 공급 유량들의 조합을 찾아내는 것을 목적으로 하고 있다. 본 연구에서 사용 된 목적함수와 제약조건은 다음 식(2)와 식(3)과 같다.

목적함수:

$$\text{Maximize } Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (2)$$

여기서,

$$q_i = i \text{ 절점의 공급가능한 유량}$$

$$n = \text{절점의 수}$$

제약조건,

$$H_i \geq H_{\min}, i = 1, 2, 3 \dots, n \quad (3)$$

여기서,

$$H_i = i \text{ 절점의 계산된 압력 수두}$$

$$H_{\min} = \text{최소 기준 압력}$$

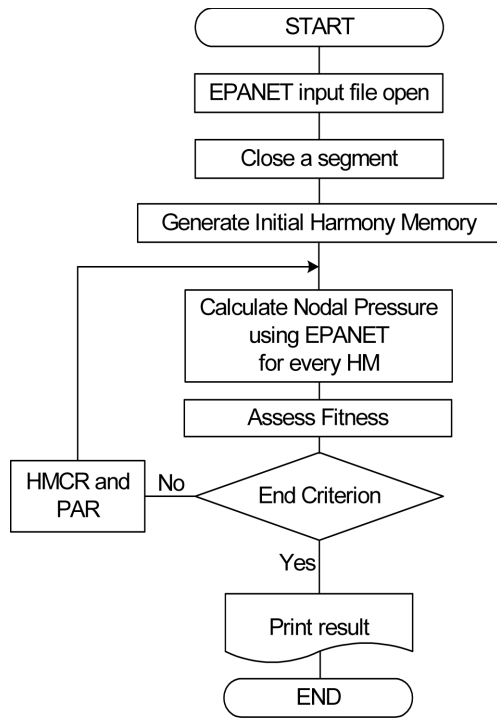


그림 2. 모형의 흐름도.

그리고 절점상태에 따른 가정과 최적화의 수렴성 향상을 위한 가정을 하였다. 절점상태에 따른 가정은 정상상태에서의 압력이 최소 기준압력  $H_{min}$ 보다 낮은 절점은 그 정상상태의 압력을  $H_{min}$ 으로 설정하였으며, 비정상상태의 공급량이 기본 수요량을 모두 만족시키며 절점 압력이  $H_{min}$ 보다 큰 절점은 기본 수요량 이상 공급량을 증가시키지 않았다. 다음으로 수렴성 향상을 위하여, 절점 압력이 정확히  $H_{min}$ 과 같아질 때까지 반복계산을 한다면, 경우에 따라서는  $H_{min}$ 과 차이가 아주 작음에도 불구하고 계산이 무한정 계속될 수 있기 때문에,  $H_{min}$ 에 완충범위를 설정하여 절점 압력이 그 범위안에 들어오면 제약조건을 만족시킨 것으로 간주하였다.

#### 4. 모형의 적용 및 결과

##### 4.1 소규모 관망에서의 개별 관 파괴 모의

모형을 실제 관망에 적용해 보기에 앞서, 간단한 구조를 가진 가상 관망에 대해서 모형의 적용성을 평가 해 보기로 하였다. 여기 사용된 관망은 Ozger(2003)가 SPDA 모형의 적용성 평가를 위해 사용했던 관망으로 2개의 저수지와 13개의 절점, 그리고 21개의 관으로 이루어진 관망이다. 다음 그림 3은 해당 가상 관망을 나타낸다. 관망의 절점 및 관거 제원은 다음 표 1과 표 2와 같다.

이 관망은 정상 시 총 공급량이 3146.4 CMH(Cubic Meter per Hour) 이고, 정상상태에서의 각 절점의 압력 분포는 다음 표 3과 같다. 이 관망의 최소 기준 압력을 15m로 한다면, 절점 11과 12는 정상상태에도 기준 압력에 못 미치는 압력을 받는 것으로 볼 수 있다. 따라서 이 절점들은 기준 압력이 15m가 아닌, 각 절점의 정상상태의 압력을 적용하여 적합도를 검사하게 된다.

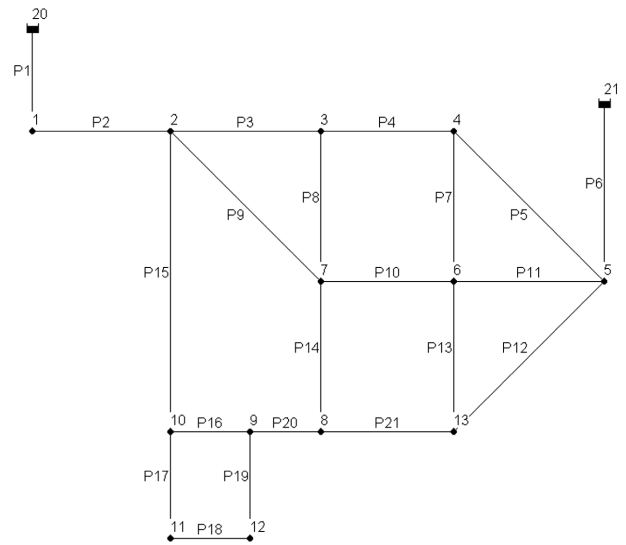


그림 3. Ozger(2003) 가상 관망.

표 1. 가상 관망의 절점 제원

ID	Elevation (m)	Demand (CMH)	Type
1	27.43	0	Junction
2	33.53	212.4	Junction
3	28.96	212.4	Junction
4	32	640.8	Junction
7	29.56	640.8	Junction
6	31.39	684.0	Junction
5	30.48	212.4	Junction
13	33.53	0	Junction
8	31.39	327.6	Junction
9	32.61	0	Junction
10	34.14	0	Junction
11	35.05	108	Junction
12	36.58	108	Junction
20	60.96	-	Reservoir
21	60.96	-	Reservoir

##### 4.1.1 Subsystem Importance Index (SII)의 산정

이 가상 관망에는 밸브의 위치는 정의되어 있지 않다. 따라서 Subsystem 격리 모의를 하려면 밸브 설치 위치를 임의로 가정해야 하나, 그 전에 개별 관거의 격리 모의를 통하여 모형의 적용성을 평가하였다. 이 관망은 크기가 작아 관거의 차단에 의한 절점의 변화가 비교적 잘 나타나도록 만들어져 있기 때문이다. 다음 표 4는 각 관거를 하나씩 차단한 상태에서 해석을 수행하여 산정된 유효유량과 이에 따라 계산된 Subsystem 중요도 지수의 크기에 따라서 정렬한 결과이다.

표 4에 나타난 결과는 관거 P1과 P2가 차단될 경우 공급량이 63%가량 감소하여 가장 중요도가 높은 관거임을 보여 준다. 하지만 이는 20번 저수지와 관망을 연결시키는 유일한 경로이므로 당연한 결과로 볼 수 있다. 반면 21번 저수지와 연결된 P6는 차단되더라도 전체 공급량의 감소정도가 13%에

표 2. 가상 관망의 관거 제원

ID	Start Node	End Node	Length (m)	Diameter (mm)	C (H-W)
P1	20	1	609.6	762	130
P2	1	2	243.8	762	128
P3	2	3	1524	609	126
P4	3	4	1127.76	609	124
P5	4	5	1188.72	406	122
P8	3	7	944.88	254	116
P10	7	6	883.92	305	112
P7	4	6	762	254	118
P9	2	7	1676.4	381	114
P11	6	5	883.92	305	110
P13	6	13	762	254	106
P12	13	5	1371.6	381	108
P15	2	10	944.88	305	102
P14	7	8	822.96	254	104
P16	10	9	579	305	100
P20	9	8	883.92	203	92
P21	8	13	944.88	305	90
P17	10	11	487.68	203	98
P18	11	12	457.2	152	96
P19	9	12	502.92	203	94
P6	21	5	640	406	120

표 3. 가상 관망의 정상상태 압력 분포

Junction ID	Base Demand (CMH)	Pressure Head (m)
1	0.00	32.28
2	212.40	25.67
3	212.40	27.12
4	640.80	23.00
7	640.80	20.39
6	684.00	18.46
5	212.40	24.60
13	0.00	18.61
8	327.60	17.56
9	0.00	19.62
10	0.00	19.40
11	108.00	13.93
12	108.00	12.17

불과하다. 이는 21번 저수지의 관망에 대한 기여도가 20번 저수지보다 더 작기 때문이고, 본 모형이 이러한 우선순위를 잘 표현해주고 있다고 볼 수 있다.

수원에 바로 연결되어있지 않은 관거들 중 공급량 감소율이 가장 큰 관거는 P3이고, 그 뒤로 P15, P4, P9 등의 순서로 SII가 나타나고 있다. 이들 관거들도 모두 20번 저수지의 영향을 많이 받는 관거들 이므로 이런 결과가 나왔다고

표 4. 가상 관망에서의 개별 관거 모의 결과

Closed Pipe	Total Available Demand (CMH)	SII
P2	1130.17	0.640805
P1	1157.16	0.632227
P3	2425.12	0.22924
P6	2733.8	0.131134
P15	2819.45	0.103912
P4	2862.06	0.09037
P9	2875.12	0.086219
P12	2994.16	0.048385
P17	3051.16	0.03027
P16	3052.49	0.029847
P21	3061.9	0.026856
P19	3064.98	0.025877
P11	3102.92	0.013819
P14	3136.06	0.003286
P18	3138.16	0.002619
P5	3146.4	0
P8	3146.4	0
P10	3146.4	0
P7	3146.4	0
P13	3146.4	0
P20	3146.4	0

볼 수 있다.

4.1.2 Demand Driven Analysis (DDA) 해석결과와 비교

다음 표 5는 P3 차단시의 DDA 해석 결과와 본 모형의 해석 결과를 비교한 것이다.

결과에서 나타나듯이 DDA 해석은 기본 수요량을 무조건 만족시키도록 되어있다. 따라서 경우에 따라서는 압력이 매우 낮아지는 절점도 생긴다. 그러나 본 연구의 모형은 적절한 압력으로 공급 가능한 용수량을 찾아내도록 되어있다. 3, 4, 7, 6, 5, 8번 절점들은 DDA 해석에서 기준 압력인 15 m보다 낮은 압력을 보이고 있다(11번과 12번은 정상상태에서도 기준 압력보다 낮은 압력을 보이니 제외한다). 따라서 이들 절점의 압력을 15 m에서 ±0.5 m의 범위 내에 오도록 하는 절점 공급량들의 조합을 찾는 것이다. 그 결과 본 모의에서는 4, 6, 8번 절점의 공급량을 낮추어 모든 절점들의 압력 기준을 맞춘 것을 알 수 있다. 어느 절점을 변화 시킬지는 매 모의마다 조금씩 다르게 나올 수도 있으나 총 공급량은 큰 차이가 없다.

4.2 대규모 관망에서의 가상 Subsystem 차단 모의

개별 관의 차단과 Subsystem의 차단은 관망에 미치는 영향의 정도가 다르다. 밸브의 설치 위치에 따라서 한 Subsystem에 포함될 수 있는 관거와 절점의 수가 천차만별이고, 이에 따른 수리학적 변화도 차이가 나기 때문이다. 하지

표 5. P3 차단 모의 시 DDA 해석 결과와 비교

Junction ID	Base Demand (CMH)	DDA (EPANET)		Suggested Model	
		Demand (CMH)	Pressure (m)	Demand (CMH)	Pressure (m)
1	0	0	32.95654	0	33.14399
2	212.4	212.4	26.62051	212.4	26.88512
3	212.4	212.4	5.774617	212.4	17.78352
4	640.8	640.8	2.765061	164.56	14.86358
7	640.8	640.8	6.668549	640.8	17.02323
6	684	684	3.398787	581.2	14.60039
5	212.4	212.4	11.83511	212.4	19.85702
13	0	0	5.316887	0	14.79814
8	327.6	327.6	4.766938	185.36	15.3714
9	0	0	16.38756	0	19.68345
10	0	0	17.33616	0	19.78111
11	108	108	11.39767	108	14.17717
12	108	108	9.350288	108	12.35306
Total	3,146.4	3,146.4		2,425.12	

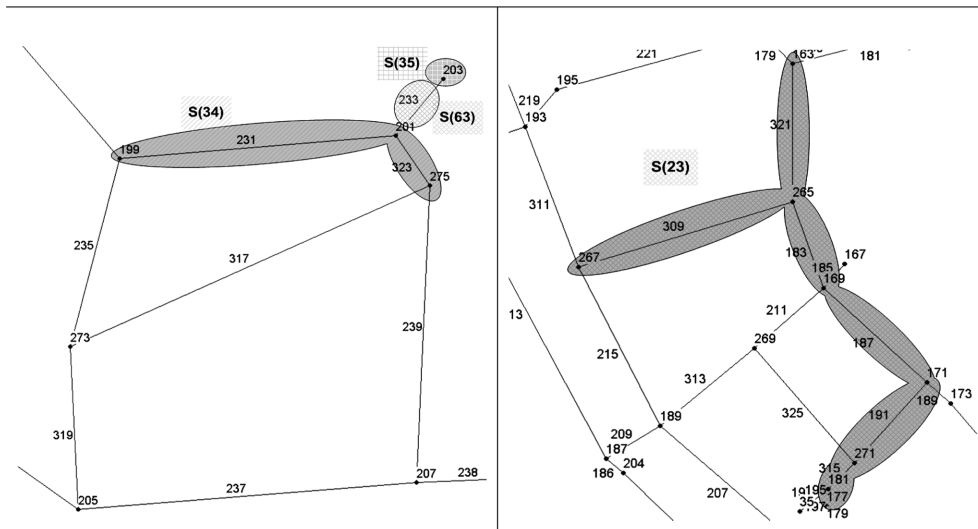
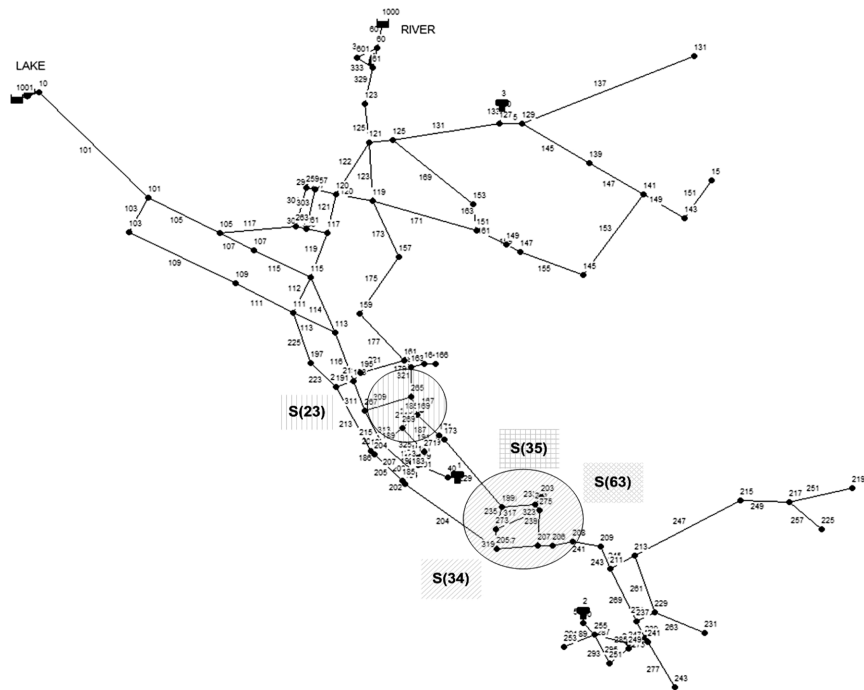


그림 4. Net3 관망 및 Subsystem 결과 (좌측그림 : S(34), S(35), S(63), 우측그림 : S(23)).

만 앞서 적용했던 소규모 관망은 Subsystem 차단 모의를 하기에는 부적합하므로 더 큰 관망에서 모의를 수행하였다. 대상 관망은 그림 4에 보이는 바와 같이 EPANET에서 예제 관망으로 주어지는 Net3 관망으로 하였다. 이 관망은 두 개의 수원과 세 개의 탱크를 갖고 있고, 두 수원 앞에는 펌프가 설치되어 있다. 절점의 개수는 92개, 관거 개수는 119개이다. 그러나 이 관망도 기본적으로는 밸브에 대한 정보를 갖고 있지 않다. 따라서 Subsystem 모의를 수행하기 위하여 임의로 밸브 위치를 결정하였다. 관의 개수가  $n$ 이라면 밸브가 설치될 수 있는 위치의 개수는 각 관거의 양 끝에 한 개씩 이므로  $2n$ 이 된다. 이 중 밸브 설치율이 40%라고 가정하고 설치 위치는 완전 임의로 가정하여 공급량 변화를 모의해 보았다. 가정된 밸브들로 인하여 Net3는 총 67개의 Subsystem으로 구분되었고, 본 관망의 정상상태 시 총 공급량은 10963.11 GPM(Gallon Per Minute) 이다.

표 6은 Net3의 Subsystem 차단 모의 결과를 나타낸다. 본 모의는 최소 기준 압력을 25 psi로 하여 수행되었다. 결과는 SII를 내림차순으로 정렬하여 나타냈고 SII가 0.01 이상인 Subsystem들만 표기하였다. 표를 보면 SII 상위 3개 Subsystem인 S(34), S(35), S(63)이 차단 될 경우 공급량이 40%가량 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 이들 Subsystem이 매우 큰 기본 수요량을 갖는 절점을 포함하고 있거나 혹은 이 절점을 Unintended Isolation으로 만들어서 해당 절점의 용수 공급이 완전 차단되기 때문에 발생한 결과이다. 즉 S(35)의 경우 그림 4와 같이 절점 203번을 포함하고 있으며, S(34) 및 S(63)의 경우 Subsystem의 격리 시 절점 203번이 포함된 Unintended Isolation을 유발하게 된다. 절점 203번의

기본 수요량은 4439GPM로 상당히 크며, 이에 따라 Subsystem 중요도 지수가 상당히 크게 나타났다.

반면 그 아래의 S(23) Subsystem에는 총 12개의 절점과 11개의 관거가 포함되어 있다. 이들 12개의 기본 수요량의 합은 238.4 GPM에 불과하나, 총 공급 부족량은 2639 GPM에 달한다. 이 경우는 S(23) Subsystem이 관망에서 직접적인 피해영역이 아닌 다른 절점들의 용수 공급 능력에 어느 정도의 영향을 미친다고 볼 수 있는 근거가 될 것이다.

위 결과에 비추어 봤을 때, SII의 크기가 큰 Subsystem이 꼭 관망 전체적으로 영향을 미친다고 볼 수는 없다. 해당 Subsystem을 차단했을 때 Subsystem 내의 공급량만 사라질 뿐 다른 절점들에는 거의 영향이 없을 수도 있기 때문이다. 이 관망과 같은 경우 수원이 두 군데에 탱크도 세 곳이나 있기 때문에 Subsystem의 차단으로 인한 영향이 경미하다고 볼 수 있다. 그러나 이것이 해당 Subsystem이 중요하지 않다는 뜻은 아니다. 여기에서 표현한 관망의 절점이 어떤 물리적인 의미를 갖는 요소가 아니라, 상수 시스템을 간략히 표현하기 위해 실제 수요지점들을 한 곳에 묶은 개념임을 감안 한다면 Subsystem이 포함하고 있는 피해영역 또한 관망에 영향을 미치는 주요한 요소로 볼 수 있기 때문이다.

## 5. 결 론

본 연구는 적절한 제수밸브가 설치되어있고 이로 인하여 여러 개의 Subsystem으로 구분이 될 수 있는 상수관망을 대상으로 하여, 제수밸브를 차단함으로써 Subsystem을 격리해야 하는 상황, 즉 비정상상태의 관망에서 사용에 불편함이 없게 공급 가능한 최대 유량인 유효유량(Effective Supply)을 산정하고자 하였다. 이는 각 절점 압력이 해당 절점의 용수가 어느 정도의 사용성을 확보하기 위한 최소 기준 압력보다 높다는 전제조건을 만족시킬 때의 유량을 뜻한다. 이 기준압력은 상수도 기준에서 일반적으로 지정하는 최소동수압 15 m를 기준으로 하였다. 유효유량의 산정은 Harmony Search를 이용한 절점 유량의 가정 과정과 EPANET을 이용한 절점 압력 계산 과정을 통해 가정된 절점 유량들로 인한 절점 압력이 모두 기준을 만족시키는지 여부를 판단하여, 최종적으로 모든 절점이 공급유량이 최대가 될 것이라고 여겨지는 압력 차이를 갖게 될 경우 계산을 종료하고 이때의 절점 유효유량의 합을 최대 공급 가능 유량으로 하였다. 이렇게 산정된 최대 공급 가능 유량과 정상상태시의 기본 수요량의 차이가 공급 부족량이 되고, 기본 수요량 대비 공급 부족량의 비율을 해당 Subsystem의 중요도 지수(Subsystem Importance Index)로 정의하였다.

제안된 모형을 간단한 가상 관망과 큰 규모의 가상관망에 적용 해 보아 적용성을 평가하였다. 간단한 관망에서는 개별 관 파괴 모의를 하여 정상상태와 비정상상태시의 각 절점별 공급량 및 압력을 비교하였다. 대규모 관망인 Net3 관망에서는 밸브 위치를 가정하여 임의로 Subsystem을 구분하고, 이들 Subsystem이 차단되었을 때의 유효유량을 산정하고 SII를 계산하였다.

표 6. Net3관망의 Subsystem 차단 모의 결과

Subsystem ID	Total Available Demand (GPM)	SII
S(34)	6360.179	<b>0.419856</b>
S(35)	6524.108	<b>0.404903</b>
S(63)	6524.108	<b>0.404903</b>
S(23)	8324.049	<b>0.240722</b>
S(4)	9326.11	<b>0.149319</b>
S(7)	9744.11	<b>0.111191</b>
S(27)	10244.1	<b>0.065585</b>
S(20)	10299.43	<b>0.060538</b>
S(2)	10336.91	<b>0.057119</b>
S(54)	10336.91	<b>0.057119</b>
S(9)	10504.59	<b>0.041824</b>
S(15)	10555.09	<b>0.037218</b>
S(12)	10670.13	<b>0.026724</b>
S(6)	10724.71	<b>0.021746</b>
S(11)	10731.71	<b>0.021107</b>
S(41)	10768.64	<b>0.017739</b>
S(17)	10831.71	<b>0.011986</b>
S(14)	10845.4	<b>0.010737</b>



본 연구는 상수 관망의 유지, 보수 시에 관거 혹은 밸브 등의 처리 우선 순위를 결정할 때 고려할 기준 중 하나로 사용될 수 있을 것이며 상수관망의 신뢰도 평가 시 사용 가능할 것으로 판단된다. 또한 유효유량 산정을 통하여 관망이 실제로 사용함에 불편함이 없는 정도로 용수를 얼마나 공급 가능한가를 종전에 비해 더 정량적으로 산정 가능하였다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 자연과 함께하는 하천복원기술개발 연구(ECORIVER21)(06건설핵심B01)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

### 참고문헌

백천우 (2002) ReHS를 이용한 상수관망 최적 개량 의사결정 시스템의 개발, 석사학위논문, 고려대학교 대학원 토목환경공학과.  
 환경부 (2004) 상수도시설기준, 2004.  
 Bhave, P.R. (1981) Node flow analysis of water distribution systems. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 107, No. TE4, pp. 457-467.  
 Geem, Z.W., Kim, J.H. and Loganathan, G. V. (2001) A new Heuristic Optimization Technique : Harmony Search. *Simulation*, Vol. 14, No. 1, pp. 34-39.

Geem, Z.W., Kim, J.H. and Loganathan, G. V. (2002) Harmony Search Optimization : Application to Pipe Network Design. *International Journal of Modeling and Simulation*, Vol. 22, No. 2, pp. 125-133.  
 Gupta, R. and Bhave, P.R. (1996) Comparison of Methods for Predicting Deficient-Network Performance. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 122, No. 3, pp. 214-217.  
 Jun, H.D. (2005) *Strategic valve locations in a water distribution system*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.  
 Mays, L.W. (2003) *Water Supply Systems Security*. McGRAW-HILL.  
 Ozger, S.S. (2003) *A Semi-Pressure-Driven Approach to Reliability Assessment of Water Distribution network*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona.  
 Tanyimboh, T.T. and Tabesh, M. (1997) Discussion Comparison of Methods for Predicting Deficient-Network Performance. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 369-370.  
 Walski, T.M. (1993) Water Distribution Valve Topology for Reliability Analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 42, pp. 21-27.

◎ 논문접수일 : 09년 09월 15일  
 ◎ 심사의뢰일 : 09년 09월 18일  
 ◎ 심사완료일 : 09년 11월 09일