

## 상수관망 시스템의 골격화 기법 평가 Skeletonization Methods for Complex Water Distribution Network

최정욱\* / 강두선\*\*

Choi, Jeong Wook / Kang, Doosun

### Abstract

Studies of optimizing pump operation in water distribution networks (WDN) are receiving spotlight in recent days. However, the water networks are quite complex including thousands of or even tens of thousands of nodes and pipes, thus simulation time is an issue. In some cases, implementing a computer model for pump operation decisions is restrictive due to intensive computation time. To that end, it is necessary to reduce the simulation time of water networks by simplifying the network layout. In this study, WDN skeletonization approaches were suggested and applied to a real water transmission network in South Korea. In skeletonizing the original network, it was constrained to match the water pressure and water age in the same junction locations to maintain the hydraulic and water quality characteristics in the skeletonized network. Using the skeletonization approaches suggested in this study, it is expected to reduce the simulation time of WDN and apply for developing a computer module of WDN real-time optimal operation.

**Keywords** : Water Distribution Network, Skeletonization, EPANET

### 요 지

대규모 상수관망 시스템의 운영비용 절감을 위한 펌프장 운영 최적화 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 이러한 상수관망 시스템 운영 최적화에 대한 연구를 수행하기 위해서는 짧게는 24시간, 길게는 1주일 이상의 시간모의가 필수적이며, 최적화 알고리즘과의 연계를 통한 시뮬레이션이 요구된다. 대규모 상수관망의 경우 관로 및 절점의 수가 수 천 혹은 수 만개에 달해 수리해석 및 최적화에 많은 시간이 소요되며 실시간 운영을 목적으로 하는 경우 모형의 적용에 한계가 발생한다. 이처럼 모의시간에 대한 문제를 해결하기 위해서는 해당 상수관망 시스템의 수리 거동, 수질 해석 결과를 변화시키지 않는 범위에서 관망을 간소화 할 필요가 있다. 본 연구에서는 국내에서 실제로 운영되고 있는 송, 배수 시스템의 일부를 대상으로 시스템 간소화, 즉 골격화(Skeletonization) 연구를 진행하였으며, 모두 네 가지의 골격화 기법을 비교, 평가하였다. 본 연구에서 제안된 골격화 기법을 통해 대규모 상수관망의 해석에 소요되는 시간을 단축함으로써, 실제 상수관망의 실시간 운영 모듈 개발에 도움이 될 것으로 기대한다.

**핵심용어** : 상수관망, 골격화, 간략화, 모의시간 단축

### 1. 서 론

상수관망 시스템은 인간의 생활에 필수적인 음용수를 안

전하게 공급하기 위한 사회기반시설물이다. 우리나라의 상수도 보급률은 해마다 증가하고 있으며, 이에 따라 상수관망 시스템의 규모 또한 점차 확대되고 있다(KOSIS, 2012)

\* 경희대학교 사회기반시스템공학과 석사과정 (e-mail: cjw4859@naver.com)

Graduate Student, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin-si, Korea

\*\* 교신저자, 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수 (e-mail: doosunkang@khu.ac.kr, Tel: 82-31-201-2513)

Corresponding Author, Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin-si, Korea

최근 들어, 이러한 상수관망 시스템의 발전과 규모의 거대화에 따라 시스템 운영에 소요되는 에너지의 절감에 대한 필요성이 대두되고 있다.

상수관망 시스템의 소요 에너지 절감을 위한 방안으로는 관망 내 누수 방지 및 저감, 관로 내 잉여 에너지 회수, 펌프장 최적운영 등이 있다. 관망 내 누수 문제는 용수의 손실뿐만 아니라 압력 손실로 인한 추가 에너지 소비를 유발하기 때문에 에너지 절감을 위해 반드시 해결되어야 하는 문제이다. 최근 다양한 누수 탐지 기술이 개발됨에 따라 상수관망의 누수율은 점차 개선되고 있지만 상수도 보급률과 함께 성장한 대규모의 상수관망에 의해 아직까지 전체적인 시스템에 대해 효율적이고 확실하게 누수를 탐지하고 저감하는데 어려움이 있는 실정이다. 관로 내 소수력 발전은 수도관 차압을 이용하여 수차발전기를 통해 잉여 에너지를 회수하는 방법이다. 이 방법을 통해 시스템 내 잉여 에너지를 어느 정도 회수할 수는 있지만 초기 설치비용과 효율성 문제로 인해 현재 널리 활용되고 있지 않은 실정이다. 또 다른 에너지 절감 방안으로는 상수관망 시스템에서 가장 큰 에너지 소비 비중을 차지하고 있는 펌프운동을 최적화 하는 것이다. 실제로 전체 수도 사업 전력 소비량의 약 94%를 취수, 가압, 송수펌프 등을 가동하는데 사용하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 전력소비량이 큰 상수관망 시스템의 펌프 운영을 최적화한다면 에너지 절감에 있어 가장 큰 효과를 기대할 수 있을 것이며, 관련 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 상수관망 시스템의 최적운영은 서비스 중단 없이 공급되어야 하는 상수도 특성 상 실시간으로 최적화된 운영 결과를 필요로 하며 이를 위해서는 최대한 짧은 시간 내에 수리해석과 최적의 운영 방안을 도출해내야 한다. 하지만 대규모 상수관망의 경우 관로 및 절점의 수가 수 천에서 수 만개에 달해 수리해석 및 최적화 모의에 많은 시간이 소요되며, 실시간 모의에 한계가 발생한다. 모의의 계산시간 단축을 위한 가장 효과적인 방안은 실제 네트워크의 수리 및 수질 거동에 영향을 미치지 않는 범위에서 해당 시스템을 간략화 하는 것이다.

상수관망 간략화 혹은 골격화(이하, 골격화)에 대한 연구는 Eggener and Polkowski (1976)에 의해 처음 시도되었다. 해당 연구에서 그들은 골격화와 민감도 분석을 통해 시스템 압력에 큰 영향을 주지 않는 범위에서 시스템의 관로와 절점을 간략화 할 수 있다는 것을 증명하였다. 이후, Jung et al. (2007)에서는 Hazen-Williams 손실수두 공식을 사용하여 관로의 등가관계에 대한 공식을 제안하여 좀 더 체계적으로 직렬 및 병렬 관로의 통합을 실험하고 분

석하였으며, Raczynski et al. (2008)은 나아가 관망 내 수질인자를 추가하여 등가관계를 규명하였다. 국내의 경우, Lee (2004)에서 상수관망의 간략화에 대해 다룬 바가 있다. 해당 연구에서 몇 가지 간략화 방법에 대한 검토를 하였으나, 체계적인 방법론이 제시되지 않아 해당 골격화 기법을 다른 관망에 적용하기에 무리가 있는 것으로 판단된다. 이렇듯 복잡한 상수관망의 골격화에 대한 필요성은 인지하고 있으나, 범용으로 적용 가능한 기법 제시 및 실제 시스템에 적용한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 대규모 상수관망의 골격화 방안에 대한 체계적인 절차를 제안하고 나아가 수압과 수질을 동시에 고려한 기법들을 소개하였다. 제안된 기법들은 국내 실제 송, 배수시스템에 적용하여 각각의 골격화 방법을 비교, 분석하였다.

본 연구에서는 상수관망 수리해석 프로그램인 EPANET (U.S. EPA, 2000)과 수치해석 및 프로그래밍 환경을 제공하는 공학용 소프트웨어인 MATLAB (Mathworks, 2000)을 연동하여 상수관망 시스템의 골격화 기법을 제시하고 평가하였다. 등가 관 공식을 이용하여 시스템 내 수압(Pressure)을 기준으로 골격화 하는 경우와 수질(Water Age)을 기준으로 골격화 하는 경우, 그리고 두 가지 인자를 동시에 고려한 골격화 방안을 제시하고 각각의 결과에 대해서 분석하였다. 본 연구를 통해 대규모 상수관망의 시뮬레이션과 최적화 모형 적용에 있어 제약이 되었던 계산시간 문제를 효과적으로 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 상수관망 골격화의 정의 및 방법

상수관망 골격화의 가장 큰 목적은 원본 시스템의 수리 거동 및 수질을 왜곡하지 않는 범위에서 관로와 절점의 삭제, 통합을 통해 복잡한 상수관망을 단순화하는 것이다. 이러한 골격화 방법으로는 단순 골격화와 등가 관 방법(Equivalent Pipe Method)이 있다. 단순 골격화라 함은 해당 관망 내에서 수리해석에 큰 영향을 미치지 않는 소 유량, 소 구경 관을 삭제하거나, 특정 구역의 여러 주요절점을 하나의 주요절점으로 통합하는 방법이다. 이 방법은 간단하지만 관로의 삭제나 절점의 통합에 대한 뚜렷한 기준이 없고, 골격화를 진행하는 엔지니어의 판단에 의존하는 방법이다. 따라서, 단순 골격화 방법으로는 골격화 전, 후의 수리해석 오차에 대한 원인 분석 및 수정이 어려우며 체계적이지 못하다는 단점이 있다. 다음으로 등가 관 방법은 Fig. 1과 같이 관경, 조도계수와 관 길이가 상이한 복수

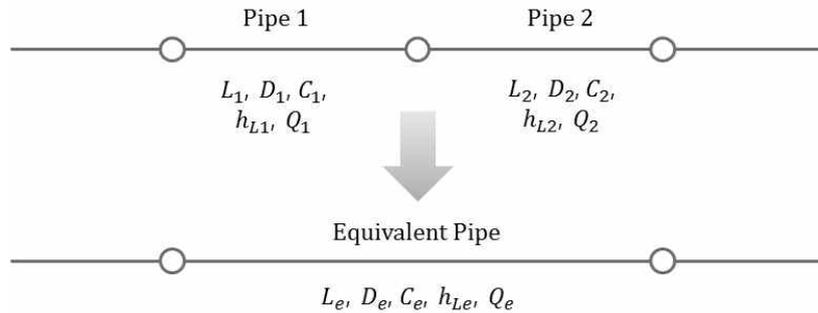


Fig. 1. Schematic Diagram of Equivalent Pipe Method

의 관에 대해 관경, 길이, 조도계수 등을 조절하여 관로의 통합 전, 후의 수리해석 결과가 동일한 등가 관계에 있는 하나의 관으로 통합하는 방법이다.

### 2.2 등가 관 방법의 적용 절차

상수관망 시스템의 골격화를 위한 등가 관 방법의 적용 절차는 아래와 같이 6단계로 구분할 수 있다.

Step 1) 대상 네트워크에서 분기점과 말단절점을 기준으로 통합 대상이 될 Pipe들을 선정 및 Grouping

Step 2) 통합 대상이 되는 Pipe들 중 흐름 방향 순으로 두 개를 선택하여 중간 절점 및 후단 Pipe 삭제

Step 3) 중간 절점의 수요량(Demand)은 균등하게 전, 후단 절점으로 배분

Step 4) 선택된 두 Pipe의 Data와 등가 관 개념을 이용하여 등가 관경, 길이, 조도계수 산정

Step 5) 삭제하지 않은 전단 Pipe에 Step 4에서 계산된 Equivalent Pipe Data 입력

Step 6) 대상 네트워크 내 통합해야할 Pipe가 없을 때까지 Step 1~5 반복 수행

위의 알고리즘은 EPANET Toolkit과 Matlab를 연동하여 프로그래밍함으로써 골격화 진행시간을 단축하고 대규모 네트워크에 적용이 가능하도록 편의성을 확보하였다.

### 2.3 수압 균등(Pressure Equivalent) 등가 관 산정

수압 균등 등가 관 산정 방법은 골격화 전, 후로 동일 절점의 수압이 일치하도록 등가 관을 산정하는 방법이다. Hazen-Williams 손실수두 공식을 이용한 등가 관의 관경은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$D_e = \left( \frac{10.67 \times L_e \times Q_e^{1.852}}{h_e \times C_e^{1.852}} \right)^{\frac{1}{4.8655}} \quad (1)$$

여기서,  $D_e$ 는 등가 관의 직경이며  $h_e$ 는 통합 전 두 관의

손실수두의 합,  $L_e$ 는 통합 전 두 관의 연장의 합,  $Q_e$ 는 두 관의 통합 후 흐르게 될 유량,  $C_e$ 는 통합 전 두 관의 조도계수의 평균값이며, 다음과 같이 각각 산정할 수 있다.

$$h_e = h_{L1} + h_{L2}, \quad L_e = L_1 + L_2, \quad Q_e = Q_2 + \frac{Q_1 - Q_2}{2},$$

$$C_e = \frac{C_1 + C_2}{2}$$

$L_e$ 의 경우, 골격화 전, 후의 네트워크가 동일한 연장을 갖도록 하기 위해 두 연장의 합으로 산정하였으며,  $Q_e$ 는 중간 절점의 수요량이 전, 후단 절점으로 동일하게 분배 되었을 때 통합 관에 흐르게 되는 유량을 의미한다.  $C_e$ 의 경우에는 두 관이 통합되는 것을 고려하여 두 관의 조도계수의 평균값으로 산정하였다. 해당 등가 관 방법은 등가 손실수두( $h_e$ ), 연장( $L_e$ ), 유량( $Q_e$ ), 조도계수( $C_e$ )를 먼저 산정한 후, Eq. (1)을 이용하여 등가 관경( $D_e$ )을 계산하는 방법이므로 등가 관경 방법(Equivalent Diameter Pipe Method)이라 할 수 있다.

### 2.4 수질 균등(Water Age Equivalent) 등가 관 산정

수질 균등 등가 관 방법은 앞의 수압 균등 등가 관 방법과는 달리 동일 절점의 수질 인자가 일치하도록 골격화하는 방법이다. 이 방법은 두 관로의 통합 전, 후 용수의 이동시간(Travel time=관 길이/관 유속)이 동일해야 한다는 개념을 이용한다( $T_e = T_1 + T_2$ ). 각 관로 내 이동시간은 해당 관로의 연장과 유속에 의해 결정되며 따라서, 통합 후 등가 관의 관경은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$D_e = \left[ \left( \frac{D_1^2 \times L_1}{Q_1} + \frac{D_2^2 \times L_2}{Q_2} \right) \left( \frac{Q_e}{L_e} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서,  $D_e$ 는 골격화 후 등가 관의 직경이며,  $Q_1$ 과  $Q_2$ ,  $D_1$ 과  $D_2$ ,  $L_1$ 과  $L_2$ 는 통합 전 두 관로의 유량, 직경, 연장을 각각 의미한다.  $Q_e$ 와  $L_e$ 는 앞서 정의한 바와 같이 두 관의 통합 후 흐르게 될 유량, 통합 전 두 관의 연장의 합

이다. 이 방법도 통합 후 등가관계에 있는 관의 관경을 산정하고 적용하는 방법이므로 등가 관경 방법이라 할 수 있지만, 통합 전·후의 관로 내 용수의 이동시간을 기준으로 등가 관경을 계산하므로, 결과는 앞선 수압 균등 등가 관 방법과는 상이하게 나타난다.

### 2.5 수압과 수질을 동시에 고려한 등가 관 산정

수압과 수질을 동시에 고려하기 위하여 두 가지 방법을 적용하였다. 먼저, Eqs. (1) and (2)를 비교해 보면 수압 균등 등가 관 공식(Eq. (1))에서는 조도계수가 영향을 미치지만 수질 균등 등가 관 공식(Eq. (2))에서는 조도계수가 포함되지 않는 것을 알 수 있다. 따라서, Eq. (2)를 이용하여 먼저 수질 균등 등가 관경( $D_e$ )을 산정한 후, 해당 등가 관의 조도계수를 아래 Eq. (3)을 이용하여 조정함으로써 수압과 수질 기준을 동시에 만족하는 등가 관경( $D_e$ )과 등가 조도계수( $C_e$ )를 연속적으로 계산한다.

$$C_e = \left( \frac{10.67 \times L_e \times Q_e^{1.852}}{h_e \times D_e^{4.8655}} \right)^{\frac{1}{1.852}} \quad (3)$$

또 다른 방법으로는 Eqs. (1) and (2)에 의해서 산정된 두 개의 등가 관경( $D_e$ )을 단순히 산술평균하여 새로운 등가 관경을 계산하는 방법이다. 3절에서는 이와 같은 네 가지 등가 관 산정 방법을 실제 시스템에 적용한 후, 그 결과를 비교, 분석하였다.

## 3. 연구결과 및 분석

### 3.1 적용 네트워크

본 연구에서 제시한 골격화 기법을 국내에서 실제로 운영되고 있는 송, 배수 시스템에 적용하였으며, 적용된 관망은 Table 1에 정리한 바와 같이 정수장(Reservoir), 배수지(Tank), 펌프(Pump) 각각 1개소와 173개의 절점, 185개의 관로로 구성되어 있다. 해당 관망의 모식도는 Fig. 2와 같다.

Table 1. Original Network Components

Component	Number
Reservoir	1
Tank	1
Pump	1
Junction	173
Pipe	185

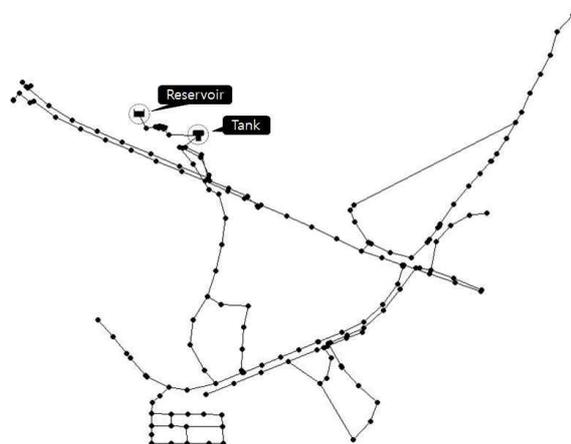


Fig. 2. Original Network Layout

### 3.2 골격화 적용

적용 관망에 대한 골격화는 총 23번의 반복 연산 후에 완료되었으며, Fig. 3에 골격화가 진행됨에 따라 네트워크 layout이 변화되는 양상을 단계 별로 도시하였다. 등가 관의 계산은 절점의 수요량을 기본 수요량으로 고정한 상태(정상상태, steady state condition)에서 수행하였다. 골격화 전, 후 관망 구성요소 수는 Table 2에 정리하였다. 주요 시설물인 정수장(Reservoir), 배수지(Tank), 펌프(Pump) 등은 그대로 유지되었으며, 절점은 173개에서 56개로, 관로는 185개에서 68개로 각각 약 67%, 63% 감소되었음을 알 수 있다.

### 3.3 골격화 결과 분석

본 연구에서는 골격화 기법을 Table 3에 정리한 바와 같이 4가지 Case로 나누어서 적용 및 분석하였다. 골격화 전, 후 결과 분석을 위해 관망 내 주요 절점을 선택하여 해당 절점의 수압(Pressure)과 수령(Water Age)을 비교하였다. 원본 시스템과의 비교, 분석을 위해 골격화 후에도 통합되지 않은 절점을 주요 절점으로 선택하였으며 다양한 분석을 위해 주로 말단 절점과 분기점을 선택하였다. 주요 절점의 위치는 Fig. 4에 표시하였다.

#### 3.3.1 고정 수요량 모의

먼저, 네 가지 골격화 기법의 정확도 비교를 위해 절점의 수요량을 기본 수요량(정상상태)으로 고정한 후 수리 및 수질 모의를 수행하였다. 수리 모의와 달리 정확한 수질 모의를 위해서는 모의시간을 충분히 길게 설정하여야 한다. 즉, 용수가 시스템 말단까지 충분히 도달한 후의 수령(Water Age)을 비교해야 하므로 총 수질모의는 168시

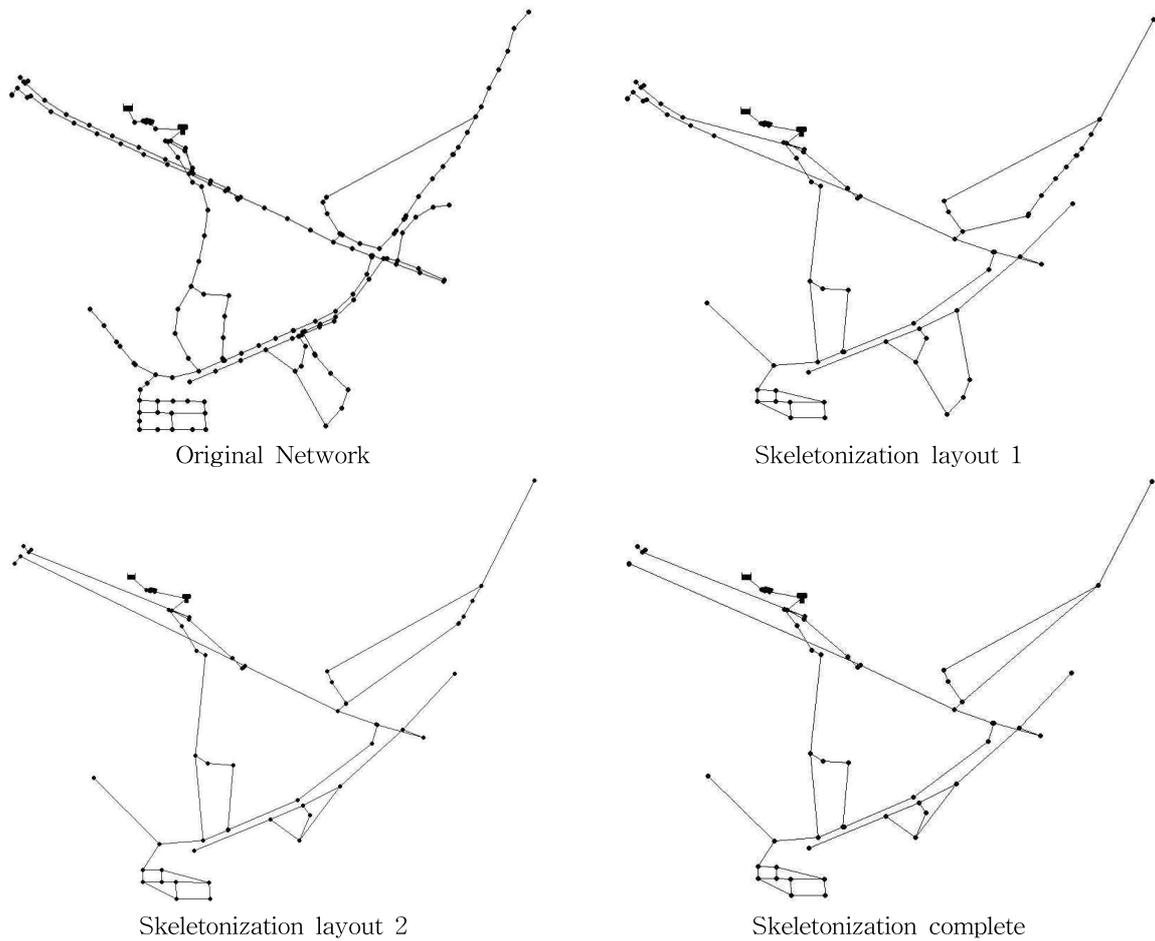


Fig. 3. Transition of Network Layout

Table 2. Network Components Reduction by Skeletonization

Component	Original network	Skeletonized network	Reduction ratio (%)
Reservoir	1	1	0
Tank	1	1	0
Pump	1	1	0
Junction	173	56	67.6
Pipe	185	68	63.2

Table 3. Case of Skeletonization Approaches

Case	Skeletonization Approach
Case 1	Pressure Equivalent Approach
Case 2	Water Age Equivalent Approach
Case 3	Pressure & Water Age Equivalent Approach ( $D_e$ , $C_e$ calculation sequentially)
Case 4	Arithmetic Mean Diameter of Case 1 & 2

간을 실시하였고, 이 중 마지막 시간의 결과를 분석하였다. 골격화 기법 별 대표 절점의 수압 및 수질 모의 결과는 각각 Fig. 5, 6에 도시하였다.

수압(Pressure) 결과에 해당하는 Fig. 5의 경우, Case 1과 Case 3의 결과가 원본 네트워크의 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 Case 1에서 사용한 골격화 방법이 손

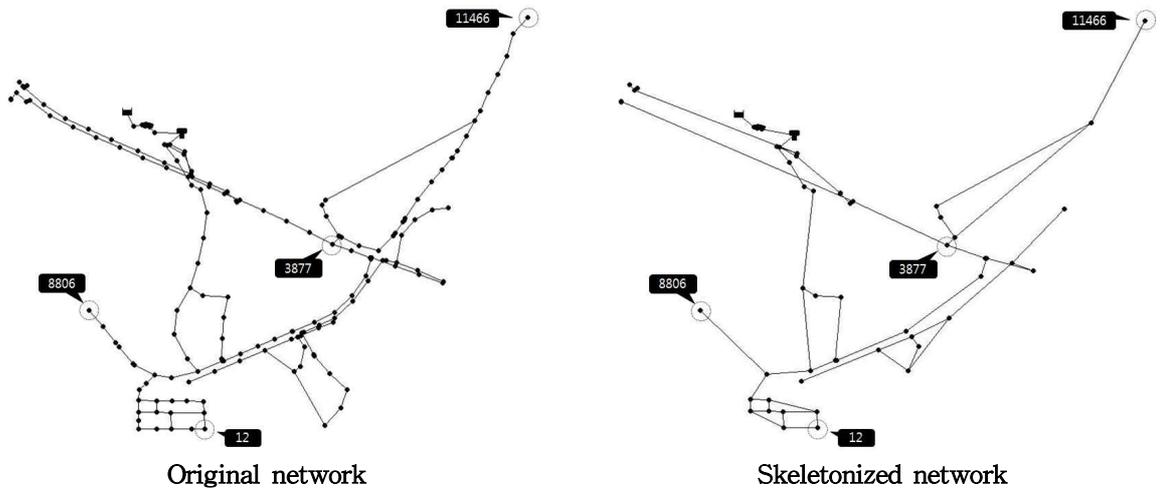


Fig. 4. Representative Junction Locations

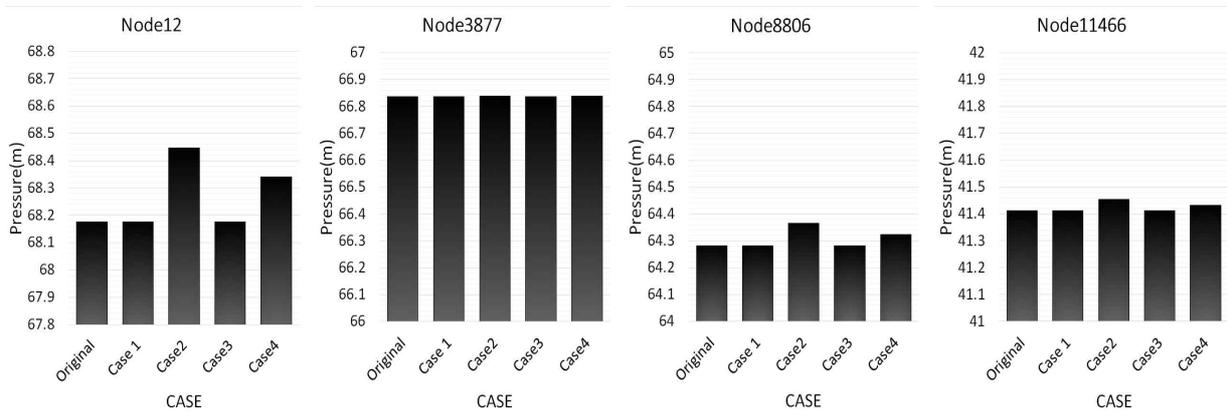


Fig. 5. Pressure Comparisons at the Representative Nodes

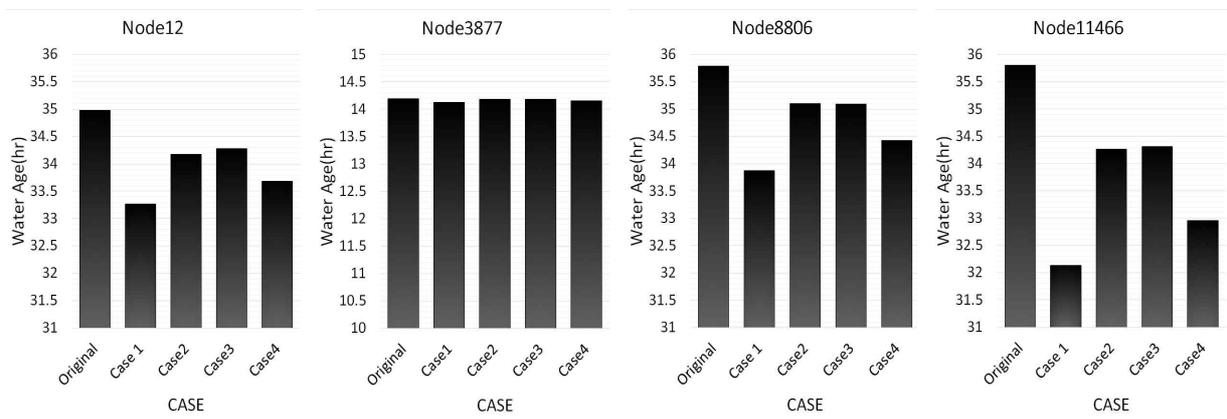


Fig. 6. Water Age Comparisons at the Representative Nodes

실수두 값을 기준으로 한 등가 관 공식이기 때문이며, Case 3 또한 수질 균등 등가 관 계산을 한 뒤 조도계수(C)의 조정을 통해 손실수두를 일치시켰기 때문이다. 이와

달리 관로 내 이동시간을 고려하여 등가 관경을 산정한 Case 2의 경우, 원본 네트워크의 수압 결과와 다소 차이를 보였으며, 수압 및 수질 균등 등가 관 계산을 한 뒤 그

평균값을 사용한 Case 4의 경우에는 Case 1과 Case 2의 중간 정도의 오차를 보였다. 하지만, 전반적으로 모든 Case에 대해 원본 네트워크와 비교하여 수압의 편차가 크지 않음을 알 수 있다. 특히, 배수지와 근거리에 위치한 절점 3877의 경우에는 모든 골격화 기법에서 원본 네트워크의 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 반대로 배수지로부터 원거리에 위치하고 망(loop)형 구간에 위치한 절점 12의 경우에는 다른 절점과 비교하여(Case 2와 4의 경우에) 상대적으로 오차가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 참고로 Fig. 5의 종축 범위는 모든 절점에서 동일하게 1.0m로 설정하여 절점 간 객관적인 비교가 가능하도록 하였다.

절점별 수령(Water Age) 비교 결과를 도시한 Fig. 6의 경우, 원본 네트워크의 모의 결과와 가장 일치하는 결과는 수질 균등 등가 관 공식을 사용했던 Case 2와 Case 3이었으며, 반대로 가장 큰 오차가 발생한 방법은 수압 균등 등가 관 산정 방법인 Case 1이었다. Case 4의 경우에는 수압 분석 결과와 마찬가지로 Case 1과 Case 2의 중간 정도의 오차를 보였다. 절점 별 결과를 비교해보면, 정수장으로부터 가장 근거리에 위치한 절점 3877의 오차가 가장 낮았으며, 도달시간이 가장 긴 말단부에 위치한 절점 11466의 오차가 가장 크게 발생한 것을 알 수 있다. 절점 별 객관적인 결과 비교를 위해 Fig. 6의 종축 범위는 모든 절점에서 동일하게 5.0hr로 설정하였다.

다음으로, 모든 절점에서의 골격화 전, 후 수압 및 수령 결과 비교를 위해 산점도(Scatter plot)를 도시하였다. 각각의 점들은 골격화 후 남은 56개의 절점에서의 수압과 수령 값을 의미하며, 1:1 라인에 가까울수록 골격화로 인한 오차가 낮음을 의미한다. Fig. 7을 살펴보면 앞선 분석과 마찬가지로 Case 1과 Case 3의 수압 결과가 모든 절점에서 원본 네트워크의 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 이는, 해당 기법을 통해 구해진 골격화된 네트워크를 원본 네트워크를 대신해서 수리모의에 활용할 수 있음을 의미한다. Case 2와 Case 4의 경우, 골격화 후 일부 절점에서 수압이 과다 산정되고 있으나, 오차는 크지 않음을 알 수 있다. 절점의 수령을 비교한 Fig. 8을 살펴보면, Case 2와 Case 3의 결과가 원본 시스템과 매우 유사함을 알 수 있다. Case 1과 Case 4의 경우에는 골격화 이전의 결과와 비교하여 일부 절점의 수령이 과소하게 추정됨을 알 수 있다.

네 가지 골격화 기법의 정확도를 비교한 결과, Case 3 방법이 수압 및 수질 기준으로 모두 골격화가 잘 이루어졌음을 알 수 있고, Case 1과 Case 2는 각각의 기준에는 적합하나, 다른 기준을 제대로 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 또한 Case 4의 경우는 Case 1의 등가 관경과 Case 2의 등가 관경을 산술 평균한 값을 적용하였기 때문에 두 기준을 일정수준 만족하지만 반대로 각각 일정한 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 등가 관경(수

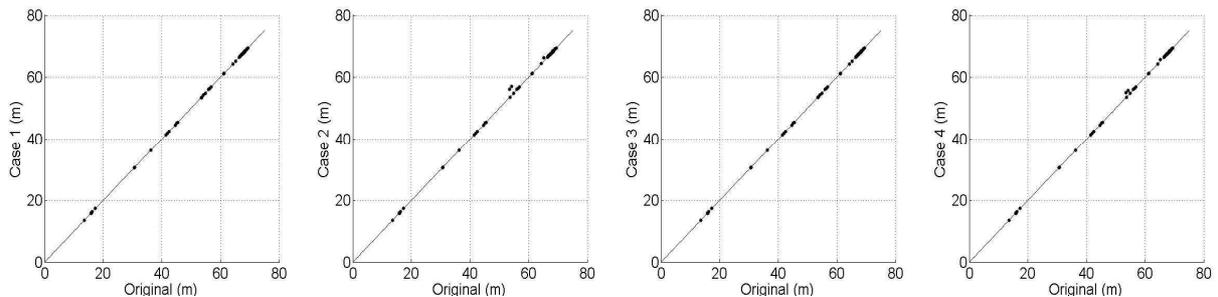


Fig. 7. Scatter Plots for Nodal Pressure Comparisons

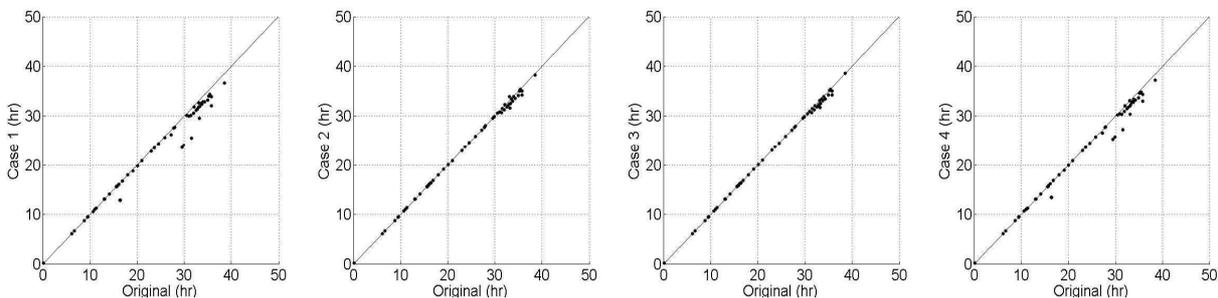


Fig. 8. Scatter Plots for Nodal Water Age Comparisons

질기준 산정)과 등가 조도계수(수압기준 산정)를 순차적으로 산정하는 Case 3 방법이 가장 효율적인 골격화 방법임을 알 수 있다.

### 3.3.2 변동 수요량 모의

실제 상수관망 시스템의 수요량은 시간에 따라 변화하므로, 본 절에서는 시간별 수요패턴(Demand Pattern)을 고려하여 골격화 전, 후 수위 및 수질 해석 결과를 비교, 분석하였다. 수요 패턴을 고려함으로써 보다 현실적인 모의가 가능할 것으로 판단되며, 따라서 네 가지 골격화 기법의 시간별 모의 결과를 원본 네트워크의 결과와 비교하였다. 해당 네트워크에 적용된 수요 패턴은 Fig. 9에 도시하였으며, 수요패턴값(Multiplier)은 기본 수요량(Base demand) 대비 절점의 시간별 실제 사용량(Actual demand)의 비율을 의미한다. 24시간 주기의 수요패턴을 적용하여 총 모의시간은 168시간으로 설정하였고, 이 중 마지막 24시간(144~168시간)의 결과를 비교, 분석하였다.

국내 송, 배수 시스템의 경우, 펌프를 이용해 고지대에 위치한 배수지(Tank)에 용수를 저장하였다가, 자연유하에 의해 급수지역으로 공급하는 것이 일반적인 운영방식이다. 이 경우 배수지 내 수위변동 및 수질이 하류지역에 미치는

영향이 크므로 가장 먼저, 배수지의 수위와 수령이 골격화 후 제대로 모의가 되었는지를 판단하는 것이 중요하다. 분석을 실시한 결과, Fig. 10에 도시화 바와 같이 대체로 모든 Case에 대해서 배수지 내 수위와 수령의 계산 값이 골격화 이전의 값과 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 11에 주요 절점의 각 Case별 수압 결과를 비교하여 도시하였다. 참고로 Fig. 11의 종축 범위는 모든 절점에서 동일하게 6.0m로 설정하여 절점 간 비교가 용이하도록 하였다. 앞선 ‘3.3.1 고정 수요량 모의’ 결과와 마찬가지로, 대부분의 절점에서 수압은 큰 오차가 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 절점 별 결과를 비교해보면, 배수지로부터 원거리의 망형구간에 위치한 절점 12의 골격화 오차가 가장 큰 것을 알 수 있으며, 그 외의 절점에서는 0.2m 이하의 낮은 편차를 보였다. 즉, 배수지에서 가장 가까운 거리에 있는 절점 3877은 골격화 전, 후 결과간의 오차가 거의 없으며, 반대로 해당 절점까지의 경로에 가장 많은 관로를 보유한 절점 12가 골격화 전, 후 오차가 다른 절점에 비해 큰 것을 알 수 있다. 특히, 절점 3877의 경우에는 배수지의 직접적인 영향을 받기 때문에 수압의 시간별 변화 패턴이 Fig. 10에 도시되어 있는 배수지 수위 패턴과 상당히 유사한 것을 알 수 있다. 시간대 별 오차를

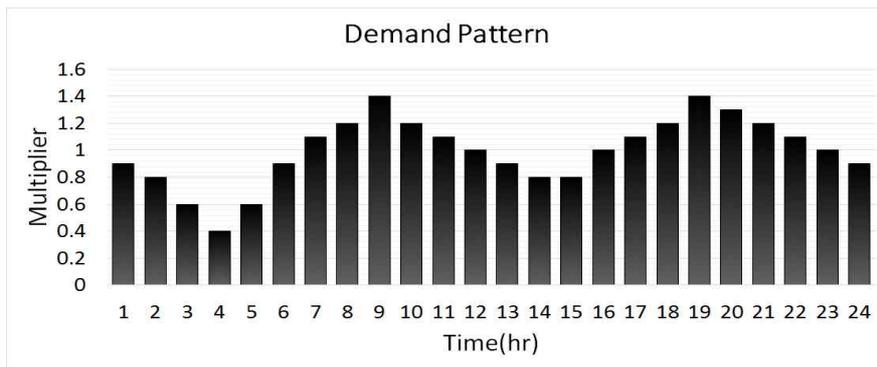


Fig. 9. 24hr-cycle Water Demand Pattern

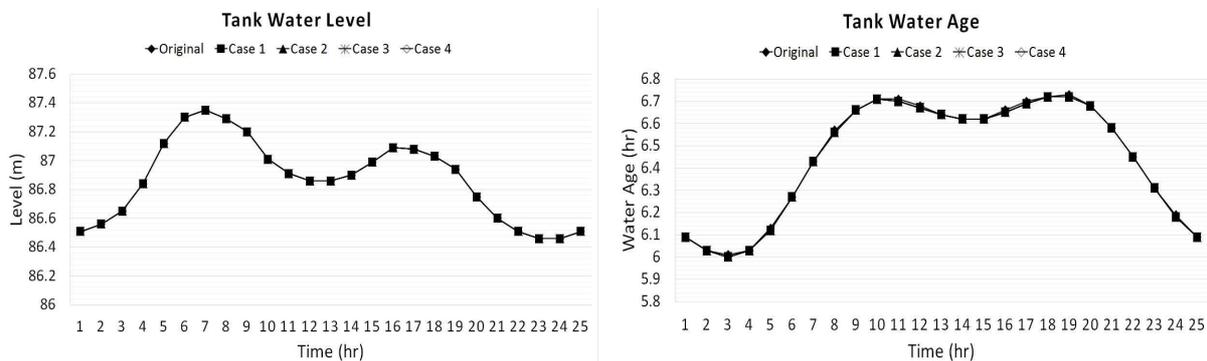


Fig. 10. Comparisons of Tank Water Level and Age for Cases

분석해보면, 수요량(유량)이 증가하는 시간대 일수록 골격화에 의한 오차가 커지는 것을 알 수 있으며, 수요량의 최대 상승 시간인 9시와 19시 부근에서 오차가 가장 크게 나타났다. 골격화 기법 별로 큰 차이가 발생하지는 않지만, 전반적으로 Case 1과 3이 가장 좋은 결과를 나타내고, 반대로 Case 2의 오차가 가장 크게 발생하였다.

주요절점의 Case별 수질해석 모의 결과는 Fig. 12에 도시하였다. 절점 별 결과 비교를 위해 Fig. 12의 종축 범위는 모든 절점에서 동일하게 7.0hr로 설정하였다. 정수장/배수지와 가장 근거리에 위치한 절점 3877은 가장 수량이 적고 골격화에 의한 오차도 가장 낮다. 반대로, 정수장/배수지로부터 가장 원거리의 말단 절점인 절점 11466은 가

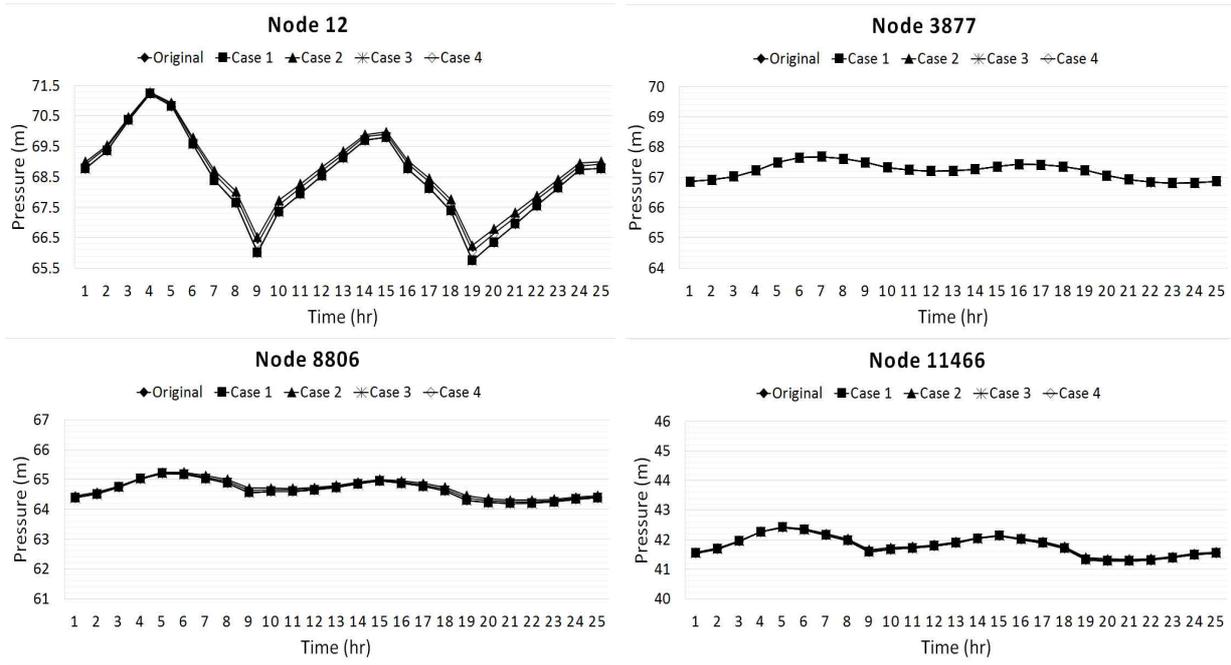


Fig. 11. Temporal Pressure Comparisons at the Representative Nodes

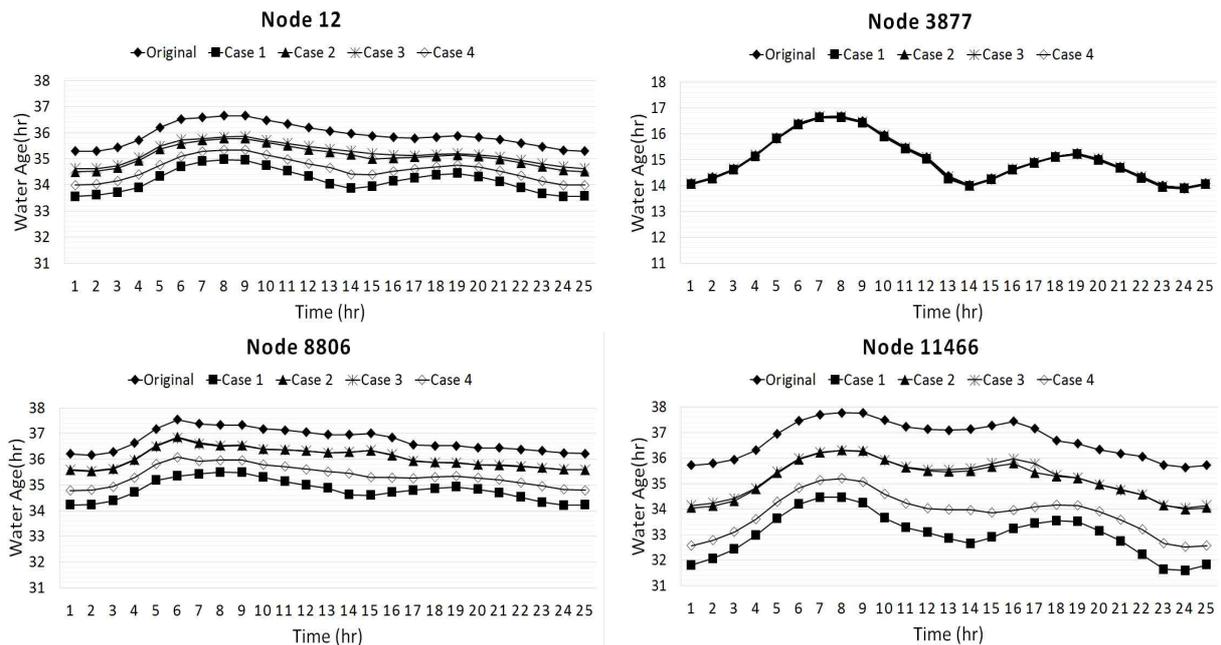


Fig. 12. Temporal Water Age Comparisons at the Representative Nodes

장 수량이 높고 골격화에 의한 오차도 큰 것을 확인할 수 있다. 골격화 기법별로 오차가 큰 차이를 보이는데, Case 2와 3이 골격화 이전 값과 가장 유사한 반면, Case 1은 가장 큰 오차를 보인다. 특히 절점 11466의 경우에는 Case 1의 오차값이 원본 네트워크와 비교하여 4~5hr가량 발생하는 것을 확인할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 네트워크의 골격화(즉, 등가 관경 및 조도계수의 산정)는 기본 수요량을 기준으로 이루어지므로, 시간별 수요패턴을 고려한 시뮬레이션의 경우, 특히 수질모의에 있어서 각 시간대별 발생한 오차가 누적되어 골격화 전, 후 오차가 크게 발생할 여지가 있다.

### 3.4 전체 네트워크 결과 분석

본 절에서는 각 Case별 시스템의 평균 직경, 수압 및 수량 값을 산정하여 비교하였다. 시스템 평균 직경은 시스템 내 모든 관로의 평균값을 의미하며, 평균 수압과 수량 값은 관망 내 모든 절점에서의 평균값을 의미한다. 시스템 평균 직경은 각 관로의 연장을 고려하여 관 연장에 가중치를 두어 가중평균 하였으며, 시스템 평균 수압과 수량은 각 절점의 기본수요량을 가중 값으로 사용하여 가중 평균한 값이다. 각 Case 별 시스템의 평균값을 비교한 결과는 Fig. 13에 도시되어 있다. 이들 시스템 평균값은 적절한 가중인자를 사용하여 추정한 가중평균값으로, 시스템의 모든 절점 및 관로를 포함한 시스템의 대푯값이므로, 각 Case별 결과의 비교, 분석에 유용하게 활용할 수 있다. 우선, 시스템 평균 직경을 살펴보면 Case 2와 Case 3의 평균 직경이 원본 네트워크의 평균 직경과 유사한 반면, Case 1의 평균 직경은 가장 낮고 편차가 가장 큰 것으로 산정되었다(원본 네트워크 대비 45 mm 감소). Case 1 골격화 네트워크의 평균 직경이 낮은 사실은 각각 시스템 평균 수압과 평균 수량이 원본 네트워크 대비 과소 추정된 원인 중의 하나로 유추할 수 있다. 시스템 평균 수압의

경우, Case 1과 Case 3의 결과가 가장 나은 것으로 나타났다. 시스템 평균 수량 값은 Case 2와 Case 3의 결과가 원본 네트워크의 값과 가장 일치하는 것으로 나타났다. 결과적으로 Case 3 골격화 기법이 수압과 수질, 두 가지 인자를 동시에 고려하였기 때문에 평균 수압과 평균 수량 모두 원본 네트워크의 결과와 가장 유사한 값을 나타내었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 대규모 상수관망의 시뮬레이션과 실시간 최적화 모형 적용에 있어 제약이 되었던 계산시간 문제를 개선하기 위하여 다양한 골격화 기법을 제시하고 평가하였다. 등가 관 공식을 적용하여 수압균등, 수질균등, 수압 및 수질균등 등 모두 4가지 골격화 기법을 제시하고 실제 관망에 적용하였다. 각 기법을 통해 구해진 골격화 네트워크를 이용하여 고정수요량 모의 및 변동수요량 모의를 실시하였으며, 원본 네트워크와의 수압 및 수량 비교를 통해 제안된 골격화 기법의 적용가능성을 분석하였다. 실제 시스템을 대상으로 실시한 연구결과를 요약하고 분석된 결론을 정리하면 다음과 같다.

등가 관 공식을 적용하여 직렬 관로의 통합을 통해 원본 네트워크 대비 골격화 후 절점과 관로의 수가 약 65% 감소하였다.

골격화 전, 후 수리해석 시간을 비교한 결과, 원본 네트워크의 수리해석을 EPANET을 이용하여 10,000번 반복 수행하였을 경우 계산시간이 약 1,332초(약 22분) 소요된 반면, 골격화를 진행한 Case1, 2, 3, 4의 경우 각각 458.8초, 458.1초, 471.7초, 468.4초로 평균 약 65% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 골격화에 따른 절점과 관로 수의 감소율과 유사한 결과이며 이러한 수리해석 시간의 감소는 계산 시간이 중요한 실시간 모의에서 큰 도움이 될 것이다. 참

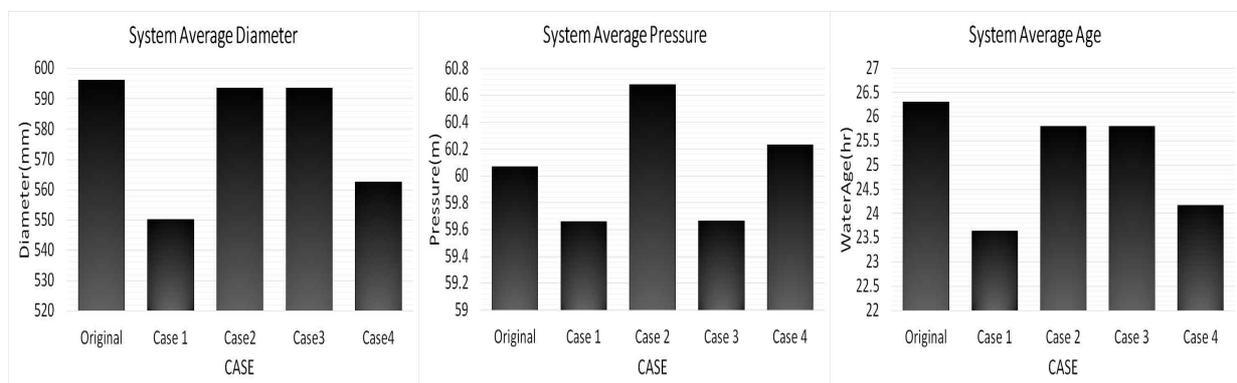


Fig. 13. System Average Results

고로 본 연구의 모든 시뮬레이션은 Intel (R) Core (TM) i5-4570 3.20 GHz의 프로세서와 8.0 GB의 RAM 체원의 PC에서 실행되었다.

절점의 위치에 따라 일부 차이는 있으나, 골격화 전, 후 수압은 큰 오차가 발생하지 않지만, 수령값은 골격화 후 유의한 편차를 보였다. 절점 별 분석에 따르면, 정수지/배수지로부터 원거리의 절점, 해당 절점까지의 경로에 많은 관로를 보유한 절점이 골격화에 따른 오차가 상대적으로 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 제안한 기법은 직렬 관로의 통합을 통한 시스템의 간략화이기 때문에 망(loop)이 다수 존재하는 시스템에서는 오차가 크게 발생할 가능성이 있다.

제안된 4가지 기법 중에서는 등가 관경과 등가 조도계수를 순차적으로 산정하여 수압과 수질기준을 동시에 만족하는 Case 3 방법이 가장 효율적인 골격화 방법임을 알 수 있다.

앞으로의 연구에서는 본 연구에서 제안된 기법을 보다 개선하여, 대규모 망형 시스템으로 적용범위를 확대할 계획이다. 또한, 골격화 네트워크의 활용목적(실시간 최적 운영방안 수립, 시스템 확장계획 수립 등)에 따라 다양한 골격화 기법이 개발되어야 할 것으로 판단된다. 기술적으로는, 시스템의 골격화에 소요되는 계산시간을 단축할 수 있는 알고리즘 개발도 추후에 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 1) 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2013R1A1A1060726)이며, 동시에, 2) 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행된 연구입니다. 이에 감사드립니다.

## References

- Eggener, C.L., and Polkowski, L. (1976). "Network Modeling and the Impact of Modeling Assumptions." *Journal of the American Water Works Association*, Vol. 68, No. 4, pp. 189-196.
- EPANET2 User's Manual. United States Environmental Protection Agency. 2000.
- Jung, B., Boulos, P.F., and Wood, D.J. (2007). "Impacts of Skeletonization on Distribution System Hydraulic Transient Models." World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat. American Society of Civil Engineers.
- KOSIS, Korean Statistical Information Service, Statistics Report of the Waterworks, 2012. (<http://kosis.kr/wnsearch/totalSearch.jsp>)
- Lee, J.P. (2004). Transient Analysis Using Skeletonization Method in Pipeline System. Department of Environmental Engineering Graduate School, Pusan National University, Busan, Korea. pp. 53-87.
- MATLAB User's Manual. The MathWorks, Inc. 2000.
- Raczynski, A., Kirkpatrick, W., Rehnstrom, D., Boulos, P., and Lansey, K. (2008). "Developing Hydraulic and Water Quality Equivalent Systems." Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA2008. August 17-20, 2008, Kruger National Park, South Africa.

paper number : 15-061

Received : 11 August 2015

Revised : 9 September 2015

Accepted : 9 September 2015