

상수관망 부정류 해석을 위한 관망 간략화 방법에 대한 연구

Applicability of Several Skeletonization Methods for the Transient Analysis in the Water Distribution System

이종필*, 김형근**, 김상현***, 이현동****

Jong-Pil Lee · Hyung-Guen Kim · Sang-Hyun Kim · Hyun-Dong Lee

ABSTRACT

It is necessary to analyze the unsteady flow in the pipe network for the better operation and controls, but there are some problems in actual pipe network simulation, such as collecting a large amount of information in the field, operating highly upgraded computer system, and keeping a big storage device to run analysis program. The skeletonization method is used to cope with the problems in this paper. It is expected to reduce computation time, researcher's efforts, and costs for the analyzing the pipe network. The impact of individual pipe elements to the behavior of the water distribution system can be accounted in the process of skeletonization. However it is also important to study continuously about how to apply the skeletonization method for each of different cases, because inadequate uses may bring simulation to a false result. This paper introduces basic theories and skeletonizing examples in the actual pipe network in Dae-gu city.

Key Words : Water Distribution System, Pipe Network, Skeletonization, MOC,

핵심용어 : MOC, 상수관망, 부정류 해석, 간략화 방법, 관망

1. 서론

관수로내의 흐름이 펌프의 가동과 정지, 밸브의 개폐 등에 의해 발생하는 수격현상은 관로 내 각종 시설물들을 파괴하여 상당한 피해를 야기하는 원인이 되고 있다. 관의 파열로 인한 누수, 부압 발생으로 인한 좌굴 등을 고려한 안정적인 시스템 구축과 건설·유지관리비의 절약을 위해서는 부정류 해석을 통한 천이 흐름을 고려한 관망 설계가 필수적이다. 관망에 대한 모든 정보들을 부정류 해석에 사용하는 것은 보다 정확한 결과를 보여주겠지만, 정보의 방대함과 처리의 어려움으로 인해 많은 문제점을 보이고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해서는 실제관망 정보의 간략화가 필요하다. 지금까지 행해진 간략화 방법에 대한 연구는 Eggener와 polkoski(1976)에 의해 처음으로 소개되었으며, 이후에 Shamir와 Hamberg(1988a,1988b)등에 의해 발전되어왔다. 본 연구에서는 예제 관망과 실제 관망의 정보를 이용하여, 부정류 해석의 결과 및 간략화에 의한 영향 및 결과를 평가하고자 한다.

1) 정회원 · LG건설 E-mail : leejp0511@hotmail.com

** 정회원 · 부산대학교 환경공학과 석사 E-mail : kgun213@hotmail.com

*** 정회원 · 부산대학교 환경공학과 교수 E-mail : kimsangh@pusan.ac.kr

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 연구원 E-mail : hdlee@kict.re.kr

2. 방법론

2.1 특성선 방법을 활용한 부정류 해석법

관수로내의 부정류 흐름을 해석하는 방법 중 하나로 특성선방법 (Method Of Characteristics)이 있다. 특성선 방법(MOC)은 미소 공간축과 미소 시간축의 비가 충격파의 속도로 정의된 특성선상에서 운동량방정식과 질량보전방정식을 결합하여 유한차분형태의 적분을 통해 임의의 지점의 수두와 유량을 구하는 해석법으로 계산상의 정확도와 편리성으로 단일관망 및 복합관망의 부정류해석에 가장 널리 사용하는 방법이다. 운동량 방정식과 질량보전 방정식은 식(1), 식(2)로 표현된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2)$$

여기서, h 는 압력수두, Q 는 유량, D 는 내부관경, f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수, c 는 충격파속도, g 는 중력가속도, A 는 관로단면적이다. 식(1)과 식(2)를 조합하여 유량 Q 와 수두 H 로 이루어진 특성방정식을 얻을 수 있는데 이 식은 천이상태에서 효율적인 수치 해석적 해를 구하는데 이용되어진다. 편미분 형태의 두 식이 상 미분 형태의 조합으로 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{dQ}{dt} \pm \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (3)$$

식(3)을 양과 음의 방향의 특성선을 따라 적분을 수행하여, 미지점 P에서의 압력수두와 유량에 대한 정보를 해석할 수가 있다.

2.2 부정류 해석프로그램

부정류 해석프로그램의 방법론으로는 부정류 해석에 가장 보편적으로 사용하는 특성선 방법을 이용하였다. 부정류 해석 프로그램은 저수지, 유량조절밸브, 누수, 에어 챔버, 펌프등과 같은 수리구조물을 포함하여, 상수관망에 대한 적절한 모의를 가능하게 하였다.

부정류 해석은 초기 입력된 자료로부터 상수관망의 구성을 확인한 후 최소의 Courant 수를 찾아서 그에 따른 관망의 재구성 여부를 결정하게 된다. 재구성된 관망은 여러 가지 수리구조물들을 경계조건에 따라 해석하고 선형 시간 보간을 이용하여 미지점에 대한 수압과 유량을 산출하게 된다.

2.3 상수관망의 간략화 방법

간략화는 상수관망에서 시스템에 중요한 영향을 미치는 부분들을 고르는 과정이다. 시스템에 대한 모든 정보들을 부정류 해석에 사용하는 것은 보다 정확한 결과를 보이나, 정보의 방대함과 처리의 어려움으로 인해 많은 문제점을 보이고 있다. 간략화는 불필요한 비용이나 시간을 투자하지 않고도, 신뢰성이 확보되고, 정확한 결과를 얻을 수 있는 실용적인 방법이다. 간략화에 대한 연구는 Eggener와 Polkoski (1976)이 그들의 모델의 적용과 모델 결과의 민감도를 시험하면서 최초로 사용되었으며, 위의 연구를 통해 시스템의 압력에 심각한 영향을 주지 않을 정도의 pipe와 node의 간략화는 가능하다는 것을 알아내었다. Shamir와 Hamberg (1988a,1988b)는 상수관망의 설계 및 분석에 앞서 이루어져야 할 투자의 적당한 방법론과 접근법을 모색하기 위해서 간략화 모델을 연구하였다. 연구의 결과로 모델의 크기를 줄이는 정밀한 규칙을 연구하였고, 이들의 연구결과에 따르면, pipe를 모델에 포함시켜야 되는 절대적인 규칙은 없으나, 적절한 간략화 방법의 사용이 유용함을 보여주고 있다. 간략화 과정에서 포함되어야 되는 관의 특정 지점이 존재하는데, 이는 대규모 상수 소비자, 샘플링 지점과 같은 중

요 포인트, 알려지지 않은 경계지점, 대구경의 관, 중요한 loop의 관망, 펌프, control 밸브, 수조이외의 조절장치 등이다. 간략화 방법을 이용함에 있어서, 모델에 적당한 간략화의 수준을 알아내는 것이 중요하며, 만일 간략화 전과 간략화 후의 모의 결과가 모의 목적을 구현하는 정도에 차이가 없으면, 해당 간략화 방법이 성공한 것으로 간주할 수 있다. Walski 등에 의해 제안된 단순 간략화 방법과 본 논문에서 연구된 Courant 수 변화법, 관로 길이 변화법을 사용하였다.

2.3.1 단순 간략화법

이 방법은 관망의 구조적 형태를 유지하면서, 인접지역에 위치한 여러 개의 수요점을 하나로 통합하여, 간략화를 수행하는 방법으로 간략화 수행자의 주관적인 판단이 일정 역할을 하게 된다. 그러나 관의 저수조나 밸브 같은 중요구조물은 간략화 후에도 보전하도록 수행한다. 이 과정을 통해서 관의 요소수와 절점은 20%~30%로 감소하며, 관의 길이나 관경에는 각각 상한치와 하한치에 약간의 변화를 허용한다.

2.3.2 Courant(Cr) 수의 변화 방법

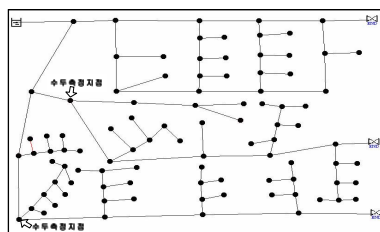
부정류 해석 시에 Cr 수의 변화를 허용하여, 관의 해석을 위한 재구성에 여유를 부여함으로써 관 해석을 실시하는 방법으로 관 요소, 절점, 수요점, 길이나 관경에 변화 없이 해석을 실시하는 방법이다. 본 연구에서는 Cr 수의 0.75를 허용치로 사용하여 간략화를 수행하였다.

2.3.3 관로 길이 변화 방법

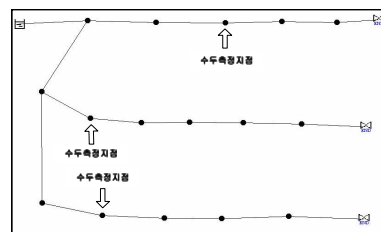
관로 상에서 다양한 길이의 요소가 혼재되어 관망을 구성한다. 이들 각 요소는 각기 다른 환경과 재질로 이루어져있고 관로의 모의 시간을 비약적으로 증대시키는 주요 원인이 되고 있다. 또한 관로 재질의 불확실성과 누수 존재로 인한 압력과 진파 속도의 변화를 고려하면, 관로 길이를 변화시켜 발생하는 불확실성에서 기인되는 모의 결과의 불확실성은 미소할 것으로 예상된다. 관로 길이 변화법은 관 요소, 절점, 수요점, 유량, 관경 등의 제반 요소를 보전하고 일부관망의 길이만 변화시킴으로써 부정류 해석의 관망 재구성의 필요성을 최소화하는 방법이다.

3. 간략화 모의를 위한 예제관망 및 실제관망

기술된 방법론을 시험하고 비교하기 위해 그림 1과 같은 가상관망을 구성하였다. 간략화 작업 이전의 가상관망도는 101개의 관과 99개의 절점, 1개의 저수지, 3개의 유량조절 밸브로 이루어졌으며, Demand의 수는 43지점이다. 각각의 Demand당 유출되는 유량은 $0.0001m^3/s$ 로 가정되었으며, 관망으로 유입되는 총 유량은 $0.0045m^3/s$ 이다. 간략화 작업이후의 가상 관망도는 19개의 관과 20개의 절점, 1개의 저수지, 3개의 유량조절 밸브로 구성되었으며, Demand의 수는 14개로 줄어들었다. 간략화 이후의 모의에 소요된 시간은 63초이다. 예제 관망의 관망 제원은 길이 10m, 관경 25mm, 50mm이다.



(a) 간략화 작업 이전 관망도



(b) 간략화 작업 이후의 관망도

그림 1. 예제 관망도

간략화 방법에 대한 적용성을 평가하기 위하여, D시의 실제 배수구역을 모의하였다. 그림 2(a)에 보이는 관망도의 구성은 142개의 관과 135개의 절점, 147개의 Demand로 구성되어있으며, 유량조절밸

브는 없으며, 저수지에서 유입된 유량이 구역내에서 전량 소비되는 특성을 가지고 있는 구역이다. 구역 내에서 흐르는 총 유량은 $0.01266m^3/s$ 이다. 그림 2(a)의 관망도의 관망 제원은 길이는 최소 3m에서 최대 46.6m이며, 관경은 최소 13mm에서 최대 200mm로 구성되어 있다. 간략화 후의 모양을 보여주는 그림2(b)에 보이는 관망도의 구성은 51개의 관과 45개의 절점, 27대의 Demand로 구성되었다. 그림 2(b)에 보이는 관망도의 관망 제원은 길이는 최소 2.4m에서 최대 56.8m이며, 관경은 최소 40mm에서 최대 200mm로 구성되어있다 두 가지 경우의 모의에 소요되는 시간은 간략화 전의 경우는 1시간 39분 10초가 소요되었으며, 간략화 이후의 경우는 28분이 소요되었다.

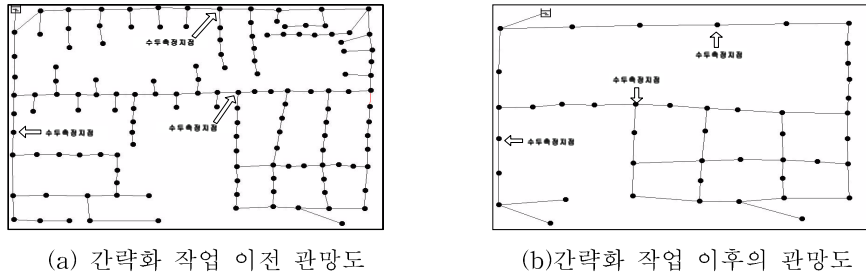
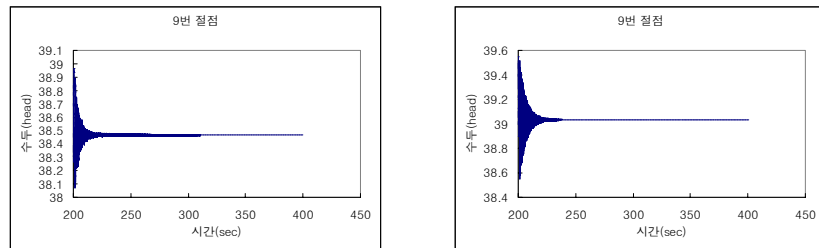


그림 2. 실제 관망도

3.2 적용예

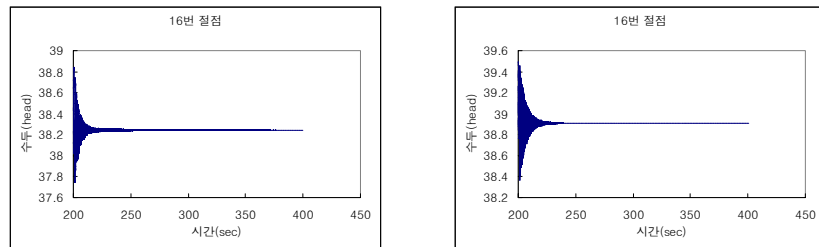
3.2.1 예제 관망

예제 관망에 대한 모의가 시행되었으며, 모의 방법은 관망의 정상상태 형성을 위해서 초기 200초 동안 관망의 아무런 조건 변화 없이 모의되었으며, 200초에서 201초까지 1초 동안의 세 개의 유량조절 밸브를 닫음으로서 부정류를 발생시켜, 관망에 대한 부정류 해석을 시행하였다.



(a)간략화 작업 이전의 절점 수두 (b)간략화 작업 이후의 절점 수두

그림 3. 절점에서의 수두비교

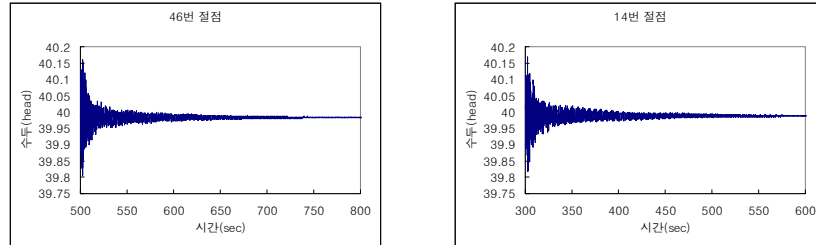


(a)간략화 작업 이전의 절점 수두 (b)간략화 작업 이후의 절점 수두

그림 4. 절점에서의 수두비교

3.2.2 D-시 관망에 대한 모의결과

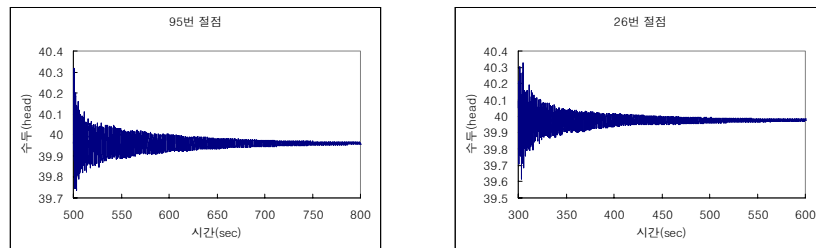
관망의 정상상태 형성을 위해 간략화 이전의 관망에서는 500초의 예비시간을 두었으며, 간략화 이후의 관망에 대해서는 300초의 예비시간을 두었다. 관망에 부정류를 발생시키는 조건은 여러 개의 Demand를 한곳에 집중시키는 방법이 사용되었으며, 부정류 발생이후에 간략화 이전의 관망과 간략화 이후의 관망을 해석하기 위의 300초의 모의시간을 두었다.



(a)간략화 작업 이전의 절점 수두 (b)간략화 작업 이후의 절점 수두

그림 5. 절점에서의 수두비교

그림5.(a)의 46번 절점과 그림6.(b)의 14번 절점은 관망의 위치상 동일한 지점을 가리키며, 그림 2.의 가장 위쪽의 측정 지점이다.



(a)간략화 작업 이전의 절점 수두 (b)간략화 작업 이후의 절점 수두

그림 6. 절점에서의 수두비교

그림 6(a)의 95 절점과 그림6(b)의 26 절점은 관망의 위치상 동일한 지점을 가리키며, 그림 6.의 측정 위치는 그림 2.의 중간지점의 측정위치이다.

표 1. 대구시 관망의 부정류 해석 결과

	First point	Second point	Third point
간략화 전			
수격압 최대치(m)	40.2196	40.1744	40.3307
수격압 최저치(m)	39.7640	39.7744	39.7182
수격압 차이(m)	0.4556	0.4	0.6125
단순 간략화법			
수격압 최대치(m)	40.2350	40.1660	40.2894
수격압 최저치(m)	39.7011	39.7920	39.6264
수격압 차이(m)	0.5339	0.374	0.663
Courant 수의 변화 방법			
수격압 최대치(m)	40.1938	40.1459	40.2571
수격압 최저치(m)	39.7428	39.8509	39.7078
수격압 차이(m)	0.451	0.295	0.5493
관로 길이 변화 방법			
수격압 최대치(m)	40.0701	40.0203	40.0765
수격압 최저치(m)	39.9283	39.9728	39.9335
수격압 차이(m)	0.1418	0.0475	0.143

표 1.에 보이는 바와 같이 간략화전의 수격압 최대치는 40.3307 m로 나타나고, 수격압 최저치는 39.7182 m로 나타났으며, 단순간략화 방법을 적용한 후의 최대치는 40.2894 m, 최저치는 39.6264 m이며, Courant 수를 변화시킨 방법은 최대치는 40.2571 m, 최저치는 39.7078 m, 관의 길이를 변화시킨 방법에서는 최대치는 40.0765 m, 최저치는 39.9283 m로 나타났다. 간략화 전과 후의 결과를 비교해보면, 간략화 방법의 적용 전후의 결과의 차이가 미세함을 알 수 있다.

4. 결론

예제 관망과 D-시의 배수구역 간략화에 대한 수행에 대한 결과를 서로 비교하였다. 간략화 결과는 동일한 경향을 보인다. 간략화 작업을 수행하는 지역에 대해 연구자가 관망의 과다소비자나 측정위치와 같은 주요 요소에 대한 정보의 부족으로 요소에 대한 제외와 포함에 대한 영향을 자세히 알지 못한다면, 모델링을 통한 시행 착오법을 시행함으로써, 요소가 시스템에 미치는 영향을 알 수 있다. 이런 방법을 이용하여 요소의 중요성을 파악하여, 적절한 간략화에 대한 지침을 마련할 수 있을 것이다. 여러 가지 가능성을 평가하면서, 모델에 적당한 간략화의 수준을 알아내는 것이 중요하며, 만일 간략화 전과 간략화 후의 모델링 결과가 근본적으로 같다면, 시스템에 중요한 역할을 하지 않는 관을 적절히 제거한 것이라 볼 수 있다. 만일 관의 중요성이 결정되지 않거나, 의문스럽다면, 제거하지 않는 것이 좋다.

감사의글

본 연구는 환경부의 "차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)으로 지원받은 과제입니다.

참고문헌

1. Egger, C. L., and Polkoski, L.(1976)."Network Modeling and the Impact of Modeling Assumptions." *Journal of the American Water Works Association*. 68(4),189
2. Shamir. U. and Hamberg. D.(1988a)."Schematic Models Distribution System Design I:Combination Concept." *Journal of Planning and Management*. ASCE 114(2). 129.
3. Shamir. U. and Hamberg. D.(1988b)."Schematic Models Distribution System Design II: Continuum Approach." *Journal of Planning and Management*. ASCE 114(2). 141.
4. Roberson, J., Cassidy. J. and Chaudhry M.H.(1993), *Hydraulic engineering*. Boston Graphics, Inc.,(1995).
5. Thomas M. Walski and Donald V. Chase and Dragan A. Savic(2001), *Water Distribution Modeling*. Haestad Methods
6. Wylie. E. B. and Streeter, V. L., *Fluid transient in systems*, Prentice-Hall Englewood cliffs, N.J.(1993)