

통수년수 경과에 따른 C상수 변화곡선의 매개변수 추정

Study on Hazen-Williams's C Value Estimation Considering Burying Period

백천우*, 김석우**, 조덕준***, 김응석****, 김종훈*****

Chun Woo Baek, Seok Woo Kim, Deok Jun Jo, Eung Seok Kim, Joong Hoon Kim

요 지

노후된 상수도 관망의 최적개량 계획수립을 위하여 많은 모형들이 개발되었으며, 이러한 모형들은 수리학적 타당성을 비롯한 다양한 인자들을 복합적으로 고려한다. 관망의 수리학적 타당성을 검토하기 위해서는 관망해석을 통해 절점 압력변화 등이 계획기간동안 만족되어야 하며, 이를 위해서는 관거의 노후정도에 따라 변하는 Hazen-Williams C상수의 변화를 고려하여야 한다. 그러나 Hazen-Williams C상수의 변화는 관거의 매설지역, 통수년수, 수질 등과 같은 여러 가지 복합적인 인자에 의해 차이가 있으며, 실제 유량 및 압력자료 등에 대한 조사에 의해 매설된 관거의 C상수를 추정하여야 한다. 그러나, 대상 지역의 모든 관거에 대하여 유량과 압력을 조사하는 것은 경제적인 문제를 비롯한 여러 가지 이유로 불가능하므로 본 연구에서는 실측된 몇몇 지점의 유량 및 압력 변화에 따라 대상지역에 매설된 관거의 C상수 변화를 추정하는 알고리즘을 제시하였다.

핵심용어 : Hazen-Williams계수, 통수년수, 관망해석, 최적개량계획수립

1. 서론

노후관 개량사업은 예산상, 시공상 등 여러 제약조건에 의해서 장기적인 계획 하에 시행되며 이 때, 언제, 어디에서부터, 어느 위치의 범위를 개량해 갈 것 인지의 우선순위 부여가 필수적이다. 그러나, 현재 우리나라의 노후관 개량사업은 경험적 판단에 의존하여 노후관거를 개량하는 실정이며 국내에 적용하기 위한 몇몇 노후관거 개량계획 수립을 위한 의사결정 시스템이 개발되어 왔다. 노후 상수도관 최적개량계획의 수립방안에 관한 국내 연구는 미비한 실정이며, 김한주(1994) 및 한국수자원공사(1995)에 의해 Sharmir 등(1979)의 모형을 근간으로 한 경제성분석 모형이 제안된 적이 있으며, IP(Integer Programing)을 이용한 최적개량전략(Kim, 1992) 등은 연구된 바가 있다. 백천우(2002)는 ReHS(Revised Harmony Search)를 최적화 기법으로 적용하여 한국수자원공사(1995)의 모형을 경제적, 수리학적 영향 면에서 보다 발전시킨 의사결정시스템을 구축하였다.

국내 적용된 김한주(1994), 한국수자원공사(1995), 백천우(2002) 등의 모형은 Sharmir 등(1979)이 제시한 경제성 분석 모형에 관망해석 프로그램인 KYPIPE를 접목시켜 계획기간동안의 수리학적 타당성을 검토하였으며, 관망 해석 시에 통수년수 변화에 따른 Hazen-Williams C상수의 변화를 고려하기 위해 Mononobe(物部, 1960)가 제안한 식을 이용하였다. 그러나, 매설된 관거의 C상수변화는 매설지역, 통수년수, 수질 등과 같은 다양한 인자에 의해 변하므로, 실제 대상지역의 C상수변화를 추정하기 위해서는 실제 유량 및 압력자료 등에 대한 조사에 의해 매설된 관거의 C상수를 산정하고, 산정된 현재 C상수 값에 의해 시간에 따른 변화 함수를 유도하여야 한다. 그러나 실제 대상 지역

* 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 · E-mail : chunoo@korea.ac.kr
** 정회원 · 세길엔지니어링 수자원부 · E-mail : civilal@hanmail.net
*** 정회원 · 경북대학교 토목설계과 겸임교수 · E-mail : djjo7592@lycos.co.kr
**** 정회원 · 선문대학교 토목공학과 전임강사 · E-mail : hydrokes@sunmoon.ac.kr
***** 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 · E-mail : jaykim@korea.ac.kr

의 모든 관거에 대하여 유량과 압력을 조사하는 것은 경제적인 문제를 비롯한 여러 가지 이유로 불가능하므로 본 연구에서는 실측된 몇몇 지점의 유량 및 압력 변화에 따라 대상지역에 매설된 관거의 C상수를 추정하고 이에 따라 Mononobe(1960)가 제안한 시간에 따른 C상수변화 함수의 매개변수를 추정하는 알고리즘을 제시하였다.

2. 통수년수 경과에 따른 Hazen-Williams C상수의 변화

Hazen-Williams C상수의 변화는 관거의 매설지역, 통수년수, 수질 등과 같은 여러 가지 복합적인 인자에 의해 차이가 있으며, 관내면의 조도와 관로 중의 굴곡, 분기부 등의 수에 따라서도 변한다.

일반적으로 관망해석시 새로운 관을 사용하는 설계에서는 굴곡부 손실 등을 포함한 관로 전체로서 110, 굴곡부손실 등은 별도로 계산하는 직선부의 경우에는 130을 적용하여 설계에 반영한다. 기존에 매설된 관로의 정비 또는 개량시에 C값이 필요하게 되는 경우에는 통수년수 및 수질의 영향이 상당히 다르기 때문에 실제로 조사에 의한 C값의 산정이 필요하다. 그림 1은 일반적인 주철관의 통수년수 경과에 따른 C값 변화를 나타내고 있다(상수도시설기준, 상수도협회, 1997).

Mononobe(1960)는 기존의 관망 자료를 회귀분석하여 Hazen-Williams의 C상수를 다음 식 (1)과 같이 시간에 대한 함수로 표현하였다.

$$C = C_i \left(1 - \frac{a\sqrt{y}}{D}\right)^b \quad (1)$$

여기서, D = 관경(mm), y = 경과년도(year)
 a, b = 관경에 따른 계수
 C_i = 설치초기의 관의 C계수

Mononobe(1960)는 식 (1)에 사용된 계수 a, b 를 다음 식 (2)와 (3)과 같이 유도하였으며 유도된 계수 a 와 b 에 의한 통수년수 경과에 따른 C값 변화는 그림 2와 같다.

$$a = 0.0961659D + 1.15507 \quad (2)$$

$$b = 0.723076D^{-0.0660117} \quad (3)$$

Sharp 등(1988)은 조도변화를 고려하여 관연령과 관경에 따라 다음 식 (4)와 같은 C값의 변화공식을 제시하였다.

$$C = 18.0 - 37.2 \log \left\{ a(T - T_i) / D + 10 \right\}^{(18 - C_i) / 37.2} \quad (4)$$

여기서, a = 조도성장율(ft/year), D = 관경(ft)
 T = 경과년도(year), C_i = 설치 T_i 년 후의 C계수

조도성장율은 pH 또는 Langelier Index(LI)를 이용하여 산정가능하며, Lamont(1981)는 LI에 따른 조도성장율의 산정식을 제시하였고, 국내 도송수강관에 대한 마찰계수를 실측, 분석한 손광익(1996)에 의하면 국내 관의 조도성장율이 0.41mm/년으로 외국에 비해 높아 관의 통수능이 빨리 저하한다는 것으로 나타났다.

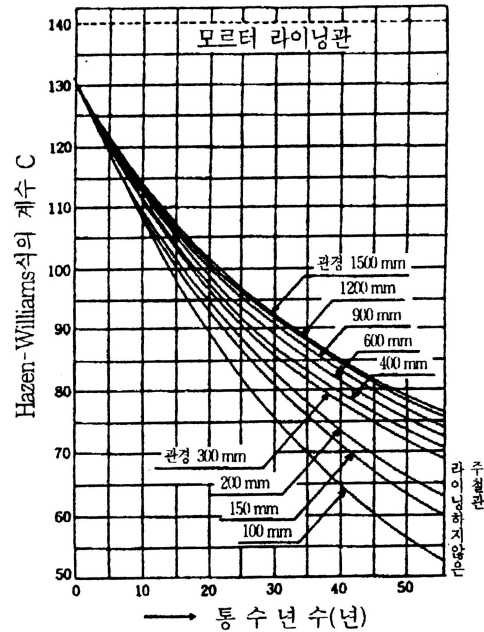


그림 1. 통수년수 경과에 따른 C값 변화

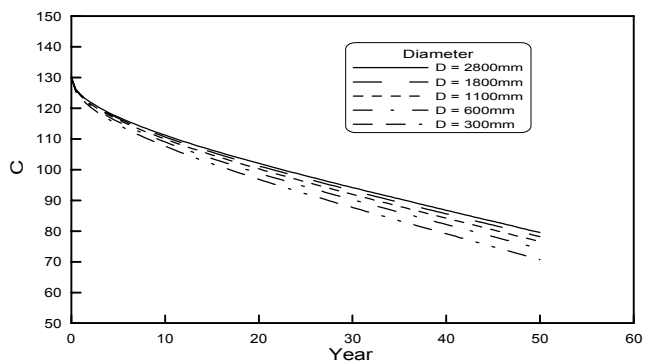


그림 2. 통수년수에 따른 C값 변화(Mononobe)

손광익(1996)은 국내 도송수관의 관령(매설기간)에 따른 통수능의 변화는 외국의 연구결과에 비하여 국내만의 특수한 변화경향을 나타내고 있다고 단정하기 어려우며, Mononobe(1960)공식과 동일한 경향을 나타낸다고 하였고, 실측에 의한 국내 도송수 강관의 C값은 외국평균치에 비해 약 5~10 정도 작게 산정된다고 하였다.

3. 현재 C상수 산정 모듈의 개발

관거의 현재상태 C상수는 각 절점에서의 유량과 수압을 측정하여 실시하는 것이 가장 정확한 방법이지만 이는 실질적으로 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 실제 측정된 일부 지점의 유량과 수압 데이터를 이용하여 각 관거의 C상수 결정모듈을 개발하였다.

블럭을 구성하는 전체 관거에 대한 유량과 수압 측정은 불가능하므로, 관거의 현재 C상수를 산정하기 위해서는, 나뉘어진 각각의 블럭을 대표하는 인접한 몇몇 지점에 대한 유량과 수압 측정이 우선되어야 한다. 유량과 수압을 측정 할 때에는 블럭별 도달시간을 고려하여, 일정 유량과 수압이 유지되는 구간의 값들이 선별하여 이용하여야 한다.

각 관거별 C상수는 측정된 유량, 수압자료를 기본 자료로 하여 최적화 기법인 ReHS(Revised Harmony Search)와 수리해석모형인 Epa-net을 통해 산정된다. ReHS는 최적해를 탐색하기 위한 Meta-Heuristic Algorithm의 하나로 Geem, J. W. 등(2001, 2002)에 의해 Harmony Search(HS)라는 이름으로 개발된 후 백천우(2002)에 의해 수정보완된 최적해 탐색 알고리즘이다.

현재 관거의 C상수는 관거별 C상수를 가정하여 Epa-net에 의해 관망해석을 실시하고, 실측된 유량과 수압자료와 비교하여, 그 차가 가장 작게 될 때의 관거별 C상수를 탐색하는 그림 3과 같은 과정을 통해 이루어진다. 즉 가정된 C상수를 적용하여 Epa-net에 의해 계산된 수압, 유량 값과 실측된 수압, 유량값의 차가 최소가 되는 조건을 탐색하게 된다. 최적해 탐색과정은 최적개량계획 수업에서 사용된 ReHS알고리즘과 동일하며, 주어진 종결 조건에 따라 관거별 현재 C상수값이 결정된다. 적합도함수에 사용되는 각 인자별 가중치와 종결조건은 실제 대상지역 적용을 통해 조정되어야 할 것이다. 현재의 C상수값이 결정되면, 매설년도에 따라 회귀분석하여 C상수변화 함수의 매개변수를 추정하게 된다.

현재 관거의 C상수를 가정하는 방법은 크게 두가지가 있다. 먼저, 각각의 관거에 대해 무작위로 가정하는 방법이 있으나, 이는 실측되는 유량과 수압이 상당히 많은 지점에서 이루어져야 적용 가능한 방법으로 대상 지역에 유량계와 수압계의 설치가 적은 경우 적용이 어렵다. 다음 방법은 식 (1)에 사용된 계수인 a , b 에 대한 식 (2)와 식 (3)의 계수들을 가정하여, 관경과 매설년도에 따라 현재 C상수를 가정하는 방법이다. 즉 실제 최적해 탐색과정에는 C상수를 탐색하는 것이 아닌, 식 (2)와 식 (3)의 계수들을 탐색하는 것으로 이 방법을 적용하는 경우 C상수변화 함수의 매개변수가 직접 추정되게 된다. 본 연구에서는, 후자의 방법을 택하여 실제 사업지구에 적용, C상수변화 함수의 매개변수를 추정하였다.

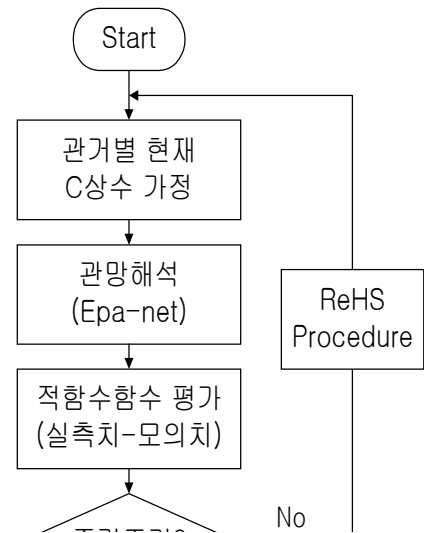


그림 3. 현재 C상수 산정 흐름도

4. 실제 상수도 관망에의 적용

본 연구에서는 개발된 모듈의 적용성을 검토해 보기 위해 실제 대상지역을 선정하여 모듈을 적용해보았다. 대상 지역은 대구광역시내의 수도관리사업소 관할의 네 개의 소블록으로 구성된 1개 중블록에 대하여 개발된 모듈을 적용하였으며 대상지역내에 관경 80mm 이상인 260개의 관과 198개의 복합절점으로 이루어진 관망을 구성하였다. 관망내에는 전자식 압력계를 포함한 총 8개의 압력계와 전자식 유량계를 포함한 총 10개의 유량계가 설치되어 있으며, 이 중 4개소의 유량과 4개소의 수압 데이터가 최소 10초 단위로 인터넷망을 통해 획득, 저장 가능하다. 그림 4에는 대상 관망의 구성을 나타내었고, 그림 5와 그림 6에는 매설된 관거의 관경과 매설년도를 나타내었다.

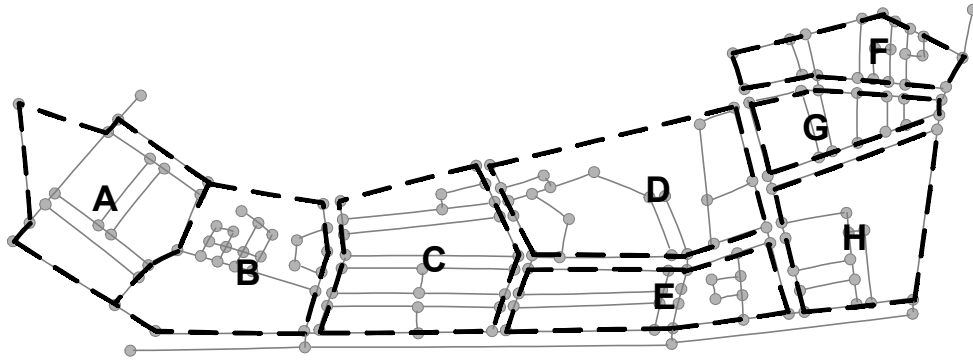


그림 4. 관망의 구성

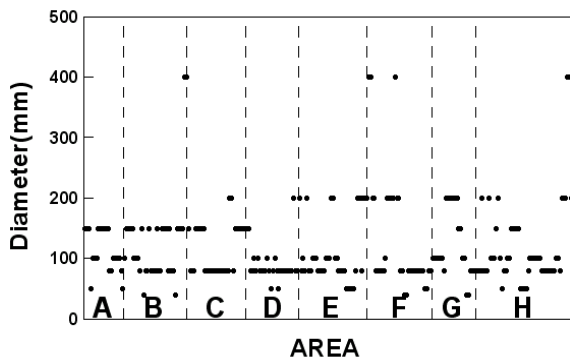


그림 5. 관거의 관경 현황

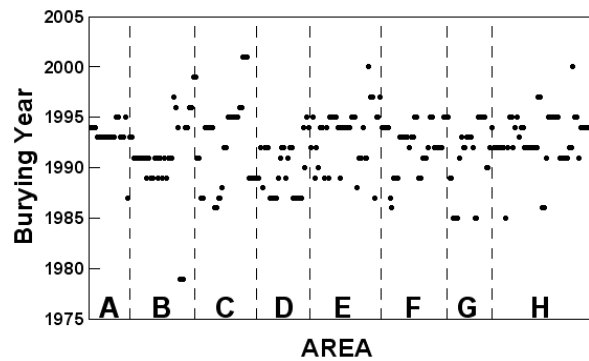


그림 6. 관거의 매설년도 현황

대상지역의 매설관거 현황을 살펴보면 대부분의 관거가 200mm이하의 배수지관들이며, 1990~1995년 사이에 집중적으로 개량사업이 이루어진 비교적 신설관로들로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 대상지역의 관망은 각 소블럭 유입구에서 블럭 최종단까지의 도달시간이 15~20분인 비교적 작은 관망으로, 개발된 모듈을 적용하기 위해 최대 편차 5%이내에서 20분이상 지속적인 유량과 수압이 유지되는 자료를 선별하여 총 50개 시간구간의 실측 자료를 수집하였다. 실측자료는 비교적 물 사용량의 편차가 작은 야간시간대의 자료를 선별하였다. 각 절점에서의 용수수요는 소블럭 유입구에서의 유입량을 각 절점에 해당하는 세대별 가중치로 분배하여 적용하였다. 최적화 과정에 사용된 조건으로 최대 반복계산(iteration)은 5000회를 적용하였으며, 초기 가정되는 C 값은 Mononobe(1960)식에 의한 값을 이용하였다. ReHS모듈에 의해 산정된 식 (1)의 계수 a , b 는 다음 식 (5)와 (6)과 같다.

$$a = 0.1360539D + 1.14830 \quad (5)$$

$$b = 0.542391D^{-0.0996917} \quad (6)$$

그림 7에는 식 (1)~(3)과 같은 Mononobe(1960)식에 의해 산정된 관거별 C 값이 나타나 있으며, 그림 8에는 개발된 ReHS모듈에 의한 관거별 C 값이 나타나 있다. 결과를 살펴보면 Mononobe(1960)식에 의한 관거의 현재 C 값과 개발된 모듈에 의해 산정된 C 값은 총 260개의 관거 중 같은 값을 나타내는 관거가 56개이며 나머지는 (-1)~(+6)의 범위 내에서 차이를 나타내었다. 이는 실측 데이터를 얻기 위해 설치된 유량계와 압력계의 개수가 적어, 실측치와 모의치를 검정하기 위한 데이터가 부족한 점과, 초기 C 값 가정치가 Mononobe(1960)식에 의해 발생된 것을 감안하면 어느정도 예측된 결과라 할 수 있다. 그러나, 국내 도송수관의 관령(매설기간)에 따른 통수능의 변화가 Mononobe(1960)공식과 유사한 경향을 나타낸다는 손광익(1996)의 연구결과와도 유사한 결과를 나타내고 있다. 따라서 관망내에 좀 더 많은 유량계와 압력계가 설치되어 보다 양질의 자료를 획득 한다면, 보다 타당한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

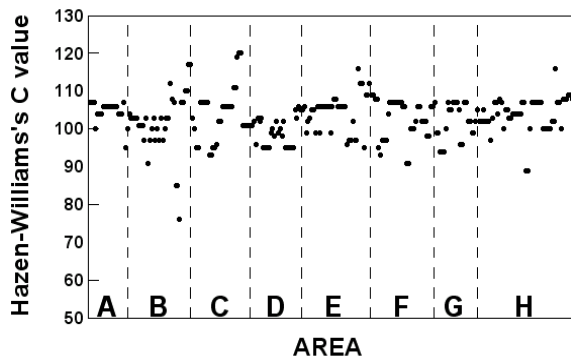


그림 7. 관거의 현재 C값(Mononobe)

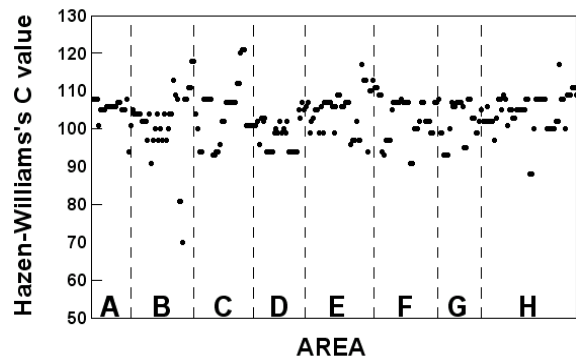


그림 8. 관거의 현재 C값(ReHS)

5. 결론

국내에서 개발된 노후상수도관망 최적개량계획 수립모형에서는 관거의 노후도 정도를 나타내기 위해 시간에 따른 Hazen-Williams C 상수를 Mononobe(1960)식에 의해 산정하였으나, 관거의 매설지역, 통수년수, 수질 등과 같은 여러 가지 복합적인 인자에 의해 영향을 받는 C 상수는 실측자료를 통해 추정하여야 한다. 그러나, 대상 지역의 모든 관거에 대하여 유량과 압력을 조사하는 것은 경제적인 문제를 비롯한 여러 가지 이유로 불가능하므로 본 연구에서는 실측된 몇몇 지점의 유량 및 압력 변화에 따라 대상지역에 매설된 관거의 C상수 변화를 추정하는 모듈을 제시하였다. 대구광역시 관할 1개 중블럭에 개발된 모듈을 적용하여, 기존식에 의한 결과와 비교하였으며, 비교적 타당한 결과를 나타내었다. 그러나, 개발된 모듈은 좀 더 많은 지점에서 측정된 실측 데이터에 의해 보완되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국환경기술진흥원의 차세대핵심환경기술개발사업의 지원(과제번호 : 110070006)으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김한주 (1994). "물분배 시스템의 최적 관개량 의사결정 모형에 관한 연구", 석사학위논문, 고려대학교 대학원.
2. 손광익 (1996). "주변환경을 고려한 상수도관망의 관 마찰손실계수 산정", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제 29권, 제 4호, pp223~231.
3. 백천우 (2002). "ReHS를 이용한 상수도관망 최적 개량 의사결정 시스템의 개발", 석사학위논문, 고려대학교, 대학원.
4. 한국수도협회 (1997). "상수도시설기준".
5. 한국수자원공사 (1995). "수도관 개량을 위한 의사결정 시스템 개발".
6. 物部長穗 (1960). 水理學. 岩波書店刊, pp 155-158.
7. Geem, Z. W., J. H. Kim, and G. V. Loganathan (2001). "A New Heuristic Optimization Technique: Harmony Search.", Simulation, Vol.14, No.1, pp.34-39.
8. Geem, Z. W., J. H. Kim, and G. V. Loganathan (2002). "Harmony Search Optimization : Application to Pipe Network Design.", International Journal of Modeling and Simulation, Vol.22, No.2, pp.125-133.
9. Kim, J. H. (1992). "Optimal Rehabilitation/Replacement Model for Water Distribution System", Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, Texas, December.
10. Lamont, P. A. (1981). "Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness", Journal of the American Water Works Association, Vol.73, No.5, pp.274~280, May.
11. Shamir, U. and Howard, C. D. (1979). "An Analytic Approach to Scheduling Pipe Replacement", Journal of the American Water Works Association, Vol.71, No.5, pp.248~258, May.
12. Sharp, W. W., and Walski, T. M. (1988). "Predicting internal roughness in water main.", Journal of the American Water Works Association, Vol.73, No.11, pp.579~582, May.