

ReHS를 이용한 상수관망 최적개량 의사결정 시스템의 개발

Development of Optimal Decision-Making System for Rehabilitation of Water Distribution Systems Using ReHS

백 천 우* / 김 응 석** / 박 무 종*** / 김 중 훈****

Baek, Chun Woo / Kim, Eung Seok / Park, Moo Jong / Kim, Joong Hoon

Abstract

The study on the plan for rehabilitation project of domestic water distribution system - especially using Heuristic Algorithm as Genetic Algorithm which is expected to provide a more optimal solution effectively - has not been done sufficiently. The purpose of this study is the development of the optimal decision making system for the rehabilitation of the water distribution system considering economic and hydraulic influences using ReHS which is recent study of OR technique. Five different models with different objective functions are developed and tested to virtual pipe network according to various conditions considered in this study. These models provide more options for the rehabilitation of pipe network systems compared to previously suggested models in the literature.

keywords : pipe network, rehabilitation, decision-making, Harmony Search, ReHS

요 지

노후관망의 최적개량 계획수립 시에는 수리학적 타당성을 포함한 다양한 인자들이 복합적으로 고려되어야 하며 모형에 고려할 인자들이 증가할수록 보다 효율적인 최적화 기법의 적용이 필요할 것이다. 그러나, 국내에서는 유전 자알고리즘과 같은 보다 효과적인 알고리즘을 이용한 노후관 개량을 위한 의사결정시스템에 대한 연구가 미비한 실정이다. 본 연구의 목적은 최근 국내에서 제안된 ReHS라는 최적화기법을 이용해 기존의 모형에서 고려하지 않은 다양한 인자들을 고려한 상수관망 최적개량 의사결정 시스템을 개발하는데 있다. 본 연구에서는 고려하는 조건에 따라 다른 목적함수를 갖는 5개의 모형을 개발하여 가상관망에 적용하였으며, 기존에 개발된 모형들보다 타당한 결과를 나타내었다.

핵심용어 : 관망, 관개량, 의사결정, 화음탐색법, ReHS

1. 서 론

노후관 개량사업은 예산상, 시공상 등 여러 제약조건에 의해서 장기적인 계획 하에 시행되게 된다. 이

때, 언제, 어디에서부터, 어느 위치의 범위를 개량해 갈 것인지의 우선순위 부여가 필수적이라 하겠다. 그러나, 현재 우리나라의 노후관 개량사업은 경험적 판단에 의존하는 노후관 평가 및 대안의 선정, 사고예방

* 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea
(e-mail: chunoo@korea.ac.kr)

** 선문대학교 공과대학 토목공학과 전임강사
Instructor, Dept. of Civil Engineering, Sunmoon Univ., Choong-nam 336-703, Korea

*** 한서대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanseo Univ., Choong-nam 356-706, Korea

**** 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수
Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

을 위한 대응적 차원의 개량 사업을 실시함으로써 인해 경제적 손실은 물론 시스템의 기능향상이 이루어지지 않고 있는 실정이다. 더욱이 2011년까지 노후관거 개량사업을 위해 환경부에서 계획하고 있는 막대한 예산을 고려한다면 이러한 예산을 효율적으로 사용하여 관망 시스템의 성능개선을 도모할 수 있는 노후관거 개량계획 수립을 위한 의사결정 시스템이 절실히 필요한 시점이다.

과거에 수행되어온 상수도관개량 최적개량계획 수립 모델로서는 크게 경험적 판단에 따른 개량모델, 경제성 분석을 이용한 모델, O.R. 기법의 수식모델 등 세 가지로 분류 될 수 있으며 국외에서 수행된 대표적인 연구들은 다음과 같다.

경험적 판단에 따른 개량모형으로는 Walski (1987), Sullivan (1982) 등의 모형이 있으나 이러한 모형들은 실제 현장자료와 몇 가지의 일반적인 지침에 기초를 둔 모형으로, 최적화 기법이 적용되지 않았다. 또한, 실제 관로개량에 대한 자료가 통합적으로 관리되지 않고, 자료의 양도 부족한 우리나라의 실정에는 적합하지 않은 모델이라 할 수 있다.

경제성 분석을 이용한 모델로는 Shamir 등(1979)과 Walski (1982)의 모델이 있으며, Sharmir의 모형은 많은 상수도관개량 최적개량계획 수립모형의 근간이 되어 왔다. 그러나 이들 모형은 단순히 경제성 분석을 통한 최적 교체시기를 결정하였으므로, 관망의 수리학적 타당성 등을 고려하는 복합적인 의사결정 모형은 아니라 할 수 있다.

O.R. 기법의 수식모델인 Woodburn 등(1987)과 Lansley 등(1992)의 모형은 학문적 모형에 지나지 않으며, 적절한 시기에 교체나 갱신을 판단할 수 있는 의사결정을 실무적으로는 지원하지 못하였다. 또한 Halhal 등(1997)의 모형은 관망의 수리학적 함수, 물리적 건전도 함수, 수질함수, 비용함수 등을 매개변수로 유전자 알고리즘인 Messy Genetic을 이용하여 관망의 매설년수에 따른 최적 개량시기를 제시하였으나 목적함수를 구성하는 매개변수의 상관성이 떨어지는 단점이 있다.

노후 상수도관 최적개량 계획수립 방안에 관한 국내 연구는 미비한 실정이며, 경제성 분석을 통한 최적개량 전략(김한주, 1994; 한국수자원공사, 1995)이나 IP (Integer Programing)을 이용한 최적개량전략(Kim, 1992)은 연구된 바가 있으나, 기법 면에서 보다 나은 최적값을 찾을 수 있는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)등과 같은 발견적 탐색법(heuristic algorithm)을 이용한 최적개량전략은 연구된 바가 없다.

따라서, 본 연구에서는 국내에서 제안되어 연구되고 있는 화음탐색법(Harmony Search, HS)의 발전된 형태

인 ReHS (Revised Harmony Search)를 최적화 기법으로 적용하여 경제적, 수리학적인 영향을 고려한 물 분배 시스템의 최적개량계획 수립을 위한 의사결정시스템을 구축하였다.

2. ReHS(Revised Harmony Search)의 이론적 전개

1970년대 이후 자연현상에 기초한 알고리즘들이 개발되기 시작했으며, 전자계산기의 발달로 새롭게 개발된 알고리즘의 실질적인 응용이 더 많은 분야에서 가능하게 되었다. 이런 종류의 발견적 탐색법 중 널리 알려진 것들로는 EP (Evolutionary Programming), ES (Evolution Strategies), SA (Simulated Annealing), TS (Taboo Search), NN (Neural Network), GA (Genetic Algorithm)등이 있으며, 본 연구에서는 국내에서 제안된 화음탐색법(Harmony Search, HS)의 발전적 형태인 ReHS (Revised Harmony Search)를 최적화 기법으로 적용하였다.

2.1 Harmony Search

대부분의 발견적 탐색법이 자연현상의 관찰을 통해 만들어 졌지만, HS는 화음(harmony)이라는 인공적인 현상에서 영감을 얻어 만들어진 알고리즘으로 김종우(2000)에 의해 처음 제안되었다. 여러 가지 악기가 소리를 내 화음을 만들 때, 각 악기에서 나오는 여러 소리는 하나의 화음을 생성하게 되며 화음 중에는 잘 어울리는 화음이 있을 수도 있고, 불협화음을 나타내는 경우도 있을 것이다. 연습과정을 통해 불협화음은 점차 사라지게 되고, 화음으로서 적합한 화음(local optimum) 중에서도 미적으로 가장 아름다운 화음(global optimum)이 있을 것이며 많은 연습을 통해 구성할 수 있을 것이다. HS는 연습과정(반복계산)을 통해 찾아지는 최적 화음이 찾고자 하는 최적해라 보는 기법이다.

HS에서도 다른 기법과 같이 몇 가지의 인자들을 사용하는데 이러한 인자로는 HM (Harmony Memory), HMCR (Harmony Memory Considering Rate), PAR (Pitch Adjusting Rate)등이 있다.

- HM (Harmony Memory)

HM이란 연습과정을 통해 경험한 화음 중에서 좋다고 생각되는 화음들을 모은 집합으로 새로이 나타난 화음이 기존의 HM에서의 최악의 화음보다 좋다면 이 화음이 HM에 추가되며 기존의 화음 중 최악의 것은 HM에서 탈락하게 되는 것이다. HM의 구조도는 그림 1과 같다.

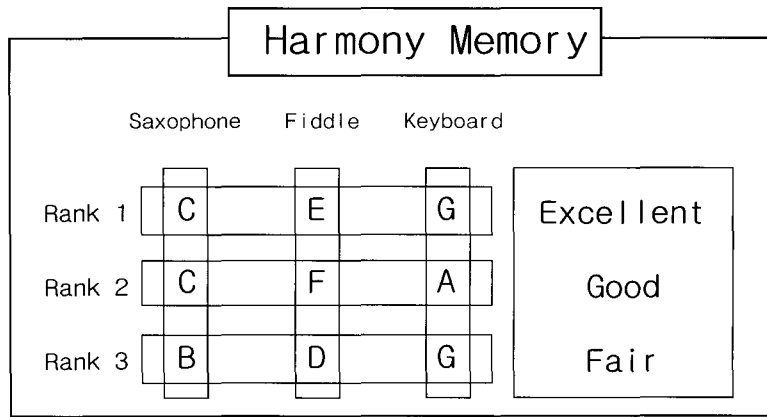


그림 1. Harmony Memory의 구조

그림 1에서와 같이 saxophone, fiddle, keyboard의 세 개 악기가 내는 소리로 만들 수 있는 화음은 여러 가지가 있다. 그러나, 화성악(和聲樂)적 입장에서 볼 때에는 그림의 세 화음 중에는 장3도로 이루어진 (C, E, G)이 (C, F, A)나 (B, D, G)보다는 잘 어울리는 화음이다. 또한 (C, F, A)가 (B, D, G)보다는 좋은 화음이 되며, HM 안에서 순차적으로 배열된다. 이렇듯 HS에서는 탐색하고자 하는 각 매개변수를 악기라 하고, 매개변수의 값을 악기의 음조라 하면 HS에서는 가장 잘 어울리는 악기의 소리조합을 탐색하는 것이다. 이때 화음의 어울림 정도는 GA에서와 같이 적합도함수로 판단하게 된다.

- HMCR (Harmony Memory Considering Rate)

HMCR이란 새로운 화음을 만들 때, HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어 낼 것인가 아니면 전체 정의영역에서 무작위로 만들어 낼 것인가 하는 확률이다. 그림 2에서는 (B, D, G)가 가장 어울리지 않는 화음으로 최하위에 랭크되었으며 HMCR을 적용하여 새로운 화음 추가 시에 fiddle의 자리에 올 수 있는 소리는 다음과 같은 두 가지 경우에 따라 달라진다. 첫째, 전체 정의영역에서 새로운 화음을 구성할 때에는 가능한 모든 소리인 (C, D, E, F, G, A, B)안에서 새로운 화음의 fiddle음을 결정하게 된다. 둘째, 기존 HM안에서 새로운 화음을 구성할 때에는 HM안에서 fiddle의 음으로 존재하는 (E, F, D)안에서 새로운 화음의 fiddle음을 선택하게 된다. HMCR의 기능은 해가 국지해에 빠지지 않고 더 나은 곳으로 찾아갈 수 있는 가능성을 부여하는 것으로 마치 GA의 돌연변이율과 유사한 기능이라고 할 수 있다.

- PAR (Pitch Adjusting Rate)

PAR은 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.

HS는 이들 인자를 기본으로 작동하며 기본 흐름은 그림 2와 같다. 그림 2와 같이 HS에서는 가능 해의 조합으로 HM를 구성하여, HM안에서 HMCR과 PAR을 적용하여 최적해에 접근해가는 과정을 통해 해를 탐색한다.

HS는 다른 발견적 탐색법인 EP, ES, SA, TS, GA등과 같이 가능해 영역에서 반복과정을 통해 최적해를 탐색하는 면에서 유사성을 갖으나, HS는 기존의 발견적 탐색법인 SA나 TS와 달리 광대한 영역을 통한 군탐색을 실시하지만 과거의 경험을 축적하고 있다는 측면에서는 TS의 특징을, 해가 꼭 최적이지 아니라도 어느 정도 좋은 범위에 들면 경험의 집합에 추가한다는 점에서는 SA의 특징도 지니고 있는 탐색기법이다. 또한, 군탐색의 특징을 가지고 있는 GA의 경우 새로운 해를 생성할

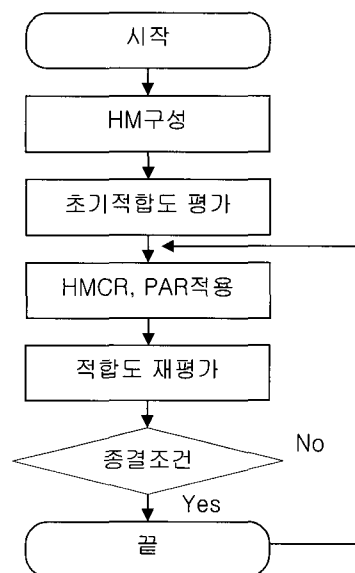


그림 2. HS의 기본 흐름

때 오직 부모세대의 두 유전자만이 새로운 유전자에 영향을 주며 양 부모의 경험만이 새로운 유전자의 정보가 되지만, HS는 과거의 모든 화음에서부터 경험을 얻기 때문에 새로운 해가 보다 풍부한 정보를 통해 구해질 수 있다. 표 1에는 최근 많은 공학적 분야에서 적용되는 GA와 HS의 특징을 비교해 나타내었다.

2.2 Harmony Search의 발전형태

- MHS (Modified Harmony Search)

MHS는 발전된 HS의 한 형태로 백정록(2001)에 의해 연구되었다. 백정록은 PAR의 적용방법에 따라 HS를 HS1, HS2, HS3의 세 가지로 구분하였으며 HS2의 PAR변화를 기본으로 하여 HS의 기본흐름은 유지하되 주요 인자인 HM, HMCR, PAR의 적용에 변화를 준 세 가지 형태의 MHS를 제안하였다.

- ReHS (Revised Harmony Search)

ReHS는 최적해 탐색속도와 정확도를 향상시킨 보다 발전된 형태의 HS로 백천우(2002)에 의해 제안 되었다. HS와 MHS가 갖는 최적해 탐색 후반기의 탐색 속도와 관련된 문제를 해결하기 위해 ReHS에서는 HMCR과 PAR 적용 방법에 변화를 주었다. ReHS의 가장 큰 특징은 반복계산과정이 진행됨에 따라 HMCR과 PAR값에 점차 변화를 주는 것과 다수의 화음과 매개변수에 대해 HMCR과 PAR을 적용하는 것이다.

3. 모형의 구성

3.1 모형의 기본 알고리즘

관망의 최적 개량계획 수립모형은 그림 3과 같이 관망의 개량에 소요되는 비용과 개량으로 인해 관망이 개선되어 얻어지는 비용(개선이익)을 산정해 이 값이 최소가 되며, 계획기간동안의 수리학적 타당성을 만족시키는 개량계획을 세우는 것을 기본으로 하며 크게 다섯 단계로 이루어진다.

- Step 1 : HM의 구성

교체(replacement), 갱생(rehabilitation), 유지보수(maintenance & repair)의 세 가지를 개량방법으로 한

다면 우선 계획기간동안의 각 관망별 개량 계획으로 HM를 구성한다.

- Step 2 : 비용산정

HM의 구성이 완료되면 관망자료를 입력하여 각 화음별로 구성된 개량방법에 대해 총 개량비용과 개선이익으로 구성되는 적합도함수 값을 산정하고 화음을 순차적으로 나열한다.

- Step 3 : 수리학적 타당성 검토

관거 매설년도가 경과함에 따라 관거의 Hazen-Williams 계수 C값은 감소할 것이며, 관망해석 모형인 KYPIPE를 이용하여 C값 감소에 따라 변하는 관망 내 모든 절점에서의 압력을 점검하여 수리학적 타당성 검토를 한다. 가장 최소의 비용이 나오는 화음(관망별 개량방법)에 대하여, 계획기간동안의 모든 절점에서의 압력이 기준치(최대압력, 최소압력)를 만족하는 경우, 이때의 개량방법은 발생된 화음 중 최소비용을 갖으며 수리학적으로도 적합한 값으로 남게 된다. 계획기간 동안 한 곳의 절점에서라도 기준값을 벗어난 압력이 계산되

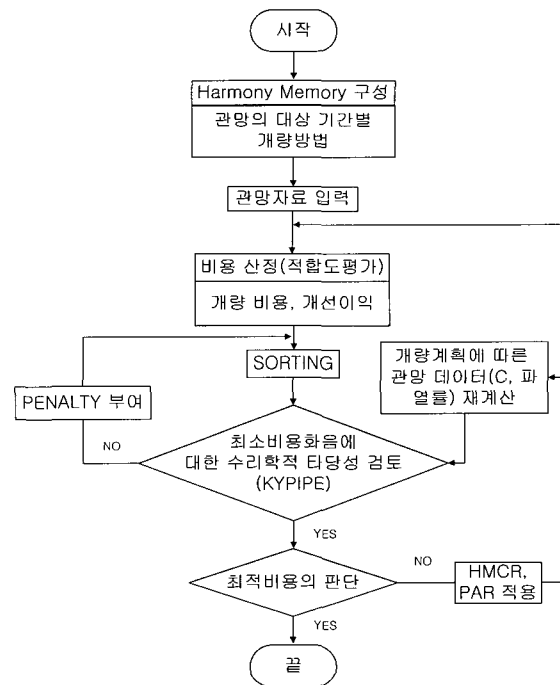


그림 3. 모형의 기본 알고리즘

표 1. HS와 GA의 비교

구분	HS	GA
공통점	- 기능해 영역 내 반복계산을 통한 최적해 탐색(군탐색) - 최적해에 근사한 유전자(화음)의 저장을 통한 탐색속도 향상	
차이점	- 과거 경험한 모든 화음에서 새로운 화음 획득 - 2진수 코딩 불필요(탐색속도 향상)	- 부모세대의 두 유전자만 새로운 유전자에 영향 - 2진수 코딩 필요

는 경우 벌점(penalty)을 부여하고 수리학적으로 문제가 없는 화음을 찾을 때까지 다음의 최소 비용을 갖는 화음에 대하여 수리학적 타당성 여부를 검토한다. 벌점은 LP (Linear Programming)의 한 기법인 Big-M Method에서와 같이 적합도함수 값으로 아주 큰 값을 주며, 전체 HM가 수리학적으로 부적당하게 되면 새롭게 화음을 구성하여 과정을 반복하게 된다.

- Step 4 : 최적비용의 판단

수리학적 타당성 검토가 끝나면 계산된 화음 중의 최소비용이 원하는 최적비용의 조건을 만족하는가에 대한 판단을 내리고, 최적비용으로 판단되면 결정된 계획기간 동안의 개량방법을 출력하고 모형을 종료시킨다. 최적비용이 아닌 경우 Step 5의 단계로 넘어간다.

- Step 5 : HMCR, PAR의 적용

HMCR 및 PAR은 기존 HM에서 선택된 대상 관망의 개량 계획 외에 다른 개량 계획을 구성하여 보다 낮은 개량계획을 탐색하기 위해 적용하게 된다. HMCR과 PAR 적용이 끝나면 Step 2의 과정을 실시한다. 즉, 새롭게 구성된 HM에 대하여 개량비용을 계산하고 다시 순차적으로 나열한다. 새롭게 구성된 HM 중 최소비용이 원하는 최적비용 수준을 만족시키면 계산을 종료하고, 만족시키지 않으면 다시 HMCR과 PAR을 적용하여 최적비용을 갖게 될 때까지 과정을 반복하게 된다.

3.2 목적함수의 구축

모형에서 사용되는 목적함수를 구성하는 비용은 관망의 개량에 소요되는 개량비용(cost of improvement)과 개량으로 인해 관망이 개선되어 얻어지는 개선이익(benefit after improvement)으로 구분할 수 있다. 이 값

의 차를 산정하는 것을 목적함수로 하여 목적함수 값이 최소가 될 때 최적비용을 갖는 최적개량계획이 수립되게 된다. 본 연구에서는 개량비용으로는 교체, 갱생, 유지보수비용을 고려하였으며, 관개량 후 얻어지는 양수비용의 절감액과 누수 절감으로 인한 이익을 개선이익으로 고려하였다.

목적함수를 구성하는 각 매개변수의 정의는 표 2와 같으며 물가상승률 및 공사비상승률 고려 여부에 따라 현가로 환산한 개량비용, 개선이익 함수는 표 3과 같다. 또한 모형에서 고려하는 개량비용과 개선이익의 변화에 따른 개량계획 변화를 검토하기 위해 한국수자원공사(1995)에서 사용한 식을 확장시켜 표 4와 같이 목적함수를 다르게 구성하였다.

각 조건별로 공통적으로 적용한 제약조건으로는 목표년도 전체에 대한 수리학적 타당성이 있다. 본 연구에서는 각 절점압을 KYPIPE를 이용해 산정하고 이를 수리학적 타당성 검토를 위한 기준으로 하였으며 이를 표 1에 나타나 있는 매개변수를 이용하여 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\text{Subject to } p_{\max} \geq p_{jk} \geq p_{\min},$$

$$j = 1, 2, \dots, N_n, \quad k = 1, 2, \dots, N_y \quad (1)$$

4. 비용산정 및 관망자료의 수집

4.1 관망자료의 수집

관의 유지보수비용 산정을 위한 시간에 따른 관 파열률 함수는 강관 파열자료를 회귀 분석하여 지수함수로 유도한 김한주(1994)의 자료를 사용하였으며 시간 t (year)에 대한 누가 관 파열률 함수는 식 (2)와 같다.

표 2. 매개변수의 정의

구분	정의	구분	정의
t	년(year)으로 표시되는 시간함수	C_p	관 개량 후 절감되는 양수비용
t_0	원관 매설년도	C_l	관 개량 후 누수절감으로 인한 이익
t_p	현재시점	G	물가 상승률
t_r	교체시기	I	공사비 상승률
t_{re}	갱생시기	R	이자율
t_d	계획기간	N_p	관망을 구성하는 관거 수
C_r	관경별 교체비용	N_n	관망을 구성하는 절점 수
C_{re}	관경별 갱생비용	N_y	계획기간
$N(t)$	t 년의 단위길이당 파열률(1회/m/year)	p_{\max}	절점 최대 동수압
A	증가비율상수(1/year)	p_{\min}	절점 최소 동수압
C_b	하나의 파열에 대한 보수비용	p_{jk}	j 절점의 k 년도 동수압

표 3. 개량비용 및 개선이익함수

구 분		물가상승률, 공사비상승률 미고려시	물가상승률, 공사비상승률 고려시
개량 비용	교체비용 $P_r(t_r)$	$\frac{C_r}{(1+R)^{(t_r-t_p)}}$	$\frac{C_r(1+I)^{(t_r-t_p)}}{(1+R)^{(t_r-t_p)}}$
	갱생비용 $P_{re}(t_{re})$	$\frac{C_{re}}{(1+R)^{(t_{re}-t_p)}}$	$\frac{C_{re}(1+I)^{(t_{re}-t_p)}}{(1+R)^{(t_{re}-t_p)}}$
	유지보수비용 $P_m(t_r)$	$\sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_b N(t_0) e^{A(t-t_0)}}{(1+R)^{t-t_p}}$	$\sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_b M(t_0) e^{A(t-t_0)} (1+I)^{(t-t_p)}}{(1+R)^{t-t_p}}$
개선 이익	양수비절감액 $P_p(t_r)$	$\sum_{t=t_r}^{t_p+t_d} \frac{C_p}{(1+R)^{t-t_p}}$	$\sum_{t=t_r}^{t_p+t_d} \frac{C_p(1+G)^{(t-t_p)}}{(1+R)^{t-t_p}}$
	누수절감이익 $P_l(t_r)$	$\sum_{t=t_r}^{t_p+t_d} \frac{C_l}{(1+R)^{t-t_p}}$	$\sum_{t=t_r}^{t_p+t_d} \frac{C_l(1+G)^{(t-t_p)}}{(1+R)^{t-t_p}}$

주) 각 함수를 구성하는 매개변수의 정의는 표 1 참조

표 4. 개량비용 및 개선이익 변화에 따른 목적함수

구 분	개량방법 선택	개선이익	공사비, 물가상승률	목적함수
Case1	교체만 실시	양수비용	미고려	$Minimize P_{t1} = \sum_{i=1}^{N_p} (P_r(t_r) + P_m(t_r) - P_p(t_r))$
Case2	교체만 실시	양수비용+ 누수절감액	미고려	$Minimize P_{t2} = \sum_{i=1}^{N_p} (P_r(t_r) + P_m(t_r) - P_p(t_r) - P_l(t_r))$
Case3	교체, 갱생 입의선택	양수비용	미고려	$Minimize P_{t3} = \sum_{i=1}^{N_p} (P_r(t_r) + P_{re}(t_{re}) + P_m(t_r) - P_p(t_r))$
Case4	교체, 갱생 입의선택	양수비용+ 누수절감액	미고려	$Minimize P_{t4} = \sum_{i=1}^{N_p} (P_r(t_r) + P_{re}(t_{re}) + P_m(t_r) - P_p(t_r) - P_l(t_r))$
Case5	교체, 갱생 입의선택	양수비용+ 누수절감액	고려	$Minimize P_{t5} = \sum_{i=1}^{N_p} (P_r(t_r) + P_{re}(t_{re}) + P_m(t_r) - P_p(t_r) - P_l(t_r))$

주) 각 함수를 구성하는 매개변수의 정의는 표 1 참조

$$N(t) = (0.3882E-005)e^{0.165(t-t_0)} \quad (2)$$

$$a = 0.0961659D + 1.15507 \quad (4)$$

관제 노후도를 나타내는 지표로 Hazen-Williams의 C상수를 사용하였다. 경과년수(y)에 대한 관경(D)별 C상수 변화는 일본의 物部(1960)가 만든 식 (3)을 사용하였으며 계수 a와 b를 Hazen-Williams가 유도한 경험식으로 산정된 관경별 C값에 적용시키면 식 (4) 및 (5)와 같다.

$$C = 130(1 - \frac{a\sqrt{y}}{D})^b \quad (3)$$

$$b = 0.723076D^{-0.0660117} \quad (5)$$

4.2 개량비용 자료의 수집

관교체 비용은 한국종합기술개발공사(1994)에서 산정한 300~2800mm 강관의 교체비용을 회귀분석하여 이용하였으며, 관경(D,mm)별 교체비용(C_r)은 식 (6)과 같다.

$$C_r = 0.237566D^2 + 380.649D + 111178 \quad (6)$$

갱생비용으로는 에어샌드공법에 의해 관 세정을 실시하고 예폭시수지 라이닝공법을 적용하는 공법에 대한 비용은 회귀분석을 이용하였으며(동부기공주식회사, 2002), 물가상승률을 고려 1994년 비용으로 환산한 관경(D, mm)별 갱생비용(C_{re})은 식 (7)과 같다.

$$C_{re} = 355.195D + 15635.84 \quad (7)$$

유지보수비용은 하나의 관과열을 보수하기 위한 비용으로 관경에 따라 달라지는 함수로 표시하며 국내 자료가 미비한 관계로 미국육군공병단이 1983년 발표한 관경별 보수 비용자료를 환산하여 사용하였다. 관경(D, mm)별 관 과열 한건 당 보수비용(C_b)은 식 (8)과 같으며 예기치 못한 관의 과열로 인하여 발생하는 여러 가지 문제에 대한 피해액은 유지보수비용 함수에 포함하였다.

$$C_b = 1300 \left(\frac{D}{304.8} \right)^{0.62} \times 800 \quad (8)$$

공사비 상승률은 건설표준품셈 및 상수도 공사 일위 대가표에 나와 있는 공정과 자재비에 대해 항목별로 물가상승률을 고려 매년 공사비를 산정해 사용해야 하나 본 연구에서는 평균 소비자 물가지수의 상승률이 공사비상승률과 같다고 가정하였다. 1975년부터 2000년까지의 소비자 물가지수 변화를 회귀분석해 산정한 평균 소비자 물가지수 상승률 7.95%를 공사비 상승률로 적용하였다.

4.3 개선이익산정 자료의 수집

경과년수(y)에 대한 관경(D)별 C상수 변화는 일본의 物部(1960)가 만든 식 (3)을 이용해 산정할 수 있다. 식 (3)에 의한 개량 전후의 C값을 이용하여 관의 개량 후 향상되는 수두손실량(h_L)을 식 (9)와 같은 Q(관내유량, CMS), L(관길이, m), D(관경, m) 및 C값으로 이루어지는 Hazen-Williams의 식을 이용해 산정할 수 있다.

$$h_L = \frac{Q^{1.852}(10.64L)}{D^{4.87} C^{1.852}} \quad (9)$$

개량 전후의 관의 손실 수두 차(Δh_L)와 관내유량, 산업용(乙) 전기요금(한국전력공사, 1994)을 이용해 하루 24시간씩 1년 간 양수를 할 경우 절약되는 연간 전기비용(C_p)은 식 (10)과 같다.

$$C_p = 323770 \times 9.8 Q \Delta h_L \quad (10)$$

관의 개량 후 향상되는 누수율로 인한 누수감소비용은 관의 누수율과 유량을 이용해 산정할 수 있다. 관의 누수율을 SR(%), 유량을 Q(CMS)라 하면 365일간 관을 통해 누수되는 누수량 $SQ(m^3)$ 는 식 (11)과 같다.

$$SQ = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot SR \cdot Q \quad (11)$$

따라서, 개량 전후의 누수율 차(ΔSR)와 전국평균 수돗물 단가 181원/ m^3 (통계청, 1994)을 이용해 산정한 관 교체나 갱생 후 감소 가능한 누수감소비용(C_i)을 구하면 식 (12)와 같다.

$$C_i = 181 \Delta SQ = 5708 \times 10^6 \Delta SR \cdot Q \quad (12)$$

식 (12)는 관망을 구성하는 각 관별 누수율 측정이 가능한 경우 이용할 수 있으나 현재 이것은 실무적으로 불가능하다. 그러나 어느 구역의 전체 누수량은 어느 정도 측정이 가능하므로 이를 배분하여 누수감소비용을 산정하였다. 누수량은 관내수압, 관재질, 관경, 누수공의 단면적, 주변토질 등에 영향을 받으며(건설교통부, 1997), 누수공의 형상 등에 관한 계수(c), 누수공의 단면적(a), 관내압력수두(h)를 고려할 때, 하나의 누수공에서 유출 누수량(Q)은 다음 식 (13)과 같이 표시할 수 있다.

$$Q = c \cdot a \cdot h^n \quad (13)$$

누수공의 형상 계수 c는 관망을 구성하는 모든 관거에서 같다고 가정하였고, 누수공의 단면적 a는 누수공 1개소당 단면적은 같다고 가정하여 4.1절에 나타나 있는 관의 과열률 함수 자료를 이용해 산정하였다. 즉 평균 누수공 단면적을 a_m , 관거별 과열률을 4.2절의 식 (2)에 나타난 N_i , 관의 연장을 l_i 라 하면 현재 관망의 전체 누수량을 Q_T 는 다음 식 (14)와 같다.

$$Q_T = \sum c \cdot (a_m N_i l_i) \cdot h^n \quad (14)$$

누수공의 형상 계수 c와 평균 누수공 단면적 a_m 은 산정이 어려우나, N_i , l_i 는 관망의 입력자료이고, h^n KYPIPE를 통해 산정이 가능하며, 구역의 전체 누수량 Q_T 가 측정된다면, 식 (15)에 의해 관망전체를 대표하는 $c \cdot a_m$ 산정이 가능하다.

$$c \cdot a_m = \frac{Q_T}{\sum (N_i l_i) \cdot h^n} \quad (15)$$

산정된 $c \cdot a_m$ 과 관거별 파열률 N_i , 관거별 연장 l_i 및 식 (13)을 이용하면, 다음 식 (16)에 의해 각 관거별 누수량(Q_i)이 산정된다.

$$Q_i = (c \cdot a_m) N_i \cdot l_i \cdot h^n \quad (16)$$

또한, 누수현상은 누수지점을 발견하여 수리한 후에 도 재발하는 경우가 많으므로 복원 수리작업을 지속적으로 실시해야 하며, 관망의 유지보수작업을 통해 누수 방지작업을 실시하는 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서 이와 같은 누수의 특성을 고려해 누수감소로 인한 개선 이익 산정시 가정된 사항은 다음과 같다.

- ① 현재 관망의 누수율은 계획기간동안 유지보수작업을 통해 일정하게 유지된다.
- ② 관거의 교체 직후 관의 누수율은 허용누수율을 적용한다.
- ③ 관교체 후 누수율은 허용누수율에서 관 파손율을 따라 증가되되 현재 누수율을 초과하지 않는다.

물가상승률을 고려하기 위해 1975년부터 2000년까지의 전기요금과 수도요금 소비자 물가 지수를 회귀분석해 산정한 평균 전기요금 상승률은 2.45%, 평균 수도요금 상승률은 8.94%로 적용하였다.

5. 모형의 적용

5.1 ReHS의 적용성 검토

최적화기법인 ReHS의 적용성을 검토해 보기 위해 김한주(1994)에 의해 개발된 최적개량 의사결정 모형의 결과와 비교해 보았다. 이 모형은 상수관망 최적개량계획수립을 위한 의사결정시스템과 관련된 많은 모형의 근간이 되는 Sharmir (1979)의 모형을 기본으로 하였으며 한국수자원공사(1995)에서 개발한 “수도관 개량을 위한 의사결정시스템” 중의 하나로 채택된 모형이다.

김한주(1994)의 모형에서는 경제성 분석에 의해 관의

최적교체시기를 결정하고 결정된 교체시기에 대해 관망의 수리검토 실시한다. 수리학적 타당성의 검토는 각 절점에서의 부압발생 여부를 점검하였으며, 수리학적으로 타당성을 만족시키지 않는 경우, 교체시기가 가장 빠른 관부터 순차적으로 교체시기를 앞당겨, 수리학적 타당성을 만족시킬 때까지 교체시기를 조정하는 과정을 통해 최적개량 계획을 수립하는 모형이다. 이 모형은 경제성분석이 포함되나 완전한 최적화 기법이 적용된 모델은 아니며, 교체만을 개량방법으로 고려하여 모든 관에 대해 교체를 실시하는 것으로 하였다.

모형에서 사용한 목적함수는 표 4의 case 1과 동일하나 교체 후의 유지보수비용은 제외하였으며 KYPIPE user's Manual에 나타나 있는 16개의 관과 11개의 복합 절점으로 구성된 가상관망에 적용해 보았다. 김한주(1994)의 모형과 동일하게 대상 목표년도는 20년을 적용하였으며 이자율은 14%를 적용하였다. 관 교체 후의 유지보수비용은 비용함수 계산에서 제외되었으며 급작스런 관 파열로 인한 피해비용의 합은 1억원으로 하였다. 그림 4에는 대상관망의 구성과 각 절점의 표고와 수량을 나타내었고, 표 5에는 관망의 제원을 나타내었다.

두 모형에 의한 최적교체시기 및 현가로 환산한 개량비용은 표 6에 나타나 있으며, 그림 5에 각 관별 교체시기를 비교해 나타내었다. 두 모형의 결과를 비교해 보면 8번관과 12번관의 경우만 교체시기가 같으며 서로 다른 최적개량계획이 나타났다. ReHS를 적용한 모형에 의한 결과는 계획기간인 20년 중 2003~2007년 사이에 최적교체시기가 분포되어 있는 것으로 나타났으며, 총 개량비용의 경우 김한주의 모형에 의한 2,942백만원보다 60백만원 가량 작은 2,878백만원으로 나타나 보다 낮은 최적해를 나타내고 있다. 이 값은 2%가량 감소한 값이지만, 복잡하고 규모가 큰 관망에 모형을 적용할 경우 상당한 예산 절감 효과를 기대할 수 있을 것이다. 따라서, 최적교체시기를 결정하는 최적화 기법으로 ReHS를 적용할 경우 보다 낮은 해를 탐색할 수 있음을 파악할 수 있다.

표 5. 가상관망의 제원

관 번호	관경 (mm)	길이 (m)	현재 C값	미소손실 계수	매설 년도	관 번호	관경 (mm)	길이 (m)	현재 C값	미소손실 계수	매설 년도
1	600	3000	104	10	1979	9	200	800	101		1979
2	450	1500	103		1979	10	300	1100	102		1979
3	450	1500	103	5	1979	11	300	670	102		1979
4	150	300	100		1979	12	400	2000	103		1979
5	400	1600	103		1979	13	400	1500	103		1979
6	400	1100	103		1979	14	400	1700	103		1979
7	400	1700	103		1979	15	400	900	103		1979
8	300	1400	102		1979	16	400	1200	103		1979

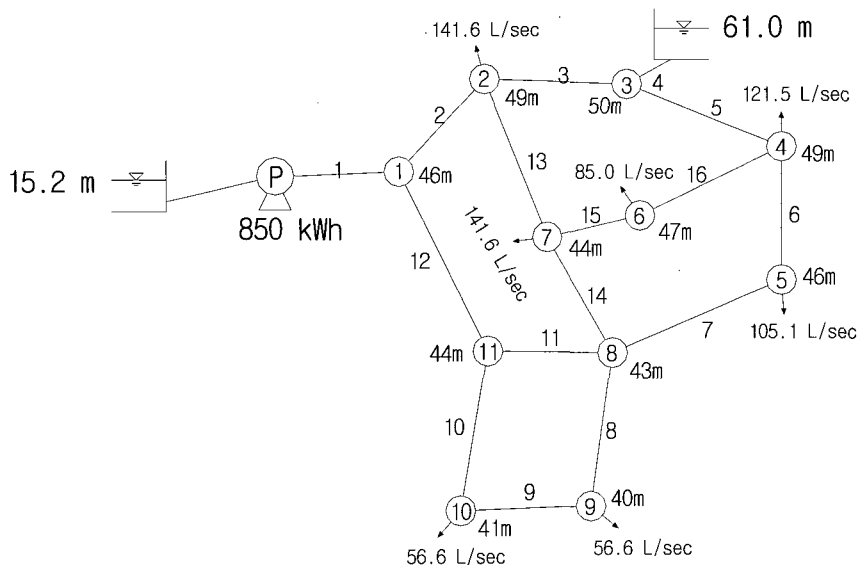


그림 4. 가상관망의 구성

표 6. 김한주 모형과 ReHS적용 모형에 의한 최적개량계획 비교

관번호	기존 모형(김한주)		ReHS적용 모형		관번호	기존 모형(김한주)		ReHS적용 모형	
	교체시기 (year)	개량비용 (백만원)	교체시기 (year)	개량비용 (백만원)		교체시기 (year)	개량비용 (백만원)	교체시기 (year)	개량비용 (백만원)
1	2008	419	2007	427	10	2002	145	2005	135
2	2002	185	2004	165	11	2001	82	2004	71
3	2008	213	2007	212	12	2006	257	2006	254
4	1999	36	2003	27	13	2008	203	2006	201
5	2008	218	2007	217	14	2008	234	2007	233
6	2008	152	2007	151	15	2008	124	2007	123
7	2008	234	2007	232	16	2008	165	2007	165
8	2006	176	2006	176	합계		2,942		2,878
9	2000	99	2004	89					

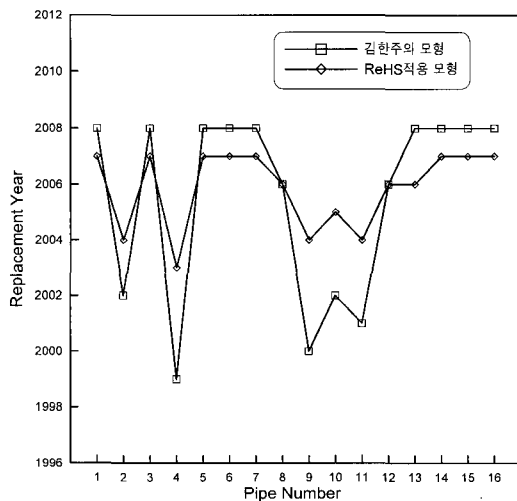


그림 5. 김한주모형과 ReHS모형에 의한 교체시기의 비교

5.2 모형의 적용결과 및 고찰

모형에서 고려하는 개량비용과 개선이익의 변화에 따른 개량계획 변화를 검토하기 위해 5.1절에서 사용한 가상관망에 적용하였다. 예산제약을 미고려하는 경우와 예산제약을 고려하는 두 가지 경우에 대한 최적개량계획을 수립하였으며 본 연구에서 구축하고자 최종적인 시스템과 비교, 검토하여 모형의 적용성을 검토하였다.

5.2.1 예산제약을 미고려한 모형

표 7과 그림 6에는 개량비용, 개선이익의 변화에 따른 케이스별 모형의 적용 결과가 나타나 있다.

- Case 1

- Case 1은 5.1절에서 사용한 목적함수에 개량 후의 유지보수비용을 포함한 개량계획

표 7. 개량계획의 비교(예산제약 미고려)

관 번호	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4			Case 5		
	개량 방법	개량 시기	개량비용 (백만원)	개량 방법	개량 시기	개량비용 (백만원)	개량 방법	개량 시기	개량비용 (백만원)	개량 방법	개량 시기	개량비용 (백만원)	개량 방법	개량 시기	개량비용 (백만원)
1	교체	2007	429	교체	2005	384	교체	2007	429	교체	2005	384	갱생	1998	445
2	교체	2004	167	교체	2002	122	교체	2004	167	교체	2002	122	교체	2001	171
3	교체	2007	213	교체	2006	195	갱생	1998	207	갱생	1998	162	갱생	1998	216
4	교체	2003	28	교체	2001	23	갱생	1998	22	갱생	1998	14	교체	2000	30
5	교체	2007	218	교체	2005	200	갱생	1998	204	갱생	1998	162	교체	2001	320
6	교체	2007	151	교체	2005	140	교체	2008	151	갱생	1998	114	갱생	1996	164
7	교체	2007	233	교체	2005	212	갱생	1998	218	갱생	1998	170	갱생	1997	234
8	교체	2006	177	교체	2003	153	갱생	1998	151	갱생	1998	108	갱생	1998	142
9	교체	2004	90	교체	2001	69	갱생	1998	69	갱생	1998	42	갱생	1994	60
10	교체	2005	136	교체	2002	111	갱생	1998	116	갱생	1998	75	갱생	1997	98
11	교체	2004	72	교체	2001	54	갱생	1998	64	갱생	1998	41	교체	2005	108
12	교체	2006	255	교체	2003	204	갱생	1998	240	갱생	1998	151	교체	1999	252
13	교체	2007	202	교체	2005	181	갱생	1998	189	갱생	1998	144	갱생	1997	197
14	교체	2007	234	교체	2005	212	갱생	1998	219	갱생	1998	169	갱생	1997	231
15	교체	2007	123	교체	2005	113	갱생	1998	156	갱생	1998	91	갱생	1996	131
16	교체	2007	165	교체	2005	153	갱생	1998	155	갱생	1998	125	갱생	1998	168
합계			2,892			2,526			2,716			2,074			2,966

주) 각 case는 개량비용 및 개선이익 변화에 따른 목적함수임(표 3참조)

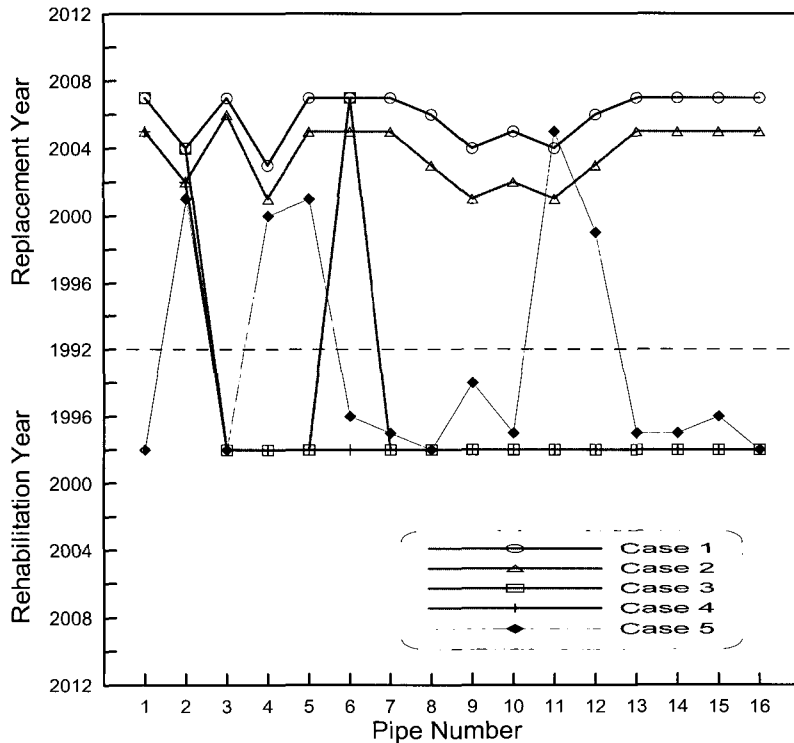


그림 6. 개량계획의 비교(예산제약 미고려)

- 여기서는 결과 값에 큰 차이는 없으나 개량 후 초기 파열률이 높은 경우 개량 후의 유지보수비용이 개량 계획에 영향이 있을 것이며, 개량 후의 유지보수비용도 목적함수 값에 포함되어야 할 것으로 판단됨

- Case 2

- 관개량 후 향상되는 누수율로 인해 발생하는 이익을 개선이익에 포함시킨 경우
- 배수관망 자체와 배수관망 접지부에서 발생하는

누수율을 18%, 배수관망의 허용누수율을 10%로 가정하여 누수감소로 인한 개선이익을 산정(서울시 상수도의 무수율은 1999년말 기준 31.82%, 서울시 유수율대책백서, 2000)

- 관개량 시기가 빠를수록 누수절감에 의한 이익은 더 커지게 될 것이나, 어느 수준 이상 앞당겨지게 되면 누수절감으로 인한 이익보다는 이자율로 인한 손해가 더 크게 될 것이며, 그 결과 그림 6과 같이 대부분의 관들이 교체시기의 양상은 유지하며 case 1의 경우보다 교체시기가 2~3년 정도 빠르게 결정됨

- 전체개량비용의 경우 보면 누수절감효과를 고려하지 않은 경우 2,892백만원, 고려한 경우에는 2,526백만원으로 전체 개량비용에 있어 약 10%가량의 누수절감에 의한 효과가 있는 것으로 판단됨

- Case 3

- 관거 개량방법을 교체와 갱생 중, 임의 선택하여 수립되는 개량계획을 검토

- 일반적으로 관교체 보다 갱생공법은 공사비가 저렴하나, 갱생공법에 따라 내구성이 교체시보다 떨어지거나, 관경이 줄어들어 통수능을 저하시키는 단점이 있으므로, 계획기간동안의 개선이익과 개량비용을 고려했을 때, 전체비용은 저렴하며 전체 관망의 수리학적 타당성을 만족시키는 개량방법이 선택되어야 할 것임

- 갱생공법 적용시 관과열률 함수는 매설시점이 개량년도가 되는 교체시와는 달리 갱생공법적용 후 교체보다는 5년이 더 빨리 노후되는 파열률 함수를 이용하여 유지보수비용을 산정(대부분의 갱생공법이 기존 관 내부위주로 부식을 제어하는 공법으로 내면부식과 세관에 의해 얇아진 관두께와 외부하중에 의한 내구성 저하, 또한 관의 부식 중 많은 비중을 차지하고 있는 외면부식을 미고려하는 것에 대한 페널티)

- 에폭시수지 라이닝공법은 잔존내용년수가 5년 이내인 경우에만 시공 가능하고 강관의 갱생은 매설한지 최대 20년 이내인 관에 대해서만 가능한 한국 건설기술연구원의 연구결과(상수도 관로의 갱생공법별 특성 및 사용현황 조사 연구, 2001)를 제약조건으로 추가

- 모형적용 결과 1번, 2번, 11번관의 세 개관에 대해서만 교체를 실시하고 나머지 관의 경우 갱생을 하는 것이 보다 유리한 것으로 결정되었으며, 전체개량비용은 2,717백만원으로 case 1의 2,892백만원 보

다 약 6%가량 적게 산출

- 공사비용이 저렴한 갱생이 많이 선택되었지만, 전체개량비용이 case 1에 비해 6%만 적게 산출된 것은 계획기간매설 후 20년 이상인 관은 갱생공법의 적용이 불가능하다는 제약조건 때문으로, 1994년가로 환산 시에 이자율로 인한 손해가 크게 때문으로 판단됨

- Case 4

- Case 2의 누수절감효과 와 case 3의 교체·갱생 임의 선택에 의한 효과를 동시에 고려

- 개량시기는 case 3의 결과와 유사한 양상

- 전체 개량비용은 2,074백만원으로, case 2의 2,526백만원 보다는 17.9%, case 3의 2,716백만원보다는 23.6%, case 1의 2,892백만원보다는 28.3% 낮은 결과

- 교체와 갱생의 적절한 개량방법 선택과 누수율을 동시에 고려한 개량계획을 수립하면, 전체 상수관망의 수리학적 타당성을 만족시키면서도 기존모형에서의 결과보다 더 낮은 비용을 갖는 적절한 개량계획을 수립이 가능할 것으로 판단됨

- Case 5

- 물가상승률과 공사비 상승률이 최적개량계획에 미치는 영향을 검토

- 4절에서 산정한 공사비 상승률 7.95%, 전기요금 상승률 2.45%, 수도요금 상승률 8.94% 적용

- 전체 개량비용은 case 4의 2,074백만원에서 2,966백만원으로 88%가량 증가(양수비절감과 누수감소로 인한 개선이익도 물가상승률에 따라 증가하지만, 전체 개량비용에서 공사비가 차지하는 비율이 높은데 원인)

- Case 4에서 갱생으로 선택되었던 4, 5, 11, 12번관이 교체로, 1번관은 교체에서 갱생으로 개량방법 변화(교체시기가 빠를수록 개량으로 인한 개선이익과 유지보수비용은 커지며, 교체시기가 느릴수록 공사비용의 현가 환산으로 인한 이익이 더 커지므로, 상대적으로 공사비가 높은 교체가 갱생보다 높은 이익이 발생하는데 원인)

5.2.2 예산제약을 고려한 모형

예산제약을 고려하지 않은 모형의 결과를 살펴보면 case 5의 경우를 제외하고는 교체나 갱생의 시기가 목표년도 기간 중 일부 특정 년도에 집중되어 나타나고 있다. 그러나, 실제 관망의 개량계획 수립 시에 개량예산이 편중하여 수립되는 것은 타당하지 않으며, 장기 계획기간 간에 적절하게 분포되어 예산이 수립되어야

할 것이다. 따라서, 전체 관망에 대하여 한 해에 배정할 수 있는 예산을 고려할 경우의 모형의 결과를 검토해 보았다. 연 최대 예산배정 가능액은 10억원으로 하였으며 이 값은 현가로 환산하지 않은 금액이다. 표 8과 그림 7에 예산제약을 고려한 경우의 개량계획을 나타내었다.

Case 1의 경우 2007년과 집중되었던 교체시기가 2003~2010년 사이에, case 2의 경우 2005년에 집중되었던 교체시기가 2001~2007사이에 적절히 분포되었다. 두 경우 모두 전체 개량비용도 5%미만의 증가만 나타나고 있어, 예산제약을 고려하지 않은 경우와 비교했을 때 보다 적합한 개량계획을 나타내고 있음으로 판단된다.

표 8. 개량계획의 비교(예산제약 고려)

관 번호	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4			Case 5		
	개량 방법	개량 시기	개량비용 (백만원)	개량 방법	개량 시기	개량비용 (백만원)	개량 방법	개량 시기	개량비용 (백만원)	개량 방법	개량 시기	개량비용 (백만원)	개량 방법	개량 시기	개량비용 (백만원)
1	교체	2007	429	교체	2005	384	갱생	1998	436	갱생	1996	410	갱생	1996	496
2	교체	2004	167	교체	2001	123	교체	2003	169	교체	1999	134	교체	1999	152
3	교체	2010	219	교체	2007	197	교체	2013	238	갱생	1998	162	갱생	1998	216
4	교체	2003	28	교체	2001	23	교체	2003	28	교체	2004	24	교체	2004	41
5	교체	2009	222	교체	2006	201	갱생	1998	204	교체	2007	203	교체	2007	417
6	교체	2006	152	교체	2007	142	교체	2009	154	교체	2005	140	교체	2005	258
7	교체	2008	234	교체	2006	213	교체	2002	264	갱생	1995	213	갱생	1995	258
8	교체	2004	180	교체	2003	153	갱생	1996	174	교체	2001	158	교체	2001	216
9	교체	2004	90	교체	2001	69	교체	1997	123	교체	2003	71	교체	2003	103
10	교체	2005	136	교체	2002	111	교체	1997	204	갱생	1995	90	갱생	1995	110
11	교체	2003	72	교체	2001	54	교체	2005	72	교체	2006	63	교체	2006	121
12	교체	2005	256	교체	2002	204	교체	2004	260	갱생	1997	162	갱생	1997	197
13	교체	2008	204	교체	2003	183	교체	2006	202	교체	2001	195	교체	2001	279
14	교체	2009	238	교체	2004	213	교체	2009	238	갱생	1997	179	갱생	1997	231
15	교체	2006	124	교체	2004	117	교체	2004	129	교체	1999	139	교체	1998	182
16	교체	2006	166	교체	2008	157	교체	2007	165	갱생	1995	157	갱생	1995	190
합계			2,916			2,541			3,060			2,501			3,467

주) 각 case는 개량비용 및 개선이익 변화에 따른 목적함수임(표 3참조)

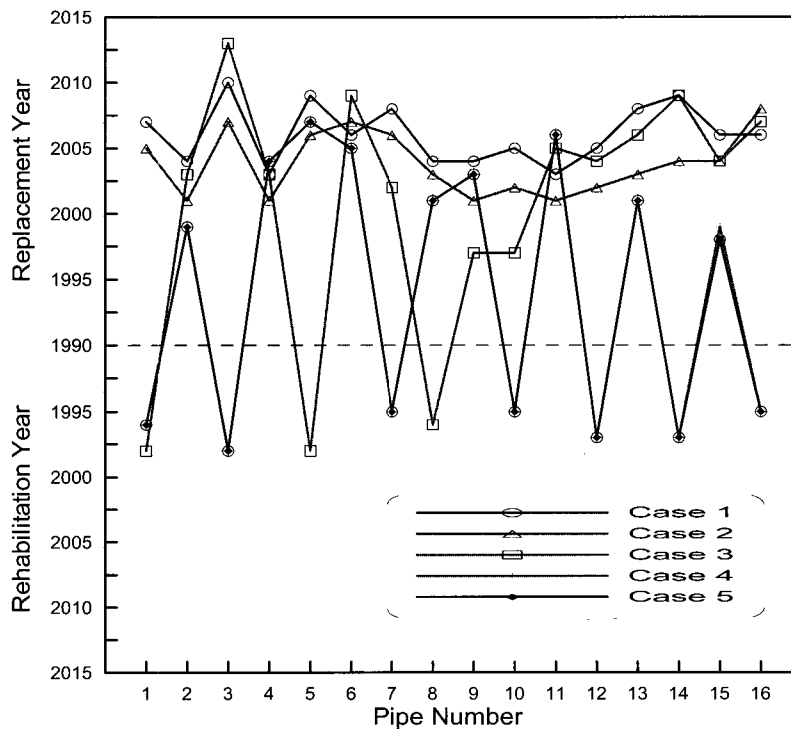


그림 7. 개량계획의 비교(예산제약 고려)

Case 3과 4의 경우 예산제약을 고려하지 않았을 때 대부분의 관거가 1998년에 갱생하는 것으로 결정되었다. 그러나, 예산제약을 고려할 경우 case 3은 대부분의 관거가 1997년 이후 교체하는 것이 보다 적합한 개량계획으로 수립되었으며, case 4는 1998년 이전에는 갱생이, 1998년 이후에는 교체가 선택되어 계획기간 전반에 적절하게 분포된 개량계획이 수립되었다. 이는 예산이 적절히 배정되어 저야만 하는 경우 1998년 이전에 실시되어야만 하는 갱생보다는 목표년도 후반에 넓게 분포될 수 있는 교체가 현가 환산 시 보다 유리하기 때문이다. 전체 개량비용에 있어서는 case 3과 4에서 각각 10%와 25%가량의 증가가 있었지만, 예산제약이 포함될 때 장기계획기간 동안 편중되지 않고 적절하게 분포된 예산수립이 가능해지며 보다 실무에 적합한 시스템 구축이 가능한 것으로 판단되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존의 모형과는 달리 관망의 수리학적 타당성을 만족하며 전체 개량비용이 최소가 되도록 교체와 갱생 중 적합한 개량방법을 채택하고, 양수비용 절감과 누수감소로 인한 개선이익을 고려하는 시스템을 개발하였다.

- 1) 최적화기법으로 ReHS를 적용한 결과, 최적화기법이 적용되지 않은 기존의 김한주(1994)모형보다 전체 개량비용이 2% 저렴한 보다 적합한 개량계획을 수립할 수 있었다.
- 2) 관의 개량으로 감소되는 누수량을 고려해본 결과(case 2) 적절한 관의 개량으로 낭비되는 물을 절감하면 공사비는 증가하더라도 누수량 감소로 인해 발생하는 이익이 추가되는 공사비를 제하고도 결과적으로 10%가량 많은 이익을 발생시키는 것으로 나타났다.
- 3) 개량 방법으로 교체와 갱생 중 임의선택 할 경우(case 3) 내구성과 효율면에서 교체보다 불리한 갱생방법을 적용하더라도 계획기간동안의 관망의 수리학적 타당성을 만족시키며 총 개량비용에 있어서도 6%가량 경제적인 개량계획을 수립할 수 있었다.
- 4) 적합한 관 개량방법 선택에 의해 개량계획을 수립하며 누수감소로 인한 이익까지 동시에 고려하는 경우(case 4) 개량비용에 있어 28%가량의 이익이 발생하는 개량계획 수립이 가능한 것으로 나타났다. 즉, 각각의 관거가 전체 관망에 미치는 수리학적

적 영향에 따라 적절한 개량방법을 선택하고 관의 개량으로 인한 다양한 이익을 고려하면, 보다 적절한 상수도관망의 최적개량계획을 수립할 수 있을 것이다.

- 5) 시기를 결정하는 최적화문제에서 일반적으로 고려하지 않는 물가상승률을 고려하는 경우(case 5), 88%가량 개량비용이 증가한 개량계획이 수립되었다.
- 6) 장기적인 관망개량계획 수립에 있어 적절한 예산 배분을 위해서는 예산제약을 고려한 시스템구축이 필수적인 것으로 나타났으며, 이를 통해 보다 실무에 가까운 모형개발이 가능할 것으로 나타났다.

본 연구에서 구축한 모형은 실무에 바로 적용 가능한 완벽한 모형은 아니다. 관망을 구성하는 각각의 관에 대한 개량계획은 실제 실무에서는 적용에 무리가 있으며, 관의 노후화정도를 나타내는 척도로 사용한 Hazen-Williams의 *C*상수의 변화를 고려하기 위해 관 노후도 예측모형과의 연계도 필요할 것이다. 그러나, 우수한 최적화 기법을 적용하여 기존의 모형에서 다루지 않은 인자들을 고려했다는 점에서 노후된 관의 개량계획수립에 대한 좋은 지침이 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호 : R01-2004-000-10362-0)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김종우 (2000). "Optimal Design of Water Distribution Network Using Harmony Search." 박사학위논문, 고려대학교.
- 김한주 (1994). "물분배 시스템의 최적 관개량 의사결정 모형에 관한 연구." 석사학위논문, 고려대학교.
- 건설교통부 (1997). "수도정비기본계획 보고서(제1편 전국계획)." pp 494-498.
- 서울특별시상수도사업본부 (2000). 서울시유수율대책백서.
- 백경록 (2001). "Development of Seasonal Tank Model and Comparison of Optimization Algorithm for Parameter Calibration." 석사학위논문, 고려대학교.
- 백천우 (2002). "ReHS를 이용한 상수관망 최적개량 의사결정시스템의 개발." 석사학위논문, 고려대학교.

- 한국건설기술연구원 (2001). "상수도 관로의 경쟁공법별 특성 및 사용현황 조사연구." pp 143 -149.
- 한국수자원공사 (1995). "수도관개량을 위한 의사결정 시스템 개발."
- 物部長穗 (1960). "水理學." 岩波書店刊, pp 155-158.
- Halhal, D., Walters, G.A., Ouazar, D., and Savic, D.A. (1997). "Water Network Rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.123, No.3, June, pp.137~146.
- Kim, J. H. (1992). "Optimal Rehabilitation/Replacement Model for Water Distribution System." *Ph.D. Dissertation*, University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- Lansley, K. E., Basnet C., Mays, L. W., and Woodburn, J. (1992). "Optimal Maintenance Scheduling for Water Distribution Systems." *Civil Engineering System*, England.
- 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, May, pp.248~258.
- Sullivan, J. P. Jr. (1982) "Maintaining aging System-Boston's Approach." *Journal of the American Water Works Association*, Vol.74, No.11, November, pp.555~559.
- Walski, T. M. (1982). "Economic Analysis of Rehabilitation of Water Mains." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.108, No.3, pp.296~304.
- Walski, T. M. (1987). "Replacement Rules for Water Mains." *Journal of the American Water Works Association*, Vol.79, No.11, November, pp.33-37.
- Woodburn, J., Lansley, K. E., and Mays, L. W. (1987). "Model for the Optimal Replacement and Replacement of Water Distribution System Component." *Proceeding of the 1987 National Conference on Hydraulic Engineering*, ASCE, pp.606~611, Williamsburg, Virginia, August.

(논문번호:02-75/접수:2002.09.16/심사완료:2005.02.22)