Harmony Search를 이용한 상수관로 최적 관개수 의사결정 모형에 관한 연구

○백천우*, 김응석**, 조덕준**, 강인주***, 김중훈****

1. 서 론

노후관 개량사업은 예산, 시공성 등의 제약조건으로 장기적인 계획 하에 추진하게 된다. 이와 같은 단계별 개량사업추진은 개량시기 및 범위 등 우선순위 판별이 가능한 개관적 체계구축과 모형개발 및 검증이 선행되어야 할 것이다. 현재 우리나라의 노후관 개량사업은 경험적 판단에 의존한 노후관 평가 및 대책 수립과, 사고예방을 위한 대응적 차원의 개량 사업으로 경제적 손실은 증폭되고 있으나 시스템의 성능은 개선되지 못하고 있는 실정이다.

노후상수도관 최적개량전략 수립에 있어 O.R(Operation Research)기법을 적용한 국외 연구는 Halhal 등(1997)이 Messy Genetic을 적용, 관망의 수리학적 함수, 물리적 건전도 함수, 수질함수, 비용함수 등을 이용하여 관망의 매설년수에 따른 최적 개량시기를 제시하였다. 국내 연구로는 KYPIPE와 Shamir 등(1979)이 제안한 파손율 함수 및 비용함수를 이용, 관 개량 모형을 개발한 김한주(1994)의 연구가 있으나 기법 면에서 개선된 최적값을 찾을수 있는 Genetic Algorithm(GA)과 같은 발견적 탐색법(heuristic algorithm)을 이용한 연구는 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 현재의 노후관 개량사업에서는 전혀 고려해주지 못하고 있는 노후상수도관 최적개량전략을 최근 발표된 발견적 탐색법인 화음탐색법(Harmony Search, HS)을 이용하여 김한주의 연구 결과와 비교해 보았다.

2. Harmony Search

화음탐색법은 일종의 발견적 탐색법으로 음악의 최적화음을 공학의 최적해와 대비하여 해를 찾아가는 기법으로 김종우(박사학위논문, 2000)에 의해 처음 제안된 기법이다. 이후 이를 발전시킨 Modified Harmony Search(MHS)가 제안되었다(Paik & Kim).

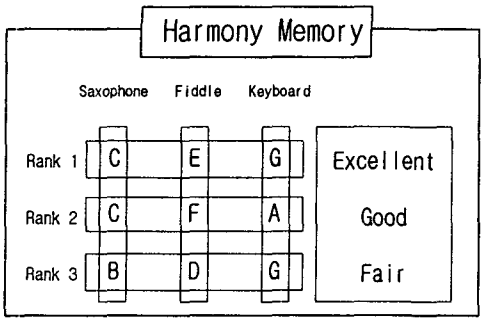
대부분의 발견적 탐색법이 자연현상의 관찰로 만들어 졌지만 HS는 화음(harmony)이라는 인공적 현상을 모태로 한 알고리즘이다. 여러 악기의 소리로 이루어진 화음 중에는 잘 어울리는 화음과 불협화음이 있을 수 있다. 연습과정을 통해 불협화음은 점차 사라지고, 화음으로서 적합한 화음(local optimum)과 미적으로 가장 아름다운 화음(global optimum)이 있을 것이다. HS는 연습과정(Iteration)으로 최적 화음을 탐색하여 이를 최적해라 보는 기법이다.

HS는 기존의 발견적 탐색법인 Simulated Annealing(SA)나 Tabu Search(TS)와 달리 군탐색을 하며, 과거의 경험축적 측면에서는 TS의 특징을 또한 초기탐색에서 최적해 범주에 들면 경험집합에 추가, 최종 최적해 탐색에 이용한다는 점에서 SA의 특징도 지니고 있는 탐색기법이다. 군탐색의 특징을 가지고 있는

* 고려대학교 토목환경공학과 석사과정
** 고려대학교 부설 방재과학기술연구센터 선임연구원
*** (주)유일엔지니어링 부설 연구소장
**** 고려대학교 토목환경공학과 교수

GA와 비교하면, GA는 부모세대의 두 유전자만이 다음 세대의 한 개체 유전자에 영향을 미치므로 양 부모의 경험만이 새로운 유전자정보가 된다. 반면에 HS는 과거의 모든 화음에서 경험을 얻기 때문에 새로운 해가 보다 풍부한 정보를 얻게 된다.

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



<그림 2.1> Harmony Memory의 구조

① HM(Harmony Memory) : HM이란 이제까지 경험했던 화음 중에서 좋았다고 생각되는 화음들을 모은 집합으로 새로운 화음이 기존 HM의 최악화음보다 좋다면 이 화음이 HM에 추가되며 기존의 최악화음은 HM에서 탈락시킨다. HM의 구조는 <그림 2.1>과 같다.

② HMCR(Harmony Memory Considering Rate) : HMCR이란 새로운 화음을 만들어 낼 때 HM안에서 만들어 낼 것인가 아니면 전체 정의영역에서 만들어 낼것인가 하는 확률이다. HMCR의 기능은 국지해(local optimum)에 빠지지 않고 최적해(global optimum)를 추적할 수 있도록 하는 것으로 GA의 돌연변이율과 같은 기능이라 할 수 있다.

③ PAR(Pitch Adjusting Rate) : PAR은 좋은 화음을 만들기 위해 각 악기의 음조(Pitch)를 조절하는 것과 같이 더 나은 해를 찾기 위해 기존 해의 이웃하는 값을 고려(Pitch Adjusting, PA), HS의 성능을 향상시키는 인자이다.(Geem, Z. W.,2000)

MHS(Modified Harmony Search)는 HS의 발전된 형태이다(Paik, 2001). Paik은 HS의 주요 인자인 초기 HS와는 달리 HMCR과 PAR의 적용에 변화를 주었으며, 이를 위해 PAR의 적용방법에 따라 HS를 HS1, HS2, HS3의 세가지로 구분하였다. MHS는 새롭게 생성되는 화음의 구성과는 상관없이 PA는 가능한 범위에서 기존 HM의 한계와 상관없이 적용하는 HS2를 기본으로 하였으며, HMCR의 적용 방법에 따라 MHS1, MHS2, MHS3의 세가지로 구분하였다.

3. 의사결정모형의 구성

관망의 최적 개량 모형은 HS에 의해 데이터를 조정하고 결과를 판단하는 메인모듈을 기본으로, 개량비용 및 개선이익 산정 모듈, 수리검토 모듈이 정보를 주고받으며 최적값을 탐색하게 된다. 모형의 기본 알고리즘은 다음과 같다.

교체(replacement), 갱생(rehabilitation), 유지보수(maintenance & repair)의 세가지를 개량 방법으로 한다면 우선 계획기간동안의 각 관망별 개량 계획으로 무작위 하게 HM을 발생시킨다. 이 때, 발생되는 계량계획은 일반적으로 정수형태이며, 두 가지 구성방법이 있다. 하나는 관망의 개량을 계획년도 간에 교체나 갱생 중 한가지 선택 시행한다고 가정하고 교체는 양수, 갱생은 음의 부호를 부여하여 개량 년도를 정수형으로 발생시키는 방법이다. 다른 하나는 0은 유지보수, 1은 교체, -1은 갱생으로 하여 관망별 개량계획을 계획기간동안 매해 무작위로 발생시켜 HM를 구성하는 방법이다. 계획기간이 5년인 5개의 관으로 구성된 관망이 대하여 <그림 3.1>에는 전자의 방법을, <그림 3.2>에는 후자의 방법을 이용하여 5개의 크기(Harmony Memory Size, HMS)를 갖는 HM구성 예를 나타내고 있다.

관에 따라서 교체나 갱생이 필요없이 유지보수만으로 수리학적 조건을 만족할 수 있으므로 전자는 후자에 비해 비용함수의 계산이 간단하나 최적 개량계획을 나타내지 않을 수도 있는 단점이 있으며, 후자의 경우는 비용함수 계산과정의 복잡서으로 연산시간이 많이 소요되는 단점이 있으나 계획기간동안 발생 가능한 모든 개량방법을 검토할 수 있는 장점이 있다.

	PIPE 1	PIPE 2	PIPE 3	PIPE 4	PIPE 5
Rank 1	1	-3	2	4	-1
Rank 2	-2	1	1	4	5
Rank 3	-1	-3	4	2	1
Rank 4	3	4	-1	2	-5
Rank 5	4	-1	3	-2	1

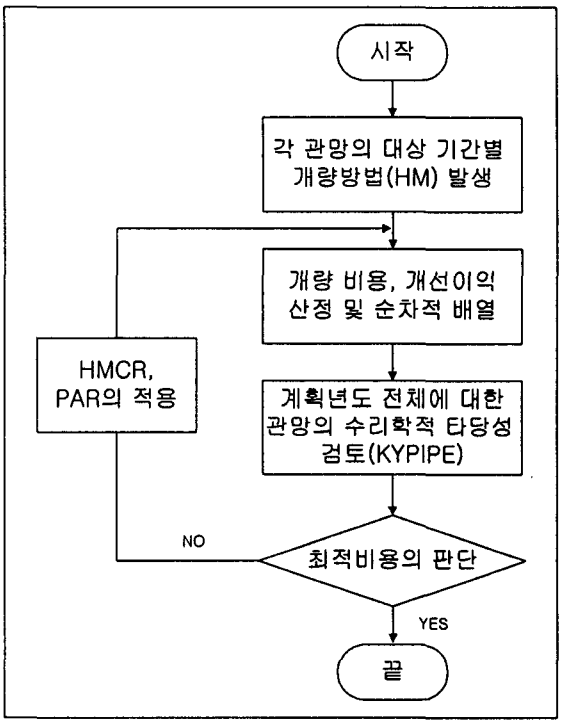
<그림 3.1> HM의 구성 예(Type 1)

	PIPE 1					PIPE 2					PIPE 3					PIPE 4					PIPE 5				
Year	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Rank 1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1				
Rank 2	1	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0		
Rank 3	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	1	0	
Rank 4	1	0	-1	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	
Rank 5	1	1	0	0	1	-1	0	1	0	-1	1	1	0	-1	0	1	0	-1	-1	0	-1	0	1	-1	0

<그림 3.2> HM의 구성 예(Type 2)

HM의 구성이 완료되면 구성된 개량계획에 대한 비용을 화음별로 계산고 화음을 순차적으로 나열한다. 순차적 배열이 끝나면 발생된 개량계획에 대해 수리학적 타당성을 검토한다.

가장 최소비용의 화음(관망별 개량방법)에 대하여, 수리학적으로 만족 되면, 이 때의 개량방법은 최상위에 rank되는 화음이 된다. 수리학적으로 타당하지 않을 경우 벌점(penalty)을 부여한다. 수리학적으로 만족하는 화음을 찾을 때까지 다음의 최소 비용을 갖는 화음에 대하여 수리학적 타당성을 검토하고, 전체 HM이 수리학으로 부적당하게 되면 새롭게 HM을 구성하여 과정을 반복하게 된다. 수리학적 타당성 검토가 끝나면 계산된 화음에서 최소비용이, 원하는 최적비용조건을 만족하는가에 대한 판단을 내리고, 최적비용으로 판단되면 계획기간 동안의 결정된 개량방법을 출력하고 모형을 종료시킨다.



<그림 3.3> 모형의 기본 구조

목표 수준의 최적비용으로 판단되지 않으면, HMCR과 PAR를 적용한다. HMCR 및 PAR은 기존 HM에서 선택된 관망개량계획 이외의 다른 개량 계획을 구성하여 향상된 개량계획 탐색을 위해 적용한다.

HMCR과 PAR 적용이 끝나면 새롭게 구성된 HM에 대하여 개량 비용을 계산하고 순차적으로 나열한다. 새롭게 구성된 HM 중 최소비용이 원하는 최적비용 수준을 만족시키면 계산을 종료하고, 만족시키지 않으면 다시 HMCR과 PAR을 적용하여 최적비용이 될 때까지 과정을 반복하게 된다. 이러한 과정을 모식화 하면 <그림 3.3>과 같다.

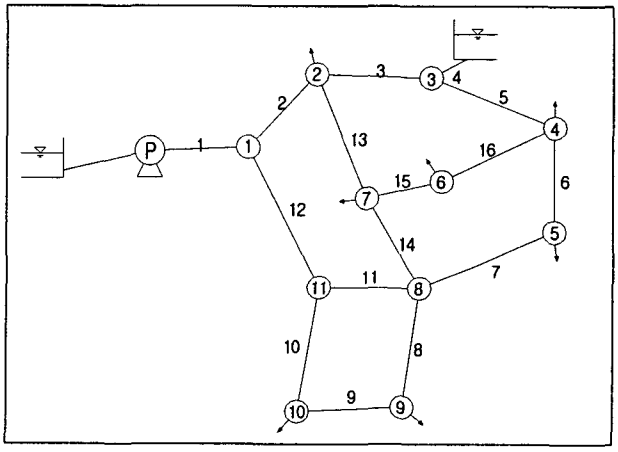
4. 모형의 비교 검토

HS모형의 적용성 검토를 위해 비교한 김한주의 모형은 경제성분석에 의해 관거별 최적개량시기를 결정하고 수리적 타당성 검토를 통해 결정된 시기를 조정 최적교체시기를 결정하는 모형으로 모든 관거는 목표년도 안에 교체한다는 가정을 전제로 한다. 적용 관망은 16개의 관과 11개의 복합절점으로 구성된 가상관망으로, 기준이 되는 목표년도는 20년, 이자율은 14%를 적용하였다.

<표 4.1> 가상관망의 제원

관 번호	관경(mm)	연장(m)	현재C값	미소 손실계수	매설년도	절점번호	표고(EL.m)	수요량 (liter/sec)
1	600	3000	104	10	1979	①	46.0	0.0
2	450	1500	103		1979	②	49.0	141.6
3	450	1500	103	5	1979	③	50.0	0.0
4	150	300	100		1979	④	49.0	121.5
5	400	1600	103		1979	⑤	46.0	105.1
6	400	1100	103		1979	⑥	47.0	85.0
7	400	1700	103		1979	⑦	44.0	141.6
8	300	1400	102		1979	⑧	43.0	0.0
9	200	800	101		1979	⑨	40.0	56.6
10	300	1100	102		1979	⑩	41.0	56.6
11	300	670	102		1979	⑪	44.0	0.0
12	400	2000	103		1979			
13	400	1500	103		1979			
14	400	1700	103		1979			
15	400	900	103		1979			
16	400	1200	103		1979			

관망의 좌·우측 저수지(고정수두절점)의 수위는 EL.15.2m와 EL.61.0m이고, 좌측 저수지와 ①번 절점 사이에 위치한 펌프용량은 850kW이다. <그림 4.1>에 적용관망의 구성을 나타내었고, <표 4.1>에는 관망의 제원을 나타내었다.



<그림 4.1> 가상관망의 구성

교체시기 결정을 위한 비용함수는 교체비용, 유지보수비용, 관 교체나 갱생 후 절약되는 양수비용으로 구성된다. 관교체 비용은 1994년 한국종합기술개발공사에서 산정한 300~2800mm 강관의 교체비용을 이용하였으며, 여기에는 관 철거비용과 신관매설비용이 포함되어 있다. 유지보수비용은 미국육군공병단이 1983년 발표한 하나의 관파열에 대한 관경별 보수비용자료를 환산하여 사용하였다. 예기치 못한 관 파열로 발생하는 기타 피해액은 1억원으로 가정 유지보수비용 함수에 포함하여 사용하였다. 관경(D)에 대한 교체비용(C_r)과 유지보수비용(C_b)은 다음 식과 같다.

$$C_r = 0.237566D^2 + 380.649D + 111178$$

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

관의 개량으로 절약되는 양수비용(C_p)은 Hazen-Williams공식에 의한 개량 전후의 관 손실수두 차(Δh_L)를 소요동력차로 환산하고 이를 산업용(乙) 전기요금(한국전력공사, 1994)을 적용하여 산정 하였다. 하루 24시간 양수시 절약되는 연간 양수비용은 다음 식과 같다.

$$C_p = 323770(\mathrm{kW}) = 323770\gamma Q\Delta h_L$$

관거별 교체비용(C_r), 유지보수비용(C_b) 및 관 교체나 갱생으로 절감되는 양수비용(C_p)에 의한 총 비용함수, $P_t(t_r)$는 다음 식과 같다.

$$P_t(t_r) = P_m(t_r) + \{P_r(t_r) - P_p(t_r)\}$$

$$= \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_b N(t_0) e^{A(t-t_0)}}{(1+R)^{t-t_p}} + \left\{ \frac{C_r}{(1+R)^{(t_r-t_p)}} - \sum_{t=t_r}^{t_p+t_d} \frac{C_p}{(1+R)^{t-t_p}} \right\}$$

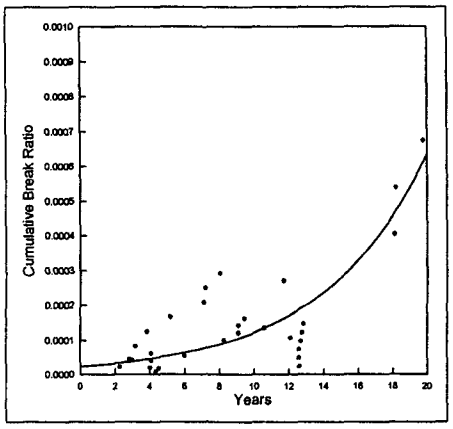
여기서, t = 시간함수(year), t_0 = 매설년도, t_p = 현재시점, t_r = 교체시기,
R = 이자율(0.01%), $N(t)$= t년의 단위길이당 파열율(1회/m/year),
A = 증가비율상수(1/year), $P_m(t_r)$ = 계획기간 동안의 총 유지보수비용,
$P_r(t_r)$ = 현가로 환산된 관 교체비용, $P_p(t_r)$ = 교체로 절감되는 총양수비용의 합

유지보수비용 산정을 위한 시간에 따른 관 파열률 함수, $N(t)$는 한국수자원공사의 수도권지역 강관 파열률 자료를 회귀분석하여 경과 년수별 누가 관 파열률 함수를 유도하였고, 이를 미분하여 경과 년수별 관 파열률 함수를 유도하였다. 유도된 경과 년수별 누가 관 파열률 함수는 다음 식과 같다.

$$\int N(t)dt = (2.3529E-005)e^{0.165(t-t_0)}$$

이 식을 미분하여 산정한 경과 년수별 관 파열률 함수는 다음과 같다.

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

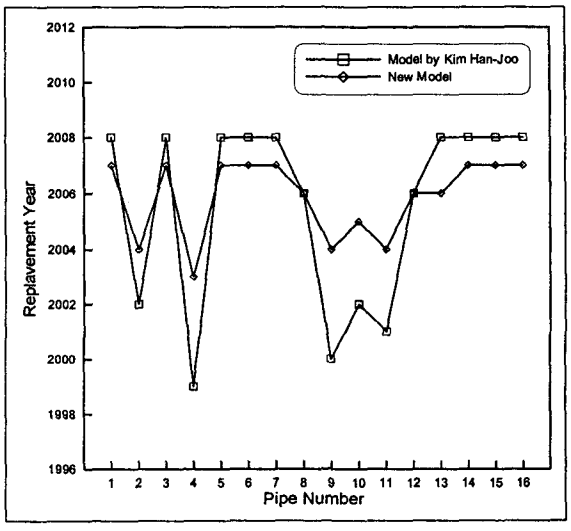


<그림 4.2> 누가 파열률 함수

두 모형에 의한 최적교체시기 및 개량비용은 <표 4.2>와 같으며, <그림 4.3>에 각 관별 교체시기를 비교하였다.

두 결과를 비교해 보면 8번관과 12번관의 경우만 최적교체시기가 같은 것으로 나왔으며 다른 관들의 경우 김한주의 모형과는 다른 최적개량계획이 나타났다.

교체시기의 분포를 살펴보면 김한주의 모형에서는 1999년~2008년 사이에 비교적 넓게 분포되어 있으나, HS모형에서는 2003~2007년 사이에 최적교체시기가 분포된 것으로 나타났다. 총 개량비용도 기존 모델의 2,942백만원보다 6천만원 가량 작은 2,878백만원으로 나타나 기존의 모형보다는 개선된 최적해를 갖고 있음을 알 수 있다. 이 값은 비율로 보면 2%가량 감소한 값이지만 좀 더 복잡하고 규모가 큰 관망에 적용할 경우 상당 예산 절감을 기대할 수 있을 것이다. 또한, 모든 관을 교체한다는 가정 없이 수리적으로 부적절한 경우에만 교체를 실시하는 조건에서는 보다 향상된 결과를 얻을 수 있을 것이다.



<그림 4.3> 관거별 교체시기의 비교

<표 4.2> 최적개량 의사결정 모형의 적용 결과 비교

관번호	김한주의 의사결정 모형		HS(Harmony Search) 모형	
	최적교체시기	전체개량비용	최적교체시기	전체개량비용
1	2008	418,632,384	2007	427,331,600
2	2002	184,936,528	2004	164,938,530
3	2008	212,781,920	2007	211,849,167
4	1999	36,151,344	2003	27,197,738
5	2008	218,149,552	2007	217,237,010
6	2008	151,681,968	2007	150,840,276
7	2008	233,871,968	2007	232,387,160
8	2006	176,415,776	2006	176,413,917
9	2000	99,199,960	2004	88,737,038
10	2002	144,702,048	2005	134,907,499
11	2001	82,468,456	2004	70,768,870
12	2006	256,816,064	2006	253,885,060
13	2008	203,016,416	2006	201,356,517
14	2008	234,279,600	2007	232,911,207
15	2008	123,819,440	2007	123,031,394
16	2008	165,479,216	2007	164,556,705
합계		2,942,402,816		2,878,349,688

5. 결 론

노후관망의 최적개량 계획수립 모형에서는 수리학적 타당성 이외에 다양한 인자들이 복합적으로 고려되어야 하며 모형에 고려할 인자들이 증가할수록 보다 효율적인 최적화 기법이 필요할 것이다. 본 연구에서는 기존에 만들어진 모형의 적용결과와 HM(Harmony Search)라는 새로운 최적화 기법에 의한 모형의 적용결과를 비교해 보았고, 그 결과 개선된 최적개량계획을 수립할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 현재까지의 여러 연구 결과를 토대로 관의 교체는 물론 갱생까지 고려하면서 개량비용과 양수비용 외에 누수비용 같은 요소를 추가한 종합적인 의사결정모형이 개발되면, 노후관의 효율적인 개량지침이 될 수 있을 것이다.

4. 참고문헌

- 김응석 (2002). "상수관로의 노후도 예측에 근거한 최적 개량 모형의 개발", 박사학위 논문, 고려대학교 대학원.
- 김종우 (2000). "Optimal Design of Water Distribution Networks using Harmony Search", 박사학위논문, 고려대학교 대학원.
- 김한주 (1994). "물분배 시스템의 최적 관개량 의사결정 모형에 관한 연구", 석사학위논문, 고려대학교 대학원.
- 백경록 (2001). "Development of Seasonal Tank Model and Comparison of Optimization Algorithms for Parameter Calibration", 석사학위논문, 고려대학교, 대학원.
- 한국수자원공사 (1995). "수도관 개량을 위한 의사결정 시스템 개발".
- Halhal, D. et al(1997). "Water Network Rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.123, No.3, pp.137~146, June.
- Kim, J. H. (1992). "Optimal Rehabilitation/Replacement Model for Water Distribution System", Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, Texas, December.
- 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.