



## Harmony search algorithm and its application to optimization problems in civil and water resources engineering

Kim, Joong Hoon<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

Paper number: 17-108

Received: 23 December 2017; Revised: 16 January 2018; Accepted: 16 January 2018

### Abstract

Harmony search algorithm (HSA), developed by Hydrosystem lab. in Korea University in 2001, was a new meta-heuristic optimization algorithm inspired by the iterative improvisation process of Jazz music players where the best harmony is eventually produced. HSA is now one of the most well-known meta-heuristic algorithms (as proven by its cited number of the first published paper more than 3,600 times as of January 11th 2018 based on Google Scholar citation) and has been applied to diverse research domains such as not only water resources and civil engineering but also in medical science, business, and humanities. This paper is a review article written with the wish for wider application of HSA and other optimization algorithms, especially in the domain of water resources engineering. Therefore, this paper first briefly introduces the mechanism and operators of HSA and then reviews its application area and citation frequency per research domain. In addition, recent globalization of HSA will be investigated and summarized by checking the current status of related international conferences and on-going research projects. After reviewing previous domestic papers with optimization algorithms specifically published in the water resources domain, this paper is finalized by delivering some suggestions to encourage the application of optimization algorithms including HSA.

**Keywords:** Harmony search algorithm, Optimization algorithm, Water resources engineering

## 화음탐색법과 토목 및 수자원공학 최적화문제에의 적용

김중훈<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부

### 요 지

화음탐색법은 2001년 고려대학교 수자원연구실에서 개발한 최적화 알고리즘으로 재즈의 즉흥연주에서 반복적인 연습을 거듭할 수록 좋은 화음이 만들어지는 현상에 착안하였다. 화음탐색법은 처음 소개된 논문이 Google Scholar 기준 약 3,600여 회(2018년 1월 11일 기준) 인용될 만큼 유전자알고리즘과 견줄만한 세계적인 최적화 알고리즘이 되었고 비단 수자원공학 및 토목공학 뿐 만 아니라 공학 전 분야, 의학, 경영학, 인문학 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 본 논문은 화음탐색법을 포함한 최적화 알고리즘이 수자원공학의 다양한 분야에서 널리 적용되기를 바라며 작성된 화음탐색법 총설논문(Review Article)이다. 따라서, 본 논문에서는 먼저 화음탐색법을 간략히 소개하고 적용분야 및 분야별 적용 빈도를 살펴본다. 또한 화음탐색법의 세계화 현황을 관련 학회의 성장과 관련 연구프로젝트의 동향 정리를 통해 알아본다. 마지막으로 국내 수자원공학 분야 연구에 적용된 최적화 알고리즘 현황을 살펴보고 활용의 증대를 위한 몇 가지 제안사항을 전달하며 마무리한다.

**핵심용어:** 화음탐색법, 최적화 기법, 수자원공학

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-3290-3316  
E-mail: jaykim@korea.ac.kr (J. H. Kim)

# 1. 서론

최적화 (Optimization)는 제약조건 (Constraints)을 고려하여 어떠한 함수의 최대치 (Maximum) 또는 최소치 (Minimum)를 찾는 과정을 말하며 수학, 공학, 과학 등에서 다루어지는 다양한 문제의 해는 최적화를 통해 구할 수 있다. 제2차 세계대전 동안 군 관련기관에서 작전, 기획, 물류와 같은 문제를 합리적으로 해결하기 위하여 사용하기 시작한 최적화 기법은 현재에도 각 산업분야에서 이익을 극대화하기 위한 해법을 제공하고 있다. 일례로 전 세계적으로 약 6,500억 원의 시장규모를 가지는 공정시스템 시장에서 약 40%의 점유율을 차지하고 있는 아스펜 테크놀로지(2011 Global Outlook Study, 2012)는 공정 최적화 솔루션프로그램인 AspenOne을 개발하여 상용화 하였으며, 국내기업인 한화토탈과 LG화학은 이 프로그램을 사용하여 각각 매년 약 40억 원과 50억 원의 수익 개선 효과를 거둔 바 있다. 토목공학분야에서는 호주의 상수도 설계사 Barwon Water는 상수도관망의 설계와 펌프 및 운영 규칙 결정을 위해 최적화 기법을 적용하여 300만 달러의 설계비용 절감과 매년 2만 달러 상당의 운영비용 절감효과를 거두었다. 대전의 경우 신호체계 최적화 사업을 통하여 연간 281억 원의 경제적 편익을 거두었다. 최적화 기법은 도로, 교통, 상수도 및 수자원시스템 등과 같은 토목분야에서는 물론 공학, 의학, 경영학, 인문학 분야에 걸쳐 활발히 적용되고 있으며 그로 인해 얻어지는 경제적 효과는 실로 상상을 초월하는 수준이다.

최적화 기법은 크게 해석적 기법(A analytical Method)과 발견적 기법(Heuristic Methods)으로 나뉜다. 해석적 기법은 수학적 반복계산 방법으로 매번의 계산마다 동일한 해를 구하는 방법이며 발견적 기법은 주로 대상 문제의 차원 및 크기가 크거나 높은 비선형성을 지닌 복잡한 문제의 해를 찾기 위해 다양한 자연현상 이론에 영감을 얻는 추계학적 탐색 방법 (Stochastic Method)이다. ‘적자생존’의 진화론에 기반한 유전자알고리즘(Genetic Algorithm), 개미 떼의 군집 먹이 탐색 능력에 영감을 얻은 입자군집최적화기법(Particle Swarm Optimization) 등이 대표적인 발견적 기법이다. 화음탐색법 (Harmony Search Algorithm, HSA) (Geem *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2001)은 화음이라는 인공적인 현상에서 착안하여 개발된 고도화된 발견적 기법(Meta-heuristic methods)이다. 화음탐색법은 적절한 전역탐색(Exploration)과 지역탐색(Exploitation)을 이용한 최적해 탐색기법으로 전세계적으로 그 우수성을 인정받아 현재는 공학, 수학, 의학, 경영학, 인문학 분야까지도 적용되고 있다.

본 논문은 화음탐색법을 포함한 최적화 기법이 수자원공학의 다양한 분야에서 널리 적용되기를 바라며 작성된 화음탐색법 총설논문(Review Article)이다. 따라서 본 논문은 먼저 화음탐색법의 원리를 간략히 설명하고 적용분야 및 분야별 연구내용을 살펴본 후 최적화알고리즘 측면에서 토의한다. 또한 화음탐색법의 세계화 현황을 관련 학회의 성장과 관련 연구프로젝트의 동향 정리를 통해 알아본다. 마지막으로 국내 수자원공학 분야 연구에 적용된 최적화 기법을 리뷰하고 최적화 적용 증대를 위한 몇 가지 제안사항을 전달하며 마무리한다.

# 2. 화음탐색법의 원리

화음탐색법은 재즈의 즉흥연주에서 반복적인 연습을 거듭할수록 좋은 화음이 만들어지는 현상에 착안하여 만들어진 최적화 알고리즘이다. 여러 가지 악기가 소리를 내는 과정에서, 잘 어울리는 화음을 만들거나 불협화음을 내는 경우도 존재하지만, 훈련의 과정(반복계산)을 통해 불협화음은 점차 사라지게 되고 미적으로 가장 아름다운 화음(Global Optimum, 최적해)을 이룰 수 있을 것이다. Table 1에서 이러한 실제 음악적 현상과 최적화과정을 비교하였다.

화음탐색법은 최적해 탐색 능력을 극대화하기 위해 하모니메모리 고려(Harmony Memory Considering) 연산자, 음조정(Pitch Adjusting) 연산자, 랜덤 탐색(Random Search) 연산자로 구성되어 있다. 각 연산자는 매개변수에 의해 연산 빈도가 통제되며 대상문제에 적합하게 설정할 수 있다. 화음탐색법의 최적해 탐색과정은 Fig. 1과 같다.

화음탐색법은 HM (Harmony Memory)라고 불리는 저장소에 훈련의 과정 속에서 찾은 아름다운 화음들을 저장한다. 반복계산 마다 발생하는 새로운 화음이 기존 HM에 저장된 최악의 화음보다 좋다면 새로운 화음은 추가되고 최악의 화음은 제거된다. 매 반복계산 마다 발생하는 새로운 해는 하모니

Table 1. Comparison between optimization and musical performance processes

Optimization process	Musical performance process
Objective function	Aesthetic standard
Global optimum solution	Best state
Values of decision variable	Pitches of instrument
Variables	Musical instrument
Each iteration	Each practice
Solution vector	Harmony

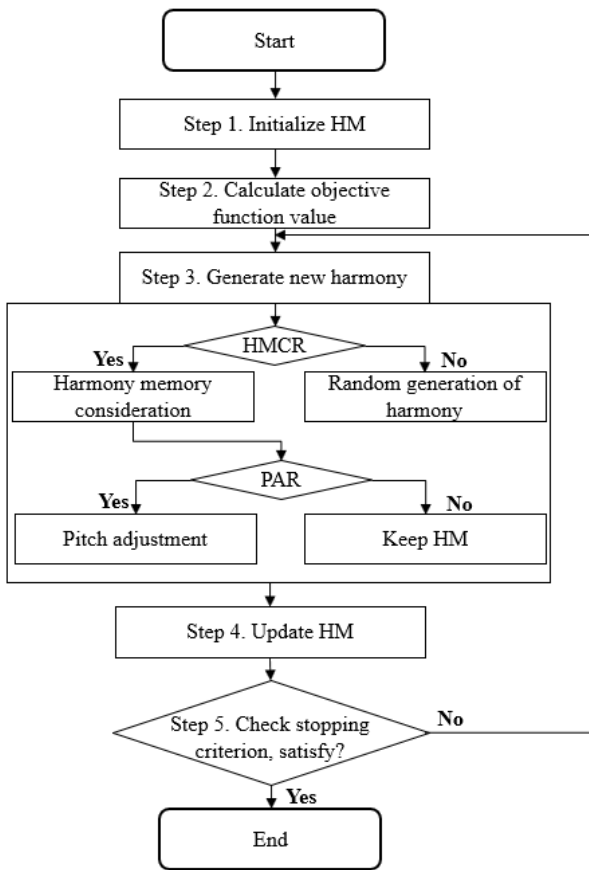


Fig. 1. Flow chart of harmony search algorithm

메모리 고려 연산자 또는 랜덤 탐색 연산자에 의해 발생될 수 있는데 HMCR (Harmony Memory Considering Rate)의 확률로 전자가 발생하고 여분의 확률로 후자가 발생한다. 전자의 경우 새로운 화음을 만들 때, HM에 있는 화음을 바탕으로 만들며 후자의 경우 새로운 영역에서 무작위로 생성한다. 따라서 랜덤 탐색 연산자는 반복계산이 지속되면서 알고리즘에서 발생할 수 있는 지역해에 빠지는 것을 방지하여 탐색의 전역성을 확보하고, 하모니메모리 연산자는 우수한 해들의 조합을 통해 근처의 최적해를 찾을 가능성을 높이는 역할을 하여 탐색의 지역성을 유지한다. 한편, 음조조정 연산자는

하모니메모리 고려 연산자가 수행될 때 마다 PAR (Pitch Adjusting Rate)의 확률로 동작하며 좋은 화음을 만들기 위해 각 악기의 음조를 미세하게 조절하는 것과 같이 우수한 해를 찾기 위해서 기존 해와 이웃하는 값을 고려하는 또 다른 지역 탐색자이다. 또한 화음탐색법 연산자들의 추계학적 적용을 통해 전역탐색과 지역탐색의 적절한 균형을 확보하는 것이 화음탐색법의 최대 장점이라고 할 수 있다(Yang, 2010).

이전의 실험적 연구에서 확인된 바와 같이(Geem, 2006; Sadollah *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2016b) 화음탐색법은 다른 기존의 발견적 탐색기법에 비해 다양한 탐색능력을 보유하고 있다. ‘적자생존’의 자연선택과정을 모방한 발견적 탐색법인 유전자알고리즘(Goldberg, 1989)은 새로운 유전자(해)의 생성 시 오직 부모세대의 두 유전자만이 새로운 유전자에 영향을 준다. 즉, 양부모의 경험만이 새로운 유전자 생성에 활용되는 것이다. 그러나 화음탐색법은 과거 반복계산에서 발견하여 저장된 다양한 화음(해)으로부터 새로운 화음을 생성하기 때문에 전역해의 탐색 확률이 높다. 또한 모의담금질(Simulated Annealing, Kirkpatrick *et al.*, 1983)과 타부검색법(Tabu Search, Glover, 1977)과는 달리 군 탐색을 수행하면서도, 과거의 경험을 축적한다는 측면에서는 타부검색법의 특징을 지니며, 해가 꼭 최적이지 아니라도 어느 정도 좋은 범위에 들면 경험의 집합에 추가한다는 점에서 모의담금질의 특징도 지니고 있는 탐색기법이다(Table 2).

### 3. 화음탐색법 적용분야별 연구: 국제저널에 집중하여

화음탐색법은 2001년에 처음 개발된 이래로 공학 전 분야, 의학, 경영학, 인문학 등 다양한 분야에 적용되어 왔으며 국제적인 관심이 급증하고 있다. 본 절에서는 국제저널에 게재된 화음탐색법의 분야별 적용 연구에 대해 토목공학 세부 분야, 즉 구조공학, 교통공학, 지반공학, 수자원공학 분야별로 살펴본다.

Table 2. Comparison between HSA and other meta-heuristic optimization algorithms

Optimization algorithms	Population vs. Memory	Single search vs. Multi search (each iteration)	Considering number of neighbor solutions
Genetic algorithm	Population-based	Multi-search	One neighbor solution
Simulated annealing	Single-based	Single-search	One neighbor solution
Tabu search	Memory-based	Single-search	n neighbor solutions
Particle swarm optimization	Population-based	Multi-search	One neighbor solution
Harmony search	Memory-based	Single-search	n neighbor solutions

Fig. 2는 국제저널(SCI (E), Scopus 등)에서 화음탐색법의 연도별 인용횟수를 정리한 그래프이다. 현재(2018년 1월 11일)까지 Google Scholar 기준으로 3,656회, Web of Science [과학인용 색인 확장(SCIE), 사회 과학 인용 색인(SSCI), 예술 및 인문 인용 색인(A & HCI)]에서 1,791회, Scopus에서 2,410회 인용되어 명실상부 세계적 최적화알고리즘의 대열에 합류하였다.

현재까지 화음탐색법을 인용한 총 3,601편의 국제논문들 출판저널의 분야 또는 각 논문의 연구 분야를 기준으로 분류한 결과, 총 16가지 분야로 분류할 수 있었다(Fig. 3). 그 중 컴퓨터공학, 수학, 에너지 분야 연구가 전체의 50% 이상을 차지하였고 나머지 공학 분야 연구가 28%를 차지하였다. 공학 분야 인용논문 중 토목분야 논문은 총 201편이었으며 토목분야 세부전공별 논문 비율은 Fig. 4와 같다. 의학, 환경, 물리학, 지질학, 사회, 경제 분야에서도 화음탐색법을 이용하여 문제를 해결, 그 결과를 국제저널에 보고하고 있다(Fig. 3).

토목공학분야에서 화음탐색법이 가장 많이 적용되는 분야는 구조공학 분야로 전체 토목공학 논문 201편 중 119편 (59%)이 구조분야 논문이었다. 화음탐색법이 최초로 적용된 수자원공학 분야에서는 전체의 19%에 해당하는 논문이 출판되었다. 또한 환경, 지반, 교통, 건설관리 및 해안공학분야 논문은 모두 10% 이하로 상대적으로 적용비율이 적었다. 아래에서는 토목공학 세부분야별 화음탐색법 적용연구 내용을 살펴보고 최적화알고리즘 측면에서의 한계점 및 개선사항에 대해 토의한다.

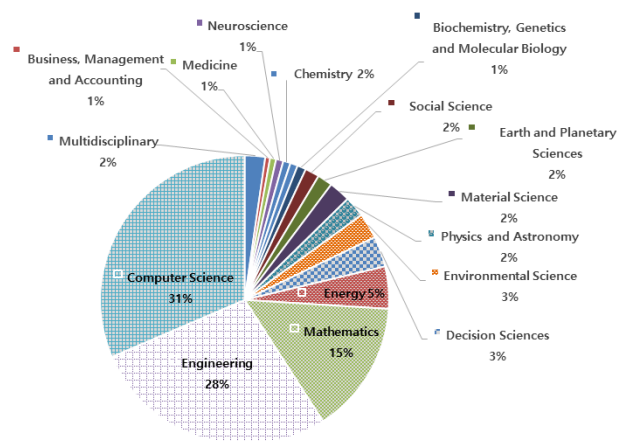


Fig. 3. Pie diagram of HSA application fields

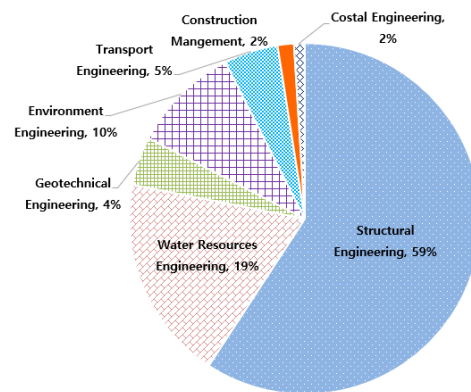


Fig. 4. Pie diagram of HSA application fields in civil engineering domain

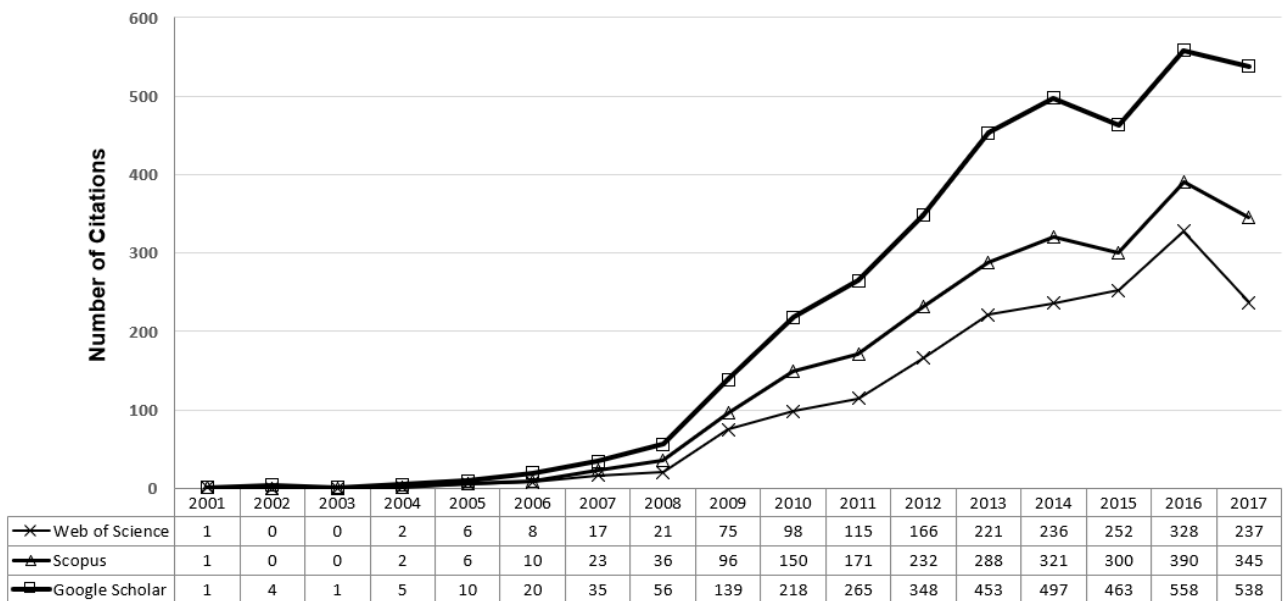


Fig. 2. HSA's citation increases in SCI (E), Scopus, and Google Scholar (As of January 11th 2018)

### 3.1 구조공학 분야

구조공학 분야에서는 주로 구조물 설계에 화음탐색법이 적용되었으며 Saka, Kaveh, Degertekin 등의 연구자들의 주도 하에 일련의 설계 최적화 연구가 수행되었다. Saka (2007)는 지오데식 돔(Geodesic Dome) 설계를 위해 초기버전의 화음탐색법을 적용하였고 최적화 신뢰도를 확보하기 위해 HMCR과 PAR의 다양한 조합에 대한 민감도분석을 수행하였다. 이후 Saka는 영국구조설계법규 기준인 BS5950 조건을 만족하면서 구조물자체의 하중을 최소화하는 철골구조물(Saka, 2009), 격자구조시스템(Saka and Erdal, 2009), 셀룰러 빔(Erdal *et al.*, 2010)의 설계 최적화에 화음탐색법을 적용하였다. 하지만 앞서 언급된 연구들은 초기버전의 화음탐색법을 사용하였다는 한계점이 존재한다. Kaveh의 경우 철근콘크리트 일방향 슬래브 비용 최적화(Kaveh and Abadi, 2011)에 화음탐색법의 적용, 매개변수 민감도 분석을 수행하였다. 또한 합성바닥 구조 시스템 비용 최적화(Kaveh and Abadi, 2010)를 위해 PAR을 반복계산에 따라 동적으로 변경하는 개선 화음탐색법(Mahdavi *et al.*, 2007)을 적용하여 그 성능을 초기버전 화음탐색법과 비교하였다. Degertekin (2008)는 강구조물 설계문제에서 화음탐색법이 유전자알고리즘보다 우수한 해를 찾는 것을 확인하였고 유사한 후속 연구를 수행하였다(Degertekin *et al.*, 2009; Degertekin and Hayalioglu, 2010).

Bekdas and Nigdeli (2011)는 동조 질량 감쇠장치(Tuned Mass Damper)의 매개변수 최적화를, Gholizadeh *et al.* (2010)은 공사현장 시설물 위치결정 최적화를 위해 개선 화음탐색법(Mahdavi *et al.*, 2007)을 적용, 유전자 알고리즘과 비교하였다. 화음탐색법은 구조공학 분야에서 다양한 최적화 문제에 적용되었으며 주로 초기버전의 화음탐색법을 이용하여 매개변수 민감도 분석을 수행하거나 유전자알고리즘 등 다른 최적화 알고리즘과 성능을 비교하여 결과의 신뢰성을 확보하였다.

### 3.2 교통/지반공학 분야

교통 및 지반공학 분야에서는 화음탐색법이 적용이 상대적으로 미비하였지만 보다 고도화된 화음탐색법 기술이 개발되어 다목적 최적화 문제 등에 적용되었다. 교통공학 분야에서는 도시 도로망, 도로 설계 등의 최적설계 문제(Piperagkas *et al.*, 2012; Ceylan and Ceylan, 2013)를 풀기위해 화음탐색법을 이용하였다. 특히 일방통행 길의 재구성을 위한 다목적 최적화 문제를 풀기위해 다목적 화음탐색법이 개발되기도 하였으며(Salcedo-Sanz *et al.*, 2013), 다목적 도로망 설계 시 최적화 성능향상을 위해 하이브리드 화음탐색법 알고리즘이 개발되었다(Miandoabchi *et al.*, 2012). 지반공학 분야에서는

Cheng에 의해 화음탐색법이 다양한 문제에 적용되었다. 임계단면 결정문제에 수정된 화음탐색법과 초기버전을 포함한 총 6가지 최적화알고리즘을 적용, 비교하여 화음탐색법의 우수한 성능을 확인하였고(Cheng *et al.*, 2007), 사면 안전을 결정 문제의 해를 구하기 위해 입자군집최적화기법과 화음탐색법을 결합한 하이브리드 알고리즘을 개발하였다(Cheng *et al.*, 2011a). 이외에 Cheng은 사면안정성 분석을 위해 수정 화음탐색법을 제안하였고(Cheng *et al.*, 2008), 지반공학 변분원리(Variational principle)를 대체하기 위해 활용하였다(Cheng *et al.*, 2011b).

### 3.3 수자원공학 분야

수자원공학 분야에서는 주로 수문모형 매개변수 검보정과 상·하수도시스템 설계 및 운영최적화에 화음탐색법이 적용되었다. 화음탐색법의 개발자들이 수자원공학자였기 때문에 수자원공학 분야의 화음탐색법 적용 연구는 2000년대 초부터 다양한 개선 화음탐색법을 개발 및 적용하였고, 2010년 후에는 새로운 형태의 화음탐색법이 개발되었다. Paik *et al.* (2005)은 계절성을 고려한 탱크모형의 매개변수를 자동으로 보정하기 위해 비선형계획법, 유전자알고리즘, 수정 화음탐색법(HM 업데이트 방법 개선 등)을 적용, 정확도를 비교하였으며 그 결과 화음탐색법이 가장 우수한 매개변수 값을 도출함을 확인하였다. Geem (2011)은 비선형 Muskingum 모형의 매개변수 추정을 위해 Parameter-setting-free 화음탐색법을 개발하였다. 해당 연구에서는 자가적응형 HMCR과 PAR 값을 고려하여 전역탐색력과 지역탐색력을 탐색상황에 알맞게 변동할 수 있었으며 탐색성능을 향상시켰다. 앞서 언급한 연구 이후로 소모적인 매개변수 민감도 분석 없이도 탐색효율 및 신뢰성이 높은 화음탐색법의 활용이 가능하게 되었다(Geem, 2010; Geem and Shim, 2010; Luo *et al.*, 2012; Shivaie *et al.*, 2015).

상·하수도시스템 분야에서는 상수도관망 수요절점의 최소 압력요구 조건과 관 내 유속 조건을 만족시키는 최소비용 관망 설계에 Parameter-setting-free 화음탐색법이 적용되었으며(Geem and Cho, 2011), 펌프 에너지 비용을 최소화하는 최적 펌프운영 솔루션 도출을 위해 화음탐색법을 이용한 연구들이 수행되었다(Geem, 2005; Geem, 2009; Ostfeld *et al.*, 2011). Baek *et al.* (2010)은 화음탐색법 기반 압력기반 상수관망 수리 해석 툴을 개발하였다. Jung *et al.* (2016)은 병렬계산 환경에서 적용할 수 있는 병렬화음탐색법(Parallel Harmony Search)을 개발하여 대규모 상·하수도시스템 시나리오 계획법 문제에 적용하였다. Yazdi *et al.* (2017)은 상수관망 다목적 최적 설계를 위해 화음탐색법과 미분진화알고리즘(Differential

Evolution Algorithm)을 결합한 하이브리드 다목적 최적화 알고리즘을 개발하였다. Jung *et al.* (2017)은 기계학습법과 화음탐색법을 결합하여 좋은 해를 만드는 패턴을 학습, 새로운 해 생성시 반영하도록 하였고 이를 상수관망 강건성 설계에 적용하였다. 상·하수도시스템 분야에는 해당 시스템의 설계, 운영, 관리에 관련된 다양한 최적화 문제가 존재하며 화음탐색법에 대한 전문성을 보유한 전문 연구 인력들이 새로운 버전의 화음탐색법(하이브리드, 병렬, 다양한 개선버전)을 적극 개발하고 있다(Choi *et al.*, 2017).

#### 4. 화음탐색법의 세계화

Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 화음탐색법의 인용횟수는 2010년부터 급격히 증가하였다. 2010년부터 지금까지 8년 동안 3,462회의 인용횟수를 기록하며 명실상부 세계적인 최적화 알고리즘으로 자리매김하였다. 이는 그동안 유전자알고리즘 등 기타 알고리즘과 비교연구를 통해 화음탐색법의 우수성이 증명되었을 뿐 아니라 화음탐색법의 원리가 쉽고 적용이 용이하기 때문이다. 또한 국내외 다양한 분야의 연구자들이 활발히 연구에 활용하였으며 화음탐색법 관련 학회(Fig. 5), 프로젝트 등 화음탐색법의 세계화를 위한 많은 노력도 원동력이 되었다.

화음탐색법에 집중한 최초의 국제회의인 제1회 International Conference on Harmony Search Algorithm (ICHSA)는 2014년 2월 13일부터 14일까지 2일 동안 고려대학교에서 개최되었으며 총 6개국 96명의 연구자가 참여하여 화음탐색법 저변 확대에 기여하였다. 최적화분야에서 전 세계 최고의 권위자로 손꼽히는 Xin-She Yang 교수(Middlesex University)는 기조강연에서 화음탐색법의 특·장점을 수학원리로 검증하였다. ICHSA 2014를 통해 전 세계적의 화음탐색법 연구자들을 파

악할 수 있었으며, 화음탐색법 전문단을 구축, 운영하는 계기가 되었다. 제2회 ICHSA 2015는 새로운 화음탐색법 개발, 토목분야 적용, 다목적최적화 등 7개의 주제로 총 43편의 구두발표가 진행되었으며 발표된 논문들은 Springer의 *Advances in Intelligent Systems and Computing*으로 출판되었다. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering (SCI IF = 5.786)의 편집장인 Hojjat Adeli 교수(Ohio State University)는 최적화 알고리즘이 공학분야 뿐만 아니라 의학분야에서도 활발히 적용되고 있음을 보여주었고 화음탐색법을 포함한 최적화 알고리즘의 지속적 발전의 중요성을 강조하였다. 해외에서 개최된 첫 대회인 제3회 ICHSA 2017은 스페인 빌바오에서 TecNALIA Research & Innovation의 Javier Del Ser 선임연구원의 주도하에 개최되었다. 제4회 대회인 ICHSA 2018은 금년 2월에 인도 뉴델리에서 성황리에 개최되었으며, 제5회 대회는 내년 7월에 중국 칭다오에서 개최될 예정이다. 지속적인 화음탐색법 국제회의의 개최로 화음탐색법의 개선 및 적용에 대한 심도있는 토의의 장과 인적네트워크를 유지하고 있으며 홍보효과까지 누리고 있다.

한편, 화음탐색법 관련 연구프로젝트가 진행되고 있어 화음탐색법의 저변을 확대하고 있다. 한국연구재단에서 진행하고 있는 기초연구사업인 ‘Harmony Search 알고리즘 원천 기술 확립 및 세계화 추진 전략’은 화음탐색법의 원천기술 재확립과 세계화 추진 및 주도권 확립을 연구목표로 2013년부터 진행되고 있다.

#### 5. 수자원공학에의 최적화 알고리즘 적용: 국내논문에 집중하여

지금까지 화음탐색법의 원리, 적용분야별 연구내용, 세계화에 대해 살펴보았다. 본 절에서는 화음탐색법을 포함한 최



(a) ICHSA 2014



(b) ICHSA 2015



(c) ICHSA 2017

Fig. 5. International conference on harmony search algorithm



적화 알고리즘의 국내 수자원공학 분야 적용사례를 정리하고 분석하였다. Fig. 6은 연도별 최적화 기법이 적용된 국내논문의 수를 나타내고 있다. 현재까지(2017년 1월 11일) 국내 등재저널(KCI)에 게재된 최적화 알고리즘 적용 연구는 토목분야에 총 367편이다. 이 중 수자원 분야에서 발표된 논문은 총 게재논문의 26.2% 인 97편이다.

국내 수자원 분야 연구에 최적화 알고리즘이 적용된 경우는 국제저널의 경우와 유사하게 수문모형 최적화와 상·하수도 연구로 나눌 수 있다. 수문모형의 최적 매개변수를 산정하기 위해 유전자알고리즘, 비선형계획법 등이 적용되었는데 (Choi *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2007; Koo *et al.*, 2007; Ahn *et al.*, 2009; Shim *et al.*, 2009), 특히 미국 애리조나대학에서 개발된 Shuffled Complex Evolution at University of Arizona (SCE-UA) 알고리즘이 많이 활용되었다(Lee, 2006; Chung *et al.*, 2012). 또한 유전자 알고리즘을 이용한 확률강우강도식 산정(Na *et al.*, 2001) 및 대상지역의 유출곡선지수 재산정 (Park *et al.*, 2016) 등의 연구가 진행되었다.

수문모형 매개변수 최적화 문제의 다목적 성격 때문에 다목적 유전자알고리즘이 적용되는 등 최적화 알고리즘 측면에서 진보가 있었다(Kim *et al.*, 2007). 하지만 최적화 알고리즘은 매개변수를 어떻게 설정하느냐에 따라 탐색능력의 편차가 큼에도 불구하고 앞서 언급된 대부분의 연구에서 매개변수 민감도 분석 없이 임의로 지정하여 사용하였다. 문제에서 고려하는 결정변수와 제한조건이 많고 함수관계가 복잡한 경우 최적화 알고리즘을 몇 번 적용한다고 해서 전역해가 찾아진다

는 보장이 없으므로 앞서 언급된 민감도 분석을 수행하여 결과의 신뢰성을 확보하여야 한다. 또한, 해외의 경우, 각종 최적화 알고리즘의 초기버전에서 향상된 버전이 발표될 때마다 신속하게 활용하지만, 국내에서는 여전히 화음탐색 또는 유전자알고리즘의 초기버전을 적용하는 경우가 많다. 문제에 따라 초기버전과 향상된 버전의 탐색 성능이 크게 차이나는 경우가 있으므로 유의할 필요가 있다.

상하수도공학 분야에서는 최적화 알고리즘을 이용하여 상수도관망의 최적관경을 결정하면서 시스템 신뢰성을 확보하는 연구(Jung *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2015), 시스템 내 수리구조물 설계 연구(Jung *et al.*, 2000), 최적관경 결정시 초기해 설정 방법에 대한 연구(Kim *et al.*, 2013), 상수도관망 설계를 위해 계층구조를 가진 화음탐색법을 개발한 연구(Lee *et al.*, 2016a), 내배수시스템의 관경, 레이아웃, 저류지 위치, 규모 등을 결정하는 연구(Jung *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2011; Ryu and Lee, 2012) 등이 수행되었다.

### 6. 최적화 알고리즘 적용 증대를 위한 방법

앞서 살펴보았듯이, 토목 및 수자원공학 분야에서 최적화 대상이 될 수 있는 문제가 방대함에도 국내에서는 화음탐색법을 포함한 발견적 기법을 이용한 최적화 기반 연구가 미비한 실정이다. 이는 대부분 최적화 및 최적화 알고리즘이 생소하기 때문이나 조금만 관심을 기울여 그 원리를 이해한다면의

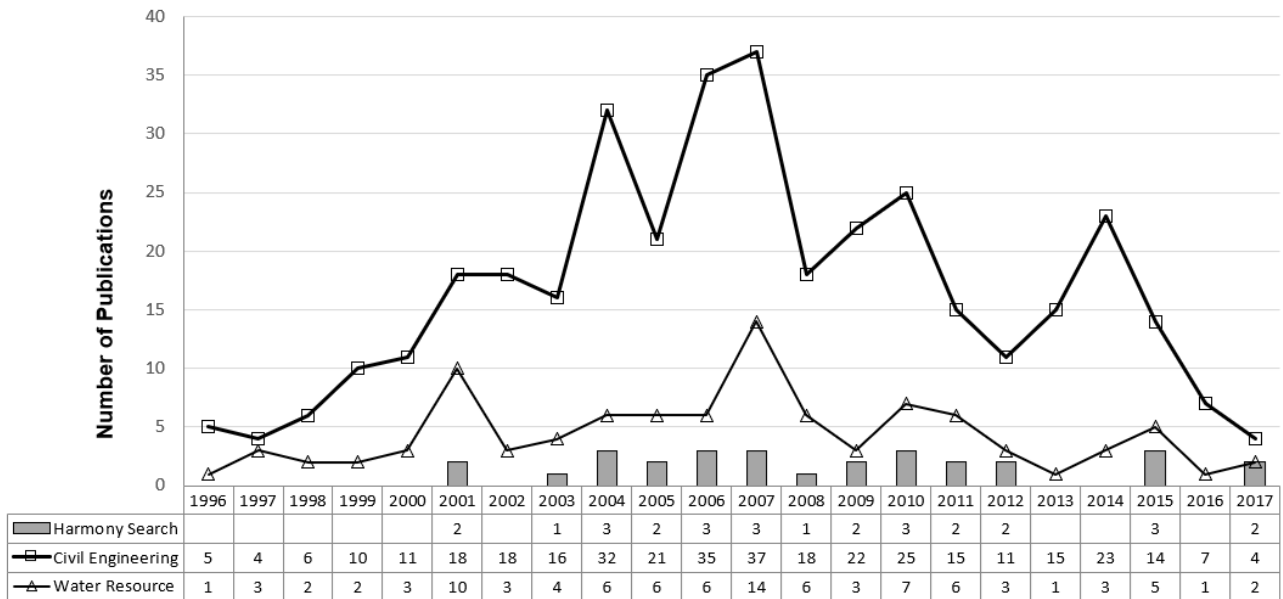


Fig. 6. Number of papers with optimization techniques published in domestic journals

외로 쉽게 적용할 수 있다. 본 절에서는 화음탐색법을 비롯한 발전적 기법의 적용을 촉진하기 위해 다음과 같은 사항을 제안한다.

화음탐색법, 유전자 알고리즘 등 일반 알고리즘을 사용하는 경우, 연산메커니즘을 이해하고 적절한 매개변수 값의 설정을 통해 최적해의 수렴성 및 신뢰성을 확보해야 한다. 일반적으로 전역탐색은 지역탐색에 비해 높은 확률로 적용이 되도록 설정해야 하는데 예를 들어, HMCr은 70~90%의 확률로 PAR은 5~20%의 확률로 처리되는 것이 바람직하다(Geem, 2006). 많은 최적화 알고리즘 매개변수 민감도 분석 연구에서 확인되었다시피 잘못 설정된 매개변수로 인해 수렴성이 매우 떨어지는 비전역해가 도출될 수도 있다.

비전문가의 최적화 알고리즘 매개변수 설정에 어려움을 해소하기 위해 매개변수를 자동으로 설정, 반복계산에 따라 동적으로 변화하도록 하는 자가적응형(Self-adaptive) 및 하이퍼휴리스틱(Hyper-heuristic) 알고리즘이 개발되었다. 최적화 초보자들은 이를 적극 활용하기 바란다.

공학문제 최적화에서는 이론적인 수학적 문제 최적화와 달리 최적화 대상이 되는 공학시스템의 정보, 이해, 시스템원리를 최적화 과정의 간략화, 탐색공간의 제한을 위해 활용할 수 있다. 예를 들어, 상수관망의 관경을 결정하는 최적설계문제에서 수원과 근접한 상류관이 하류 인구밀집지역에 망으로 구성된 배수관보다 큰 관경이 결정된다(예를 들어, 10~20만 규모 소도시의 수요량을 공급하는 관망의 수원 인근 본관이 100 mm 일리는 없다). 또는 수문모형에서 각 매개변수들이 물리적으로 합리적인 범위가 존재할 수 있다(예를 들어, 강우량 대비 증발산 비율은 80~90%는 되지 않는다). 따라서 이러한 정보, 물리적 합리성을 활용하여 탐색 대상이 되는 해공간의 규모를 줄여 해탐색의 효율을 향상시킬 수 있다.

수자원시스템과 관련된 의사결정에 다중목적 고려해야 할 필요성이 증대되고 있다. 기후변화의 영향으로 수자원시스템의 계획, 설계, 운영, 관리 문제에 전통적으로 고려되어 왔던 비용 뿐 만이 아니라 불확실성, 신뢰성, 강건성, 탄력성, 생애주기비용 등 다양한 목적함수가 등장하였고 또한 그 중요성이 강조되고 있다. 최근에는 주로 네 개 이상의, 서로 상쇄관계를 가진 다중목적(Many-objective) 최적화 문제가 고려되는 추세이다. 다중목적 최적화 문제의 경우 최적해 도출 이후 그 결과의 도시 방법(Visual Analytics), 도시 체계(Coordinate System)에 따라 분석의 효율성, 결과의 해석력이 크게 차이나며 결국 의사결정권자의 합리적인 대안선택에 크게 영향을 끼친다. 따라서 다중목적 최적화 결과의 해석방법 연구가 필요하다.

## 7. 결 론

본 총설논문은 먼저 화음탐색법의 원리에 대해 설명하였고 화음탐색법의 적용분야를 국제저널에 집중하여 살펴보았다. 토목공학분야에서 화음탐색법이 가장 많이 적용되는 분야는 구조공학 분야였으며, 수자원공학 분야에서는 주로 수문모형 매개변수 검보정과 상·하수도시스템 설계 및 운영 최적화에 화음탐색법이 적용되었다. 또한 본 논문에서는 화음탐색법이 세계적인 최적화 알고리즘으로 자리매김한 원인 및 세계화 현황에 대해 분석한 다음, 국내 수자원공학 분야에서 최적화 알고리즘이 적용되고 있는 수문모형 매개변수 최적화, 상·하수도관망 설계 및 운영 최적화 연구를 정리하였다. 마지막으로 수자원공학 분야에서 화음탐색법을 포함한 최적화 알고리즘의 적용을 확대하기 위한 제안사항을 전달하였다. 즉, 적절한 매개변수 값의 사용, 자가적응형 및 하이퍼휴리스틱 알고리즘의 활용, 공학문제 최적화에 시스템 정보 및 원리를 활용, 다중목적함수 고려의 중요성이다. 최적화 알고리즘은 다양한 수자원공학 분야 문제의 최적해를 도출하게 하는 유용한 툴이며 그 원리가 대부분 자연, 인공적인 현상에 기반하였기 때문에 이해하기도 쉽다. 보다 많은 연구자들이 화음탐색법을 포함한 최적화 알고리즘들을 연구에 활용하기를 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2016R1A2A1A05005306).

## References

- Ahn, S. E., Lee, H. S., and Jun, M. W. (2009). "Prediction of stream flow on probability distributed model using multi-objective function." *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 5, pp. 93-102.
- Baek, C. W., Jun, H. D., and Kim, J. H. (2010). "Development of a PDA model for water distribution systems using harmony search algorithm." *Ksce Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 613-625.
- Bekdas, G., and Nigdeli, S. M. (2011). "Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search." *Engineering Structure*, Vol. 33, No. 9, pp. 2716-2723.



- Ceylan, H., and Ceylan, H. (2013). "Discrete design of urban road networks with meta-Heuristic harmony search algorithm." *Teknik Dergi*, Vol. 24, No. 1, pp. 6211-6231.
- Cheng, Y. M., Li, D. Z., Li, L., Sun, Y. J., Baker, R., and Yang, Y. (2011a). "Limit equilibrium method based on an approximate lower bound method with a variable factor of safety that can consider residual strength." *Computers and Geotechnics*, Vol. 38, No. 5, pp. 623-637.
- Cheng, Y. M., Li, L., and Chi, S. C. (2007). "Performance studies on six heuristic global optimization methods in the location of critical slip surface." *Computers and Geotechnics*, Vol. 34, No. 6, pp. 462-484.
- Cheng, Y. M., Li, L., and Fang, S.S. (2011b). "Improved harmony search methods to replace variational principle in geotechnical problems." *Journal of mechanics*, Vol. 27, No. 1, pp. 107-119.
- Cheng, Y. M., Li, L., Lansivaara, T., Chi, S. C., and Sun, Y. J. (2008). "An improved harmony search minimization algorithm using different slip surface generation methods for slope stability analysis." *Engineering Optimization*, Vol. 40, No. 2, pp. 95-115.
- Choi, M. H., Ahn, J. H., Kim, J. H., and Yoon, Y. N. (2001). "Parameter estimation for nash model and disk model by optimization techniques." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 1, No. 3, pp. 73-82.
- Choi, Y. H., Jung, D., Lee, H. M., Yoo, D. G., and Kim, J. H. (2017). "Improving the quality of pareto optimal solutions in water distribution network design." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 143, No. 8, pp. 04017036.
- Choi, Y. H., Lee, H. M., Yoo, D. G., and Kim, J. H. (2015). "Optimal design of water supply system using multi-objective harmony search algorithm." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 29, No. 3, pp. 293-303.
- Chung, G. H., Park, H. S., Sung, J. Y., and Kim, H. J. (2012). "Determination and evaluation of optimal parameters in storage function method using SCE-UA." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 11, pp. 1169-1186.
- Degertekin, S. O. (2008). "Optimum design of steel frames using harmony search algorithm." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 36, No. 4, pp. 393-401.
- Degertekin, S. O., and Hayalioglu, M. S. (2010). "Harmony search algorithm for minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 42, No. 5, pp. 755-768.
- Degertekin, S. O., Hayalioglu, M. S., and Gorgun, H. (2009). "Optimum design of geometrically non-linear steel frames with semi-rigid connections using a harmony search algorithm." *Steel and Composite Structures*, Vol. 9, No. 6, pp. 535-555.
- Erdal, F., Doğan, E., and Saka, M. P. (2011). "Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, No. 2, pp. 237-247.
- Geem, Z. W. (2005). "Harmony search in water pump switching problem." *International Conference on Natural Computation*, Vol. 3612, pp. 751-760.
- Geem, Z. W. (2006). "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search." *Engineering Optimization*, Vol. 38, No. 3, pp. 259-277.
- Geem, Z. W. (2009). "Harmony search optimisation to the pump included water distribution network design." *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 26, No. 3, pp. 211-221.
- Geem, Z. W. (2010). "Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using parameter-setting-free harmony search." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 684-688.
- Geem, Z. W. (2011). "Solution quality improvement in chiller loading optimization." *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 10, pp. 1848-1851.
- Geem, Z. W., and Cho Y. (2011). "Optimal design of water distribution networks using parameter-setting-free harmony search for two major parameters." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 137, No. 4, pp. 377-380.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., and Loganathan, G. V. (2001). "A new heuristic optimization algorithm: harmony search." *Simulation*, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68.
- Geem, Z. W., and Shim, K. B. (2010). "Parameter-setting-free harmony search algorithm." *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 217, No. 8, pp. 3881-3889.
- Gholizadeh, R., Amiri, G. G., and Mohebi, B. (2010). "An alternative approach to a harmony search algorithm for a construction site layout problem." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 37, No. 12, pp. 1560-1571.
- Glover, F. (1977). "Heuristics for integer programming using surrogate constraints." *Decision Sciences*, Vol. 8, No. 1, pp. 156-166.
- Goldberg D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, Reading.
- Jung, B. S., Kim, J. I., Kim, S. H., and Park, N. S. (2000). "Optimal design of hydraulic device at the Seobyun pumping station using Genetic Algorithm." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. 3, pp. 289-298.
- Jung, D., Choi, J., Choi, Y. H., and Kim, J. H. (2016). "A new parallelization scheme for harmony search algorithm." *Harmony Search Algorithm, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 382, pp. 147-152.
- Jung, D., Chung, G., and Kim, J.H. (2010). "Optimal design of water distribution system considering the uncertainties on the demands and roughness coefficients." *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 1, pp. 73-80.
- Jung, D., Kang, D., and Kim, J. H. (2017). "Development of a hybrid harmony search for water distribution system design." *KSCE Journal of Civil Engineering*, pp. 1-9.
- Jung, J.H., Han, G.Y., and Kim, G.S. (2008). "Optimization of detention facilities by using multi-objective Genetic Algorithms." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 12, pp. 1211-1218.
- Kaveh, A., and Abadi, A. S. M. (2010). "Cost optimization of a composite floor system using an improved harmony search algorithm." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, No. 5, pp. 664-669.

- Kaveh, A., and Abadi, A. S. M. (2011). "Cost optimization of reinforced concrete one-way ribbed slabs using harmony search algorithm." *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 36, No. 7, pp. 1179-1187.
- Kim, J. H., Geem, Z. W., and Kim, E. S. (2001). "Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using harmony search." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 5, pp. 1131-1138.
- Kim, K. W., Lee, Y. J., Kang, D. S., and Kim, Y. H. (2013). "Improved approach for optimal design of agricultural irrigation system." *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 6, pp. 359-365.
- Kim, T. S., Jung, I. W., Koo, B. Y., and Bae, D. H. (2007). "Optimization of tank model parameters Using multi-objective Genetic Algorithm (I): methodology and model mormulation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 9, pp. 677-685.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P. (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680.
- Koo, B. Y., Kim, T. S., Jung, I. W., and Bae, D. H. (2007). "Optimization of tank model parameters Using multi-objective Genetic Algorithm (II): application of preference ordering." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 9, pp. 686-694.
- Lee, D. H. (2006). "Automatic calibration of SWAT model using LH-OAT sensitivity analysis and SCE-UA optimization method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 8, pp. 677-690
- Lee, H. M., Yoo, D. G., Lee, E. H., Choi, Y. H., and Kim, J. H. (2016a). "Development and applications of multi-layered Harmony Search Algorithm for improving optimization efficiency." *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 17, No. 4, pp. 1-12.
- Lee, H. M., Yoo, D. G., Sadollah, A., and Kim, J. H. (2016b). "Optimal cost design of water distribution networks using a decomposition approach." *Engineering Optimization*, Vol. 48, No. 12, pp. 2141-2156.
- Lee, J. H., Kim, J. H., and Jun, H. D. (2011). "An optimal sewer layout model to reduce urban inundation ." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 10, pp. 777-786.
- Lee, S., Yoo, D. G., Jung, D., and Kim, J. H. (2015). "Optimal life cycle design of water pipe system using Genetic Algorithm." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 16, No. 6, pp. 4216-4227.
- Luo, Q., Wu, J., Sun, X., Yang, Y., and Wu, J. (2012). "Optimal design of groundwater remediation systems using a multi-objective fast harmony search algorithm." *Hydrogeology Journal*, pp. 1-14.
- Mahdavi, M., Fesanghary, M., and Damangir, E. (2007). "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems." *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 188, No. 2, pp. 1567-1579.
- Miandoabchi, E., Farahani, R. Z., and Szeto, W. Y. (2012). "Bi-objective bimodal urban road network design using hybrid metaheuristics." *Central European Journal of Operations Research*, Vol. 20, No. 4, pp. 583-621.
- Na, C. J., Kim, J. H., Lee, E. T., and Ahn, W. S. (2001). "Derivation of probable rainfall intensity formula using Genetic Algorithm." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 1, pp. 103-115.
- Ostfeld, A., Salomons, E., Ormsbee, L., Uber, J. G., Bros, C. M., Kalungi, P., Burd, R., Zazula-Coetzee, B., Belrain, T., Kang, D., Lansey, K., Shen, H., McBean, E., Wu, Z. Y., Walski, T., Alvisi, S., Franchini, M., Johnson, J. P., Ghimire, S. R., Barkdoll, B. D., Koppel, T., Vassiljev, A., Kim, J. H., Chung, G., Yoo, D. G., Diao, K., Zhou, Y., Li, J., Liu, Z., Chang, K., Gao, J., Qu, S., Yuan, Y., Laucelli, T. D. P., Lyroudia, L. S. V., Kapelan, Z., Savic, D., Berardi, L., Barbaro, G., Giustolisi, O., Asadzadeh, M., Tolson, B. A., and McKillop, R. (2011). "Battle of the water calibration networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 138, No. 5, pp. 523-532.
- Paik, K., Kim, J. H., Kim, H. S., and Lee, D. R. (2005). "A conceptual rainfall-runoff model considering seasonal variation." *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 19, pp. 3837-3850.
- Park, D. H., Kang, D. S., Ahn, J. H., and Kim, T. W. (2016). "Redetermination of curve number using genetic algorithm and CN aligner equation." *Journal of Korea Water Resources Association*. Vol. 49, No. 5, pp. 373-380.
- Piperagkas, G. S., Konstantaras, I., Skouri, K., and Parsopoulos, K. E. (2012). "Solving the stochastic dynamic lot-sizing problem through nature-inspired heuristics." *Computers & Operations Research*, Vol. 39, No. 7, pp. 1555-1565.
- Ryu, S. H., and Lee, J. H. (2012). "Determination of optimal locations and size of storage in the urban sub-surface using Genetic Algorithm." *Korean Society of Hazard Mitigation*. Vol. 12, No. 3, pp. 285-290.
- Sadollah, A., Choi, Y., Yoo, D. G., and Kim, J. H. (2015). "Metaheuristic algorithms for approximate solution to ordinary differential equations of longitudinal fins having various profiles." *Applied Soft Computing*, Vol. 33, pp. 360-379.
- Saka, M. P. (2007). "Optimum geometry design of geodesic domes using harmony search algorithm." *Advances in Structural Engineering*, Vol. 10, No. 6, pp. 595-606.
- Saka, M. P. (2009). "Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, No. 1, pp. 36-43.
- Saka, M. P., and Erdal, F. (2009). "Harmony search based algorithm for the optimum design of grillage systems to LRFD-AISC." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 38, No. 1, pp.25-41.
- Salcedo-Sanz, S., Manjarres, D., Pastor-Sánchez, Á., Del Ser, J., Portilla-Figueras, J.A., and Gil-Lopez, S. (2013). "One-way urban traffic reconfiguration using a multi-objective harmony search approach." *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 9, pp. 3341-3350.

- Shim, S. K., Koo, B. Y., and Ahn, T. J. (2009). "Development of combination runoff model applied by Genetic Algorithm." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 3, pp. 201-212.
- Shivaie, M., Kazemi, M. G., and Ameli, M. T. (2015). "A modified harmony search algorithm for solving load-frequency control of non-linear interconnected hydrothermal power systems." *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 10, pp. 53-62.
- Yang, X. S. (2010). *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver Press.
- Yazdi, J., Choi, Y. H., and Kim, J. H. (2017). "Non-dominated sorting Harmony Search Differential Evolution (NS-HS-DE): a hybrid algorithm for multi-objective design of water distribution networks." *Water*, Vol. 9, No. 8, p. 587.