분산형 저류시설-하수관망 네트워크 시스템의 입자군집최적화 기반 모델 예측 제어

Model Predictive Control for Distributed Storage Facilities and Sewer Network Systems via PSO

백현욱* · 류재나** · 김태형* · 오재일**

Hyunwook Baek, Jaena Ryu, Tea-Hyoung Kim* and Jeill Oh

*중앙대학교 기계공학과, **중앙대학교 사회기반시스템공학부

† School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

요 약

도시지역의 하수관거 시스템은 우수 수용능력 및 하수 월류 발생 등의 시스템의 한계점을 가지고 있어, 강우시 우수 유출수로 인한 침수저감과 더불어 도시비점오염원의 저감에 모두 대응할 수 있는 저류시설의 도입이 주목받고 시작하였다. 최근 환경부에서는 방재적 우수관리와 더불어 합류식 하수관거 월류수, 분류식 우수관거 유출수 처리를 포함하는 다기능 저류시설을 “하수저류시설”이라 통칭하고, 이의 도입을 적극 추진하고 있는 실정이다. 반면 대규모 단일 저류시설 설치의 경우에는 공간 확보의 문제가 발생할 수 있으며, 이에 대안으로는 중·소규모의 분산형 저류시설 설치 및 운영을 들 수 있다. 본 연구에서는 분산형 저류시설-하수관망 네트워크 시스템의 최적 운영을 위한 모델 예측 제어기법을 제안한다. 이를 위해 첫째로 네트워크 시스템의 각 구성 요소의 수리모델을 제시함으로써 보다 정밀한 하수관망 네트워크의 거동을 모사하고자 한다. 둘째로 제안된 모델을 기반으로 현재의 강우 유입량을 고려하여 각 저류조의 수위, 하수관로의 유입/유출량을 예측하여, 입자군집 최적화 알고리즘을 이용한 모델 예측 제어기법을 바탕으로 주어진 제약조건을 만족하며 상황을 바탕으로 제안된 제어기법의 사용여부에 따른 효과를 비교 분석하고, 이의 타당성을 검증하고자 한다.

키워드 : 모델 예측 제어, 입자군집최적화 알고리즘, 분산형 저류시설-하수관망 네트워크, 내수침수, 합류식 하수관거 월류수

Abstract

Urban sewer systems has a limitation of capacity of rainwater storage and problem of occurrence of untreated sewage, so adopting a storage facility for sewer flooding prevention and urban non-point pollution reduction has a big attention. The Korea Ministry of Environment has recently introduced a new concept of “multi-functional storage facility”, which is crucial not only in preventive stormwater management but also in dealing with combined sewer overflow and sanitary sewer discharge, and also has been promoting its adoption. However, reserving a space for a single large-scale storage facility might be difficult especially in urban areas. Thus, decentralized construction of small- and midium-sized storage facilities and its operation have been introduced as an alternative way. In this paper, we propose a model predictive control scheme for an optimized operation of distributed storage facilities and sewer networks. To this aim, we first describe the mathematical model of each component of networks system which enables us to analyze its detailed dynamic behavior. Second, overflow locations and volumes will be predicted based on the developed network model with data on the external inflow occurred at specific locations of the network. MPC scheme based on the introduced particle swarm optimization technique then produces the optimized the gate setting for sewer network flow control, which minimizes sewer flooding and maximizes the potential storage capacity. Finally, the operational efficacy of the proposed control scheme is demonstrated by simulation study with virtual rainstorm event.

Key Words : Model Predictive Control, Particle Swarm Optimization, Distributed storage facilities-sewer networks, Sewer flooding, Combined Sewer Overflows

접수일자: 2012년 10월 12일

심사(수정)일자: 2012년 10월 19일

게재확정일자 : 2012년 12월 12일

† Corresponding author

본 논문은 환경부 “차세대 에코노베이션기술개발사업(과제번호 414-111-006)”으로 지원 받은 과제입니다. 이에 감사드립니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 몇 년간 연달아 발생한 내수침수에 대하여 이를 방지하기 위한 우수관리 방법은 국가적 차원에서 그 중요성이 크게 대두되고 있다. 특히 대부분 합류식으로 매설되어있는 도심지역의 하수관거 시스템은 우수 수용능력 및 하수 월류 발생 과 같은 시스템의 한계점을 가지고 있어, 강우시 우수 유출로 인한 침수저감과 더불어 도시 비점오염원의 저감에 모두 대응할 수 있는 저류시설의 도입이 주목받기 시작하였다. 2011년 환경부의 기후변화 대응을 위한 다기능 하수도 구축계획은 방재적 우수관리와 더불어 합류식 하수관거 월류수(CSO, Combined Sewer Overflow), 분류식 우수관거 유출수(SSD, Sanitary Sewer Discharge) 처리를 포함하는 다기능 저류시설을 “하수저류시설”이라 통칭하고 하수저류시설의 계획 및 강우시 오염부하 저감계획을 하수도정비기본계획 수립시 반영하도록 하고 있다[1]. 반면 대도시 지중공간에는 대형 저류시설물을 위한 이용가능 공간이 적고, 도심부의 높은 지가는 공간 확보의 경제적 어려움을 초래하고 있기 때문에 대규모 단일 저류시설의 설치가 지역적 특성에 의하여 불가능한 경우가 빈번하다. 이를 위한 대안으로 중·소규모 저류조를 적절히 분산 설치하고 이들을 하수관망과 연계하여 효율적으로 운영하는 방안이 있을 수 있다. 이러한 복수의 저류조 및 하수관망으로 구성되는 복잡한 네트워크 시스템의 경우 종래의 개별 시스템 운영 관리기법을 기반으로 하여서는 최대의 효율을 구현하기 어려우며, 따라서 총체적 관점에서의 네트워크 시스템 운용·제어기법이 요구된다.

저류시설 하수관망 네트워크를 제어하기 위한 기법으로는 모델예측 제어[2], 선형 프로그래밍 기법[3], 비선형 제어 기법[4] 등이 제시되어 왔다. 대규모 분산형 하수관망 시스템의 제어기술에 필수 요구사항으로는 우선 강우 외란에 의한 영향을 강건하게 다루어야 하며 복잡성과 수치연산 처리량을 가능한 한 최소화함으로써 실시간 제어에 적합해야 한다. 또한 대상 시스템에서는 수많은 센서와 구동장치들이 분산 설치되므로 제어전략은 다변수 모델을 다룰 수 있어야 하고, 시간지연이나 불감시간 등에 기인하는 바람직하지 않은 동적 특성의 영향을 보상할 수 있어야 한다. 또한 시스템 구성요소들의 물리적 제약조건과 비선형 거동 특성도 고려할 수 있어야 한다. 상기 이슈들에 적합한 제어전략의 하나로 모델예측제어 기법이 최근 학계와 산업계의 많은 주목을 받고 있다. 하지만 대상으로 하는 하수관망이 대규모의 복잡시스템인 관계로 이에 관련된 최적화 문제 또한 차원, 제약조건 및 복잡성 등의 관점에서 매우 난해한 것으로 알려져 있다.

이에 본 논문에서는 분산형 저류시설-하수관망 네트워크 시스템의 최적 운용을 위해 시스템 관리자의 편의성 및 제어 효율성을 향상시킨 새로운 모델 예측 제어기법을 제안한다. 이를 통해 대상 시스템의 각 저류조 수문 높이를 적절히 제어하는 전략을 도출하여 내수침수가 어느 한 곳에서 발생하기 이전에 전체의 이용 가능한 저장 공간을 사용하도록 한다. 이때 저류조 수문의 높이를 디자인 변수로 하는 최적화 문제를 도출하게 되며, 이를 해결하기 위해 입자군집최적화 알고리즘을 도입한다.

입자군집최적화(Particle Swarm Optimization, PSO)[5], 알고리즘은 1995년 J.Kennedy와 R.Berhart에 의해

처음으로 제안되었으며, 물고기 떼나 새 떼와 같은 동물들의 사회적 행동양식에 기반 하여 개발되었다. 이러한 입자군집 최적화 알고리즘은 여타 메타 휴리스틱 알고리즘에 비해 사용자가 설정해야 할 파라미터의 수가 적고, 이들의 설정이 비교적 용이함에도 불구하고 그 최적화 성능이 매우 우수하다는 장점을 바탕으로 최근 다양한 분야에서 각광을 받고 있다[6-9]. 그러나 최적화 문제의 차원이 증가하고 목적함수가 복잡해짐에 따라 탐색 입자들이 전역 최적해(global optimum)에 수렴하지 못하고 국소 최적해(local optimum)에 수렴하게 되는 조기수렴(premature convergence) 현상이 빈번히 발생하게 되며, 이는 여러 입자군집에 기반 한 최적화 알고리즘의 치명적인 약점으로 지적되었다[10].

본 논문에서는 상기 조기수렴 현상을 효과적으로 개선시키기 위해 본 연구팀에서 기존에 제시한 DPSO 알고리즘을 도입하였다[11]. 제안된 DPSO 알고리즘은 ‘이웃’이라는 개념을 사용하여 전체 입자군집을 적절한 크기를 갖는 소그룹으로 세분화 하였다. 이를 통해 입자들의 정보교환을 각 그룹 내로 제한하였고, 결과적으로 입자들의 탐색 다양성과 수렴속도의 변화를 도출 할 수 있게 되었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 분산형 저류시설-하수관망 네트워크의 최적제어 운용 기법을 도출 하고자 한다. 이를 위해 첫째로 네트워크 시스템의 각 구성요소의 수리모델을 제시함으로써 보다 정밀한 하수관망 네트워크의 거동을 모사하고자 한다. 둘째로 제안된 모델을 기반으로 현재의 강우 유입량을 고려하여 각 저류조의 수위, 하수관로의 유입/유출량을 예측한 후, 입자군집최적화 알고리즘을 이용한 모델 예측 제어기법을 바탕으로 주어진 제약조건을 만족하며 월류수 발생을 최소로 하고, 저류용량의 확보를 최대화 하는 최적의 수문 개/폐 정도를 결정한다. 끝으로 가상의 집중강우 상황을 바탕으로 제안된 제어기법의 사용여부에 따른 효과를 비교 분석하고 이의 타당성을 검증 한다.

2. 분산형 저류시설-하수관망 네트워크 시스템

2.1 시스템 구성 및 수리 모델링

분산형 저류시설-하수관망 네트워크 시스템은 제어 가능한 수문을 가진 여러 개의 저류조와 연결 관로, 처리장 등으로 구성되어 있다. 이들 구성요소의 일반적인 모식도를 그림 1. 에 나타내었다.

그림 1. 분산형 저류시설-하수관망 네트워크 시스템
Fig. 1. Distributed storage facilities and sewer network systems

1) 저류조(Reservoir): 우수의 저류를 목적으로 하는 시설물이다. i 번째 저류조에 우수의 유입 및 유출을 모사하기 위한 이산 시간 방정식은 질량보존의 법칙으로 모사할 수 있으며, 이는 다음과 같다.

$$v_i(k+1) = v_i(k) + T(q_{r,in,i}(k) - q_{r,i}(k) - s_i(k)) \quad (1)$$

여기서, $i=1,2,\dots,N_r$ 이며, N_r 은 저류조의 개수를 나타낸다. T 는 샘플링 시간 간격이며, $v_i(k)$ 는 i 번째 저류조에 저장된 우수의 체적이고 $q_{r,in,i}(k)$ 는 외부 유입량 및 상류에서의 방류유량을 포함한 i 번째 저류조로 유입되는 모든 유량의 합을 의미한다. $q_{r,i}(k)$ 는 수문조절을 통해 i 번째 저류조에서 유출되는 유량을 의미하며 다음의 (2)식과 같이 계산된다.

$$q_{r,i}(k) = C_0 b_i f_i(h) \cdot \sqrt{\frac{v_i(k)}{a_i}} \quad (2)$$

$k=l+h \cdot Tc$ ($l=0,1,\dots,Tc-1$; $h=0,1,\dots,M-1$) (3)
식 (2)에서 C_0 는 실험적인 계수이고, 단위는 $(m^{0.5} \cdot \min^{-1})$ 이다. a_i , b_i 는 각각 저류조의 바닥면과 수문의 면적을 의미한다. f_i 는 0-1사이의 값으로 수문 전체에 대한 열린 비율을 나타낸다. Tc 와 Ts 는 각각 제어 입력이 적용되는 시간과 예측 시간을 의미한다. 따라서 $M(=Tc/Tc)$ 은 제어 횟수를 의미한다. 식 (1)에서 $s_i(k)$ 는 저류조의 월류량을 의미하며 다음과 같이 계산된다.

$$s_i(k) = \begin{cases} 0, & \text{if } v_i(k) \leq v_{\max,i} \\ (v_i(k) - v_{\max,i})/T, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $v_{\max,i}$ 는 i 번째 저류조의 최대 저장 용량이다.

2) 연결 관로(Link Component): 저류조 네트워크 시스템에서 연결 관로의 길이로 인해 야기되는 유량 도달 지연을 고려한 모델을 다음과 같다.

$$q_{l,i}(k+1) = (1 - T/t_i)q_{l,i}(k) + (T/t_i) \sum_{j \in N_{in}} q_{l,i,j}(k - \tau_i) \quad (5)$$

여기서, $q_{l,i}$ 과 $q_{l,i,j}$ 는 i 번째 관로의 유출유량과 유입유량을 의미하고, τ_i 는 각 연결 관로의 시간 지연 변수를 나타낸다. t_i 는 시정수이며, N_{in} 은 i 관로에 대응하는 유입유량의 집합이다.

3) 합류 지점(Summation node): 유량들이 모여지는 합류지점은 다음과 같이 모델링된다.

$$q_{s,out,i}(k) = q_{s,in,i,1}(k) + q_{s,in,i,2}(k) + \dots \quad (6)$$

4) 외부 유입량(External inflow)과 처리장(Treatment plants): 외부 유입량 d_i 는 저류조 또는 관로로 유입되는 유량을 의미하며, 이는 강우량과 관련되어 있다. 처리장은 저류 네트워크 시스템으로부터 이송되는 우·하수를 처리하는 시설물로, 처리장에 유입되는 유량은 p_i 로 나타내었다.

2.2 제약조건

각 저류조에서 방출되는 유량 $q_{r,i}(k)$ 는 다음과 같은 상하한계를 가진다.

$$0 \leq q_{r,i}(k) \leq q_{r,\max,i}[v_i(k)] \quad (7)$$

여기서 상 한계는 $q_{r,\max,i}[v_i(k)] = \min\{q_{r,\text{cap},i}, q_{r,v,i}[v_i(k)]\}$ 로 정의된다. $q_{r,\text{cap},i}$ 는 i 번째 저류조의 최대 토출용량을 나타내고 $q_{r,v,i}(k) = C_1 \cdot v_i(k)$, $C_1 = 1(\min^{-1})$ 이다.

이와 유사하게 연결 관로와 처리장 또한 각각의 수용 한계($q_{l,\max,i}$, $p_{\max,i}$)를 가지고 있다. 따라서 i 번째 관로로 들어오는 유량의 합은 다음 식 (8)과 같이 제한되며, 처리장으로 유입되는 유량은 식 (9)의 제약조건을 가진다.

$$\sum_{j \in N_{in}} q_{l,i,j}(k - \tau_i) \leq q_{l,\max,i} \quad (8)$$

$$p_i \leq p_{\max,i} \quad (9)$$

2.3 최적화를 위한 목적 함수

본 연구에서는 유한한 시간 구간($N = Ts/T$) 동안 주어진 강우량 d_i 를 바탕으로 식(1)~(9)를 이용하여 저류조 전체 월류량을 절감하고 예비 저장용량을 최대화하기 위한 목적함수를 아래와 같이 도입하였다.

$$\min J = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^{N_r} \alpha s_i(k) + \beta v_i(k) \quad (10)$$

상기 식 (10)에서 α , β 는 가중치를 나타내며 $\alpha + \beta = 1$ 이다. 이를 통해 저류조 월류량을 줄이면서, 월류가 발생하지 않을 때는 최대한 예비 저장용량을 확보하여 극한 강우가 언제 발생할지 모르는 불확실한 상황에서 저류 공간을 최대한 확보 할 수 있는 메커니즘을 가능케 하였다.

3. 입자군집최적화 기반 모델 예측 제어

이 장에서 순환 네트워크 구조를 갖는 분산형 입자군집최적화 알고리즘에 대해 소개하고 이를 기반으로 하는 모델 예측 제어 기법을 설명하고자 한다.

3.1 최적화 문제

일반적인 구속조건을 갖는 최적화 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\min_{x \in F} f(x), f(x): \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R} \quad (11)$$

$$F := \{x \in \mathbf{R}^n \mid h_1(x) < 0, h_2(x) < 0, \dots, h_m(x) < 0\} \quad (12)$$

여기서 $f(x)$ 는 선형/비선형의 목적함수이며, 디자인 변수 벡터 $x \in \mathbf{R}^n$ 에 의해 계산된다. n 은 설계변수의 개수, m 은 구속조건의 개수를

의미하며, $h_l: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ 은 선형/비선형의 구속함수이다. 그러므로 F 는 모든 구속 조건이 만족되는 해가 존재하는 영역, 즉 가해구역(feasible region)을 의미하며 D 는 디자이너에 의해 설정되는 초기 탐색영역이 된다. 본 논문에서는 제약조건 $h_l(x)$ 을 PSO의 메커니즘 내에서 다루기 위해서 가상목적함수 $f_v(x)$ 를 도입하여, 식 (11)과 식 (12)에서 주어진 최적화 문제를 아래와 같이 제약 조건이 없는 문제로 새롭게 정의한다.

3.2 분산형 입자군집최적화 알고리즘

가상목적함수 $f_v(x): \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ 는 다음 두 가지 조건을 모두 만족하는 임의의 함수가 될 수 있다 : (i) 모든 구속조건 $h_l(x) < 0, \forall l$ 을 만족하는 x 에 대해 $f_v(x) < 0$ 인 함수, (ii) $f(x_i) < f(x_j)$ 의 관계일 때 $f_v(x_i) < f_v(x_j)$ 를 만족하는 함수이다. 한 예로 상기 조건을 모두 만족하는 가상목적 함수 $f_v(x)$ 를 $f_v(x) := \arctan\{f(x)\} - \pi/2$ 라 한다면 최적화 문제는 다음과 같이 제약조건이 없는 문제로 새롭게 정의된다.

$$\min_{x \in \mathbf{R}^n} L(x)$$

$$L(x) := \begin{cases} h_{\max}(x), & \text{if } h_{\max}(x) > 0 \\ f_v(x), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

여기서 $h_{\max}(x) := \max[h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)]$ 이다. 상기 기법은 초기 진화연산 단계에서 그림 2. 와 같이 모든 입자들을 가해구역으로 이끌고 가해구간 내에서 최적해를 탐색하도록 한다. 전형적인 구속조건을 다루기 위한 방법들과 비교할 때 상기 기법은 문제에 의존하거나 디자이너에 의해 선택되어야 하는 페널티 계수, 라그랑지 계수 등을 사용하지 않아 상대적으로 활용도가 쉽다.

그림 2. 입자가 가해 영역으로 이동되는 모식도

Fig. 2. Graph for a particle moving to a feasible region

식 (13)과 같이 재 정의된 최적화 문제를 해결하기 위해 본 연구팀에서 기존에 제안한 분산형 입자군집최적화 기법은 이웃입자 기반 순환 네트워크 구조를 갖는 알고리즘이다 [8]. n_p 개의 입자($P_1, P_2, \dots, P_{n_p}$)로 구성된 군집에서 x_i^k 를 i 번째 입자 P_i 의 k 번째 단계에서의 위치라 한다면 같은 단계에서 입자 P_i 의 속도는 $v_i^k := (v_{i,1}^k, v_{i,2}^k, \dots, v_{i,n}^k)^T$ 로 정의된다. 그때 다음 단계 $k+1$ 에서 i 번째 입자 P_i 는 아래와 같은 법칙에 따라 이동하게 된다.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (14)$$

$$v_i^{k+1} = c_0 v_i^k + c_1 r_{1,i}^k (x_{pbest,i}^k - x_i^k) + c_2 r_{2,i}^k (x_{sbest}^k - x_i^k) \quad (15)$$

여기서 c_0, c_1, c_2 는 각각 설계자가 결정하는 파라미터이다. 이들의 선택에 따라 입자들의 움직임 수렴성과 탐색 다양성이 달라진다. $r_{1,i}^k, r_{2,i}^k$ 는 $[0,1]$ 사이에서 정규분포에 의해 발생하는 난수이며, PSO의 확률적 행동을 내포한다. 식 (15)에서 $x_{pbest,i}^k$ 는 i 번째 입자의 개인적인 최고 후보위치를 의미하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{pbest,i}^k := \arg \min_{x \in \{x_j^k | j=1,2,\dots,k\}} L(x) \quad (16)$$

또한 식 (15)에서 $x_{sbest,i}^k$ 는 i 번째 입자와 그 주변 입자

중에서의 최고 후보위치이며 다음과 같이 표현된다.

$$x_{sbest,i}^k := \arg \min_{x \in \{x_j^k | j=i-\frac{n_s}{2}, \dots, i+\frac{n_s}{2}\}} L(x) \quad (17)$$

여기서 $n_s (\leq n_p)$ 는 i 번째 입자의 이웃 입자 개수를 나타내며 짝수로 선정해야하는데, $l < 1$ 이거나 $l \geq n_p + 1$ 인 경우 $x_l^k := x_{(l-1 \bmod n_p)+1}^k$ 이다. 일반적인 PSO가 군집 내 모든 입자와 정보교환을 했던 것과 달리 이웃입자 기반 순환 네트워크 구조에서 i 번째 입자 P_i 는 자신을 중심한 이웃한 입자 $P_{i-\frac{n_s}{2}}, P_{i-\frac{n_s}{2}+1}, \dots, P_{i+\frac{n_s}{2}}$ 들과 정보교환을 한다. 그림

3. 을 통해 기존 PSO의 정보교환 기법과 DPSO에서 $n_s = 4$ 인 경우를 쉽게 확인 할 수 있다.

(a) Star topology : 군집 내 모든 입자들이 정보를 공유

(b) Cyclic-network topology : 각 입자들은 공정한 이웃 입자들과 정보를 공유

그림 3. 입자들의 정보교환 네트워크 구조 모식도

Fig. 3. Representations of two network topology

이러한 순환 네트워크 구조에서 이웃 입자란 다중 차원 내에서 서로 가까운 거리의 입자를 의미하는 것이 아니며, 번호에 의해 분류되는 구조를 통해 결정된다. 각 입자들은 이웃 입자들의 목적 함수 값과 비교하여, $x_{sbest,i}^k$ 를 선정하고 식(15)에 기반 이동한다. 상기 알고리즘에서 이웃입자 n_s 는 고정된다. 다시 말해, PSO의 초기에 설정된 n_s 는 반복횟수가 $k_{\max}$ 에 도달되기 까지 변하지 않는다. 따라서 n_s 의 설정은 서론에서 언급된 것과 같이 알고리즘 내 입자들의 탐색 능력과 수렴속도에 큰 영향을 미친다. 만약 $n_s = n_p$ 라면 $x_{sbest,i}^k$ 는 star topology를 갖는 종래의 PSO와 같을 것이며, 종래의 PSO는 앞서 언급된 것과 같이 빠른 수렴 속도를 보장할 수 있으나 이러한 특성은 전역해가 아닌 지역해로 모든 입자가 조기 수렴해 버리는 치명적 약점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 DPSO에서는 n_p 보다 적은 이웃입자의 개수 n_s 를 선택하게 되고, 이를 통해 탐색 능력과 수렴속도의 다양성을 모사할 수 있게 되었다. 특히 본 연구팀은 최근 연구결과에서 구속조건을 갖는 최적화 문제에 DPSO를 도입할 때 적절한 이웃입자의 선정에 관해 언급한 바 있으며[9], 이웃입자를 $n_s = 2n$ (디자인 변수의 두 배)로 선정하는 것이 좋은 결과를 이끌어 낼 수 있음을 보였다[12].

3.3 모델 예측제어

모델예측제어는 모델을 이용해 미래 출력치를 예측하고 이를 최적화하여 얻어진 제어 입력을 사용하는 기법으로 유한구간 개 루프 최적제어 입력을 폐 루프 제어 형태로

구현하는 기법으로도 볼 수 있다. 이러한 모델 예측제어의 기본 개념은 Kalman에 의해 상태공간제어 기법이 소개되고 이에 기반 해서 최적제어가 활발히 연구되던 1960년대 초에 이미 성립되었다. 이후 1994년 저류 네트워크의 제어 기법으로도 사용되어 그 효용성이 인정받고 있으며[2], 지속적으로 국내외에서 많은 연구가 활발히 진행 중이다. 이 기법의 장점을 간략히 요약하면 다음과 같다. 첫째, 실시간 제어에서 발생하는 시간지연 특성의 보상이 가능하다. 둘째, 시스템의 물리적 제약조건 범위 내에서의 제어입력 생성이 가능하다. 셋째, 사용자 친화적이며 매우 직관적인 기법으로서 제어이론에 대한 기본적인 지식을 갖지 않고도 구현이 가능하다. 마지막으로 다변수 시스템의 제어가 용이한 특징이 있다.

본 연구에서는 상기 DPSO알고리즘과 모델 예측제어를 결합한다. 이때 입자들의 위치 x_i 는 저류조 수문의 개/폐 정도에 해당 한다. 각 제어 입력 시간(T_c)마다 MPC는 시스템 모델(1)~(9)을 기반으로 유한한 예측 시간(N) 동안 각 요소들의 상태를 추정하고, 이를 통해 목적 함수를 최소화 하는 최적 수문 개/폐 정도를 DPSO알고리즘을 통해 도출하게 된다. 이를 바탕으로 전체시스템을 한 제어 입력 시간동안 운용한 후 다음 시간 단계에서는 예측된 실제 상태량을 바탕으로 상기 과정을 반복한다.

본 연구에서 제안하는 입자군집최적화 기반 모델예측제어 알고리즘은 다음과 같은 절차를 바탕으로 수행하게 된다.

Algorithm DPSO-MPC

1: Initialize the swarm,

$X_i(1)$ and $V_i(1)$ $i=1,2,\dots,M$

$K=1:K_{\max}$

2: Do for

3: For all Particle

4: Update Personal best using (16)

5: Update Social network best using (17)

9: Replace the Velocity and Position using (14),(15)

7: end for

8: end for

9: Obtain the optimization solution $\arg \min_{x \in \{x_i^{\max} | i=1,\dots,M_p\}} L(x)$

10: Apply the first element of input

sequence to system during T_c

11: Measure the system's current states and Go to [Step 1]

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

입자군집최적화 기반 모델 예측 제어 기법의 효용성을 테스트하기 위해 가상의 저류조 용량을 설정하고 집중 강우 사상의 유입을 시험하였다. 11개 저류조의 최대 용량은

각각 (단위 : m^3) [2800, 2050, 1054, 1280, 2600, 3080, 4100, 1980, 3760, 1820, 4050]이며, 6개의 관로는 각각 [3, 9, 14, 20, 22, 5] (단위: min)의 지연시간을 가진다. 분산형 저류시설-하수관망 네트워크 시스템의 최적화 문제를 풀기위한 DPSO 알고리즘의 파라미터들을 다음과 같다. 반복 횟수 : 200회, 입자 수 : 100개, $c_0, c_1, c_2=[0.7298, 1.4962, 1.4962]$, $n_s=45$.

그림 4. MPC-DPSO 기법의 도입 여부에 따른 월류수 발생량 비교

Fig. 4. Overflow by no control case and MPC-DPSO control case

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 분산형 저류시설-하수관망 네트워크의 효율적인 운영을 위한 제어 기법으로 모델 예측 제어 알고리즘을 도입하였다. 이를 위해 시스템 구성요소의 정밀 수리 모델을 구축하여 실제적인 거동을 모사하고자 하였으며, 저류조의 월류 발생을 최소화하고 저류능력을 최대화하기 위한 네트워크 운영의 최적화 문제를 도출 하였다. 구속조건이 고려되는 최적화 문제를 보다 효율적으로 해결하기 위해 가상목적함수를, 종래의 입자군집 최적화 알고리즘의 문제점인 조기 수렴문제를 해결하기 위해 DPSO 알고리즘을 도입하였다. 가상 목적함수를 통해 디자이너가 결정해야하는 파라미터 없이 구속조건이 없는 새로운 최적화 문제로 재정의하여 보다 손쉽게 PSO를 통해 문제를 해결 할 수 있었다. 또한 '이웃'이라는 개념을 적절히 적용하여 전체 입자군집을 몇 개의 소그룹으로 나누어 입자들의 정보교환을 각 그룹 내로 제한함으로써 입자들의 탐색 다양성을 향상시키고 수렴 속도에 변화를 줄 수 있었다.

향후 연구에서는 시뮬레이션에 국한되었던 연구를 확장시킬 예정이다. 첫째로는 적절한 대상지역을 선정하여 수리 모델의 검토를 수행하고, 더욱 정밀한 수리 모델을 수립하고자 한다. 이는 본 연구에서 제안된 제어 기법의 효과를 증대시킬 것으로 기대된다. 둘째로는 대상 지역에서 발생한

실제 강우-유출 자료를 활용함으로써 저류시설의 최적운영 이전 및 이후의 제어효과를 비교 분석하고자 한다. 이를 통해 본 연구에서 제안된 분산형 저류시설-하수관망 네트워크의 모델 예측 제어 기법의 유용성 및 범용성을 입증할 것이라고 판단된다. 마지막으로 인구기반의 진화 연산 알고리즘이 태생적으로 지니고 있는 연산 시간에 대한 문제를 해결하기 위한 기술적 연구가 필요하다. 따라서 최근 각광을 받고 있는 GPU(Graphic Processor Unit)기반의 DPSO 알고리즘 연산체계의 도입을 고려하고 있으며, 이를 통해서 기존의 연산 속도가 혁신적으로 단축시킬 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Jaena Ryu, Jeill Oh, "Feasibility Study on Installing a Multi-Functional Storage Facility," *Journal of Korean Society of Water & Wastewater*, vol. 25, pp. 935-947 12, 2011.
- [2] M.S. Gelormino, and N.L. Ricker, "Model-predictive control of a combined sewer system," *Int. J. Control*, vol. 59, no. 3, pp. 793-816, 1994.
- [3] W.Schilling, "Real-time Control of Urban Drainage Systems, the state of the art," *IAWPRC Task Group on Real-Time Control of Urban Drainage Systems*, 1989.
- [4] M.Pleau, J.F.Methot, A.Lebrun and H.Colas, "Minimizing combined sewer overflows in real-time control applications," *Water Qual. Res. J. Canada*, vol. 31, no. 4, pp. 775-786, 1996.
- [5] R. Eberhart, J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, pp. 39-43, Piscataway, NJ: IEEE Service Center., 1995.
- [6] R.Poli, "Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimization," *Journal of artificial Evolution and Applications*, vol. no.1, pp. 1-10, 2008.
- [7] Dongho Song, Yougil Lee, Tae-Hyoung Kim, "A Study on Distributed Particle Swarm Optimization Algorithm with Quantum-infusion Mechanism," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 527-531, August, 2012.
- [8] Sun-Wook Kim, Dong Hun Kim, "Design of Leg Length for a Legged Walking Robot Based on Theo Jansen Using PSO," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 21, no. 5, pp. 660-666, October, 2011.
- [9] Hwan-Il Kang, Byung-Hee Lee, Woo-Seok Jang, "Path Planning Method Using The Particle Swarm Optimization and the Improved Dijkstra Algorithm," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 212-215, April, 2008.
- [10] J. Riget, J. S. Vesterstrom, *A diversity-guided*

particle swarm optimizer-The ARPSO, Dept. comput. Sci., Univ. of Aarhus, Aarhus, Denmark, Tech. Rep. 2002-02, 2002.

- [11] I. Maruta, T. Sugie and T.-H. Kim, "Synthesis of fixed-structure robust controllers using the distributed particle swarm optimizer with cyclic-network topology," *ACC*, San Francisco CA, USA, June 29-July 01, 2011.
- [12] I. Maryta, T.Sugie and T.-H. Kim, "Identification of multiple mode models via distributed particle swarm optimization," *The 18th IFAC world Congress*, pp. 7743-7748, 2011.

저 자 소 개

백현욱(Hyunwook Baek)

2016년 : 중앙대학교 기계공학부 공학사
2012년~현재 : 중앙대학교 대학원 기계공학과 석사과정

관심분야 : System identification, Model Predictive control, Particle Swarm Optimization, Robust Control & Real time control

Phone : +82-70-8227-0917

E-mail : hyunwook@wm.cau.ac.kr

류재나(Jeana Ryu)

2001년 : 중앙대학교 토목공학과 공학사
2003년 : 중앙대학교 토목환경공학과 공학석사

2008년 : Imperial College London Ph.D. degree in Environmental Engineering

2008년~현재 : 중앙대학교 사회기반시스템공학부 연구교수

관심분야 : Urban drainage systems, Sewer network management, Urban flooding, Combined sewer overflows

Phone : +82-2-826-4528

E-mail : jaena.ryu@gmail.com

김태형(Tae-Hyoung Kim)

1999년 : 중앙대학교 기계공학부 공학사

2001년 : 중앙대학교 기계공학과 공학석사

2006년 : Kyoto Univ. Ph.D. degree in informatics

2008년~현재 : 중앙대학교 기계공학부 교수

관심분야 : Model Predictive Control, Iterative Learning
Control, Cooperative Control, Particle Swarm
Optimization, System Identification

Phone : +82-2-820-5748

E-mail : kimth@cau.ac.kr

오재일(Jeill Oh)

1992년 : 중앙대학교 토목공학과 공학사

1995년 : University of Colorado at
Boulder MS degree in
Environmental Engineering

1998년 : University of Colorado at
Boulder Ph.D. degree in
Environmental Engineering

2000년~현재 : 중앙대학교 사회기반시스템공학부 교수

관심분야 : Wastewater treatment, Sewer network man-
agement, Combined sewer overflows, Infiltration
and Inflow

Phone : +82-2-820-5339

E-mail : ohjeill@cau.ac.kr