

Framework for a real-time control system of sewer systems

하수도 시스템의 실시간 제어시스템 구축 방안

Jaena Ryu¹ · Hyunwook Baek² · Tae-Hyoung Kim² · Jeill Oh^{1*}

류재나¹ · 백현욱² · 김태형² · 오재일^{1*}

¹중앙대학교 사회기반시스템공학부 · ²중앙대학교 기계공학부

Abstract : Real time control (RTC) can be broadly defined as a system that dynamically adjusts the operation of facilities in response to online measurements in the field to maintain and meet the operational objectives, both during dry and wet weather conditions. RTC adds a dynamic component that is actively adjusted in real time based on system conditions. In terms of reducing or eliminating sewer flooding, CSOs and/or managing flows, implementation of RTC has various benefits to sewer system operation. It has been emerging as an attractive approach, but related elements (such as framework for the application, its components and equipments, aspects to be considered) towards its application on sewer systems have not been thoroughly introduced so far. The main goal of this study is to review several applications of RTC and firm guidelines published abroad, and finally to provide a framework for the proper application of RTC on sewer systems.

Key words : real-time control system, sewer systems, framework for RTC

주제어 : 실시간 제어시스템, 하수도시스템, RTC 구축틀

1. 서론

하수관거와 하수처리장으로 대변되는 하수도 시스템은 근래 월류수 발생, 하수관망 용량의 과부하 된 사용, 소요비용의 절감 등의 다양한 이슈를 동시에 해결해야하는 문제에 직면하고 있다. 이를 위해 특히 기존에 설치되어있는 시스템의 운영을 효율화함으로써 문제들을 적극적이고 통합적으로 해결하려고 하는 노력이 대두되고 있다. 하수도 시스템의 통합적인 관리 목표의 설정시에는 ①방류수역의 오염물질의 감소 (합류식하수관

거 월류수의 감소, 하수처리장에의 하수 처리를 증대), ②투자비용의 최소화 (추가적으로 새로운 저류시설의 설치보다는 관망의 저류공간을 이용하는 등의 방법), ③하수관망 운영의 최적화 (월류수와 침수의 감소, 관망의 퇴적을 최소화) 등과 같은 여러 가지 목표를 동시에 달성하기 위한 방법론의 제시 등이 각광을 받고 있다 (DWA, 2005). Sacareau (2011)는 프랑스에서 하수도시설물의 통합적인 관리방법을 소개함에 있어서 침수방지 및 오염물질의 제거(합류식하수관거월류수(Combined Sewer Overflows, CSOs) 및 분류식하수관거유출수(Seperate Sewer Overflows, SSOs) 발생의 저하) 두 가지 목표의 통합적인 해결을 위해 강우 예측 기술, 저류시설의 이용, 하수

* Received 02 January 2013, revised 14 October 2013, accepted 15 October 2013.

* Corresponding author: Tel : +82-2-820-5339 Fax : +82-2-812-1834 E-mail : ohjeill@cau.ac.kr

처리장의 처리용량, 펌프장등의 최적화된 활용을 통합적으로 도모할 것을 제시하였다.

상기에 나타난 바와 같이 하수도 시스템이 직면하는 다양한 문제의 해결을 위해서는 배수구역, 하수관거, 하수처리장 및 방류수역의 관리의 통합적인 접근방법론이 지배적이며, 특히 효율적인 운영 방법의 도입이 필연적이다. 통합적인 목표 해결의 적극적인 해결방안의 하나로 새로운 시설물의 최적화된 설계기법을 넘어서, 기존의 설치되어있는 시스템의 최적화된 운영을 도모하는 실시간 제어(Real-Time Control, RTC) 기법의 활용이 중요시되고 있는 실정이다. RTC의 하수도 시설물에의 활용은 기존의 여러 문헌에서 다루고 있으며, 특히 독일의 DWA, 미국의 EPA 등에서는 RTC 도입의 체계적인 방안을 제시하기 위해 매뉴얼을 작성하여 보급하고 있는 실정이다 (DWA, 2005; US EPA, 2006).

US EPA (2006)에서는 RTC를 '건기시 및 우기시 모두의 상황에서, 운영의 목표를 유지하고 달성하기 위해 온라인으로 측정되는 정보에 대응하여 시설의 운영을 동적으로 적용하는 시스템'이라고 정의하고 있다. RTC를 통하여 이루고자하는 운영목표는 대상지역의 특성에 따라 다르겠지만, RTC를 가장 단순한 기능적인 관점에서 바라본다면 ①현재 상태의 하수도 시스템에 관한 정보를 수집하고, ②기대되는 상태의 하수도 시스템과 현재 상태를 비교하고, ③기대되는 상태와 가장 근접한 상태로 시설물의 제어를 결정하는 다음, ④최종적인 제어도구들 (예: 수문, 펌프 등)에 대한 실행을 위한 세팅을 수행함으로써 이루어질 수 있다. RTC 운영의 목표의 대표적인 예로는 ①하수관거의 역류 및 내수침수의 발생을 감소/제거, ②SSOs의 감소/제거, ③CSOs의 감소/제거, ④에너지 소비의 관리/감소, ⑤하수관거내의 과다한 토사퇴적의 방지, ⑥시스템의 대규모 건설작업 등으로 인하여 발생할 수 있는 유량의 교란을 관리, ⑦주요한 장비의 결함 등으

로 인한 기대하지 않았던 사건의 발생으로부터 유량의 교란을 관리, ⑧하수처리장으로 유입되는 유량을 관리 하는 등을 들 수 있다.

최근 하수도 시스템의 RTC 도입과 관련하여 다양한 방면에서 관심이 증대되고 있는 실정임은 분명하나, RTC의 구성요소 및 이들의 적절한 운용에 있어서 체계화된 절차에 의해 시스템을 구성하고 그 필요성대비 효율 등을 정확히 검증하여 시스템을 구성함이 제반 비용 및 효율에 있어서 경제적이 사실이다. 이에 본 연구에서는 국외의 여러 가지 하수도 시스템에서의 RTC 운용사례, 미국, 독일 등에서 출간된 하수도 시스템에 RTC 적용을 위한 매뉴얼 등을 참조하여 국내의 하수도 시스템에 RTC의 적용 설계를 위한 체계화된 방안을 제시하고자 한다.

2. 하수도시설물의 실시간 제어시스템 적용 사례

방류수역의 수질저감의 목적하에 운영되는 RTC의 가장 빈번한 예는 CSO의 저감을 위한 하수관거의 적정 운영이 있다. 일본의 Umeda 펌프장의 경우, 2004년 CSO와 홍수의 제어 목적으로 RTC를 설치하여 구현하고 있다. Radar를 통한 강우자료, 유입수로의 수위, 펌프장의 유입 유량의 정보를 MOUSE 모델을 통해 실시간으로 구현하고 있으며, 10분 예측시스템을 갖추고 있다. 2005년부터 2006년간 34회 강우발생시 17회의 RTC 운영의 결과를 BOD, COD, SS의 오염물질 배출부하의 저감으로 나타내었다(Kuno and Suzuki, 2009). Cembrano et al. (2004)의 연구에서는 스페인 Barcelona에서 CSO 및 홍수제어를 위한 저류조 시스템에 RTC 적용을 시험하였으며, 집중강우의 발생시 저류조 최적 운영을 통하여 홍수를 경감시키고, CSO 발생을 저감하며, 처리장으로 이송량을 증대시키기 위한 목적함수의 구현을 나타내었다.

도심지역에서 빈번하게 발생하는 침수의 제어 목적을 위해서 RTC를 활용하는 목적의 실현

은 특히 도시홍수예측의 기법을 다방면으로 발전시켰다. 이를 위한 도시홍수예측의 여러 가지 기법들은 여러 참고문헌에서 제시가 되어있으며, 실제로 설계되고 운영이 활발하게 이루어지고 있는 적용분야이기도 하다. Henonin et al. (2010)에서는 RTC를 구현하기 위한 실시간 도시홍수예측시스템을 시스템의 복잡성에 따라 크게 네가지로 분류하였다. ①강우자료와 경험을 통한 실시간 홍수 예측, ②강우자료와 작성된 시나리오들을 통한 실시간 홍수 예측, ③실시간 측정자료를 통한 홍수 예측, ④하수도 시스템 운영의 피드백을 추가가 이에 해당한다. ①의 경우 강우자료만을 입력자료로 사용하고 과거의 경험을 통하여 홍수를 예측하는 방법으로 가장 간단한 형태의 시스템을 구현하는 경험적인 방법을 의미한다. ②는 시나리오를 기반으로 하는 예측을 의미한다. 기존에 작성된 모델을 이용하여 시나리오별 결과를 예측해두며, 강우가 발생한 입력자료를 이용해서 홍수가 어느 정도 발생할 지를 예측하는 시스템이다. 모델의 정확도에 의해 예측결과의 정확도가 결정됨이 일반적이며, 대표적인 예로는 덴마크 Hvidovre의 시스템이 있다. 이 시스템은 Radar 데이터를 이용하여 강우자료를 입력받으며, 2008년부터 설치되어 온 라인, SMS, email 등을 이용하여 5분 간격으로 업데이트한 지도 및 경고를 행하는 시스템이다 (Jenson and Pedersen, 2009). ③의 경우는 온라인 모델링 시스템에 강우자료를 입력자료로 활용하여 실시간 모델링을 통해 유출해석을 수행, 홍수 발생을 예측하는 시스템이다. 스페인의 Barcelona에서는 이와 같은 시스템을 6개월 이상 시험한 후 2009년 이래로 운영하고 있으며, 프랑스의 Nimes 지역에서도 15분 간격의 강우자료를 통해 강우유출 모델을 수행하여 30분 간격으로 홍수위험지도를 업데이트하여 경고시스템을 작동하고 있다 (Raymond et al., 2006). ④의 경우 실시간 제어의 관점에서 가장 발전된 형태를 나타내며, 상기에 나타낸 온라인

모델링 시스템과 더불어 실제 하수도 시스템에서의 RTC를 구현하여 하수도 시스템 운영에 대한 피드백을 추가정보로 활용하여 운영을 구현하는 방법이다.

3. 하수도 시스템의 실시간 제어시스템 구축 개요

독일의 설계기준에 해당하는 DWA-M 180E Framework for planning of real time control of sewer networks에서는 계획단계의 대안으로서 RTC를 계획하는 절차에 대하여 Fig. 1과 같이 나타내었다.

RTC 시스템 구축의 첫 단계로는 계획목표를 명확히 설정하고 이러한 운영 기법이 합리적인 해결책인지 분석하는 단계이다. 이를 위해서는 하수도 시스템의 제어 및 운영관리에 관한 목표가 명확하고 상세하게 설정되어야 하며, 또한 하수·우수의 배수와 처리 방식, 시설물의 수리학적 제약사항, 우수지 및 저류시설 등을 포함한 시스템의 통합적인 특성들이 분석되어야 한다. 여기에서 특히 주의할 점은 RTC를 구현하기 위한 충분한 데이터의 수집과, 이들의 평가이다. RTC를 이용함에 있어서 잠재적인 기대효과와 판단은 관찰된 데이터의 평가와 실제 운영 경험들을 기반으로 하여 분석한다. 이러한 평가결과, RTC 시스템의 구축이 합리적이라는 결론에 이르게 되면 다음 단계는 사전 연구를 통해 구체적인 제어기법을 도출하고 이의 실현을 위한 기본 조건을 확립하게 된다. 사전 연구에서는 RTC 시스템에 관련된 제어기법 및 운영, 시스템 구성, 제도적 문제 및 경제적 효용성 등에 관한 종합적인 표준들을 기초로 타당성 평가를 수행한다. 특히 하수도 시설물의 모의를 위한 모델의 선정 및 제어를 위한 알고리즘의 선정이 주를 이룬다. 끝으로 이러한 사전 연구를 통해 도출된 결과와 궁극적인 시스템 운영관리 방식을 비교·분석하여 최적의 운영방안에 적합한 방식을 결정하고, 선정된 모델의 수식화와 시뮬

레이션 작업을 수행한다. 이들을 바탕으로 세부적인 RTC 시스템 구축 계획 단계를 진행하며, 이를 통해 개발된 RTC 시스템을 시운전을 하게 된다.

상기의 내용 중 하수도 시스템의 RTC 구현의 골자가 되는 ①대상 시스템의 평가, ②모델의 선정, ③수식화 및 시뮬레이션, ④운영방식의 선정 및 ⑤기타 관련된 고려사항들을 다음 장에 보다 자세히 나타내었다.

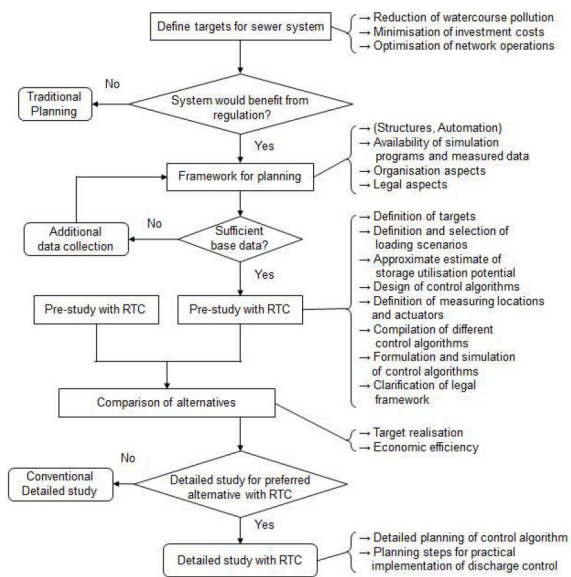


Fig. 1. Basic course of action for the planning of real time control as a planning alternative

4. 하수도 시스템의 실시간 제어시스템 구축 체계

4.1 대상 시스템 평가

Table 1에 나타난 사항은 하수도 시스템에 RTC를 적용함에 있어서, 고려되는 요소들 별로 대상이 되는 시스템을 평가하는 예시이다 (Sehultze et al., 2004). 대상지역의 하수도 시스템의 구성물 전반에 해당하는 대상구역, 하수의 발생 상황, 하수관거 시스템, 시스템의 운영과 관련된 지표, 방류수역 및 하수처리장에서 RTC 구현과 관련된 요소들에 대하여 현재 상태를 평가하고, 이를 통해서 대상지역에 RTC를 적용함

에 있어서 기대되는 운영·관리의 효율성 구현 가능 여부를 점수화하여 그 정도를 평가함이 가능하다. 각 세부항목별로 RTC를 통한 운영의 수행시 얻을 수 있는 효과를 예로 나타내면 다음과 같다.

A. 유역의 특성인자로는 배수구역의 면적 (도달시간) 과 장래의 개발계획을 들 수 있다. 대규모 유역의 경우, 관망시스템의 도달시간이 길며, 관망 시스템이 불균형하게 이용되는 경우가 많다. 이런 경우 오염부하를 감소시키기 위해 유역의 일정 부분의 관망을 저류공간으로 활용하거나, 극심하게 오염된 하수를 하수처리장으로 유입하기 위하여 관거의 용량을 사용할 수 있다. 하수관거 시스템은 일반적으로 특정한 면적, 하수발생의 조건하에서 설계되어진다. 완전히 개발이 이루어지지 않은 도시지역의 경우 관거로의 유량은 설계유량보다 적게 유입이 될 것이며, 관거용량을 저류공간으로 활용하는데 있어서 최적화된 운영이 가능하다. B. 특정 유역은 특히 오염된 우수의 유입이 있을 수 있으며, 이들을 우선적으로 하수처리장으로 유입시키거나, 저류시켜서 방류되지 않도록 하는 방법이 효과적이다. 분류식하수관거와 같은 경우 특히 극심한 하수의 오염농도가 발생할 수 있으며, 이 또한 RTC를 통한 적정 운영으로 방류를 조절할 수 있다. C. 기존에 펌프, 슬라이드, 웨어 등과 같은 장비들이 설치되어있다면 RTC를 통한 제어가 더욱 쉬울 것이며, 간선관거의 경사가 낮을수록, 기존에 존재하는 저류조의 개수가 많고, 체적이 클수록, 하수처리장으로의 차집관이 다수 존재할수록 RTC 도입의 효과가 클 것이다. D. 항목의 경우 RTC 운영과 관련하여, 국지적인 홍수가 발생하는 지역에서 유량 전환의 효과, 저류조 체적의 효율적인 운영과 관련한 사항들에 대한 항목을 나타낸다. E. 는 방류수역과 관련된 내용들로 다양한 방류수역으로 관거로부터 배출되는 수리학적 부하의 조절과 관련한 RTC의 역할을 나타내었다. F. 의 항목들은 하수처리장에서의 적용성과 관련된 내용으로 하수처리장

Table 1. Table for assessment and evaluation

	Criterion	Evaluation		
A.	Catchment	Scores (value in brackets)		
A.1	Catchment area (Flow length in the main collector)	long > 5 km (2)	medium (1)	short < 1 km (0)
A.2	Differences between current and planned development of the area	large (2)	small (1)	none (0)
B.	Wastewater production	Scores		
B.1	Areas with increased pollution of surface runoff	several (2)	1-2 (1)	none (0)
B.2	Variability in time and space of wastewater production (e.g. producers of heavily polluted wastewater, connections from separate system)	high (2)	medium (1)	none (0)
C.	Sewer system	Scores		
C.1	Number of existing control devices (e.g. pumps, slides, weirs)	several (4)	1-2 (2)	none (0)
C.2	Slope of trunk sewers	flat < 0.2 % (4)	medium (2)	steep > 0.5 % (0)
C.3	Capable loops in the sewer system	several (4)	1-2 (2)	none (0)
C.4	Number of existing storage tanks (tanks and storage pipes ≥ 50 m ³)	> 4 (4)	1-4 (2)	none (0)
C.5	Number of discharge devices	> 6 (4)	2-6 (2)	< 2 (0)
C.6	Total storage volume (tanks and storage pipes)	> 5000 m ³ (4)	2000-5000 m ³ (2)	< 2000 m ³ (0)
C.7	Specific storage volume (= total storage volume related to impervious area)	> 40 m ³ /ha (4)	20-40 m ³ /ha (2)	< 20 m ³ /ha (0)
C.8	Number of collectors to the WWTP	> 2 (3)	2 (1)	1 (0)
D.	Operational system behaviour	Scores		
D.1	Local flood areas	several (2)	1-2 (1)	none (0)
D.2	Number of non-uniformly used tanks	> 1 (4)	1 (2)	none (0)
D.3	No-uniform discharge behaviour	significant (4)	medium (2)	none (0)
E.	Receiving water	Scores		
E.1	Local differences in hydraulic capacity	strong (4)	medium (2)	none (0)
E.2	Local differences of load capacity (e.g. swimming, fish farming protected areas)	significant (4)	medium (2)	insignificant (0)
E.3	Sensitivity of the receiving water body	very sensitive (2)	less sensitive (0)	
F.	Wastewater treatment plant (WWTP)	Scores		
F.1	Admissible combined wastewater inflow	$> 1,0$ $f_{ww,QCW} \cdot Q_{ww,aM}$ $+ Q_{Inf,aM}$ (3)	$> f_{ww,QCW} \cdot Q_{ww,aM}$ $+ Q_{Inf,aM}$ (1)	$< f_{ww,QCW} \cdot Q_{ww,aM}$ $+ Q_{Inf,aM}$ (0)
F.2	Sensitivity of WWTP to hydraulic or pollutant peaks	very sensitive (2)	less sensitive (0)	
Scores :				
0-24 possible not control worthy				
25-35 possible control worthy				
> 35 control worthy				

에 유입되는 유량을 적정 조절하여 하수관망의 부담을 경감할 수 있는지의 여부 및 반대의 경우로 하수관거의 유량을 적정 조절하여 하수처리장의 처리능력을 손상시키지 않을 수 있는지에 대한 여부를 통해 RTC의 적용성을 점수화하는

내용에 대해 나타내었다.

4.2 모델의 선정

4.2.1 시뮬레이션 프로그램 선정

RTC의 구현을 위해서는 우선적으로 하수관거 시스템의 정밀한 수리 모델이 필요하며 경우에 따라서는 기존에 작성되어진 모델이 사용될 수도 있다. 이들 모델의 보정 및 검증은 강우, 유출, 만관유량 및 오염 농도의 측정값 등과의 비교를 통해 정밀도 및 적합성을 판단해야 한다. 이러한 네트워크 모델은 하수관망의 성능과 상태를 분석하고 정량화하는데 사용되며, 또한 다른 제어 전략과의 비교를 위한 기초 틀로서도 사용된다. 그러므로 시뮬레이션 프로그램은 제어

작동을 상세히 시뮬레이션 하고, 주요 유량 및 오염 부하에 관한 정보를 명확하게 제시할 수 있어야 한다. 아래의 Table 2에는 사전 연구 단계와 상세 연구 단계에서 사용되는 시뮬레이션 프로그램에 대한 필요조건 목록을 제시하였다.

4.2.2 제어 방식의 선정

제어 방식 선정의 첫 단계에서는 대상 시설물의 특성을 고려하여 최대의 제어 효과가 달성될 수 있도록 계측·제어설비들의 설치 위치를 결정하고, 대상 시스템의 제어 목표 달성을 위해 현장제어(Local control), 복합제어(Combined control) 및 통합제어(Integrated control) 등과 같은 다양한 제어 시스템 구축 유형들을 분석하고 각각의 효용성을 엄밀히 비교·분석하여야 한다. 현장제어는 아래의 Fig. 2와 같은 형태로 구성되며, 하수도 시설물의 액추에이터(밸브 등)는 서로 독립적으로 작동하며 개별적인 피드백 제어 루프가 서로 독립적으로 제어된다. 즉, 각 제어장비는 개별적인 특정 시설물의 정보를 계측하고, 이를 이용하여 해당 시설물을 제어한다(예: 한계 수위/유량을 고려한 펌프의 동작제어를 기반으로 수위를 제어). 하지만 이러한 기법은 전체 네트워크 시스템의 특성을 파악하지 못하므로 통합된 시스템 운영 측면에서 요구되는 제어 목표의 달성에는 어려움을 겪을 수 있다. 한편 복합제어 시스템은 Fig. 3과 같이 구성된다. 이와 같은 제어시스템에서는 계측된 네트워크상의 모든 시설물들의 상태 정보들이 중앙 제어센터로 전송되며, 중앙제어장치는 이를 이용하여 하수관망에 대한 전반적인 관점으로부터 각 시설물에 설치된 제어 장비들을 통합적으로 제어·운영한다. 이 방식은 현장 제어를 통해 잠재적 저류량이 완전하게 활용되지 못할 때 유용하게 사용될 수 있다 (Schilling, 1996).

통합제어 방식은 상기 두 가지 형태의 제어기 구성법들과 달리 하수처리시설과 하수관거 등 하수도 시스템 전반의 모든 구성 요소들의 정보

Table 2. List of requirements for simulation programs for real time control

	Of special importance for	
	Pre-study	Detailed study
Control intervention, possibility of changing target values	×	×
Software accepted by regulatory body/authorising agency		×
Correct and timely response between control intervention and associated effect on the flow behaviour	×	×
Calculation of defined assessment criteria as a measure of success of the control intervention (e.g. frequency of spills, spill volumes, watercourse pollution)	×	×
Flexibility in defining control algorithms, interaction with treatment plant and other components of the urban sewer system		×
Suitability for long term simulations	×	×
Hydrodynamic simulation -consideration of hydrodynamic effects which may occur especially during control interventions (e.g. backwater, pressure lines, actuators)		×
Potential for calibration and validation		×
(Project specific-if applicable:) possibility to link with optimisation routines or external data base	×	×
(Project specific-if applicable:) possibility to link with process control system		×

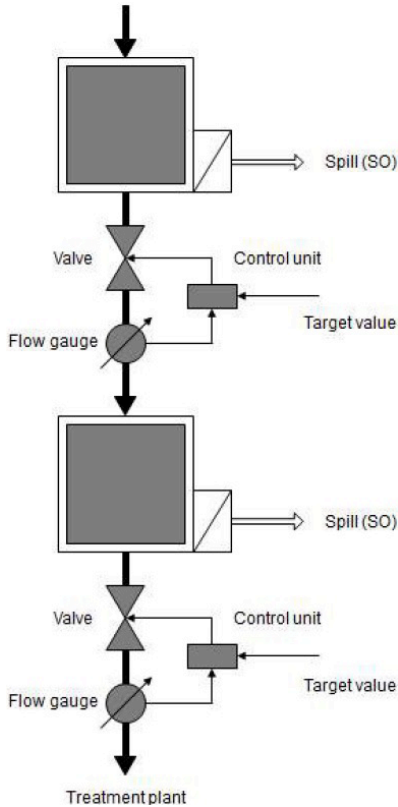


Fig. 2. Local control of two valves

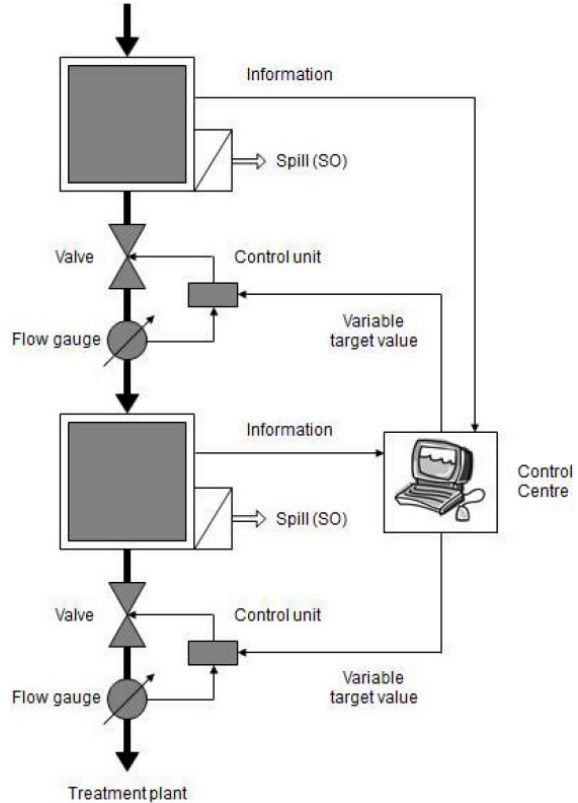


Fig. 3. Global control system for two valves

를 공유하고 이를 통합하여 제어 결정에 사용한다. 따라서 제어기 구성이 복잡해지는 반면에 다양한 제어 목표에 보다 효율적으로 유연하게 대처할 수 있다는 장점을 갖는다.

4.3 제어 알고리즘 구성

하수관거 시뮬레이션 프로그램과 제어 방식이 결정되면 RTC 시스템 성능 구현에 핵심적 역할을 담당하는 제어 알고리즘을 계획한다. 이러한 알고리즘은 ①저류량의 균등하게 활용, ②모든 저류량을 소모한 이후에만 유출을 허용, ③하수의 각기 다른 오염 정도를 고려 (예: 처리가 필요한 하수를 위해 저류용량을 유지), ④퇴적 방지, ⑤하수처리장 유입 유량의 균등화 (예: 처리장으로의 추가적인 부하를 막기위해 고유량 발생시 저류조에서의 배출을 억제), ⑥현재 하수처리장의 상황을 파악하여 슬러지 축적이 증가하

는 등의 경우 처리장 유입량을 감소, ⑦수리학적 및 수질적 측면에서 방류수역의 상태를 고려, ⑧처리가 불필요한 하수는 우수 저류조로부터 방류수역으로 직접 배출 등과 같은 제어 목표들을 하나 또는 여러개를 선택하여 작성하도록 한다. 제어 알고리즘의 설정과 정립 시에는 운영자와의 긴밀한 협조를 통해 기존의 운영 경험이 고려되도록 하는 것이 바람직하다.

제어 알고리즘은 다음과 같이 크게 두 종류로 분류된다. 첫째는 Fig. 4와 같이 구성되는 시스템의 각 상황·단계에 적용될 확정된 규칙이나 규정의 명시적 설정을 기반으로 한 제어 알고리즘이다. 이러한 제어 방식에서는 일반적으로 하수관거 네트워크의 수리 모델을 기반으로 제어 이론 및 시뮬레이션 검토를 수행하여 오프라인에서 명시적 규정(If-Then 규칙(규칙기반 시스템), 의사결정행렬, 퍼지제어기, 다중변수 제어

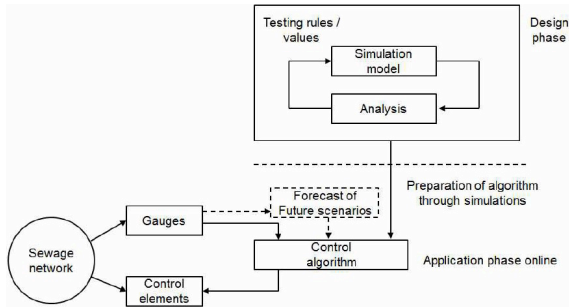


Fig. 4. Schematic sketch of control algorithm based on an explicit setup of control rules

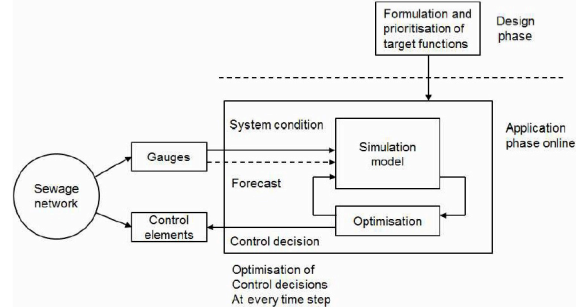


Fig. 5. Schematic sketch of control algorithm based on the formulation of an optimisation problem

법 등)을 정립하고 이를 실제 제어대상 시스템에 적용하는 기법이다.

두 번째는 최적 제어로 대표되는 제어 알고리즘 유형으로서 아래의 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 구성된다. 이 제어 알고리즘은 모든 제어 단계에서 수학적 루틴을 사용하여 해결하는 수학적 최적화 문제의 정의를 기반으로 제어 명령을 결정하며, 따라서 최적화 문제의 목적함수 및 저장용량의 한계와 제어요소, 동적 경계 조건(네트워크 내 관거와 유역 내의 흐름 상태) 등에 관한 관련 조건식들의 정립에 주의를 기울여야 한다. RTC 시스템에서 각 상황마다 시뮬레이션 모델, 시스템 예측정보, 관련 예측정보 등을 이용하여 각각의 최적 제어 입력을 결정(정의된 목적 함수와 관련)하는데 사용되는 선형·비선형 최적화 기반 응용 프로그램이 이러한 범주에 속한다. 최근 하수관거 네트워크 시스템의 효과적인 제어 알고리즘의 하나로서 국·내외에서 많은 주목을 받고 있는 모델예측제어(MPC: Model Predictive Control) 알고리즘이 이러한 유형의 하나이다.

4.4 실시간 제어시스템 운용 전략

하수도 시스템에서 RTC의 운용 방법과 관련하여 미국 EPA의 Real time control of urban drainage networks 에서는 Table 3에 나타낸 다섯 가지의 기준에 의해 분류하고 이들의 복잡성과 적용에 대하여 나타내었다.

Table 3. Criteria for categorizing control system and algorithms

Criteria	Control system and algorithms
'Where' the control decisions are made	<ul style="list-style-type: none"> • local control • remote control
'Who' makes the control decision	<ul style="list-style-type: none"> • manual • supervisory • automatic
'timing of the inputs' that are used for making the control decision	<ul style="list-style-type: none"> • reactive, or feedback algorithms • predictive algorithms
'what' is being controlled by the algorithm	<ul style="list-style-type: none"> • local algorithms • regional algorithms • system-wide algorithms
inclusion of a mathematical model	<ul style="list-style-type: none"> • model referenced control algorithms • model non-referenced control algorithms

①제어 전략을 수행하는 '장소'에 따른 분류는 현장제어와 원격제어로 분류할 수 있다. 현장 제어는 제어가 필요한 장소에서 제어가 이루어지며 하수도 시스템의 다른 부분들이나 다른 시설물들과의 연계가 필요하지 않는 방식을 말한다. 원격제어는 각기 다른 제어위치에서 전송되는 입력값들에 의해 제어가 영향을 받는 시스템을 말한다. ②제어 전략을 결정하는 '사람'과 관련되어서는 제어가 수동으로 이루어지거나 (운영자가 현장에서 제어 전략을 결정), 중앙통제실에서 있는 운영자가 자동제어를 결정하는 관리방식, 제어 로직과 규칙이 프로그램화 되어있어서 운영자의 선택 없이 자동으로 이루어지는 방식을 말한다. ③제어 수행에 사용되는 '입력자료의 주입시기'에 따라서는 제어 알고리즘이 오

직 현재와 과거에 측정된 정보만을 사용할 때 반 작용 또는 피드백 알고리즘이라고 말하며, 제어 알고리즘이 현재 및 과거의 측정값 뿐 아니라 미래의 예측값도 적용하여 수행할 때 예측 알고리즘이라고 한다. ④알고리즘에 의해 제어를 받는 '대상'을 나타낼 때는 오직 한 장소에서 제어하는 현장 알고리즘으로, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 하수도 시스템의 다른 부분들이나 다른 시설물들과의 연계가 필요하지 않는 방식을 말한다. 지역적 알고리즘은 여러 대상(장소들) 제어함을 말하며, 하수도 시스템내의 모든 설비를 통합하여 시스템 관점에서 제어하는 방식은 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 각기 다른 제어위치에서 전송되는 입력값들에 의해 제어가 영향을 받는 시스템을 말한다. 이들은 전역적(global) 제어 알고리즘이라고 하기도 하나 전조직(system-wide) 제어라는 용어가 더 타당하다. ⑤수학적 모델의 포함 및 불포함과 관련하여는 수학적 모델을 포함할 경우 제어 동작을 결정하고 목표지점을 수행하기 위해서 온라인으로 수행이 되며, 모델 참조 알고리즘이라고 불린다.

Schilling (2004)의 연구에서는 RTC 시스템의 기본적인 구성요소를 ①장비, ②제어전략을 위한 소프트웨어, ③하수도의 운영과 RTC를 통합하여 관리하는 소프트웨어라고 나타낸 반면, Villeneuve et al. (2000)에서는 ①센서, ②자

동화된 게이트, ③전략이라고 하였다. Stinson (2005)이 나타낸 RTC 시스템의 구성요소는 ①수위, 유량, 강우강도, 오염물질 등을 측정할 수 있는 장비, ②펌프, 수문, 웨어 등을 조절하는 장치, ③의사소통을 위한 시스템, ④SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition Systems), PLC (Programmable Logic Controllers), RTU (Remote Terminal Units)등을 제어하고 수행하는 컴퓨터라고 하였다. 이에 US EPA(2006)에서는 제어 작동을 위한 입력값과 모니터링의 수행, 강우 예측 및 온라인 모델을 추가적으로 나타내었다. RTC 운용을 위해 앞 절들에서 나타낸 각기 다른 방법들에 필요한 RTC의 구성요소를 나타내면 Table 4와 같다.

4.5 기타 고려사항들

끝으로 관련 시설물의 설치·개선과 관련된 제도적인 승인 및 허가 여부에 대한 종합적인 사전 고찰이 필요하다. 하수관망의 계획과 관련된 모든 업무는 특히 하수관망과 하수처리장이 통합적인 단위체계로 인식되어질 필요가 있으며, 총체적인 관점에서 접근이 필요하다. 관계 기관의 관점에서는 법적인 승인과 허가와 관련하여 조정을 수행해야 할 것이다. RTC 시스템을 포함한 하수도 시스템의 계획에는 다음과 같은 법

Table 4. Components required for different control modes

Control mode	Local manual control	Local automatic control	Regional automatic control	Supervisory remote control	Global automatic-rule based	Global automatic-optimisation
Instruments	×	×	×	×	×	×
PLCs		×	×	×	×	×
SCADA/communications			×	×	×	×
Central SCADA server			×		×	×
Active operator input, monitoring	×			×		
Central RTC server					×	×
Rainfall forecasting						×
Online model						×

적 측면이 고려되어야 한다. ①하수도 시스템의 승인 관련: 제어 시스템에 의해 관리되는 하수도 시스템은 법률의 요구사항에 따라 승인을 받아야 한다. 이러한 승인은 새로 설치되는 하수도 시스템과 부속 구조물들뿐 아니라 기존 하수관망에 대하여 변경 사항이 많은 경우에도 해당한다. ②하수처리 시설 승인 관련: 신규로 건설된 시설이나 RTC 시스템이 적용된 시설은 법률의 요구사항에 따라 건설과 운영에 대한 승인이 필요하고, 기존 구조물에 대한 대폭적인 변경이나 개선작업을 한 경우에도 승인이 필요하다. ③하수 방류의 허가 관련: 하수 방류수질 기준 및 방류 장소에 대해서는 법적 승인이 필요하다. 그리고 방류수역에 대한 배출로 인한 영향이 허가 기준내에 있는지도 평가 되어야 할 필요가 있다. ④책임 측면 관련: 공공의 문제에 접근함에 있어 계획자와 운영자 양측의 책임을 고려할 필요가 있다. 문제가 발생할 시 계획자의 주된 의무와 운영자의 하수 시스템의 기능 유지에 대한 책임을 고려하여, 문제가 발생한 부분을 확인해야 한다.

5. 결론

하수도 시스템에 있어서 RTC는 시스템 내에 발생하는 상황을 수동적으로 받아들이기보다는 능동적으로 유량을 조정하는 것과 같은 운영방법으로, 기존에 이용되어오던 전형적인 운영의 접근방법이 아니다. RTC는 또한 전형적인 도시 배수시스템에 센서, 제어장치 등의 기술을 부합시킨다. 특히 합류식하수관거시스템과 연관되어 있는 내수침수의 발생, 오염물질로 인한 문제들을 해결하기 위해 다수의 엔지니어들이 RTC의 도입을 선호하고 있는 실정이다. 최근 하수도 시스템의 RTC 도입과 관련하여 다양한 방면에서 관심이 증대되고 있는 실정임은 분명하나, RTC의 구성요소 및 이들의 적절한 운용에 있어서 체계화된 절차에 의해 시스템을 구성하고 그 필요성 대비 효율 등을 정확히 검증하여 시스템을 구

성하여 도입을 고려하여야한다. 하수도 시스템의 RTC의 각 필요 요소부분들에 대하여 여러 가지 제시된 고려사항들을 바탕으로 계획이 수립 되어야하며, 하수도 시스템에 RTC의 도입은 비용 효과적인 관점을 우선시하는 체계적인 접근 방법론 하에서 다음의 사항들을 고려하여 설계되고 운영되어야할 것이 분명하다.

- 1) 대상지역의 하수도 시스템의 구성물 전반에 해당하는 대상유역, 하수의 발생상황, 하수관거 시스템, 시스템의 운영과 관련된 지표, 방류수역 및 하수처리장에서 RTC 구현과 관련된 요소들에 대하여 현재 상태를 평가하고, 이를 통해서 대상지역에 RTC를 적용함에 있어서 기대되는 운영·관리의 효율성 구현 가능 여부를 평가하여 도입을 계획하여야 한다.
- 2) RTC의 구현을 위해서는 하수관거 시스템의 정밀한 수리 모델이 필요하며 이들 모델은 모델의 정밀도 및 적합성이 강우, 유출, 만관유량 및 오염 농도의 측정값 등과의 비교를 통해 정확히 작성되어야 한다. 시뮬레이션 프로그램은 제어 작동을 상세히 시뮬레이션 하고, 주요 유량 및 오염 부하에 관한 정보를 명확하게 제시할 수 있어야 한다.
- 3) 제어 알고리즘은 네트워크의 수리 모델을 기반으로 제어이론 및 시뮬레이션 검토를 수행하여 오프라인에서 명시적 규정을 정립하고 이를 실제 제어대상 시스템에 적용하는 기법 또는 수학적 루틴을 사용하여 해결하는 수학적 최적화 문제의 정의를 기반으로 제어 명령을 결정하는 알고리즘을 정립할 수 있다. 운영의 목적을 달성하기 위한 적절한 알고리즘을 선택하도록 하며, 최적화 문제의 목적함수 및 저장용량의 한계와 제어요소, 동적 경계 조건 등에 관한 관련 조건식들의 정립에 주의를 기울여야 한다.

- 4) 하수도시스템에서 RTC의 운용 방법과 관련하여 제어의 장소, 작동방법, 제어 입력 변수의 적용시점 등의 여러 인자에 따라 제어 시스템의 구성요소와 운용방법은 다르게 적용이 되어야한다.

사사

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

참고문헌

- Cembrano, G., Quevedo, J., Salamero, M., Puig, V., Figueras, J., Marti, J. (2004) Optimal control of urban drainage systems. A case study., *Control Engineering Practice*, 12, pp. 1-9
- DWA (2005) *Framework for planning of real time control of sewer networks*, German DWA Rules and Standards, Advisory Leaflet DWA-M 180E
- Henonin, J., Russo, B., Roqueta, D. S., Sanchez-Diezma, R., Domingo, N. D., S., Thomsen, F., Mark, O. (2010) Urban flood real-time forecasting and modelling: a state-of-the-art review, MIKE by DHI Conference, Copenhagen
- Jenson, N. E., Pedersen, L. (2009) Unattended automatic real-time SMS flood warning using high resolution X-band radar data and automatic real time calibration of X-band radar data, WMO Symposium on Nowcasting, Whistler, B.C., Canada
- Kuno, K., Suzuki, T. (2009) Availability of CSO control and flood control of real-time control system in urban pumping station, *Proceedings of the Water Environment Federation*, WEFTEC 2009: Session 51 through Session 60, pp. 3347-3364
- Raymond, M., Peyron, N., Martin, A. (2006) ES-PADA, a unique flood management tool: first feedback from the september 2005 floods in Nimes, 7th International Conference on Hydroinformatics, HIC 2006, Nice, France
- Sacareau, P. (2011) Integrated control in France, Real time management of urban drainage systems: overview and examples, International Water Association, World Water Congress & Exhibition, Busan, Korea
- Schultze, M., Erbe, V., Haas, U., Scheer, M., Weyand, M. (2004) PASST-A planning aid for sewer system real time control, 6th International Conference on Urban Drainage Modelling - UDM '04, Dresden
- Schilling, W. (1996) Potential and limitations of real time control, In: *Proceedings of the 7th Int. Conference on Urban Storm Drainage*, Hannover
- Schilling, W. (2004) Real-time control of urban water systems, Technical seminar: Research, development, and applications of urban water systems in Europe, Presented at the Urban Watershed Management Branch, US EPA, Edison, NJ
- Stinson, M. K. (2005) Benefits of sewerage system real-time control, World Water and Environmental Resources Congress 2004, Anchorage, Alaska
- US EPA (2006) *Real time control of urban drainage networks*, United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-06/120
- Villeneuve, E., Jolicoeur, N., Pleau, M., Marcoux, CH., Field, R., Stinson, M. (2000) The choice of a real-time control strategy for Combined Sewer Overflow control, *Proceedings of Water Environment Federation Collection Systems Wet Weather Pollution Control: Looking into Public, Private, and Industrial Issues Conference*, Rochester, NY