

실시간 자료지향형 예측을 활용한 내배수 시설 운영기법 연구

손아롱* · 김병현** · 한건연***

Son, Ahlong*, Kim, Byunghyun**, Han, Kunyeun***

A Study on Real-Time Operation Method of Urban Drainage System using Data-Driven Estimation

ABSTRACT

This study present an efficient way of operating drainage pump station as part of nonstructural measures for reducing urban flood damage. The water level in the drainage pump station was forecast using Neuro-Fuzzy and then operation rule of the drainage pump station was determined applying the genetic algorithm method based on the predicted inner water level. In order to reflect the topographical characteristics of the drainage area when constructing the Neuro-Fuzzy model, the model considering spatial parameters was developed. Also, the model was applied a penalty type of genetic algorithm so as to prevent repeated stops and operations while lowering my highest water level. The applicability of the development model for the five drainage pump stations in the Mapo drainage area was verified. It is considered to be able to effectively manage urban drainage facilities in the development of these operating rules.

Key words : Drainage pump station, GeoANFIS, Penalty type of genetic algorithm, Operation rule

초 록

본 연구는 도시홍수 피해저감을 위한 비구조적 대책의 일환으로 배수펌프장의 효율적인 운영방안을 제시하고자 한다. 배수펌프장 내의 수위를 뉴로-퍼지모형을 통하여 예측하고 예측되는 내수위에 따라 유전자 알고리즘 기법을 적용하여 배수펌프장의 운영률을 결정하고자 한다. 뉴로-퍼지모형 구축시 배수구역의 지형적 특성을 반영하기 위하여 공간적 매개변수를 고려한 GeoANFIS모형을 개발하였고 배수펌프장 내 최고수위를 저하시키면서 반복적인 정지와 운영이 발생하지 않도록 벌칙유형의 유전자 알고리즘을 적용하였다. 마포 배수구역 내 5개의 배수펌프장(마포, 합정, 상수, 봉인, 당인)에 대하여 개발 모형의 적용성을 검증하였다. 이러한 운영률의 개발로 효과적으로 내배수 시설을 운영할 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : 배수펌프장, GeoANFIS, 벌칙유형의 유전자알고리즘, 운영률

1. 서론

도시홍수에 대한 대책으로는 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 우선, 구조적 대책으로서는 하수관거 용량증대 및 설계빈도 상향, 노면수의 저지대 유입 차단 및 우수집수능력 증대, 지하공간 침수대응 및 방지사설 구축 등이 있다. 비구조적 대책으로서는 배수펌프장의 효율적 운영, 기후 및 사회구조 변화로 인한 침수가중요인의 제거와 내수침수예측 및 위험도 분석을 통한 의사결정 지원, 관련 주체

* 국립재난안전연구원 재난정보연구실 시설연구사

(Disaster Information Research Division, National Disaster Management Research Institute · salong83@korea.kr)

** 종신회원 · 교신저자 · 행정안전부 국가민방위재난안전교육원 교수 (Corresponding Author · National Civil Defense and Disaster Management Training Institute, Ministry of the Interior and Safety · bhkmc@korea.kr)

*** 종신회원 · 경북대학교 토목공학과 교수 (Kyungpook National University · kshanj@knu.ac.kr)

Received August 8, 2017/ revised September 11, 2017/ accepted September 19, 2017

및 법체계의 통합관리, 토지이용계획 및 홍수구역제 설정, 고품 폐기물 및 폐수 관리, 홍수 보험, 재난 대피 계획, 조기 경보 시스템 등이 있다. 그러나 도시지역의 내수 침수피해에 대한 종합적인 차원의 연구는 수행된 바가 없고, 침수에 대비한 지방자치단체별, 도시유형별 통합마스터 플랜의 작성이 이루어지지 못하고 있는 실정이며 대체적으로 구조적 대책에 의존하고 있는 실정이다. 그러다보니 정작 펌프용량이 과대하게 설계되어 방치되고 있는 시설이 발생하고 이로인해 1,957억이 낭비되고 있으며, 반포빗물펌프장은 설계와 시공의 부적절성으로 40억이 과다투입되는 등의 문제점이 지난 2012년 국정감사에서 지적되었다.

이는 관리자가 수위 및 강우의 상태를 고려하여 과거의 펌프 운전경험으로 우수지의 수위를 가능한 낮게 억제하는 경험적인 운영을 하고 있고 재난 대비에 대한 보수적인 측면에서 빗물펌프장의 설계용량이 과대하게 산정되었음을 반증하고 있다.

배수펌프장의 수위를 예측하여 침투유량에 미리 대처함으로써 대상 강우사상 기간동안 발생하는 배수펌프장의 최고수위를 저하시키고 펌프의 잦은 가동과 정지상태 반복을 피함으로써 관리비의 저감효과를 동시에 가져올 수 있는 도시홍수 비구조적 대책을 위하여 데이터 기반의 실시간 배수펌프장 운영시스템을 개발할 필요가 있다.

수자원의 계획 및 관리에 있어서 시스템분석은 가장 효과적인 의사결정방법으로 최적화 방법과 모의실험 방법으로 분류할 수 있다. 수자원 시스템 분야에서는 최근에 최적화 방법이 더 나은 해결방법으로 알려지면서 널리 사용되어지고 있다(Nien et al., 2013). 하지만, 홍수방어를 위한 댐 운영에는 최적화 기법을 적용시킨 연구는 많이 이루어지고 있으나(Winsor, 1973; Unver and Mays, 1990; Niewiadomska-Szynkiewicz et al., 1996; Chang and Chen, 1998; Needham et al., 2000; Hsu and Wei, 2007; Chang, 2008; Valeriano et al., 2010; Kumar et al., 2010), 빗물펌프장의 운영에 대한 연구는 모의실험 방법이 주를 이루고 있다. Chang et al. (2008)은 대만에 위치한 Yu-Chang 펌프장 유역 내 강우량, 펌프장 내수위, 게이트의 개폐여부 및 펌프의 운영기록을 입력자료로 하여 내수침수 방지를 위한 시스템 구축에 반대방향 전파 네트워크 뉴로-퍼지(Counterpropagation Fuzzy-Neural Network, CFNN)를 적용하였다. Chiang et al. (2011)은 20분 간격으로 펌프장에서 개폐된 펌프의 수를 예측하기 위하여 ANFIS 와 CFNN 두 모형을 적용하였다. Nien et al. (2013)은 관측된 자료와 실시간 펌프운영 기록을 이용하여 ANFIS-His모형을 개발하였으며, 관측된 자료들로부터 1986년 Glover에 의해 제안된 최적화 기법인 Tabu search를 이용하여 ANFIS-Opt모형을 개발하였다.

국내에서는 Kim et al. (2004)은 6개의 퍼지제어규칙 이외에

Petri Net Diagram (Luciano and Mauro, 2001)을 이용한 펌프 조작법과 우수지 유입수문곡선의 상승부에서의 유입량은 보유하고 있는 펌프대수로 전량배제 한다는 기준으로 펌프를 조작하는 개발 모형을 제시하였으며, 이 중 퍼지모형이 가장 우수한 것으로 연구결과를 발표하였다. Lee et al. (2007)은 배수펌프장을 실시간으로 운영할 수 있는 기법을 제안하였으며, Joo et al. (2010)은 빗물펌프장 운영시스템을 개선하고 확률호우사상에 대하여 침수저감효과와 경제성분석을 실시하였다. Song et al. (2016)은 펌프 조기가동 및 내배수시설 경계 재설정에 따른 침수저감효과를 대립3 빗물펌프장을 대상으로 분석하였다.

대부분의 선행 연구방법은 강우량으로부터 운영펌프의 규모를 결정하는 뉴로-퍼지모형을 구축하였고, 시간적 입력매개변수만을 고려하였다. 그리고 유전자 알고리즘은 뉴로-퍼지모형의 매개변수 추정에 활용하였다. 펌프의 운영에 있어 가동시작시점과 시간의 변화에 따른 양수율의 변화조절이 중요하기 때문에 강우량으로부터 직접 펌프의 토출량을 산정하는 것보다 강우량으로부터 향후 내수위를 뉴로-퍼지모형을 통하여 예측하고 예측된 내수위와 현재 강우조건 등을 고려하여 유전자 알고리즘을 통한 배수펌프의 토출량을 산정하는 것이 즉각적인 대처에 유리할 것으로 보인다. 뿐만 아니라 시간적 매개변수만을 고려한 뉴로-퍼지모형의 공간적 확장성을 고려하기 위하여 유역의 유출에 영향을 미치는 공간적 매개변수 등이 반영된다면 효과적으로 배수펌프장을 운영할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 강우-펌프운영보다는 펌프장 내수위-펌프 운영에 대한 뉴로-퍼지모형을 구축하고 시간 및 공간적 매개변수를 고려하고자 하였으며 배수펌프장의 다양한 운영상의 목적을 반영하기 위하여 유전자 알고리즘을 적용하였다. 이를 통하여 개발된 데이터 기반의 실시간 배수펌프장 운영률을 미포배수구역에 위치한 배수펌프장에 대하여 적용성을 검증하였다.

2. 연구 방법

2.1 뉴로-퍼지모형

본 연구에서는 배수펌프장의 최적운영을 위하여 시-공간적 뉴로-퍼지 모형(Geo-ANFIS)을 개발하였다. Geo-ANFIS모형은 전체 배수구역 내 존재하는 빗물펌프장 운영에 있어 수문기상학적 자료 및 지형학적 자료와의 불확실성과 비선형성을 고려하기 위하여 개발되었다. 따라서 Geo-ANFIS모형은 관측된 강우자료와 실제 펌프장의 운영기록 그리고 빗물펌프장 상류 배수구역의 유역면적, 평균경사 및 불투수율과 같이 물리적, 지형공간학적 입력변수를 바탕으로 개발하였다. 즉, Geo-ANFIS모형의 입력자료는 강우의 시계열 자료와 배수구역의 지형학적 특성으로 구성되어 있으며,

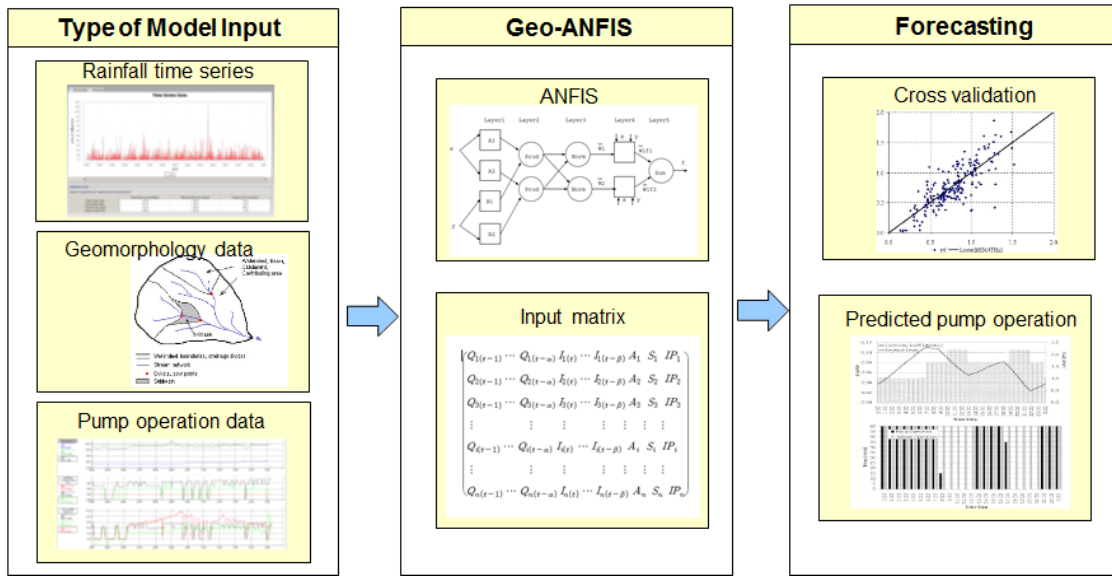


Fig. 1. Schematic of Proposed Geo-ANFIS Model

Fig. 1는 제안한 Geo-ANFIS모형의 모식도이다.

Fig. 1의 Input matrix에서 i 는 일련의 빗물펌프장을 의미하고 α, β 는 각각 펌프운영과 강우데이터에 대한 지체시간을 나타낸다. A_i, S_i 그리고 IP_i 는 각각 빗물펌프장 i 의 배수구역에 대한 유역면적, 평균 유역경사, 불투수율을 나타낸다. 이와 같은 물리적 지형학적 입력변수들을 선정한 이유는 강우-유출의 수문학적 현상을 개념적 혹은 물리적 모형으로 분석하고자 할 때 주로 이 입력변수들을 활용하기 때문이다. 일반적인 유역에서의 강우-유출을 위한 입력변수로는 유역면적, 유역경사 그리고 CN값을 적용하였으나(Beven and Kirby, 1979; Sarangi et al., 2005; Melesse et al., 2003), 본 연구는 도시지역에 대한 분석이므로 CN값 대신에 불투수율을 적용하였다. 시간적 입력변수로서 강우와 펌프의 운영조작에 대한 기록(유수지의 내수위)뿐만 아니라 공간적 입력변수인 상류 배수구역의 면적, 수해면적, 평균 하수관거 경사 그리고 불투수율을 모형의 입력자료로 고려하였다.

Geo-ANFIS 모형은 배수구역 내의 모든 빗물펌프장의 펌프운영 조작을 위해 개발하였으며, 배수구역 내 빗물펌프장의 현재 수위를 예측하기 위하여 과거와 현재의 강우 및 펌프운영 조작, 각 빗물펌프장 상류 유역의 물리적특성을 입력자료로 구성하였다.

배수구역 내 모든 빗물펌프장에 대한 모의에서 Geo-ANFIS 모형은 여러 ANFIS 모형을 사용하는 대신에 적용되기에 충분히 적합한 단일모형으로 되어 있다. 또한 모형의 입력자료로 각 빗물펌프장 상류유역의 시간적 입력변수뿐만 아니라 공간적 입력변수를 적용하였기 때문에 배수구역내의 과거 펌프운영 조작에 대한 기록이 존재하지 않거나 부족한 경우에도 빗물펌프장의 내수위 예측이 가능할 것으로 판단된다(Fig. 1).

2.2 유전자 알고리즘

대다수 실생활 최적화 문제에서 일반적인 문제는 제약조건이 포함된 최적화 문제이다. 유전자 알고리즘은 복잡한 제약조건을 포함하지 않은 최적해를 구하기 때문에 제약조건을 처리하기 위해 변형시킬 필요가 있다. 그러나 유전자 알고리즘을 이용하여 제약조건을 고려하는 것은 쉽지 않다.

제약조건을 처리하기 위한 다양하게 제안된 방법들은 대략 rejecting 전략, repairing 전략, modifying genetic operator 전략, penalizing 전략으로 나누어 볼 수 있다(Gen and Cheng, 1996). penalizing 전략을 제외한 나머지는 현실적인 결과값을 제시하지만 탐색과정이 매우 어렵다. Glover and Harvey (1989)는 탐색영역 중 비현실적인 영역을 통하여 실행 가능한 영역으로의 이동을 하는 것이 빨리 최적해를 찾을 뿐만 아니라 더 나은 해를 찾는다고 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 비현실적인 해결책을 고려하고 최적해 방향으로 탐색하도록 효과적으로 유도하기 위해서 다양한 벌칙함수를 가지는 penalizing 전략을 적용하였고 벌칙함수는 Eq. (1)과 같다.

$$p(\vec{x}) = \prod_{i=1}^l (1 + c_i \max(g_i(\vec{x}), 0)) \times \prod_{j=1}^m (1 + d_j |h_j(\vec{x})|) \quad (1)$$

여기서, c_i 와 d_j 는 각각 부등식과 등식 제약조건에 대한 벌칙 기중요소이다.

배수펌프장의 실시간 펌프 조작운영은 관련 운영률, 정책과 법령에 따라 연속적이고 즉각적인 의사결정 과정이며 펌프 운영기간동안 작동해야 하는 펌프의 수를 결정해야 한다.

앞서 언급하였듯이, 펌프장 내수위의 최고수위 최소화 및 작동 펌프 수의 최소화인 두 가지의 목적함수를 내포하는 펌프의 실시간 운영 최적화 모형을 개발하였다.

$$Z = \min \left\{ C_1 \cdot \left(\frac{x_H^{\max} - H^b}{H^t - H^b} \right) + C_2 \cdot \left(\frac{P_o^{no.}}{T} \right) \right\} \quad (2)$$

여기서, x_H 는 펌프장 내수위, H^b , H^t 는 각각 펌프장의 바닥 높이와 꼭대기 높이를 나타낸다. 그리고 $P_o^{no.}$ 은 작동한 총 펌프의 수 그리고 T 는 펌프의 초기 작동시간부터 펌프의 마지막 작동시간까지를 의미한다. C_1 과 C_2 는 최고수위와 작동 및 중지된 펌프의 수에 대한 가중계수이며 본 연구에서는 수위에 비중을 더 두어 C_1 은 0.7, C_2 는 0.3으로 하였다.

제약조건은 다음과 같이 Hard, Soft, Boundary로 분류할 수 있으며, Hard는 반드시 준수해야 하는 제약조건, Soft는 어느 정도의 위배는 허용하는 제약조건, Boundary는 탐색영역을 제한시켜주는 제약조건으로 예를 들면 다음과 같다.

① Hard: 각 운영 시간단계에서 펌프장 내 수위는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$H^b \leq x^H(t) \leq H^t, \quad 1 \leq t \leq T \quad (3)$$

② Soft: 강우의 패턴이 증가하는 경우(혹은 유입량 증가), 펌프에 의한 토출량을 증가시키고 강우의 패턴이 감소하는 경우(혹은 유입량 감소), 펌프에 의한 토출량을 감소시킨다.

$$x_{pump}^{no.}(t-1) \leq x_{pump}^{no.}(t), \quad x_{pump}^{no.}(t) \leq x_{pump}^{no.}(t-1) \quad \text{or} \\ P(t-1) \leq P(t), \quad P(t) \leq P(t-1) \quad (4)$$

③ Boundary: 작동 중인 펌프의 수는 총 펌프의 수를 초과하지 않으며 양수이다. 또한 유출량은 유입량을 초과하지 않는다.

$$0 \leq x_{pump}^{no.}(t) \leq P_{pump}^s, \quad 1 \leq t \leq T \quad (5)$$

각 제약조건 유형에 따른 벌칙(Penalty)유형이 달라진다. Hard 유형의 제약조건은 반드시 준수해야 하므로 유전자 알고리즘에서 생존확률을 0 혹은 매우 작은 값으로 두기 위해 매우 심한 벌칙을 부과한다. 여기서 Hard 유형의 제약조건에 대한 벌칙은 다음과 같다.

Soft유형의 제약조건은 어느 정도의 위배는 허용하기 때문에 강우가 증가하는 경우와 강우가 감소하는 경우에 대하여 각각

다음과 같은 벌칙을 따른다.

$$p_i = 1 + \frac{\max(0, P(t-1) - P(t))}{10} \quad (6)$$

$$p_i = 1 + \frac{\max(0, P(t) - P(t-1))}{10} \quad (7)$$

벌칙유형 유전자 알고리즘의 Soft유형의 제약조건으로 유입량의 증가와 감소에 따라 벌칙함수 값을 산정하기 위해서 유입량의 자료가 요구된다. 유입량을 계산하기 위해 저수위-유량 관계곡선(H-S)에 따라 펌프장의 저류방정식을 적용한다.

$$S(t+1) = I(t) - P(t) + S(t) \quad (8)$$

$$H(t) = a_1 \cdot S(t) + b_1, \quad H(t+1) = a_1 \cdot S(t+1) + b_1 \quad (9)$$

$$P(t) = x_{a-pump}^{no.}(t)[q_1(x_{a-pump}^h(t))^2 + q_2x_{a-pump}^h(t) + q_3] \\ + x_{b-pump}^{no.}(t)[q_4(x_{b-pump}^h(t))^2 + q_5x_{b-pump}^h(t) + q_6] \quad (10)$$

여기서, S는 유수지의 저류량, I는 유입량, P는 펌프로 인한 토출량을 의미하며 a_1, b_1 은 각 유수지에 따른 매개변수로 유수지를 직육면체로 가정하였다. 그리고 $x_{a-pump}^{no.}$, $x_{b-pump}^{no.}$ 는 각각 다른 종류의 작동 펌프의 수, $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ 는 펌프의 특성곡선방정식의 매개변수이고 x_{a-pump}^h , x_{b-pump}^h 는 펌프의 양정을 의미한다.

Eq. (9)로부터 과거 사상에서 관측된 배수펌프장 내수위로부터 저류량을 산정할 수 있으며 Eq. (10)로부터 과거 사상에서 작동된 펌프로 인한 토출량을 산정할 수 있으나 펌프의 양정을 관측한 데이터가 존재하지 않아 각 펌프의 분당 토출량 O를 적용한 다음 식으로 변환하였다.

$$P(t) = x_{a-pump}^{no.}(t) \times O_{a-pump}(t) + x_{b-pump}^{no.}(t) \times O_{b-pump}(t) \quad (11)$$

Eqs. (9) and (11)로부터 산정한 저류량과 펌프의 토출량을 Eq. (8)에 적용하여 과거 사상에 대한 시간별 유입량을 산정한 후 벌칙함수 값을 계산하여 최적의 작동 펌프의 수를 구할 수 있다.

2.3 배수펌프장 실시간 운영모형(Geo-ANFIS)

본 연구는 배수펌프장 실시간 운영모형을 개발하여 도시지역

피해저감 대책을 위한 기존의 내배수 통합운영의 한계점을 극복하고 실무에 적용하기 위한 것으로, 그 적용방법에 대해서는 Fig. 2에서 보여준다.

Geo-ANFIS 모형의 가장 기초가 되는 배수펌프장의 실시간 수위예측을 하기 위한 절차는 다음과 같다. 앞서 언급하였듯이 뉴로-퍼지 모형에서 불필요한 입력자료의 수는 모형의 규칙수를 증가시키고 오차를 유발하므로 최소한의 입력자료를 구성하기 위하여 크게 시간적 입력변수와 공간적 입력변수로 나누어 모형을 개발하였으며, 가장 작은 오차와 큰 결정계수를 가지는 모형을 최종적으로 선택하였다. 시간적 입력변수를 결정을 위해서는 우선 선행시간 확보 및 시간적 입력자료의 수를 결정하여야 하므로 자기 상관분석 및 교차 상관분석을 실시하였으며, 그로부터 시간적 입력변수별로 시나리오를 구성하여 시나리오별 평균절대오차 (MAE), 평균제곱근오차(RMSE), 결정계수(DC), 상대첨두오차 (RPE)를 산정하여 가장 적합한 시나리오를 채택하였다. 시나리오에 적용된 시간적 입력변수로는 선행강우, 배수펌프장 내수위 및 외수위, 배수문의 개폐여부, 작동중인 펌프의 수가 고려되었다. 선정된 시간적 입력변수 시나리오를 바탕으로 공간적 입력변수별로 시나리오를 구성하고 시간적 입력변수 선정방법과 마찬가지로 평균절대오차, 평균제곱근오차, 결정계수, 상대첨두오차를 산정하여 최종적으로 가장 적합한 공간적 입력변수를 채택하여 실시간 수위예측을 위한 모형을 개발하였다.

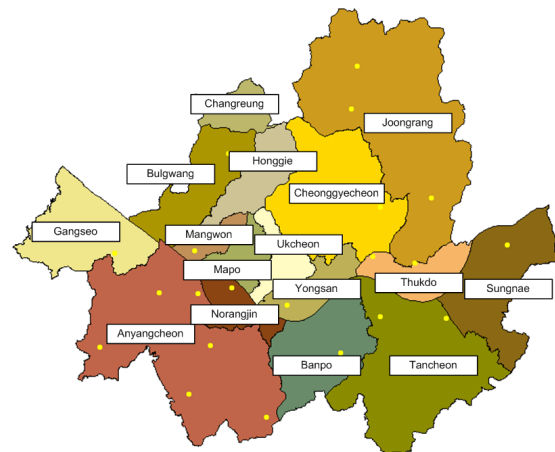
이전 시간의 입력자료로부터 현재 시간의 수위를 예측하고 예측된 현재 시간의 수위를 바탕으로 작동 펌프의 수를 산정해야 한다. 이 과정에서 최적의 작동 펌프의 수를 계산하기 위하여 최적화

기법으로 수정된 유전자 알고리즘을 적용하였으며 여러 제약조건과 목적함수를 만족시키는 작동 펌프의 수를 도출하였다. 계산된 작동 펌프의 수는 뉴로-퍼지모형의 입력자료가 되어 다음 시간의 수위 예측이 가능하도록 하였다.

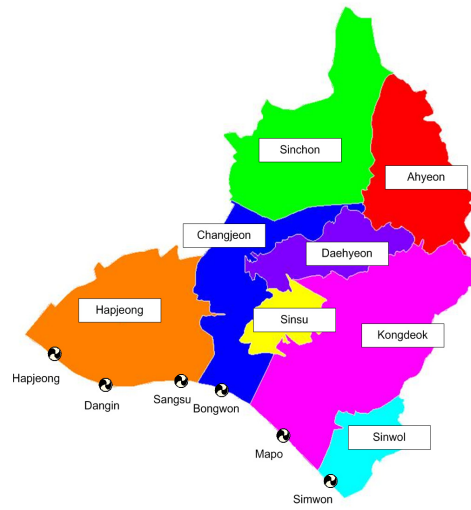
3. 모형의 적용

3.1 대상구역

서울시 배수구역은 한강으로 직접 유입되는 한강의 지천 및 주요토구별로 분할하여 강북에 마포배수구역 등 10개 배수구역과 강남에 탄천배수구역 등 6개 배수구역으로서 총 16개의 배수구역으로 나뉜다. 16개의 배수구역은 다시 239개의 배수분구로 나뉘어지며, 마포배수구역 내에는 8개(아현, 창전, 합정, 대현, 공덕, 신촌, 신수, 심원)의 배수분구가 존재한다. 배수구역에 대한 배수분구의



(a) Drainage Area in Seoul



(b) Drainage Sector in Mapo Drainage Area

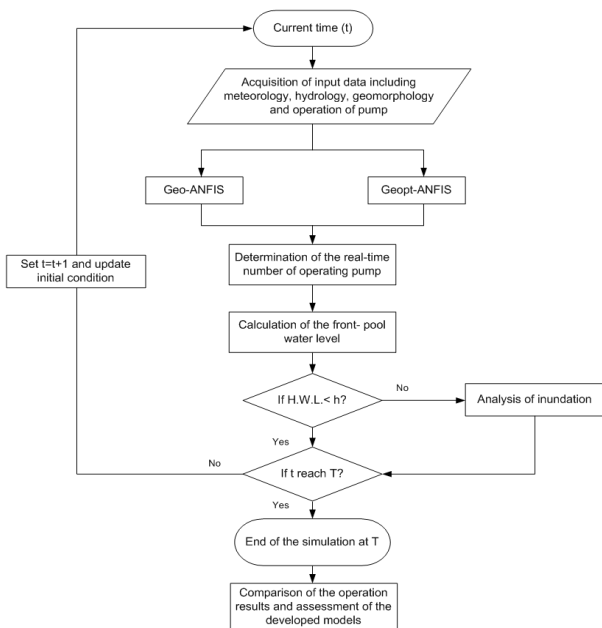


Fig. 2. Flow Chart

Fig. 3. Study Area

분할은 주요 방류토구 및 분수령을 기준으로 각 분구의 특성에 적합한 하수도 시설정비 및 관거 준설작업 등 유지관리를 용이하게 행할 수 있도록 계획하였다.

마포배수구역은 행정상으로 마포구와 용산구에 위치하고 있으며, 총면적은 1069.2ha, 배수구역 내에 마포 배수펌프장, 합정 배수펌프장, 상수 배수펌프장, 봉원 배수펌프장, 당인 배수펌프장, 심원 배수펌프장이 존재하고 있으며 한강으로 직접 유입되는 배수구역 중의 하나이다. 그리고 마포배수구역은 마포, 서대문 자동기상 관측소(AWS)의 관측자료를 이용한다. Fig. 3은 서울시 배수구역 현황도와 마포배수구역 내 8개의 배수분구를 보여주고 있다. Fig. 3(b)에서와 같이 8개의 각 배수분구는 각 배수펌프장의 존재를 의미하는 것은 아니다. 예를 들어 봉원 배수펌프장은 아현 배수분구의 유출수가 대현 배수분구를 거쳐 창전 배수분구에 위치하고 있는 봉원 배수펌프장으로 유입되며, 합정 배수분구는 합정, 당인, 상수 배수펌프장 총 3곳이 위치하고 있다.

3.2 실시간 내수위 예측

3.2.1 교차 및 자기상관관계 분석

정확도를 증가시키면서 모의시간을 단축할 수 있는 입력 자료의 조합을 선정하기 위하여 입력변수와 출력변수간의 상관관계를 분석할 필요가 있다. 여기서는 마포구내 각 배수펌프장에 강우와 우수지 내수위간의 교차상관관계와 자기상관관계를 분석하였다. 유출에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 강우와 우수지 내수위간의 교차상관관계를 분석하기 위하여 마포구내 위치하고 있는 배수펌프장의 수위자료를 이용하였으며 적용한 강우사상은 단일호우와 연속호우로 나누어 총 8개의 호우사상(Table 1)에 대하여 분석하였다.

각 배수펌프장마다 높은 상관도를 보이는 시간은 달랐으며 이는 각 배수펌프장이 위치하는 유역의 면적, 하수관거의 경사, 불투수율과 같은 유역의 특성에 영향으로 발생하는 것으로 판단된다. 예를 들어, 난지(t-80)의 경우 매우 큰 유역면적으로 인하여 유역의 반응시간이 매우 커서 유역의 면적이 작은 성산(t-10),

합정(t-10)보다는 높은 상관도를 보이는 시간이 느린 것으로 판단되며, 봉원(t-10)과 마포(t-20)는 망원1(t-40)보다 더 큰 면적을 가지고 있음에도 불구하고 높은 상관도를 보이는 시간이 빠른 것은 큰 하수관거의 경사와 높은 수해면적을 때문인 것으로 판단된다. 상수(t-50)의 경우 상대적으로 매우 작은 유역면적을 가지고 있음에도 불구하고 높은 상관도를 보이는 시간이 비슷한 유역의 면적을 가지고 있는 배수펌프장보다 느린 것은 상수 배수펌프장 유역의 낮은 불투수율로 인하여 유역의 도달시간이 길기 때문인 것으로 보인다.

강우와 수위의 교차상관관계 분석으로부터 각 배수펌프장 유역마다 면적 혹은 수해면적과 유역의 평균경사 혹은 하수관거의 경사 및 불투수율 등의 유역의 지형적 특성에 따라 다른 패턴을 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 뉴로-퍼지모형 개발시 시간적 입력변수뿐만 아니라 공간적 입력변수를 고려할 필요가 있을 것으로 판단되며 평균적으로 t-10에서 가장 높은 상관도를 보여 강우의 t-10을 뉴로-퍼지의 입력자료로 구성하고자 한다. 여기서 ‘t-숫자’는 숫자에 해당하는 시간단위 “분”에 해당하는 이전시간을 의미한다.

우수지 내 수위를 뉴로-퍼지의 입력자료로서 이용하기 위하여 강우와 마찬가지로 자기상관관계를 분석하였으며 앞서 제시한 8개의 호우사상에 대하여 적용하였다. 우수지 내 수위의 자기상관관계는 단일호우 및 복합호우 사상에 관계없이 시간이 지체됨에 따라 점차적으로 감소하여 우수지 내 수위의 t-10을 뉴로-퍼지의 입력자료로 구성하고자 한다.

3.2.2 최적 입력자료의 구성

뉴로-퍼지모형을 개발하기 위해서는 멤버쉽함수와 규칙수를 결정해야 한다. 따라서 여러 가지 뉴로-퍼지모형을 개발하고 적용하여 가장 작은 오차를 가지는 뉴로-퍼지모형을 최종적으로 선택하고자 한다. Table 2는 본 연구의 적용 배수펌프장 제원을 보여주고 있으며 Table 3은 시간적 입력변수를 선정하기 위한 뉴로-퍼지모형을 보여준다. 여기서 ‘R’은 강우, ‘I’는 우수지 내수위, ‘G’는 수문의 개폐여부, ‘S’는 우수지 외수위를 의미하며 Table 1에서 제시된 강우자료를 각각 훈련(Training), 확인(Checking), 검증(Testing) 단계에 입력자료로 사용하였다.

10개의 뉴로-퍼지 모형은 각각 Generalized Bell Membership Function (gbell, gbell2), Gaussian Membership Function (gauss, gauss_constant), Sigmoid Membership Function (dsigmoid) 및 Subtractive clustering (cluster)기법을 적용하여 Table 4에 제시하였으며, 모의 결과 계산된 오차는 Table 5에서 보여준다. 적절한 멤버쉽함수를 선정하는 것뿐만 아니라 규칙수를 찾기 위해서 규칙수를 기본적으로 3개로 하고 규칙수가 2개인 경우와 비교하였으며, 다양한 규칙수와 비교하고자 자동적으로 규칙수를 찾아주는

Table 1. Applied Rainfall Event

| No. | Single event | No. | Continuous event |
|-----|----------------------------------|-----|----------------------------------|
| 1 | 2003.08.23~2003.08.24 (264mm) | 5 | 2002.08.04~2002.08.07 (471mm) |
| 2 | 2006.07.27~2006.07.28 (275mm) | 6 | 2006.07.15~2006.07.18 (365mm) |
| 3 | 2010.09.21 (279mm) | 7 | 2009.07.12~2009.07.14 (257mm) |
| 4 | 2011.07.26~2011.07.28 (564mm) | 8 | 2011.06.23~2011.06.30 (354mm) |

Table 2. Physical Characteristics at Each Pump Station in Mapo (Seoul Metropolitan City, 2009)

| Drainage | Pump station | Storage volume (m ³) | Total pump capacity (m ³ /min) | Stage in Detention pond (m) | | Area (ha) | Benefiter Area (ha) | Slope (%) | Impervious |
|----------|--------------|----------------------------------|---|-----------------------------|--------|-----------|---------------------|-----------|------------|
| | | | | H.W.L. | L.H.L. | | | | |
| Mapo | Mapo | 72,542 | 2,710 | 7.00 | 4.00 | 298.5 | 23.5 | 0.80 | 73.0 |
| | Dangin | 2,350 | 1,160 | 6.00 | 3.90 | 89.2 | 14.3 | 2.10 | 58.4 |
| | Hapjeong | 1,410 | 218 | 8.30 | 4.20 | 21.0 | 3.7 | 1.69 | 57.9 |
| | Sangsu | 464 | 134 | 9.00 | 6.50 | 9.0 | 1.1 | 1.99 | 27.7 |
| | Bongwon | 2,200 | 1,000 | 8.40 | 3.80 | 629.9 | 49.8 | 1.95 | 67.3 |
| | Simwon | 510 | 160 | 12.40 | 7.00 | 21.7 | 1.5 | 3.09 | 77.5 |

Table 3. Details of 10 Models

| Model | Inputs | Remark |
|-----------|--|---|
| T1 | R (t-10), I (t-10) | R: Rainfall G: Flood Gate P: Pump Capacity I: Stage of Inside Detention S: Stage of Outside Detention |
| T2 | R (t-10), R (t), I (t-10) | |
| T3 | R (t-20), R (t-10), R (t), I (t-10) | |
| T4 | R (t-10), G (t-10), I (t-10) | |
| T5 | R (t-10), S (t-10), I (t-10) | |
| T6 | R (t-10), P (t-10), I (t-10) | |
| T7 | R (t-10), S (t-10), G (t-10), I (t-10) | |
| T8 | R (t-10), P (t-10), S (t-10), I (t-10) | |
| T9 | R (t-10), P (t-10), G (t-10), I (t-10) | |
| T10 | R (t-10), P (t-10), S (t-10), G (t-10), I (t-10) | |

Table 4. Applied Method

| CASE | MF | Number of MFs | MF Type |
|------|----------|---------------|---------------|
| 1 | Gbell | 2 | linear |
| 2 | | 3 | linear |
| 3 | Gauss | 3 | linear |
| 4 | | 3 | constant |
| 5 | Dsigmoid | 3 | linear |
| 6 | Cluster | 6 | - |

Table 5. Statistical Index of ANFIS using Temporal Parameters

| | CASE | MAE | RMSE | DC | RPE | | CASE | MAE | RMSE | DC | RPE |
|----|------|--------------|--------------|--------------|--------------|----|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| T1 | C1 | 0.127 | 0.298 | 0.954 | 3.072 | T2 | C1 | 0.127 | 0.277 | 0.960 | 3.385 |
| | C2 | 0.119 | 0.267 | 0.965 | 4.348 | | C2 | 0.087 | 0.206 | 0.979 | 3.614 |
| | C3 | 0.095 | 0.256 | 0.963 | 2.729 | | C3 | 0.119 | 0.220 | 0.978 | 3.571 |
| | C4 | 0.127 | 0.306 | 0.957 | 3.463 | | C4 | 0.125 | 0.286 | 0.963 | 2.334 |
| | C5 | 0.119 | 0.276 | 0.963 | 4.200 | | C5 | 0.092 | 0.210 | 0.976 | 4.863 |
| | C6 | 0.129 | 0.310 | 0.953 | 1.433 | | C6 | 0.126 | 0.300 | 0.956 | 1.515 |
| T3 | C1 | 0.111 | 0.245 | 0.969 | 4.300 | T4 | C1 | 0.119 | 0.288 | 0.960 | 3.037 |
| | C2 | 0.061 | 0.153 | 0.989 | 1.885 | | C2 | 0.101 | 0.236 | 0.973 | 1.753 |
| | C3 | 0.067 | 0.172 | 0.988 | 2.860 | | C3 | 0.104 | 0.239 | 0.972 | 2.021 |
| | C4 | 0.108 | 0.254 | 0.971 | 5.047 | | C4 | 0.118 | 0.287 | 0.960 | 3.329 |
| | C5 | 0.064 | 0.154 | 0.986 | 3.046 | | C5 | 0.107 | 0.237 | 0.972 | 1.897 |
| | C6 | 0.137 | 0.301 | 0.956 | 1.619 | | C6 | 0.125 | 0.291 | 0.959 | 3.715 |

Table 5. Statistical Index of ANFIS using Temporal Parameters (Continue)

| | CASE | MAE | RMSE | DC | RPE | | CASE | MAE | RMSE | DC | RPE |
|----|------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| T5 | C1 | 0.122 | 0.268 | 0.961 | 3.728 | T6 | C1 | 0.113 | 0.240 | 0.963 | 3.451 |
| | C2 | 0.074 | 0.165 | 0.987 | 1.998 | | C2 | 0.046 | 0.151 | 0.985 | 0.806 |
| | C3 | 0.081 | 0.171 | 0.988 | 1.849 | | C3 | 0.045 | 0.158 | 0.981 | 1.599 |
| | C4 | 0.122 | 0.282 | 0.965 | 4.739 | | C4 | 0.078 | 0.256 | 0.970 | 2.177 |
| | C5 | 0.068 | 0.156 | 0.986 | 1.785 | | C5 | 0.040 | 0.144 | 0.982 | 0.769 |
| | C6 | 0.130 | 0.271 | 0.964 | 7.141 | | C6 | 0.125 | 0.296 | 0.957 | 4.731 |
| T7 | C1 | 0.103 | 0.239 | 0.968 | 5.653 | T8 | C1 | 0.093 | 0.206 | 0.976 | 1.663 |
| | C2 | 0.062 | 0.151 | 0.989 | 2.801 | | C2 | 0.037 | 0.112 | 0.994 | 0.403 |
| | C3 | 0.063 | 0.158 | 0.988 | 3.354 | | C3 | 0.043 | 0.121 | 0.994 | 0.636 |
| | C4 | 0.109 | 0.256 | 0.972 | 3.540 | | C4 | 0.089 | 0.223 | 0.979 | 2.781 |
| | C5 | 0.058 | 0.150 | 0.988 | 0.604 | | C5 | 0.035 | 0.109 | 0.993 | 0.082 |
| | C6 | 0.124 | 0.295 | 0.957 | 2.948 | | C6 | 0.121 | 0.259 | 0.967 | 4.887 |
| T9 | C1 | 0.102 | 0.220 | 0.972 | 3.984 | T10 | C1 | 0.061 | 0.138 | 0.985 | 1.018 |
| | C2 | 0.031 | 0.096 | 0.996 | 0.448 | | C2 | 0.019 | 0.086 | 0.996 | 0.014 |
| | C3 | 0.035 | 0.100 | 0.996 | 0.286 | | C3 | 0.020 | 0.080 | 0.997 | 0.040 |
| | C4 | 0.097 | 0.239 | 0.976 | 2.459 | | C4 | 0.066 | 0.172 | 0.991 | 0.682 |
| | C5 | 0.028 | 0.094 | 0.995 | 0.159 | | C5 | 0.017 | 0.085 | 0.997 | 0.020 |
| | C6 | 0.139 | 0.288 | 0.959 | 4.569 | | C6 | 0.137 | 0.284 | 0.961 | 4.136 |

Subtractive clustering 기법을 적용하였다. 또한 1차 Takagi-Sugeno (linear)와 0차 Takagi-Sugeno (constant)를 비교하기 위하여 Gaussian Membership Function 적용시 두 Takagi-Sugeno를 적용하였다. 모형의 정확성과 효율성을 판단하기 위하여 절대평균오차(MAE), 평균제곱근오차(RMSE), 결정계수(DC), 상대첨두오차(RPE)와 같은 판단기준을 적용하였다.

Table 5에서 보여주듯이, model T10이 평균적으로 가장 작은 평균오차 및 절대제곱근오차와 상대첨두오차를 가지고 있었으며, 또한 가장 큰 결정계수를 보이고 있다. 입력자료별로 살펴보면 강우의 경우 model T1~model T3중 model T3이 가장 큰 결정계수를 가지고 있으나 큰 차이가 없고 오차의 경우 가장 작지만 혼란단계에서 학습횟수가 증가하고 모의시간이 오래 걸리는 단점이 있다. model T4~model T6에서 외수위, 배수문의 개폐여부, 운영펌프수를 비교해보면 운영펌프수를 고려한 model T6이 오차가 작고 높은 결정계수를 보이고 있었으며 무엇보다 상대첨두오차 값이 많이 작았다. Fig. 4는 model T6에 대한 2010년 강우사상에 대한 예측결과를 실측결과와 비교한 것을 모형별로 제시하고 있다.

3.3 Geo-ANFIS 모형의 적용결과

마포배수구역에 위치한 빗물펌프장은 합정(Hapjeong), 당인(Dangin), 상수(Sangsu), 봉원(Bongwon), 마포(Mapo), 심원(Simwon)으로 총 6개이며, 합정, 당인, 상수, 봉원, 마포 배수펌프

장의 공간적 매개변수를 이용하여 개발된 Geo-ANFIS의 타당성을 입증하기 위하여 심원 배수펌프장에 테스트하였다. 여기서 공간적 매개변수는 관거의 평균경사, 유역의 면적, 수혜면적, 불투수율을 의미한다.

시간적 입력변수만을 적용한 뉴로-퍼지모형과 같이 공간적 입력변수를 적용한 Geo-ANFIS모형을 개발하기 위해서는 멤버쉽함수와 규칙수를 결정해야 한다. 따라서 여러 가지 뉴로-퍼지모형을 개발하고 적용하여 가장 작은 오차와 가장 큰 결정계수를 가지는 뉴로-퍼지모형을 최종적으로 선택하고자 하며, 이를 위해 Table 6과 같이 다양한 입력조건 시나리오를 구성하였다. 멤버쉽 함수는 앞서 시간적 입력변수만을 고려한 뉴로-퍼지모형과 동일하게 적용하였다. 각 시나리오별 모의 결과 마포 배수구역 평균오차를 Table 7에 제시하였다. Fig. 5는 2010년 강우사상에 대해 model G8-C5를 각 배수펌프장에 적용하여 예측된 결과를 실측치와 비교하여 보여준다.

앞서 언급하였듯이 심원배수펌프장은 개발된 공간적 입력변수를 고려한 뉴로-퍼지 모형의 교차타당화를 검증하기 위한 데이터이다. 교차타당화란 연구결과에 대한 타당성을 그 연구에 사용하지 않은 다른 표본으로 평가해보는 방법을 말한다. 즉, 공간적 입력변수를 고려한 뉴로-퍼지 모형중 가장 최적의 자료조합을 구성하는 G8-C5모형을 다른 배수펌프장에 적용시 실측값과의 오차를 비교하여 모형의 타당성을 입증하고자 하는 것이다. Fig. 6은 심원배수

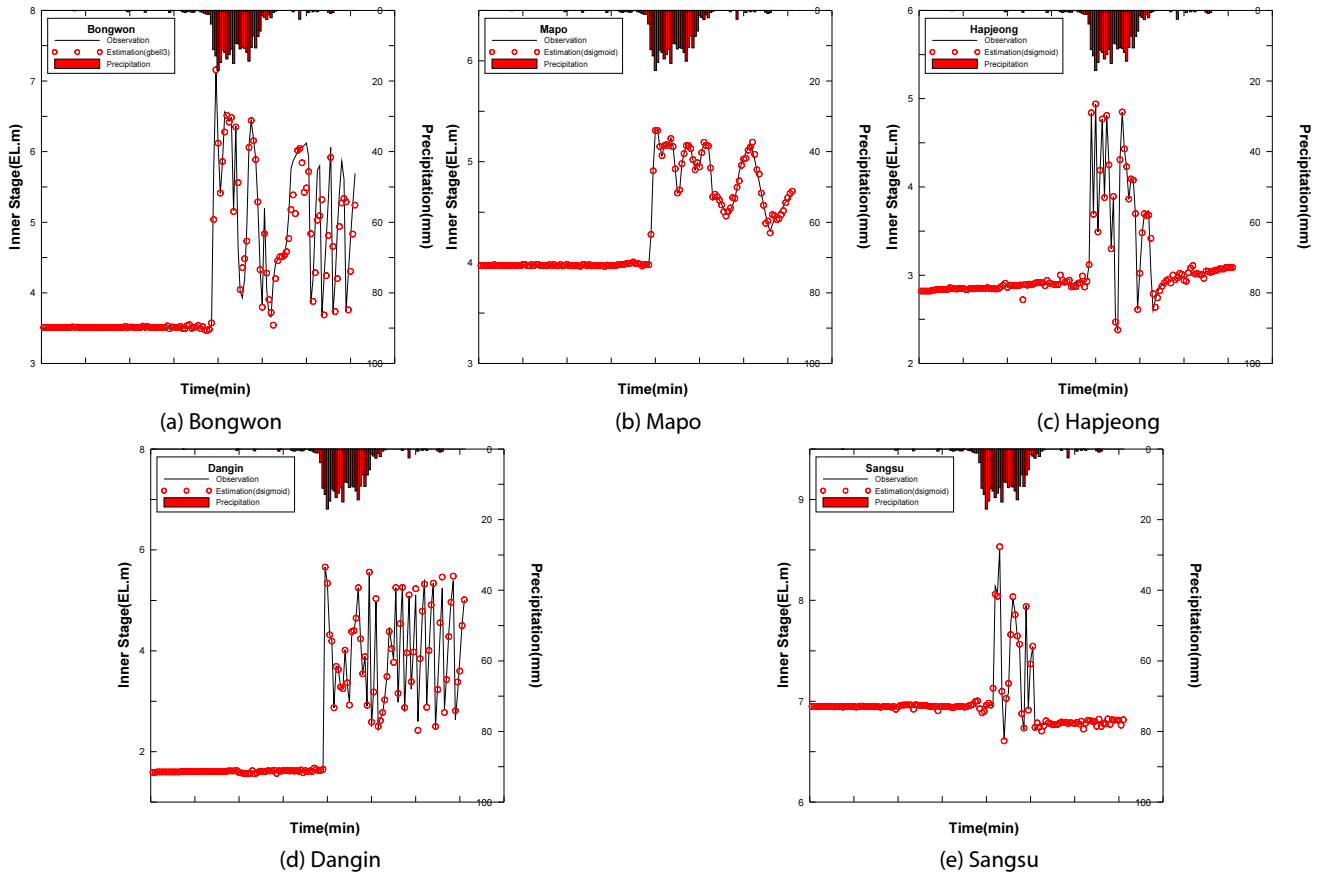


Fig. 4. Results of Inner Stage Estimation in Model T6

Table 6. Details of 8 Models

| Model | Inputs | Remark |
|-------|--|---|
| G1 | R (t-10), I (t-10), P (t-10), A | R: Rainfall I: Stage of Inside Detention P: Pump Capacity A: Area BA: Benefiter Area Imp: Impervious S: Slope |
| G2 | R (t-10), I (t-10), P (t-10), BA | |
| G3 | R (t-10), I (t-10), P (t-10), Imp | |
| G4 | R (t-10), I (t-10), P (t-10), S | |
| G5 | R (t-10), I (t-10), P (t-10), BA, Imp | |
| G6 | R (t-10), I (t-10), P (t-10), BA, S | |
| G7 | R (t-10), I (t-10), P (t-10), Imp, S | |
| G8 | R (t-10), I (t-10), P (t-10), BA, Imp, S | |

Table 7. Statistical Index of Geo-ANFIS

| | CASE | MAE | RMSE | DC | RPE | | CASE | MAE | RMSE | DC | RPE |
|----|------|--------------|--------------|--------------|--------------|----|--------------|-----|--------------|--------------|--------------|
| | G1 | C1 | 0.130 | 0.112 | 0.962 | | 7.760 | G2 | C1 | 0.126 | 0.108 |
| C2 | | 0.075 | 0.063 | 0.978 | 0.730 | C2 | 0.065 | | 0.052 | 0.982 | 1.491 |
| C3 | | 0.076 | 0.066 | 0.977 | 1.246 | C3 | 0.063 | | 0.053 | 0.982 | 0.715 |
| C4 | | 0.184 | 0.167 | 0.943 | 8.407 | C4 | 0.186 | | 0.160 | 0.945 | 10.072 |
| C5 | | 0.088 | 0.073 | 0.975 | 1.767 | C5 | 0.064 | | 0.053 | 0.982 | 1.925 |
| C6 | | 0.139 | 0.123 | 0.958 | 9.775 | C6 | 0.137 | | 0.115 | 0.960 | 10.331 |

Table 7. Statistical Index of Geo-ANFIS (Continue)

| | CASE | MAE | RMSE | DC | RPE | | CASE | MAE | RMSE | DC | RPE |
|----|------|--------------|--------------|--------------|--------------|----|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| G3 | C1 | 0.114 | 0.102 | 0.965 | 7.083 | G4 | C1 | 0.127 | 0.115 | 0.961 | 6.538 |
| | C2 | 0.069 | 0.054 | 0.982 | 1.284 | | C2 | 0.073 | 0.060 | 0.979 | 1.346 |
| | C3 | 0.080 | 0.066 | 0.977 | 1.330 | | C3 | 0.074 | 0.061 | 0.979 | 1.623 |
| | C4 | 0.134 | 0.118 | 0.959 | 9.538 | | C4 | 0.164 | 0.165 | 0.943 | 8.124 |
| | C5 | 0.067 | 0.056 | 0.981 | 0.717 | | C5 | 0.071 | 0.058 | 0.980 | 0.805 |
| | C6 | 0.179 | 0.155 | 0.947 | 5.457 | | C6 | 0.129 | 0.110 | 0.962 | 5.912 |
| G5 | C1 | 0.096 | 0.086 | 0.970 | 4.551 | G6 | C1 | 0.104 | 0.093 | 0.968 | 4.255 |
| | C2 | 0.051 | 0.047 | 0.984 | 0.458 | | C2 | 0.052 | 0.047 | 0.984 | 0.344 |
| | C3 | 0.055 | 0.048 | 0.983 | 1.382 | | C3 | 0.054 | 0.048 | 0.984 | 0.937 |
| | C4 | 0.097 | 0.088 | 0.970 | 5.731 | | C4 | 0.097 | 0.088 | 0.970 | 5.733 |
| | C5 | 0.053 | 0.048 | 0.983 | 1.517 | | C5 | 0.047 | 0.045 | 0.985 | 0.513 |
| | C6 | 0.128 | 0.117 | 0.960 | 8.276 | | C6 | 0.131 | 0.114 | 0.961 | 8.419 |
| G7 | C1 | 0.100 | 0.087 | 0.970 | 4.423 | G8 | C1 | 0.077 | 0.086 | 0.971 | 3.847 |
| | C2 | 0.052 | 0.047 | 0.984 | 0.413 | | C2 | 0.031 | 0.046 | 0.984 | 0.468 |
| | C3 | 0.055 | 0.048 | 0.984 | 1.380 | | C3 | 0.035 | 0.048 | 0.984 | 1.371 |
| | C4 | 0.097 | 0.088 | 0.970 | 5.734 | | C4 | 0.077 | 0.088 | 0.970 | 5.711 |
| | C5 | 0.053 | 0.049 | 0.983 | 1.592 | | C5 | 0.033 | 0.048 | 0.983 | 1.596 |
| | C6 | 0.141 | 0.125 | 0.957 | 9.519 | | C6 | 0.122 | 0.144 | 0.950 | 7.717 |

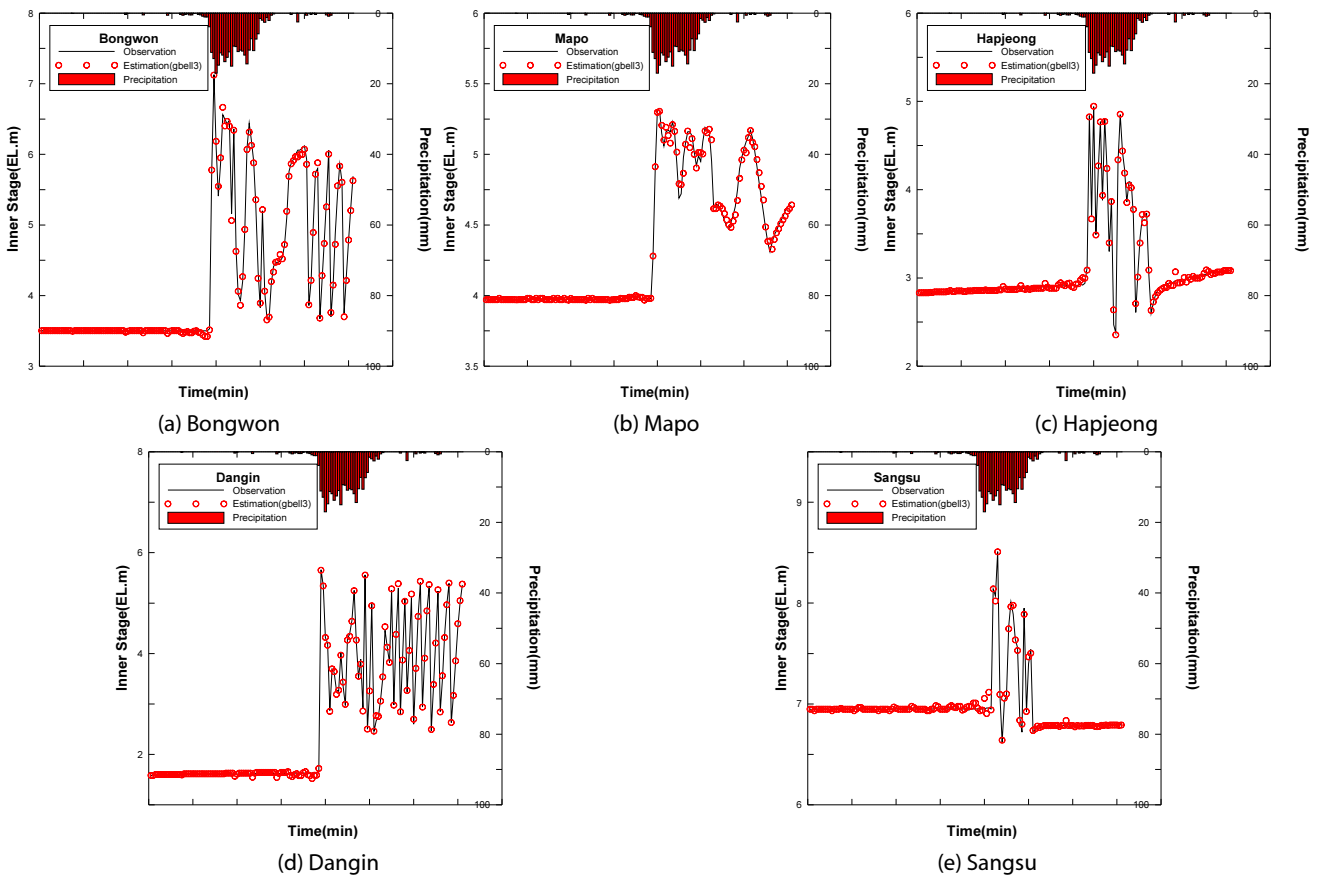


Fig. 5. Results of Inner Stage Estimation in Model G8-C5

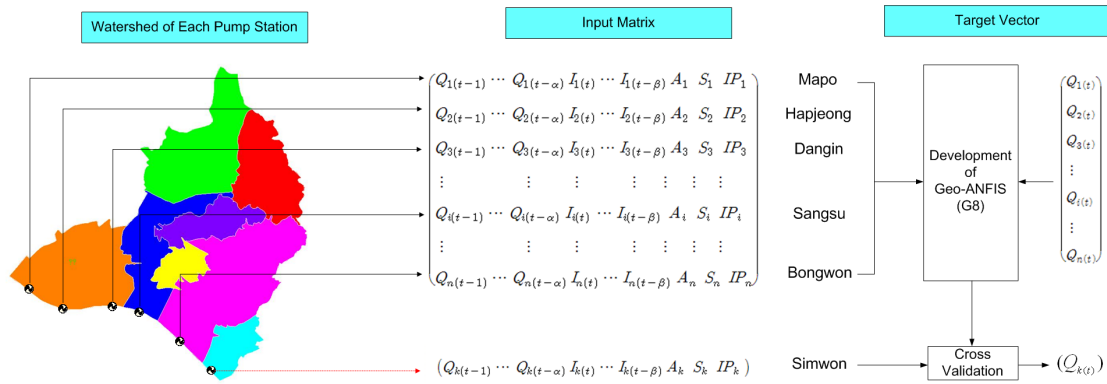


Fig. 6. Meaning of Cross Validation

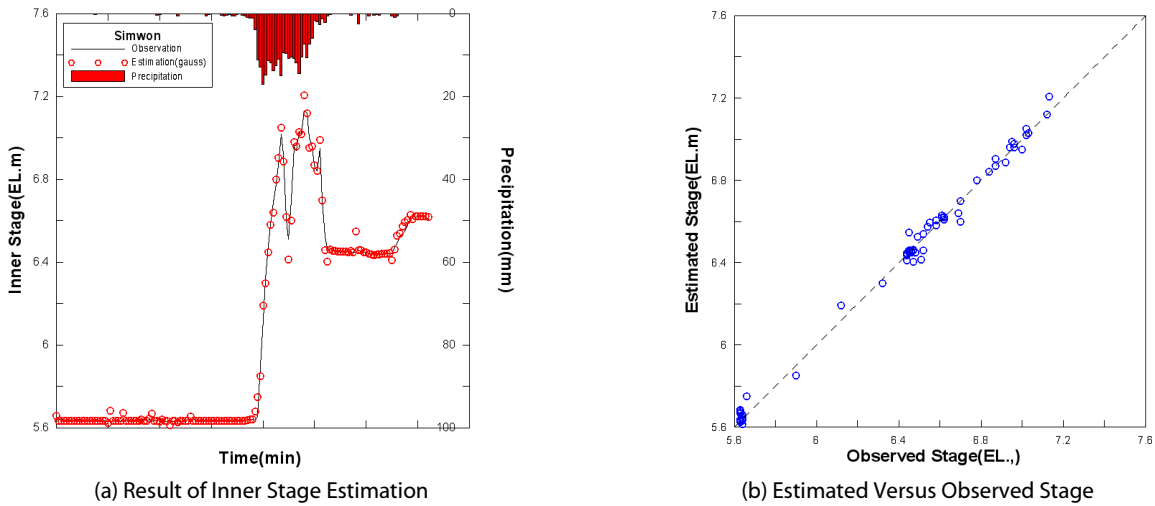


Fig. 7. Estimated versus Observed Stage at Cross Validation Step for Simwon

펌프장에 대한 교차타당화를 설명하고 있으며 Fig. 7은 교차타당화에 대한 결과를 보여주고 있다. 심원배수펌프장의 경우 마포배수구역의 다른 배수펌프장에 비하여 수위의 시간에 따른 변화폭이 작고 수위의 상승과 하강의 반복패턴이 작았다. 모형의 적용결과 수위가 높을수록 예측치가 관측치보다 더 높은 수위를 보이고 있었으나 절대평균오차의 경우 0.033으로 다른 배수펌프장의 평균인 0.030884과 거의 유사한 것을 확인할 수 있었으며 결정계수는 약 0.73으로 나타났다.

3.4 실시간 배수펌프운영 기법의 적용결과

뉴로-퍼지모형을 적용한 결과 예측되는 선행시간 10분(t-10')의 배수펌프장의 수위자료는 벌칙유형의 유전자 알고리즘의 입력 자료로 활용되어 배수펌프장의 펌프 운영을 자동적으로 지시하도록 하며, 펌프 운영률을 통하여 작동하는 펌프의 수는 다시 뉴로-퍼지 모형의 입력자료가 되어 다음 시간의 배수펌프장의 수위를 예측하도록 한다.

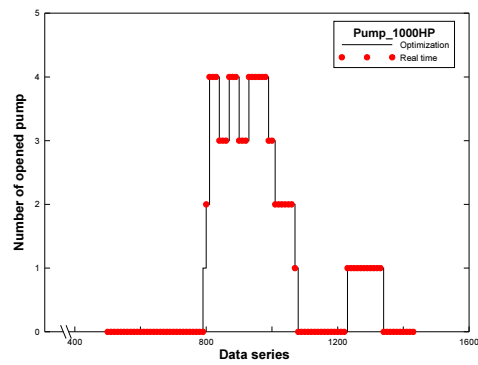
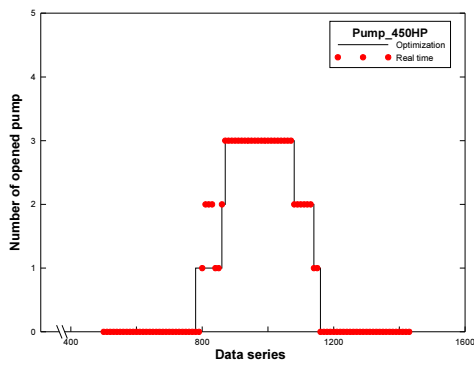
예측된 수위로부터 배수펌프장에서의 최적의 작동 펌프수를 결정하기 위하여, 실시간 수위예측을 위해 적용하였던 마포 배수구역에 개발된 벌칙유형의 유전자 알고리즘을 적용하여 검증하고자 한다. 벌칙유형의 유전자 알고리즘 기법의 적용을 위해서는 배수펌프장의 물리적 제반사항과 과거 강우사상(Table 1)과 펌프운영 기록이 필요하다. 펌프운영 기록의 경우 빗물펌프장 담당 소관인 마포구청의 펌프장 운영실태 조사자료를 참고하였다. 각 배수펌프장의 물리적 제반사항은 Table 8에 제시하였다. 벌칙유형의 유전자 알고리즘을 통한 배수펌프장의 최적 운영모의 결과는 Fig. 8과 같다.

배수펌프장 내 수위를 효과적으로 줄이기 위해서는 펌프 운영시간과 양수율을 결정하는 것이며 최적의 배수펌프 운영을 위해서는 침투유입량이 발생하기 전에 펌프의 작동을 시작해야 한다.

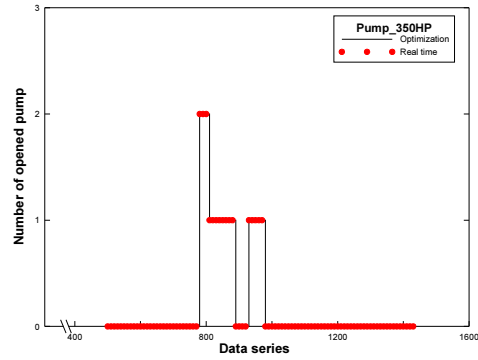
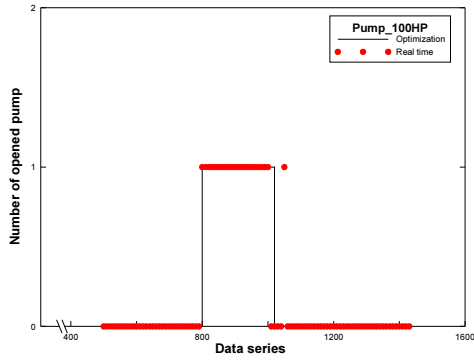
마포 배수펌프장의 경우 20분 먼저 450hp 펌프를 작동함으로써 이후 잦은 작동과 중지의 반복을 피하면서 배수펌프장의 최고수위를 0.13m 낮출 수 있었다. 합정 배수펌프장의 경우는 실제운영을

Table 8. Physical Characteristics of Each Pump Station (Seoul Metropolitan City, 2009)

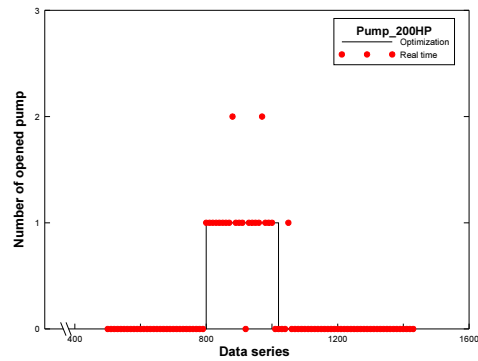
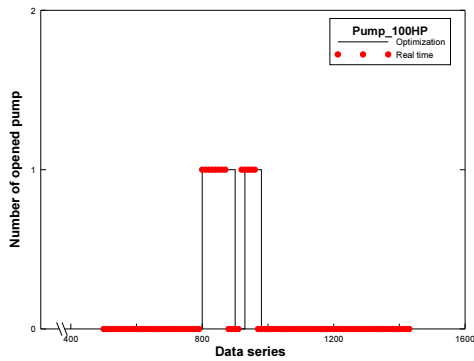
| Pump station | Pump Scale (HP × ea) | Pump output (m ³ /min) | Design Frequency (yr) | Drainage Gate (m) | Stage in Detention pond (m) | |
|--------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------|--------|
| | | | | | H.W.L. | L.H.L. |
| Mapo | 1000 × 4 450 × 3 | 2,710 | 10 | 2@2.5×3.0 | 7.00 | 4.00 |
| Dangin | 750 × 4 | 1,160 | 10 | 1@2.5×2.5 | 6.00 | 3.90 |
| Hapjeong | 100 × 1 350 × 2 | 218 | 10 | 1@1.0×1.0 | 8.30 | 2.80 |
| Sangsu | 100 × 1 200 × 2 | 134 | 10 | 1@2.7×1.3 | 9.00 | 6.50 |
| Bongwon | 750 × 4 | 1,000 | 10 | 1@2.7×2.5 | 8.40 | 3.80 |



(a) Mapo



(b) Hapjeong



(c) Sangsu

Fig. 8. Results of Optimization Simulation

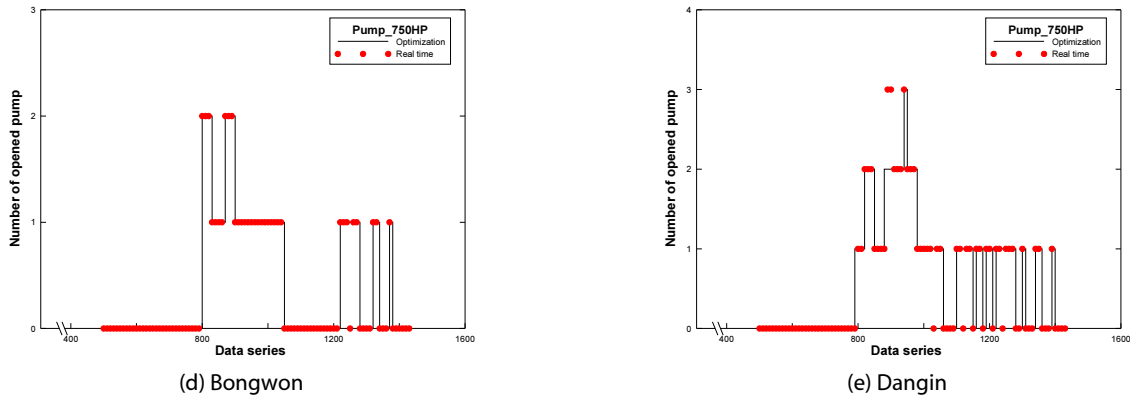


Fig. 8. Results of Optimization Simulation (Continue)

비교적 최적의 상태에 가깝게 운영하고 있었으며 최고수위의 변화는 없었다. 다만 1,050분에서 100hp 펌프를 10분간 작동한 것을 1,010분에서 운영을 한다면 이전부터 계속 작동 중이었기 때문에 펌프의 가동과 정지상태의 반복을 피할 수 있다.

합정배수펌프장 배수펌프 운영에 따른 수위예측 결과에서 1,050분에 펌프를 가동하지 않음으로 인하여 실측 수위와 차이가 발생하였으며 최고수위측면에서 실제 운영으로 인한 수위보다 약 0.11m 상승하게 되지만 합정 배수펌프장의 허용 최고수위인 EL. 8.3m에는 못미치기 때문에 안정적인 운영이 가능하다. 상수 배수펌프장의 경우도 100hp 펌프와 200hp 펌프가 상호보완적으로 운영을 하면서 반복적인 작동과 정지상태를 줄이도록 운영한 결과 최고수위는 약 0.02m 상승하였으나 상수 배수펌프장의 허용 최고수위 EL. 9m에는 여유고가 충분하다. 봉원 배수펌프장과 당인 배수펌프장은 토출량이 큰 750hp 펌프만을 사용하고 있어 펌프 한 대의 작동과 정지가 배수펌프장 내 수위에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 상수 배수펌프장의 실제운영은 최고수위를 효과적으로 관리하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 펌프의 반복운영을 피하여 운영비 측면에서 효율성을 높이기 위하여 1,250분에 750hp 펌프의 운영을 중지하지 않고 계속 작동시켰다. 그 결과 수위가 더 낮아졌으며 최저수위에 도달하지는 않았다. 당인 배수펌프장의 경우에는 실제 발생한 최고수위가 당인 배수펌프장의 허용 최고수위인 EL. 6.0m에 여유고가 0.34m밖에 되지 않아서 실제 펌프 운영시작시간보다 10분 앞서 운영을 시작하였으며, 그 결과 최고수위가 EL. 5.66m에서 EL. 5.43m로 0.23m 낮아졌다. 배수펌프장의 실제 펌프 운영시작 시간은 합정, 상수 배수펌프장의 경우 2009년 9월21일 13:15:00이다. 이는 벌칙유형의 유전자 알고리즘을 적용한 최적 운영 모의 기법에서는 10간격으로 모의가 이루어지기 때문에 실제 합정, 상수 배수펌프장의 경우 5분 앞서 펌프운영이 시작되고 있어 관측되는 최고수위는 더 낮아질 수 있을 것으로 판단된다.

3.5 비교 및 분석

뉴로퍼지 모형의 적용성을 검토하기 위해서는 훈련, 확인, 검증의 단계를 거치게 되는데, 이 중 훈련 과 확인 단계를 통해 소속 함수의 매개변수를 결정하게 된다. 이 때 훈련과 확인 단계에 사용하는 호우사상 및 배수펌프장의 내수위 등을 포함한 입력변수에 따라 소속 함수의 매개변수 값이 달라지며 뉴로퍼지 모형의 결과 또한 차이가 나게 된다.

따라서 본 연구에서는 앞서 선정된 4개의 단일 호우사상(Table 1)을 이용해 훈련과 확인 단계를 위한 호우조합을 구성(Table 9)하

Table 9. Details of 12 Test Case

| TEST | Training | Checking | Testing |
|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 2011.06.23 | 2011.07.26~ 2011.07.28 | 2010.09.21 |
| 2 | 2009.07.12 | 2011.07.26~ 2011.07.28 | 2010.09.21 |
| 3 | 2010.09.21 | 2011.07.26~ 2011.07.28 | 2009.07.12 |
| 4 | 2009.07.12 | 2010.09.21 | 2011.06.23 |
| 5 | 2011.07.26~ 2011.07.28 | 2010.09.21 | 2011.06.23 |
| 6 | 2011.06.23 | 2010.09.21 | 2009.07.12 |
| 7 | 2010.09.21 | 2011.06.23 | 2009.07.12 |
| 8 | 2011.07.26~ 2011.07.28 | 2011.06.23 | 2009.07.12 |
| 9 | 2009.07.12 | 2011.06.23 | 2011.07.26~ 2011.07.28 |
| 10 | 2011.06.23 | 2009.07.12 | 2011.07.26~ 2011.07.28 |
| 11 | 2010.09.21 | 2009.07.12 | 2011.07.26~ 2011.07.28 |
| 12 | 2011.07.26~ 2011.07.28 | 2009.07.12 | 2010.09.21 |

Table 10. Statistical Index of Test

| TEST | MAE | RMSE | DC | RPE |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.031 | 0.46 | 0.984 | 0.466 |
| 2 | 0.038 | 0.054 | 0.937 | 0.694 |
| 3 | 0.046 | 0.087 | 0.978 | 0.562 |
| 4 | 0.059 | 0.103 | 0.883 | 0.782 |
| 5 | 0.032 | 0.079 | 0.980 | 0.643 |
| 6 | 0.056 | 0.093 | 0.924 | 0.820 |
| 7 | 0.039 | 0.059 | 0.978 | 0.602 |
| 8 | 0.050 | 0.088 | 0.936 | 0.786 |
| 9 | 0.039 | 0.052 | 0.987 | 0.544 |
| 10 | 0.064 | 0.120 | 0.851 | 1.005 |
| 11 | 0.060 | 0.106 | 0.910 | 0.718 |
| 12 | 0.044 | 0.076 | 0.951 | 0.549 |

고 각 조합에 따른 결과를 검증단계에서 정량적으로 분석하였다. 정량적 분석을 위하여 절대평균오차, 평균제곱근오차, 결정계수, 상대첨두오차를 산정하고 각 배수펌프장에 대하여 평균값을 Table 10에 제시하였다.

절대평균오차는 0.031m~0.064m, 평균제곱근오차는 0.046m~0.120m, 결정계수는 0.851~0.987, 상대첨두오차는 0.468m~1.005m 범위를 보이고 있어 어떤 호우사상을 훈련 단계와 확인 단계에 적용하는가에 따라 통계적 지표값이 달라짐을 알 수 있었다. 따라서 향후 더 많은 강우 사상에 대한 검증을 통하여 대표성을 확보해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 도시지역의 배수펌프장의 기존 운영상의 문제점을 해결하기 위해 뉴로-퍼지모형을 구축하여 수위를 예측하고 예측된 수위를 바탕으로 펌프 운영기간 중 최고수위를 낮추면서 펌프의 반복조작을 피할 수 있는 최적 운영방법을 찾기 위해 유전자 알고리즘을 개발 및 적용하였다. 개발된 알고리즘을 마포 배수구역 내 마포, 합정, 상수, 봉원, 당인 배수펌프장에 적용하였고, 확장성 고려를 위해 심원 배수펌프장에 대해 검증하였다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 시간적 입력변수와 공간적 입력변수를 함께 고려한 실시간 수위예측 뉴로-퍼지 모형을 개발하고 펌프의 효율적인 운영을 위하여 유전자 알고리즘을 수정하여 제약조건을 반영할 수 있는 방법을 제시하여 실시간 배수펌프장 운영모형을 개발하였다.
- (2) 배수펌프장의 첨두유량 발생시점에서는 어떠한 운영기법에서

도 모든 펌프를 가동하므로 펌프장의 효과적인 운영을 위해서는 첨두유량 발생이전의 펌프 가동시점과 시간변화에 따른 양수율의 변화를 적절하게 조절하는 것이 중요하다. 이러한 펌프장의 운영은 수위를 기준으로 이루어지고 있어 정확한 수위예측이 중요하다. 따라서 펌프장의 내수위에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 예상되는 강우와 수위에 대한 교차상관분석과 자기상관분석을 실시하였다.

- (3) 뉴로-퍼지 모형을 이용한 선행시간 10분의 실시간 수위예측을 위한 최적 입력자료 조합의 선정에 대해 마포배수구역에 대해 다양한 강우, 작동 펌프의 수, 내수위, 외수위, 수문의 개폐여부를 구성하여 분석하였고 면적, 평균경사, 불투수율과 같은 공간적 입력변수를 추가로 구성하여 분석하였다. 분석 결과, 시간적 입력변수의 경우 T6, 공간적 입력변수의 경우 G8이 최적 입력자료의 조합임을 보여주었다. 즉, 현재시간을 t시간이라 했을 때, t시간의 강우, t-10시간의 강우, t시간의 내수위, t시간의 작동 펌프수(토출량), 면적, 평균경사, 불투수율을 입력자료로 선정하였다.
- (4) 벌칙유형의 유전자 알고리즘을 적용한 펌프의 운영률은 펌프 운영기간 동안의 최고수위를 낮추거나 여유고가 충분히 확보된 상태에서는 펌프의 반복적인 운전은 피함으로써 관리비를 포함한 비용절감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.
- (5) 본 연구에서 개발한 실시간 배수펌프장 운영률을 2차원 내수침수해석과 연계하여 모니터링을 실시한다면 실제 침수피해면적 저감효과를 파악할 수 있을 것으로 예상되며 더 나아가 재해정보 지도 구축에 기초자료로 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(17AWMP-B079625-04)에 의해 수행되었습니다.

References

Beven, K. J. and Kirby, M. J. (1979). "A physically based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.

Chang, F. J. and Chen, L. (1998). "Real-coded genetic algorithm for rule-based flood control reservoir management." *Water Resources Management*, Vol. 12, No. 3, pp. 185-198.

Chang, F. J., Chang, K. Y. and Chang, L. C. (2008). "Counter-propagation fuzzy-neural network for city flood control system." *Journal of Hydrology*, Vol. 358, pp. 24-34.

Chang, L. C. (2008). "Guiding rational reservoir flood operation using penalty-type genetic algorithm." *Journal of Hydrology*,

- Vol. 354, pp. 65-74.
- Chiang, Y. M., Chang, L. C., Tsai, M. J., Wang, Y. F. and Chang, F. J. (2011). "Auto-control of pumping operations in sewerage systems by rule-based fuzzy neural networks." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, pp. 185-196.
- Gen, M. and Cheng, R. (1996). "A survey of penalty techniques in genetic algorithms, evolution computation." *Proceedings of IEEE International Conference*, pp. 804-809.
- Glover, F. and Harvey, J. G. (1989). "New approaches for heuristic search: a bilateral linkage with artificial intelligence." *European Journal of Operational Research*, Vol. 39, pp. 119-130.
- Hsu, N. S. and Wei, C. C. (2007). "A multipurpose reservoir real-time operation model for flood control during typhoon invasion." *Journal of Hydrology*, Vol. 336, pp. 282-293.
- Joo, J. G., Yoo, D. G., Yang, J. M., Jung, D. H. and Kim, J. H. (2010). "Improvement and application of pump station operating system and economic analysis of the application." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 3, pp. 155-165 (in Korean).
- Kim, Y. T., Shim, J. H., Chung, J. H. and Ahn, J. C. (2004). "Application of the fuzzy models for the efficient operation of pumping station." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 4, No. 3, pp. 51-60 (in Korean).
- Kumar, D. N., Baliarsingh, F. and Raju, K. S. (2010). "Optimal reservoir operation for flood control using folded dynamic programming." *Water Resource*, Vol. 24, pp. 1045-1064.
- Lee, J.H., Lee, Y.J., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2007). "Development of a Pump Operation Rule in a Drainage Pump Station using a Real Time Control Model for Urban Drainage System." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 40, No. 11, pp. 877-886.
- Luciano, B. and Mauro, P. (2001). "Improving UML with petri nets." *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, Vol. 44, No. 4, pp. 107-119.
- Melesse, A. M., Graham, W. D. and Jordan, J. D. (2003). "Spatially distributed watershed mapping and modeling: GIS based storm runoff response and hydrograph analysis: Part 2." *Journal of Spatial Hydrology*, Vol. 3, No. 2, pp. 2-28.
- Needham, J. T., Watkins, D. W., Jay, R. L. and Nanda, S. K. (2000). "Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines rivers." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 126, No. 3, pp. 118-127.
- Nien, S. H., Chien, L. H. and Chih, C. W. (2013). "Intelligent real-time operation of a pumping station for an urban drainage system." *Journal of Hydrology*, Vol. 489, pp. 85-97.
- Niewiadomska, S. E., Malinowski, K. and Karbowski, A. (1996). "Predictive methods for real-time control of flood operation of a multireservoir system: Methodology and comparative study." *Water Resources Management*, Vol. 32, No. 9, pp. 2885-2895.
- Sarangi, A., madramootoo, C. A., Enright, P., Prasher, S. O. and Patel, R. M. (2005). "Performance evaluation of ANN and geomorphology-based models for runoff and sediment yield prediction for a Canadian watershed." *Current Science*, Vol. 89, No. 12, pp. 2022-2033.
- Seoul Metropolitan City (2009). *Report on maintenance master plan of sewer system*, Seoul, Korea.
- Song, Y. H., Park, M. J. and Lee, J. H. (2016). "Analysis on the effects of inundation mitigation according to revise the border for urban drainage system." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 1, pp. 213-220 (in Korean).
- Unver, O. I. and Mays, L. W. (1990). "Model for real-time optimal flood control operation of a reservoir system." *Water Resources Management*, Vol. 4, No. 1, pp. 21-46.
- Valeriano, O. C. S., Koike, T., Yang, K. and Yang, D. W. (2010). "Optimal dam operation during flood season using a distributed hydrological model and a heuristic algorithm." *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 580-586.
- Winsor, J. S. (1973). "Optimization model for the operation of flood control system." *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 5, pp. 1219-1226.