침두유출량 저감을 위한 도시유역 경계 및 우수관망 최적 설계

Optimal Designs of Urban Watershed Boundary and Sewer Networks to Reduce Peak Outflows

이정호* · 전환돈** · 김중훈***

Lee, Jung Ho · Jun, Hwan Don · Kim, Joong Hoon

Abstract

Although many researches have been carried out concerning the watershed division in natural areas, it has not been researched for the urban watershed division. If the boundary between two urban areas is indistinct because no natural distinction or no administrative division is between the areas, the boundary between the urban areas that have the different outlets (multi-outlet urban watershed) is determined by only designer of sewer system. The suggested urban watershed division model (UWDM) determines the watershed boundary to reduce simultaneously the peak outflows at the outlets of each watershed. Then, the UWDM determines the sewer network to reduce the peak outflow at outlet by determining the pipe connecting directions between the manholes that have the multi-possible pipe connecting directions. In the UWDM, because the modification of the sewer network changes the superposition effect of the runoff hydrographs in sewer pipes, the optimal sewer layout can reduce the peak outflow at outlet, as much as the superposition effects of the hydrographs are reduced. Therefore, the UWDM can optimize the watershed distinction in multi-outlet urban watershed by determining the connecting directions of the boundary-manholes using the genetic algorithm. The suggested model was applied to a multi-outlet urban watershed of 50.3ha, Seoul, Korea, and the watershed division of this model, the peak outflows at two outlets were decreased by approximately 15% for the design rainfall.

Key words : urban watershed, sewer network, watershed boundary, optimize, genetic algorithm

요 지

자연유역에서의 유역 분할에 관한 많은 연구가 진행되어왔음에도 불구하고, 도시유역에서의 유역 분할에 관한 연구는 이루어져 있지 않다. 도시유역간의 경계 구분에 있어서 두 개의 유역 사이에 어떤 자연적 경계 또는 행정적 경계가 존재하지 않아 그 구분이 모호한 경우, 각기 다른 유출구를 갖는 우수관망에 의한 도시유역간의 경계는 오직 우수관거시스템의 설계자에 의하여 결정된다. 본 연구에서 제안된 UWDM(Urban Watershed Division Model)은 각 유역의 유출구에서의 침두유출량을 동시에 감소시키기 위한 유역경계를 결정하게 된다. 이때, UWDM은 복수의 관거 연결 방향을 갖는 맨홀간 연결 방향을 결정함으로써 우수관거 유출구에서의 침두 유출량을 저감시키기 위한 우수관망을 결정한다. UWDM을 통한 우수관망의 변경은 관거 내 유출 수문곡선의 중첩효과를 변화시키기 때문에, 최적화된 우수관망에서의 수문곡선은 그 중첩효과가 감소된 만큼 유출구에서의 침두 유출량을 감소시킬 수 있다. 따라서 UWDM은 유역 경계상에서의 맨홀간 관거의 연결 방향을 유전자알고리즘을 이용하여 결정함으로써 인접한 도시유역간의 경계를 최적화할 수 있다. 본 연구에서 제안된 모형은 서울의 50.3 ha의 각기 다른 유출구를 갖는 인접한 두 개의 도시유역에 적용되었으며, 이 모형의 유역 구분에 의하여 두 개의 우수관망 유출구에서의 침두유출량은 약 22% 감소하는 결과를 나타냈다.

핵심용어 : 도시유역, 우수관망, 유역경계, 최적화, 유전자알고리즘

1. 서 론

현재 도시유역에서의 우수관거의 설계는 최단거리의 관거 노선 설정에 따라 최소비용의 공사비가 소모되도록 설계되고 있다. 우수관거의 최적 설계에 대한 기존의 연구들 또한 수

리학적 조건을 만족시키는 범위 내에서 최소의 비용을 위한 관거 설계에 초점을 맞추어왔다. Mays and Yen(1975) 및 Mays and Wenzel(1976)은 최소비용에 대한 우수관거의 관경과 관 경사를 결정하는 모형을 개발하였으며, Merritt and Bogan(1973) 및 Froise and Burges(1978)는 펌프장을 고려

*정회원 · 한밭대학교 토목공학과 전임강사 (E-mail : leejh@hanbat.ac.kr)

**정회원 · 서울과학기술대학교 건설공학부 조교수

***정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 교수 (교신저자)

한 우수관거 설계 모형을 개발하였다. 또한 Tekeli and Belkaya(1986)는 shortest path algorithm을 이용하여 우수관망 설계 모형을 개발하였으며, Weng et al.(2004)은 'network layout'과 'hydraulic design'의 최적화 문제를 동시에 고려할 수 있는 SSOM/LH를 개발하였다. 그러나 이러한 기존의 연구들에서 우수관망 및 관거의 설계란 고정된 유입량에 대한 통수용량을 만족시키는 범위 내에서 관경 및 관 경사에 대한 최적화 문제를 해결하는 것에 국한되었다.

그러나 김중훈 등(2009)은 관거의 노선 변경에 따른 관망 내 흐름의 변화에 관한 연구 결과를 제시한 바 있다. 이 연구에서는 현재의 도시구역 관망 노선을 임의적으로 변경시켜 그에 따른 유출구에서의 침투유출량이 저감될 수 있음을 나타내었다. 그러나 관망 노선이 임의적으로 결정되었으며, 침투유출량을 최소화할 수 있는 관망 노선의 결정에 관한 모형의 개발은 이루어지지 않았다. 반면 이정호(2010)는 유전자 알고리즘을 이용하여 우수관망에서의 유출구 침투유출량을 최소화하는 것을 목적함수로 하는 최적 노선 결정 모형을 개발하였으며, 이것은 유량 부하가 특정 노선에 집중되지 않고 적정 분배되도록 노선을 결정함에 따라서 그 결과로 나타나는 유출구에서의 침투유출량을 최소화한 관망 설계가 설계빈도를 초과하는 강우 사상에 대하여 침수 저감 효과를 가져온다는 분석 결과를 나타내었다.

본 연구에서는 김중훈 등(2009)과 이정호(2010)의 연구를 바탕으로 우수관망의 노선 결정에 있어서 유출구 침투유출량 최소화를 목적함수로 하는 우수관망 최적 설계를 기본 메커니즘으로 하였다.

도시 구역에서의 구역의 경계는 주로 자연적 경계, 구조적 경계 및 행정적 경계에 의하여 구분된다. 또한 하천, 산 등의 자연적 경계나 도로, 건물 등의 구조적 경계 혹은 행정적 경계를 통한 구역 경계의 구분이 불확실한 도시 구역에 대해서는 설계자의 판단에 의하여 구역 경계를 설정하게 된다. 그러나 구역의 경계가 불명확한 도시구역에 대해서는 각기 다른 유출구를 갖는 도시구역 간의 관계를 동시에 고려하여 최적 우수관망을 구성하여야만 한다. 즉, 하나의 구역에 대한 경계가 변화한다는 것은 인접한 구역의 경계가 변화하는 것과 같은 의미이기 때문이다. 따라서 구역 경계가 불명확한 구역에 대한 경계의 설정은 그 경계가 영향을 미치는 인접 구역에서의 흐름 양상을 동시에 고려하여 관망을 구성하여야만 한다.

따라서 본 연구에서는 이상의 개념을 고려하여 도시구역에서의 구역 경계를 결정하기 위한 새로운 모형인 Urban Watershed Division Model(UWDM)을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 UWDM은 구역 경계가 불명확한 도시구역에서의 구역간 경계 설정 및 구역별 최적 우수관망을 동시에 구성할 수 있는 모형이다. 이때 인접한 도시구역간의 경계 설정 및 구역별 우수관망의 최적 설계는 각 구역별 침투 유출량 최소화를 목적함수로 하였다.

2. 모형의 구성

UWDM은 Optimal network module과 Hydraulic design

그림 1. UWDM의 구성

module로 구성되어 있다. 다음의 그림 1은 UWDM의 기본적인 구조를 나타낸다.

UWDM에 의한 도시구역간의 경계 설정 및 우수관망 최적화를 위해서는 우선적으로 pre-processing 단계를 거쳐야 한다.

다음의 그림 2는 UWDM에서 pre-processing의 역할을 설명하기 위한 간략화된 영역을 보여주고 있다. 이 영역은 각기 다른 유출구로 연결되는 두 개의 구역으로 구분되어진다. 이때 그림 2의 구역에 대한 각각의 독립적인 구역 및 경계 구역(boundary area)이 구분되어진다. 그림 2에서 7번 및 8번 맨홀 지점에서 관거의 연결 방향을 어떻게 결정하느냐에 따라서 소유역 A와 소유역간의 구역 경계가 달라지게 된다. 이렇게 구역 간에 경계 구분에 결정적 역할을 하는 맨홀 지점들을 본 연구에서는 boundary node로, 이들의 집합을 boundary matrix로 명칭지었다. 반면, 소유역에 A에서의 1번, 3번 맨홀 지점 및 소유역 B에서의 10번, 11번 맨홀지점의 경우 각 소유역에서의 관망의 구성에 영향을 미칠 뿐 구역 경계 구분에는 영향을 미치지 않는 지점들로 이들을 복수의 관거 연결 방향성을 갖는 optional node로 명칭지었다. 이때 맨홀 지점간의 관거의 연결은 지표고가 높은 곳에서 낮은 곳으로 연결되는 것을 가정하였다. 따라서 복수의 연결 방향성을 갖는 맨홀 지점은 해당 지점 주변에 관거의 연결이 가능한 낮은 지표고의 맨홀 지점이 2개 이상 존재하는 것을 의

그림 2. Pre-Processing 가상 구역

$$B(b_{ij}) = \begin{bmatrix} b_{7,3} & b_{7,9} \\ b_{8,6} & b_{8,12} \end{bmatrix} \quad C_A(c_{ij}) = \begin{bmatrix} c_{1,2} & c_{1,4} \\ c_{3,2} & c_{3,6} \end{bmatrix} \quad C_B(c_{ij}) = \begin{bmatrix} c_{10,9} & c_{10,13} \\ c_{11,10} & c_{11,14} \end{bmatrix}$$

(a) Boundary matrix (b) Optional matrixes of each basin

그림 3. Boundary matrix 및 optional matrix

미한다. 아래의 그림 3은 두 유역간의 boundary node와 각 소유역별 optional node로 구성된 boundary matrix 및 optional matrix를 나타내며 이것은 유역의 경계 및 소유역별 우수관망의 최적화시키기 위한 결정변수가 된다.

UWDM에서 Optimal network module은 도시유역에서 각기 다른 유출구를 갖는 인접한 유역 간에 유역 경계를 설정하고 유역별 최적 우수관망을 결정하는 역할을 한다. 이때 Optimal network module의 최적화가 목적하는 바는 각 유역의 유출구에서의 침투 유출량의 감소이다. 또한 이 모듈에 의한 탐색 과정은 유역 경계의 설정과 우수관망의 설계를 동시에 고려하면서 진행되어진다. 적용된 최적화 기법은 수공학 분야에서 그 적용성이 널리 입증된 유전자알고리즘(genetic algorithm)를 이용하였으며, 이를 통한 UWDM에서의 Optimal network module의 흐름 구성은 다음의 그림 4에 나타나는 바와 같다.

여기서, C 는 optional matrix를 의미하며, B 는 boundary matrix를 의미한다. 또한 optional matrix는 맨홀 지점간 복수의 연결 가능한 방향성을 갖는 지점인 optional node로 구성된 행렬을 의미하며, boundary matrix를 구성하는 boundary node는 optional node들 중 각기 다른 인접 유역의 지점으로 연결 가능한 지점을 의미한다.

모듈의 구성상 해당 유역들에 대한 최단거리 관망이 우선적으로 결정되어지는데 이것은 최적 우수관망에서의 각 유역별 침투 유출량을 최단거리 관망에서의 유출량과 비교하도록 목적함수를 설정하였기 때문이다. 이때 각 유역별 최단거리 관망은 boundary node들을 제외한 각 유역별 optional node들에 의하여 최초로 설정되어진다. 따라서 boundary node의 연결 방향이 바뀔 때마다 해당 node는 이미 구성된 해당 유역의 최단거리 관망에 편입된다. 그러나 최단거리 관망은 최초로 boundary node를 제외하고 관망을 구성하였기 때문에 boundary node의 연결 방향이 바뀐다 하더라도 유역별 관망의 구성 형태는 바뀌지 않는다. Boundary node가 각 유역으로 편입된 후, 유역별 최단거리 관망에서의 침투 유출량은 이후 최적화된 관망에서의 침투 유출량과 비교됨으로써 그 저감효과를 고려하게 된다. 물론, boundary node의 연결 방향이 바뀔 때마다 유역별 유역 면적이 달라지므로 각 유역의

최단거리 관망에서의 침투 유출량 또한 변화한다. 또한 boundary node의 연결 방향이 변화될 때마다 Hydraulic design module은 수리학적 분석을 실시함으로써 Optimal network module의 최적화 과정에 필요한 정보를 제공한다.

Optimal network module은 아래의 식 (1)과 같은 목적함수를 갖는다. 이것은 두 개의 소유역(배수분구)으로 구성되어 있는 도시유역에 대하여 소유역별 침투 유출량의 저감 효과를 최대화하는 유역 경계 및 우수관망을 결정하는 것에 목적을 두고 있다.

$$\text{Max } Q_{obj} = [Q_A - Q_{A_{opt}}] + [Q_B - Q_{B_{opt}}] \quad (1)$$

여기서, Q_A 는 소유역 A에서의 최단거리 관망에 의한 침투 유출량이며, Q_B 는 소유역 B에서의 최단거리 관망에 의한 침투 유출량이다. 또한 $Q_{A_{opt}}$ 는 소유역 A에서의 최적 우수관망에 의한 침투 유출량이며, $Q_{B_{opt}}$ 는 소유역 B에서의 최적 우수관망에 의한 침투 유출량이다. 이때, boundary matrix, B 가 최적화 과정에서 재생산될 때마다 Q_A , Q_B , $Q_{A_{opt}}$ 및 $Q_{B_{opt}}$ 또한 변화되는 값들이다. 이것은 boundary matrix가 바뀔 때마다 소유역별 전체 지점 개수가 바뀌고 유역 면적 또한 바뀌는 것에 기인한다.

또한 최적화 과정에서 주어진 제약조건은 다음의 식 (2)와 같다.

$$Q_{A_{opt}} < Q_A \text{ and } Q_{B_{opt}} < Q_B \quad (2)$$

목적함수에 대한 최적화 과정에서 $Q_{A_{opt}}$ 는 항상 Q_A 보다 작아야 하며, $Q_{B_{opt}}$ 또한 Q_B 보다 항상 작아야 한다. 만약 어떤 한 유역에 대하여 식 (1)의 목적함수에 대한 최적화 과정을 수행함에 있어서 $Q_{A_{opt}}$ 가 Q_A 보다 큰 값으로 산정됨에도 불구하고 $Q_{B_{opt}}$ 가 Q_B 보다 매우 작게 산정됨으로써 Q_{obj} 가 최소가 되는 경우가 발생할 수 있다. 만약, 식 (2)의 제약조건이 고려되지 않았을 때 이 같은 경우 UWDM은 Q_{obj} 가 최소가 되었으므로 해당 관망 구성을 최적화된 관망으로 결정할 것이다. 그러나 이러한 경우에서의 관망은 소유역 B에서의 내수침수 위험도는 감소하였더라도 소유역 A에서의 내수침수 위험도는 증가하였기 때문에 적합한 최적 우수관망으로서 인정될 수 없다. 따라서 이상의 제약조건이 의미하는 바는 UWDM에 의한 최적 우수관망이란 대상이 되는 모든 유역에서의 내수침수 위험도를 저감시킬 수 있는 관망이라는 것이다.

Optimal network module이 하나의 우수 관망을 결정지었을 때, Hydraulic design module의 주요 역할은 설계 요건을 만족시키면서 우수 관망 내 관거의 관경 및 경사를 선택하고 궁극적으로 목적함수라는 최종 목표를 위한 연산을 수행하는 것이다. 다음의 그림 5는 Hydraulic design module의 구성도를 나타낸다.

여기서, D_{ij} 는 i 번째 지점의 j 번째 경우의 수에 대한 관경을 나타내며 s_{ij} 는 관거의 경사를 나타낸다. 각 관거는 관경의 다양한 경우의 수를 가지고 있으며 제약조건들을 만족시

그림 4. Optimal network module

그림 5. Hydraulic design module

키는 각기 다양한 경사들과 조합을 이루게 된다. 적용된 제약조건은 하수도시설기준(한국수도협회, 2005)상에 제시되어 있는 최대·최소 유속(식 (3)), 관내 수심(식 (4)) 및 매설 깊이(식 (5))가 된다.

$$0.8 \text{ m/sec} \leq V_i \leq 3.0 \text{ m/sec} \quad (3)$$

$$h_i \leq 0.8 D_i \quad (4)$$

$$d_i \geq 0.1 m \quad (5)$$

여기서, D_i 는 관경, V_i 는 관 내 유속, h_i 는 관 내 수심, d_i 는 관거의 매설 깊이를 나타낸다.

이상의 제약조건에 의하여 본 모형에 의하여 결정된 설계 사항은 관내 흐름을 적정 유속 범위에서 안정화시키며, 상부 하중 및 동수경사선에 대한 수리학적 안정성을 유지할 수 있다.

또한, 다양한 조건에 따른 수리학적 해석은 Hydraulic design module과 연계된 SWMM(Storm Water Management Model)을 통하여 이루어진다. SWMM은 도시구역에서의 우수관망 수리해석에 가장 폭넓게 이용되는 모형으로 본 연구에서는 SWMM의 dll(dynamic linking library)을 연계 구성하였다.

3. 적용 및 결과

UWDM은 서울시 노원구에 위치한 중계 배수분구에 적용되었다. 중계 배수분구는 각기 다른 유출구로 연결되는 두 개의 소유역으로 나뉘며 각 유출구는 중량천으로 연결되어있다. 전체 배수분구의 유역 면적은 50.3 ha이며 현재 구성되어 있는 관망의 총 연장은 8,709 m이다. 해당 유역에 대한 pre-processing을 통하여 획득된 데이터는 다음의 표 1에 나타내었다.

Boundary node들은 UWDM의 최적화 과정에서 각기 다른 소유역으로 연결될 때 각 소유역의 유역 면적 및 유출 용량이 변화되기 때문에 각 소유역의 침투 유출량을 저감시키는 유역의 경계 및 소유역별 최적 우수관망을 결정함에 있어서 중요한 변수로 작용된다. 따라서 UWDM은 boundary node들의 연결 방향을 변화시킴으로써 소유역간의 경계를 변화시키고, 변화된 유역 경계에 따른 소유역별 유출 변화에 대하여 최적화된 소유역별 우수관망을 결정하게 된다.

표 1. 중계 배수분구 유역 및 관망 현황

	유역 면적 (ha)	맨홀 지점 개 수	Optional node 개수	Boundary node 개수
Basin A	24.93	111	13	10
Basin B	25.37	70	7	5
Sum	50.3	181	20	15

그림 6. UWDM에 의한 유역경계 및 우수관망 구성

최적 우수관망 및 유역 경계를 결정하기 위하여 적용된 강우는 우수관거의 설계빈도에 해당하는 서울지역 10년 빈도의 강우강도 77.1 mm/hr에 대하여 지속기간 1시간을 갖는 huff 4분의 강우를 대표 강우로 설정하였다. 확률빈도의 강우강도는 서울지방 기상청 관측 48개년(1961~2008년)자료를 토대로 산정되었다. 중계 배수분구에 대하여 UWDM에 의하여 결정된 유역의 경계 및 최적 우수관망은 다음의 그림 6과 같다.

UWDM에 의하여 최적화된 우수관망 및 유역 경계에서는 소유역 A의 13개의 optional node들 중 9개 node의 연결 방향이 바뀌었으며, 소유역 B의 7개 optional node들 중 4개 node의 연결 방향이 현재의 우수관망과는 달리 연결되었다. 또한 15개의 boundary node들 중 5개의 node가 기존의 연결 방향에서 각기 다른 유역으로 연결 방향을 결정함으로써 유역간의 경계가 변화되었다. 그림 6의 (b)에서 원형의 음영으로 표시된 부분이 맨홀간 관거 연결방향을 현재와 달리 선정된 boundary node 지점을 나타낸다.

또한 UWDM에 의하여 최적화된 유역 경계 및 소유역별 우수관망 설정에 따른 각 소유역별 침투유출량 감소 효과는 표 2에서 나타내는 바와 같다. 본 연구에서는 UWDM에 의한 최적화된 우수관망과의 비교 분석을 위하여 현재 구성되

표 2, UWDM에 의한 침투유출량 감소 효과

	우수관망 유출구 침투유출량(m ³ /sec)		
	Basin A	Basin B	Sum
(1) 최단거리 우수관망	5.14	2.53	7.67
(2) 현재 우수관망	4.97	2.21	7.18
(3) 최적 우수관망	4.02	1.61	5.63
(1)-(3) (%)	1.12 (21.8%)	0.92 (36.4%)	2.04 (26.6%)
(2)-(3) (%)	0.95 (19.1%)	0.6 (27.1%)	1.55 (21.6%)

어있는 우수관망에서의 결과와 비교하였으며, 또한 기존의 최적 우수관망 연구들에서 일반적으로 비교대상이 되어온 최단거리 우수관망을 추가적으로 비교하였다.

현재의 유역 경계 및 우수관망에 대하여 UWDM에 의하여 최적화된 우수관망은 기존의 유역 경계를 변화시켰다. 변화된 유역 경계는 소유역 A의 유역 면적을 기존의 22.93 ha에서 26.04 ha로 변화시켰으며, 소유역 B의 유역 면적을 기존의 24.37 ha에서 21.26 ha로 변화시켰다. 유역 경계가 변화하는 상황에서 각 소유역별 최적의 우수관망을 구성한 결과 소유역 A에서의 침투 유출량은 4.02 m³/sec로 현재의 우수관망에 비하여 약 19%, 최단거리 관망에 비하여 약 22% 감소하였다. 또한 소유역 B에서의 최적 우수관망에 의한 침투 유출량은 1.61 m³/sec로 현재의 우수관망에 비하여 약 27% 감소하였고 최단거리 관망에 비하여 약 36% 감소하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

도시유역에서의 유역의 경계는 일반적으로 자연적·구조적 경계 및 행정적인 경계에 의하여 결정된다. 그러나 유역의 경계를 구분할 만한 요소들이 불확실한 경우에 있어서는 일반적으로 설계자의 판단에 의하여 유역이 구분되어지며, 이러한 경우 어떠한 관점에서 유역의 경계 및 우수관망을 구성하느냐에 따라서 상대적인 효과는 다르게 나타날 수밖에 없다. 일반적으로 우수관망의 설계가 최소비용을 목적으로 구성되며, 유역 경계의 설정이 불분명한 기준에 의하여 이루어지는 현재의 우수관망 설계 시스템에 대하여 본 연구에서는 도시유역에서의 내수침수 방재를 목적으로 우수관망 유출구 침투 유출량을 최소화할 수 있는 도시유역의 경계 설정 및 우수관망 최적화 모형을 개발하였다.

본 연구에서 UWDM의 개발이 의미하는 바는 다음과 같이 정리될 수 있다. 첫째, 도시유역에서의 유역 경계란 그 결과

물로서의 유역 내 우수관거 시스템을 설계하여야 하는 필요 조건이 아닌 도시유역 내 내수침수 위험도 저감을 위하여 변화될 수 있는 요소이며, 우수관거 시스템의 설계와 동시에 고려되어야 한다. 둘째, 도시유역에서의 내수침수 위험도를 저감시킬 수 있는 유역 경계의 설정 및 최적 우수관망의 설계가 가능한 UWDM은 대단위 도시유역에서의 전반적인 우수관거 시스템 설계에 유용하게 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 한국수도협회 (2005) 하수도시설기준, **환경부**, pp. 59-67.
- 김중훈, 주진걸, 전환돈, 이정호 (2009) 우수관거 흐름 제어를 위한 관망 설계에 관한 연구, **한국방재학회논문집**, 제9권 1호, pp. 1-7.
- 이정호 (2010) 우수관망 노선 결정에 따른 침투유출량 변화 분석, **한국산학기술학회논문지**, 제11권 12호, pp. 5151-5156.
- Froise, S. and Burges, S.J. (1978) Least-cost design of urban-drainage network, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 104, No. 1, pp. 75-92
- Merritt, L.B. and Bogan, R.H. (1973) Computer based optimal design of sewer system, *Journal of Envir. Engrg. Div.*, Vol. 99, No. 1, pp. 35-53.
- Mays, L.W. and Wenzel, H.G. (1976) A serial DDDP approach for optimal design of multi-level branching storm sewer systems, *Water Resources and Research*, Vol. 12, No. 5, pp. 913-917.
- Mays, L.W. and Yen, B.C. (1975) Optimal cost design of branched sewer system, *Water Resources and Research*, Vol. 11, No. 1, pp. 37-47.
- Tekeli, S. and Belkaya, H. (1986) Computerized layout generation for sanitary sewers, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 112, No. 4, pp. 500-515.
- Weng, H.T., Liaw, S.L. and Huang, W.C. (2004) Establishing an optimization model for sewer system layout with applied genetic algorithm, *Environmental Informatics Archives*, Vol. 5, No. 1, pp. 26-35.

© 논문접수일 : 11년 03월 03일
 © 심사의뢰일 : 11년 03월 04일
 © 심사완료일 : 11년 03월 11일