

도시침수 저감을 위한 최적 우수관망 설계 모형

An Optimal Sewer Layout Model to Reduce Urban Inundation

이 정 호* / 김 중 훈** / 전 환 돈***

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

Abstract

In the previous researches for storm sewer design, the flow path, pipe diameter and pipe slope were determined to minimize the construction cost. But in the sewer networks, the flows can be changed according to flow path. The current optimal sewer layout models have been focussed on satisfying the design inflow for sewer designs, whereas the models did not consider the occurrences of urban inundation from excessive rainfall events. However, in this research, the sewer networks are determined considering the superposition effect to reduce the inundation risk by controlling and distributing the inflows in sewer pipes. Then, urban inundation can be reduced for excessive rainfall events. An Optimal Sewer Layout Model (OSLM) was developed to control and distribute the inflows in sewer networks and reduce urban inundation. The OSLM uses GA (Genetic Algorithm) to solve the optimal problem for sewer network design and SWMM (Storm Water Management Model) to hydraulic analysis. This model was applied to Hagye basin with 44 ha. As the applied results, in the optimal sewer network, the peak outflow at outlet was reduced to 7.1% for the design rainfall event with 30 minutes rainfall duration versus that of current sewer network, and the inundation occurrence was reduced to 24.2% for the rainfall event with 20 years frequency and 1 hour duration.

Keywords : optimal sewer layout, inundation, superposition effect

요 지

우수관망의 최적 설계에 관한 기존의 연구 모형들은 설계강우에 대하여 관거의 연결, 관경 및 관 경사 등을 최소의 비용을 목적으로 최적화하여 왔다. 그런데 우수관망에서의 관거 내의 흐름은 관경, 관 경사와 특히 관망의 구성 형태에 따라서 크게 달라진다. 기존의 최적 우수관망 설계 모형들은 설계유량을 만족시키는 것에 국한되었으며, 설계기준을 초과하는 강우에 따른 침수의 발생은 관망의 설계에 어떠한 고려도 되지 않았다. 본 연구에서는 우수관망을 구성함에 있어서 관거 내 흐름을 분산시키고 제어함을 목적으로 한다. 이것은 관망 구성에 따른 관거 내 흐름의 중첩효과를 제어함으로써 가능하며, 이러한 흐름의 제어를 통하여 설계기준을 초과하는 강우에 대해서 우수관망에서의 내수침수 발생을 저감될 수 있다. 본 연구에의 최적 우수관망 설계 모형 (Optimal Sewer Layout Model, OSLM)은 내수침수 발생을 저감시키기 위해 흐름의 중첩효과를 고려하여 관거 내 흐름을 분산시키고 제어하기 위하여 개발되었다. 이 모형은 최적화를 위하여 유전자알고리즘 (Genetic Algorithm, GA)를 이용하였으며, 수리학적 분석을 위하여 SWMM (Storm Water Management Model)을 연계하였다. 모형의 적용은 유역면적 44 ha의 서울시 하계 배수분구에 이루어졌으며, 현재의 우수관망 구성에

* 한밭대학교 토목공학과 조교수 (e-mail: leejh@hanbat.ac.kr)

Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanbat National University, Daejeon, Korea.

** 고려대학교 건축사회환경공학과 교수 (e-mail: jaykim@korea.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea.

*** 교신저자, 서울과학기술대학교 건설공학부 조교수 (e-mail: hwjun@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author, Assistant Professor, School of Civil Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, Korea.

대하여 도출된 최적 우수관망에서는 지속기간 30분의 설계강우에 대하여 7.1%의 유출구 침투유출량 감소와 20년 빈도의 지속기간 1시간 초과강우에 대하여 24.2%의 침수 발생량 저감 효과를 나타내었다.

핵심용어 : 최적우수관망설계, 내수침수, 중첩효과

1. 서론

도시구역에서의 우수관거 시스템은 강우에 의한 지표 유출을 수집하여 빗물펌프장 및 하천으로 이송함으로써 원활한 내수 배제를 목적으로 한다. 그러나 근래 들어 빈번히 발생하는 국지성 집중호우는 단시간 내 많은 강우량을 동반하므로 우수관거의 통수능력을 초과함으로써 내수침수 피해를 유발하고 있다. 또한 도시화에 따른 불투수면적의 증가는 유출량을 증가시킬 뿐만 아니라 도달시간의 감소로 침투 유출량을 증가시켜 도시구역에서의 침수피해 발생 위험을 가중시키고 있다.

현재 도시구역에서의 우수관거의 설계는 최단거리의 관거 노선 설정 및 최소비용의 공사비가 소모되도록 설계되고 있다. 즉, 구역 내 맨홀의 위치를 설정하고 맨홀 간 연결 노선을 설정한 뒤 강우-유출 관계를 분석하여 맨홀별 유입량을 산정한 후 맨홀 간 관거의 경사 및 관경을 설계하는 것이 일반적이다. 우수관거의 최적 설계에 관한 기존의 연구들 또한 수리학적 조건을 만족시키는 범위 내에서 설계강우량에 대하여 최소의 비용을 위한 관거 설계에 초점을 맞추어 왔다.

우수관거의 제원에 관한 최적설계에 있어서 Mays and Yen (1975) 및 Mays and Wenzel (1976)은 맨홀간 연결관에 대한 최소비용의 관경 및 경사 결정에 DDDP (Discrete Differential Dynamic Programming)을 이용한 바 있으며, Merritt and Bogan (1973) 및 Froise and Burges (1978)은 관경 및 관 경사와 함께 펌프장의 규모 및 운영비용을 추가로 고려한 최적 설계에 관한 연구를 수행한 바 있다. 또한 Yen et al. (1976, 1984) 및 Cheng (1982)은 주어진 관망 노선에 대하여 Manning's formula를 통한 관내 흐름 해석과 DDDP에 의한 최적화를 수행하는 ILSD-1 (Illinois Least-Cost Sewer-System Design Model)의 개발 및 적용 예를 보여주었으며, Nough (1987)은 ILSD-1에 위험도 및 불확실성 분석을 추가한 ILSD-2에 대한 적용 및 분석에 관한 연구를 수행하였다.

우수관망의 최적 노선 결정에 관한 연구에 있어서 Tekeli and Belkaya (1986)는 맨홀 간 연결방향의 설정에 있어서 standard shortest path algorithm을 이용한 LGA (Layout Generation Algorithm)을 개발한 바 있으며, Weng et al. (2004)은 shortest path algorithm에 의하여 맨홀 간 연결

방향을 설정하고 설정된 연결 관로에 대하여 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm, GA)을 이용한 최소비용의 관경 및 관 경사를 설정하는 모형을 개발하였다.

그러나 기존의 연구들에서 관망의 설계는 최소비용을 목적함수로 국한시켰으며, 이때 관거 내 흐름이란 관거 설계를 위한 조건일 뿐 관거 설계에 따른 결과로서 고려되지는 않았다. 즉, 우수관망의 설계에 있어서 관망 노선의 변경에 따라서 달라지는 관내 흐름의 변화 영향에 대한 고려는 이루어지지 않았다. 그러나 김중훈 등 (2009)은 관거의 노선 변경에 따른 관망 내 흐름의 변화에 관한 연구 결과에서 현재의 도시구역 관망 노선을 임의적으로 변경시켜 그에 따른 유출구에서의 침투유출량이 저감될 수 있음을 나타내었다. 그러나 해당 연구에서는 관망 노선이 임의적으로 결정되었으며, 침투유출량 최소화를 목적함수로 하는 최적화 모형의 개발은 이루어지지 않았다. 반면 이정호 (2010)는 유전자 알고리즘을 이용하여 우수관망에서의 유출구 침투유출량을 최소화하는 것을 목적함수로 하는 최적 노선 결정 모형을 개발하였으며, 침투유출량을 최소화한 관망 설계가 설계빈도를 초과하는 강우사상에 대하여 침수 저감 효과를 가져오는 분석 결과를 나타내었다. 그러나 해당 연구에서는 관경 및 관 경사가 고정되어있는 가상의 관망에 대하여 노선 결정만을 최적화하는 것에 국한되었으며, 따라서 관망 노선의 변경 과정에서 동시에 이루어져야할 관경 및 관 경사의 결정이 이루어지지 않는 한계를 가지고 있다. 따라서 이정호 (2010)의 연구에서는 최적화 모형이 가상 관망에 대한 적용에 국한되어 실제 도시구역에 대한 검토가 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 김중훈 등 (2009) 및 이정호 (2010)의 연구결과를 바탕으로 우수관망에서의 관내 흐름의 분산효과를 최대화하여 유출구 침투유출량을 최소화하는 것을 목적함수로 하는 우수관망 최적 설계 모형인 OSLM (Optimal Sewer Layout Model)을 개발하였다. OSLM은 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화 문제를 해결하며, 이때 결정되는 사항은 관망 노선, 관경 및 관 경사가 된다. 기존의 김중훈 등 (2009) 및 이정호 (2010)의 연구에서 개발된 모형과 달리 OSLM은 우수관망의 노선 변경과 함께 관경 및 관 경사를 동시에 결정해주는 특징을 가지고 있으며, 따라서 도시구역에서 실제 관망의 최적 설계가 가능하도록 하였다.

본 모형은 수리학적 해석을 위하여 SWMM (Storm Water Management Model) DLL을 연계 구성하였으며, 개발된 모형은 실제의 도시 유역에 적용되어 초과강우사상에 대한 침수 발생 저감 효과를 검증하였다.

2. 유출수문곡선의 중첩 효과

우수관망 내 어떤 한 지점에서의 합성유출수문곡선은 상류 관거로 유입된 유입수문곡선의 합성에 의하여 형성된다. 따라서 우수관거의 관망 구성이 변화한다면 어떤 한 지점에서의 합성수문곡선 또한 변하게 되며, 또한 이것은 상류의 맨홀 지점들 간 관거의 연결 방향이 변하게 되면 상류로부터 유입된 유량이 하류 유출구에 도달하는 시간이 달라짐을 의미한다. 이러한 이유로 인하여 관망이 어떻게 구성되느냐에 따라서 각 지점으로 유입된 수문곡선의 첨두치에 대한 중첩효과 (superposition effect)가 달라지며, 관망 구성을 통한 첨두 유출량의 조절이 어느 정도 가능하게 된다. 또한 첨두유출량의 제어는 바로 우수관망 내 흐름들에 대한 중첩효과의 제어를 의미하므로 이것은 관망 구성에 따른 전체 우수관망 내 각 지점별 유입량의 분배를 통해서 가능하다 (김중훈 등, 2009).

다음의 Figs. 1 and 2는 김중훈 등 (2009)의 연구에 수록된 관망 노선 변경에 따른 수문곡선의 중첩효과와 그 결과로서 나타나는 유출구 첨두유출량의 변화를 설명하는 그림이다. Fig. 1에서 연결 관거를 통한 우수의 이동 시간은 단위시간으로 동일하다고 가정하고, Fig. 1(c)의 동일한 단위 수문곡선이 모든 지점으로 동일하게 유입된다

고 가정하였다. 이러한 경우 관망 노선이 달라짐에 따라서 Fig. 2와 같이 유출구 첨두유출량은 달라지게 된다.

본 연구에서는 이상의 연구 결과를 바탕으로 최적화 기법을 이용하여 관거 노선 변경에 따른 흐름의 중첩효과 변화에 기인하여 전체 관망내의 흐름 분산을 통한 유출구 첨두유출량을 최소화하는 우수관망 최적 설계 모형을 개발하였다.

3. 최적 우수관망 설계 모형

본 연구에서 개발된 최적 우수관망 설계 모형인 OSLM (Optimal Sewer Layout Model)은 Optimal network module과 Hydraulic design module로 구성되어있다. 다음의 Fig. 3은 OSLM에서의 최적 우수관망 설계 과정을 보여준다.

여기서 pre-processing에서는 유역 내 맨홀들의 지점 (node)들을 지정하고 그 좌표표를 수집하게 된다. 이 과정에서 가장 중요한 역할은 복수의 연결 가능한 방향성을 가지고 있는 맨홀 지점들을 추출해내는 것이다. 본 연구에서는 이러한 맨홀 지점들을 'optional node'라고 명칭을 붙였으며, 이 과정에서 optional node들로 이루어진 optional matrix를 구성하게 되는데 이것은 optimal network module에서 최적화 과정에서 결정변수 역할을 하게 된다.

Optimal network module은 pre-processing에서 획득된 optional matrix를 이용하여 생성 가능한 관망들의 case 들을 계속적으로 재생산하고, 그 과정에서 GA를 이용하여 최적화된 관망을 선택하도록 구성되어있다. 여기서, 매

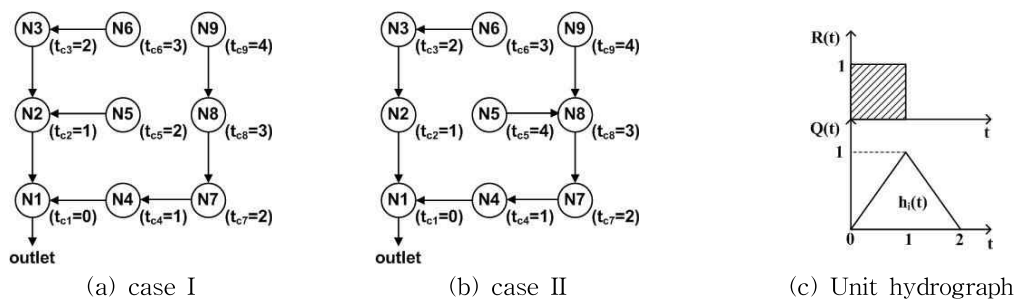


Fig. 1. Example of a Sewer Network (Kim et al., 2009)

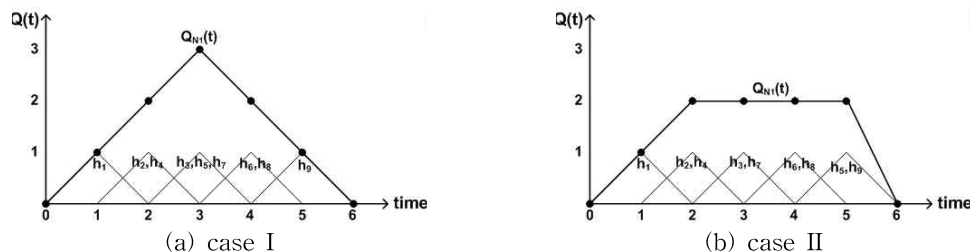


Fig. 2. Composite Hydrograph at Outlet (Kim et al., 2009)

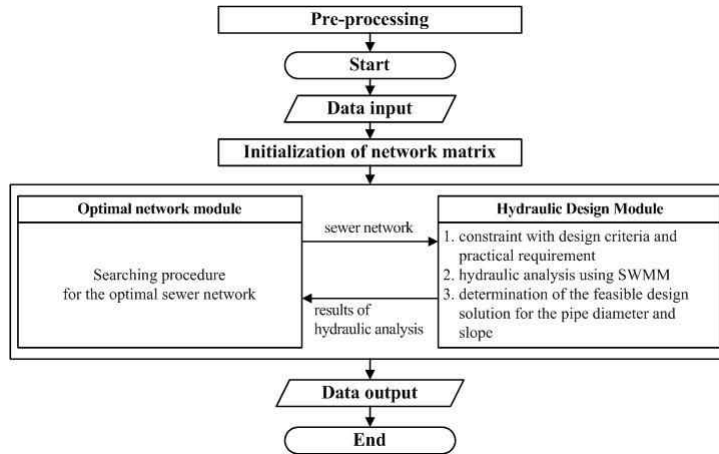


Fig. 3. Flow Chart of the OSLM

번 재생산되는 관망들에 대한 정보는 Hydraulic design module로 입력되어 수리학적 분석을 수행하게 된다. 또한 Optimal network module은 Hydraulic design module로부터 얻어진 수리학적 분석 결과를 이용하여 주어진 목적 함수를 만족시키기 위한 우수관망 최적화 과정을 수행하게 된다.

Optimal network module에서 생산되는 관망 case들은 수리학적 분석을 위하여 Hydraulic design module로 입력되어지며, Hydraulic design module은 각 관망 case들에 대하여 전체 관거 시스템에서의 수리학적 조건들(최대·최소 유속, 관 내 수심 등)에 대한 만족 여부를 분석하며, 수리학적 조건들을 만족하는 관경 및 관 경사를 결정한다. 또한 주어진 관망 case에 대하여 유출구에서의 침투 유출량에 대한 결과 값을 Optimal network module에 전달함으로써 최적화 과정의 계속적인 수행이 가능하도록 한다. Hydraulic design module에서 수리·수문학적 분석은 대표적 도시유출 모형인 SWMM (Storm Water Management Model)의 연계 구성을 통하여 가능하다.

3.1 Pre-processing

맨홀 지점간의 관거의 연결은 일반적으로 높은 지표고의 지점으로부터 낮은 지표고의 지점으로 연결되어진다. 따라서 어떤 지점들은 복수의 연결 가능한 방향성을 갖게 되는데 이 지점들의 가능한 연결 방향들이 최적 우수관망 설계를 위한 결정 변수들이 되며, 이러한 맨홀 지점들을 이정호 (2010)의 연구에서는 'optional node'로 명칭지었다.

이정호 (2010)의 연구에서는 다음의 Figs. 4 and 5의 그림을 예로 나타내었다. Fig. 4는 pre-processing을 설명하기 위한 예로서 여기서, 지점 1과 지점 3은 복수의 연결 가능한 방향성을 갖는 optional node이다. Fig. 4의 예에서 전체 지점들에 대한 network matrix, M 은 다음의 Fig. 5

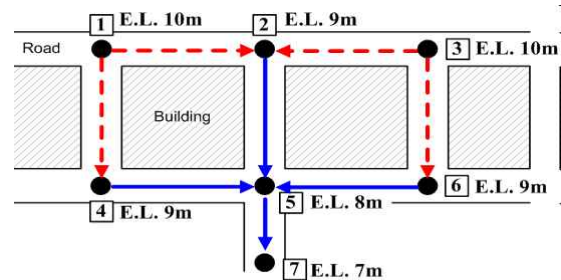


Fig. 4. Selection of Possible Connections between Nodes in Example Map (Lee, 2010)

$$M(m_{ij}) = \begin{matrix} & i \backslash j & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \end{matrix} \rightarrow C(c_{ij}) = \begin{matrix} c_{1,2} & c_{1,4} \\ c_{3,2} & c_{3,6} \end{matrix}$$

Fig. 5. Network Matrix for Pipe Connection in Example Map (Lee, 2010)

와 같이 구성된다. 또한, optional matrix (C)가 network matrix (M)로부터 추출되며 optional matrix는 optional node (c_{ij})들로 구성되어진다.

Network matrix (M)에서 그 구성 요소인 m_{ij} 가 1로 나타내진 것은 i 지점이 j 지점으로 연결 가능함을 의미한다. 따라서 network matrix에서 각 i 지점에 대한 모든 열의 총 합이 2 이상인 경우는 해당 지점의 복수의 연결 가능한 방향성을 갖는 optional node임을 의미한다. 또한 network matrix상의 optional node들은 optional matrix (C)의 구성 요소인 c_{ij} 가 된다.

이상과 같이 pre-processing에서 획득된 network matrix 및 optional matrix에 대한 정보는 Optimal network

module로 제공되며, Optimal network module은 optional matrix를 이용하여 최적화 문제를 해결하는 과정을 진행한다.

3.2 Optimal network module

본 연구에서 개발된 모형은 GA를 사용하였으며 Fig. 6은 Optimal network module의 흐름도를 나타낸다. 여기서, optional matrix C 는 pre-processing으로부터 얻어지며, 이것은 GA의 최적화 과정에서 재생산되어진다. 전체 관거에 대한 network matrix는 optional matrix가 재생산될 때마다 수정되어지며 이것은 Hydraulic design module의 입력 자료로서 이용된다. Hydraulic design module은 주어진 관망에 대하여 수리·수문학적 분석을 수행하고 그 결과를 다시 optimal network module에 제공한다. 이렇게 산정된 결과 값은 optimal network module에 의하여 적합도를 평가하게 되며 만족하는 조건에 도달하면 최적화 과정을 종료하게 된다.

우수관망 최적설계에 있어서 최소비용을 목적함수로 하는 기존의 연구들과는 달리, OSLM에서는 Eq. (1)과 같이 우수관망 유출구에서의 침투유출량 최소를 목적함수로 한다. 이것은 전체 관망 내 흐름의 적절한 분산의 결과로 나타나는 것이 유출구에서의 침투유출량이며 이것이 감소

됨으로써 초과 강우사상에 따른 관망 내 유량 부하가 적절히 분산되어 침수 발생을 저감시킬 수 있기 때문이다.

$$\text{Min } Q_{peak} = Q_{peak}[C, D, S] \quad (1)$$

위 식에서 Q_{peak} 는 유출구에서의 침투 유출량이며, 이 목적함수는 C, D 및 S 의 조합들 중 최적 해를 찾게 된다. 여기서 C 는 optional node들로 구성된 Optional matrix를 나타내며, D 는 전체 우수관망에 대한 관경의 조합을 나타내고, S 는 경사에 대한 조합을 나타낸다.

3.3 Hydraulic design module

Optimal network module이 하나의 우수 관망을 결정 지었을 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 Fig. 7은 Hydraulic design module의 구성도를 나타내고 있다. 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 만족시키는 각기 다양한 경사들과 조합을 이루게 된다.

우수관망에 대한 network matrix는 Optimal network module에 의하여 결정되어지며, Hydraulic design module은 우수관망의 각 case들에 대한 적정 관경 및 관 경사를 결정하고 수리학적 분석에 의한 결과를 제시하게 된다. 또한, Hydraulic design module은 SWMM 5.0 DLL과 연계되어 수리학적 분석을 수행하며 그 결과는 Optimal network module로 제공되며, 이것을 통하여 Optimal network module은 적합도의 판정 및 다음 세대의 우수관망 개체를 재생산 하게 된다.

이때 적정 관경 및 관 경사를 결정하기 위한 하수도시설기준 (한국상하수도협회, 2005)상의 조건은 최대·최소 유속 (Eq. (2)), 관내 수심 (Eq. (3)) 및 매설 깊이 (Eq. (4))가 된다.

$$0.8 \text{ m/sec} \leq V_i \leq 3.0 \text{ m/sec} \quad (2)$$

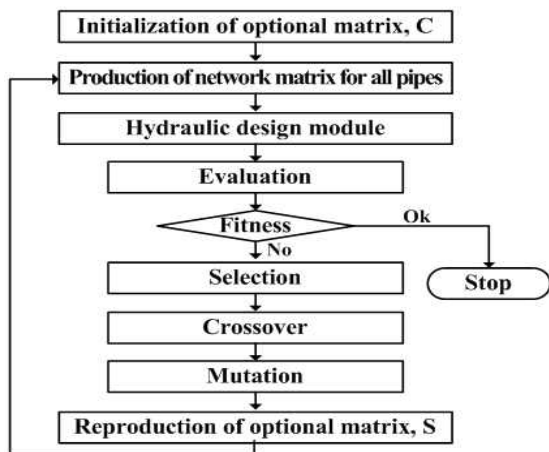


Fig. 6. Optimal Network Module

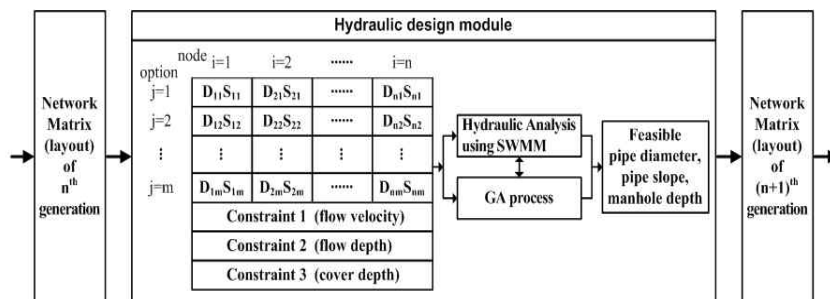


Fig. 7. Flow Chart of the Hydraulic Design Module

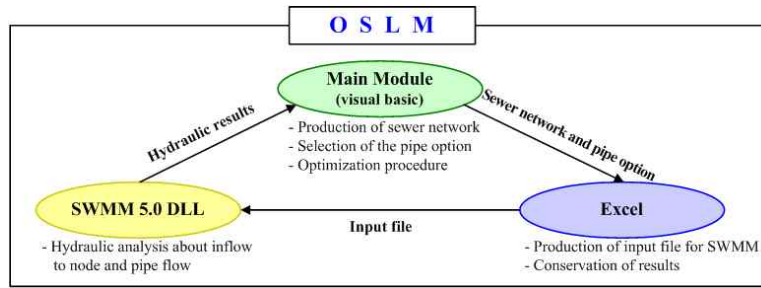


Fig. 8. The Relationship between OSLM and SWMM

$$h_i \leq 0.8 D_i \quad (3)$$

$$d_i \geq 1.0 m \quad (4)$$

여기서, i 번째 맨홀 지점의 연결 관거에 대하여 D_i 는 관경, V_i 는 관 내 유속, h_i 는 관 내 수심, d_i 는 관거의 매설 깊이를 나타낸다.

Fig. 8은 OSLM과 SWMM간의 연계 및 excel 연계 구성을 나타낸다. Visual basic으로 작성된 Main Module (Optimal network module, Hydraulic design module)로부터 생성된 network matrix, 관거 제원 등의 데이터는 excel을 통하여 SWMM의 입력 자료로 재생성되고 SWMM은 입력된 자료를 바탕으로 수리학적 분석을 실시하여 그 결과를 다시 Main Module에 제공하게 된다.

4. 적용 및 결과

본 연구에서 적용된 도시구역은 서울시에 위치한 하계 배수분구로서 전체 구역 면적은 44 ha이며, 맨홀 지점의 개수는 총 167개로서 이중 32개 지점이 복수의 연결 가능한 방향성을 가지고 있는 optional node이다. 즉, pre-processing 단계를 통하여 해당 맨홀 지점의 지표고보다 상대적으로 낮은 지표고를 갖는 주변부 맨홀 지점이 2개 이상으로 파악된 지점들을 optional node로 선정하였다. optional node는 지표고를 기준으로 관거를 연결할 때 연결 가능한 방향이 2개 이상인 경우를 나타내며, 이것은 관거 노선을 결정하는 일반적인 기준에 해당한다. 다만, 지장물 등에 의하여 부득이 관거 노선을 지표 경사에 역방

향으로 결정하는 경우가 있으나, 본 연구에서는 이러한 특수한 상황은 배제하였다. 따라서 생성 가능한 관망의 경우의 수는 약 43억 ($2 \times 11_{32} = 4.3 \times 10^9$)개이다.

최적 우수관망을 찾기 위하여 적용된 강우사상들은 10년 빈도의 huff 1, 2, 3 및 4 분위와 지속기간 30분, 1시간 및 2시간에 해당한다. 다음의 Table 1은 지속기간별 강우 강도를 나타낸다.

또한 본 연구에서는 설계빈도 10년을 기준으로 한 우수관망의 설계에 있어서 기존의 우수관망과 달리 유출구 침투유출량을 최소화하는 관망의 설계가 설계빈도를 초과하는 호우 발생 시 침수 발생량을 저감시킬 수 있음을 검증하고자 한다. 따라서 설계빈도를 초과하는 강우에 대한 내수침수 저감 효과를 검증하기 위하여 재현기간 20년, 30년 및 50년의 강우들에 대하여 강우지속기간 1시간, 2시간 및 3시간의 huff 4분위 강우사상들을 해당 구역에 적용하였다. 적용된 초과 강우사상들의 빈도별 강우강도는 다음의 Table 2와 같다.

다음의 Fig. 9는 해당 구역에 대한 현재의 우수관망 및 optional node들을 나타내고 있다. 여기서 화살표는 각 지점별 관거 연결 방향을 나타내며, 숫자가 기입된 원형의 지점들은 복수의 연결 가능한 방향성을 갖는 optional node를 나타낸다. 또한 optional node에 접해있는 삼각형 형상은 연결 가능한 방향을 나타내고 있다. 또한 Fig. 10은 OSLM에 의한 유출구 최소 침투유출량의 최적 관망 구성을 나타내며, 음영으로 표현된 총 17개 지점에서 현재와는 관거의 연결 방향을 달리하였다.

OSLM에 의하여 설계빈도의 지속시간별 각 강우시간

Table 1. Rainfall Intensity of Design Frequency

Duration	30 min.	1 hr	2 hr
Rainfall intensity	96.8 mm/h	77.1 mm/h	55.2 mm/h

Table 2. Rainfall Intensity of Each Frequency

Frequency	20 years	30 years	50 years
Rainfall intensity	88.2 mm/hr	94.5 mm/hr	102.4 mm/hr

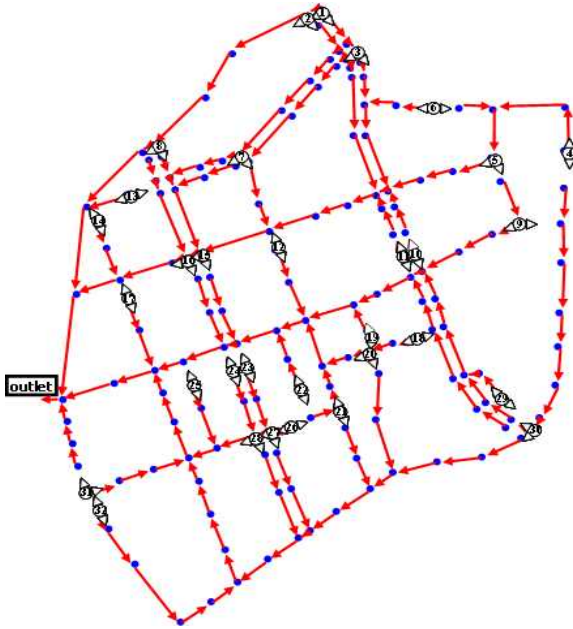


Fig. 9. Current Sewer Network in Hagye Basin

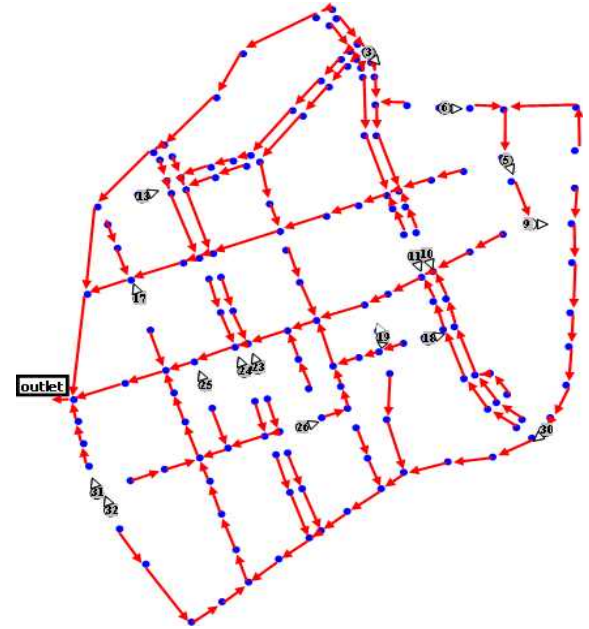


Fig. 10. Optimal Sewer Network in Hagye Basin

Table 3. Comparison of Results for Hagye Basin

Rainfall duration	Rainfall intensity	Huff distribution	Peak outflows (m^3/sec)		Reduction of peak outflow (m^3/sec)
			Current layout	Optimal layout	
0.5 hr	96.8 mm/hr	1 st	2.77	2.45	0.33 (11.8%)
		2 nd	3.02	2.65	0.38 (12.5%)
		3 rd	3.45	2.97	0.48 (14.0%)
		4 th	3.33	2.82	0.51 (15.3%)
1 hr	77.1 mm/hr	1 st	4.42	3.96	0.46 (10.4%)
		2 nd	5.12	4.77	0.34 (6.7%)
		3 rd	5.85	5.48	0.36 (6.2%)
		4 th	5.48	5.05	0.43 (7.8%)
2 hr	55.2 mm/hr	1 st	6.14	5.87	0.27 (4.3%)
		2 nd	6.44	6.26	0.18 (2.8%)
		3 rd	7.03	6.80	0.23 (3.3%)
		4 th	7.34	7.00	0.34 (4.6%)

분포에 해당하는 설계강우에 대하여 유출구에서의 침투 유출량이 최소가 되는 관망 구성을 탐색한 결과 모든 적용 강우사상들에 대하여 하나의 관망 구성이 최적 해로서 탐색되었다. 따라서 이 같은 결과는 관망의 구성에 있어서 침투유출량을 저감시키는 요인은 관망 내에서의 흐름의 구조적인 분배에 의한 것임을 나타낸다. 즉, 강우의 형상에 따른 관망 내에서의 부분적 흐름의 지체에 의한 인위적인 침투유출량의 저감이 아닌 흐름의 중첩을 최소화하고자 하는 관망의 구조적 연결에 의한 흐름의 분산이 침투유출량 저감에 직접적인 효과를 가져올 수 있다는 것이다. 적용 유역에 대한 현재의 관망 및 최적화된 관망에 대한 침투유출량의 결과 비교는 다음의

Table 3과 같다.

Table 3에서 변화된 우수관망에서의 침투유출량은 현재 구성된 관망에 비하여 크게는 15.3%, 작게는 2.8% 감소됨을 보여주고 있다. 비록 강우의 지속기간이 늘어남에 따라서 침투유출량의 감소 비율은 적어지는 경향을 나타내고 있으나, 이것은 강우의 형상 자체가 지속기간에 비례하여 강우의 침투치를 중심으로 양 옆으로 늘어지는 경향에 의한 것이다. 반면, 도시유역에서 빈번히 발생하는 국지성 집중호우는 단시간 내에 높은 강도의 강우를 동반하는 특징을 가지고 있으므로 이러한 경향의 강우에 대해서는 변화된 관망 구성을 통하여 높은 침투유출량 저감 효과를 나타낼 수 있으며, 또한 그 감소 비율이 비록 크지 않다 하더

Table 4. Overflow Volumes in Current and Optimal Sewer Layouts

Frequency	Rainfall duration	Overflow volumes (m^3)		
		Current layout	Optimal layout	Reduction
20 years	1 hr	428	325	103 (24.1%)
	2 hr	2,942	2,643	299 (10.2%)
	3 hr	5,295	4,652	643 (12.1%)
30 years	1 hr	911	845	66 (7.2%)
	2 hr	4,106	3,658	448 (10.9%)
	3 hr	6,880	6,286	594 (8.6%)
50 years	1 hr	1,690	1,443	247 (14.6%)
	2 hr	6,006	5,539	467 (7.8%)
	3 hr	9,612	9,098	514 (5.3%)

Table 5. Excessive Rainfall Event (Sept., 21, 2010)

Time	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
Rainfall (mm)	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.5	0.0	1.0	1.0	2.5	15.0	67.0
Time	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
Rainfall (mm)	71.0	60.5	26.0	7.0	0.0	4.0	1.5	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 6. Overflow Volumes for the Excessive Rainfall Event (Sept., 21, 2010)

Date	Overflow volumes (m^3)		
	Current layout	Optimal layout	Reduction
Sept., 21, 2010	22,423	17,653	4,770 (21.3%)

라도 유출구에서의 침투유출량의 감소는 우수 관망 시스템에서 전체적인 유출 부하량의 감소로 이어짐으로써 시스템 전반에서의 안전성 증대의 효과를 가져 올 수 있다.

설계빈도를 초과하는 강우에 대한 내수침수 현상을 모의하기 위하여 재현기간 20년, 30년 및 50년의 강우들에 대하여 강우지속기간 1시간, 2시간 및 3시간의 Huff 4분위 강우사상들을 해당 유역에 적용한 결과는 다음의 Table 4에 나타나는 바와 같다.

본 연구에서는 또한 설계빈도를 초과하는 실강우사상에 대한 최적화된 관망의 내수침수 저감효과를 검증하기 위하여 2010년 9월 21일 수도권을 중심으로 발생하여 광화문 일대에 심각한 침수피해를 발생시켰던 당시의 호우사상을 적용시켜 보았다. 당시의 호우는 21일 하루 동안 총 강우량 259.4 mm를 기록하였으며, 이때의 호우사상에 대한 재현기간은 100~200년 (유철상, 2011)에 해당한다고 한다. 본 연구에서 적용된 당시 강우사상은 서울기상

청의 관측값을 이용하였으며 다음의 Table 5와 같다. 또한 적용 결과는 Table 6과 같으며, 분석 결과 현재의 관망 대비 최적화된 관망에서의 침수 발생량 저감 비율은 약 21%에 해당하는 것으로 나타났다.

이상에서와 같이 변화된 우수관망에서의 설계빈도를 초과하는 강우사상에 따른 맨홀지점들에서의 월류 발생량은 현재의 관망 구성에 비하여 현격히 감소하는 모의 결과를 나타냈으며, 이것은 전체 관망에서의 흐름을 분산시킨 결과로 나타나는 유출구 침투유출량의 감소가 초과 강우사상에 따른 내수침수 발생 저감 효과로 이어지고 있음을 알 수 있다. 또한 유출구에서의 침투유출량 감소는 내수침수 저감 효과 이외에 유역의 출구 저지대에 일반적으로 위치하는 빗물펌프장에 대한 부하량의 저감으로 인한 펌프 용량 및 운영상의 효과도 가져올 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

우수관망 최적 설계에 관한 기존의 연구들은 최소비용의 관망 노선 및 제원 결정에 국한되어 왔으며, 이러한 기존 연구들은 관내 유량 해석은 입력 자료로서 주어지거나 또는 관경 및 경사의 설정에 따른 출력 결과로서만 고려되었다. 이것은 맨홀간 연결 경로의 설정에 관한 문제와 개별된 대상이었으며, 관망 구성에 따른 흐름의 변화는 모두 비용과의 연계상에서만 고려되었다.

그러나 본 연구에서는 맨홀간 연결경로의 설정에 따라 관내 흐름이 변화되며, 유역 내 전체 우수관거에서 상대적으로 유입량 부하가 높은 관거에 대하여 인근 관거로 유입량을 분산시킬 경우 하단부의 관내 유입량은 대체적으로 저감되어 유출구 침투유출량의 감소와 이로 인한 내수침수 저감 효과를 가져 올 수 있음을 나타내었다. 따라서 이러한 목적 하에 최적의 우수관망을 설계하기 위한 모형을 개발하였으며, 이에 대한 실제 도시유역에의 적용을 통하여 그 효과를 검증하였다.

본 연구는 도시유역의 우수관망에서의 관망 내 흐름의 구조적인 분배에 의하여 유출구의 침투유출량 및 내수침수 위험성이 저감될 수 있음을 증명하였으며, 이것을 최적화할 수 있는 설계 모형의 개발하였다는 것에 가장 큰 의의를 둘 수 있다. 다만, 도시유역에서의 침수 저감의 가장 큰 효과는 도심지 내 저류지의 설치에 의할 수 있으며, 또한 관망의 노선 변경 이외에 관경 및 관 경사의 조절에 의한 효과 또한 가능할 것이다. 그러나 본 연구에서는 이러한 모든 내수배제시스템의 침수위험 저감 방안들과 더불어 그 효과를 증대시킬 수 있는 새로운 내수침수 저감 방안으로서 관망의 최적 노선 선정이라는 새로운 설계 개념을 제안하였다는 것에 주목할 수 있다.

아울러, 이상의 연구 결과는 최근의 집중호우로 인하여 도시유역에서 그 피해의 심각성이 대두되고 이에 대한 침수 방재 연구의 필요성에 부합되는 것으로서 향후 지속적인 연구가 필요하다. 본 연구를 바탕으로 한 추후 연구로는 다양한 목적함수의 적용에 따른 침수저감 효과의 최대화가 필요하며, 아울러 유역의 출구에 우수지 및 빗물펌프장이 계획될 경우에는 그 시설 규모 및 운영 기준에 따라서 관망의 최적 설계가 달라질 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

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

의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 한국상하수도협회 (2005). 하수도시설기준. 환경부, pp. 59-67.
- 김중훈, 주진걸, 전환돈, 이정호 (2009). “우수관거 흐름 제어를 위한 관망 설계에 관한 연구.” **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제9권, 제1호, pp. 1-7.
- 유철상 (2011). “2010년 9월 21일 호우사상의 재현기간은 얼마인가?” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제44권, 제1호, pp. 67-72.
- 이정호 (2010). “우수관망 노선 결정에 따른 침투유출량 변화 분석.” **한국산학기술학회논문지**, 한국산학기술학회, 제11권, 제12호, pp. 5151-5156.
- Cheng, S.T. (1982). “Detention storage optimization in least-cost sewer system design.” *Urban stormwater quality, management and planning*, Water Resources Publ., Littleton, Colo.
- Froise, S., and Burges, S.J. (1978). “Least-cost design of urban-drainage network.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 104, No. 1, pp. 75-92.
- 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.
- Merritt, L.B., and Bogan, R.H. (1973). “Computer based optimal design of sewer system.” *J. Envir. Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 99, No. 1, pp. 35-53.
- Nough, M. (1987). “Storm sewer design sensitivity analysis using ILSD-2 Model.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 113, No. 1, pp. 151-158.
- Tekeli, S., and Belkaya, H. (1986). “Computerized layout generation for sanitary sewers.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 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.

Yen, B.C., Cheng, S.T., Jun, B.H., Voorhees, M.L., Wenzel, H.G., and Mays, L.W. (1984). Illinois least-cost sewer system design model: ILSD-1 & 2 user's guide. Research Report No. 188, Water Resour. Ctr., Univ. of Illinois, Urbana-champaign, Ill.

Yen, B.C., Wenzel, H.G., Mays, L.W., and Tang, W.H.

(1976). Advanced methodologies for design of storm sewer systems. Research Report No. 112, Water Resour. Ctr., Univ. of Illinois, Urbana-champaign, Ill.

논문번호: 11-023	접수: 2011.02.21
수정일자: 2011.08.29/09.06	심사완료: 2011.09.06