

# 도시우수관망 설계의 최적화 방안연구

장석환\*, 전병호\*\*, 김민규\*\*\*, 박상우\*\*\*\*, 김상한\*\*\*\*\*

## 1. 서 론

도시 우수 시스템은 유출 추정과 관망설계부분으로 크게 나눌 수 있다. 유출해석분야는 많은 수문학자들의 관심거리였고 실제로 많은 연구가 진행되어 강우-유출 해석 모형들은 여러 가지가 있다. 그러나 실제 도시유출 검증자료의 부족으로 이러한 강우-유출 모형의 정확한 해석에는 다소 어려움이 있다.

도시 우수관망 설계부분은 유출해석 분야보다는 상대적으로 관심이 부족하였다고 볼 수 있다. 그러나 주어진 설계유량을 가지고 어떻게 배수시키느냐에 따라 도시 홍수의 문제를 경감시킬 수 있으며 최적화된 설계를 통하여 경제적인 우수시스템을 설계할 수 있는 모형의 개발이 이루어져야 할 필요성이 있다.

본 연구에서는 최적화 기법으로 동적계획법(Dynamic Programming : DP)의 특수한 방법인 이산분리형 동적계획법(Discrete Differential Dynamic Programming : DDDP)를 이용해 최적화된 설계조건을 구할 수 있도록 한다. 이산분리형 동적계획법의 기법은 설계유량과 맨홀의 위치가 결정되면 그에 따른 최적 우수시스템이 될 수 있는 관의 용량, 경사, 수위, 수심, 위험도, 회수비용 등을 결정할 수 있는 방법이다.

## 2. 관망설계 최적화 방법

### 가. 최적화 요소

#### 1) 단계

맨홀의 위치는 지형도상에서 낮은 쪽으로 유출구 지점이 존재한다. 이러한 맨홀과 맨홀을 우수관으로 연결하는데 각 맨홀과 맨홀이 있는 우수관이 하나의 단계가 되면 각 단계는 상류단과 하류단이 존재한다. 어떤 구역 내에 우수시스템 맨홀의 수가  $n$ 개 존재한다면 단계의 수는  $n-1$ 개이다. 그리고 이 단계는 유역출구 지점에서 최원점의 맨홀과 연결관 우수관부터 순서대로 정해진다. 예를 들면 그림 1의 가상의 우수시스템의 관망도라면 맨홀의 번호는 유역출구로부터 1번으로 시작하여 13번까지 존재하며 각 맨홀을 연결하는 우수관이 단계가 되며 그림 1에서는 12단계가 존재한다.

---

\* 대전대학교 공과대학 토목공학과 조교수  
\*\* 육군사관학교 군사과학대학원 원장  
\*\*\* (주)새길 엔지니어링 수자원사업본부 차장  
\*\*\*\* 서남대학교 공과대학 토목공학과 부교수  
\*\*\*\*\* 서남대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

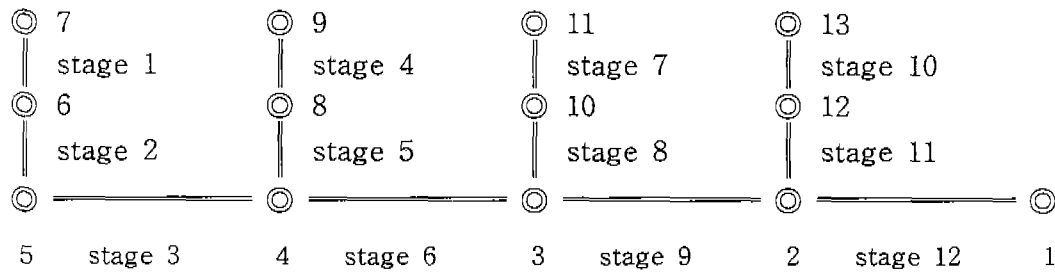


그림 1. 단계(stage)의 구성

2) 상태변수

상태변수는 각 단계의 특성을 나타내는 변수로서 유입 상태변수와 유출 상태변수가 있다. 상태변수는  $S_n$ 으로 표현하고 우수관 하류단의 유출상태변수는  $\overline{S}_n$ 으로, 각각의 유입 상태변수는 단계의 상류단 수위이고 유출상태변수는 하류 수위이며, 이는 행렬의 형태로 표현된다.

맨홀이나 합류점은 저류를 고려하지 않는다는 가정 하에 전 단계 유출 상태변수는 다음 단계의 유입 상태변수 값으로 변환된다.

$$S_n = \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix}, \quad \overline{S}_n = \begin{bmatrix} \overline{S}_1 \\ \vdots \\ \overline{S}_n \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

$$\overline{S}_{n-1} = S_n \dots \dots \dots (2)$$

3) 결정변수

결정변수는 1개 단계의 상류단의 수위와 하류단 수위차로서 임의의 단계의 결정변수는  $D_n$ 으로 표현된다. 결정변수가 결정되면 단계 폭, 우수관의 경사, 관경 등이 결정되므로 이들의 종속변수가 된다.

맨홀 1번과 2번 사이의 우수관의 단계에서의 결정변수는  $D_{m1,m2}$ 로 표현할 수 있으며 이는 1번 단계의 결정변수이므로  $D_1$ 으로 표현할 수 있다. 결정변수는 상류단 수위(유입 상태변수)와 하류단 수위(유출 상태변수)차이므로 유출 상태변수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\overline{S}_n = S_n - D_n \dots \dots \dots (3)$$

4) 회수비용

회수비용은  $r_n$ 으로 표현되며 이는 n stage를 관로공사 일위대가를 기준으로 한 설치비용을 나타내며 위험도(risk)가 고려되면 위험부담비까지 고려한 비용으로 본다.

나. DDDP방법의 최적화

1) 우수관망의 DP 추적 방법

일반적으로 n번째 단계(n=1,2,3,...,N)의 결정변수  $D_n$ 을 사용하여 변환식을 사용하면 식(3)이 되며  $D_n$ 에 대한 회수비용은 유입 상태변수  $S_n$ 과  $D_n$ 에 대한 함수로 표현된다.

$$r_n = r_n (S_n, D_n) \dots \dots \dots (4)$$

그리고 전 시스템에 대한 회수함수는 각 단계의 회수의 총화로 표시할 수 있다.

$$R_n = \sum_{n=1}^{N-1} r_n \dots \dots \dots (5)$$

동적 계획법에 의거 각 단계의 최적화를 회귀 방정식으로 표현하면,

$$f_n = \text{MIN. } D_n [ r_n (S_n, D_n) + f_{n-1}(S_{n-1}) ] \dots \dots \dots (6)$$

n=1, \dots, N

$$f_0 (S_0) = 0 \dots \dots \dots (7)$$

식(6)에서  $f_n (S_n)$ 는 n단계까지의 최소비용을 나타내주고 있으며 식(7)은 맨 처음 단계에서 그 이전 단계는 존재하지 않으므로 0 값을 취한다.

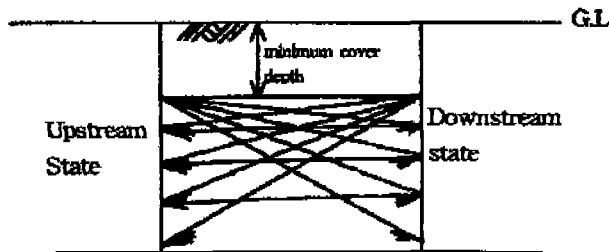


그림2.  $\Delta S$ 를 5등분시 상하류단의 수위연결 형태

2) DDDP 추적 방법

DDDP에서는 먼저 시험 결정변수를 정해야 한다. 시험 결정변수  $D_n$ 은 통상 시스템의 유출 출구 지점 표고와 최 원점의 유출지점 표고차를 단계의 수로 나누어 정의한다. 그러므로 각 단계의 상태변수는 시험변수에 의하여 구할 수 있다.

이러한 상태변수 들을 연결한 선을 시험궤도(trial trajectory)라고 하며  $\overline{S_n}$ 으로 표현한다. 이 시험궤도 주위로 상태의 증분  $\Delta S$ 를 일정범위 내에 존재한다고 가정하고 이 구간을 시험궤도에 따르는 궤도 범위(corridor)로 생각한다.

$$f_n = \text{MIN. } D_n [ r_n (S_n, D_n) + f_{n-1}(S_{n-1}) ] \dots \dots \dots (8)$$

$\Delta S$ 를 변화시키면서 궤도범위를 조정하여 반복 계산하여 허용오차 범위 내에 회귀방정식 함수 값이 존재하면 그때의 궤도가 최적화된 상태변수가 된다. 즉 1번째 반복 계산한 최적화 값  $f_i$ 가 전 단계인  $i-1$ 번째 최적화 값  $f_{i-1}$ 와의 차이가 허용오차 범위 내에 존재하면  $f_{i-1}$ 번째의 값이 최적화 값이 된다.

$$\left| \frac{f_i - f_{i-1}}{f_{i-1}} \right| < E_r \dots \dots \dots (9)$$

### 3. 우수관내 지체시간을 고려한 설계유량

우수관의 설계유량은 맨홀로 유입되는 침투홍수량을 가지고 정상류로 가정하고 각 단계를 거쳐서 선형적으로 계산할 수 있다. 이러한 정상류 조건에서의 우수관의 유량은 Manning 공식이나 Darcy-Weisbach 공식으로 구할 수 있으며 수문곡선의 형태와 단순 침투유량의 형태로 대별할 수 있다. 단순 침투유량은 우수관내 유량이 도달되는 지체시간을 고려하지 않고 각 맨홀에서 유입되는 설계유량을 계속 더해가는 것이다. 이러한 지체시간을 고려하지 않은 단순 침투유량 산정은 소유역에서는 간단하다는 장점이 있으나 하류로 갈수록 과다설계가 이루어질 가능성이 있다. 따라서 이 연구에서는 Manning 공식에 의한 유속과 평균 유속에 의한 유달시간을 산정하여 설계유량이 각 단계에서의 유입유량과의 선형적인 중첩관계로 산정하였다.

### 4. 시험유역에의 적용 및 결과분석

그림 1에서 제시된 유역형상을 갖는 단지에서의 시험유역을 대상으로 하며, 이때의 각 맨홀의 표고 및 단계는 다음과 같다.

표 1. 시험유역의 각 맨홀의 표고 및 단계 구성

Stage	upstream		downstream		length (m)
	manhole	EL,m	manhole	EL,m	
1	M7	100	M6	99	200
2	M6	99	M5	98	200
3	M5	98	M4	97	200
4	M9	99	M8	98	200
5	M8	98	M4	97	200
6	M4	97	M3	96	200
7	M11	98	M10	97	200
8	M10	97	M3	96	200
9	M3	96	M2	95	200
10	M13	97	M12	96	200
11	M12	96	M2	95	200
12	M2	95	M1	94	200
13	M1	94			

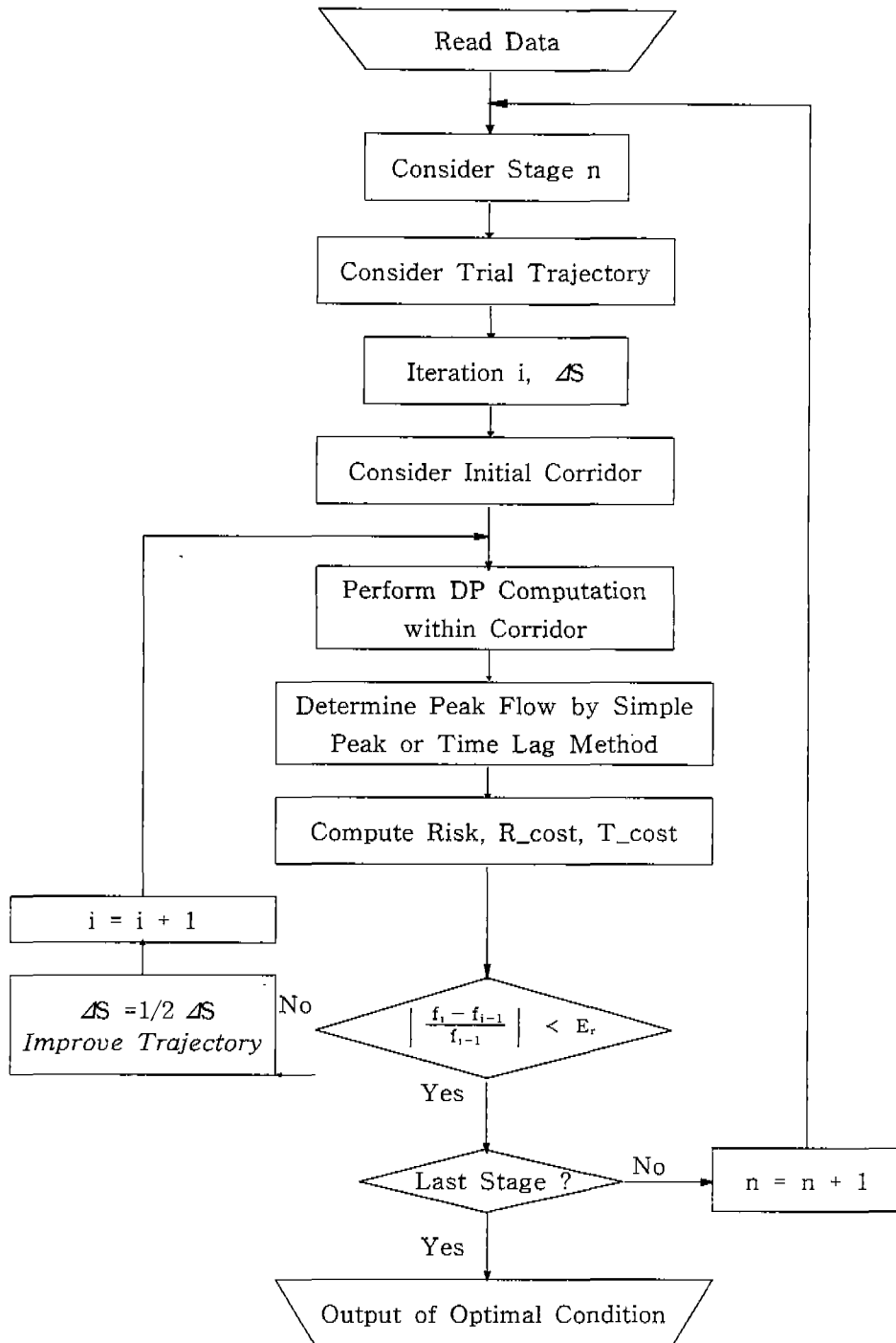


그림 3. DDDP 최적화 과정 흐름도

시험유역에 USSOD-1과 USSOD-2를 적용하였다. 모의결과 설계유량은 지체시간을 고려한 USSOD-2모형이 출구쪽에서 USSOD-1 모형보다 45% 적은 유량을 모의하였으며(그림 4 참조), 이는 과다설계의 위험성을 배제할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 계산된 우수관의 유출지점의 정점표고에서도 USSOD-2의 계산결과가 USSOD-1의 것보다 0.3m 작은 굴착깊이를 계산하고 있으며 이는 USSOD-1에 의하여 과대 계산된 관경에 의한 것이다(그림 5 참조).

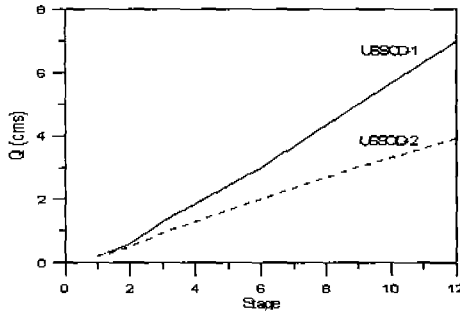


그림 4. 각 단계의 유량변화

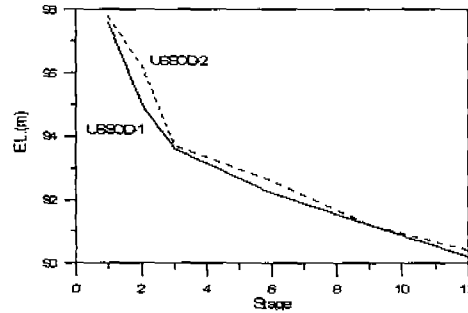


그림 5. 각 단계의 정점 표고

## 5. 결 론

이 연구에서는 주어진 설계유량과 맨홀의 위치가 결정되면 그 결과 유입유량만 결정되면 우수관망의 각 요소의 위험도를 평가하고 이에 따르는 위험부담비를 고려해서 가장 경제적인 우수관경, 경사, 수위, 회수비용 등을 계산할 수 있는 도시우수관망 최적설계모형(USSOD)를 개발하고자 하였다.

모의결과 설계유량의 산정방법의 차이로 인하여 USSOD-1이 설계유량에서 USSOD-2보다 45% 정도의 과다설계 경향을 보이며, 유출구지점의 정점표고도에서 0.3m의 차이가 발생하였으며, 회수비용도 35%정도 크게 나타나 실제 적용에는 USSOD-2가 합리적인 것으로 조사되었다.

향후 우수시스템의 연결망을 결정하는 layout design model 개발도 이루어져야 할 것이며 실무에서도 위험도를 고려한 설계 및 최적화 설계기법을 도입하여 설계의 신뢰도를 높일 수 있도록 해야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Heidari, M., "A differential dynamic programming approach to water resources analysis", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Campaign, Ill., 1970
2. Ang, A. H. S., and Tang, W. H., "Probability Concept in Engineering Planning and Design", Vol. I : Basic Principles, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975
3. Argaman, Y., Shamir, U., and Spivak, E., "Design of Optimal Sewerage System", Jour. Env. Div., ASCE, Vol.99, No.EE5, Oct. 1973, pp.703~716
4. Barlow, J. F., "Cost Optimization of Pipe Sewerage Systems", Proceedings, Institution of Civil Engineers(London), Vol.53, pt.2, June 1972