

최소비용을 고려한 도시우수관망 최적화설계 모형개발 및 적용

장석환*, 전병호**, 오경두**, 박상우***

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 공사비의 최소비용을 고려한 최적화된 설계조건을 구할 수 있도록 하는 모형(USSOD)을 개발하고자 한다. 최적화 모형은 DDDP기법을 이용하여 설계유량과 맨홀의 위치가 결정되면 그에 따른 최적 우수 시스템이 될 수 있는 관의 용량, 경사, 수위, 수심, 위험도, 회수비용 등을 결정할 수 있고 기존의 설계된 우수관망에 대한 평가도 가능한 모형이다.

2. 관망설계 최적화 방법

2.1 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.

$$r_n = r_n(S_n, D_n) \dots \dots \dots (1)$$

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

$$R_n = \sum_{i=1}^n r_i \dots \dots \dots (2)$$

동적 계획법에 의거 각 단계의 최적화를 회귀 방정식으로 표현하면,

$$f_n = \text{MIN. } D_n [r_n(S_n, D_n) + f_{n-1}(S_{n-1})] \dots \dots \dots (3)$$

$$f_0(S_0) = 0 \dots \dots \dots (4)$$

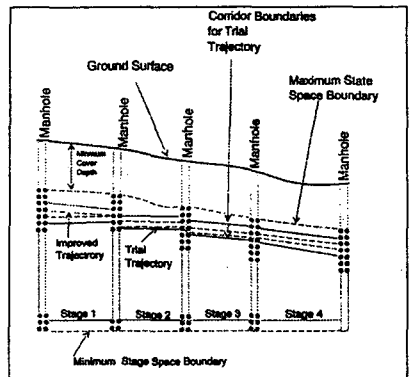
식(3)에서 $f_n(S_n)$ 는 n단계까지의 최소비용을 나타내주고 있으며 식(4)은 맨 처음 단계에서 그 이전 단계는 존재하지 않으므로 0 값을 취한다.

2.2 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 ΔS 를 일정범위 내에 존재한다고 가정하고 이 구간을 시험궤도에 따르는 궤도 범위(corridor)로 생각한다.

* 대전대학교 공과대학 토목공학과 조교수
** 육군사관학교 토목공학과 교수
*** 서남대학교 공과대학 토목공학과 부교수



upstream downstream
 <그림 1> DDDP계산의 각 요소들

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

ΔS를 변화시키면서 궤도범위를 조정하여 반복 계산하여 허용오차 범위 내에 회귀방정식 합 수 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.

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

2.3 우수관내 지체시간을 고려한 설계유량

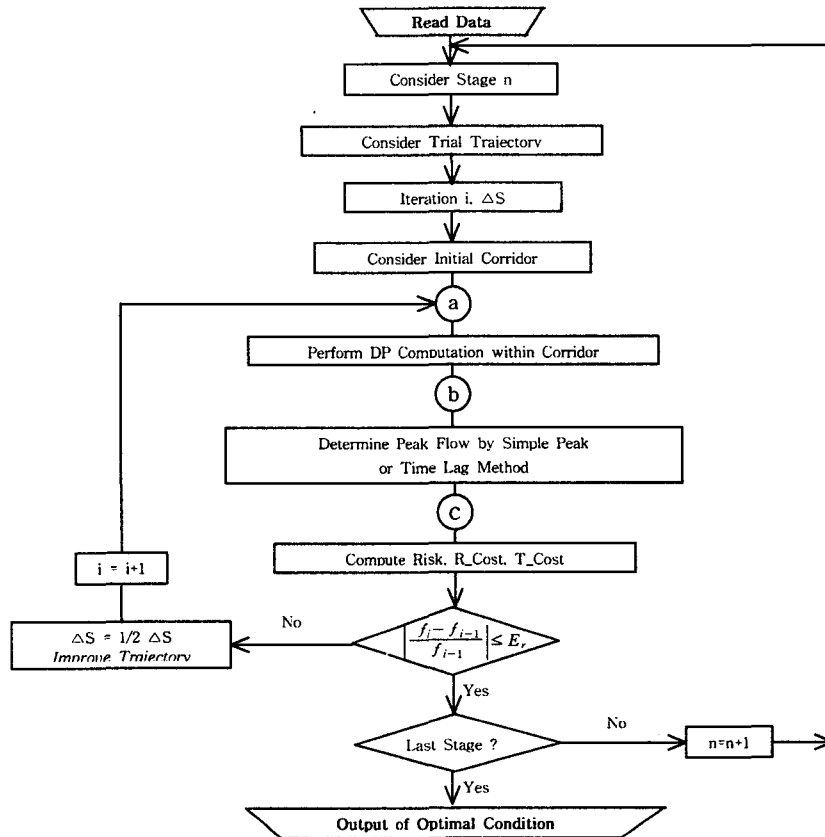
우수관의 설계유량은 맨홀로 유입되는 침투홍수량을 가지고 정상류로 가정하고 각 단계를 거쳐서 선형적으로 계산할 수 있다. 이러한 정상류 조건에서의 우수관의 유량은 Manning 공식이나 Darcy-Weisbach 공식으로 구할 수 있으며 수문곡선의 형태와 단순 침투유량의 형태로 대별할 수 있다. 단순 침투유량은 우수관내 유량이 도달되는 지체시간을 고려하지 않고 각 맨홀에서 유입되는 설계유량을 계속 더해가는 것이다. 이러한 지체시간을 고려하지 않은 단순 침투유량 산정은 소유역에서는 간단하다는 장점이 있으나 하류로 갈수록 파다설계가 이루어질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

또한 비용산출을 위한 회귀식은 건설교통부 표준품셈 및 서울시 단가산출을 근거로 하였다.

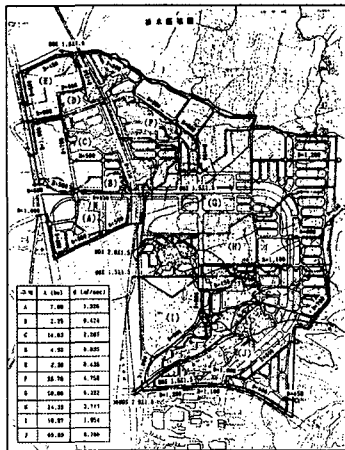
3. 단지설계 적용

3.1 유역의 개요 및 적용결과

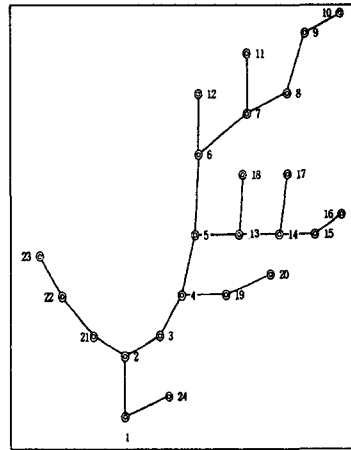
울산 화봉지구 단지 조성은 한국토지개발공사에서 시행하였으며 본 지구의 계획면적은 1,064,246 m²로서 주택상업 공공시설 용지로 구성되어 있으며 우수배제방식으로는 우수관이 따로 존재하는 분류식으로 계획되었다. 우수 유출 계통은 지구 내외부에 위치하는 두부곡천, 상방천, 진장천으로 방류되어 태화강으로 유출되며 이들은 10개의 소류역으로 나누어 유출구를 계획하였다. 실제 설계에서 유입간은 Kerby공식을 사용하여 적용하였으며 설계유량은 합리식을 산정하였다. 강우강도는 이원환공식을 사용하고 유출계수는 평균 0.6적용하여 합리식에 적용하였으며 Manning공식으로 적용하여 관경을 계산하였다. 본 연구에서 적용하는 유역면적은 10.97 ha로서 맨홀의 수는 24개이고 상기와 같은 유역을 가지고 본 연구에서 개발한 우수관망최적설계모형(USSOD)에 적용하여 실제 적용된 설계결과와 비교, 평가하였다.



<그림 2> DDDP 최적화 과정 Flow Chart



<그림 3> 울산 화봉지구 배수구역도



<그림 4> 울산 화봉지구 적용유역 우수관망도

3.2 분석 및 고찰

최적 설계모형인 USSOD의 결과와 실제 설계의 결과를 다음의 <표 1>에 나타나 있으며 이때 주 연결 관로와 분기 연결 관로로 나누어 주 연결 관로는 유역출구 지점인 1번 맨홀 위치에서 최원점인 10번 맨홀 위치까지 연결되는 관로로서 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10으로 연결된다. 분기 연결 관로는 16-15-14-13-5로 연결되는 관로를 택하여 이들을 각 주요 항목별로 비교 분석하면 다음과 같다.

가. 관로 정점 표고

최적 설계모형인 USSOD의 결과치인 정점 표고와 실제 설계 결과를 도시하면 다음의 <그림 5>와 같고 이 결과는 굴착깊이를 결정짓는 항목으로 최적화의 값에 영향을 미친다고 할 수 있다. 적용 결과 먼저 주 연결 관로에서 1단계, 2단계에서는 표고 차이가 0.03m 차이가 나며 3단계에서는 0.48m로서 실제 설계치의 굴착깊이가 더 깊게 나타난다. 7단계에서는 0.03m 정도의 차이가 나며 17단계, 18단계에서는 0.06m의 차이를 보이고 22단계에서는 0.77m 만큼 실제 설계 결과가 깊어지고 있다. 이와 같이 관로 정점 표고를 살펴보면 전반적으로 USSOD모형의 결과가 실제 설계보다 경제적인 최적 설계를 보이고 있다.

<표 1> 울산 화봉지구 USSOD 결과

단 계	번 호	설계유량	관 유 량	경 사	관 경	상류단 정점표고	하류단 정점표고	안 전 율	위 험 도	최수비용
1	10→9	0.092	0.3146	0.01218	0.45	33.43	32.27	3.4190	<10 ⁻⁹	2750324
2	9→8	0.2087	0.4755	0.03226	0.45	29.72	26.50	2.2784	<10 ⁻⁹	2883810
3	8→7	0.2558	0.4693	0.03142	0.45	26.40	25.30	1.8342	<10 ⁻⁹	1011255
4	11→7	0.035	0.3447	0.01695	0.45	25.69	25.30	9.8501	<10 ⁻⁹	664539
5	7→6	0.2996	0.3731	0.01986	0.45	25.30	24.30	1.2451	0.0028	1458941
6	12→6	0.073	0.1882	0.00500	0.45	24.48	24.30	2.5780	<10 ⁻⁹	1029168
7	6→5	0.6304	0.6402	0.01260	0.60	24.30	22.97	1.0150	0.0439	5751314
8	16→15	0.069	0.3035	0.01314	0.45	29.94	29.02	4.3988	<10 ⁻⁹	2022510
9	15→14	0.1118	0.4744	0.03211	0.45	28.52	26.22	4.2407	<10 ⁻⁹	2069316
10	17→14	0.055	0.1432	0.00290	0.45	26.43	26.22	2.6049	<10 ⁻⁹	2071917
11	14→13	0.1623	0.4765	0.03239	0.45	26.02	24.62	2.9355	<10 ⁻⁹	1248755
12	18→13	0.054	0.2196	0.00680	0.45	25.16	24.62	4.0679	<10 ⁻⁹	2266366
13	13→5	0.2576	0.4478	0.02860	0.45	24.62	23.27	1.7381	<10 ⁻⁹	1363460
14	5→4	0.9710	1.1341	0.01738	0.70	22.67	21.38	1.1679	0.0088	4808318
15	20→19	0.021	0.2854	0.01160	0.45	22.57	21.90	13.59	<10 ⁻⁹	1665103
16	19→4	0.0512	0.2081	0.00610	0.45	21.98	21.38	4.0618	<10 ⁻⁹	2430479
17	4→3	1.1328	1.1526	0.01790	0.70	20.53	18.51	1.0175	0.0432	7537069
18	3→2	1.2142	1.4833	0.01450	0.80	17.61	16.31	1.2215	0.0041	7186355
19	23→22	0.212	0.2199	0.00690	0.45	17.22	16.53	1.0373	0.0368	3193500
20	22→21	0.3983	0.4015	0.02300	0.45	16.53	14.16	1.0078	0.0464	3731310
21	21→2	0.5124	0.5196	0.00360	0.70	14.16	13.96	1.0141	0.0444	1083866
22	2→1	1.6765	1.7068	0.01030	0.90	13.96	12.92	1.0181	0.0430	1079789
23	24→1	0.042	0.3361	0.01610	0.45	15.14	13.77	8.002	<10 ⁻⁹	2455905

나. 설계유량 및 관경

화봉지구 적용 유역에서의 최소 관경은 0.45m를 사용하였으며 USSOD에서도 최소 관경을 0.45를 사용하였다. 주 연결 관로 1단계에서 설계유량은 0.092cms인데 관경 0.45m인 관의 유량은 실제 설계 결과에서는 0.315cms가 나타나고 USSOD에서는 0.2922가 나타났다. 물론 두 경우의 관 유량 차이는 각각의 관 경사의 차이에서 연유한다. 또한 설계유량과 관유량의 비가 안전율이므로 관유량이 커질수록 안전율은 커지며 상대적으로 위험도는 적어진다.

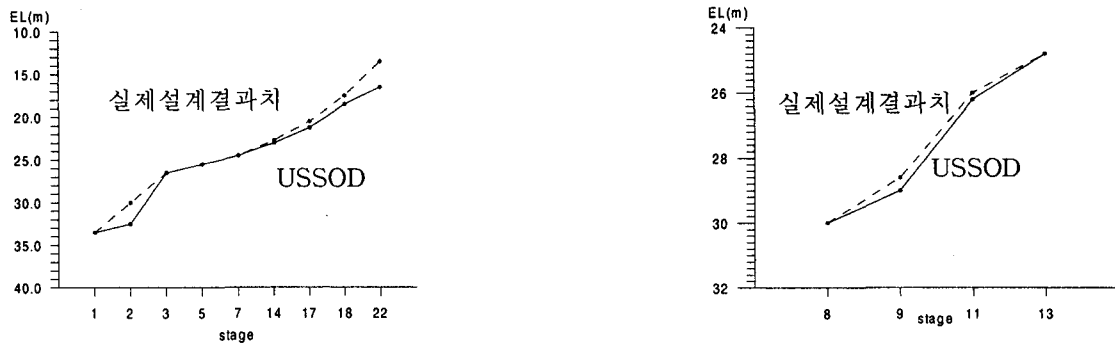
주 연결 관로에서 설계유량 결과를 살펴보면 다음의 <그림 6>에서 보듯이 USSOD의 설계유량이 유역 출구쪽으로 진행할수록 설계유량 산정값이 차이가 나며 22단계의 설계유량은 실제 설계 결과치는 1.6765cms이고 USSOD설계 유량은 1.9290cms로 0.2525cms의 차이가 나타난다. 이는 관경의 결정에 영향을 미치는 결정적인 인자이다. 또한 분기 연결 관로에서도 11단계에서는 0.0157cms, 13단계에서는 0.0204cms가 USSOD설계 결과가 적게 나타나 있음도 알 수 있다.

다음의 <그림 7>은 각 단계에서의 상용 우수관을 비교한 것으로 주 연결관로 1, 2, 3, 5, 7단계에서는 동일한 우수관으로 설계 결과가 나왔으나 14단계와 17단계에서는 실제 설계시는 0.8m관경을 사용하나 USSOD에서는 0.7m의 관경을 사용함을 보여주고 있다. 또한 22단계에서도 실제 설계 결과는 1.0m 관경이나 USSOD에서는 0.9m의 관경을 경제적인 최적 결과로 보여주고 있다. 그러나 분기 연결 관로에서는 설계유량이 차이가 있어도 최소 관경이 0.45m이므로 실제 설계 결과 관경과 USSOD관경이 동일하게 나타난다.

다. 회수비용

관로설치 비용은 굴착깊이과 관경의 함수이기 때문에 동일한 규격의 관로에서는 굴착깊이에 영향을 받는다. 또한 본 연구에서는 위험도를 계산하여 위험부담비를 고려하여 최적설계를 실시하였으므로 실제 설계 결과치에서도 위험도를 계산하여 회수비용을 비교하여 본 결과 다음의 그림 8에 나타나 있다.

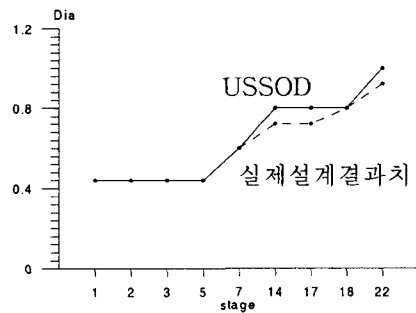
주 연결관로에 서 살펴보면 14단계에서는 실제 설계치의 회수비용은 USSOD설계 결과 회수비용 보다 약 24.4%가 더 많고 17단계는 20.3%, 22단계에서도 12.5% 정도 많아지고 있다. 또한 분기 연결 관로에서도 설계유량이 적고 관경이 동일한 8단계, 9단계, 11단계에서는 회수비용이 1%이내의 차이를 보이거나 13단계에서는 6.1%정도 실제 설계 결과치가 USSOD 설계 결과 회수비용 보다 크게 나타난다.



<그림 5> 주 연결 관로 및 분기 연결 관로 USSOD와 실제설계치 정점표고 비교



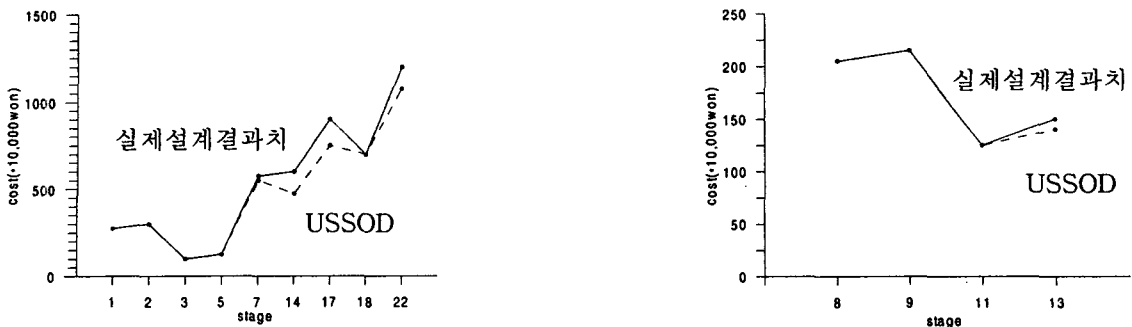
<그림 6> 주 연결 관로와 분기 연결 관로에서 USSOD-2와 실제설계치의 설계유량 비교



<그림 7> 주 연결관로에서 USSOD와 실제설계치의 우수관경 비교

<표 2> 주 연결 관로 및 분기 연결 관로의 맨홀위치 번호 및 단계

주 연결 관로		분기 연결 관로	
맨홀위치	단 계	맨홀위치	단 계
10 → 9	1	16 → 15	8
9 → 8	2	15 → 14	9
8 → 7	3	14 → 13	11
7 → 6	5	15 → 5	13
6 → 5	7		
5 → 4	14		
4 → 3	17		
3 → 2	18		
2 → 1	22		



<그림 8> 주 연결로와 분기 연결로에서 USSOD와 실제설계치와 회수비용 비교

4. 결 론

최소비용을 고려한 도시 우수관망의 최적 설계모형(USSOD) 개발과 적용에서 얻은 결론과 앞으로의 연구방향에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 개발한 모형은 위험도 해석을 포함한 도시우수시스템 최적설계모형으로써 맨홀의 위치와 유입 유량만 결정되면 최적 설계 결과를 도출할 수 있는 모델이다.
- (2) USSOD모형을 한국토지개발공사가 시행한 울산화봉지구 설계결과에 직접 적용해 본 결과 실제 설계에서 나타나는 위험부담비까지 고려해서 비교한 USSOD의 최적설계보다 실제 설계시 적용한 설계시의 회수비용이 약 9% 높게 나타났으며 이는 최적설계모형인 USSOD모델이 더 경제적인 설계결과를 도출한다고 판단된다.
- (3) 모의결과 설계유량과 상용우수관 사용에서도 USSOD 모형이 실제설계보다는 일부 적은 관경을 사용해도 무리가 없는 경우가 나타났으며 이는 기존 설계방법보다 최적화된 설계 결과를 도출할 수 있었다고 판단된다. 또한 굴착깊이에 관련되는 정점표고는 최대 0.77m까지 차이를 보이고 유출구 지점의 정점표고에서도 0.3m의 차이가 발생하였다.
- (4) 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
5. 장 석환, '위험도를 고려한 도시우수시스템의 최적설계 모형 개발에 관한 연구', 1994 서울시립대학교 박사학위논문
6. 장 석환, 전병호, '도시우수시스템의 불확실성 해석과 위험도 평가' 1993, 한국수문학회 학술발표회
7. 한국 토지개발공사, '울산 화봉지구 택지개발 기본설계서' 1990