

## 위험도를 고려한 최소비용 도시우수관망 설계의 최적화 모형개발 (II): 위험도를 고려한 최적화 모형

### Development of Optimal Design Simulation Model for Least Cost Urban Sewer System Considering Risk (II)

박상우\* / 장석환\*\*

Park, Sang Woo / Jang, Suk Hwan

#### Abstract

Urban Storm Sewer Optimal Design Model(USSOD) was developed to compute pipe capacity, pipe slope, crown elevation, excavation depth, risk and return cost in the condition of design discharge. Rational formula is adopted for design discharge and Manning's formula is used for pipe capacity. Discrete differential dynamic programming(DDDP) technique which is a kind of dynamic programming (DP) is used for optimization and first order second moment approximation method and uncertainty analysis is also for developing model. USSOD is applied to hypothetical drainage basin to test and verify. After testing the model, it is also applied to Ulsan drainage basin which was developed by Korea Land Cooperation(KOLAND). Comparing the design results of USSOD with those of KOLAND, discharge capacity 0.35 m<sup>3</sup>/sec, the crown elevation is 0.77m higher and return cost is 9% less than design results of KOLAND, which verify the improvement of USSOD. Layout design model using GIS and optimization including detention or retention effect are needed in the future study.

*keywords* : urban sewer system, optimization, DDDP, return cost, USSOD

#### 요 지

본 연구는 도시 우수관망 설계 시 주어진 설계유량을 효율적이고 경제적인 단면 구성과 관망에 따른 우수배제 능력을 극대화시키기 위해 최적화 기법인 동적계획법(Dynamic Programming : DP)의 특수한 방법인 이산미분형 동적계획법(Discrete Differential Dynamic Programming : DDDP)를 이용해 최적화된 설계조건을 구할 수 있도록 하였다. 이산미분형 동적계획법의 기법은 설계유량과 맨홀의 위치가 결정되면 그에 따른 최적 우수시스템이 될 수 있는 관의 용량, 경사, 수위, 수심, 위험도, 회수비용 등을 결정할 수 있는 방법으로 이는 공사비용에 따라 최소비용을 목적함수로 위험도 분석을 통하여 최적화된 조건을 찾는 방법으로 모형개발을 하였다. 개발된 모형을 실제 단지계획의 합리식으로 설계된 우수관망 계획과 비교 검증하여 보다 경제적이고 효율적인 우수관망 시스템을 구축하는 모형을 제시하였다.

**핵심용어** : 이산미분형 동적계획법(DDDP), 최적 우수시스템, 회수비용, USSOD

\* 서남대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

Associate Prof. Dept., Civil Eng., Seonam Univ., 720 Gwangchi Dong, Namwon City, Jelloabuk Do, 590-711, South Korea  
(e-mail: psw0232@seonam.ac.kr)

\*\* 대전대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

Associate Prof., Dept., Civil Eng., Deajin Univ., 11-1 Sundan Dong, Pocheon City, Kyunggi Do, 487-711, South Korea  
(e-mail: drjang@daejin.ac.kr)

## 1. 서 론

본 연구의 선행연구에서는 도시 우수관망 설계 시 주어질 설계유량을 효율적이고 경제적인 단면 및 관망 구성에 의해 우수배제 능력을 극대화시키기 위하여 최적화 기법으로 동적계획법(Dynamic Programming : DP)의 특수한 방법인 이산분리형 동적계획법(Discrete Differential Dynamic Programming : DDDP)를 이용해 공사비의 최소비용을 고려한 도시우수 배수시스템 최적 설계모형(Urban Storm Sewer System Optimal Design Model : USSOD)을 개발하였다. 이때 USSOD모형은 침투유량의 우수관내 흐름에 대한 지체시간의 고려여부에 따라 두 가지 모형으로 개발되었으며, 이들 모형을 시험유역에 적용하여 그 적합성을 평가한 결과 지체시간을 고려하여 침투유량을 산정한 모형이 더 우수한 결과를 보였다.

한편, 수문시스템을 포함한 모든 공학시스템은 때때로 의도하는 기능을 충분히 실행하지 못하고 시스템의 파괴를 초래할 수 있다. 그러므로 모든 공학시스템은 실패에 대한 위험도를 내재하며 이를 최소화하여 시스템의 신뢰도를 높이는 것이 중요한 일이다. 종래의 공학적 시스템의 신뢰성 문제는 주로 수요와 공급의 관계로 기준을 두어 해석하여 여유설계에 대한 안전율, 과거의 유사설계에 대한 추정도로 안전도를 채택하여 왔으나, 이러한 방법은 정량적 해석이 불가능할 뿐 아니라 각 요소의 불확실성에 대한 고려가 결여되기 쉽다(Ang, 1970, 1973). 신뢰도에 대한 연구는 주로 구조공학자들에 의해 구조물의 안전여부를 판단하기 위해 하중-저항 관계로부터 주로 발전되어 왔으며, 최근에는 수문시스템에서도 신뢰도 및 위험도에 대한 관심이 증가되고 있다. 수문시스템의 해석에 위험도 평가를 고려하여 연구한 사람들로써 Yen and Ang(1971), Tang and Yen(1972), Huang(1986) 등이 있으며, Yen(1970)은 위험도와 안전율의 상관분석을 통하여 Illinois지역의 위험도 공식을 제안하기도 하였다. 특히, 도시 배수시스템에 관한 연구로는 Yen et al. (1976)이 도시우수 배수시스템의 신뢰도 해석을 고려한 설계에서 최적 위험도에 대한 연구를 하였으며, Melching(1987)은 1계 2차 모멘트 방법을 도입해 Rackwitz 반복기법으로 신뢰도 해석을 실시하였다.

본 연구에서는 도시우수 배수시스템의 최적 설계를 위하여 기 개발된 침투유량의 지체시간을 고려한 USSOD모형에 위험도 및 불확실성 분석 이론을 적용하여 각 요소의 위험도를 평가해 보고, 그에 따른 위험부담비를 고려해서 가장 경제적인 우수관경, 경사, 수위,

설치에 따른 회수비용 등을 산정할 수 있는 모형을 개발하고자 하였다. 위험도를 고려한 USSOD모형은 공사비용에 따른 최소비용을 목적함수로 한 위험도 분석을 통하여 최적화된 설계조건을 찾게 되며, 모형의 적용은 한국토지공사(1990)에서 단지 조성한 울산 화봉지구를 대상으로 하여 실제 단지계획에서 설계된 우수관망 계획과 비교 검증하여 그 적합성을 평가하고자 하였다.

## 2. 위험도를 고려한 최적 관망설계 모형

### 2.1 위험도 방정식

수문시스템이 적절한 기능을 수행할 수 있도록 하기 위한 신뢰도 또는 위험도는 외적 하중에 저항할 수 있는 시스템의 능력이라고 말할 수 있으며, 위험도는 실패할 확률, 신뢰도는 실패하지 않을 확률을 의미한다. 즉, 위험도는 시스템에 작용하는 하중  $L$ 이 용량  $C$ 를 초과하는 확률로 정의되며, 도시우수 시스템에서는 하중이 설계유량이 되고 용량은 우수관의 통수능력이 된다(고재웅, 1993). 이러한 위험도를 산정하기 위하여 시스템에 작용하는 여러 변수들을 하중과 용량을 연관시킨 실행변수  $Z$ 를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$Risk = P_F = P(L > C) = P(Z < 0) \quad (1)$$

$$Reliability = 1 - P_F = P(L < C) = P(Z > 0) \quad (2)$$

여기서,  $Z = C - L$ 이며, 하중  $L$ 과 용량  $C$ 는 시스템에 작용하는 여러 변수들의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L = G_L(X_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$C = G_C(X_j) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

시스템에 작용하는 여러 인자들을 고려하고 조합한 후 하중  $L$  및 용량  $C$ 의 확률밀도함수(pdf)를 각각  $f_L(l)$ 과  $f_C(c)$ 라고 하면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며, 이 때 시스템의 위험도는 Eq. (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$P_F = \int_0^{\infty} \int_0^l f_{C,L}(c, l) dc dl \quad (5)$$

여기서,  $f_{C,L}(c, l)$ 는  $C$ 와  $L$ 의 결합확률밀도함수이다.

만약, 용량  $C$ 와 하중  $L$ 이 통계학적으로 독립이라면 Eq. (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_F = \int_0^\infty f_L(l) \left[ \int_0^l f_C(c) dc \right] dl \quad (6)$$

Fig. 1에서 하중  $L=a$ 라면 용량  $C < a$ 의 누가확률은 빗금 친 부분이고 이것을 누가확률분포함수  $F_C(l)$ 로 나타내면 Fig. 2와 같다. 따라서 하중  $L=a$ 에 대한 실패확률은 Fig. 1의 빗금 친 부분의 면적과 B점의  $f_L(l)$  확률값을 곱한 값으로 Eq. (6)을 다시 쓰면 Eq. (7)과 같이 된다.

$$P_F = \int_a^b f_L(l) F_C(l) dl \quad (7)$$

또한, 이를 실행변수  $Z$ 의 향으로 나타내  $Z$ 의 확률밀도함수를 표시하면 Fig. 3과 같으며, 여기에서  $Z=0$ 인 수직축의 왼쪽 빗금 친 부분이 위험도이다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_F = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_Z(z) dz \quad (8)$$

여기에서 실행변수  $Z$ 가 표준정규분포를 이룬다면 Eq. (8)은 다음과 같이 된다.

$$P_F = \phi(-\beta) = 1 - \phi(\beta) \quad (9)$$

$$\text{여기서, } \beta = \frac{\mu_z}{\sqrt{\text{Var}(z)}} \quad (10)$$

Eq. (10)에서  $\mu_z$ 와  $\text{Var}(Z)$ 는 각각 실행변수  $Z$ 의 평

균과 분산이며,  $\beta$ 는 신뢰도 지수로서  $Z=0$ 인 원점에서 평균까지의 거리를 나타낸다. 그리고  $\phi(\beta)$ 는  $\beta$ 값에 대한 표준정규분포의 누가확률값으로  $\beta$ 가 커질수록 위험도는 감소한다.

또한, 실행변수  $Z$ 를  $C-L$ 로 놓고 하중  $L$ 과 용량  $C$ 가 정규분포를 이룬다고 가정하면 실행변수  $Z$ 도 정규분포를 가지며 이때 신뢰도 지수  $\beta$ 값은 Eq. (11)이 된다(Huang, 1986).

$$\beta = \frac{\left( \frac{\mu_C}{\mu_L} \right) - 1}{\sqrt{\left( \frac{\mu_C}{\mu_L} \right)^2 \Omega_C^2 + \Omega_L^2}} \quad (11)$$

여기서,  $\mu_C/\mu_L$ 은 안전율이고,  $\Omega$ 는 변동계수로  $\sigma/\mu$ 이다.

## 2.2 불확실성 방정식

Eq. (3)과 (4)에서 하중  $L$ 과 용량  $C$ 는 각각  $X_i$  변수들의 합수로 표현할 수 있으며, 이들의 불확실성은 각각의 평균과 변동계수에 의해 식으로 나타낼 수 있다(Melching, 1987). 하중  $L$ 과 이의 기댓값  $E(L)$  및 분산  $\text{Var}(Z)$ 에 대하여 Eq. (11)의 작용점  $p$ 에서 Taylor 전개시키고, 수문시스템에서 각각의 확률변수  $X_i$ 의 분포가 정확히 규명되어 있지 않아 통계학적으로 Taylor 전개에 대한 2번째 항의 모멘트 값을 취하여도 고차항에 대한 오차범위를 신뢰할 수 있다고 가정하여 이를 1계 2차항의 근사식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L = G_L(x_{ip}) + \sum_{i=1}^n (X_i - x_{ip}) \left( \frac{\partial G_L}{\partial X_i} \right)_p \quad (12)$$

$$E(L) = G_L(x_{ip}) + \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - x_{ip}) \left( \frac{\partial G_L}{\partial X_i} \right)_p \quad (13)$$

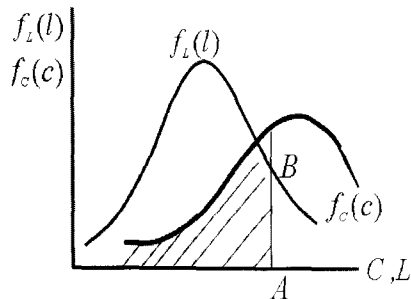


Fig. 1. Probability distribution function of capacity C and load L

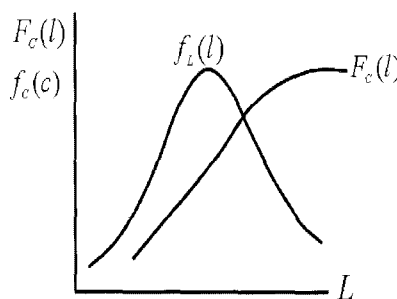


Fig. 2. Probability density function of capacity C and probability distribution function of load L

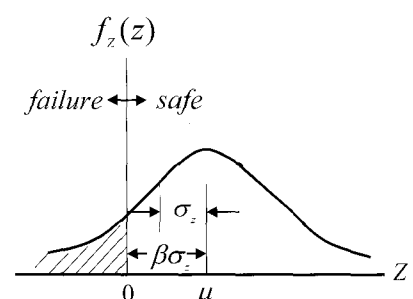


Fig. 3. Probability density function of transformed variable Z

$$Var(L) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial G_L}{\partial X_i} \right)^2 Var(X_i) \quad (14)$$

이때, 불확실성  $\Omega_L^2$ 는 Eq. (15)와 같이 쓸 수 있으며, 하중  $L$ 이나 용량  $C$ 의 식이 주어지면 확률분포함수를 알 수 없어도 평균과 분산을 가지고 각 변수들의 변동계수  $\Omega$ 를 계산 추정할 수 있어 이들의 불확실성을 Eq. (15)에 의해 구할 수 있다.

$$\Omega_L^2 = \frac{1}{G^2} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial G_L}{\partial X_i} \right)^2 Var(X_i)^2 \Omega_{x_i}^2 \quad (15)$$

### 2.3 도시우수관 설계에서의 불확실성

도시우수관의 설계에서 흔히 발생하는 불확실성은 설계유량에 미치는 인자들의 불확실성과 우수관의 용량에 미치는 인자들의 불확실성으로 나누어 생각할 수 있다.

도시우수관의 설계유량은 보통 합리식에 의해 계산되며, 이럴 경우 유량계수 및 유역면적, 강우강도의 산정시에 발생하는 불확실성과 유량산정식 자체에 내포된 불확실성을 고려해야 한다. 또한 우수관의 용량에 미치는 인자들로는 관 표면의 조도 및 분포 변동의 영향, 관의 제작시 발생하는 관경의 오차, 시공의 부정확이나 침하 등의 이유로 발생하는 관로경사의 불확실성, 우수관내의 흐름이 부정류이기 때문에 Manning공식을 적용할 때 발생하는 불확실성 등을 들 수 있다.

어떤 유역의 우수관 설계를 위한 위험도 해석에서 가장 중요한 사항은 이런 불확실성 인자들에 의한 변동계수의 산정과 변동계수에 따른 위험도( $P_f$ )와 안전률( $\mu_C/\mu_L$ )과의 관계분석이며, 설계의 신뢰도를 높이기 위해서는 위험도 해석을 실시하여 안전을 값을 구한 후 관의 용량을 구하고 주어진 위험도 한계 내에서 관경이나 경사 등을 역추적하여 평가 및 확인 작업을 해야 한다.

### 2.4 최적화 모형 및 프로그램

본 연구에서는 위험도를 고려한 USSOD모형을 개발하기 위하여 선행연구에서 설명한 이산분리형 동적계획법인 DDDP에 위험도 분석과정을 추가하여 실제 우수시스템의 모형화로부터 설계유량과 맨홀의 위치가 결정되면 각 우수관의 최소 회수비용에 따르는 관의 용량, 관경사, 관경, 수위, 수심, 정점표고, 위험도 등을 계산할 수 있도록 하였으며, 그 최적화 과정의 흐름도는 Fig. 4와 같다.

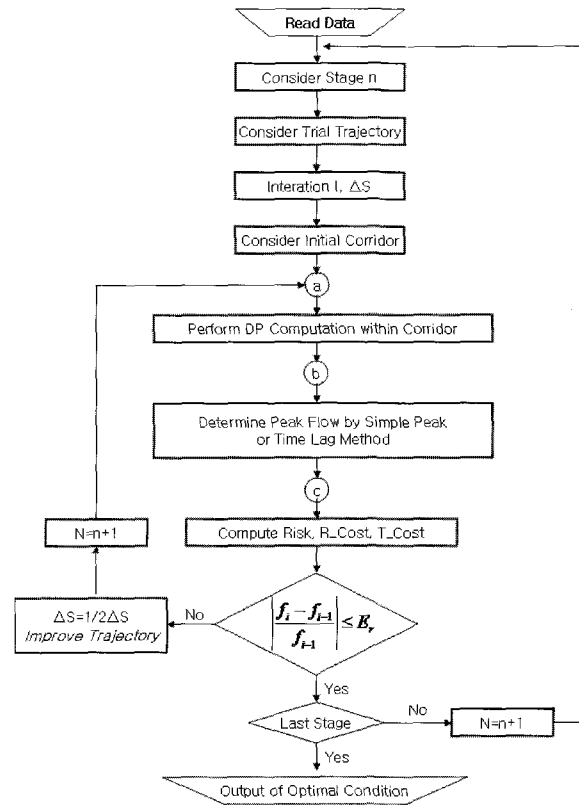


Fig. 4. Flowchart of optimizing DDDP process considered risk

그리고 프로그램에서 사용된 데이터 구조는 각 맨홀을 중심으로 구성되어 있으며, 각 맨홀에서는 표고, 유입 설계유량, 맨홀간 거리를 가지고 있으며, 맨홀에는 다른 맨홀과의 연결 상태를 나타낼 수 있는 메모리 부분을 갖는다. 이러한 우수시스템의 정보를 데이터 파일에 기입하고, 이를 프로그램이 읽어서 컴퓨터 내의 메모리에 우수관망을 구성하고, 구성된 우수관망을 순차적으로 스캔하면서 각 우수관로의 최적 설계조건을 찾을 수 있도록 하였다.

## 3. 단지설계의 적용

### 3.1 유역의 개요 및 적용

본 연구의 모형을 적용하기 위한 대상 유역은 Fig. 5와 같이 한국토지공사에서 단지 조성을 시행한 울산 화봉지구이며, 본 지구는 계획면적이 1,064,246m<sup>2</sup>로서 주택상업 공공시설 용지로 구성되어 있고 우수배제방식은 우수관이 따로 존재하는 분류식으로 계획되었다. 우수 유출계통은 지구 내외부에 위치하는 두부곡천, 상방천, 진장천으로 방류되어 태화강으로 유출되며 이들은 10개의 소유역으로 나누어 유출구를 계획하였다.

울산 화봉지구의 실제 설계에서 이용된 유역면적은

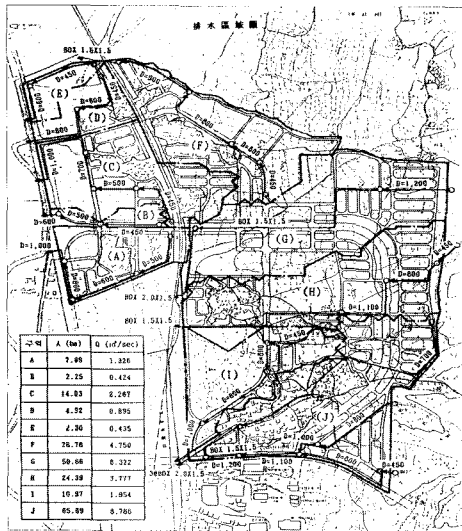


Fig. 5. Drainage district map of Hwabong zone at Ulsan

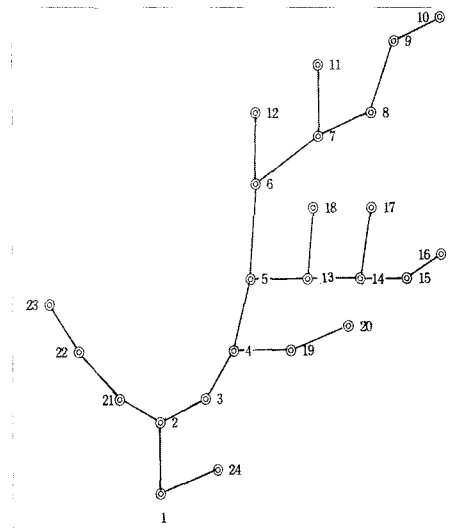


Fig. 6. Storm drainage network of Hwabong zone at Ulsan

10.97ha이고, 이 구역의 우수관망도는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 맨홀 수는 24개로서 단계는 23개 단계가 존재하며, 각 우수관의 길이, 표고, 유입유량 및 유달시간 등의 입력자료는 Table 1과 같다. 이때 유입유량은 합리식을 이용하였으며, 우수의 유달시간은 Kerby공식을, 강우강도는 이원환공식을, 유출계수는 평균 0.6으로 적용하였다.

다음의 Table 2는 상기와 같은 울산 화봉지구의 실

제 설계 결과 및 그에 따른 위험도 분석 결과이며, Table 3은 동일한 구역의 동일한 자료를 가지고 본 연구에서 개발한 위험도를 고려한 우수관망의 최적 설계 모형인 USSOD모형의 적용 결과이다. 이때 실제설계의 설계유량은 맨홀로 유입되는 침투 홍수량의 우수관내 지체를 고려하지 않은 유량이고, USSOD모형은 지체시간을 고려한 설계유량이며, 각 경우의 관경은 Manning 공식을 이용하여 계산하였다.

Table 1. Input data of storm drainage of Hwabong zone at Ulsan

Manhole	Length(m)	EL.(m)	Inflow(cms)	Travel time(min)
1	0	14.77	1.965	11.87
2	100.88	17.31	1.929	11.29
24	58.00	16.14	0.042	7.00
3	89.09	19.51	1.343	10.66
21	136.96	17.71	0.539	9.69
4	112.46	22.38	1.252	10.03
22	90.00	17.93	0.423	8.43
5	74.19	24.27	1.073	9.61
23	100.00	18.22	0.212	7.00
19	84.12	22.90	0.053	7.50
20	57.63	23.57	0.021	7.00
6	105.49	25.30	0.680	8.90
13	47.19	25.62	0.278	8.48
14	43.22	27.22	0.178	8.23
18	78.44	26.16	0.054	7.00
7	50.35	26.30	0.325	8.56
12	35.62	25.48	0.073	7.00
11	23.00	26.69	0.035	7.00
8	35.00	27.50	0.273	8.37
17	71.71	27.43	0.550	7.00
15	71.62	30.02	0.116	7.57
9	98.81	27.50	0.221	7.80
16	70.00	30.94	0.069	7.00
10	95.19	34.43	0.092	7.00

Table 2. Practical design result of Hwabong zone at Ulsan

Stage	Manhole	Design discharge (cms)	Pipe discharge (cms)	Slope	Diameter (m)	Upstream EL.(m)	Downstream EL.(m)	Safety ratio	Risk	Return cost (won)
1	10⇒9	0.092	0.315	0.01219	0.45	33.40	32.24	3.4190	<10 <sup>-5</sup>	2763952
2	9⇒8	0.221	0.468	0.02700	0.45	32.24	26.47	2.2784	<10 <sup>-5</sup>	2898099
3	8⇒7	0.273	0.468	0.02700	0.45	26.47	24.82	1.8342	<10 <sup>-5</sup>	1016265
4	11⇒7	0.035	0.371	0.01696	0.45	25.66	25.27	9.8501	<10 <sup>-5</sup>	667831
5	7⇒6	0.325	0.402	0.01986	0.45	25.27	24.27	1.2451	0.0028	1461970
6	12⇒6	0.073	0.203	0.00505	0.45	24.45	24.27	2.5780	<10 <sup>-5</sup>	1034268
7	6⇒5	0.680	0.700	0.01299	0.60	24.27	22.90	1.0150	0.0439	5546693
8	16⇒15	0.069	0.327	0.01314	0.45	29.91	28.99	4.3988	<10 <sup>-5</sup>	2032531
9	15⇒14	0.116	0.468	0.02700	0.45	28.99	26.19	4.2407	<10 <sup>-5</sup>	2079569
10	17⇒14	0.055	0.154	0.00290	0.45	26.40	26.19	2.6049	<10 <sup>-5</sup>	2082183
11	14⇒13	0.178	0.468	0.02700	0.45	26.19	24.59	2.9355	<10 <sup>-5</sup>	1254942
12	18⇒13	0.054	0.237	0.00688	0.45	25.13	24.59	4.0679	<10 <sup>-5</sup>	2277596
13	13⇒5	0.278	0.468	0.02702	0.45	24.59	22.90	1.7381	<10 <sup>-5</sup>	1446692
14	5⇒4	1.073	1.478	0.01250	0.70	22.90	21.32	1.1679	0.0088	5983395
15	20⇒19	0.021	0.307	0.01163	0.45	22.54	21.87	13.59	<10 <sup>-5</sup>	1673353
16	19⇒4	0.053	0.224	0.00618	0.45	21.87	21.35	4.0618	<10 <sup>-5</sup>	2442521
17	4⇒3	1.252	1.490	0.01270	0.80	31.32	18.45	1.0175	0.0432	9069857
18	3⇒2	1.343	1.490	0.01270	0.80	18.45	16.25	1.2215	0.0041	7185075
19	23⇒22	0.212	0.331	0.00290	0.50	17.17	16.88	1.0373	0.0368	4013520
20	22⇒21	0.423	0.458	0.00240	0.70	16.88	16.66	1.0078	0.0464	5805081
21	21⇒2	0.539	0.715	0.00290	0.80	16.66	16.25	1.0141	0.0444	11045773
22	2⇒1	1.929	2.275	0.00900	1.0	16.25	13.69	1.0181	0.0430	12152187
23	24⇒1	0.042	0.326	0.01612	0.45	15.11	13.74	8.002	<10 <sup>-5</sup>	2468073

Table 3. Result of USSOD model of Hwabong zone at Ulsan

Stage	Manhole	Design discharge (cms)	Pipe discharge (cms)	Slope	Diameter (m)	Upstream EL.(m)	Downstream EL.(m)	Safety ratio	Risk	Return cost (won)
1	10⇒9	0.092	0.2922	0.01218	0.45	33.43	32.27	3.4293	<10 <sup>-5</sup>	2750324
2	9⇒8	0.2087	0.4755	0.03226	0.45	29.72	26.50	2.1176	<10 <sup>-5</sup>	2883810
3	8⇒7	0.2558	0.4693	0.03142	0.45	26.40	25.30	1.7142	<10 <sup>-5</sup>	1011255
4	11⇒7	0.035	0.3447	0.01695	0.45	25.69	25.30	10.601	<10 <sup>-5</sup>	664539
5	7⇒6	0.2996	0.3731	0.01986	0.45	25.30	24.30	1.2396	0.00329	1458941
6	12⇒6	0.073	0.1882	0.00500	0.45	24.48	24.30	2.7809	<10 <sup>-5</sup>	1029168
7	6⇒5	0.6304	0.6402	0.01260	0.60	24.30	22.97	1.0294	0.03939	5751314
8	16⇒15	0.069	0.3035	0.01314	0.45	29.94	29.02	4.7391	<10 <sup>-5</sup>	2022510
9	15⇒14	0.1118	0.4744	0.03211	0.45	28.52	26.22	4.0344	<10 <sup>-5</sup>	2069316
10	17⇒14	0.055	0.1432	0.00290	0.45	26.43	26.22	2.8000	<10 <sup>-5</sup>	2071917
11	14⇒13	0.1623	0.4765	0.03239	0.45	26.02	24.62	2.6292	<10 <sup>-5</sup>	1248755
12	18⇒13	0.054	0.2196	0.00680	0.45	25.16	24.62	4.3888	<10 <sup>-5</sup>	2266366
13	13⇒5	0.2576	0.4478	0.02860	0.45	24.62	23.27	1.6834	<10 <sup>-5</sup>	1363460
14	5⇒4	0.9710	1.1341	0.01738	0.70	22.67	21.38	1.3774	0.0003	4808318
15	20⇒19	0.021	0.2854	0.01160	0.45	22.57	21.90	14.6104	<10 <sup>-5</sup>	1665103
16	19⇒4	0.0512	0.2081	0.00610	0.45	21.98	21.38	4.2264	<10 <sup>-5</sup>	2430479
17	4⇒3	1.1328	1.1526	0.01790	0.70	20.53	18.51	1.1900	0.00657	7537069
18	3⇒2	1.2142	1.4833	0.01450	0.80	17.61	16.31	1.1094	0.01816	7186355
19	23⇒22	0.212	0.2199	0.00690	0.45	17.22	16.53	1.5613	<10 <sup>-5</sup>	3193500
20	22⇒21	0.3983	0.4015	0.02300	0.45	16.53	14.16	1.0827	0.02417	3731310
21	21⇒2	0.5124	0.5196	0.00360	0.70	14.16	13.96	1.3265	0.0007	1093265
22	2⇒1	1.6765	1.7068	0.01030	0.90	13.96	12.92	1.1793	0.0076	10797589
23	24⇒1	0.042	0.3361	0.01610	0.45	15.14	13.77	8.6190	<10 <sup>-5</sup>	2455905

### 3.2 적용결과와 고찰

본 연구에서는 울산 화봉지구의 실제 설계 결과인 Table 2와 본 연구의 최적 설계모형 USSOD모형의 적용 결과인 Table 3에 대하여 관로의 정점표고, 설계유량 및 관경, 회수비용 등의 주요 항목을 비교 분석하였다. 이때 Table 4와 같이 주 연결 관로와 분기 연결 관로로 나누어 분석하였으며, 주 연결 관로는 유역 출구 지점인 1번 맨홀 위치에서 최원점인 10번 맨홀 위치까지 연결되는 관로로서 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10으로 연결되고, 분기 연결 관로는 16-15-14-13-5로 연결되는 관로를 택하였다.

**Table 4. Manhole station number and stage of main drainage pipe and branched drainage pipe**

Main drainage pipe		Branched drainage pipe	
Manhole station	Stage	Manhole station	Stage
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		

#### 3.2.1 관로 정점표고

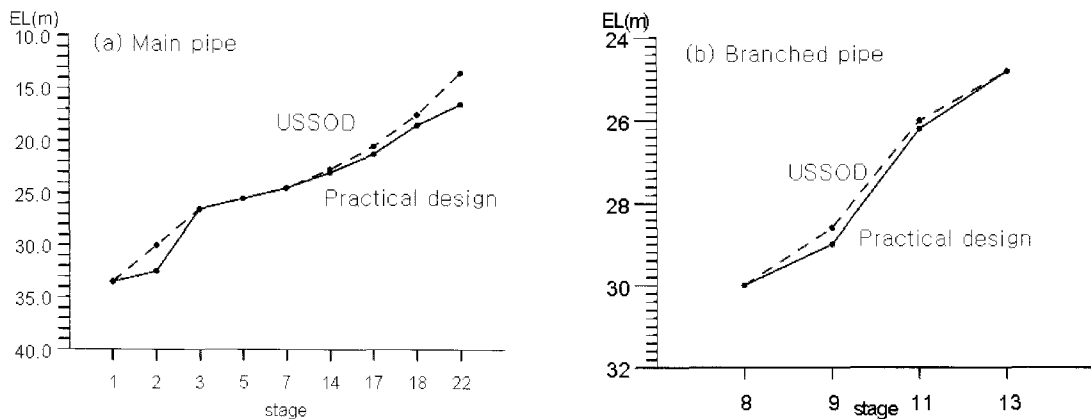
최적 설계모형인 USSOD모형의 결과치인 정점표고와 실제 설계 결과를 도시하면 다음의 Fig. 7과 같고, 이 결과는 굴착깊이를 결정짓는 항목으로 최적화의 값에 영향을 미친다고 할 수 있다. 적용 결과 먼저 주 연

결 관로에서 1단계, 2단계에서는 표고 차이가 0.03m 차이가 나며, 3단계에서는 0.48m로서 실제 설계치의 굴착 깊이가 더 깊게 나타난다. 7단계에서는 0.03m 정도의 차이가 나며, 17단계, 18단계에서는 0.06m의 차이를 보이고, 22단계에서는 0.77m 만큼 실제 설계 결과가 깊어지고 있다. 또한 분기 연결 관로에서도 8단계에서는 0.47m, 11단계에서는 0.24m로 실제 설계 결과치가 더 깊게 나타난다. 여기서 13단계는 유출상태가 5번 맨홀로 연결되고, 이는 주 연결 관로의 14단계로 연결되어지는 지점이다. 이와 같이 관로의 정점표고를 살펴보면 전반적으로 USSOD모형의 결과가 실제 설계보다 경제적인 최적 설계를 이룬다고 할 수 있다.

#### 3.2.2 설계유량 및 관경

화봉지구 적용 유역에서의 최소 관경은 0.45m를 사용하였으며 USSOD모형에서도 최소 관경을 0.45m로 사용하였다. 주 연결 관로 1단계에서 설계유량은 0.092 cms인데 관경 0.45m인 관의 유량은 실제 설계 결과에서는 0.315cms가 나타나고 USSOD모형에서는 0.2922 cms가 나타났다. 물론 두 경우의 관유량 차이는 각각의 관 경사 차이에서 연유한다. 또한 설계유량과 관유량의 비가 안전율이므로 관용량이 커질수록 안전율은 커지며 상대적으로 위험도는 적어진다.

주 연결 관로에서 설계유량 결과를 살펴보면 다음의 Fig. 8에서 보듯이 USSOD모형의 설계유량이 유역 출구쪽으로 진행할수록 설계유량의 산정값이 차이가 나며 22단계의 설계유량은 실제 설계 결과치는 1.9290cms이고 USSOD모형의 설계 유량은 1.6765cms로 0.2525cms의 차이가 나타난다. 이는 관경의 결정에 영향을 미치는 결정적인 인자이다. 또한 분기 연결 관로에서도 11단계에서는 0.0157cms, 13단계에서는 0.0204cms가 USSOD모형의 설계 결과가 적게 나타나고 있음도 알 수 있다.



**Fig. 7. Comparison of crown elevations of practical design with USSOD model**

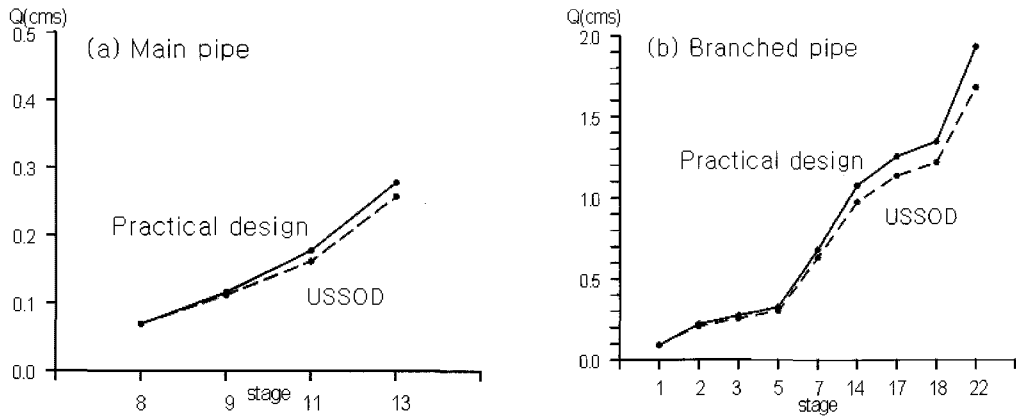


Fig. 8. Comparison of discharges of practical design with USSOD model

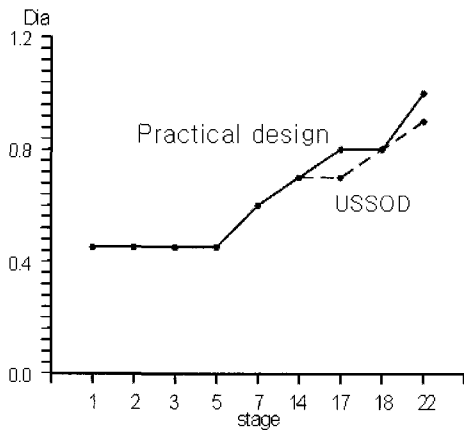


Fig. 9. Comparison of diameters of practical design with USSOD for main drainage pipe

다음의 Fig. 9는 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 USSOD모형에서는 0.7m의 관경을 사용함을 보여주고 있다. 또한 22단계에서도 실제 설계 결과는 1.0m 관경이나 USSOD

모형에서는 0.9m의 관경을 경제적인 최적 결과로 보여주고 있다. 그러나 분기 연결 관로에서는 설계유량이 차이가 있어도 최소 관경이 0.45m이므로 실제 설계 결과의 관경과 USSOD모형의 관경이 동일하게 나타난다.

### 3.2.3 회수비용

관로의 설치비용은 굴착깊이와 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 Fig. 10에 나타나 있다.

주 연결 관로에서 살펴보면 14단계에서는 실제 설계치의 회수비용은 USSOD모형의 설계 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 보이나, 13단계에서는 6.1%정도 실제 설계의 결과치가 USSOD모형 설계 결과의 회수비용 보다 크게 나타난다.

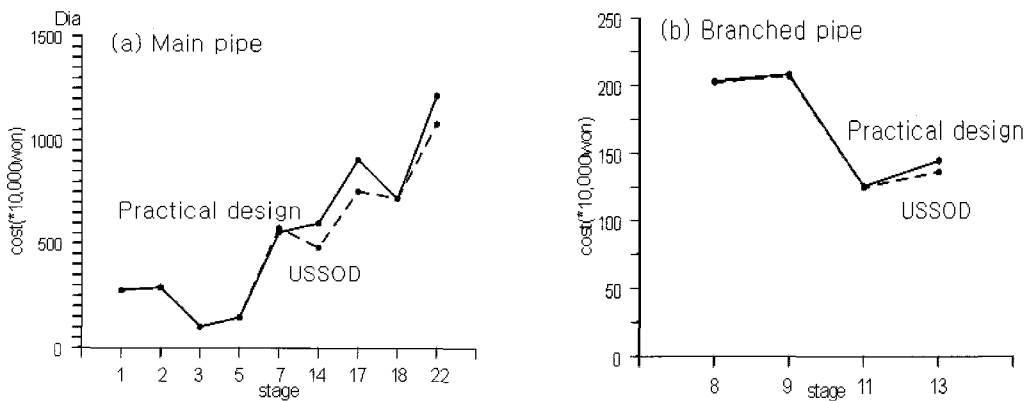


Fig. 10. Comparison of return costs of practical design with USSOD model



#### 4. 결 론

본 연구에서는 위험도를 고려한 최소비용의 도시 우수관망 최적 설계모형(USSOD)을 개발하였으며, 이의 적용 결과로부터 얻은 결론과 앞으로의 연구방향에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 개발한 모형은 위험도 해석을 포함한 도시 우수시스템의 최적설계모형으로써 맨홀의 위치와 유입 유량만 결정되면 최적 설계 결과를 도출할 수 있는 모형이다.
- (2) USSOD모형을 한국토지개발공사가 시행한 울산 화봉지구의 설계결과에 직접 적용해 본 결과, 위험부담비를 고려한 실제 설계시의 회수비용이 USSOD모형의 최적 설계의 회수비용보다 약 9% 높게 나타났으며, 이는 최적설계모형인 USSOD 모형이 더 경제적인 설계결과를 도출한다고 판단된다.
- (3) 모의결과 설계유량과 상용우수관 사용에서도 USSOD모형이 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.

#### 참 고 문 헌

- 김문모, 이원환, 조원철 (1992). "수공학에서 신뢰도 해석방법에 관한 연구", **한국수문학회지**, Vol.25, No.4, pp.18~30.
- 김문모, 이원환, 조원철 (1993). "수공학에서 신뢰도 해석방법에 관한 연구", **한국수문학회지**, Vol.26, No.1, pp.18~26.
- 고재웅 (1993). "하수도 설계에서 불확실성과 위험도", **도시수문학 강좌**, 한국수문학회
- 이희영, 장석환, 전병호 (1993). "도시우수시스템의 불확실성 해석과 위험도 평가" **한국수문학회 학술발표회**.
- 한국토지개발공사 (1990). **울산 화봉지구 택지개발 기**

#### 본설계서.

- Ang, A.H.S., and Tang, W.H. (1975). "Probability Concept in Engineering Planning and Design", Vol. I : *Basic Principles*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Argaman, Y., Shamir, U., and Spivak, E. (1973). "Design of Optimal Sewerage System", *Jour. Env. Div.*, ASCE, Vol.99, No.EE5, pp.703~716.
- Barlow, J.F. (1972). "Cost Optimization of Pipe Sewerage Systems", *Proceedings, Institution of Civil Engineers(London)*, Vol.53, pt.2.
- Heidari, M (1970). *A differential dynamic programming approach to water resources analysis*, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Campaign, Ill.
- Huang, K.Z. (1986). "Reliability Analysis on Hydraulic Design of Open Channel", *Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Eng.* e.d. Yen, Water Resources Publication Littleton Colo., pp.60~68.
- Melching, M.B. (1987). *A Reliability Analysis on Flood Event Forecasting with Uncertainties*, Ph.D Thesis Dept. of Civil Engineering Univ. of Illinois.
- Merritt, L.B. (1973). "Computer-Based Optimal Design of Sewer System", *Jr. Env. Div.*, ASCE, Vol.99, No.EE1, pp.35~53.
- Tang, W.H., and Yen, B.C. (1972). "Hydrology and Hydraulic Design under Uncertainties", *Proceedings, International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources System*, Vol.2, Tucson, Ariz., pp.868~882.
- Yen, B.C. (1970). "Risk in Hydrologic Design of Engineering Projects", *Jr. of the Hydraulic Div.*, ASCE, Vol.96, No.HY4, Proc. Paper 7229, pp.959~966.
- Yen, B.C., and Ang, A.H.S. (1971). "Risk Analysis in Design of Hydraulic Projects", *Stochastic Hydraulic, University Pittsburgh*, Pittsburgh, pp.694~709.
- Yen, B.C., Wenzel H.G., Mays, L.W., and Tang, W.H., "Advanced Methodologies for Design of Storm Sewer System", *WRC, Research Report No.112*, University of Illinois.

(논문번호:05-38/접수:2005.02.25/심사완료:2005.10.17)