

## 도시지역의 최적 배수관망 설계를 위한 Risk Safety Factor 관계의 설정

### Derivation of the Risk-Safety Factor Relation for Optimal Storm Sewer Design in Urban Area

김문모\* · 이원환\*\* · 조원철\*\*\*

Kim, Mun Mo · Lee, Won Hwan · Cho, Won Cheol

#### Abstract

This paper presents the relation between risk and safety factor for optimal storm sewer design in urban area. For reliability analysis of the storm sewer, uncertainty of the various parameters of constituting equation determining the capacity and load of storm sewer is considered and risk is determined.

In this study, reliability analysis method is applied to Seongsan detention reservoir basin which area is 381,000 m<sup>2</sup>. Darcy-Weisbach equation is used for determining capacity of the storm sewer and rational formula is used for determining load. Safety factor representing ratio of the sewer capacity and design flowrate is calculated, and relating with risk. Then risk and safety factor with return period is obtained and it is used for optimal design of storm sewer.

#### 요 지

본 논문은 도시구역의 최적 배수관망설계를 위한 위험도-안전도계수 관계를 설정하는 것이다. 배수관망의 신뢰도 분석을 위하여는 하수관의 용량과 하중을 결정하는 식을 구성하는 여러가지 매개변수들의 불확실성이 고려되어야 하며, 이에 따른 위험도를 결정하게 된다.

본 연구에서는 신뢰도 분석기법을 유역면적 381,000m<sup>2</sup>인 성산 유수지 유역에 적용하였다. 하수관망의 용량을 결정하는 식으로는 Darcy-Weisbach식을, 하중을 결정하는 식으로는 합리식을 사용하였으며, 하수관의 용량과 설계유량과의 비로 나타나는 안전도계수를 구하여 이를 하수관망의 위험도와 상관시켰다. 이에 따라 재현기간별 위험도-안전도계수를 얻었으며, 이는 배수관망의 최적설계에 이용될 수 있다.

#### 1. 서 론

\* 정회원 · 신구전문대학 토목공학과 전임강사  
\*\* 정회원 · 연세대학교 토목공학과 교수  
\*\*\* 정회원 · 연세대학교 토목공학과 부교수

최근의 급격한 도시화에 따른 포장율의 증가로 기존의 강우에 대해서도 침투 도달시간의 단축, 침투

유출량의 증가, 총유출량의 증가와 같은 도시화 현상이 나타나기 시작하였다. 따라서, 기왕의 강우와 비슷한 강우에 대해서도 재해를 입는 경우가 많이 발생하게 되었다. 이에 대한 대비책의 일환으로 배수관망체계에서 관의 직경과 경사와 같은 여러가지 변수들의 최적설계를 위한 새로운 방법의 연구가 활발히 진행되고 있다. 배수관망의 신뢰도 분석을 위하여는 여러가지 요인의 불확실성이 고려되어야 하며, 이를 이용하여 강우로 인한 잠재적인 홍수피해와 관망설치 비용사이에 기준을 설정하게 된다. 이를 위하여는 배수관망의 Risk-Safety Factor 관계를 설정하여야 한다. 배수관망의 신뢰도 분석을 위하여는 하수관의 용량(Capacity)과 하중(Load)을 결정하여야 하며, 배수관거에 있어서 파괴(Failure)는 구조적인 변형이나 피해를 의미하는 구조적 파괴(Structural Failure)와 시스템의 수행 능력을 초과하는 것을 의미하는 수행능력상의 파괴(Performance Failure)로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 하수관거의 하중이 용량을 초과하는 것으로 정의한다.<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 신뢰도 분석기법을 생산유수지 유역의 배수관망에 적용하였으며, 하수관의 용량을 구하는 데는 Darcy-Weisbach 식을 이용하였고, 하수관의 하중으로는 합리식을 이용하였다. 이 두식의 각 변수에 미치는 불확실성을 계산하여 위험도-안전도계수의 관계를 설정하였다. 이렇게 설정된 관계는 하수관망의 최적설계 방법에 이용될 수 있을 것이다.

## 2. 기본방정식

공학시스템과 관련된 위험도란 시스템이 설계된 기능을 수행하지 못할 확률을 말한다. 공학시스템에서, 시스템파괴의 개념은 일반적으로, 시스템에 작용하는 하중,  $L$ 이 시스템의 저항능력,  $R$ 을 초과하는 것으로 정의된다.  $Q_c$ 를 하수관의 용량,  $Q_L$ 을 재현기간  $T$ 년의 침투홍수량이라 하고, 파괴는 이 침투홍수량을 하수관이 통수시킬 수 없는 것으로 정의하면, 위험도는  $Q_L > Q_c$  일 사건의 확률로 정의된다. 불확실성의 1계 분석(First-Order Analysis of Uncertainties)<sup>(2)</sup>을 이용하고,  $Q_c$ 와  $Q_L$ 을 대수정규 분량으로 가정하면 위험도를 구하는 식은 식 (1)과 같이 된다.

$$\text{위험도} = P(Q_L > Q_c) = \Phi \left[ \frac{\ln \frac{\bar{Q}_L}{\bar{Q}_c}}{(\Omega_{Q_L}^2 + \Omega_{Q_c}^2)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

여기서,  $\Phi$  = 누가 표준정규 분포함수,  $\Omega_{Q_L}$ 과  $\Omega_{Q_c}$ 는 각각  $Q_L$ 과  $Q_c$ 의 변동계수(Cov)이다. 또한,  $-$ 는 평균치를 의미한다. 일반적으로, 하수관의 용량은 설계상 요구되는 능력  $Q_0$ 보다 크도록 계획된다. 따라서, 설계의 안전도계수(Safety Factor, SF)는 다음과 같이 정의된다.

$$SF = \frac{\bar{Q}_c}{Q_0} \quad (2)$$

만일, 합리식  $Q = CiA$  가 하수관망의 하중을 결정하는 식으로 사용된다면,  $Q_0$ 는 식 (3)에 의해 계산될 수 있다. 여기서,  $C$  = 유출계수,  $i$  = 강우강도,  $A$  = 유역면적이다.

$$Q_0 = \bar{C} i_0 \bar{A} \quad (3)$$

여기서,  $i_0$  = 설계재현기간에 따라 유량을 계산하기 위해 사용되는 확률강우강도이다. 하수도용량  $Q_c$ 는 관이 거의 차서 흐르는 중력관 흐름으로 가정한 Darcy-Weisbach식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$Q_c = \frac{\pi}{4} \left( \frac{2gS}{f} \right)^{1/2} (4R)^{5/2} \quad (4)$$

여기서,  $f$  = Weisbach 저항계수,  $S$  = 마찰경사,  $g$  = 중력가속도,  $R$  = 경심으로서 여기서는 관의 직경을  $D$ 라 할 때  $R$ 은  $D/4$ 와 같다고 가정하였다. 그러나, 식 (4)는 부정부등류 흐름에서는 근사식이 된다. 모형화에 따른 오차항  $\lambda_c$ 를 식 (4)에 도입하면 식 (5)와 같이 된다.

$$\bar{Q}_c = (8\pi \sqrt{2}) \sqrt{g} \bar{\lambda}_c \bar{S}^{1/2} \bar{f}^{-1/2} \bar{R}^{5/2} \quad (5)$$

$$\Omega_{Q_c}^2 = \Omega_{\lambda_c}^2 + \frac{1}{4} \Omega_S^2 + \frac{1}{4} \Omega_f^2 + \frac{25}{4} \Omega_R^2 \quad (6)$$

같은 방법으로  $Q_L$ 의 평균과 변동계수는 식 (7), (8)과 같이 산정될 수 있다.

$$\bar{Q}_L = \bar{\lambda}_L \bar{C} i_T \bar{A} \quad (7)$$

$$\Omega_{Q_L}^2 = \Omega_{\lambda_L}^2 + \Omega_C^2 + \Omega_{i_T}^2 + \Omega_A^2 \quad (8)$$

여기서,  $i_T = T$ 년 동안  $i$ 가 발생할 수 있는 최대

기대치이며,  $\lambda_n$ 은 합리식에 사용된 근사치로 인한 보정치를 나타낸다.

### 2.1 하수관용량 산정에서 불확실성의 분석

하수관용량의 산정에서 불확실성에 기여하는 4 가지 매개변수는 다음과 같이 계산된다.

#### 2.1.1 경심

경심 R에서 발생하는 불확실성의 주요 원인은 관의 제조상 공차에 기인한다. 또 다른 하나는 침전물에 따른 단면의 감소이며, 이것은 저항계수(Resistance Coefficient)에 변화를 줌으로서 설명하여 왔다. 결국, 수심은 거의 차서 흐르는 중력흐름으로부터 크게 변화할 수 있다. 이러한 불확실성은 식에 의한 오차에 포함된다.

#### 2.1.2 저항계수

저항계수 f에 대한 불확실성은 주로 관벽의 매끈한 정도로부터 발생한다. 공칭직경으로부터 관직경의 편차와 같은 다른 요인인 f의 값에 거의 영향을 미치지 못한다. 새로운 콘크리트관에서 대응하는 표면 거칠기, k는 0.0003 m ~ 0.003 m까지 변화한다. 1.5 m 관에서, k/D 값은 0.0002 ~ 0.002까지 변화한다. 따라서, Moody Diagram으로부터, 아주 발달한 난류흐름에서 f는 0.0135 ~ 0.024까지 변화한다.<sup>(3)</sup>

#### 2.1.3 경사

경사 S에 대한 불확실성은 관의 정렬불량 또는 굴곡 때문에 주로 발생하는데 경사가 작을 때 크게 된다. 1/1,000 경사에서  $\pm 25\text{mm}$ 의 오차를 가지며, 이 오차의 범위에서 대칭삼각형 분포로 가정하면 오차는  $S=0.001$ 에서  $\Omega_S=0.068$ 이다.

#### 2.1.4 식오차

도시 하수관망의 홍수흐름은 부정류이고 부정류이다. 따라서, Darcy-Weisbach 식은 오차가 있을 것으로 생각된다. Yen과 Sevuk<sup>(4)</sup>에 의해 관거설계에 적용된 통계학적 결과분석에 따르면  $\lambda_C=1.1$ 이다. 평균이 1.1이며 0.8 ~ 1.4에 걸친  $\lambda_C$ 의 분포를 삼각형으로 가정하면  $\Omega_{\lambda_C}=0.11$ 이다.

### 2.2 설계유량산정에서 불확실성의 분석

다음 매개변수들의 불확실성은 식 (7)과 (8)에서 지적된 것처럼 설계유량  $Q_L$ 의 평균과 공분산을 예측하는데 필요하다.

표 1. 유출계수에 미치는 불확실성 요소의 산정

	아파트 지역	지 붕	주거지	주행로와 보도
$\alpha_j$	0.5	0.2	0.2	0.1
$C_j$	0.5-0.7	0.75-0.95	0.3-0.5	0.75-0.85
$C_j$ 의 변동계수	0.096	0.068	0.145	0.036
$C_j$ 의 예측오차	0.031	0.023	0.048	0.012
$\delta_{C_j}$	0.101	0.072	0.153	0.038

#### 2.2.1 유출계수

배수면적이 A인 유역에서 가중유출계수는  $C = \sum_j \alpha_j C_j$ 에 의해 계산된다. 여기서,  $\alpha_j = a_j/A$ 이며,  $a_j$ 는 같은 유출계수  $C_j$ 를 갖는 소유역의 면적이다. 성산유수지 배수유역은 50%가 아파트 지역, 20%가 지붕, 20%가 주거지, 10%가 주행로와 보도로 구성된 조밀한 유역으로 가정했다.  $\Omega_C$ 에 기여하는 요소의 불확실성 분석은 표 1에 요약되어 있다.  $\delta_{\alpha_j}$ ( $\alpha_j$ 의 예측오차)는 대략 0.10으로 보았다. 여기서,  $\delta_{C_j}$ ( $C_j$ 의 변동계수)<sup>2</sup> + ( $C_j$ 의 예측오차)<sup>2</sup>이다.

또한, 다음과 같은 1계 방정식에 기초하여  $\Omega_C$ 에 기여하는 요소의 불확실성을 산정하였다.

$$\bar{C} = \sum_j \bar{\alpha}_j \bar{C}_j \quad (9)$$

$$\Omega_C = \frac{1}{\bar{C}} \left[ \sum_j \bar{\alpha}_j^2 \bar{C}_j^2 (\delta_{\alpha_j}^2 + \delta_{C_j}^2) \right]^{1/2} \quad (10)$$

#### 2.2.2 강우강도

강우강도에 대한 불확실성은 설계 재현기간,  $T_r$ 과 강우지속기간  $t_d$ , 유역의 위치와 크기에 따라 변화한다.

##### (1) 재현기간의 영향

주어진 강우지속기간에 대한 서울시 유역에서 강우강도와 재현기간 사이의 관계는 참고문헌 (5)로부터 계산될 수 있다. 일례로  $t_d=30$ 분인 성산 유수지 유역에서  $i_r$ 과  $T_r$  사이의 관계는 그림 1에서 처럼 대수정규확률지에 도시해 볼때 대략 직선이다. 따라서 연최대 강우강도  $i_n$ 는 대수정규분포로 가정될 수 있다.

$$\bar{i}_r = i_0 + 0.45 \zeta \exp(M + 0.5 \zeta^2) \quad (11)$$

여기서,  $i_0$ 는 식 (3)에서 정의된 것이며, M은 그림

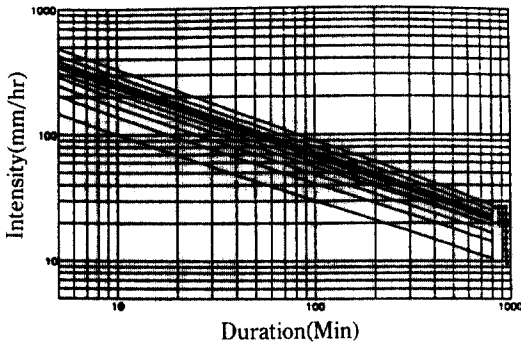


그림 1. 서울지방의 강우강도-재현기간-지속기간의 관계

1에서 각 지속기간 별로 확률 0.5에서  $\log i$  값이고,  $\zeta$ 는 확률 0.16에서  $\log i$  값-M이다.<sup>(2)</sup> 또한, 공분산은 다음과 같다.

$$\delta_{ir} = \frac{\zeta \exp(M + 0.5 \zeta^2)}{i_r} \quad (12)$$

#### (2) 지속기간의 영향

서울시의 강우자료로부터 유도된 주어진 재현기간에서 강우강도  $i_r$ 와 지속기간  $t_d$  사이의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$i_r = \frac{a}{b + t_d^{1/2}} \quad (13)$$

결과적으로, 불확실성의 1계 분석으로부터,<sup>(2)</sup> 공분산은  $\delta_{ir} = \delta_i t_d / (b + t_d)$ 이며, 여기서  $\delta_i$ 는 약 10% 정도로 계산되는 지속기간의 예측오차이다.

#### (3) 제한된 강우자료의 영향

유용한 강우자료가 제한됨으로 말미암아 예측오차는 생긴다. 이러한 오차가 전체 불확실성에 미치는 기여도는 주로  $i_d$ 의 계산으로부터 발생하며, 예측오차는  $\delta_{ia}/N^{1/2}$ 로 나타난다. 여기서, N은 관측년수이며,  $\delta_{ia}$ 는  $i_d$ 의 공분산이다. 따라서, 제한된 자료 때문에  $i_r$ 에서 발생하는 오차는  $\delta_{ir} = (\delta_{ia}/N^{1/2}) (i_0/i_r)$ 이다.

#### (4) 유역크기의 영향

주어진 재현기간과 강우지속기간에서 평균강우강도는 유역면적이 커짐에 따라 줄어드는 경향이 있다. 본 논문에서 적용한 성산유수지 경우의 유역면적 381,000 m<sup>2</sup>에서 이러한 영향은 매우 작다. 유역크기의 영향에 따른 오차  $\delta_{is} = 0.006$ 으로 가정될 수 있다.

(5) 기계사용, 자료읽음과 처리, 보상에 따른 영향

이러한 매개변수의 불확실성을 판단하기에 유용한 정보는 예측오차의 자세한 확률분석을 위해서는 부적절하다. 그러나, 이러한 영향에 따른 총오차는 주관적으로 계산해 볼 때  $\delta_{id} = 0.08$ 이다.<sup>(6)</sup>

#### (6) 강우강도의 총예측오차

이것은 공분산  $\Omega_i = (\delta_{ir}^2 + \delta_{it}^2 + \delta_{ir}^2 + \delta_{is}^2 + \delta_{id}^2)^{1/2}$ 에 의해 얻어진다.

#### 2.2.3 유역 면적

유역면적은 통상 지도로부터 구해진다. A의 오차를 계산하기 위해 34명의 학생에게 배수유역을 조사하고 USGS 지도로부터 면적을 결정하도록 한 결과에 의하면 평균오차는  $\delta_A = 0.045$ 로 나타났다.<sup>(7)</sup>

본 논문에서 면적은 한사람에 의해 계산된 것으로 가정한다. 따라서, 예측오차는  $0.045/n^{1/2} = 0.045/1^{1/2} = 0.045$ 이다. 지도에서 오차는 일반적으로 작으며 0.001로 가정된다.

#### 2.2.4 식오차

합리식은 가정하는 조건에 따라 첨두유량을 과대 혹은 과소 계산하게 된다. 따라서,  $\lambda_L = 1.0$ ,  $\Omega_{\lambda_L} = 1.0$ 으로 가정된다.

### 3. 위험도-안전도계수 곡선의 작성

위의 유역에서 계산된  $Q_0$ ,  $Q_L$ ,  $Q_C$  및  $\Omega_{QL}$ 과  $\Omega_{QC}$ 의 값을 조합하면 식 (1)로부터 위험도를 구할 수 있으며, 대응하는 안전도계수는 식 (2)로부터 구할 수 있다. 이 값과 다른 조건은 변화없이 관경만 변화시키면  $Q_C$ 와  $\Omega_{QC}$ 가 변화하게 되며, 또 다른 점을 얻게 된다. 최종 과정은 재현기간은 변화시키지 않고 지속기간을 변화시켜 행하여 진다. 이 과정을 계속 반복하면 여러가지 재현기간  $T_r$ 에 대한 곡선군을 얻을 수 있다.

### 4. 적용 및 고찰

위와 같은 신뢰도 분석기법을 유역면적 381,000 m<sup>2</sup>인 성산 유수지 유역에 적용하여 본 결과, 재현기간별로 그림 2~그림 5와 같은 위험도-안전도계수 곡선을 얻을 수 있었다. 그림에서 알 수 있듯이,

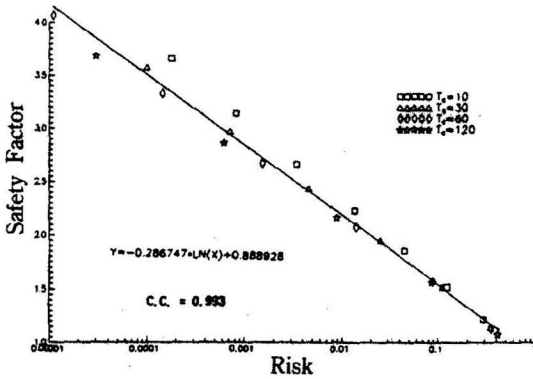


그림 2. 성산 유수지유역의 위험도-안전도계수 곡선 (재현기간 2년)

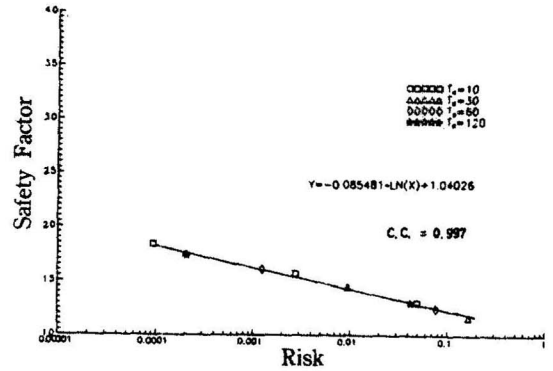


그림 5. 성산 유수지유역의 위험도-안전도계수 곡선 (재현기간 20년)

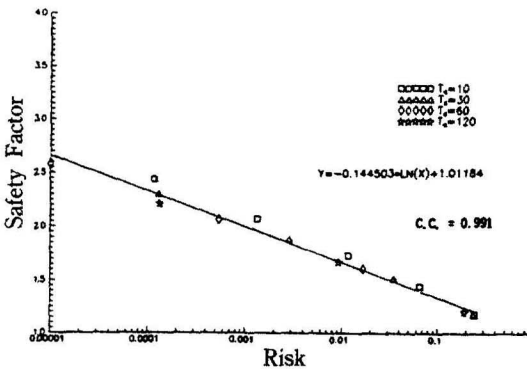


그림 3. 성산 유수지유역의 위험도-안전도계수 곡선 (재현기간 5년)

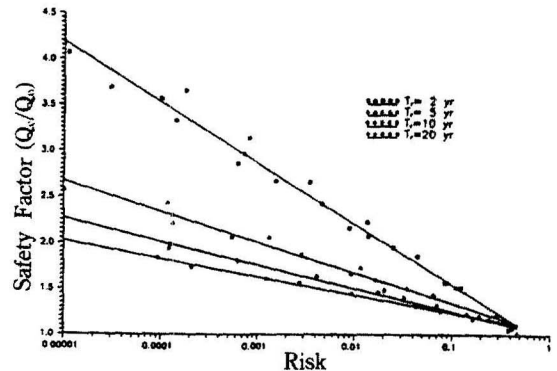


그림 6. 성산 유수지유역의 재현기간별 위험도-안전도 계수 곡선

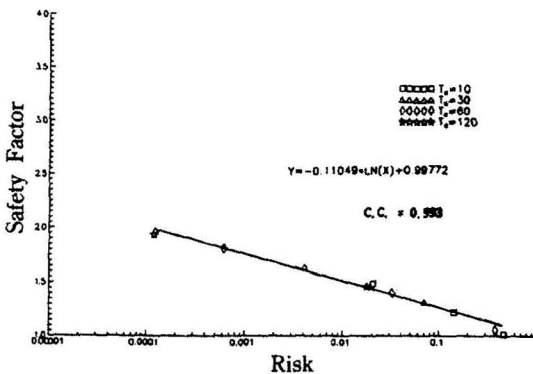


그림 4. 성산 유수지유역의 위험도-안전도계수 곡선 (재현기간 10년)

강우의 지속기간에는 관계없이 위험도와 안전도계수는 반대수지 상에서 직선을 나타내고 있다. 또한, 이것을 하나로 통합해 보면 그림 6과 같이 재현기

간이 커짐에 따라 직선의 기울기가 감소함을 알 수 있다. 위험도-안전도계수 곡선은 강우의 공간적 변화와 표면경사 때문에 지리적조건에 따라 변화하게 된다. 때문에 위치가 다른 곳에는 다른 곡선이 사용되어야 한다. 또한, 각 매개변수의 불확실성 산정에 보다 정확한 정보를 사용할 수 있다면 불확실성의 수준은 줄어들 것이며, 동일한 위험도에서도 작은 안전도계수를 사용할 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

본 연구는 하수관망의 최적설계를 위한 위험도-안전도계수 곡선을 유도하기 위한 것으로 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 성산유수지 유역에 신뢰도 분석기법을 적용하여 재현기간별 위험도-안전도계수곡선을 얻었다.

2) 위험도와 하수관거의 용량에 대한 설계유량의 비로 나타나는 안전도 계수(SF)는 반 대수지상에서 선형적으로 반비례하는 관계를 나타내었다.

3) 그림 6과 같이 재현기간이 작아짐에 따라 동일한 위험도를 가지기 위해서는 큰 안전도계수를 요구하게 된다.

4) 최적하수관망 설계를 위해서는 매개변수의 불확실성을 고려한 위험도를 각 구역별로 결정하여 사용해야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. B. C. Yen, *Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering*, WRP, 1986.
2. A. H-S. Ang and W. H. Tang, *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*: Vol. I and II, John Wiley & Sons, 1984.
3. 이원환, 수리학, 문운당, 1987.
4. B. C. Yen and A. S. Sevuk, "Design of Storm Sewer Networks", *Journal of Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 102, No. EE4, pp. 509-516, 1975.
5. 서울특별시, 하천연안 수공구조물 안전진단 및 관리대책 조사연구보고서, 1991.
6. B. C. Yen, and W. H. Tang, "Risk-Safety Factor Relation for Storm Sewer Design", *Journal of Environmental Engineering Division*, ASCE, Tech. Notes, Vol. 102, No. EE2, pp. 509-516, 1976.
7. C. S. Melching, "A Reliability Analysis on Flood Event Forecasting with Uncertainties", Ph. D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 1987.

(接受 : 1992. 7. 21)