한국관개배수 제4권 제2호
KCID J. Vol.4 No.2(1997. 12)pp 10-24

논 문

도시유역 우수관거의 안전도 해석에 관한 연구

Reliability Analysis of Storm Sewer in Urban Area

김 문 모*
Kim, Mun-mo

Abstract

This study is to analyse the reliability of storm sewer in urban area by applying the reliability analysis method. Two methods (MVFOSM and AFOSM) are applied to 6 drainage area in Seoul city and risk-safety factor curves are derived. Because risk-safety factor relation is plotted linearly on semilog paper when MVFOSM method is used, it is regressed and represented as linear equation and the coefficient of linear equation is presented at each basin according to return period. Also, representative risk based design curve is suggested.

I. 서 론

최근 우리 나라에서는 급격한 산업화와 도시화로 인하여 인구의 도시집중 현상, 택지개발로 인한 포장률 증가 등의 현상이 나타나고 있으며, 이에 따라 도시지역에 있어서는 유출현상에 많은 변화가 나타나고 있다. 즉, 이전과 동일한 강우에 대해서도 도달시간은 단축되고 첨두홍수량은 증가되어 피해규모는 커지고 있다. 또한, 도시의 인구 집중현상에 의해 하천연변의 저지대까지 택지가 조성되어 홍수발생시 재산상의 피해 뿐만 아니라 인명의 피해도 증가하고 있으며, 여러가지 에너지의 사용으로 인한 대기오염, 공장폐수 등에 의해 수질오염이 가중되고 있어 도시화에 따른 피해가 이수, 치수적인 측면에서 더욱 가중되고 있는 실정이다. 과거에는 각종 수공구조물을 설계할 때 기왕의 수문사상을 통계학적으로 분석하여 적당한 설계빈도에 따른 계획수문량을 결정하는 확정론적인 방법을 많이 이용하여 왔다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같은 수문사상의 변화에 대처하지 못하고 있어, 설계빈도의 무조건적인 상향조정과 같은 방법보다는 강우, 유출에 기여하는 변수들의 특성과 불확실성을 분석하고 이들의 확률분포를 이용하여 수공시스템에 미치는 영향을 파악하는 신뢰도 분석을 하여야 할 것이다.

* 신구전문대학교 토목과

키워드 : 신뢰도 분석방법, MVFOSM 방법, AFOSM 방법, 위험도, 안전율, 불확실성

우수관거의 경우에 있어서도, 홍수시 토사의 퇴적으로 인하여 통수단면이 축소되고 이로 인하여 설계시의 홍수량을 제대로 소통시키지 못하는 경우가 많이 발생하고 있으며, 설계시에는 간선의 경우 10년, 지선의 경우 5년 등과 같이 우수관거의 중요도나 위험도와 같은 다른 설계인자들을 고려하지 않고 일률적인 빈도로 설계를 하고 있는 실정이다. 이에 대한 대책의 일환으로 우수관거 시스템에서는 우수관의 관경과 경사와 같은 홍수소통 능력에 영향을 주는 여러가지 변수들의 최적설계를 위한 새로운 방법의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 이에 대한 연구가 매우 미흡한 실정이다. 우수관거의 신뢰도 분석을 위하여는 우수관거의 용량에 영향을 주는 여러가지 요인의 불확실성이 고려되어야 하며, 이것을 이용하여 강우로 인한 잠재적인 홍수피해와 관망설치 비용 사이에 기준을 설정하게 된다.

수공구조물의 설계와 평가에서는 불확실성이 항상 포함되기 때문에, 이에 따른 위험도의 산정이 반드시 고려되어야 한다. 신뢰도 분석방법에는 크게 직접적분법, Monte Carlo Simulation법, MVFOSM(Mean Value First Order-Second Moment)법과 AFOSM(Advanced First Order-Second Moment)법 등이 있다. 직접적분법은 만일, 어떤 시스템에 가해지는 부하와 이에 대응하는 능력을 나타내는 저항의 관계를 적절하게 나타낼 수 있는 분포함수를 정확하게 알 수 있다면 이에 의해 산정되는 위험도는 엄밀해를 나타내며 이 방법은 가장 좋은 방법이 된다. 그러나, 이 방법에는 여러 가지 문제점이 있으며, 가장 크게 어려운 점은 적절한 분포함수를 선정하는 것이다. 산정된 위험도는 선정된 분포함수에 아주 민감하게 되며, 실제로 분포함수의 부적절하게 주어진 가정들 때문에 직접적분법의 가장 큰 장점인 정확도를 얻을 수 없게 될 수도 있다. 따라서, 홍수경보와 같은 실제적인 적용을 할 경우, 직접적분법은 현실적이지 못한 것으로 알려져 있다.

Monte Carlo법은 일반적으로 여러 분야에서 많이 적용이 되고 있는 알려진 방법으로서 각각의 모의에 있어 대응하는 기본변량의 확률분포에 따라 발생되는 무작위 변량값의 특정집합을 사용하는 과정이다. 그러나, 이 방법에 의해 산정되는 위험도는 유일한 해를 가지지 않는다. 즉, 이것은 표본의 크기와 시행 횟수에 따라 결정되기 때문이다. 이러한 단점을 극복하기 위해, 시행 횟수를 늘려야만 하며, 따라서 요구되는 계산시간은 대단히 크게 된다. 이렇게 과다한 계산비용이 들게 되므로 Monte Carlo법의 신축성은 의미가 없게 된다. 더우기 Monte Carlo법은 기본변량의 가정된 분포에 대단히 민감하게 작용한다. 따라서 Monte Carlo법은 일반적으로 나머지 방법의 적용이 불가능한 경우에 최후의 수단으로 사용하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 서울시의 우수관거의 신뢰도를 평가하기 위하여 MVFOSM법과 AFOSM법을 적용하고, 이에 따른 위험도를 산정하여, 위험도와 안전율과의 관계를 유도, 우수관거의 설계와 평가시 이를 활용할 수 있는 기법을 제시하고자 한다. 또한, 이것을 바탕으로 설계 재현기간별로 위험도와 안전율과의 관계를 각 유역별로 설정하여 우수관거의 최적설계를 할 수 있도록 하고자 한다.

Ⅱ. 기본 이론

1. MVFOSM법

FOSM(First Order Second Moment) 신뢰도 분석방법의 개념은 오래전에 제안되었으며, Mayer[7] 는 구조물의 안전도 분석에 무작위 변량의 평균과 분산의 사용을 제안하였다. 그러나, Mayer의 제안은 30년 이상이나 무시되어 왔는데 그 이유는 아마도 공학자들이 공학설계 문제에서 물리적인 면으로 보다 나은 식을 얻기 위해 노력해 왔기 때문일 것이다. Su[10] 는 여러가지 구조적인 문제에서 물리적인 면은 현재 잘 규명되었으나, 구조적인 설계에 대한 전통적인 방법은 아직도 만족스럽게 해명되지 못하고 있

다고 주장하였다. 그는 정규분포에 기초하여 MVFOSM식을 개발하였으며, 구조적인 안전계수의 보다 합리적인 결정을 위해 사용할 것을 제안하였다. 그러나, Cornell[5]이 Su의 방법과 매우 유사한 식을 제안한 후에야 MVFOSM법은 구조공학에서 사용되기 시작했다.

MVFOSM법이 처음으로 수리시스템의 위험도 산정에 사용된 것은 Tang 과 Yen[11]에 의해서이다. 이 방법에서의 신뢰도는 다음과 같이 정의되는 안전성지표 β의 항으로 측정된다.

$$\beta = \frac{E(Z)}{\sigma_Z} \tag{1}$$

이것은 Z의 변동계수(Coefficient of variation)의 역수이다.

여러가지 공학시스템의 설계에서, 여러가지 선택에 따른 신뢰도를 비교하기 위해 β값 만을 사용하게 된다. 홍수예보의 불확실성 분석 같은 경우에도, 시스템 위험도의 산정은 필요하게 된다. 이러한 경우에 확률분포는 기능 수행함수 Z로 가정되고 β는 시스템의 평균상태로부터 시스템 파괴수준(Failure level)까지 거리를 정규적으로 관측함으로써 얻어지므로, β값에 대한 확률이 시스템의 신뢰도로 채택된다. MVFOSM법에서, 기본변량에 대한 어떠한 분포의 가정도 필요치 않기 때문에, Z의 분포는 정의되지 않은 상태로 남게 되고, 따라서 β에 포함된 확률정보는 부족하게 된다. 일반적으로, Z는 정규분포로 가정되며, 시스템의 위험도는 식(2)와 같이 된다.

$$R_s = 1 - \Phi(\beta) \tag{2}$$

여기서, $\Phi(\beta)$는 표준 정규적분값이다.

이러한 가정은 실제적으로 여러가지 장점이 있다. 만일 시스템의 기능 수행함수가 선형(즉, Z=R−L) 이고, 부하와 저항이 정규분포를 한다면 식 (2) 는 정확한 위험도를 나타낸다. 만일, 시스템의 기능 수행함수가 $Z = \ln(\frac{R}{L})$ 과 같이 비선형이고, 부하와 저항이 대수정규분포를 하며, L과 R의 변동계수가 상대적으로 작으면 식(2)는 정확한 위험도에 매우 근접한 값을 갖게 된다. 따라서, Z를 정규분포로 선택하는 것은 아주 합리적이며, 그 이유는 많은 자연적인 시스템이나 변량들은 정규 또는 대수정규분포를 나타내기 때문이다. 일반적으로 기본변량의 분포특성에 대한 어떤 정보를 알 수 있으면, 비록 불완전하고 정확하지 않을 지라도 이러한 제한된 정보는 허용할 만한 정도 이내로 위험도 평가를 하는데 도움을 준다. 예를 들면, 만일 기본변량 분포가 시작범위 근처에서 평균을 가지는 단일 형태라면, $Z = \ln(\frac{R}{L})$로 놓고, Z를 정규분포로 가정하는 것이 위험도의 산정에 좋다. 만일, 기본변량분포가 작은 왜곡도를 가지는 단일 형태라면, Z=R−L로 놓고 Z를 정규분포로 가정하는 것이 좋다. 또한, Cheng[2]은 다음과 같은 경우에도 Z=R−L(R=X_1+X_2, L=X_3X_4)로 하고 Z를 정규분포로 가정하면 위험도가 큰 경우 (예를 들면, $R_s > 0.01$)에 엄밀해에 비해 상대적으로 좋은 값을 준다고 하였다.

$$Z = X_1 + X_2 - X_3X_4 \tag{3}$$

여기서, X_1과 X_2는 균등분포이며, X_3와 X_4는 대수정규분포이다.

결론적으로, Z의 분포를 가정해야 하는 필요성에도 불구하고 MVFOSM법을 사용함으로써 아주 타당한 시스템 위험도의 값을 알 수 있다. MVFOSM 방법을 이용한 위험도 산정과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

1) 부하와 저항(또는 기능 수행함수 Z)에 기여하는 변량을 정의하고 L에서 G_1과 R에서 G_2 (또는 Z에서)의 함수관계를 정의한다.

2) 통계치 또는 계산치로부터 X_i와 Y_j의 각각의 변량에서 평균과 분산 $\overline{x_i}$, Var(x_i), $\overline{y_j}$, Var(y_j)를 결정한다.

3) X_i와 Y_j 각각에서 변동계수 Ω_{xi}와 Ω_{yj}를 계산한다.

4) 미분 또는 전방차분식을 이용하여 X_i와 Y_i 각각의 경우에 평균점 $\overline{x_i}$에서 민감도계수 $(\frac{\partial G_1}{\partial x_i})_0$, 평균점 $\overline{y_i}$에서 민감도계수 $(\frac{\partial G_2}{\partial y_i})_0$를 계산한다.

5) $\overline{L} = G_1(\overline{x_i})$, $\overline{R} = G_2(\overline{y_i})$, 에 의해 Ω_L, Ω_R을 계산한다.

6) R과 L의 분포가정에 따라 안전성지표, 를 구한다.

7) 위험도, P_f를 구한다.

2. AFOSM 법

최근의 연구는 MVFOSM 방법의 장점인 단순성을 유지하려고 노력해 왔으나, 아직도 결점들이 많이 발견되고 있다. 그 결과 AFOSM 방법을 개발하였고, AFOSM 방법의 기본개념은 Hasofer와 Lind[6]에 의해 최초로 제안되었으며, Rackwitz[8]가 완전한 AFOSM 방법을 만들었다. 이 방법의 요점은 파괴평면상의 가능파괴점 $(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_p^*)$에서 기능 수행함수, $g(\underline{x}^*)$가 0 일때 Taylor 급수전개를 통해 기능 수행함수를 선형화하는데 있다. 통계학적으로 독립인 기본변량일 경우에 파괴점에서 1계 Taylor 급수에 의해 근사되는 기능 수행함수의 기대값과 분산은 다음과 같다.

$$E(Z) = g(\underline{x}^*) + \sum_{i=1}^{p} C_i (\overline{x_i} - x_i^*) \quad (4)$$

$$Var(Z) = \sigma_z^2 = \sum_{i=1}^{p} C_i^2 \, Var(X_i) \quad (5)$$

$$\sigma_Z = [\sum_{i=1}^{p} (C_i \sigma_i)^2]^{1/2} \quad (6)$$

여기서, C_i는, $(x_1^*, x_2^* \cdots, x_p^*)$에서 계산되는 $\frac{\partial g}{\partial x_i}$ 이다. σ_Z의 식은 다음과 같은 선형 형태로 다시 쓸 수 있다.

$$\sigma_Z = \sum_{i=1}^{p} \alpha_i C_i \sigma_i \quad (7)$$

여기서, α_i는 민감도 계수이며, 다음 식 (8)로 부터 계산된다.

$$\alpha_i = \frac{C_i \sigma_i}{[\sum_{j=1}^{p} (C_j \sigma_j)^2]^{1/2}} \quad (8)$$

AFOSM 방법에서의 안전성 지표는 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \frac{g(\underline{x}^*) + \sum_{i=1}^{m} (x_i - \overline{x_i^*})}{\sum_{i=1}^{p} \alpha_i C_i \sigma_i} \quad (9)$$

AFOSM 방법에서의 파괴확률 계산은 MVFOSM 방법에서와 마찬가지로 β를 포함한 확률상태의 관점에서 보면, 신뢰도에 관한 정보는 빈약하며 Chebyshev 부등식의 형태를 가지게 된다. 그러나, MVFOSM 방법과는 달리 AFOSM 방법에서는 만일 기본변량의 분포가정이 채택된다면 보다 정확한 확률상태를 만들 수 있다. 모든 기본 변량들이 정규분포하는 선형파괴면에서 파괴확률(위험도)은 정확하게 주어진다. 모든 기본변량들이 정규분포하는 볼록 파괴면에서 파괴확률(위험도)은 다음과 같이 제한된다.

$$1 - \Phi(\beta) \le R_s \le 1 - X_p^2(\beta^2) \quad (10)$$

여기서, $X_p^2(\cdot)$은 자유도가 p인 X^2 분포이다. 구조적인 문제에서 Rackwitz에 따르면 만일 β(즉, 시스템의 평균에서 파괴면 까지의 거리함수) 가 하나의 최소치를 가지면, 하한치는 일반적으로 1계 근사의 정도내에서 상대적으로 좋은 확률계산치가 된다고 했다. 우수관거의 신뢰도 평가에 대한 경험이 적으므로, 수리학적인 문제들은 하나의 거리함수 최소치를 가지는 것으로 나타날 수도 있으며, 따라서 하한치는 구

조적인 문제에서와 마찬가지로 수리학적 시스템에서도 좋은 위험도 계산치이다.

그러나, 대부분의 실제 시스템에서는 기본변량들이 정규분포를 하지 않으므로, 비정규 변량들은 대응하는 정규분포 변량들로 변환하는 것이 좋다. Rackwitz는 비정규분포의 누가확률분포함수(CDF)와 확률밀도함수(PDF)의 값들을 파괴점에서 대응하는 정규분포와 같도록 하는 변환을 제안하였다.

즉,

$$F_{xi}(X^*_i) = \Phi\left(\frac{x^*_i - \overline{x_i^N}}{\sigma_i^N}\right) \qquad (11)$$

$$f_{xi}(X^*_i) = \frac{f_N\left(\frac{x^*_i - \overline{x_i^N}}{\sigma_i^N}\right)}{\sigma_i^N} \qquad (12)$$

여기서, $F_{xi}(X_i^*)$와 $f_{xi}(X_i^*)$는 각각 X_i와 X_i^*의 CDF와 PDF이고, $\Phi(\cdot)$와 $f^N(\cdot)$은 각각 표준정규분포의 CDF와 PDF이다. 이렇게 하기 위하여, Rackwitz는 1계 Taylor 급수 확장에 의해 비정규 분포함수를 근사하였다.

따라서, 대응하는 정규분포의 평균, $\overline{X_i^N}$과 표준편차, σ_i^N은 다음과 같이 된다.

$$\overline{X_{iN}} = X^*_{iN} - \Phi^{-1}[F_{xi}(x^*_i)]\,\sigma_i^N \qquad (13)$$

$$\sigma_i^N = \frac{f[\Phi^{-1}\{F_{xi}(x^*_i)\}]}{f_{xi}(X^*_i)} \qquad (14)$$

또한, 비선형 최적화 문제에서의 제약조건은 다음과 같다.

$$\overline{X_i^N} - X^*_i - \alpha_i \beta \sigma_i^N = 0 \text{ ; 모든 i 에 대해} \qquad (15)$$

여기서,

$$\alpha_{iN} = \frac{C_i \sigma_i^N}{\left[\sum_{j=1}^{p}(C_j \sigma_j^N)^2\right]^{1/2}} \qquad (16)$$

$$\beta = \frac{g(\underline{x}^*) + \sum_{i=i}^{p} C_i(\overline{x_i^N} - x^*_i)}{\sum_{i=1}^{p} \alpha_i C_i \sigma_i^N} \qquad (17)$$

AFOSM 방법을 적용하는 과정을 요약하면 다음과 같다.

가) 시스템의 기능 수행함수 $G(x_i)$를 정의한다.

나) x_i에 대한 통계량을 대입한다.

다) β와 x_i^*와의 초기 시도값을 가정하고, β와 x_i^*의 초기 시도값을 결정하는 자료가 부적절하다고 판단되면 x_i^*에 평균값을 대입한다.

라) x_{it}^*에서 모든 i 에 대한 편미분 $C_i = \frac{\partial C_i}{\partial X_i}$를 구한다.

마) $\overline{x}_{int}$와 σ_{int}를 계산한다.

바) α_{int}를 구한다.

사) x_{it}^*의 새로운 시도값을 계산하고, 만일 β_t가 가정되지 않았다면 초기값으로는 새로운 β_t를 구한다.

아) 단계 사) 에서 얻어진 새로운 시도값 x_{it}^*를 $G(x_{it}^*)=0$ 에 대입하고 새로운 시도값 β_t를 구한다.

자) 새로운 β_t에 대한 x_{it}^*를 다시 계산한다.

차) 수렴한도 내에 들어올 때까지 단계 라)~단계 자)를 반복한다.

카) 위험도, P를 계산한다.

Ⅲ. 우수관거의 불확실성 분석 방법

공학시스템에서, 시스템 파괴의 개념은 일반적으로, 시스템에 작용하는 부하, L이 시스템의 저항, R을 초과하는 것으로 정의된다. Q_R을 우수관의 저항, Q_L을 재현기간 T년의 첨두홍수량이라 하고, 파괴는 이 첨두홍수량을 우수관이 통수시킬 수 없는 것으로 정의하면, 위험도는 $Q_L > Q_R$일 사건의 확률로 정의된다.

$$\text{위험도} = P(Z<0) = P(Q_L > Q_R) \qquad (18)$$

여기서, $Z = \ln(\frac{Q_R}{Q_L})$이다.

기능수행함수 Z를 구성하는 변수들의 분포형은 여러가지이므로 Z의 분포를 결정하기는 쉽지 않다. 그러나, 위험도의 수준이 10^{-3}보다 큰 경우 위험도는 가정된 분포형에 민감하지 않게 된다. 따라서, Z를 정규분포로 가정하면, 위험도는 식 (19) 와 같이 된다.

$$P(Z<0) = \Phi[-\frac{\overline{Z}}{\sqrt{Var(Z)}}]$$

$$= \Phi[\frac{\ln\frac{\overline{Q_R}}{\overline{Q_L}}}{(\Omega_{QL}^2+\Omega_{QR}^2)^{1/2}}] \quad (19)$$

여기서, Φ=누가 표준정규 분포함수, Ω_{QL}과 Ω_{QR}은 각각 Q_L과 Q_R의 변동계수이다. 또한, bar는 평균치를 의미한다.

일반적으로, 우수관의 저항은 설계상 요구되는 능력 $\overline{Q_0}$보다 크도록 계획된다. 따라서, 설계상의 안전율은 다음과 같이 정의된다.

$$S.F. = \frac{\overline{Q_R}}{\overline{Q_0}} \quad (20)$$

만일, 합리식 Q= CiA가 우수관거의 부하를 결정하는 식으로 사용된다면, $\overline{Q_0}$는 식 (21) 에 의해 계산할 수 있다. 여기서, C= 유출계수, i= 강우강도, A= 유역면적이다.

$$\overline{Q_0} = \overline{C}\,\overline{i_0}\,\overline{A} \quad (21)$$

여기서, i_0= 설계재현 기간에 따라 유량을 계산하기 위해 사용되는 확률강우강도이다. 하수도 저항 Q_R은 관이 거의 차서 흐르는 중력관 흐름으로 가정한 Darcy-Weisbach 식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$Q_R = \frac{\pi}{4}(\frac{2gS}{f})^{1/2}(4R_h)^{5/2} \quad (22)$$

여기서, f= Weisbach 의 저항계수, S= 마찰경사, g= 중력가속도, R_h= 경심으로서 여기다고 가정하였다. 그러나, 식 (22) 는 부정부등류 흐름에서는 근사식이 된다. 모형화에 따른 오차항 λ_R을 식 (22) 에 도입하면 식 (23) 과 같이 된다.

$$\overline{Q_R} = (8\pi\sqrt{2})\sqrt{g}\,\overline{\lambda_R}\,\overline{S}^{1/2}\,\overline{f}^{-1/2}\,\overline{R}_h^{5/2} \quad (23)$$

$$\Omega_{QR}^2 = \Omega_{\lambda R}^2 + \frac{1}{4}\Omega_S^2 + \frac{1}{4}\Omega_f^2 + \frac{25}{4}\Omega_{R_h}^2 \quad (24)$$

같은 방법으로 Q_L의 평균과 변동계수는 식 (25), (26) 과 같이 산정할 수 있다.

$$\overline{Q_L} = \overline{\lambda_L}\,\overline{C}\,\overline{i_T}\,\overline{A} \quad (25)$$

$$\Omega_{QL}^2 = \Omega_{\lambda L}^2 + \Omega_C^2 + \Omega_{iT}^2 + \Omega_A^2 \quad (26)$$

여기서, $\overline{i_T}$= 년 동안 강우강도 i가 발생할 수 있는 최대기대치이며, λ_L은 합리식에 사용된 근사치로 인한 보정치를 나타낸다.

1. 우수관거 용량의 불확실성 산정

우수관저항의 산정에서 불확실성에 기여하는 4 가지 매개변수의 불확실성은 다음과 같이 구할 수 있다.

가. 경심

경심 R_h에서 발생하는 불확실성의 주요 원인은 관의 제조상 허용오차에 기인한다. 경심 R_h가 1.5m 일때 허용오차가 52mm 이고, 이 범위내에서 균등분포한다고 가정하면, Ω_R = 0.005가 된다. 또 다른 요인은 침전물에 따른 단면의 감소이며, 이것은 저항계수 (resistance coef-

ficient) 에 변화를 줌으로써 설명하여 왔다. 결국, 수심은 거의 가득차서 흐르는 중력흐름과 매우 달라진다. 이러한 불확실성은 식에 의한 오차에 포함된다.

나. 저항계수

저항계수 f에 대한 불확실성은 주로 관벽의 매끈한 정도(조도)로부터 발생한다. 공칭관경으로 부터 관경의 편차와 같은 다른 요인은 f의 값에 거의 영향을 미치지 못한다. 새로운 콘크리트 관에서 대응하는 표면거칠기, k는 0.0003m~0.003m 까지 변화한다. 예를 들어, 관경이 1.5m인 관에서, $\frac{k}{D}$ 값은 0.0002~0.002 까지 변화한다. 따라서, Moody diagram 으로부터, 아주 발달한 난류흐름에서 f는 0.0135~0.024까지 변화한다[1]. 이 범위내에서 f를 삼각형 분포로 가정하면 $\Omega_f = 0.121$이 된다.

다. 경사

경사 S에 대한 불확실성은 관의 정렬불량 또는 굴곡 때문에 주로 발생하는데 경사가 작을 때 크게 된다. 만일 경사가 1/1,000이라면 ±25mm의 오차를 가지며, 이 오차의 범위에서 대칭삼각형 분포로 가정하면 오차는 S = 0.001에서 $\Omega_S = 0.068$이다[16].

라. 식오차

도시 우수관거의 홍수흐름은 부정류이고 부등류이다. 따라서, Darcy-Weisbach 식은 오차를 포함하게 된다. Yen 과 Sevuk[15]에 의해 관거설계에 적용된 통계학적 결과분석에 따르면 $\lambda_R = 1.1$ 이다. 평균이 1.1 이며 0.8~1.4 에 걸친 λ_R의 분포를 대칭삼각형으로 가정하면 $\Omega_{\lambda R} = 0.11$이다.

2. 설계유량의 불확실성 산정

가. 유출계수

배수면적이 A인 유역에서 가중유출계수는 $C = \sum_j C_j \alpha_j$ 에 의해 계산된다. 여기서, $\alpha_j = \frac{a_j}{A}$ 이며, a_j 는 같은 유출계수 C_j를 갖는 소유역의 면적이다. 만일, 일예로 어떤 유역의 피복상태가 50%가 아파트 지역, 20%가 지붕, 20%가 주거지, 10% 가 주행로와 보도로 구성된 유역일 경우, Ω_C에 기여하는 성분의 불확실성 분석결과가 〈Table 1〉 에 나타나 있다[3]. 여기서, C_j는 이 범위내에서 균등분포한다고 보았으며, $\delta_{\alpha j}$(α_j의 예측오차) 는 대략 0.10으로 보았다. 여기서, δ_{Cj} = (C_j의 변동계수)^2+(C_j의 예측오차)^2 이다.

또한, 다음과 같은 1계 방정식에 기초하여 Ω_C에 기여하는 요소의 불확실성을 산정하였다.

$$\overline{C} = \sum_j \overline{C}_j \overline{\alpha}_j \tag{27}$$

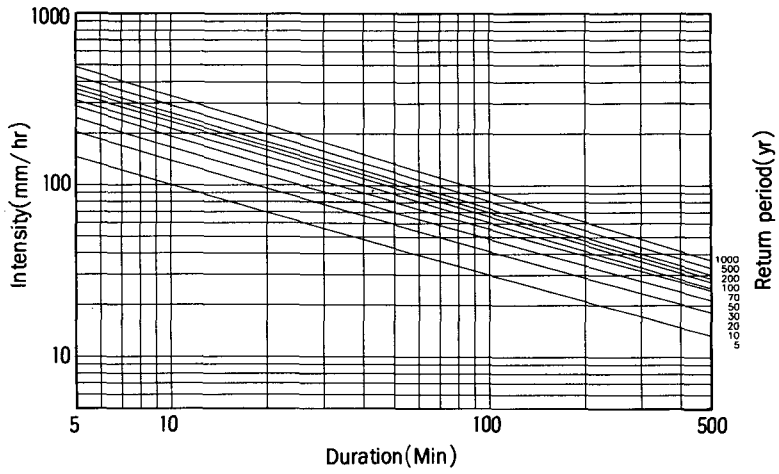
$$\Omega_c = \frac{1}{\overline{C}}\left[\sum_j \overline{\alpha}_j^2 \overline{C}_j^2 (\delta_{\alpha j}^2 + \delta_{C_j}^2)\right]^{1/2} \tag{28}$$

나. 강우강도

강우강도에 대한 불확실성은 설계 재현기간, T_r과 강우지속기간 t_d, 유역의 위치와 크기에 따라 변화한다.

〈Table 1〉 Example of component errors for runoff coefficient

Surface	Apartment	Roofs	Residential area	Driveways and Sidewalks
α_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
Variability of C_j	0.096	0.068	0.145	0.036
Prediction error of C_j	0.031	0.023	0.048	0.012
δ_{Cj}	0.101	0.072	0.153	0.038



〈Fig. 1〉 Relationship of rainfall intensity-return period-rainfall duration in Seoul city

1) 재현기간의 영향

주어진 강우지속기간에 대한 서울시 유역에서 강우강도와 재현기간 사이의 관계는 서울시의 경우 〈Fig. 1〉에서 처럼 대수정규확률지에 도시해 볼때 대략 직선으로 나타난다. 따라서, 연최대 강우강도 i_a는 대수정규분포로 가정할 수 있으며, 재현기간이 T_r인 최대 강우강도는 식 (29) 와 같이 구할 수 있다.

$$\overline{i_T} = i_0 + 0.45\,\zeta \exp(M + 0.5\,\zeta^2) \qquad (29)$$

여기서, i_0는 식 (21) 에서 정의된 것이며, M은 〈Fig. 1〉 에서 각 지속기간 별로 확률 0.5 에서 log i값이고, ζ는 확률 0.16에서 log i−M이다. 또한, 공분산은 다음과 같은 식에 의해 결정된다.

$$\delta_{iT} = \frac{\zeta \exp(M+0.5\,\zeta^2)}{\overline{i_T}} \qquad (30)$$

2) 지속기간의 영향

서울시의 강우자료로부터 유도된 주어진 재현기간에서 강우강도 i_t와 지속기간 t_d사이의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_t = \frac{a}{b + t_d^{1/2}} \qquad (31)$$

결과적으로, 불확실성의 1계 분석을 하면, 공분산은 $\delta_{it} = \delta_t \dfrac{\overline{t_d}}{(b+\overline{t_d})}$ 으로 주어지며,

여기서 δ_t는 약 10% 정도로 계산되는 지속기간의 예측오차이다[16].

3) 제한된 강우자료의 영향

유용한 강우자료가 제한됨으로 말미암아 예측오차는 생긴다. 이러한 오차가 전체 불확실성에 미치는 기여도는 주로 i_a의 계산으로부터 발생하며, 예측오차는 $\dfrac{\delta_{ia}}{N_{1/2}}$ 로 나타난다. 여기서, N은 관측년수이며, δ_{ia}는 i_a의 공분산이다. 따라서, 제한된 자료로 인하여 i_T에서 발생하는 오차는 $\delta_{ir} = \left(\dfrac{\delta_{ia}}{N_{1/2}}\right)\left(\dfrac{i_0}{i_T}\right)$ 에 의해 결정된다.

4) 유역크기의 영향

주어진 재현기간과 강우지속기간에서 평균강우강도는 유역면적이 커짐에 따라 줄어드는 경향이 있다. 도시지역 소유역의 경우 일반적으로 이러한 영향은 매우 작다. 유역크기의 영향에 따른 오차 $\delta_{is} = 0.006$ 으로 가정하였다[17].

5) 기계사용, 자료읽음과 처리, 보삽에 따른 영향

이러한 매개변수의 불확실성을 판단하기에 유용한 정보는 예측오차의 자세한 확률분석을 위해서는 적절하지 못하다. 그러나, 이러한 영향에 따른 총오차는 일반적으로 볼 때 $\delta_{id} = 0.08$ 정도이다[17].

6) 강우강도의 총 예측오차

이것은 공분산 $\Omega = (\delta^2_{iT} + \delta^2_{it} + \delta^2_{ir} + \delta^2_{is} + \delta^2_{id})^{1/2}$에 의해 얻어진다.

다. 유역 면적

유역면적은 보통 지도로부터 구해진다. 유역면적의 오차를 계산하기 위해 34명의 학생에게 $3mi^2$의 배수유역을 조사하여 USGS 지도로부터 면적을 결정하도록 한 결과에 의하면, 유역면적은 정규분포를 하는 것으로 나타났으며, 평균오차 $\delta_A = 0.045$이었다[15]. 본 논문에서 유역면적은 한사람에 의해 계산된 것으로 가정한다. 따라서, 유역면적에 대한 예측오차는

$\frac{0.045}{n^{1/2}} = \frac{0.045}{1^{1/2}} = 0.045$ 이다. 또한, 지도가에 의한 오차는 일반적으로 작으며 0.001로 가정한다.

라. 식오차

합리식은 가정하는 조건에 따라 첨두유량을 과대 혹은 과소 계산하게 될 수도 있다. 즉, 강우-유출과정을 정확하게 나타낼 수는 없으며, 단지 첨두유출량 만을 예측할 수 있다. 따라서, 이 식을 사용하는데 따른 오차를 고려할 때 $\lambda_L = 1.0$이며, 0.7~1.3에 걸친 대칭 삼각형 분포로 가정하면 $\Omega_L = 0.12$ 이다[15]

3. 안전율

일반적으로, 안전율은 부하에 대한 어떤 시스템의 저항능력이라고 할 수 있다. 보다 정확한 의미는 파괴를 어떻게 정의하고 산정하느냐에 따라 달라지며, 수공학에서 사용되는 안전율에는 다음과 같은 6가지가 있다.

1) 선지정 안전율 (Preassigned safety factor)
2) 중앙 안전율 (Central safety factor)
3) 평균 안전율 (Mean safety factor)
4) 특성 안전율 (Characteristic safety factor)
5) 요소별 안전율 (Partial safety factor)
6) 환산 안전율 (Reduced safety factor)

본 논문에서는 특성 안전율을 사용하기로 하며 이 것은 중요한 설계 매개변수 값으로 평균이 아닌 특정값(또는 범위)을 사용하는 경우에 적용한다. 예를 들어, 여수로 설계에서는 부하값으로 모든 홍수의 평균값이나 연 최대치 계열의 특정 홍수의 평균값을 사용하지는 않으며, 주어진 크기(예를 들어, n년의 재현기간을 가진 홍수)의 특정 홍수량을 사용한다. 따라서, 특성 안전율, SF_C는 다음과 같다.

$$SF_C = \frac{R_0}{L_0} \tag{32}$$

여기서, R_0와 L_0는 각각 특정 저항과 부하이다. 확률적인 분석없이 R_0와 L_0가 주어진다면 식 (32) 는 전통적으로 사용 되어온 선지정 안전율과 같아진다. 일반적으로, R_0와 L_0는 매개변수의 확률분석을 통해 결정할 수 있다. 이러한 방법은 기존의 기준과 일치하도록 구조물의 안전도를 산정하기 위해 구조공학자들에 의해 사용되어 왔다. Tang 과 Yen[11] 은 R의 계산평균값과 특정 L값을 사용하여 우수관거설계에서 위험도-안전율의 관계곡선을 작성하였다. 본 연구에서는 안전율로 식 (33) 을 사용하기로 한다.

$$SF_C = \frac{\overline{R}}{L_0} \tag{33}$$

4. 위험도-안전율 곡선의 작성

위험도-안전율 곡선은 기능수행함수를 구성하는 변수들의 불확실성 분석을 통하여 구할 수 있으며, 그 과정을 요약하면 다음과 같다.

1. 우수관거의 저항과 설계유량(부하)을 구하기 위한 적정모형을 설정한다.

2. 강우강도에 대한 불확실성 분석을 수행한다. 여기서는 재현기간, 지속기간, 제한된 강우기록과 자료의 신뢰도에 따른 불확실성의 산정도 포함된다. 각각의 재현기간과 지속기간에 따라 Q_0를 산정하기 위한 대응 강우강도가 구해지며, 평균 강우강도는 $\overline{Q}_L$와 Ω_{QL}의 계산에서 변동계수에 따라 구해진다. 만일, 우수관으로의 유입수문곡선이 사용된다면 수문곡선에 대한 불확실성 분석을 해야한다.

3. 설계유량에 대한 불확실성 분석을 한다. 여기에는, 계수에 대한 것도 포함되며, 설계유량의 불확실성 분석에 영향을 주는 강우 강도에 대한 것도 포함한다. 다시 말하면, 이 단계에서는 설계유량에 영향을 주는 각 인자들의 평균과 변동계수를 구하는 것이다. 결과값은 우수관거의 기대효용수명과 같도록 선택되는 강우재현기간과 지속기간에 대한 Q_0, $\overline{Q}_L$, Ω_{QL}의 값이다.

4. 인위적으로 선택된 관경에 대해서 우수관거의 저항에 대한 불확실성 분석을 한다. 여기서는, 관경, 조도, 관경사와 모형의 오차와 같은 시공 신뢰도에 대한 불확실성 분석을 포함한다. 관의 저항에 영향을 주는 인자에 대한 평균과 변동계수 값을 먼저 구한다. 최종 결과는 고려된 관경에 대해 $\overline{Q}_R$와 Ω_{QR}를 구함으로 얻을 수 있다.

5. 각 변수들의 특성에 따라 MVFOSM 방법 또는 AFOSM 방법에 의해 우수관거의 위험도를 구한다.

6. 특성 안전율을 사용하여 안전율을 구한다.

7. 5, 6단계에서 구한 위험도와 안전율의 값의 조합은 곡선상의 한점이 된다.

8. 관경의 변화에 따라 4~6단계를 반복한다. 이것은 위험도-안전율 곡선상의 또 다른 한점이 되며, 고려한 강우지속기간과 설계재현기간에 대한 곡선을 얻게 된다.

9. 같은 설계재현기간에 대해 다른 지속기간으로 3~8의 단계를 반복한다. 이 결과는 다른 지속기간에 대한 곡선이 된다. 그러나, 강우지속기간의 영향은 매우 작으며, 같은 설계재현기간에 대한 다른 지속기간의 점들은 하나의 곡선으로 표시됨을 알 수 있다.

10. 다른 설계재현기간에 대해 3~9의 단계를 반복하면 관의 기대효용 수명에 따른 위험도-안전율 곡선을 얻을 수 있다.

Ⅳ. 적용 및 고찰

위와 같은 신뢰도 분석기법의 적용성을 판별하기 위하여 서울시에 있는 6개의 유역(한남, 심원, 흑석, 서초, 성내, 장안)을 선정하여 신뢰도 분석기법인 MVFOSM법과 AFOSM법을 적용하였다. 각 배수유역의 유역면적, 평균유출계수, 총관로 연장 등 유역특성은 〈Table 2〉와 같다.

앞에서 언급한 방법을 서울시의 6개 유수지 유역의 우수관거에 적용하여 작성된 위험도-안전율 곡선이 〈Fig. 2〉~〈Fig 7〉에 나타나 있다.

위험도-안전율 관계란 어떤 시스템이 설계재현기간별로 위험도에 따라 대처하는 부하에 대한 저항능력을 나타낸다. 안전율로는 전술한 바와 같이 특성 안전율을 사용하며, 우수관거의 위험도를 산정하는데 있어서는 MVFOSM 방법과 AFOSM 방법을 이용한다. 〈Fig. 2〉~〈Fig. 7〉에서 나타나는 바와 같이 MVFOSM을 이용할 경우 우수관거의 위험도를 대수로 취하고 안전율과의 관계를 도시하여 회귀분석하면 대부분 선형의 관계를 보임을 알 수 있다. 따라서, 위험도와 안전율의 관계는 각 재현기간별로 식 (34) 와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 이용하면 보다 편리하게 위험도 안전율 관계를 산정할 수 있을 것이다.

〈Table 2〉 Characteristics of each basin in Seoul city

Basin	Area(ha)	Average value of runoff coefficient	Total length of storm sewer(km)
Hannam	250.6	0.60	2.90
Simwon	24.8	0.70	0.40
Heukseok	138.0	0.66	1.40
Seocho	104.8	0.80	2.00
Seongnae	220.0	0.71	3.10
Jangan	322.7	0.65	4.20

〈Table 3〉 Regression coefficient of each basin

Basin	5 yr		10 yr		20 yr		30 yr		50 yr	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Hannam	1.087	-1.792	1.497	-2.141	1.785	-2.419	1.994	-2.589	2.123	-2.734
Simwon	0.968	-1.730	1.392	-2.079	1.755	-2.385	1.935	-2.544	2.125	-2.723
Heukseok	1.105	-1.801	1.473	-2.135	1.873	-2.455	2.063	-2.617	2.257	-2.794
Seocho	1.066	-1.781	1.436	-2.111	1.664	-2.341	1.827	-2.492	2.056	-2.683
Seongnae	0.933	-1.703	1.330	-2.045	1.722	-2.367	1.922	-2.537	2.129	-2.727
Jangan	1.140	-1.835	1.511	-2.162	1.815	-2.435	1.948	-2.567	2.224	-2.773

$$\text{위험도} = \exp(a + b \times \text{안전율}) \qquad (34)$$

각 유역의 우수관거에 대한 식 (34) 의 계수 a와 b값을 회귀분석하여 구한 결과를 〈Table 3〉에 나타내었다.

서울시에 적용한 6개의 배수유역에서 MVFOSM법을 이용한 경우 〈Fig. 2〉~〈Fig. 7〉을 살펴보면 각 재현기간 별로 특별한 차이를 나타내지 않고 거의 동일한 직선을 나타냄을 알 수 있다. 따라서, 이를 이용하여 서울시의 어느 유역에서나 사용가능한 대표적인 위험도-안전율 곡선을 얻을 수 있으며, 이를 〈Fig. 8〉 에 나타내었다.

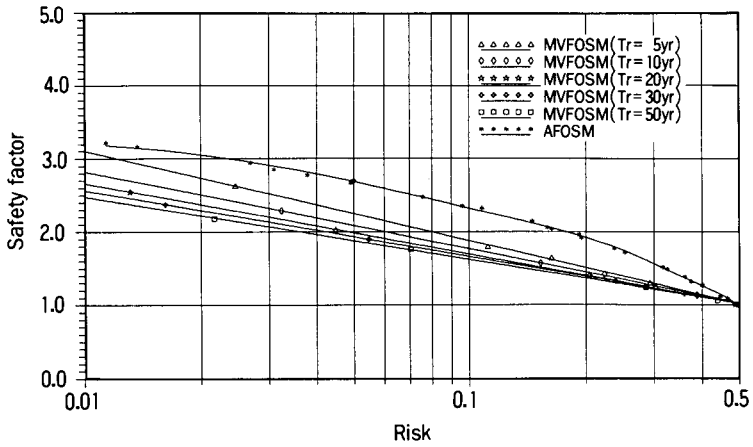
또한, 이를 위에서 제시한 회귀식을 이용하여 나타내면 편리하게 사용할 수 있으며, 각 재현기간별로 회귀식의 계수를 구하면 〈Table 4〉와 같다.

우수관거의 위험도를 산정하는데 AFOSM 방법을 이용하는 경우, 재현기간에 관계없이 위험도-안전율의 관계는 하나의 곡선으로 나타나며, 이는 방법상의 차이에서 나타나는 결과로 생각된다. AFOSM에 의한 결과를 MVFOSM

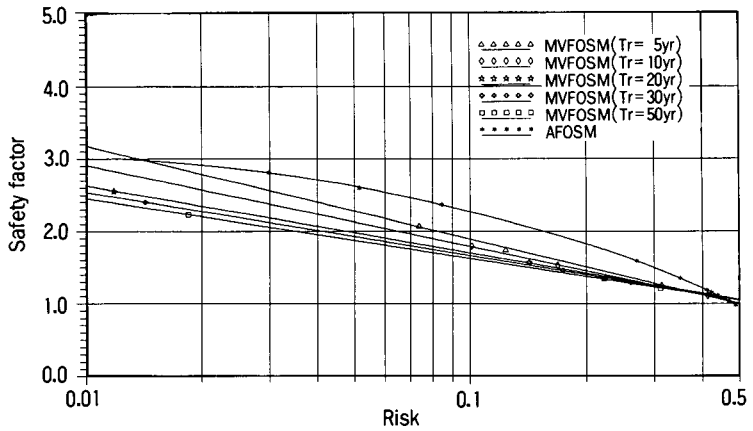
〈Table 4〉 Coefficient of regression equation in Seoul city

Return period	a	b
5 yr	1.050	-1.774
10 yr	1.440	-2.112
20 yr	1.769	-2.400
30 yr	1.948	-2.558
50 yr	2.152	-2.739

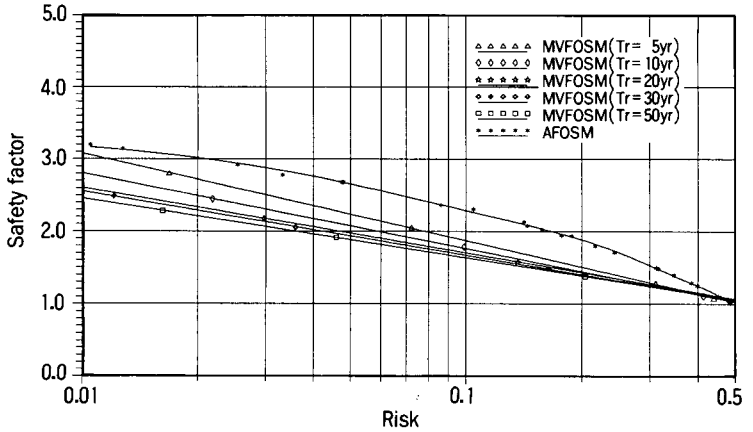
에 의한 결과와 비교하여 볼때, AFOSM에 의한 곡선은 MVFOSM에 의한 직선군의 상부에 위치하므로 이것은 어떤 유역에서 우수관거를 설계할 때 동일한 위험도를 가지도록 하려면 안전율을 크게 하여야 한다는 것을 의미하므로 보



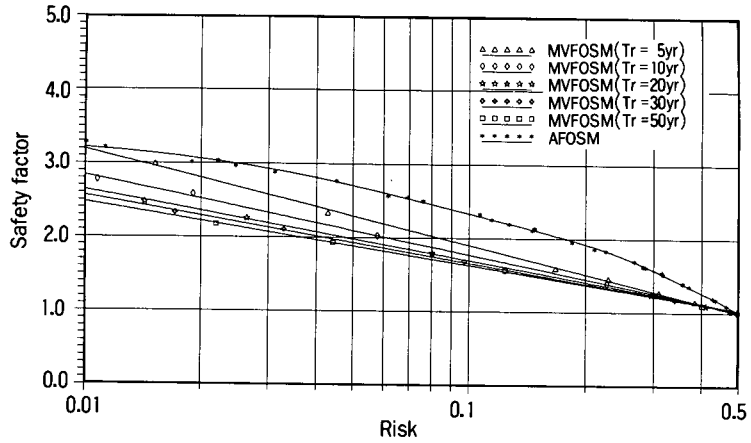
〈Fig. 2〉 Risk-safety factor relationship at Hannam basin area



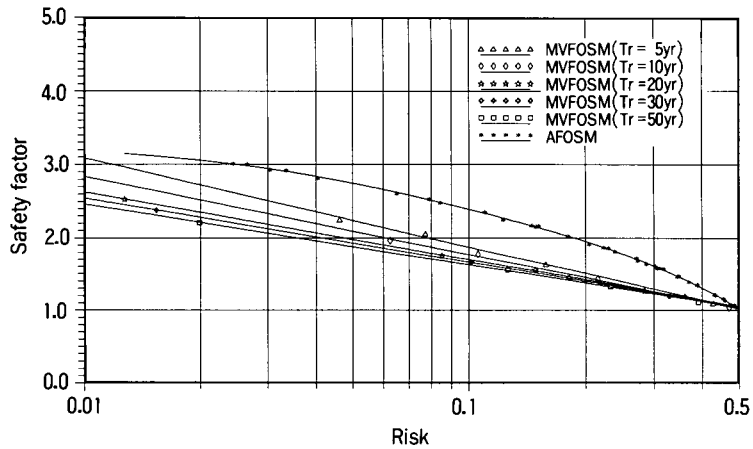
〈Fig. 3〉 Risk-safety factor relationship at Simwon basin area



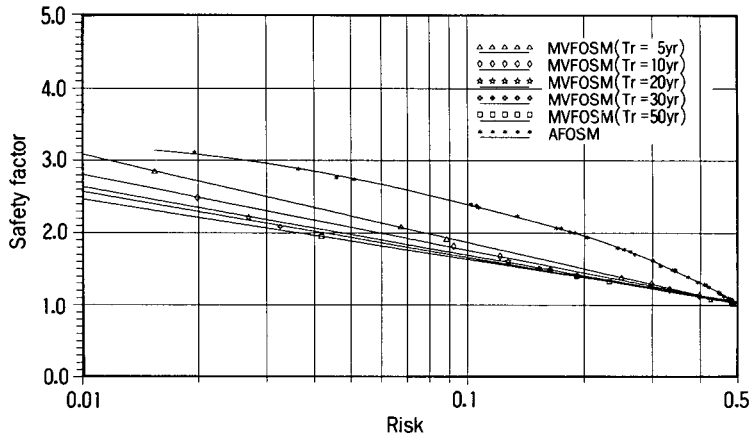
〈Fig. 4〉 Risk-safety factor relationship at Heukseok basin area



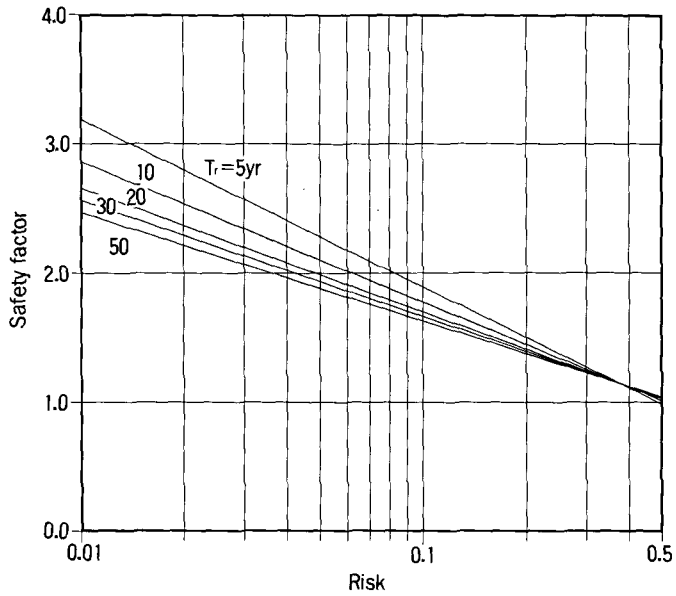
〈Fig. 5〉 Risk-safety factor relationship at Seocho basin area



〈Fig. 6〉 Risk-safety factor relationship at Seongnae basin area



〈Fig. 7〉 Risk-safety factor relationship at Jangan basin area



〈Fig. 8〉 Recommended risk-based design curve in Seoul city

다 안전측의 설계가 가능할 것으로 생각된다.

V. 결 론

1. 도시유역 우수관거의 최적설계를 위하여 신뢰도 분석기법을 서울시에 있는 6개 유역의 우수관거에 적용하여 위험도-안전율의 관계를 설정하였다. 또한, 이를 이용하여 서울시의 모든 유역에서 적용가능한 대표 위험도-안전율 곡선을 제안하였다.

2. MVFOSM 방법을 적용하는 경우 재현기간별로 위험도-안전율 곡선이 나타나며 이는 반대수지 상에서 거의 직선에 가깝게 나타난다. 따라서, 이를 이용하기 편리하도록 다음과 같은 회귀곡선식으로 나타내었으며, 계수값 a, b 를 제시하였다.

$$\text{위험도} = \exp(a + b \times \text{안전율})$$

3. AFOSM 방법을 이용한 경우 위험도-안전율 곡선은 재현기간에 관계없이 하나의 곡선으로 도시되었으며, 이를 이용하면 보다 안전측의 설계가 가능한 것으로 생각된다.

4. 위험도와 설계재현기간에 따라 안전율을 결정할 수 있으므로 안전율을 고려한 설계홍수량의 산정이 가능하며 이를 이용하면 최적 단면의 설계가 가능할 것으로 생각된다.

5. 설계변수에 영향을 미치는 각종 인자들의 불확실성분석 방법을 연구하면 신뢰도 분석방법은 댐, 제방, 상수도 관망 등의 여러 가지 수공구조물에 대해서도 적용가능할 것으로 생각된다.

이 논문은 1996년도 한국 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

참고문헌

1. 이원환, 1987. 수리학, 문운당, p. 81.
2. Cheng, S. T., 1982. Overtopping Risk Evaluation for an Existing Dam, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Cham-

paign.
3. Chow, V. T., 1964. Handbook of Applied Hydrology, p.14.8.
4. CIRIA, 1977. Rationalization of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes, Report 63, London.
5. Cornell, C. A., 1972. First-Order Analysis of Model and Parameter Uncertainty, Proceedings, International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources Systems, Vol. 2, Tucson, Arizona, pp.1245~1272.
6. Hasofer, A. M., and N. C. Lind, 1974. Exact and Invariant Second-Moment Code Format, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, No. EM1, pp.111~121.
7. Mayer, H., 1926. Du Sicherheit der Bauwerk (The Safety of Structures), Springer Verlag, Berlin.
8. Rackwitz, R., 1976. Practical Probabilistic Approach to Design, Bulletin 112, Comite European du Beton, Paris, France.
9. Shinozuka, M., 1983. Basic Analysis of Structural Safety, Journal of the Structural Engineering Division, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp.721~740.
10. Su, H. L., 1959. Statistical Approach to Structural Design, Proceedings, Institution of Civil Engineers, London, Vol. 13, pp.353~362.
11. Tang, W. H., and B. C. Yen, 1972. Hydrologic and Hydraulic Design Under Uncertainties, Proceedings, International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources Systems, Vol. 2, Tucson, Arizona, pp.868~882.
12. Tung, Y. K., and L. W. Mays, 1980. Risk Analysis for Hydraulic Design, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 106, No. HY5, pp.893~913.
13. Tung, Y. K., and L. W. Mays, 1981. Risk Models for Flood Levee Design, Water Resource Research, Vol. 17, No. 4, pp. 833~841.
14. Wood, E. F., 1976. An Analysis of the Effects of Parameter Uncertainty in Deterministic Hydrologic Models, Water Resource Research, Vol. 12, No. 5, pp. 925~932.
15. Yen, B. C., and A. S. Sevuk, 1975. Design of Storm Sewer Networks, Journal of Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. EE4, pp.535~553.
16. Yen, B. C., H. G. Wenzel, Jr., L. W. Mays and W. H. Tang, 1976. Advanced Methodologies for Design of Storm Sewer Systems, Research Report No. 112, Water Resourses Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
17. Yen, B. C., and W. H. Tang, 1976. Risk-Safety Factor Relation for Storm Sewr Design, Journal of Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. EE4, pp. 509~516.

약 력

김 문 모

1984. 연세대학교 토목공학과 졸업
1986. 연세대학교 대학원 공학석사
1994. 연세대학교 대학원 공학박사
현재 신구전문대학 토목과 조교수