Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.24, No.5, pp.509-517, October, 2010

상하수도학회지, 논문
24권 5호, pp.509-517, 10월, 2010

토사 적체에 따른 우수관의 성능불능확률

Probability of performance failure of storm sewer according to accumulation of debris

권혁재

Kwon, Hyuk Jae

청주대학교

(2010년 6월 24일 접수 ; 2010년 9월 29일 수정 ; 2010년 10월 1일 채택)

Abstract

Statistical distribution of annual maximum rainfall intensity of 18 cities in Korea was analyzed and applied to the reliability model which can calculate the probability of performance failure of storm sewer. After the analysis, it was found that distribution of annual maximum rainfall intensity of 18 cities in Korea is well matched with Gumbel distribution. Rational equation was used to estimate the load and Manning's equation was used to estimate the capacity in reliability function to calculate the probability of performance failure of storm sewer. Reliability analysis was performed by developed model applying to the real storm sewer. It was found that probability of performance failure is abruptly increased if the diameter is smaller than certain size. Therefore, cleaning the inside of storm sewer to maintain the original diameter can be one of the best ways to reduce the probability of performance failure. In the present study, probability of performance failure according to accumulation of debris in storm sewer was calculated. It was found that increasing the amount of debris seriously decrease the capacity of storm sewer and significantly increase the probability of performance failure.

Key words : Debris, Storm sewer, Probability of performance failure, Reliability model

주제어 : 토사, 우수관, 성능불능확률, 신뢰성 모형

1. 서 론

신뢰성 해석은 공학전반에 걸친 설계과정에 많이 사용되고 있다. 최근에는 수공학 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있으며 수공구조물의 안전성 평가에서 주요변수들을 결정하는 과정에도 적용되고 있다. 이런 수공구조물의 설계에 사용되는 변수들은 많은 불확실성을 내재하고 있으며 이를 분석하기 위한 많은 방법들이 제안되고 있다. 하수도의 설계에는 하수관의 용량(capacity) 결정에 Manning의 공식이나 Darcy-Weisbach 공식등이 사용되고 있으며 하중(load)을 결정하는 식으로는 합리식(rational equation)이 주로 사용되고 있다. 용량과 하중을 결정하기 위한 식에는 여러 가지 변수들이 사용되며 이 변수들은 불확실성을 내재하고 있으므로 확률변수로 인식하고 신뢰성 분석을 수행하여야 한다.

김 등(1993)은 하수관의 신뢰성 분석을 위해서

* Corresponding author Tel:+82-43-229-8473, Fax:+82-43-229-8466, E-mail: hikwon@cju.ac.kr(Kwon, H.J.)

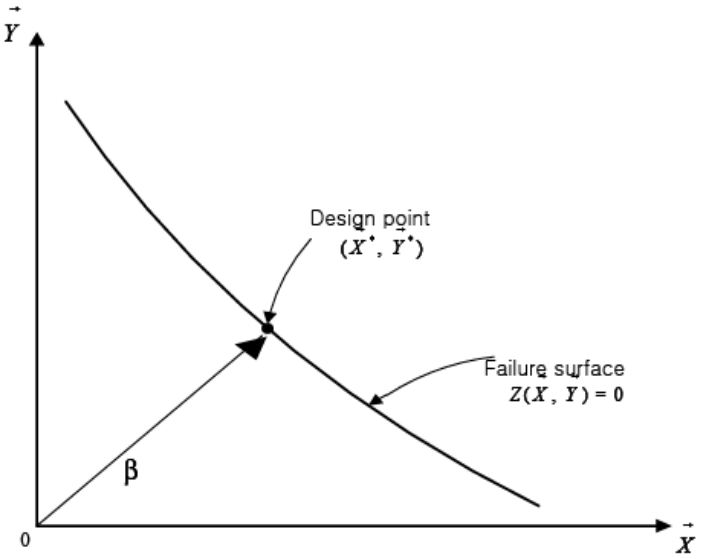

Fig. 1. Design point on failure surface

AFOSM(Advanced First Order Second Moment)법을 사용하였다. 이 연구에서 신뢰함수에는 하중을 결정하기 위해 합리식(rational equation)을 사용하고 용량결정을 위해서 Manning과 Darcy-Weisbach공식을 이용하여 위험도를 분석하였다. 또한 김 등(1995)은 서울시의 58개 배수구역을 선정하여 위험도와 안전율의 관계곡선을 결정지었다. 그리고 위험도-안전율-재현기간의 3가지 변수들에 대한 상관도와 상관관계식을 각 유역별로 제시하였다. 이 등(2005)은 우수관의 강우확률 년 수를 변화시키며 우수관의 건설비용 변화를 산정하였다. 그리고 다양한 확률 년 수에 기초한 건설비용과 설계우량의 변화율 함수가 회귀분석에 의해서 유도되었다. Kwon and Lee(2008a)는 상수관에서 유효유량의 확보여부를 가지고 상수관 시스템의 불능확률을 산정하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 그리고 Kwon and Lee(2008b)는 상수관망의 부정류 수치해석을 통해 얻어진 압력의 시간에 따른 유동특성을 이용하여 상수관의 파괴확률을 산정하였고 Kwon and Lee(2009)는 AFDA 방법을 이용하여 상수관의 파괴확률을 산정하고 마찰손실계수에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

최근 들어 국지성 호우가 자주 발생하고 있으며 강우량 역시 상당한 양에 이르고 있다. 기존의 설계방식에 따라 건설된 하수관거는 이러한 호우에 의해 자주 제 역할을 못하고 있으며 보다 안전한 설계방법이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성 모형을 개발하여 우수관의 성능불능확률(probability of performance failure)을 산정하였다.

2. 신뢰성 모형

2.1 AFDA(Approximate Full Distribution Approach) 모형

먼저 신뢰함수를 구하기 위해서 시스템에 작용하는 하중과 저항(용량)을 결정하여야 한다. 하수관의 경우 성능불능상태(state of performance failure)란 강우량 Q_L이 하수관의 용량 Q_C를 초과한 경우로 정의한다. 따라서 신뢰함수는 아래 식(1)과 같이 규정할 수 있다.

$$Z = Q_C - Q_L \tag{1}$$

여기서, 하중을 산정하기 위하여 합리식(2)이 사용되었고 용량을 산정하기 위해서 Manning의 식(3)이 사용되었다.

$$Q_L = 0.2778\lambda_L C i A \tag{2}$$

여기서 λ_L은 합리식을 사용하는데서 오는 오차를 보정하는 계수이며, C는 유출계수, i는 강우강도(mm/hr)이고, A는 유역면적(km^2)이다.

$$Q_C = \lambda_C \left(\frac{4}{n}\right) \pi R^{8/3} S^{0.5} \tag{3}$$

여기서, λ_C는 Manning의 공식을 사용하는데서 생기는 오차를 보정하는 계수, n은 Manning의 조도계수, R은 경심(hydraulic radius), S는 우수관의 경사(slope)이다. 본 연구에서는 우수관의 성능불능상태에 도달할 확률을 산정하기 위해서 Level II AFDA방법(Kwon and Lee, 2008a)이 사용되었다. **Fig. 1**에서 신뢰지수(reliability index) β는 원점에서 파괴면의 설계지점(design point)에 이르는

상하수도학회지, 논문
24권 5호, pp.509-517, 10월, 2010

최단거리이며 반복계산에 의해서 구해진다. β를 구할 때 신뢰지수의 불변성이 요구되어지기 때문에 정규화과정(normalization process)이 필수적이다.

먼저 방향여현(directional cosine)은 식(4)과 같이 구하고 식(5)의 새로운 설계점(Ang and Tang, 1984; Frankel, 1988; Modarres, 1999)을 산정하기 위해 사용된다. 첫 번째 반복계산에서는 확률변수의 평균값이 설계점(design point)으로 사용된다.

$$\alpha_{x_i}^{*} = \frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_i'}\right)_*}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Z}{\partial x_i'}\right)_*^2}} \tag{4}$$

여기서 $x_i' = (x_i - \mu_{x_i})/\sigma_{x_i}$, x_i는 각 확률변수 그리고 μ_{x_i}와σ_{x_i}는 각 확률변수들의 평균과 표준편차이다. 따라서 설계점은 다음 식(5)과 같이 구할 수 있다.

$$n^{*} = \mu_n - \alpha_n^{*}\beta\sigma_n \tag{5a}$$

$$i^{*} = \mu_i^N - \alpha_i^{*}\beta\sigma_i^N \tag{5b}$$

$$C^{*} = \mu_C - \alpha_C^{*}\beta\sigma_C \tag{5c}$$

여기서 μ_i^N 과 σ_i^N는 지역별 년 최대강우강도의 등가정규분포(equivalent normal distribution)의 평균과 표준편차이며 식(6)과 같이 Rosenblatt 변환으로 산정할 수 있다.

$$\mu_i^N = i^{*} - \sigma_i^N \Phi^{-1}\left[F_i(x^{*})\right] \tag{6a}$$

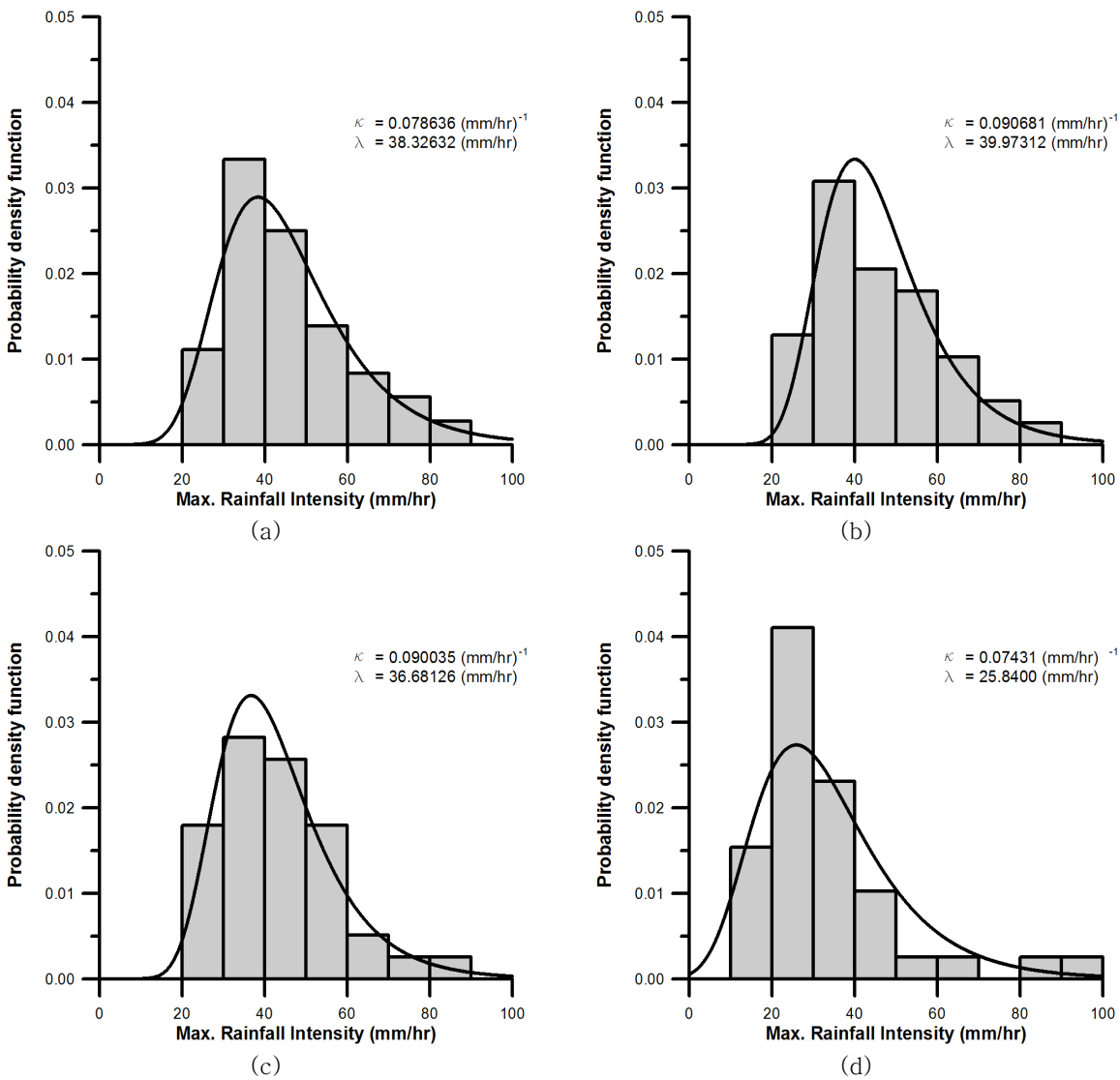

Fig. 2. Statistical distributions of the annual maximum rainfall intensity of (a)Yangpyong (b)Gwangju (c)Jeonju (d)Pohang

$$\sigma_i^N = \frac{\phi\{\Phi^{-1}[F_i(x^*)]\}}{f_i(x^*)} \quad (6b)$$

$F_i(x)$와 $f_i(x)$는 식 (7)과 같이 최대강우강도의 Gumbel 분포함수를 의미한다.

$$F_i(x) = \exp[-e^{-\kappa(x-\lambda)}] \quad (7a)$$

$$f_i(x) = \kappa\exp[-\kappa(x-\lambda)-e^{-\kappa(x-\lambda)}] \quad (7b)$$

여기서 $\kappa = \pi/(\sqrt{6}\sigma)$, $\lambda = \mu-(0.577/\kappa)$이다.
새로운 설계지점은 β을 식(5)에 삽입함으로써 얻을 수 있다. β가 적정한 값에 수렴할 때 까지 반복계산이 이루어져야 한다. 신뢰함수를 이루는 다른 확률변수들은 정규분포를 따른다고 가정하였으나 지역별 연 최대강우강도는 불확실성이 상당히 많이 내포되어 있으며 그 분포함수를 찾아내고 통계학적 특성을 분석할 필요가 있다.

2.2. 최대강우강도의 확률분포 특성

본 연구에서는 우리나라 여러 지역의 중소도시들의 연 최대강우강도(maximum rainfall intensity)의 분포특성을 분석한 결과 **Fig. 2**와 같이 Gumbel분포와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

춘천시의 경우 43년간의 연 최대강우강도 자료 즉 43개의 자료를 사용하였고, 대구, 진주, 포항, 전주, 그리고 광주의 경우 39개를 사용하였고, 문경, 영주, 그리고 순천은 38개를, 밀양과 남원은 37개를 그리고 홍천, 인제, 원주, 양평, 충주, 청주, 그리고 대전은 36개를 사용하였다. **Table 1**에서 보는 바와 같이 포항과 문경이 가장 낮은 평균 연 최대강우강도를 나타냈고 광주와 대전이 가장 높은 평균 연 최대 강우강도를 나타냈다. Gumbel분포함수와 자료의 일치성을 알아보기 위해서 **Table 2**와 같이 chi-square goodness-of-fit test를 수행하였다.

Table 2에서 보는 바와 같이 모든 도시에서 연 최대강우강도의 분포함수가 Gumbel함수와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며 일치수준은 유의 수준 5%이내에 들었다. 그리고 **Fig. 2**와 같이 광주의 경우 평균 연 최대강우강도가 46.33mm/hr인 것으로 나타났다. 재현기간에 따른 연 최대강우강도는 아래 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_T = \mu + K_T\sigma \quad (8)$$

여기서 μ는 연 최대강우강도의 평균값, σ는 표준편차, 그리고 K_T는 빈도계수(frequency coefficient)이며 재현기간과 사용되는 확률분포의 종류에 따라 결정된다. 본 연구에서는 연 최대강우강도에 대해서 Gumbel분포를 사용하게 되므로 K_T는 아래 식(9)에 의해 결정되었다.

Table 1. Statistical properties of annual maximum rainfall intensity of 18 cities in Korea

	Sample size	Mean(mm/hr)	Standard Deviation(mm/hr)	COV
Chuncheon	43	37.70	10.36	0.2748
Hongcheon	36	42.42	13.05	0.3638
Inje	36	34.67	13.23	0.3816
Wonju	36	45.65	14.01	0.3070
Yangpyong	36	45.66	16.30	0.3572
Chungju	36	39.72	14.26	0.3590
Cheongju	36	42.75	12.91	0.3021
Daejeon	36	46.69	12.22	0.2618
Mungyeong	38	33.32	10.64	0.3193
Youngju	38	36.95	14.36	0.3887
Daegu	39	36.06	10.99	0.3048
Jinju	39	43.22	11.66	0.2700
Pohang	39	33.60	17.25	0.5136
Milyang	37	38.32	14.26	0.3722
Namwon	37	42.84	13.53	0.3159
Jeonju	39	43.09	14.24	0.3306
Suncheon	38	44.59	20.35	0.4565
Gwangju	39	46.33	14.14	0.3052

상하수도학회지, 논문
24권 5호, pp.509-517, 10월, 2010

Table 2. Results of chi-square goodness-of-fit test

	Degree of Freedom	Significance Level	Probability	Result
Chuncheon	6-2-1=3	5%(0.05)	7.82	7.39
Hongcheon	5-2-1=2	5%(0.05)	5.99	5.11
Inje	5-2-1=2	5%(0.05)	5.99	5.82
Wonju	5-2-1=2	5%(0.05)	5.99	0.91
Yangpyong	5-2-1=2	5%(0.05)	5.99	1.72
Chungju	5-2-1=2	5%(0.05)	5.99	0.14
Cheongju	5-2-1=2	5%(0.05)	5.99	0.59
Daejeon	5-2-1=2	5%(0.05)	5.99	4.04
Mungyeong	7-2-1=4	5%(0.05)	9.49	3.83
Youngju	6-2-1=3	5%(0.05)	7.82	1.96
Daegu	7-2-1=4	5%(0.05)	9.49	4.43
Jinju	6-2-1=3	5%(0.05)	7.82	7.41
Pohang	6-2-1=3	5%(0.05)	7.82	4.63
Milyang	7-2-1=4	5%(0.05)	9.49	2.40
Namwon	6-2-1=3	5%(0.05)	7.82	5.41
Jeonju	7-2-1=4	5%(0.05)	9.49	2.02
Suncheon	6-2-1=3	5%(0.05)	7.82	2.22
Gwangju	7-2-1=4	5%(0.05)	9.49	4.18

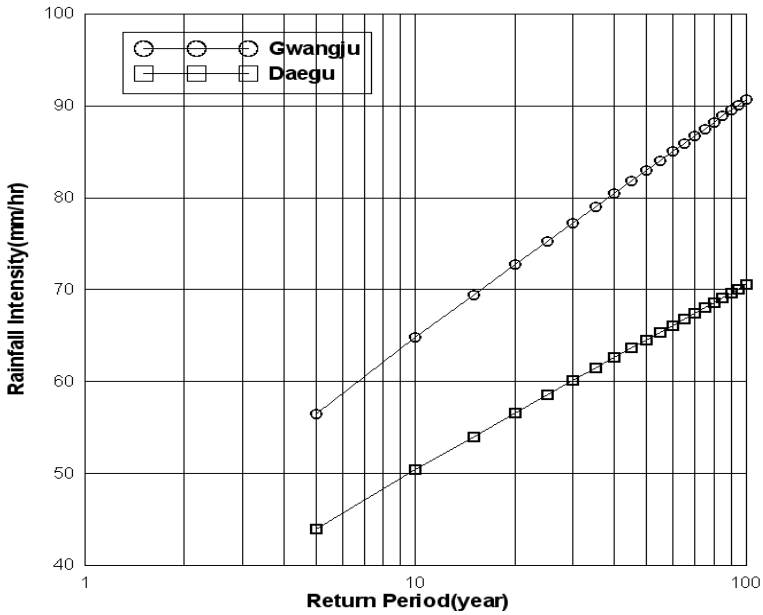

Fig. 3. Annual maximum rainfall intensity according to return period

$$K_T = -\left\{0.45 + 0.7797\ln\left[\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right]\right\} \quad (9)$$

여기서 T는 재현기간(년)이다. 재현기간(return period)에 대한 광주와 대구의 연 최대강우강도를 아래 **Fig. 3**과 같이 산정하였다. 광주의 50년 재현기간의 연 최대강우강도는 약 82.99mm/hr인 것으로 나타났다. 본 연구에서는 광주에 대한 연 최대강우강도의 통계적 특성을 이용하여 우수관의 성능불능확률을 산정하였다.

2.3 우수관의 수리학적 특성

본 연구에서 개발된 신뢰성 모형을 성능불능확률 산정을 위해 원형 우수관에 적용하였다.

우수관의 직경은 1.2m, 경사는 1:1000, Manning의 조도계수는 0.01, 유출계수는 0.85, 유역면적은 0.07km^2 (70,000m^2)로 가정하였다. **Table 3**은 광주시 우수관의 성능불능확률 산정을 위한 신뢰함수에 사용된 확률변수의 통계학적 특성을 나타내고 있다. 강우강도에 대한 확률분포함수는 Gumbel분포를 사용하였고 나머지 변수들에 대해서는 정규분포를 따른다고 가정하였다.

모든 확률변수들은 통계학적으로 독립적이라고 가정하고 각 우수관의 유입량은 관의 용량을 초과할 경우 불능상황으로 간주한다. 아래 식(10)은 우수관의 신뢰함수를 나타낸다.

$$Z = \frac{\pi D^2}{4n} R^{2/3} S^{0.5} - 0.2778 CiA \qquad (10)$$

신뢰함수에서 $Z<0$은 불능상태, $Z>0$는 안전상태, 그리고 $Z=0$는 한계상태를 의미한다. 따라서 신뢰함수는 식(11)을 사용하여 $Z \le 0$에 해당하는 성능불능확률을 정량적으로 산정할 수 있다.

$$P_f = P(Z \le 0) \qquad (11)$$

3. 우수관의 용량과 성능불능확률

우수관의 유입구는 도로와 같은 개방된 장소에 노출되어 있다. 따라서 비가 올 때는 물론 비가 내리지 않을 때에도 흙, 자갈, 쓰레기, 낙엽 등 많은 잔재(debris)가 유입되어 쌓이게 된다. 그중 많은 양이 토사이며 이렇게 유입되어 쌓인 토사로 인해서 우수관의 유효면적은 줄어들게 되고 결국 우수관의 용량을 감소시키게 된다. 본 연구에서는 토사의 적체로 인해 용량이 감소된 우수관의 성능불능확률을 산정하여 토사의 증가에 따른 위험도를 분석하려고 한다. 먼저 **Fig. 4**는 원형 우수관에 토사가 쌓이는 형태를 보여주고 있으며 **Fig. 5**는 그로 인한 1.2m 직경 우수관의 경심

Table 3. Statistical properties of random variables for reliability functions

Variables	Distribution	Mean/COV	Value
C_1	Normal	Mean	0.85
		COV	0.07
i	Gumbel	Mean(mm/hr)	46.33
		50-year return period(mm/hr)	82.99
		COV	0.3052
n	Normal	Mean	0.01
		COV	0.12
K	Normal	Mean	0.9
		COV	0.05

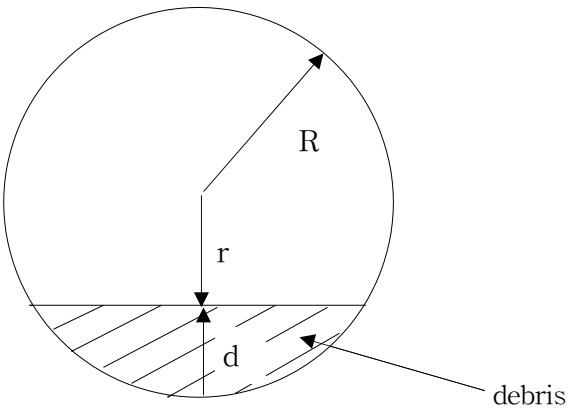

Fig. 4. Debris in sewer pipe

상하수도학회지, 논문
24권 5호, pp.509-517, 10월, 2010

Fig. 5. Hydraulic radius vs. height of debris

Fig. 6. Capacity of storm sewer vs. height of debris

(hydraulic radius)의 변화 그리고 **Fig. 6**은 적체된 토사의 높이가 증가함에 따른 우수관의 용량(capacity) 감소를 나타내고 있다. **Fig. 4**에서 d는 우수관에 쌓인 토사의 바닥으로부터의 높이, r은 우수관 중심으로부터 적체된 토사의 표면까지 길이, 그리고 R은 우수관의 반지름이다. 본 연구에서는 토사가 수평하게 쌓인다고 가정하였다. **Fig. 6**에서 볼 수 있듯이 토사가 0.4m 쌓이면 우수관의 원래 용량의 약 40%가 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 광주의 연 최대강우강도의 평균값(46.33mm/hr)과 50년 재현기간(82.99mm/hr)을 사용하여 우수관의 직경이 1.2m일 때의 성능불능확률을 산정한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 평균값을 사용한 경우, 불능확률은 아주

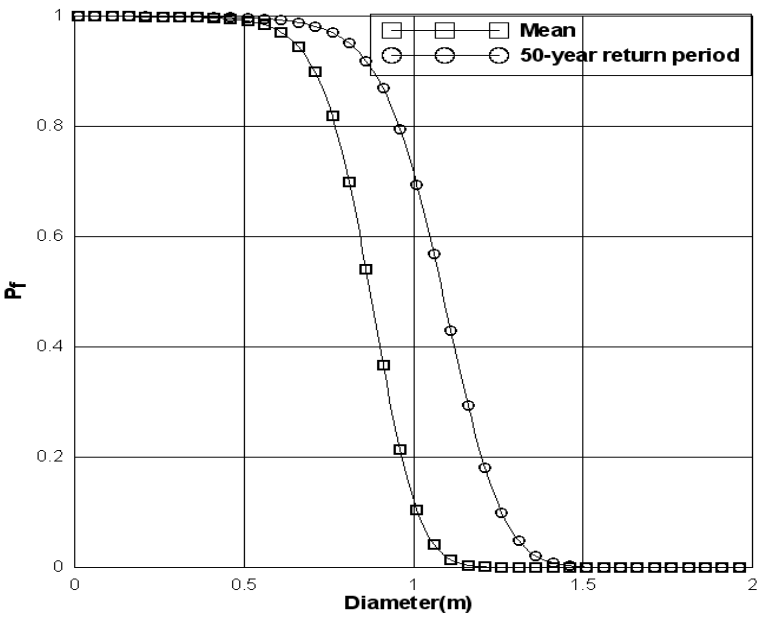

Fig. 7. Probability of performance failure according to diameter using mean value and 50-year return period of annual maximum rainfall intensity of Gwangju

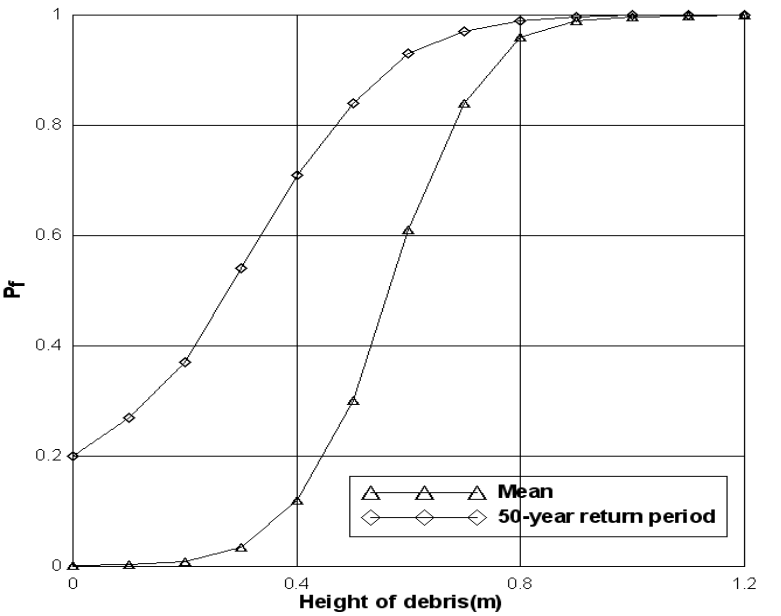

Fig. 8. Probability of performance failure according to height of debris using mean value and 50-year return period of annual maximum rainfall intensity of Gwangju

작은 것으로 나타났으나 재현 기간 50년을 사용한 경우 불능확률이 크게 증가함을 알 수 있다. 광주의 우수관 지름이 1.2m일 때 평균 연 최대 강우강도를 사용한 경우 성능불능확률이 0.1%미만이고 50년 재현기간을 사용한 경우 성능불능확률이 약 20.1%로 크게 증가한다.

이것으로 우수관의 성능불능확률이 강우강도의 크기에 상당히 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다. Fig. 8은 우수관에 쌓인 토사의 높이가 증가함에 따른 성능불능확률을 나

상하수도학회지, 논문
24권 5호, pp.509-517, 10월, 2010

타낸 것이다. 우수관의 바닥으로부터 토사가 0.4m 쌓였을 경우 평균 강우강도를 사용 시 성능불능확률은 약 12%로 나타났고 50년 재현기간을 사용하면 성능불능확률은 약 70%에 이르는 것으로 나타났다.

지표면 아래에 축조된 하수관의 경우 평상시 흙과 낙엽 등 여러 가지 물질들이 적체되어 있는 경우가 많다. 우수관에 많은 토사가 적체되어 있을 경우 우수관의 유효면적이 줄어들어 허용용량이 크게 줄어들게 된다. 따라서 적은 강우량에도 과부하 상태가 되어 성능불능상태에 쉽게 도달하게 된다. 그러므로 Fig. 5와 6과 같은 계산을 통해 하수관의 실제단면이 어느 정도 줄어 있는지 파악하고 그 실제용량에 해당하는 불능확률을 찾아야 한다. 토사의 적체로 인해서 실제 우수관의 면적이 줄어있다면 그 하수관의 불능확률은 크게 상승하게 된다. 신뢰할 수 있는 설계에 의해 시공된 우수관은 원래의 설계직경을 유지한다면 불능확률은 0%에 가깝지만 어떤 이유에서든지 조금이라도 우수관의 직경이 줄어든다면 그 불능확률은 크게 증가하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 우수관의 성능불능확률 산정을 위한 신뢰성 해석을 수행하였다. 먼저 여러 도시의 강우자료를 면밀히 분석하고 연 최대강우강도를 사용하여 신뢰함수를 구축하였으며 우수관의 성능불능확률 산정을 위한 신뢰성 모형이 개발되었다. 그리고 광주의 우수관의 토사적체로 인한 성능불능확률을 산정하였다. 자세한 결과는 다음과 같다.

(1) 18개 도시의 강우자료를 분석한 결과 연 최대강우강도의 확률분포는 Gumbel분포를 나타내는 것을 알 수 있었다. Chi-square goodness-of-fit test결과 모두 유의수준 5%미만으로 만족할 만한 일치를 보였다.

(2) 광주의 원형우수관의 성능불능확률을 산정한 결과, 50년 재현기간의 연 최대강우강도를 사용할 경우 성능불능확률이 크게 나타났다. 결과에서 볼 수 있듯이 광주의 우수관의 지름이 1.2m 일 때 연 평균 강우강도를 사용 시 성능불능확률이 약 0.1%미만이고 50년 재현기간을 사용 시 성능불능확률이 약 20.1%로 나타났다.

(3) 원형 우수관에 쌓이는 토사의 높이에 따른 유효용량을 산정하고 그에 따른 성능불능확률을 산정하였다. 우수관 바닥에서 0.4m 높이의 토사가 쌓일 경우 우수관의 성능불능확률은 평균 연 최대강우강도 사용 시 12% 그리고 50년 재현기간을 사용 시 70%로 나타났다. 이것은 토사가 없는 경우 성능불능확률의 3배가 넘는 수치이다. 우수관의 성능불능확률은 직경의 변화에 아주 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 실제직경이 토사의 적체로 인해서 설계직경보다 줄어 있다면 성능불능확률은 크게 증가하게 되므로 평상시에도 설계직경을 최대한 유지하는 것이 하수관의 불능확률을 최대한 줄일 수 있는 방법이라고 판단된다.

참고문헌

김문모, 이원환, 조원철(1993). "AFOSM 방법에 의한 하수관거의 신뢰성 분석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, Vol. 13, No. 2, pp. 201-209.

김문호, 조원철, 허준행(1995). "우수관거의 불확실성과 위험도-안전율 곡선에 관한 연구." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, Vol. 15, No. 5, pp. 1323-1332.

이철규, 현인환, 독고석, 김형준(2005). "강우 확률년수의 설정이 우수관거 설계에 미치는 영향." **상하수도학회지**, 대한상하수도학회, Vol. 19, No. 5, pp. 647-654.

Ang, A. and Tang, W.H. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design.* John Wiley and Sons, Inc. New York.

Frankel, E. G. (1988). *Systems Reliability and Risk Analysis.* Klume Academic Publishers.

Kwon, H.J. and Lee, C.E. (2008a). "Reliability analysis of pipe network regarding transient flow." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 12, No. 6, pp. 409-416.

Kwon, H. J. and Lee, C. E. (2008b). "Reliability analysis for the probability of pipe breakage." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, KSWW, Vol. 22, No. 6, pp. 609-617.

Kwon, H.J. and Lee, C.E. (2009). "Sensitivity analysis for friction coefficient on the estimations of probability of pipe breakage." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 13, No. 6, pp. 453-462.

Modarres, M. (1999). *Reliability Engineering and Risk Analysis.* Marcel Dekker.