

파괴확률과 다중파괴유형을 이용한 우수관의 안전성 분석

Safety Analysis of Storm Sewer Using Probability of Failure and Multiple Failure Mode

권혁재* / 이철응**

Kwon, Hyuk Jae / Lee, Cheol-Eung

Abstract

AFDA (Approximate Full Distribution Approach) model of FORM (First-Order Reliability Model) which can quantitatively calculate the probability that storm sewer reach to performance limit state was developed in this study. It was defined as a failure if amount of inflow exceed the capacity of storm sewer. Manning's equation and rational equation were used to determine the capacity and inflow of reliability function. Furthermore, statistical characteristics and distribution for the random variables were analyzed as a reliability analysis. It was found that the statistical distribution for annual maximum rainfall intensity of 10 cities in Korea is matched well with Gumbel distribution. Reliability model developed in this study was applied to Y shaped storm sewer system to calculate the probability that storm sewer may exceed the performance limit state. Probability of failure according to diameter was calculated using Manning's equation. Especially, probability of failure of storm sewer in Mungyeong and Daejeon was calculated using rainfall intensity of 50-year return period. It was found that probability of failure can be significantly increased if diameter is decreased below the original diameter. Therefore, cleaning the debris in sewer pipes to maintain the original pipe diameter should be one of the best ways to reduce the probability of failure of storm sewer. In sewer system, two sewer pipes can flow into one sewer pipe. For this case, probability of system failure was calculated using multiple failure mode. Reliability model developed in this study can be applied to design, maintenance, management, and control of storm sewer system.

Keywords : multiple failure mode, performance limit state, probability of failure, reliability model, storm sewer

요 지

우수관의 성능이 한계상태 (performance limit state)에 도달할 확률을 정량적으로 산정할 수 있는 FORM (First-Order Reliability Model)의 AFDA (Approximate Full Distribution Approach) 신뢰성 모형을 개발하였다. 우수관망에서 각각의 관으로 유입하는 유량이 그 관의 허용 가능 배출량을 초과하여 성능한계상태에 도달할 때 이를 파괴상태 (failure state)라 정의하여 신뢰함수를 수립하였다. 우수관거로의 유입량은 합리식, 유출량은 Manning의 공식을 적용하였다. 또한 신뢰성 해석을 위한 관련 확률변수들에 대한 통계적 특성과 분포함수에 대한 해석이 수행되었다. 강우자료의 불확실성 해석에서 우리나라 여러 중소도시에 대한 연 최대강우강도의 확률분포가 Gumbel 극치분포함수와 일치함을 확인하였다. 개발된 신뢰성 모형을 Y자형 우수관망에 적용하여 성능한계상태가 발생할 확률, 즉 파괴확률 (probability of failure)을 정량적으로 산정하였다. Manning의 공식을 이용하여 우수관의 직경 변화에 따른 파괴확률의 거동특성을 분석하였다. 특히 문경과 대전의 50년 재현기간을 갖는 설계 강우강도에 대한 우수관의 파괴확률을 산정한 결과에 의하면, 관의 직경이 특정수

* 교신저자, 청주대학교 토목환경공학과 전임강사 (e-mail: hjkwon@cju.ac.kr)

Corresponding Author, Full-Time Lecturer, Department of Civil and Environmental Eng., Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

** 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: celee@kangwon.ac.kr)

Professor, Department of Civil Eng., Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

치 이하일 경우 파괴확률이 급격히 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 실제 우수관의 유효직경이 설계직경에 가깝도록 항상 관내 불순물을 제거하는 것이 파괴확률을 줄이는 최선의 방법임을 의미하는 것이다. 또한 우수관 시스템의 경우 여러 개의 관이 모여 하나의 관으로 흘러 들어가는 경우가 많으며 이 경우 다중파괴유형 (multiple failure mode)을 적용하여 시스템이 파괴상태에 도달할 확률을 정량적으로 산정하였다. 본 연구에서 개발된 신뢰성 모형은 우수관의 운용, 관리, 감독은 물론 설계에 활용이 가능 할 것이다.

핵심용어 : 다중파괴유형, 성능한계상태, 파괴확률, 신뢰성 모형, 우수관

1. 서 론

최근에 지구 온난화 등의 이유로 국지성 호우가 자주 발생한다. 이런 형태의 강우는 기존에 도시지역에 설치된 우수관의 배수능력을 초과하여 저지대를 비롯한 도시의 많은 지역에 침수를 유발하게 된다. 따라서 이와 같은 강우의 불확실성에 대한 대책이 기존에 설치된 우수관 뿐만 아니라 새로 설치되는 우수관의 설계에 반영되어야 한다.

수공구조물로서 우수관의 설계 시 관의 용량 (capacity) 결정을 위해 Manning의 공식이나 Darcy-Weisbach 공식, 하중 (load)을 산정하기 위하여 합리식등이 주로 사용되고 있다. 이와 같은 식에는 여러 가지 변수들이 포함되며 이 변수들에는 필연적으로 일정 크기의 불확실성이 내재될 수밖에 없다. 따라서 이와 같은 불확실성이 해당 구조물의 성능에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 기존의 결정론적 설계법은 각 변수들이 상수로 취급되기 때문에 불확실성에 대한 해석이 불가능하다. 따라서 각 변수를 확률변수로 고려하는 신뢰성 해석이 수행되어야 한다.

김문모 등 (1993)은 하수관의 신뢰성 분석을 위해서 AFOSM (Advanced First Order Second Moment)법을 사용하였다. 합리식과 Manning, Darcy-Weisbach 공식을 이용하여 위험도 분석을 수행하였다. 신뢰함수를 이루는 확률변수에 대해서는 대부분 정규분포형 함수를 사용하였고 지역에 대한 강우강도는 3-Root 정규분포를 따른다고 가정하였다. 김문모 등 (1995)은 서울시의 58개 배수구역을 선정하여 위험도와 안전율의 관계곡선을 결정지었다. 그리고 위험도-안전율-재현기간의 3가지 변수들에 대한 상관도와 상관관계식을 각 유역별로 제시하였다. 신뢰도 분석기법으로는 MVFOSM과 AFOSM법을 사용하였으며 확률변수인 강우강도에 대해서는 대수정규분포를 따른다고 가정하였다. 이철규 등 (2005)은 우수관의 강우확률 년 수를 5, 10, 15, 30년 등으로 변화시키며 우수관의 건설비용 변화를 산정하였다. 그리고 다양한 확률 년 수에 기초한 건설비용과 설계용량의 변화를 함수가 회귀분석에 의해서 유도되었다. 이들은 설계 계획 년 수가 증가할수록 공사비 증가에 대한 비율을 산정하였다. 한편 Kwon

and Lee (2008a)는 상수관에서 유효유량의 확보여부를 가지고 신뢰성 해석을 하였다. 그리고 Kwon and Lee (2008b)는 상수관망의 부정류 수치해석을 통해 얻어진 압력의 시간에 따른 유동특성을 이용하여 상수관의 파괴확률을 산정하였고, Kwon and Lee (2009)는 AFDA방법을 이용하여 상수관의 파괴확률에 큰 영향을 미치는 마찰손실계수에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다.

최근 들어 많이 나타나는 국지성 호우와 홍수로 인해 많은 피해가 속출하고 있다. 이러한 호우에 의해 기존의 설계방식에 따라 건설된 우수관은 자주 제 역할을 못하고 있으며 보다 안전한 설계방법이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 신뢰성 모형을 개발하여 실제 우수관이 성능한계상태에 도달할 확률을 산정하였다.

2. 신뢰성 해석 모형의 수립

2.1 한계상태함수의 수립

먼저 신뢰함수를 구하기 위해서 시스템에 작용하는 하중과 용량을 결정하여야 한다. 우수관의 경우 성능한계상태 (performance limit state)란 강우량 Q_L 이 우수관의 용량 Q_c 에 이르는 경우로 정의한다. 그리고 파괴확률이란 우수관이 성능한계상태에 도달하거나 초과할 확률로 정의한다. 따라서 신뢰함수는 아래 Eq. (1)과 같이 규정할 수 있다.

$$Z = Q_c - Q_L \quad (1)$$

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

$$Q_L = \lambda_L C i A \quad (2)$$

여기서, λ_L 은 합리식을 사용하는 데서 오는 오차를 보정하는 계수이며, C 는 유출계수, i 는 강우강도 (mm/hr), A 는 유역면적 (km^2)이다.

$$Q_c = \lambda_{c2} \left(\frac{4}{n} \right) \pi R^{8/3} S^{0.5} \quad (3)$$

여기서, λ_{c2} 는 Manning의 공식을 사용하는 데서 생기는

오차를 보정하는 계수, n 은 Manning의 조도계수, R 은 경심 (hydraulic radius), S 는 우수관의 경사 (slope)이다.

2.2 AFDA (Approximate Full Distribution Approach) 모형

본 연구에서는 우수관의 파괴확률 산정을 위해서 FORM의 일종인 Level II AFDA방법 (Kwon and Lee, 2008a)이 사용되었다. Fig. 1에서 신뢰지수 (reliability index) β 는 원점에서 파괴면의 설계지점 (design point)에 이르는 최단거리이며 반복계산에 의해서 구해진다. β 를 구할 때 신뢰지수의 불변성 (invariability)이 요구되어지기 때문에 정규화과정 (normalization process)이 필수적이다.

먼저 방향여현 (directional cosine)은 Eq. (4)과 같이 구하고 Eq. (5)의 새로운 설계점을 산정하기 위해 사용된다. 첫 번째 반복계산에서는 확률변수의 평균값이 설계점 (design point)으로 사용된다.

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

여기서, $x'_i = (x_i - \mu_{x_i}) / \sigma_{x_i}$, x_i 는 각 확률변수 그리고 μ_{x_i} 와 σ_{x_i} 는 각 확률변수들의 평균과 표준편차이다. 따라서

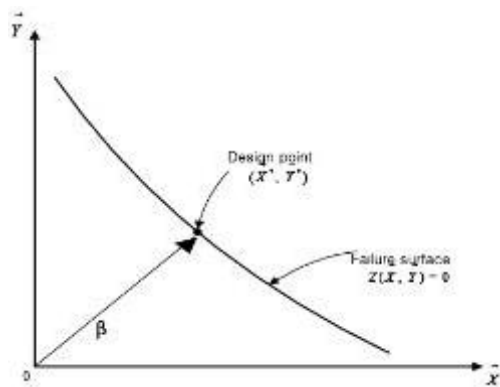


Fig. 1. Design Point on Failure Surface

설계점은 다음 Eq. (5)와 같이 구할 수 있다.

$$n^* = \mu_n - \alpha_n^* \beta \sigma_n \quad (5a)$$

$$i^* = \mu_i^N - \alpha_i^* \beta \sigma_i^N \quad (5b)$$

$$C^* = \mu_C - \alpha_C^* \beta \sigma_C \quad (5c)$$

여기서, μ_i^N 과 σ_i^N 는 지역별 연 최대강우강도의 등가정규 분포 (equivalent normal distribution)의 평균과 표준편차이며 Eq. (6)과 같이 Rosenblatt 변환으로 산정할 수 있다.

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

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

$F_i(x)$ 와 $f_i(x)$ 는 Eq. (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.

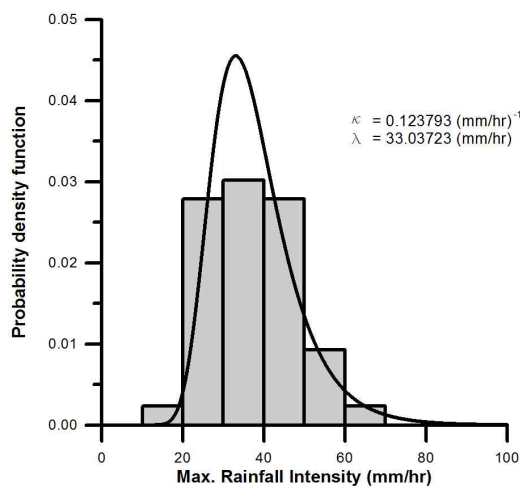
적절한 β 를 구한 후 새로운 설계지점은 β 를 Eq. (5)에 삽입함으로써 얻을 수 있다. β 가 적절한 값에 수렴할 때까지 반복계산이 이루어져야 한다. 신뢰함수를 이루는 다른 확률변수들은 여러 가지 불확실성을 내포하고 있지만 정규분포를 따른다고 가정하였다. 그리고 신뢰함수의 확률변수들 중 지역별 연 최대강우강도는 많은 불확실성을 내포하고 있으며 그 분포함수를 찾아내고 통계학적 특성을 분석할 필요가 있다.

3. 강우강도의 불확실성 해석

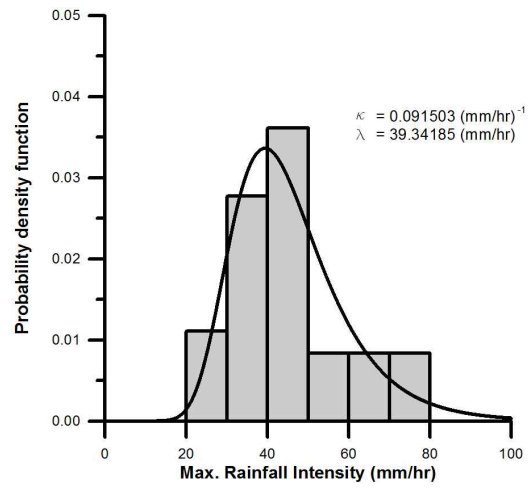
본 연구에서는 우리나라 여러 지역의 중소도시들의 연 최대강우강도의 분포특성을 분석한 결과 Fig. 2와 같이 Gumbel 분포와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 춘천시의 경

Table 1. Results of Chi-Square Goodness-of-Fit Test

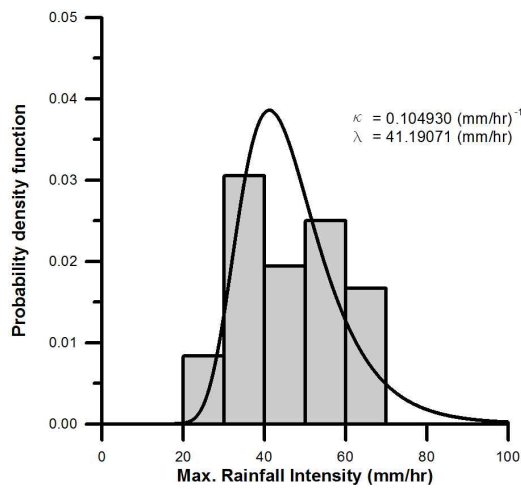
	Degree of Freedom	Significance Level	Probability	Result
Chuncheon	6-2-1=3	5% (0.05)	7.82	7.39
Wonju	5-2-1=2	5% (0.05)	5.99	0.91
Cheongju	5-2-1=2	5% (0.05)	5.99	0.59
Daejeon	5-2-1=2	5% (0.05)	5.99	4.04
Mungyeong	7-2-1=4	5% (0.05)	9.49	3.83
Daegu	7-2-1=4	5% (0.05)	9.49	4.43



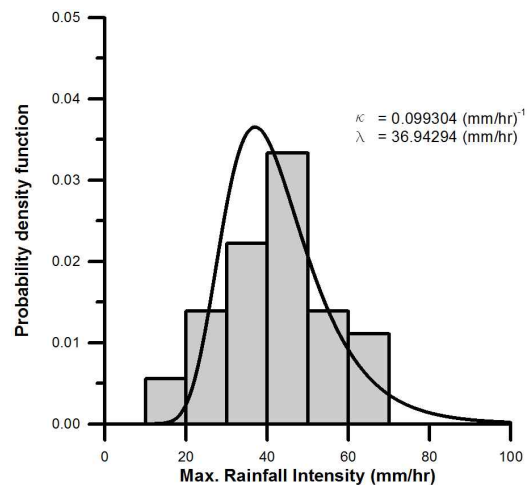
(a)



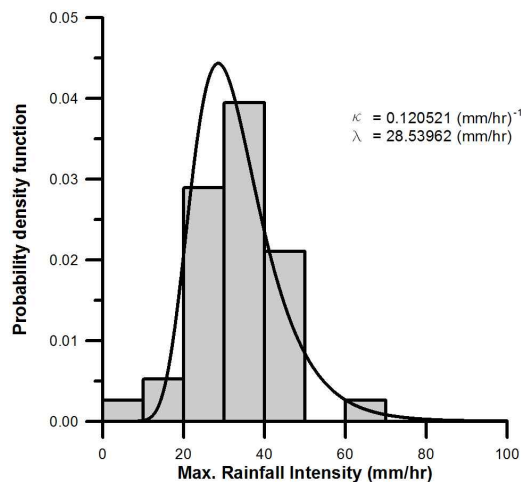
(b)



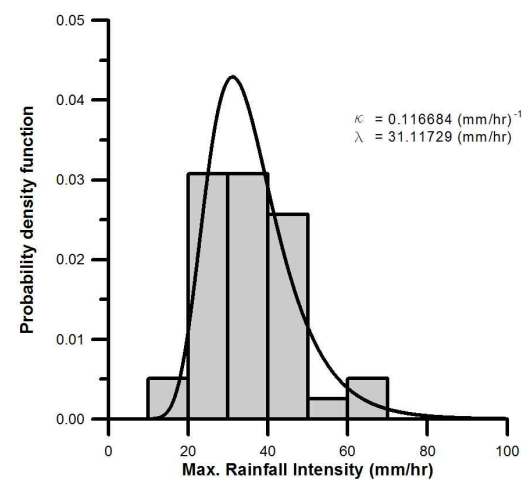
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 2. Statistical Distribution of the Annual Maximum Rainfall Intensity of (a)Chuncheon (b)Wonju (c)Cheongju (d)Daejeon (e)Mungyeong (f)Daegu

우 최근 43년간(1967~2009)의 연 최대강우강도 자료 즉 43개의 자료를 사용하였고, 원주, 청주, 대전의 경우 최근 36(1974~2009)개의 자료를 사용하였다. 그리고 문경과 대구는 최근 39(1971~2009)개의 자료를 사용하였다. Gumbel 분포함수와 자료의 일치성을 알아보기 위해서 Table 1과 같이 chi-square goodness-of-fit test를 수행하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 모든 도시에서 연 최대강우강도의 분포함수가 Gumbel 함수와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며 일치수준은 유의수준 5%이내에 들었다. 특히 청주와 원주의 경우 일치도가 상당히 높은 것으로 나타났다. 그리고 문경의 경우 연 최대강우강도의 평균은 약 33.33 mm/hr으로 가장 낮은 평균을 나타냈으며 대전이 46.69 mm/hr로 가장 큰 연 최대강우강도 평균을 나타냈다. 본 연구에서는 이 결과를 토대로 문경과 대전에 대한 연 최대강우강도의 통계적 분포를 이용하여 우수관의 파괴확률을 산정하였다.

한편 재현기간에 따른 연 최대강우강도는 아래 Eq. (8)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, μ 는 연 최대강우강도의 평균, σ 는 표준편차, 그리고 K_T 는 빈도계수(frequency coefficient)이며 재현기간과 사용되는 확률분포의 종류에 따라 결정된다. 본 연구에서는 연 최대강우강도에 대해서 Gumbel 분포를 사용

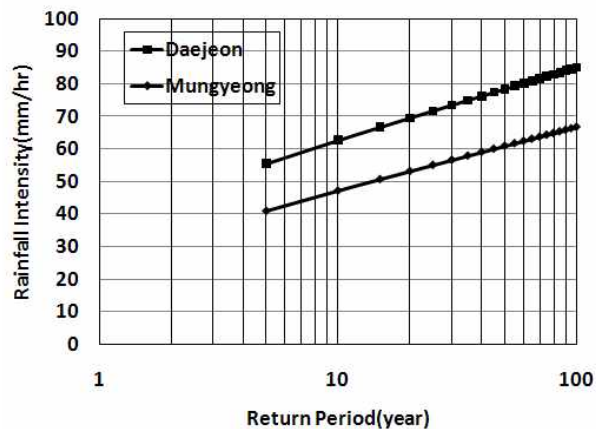


Fig. 3. Annual Maximum Rainfall Intensity according to Return Period

Table 2. Hydraulic Specification of Storm Sewer

Sewer No.	Basin Area (km ²)	Slope	n	Diameter (m)	C
1	0.05	0.001	0.015	1.2	0.8
2	0.05	0.001	0.015	1.2	0.8
3	0.05	0.001	0.016	1.7	0.9

하게 되므로 K_T 는 아래 Eq. (9)에 의해 결정된다.

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

여기서, T는 재현기간(년)이다. 재현기간(return period)에 따른 연 최대강우강도를 아래 Fig. 3과 같이 산정하였다.

4. 파괴확률의 산정

본 연구에서는 우수관의 파괴확률 산정을 위한 신뢰성 모형이 개발되었으며 Fig. 4와 같은 Y자형 우수관에 적용하였다. 우수관에 대한 규격 및 수리학적 특성은 Table 2와 같다.

Fig. 4와 같은 Y자형 우수관 시스템에서 3개의 우수관에 따른 3개의 각기 다른 신뢰함수가 수립되었다. 앞의 Eq. (2)과 같이 1번 우수관(P-1)과 2번 우수관(P-2)의 하중을 산정할 식은 Eqs. (10a) and (10b)로 표현할 수 있으며 3번 우수관(P-3)에 대한 하중을 나타낼 식은 Eq. (10c)과 같다.

$$Q_{L_1} = 0.2778 \lambda_{L_1} C_1 i A_1 \quad (10a)$$

$$Q_{L_2} = 0.2778 \lambda_{L_2} C_2 i A_2 \quad (10b)$$

$$Q_{L_3} = 0.2778 \lambda_{L_3} C_3 i A_3 + K(Q_{L_1} + Q_{L_2}) \quad (10c)$$

여기서, K는 최대유량에 대한 감소계수이며 λ_{L_1} , λ_{L_2} , λ_{L_3} 는 합리식을 사용할 때 생기는 보정계수이다. 유역면적은 3곳 모두 0.05 km²로 가정하였으며 경사도는 0.001로 가정하였다. Manning의 조도계수는 1, 2번관(P-1, P-2)의 경우 0.015 그리고 3번관(P-3)의 경우 0.016으로 가정하였다. Table 3은 문경과 대전의 신뢰함수의 확률변수에 대

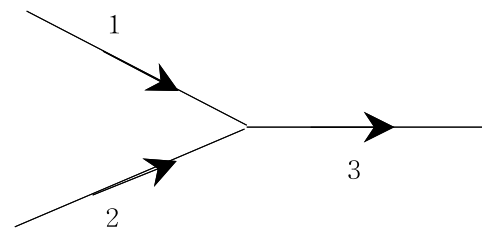


Fig. 4. Sewer Pipes

Table 3. Statistical Properties of Random Variables for Reliability Functions

	Distribution		Mungyeong	Daejeon
C1	Normal	Mean	0.8	0.8
		COV	0.07	0.07
C2	Normal	Mean	0.8	0.8
		COV	0.07	0.07
C3	Normal	Mean	0.9	0.9
		COV	0.05	0.05
i	Gumbel	Mean (mm/hr)	33.33	46.69
		COV	0.3193	0.2618
K	Normal	Mean	0.9	0.9
		COV	0.05	0.05
n1	Normal	Mean	0.015	0.015
		COV	0.12	0.12
n2	Normal	Mean	0.015	0.015
		COV	0.12	0.12
n3	Normal	Mean	0.016	0.016
		COV	0.12	0.12

Table 4. Probability of Failure of Storm Sewer in Mungyeong and Daejeon

		Mungyeong		Daejeon	
	Rainfall intensity	Pipe #1	Pipe #3	Pipe #1	Pipe #3
P_f	Mean	0.000042	0.00071	0.00278	0.0174
	50-year	0.05	0.175	0.192	0.446

한 통계학적 특성을 나타내고 있다. 문경과 대전은 강우 강도에서 차이를 보이고 있으며 나머지 변수들의 수치는 일괄적으로 같다고 가정하였다. 강우강도에 대한 확률분포함수는 Gumbel 분포를 사용하였고 나머지 변수들에 대해서는 정규분포를 따른다고 가정하였다.

모든 확률변수들은 통계학적으로 독립적이라고 가정하고 각 우수관의 유입량이 관의 용량을 초과할 경우 성능 한계상태로 간주한다. 아래 Eq. (11)은 각 우수관의 신뢰함수를 나타낸다.

$$Z_1 = \frac{0.016}{n} - 0.0139C_1i \quad (11a)$$

$$Z_1 = \frac{0.016}{n} - 0.0139C_2i \quad (11b)$$

$$Z_3 = \frac{0.0406}{n} - 0.0139i(C_3 + KC_1 + KC_2) \quad (11c)$$

신뢰함수에서 $Z \leq 0$ 은 성능한계상태 그리고 $Z > 0$ 은

안전한 상태를 의미한다. 따라서 신뢰함수는 Eq. (12)을 사용하여 $Z \leq 0$ 에 해당하는 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있다.

$$P_f = P(Z \leq 0) \quad (12)$$

Table 4는 문경과 대전의 연 최대강우강도의 평균을 사용하여 Y자형 우수관의 1번, 2번관 (P-1, P-2)의 직경이 1.2m이고 3번관 (P-3)의 직경이 1.7m일 때의 파괴확률을 산정한 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 평균을 사용한 경우 파괴확률이 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 상대적으로 파괴확률이 높은 대전의 3번관도 2%미만인 것으로 나타났다.

Fig. 5는 대전과 문경의 우수관의 직경에 따른 파괴확률을 나타낸다. 대전의 연 최대강우강도의 평균값이 높았기 때문에 파괴확률도 크게 나타났다. 그리고 50년 재현기간에 따른 파괴확률도 산정하여 비교하였다. 대전은 재현기간 50년의 연 최대강우강도인 78.37 mm/hr를 사용하고 문

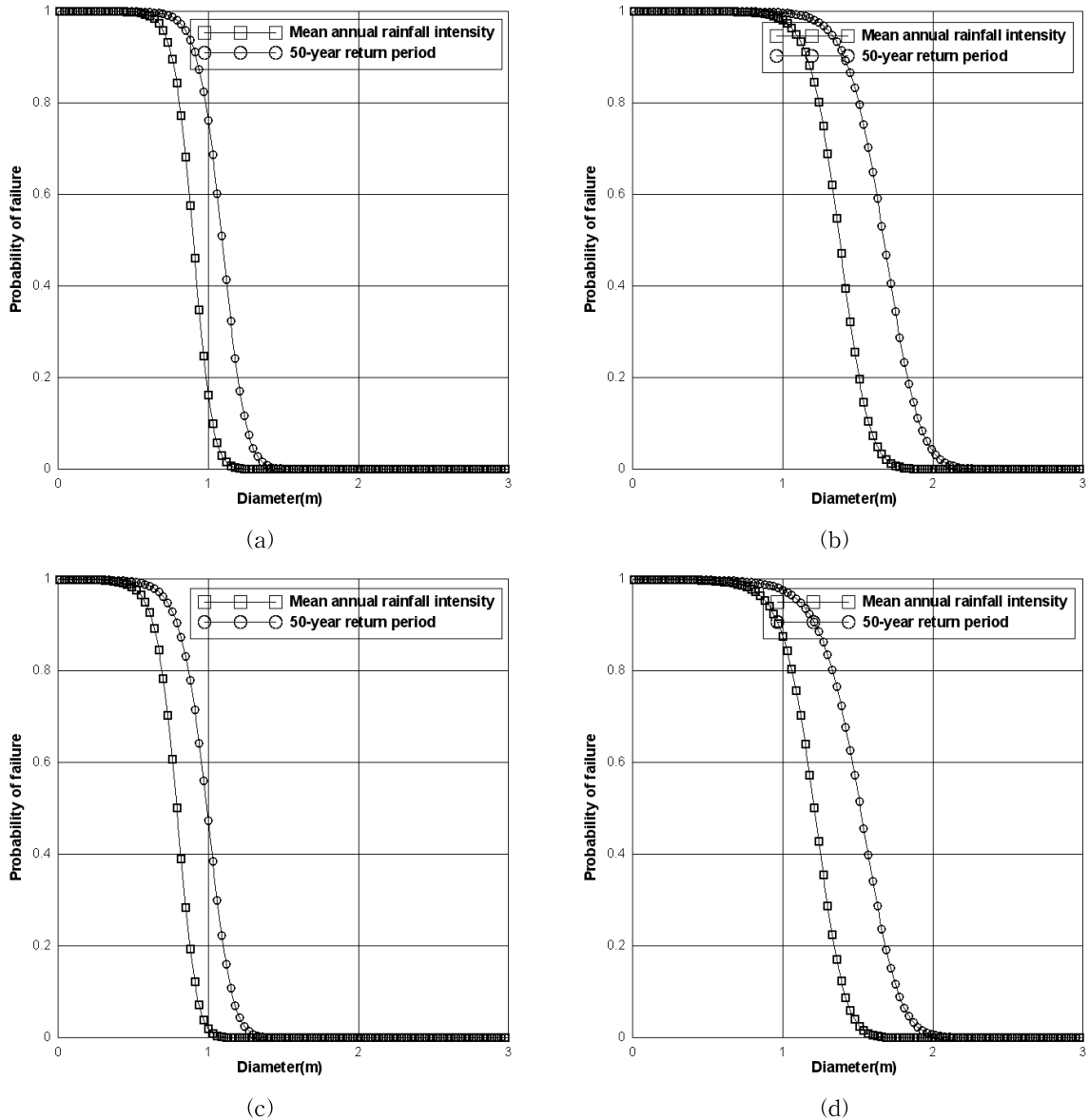


Fig. 5. Probability of Failure according to Diameter of (a)P-1 and (b)P-3 at Daejeon (c)P-1 and (b)P-3 at Mungyeong

경은 재현기간 50의 연 최대강우강도인 60.91 mm/hr를 사용하여 파괴확률을 산정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 대전의 1번 우수관(P-1)의 지름이 1.2m일 때 파괴확률이 19%로 나타났다. 문경의 1번 우수관(P-1)의 지름이 1.2m일 때 파괴확률은 5%로써 약 4배 차이가 나는 것으로 나타났다. 그리고 대전의 3번 우수관(P-3)의 지름이 1.7m일 때 파괴확률은 44%로 나타났고 문경의 3번 우수관(P-3)의 지름이 1.7m일 때 파괴확률이 19%로 나타났다. 대전이 2배 이상 파괴확률이 크게 나타났으며 이것으로 우수관의 파괴확률이 강우강도의 크기에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다. 문경과 대전은 재현기간에 따른 우수관의 파괴확률을 산정하여 비교한 결과 큰 차이를

나타냈다.

지하에 축조된 우수관의 경우 평상시 오물과 흙, 낙엽 등 여러 불순물이 적체되어 있는 경우가 많으며 그것을 인지하기 상당히 어렵다. 우수관에 많은 불순물이 적체되어 있을 경우 우수관의 유효한 실제직경이 줄어들어 허용 용량이 크게 줄어들게 되며 적은 강우량에도 쉽게 과부하 상태가 되어 성능한계상태에 도달하게 된다. 따라서 우수관의 실제단면이 어느 정도 줄어 있는지 파악하고 그 실제용량에 해당하는 파괴확률을 찾아야 한다. Fig. 5(c)에서 문경의 경우 불순물의 적체로 인해서 실제 직경이 1.2m에서 약 0.8m로 줄어들었다면 그 우수관의 파괴확률은 약 40%로 크게 상승하게 된다. 실제 우수관이 1.2m라는

Table 5. Probability of Multiple Failure

Rainfall Intensity	Mungyeong	Daejeon
Mean	$0.00069 \leq P_f \leq 0.00074$	$0.016 \leq P_f \leq 0.018$
50-year return period	$0.137 \leq P_f \leq 0.207$	$0.274 \leq P_f \leq 0.552$

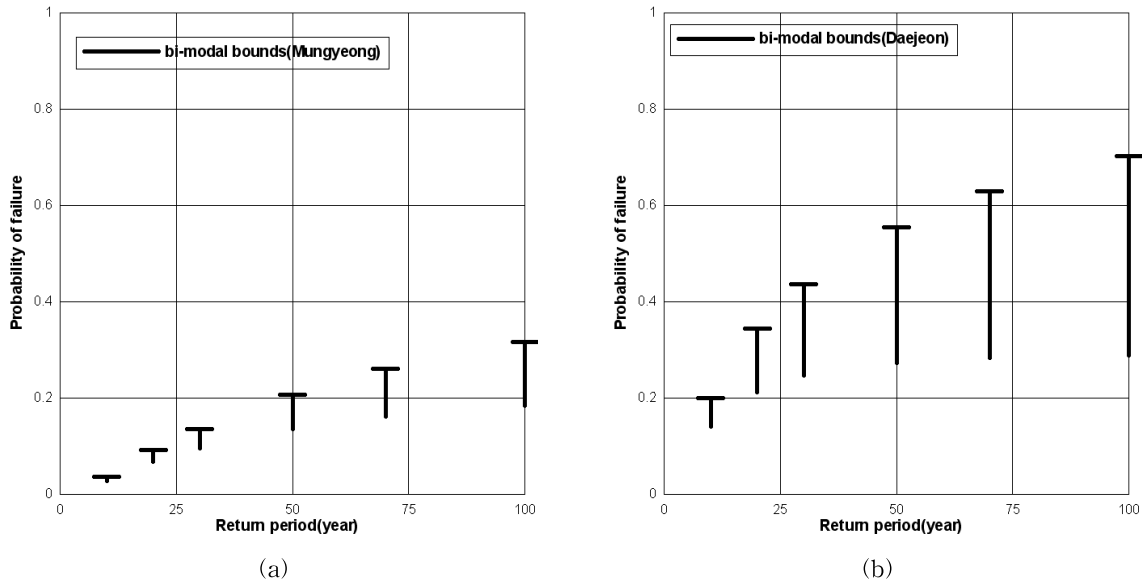


Fig. 6. Probability of Multiple Failure of (a) Mungyeong (b) Daejeon

원래의 설계직경을 유지한다면 파괴확률은 0%에 가깝지만 어떤 이유에서든지 조금이라도 우수관의 실제 직경이 줄어든다면 그 파괴확률은 크게 증가하게 된다.

5. 다중파괴확률

실제 Y자형 우수관의 경우 세 개의 관이 상호 상관관계가 있음을 짐작할 수 있다. 따라서 상관계수 (correlation coefficient)를 산정하고 우수관 시스템의 다중파괴확률을 산정할 필요가 있다. Table 4에 나타난 것과 같이 50년 재현기간의 연 최대강우강도를 사용한 경우 문경의 우수관 1번 (P-1)과 2번 우수관 (P-2)의 파괴확률은 0.05 이고 3번 우수관 (P-3)의 파괴확률은 0.175이다. 이 경우 우수관 시스템의 파괴확률에 대한 1차 경계 (first-order bounds)는 $0.175 \leq P_f \leq 0.275$ 이다. 그러나 이형 경계 (bi-modal bounds)를 위해서는 파괴유형 (failure mode) 사이의 상관계수를 구해야 하며 최종적인 다중파괴확률은 아래 Eq. (13)과 같이 표현된다 (Ang and Tang, 1984).

$$\sum_{i=1}^k P_{f_i} + \max \left[\sum_{i=2}^k \left\{ P_{f_i} - \sum_{j=1}^{i-1} P(E_i E_j) \right\}; 0 \right] \leq P_f \leq \sum_{i=1}^k P_{f_i} - \sum_{i=2}^k \max_{j < i} P(E_i E_j) \quad (13)$$

여기서, 하한경계 (lower bound)는 Eq. (14a)과 같고 상한 경계 (upper bound)는 Eq. (14b)과 같으며 이형경계 (bi-modal bounds)는 Eq. (14c)와 같다.

$$P(E_i E_j) = P(A) + P(B) \quad (14a)$$

$$P(E_i E_j) = \max[P(A), P(B)] \quad (14b)$$

$$\max[P(A), P(B)] \leq P(E_i E_j) \leq P(A) + P(B) \quad (14c)$$

여기서, $P(A)$ 와 $P(B)$ 는 다음 Eq. (15)과 같이 구할 수 있다.

$$P(A) = \Phi(-\beta_i) \Phi \left(-\frac{\beta_j - \rho_{Z_i, Z_j} \beta_i}{\sqrt{1 - \rho_{Z_i, Z_j}^2}} \right) \quad (15a)$$

$$P(B) = \Phi(-\beta_j) \Phi \left(-\frac{\beta_i - \rho_{Z_i, Z_j} \beta_j}{\sqrt{1 - \rho_{Z_i, Z_j}^2}} \right) \quad (15b)$$

상관계수는 아래 Eq. (16)에 의해서 구해진다.

$$\rho_{Z_i, Z_j} = \frac{\sum_k \left(\frac{\partial Z_i}{\partial X'_k} \right) \left(\frac{\partial Z_j}{\partial X'_k} \right)}{\sqrt{\sum_k \left(\frac{\partial Z_i}{\partial X'_k} \right)^2} \sqrt{\sum_k \left(\frac{\partial Z_j}{\partial X'_k} \right)^2}} = \sum_{k=1}^n \alpha_{ik}^* \alpha_{jk}^* \quad (16)$$

연 최대강우강도의 평균을 사용하여 이형경계를 계산한 결과 Table 5와 같이 문경은 $0.00069 \leq P_f \leq 0.00074$ 이고 대전은 $0.016 \leq P_f \leq 0.018$ 로 2%미만의 작은 이형 경계를 나타냈으나 재현기간 50년의 연 최대강우강도를 사용하여 다중파괴확률을 산정한 결과 이형 경계가 아주 크게 나타났다. Fig. 6은 문경과 대전의 재현기간별 연 최대강우강도를 사용했을 경우의 이형경계를 나타내고 있다. 50년 재현기간을 사용할 경우 대전의 우수관 시스템의 다중파괴확률이 문경의 파괴확률보다 약 2배 이상 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 우수관의 파괴확률 산정을 위한 신뢰성 해석을 수행하였다. 먼저 여러 도시의 강우자료를 분석하여 연 최대강우강도를 사용하여 신뢰함수를 구축하였으며 AFDA방법을 이용한 우수관의 성능한계상태에 도달할 확률, 즉 파괴확률 산정을 위한 신뢰성 모형이 개발되었다. 두 개 도시를 예로 Y자형 우수관의 파괴확률을 산정하였다. 자세한 결과는 다음과 같다.

- (1) 10개 도시의 강우자료를 분석한 결과, 연 최대강우강도의 확률분포는 Gumbel분포를 나타내는 것을 알 수 있었다. Chi-square goodness-of-fit test결과 모든 도시에서 유의수준 5% 미만으로 만족할 만한 일치를 보였다.
- (2) Y자형 우수관의 파괴확률을 산정한 결과, 두 도시 모두 연 최대강우강도의 평균값을 사용할 경우 파괴확률은 미미 한 것으로 나타났다. 연 최대강우강도의 평균이 46.69 mm/hr인 대전은 연 최대강우강도의 평균이 33.33 mm/hr인 문경보다 파괴확률이 훨씬 높은 것으로 나타났다. 그러나 평균값을 사용할 경우 두 지역 모두 파괴확률은 2%미만으로 작은 값을 나타냈다. 그리고 재현기간 50년의 연 최대강우강도를 사용하여 파괴확률을 산정하였다. 그 결과 대전의 1번 우수관의 지름이 1.2m 일 때 파괴확률이 약 19%이고 3번 우수관의 지름이 1.7m일 때 파괴확률이 약 44%이다. 문경의 1번 우수관의 지름이 1.2m일 때 파괴확률이 약 5%이고 3번 우수

관의 지름이 1.7m일 때 파괴확률이 약 17%이다.

- (3) 다중파괴유형을 사용하여 이형경계 (bi-modal bounds)를 산정하였다. 그 결과 다중파괴확률의 하한경계 (lower bound)와 상한경계 (upper bound)를 산정할 수 있었다. 이형경계로 산정된 하한경계와 상한경계가 1차 경계로 산정된 값보다 훨씬 더 작은 값을 나타내고 있다. 그리고 문경과 대전의 이형경계를 비교한 결과, 대전의 이형경계의 하한치와 상한치가 항상 문경보다 2배 이상 크게 나타났다.

대전과 문경의 파괴확률을 비교해보면 결과에서 볼 수 있듯이 대전이 항상 파괴확률이 크게 나타났으며 이는 우수관의 파괴확률이 확률변수인 강우강도에 따라 상당히 큰 차이를 나타내기 때문이다. 따라서 도시 우수관의 설계에 있어서 강우강도에 대한 면밀한 분석이 필요하다. 또한 우수관의 파괴확률은 직경의 변화에 아주 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 설계직경이 불순물로 인해서 줄어들었다면 성능한계상태에 쉽게 도달하여 파괴확률이 크게 증가하게 되므로 평상시에도 원래의 직경을 최대한 유지하는 것이 우수관의 파괴확률을 줄일 수 있는 최선의 방법이라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2009-0071042).

참고문헌

- 김문모, 이원환, 조원철 (1993). "AFOSM 방법에 의한 하수관거의 신뢰성 분석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제13권, 제2호, pp. 201-209.
- 김문모, 조원철, 허준행 (1995). "우수관거의 불확실성과 위험도-안전율 곡선에 관한 연구." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제5호, pp. 1323-1332.
- 이철규, 현인환, 독고석, 김형준 (2005). "강우 확률년수의 설정이 우수관거 설계에 미치는 영향." **상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제19권, 제5호, pp. 647-654.
- Ang, A., and Tang, W.H. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- 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.

논문번호: 10-045	접수: 2010.06.01
수정일자: 2010.10.05/10.26	심사완료: 2010.10.26