

우수관의 불능확률 산정을 위한 신뢰성 모형

Reliability model for the probability of system failure of storm sewer

권혁재* / 이철응** / 안재범***

Kwon, Hyuk Jae / Lee, Cheol-Eung / Ahn, Jae Beom

요 지

본 연구에서 AFDA(Approximate Full Distribution Approach)를 사용하여 하수관의 불능확률을 정량적으로 산정할 수 있는 신뢰성 모형이 개발되었다. 여러 도시의 연 최대강우강도(Yearly Maximum Rainfall Intensity)를 이용하여 그 확률분포함수를 분석하였고 우수관(Storm sewer)의 불능확률 산정을 위한 신뢰성 모형에 적용하였다. 연 최대강우강도 자료의 분석결과 우리나라 중부지방의 여러 중소도시에 대한 연 최대강우강도의 확률분포함수는 Gumbel분포와 일치하는 것으로 나타났다. 신뢰성 모형은 불능확률의 신뢰함수를 구하기 위해 하중(Load)을 규정하는 식은 합리식이 사용되었고 용량(Capacity)을 규정하는 식은 Darcy-Weisbach공식과 Manning의 공식이 사용되었다. 이렇게 개발된 신뢰성 모형을 실제 우수관에 적용하여 불능확률을 산정하는 신뢰성 해석을 수행하였다. Y자형 우수관망에서 2개의 관으로 유입하는 각각의 유량이 그 관의 허용용량을 초과할 경우를 불능확률로 가정하였고, 나머지 관의 경우는 두 개의 관으로부터 유입하는 유량과 그 세 번째 관의 매설지역의 우수유입량의 합이 그 관의 허용용량을 초과할 경우를 불능상태(state of system failure)로 간주하여 불능확률을 정량적으로 산정하였다. Darcy-Weisbach공식과 Manning의 공식을 사용한 신뢰성 해석결과를 비교하였으며 우수관 직경의 변화에 따른 불능확률을 산정하였다. 특정한 수치(설계직경)이하일 경우 불능확률이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 실제 우수관의 유효직경이 설계직경에 항상 가깝도록 불순물을 제거하는 것이 최선의 관리 방법이며 불능확률을 줄이는 최선의 방법일 것이다. 본 연구에서 개발된 신뢰성 모형은 우수관의 운용, 관리, 감독은 물론 설계에 활용이 가능 할 것이다.

핵심용어 : 우수관, 불능확률, 신뢰성 모형, 최대강우강도

1. 서론

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. 수공구조물로서 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. 최근 들어 국지성 호우가 자주 발생하고 있으며 강우량 역시 상당한 양에 이르고 있다. 이러한 호우에 의해 기존의 설계방식에 따라 건설된 하수관거는 자주 제 역할을 못하고 있으며 보다 안전한 설계방법이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성 모형을 개발하여 실제 하수관거의 불능확률(Probability of system failure)를 산정하였다.

* 청주대학교 이공대학 토목환경공학과, 전임강사, E-mail: hjkwon@cju.ac.kr

** 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수, E-mail: celee@kangwon.ac.kr

*** 강원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, E-mail: ach222@kangwon.ac.kr

2. 신뢰성 모형

2.1 AFDA(Approximate Full Distribution Approach) 모형

먼저 신뢰함수를 구하기 위해서 시스템에 작용하는 하중과 저항(용량)을 결정하여야 한다. 하수관망의 경우 불능상태(state of system failure)란 강우량 Q_L 이 하수관의 용량 Q_c 를 초과한 경우로 정의한다. 따라서 신뢰함수는 아래 식(1)과 같이 규정할 수 있다.

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

여기서, 하중을 산정하기 위하여 식(2)이 사용되었고 용량을 산정하기 위해서 Darcy-Weisbach식(3)과 Manning의 식(4)이 사용되었다.

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

여기서 λ_L 은 합리식을 사용하는데서 오는 오차를 보정하는 계수이며 본 연구에서는 1.0을 사용하고, C 는 유출계수, i 는 강우강도(m/s)이고, A 는 유역면적(m²)이다.

$$Q_c = \lambda_{c1} \left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{2gS}{f} \right)^{1/2} (4R)^{2.5} \quad (3)$$

여기서, λ_{c1} 은 Darcy-Weisbach공식을 사용하는데서 생기는 오차를 보정하는 계수이며, g 는 중력가속도, S 는 관로의 경사, f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수, R 는 경심(hydraulic radius, m)이다.

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

여기서, λ_{c2} 는 Manning의 공식을 사용하는데서 생기는 오차를 보정하는 계수이고 n 은 Manning의 조도계수이다.

지역별 년 최대강우강도는 불확실성이 내포되어 있으며 그 분포함수를 찾아내고 통계학적 특성을 분석할 필요가 있다. 그리고 신뢰함수를 이루는 다른 확률변수들은 여러 가지 불확실성을 내포하고 있지만 정규분포를 따른다고 가정하였다. 그리고 모든 확률변수들은 통계학적으로 독립적이라고 가정하고 각 우수관의 유입량인 관의 용량을 초과할 경우 불능상황으로 간주한다. 아래 식(5)은 각 우수관의 신뢰함수를 나타낸다.

$$Z_1 = \frac{0.2424}{\sqrt{f}} - 40460 C_1 i \quad (5a)$$

$$Z_2 = \frac{0.2424}{\sqrt{f}} - 40460 C_2 i \quad (5b)$$

$$Z_3 = \frac{0.7315}{\sqrt{f}} - 40460 i (C_3 + K C_1 + K C_2) \quad (5c)$$

신뢰함수에서 $Z < 0$ 은 불능상태, $Z > 0$ 은 안전상태, 그리고 $Z = 0$ 은 한계상태를 의미한다. 따라서 신뢰함수는 식 (6)을 사용하여 $Z < 0$ 에 해당하는 불능확률을 정량적으로 산정할 수 있다.

$$P_f = P(Z \leq 0) \quad (6)$$

2.2. 최대강우강도의 확률분포 특성

본 연구에서는 우리나라 여러 지역의 중소도시들의 연 최대강우강도(maximum rainfall intensity)의 분포 특성을 분석한 결과 Fig. 1과 같이 Gumbel분포와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 춘천시의 경우 43년간의 연 최대강우강도 자료 즉 43개의 자료를 사용하였고 원주의 경우 36개의 자료를 사용하였다.

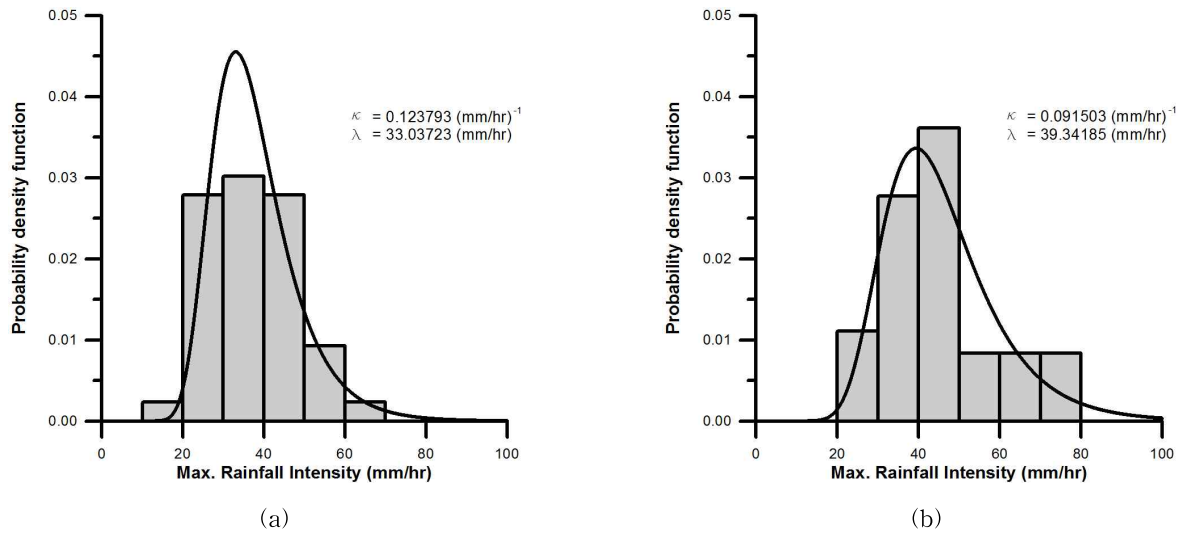


Fig. 1. Statistical distribution of maximum rainfall intensity of (a)Chuncheon (b)Wonju

2.3 하수관거의 수리학적 특성

본 연구에서는 우수관의 불능확률 산정을 위한 신뢰성 모형이 개발되었으며 Fig. 2와 같은 Y자형 하수관거에 적용하였다. 하수관거에 대한 규격 및 수리학적 정보는 Table 1과 같다.

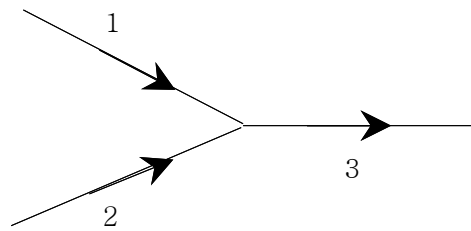


Fig. 2. Sewer pipes

Table 1. Hydraulic specification of sewer pipes

Sewer No.	Basin Area(m ²)	Slope	f	n	Diameter(m)	C
1	40,460	0.01	0.03	0.016	1.2	0.825
2	40,460	0.01	0.03	0.016	1.2	0.825
3	40,460	0.01	0.03	0.017	1.7	0.90

유역면적은 3곳 모두 40,460 m² 으로 가정하였으며 경사도는 0.01로 가정하였다. Darcy-Weisbach 마찰손실 계수는 0.03으로 가정하였고 그에 상응하는 Manning의 조도계수는 두 식을 연계하여 마찰손실계수 f가 0.03 일 때 특정 직경(D₁, D₂=1.2m, D₃=1.7m)에 대한 n값을 도출하였다. 그 결과 1, 2번관의 경우 0.0164 그리고 3번관의 경우 0.0176을 얻을 수 있었다. Table 2는 원주시와 춘천시의 신뢰함수의 확률변수에 대한 통계학적 특성을 나타내고 있다. 춘천과 원주는 강우강도에서 차이를 보이고 있으며 나머지 변수들의 수치는 일괄적으로 같다고 가정하였다. 강우강도에 대한 확률분포함수는 Gumbel 분포를 사용하였고 나머지 변수들에 대해서는 정규분포를 따른다고 가정하였다.

Table 2. Statistical properties of random variables for reliability functions

	Distribution		Wonju	Chuncheon
C _{1,2}	Normal	Mean	0.825	0.825
		COV	0.07	0.07
C ₃	Normal	Mean	0.9	0.9
		COV	0.05	0.05
i	Gumbel	Mean(m/s)	0.00001268	0.00001047
		COV	0.307	0.275
f	Normal	Mean	0.03	0.03
		COV	0.12	0.12
n ₁ , n ₂	Normal	Mean	0.016	0.016
		COV	0.12	0.12
n ₃	Normal	Mean	0.017	0.017
		COV	0.12	0.12

3. 우수관의 불능 확률

Fig. 3은 춘천과 원주의 연 최대강우강도의 평균값을 사용하여 Y자형 우수관의 불능확률을 산정한 것이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 평균값을 사용할 경우, 1, 2번관의 직경이 1.2m 이고 3번관의 직경이 1.7m 일 때 불능확률이 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 상대적으로 불능확률이 높은 3번관의 경우도 역시 1%미만인 것으로 나타났다. 그리고 Manning의 공식을 사용한 계산결과가 Darcy-Weisbach공식을 사용한 계산 결과보다 전반적으로 불능확률이 약간 크게 나타났으며 원주의 최대강우강도의 평균값이 크기 때문에 불능확률도 춘천보다 크게 나타났다.

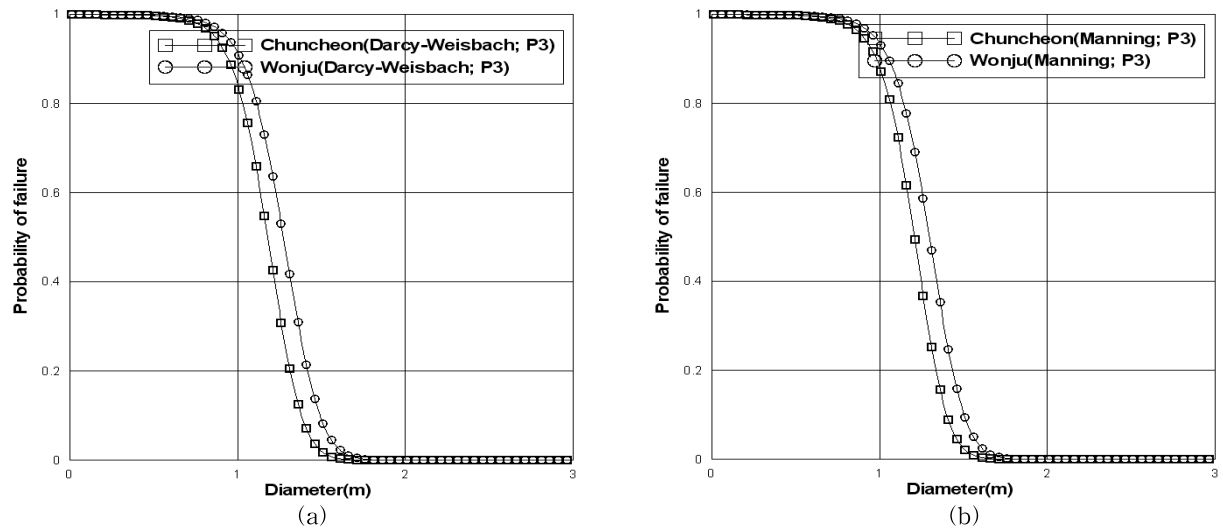


Fig. 3. Probability of failure storm sewer #3 according to diameter ((a)Wonju vs. Chuncheon; Darcy-Weisbach (b)Wonju vs. Chuncheon; Manning)

4. 결론

Y자형 하수관의 불능확률을 산정한 결과, 연 최대강우강도의 평균값이 큰 원주가 춘천보다 불능확률이 큰 것을 알 수 있었다. 두 도시 모두 연 최대강우강도의 평균값을 사용할 경우 파괴확률은 미미 한 것으로 나타났다. 그러나 연 최대강우강도의 평균이 45.65mm/hr(0.00001268m/s)인 원주는 연 최대강우강도의 평균이 37.7mm/hr(0.00001047m/s)인 춘천보다 불능확률이 10배 높은 것으로 나타났다. 우수관의 불능확률은 직경의 변화에 아주 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 실제 우수관의 직경이 오물이나 불순물로 인해서 설계시의

직경보다 줄어 있다면 불능확률은 크게 증가하게 되므로 평상시 설계직경을 최대한 유지하는 것이 우수관의 불능확률을 최소화하는 최선의 방법이라고 판단된다. 본 연구에서 사용된 년 최대강우강도는 재현기간이 40년 이하인 자료들이다. 50년 이상의 재현기간에 대한 년 최대강우강도를 사용한다면 우수관의 불능확률은 더욱 크게 나타날 것이다.