초과강우에 대한 우수관망 신뢰도 평가 기법

A Reliability Evaluation Method of Storm Sewer Networks for Excessive Rainfall Events

이정호* · 박무종**

Lee, Jung Ho · Park, Moo Jong

Abstract

One of the researches about the reliability of storm sewer network defined the sewer system failure as the overflow occurrence for the rainfall events and suggested the reliability evaluation method of storm sewer network, RSDMM(Reliability of Sewer system using DMM). In this study, the parameters to estimate the reliability are the overflow volume and the number of the overflow manholes in the storm sewer network. In order to estimate the reliability, this method used the Distance Measure Method (DMM) to estimate the distance between the parameters while the units and dimensions of each parameter are different. But, the frequency boundary of applied rainfall events was not clear although the reliability results can be different when the boundary of rainfall event's frequency is different. That is, the RSDMM is estimated as the average of overflows for each excessive rainfall event although the overflow occurrences are different according to applied rainfall frequencies. Therefore, to solve these problems and improve the RSDMM, in this study, the frequency boundary of applied rainfall events was defined clearly and the scale control between the number of overflow nodes and overflow volume was organized. Then, the reliability of sewer network is estimated as the quantitative evaluation and this new suggested method improved the RSDMM of Lee's study.

Key words : Storm sewer network, Reliability, Distance measure method, Excessive rainfall event

요 지

우수관망의 신뢰도에 관한 기존의 연구들 중 우수관망에서의 파괴 현상을 초과 강우 사상들에 대한 월류 발생 현상으로 정의하고 이에 따른 신뢰도 산정 방법인 RSDMM(Reliability of Sewer system using DMM)을 제안한 바가 있다. 이때 RSDMM 산정을 위한 매개변수로는 초과 강우 사상들에 대한 관망 내 월류 발생량 및 발생 지점 개수가 되며, 이때 이 두 가지 요소는 단위와 차원이 다르므로 거리척도방법(Distance Measure Method, DMM)을 이용하여 하나의 정량화된 신뢰도를 산정하였다. 그러나 이러한 연구에서 제안된 우수관망 신뢰도 산정식 및 산정 절차는 적용 대상이 되는 초과강우 사상들의 범위를 명확히 규정짓지 못하고 있다. 즉, 적용되는 초과강우사상에 따라서 월류의 발생 현상이 명확히 차이남에도 불구하고 단순 평균하여 신뢰도를 산정하였다. 따라서 본 연구에서는 우수관망 신뢰도 산정을 위한 적용 대상 초과강우사상의 범위를 명확히 규정하였으며, 또한 빈도별 초과강우사상에 따른 월류 발생량 및 발생 지점 개수에 대한 스케일 조정을 통하여 하나의 정량화된 신뢰도를 산정할 수 있도록 기존의 RSDMM 산정식을 개선하고 산정 절차를 새롭게 수립하였다.

핵심용어 : 우수관망, 신뢰도, 거리척도방법, 초과강우

1. 서 론

우수관망 신뢰도에 관한 기존의 연구들에서는 설계 강우를 산정하는 과정에서 관여되는 각종 매개변수에 대한 변동성뿐만 아니라 산정된 지표 유출에 대하여 적절한 관경 및 관경사를 선정하는 과정에서의 산정식에 관여된 모든 매개변수에 대한 변동성을 고려하게 된다. 그리고 고려된 여러 가지 변동성을 종합하여 파괴 확률과 그에 따른 신뢰도를 산정한

다. 이와 관련하여 Yen et al.(1976)은 도시우수 배제 시스템의 신뢰도 해석을 고려한 설계에서 최적 위험도에 대한 연구를 하였으며, Yen et al.(1980)은 암거의 수리학적 설계에 있어서의 신뢰도에 대하여 연구하였다. 또한 Yen et al.(1986)은 우수관거 시스템에서의 구조적 불확실성 분석에 대하여 AFOSM(Advanced First Order Second Moment)을 이용한 바 있다. 또한 Huang(1986)은 개수로에서의 수리학적 설계에 대한 신뢰도 분석 방법을 제안하였으며, Melching

*정회원 · 국립한밭대학교 건설환경공학과(E-mail : leejh@hanbat.ac.kr)

**정회원 · 한서대학교 토목공학과(교신저자)

(1987)은 Rackwitz 반복기법으로 신뢰도 해석을 실시하였다. 그러나 이상의 연구들은 시스템에 대한 불확실성 분석에 기반하고 있으며 이를 통한 구조물의 파괴 확률만을 고려하여 신뢰도를 산정하였으며, 파괴에 따른 현상에 대해서는 고려하지 않았다. 이와 같은 연구에서라면 우수관망의 경우 동일한 파괴 확률을 갖는 시스템은 동일한 신뢰도로 평가될 수밖에 없다. 그러나 파괴 확률이 동일한 시스템들이라 할지라도 파괴에 따른 현상은 다를 수 있다. 이것은 특히, 우수관망이 위치한 지역의 특성에 따라 달라질 수 있으며, 동일한 지역이라 하더라도 관망의 구조에 따라 다를 수 있기 때문이다. 이것은 설계빈도를 초과하는 강우의 발생 시 강우의 강도, 지속기간, 혹은 관망의 구성에 따라서 나타나는 현상, 즉 월류 발생량 및 월류 발생 지점 등이 달라질 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 이정호(2012)는 이러한 기존의 신뢰도 산정 방법의 문제점을 해결하고자 우수관거 시스템에 대하여 새로운 신뢰도 산정 방법을 제안하였다. 여기서 우수관망의 파괴란 초과 강우의 발생에 따른 시스템 내 월류의 발생으로 정의되었다. 즉, 우수관망의 기본적인 기능은 발생된 우수를 원활히 배제하는 것이며, 따라서 우수관망의 파괴란 그 근본적 기능을 수행하지 못하는 상황을 의미한다. 이러한 개념을 통하여 이정호(2012)는 우수관망 시스템에 대한 신뢰도 산정 방법인 RSDMM(Reliability of Sewer system using DMM)을 새롭게 제안하였다. RSDMM은 우수관망별 초과강우에 따른 월류의 발생량 및 발생 지점 개수에 대하여 거리척도 방법을 이용하여 하나의 정량화된 평가 지수를 산정할 수 있다.

그러나 이정호(2012)의 연구에서 제시하고 있는 우수관망 신뢰도 산정 방법은 적용 대상이 되는 초과강우사상들에 대한 범위를 명확히 제시하지 못하고 있다. 즉, 적용 강우사상의 재현기간 및 강우지속기간 등이 달라짐에 따라서 우수관망에서의 월류 발생 양상은 달라질 수 밖에 없음에도 불구하고 이에 대한 고려 없이 각 빈도 및 강우지속기간별 월류 발생 현상을 단순 평균하여 신뢰도를 산정하고 있다. 이러한 경우 적용 대상 강우의 재현기간 범위를 어디까지 고려하느냐에 따라서 평균하여 산정되는 신뢰도 결과값은 크게 달라질 수 있다. 이와 같은 사항은 이정호(2012)의 연구에서 제시된 우수관망 신뢰도 산정 결과 일부를 나타내는 아래의

Table 1에서 확인할 수 있다.

여기서 초과강우사상들에 대한 월류량(V_o), 맨홀지점의 총 개수(N_i), 월류 발생 지점 개수(N_o)와 함께 overflow-period 동안의 전체 유출량(V_i) 산정 결과는 각 우수관망별 RV, RN 및 RSDMM을 산정하기 위한 기초 데이터에 해당한다. 또한 이를 통하여 월류 발생량 비율(V_o/V_i), 발생 지점 개수의 비율(N_o/N_i)이 산정되어지며 이에 대한 각 강우사상별 산정 결과들을 종합적으로 고려하여 RV 및 RN의 산정과 최종적으로 RSDMM의 산정이 이루어진다(이정호, 2012).

앞서 언급하였듯이 이정호(2012)의 연구에서 제시된 Table 1의 결과에서 나타나는 첫 번째 문제는 적용 대상 강우의 범위가 불분명하다는 것이다. 하나의 우수관망에서 월류 발생은 강우사상의 재현기간이 증가할수록 월류의 발생량 및 발생지점 개수는 증가할 수밖에 없다. 따라서 표 1의 결과를 도출한 해당 우수관망에 대해서 적용 강우사상을 80년 혹은 100년 빈도로 증가시켜 신뢰도를 산정할 경우 산정되는 RSDMM 결과값은 크게 달라질 수밖에 없다. 따라서 실제 우수관망에 대한 신뢰도(RSDMM)의 산정 시 초과강우사상을 어느 범위까지 적용시켜야 할 것인가에 대한 의문이 생기게 된다. 두 번째 문제는 적용 대상 강우의 빈도에 따라서 편차가 두드러지게 나타나는 신뢰도 산정값들의 대표성 문제이다. 표 1의 결과에서 보여지듯이 동일한 강우지속기간이라도 강우의 재현기간에 따라서 월류 발생 현상이 두드러지게 차이 나고 있음을 알 수 있다. 물론 이같은 현상은 당연한 결과이지만 문제는 이를 통한 V_o/V_i 및 N_o/N_i 가 매우 큰 차이를 보이고 있다는 것이다. 여기서 RV, RN 및 RSDMM은 각 빈도별 V_o/V_i , N_o/N_i 결과값들의 평균 방식으로 산정되어지는데, 각기 편차가 매우 큰 V_o/V_i , N_o/N_i 값들을 하나의 우수관망에 대한 대표값으로서 그대로 고려하기에는 무리가 있다. 아울러 적용 대상 강우의 빈도를 확대할수록 이러한 문제는 크게 작용할 것이다. 마지막으로 표 1의 신뢰도 산정 요소중 월류량에 따른 V_o/V_i 가 월류발생지점 개수에 따른 N_o/N_i 에 비하여 상대적으로 매우 작은 수치를 나타내고 있다. 이것은 신뢰도(RSDMM)의 산정에 있어서 V_o/V_i 에 비하여 N_o/N_i 가 지배적인 영향을 미치고 있다는 것을 나타낸다. 즉, 두 가지 매개변수인 월류발생량과 월류발생지점 개수에 대한 종합적

Table 1. Estimation results of sewer network reliability(RSDMM)(Lee, 2012)

Frequency (yrs)	Duration (hr)	Overflow- period (min.)	V_i (m ³)	V_o (m ³)	N_i (node)	N_o (node)	$\frac{V_o}{V_i}$	$\frac{N_o}{N_i}$	R V	R N	RSDMM
20	1	10	3,179	124	140	26	0.039	0.186	0.938	0.795	0.848
	2	18	5,740	131	140	16	0.023	0.114			
	3	23	7,192	60	140	7	0.084	0.050			
30	1	12	4,095	284	140	35	0.069	0.250			
	2	22	6,812	300	140	25	0.044	0.179			
	3	28	8,728	187	140	14	0.022	0.100			
50	1	16	4,618	581	140	48	0.126	0.343			
	2	25	7,582	651	140	37	0.086	0.264			
	3	34	10,463	474	140	27	0.048	0.193			

이고 균형있는 고려라기 보다는 월류발생지점 개수에 의하여 신뢰도(RSDMM)가 결정되어지는 양상을 나타낸다. 따라서 이에 대한 균형있는 고려를 위해서는 이들에 대한 적정 범위에서의 스케일 조정이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 이정호(2012)의 연구들에서 나타나는 신뢰도 산정상의 문제점을 해결하기 위한 새로운 산정 절차 및 개선된 산정식을 제시하였다. 개선된 사항은 우선, 신뢰도 산정을 위한 적용 대상 강우를 30년~100년 빈도로 규정하였다. 또한 신뢰도 산정에 고려되는 월류 발생량 및 월류 발생 지점 개수의 두 가지 요소에 대하여 적용 대상 강우 빈도별 산정값의 편차가 크게 나타나지 않음으로써 대표성을 모의할 수 있도록 산정 절차를 새롭게 제시하였다. 아울러 기존의 산정식에서 V_o/V_t 및 N_o/N_t 간의 상대적 지배도가 편중되는 것을 개선하여 두 요소가 균형적으로 종합 고려될 수 있도록 산정식을 개선하였다. 이렇게 개선된 우수관망 신뢰도 산정식(ARSDMM, Advanced RSDMM)은 우수관망의 구성에 따라서 달라질 수 있는 침수 위험도에 대하여 상대적인 신뢰도를 정량적으로 제시해줌으로써 관망 설계 시 이에 대한 고려를 통하여 보다 안전한 우수관망의 설계가 가능하게 한다. 이에 대하여 본 연구에서는 특정 도시구역에서의 우수관망 구성을 각기 다른 세 가지 case에 대하여 초과 강우사상에 따라 달라지는 월류 발생 현상을 ARSDMM에 의하여 정량화하여 비교 분석하였다.

2. 우수관망 신뢰도 산정 방법

본 연구에서의 우수관망 신뢰도 산정은 동일한 도시구역에서 설계빈도를 만족하는 우수관망을 설계할 때 관망을 어떻게 구성하느냐에 따라서 설계빈도를 초과하는 강우 발생시 침수 발생 현황은 달라질 수 있다는 것에 주안점을 두고 있다. 따라서 설계자에 따라서 달라질 수 있는 각기 다른 관망에 대하여 정량적인 신뢰도 평가를 통하여 해당 관망의 구성이 얼마만큼의 침수 방제 효과를 가지고 있을지 판단할 수 있다.

본 연구에서는 우수관망의 신뢰도를 평가하기 위하여 두 가지 요소를 종합적으로 고려하였다. 고려된 요소들은 우수관의 설계 빈도를 초과하는 강우 발생시의 월류 발생량과 월류 발생 지점 개수이다. 앞서 언급하였듯이 이정호(2012)의 연구에서 제시된 신뢰도 산정 방법상의 고려된 요소와 동일하나 본 연구에서는 제시된 신뢰도 산정식의 개선을 위하여 그 산정 절차를 새롭게 수립하였다.

2.1 신뢰도 산정 절차

본 연구에서는 동일한 도시구역에서 각기 다른 관망 구성에 따라서 달라질 수 있는 신뢰도 평가를 제시하고자 하였다. 이때의 신뢰도란 설계빈도를 초과하는 강우 발생시 월류 발생량 및 월류 발생 지점 수가 각 관망에 따라 어떻게 달라 나타나는가에 대한 정량적 수치를 표현한다. 즉, 아래의 Fig. 1과 같이 동일한 구역의 설계빈도를 만족하는 각 관망 구성안에 따라 초과강우에 따른 각기 다른 월류 발생은 월류량과

Fig. 1. Overflow cases for excessive rainfall events

발생 지점 측면에서 상이한 결과를 나타낸다. 과연 이러한 Fig. 1의 두 관망에 대하여 그 신뢰도를 어떻게 정량적으로 나타낼 수 있을 것인가에 대한 문제를 본 연구에서 해결하고자 하였다.

이러한 우수관망에서의 신뢰도 산정을 위하여 본 연구에서는 그 산정 절차를 수립하였으며, 우선 분석 대상이 되는 초과강우사상의 재현기간을 본 연구에서는 30~100년 빈도로 규정하였다. 우수관망에서의 월류 발생 현상을 모의하기 위해서는 압력류 흐름 계산이 가능한 수리해석 모형을 이용하여야 하며, 그 대표적인 모델이 SWMM(Storm Water Management Model)이다. 이러한 압력류 계산 가능 모형을 이용하여 우수관망의 월류 발생을 명확히 해석하기 위해서는 빈도별 월류의 발생 현상이 관망별로 명확히 나타나야 신뢰도의 수치 산정이 가능하다. 그런데 현재 보통 10년빈도로 설계된 우수관망이라 할지라도 일반적으로 30년 빈도 미만의 초과강우에서는 그 월류 발생 현상이 명확히 나타나지 않는 경우가 대부분이다. 반면, 초과강우 사상을 100년 빈도를 초과하여 적용할 경우 일반적인 우수관망에서의 경우라면 대부분의 맨홀 지점에서 월류를 발생시키게 된다. 따라서 너무 큰 재현기간의 초과강우사상을 적용한다면 관망별 월류 발생 현상이 큰 차이 없이 대부분 철류하게 된다. 따라서 이러한 이유로 본 연구에서 제시하는 신뢰도 산정시 적용되어야 할 초과강우사상은 재현기간 30~100년으로 규정하였다. 다만, 해당 재현기간 사이라면 몇 개의 강우사상을 적용시켜도 신뢰도 산정에는 큰 영향을 미치지 않는다.

다음으로 우수관망 신뢰도 산정시 적용되는 초과강우사상의 빈도별 월류 발생 현상의 선형적 관계를 개선하였다. 즉, Table 1에서 제시된 이정호(2012)의 신뢰도 산정 과정에서는 월류 발생량 및 월류 발생 지점 개수에 따른 신뢰도 산정 요소가 초과강우의 재현기간이 증가함에 따라서 선형적으로 증가하고 있다. 이러한 결과를 나타낸 그림이 Fig. 2(a)이다. Fig. 2(a)는 Table 1의 결과 중 강우 재현기간별 1분위의 수치만을 나타낸 것으로 재현기간에 따른 월류량 및 월류 발생량 지점 비가 선형적인 증가를 보인다. 이를 통한 신뢰도 산정값은 보여지는 3가지 수치에 대한 평균 값으로 정의된다. 이때 초과강우의 빈도 증가에 월류 발생 현상의 선형적 증가는 매우 자연스러운 현상이나 문제는 대상 초과강우 빈도를 어디까지 혹은 몇 가지를 적용하느냐에 따라서 신뢰도 산정값이 달라질 수 있으며, 따라서 이러한 현상 그 자체로는 어떠한 특정 관망의 신뢰도에 대한 대표성을 나타내기에 모호한 점이 있다.

(a) N_o/N_t and V_o/V_t points of RSDMM

(b) N_o/N_t and V_o/V_t points of ARSDMM

Fig. 2. N_o/N_t and V_o/V_t points to estimate the sewer reliability

마지막으로 기존의 산정식에서 신뢰도 값은 V_o/V_t 에 비하여 N_o/N_t 의 상대적 지배도에 편중되고 있으며, 본 연구에서는 두 요소간의 균형적인 고려를 가능하도록 산정 절차 및 산정식을 개선하였다. 기존 식에서의 이같은 현상은 Fig. 2(a)에서와 같이 V_o/V_t 의 수치 및 변화폭에 비하여 N_o/N_t 의 수치 및 변화폭이 상대적으로 크게 나타나는 것으로 이해될 수 있다. 즉, 월류 발생량의 정보보다는 월류 발생 지점 수에 따라 해당 관망의 신뢰도 결과값이 좌우되는 현상을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 이 두 가지 요소의 상대적 편중도를 어느 정도 상쇄시킬 수 있도록 하였다.

이상과 같은 적용 초과강우 사상의 빈도 증가에 따른 평가 요소값의 선형적 증가 문제와 월류발생지점 수에 따른 편중된 수치 산정의 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 월류 발생량 및 월류발생지점 수를 각각 총 유출량 및 총 맨홀지점 수로 나뉜 이후 적용된 초과강우사상 각각의 총강우량으로 다시 나뉘춤으로써 이같은 문제를 해결하였다. 또한 신뢰도 산정 결과값의 스케일 조정을 위하여 적용 강우사상 중 가장 큰 강우량 값으로 다시 나뉘춤으로써 최종 신뢰도 평가 요소값을 산출할 수 있다. 이렇게 산정된 신뢰도 평가 요소값들을 Table 1의 수치들을 바탕으로 100년 빈도까지 확대 적용하여 결과값을 재산정하여 나타내면 다음의 Fig. 2(b)와 같다. 따라서 종합적인 신뢰도 산정 값은 Fig. 2(b)의 각 점들에 대한 중심값으로 정의될 수 있다.

이상에서 설명한 우수관망 신뢰도 산정 절차를 정리하면 다음과 같다.

- step 1) 재현기간 30~100년 빈도 사이의 다수의 초과 강우 사상 선정
(적용 강우지속기간 및 강우시간분포는 월류발생량 최대인 경우를 선정)
- step 2) 초과강우사상 재현기간별 월류발생량 및 월류 발생 지점 수 산정
- step 3) 빈도별 월류발생량 비율(V_o/V_t) 및 월류발생지점 비율(N_o/N_t) 산정
(V_o : 월류발생량, V_t : 유역 총 유출량, N_o : 월류발생 지점 수, N_t : 관망 전체 맨홀지점 수)
- step 4) 초과강우사상 빈도 증가에 따른 월류 발생 양상의 선형성 제거를 위하여 V_o/V_t 및 N_o/N_t 를 각 적용 강

우량으로 나눔

step 5) V_o/V_t 및 N_o/N_t 의 스케일 조정을 위하여 적용 최대 강우량 값으로 나눔

step 6) V_o/V_t 및 N_o/N_t 의 중심점을 구하여 신뢰도값 산정

2.2 우수관망 신뢰도 산정식

본 연구에서는 동일한 도시유역에서 각기 다른 관망 구성에 따라서 달라질 수 있는 신뢰도 평가를 제시하고자 초과강우에 대한 월류 발생량과 월류 발생 지점 수를 종합적으로 고려하였다. 그런데 이 두가지 요소는 단위의 차원이 달라 1대 1의 대응이 불가능하며, 따라서 본 연구에서는 하나의 통일된 평가결과를 도출하기 위하여 거리척도방법(Distance Measure Method, DMM)을 이용하였다.

거리척도방법은 시스템의 현재 상태(상황)에 대한 평가를 위하여 시스템의 파괴가 전혀 일어나지 않는 이상점(utopian point)과 파괴가 일어나는 현재 상태에 대하여 그 거리 차를 척도로 하여 현 상태에 대한 평가를 정량적으로 나타낼 수 있는 방법이다. 거리를 척도하는 방법으로는 이상점(utopian point)과의 거리를 최소화하는 utopian approach가 대표적인데, utopian approach는 각각 의사결정자들이 선택한 대안점(alternatives or points)과 이상점(utopian point)과의 거리를 비교하여 가장 거리가 짧은 대안을 그룹의 합의안으로 채택하는 방법이다(이정호, 2012).

본 연구에서 우수관망의 신뢰도 평가 시 월류 발생 총량과 발생 지점 수에 대한 종합적인 평가를 위하여 utopian approach의 개념을 도입한 거리척도 방법을 이용하였으며, Fig. 3은 이것을 이용한 신뢰도 산정 개념을 나타내고 있다. 여기서 시스템을 평가하기 위하여 고려해야할 기준이 Z_1 , Z_2 두 가지이며 두 기준 모두 최대로 만족시켰을 때의 값이 각각 1이라고 하면 점 A는 두 기준을 모두 최대로 만족시키므로 파괴가 일어나지 않는 이상점(utopian point)이 되며, B 점은 시스템에서 파괴가 일어난 현상태를 나타내는 현재점이 된다. 즉, Fig. 3에 나타나 있는 거리인 a, b, c 그리고 d를 이용해 서로 다른 기준인 Z_1 과 Z_2 에 대하여 시스템의 현재 상태를 종합적으로 평가하게 된다. 거리척도는 각각의 기준이 특정한 상황에 있을 때를 나타내는 점과 모든 조건을 만족시키는 점과의 거리를 의미하며, 본 연구에서는 일반적으로 많

Fig. 3. Concept of distance measure method

이 쓰이는 거리척도로 아래의 식과 같은 euclidean distance에 의하여 시스템 신뢰도를 평가하였다.

$$\text{Euclidean distance} : c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1)$$

거리척도 방법을 이용하여 본 연구에서 제시한 우수관망 신뢰도(ARSDMM) 산정 식은 다음과 같다.

$$ARSDMM = 1 - \frac{\sqrt{(1-N_m)^2 + (1-V_m)^2}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

여기서, N_m 및 V_m 은 적용된 각 빈도별 월류발생지점수 비율(N_i) 및 월류발생량 비율(V_i)들에 대한 중심값을 의미하며, 각각은 다음 식과 같다.

$$N_m = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n}, \quad V_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (3)$$

$$N_i = 1 - \left[\frac{(N_o)_i}{(N_t)_i} \right] \left(\frac{R_{\max}}{R_i} \right), \quad V_i = 1 - \left[\frac{(V_o)_i}{(V_t)_i} \right] \left(\frac{R_{\max}}{R_i} \right) \quad (4)$$

여기서, n 은 적용된 초과강우사상 각각을 나타낸다. $(N_o)_i$ 및 $(V_o)_i$ 는 각 강우사상에서의 월류발생지점 수 및 월류발생량을 나타내며, $(N_t)_i$ 및 $(V_t)_i$ 는 각 강우사상에서의 총 맨홀지점 수 및 총 유출량을 나타낸 것으로 무차원이다. 또한, R_i 는 해당 강우사상에서의 총 강우량, $R_{\max}$ 는 적용된 최대의 강우량값을 나타낸다.

3. 우수관망 신뢰도 산정

3.1 적용 우수관망

김중훈 등(2009)은 우수관망의 노선 변경에 따른 관망 내 흐름의 변화에 관한 연구 결과를 제시한 바 있으며, 이정호(2010)는 유전자 알고리즘을 이용하여 우수관망에서의 유출구 침투유출량을 최소화하는 것을 목적함수로 하는 최적 노선 결정 모형을 개발한 바 있다. 여기서 침투유출량을 최소화한 관망 설계가 설계빈도를 초과하는 강우 사상에 대하여 침수 저감 효과를 가져오는 분석 결과를 나타내었다. 즉, 동일한 유역에서 설계빈도를 만족시키는 우수관망이라 하더라도 그

Fig. 4. Sewer network cases

구성을 어떻게 하느냐에 따라서 초과강우사상에 따른 월류 발생 현상이 달라진다는 것이다(이정호, 2012).

따라서 본 연구에서는 하나의 도시유역에서 각기 다른 임의의 설계안에 따른 관망 구성이 초과강우사상 발생 시 어떠한 월류 발생 현상을 나타내는지와 이에 따른 우수관망별 신뢰도 평가를 정량화해보았다. 적용된 도시유역은 송파구의 가락배수분구의 일부 유역으로 면적은 총 36 ha, 맨홀 지점(node)의 개수는 총 140개이며, 설계빈도를 만족하는 범위에서 임의의 관망 세 개를 구성하여 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 음영으로 나타내어진 부분들은 관거의 연결 방향을 달리 구성한 맨홀 지점들을 나타낸다.

Fig. 4에서 화살표는 각 지점별 관거 연결 방향을 나타내며, 음영으로 표시된 부분에서 연결 방향을 달리한 임의의 3개 관망 케이스는 모두 설계빈도 10년을 만족하도록 설계되었다. 그러나 동일한 설계빈도를 만족시키는 Fig. 4의 각 관망 구성은 초과강우를 적용시 월류 발생 양상이 크게 차이나는 것으로 확인되었으며, 그 결과값을 Table 2에 나타내었다. 여기서 초과강우 적용시 강우의 지속기간 및 강우 시간 분포는 월류 발생 양상을 가장 크게 나타내는 강우지속기간 60분 및 huff 4분위를 적용하였다.

Table 2. The numbers of overflow nodes(N_o) and overflow volumes(V_o) for each network case

Frequency (yrs)	Rainfall depth (mm)	Case I		Case II		Case III	
		N_o (node)	V_o (m ³)	N_o (node)	V_o (m ³)	N_o (node)	V_o (m ³)
30	116.6	70	3,036	43	2,667	42	1,389
50	127.3	76	4,155	48	3,718	47	2,210
70	134.3	79	4,943	52	4,438	50	2,782
80	137.0	81	5,256	52	4,743	51	3,016
100	141.7	81	5,817	57	5,253	55	3,430

Table 3. Reliability(ARSDMM) of each sewer network

(a) Case I										
Frequency (yrs)	Rainfall depth (mm)	N_o (node)	V_o (m ³)	N_t (node)	V_o (m ³)	N_i	V_i	Central point		Reliability (ARSDMM)
								N_m	V_m	
30	116.6	70	3,036	140	22,215	0.392	0.834	0.403	0.795	0.554
50	127.3	76	4,155	140	23,607	0.396	0.804			
70	134.3	79	4,943	140	24,463	0.405	0.787			
80	137.0	81	5,256	140	24,787	0.402	0.781			
100	141.7	81	5,817	140	25,333	0.421	0.770			
(b) Case II										
Frequency (yrs)	Rainfall depth (mm)	N_o (node)	V_o (m ³)	N_t (node)	V_o (m ³)	N_i	V_i	Central point		Reliability (ARSDMM)
								N_m	V_m	
30	116.6	43	2,667	140	22,215	0.627	0.854	0.612	0.816	0.697
50	127.3	48	3,718	140	23,607	0.618	0.825			
70	134.3	52	4,438	140	24,463	0.608	0.809			
80	137.0	52	4,743	140	24,787	0.616	0.802			
100	141.7	57	5,253	140	25,333	0.593	0.793			
(c) Case III										
Frequency (yrs)	Rainfall depth (mm)	N_o (node)	V_o (m ³)	N_t (node)	V_o (m ³)	N_i	V_i	Central point		Reliability (ARSDMM)
								N_m	V_m	
30	116.6	42	1,389	140	22,215	0.635	0.924	0.623	0.888	0.722
50	127.3	47	2,210	140	23,607	0.626	0.896			
70	134.3	50	2,782	140	24,463	0.623	0.880			
80	137.0	51	3,016	140	24,787	0.623	0.874			
100	141.7	55	3,430	140	25,333	0.607	0.865			

Table 2의 결과에서 나타나듯이 적용된 30~100년 빈도의 초과강우사상들에 대하여 월류의 발생 양상은 전반적으로 Case I, Case II, Case III 순으로 크게 나타나고 있다. 관망 케이스별 상대적인 개략적 위험도는 인지할 수 있으나 정량화된 수치로 직접적인 비교는 모호함을 알 수 있다. 따라서 각 관망별 초과강우에 따른 월류 발생 지점 수 및 월류 발생량의 두 가지 변수를 고려하여 일관되고 정량화된 수치를 통하여 초과강우사상에 따른 신뢰도를 비교할 수 있도록 제시된 것이 본 연구에서의 ARSDMM이다.

3.2 ARSDMM을 이용한 우수관망 신뢰도 평가

ARSDMM을 산정하기 위해서는 우수관망 내에서의 초과강우에 따른 월류 발생량 및 월류발생지점 수에 대한 Table 2의 결과 외에 해당 유역에서의 강우에 따른 총 유출량 및 관망의 총 맨홀 지점 수가 필요하다. 이를 통하여 Eq. (4)에

서의 월류발생비율(V_o/V_i) 및 월류발생지점 수 비율(N_o/N_i)과 강우량에 따른 스케일 조정이 가능하다. 또한 이렇게 산정된 결과들에 대한 중심점(central point)을 찾기 위하여 Eq. (3)에 따른 N_m 및 V_m 을 산정한 후 최종적으로 해당 관망의 신뢰도인 ARSDMM을 Eq. (2)에 의하여 산정할 수 있다. 다음의 Table 3에 각 관망별 신뢰도(ARSDMM) 산정 결과를 나타내었다.

Table 3의 결과들에서 각 관망 케이스에 따른 강우 재현기간별 N_i , V_i 및 중심점 및 신뢰도를 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서는 각 관망 케이스별 신뢰도를 나타내는 중심점의 위치가 절대적인 신뢰도를 나타내는 이상점(Utopinal point)으로부터 떨어진 거리를 나타내고 있으며, 이것은 Fig. 3의 c를 의미한다. Fig. 5에서 나타나듯이 이상점으로부터 가장 가까운 거리에 있는 Case III의 관망 구성이 신뢰도 측면에서 가장 우수함을 알 수 있다. 즉, 동일한 유

Fig. 5. Distance between utopian point and central points of each network case

역에서 동일한 설계 빈도하에 관망을 구성할 때 그 구성 형태에 따라서 초과강우에 따른 월류 발생에 대한 신뢰도는 다르게 나타날 수 있으며, 이때 정량화된 신뢰도 평가 결과는 보다 우수한 관망 구성을 위한 척도가 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 초과강우에 따른 월류 발생 양상에 대한 우수관망의 신뢰도 평가에 있어서 기존의 연구에서 나타난 적용대상 강우 범위의 불분명함, 신뢰도 산정값들의 대표성 문제, 고려된 변수의 편향성 문제 등을 개선하여 우수관망의 신뢰도 산정 절차 및 산정 식을 보다 명확히 제시하였다. 이러한 우수관망 신뢰도 평가 방법이 제안된 주된 목적은 우수관망 설계의 근본적 목적이 우수 배제 및 침수 방재에 있다는 것이다. 즉, 설계빈도를 만족하는 범위에서라면 더 이상의 추가적인 목적을 갖지 않는 기존의 우수관망 설계 관점에서 벗어나 동일한 설계빈도하에 관망을 구성할지라도 보다 높은 빈도의 호우 발생 시 보다 우수한 배제 능력을 갖는 관망 구성을 고려해야 한다. 이때 우선적으로 고려되어야 하는 것이 초과강우사상에 따른 우수관망의 성능 평가, 즉 신뢰도를 어떠한 방식에 의하여 정량적으로 산정할 수 있을 것인가이

며, 본 연구에서는 이것에 대한 해답을 제시하고 있다. 따라서 본 연구에선 제시된 우수관망 신뢰도 평가 방법은 이러한 우수관망의 근본적 기능을 정량적으로 평가함으로써 의사결정자에게 관망 구성 및 설계에 대한 판단 기준을 제공할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20100026519)

참고문헌

- 김중훈, 주진걸, 전환돈, 이정호 (2009) 우수관거 흐름 제어를 위한 관망 설계에 관한 연구, **한국방재학회논문집**, 제9권, 제1호, pp. 1-7.
- 이정호 (2010) 우수관망 노선 결정에 따른 침투유출량 변화 분석, **한국산학기술학회논문지**, 제11권, 제12호, pp. 5151-5156.
- 이정호 (2012) 우수관망 신뢰도 산정 방법의 개발, **한국방재학회 논문집**, 제12권, 제2호, pp. 225-230.
- Amorocho, J., Espildora, B. (1973) Entropy in the assessment of uncertainty in hydrologic systems and models. *Water Resources Research*, Vol. 9, Issue. 6, pp. 1511-1522.
- Yen, B.C., Wenzel, H.G., Mays, L.W. and Tang, W.H. (1976) Advanced methodologies for design of storm sewer systems. *Research Report No.112*, Water Resour. Ctr., Univ. of Illinois, Urbana-champaign, Ill.
- Yen, B.C., Cheng, S.T. and Tang, W.H. (1980) Reliability of Hydraulic Design of Culverts. *International Conference on Water Resources Development*, Taipei, Taiwan, pp. 991-1001.
- Yen, B.C., Cheng, S.T. and Melching, C.S. (1986) Stochastic and risk analysis in hydraulic engineering. *Water Resources Publications*, ISBN-0918334-57-8, Littleton, Colo.
- Huang, K.Z. (1986) Reliability Analysis on Hydraulic Design of Open Channel. *Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Eng.* pp. 60-68.
- Melching, M.B. (1987) Reliability Analysis on Flood Event Forecasting with Uncertainties. Ph.D Thesis Dept. of Civil Engineering Univ. of Illinois.

© 논문접수일 : 2012년 06월 29일
 © 심사외뢰일 : 2012년 06월 29일
 © 심사완료일 : 2012년 07월 13일