

우수 이용을 위한 포집재료별 포집수량과 수질에 관한 연구

A Study on Quantity and Quality of Collected Rainwater by Collected Materials

이영복 · 이승근 · 왕창근*

Lee, Young-Bok · Lee, Seung-Keun · Wang, Chang-Keun*

충남대학교 환경공학과

(2003년 11월 3일 접수; 2003년 12월 30일 최종수정논문 채택)

Abstract

In this study, quantity and quality of collected rainwater by sand, gravel, soil, lawn and concrete surface, as collection materials were investigated and Rainwater Collection Prediction Model was developed to predict the amount of collected rainwater. The quantity of collected rainwater in concrete surface, gravel, sand, soil and lawn collection system was 1,067L(93.2%), 1,006L(87.8%), 902L(78.8%), 800L(69.9%), 788.5L(68.8%) for 8 months period, respectively. The average turbidity of collected rainwater in concrete surface, gravel, sand, soil and lawn collection system was 3.2NTU, 2.2NTU, 1.9NTU, 1.7NTU, 1.5NTU for 8 months period, respectively. For sand collection material, predicted amount by the Model and actual collected amount were 931.5L and 902L, which were very closed. For gravel collection material, predicted amount by Model and actual collected amount were 1,028.2L and 1,006L, which were very closed. To simulate the optimal rainwater storage volume, the rainfall and evaporation data in Daejeon city were used. For sand collection system with 30m² area, the maximum storage volume was 17m³ and 62% of the year was secured for use of 240L/day.

Key words: Rainwater collection prediction model, Average turbidity, Optimal rainwater storage volume

주제어: 빗물포집 예측모델, 평균 탁도, 최적 포집장치 용량

1. 서론

우리 나라의 수자원은 연간 강수량이 1,283mm로 세계 평균 973mm의 1.3배에 이르지만, 좁은 국토면적에 높은 인구밀도로 인해 1인당 수자원 강수량은

2,705m³/년으로 세계평균 22,096m³/년의 12%에 지나지 않아 국제적으로 물 부족국가로 분류되고 있다(대한상수도학회 빗물이용연구회, 2002). 연강수의 부존 총량 중 증발로 인한 손실 등을 빼면 이용 가능량은 26%에 불과하고, 특히 지하수 이용 가능량은 연

*Corresponding author Tel: +82-42-821-6676, Fax: +82-42-822-5610, E-mail: ckwang@cnu.ac.kr (Wang, C.K.)

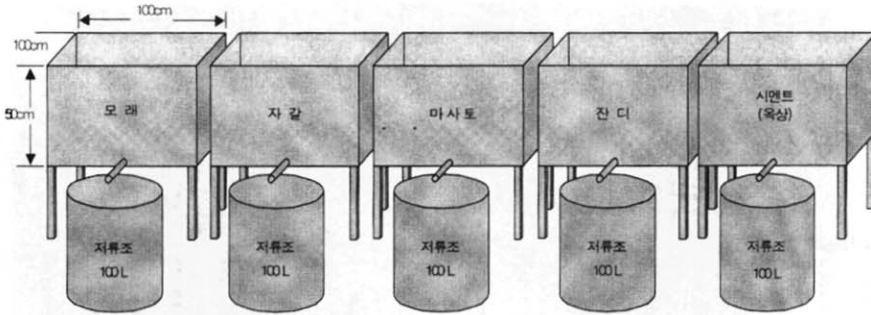


Fig. 1. The facilities of rainwater collection and storage.

간 133억³로 추정되지만, 1999년의 이용량은 연간 40억³에 지나지 않는다(기상청, 1999). 더구나 연도별, 지역별, 계절별 강수량의 차이가 크고, 변화의 폭이 커 수자원 관리에 매우 불리한 특성을 갖고 있다.

물 수요의 급증에 따른 댐 등의 대규모 저수시설 설치하는 방대한 수몰지역의 발생, 주민이주대책, 막대한 건설비와 환경파괴, 주민피해로 인한 지역갈등의 문제 등으로 제한되고 있다. 또한 최근 해마다 국부적인 갈수문제와 더불어 지표수 및 지하수의 오염 등으로 인하여 물부족 현상은 더욱 심화될 것으로 예상된다. 날로 악화되는 수자원 환경을 고려할 때 수질 사고나 이상기후 등 비상시에 대비하여 용수원 다변화를 추진해야 한다.

빗물을 저장하여 이용하는 것은 환경파괴 없이 부족한 물 문제를 해결할 수 있으며 빗물의 지하 침투로 하천의 건천화, 지하수의 고갈 등을 예방할 수 있고 도시 홍수에 의한 피해도 예방할 수 있다. 그러나, 국내에서는 빗물이용에 대한 인식이 부족하고 그에 대한 연구도 아직 미흡한 실정이며, 대부분의 연구가 지붕면만을 우수포집 대상으로 수행되었다.

따라서 본 연구에서는 마사토, 모래, 자갈, 잔디, 시멘트 등 다양한 포집재료를 통해 우수를 포집하고, 그 포집된 포집수의 수량과 수질을 측정하였다. 또한 강우 발생시 강우량에서 포집량을 뺀 손실량의 대부분이 포집재료의 함수율을 높이는데 사용된 점을 기초로 포집재료별 우수 포집량을 산정하기 위한 빗물 포집 예측모델을 개발하여 실제 강우시 포집된 실측값과 모델의 예측값을 비교하고, 이때 필요한 저류조의 용량을 산정하였다.

Table 1. The characteristics of rainwater collection and storage facilities

포집장치 규격	1m(가로) 1m(세로) 0.5m(높이)		
상부포집재료	모래	입도: 2.5mm이하, 깊이: 15cm	
	자갈	입도: 5-10mm, 깊이: 15cm	
	마사토	입도: 2.5mm 이하, 깊이: 15cm	
	잔디	마사토입도: 2.5mm 이하, 깊이: 20cm	
	시멘트	-	
하부집수장치	자갈 1	입도: 10-20mm, 깊이: 3cm	
	자갈 2	입도: 5-10mm, 깊이: 2cm	
저류조	100 L		

2. 재료 및 방법

우수를 포집 및 저류하기 위한 실험장치는 대전광역시 유성구 궁동 충남대학교 공대 3호관 옆 공터에 설치하였으며, 2002년 2월 21일부터 2002년 9월 30일까지 발생한 강우에 대해 포집 실험을 수행하였다.

우수 포집을 위한 실험장치는 가로 1m, 세로 1m, 높이 0.5m의 크기로 제작되었으며, 포집재료로 각각 모래, 자갈, 마사토, 잔디, 시멘트를 사용하였다. 모래, 자갈, 마사토는 15cm의 깊이로 채웠으며 잔디는 깊이 20cm의 마사토 위에 심었다. 하부집수장치로 입도 10-20mm의 자갈을 3cm 깊이로 채웠으며, 그 위에 5-10mm의 자갈을 2cm 깊이로 채웠다. 저류조로는 100L 용량의 통을 사용하였다. Fig. 1에 포집장치와 저류조를 나타내었으며, Table 1에 포집장치와 저류조의 특성을 나타내었다.

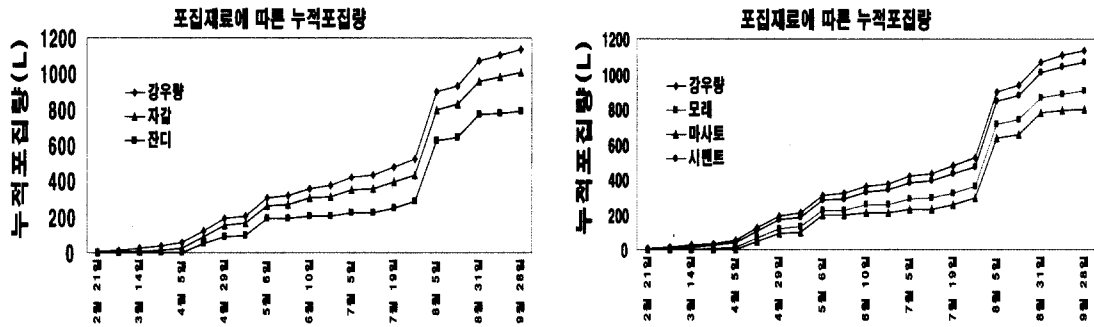


Fig. 2. Accumulation curve of collected rainwater in various filter materials.

3. 결과 및 토의

3.1. 포집재료별 포집수량

2002년 2월 21일부터 2002년 9월 30일까지 내린 강우에 대해 포집실험을 수행하였으며, 포집장치의 가로와 세로가 각각 1m로 포집장치에 내린 강우를 전량 포집한다고 가정할 경우 가로(1m)×세로(1m)×강우량(mm) = 포집량(L)이므로 강우량(mm) = 포집량(L)으로 환산할 수 있다.

포집실험 기간 동안 내린 총 강우량은 1,145.3mm (1,145.3L)였으며 포집재료를 모래로 사용한 포집장치에서는 902L를 포집하여 78.8%의 포집율을 보였고, 자갈의 경우 1,006L를 포집하여 87.8%의 포집율을 보였고, 마사토의 경우 800L를 포집하여 69.9%의 포집율을 보였다. 잔디의 경우는 788.5L를 포집하여 68.8%의 포집율을 보였으며, 콘크리트 표면의 경우 1,067L를 포집하여 93.2%의 포집율을 보였다. Fig. 2에 각각의 포집재료에 따른 누적강우 포집량을 나타내었다.

3.2. 포집수질

3.2.1. 탁도

2002년 2월 21일부터 2002년 9월 30일까지 모래를 포집재료로 사용한 포집수의 탁도를 Fig. 3에 나타내었다. 실험기간 중 발생한 강우의 탁도를 살펴보면 황사기간 중에 발생한 3월 14일-15일 강우와 3월 21일-22일 강우의 탁도가 각각 11NTU와 17NTU로 높게 나타났으며, 이 기간을 제외하면 2NTU 정도를 유지하였다. 모래를 포집재료로 사용한 경우 포집수

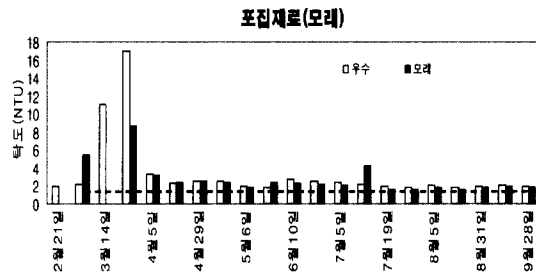


Fig. 3. Turbidity of collected rainwater in sand system.

량 가중평균으로 계산한 포집수의 탁도가 1.9NTU를 나타내었으며, 황사기간이었던 3월 21일-22일 강우시 포집수의 탁도가 8.7NTU로 가장 높았으나 우수 탁도인 17NTU에 비해 절반 정도로 낮았다.

2002년 2월 21일부터 2002년 9월 30일까지 자갈을 포집재료로 사용한 포집수의 탁도를 Fig. 4에 나타내었다. 자갈을 포집재료로 사용한 경우 포집수량 가중평균으로 계산한 포집수의 탁도가 모래를 포집재료로 사용한 경우보다 약간 높은 2.2NTU를 나타내었으며, 황사기간이었던 3월 14일-15일 강우시와 3월 21일-22일 강우시 포집수가 각각 11NTU와 10NTU로 높은 탁도를 나타내었다.

2002년 2월 21일부터 2002년 9월 30일까지 마사토를 포집재료로 사용한 포집수의 탁도를 Fig. 5에 나타내었다. 마사토를 포집재료로 사용한 경우에는 포집수량 가중평균으로 계산한 포집수의 탁도가 모래를 포집재료로 사용한 경우보다 약간 낮은 1.7NTU로 나타났으며 황사기간에는 강우량이 적어 우수가 포집되지 않았다.

2002년 2월 21일부터 2002년 9월 30일까지 잔디를

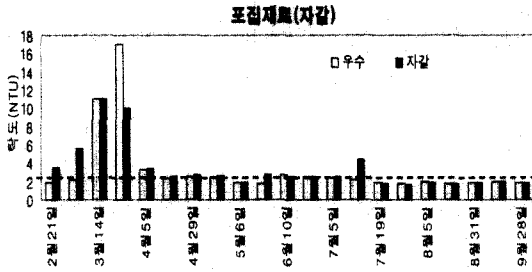


Fig. 4. Turbidity of collected rainwater in gravel system.

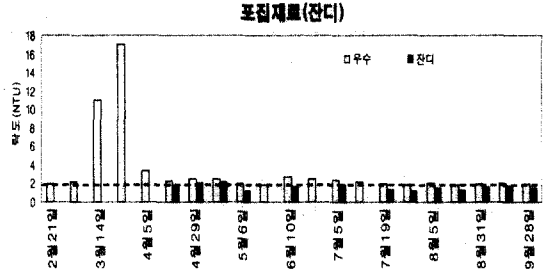


Fig. 6. Turbidity of collected rainwater in lawn system.

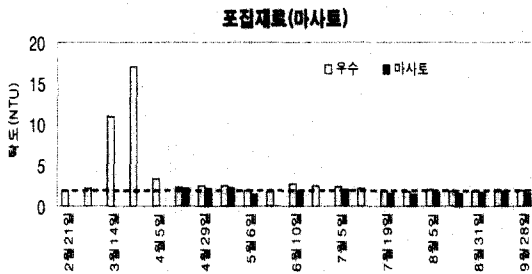


Fig. 5. Turbidity of collected rainwater in soil system.

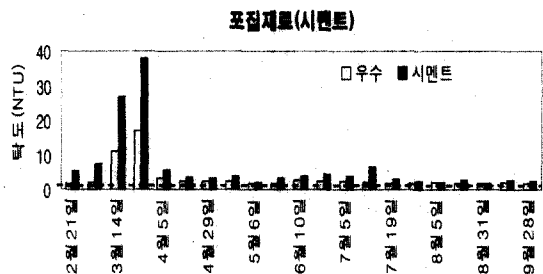


Fig. 7. Turbidity of collected rainwater in cement system.

Table 2. Volume weighted mean heavy metal concentrations of collected rainwater in sand, gravel, soil, lawn, cement system (단위: ppb)

구분	먹는물 수질 기준	모래	자갈	마사토	잔디	시멘트
납	50	2.78	3.79	2.73	2.46	2.85
비소	50	3.83	4.09	3.48	2.98	3.02
크롬	50	2.59	3.68	2.63	2.32	2.30
카드뮴	10	3.22	4.38	3.12	3.11	3.30
구리	1000	4.78	5.06	4.75	4.53	4.56
아연	1000	26.52	29.85	20.66	14.95	32.25
철	300	102.5	130.5	82.36	52.44	69.35
망간	300	125.4	136.5	85.04	62.38	42.00

포집재료로 사용한 포집수의 탁도를 Fig. 6에 나타내었다. 잔디를 포집재료로 사용한 경우에는 포집수량가중평균으로 계산한 포집수의 탁도가 1.5NTU로 나타나 포집재료 중 가장 낮은 탁도를 보였으며 황사기간에는 강우량이 적어 우수가 포집되지 않았다.

2002년 2월 21일부터 2002년 9월 30일까지 시멘트를 포집재료로 사용한 포집수의 탁도를 Fig. 7에 나타내었다. 시멘트를 포집재료로 사용한 경우 포집수량가중평균으로 계산한 포집수의 탁도가 3.2NTU를 나타내 포집재료 중 가장 높은 포집수 탁도를 나타냈으며, 황사기간인 3월 21일~22일 강우시의 포집수는

38NTU의 높은 탁도를 나타내었다.

3.2.2. 중금속

2002년 2월 21일부터 2002년 9월 30일까지 각 포집재료별 중금속 농도를 Table 2에 포집수량가중평균으로 계산하여 나타내었다. 모든 포집재료에서 철과 망간의 농도가 다른 중금속에 비해 높은 농도를 나타냈으나 먹는물 수질기준 이하로 매우 낮은 포집수 사용시 중금속에 의한 문제는 없는 것으로 나타났다.

Table 3. Volume weighted mean quality of collected rainwater in sand, gravel, soil, lawn, cement system

구분	먹는물 수질 기준	모래	자갈	마사토	잔디	시멘트
pH	5.8-8.5	7.05	6.98	7.19	7.22	9.15
TOC(ppm)	-	2,303	2,734	2,195	2,004	3,492
CODMn(mg/l)	10	2.16	2.63	1.96	1.78	3.34
NH ₄ -N(mg/l)	0.5	0.30	0.30	0.32	0.25	0.56
NO ₃ -N(mg/l)	10	2.34	2.29	1.43	1.34	1.38
일반세균(마리수/ml)	100	912	1560	832	778	3583

3.2.3. 기타

실험기간 동안의 포집재료별 포집수의 pH, TOC, COD_{Mn}, NH₄-N, NO₃-N, 일반세균을 포집수량 가중평균으로 계산하여 Table 3에 나타내었다. 모래, 자갈, 마사토, 잔디를 포집재료로 사용한 포집수의 경우 일반세균을 제외한 항목에서 먹는물 수질기준 이하로 나타났으며 시멘트를 포집재료로 사용한 포집수의 경우 pH와 NH₄-N, 일반세균을 제외한 항목에서 먹는물 수질기준 이하로 나타났다. 종합적으로 고려해 볼 때 잔디를 포집재료로 사용한 경우가 가장 깨끗하였으며 마사토, 모래, 자갈, 시멘트 순으로 수질이 낮아졌다. 또한 일반세균의 경우 모든 포집재료에서 먹는물 수질기준을 초과하였으며 특히 시멘트에서 포집된 포집수는 다른 재료에서 포집된 포집수보다 2-4배 높은 농도를 보여 사용용도에 따른 별도의 처리 장치가 요구된다.

3.3. 빗물 포집 예측 모델(CNURCPM-Chungnam National University Rainwater Collection Prediction Model)

강우에 따른 포집량을 예측하고 적절한 저류조 용량을 산정하기 위한 프로그램의 Flow diagram을 작성하였다. Flow diagram은 포집재료의 함수율 변화량은 강우량과 증발량에 의해 영향을 받고, 강우시 일부는 포집재료의 함수율을 높이는데 사용되고 그 사용된 나머지 부분은 저류조에 포집된다는 가정을 세운다. 포집장치의 규격인 가로, 세로의 길이와 포집재료의 최대 및 최소 함수율을 측정하고, 기상청을 통해 수집한 증발량을 실제 사용하는 포집재료에 따른 증발율의 비로 계산한 후 각각의 강우량을 대입하면 포집 가능한 포집량을 구할 수 있다. 이 프로그램을 이용하여 포집재료 모래와 자갈의 경우에 대하여 실제 강우포집량과 모델의 예측값을 비교하였다.

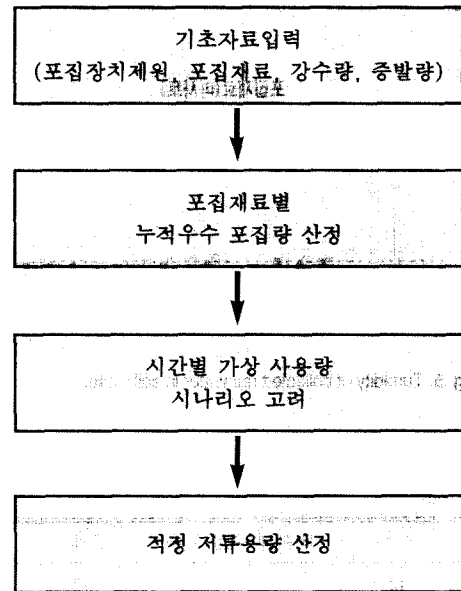


Fig. 8에 포집재료를 모래와 자갈을 사용했을때의 우수 포집량 예측 모델값과 실제 누적포집량과의 관계를 나타내었다. 누적포집량 모델값은 931.5L로 계산되었으며 실제값은 902L로 포집되어 3.3%의 오차를 보였고, 포집재료를 자갈로 사용한 경우의 우수 포집량 예측 모델 결과값은 1,028.2L로 계산되었으며 실제값은 1,006L로 포집되어 2.2%의 오차를 보였다.

3.4. 저류조 용량 산정

포집재료로부터 임의의 t일에 저류조에 유입되는 포집수량 Q_t (l/day)과 t-1일의 저류량 S_{t-1} (l)을 합한 후 t일 동안 저류조에서 유출되는 사용량을 빼줌으로써 t일에 저류조에 남은 저류량을 구할 수 있다. 이를 식 (1)에 나타내었다.

$$S_t = \min[\max\{(S_{t-1} + Q_t - D_t), 0\}T] \quad (1)$$

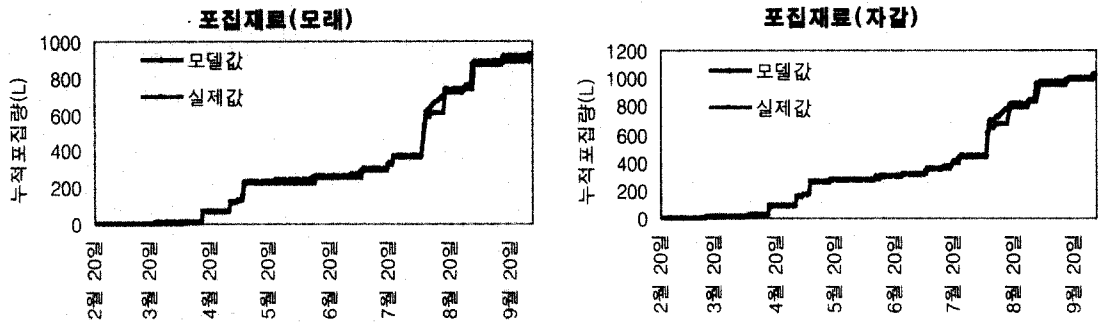


Fig. 8. Simulation with gravel and sand collection material by the program.

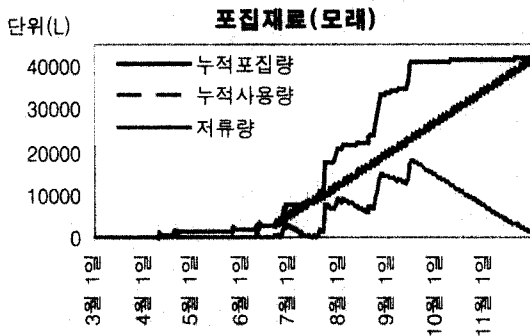


Fig. 9. Maximum storage volume in sand collection material.

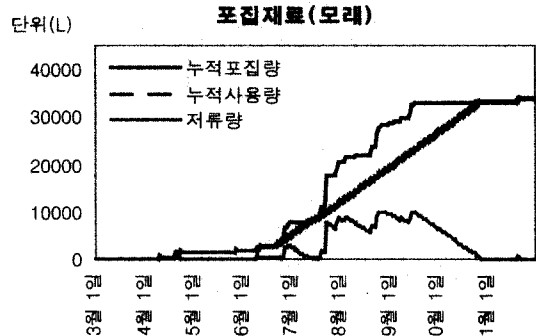


Fig. 10. Storage volume in sand collection material (storage tank 10m³).

- 여기서, S_t : 저류조에서의 저류량
- Q_i : 저류조에 유입되는 포집수량
- D_t : 저류조에서 유출되는 사용량
- T : 저류조의 크기

여기서, 저류조에서의 저류량 S_t 는 0보다 크고 저류조의 크기 T 보다 작아야 한다. 저류조 크기의 결정에 있어서 안정성 정도를 판단하기 위해 보장률(security, S_e)을 사용하여 검토한다. 전체 기간 중에서 저류량이 0이 되는 일수 N_f 를 전체 일수 N_t 로 나누어 그 비를 구하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_e = \left(1 - \frac{N_f}{N_t}\right) \times 100 \quad (2)$$

- 여기서, S_e : 보장률
- N_f : 저류량(S_t)이 0이 되는 일수
- N_t : 전체 일수

대전광역시의 2000년 강우자료와 증발자료를 이용하여 모래에 대한 저류조의 크기와 보장률을 구하였다. 기간은 눈이 내리는 겨울을 제외한 3월부터 11월까지이며, 기본조건으로 집수면적은 30m², 포집재료 깊이는 15cm로 가정하였다. 또한 사용량은 우수의 주요 사용 대상이 화장실 용수인 점을 고려하여 60 l/day · person을 적용하였으며 1세대당 4인을 기준으로 하여 240l/day를 사용하였다.

모래를 포집재료로 사용하였을 경우의 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 최대저류량은 17m³이었으며 보장률은 62%로 나타났다. 따라서 저류조의 크기를 17m³ 이상으로 설치하는 것은 타당성이 없으며 그 이하에서 저류조 설치비 등의 경제성을 고려하여 선택해야 한다. Fig. 10에 저류조의 크기를 10m³으로 하였을 때의 결과를 나타내었다. 저류조의 용량이 작아지면서 보장률도 51%로 낮아지는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 포집재료에 따른 우수 포집 수량과 수질을 제시하였으며 강우 발생시 우수 포집량을 예측할 수 있는 빗물 포집 예측 모델(CNURCPM)을 개발하였고 이를 이용하여 저류조의 크기를 산정하였다.

실험기간인 2002년 2월 21일부터 2002년 9월 30일까지 발생한 강우에 대해 포집재료별 포집 실험을 수행한 결과 시멘트를 포집재료로 사용한 경우 93.2%, 자갈을 포집재료로 사용한 경우 87.8%, 모래를 포집재료로 사용한 경우 78.8%, 마사토를 포집재료로 사용한 경우 69.9%, 잔디를 포집재료로 사용한 경우 68.8%의 포집율을 나타냈다.

포집재료별 포집수질을 포집수량에 대한 가중평균으로 구한 탁도의 경우 시멘트를 포집재료로 사용한 경우 3.2NTU, 자갈을 포집재료로 사용한 경우 2.2NTU, 모래를 포집재료로 사용한 경우 1.9NTU, 마사토를 포집재료로 사용한 경우 1.7NTU, 잔디를 포집재료로 사용한 경우 1.5NTU를 나타냈다.

중금속의 경우 모든 포집재료에서 철과 망간의 농도가 다른 중금속에 비해 높은 농도를 나타냈으나 먹는물 수질기준 이하로 포집수 사용시 중금속에 의한

문제는 없는 것으로 나타났다.

강우발생시 강우량에서 포집량을 뺀 손실량의 대부분이 포집재료의 함수율을 높인데 사용된 점을 기초로 포집재료별 우수 포집량을 산정하기 위한 빗물 포집 예측 모델(CNURCPM)을 개발하였으며 자갈과 모래의 경우 모델 결과와 실측값을 비교해본 결과 2-3%의 오차를 보였다.

2000년도 대전시 강우량, 증발량 자료와 기본 조건으로 집수면적 30m², 사용량 240l/day를 이용하여 저류조 용량을 산정한 결과 모래를 포집재료로 사용한 경우 최대저류량은 17m³이었으며 이 때의 보장율은 62%였고 저류조의 크기를 10m³으로 가정하였을 경우에는 보장율이 51%로 낮아졌다.

참고문헌

- 건설교통부 (1996) 수자원 장기종합계획.
- 대한상하수도학회 빗물이용연구회 (2002) 빗물모으기운동 국제 워크샵.
- 기상청 홈페이지, www.kma.go.kr.
- Thilo, H. and Uwe, S. (1999) Rainwater Utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects, *Urban Water*, 1, pp.307-316.
- Adhiyan, A. (1999) A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses, *Urban Water*, 1, pp. 317-321.