

## 우수의 지표 포집 모델의 개발 및 적용

### Development and Application of Rainwater Collection Model by the Ground

이동곤 · 이길수 · 왕창근\*

Dong-Kon Lee · Kil-Soo Lee · Chang-Keun Wang\*

충남대학교 환경공학과

(2004년 12월 11일 논문 접수; 2005년 4월 9일 최종 수정논문 채택)

#### Abstract

In this study, quantity and quality of collected rainwater by the ground collection system were investigated and the Rainwater Collection Prediction Model was developed to predict the amount of collected rainwater. The quantity of collected rainwater in the collection system was 9516L (38.2%) and the quantity of infiltrated rainwater in the collection system was 9946L (40.2%) through 25m<sup>2</sup> area for the study period, respectively. Average turbidity of collected rainwater in collection system was 2.2 NTU, and average turbidity of infiltrated rainwater in collection system was 2.3 NTU for study period, respectively. The predicted amount by the model and the actual collected amount were 9842.4L and 9516L, which were very close showing that prediction was excellent. The optimal rainwater storage tank volume was simulated with a certain consumption condition for various cities with different rainfall patterns.

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

**주제어:** 빗물포집 예측모델, 평균 탁도, 최적 포집장치 용량

#### 1. 서론

수자원의 부족 문제는 우리나라뿐만 아니라 세계가 당면하고 있는 중요한 현안이자 꼭 해결해야 할 과제이다. 우리나라의 연간 강수량은 1,283mm로 세계 평균 973mm의 1.3배에 이르지만, 좁은 국토면적에 높은 인구밀도로 인해 1인당 수자원 강수량은 2,705m<sup>3</sup>/년으로 세계평균 22,096m<sup>3</sup>/년의 12%에 지

나지 않아 국제적으로 물 부족국가로 분류되고 있다 (대한상하수도학회 빗물이용연구회, 2002). 연 강수의 부존 총량 중 증발로 인한 손실 등을 빼면 이용 가능량은 26%에 불과하고, 특히 지하수 이용 가능량은 연간 133억 m<sup>3</sup>로 추정되지만, 1999년의 이용량은 연간 40억 m<sup>3</sup>에 지나지 않는다(기상청, 1999). 더구나 연도별, 지역별, 계절별 강수량의 차이가 크고, 변화의 폭이 커 수자원 관리에 매우 불리한 특성을 갖고

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

있다.

선진국에서는 오래전부터 급격한 도시화와 인구증가로 인하여 폭증하는 물 수요와 불투수구역의 증대로 발생하는 도시형 홍수 문제의 해결을 위해 우수의 이용에 관심을 가져왔다. 그리고 최근 여러 국가들은 빗물을 유효적절하게 저류하여 각종 용수로 활용하고 있다. 그러나 국내에서는 빗물이용에 대한 인식이 부족하고 연구도 미흡한 실정이며 대부분의 연구가 지붕면만을 우수포집 대상으로 수행되었다. 건물 옥상 등의 지붕면의 경우 넓은 부지의 포집에 적당하지 않고 턱도 등 기타 수질에서 양호하지 않았다.

따라서 본 논문에서는 운동장 등 지표면을 이용하여 우수를 포집·저류하기 위한 포집 저류 시설의 포집구조 및 용량을 제안하고 포집수량을 측정하였고, 이용성 여부와 추가적인 처리의 필요성을 알아보고자 포집수질을 측정하였다. 또한 강우 발생 시 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.

## 2. 재료 및 방법

우수를 포집 및 저류하기 위한 실험 장치는 대전광역시 유성구 궁동 충남대학교 공대 3호관 옆 공터에 설치하였으며, 2004년 5월 28일부터 2004년 9월 1일까지 발생한 강우에 대해 포집 실험을 수행하였다.

우수 포집을 위한 실험 장치는 가로 5m, 세로 5m,

높이 0.5m의 크기로 제작되었고 포집재료로는 모래를 사용하였다. 포집재료의 구성은 상부포집재료로 모래 25cm를 포설하였고, 모래층 사이에 포집을 위한 중간집수관으로 125mm PVC pipe 23개를 반으로 쪼개어 설치하였고 관로의 물의 흐름을 좋게 하기 위해서 내부에 자갈을 채웠고 상부 모래층의 유입을 막기 위해 투수성의 부직포를 위에 깔았다. 그리고 중간집수관은 전체 면적의 약 50%를 차지하고 있다. 하부집수장치는 맨 아래에 두께 1cm의 차수막을 설치하였고, 그 위에 입도 15~25mm의 자갈을 10cm 채웠고 그 위에 입도 7~15mm의 자갈을 5cm 채워 실험을 수행하였다. 그리고 하부로 침투되어 나오는 우수와 중간집수관을 통하여 포집되는 우수를 각각 포집하기 위해서 포집장치 중간부와 하단부에 각각 포집관을 설치하여 저류조에 포집하였다.

저류조는 400L 물탱크 3개씩 6개를 직렬로 연결하여 총 2400L의 저류조를 설치하였다. Fig. 1에 포집장치와 저류조를 나타내었으며, Table 1에 포집장치와 저류조의 특성을 나타내었다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1. 포집수량

2004년 5월 28일부터 2004년 9월 1일까지 내린 강우에 대해 포집실험을 수행하였으며, 중간 집수관을 통한 포집량과 하부로 침투되는 침투량을 각각 측정하였다.

포집실험 기간 동안 내린 총 강우량은 997.4mm (24935L)이었으며 중간집수관에서 9516L를 포집하

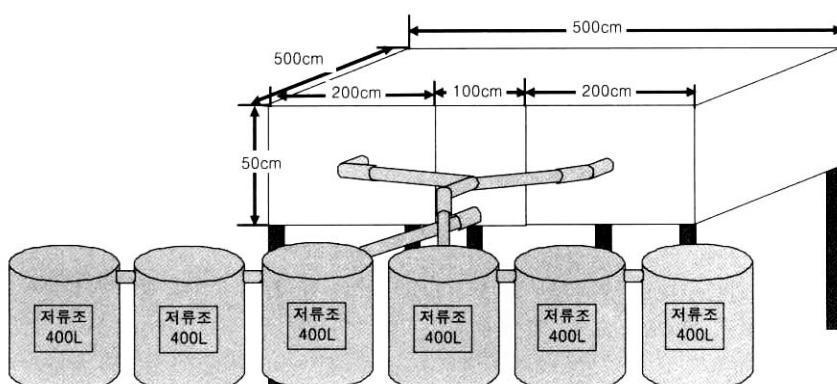


Fig. 1. The facilities of rainwater collection and storage.

**Table 1.** The characteristics of rainwater collection and storage facilities

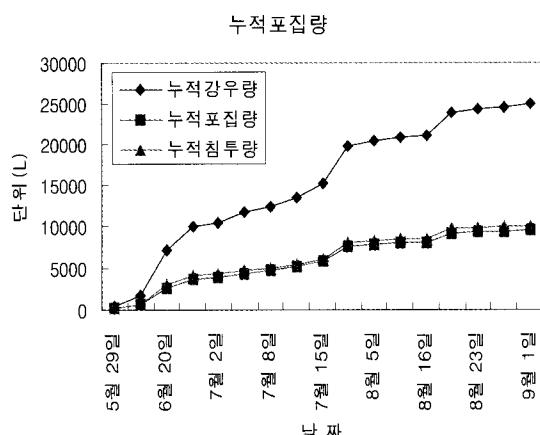
포집장치의 규격	5m(가로) × 5m(세로) × 0.5m(높이)
상부포집재료	모래 입도: 5mm 이하, 깊이: 25cm
중간집수관	PVC pipe 직경: 125mm, 길이: 4.5m, 개수: 23개
하부집수장치	상부자갈 입도: 7~15mm, 깊이: 5cm 하부자갈 입도: 15~25mm, 깊이: 10cm 차수마트 두께: 10mm, HDPE계 수지
저류조	2400L

여 38.2%의 포집율을 보였으며 하부로 침투된 양은 9946L로 40.2%의 침투율을 나타냈다. 포집량과 침투량의 비는 50:50 정도로 거의 일정하였으며 강우량이 증가할수록 침투량이 증가하는 경향을 보였다. Fig. 2에 포집실험 기간 동안의 누적강우 포집량을 나타내었다.

### 3.2. 포집수질

#### 3.2.1 탁도

2004년 5월 28일부터 2004년 9월 1일까지의 중간 집수관을 통한 포집수 및 하부로 침투되는 침투수의 탁도를 Fig. 3에 나타내었다. 실험기간 중 발생한 강우의 탁도를 살펴보면 약 2NTU 이내를 나타내고 있었다. 포집수량 가중평균으로 계산한 포집수의 탁도가 2.2NTU를 나타내었으며, 침투수의 탁도는

**Fig. 2.** Accumulation curve of collected rainwater in collection system.

2.3NTU를 나타내었다. 따라서 중수도 수질기준인 5NTU보다 낮은 양호한 탁도를 나타내었다. 그러므로 이차적인 처리 없이 조경 살수나 세차용수 등으로 이용이 가능할 것이다.

#### 3.2.2 중금속

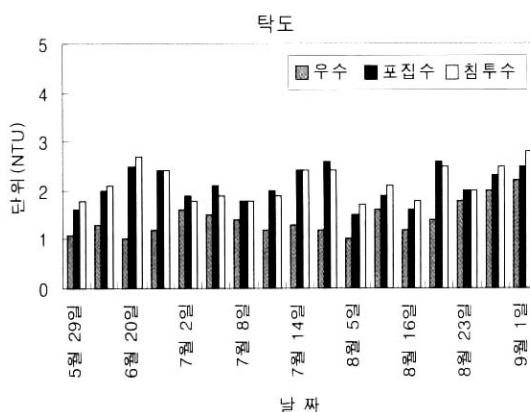
2004년 5월 28일부터 2004년 9월 1일까지 포집수 및 침투수의 중금속 농도를 Table 2에 포집수량 가중 평균으로 계산하여 나타내었다. 중금속 농도 중 철의 농도가 지중에 포함되어 있는 철 이온 등의 영향으로 먹는물 수질기준을 초과하는 경우가 발생하였지만, 다른 항목에서는 모두 먹는물 수질기준 이하로 양호한 결과를 나타내고 있다. 그리고 철의 경우도 먹는 물 이외의 중수 용도로 포집수를 사용시 별다른 문제가 없을 것으로 예상되었다.

#### 3.2.3 기타 수질항목

실험기간 동안의 포집수 및 침투수의 pH, TOC, CODMn, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, 대장균에 대한 수질을 Table 3에 나타내었다. 포집수의 수질을 살펴보면 CODMn과 NO<sub>3</sub>-N 등은 먹는물 기준보다 낮은 값을 나타냈으며, 대장균과 NH<sub>4</sub>-N 등은 먹는물 기준을 초과하는 경우가 발생했지만, 중수 용도로 사용시 그리 문제가 없을 만큼 양호한 수질을 얻을 수 있었다.

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

강우에 따른 포집량을 예측하고 적정한 저류조 용량을 산정하기 위한 모델을 개발하였다. 포집재료의

**Fig. 3.** Turbidity of collected rainwater in collection system.

**Table 2.** Volume weighted mean heavy metal concentrations of collected rainwater in collection system (단위:ppb)

구 분	먹는물 수질기준	우 수	포집수	침투수
납(ppb)	50	0.484	1.097	1.662
비소(ppb)	50	0.826	1.039	1.295
크롬(ppb)	50	0.396	1.634	2.443
카드뮴(ppb)	10	0.142	0.331	0.349
구리(ppb)	1000	2.592	2.999	3.457
아연(ppb)	1000	18.435	27.570	28.644
철(ppb)	300	8.108	302.801	368.577
망간(ppb)	300	5.802	10.129	14.209

함수율 변화량은 강우량과 증발량에 의해 영향을 받고, 강우시 일부는 포집재료의 함수율을 높이는데 사용되고 그 사용된 나머지 부분은 저류조에 포집된다는 가정에 근거하여 모델식을 수립하였다. 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. 식(1)과 식(2)에 모델식을 나타내었고 Fig 4에 모델의 Flow diagram을 나타내었다.

$$Q = (P \times A - \text{Loss}) \times C \quad (1)$$

여기서,  $Q$ : 포집량( $l$ )

$P$ : 강우량( $mm$ )

$A$ : 집수면적( $m^2$ )

Loss: 손실량( $l$ )

$C$ : 포집율(%)

$$\text{Loss} = \frac{(WC_n - WC_{n-1})}{100} A \times D \times K \quad (2)$$

여기서,  $WC_n$ : 강우 후 함수율(%)

$WC_{n-1}$ : 강우 전 함수율(%)

$A$ : 집수면적( $m^2$ )

$D$ : 포집재료의 깊이( $m$ )

$K$ : 포집재료의 걸보기 밀도( $kg/m^3$ )

Fig. 5에 포집실험 기간 동안의 우수 포집량 예측 모델값과 실제 누적포집량과의 관계를 나타내었다. 누적포집량 모델값은 9842.4L로 계산되었으며 실제 값은 9516L로 포집되어 3.3%의 오차를 보였다.

### 3.4 저류조 용량 산정

포집장치로부터 임의의  $t$ 일에 저류조에 유입되는 포집수량  $Q_t(L/day)$ 과  $t-1$ 일의 저류량  $S_{t-1}(L)$ 을 합한 후  $t$ 일 동안 저류조에서 유출되는 사용량을 빼줌으로써  $t$ 일에 저류조에 남은 저류량을 구할 수 있다. 이를 식(3)에 나타내었다.

$$S_t = \min[\max[(S_{t-1} + Q_t - D_t), 0] T] \quad (3)$$

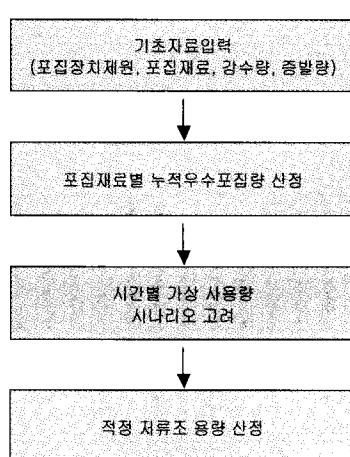


Fig. 4. Flow diagram of model.

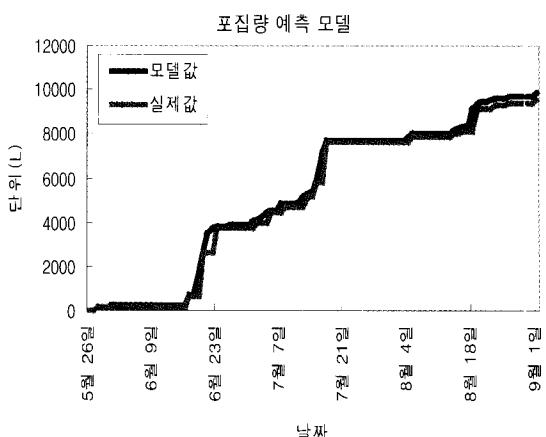


Fig. 5. Simulation in collection system by model.

Table 3. Quality of collected rainwater in collection system

수질항목	pH	CODMn(mg/l)	TOC(mg/l)	NH4-N(mg/l)	NO3-N(mg/l)	대장균(100㎖당)
먹는물 기준	5.88.5	10	-	0.5	10	불검출
5월 28일, 29일	우 수	5.93	2.12	2.907	0.28	1.60
	포집수	6.30	3.64	4.106	0.33	1.92
	침투수	6.12	2.72	4.092	0.37	2.74
6월 17일, 18일	우 수	6.15	2.10	1.758	0.42	2.25
	포집수	6.45	2.22	3.206	0.44	2.49
	침투수	6.50	2.35	3.314	0.47	2.58
6월 21일, 23일	우 수	6.08	2.05	2.403	0.42	2.16
	포집수	6.40	2.24	2.845	0.44	2.33
	침투수	6.44	2.35	2.907	0.39	2.35
7월 1일, 2일	우 수	5.75	2.05	1.448	0.47	1.89
	포집수	6.88	2.75	2.225	0.52	2.05
	침투수	6.75	2.45	2.423	0.50	2.17
7월 7일, 8일	우 수	6.05	1.96	2.211	0.43	1.95
	포집수	6.60	2.02	2.584	0.50	1.78
	침투수	6.72	2.10	2.411	0.47	2.09
7월 16일, 17일	우 수	6.12	2.24	1.647	0.37	2.12
	포집수	6.77	2.50	2.431	0.40	2.32
	침투수	6.75	2.62	2.254	0.46	2.28
8월 4일, 5일	우 수	6.45	2.44	2.052	0.47	2.32
	포집수	7.03	2.48	2.849	0.53	2.85
	침투수	7.12	2.55	3.015	0.50	3.07
8월 14일	우 수	6.14	2.87	2.254	0.42	1.54
	포집수	6.84	3.03	2.652	0.46	1.73
	침투수	6.80	3.14	2.307	0.47	1.80
8월 18일, 19일	우 수	5.85	1.68	2.645	0.38	1.26
	포집수	6.25	1.96	3.024	0.44	1.88
	침투수	6.32	2.24	3.241	0.48	1.74
9월 1일	우 수	6.02	2.21	2.864	0.49	1.69
	포집수	6.54	2.67	3.002	0.52	1.84
	침투수	6.70	2.55	3.014	0.55	1.77

여기서,  $S_i$ : 저류조에서의 저류량 $Q_i$ : 저류조에 유입되는 포집수량 $D_i$ : 저류조에서 유출되는 사용량

T: 저류조의 크기

여기서, 저류조에서의 저류량  $S_i$ 는 0보다 크고 저류조의 크기 T보다 작아야 한다. 저류조 크기의 결정에 있어서 안정성 정도를 판단하기 위해 보장률 (security, Se)을 사용하여 검토한다. 전체 기간 중에

서 저류량이 0이 되는 일수  $N_f$ 를 모델링을 실시한 전체 일수  $N_t$ 로 나누어 그 비를 구하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_e = \left(1 - \frac{N_f}{N_t}\right) \times 100 \quad (4)$$

여기서,  $S_e$ : 보장을 $N_f$ : 저류량( $S_i$ )이 0이 되는 일수

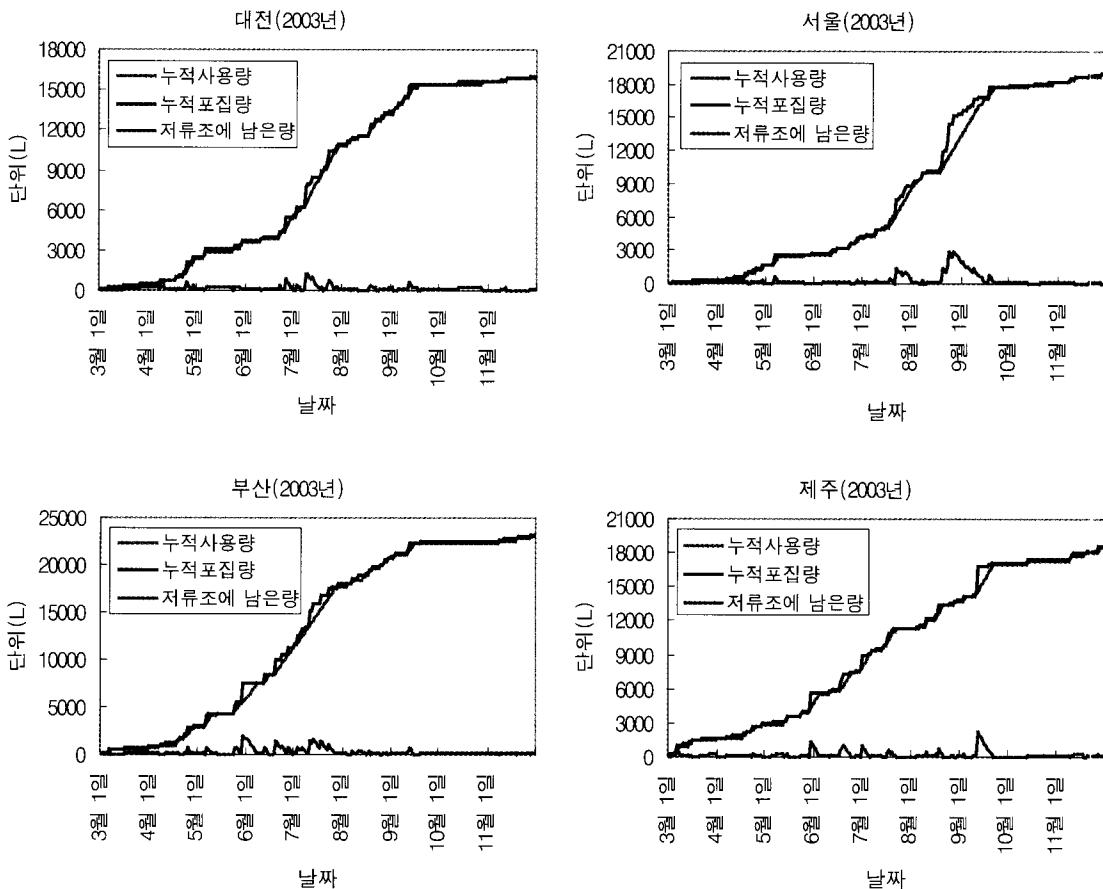


Fig. 6. Maximum storage volume in collection system.

$N_t$ : 모델링을 실시한 전체 일수

대전, 서울, 부산, 제주의 2003년 강우자료와 증발자료를 이용하여 저류조의 크기와 보장률을 구하였다. 모델링을 실시한 기간은 눈이 내리는 겨울을 제외한 3월부터 11월까지이며, 기본조건으로 집수면적은 25m<sup>2</sup>, 포집재료는 모래, 깊이는 20cm, 침투율 50%로 가정하였다. 또한 사용량은 우수의 주요 사용대상이 화장실 용수(대·소변량 참고)인 점을 고려하여 60L/day · person을 적용하였으며 1세대당 4인을 기준으로 하여 240L/day를 사용한 것으로 하였다.

Fig. 6에 각 도시별 누적포집량과 누적사용량 등의 결과를 나타내었다. 대전의 경우 최대저류량은 3845L이었으며 보장율은 24%로 나타났고 서울의 경우 최대저류량 2913L이었으며, 보장율은 28.7% 이었다. 또한 부산의 경우 최대저류량 1960L, 보장을

35%를 나타냈고, 제주의 경우 최대저류량 2209L, 보장을 28%를 나타냈다. 포집율이 50% 이었기 때문에 보장율이 다소 떨어졌지만, 건물 지붕면과 연계하여 포집을 실시할 경우 충분한 포집수를 얻을 수 있을 것이다.

다음으로 운동장 규모로 포집이 이루어질 경우 각 도시별로 2003년 강우 및 증발량 자료를 이용하여 저류조의 크기와 보장율을 구하였다.

기간은 겨울을 제외한 3월부터 11월까지이며, 운동장의 깊이는 6000m<sup>2</sup>, 포집재료는 모래, 포집깊이는 50cm으로 가정하였다. 그리고 침투량과 포집량의 비를 50:50으로 산정하였다. 그리고 화장실용수(소변량만 참고) 및 청소용수로 1인당 20L/day를 사용한다고 가정하였으며 학교당 1000명을 기준으로 20m<sup>3</sup>/day를 사용한 것으로 하였다.

Fig 7에 각 도시별 누적포집량과 누적사용량 결과

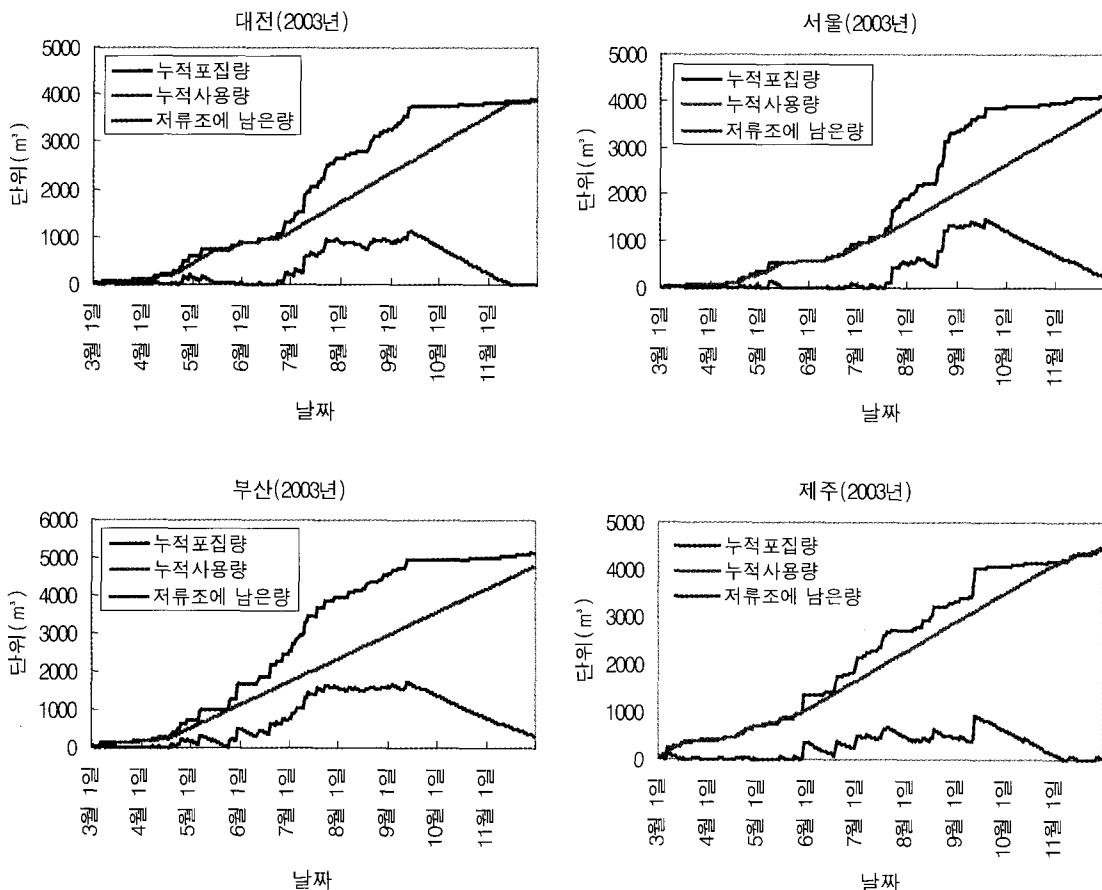


Fig. 7. Storage volume in collection system by playground.

를 나타내었다. 대전의 경우 최대저류량  $1115\text{m}^3$ , 보장을 70%를 나타내었으며 서울의 경우 최대저류량  $1475\text{m}^3$ , 보장을 70%로 나타났다. 또한 부산의 경우 최대저류량과 보장율이 각각  $1725\text{m}^3$ , 87%로 나타났고 제주의 경우 최대저류량과 보장율은 각각  $938\text{m}^3$ , 81%로 나타났다. 각 도시 및 학교의 조건에 따른 적정 저류조 용량 산정이 중요하고 학교 지붕면을 통한 포집과 연계하여 우수 포집을 실시할 경우 거의 100% 정도의 보장율이 가능할 것이라 생각된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 지표 포집을 위한 포집방법 및 포집수량과 수질을 제시하였으며 강우 발생시 우수 포집량을 예측할 수 있는 빗물 포집 예측 모델(CNURCPM)을 개발하였고 이를 이용하여 저류조

의 크기를 산정하였다.

실험기간인 2004년 5월 28일부터 2002년 9월 1일 까지 발생한 강우에 대해 포집 실험을 수행한 결과 총 강우량 대비 포집율은 38.2%를 나타냈고 하부로의 침투율은 40.2%를 나타냈다.

포집수질 중 포집수량에 대한 가중평균으로 구한 탁도의 경우 포집수는 2.2NTU로 나타났고 침투수는 2.3NTU를 나타냈다. 중금속의 경우 포집수 및 침투수에서 철의 농도가 먹는 물 수질기준을 초과하였으나 다른 중금속의 경우 먹는 물 수질기준 이하로 양호한 결과를 나타냈다. 이 결과 추가적인 처리 없이 포집수를 중수 용도로 이용이 가능할 것이라 생각된다.

강우발생시 강우량에서 포집량을 뺀 순설량의 대부분이 포집재료의 험수율을 높이는데 사용된 점을 기초로 우수 포집량을 산정하기 위한 빗물 포집 예측 모델(CNURCPM)을 개발하였으며 포집실험 기간 동

안의 강우에 대하여 모델 결과와 실측값을 비교해본 결과 3.3%의 오차를 보여 양호한 결과를 나타냈다.

2003년도 대전, 서울, 부산, 제주의 강우량, 증발량 자료와 기본 조건으로 집수면적 25m<sup>2</sup>, 침투율 50%, 사용량 240L/day를 이용하여 저류조 용량과 보장율을 산정한 결과 각 도시별 최대 저류량은 3845L(대전), 2913L(서울), 1960L(부산), 2209L(제주)로 나타났고 보장율은 24%(대전), 29%(서울), 35%(부산), 28%(제주)로 나타났다. 2003년도 각 도시별 강우량 및 증발량 자료를 바탕으로 운동장 규모의 면적에 적용하여 보았다. 운동장 면적 6000m<sup>2</sup>, 침투율 50%, 사용량 20m<sup>3</sup>/day를 이용하여 저류조 용량과 보장율을 산정한 결과 각 도시별 최대 저류량은 1115m<sup>3</sup>(대전), 1475m<sup>3</sup>(서울), 1725m<sup>3</sup>(부산), 938m<sup>3</sup>(제주)로 나타났고, 보장율은 70%(대전), 70%(서울), 87%(부산), 81%(제주)로 나타났다.

그러므로 학교 운동장 등을 이용하여 우수를 포집할 경우 많은 양의 우수 이용이 가능하고 실제로 운동장 하부에 저류시설을 설치할 경우 이 모델을 통해 적정 저류조 용량을 산정할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 건설교통부(2001) 수자원 장기종합계획.  
기상청 홈페이지, [www.kma.go.kr](http://www.kma.go.kr)  
대한상하수도학회 빗물이용연구회(2002) 빗물모으기운동  
국제 워크샵.  
Adhiyan, A. (1999) A dual-mode system for harnessing roofwater  
for non-potable uses, *Urban Water*, 1, pp. 317-321.  
A Fewkes (1999) Modeling the performance of rainwater  
collection systems, *Urban Water*, 1, pp. 323-333.  
Thilo, H. and Uwe, S. (1999) Rainwater Utilization in Germany:  
efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental  
aspects, *Urban Water*, 1, pp. 307-316.