

## Mass-balance 및 경제성 분석에 의한 빗물저류시설 적정 규모 산정

### Estimation of Optimum Capacity for Rainwater Storage Facilities based on Mass Balance and Economic Analysis

김영민·이상호·이정훈·김이호\*

Kim, Youngmin · Lee, Sangho · Lee, Jung-Hun · Kim, Ree-Ho\*

한국건설기술연구원 첨단환경연구실

(2008년 1월 15일 접수; 2008년 3월 27일 채택)

#### Abstract

Recently, rainwater harvesting facilities have increasingly constructed mainly in elementary schools and government buildings. Nevertheless, few methods are available for efficient planning and design of rainwater harvesting facilities by considering the weather conditions and purpose of rainwater management in each site, which may lead to a construction of uneconomic facilities. The current method estimates the size of rainwater storage tank by multiplying the size of building or plottage with a certain ratio and has many limitations.

In this study, we first developed a method for planning and design of rainwater storage facilities using Rainstock™ model, which is based on mass balance, and economic analysis. Then, the model was applied for the design of a rainwater harvesting facility in a building with the catchment area of 1,000m<sup>2</sup>. The model calculation indicated that the economic feasibility of rainwater harvesting depends on not only the size of storage tank but also the water usage rate. When the water usage rate is 1m<sup>3</sup>/day, the rainwater harvesting facility is not cost-effective regardless of the size of the storage tank. With increasing the water usage rate, the economical efficiency of the facility was improved for a specific size of the storage tank. Based on the model calculation, the optimum tank sizes for 5 m<sup>3</sup>/day and 10m<sup>3</sup>/day of water usage rates were 24m<sup>3</sup> and 57m<sup>3</sup>, respectively. It is expected that the model is useful for optimization of rainwater storage facilities in planning and designing steps.

**Key words** : rainwater, rainwater harvesting, rainwater storage, Economic Analysis

#### 1. 서론

최근 전 세계적으로 물 부족 해소를 위해 대체수자원을 확보하거나 도시 내 불투수층 면적의 증가에 기인하는 물순환 왜곡을 개선하기 위해 분산식 빗물관리기술에 대한 연구

가 활발히 진행되고 있다. 분산식 빗물관리기술은 저류 및 활용, 침투 그리고 증발산을 통해 도시 배수 기능 이외에 환경 친화적이고 생태적인 도시 물순환을 유도하는 관리방안이라 할 수 있다. 그러나 현재까지 국내에서는 대체수자원 확보를 위한 빗물이용시설이나 치수목적의 재해저감시설로

서 저류시설을 위주로 설치하고 있는 실정이다.

치수용 저류시설의 경우 개발 전후의 홍수량 분석을 통해 개발 후 침투 유출량을 개발 전 침투 유출량 수준으로 유지하도록 설계하고 있으나 빗물이용시설의 경우 수도법 및 지자체 조례에서 정하는 바대로 대지면적 및 건축면적에 일정비율을 곱하여 산정하고 있다.

빗물저류시설은 목표 기능, 사용수량, 대상 건축물의 규모 및 종류, 경제성 및 환경성 정도에 따라 시설 규모 및 조합에 큰 차이가 있으나 대상 면적의 일정비율 이상의 규모로 설치하는 방식은 사용수량 대비 적절한 용량이 설치되지 않아 비경제적이기 쉽다.

외국의 경우 빗물저류시설 설계 시 Mass Balance에 기초한 Rainwater Reservoir storage model(Dixon et al, 1999, Edgar L. Villarreal et al., 2005), Neptune(Enedir Ghisi et al, 2007) 등을 통해 상수대체율(WSE, Water Saving Efficiency)을 산정하여 결정하거나, 확률빈도해석을 통해 집수면적에 대한 저류용량의 비를 유출계수, 저류조의 비위침(failure probabilities) 및 급수/집수면적 비율에 대한 함수로 정의하는 확률통계학적 방법(Kwan Tun Lee et al., 2000) 등이 활용되고 있으며 관련 연구가 지속적으로 추진되고 있다.

국내에서도 빗물저류시설 도입 시 활용할 수 있는 계획/설계 모형이 필요하며, 본 논문에서는 Mass balance 이론에 기초하여 개발된 Rainstock™ 모형(한국건설기술연구원, 2004)과 경제성 분석을 통해 건축물 빗물저류시설의 적정 규모를 제시하고자 하였다.

## 2. 기본이론

### 2.1. Rainstock™ 모형 이론

Rainstock 모형은 대상 집수면에서의 유입량과 유출량의 차이는 저류량의 변화율과 같다는 Mass-balance 이론에 근거하며, 주요 관계식은 아래와 같다.

강우 시 대상 집수면 유출량  $Q_t$ 는

$$Q_t = 1 \times 10^{-3} \cdot C \cdot A \cdot P_t \quad (1)$$

금일 저류량  $S_t$ 는

$$S_t = Q_t + S_{t-1} - D_t \quad (2)$$

여기서,  $C$ : 집수면 유출계수,  $A$ : 집수면적(m), : 일강우량(mm),  $P_t$ : 전일 저류량( $m^3$ ),  $S_{t-1}$ : 일사용수량( $m^3$ )

빗물저류시설의 적정 규모의 결정은 대상 집수면에서의 집수가능량에 대한 빗물 급수량의 비인 우수이용률(RUR,

Rainwater use ratio)과 전체사용수량에 대한 빗물 급수량의 비인 상수대체율(WSE)로부터 판단할 수 있다. 우수이용률은 초기우수의 배제 및 처리 여부, 치수목적의 활용에 관계되며, 상수대체율은 수도물 절약에 대한 인자로서 시설의 경제성과 밀접한 관계를 이룬다. 우수이용률 및 상수대체율의 기본식은 아래와 같으며, Fig. 1은 Rainstock™ 모형의 모의 순서도이다.

$$RUR = \frac{U_s}{C_s} \times 100 \quad (3)$$

$$WSE = \frac{D_s - M_s}{C_s} \times 100 \quad (4)$$

여기서,  $R_u$ : 우수이용률(%),  $U_s$ : 빗물 급수량( $m^3$ ),  $C_s$ : 빗물 집수가능량( $m^3$ ),  $WSE$ : 상수대체율(%),  $D_s$ : 총사용수량( $m^3$ ),  $M_s$ : 상수 급수량( $m^3$ )

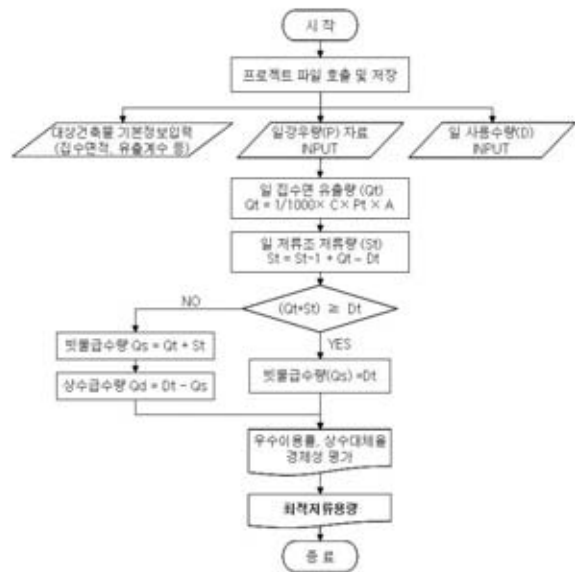


Fig. 1. Rainstock™ 모의 순서도.

### 2.2. 경제성 분석

경제성분석(economic analysis)이란 사업계획의 입안과 정이나 입안 후에 사회적 후생의 극대화 측면에서 경제적 타당성을 분석, 평가하는 것을 말하며, 일반적으로 편익·비용 분석(benefit cost analysis; BCA 또는 CBA)이 사용되고 있다(심, 2000).

빗물관리시설에 대한 편익·비용 분석의 경우 중국 등 반 건조 지역에서 빗물을 농업용수로 활용하고자 순현재가(NPV, financial net present valuse) 방법과 내부수익률(IRR, financial internal rate of return) 등 2가지 지표를 활용하여 작물 종류, 관개 및 경작방식에 따른 경제적 효과를 비교·분석한 바 있으며(T. Yuan et al. 2003), 국내에서는

저류용량 증가에 따라 우수이용률을 산정하고 빗물이용으로 인한 편익과 초기시설 투자비를 비교함으로써 순이익을 평가한 바 있으며(과학기술부, 2004), 수도물 이용, 빗물이용과 빗물이용에 따른 사회적 편익 간의 연평균 비용을 비교 분석한 사례가 있다(환경부, 2003).

순편익(NPV)은 비용-편익 간 상대적인 차액을 구하므로 투자규모가 큰 사업이 유리하게 나타나는 문제점이 있으므로 본 연구에서는 여러 가지 사업을 객관적인 입장에서 비교할 수 있는 편익·비용비(BCR, benefit cost ratio) 방법을 이용하였다(심, 2000). 이수목적의 빗물저류시설에 있어 저류용량 변화에 따른 편익·비용비를 산정하였으며, 산정식은 아래와 같다.

$$BCR = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (5)$$

여기서,  $r$ : 할인율,  $B_t$ : 연도별 편익,  $C_t$ : 연도별 비용임.

### 3. 연구방법

빗물저류시설의 적정 용량 결정을 위한 강우자료는 서울 지역의 일 강우자료(1999/01/01~2004/12/31)를 사용하였으며, 집수면적 1,000m<sup>2</sup>의 건축물 옥상을 대상으로 Fig. 2의 빗물 집수 및 설비 개념도와 같이 설치하여 청소 및 조경용수 등으로 1, 5, 10m<sup>3</sup>/day의 빗물을 급수할 경우를 대상으로 하였다.

Mass balance 및 경제성 분석에 근거하여 빗물저류시설 적정규모를 산정하기 위해서는 Rainstock™ 모형을 통해 동일 집수면 조건에서 계획 사용수량 및 저류용량 변화에 따라 우수이용률, 상수대체율(WSE) 및 편익·비용비(BCR)를 산정하여 적정규모 선정을 위한 근거자료로 활용하였다.

Table 1. 비용-편익 항목 및 내용

구분	항목	내용
비용	초기비용	설치비, 부대시설비
	유지관리	유지관리비
편익	직접편익	수도요금, 하수세, 물이용부담금 절감
	간접편익	용량별 빗물급수량에 따른 수도물 생산원가, 댐건설 및 지원/관리비 절감
적용 원단위	수도요금	600 원/m <sup>3</sup> (서울시 상수도사업본부)
	하수세	390 원/m <sup>3</sup> (서울시 상수도사업본부)
	물이용부담금	150 원/m <sup>3</sup> (서울시 상수도사업본부)
	수도물생산원가	680 원/m <sup>3</sup> (상수도통계 2006)
	댐건설, 지원/관리비	135 원/m <sup>3</sup> (환경부, 2004)
	내구년수	35년
	할인율	5.75 %

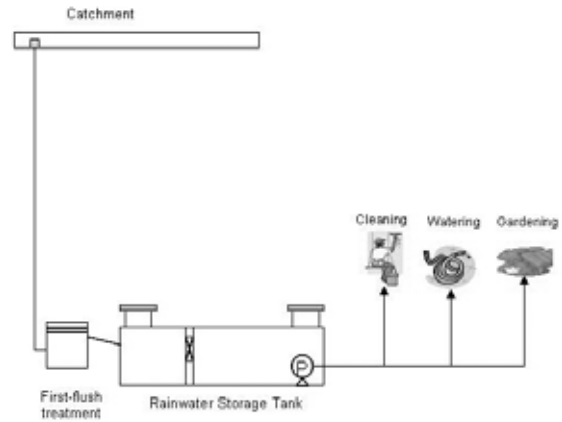


Fig. 2. 빗물 집수 및 설비 개념도.

편익·비용비(BCR)는 구조물의 내구년수 동안의 할인율에 대한 비용과 편익을 각각 합산하여 산정하였으며, 사회적 편익 등 계량화가 어려운 간접편익은 이수목적의 빗물저류시설을 대상으로 하므로 대용가격(수도물 생산원가, 댐 건설비 및 주변지역 지원/관리비 절감)에 의한 평가방법을 활용하여 산정하였다. 비용과 편익 산정을 위한 대상항목 및 내용은 Table 1과 같다.

### 4. 연구결과 및 분석

#### 4.1. 용량별 우수이용률 산정

Rainstock™ 모형을 이용하여 저류용량 및 사용수량 변화에 따라 일 집수 가능량, 저류량, 빗물급수량 및 월류량 등을 산정하였으며, 식 (3), (4)의 관계로부터 우수이용률 및 상수대체율을 산정하였다. Fig. 3~4는 동일 집수면적 1,000m<sup>2</sup>을 대상으로 사용수량 1, 5, 10m<sup>3</sup>/day일 경우의 우수이용률 및 상수대체율 그래프이다.

산정 결과 저류용량(10~200m<sup>3</sup>)에 따라 우수이용률은 계

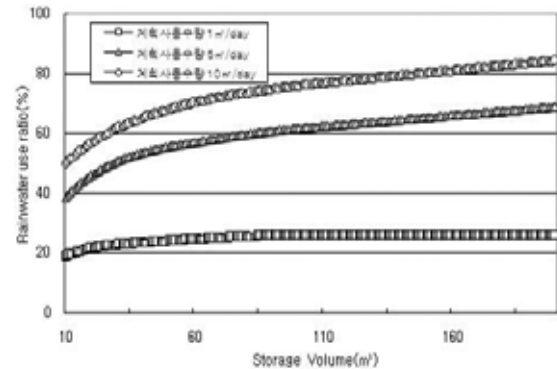


Fig. 3. 저류용량 별 우수이용률.

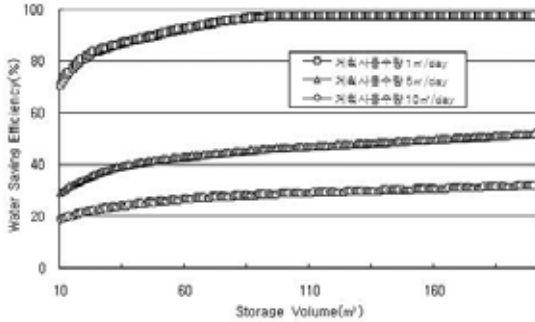


Fig. 4. 저류용량 별 상수대체율.

획 사용수량 1m³/day일 때 18.65~25.74%, 5m³/day일 때 38.42~68.76%, 10m³/day일 때 49.51~84.02%로 점차 증가함을 볼 수 있었으며, 상수대체율은 계획사용수량의 증가에 따라 1m³/day일 때 70.49~97.28%, 5m³/day일 때 29.04~51.97%, 10m³/day일 때 18.71~31.76%로 감소하는 것으로 나타났다.

따라서 동일 집수면적을 대상으로 하는 경우 저류용량의 증가에 따라 계획 사용수량이 증가할수록 우수이용률은 증가하며, 상수 대체율은 계획 사용수량에 비해 빗물로 급수할 수 있는 양은 제한되어 있으므로 그 비율이 감소함을 알 수 있다.

연구대상지역인 서울지역의 최근 10년간(1994~2004)의 강우사상을 강우강도에 따라 연도별로 누계한 결과 1~10

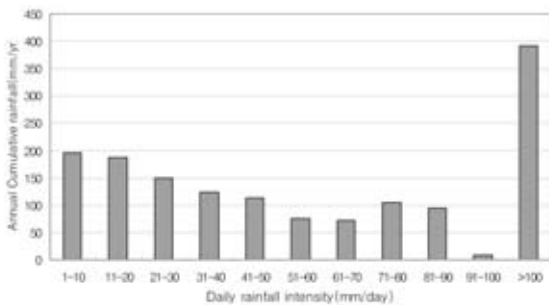


Fig. 5. 강우강도별 연 누가강우량(서울지역).

Table 2. 비용-편익 항목 및 내용

저류조 용량(m³)	저류시설 설치비 (STS 조립식 물탱크 기준, 원)	연간 유지관리비 (원)	부대시설비 (초기우수처리장치 및 배관설비 등, 원)
10	5,699,200	121,992	
20	9,574,400	160,744	
40	15,600,000	221,000	
80	24,504,000	310,040	6,500,000
100	30,528,000	370,280	
150	40,417,600	469,176	
200	55,563,200	620,632	

mm/day의 초기 강우사상이 차지하는 평균 비율이 Fig. 5과 같이 총 누가강우량의 약 13%를 차지하는 것으로 나타났다.

일본의 경우와 같이 경제성 여부와 관계없이 되도록 많은 양의 빗물을 집수해서 활용할 경우 초기우수 배제 시는 우수이용률 80~90%로 설정하여 저류용량을 결정할 수 있다(김, 2004). 예를 들어 초기우수를 배제할 경우에는 우수이용률 80% 기준에서 계획사용수량 10m³/day, 저류용량 150m³ 규모로 설정할 수 있으며, 이때의 상수 대체율은 30.25%이다.

#### 4.2. 용량별 경제성 분석

경제성 분석에 기초한 빗물저류시설 용량 산정을 위해 Fig. 2의 시스템에 대한 E사 견적을 바탕으로 용량별 설치 및 유지관리 비용을 Table 2와 같이 산출하였으며, 연간 유지관리 비용은 설치비의 2%로 가정하였다.

빗물저류시설의 편익은 Rainstock™ 모형을 이용하여 Fig. 6과 같이 저류조 용량 및 계획사용수량 변화에 따라 연평균 빗물 급수량을 산정하였으며, 편익 항목에 따라 원단위를 곱한 후 할인율을 적용하여 현재가치로 환산하였다. Fig. 7

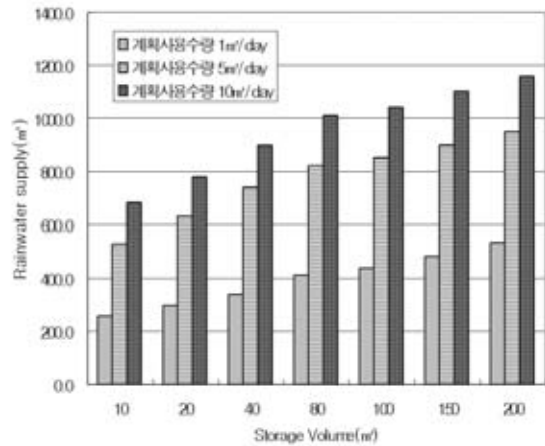


Fig. 6. 강우강도별 연 누가강우량(서울지역).

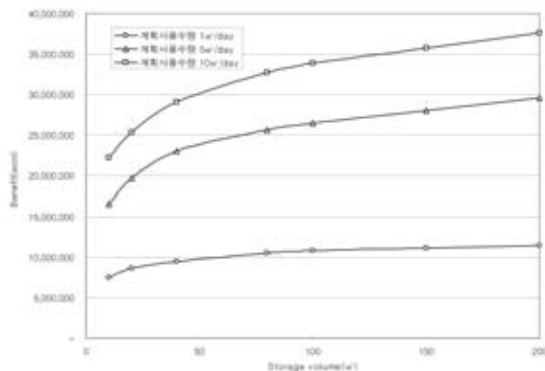


Fig. 7. 저류용량 별 빗물관리시설 편익.

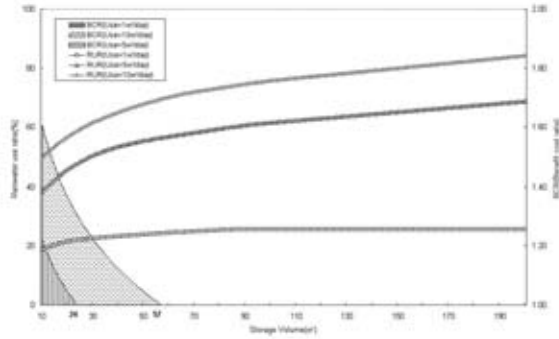


Fig. 8. 저류용량 별 우수이용률 및 BCR

Table 3. 저류용량-BCR 관계식

구분	관계식
계획사용수량 1m³/day	$y = -0.125 \cdot \ln(x) + 0.832$
계획사용수량 5m³/day	$y = -0.258 \cdot \ln(x) + 1.817$
계획사용수량 10m³/day	$y = -0.3489 \cdot \ln(x) + 2.4092$

은 환산치를 저류용량별로 합산한 빗물관리시설 편익이다.

산정 결과 저류용량 및 계획 사용수량의 증가에 따라 빗물 급수량은 증가하였으며, 이에 따라 빗물저류시설의 편익 또한 1m³/day일 때 11,445천원에서 10m³/day일 때 37,616천원(저류용량 200m³ 기준)으로 증가함을 알 수 있다.

경제성 분석을 위해 일부 저류용량의 산정 결과로부터 Table 3과 같이 관계식을 도출하였으며, Fig. 8과 같이 계획 사용수량 및 저류용량 변화에 따라 우수이용률과 BCR을 함께 도시하였다. 적용 시설에 대한 경제성 분석은 BCR이 1보다 클 경우 경제적이라고 판단할 수 있다. 저류용량-BCR 관계로부터 계획사용수량 1m³/day의 경우 저류용량과 관계 없이 비경제적인 것으로 나타났으며, 계획사용수량 5m³/day의 경우 저류용량 24m³ 이하, 계획사용수량 10m³/day의 경우 57m³ 이하에서 경제적인 것으로 나타났다.

## 5. 결론

국내의 경우 이수목적의 빗물저류시설 용량 결정 시 건축 면적 및 대지면적에 일정비율을 공급하는 방식 이외에는 설계 방법이 부족하기 때문에 본 연구에서는 국내실정에 맞는 빗물저류시설 설계방법을 도출하고자 하였으며 그 결론은 다음과 같다.

- 1) Mass Balance 이론에 근거하여 개발된 건축물 빗물저류시설 계획/설계 모형인 Rainstock™을 이용하여 집수면적 1,000m² 건축물을 대상으로 강우량 및 사용수량

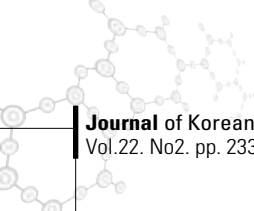
변화에 따른 우수이용률과 상수대체율을 산정하였다.

- 2) 산정 결과 동일 집수면적을 대상으로 하는 경우 저류용량의 증가에 따라 계획 사용수량이 증가할수록 우수이용률은 증가하며, 상수 대체율은 계획 사용수량에 비해 빗물로 급수할 수 있는 양은 제한되어 있으므로 그 비율이 감소함을 알 수 있다. 또한, 집수 가능량에 비해 사용수량이 적은 경우 우수이용률은 현저히 낮아지고, 상수대체율은 저류량 증가와 관계없이 필요 사용수량을 충족할 경우 효율이 증가함을 알 수 있다.
- 3) 서울 지역의 강우사상을 분석한 결과 강우 초기 1~10mm/day의 초기우수가 전체 총 누가강우량의 13%를 차지함을 알 수 있으며, 경제성 여부와 관계없이 다량의 빗물을 활용하고자 할 경우 초기우수 배제시 우수이용률 80~90%로 적정 저류용량을 설정할 수 있다.
- 4) 경제성 분석을 위해 저류용량 별로 BCR을 산정한 결과 저류용량 증가에 따라 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이는 저류용량에 따라 STS 저류조의 설치비용이 크게 증가하기 때문인 것으로 판단되므로 향후 철근콘크리트조 등 기타 재료에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 저류용량에 따른 우수이용률과 BCR을 비교한 결과 계획사용수량 1m³/day의 경우 저류용량과 상관없이 비경제적이며, 5 m³/day의 경우 저류용량 24m³ 이하 10 m³/day의 경우 57m³ 이하에서 경제적인임을 알 수 있다. 치수 및 환경보호 등 기타 목적을 고려하여 가능한 많은 양의 빗물을 활용할 경우 계획사용수량 5m³/day는 24m³, 10m³/day의 경우 57m³이 적정할 것으로 판단된다.
- 6) 향후 연구로서 개별 건축물 및 공동주택단지에서의 빗물관리시설 시범지구를 대상으로 모니터링을 실시하여 Rainstock 모의 결과와 실측값을 비교함으로써 모형의 검·보정을 수행할 계획이다.



## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적인 확보기술개발사업단의 우수 저류 및 활용 시스템 적용(과제번호:4-3-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.



## 참고문헌

1. Edgar L, Villarreal et al.(2005), Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrkoping, Sweden, *Building and Environment*, 40, pp. 1174-1184
2. EneDir Ghishi et al.(2007), Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil, *Building and Environment*, 42, pp. 1654-1666
3. Kwan Tun Lee et al.(2000), Probabilistic Design of Storage Capacity for Rainwater Cistern Systems, *J. agric. Engng Res.*, 77(3), pp. 343-348
4. Tian Yuan et al.(2003), Economic analysis of rainwater harvesting and irrigation methods, with an example from China, *Agricultural Water Management*, 60, pp. 217-226
5. 과학기술부(2004), 우수 저류 및 활용 기술 개발, pp. 186-195
6. 김이호(2004), 일본 후쿠오카현 우수이용메뉴얼 번역자료, pp. 23
7. 심명필(2000), 수자원 경제성 분석 입문(1), *한국수자원학회지*, 33(3), PP. 111-120
8. 심명필(2000), 수자원 경제성 분석 입문(2), *한국수자원학회지*, 33(4), PP. 87-93
9. 환경부(2003), 빗물이용시설 보급확대를 위한 정책방안 연구
10. 환경부(2004), 중수도 활성화를 위한 제도개선 T/F팀 구성 운영 보고서(최종보고서), pp. 294-295