

양도 초등학교 빗물이용시설의 수질 및 경제성 평가 Evaluation of Stored Rainwater Quality and Economic Efficiency at Yangdo Elementary Rainwater Harvesting System

김기영 · 박현주*[†] · 김충일** · 한무영

Kiyoung Kim · Hyunju Park*[†] · Tschungil Kim** · Mooyoung Han

서울대학교 건설환경공학부 · *서울대학교 공학연구소 · **서울대학교 건설환경종합연구소

Department of civil and Environmental Engineering, Seoul National University

*Engineering Institute, Seoul National University

**Integrated Research Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University

(2012년 10월 22일 접수, 2014년 4월 30일 수정, 2014년 5월 5일 채택)

Abstract : To supply substitution water, 2 m³ of capacity of rainwater harvesting system is designed calculating rainfall, catchment area and LPCD and has a effects to 34.4% of substitution water supply and 237 days of service day. Rainwater of drinking water quality was judged to be suitable except for bacteria problem, however, groundwater is exceeded in nitrate nitrogen, the evaporation residue and also bacteria, which means that the rainwater is suitable for use as water supply. In addition, to consider cost-benefit ratio, economic analysis conducted. The result is that B/C ratio of RWHS (10 years) is 1.70. It means total benefit is bigger than cost. Except to social factor in this study, there are a variety of benefit such as flood or drought prevention, educational effects inspiring water conservation awareness.

Key Words : Rainwater Harvesting, Test-bed, Island Area, Economic Analysis

요약 : 본 연구에서는 양도 초등학교에 강우량과 집수면적, LPCD를 고려하여 빗물이용시설을 설치하였다. 빗물이용시설은 학교 내·외의 상수를 대체하고자 하는 목적으로 설계되었다. 용량은 2톤으로 학교 용수의 34.4%를 대체할 수 있었으며 1년의 2/3정도인 237일 동안 빗물을 사용할 수 있었다. 총 세 차례의 수질검사 결과 일반 세균을 제외한 나머지는 먹는 물 수질에 적합하였다. 또한 동시간에 조사한 주변 지하수는 일반세균을 비롯한 질산성질소, 증발잔류물이 기준치를 초과하였다. 빗물의 수질 및 수량을 고려한 결과, 양도초등학교의 경우 빗물을 대체용수로서 사용하기에 적합하였다. 빗물시설에 대한 경제성 분석 결과, 내구연수 10년인 빗물이용시설은 B/C (Benefit-Cost Ratio) 비율이 1.70으로 경제성 편익이 비용보다 큰 것으로 나타났다. 특히 본 연구에서 고려한 사회적인 요인 외에도 금액으로 환산하기 힘든 홍수방지, 가뭄대비, 교육 효과가 있어 사회적 편익이 더욱 증가할 것으로 예상된다.

주제어 : 빗물이용시설, 시범사업, 도서지역, 모니터링, 경제성 분석

1. 서론

국토해양부가 2010년 1월 공식집계로 제시한 우리나라의 섬은 총 3,358개로 사람이 사는 유인도가 482개, 무인도는 2,876개이다. 섬 주민은 30여만 가구에 100여만 명으로 추산되며 대부분의 섬은 해안선이 복잡한 서해와 남해에 몰려 있다.¹⁾

우리나라 섬 주민들은 전통적으로 물공급에 어려움이 겪고 있으며, 물부족은 관광객 유치도 어렵게 하여 지역경제 발전까지 영향을 미치고 있다. 현재 대부분의 섬 주민들은 용수공급을 지하수에 의존하고 있다.²⁾ 그러나 섬지역 지하수의 경우 제주도와 같은 비교적 큰 섬이라도 섬 지역 및 해안 지역의 지하수는 해수에 오염되어 염도가 높다. 따라서 섬지역의 용수문제를 해결하기 위해 국가에서는 많은 시설 투자비와 유지비가 드는 해수담수화 시설을 통해 상수를 공급하는 방안을 추진하고 있다.³⁻⁵⁾

특히 2012년 상수도통계연보에 의하면 전국 상수도 보급

률은 98%이며 강화도의 경우는 49.3%에 불과하다. 상수도 보급률이 부족한 실정에도 강화도 방문 관광객은 156만명을 넘어서고 있으며 이는 강화도 인구(68,000명)의 22배가량이다. 또한 강화도의 관광객 수는 계속 증가하는 추세이며, 이는 잠재적인 물수요량도 점차 증가함을 의미한다.

현재 상수도가 보급 되지 않는 강화도의 대부분은 지하수를 이용하고 있으며, 지하수 수질은 식수 기준을 만족하지 못한 실정이다. 또한 2011년에 있었던 구제역 발생으로 인해 대량의 돼지 사체가 매장되어 지하수 오염이 우려되고 있다.⁶⁾ 주민들 또한 지하수에 대한 불신이 가중되어 있는 상태이며 대체 상수원을 찾는 것이 시급한 문제로 떠오르고 있다.⁷⁾

대체 수자원으로서는 빗물의 이용은 기존의 용수 공급을 보조할 수 있을 뿐만 아니라 빗물이용을 통한 관리비 및 수도세 저감, 교육적 효과, 쾌적한 주거공간의 창출 등을 기대할 수 있다.⁸⁾ 특히 수자원이 부족한 도서지역의 경우, 수자원확보의 일환으로써 빗물이용방안이 추천되고 있다.⁹⁾ 효

[†] Corresponding author E-mail: narjjs@hanmail.net Tel: 02-880-4321 Fax: 02-885-7376

과적인 빗물이용을 위해서는 지속적인 모니터링을 통한 수량적, 수질적인 해석 및 빗물이용에 대한 경제성이 수치적으로 해석되어야 한다.

본 연구에서는 섬 지역의 수자원 문제를 해결하기 위한 일환으로 빗물이용시설의 이용 가능성을 검토하였다. 이를 위해 강화도 양도 초등학교를 대상으로 빗물이용시설을 설치하였으며, 빗물이용시설을 설치한 후 수량과 수질에 대한 모니터링을 실시하였다. 양도초등학교의 지하수와 빗물의 수질을 비교하여 대체 상수원으로서 빗물의 수질을 평가하였다. 또한 빗물이용시설의 경제성을 평가하여 최적 설계인자와 수질관리 방안을 제안하였다.

2. 연구방법

2.1. 빗물이용시설설계

2.1.1. 빗물이용시설 설계 순서도

빗물이용시설 설계는 유출량과 유입량 및 저류량간의 물수지(water balance)를 기초로 저장조 운영을 모의한 후 이를 바탕으로 빗물시설용량을 설계하였다.¹⁰⁾ 빗물저류시설 내 물 흐름은 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 저장조의 유입량(Q_{in})은 건물의 지붕면으로 이루어진 집수면적에 유출계수 및 필터효율의 합수인 집수율을 강수량에 곱하여 집수량을 계산할 수 있다. 유출량의 경우는 사용량(Q_{sup})과 월류량(Q_{out})으로 나눌 수 있다.

사용량의 경우 하루에 사용되는 물 중 빗물로 대체가능한 물의 양을 과거 통계를 통하여 결정한다. 월류량의 경우는 빗물저류이용시설의 운영 모의를 바탕으로 저장조 용량 이상의 빗물이 유입될 경우 그 나머지를 월류량으로 한다.

위의 물 흐름을 바탕으로 빗물 저류/이용시설에서 빗물저

류조의 용량, 강수량, 빗물 수요량 등을 바탕으로 운영을 모의할 수 있는 순서도를 Fig. 2에 나타내었으며 효율평가인자 계산 방법을 Table 1에 나타내었다.¹¹⁾

빗물이용률은 특정 기간 동안 용수로 공급된 빗물의 양을 집수면에서 모아진 빗물의 총량으로 나눈 값이다. 집수면에 모아진 빗물은 저장조로 유입되고 저류되어 용수로 활용되며 월류되어 하수관을 통해 빠져나간다. 즉 빗물 저류/이용시설이 집수된 빗물을 얼마나 효율적으로 사용하고 있는가를 나타내는 지표로 이 값이 높을 수록 효율적으로 사용했다는 것을 의미한다.

상수대체율은 공급 대상용수의 총 소비량에 대한 빗물공급량의 비율이며, 빗물은 먹는 물 이외에 화장실용수, 청소용수, 조경용수 등 다양하게 이용될 수 있다. 그러나 설계시 현장여건에 따라 빗물의 용도와 수요량을 구체적으로 결정하고, 이를 기준으로 상수대체율을 예측, 평가해야 할 것이다.

사이클 수는 정해진 기간 동안 사용한 총 빗물의 양을 저장조 용량으로 나눈 값이다. 이 값은 저장조의 활용빈도를

Table 1. Evaluation factors of rainwater retention/Use of facilities

Efficiency factor	Calculation
Rainwater utilization ratio, RUR	$RUR = \frac{\text{Amount of supply rainwater in a given period}}{\text{Rainwater harvested in a given period}}$
Water substitution ratio, WSR	$WSR = \frac{\text{Amount of supply rainwater in a given period}}{\text{Amount of demand water in a given period}}$
Cycle number, CN	$CN = \frac{\text{Amount of supply rainwater in a given period}}{\text{Volume of reservoir}}$
Service day, SD	Count of used days per year

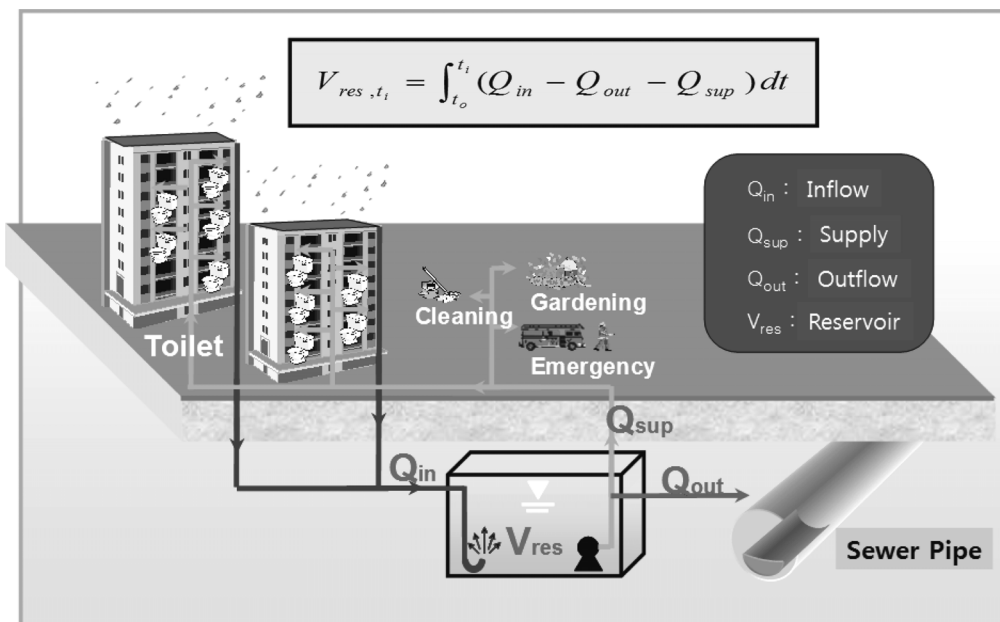
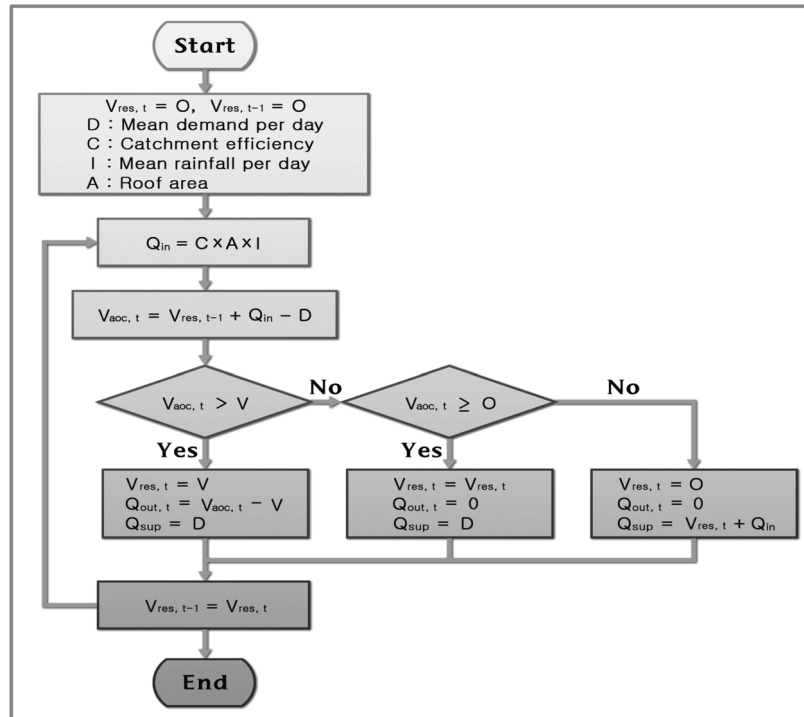


Fig. 1. Water cycle flows in rainwater harvesting system.



$V_{res,t}$: The volume of rainwater stored in reservoir at time t
 $V_{acc,t}$: Total volume of rainwater coming into the reservoir at time t
 t = amount of rainwater before + total amount of rainfall - demand
 $Q_{out,t}$: Output of rainwater through overflow pipe at time t
 C : Runoff coefficient of catchment area
 A : Catchment area
 V : The volume of reservoir
 Q_{in} : Input of rainwater in reservoir
 Q_{sup} : Supply of rainwater
 D : Demand of rainwater
 I : Rainfall intensity

Fig. 2. Water supply computing flow chart using rainwater tank volume.

나타낸다. 빗물이용률과 용수대체율에 큰 차이가 없는 경우 저장조의 활용빈도가 높을수록 효율적인 설계와 운영이 이루어졌다고 할 수 있다.

사용일수는 정해진 기간 동안 빗물을 며칠 동안 사용하였는가를 날 수로 보여주는 값이다.

위의 네 가지 지표는 빗물의 이용도와 공급대상이 결정되면 저장조 용량에 따라 변하는 값들이다. 설계자는 이 효율인자들을 종합적으로 고려하여 저장조 용량을 결정할 수 있다.

2.1.2. 빗물이용시설 설계인자

빗물이용시설의 용량 및 이용량을 결정하기 위한 설계인자들은 다음과 같다.

2.1.2.1. 강우량

빗물 뿐 아니라 눈, 싸락눈, 우박, 이슬 및 서리의 양도 포함하며, 일정지역 즉, 지붕면에 일정기간 동안 내린 비의 양을 mm로 표시하며 내린 비의 총량을 무게로 환산하여 m^3 으로 표시한다.

2.1.2.2. 집수면적 및 집수방법

건물 부지 면적에서 빗물을 집수하는 면적을 집수면적이라 칭한다. 이 집수면적이라 함은 빗물을 모을 수 있는 유효지붕면의 합을 의미하며, 집수방법은 낙수흡통, 펌프, 집수

정, 필터 등을 통해 저장조로 유입시키는 빗물 수집 방법을 나타낸다.

2.1.2.3. 물 사용량

저장조로 유입된 빗물을 음용수, 화장실용수, 조경용수, 청소용수, 비상용수 등 각 용도별로 사용될 수 있으며 사용된 빗물의 양은 상주인수 및 1인 1일 상수 사용량을 이용하여 빗물사용량을 계측한다.

2.1.2.4. 빗물이용시설 용량 산정

빗물이용시설의 용량을 결정하기 위해 빗물이용시설의 물수지(water balance)와 빗물이용시설 설계인자를 바탕으로 빗물 이용률, 상수대체율, 연간 사이클 수, 연간 가동일수를 계산하는 것이 필요하다.

본 연구는 인천시 강화군에 소재하는 양도 초등학교를 대상으로 하였다. 본 학교의 건물 부지 면적은 $6,459 m^2$ 이며 이 중 집수면은 $300 m^2$ 을 이용하는 것으로 설계하였다. 구성원은 현재 전교생 23명과 교직원 15명이다. 이 학교에서의 하루 물 사용량은 1인 1일 학교 물 사용량 원단위인 50 L를 기준으로 하여 하루 약 $1.9 m^3$ /일로 결정하였다. 일일 경우는 2008년부터 2011년까지 평균값을 이용하였다.

빗물이용시설 용량산정은 2011년에 서울대학교 빗물연구센터에서 개발한 DR.RAIN을 이용하였다.

2.2. 빗물이용시설 모니터링 방법

2011년 10월에 양도초등학교에 빗물이용시설 설치하고 2011년 10월~2012년 8월까지 빗물에 대한 모니터링을 실시하였다. 빗물과 지하수를 동일한 시기에 채수하여 먹는 물 수질 기준 측정 항목 47가지를 분석하였다.

2.3. 빗물이용시설 경제성 분석 방법

2.3.1. 일반적인 경제성 분석 방법

경제성평가(economic evaluation)는 사업의 경제적 효율성을 분석하여 투자의 타당성을 검토하는 것을 의미하는데, 투입 비용과 편익에 대한 검토가 일반적이다. 비용 편익분석을 위한 평가 기준으로는 순현재가, 편익/비용비 및 내부수익률과 같은 지표가 널리 이용되고 있다. 그러나 이들 지표는 대상 투자사업의 목적과 특성에 따라 각각 장단점이 있으므로 적절한 평가지표를 설정하여 적용하는 것이 바람직하다. 이러한 평가지표는 투자사업을 평가하는데 서로 배타적인 개념이 아니라 보완적인 기준으로 쓸 수 있다.

2.3.1.1. 편익/비용비(Benefit-Cost Ratio, B/C)

편익/비용비는 현 시점으로 할인된 총편익과 총비용의 비를 나타내며 다음 식 (1)과 같다.¹²⁾

$$B/C = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^t \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

B_t : Benefit at the time

C_t : Cost at the time

2.3.1.2. 순현재가(Net Present Value, NPV)

순현재가는 투자사업으로부터 미래에 발생할 순편익(net benefit)을 현재 가치화하여 합산한 것이다. 현재기준으로 환산하기 위해서는 적절한 할인율을 결정하는 것이 중요하며, 미래의 연도별 순편익을 현재가로 할인하여 산출한다. 순현재가는 아래 식 (2)와 같이 나타내며, 자산의 잔존가치(residual value)가 남아있다면 감가상각을 고려하여 추가한다.¹²⁾

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{NB_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

NB_t : Net benefit at the time (Benefit - Cost)

n : Period of analysis

r : Discount rate

2.3.2. 빗물이용시설의 경제성 분석 방법

빗물이용시설의 경제성 분석 방법은 일반 재화에 대한 비용 편익을 분석하여 적용하거나 생애 주기에 대한 비용/편익을 누적하여 비교하는 LCC (Life Cycle Cost)분석이 활용

Table 2. Factors of cost-benefit analysis of rainwater harvesting system¹³⁾

Kind of benefit	Cost	Benefits
Private benefits	<ul style="list-style-type: none"> • Machinery equipment • Plumbing work • Electric work 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducing water bills • Reducing water usage charges • Reducing sewer rates
Social benefits	<ul style="list-style-type: none"> • Quantity and quality water monitoring • Electric charges • Maintenance cost 	<ul style="list-style-type: none"> • Dam construction • Reducing dam area allowance • Reducing environmental pollution Maintenance cost-

되는 것이 일반적이다. 빗물이용시설에 대한 비용은 토목, 건축, 기계 및 전기계장 등의 건설비용뿐 아니라 운영/유지 관리 비용 등을 고려되어야 한다. 편익에 있어서는 사적 편익과 사회적 편익으로 구분할 수 있으며 고려할 수 있는 세부 사항은 Table 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 빗물이용시설 설계

대상지역의 강우특성을 파악하여 설계강우를 결정하였다. 강우자료는 대상지역에 가까운 지점의 최근 11년간의 데이터를 이용하였으며 Fig. 3에 나타난 바과 같이 연 평균 강수량은 1,324 mm이다.

양도초등학교에 설치한 빗물이용시설의 집수면적 300 m²이며, PVC 재질로 된 2 m³ 용량의 빗물탱크를 설치하였다. 저장조 용량에 따른 빗물이용률과 용수대체율을 감안하였을 때, 최적 용량은 13 m³으로 계산된다. 집수면과 빗물탱크 사이에 0.3 mm단위로 이뤄진 망사형 스크린 필터를 설치하였으며, 생활용수로 이용하기 위한 펌프를 연결하였다(Fig. 4).

양도초등학교에 설치된 2 m³의 빗물저장시설의 빗물이용률은 56.3%, 용수대체율은 34.4%이다. 반면, 빗물이용시설 설계인자를 바탕으로 양도초등학교에 13 m³의 빗물저장시설을 설치하였을 때, 집수면적에 대한 빗물이용률은 60.7%이다. 빗물이용시설의 저장조 용량에 따른 용수대체율은

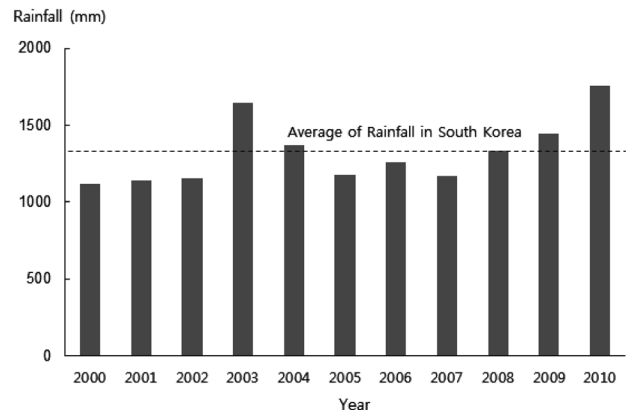


Fig. 3 Annual rainfall in Ganghwa island (2000~2010).

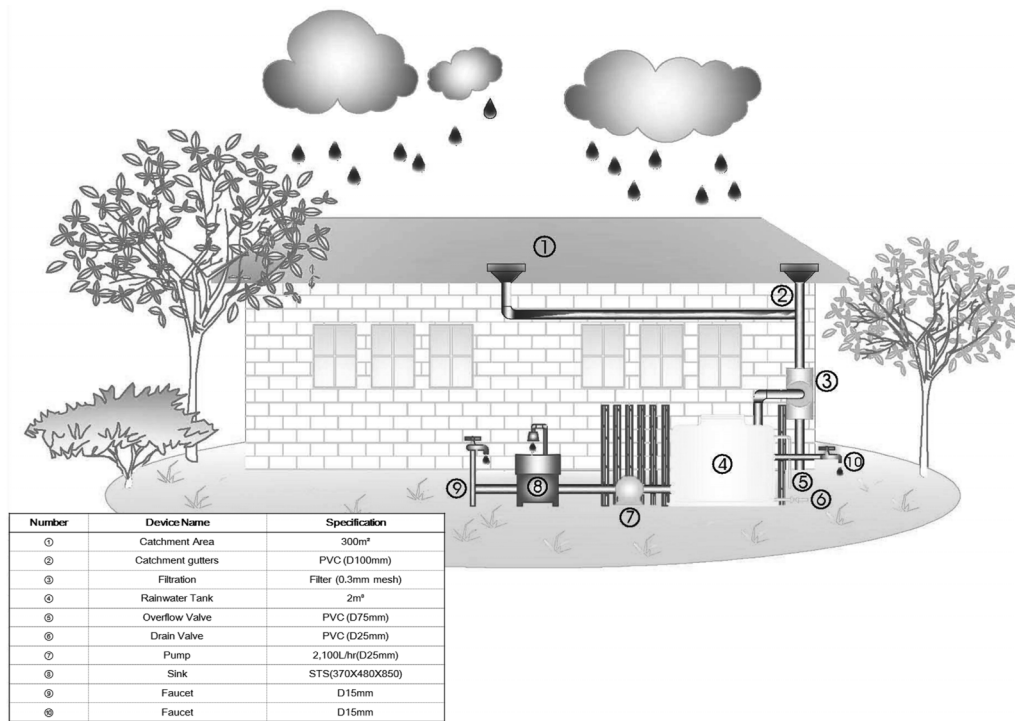


Fig. 4. Rainwater harvesting system overview in ganghwa elementary school.

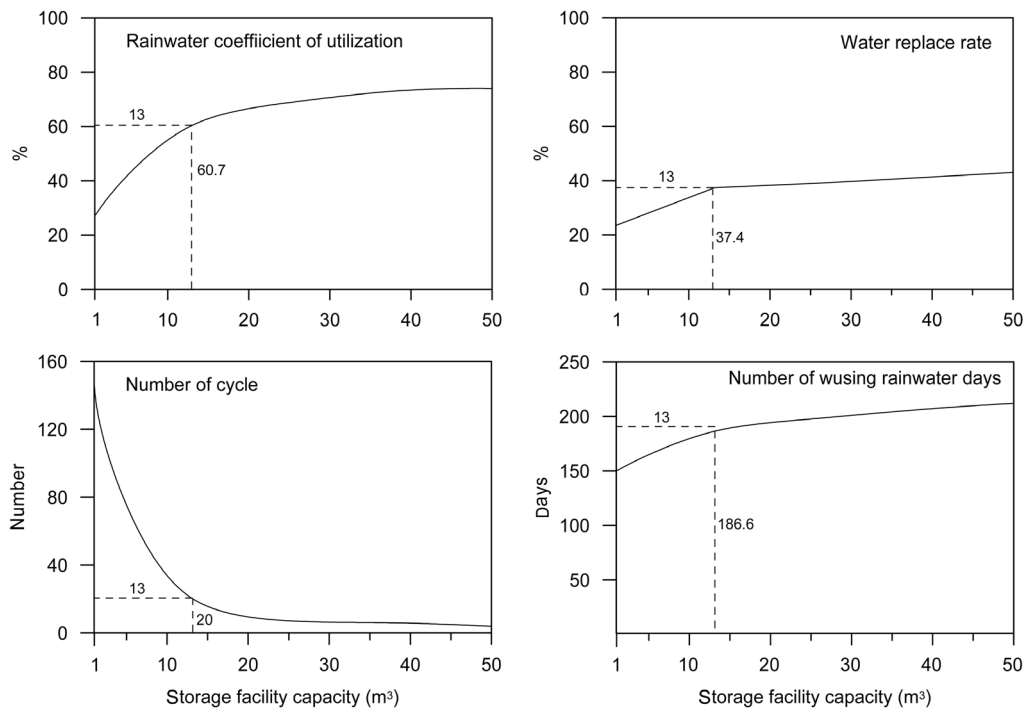


Fig. 5. Effect of rainwater harvesting system (2 m³) in evaluation factors of rainwater retention/Use of facilities.

37.4%이다. 빗물 탱크의 사이클 수는 13회, 빗물사용일수는 365일 중 186.6일을 쓸 수 있다(Fig. 5).

3.2. 빗물이용시설 모니터링 결과

빗물이용시설과 지하수의 수질 측정된 결과를 Table 3에 나타내었다. 탁도는 빗물과 지하수에서 1 NTU 이하로 나타

났으며, 빗물의 경우 0.47~0.64 NTU로 매우 안정된 값을 보여 주고 있다. 질산성 질소의 경우 빗물은 0.8-1.4 mg/L로 식수 기준인 10 mg/L 이하로 나타났으며 지하수는 4.0-25.6 mg/L로 약 2.5배 정도 식수기준치를 초과하였다. 중발 잔류물의 경우 빗물은 42-135 mg/L로 검출되었으나 지하수는 기준치를 초과하였으며 2월에 가장 높은 값을 보였다.

Table 3. Comparing rainwater and groundwater quality in Ganghwa elementary school

Name of test items	Rainwater				Groundwater				Standard unit	
date	2011.10.16	2011.12.20	2012.02.17	2012.08.30	2011.11.19	2011.12.20	2012.02.17	2012.08.16		
Nitrate (NO ₃ -N)	0.8	1.4	1.4	ND	15.5	25.6	4.0	3.2	10	mg/L
Residue on evaporation	52	135	42	37	676	952	1254	698	500	mg/L
Bacteria	2.04 × 10 ⁵	1.16 × 10 ⁴	4.80 × 10 ³	1.7 × 10 ⁴	1.04 × 10 ⁴	1.52 × 10 ⁴	3.00 × 10 ⁴	2.32 × 10 ⁴	100	CFU/mL
Total coliforms	ND	D	D	D	ND	D	D	D	ND	
E.coli	ND	D	ND	ND	ND	ND	D	ND	ND	
Turbidity	0.47	0.64	0.42		0.94	0.09	0.10	0.53	1	NTU
Pb, Hg, CN, Cr, NH ₄ ⁺ -N, Cd, Fe, Al, Mn	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00	mg/L
Fluorine (F)	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	0.24	00±00	00±00	1.5	mg/L
Arsenic (As)	00±00	0.005	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	0.01	mg/L
Selenium (Se)	00±00	00±00	0.008	00±00	00±00	0.008	0.009	00±00	0.01	mg/L
Zinc (Zn)	0.163	0.032	0.017	0.045	0.051	0.050	0.057	0.050	3	mg/L
Copper (Cu)	0.103	00±00	00±00	00±00	0.419	0.019	0.020	0.021	1	mg/L
Boron (B)	00±00	0.01	00±00	0.001	0.01	0.01	00±00	0.01	1	mg/L
Phenols, 1,2-dibromo-3-chloropropane, Diazinon, Parition, Peniteurotion, Kabaril, 1,1,1-trichloroethane, PCE, TCE, Benzene, Toluene, Etylbenzene, Xylene, 1,1-dichloroethylene, Carbon tetrachloride, 1,4-Dioxane	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00	mg/L
Dichloromethane	0.025	0.003	0.002	0.030	0.008	0.005	0.007	0.005	0.02	mg/L
Hardness	137.0	70.0	37.0	40.0	138.0	290.0	300.0	260.0	300	mg/L
Color	1	1	1	1	1	1	1	1	5	do
Odor, Flavor	Odorless, tasteless	Odorless, tasteless	Odorless, tasteless	Odorless, tasteless	Odorless, tasteless	Odorless, tasteless	Odorless, tasteless	Odorless, tasteless	Odorless, tasteless	-
Detergent (Anionic surfactant)	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	00±00	0.5	mg/L
Consumption of potassium permanganate	3.2	3.8	1.6	0.3	4.7	2.2	1.3	2.5	10	mg/L
pH	7.0	7.4	7.1	6.8	7.6	7.4	6.5	6.8	5.8~8.5	-

일반 세균의 경우 지하수 및 빗물 모두 식수 기준을 만족하지 못했다. 빗물의 경우 집수면의 오염으로 인해 미생물이 유입된 것으로 판단된다. 최근 연구에 따르면 빗물 탱크로 들어온 세균은 바이오 필름으로 인해 시간이 지남에 따라 지속적으로 줄어드는 것으로 보고되었다.¹⁴⁾

중금속 및 무기물의 경우 빗물과 지하수 모두 먹는 물 기준에 적합한 것으로 나타났다. 이와 같이 빗물의 수질은 지하수의 수질과 비슷하거나 더 양호하게 나타났으며 빗물을 지하수 및 상수 대체용수로 이용하기 적합하다는 것을 알 수 있다.

3.3. 빗물이용시설 경제성 분석

본 연구에서는 빗물이용시설 설치비용을 기계장비, 배관 및 잡철공사, 전기공사, 저류조 설치비 및 인건비로 산정하여 분석하였다.

3.3.1. 빗물이용시설 설치비 및 운영비

Table 4. Installation costs of RWHS in Yangdo elementary school

Product Name	Material	Labor	Totals	Remarks
1) Machinery and equipment	1,320,000	0	1,320,000	
2) Plumbing & mechanical works	353,290	840,000	1,193,290	
3) Electrical works	100,000	200,000	300,000	
Total	1,773,290	1,040,000	2,813,290	

빗물이용시설 단위당 공사비는 G사의 건설비용 견적을 토대로 산정하였으며, Table 4와 같다.

환경부에서는 2004년에 중수도 시설에 대한 경제성 평가 시 건설비의 2~3%를 유지관리비로 제시하였으며, 빗물이용시설의 유지관리비로는 건설비의 2%를 적용하였다.¹⁵⁾ 연간 유지관리비는 건설비의 1%에 해당하는 빗물 공급을 위한 전기요금과 수질 및 수량 모니터링 비용, 그리고 건설비의 1%는 보수, 인건비 및 기타 비용을 적용하였다(Table 5).

Table 5. Maintenance costs of RWHS in Yangdo elementary school (unit: won/year)

	Cost	Remarks
Water quality monitoring	19,693	0.7% of Installation costs
Electronic power cost	8,440	0.3% of Installation costs
Maintenance costs	28,133	1% of Installation costs
Total cost	56,266	

Table 6. Water supply cost rates in Ganghwa island (2011)

Classification	Usage (m ³)	Cost (won/m ³)
Residential	1~20	450
	21~30	640
	31~	810
Standard	1~300	820
	301~	1,050
Spa	1~1,000	560
	1,001~3,000	760
	3,001~	920

3.3.2. 빗물이용시설의 편익요인

3.3.2.1. 사적편익

빗물이용시설의 설치에 발생하는 사적편익을 분석하기 위해 상하수도 이용요금을 비교 검토하였다. 특히 상하수도 이용요금은 업종별 요금이 상이한 관계로 적용되어지는 용도에 따라 요금을 다르게 적용하였으며 물이용부담금은 2011년 이후 업종에 관계없이 일괄적으로 170원/m³이므로 이를 적용하였다.

① 상수도요금

상수도요금은 업종별 요금이 상이하하며 누진세가 적용되고 있다. 2011년 기준에 따라 수도요금을 적용하여 편익비용을 계산하였다(Table 6).

② 하수도요금

하수도요금은 업종별 요금이 상이하하며 누진세가 적용되고 있다. 빗물이용시설 설치시 하수도 요금 절감 혜택을 얻을 수 있음을 추측할 수 있다. 본 연구는 2011년 기준에 따라 수도요금을 적용하여 편익비용을 계산하였다(Table 7).

3.3.2.2. 사회적 편익

사회적 편익검토에서는 빗물이용시설의 경우, 용수 사용량 감소로 인한 댐건설 절감비 및 주변지역 지원비 절감비, 환경오염요소 절감편익 등을 고려하였다.

① 댐건설비

빗물이용에 따른 용수 사용량 감소로 인한 댐건설의 절감비는 빗물관리 및 활용계획 수립과 저변확대 방안 조사연구¹⁶⁾를 참조하였다. 1998년도 기준 용수공급 m³당 댐건설 평균 총 사업비에서 2009년의 물가상승률을 고려하여 다음식 (3)과 같이 산정한 결과 m³당 17.62원으로 나타났다.

Table 7. Sewer cost rates in Ganghwa island (2011)

Classification	Usage (m ³)	Cost (won/m ³)
Residential	1~10	190
	11~20	300
	21~30	330
	31~40	440
	41~50	510
Business	51~	870
	1~20	250
	21~50	310
	51~100	530
	101~300	560
Standard	301~	580
	1~30	530
	31~50	610
	51~100	860
	101~500	1,240
Spa	501~	1,390
	1~500	210
	501~1,000	420
	1,001~3,000	530
	3,001~	680

Table 8. Maintenance cost in dam construction areas and drinking water source protection zone (unit: won/m³)

Classification	Maintenance cost in dam construction areas	Maintenance cost in drinking water source protection zone	Total maintenance cost per m ³
	159.75	1.95	161.7

$$C = \frac{PI^*}{PI_p} \times C_p \quad (3)$$

C : Dam construction present value

PI* : the current price level

PIp : Price level at the time of construction

Cp : Dam construction cost

② 댐주변지역 지원비 절감

댐주변지역 지원비 절감액 산출을 위해 용수공급 m³당 댐 주변지역 지원사업비와 상수원보호구역 주민지원 사업비는 빗물이용시설 등 설치 운영 의무화 확대방안 연구¹⁷⁾를 참고하여 산정한 결과는 Table 8과 같다.

③ 환경오염요소 절감 편익비용

한국환경산업기술원과 에너지관리공단에서의 CO₂ 배출량 기준에 따르면 상수도 생산 1 m³당 332g CO₂가 발생하며, 전기 1 Kwh당 이산화탄소 470.5g CO₂가 발생한다.¹⁸⁾ 전력 통계정보시스템에서 원자력, 우연탄, 무연탄, 유류, LPG에서 연료원별 1 Kwh당 발전단가의 2012년 1월에서 6월까지의 평균은 130.7원이었다.¹⁹⁾ 따라서 m³당 편익은 92.25원으로 산정하였다.

3.3.2.3. 빗물이용시설의 기타 사항

건물의 수명 및 재건축 시기를 고려해 내구연수를 20년

Table 9. Other details in RWHS

Persisting period	Water cost inflation rate	Sewer cost inflation rate	General inflation rate	Discount rate
10 year	7.2%	10%	3.1%	2.35%

으로 설정하였다. 2002년부터 2009년까지의 평균 상수요금 증가율 7.2%, 2003년부터 2009년까지의 평균 하수요금상승률 10%와 2000년부터 2009년까지의 물가상승률 3.1%를 적용하였다. 2000년에서 2009년의 한국중앙은행 할인율 평균을 이용해 할인율 2.35%로 하였다(Table 9).

3.3.3. 빗물이용시설의 편익 분석결과

학교의 빗물이용시설 경제성 분석 결과는 Table 10에 나타난 바와 같다.

빗물이용률과 용수대체율을 고려했을 경우 양도초등학교의 최적 빗물 저장조는 13톤이다. 학교에 13톤의 빗물이용시설을 설치할 경우, 내구연수 10년인 빗물이용시설은 B/C 비율이 1.70으로 경제성 편익이 비용보다 높다는 것을 알 수 있다(Fig. 6). 특히 사적편익은 6년을 기점으로 총비용보다 높아짐을 확인할 수 있으며, 이는 빗물이용시설이 장기적으로 편익을 발생 시킬 수 있음을 의미한다.

사적편익 외에도 금액으로 환산하기 힘든 사회적 편익으로 홍수방지, 가뭄대비 효과 등이 있다. 특히 학교 빗물이용시설의 경우 빗물을 이용한 환경 및 생태교육 등의 체험학습과 물절약 실천 등 교육적 효과가 있어 사회적 편익이 더

Table 10. Economic analysis for RWHS in Yangdo elementary school (persisting period: 10 years)

Tank capacity (m ³)	Total costs (Thousnad won)	Private benefits (Thousnad won)	Social benefits (Thousnad won)	Private B/C	Social B/C	Total B/C
13.00	3,523	3,758	670	1.07	0.63	1.70

욱 증가할 것으로 예상되지만 정량적 분석이 어려운 한계점을 가지고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 섬 지역의 대체 수자원으로서 빗물이용 가능성을 검토하기 위해 강화도 양도 초등학교에 빗물이용시설을 설치한 후 수량과 수질에 대한 모니터링을 실시하였다.

빗물이용시설은 저장조 용량이 13톤일 경우, 학교 용수의 37.4%를 대체할 수 있으며 1년에 187일 동안 빗물을 사용할 수 있다.

지하수와 빗물의 수질검사 결과, 빗물은 일반 세균을 제외한 모든 항목이 먹는 물 수질 기준에 적합하였다. 반면 양도 초등학교 및 주변 주민들이 이용하고 있는 지하수의 경우 일반세균, 질산성질소 및 증발잔류물이 음용수 기준치를 초과하였다.

따라서 도서지역에서 빗물이용시설을 설치하여 이용할 경우 간단한 소독처리만으로 빗물을 음용수로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 도서 지역에서 빗물을 용수로 공급함으로써 발생하는 편익과 비용을 이용한 경제성 분석 결과, 빗물이용시설의 단위당 설치비와 유지관리비도 낮아 장기적인 이익을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다. 빗물이용의 사적 편익은 6년을 사용했을 때 총비용보다 높아져 내구연수 10년에 B/C 비율이 1.7로 나타났다. 특히 도서지역의 상수 공급을 배를 통해 수송해 오는 방법이나 해수담수화 시설을 통해 공급하는 방법과 비교하면 빗물 이용의 편익은 매우 클 것이라 기대된다. 따라서 도서 지역에 적절한 설계 인자를 이용하여 빗물이용시설을 설치할 경우 도서지역의 수자원 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

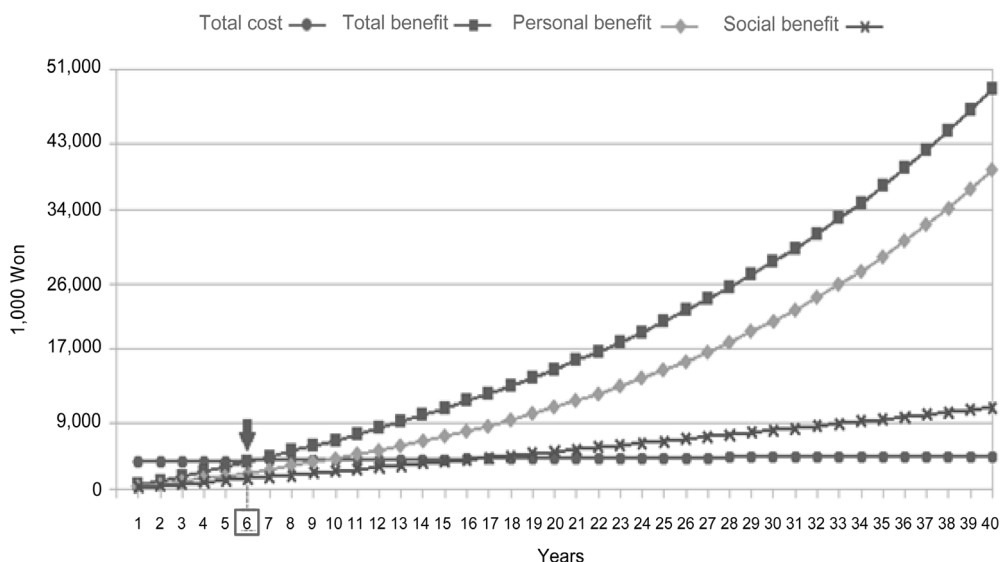


Fig. 6. Trend of total costs, total benefits, private and social benefits for RWHS in Yangdo elementary school.

사사

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 한-아프리카협력기반조성사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2011-0030900).

KSEE

Reference

1. Cho, H. S., Choi, S. H. and Cho, W., "Vegetation Characteristics of Four Major Islands in the Taeanhaean National Park," *Kor. J. Environ. Ecol.*, **24**(2), 93~100(2010).
2. Jun, J. Y., Lee, S. Y., Jee, H. K. and Jia, P., "Economical Analysis of Rainwater Harvesting System-Focused on Island Region-," *Proc. Kor. Soc. Water Qual.*, pp. 751~756(2005).
3. Oh, S. T., Go, J. U., Lee, M. K. and Gam, S. K., "Water Quality Characteristics of Groundwater Salinization in the Eastern Area of Jeju Island with Tidal Levels," *Proc. Kor. Soc. Water Qual.*, pp. 324~325(2011).
4. Shim, B. G., Chung, S. Y., Kim, H. J., Sung, I. W. and Kim, B. W., "Characteristics of Sea Water Intrusion Using Geostistical Analysis of Geophysical Surveys at the Southeastern Coastal Area of Busan, Korea," *J. Kor. Soc. Soil & Groundwater Environ.*, **7**(3), 3~18(2002).
5. Kim, C. H. and Kim, W. G., "Economic Analysis of Small Desalination Systems" *Kor. Soc. Civil Eng.*, **3**, 921~924(2000).
6. Kang, M. A., Kim, M. S., Choi, B. W. and Sohn, H. Y., "Organic Matter Analysis and Physicochemical Properties of Leachate from a Foot-and-Mouth Disease Landfill Site," *Kor. Soc. Microbiol. Biotechnol.*, **40**(2), 128~134(2012).
7. Yoon, J. H. and Kim, K. H., "Application of biochar from organic wastes for remediation of leachate from animal carcass," *Korean Society Of Soil Sciences And Fertilizer*, p. 318(2012).
8. Choi, J. H., Kim, D. M. and Lee, M. H., "Active Rainwater Utilization Methods within Apartment Complex," *The Korean Regional Development Association*, pp. 290~300(2011).
9. Koh, B. Y. and Lee, B. C., "Policy proposal of rainwater harvesting for agricultural water ensure in the island," *Proc. Kor. Environ. Sci. Soc. Conference*, **12**(1), 372~377(2003).
10. Han, M. Y., Han, M. S. and Kim, S. R., "A Consideration in Determining the Tank Size of Rainwater Harvesting System in Buildings," *Kor. Soc. Water Wastwater.*, **18**(2), 99~109(2004).
11. Edgar, V.-G. and Andrew, D., "Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrkoping, Sweden," *Building Environ.*, **40**(9), 1174~1184(2005).
12. Hong, W. H., Bea, S. H. and Choi, M. Y., "A Study on the Economic Evaluation by Introducing Facility to Use Rainwater in Daegu Worldcup Stadium," *Arch. Inst. Kor.*, **21**(8), 243~250(2005).
13. Mun, J. S. and Han, M. Y., "Rainwater Harvesting (RWH) System at the S Residential and Commercial Complex," *Arch. Inst. Kor.*, **25**(12), 173~181(2009).
14. Kim, M. Y. and Han, M. Y., "Composition and distribution of bacteria in an operating rainwater harvesting tank," *Water Sci. Technol.*, **63**(7), 1524~1530(2011).
15. Kim, Y. M., Lee, S. H., Lee, J. H. and Kim, R. H., "Estimation of Optimum Capacity for Rainwater Storage Facilities based on Mass Balance and Economic Analysis," *Kor. Soc. Water Wastwater*, **22**(2), 233~238(2008).
16. Han, M. Y., "Study on the Enlargement Methods of Rainwater Management and Utilization Plan" Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 15~151(2008).
17. Kim, R. H., "Study on the Enlargement Methods of Mandatory installation of rainwater harvesting facilities," *Korea Institute of Construction Technology*, pp. 5~104(2010).
18. <http://www.keiti.re.kr/action.do?mid=1010409000>, Korea Environmental industry and Technology Institute(2014).
19. Korea Energy Economics Institute, "2012 Yearbook of Energy statistics," pp. 153~200(2012).