빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 설계 및 운전 평가 : 서울대 39동

Design and Operation of the Rainwater-Greywater Hybrid System : SNU No. 39 Building

심인태 · 박현주* · 김충일* · 정성운** · 한무영 · 남궁은***,†
In-tae Shim · Hyun-ju Park* · Tschung-il Kim* · Sung-un Jung**
Moo-young Han · Eun Namkung***,†

서울대학교 건설환경공학과 · *서울대학교 건설환경종합연구소

(사)빗물모아 지구사랑* · *명지대학교 환경에너지공학과*

Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

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

***Incorporated Association, Rainwater for All*

****Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University*

(Received November 25, 2016; Revised December 26, 2016; Accepted December 28, 2016)

Abstract : In this study, rainwater-greywater hybrid system was installed and operated for 1 year in order to evaluate its water quantity, water quality, and economic efficiency in building no. 39. This system was expected to overcome each disadvantages of and maximize each advantages. Low-greywater that was washed up from shower room was treated by MBR (Membrane Bioreactor) and ozone oxidation. Rainwater that was collected from the rooftop was stored in a reservoir, and then transferred to the storage tank that was mixed with treated greywater. After 1 year operating in building no. 39, rainwater and greywater was used to supply 2,599 m³ of toilet flushing water. In terms of water quality, rainwater was satisfied far the greywater reuse standards except for E.coli. Moreover, low greywater quality was acceptable except for E. coli, BOD, SS, and turbidity. In addition, economic analysis was obtained from benefit-cost ratio (B/C) with 1.11. It implies that the feasibility of the project was reasonable. Furthermore, various research and policy to improve the economic efficiency of water recycling facilities is required to expand the use of water recycling facilities.

Key Words : Rainwater-Greywater Hybrid System, Water Reuse, Toilet Flushing Water, Economic Analysis

요약 : 본 연구에서는 빗물과 중수를 연계하여 각각의 단점을 극복하고 장점을 극대화 할 수 있는 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템을 설계하고 서울대학교에 설치하여 수량 및 수질 모니터링과 경제성을 평가하였다. 건물에서 발생하는 오수 중 세면, 샤워용수를 중수로 선택하여 침지형 분리막과 오존산화 처리하였으며, 건물 옥상에서 집수된 빗물은 저류 후 처리수조로 이송되어 처리된 저농도 오수와 혼합되어 변기 세척용수로 공급하였다. 변기 세척용수 3,979 m³ 중 65%인 2,599 m³를 빗물 이용과 저농도 오수를 재이용하였다. 빗물은 총대장균을 제외한 나머지 항목에서 중수도 수질 기준을 만족하였으며, 저농도 오수는 탁도, SS, BOD, 총대장균이 기준치를 초과하여 침지형 분리막과 오존산화 처리하여 안정적인 수질을 유지하였다. 경제성 분석 결과, 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템은 B/C (Benefit-Cost Ratio) 비율이 1.11으로 사업의 타당성이 있다고 판단된다. 물 재이용시설의 이용확대를 위해 시설 운영에 따른 경제성을 높이기 위한 다양한 연구 및 정책적 지원이 필요하다.

주제어 : 빗물, 저농도 오수, 물 재이용, 수질 수량, 경제성 평가

1. 서론

산성비라는 오해와 편견으로 인해 빗물 수질에 대한 우려가 많지만, 많은 연구결과가 빗물 집수 및 이용에 대해 긍정적이다. 빗물이용을 위해 고려되는 총대장균 및 분변성 대장균, 질소, 인 농도는 집수시설의 관리 상태에 따라 세계보건기구 및 우리나라 음용수 기준을 만족할 만큼 청정한 수질을 유지하는 것으로 보고되고 있다.¹⁾ 따라서 빗물은 간단한 처리만으로 건축물에서 비교적 낮은 수질을 요구하는 변기 세척, 조경, 청소 등 다양한 용도로 활용이 가능하다. 하지만 자연조건 및 지형 등 기후인자의 영향을

받는 빗물은 시·공간적인 변동성이 커 안정적인 수원 확보가 어렵다. 특히, 우리나라와 같은 경우 하계에 강우가 집중되어 유량변동계수가 유럽의 10~25배로²⁾ 빗물이용의 효율성이 낮은 편이다. 반면, 건축물에서 발생하는 오수는 건축물 내에서 사용한 만큼 발생되고, 그 발생량이 일정하여 물 재이용 관점에서 안정적인 수량을 확보할 수 있다. 하지만 세면, 주방, 목욕, 청소 등 다양한 오염물질이 혼합되어 오염부하가 높아, 물 재이용을 위해서는 많은 에너지와 비용이 필요하다.

수질은 양호하나 안정적인 수량 확보가 어려운 빗물과 안정적인 수량 확보는 가능하나 수질이 좋지 않아 비용이 많

† Corresponding author E-mail: enamkung@mju.ac.kr Tel: 031-330-6693 Fax: 031-336-6336

이 드는 중수를 연계하여 안정적인 수질과 수량을 얻을 수 있어 지속가능한 수자원 확보가 가능하다. 또한 빗물과 오수의 물 재이용으로 건축물의 물 자급률을 향상시킨다. 다만 빗물과 중수를 연계할 때 적정 저장용량을 고려하여 경제성 있는 시스템을 구축해야 한다. 빗물과 중수 각각에 대한 물 재이용에 관련 연구는 많이 진행되었지만 빗물과 중수를 연계한 효과에 대한 연구는 많이 부족하다. 기존 연구에서는 빗물과 중수 연계를 통한 막 성능 평가, 중수와 빗물의 혼합 비율에 따른 수질의 변화, 경제성 평가(Enedir)가 진행되었고 빗물-중수 연계 시스템 전체에 대한 분석에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 빗물과 중수를 연계하여 각각의 단점을 극복하고 장점을 극대화 할 수 있는 빗물·중수 하이브리드 시스템을 고안 및 설계하였고, 서울대학교 대학원 연구동에 설치 및 운전하여 수량과 수질에 대한 모니터링 및 경제성을 평가하여 빗물과 중수를 연계한 물 재이용시설에 대한 가이드 라인을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 설계

빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템은 4가지 원칙을 세워 설계하였다. 첫째, 본 시스템은 기존 건물 내에 설치하기 때문에 장치의 규모가 작아야 한다. 둘째, 전문 관리자가 상주할 수 없기 때문에 운전이 용이해야 한다. 셋째, 학생들이 바로 사용하기 때문에 안정적인 수량과 수질로 공급해야 한다. 넷째, 학교 측의 편익을 위해 유지 관리 비용이 낮고 물의 재이용률이 높아야 한다.³⁾

2.2. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 적용

빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템을 서울대학교 대학원 연구동(39동)에 설치하였다(Fig. 1). 기존에 설치된 빗물 이용시설(224 m³)과 중수 이용 시설(30 m³)을 추가 설치 및 연계하여 연구를 진행하였다. 연구 대상 건물인 서울대 39동은 2005년 10월에 완공되었으며 상주인구는 대학원생, 교직원 등 약 800명이며, 건물의 층수는 지상 5층, 지하 3층으로 총 8층이다. 변기 세척용수로 공급되는 대변기는 82대, 소변기는 52대이다. 빗물이용시설은 2005년 완공되었고 지붕 집수면은 960.24 m², 저류조는 224 m³으로 70 m³은 소방용수로 사용하기 위해 항상 저류하고 있다. 각 건물의 지붕에서 받아진 빗물은 침전형 AFS200필터(ELWA, 독일)와 와류여과형 WFF100필터(WISY, 독일)를 통해 초기 강우 시 지붕에서 유입되는 오염물질 및 부유물질이 제거된 후 빗물저류조로 이송되며, 저류조 내 격벽 설치 및 빗물을 월류시킴으로써 바닥의 이물질이 부상하지 않도록 하였다.

수량 및 수질에 대한 모니터링을 위해 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템에 유량계(K-201 50A, 한국) 4개소, 수질 감지센서(CUBE-TU1000, 한국) 3개소를 설치하였다. 유량

Gross area	24,439 m ²	Population	800 people
Building area	4,398 m ²	Rainwater resovier	224 m ³
Catchment area	960.24 m ²	Closet bowl	82 EA
Floor	5 ground, 3 underground	Urinal	52 EA

Fig. 1. Overview of SNU No. 39.

계는 MBR 처리수, 빗물, 상수, 변기 세척용수 4개소에 설치하여 각 위치에서의 사용량을 1시간 단위로 모니터링 하였다. 저농도 오수, 빗물, 변기 세척용수 3개소에서 탁도, 전기전도도, pH에 대한 수질 모니터링을 하였고, 주 1회 총대장균, 탁도, SS, BOD, T-N, T-P에 대한 수질 실험을 실시하였다.

2.3. 경제성분석

경제성평가(Economic evaluation)는 사업의 경제적 효율성을 분석하여 투자의 타당성을 검토하는 것을 의미하는데, 일반적으로 투입 비용과 편익에 대한 검토를 한다. 본 연구에서는 일반 재화에 대한 비용 편익을 분석하여 적용하거나 생애 주기에 대한 비용/편익을 누적하여 비교하는 LCC (life cycle cost) 분석을 활용하였다.⁴⁾ 비용적인 측면에서는 건축, 기계 및 전기 등의 건설비용 뿐 아니라 운영/유지관리 비용 등을 고려하였다. 편익적인 측면에서는 사적 편익과 사회적 편익을 구분하여 경제성 평가를 실시하였다. 사적 편익은 물 절약으로 인한 상하수도 절감요금이 해당되며, 사회적 편익은 이로 인한 댐 건설 및 관리 비용, 환경비용 등을 포함하여 추정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 설계

빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템을 4가지 원칙을 세

Fig. 2. Design factors of rainwater & greywater hybrid system.

위 설계하였으며, 시스템 설계 시 고려된 인자들을 Fig. 2에 나타내었다.

3.1.1. 오수의 선별

건축물에서 발생하는 오수는 다양한 오염물질이 혼합되어 있어 이를 재이용하기 위해서 많은 비용과 에너지를 필요로 한다. 중수로 이용될 수 있는 오수는 그 발생에 따라 세면용수, 주방용수, 청소용수, 화장실배수, 목욕용수 등으로 구분할 수 있다. 유기물 농도가 높은 화장실배수를 제외한 건물 내 발생원별 오수의 성상을 분석하여, 비교적 오염 부하가 낮아 처리가 용이하며 발생량이 일정한 저농도 오수(세면용수와 샤워용수)를 물 재이용수로 선택하였다. 화장실 세면용수와 지하 1층의 체력단련실의 샤워용수를 집수하기 위한 배관 연결공사를 하여 저농도 오수를 확보하였다.

3.1.2. 물 재이용수 사용처 선정

물 재이용수는 싱가포르의 뉴워터(NEWater)처럼 하수를 정수해 음용수 이상의 깨끗한 물을 생산할 수 있지만,⁵⁾ 이는 높은 기준의 수질이 요구되기 때문에 많은 에너지를 필요로 한다. 반면 조경용수, 청소용수, 변기 세척용수 등과 같은 잡배수는 먹는 물 수질기준에 비해 낮은 수질이 요구되기 때문에 저에너지, 저비용으로 처리할 수 있다. 따라서 물 재이용수의 사용처를 일반 가정에서 사용량이 25%로 많고,⁶⁾ 수질이 낮아도 사용 가능한 변기 세척용수로 결정하였다.

3.1.3. 처리방식

처리방식을 결정하기 위해서 공법, 시스템의 규모, 운전 및 관리, 수질/수량, 유지비용을 고려하였다. 오수를 처리하기 위해서는 물리·화학적, 생물학적, 막 처리 등 다양한 공법이 존재한다. 기존의 물리·화학적, 생물학적 공정은 많은 공간이 필요하고 전문 관리자의 상주가 필요하기 때문에 적용 대상 공정에서 제외하였다. 기존 건물의 좁은 공간을 활용하기 위해 소규모 처리 방식인 침지형 분리막(MBR, membrane bioreactor, Econity-202CF)과 오존산화장치(HIO-600, 한국)를 적용하였다. 침지형 분리막 방식은 기존의 생물학적 공정에서 침전조를 없애고 막 분리 공정을 결합한 공정으로, 고농도의 MLSS를 유지하여 높은 처리효율을 얻을 수 있으며, 단위 용적당 처리량이 증가하여 기존 처리 시설에 비해 적은 용적으로도 적용 가능하여 중수도처리에 적합한 공법이다.⁷⁾ 저농도 오수의 수질 성상이 일반 하·폐수보다 훨씬 안정적이기 때문에 침지형 분리막에 의한 BOD, T-N, T-P의 효율적인 처리가 가능하며, 침지형 분리막 후단에 미세 기포를 이용한 오존 주입을 통해 색도와 유기물 등을 제거하여 안정적인 수질을 얻을 수 있도록 하였다.

오염부하가 적은 저농도 오수를 원수로 사용하기 때문에 막 오염(Membrane Fouling) 현상이 줄어들어 막 세척과 교체 주기가 길어져 일반적인 하·폐수를 원수로 사용하는 막 여과 공법보다 막 성능 유지를 위한 유지관리비가 낮아질 것으로 예상하였다.

3.1.4. 빗물과 저농도 오수의 혼합시점

빗물과 저농도 오수를 연계하는 방법은 Fig. 2와 같이 4가지 방안이 있다. 빗물은 수질이 양호하기 때문에 유입된 저농도 오수와 혼합할 수 있으나 본 연구에서는 침지형 분리막의 안정적인 운전을 위하여 빗물과 저농도 오수의 처리를 분리시켜 입자처리와 소독을 거친 저농도 오수와 빗물이 혼합되도록 설계하였다. 저농도 오수는 침지형 분리막, 오존산화의 처리를 거치지만, 빗물은 저류조에서 물리적인 여과와 침전 과정을 거친 후 처리수조에 인입되어 변기 세척용수로 공급되었다.

3.2. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 적용

여러 설계 인자를 고려하여 Fig. 3과 같이 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템을 30 m³/day의 규모로 구성하였다. 시설 관리자의 편의와 용이한 운전을 위해서 운전 조건 변경 및 수질 및 수량 모니터링이 가능한 PLC 및 원격제어 시스템을 적용하였다. 저농도 오수 유입량은 20 m³/day로 계획하였으며, 유량조정조는 10 m³으로 12시간 체류도록 설계하였다. 침지형 분리막 시스템은 15 m³으로 8시간의 체

류시간을 가지며 막의 모듈은 중공사막, pore size는 0.4 μm이다. 처리수조는 15 m³으로 유입반응조, 산화반응조, 저류수조로 구성되었다. 미세기포 오존 산화를 거쳐 처리수조로 공급되고 처리수조에서 빗물과 혼합되어 부스터 펌프를 통해 변기 세척용수로 공급된다. 빗물과 저농도 오수의 수량이 부족할 경우를 대비하여 상수를 연결하였다.

3.2.1. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 수량 분석 결과

2015년 서울대학교 39동의 총 물 사용량은 51,440 m³으로 Fig. 4에 물 사용량과 매스 밸런스를 나타내었다. 각 위치별 사용량은 체력단련장 2,151 m³, 세면 345 m³, 화장실 4,300 m³, 실험실 24,038 m³, 청소 362 m³, 기타 20,244 m³이다. 상수는 48,841 m³, 빗물 이용과 저농도 오수 재이용으로 2,599 m³을 사용하여 5.3%의 물 자급률을 보였다. 2015년 2월부터 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템을 통해 총 3,979 m³을 변기 세척용수로 공급하였으며, 이중 저농도 오수 1,728 m³ (43%), 빗물 871 m³ (22%), 상수는 1,380 m³ (35%)을 공급하였다(Fig. 5). 빗물 이용과 저농도 오수의 물

Fig. 3. Schematic diagram of rainwater & low-greywater hybrid system.

	Gym	Washstand	Toilet flushing	Laboratory	Cleaning	Etc	Total
Usage	2,151 (4.2%)	345 (0.7%)	4,300 Reusewater: 2,599 Tapwater: 1,701 (8.4%)	24,038 (46.7%)	362 (0.7%)	20,244 (39.3%)	51,440 Reusewater: 2,599 Tapwater: 48,841 (100%)

Fig. 4. Water consumption and water mass balance of building no.39 in 2015.

Fig. 5. Toilet flushing water consumption.

재이용으로 2,599 m³의 상수를 절약하여 변기 세척용수 65%를 대체하며, 5,198천원의 상수도 요금을 절약하였다.

저농도 오수는 학기 중과 방학기간 동안 유동인구의 변화로 발생량이 차이가 나, 84~273 m³/월의 사용량을 보였다. 저농도 오수는 평균 7 m³/day이 꾸준히 발생하며, 안정적인 수량을 확보할 수 있어서 변기 세척용수의 주요 상수 대체원이 되었다. 반면 빗물은 계절적 차이가 뚜렷하게 나타나, 안정적인 수량 확보가 어려웠다. 특히 2015년은 가뭄으로 인해 서울지역의 강수량은 평년(30년 평균) 강수량인 1,450 mm의 55%인 792.1 mm가 내려, 예상 공급량보다 적은 양을 변기 세척용수로 공급하였다. 강우량이 많은 8월

의 경우, 221톤을 사용하며 변기 세척용수의 62%를 빗물로 공급할 수 있었다. 하지만 강우가 적었던 10월의 경우, 2톤의 빗물을 사용하여 계절적 편차가 크게 나타났다. 빗물과 저농도 오수를 연계하여 안정적인 수량으로 변기 세척용수를 공급할 수 있었다.

서울대 39동 물 사용량 분석을 통해 실험실 장비 냉각수의 물 사용량이 많은 것으로 밝혀져, 이를 재이용하기 위한 방안이 강구되었다. 냉각수는 열 오염 외에는 다른 오염이 없기 때문에 온수로 재이용하기 위한 시설을 도입할 예정으로 이를 통해 상수 및 난방비를 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 6. Results of water quality monitoring for 6 months.

3.2.2. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 수질 분석 결과

시스템 각 공정별로 수질을 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 저농도 오수의 경우 일반 하·폐수에 비해 총 질소, 총 인 그리고 고농도의 부유물질의 오염 부하가 적었지만, 총대장균, 탁도, SS, BOD가 중수도 수질 기준을 만족하지 못하였다. 저농도 오수는 침지형 분리막 처리 후 중수도 수질 기준을 만족하였다. 일반적으로 침지형 분리막에 적용되는 막은 총대장균, 분변성대장균, 박테리오파지 등의 미생물 제거율이 박테리아의 경우 6~8 log, 바이러스의 경우 3~5 log 정도로 상당히 높다.⁸⁾ 가동 초기 총 인, 총 질소의 농도가 일시적으로 상승하는 현상이 있었다. 이는 시설의 가동 초기 침지형 분리막 내 미생물의 불안정한 상태로 일시적으로 총 인과 총 질소가 상승했을 것으로 보인다. 미세기포 오존산화를 통해 침지형 분리막이 처리 못한 총대장균을 소독하였으며, 유기물 및 색도를 제거하였다. 빗물은 총대장균을 제외한 나머지 항목에서 중수도 수질기준을 만족하였다. 이는 와류식과 침전식 필터를 통한 초기우수 배제 및 부유물질 제거 등의 물리적 처리와 빗물 저류조 내 격벽 설치 및 빗물을 월류하여 이물질이 부상하지 않도록 하였고, 저류조 내 형성되는 바이오 필름에 의한 자연정화로 인해 수질이 양호한 것으로 보인다.⁹⁾ 또한 빗물의 pH는 6.66~6.85로 중성을 유지하였으며, 이는 저류조에 저장된 빗물은 산성에서 중성으로 변한다는 연구결과와 일치하였다.¹⁰⁾ 최종 처리수는 모든 수질 항목에서 중수도 수질 기준을 만족하였으며, 빗물을 다른 처리 과정 없이 오존 산화를 거친 처리수와 혼합하는 방식으로든 최종 처리수의 수질이 양호함을 알 수 있었다.

3.3. 경제성 분석

3.3.1. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템 설치비 및 운영비

설치비는 기존 설치되어 있던 빗물저류조와 2015년 시공 완료 된 저농도 오수 중수시설로 구분하였으며 설치비와 유지비용의 상세 내용은 Table 1과 같다. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 설치 비용은 빗물이용시설 51,200천원, 중수시설 96,900천원으로 총 148,100천원이었다. 빗물 이용시설의 유지비용은 건설비의 1%를 적용하였고,⁴⁾ 중수 시설의 유지비용은 전력비용, 경상수선비, 대수선비를 적용하여 연간 유지비용을 산출하였다. 일반적으로 SOC 사업의 내구년수는 20년으로 할인율은 8%이지만, 중수 시설의 경우 배관 등의 부식을 고려하여 내구년수 15년, 할인율 5% 평균 소비자물가상승률(3%)을 적용한 현재가치로 환산하여

Table 1. Installation & maintenance costs of rainwater - low - greywater hybrid system

	Installation costs		Maintenance costs (thousand won/year)
	Total	Costs (thousand won)	
Rainwater harvesting system	51,200	- Reservoir : 35,000 - Plumbing : 16,200	512
Grey water system	96,900	- Plumbing : 31,000 - Electricity : 22,500 - Machine : 43,400	- Power cost : 1,245 - Ordinary repair expenses : 316 - Maintenance cost : 2,100

* Ordinary repair expenses : (Electricity + Machine construction costs) × 0.5%

* Maintenance cost : (Electricity + Machine construction costs) × $\frac{1}{(1 + \text{Discount rate})^{\text{Useful life}}} / \text{Useful life} \times 10$
 (Discount rate : 5%, useful life : 15 years)

유지비용을 산출하였다.¹¹⁾

3.3.2. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 사적편익

사적편익은 물 재이용량에 따라 상·하수도 사용요금 절감액을 산정할 수 있다. 상·하수도 이용요금은 업종별, 지역별 요금이 상이한 관계로, 서울대학교 상·하수도 요금으로 산정하였으며, 상수도요금 830원, 하수도요금 1,000원, 환경부담금 170원 총 2,000원을 상·하수도 이용요금으로 적용하였다. 지난 20년간(1989~2008년), 연간 상수도 요금은 6.06%, 하수도 요금은 7.05%의 상승률을 보였다. 여기서 물가상승률 3%를 차감한 실질 물가 상승률은 상수도 요금이 3.06%, 하수도 요금이 4.5%로 산정하여 현재가치로 환산하였다.¹²⁾ 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 물 재이용량을 최적의 조건에서 재이용 할 수 있는 5,000 m³/년으로 가정하여 사적편익을 산출하였다.

3.3.3. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 사회적 편익

물 재이용으로 인한 사회적 편익은 상하수도의 생산원가 절감액, 상수도 원가에 포함되지 않은 댐건설비용과 댐건설로 인한 계산 가능한 환경비용, 상·하수도 총괄원가의 저평가로 인한 상·하수도 비용감소와 댐건설에 의한 편익, 하수처리장 감소로 인한 주변 환경개선 편익 등이 있다. 이를 고려하기 위해 환경부¹³⁾의 자료를 활용하여 사회적 편익의 현재 가치를 계산하였다. 현재시점 2015년의 물가지수(115.34)를 기준시점인 1999년의 물가지수(57.72)로 나누어 사회적인 편익을 곱하여 계산하였다. 현 시점의 사회적 편익의 가치를 산출한 결과, 사회적 편익의 가치가 1,626원/m³으로 나타났다(Table 2).

Table 2. The present value of social benefits

	Water and sewage production costs	Actualized water and sewage cost	Dam's water supply cost	Dam surroundings support cost	Dam surroundings maintenance cost	Environmental expense	Total
1999	667	10.9	12.85	1,632	116.27	5.05	813.702
2015	1332.8	21.8	25.7	3.3	232.3	10.1	1626.0

Table 3. Economic analysis for rainwater-low-greywater hybrid system (persisting period : 15 years)
(unit : thousand won)

Total costs		Total benefits		Payback period	B/C Ratio
Installation costs	Maintenance costs	Private benefits	Social benefits		
148,100	54,900	136,623	88,605	11.6	1.11
203,000		225,229			

3.3.4. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 경제성 분석결과

빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 경제성 분석 결과는 Table 3에 나타내었다. 내구년수 15년, 할인율 5%를 적용하여 현재가치로 환산하였다. 총 비용은 203,000천원, 총 편익은 225,229천원이며 B/C Ratio는 1.11로 값이 1이상으로 사업의 타당성이 인정되었다. 회수기간은 11.6년으로 경제성이 있는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 적용한 사회적 편익 외에도 홍수저감, 가뭄대비, 탄소 배출량 저감 등 추가적인 사회적 편익이 발생하며 이를 고려시 편익은 증대될 것으로 보여진다.

4. 결론

본 연구에서는 대체 수자원인 빗물과 중수의 장단점을 보완한 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템을 설계한 후, 서울대학교 39동에 설치하여 수량 및 수질에 대한 모니터링과 경제성을 분석하였다.

빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템 설계는 건물에서 발생하는 오수 중 세면, 샤워용수를 중수로 선택하였으며 빗물과 연계하여 변기 세척용수로 공급하는 방안으로 택하였다. 건물의 좁은 공간을 이용하고 안정적인 수질과 수량을 확보하여 공급하기 위해 소규모 처리장치인 침지형 분리막과 오존산화장치를 오수 처리 방법으로 채택하였다.

빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템을 설계 후 서울대학교 39동에 설치하여 수량 모니터링 한 결과, 변기 세척용수 3,979 m³ 중 65%를 빗물 이용과 저농도 오수를 재이용함으로써 2,599 m³ (5,198천원)의 상수를 절약할 수 있었다.

또한 수질 모니터링 한 결과, 저농도 오수는 총대장균, 탁도, SS, BOD 4가지 항목에서 중수도 수질 기준을 만족하지 못했으며, 침지형 분리막과 미세기포 오존 산화 처리하였다. 빗물은 총대장균을 제외한 나머지 항목에서 수질 기준을 만족할 정도로 청정하여, 별도의 처리 과정 없이 오존 산화를 거친 처리수와 혼합하여 변기 세척용수로 공급하였다.

빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 경제성을 분석한 결과, 연간 5,000 m³의 빗물과 저농도 오수를 변기 세척용수로 재이용할 때, 사적 및 사회적 편익을 고려하여 11.6년에 투자비용을 회수 할 수 있었으며, B/C 비율은 1.11로 경

제성과 사업 타당성이 있는 것으로 나타났다. 빗물-저농도 오수 하이브리드 시스템의 적용으로 빗물과 중수의 장단점을 보완하여, 시설의 설치 및 유지비용을 절감할 뿐 아니라 물 재이용에 대한 불신을 저감할 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 16TBIP-C111792-01)

KSEE

References

1. Lee, J. Y., Kim, T. I., Kim, H. W. and Han, M. Y., "The Effect of Roofing Materials for Using Harvested Rainwater," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **34**(9), 623~629(2012).
2. Ministry of Environment, "Research for establishing basic plan of water reuse"(2011).
3. Kim, T. I., Shim, I. T. and Han, M. Y., "Rainwater-graywater Hybrid system for improving water self-sufficiency in the building," 2015 Korean society of environmental engineers conference(2015).
4. Kim, K. Y., Park, H. J., Kim, T. I. and Han, M. Y., "Evaluation of Stored Rainwater Quality and Economic Efficiency at Yangdo Elementary Rainwater Harvesting System," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(5), 333~341(2014).
5. Kim, J. H., "Study on the improvement of Smart Water Grid in Korea from case study in Australia and Singapore," *Water Eng. Res.*, **44**(8), 19~24(2011).
6. Kim, H. S., Lee, D. J., Kim, J. H. and Jung, K. S., "End-use Analysis of Household Water by Metering," *Korean Soc. Civil Eng.*, **28**(5B), 595~601(2008).
7. Ha, I. S., "The need for the wastewater reuse system," *Magazine of the SAREK*, **4**(2), 48~61(2012).
8. Jang, M. S., Kim, J. S. and Lee, J. W., "Prospect and Present Status of MBR Technology for Advanced Wastewater Treatment," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **30**(1), 15~20(2008).
9. Kim, M. K. and Han, M. Y., "Composition and distribution of bacteria in an operating rainwater harvestign tank," *Water Sci. Technol.*, **63**(7), 1524~1530(2011).
10. Ham, M. Y., Kim, Y. W. and Kim, S. R., "Rainwater using system in SNU dormitory," Rainwater harvesting international workshop, UNEP-SNU rainwater research center, pp. 105~112.
11. Ministry of Land "Life cycle cost (LCC) analysis and evaluation"(2008).
12. Roh, S. H. and Min, D. K., "Study on cost - benefit analysis of wastewater reclamation and reusing system" *The Assoc. Korean Economic Studies*, **10**(2), 33~54(2001).
13. Ministry of Environment "A Study on the Policy Plan for Expanding the reuse water"(1999).