

기후변화 대응을 위한 수처리 여과시스템 선정 방안 연구

황윤빈 · 박기학*[†]

*주) 에코피엔지

Study on Selection of Water Treatment Filtration System to Cope with Climate Change

Yun-Bin Hwang, Ki-Hak Park*[†]

*Eco P&G, Inc.

ABSTRACT

The problem of water shortages and water related disasters caused by climate change has increased the seriousness of water problems and the importance of water treatment technology capable of securing clean water is expanding. In this study, we analyzed not only the water pollutant generated by the filtration system technology of various water treatment technologies but also the indirect greenhouse gas emissions generation, and analyzed the influence on the environment. The subjects of study are Fabric Filter, Reverse Osmosis System and Pressurized Microfiltration Device which are widely used for water treatment and we analyzed the impact on the environment using the Life Cycle Assessment (LCA) method using the electricity amount necessary for use, the water purification efficiency, the throughput per ton and the cost. The amount of greenhouse gas generated when the Pressurized Microfiltration Device operates for 1 year is 2.15E+04 kg CO₂-eq., Fabric Filter is 3.29E+04 kg CO₂-eq., and Reverse Osmosis System is 1.68E+05 kg CO₂-eq. As a result of analyzing the amount of greenhouse gas generated at the time of purifying 1 ton of the Pressurized Microfiltration Device and the conventional filtration system, the Pressurized Microfiltration Device was 20.5 g CO₂-eq., Fabric Filter was 34.7 g CO₂-eq., and Reverse Osmosis System was 191.7 g CO₂-eq. The amount of greenhouse gas generated was calculated to be 41.0% less than that of the Fabric Filter by the Pressurized Microfiltration Device and 89.3% less than the Reverse Osmosis System. From the viewpoint of climate change, it is necessary to select a filtration system that takes climate change into account, not from the viewpoint of water quality removal efficiency and economic efficiency according to future water treatment applications, and it is necessary to select a water treatment filtration system more researches and improvements will be made for.

Key words: Greenhouse Gases, Water Treatment LCA (Life Cycle Assessment), Pressurized Microfiltration device, Filtration System

1. 서 론

세계 인구 증가 및 산업화에 의한 기후변화는 남극의 오존을 감소시키고 대기 중의 이산화탄소를 증가시켜 지구온난화를 일으키고 있으며, 다양한 환경문제가 발생하고 있다. 기후변화에 의해 발생하는 물 부족과 물 관련 재난·재해 문제는 물 문제의 심각성을 증대시키고 있을 뿐만 아니라 가뭄, 태풍, 홍수의 경우 수해지역은 각종 병균으로 오염되어 전염병

을 일으킨다.) 이러한 수인성 전염병은 오염된 물로 전파되어 2차적인 재해를 야기한다. 따라서 깨끗한 물을 확보 할 수 있는 수처리 기술의 중요성이 확대되고 있는 실정이며, 수처리 기술의 개발은 지속적으로 연구개발이 이루어지고 있다. 본 연구에서 분석 대상인 가압필터 여과장치는 여러 가지 수처리 장치 중 여과장치 시스템으로서 다양한 원수를 정화할 수 있으며 비상급수시설로서의 사용과 재해발생지역의 수인성 전염병을 예방하기 위한 생활용수를 공급할 수 있다. 가압

[†]Corresponding author: Ki-Hak Park, #201, College of Engineering BLDG No.1, 17, Wuan-gil, Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, (18323), Korea Tel: 031-220-2146, Fax: 031-220-2533, Email: parkihak@naver.com

Received December 21, 2017 / Revised January 17, 2018 / Accepted February 02, 2018

1) The Export-Import Bank of Korea (2014)

필터 여과장치는 액체 펌프 또는 압축공기를 사용하여 대기압 이상의 압력을 원액 측에 걸어주어 여과하는 방식으로, 여과 과정에서 다공성 매질인 사각여과포에 구조토, 제올라이트, 산성백토, 활성탄 등의 여재를 흡착시켜 여과를 위한 필터막으로 활용한다. 비슷한 여과 원리로 기존 수처리에서 사용되고 있는 섬유상여과기와 역삼투여과기 등이 있다.

본 연구에서는 가압필터 여과장치와 시중에서 수처리에 사용되고 있는 섬유상여과기와 역삼투여과기의 성능을 환경성 평가를 통해 비교 분석하였다. 환경성 평가는 각 여과시스템들의 운영에 따른 수질측정결과와 에너지 사용량을 이용하여 전과정평가 기법을 통해 분석하였다. 전과정평가의 부영양화 지수와 지구온난화 지수를 통해 수질오염물질 제거량과 온실가스 발생량을 도출하고, 에너지 사용과 수처리에 따른 CO₂ 상당량을 분석하였다. 또한 가압필터 여과장치가 기후변화를 대응하기 위한 기술로서 기존 여과시스템보다 운영 중에 온실가스 발생량이 얼마나 적게 발생하는지 알아보고자 한다.

2. 연구대상

2.1 가압필터 여과장치의 개요

가압 여과란 액체 펌프 또는 압축공기를 사용하여 대기압 이상의 압력을 원액 측에 걸어 주어 여과하는 방식으로, 여과 과정에서 다공성 매질인 여과포에 구조토, 제올라이트, 산성백토, 활성탄 등의 여재를 흡착시켜 여과를 위한 필터(막)로 활용한다.

필터 막여과는 분리막을 화학반응이나, 모양변화를 수반하지 않고 압력차로서 물을 막에 통과시킴으로서 현탁물질이나 콜로이드를 물리적으로 분리하는 공정이다. 막여과 고도정수 처리는 막여과를 핵심단위공정으로 분리막의 성능향상 및 제거능 보안을 위한 전처리 및 후처리 공정이 조합된 정수처리 기술이다.

수영장에서 가장 보편적으로 사용되는 다층복합여과기는 여러 층의 적재층을 통하여 여과되는 방식이나 크기에 비해 여과능력이 떨어져 수질관리에 어려움을 겪었으나, 가압필터 여과방식은 특히 구조토 여과포의 여과능력, 여과용량이 뛰어나 보다 수처리가 용이하게 되었다.

기술적 측면으로 여과효율이 기존보다 월등히 향상되어졌는데 이는 단계별 여과포에 여재(구조토)를 분말상태로 투입하여 보다 신속한 여재의 교체 및 처리를 가능케 하기 때문이다. 그리고 중력식 방식이 아닌 가압식인

순환 펌프를 통해 보다 대량의 폐수를 신속히 처리할 수 있다. 또한 역세척에 관하여 기존의 적층방식은 역세척을 하게 되면 여재가 서로 혼합되어 여과효율이 떨어진다는 단점이 있었으나 가압필터 여과장치는 물의 방향을 반대로 하여 고정된 여과포에 도포된 여재와 이물질이 함께 역세척되어 슬러지로 배출함에 따라 기존의 문제였던 역세척 효율의 향상을 도모할 수 있게 되었다.

기존의 방식의 다양한 여재를 적층하는 것과 달리 가압필터 여과방식은 여과판에 단계별 여과포를 고정하고 여재를 투입하여 도포하는 방식이다. 또한 기존의 중력여과방식과는 다르게 순환 펌프를 통해 가압식으로 여과를 하는 원리가 이와 다른 점이다.

2.2 기존 여과시스템의 비교

본 연구에서의 여과시스템 비교 대상은 여과 원리가 같으며, 현재 수처리에 많이 사용되는 섬유상 여과기와 역삼투여과기를 대상으로 하였다.

섬유상 여과기는 처리수의 농도 및 상태에 따라 여과기 내에 섬유다발의 공극을 조절하며, 역세척 시 섬유다발의 이완으로 역세척을 실시한다. 부하변동에 대한 대응성이 우수하며 고장시 단위기별 보수가 가능하지만 손실수두가 높아 동력소비가 큰 단점을 가지고 있다. 섬유상여과기의 1일 가동시 필요한 소비 전력량은 182 kWh이며, 톤당 처리비용은 13 원이다. 수질제거 처리효율은 부유물질(Suspended solids, SS)은 50~80%, 비용해성 화학적 산소 요구량(Insoluble Chemical Oxygen Demand, ICOD)은 0~2%의 효율을 보이고 있다.

역삼투 여과기는 초미세공극으로 대부분의 오염물질을 제거하지만 그에 따라 여과막의 막힘 현상이 심하고 여과막의 교체주기가 짧으며, 유입수의 수질이 높으면 여과막의 폐색이 급격히 증가하므로 오염부하를 경감시키기 위해 전처리 시설이 반드시 필요하다. 또한 단위면적당 처리량이 작기 때문에 대용량의 처리 시 부지설치면적이 매우 크며, 전력소모와 비용이 크다. 역삼투여과기의 1일 가동 시 필요한 소비 전력량은 929 kWh이며, 톤당 처리비용은 66원이다. 수질제거 처리효율은 SS는 99% 이상, ICOD는 5~10% 효율을 보이고 있다.

가압필터 여과장치는 여과판을 다층으로 적재하여 여과면적을 획기적으로 증대시킴으로서 장치가 콤팩트하고 부지설치면적이 매우 작으며, 기존 기술의 여과공극이 10~20 μm인 것에 비하여 본 기술은 여과포에 구조토를 프리

코팅 함으로서 미세여과 (여과공극 0.5 μm)가 가능하여 수처리 성능이 매우 뛰어나다. 또한 여과포가 아닌 구조가 제거를 현상을 일으키기 때문에 역세 시 코팅된 구조와 제거된 오염물질이 같이 탈리되어 제거되고 구조를 재코팅 후 운전하는 방식으로서 여과포의 교체가 필요 없다. 가압필터 여과장치의 1일 가동 시 필요한 소비 전력량은 119 kWh이며, 톤당 처리비용은 4원이다. 수질제거 처리효율은 SS는 70~80%, ICOD는 3~6% 효율을 보이고 있다.

가압필터 여과장치와 기존 기술인 섬유상여과기와 역삼투 여과기의 소비 전력량과 톤당처리비용의 비교에서는 가압필터 여과장치가 우수하다. 수질 제거 처리효율에서는 각 여과기의 특성이 반영이 되어 효율이 다르기 때문에 수질 처리를 목적으로 어떤 장치를 사용할 것인지에 대한 선정이 매우 중요하다. 하지만 현재 기후변화로 인하여 물 문제와 물 재난이 발생하고 있는 현시점에서 수질제거 효율과 경제성의 관점이 아닌 기후변화 관점에서 살펴보고 장치를 선정해야 한다. 본 연구에서는 각 여과시스템의 수질처리량과 온실가스 발생량을 분석하여, 수처리 뿐만 아니라 기후변화에 능동적으로 대응할 수 있는 장치의 선택을 위해 각 여과시스템의 환경영향을 분석하고자한다.

3. 연구방법

3.1 연구범위

전과정평가를 위해선 제품이나 기술의 자재의 생산, 수송, 제작 그리고 제품의 사용과 폐기단계 까지 고려하여 분석이 이루어져야 한다. 하지만 본 연구에서는 여과시스템들의 수질 정화중에 발생하는 온실가스와 제거되는 오염물질만을 고려하기 때문에 제품의 운영 단계만을 시스템 경계로 설정하여 분석하였다. 목록 분석에서는 제거 특성 중 여과되면서 걸러지는 ICOD와 전력량, 처리용량을 이용하여 분석하였다. 전과정영향평가 방법은 영향평가 방법 목록 중 오염물질제거효과를 보기 위하여 부영양화 결과 값을 분석하였으며, 온실가스 발생량을 분석하기 위해 지구온난화 결과 값을 비교하였다.

3.2 시스템 경계

가압필터 여과장치의 처리용량은 2,880 m^3/d 이며 1년 가동을 고려하여 기능 단위는 원수 1,051,200 ton 처리이며, 기준 흐름은 원수 1,051,200 ton 이다. 여과장치는 수처리 인프라 시설로서 제작단계와 운영단계로 크게 나눌 수 있으며, 시스

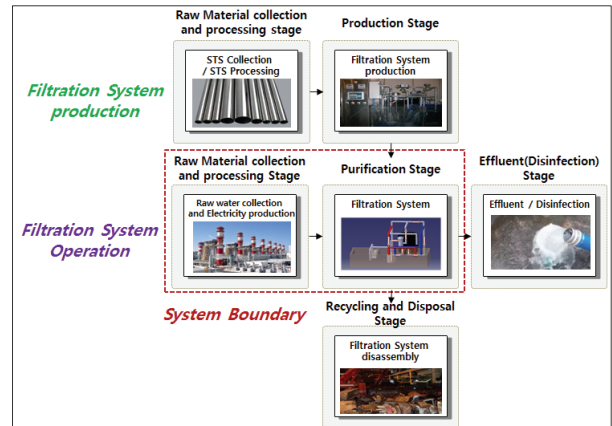


Fig. 1. System boundary set-up.

템 경계는 여과장치의 운영만을 고려하였다.

4. 연구결과

4.1 환경영향 분석 수행

가압필터 여과장치와 기존 여과시스템의 운영 단계에 대한 전과정평가를 수행한 결과 다음 Table 1.과 같이 특성화 결과 값이 나타났다. 환경영향범주는 부영양화, 지구온난화 등 8가지이며, 운영중에 발생하는 오염물질 발생량을 계산하기 위해 부영양화지수와 지구온난화 지수를 중심으로 분석을 진행하였다. 또한 Fig. 2.와 같이 가중화 결과 값을 이용하여 전체 환경영향범주를 지수화하고, 수질개선과 기후변화뿐만 아니라 전체 환경영향을 비교해보았다.

부영양화 결과에서는 가압필터 여과장치가 2.18E+01 kg $\text{PO}_4^{3-}\text{-eq.}$, 섬유상여과기는 1.28E+01 kg $\text{PO}_4^{3-}\text{-eq.}$, 역삼투여과기는 7.86E+01 kg $\text{PO}_4^{3-}\text{-eq.}$ 의 결과 값이 나타났다. 지구온난화 결과 값은 2.15E+04 kg $\text{CO}_2\text{-eq.}$, 섬유상여과기가 3.29E+04 kg $\text{CO}_2\text{-eq.}$, 역삼투여과기가 1.68E+05 kg $\text{CO}_2\text{-eq.}$ 로 나타났으며, 가압필터 여과장치가 지구온난화 지수가 상대적으로 적은 것으로 분석되었다.

전과정평가 가중화 결과에서는 가압필터 여과장치가 역삼투여과기보다 87% 환경영향이 적게 발생하는 것으로 나타났고, 섬유상여과기보다 33% 환경영향 적었다.

4.2 에너지 사용에 따른 온실가스 발생량 분석

가압필터 여과장치가 1년 동안 가동할 때 발생하는 온실가스의 양은 Fig. 3.과 같이 2.15E+04 kg $\text{CO}_2\text{-eq.}$, 섬유상

Table 1. Life Cycle Assessment Characterization result

Environmental Impact Category (Unit)	Pressurized Microfiltration Device	Fabric Filter	Reverse Osmosis System
Abiotic Depletion Potential (1/yr)	7.49E+01	1.15E+02	5.85E+02
Acidification Potential (kg SO ₂ -eq.)	3.64E+01	5.56E+01	2.84E+02
Eutrophication Potential (kg PO₄³⁻-eq.)	2.18E+01	1.28E+01	7.86E+01
Global Warming Potential (kg CO₂-eq.)	2.15E+04	3.29E+04	1.68E+05
Human Toxicity Potential (kg 1,4 DCB-eq.)	4.81E+00	7.35E+00	3.75E+01
Ozone layer depletion Potential (kg CFC 11-eq.)	4.95E-07	7.57E-07	3.87E-06
Photochemical Ozone Creation Potential (kg ethylene-eq.)	1.49E+01	2.28E+01	1.16E+02
Terrestrial Ecotoxicity Potential (kg 1,4 DCB-eq.)	8.69E-07	1.33E-06	6.78E-06

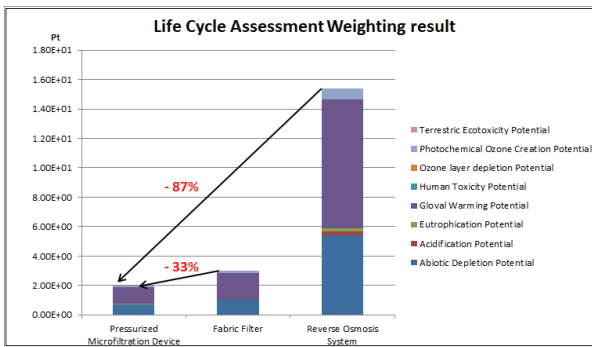


Fig. 2. Life Cycle Assessment Weighting result.

여과기는 3.29E+04 kg CO₂-eq., 역삼투여과기는 1.68E+05 kg CO₂-eq.로 산출되었다. 가압필터 여과장치가 섬유상여과기 대비 65.4%, 역삼투여과기 대비 12.8% 만큼 온실가

스를 적게 발생시키며, 기존 여과시스템보다 기후변화 대응에 긍정적인 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

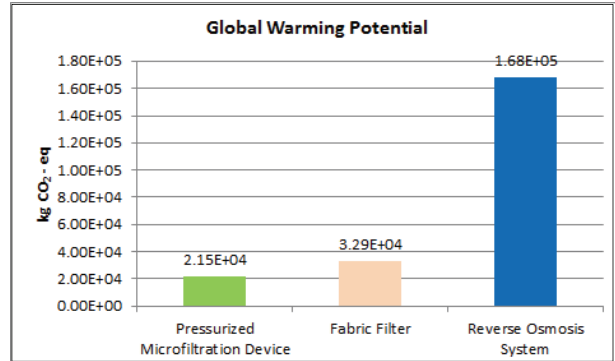


Fig. 3. GHG emissions from Filtration Systems.

4.3 오염물질 제거에 따른 온실가스 발생량 분석

전과정평가 수행으로 얻어진 특성화 결과값을 이용하여 오염물질 (부영양화) 1 kg 제거당 온실가스 발생량과 전력 사용량을 Fig. 4와 같이 분석하였다. 가압필터 여과장치의 오염물질 1 kg 제거할 때 사용되는 전력량은 1,997 kWh이며, 섬유상여과기보다 3,198 kWh, 역삼투여과기보다 2,320 kWh 적은 양의 전기가 필요한 것으로 나타났다. 가압필터 여과장치의 오염물질 1 kg 제거당 온실가스 발생량은 9.89E+02 kg, 섬유상여과기는 2.57E+03 kg, 역삼투여과기는 2.14E+03 kg으로 산출되었다. 섬유상여과기가 역삼투여과기보다 온실가스 발생량이 많은 것은 시스템의 수질제거특성 효율의 차이로 인한 것이다.

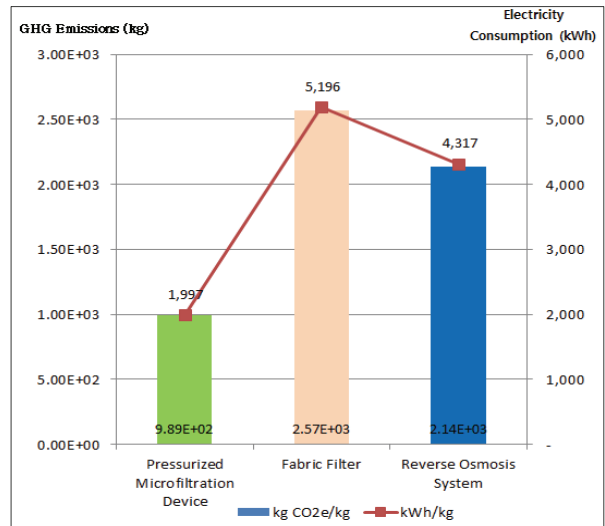


Fig. 4. Electricity consumption and GHG emissions due to pollutant removal.

가압필터 여과장치와 기존 여과시스템의 1톤 정화 시 발생하는 온실가스 양을 Fig. 5와 같이 분석하였다. 가압필터 여과장치는 20.5 g CO₂-eq.로 가장 적은 양을 발생하였으며, 섬유상여과기는 34.7 g CO₂-eq., 역삼투여과기는 191.7 g CO₂-eq. 발생하는 것으로 나타났다. 온실가스 발생량이 가압필터 여과장치가 섬유상여과기보다 41.0% 적게 산출되었고, 역삼투여과기보다 89.3% 적은 것으로 분석되었다. Fig. 3의 결과와 비슷한 양상을 보이지만 처리용량에서 가압필터 여과장치가 더 우수하기 때문에 기존 여과시스템보다 효율이 더 높게 나타났다.

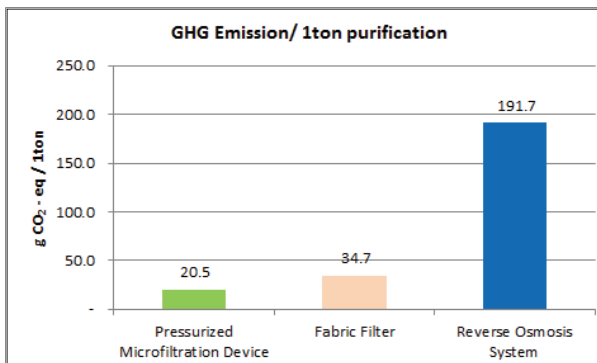


Fig. 5. GHG emissions from 1 ton purification.

5. 결 론

기후변화에 따라 미래사회는 기후와 에너지로 개편되는 세계로 변화하고 있으며, 전 세계적으로 물산업은 인구 증가 및 산업 발전과 더불어 꾸준히 성장하고 있다. 하지만 기후변화로 인하여 물 문제와 물 재난이 지속적으로 발생되고 있으며, 안정적인 수처리와 수자원 확보가 시급한 시점이다. 본 연구에서는 수질제거 효율과 경제성 관점뿐만 아니라 물 문제와 물재난의 원인이 되고 있는 기후변화를 대응하면서 깨끗한 물 공급을 하는 여과시스템의 선택 방안을 제시하고자 한다. 여과시스템의 대상은 가압필터 여과장치, 섬유상여과기, 역삼투여과기를 비교하였으며, 기후변화 대응 측면에서 환경영향이 얼마나 발생하는지 분석하였다.

본 연구는 가압필터 여과장치의 전과정평가 기법을 적용하여 운영 중에 발생하는 온실가스 발생량과 제거되는 수질오염물질량을 기존 여과시스템과 비교 분석하였다. 각 여과시스템을 1년 동안 운영하였을 때 발생하는 환경영향 결과, 가압필터 여과장치가 2.18E+01 kg PO₄³⁻-eq., 섬

유상여과기는 1.28E+01 kg PO₄³⁻-eq., 역삼투여과기는 7.86E+01 kg PO₄³⁻-eq.의 결과 값이 나타났다. 수질제거에 따른 부영양화 값이 섬유상여과기보다 가압필터 여과장치가 높게 나왔다. 하지만 오염물질 제거에 따른 온실가스 발생량은 오염물질 1 kg 제거 시 온실가스 발생량은 9.89E+02 kg, 섬유상여과기는 2.57E+03 kg, 역삼투여과기는 2.14E+03 kg 으로 산출되어 가압필터 여과장치가 온실가스 발생량이 기존 여과시스템보다 적은 것으로 평가되었다. 이는 가압필터 여과장치와 섬유상여과기의 전력량의 차이로 인해 기인한 것으로 분석되었으며, 운영 기간이 길어질수록 가압필터 여과장치의 효율과 환경성은 더 높게 나타날 것이다. 본 연구를 통해 처리용량별 온실가스 발생량을 분석하였을 때 가압필터 여과장치가 1톤 수처리 시 20.5 g CO₂-eq.로 가장 적은 온실가스 발생량을 나타냈으며, 섬유상여과기보다 41.0%, 역삼투여과기보다 89.3% 적게 발생함을 알 수 있었다. 가압필터 여과장치는 기존 여과시스템보다 기후변화에 능동적으로 대처 할 수 있으며, 유지관리가 용이하고 경제성 면에서도 우수한 것으로 나타났다.

가압필터 여과장치와 역삼투여과기를 1년동안 가동하였을 때 온실가스 발생량의 차이는 146.4톤이다. 발생하는 온실가스의 차이를 비용으로 환산하면 약 410만원이며, 이 비용은 역삼투여과기를 운영 중에 가압필터 여과장치로 교체 시 발생할 수 있는 편익이다.

향후 수질정화가 필요한 곳에서는 수질 특성과 수질 정화에 따라 발생하는 온실가스 양을 고려하여 기후변화에 능동적으로 대응할 수 있는 장치 선정이 이루어져야 한다. 또한 기후변화에 대응하고 친환경적이며 안정적인 수자원 확보 및 관리가 가능하기 위해서 여과시스템에 대한 더 많은 연구와 개선이 이루어져야 할 것이다.

사 사

본 연구는 국토교통부의 국토교통과학기술진흥원에 지원을 받아 “국토교통기술사업화 (17TBIP-C111190-02-000000)”을 통해 수행되었으며 연구에 힘써주신 관계자분들에게 감사드립니다.

REFERENCES

The Export-Import Bank of Korea, 2014 Overseas expansion strategy of domestic water industry.

SBA, 2010, Performance improvement and market diversification strategy consulting for Pressurized Microfiltration Device.

K-1 Ecotech, 2010, High-efficiency microfiltration system using pressurized filtration system.

K-1 Ecotech, 2012, Pressurized high-efficiency microfiltration device.