

빗물여과를 위한 침지식 정밀여과막의 여과특성 해석

조형락·정정우·손진식·이상호[†]·채수권*

국민대학교, *울지대학교

(2014년 2월 3일 접수, 2014년 2월 20일 수정, 2014년 2월 20일 채택)

Analysis of Filtration Characteristics of Submerged Microfiltration Membranes for Rainwater Filtration

Hyeongrak Cho, Jungwoo Jung, Jinsik Sohn, Sangho Lee[†], and Soo Kwon Chae*

Kookmin University, *Eulji University

(Received February 3, 2014, Revised February 20, 2014, Accepted February 20, 2014)

요약: 지붕이나 여러 가지 방법과 장소에서 수집된 빗물을 처리하면 직접적 간접적으로 유익하게 사용될 수 있다. 이러한 빗물은 점점 더 높은 품질을 위해 고려되고 있고, 분리막은 이러한 빗물 처리를 위한 중요한 기술이다. 특히, 분리막은 고품질 물 생산, 높은 집적도 및 낮은 에너지 소비 등의 장점이 있다. 그럼에도 불구하고, 막오염은 수처리 및 폐수 재활용 부분과 마찬가지로 심각한 문제로 간주되고 있다. 본 연구에서는 빗물 처리에 정밀여과(MF)막을 적용하였고, 저압 자외선(LPUV) 처리를 정밀여과막의 전처리로 사용하였다. 유기물에 대한 UV의 영향을 정량화하기 위해 총 유기탄소(TOC) 및 UV 흡광도(UVA)를 모두 측정하였다. 또한 UV 전처리 효과에 따른 막의 오염 정도를 조사하였다. LPUV 전처리를 하고 실험을 한 결과 조류에 의해 오염된 빗물에서 막의 오염을 제어하는데 효과적임을 알 수 있었으며, 이것은 UV 처리 후 유기물의 양이 감소하고 특성이 변화하기 때문이었다. 따라서 UV/MF 처리는 마이크로 워터 그리드 시스템과 같은 수처리를 위한 유망한 옵션이 될 수 있을 것으로 생각된다.

Abstract: Rainwater harvesting is a process by which rainwater collected from rooftop or other catchment is purified so that the water can be directly or indirectly used by human beings for beneficial uses. As rainwater is increasingly considered for high quality purposes, membranes have gained an important place in rainwater treatment. It has advantages such as the production of high quality water, small footprint, and affordable energy consumption. Nevertheless, membrane fouling is regarded as a serious problem similar to the cases of water treatment and wastewater reclamation. In this study, we applied microfiltration (MF) membranes for rainwater treatment. In addition, a low pressure ultraviolet (UV) process was also use as a pretreatment to control notonly. To quantify the effect of UV on organic matters, both total organic carbon (TOC) and UV absorbance (UVA) were measured. Moreover, the effect of UV pretreatment on membrane fouling was investigated. Experimental results indicated that the pretreatment of membranes using LPUV was effective to control fouling of MF membranes only when the rainwater was contaminated by algae. This was attributed the reduction and modification of organics after UV treatments. It is likely that the UV/MF process is a promising option for water treatment in decentralized water treatment such as micro water grid systems.

Keywords: rainwater harvesting, microfiltration, ultraviolet irradiation, pretreatment, fouling

1. 서론

최근 물 부족이 심화됨에 따라 기존 수자원의 한계를

극복하기 위한 수단으로 대체수자원의 개발이 활발하게 진행되고 있다[1,2]. 대체수자원은 기후변화 등의 환경변화에 큰 영향을 받지 않고 안정적으로 물을 확보할 수 있는 다양한 방법을 포함하고 있으며, 대표적으로는 해수담수화, 하폐수 재이용, 그리고 빗물이용 등이 있다

[†]교신저자(e-mail: sanghlee@kookmin.ac.kr)

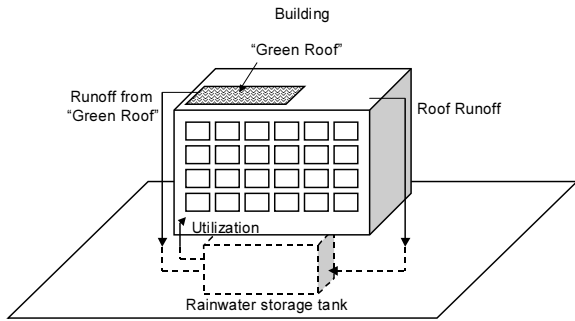


Fig. 1. Rainwater harvesting in buildings.

[3,4]. 특히 빗물이용은 건물과 소규모 단지에서 분산형으로 물을 공급하고 관리할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 물 부족 외에도 도시지역에서의 침수문제와 물순환 왜곡 등의 문제를 해결할 수 있는 가능성을 가지고 있다[4-7]. Fig. 1은 일반적인 빗물이용시설의 개념도를 보여주고 있다.

또한 빗물이용은 다른 대체수자원 확보방법보다 낮은 비용으로 물을 생산할 수 있다는 장점을 가진다 [8]. 높은 에너지를 필요로 하는 해수담수화와 다양한 종류의 오염물질을 처리해야 하는 하폐수 재이용과 달리 빗물이용은 간단한 여과와 소독으로 비음용 목적의 도시용수를 확보할 수 있다[6,9]. 그러나 도시지역에서 빗물을 이용하는 경우에는 여러가지 종류의 오염물질이 포함될 수 있으므로 이에 대한 경제적이고 효율적인 처리방법의 개발이 필요한 실정이다[10,11].

최근들어 분리막이 수처리에 도입되어, 상하수도 분야 외에도 해수담수화와 하폐수 재이용 분야에서도 활발하게 적용되고 있다[12]. 분리막 공정은 높은 처리효율과 집적도를 가지는 장점을 가지고 있으며, 자동화가 용이하고, 특히 분산형 수처리에 적합한 특징을 가진다. 그러나 아직까지 분리막을 빗물이용에 적용하는 연구는 거의 진행된 바 없다. 이는 정밀여과와 같은 분리막 공정을 적용하는 경우 높은 초기투자비와 함께 막오염으로 인한 운전비용의 상승이 발생하기 때문이다.

따라서, 본 연구는 빗물이용에 정밀여과 분리막을 적용하기 위한 실험적 검토를 수행하였다. 다양한 종류의 빗물에 대하여 분리막의 여과특성을 비교하였으며, 분리막의 종류에 따른 처리효율도 같이 평가하였다. 또한 빗물의 특성에 따라 막오염 메커니즘이 어떻게 달라지는지에 대하여도 연구하였다. 또한 이러한 연구결과를 바탕으로 하여 빗물처리에 적용되는 분리막 공정의 막

Table 1. Average Water Quality of Normal Rainwater Samples

	Supernatant from Storage Tank
Turbidity (NTU)	0.93
pH	6.51
Conductivity (μS/cm)	36.9
COD (mg/L)	2.9
UV254 (ABS)	0.018
Total coliform group (unit/mL)	57
TOC (mg/L)	0.9
Total bacteria (unit/mL)	193

오염을 제어하기 위한 자외선 소독공정의 적용을 시도하였다.

2. 분석방법

실험에 사용한 빗물은 서울시 소재의 대학교 지붕면(서울시 내 소재)에서 수집하였다. 빗물의 수질을 시료를 얻는 시점에 따라 달라지므로, 이에 따라서 i) 초기우수(강우 후 20분 이내)와 ii) 일반빗물(강우 후 20분 이후)로 구분하였다. 또한 일반빗물의 경우 장기저류에 의한 효과를 관찰하기 위하여 바로 냉장고에서 보관한 빗물과 야외에서 7일간 방치한 빗물을 구분하여 유입수로 사용하였다. Table 1은 수집한 빗물의 수질을 나타내고 있다.

분리막은 3가지 종류를 사용하였으며, PVDF재질의 0.1 μm 공칭공경을 가지는 중공사 분리막을 주로 사용하였다. 비교를 위하여 기존의 빗물처리에 사용되고 있는 2가지 종류의 금속막(공칭공경 1 μm와 5 μm)을 같이 사용하였다. 분리막 실험은 Fig. 2와 같은 침식식 분리막 실험장치를 이용하여 수행하였다. 본 실험장치에서 투과수의 플럭스는 일정하게 하고 막간차압의 변화를 전자압력계를 이용하여 연속적으로 모니터링한 후, 이를 컴퓨터에 일정시간 간격으로 기록하였다. 비록 실험장치에는 공기주입을 위한 폭기장치를 설치하였으나, 본 실험에서는 무폭기 운전의 가능성을 확인하기 위하여 침전물이 발생하지 않는 정도의 수준으로 용액을 교반하며 (200 rpm 이하) 여과를 수행하였다.

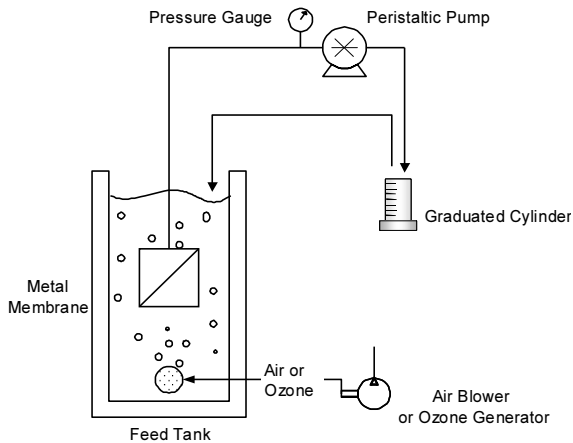


Fig. 2. Schematics of membrane filtration system.

Hach사의 탁도계와 DR-4000 분석장치를 이용하여 유입수의 수질을 분석하였으며[13], 총유기탄소는 Sievers사의 Laboratory TOC Analyzer를 사용하여 분석하였다. UV장치의 경우, 국산((주)그린피아)에서 제조된 Low-pressure-UV (16 W)장치를 사용하였다. UV 조사 시간은 각각 10, 15, 20초의 조건에서 실험을 수행한 후 결과를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분리막의 종류에 따른 여과특성

먼저 실험에 사용한 3가지 분리막의 여과특성을 실험을 통하여 비교하였다. Fig. 3은 고분자 분리막과 금속막의 막간차압 변화를 나타내고 있다. 고분자 분리막의 경우 100 L/m²-hr의 조건에서 여과를 수행하였으며, 금속막은 1,000 L/m²-hr의 조건에서 여과를 수행하였다. 플럭스 조건이 상이하였으나 초기 막간차압은 유사하게 나타났으며, 이는 금속막의 경우 상대적으로 큰 세공크기로 인하여 높은 투과율을 가지기 때문이었다. 막간차압의 변화를 보면 고분자 막과 1 μm의 금속막은 60분간의 단기실험에서 거의 변화가 없었으나 5 μm의 금속막에서는 막간차압의 증가가 관찰되었다. 실제로 유입수를 Malvern사의 Particle Size Analyzer로 분석해본 결과 유입수 내의 입자 평균크기가 약 10 μm이었으며, 이로 인하여 유사한 크기의 세공을 가진 5 μm의 금속막이 폐색된 것으로 추정할 수 있었다.

비록 금속막이 더 높은 투과성을 보였으나, 처리수의 수질을 비교해보면 탁도 제거율이 상대적으로 낮았으

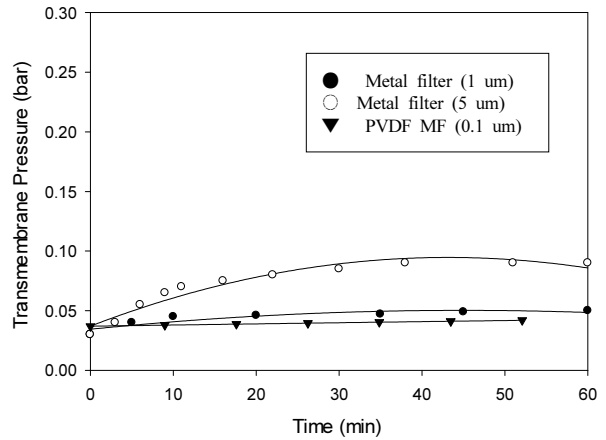


Fig. 3. Comparison of different membranes for rainwater filtration (Feed: Normal rainwater).

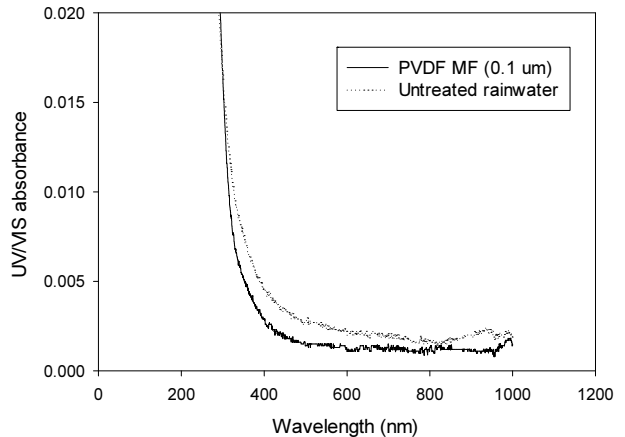


Fig. 4. Comparison of UV absorbance for feed water and PVDF MF permeate (Feed: Normal rainwater).

므로, 이후 실험에서는 고분자 분리막을 사용하였다. Fig. 4는 유입수(일반 빗물)와 처리수의 UV 흡광도를 비교한 것이다. 처리 전에 비하여 처리 후에 UV 흡광도가 감소한 것을 볼 수 있다. UV 흡광도는 물속의 부유입자 뿐 아니라 용존유기물과도 연관성이 있으므로, 고분자막 처리를 통해 유기물의 일부를 제거할 수 있음을 확인하는 결과라고 할 수 있다. 실제로 처리 전후의 유기물 농도를 비교한 결과 약 30%의 제거율을 얻을 수 있었다.

3.2. 유입수의 종류에 따른 여과특성

다음으로, 유입수의 종류에 따라서 고분자 분리막의 여과특성이 어떻게 변하는지를 조사하였다. 앞에서 기

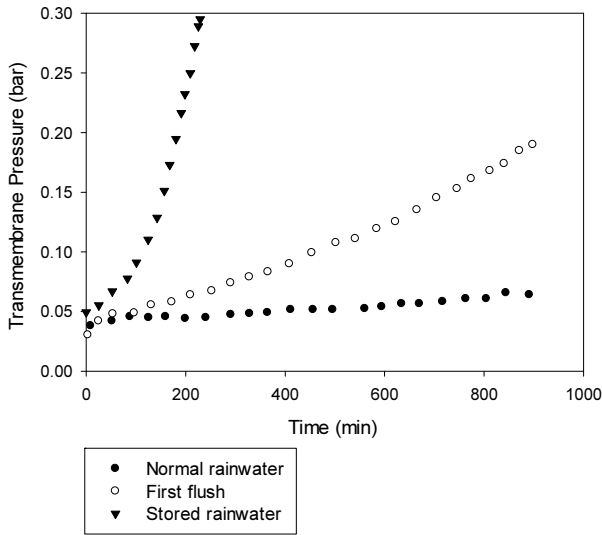


Fig. 5. Comparison of transmembrane pressure in micro-filtration of three types of rainwaters (Membrane: 0.1 um PVDF).

술한 3가지 종류의 빗물에 대한 여과실험결과는 Fig.5에 나타나 있다. 초기빗물을 제외한 일반 빗물을 이용하여 여과를 하는 경우 900분간의 운전에도 막간차압의 변화가 크지 않은 것을 알 수 있다. 반면에 초기빗물(First flush)의 경우 일반빗물보다 막간차압의 증가속도가 빠르게 나타났으며, 야외에서 방치한 빗물은 이보다 높은 막간차압의 증가를 보였다. 야외에 방치한 빗물의 경우 녹조가 발생하였으며, 이를 사전에 제거하지 않고 여과를 수행하였으므로 막이 용이하게 오염된 것으로 볼 수 있다. 또한 초기빗물은 일반빗물에 비하여 탁도가 높아서(1 NTU 이상) 막오염이 진행된 것으로 추정되었다.

Fig. 6은 앞의 결과를 보다 자세히 살펴보기 위하여 막의 투과도($J/\Delta P$)를 초기 투과도($J/\Delta P_0$)로 나눈 값으로 그래프를 표시하였다. 앞서 막간차압의 증가가 크지 않았던 일반빗물의 경우에도 투과도는 초기에 비하여 약 40%가 감소된 것을 볼 수 있다. 반면에 초기빗물과 방치된 빗물의 경우 각각 900분과 220분 후에는 투과도가 80% 이상 감소하여 더 이상 실험을 진행할 수 없는 것을 알 수 있다. 따라서 정밀분리막으로 빗물을 처리하고자 할 때 유입수의 수질이 막의 효율에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

3.3. 막오염 메커니즘 분석

유입수의 종류에 따라서 고분자 분리막의 막오염이

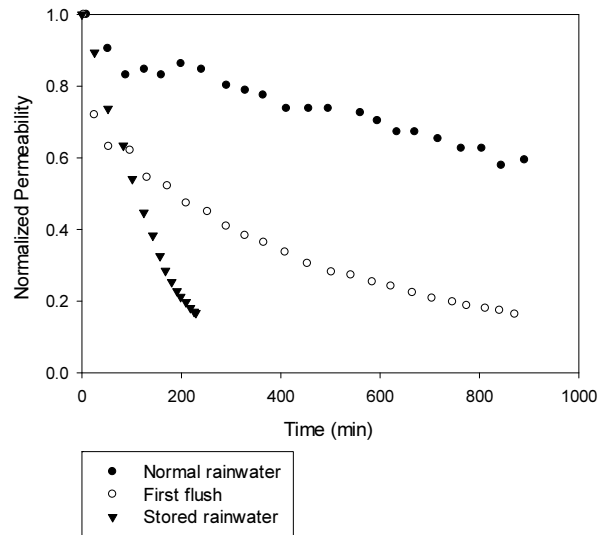


Fig. 6. Comparison of normalized permeability in micro-filtration of three types of rainwaters (Membrane: 0.1 um PVDF).

어떤 기작으로 진행되는지 규명하기 위하여 여과모델을 이용한 분석을 수행하였다. 이에 따르면 정유량 방식의 여과에서 완전막힘(complete blocking), 표준막힘(standard blocking), 케이크층 형성(cake formation)에 의한 막오염은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[12].

$$J^* = (1 - k_b t)^2 \tag{1}$$

$$J^* = e^{-k_s t} \tag{2}$$

$$J^* = \frac{1}{1 + k_c t} \tag{3}$$

여기서 J^* 는 투과도($J/\Delta P$)를 초기 투과도($J/\Delta P_0$)로 나눈 값이며, t 는 시간, k_b , k_s , k_c 는 각각 완전막힘, 표준막힘, 케이크 형성과 관련된 상수 값이다. 따라서 위의 식을 실험데이터에 적용하였을 때 가장 높은 R^2 값을 보이는 경우가 주요한 막오염 메커니즘이 된다고 판단할 수 있다. Figs. 7, 8, 9는 각각 일반 빗물, 초기 빗물, 그리고 방치된 빗물에 대하여 위의 여과모델식을 적용한 결과이다. 일반 빗물의 경우 R^2 값이 모두 유사하게 나왔으므로, 중요한 막오염 메커니즘을 규명하기 어려웠으나, 초기빗물의 경우 케이크 형성이($R^2 = 0.985$), 방치된 빗물의 경우 완전폐색이($R^2 = 0.996$) 가장 중요

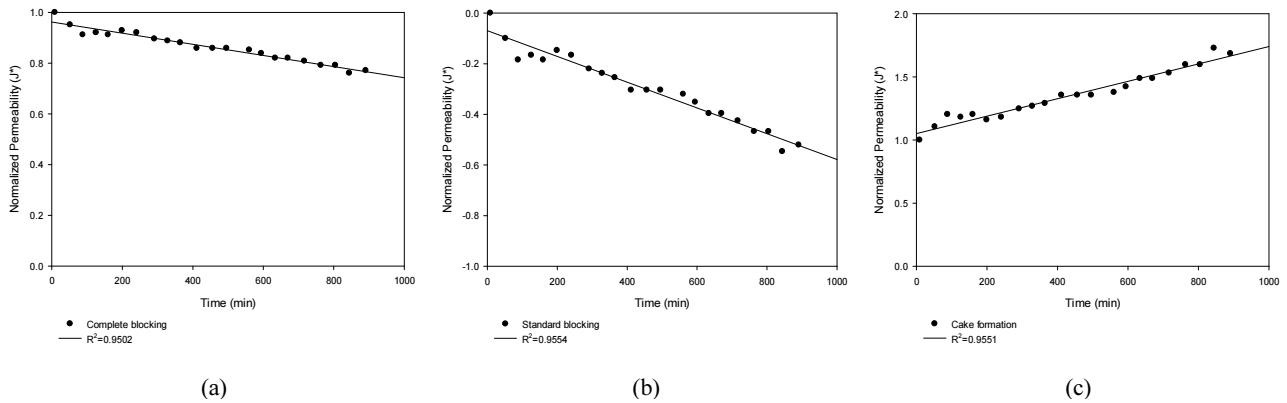


Fig. 7. Application of filtration models to identify the dominant fouling mechanism (Feed: normal rainwater) (a) complete blocking (b) standard blocking (c) cake formation.

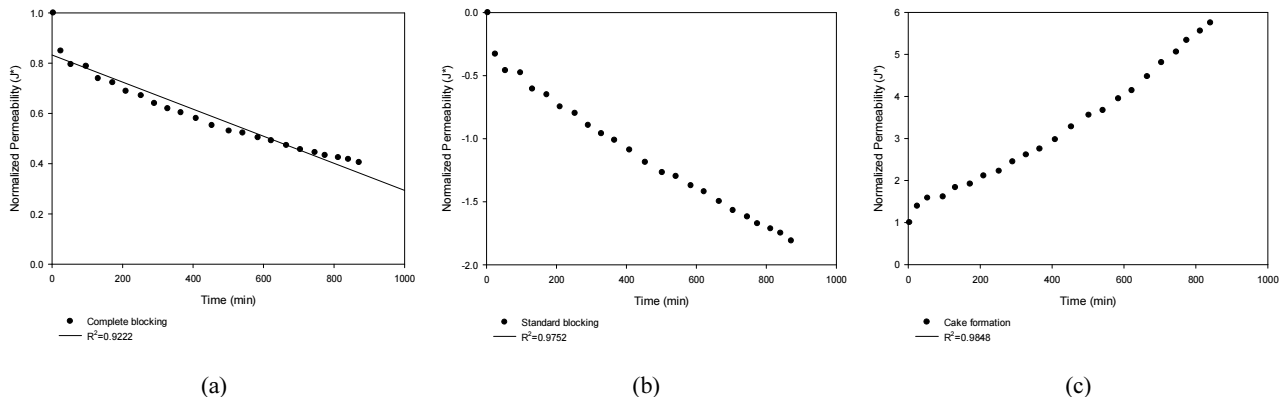


Fig. 8. Application of filtration models to identify the dominant fouling mechanism (Feed: first flush) (a) complete blocking (b) standard blocking (c) cake formation.

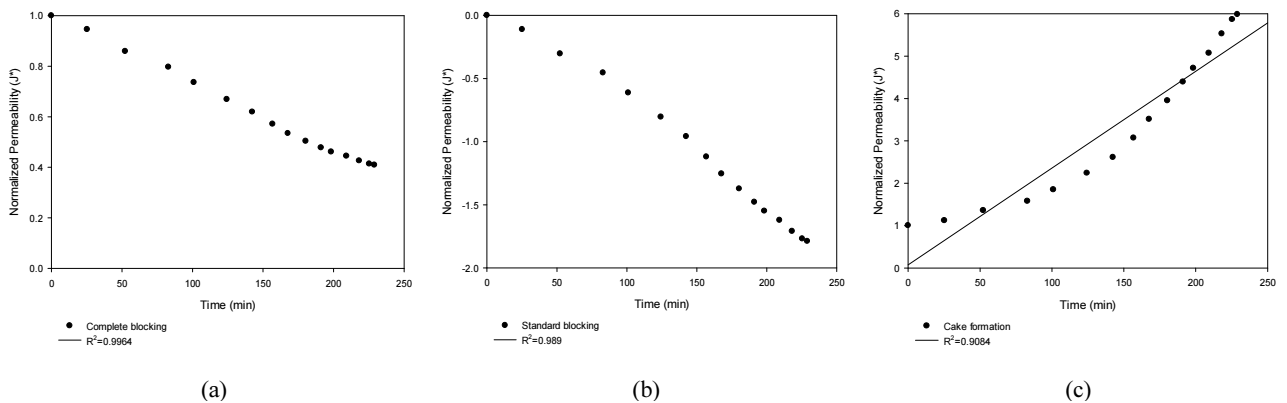


Fig. 9. Application of filtration models to identify the dominant fouling mechanism (Feed: stored rainwater) (a) complete blocking (b) standard blocking (c) cake formation.

한 막오염 메커니즘으로 나타났다. 따라서 초기빗물의 경우 상대적으로 높은 농도의 부유물질이, 방치된 빗물

의 경우, 조류 등의 미생물이 막오염을 유발하는 것으로 판단되었다.

Table 2. Comparison of TOC for Different Rainwater Samples

	Normal Rainwater	First flush	Store rainwater
Control	0.90	1.34	1.40
UV 10 sec	0.83	1.41	1.63
UV 15 sec	0.91	1.36	1.59
UV 20 sec	0.77	1.70	1.59

3.4. 막오염 제어를 위한 UV 전처리의 효과

이러한 정밀여과의 막오염을 억제하기 위하여 본 연구에서는 UV를 전처리로서 적용하였다. 본 연구에서

적용한 UV는 소독용으로 사용되는 저압 UV이므로, 유기물의 직접적인 분해효과는 거의 없을 것으로 예상되었다. Table 2에 나타난 바와 같이 UV 처리 후의 TOC는 오차범위 이내에서 변동하고 있어, UV에 의한 직접적인 유기물 분해효과는 거의 없는 것으로 확인되었다.

Fig. 10은 일반빗물을 UV로 전처리한 후 여과특성을 비교한 것이다. 이 경우 막오염 경향이 낮아서 막간차압 상승속도가 낮았으며, UV 전처리의 효과는 거의 나타나지 않았다. 반면에 Fig. 11의 경우에서와 같이 초기 빗물을 막으로 처리하는 경우에 UV 전처리에 의한 막간차압의 차이는 크지 않았으나, 투과도를 분석해본 결과에 의하면, UV 전처리 후 막의 투과도가 높게 유지

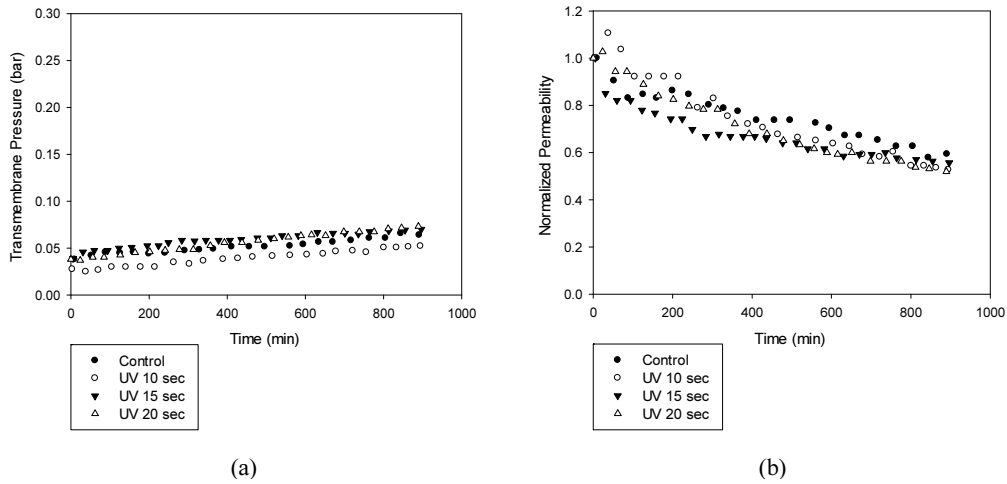


Fig. 10. Effect of UV pretreatment on membrane filtration characteristics (Feed: normal rainwater) (a) transmembrane pressure (b) normalized permeability.

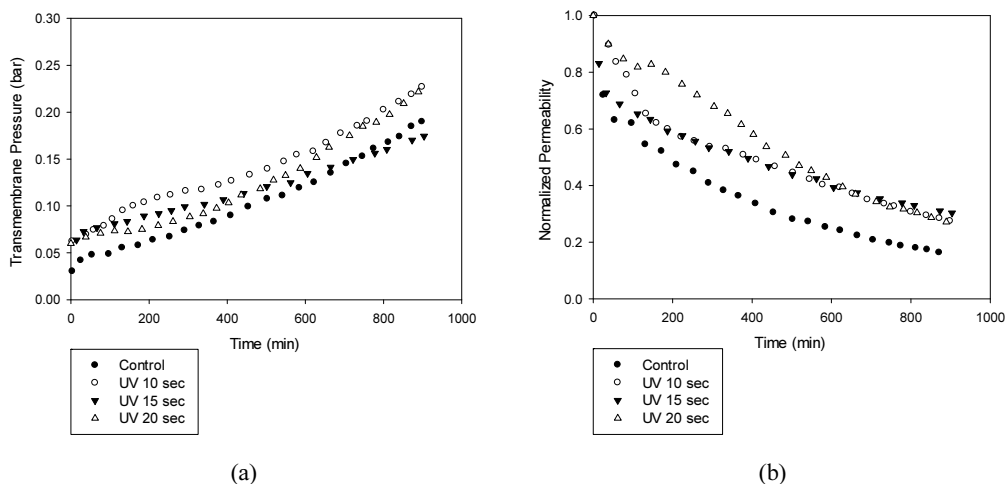


Fig. 11. Effect of UV pretreatment on membrane filtration characteristics (Feed: first flush) (a) transmembrane pressure (b) normalized permeability.

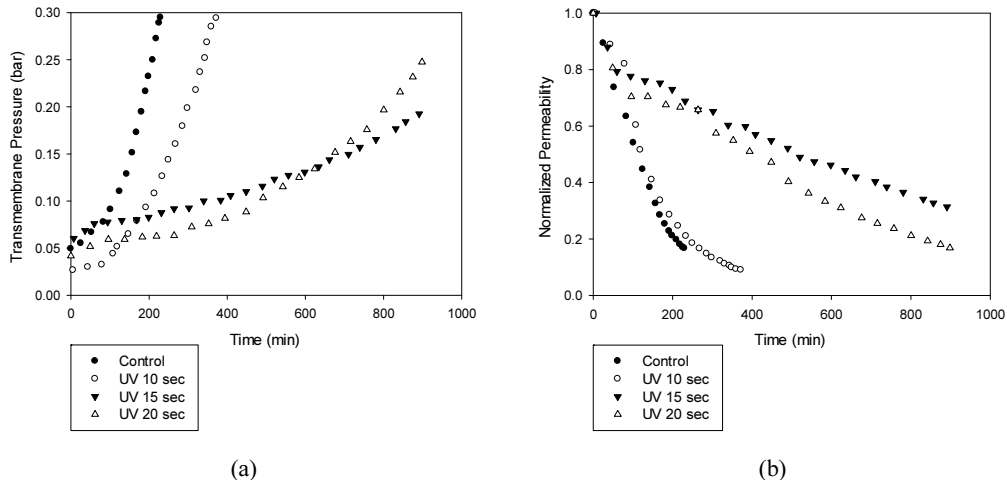


Fig. 12. Effect of UV pretreatment on membrane filtration characteristics (Feed: stored rainwater) (a) transmembrane pressure (b) normalized permeability.

되는 것을 볼 수 있었다. 이는 UV가 용액 중의 유기물을 분해하지는 못하지만 그 특성을 변화시켜 막오염 억제 효과가 나타난 것으로 판단되었다. 막의 오염속도가 가장 큰 야외저류된 빗물의 경우(Fig. 12)에서는 UV 전처리에 의한 효과를 가장 많이 볼 수 있었다. 따라서 빗물을 처리할 때 막의 오염이 심한 조건에서는 UV 전처리를 사용하는 것이 효율적이라는 결론을 내릴 수 있었다.

UV는 중수처리에서 미생물의 소독을 위해서 막여과 처리 후에 공정이다. 그러나 빗물처리에서는 UV를 막여과 전에 적용함으로써 소독은 물론 막오염의 억제도 가능한 것으로 나타났다. 따라서 이러한 UV/정밀여과는 새로운 빗물처리의 방법으로 활용이 가능할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 빗물이용에 정밀여과 분리막을 적용하기 위한 실험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 빗물은 취수한 시점과 방법, 보관방법에 따라서 수질이 크게 변화하였으며, 이에 따라서 막여과 효율도 차이가 나타났다. 초기빗물과 야외저류한 빗물의 경우 상대적으로 막오염이 심하게 나타났으며, 일반빗물의 경우 막오염이 상대적으로 느리게 진행되었다.
- 2) 여과모형을 적용하여 분석한 결과 일반빗물의 경우 막오염 경향이 심하지 않아서 정확한 결론 도출이

어려웠으며, 초기빗물의 경우 케이크 형성이, 야외보관된 빗물의 경우 완전폐색이 주요한 메커니즘으로 나타났다.

3) UV를 이용한 전처리를 적용한 결과 일반빗물에서는 효과가 크지 않았으나 오염물이 다량 존재하는 초기빗물과 야외보관된 빗물의 경우는 UV에 의한 투과도 향상과 막간차압 상승속도 완화가 나타났다. 따라서 이러한 UV와 정밀여과의 조합시스템이 향후 빗물을 처리하여 활용하는 시스템으로 가능성이 있는 것으로 결론을 내릴 수 있었다.

Acknowledgements

This research was supported by a grant (12-TI-C01) from Advanced Water Management Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

참 고 문 헌

1. K. W. Konig, "Rainharvesting in Building", *Wilo.*, (2001).
2. T. Masaru, "Strategies Toward Building "Green" Society", *Central law publishing Co.*, (2002).
3. R. H. Kim, "Rainwater utilization for urban establishment of new paradigm. in A Joint Conference with Korea Society of Water and Wastewater and

- Korea Society on Water Quality”, (2002).
4. R. H. Kim, “Rainwater utilization and functional changes in building roof, *Construction Technology Review*, **220**, 13-19.
 5. R. H. Kim, “Rainwater utilization for urban establishment of new paradigm, F 41-44. in A Joint Conference with Korea Society of Water and Wastewater and Korea Society on Water Quality”, (2002).
 6. R. H. Kim, Utilization of ground water and rainwater in urban area, *Geoenvironment*, 217-241. (2001).
 7. R. H. Kim, “Development trend of rainwater utilization”, *Construction Technology Review*, **211**, 23-28.
 8. A. Fewkes, “The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system”, *Building and Environment*, **34**, 765-772 (1999).
 9. R. H. Kim, “Rainwater storage and utilization to overcome drought, in Preventing droughts”, (2002).
 10. U. Dorfler and I. Scheunert, “S-Triazine herbicides in rainwater with special reference to the situation in germany”, *Chemosphere*, **35**(1/2): 77-85 (1997).
 11. C. Reimann, *et al.*, “Rainwater composition in eight arctic catchment in northern europe (Finland, Norway, and Russia)”, *Atmospheric Environment*, **31**(2), 159-170 (1997).
 12. S. Lee, *et al.*, “Analysis of filtration characteristics in submerged microfiltration for drinking water treatment”, *Water Research*, **42**(12), 3109-3121. (2008).
 13. Hach, *Hach Water Analysis Handbook*, 2nd ed. Colorado, USA: Hach Company, (1992).
 14. J. H. Kim, “Physicochemical Effect on Permeate Flux in a Hybrid Ozone-Ceramic Ultrafiltration Membrane Treating Natural Organic Matter”, *Membrane Journal*, **18**(4), 358-360 (2008).
 15. Y. T. Lee, “Membrane Fouling Effect with Organic-Inorganic Materials Using the Membrane Separation in Drinking Water Treatment Process”, *Membrane Journal*, **13**(4), 221-227 (2003).
 16. J. M. Lee and B. S. Lee, “Experimental and Theoretical Consideration for Flow Rate, Pressure Drop, and Permeate Flow in a Hollow Fiber Membrane”, *Membrane Journal*, **22**(6), 470-480 (2012).