

응집 및 한외여과 공정에 의한 상수원수의 유기물질 제거 특성

김현식, 임지영, 김진한[†]

인천대학교 건설환경공학부

The Removal Characteristics of Organic Matter in Drinking Water Source by Coagulation and Ultrafiltration Process

Hyun-Sik Kim, Ji-Young Lim, Jin-Han Kim[†]

Department of Civil & Environmental Engineering, Incheon National University

(Received: Mar. 10, 2018 / Revised: Apr. 15, 2018 / Accepted: Apr. 15, 2018)

ABSTRACT: This study was evaluated the characteristics of organic materials in the water source and the removal characteristics of organic materials by ultrafiltration including mixing and coagulation process. As a results of the study, it was found that the total organic carbon in the water source was mostly caused by the dissolved organic materials. As the specific ultraviolet absorbance value of the raw water was low, we found the soluble organic material has a high hydrophilic and low molecular material composition ratio. As a result of ultrafiltration experiment including mixing and coagulation process, the average removal rate of total organic carbon, dissolved organic carbon and ultraviolet absorbance at 254 were 37.9%, 30.3%, and 28.2%, respectively.

Keywords: Ultrafiltration, Total organic carbon, Dissolved organic carbon, UV₂₅₄, coagulation, Water source

초 록: 본 연구는 상수원수 내에 존재하는 유기물질 특성을 평가하고 혼화·응집 공정을 포함한 UF 막여과에 의한 유기물질의 제거 특성을 평가하였다. 연구결과, 상수원수내의 총유기탄소는 대부분 용존성 유기물질에 기인함을 알 수 있었으며, 원수의 SUVA 값이 낮게 측정됨으로써 용존성 유기물질은 친수성, 저분자 물질의 구성 비율이 높음을 알 수 있었다. 또한 혼화·응집 공정을 포함한 UF 막여과 처리 실험 결과 총유기탄소의 제거율은 평균 37.9%, 용존유기탄소의 제거율은 평균 30.3%, 그리고 UV₂₅₄의 제거율은 평균 28.2%로 나타났다.

주제어: 한외여과, 총유기탄소, 용존유기탄소, UV₂₅₄, 응집, 상수원수

1. 서 론

재래식 정수공정은 혼화·응집, 침전, 여과 및 소독 공정으로 구성되어 있으며, 이를 통하여 상수원수를 먹는물 수질 기준에 적합하게 처리하고 있다. 그러

나 각종 산업의 발전과 인구 증가로 인한 상수원수의 수질 악화와 먹는물 수질 기준의 강화에 따라 이러한 사항을 충족시키기 위하여 오존·활성탄 및 막여과를 이용한 고도정수 공정이 도입되고 있다¹⁾. 막여과를 이용하는 고도정수 공정의 경우 부유성 물질과 병원성 미생물의 제거 능력, 시설 부지 축소와

[†] Corresponding author(e-mail : jinhan@inu.ac.kr)

유지관리의 단순화를 유도할 수 있는 장점을 가지고 있다²⁾. 한편, 정수공정에서 고려하여야 하는 자연유기물질(NOM; natural organic matter)은 막여과 단독 공정으로는 비교적 낮은 제거 효율을 보이고^{3,4)} 막표면에 케이크층을 형성하여 막의 기공을 막아 막 오염물질로 작용한다고 알려져 있다⁵⁾. 또한 이는 염소와 반응하여 소독부산물물을 생성하며⁶⁾, 생성된 소독부산물들의 대부분이 인체에 유해성을 나타낸다고 알려져 있다⁷⁾. 이러한 자연유기물질의 특징을 용존유기탄소(dissolved organic carbon) 및 UV₂₅₄ 측정을 통한 SUVA(specific ultraviolet absorbance)로 나타낸다⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 한강수계 상수원수의 특성을 파악하고 혼화·응집 공정을 포함한 UF(ultrafiltration) 여과 공정에 의한 상수원수의 유기물질 제거를 평가하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. Pilot plant 공정

상수원수로 풍납과 팔당 원수를 사용하는 인천광역시 소재 B정수장에 pilot plant를 설치하였으며, 그 공정도를 Fig. 1에 나타내었다. 유입수의 pH는 7.8~8.5 이었고, 온도는 5.4~20.8°C, 알칼리도는 44~59 mg/L 이었다.

Pilot plant 공정은 혼화·응집 및 막여과로 구성되어 있으며 사용된 UF막은 T사의 가압식 막모듈로 막면적 72 m²의 공칭공경 0.03 μm인 PVDF(polyvinylidene difluoride)소재이다. 분리막의 여과유속을 80 LMH (L/m²/hr)로 설정하여 운전하였을 때, 막 공급수 유량은 5.76 m³/hr, 24시간 기준 막여과 처리수 생산수량은 약 126 m³, 역세수량은 8.3 m³으로 이때 회수율은 약 92%이었다.

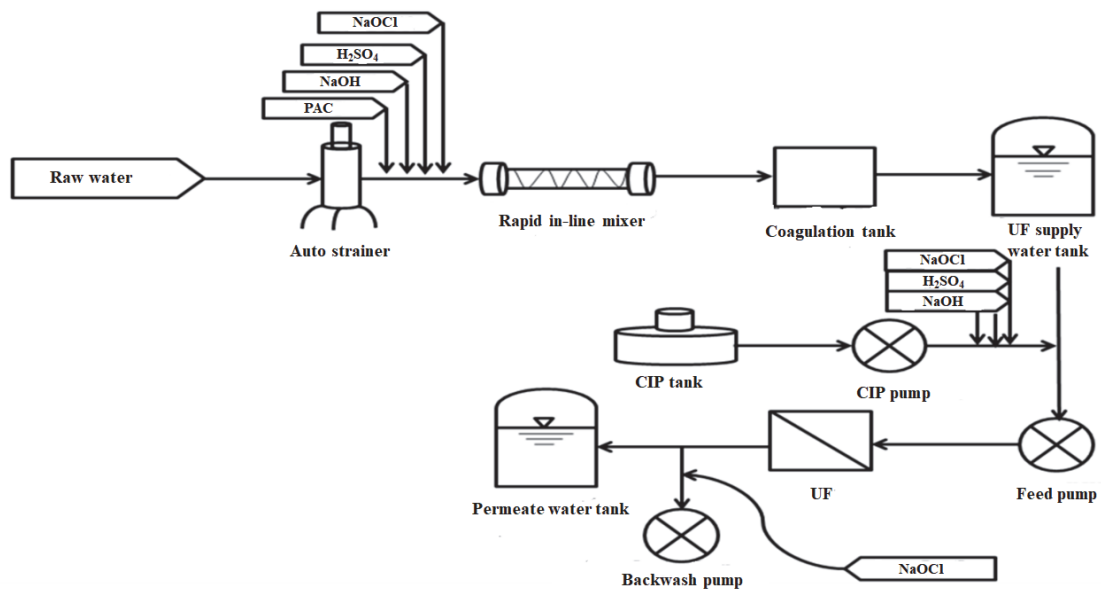


Fig. 1. Schematic diagram of pilot plant.



Fig. 2. Operation procedures of pilot

2.2. 운전 조건

Pilot plant 공정의 운전 모드를 Fig. 2에 나타내었는데, 운전은 혼화·응집, 막여과, 역세척, 배수, 채움 순서로 진행되었다. 초기 원수 유입시 응집제가 배관으로 주입되어 인라인 믹서에 의하여 혼합되면서 응집이 진행되는데, 이때 응집제는 12.5%의 PAC (poly aluminium chloride)를 사용하였으며 원수유량 대비 약 10 ppm 농도로 주입하였다. 응집 이후 UF 막모듈로 유입되어 여과가 진행되었으며, 여과 이후 물 및 공기 혼합 역세척이 진행되었다. 역세척시 12%의 NaOCl을 역세유량 대비 약 5 ppm 농도로 주입하였다. 또한 25분에 1회 역세척시 물은 8.64 m³/hr, 공기는 6 m³/hr로 공급하였다. 역세척 이후 UF 막모듈의 배수가 진행되고 여과전 UF 막모듈에 막여과 공급수를 채우는 채움단계가 진행되었다.

2.3. 수질 분석

수질 분석은 pilot plant 보수공사를 위한 약 10일을 제외한 pilot plant 연속 운전 기간인 3월부터 6월까지 약 110일간 진행하였다. 분석 항목은 원수, 혼화·응집 공정을 거친 막여과 공급수, 그리고 막여과 처리수에 대하여 유기물질의 지표인 총유기탄소, 용존유기탄소 및 UV₂₅₄를 분석하였다. 유기탄소는 저농도 바이알(0.3~20 mg/L, HACH, USA)을 사용하여 분석하였으며, 용존유기탄소 및 UV₂₅₄의 경우 0.45 μm 필터를 사용하여 여과 후 시료로 사용하였다. UV₂₅₄(Cary® 50 UV-Vis spectrophotometer, Varian, Australia)는 파장 253.7 nm에서 측정하였다. SUVA는 분석된 UV₂₅₄ 및 용존유기탄소 자료를 바탕으로 계산하였다.

3. 실험결과

3.1. 상수원수의 유기물질 특성

상수원수의 유기물질 특성을 파악하기 위하여 총유기탄소, 용존유기탄소, 그리고 UV₂₅₄를 측정하고 용존유기탄소/총유기탄소 비와 SUVA 값으로 계산하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

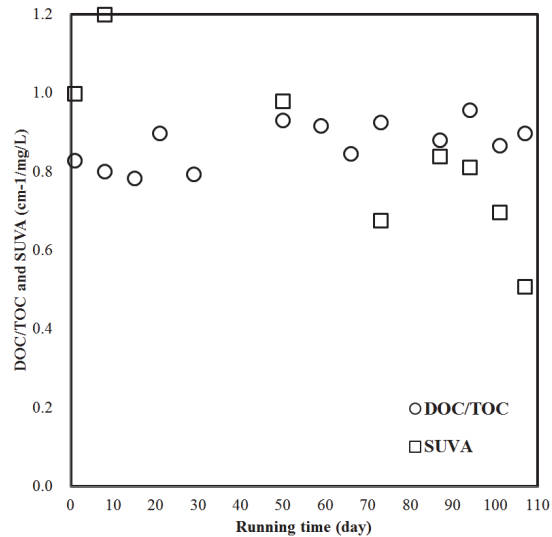


Fig. 3. Variation of DOC/TOC ratio and SUVA in drinking water source.

상수원수내 용존유기탄소/총유기탄소 비는 0.78~0.96 범위로 나타나 총유기탄소의 대부분이 용존상태로 존재함을 알 수 있다. 이는 입자성 유기탄소의 비율이 적어 UF 단독 공정으로는 유기탄소의 제거가 어려움을 나타내고, 혼화·응집 공정에 의해 일부 용존유기탄소가 입자성 유기탄소로 전환되어야 함을 의미한다. 특히, 김 등⁹⁾은 혼화·응집 공정에 의하여 용존성 유기물질의 40~50%가 금속성염과 반응하여 입자상 물질로 전환됨을 언급하였다. 또한 원수의 SUVA 값은 0.5~1.3 cm⁻¹/mg/L 범위로 비교적 안정적인 값을 나타내었으며, 정수에 문제가 되는 humic 물질의 영향은 적은 것으로 나타났다. 그러나 SUVA 값이 3 이하로 나타남으로써 대부분의 용존성 유기물질은 친수성의 저분자물질로 판단할 수 있었으며, 이로 인하여 총유기탄소 및 용존유기탄소 제거 효율에 악영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 이는 친수성의 저분자 물질이 응집공정에 영향을 준다는 선행 연구 결과에서도 확인할 수 있었다¹⁰⁾.

3.2. 혼화·응집 및 UF 공정에 의한 유기물질 제거 특성

3.2.1. 총유기탄소 및 용존유기탄소

총유기탄소 및 용존유기탄소 처리 수질 분석 결

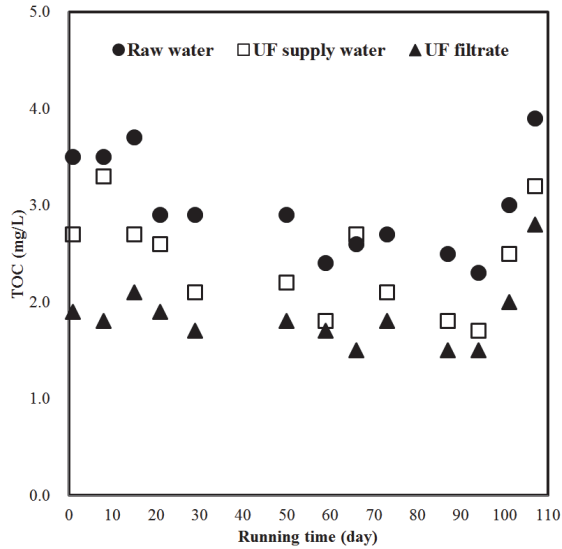


Fig. 4. Variation of TOC concentration in water treatment process.

과를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. Pilot plant 연속 운전기간 동안 원수와 막여과 공급수의 총유기탄소 농도는 유사하거나 막여과 공급수가 약간 낮은 경향을 나타내었다. 이는 응집제 주입후 floc 형성에 의하여 일부 입자성, 용존성 유기물질이 침전 및 부상에 의하여 제거된 것으로 판단된다. 한편, 원수 및 막여과 공급수에서 총유기탄소 농도는 각각 2.3~3.9 mg/L 및 1.7~3.3 mg/L 범위이었으며, 막여과 처리수의 경우 1.5~2.8 mg/L 범위로 측정됨으로써 총유기탄소 제거율은 28.2~48.6% 범위로 평균 37.9%로 나타났다. UF 단독공정 및 응집+UF 공정으로 운영한 선형 연구사례에서 총유기탄소 제거율이 각각 평균 1% 미만 및 24%인 것에 비하여 높은 제거율을 나타내었다⁴⁾. 또한 막여과 공급수의 용존유기탄소 농도가 원수에 비하여 낮은 것으로 나타났는데 이는 혼화·응집 공정에 의하여 형성된 floc이 시료 여과과정에서 제거되어 오히려 막여과 처리수와 유사한 용존유기탄소 농도를 나타낸 것으로 판단된다. 한편 원수 및 막여과 공급수의 용존유기탄소 농도는 각각 2.2~3.5 mg/L 및 1.7~2.7 mg/L 범위임을 감안할 때 용존유기탄소 제거율은 22.7~35.7% 범위로서 평균 30.3%이었다.

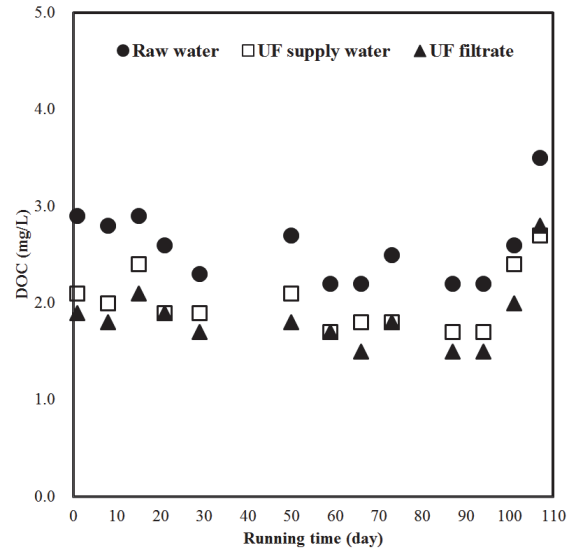


Fig. 5. Variation of DOC concentration in water treatment process.

3.2.2. UV₂₅₄

UV₂₅₄ 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 원수의 UV₂₅₄ 값은 0.017~0.037cm⁻¹ 범위로 나타나 다른 수계지역에 비하여 낮은 값을 보였는데^{2,4,9)} 이는 상수원수의 성상이 비교적 친수성 물질로 구성되며 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 또한 용존유기탄소 농도 변화 특성과 동일하게 막여과 공급수와 처리수가 유사한 값을 나타내었다. 특히, 막여과 공급수

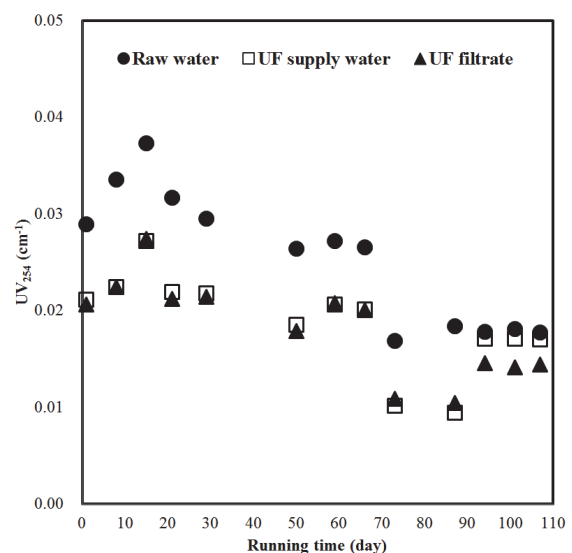


Fig. 6. Variation of UV₂₅₄ in water treatment process.

에서의 UV₂₅₄ 값이 0.009~0.027 cm⁻¹범위로서 막여과 처리수와 거의 동일한 값을 나타냄으로써 UV 흡광도를 유발하는 용존성 유기물질은 UF 막여과를 통하여 높은 제거 효율을 기대하기 어려움을 확인할 수 있었다. 결국 UV₂₅₄ 유발물질 제거는 응집제 투입으로 인한 혼화·응집 공정에 의하여 이루어진 것으로 판단되며, 이때 제거율은 18.1~43.2% 범위로서 평균 28.2%이었다.

친수성 저분자 물질의 구성 비율이 높는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 인천대학교 2017년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

4. 결론

한강수계 상수원수내에 존재하는 유기물질 특성을 분석하고 혼화·응집 및 UF 공정에 의한 유기물질 제거 특성에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 풍납과 팔당 원수를 사용하는 상수원수의 용존유기탄소/총유기탄소 비는 0.78~0.96 범위로 나타나 총유기탄소의 대부분이 용존상태로 존재함을 알 수 있었다. 즉 상수원수내에 존재하는 입자성 유기탄소의 비율이 적어 UF 단독 공정으로는 유기탄소의 제거가 어려움을 알 수 있었다. 또한 원수의 SUVA값이 3 이하로서 대부분의 용존성 유기물질은 친수성의 저분자물질로 구성되어 있음을 알 수 있었다.
2. 혼화·응집을 포함한 UF 막여과 공정의 총유기탄소 및 용존유기탄소 제거효율은 각각 28.2~48.6% 및 22.7~35.7% 범위이었으며, UV₂₅₄의 제거효율은 18.1~43.2%로 나타났다. 즉, 상수원수내의 유기탄소를 제거하기 위해서는 UF 단독 막여과 공정 보다는 혼화·응집을 포함한 UF 막여과 공정이 효율적이었다.
3. 용존성 유기물질의 지표인 용존유기탄소와 UV₂₅₄ 값은 막여과 공급수와 막여과 처리수가 유사한 값을 나타냄으로써 UF 막여과를 통한 용존성 유기물질의 높은 제거 효율은 기대하기 어려움을 알 수 있었다. 이는 높은 용존유기탄소/총유기탄소 비 및 원수의 낮은 SUVA값을 고려할 때 상수원수 내 유기물질의 대부분이 용존성 유기물질로 존재하고, 또한 용존성 유기물질이

References

1. Lee, S. H., Mun, S. S., Chin, J. C., Choi, K. K., Sim, S. J., Park, D. W. and Lee, J. W., "The characteristic of biological activated carbon process for removal dissolved organic matter in drinking water facility", *Theories and Applications of Chemical Eng.*, 8(2), pp. 4381~4384. (2002).
2. Yeon, K. H., Cho, J. B., Lee, Y. K., Kang, H. J. and Kim, W. G., "Taeyoung submerged-type membrane filtration for advanced drinking water treatment", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 14(4), pp. 15~27. (2013).
3. Laine, J. M., Clark, M. M. and Mallevialle, J., "Ultrafiltration of lake water : Effect of pretreatment on the portioning of organics, THMFP and flux", *Journal of the American Water Works Association*, 82(12), pp. 82~87. (1990).
4. Jung, C. W., Kim, H. J. and Kang, L. S., "Removal of NOM for water treatment using the combined process of coagulation and UF membrane", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 24(5), pp. 927~937. (2002).
5. Cheng, X., Liang, H., Ding, A., Tang, X., Liu, B., Zhu, X., Gan, Z., Wu, D. and Li, G., "Ferrous iron/peroxy-monosulfate oxidation as a pre-treatment for ceramic ultrafiltration membrane : control of natural organic matter fouling and degradation of atrazine", *Water Research*, 113, pp. 32~41. (2017).
6. Rook, J. J., "Formation of haloform during chlorination

- of natural waters”, *Journal of Water Treatment Examination*, 23(2), pp. 234~243. (1974).
7. Craun, G. F., Bull, R. J., Clark, R. M., Doull, J., Grabow, W., Marsh, G. M., Okun, D. A., Regli, S., Sobsey, M. D. and Symons, J. M., “Balancing chemical and microbial risks of drinking water disinfection. Part I. benefits and potential risks”, *Journal of Water Supply : Research & Technology-AQUA*, 43(4), pp. 192~199. (1994).
 8. Hua, G., Reckhow, D. A. and Abusallout, I., “Correlation between SUVA and DBP formation during chlorination and chloramination of NOM fractions from different sources”, *Chemosphere*, 130, pp. 82~29. (2015).
 9. Kim, E. J., Jung, C. W., Choi, S. H. and Kang, L. S., “The influence of rapid mixing condition on coagulation in water treatment”, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 23(4), pp. 631~640. (2001).
 10. Leenheer, J. A., “Comprehensive approach to preparative isolation and fractionation of dissolved organic carbon from natural waters and wastewaters”, *Environmental Science & Technology*, 15(5), pp. 578~587. (1981).