

고도정수처리 新 공정(PMR)개발 및 처리효율 평가

안효원*[†] · 노수홍** · 권오성** · 박용효* · 왕창근***

*한국수자원공사, **연세대학교 환경공학부, ***충남대학교 토목·환경공학부
(2008년 5월 13일 접수, 2008년 6월 17일 수정, 2008년 6월 19일 채택)

Development of a New Advanced Water Treatment Process (PMR) and Assessment of Its Treatment Efficiency

Hyowon Ahn*[†], Soohong Noh**, Ohsung Kwon**, Yonghyo Park*, and Changkeun Wang***

*Korea Water Resources Corporation

**School of Environmental Engineering, Yonsei University

***Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

(Received May 13, 2008, Revised June 17, 2008, Accepted June 19, 2008)

요약: 수돗물 공급에 있어서의 미량 유기물질 및 맛냄새 제거의 중요도가 높아짐에 따라 오존, GAC 및 PAC 등 고도정수처리공정의 도입이 지속적으로 증대되고 있다. 하지만, 원수의 수질악화, 새로운 오염물질의 출현 등에 의해 기존의 고도처리공정이 향후에도 충분한 대안이 된다고 확신하기는 어려운 실정이다. 본 연구에서는 고농도의 분말활성탄을 slurry blanket의 형태로 채류시킨다는 새로운 개념의 접촉조를 구상, 막여과조와 연계하여 하나의 공정으로 완성하였다. 한강원수를 대상으로 80 m³/일 규모의 pilot plant를 이용, 유기물질 및 2-MIB, Geosmin에 대한 제거특성을 살펴본 결과 DOC의 경우 운영초기 90% 이상, 안정화된 이후에도 70~80% 내외의 높은 처리효율을 나타내었으며, 2-MIB, Geosmin의 경우 검출한계 이하로 제거되었다. 본 공정은 1년 이상의 장기간의 고도처리 효율 검증 및 안정된 PAC 접촉조의 운영방안 등 공정최적화를 위한 추가적인 연구가 필요한 실정이나 기존의 고도처리에 비해 컴팩트하면서 높은 처리효율을 안정적으로 나타냄으로써 맛냄새물질을 비롯한 미량 오염물질을 제거하기 위한 대안공정으로서의 높은 가능성을 확인하였다.

Abstract: Removal of organic substances and taste/odor control are ones of the main issues in water supply, resulting in introduction of advanced processes such as ozon, ozon/GAC, or PAC. However, raw water quality deteriorates, new pollutants advent, so water quality is not acceptable enough even with those existing advanced processes. In this paper, a new advanced water treatment process using PAC slurry blanket, where PAC particles stay in the basin as slurry blanket, coupled with submerged membranes is introduced. A pilot plant (80 m³/day) was installed to assess the performance of this new process using actual raw water, and DOC was removed higher than 90% in the beginning and 70~80% afterwards, while 2-MIB and geosmin were removed completely. This new process still requires future study on process optimization and long-term assessment, however it seems highly possible to countermeasure as a new advanced process with high removal efficiency.

Keywords: advanced water treatment, PAC (powdered activated carbon), slurry blanket, submerged membrane

1. 서론

기존정수처리공정은 탁질제거를 주목적으로 하여 원수 내의 미량유기물질의 제거가 용이하지 못하며 특히

봄, 가을 조류(Algae) 번식시 조류 대사 물질에 의한 맛·냄새 물질 제거에 취약하다. 미량유기물질이나 맛·냄새 유발물질을 제거하기 위하여 분말활성탄을 주입하거나, 오존+GAC 또는 GAC를 기존정수처리 공정에 추가하여 고도정수처리공정을 도입하고 있다. 이 중 분말활성탄은 표준처리 공정에서 주로 응집공정의 전단

[†]주저자(e-mail : anwon@kwater.or.kr)

에 투입되어 원수중의 맛·냄새물질 등의 용존성 유기물질을 흡착제거하고 여과지에서 처리수와 분리, 배출하여 왔으나, 최근 들어 막여과와 연계한 조합공정에 대한 다양한 연구가 추진되어 왔다.

정지현 등[1]에 따르면 고도 정수처리를 위하여 막여과와 응집공정을 조합한 경우 탁도나 UV₂₅₄ 제거효율에 영향을 미쳤으나 시스템의 효율성 최적화를 위하여는 단순응집처리에서와는 다른 응집조건의 결정이 요구되며, 흡착을 조합한 경우 오염물질의 제거효율은 향상되었으나 흡착제에 의한 막오염에 대한 안정성을 확신할 수 없다고 보고하고 있다. 또한 특정 화학반응을 조합하거나 막표면을 코팅하는 방법 또한 고도정수처리를 위한 막여과 공정의 활용에 적용되고 있어 다양한 공정과의 연계를 통해 막여과를 이용한 고도정수처리가 가능할 것으로 기대하고 있다.

Lin *et al.*[2]은 UF막분리에 관한 연구에 있어서 NOM의 제거는 막의 MWCO (Molecular Weight Cut-Off)과 유기물의 AMS (겔보기 분자량)에 따라 달라지며, 막분리를 이용한 수처리에 membrane은 각종 미생물의 제거 및 입자상 물질의 제거에는 우수하나 0.01 μm 이하의 크기를 가지고 있는 용존성 유기물의 제거는 거의 이루어지고 있지 않다고 하였다. 특히 분획분자량이 큰 막을 사용하였을 경우 소독부산물 전구물질의 제거가 이루어지지 않을 뿐만 아니라 작은 분자량을 가지고 있는 유기화합물의 제거율은 낮게 나타났다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 분말활성탄을 사용했을 경우 소독부산물 전구물질의 제거에 효과가 있고, 막의 공극을 통과하는 작은 size의 분자량을 가지고 있는 유기물에 대한 우수한 흡착 제거 특성을 보였다. 또한 분말활성탄을 사용함으로써 응집 또는 막분리 단독공정에서 쉽게 제거하지 못하는 저분자량의 화합물 제거가 가능하고, 수질 변동이 심한 공정에서의 적절한 분말활성탄 사용으로 안정적인 수질을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다. 분말활성탄은 다른 수처리 공정과 결합하여 높은 운전성능과 제거율을 얻을 수 있는 장점이 있으며 분말활성탄을 막분리 공정에 적용했을 경우 NOM 및 SOC의 물리적인 제거율을 향상시키며, 슬러지의 양을 줄여 줄 수 있고, 용존성 오염물질에 대한 분말활성탄 흡착제거가 우수하다[3,4]. 그리고 MF 또는 UF막분리 공정에 분말활성탄을 사용함으로써 막의 fouling을 유발하는 물질을 흡착 제거함으로써 막의 투과 flux를 향상시킬 수 있으며 운전비용을 절감시킬 수 있다.

안규홍 등[5]의 연구에서는 막분리를 이용한 중수처리 시스템의 적용에 있어서 분말활성탄의 투과 flux 변화를 관찰한 결과 분말활성탄의 사용으로 인하여 막의 투과 flux변화는 분말활성탄에 의하여 막의 공극을 폐쇄하여 오히려 막분리 단독으로 사용했을 경우보다 투과 flux의 감소가 증가하였고 분말활성탄을 막분리에 적용하였을 경우 물리적인 세척만으로도 높은 투과 flux 회복을 얻을 수 있었다고 보고하였다. 그러나 Kim *et al.*[6]에 따르면 2차 침전수를 중수도로 재이용하기 위한 고농도 PAC와 침지형 중공사막 일체형 시스템에서 분말활성탄의 농도가 높을수록 유기물의 효과적인 흡착제거를 통해 분리막의 오염속도가 낮은 것으로 보고하였다. Chang *et al.*[7]의 연구에서는 분말활성탄의 흡착특성과 막의 재질적인 특성 및 운전이 무엇보다 크게 유기물 및 제거하고자 하는 물질의 제거율에 영향을 주게 되는데 PAC-UF 막분리에 있어서 영향을 주는 인자들로써 역세척 횟수, 막의 공극 size, 접촉각, 용액의 농도에 따라 그 제거율과 운전에 영향을 주었다. Lebeau T. *et al.*[3]은 자연유기물질(NOM, Natural organic matter)과 복합유기화합물(SOCs, Synthetic organic chemicals)을 제거하기 위한 고농도(5~20 g/L) 분말활성탄과 침지형 분리막 모듈을 이용한 연구를 통하여 조합의 장점으로, (1) 적절한 분말활성탄의 사용을 통해 NOM과 SOC의 효과적인 제거, (2) 미생물에 의한 NOM의 제거, (3) 슬러지 감량 등을 들었다. 이 실험에서 침지형 MF를 이용하여 반응조 내에 5~20 g/L의 고농도 분말활성탄을 사용하였으며 매우 높은 처리수질 결과를 얻었으며, Kim *et al.*[7]는 침지형 막여과 시스템에 고농도 분말활성탄을 도입한 공정을 구성하여, 유기물 및 암모니아성질소 등의 제거실험을 하였다. 침지조의 활성탄 농도는 40 g/L까지 가능하였으며, 활성탄 주입농도가 높을수록 수질인자의 제거효율이 높았으며, 여과 지속시간도 향상되었음을 보였다. 한편 활성탄을 고농도로 사용함으로써 부착성 미생물의 증가로 인하여 암모니아성질소가 산화되어 제거되는 결과를 얻었다.

PAC + Membrane 조합기술에 대한 연구는 다양하게 이루어지고 있으나, 이는 저농도 PAC + Casing형 막여과 형태, 또는 MBR (Membrane Bio-Reactor) 형태와 유사한 고농도 PAC-침지형 막여과 일체형 공정이다. 여기서, 높은 고도처리 효율을 나타내는 것은 고농도 PAC + 침지형 막여과 일체형 공정으로 일본을 비롯하여 다양하게 연구되고 있으나 실공정 적용사례는 현재

까지 보고되지 않고 있는 실정이다.

기존의 표준정수처리공정에서 PAC는 5~20 ppm 정도로 투입하여 간헐적인 맛냄새 문제해결을 위해 경제적이고 효율적으로 적용되고 있다. 하지만, 이 경우에 있어서 PAC는 흡착능을 모두 활용하지 못하고 1회 접촉 후 슬러지와 함께 배출되기 때문에 장기적으로 지속되는 맛냄새 문제해결에 있어서는 오존이나 GAC보다 오히려 비경제적이다. 이와 같이 PAC는 기존 공정에서 장기간, 고농도로 적용될 수 없기 때문에 최근들어 침지형막여과와 조합시킨, 즉 침지형 막여과반응조에 고농도의 PAC를 투입, complete mixing 상태로 PAC를 반응조 내에 체류시키는 형태의 공정에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이 공정은 PAC의 흡착능을 모두 활용하고, 이후 BAC로 전환되어 생물학적 고도처리의 역할도 하고 있으며, 매우 높은 처리효율을 나타내고 있다. 하지만 이는 침지형 막여과공정 운영상에 있어 필요한 주기적인 배출수 배출시 고농도의 PAC가 그대로 배출됨으로써 많은 양의 PAC를 지속적으로 보충시켜야 하는 경제적인 문제점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 고농도의 PAC 접촉조를 침지형 막여과반응조에서 분리시킴으로써 막여과 반응조에서의 PAC 손실문제를 해결하고자 하였다. 즉, 저농도의 PAC를 완전 혼합시키는 기존의 접촉조와는 달리 고농도의 PAC를 slurry blanket의 형태로 체류시킨다는 새로운 개념의 접촉조를 고안하여 침지형 막여과 반응조와 조합시킨 PMR (PAC + Membrane 조합 Retrofitting) 공정을 개발하였다. 이 공정은 신설 정수장에 적용될 수도 있으나, 모래 여과지를 침지형 막여과조로 대체하는 등 기존의 시설을 그대로 활용하여 Retrofitting 하기에 적합한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 PAC slurry blanket 반응조에서의 PAC의 거동특성과 PMR 전체공정에 대한 DOC 및 맛냄새 유발물질(2-MIB, Geosmin) 등에 대한 제거특성 평가를 통하여, PMR공정의 실현성과 처리효율에 대한 가능성을 파악해 보고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 공정의 구성

PMR 공정은 Fig. 1과 같이 크게 PAC slurry blanket 접촉조와 침지형 막여과 반응조로 구성되어 있다. PAC 접촉조는 장방형의 형태로 원수가 내부 분획판으로 유입되고 외부로 월류하여 막여과조로 유입되도록 구성

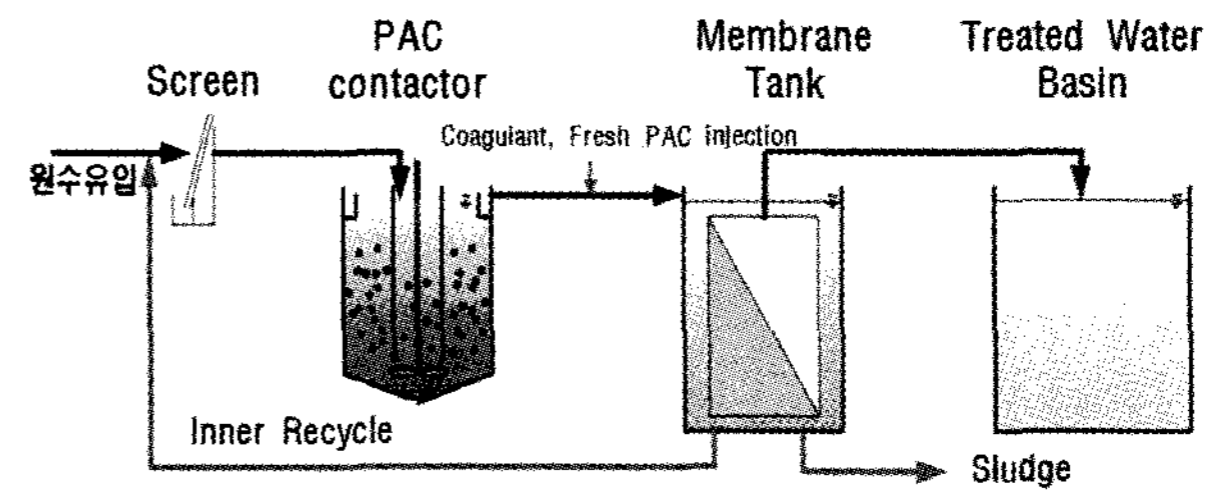


Fig. 1. Schematic diagram of PMR Process.

되었다.

PAC 접촉조는 저농도(약 5~20 ppm)의 분말활성탄을 원수와 완전혼합, 접촉시키는 기존의 방식과 달리 고농도(10,000 ppm 내외)의 PAC를 slurry blanket의 형태로 체류시키며 원수와 접촉되도록 하였다. 즉, 반응조의 표면부하율을 고려하여 PAC 입자가 월류되지 않도록 함과 동시에 반응조 내 교반을 통하여 PAC가 완전히 침전되지 않고 slurry blanket의 형태로 유지되도록 함으로써 반응조 중-하단에서 PAC와 접촉, 처리수만 막여과조로 유입되도록 하였다. 본 공정에서 사용된 분리막은 침지형 분리막을 사용하였으며 처리수의 생산을 위하여 감압펌프를 설치, 일정시간 동안의 처리수 생산 후 처리수를 이용, 짧은 시간동안 역세척을 통하여 분리막의 오염을 지연시키도록 구성되었다. 파울링 저감을 위한 응집제와 다중 복합처리 효과를 위한 Fresh PAC를 막여과 반응조 전단에 주입하였으며, slurry blanket 파괴시 막여과조로 월류되는 PAC의 재순환 및 Fresh PAC의 지속순환을 위한 내부 반송라인을 설치하였다.

2.2. 플랜트 구성 및 운영

막여과공정에 있어서 분리막 모듈은 형태에 따라 모듈내부를 통과하는 유체의 흐름 및 필요 산기량 등이 크게 다르기 때문에 형태에 따른 운영방법이 크게 달라질 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 실공정에 직접 사용되는 분리막 모듈을 이용, 처리수 용량을 80 m³/day 규모의 플랜트를 활용하였다. 한강원수를 대상으로 고농도의 PAC에 의한 흡착 및 PAC의 자연적 BAC화를 통한 원수 내 미량유기물질을 제거하고 입자성 물질을 침지형 중공사막을 이용하여 최종처리수를 생산하도록 구성하였다.

파일럿 플랜트는 실제 운영중인 정수장에 설치하여 한강원수를 대상으로 하여 처리효율을 평가하였다. Fig. 2에서와 같이 원수를 응집조로 유입, PAC slurry blan-

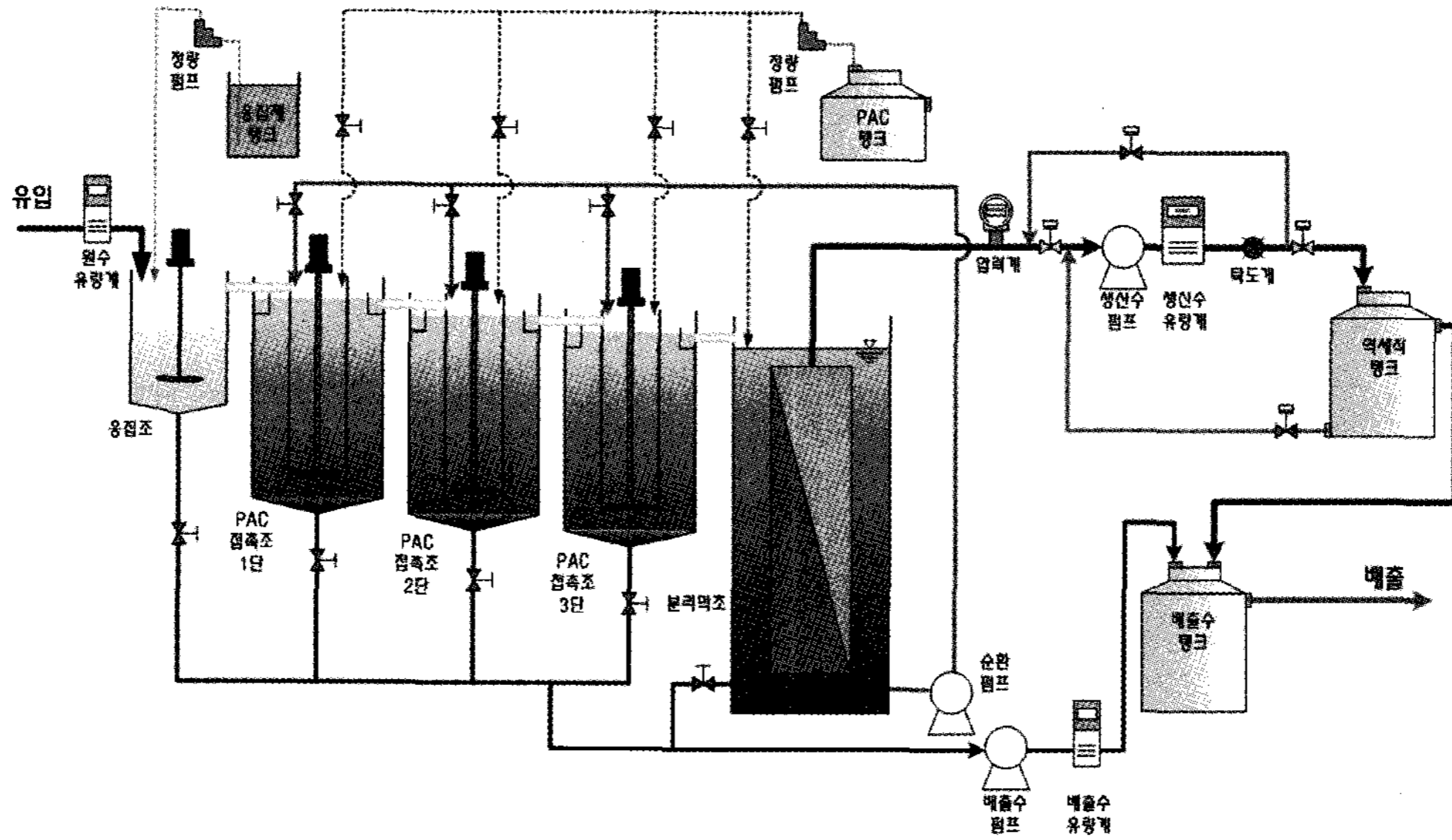


Fig. 2. Schematic diagram of the pilot plant (Capacity: 80 m³/day).

ket 접촉조에 의한 1차 처리 후 막여과조에서 최종 처리되어 유출되도록 구성하였다.

PAC접촉조의 체류시간은 곧 유입된 원수가 접촉조 내부에 고농도로 존재하고 있는 PAC Slurry와 접촉할 수 있는 접촉시간을 의미한다. 따라서 직렬연결로 사용할 경우 유효부피 0.896 m³의 접촉조를 80 m³/day의 유량이 접촉하므로 각 조의 체류시간은 약 15분이 되며 이러한 직렬연결을 사용하여 PAC접촉조 2단을 사용할 경우 전체 PAC 접촉시간은 30분, 3단을 모두 사용할 경우는 45분의 접촉시간을 갖는다. 또한 병렬로 사용하는 경우 PAC 접촉조 2단을 병렬로 사용할 경우 PAC 접촉조에 유입된 원수가 둘로 분배되어 유입되므로 각 조당 유입유량은 약 40 m³이 되어 체류시간은 30분이 되며 3단을 병렬로 사용할 경우 PAC 접촉조 접촉시간은 약 45분이 된다. 원수는 Fig. 1의 개념도에서와 같이 접촉조 상부에서 격벽내부로 유입된 후 slurry blanket과 접촉 후 외부로 상승하여 월류될 수 있도록 하였으며, 접촉조 중앙 바닥부에 교반기를 설치하여 수리조건에 따라 PAC가 완전히 침전하여 blanket을 형성하지 못하는 경우에 대비하여 유동적으로 운영하였다. 운영기간동안 slurry blanket의 농도는 약 8,000 ppm 내외로 안정적으로 유지되었으며, blanket의 형성 및 운영상태 파악을 하기 위하여 접촉조 내 수심별 PAC 농도를 분석하였다.

침지형 막여과조는 0.9 m (L) × 0.5 m (W) × 3.4 m

(H)의 규격을 가지고 있으나 실 운영되는 유효높이는 평균 3 m로 총 1.35 m³의 부피이다. 일 처리유량 80 m³을 기준으로 체류시간은 약 24.3분이다. 본 연구에서 사용된 분리막은 미국의 G社서 생산되는 Z모듈로 이 모듈에 사용된 중공사막은 내화학적, 내염소성이 강한 PVDF (Polyvinylidene fluoride) 재질이며 중공사막의 공칭공경은 0.04 μm, 최대 여과압력은 83 kPa (0.85 kgf/cm²), 최대 역여과 압력은 69 kPa (0.70 kgf/cm²), 최대 운전온도는 40°C이다. 본 연구에 사용된 분리막 모듈은 상하부에 처리수를 집수할 수 있는 구조로 구성되었으며 각 분리막 모듈의 유효 막면적이 31.6 m²인 단위 모듈을 3개 연결하여 유효 막면적 94.8 m²의 Cassette을 구성하였다.

막여과 반응조의 체류시간은 약 25분 정도이고, 15분 (여과: 14.5분, 역세척: 0.5분)의 주기로 운영하였다. 또한, 막여과 반응조 내에 2~3,000 ppm 정도의 PAC가 체류함으로써 2단계에 걸친 고도처리가 이루어지도록 하였으며, 이 PAC는 slurry blanket 접촉조에 투입시킨 PAC 중 체류하지 못하고 월류되는 수 μm 내외의 미세 탄과 막여과 전단에 투입되는 Fresh PAC이며, 응집제는 주입량에 따른 TMP 평가를 통하여 최적 주입량을 결정, 10 ppm의 응집제를 주입하였다. 막여과 반응조에서는 처리유량 대비 0.5% (0.4 m³/일)의 배출수를 배출하였으며, 최종처리수량 대비 2% (1.6 m³/일)를 침지형 막여과에서 slurry blanket 접촉조로 내부순환 시켰다.

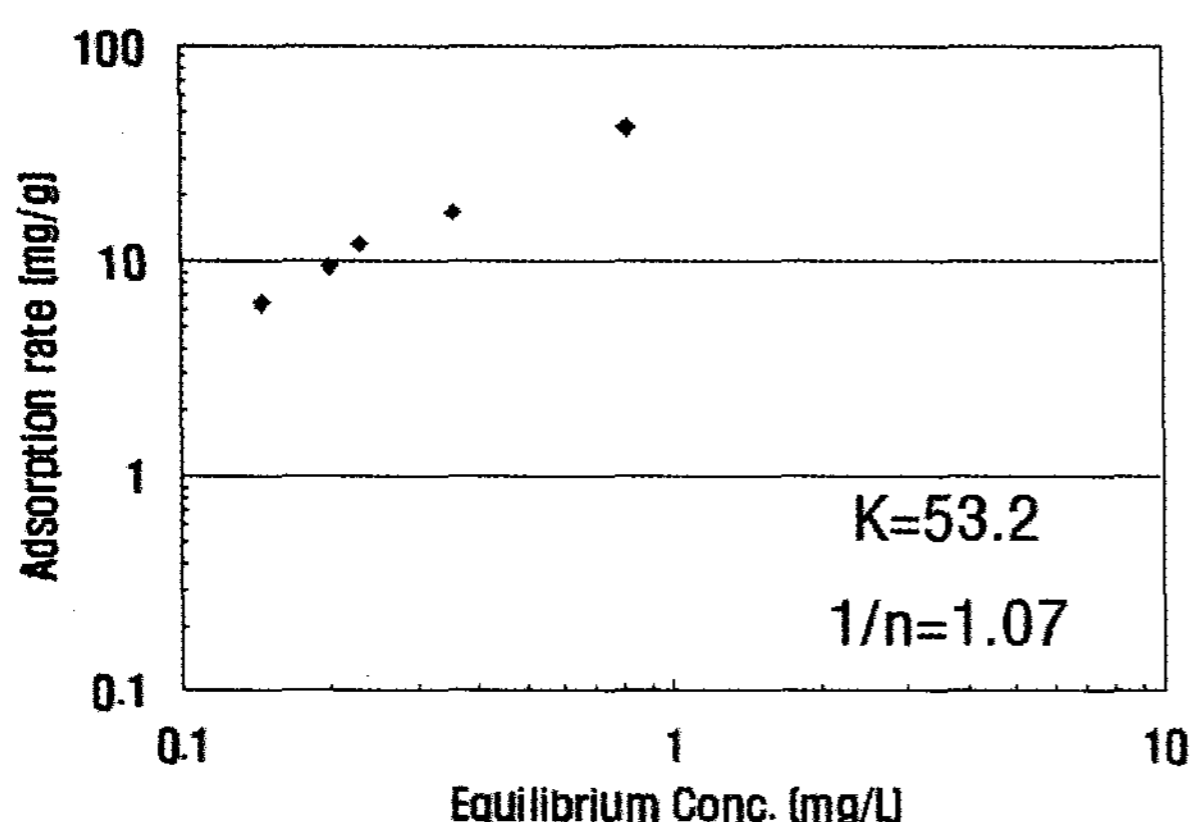


Fig. 3. Isothermal characteristics of PAC in use.

역세척 사용수량을 모두 감안한 최종 처리수량을 80 m³/일로 하여 80.4 m³/일의 원수를 유입, 0.4 m³/일의 배출수를 배출시킴으로써 전체 시스템상의 회수율은 99.5%, 여과 플럭스는 36.4 LMH (L/m²/hr)로 운영하였다.

2.3. PAC 농도 및 사용량

PMR 공정에 있어서 원수의 수질조건 및 목표수질에 따른 최적 PAC 농도는 결정되지 않은 상황으로, 운영 초기 흡착에 많이 의존하는 시기와 흡착능이 어느 정도 소진된 이후 생물학적 고도처리 등에 의한 처리특성을 살펴보고자 하였다. 즉, PAC의 주입농도는 이론적으로 산출하여 10~20일 내에 완전히 파괴하여 흡착에 의한 제거효율을 기대하기 어려운 시점에 대한 처리효율 평가가 가능하도록 결정하였다. 사용된 PAC의 흡착특성을 파악하기 위한 등온흡착실험을 통하여 Fig. 3에서와 같이 Freundlich 식에 적용시켜 본 결과 분말활성탄의 흡착용량 k는 53.2이었으며 흡착질과의 친화력(1/n)은 1.07이었으며, 이 상수 값을 이용하여 한강원수의 평균 DOC값 1.5 mg/L를 기준으로 사용된 활성탄이 갖는 최대 흡착량 C_{max} = 82.1 mg_DOC/g_분말활성탄이 된다.

앞서 언급한 바와 같이 모든 DOC는 활성탄 흡착으로만 제거된다는 가정하에 15일간 유입되는 DOC를 흡착제거하는 데에 필요한 활성탄 총량을 등온흡착 실험 결과를 이용하여 산출하였다. 즉, DOC 1.5 mg/L를 기준으로 플랜트(80 m³/일)로 유입되는 DOC 총량은 1,800,000 mg이 되며, 최대 흡착량을 기준으로 필요한 활성탄 총량은 약 22 kg으로 산출된다. 이는 PAC 접촉조 용량(2.7 m³)대비 약 8,000 ppm으로 유지되나, 앞서 언급한 바와 같이 미세탄의 월류 및 막여과 반응조에서

의 2차 고도처리를 위하여 실제 25 kg의 활성탄을 투입하여 막여과 반응조에서는 운영초기 약 2,000 ppm 정도의 PAC가 체류하도록 결정하였다.

PAC 농도산출에서의 가정에 따라 PMR 공정에서의 고도처리가 흡착에만 의존할 경우 PAC는 1회/15일 주기로 교체해야 한다. 하지만, PMR 공정에서는 활성탄 흡착, 생물학적 고도처리 등 복합적인 메커니즘에 의하고, 실제 플랜트 운영기간 동안 처리효율은 지속되었으나, 최대 지속기간 및 이에 따른 활성탄 교체주기는 구체적으로 평가되지 못하였다. PAC 교체주기에 따라 활성탄 사용량은 그 만큼 변화하겠으나, 1회/년 교체한다는 가정하에 본 플랜트에서 투입된 25 kg의 PAC는 기존의 PAC 접촉조와 같은 방식으로 80 m³/일 플랜트에 연속 주입하는 경우 1 ppm 이하(약 0.86 ppm)를 주입하는 경우와 동등한 사용량으로써, 적은 양의 PAC를 slurry blanket의 형태로 체류시킴으로써 고농도의 접촉효율을 기대할 수 있도록 구상하였다. 단, 이는 PMR공정 운영상의 선택사항인 5 ppm의 Fresh PAC는 제외하였으며, 연중 지속적으로 5 ppm의 Fresh PAC를 투입하는 경우 기존의 접촉방식과 비교하면 연중 6 ppm 주입에 해당하고, 구체적인 추가연구가 필요하나 현재까지의 플랜트 운영경험 및 slurry blanket에 의한 단독 처리효율을 감안하면 Fresh PAC가 지배적인 역할을 하지는 못한 것으로 판단된다.

3. 실험결과

3.1. PAC 거동특성 평가

PMR 공정에서 미량 유기물 제거에 가장 핵심이 되는 부분은 PAC slurry blanket 접촉조의 운영으로써, PAC는 유체흐름에 의해 월류되거나 바닥에 완전히 침전되지 않도록 하는 것이 가장 중요하다. PAC의 입도 분포가 다양하고, 교반기 운전에 대한 영향까지 고려하여야 하나 PAC의 거동특성은 접촉조에서의 상승유속과 Stoke's Law를 통해 얻을 수 있는 PAC 입자의 침강속도를 통하여 개략적으로 산출해 낼 수 있다. 1개의 접촉조만을 사용하는 경우 유체의 상승속도는 6.979 m/hr로 미세탄뿐만 아니라 상당량의 PAC가 월류할 것으로 예측되어, Table 1에서와 같이 2개 및 3개의 접촉조를 사용하는 경우에 대하여 서로 입경이 다른 2종의 PAC에 대하여 평가하였다.

PAC slurry blanket의 유지여부 및 월류특성을 확인

Table 1. Operational conditions for PAC particle dynamics

Trial #	size	# of contactors (retention time)	upflow velocity (m/hr)	Terminal velocity (m/hr)	mixing velocity (rpm)
(A)	200 mesh	2 (30 min)	3.559	4.72	100
(B)	(smaller than 75 μm)	3 (45 min)	2.373	18.9	90
(C)	100~200 mesh	2 (30 min)	3.559	18.9	120
(D)	(75~150 μm)	3 (45 min)	2.373	4.72	40

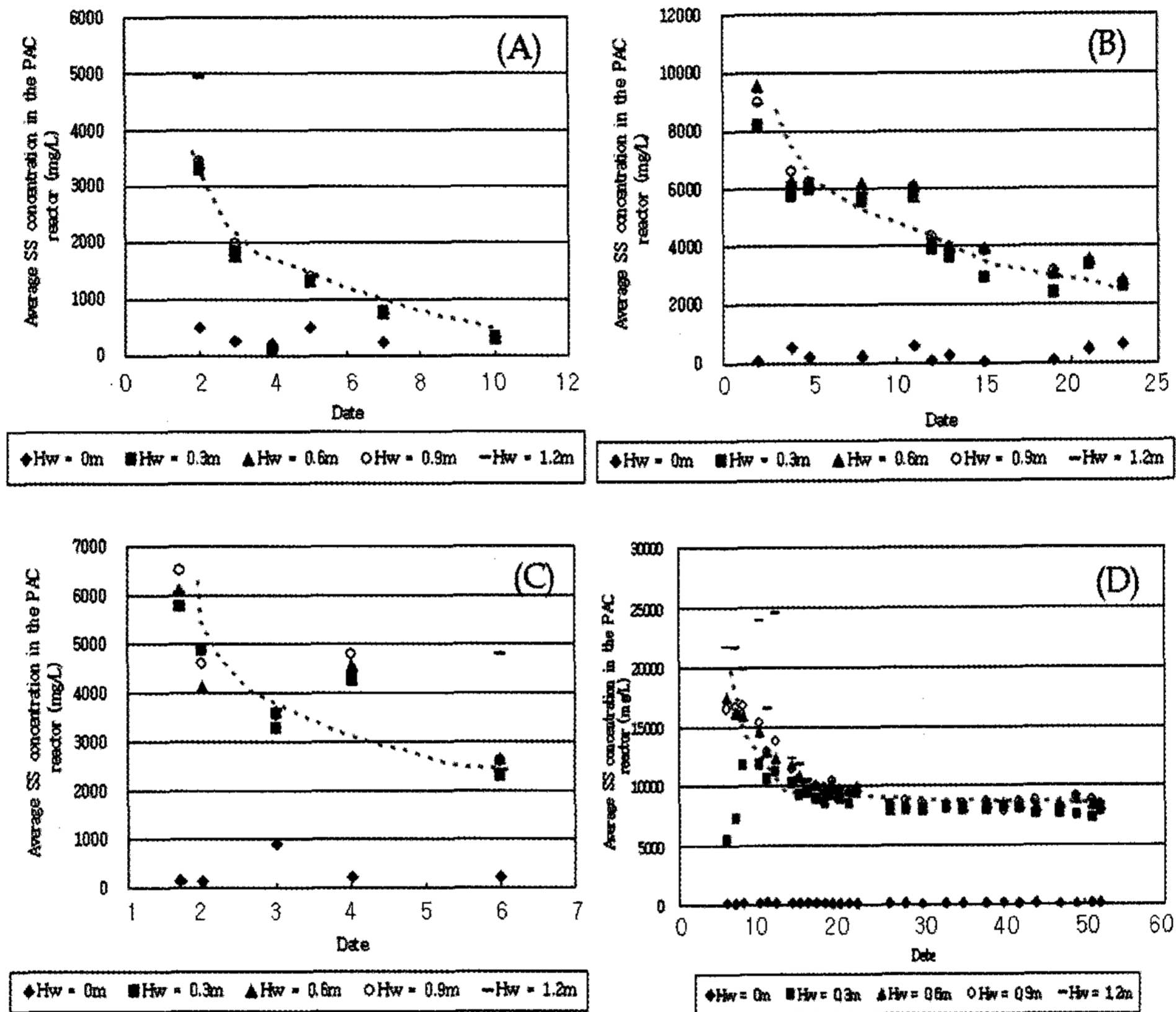


Fig. 4. PAC concentration variation at each depth depending on operational days. * Hw ; Depth of sampling point from water surface (m).

하기 위하여 각 조건에 따라 접촉조 내 수심별 5개 지점에 대한 PAC 농도를 측정하였다. Fig. 4에서와 같이 모든 조건에 있어서 운영초기에는 수 μm 내외의 미세탄의 율류에 의해 운영기간에 따라 지속적으로 PAC 농도는 감소한다. 하지만, PAC의 침강속도와 유체의 상승속도를 비교한 것과 같이 모든 경우에 있어서 어느 정도는 일정한 농도로 slurry blanket이 유지될 것으로 예상하였으나, (D)의 경우를 제외하고는 일정기간 이후에도 지속적으로 PAC 농도가 감소하여 더 이상 slurry blanket으로의 기능을 하지 못하였다. 이는 PAC 입도가

일정하지 않고, 고르게 분포되어 있지 않은 상태에서 최대 size를 기준으로 침강속도를 산출하였고, PAC의 완전침전에 대비한 교반속도가 과다하게 적용되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 추후 PAC 접촉조 설계시에는 사용되는 PAC의 입도분포 분석을 통하여 최대 size가 아닌 평균입도를 적용하거나 전체 입도분포를 같이 고려하여 설계할 경우 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

(C)의 경우 최소입경이 75 μm 로 유체의 상승속도보다 침강속도가 크기 때문에 대부분 체류할 것으로 예측

하였으나, 과도한 교반과 운영 중 PAC 입자간의 충돌 등으로 인한 size 감소로 인하여 slurry blanket을 유지하지 못한 것으로 판단되며, 이에 따라 교반기의 운영은 향후 완전침전을 방지하기 위한 최저 속도의 운전이 바람직 할 것으로 판단되었다. (C)보다 교반속도를 낮게 운영한 (D)에서는 운영초기 미세탄의 월류로 인해 지속적으로 농도가 감소하였으나, 약 20일 이후에는 수면을 제외한 모든 sample에서 8,000 ppm 내외로 안정되었으며, 이는 고도처리 평가를 위한 2개월간의 운영기간 동안에 농도상의 변화없이 안정적으로 운영되었다. 하지만, 접촉조의 깊이에 있어서는 수심아래 30 cm 까지 고농도로 PAC가 체류함으로써 접촉조 깊이를 보다 깊게 하여 slurry blanket에서 수면까지의 충분한 여유고를 확보하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

3.2. 고도처리 효율평가

PMR 공정에서의 고도처리 성능을 평가해 보기 위하여 유기물 및 맛·냄새 유발물질(2-MIB, Geosmin)의 제거효율을 살펴보았다. SCODCr은 DOC 제거특성에 대한 비교검토를 위해 DOC와 같이 평가하였으며, 맛·냄새 유발물질에 대해서는 운영기간 중 원수중에 유입되지 않아 인위적으로 spiking test를 실시하였다. 맛·냄새 유발물질의 spiking test를 수행함에 있어 본 파일럿 플랜트의 모든 반응조 및 배관의 흡착을 방지하기 위하여 SUS 304의 재질을 사용하였다. 또한 stock solution은 유리병에 제조, 주입을 위한 튜브는 비흡착, 내화학적인 테프론 계열의 튜브를 사용하여 반응조 및 배관에 의한 흡착을 미연에 방지하였다.

3.2.1. DOC 및 SCODCr 처리효율

공정기간 동안 DOC유입농도는 0.950 ppm에서 2.299 ppm까지 변화하였으며, 이에 대한 DOC 제거특성은 Fig. 5와 같다. 공정개시 후 2일 때까지 PAC 접촉조 단독처리를 통한 처리율은 100%에 근접하게 나타났으나, PAC의 흡착능의 저하 등으로 인하여 공정개시 15일까지 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 막여과 반응조에서의 추가적인 고도처리기능을 통하여 최종처리수는 공정개시 10일까지 100%의 제거효율을 나타내었으며 이후 다소 감소하였으나 약 20일 이후부터 다시 안정화되어 80% 이상의 높은 제거효율을 지속적으로 나타내었다.

PMR공정은 PAC 접촉조에서의 1차처리와 막여과조

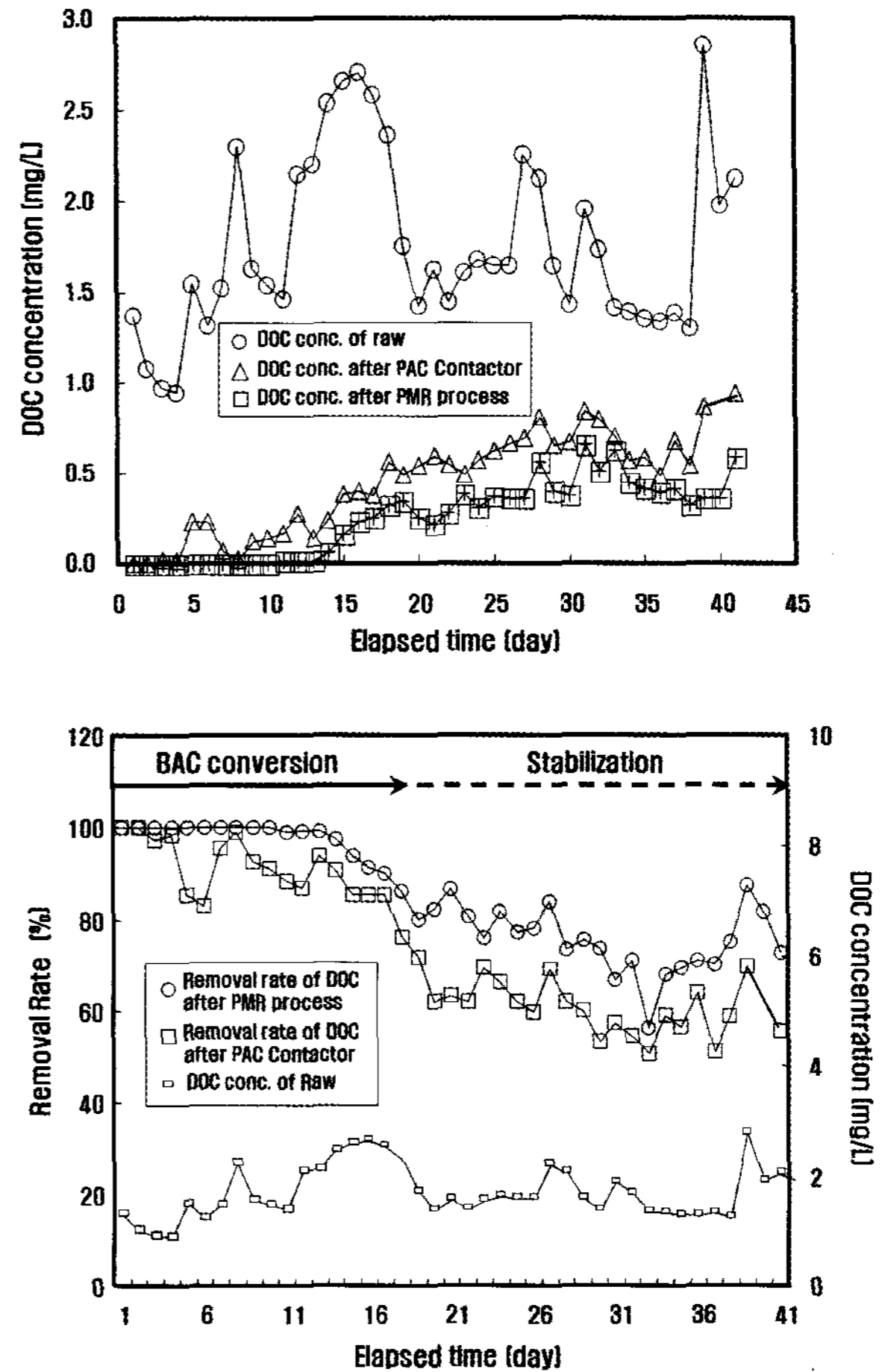


Fig. 5. DOC removal efficiency by PMR process.

에서의 2차처리로 이루어져 있다. 또한, 생물학적인 고도처리, Fresh PAC 주입을 통한 추가 흡착, 응집 및 membrane 표면층 gel layer에 의한 rejection 효과 등 복합적인 처리기능을 가지고 있기 때문에 실험결과에서와 같이 매우 높은 처리효율을 나타낸 것으로 판단된다. 특히 운영초기에는 PAC의 흡착능이 그대로 남아 있는 상태에서 고농도의 PAC와 접촉하고, 90% 이상 처리된 1차 처리수가 막여과 반응조에서 재처리됨으로써 분석기의 검량한계 이내로 100% 가까이 제거된 것으로 판단된다. 입상활성탄을 이용하는 경우 100%의 처리효율을 나타내는 경우는 거의 보고되지 않고 있으나, 고농도의 분말활성탄을 사용하는 경우 제거대상 물질에 관계없이 상대적으로 매우 높은 처리효율을 나타내고 있다. 특히, 20,000 ppm의 고농도 PAC를 적용한 경우에 있어서 원수 TOC 10 ppm 대비 평균 95%, 간헐적으로 100%의 처리효율을 나타내었고[9], 40,000 ppm의 PAC-막여과 반응조 공정운영 50일 이후 Geosmin

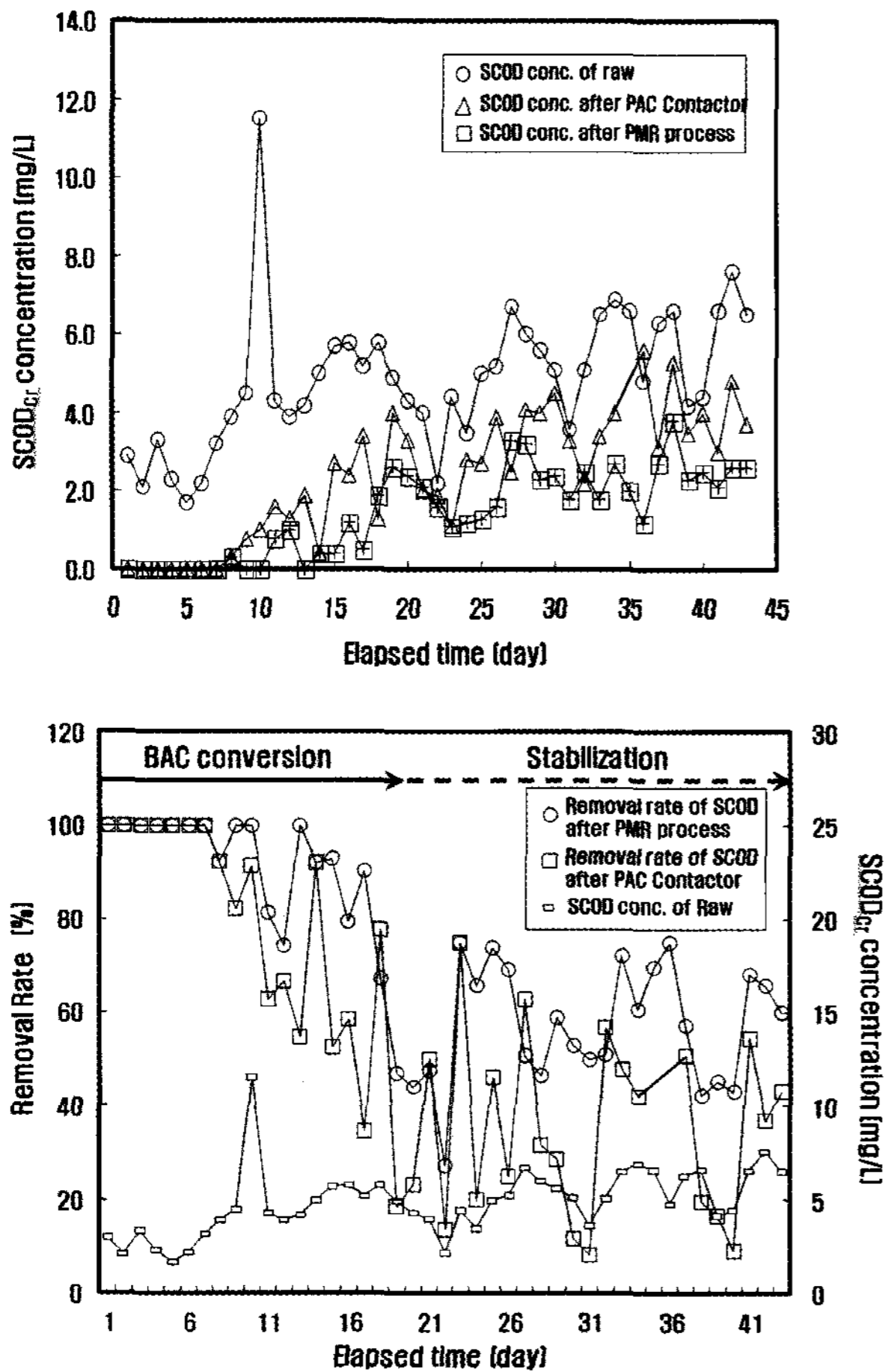


Fig. 6. SCOD_{Cr} removal efficiency by PMR process.

1,500 ng/L spiking test에서도 100% 제거(처리수 2 ng/L 이하)하는 등[10] 고농도 PAC에 의한 높은 고도 처리 효율은 국내외적으로 검증된 보고가 있다.

PMR 공정에서는 원수중의 미생물이 모두 시스템 내에 농축되고, 막여과 반응조에서 충분한 산소가 공급되며, PAC가 미생물 media 역할을 하는 등 미생물이 서식하기에 매우 좋은 환경이라 할 수 있다. 이에 따라 BAC로의 전환이 기존의 입상활성탄 공정보다 훨씬 빠른 시기에 이루어진 것으로 판단되며, 공정개시 후 8일, 30일, 50일에서의 미생물 개체수는 $4.0 \sim 8.0 \times 10^6$ CFU/mL 정도로 유지되었다. 특히, 미생물 활성도가 높은 여름철 시기에 평가함으로써 상대적으로 생물학적 고도 처리의 역할도 크게 작용한 것으로 판단되며, 이에 따라 향후 겨울철 시기를 포함한 장기간의 처리효율 평가를 통한 추가검증이 필요하다.

DOC 제거특성에 대한 비교검토를 위한 SCOD_{Cr}의 제거효율은 Fig. 6에서와 같이 DOC와 비슷한 경향의 제

거율을 나타내고 있다. 운영초기 약 10일 간의 SCOD_{Cr}의 제거율은 DOC와 마찬가지로 평균 90% 이상의 높은 제거율을 나타내고 있으며 PAC접촉조에서의 PAC 흡착능 저감에 따라 처리효율이 감소하여 제거율이 감소하였으나 DOC의 경우와 마찬가지로 다시 안정적인 처리효율을 나타내고 있다. 운영초기 SCOD_{Cr}의 제거효율이 100%에 가까운 것은 DOC에서와 마찬가지로 2단에 걸친, 그리고 복합적인 제거기작을 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다.

3.2.2. 맛냄새 유발물질(2-MIB, geosmin)의 제거

맛·냄새물질의 대표적 물질로 봄철에 발현하는 2-MIB와 가을철에 발현하는 Geosmin은 곰팡이 냄새 또는 흙냄새를 일으키며 수돗물에서 맛과 냄새가 나게 되면 혐오감을 일으킬 수 있으므로 미치는 영향이 크며 최근 수돗물이 불신을 받고 있는 가장 근본적인 원인이 되고 있으며, 현재 국내 고도처리 시설 도입에 대한 주 처리대상이다. 플랜트 운영기간 동안 맛냄새 유발물질은 원수 중에 유입되지 않았으며, PMR 공정에서의 맛·냄새 유발물질의 제거효율 평가를 위하여 인위적으로 총 3회에 걸친 spiking test를 수행하였다. Spiking 시기는 ① PAC접촉조의 PAC흡착능이 가장 많은 시기(공정개시 1일, 2일째), ② PAC흡착능이 과과된 시점(공정개시 20일째), ③ PAC흡착능이 대부분 소멸되고 PAC가 BAC화 되었다고 판단되는 시점(공정개시 50일째)이었다. 또한, 첫 번째 spiking test에서는 2-MIB와 geosmin을 따로 24시간씩 spiking하였으며, 두 번째는 2-MIB만을, 세 번째는 20 L의 표준용액에 2-MIB와 geosmin을 동일 농도로 혼합하여 각각에 대한 제거특성 및 상호간의 간섭효과를 파악하고자 하였다. Spiking test를 위하여 각각의 물질 10 mg을 20 L의 DI water에 희석하여 0.5 mg/L의 표준용액을 제조, 원수유입량 대비 125 ppt (ng/L)가 되도록 24시간 동안 연속으로 주입하였다. 제거효율 평가를 위하여 샘플링은 spiking 개시 후 6시간(또는 8시간) 간격으로 일정하게 이루어졌으며, 원수, PAC접촉조 월류수, Membrane처리수(최종처리수)에 대하여 채수하였다. 샘플은 멸균된 1 L 용량의 갈색 채수병에 채수하였으며 채수 후 GF/C를 이용하여 여과한 뒤 분석 시까지 4°C 미만에서 냉장 보관, 분석하였다.

입의 주입한 2-MIB와 geosmin의 농도는 원수대비 125 ng/L로 주입하였으나 실제 측정결과는 최소 72

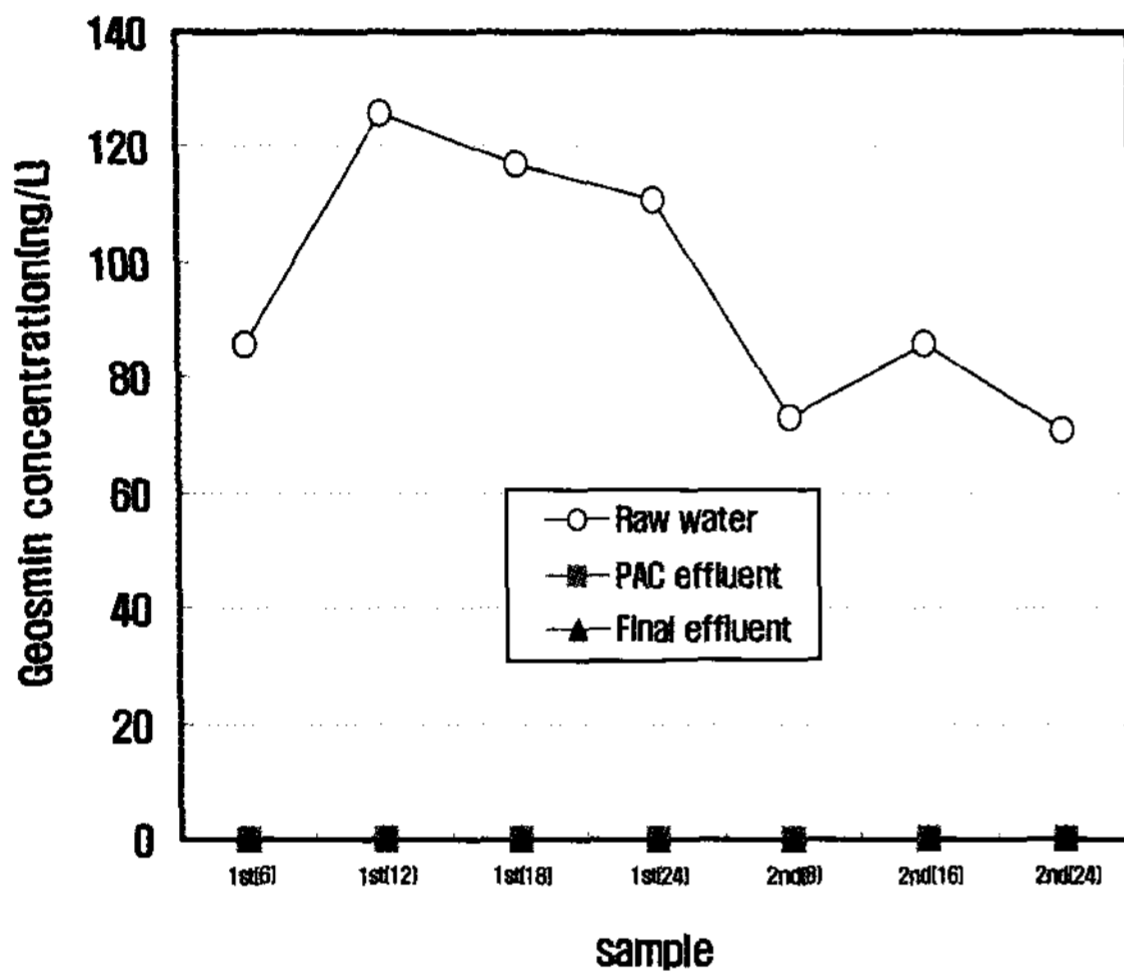
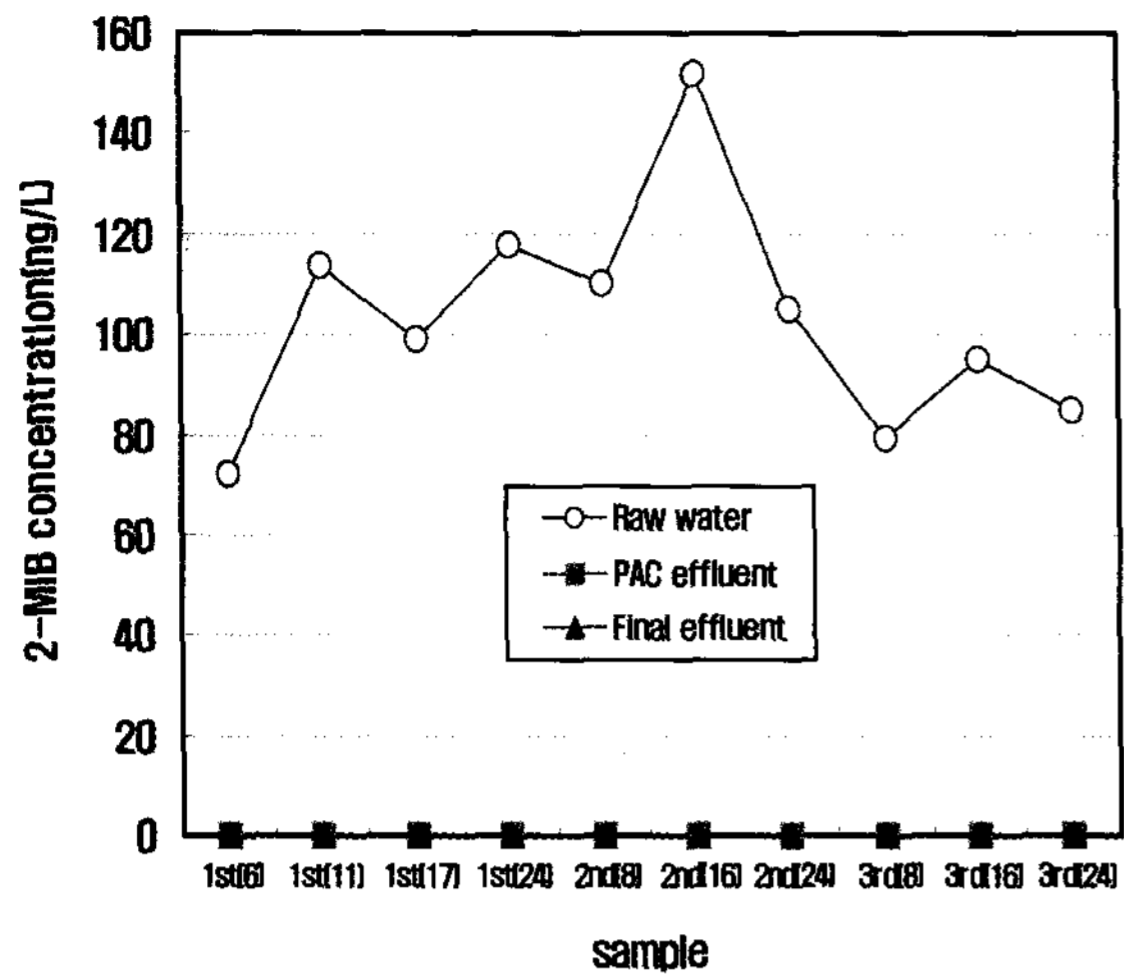


Fig. 7. Experimental results of 2-MIB (left) & geosmin (right) spiking test.

ng/L에서 최대 152 ng/L로 편차를 보였다. 원수의 농도가 편차를 보인 이유는 원수의 유입이 80 m³/day의 유량으로 일정하게 유입되지 못하고 막여과조의 수위에 따라 유입되는 유량이 항시 약간의 변동이 있기 때문이다.

실험결과 2-MIB와 geosmin은 spiking 시기나 동시주입 등에 관계없이 PAC slurry blanket 접촉조 단일 처리만으로 검량한계 이하로 100%의 제거효율을 나타내었다. 이는 2-MIB와 Geosmin을 장기간 연속주입이 아닌 24시간만을 spiking하여 DOC나 SCOD_{Cr}의 경우 운영초기 100%의 제거효율을 나타낸 것과 유사한 결과라고 할 수 있으며, 장기간 지속적으로 spiking 하였을 경우에는 운영기간에 따라 제거효율은 감소할 가능성이 있을 것으로 판단된다. 그러나 PAC의 흡착능이 상당부분 소진된 이후에도 단기간의 spiking이긴 하나 매우

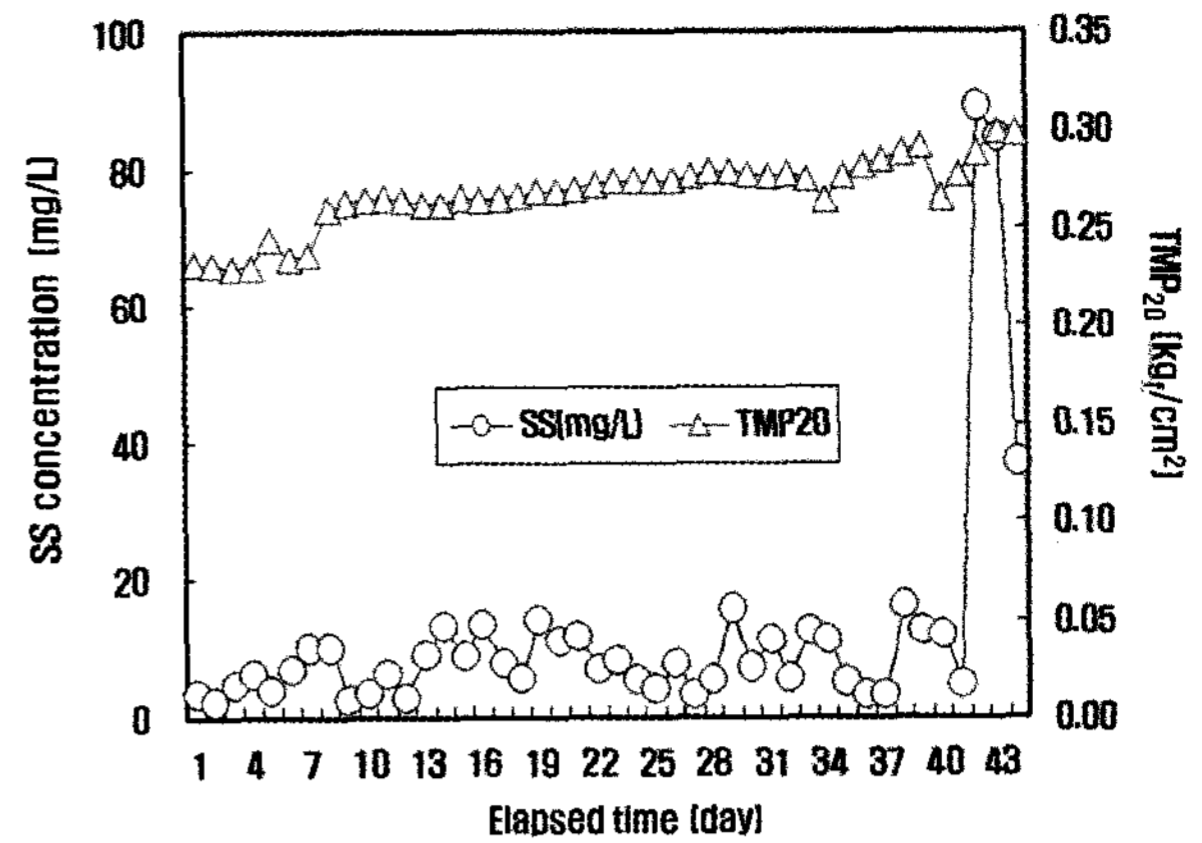


Fig. 8. Comparison with SS of raw water and TMP variation.

높은 제거효율을 나타내어 고농도 PAC의 높은 처리효율에 대한 가능성을 확인할 수 있었으며, 현재의 고도처리 공정도입에서와 같이 맛·냄새 유발물질 제거를 목적으로 하는 경우 본 공정의 PAC 농도는 다소 과다하게 적용되었다고 할 수 있다. 따라서 향후에는 BAC로 완전히 전환된 시점에서 고농도의 2-MIB, Geosmin을 연속적으로 오랜 기간동안 주입하여 PMR 공정에 의한 2-MIB, geosmin 제거 한계능을 살펴 볼 필요가 있다.

3.2.3. 막여과 성능평가

플랜트 운영기간 중 원수 SS는 Fig. 8에서와 같이 1~2일간의 고탁도시기(약 80 mg/L)를 제외하고는 대부분 20 mg/L 이하로 유입되었으나, 최종처리수는 탁도는 검량한계 이하로 유지되었다.

운영기간 중 원수의 SS 변화에 관계없이 회수율(99.5%), 약품 주입량(10ppm) 등 공정운영을 유지하였음에도 불구하고 TMP₂₀은 운영초기 0.23 kg/cm²에서 0.30 kg/cm²으로 TMP₂₀상승률은 크지 않았으며, 이는 막 fouling에 크게 영향을 미치는 유기물질에 대한 제거효율이 매우 높았기 때문인 것으로 판단된다. 침지형 막여과의 경우 일반적으로 90%의 회수율을 유지, 2단 처리함으로써 99%의 회수율로 운전된다. 하지만, PMR 공정은 유기물에 대한 높은 제거효율로 인하여 단일 반응조를 사용, 회수율 99.5% 운영이 가능한 것을 확인하였다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 적은 양의 PAC를 slurry blanket의 형태로 체류시킴으로써 고농도의 접촉효율을 나타낼 수 있는 새로운 개념의 PAC 접촉조를 고안하여 침지형 막여과와 연계시킨 PMR 공정에 대한 실현성 및 고도처리 효율에 대한 가능성을 평가해 보았다. 연구결과 PAC의 거동은 접촉조의 수리학적 최적설계 및 운영을 통하여 blanket의 유지에는 큰 어려움이 없었으나, 현재의 개발단계에서는 갑작스러운 처리유량 변동에 다소 취약하다고 할 수 있다. 하지만, 기존의 정수나 하수처리에 적용되어온 blanket 형태의 공정에서는 유량과 함께 blanket의 고형물 양이 동시에 지속적으로 변화하여 blanket의 유지가 복잡하고, 어려우나 PMR 공정에서는 고형물 양의 변화가 거의 없기 때문에 유량변동에 대하여 PAC 접촉조 구조 및 운영방법 개선을 통한 충분한 대처가 가능할 것으로 판단된다.

고농도의 slurry blanket 접촉조 1차 처리를 통하여 운영기간 중 DOC 기준 60% 이상, 막여과 반응조에서의 2차 처리를 통하여 80% 이상, 그리고 맛냄새 유발물질에 대해서는 100%의 제거효율을 얻을 수 있었다. 5 ppm의 Fresh PAC가 연속적으로 주입되기는 하였으나, 기존의 PAC 접촉방식에서 5 ppm의 주입으로 큰 제거효율을 얻기가 어려운 것을 감안하면 현재의 원수 수질 및 공정 운영상에서 Fresh PAC는 큰 역할을 하지 못한 것으로 판단되며, PAC slurry blanket을 통한 고농도의 PAC 접촉 및 생물학적 고도처리, 그리고 막여과 반응조에서의 2차 처리를 통하여 높은 제거효율을 얻은 것으로 사료된다.

현재 PMR 공정은 하나의 공정으로써의 가능성 정도만을 판단한 정도이며, 실공정 적용을 위해서는 다양한 추가연구가 필요하다. 첫째, slurry blanket이 유지되지 못하여 PAC가 월류될 경우 PAC가 소실되는 것은 아니나 막여과 반응조에서 PAC 접촉조로 재순환 시켜야 하며 이 빈도가 높을 경우 실공정 적용은 곤란하기 때문에 유량변동에 대비한 slurry blanket 안정화방안이 필요하다. 둘째, 본 연구에서는 2개월 정도의 짧은 기간 동안 고도처리 효과를 분석하였으나, 겨울철을 포함한 1년 이상의 운영을 통하여 계절적, 수질적 변화와 함께 장기간에 걸친 제거효율을 살펴봐야 하며, 이를 통하여 2개월 정도까지 안정적 수준으로 유지된 처리효율이 어느 정도까지 지속될 수 있는지, 이에 따른 PAC 교체

주기 및 방안에 대한 연구가 필요하다. 셋째, 원수 수질 및 목표수질 대비 최적 PAC slurry blanket 농도, Fresh PAC 주입 필요성 및 최적농도, 수질악화 대비 다단계 PAC slurry blanket 접촉조 운영의 필요성 및 효과 등 세부공정 운영에 대한 연구 등이 필요하다.

PMR 공정은 현재 개발 초기단계이기는 하나 운영상의 실현성 및 고도처리 효율에 대한 그 가능성은 매우 높은 것으로 판단된다. 본 공정은 PAC slurry blanket 접촉조와 막여과 반응조로 구성된 매우 compact한 고도처리 공정으로써, 표준정수처리에 고도처리공정을 추가하는 기존의 방식을 매우 간단하게 대체할 수 있다. 특히, 국내에서와 같이 신규정수장의 필요성보다는 기존의 시설을 retrofitting/rehabilitation 하는 상황에서 기존의 부지면적에 기존의 구조물을 그대로 사용하여 응집지는 PAC 접촉조로, 여과지는 침지형 막여과조로 retrofitting 하기에 매우 적절할 것으로 판단된다. 고품질의 수돗물 공급을 위하여 고도처리공정은 지속적으로 도입되고 있으며, 기존의 표준정수처리공정은 막여과로 개선하기 시작하였다. 이러한 시점에서 PMR 공정은 이 두가지의 목적을 경제적으로 동시에 획득할 수 있는 좋은 대안공정이 될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. 정지현, 추광호, 박학순, “저압 막여과 혼성공정을 이용한 고도 정수처리”, *멤브레인*, **17**, 61 (2007).
2. C. F. Lin, Y. J. Huang, and O. J. Hao, “Ultrafiltration Process for Removing Hummic Substances: Effect of Molecular Weight Fractions and PAC Treatment”, *Wat. Res.*, **33** (1999).
3. T. Lebeau, C. Lelievre, H. Buisson, D. Cleret, L. W. Van de Verter, and P. Cote, “Immersed membrane filtration for the production of drinking water: combination with PAC for NOM and SOCs removal”, *Desalination*, **117** (1998).
4. Y. Matsui and T. Matsushita, “Effect of natural organic matter on powdered activated carbon adsorption of trace contaminants: characteristics and mechanism of competitive adsorption”, *Wat. Res.*, **37** (2003).
5. 안규홍, 송경근, 박준홍, 권지향, 김형수, “분말활성탄 첨가가 한외여과막 투과성능에 미치는 영향”,

- 한국환경과학회지, 3월호 (1995).
6. H. S. Kim, H. Katayama, S. Takizawa, and S. Ohgaki, "Removal of coliphage Q β and organic matter from synthetic secondary effluent by powdered activated carbon-microfiltration (PAC-MF) process", in *Proc. IWA Specialized Conference on Membr. Tech.*, Israel (2001).
 7. Y. J. Chang, K. H. Choo, M. M. Benjamin, and S. Reiber, "Combined adsorption-UF process increases TOC removal", *J. AWWA*, **90** (1998).
 8. H. S. Kim, H. Katayama, S. Takizawa, and S. Ohgaki, "Development of microfilter separation system coupled with a high dose of powdered activated carbon for advanced water treatment", *Desalination*, **186** (2005).
 9. G. T. Seo, Y. Suzukib, and S. Ohgaki, "Biological powdered activated carbon (BPAC) microfiltration for wastewater reclamation and reuse", *Desalination*, **106** (1996).
 10. 김한승, "막분리형 고농도 분말활성탄 처리시스템 개발에 관한 연구", 동경대학교 박사학위 논문 (2000).