

완속여과 공정에서 표층 생물막 생성 및 제어와 원인조류 규명

Analysis and effectiveness of biological thin layer (Schmutzdecke) on the sand surface in slow sand filtration processes

김성수^{1,*} · 박노석¹ · 김충환¹ · 박종근²

Seong-Su Kim^{1,*} · No-Suk Park¹ · Chung-Hwan Kim¹ · Jong-Keun Park²

1 한국수자원공사, 2 대구대학교 환경교육과

(2007년 6월 7일 논문 접수 ; 2007년 12월 10일 최종수정논문 채택)

Abstract

Because of their simplicity, efficiency, and economy, slow sand filters are appropriate means of water treatment for small water systems. Biological activity within the sand bed have the strongest influence on removal efficiency of pollutants by slow sand filtration. This report investigated the microorganisms(algae) of slow sand filtration pilot plant at Y water treatment plant. Data were collected at inflow and slow sand filtration from May to October, 2007. The results indicated that the light exposure was influenced on microorganism in slow sand filtration according to the formation of algal biofilm.

The relative contribution of biomass and accumulated particulates to head loss development in slow sand filters requires further study.

Key words : slow sand filtration, biological skin, Schmutzdecke, algae

주 제 어 : 완속여과, 생물막, 조류

1. 서론

정수처리 방식 중 완속여과 처리방식은 원수의 수질이 비교적 양호한 경우에 처리하는 방식으로, 모래층을 통과하여 천천히 여과하여 원수를 정화하는 것으로 모래층과 모래층 표면에 증식하는 미생물군이 물속의 불순물을 포착하여 산화·분해하는 작용에 의존하는 정수방법이다. 이러한 완속여과는 여과속도가 5~10 m/일 이하를 표준으로 하여 여과지의 표면 또는 안에서 번식한 조류, 세균, 미생물 등에 의해

만들어진 점질의 생물막에 의하여 정수되어진다. 완속여과지에 형성된 생물막은 수중의 부유물, 암모니아, 망간 및 맛·냄새 유발물질 등을 물리적, 화학적 또는 생물학적으로 제거 또는 분해가 가능하다고 알려져 있다. 또한 생물학적으로 활성화된 완속여과지는 병원균의 제거 효율이 다른 여과 방식보다 더 높은 것으로 알려져 있다. 또한, 완속여과법은 급속여과법에 비해 상대적으로 건설비가 저렴하고 유지·관리에 있어 급속여과법에 비하여 매우 간단하여 국내 200개 이상의 소규모 정수처리 시설에 적용되어 운영중에 있다.

이러한 완속여과 공정은 유립을 중심으로 많은 실공정 운영에 의하여 자연적인 생물막을 이용하기 때문에 소독부산물의 발생에 대한 우려가 없고, 유해 미생물의 제거에 효과적인 것으로 보고되고 있다. 그러나 국내에서 완속여과법에 대한 연구는 완속여과 공정에서 자연유기물 또는 농약 제거 특성(전 등, 2003, 정용준 등, 2002), 여과공정에서 GAC 도입(안과 남, 2005) 등 소수에 불과한 실정으로 상당히 많은 시설에서 운영중에 있으나, 국내 완속여과 공정의 제거 매커니즘 규명 및 효과에 대한 평가, 운영최적화를 위한 연구는 드문 실정이다. 특히, 완속여과법에서의 생물학적 특성이나 기능, 분류와 동정은 현재까지 다루어 지지 않은 상황이다.

완속여과법에서의 생물학적 작용은 햇빛과 산소의 공급이 원활한 표층 수 cm 이내에서 미생물이 성장하고 모래표면에 부착하여 형성된 생물막에 의해 이루어진다. 완속여과지의 장점은 이렇게 자연적으로 서식하는 미생물에 의하여 오염물질이 제거됨에 따라, 소독부산물 발생에 대한 우려가 없다는 것이다. 또한 미생물 간에 먹이사슬과 경쟁에 의해 바이러스 또는 유해 미생물의 제거에 효과적이다. 그리고 입자성 물질의 제거는 여과지 표층에 형성된 생물막에 의해 제거된다고 알려져 있다. 완속여과지 표층의 생물막 형성은 보통 환경적 요인에 따라 달라지지만 30일에서 200일 정도가 소요된다고 보고되고 있다. 특히 국내 완속여과 처리시설의 경우 여재표층의 조류가 많이 번성하여 여과막을 덮고 용단을 깎아내려 버리는 경우가 많이 나타나고 있다. 그러나 온도가 5°C 이하로 감소하는 겨울철에는 미생물의 의한 수질정화 작용을 기대하기 어렵다. 조류는 무기영양염류의 흡수와 유기물질의 분해와 같은 긍정적인 역할도 있지만, 외관 손상, 여과지 폐색과 불결한 냄새의 유발과 같은 부정적인 측면도 있다. 조류의 억제에 위해서는 약품 처리가 가능하다. 그러나 처리 약품에 따라 여과지 내의 미생물을 죽게 하여 여과 기능이 손상될 염려가 있어 원칙적으로는 사용하지 않는 것이 좋다고 제시하고 있다(환경부, 2007).

그러나 국내 완속여과 공정의 운영에 있어서 이러한 생물학적인 기작에 대한 명확한 평가가 이루어지지 않은 실정이다. 완속여과 공정의 운영에 있어서 일부 시설에서는 주기적으로 여층 표면을 세정하고 있고, 일부에서는 일정기간 운영 후 여층을 삭취하고 있으며, 일부에서는 표면 조류의 생성을 억제하기 위하여 차광막을 설치하여 운영중에 있다. 그러나 이러한 여러 형태의 운영방식에 대한 평가가 이루어지지 않고 있음에 따라 최적 운영방안 마련을 위한 의견이 분분한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 국내 원수 수질조건에서 완속여과 공정의 표층 생물막의 생성과 제어에 미치는 영향 인자를 평가하고 환경조건에 따른 생물막 형성에 관여한 원인 조류종을 규명하여 완속여과 공정의 최적 운영방안 마련을 위한 기초자료로서 활용하고자 연구를 수행하였다.

Table 1. M시 완속여과 정수장 시설 및 수질특성

	구분	M시 K-WTP	M시 D-WTP
시설	취수원	하천복류수	수원지(호소수)
	시설용량	3,000m ³ /일	800m ³ /일
	처리공정	완속여과 -여과면적 : 207m ² -여과지수 : 4지	완속여과 -여과면적 : 96m ² -여과지수 : 2지
원수 수질 특성	탁도(NTU)	1.56 (0.16 ~ 70)	0.77 (0.07 ~ 17.8)
	pH	7.0 (6.4 ~ 7.5)	6.9 (6.1 ~ 7.6)
	부유물질(SS, mg/L)	0.58 (0.2 ~ 3.8)	0.6 (0.2 ~ 2.5)
	대장균수(MPN)	242 (0 ~ 3,000)	248 (0 ~ 5,000)

2. 실험재료 및 방법

2.1. 대상정수장 및 모형실험장치

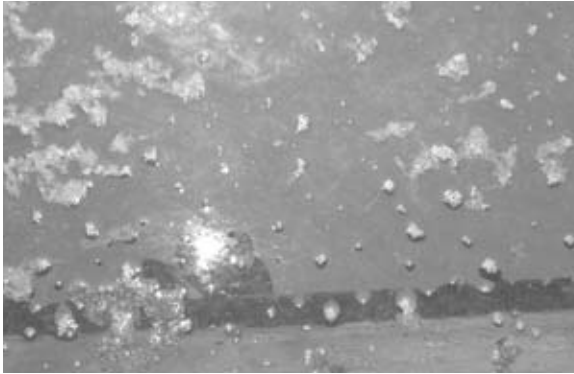
완속여과 공정의 환경조건별 생물학적인 평가를 위하여 M시의 2개 정수장에 여과지 상부에 차광막을 설치하여 조류의 과잉번성 억제 효과를 살펴보았다. 또한, 예천군의 Y정수장에 완속여과 모형플랜트를 설치 운영하면서 조류의 생성에 따른 효과를 평가하였다. Table 1과 같은 특성을 갖고 있는 M시의 2개 정수장의 경우 여과지내 조류의 과잉번성으로 여과지 운영에 지장을 초래하고 있어 전염소를 주입 운영하고 있었으며, 조류로 인한 미관 억제 및 여과지 표층부의 조류를 제거하기 위하여 정수장 근무자들이 대략 1개월에 1회 여층 표면청소를 실시하고 있는 실정이었다. 그러나 착수정에 조류를 제어하기 위해 전염소를 주입하는 방법은 완속여과 공정내 생물학적 제거효과 부분에 지장을 초래할 우려가 있기 때문에, 이에 대한 대응방안으로 여과지 상부에 차광막을 설치하여 조류 성장억제 효과를 육안으로 평가하고자 하였다.

또한, 환경조건별 완속여과 공정내 조류의 성장형태를 평가하기 위한 모형플랜트를 예천군의 Y정수장에 설치 운영하면서 연구를 수행되었다. 건물 내에 햇빛의 영향을 전혀 받지 않는 실내조건의 1지와 건물 외벽에 햇빛에 노출된 조

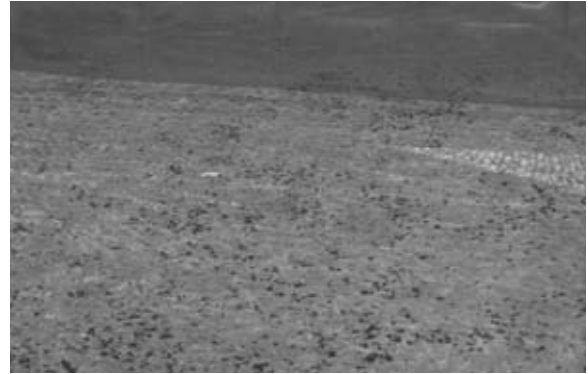


Fig. 1. Y정수장 완속여과 모형플랜트 설비.

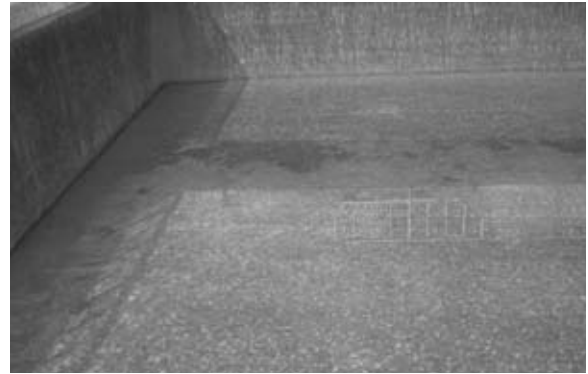
차광막 미설치지(1개월 운영 후)



차광막 설치지(2개월 운영 후)



(a) M시 A정수장



(b) M시 B정수장

Fig. 2. 차광막 설치 여부에 따른 표층 조류발생 특성.

건의 2지를 각각 설치하여 운영하였으며, 실외조건 중 1지는 Fig. 1과 같이 일사량을 대략 1/2정도 줄여주는 일사량 차단장치를 설치하여 운영하면서 비교평가를 수행하였다.

Y정수장 모형플랜트는 복류수를 유입원수로 약품 투입공정 및 침전공정 없이 직접 완속여과지로 유입되는 단순한 공정으로서 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 공정은 매우 단순하다. 한 지당 여과속도는 4m/일로 유량을 조정하여 운전하면서, 주기적으로 여재를 채취하여 지내 생성된 조류를 분석하였으며, 유입 및 유출수의 생물학적 인자들을 평가하였다. 또한, 각 지에는 압력계를 설치하여 여과지내에서 발생하는 손실수두를 관찰하였으며, 위치별 샘플링용 포트를 구성하여 층고별 평가시 여재샘플링을 좀 더 수월하게 수행하였다. 완속여과 컬럼은 여재층의 햇빛에 의한 조류의 성장을 방지하기 위하여 햇빛을 차단할 수 있는 구조로 설치하여 여층내 조류성장을 방지하였으며, 유입수 및 유출수에 대해 일정 간격별로 수질분석을 수행하여 효율평가를 수행하였다. Table 2에 나타낸 바와 같이 Y정수장 완속여과 모형플랜트에서 사용된 완속여과사는 여재비중 2.65로서, 여재유효경(d_{10})은 0.30 ~ 0.45 mm이며, 여재균등계수(UC)는 1.40 이하의 모래를 이용하였고, 여층 구성은 모래 80cm에 여과

사리 60cm를 충전하여 사용하였다.

2.2. 부착조류 및 식물성플랑크톤

Y정수장의 유입수와 모형실험장치 실내(1번), 실외1(2번), 일사량 조절장치를 설치하지 않고 운영) 및 실외2(3번, 일사량 조절장치를 설치하여 일사량을 대략 1/2로 차단하여 운영)의 완속여과지 상층수의 시료는 각각 2 L씩 정량 채수하

Table 2. M시 완속여과 정수장 시설 및 수질특성

구분	Y정수장 완속여과 모형실험장치		
모형 설비 제원	취수원	하천복류수	
	시설용량	1.5m ³ /일	
	처리공정	모형 아크릴 완속여과 컬럼	
		- 여과면적 : 0.1m ² (φ0.35m 원형)	
- 여과지수 : 3지(실내1, 실외2)			
원수 수질 특성	탁도(NTU)	0.56 (0.16 ~ 70)	
	pH	7.1 (6.8 ~ 7.3)	
	부유물질(SS, mg/L)	0.1 (0.1 ~ 0.2)	
	대장균수(MPN)	121 (70 ~ 500)	

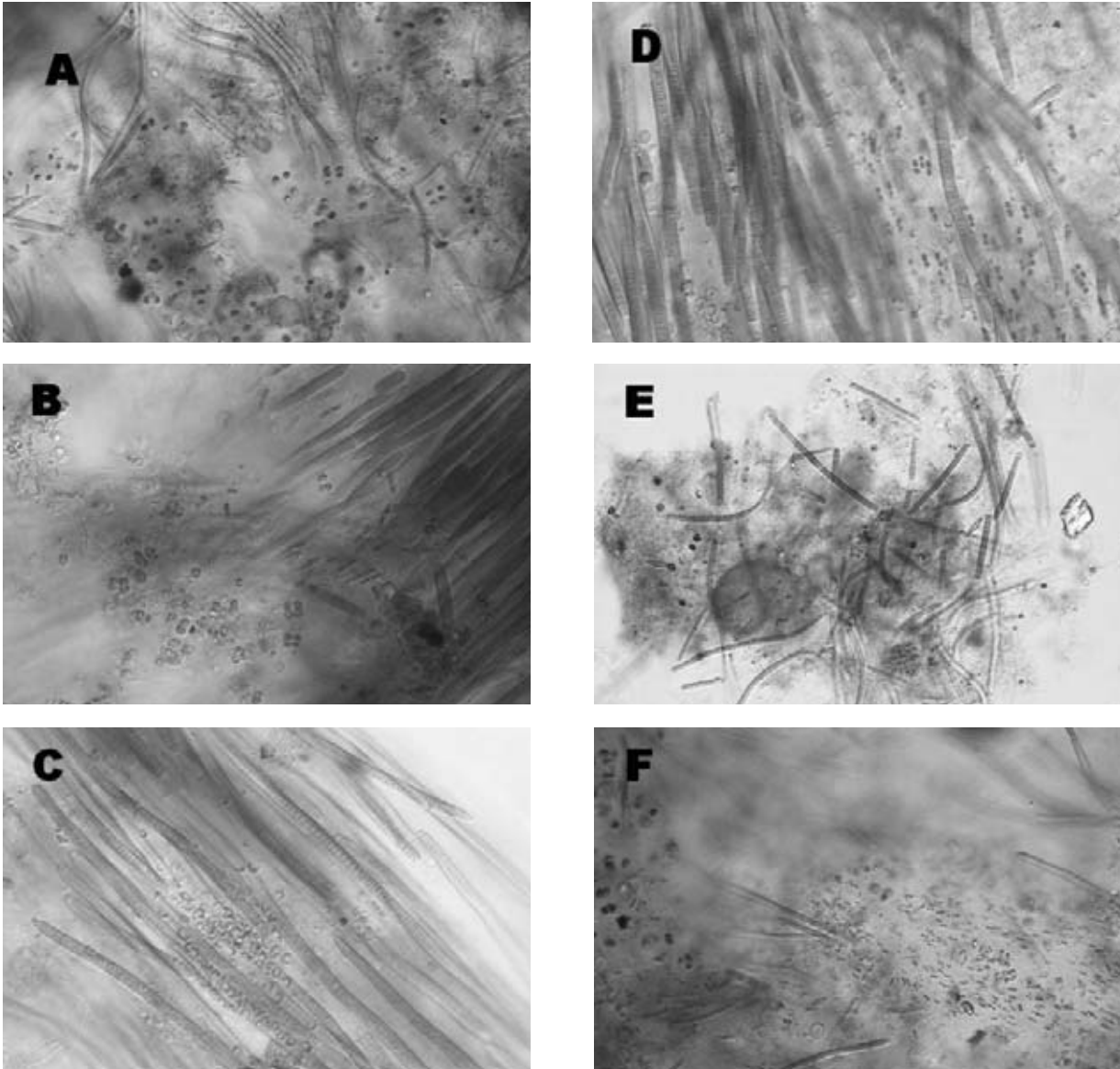


Fig. 3. 완속여과 모형실험장치 여과사 표층에 형성된 조류 생물막.

A: *Oscillatoria troelichii*와 *Chlorella ellipsoidea*, B: *O. troelichii*와 *Chroococcus varius*, C: *O. troelichii*와 *Kirchneriella irregularis*, D: *O. troelichii*와 *Nitzschia* sp., E & F: *O. troelichii*와 이물질 또는 여러 종의 조류

였다. 완속여과지 상층부의 물 시료는 각 모형실험장치 물 시료 채취구 1번을 사용하였다. 부착조류 조사를 위한 완속 여과지 상층부의 모래 시료는 각 모형실험장치 여과사 채취구를 이용하여 채취하였다. 식물플랑크톤 현존량을 구하기 위하여 정량시료는 1 L를 취하여 붕산나트륨(Sodium borate, $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_4$)로 중화한 포르말린(포름알데하이드 용액)을 사용하여 고정하였으며, 고정 농도는 포름알데하이드 최종 농도를 2.5%로 하였다. 부착 조류를 위한 모래 시료는 채취한 시료 부피와 동량의 2.5% 포름알데하이드 용액을 첨가하여 고정하였다.

식물플랑크톤의 현존량을 파악하고자 하는 정량 분석용 시료는 자연 침강법을 사용하여 농축하였다. 자연 침강법은 중력을 이용해 시료를 장시간 방치하여 농축하는 방법으로 원심 분리법과는 달리 세포의 원형이 그대로 유지되며, 시료의 침강이 충분히 일어난다. 채수된 1 L 시료는 고정 후 어두운 장소에서 최소 48 시간 이상 침강시켰다. 식물플랑크톤 및 부착 조류의 동정은 광학현미경 Nikon Eclipse 80i (Nikon, Japan)와 ACT-2U(Nikon, Japan) 디지털사진 시스템을 사용하여 수행하였다. 출현종은 Prescott의 분류 체계에 따라 분류하였으나, 구조강은 Simonsen의 체계를

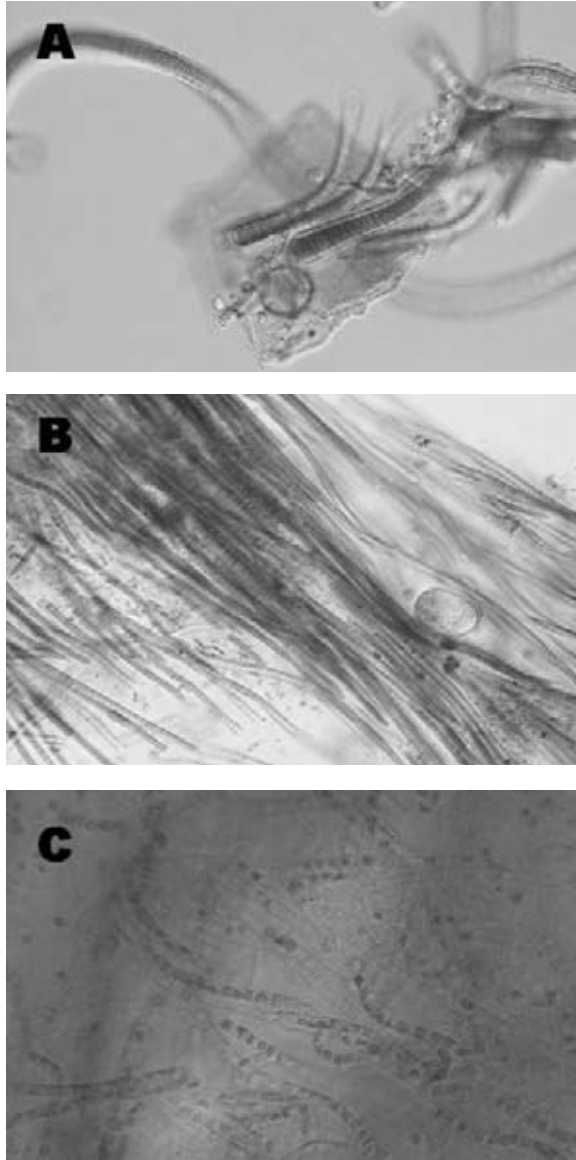


Fig. 4. 완속여과지 표층에 형성되는 생물막의 매트가 되는 부착 조류.
A: *Calothrix* sp. B: *Oscillatoria froelichii* C: *Mougeotia* sp.

따랐다. 식물플랑크톤 현존량의 계수는 시료를 Sedgwick-Rafter(SR) chamber를 사용한 Schoen(1988)의 방법으로 정량 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 표층 생물막(조류)의 생성과 억제

완속여과지 운영에 있어서 조류의 성장은 탁도물질 뿐만 아니라 유기물 및 박테리아의 제거 등에 관여하여 처리효율을 증가시키는 장점을 가지고 있지만, 과잉번성시 손실수두

의 증가를 통한 여과시간의 감소, 불쾌한 맛냄새 유발, 여과지의 불쾌한 미관유발 등의 단점을 가지고 있다. 모형플랜트 운영을 통한 이러한 조류의 성장에 대한 평가결과 12~14℃의 수온조건의 복류수를 원수로 사용하는 완속여과지 공정 중 실외조건의 경우 운영시작 2주 후에 이러한 조류에 의한 생물막이 형성되어 졌다. 이러한 경향은 Y정수장에 신규로 건설된 실공정 완속여과지 공정에서도 유사하게 나타났으나, 실내 조건에서 운영중인 모형 완속여과 컬럼의 경우에는 조류에 의한 생물막이 생성되지 않았다. 따라서, 이러한 여층 표면의 생물막은 실운영 조건에서 햇빛이 주 성장 제한인자임을 알 수 있었다.

2개의 M시 정수장을 대상으로 차광막 설치 유무에 따른 여층표면의 조류 과잉번성 억제효과를 평가한 결과 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 차광막을 설치하지 않은 여과지는 설치 후 1개월 운영시 조류발생이 여과사 표면, 여과지 벽면 및 수 표면 전체에 상당히 진행되었으나, 조류차광막을 설치한 지는 조류 발생량이 현저히 감소한 것으로 육안 관찰되었다. 따라서 여제 표층의 조류 성장 제한인자는 햇빛의 차단 여부이며, 적은 비용으로 설치한 차광막은 완속여과지 표면의 조류 과잉번성에 매우 효과적이고 경제적인 제어방안임을 알 수 있다.

3.2. 여제표층 생물막 형성 조류

Y정수장에 설치 운영한 완속여과 모형실험장치 중 실외 조건의 여과지 상층부에서는 조류에 기인하는 생물막이 형성되었으며, 관찰된 조류종의 모습을 Fig. 3에 각각 나타내었다. 그리고 실외에 설치하여 햇빛이 조사되어지는 모형실험장치 중 일사량 조절과 조절하지 않은 지는 생물막이 각각 형성되었지만, 육안상으로는 그 차이를 구별하지 못했다.

실외조건의 두 완속여과지에서 형성된 조류 생물막은 *Oscillatoria froelichii* 가 매트(mat)가 되어, 다른 여러 종의 조류와 군집을 형성하는 경우가 많았다(Fig. 3). 조류 생물막 형성을 현미경 시야에서 관찰하면 *O. froelichii* 군락 안에 녹조류인 *Chlorella ellipsoidea*(Fig.3 A), *Kirchnerella irregularis*(Fig.3 C), 남조세균인 *Choroococcus varius*(Fig.3 B) 그리고 규조류인 *Nitzschia* sp.(Fig.3 D)과 부분적으로 군집을 이루고 있었다. 그러나 *O. froelichii* 군락 전체를 볼 경우에는 Fig. 3 E와 F처럼 이물질 또는 여러 종의 조류와 군체 또는 군집을 형성하고 있었다. 조류 생물막의 매트가 되는 경우는 *O. froelichii* 이외에도 Fig. 4에서 나타난 바와 같은 남조세균인 *Calothrix* sp.와 녹조류인 *Mougeotia* sp.에 의해서도 형성될 수 있었다. 녹조류인 *Mougeotia* sp.의 경우는 형태가 사상체로서 일사량을 1/2로 줄인 모형실험장치에서 주로 출현하였으며, 6월달의 경우 *O. froelichii* 보다 분포빈도가

Table 3. 일사량 조절되지 않은 완속여과지에서 검출되는 조류

Taxon	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
남조세균(남조류, Cyanophyceae)						
<i>Calothrix</i> sp.		+		+	+	+
<i>Chroococcus varius</i>						
<i>Oscillatoria troelichii</i>		++	++	+	++	++
<i>Pseudanabaena limnetica</i>						
규조류(Bacillariophyceae)						
<i>Aulacoseira ambigua</i>						
<i>Flagilaria capucina</i>						
<i>Navicula cryptocephala</i>				+	+	++
<i>Nitzschia sociabilis</i>		++				+
<i>Nitzschia</i> sp.		+				
녹조류(Chlorophyceae)						
<i>Chlamydomonas debaryana</i>				+		
<i>Chlorella ellipsoidea</i>		+	+		+	
<i>Coenochloris</i> sp.				++	+	
<i>Monoraphidium arcuatum</i>						
<i>Mougeotia</i> sp.		+				+
<i>Kirchneriella irregularis</i>		+				
<i>Oocystis</i> sp.			+			+
Genus <i>Scenedesmus</i>						
<i>Scenedesmus dimorphus</i>		+	+	+	++	++
<i>Scenedesmus arcuatus</i>			+			+
<i>Sphaerellopsis mantata</i>						

++: 분포 빈도가 높은 종, +: 출현이 확인 된 종

Table 4. 일사량을 조절한 완속여과지에서 검출되는 조류

Taxon	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
남조세균(남조류, Cyanophyceae)						
<i>Calothrix</i> sp.			+			
<i>Chroococcus varius</i>		+	+	++	++	
<i>Oscillatoria troelichii</i>		+	++	++	+	+
<i>Pseudanabaena limnetica</i>			+			
규조류(Bacillariophyceae)						
<i>Aulacoseira ambigua</i>						
<i>Flagilaria capucina</i>						++
<i>Navicula cryptocephala</i>			+	++	++	+
<i>Nitzschia sociabilis</i>						
<i>Nitzschia</i> sp.		+				
녹조류(Chlorophyceae)						
<i>Chlamydomonas debaryana</i>				+		
<i>Chlorella ellipsoidea</i>						
<i>Coenochloris</i> sp.		+	+			+
<i>Monoraphidium arcuatum</i>						
<i>Mougeotia</i> sp.		++	++	+	+	
<i>Kirchneriella irregularis</i>						
<i>Oocystis</i> sp.			+			+
Genus <i>Scenedesmus</i>						
<i>Scenedesmus dimorphus</i>					+	+
<i>Scenedesmus arcuatus</i>						+
<i>Sphaerellopsis mantata</i>						

Table 5. 일사량 조절되지 않은 완속여과지에서 출현하는 식물플랑크톤

Taxon	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
Cyanophyceae					
<i>Oscillatoria froelichii</i>	++	+	+	++	++
<i>Pseudanabaena limnetica</i>					
Bacillariophyceae					
<i>Aulacoseira ambigua</i>					
<i>Navicula cryptocephala</i>		+		+	+
<i>Nitzschia sp.</i>			+	+	+
Chlorophyceae					
<i>Coenochloris sp.</i>		+	++		+
<i>Monoraphidium arcuatum</i>			+	+++	
<i>Kirchneriella irregularis</i>					+
<i>Scenedesmus dimorphus</i>		+	+		+
<i>Sphaerellopsis mantata</i>			+		

+: ≤ 50 cells/mL, ++: 50 ~ 100 cells/mL, +++: ≥ 100 cells/mL

Table 6. 일사량을 조절된 완속여과지에서 출현하는 식물플랑크톤

Taxon	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
Cyanophyceae					
<i>Oscillatoria froelichii</i>			+		+
<i>Pseudanabaena limnetica</i>	+				
Bacillariophyceae					
<i>Aulacoseira ambigua</i>		+			
<i>Navicula cryptocephala</i>		+	+++	+	
<i>Nitzschia sp.</i>	+	+	+		
Chlorophyceae					
<i>Coenochloris sp.</i>					
<i>Monoraphidium arcuatum</i>					
<i>Kirchneriella irregularis</i>					
<i>Scenedesmus dimorphus</i>			+		+
<i>Sphaerellopsis mantata</i>					

+: ≤ 50 cells/mL, ++: 50 ~ 100 cells/mL, +++: ≥ 100 cells/mL

높아 조류 생물막의 주요 매트임이 확인되었으나, 수온이 상승하기 시작한 7월 이후에는 *O. froelichii*가 더 많아지기 시작하였고, 8월에는 조류 생물막의 주요 매트로서의 역할을 하지 못했다. 따라서, 여과지로 유입되는 일사량의 조절 유무에 따라서도 여과지 상부에 형성되는 조류 생물막 구성에 차이가 있음을 알 수 있다.

*Mougeotia sp.*의 경우는 햇빛을 조절하지 않는 완속여과지에서 출현 빈도가 낮은 반면, 햇빛의 일부만이 유입되는 여과지에서는 출현 빈도가 높게 나타났고, 수온이 낮은 6월에는 모든 여과지에서 같이 출현하기 시작하였으나, 빈도는 빛의 일부를 차단한 여과지에서 더 높게 나타났다. 따라서, 빛의 일부를 차단하는 여과지에서는 조류 생물막의 매트로서 *Mougeotia sp.*, 차단하지 않은 여과지에서는 *O. froelichii*가 생물막 매트를 형성하는 주 조류종으로 나타나 *Mougeotia sp.*는 빛이 약하고 수온이 낮은 조건을 선호하는 반면 *O. froelichii*는 일사량이 많은 경우와 수온이 높은 경우, 양쪽 모두에서 다른 조류 종에 비해 그 경쟁력이 우수

하다고 판단된다.

수온이 낮아지는 9월부터 여과지 상부의 조류 생물막은 Table 3과 4에 나타난 바와 같이 그 이전과는 다른 생물 분포를 나타내었다. 일사량을 조절하지 않은 여과지에서는 *O. froelichii*가 생물막 매트가 되고, 이와 함께 군집을 형성하는 조류로서 녹조류인 *Scenedesmus dimorphus*와 규조류인 *Navicula cryptocephala*의 출현 빈도가 높아졌다. 그러나 일사량을 1/2가량 조절된 여과지에서는 9월의 경우 *O. froelichii* 보다 남조세균인 *Chroococcus varius*와 규조류인 *N. cryptocephala*의 출현 빈도가 높았으며, 10월에는 규조류인 *Fragilaria capucina*의 출현 빈도가 높아졌다.

완속여과지 표층에 번성하는 조류는 수온 및 일사량 등의 환경요인에 따라 각각 조류종이 차이를 나타냈으며, 이러한 시기별 차이는 지속적으로 평가해야 할 것으로 판단되어진다. 그러나, 완속여과지 운영시 가장 애로사항으로 나타나는 하절기 수온 상승에 따른 조류 과잉번성시 생물막 매트를 형성하는 조류종은 *Oscillatoria froelichii*, *Calothrix sp.*

*Mougeotia sp.*으로 나타났다.

3.3 식물플랑크톤

Y정수장 완속여과 모형실험장치를 이용하여 식물플랑크톤의 발생현황을 평가한 결과 유입되는 유입수(복류수)에서 식물플랑크톤을 비롯한 조류는 현존하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 Table 5와 6에서 나타난 바와 같이 모형실험 장치의 여과지 상층수의 식물플랑크톤 총 현존량은 $1.8 \times 10 \sim 3.5 \times 10^2$ cells/mL로 나타났으며, 이러한 식물플랑크톤 중은 여과지 상층부에서 출현하는 조류 생물막의 종 구성과 유사하였다. 식물플랑크톤 현존량이 50 cells/mL 이상으로 출현한 종은 남조세균인 *Oscillatoria froelichii*, 녹조류인 *Coenochloris sp.*와 *Monoraphidium arcuatum*, 규조류인 *Navicula cryptocephala*이었다. *M. arcuatum*은 크기가 $2 \times 10 \mu\text{m}$ 정도로 작은 전형적인 부유 조류로 호소에서 자주 출현하는 조류로서 모형실험 결과 일사량을 조절하지 않은 여과지에서 8월 조사부터 출현하기 시작하여 9월에는 2.6×10^2 cells/mL로 현존량이 증가하였다. 그러나 *M. arcuatum*을 제외하고는 여과지 상층부에 형성되는 조류 생물막의 주요 구성종임에 따라 완속여과 상층수에서 출현하는 식물플랑크톤은 상층수에서 자체적으로 성장하였다고 판단하기 보다는 조류생물막에서 탈리된 조류로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다. 그러나 완속여과 정수장 보다 식물플랑크톤 생육 환경이 열악한 모형실험장치에서 조류 생물막과 관련이 적은 *M. arcuatum*이 상층수에서 검출된 것을 보면, 실제 완속여과 공정을 채택하는 정수장에서는 많은 일사량이 때문에 더 많은 식물플랑크톤 증과 양이 발생할 가능성이 있는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 원수 수질조건에서 완속여과 공정의 표층 생물막의 생성과 제어에 미치는 영향인자를 평가하고 환경조건에 따른 생물막 형성에 관여한 원인 조류종을 규명하여 완속여과 공정의 최적 운영방안 마련을 위한 기초자료로서 활용하고자 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 완속여과 공정에서 여재 표층의 조류 성장을 제한하기 위한 영향인자는 햇빛의 차단 여부이며, 실제 정수장의 완속여과 공정 운영시 차광막은 완속여과지 표면의 조류 과잉번성에 매우 효과적이고 경제적인 제어방안으로 이용이 가능한 것으로 나타났다.
- 2) 햇빛이 있는 완속여과지 여재층 상부에서는 실모양의 부착조류를 매트로 하여 생물막이 형성될 수 있으며, Y정수장에 설치된 완속여과 모형실험장치의 연구결과

생물막의 근거가 되는 부착조류는 빛이 강하고 수온이 높은 환경조건에서는 남조세균인 *Oscillatoria froelichii*이 주 조류종이었으며, 녹조류인 *Mougeotia sp.*의 경우도 빛이 약하고 기온이 낮은 봄과 초여름에는 조류 생물막의 매트가 될 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) 모형 완속여과지 운영결과에서 상층수에서 출현하는 식물플랑크톤은 여과지 상층부에서 발달한 조류생물막으로부터 탈리된 조류로 보는 것이 타당하지만, 실제 완속여과 공정에서의 상층수에서는 *Monoraphidium arcuatum*과 같이 자체적으로 성장하는 식물플랑크톤이 다수 있을 것으로 사료된다.
- 4) 완속여과 공정에서 생물막(biological skin 또는 Schmutzdecke 층)의 형성은 완속여과 공정의 유입수 질 및 환경조건에 따라 그 구성 및 특성이 다르게 나타나며, 이러한 생물막의 형성에 따라 완속여과지의 처리수 질 또한 달라질 것이다. 그러므로 조류 뿐만 아니라 완속여과지 여층 내 세균류의 분석 및 동물성 플랑크톤, 미소생물 등 다양한 완속여과 공정내 생물환경에 대한 평가가 필요하다. 또한, 생물막에 대한 지속적인 분석과 병행한 완속여과지 유출수의 수질에 대한 지속적인 평가를 바탕으로 한 완속여과 공정의 운영 및 생물환경 조성이 완속여과 공정의 운영최적화를 위해 반드시 필요할 것으로 판단된다.

KSWW

참고문헌

1. APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WEF (Water Environment Federation), (1988). "Standard methods for examination of water and wastewater", 20th ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
2. Schoen, S., (1988). "Cell counting", In: *Experimental Phycology A Laboratory Manual* (Christopher, S.L., J.C. David and P.K. Bruno, eds.), Cambridge University Press, London.
3. Shen, C.J., (1979). "Freshwater Copepoda, Fauna Sinica", Science Press, Peking, pp. 1-450.
4. M. Robin Collins, T. Taylor Eighthy, James M. Fenstermacher and Stergios K. Spanos (1989). "Modifications to the slow sand filtration process for improved removals of Trihalomethane Precursors" AWWARF, pp 122~123.

5. Joy M. Barrett, Jack Bryck, M. Robin Collins, Brain A. Janonis and Gary S. Logsdon (1991). "*Manual of design for slow sand filtration*" AWWARF, pp 5~12.
6. Gary S. Logsdon, Roger Kohne, Solomon Abel, and Shawn LaBonde, (2002) "Slow sand filtration for small water systems", *J. Environ. Eng. Sci. 1*: 339~348.
7. 환경부, (2007) *상수도시설유지관리매뉴얼*, 한국상하수도협회, pp 362~369.
8. 전향배, 이영주, 신승식, (2003). "표면처리된 완속여과 시스템에서 입자 및 자연유기물(NOM)의 제거 특성 연구", *대한환경공학회지*, 제25권, 제9호, pp 1132-1137.
9. 안우정, 남상호, (2005). "휴믹물질 제거를 위한 완속여과공정에서의 GAC 도입", *상하수도학회지*, 제19권, 제2호, pp 209-213.
10. 정용준, 정동숙, 강재형, 민경석, (2002). "다층완속여과를 이용한 농약 제거", *대한환경공학회지*, 제24권, 제9호, pp 1509-1519.