

하수처리수 방류구의 거품발생 원인진단 및 저감방안: 국내 하수처리장 사례를 중심으로

신재기* · 조영수 · 김영성¹ · 황순진²

한국수자원공사 낙동강통합물관리센터, ¹한국수자원공사 K-water 연구원, ²건국대학교 보건환경과학과

Cause Diagnosis and Reduction Measures of Foaming in the Treated Wastewater Outlet of D Waste-water Treatment Plant. Shin, Jae-Ki* (0000-0002-5380-5078), Youngsoo Cho (0000-0002-3119-4296), Youngsung Kim¹ (0000-0001-5422-1915) and Soon-Jin Hwang² (0000-0001-7083-5036) (Center for Integrate Water Management of the Nakdong River, Korea Water Resources Corporation (K-water), Busan 49300, Korea; ¹K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation (K-water), Daejeon 34045, Korea; ²Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

Abstract This study was conducted to suggest the cause analysis and mitigation measures of foaming generated in the effluent of wastewater treatment plant. The foam generated in the outlet connected with the tidal river system was identified as structural problems. And the main cause of foaming was air entrainment by an impinging jet and the internal accumulation by the diffusion barrier. In consideration of these conditions, it present the effective ways such as micro-screen and submerged outlet, to mitigate the foaming generated in the water channel and outlet end.

Key words: wastewater, outlet, foam, cause, reduction

하폐수처리장에서 단위 공정 또는 최종 방류 때 발생 하는 거품현상은 우리나라를 포함하여 전 세계적으로 주 요 관심의 대상이 되고 있다(Berovic, 1990; Vardar-Sukan, 1998; Chung, 2000; Shin *et al.*, 2001; Jang and Mun, 2005; Im and Gil, 2014). 그러나 지금까지 거품에 관한 다수 연 구들은 처리장 내에서 일어나는 문제점을 해결하는 데 집 중되었다. 그 이유는 거품이 미생물 곰팡이류와 연관되어 악취, 수처리 저해 및 미관 저하 등의 주요한 원인으로 작 용하기 때문이다(Vardar-Sukan, 1998; Chung, 2000).

하수처리장 방류구의 거품은 외형상으로 일반인이 막

연히 유해하다고 인식하고 있는 실정이나, 생물학적 검정 을 통해 특이한 유해성은 없었다(Shin *et al.*, 2001). 부유성 거품이 공공수역 하천으로 방류될 경우, 외관상 좋지 않기 때문에 유해한 물질을 배출하고 있다는 부정적 시각을 갖 게되어 인근 지역주민과 환경단체에 의해 불필요한 민원 이 제기될 가능성이 있다. 따라서 방류구의 거품발생 원인 을 진단하여 발생량을 경감시키는 연구와 노력이 필요하 겠다. 현재까지 하수처리수에서 발생하는 거품을 감소시 키기 위한 가장 손쉬운 방법은 소포제를 주입하거나 물을 살포하는 것에 의존하고 있다. 그러나 살수법은 비효과적 이고, 소포제는 액상화학물질로써 수질 및 수생태계에 좋 지 않는 2차적 환경영향을 미칠 수 있으며(Jang and Mun, 2005; Maeng *et al.*, 2013), 지속적으로 사용할 경우 상당한 비용이 수반된다. 또한, 발생된 거품의 배출을 막기 위해서

Manuscript received 17 May 2016, revised 28 June 2016,
revision accepted 30 June 2016
* Corresponding author: Tel: +82-10-3870-6121, Fax: +82-51-529-3168,
E-mail: shinjaeki@gmail.com

일정시간 저류 후 자연소멸을 유도할 수 있는 거품확산방지막(펜스, 울타리)을 주로 사용하고 있다(Jang and Mun, 2005). 이것은 거리가 짧은 제한성으로 인해 거품 축적과 흡착물질 농축 등 또 다른 문제점을 야기할 뿐만 아니라 바람, 파랑 및 조석 등에 취약하여 파손이 빈번하게 발생하기 때문에 주기적인 교체 또는 보수하는 데 따른 유지관리 비용이 지속적으로 드는 단점이 있다.

국외에서 미국의 경우, 국가 오염물질 배출규제 제도(National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES)의 허가요건에 “방류구에서 미립 물질, 광택성 기름 및 다량의 거품이 배출되거나 발생되어서는 안된다.”는 규정이 있고, 미국환경보호청(USEPA)에서는 “거품이 외관상 볼

쾌하게 보일 정도로 발생하게 되면 조치해야 한다.”로 권고하고 있다(<http://www.epa.gov/npdes>). 그러나 국내에는 아직까지 거품에 관한 법적 규제 및 제도적 기준이 없다. 이러한 연유로 육상 하폐수처리장 방류구의 거품발생에 관한 연구는 전무한 실정에 있다. 반면에, 연안해양에 위치하고 있는 화력 및 원자력발전소의 방류구를 대상으로 한 연구가 어업피해 및 환경영향의 우려에 대한 민원해결을 위하여 선행되었다(Lim and Bae, 1995; Jang and Mun, 2005; Kim *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2010; Maeng *et al.*, 2013). 그리고 일본의 경우, 거품에 관한 규제는 별도로 없으나 미관상 좋지 않다는 이유만으로 스스로 거품을 발생시키지 않도록 저감장치를 설치하고 있다(Kang *et al.*, 2005). 본 연구는 2015년 3월부터 2016년 5월까지 현장조사를 통해 하수처리장내 공정별 거품발생 실태를 파악하였고, 방류수와 방류구를 중심으로 거품발생의 원인규명 및 저감방안을 제시하고자 하였다.

부산광역시에 위치하고 있는 D 하수처리장을 대상으로 하였다(Table 1). 2002년 12월에 착공하여 2006년 10월에 준공되었고, 행정구역상 처리범위는 대도시의 1개 구와 인근 구의 1개 동을 포함하고 있다. 발생 하수는 차집관로(24 km, 350~1,650 mm diameter)를 통해 전량 처리장으로 이송되고 있으며, 관로는 분류식(50%)과 합류식(50%)이 혼재되어 있어 강우에 의한 유량의 증감 변동에 다소 취약하다. 중계펌프장은 각 구역의 하류에 1개씩으로써

Table 1. Simple description of D wastewater treatment plant located in Busan metropolitan city, Korea.

Item	Content
Construction period	From December 2002 to October 2006
Length of collection pipe line (km)	24.0 (With diameter 350~1,650 mm)
Intermediate pumping station	2
Area of wastewater treatment plant (m ²)	28,900
Facility capacity (m ³ day ⁻¹)	135,000
Treatment capacity (m ³ day ⁻¹)	About 78,000

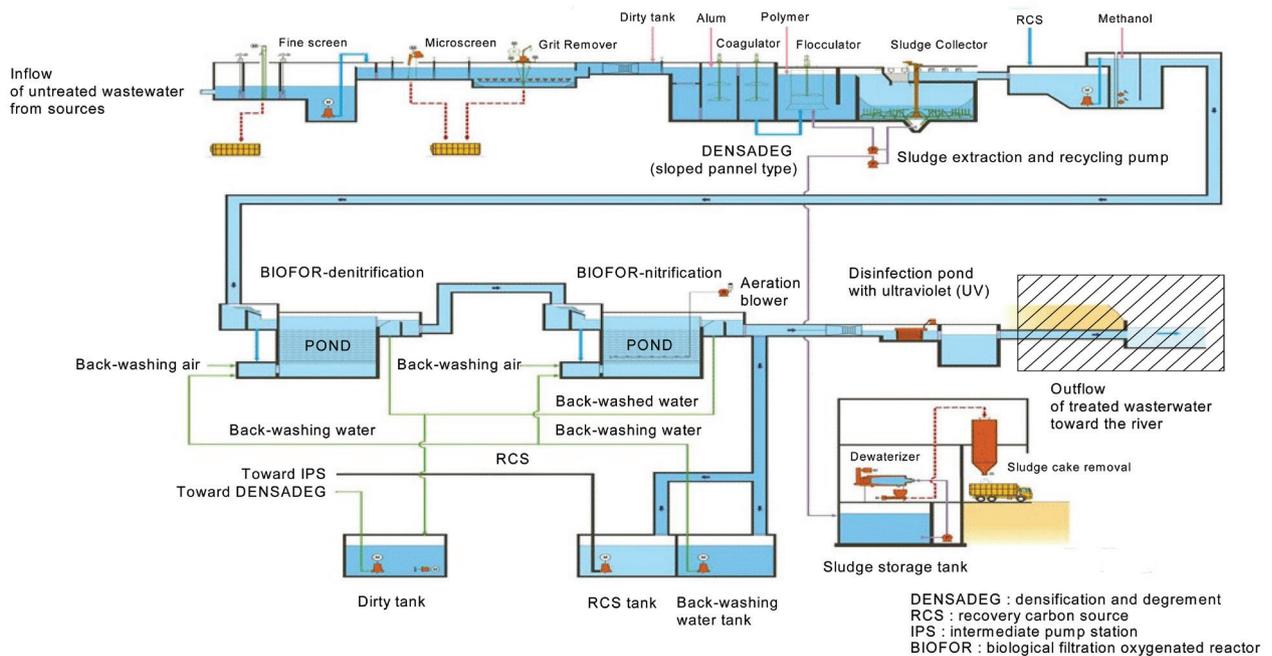


Fig. 1. Schematic diagram showing the unit processes of wastewater treatment in D wastewater treatment plant.

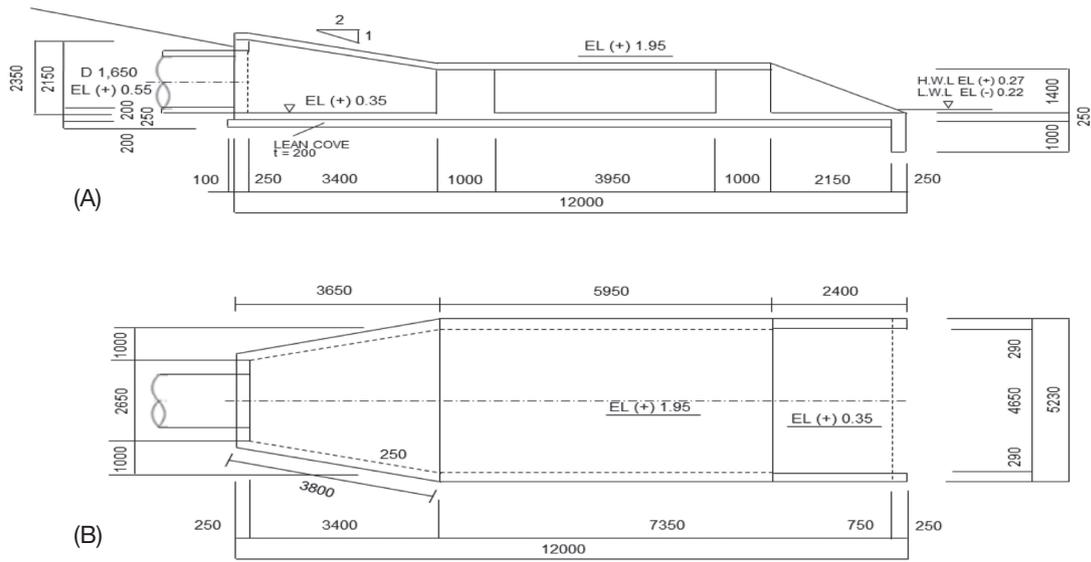


Fig. 2. Schematic diagrams showing side view (A) and plan view (B) of the treated wastewater outlet in D wastewater treatment plant.

총 2개가 있다. 하수처리장 면적은 28,900 m²이고, 시설용량은 135,000 m³ day⁻¹이다. 2015년 기준으로 현재 처리량은 약 78,000 m³ day⁻¹으로써 58,000 m³ day⁻¹은 강으로 직접 방류하고, 20,000 m³ day⁻¹은 유량이 빈약한 상류의 지천에 하천유지용수로 상시 공급하고 있다. 수처리 계통은 침사지-혼화지-침전지(펌프장)-여과지-최종 방류 순으로 이루어져 있고, 슬러지처리는 별도로 구성되어 있다(Fig. 1). 처리공법은 경사판침전지와 생물막여과를 적용하고 있다. 하수처리수 방류토구는 12.0 m(L)×4.7 m(W)이고, 이 중에서 수로(복개공간)와 방류구(개방공간)는 각각 9.6 m(L)×4.7 m(W), 2.4 m(L)×4.7 m(W)이다(Fig. 2A, B). 그리고 거품확산방지막의 체적은 10.0 m(L)×5.2 m(W)×2.0 m(H)로써 U자형이고, 방류구의 양끝과 하천 바닥에 굽은 받침과 앵커로 각각 고정시켜 놓았다.

거품발생의 원인물질과 작용인자는 크게 3가지로 볼 수가 있다. 첫째로 계면활성제로써 이것은 수중의 계면상에 에너지를 변화시키는 물질이다. 전기적 성질에 의하여 양이온계, 음이온계 및 비이온계로 구분되며, 물과 결합 정도에 따라 친수성과 소수성으로 나눌 수 있다(Moeller *et al.*, 2010). 따라서 거품을 발생시키는 원로나 성상이 다양하기 때문에 이에 대한 성분분석이 선행되어야 계면활성성분 원인물질을 정확하게 판단할 수 있겠다. 둘째는 점성물질, 수중 용존염 및 N-H 성분 함량 등 다양한 물질들이 거품을 유발하는 것으로 알려져 있다(Vardar-Sukan, 1998). 셋째는 열적 및 화학적 반응에 의해 기포가 발생하게 된다. 일반적으로, 수온이 낮은 동절기에 발생된 거품은 물의 점

Table 2. Comparison of some properties between natural water and foam solution at 25°C (Modified from Kang *et al.*, 2000).

Item	Freshwater	Seawater	Foam solution
Surface tension (dyne cm ⁻¹)	74	75	27~34
Viscosity (g cm · s ⁻¹)	0.0130	0.0137	0.63
Organic and inorganic matter (%)	Variable	Variable	22:78

도가 높아져 쉽게 해체되지 않는다. 하수처리수의 방류구에서 발생하는 거품은 유기물 성분이 22%였고, 비휘발성 무기물 성분이 78%가 포함되었다(Table 2). 그리고 거품액의 표면장력은 담수(freshwater)에 비해 1/3에 불과하고, 점성계수는 약 50배에 달하여 아주 안정된 상태를 유지한다(Kang *et al.*, 2000). 거품이 안정상태로 되는 이유는 작은 기포들이 수중에 함유되어 있는 미세한 유기물질들을 흡착, 부상분리 및 농축시키기 때문이다.

거품은 수중에서 발생하는 것으로써 물리 기계적 또는 화학적 작용에 의해 수천 개의 미세한 기포로 구성되어 있다(Vardar-Sukan, 1998). 수표면에 기포가 떠오를 때 축적되는 것이 파괴되는 것보다 빠를 때 거품이 만들어진다. 이것은 기체에 의해 부피가 크게 성장하는 것으로 볼 수 있고, 가비중(bulk density)은 액체보다 오히려 기체에 더 가깝기 때문이다(Vardar-Sukan, 1998). 거품 속 기포들은 얇은 액상막(liquid film)에 의해 분리되어 있다. 따라서

진정한 거품은 기포와 기포 사이에 가장 밀착되는 접촉점에서 파괴되기보다 액체가 개입되어 접층(lamella)을 이룰 때 생기게 된다. 거품은 액체 속에서 기체의 확산으로 정의되나, 일반적인 기체-액체의 확산과 다르다(Thomas and Winkler, 1977). 거품에서 기포 사이의 거리는 극히 가깝고, 기체의 부피는 매우 크다. 거품의 비표면적이 큰 것은 낮은 표면 에너지를 갖는 단순 기체와 액체 상태에 비해 열역학적으로 불안정한 상태를 만들기 때문이다. 이렇듯 거품의 형성과정은 단순한 것 같으면서 매우 복잡하다(Thomas and Winkler, 1977). 일반적으로, 입자성 및 용존성 물질이 거의 없는 오염되지 않은 물은 거품이 생기지 않는데 이것은 액상막을 형성하는 능력이 미약하기 때문이고, 반면에 거품의 액상막은 탄력성을 갖는 특성이 있다. 그 예로써, 계면활성제가 포함된 용액을 폭기하면 기포가 표면으로 부상하게 되고, 뚜렷한 2개의 층으로 되는 것을 볼 수 있다. 기포가 뻣뻣하게 밀집되는 상부 층(foam)과 액체가 더 많은 하부 층(froth)으로 나누어진다. 그리고 기체 전달율은 큰데 기포가 적게 발생하면 액상거품(fluid foam)이라고 한다(Vardar-Sukan, 1998). 이러한 특성을 기초로 거품은 Table 2와 같이 다양한 범주로 분류된다(Ghildyal *et al.*, 1988). 공기와 물의 계면시스템에서 표면활성의 계면흡착막에 대한 물리화학적 특성은 활성제의 종류, 흡착분자의 탄소원자 수, 분자형태, 흡착성향 모드, 흡착막의 압축성과 분산성 및 수소결합 유무 등에 의존적이다(Mancy and Okun, 1960).

D 하수처리장에서 처리과정 중 거품을 발생하는 곳은 침전지 월류부, 중간펌프장, 여과지 및 방류수로와 방류구의 말단부로서 총 5군데가 해당하였다(Fig. 1 참조). 하수처리장의 수처리 공정에서 화학적 처리를 하게 되면 거품발생이 증가하게 된다(Berovic and Cimerman, 1979). 이것은 생물 기원성 유기물질의 농도가 높아서 분해 시 CO₂에 의한 기포발생이 많아지는 데 주요한 원인을 둘 수가 있다. 하수처리수는 최종적으로 관로, 수로 및 방류구를 통해 감조하천에 배출되게 되는데 방류구 종단에서 낙차로 인해 방류수 도달위치의 하천 주변에 거품이 대량 발생하였다(Fig. 2). 방류구 인근에서 발생하는 거품의 양은 밀물 때보다 썰물 때에 낙차가 크고 방류수 유량이 많을 때 급증하였다. 또한, 하천수의 수온이 상승하는 봄철 이후로 증가하였다. 이것은 수온이 높아짐에 따라 수중에 동식물플랑크톤과 부착조류 등 생물기원성 유기물 농도가 증가하여, 표면장력이 작고 점성이 큰 거품이 생성되며 한번 만들어진 거품은 쉽게 부서지지 않았다. 그리고 하천변에 인위적으로 설치된 거품확산방지막의 협소한 공간(10 m(L)×5.5 m(W))의 내부에 급격하게 축적되는 영향도 관찰되었다.

따라서 거품확산방지막은 효과가 작았을 뿐만 아니라 오히려 농축되는 결과를 초래하고 있었다.

거품은 유체에 기체가 인입되어 발생하는 것이므로, 거품발생의 기작은 공기유입(air entrainment)의 관점에서 설명될 수 있다(Wood, 1991; Kim *et al.*, 2008). 인위적인 폭기 설비를 통하지 않고, 흐름조건 자체로부터 자유수면을 통하여 공기의 유입이 일어나는 상태를 수표면 폭기(water surface aeration) 또는 자연폭기(natural aeration)이라고 한다(Wood, 1991). 흐름 상태에 따라 수표면 전체에 걸쳐서 공기유입이 발생하는 경우와 수표면의 불연속점에서 국부적으로 발생하는 경우가 있다. 수표면 폭기는 여수로(spillway), 낙수부(impinging jets area)와 같은 고유속의 개수로 흐름에서 강한 난류와 주변 공기의 전단력에 의해서 수표면 교란이 발생하여 3차원적인 와류가 형성되면서 공기유입이 일어나는 것으로써 수표면 전체에서 넓게 발생한다. 낙수에 의한 폭기는 수표면과 떨어지는 자유 낙수(free jet)의 교차면에서 국부적으로 발생하는 것이다. 낙수가 수표면에 도달하기 이전에 난류가 발달하는 제트 표면부에서 거품층이 형성되었을 때 공기의 연행은 크게 증가하고, 흐름방향과 직각을 이루는 소용돌이(vortex)가 발생되며, 이에 의해 기포가 포획되어 표면으로 이송된다. 이때, 거품이 부상하는 속도는 담수(freshwater)에서 약 0.3 m s⁻¹ 정도이나, 해수(seawater)는 약 1/10 수준이다(Wood, 1991). 수중에서 발생한 거품은 흐름에 의해 쉽게 운반된다. 또한, 수표면보다 깊은 곳까지 균일하게 분포되어 수중 체류시간이 길기 때문에 많은 현탁성 유기물질의 흡착이 가능하여 거품이 쉽게 소멸되지 않는 성질을 가지게 된다(Lim and Bae, 1995). 거품은 단위 부피당 표면적이 커서 기포 막에 많은 부유물을 흡착시켜 고밀도화 됨으로써 충격과 수온 변화에 대한 물리적 완충작용도 우수하다.

하수처리수가 최종 방류되는 감조하천에서 거품발생에 미치는 영향인자는 다음과 같이 요약될 수 있었다. 첫째로, 낙차와 난류 영향으로써 조석현상 중 썰물 때 배수로와 수면에 큰 낙차가 생기는데 이때 거품이 특히 많이 발생하였다(Fig. 2 참조). 거품은 유체에 공기와 같은 기체가 유입되어 발생하는 것이므로 거품의 직접적인 원인은 공기유입이며, 이것은 주로 낙차가 있고 고유속의 난류상태에서 일어난다. 기포 혼입은 보(weir), 관로 말단부, 배수로 등의 제트류 및 도수영역에서 주로 일어나며, 낙수량의 약 15% (v/v)에 해당하는 기체가 수중에 확산된다(Wood, 1991). 따라서 공기유입경로의 차단 또는 접촉면의 최소화와 난류저감이 거품제어에 중요한 변수가 된다고 하겠다. 둘째는, 수중 유기물질 농도이다. 유기물 기원성 물질이 거의 존재하지 않는 깨끗한 물에서 거품은 발생하지 않는다. 그

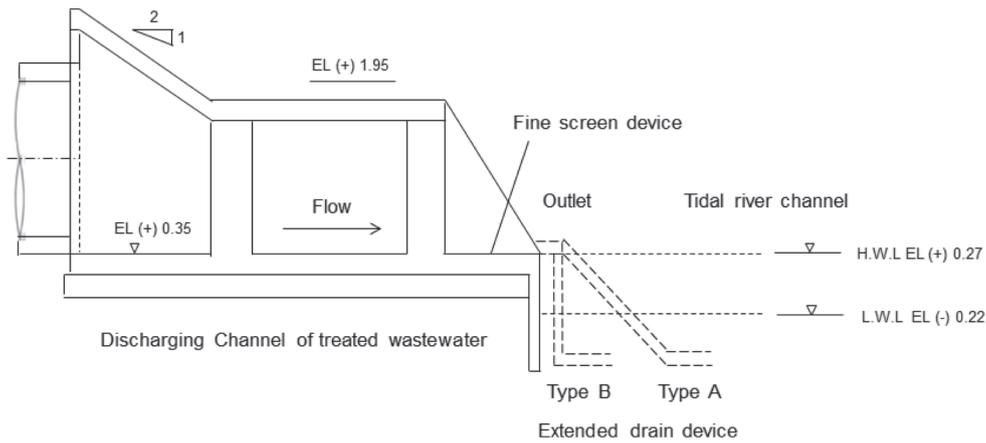


Fig. 3. Schematic diagram suggested reduction measures for foaming occurred at the treated wastewater outlet of the D wastewater treatment plant.

러나 부영양화된 수체에서 동식물플랑크톤 및 부착조류 기원성 고분자 단백질, 용존성 유기물질과 무기염류 등을 포함하는 유기물 성분은 거품의 표면에 흡착되어 거품 형태의 지속시간을 늘리고 안정화시키는 데 기여한다. 따라서 낙차와 유기물 성분의 공존은 거품발생의 필요충분조건이라 하겠다. 셋째는, 수온 변화이다. 계절적으로, 수온이 증가하면서 거품의 발생이 증가하는 것으로 관찰되었다. 이것은 수체 유기물의 양이 증가하는 요인도 있겠지만, 물 사용량이 많아지면서 유량과 유속이 증가한다. 이때 거품의 발생량도 급격하게 많아지고, 방류 후 발생한 거품의 수평 이동속도도 빨라져 확산방지막 내부에서 대량 축적되면서 그 크기가 성장하게 된다. 따라서 전술한 바와 같이 다양한 발생 영향요인을 고려할 때 거품발생량을 근원적으로 저감할 수 있도록 방류수로와 방류구의 구조적 문제점을 개선할 필요성이 제기되었다.

하수처리장의 방류구를 중심으로 한 거품발생 완화 및 제어방안으로 다음과 같이 제시될 수 있었다. 방류구의 배수로와 수면과의 낙차가 발생하는 조건에서 저감할 수 있는 방안과 수중으로 직접 방류하여 거품발생을 원천적으로 차단하는 방법으로 구분할 수 있다. 전자는 커튼벽 설치, 분사장치, 분산방류(tetrapod), 분산낙하 저층방류, 계단식 분산낙하방류 및 소포제 살포주입 등으로 완화시킬 수가 있다. 후자는 수면을 복개하는 방법, 배수로에 저수조를 설치하여 수위를 조절하여 방류하는 방법 및 배기공이 있는 배수로의 수중방류가 가능하겠으며, 현장 여건을 고려하여 다양한 형태의 연장시킨 관(pipe)에 의한 방류가 고려될 수 있다.

D 하수처리장의 방류구에서 발생하는 거품은 낙차에 의한 공기의 혼입과 난류작용이 직접적인 원인으로 작용하

Table 3. Classification of foams according to the relative characteristics of gaseous and liquid phase (Modified from Vardar-Sukan, 1998).

Type	Characteristics
True	Predominantly gaseous dispersion
Fluid	Predominantly liquid dispersion
Unstable	Equilibrium state
Metastable	Progress to the equilibrium state
Transient	Lifetime of seconds
Persistent	Lifetime of hours or days if undisturbed

므로 이를 차단하거나 최소화하는 목적으로 본 연구에서 Fig. 3과 같이 제안되었다. D 하수처리장의 방류수로는 유속이 빠르고 수심이 얇기 때문에 망목스크린(약 5×5 mm mesh)을 깔아서 거품발생 및 흐름을 조절하는 것이 거품형성방지에 효과적일 것이다. 또한, 방류구는 감소하천에 인접하고 있기 때문에 그 특성상 조석주기에 의해 하루에 2회씩 수위가 0.49 m 정도 변동된다(Fig. 3). 그래서 하천의 최고 및 최저 수위에 대한 수심 변화가 고려되어야 하겠다. 결과적으로, 방류구의 종단에서 A형 또는 B형과 같이 위치 가변형 수관을 연장하여 하천의 수중에 직접 배출할 경우 낙차와 표면 난류 발생요인을 제거함으로써 거품발생을 제어할 수 있다. 이렇게 하여 기존에 적용하고 있는 소포제와 거품확산방지막의 비구조적 및 구조적 문제점을 동시에 해결함은 물론 하수처리수의 거품에 대한 막연한 불신과 관련한 민원도 예방할 수 있을 것이다. 끝으로, 본 연구는 D 하수처리장을 대상으로 하였으나, 국내 다른 하수처리장의 유사한 사례에도 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 하수처리장에서 최종 방류되는 하수처리수의 거품발생 원인분석과 저감방안을 제시하고자 수행되었다. 감조하천의 방류구에서 거품이 발생하는 것은 구조적인 문제점으로 파악되었다. 거품은 낙차에 의한 공기 연행과 확산방지막에 의한 내부축적이 주요한 원인이었다. 이러한 여건을 고려하여, 방류수로와 방류구 종단에서 미세스크린과 수중방류를 통해 거품발생을 완화시킬 수 있는 효과적인 방안을 제시하였다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 낙동강통합물관리센터의 창의혁신과제 현장기술지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Berovic, M. 1990. Foam problems in fermentation processes. *Chemistry and Industry* **39**: 567-573.
- Berovic, M. and A. Cimerman. 1979. Foaming in submerged citric acid fermentation on beet molasses. *European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology* **7**: 313-319.
- Chung, K.Y. 2000. Biodegradation potential of hexadecane by sewage foam. *Korean Journal of Sanitation* **15**: 69-76.
- Ghildyal, N.P., B.K. Lonsane and N.G. Karanth. 1988. Foam control in submerged fermentation: state of the art. *Advances in Applied Microbiology* **33**: 173-222.
- Im, J. and K. Gil. 2014. Characteristic of foaming in nitrification reactor using anaerobic digester supernatant and livestock wastewater. *Journal of Wetlands Research* **16**: 433-441. (in Korean)
- Jang, H.S. and G.S. Mun. 2005. A study on the foam wastewater treatment and foam collection by inhalation force at the outlet of power plants. *Journal of Korean Society on Water Quality* **21**: 496-499. (in Korean)
- Kang, G.S., D.S. Lee and Y.C. Kim. 2000. The hydraulic measures for alleviating foam formation at the outlets of power plants. *Proceeding for Spring Meeting Conference of Korean Nuclear Society* pp. 1-10.
- Kim, J.Y., K.S. Kang, Y.M. Oh and S.H. Oh. 2008. Design of submerged outlet structure for reducing foam at a power plant using a numerical model simulating air entrainment. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* **20**: 452-460. (in Korean)
- Lim, Y.H. and B.K. Bae. 1995. Property and reduction of seawater foam occurred during operation of power plant. *Electric Technology* (summer) pp. 6-17. (in Korean)
- Maeng, J.H., T.Y. Kim, D.H. Seo, J.I. Seo, M.H. Son and T.S. Kang. 2013. A study of measures to predict and mitigate marine environmental impacts of cooling water discharges from power plants. Project Report of Korea Environment Institute (KEI) No. 2013-04-01. pp. 98-100. (in Korean)
- Mancy, K.H. and D.A. Okun. 1960. Effects of surface active agents on bubble aeration. *Journal of the Water Pollution Control Federation* **32**: 351-364.
- Moeller, L., C. Herbes, R.A. Müller and A. Zehnsdorf. 2010. Formation and removal of foam in the process of anaerobic digestion. *Landtechnik* pp. 204-207.
- Oh, S.H., Y.M. Oh, K.S. Kang and J.Y. Kim. 2008. Experimental investigation on the efficiency of reducing air bubble formation by installing horizontal porous plate in the submerged outlet structure of power plant. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* **20**: 472-481. (in Korean)
- Oh, Y.M., S.H. Oh and S.C. Jang. 2010. Reduction of the foam generated in the discharge channel of a power plant. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* **22**: 235-240. (in Korean)
- Shin, J.K., O.H. Lee, S.J. Hwang and K.J. Cho. 2001. Algal bio-assay for the treated and raw wastewater in the Kyongan Stream. *Korean Journal of Limnology* **34**: 192-198.
- Thomas, A. and M.A. Winkler. 1977. Foam separation of biological materials. In: Wiseman, A. (eds.), Topics in Enzyme and Fermentation Biotechnology. Ellis Horwood, Chichester. pp. 43-71.
- Vardar-Sukan, F. 1998. Foaming: Consequences, prevention and destruction. *Biotechnology Advances* **16**: 913-948.
- Wood, I.R. 1991. Air Entrainment in Free-Surface Flows. IAHR Hydr. Struct. Des. Manual No. 4., Hydraulic Design Considerations. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.