공기방울 역세척을 이용한 VOCs 제거용 Biological Trickling Filter

공학박사임재신 | (주)카보텍대표이사
042)862-8912 | kavo@kaist.ac.kr

특허등록

· 제 028847호 - 무기성 악취와휘발성 유기화합물이 혼합된공기를 동시에 제거하는 미생물 담체충전형 모듈러 생물여과장치

특허출원

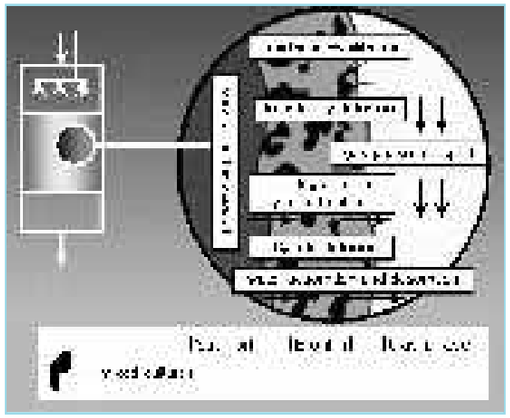
· 제 99-2876호 - 담체충전형 생물 여과장치에서의 담체 표면의과잉미생물제거방법

· 제 00-5278호 - 트리클링에어바이오필터전용기공폐쇄경량세라믹담체및제조방법

1. 서론

최근 휘발성유기화합물(VOCs; Volatile Organic Compounds) 생물학적으로 제거하고자 하는 많은 연구가 시도되고 있으며, 이미 담체 충진형 BTF (Biological Trickling Filter)는 각종 산업현장에서 발생하는 VOCs 제거에 상업적으로 이용되고 있다. BTF는 미생물 담체에 미생물을 고정하여 악취 및 VOCs를생물여과장치내부로통과시킴으로써담체에 부착된 미생물에 의해서 오염물질을 정화하는 방법으로써, 현장에서의실용화가급속도로빨라지고있다.

BTF(Biological Trickling Filter)의원리



BTF는높은효율에도불구하고, 유입되는기질량이 많아 과량의 미생물이 증식할 경우 하우징(Housing) 내부에 충진된 담체 입자들 사이의 공극을 막게 되어 처리효율이 감소하고 높은 압력손실로 인하여 동력비 손실과처리유량과풍량이줄어들게되어전체적인효율이 낮아지는 단점이 있다. 그러므로 유입부하량에 따른 미생물 축적량을 파악하고 과잉미생물(Excess biomass)을효과적으로제거하는방법이필요하다.

BTF에서의이와같은문제점을해결하기위하여미국의 Weber 등(1994)은 NaCl 용액을 이용하여 미생물의 생육을 억제하는 방법을 고안했고, Holubar 등(1994)은질소와인산공급을중단하는방법으로써미생물의 생육을 억제하는 방법을 사용했으나, 결국 미생물의 생육장애가 발생하여 처리효율이 급격히 감소하는결과를초래했다.

미국의 Soria와 Smith 등(1997)은 물을 이용한 역세척에의해서과잉의미생물을제거하는방법을연구하였으나역세척시간이 60분이상소요하였고, 역세척수의유속을 81 190m/h로하여많은 폐수가발생되었다. 기존의 역세척 방법은 단순히 물만을 이용하여 담체가충진된하우징하단으로부터상부로물을통과시키므로 이때 발생되는 전단력만을 이용하여 미생물을 제거한다. 그러나 이와 같은 기존의 방법은 담체에 부착된 미생물을 효과적으로 탈리시키기도 어려울 뿐만 아니라, channeling 현상이 발생하여 균질한 역세척 효과가 적고 역세척 후에도 역세척시 형성된 channel에 의해서 VOCs 제거효율이 떨어진다. 또한 과량의 역세척수의 사용으로 인해 동력비 상승, 폐수 발생등의문제점이발생한다.

2. 특허의 개요

Amirtharajah가제시한 식(1)은 역세척 속도와 공기의속도를변수로생물막이형성된여재의역세척에 적용되고있는데, 주입되는공기의속도만으로여과지 내의기체거동을표현하기에는무리가있다.

$$aQ_a + \left(\frac{V}{V_{mf}}\right) \times 100 = b \qquad (1)$$

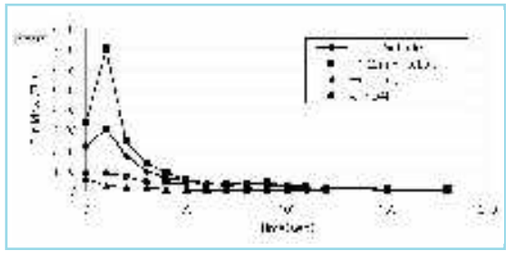
여기서, V = 역세척종류(m/min)
V_{mf} = 최소유동화속도(m/min)
Q_a = 공기의속도(m/min)
a, b = 여재의물성에따르는경험상수

이는 역세척시 사용되는 공기 방울은 유입속도 뿐만 아니라 표면장력, 주위 흐름에 따른 레이놀드 수 (Reynolds number) 또는공기방울의크기에따라난류 발생의양상이크게달라지기때문이다. 주변유동장이 있을 때, 공기방울, 역세척수 및 여재의 3상거동 문제는 간략화하여 물과 공기가 여재표면에 발생시키는 전단응력장을구하는것으로모델화할수있으며, 이는구체적으로수리동역학적관점에서검토되어야한다.

3. 연구 · 개발 및 실험결과

VOCs 제거용 BTF에서 과잉으로 미생물이 부착되어압력손실이 300mmH_2O 이상증가된시점에서, 일정량의 세라믹담체를 채취하여 4개의 column에 충진하였다. 첫번째 column은물로만역세척을하며, 두번째 column은 평균 1cm의 공기방울과 물을 병용하여 역세척을 하고, 세번째 column은 평균 0.2cm의 공기방울과병용하여역세척을하였다. 마지막으로네번째 column은용존공기와물을혼합하여역세척을실시하였다. 각 column의 geometry는 공히 직경 5cm, 길이 50cm이다.

[그림 1]은역세척시배출되는역세척수를시간별로 채취하여탁도를측정한결과를나타낸것이다.



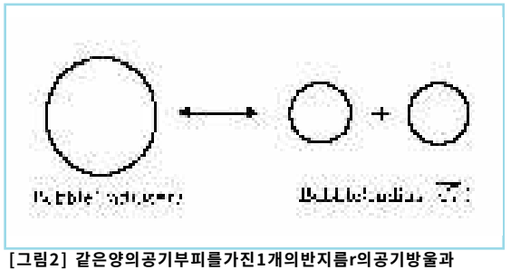
[그림1] 시간에따른역세척수탁도

[그림 1]에서나타난바와같이, 직경 0.2cm의공기방울과물을병용하여역세척시탁도의제거효율이가장 좋은 것으로 나타났으며, 그 다음으로 직경 1cm인 공기방울과 물을 병용하는 경우, 용존 공기와 물을 병용하는 경우, 물로만 역세척하는 경우 순으로 탁도 제거 효율이 좋은 것으로 나타났다. 그리고 역세척 초기에 시료 채취를 시작한지 60초 후, 네 가지 경우에 있어서 탁도가 500NTU 이하로 안정되는데, 이것은 각각의 경우 역세척의 효과가 더 이상 나타나지 않는것을의미한다.

[그림 1]의결과를고려할때, 공기방울의크기는역세효과와 큰 연관관계가 있는 것으로 판단되며, 이것은 역세척에 사용되는 공기방울의 크기에 따라 여재 표면에서발생하는난류의발생양상이 달라지기때문이다. 그리고, 여재표면에서발생되는난류는실제여

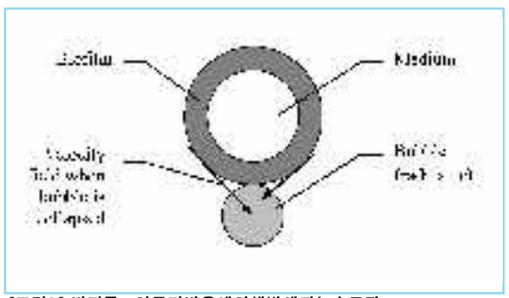
재로부터 생물막을 탈리시키는 전단응력과 직접적인 연관이 있다. 이와 같은 현상은 다음과 같이 이론적으로설명될수있다.

[그림 2]는 같은 양의 공기가 역세척시 사용되었을 때, column 내부에서 공기방울의 크기가 다른 경우를 가정한것이다.



[그림2] 같은양의공기부피를가진1개의반지름r의공기방울과 2개의반지름 $\frac{r}{\sqrt[3]{2}}$ 의공기방울

공기방울의 크기에 따르는 역세척시 전단력의 변화를 모사하기 위해, [그림 2]에서 나타낸 바와 같이 공기방울을둘로나눈다고가정하면, 공기의부피가 $\frac{4\pi r^3}{3}$ 인 공기방울은 공기의 부피가 $\frac{2\pi r^3}{3}$ 인 공기방울 2개와 같은양의공기를가진다. 그리고그때반지름은큰공기방울이 r이고작은 공기방울이 $\frac{r}{\sqrt[3]{2}}$ 이 된다. 큰 공기방울이 생물막이 형성된 여재와의 충돌, 소산 및 미끄러짐에 의해발생되는난류의발생은[그림 3]과 같이묘사할수있다.



[그림3] 반지름 r인공기방울에의해발생되는속도장

[그림3]에서나타낸것은둥근여재에생물막이균일하게형성되고, 역세척시사용되는공기방울역시완전한구(球)형이라고가정하였을때, [그림2]에서반지름이r인공기방울이여재와부딪치거나소산되었을때발생되는속도장을간략화하여표현한것이다. 이경우에공기방울이상승하다가여재를만나면터지거나미끄러져공기방울이액상에서차지하고있던부피를물이채우게된다. 이때, 균일한상승유속내에서공기방울이차지하고있던부피를채우기위한유체의흐름은여재의표면에서접선방향과 공기가차지하고있던구의중심방향으로속도장이생기게 된다. 이를수식으로전개하여보면먼저, 반지름r의공기방울이차지하고있는액상내의부피는식(2)와같이표현할수있다.

$$V_b = \frac{4}{3}\pi r^3 \qquad (2)$$

여기서, r : 공기방울의반지름
V_b : 공기방울의부피

만약이부피의공기방울이 여재의표면에서소산되었을때, 이공간을채우기위하여유입되는물의양은 다음의식으로구할수있다.

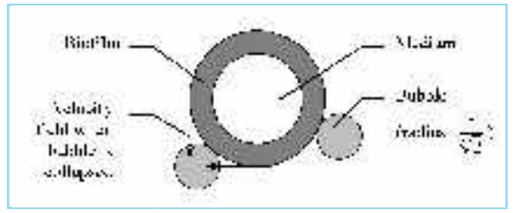
$$V = \frac{Q}{A} \qquad (3) \qquad\qquad Q = \frac{V_b}{t_c} \qquad (4)$$

여기서, Q : 공기방울이소산되었을때, 그부피를채우기위한유량
t_c : 공기방울소산속도
A : $4\pi r^2$, 공기방울표면적

따라서, 식(2)와 식(4)를 식(3)에 대입하여 정리하면 다음식(5)와 같이 여재의 표면에서 발생되는속도를구할수있다.

$$V = \frac{\frac{4\pi r^3}{3t_c}}{4\pi r^2} = \frac{r}{3t_c} \qquad (5)$$

한편, 반지름이 $\frac{r}{\sqrt[3]{2}}$ 인 공기방울 2개가 여재와부딪쳤을때발생되는속도장을알아보기위하여, [그림 4]와같은모델을구상하였다.



[그림4] 반지름 $\frac{r}{\sqrt[3]{2}}$ 인공기방울에의해발생되는속도장

[그림 4]에서 나타낸 것은1개의여재에[그림 3]의 경우와 같은 양의 공기가 부딪치는 것을 가정하여 반지름이 $\frac{r}{\sqrt[3]{2}}$ 인 2개의 공기방울이여재와 부딪치는것을 묘사하였다. 이 경우 액상 내에 1개의 공기방울이 차지하고있는부피는식(6)과같이표현된다.

$$V = \frac{4}{3}\pi\frac{r^3}{2} = \frac{2}{3}\pi r^3 \qquad (6)$$

그리고, 공기방울이 소산되었을 때 그 공간을 채우기위한물의유량은식(7)과같이나타낼수있다.

$$Q = \frac{\frac{2}{3}\pi r^3}{t_c} = \frac{2\pi r^3}{3t_c} \qquad (7)$$

따라서, 식(6)과 식(7)을 식(3)에 대입하여 정리하면 식(8)과같이표현될수있다.

$$v = \frac{\frac{2\pi r^3}{3t_c}}{\frac{4\pi r^2}{(\sqrt[3]{2})^2}} = \frac{2(\sqrt[3]{2})^2 r}{6t_c} \qquad (8)$$

그런데, 공기방울2개가여재와부딪치는 것으로가정하였으므로, 전체여재의표면에서발생되는속도장은 2v가 된다. 결론적으로 식(5)와 식(8)을 비교하였을 때, 여재 표면에서 발생하는 유동장(전단응력을 일으키는속도성분)은1개의큰공기방울보다는같은부피의공기방울2개가 충돌할때가효율이좋을것으로 판단된다.

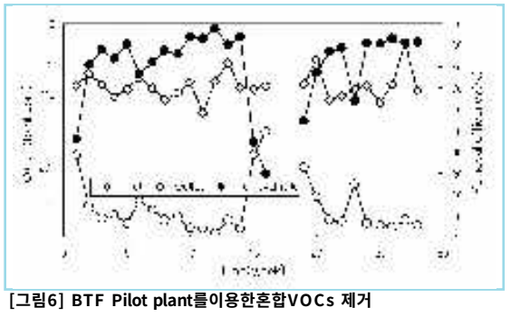
다음 식(9)는 같은 공기량에 대해서 나타나는 접선방향의속도성분을비교한결과이며, 식(10)은일반적인 유체의 전단응력을 나타내는 것으로, 여기서 전단응력은접선방향속도성분에비례하여커지는것을알수있다. 이러한경우, 공기방울 크기조건을제외한동일조건하에서의전단력의증가는역세척효율의증대에상당한영향을미칠것으로판단된다.

$$\frac{r}{3t_c} < \frac{2(\sqrt[3]{2})^2 r}{6t_c} \qquad (9) \qquad\qquad \tau = \frac{\Delta v}{\Delta r} \qquad (10)$$

4. 현장 적용 결과

공기방울 역세척 장치가 장착된 BTF Pilot plant를 이용하여 Benzene(240 390ppm), Ethylbenzene(80 200ppm), Toluene(3 10ppm) 및 Styrene(40 96ppm)이 주로 배출되는 석유화학단지 내 화학공장 폐수처리장에서 27주(189일) 동안 pilot plant test를 수행하였다.([그림 5] 참조) [그림 6]은 실험결과를나타낸것이다. 최대유입농도는 543ppm으로 혼합 VOCs 중 배출물질의 점유율은 평균(Benzene : 61 64%, Toluene : 0.8 1%, Ethylbenzene : 20 22%, Stylene : 11 13%)로 평균 유입농도 423ppm의 혼합 VOCs가 BTF에 주입되었으며, 공탑속도(SV)는 117 262h⁻¹에서 가변적으로운전하였다.

[그림5] 현장에설치된Pilot Plant Test system



[그림6] BTF Pilot plant를이용한혼합VOCs 제거

유입 후 약 80% 정도의 VOCs 제거효율을 나타내기까지 약 2주정도 소요되었으며, 3주 이후에는 비교적 안정적인 효율을 유지하였다. 실험기간 동안 압력손실 증가로 인한 기공폐쇄와 혐기성화 및 유입수의 공급 중단 등이 발생할 때마다 심한 제거율 변동이 나타났다. 운전기간동안압력손실증가에따라5차례의 역세척을실시하였다. 운전 15주차에역세척을실시하지않아압력손실이증가하여 45%까지저하된후, 16주차에는 25%까지 저하되어 Biofilter로써의 기능을 상실하였다. 이때 압력손실은 650pa/m로 높았으며, 담체 사이에 축적된 사멸된 미생물은 마치 묽은 진흙과도같은검은색으로변해있었다. 그후약2주간운전이 중단되었다. 역세척 실시 후미생물을 seeding하고 정상적인 상태에서 운전을 재개한 결과, 1주일 후 77%의제거율을회복하였고, 이후제거율은안정적으로상승하여85% 이상상승되었다. 운전 18주차와 22주차에 제거효율이 각각 77%와 64%까지 감소한 원인은 현장 사정으로 인해 물의 공급이 중단되었기 때문이다.

5. 결론

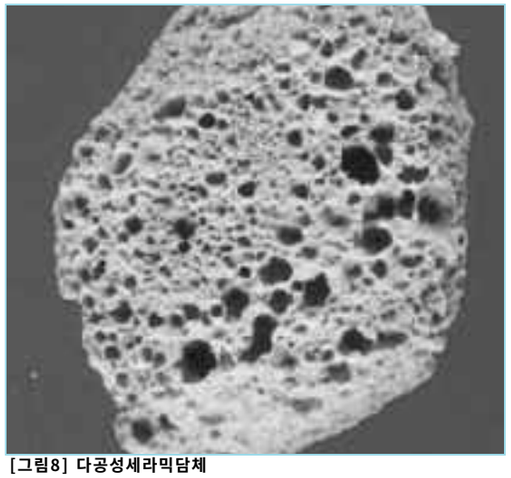
미생물의 과잉증식은 BTF의 효율을 급격히저하시킨다. 이때 공기방울을 이용한 역세척은 안정적인 BTF운전에 필수적이라 할 수 있으므로, 여재의 수명과처리효율을안정적으로유지하는데에결정적인역할을한다고할수있다. 공기방울과물을병용한역세척은작은공기방울이큰공기방울보다심한난류장을 발생시켜 높은 전단응력을 만들어냄으로, 공기방울의 크기가작을수록역세척의효과는커진다.

이 기법은 기존에 KAVO-TECH에서 개발한 기존의 생물학적 악취 및 VOCs 제거기술과 함께 사용되어, 그 성능과 수명을 크게 향상시켜줄 것으로 기대된다(<표1> 및[그림 7] ~ [그림11] 참조).

<표1> 생물학적악취및VOCs 제거기술관련특허현황 (KAVO-TECH)

No.	특허번호	특허명칭
1	99-13734	휘발성유기화합물및악취를제거하기위한쌍방향 흐름형생물학적제거장치
2	99-28760	담체충전형생물여과장치에서의담체표면의과잉 미생물제거방법
3	99-40016	악취성분및VOCs가함유된폐가스를생물학적으로 정화하는장치
4	99-40017	미생물을순환공급하는VOCs 및악취제거용 트리클에어바이오필터
5	99-40023	무기성악취와휘발성유기화합물이혼합된공기를 동시에제거하는미생물담체충전형모듈러생물여과기

[그림7] (주)샘표식품이천공장 Bio-filter(300㎥/min.)



[그림8] 다공성세라믹담체

[그림9] 다공성세라믹담체의미세구조

[그림10] 다공성세라믹담체에부착된톨루엔분해미생물

[그림11] Higher organisms, preying upon bacteria

참고문헌

1. 임재신 " Biological Trickling Filter를이용한VOCs 처리에있어서공기병용역세척에의한잉여미생물제거 ", 2001.2 한국과학기술원박사학위청구논문
2. Jae-Shin Lim, Sang-Jin Park, Ja-Kong Koo and Heekyung Park, " Evaluation of Porous Ceramic as Microbial Carrier of Biofilter to Remove Toluene Vapor ", Environmental Technology, in print.
3. 임재신, 구자공, 박상진, " 다공성 세라믹 Biofilter를 이용한 Toluene 가스제거 ", 한국대기보전학회지, 제 14권, 6호, pp. 599 ~ 606, 1998.
4. 임재신, 박노석, 김성훈, 박희경," 물과공기를이용한생물막여재역세척시공기방울크기의영향연구 ", 대한환경공학회지, 제21권 12호, pp.2321 ~ 2328, 1999.
5. 박상진, 임재신." Biofilter를이용한휘발성유기화합물및무기악취제거 ", 화학공학의 이론과 응용 1999년도 추계학술대회 논문집, 제5권 2호, pp.3437, 1999.
6. 임재신, 박희경," Toluene 제거를위한Trickling Bed Air Biofilter에서의공기혼합역세척에관한연구 ", 1999년도대한환경공학회추계학술대회논문집