

Shadow mask 여과 모듈을 이용한 슬러지 농축 특성

정용준 · 권구호 · 민경석[†]

경북대학교 환경공학과

Sludge Thickening Performance of the Filtration Bio-reactor Equipped with Shadow Mask Filter Module

Yong-Jun Jung · Koo-Ho Kwon · Kyung-Sok Min[†]

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

(Received 19 August 2004, Accepted 1 October 2004)

Abstract : In order to recycle the waste material and to develop the thickening unit of waste activated sludge from wastewater treatment facilities, the filtration bio-reactor equipped with a shadow mask filter module was employed for this work from which the operating properties and parameters were drawn. The sludge thickening and filtration unit is made of cylindrical acryl tank(12cm i.d. X 58cm height: working volume of 6L), where the flat-sheet type of shadow mask filter module(pore size: 220~250um, opening area: 34.8~39.6%) was installed and the effluent was withdrawn from the effluent port at the lowest point of the reactor, and the filtration was performed only by the hydraulic pressure. For evaluating the operating performance of this reactor, some parameters such as the solid-liquid separation of different biomass concentrations, the water quality of filtrate, the aeration cleaning time and the cleaning effect were investigated. Depending on the MLSS concentrations, the different time to withdraw 3L of filtrate was required in which the longer filtration time was necessary for the higher MLSS concentrations caused by the thicker formation of cake layer: 40 minutes for 5,000 mg/L, 70 minutes for 10,000 mg/L and 100 minutes for 15,000 mg/L, where the concentrations of SS were 8.9, 6.7 and 6.5 mg/L, respectively. Under the same operating conditions (the intensity of aeration cleaning: 80 L/min, MLSS: 10,000 mg/L), the proper aeration cleaning time was revealed 30 seconds, and the stable formation of cake layer was in the range of 10 to 15 minutes. Therefore, the shadow mask considered as a waste material can be of use as a filter material for the sludge thickening system.

keywords : Shadow mask, Filter module, Waste activated sludge, Thickening, Solid-liquid separation

1. 서 론

최근의 하수처리장은 대규모 시설보다는 마을 하수도와 같은 중소규모시설 위주로 건설되고 있는 가운데, 기존의 대규모 하수처리장이 점차 강화되고 있는 엄격한 배출 기준을 달성하기 위하여 고도처리로 전환되면서 슬러지 농축 공정 시설도 중력식 농축에서 부상 농축이나 원심분리 농축으로 전환되고 있다(Paul, 1994). 농축공정의 효율 향상은 탈수 공정으로의 슬러지 유입량을 감소시켜 탈수조의 용량을 감소시키고, 탈수 효율을 향상시키며, 농축조의 규모를 축소할 수 있으므로 비용절감이라는 경제적 이점도 얻을 수 있다(박 등, 2003). 중력식 농축의 경우 시설과 운전이 간단한 이점이 있지만, 고도처리 공정 도입 시 긴 체류시간으로 인하여 인의 재방출 문제를 유발시켜 대부분의 소규모 하수처리장에서는 원심분리 농축 공정을 이용하고 있는 실정이다(Gurjar et al., 2001; 환경부, 1998). 하지만 원심분리농축의 경우는 시설비와 유지관리비가 많이 들고 운

전 및 유지관리가 어렵기 때문에, 마을 하수도와 같은 소규모 하수처리시설에는 비교적 운전이 쉽고, 경제적인 슬러지 농축 장치가 필요하다.

또한, 기존 활성슬러지 공정의 2차 침전지를 막분리공정으로 대체한 막결합형 생물반응조(MBR, Membrane Bio-reactor)(Gander et al., 2000; Shimizu et al., 1996; 이동, 2000)가 이용되어 처리수질을 향상시키고, 수처리 시스템의 규모를 줄일 수 있게 되었다. 하지만 고가의 막분리 장치와 처리수 배출을 위한 동력비와 같은 경제적인 문제점으로 인하여 분리막을 대체할 만한 여과재에 대한 연구가 진행되어 왔다. 대체 여과막으로는 폴리에틸렌 부직포(임 등, 2003; Alavi et al., 2001; Seo et al., 2002)와 나일론 메쉬 여재(Kiso et al., 2000; 정 등, 2001; 정 등, 2004)를 예로 들 수 있는데, 이들을 사용한 여과분리형 생물반응조는 정밀여과막을 사용한 MBR공정과 비교하여 수질은 다소 떨어지지만, 여과수를 배출시키기 위한 동력장치가 요구되지 않고, 단지 수두차만으로도 높은 투과플럭스를 확보하여 동력비 절감이라는 경제적인 장점을 제시한 공정이다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
ksmin@knu.ac.kr

한편, 국내 L 기업의 브라운관 핵심부품인 shadow mask의 국내의 생산량이 TV 브라운관용(CPT)은 33%로 세계 시장 점유율 1위, 모니터용(CDT)은 22%로 세계 2위를 각각 차지할 정도로 증가되고 있는 것과 동시에 생산공정에서의 불량품도 다량 발생되고 있다. 이러한 전자산업에서 사용되는 shadow mask도 일정한 pore size를 가지므로, 부직포나 나일론 메쉬처럼 대체 여과재로 사용될 가능성이 있는 것으로 분석되었고, 만약 수처리산업에서 재활용을 할 경우 경제적인 유용성도 증대될 수 있다.

따라서, 본 연구는 shadow mask 여과모듈을 이용하여 소규모 하수처리시설에서 발생하는 잉여슬러지의 효율적인 처리를 목적으로, 비교적 시설설치와 운전이 쉽고, 경제적인 간이 슬러지 농축 장치를 개발함과 동시에, 본 장치 시스템의 타당성과 기초 운전인자를 도출하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. Shadow mask

Shadow mask는 두께 약 0.15 mm의 금속판에 약 30만개의 작은 구멍이 규칙적으로 뚫려있는 얇은 제품으로, TV나 PC모니터 스크린의 패널 내면에 장착되는 전자 부품이다. 본 연구에 사용된 재료는 철과 니켈의 합금인 17인치 PC 모니터용 shadow mask이고, pore size는 중앙부가 약 250 μm , 끝으로 갈수록 약간씩 작아져서 약 220 μm 되는 원추형 구멍으로 되어있다. 제조회사에서 제시한 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of shadow mask used in this work

Item	Property
Thickness(μm)	150
Pore size(μm)	220 ~ 250
Opening area(μm)	34.8 ~ 39.6
Material(%)	Fe(64%) + Ni(36%)

2.2. 실험장치

막을 사용한 MBR공정의 crossflow 여과방식에서는 막오염 방지를 위하여 슬러지의 유동성을 확보할 필요가 있으므로 높은 슬러지 농축율을 달성하기 곤란하다. 본 연구에 사용된 슬러지 농축 여과분리장치는 shadow mask 여과 모듈을 반응조 내에 침지시켜 활성슬러지 여과막에 의한 여과분리 농축과 중력농축을 병용하는 시스템으로서 Fig. 1과 같이 구성하였다. 본 장치는 슬러지 공급 이외의 특별한 조작이 필요하지 않는 간단한 시스템으로 구성하였다.

슬러지 농축 여과분리장치는 아크릴로 제작된 6 L의 원통형 반응조에 shadow mask로 제작된 평막형 여과 모듈(7.513 cm, 막면적 0.0195 m^2)을 장착한 후, 농축 여과수를 장치 아래 배출구로 유출시키는 형태로 제작되었다. 사용된 shadow mask 여과 모듈은 평막과 유사하게 폴리에스테로

제조된 그물망 형태의 지지체를 두고, Fig. 1에 나타난 바와 같이 주위를 shadow mask로 둘러싸서 제작하였다.

본 장치는 여과수를 배출시키는데 별도의 동력을 사용하지 않고, 수두차로만 농축 여과 분리를 진행시키며, 85 cm로 설정된 초기 수두차로부터 농축 여과가 진행되어 농축 여과시간이 진행됨에 따라 수위가 감소하면서 shadow mask 여과 모듈의 일정부위가 노출되어 농축 여과에 이용되지 않는다. 분리막을 이용한 MBR공정에서의 수처리 투과 기구와는 달리 본 장치에서는 shadow mask표면에 형성되는 cake층, 즉 활성슬러지로 구성된 여과막을 이용하여 여과수를 배출하도록 구성하였다.

Shadow mask 여과 모듈아래의 사영역(dead space)부분의 용적은 투입 슬러지량의 약 10% 정도를 차지하여 최대 0.6 L 정도까지 농축이 가능하도록 설계하였다. 또한 shadow mask 여과 모듈의 높이를 조정함으로써 농축된 슬러지의 유동성 확보를 위한 슬러지의 농도 조절도 가능하도록 설계하였다.

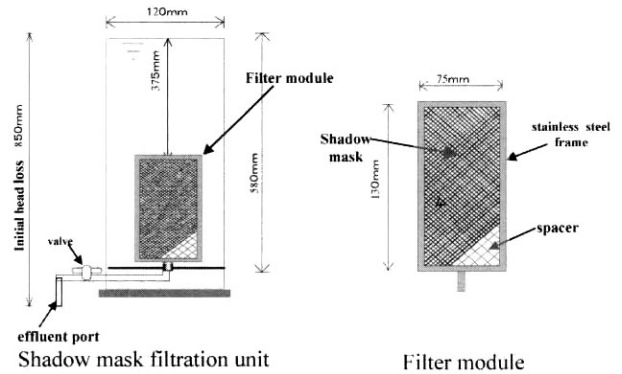


Fig. 1. Schematic diagram of sludge thickening unit equipped with a shadow mask filter module.

2.3. 운전방법

농축에 사용된 슬러지는 하수고도처리 공정으로 운전되고 있는 인근 수질환경사업소의 반송슬러지를 채취한 후, 유입하수와 유사한 농도로 일정기간 배양한 것이다. 농축 실험에 사용될 당시의 슬러지 성상은 Table 2에 정리하였다. 슬러지의 농축 실험은 회분식으로 진행하였고, 사용된 슬러지의 SS농도에 따라 5,000~15,000 mg/L의 3가지 모드로 구분하여 진행하였다.

본 시스템의 운전 특성을 평가하기 위하여 반응조 내에 6 L의 슬러지를 주입한 후, 시간 경과에 따른 농축 여과수의 유출속도와 여과수의 탁도 변화를 관찰하였다. 활성슬러지 여과막의 폐색 후, 포기 세정시간을 10초, 30초 및 60초로 조절하면서 적절한 포기 세정시간을 설정하였다. 또한 설정된 포기 세정 시간에서 세정 특성을 알아보기 위하여 포기 세정 후 시간별 플럭스와 탁도 변화를 관찰하였다. 여과수의 탁도 측정을 위해서는 HACH사의 2100N 모델을 사용하였으며, SS농도는 Standard method(APHA, 1998)에 따른 방법으로 측정하였다.

Table 2. Comparison of sludge properties used in this work

	Run 1	Run 2	Run 3
SS concentration(mg/L)	5,000±500	10,000±500	15,000±500
SVI	145	160	180
Supernatant SS(mg/L)	35	40	50

3. 결과 및 고찰

3.1. 농축 분리특성

Shadow mask 여과 모듈을 이용하여 슬러지의 SS농도를 5,000 mg/L(Run 1), 10,000 mg/L(Run 2) 및 15,000 mg/L(Run 3)로 변화시켜 농축 여과분리 한 결과, 시간 경과별 flux변화와 잔류 용적의 변화는 Fig. 2와 같이 나타났다. 3 L의 농축 여과수를 배출시키는데 소요되는 시간은 Run 1의 경우 40분, Run 2의 경우 70분 및 Run 3의 경우 100분으로 슬러지의 농도가 증가할수록 농축 여과시간도 증가하였다. 농축 여과수를 반응조 하부로 배출시키면서 발생하는 하향류와 고액분리에 의한 농축으로 일반 활성슬러지 처리 공정에서 주로 사용하고 있는 중력 농축여과 방식에 비해 짧은 시간 안에 고농도의 슬러지로 농축이 가능하였다.

비교적 양호한 수질의 농축 여과수를 배출시키기 위해서는 shadow mask자체의 여과기능 보다는, 여과 모듈 표면에 형성된 활성슬러지 여과막의 기능이 더욱 크게 작용한다. 본 연구에서는 농축 여과시간의 경과에 따른 flux의 변화에서 비교적 flux변화폭이 적은 시점을 안정된 활성슬러지 여과막의 형성으로 가정하였다. 즉, 비교적 고농도인 Run 2와 Run 3에서는 10~20분 사이에 안정된 flux를 나타냈지만, 저농도의 농축 여과를 실시한 Run 1의 경우에는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 지속적으로 flux가 감소하였다. Run 1에서는 농축 시작 후 5분 이내에 flux가 급격히 감소하지만, 이때 형성된 활성슬러지 여과막은 flux가 5 m/d 이상에서도 계속적으로 감소하는 경향을 나타내는 것으로 볼 때, shadow mask 여과막 모듈 전면에 안정적으로 형성되지 못한 것으로 판단된다. Shadow mask를 여과막 모듈로 사용한 본 연구에서의 활성슬러지 여과막 형성은 비교적 저농도인 Run 1 (5,000 mg/L)보다는 Run 2와 Run 3, 즉 10,000 mg/L 이상의 고농도에서 보다 빠른 시간에 형성되는 것을 알 수 있다. 본 연구 결과는 100 μ m의 mesh 여과

막 모듈로 3,000~9,000 mg/L농도의 활성슬러지로 여과막 형성 시간을 연구한 결과, 비교적 저농도에서 보다 빠른 시간에 안정된 여과막이 형성된 연구 결과(Kiso et al., 2000)와 비교할 때 다르게 나타났는데, 이는 여재의 pore size 차이에 의해 안정된 활성슬러지 여과막을 형성하는 영향인자들이 다르게 작용한 원인으로 분석된다. 즉, 100 μ m 정도의 작은 pore size에서는 수두차에 의한 여과만으로도 안정된 활성슬러지 여과막이 형성되나, shadow mask여재의 경우 pore size가 비교적 크므로 저농도의 미생물은 안정된 여과막을 형성하기 전에 유출되기 때문에 상대적으로 더 큰 분포의 활성슬러지의 플록이 여과막을 형성할 수 있도록 10,000 mg/L이상의 고농도의 미생물이 필요하게 되는 것으로 사료된다.

이상에서 검토한 바와 같이 pore size가 30 μ m인 부직포나, 100 μ m 매쉬 정도의 여과막에서는 수처리 공정이 가능한 것으로 나타났으나, pore size가 200 μ m가 넘는 여재의 경우는 저농도의 수처리 공정운전 보다는 비교적 고농도의 슬러지 처리공정이 더 적합할 것으로 사료된다.

또한 소규모 처리시설을 대상으로 한 본 시스템의 특성을 고려할 경우, 배출되는 농축 여과 슬러지는 후속처리로서 단순 폭기만으로도 가능한 호기성소화가 효율적일 것으로 사료된다.

3.2. 농축 여과분리수 수질

국내 소규모 하수처리장에서 발생하는 반류수에 의한 유입부하 증가량 중 BOD와 SS가 각각 10%와 20%일 정도로 유입하수 부하는 증가(환경부, 2001)하는 것으로 나타났다. 특히 고농도의 질소와 인을 포함한 반류수는 고도처리 시설에 질소, 인의 부하를 가중시킨다. 하지만, 소규모 하수처리장에서 발생하는 슬러지는 단독처리와 공동처리 모두 슬러지 처리공정의 상시 운전은 적으며, 간헐운전의 경우가 많기 때문에 반류수도 집중하여 발생하므로, 처리에 상당한 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서 농축 공정에서 발생하는 농축수의 수질 또한 공정 설계의 중요한 인자(환경부, 1998)가 될 수 있다. 본 shadow mask 농축 여과 분리 시스템에서 배출되는 여과수의 수질 정도를 평가하기 위하여 우선적으로 농축 여과분리수의 초기 40분간의 탁도 변화를 Fig. 3에 표시하였다.

저농도의 슬러지를 이용하여 농축 실험한 Run 1과 고농

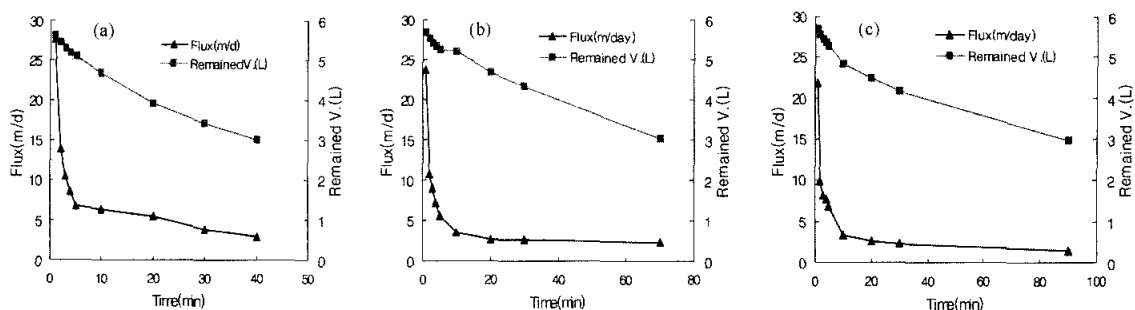


Fig. 2. Profile of flux and remained volume at each mode: (a) Run 1, (b) Run 2, (c) Run 3.

도의 슬러지를 이용한 Run 2와 3에서의 농축 여과분리수는 각각 농축 시작 후 약 40분과 10~20분 정도가 경과한 시점에서 탁도 10 NTU이하의 양호한 수질을 나타냈는데, 이것은 활성 슬러지 여과막의 형성시간과 거의 유사하게 나타난 결과이다. Run 1과 Run 2,3에서는 전체적으로 농축 여과분리 시작 후 시간 경과에 따라 탁도가 감소하였지만, 변화폭은 Run 1이 Run 2,3보다 상대적으로 크게 나타났다. Fig. 3에 제시한 바와 같이 안정된 여과막이 형성되기 전까지의 농축 여과분리수의 탁도는 매우 높았기 때문에 초기 농축 여과 분리수는 전량 반송하거나, 배출시키는 것과 같은 적절한 대체 처리 방안이 강구되어야 할 것으로 판단된다. 또한 3L의 농축 여과분리수를 배출할 때의 SS농도는 Run 1의 경우 8.9 mg/L, Run 2는 6.7 mg/L, Run 3에서 6.5 mg/L로 매우 양호하게 나타나 하수처리장 수처리공정에서의 반류수의 영향을 가능한 최소화 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

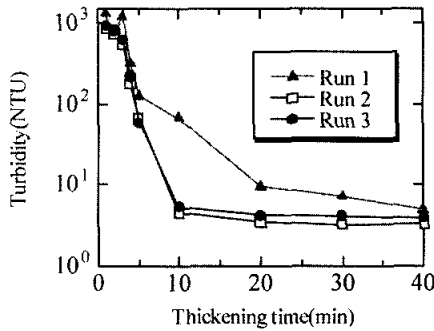


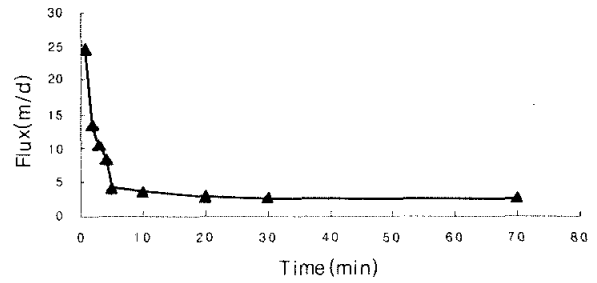
Fig. 3. Comparison of effluent Turbidity.

3.3. Shadow mask 여과 모듈 세정

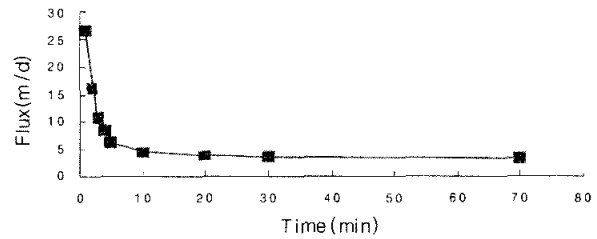
Fig. 4에는 일정한 포기 강도(80 L/min)와 MLSS(10,000 mg/L)에서 포기 세정시간을 10초, 30초 및 60초로 조절하면서 관찰한 flux의 변화를 나타냈다. 포기 세정 후 flux의 변화가 원상태로 회복하여 안정되게 일정한 형태로 나타나기 시작한 시점을 활성슬러지 여과막이 형성된 것으로 가정할 경우, 본 연구에서의 포기 세정 시간은 30초 전후가 적당한 것으로 사료된다. 10초간의 포기 세정에서는 이전에 형성되었던 여과막이 충분히 탈리되지 않은 상태에서 여과분리가 진행되어 다른 포기 세정시간에서 보다 이른 시간(5~10분)에 flux 변화가 안정되었다. 하지만, 30초와 60초간의 포기 세정은 거의 유사하게 원상태로 회복되어 (10~20분) 포기 세정시간 증가에 의한 세정 효과는 미미한 것으로 판단된다.

일반적인 침지형 MBR공정에서는 분리막의 폐색을 방지하기 위하여 12분 흡입, 3분 정지형태로 흡입펌프 시간을 조절하면서, 수개월에 한번씩 약품세정을 실시한다. 또한 메쉬나 부직포 여과재를 사용한 여과분리형 생물반응조도 최소한 1분 이상의 공기 역세를 실시하는 것으로 볼 때, 본 공정은 불과 30초 이내의 단시간에도 충분한 역세 효과를 나타낸다고 할 수 있다.

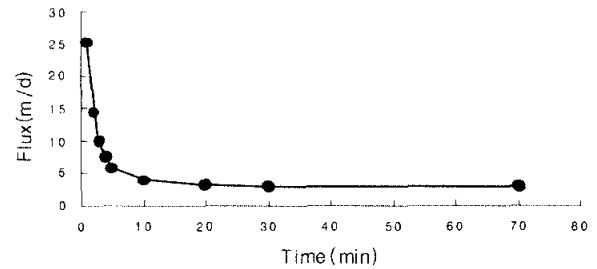
Shadow mask 여과 모듈 표면에 과도하게 형성된 활성슬



(a) 10 sec



(b) 30 sec



(c) 60 sec

Fig. 4. Effect of aeration cleaning time on flux.

러지 여과막의 세정을 위하여 30초간의 포기 세정을 실시한 후, 시간 경과별 flux와 탁도의 변화를 조사한 결과, Fig. 5와 같이 나타났다. 포기 세정은 고농도 슬러지를 이용한 Run 2에 대해서만 실시하였으며, flux는 대체로 포기 세정 후 약 10~20분을 전후로 하여 감소하면서 안정된 것으로 나타나, 이때 활성 슬러지 여과막이 형성되는 것으로 예상할 수 있었다. 여과 분리수의 탁도는 포기 세정 후 약 15분 후 10 NTU이하로 유지되어 비교적 양호한 수질을 나타내었다. 따라서 양호한 수질의 여과수를 배출시키기 위한 안정된 활성슬러지 여과막은 포기 세정 후 약 10~15분 정도만 경과하면 재형성되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 포기 세정 이전의 결과와 매우 유사하며, shadow mask 표면특성상 간단한 포기 세정만으로도 농축 여과분리 시간의 경과에 따라 shadow mask 여과 모듈 표면에 두껍게 형성된 활성슬러지 cake층을 쉽게 탈리시킬 수 있다는 사실을 보여준다.

3차원 구조의 불규칙한 pore형태를 가진 부직포 여과막을 사용할 경우에는 여과와 포기 세정 중에 여과 모듈내부로 흡입된 입자들이 시간이 경과함에 따라 점차로 유출되어 간혹 불안정한 수질을 나타내는 것과 비교하면, 본 shadow mask 여과막은 pore size만 클 뿐, 재료적인 특징 면에서는 더 우수할 것으로 사료된다.

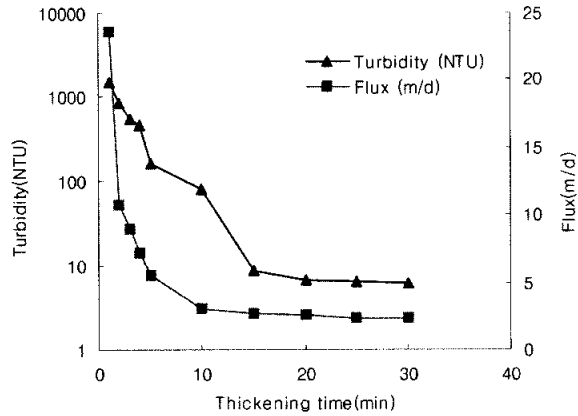


Fig. 5. Reformation of cake layer.

4. 결론

Shadow mask를 이용한 슬러지 농축 여과분리 장치의 적용 가능성과 기초운전 인자를 도출하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 3 L의 여과수를 배출하는데 소요되는 시간은 슬러지 농도에 따라 Run 1(MLSS: 5,000 mg/L)의 경우 40분, Run 2(MLSS: 10,000 mg/L)의 경우 70분 및 Run 3(MLSS: 15,000 mg/L)의 경우 100분으로 여과속도에서 큰 차이를 나타냈으며, 최종 여과수의 SS농도는 각각 8.9 mg/L, 6.7 mg/L 및 6.5 mg/L였다.
- 탁도가 10 NTU이하의 안정된 수질을 만족시키는데 필요한 활성슬러지 여과막 형성 시간은 슬러지 농도에 따라 Run 1의 경우 20~30분, Run 2,3의 경우 10~20분 전후로 나타났다.
- 본 연구에서 사용한 shadow mask 여과 모듈의 경우 약 30초간의 포기 세정만으로도 여과 모듈 표면에 생성된 cake층을 쉽게 탈리시킬 수 있었으며, 포기 세정 후 약 10분~15분 경과 후 활성슬러지 여과막이 재형성되는 것으로 나타났다.
- 활성슬러지 여과막이 재형성되기 이전 시간 동안 농축 여과되는 고농도의 초기 유출수는 전량 재반송하거나, 배출시키는 것과 같은 대책 방안이 요구된다.
- 폐자재인 shadow mask는 기존의 mesh나 부직포 여과막과 같은 여과분리 기능이 가능한 것으로 나타났으며, 특히 고농도(MLSS: 10,000 mg/L)미생물의 농축 여과 분리장치에 적용 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 박용호, 한부영, 안현주, 하창원, 전해부상법에 의한 슬러지 농축특성, *대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집*, pp. 271-274 (2003).
- 이상민, 신항식, 서인석, 개별빌딩 오수 재이용을 위한 SBR 과 MF의 조합공정에 대한 연구, *대한환경공학회지*, **22**(8), pp. 1369-1376 (2000).
- 임상호, 배민수, 조광명, 부직포 여과막 생물반응조를 이용한 하수의 처리, *한국물환경학회지*, **19**(1), pp. 99-107 (2003).
- 정용준, 민경석, 간헐포기 Mesh 침지여과분리법을 이용한 하수처리와 운전 안정성, *대한환경공학회지*, **23**(1), pp. 13-20 (2001).
- 정용준, 키소요시아끼, 민경석, 메쉬 침지여과막을 이용한 활성슬러지의 고액분리, *대한환경공학회지*, **26**(3), pp. 299-304 (2004).
- 환경부, *하수도시설기준* (1998).
- 환경부, *슬러지공정 반류수 처리기술 개발, G-7 최종보고서* (2001).
- Alavi, M. M. R., Satoh, H., and Mino, T., Effect of important operational parameters on performance of coarse pore filtration activated sludge process, *Wat. Sci. Tech.*, **46**(9), pp. 229-236 (2001).
- Gurjar, B. R., *Sludge treatment and disposal*, A. A. Balkema (2001).
- Gander, M. A., Jefferson, B., and Judd, S. J., Membrane bio-reactors for use in small wastewater treatment plants: membrane materials and effluent quality, *Wat. Sci. Tech.*, **41**(1), pp. 205-211 (2000).
- Kiso, Y., Jung, Y. J., Ichinari, T., Park, M., Kitao, T., Nishimura, K., Min, K. S., Wastewater treatment performance of a filtration bio-reactor equipped with a filter media, *Water Res.*, **34**, pp. 4143-4150 (2000).
- Paul, N. Cheremisinoff., *Sludge management and disposal*, PTR Prentice Hall (1994).
- Seo, G. T., Moon, B. H., Lee, T. S., Lim, T. J., and Kim, I. S., Non-woven fabric filter separation activated sludge reactor for domestic wastewater reclamation, *Wat. Sci. Tech.*, **47**(1), pp. 133-138 (2002).
- Shimizu, Y., Okuno, Y., Uryu, K., Ohtsubo, S., and Watanabe, A., Filtration characteristics of hollow fiber microfiltering membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment, *Wat. Res.*, **30**, pp. 2385-2392 (1996).
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, American Public Health Association, AWWA, WEF, Washington DC. USA (1998).