

메쉬 여과모듈을 이용한 잉여슬러지 농축

정용준 · 木曾祥秋* · 민경석†

경북대학교 환경공학과

*토요하시기술과학대학

Thickening of Excess Sludge using Mesh Filter

Yong-Jun Jung · Yoshiaki Kiso* · Kyung-Sok Min†

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

*Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology, Japan

(Received 19 March 2004, Accepted 17 May 2004)

Abstract : Because of being produced a great deal of excess sludges from biological wastewater treatment process, the subject regarding treatment and disposal of them has been significantly handled in real plants. It should be considered the alternative treatment with easy operating and cost effective process in rural areas. For the thickening of wasted activated sludge from small scale wastewater treatment facilities, thus, the provisional sludge thickening system was developed by the application of mesh filter module. Three meshes with different pore size(100, 150, 200 μ m) were prepared for filter modules that were used to withdraw effluent from thickening system. A filter module with 100 μ m mesh was chosen as the most effective thickening material in the viewpoint of volume reduction and effluent quality: the volume reductions of initially injected sludge with 3,600 mg/L and 9,100 mg/L were 95% and 85%, respectively, and the filtered effluents were enough good to be shown below 1.0 mg/L of SS and 1.0 NTU of turbidity. Since the filtration of thickening was influenced by the cake layer formed on mesh filter module and this system was operated in the combination of sludge thickening with gravity settling, the filter modules with smaller pore size and the larger floc size were required for long term operation safely.

keywords : Sludge thickening, Mesh filter, Cake layer, Flux, Small scale system

1. 서 론

하수처리장에서 발생하는 슬러지량은 합수율에 크게 좌우되므로 효율적인 농축 공정의 선정에 의해 슬러지의 합수율을 낮출 경우 후속처리 시설의 용량을 줄일 수 있는 반면, 충분한 농축이 이루어지지 않으면 슬러지 소화공정에서 가운을 위해 더 많은 열량이 필요하게 되고, 소화일수에도 영향을 받게 되므로 농축 공정은 후속처리에 부하를 줄여주기 위하여 신중하게 선정되어야 한다(환경부, 1998). 하수처리시설에서 채택되고 있는 주된 슬러지 농축 처리방식에는 중력식, 부상식, 원심분리식 농축법등이 이용되고 있다.

일반적으로 2차 슬러지내의 미생물은 가스를 생성시켜 슬러지를 부상시키므로 침전이 잘 안되며, 농축도 불량하여 주로 부상농축(DAF, Dissolved Air Flotation)방법에 의존하여 슬러지를 농축시키고 있으나, 중력식 농축 방법과 비교하여 농축에 한계가 있고, 전기소모가 크며, 소요부지가 크다는 단점이 있다(최희소, 2001).

한편 국내 대부분의 하수관거는 하수와 우수가 함께 유

입되는 합류식 하수관거 시스템으로 구성되어 있기 때문에, 유기물 함량이 상대적으로 다른 나라와 비교하여 낮으면서 탈수효율도 떨어지게 되어, 5%로 설계되는 슬러지 농축조의 농축도가 일반적으로 2~3%에 그치고 있는 실정이다(배재근, 2002; 이용두 외, 1998).

생활수준의 향상과 더불어 하수슬러지의 발생량은 매년 증가하여 슬러지 처리비용이 전체 처리비용의 25~50%정도 소요될 만큼, 슬러지 처리에 상당한 비용이 소요되는데다, 현재 이용되고 있는 슬러지 처분 방법조차 법적으로 금지되고 있어 슬러지 감량화가 시급한 실정이므로, 효율적인 슬러지 농축 방법의 개발은 슬러지 감량화와 후속처리의 부하를 감소시키기 위한 매우 중요한 공정(문병현 외, 2002)이라 할 수 있다. 특히 소규모 처리장에서는 비교적 소량의 슬러지가 발생하므로 간단하고, 경제적인 처리공정의 선정이 필요하다.

Kiso(1996) 등의 연구에 따르면 MF막보다는 경제적인 mesh여재를 사용하여 여과모듈의 표면에 형성된 활성슬러지의 케이크층으로 MF막을 사용한 막결합형 생물반응조(MBR, membrane bio-reactor)와 유사한 처리수질을 보였고, 또한 mesh여재를 사용한 수처리로서의 적용 가능성(정용준 외 2000; 정용준 외 2001)과 활성슬러지의 고액분리 가능성(정용준 외 2004)을 문헌에서 찾아볼 수 있었다.

† To whom correspondence should be addressed.

ksmin@knu.ac.kr

따라서 본 연구에서는 농촌지역의 하수도나 마을하수도 와 같은 소규모 하수처리 시설에서 발생하는 잉여슬러지의 효율적인 처리를 위하여 매쉬 여과모듈을 이용한 간이 슬러지 농축 장치의 개발을 목적으로 기초 운전 및 설계 인자를 도출하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

막을 사용한 MBR공정의 crossflow 여과방식에서는 막오염 방지를 위하여 슬러지의 유동성을 확보할 필요가 있으므로 높은 슬러지 농축율을 달성하기 곤란하지만, 본 연구에 사용된 슬러지 농축 여과장치는 매쉬를 사용한 중력농축과 여과를 병용하는 Fig. 1과 같은 형태의 농축장치로서 슬러지 공급이외의 특별한 조작이 필요하지 않는 간단한 시스템으로 구성되어 있다.

농축장치는 아크릴로 제작된 20L의 원통형 반응조(직경: 19cm, 높이: 70cm)내에 매쉬를 이용하여 만든 평막형의 여과모듈(15x40cm, 막면적 0.12m²)을 장착한 후, 농축 여과수를 장치 아래로부터 유출시키는 구조로 설계하였다. 본 시스템은 매쉬 여과모듈에 의해 주입 슬러지의 분리 농축과 함께 중력 침전에 의해서도 농축되는 구조로 설계하였기 때문에, 여과모듈의 유출구를 수직으로 설치한 뒤, 밸브를 연결하도록 하여 실제적인 농축 여과가 이루어지는 반응조의 유효용적은 약 15L였다. 또한 매쉬 여과모듈 아래의 사영역(dead space)부분의 용적은 투입 슬러지량의 약 3%정도를 차지하여 최대 0.45L정도까지 농축이 가능하도록 설계하였다. 사용된 여과 모듈은 평막과 유사하게 폴리에스테르 제조된 그물망 형태의 지지체를 두고, 주변에 매쉬를 둘러서서(정용준 외, 2001) 제조하였다.

본 장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 유출구와 원통형

반응조내로 주입되는 하수 슬러지와 초기 높이 차이 즉, 수두차로만 농축 여과분리가 진행되기 때문에 65cm로 설정된 초기수두차가 조작압력이 되는데, 농축 초기에는 매쉬 여과모듈의 전체 표면이 농축 여과에 이용되지만, 농축 여과 시간이 경과함에 따라 수위가 감소하면서 여과모듈의 일정 부위는 노출되어 농축 여과에 이용되지 않는다. MF막을 사용한 MBR공정에서는 투과수를 얻기 위하여 최소한 1 kPa정도의 조작압력이 필요하지만, 본 연구에 사용된 농축 장치로는 단지 수십 cm 이내의 수두차만으로도 아무런 펌프의 동력없이 농축 여과분리가 가능하였다.

여과모듈의 재료로 사용된 매쉬의 재질은 나일론이었고, 각각의 pore size는 100, 150 및 200 μ m였으며, 제조회사(Nytal, 스위스)에서 제시한 자세한 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specifications of mesh filter

Pore size(μ m)	Code No.	Opening area(%)	Dry weight(g/cm ²)
100	NXX 13	36	0.0058
150	NXX 9	43	0.0049
200	NXX 7	48	0.0045

2.2. 실험 방법

슬러지 농축에 사용된 미생물은 장기폭기법으로 운전되고 있는 하수처리장의 반송슬러지를 채취하여, 생활하수의 농도와 유사하게 skim milk, NH₄Cl, K₂HPO₄ 등으로 제조된 인공하수로 1개월 이상 배양한 것이다. 농축 장치에 주입될 당시의 슬러지 농도는 Table 2에 나타난 바와 같이 매쉬 여과모듈의 크기별로 실제 처리장의 호기조와 침전지에서의 미생물 농도를 고려하여 각각 3,000 mg/L과 9,000 mg/L 정도로 조정하였다. 슬러지 농축은 회분식으로 운전하였고, 본 시스템의 운전 특성을 평가하기 위하여 반응조내에 15L의 미생물을 주입한 후 시간 경과에 따른 농축 여과수의 유출속도와 SS의 농도 변화를 관찰하였다.

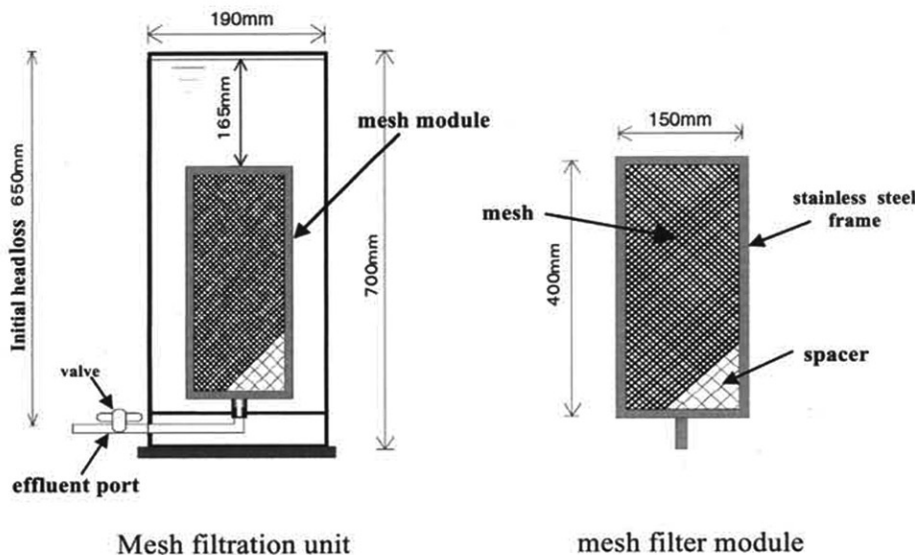


Fig. 1. Schematic diagram of mesh filtration sludge thickening system.

Table 2. Operating conditions

	Mode 1-1	Mode 1-2	Mode 2-1	Mode 2-2	Mode 3-1	Mode 3-2
Mesh(μm)	100		150		200	
Initial MLSS	3,600	9,100	3,000	9,800	3,000	9,800
Final MLSS*	28,400	60,000	17,900	46,200	11,000	33,200
Vol. after 24 hr(%)	5.0	15.0	9.0	16.0	5.6	6.0
Thickening time(hr)	9	24	24	24	6	18
Effluent SS	<1.0	<1.0	37.1	11.0	-	42.6
Effluent Turbidity(NTU)	<1.0	<1.0	27.8	8.2	13.4	29.3
Recovery of SS(%)**	80.0	96.0	51.0	76.0	15.0	18.0

unit: mg/L, *: without attached SS on the mesh filter, **: including attached SS on the mesh filter.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지 농축 특성

Pore size가 서로 다른 3종류의 메쉬 여과모듈을 이용하여 농도가 각각 3,000 mg/L과 9,000 mg/L인 활성슬러지를 농축 실험한 결과는 Table 2와 같다. 슬러지 농축시간은 메쉬 여과모듈과 주입된 초기에 주입된 슬러지의 농도에 따라 9시간~24시간으로 나타났고, 슬러지 체적 감소율과 농축 슬러지 농도 또한 메쉬 여과모듈의 pore size와 초기에 주입된 슬러지의 농도에 영향을 받는 것으로 나타났다. Table 2에서 최종 슬러지 농도는 메쉬 여과모듈 표면에 부착된 슬러지를 포함하지 않았지만, 반응조내의 SS회수율은 메쉬 여과모듈 표면에 부착된 슬러지의 농도를 포함하여 계산하였다.

농축 여과가 시작된 30분 후의 여과수의 SS와 탁도 변화를 관찰한 결과, 200 μm 의 메쉬 여과모듈로 3,000 mg/L의 저농도 슬러지를 농축 여과한 경우(mode 3)에서는 30분 정도 경과한 시점에서 최초로 주입된 슬러지의 대부분이 유출되었기 때문에 다른 운전 mode와 비교할 수 없었으며, 농축 여과수의 수질은 별도로 평가하였다.

반응조내에는 여과모듈의 아랫부분에 주입 슬러지량의 약 3%가 사영역으로 남기 때문에, 본 장치에서의 최대 체적 감소율은 97%로 간주할 수 있다. 메쉬 여과모듈의 pore size에 무관하게 초기 주입 슬러지의 농도가 낮은 경우에는 짧은 시간에 농축 여과가 가능하였지만, 실제적으로 농축 여과를 담당하는 슬러지 케이크층의 형성이 그만큼 늦어지므로 최종 슬러지농도 및 SS회수율은 오히려 낮은 경향을 보였다. 즉, 메쉬 여과모듈의 표면에 슬러지 케이크층을 짧은 시간에 형성시키기 위해서는 슬러지를 고농도로 유지할 필요가 있는 것으로 사료된다.

메쉬 여과모듈의 pore size를 고려하면, 크기가 가장 작은 100 μm 메쉬 여과모듈의 슬러지 회수율이 가장 높으며, 150 μm 의 메쉬 여과모듈은 76% 이하의 회수율 밖에 얻지 못했으므로 슬러지의 유출을 막기 위한 세공 크기로서는 100 μm 정도가 적당한 것으로 나타났다.

하지만, mode 1(100 μm)에서 농축 여과수의 SS는 실험초기부터 낮게 유지되고 있어, 본 연구에서 표시한 회수율은 낮게 평가되고 있는 경향이 있다.

본 농축 여과 실험에서 진행된 슬러지의 물질수지를 Fig. 2에 정리하였다. 슬러지 회수율이 비교적 높은 mode 1과 mode 2-2를 분석해 보면, 여과모듈의 pore size가 작고, 반응조에 주입되는 슬러지의 농도가 커질수록 메쉬 여과모듈 표면에 부착된 슬러지의 비율도 높다는 것을 알 수 있다. 또한 200 μm 의 메쉬 여과모듈을 사용한 mode 3에서는 농축 여과가 진행됨에 따라 메쉬 여과모듈이 노출되므로 초기 슬러지 농도에 무관하게 여과모듈에 부착된 슬러지 케이크층의 탈리와 다량의 SS가 배출되기 때문에 메쉬 여과모듈에 부착된 슬러지량의 비율이 낮게 된 요인으로 분석된다.

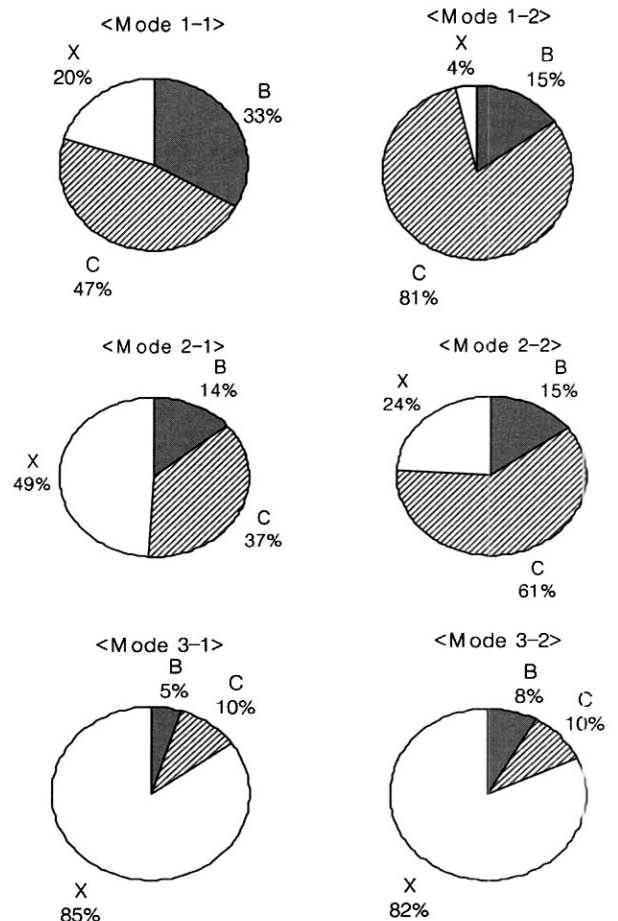


Fig. 2. Mass balance of SS after thickening (B:Residual SS, C:Attached SS, X:Effluent SS).

3.2 여과속도 변화

농축 여과 장치내의 슬러지 체적비와 투과 유속의 변화를 Fig. 3에 정리하였다.

100 μ m의 여과모듈을 사용한 mode 1에서는 주입 슬러지의 농도가 3,600 mg/L로 낮을 경우, 불과 50분내에 80% 이상의 슬러지 체적 감소율을 나타냈고, 초기 주입 슬러지 농도가 낮은 만큼 슬러지 부피의 감소 속도도 빨라서 2시간 정도에 농축여과가 거의 종료되었다. 주입된 슬러지농도가 9,100 mg/L인 경우, 2시간 정도에 슬러지 농축 배율이 2.5~3배 정도였지만, 초기의 슬러지 농축 속도는 상당히 빠른 것으로 나타나서 12시간 정도에 농축이 거의 종료되었다.

Mode 2에서는 mode 1에 비하여 초기의 여과속도는 커지만 20분 이후에 급격히 감소하여, 12시간 후에 잔류하는 슬러지량은 mode 1과 거의 같거나 조금 증가하였다. 이는 20분 이후의 투과유속이 mode 1에 비하여 낮기 때문이다. 즉, 150 μ m의 매쉬 여과모듈을 농축시스템으로 사용한 경우에는 초기 슬러지농도의 영향은 mode 1에 비하여 작지만,

pore size가 커짐에도 불구하고 슬러지 케이크층의 폐색이 쉽다는 것을 나타냈다.

200 μ m의 여과모듈을 사용한 mode 3에서는 약 60분에서 120분정도에 걸쳐 주입된 슬러지의 대부분이 농축되면서 농축여과수는 유출되었지만, 이미 30분 정도에 상당부분 유출되고 있는 것으로 나타났다. 이때 대조실험으로 사용된 수도수만의 농축 여과 실험 결과에서도 나타난 것처럼, 200 μ m의 매쉬 여과모듈에서는 슬러지의 투수성이 수도수와 거의 동일한 정도로 나타나고 있다.

본 매쉬 여과모듈 농축시스템에서는 여과시간이 경과함에 따라 슬러지 케이크층은 상대적으로 두껍게 형성될 것으로 예상되에도 불구하고, mesh의 pore size에 무관하게 전체 농축 여과시간은 크게 변하지 않은 것으로 나타났다. 본 시스템은 주입 슬러지량의 감소속도가 200 μ m의 매쉬 여과모듈에서 가장 빠른 것으로 나타났지만, 이미 Table 2에 제시한 것처럼 슬러지의 배제율도 낮고, 농축 효과 역시 낮은 것으로 나타났다. 실험에 이용된 매쉬 여과모듈 가운데 슬러지 케이크층의 폐색 진행이 늦고, 장기간 안정된

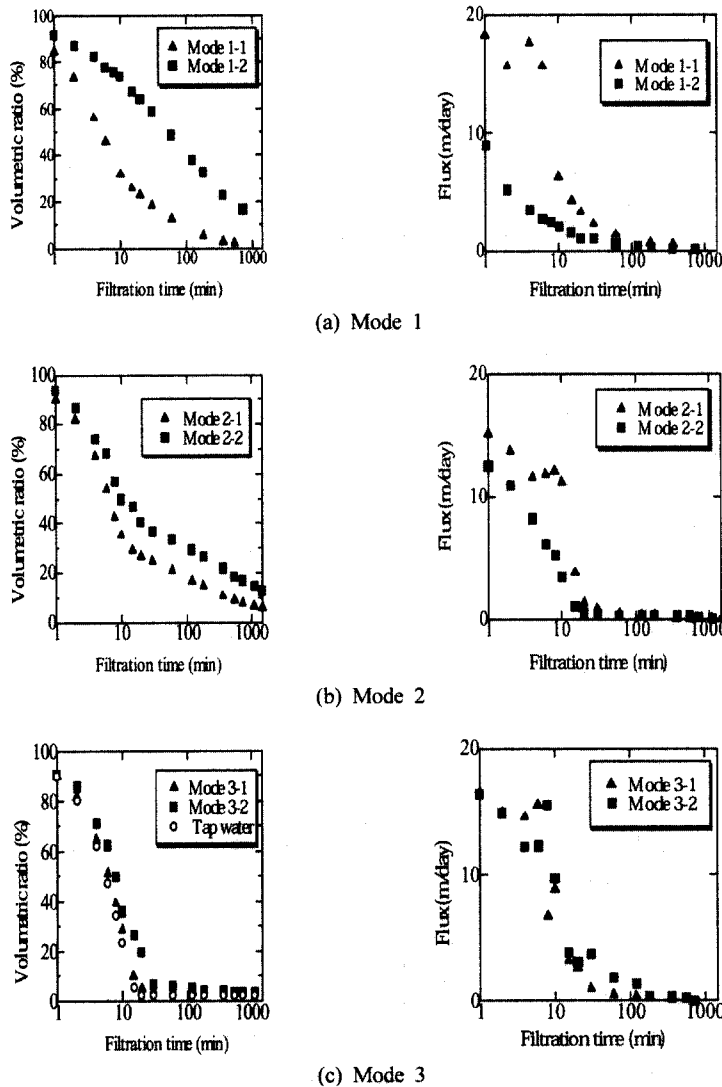


Fig. 3. Sludge volume and flux vs. filtration time.

농축 여과분리가 가능했던 것은 100 μ m의 메쉬 여과모들로 제작된 농축시스템이라고 판단할 수 있다.

3.3. 농축 여과수 수질

국내 소규모 하수처리장에서 발생하는 반류수의 양은 유입 유량대비 1.17%, 농축 상정액의 유량은 전체의 57%일 정도로, 슬러지 농축공정에서 발생하는 반류수가 큰 것으로 조사되었으며, 반류수에 의한 유입부하 증가량 중 BOD와 SS가 각각 10%와 20%일 정도로 하수부하는 증가(환경부, 2001)하는 것으로 나타났다. 하지만, 소규모 처리장의 슬러지 처리는 단독처리와 공동처리 모두 슬러지 처리공정의 상시 운전은 적으며, 간헐운전의 경우가 많기 때문에 반송수도 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 메쉬 농축여과 시스템에서 배출되는 여과수의 수질 정도를 평가하기 위하여 농축 여과수의 초기 30분간의 SS의 변화를 Fig. 4에 표시하였다.

100 μ m의 여과모들을 사용한 mode 1에서는 초기부터 25 mg/L이하의 양호한 농축 여과수의 수질이 얻어져, 여과기능을 담당하는 슬러지 케이크층이 메쉬 표면에 단시간에 형성되는 것을 알 수 있었다. 또한 초기 슬러지농도가 3,000 mg/L의 경우는 10분내에, 보다 고농도 슬러지의 경우에는 5분내에 유출수의 SS가 2 mg/L이하의 농축 여과수를 배출할 정도로 수질은 양호한 것으로 나타났다.

Mode 2 (150 μ m)에서의 초기 농축 여과수는 주입 슬러지 농도에 근접하였지만, 10분만에 급속히 감소하여 20분 이후에는 SS가 30 mg/L이하로 되었다. 이 시점에서 투과유속은 급격히 감소하여 메쉬 여과모들의 표면에 비교적 두꺼운 슬러지 케이크층이 형성된 것으로 판단된다. 초기 주입슬러지의 농도에 무관하게 투과수량은 많았기 때문에 유출 슬러지의 비율은 어느정도 큰 것으로 나타났다.

Mode 3 (200 μ m)에서도 투과액의 SS는 소량 감소하여 농축 여과가 어느 정도 진행되고 있다는 것을 알 수 있었다. Fig. 3에 표시한 투과유속과 비교하면, 10 m/d 이하의 투과유속이 되면 여과분리 효과가 확인되었다. 하지만, Table 2에 표시한 것처럼 슬러지의 회수율은 상당히 낮게 나타났으므로, 200 μ m 메쉬로 제작된 여과모들의 슬러지 농축 효과는 거의 확인되지 않았다.

본 연구에 도입된 메쉬 농축여과의 기작은 메쉬 표면에 형성되는 슬러지 케이크층에 의한 것이지만, 슬러지 플록층의 형성에는 슬러지 입자의 크기와 메쉬 크기와의 관계가 중요한 인자라고 생각할 수 있다. 일반적으로 활성슬러지의 입자 크기 분포(Jorand et al., 1995)는 1~600 μ m이지만, 5 μ m 이하의 입자들이 전체 갯수를 차지하고, 부피나 질량면에서는 50 μ m 이상의 입자들이 대부분(Wu et al., 2000; Li et al., 1991; Barbusinski et al., 1995)을 차지하는 것으로 나타나 이들이 활성슬러지 플록을 구성하게 된다. 본 시스템에서는 메쉬 표면에 형성되는 활성슬러지의 플록에 의한 케이크층이 농축 여과수의 수질에 절대적인 영향을 끼치므로, 이에 대한 적절한 환경을 조성해 주어야 한다.

본 연구에서는 슬러지 플록의 크기를 측정하지 않았지만, 대부분이 여과막인 케이크층 형성에 적합한 크기, 즉 100~150 μ m 범위의 것으로 예상되어 100 μ m 메쉬 여과막이 가장 좋은 성능을 발휘한 것으로 사료된다. 따라서 슬러지 플록 크기를 크게 할 경우, 보다 큰 pore size를 가진 메쉬로도 여과분리 농축이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결론

3종류의 다른 pore size를 가진 메쉬 여과모들을 이용한 소규모 슬러지 농축시스템 장치의 운전으로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 100 μ m의 메쉬 여과모들을 사용한 경우, 비교적 단시간에 걸쳐 안정된 여과 분리 농축이 가능하였다. 초기의 주입 슬러지 농도가 3,600 mg/L과 9,100 mg/L에서 24시간 후의 슬러지 감소 부피는 95%와 85%였고, 농축 여과수는 모두 SS가 1.0 mg/L, 탁도가 1.0 NTU이하의 양호한 수질을 나타냈다.
2. 150 μ m의 메쉬 여과모들의 경우, 9,800 mg/L정도의 고농도에서 농축 여과가 가능하였지만, 200 μ m의 메쉬 여과모들의 경우에는 주입 슬러지의 농도와 무관하게 본 농축 시스템으로는 적합하지 않은 것으로 나타났다.
3. 농축 여과와 증력침전을 병용한 본 시스템은 여과모들 자체보다 여과모들의 표면에 형성되는 슬러지 케이크층과 적절한 두께의 케이크층을 형성할 메쉬 pore size의 영향이 중요하므로, 농축 효율을 향상시키기 위한 방법으로는 활성슬러지 입자의 크기를 크게 하거나, 메쉬 여

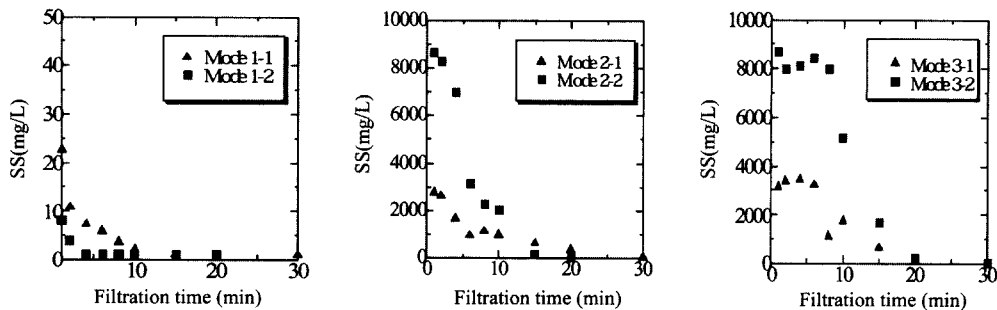


Fig. 4. Relationship between effluent SS and filtration time.

과모들의 pore size를 작게 구성할 필요가 있었다.

참고문헌

1. 환경부제정, *하수도시설기준* (1998).
2. 최의소, *상하수도공학*, 청문각, pp. 322-332 (2001).
3. 배재근, 슬러지처리 및 자원화의 문제점 및 향후 개선 방안, *폐기물자원화*, **10**(3), pp. 21-33 (2002).
4. 이용두, 강용태, 허목, 이재복, *슬러지처리공학 -공정의 계획과 설계*, 동화기술 (1998).
5. 문병현, 김상수, 윤조희, 윤태경, 이강춘, 염분 및 C/N 비가 floc의 특성과 슬러지 농축에 미치는 영향, *한국 폐기물학회지*, **19**(4), pp. 466-472 (2002).
6. Kiso, Y., Jung, Y-J., Ichinari, T., Park, M., Kitao, T., Nishimura, K., and Min, K-S., Wastewater treatment performance of a filtration bio-reactor equipped with a mesh as a filter media. *Water Res.*, **34**, pp. 4143-4150 (2000).
7. 정용준, 남광현, 민경석, Mesh를 이용한 침지여과분리형 생물반응조의 하수처리, *한국물환경학회지*, **16**(1), pp. 121-131 (2000).
8. 정용준, 민경석, 간헐폭기 Mesh 침지여과분리법을 이용한 하수처리와 운전 안정성, *대한환경공학회지*, **23**(1), pp. 13-20 (2001).
9. 정용준, 木曾祥秋, 민경석, 메쉬 침지여과막을 이용한 활성슬러지의 고액분리, *대한환경공학회지*, **26**(3), pp. 299-304 (2004).
10. 환경부, *슬러지공정 반류수 처리기술 개발, G-7 최종보고서* (2001).
11. Jorand, F., Zartarian, F., Thomas, F., Block, J.C., Bottero, J.Y., Villemin, G., Urbain, V., and Manem, J., Chemical and structural (2D) linkage between bacteria within activated sludge flocs, *Water Res.*, **29**, pp. 1639-1647 (1995).
12. Wu R.M., Tsou, G.W., Lee, D.J., Estimate of sludge floc permeability, *Chemical engineering Journal*, **80**, pp. 37-42 (2000).
13. Li, D.H., Ganczarczyk, J.J., Size distribution of activated sludge floc, *Res. J. Wat. Pollut. Control Fed.*, **63**, pp. 806-814 (1991).
14. Barbusinski, K., Koscielniak, H., Influence of substrate loading intensity on floc size in activated sludge process, *Water Res.*, **29**, pp. 1703-1710 (1995).