

섬모상 매트에 의한 탁수이동차단에 관한 실험적 연구

유지양화 · 이치타오 · 김영철[†]

한서대학교 환경공학과

Control of Turbid Water Transport with Filamentous Mat

Jianghua Yu · Qitao Yi · Youngchul Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Hanseo University

(Received 20 August 2009, Revised 9 November 2009, Accepted 13 November 2009)

Abstract

A lab-scale apparatus for turbid water transport control was tested and examined. The channel had a dimension of 100 cm×30 cm×15 cm (length×height×width). And the turbidity water was prepared using two types of particles, bentonite and loess. The channel equipped with filamentous mat was operated under various shock load conditions. In the control channel, instantly, turbid water mixed with the clean water inside the channel and turbidity prevails the entire channel. While in the mat-equipped channel, it increases only at the bottom. Overall, the filamentous mat gave capture efficiency of 70~90% compared with the control group. The capture efficiency of turbid particles decreased with increased input turbidity flux. The result of experimental run on how turbid particles are separated in the mat channel shows that settling, filtration and attachment are the main processes. Meanwhile, turbidity was diffused from the channel bottom due to turbidity gradient before and after mat zone. The particle size before mat zone was lightly coarser than that after mat zone.

keywords : Capture efficiency, Diffusion, Filamentous mat, Lab-scale, Turbid water

1. 서론

여러 가지 오염물질 중에 특히 수생태계 환경에 민감하게 영향을 미치는 물질은 탁수(turbid water)이다.

토양침식이나 하천이나 저수지 준설시 퇴적물 교란에 의해 발생된 탁수는 강우유출수의 주요 구성성분으로 과도한 토사는 수생생물체의 광합성과 내호흡, 증식/번식을 방해하는 요인으로 작용한다(US EPA, 2001, 2003). 탁수를 유발하는 부유토사(부유사)가 수생태계에 미치는 영향을 요약 정리하면 다음과 같다.

- 물고기 아가미 마모로 질병감염 위험성 증대
- 플랑크톤의 세굴 및 탁수에 강한 어종으로 대체
- 가시거리 감소로 인한 먹이활동 지장
- 호소에서 동물성 플랑크톤의 여과작용 감소
- 먹이사슬의 최하부에 위치한 수서곤충에 악영향
- 여름철 수온상승 및 침수식생 개체수의 감소
- 투명도(햇빛투과 수심)감소로 식물성 플랑크톤 및 수생 생물 개체수 감소

토사입자는 표면에 흡착된 영양소, 미량중금속, 탄화수소의 운반체 역할을 수행한다(US EPA, 2005). 토사에 의한 고

탁도는 수처리비용을 상승시킬 뿐만 아니라 공업용수나 위락용수로서의 가치를 떨어뜨린다.

토사는 대부분 경사진 밭과 건설 사업장에서 발생되며 우리나라에서는 연간 약 5000만톤(임야 2200만톤, 밭 2800만톤)이 발생하는 것으로 알려지고 있으나(농림부, 2007) 토사유출이 가능한 세부적인 대상사업(수질환경보전법 제 15조 4항, “공공수역에 다량의 토사를 유출하거나 버려 상수원 또는 하천 호소수질을 현저히 오염되게 하는 행위에 해당하는 사업장) 즉 건설 사업장에서 배출되는 토사량에 대해서는 아직 알려진 바가 없다. 환경관리공단에서는 2007년 비점오염사업장의 토양침식 및 토사관리 방안 마련을 위한 연구를 수행하였고 2008년 현재 토사유출사업장의 관리를 위한 지침을 마련하고 있는 단계에 있다(환경관리공단, 2007).

현재 우리나라에서 탁수가 수자원의 질을 저하시키는 일차적인 요인이 되고 있다. 소양호, 도암호, 임하호, 인동호 등은 탁수문제가 심각한 수준에 있다(한국수자원공사, 2007). 대규모 다목적 댐에서 발생하는 탁수문제는 대부분 댐 상류지역의 고랭지 작물의 경작과 관련이 있는 것으로 보고되고 있다(이근상 등, 2007; 최용훈 등, 2009; 한국수자원공사, 2005). 다목적 댐에서 탁수가 문제가 되는 것은 탁수발생 지속시간 밀도류, 확산, 댐 내부에서 온도 성층화에 의한 입도의 침전특성 변화에 의한 탁수대의 정체현상 때문이다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
ykim@hanseo.ac.kr

또한 탁수는 저수지나 하천 등 수체인근에서 행해지는 각종 건설사업(토양교란행위)과 퇴적물의 준설작업시 대량 발생한다.

본 연구의 목적은 고랭지 밭이나 건설 및 준설현장 등으로 탁수가 문제가 되는 댐이나 저수지 유역의 측부나 유입 지류에 탁수확산을 방지할 수 있는 차단막을 개발하는데 있다.

2. 연구방법

2.1. 섬모상 미디어

Fig. 1에는 본 연구에서 적용된 섬모상 미디어를 보여주고 있다. 섬모상 미디어는 고리-1100테니아 69합사 BCF (Bulky Continuous Filaments) 다섬사, 내심은 4 mm 폴리에틸렌 로프사, 고정실은 폴리프로필렌 다섬사로 구성되어 있다. 직경은 35~45 mm, 표면적은 1.0~1.6 m²/m, 공극율은 95~96%, 사용연한은 반영구적이다. 화학적 성질로 나일론 재질의 아민기(NH₃)가 붙어 있어 수중에서 양전하를 띠는 것이 특징이다.

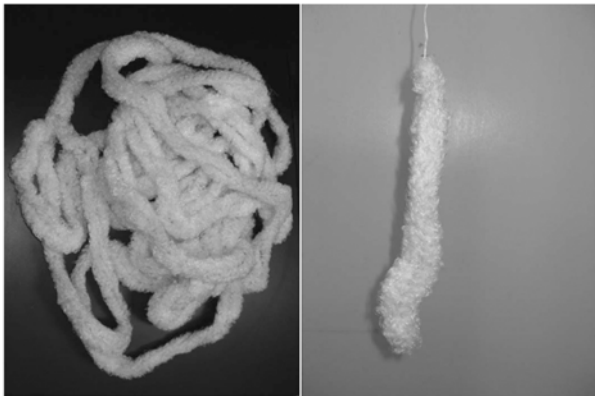


Fig. 1. Filamentous media.

2.2. 시험용 수로

Fig. 2와 Fig. 3에는 시험장치를 보여주고 있다. 시험용 수로 길이는 100 cm, 높이 30 cm, 폭 15 cm로 제작하였다.

주요구조는 유입구, 정류관, 섬모상 여과막 설치틀, 여과막 설치틀 레일, 유출부 웨어, 유출관으로 구성되어 있고, 유입유량 수조 및 제어는 부피 6 Liter, 밸브조작에 의한 유량조절 방법을 사용하였다. 유입부 유공 정류관에서 유공의 크기는 $\varnothing 1$ cm, 시험장치는 2식으로 대조장치(control)와 섬모상 여과막 장치를 동시에 시험하였다. 또한 수로에는 섬모상 미디어를 매트형태로 고정할 수 있는 고정틀과 여과막의 설치간격을 자유롭게 조절할 수 있는 구조로 이루어져 있다.

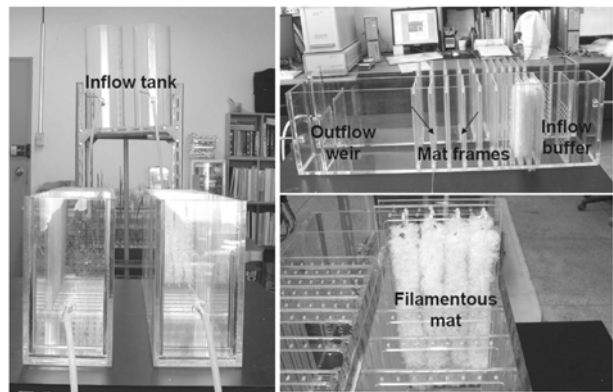


Fig. 3. View of the lab. scale turbidity control channel.

2.3. 성능의 평가인자

탁수차단 성능평가 인자로 섬모상 매트 설치 전후의 탁도를 측정하였다(탁도계 기종: HACH 2100N). 탁도 측정위치는 수조에서 횡방향, 종방향 수층에서의 분석과 함께 각 지점(셀)별 탁도를 측정하였다. 아울러 탁도와 함께 각 지점에서의 탁도를 일으키는 입자의 입도분석(모델명: ACCUSIZER 780A)을 수행하였다.

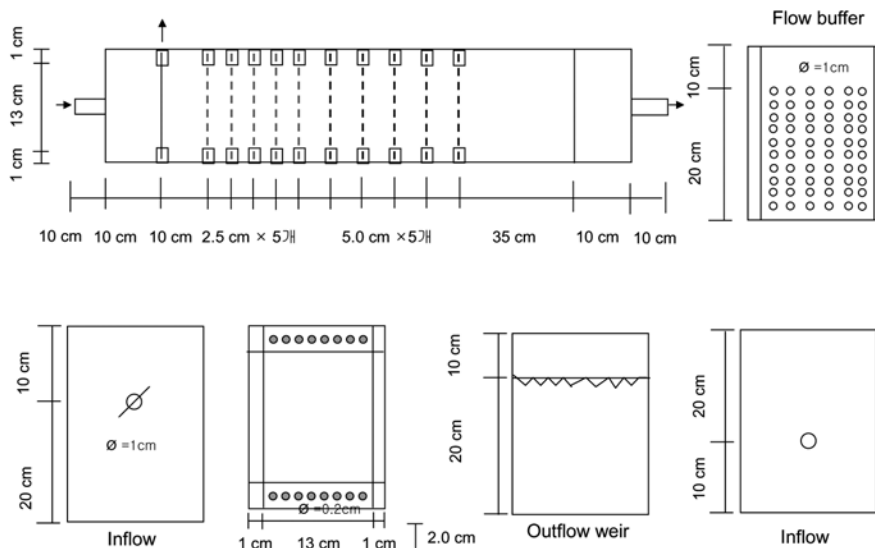


Fig. 2. Lab. scale channel.

2.4. 인공탁수의 조제

실험실 조건에서 탁수차단 성능을 평가하고자 탁수문제와 일차적으로 관련이 있는 콜로이드 입자를 모의하기 위하여 시판되고 있는 벤토나이트 건립자와 황토입자를 물에 혼합하여 유입탁수로 사용하였다.

2.5. 시험용 수로의 운전

시험 장치는 정류관이 설치되어 있는 Cell #1과 차단막이 설치된 Cell 2#(2.5 cm 간격으로 3입), 그리고 차단막 이후의 Cell #3, Cell #4, Cell #5 영역으로 구분하였다. 시험이 종료된 후 각 셀을 분리판(partition)을 이용하여 차단하고 각 셀을 혼합한 후 탁도를 측정하였다. 차단막에 의한 탁수유발 입자의 포착율(capture efficiency)은 다음 식에 의하여 산출하였다.

$$\text{포착율(\%)} = \frac{(\text{Cell \#1} + \text{Cell \#2})100}{(\text{Cell \#1} + \text{Cell \#2} + \text{Cell \#3} + \text{Cell \#4} + \text{Cell \#5})} \quad (1)$$

상기식에서 Cell #1, Cell#2, Cell #3, Cell #4, Cell #5는 각각의 셀에 있는 탁도량(NTU-L)를 나타낸다(Fig. 4).

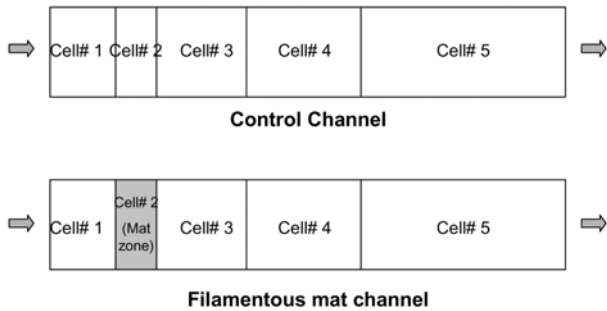


Fig. 4. Compartment of control and filamentous mat channel.

3. 결과 및 고찰

3.1. 차단성능결과

Fig. 5에는 차단시험 수행결과를 나타내었다. 유량조건은 1.5분 동안 4 Liter를 유입시켰고 유입탁도는 300 NTU이었다. 수로 내부의 물 교환율(exchange rate)은 10%(내부용량 40 Liter)이었다. 먼저 대조시험 수로에서 탁도는 표층, 중층, 하층에서 비교적 균일하였다.

유입수의 탁도가 높아 발생된 밀도류에 의해 대조시험장치 바닥층의 탁도가 월등하게 높았다. 이와 반면에 차단막이 설치된 장치에서는 차단막을 경계로 급격한 감소를 보이고 있다. 그러나 대조시험장치와 마찬가지로 바닥층에서 밀도류의 영향으로 탁도는 높게 나타나고 있다.

Fig. 6에는 수로내 각 수층에서 측정된 탁도의 평균값을 보여주고 있다. 포착성능을 산출한 결과 대조시험장치에서는 34.2%(모든 셀에서 유사한 분포를 보임), 차단막을 설치한 시험장치에서는 78.9%를 기록하였다. 대부분의 탁질이 매트가 설치된 장치의 선단 지점에 위치하고 있는 2개의 Cell

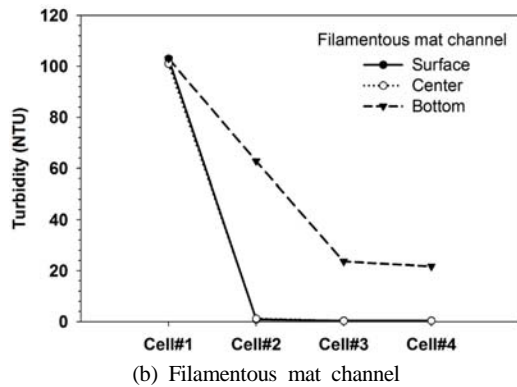
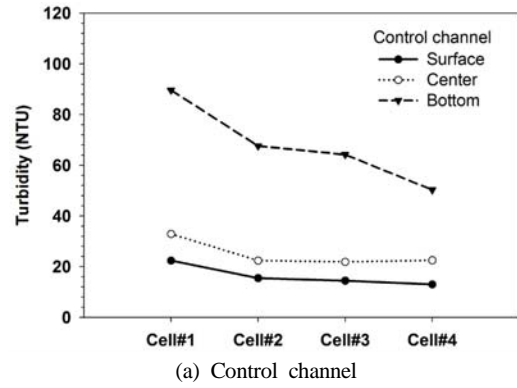


Fig. 5. Turbidity profiles in each experimental set-ups.

에 억류되었음을 시험자료를 통하여 알 수 있다.

대조시험장치에서 포착되는 탁질입자는 침전기작에 의해 이루어진 것인데 반해 매트가 설치된 셀에서는 순간적으로 유입된 탁수가 초기 내부에 있던 청수(clean water)를 밀어 내면서 흐름이 억제된 상태에서 교체되었기 때문에 사료 된다.

운전조건과 포착성능과의 관계를 파악하기 위하여 총 15회에 걸쳐 시험을 수행하였다(Table 1, 2). 시험에 사용된 탁도범위는 100~2,000 NTU, 유량은 0.17~2.67 L/min (수리학적 체류시간 = 0.19~3.0 hr), 유입수량은 1~4 L(전환율 = 3.3~13.3%)이었다. Fig. 7에는 대조장치와 미디어를 장착한 장치에서 얻은 유입탁질 플럭스(inflow turbidity flux)에 따른 차단성능(capture efficiency)을 나타내었다. 유입탁질 플럭스(F)는 유량(Q)에 탁도(NTU)를 곱한 후 섬모상 미디어의 면적(A)으로 나눈 값을 나타낸다.

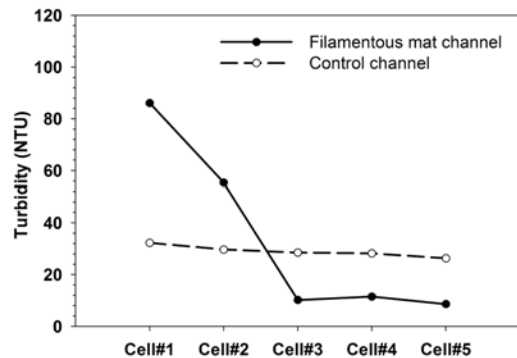


Fig. 6. Average turbidity at the individual compartment.

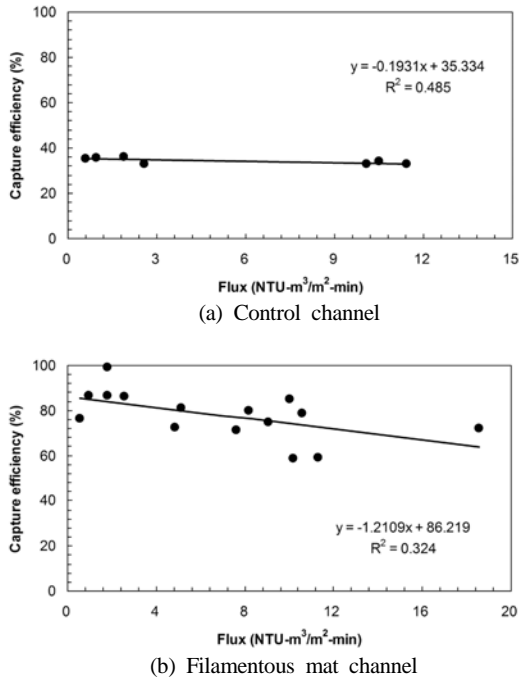


Fig. 7. Capture efficiency with respect to inflow turbidity flux.

먼저 유입탁질 플럭스가 증가함에 따라 차단성능은 감소하는 추세를 보이고 있으며 대체로 시험 플럭스 영역에서 70~90%의 차단성능을 보여주고 있다. 이에 반하여 미디어를 장착하지 않은 대조장치에서는 단순한 침전현상으로 30% 내외의 성능을 보여 섬모상 미디어의 탁수차단 능력을 확연하게 보여주고 있다.

3.2. 농도경사

섬모상 여재에 의해 탁질이 억류되는 현상을 파악하기 위하여 시험장치의 길이방향으로 탁도가 변화하는 양상을 분석하였다. 매우 짧은 시간동안 총경부하형태로 섬모상 여재(매트)에 의해 탁도입자가 억류되는 여과기능이 우세한지 아니면 일시적으로 탁도입자를 포함한 수류가 내부의 초기의 청수를 밀어내면서 억류되어 탁질입자가 침전되는지 여부를 평가하였다.

Fig. 8에는 총15회에 걸쳐 수행된 탁도변화를 수로의 길이방향으로 나타내었다. 매트를 중심으로 농도경사는 탁질부하가 클수록 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 8에 따르면 시험장치의 길이방향으로 평균 탁도가 점진적으로 감소하게 되는데 이것은 각 셀과 셀 사이에 농

Table 1. Results of control test-channel operation

Conditions		Inflow			Cell#1		Cell#2		Cell#3		Cell#4		Cell#5		Reff. (%)
Operation	Flow rate (L/min)	Turbidity (NTU)	Total load (NTU-L)	Flux (NTU-m ³ /m ² -min)	Turbidity (NTU)	Mass (NTU-L)	Turbidity (NTU)	Mass (NTU-L)	Turbidity (NTU)	Mass (NTU-L)	Turbidity (NTU)	Mass (NTU-L)	Turbidity (NTU)	Mass (NTU-L)	
4 L/1.5 min	2.67	307	1,228	10	32	203	30	85	29	145	28	140	26	268	34.2
4 L/6 min	0.67	302	1,208	3	34	211	31	89	30	152	33	164	29	294	33.0
4 L/25 min	0.16	289	1,156	1	34	214	31	89	28	140	29	144	27	273	35.3
4 L/1.5 min(pure water)	2.67	295	1,180	10	38	240	34	97	33	166	34	166	34	350	33.1
2 L/4 min	0.50	296	592	2	19	118	15	43	15	75	15	76	14	138	35.9
4 L/6 min	0.67	1338	5,352	11	94	592	77	221	81	411	77	380	86	877	32.8
4 L/6 min	0.67	113	452	1	16	100	13	36	12	63	12	58	12	121	35.8

Table 2. Results of filamentous-mat equipped test-channel operation

Conditions		Inflow			Cell# 1		Cell# 2		Cell# 3		Cell#4		Cell# 5		Reff. (%)
Operation	Flow rate (L/min)	Turbidity (NTU)	Total load (NTU-L)	Flux (NTU-m ³ /m ² -min)	Turbidity (NTU)	Mass (NTU-L)	Turbidity (NTU)	Mass (NTU-L)	Turbidity (NTU)	Mass (NTU-L)	Turbidity (NTU)	Mass (NTU-L)	Turbidity (NTU)	Mass (NTU-L)	
4 L/1.5 min	2.67	310	1,240	11	86	542	55	158	10	52	12	57	9	88	78.9
4 L/6 min	0.67	299	1,196	3	100	630	57	162	11	56	8	41	3	35	86.1
4 L/25 min	0.16	280	1,120	1	79	495	50	143	16	79	9	43	8	86	76.2
4 L/1.5 min(pure water)	2.67	298	1,192	10	59	371	50	141	21	109	19	92	19	193	58.7
2 L/4 min	0.50	282	564	2	54	337	23	66	8	39	4	20	0	5	86.7
1 L/2 min	0.50	280	280	2	35	217	9	25	0	1	0	0	0	1	99.1
4 L/6 min	0.67	114	456	1	45	286	23	66	5	24	3	14	2	19	86.7
4 L/6 min	0.67	1,317	5,268	11	159	1002	174	496	53	270	55	271	50	512	59.2
4 L/5.67 min	0.71	2,051	8,204	19	369	2,325	197	561	79	403	51	254	47	481	71.9
4 L/6.5 min	0.62	649	2,596	5	186	1,172	99	283	21	109	18	91	14	141	81.2
4 L/8 min	0.50	1,411	5,644	9	262	1,651	168	479	36	182	40	198	34	342	74.9
4 L/4 min	1.00	638	2,552	8	148	932	97	457	22	72	22	108	17	173	80.0
4 L/8.25 min	0.48	781	3,124	5	146	920	99	281	26	130	28	136	19	198	72.5
4 L/8 min	0.50	1,188	4,752	8	193	1,216	129	368	32	163	37	181	31	311	71.1
4 L/5 min	0.80	976	3,904	10	222	1,399	106	302	19	98	16	80	12	124	85.1

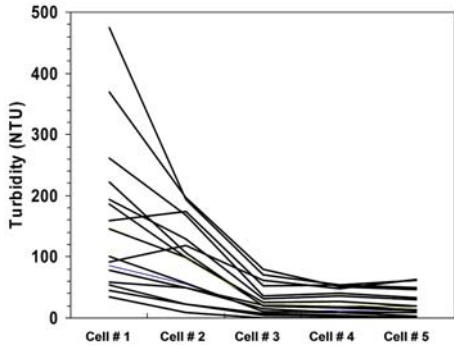


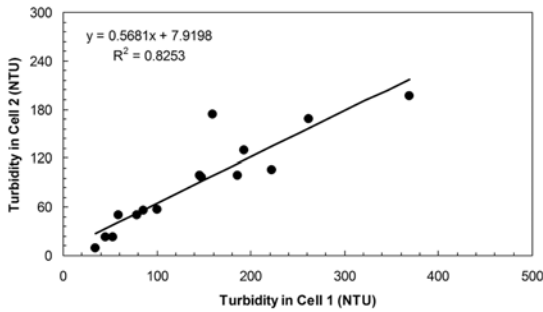
Fig. 8. Turbidity changes in individual cell.

도경사가 존재함을 시사해주고 있다. 전체 자료를 Cell# 1, Cell #2, Cell #3에서 측정된 탁도를 셀별로 도시한 결과 선형관계를 보이고 있다.

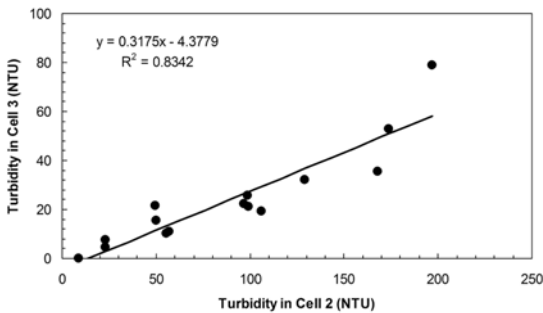
Cell# 2와 Cell# 3에서의 농도경사가 Cell# 1보다 Cell# 2에서 보다 큰데 이것은 유입된 탁수가 차단막 인근에 집중되어 억류되기 때문이다. 이러한 농도경사가 존재하면 탁수가 문제가 되는 저수지나 댐에서 차단막을 설치해도 밀도류와 확산에 의해 시간이 지나면서 탁질이 매트 밖으로 이동할 위험이 있다.

공극율이 95~96%에 달하는 섬모상 매트에 의해 매트 경계면을 사이에 두고 뚜렷한 농도경사가 형성된 이유는 탁수가 유입되기 전에 있던 깨끗한 물이 순간적으로 유입된 탁수와 비교적 완벽하게 교환되었기 때문이다.

다시 말하면 매트가 없는 수로와 비교하여 매트에 의해 수리학적 교란이나 단회로(short-circuiting), 채널링(channeling)과 같이 탁질입자를 이웃하는 수층으로 분산이동시킬 수 있는 요인이 물리적으로 배제된 것을 의미한다.



(a) Cell 2 versus Cell 1



(b) Cell 3 versus Cell 2

Fig. 9. Turbidity relationship between cells.

3.3. 확산영향의 평가

농도경사로 인하여 확산으로 야기되는 포착 효율저하를 평가하기 위하여 Fig. 10과 같이 시험용 수로의 매트설치 지점을 중심으로 하여 층별로 시료채취를 실시하였다. 또한 확산의 영향을 비교하기 위하여 2개의 수로에서 하나의 수로에는 섬모상 매트만을 설치하고 다른 수로에는 매트 끝 지점에 입자확산을 방지하기위한 아크릴 판(acryl partition)을 설치하였다.

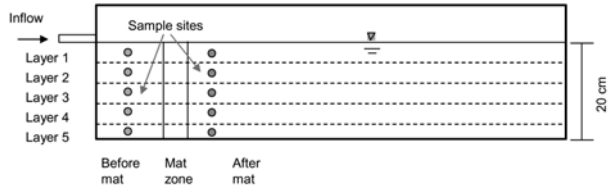
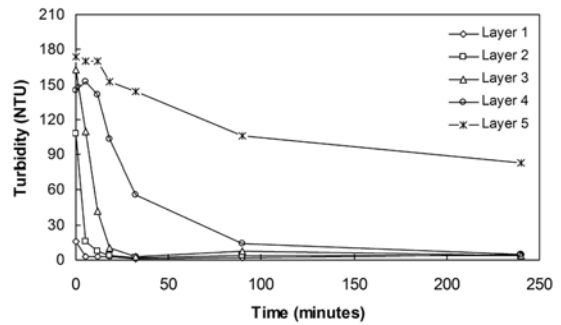
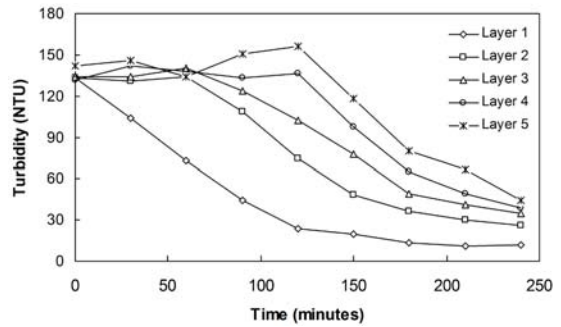


Fig. 10. Turbidity transport observation layer.



(a) FM without partition



(b) FM with partition

Fig. 11. Changes of turbidity profiles in filamentous mat channels with/without acryl partition.

탁수를 유입시킨 후 실질적인 침전이 종료될 것으로 추정되는 6시간을 방치하였으며 본 실험으로부터 얻은 결과를 Fig. 11에 제시하였다. 실험결과에 따르면 초기에 충격 부하가 가해졌을 때 2개의 수로에서 동일하게 모든 수층에서 탁도는 300 NTU로 동일함을 알 수 있다.

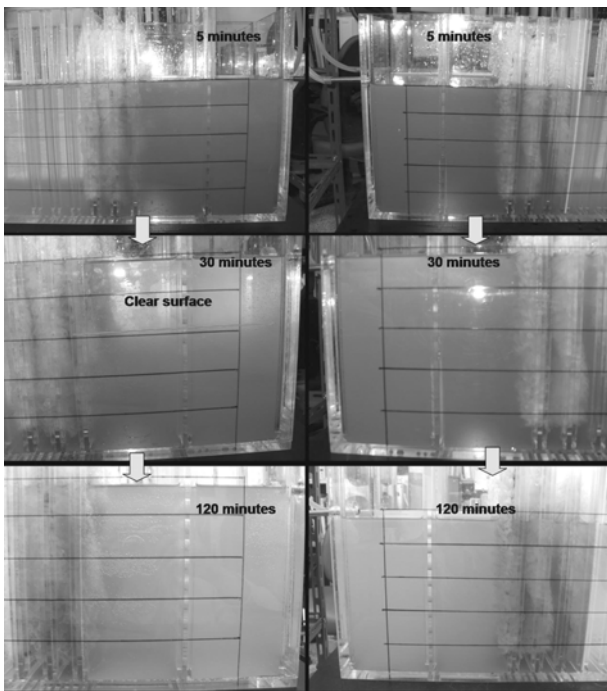
시간이 경과함에 따라 각 수층의 탁도가 감소하기 시작하나 확산 차단목적의 아크릴 판을 설치한 장치(FM(Filamentous mat) with acryl partion)에서는 시간의 경과에 따라 상하층부의 수층에서 탁도가 급격하게 감소되다가 200분 정도 경과한 이후에는 모든 수층의 탁도가 같아지고 이후에 500분에 이를 때까지 별다른 변화 없이 지속되었다.

이와 같은 현상은 나란하게 이웃하는 층의 물과 물리적으로 완전히 분리 고립되어 있으므로 모든 수층에서 침전 속도가 빠른 입자는 빠르게 감소하고 침전이 어려운 입자만이 잔존하기 때문인 것으로 판단된다.

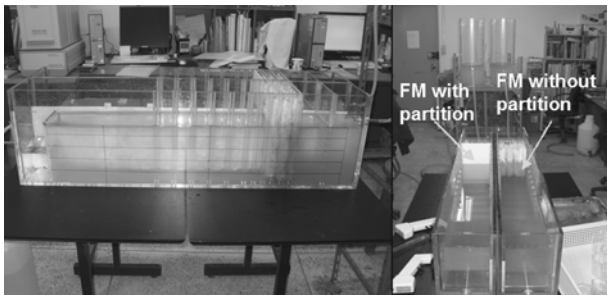
이와 반면에 아크릴 차단판이 설치되지 않은 수로(FM without acryl plate)에서는 설치된 수로와 비교하여 상층부(Layer 1, 2, 3)의 탁도 감소가 훨씬 빠르게 진행되며 탁수대 경계면이 뚜렷하게 관측되었다. 또한 방치시간의 경과에도 불구하고 상층부와 하층부의 농도차가 거의 없이 동일한 수준으로 유지되고 있다.

차단판이 없는 수로에서 상층부의 탁도가 급속하게 감소한 이유는 탁질입자의 침전과 함께 섬모상 매트 이웃 수층으로 탁질이 확산되었기 때문이며 확산통로가 매트가 설치된 지점의 바닥을 통해서 이루어졌기 때문이다.

황토입자를 이용한 동일한 시험에서 촬영한 사진자료를 Fig. 12에 제시하였다. 아크릴 판이 설치되지 않은 수로(Fig. 12(a))에서는 약30분이 경과되면서 Layer 1, 2 층에서 맑은 수층이 나타나지만 아크릴 판이 설치된 수로(Fig. 12(b))의



(a) Test channel without acryl plate (b) Test channel with acryl channel



(c) Turbidity changes in test channel without acryl plate

Fig. 12. Turbidity changes in vertical and longitudinal direction.

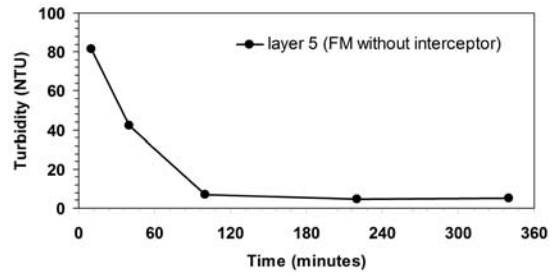


Fig. 13. Turbidity changes in the bottom water layer after filamentous mat.

수층에서는 아직 경계면이 나타나지 않았음을 알 수 있다.

또한 확산 차단판이 설치되지 않은 수층에서는 대부분의 탁질이동이 매트바닥을 통해 이루어지고 있음을 알 수 있다(Fig. 8(c)).

섬모상 매트가 설치된 지점을 중심으로 매트 바닥을 통하여 탁질입자가 이송되는 현상은 매트 종단면 전체를 통한 이송과 비교하여 침전 등에 의한 최종분리를 고려하면 유익한 현상이 분명하다. 또한 농도경사에 의한 확산을 방지하면서 매트의 여과작용을 보강할 수 있도록 수로바닥면에 집중적으로 매트를 설치하는 것도 고려할 수 있다.

Fig. 13에는 탁질입자가 매트를 통과한 이후의 바닥층(Layer 5)에서 시간에 따른 탁도변화를 나타낸 것이다. 매트를 통과한 이후 약 2시간이 경과하면 침전에 의해 제거된 후 탁도는 300 NTU로 유입된 탁도가 10 NTU 이하로 유지됨을 알 수 있다.

3.4. 입도분포

Fig. 14에는 대조시험 수로와 섬모상 매트가 설치된 수로에서 측정된 입자의 밀도분포를 나타낸 것이다. 대조시험 수로에서는 수로의 각 셀에서 측정된 입도분포에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이와 반면에 섬모상 매트가 설치된 수로에서는 매트가 설치된 지점을 지나면서 입자의 수가 급속히 감소하며 후단으로 갈수록 작은 크기의 입자가 주종을 이룸을 알 수 있다.

Fig. 15에는 차단매트 직후 확산방지용 아크릴 판을 설치한 수로와 차단매트만이 설치된 수로에서 매트설치 지점 전후의 입도분포를 나타내었다. 먼저 입도에 따른 누적입자분포 자료(상단 그림)를 보면 매트를 설치한 전후에 입도 차이가 있음을 알 수 있는데 매트를 통과한 후 작은 입자가 차지하는 비율이 증가함을 알 수 있다. 입자의 수가 아닌 입자의 용적분포를 보면 이와 같은 경향이 확연하게 나타나고 있는데 이는 매트를 통과하면서 큰 입자는 대부분 매트에 의해 분리제거됨을 알 수 있다.

3.5. 섬모상 미디어의 기능 및 역할

Fig. 16은 탁수차단 시험 후 미디어 고정 틀에 장착되었던 섬모상 미디어를 가위로 잘라낸 후 전자 주사현미경으로 촬영한 영상이다. 사진에 나타나듯이 섬모상 미디어 표면에 부착 억류된 탁질입자를 볼 수 있다.

미디어에 의한 탁수와 탁질입자의 억류기작은 정확히 밝

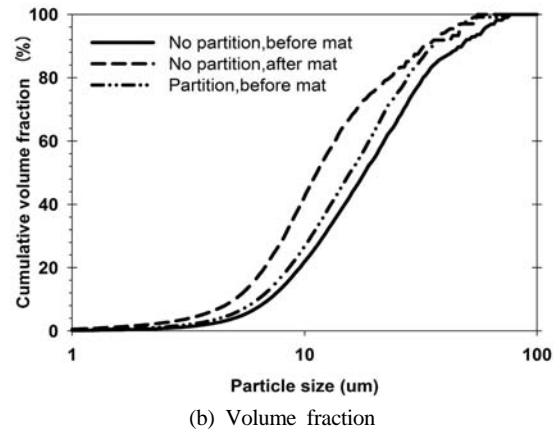
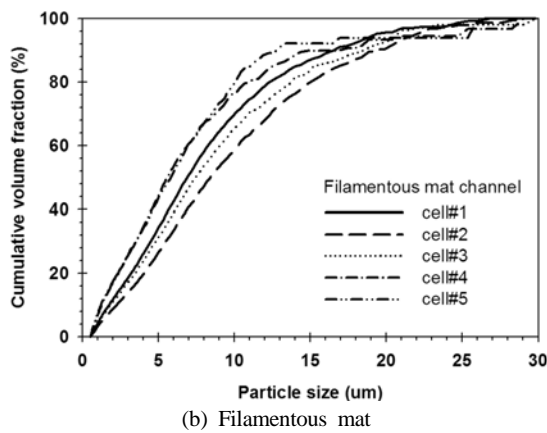
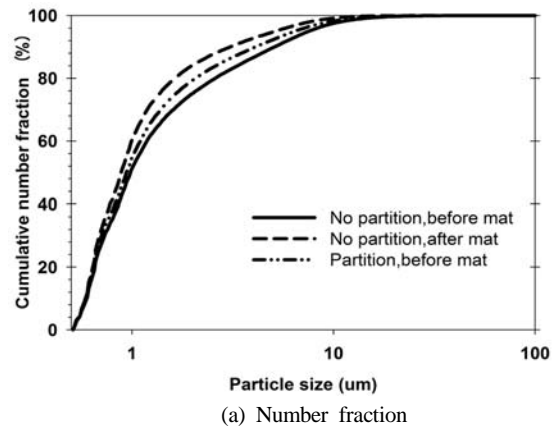
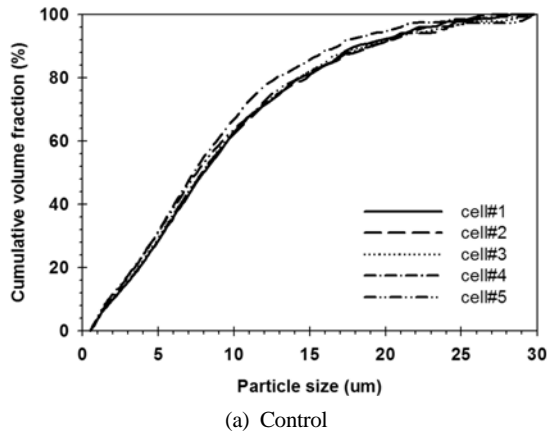


Fig. 14. Particle size distribution at the control and filamentous mat test channels (upper-control, below-filamentous mat).

Fig. 15. Particle size distribution in the presence and absence of acryl plate.

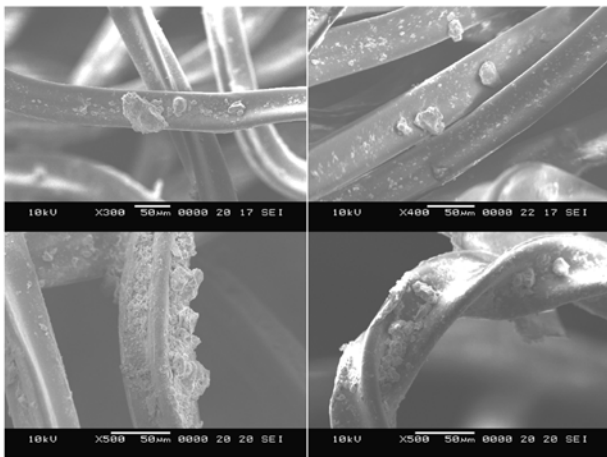


Fig. 16. Micro-photograph view of filamentous mat

혀내지 못했으나 수류와 함께 이동하거나 확산되는 입자가 미디어와 충돌하여 섬모상 미디어 표면에 차단, 부착·역류되거나 침전되는 것으로 추정된다. 또한 탁수를 이루는 입자의 전기적 특성과 섬모상 미디어가 반응하여 탁수이동 차단여건이 조성되었을 가능성도 높다.

4. 결론

사 사

본 연구는 환경부 수생태 복원사업단의 연구지원으로 이루어진 것으로 감사드립니다.

참고문헌

농림부(2007). 농촌지역 비점오염관리 가이드북, 한국농촌공사.

- 이근상, 염경택, 박언상, 송상진(2007). 소양강댐 고탁수 발생원인 분석. *물과 미래*, **40**(5), pp. 73-82.
- 최용훈, 원철희, 서지연, 신민환, 양희정, 임경재, 최중대(2009). 평지밭과 고랭지 밭의 비점오염에 대한 분석과 비교. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(5), pp. 682-688.
- 한국수자원공사(2005). 임하호 유역 소하천별 탁수발생현황 조사. 한국수자원공사 임하댐관리단.
- 한국수자원공사(2007). 다목적 댐(소양강댐등) 탁수저감방안 수립보고서.
- 환경관리공단(2007). 비점오염원 유출사업장의 토양침식 및 토사관리 방안 마련을 위한 연구.
- U.S. EPA. (2001). *The Biological Effect of Suspended and Bedded Sediments in Aquatic Systems: A Review*.
- U.S. EPA. (2003). *Developing Water Quality Criteria for Suspended and Bedded Sediments (Draft)*.
- U.S. EPA. (2005). *National Management Measures to Control Nonpoint Pollution from Urban Areas*. EPA-841-B-05-004.