

모래 단층 여과지의 여과사 오염도 평가에 관한 연구

A study on the assessment of contamination level of filter sand
in mono-layer sand filter bed

정종순 · 김한호* · 유명진**

서울시 상수도연구소, 서울시 암사정수사업소*, 서울시립대학교 환경공학부**

1. 서론

일반적인 여과란 유동성이 있는 고체·액체혼합물을 다공성 여과재를 지나게 하여 고체는 여과재의 표면이나 내부에 퇴적시키고 액체는 투과시켜 양자를 분리시키는 기계적인 조작을 말한다. 상수도에서 정수처리 과정의 여과는 침전의 후 단계로 침전되지 않은 미세한 부유물질을 모래여과를 통하여 정제된 정수를 얻는 과정을 거치는 하향식 급속 여과방식을 채택하고 있다. 보통 침전지를 전처리로 사용되는 완속여과법과 약품침전지를 전처리로 사용되는 급속여과법이 있으며 우리나라 대부분은 급속여과방식을 채택하고 있다.

급속여과는 완속여과 보다 보통 수 십배 정도 빠른 공정으로 대규모 정수처리 시설에 많이 사용하고 있는데 우리나라에서는 모래여과를 이용한 여과방법을 주로 채택하고 있다. 모래여과는 모래와 모래사이에 탁질을 억류시켜 일정시간이 경과되면 역세척수를 하부에서 상부로 도입하여 탈착 제거하는 방법을 이용하고 있으나 역세척수가 균등하게 분산되지 않거나 하부집수장치가 제대로 작동하지 않을 경우 탁질 제거가 원활하게 이루어 지지 않으며 이에 따라 여과사에 탁질이 쌓여 오염도가 심화되고 여과 기능이 저하되며 탁질 유출로 여과수 수질을 나빠지게 할 수 있다. 또한 여과기능이 현저하게 저하 될 경우 여과사를 폐기하거나 보사해야 한다.

본 연구는 여과사 오염도 분포를 조사하기 위해 서울시 G정수사업소 여과사에 대해 한국수도협회 KWWA F 100 에 명시되어 있는 「수도용 여과모래 시험방법」의 항목 중에서 슬러지비체적(Specific volume of sludge), 세척탁도(Wash Turbidity), 강열감량(Ignition Loss) 등과 공극율(Porosity) 및 머드볼(mudball)을 중심으로 각각의 여과지 여과사에 대해 오염정도를 조사·분석하여 오염도 분포를 확인·평가하고 이를 적절히 관리함으로써 정수처리 공정에 참고하여 맑은 물 생산에 도움을 주고자 한다.

2. 오염도기준 및 용어설명

세척탁도는 불순물의 함유정도를 나타내는 정도로 약 30g의 여과사를 증류수에 흔들여 섞었을 때의 탁도를 구하는 것으로 기준은 30도(16NTU) 이하이다.

강열감량은 적은 것이 바람직하며 여과사에 섞인 유기불순물이나 석탄입자, 탄소, 석회석, 조개껍질, 기타 칼슘이나 마그네슘, 탄산염류 등의 함유정도를 파악하기 위한 기준으로 전기로에서 약 $925 \pm 25^\circ\text{C}$ 로 열을 가하여 불순물 제거로 인한 감량 정도를 %로 나타내며 기준은 0.7%이하이다.

공극율은 모래여과의 경우 여과층의 전체용적에 대한 모래와 모래사이의 공극의 전체 용적의 비를 말한다. 여과진행에 따라 공극율은 감소되며 여과층의 공극율은 40~50% 정도가 일반적이다.

3. 실험

3.1 시료채취

풍건시료는 평균 시료 약 100g을 깨끗한 접시에 얇고 넓게 펴서 자연건조 또는 완속 송풍하여 수분을 증발시킨다. 건조시료는 잘 건조한 시료 약 2kg을 깨끗한 접시에 담고 고르게 편다. 전기 건조기 중에서 $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ 로 약 3시간 건조시킨 다음 데시케이터 중에서 방냉하여 습기를 피하여 보존한다.⁽²⁾ 이 시료는 슬러지비체적, 세척탁도, 강열감량, 공극율 등 시험에 사용한다. 본 연구대상의 채취는 여과지 40지×2면/지×3점(여과사 아래방향 30cm, 60cm, 90cm)/면=240점을 대상으로 하였다.



Figure 1. The sampler of sand



Figure 2. The results of sampling

3.2 여과지 및 여과사 현황

본 연구는 서울시 G정수장 여과지로서 여과방식은 중력식이며 규격은 L 17.46m×B 4.0m×2 bay, 면적은 140m²/지이며 총 여상면적은 140m²/지×40지=5,600m², 여층두께는 모래 115cm, 자갈 5cm 등 총 120cm로 되어있다. 여과속도는 180m/일, 역세수량은 460~570m³/회, 사면상수심은 1.2m, 역세소요시간 14분 20초이다. 여과사 현황의 경우 유효경은 1.0±0.1mm, 균등계수 1.4이하, 최소경 0.7±0.1mm, 최대경 1.6mm이하인 여과사를 사용하고 있다.

3.3 실험방법

3.3.1. 슬러지비체적

슬러지비체적은 역세척을 실시한 후 여과사 사층별로 상층(30cm), 중층(60cm), 하층(90cm) 등 3개 부분으로 나누어 채취하여 건조기에서 105℃로 하여 3시간 건조시킨 후 항온이 될 때까지 방치한 다음 시료 약 50g을 물로 계속 씻어주면서 세척한 물의 총량을 1,000mL 되게 하여 이토침전관에 모으고 30분간 정치 후 슬러지 부피를 측정하여 다음식에 의해 구한다.^{(3),(5)}

$$\text{슬러지비체적} = \frac{\text{슬러지 부피(mL)}}{\text{세척후 건조한 여과사 무게(g)}}$$

일본수도협회 「수도용 유지관리지침 오염도기준」에 따르면 0.004mL/g 미만은 양호, 0.01mL/g 미만은 오염초기, 0.05mL/g 미만은 오염중기, 0.05mL/g 이상은 오염말기 등으로 구분하고 있다.

3.3.2. 세척탁도

풍건시료 30g을 마개달린 500mL 시약병에 넣고 증류수 300mL를 넣어 밀폐시킨 다음 1분간 150회의 비율로 진폭 약 15cm 로 1분간 세계 흔들어 섞어 3분간 정치한다. 상등액 약 150mL를 다른 용기에 따르고 이것을 시료수로 한다. 시료수를 잘 흔들어 섞으면서 100mL(시료수의 탁도가 10도 이상인 때는 적당량을 넣고 증류수를 넣어 100mL로 한다)를 검수로 하여 측정한다⁽⁵⁾. 또한 역세척 전·후의 세척탁도를 측정하기 위해 오염도가 심한 여과사를 선정하여 0, 10, 20, ... 90cm 등 10cm 간격으로 채취하여 건조시킨 후 세척탁도 실험방법과 같이 측정하였다.

3.3.3. 강열감량

건조시료 약 10g(a g)을 1mg 까지 무게를 알고 있는 도가니에 정확히 달아 넣는다. 다음에 이것을 전기로에서 30분간 열을 강하게(925℃±25℃) 가한다. 다음에 데시케이터 속에 방냉 시킨 후 무게를 달아 강열 후의 모래의 중량(b g)을 구하고 다음식에 의해 강열감량(%)을 구한다^{(3),(5)}.

$$\text{강열감량(\%)} = \frac{a-b}{a} \times 100$$

3.3.4. 공극율

공극율은 외관 용적과 실 용적과의 차이에서 공극의 용적을 구하고 이것을 외관의 용적에 대한 비율로 구하는 것이다. 잣슨 탁도관의 약 절반까지 증류수를 넣은 다음 이것에 건조시료 약 150g(a g)을 조금씩 넣고 기포가 없어질 때 까지 천천히 흔든다. 이때 탁도가 심하면 주의하여 물을 따라 버리고 깨끗하게 될 때 까지 되풀이 한다. 이어서 관에 증류수를 가하여 가득 채우고 단단히 고무마개를 한 뒤 수직이 되도록 관집계로 지지대위에 세운다. 관바닥과 지지대 사이에는 고무판을 놓고 관의 중앙을 정확히 집도록 한다. 다음에 관을 180도 회전시켜(거꾸로 세워서) 관내의 모래를 전부 고무마개 쪽으로 침전시킨다. 모래가 전부 고무마개 쪽으로 침전되면 재빨리 관을 회전시켜 최초로 침강하는 모래가 관바닥에 닿기 전에 이것을 정위치에 수직으로 세운다. 이와 같이 하여 모래가 전부 바닥으로 침전한 뒤 (진동을 주지 않고 약 5분간 정치시킨다) 모래의 부피를 구한다. 이 조작을 동일 시료에 3회 반복하여 그 부피의 평균값(b mL)를 구한다. 따로 그 모래의 비중을 측정하여 다음 식에 의해 공극율(%)을 구한다⁽⁵⁾.

$$\text{공극율(\%)} = \frac{b - \frac{a}{\text{비중}}}{b} \times 100$$

3.3.5. 머드볼

여과사오염도 조사로 지정된 여과지의 물을 배수시킨 후 육안으로 머드볼 생성 유무 확인 및 여과사 균열 등 오염여부 육안 검사하는 것으로 여과지 표면에 머드볼이 생성되어 있다는 것은 여과지 내부의 오염이 상당히 진행된 상태로 즉시 여과사 오염도 검사를 측정하여 오염도가 심한 경우 표면 오사삭취, 보사, 교체 등의 상태를 파악 할 수 있는 지표이다. 머드볼이 여층내에 발견되면 여층 중의 머드볼의 부피가 차지하는 비율을 측정해야 한다. 그 체적 비율이 0.1% 미만이면 여층은 깨끗한 편에 속하고 0.1~0.5% 이면 아직까지 여층은 양호한 상태이다. 0.5~1.0% 이면 비교적 깨끗하고 1~5% 범위이면 여층은 나쁜 상태를 표시한다. 머드볼의 부피 비율이 5%를 넘으면 새로운 여재로 교체해야 한다⁽⁶⁾. 본 연구에서는 여과사가 상당히 오염된 여과지의 머드볼을 채취하여 이들의 성상을 폐기물오염 공정시험방법으로 분석하였다. 분석기기는 유도결합플라즈마발광광도계(ICP-AES)로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 슬러지비체적

일분수도협회 「수도용유지관리지침」 오염도기준에 의한 슬러지비체적(단위질량당 오염도부피 : mL/g)은 총 240점 중에서 양호(0.004mL/g미만) 219점, 오염초기(0.01mL/g미만) 13점, 오염중기(0.05mL/g미만) 8점 등으로 조사지점 대부분이 양호한 수준으로 조사되었으며, 38지 B면 중간 부분(이하 38B중)이 최고 0.05mL/g의 값을 보이고 36B하, 38B상, 39B하 등도 오염도 수준이 높았다. 오염도가 높은 지의 경우 역세척수가 균등하게 공급되지 않아 탁질 제거가 되지 않은 상태가 유지되어 오염도가 진행 중이거나 진행된 경우로 판단되었다.

Table 1. Distribution of specific volume of sludge

Parameter	Good	Initial Pollution	Intermediate ~	Last Pollution
	0.004mL/g미만	0.010mL/g미만	0.050mL/g미만	0.050mL/g이상
Sampling points	1A상	5B상	23B상	
	1A중	6B상	23B중	
	1A하	9A하	36B중	
		12B중	36B하	
		12B하	38B상	
	...	15B상	38B중	
		17A상	38B하	
	...	17A하	39B하	
		19B중		
		19B하		
		40B상	22A하	
		40B중	23B하	
		40B하	26A하	
Total 240점	219점	13점	8점	0점

※슬러지비체적 : Specific volume of sludge

4.2. 세척탁도

세척탁도의 경우 역세 후 여과사를 채취하여 분석하였으며 분석결과를 한국수도협회규격 KWWA F 100의 수도용여과모래의 기준(30도이하(16NTU))에 적용한 결과 총 240점 중에서 81.9%인 199점이 기준값에 적합한 것으로 조사되었으며 그 외 41점은 30도 이상(16NTU)으로 18.1%의 비율로 조사되어 일부 여과지의 경우 오염도가 진행 중이거나 이미 진행된 형태를 보여 주기적인 역세척으로 탁질 제거 및 적절한 여과지 운영관리가 필요하였으며 특히 23B중이 84NTU로 최고의 오염도를 보였고 39B하, 2A하, 23B상, 38B중 등도 높은 오염도로 조사되어 중점 관리 대상지로 세심한 관리가 필요하였다. 세척탁도의 분포별로 나누어 본 결과는 다음과 같다.

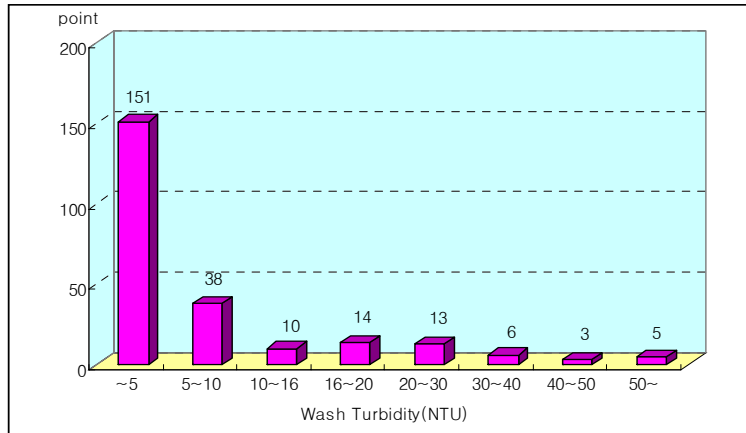


Figure 3. Distribution of wash turbidity

역세척 전·후의 세척탁도를 측정하기 위해 23B 여과지를 선정하여 10cm 간격(깊이별)으로 시료를 채취하여 분석한 결과 역세전의 세척탁도(Figure 4)는 표면(0cm)에서 최고 11NTU, 90cm에서 최저 1.5NTU로 조사되었으며 깊이 30cm 정도에서 하향 안정화 하는 추세를 보였다. 반면에 역세척 후의 탁도변화는 전 지점이 거의 비슷한 추세를 보여 탁질의 제거가 전체적으로 이루어 지는 것을 보여 충분한 역세척을 통해 적절한 여과지의 유지관리가 필요함을 보여주었다.

트래프의 여과사 오염도 분포(Figure 5)를 보기 위해 23B 여과지에 대해 역세척 전·후에 시료를 표면 0cm에서 아래방향으로 10cm 간격을 두어 90cm까지 채취하여 세척탁도를 분석한 결과 역세척 전은 30cm까지 점진적으로 하향하는 추세를 보이다가 이후 70cm, 80cm 정도의 하층부분에서 머드볼의 영향으로 인해 오염도가 증가하는 추세를 보였다. 역세척 후는 10cm~30cm까지 오염도가 심하게 나타나 탁질 제거가 되지 않았으나 이후에는 탁도의 제거가 이루어진 안정화 추세를 보였다.

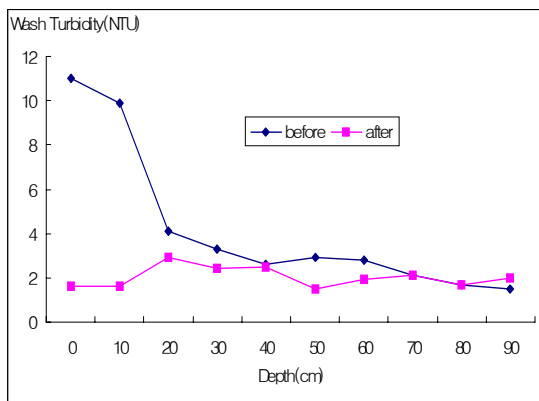


Figure 4. Wash turbidity distribution before and after backwash at Filter 23

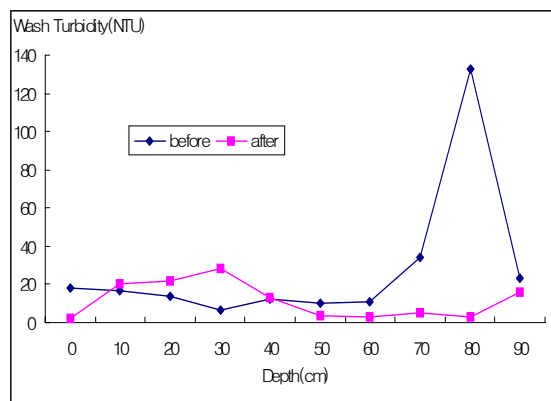


Figure 5. Wash turbidity before and after backwash near the trough

트랩 부근(Figure 6) 및 여과사 중심(Figure 7)의 역세척 전·후로 구분하여 150cm 간격을 두어 깊이 50cm에서 시료를 채취하여 세척탁도를 분석한 결과 트랩 부근은 역세척 전·후의 오염도 분포는 큰 차이를 보였으며 반면에 여과사 중심의 세척탁도는 분포도차이가 크지 않았으나 저층부에서 머드블의 영향으로 오염도가 높게 나타났다. 트랩 부근과 여과사 중심의 오염도는 트랩 부근이 여과사 중심 보다 오염도가 큰 것으로 조사되어 역세척으로 인한 탁질 제거가 제대로 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있었다.

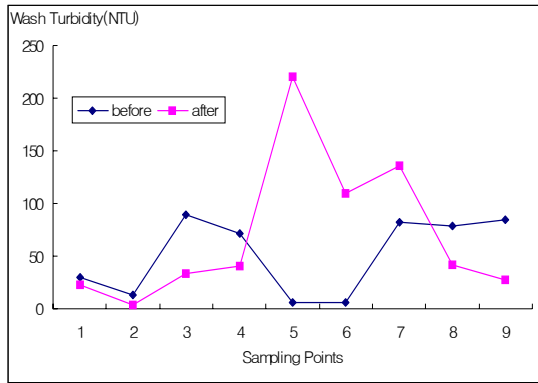


Figure 6. Wash turbidity near the trough

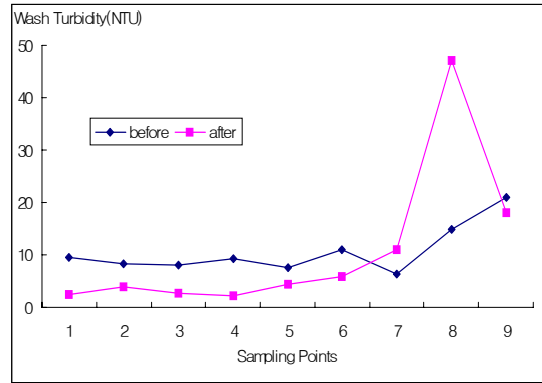


Figure 7. Wash turbidity at the center of bed

우리나라의 경우 급속여과 공정을 운영하면서 여과지를 효율적으로 운영하기 위해서 각각의 여과지에 대해 지속시간, 오염도 실험, 역세척 주기, 여과사 교체 및 보사 등 장기간 여과공정을 유지하기 위한 필수적이다. 특히 여과공정에서 역세척은 머드블과 여재 크랙 등이 여과공정에서 문제를 발생시키는데 이러한 문제 해결을 하기 위한 것이다⁽¹¹⁾. 미국의 필라델피아 퀸레인 정수장에서는 노후된 시설, 하부집수장치 손상 및 공기발생, 초기 누출탁도(0.5~2.0NTU) 등으로 탁도에 문제점이 발생하여 단계적 역세척을 이용하여 <0.06NTU 로 개선책을 마련하는 공법을 실시하였다⁽⁴⁾.

4.3. 강열감량

강열감량의 경우 한국수도협회 KWWA F 100 수도용모래여과 방법에 따라 실험한 결과 전체 평균 0.37%를 보였으며 98%가 기준값 0.7%이하로 적합하였다. 반면에 일부는 오염도가 높게 나타났으며 특히 23B상 지점이 최고 0.77%의 값을 보였다. 또한 23B중, 39B하, 12B중, 12B하 등도 오염도가 높았다. 전체적으로 슬러지비체적, 세척탁도 등이 높은 지점이 강열감량도 높은 수치를 나타내 항목간 상관성이 있는 것으로 조사되었다.

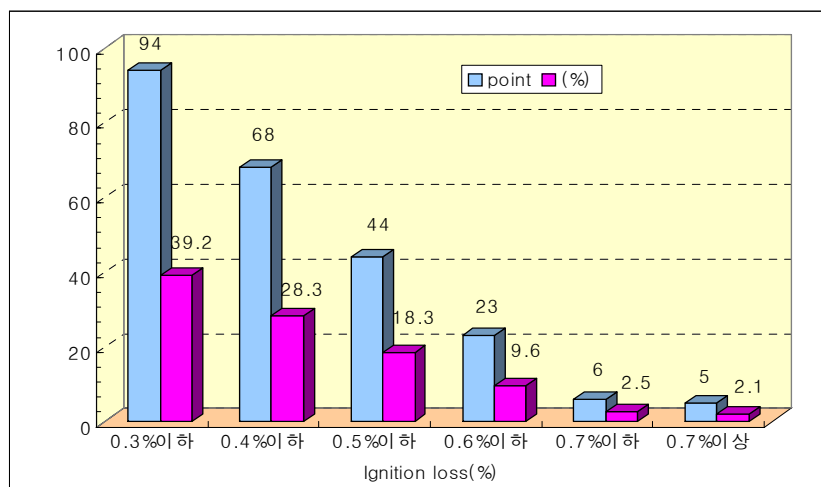


Figure 8. The distribution of contamination level characterized by ignition loss

탁도와 강열감량의 관계는 23B의 트라프를 대상으로 수직적(여과사 표면 0cm에서 90cm까지 10cm 간격으로 채취) 및 수평적(150cm 간격을 두고 깊이 50cm에서 채취) 상관성을 분석한 결과 r제곱값은 수직적은 0.92, 수평적은 0.75 등으로 깊이별 채취가 지점별 보다 조금 큰 상관성이 있는 것으로 조사되었다. 또한 수직적 오염도 경우 80cm에서 세척탁도 133NTU, 강열감량 0.62%로 가장 높은 결과를 보였으며 수평적 오염도 경우 5지점은 낮게 조사되었으나 3, 4, 7, 8, 9 지점 등은 오염도가 높게 나타나 대부분의 탁질이 월류되는 트라프에서 충분히 제거되지 못하여 상당한 오염도가 진행되고 있는 것으로 추정 할 수 있다.

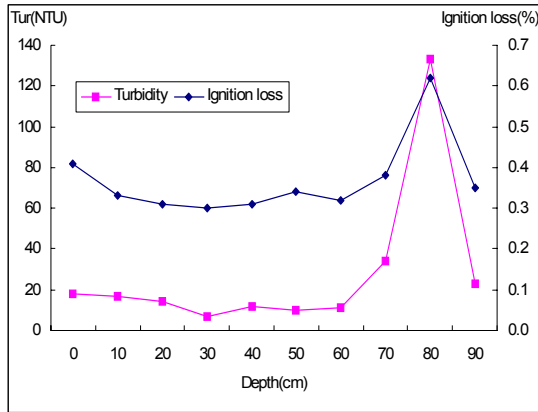


Figure 9. The turbidity and ignition loss near the trough(verticality)

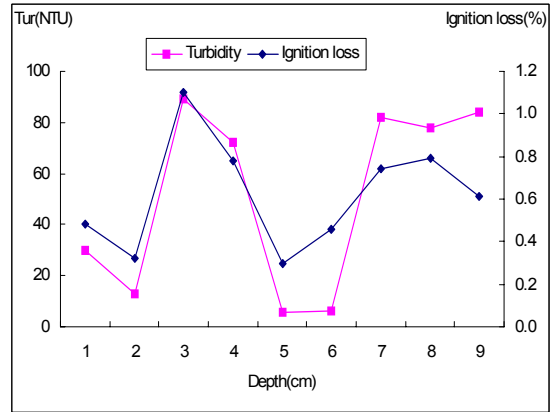


Figure 10. The turbidity and ignition loss near the trough(horizontality)

4.4. 공극율

여과사 비중(Specific Gravity) 실험은 복잡한 실험을 거치는 과정으로 이들의 값을 약식 추정하여 도입하면 「수도용 여과모래 시험방법」의 여과사 비중의 범위(2.55~2.65)의 평균값 비중 2.60을 이용하면 이를 바탕으로 서울시 G정수장의 여과사 유효경 ϕ 1.0mm의 공극율은 약 42.8%로 조사되었으며 본 실험에서 실험대상으로 선정한 여과사 유효경 ϕ 0.6mm의 공극율은 40.9%, ϕ 0.7mm의 공극율은 41.9%로 조사되었고 유효경 ϕ 0.6mm+ ϕ 1.0mm의 혼합여과사의 공극율은 40.0%, ϕ 0.7mm+ ϕ 1.0mm의 혼합여과사의 공극율은 40.5%의 결과로 조사되어 입경이 작을수록 공극율이 작은 것으로 조사되었다.

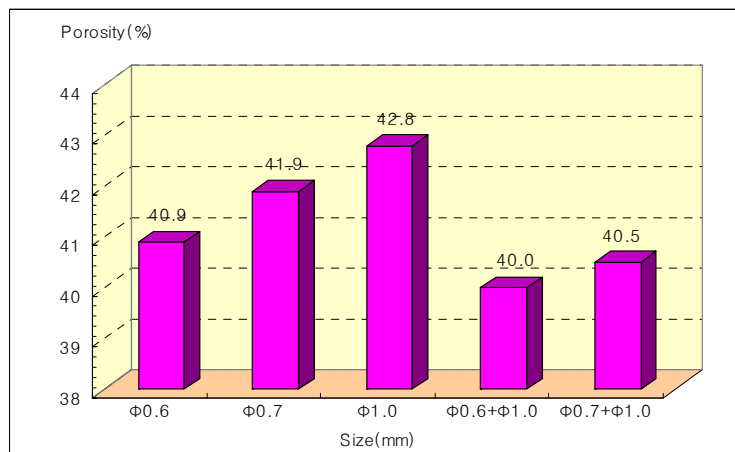


Figure 11. Porosity depending on the sand size

4.5. 머드볼

여과공정에서 여과 유출수 탁도가 증가하면 역세척 과정을 통해 여과지에 부착되어 있는 탁질 제거가 이루어져야 한다. 만약 역세척 과정이 충분치 못하다면 여과에 고형물이 남을 것이며 이런 고형물들은 작은 ball을 만들기에 충분한 점착력을 갖고 있다. 이것은 플러입자와 모래의 혼합에 의해 만들어진 성상으로 일반적으로 시간이 흘러감에 따라 여과와 섞이면서 점점 더 무거워지게 되면 머드볼은 여과의 바닥으로 가라앉게 된다^{(7),(9)}.

머드볼은 대개 역세척을 한 후 여과지 표면에서 볼 수 있는데 머드볼에 대한 검사는 정기적으로 이루어져야 하고 적절한 역세척도와 표면세척으로 여과표면의 플러를 충돌시킴으로 머드볼의 생성을 막을 수 있다⁽⁸⁾. 본 연구의 머드볼 조사는 오염도가 심한 23지B 여과지 표면에 위치한 머드볼을 채취하여 질산에 의한 유기물 분해의 방법에 따라 전처리 실시한 후 유도결합 플라즈마 원자방출 분광기(ICP/AES : Inductively coupled plasma/Atomic emission spectrometer / Jobin Yvon(프랑스))로 분석하였으며 분석 결과 알루미늄이 2,182mg/kg으로 가장 높은 수치를 보였으며 철 540mg/kg, 망간 46.7mg/kg 등의 순으로 높은 값을 보였다. 이는 응집제 폴리염화알루미늄(PAC)의 주성분인 산화알루미늄(Al_2O_3)에 기인한 것으로 사료된다. 머드볼의 크기는 약 1cm 내외 정도의 크기를 보였다.



Figure 12. The photograph of mudball

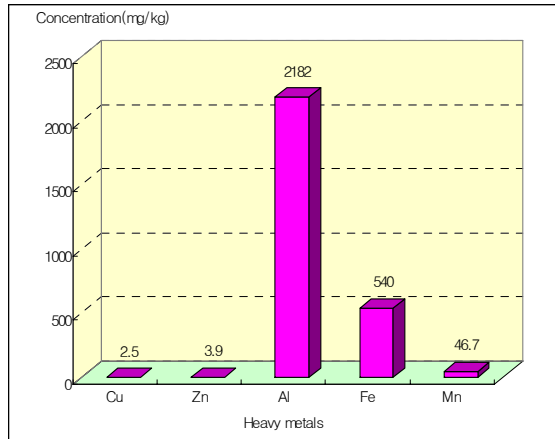


Figure 13. Heavy metals in the mudball of Filter 23B

5. 오염도 평가

여과사 오염도를 평가하기 위해 나름대로 평가기준을 적용해 볼 수 있는데 본 연구에서는 유기물 평가가 가능한 슬러지비체적, 세척탁도, 강열감량 등 3항목을 중심으로 각각의 항목에 대한 가중 값으로 매우양호 (1점), 양호 (2점), 오염초기 (3점), 오염중기 (4점), 오염말기 (5점) 등을 선정하여 조사하였다.

Table1 2. The assessment criteria for the contamination level

Distinction	Excellent (1point)	Good (2points)	Initial pollution (3points)	Intermediate pollution (4points)	Last pollution (5points)
Specific volume of sludge (mL/g)		~0.004	0.010	0.050	0.050~
Wash turbidity (NTU)	~5	10	16	20~30	30~
Ignition loss (%)	~0.3	0.4	0.5	0.6	0.6~

Table1 2에 의한 오염도 평가결과 슬러지비체적 2.12점, 세척탁도 1.79점, 강열감량 2.12점 등으로 조사되어 대체로 양호(2점)한 수준을 보여 여과사 오염도가 심하지 않았으나 Table1 3의 오염도종합표에서 23B, 38B, 39B, 36B, 5B, 6B 등은 다른 지에 비해 오염도가 높게 조사되어 여과사를 보사 혹은 대체할 경우 우선 교체 대상지로서 선정될 수 있다.

Tablel 3. The overall result of the contamination level

S a m p l e	A									B								
	Upper(30cm)			Middle(60cm)			Lower(90cm)			Upper(30cm)			Middle(60cm)			Lower(90cm)		
	Sludge	Tur	Ignition	Sludge	Tur	Ignition	Sludge	Tur	Ignition	Sludge	Tur	Ignition	Sludge	Tur	Ignition	Sludge	Tur	Ignition
1																		
2					4	4		5	4					4	5		4	4
3																		
4																		
5										3	4						5	4
6										3	4	4			4		4	4
7																		
8																		
9							3											
10											4	5		4	5			4
11											4	5	3	4	5	3	4	5
12																		
13																		
14																		
15										3		4			4			4
16																		
17	3	4	4		4	4	3	4	4									
18		4			4			4									5	
19			4			4					4		3	4		3		5
20																	4	
21																		
22							3	4										
23										4	5	5	4	5	5	3	4	4
24																		
25																		
26	3				4	4		4										
27																		
28																		
29																		
30		4																
31																		
32																		
33																		
34																		
35											4	4		4			4	
36											4		4	4		4	5	4
37																		
38			4						4	4	4		4	5	5	4	4	
39													4	4		4	5	5
40																		

☐ Blanks have 1~2 points, Sludge : specific volume of sludge, Tur : Wash turbidity, Ignition : Ignition loss

오염도 평가결과 각각의 항목이 3~5점의 가중 결과값을 가지면서 총점이 9점 이상인 여과지는 여과사를 보사 혹은 대체 할 경우 우선 교체대상지로 선정할 수 있다. 또한 가중 결과값이 9점 이하이면서 한 항목에서 3~5점의 결과값을 가진 여과지의 경우 정상 여과지 보다 2~3회의 역세척을 실시한다면 양호한 여과지 관리를 할 수 있다.

참고문헌

1. 고완석 외, 단위조작, 보문당, 1994, p391~394
2. 이민용, 주문진규사, (주)주문진규사, 2002.06, p43~54
3. (사)한국수도협회, 상수도시설기준, 1980.06, p133~134
4. 최정진, 미국의 상수도 정책과 수질관리 기술, 서울시수도기술연구소, 1999.11, p29~32
5. 한국수도협회규격, KWWA F 100, 1989
6. 장준영, 수질환경기사, 성안당, 1993, p2~45
7. Susumu Kawamura, 정수시설의 최적설계 및 유지관리, (주)그린테크노, 1997, p253
8. 한국수자원공사, 정수장 OPERATOR 자격인증 교재, 한국상하수도협회, 2002, pII-3~36
9. 환경관리공단, 정수처리실무, 환경관리공단, p349
10. AWWA, Basic Concepts and Applications 2nd, 1995, p197
11. AWWA, Water Quality and Treatment 4th, 1990, p516