석탄저회를 여재로 활용한 건설현장 발생 탁수의 여과특성에 관한 연구 II. Pilot-test 여과실험

A Study on Filtration Characteristics of Turbid Water in Construction Sites Using Bottom Ash as Filter Media II. Pilot-test filtration experiment

김진호¹ · 주진철^{2,*} · 방기웅² · 강은비¹ · 박병욱¹ · 최종수³ · 김용혁⁴
Jin Ho Kim¹ · Jin Chul Joo^{2,*} · Gi Woong Bang² · Eun Bi Kang¹ ·
Byung Uk Park¹ · Jong Soo Choi³ · Yong Hyok Kim⁴

¹한밭대학교 환경공학과 · ²한밭대학교 건설환경공학과

³토지주택연구원 · ⁴한국남동발전(주) 자원순환연구센터

¹Department of Environmental Engineering, Hanbat National University

²Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University

³Land & Housing Institute · ⁴Korea South-East Power Co.

(Received January 11, 2019; Revised January 26, 2019; Accepted January 28, 2019)

Abstract : The bottom ash pilot-test filtration experiment was conducted to reduce the discharge of suspended solids from construction sites runoff using relatively large diameter ($d \geq 10$ mm) of bottom ash filter media. The filtration efficiency of the bottom ash increased with an increase in the input loadings of suspended solids. Whereas the filtration efficiencies of suspended solids were more than 20% up to the second filtration layer ($L \leq 46.6$ cm), while the filtration efficiencies of suspended solids were less than 20% after the third filtration layer ($L > 46.6$ cm). Additionally, more than 70% from total filtered amounts of suspended solids were removed by clogging the pores in the second filtration layer ($L \leq 46.6$ cm). On the other hand, the turbidity removal efficiencies were less than 20%, irrespective of the influent turbidity, and the order and length of the bottom ash filtration layer. As a result of the mass balance analysis, the clogging time of bottom ash filter layer was about 510 minutes, the average filtration efficiency of suspended solids was 67.7%, and the average filtration efficiency of turbidity was calculated at 31.8%, indicating that bottom ash filter layer with relatively enhanced filtration efficiency is effective in reducing suspended solids in the construction sites runoffs.

Key Words : Construction Site Runoff, Suspended Solids, Bottom Ash, Filter Media, Inflow Loadings, Clogging

요약 : 실제 건설현장의 탁수 내 부유물질 유출저감용 석탄저회 pilot-test 여과장치를 모사하여 비교적 큰 석탄저회 입경($d \geq 10$ mm)을 다층으로 설치하여 pilot-test 여과실험을 실시하였다. pilot-test 여과실험을 통해 석탄저회 여재층의 여과효율은 유입 부유물질 부하량이 증가함에 따라 증가하였으며, 2단 여재층($L \leq 46.6$ cm)까지는 20% 이상의 높은 부유물질 여과효율을 나타낸 반면, 3단 이후 여재층($L > 46.6$ cm)은 20% 미만의 낮은 부유물질 여과효율을 나타냈다. 또한 여과장치의 전단부(2단 여재층)에서 부유물질 총 여과량의 70% 이상이 여재 공극을 일부 폐색시키면서 제거되는 것으로 조사되었다. 반면에, 탁도의 제거효율은 유입수의 탁도, 여재층의 순서 및 길이와 무관하게 20% 미만의 낮은 여과효율을 나타내었다. 이러한 결과는 유입 탁수 내 10 μ m 미만의 부유물질 입도는 석탄저회 여재층의 여과를 통해 제거되지 않기 때문에 판단되며, 응집처리 등의 화학적 처리가 동반되어야 할 것으로 판단된다. 물질수지분석 결과, 석탄저회 여재의 폐색발생 시기는 510분 내외이며, 부유물질의 평균 여과효율은 67.7%, 탁도의 평균 여과효율은 31.8%로 산출되어 비교적 높은 여과효율을 나타내 건설현장 탁수 내 부유물질의 저감에 효율적일 것으로 판단된다. 또한 석탄저회 여재 단위중량(kg) 및 단위면적(m^2) 당 석탄저회 여재를 통해 여과되는 부유물질량은 석탄저회 여재층의 길이가 증가함에 따라 지수적으로 감소하였으며, 추세식을 활용하여 석탄저회 여재층의 길이에 따라 제거되는 부유물질량을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 결론적으로 물질수지분석과 누적접근법을 통한 누적여과량 산출을 통해 건설현장 발생 탁수 내 부유물질 여과용 석탄저회 여재층의 최적 길이는 약 50 cm 내외로 판단된다.

주제어 : 건설현장 탁수, 부유물질, 석탄저회, 여과 여재, 유입부하량, 폐색

1. 서론

건설현장 및 농경지에서 토양침식과 강우유출수로 발생하는 토사 및 탁수 유출로 인해 주변 수계의 부유물질 농도와 탁도를 증가시키며,¹⁻³⁾ 이로 인한 어류나 수서생물의 서식 공간과 산란장소가 파괴되어 수생태계의 건강성이 악화되는

것으로 지속적으로 보고되고 있다.⁴⁻⁷⁾ 특히 건설사업장은 타 토지이용도 대비 표토의 교란이 심하므로 강우에 따른 토사 유출정도가 심하며,⁸⁾ 토사를 포함한 다양한 비점오염원 물질들이 지속적으로 배출되어 주변 토양 및 수계의 환경오염이 우려할 만한 수준인 것으로 보고되고 있다.⁹⁾

이러한 건설현장에서 발생하는 토사를 포함한 강우유출

* Corresponding author E-mail: jincjoo@hanbat.ac.kr Tel: 042-821-1264 Fax: 042-821-1476

수(탁수)의 처리 방식에는 발생원 대책인 침식억제(erosion control) 대책과 2차적으로 발생하는 유출토사의 토사억제(sediment control) 대책이 적용되고 있으며, 침식억제 대책에는 토양섬유 피복, 토사방지막, 식생피복 등이 주로 적용되고, 토사억제 대책에는 침사지, 오탁방지망, 쇄석 등의 여재여과 등이 주로 적용되고 있다.¹⁰⁾ 하지만, 효과적인 건설현장의 탁수제어를 위해서는 토사를 포함한 비점오염원의 발생기작과 유출경로를 고려하여 다양한 침식억제 대책과 토사억제 대책을 연계하여 운영하는 것이 필요하다.¹¹⁾

Part I의 연구에서 석탄저회(bottom ash)가 충전된 원형컬럼(circular column)을 활용해 석탄저회의 입경별(3~6 mm, 6~10 mm, 10~20 mm), 탁수 유입 선속도별(200 m/d, 500 m/d, 1000 m/d) 실내 실험을 실시하였다. 실험결과, 석탄저회를 건설현장의 탁수 내 부유물질 여과용 여재로 활용 시 부유물질 여과량 및 여과효율은 석탄저회의 입경(d)과 분포, 탁수의 유입선속도(v) 및 부유물질 유입부하량(inflow loading)에 따라 결정되는 것으로 확인되었다. 또한, 탁수 내 부유물질의 전체 여과효율은 유입부에 위치한 석탄저회의 폐색에 의해 큰 영향을 받는 것으로 조사되었다. 따라서, 건설현장 발생 탁수 내 부유물질 유출저감에 석탄저회를 여재로 적용 시 비교적 큰 입경($d \geq 10$ mm)의 석탄저회를 초기에 탁수와 접촉할 수 있는 유입부에 배치하고 작은 입경($d < 10$ mm)의 석탄저회를 후단에 배치하면 높은 부유물질 여과효율을 유지하면서 지속가능한 탁수 내 부유물질의 유출저감이 가능할 것으로 판단된다. 또한 석탄저회는 여과 여재로 활용 후 건설현장 지표매립 및 기존 토양과 성토재로 혼입하여 활용이 가능하므로 현장 적용성이 우수한 여재로 확인되었다.

따라서 Part II에서는 실제 건설현장의 탁수 내 부유물질 유출저감용 여과장치를 모사하여 여재층 전단에 비교적 큰 석탄저회 입경($d \geq 10$ mm)을 다층으로 설치, 적용하는 경우를 가정하여 pilot-test 여과실험을 실시하였다. 이를 위해 건설현장의 조건을 최대한 모사한 다층 석탄저회 pilot-test 여과장치를 활용해 건기 시와 강우 시를 모사하여 부유물질의 유입부하량 별 여과효율과 물질수지 분석을 통해 석탄저회 여재의 폐색시간과 최대 여과량을 산정하여 현장 적용 시 주요 설계인자 도출이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구의 세부 목적은 다층 석탄저회 여재층을 활용한 pilot-test 여과실험을 통해 (1) 각 여재층별 부유물질과 탁도의 여과효율을 분석, (2) 여과에 따른 탁수 내 부유물질 입자의 입도 변화를 파악, (3) 석탄저회 여재층의 최적 길이와 폐색주기 등을 산정하여 현장 적용 시 설계인자를 도출하고자 한다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 여재로 활용된 석탄저회 및 인공 탁수

본 연구에서 사용된 시험재료는 국내 N 화력발전소에서 석탄연소의 부산물로 발생한 석탄저회(bottom ash, BA)를 활용하였다. 석탄저회를 여과여재로 활용하기 위한 자세한

전처리과정과 물리·화학적 특성은 Part I에 제시되었다. 또한 Part I의 연구결과로부터 석탄저회 입경(d) 10~20 mm는 투수계수(K)가 비교적 크고 다양한 공극과 채널이 발달되어 탁수의 흐름에 수리학적 저항이 낮으나 여과를 통한 탁수 내 부유물질 제거량이 낮으므로 부유입자들의 축적으로 인하여 발생하는 공극 폐색(clogging)의 발생시기가 지연되는 것으로 조사되었다. 기존 연구에서도 여과여재의 투수계수가 크면 동일 수두에서 탁수의 선속도는 증가하고 입자들의 포획으로 인한 폐색(clogging)의 발생 시기는 늦어진다고 보고하고 있다.¹²⁾ 따라서 강우 시 다량의 부유물질 부하량이 유입되는 건설현장에서 폐색되지 않고 지속가능한 여과장치를 운영하기 위해 비교적 큰 입경(10~20 mm)의 석탄저회를 pilot-test 여과실험에 활용하였다.

건설현장 탁수저감시설과 유사한 실험 환경을 조성하기 위해 실제 S시 A건설 현장에서 탁수의 농도를 조사한 결과, 건기 시 부유물질 농도는 501~580 mg/L이며, 강우 시 부유물질 농도는 1,700~2,300 mg/L로 조사되었으며, 탁도는 건기 시 303~362 NTU이고 강우 시 1,374~3,500 NTU로 조사되었다. 유사한 연구결과로, 최 등¹³⁾은 건설현장 탁수의 부유물질 농도가 1,702~3,900 mg/L라고 보고하였으며, 허¹⁴⁾는 강우강도가 6.35~25.4 mm/hr일 때, 부유물질 농도가 2,000 mg/L로 관측되었다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 건설현장 탁수의 부유물질 농도를 건기(0~210 min)와 우기(210~510 min)로 구분하여 실험을 진행하였으며, 인공 탁수는 실제 건설현장에서 채취한 흙을 수돗물과 혼합하여 5분간 침전 후 상등액을 원수로 활용하였으며, 협잡물과 큰 입자로 인한 교란을 방지하기 위해 체거름(80번체, $d = 180 \mu\text{m}$)을 실시하였다. 일부 부유물질의 재침전을 방지하기 위해 유입조 내 수중펌프를 설치해 실험동안 지속적으로 교반하여 석탄저회 pilot-test 여과실험 장치로 유입하였다.

2.2. 다층 석탄저회 pilot-test 여과장치

본 연구는 건설현장의 탁수 내 포함된 다량의 부유물질을 석탄저회 여재의 여과(침전, 흡착, 포집)기작을 통해 토사유출저감 및 탁수저감을 주요 목적으로 하여 실제 석탄저회가 여재로 설치되는 현장 조건을 최대한 모사해 연속식 상향류 여과장치를 다층으로 제작하였다(Fig. 1). 실제 건설현장에서는 여과장치 전단 하부가 토사퇴적으로 조기 폐색 시 일부 상향류의 흐름특성을 나타내어 상향류로 선정하였으며, 석탄저회 여재층을 현장에서 연속으로 설치하는 경우를 모사하여 다층 여과장치로 제작하였다. 제작한 pilot-test 여과장치는 정량펌프를 활용해 일정한 유량의 인공 탁수를 유입시켰으며, 전단에 저류조를 설치해 비교적 균일한 농도의 부유물질과 탁도를 가진 인공 탁수가 유입되도록 제작하였다.

Fig. 1에 구체적으로 제시되었듯 인공 탁수는 1단부터 5단까지 석탄저회 개별 여재층을 단계별로 통과하여 최종적으로 유출되게 되며, 각 단계별로 여재층과 월류구로 구분되어 있다. 개별 여재층(23.3 cm)을 통과한 유입수는 월류구를 통해 다음 여재층을 상향류로 유입하여 총 116.5 cm

(a) Schematic flow diagram

(b) Pictorial view

Fig. 1. Schematic flow diagram and pictorial view of bottom ash pilot-test filtration apparatus.

의 석탄저회 여재층을 통과하게 된다. 전체적인 pilot-test 여과장치의 구체적인 제원은 Table 1에 정리되었다.

현장에서 실측된 부유물질 농도를 고려해 건기 시 탁수의 부유물질 농도는 534~935 mg/L이며, 우기 시 탁수의 부유물질 농도는 1,070~2,148 mg/L로 석탄저회 pilot-test 여과장치로 유입하였다. 또한 탁수의 탁도도 건기 시 354~440

NTU, 우기 시 825~980 NTU 범위로 하여 총 570분 동안 약 4,000 L의 인공 탁수를 200 m/d의 유입 선속도(v)로 석탄저회 pilot-test 여과장치로 유입하였다(Fig. 1(a)).

시료의 채취는 Fig. 1(b)에 제시되었듯 각 단계별 석탄저회 여재층을 통과 후 상부의 sampling port에서 각 시간대 별로 측정하였다. 분석항목은 석탄저회 여재를 활용한 탁수 내 부유물질과 탁도의 여과효율을 조사하기 위해 부유물질과 탁도를 측정하였다. 또한 탁수 내 부유물질의 입도별 제거특성을 알아보기 위해 각 여재층을 통과한 탁수 내 부유물질의 입도분석을 실시하였다. 부유물질은 수질오염공정시험법에 의거하여 실시하였으며, 탁도는 Turbidity meter (Istek, K100-TB)를 활용하여 측정하였다. 마지막으로 입도분석은 Laser scattering particle size analyzer (Malvern Instruments, MS2000)를 활용하여 측정하였다.

2.3. 물질수지와 누적접근법을 활용한 다층 석탄저회 여과장치 효율분석

다층 석탄저회 pilot-test 여과장치를 활용해 석탄저회 여

Table 1. Specification and properties of bottom ash pilot-test filtration apparatus

Column No.	1	2	3	4	5
Cross-sectional area, A (cm ²)	508.4				
Total volume, V_T (cm ³)	11,846				
Cumulative length, L (cm)	23.3	46.6	69.9	93.2	116.5
Bottom ash weight, W_{BA} (g)	8,295	8,430	8,545	7,855	8,405
Bulk density, ρ_b (g/cm ³)	0.70	0.71	0.72	0.66	0.71
Void ratio, e (V_v/V_s)	1.44	1.39	1.36	1.56	1.40
Porosity, n (V_v/V_T)	0.59	0.58	0.58	0.61	0.58
Water volume, V_W (cm ³)	6,984	6,887	6,819	7,225	6,901

재에 여과(침전, 흡착, 포획)기작을 통해 여과된 부유물질량을 물질수지(mass balance)로 산정하여 여과효율을 평가하였다. 여과실험을 지속하는 시간 동안 유입 및 유출되는 원수의 유량(Q_i)과 농도(C_i)를 지속적으로 측정하였으며, 물질수지 분석과 누적접근법의 구체적 방법과 식은 Part I의 연구에 제시되었다.

3. 결과 및 고찰(Results and Discussion)

3.1. 여재층 별 탁수 내 부유물질과 탁도 여과효율

다층 석탄저회 pilot-test 여과장치의 각 여재층 별 부유물질과 탁도의 농도기반 여과효율은 Fig. 2에 제시되었다. 건기로 설정한 0~210 min의 시간 동안 석탄저회 여재의 탁수 내 부유물질 여과효율은 58~65%로 평균 63%를 나타내었으며, 우기로 설정한 210~570 min의 시간 동안에 석탄저회 여재의 탁수 내 부유물질 여과효율은 56~83%로 평균 71%의 여과효율을 나타내었다. 따라서 탁수 내 부유물질 유입 농도가 증가함에 따라 석탄저회 여재의 부유물질 여과효율이 통계적으로 유의한 수준($p < 0.05$)에서 증가하는 것으로 조사되었다(Fig. 2(b)).

부유물질을 포함한 탁수는 각 여재층을 통과함에 따라 2단 여재층($L \leq 46.6$ cm)까지는 20% 이상의 높은 부유물질 여과효율을 나타내었으나, 3단 이후 여재층($L > 46.6$ cm)은 20% 미만의 낮은 부유물질 여과효율을 나타내었다. 또한 탁수가 유입되는 전단부에 위치한 여재층의 부유물질 여과효율이 우수한 것으로 조사되었으며, 다양한 부유물질의 유입 부하량 조건에서 부유물질은 석탄저회 pilot-test 여과장치의 후단부 대비 전단부(2단 여재층)에서 부유물질 총 제거량의 70% 이상이 여재 공극을 일부 폐색시키면서 제거되는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 석탄저회를 통해서 여과되는 입경의 부유물질은 이미 전단부에서 여과가 되었으며, 특정 입경 미만의 부유물질은 여과기작을 통해서 제거되지 않기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 또한 석탄저회 여재 내 공극에 비교적 큰 입도의 부유물질이 먼저 여과되어 제거되고 여재의 공극보다 작은 입도의 부유물질은 쉽게 제거가 되지 않고 유출되기 때문인 것으로 판단된다. 기존 연구에서도 여과여재의 공극보다 큰 입도의 부유물질들은 여재의 상단부에 퇴적되어 봉쇄(blinding) 및 폐색(clogging)을 일으킨다고 보고하고 있으며,^{15,16)} 매우 작은 입자의 콜로이드성 부유물질은 여과공정이 아닌 화학적 응집처리를 연계

(a) SS vs. time

(b) Removal efficiency of SS vs. time

(c) NTU vs. time

(d) Removal efficiency of turbidity vs. time

Fig. 2. Changes in removal efficiencies of SS and NTU for each bottom ash column with elapsed time.

해야 한다고 보고하였다.¹⁷⁾

각 여재층을 통과함에 따라 탁도의 여과효율은 유입수의 탁도와 관계없이 거의 일정하고 유사한 여과효율을 나타내었고(Fig. 2(c)), 여재층의 순서와 통과길이와 무관하게 20% 미만의 낮은 여과효율을 나타내었다(Fig. 2(d)). 이러한 결과는 인공 탁수 내 포함된 작은 입도의 부유물질이 석탄저회 여재층에서 여과되지 않고 유출되어 탁도에 기여하고 있기 때문이다. 이를 통해 석탄저회 여재층의 다층화(길이증대)는 부유물질 여과효율에 영향을 미치는 반면, 탁도 여과효율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 또한 정 등¹⁸⁾의 연구에서도 천변여과지 모사를 위해 모래여재를 활용한 하천수 여과 실험에서 탁도는 대부분 50 cm 이내의 표층에서 제거가 이루어졌으며, 50 cm 이상의 여재층은 제거효율에 관여하지 않는 것으로 보고하였다.

3.2. 여재층 별 탁수 내 부유물질의 입도 분포 변화

석탄저회 여재층을 통과함에 따라 발생하는 탁수 내 부유물질의 입도 분포변화를 Fig. 3에 제시하였다. 인공 탁수 내 입도 분포변화를 관측한 결과, 석탄저회 여재층 여과를

통해 탁수 내에서 부유물질 여과가 발생하는 입도구간($d \geq 10 \mu\text{m}$)의 비율은 점차 감소하는 반면 부유물질 여과가 발생하지 않는 입도구간($d < 10 \mu\text{m}$)은 비율이 점차 증가하는 것으로 관측되었다. 즉 입도 $10 \mu\text{m}$ 이상의 부유물질은 석탄저회 여재층을 통해 여과되지만, 입도 $10 \mu\text{m}$ 미만의 부유물질은 석탄저회 여재층을 통해 여과되지 않는 것으로 판단된다. 이러한 입도의 여과 및 유출의 분할(fraction)은 시간의 경과 및 여재층의 다층통과에 따라 더욱 명확해졌다. 유사한 연구결과로 구 등¹⁹⁾은 도로면 강우유출수를 EPP, EPS, Perlite, Zeolite로 여과한 결과, 초기 강우유출수 내 부유물질이 발생위치에 따라 d_{50} 이 $21.99 \mu\text{m}$ (도로), $31.55 \mu\text{m}$ (주차장)에서 각 여재를 통과한 유출수 내 부유물질의 d_{50} 이 각 여재에 따라 Zeolite ($14.4 \mu\text{m}$), EPP ($18.9 \mu\text{m}$), EPS ($21.6 \mu\text{m}$), Perlite ($25.7 \mu\text{m}$)로 변화하고, 실험의 경과에 따라 d_{50} 이 증가하는 경향을 나타내었다고 보고하였다. 따라서 여과 여재(석탄저회, Zeolite, EPP, EPS, Perlite)는 여과 기작을 통해 제거가능한 부유물질의 입도한계가 존재하는 것으로 확인되었다.

Fig. 4에는 탁수 내 부유물질의 입도를 0~10 μm 입도구간

Fig. 3. Changes in particle size distribution with sampling ports and elapsed time for bottom ash filtration pilot-test apparatus.

Fig. 4. Changes in fraction of particle size distribution with both elapsed time and sampling port.

과 10~100 μm 입도구간으로 분할하여 해당 부유물질 입도 비율의 증감을 제시하고 있다. 유입 탁수의 10~100 μm 의 입도구간에서는 350분을 기준으로 전체 부유물질 대비 약 70%가 넘는 비율을 나타냈으나 석탄저회 여재를 통해 여과되면서 약 35%까지 감소되는 것으로 확인되었다. 반면에, 0~10 μm 의 입도구간에서는 350분 기준으로 전체 부유물질 대비 약 25%를 차지하던 비율이 석탄저회 여재를 통해 여과되면서 약 60%가 넘는 비율로 증가하는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 탁도의 연구결과와 유사하며, 10 μm 미만의 입도는 여과를 통한 물리적 공정을 통해서 제거되지 않기 때문에 비율이 증가하나, 10 μm 이상의 입도는 여과를 통한 물리적 공정을 통해서 제거되므로 비율이 지속적으로 감소되어 관측된 것으로 판단된다. 따라서 석탄저회 여재를 활용해 탁도를 제거하기 위해서는 물리적 여과공정으로 제거되지 않는 입도 10 μm 미만의 부유물질을 대상으로 응집처리 등의 화학적 처리가 동반되어야 할 것으로 판단된다.

3.3. 석탄저회 여재층의 폐색 및 평균 여과효율

물질수지 분석결과, 시간경과에 따른 부유물질의 유입량, 유출량, 여과를 통한 제거량을 Fig. 5(a)에 제시하였다. 유입 부하의 증가에 따라 여과되는 부유물질의 양도 증가하는 추세를 나타내지만, 시간경과에 따라 여과되는 부유물질의 양

Fig. 5. Changes in mass and removal efficiency of SS with elapsed time.

이 감소하는 것이 확인되었다. 또한 시간경과에 따른 탁수 내 부유물질의 여과효율분석 결과, 여과효율은 48~83%의 범위를 나타내었다. 초기에는 유입 부유물질 부하량이 높아 질수록 여과를 통한 제거량이 증가하는 것으로 조사되었지만, 약 510분을 기점으로 하여 유입수의 부유물질 부하량이 증가하여도 제거효율이 증가하지 않는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5(b)). 이러한 결과를 바탕으로 부유물질 여과효율이 감소하는 510분부터 폐색이 시작되는 시간이라고 판단된다. 따라서 본 연구에 활용된 석탄저회 여재의 수명을 510분이라고 산정할 경우, 부유물질의 평균 여과효율은 67.7%로 산출되었고, 탁도의 평균 여과효율은 31.8%로 산출되었다. 총 여과된 부유물질(g)량은 약 3 kg으로 산출되었다. 이러한 결과를 통해, 석탄저회를 통한 탁수 내 부유물질 저감은 기존 건설현장에서 사용되고 있는 탁수 내 부유물질저감 공법인 Check Dam(효율 25~65%), Silt fence(효율 46~49%) 대비 우수한 효율을 나타내었다.¹³⁾

3.4. 물질수지 기반 석탄저회 여재층 길이별 부유물질 제거량 산정

본 연구에서는 물질수지 분석을 기반으로 석탄저회 여재

Table 2. Total amount of SS removed through the filtration of bottom ash columns

Column	Amount of SS (g)	Rate (%)	W_{BA} (kg)	MSS_W (g-SS/kg-BA)	A_{BA} (m ²)	MSS_{SA} (g-SS/m ² -BA)
in	3,955	100	-	-	-	-
1	1,201	30.4	8.3	144.7	208.6	576
2	711.8	18.0	8.4	84.7	212.8	334
3	377.8	9.55	8.5	45	215.7	175
4	253.7	6.42	7.9	32.1	198.3	128
5	204.2	5.16	8.4	24.3	212.2	96
Sum	2,749	69.5	-	-	-	-

Fig. 6. Changes in filtered amount of SS with length of the bottom ash.

층별 부유물질 제거량을 폐색으로 산정된 510분을 기준으로 산출하였다. 실험경과 후 510분까지의 부유물질 물질수지 분석결과는 Table 2에 제시되었다. 석탄저회 여재층의 총 부유물질 여과효율은 유입 부유물질량의 약 70%가 여과기작을 통해 제거되었으며, 농도기반 여과효율 결과와 동일하게 1단과 2단 여재층에서 높은 부유물질 제거효율을 나타내었다.

석탄저회 여재 단위중량(kg) 및 단위면적(m²) 당 여과되는 부유물질 여과량과 석탄저회 여재층의 길이의 추세식을 Fig. 6에 제시하였다. 석탄저회 여재 단위중량(kg) 당 석탄저회 여재를 통해 여과되는 부유물질의 양(MSS_W)과 석탄저회 여재 단위면적(m²) 당 석탄저회 여재를 통해 여과되는 부유물질의 양(MSS_{SA})은 석탄저회 여재층의 길이가 증가함에 따라 지수적으로 감소하였다($R^2 > 0.99$, $p < 0.05$). 따라서 석탄저회($d = 10 \sim 20$ mm)를 여재로 활용할 경우 추세식을 활용하여 석탄저회 여재층의 길이에 따라 제거되는 부유물질량을 예측할 수 있으며, 현장적용 시 설치되는 석탄저회 여재층의 길이 설정에 주요한 설계인자가 될 수 있으리라 판단된다.

3.5. 누적접근법을 통한 여과량 산정 및 최적 길이 도출

본 연구의 pilot-test 여과실험 결과를 바탕으로 석탄저회의 현장적용에 설계인자로 적용 가능한 석탄저회 여재층의 최적 길이를 도출하기 위해 유입부하량에 따른 석탄저회의

누적여과량을 산출하였다. 물질수지 분석결과와 동일하게 1단과 2단 여재층에서 대부분의 부유물질이 제거된 것을 확인할 수 있었으며, 제거되는 부유물질량의 증가는 초기에는 급증하나 점차 최대값에 도달하는 것으로 관측되었다. 따라서 누적된 유입부하량에 따른 부유물질 누적여과량을 예측하기 위해 Langmuir 모형을 활용한 추세선 분석을 실시하였으며, 누적된 유입부하량에 따른 부유물질 누적여과량의 증가는 대체로 Langmuir 모형에 적합하였으며($R^2 > 0.991$), 2단(46.6 cm)까지는 높은 누적여과량을 나타내지만, 3단(69.9 cm) 이상이 되면 누적여과량이 급격하게 감소된다(Fig. 7(a)).

또한 유입 부유물질 부하량별 각 석탄저회 여재층의 여과효율을 비교한 결과를 Fig. 7(b)에 제시하였다. 3~5단 여재층의 여과효율은 대부분 12% 미만인 반면, 1단과 2단의 석탄저회 여재층의 여과효율은 12% 이상인 것으로 확인되었다. 앞선 물질수지분석에 따른 석탄저회 여재의 여과효율과 누적접근법을 통한 누적여과량 산출 결과와 동일한 결과로 석탄저회를 건설현장에서 탁수 내 부유물질 저감용 여재로 활용 시 단일 석탄저회 여재층의 최적 길이는 약 50 cm 내외로 판단된다.

(a) Cumulative removal efficiency

(b) Removal efficiency

Fig. 7. Changes in removal efficiencies of SS with the length of coal bottom ash filter media.

Table 3. Comparison of efficiency between circular column and multilayer column

Filtration system	Circular column	Multilayer column					
Length (cm)	50	23.3	46.3	69.9	93.2	116.5	
BA (kg)	1.97	8.41	8.43	8.55	7.86	8.27	
Filtered-SS (g)	71.2	1,201	712	378	254	204	
g-SS/Kg-BA, MSS _w	36.1	143	84.5	44.2	32.3	24.6	
g-SS/m ² -BA, MSS _{SA}	97.4	576	334	175	128	96	
Cumulative removal efficiency (%)	53	30.4	48.4	58.0	64.4	69.6	

3.6. 원형 상향류 컬럼과 pilot-test 여과장치 제거효율 비교

Part I의 원형컬럼과 part II의 pilot-test 여과장치의 탁수 내 부유물질 여과효율의 비교 결과를 Table 3에 제시하였다. 동일한 조건에서 여과장치 효율의 차이를 확인하기 위해서 동일 여과실험 조건($d = 10 \sim 20$ mm, $v = 200$ m/d)에서 여과 효율을 비교하였다. 단위중량(kg) 당 부유물질 여과량은 석탄저회 여재길이 50 cm인 원형컬럼($L = 50$ cm) 대비 pilot-test 여과장치(2단 여재층, $L = 46.6$ cm)가 약 5배가 넘는 부유물질 여과량을 나타냈다. 또한 단위면적(m²) 당 부유물질 여과량은 원형컬럼($L = 50$ cm) 대비 pilot-test 여과장치(2단 여재층, $L = 46.6$ cm)가 약 10배의 부유물질 여과량을 나타냈다. 이러한 차이는 지속적으로 유입되어 누적된 부유물질 유입부하량(inflow loading)의 차이로 인해 발생한 것으로 판단된다. 하지만 원형컬럼과 pilot-test 여과장치의 탁수 내 부유물질의 유입과 유출의 농도차로 여과효율을 비교할 경우 원형컬럼은 53%, 다층 석탄저회 여과장치는 2단 여재층까지 48.4%로 비슷한 효율을 나타낸 것으로 산출되었다. 따라서 물질수지분석과 누적접근법을 통한 누적여과량과 석탄저회 여재층의 설치 길이를 활용해 석탄저회를 건설현장 발생 탁수 내 부유물질 저감용 여재로 활용 시 석탄저회 여과장치의 수명과 폐색주기 도출이 가능하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 Part I의 석탄저회의 건설현장 탁수 내 부유물질의 유출저감용 여과재(filter media) 적용 타당성 검토에 이어, 실제 건설현장의 탁수 내 부유물질 유출저감용 여과장치를 모사, 여재층 전단에 비교적 큰 석탄저회 입경을 다층으로 설치하여 적용하는 경우를 가정하여 pilot-test 여과실험을 실시하였다. pilot-test 여과실험의 결과를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1) 석탄저회 여재층의 여과효율은 유입 부유물질 부하량이 증가함에 따라 증가하였으며, 2단 여재층($L \leq 46.6$ cm)까지는 약 20% 이상의 높은 부유물질 여과효율을 나타낸 반면, 3단 이후 여재층($L > 46.6$ cm)은 약 20% 미만의 낮은 부

유물질 여과효율을 나타냈다. 또한 석탄저회 pilot-test 여과장치의 전단부(2단 여재층)에서 부유물질 총 여과량의 70% 이상이 여재 공극을 일부 폐색시키면서 여과되는 것으로 조사되었다. 반면에, 탁도의 여과효율은 유입수의 탁도, 여재층의 순서 및 길이와 무관하게 20% 미만의 낮은 여과효율을 나타내었다.

2) 유입 탁수 내 10 μ m 이상의 부유물질 입도는 여과를 통해 제거되지만, 10 μ m 미만의 부유물질 입도는 여과되지 않는 것으로 조사되어 석탄저회 여재층의 여과를 통해 제거 가능한 부유물질 입도한계값(cutoff value)이 존재하는 것으로 확인되었다. 따라서 탁도를 제거하기 위해서는 물리적 여과공정으로 제거되지 않는 입도 10 μ m 미만의 부유물질을 대상으로 응집처리 등의 화학적 처리가 동반되어야 할 것으로 판단된다.

3) 물질수지분석 결과를 바탕으로 석탄저회 여재의 폐색 발생 시기는 510분이며, 석탄저회 pilot-test 여과 장치의 부유물질 평균 여과효율은 67.7%로 산출되었고, 탁도의 평균 여과효율은 31.8%로 산출되었다. 따라서 석탄저회를 통한 탁수 내 부유물질 저감은 기존 건설현장에서 사용되고 있는 탁수 내 부유물질저감 공법(Check Dam, silt fence, 쇠석) 대비 비교적 높은 효율을 나타내어 건설현장 탁수 내 부유물질의 저감에 효율적일 것으로 판단된다.

4) 석탄저회 여재 단위중량(kg) 및 단위면적(m²) 당 석탄저회 여재를 통해 여과되는 부유물질량은 석탄저회 여재층의 길이가 증가함에 따라 지수적으로 감소하였으며, 추세식을 활용하여 석탄저회 여재층의 길이에 따라 여과되는 부유물질량을 예측할 수 있었다. 또한, 물질수지분석과 누적접근법을 통한 누적여과량 산출을 통해 건설현장에서 탁수 내 부유물질 여과용 석탄저회 여재층의 최적 길이는 약 50 cm 내외로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국토지주택공사와 한국남동발전의 「건설현장 탁수저감시설 제작 및 현장 적용 용역」의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

- Bouraoui, F., Grizzetti, B., Granlund, K., Rekolainen, S. and Bidoglio, G., "Impact of climate change on the water cycle and nutrient losses in a Finnish catchment," *Climatic Change*, **66**(1-2), 109~126(2004).
- Mimikou, M., Blatas, E., Varanaou, E. and Pantazis, K., "Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators," *J. Hydrol.*, **234**(1-2), 95-109(2000).

3. Neff, R., Chang, H., Knight, C., Najjar, R., Yarnal, B. and Walker, H., "Impact of climate variation and change on Mid-Atlantic Region hydrology and water resources," *Climate Res.*, **14**, 207~218(2000).
4. Kerr, S. J., "Silt, Turbidity and Suspended Sediments in the Aquatic Environment: An Annotated Bibliography and Literature Review," Southern Region Science and Technology Transfer Unit Technical Report TR-008: Ontario, Canada, pp. 277(1995).
5. Kim, B. C. and Jeong, S. M., "Current Status and Countermeasures of Turbid water in River and Lake in Korea," *Korean Assoc. Conservat. Nature. Conservat. Nature.*, **137**, 1~7(2007).
6. Lloyd, D. S., "Turbidity as a water quality standard for Salmonid habitats in Alaska," *North Am. J. Fisheries Manage.*, **7**(1), 34~45(1987).
7. Seo, J. O., Lee, J. E., Lee, S. G., Yoon, H. G. and Choi, Y. Y., "The Effects of Turbid Water on Fish in Streams and Dan Reservoirs," *In Proceedings of the annual meeting of Korean Society of Environmental Engineers*, KSEE, WorldCup Stadium, Suwon, pp. 700~706(2005).
8. Pitt, R., Clark, S. E. and Lake, D., "Construction site erosion and sediment controls: Planning, design and performance," Destech Publications, Inc., Pennsylvania (2007).
9. Eiswerth, B. A., "An Evaluation Soil Erosion Hazard : A Case Study In Southern Africa using Geomatics Technologies," Ph. D, Univ. of Arizona, pp. 233~237(2003),
10. Caltrans, Construction site best management practice (BMP) field manual and troubleshooting guide. CTSW-RT-02-007. (2003).
11. Kang, M. S., Im, S. J. and Kim, S. M., "Non-point pollution source management plan based on development," *Korean National Committee on Irrigat. and Drainage.*, **47**, 18~25 (2011).
12. Bear, J., "Dynamics of fluids in porous media," Dover Publications, Inc., New York. (1972).
13. Choi, Y. H., Jeong, S. H., Kim, C. Y., Kim, H. S. and Oh, J. H., "Characteristics Evaluation of Non Point Source Treatment Facilities in Construction Site," *J. Korea Soc. Ground Environ. Eng.*, **10**(3), 53~62(2009).
14. Heo, T. J., "A Study on Improvement of a Temporary Sediment Basin Installation for Reducing Suspended Solid from a Construction Site," Master's Dissertation, Seoul National University of Science and Technology Korea (2011).
15. Lee, I. M., Kim, J. H. and Lakshmi, N. R., "Experimental Study of permeability reduction in Soil-Geotextile filter system," - Anisotropic Characteristics-. *J. Korea Soc. Civil Eng. C.*, **20**(3), 229~242(2000).
16. Koo, Y. M., Kim, J. Y., Kim, B. R. and Seo, D. I., "Removal of Suspended Solids from Stormwater Runoff Using a Fabric Filter System," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **37**(3), 165~174(2015).
17. Rowe, R. K. and VanGulck, J. F., "Filtering and drainage of contaminated water," Proc. 4th Int. Conf. on GeoFilters, Stellenbosch, pp. 1~63(2004).
18. Jeong, J. M. and Kim, S. H., "An Experimental Study on the Clogging of Sand Filter in a Model Filtration-Pond," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **35**(9), 681~685(2013).
19. Koo, B. J., Choi, G. W., Choi, W. S., and Song, C. S., "A Comparison of filtering characteristics of various media considering particle size distribution of road runoff," *J. Korea Soc. Water and Wastewater*, **27**(3), 299~312(2013).