석탄저회를 여재로 활용한 건설현장 발생 탁수의 여과특성에 관한 연구 I. 실내 상향류 여과 컬럼 실험

A Study on Filtration Characteristics of Turbid Water in Construction Sites using Bottom Ash as Filter Media I. Lab Scale Upflow Filtration Column Experiment

강은비 · 주진철*[†] · 방기웅* · 김진호 · 박병욱 · 최종수** · 김용혁***

Eun Bi Kang · Jin Chul Joo*[†] · Gi Woong Bang* · Jin Ho Kim ·

Byung Uk Park · Jong Soo Choi** · Yong Hyok Kim***

한밭대학교 환경공학과 · *한밭대학교 건설환경공학과

토지주택연구원 · *한국남동발전(주) 자원순환연구센터

Department of Environmental Engineering, Hanbat National University

*Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University

Land and Housing Institute · *Korea South-East Power Co.

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

Abstract : The feasibility for usage of porous bottom ash with various diameters and high surface areas as filter media to reduce the discharge of suspended solids (SS) in construction sites was investigated. As a filter media in construction site runoffs, the filtration efficiency of bottom ash to reduce the discharge of SS was found to be dependent on the diameter and the distribution of bottom ash, the linear velocity of turbid water, and the inflow SS loadings. Although the filtration efficiency of bottom ash with diameters of 3~6 mm and 10~20 mm significantly decreased as the inflow SS loadings increased, the filtration efficiency of bottom ash with diameters of 6~10 mm was stable despite of the variations in the inflow SS loadings. Additionally, since the overall filtration efficiency of bottom ash filter media was significantly affected by the clogging of the inlet in filter media, the bottom ash with greater diameters was installed in the inlet in filter media, and longer life span of filter media was expected. Compared to other filter media, the filtration efficiency of bottom ash as a filter media was greater and more stable despite of the variations in the inflow SS loadings. Thus, the short-term clogging of bottom ash filter media was protected and greater filtration efficiency of SS can be maintained by efficiently arranging bottom ash of various diameters in construction sites. After the usage of bottom ash as an excellent filter media, the bottom ash can be used as landfill and mixing materials with existing soil at the construction site.

Key Words : Construction Site, Suspended Solids, Bottom Ash, Filtration, Filter Media, Inflow Loadings, Turbid Water, Clogging

요약 : 비교적 입경이 크고 내외부 공극과 표면적이 잘 발달된 다공성 석탄저회를 건설현장 발생 탁수 내 부유물질의 유출 저감에 활용할 수 있는 탁수여재로 적용 타당성을 검토하였다. 석탄저회를 건설현장의 탁수 내 부유물질 유출저감용 여재로 활용 시 부유물질 여과효율은 석탄저회의 입경과 분포, 탁수의 유입선속도 및 부유물질 유입부하량에 따라 결정되는 것으로 조사되었다. 입경 3~6 mm의 석탄저회와 입경 10~20 mm의 석탄저회는 부유물질 유입부하량이 증대됨에 따라 여과효율은 급격히 감소하였으나, 입경 6~10 mm의 석탄저회는 부유물질 유입부하량의 변화에도 가장 안정적인 여과효율을 나타내는 것으로 확인되었다. 또한, 부유물질 전체여과효율은 유입부에 위치한 석탄저회의 폐색에 의해 큰 영향을 받는 것으로 조사되었으므로, 석탄저회를 여재로 적용 시 비교적 큰 입경의 석탄저회를 초기에 탁수와 접촉할 수 있는 유입부에 배치하여 여재 폐색을 지연시켜 장기간 여재로서 활용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 석탄저회 여재는 다른 여재 대비 높은 여과효율을 나타냈고, 부유물질 유입부하가 증가하여도 안정적인 여과효율을 지속하는 것으로 분석되었다. 따라서 강우 시 부유물질 유입부하량이 단기간에 집중되는 건설현장에서는 다양한 입경의 석탄저회를 효과적으로 배치하여 단기간에 여재가 폐색되는 것을 방지하고 높은 부유물질 여과효율을 유지가 가능하며, 여재로 활용 후 건설현장에 지표매립 및 기존 토양과 혼합하여 성토재로 활용이 가능한 현장 적용성이 우수한 여재로 판단된다.

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

1. 서론

2017년 7월 기준 에너지원별 발전전력량 비중이 가스 16.9%, 원자력 30%, 석탄 45.4% 순으로 석탄에너지 비중이 가장 높으며, 신기후체제에 대응해 신재생에너지의 비중이 크게 확대된 2030년에도 석탄에너지의 발전량 비중은

36.1%로 가장 높을 것으로 예상된다.¹⁾ 또한 화력발전소 신규확장 설비는 2029년까지 20기가 추가로 계획되어 있어 석탄 화력발전소의 석탄연소 부산물(coal combustion products)은 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.²⁾ 석탄연소 부산물은 발생위치에 따라 크게 석탄비회(fly ash)와 석탄저회(bottom ash)로 구분할 수 있으며 그중 석탄저회는 총 석탄연소 부산

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

물 전체의 약 20% 가량을 차지한다.³⁾ 물성과 적용성이 상대적으로 우수한 석탄비회는 시멘트 제조 원료, 노천광산의 그라우팅재료, 산성광산배수의 중화처리, 지하광산의 채움재 등의 다양한 분야에서 활용되고 있으나,⁴⁾ 석탄저회는 비교적 입자가 크고 불균질하고 낮은 압축강도를 나타내는 다공성 물질로, 현재까지 대부분 매립재 및 성토재의 단순 용도로 제한적으로 활용되고 있다.^{5,6)}

최근의 국내 석탄저회 재활용 현황을 살펴보면 ‘철강 슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용지침’에 따라 총 15개 항목으로 재활용이 가능하나 대부분 석탄저회는 바닥재로서 사용되거나 단순 매립처리되고 있다.^{7,8)} 국내 실정과 달리 네덜란드의 경우 석탄저회의 매립처리가 금지되어 있으므로 100% 재활용되고 있으며, 독일은 매립처분 비용 상승에 따른 재활용 노력으로 전량 재활용되고 있다.⁸⁾ 일본의 경우 석탄저회를 성토재 뿐만 아니라 토목분야, 건축분야, 농림·수산분야 등 다양한 분야에서 재활용 하고 있다. 비록 다수의 선행연구를 통해 석탄저회 재활용 시 환경 및 생태계에 미치는 위해성은 미미한 것으로 조사되었으나,⁵⁻⁹⁾ 국내에서의 석탄저회 재활용은 주로 수평 배수재 및 연약지반 염분차단용 매립재, 성토재 등의 단순 용도로 제한적으로 활용되고 있으므로 석탄저회의 재활용과 자원화 측면에서 다양한 적용처를 확대할 필요가 있다.³⁾

개발사업장에는 공사 진행과정에서 사업장의 전체 혹은 일부지역에 대해 식생이 제거된 교란된 표토에서 강우 시 상당량의 토사를 포함한 강우유출수(탁수)가 발생하게 된다. 일반적인 개발사업장에서 탁수를 저장하는 기술로는 식생피복, 토양섬유 피복, 토사방지막, 토사받이 등의 침식억제(erosion control)기술과 세류장, 침사지, 가배수로, 오탁방지막, 식생완충대, 인공습지 등의 토사억제(sediment control) 기술이 조합된 BMPs (Best Management Practices)를 적용하고 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 하지만, 강우에 의한 토사침식 및 유출은 강우강도 및 지속시간, 선행강우조건 등의 기후인자, 토양 구조 및 특성, 유기물 함량, 투수성 등의 토양인자, 지표면 경사도 및 길이, 지면 요철정도 등의 지형인자와 식생 종류, 뿌리 분포 및 길이 등의 식생인자에 의해 복합적인 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.¹³⁻¹⁵⁾ 또한 개발사업장 탁수저감을 위한 대부분의 BMPs는 물리적 여과(침전, 흡착, 포획) 공정으로 자갈(gravel), 모래(sand), 실트(silt) 등을 제거한 후 점토(clay)와 같은 미세입자의 경우 고분자 계열 응집제를 활용한 여과-응집공정을 연계해 운영한다.^{16,17)}

기존의 건설현장 강우유출수(탁수) 처리 시 물리적 여과공정에 활용된 여재로는 anthracite (AC), polyurethane (PU), polypropylene (PP)가 있는데 이러한 여재는 초기에는 50%의 부유물질(suspended solids, SS) 여과효율을 보였으나 20분 이상 여과 시 여과효율이 급격히 낮아지는 것으로 보고되고 있다.¹⁸⁻²⁰⁾ 또 쇄석과 석탄저회의 폐색(clogging)현상에 관한 연구에 따르면 쇄석 100%로 시공된 경우 초기 투수능이 가장 크게 나타났으나 시간이 경과함에 따라 쇄석간의 공극 사이에 점토입자들의 침입으로 인해 폐색현상이 가장

빠르게 발생해 배수능이 점차 저하되었고 석탄저회와 혼합하여 사용한 경우 폐색이 지연되는 것으로 보고되었다.²¹⁾ 따라서 부유물질 제거용 적정 여재의 선정은 여과속도 및 여과효율, 여과장치의 수명과 크기 등에 큰 영향을 미칠 수 있다. 초기에 발생하는 기타 비점오염원(도로, 교량, 산지) 대비 비교적 높은 부유물질 부하가 단기간에 집중되는 건설현장 탁수의 경우 기존 비점오염처리장치에 주로 활용되는 입경이 작은 여재의 적용은 단기간에 여과효율 저하와 여과장치 수명을 단축시킬 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 비교적 입경이 크고 다양한 크기와 모양의 입경이 혼재되며, 내외부 공극과 표면적이 비교적 잘 발달된 다공성 석탄저회를 탁수 내 부유물질의 유출저감에 활용할 수 있는 건설현장 탁수여재(filter media)로 적용 타당성을 검토해 보고자 한다.

본 연구의 주요 목적은 (1) 다양한 유입선속도(v)와 석탄저회의 입경크기(d) 조합에 따른 부유물질 제거효율(removal efficiency) 분석, (2) 석탄저회 여과컬럼의 구간별 수두변화(Δh) 관측을 통한 투수계수(K)의 변화 분석 및 폐색구간(clogging zone)도출, (3) 누적접근법(cumulative approach)과 부유물질 물질수지(mass balance) 분석을 통한 석탄저회 단위면적과 단위중량당 부유물질 여과량(filtered amount) 산출 및 (4) 기존 다른 여재와의 여과성능 비교를 통한 석탄저회의 건설현장 탁수여재로의 적용 타당성 검토이다. 본 연구를 통해 도출된 결론을 통해 건설현장 탁수 내 부유물질의 유출저감에 영향을 미치는 다양한 복합인자를 종합 고려한 석탄저회 여재의 입경배치(안)의 도출이 가능하고 건설현장 탁수 내 부유물질의 유출저감에 최적화된 석탄저회 여재 적용 시 설계인자 제공이 가능하리라 판단된다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 석탄저회의 물리화학적 특성 분석

본 연구에서는 국내 N 화력발전소에서 발생된 석탄저회(bottom ash, BA)를 여재로 활용하였으며, 다양한 입경의 석탄저회 여과를 통한 탁수 내 부유물질 여과효율을 평가하기 위해, 석탄저회는 재활용 허가를 받은 상용화 제품의 입경을 근거로 각각 3~6 mm, 6~10 mm, 10~20 mm로 분류하였다. 분류된 석탄저회에 잔류하는 일부 분진을 수돗물로 세정 후 상온에서 24시간 건조 후 사용하였으며, 물리적 특성을 분석하기 위해 비표면적과 공극부피와 공극크기 등을 조사하였으며, 구체적인 조사방법은 Kim 등²²⁾에 제시되었다.

2.2. 인공탁수

기존 연구에 따르면 강우 시 나대지에서 연간 30~80톤/ha의 토사와 오염물질이 유실되고,²³⁾ 건설현장에 따라 매우 다양한 농도의 부유물질을 포함한 탁수가 발생하는 것으로 보고되고 있다.^{24,25)} 따라서 본 연구에서는 건설현장에서 강우 시 발생하는 일정농도 이상의 탁수를 인공적으로 모사

하기 위하여 실제 건설현장에서 채취한 토사와 수돗물을 혼합하여 인공탁수를 제조하였다. 채취한 건설현장의 토사는 협잡물과 큰 입자가 침전하는 것을 방지하기 위해 체분식을 실시하였으며, 입경(d) 180 μm 인 80번체를 통과한 토사와 수돗물을 혼합 후 지속적으로 교반하여 상등액(supernatant)을 채수하였다. 이러한 상등액은 PVC 소재의 1 m^3 의 주입조(inflow tank)로 이송 후 지속적으로 교반하여 석탄저회 여과 컬럼 주입 전에 일정한 농도($\text{SS} \geq 500 \text{ mg/L}$)를 유지하며 유입시켰다.

2.3. 석탄저회로 충전된 여과 컬럼

석탄저회로 충전된 여과 컬럼은 원기둥 형태로 직경(D) 8 cm, 높이(H) 50 cm로 제작되었으며, 유입조와 유출조 및 천공된 스테인리스 거름망을 상단과 하단에 각각 설치하여 탁수의 유입속도(v)와 부유물질농도(C_{ss})를 균등화하였다. 또한 석탄저회 여과 컬럼 통과 길이에 따른 부유물질의 여과효율을 평가하기 위해 10 cm 간격으로 채수구(sampling port)를 제작하였다.

여재의 입경 분포는 투수계수(K)와 수두(h) 분포를 결정하고 이는 다시 여과장치내의 체류시간(retention time)을 결정하므로 여재의 입경 분포를 적절하게 조절하는 것은 여과장치의 설계에 중요한 요소 중 하나이다.^{26,27)} 즉, 투수계수가 크다면 수두손실이 낮아 장치의 처리 용량은 증가하겠지만 여재로의 흡착, 침전, 포획을 유도할 만큼의 충분한 체류시간을 확보하지 못할 수 있다.^{20,27)} 본 연구에서는 폐색현상을 직접 관측하기 위해 각 채수구에 3-way valve를 설치하여 채수와 함께 피에조미터(piezometer)를 연결하여 석탄저회 여과 컬럼 내 구간별 총 수두(h_T) 변화를 실험 진행 동안 관찰할 수 있도록 하였다. 구체적인 석탄저회 여과 컬럼의 제원과 석탄저회 여과효율 평가실험 장치의 전경은

Fig. 1에 제시되었다.

Darcy의 법칙(식 (1))에 따르면 석탄저회 입자 사이를 통과하는 탁수 유출유량(Q)은 투수계수(K)와 수리학적 구배(dh/dL) 및 흐름단면적(A)으로 산출할 수 있으며, 동일 유량 조건에서 여재 공극의 폐색으로 인한 투수계수가 감소 시 총 수두(h_T)가 증대됨을 알 수 있다. 따라서 석탄저회 여과 컬럼 구간별 총 수두 변화를 관측하여 석탄저회 여재 공극의 폐색시기와 구간을 예측할 수 있다.

$$Q = -K \cdot \frac{dh}{dL} \cdot A \quad (1)$$

여기서, Q 는 탁수 유출유량(cm^3/min), K 는 투수계수(cm/min), h 는 탁수 수두(cm), L 은 탁수 이동거리(cm), A 는 석탄저회 여과컬럼 총단면적(cm^2)을 의미한다.

2.4. 여과 컬럼을 통한 부유물질 여과실험

기존 연구²⁸⁻³²⁾에 따르면 여재의 여과효율은 여재의 입경과 분포, 여재 공극률, 여재층의 깊이, 유체의 여과선속도, 부유물질 유입부하 등에 따라 결정되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 여과효율을 결정하는 주요 인자로 보고되는 유입탁수의 여과선속도(v)와 석탄저회의 입경(d)을 조합하여 실험계획을 작성하였다. 유입 여과선속도는 정량펌프를 이용해 각각 200 m/d , 500 m/d , 1000 m/d 로 조절하였고, 충전된 석탄저회의 입경은 각각 3~6 mm, 6~10 mm, 10~20 mm로 분류하여 총 9회 여과실험을 실시하였다. 유입 탁수는 일정농도의 부유물질 농도를 유지하기 위해 주입조에서 입자가 침전되지 않도록 수중펌프를 활용해 지속적으로 교반하여 공급하였으며, 부유물질 물질수지 분석과 유출조에 누적된 부유물질을 분석하기 위해 유출조에서도

Fig. 1. Schematic diagram and pictorial view of lab-scale filtration column apparatus using bottom ash and simulated turbid water.

지속적으로 유출수를 누적하여 포집하였다. 여과효율은 석탄저회 여과컬럼 전체와 여재층전 높이별 부유물질 여과효율을 분석하기 위해 Fig. 1에 제시된 석탄저회 충전 여과컬럼의 ports 1(inflow), 3, 5와 outflow에서 일정시간 간격으로 시료를 채수하여 부유물질농도(C_{ss})와 부유물질 부하량($Load_{ss}$)을 분석하였다.

2.5. 부유물질 물질수지 분석

석탄저회에 여과(침전, 흡착, 포집)된 탁수 내 부유물질 물질수지분석을 통해 석탄저회 단위면적과 단위중량당 여과된 SS(g)양을 산정하였다. 부유물질 물질수지식은 식 (2)~(4)를 활용하였으며, 부유물질의 유입량(M_{in}) 및 유출량(M_{out})은 특정 여과시간(t)에 측정된 유입 및 유출탁수의 SS농도(C_{ss})와 유량(Q)을 활용해 누적하여 산정하였다.

$$\text{Inflow Mass} = \sum_{t=0}^{t=T} [C_{in}(t) \cdot Q_{in}(t)] \quad (2)$$

$$\text{Outflow Mass} = \sum_{t=0}^{t=T} [C_{out}(t) \cdot Q_{out}(t)] \quad (3)$$

Mass of SS filtered in bottom ash at time T , =

$$\sum_{t=0}^{t=T} [C_{in}(t) \cdot Q_{in}(t)] - \sum_{t=0}^{t=T} [C_{out}(t) \cdot Q_{out}(t)] \quad (4)$$

여기서, $C_{in}(t)$ 과 $C_{out}(t)$ 은 특정 여과시간(t)에 측정된 부유물질의 유입과 유출농도(mg/L), 그리고 $Q_{in}(t)$ 과 $Q_{out}(t)$ 은 특정 여과시간(t)에 측정된 탁수의 유입과 유출유량(L/min)을 의미한다.

또한 석탄저회 여재층 내 포집된 SS(g) 중량을 산정하기 위해서 부유물질 농도(C_{ss})와 유량(Q)을 고려하여 물질수지를 활용해 각 석탄저회에 여과된 부유물질 중량을 산정하였다. 산정된 부유물질 중량을 활용해 석탄저회 여재 단위중량(kg)당 SS(g) 여과량(식 (5))과 석탄저회 여재 단위면적(m^2)당 SS(g) 여과량(식 (6))을 산정하였다.

$$g\text{-SS/kg-BA} = \frac{M_{in} - M_{out}}{W_{BA}} \quad (5)$$

$$g\text{-SS}/m^2\text{-BA} = \frac{M_{in} - M_{out}}{SA_{BA}} \quad (6)$$

여기서, W_{BA} 는 여과 컬럼 내 석탄저회의 중량(kg), SA_{BA} 는 여과 컬럼 내 탁수 흐름방향에 수직인 석탄저회의 단면적(m^2)을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 석탄저회의 표면 특성

Table 1에 제시된 바와 같이 석탄저회의 비표면적은 입경 크기의 증대에 따라서 감소하는 것으로 조사되었으며 석탄저회의 입자크기가 작을수록 비표면적이 확대되고 공극부피와 공극크기가 감소되어 탁수 내 비교적 작은 미세 크기의 부유물질을 효과적으로 여과하여 탁수 내 부유물질 여과효율이 우수할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에 활용된 모든 석탄저회는 입경분포와 균등계수 및 곡률계수를 고려 시 비교적 균질한 입자로 분류되었다(Table 2). Fig. 2에 제시된 SEM 분석결과, 석탄저회의 표면은 비교적 거칠고 다양한

Table 1. Physicochemical properties of bottom ash used in this study

Range (mm)	BET Surface area (m^2/g)	Pore volume (cm^3/g)	Pore size (nm)
3~6	0.0393	5.4×10^{-5}	5.45
6~10	0.0349	7.2×10^{-5}	7.32
10~20	0.0252	7.0×10^{-5}	22.23

Table 2. Particle size specification of bottom ash

Range (mm)	Diameter (mm)			Coefficient of uniformity ($C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$)	Coefficient of curvature ($C_g = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$)
	d_{10}	d_{30}	d_{60}		
3~6	4.2	4.6	5.8	1.38	0.86
6~10	9.2	9.8	10.0	1.14	1.01
10~20	11.5	12.1	12.5	1.08	1.01

Fig. 2. Scanning electron microscopy/Energy dispersive X-Ray spectroscopy (SEM/EDS) results of bottom ash used in this study.

공극을 형성하고 있는 것을 확인할 수 있으며 이러한 다양한 크기의 내외부 공극의 발달을 통해 부유물질을 효과적으로 여과할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 SEM-EDS 분석 결과, Al, Si, K, Fe, Ti 등의 원소가 표면에 분포함을 확인할 수 있었으나, 각종 중금속의 표면 분포는 확인되지 않았으므로 석탄저회를 건설현장 탁수 여재로 재활용 시 표면에 존재하는 중금속 용출로 인해 환경에 미치는 위해성은 미미할 것으로 판단된다.

3.2. 석탄저회 여재 입경 별 부유물질 여과효율 평가

동일한 여과선속도(v)에서 석탄저회 여재 입경 별 부유물질 여과효율은 Fig. 3에 제시하였다. 여과선속도가 200 m/d 인 경우(Fig. 3(a)) 석탄저회 여재 입경 별 여과효율 변화는 크지 않았으나, 여과선속도가 증가할(≥ 500 m/d) 경우 여재 입경변화에 따라 여과효율의 급격한 변화가 발생하였다. 이는 낮은 여과선속도에서는 부유물질 유입부하량(inflow loading)이 낮아 여과 중 폐색되지 않으므로 여재의 입경 크기와 무관하게 높은 여과효율이 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 예를 들어, 여과선속도 500 m/d에서(Fig. 3(b)) 입경 6 mm 이상의 석탄저회는 실험기간 동안 공극이 폐색되지 않고 40% 이상의 여과효율을 유지하였으나, 입경 3~6

mm의 석탄저회의 경우 유입부하량이 증대됨에 따라 입경 사이 공극이 단기간에 폐색되어 여과효율이 급감한다. 또한, 여과선속도가 1,000 m/d로 증가되는 경우(Fig. 3(c)), 일정시간($t \geq 100$ min) 이후에는 부유물질 유입부하량의 지속 유입으로 인해 실험에 사용된 입경 20 mm 미만의 석탄저회는 한계 여과량에 도달하여 모두 폐색되어 여재로서 기능을 상실하는 것으로 조사되었다.

유사한 연구결과로 다양한 여재를 적용한 부유물질 여과 효율과 비교 결과, 여과선속도가 200 m/d 이하인 경우는 시료의 입경에 무관하게 90% 이상의 여과효율을 보였으나 여과선속도가 증가할수록 폐색으로 인해 여과효율이 감소하는 경향을 나타냈다.^{12,19,30)} 또한 하천수를 지하에 인공함양 시 탁수 주입에 의한 막힘 특성의 연구에서도 하천수 내 부유물질 제거효율과 막힘현상은 여재 입경과 부유물질 유입부하량의 함수에 의해 결정되는 것으로 보고하였다.^{20,32)}

3.3. 탁수 여과선속도 별 부유물질 여과효율 평가

동일한 입경(d)의 석탄저회에서 여과선속도(v)의 변화에 따른 부유물질 여과효율은 Fig. 4에 제시되었다. 동일한 입경의 석탄저회의 경우, 여과선속도가 느릴 때 부유물질 유입부하량의 감소로 폐색이 되기까지 비교적 높은(50~60%)

Fig. 3. Comparison of removal efficiency of suspended solids for various linear velocity in terms of the changes in diameter of bottom ash.

Fig. 4. Comparison of removal efficiency of suspended solids for various bottom ash with different diameters in terms of the changes in linear velocities.

부유물질 여과효율이 유지되는 것으로 조사되었다. 그러나 여과선속도가 증가하는 경우($v \geq 500$ m/d) 부유물질 유입부하량의 증대로 단기간에 공극 폐색이 진행되어 부유물질 여과효율이 급격히 감소한다.

석탄저회 입경 3~6 mm의 경우(Fig. 4(a)) 200 m/d의 여과선속도에서 부유물질 유입부하량이 상대적으로 낮아 공극 폐색이 실험기간 동안 발생하지 않으므로 비교적 높은 여과효율을 유지하나, 여과선속도 500 m/d 이상에서는 공극이 단기간에 폐색된다. 반면 비교적 공극이 발달된 10~20 mm의 석탄저회는 높은 여과선속도($v = 1000$ m/d)에서만 폐색이 발생한다(Fig. 4(c)). 따라서 석탄저회를 건설현장의 탁수 내 부유물질 유출저감용 여재로 활용 시 부유물질 여과효율은 석탄저회의 입경(d)과 분포, 탁수의 유입선속도(v) 및 부유물질 유입부하량(inflow loading)에 따라 결정되는 것으로 판단된다.

3.4. 석탄저회 여재 입경 별 수두변화 및 폐색구간 예측

기존 연구에 따르면, 다양한 여재의 여과효율을 변화시키는 주요 인자 중의 하나로 여재의 공극 폐색현상을 주장하였다.^[19,20] 실제 폐색은 탁수 내의 부유물질이 여재에서 침전, 포집, 흡착기작으로 여과되어 부동성 입자들이 여재 공극을

포화시켜 발생하며,^[33~35] 폐색이 발생하면 통수기능 저감과 더불어 여재의 수명단축을 초래하므로 폐색의 발생시기와 구간은 여과조 설계 및 운영의 주요인자로 알려져 있다.^[34]

본 연구에서 관측된 다양한 입경의 석탄저회 여재층 구간별 수두변화(Δh) 및 투수계수(K) 변화를 Fig. 5에 제시하였다. 석탄저회 입경이 3~6 mm 경우, 여과선속도 1,000 m/d에서는 단기간에 다량의 부유물질의 유입으로 인해 공극이 폐색되어 탁수 흐름이 방해되어 석탄저회 여과 컬럼 내 수두 손실이 단기간에 발생되었다(Fig. 5(a)). 이로 인해 총수두차(Δh_T)와 총투수계수(K_T)의 급격한 변화가 발생한 반면, 여과선속도 500 m/d 미만에서는 부유물질의 점진적인 유입으로 인해 총수두차와 총투수계수의 완만한 변화가 발생하였다. 또한, 여과선속도 1,000 m/d의 경우, 석탄저회 여과 컬럼 유입부(0~10 cm)에서는 석탄저회 내 공극 폐색에 따라 수두(Δh_{12})와 투수계수(K_{12})의 급격한 변화가 발생한 반면 석탄저회 여과컬럼의 중간층(10~20 cm)에서는 여과시간이 지속되어도 수두(Δh_{23})와 투수계수(K_{23})의 변화는 유입부 대비 변화의 폭이 크지 않았다(Fig. 5(b)). 유사한 연구에서 다양한 침투 및 수두조건에서 부유물질은 여과컬럼의 유입부 25% 깊이에서 부유물질 총량의 70% 이상이 여재 공극을 폐색하면서 여과되는 것으로 조사되었다.^[35,36]

Fig. 5. Changes in both hydraulic conductivity and head difference with different diameters of bottom ash and different linear velocities.

석탄저회 입경이 비교적 큰 경우($d \geq 6$ mm), 높은 여과선 속도($v \geq 500$ m/d)에서는 수두차(Δh)와 투수계수(K)가 변화하였으나($p < 0.05$), 낮은 여과선속도($v = 200$ m/d)에서는 수두차(Δh)와 투수계수(K)의 유의할만한 변화가 관측되지 않았다($p > 0.05$) (Fig. 5(c), 5(e)). 여과선속도가 1,000 m/d에서는 입경 10 mm 미만의 석탄저회 경우 비교적 선형으로 수두차는 증가하고 투수계수는 감소하는 경향을 보였으나, 입

경 10 mm 이상의 석탄저회 경우 수두차와 투수계수가 일관성 없이 변화하였다(Fig. 5(e)). 이는 큰 입자의 여재를 사용 시 여재 내의 공극이 비교적 크게 발달되어 부유물질에 의한 폐색 속도도 느리고 수두손실도 낮기 때문인 것으로 판단된다.

유사한 연구결과로 ‘여재 조건에 따른 강우유출수 침투 시설의 폐색특성’에서³⁶⁾ 큰 입경의 여재 대비 작은 입경의

여재에서 폐색이 비교적 빠르게 발생하였는데 이는 강우유출수 내의 부유물질과 용존성 입자들이 여재에서 침전, 걸림, 흡착현상으로 제거되어 여과된 부유물질들이 여재 공극을 폐색하여 발생한 것으로 조사되었다. 따라서 탁수 내 부유물질의 전체여과효율은 유입부에 위치한 석탄저회의 폐색에 의해 큰 영향을 받는 것으로 조사되었으므로, 건설현장 발생 탁수 내 부유물질 유출저감에 석탄저회를 여재로 적용 시 비교적 큰 입경의 석탄저회를 초기에 탁수와 접촉할 수 있는 유입부에 배치하여 여재 폐색을 지연시켜 장기간 여재로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

3.5. 누적접근법과 물질수지를 활용한 석탄저회 여재 효율 평가

본 연구에서는 폐색 등의 원인으로 비교적 단기간에 여과 실험이 종료되어 실험적으로 단위면적 및 단위중량당 여과된 최대 SS양은 산출하지 못했으며, 데이터의 일부 부재로 인해 Sigmoidal 또는 Langmuir model을 이용해 최대 SS양의 예측도 불가하였다. 따라서 누적접근법(cumulative approach)과 부유물질 물질수지(mass balance) 분석을 통한 석탄저회 단위면적과 단위중량당 부유물질 여과 경향을 산출한 결과는 Fig. 6에 제시되었다.

유입수와 유출수 내 부유물질 농도 차이를 기반으로 한 단순 부유물질 여과결과와 동일하게, 입경 3~6 mm 석탄저회의 경우 유입선속도가 낮을수록 많은 양의 부유물질을 여과하는 것으로 확인되었으며, 반면에 유입선속도가 빠른 경우 탁수 내 부유물질이 여과되지 못하고 탈리되어 유출수를 통해 배출되어 석탄저회의 공극 내 여과되지 못하는 것으로 조사되었다. 반대로 비교적 공극과 채널이 발달된 입경 6~10 mm 석탄저회의 경우 유입선속도가 높은 경우(1,000 m/d)에 다량의 부유물질을 여과하는 것으로 조사되었다. 따라서 석탄저회의 탁수 내 부유물질 유출저감량은 석탄저회의 입경(d)과 탁수의 유입선속도(v) 및 부유물질 유입부하량(inflow loading)의 함수인 것으로 확인되었다.

동일한 부유물질 유입부하량(180 g)이 여과 컬럼 내 주입된 경우, 유입선속도에 관계없이 입경 10 mm 미만 석탄저회의 부유물질 여과량이 비교적 높게 산출된 반면 입경 10 mm 이상 석탄저회의 경우 유입선속도에 관계없이 여과된 부유물질량이 낮은 것으로 조사되었다. 이러한 결과를 통해 큰 입경의 여재는 공극과 채널이 비교적 잘 발달되어 있어 여과 효율이 감소되며 편류(channeling)를 통해 부유물질이 유출되는 것으로 판단된다. 따라서 투수계수와 수두변화의 결과와 동일하게, 누적접근법과 부유물질 물질수지 분석을

Fig. 6. Comparison in filtered amount of SS based on unit weight and surface area of bottom ash with different diameters of bottom ash and different linear velocities.

Fig. 7. Comparison in filtered amount and removal efficiency of SS based on mass balance with different diameters of bottom ash and different linear velocities.

통해서도 작은 입경의 석탄저회일수록 석탄저회 단위면적과 단위중량당 비교적 다량의 부유물질을 여과하는 것으로 분석되었으나 단기간에 폐색이 우려된다. 따라서 건설현장의 탁수 내 부유물질의 유출저감에 석탄저회를 적용할 경우 큰 입경의 석탄저회를 전단부에 설치하고 비교적 폐색이 빠른 작은 입경의 석탄저회를 후단부에 설치하여 장기간 투수능을 유지하고 여재의 폐색을 지연시키며 높은 여과효율을 지속할 수 있으리라 판단된다.

여과선속도 1,000 m/d에서 여과 실험 60분 이후에 폐색 현상이 발생하여 동일한 시간(60분)을 기준으로 석탄저회 입경과 여과선속도의 변화에 따른 부유물질 여과효율과 석탄저회 여과 컬럼 내 여과된 부유물질을 질량수지로 분석하여 Fig. 7에 제시하였다. 분석결과, 비교적 유입선속도가 낮을수록 높은 비율의 부유물질이 석탄저회 여과 컬럼 내에 여과가 가능하나 유입선속도 증가에 따라 부유물질이 석탄저회 여과 컬럼 내에 여과하는 비율이 감소하였다. 그러나 입경 6~10 mm 석탄저회의 경우 여과선속도의 변화에 관계없이 상대적으로 높은 여과효율을 나타냈으며, 다량의 부유물

질을 여과하였다.

반면에 입경 3~6 mm의 석탄저회는 유입선속도가 낮은 경우(200 m/d) 부유물질 여과량이 비교적 높았으나 유입선속도가 증가할수록 부유물질 여과량은 현저하게 감소하였으며, 입경 10~20 mm의 석탄저회도 마찬가지로 유입선속도가 증대됨에 따라 여과효율은 급격히 감소하였다. 이러한 결과를 통해, 입경 6~10 mm 석탄저회가 탁수의 유입선속도(v) 및 부유물질 유입부하량(inflow loading)의 변화에도 가장 안정적인 여과효율을 나타내는 것으로 확인되었다.

3.6. 석탄저회 여재와 기존 여재와의 여과효율 비교

기존의 연구에서 탁수 내 부유물질 유출저감을 위해 주로 적용되는 여과장치 내 여재로는 zeolite, 화산석, 자갈, 발포성 고분자 계열 등이 있다. 기존 연구에 따르면 대부분의 여과장치는 여과 초기에는 우수한 부유물질 여과효율을 나타냈으나 일정시간 이상 여과 시 부유물질 여과효율이 급격히 낮아지므로 역세척이나 여재 교체를 통해 유지관리를 해야 하는 것으로 보고되고 있다.^{37,38)} 기존의 여과여재 실험

Fig. 8. Comparison in removal efficiency of SS among various types of filter media in terms of loading flux of SS.

대부분의 실험시간이 단기간(60분 이내)으로 진행되었으므로 정확한 여재의 효율비교를 위해 여과 실험시간 60분에서의 단위면적당 단위시간당 부유물질 여과량(flux)을 산정하여 여과효율 및 여과량을 비교 및 분석하였다.

동일한 부유물질 유입량 기준으로 기존 연구의 다양한 여재와 본 연구의 석탄저회의 부유물질 여과량 분석결과는 Fig. 8에 제시하였다. 석탄저회의 경우 동일한 부유물질 유입부하($100 \text{ kg/m}^2/\text{d}$)에서 다른 여재 대비 높은(>60%) 여과효율을 나타냈고, 부유물질 유입부하가 증가하여도 40% 이상의 안정적인 여과효율을 지속하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과를 통해 탁수 내 부유물질의 유출저감에 사용되는 다양한 여재 중 다공성 석탄저회가 비교적 입경이 크고 다양한 크기와 모양의 입경이 혼재되며, 내외부 공극과 표면적이 비교적 잘 발달된 비교적 우수한 여과 여재임을 확인할 수 있었다.

일반적으로 건설현장의 경우 유량가중평균농도(EMC)가 약 650~3,120 mg/L 범위로 매우 높은 수준이며,^{26,27)} 이로 인해 강우 시에 부유물질 유입부하량이 단기간에 집중되는 사실을 고려하면 건설현장에서는 다양한 입경의 석탄저회를 효과적으로 배치하여 단기간에 여재가 폐색되는 것을 방지하고 높은 부유물질 여과효율을 유지하면 지속가능한 탁수 내 부유물질의 유출저감이 가능하다고 판단된다. 또한 다른 여재는 여재로서의 기능을 상실한 후 교체나 수거를 해야 하지만 석탄저회의 경우 여과 여재로 활용 후 건설현장에 지표매립 하여도 환경에 미치는 위해성은 미미하기 때문에 사용 후 수거가 불필요하며 기존 토양과 혼입하여 성토재로 활용이 가능하여 현장 적용성이 우수한 여재로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 비교적 입경이 크고 다양한 크기와 모양의 입경이 혼재되며, 내외부 공극과 표면적이 비교적 잘 발달된 다공성 석탄저회를 탁수 내 부유물질의 유출저감용 건설현장 탁수여재(filter media)로 적용 타당성을 검토하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론이 도출되었으며, 이러한 결론을 통해 건설현장 탁수 내 부유물질의 유출저감에 영향을 미치는 다양한 복합인자를 종합 고려한 석탄저회 여재의 입경배치(안)의 도출이 가능하며 석탄저회 여재 적용 시 설계인자 제공이 가능하리라 판단된다.

1) 석탄저회를 건설현장의 탁수 내 부유물질 유출저감용 여재로 활용 시 부유물질 여과효율은 석탄저회의 입경(d)과 분포, 탁수의 유입선속도(v) 및 부유물질 유입부하량(inflow loading)에 따라 결정되는 것으로 조사되었다.

2) 탁수 내 부유물질의 전체여과효율은 유입부에 위치한 석탄저회의 폐색에 의해 큰 영향을 받는 것으로 조사되었으므로, 건설현장 발생 탁수 내 부유물질 유출저감에 석탄저회를 여재로 적용 시 비교적 큰 입경의 석탄저회를 초기에 탁

수와 접촉할 수 있는 유입부에 배치하여 여재 폐색을 지연시켜 장기간 여재로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

3) 입경 3~6 mm의 석탄저회는 유입선속도가 낮은 경우 (200 m/d) 부유물질 여과량이 비교적 높았으나 유입선속도가 증가할수록 부유물질 여과량은 현저하게 감소하였으며, 입경 10~20 mm의 석탄저회도 유입선속도가 증대됨에 따라 여과효율은 급격히 감소하였다. 그러나 입경 6~10 mm 석탄저회는 탁수의 유입선속도(v) 및 부유물질 유입부하량(inflow loading)의 변화에도 가장 안정적인 여과효율을 나타내는 것으로 확인되었다.

4) 석탄저회는 다른 여재 대비 높은(>60%) 여과효율을 나타냈고, 부유물질 유입부하가 증가하여도 40% 이상의 안정적인 여과효율을 지속하는 것으로 분석되어 비교적 우수한 여과 여재임을 확인하였다. 강우 시 부유물질 유입부하량이 단기간에 집중되는 건설현장의 탁수 내 부유물질의 유출저감에 석탄저회를 적용 시 큰 입경의 석탄저회를 전단부에 설치하고 작은 입경의 석탄저회를 후단부에 설치하여 높은 부유물질 여과효율을 유지하면 지속가능한 탁수 내 부유물질의 유출저감이 가능하다. 석탄저회는 여과 여재로 활용 후 건설현장 지표매립 및 기존 토양과 혼입하여 성토재로 활용이 가능하므로 현장 적용성이 우수한 여재로 판단된다.

Acknowledgement

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

KSEE

References

1. An, J. G., "Study on the Achievement of Long-term Greenhouse Gas Reduction Targets in Power Generation Sector," Korea Energy Economics Institute, (2017).
2. Choi, W. S., Lee, S. E. and Gwon, S. M., "Eighth Basic Plan for Electricity Supply and Demand," Ministry of Trade, Industry and Energy, (2017).
3. Mang, J. H., Kim, T. Y. and Seo, D. H., "Minimizing Environmental Impact in Accordance with the Thermal Power Plant Ash Management(I)," Korea Environment Institute (2014).
4. Skousen, J., Ziemkeiwicz, P. and Yang, J. E., "Use of coal combustion by-products in mine reclamation: review of case studies in the USA," *Geosy. Eng.*, **15**(1), 71~83(2012).
5. Lee, S. C., Jung, J. H. and Lee, J. H., "Environmental Risk evaluation of bottom ash leachate for recycling as embankment materials," *J. Korean Soc. Environ. Technol.*, **17**(4), 332~339 (2016).
6. Kim, S. U., Kim, Y. G., Lee, S. M., Park, H. C., Kim, K. K., Son, H. J., Yun, S. W., Kim, S. Y. and Hong, C. O.,

- "The Effect of Bottom Ash in Reducing Cadmium Phytoavailability in Cadmium-contaminated Soil," *Korean J. Environ. Agr.*, **35**(2), 152~157(2016).
7. Cho, H. N. and Maeng, J. H., "A Study on Eco-friendly Use of Coal Ash at Mine Reclamation Sites," *J. Korea Soc. Waste Management*, **33**(4), 328~337(2016).
 8. Jeon, T. W., Park, J. E., Hwang, D. G., Hong, S. Y., Shin, S. K., Oh, G. J., Kang, Y. Y., Um, N. I., Jeong, Y. W. and Jeong, S. K., "The Study on Recycling Availability and Use Expansion of Coal Ash," National Institute of Environmental Research, (2014).
 9. Lee, S. J., Kim, Y. K., Lee, T. Y., Shin, M. H. and Hwang, S. K., "A Study on Application as fill materials of Bottom Ash and Tire Shred by Field Test Embankment," *Korean Geotechnical Society*, **2010**, 1032~1039(2010).
 10. Choi, Y. H., Jeong, S. H., Kim, C. R., Kim, H. S. and Oh, J. H., "Characteristics Evaluation of Non Point Source Treatment Facilities in Construction Site," *J. Korean Geo-Environ. Soc.*, **10**(3), 53~62(2009).
 11. Bae, S. K. and Choi, S. Y., "Turbidity Reduction of the Turbid Water by Dredging," *Proc. Korea Water Resour. Assoc. Conference*, **2011**, 207~211(2011).
 12. An, T. J., "Plans to Reduce Soil Erosion and Similarities in Construction Sites," *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **31**(6), 39~45(1998).
 13. Park, B. K., Ju, S. H., Park, M. S., Lee, S. I. and Choi, J. D., "Study on the Connection between Turbidity-SS Flow Changes in Rainfall," *Proc. Korean Soc. Agric. Eng. Conference*, **2016**, 89~89(2016).
 14. Eiswerth, B. A., "An Evaluation Soil Erosion Hazard : A Case Study In Southern Africa using Geomatics Technologies," *Arizona Univ.*, **64**(9), 233~237(2003).
 15. Choi, J. S., "A Study on Pollutant Removal Efficiency of Vertical Flow-Horizontal Flow Constructed Wetlands Using Functional Filter Media for the Primary Treatment of Sewage and Lake Water," Gyeongsang National Univ., (2014).
 16. Kang, J. H., "Turbidity Reduction for Construction Runoff Using Polyacrylamide," *Proc. Korea Water Resour. Assoc. Conference*, **2012**, 237~241(2012).
 17. Lee, S. H., Kwon, H. H., Oh, M. A., Lee, J. Y. and Kim, D. M., "Feasibility Tests for Treating Fine Suspended Solids from Mining Drainage, using Various Media by Column Methods - A Case from H Coal Mine," *J. Soil and Groundwater Environ.*, **17**(6), 112~118(2012).
 18. Kim, S. B. and Lee, W. T., "Reduction of Suspended Solids in First Flush from a Building Rooftop using Various Media," *J. Korea Soc. Environ. Eng.*, **39**(4), 214~219(2017).
 19. Lim, C. S., Kim, D. G. and Ko, S. O., "Evaluation of Down-flow Granular Media Filtration for Stormwater Treatment," *J. Korea Soc. Environ. Eng.*, **34**(10), 684~693(2012).
 20. Yang, J. S., Kim, I. H. and Jeong, J. H., "A study on the application of modified hydraulic conductivity to consider turbid water for open-cut riverbed infiltration process: numerical modeling approach," *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **49**(9), 741~748(2016).
 21. Lee, D. Y., "An Experimental Study on Shear Strength and Clogging Characteristics of Bottom Ash and Rammed Aggregate Mixture Compaction Pile," Hanyang Univ., (2010).
 22. Kim, J. H., Joo, J. C., Kang, E. B., Choi, J. S. and Kim, Y. H., "Assesment of Heavy Metal Leaching and Ecological Toxicity of Reused Coal Bottom Ash for Construction Site Runoff Control," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **33**(6), 561~570(2018).
 23. Park, H. K., "Environmental Damages and Control Measures By Highland Agriculture-Study on System Improvement," Kangwon Univ., (2006).
 24. Park, H. J., "Relation Analysis Between Soil Grading and SS Concentration of Discharge Water at Bare Area," Kwang-woon Univ., (2003).
 25. Ezequie, Q. S., Kim, L. H., Jeong, S. M. and Lee, B. S., "A Laboratory Study on the Filtration and Clogging of the Sand-Bottom Ash Mixture for Stormwater Infiltration Filter Media," *Water*, **9**(1), 32(2017).
 26. Kim, T. G., "Study on properties of removal by filtration device for non-point source pollution in urban area," Korea Univ., (2009).
 27. State of California Department of Transportation, "Construction site best management practice field manual and troubleshooting guide," CTSW-RT-02-007, (2003).
 28. Kang, S. W. and Lee, T. Y., "Recycling of Wood Waste Generated from Construction Sites for Removal of Soil Efflux," *J. Korea Soc. Waste Manage.*, **29**(3), 245~250(2012).
 29. Ryu, J. Y., "SS removal efficiency of storm runoff in according to the various types of filter media in HDFS," Hanbat National Univ., (2007).
 30. Choi, W. S., "Study on the characteristics of media for the removal of road surface runoff," Honam Univ., (2009).
 31. Park, J. C., "Comparison Analysis of Filtration Efficiency of The Upflow Type Nonpoint Pollution Filter," Korea National Univ. of Transportation, (2018).
 32. Kim, S. S., "A Study on Up flow Filtering Non-point Source Pollutants Treatment Facilities using Volcanic Stone Filter Media," Univ. of Seoul, (2016).
 33. Kim, H. J., "Characterization of clogging phenomena of clinkers in Jeju for artificial recharge of turbid water," Chonnam National Univ., (2010).
 34. Kandra, H. S., Deletic, A. and McCarthy, D., "Assessment of Impact of Filter Design Variables on Clogging in Stormwater Filters," *Water Resour. Manage.*, **28**(7), 1873~1885(2014).
 35. Goo, B. H., "Studies for the clogging of Granular Media Filter in LID Infiltration Facilities," Kongju National Univ., (2016).
 36. Lee, B. S., Kim, L. H. and Goo, B. H., "Clogging Characteristics of Stormwater Infiltration System According to Filter Media Conditions," *J. Korea Soc. Hazard Mitigation*, **18**(3), 391~398(2018).
 37. Siriwardene, N. R., Deletic, A. and Fletcher, T. D., "Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study," *Water Res.*, **41**(7), 1433~1440(2007).
 38. Iwasaki, T., "Some notes on sand filtration," *Adv. Chem. Eng. and Sci.*, **4**(4), 1591~1973(1973).