

유기성 슬러지 반복 탈수에 의한 필터프레스 여과포 오염 특성 분석 및 초음파 세척 적용 평가

김은주^a, 정철진^a, 김경우^b, 송태규^c, 한성국^{dt}

Analysis of contamination characteristics of filter cloth in filter press by repeated dehydration of organic sludge and evaluation of ultrasonic cleaning application

Eunju Kim^a, Cheol-Jin Jeong^a, Kyung Woo Kim^b, Tae Gyu Song^c, Seong Kuk Han^{dt}

(Received: Mar. 29, 2024 / Revised: May. 2, 2024 / Accepted: May. 2, 2024)

ABSTRACT: In this study, the regeneration effect of pressurized water and ultrasonic cleaning was investigated for contaminated filter cloth from the sewage sludge filter press process. For this purpose, contaminated filter cloth was collected from a 3-ton sewage sludge hydrothermal carbon treatment filter press. First, the contamination characteristics were analyzed. According to the location of the filter cloth, air permeability and unit mass were measured, and compared with the values of a new filter cloth. Next, the results were mapped over the entire area to evaluate the contamination characteristics. Finally, pressure cleaning at 3 bar and ultrasound at frequencies of 34, 76, 120, and 168 kHz were performed on the contaminated filter cloth. In addition, the cleaning efficiency was evaluated by 3 levels of contamination degree. As a result, pore contamination occurred mainly at the bottom and both sides of the filter cloth, where the filter material was continuously injected and compressed. Surface contamination appeared evenly over the entire area. As a result of washing, air permeability increased by 1.3-3.1% μ p and contaminant removal was by 2.7-4.4% under pressure. In ultrasonic cleaning, air permeability increased by 12.5-61.5% μ p and contaminants were removed by 2.7-29.2%. In ultrasonic cleaning the lower the frequency, the higher air permeability and contaminant removal rate. Also, The higher pore contamination level, the better the air permeability improvement and contaminant removal.

Keywords: Filter press, Filter cloth, ultrasonic, Contaminant, Air permeability

초 록: 본 연구에서는 하수슬러지 필터프레스 공정에서 발생하는 오염 여과포에 대하여 가압수 및 초음파 세척에 대한 재생효율을 평가하였다. 이를 위하여 3톤 규모 하수슬러지 수열탄화물 처리 필터프레스로부터 오염된 여과포를 채취하였다. 먼저, 필터프레스 여과포의 오염 특성을 평가하였다. 오염 여과포의 위치에 따른 공기투과도와 단위질량을

^a 고등기술연구원 플랜트엔지니어링 본부 선임연구원 (Senior Researcher, Center for Plant Engineering, Institute for Advanced Engineering)

^b 고등기술연구원 플랜트엔지니어링 본부 연구원 (Researcher, Center for Plant Engineering, Institute for Advanced Engineering)

^c (주)동일캔버스엔지니어링 기술연구소 연구소장 (Director of Research Institute, Institute of Technology Department, Dongil Canvas Engineering Co. Ltd.)

^d 고등기술연구원 플랜트엔지니어링 본부 책임연구원 (Principal Researcher, Center for Plant Engineering, Institute for Advanced Engineering)

† Corresponding author(e-mail: env_engineer@iae.re.kr)

측정하였으며, 새 여과포 측정값과 비교하였다. 다음으로 오염 여과포 전체 면적에 대하여 공기투과도 및 단위질량 분포를 지도화하여 오염 특성을 평가하였다. 마지막으로 오염 여과포를 대상으로 3 bar의 압력 세정 및 34, 76, 120, 168 kHz 주파수의 초음파 세척을 수행하였다. 이때, 여과포의 기공 오염 정도를 3단계로 나누어 세척효율을 평가하였다. 여과포 오염 비교 결과, 기공 오염은 여과물질이 지속적으로 투입, 압착되는 여과포 하부와 양측면 위주로 발생하였으며, 표면 오염은 전체면적에 걸쳐 고르게 나타났다. 가압 세척 결과, 공기투과도는 1.3-3.1%p 증가하였으며, 오염물질은 2.7-4.4% 제거되었다. 초음파 세척결과, 공기투과도는 12.5-61.5%p 증가하였으며 오염물질은 2.7-29.2% 제거되었다. 초음파 세척에서 주파수가 낮을수록 공기투과도 재생율과 오염물질 제거율이 우수하였다. 여과포의 기공 오염 정도가 클수록 초음파 세척 후 공기투과도 향상 및 오염물질 제거 효과가 우수하였다.

주제어: 필터프레스, 여과포, 초음파, 오염물질, 공기투과도

1. 서 론

필터프레스는 대상 물질의 수분을 제거하여 고형 물질의 밀도를 높이는 데 적합한 기계이다¹⁾. 필터프레스는 고압, 고처리량 특성으로 인해 폐기물 및 수처리 환경분야 외에 식품, 광산 등 산업분야에서도 널리 사용되고 있다²⁻⁴⁾. 필터프레스 시스템은 본체, 여과관, 여과포, 펌프, 공압 장치 등으로 구성되어 압착, 여과, 탈리를 반복한다⁵⁾. 여과 횟수가 증가할수록 여과포에 오염물질이 침적되며 기계구동으로 인한 미세한 손상이 발생한다⁶⁾. 여과포의 오염물질 침적 및 손상은 여과 성능을 저하시킴으로 필터프레스 투과성을 유지하기 위한 지속적인 관리가 필요하다⁷⁾.

필터프레스 여과포는 주로 고분자 복합체 직조물을 사용하며, 소재로는 폴리프로필렌, 폴리이미드 등이 있다⁸⁾. 폐기물 및 폐수처리 공정 발생 폐기물은 주로 하수슬러지에서 기인한 물질로 인해 유기물, 질소, 인을 다량 포함한다⁹⁾. 여과포에 발생하는 오염은 표면과 기공으로 나뉜다. 오염물질과 여과포와의 접촉성에 의해 표면 오염이 발생하며, 미세입자의 침투 및 침적에 의해 필터 기공 내부 오염이 발생한다¹⁰⁾. 오염 입자가 침적되면 필터 유효 단면적과 기공 크기가 줄어들고, 이로 인해 여과 저항이 증가하여 투과 성능이 떨어지게 된다¹¹⁾. 여과 성능을 유지하기 위해서는 필터프레스에 효율적인 세척 기술 적용이 필요하다.

필터프레스의 세척기술로는 고압수 분사¹²⁾, 압축 공기 분사¹³⁾, 초음파 진동¹⁴⁾ 등이 있다. 상용 규모 필

터프레스 대부분 고압수 세척기술이 적용되었으며 여과포 표면에 세척수를 분사하는 방식이다. 압축공기 분사방법은 고압수 세척과 함께 보조적으로 적용되었다^{8,15)}. Rushton 등(2008)은 고압 세정이 표면 세척에 효과적이지만, 오염물질이 기공 내부로 운반되는 문제가 있다고 보고하였다¹⁶⁾. 기공 내부 세척기술로는 초음파 방법의 가능성이 제시되었으나, 실제 시스템에 적용하여 세척 평가 결과를 보고한 문헌은 거의 없다^{14,17)}. 반면, 고분자 막과 천에 대한 초음파 세척평가에 관한 연구가 수행되었다. Gotoh 등(2013)은 폴리에스터에 부착된 도양 오염물질을 제거하기 위하여 초음파 세척시간과 세척제에 대해 조사하였다¹⁸⁾. Muthukumarana 등(2004)은 폴리숄폰 막을 폐색시킨 후, 초음파 세척을 적용하여 여과 플럭스를 초기조건까지 회복하는 결과를 얻었다¹⁹⁾. 따라서, 필터프레스 여과포의 기공 세척을 위한 방법으로 초음파 세척 적용을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 필터프레스 내 오염된 여과포의 특성을 분석하고 고압수 및 초음파 세척에 따른 여과포 재생효과에 대해 평가하고자 한다. 여과포 오염 특성 및 재생효율을 평가하기 위한 지표로 공기투과도와 단위질량을 사용하였다. 먼저, 새 여과포의 공기투과도 및 질량 분석을 통해 오염 전 상태를 규정하였다. 이후, 유기성 슬러지 반복 탈수 여과포의 오염 특성을 분석하여 오염 분포를 제시하였다. 여과포 공기투과도에 따라 기공 오염 정도를 분류하였으며, 오염 단계에 따른 고압 및 초음파 세척의 효과를 비교하였다. 고압수 분사는 3 bar 조건에서, 초음파는 34, 76, 120, 168 kHz 주파수 조건에서 시험하

였다. 세척 후 공기투과도 증가량 및 단위질량 감소량을 비교하여 여과포 재생효율 및 오염물질 제거율을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 여과포

유기성 슬러지 처리 필터프레스로부터 오염 여과포를 채취하였다. 필터프레스 용량은 3톤 규모이며 운전조건은 Table 1과 같다. 필터프레스 여과물질은 하수슬러지 수열탄화 반응물(반응온도 180 °C)로 열수반응에 의하여 탈수 및 탈카르복실화 반응이 진행되어 탈수성이 증가하고 입자가 미세해지며 여과 시 케이크가 조밀하게 형성된다는 특징이 있다²⁰⁾. 필터프레스는 18-25 bar의 압력범위에서 12회 운전되었으며, 투입량은 회당 평균 2.47톤이며, 여액은 약 2.05톤이 배출되었다. 여과 전 후 고형물(Total solid,

TS)은 13.9%에서 3.4%로 감소하였으며, 부유물질(Suspended solid, SS)은 12.7%에서 0.072%로 감소하였다. 여과 후 탈수케이크는 박리하였고 별도 세척은 하지 않았다. 반복운전 결과, 11회 여과 시 여과 플럭스가 감소하였으며, 12회 운전 후 여과포를 채취하였다.

실험에 사용한 여과포는 폴리프로필렌 소재이며,

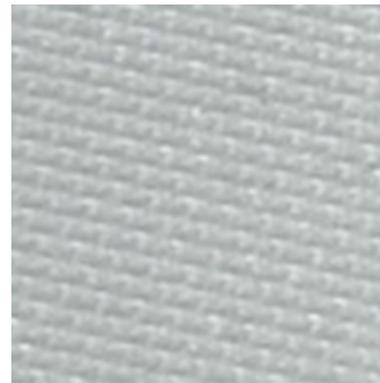


Fig. 1. The photo of new filter cloth (10 mm × 10 mm).

Table 1. Operating Conditions of High-Pressure Filter Press

Property (average)		value	unit
Filter cloth	Pore size	26.8	μm
	Pressure	18-25	bar
Filter press	Number of operations	12	times
	Input	2.47	ton
	Output	1.93	ton
	pH	6.2	-
Input (hydrothermal carbonized sewage sludge)	Water	86.1	%
	TS	13.9	%
	SS	12.7	%
	COD _{Cr}	139,900	mg/L
	T-N	5,800	mg/L
	NH ₃ -N	3,300	mg/L
	T-P	25	mg/L
Output (filtrate)	Water	96.6	%
	TS	3.4	%
	SS	0.072	%
	COD _{Cr}	46,100	mg/L
	T-N	5,700	mg/L
	NH ₃ -N	3,290	mg/L
	T-P	21	mg/L

기공크기는 $26.8 \mu\text{m}$ 이다. Fig. 1은 새 여과포 사진이며, 주자직 조직형태를 확인할 수 있다. Fig. 2는 오염 여과포 사진이며 가로 및 세로 길이 850 mm 크기이다. 여과포는 공기투과도 및 단위질량 분석을 위하여 직경 110 mm의 원 형태로 재단하였다. 이때, 오염 여과포는 각 위치에 따른 공기투과도 및 단위질량 분석을 위하여 Fig. 2와 같이 x, y 좌표계로 설정하였으며, 각 사분면에서 10개의 샘플을 채취하여 총 40개의 오염 여과포를 준비하였다.

2.2. 압력 세척장치

여과포 세척용 세척수 분사장치를 설계하였다. 장치는 Fig. 3과 같으며, 증류수 탱크, 가압 펌프, 분사 노즐, 깔때기, 여과 플라스크로 구성된다. 깔때기 내부 직경은 110 mm으로 설정하여 여과포가 거치될

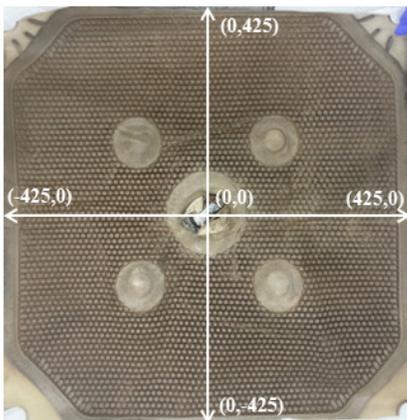


Fig. 2. The photo of contaminated filter cloth (850 mm × 850 mm).

수 있도록 하였다. 여과포는 오염된 면을 상부로 향하게 하여 깔때기 내부에 설치하였다. 또한, 세척수 분사 압력을 측정하기 위하여 압력계를 분사 노즐 전단에 설치하였다. 가압 펌프 동작 시 세척수 노즐을 통해 분사되어 여과포가 세척되며, 세척수의 압력은 3 bar, 유량은 120 mL/min으로 공급된다. 여과포 세척은 10분간 수행하였으며 세척수 공급량은 2분에 240 mL, 5분에 600 mL, 10분에 1,200 mL이었다.

2.3. 초음파 세척장치

여과포 기공 세척을 위하여 Fig. 4와 같이 초음파 세척장치를 제작하였다. 초음파 세척장치의 사양은 Table 2에 나타내었다. 장치는 수조, 여과포 홀더, 진동부, 발진부로 구성된다. 수조는 투명한 아크릴로 제작하였으며, 너비 850 mm, 길이 450 mm, 높이 500 mm로 설계하였다. 수조의 상부에는 세척액이 넘치지 않도록 배관을 구성하였고, 하부에는 배출 배관 및 밸브를 설치하였다. 여과포 홀더는 여과포를 세로로 거치할 수 있는 지그 형태로 구성하였다. 이때, 여과포는 홀더에 의해 위치가 고정되어, 다른 여과포로 교체하더라도 동일한 위치에 세척이 가능하도록 설계하였다. 초음파는 주파수를 34, 76, 120, 168 kHz로 조절할 수 있도록 4채널로 구성하였다. 초음파 진동부는 가로 400 mm, 세로 400 mm의 크기로 제작하였다. 여과포와 초음파 진동부 간 거리는 50-150 mm 범위 내 조절이 가능하게 설계하였으며, 50 mm 조건에서 세척효율을 평가하였다¹⁸⁾. Juang 등(2004)은 초음파 전달거리(10-100 mm)와 출력(30-240 W)에 따른 여과 플럭스를 비교하였다²¹⁾. 그 결

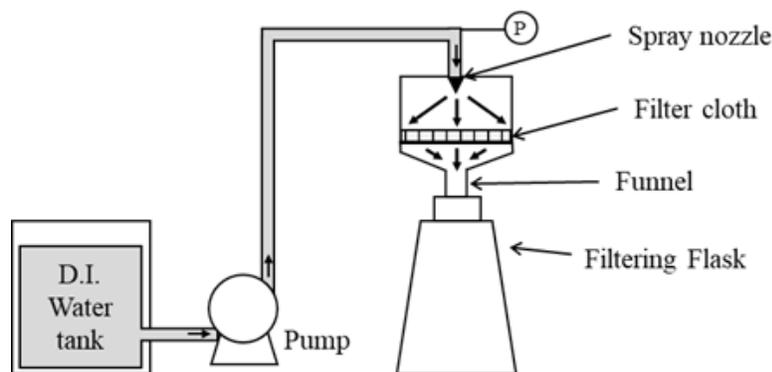


Fig. 3. The configuration of filter cloth cleaning by pressure.

과 초음파 전달거리 65 mm에서 여과 플럭스의 증가량이 가장 크게 나타났으며, 초음파 출력에 대해서는 출력이 증가할수록 플럭스가 선형적으로 증가하였다. 발전부는 각 진동부를 제어하도록 2개 설치하였으며, 출력은 300 W으로 설정하였다.

2.4. 공기투과도 분석

공기투과도는 일정 압력에서 단위 면적 당 투과되는 공기 유량을 의미하며, 플럭스와 동일한 단위로 표현된다. 본 연구에서는 여과 플럭스를 대신하여 여과포의 기공의 폐색정도를 비교하는 지표로 공기투과도를 사용하였다. 공기투과도는 TEXTEST INSTRUMENTS(스위스)사의 FX 3340 MinAir 분석장치를 이용하여 측정하였다. 여과포는 직경 110 mm 크기의 원 형태로 재단된 시편을 시험에 사용하

였다. 이 시편 크기는 공기투과도 분석장치 클램핑 시 파지 장치에 딱 맞는 크기로, 세척 전 후 같은 부위의 공기투과도를 위해 설정한 값이다. 공기투과도는 국가표준 천 공기투과도 측정법인 KS K ISO 9237:1995를 준용하여 압력 100 Pa, 면적 20 cm² 조건에서 일정하게 측정하였다²²⁾. 매 측정 전 표준시편을 이용하여 장비의 정확도를 점검을 하였으며, 장치의 고장을 방지하기 위하여 여과포를 완전히 건조시킨 후 공기투과도를 측정하였다.

새 여과포, 오염 여과포, 세척 후 여과포 공기투과도 비교를 위하여 다음 순서로 공기투과도를 분석하였다. 먼저, 새 여과포 시편 20장을 준비하여 공기투과도를 측정하여 평균 및 편차를 분석하여 오염 전 특성을 분석하였다. 다음 단계로 오염 여과포의 공기투과도를 측정하여 기공 오염 정도를 평가

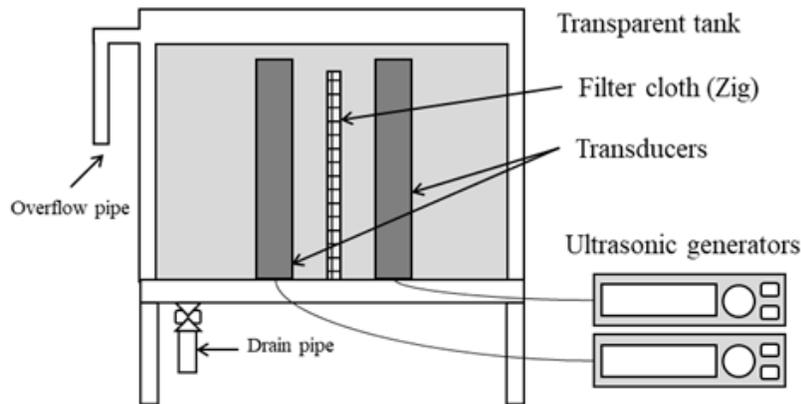


Fig. 4. The configuration of ultrasonic washer for filter cloth.

Table 2. The Specifications of Ultrasonic Washer

parameter		value	unit
Tank	Volume	191	L
	Width	850	mm
	Length	450	mm
	Height	500	mm
Transducers	Width	400	mm
	Length	400	mm
	Distance ^{a)}	50	mm
Ultrasonic generators	Frequency	34, 76, 120, 168	kHz
	Power	300	W

a) Distance between filter cloth and each transducer

하였다. 마지막으로 새 여과포 공기투과도 대비 세척 후 공기투과도 값으로부터 기공 재생율을 산출하였다. 공기투과도 재생율은 다음 식(1)과 같이 정의하였다.

$$\eta = AP/AP_0 \times 100 \quad \text{식(1)}$$

이때, η , AP_0 , AP 는 각각 공기투과도 재생율, 새 여과포 공기투과도, 여과포 세척 전 또는 후 공기투과도를 의미한다.

2.5. 단위질량 측정

여과포에 부착된 오염물질 양을 비교하는 지표로 단위질량을 사용하였다. 재단된 여과포 시편의 질량을 측정하여 면적 당 질량으로 나타내었다. 이때, 여과포는 30 °C에서 건조하여 수분을 모두 제거한 상태에서 정밀저울을 이용하여 소수점 넷째자리까지 측정하였다.

여과포에 부착된 오염물질 양은 세척 전 여과포와 새 여과포의 질량 차로부터 산출된다(식(2)). 또한, 세척에 의한 오염물질 제거량은 세척 전 여과포와 세척 후 여과포의 질량차로 산출된다(식(3)).

$$W_{Contaminant} = W_{Before\ wash} - W_0 \quad \text{식(2)}$$

$$W_{Removal} = W_{Before\ wash} - W_{After\ wash} \quad \text{식(3)}$$

여기서, $W_{Contaminant}$ 은 오염물질 부착량, $W_{Removal}$ 은 오염물질 제거량, W_0 은 새 여과포 단위질량, $W_{Before\ wash}$ 은 세척 전 여과포 단위질량, 그리고 $W_{After\ wash}$ 는 세척 후 여과포 단위질량을 나타낸다.

최종적으로 세척 후 여과포의 오염물질 제거율 (R)은 식(4)와 같이 평가하였다.

$$R = W_{Removal}/W_{Contaminant} \times 100 \quad \text{식(4)}$$

2.6. 여과포 세척

여과포 기공 세척효율을 평가하기 위하여 기공 폐색 정도가 다른 오염 여과포를 준비하였다. Fig. 2에서 직교 좌표계로 나눠 분석한 총 40개의 시편으로부터 공기투과도가 유사한 여과포를 선정하였으며 오염도에 따라 3개의 그룹으로 나누었다. 오염 단계에 따른 공기투과도는 I 단계 113-119 m³/m²/h, II 단계 75-87 m³/m²/h, III 단계 51-68 m³/m²/h로 분류하였다. 단계가 I에서 III 단계로 갈수록 공기투과도가 낮아지며, 이는 여과포 내부 오염으로 인하여 기공 폐색이 심한 것을 의미한다. 기공 오염 단계별 3개의 그룹을 대상으로 압력 및 초음파 세척을 수행하여 세척효율을 평가하였다. 실험조건은 Table 3과 같으며, 각 세척은 10분간 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 새 여과포 특성

새 여과포 시편에 대한 공기투과도와 단위질량 분석결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 새 여과포의 공기투과도는 142-183 m³/m²/h이며 평균 및 편차가 각각 160 m³/m²/h, 11 m³/m²/h로 나타났다. 단위질량은 299-304 g/m³으로 평균 302 g/m³, 편차 2 g/m³ 값으로 나타났다. 한 장의 여과포를 여러 개로 나누어

Table 3. Experimental Conditions according to the Contaminant Level of Filter Cloth

Condition		Contaminant level, Air permeability (m ³ /m ² /h)		
		I	II	III
Pressure (bar)	3	115	79	56
	34	119	75	68
Frequency (kHz)	76	113	78	52
	120	113	87	56
	168	118	77	51

공기투과도와 단위질량을 분석하였을 때 공기투과도의 편차는 상대적으로 큰 반면, 단위질량은 비교적 균일한 것을 확인하였다. 이는 여과포 생산을 위한 열처리 과정에서 온도제어가 균일하게 되지 않아 조직 균질도에 차이가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 식(1)의 공기투과도 재생효율과 식(2)의 오염물질 제거율 산출 시 새 여과포 공기투과도와 단위질량은 평균값을 적용하였다.

3.2. 오염 여과포 특성

오염 여과포의 위치에 따른 공기투과도와 단위질량 분석결과를 직교좌표계에 매핑하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 오염 여과포의 공기투과도와 단위질

량 매핑결과를 나타낸다. Fig. 7의 공기투과도로부터 기공 오염 특성을 확인할 수 있으며, 공기투과도가 낮을수록 기공 오염 정도가 큰 것을 나타낸다^{22,23}. 여과포 기공 오염도는 양측면, 중앙부/하단부, 상부 순으로 높게 나타났다. 여과포 제일 상단의 공기투과도는 140-161 $m^3/m^2/h$ 으로 가장 높았으며, 새 여과포 공기투과도 $160 \pm 11 m^3/m^2/h$ 와 가장 유사한 값을 나타내어 기공 오염도가 가장 낮은 것을 확인하였다. 그다음으로는 여과포 중앙부, 하단부, 중상단부의 공기투과도 분포는 유사하였으며, 80-120 $m^3/m^2/h$ 으로 나타났다. 여과포 양측면은 40-70 $m^3/m^2/h$ 의 공기투과도 분포를 나타내었으며, 기공 오염이 가장 심한 것으로 확인하였다. 시험에 사용한 필터프레스

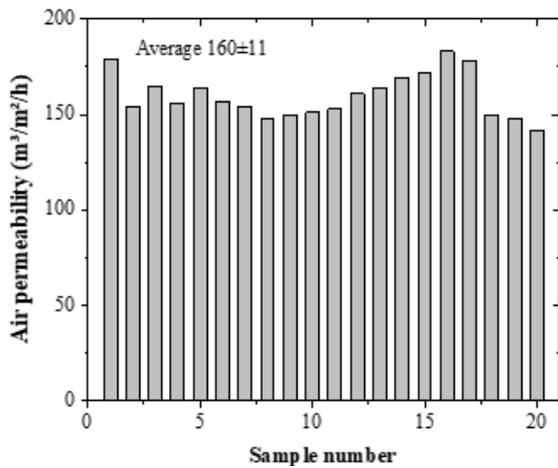


Fig. 5. Air permeability results of new filter cloth.

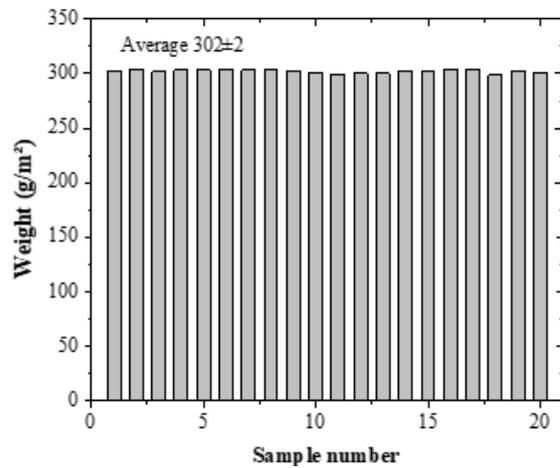


Fig. 6. Unit mass for new filter cloth.

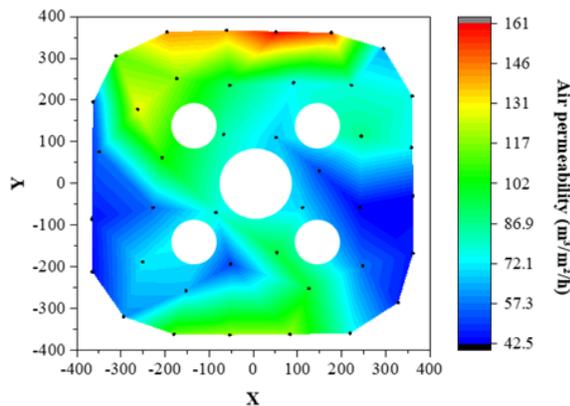


Fig. 7. The map for air permeability in x, y coordinates of contaminated filter cloth.

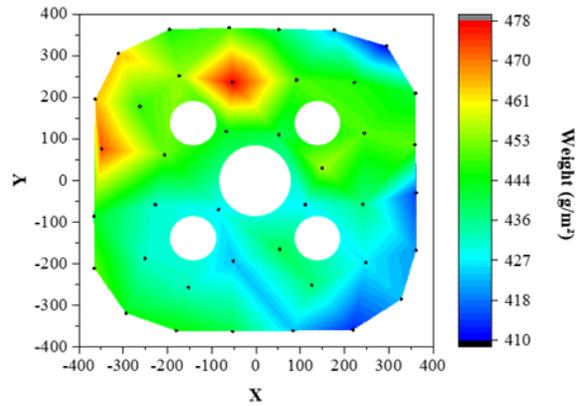


Fig. 8. The map for unit mass in x, y coordinates of contaminated filter cloth.

는 투입물질이 상부 양측에서 공급되어 하단과 양측부터 쌓이는 구조로 설계되어 있다. 여과물질 투입 초기부터 여과포 하부와 측면에서는 여과가 시작되며, 미세한 오염원이 지속적으로 여과포를 투과하게 된다. 여과포 내부에 케이크가 형성되면 압착이 진행되며 여과판, 여과포, 케이크, 여과물질 순으로 수평적인 힘이 전달된다. 이 과정에서 미세입자가 여과포 기공 내부로 침투하게 되며, 오염물질이 다량 투과되는 여과포 하부와 양측면 위주로 기공 오염이 크게 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 8에서 오염 여과포 단위질량 분포는 $410\text{-}478\text{ g/m}^3$, 오염물질 양은 $106\text{-}179\text{ g/m}^3$ 임을 확인하였다. 이때, 오염물질 양은 여과포 질량의 35-58% 수준으로 높게 나타난 바, 단위질량으로 측정되는 오염물질의 양은 여과포의 기공 내부 오염물질보다는 표면의 오염물질 부착에 의한 것으로 판단하였다. 단위질량 분포는 여과포 전체면적에 대해서 여과포 중앙부를 중심으로 균일한 분포를 나타내었으며, 일부 상부와 여과포 외각에서 편차가 발생하였다. 여과포 표면 오염은 여과 후 케이크를 박리하는 과정에서 제거되지 못한 물질에서 기인한다. 필터프레스 운영에서 탈수케이크는 밀대를 이용하여 수동으로 박리되며 위치에 따라 제거되는 정도에 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 여과포 단위질량은 전체적으로 균일한 분포를 보였으나, 상부와 외곽 일부에 오염물

질 분포가 다르게 나타난 것으로 판단된다.

여과포의 기공 오염은 여과포의 양측면, 중앙부 순으로 나타난 반면, 오염물질의 절대적인 양은 여과포 전반에 고르게 발생하였다. 이는 여과포 기공 오염과 표면 오염이 발생하는 이유가 다르기 때문이다. 기공 오염은 압력이 가해지는 조건에서 여과물질 내 미세한 입자가 여과포를 통과하며 기공 내부에 축적되어 발생한다. 따라서, 오염물질이 다량 투과되는 위치에 공기투과도가 크게 감소하였다. 반면, 표면 오염은 주로 탈수케이크가 균일하게 제거되지 않아 발생하였다.

3.3. 가압 세척 결과

Fig. 3의 압력 세척장치를 이용하여 오염 여과포를 세척하였다. 시험에 사용한 여과포는 공기투과도 $115\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$, $79\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$, $56\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ 으로 기공 오염 정도가 다른 3개를 준비하였다. 2, 5, 10분간 세척을 수행하였으며, 여과포의 공기투과도와 질량을 측정하여 공기투과도 재생율과 오염물질 제거율을 평가하였다. Fig. 9는 공기투과도 재생율을 나타낸 결과로 세척 후 공기투과도가 미세하게 향상된 것을 확인할 수 있다. 오염 정도 I 여과포는 세척 후 공기투과도 재생율이 3.1%p 증가하여 75.0%을 나타내었다. 오염 정도 II, III 여과포의 경우에는 각각 1.3%p, 1.5%p 증가하였으며, 50.5%, 36.7%의 재생율을 나타

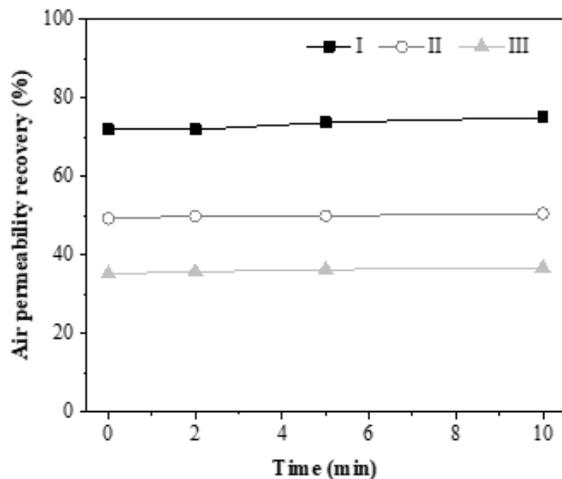


Fig. 9. The changes in air permeability by pressure washing.

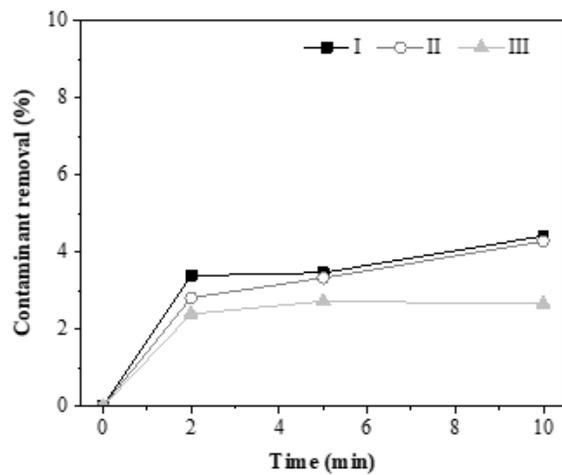


Fig. 10. The comparison results of contaminant removal by pressure washing.

났다. 기공 오염 정도에 따른 결과 비교 결과, 오염 정도가 낮은 I 여과포에서 공기투과도 재생율이 가장 높았으나, 그 수치는 3.1%p로 압력 세정에 대한 기공 세척 효과가 미미한 것을 확인하였다.

Fig. 10은 압력 세정 후 오염물질 제거율을 비교한 결과이다. 오염 정도 I 여과포는 2분 세척 후 오염물질 3.4%가 제거되었으며, 5분 후 3.5%, 10분 후 4.4%까지 제거되었다. 이를 통해 세척 시간에 따라 오염물질 제거량이 증가하는 것을 확인하였다. 오염 정도 II 및 III 여과포에서는 10분 세척 후 각각 4.4%, 2.7% 오염물질이 제거되었다. 기공 오염 정도에 따른 오염물질 제거율은 I과 II에서 유사하였으며, 오염 정도가 심한 III의 경우 제거율이 낮은 것으로 나타났다. 3 bar 세정에 따른 오염물질 제거량은 3.0-5.9 g/m², 제거율은 2.7-4.4% 수준으로 세척 효과가 미미하였다.

3.4. 초음파 세척 결과

기공 오염 정도가 다른 여과포에 대하여 초음파 주파수별 세척을 수행하였으며, Fig. 11은 공기투과도 재생율을 나타낸다. 세척 전 여과포의 공기투과도 재생율 평균은 오염 정도 I 72.4%, 오염 정도 II 49.4%, 오염정도 III 35.4% 수준이었다. 초음파 세척 후 여과포의 공기투과도는 크게 향상되었으며, I에서 83.2% 이상, II에서 78.2% 이상, III에서 75.7% 이

상으로 회복되었다. 이를 통해 기공 오염도가 높을수록 세척 전 후 공기투과도 값이 크게 증가한 것을 확인하였다.

또한, 주파수에 따른 공기투과도 재생율에 대한 뚜렷한 양상이 확인되었다. 초음파 주파수가 낮은 범위에서 공기투과도 회복정도가 크게 나타났으며, 주파수가 증가할수록 공기투과도는 감소하였다. 그러나 120 kHz 이후에는 주파수에 따른 공기투과도 재생 정도에 차이가 없었다. 특히, 34 kHz와 76 kHz에서의 공기투과도 회복율은 각각 98.8% 이상, 93.8% 이상으로 새 여과포와 유사한 수준으로 공기투과도가 회복되었으며, 기공 오염 대부분이 제거된 것으로 판단하였다. 120 kHz와 168 kHz에서의 공기투과도 회복율은 각각 76.3%-83.2%, 75.7-87.6%으로 유사한 회복율을 나타내었다.

일반적으로 초음파는 낮은 주파수에서는 캐비테이션 강도가 높고 침투력이 낮은 특성이 있으며, 주파수가 증가할수록 캐비테이션 강도가 감소하고 침투력이 증가한다²⁴⁾. 100 kHz 이상의 고주파수에서는 캐비테이션은 거의 일어나지 않으나, 미세기포의 크기가 작아져 침투력이 상승한다²⁴⁾. 따라서, 침투력과 캐비테이션 강도의 관계를 고려한 최적 주파수의 도출이 필요하다. 시험에 사용한 기공크기 26.8 μm, 주자직 직조된 폴리프로필렌 소재 여과포에 대해서는 34 및 76 kHz 주파수에서도 미세기포가 기

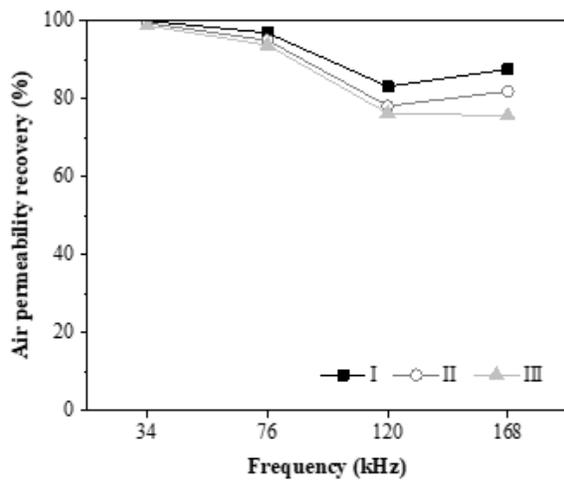


Fig. 11. The comparison of air permeability according to ultrasonic frequency.

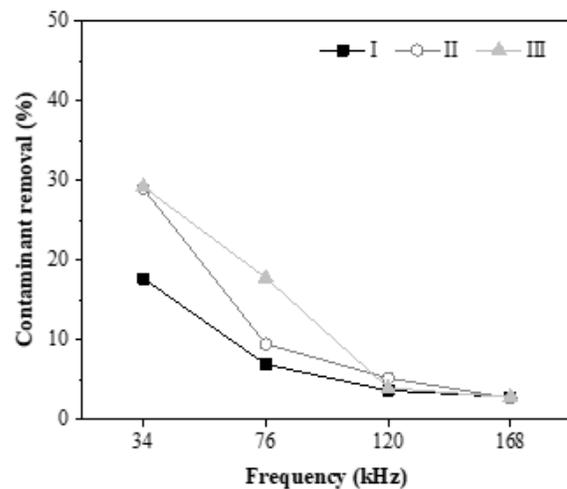


Fig. 12. Contaminant removal results by ultrasonic frequency.

공 내부로 침투되었으며, 캐비테이션 강도가 높아 세척 효율이 우수한 것으로 판단된다. 또한, 120, 168 kHz 주파수에서는 캐비테이션 강도 감소에 따라 세척 효율이 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 12는 초음파 주파수에 따른 오염물질 제거 결과이다. 오염물질 제거율이 가장 우수한 주파수는 34 kHz이며, 주파수가 증가할수록 오염물질 제거율은 감소하였다. 34 kHz에서는 오염물질이 17.7-29.2% 제거되었으며 76 kHz에서는 6.9-25.4%가 제거되었다. 120 kHz가 167 kHz보다는 오염물질 제거율이 높았으나, 오염물질 제거율이 5.2%이하로 가압 세척 결과와 유사한 값을 나타내어 세척효과가 미미한 것을 확인하였다.

기공 오염 정도에 따른 오염물질 제거율은 공기투과도와 유사한 양상을 나타내었다. 기공 오염 정도가 높을수록 초음파 세척에 의한 오염물질 제거율 우수하였다. 34 kHz에서 I, III, III 여과포의 오염물질 제거율은 각각 17.7%, 29.0%, 29.2%으로 나타났다. 같은 초음파 전달 조건에서 기공 오염도가 클 때 더 많은 오염물질이 제거되었다. 또한, 76 kHz에서도 I, III, III의 오염물질 제거율이 각각 6.9%, 9.5%, 17.8%로 동일한 경향을 보였다.

초음파 세척에 의한 공기투과도는 새 여과포의 95-99% 수준까지 회복되었다. 이를 통해 오염 여과포에 초음파 세척을 적용하여 기공 세척 및 여과 플럭스 회복이 가능할 것으로 판단된다. 오염물질 제거율은 최대 29.2% 수준으로 나타났으며, 3 bar 압력 세정 대비 오염물질 제거효과가 6배 이상 높았다. 오염물질 제거율은 공기투과도 회복에 비해 낮은 효과를 보였으며, 오염물질 제거효율을 향상시키기 위해서는 케이크의 완전한 박리, 3 bar 이상의 높은 압력의 가압수를 분사 또는 초음파 가진 동시 압력 세정수 분사 등의 기술 적용이 필요하다.

4. 결론

하수슬러지 처리 필터프레스에서 반복 여과에 따른 여과포 오염 특성에 대해 분석하였으며, 여과포 기공 세척을 위한 압력 세정 및 초음파 세척의 효율

을 평가하였다. 하수슬러지 수열탄화물을 18-25 bar에서 12회 여과한 여과포의 공기투과도는 $160 \pm 11 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ 에서 $43\text{-}161 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ 으로 감소하였으며, 질량은 $302 \pm 2 \text{ g/m}^3$ 에서 $410\text{-}478 \text{ g/m}^3$ 까지 증가하였다. 기공 오염은 여과포의 양측면, 중앙부/하단부, 상부 순으로 크게 발생하였으며, 표면 오염은 여과포 전체 면적에 걸쳐 고르게 나타났다. 3 bar의 압력 세척결과 공기투과도가 1.3-3.1%p 증가하였으며, 오염물질은 2.7-4.4% 제거되어 효과가 미미하였다. 34-168 kHz의 초음파 세척결과, 여과포의 공기투과도는 12.5-61.5%p 향상되었으며 오염물질 제거율은 2.7-29.2%으로 나타나 압력 세척 대비 세척효과가 우수한 것을 확인하였다. 초음파 주파수가 낮을수록 공기투과도 재생율과 오염물질 제거성능이 우수한 결과를 나타내었다. 특히, 34 kHz 결과에서 여과포의 공기투과도는 98.8% 이상 제거되어 새 여과포 수준까지 회복되었다. 이때, 오염물질 제거는 공기투과도 재생에 비해 낮은 효과를 보였으며, 케이크 박리 공정 개선, 3 bar 이상 가압수 분사, 초음파와 가압수 동시 적용 등을 통해 개선이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(No. 20018186). 이 논문은 환경부 한국환경산업기술원 상하수도혁신 기술개발 사업에 의해 지원(과제번호 2021002690009)을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Walter G. and Christian A., Filtration, Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 53-62. (2000).
2. Fernando, F. R., Carlos, P. L., Frank, C. W., and José, L. N., "The reaction environment in a filter-press laboratory reactor: the 1-LC flow cell",

- Electrochimica Acta, 161, pp. 436~452 (2015).
3. Lorenzo, G., Piernicola, M., Marzia, M., Chiara, C., and Alessandro, P., "Addition of a steel pre-filter to improve plate filter-press performance in olive oil filtration", *Journal of Food Engineering*, 157, pp. 84~87 (2015).
 4. Henriksson, B., "Focus on separation in the mining industry", *Filtration & Separation*, 37(7), pp. 26~29 (2000).
 5. Han, S. K., Jung, H. S., Song, H. W., Kim, H., and Ahn, D. H., "Solid-liquid separation characteristics of membrane filter press according to coagulant properties of anaerobic digestion waste water", *Journal of Korea Organic Resources Recycling Association*, 22(3), pp. 23~32 (2014).
 6. Mark, S. K., Barbara J. A., and Peter J. B., "Challenges in fine coal processing, dewatering, and disposal", *The Society for Mining, metallurgy, and Exploration, Inc.*, pp. 279~292 (2012).
 7. Wisdom, T., "Maintaining high availability and low operational costs for filtered tailings facilities", in *Proceedings of the 22st International Seminar on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, pp. 337~348 (2019).
 8. Parmentier, A. H., U.S. Patent, 4,931,177. (1990).
 9. Wolfgang, W., Szymon, H., and Matthias, G., "Combined filtration and oxalic acid leaching for recovering phosphorus from hydrothermally carbonized sewage sludge", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, pp. 104800. (2021).
 10. Bernd, F., Patrick, M., and Hermann, N., "Regeneration assessments of filter fabrics of filter presses in the mining sector", *Minerals Engineering*, 168, pp. 1~10. (2021).
 11. Anlauf, H., *Wet cake filtration: Fundamentals, equipment, and strategies*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 41~84 (2019).
 12. Kurita, T., and Hara, T., U.S. Patent, 4,129,137. (1978).
 13. Kitae, K., and Eunsoo, N., KR Patent, 10-0598675. (2006).
 14. Youngsoo, K., and Heehong P., KR Patent, 10-1533647. (2015).
 15. Masahiko, K., Takao, S., Tomomichi, N., and Hajime, W., EP Patent, 2,316,554,A1. (2011).
 16. Rushton, A., Ward, A. S., and Holdich, R. G., *Solid-liquid filtration and separation tecnology*, second, Completely Revised ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany, pp. 41~84. (2008).
 17. Tuori, T., Sekki, H., Ihalainen, J., Pirkonen, P., and Mursunen, H., U.S Patent, 6,217,782. (2001).
 18. Gotoh, K., and Harayama, K., "Application of ultrasound to textiles washing in aqueous solutions", *Ultrasonics Sonochemistry*, 20, pp 747~753. (2013).
 19. Muthukumaran, S., Yang, K., Seuren, A., Kentish, S., Ashookkumar, M., Stevens, G. W., and Grieser, F., "The use of ultrasonic cleaning for ultrafiltration membranes in the dairy industry", *Separation and Purification Technology*, 39, pp. 99~107. (2004).
 20. Afolabi, O. O. D., Sohail, M., and Thomas, C. P. L., "Microwave hydrothermal carbonization of human biowastes", *Waste Biomass Valorization*, 6(2), pp 147~154. (2015).
 21. Juang, R.-S., and Lin, K.-H., "Flux recovery in the ultrafiltration of suspended solutions with ultrasound", *Journal of Membrane Science*, 243, pp. 115~124. (2004).
 22. 산업표준심의회, 텍스타일-천의 공기투과도 측정, KS K ISO 9237:1995, <https://e-ks.kr/streamdocs/view/sd;streamdocsId=72340781145838399> (2022)
 23. Mirzaie, A., and Mohammadi, T., "Effect of ultrasonic waves on flux enhancement in microfiltration of milk", *Journal of Food Engineering*, 108, pp. 77~86. (2012).
 24. Plesset. M., "The dynamics of cavitation bubbles", *Journal of Applied Mechanics*, 16, pp. 228~231. (1949).