Research Paper

Optimization of Initial Turbidity and Coagulant Concentration to Remove Turbidity Using *Moringa oleifera* Seed

Bong Min Kim^{ID} · Hee Yun Lee^{ID} · Johng-Hwa Ahn^{†ID}

Department of Environmental Engineering, Kangwon National University

(Received December 6, 2019; Revised January 13, 2020; Accepted January 29, 2020)

Objective : Coagulation of *Moringa oleifera* seeds was studied to determine the optimal conditions in treating a turbid water.

Method : Jar-test experiments were performed at various rapid mixing (90-250 rpm; 1-2 min), slow mixing (10-60 rpm; 10-50 min), initial turbidity (100-500 NTU), coagulant doses (200-1,500 mg/L), and pH (2-12) in synthetic wastewater. Response surface analysis was used to optimize the coagulation in jar-test experiments.

Results and Discussion : The optimal conditions for turbidity removal with *M. oleifera* were 200 rpm of rapid-mixing speed for 1 min, 40 rpm of slow-mixing speed for 20 min, and pH 8. The coagulation efficiency was found to be dependent on initial turbidity of water samples. Highest turbidity removals (96.5%) were obtained for water with very high initial turbidity (500 NTU). The effects of initial turbidity and coagulant dose were successfully analyzed by the response surface analysis. Within the design boundaries, turbidity removal was more sensitive to changes in initial turbidity than to changes in coagulant dose.

Conclusions : The quadratic model between initial turbidity and coagulant for turbidity removal was shown. *M. oleifera* can be used as a potential coagulant especially for high turbidity water.

Key Words : *Moringa oleifera*, Response Surface Analysis, Coagulant Concentration, Initial Turbidity, Optimum Coagulation Condition, Turbidity Removal

[†] Corresponding author E-mail: johngghwa@kangwon.ac.kr Tel: 033-250-6357 Fax: 033-254-6357

연구논문

Moringa oleifera 씨앗의 탁도 제거 시 초기 탁도와 응집제주입량 최적화

김봉민[✉] · 이희윤[✉] · 안종화[✉]

강원대학교 환경공학과

목적: *Moringa oleifera* 씨앗 응집제를 이용한 탁도 제거 공정에 최적 조건을 도출하고자 한다.

방법: 응집실험은 합성폐수를 Jar Tester를 이용하여 급속교반(90-250 rpm; 1-2분), 완속교반(10-60 rpm; 10-50분), 초기 탁도(100-500 NTU), 응집제주입량(200-1,500 mg/L), pH (2-12) 등의 조건에서 진행하였다. 초기 탁도와 응집제주입량의 최적 탁도 제거 조건을 도출하기 위해 반응표면분석법을 사용하였다.

결과 및 토의: *M. oleifera*를 이용한 탁도 제거에서 최적 조건은 200 rpm으로 급속교반 1분, 40 rpm으로 완속교반 20분, 그리고 pH 8이었다. 응집효율은 물 시료의 초기 탁도에 좌우되는 것으로 확인되었다. 초기 탁도 500 NTU에서 가장 높은 탁도 제거 효율(96.5%)을 보였다. 초기 탁도와 응집제주입량에 대한 영향은 반응표면분석법을 통해 성공적으로 분석되었다. 실험범위 안에서 탁도 제거효율은 응집제주입량보다 초기 탁도 변화에 더 민감했다.

결론: 초기 탁도와 응집제주입량의 탁도 제거 모델을 제시하였다. *M. oleifera*는 높은 탁도의 물에서 잠재적인 응집제로 사용할 수 있다.

주제어: *Moringa oleifera*, 반응표면분석법, 응집제주입량, 초기 탁도, 최적응집조건, 탁도 제거

1. 서론

먹는물을 얻기 위해서는 응집 공정이 필요하다. 이 공정은 탁도, 색도, 천연 유기 물질 등을 제거하기 위한 물, 폐수 처리 등에 적용된다. 이 중에서도 탁도 제거는 응집제를 이용하는 물 처리 과정에서 중요한 단계 중 하나이다.¹⁾ 응집 공정에는 일반적으로 고가의 알루미늄 염과 같은 화학적 응집제가 첨가된다. 그러나 알루미늄 염의 경우 잔류 알루미늄으로 인하여 알츠하이머병을 일으킬 가능성이 보고되고 있다.²⁾ 천연 응집제의 개발은 이에 대한 해결책이 될 수 있다.

다양한 식물 원료의 천연 응집제가 알려져 있는데, 이 중 하나가 모링가(*Moringa*)이다. 모링가는 총 14종으로 알려져 있는 십자화목(*Moringaceae*)의 한 종(*species*)으로³⁾ ‘drumstick tree’ 혹은 ‘horseradish tree’로도 불린다.⁴⁾ 모링가는 인도, 아시아, 아프리카 사하라, 라틴아메리카 등 취약한 환경에서도 잘 자라는 것으로 알려져 있는 무독성 열대 식물이다.⁵⁾ 이 식물의 씨앗에는 식용의 기름과 수용성 물질이 함유되어 많은 환경과학자 사이에서 관심을 받으며 연구되는 천연 응집

제 중의 하나이다.⁶⁾

모링가 씨앗은 항균성을 가지며 응집 공정에 사용 시 물속 pH에 영향을 주지 않고 슬러지를 적게 생성하며, 이 슬러지는 생분해성을 가져 환경 친화적이다.⁷⁾ 아프리카 국가에서는 오래전부터 이러한 모링가 씨앗 추출물을 이용해 강물의 탁도 제거용으로 이용해 오고 있다.⁸⁾ 반응성이 높은 모링가 씨앗 추출물로 만들어진 응집제는 양이온 성질의 단백질이며¹⁾, 분자량 3.0 kDa 정도의 유기 고분자 전해질⁹⁾이기 때문에 응집에 효과적인 것으로 알려져 있다. 모링가 추출물질은 비용해성의 그물 망조(net-like structure)를 형성하여 부유하는 카올린 입자를 보다 효과적으로 제거할 수 있는 것으로 밝혀졌다.⁸⁾ 대부분의 개발도상국이 수처리용 약품 비용을 감당할 수 없어 개발도상국에서 천연 응집제를 이용한 탁도 제거는 저비용으로 수처리가 가능하게 할 것이다.⁶⁾

모링가 씨앗을 이용한 탁도 제거는 여러 연구자가 그 결과를 발표해 오고 있다.^{1,2,10-19)} 선행 논문들에 따르면 모링가 분말 자체를 응집제로 사용한 방법과 모링가 추출물을 이용한 방법이 있다. 모링가 추출물을 이용한 방법에서 추출

용매 종류로는 인산완충용액¹⁰⁾, 증류수^{1,2,11,17,18)}, 탈이온수¹⁵⁾, 수돗물¹⁶⁾, NaCl 수용액^{12,13,18,19)} 등이 있다. 분말을 사용한 것보다 추출한 응집제를 사용한 것이 효율이 더 높았다. 추출용매의 경우 증류수, 탈이온수, 수돗물 등으로 추출한 것보다 NaCl 용액, 인산완충용액 등에 추출한 방법이 더 좋은 효율을 보였다.

선행논문에서 인자별 영향은 보고하였지만, 연속적인 구간에서의 실험 인자별 효율은 문헌에서 찾을 수 없었다. 이에 *Moringa oleifera* 씨앗 응집제를 이용한 운전인자별 탁도 제거에 미치는 영향을 알아보고, 반응표면분석법(response surface analysis, RSA)을 통해 실험 구간에서의 초기 탁도와 응집제주입량 간의 관계 모델을 도출하고자 한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 실험재료

2.1.1. 합성페수

실험에서 사용한 합성페수는 5 g의 Kaolin 분말(대정화금)을 1 L의 증류수에 20 rpm으로 1시간 교반 후 24시간 방치하여 수화되지 않은 부분을 침전시킨 후 침전 상등액을 증류수로 희석(100-500 NTU)하여 제조하였다.¹⁾ 모든 시료량은 300 mL로 하였다.

2.1.2. *Moringa oleifera* 응집제

본 실험에서 사용한 *M. oleifera*의 원산지는 인도, 원재료명 및 함량은 *M. oleifera* 씨앗 100%로 농업회사법인 주식회사 두손애약초에서 구입하여 사용하였다. 실험에 사용된 *M. oleifera* 씨앗은 막자를 이용해 분말 형태로 분쇄하여 사용하였다. *M. oleifera* 응집제는 분말을 그대로 사용한 방법¹⁴⁾, 5 g 분말을 증류수에 넣은 후 500 mL로 하여 교반기에 1시간 동안 교반하고 24시간 방치 후, 먼 보자기에 걸러 사용한 증류수 추출 방법¹²⁾, 5 g 분말을 1% NaCl 수용액에 넣은 후 500 mL로 하여 교반기에 1시간 동안 교반하고 24시간 방치 후, 먼 보자기에 걸러 사용한 NaCl 수용액 추출 방법¹²⁾ 등의 세 가지 방법으로 만들어 비교실험을 진행하였다. 초기 탁도 500 NTU 조건에서 응집제 농도가 300 mg/L가 되도록 선행 논문¹²⁾에 따라 분말은 0.09 g, 증류수 추출 9 mL, NaCl 추출 9 mL를 주입하여 실험을 진행하였다.

2.2. 실험방법

초기 탁도 100-500 NTU, 응집제주입량 200-1,530 mg/L, 급속교반 90-250 rpm (1-2분), 완속교반 10-60 rpm (10-50 분), pH 2-12 (pH를 별도로 언급하지 않은 경우는 조절하지 않은 실험) 범위에서 인자별 탁도 제거효율에 관한 실험을 하였다.^{12,20)} 모든 실험에서 30분간 방치 후 상등액의 탁도를 측정하였다. pH를 조절하기 위해서 0.1 N NaOH와

0.1 N HCl을 사용하였다.

2.3. 반응표면분석법

RSA에서 중심합성설계법(central composite design, CCD)을 사용하여 실험을 계획하였고, 결과 데이터를 통해 회귀분석을 하여 반응표면식을 도출하였다. 예비실험을 통해 초기 탁도 범위는 200-500 NTU, 응집제주입량은 200-1,500 mg/L로 설정하였다. 초기 탁도와 응집제주입량의 2인자 설계를 하기 위하여 총 9개의 실험점과 실험 자체의 순수오차를 보정하기 위해 중앙점(350 NTU, 850 mg/L)을 5회 반복하여 총 13회의 실험을 수행하였다. 실험설계 및 분석은 통계프로그램인 미니탭(Minitab Inc. Release 17)을 사용하였다.

2.4. 분석방법

모든 실험은 Jar Tester (SF6, M-Tops)를 이용해 응집실험을 진행하였다. 탁도는 응집 전 후에 탁도계(HI88703-Turbidimeter, Hanna Instruments)를 이용하여 측정하였다. pH는 pH meter (UltraBasic, Denver Instrument)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

응집제 추출 방법에 따른 탁도 제거효율은 *M. oleifera*를 처리하지 않은 경우 76.0%, 증류수로 추출한 경우 66.0%, NaCl 수용액으로 추출한 경우 86.0%로 나타났다. 이는 NaCl이 모링가 단백질 추출 효율을 향상시켜 단백질 농도가 높아져 탁도 제거효율이 증가한 것으로 보인다.²¹⁾ 따라서 모든 실험은 탁도 제거효율이 가장 높은 NaCl 수용액에서 추출한 응집제를 사용하였다.

3.1. 교반강도와 시간

급속교반 강도에 따른 최대 탁도 제거효율(고정인자 : 탁도 500 NTU, 응집제 1,000 mg/L, 완속교반 40 rpm/20 분)은 200 rpm일 때 96.0%였다(Table 1). 급속교반 200 rpm에서 교반시간(1-2분)은 제거효율(94%)에 영향을 미치지 않았다. 완속교반 강도에 따른 제거효율(고정인자 : 탁도 500 NTU, 응집제 1,000 mg/L, 급속교반 200 rpm/1분)은 40 rpm일 때 96.0%로 탁도 제거효율이 가장 높았다. 이는 교반강도가 낮을 때는 플록 생성속도가 느리고, 높을 때는 플록이 깨지면서 정상상태의 플록의 크기가 작아지기 때문인 것으로 보인다.²²⁾ 완속교반 40 rpm에서 시간에 따른 제거효율은 20분일 때 94%로 가장 높았다(Table 1). 이는 완속교반의 시간이 길어질수록 플록형성 시간이 길어져 플록의 크기가 증가하지만, 일정 크기 이후에는 오히려 감소하기 때문이다.²³⁾ 이에 교반조건을 급속교반은 200 rpm에서 1분, 완속교반은 40 rpm에서 20분으로 하여 모든 실험을 진행하였다.

Table 1. Efficiency of turbidity removal with various mixing conditions.

	Mixing speed (rpm)	Mixing Time (min)	Initial turbidity (NTU)	Final turbidity (NTU)	Removal (%)
Rapid mixing ^{a)}	90	1	500	31	93.8
	120			28	94.4
	150			26	94.8
	200			20	96.0
	250			22	95.6
	200	1	500	30	94.0
Slow mixing ^{b)}		2		30	94.0
	10	20	500	26	94.8
	15			27	94.6
	30			23	95.4
	40			20	96.0
	45			26	94.8
	60			31	93.8
		10	500	60	88.0
		20		30	94.0
	40	30		45	91.0
		40		34	93.2
		50		35	93.0

a) Slow mixing : 40 rpm at 20 min

b) Rapid mixing : 200 rpm at 1 min

Fig. 1. Effect initial turbidity on turbidity removal with coagulant concentration.

3.2. 초기 탁도와 응집제주입량

초기 탁도 100 NTU에서는 66.0% (응집제주입량 : 470 mg/L), 250 NTU에서는 87.2% (응집제주입량 : 730 mg/L), 500 NTU에서는 96.0% (응집제주입량 : 1,000 mg/L)로 최대제거효율을 보였다(**Fig. 1**). 하지만 최적 응집제주입량 이상에서는 오히려 탁도 제거효율이 감소하였다. 선행논문¹¹⁾에서 초기 탁도 56 NTU일 때 63%, 102 NTU일 때 70%, 204 NTU일 때 88%의 제거효율을 보였고, 다른 선행논문¹⁾에서는 88 NTU일 때 79%, 194 NTU일 때 89%, 390 NTU일 때 94%였다(**Table 2**). Diaz의 연구¹²⁾에서는 202 NTU에

서 96%, 410 NTU에서 99%의 제거효율을 보였으며, Gidde의 연구¹⁷⁾에서는 50 NTU에서 77%, 150 NTU에서 92%, 450 NTU에서 98%의 제거효율을 보였다. 선행논문에서도 본 연구와 마찬가지로 탁도가 증가함에 따라 제거효율도 같이 증가하는 경향을 볼 수 있었다(**Table 2**). 높은 탁도는 더 많은 수의 입자를 포함하고 있으므로 응집제와의 충돌 가능성이 증가하고, 더 쉽게 침전될 수 있는 밀도 높은 플록이 형성될 수 있기 때문에 이러한 경향성을 보인 것으로 추정된다.¹¹⁾

선행논문¹⁾에 따르면 초기 탁도 88 NTU에서 160 mg/L의 응집제를 주입하였을 때 79%로 가장 큰 제거효율을 보였고 160 mg/L 전후로 제거효율이 낮아졌다(**Table 2**). 초기 탁도 204 NTU였던 논문¹¹⁾에서도 응집제주입량에 따라 제거효율이 달랐는데, 1,438 mg/L일 때 88%로 가장 높은 제거효율을 보였다. 초기 탁도가 450 NTU였던 논문¹⁷⁾에서는 240 mg/L의 응집제를 주입하였을 때 최대 98%의 제거효율을 보였다. 같은 탁도 조건(450 NTU)의 다른 논문¹⁹⁾에서는 *M. oleifera* 분말을 그대로 사용한 응집제 160 mg/L를 주입하였을 때는 99%, *M. oleifera*에서 지방을 제거하여 사용한 응집제 210 mg/L를 주입하였을 때는 98%까지의 제거효율을 나타냈다. 또 다른 선행논문¹⁸⁾에서 초기 탁도 200 NTU 조건에서 증류수에 *M. oleifera*를 추출한 응집제를 40 mg/L를 주입하였을 때 96%, 220 mg/L를 주입하였을 때 95%의 제거효율을 보였고, NaCl 수용액에 추출한 응집제

Table 2. Studies on *Moringa oleifera* seed coagulant for turbidity removal.

Influent water	Experimental conditions	Coagulant	Initial turbidity (NTU)	Turbidity removal (%)	References
River	pH 7.5 Phosphate buffer (0.1 M) extraction	0.05 mg/L	44	96	10
			91	99	
			333	99	
River	Distilled water extraction 100 rpm, 3 min / 15 rpm, 15 min	1,438 mg/L	56	63	11
			102	70	
			204	88	
River	1.0% NaCl solution (w/v) 200 rpm, 1 min / 40 rpm, 20 min	30 mg/L	202	96	12
		60 mg/L	410	99	
River	1 M NaCl solution + Powder (5% w/v) rapid 2 min / slow 20 min Surface water 80 mL/min	0.39 mL/min	126	76	13
River	Powder 100-120 rpm, 45 min in shaker	50 mg/L		27	14
		100 mg/L	15	43	
		150 mg/L		71	
River	100 ml deionized water + 1.0 g powder 352 rpm, 20 sec / 20 rpm, 40 min	50 mg/L	195	94	15
Pond	Tap water + Powder (5% w/v) 110 rpm, 3 min / 40 rpm, 20 min	20 mL/L	150	96	16
Synthetic (Bentonite)	Distilled water extraction 120 rpm, 1 min / 30 rpm, 15 min	70 mg/L	50	77	17
		120 mg/L	150	92	
		240 mg/L	450	98	
Synthetic (Kaolin)	Shelled seed 100 rpm, 4 min / 40 rpm, 25 min	40 mg/L (distilled water extraction)		96	18
		40 mg/L (1 M NaCl extraction)	200	97	
	Non-shelled seed 100 rpm, 4 min / 40 rpm, 25 min	220 mg/L (Distilled water extraction)		95	
		50 mg/L (1 M NaCl extraction)		95	
Synthetic (Kaolin)	Distilled water extraction 100 rpm, 4 min / 40 rpm, 25 min	160 mg/L	88	79	1
		300 mg/L	194	89	
		400 mg/L	390	94	
Synthetic (Kaolin)	Distilled water + Powder (5% w/v) 100 rpm, 2 min / 40 rpm, 20 min	10 mL/L (Shelled seed powder)	105	93	2
		10 mL/L (Non-shelled seed powder)	105	91	
Synthetic (Kaolin)	1 M NaCl 500 ml + 5 g powder 120 rpm, 1 min / 30 rpm, 15 min	210 mg/L (De-oiled powder)	450	98	19
		160 mg/L (Crude powder)		99	
Synthetic (Kaolin)	1% NaCl solution 200 rpm, 1 min / 40 rpm, 20 min	470 mg/L	100	66	This study
		730 mg/L	250	87	
		1,000 mg/L	500	96	

를 40 mg/L를 주입했을 때 97%, 50 mg/L를 주입했을 때 95%의 제거효율을 보였다. 이는 본 연구와 마찬가지로 응집제주입량이 많을수록 효율이 증가하는 것이 아닌 적정 응집제주입량이 존재한다는 것을 알 수 있었다(Table 2). 과량의 응집제 주입은 응집제 결합의 포화를 일으키고, 더 많은 입자간의 결합을 형성하기에 응집 대상 입자 수가 부족해져 과량의 응집제는 표면 하전을 역전시키고, 플록간의 반발력을 유발하여 응집효율을 떨어뜨리기 때문인 것으로 생각된다.²⁴⁾

*M. oleifera*를 응집제로 사용하여 탁도를 제거한 논문을 분석한 결과, 논문별로 응집제주입량은 응집제 제작방법에 따라 최소 0.05 mg/L에서 최대 1,438 mg/L로 차이는 있지만, 초기 탁도가 높아질수록 최대 99%까지의 제거효율을 보였다(Table 2). 초기 탁도에 따른 제거효율의 변화는 원수의 종류가 강물(river water), 호소수(pond water), 합성폐수(synthetic wastewater)에 상관없이 초기 탁도가 높을수록 제거효율이 증가하고, 낮을수록 떨어지는 유사한 경향성을 보였다.

Table 3. Experimental design and observed turbidity removal.

Trial	Independent variables		Observation
	Initial turbidity (NTU)	Coagulant (mg/L)	Turbidity removal (%)
1	200	200	65.0
2	200	1,500	70.0
3	500	200	92.6
4	500	1,500	95.4
5 ^{a)}	350	850	87.0±2.4
6	200	850	80.0
7	350	200	78.6
8	350	1,500	91.4
9	500	850	95.4

^{a)} Center point was replicated five times (average±standard deviation).

Fig. 2. Turbidity removal efficiency with initial pH.

3.3. pH

초기 pH에 따른 제거효율(고정인자 : 초기 탁도 500 NTU, 응집제주입량 1,000 mg/L)은 pH 8일 때 96.5%로 최대 탁도 제거효율을 보였다(Fig. 2). pH 4에서 93%, pH 6에서 94%, pH 10에서 95.4%, pH 12에서 94.2%로 pH 8을 전·후로 제거효율이 서서히 떨어지는 경향을 보였다. 그에 반해 pH 2에서는 84.5%로 제거효율이 급격히 떨어지는 모습을 보였다. 이는 낮은 pH 조건에서는 kaolin 입자의 음이온성 성질이 뚜렷하지 않아 응집제의 효과가 떨어진 것으로 보인다. 염기성 조건이 산성조건에 비해 제거 효율 하락 폭이 상대적으로 작았는데 pH 7보다 높은 조건에서는 탁도 유발 물질인 kaolin 입자들이 모두 음전하를 띠게 되어 *M. oleifera*에서 추출된 양이온성의 고분자전해질과 흡착이 잘 이루어지는 것으로 추정된다.⁸⁾ 선행 논문에서도 pH 7-10 범위에서 최적 탁도 제거를 보여 본 실험결과와 유사하였다.⁸⁾

3.4. 반응표면분석법

독립변수로 초기 탁도(initial turbidity, $[IT]$)와 응집제주입

량(coagulant, $[C]$), 탁도 제거효율(turbidity removal)을 종속 변수로 중심합성설계법에 따라 진행된 실험결과는 실험범위 내에서 탁도 제거효율이 65.0-95.5%로 나타났다(Table 3). 먼저 중앙점을 포함한 9개의 실험(Table 3, Trial 1-5)을 실행하여 탁도 제거의 반응표면을 설명하는 1차 모델의 적합성을 시험하였다. 통계적 유의성 검증 시 95% 신뢰수준(confidence level)에서 p 값이 0.05보다 작을 때 유의하고, 적합성 결여(lack of fit)의 p 값은 0.05보다 커야 적합한 모델이다. 실험점에 대한 1차 선형모델의 p 값이 0.05, 결정계수(coefficient of determination, R^2)가 88.3%로 나타났으나, 적합성 결여는 p 값이 0.046으로 적합하지 않은 모델로 분석되어 고차 모델을 테스트하기 위해 4개의 지점(Table 3, Trial 6-9)을 추가 실험하여 2차 모델로 분석하였다. 2차 모델 중 p 값이 0.003, 결정계수가 88.8%, 적합성 결여의 p 값이 0.091로 유의성이 인정되었지만, $[IT]$, $[C]$ 의 p 값이 0.001이하, 0.078로 초기 탁도와 탁도 제거효율 간의 상관관계는 유의했으나, 응집제주입량과 제거효율과의 상관관계를 도출해 낼 수 없었다. 하지만 일반적으로 응집제주입량은 탁도 제거에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있어 수학·통계적으로 상관관계가 있는 모델을 도출하고자 하였다.²⁵⁾ 이에 p 값이 0.795로 가장 높은 $[C] \times [IT]$ 항 제거 후 모델을 분석한 결과, 모델의 p 값이 0.001, 결정계수는 88.7%로 나타났으며, 적합성 결여의 p 값은 0.132로 유의성이 인정되었다. 하지만 $[C]$ 의 p 값이 0.059로 여전히 높았고, 이에 p 값이 0.581로 가장 높은 $[IT]^2$ 항을 소거하였다. 모델의 p 값이 0.001보다 작았고, 결정계수는 88.2%, 적합성 결여의 p 값은 0.166로 유의하였다. $[C]$ 의 p 값이 0.048, $[IT]$ 의 p 값이 0.001보다 작아 초기 탁도와 응집제주입량이 탁도 제거와의 유의성이 인정되었다. 이에 따라 식 (1)과 같은 회귀 모형식이 신뢰 가능한 모델로 도출되었으며, 잔차 그래프에서 실험값과 잔차가 어떠한 경향성을 나타내지 않아 식 (1)의 신뢰성을 추가적으로 확인할 수 있었다(Fig. 3).

Fig. 3. Residual plots of the quadratic model (Eq. 1) for turbidity removal.

$$\text{Turbidity removal (\%)} = 47.86 + 0.02352[IT] + 0.0760[C] - 0.000011[C]^2 \quad (1)$$

본 실험에서 전체적으로 초기 탁도가 증가함에 따라 탁도 제거효율이 증가하는 경향성을 보였고, 응집제주입량이 증가할수록 탁도 제거효율이 점점 증가하지만, 일정 지점 이상으로 과량의 응집제를 주입할 경우 오히려 탁도 제거효율이 낮아지거나 효율이 향상되는 폭이 점점 줄어드는 경향을 보였다(Fig. 4). 중심합성설계법으로 시행한 *M. oleifera*를 이용한 응집 실험범위 내에서 탁도 제거효율에 미치는 영향은 응집제주입량($p=0.048$)보다 초기 탁도($p<0.001$)가 더 컸다.

4. 결론

본 실험에서 *M. oleifera* 씨앗을 1% NaCl 수용액에 추출한 응집제가 탁도 제거효율이 가장 높았다. 초기 탁도가 높을수록 제거효율이 증가하였다. 응집제주입량이 증가함에 따라 탁도 제거효율이 증가하였으나 적정량 이상이 주입되면 오히려 감소하였다. 급속교반 200 rpm에서 1분, 완속교반 40 rpm에서 20분, pH 8에서 탁도 제거효율이 가장 높았다. *M. oleifera* 씨앗 응집제를 이용하여 탁도를 제거할 때 응집제주입량과 초기 탁도의 영향을 반응표면분석법으로 성공적으로 분석하였다. 실험범위 내에서 *M. oleifera*를 이용한 탁도 제거에 미치는 영향은 응집제주입량보다 초기 탁도의 영향이 더 컸다. 최적 탁도제거 효율을 얻기 위해 적정 응집제 양을 주입함으로써 응집제의 과도한 사용을 줄일 수 있다. *M. oleifera*를 이용한 천연 응집제는 환경에 영향을 최소화하며 탁도를 제거할 수 있는 데 의의가 있다.

Acknowledgements

이 논문은 2018년도 정부(교육부) 재원으로 한국연구재단

Fig. 4. Two- and three-dimensional contour plots of turbidity removal with respect to coagulant concentration and initial turbidity within the design boundaries.

의 기초연구지원사업(NRF-2018R1D1A1B07041451) 및 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단 - 현장맞춤형 이공계 인재양성지원사업(No. 2017H1D8A1028271)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. S. Katayon, M. J. Megat Mohd Noor, M. Asma, L. A. Abdul Ghani, A. M. Thamer, I. Azni, J. Ahmad, B. C. Khor, A. M. Suleyman, Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* seeds on its performance in coagulation, *Bioresource Technol.*, 97, 1455-1460(2006).
2. A. Ndabigengesere, K. S. Narasiah, Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds, *Water Res.*, 32, 781-791(1998).
3. U. Gassenschmidt, K. D. Jany, B. Tauscher, H. Niebergall, Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam, *Biochim. Biophys. Acta.*, 1243, 477-481(1995).
4. H. Makkar, K. Becker, Nutrients and antiquality factors in different morphological parts of the *Moringa oleifera* tree, *J. Agr. Sci.*, 128, 311-322(1997).

5. R. Sanghi, B. Bhattacharya, B. Singh, Cassia angustifolia seed gum an effective natural coagulant for decolourisation of dye solutions, *Green Chem.*, 4, 252-254(2002).
6. A. Ndabigengesere, N. S. Narasiah, B. G. Talbot, Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*, *Water Res.*, 29, 703-710(1995).
7. A. Celekli, A. I. Al-Nuaimi, H. Bozkurt, Adsorption kinetic and isotherms reactive red 120 on *Moringa oleifera* seed as an eco-friendly process, *J. Mol. Struct.*, 1195, 168-178, (2019).
8. C. Y. Yin, Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment, *Process Biochem.*, 45, 1437-1444(2010).
9. T. Okuda, A. U. Baes, W. Nishijima, M. Okada, Coagulation mechanism of salt solution-extract active component in *Moringa oleifera* seeds, *Water Res.*, 35, 830-834(2001).
10. E. N. Ali, S. A. Muyibi, H. M. Salleh, M. R. M. Salleh, M. Z. Alam, *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant for water treatment, *Int. Water Technol. Conf.*, 13, 163-168(2009).
11. A. T. A. Baptista, M. O. Silva, R. G. Gomes, R. Bergamasco, M. F. Vieira, A. M. S. Vieira, Protein fractionation of seeds *Moringa oleifera* lam and its application in superficial water treatment, *Sep. Purif. Technol.*, 180, 114-124(2017).
12. J. J. F. Diaz, G. B. Dajud, J. P. R. Miranda, Influence of storage time of *Moringa oleifera* seed on the coagulant activity efficiency for raw water treatment, *Indian J. Sci. Tech.*, 11(9), 1-4(2018).
13. J. B. Heredia, J. S. Martin, Improvement of water treatment pilot plant with *Moringa oleifera* extract as flocculant agent, *Environ. Technol.*, 30(6), 525-534(2009).
14. C. P. Kulkarni, Evaluation of *Moringa oleifera* seed as coagulant for water treatment, *Int. J. Bot. Stud.*, 2(6), 38-40(2017).
15. G. Sarpong, C. P. Richardson, Coagulant efficiency of *Moringa oleifera* for removal of turbidity and reduction of total coliform as compared to aluminum sulfate, *Afr. J. Agr. Res.*, 5(21), 2939-2944(2010).
16. M. E. Sengupta, B. Keraita, A. Olsen, O. K. Boateng, S. M. Thamsborg, G. R. Palsdottir, A. Dalsgaard, Use of *Moringa oleifera* seed extracts to reduce helminth egg numbers and turbidity in irrigation water, *Water Res.*, 46, 3646-3656(2012).
17. M. R. Gidde, A. R. Bhalarao, C. N. Malusare, Comparative study of different forms of *Moringa oleifera* extracts for turbidity removal, *Int. J. Eng. Res. Dev.*, 2(1), 14-21(2012).
18. M. Golestanbagh, I. S. Ahamad, A. Idris, R. Yunus, Effect of storage of shelled *Moringa oleifera* seeds from reaping time on turbidity removal, *J. Water Health*, 9(3), 597-602(2011).
19. K. Ravikumar, A. K. Sheeja, Water clarification using *Moringa oleifera* seed coagulant, 2012 International Conference on Green Technologies, IEEE, Trivandrum, India, pp. 64-70(2012).
20. Korea Environment Corporation, Water treatment plant operation and management manual, Korea Environment Corporation, Korea(2012).
21. G. S. Madrona, I. G. Branco, V. J. Seolin, B. A. A. Filho, M. R. Fagundes-Klen, R. Bergamasco, Evaluation of extract of *Moringa oleifera* lam seeds obtained with NaCl and their effects on water treatment, *Acta Scientiarum Technol.*, 34(3), 289-293(2012).
22. F. Xiao, P. Yi, X. R. Pan, B. J. Zhang, C. Lee, Comparative study of the effects of experimental variables on growth rates of aluminum and iron hydroxide flocs during coagulation and their structural characteristics, *Desalination*, 250, 902-907(2010).
23. T. I. Kim, M. Y. Han, H. R. Kim, Y. H. Kim, The effects of sedimentation efficiency by the changes of g and t value in flocculation process, *J. Korean Soc. Civil. Eng.*, 3754-3757(2007).
24. S. A. Muyibi, L. M. Evison, Optimizing physical parameters affecting coagulation of turbid water with *Moringa oleifera* seeds, *Water Res.*, 29(12), 2689-2695(1995).
25. M. M. Momeni, D. Kahforoushan, F. Abbasi, S. Ghanbarian. Using Chitosan/CHPATC as coagulant to remove color and turbidity of industrial wastewater: Optimization through RSM design, *J. Environ. Manage.*, 221, 347-355(2018).

Authors

Bong Min Kim

Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Undergraduate Student, ORCID[®] 0000-0002-6799-0382

Hee Yun Lee

Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Undergraduate Student, ORCID[®] 0000-0002-3525-0734

Johng-Hwa Ahn

Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Professor, ORCID[®] 0000-0001-5745-5338