



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

Pre-coated 진공여과 슬러지 탈수공정의 최적화



2019년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

지구환경시스템과학부 환경공학전공

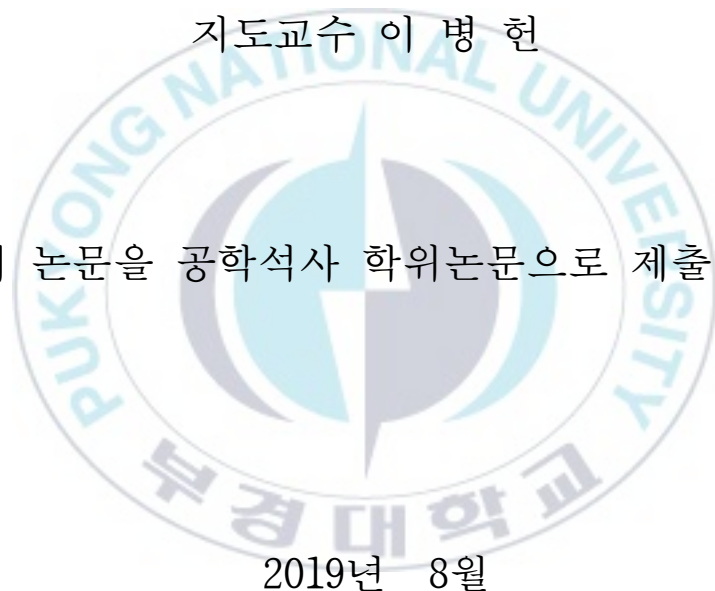
박 혜 빈

공 학 석 사 학 위 논 문

Pre-coated 진공여과 슬러지 탈수공정의 최적화

지도교수 이 병 헌

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2019년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

지구환경시스템과학부 환경공학전공

박 혜 빈

박혜빈의 공학석사 학위논문을 인준함.

2019년 08월 23일

위 원 장 공학박사 강 임 석 (인)

위 원 공학박사 손 윤 석 (인)

위 원 공학박사 이 병 헌 (인)

목 차

목 차	I
List of Figures	IV
List of Tables	VIII
Abstract	XIII
 제 1 장 서 론	 1
 제 2 장 문헌연구	 3
2.1 규조토 여과	3
2.1.1 규조토 특징 및 활용	3
2.1.2 규조토 여과기술	5
2.2 여과보조제	7
2.2.1 숯	7
2.2.2 굴 껍데기 가루	8
2.2.3 돌로마이트	9
2.3 슬러지	11
2.3.1 슬러지의 정의 및 특성	11
2.3.2 슬러지 탈수	12
2.3.3 하수 슬러지	12
2.3.4 분뇨 슬러지	16
 2.4 퇴비화	 18

제 3 장 실험재료 및 방법	19
3.1 실험재료 및 장치	19
3.1.1 여과 재료(규조토 및 여과보조제)	19
3.1.2 대상 슬러지(하수, 분뇨 슬러지)	20
3.1.3 pre-coat 진공 여과 실험 장치	21
3.2 실험방법 및 계획	22
3.2.1 수질분석법	22
3.2.2 반응표면법에 의한 pre-coat 진공 여과 실험	22
3.2.3 혼합물 실험법에 의한 여과보조제 혼합비 실험	24
제 4 장 실험결과 및 고찰	26
4.1 하수 슬러지의 pre-coat 진공 여과 특성	26
4.1.1 진공압력, 여과시간에 따른 탈수케익의 수분함량	26
4.1.2 진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 총질소 제거	33
4.1.3 진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 총인 제거	38
4.1.4 진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 BOD 및 SS 제거	43
4.1.5 하수 슬러지의 pre-coat 진공 여과시 수분함량, 총질소 및 총인 제거를 고려한 최적운전조건	44
4.2 분뇨 슬러지 pre-coat 진공 여과 특성	45
4.2.1 진공압력, 여과시간에 따른 탈수케익의 수분함량	45

4.2.2	진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 총질소 제거	51
4.2.3	진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 총인 제거	56
4.2.4	진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 BOD 및 SS 제거	61
4.2.5	분뇨 슬러지의 pre-coat 진공 여과 시 수분함량, 총질소 및 총인 제거를 고려한 최적운전조건	62
4.3	pre-coat 진공 여과 여과보조제의 최적혼합비	63
4.3.1	여과보조제의 혼합비에 따른 탈수케익의 수분함량	63
4.3.2	여과보조제의 혼합비에 따른 탈리액의 총질소 제거	68
4.3.3	여과보조제의 혼합비에 따른 탈리액의 총인 제거	72
4.3.4	여과보조제의 혼합비에 따른 탈리액의 BOD 제거	76
4.3.5	여과보조제의 혼합비에 따른 탈리액의 SS 제거	80
4.3.6	분뇨 슬러지의 pre-coat 진공 여과 시 수분함량, 총질소, 총인 및 BOD 제거를 고려한 여과보조제의 최적혼합비	81
4.4	분뇨처리장 슬러지의 구조토 여과 케익의 퇴비화 활용성	82
4.4.1	분뇨처리장 슬러지 케익의 유기물 분석	82
4.4.2	분뇨처리장 슬러지 케익의 중금속 분석	83
제 5 장	결 론	85
참 고 문 헌		87

List of Figures

Fig. 3.1.	Sludge Treatment System of Southern laboratory	20
Fig. 3.2.	Sludge Treatment System of Sanitary laboratory	20
Fig. 3.3.	A schematic diagram of the experimental process	21
Fig. 4.1.	(a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and filtration time (min) according to the water content(%) of sewage sludge	28
Fig. 4.2.	Plots of experimented value vs predicted values derived from model of Water content (%) of Sewage Sludge	32
Fig. 4.3.	Main Effects Plot for Water content (%) of Sewage Sludge	32
Fig. 4.4.	(a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and filtration time (min) according to the TN removal (%) of sewage sludge	34
Fig. 4.5.	Plots of experimented value vs predicted values derived from model of TN removal (%) of Sewage Sludge	37
Fig. 4.6.	Main Effects Plot for TN removal (%) of Sewage Sludge	37
Fig. 4.7.	(a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and	

filtration time (min) according to the TP removal (%) of sewage sludge	39
Fig. 4.8. Plots of experimented value vs predicted values derived from model of TP removal (%) of Sewage Sludge	42
Fig. 4.9. Main Effects Plot for TP removal (%) of Sewage Sludge	42
Fig. 4.10. Contour plots for deriving optimum operating conditions (a)considering water content, TN and TP removal rates, (b)considering TN and TP removal rates of sewage sludge	44
Fig. 4.11. (a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and Filtration time (min) according to the Water content(%) of Night Soil Sludge	46
Fig. 4.12. Plots of experimented value vs predicted values derived from model of Water content (%) of Night Soil Sludge	49
Fig. 4.13. Main Effects Plot for Water content (%) of Night Soil Sludge	50
Fig. 4.14. (a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and Filtration time (min) according to the TN removal (%) of Night Soil Sludge	52
Fig. 4.15. Plots of experimented value vs predicted values derived from model of TN removal (%) of Night	

Soil Sludge	55
Fig. 4.16. Main Effects Plot for TN removal (%) of Night Soil Sludge	55
Fig. 4.17. (a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and Filtration time (min) according to the TP removal (%) of Night Soil Sludge	57
Fig. 4.18. Plots of experimented value vs predicted values derived from model of TP removal (%) of Night Soil Sludge	60
Fig. 4.19. Main Effects Plot for TP removal (%) of Night Soil Sludge	60
Fig. 4.20. Contour plots for deriving optimum operating conditions (a)considering water content, TN and TP removal rates, (b)considering TN and TP removal rates of Night soil sludge	62
Fig. 4.21. (a) Mixture Contour plots and (b) Three-dimensional response Mixture surface plots of mixing ratio of mixture according to the Water content(%) of Night Soil Sludge	65
Fig. 4.22. Main Effects Plot for Water content (%) of Night Soil Sludge according to mixing ratio of mixture	67
Fig. 4.23. (a) Mixture Contour plots and (b) Three-dimensional response Mixture surface plots of mixing ratio of mixture according to the TN removal (%) of Night	

Soil Sludge	69
Fig. 4.24. Main Effects Plot for TN removal (%) of Night Soil Sludge	71
Fig. 4.25. (a) Mixture Contour plots and (b) Three-dimensional response Mixture surface plots of mixing ratio of mixture according to the TP removal (%) of Night Soil Sludge	74
Fig. 4.26. Main Effects Plot for TP removal (%) of Night Soil Sludge	75
Fig. 4.27. (a) Mixture Contour plots and (b) Three-dimensional response Mixture surface plots of mixing ratio of mixture according to the BOD removal (%) of Night Soil Sludge	78
Fig. 4.28. Main Effects Plot for BOD removal (%) of Night Soil Sludge	79
Fig. 4.29. Mixture Contour plots for deriving optimum operating conditions considering water content, TN and TP and BOD removal rates of Night Soil sludge	81

List of Table

Table 2.1.	Chemical composition of Diatomite	4
Table 2.2.	Chemical composition of oyster-shell	9
Table 2.3.	Physical properties of oyster-shell	9
Table 2.4.	Sewage generation by year(unit : m ³ /day)	14
Table 2.5.	Sewage sludge treatment status by year (unit : ton/year)	15
Table 2.6.	Night soil generation by year (unit : m ³ /day) ·	17
Table 2.7.	Night soil sludge treatment status by year (unit : ton/year)	17
Table 3.1.	Pump Specifications	21
Table 3.2.	Abbreviations and meanings used in statistical programs	24
Table 3.3.	Pre-coat diatomite filtration Experiment conditions for sewage and night soil sludge	25
Table 3.4.	Optimization experiment conditions of filtration aids as a pre-coat material for night soil sludge ·	25
Table 4.1.	Water content(%) of Sewage Sludge on each case	27
Table 4.2.	Estimated Regression Coefficients for Sewage sludge Water content (%)	28
Table 4.3.	Analysis of Variance for Sewage sludge Water content (%)	29

Table 4.4.	R-squared of models	29
Table 4.5.	Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of Water content (%) of Sewage Sludge	31
Table 4.6.	TN removal(%) of Sewage Sludge on each case	34
Table 4.7.	Estimated Regression Coefficients for Sewage sludge TN removal (%)	35
Table 4.8.	Analysis of Variance for Sewage sludge TN removal (%)	36
Table 4.9.	R-squared of models	36
Table 4.10.	Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of TN removal (%) of Sewage Sludge	36
Table 4.11.	TP removal(%) of Sewage Sludge on each case	39
Table 4.12.	Estimated Regression Coefficients for Sewage sludge TP removal (%)	40
Table 4.13.	Analysis of Variance for Sewage sludge TP removal (%)	41
Table 4.14.	R-squared of models	41
Table 4.15.	Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of TP removal (%) of Sewage Sludge	41
Table 4.16.	BOD & SS removal(%) of Sewage Sludge on each case	43

Table 4.17.	Water content(%) of Night Soil Sludge on each case	46
Table 4.18.	Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge Water content (%)	47
Table 4.19.	Analysis of Variance for Night Soil sludge Water content (%)	47
Table 4.20.	R-squared of models	47
Table 4.21.	Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of Water content (%) of Night Soil Sludge	49
Table 4.22.	TN removal(%) of Night Soil Sludge on each case	52
Table 4.23.	Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge TN removal (%)	53
Table 4.24.	Analysis of Variance for Night Soil sludge TN removal (%)	54
Table 4.25.	R-squared of models	54
Table 4.26.	Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of TN removal (%) of Night Soil Sludge	54
Table 4.27.	TP removal(%) of Night Soil Sludge on each case	57
Table 4.28.	Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge TP removal (%)	58
Table 4.29.	Analysis of Variance for Night Soil sludge TP removal (%)	58

Table 4.30.	R-squared of models	58
Table 4.31.	Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of TP removal (%) of Night Soil Sludge	60
Table 4.32.	BOD & SS removal(%) of Night Soil Sludge on each case	61
Table 4.33.	Water content(%) of Night Soil Sludge on each case according to mixing ratio of mixture	64
Table 4.34.	Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge Water content (%) according to mixing ratio of mixture	65
Table 4.35.	Analysis of Variance for Night Soil sludge Water content (%) according to mixing ratio of mixture	66
Table 4.36.	R-squared of models	66
Table 4.37.	TN removal(%) of Night Soil Sludge on each case	69
Table 4.38.	Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge TN removal (%)	70
Table 4.39.	Analysis of Variance for Night Soil sludge TN removal (%)	71
Table 4.40.	R-squared of models	71
Table 4.41.	TP removal(%) of Night Soil Sludge on each case	73
Table 4.42.	Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge TP removal (%)	74

Table 4.43.	Analysis of Variance for Night Soil sludge TP removal (%)	75
Table 4.44.	R-squared of models	75
Table 4.45.	BOD removal (%) of Night Soil Sludge on each case according to mixing ratio of mixture	77
Table 4.46.	Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge BOD removal (%) according to mixing ratio of mixture	78
Table 4.47.	Analysis of Variance for Night Soil sludge BOD removal (%) according to mixing ratio of mixture	79
Table 4.48.	R-squared of models	79
Table 4.49.	SS removal(%) of Night Soil Sludge on each case according to mixing ratio of mixture	80
Table 4.50.	Analysis of organic matter content of night soil sludge cake	82
Table 4.51.	Heavy metal experiment case of night soil sludge cake (unit : %)	83
Table 4.52.	Heavy metal concentration of night soil sludge cake in each case and standard concentration (unit : mg/kg)	83

Optimization of pre-coated vacuum filtration for sludge dewatering process

Hyebin Park

Division of Earth Environmental System Sciences,
Major of Environmental Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

This study is designed to find out the effect on Total Nitrogen, Total Phosphorus, Biochemical Oxygen Demand and Suspended Solids of the dewatering solution and reduction of moisture content of the night soil and sewage sludge in the pre-coated filter process using a mixture of diatomite and natural materials.

Reducing the amount of night soil and sewage sludge dewatering cakes can reduce the operating costs of the sludge treatment facility. Therefore, it was considered that water treatment of sludge cake and water treatment of filtrate would be necessary.

The experiment can be divided into two main types: first experiment is vacuum pressure and filtration time are set as parameters, vacuum pressure is set at 420–600 mmHg, and filtration time is set at 19–25min.

The second experiment was to filter the night soil sludge by mixing the diatomite and filtration supplement properly. Variables contained in oyster shell, charcoal powder, and dolomite were fixed at 50% and filtered for 22min. The results showed that the greater the vacuum pressure and the greater the filtration time, the smaller the moisture content of the sludge dehydration cake, and the higher the TN, TP and BOD removal rate of the dewatering filtrate. And the moisture content of sludge dehydration cake was smaller when dolomite was mainly achieved rather than oyster shell and charcoal powder, and the rate of removal of TN, TP and BOD of the dewatering filtrate increased.

제 1 장 서론

하수처리장은 수처리 시설, 슬러지 처리시설, 반류수 처리시설로 이루어져 있다(부산환경공단). 총인 기준 강화로 인한 약품 사용으로 화학 슬러지가 증가되며, 동절기 총질소의 기준 강화로 슬러지 발생량이 증가하여 수처리 공정에 반류량 부담이 되어 슬러지 부하량이 증가했다(서울특별시 상수도사업본부, 2016). 그러므로 기존 공정인 혐기성 소화조 및 농축조, 반류수 처리시설로 가는 과정에서 규조토 여과를 실행하여 슬러지 케익의 수분함량을 줄이고, 탈리여액의 수질을 감소시키는데 목적을 두었다. 그리고 분뇨처리장의 경우에는 전처리 시설의 노후화로 인하여 시설 개선이 필요한 실정이다(환경부, 2014). 드림스크린 전처리 후 수처리조로 유입되는 슬러지를 규조토 여과를 한 후 수처리조로 보낼 경우 규조토 여과에 의해 방류수 수질 개선 및 약품 사용량이 절감되고 그에 따른 화학 슬러지 발생량을 감소시킬 수 있다고 판단된다.

슬러지 처리공정 중 중요한 단계인 탈수는 슬러지로부터 수분을 제거하여 최종 최분지까지의 운반비 절감 및 매립작업에 지장이 없도록 하는 과정이다(서울특별시 상수도사업본부, 2016). 또한 탈수 공정은 탈수 효율이 높고 탈리액 농도가 낮고 케이크 함수율이 낮고 가격이 비교적 저렴하고 무기물 슬러지에 적용성이 우수하다는 장점이 있다. 가압탈수는 슬러지의 성상에 따라 처리효율이 차이가 나며 유지관리비가 많이 들고 동력소모가 크다는 점 등의 경제적 이유로 국내 사용실적이 현재까지 거의 없으며 유럽에서 많이 이용되고 있다(수도권매립지관리공사, 2014).

이러한 탈수를 적용하는 규조토 여과과정은 운전이 간편하고, 작은 면

적이 소요되며, 또 염소소독으로 살멸하기 어려운 *Entamoeba histolytica* cyst 등 병원성 미생물을 효과적으로 제거할 수 있고 규조토의 Al 흡착 작용에 의해 잔류알루미늄을 제거할 수 있는 장점도 있다(신대운, 2004).

현재 규조토 여과는 제당, 비료, 식물성 밀크류, Oil, 맥주 등의 공장에서 필연적으로 사용되는 여과공정에서 사용되며. 산업의 발달에 따라 일반화학공장, 식품공장 및 제약공장 등에서 매우 다양하게 그 수요가 급증하고 있다(윤석호, 1987).

규조토 pre-coated filter 공정에서 진공압력과 여과시간에 대한 실험과 여과보조제의 최적혼합비에 대한 실험은 통계프로그램인 Mintitab 15을 이용하여 설계하였다.

부산광역시 처리장의 탈수기 유입 전 하수 및 분뇨 슬러지를 규조토 pre-coated filter 공정을 적용하여 만들어진 탈수케익의 함수율 및 탈리여액의 오염물질농도를 분석하였다. 그 결과 진공압력(mmHg), 여과시간(min) 두개의 인자의 최적 조건을 파악하였다. 또한 규조토 및 여과보조제의 함량에 따른 탈수기 유입 전 분뇨 슬러지의 탈수케익 함수율 및 탈리여액의 오염농도를 측정하였다. 측정된 결과로 여과보조제의 최적 배합비를 찾는 데 목적이 있다. 그리고 Pre-coated filter 공정을 이용하여 분뇨 슬러지 탈수케익이 퇴비화로 쓰이는지 파악하는데 목적이 있다.

제 2 장 문헌연구

2.1. 규조토 여과

2.1.1 규조토 특징 및 활용

규조토는 평균 크기 50-100 μm 크기의 규조류라고 불리는 부유성 조류껍데기로 이루어진 퇴적물의 집합체이며 연한색의 부드럽고 가벼운 퇴적암이다(유재영, 2002; 강진수, 2018; Y Al-Degs, 2001). 또한 민물 또는 바닷물에 번식하는 단세포의 은화식물인 규조의 유해가 퇴적한 흙덩어리를 의미한다. 이런 규조는 한 개의 핵과 미량의 원형질로 구성되어 있으며, 규조의 화학적 조성은 Table 2.1.를 보면 알 수 있듯이 거의 SiO_2 로 구성되어 있다(강진수, 2018; 산업자원부, 2008). 규조토의 결정 구조는 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 와 같은 이온 교환성 양이온을 함유한다(Emin Erdem, 2005).

규조토의 평균 기공사이즈는 10.625 nm이고 기공 크기 분포는 다양하며 규조토의 비표면적과 단층 용량은 각각 18.8 m^2/g 및 4.3 cm^3/g 이다(Guodong Sheng, 2009). 또한 규조 자체의 복잡한 구조와 그 껍데기의 일차 및 이차 공극 때문에 규조토는 낮은 밀도와 미세공극을 가진다(강진수, 2018; 윤석호, 1987). 그리고 큰 비표면적 및 높은 흡착능력, 화학적 불활성, 독특한 물리적 특성을 가지고 있어서(Ahmet Erdal Osmanlioglu, 2007; Sanja Martinovic, 2006; ZHANG, 2009) Cake filtration의 효율을 증진시키고 액상 원료 물질을 0.5-4배까지 흡수 하더라도 분말로 유지할

수 있다(강진수, 2018; 윤석호,1987).

Table 2.1. Chemical composition of Diatomite

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
89.50%	4.10%	1.50%	0.60%	0.3%

규조토는 다양한 성질을 가지고 있으므로 여러 용도로 활용되는데 많이 사용되는 용도로는 여과제, 흡착제, 응집제, 단열재, 첨가제, 흡수제, 단열재, 살충제 등이 있다(산업자원부, 2008; ZHANG, 2009; Sanja Martinovic, 2006).

규조토는 높은 공극률과 투수율을 갖는데 이러한 점은 액체로부터 0.5 μm 보다 작은 입자를 여과할 수 있다. 그렇기 때문에 1920년부터 여과제로 규조토를 많이 사용하였다(유재영, 2000). 그리고 525℃ 이상의 온도에서 석면이나 고토보다 수축이 강하며, 적열에 깨지지 않는 성질을 가지므로 단열재로 사용되며, 보일러, 용광로 등 고온상태를 유지할 필요가 있는 기구의 단열재로 사용된다. 또한 낮은 밀도, 높은 흡수성, 화학 안정성 그리고 색소의 역할에 영향을 받지 않으므로 첨가제로 사용되며 이때 규조토의 크기는 1-50 μm 정도이다. 규조토를 첨가제로 적용할 수 있는 부분은 페인트 산업, 플라스틱, 폴리에틸렌 산업이다(산업자원부, 2008).

2.1.2 규조토 여과기술

규조토 여과기술은 다량의 고-액분리를 효과적으로 실시하기 위한 방법으로 규조토를 미리 코팅한 후 여과하는 가압여과방법이다(김용선, 2003; 윤석호, 1989). 운전시간에 따라 여과압력은 상승하고, 유량은 감소한다(유재영, 2000).

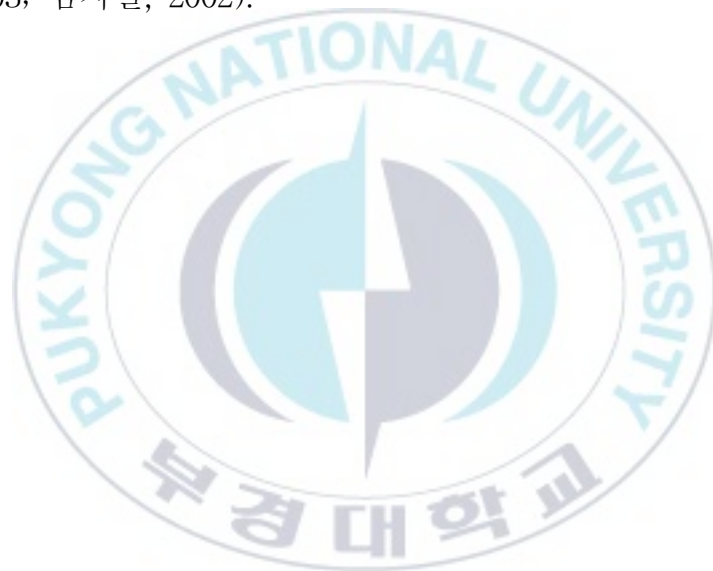
규조토 여과기술은 사전피복 과정과 여과액 주입과정에서 이용되며 여과보조제로 사용되는 규조토는 분말을 사용하며, 여과 시 사용할 때는 불순물이 끼지 않도록 맑은 물을 사용해서 균일하게 혼합하여 진행해야 한다(유재영, 2000; 김지열, 2002).

사전 피복 과정에서는 균일하게 섞어서 만든 규조토를 주입하여 다공질체 또는 막이 생기도록 해야 한다. 이 막을 생성시키는 이유는 여과기의 투수성을 유지시키고 작은 덩어리를 붙잡아 두어 여과 직후부터 탈리액이 맑아져 깨끗하게 하기 위함이다. 또한, 사전피복물은 쉽게 떼어낼 수 있어 제거가 용이하다(유재영, 2000). 그리고 여과막 시스템은 큰 입자에 의해서 손상되기 쉬우며 수리하는데도 비싸지만 규조토 장치는 다른 여과막 장치보다 설치비용이 절반정도이며, 운영비용은 1/3 정도이다. 운전이 간편하고, 적은 면적이 소요되며 기존의 여과방법보다 큰 여과속도로 운전이 가능하여 중수도 등 기타 다양한 용도로의 재이용이 가능하다(산업자원부, 2008; 이은기, 2007).

여과액 주입과정에서는 pre-coat 되어있는 피복층에 원수 중 입자성 물질들은 규조토 cake로 여과하여 제거하고 용존성 물질은 규조토에 흡착되어 제거함으로 처리수가 생산된다. 규조토 피복층에 슬러지 및 불순물을 주입하면 규조토가 가지는 투수성을 이용하여 여과액은 통과하게 하고 여과되지 못한 입자들은 규조토 피복층위에 새로운 피복층을 생성

하게 된다. 이 피복층이 공극을 막히게 하는 것은 어쩔 수 없으며, 이러한 결과로 여과된 액체는 원래의 상태보다 맑아지게 된다(김지열, 2002; 유재영, 2000).

이러한 규조토 여과는 막이 폐색되거나 오염되어 손상되지 않는 것이며, 주입하는 원수의 성분에 따라 여과보조제를 다른 보조제로 사용하거나 혼합하여 사용할 수 있다. 그리고 규조토 여과에서는 소독제로 사멸되지 않는 *Entamoeba histolytica* cysts와 같은 병원 미생물까지 여과되기 때문에 현재 수처리 뿐만 아니라 다양한 산업분야에서 응용되고 있다(김용선, 2003; 김지열, 2002).



2.2 여과보조제

2.2.1 숯

숯은 일상생활에서 실내공기 정화를 목적으로 가장 쉽게 접할 수 있는 대표적인 자연 친화 재료로서 과거에서부터 연료, 방취, 방독, 원예 등 다양한 용도로 활용되어왔으며, 구하기 쉽고 연료로의 사용뿐만 아니라 음이온 발생효과, 방부성능, 원적외선에 의한 온열효과, 전자파차단 및 의약품으로 사용하게 되었고 탈취성능, 조습성능, 여과성능 등 다양한 특징이 부각되고 있어 관심이 증대되고 있는 추세이다(김설화, 2010; 박성진, 2007).

김설화(2010)의 연구를 보면 숯을 생산할 때 발생하는 미세먼지의 연간 배출량은 약 11,938 ton/yr로 PM10배출량은 68,890 ton/yr과 비교하였을 때 17%를 차지한다는 단점이 있다. 숯의 70-90%가 탄소로 이루어져 있으며 그 외 산소, 수소 및 회분(무기성분) 및 나무에 포함되어 있는 많은 미네랄이 포함되어있다(김설화, 2010; 박성진, 2007). 비중은 대체로 0.6-0.9정도로 작으며, pH는 8-9사이로 알칼리성을 띄고 있다. 숯의 내부 표면적을 측정해보면 1 g 중에 약 100-300 m²으로 아주 크며 다공성이기 때문에 흡착력이 크다(김설화, 2010). 이런 입자들이 미로를 형성하고 있는데, 이것이 탄화되면서 숯의 기공이 되어 흡착능력을 만들어 준다(박성진, 2007).

2.2.2 굴 껍데기 가루

굴 껍데기 가루의 구성성분을 나타낸 Table 2.5.을 보면 알 수 있듯이 굴 껍데기는 탄산칼슘(CaCO_3)으로 구성되어 있으며 마그네슘, 인, 황 등의 식물 영양소를 미량으로 함유한다(임정은, 2010). 굴 껍데기 가루의 물리적 특성은 Table 2.6.에 나타나 있다(G.L.Yoon, 2002).

경제적으로 굴 양식업은 국내 경제에 기여를 하고 있으나 이와 동시에 폐 굴 껍데기의 방출은 환경문제를 유발하기 때문에 굴 껍데기 재활용은 주목을 받게 되었다. 굴 껍데기는 비싸지 않기 때문에 여러 분야에서 쓰이는데 일부 굴 껍데기는 굴 채묘, 패화석 빌, 닭 사료 등으로 재활용되고 있다(Kwon et al., 2004). 또한 16 g/kg의 P 흡착 능력이 있어서(Yoon et al, 2003), 산성토양의 중화, 폐수 중의 중금속 흡착 및 P 제거를 위한 흡착 및 여과 매체로 사용하였으며 화학적 및 기계적 성질에 기초로 하여 건축자재로도 재사용 하였다(임정은, 2009; W.H. Park, 2008; G.L.Yoon, 2002).

또한, 임정은 2010의 결과 CaCO_3 가 주성분인 굴껍질은 현행 토양환경보전법상 기준치 이하로 카드뮴과 납을 감소시킬 뿐만 아니라 식물로 전이되는 유효태 중금속도 감소시키는 것으로 나타났다. 이와 더불어 굴껍질이 중금속 오염토양에 처리되는 경우 중금속의 안정화뿐만 아니라 pH의 개량효과와 치환성 칼슘과 같은 식물 양분의 공급 효과를 기대할 수 있어 향후 매우 효과적인 토양개량제가 될 수 있을 것으로 판단하였다(임정은, 2010).

Table 2.2. Chemical composition of oyster-shell

Compos ition	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SrO (%)	P ₂ O ₅ (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Total (%)
Content (%)	95.994	0.696	0.649	0.419	0.33	0.204	0.984	0.724	100.0

Table 2.3. Physical properties of oyster-shell

Mean particle size (mm)	Bulk density (g/cm ³)	Apparent density (g/cm ³)	Porosity (%)	BET Surface area (m ² /g)
1.65	1.152	2.56	54.99	1.75

2.2.3 돌로마이트

돌로마이트는 백운석이라고 불리며, 백운석의 화학성분은 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 로 나타내어지며 탄산칼슘과 탄산마그네슘의 복합 염 착물로써 calcite와 magnesite의 중간 형태의 결정구조를 가지는 광물로, 전세계적으로 매우 저렴하고 풍부하게 존재하며 특히 인도, 인도네시아, 터키 및 중국에서 많이 발견된다(Ahmad B. Albadarina, 2012). 백운석은 Ca원자에 Mg^{2+} 이온이 완전히 대체되어 형성된 것으로 이론적으로는 CaCO_3 54.35%와 MgCO_3 45.65% 또는 MgO가 21.9%, CaO가 30.4%, CO_2 가 47.7%로 구성되어 있으며, 결정 구조는 마그네슘과 탄산칼슘의 대체 층으로 구성되어있다. 그리고 모스경도는 2-3 정도이고, 비중은 2.8-3.1이다(Ahmad B. Albadarina, 2012; 양완희, 2014; 이신행, 2016).

백운석은 박테리아 세포에 대한 항박테리아 및 항바이러스에 활성을

나타내기 때문에 식중독 균을 통한 전염병을 예방하기 위한 재료로 사용되어왔다. 이는 백운석 표면에 구강 속 박테리아 세포가 생화학적인 반응을 통해 화석화되면서 응집제의 역할을 수행하기 때문이다. 그리고 농업용 비료 및 혼합 비료를 구성하는 약 90%가 영양 물질을 구성하는 주요 원소인 P(인)인데 이러한 인을 제거하기 위해서는 생물학적, 화학적 방법이 있지만, 이 방법들은 고가의 처리 비용이 들고 운영 및 유기관리에 어려움을 가지고 있다. 하지만 백운석이 다량 포함된 석회질 토양은 인과의 반응성이 높기 때문에 인이 많이 흡착된다. 국내에서 생성되는 돌로마이트는 고토비료용, 제철용, 소성용으로 많이 사용되고 있으며 그 외에 건설재료용, 콘크리트용 골재, 농업과 제약 분야 및 각종 충전재용으로 활용되어 사용된다(양완희, 2014; Ahmad B. Albadarina, 2012). 또한 폐수로부터 Cr를 제거하기 위한 인 흡착제로 많이 연구가 되는 실정이다. 특정 독성 물질을 흡수 할 수 있는 능력으로 인해 수처리에 다양하게 적용할 수 있다(Ahmad B. Albadarina, 2012).

2.3 슬러지

2.3.1 슬러지의 정의 및 특성

슬러지는 고형물량의 40-90%가 유기물로 구성되어 있고 수분함량은 97-99%로 구성되어 있으며(인천발전연구원, 2001), 1차, 2차 침전조 및 포기조에서 발생하는 침전 배출물을 총칭하는 말이다(이준호, 2017). 그리고 자연 상태에서의 슬러지는 TS 또는 SS 분석이 중요하고, 점성이 있는 슬러지의 경우에는 고형물의 함량, 수분 및 유분 함량에 대한 조성을 분석함으로써 슬러지 특성을 파악할 수 있다(방명환, 2006).

또한, 슬러지는 입자에 부착되지 않고 중력 침강에 의해 제거 될 수 있는 수분, 고체의 플록 내에 포획되거나 탈수 된 케이크의 모세관에 존재하며 강한 기계적 힘에 의해 제거 될 수 있는 수분이 존재한다. 그리고 흡착 및 점착에 의해 고체 입자의 표면에 유지되는 수분, 세포 내 화학적으로 결합된 수분으로 이루어져 있다(Guohua Chen, 2002).

슬러지를 적절한 전처리 없이 최종 처분할 경우 슬러지 내에 다량으로 포함된 유기물의 부패가 쉬워 악취 및 위생상의 문제를 유발할 수 있다. 또한 슬러지의 함수율이 높아서 최종처분장으로 운반하는데 큰 비용이 소요되고, 보다 넓은 처분 장소가 필요할 뿐 아니라 매립 시 침출수로 인한 이차적인 오염 문제를 유발한다. 그러므로 분뇨 및 하수슬러지는 기본적으로 안정화와 감량화가 필수적이고 이를 위하여 여러 가지 공정을 통한 슬러지의 처리, 처분이 이루어지고 있다(인천발전연구원, 2001).

2.3.2 슬러지 탈수

슬러지 처리공정 중 하나인 탈수방법에는 기계적 탈수 방법이 있다. 기계적 탈수에는 진공 필터, 벨트 필터 프레스, 원심분리기 및 멤브레인 필터 프레스가 있다(Guohua Chen, 2002). 진공 탈수기의 경우 함수율은 72-80%이며, 약품으로 전처리하기 때문에 운전조작이 간편하다(한국상하수도협회, 2011; 박철휘, 2009). 반면, 가압탈수기는 진공, 벨트프레스탈수기에 비해 슬러지 케이크의 함수율이 55-65%로 낮으며, 1회 운전시간은 20-40분을 표준으로 한다. 또한 벨트프레스 탈수기는 소요면적이 작다는 장점을 가지고, 함수율은 72-80%이고 운전시간은 보통 24분 정도이다(Richard J. Wakeman, 2007; 한국상하수도협회, 2011; 박철휘, 2009). 그리고 원심분리기는 물리적으로 결합된 수분을 분리시키기에는 힘들어서 고분자 응집제와 함께 쓰이고 있다(Maryla Smollen, 1990; 김병욱, 2014). 원심분리기 작동 후 슬러지 케이크의 함수율은 75-80%이다(박철휘, 2009).

이러한 슬러지 탈수기의 탈수공정에 중요한 요인은 압축성과 미세입자 크기이다. 슬러지는 압축에 대한 상당한 저항력을 제공하기 위해 입자가 서로 강하게 상호작용하므로 필터에 고형분 함량을 가지는 케이크가 형성된다(Richard J. Wakeman, 2007).

2.3.3 하수 슬러지

하수 및 분뇨 슬러지 등의 유기성 폐기물은 유기물의 농도가 높고, 일부 중금속이 높은 농도로 혼합되어 있어 해양에 배출될 경우 환경에 영향을 미칠 수 있으므로 우리나라는 2009년에 런던협약 96 의정서를 가입

하여 하수 슬러지를 포함한 폐기물의 해양배출을 줄이고 최종적으로는 해양배출 금지를 추진하고 있다. 이에 따라 슬러지 감량 및 자원화와 관련하여 육상 처리시설들이 증가하고 자원화 하기 위해 많은 노력을 하고 있다(환경부 생활하수과, 2010; 환경부, 2011).

현재 하수처리장에서 발생하는 슬러지 처리에 적용하고 있는 방법은 재활용, 매립, 소각, 해양투기 및 연료화 등이 있는데 이는 크게 재활용 방안과 하수처리과정 중에서 슬러지 발생량을 저감하는 감량화 방안 2가지로 나눌 수 있다(남영우, 2011; 송근영, 2015).

우선 하수 슬러지 재활용 방안으로는 연료화, 복토제, 경량골재, 시멘트 연료화 및 탄화기술 등이 있으며, 슬러지 발생량 감량화 방안으로는 물리적 처리, 화학적 처리 및 생물학적 처리에 의한 방법이 있다(남영우, 2011). 이렇듯이 하수 슬러지 처리방법은 그 종류가 매우 다양하며, 시설별 공법선정 등의 과정에 대한 표준화된 결정 체계가 미흡한 현실이다. 또한 하수 슬러지 처리 공정상의 에너지효율, 자원순환, 최종처분 등에 대한 평가 수단이 부재하므로 여러 하수 슬러지 처리기술의 효용성에 대한 비교우위 구별이 어려워져 정책적 진로 모색이 곤란한 상황이다. 그러므로 각 기술에 대한 운영 및 유지관리 등 통합적인 비교 및 평가가 요구된다(환경부 생활하수과, 2010).

하수 슬러지의 발생량은 Table 2.4.에 나타냈다. Table 2.4은 2004년부터 2015년까지의 하수 발생량을 나타낸 표이다. 하수 슬러지의 발생량을 하수처리구역 내와 외로 구분하여 표시한 것으로 단위는 m^3/day 이다. 2011년부터 하수 발생량이 감소하다가 2015년에 다시 증가하는 것을 볼 수 있고, 부산의 경우 해운대가 하수 발생량이 가장 많고 중구가 가장 적다(환경부, 2015). 발생량이 점점 증가할 것으로 예상되기에 효율적인 슬러지 처리방법이 필요하다.

Table 2.5은 연도별 하수 슬러지의 처리현황을 나타낸 표이며, 단위는 ton/년이다. 처리방법으로는 연료화, 비료화로 재활용하는 방법과 소각, 건조, 매립, 해양투기 방법이 있다. 비료화하는 재활용 방법에는 부숙화 및 지렁이 사육 시 사용하는 것이 있으며 그 외에 시멘트소성물, 경량골재 등으로 사용하는 방법도 있다. 전국기준 2012년부터는 해양투기로 처리되지 않았으며 재활용으로 처리하는 양이 증가하였음을 알 수 있다.

Table 2.4. Sewage generation by year(unit : m³/day)

Year	Sewage generation amount		
	Total	Within sewage treatment area	Outside sewage treatment area
		Total	Total
2004	11,946,075	9,721,712	2,224,364
2005	16,684,026	14,831,762	1,852,264
2006	16,919,995	15,168,474	1,751,520
2007	16,744,875	15,254,641	1,490,234
2008	17,113,106	15,661,509	1,451,597
2009	16,681,388	15,449,412	1,231,976
2010	16,111,195	15,033,969	1,077,226
2011	18,660,762	17,531,359	1,129,403
2012	15,722,166	14,705,087	1,017,079
2013	15,148,298	14,119,268	1,029,030
2014	14,401,314	13,384,103	1,017,211
2015	14,975,476	13,835,052	1,140,424

Table 2.5. Sewage sludge treatment status by year(unit : ton/year)

year	Total	Recycle Fueling	Recycle Fertilizer	Recycle Other	Incine ration	Dry	Landfill	Other	Marine dumping
07	2,743, 857.4	382,462.8			350,912 .9	–	107,813.0	34,245 .2	1,868,423.5
08	2,817, 056.0	533,638.0			458,205 .0	–	103,904.0	–	1,721,309.0
09	3,024, 336.0	746,055.0			409,936 .0	–	440,783.0	–	1,427,561.0
10	3,080, 043.0	238,697.0	635,318.0		544,592 .0	–	337,966.0	9,382. 0	1,314,087.0
11	3,095, 441.0	223,257.0	802,318.0		687,868 .0	–	261,262.0	110,41 3.0	1,010,322.0
12	3,607, 743.2	322,414.3	1,233,561.4		1,276,1 40.8	–	531,119.2	244,50 7.5	0.0
13	3,529, 965.0	349,679.0	1,469,343.0		846,241 .0	–	406,574.0	458,12 9.0	0.0
14	3,651, 029.7	890,881.7	250,103.3	893,825.7	815,425 .1	56,8 39.4	692,274.2	51,680 .2	–
15	10,526 .7	2,171.9	1,164.5	2,660.8	1,971.4	902. 7	1,444.2	211.3	–
16	9,810. 5	2,000.5	3,015.6	1,689.1	1,447.1	682. 5	829.3	146.3	–

2.3.4 분뇨 슬러지

분뇨슬러지와 같은 고농도 유기성 폐기물은 인구의 증가와 생활 수준의 향상 및 산업 활동의 기술과 양태의 변화에 의하여 그 배출량은 날로 증가하고 있는 실정이며 현재 우리나라 분뇨슬러지의 처리 가정이 농축 후 탈수 과정을 거쳐 매립하거나 농작물에 이용되고 있는 실정이어서 고농도의 유기물을 함유하고 있는 분뇨슬러지를 적절히 처리하지 않을 경우 2차적 오염, 보건 위생상의 큰 문제를 안고 있다(김원태, 2006).

분뇨슬러지는 전국 156개소의 분뇨처리장에서 대량 배출되고 있으며 그 대부분이 매립되고 있는 실정이다. 또한 분뇨슬러지는 유기물 함량이 높고 악취도 심하기 때문에 퇴비화를 이용하여 안정화시킴으로써 토지 살포시 야기되는 환경오염을 최소화하고 폐기물 문제의 바람직한 해결방안인 폐기물의 자원화를 도모할 수 있다(황선숙, 1994)

2004년부터 2015년도까지의 전국 분뇨슬러지 발생량은 Table 2.6.로 나타났다. 분뇨슬러지 발생량의 경우 수거식과 수세식으로 구분하여 표시한 것으로 단위는 m^3/day 이다. 2009년부터 분뇨 발생량이 감소하다가 2015년에 다시 증가하는 것을 볼 수 있다(환경부, 2015). 분뇨슬러지의 발생량이 점점 증가할 것으로 예상되기에 효과적인 슬러지 처리방법이 필요하다.

Table 2.7.은 2007년부터 2016년까지의 전국 분뇨슬러지 처리현황을 나타낸 표이며 단위는 ton/년이다. 처리방법으로는 재활용, 육상매립, 소각, 해양투기, 연료화 방법이 있다. 전국기준 2014년부터는 해양투기로 처리되지 않았으며 2010년부터는 연료화로 처리되는 양이 적음을 알 수 있다.

Table 2.6. Night soil generation by year(unit : m³/day)

Year	night soil generation amount		
	Total	Collection	Flush
'04	49,053.0	3,004.7	46,048.3
'05	47,626.5	2,883.4	44,743.0
'06	47,093.5	2,003.2	45,090.4
'07	44,766.2	2,006.1	42,760.2
'08	46,419.6	5,457.2	40,962.5
'09	48,748.8	5,184.0	43,564.8
'10	46,188.9	3,691.4	42,497.5
'11	42,357.7	3,294.0	39,063.7
'12	41,746.7	3,761.6	37,985.2
'13	37,624.0	2,865.7	34,758.3
14	36,394.6	3,683.8	32,710.8
'15	37,892.3	4,783.1	33,109.2

**Table 2.7. Night soil sludge treatment status by year
(unit : ton/year)**

Year	Generation amount	Amount of disposal							Linkage processing	Carryover amount
	Total	Total	Recycle	Land fill	Incineration	Marine dumping	Fueling	Other	Total	Total
06	453,315	453,140	46,168	9,156	3,502	392,404	-	1,911	-	175
07	181,035	180,828	64,894	9,890	3,873	44,707	-	57,464	-	207
08	192,371	191,931	89,491	34,434	3,911	63,195	-	899	-	440
09	221,081	220,798	76,525	10,455	2,315	130,177	-	1,327	-	282
10	177,148	176,919	84,718	9,253	5,135	38,264	28,982	10,567	-	229
11	171,353	170,842	74,551	14,403	9,847	65,866	1,613	4,562	-	511
12	144,937	144,730	87,384	13,991	12,314	25,100	3,646	2,295	-	207
13	131,518	131,248	68,213	21,273	22,412	12,391	3,992	2,967	-	270
14	140,149	140,084	73,307	22,726	32,786	0	1,990	9,275	-	65
15	349,901	349,783	113,914	25,734	25,079	0	0	185,057	-	118
16	316,345	316,245	51,038	22,225	18,309	0	365	224,307	100	-

2.4. 퇴비화

분뇨슬러지의 처리방법에는 연료화, 비료화, 소각, 매립, 재활용 등이 있다(이준호, 2017). 주로 발생하는 폐기물을 매립이나 소각에 의존하여 처리해왔지만, 매립의 경우 부지 선정이 어려우며 침출수에 의한 지하수 오염문제를 유발 시킬 수 있다는 단점이 있고 소각의 경우 또한 폐기물의 파괴 감소율은 매우 크지만 연소가스에 의한 대기오염을 가중시킬 수 있다(황의영, 1994).

매립과 소각을 대체할 수 있는 기술로는 퇴비화, 혐기성 소화, 사료화 등이 있는데 이 중 퇴비화는 혐기성이나 호기성 조건하에서 주원료와 부원료내의 분해 가능한 유기물을 Bacteria, Actinomycetes, Fungi 등의 미생물을 이용하여 분해 안정시키는 생물 공학적인 반응으로 생성되는 악취나 침출수에 의한 지하수오염 등의 문제들을 상당히 감소시킬 수 있고, 다량의 유기성 폐기물을 안정화, 무해화, 퇴비화 처리하여 농지에 사용함으로써 농지의 부식질 함량을 증진시키고, 토양의 산성화 및 환경오염을 방지하며 폐자원을 회수하여 재활용함으로써 폐기물의 발생량을 줄일 수 있고 매립 공간을 효과적으로 줄일 수 있다(김원태, 2006; 황의영, 1994).

퇴비화를 효과적으로 통제하기 위해서는 생물의 분해활동이 적합한 환경이 조성되어야 하는데, 영향을 주는 인자로는 수분함량, 공기공급, 교반, 온도, C/N비, pH 등이 있다. 이 중 수분함량(함수율)이 중요한데, 수분은 미생물의 신진대사 활동을 지원하는데 필요하다. 실제 퇴비화에서 함수율의 적정 범위는 40-65%를 유지하는 것이 바람직하다(황선숙, 1994, 김원태, 2006).

3장 실험재료 및 방법

3.1 실험재료 및 장치

3.1.1 여과 재료(규조토 및 여과보조제)

본 실험에서 주로 사용되는 규조토는 CELITE CHINA사 제품을 사용하였다. 이는 800-1200°C의 회전로를 이용한 소성 과정 시 Na_2CO_3 용제(Flux)를 첨가하여 만들어진 상품(Flux Calcined)이며, 주로 백색을 띤다.

여과보조제로 사용할 숯가루는 강원도 참숯의 백탄을 파쇄, 미분쇄한 325-500 mesh인 상품을 사용하였고, 굴 껍데기 가루의 경우는 국산 굴 껍데기를 파쇄하여 세척 및 멸균 건조 공정을 거친 제품을 사용하였다. 그리고 돌로마이트의 경우 국산 백운석을 멸균 처리하여 분쇄된 제품으로 실험하였다.

이러한 규조토 및 여과보조제는 100 mesh 체에 통과한 것들만 실험에 사용하였고, 각각 10 g 와 증류수 50 mL를 혼합하여 Slurry 상태로 만들어 7 min동안 pre-coat하여 슬러지 여과 실험을 진행하였다.

3.1.2 대상 슬러지(하수, 분뇨 슬러지)

실험에 사용되는 슬러지는 부산환경공단 남부사업소, 위생사업소에서 가지고 왔다. 남부사업소는 Fig. 3.1.에 나타나 있듯이 중앙제어실, 가스탱크, 기계식농축기, 소화조, 탈수기 순으로 슬러지 처리시설로 되어있는데 실험에 사용한 슬러지는 탈수기 유입 전에 채취해서 실험하였다. 분뇨 슬러지의 경우 위생사업소에서 가지고 왔으며, 위생사업소 처리과정은 Fig. 3.2.에 나타나 있다. 위생사업소는 계량설비조, 전처리설비, 저류조, 미세목스크린, Seli-BC장치, 생물반응조, 침전조로 처리되며 상등수는 강변사업소로 유입되고 슬러지는 농축설비와 탈수설비를 거치게 된다. 이때 탈수설비 전에 슬러지를 채취하여 실험하였다(부산환경공단). 실험 시 pre-coat 되어 있는 규조토층에 슬러지 30 mL를 주입하여 여과하였다.

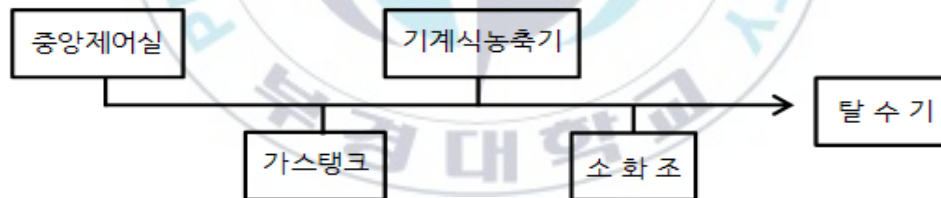


Fig. 3.1. Sludge Treatment System of Southern laboratory

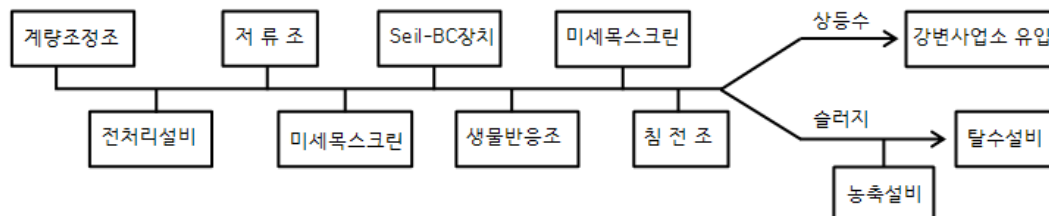


Fig. 3.2. Sludge Treatment System of Sanitary laboratory

3.1.3 pre-coat 진공 여과 실험 장치

본 실험에서 사용하는 펌프는 제조국인 USA의 Gast사에서 제작한 다
이아프램식 진공 펌프(Oilless Diaphragm Unit)이며, 사용된 펌프의 규격
은 Table 3.1.에 나타나있다. 최대 진공은 640 mmHg이고 최대 압력은 6
0 Psi로 3102.89 mmHg이다. 펌프는 지름이 10 cm인 도가니와 가지달린
삼각플라스크를 연결하여 사용하였다.

Table 3.1. Pump Specifications

Volume	32 Liter/min
Max vacuum	25.5 Hg (≒ -640 mmHg) (참고 : 완전진공=31Hg)
Max Pressure	60 Psi(4.2 Bar)
Size	18 x 15 x 27 cm
Weight	8.7 kg
Power	230 V 60 Hz, 1/8 HP
Noise	< 70 dBA
Humidity	20-80%

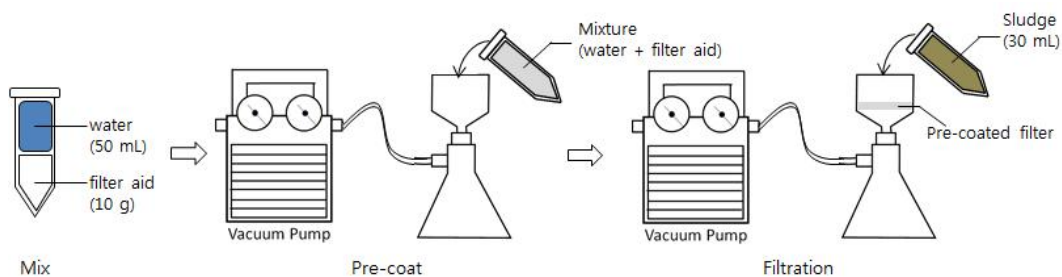


Fig. 3.3. A schematic diagram of the experimental process

3.2 실험방법 및 계획

3.2.1 수질분석법

본 실험에서 하수 및 분뇨 슬러지를 측정 대상으로 하여 수질 항목인 수분함량, TN, TP, BOD, SS를 측정하였다. 전체적인 실험 과정의 모식도는 Fig. 3.3에 나타나 있다. 규조토 및 여과보조제를 이용하여 슬러지 여과 시 여과보조제 10 g과 증류수 50 mL와 혼합하여 지름 10 cm인 도가니에 부어 7분 동안 pre-coat하였다. 그 후 하수 및 분뇨 슬러지를 30 mL를 주입하여 실험 조건에 따라 실험하였다. 분석항목은 수질오염 공정시험기준에 따라 실험하였다.

3.2.2 반응표면법에 의한 pre-coat 진공 여과 특성

본 연구에서는 통계프로그램인 Minitab 15을 이용하였으며, Pre-coat 규조토 여과 실험은 반응표면계획법을 선택하여 실험을 설계 및 분석하였다.

반응표면계획법(Response Surface Design)은 통계적 분석 방법의 하나인 반응표면분석을 염두에 두고 데이터 수집 계획을 세울 때 사용되는 실험계획법으로, 실험자의 관심 영역에서 최적 조건을 찾는 방법을 말한다. 일차적인 목적은 수율에 영향을 주는 유의한 인자효과들을 찾는 것이고 그다음의 목적은 수율을 최적으로 한 공정의 조건을 찾는 것이다. 반응표면계획법 중 많이 사용하는 실험설계는 중심합성계획(Central Composite Designs)인데, 이는 신뢰성이 높은 회귀식을 구하기 위한 것

이고 순수 오차를 구하여 적합성 결여 검정을 하려는 의도가 있기 때문에 많이 사용된다(박, 2011).

본 연구는 관심영역의 중앙과 동일한 거리에 위치한 독립변수들의 값에 대한 추정치의 정밀도를 나타내는 CCD를 이용하며, 일정한 거리 (α)는 1.5로 설정하여 실험 설계하였다.

유의확률을 나타내는 P-값(P-value)은 주어진 검정통계량의 관측치로부터 귀무가설(H_0)을 기각하게 하는 최소의 유의수준을 말한다. 이때 귀무가설은 대립가설을 입증할 수 없을 때 대립가설을 무효화시키면서 받아들이는 가설을 말한다. 유의확률이 유의수준보다 크게 나타나는 경우는 주어진 검정통계량의 관측치가 유의수의 기각역 바깥쪽에 있다는 의미가 되므로 H_0 를 기각할 수 없다. 일반적으로 많이 사용되는 유의수준은 0.01, 0.05, 0.10 등이 있다(박성현, 2011). 그리고 통계프로그램에서 사용되는 약어는 Table 3.2.에 나타나 있다.

실험 설계 시 진공압력(mmHg)과 여과시간(min)을 독립변수로 설정하였으며, 측정항목은 하수 및 분뇨 슬러지의 수분함량, TN(총질소), TP(총인), BOD, SS이다. 독립변수의 범위는 Minitab 15프로그램에서 반응표면계획법을 이용하여 설정하였으며, 진공압력(mmHg)의 범위는 420 - 600 mmHg이며, 여과시간(min)의 범위는 19-25 min으로 설정하여 실험하였다. 실험 설계의 조건은 Table 3.3.에 나타나있다.

3.2.3 혼합물 실험법에 의한 여과보조제 혼합비 실험

혼합물 실험계획법을 선택하여 실험을 설계 및 분석하였다. 혼합물 실험계획법(Mixture Design)은 인자(변수)들의 배합비율을 조사하는 실험계획으로 인자들의 배합비의 합이 100%를 이루는 혼합물에 관한 실험이다(박성현, 2011).

분뇨 슬러지 pre-coat 재료로서 여과보조제의 최적화 실험 설계 시 규조토의 함유량은 50%로 고정하였으며 숯가루, 돌로마이트, 굴 껍데기 가루의 함유량을 독립변수로 설정하였다. 측정항목은 분뇨 슬러지의 수분함량, TN(총질소), TP(총인), BOD, SS이다. 독립변수인 여과보조제의 함유량 범위는 Minitab 15 프로그램에서 혼합물 실험계획법을 이용하여 설계하였다. 각 여과보조제의 범위는 최소 0%에서 최대 50%이다. 여과 시간(min)의 범위는 22 min으로 고정하여 실험하였으며, 실험 설계의 조건은 Table 3.4.과 같다.

Table 3.2. Abbreviations and meanings used in statistical programs

Abbreviation	Meaning
DF	Degree of freedom
Seq SS	Sequential sums of squares
Adj SS	Adjust sums of squares
Adj MS	Adjust mean square
SS	Sums of squares
MS	Mean squares

Table 3.3. Pre-coat diatomite filtration Experiment conditions for sewage and night soil sludge

Case	Vacuum Pressure (mmHg)	Filtration Time (min)
1	420	22
2	450	20
3	450	24
4	510	19
5	510	22
6	510	25
7	570	20
8	570	24
9	600	22

Table 3.4. Optimization experiment conditions of filtration aids as a pre-coat material for night soil sludge

Case	Oyster shell powder (%)	Dolomite (%)	Charcoal powder (%)	Diatomite (%)	Total (%)
1	0.00	0.00	50.00	50.00	100
2	0.00	25.00	25.00	50.00	100
3	0.00	50.00	0.00	50.00	100
4	8.33	8.33	33.33	50.00	100
5	8.33	33.33	8.33	50.00	100
6	16.67	16.67	16.67	50.00	100
7	25.00	0.00	25.00	50.00	100
8	25.00	25.00	0.00	50.00	100
9	33.33	8.33	8.33	50.00	100
10	50.00	0.00	0.00	50.00	100

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1. 하수 슬러지의 pre-coat 진공 여과 특성

4.1.1 진공압력, 여과시간에 따른 탈수케익의 수분함량

진공압력(mmHg), 여과시간(min)의 조건에 따른 하수 슬러지의 수분함량을 실험한 결과는 Table 4.1.과 같다. 최대 수분함량이 68.14%이고 최소 수분함량이 63.13%임을 확인 할 수 있다.

Fig. 4.1.의 (a)는 진공압력과 여과시간에 따른 하수 슬러지의 수분함량을 나타낸 등고선이며, (b)는 두 변수에 따른 하수 슬러지의 수분함량을 나타낸 표면도이다. 등고선과 표면도를 보면 진공압력과 여과시간이 증가할수록 수분함량이 감소함을 볼 수 있다. 또한 진공압력보다 여과시간이 하수 슬러지의 수분함량에 더 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Table 4.2.는 하수 슬러지 수분함량의 추정된 회귀 계수로 두 개의 독립변수의 영향을 나타낸 표이며, 분산분석(ANOVA)을 통해서 회귀반응이 적절한지를 검토한 결과는 Table 4.3.에 나타나 있다. 이는 입력한 모형대로 주효과(진공압력, 여과시간)와 교호작용에 대한 F값과 P값이 제시되어있다. F값이 클수록 P값은 작아져서 귀무가설이 기각될 확률이 높아진다. 여기서 P값은 결정계수를 의미하며 예측값과 실제 값 사이의 관계를 나타내는 지표로써 0부터 1까지 나타낸다. 또한, F값은 분산 분석의 모형에 대한 적합성을 나타내며 그 값이 클수록 적합하다고 판단된다(김수인, 2018). 분산분석표에서 진공압력과 여과시간에 대한 F-검정

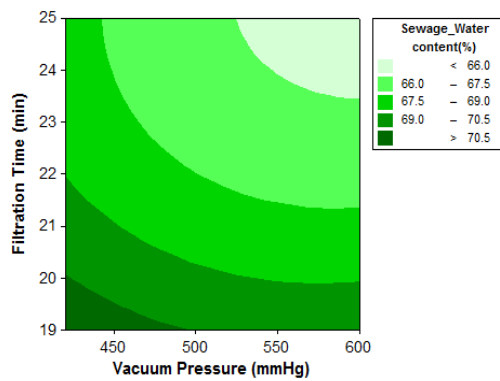
결과인 P-값이 회귀는 0.000, 선형은 0.024, 제곱은 0.009, 교호작용은 0.391임을 알 수 있는데, 교호작용을 제외한 경우가 유의수준(α)이 0.05보다 작으므로 신뢰구간 95%에서 귀무가설이 기각된다. 또한 산출된 적합 2차 회귀모형식은 Table 4.2.를 보면 추정할 수 있는데 식은 eq. (1)과 같다.

$$y = 141.999 - 0.059x_1 - 4.467x_2 + 0.098x_2^2 - 0.001x_1x_2 \quad \text{eq. (1)}$$

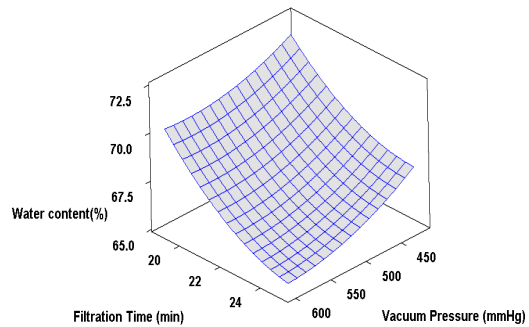
이때 y 는 하수 슬러지의 수분함량(%)을 의미하고 x_1 와 x_2 는 코드화하지 않은 진공압력(mmHg), 여과시간(min)을 의미한다. 그리고 Table 4.4.는 모형들의 R-제곱, 수정된 R-제곱, 예측된 R-제곱을 나타내는데, R-제곱은 Table 4.3.에 나타나 있는 Regression의 Seq SS와 Total Seq SS의 비로 구해진다. 결정계수(R^2)는 0.9758로 상관계수(r)은 0.9878이다. 즉 2차 회귀모형은 2개의 독립변수와 하수 슬러지 수분함량과의 관계가 97.58%로 높은 것을 확인할 수 있다.

Table 4.1. Water content(%) of Sewage Sludge on each case

Case	Vacuum Pressure (mmHg)	Filtration Time (min)	Sewage Water content (%)
1	420	22	68.14
2	450	20	67.02
3	450	24	66.15
4	510	19	68.87
5	510	22	66.05
6	510	25	66.37
7	570	20	64.13
8	570	24	64.50
9	600	22	63.13



(a)



(b)

Fig. 4.1. (a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and filtration time (min) according to the water content(%) of sewage sludge

Table 4.2. Estimated Regression Coefficients for Sewage sludge Water content (%)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	141.999	19.638	7.231	0.000
Vacuum Pressure (mmHg)	-0.059	0.0376	-1.56	0.163
Filtration Time (min)	-4.467	1.2211	-3.658	0.008
Vacuum Pressure (mmHg) * Vacuum Pressure (mmHg) ¹⁾	0	0	2.574	0.037
Filtration Time (min) * Filtration Time (min)	0.098	0.0242	4.045	0.005
Vacuum Pressure (mmHg) * Filtration Time (min)	-0.001	0.0012	-0.914	0.391

1) 2개 인자의 교호작용 효과를 의미한다.

Table 4.3. Analysis of Variance for Sewage sludge Water content (%)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	21.9449	21.9449	4.3890	56.38	0.000
Linear	2	20.3339	1.0425	0.5212	6.7	0.024
Square	2	1.546	1.5460	0.7730	9.93	0.009
Interaction	1	0.065	0.0650	0.0650	0.84	0.391
Residual Error	7	0.545	0.5450	0.0779		
Lack-of-Fit ²⁾	3	0.545	0.5450	0.1817	*	*
Pure Error	4	0	0	0		
Total	12	22.4899				

Table 4.4. R-squared of models

R-Sq	R-Sq(pred)	R-Sq(adj)
97.58%	82.57%	95.85%

eq. (2)는 두 독립변수에 따른 하수 슬러지의 수분함량에 따른 회귀식 선의 방정식을 나타낸다. y 는 하수 슬러지의 수분함량(%)을 의미하고 x_1 와 x_2 는 코드화 하지 않은 진공압력(mmHg), 여과시간(min)을 의미한다. Fig. 4.2, eq. (3), Table 4.5.는 eq. (2)에 의해 계산된 예측값과 실험값으로 구한 회귀 모델을 분석한 결과이며, 회귀식의 결정계수는 91.5%로 상관계수는 0.9566이므로 수분함량에 대한 예측값과 실험값 사이가 적합한 것으로 확인 할 수 있다. 또한 P값이 0.000이므로 신뢰구간 95%에서 귀무가설이 기각된다.

2) 적합성 결여를 의미한다.

$$y = 88.9 - 0.0113x_1 - 0.695x_2 \quad \text{eq. (2)}$$

$$\text{Predicted Sewage water content(\%)} = -2.984 + 1.046 * \text{Experimented Sewage water content(\%)} \quad \text{eq. (3)}$$

Fig. 4.3.는 진공압력, 여과시간에 대한 주효과도를 나타낸 그림이다. 주효과도는 기울기가 클수록 영향력이 크다는 의미인데, 하수 슬러지의 수분함량의 경우, 여과시간이 진공압력보다 영향이 더 크다고 판단된다.

광주광역시 환경시설공단에 따르면 하수 슬러지의 탈수효율(함수율)이 2% 개선에 따라 연간 5182톤 슬러지 케익 발생량이 감소한다. 그리고 슬러지 케익 발생량 감소에 따라 연간 2억 3천여만원 처리비가 절감된다. 이러한 이유로 슬러지의 수분함량 감소는 운영비를 절감할 수 있다고 판단된다.

김용학. (2000) 은 초기 함수율이 98.4%인 하수처리장의 혐기성 소화 슬러지를 채취하여 실험하였으며, 초음파 반응기에 따른 슬러지 탈수 전과 후의 함수율을 비교하였다. 그 결과 초음파 반응기의 출력 및 반응시간에 따른 슬러지 탈수 전 함수율은 98.09-98.72%으로 탈수에 크게 영향을 주지 않았고, 진공여과 장치를 이용하여 탈수시킨 슬러지를 초음파의 출력 및 반응시간에 따른 함수율은 80.31-84.49%까지 감소하였다. 이는 진공여과 장치로 탈수한 후 처리한다면, 슬러지 함수율을 낮추는데 더 효과적이라고 판단된다.

그리고 원세연. (2002) 의 연구에 따르면 평균 함수율이 97.5%인 하수 슬러지의 상부에 0.2 kg/cm²의 일정한 압력을 가한 상태에서 5 V-2.5 V의 정전압 및 5 V의 펄스를 적용하여 탈수 실험을 하였다. 0.2 kg/cm²의 압력을 가한 상태에서 슬러지 탈수를 12시간 동안 실시한 결과는 압력을

주지 않은 중력 탈수의 배출량의 2.75배에 해당하는 값이었다. 압력을 가해 주는 경우 탈수 효과가 급증하였고, 가압 탈수 시간이 길수록 배출량이 증가하고 슬러지 높이가 감소함을 나타내었다.

대구에 있는 하수처리장의 혼합 슬러지를 대상으로 고분자 응집제 (C-211E)를 주입하여 실험한 이상수. (2009) 의 연구에 따르면 슬러지 탈수케이크의 함수율은 68.3%를 나타내었다. 고분자 응집제보다 규조토 pre-coated filter 공정이 슬러지의 함수율 감소시키는데 적합하다고 판단된다. 또한 가압 탈수 시간이 증가하고 압력을 가해줄 때 슬러지 탈수 양이 증가함을 알 수 있다.

Table 4.5. Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of Water content (%) of Sewage Sludge

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	14.2986	14.2986	108.16	0
Error	10	1.322	0.1322		
Total	11	15.6207			

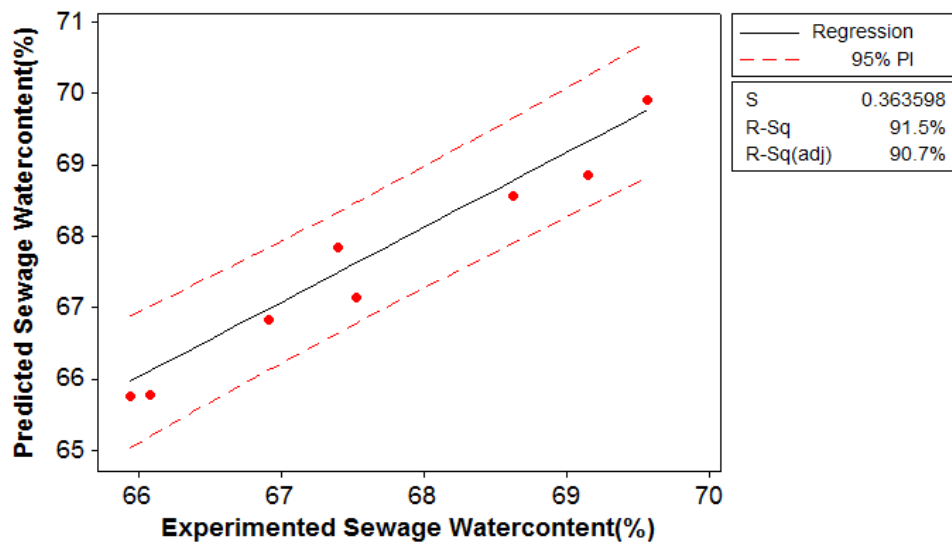


Fig. 4.2. Plots of experimented value vs predicted values derived from model of Water content (%) of Sewage Sludge

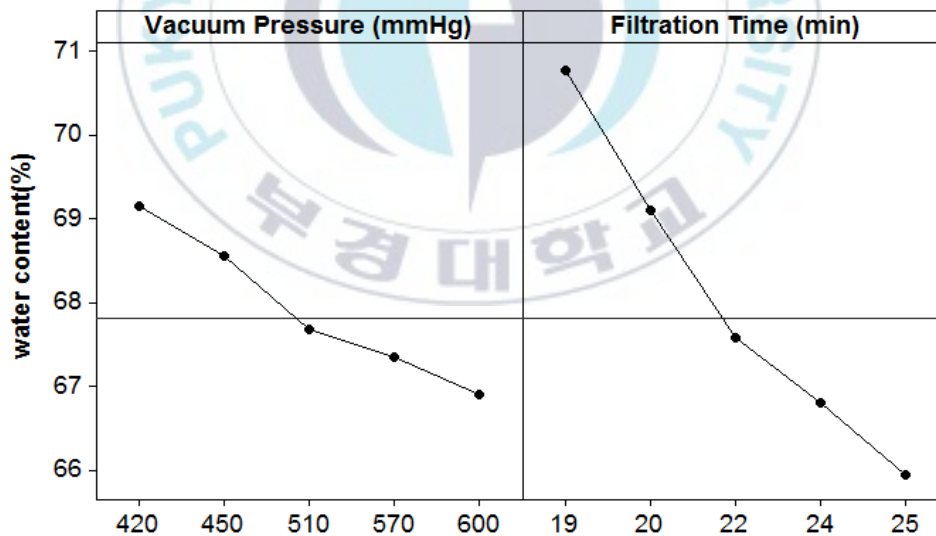


Fig. 4.3. Main Effects Plot for Water content (%) of Sewage Sludge

4.1.2 진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 총질소 제거

Table 4.6.은 독립변수인 진공압력(mmHg), 여과시간(min)에 따른 하수 슬러지의 총질소의 제거율을 실험한 결과이다. 탈수기 유입 전 하수 슬러지의 총질소 농도는 2474.41 mg/L이었으며, 실험결과 최대 제거율은 75.47%, 최소 제거율은 68.76%이다.

Fig. 4.4.의 (a)와 (b)는 두 변수에 따른 하수 슬러지의 총질소 제거율을 나타낸 등고선, 표면도이다. Fig. 4.4.를 보면 진공압력과 여과시간이 증가할수록 총질소(TN) 제거율이 증가함을 볼 수 있다.

하수 슬러지 총질소 제거율의 추정된 회귀 계수로 독립변수의 영향을 나타낸 결과는 Table 4.7.에 나타나있다. Table 4.8.에 분산분석을 통한 회귀반응의 적절성이 나타나 있다. 분산분석표에서 독립변수에 대한 P-값이 회귀는 0.000, 선형은 0.046, 제곱은 0.039, 교호작용은 0.536임을 알 수 있는데, 교호작용을 제외한 경우가 신뢰구간 95%에서 귀무가설이 기각된다. 또한 산출된 적합 2차 회귀모형식은 eq. (4)이며, 이는 Table 4.7.로 추정할 수 있다.

$$y = -72.6644 + 0.2138x_1 + 7.0833x_2 - 0.0001x_1^2 - 0.1283x_2^2 - 0.0016 x_1x_2 \quad \text{eq. (4)}$$

이때 y는 하수 슬러지의 총질소 제거율(%)을 의미한다. 그리고 모형들의 R-제곱, 수정된 R-제곱, 예측된 R-제곱은 Table 4.9.에 나타나있으며, 상관계수(r)은 0.9701이다. 즉 2차 회귀모형은 2개의 독립변수와 하수 슬러지 수분함량과의 관계가 94.11%로 높은 것을 확인 할 수 있다.

Table 4.6. TN removal(%) of Sewage Sludge on each case

Case	Vacuum Pressure (mmHg)	Filtration Time (min)	Sewage TN removal (%)
1	420	22	69.79
2	450	20	68.76
3	450	24	72.61
4	510	19	71.38
5	510	22	73.57
6	510	25	73.96
7	570	20	72.14
8	570	24	74.51
9	600	22	75.47

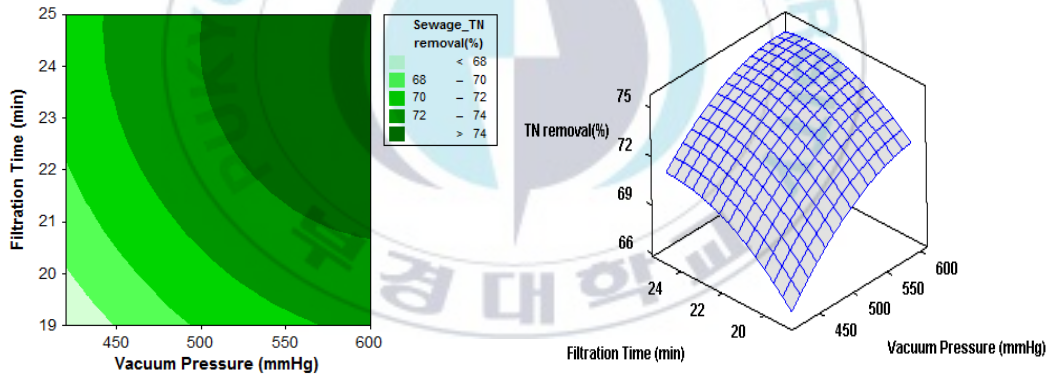


Fig. 4.4. (a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and filtration time (min) according to the TN removal (%) of sewage sludge

Table 4.7. Estimated Regression Coefficients for Sewage sludge TN removal (%)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-72.6644	42.1379	-1.724	0.128
Vacuum Pressure (mmHg)	0.2138	0.0806	2.652	0.033
Filtration Time (min)	7.0833	2.62	2.703	0.03
Vacuum Pressure (mmHg) * Vacuum Pressure (mmHg)	-0.0001	0.0001	-2.552	0.038
Filtration Time (min) * Filtration Time (min)	-0.1283	0.052	-2.466	0.043
Vacuum Pressure (mmHg) * Filtration Time (min)	-0.0016	0.0025	-0.651	0.536

$$y = 45.3 + 0.0276x_1 + 0.611x_2 \quad \text{eq. (5)}$$

$$\text{Predicted Sewage TN removal(\%)} = 7.072 + 0.9097 * \text{Experimented Sewage TN removal(\%)} \quad \text{eq. (6)}$$

eq. (5)는 독립변수에 따른 하수 슬러지 총질소 제거율의 회귀 직선 방정식을 나타낸다. eq. (5)에 의해 계산된 예측값과 실험값으로 구한 회귀 모델을 분석한 결과는 eq. (6), Table 4.10., Fig. 4.5.이며, 회귀식의 결정 계수는 95.8%로 총질소 제거율에 대한 예측값과 실험값 사이가 적합한 것으로 확인할 수 있다.

Fig. 4.6.은 총질소 제거율에 대한 두 변수의 주효과도를 나타낸 그림이다. 이는 수분함량의 결과와 반대로 진공압력이 여과시간보다 영향이 크다고 판단된다.

또한 하수처리장의 혼합슬러지를 대상으로 고분자 응집제(C-211E)를 주입한 이상수. (2009) 의 연구에 의하면 총질소는 51.29-60.86%까지 제거되었다. 또한, 대구광역시 환경시설공단에서는 하수 슬러지에 응집제를

투입하여 실험하였는데, 실험 결과 TN의 제거율은 45.1-86.2%이었다. 이는 총질소 제거율이 68.76-75.47%인 규조토 pre-coated filter 공정이 더 효과적이라고 판단된다.

Table 4.8. Analysis of Variance for Sewage sludge TN removal (%)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	40.0622	40.06221	8.01244	22.35	0.000
Linear	2	36.0897	3.55441	1.7772	4.96	0.046
Square	2	3.8205	3.82045	1.91023	5.33	0.039
Interaction	1	0.1521	0.1521	0.1521	0.42	0.536
Residual Error	7	2.5091	2.50908	0.35844		
Lack-of-Fit	3	2.5091	2.50908	0.83636	*	*
Pure Error	4	0	0	0		
Total	12	42.5713				

Table 4.9. R-squared of models

R-Sq	R-Sq(pred)	R-Sq(adj)
94.11%	57.71%	89.90%

Table 4.10. Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of TN removal (%) of Sewage Sludge

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	30.8176	30.8176	114.54	0
Error	5	1.3453	0.2691		
Total	6	32.1629			

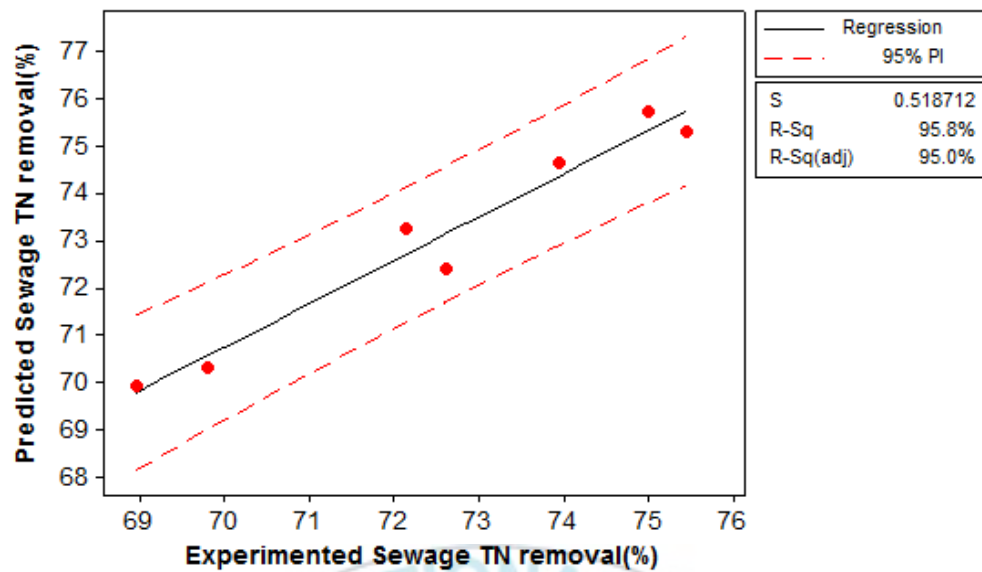


Fig. 4.5. Plots of experimented value vs predicted values derived from model of TN removal (%) of Sewage Sludge

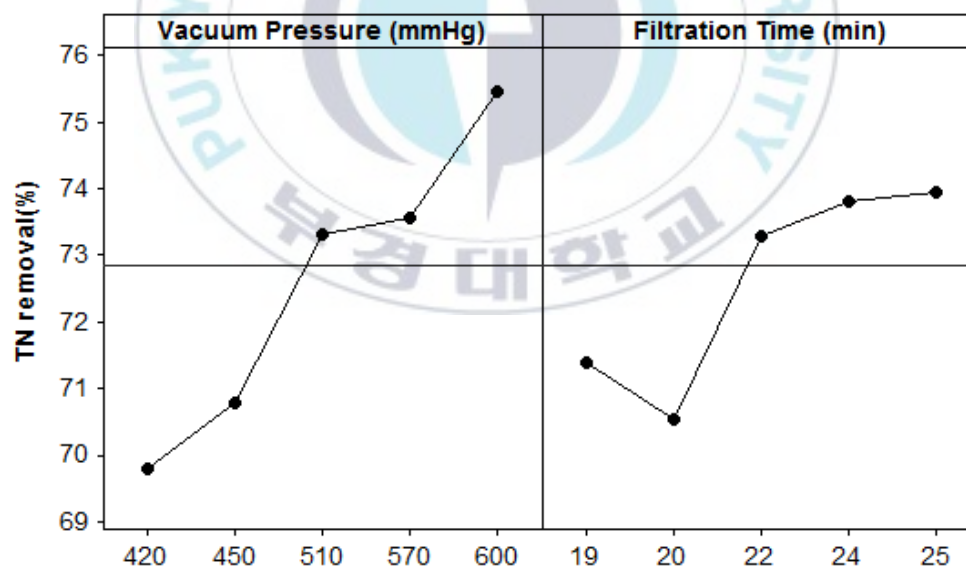


Fig. 4.6. Main Effects Plot for TN removal (%) of Sewage Sludge

4.1.3 진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 총인 제거

진공압력(mmHg), 여과시간(min)에 따른 하수 슬러지의 총인 제거율은 Table 4.11.과 같다. 탈수기 유입 전 하수 슬러지의 총인 농도는 595.76 mg/L 이며 실험 결과 최대 92.6%, 최소 80.39% 제거되었다.

Fig. 4.7.의 (a)는 두 변수에 따른 하수 슬러지의 총인 제거율을 나타낸 등고선이며, (b)는 표면도이다. Fig. 4.7.를 보면 진공압력과 여과시간이 증가할수록 총인(TP) 제거율이 증가함을 볼 수 있다.

Table 4.12.는 하수 슬러지 총인 제거율의 추정된 회귀 계수로 두 변수의 영향을 나타낸 표이다. 분산분석을 통해서 회귀반응이 적절한지를 검토한 결과는 Table 4.13.에 나타나있다. 이 표에서 진공압력과 여과시간에 대한 P-값이 회귀는 0.000, 선형은 0.061, 제곱은 0.001, 교호작용은 0.043이었다. 선형을 제외한 경우가 신뢰구간 95%에서 귀무가설이 기각되고 선형의 경우 신뢰구간 90%에서는 귀무가설이 기각됨을 알 수 있다. eq. (7)은 산출된 2차 회귀모형식으로 Table.4.12.를 보면 알 수 있다.

$$y = 215.63 - 0.232x_1 - 8.704x_2 + 0.303x_2^2 - 0.008 x_1x_2 \quad \text{eq. (7)}$$

이때 y는 하수 슬러지의 총인 제거율(%)을 의미한다. 그리고 Table 4.14.는 모형들의 R-제곱, 수정된 R-제곱, 예측된 R-제곱을 나타내고 상관계수(r)은 0.9879이다. 즉 2차 회귀모형은 2개의 독립변수와 하수 슬러지 총인 제거율과의 관계가 97.59%로 높은 것을 확인할 수 있다.

Table 4.11. TP removal(%) of Sewage Sludge on each case

Case	Vacuum Pressure (mmHg)	Filtration Time (min)	Sewage TP removal (%)
1	420	22	82.95
2	450	20	80.39
3	450	24	84.64
4	510	19	84.08
5	510	22	83.84
6	510	25	88.90
7	570	20	90.77
8	570	24	91.33
9	600	22	91.89

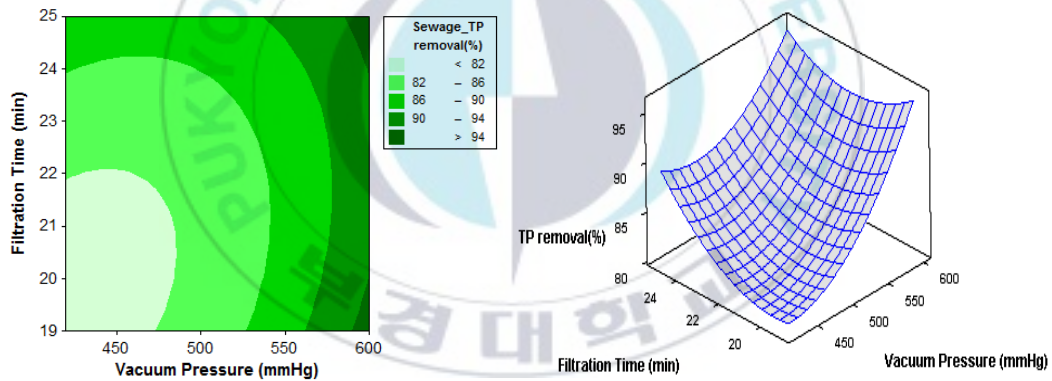


Fig. 4.7. (a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and filtration time (min) according to the TP removal (%) of sewage sludge

$$y = 39.6 + 0.0598x_1 + 0.708x_2 \quad \text{eq. (8)}$$

$$\text{Predicted Sewage TP removal(\%)} = 18.87 + 0.7848 * \text{Experimented Sewage TP removal(\%)} \quad \text{eq. (9)}$$

두 독립변수에 따른 하수슬러지 총인 제거율의 회귀직선 방정식은 eq. (8)에 나타나있다. eq. (9), Table 4.15.와 Fig. 4.8.는 eq. (8)에 의해 계산된 예측값과 실험값으로 구한 회귀 모델을 분석한 결과이며, 상관계수는 0.9301이므로 총인 제거율에 대한 예측값과 실험값 사이가 적합한 것으로 확인할 수 있다.

Fig. 4.9.은 독립변수에 대한 주효과도를 나타낸 그림이다. 하수 슬러지의 총인 제거율의 경우, 총질소의 제거율과 마찬가지로 진공압력이 여과 시간보다 영향이 더 크다고 판단된다.

대구광역시 환경시설공단, (2010) 에서 하수 슬러지에 응집제를 투입하여 실험한 결과 총인의 제거율은 90%이상 이었다. 이 결과는 규조토 pre-coated filter 공정에서 진공압력이 570 mmHg이상이고 여과시간이 20 min이상일 때 비슷하게 나오는 것으로 판단되었다.

Table 4.12. Estimated Regression Coefficients for Sewage sludge TP removal (%)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	215.63	52.6911	4.092	0.005
Vacuum Pressure (mmHg)	-0.232	0.1008	-2.298	0.055
Filtration Time (min)	-8.704	3.2762	-2.657	0.033
Vacuum Pressure (mmHg) * Vacuum Pressure (mmHg)	0	0.0001	6.249	0.000
Filtration Time (min) * Filtration Time (min)	0.303	0.065	4.66	0.002
Vacuum Pressure (mmHg) * Filtration Time (min)	-0.008	0.0031	-2.464	0.043

Table 4.13. Analysis of Variance for Sewage sludge TP removal (%)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	158.839	158.8391	31.7678	56.68	0.000
Linear	2	126.352	4.8207	2.4104	4.3	0.061
Square	2	29.083	29.0831	14.5415	25.95	0.001
Interaction	1	3.404	3.404	3.404	6.07	0.043
Residual Error	7	3.923	3.9232	0.5605		
Lack-of-Fit	3	3.923	3.9232	1.3077	*	*
Pure Error	4	0	0	0		
Total	12	162.762				

Table 4.14. R-squared of models

R-Sq	R-Sq(pred)	R-Sq(adj)
97.59%	82.64%	95.87%

Table 4.15. Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of TP removal (%) of Sewage Sludge

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	79.47	79.47	57.77	0
Error	9	12.3796	1.3755		
Total	10	91.8496			

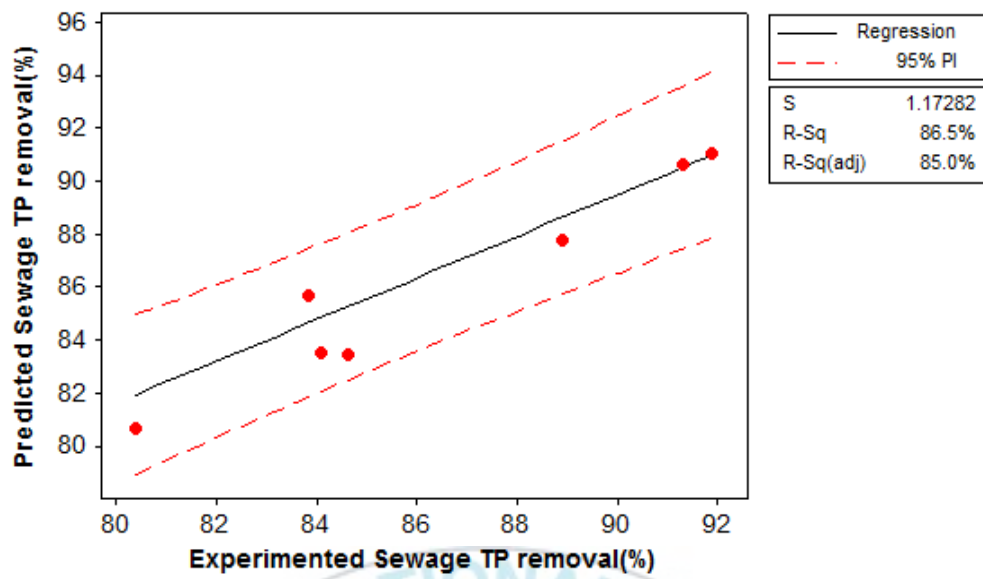


Fig. 4.8. Plots of experimented value vs predicted values derived from model of TP removal (%) of Sewage Sludge

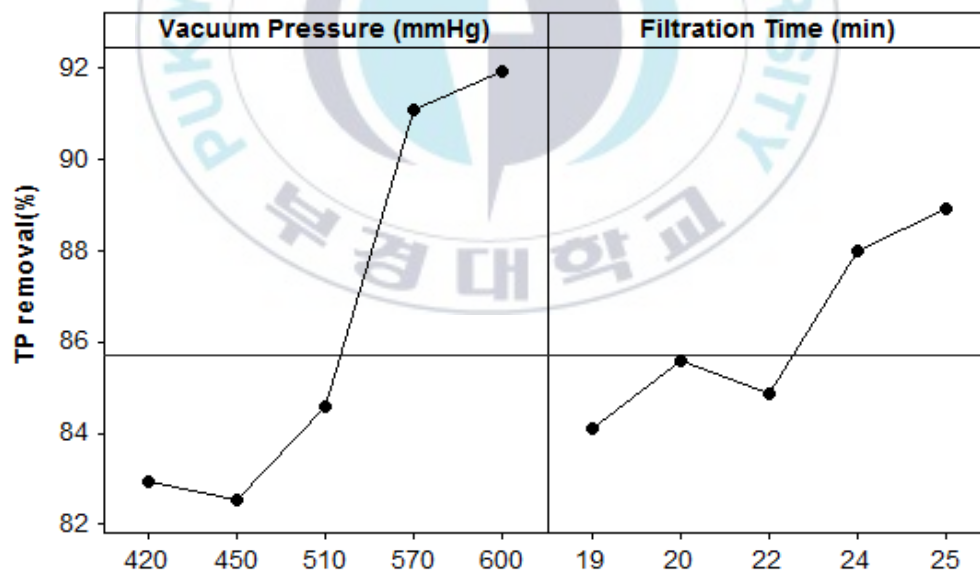


Fig. 4.9. Main Effects Plot for TP removal (%) of Sewage Sludge

4.1.4 진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 BOD 및 SS 제거

Table 4.16.은 진공압력과 여과시간에 따른 하수 슬러지의 BOD 제거율 및 SS 제거율을 나타낸다. 하수 슬러지의 BOD의 농도는 1300.74 mg/L, SS의 농도는 22600 mg/L이었다. BOD는 최대 99.07%, 최소 91.08%가 제거되었으며, SS의 경우 99.56-99.78%가 제거된다.

이상수. (2009) 는 대구에 있는 하수처리장의 혼합 슬러지를 대상으로 하여 고분자 응집제(C-211E) 주입하였다. 그 결과는 BOD의 경우 85.89-95.11%까지 제거되었으며, SS는 99.31-99.79%까지 제거되었으며 본 연구 결과와 비슷하였다. 또한, 대구광역시 환경시설공단의 연구 결과에 의하면 하수 슬러지에 응집제를 투입하면 BOD는 90%이상 제거되었다. 본 연구 결과와 비교하면 규조토 pre-coated filter 공정의 BOD 제거율이 더 높으므로 응집제보다 효과적이라고 판단된다.

Table 4.16. BOD & SS removal(%) of Sewage Sludge on each case

Case	Vacuum Pressure (mmHg)	Filtration Time (min)	Sewage BOD removal (%)	Sewage SS removal (%)
1	420	22	92.07	99.78
2	450	20	95.00	99.56
3	450	24	91.08	99.56
4	510	19	95.53	99.78
5	510	22	98.01	99.78
6	510	25	99.07	99.78
7	570	20	95.37	99.78
8	570	24	98.92	99.78
9	600	22	95.27	99.78

4.1.5 하수 슬러지의 pre-coat 진공 여과 시 수분함량, 총질소 및 총인 제거를 고려한 최적운전조건

Fig 4.10.의 (a)는 하수 슬러지 케익의 수분함량, 탈리액의 총질소 및 총인 제거율을 고려한 최적 운전조건을 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 수분함량은 63-66%, 총질소 제거율은 72-75%, 총인 제거율은 85-90%인 조건을 만족하는 범위는 하얀색으로 표시되어있다. 이 조건들은 진공압력이 541.66 mmHg 이상, 여과시간은 24.50 min이상일 때이다.

(b)는 하수 슬러지 탈리여액의 총질소, 총인을 동시에 고려한 운전 조건을 나타내는 그래프이며, 총질소 제거율이 74-75%, 총인 제거율이 90-93%인 경우가 하얀색으로 표시된 부분이다. 이 그래프를 보면 총질소와 총인의 제거율은 진공압력에 더 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

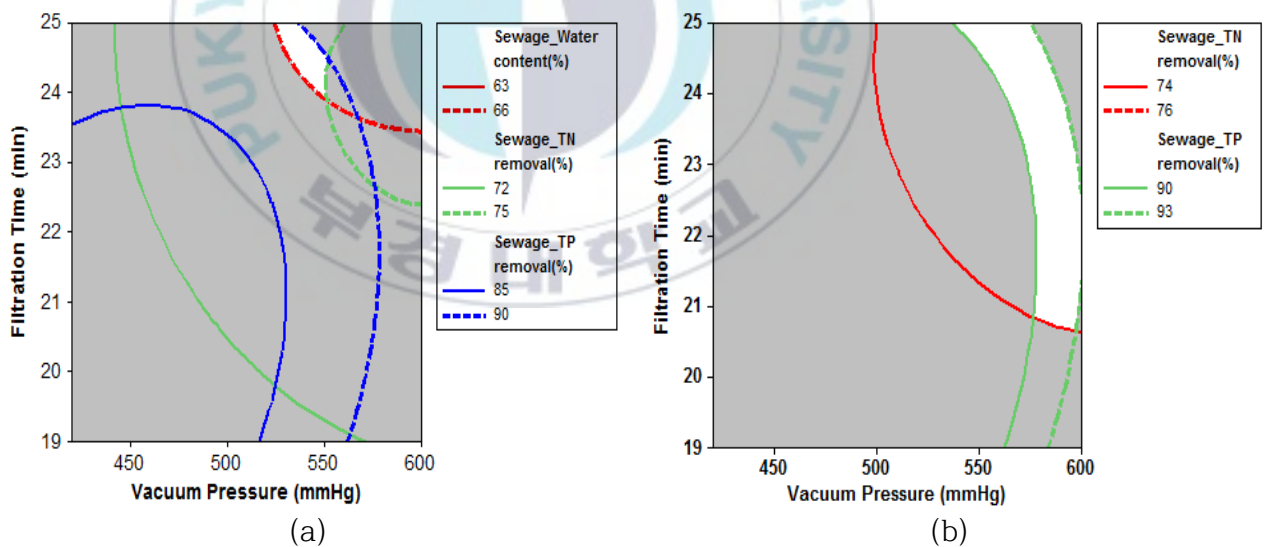


Fig. 4.10. Contour plots for deriving optimum operating conditions (a)considering water content, TN and TP removal rates, (b)considering TN and TP removal rates of sewage sludge

4.2. 분뇨 슬러지 pre-coat 진공 여과 특성

4.2.1 진공압력, 여과시간에 따른 탈수케익의 수분함량

진공압력(mmHg), 여과시간(min)에 따른 분뇨 슬러지의 수분함량을 실험한 결과는 Table 4.17.과 같다. 분뇨 슬러지의 수분함량 범위는 62.43-68.24%임을 확인 할 수 있다.

Fig. 4.11.의 (a)와 (b)는 독립변수에 따른 분뇨 슬러지의 수분함량을 나타낸 등고선, 표면도이다. Fig. 4.11.을 보면 진공압력과 여과시간이 증가할수록 수분함량이 감소함을 볼 수 있다.

Table 4.18.는 분뇨 슬러지 수분함량의 추정된 회귀 계수로 독립변수의 영향을 나타낸 표이며, Table 4.19.는 분산분석을 통해서 회귀반응이 적절한지를 검토한 결과이다. 분산분석표에서 진공압력과 여과시간에 대한 P-값이 회귀는 0.000, 선형은 0.005, 제곱은 0.065, 교호작용은 0.001임을 알 수 있는데, 제곱을 제외한 경우가 신뢰구간 95%에서 귀무가설이 기각되며, 제곱의 경우 신뢰구간 90%에서 귀무가설이 기각된다. 또한 eq. (10)은 산출된 적합 2차 회귀모형식인데, 이 식은 Table 4.18.을 보면 추정할 수 있다.

$$y = 207.033 - 0.161x_1 - 8.133x_2 + 0.058x_2^2 + 0.01x_1x_2 \quad \text{eq. (10)}$$

이때 y는 분뇨 슬러지의 수분함량(%)을 의미한다. 그리고 Table 4.2.0은 모형들의 R-제곱, 수정된 R-제곱, 예측된 R-제곱을 나타낸다. 결정계수(R^2)는 0.9696으로 상관계수(r)은 0.9847이다. 즉 2차 회귀모형은 2개의 독립변수와 분뇨 슬러지 수분함량과의 관계가 96.96%로 높은 것을

확인할 수 있다.

Table 4.17. Water content(%) of Night Soil Sludge on each case

Case	Vacuum Pressure (mmHg)	Filtration Time (min)	Night Soil Water content (%)
1	420	22	65.68
2	450	20	68.24
3	450	24	63.06
4	510	19	66.80
5	510	22	64.47
6	510	25	63.57
7	570	20	62.95
8	570	24	62.43
9	600	22	62.47

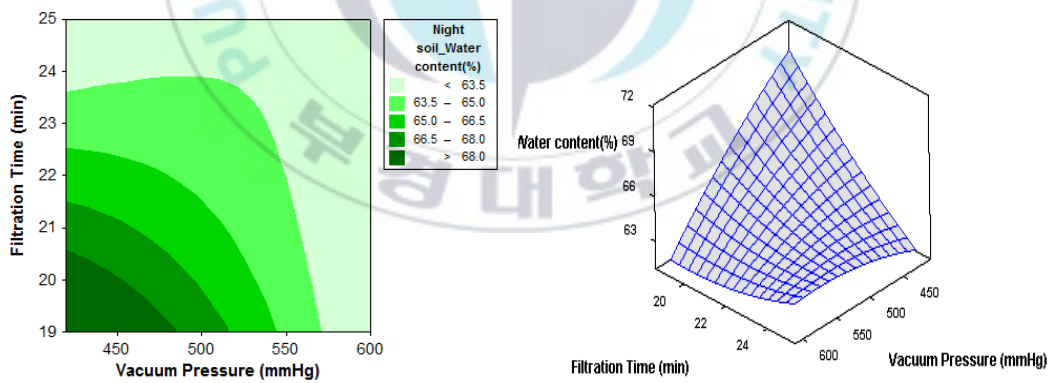


Fig. 4.11. (a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and Filtration time (min) according to the Water content(%) of Night Soil Sludge

Table 4.18. Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge Water content (%)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	207.033	27.19	7.614	0
Vacuum Pressure (mmHg)	-0.161	0.052	-3.087	0.018
Filtration Time (min)	-8.133	1.6906	-4.81	0.002
Vacuum Pressure (mmHg) * Vacuum Pressure (mmHg)	0	0	-1.949	0.092
Filtration Time (min) * Filtration Time (min)	0.058	0.0336	1.735	0.126
Vacuum Pressure (mmHg) * Filtration Time (min)	0.01	0.0016	6.032	0.001

Table 4.19. Analysis of Variance for Night Soil sludge Water content (%)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	33.2998	33.2998	6.65996	44.63	0
Linear	2	26.6283	3.61766	1.80883	12.12	0.005
Square	2	1.2406	1.24062	0.62031	4.16	0.065
Interaction	1	5.4309	5.43088	5.43088	36.39	0.001
Residual Error	7	1.0447	1.04469	0.14924		
Lack-of-Fit	3	1.0447	1.04469	0.34823	*	*
Pure Error	4	0	0	0		
Total	12	34.3445				

Table 4.20. R-squared of models

R-Sq	R-Sq(pred)	R-Sq(adj)
96.96%	78.21%	94.79%

eq. (11)는 독립인자에 따른 분뇨 슬러지의 수분함량의 회귀직선 방정식을 나타낸다. Fig. 4.12,와 eq. (12), Table 4.21.는 eq. (11)에 의해 계산된 예측값과 실험값으로 도출한 회귀 모델을 분석한 결과이며, P값이 0.000이므로 유의수준 99%에서 귀무가설이 기각된다. 또한 회귀식의 상관계수(r)는 0.9033이므로 수분함량에 대한 예측값과 실험값 사이가 적합한 것으로 확인 할 수 있다.

$$y = 88.8 - 0.0211x_1 - 0.619x_2 \quad \text{eq. (11)}$$

$$\text{Predicted Sewage water content(\%)} = 22.44 + 0.6551 * \text{Experimented Sewage water content(\%)} \quad \text{eq. (12)}$$

진공압력, 여과시간에 대한 주효과도는 Fig. 4.13.에서 나타낸다. 분뇨 슬러지 수분함량의 경우, 하수 슬러지와 마찬가지로 여과시간이 영향력이 좀 더 크다고 판단된다.

배문국. (2013) 은 하수종말처리장의 소화슬러지를 채취하여 실험하였으며, 슬러지 성상은 TS는 4.43-5.06%이었다. 1 kgf/cm², 2 kgf/cm², 3 kgf/cm², 4 kgf/cm², 5 kgf/cm²의 압력 변화에 따른 탈수 실험을 하였는데 함수율이 66.71-61.15%이었다. 압력이 증가함에 따라 함수율이 감소하였으며, 5 kgf/cm²일 때 수분함량은 61.15%로 최저였다. 또한, 시간에 따른 케익의 함수율은 시간이 증가할수록 감소하는 추세를 보였으나 8분 이후로는 감소하는 추세가 미미하다고 판단하였다.

또한, 윤석호. (1987) 연구에 따르면 Filter cake의 공극률은 압력의 증가에 따라 log-log그래프에서 선형적으로 감소하였으며, 국소여과 비저항은 압력의 증가에 따라 log-log 그래프에서 선형적으로 증가하였다.

진오석. (2009) 은 혼합슬러지(생+잉여슬러지)를 대상으로 슬러지 저류조에서 다중원판형 농축기를 거쳐 Belt Press 탈수기로 처리하는 방법을 적용시켜 실험하였다. 그 결과 탈수 케이크의 함수율은 76.5%로 규조토 pre-coated filter 공정의 함수율보다 높으므로 Belt Press 탈수기보다 규조토를 이용한 탈수공정이 더 효과적이라고 판단된다.

Table 4.21. Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of Water content (%) of Night Soil Sludge

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	12.405	12.405	39.9	0
Error	9	2.7985	0.3109		
Total	10	15.2035			

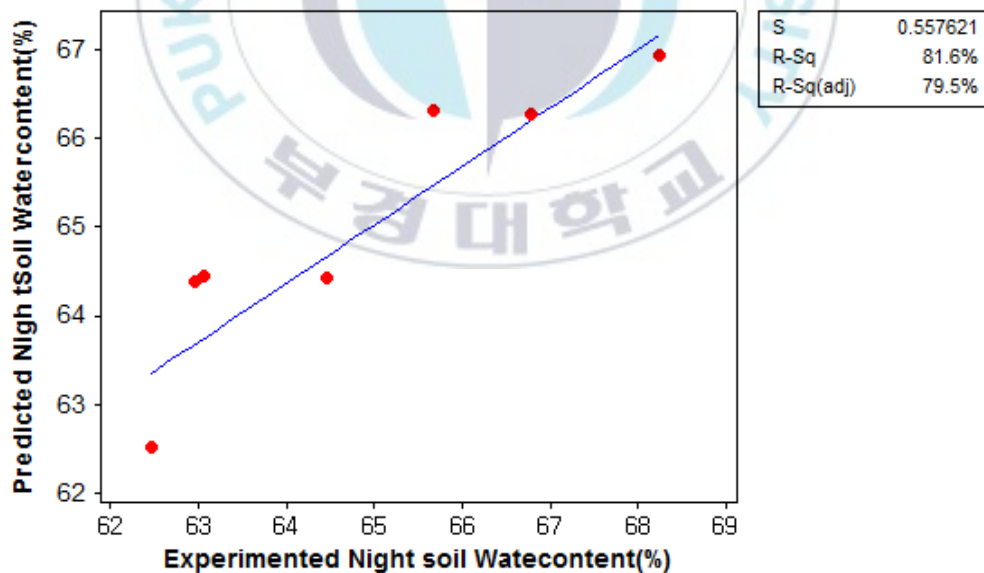


Fig. 4.12. Plots of experimented value vs predicted values derived from model of Water content (%) of Night Soil Sludge

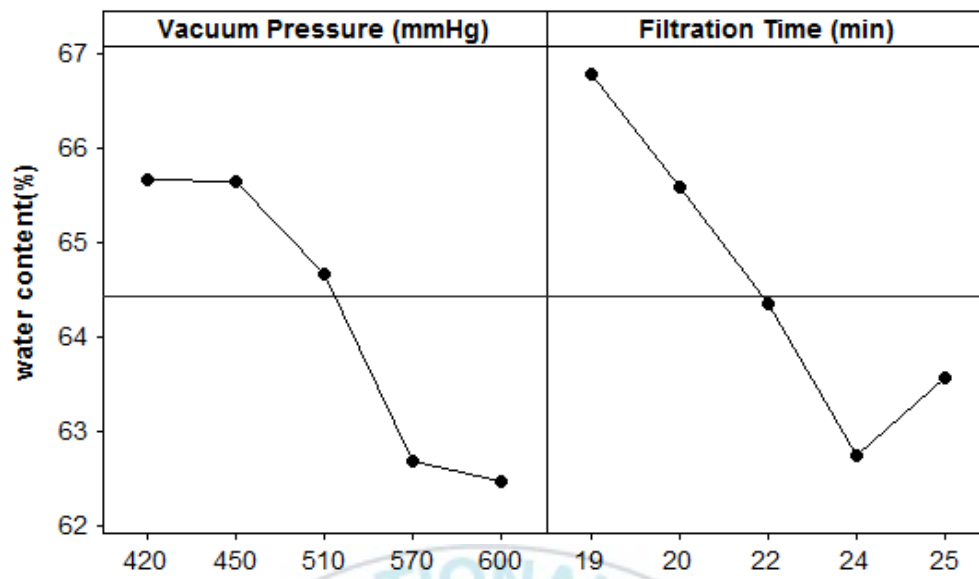


Fig. 4.13. Main Effects Plot for Water content (%) of Night Soil Sludge

4.2.2 진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 총질소 제거

Table 4.22.는 진공압력(mmHg), 여과시간(min)에 따른 분뇨 슬러지의 총질소의 제거율을 실험한 결과이다. 탈수기 유입 전 분뇨 슬러지의 총질소 농도는 1037.43 mg/L이며 최대 제거율은 84.79%, 최소 제거율은 62.92%이다.

Fig. 4.14.는 독립변수에 따른 분뇨 슬러지의 총질소 제거율을 나타낸 그림이다. Fig. 4.14.의 (a)는 등고선이며, (b)는 표면도이다. Fig. 4.14.를 보면 진공압력과 여과시간이 증가할수록 총질소 제거율이 증가함을 볼 수 있다.

Table 4.23.은 분뇨 슬러지 총질소 제거율의 추정된 회귀 계수로 독립변수의 영향을 나타낸 표이다. 분산분석을 통해서 회귀반응이 적절한지를 검토한 결과는 Table 4.24.에 나타나 있다. 분산분석표에서 독립변수에 대한 P-값이 회귀는 0.000, 선형은 0.000, 제곱은 0.000, 교호작용은 0.012임을 알 수 있는데, 교호작용 경우는 신뢰구간 95%에서 귀무가설이 기각된다. 회귀, 선형, 제곱의 경우 신뢰구간 99%에서 귀무가설이 기각된다. 또한 산출된 적합 2차 회귀모형식은 Table 4.23.을 보면 추정할 수 있는데 식은 eq. (13)과 같다.

$$y = -441.135 + 1.08x_1 + 18.711x_2 - 0.0001x_1^2 - 0.252x_2^2 - 0.013 x_1 x_2 \quad \text{eq. (13)}$$

이때 y는 분뇨 슬러지의 총질소의 제거율(%)을 의미한다. 그리고 Table 4.25.는 모형들의 R-제곱, 수정된 R-제곱, 예측된 R-제곱을 나타내고 상관계수는 0.9939이다. 즉 2차 회귀모형은 독립변수와 하수 슬러지

총질소 제거율과의 관계가 98.78%로 높은 것을 확인 할 수 있다.

Table 4.22. TN removal(%) of Night Soil Sludge on each case

Case	Vacuum Pressure (mmHg)	Filtration Time (min)	Night Soil TN removal (%)
1	420	22	62.92
2	450	20	66.80
3	450	24	71.66
4	510	19	73.23
5	510	22	79.25
6	510	25	80.59
7	570	20	83.48
8	570	24	81.96
9	600	22	84.79

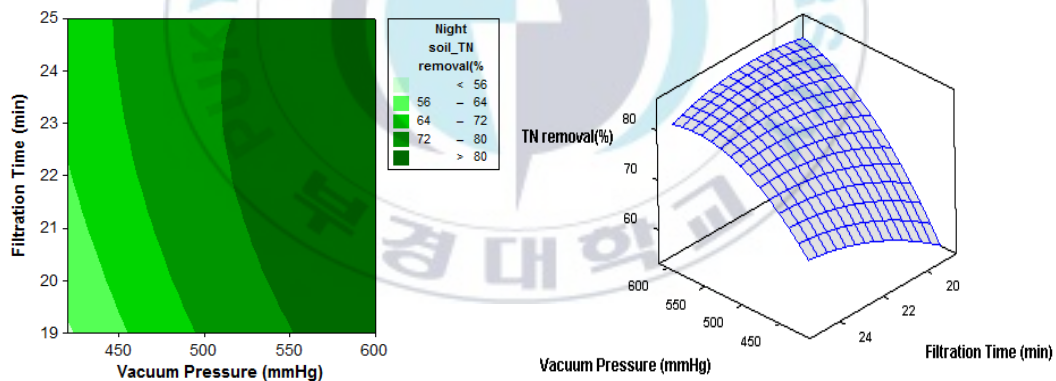


Fig. 4.14. (a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and Filtration time (min) according to the TN removal (%) of Night Soil Sludge

독립인자에 따른 분뇨 슬러지 총질소 제거율의 회귀직선 방정식은 eq. (14)을 나타낸다. 이 식에 의해 계산된 예측값과 실험값으로 도출한 회귀 모델을 분석한 결과는 eq. (15), Table 4.26.과 Fig. 4.15.이다. P값이

0.000이므로 유의수준 99%에서 귀무가설이 기각된다. 또한 회귀식의 상관계수는 0.9823이므로 분뇨 슬러지의 총질소 제거율에 대한 예측값과 실험값 사이가 적합한 것으로 확인 할 수 있다.

$$y = -1.3 + 0.117x_1 + 0.846x_2 \quad \text{eq. (14)}$$

$$\text{Predicted Night Soil TN removal(\%)} = 20.39 + 0.7226 * \text{Experimented Night Soil TN removal(\%)} \quad \text{eq. (15)}$$

Fig. 4.16.은 독립변수에 대한 주효과도를 나타낸 그림이다. 분뇨 슬러지의 총질소 제거율의 경우, 진공압력의 기울기가 더 크므로 진공압력이 여과시간보다 영향이 더 크다고 판단된다.

김용선, (2003) 의 연구에서는 농축조 회수수를 대상으로 규조토 여과 실험 하였다. 대상물질의 총질소의 농도는 2.15-2.27 mg/L에서 1.01-2.33 mg/L로 3-24% 제거되었다. 이 연구를 보아 규조토 여과는 고농도의 유기물을 함유하는 슬러지에 더 적합한 것으로 보인다.

Table 4.23. Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge TN removal (%)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-441.135	66.42	-6.642	0
Vacuum Pressure (mmHg)	1.08	0.1271	8.5	0
Filtration Time (min)	18.711	4.1298	4.531	0.003
Vacuum Pressure (mmHg) * Vacuum Pressure (mmHg)	-0.001	0.0001	-7.215	0
Filtration Time (min) * Filtration Time (min)	-0.252	0.082	-3.074	0.018
Vacuum Pressure (mmHg) * Filtration Time (min)	-0.013	0.0039	-3.38	0.012

Table 4.24. Analysis of Variance for Night Soil sludge TN removal (%)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	504.222	504.222	100.8444	113.24	0
Linear	2	444.827	64.9368	32.4684	36.46	0
Square	2	49.219	49.2188	24.6094	27.63	0
Interaction	1	10.176	10.1761	10.1761	11.43	0.012
Residual Error	7	6.234	6.234	0.8906		
Lack-of-Fit	3	6.234	6.234	2.078	*	*
Pure Error	4	0	0	0		
Total	12	510.456				

Table 4.25. R-squared of models

R-Sq	R-Sq(pred)	R-Sq(adj)
98.78%	91.20%	97.91%

Table 4.26. Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of TN removal (%) of Night Soil Sludge

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	215.083	215.083	251.55	0.000
Error	9	7.695	0.855		
Total	10	222.778			

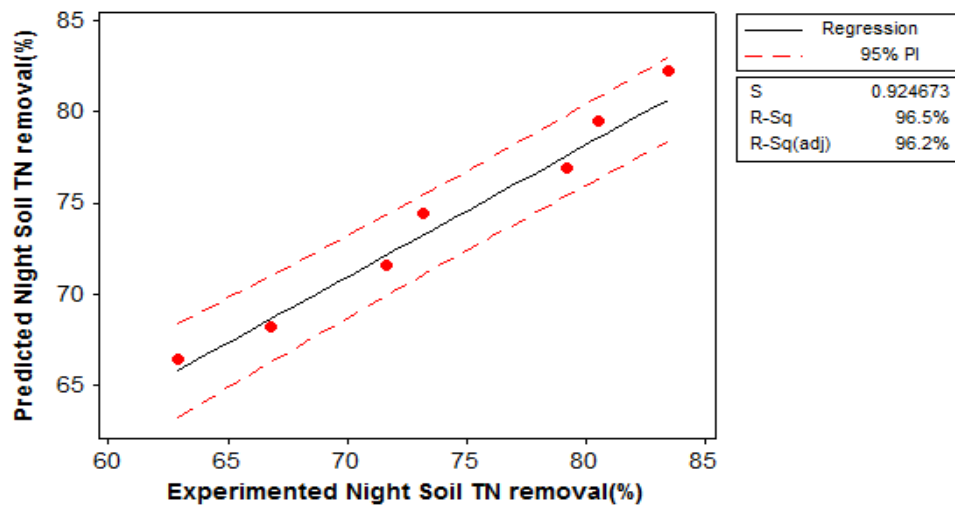


Fig. 4.15. Plots of experimented value vs predicted values derived from model of TN removal (%) of Night Soil Sludge

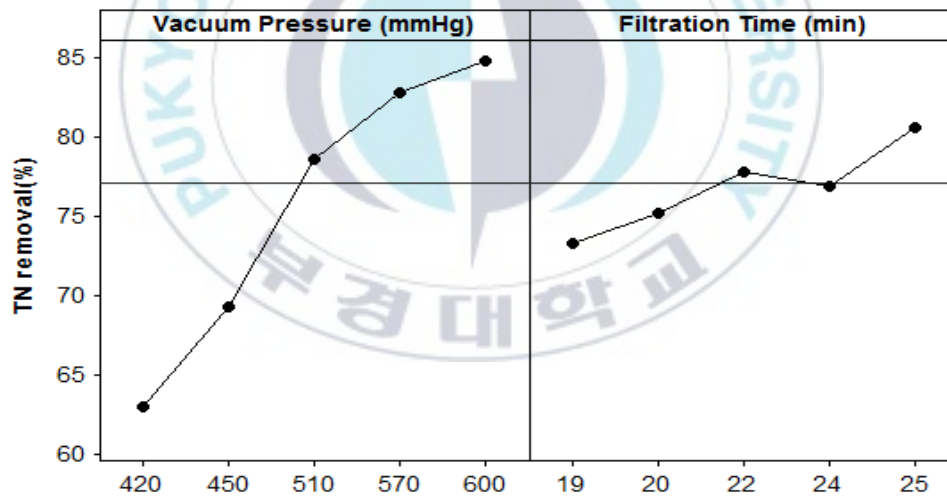


Fig. 4.16. Main Effects Plot for TN removal (%) of Night Soil Sludge

4.2.3 진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 총인 제거

진공압력(mmHg), 여과시간(min)에 따른 분뇨 슬러지 총인의 제거율을 실험한 결과는 Table 4.27.이다. 분뇨 슬러지의 총인 농도는 151.05 mg/L 이며 최대 84.95%, 최소 77.81% 제거되었다.

Fig. 4.17.의 (a)는 두 변수에 따른 분뇨 슬러지의 총인 제거율을 나타낸 등고선이며, (b)는 표면도이다. 진공압력과 여과시간이 증가할수록 총인(TP) 제거율이 증가함을 Fig. 4.17.를 보면 알 수 있다.

분뇨 슬러지 총인의 추정된 회귀 계수로 두 개의 독립변수의 영향을 나타낸 표는 Table 4.28.이다. Table 4.29.는 분산분석을 통해서 회귀반응이 적절한지를 검토한 결과가 나타나 있다. 분산분석표에서 진공압력과 여과시간에 대한 P-값이 회귀는 0.000, 선형은 0.001, 제곱은 0.032, 교호작용은 0.002임을 알 수 있다. 제곱은 신뢰구간 95%에서 귀무가설이 기각되며 나머지의 경우 신뢰구간 99%에서 귀무가설이 기각된다. 그리고 산출된 적합 2차 회귀모형식은 eq. (16)으로 Table 4.28.을 보면 추정할 수 있다.

$$y = -103.681 + 0.383x_1 + 6.975x_2 - 0.051x_2^2 - 0.009 x_1x_2 \quad \text{eq. (16)}$$

이때 y는 분뇨 슬러지의 총인의 제거율(%)을 의미한다. 그리고 모형들의 R-제곱, 수정된 R-제곱, 예측된 R-제곱은 Table 4.30.에 나타나 있으며, 상관계수(r)는 0.9870이다. 즉 2차 회귀모형은 2개의 독립변수와 분뇨 슬러지 총인 제거율과의 관계가 97.41%로 높은 것을 확인할 수 있다.

Table 4.27. TP removal(%) of Night Soil Sludge on each case

Case	Vacuum Pressure (mmHg)	Filtration Time (min)	Night Soil TP removal (%)
1	420	22	77.84
2	450	20	77.81
3	450	24	79.84
4	510	19	80.75
5	510	22	82.10
6	510	25	82.64
7	570	20	84.95
8	570	24	82.65
9	600	22	84.13

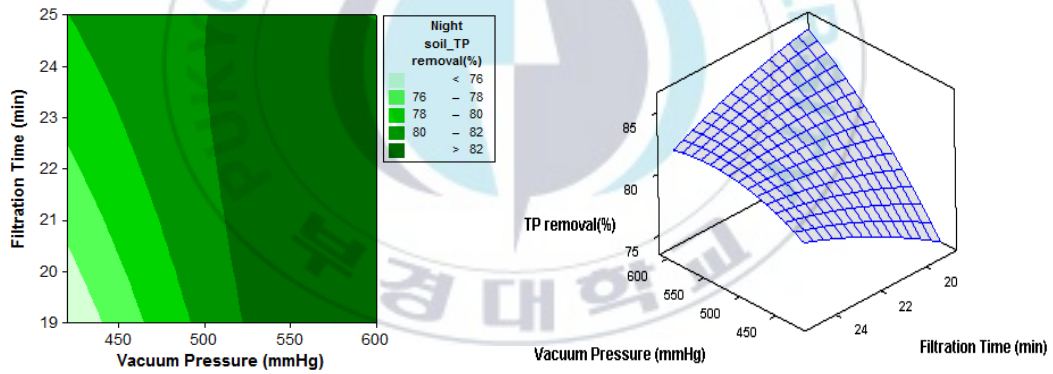


Fig. 4.17. (a) Contour plots and (b) Three-dimensional response surface plots of Vacuum Press (mmHg) and Filtration time (min) according to the TP removal (%) of Night Soil Sludge

Table 4.28. Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge TP removal (%)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-103.681	31.2681	-3.316	0.013
Vacuum Pressure (mmHg)	0.383	0.0598	6.406	0
Filtration Time (min)	6.975	1.9442	3.587	0.009
Vacuum Pressure (mmHg) * Vacuum Pressure (mmHg)	0	0	-3.354	0.012
Filtration Time (min) * Filtration Time (min)	-0.051	0.0386	-1.309	0.232
Vacuum Pressure (mmHg) * Filtration Time (min)	-0.009	0.0019	-4.873	0.002

Table 4.29. Analysis of Variance for Night Soil sludge TP removal (%)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	51.9903	51.99034	10.39807	52.68	0
Linear	2	44.9832	8.22862	4.11431	20.85	0.001
Square	2	2.3199	2.31988	1.15994	5.88	0.032
Interaction	1	4.6872	4.68722	4.68722	23.75	0.002
Residual Error	7	1.3816	1.38157	0.19737		
Lack-of-Fit	3	1.3816	1.38157	0.46052	*	*
Pure Error	4	0	0	0		
Total	12	53.3719				

Table 4.30. R-squared of models

R-Sq	R-Sq(pred)	R-Sq(adj)
97.41%	81.36%	95.56%

eq. (17)는 변수에 따른 총인 제거율의 회귀직선 방정식을 나타낸다.

이 방정식에 의해 계산된 예측값과 실험값으로 도출한 회귀 모델을 분석한 결과는 eq. (18), Table 4.31.과 Fig. 4.18.이다. P값이 0.000이므로 유의수준 99%에서 귀무가설이 기각된다. 또한 회귀식의 결정계수는 96.7%로 상관계수는 0.9834이므로 총인 제거율에 대한 예측값과 실험값 사이가 적합한 것으로 확인 할 수 있다.

$$y = 58.9 + 0.0380x_1 + 0.151x_2 \quad \text{eq. (17)}$$

$$\text{Predicted Night Soil TP removal(\%)} = 23.44 + 0.7087 * \text{Experimented Night Soil TP removal(\%)} \quad \text{eq. (18)}$$

독립변수인 진공압력, 여과시간에 대한 주효과도를 나타낸 그림은 Fig. 4.19.이다. 총인 제거율의 경우, 진공압력이 여과시간보다 영향이 더 크다고 판단된다.

혼합슬러지를 대상으로 슬러지 저류조에서 다중원판형 농축기를 거쳐 Belt Press 탈수기로 처리하는 방법을 적용시켜 실험한 진오석. (2009)의 연구에 따르면 총인은 97.42%까지 제거가 되었다. 이는 규조토 pre-coated filter 공정의 결과보다 좋았다. 또한, 김용선. (2003)은 농축조 회수수를 대상으로 규조토 여과 실험하였다. 그 결과 총인의 농도가 0.16-0.29 mg/L에서 0.101-0.126 mg/L로 줄어들었으며, 제거율은 28-63%였다. 탈수기 유입 전 슬러지와 결과 비교를 하였을 때 규조토 여과는 유기물 함량이 높은 물질일 때 제거가 더 잘 되는 것을 알 수 있다.

Table 4.31. Analysis of experimented value vs predicted values derived from model of TP removal (%) of Night Soil Sludge

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	22.5548	22.5548	264.06	0
Error	9	0.7688	0.0854		
Total	10	23.3236			

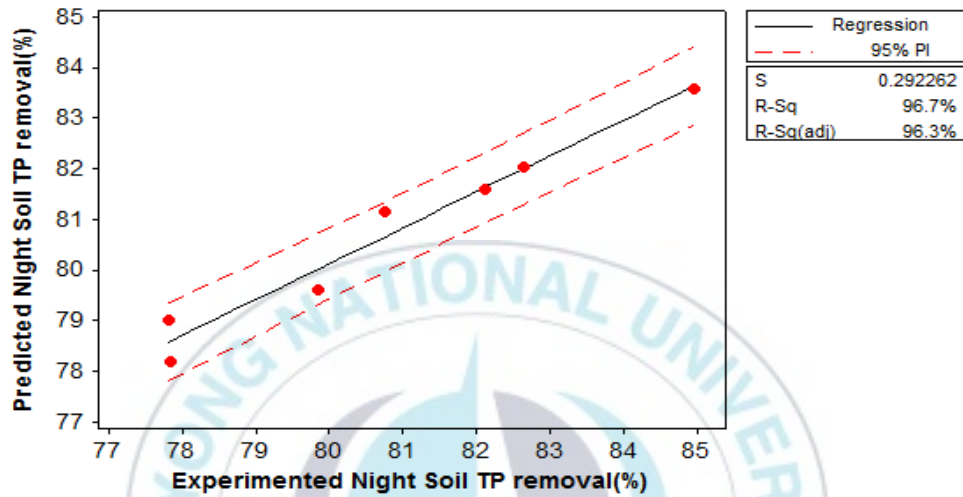


Fig. 4.18. Plots of experimented value vs predicted values derived from model of TP removal (%) of Night Soil Sludge

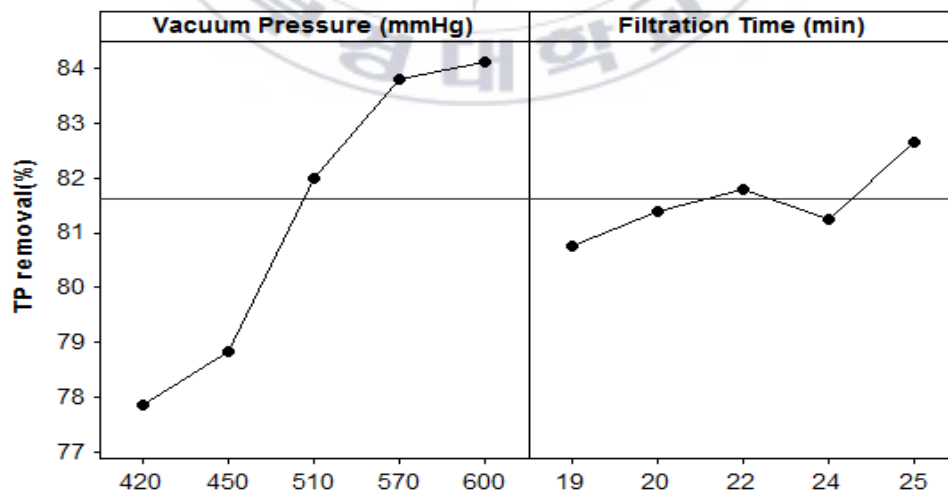


Fig. 4.19. Main Effects Plot for TP removal (%) of Night Soil Sludge

4.2.4 진공압력, 여과시간에 따른 탈리액의 BOD 및 SS 제거

진공압력과 여과시간에 따른 분뇨 슬러지의 BOD 및 SS 제거율을 실험 결과는 Table 4.32.에 나타낸다. 탈수기 유입 전 분뇨슬러지의 BOD의 농도는 1340.31 mg/L, SS의 농도는 17450 mg/L이다. 최대 BOD 제거율은 99.78%이고 최소 BOD 제거율은 94.96%이며, SS 제거율의 경우 97.71-99.71%가 제거된다.

진오석. (2009) 은 혼합슬러지를 대상으로 슬러지 저류조에서 다중원판형 농축기를 거쳐 Belt Press 탈수기로 처리하는 방법을 적용시켜 실험하였다. 여액의 SS의 제거율은 61.33%로 규조토 여과의 결과보다 많이 낮았다. 또한, 김용선. (2003) 의 연구에서는 농축조 회수수를 대상으로 규조토 여과 실험하였다. 대상물질의 SS는 10-12 mg/L에서 0.3.-5.7 mg/L까지 제거되었으며, 제거율은 47-97%이었다. 그리고 이 연구에 따르면 SS의 경우 흡착보다 여과에 의한 제거 효과가 더 컸으며, Belt Press 탈수기보다 규조토 pre-coated filter 공정이 SS가 더 많이 제거되었음을 알 수 있었다.

Table 4.32. BOD & SS removal(%) of Night Soil Sludge on each case

Case	Vacuum Pressure (mmHg)	Filtration Time (min)	Night Soil BOD removal (%)	Night Soil SS removal (%)
1	420	22	97.88	98.85
2	450	20	96.45	99.71
3	450	24	97.84	99.14
4	510	19	96.05	97.71
5	510	22	99.34	97.71
6	510	25	99.78	98.85
7	570	20	96.56	97.71
8	570	24	98.02	98.28
9	600	22	94.96	98.28

4.2.5 분뇨 슬러지의 pre-coat 진공 여과 시 수분함량, 총질소 및 총인 제거를 고려한 최적운전조건

분뇨 슬러지 케익의 수분함량, 탈리액의 총질소 및 총인 제거율을 고려한 최적 운전조건을 나타낸 결과는 Fig 4.20.의 (a)를 보면 알 수 있다. 수분함량은 62-64%, 총질소 제거율은 76-81%, 총인 제거율은 80-85%인 조건을 만족하는 범위는 하얀색으로 표시된 부분이며 진공압력이 499.52 mmHg 이상, 여과시간은 24.05 min이상이었다.

Fig 4.20.의 (b)는 분뇨 슬러지 탈리여액의 총질소, 총인을 동시에 고려한 운전 조건을 나타내며, 총질소 제거율이 81-85%, 총인 제거율이 82-84%인 경우가 하얀색으로 표시된 부분이다. 이 그래프를 보면 총질소와 총인의 제거율은 진공압력에 더 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

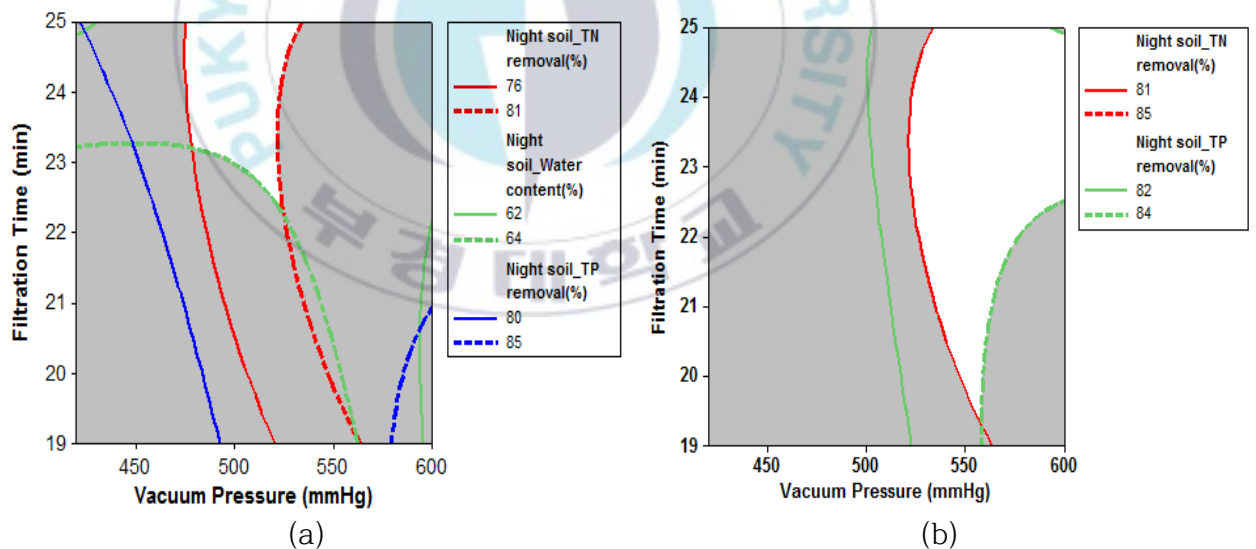


Fig. 4.20. Contour plots for deriving optimum operating conditions (a)considering water content, TN and TP removal rates, (b)considering TN and TP removal rates of Night soil sludge

4.3. pre-coat 진공여과 여과보조제의 최적혼합비

4.3.1 여과보조제의 혼합비에 따른 탈수케익의 수분함량

본 실험은 Minitab 15라는 통계프로그램을 통해 규조토 함유량을 50%로 고정하고 돌로마이트, 굴 껍데기 가루, 숯가루의 함유량을 독립변수로 설정하여 설계한 후 실험하였다. 여과보조제의 혼합비에 따른 분뇨슬러지의 수분함량은 Table 4.33.와 같다. 수분함량은 굴 껍데기 가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 0 : 1 : 1일 때 48.39%로 최소였으며, 1 : 0 : 1인 경우가 59.37%로 최대였다. 여과보조제의 혼합비에 따른 분뇨 슬러지의 수분함량을 나타낸 등고선은 Fig. 4.21. (a)에 나타나있으며 표면도는 (b)에 나타나 있다. 등고선을 보면, 함수율은 굴 껍데기 가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 2.54 : 15.43 : 32.03일 때 49.07%로 최소였고, 36.63 : 0.46 : 12.91인 경우가 59.96%로 최대였다. 숯가루의 함유율이 많아질수록, 굴 껍데기 가루가 적어질수록 수분함량이 감소하였다.

Table 4.34.는 혼합비에 따른 분뇨슬러지 수분함량의 추정된 회귀계수로 세 가지 인자의 영향을 나타낸 표이다. 분산분석으로 회귀반응이 적절한지를 검토한 결과는 Table 4.35.에 나타나 있다. Table 4.35.를 보면 회귀, 선형, 2차의 P값과 F값이 나타나 있는데 이는 각각 0.017, 0.021, 0.064이다. 2차를 제외한 경우 신뢰구간 95%에서 귀무가설이 기각되며 2차인 경우 0.1보다 작으므로 신뢰구간 90%에서 귀무가설이 기각된다. 그리고 Table 4.34.를 보면 적합한 2차 회귀모형식을 추정할 수 있는데 이때 방정식은 eq. (19)와 같다.

$$y = 58.6x_1 + 55.16x_2 + 49.3x_3 - 5.34x_1x_2 + 20.44x_1x_3 - 15.67x_2x_3$$

eq. (19)

이때 y 는 분뇨슬러지의 수분함량을 의미하며, x_1, x_2, x_3 는 코드화하지 않은 굴 껍데기 가루, 돌로마이트, 숯가루의 함량을 의미한다. 또한 모형들의 R-제곱, 수정된 R-제곱, 예측된 R-제곱은 Table 4.36.에 나타나있으며, R-제곱은 Table 4.35.에 나타나있는 Regression의 Seq SS (122.125)와 Total Seq SS(130.431)의 비로 구할 수 있다. R^2 을 의미하는 결정계수는 93.63%로 상관계수는 0.9676이다. 그러므로 2차 회귀모형은 3개의 독립변수와 분뇨슬러지 수분함량과의 관계가 93.63%로 높다고 판단된다.

Table 4.33. Water content(%) of Night Soil Sludge on each case according to mixing ratio of mixture

Case	Oyster shell powder	Dolomite	Charcoal powder	Diatomite	Night Soil Water content (%)
1	0.00	0.00	50.00	50.00	49.26
2	0.00	25.00	25.00	50.00	48.39
3	0.00	50.00	0.00	50.00	54.70
4	8.33	8.33	33.33	50.00	52.46
5	8.33	33.33	8.33	50.00	54.53
6	16.67	16.67	16.67	50.00	52.11
7	25.00	0.00	25.00	50.00	59.37
8	25.00	25.00	0.00	50.00	55.43
9	33.33	8.33	8.33	50.00	58.56
10	50.00	0.00	0.00	50.00	58.37

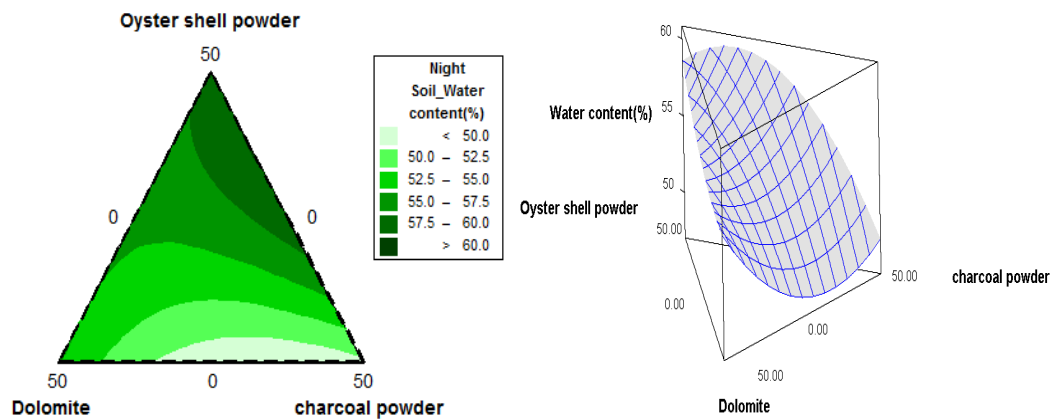


Fig. 4.21. (a) Mixture Contour plots and (b) Three-dimensional response Mixture surface plots of mixing ratio of mixture according to the Water content(%) of Night Soil Sludge

Table 4.34. Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge Water content (%) according to mixing ratio of mixture

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Oyster shell powder	58.6	1.39	*	*	1.964
Dolomite	55.16	1.39	*	*	1.964
charcoal powder	49.3	1.39	*	*	1.964
Oyster shell powder * Dolomite	-5.34	6.405	-0.83	0.452	1.982
Oyster shell powder * charcoal powder	20.44	6.405	3.19	0.033	1.982
Dolomite * charcoal powder	-15.67	6.405	-2.45	0.071	1.982

Fig. 4.22.은 세 개의 독립 인자에 대한 주효과도를 나타낸 그림이다. 기울기가 가장 적은 돌로마이트가 영향이 작다고 판단할 수 있으며 보레 가루가 없을수록, 숯가루가 많을수록 수분함량이 적다고 판단된다.

문종익. (2001) 은 정수 슬러지 200 mL에 굴 껍데기 가루를 주입하여 탈수에 미치는 영향을 알아보고자 실험을 하였는데, 굴 껍데기 가루

6.0g을 주입 시 탈수성이 가장 우수하였다. 그리고 하수슬러지의 경우에도 굴 껍데기 6.0 g 주입 시 탈수성이 가장 우수하였다. 하지만 슬러지의 고형물 함량은 굴껍질의 주입량이 증가함에 따라 슬러지 발생량도 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 폐굴껍데기를 첨가하지 않은 슬러지에 비해 폐굴껍데기를 첨가한 경우에 탈수가 더 우수한 경향을 보여주고 있어 폐굴껍데기를 슬러지의 탈수성 증진을 위한 개량제로써 활용성이 충분히 있는 것으로 판단된다.

엄한기. (2016)의 연구는 굴 폐각 주입에 따른 슬러지 탈수효율을 평가하기 위해, 굴 폐각과 잉여슬러지의 혼합비율을 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1, 5 : 1, 10 : 1로 하여 탈수를 진행하였다. 실험 결과 굴 폐각과 잉여슬러지의 혼합비율을 10 : 1로 하였을 경우 탈수케익의 함수율이 약 53-60%로 나타났으며, 굴 폐각 함유량이 많을수록 수분함량이 적음을 알 수 있다,

Table 4.35. Analysis of Variance for Night Soil sludge Water content (%) according to mixing ratio of mixture

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	122.125	122.1251	24.425	11.76	0.017
Linear	2	86.888	48.6785	24.3393	11.72	0.021
Quadratic	3	35.237	35.2374	11.7458	5.66	0.064
Residual Error	4	8.306	8.3061	2.0765		
Total	9	130.431				

Table 4.36. R-squared of models

R-Sq	R-Sq(pred)	R-Sq(adj)
93.63%	45.56%	85.67%

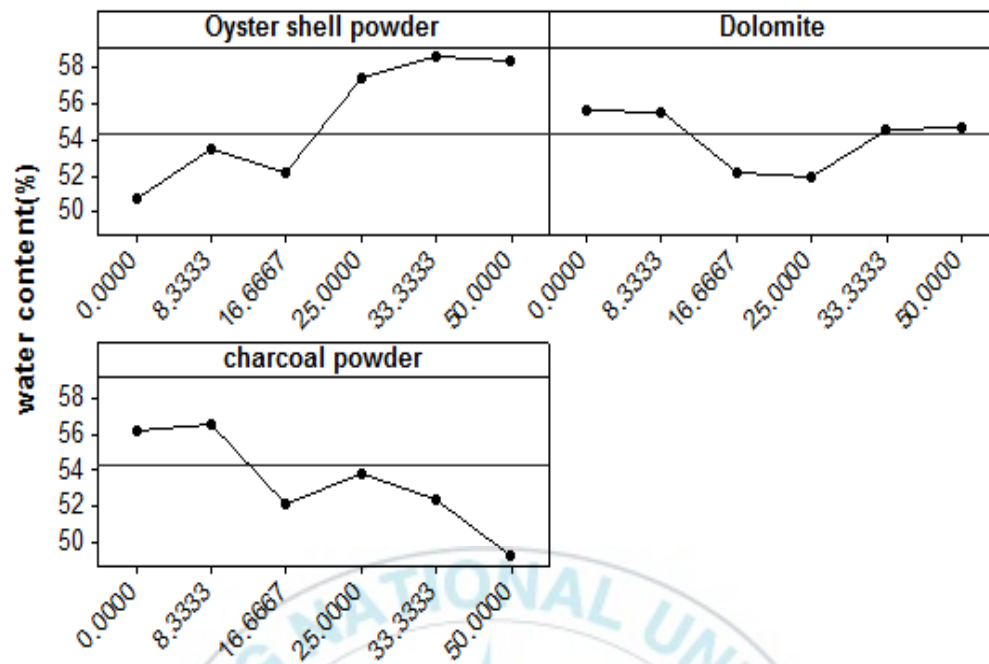


Fig. 4.22. Main Effects Plot for Water content (%) of Night Soil Sludge according to mixing ratio of mixture

4.3.2 여과보조제의 혼합비에 따른 탈리액의 총질소 제거

Table 4.37.은 규조토 함유량을 50%로 고정하고 돌로마이트, 굴 껍데기 가루, 숯가루의 함유량을 독립변수로 설정하여 실험한 분뇨 슬러지의 총질소 제거율을 나타낸 표이다. 분뇨 슬러지의 총질소 농도는 1244.27 mg/L이었으며, 총질소 제거율은 굴 껍데기 가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 1 : 0 : 1일 때 79.64%로 최소였으며, 1 : 1 : 0인 경우가 89.17%로 최대였다. Fig. 4.23.의 (a)는 여과 보조제의 혼합비에 따른 총질소 제거율을 나타낸 등고선이며, (b)는 표면도이다. Fig. 4.23.를 보면 TN 제거율은 굴껍데기 가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 32.97 : 16.82 : 0.21일 때 90.09%로 최대였으며, 22.99 : 2.36 : 24.65인 경우가 80.34%로 최소였다. 그리고 굴 껍데기 가루와 돌로마이트의 함유율이 높아질수록 총질소의 제거율이 증가함을 알 수 있다.

Table 4.38.은 혼합비에 따른 분뇨 슬러지 총질소 제거율의 추정된 회귀계수로 세 가지 인자의 영향을 나타낸 표이다. 분산분석으로 회귀반응이 적절한지를 검토한 결과는 Table 4.39.에 나타나 있다. Table 4.39.를 보면 회귀는 0.004, 선형은 0.006, 2차는 0.002이다. 모든 경우 신뢰구간 99%에서 귀무가설이 기각된다. 그리고 Table 4.38.를 보면 적합한 2차 회귀 모형식을 추정할 수 있는데 식은 eq. (20)와 같다.

$$y = 87.56x_1 + 81.86x_2 + 88.88x_3 + 20.43x_1x_2 - 33.61x_1x_3 + 3.19x_2x_3$$

eq. (20)

이때 y 는 여과보조제의 혼합비에 따른 분뇨 슬러지의 총질소의 제거율을 의미한다.

Table 4.37. TN removal(%) of Night Soil Sludge on each case

Case	Oyster shell powder	Dolomite	charcoal powder	Diatomite	Night Soil TN removal (%)
1	0.00	0.00	50.00	50.00	89.12
2	0.00	25.00	25.00	50.00	85.88
3	0.00	50.00	0.00	50.00	81.63
4	8.33	8.33	33.33	50.00	84.35
5	8.33	33.33	8.33	50.00	86.76
6	16.67	16.67	16.67	50.00	84.68
7	25.00	0.00	25.00	50.00	79.64
8	25.00	25.00	0.00	50.00	89.17
9	33.33	8.33	8.33	50.00	86.21
10	50.00	0.00	0.00	50.00	87.44

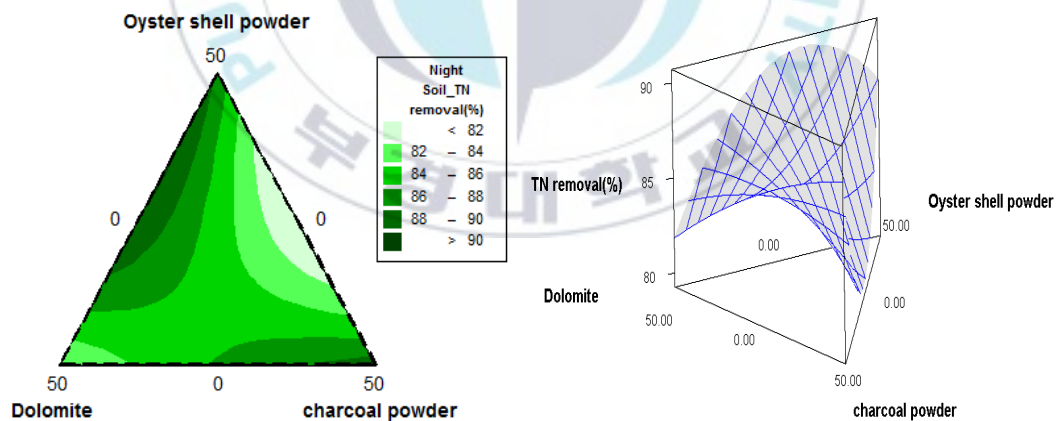


Fig. 4.23. (a) Mixture Contour plots and (b) Three-dimensional response Mixture surface plots of mixing ratio of mixture according to the TN removal (%) of Night Soil Sludge

또한 Table. 4.40.은 모형들의 R-제곱, 수정된 R-제곱, 예측된 R-제곱

이 나타나 있으며 상관계수(r)는 0.9843이다. 그러므로 2차 회귀모형은 3개의 독립변수와 분뇨 슬러지 총질소 제거율과의 관계가 96.88%로 높다고 판단된다.

세 개의 독립 인자에 대한 주효과도를 나타낸 그림은 Fig. 4.24.이다. 숯가루가 많을수록 총질소의 제거율이 높다고 판단된다.

Po-Kang Shih. (2015) 는 가정용 폐수를 정화하기 위해 폐굴껍데기를 적용하였다. 실험결과 TN의 평균 질량 제거는 71.2-86.59%이었다.

또한, 대구환경공단, (2017)의 연구에 따르면 대구의 북부처리장의 하수 슬러지를 대상으로 Struvite 결정화 공정으로 실험한 결과, $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도가 846.67 mg/L에서 495.33 mg/L로 줄어들었다. 이때 제거율은 41.50%로 규조토 및 여과보조제의 혼합물 실험보다 낮은 제거율을 확인할 수 있다. 그러므로 규조토, 굴 껍데기 가루, 돌로마이트, 숯가루의 혼합물을 이용한 여과방법이 더 효과적이라고 판단된다.

Table 4.38. Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge TN removal (%)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Oyster shell powder	87.56	0.7804	*	*	1.964
Dolomite	81.86	0.7804	*	*	1.964
charcoal powder	88.88	0.7804	*	*	1.964
Oyster shell powder * Dolomite	20.43	3.5966	5.68	0.005	1.982
Oyster shell powder * charcoal powder	-33.61	3.5966	-9.34	0.001	1.982
Dolomite * charcoal powder	3.19	3.5966	0.89	0.425	1.982

Table 4.39. Analysis of Variance for Night Soil sludge TN removal (%)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	81.27	81.27	16.254	24.83	0.004
Linear	2	1.9897	30.6117	15.3058	23.38	0.006
Quadratic	3	79.2803	79.2803	26.4268	40.36	0.002
Residual Error	4	2.6189	2.6189	0.6547		
Total	9	83.8888				

Table 4.40. R-squared of models

R-Sq	R-Sq(pred)	R-Sq(adj)
96.88%	56.18%	92.98%

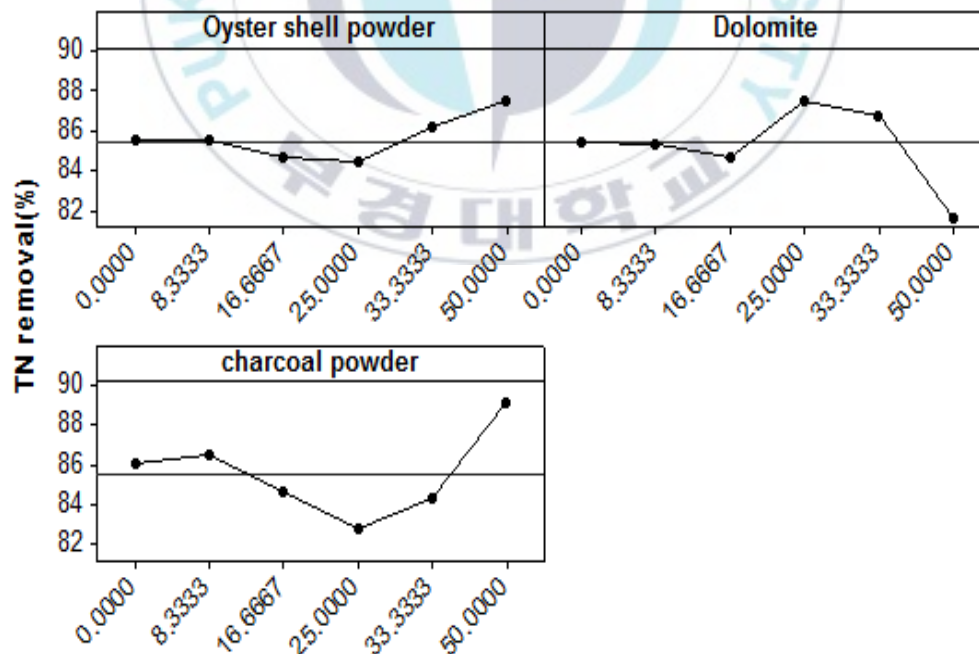


Fig. 4.24. Main Effects Plot for TN removal (%) of Night Soil Sludge

4.3.3 여과보조제의 혼합비에 따른 탈리액의 총인 제거

규조토 함유량을 50%로 고정하고 독립변수를 돌로마이트, 굴 껍데기 가루, 숯가루의 함유량로 설정하여 총인 제거율 실험하였으며 그 결과는 Table 4.41.와 같다. 분뇨 슬러지의 총인의 농도는 188.57 mg/L이었으며, 총인 제거율은 굴 껍데기 가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 0 : 1 : 1 일 때 43.48%로 최소였으며, 4 : 1 : 1인 경우가 98.50%로 최대였다. Fig. 4.25.의 (a)와 (b)는 여과 보조제의 혼합비에 따른 총인 제거율을 나타낸 등고선과 표면도이다. 이 그래프를 보면 TP 제거율은 굴 껍데기 가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 29.30 : 18.09 : 2.61 일 때 99%로 최대였으며, 2.55 : 24.14 : 23.31인 경우가 55.18%로 최소였다. 그리고 돌로마이트와 굴 껍데기 가루의 함유율이 많아질수록 총인 제거율이 증가함을 알 수 있다.

Table 4.42.는 혼합비율에 따른 분뇨슬러지 총인 제거율의 추정된 회귀 계수로 세 가지 인자의 영향을 나타낸 표이다. 분산분석으로 회귀반응이 적절한지를 검토한 결과는 Table 4.43.에 나타나 있는데 이는 각각 0.036, 0.626, 0.038이다. 선형을 제외한 경우 신뢰구간 95%에서 귀무가설이 기각된다. 그리고 eq (21)은 Table 4.42.를 보고 적합한 2차 회귀 모형식을 추정한 방정식이다.

$$y = 91.2x_1 + 80.9x_2 + 86.7x_3 + 70.7x_1x_2 + 28.5x_1x_3 - 139.4x_2x_3$$

eq. (21)

이때 y 는 분뇨슬러지의 총인 제거율을 의미한다. 또한 모형들의 R-제곱, 수정된 R-제곱, 예측된 R-제곱은 Table 4.44.에 나타나있다. R^2 을 의미하는 결정계수는 90.48%로 상관계수는 0.9512이다. 그러므로 2차 회귀

모형은 3개의 독립변수와 분뇨슬러지 총인 제거율과의 관계가 90.48%로 높다고 판단된다.

Fig. 4.26.은 세 개의 독립 인자에 대한 주효과도를 나타낸 그림이다. 비교적 세 가지 인자의 기울기가 비슷하므로 주효과도도 비슷하다고 판단된다.

가정용 폐수를 정화하기 위해 폐굴껍데기를 적용한 연구인 Po-Kang Shih. (2015)의 연구에 따르면, TP의 평균 질량은 50.58-95.5% 제거되었다. 또한, 대구환경공단, (2017)의 연구에 따르면 북부처리장의 하수 슬러지를 대상으로 하여 Struvite 결정화 공정으로 처리한 결과, $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도가 138.79 mg/L에서 66.57 mg/L로 줄어들었다. 제거율은 52.04%이었다. 서부처리장의 경우에는 72.44 mg/L에서 처리 후 37.4 mg/L까지 감소하였으며, 이때의 제거율은 48.37%로 본 실험보다 낮은 제거율을 확인할 수 있다. 그러므로 본 연구에서 실험한 혼합물을 이용한 여과방법이 더 효과적이라고 판단된다.

Table 4.41. TP removal(%) of Night Soil Sludge on each case

Case	Oyster shell powder	Dolomite	charcoal powder	Diatomite	Night Soil TP removal (%)
1	0.00	0.00	50.00	50.00	87.32
2	0.00	25.00	25.00	50.00	43.48
3	0.00	50.00	0.00	50.00	78.78
4	8.33	8.33	33.33	50.00	79.08
5	8.33	33.33	8.33	50.00	88.03
6	16.67	16.67	16.67	50.00	79.32
7	25.00	0.00	25.00	50.00	93.46
8	25.00	25.00	0.00	50.00	98.36
9	33.33	8.33	8.33	50.00	98.50
10	50.00	0.00	0.00	50.00	91.92

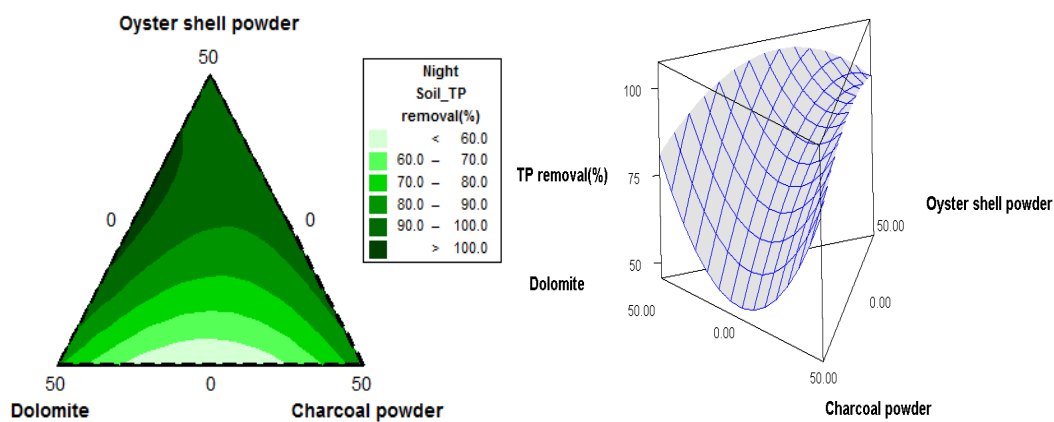


Fig. 4.25. (a) Mixture Contour plots and (b) Three-dimensional response Mixture surface plots of mixing ratio of mixture according to the TP removal (%) of Night Soil Sludge

Table 4.42. Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge TP removal (%)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Oyster shell powder	91.2	7.154	*	*	1.964
Dolomite	80.9	7.154	*	*	1.964
Charcoal powder	86.7	7.154	*	*	1.964
Oyster shell powder * Dolomite	70.7	32.972	2.14	0.099	1.982
Oyster shell powder * Charcoal powder	28.5	32.972	0.86	0.436	1.982
Dolomite * Charcoal powder	-139.4	32.972	-4.23	0.013	1.982

Table 4.43. Analysis of Variance for Night Soil sludge TP removal (%)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	2090.88	2090.88	418.175	7.6	0.036
Linear	2	805.85	58.15	29.077	0.53	0.626
Quadratic	3	1285.02	1285.02	428.341	7.78	0.038
Residual Error	4	220.1	220.1	55.025		
Total	9	2310.97				

Table 4.44. R-squared of models

R-Sq	R-Sq(pred)	R-Sq(adj)
90.48%	0.00%	78.57%

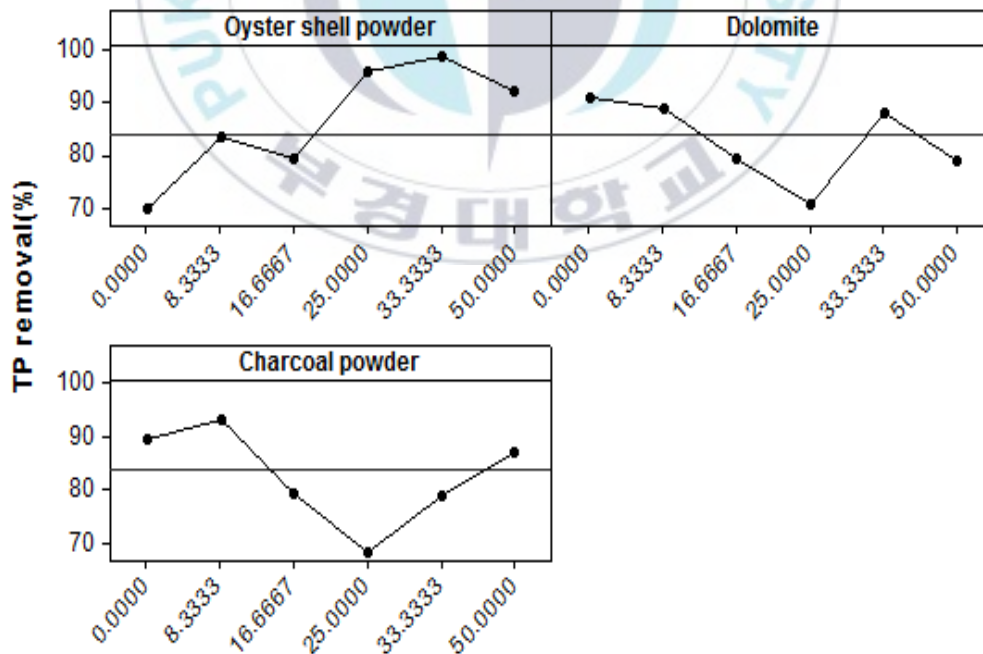


Fig. 4.26. Main Effects Plot for TP removal (%) of Night Soil Sludge

4.3.4 여과보조제의 혼합비에 따른 탈리액의 BOD 제거

규조토 함유량을 50%로 고정하고 여과보조제의 함유량을 독립변수로 설정하여 BOD 제거율 실험한 결과는 Table 4.45.이다. 분뇨 슬러지의 BOD 농도는 1494.77 mg/L 이었으며, BOD는 굴 껍데기가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 1 : 1 : 4일 때 98.07%로 최대 제거되었으며, 0 : 1 : 0인 경우가 최소 76.58%로 제거되었다. Fig. 4.27. (a)는 여과 보조제의 혼합비에 따른 BOD 제거율을 나타낸 등고선이고, (b)는 표면도이다. 이를 보면 BOD 제거율의 경우 굴 껍데기 가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 26.28 : 8.30 : 15.42일 때 97.36%로 최대였으며, 1.91 : 46.16 : 1.93인 경우가 78.85%로 최소였다. 그리고 굴 껍데기 가루와 숯가루의 함유율이 높아질수록 BOD 제거율이 증가하였다.

혼합비에 따른 분뇨슬러지 BOD 제거율의 추정된 회귀계수로 세 가지 인자의 영향을 나타낸 결과는 Table 4.46.에 나타나있다. 분산분석으로 회귀반응이 적절한지를 검토한 결과는 Table 4.47.에 나타나 있는데, 이는 각각 회귀, 선형, 2차 순으로 0.036, 0.016, 0.23이다. 2차를 제외한 경우 신뢰구간 95%에서 귀무가설이 기각된다. 그리고 Table 4.46.을 보면 적합한 2차 회귀 모형식을 추정할 수 있는데, 모형식은 eq. (22)이다.

$$y = 97.383x_1 + 75.518x_2 + 93.33x_3 + 32.283x_1x_2 + 6.781x_1x_3 + 18.367x_2x_3 \quad \text{eq. (22)}$$

이때 y 는 분뇨슬러지의 BOD제거율을 의미한다. 또한 모형들의 R-제곱, 수정된 R-제곱, 예측된 R-제곱은 Table 4.48.에 나타나있다. 결정계수는 90.48%로 상관계수는 0.9512이므로 2차 회귀모형은 3개의 독립변수

와 분뇨슬러지 BOD 제거율과의 관계가 높다고 판단된다.

세 개의 변수(굴 껍질가루, 돌로마이트, 숯가루)에 대한 주효과도를 나타낸 그림은 Fig. 4.28.이다. 비교적 돌로마이트의 기울기가 크므로 주효과도도 크다고 판단된다.

Po-Kang Shih. (2015). 에 따르면 폐굴껍데기를 가정용 폐수를 정화하기 위해 연구한 결과, BOD₅의 제거율은 89.3-85.02% 이었다. 그리고 이 실험 결과 SS의 제거로 인해서 BOD₅의 일부가 제거되었다고 판단했다.

Table 4.45. BOD removal (%) of Night Soil Sludge on each case according to mixing ratio of mixture

Case	Oyster shell powder	Dolomite	charcoal powder	Diatomite	Night Soil BOD removal (%)
1	0.00	0.00	50.00	50.00	91.86
2	0.00	25.00	25.00	50.00	90.20
3	0.00	50.00	0.00	50.00	76.58
4	8.33	8.33	33.33	50.00	98.07
5	8.33	33.33	8.33	50.00	83.70
6	16.67	16.67	16.67	50.00	93.54
7	25.00	0.00	25.00	50.00	97.05
8	25.00	25.00	0.00	50.00	97.05
9	33.33	8.33	8.33	50.00	97.22
10	50.00	0.00	0.00	50.00	97.26

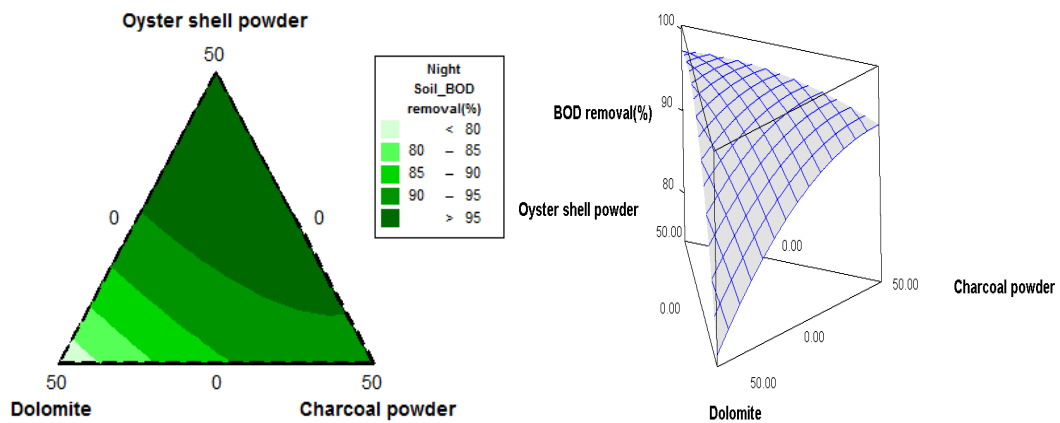


Fig. 4.27. (a) Mixture Contour plots and (b) Three-dimensional response Mixture surface plots of mixing ratio of mixture according to the BOD removal (%) of Night Soil Sludge

Table 4.46. Estimated Regression Coefficients for Night Soil sludge BOD removal (%) according to mixing ratio of mixture

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Oyster shell powder	97.383	3.172	*	*	1.964
Dolomite	75.518	3.172	*	*	1.964
Charcoal powder	93.33	3.172	*	*	1.964
Oyster shell powder*Dolomite	32.283	14.621	2.21	0.092	1.982
Oyster shell powder*Charcoal powder	6.781	14.621	0.46	0.667	1.982
Dolomite*Charcoal powder	18.367	14.621	1.26	0.277	1.982

Table 4.47. Analysis of Variance for Night Soil sludge BOD removal (%) according to mixing ratio of mixture

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	411.143	411.143	82.229	7.6	0.036
Linear	2	339.563	297.643	148.822	13.75	0.016
Quadratic	3	71.58	71.58	23.86	2.21	0.23
Residual Error	4	43.281	43.281	10.82		
Total	9	454.424				

Table 4.48. R-squared of models

R-Sq	R-Sq(pred)	R-Sq(adj)
90.48%	0.00%	78.57%

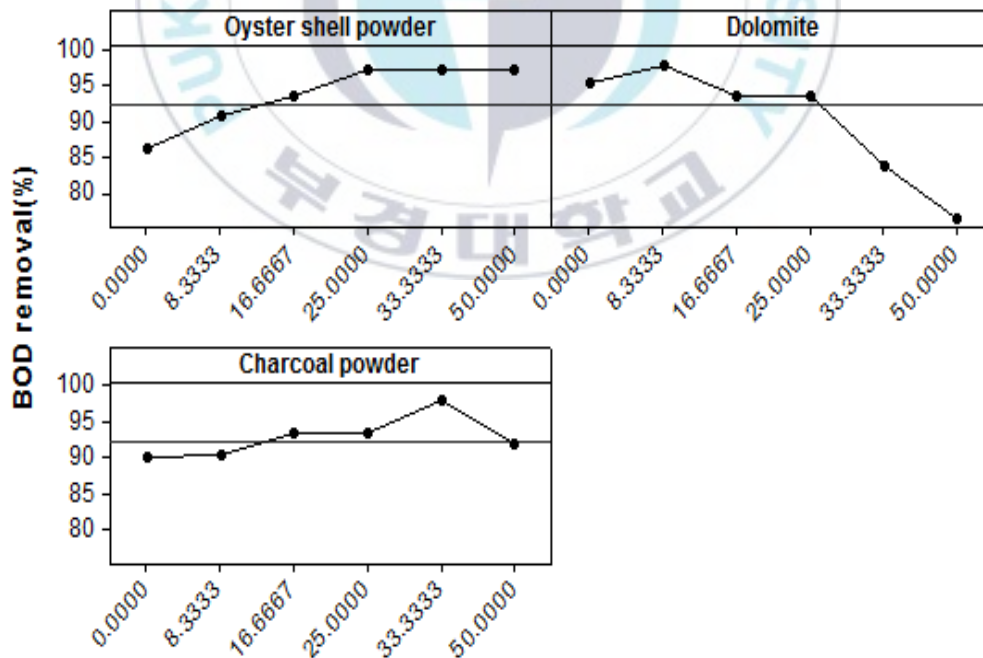


Fig. 4.28. Main Effects Plot for BOD removal (%) of Night Soil Sludge

4.3.5 여과보조제의 혼합비에 따른 탈리액의 SS 제거

규조토 함유량을 50%로 고정하고 돌로마이트, 굴 껍데기가루, 숯가루의 함유량을 최소 0%, 최대 50%로 설정하여 SS 제거율 실험을 하였으며 그 결과는 Table 4.49와 같다. 분뇨 슬러지의 SS 농도는 17450 mg/L이었으며, 굴 껍데기 가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 1 : 4 : 1 일 때 최소 78.80% 제거되었으며 1 : 1 : 0 이거나 4 : 1 : 1인 경우 최대 99.71%까지 제거되었다.

Po-Kang Shih. (2015)는 가정용 폐수를 정화하기 위해 폐굴껍데기를 적용한 연구인데, 실험결과 가정용 폐수의 부유물질 평균 질량 제거율은 85.3-85.32%였다.

Table 4.49. SS removal(%) of Night Soil Sludge on each case according to mixing ratio of mixture

Case	Oyster shell powder	Dolomite	charcoal powder	Diatomite	Night Soil SS removal (%)
1	0.00	0.00	50.00	50.00	93.98
2	0.00	25.00	25.00	50.00	96.85
3	0.00	50.00	0.00	50.00	94.96
4	8.33	8.33	33.33	50.00	94.56
5	8.33	33.33	8.33	50.00	78.80
6	16.67	16.67	16.67	50.00	97.71
7	25.00	0.00	25.00	50.00	96.56
8	25.00	25.00	0.00	50.00	99.71
9	33.33	8.33	8.33	50.00	99.71
10	50.00	0.00	0.00	50.00	99.43

4.3.6 분뇨 슬러지의 pre-coat 진공 여과 시 수분함량, 총질소, 총인 및 BOD 제거를 고려한 여과보조제의 최적혼합비

분뇨 슬러지 케익의 수분함량, 탈리액의 총질소 및 총인, BOD 제거율을 고려한 최적 운전조건을 나타낸 결과는 Fig 4.29.을 보면 알 수 있다. 수분함량은 48-55%, 총질소 제거율은 85-98%, 총인 제거율은 85-98%, BOD 제거율은 85-98%인 조건을 만족하는 범위는 하얀색으로 표시된 부분이다. 이 부분은 굴 껍데기 가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 16.18 : 29.15 : 4.67, 4.56 : 0.86 : 44.57이다.

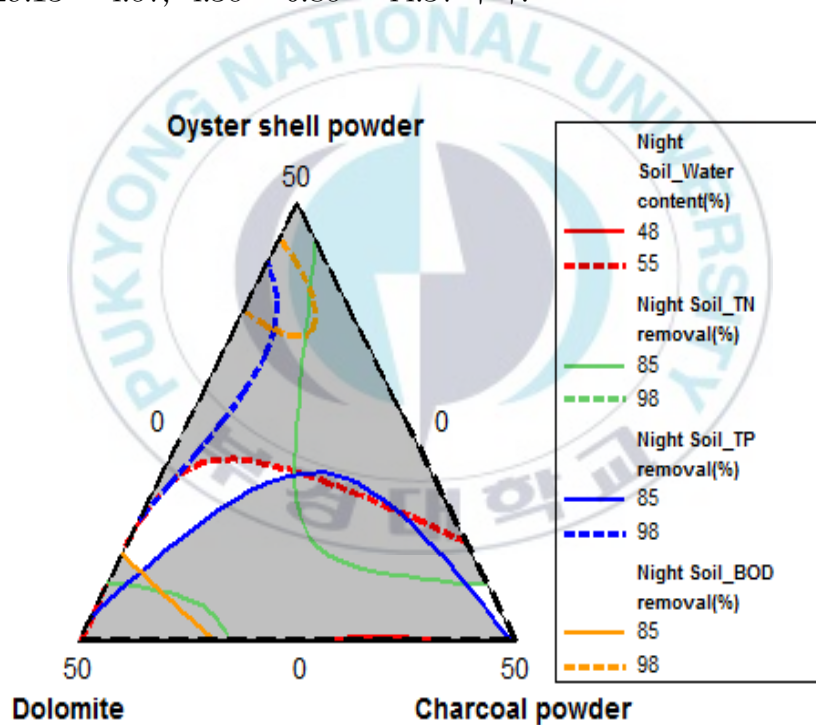


Fig. 4.29. Mixture Contour plots for deriving optimum operating conditions considering water content, TN and TP and BOD removal rates of Night Soil sludge

4.4 분뇨처리장 슬러지의 구조토 여과 케익의 퇴비화 활용성

4.4.1 분뇨처리장 슬러지 케익의 유기물 분석

아래의 Table. 4.50. 은 여과보조제의 혼합비에 따른 분뇨 슬러지 케익의 유기물 함량(%)을 나타낸 표이다. 유기물 분석 실험은 비료의 품질검사방법 및 시료채취기준을 따라 실험하였다. 비료의 퇴비조건은 유기물 함량이 30% 이상인 경우이다(농촌진흥청, 2017). 본 실험에서는 유기물 함량이 33.06-49.57%의 범위를 가지므로 퇴비 조건을 충족한다고 볼 수 있다. 이우범. (2017) 에 따르면 고품 찌꺼지는 광물질 함유량이 많아 농지의 토질 개량제와 비료로 사용할 수 있다.

또한, 김용태, (2008) 는 감량화 장치를 통해 분뇨 슬러지의 탈수 케익의 수분이 65% 이하로 저감되면 전량 퇴비화로 재활용 가능하다고 판단하였으며, 이로 인해 슬러지 처분 비용을 줄일 수 있을 것이라고 판단된다.

Table. 4.50. Analysis of organic matter content of night soil sludge cake

Case	Oyster shell powder	Dolomite	Charcoal powder	Diatomite	organic matter content(%)
1	0	25	25	50	42.15
2	8.3	8.3	33.3	50	49.57
3	16.7	16.7	16.7	50	37.05
4	100	0	0	0	33.06
5	0	0	0	100	48.14

4.4.2 분뇨처리장 슬러지 케익의 중금속 분석

Table. 4.51.은 분뇨 슬러지 케익의 중금속 실험 Case를 나타낸 표이다. Table. 4.52.은 각 Case별로 실험을 하였을 때 나오는 유해성분의 농도와 비료관리법의 기준치를 나타낸 표이며, 이는 모든 항목에서 기준치 안에 들어가므로 분뇨처리장 슬러지의 규조토 여과 케익이 퇴비로 적합하다는 것을 확인할 수 있다.

Table. 4.51. Heavy metal experiment case of night soil sludge cake (unit : %)

Case	Oyster shell powder	Dolomite	Charcoal powder	Diatomite
1	0	25	25	50
2	8.3	8.3	33.3	50
3	16.7	16.7	16.7	50
4	100	0	0	0
5	0	0	100	0
6	0	0	0	100

Table. 4.52. Heavy metal concentration of night soil sludge cake in each case and standard concentration (unit : mg/kg)

Case	As	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
1	1.47	1.12	0.42	5.83	6.83	102.94	4.88	255.49
2	1.74	1.26	0.52	5.41	8.66	102.86	5.29	301.41
3	1.76	1.00	0.79	4.35	6.23	74.71	4.00	227.49
4	1.73	0.64	0.29	1.02	3.21	39.34	2.14	108.06
5	1.21	0.75	0.61	2.01	4.60	30.45	3.16	83.89
6	2.60	2.03	1.33	7.38	12.15	116.90	7.81	388.31
Standard	45	5	2	130	200	360	45	900

이현구. (2012) 는 가축분뇨 탈수케익의 위해성을 평가하기 위해서 폐기물 용출 실험을 하였는데 분석항목은 As, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd로 비소와 납은 불검출되었으며, 아연, 구리, 니켈, 카드뮴은 폐기물 관리법 기준치보다 낮은 농도로 검출되었다. 또한, Guodong Sheng. (2009) 와 Y Al-Degs. (2001) 의 연구에 따르면 규조토에 의한 Pb (II)의 흡착은 pH가 증가함에 따라 증가하는데, pH 4.0-7.0에서 갑자기 증가하며, pH 7.0-10.0에서 높은 수준을 유지하고 pH가 10.0 이상인 경우 급격하게 감소한다. 그리고 납 이온에 대한 규조토 흡착 능력은 24 mg/g 이다. 그러므로 규조토는 중금속 중 하나인 납을 흡착 제거하는데 적합하다.

A.I. Ivanets. (2016) 은 Al^{3+} , Cr^{3+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} 및 Fe^{3+} 와 같은 2가 및 3가의 금속 이온을 함유 한 실제 광산 수를 대상으로 백운석으로 만들어진 흡착제를 이용하여 실험하였다. 그 결과 금속 이온의 제거 효율은 접촉 시간 및 용액 온도에 약간 의존적이었으며, Cd^{2+} , Co^{2+} , Cr^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} 및 Zn^{2+} 와 같은 금속 이온의 95-100%는 흡착제와 5 -10 분 이내에 접촉하여 제거되었다. 또한 Ahmad B. (2012) 와 Erol Pehlivan. (2009) 연구에 따르면 백운석의 흡착용량은 Cu^{2+} 의 경우 8.26 mg, Pb^{2+} 의 경우 21.74 mg으로 백운석은 수용액으로부터 Cr과 Cu^{2+} 및 Pb^{2+} 이온 등 중금속 이온을 흡착하여 제거하는데 뛰어난 효율을 보인다.

굴 껍데기 분말의 흡착에 관한 Ting-Chu Hsu. (2009) 의 연구에 따르면 굴 껍데기 분말은 Cu^{2+} 와 Ni^{2+} 를 효과적으로 흡착할 수 있으며, Cu^{2+} 및 Ni^{2+} 에 대한 굴 껍데기 가루의 흡착 용량은 각각 49.26-103.1 및 48.75-94.3 mg/g이었다. 그리고 굴 껍데기 분말은 전처리 없이 구리 및 니켈 이온을 폐수에서 제거하기 위한 값 싸고 효과적인 흡착제이다.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 규조토 및 여과보조제를 사용하여 분뇨 및 하수 슬러지를 대상으로 진공압력(mmHg)과 여과시간(min)의 변화에 따른 슬러지 탈수케익의 함수율과 여액을 분석하였다. 또한 pre-coat 재료로서 규조토 외의 천연재료의 혼합물을 활용하여 여과보조제의 최적 혼합비를 실험하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 하수 슬러지의 경우, 진공압력과 여과시간에 따른 슬러지 탈수케익의 함수율이 63.13%까지 감소하였다. 그리고 여액의 TN 제거율은 75.47%까지, TP의 경우에는 92.6%까지 제거되었다. BOD의 경우에는 99.07%, SS는 99.78%까지 제거되었다.

하수 슬러지의 수분함량 모델은 아래와 같으며, 결정계수는 97.58%이다. 여기서 y 는 수분함량(%)을 의미하고 x_1 와 x_2 는 진공압력, 여과시간을 의미한다. $y = 141.999 - 0.059x_1 - 4.467x_2 + 0.098x_2^2 - 0.001x_1x_2$

2. 하수 슬러지 케익의 수분함량이 63-66%이고 여액의 TN 제거율은 72%-81%, TP의 제거율이 80-85% 이상인 조건은 진공압력이 541.66mm Hg 이상, 여과시간은 24.50min이상이었다.

3. 분뇨 슬러지의 경우, 진공압력과 여과시간에 따른 슬러지 탈수케익의 함수율이 62.43%까지 감소하였다. 또한, 여액의 TN의 경우 최대 84.79%까지, TP는 최대 84.95%까지 제거되었다. BOD와 SS의 경우, 최대 99.78%와 99.71% 까지 제거되었다.

분뇨 슬러지의 수분함량 모델은 아래와 같으며, 결정계수는 96.96%이다. 여기서 y 는 수분함량(%)을 의미하고 x_1 와 x_2 는 진공압력, 여과시간

을 의미한다. $y = 207.033 - 0.161x_1 - 8.133x_2 + 0.058x_2^2 + 0.01x_1x_2$

4. 분뇨 슬러지 케익의 수분함량이 62-67%이고 여액의 TN 제거율은 76-81%, TP의 제거율이 80-85% 이상인 조건은 진공압력이 499.52mmHg 이상, 여과시간은 24.05min 이상이다.

5. 여과보조제의 혼합비로 인한 분뇨 슬러지 탈수케익의 함수율은 굴껍데기 가루 : 돌로마이트 : 숯가루의 비가 2.54 : 15.43 : 32.03일 때 49.07%로 최소였다.

분뇨 슬러지의 여과보조제의 혼합비에 따른 수분함량 모델은 아래와 같으며, 결정계수는 93.63%였다. 이때 y 는 수분함량을 의미하며, x_1 , x_2 , x_3 는 굴 껍데기 가루, 돌로마이트, 숯가루의 함량을 의미한다.

$$y = 58.6x_1 + 55.16x_2 + 49.3x_3 - 5.34x_1x_2 + 20.44x_1x_3 - 15.67x_2x_3$$

6. 여과보조제의 혼합비로 인한 분뇨 슬러지 여액의 TN 제거율은 32.97 : 16.82 : 0.21일 때 90.09%로 최대였다. 굴 껍데기 가루와 돌로마이트의 함유율이 높아질수록 총질소의 제거율이 증가했다.

또한, TP 제거율은 29.30 : 18.09 : 2.61 일 때 99%로 최대였다. 그리고 BOD 제거율의 경우 26.28 : 8.30 : 15.42일 때 97.36%로 최대였다.

7. 여과보조제의 혼합비로 인한 분뇨 슬러지 케익의 수분함량이 48-55%이고 여액의 TN 제거율은 85-98%, TP의 제거율이 85-98%, BOD의 제거율이 85-98%인 조건은 16.18 : 29.15 : 4.67, 4.56 : 0.86 : 44.57일 때이다.

8. 분뇨 슬러지 케익의 퇴비화 가능여부를 알아보기 위해 유기물 및 중금속 함량을 확인한 결과, 유기물 함량이 각각 30% 이상이었고, 중금속의 경우에는 기준치보다 낮아 여과보조제 여과에 의한 분뇨 슬러지의 퇴비화가 가능하다고 판단할 수 있다.

참 고 문 헌

- Ahmad B. Albadarina., Chirangano Mangwandi, Ala'a H. Al-Muhtaseb., Gavin M. Walkera., Stephen J. Allena., & Mohammad N.M.Ahmad. (2012). Kinetic and thermodynamics of chromium ions adsorption onto low-cost dolomite adsorbent. *Chemical Engineering Journal*. 179(1). 193-202.
- Ahmet Erdal Osmanlioglu. (2007). Natural diatomite process for removal of radioactivity from liquid waste. *Applied Radiation and Isotopes*. 65(1). 17-20.
- A.I. Ivanets, N.V. Kitikova, I.L. Shashkova, O.V. Oleksienko, I. Levchuk, & M. Sillanpaa. (2016). Using of phosphatized dolomite for treatment of real mine water from metal ions. *Journal of Water Process Engineering*. 9(2016). 246-253.
- Emin Erdem, Gülay Çölgeçen, & Ramazan Donat. (2005). The removal of textile dyes by diatomite earth. *Journal of Colloid and Interface Science*. 282(2). 314-319.
- Erol Pehlivan, Ali Mujdat Ozkan, Salih Dinc, & Serife Parlayici. (2009). Adsorption of Cu^{2+} and Pb^{2+} ion on dolomite powder. *Journal of Hazardous Materials*. 167(2009). 1044-1049.
- Gil-Lim Yoon, Byung-Tak Kim, Baek-Oon Kim, & Sang-Hun Han. (2003). Chemical - mechanical characteristics of crushed oyster-shell. *Waste Management*. 23(9). 825-834.
- Guodong Sheng, Suowei Wang, Jun Hu, Yi Lu, Jiaying Li, Yunhui Dong, & Xiangke Wang. (2009). Adsorption of Pb(II) on diatomite as affected via aqueous solution chemistry and temperature. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 339(2009). 159-166.
- Guohua Chen, Po Lock Yue, & Arun S. Mujumdar. (2002). SLUDGE DEWATERING AND DRYING. *Drying Technology*. 20(4&5). 883 - 916.
- Hyok-Bo Kwon, Chan-Won Lee, Byung-Sei Jun, Jon-do Yun, Seung-Yeon Weon, & Ben Koopman. (2004). Recycling waste oyster shells for eutrophication control. *Resources, Conservation and Recycling*. 41(1). 75-82.
- Maryla Smollen. (1990). Evaluation of Municipal Sludge Drying and Dewatering with Respect to Sludge Volume Reduction. *Water Science*.

- ience & Technology*. 22(12). 153-161.
- Po-Kang Shih, & Wen-Lian Chang. (2015). The effect of water purification by oyster shell contact bed. *Ecological Engineering*. 77. 382-390.
- Richard J. Wakeman. (2007). Separation technologies for sludge dewatering. *Journal of Hazardous Materials*. 144(3). 614-619.
- Sanja Martinovic, Milica Vlahovic, Tamara Boljanac, & Ljubica Pavlovic. (2006). Preparation of filter aids based on diatomites. *International Journal of Mineral Processing*. 80(2-4). 255-260.
- Ting-Chu Hsu. (2009). Experimental assessment of adsorption of Cu^{2+} and Ni^{2+} from aqueous solution by oyster shell powder. *Journal of Hazardous Materials*. 171(2009). 995-1000.
- W.H. Park, & C. Polprasert. Roles of oyster shells in an integrated constructed wetland system designed for P removal. *Ecological Engineering*. 34(1). 50-56.
- Y Al-Degs, M.A.M Khraisheh, & M.F Tutunji. (2001). Sorption of lead ions on diatomite and manganese oxides modified diatomite. *Water Research*. 35(15). 3724-3728.
- ZHANG, Wenqi, RAO, Pinhua, ZHANG, Hui, XU, & Jingli. (2009). The Role of Diatomite Particles in the Activated Sludge System for Treating Coal Gasification Wastewater. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 17(1). 167-170.
- 강진수. (2018). 구조토와 분말활성탄소를 흡착재로 활용한 라돈 흡착형 경화체의 특성. 석사학위논문. 한밭대학교 산업대학원.
- 과학기술부. (1988). 구조토 진공여과장치 기본설계 연구
- 광주광역시 환경시설공단. (2009). 원심탈수기에서 하수슬러지 탈수효율 개선사례
- 김문주, 이정훈, & 박성직. (2018). 돌로마이트의 열처리를 통한 고효율 인산염 흡착제 제조. 한국수처리학회지. 26(1). 69-78.
- 김병욱, 김동욱, 김승섭, 김재건, 이용석, 이한섭, 전태성, & 한동준. (2014). 기초폐수처리공학. 신광문화사
- 김설화. (2011). 숯의 종류에 따른 실내유해물질 흡착한계와 재활용성에 관한 실험적 연구. 석사학위논문. 전북대학교 대학원.
- 김수인. (2018). 반응표면분석법을 이용한 Coconut Oil과 Sugar Ester를 함유한 유화액의 물리화학적 및 유변학적 안정도의 최적화. 석사학위논문. 단국대학교 대학원.
- 김용선. (2003). 정수장 회수수의 구조토여과에 관한 연구. 석사학위논문. 조선대학교 환경보건대학원. 환경공학전공

- 김용학. (2000). 초음파를 이용한 슬러지의 농축과 탈수 성능 증진에 관한 연구. 석사학위논문. 연세대학교 대학원. 도시공학과.
- 김원태. (2006). 음식물 쓰레기, 분뇨 및 하수슬러지의 산발효액을 이용한 하수고도처리. 석사학위논문. 전북대학교 대학원.
- 김지열. (2002). 구조토여과 및 활성탄흡착 공정을 이용한 용수처리에 관한 연구. 석사학위논문. 조선대학교 환경보건대학원. 환경공학과.
- 남영우, &한금석. (2011). 국내 하수슬러지 처리 현황 및 개선 방안. 한국폐기물자원순환학회지. 28(1). 103-109.
- 농촌진흥청. (2017). 비료의 품질검사방법 및 시료채취기준
- 대구광역시 환경시설공단. (2009). 필터프레스형 탈수기를 이용한 하수슬러지의 최적 탈수방안 연구
- 문종익. (2001). 廢糞糞질을 利用한 淨水·下水슬러지의 脫水特性과 土壤利用 安定性에 관한 研究. 박사학위논문. 동아대학교 대학원.
- 박성진. (2007). 숯의 종류에 따른 흡착력과 재활용성에 관한 실험적 연구. 석사학위논문. 전북대학교 산업기술대학원.
- 박성현, 김종욱. (2018). MINITAB을 활용한 현대실험계획법. 민영사.
- 방명환. (2006). 전기분해 공정에 의한 하수 슬러지 감량화에 관한 연구. 석사학위논문. 부경대학교 대학원. 환경공학과
- 박철휘, 서정원, 박종운, &박종환. (2009). 하수도처리설계. 동화기술
- 배문국. (2013). 고함수율 슬러지의 가압전기탈수에 관한 연구. 석사학위논문. 인제대학교 대학원. 환경공학과 상하수도공학전공.
- 부산환경공단
- 산업자원부. (2008). 구조토, 건운모를 활용한 친환경 목모 세라믹 패널 개발 및 상용화
- 서울특별시 상수도사업본부 수도연구부 물순환연구과·서남물재생센터. (2014). 슬러지 탈수약품비 저감 및 함수율 개선 연구
- 송근영. (2015). 음식물류 폐기물 및 하수슬러지의 혐기성 생분해성 증진을 위한 초음파 전처리. 석사학위논문. 부경대학교 대학원. 지구환경시스템과학부 환경공학과
- 수도권매립지관리공사. 그린에너지개발주식회사. (2014). 하수슬러지 자원화시설 반입슬러지 함수율 저감시설 적용 타당성 조사 연구 용역 최종보고서
- 신대윤, 지성남, 문옥락, 김지영, 서동우, &조영관. (2004). 정수장 침전지 유출수의 구조토 여과에 관한 연구. 한국환경보건학회지. 30(5). 410-416.
- 양완희. (2014). 알칼리 활성화 고로슬래그 시멘트 콘크리트의 특성에 관한 연구 : 황산나트륨과 경소 돌로마이트를 활성화제로 사용하여.

- 박사학위논문. 건국대학교 대학원.
- 엄한기, 이진현, &주현중. (2016). 굴 폐각을 적용한 슬러지 탈수 및 탈수효율 개선에 관한 연구. 한국물환경학회지. 32(5). 458-464.
- 원세연. (2002). 전기삼투를 이용한 슬러지 탈수에 관한 연구. 석사학위논문. 연세대학교 대학원. 토목공학과.
- 유재영. (2000). 구조도와 그 응용. 한국광물학회지. 13(1). 39-50.
- 윤석호, 나중복, 곽은영, &서동석. (1989). Polyelectrolyte 흡착에 의한 구조도 여과조제의 여과 특성 개선. 한국화학공학회지. 27(6). 855-861.
- 윤석호, 강용, &고향희. (1987). Cake Filtration에서 공극률과 비저항의 변화특성. 한국화학공학회지. 25(4). 419-426.
- 윤하연. (2001). 인천광역시 하수 및 분뇨슬러지 처리방안. 인천발전연구원. 환경사회연구실 연구위원
- 이상수. (2009). 필터프레스를 이용한 하수슬러지 탈수의 최적 응집 조건 결정 연구. 석사학위논문. 영남대학교 대학원.
- 이신행. (2016). 녹조 제거용 경소 백운석 응집제 개발에 관한 연구. 석사학위논문. 광운대학교 대학원.
- 이용. (2017). 제지에서시 및 구조도를 사용한 경량 경화체의 특성. 석사학위논문. 한밭대학교 일반대학원.
- 이우범. (2017). *대학생을 위한 하수처리의 이론과 설계*. 전남대학교 출판부
- 이은기, 김효식, 최상일, &한규남. (2007). 하천수 재이용을 위한 구조도 여과기의 현장 적용성 평가. 한국물환경학회지. 2007공동 추계학술발표회 논문집. 1190-1193.
- 이준호. (2017). 축산분뇨슬러지의 고형연료화를 위한 유중건조 공정의 효율 증대 연구. 석사학위논문. 순천향대학교 대학원
- 이현구. (2012). 가축분뇨 수처리 공정에서 발생하는 탈수케익을 이용한 고형연료의 특성 연구. 석사학위논문. 서울시립대학교 대학원. 환경공학과
- 임정은. (2010). 소성가공 폐자원(굴껍질 및 달걀껍질)을 이용한 중금속 오염토양의 정화기술 개발. 석사학위논문. 강원대학교 대학원. 농화학과.
- 임정은, 문덕현, 김동진, 권오경, 양재의, &옥용식. (2009). 농축수산물 폐기물(굴껍질 및 달걀껍질)을 이용한 비소 오염토양의 안정화 효율 평가. 대한환경공학회지. 31(12). 1095-1104.
- 장정윤. (2010). 분뇨슬러지 중금속 및 탄소원을 이용한 생물반응조내 처리 효율 향상에 관한 연구. 박사학위논문. 동아대학교 대학원. 환경공학과

- 정보미. (2017). 구조토를 이용한 회화 바탕층의 열화방지법 연구. 석사학위논문. 중앙대학교 대학원.
- 정진채. (2016). 분뇨슬러지의 연료가능성 및 연소특성 평가. 석사학위논문. 한밭대학교 산업대학원. 환경공학과
- 진오석. (2009). 슬러지 분리 및 무기응집 농축기를 이용한 탈수기별 효율 개선에 대한 연구. 석사학위논문. 경기대학교 대학원. 환경공학과.
- 최동혁, 김태동, & 박종웅. (2016). 하수 슬러지 자원화를 위한 처리 공법별 사례 연구. 한국도시환경학회지. 16(4). 399-406.
- 한국상하수도협회. (2011). 하수도시설기준
- 환경부 생활하수과. (2010). 하수슬러지 최적처리기술 연구
- 환경부. (2014). 분뇨·하수슬러지 통합소화 확대방안 연구
- 환경부. (2014). 하수도슬러지 처리시설 현황
- 환경부. (2015). 하수도통계
- 황선숙. (1994). 기계식 교반장치를 이용한 분뇨슬러지 퇴비화. 석사학위논문. 건국대학교 대학원. 환경공학과
- 황의영. (1994). 공정조절인자가 분뇨슬러지 퇴비화에 미치는 영향. 석사학위논문. 건국대학교 대학원.