

슬러지 배출공정 최적화를 통한 탈수케이크 함수율 저감에 관한 연구

류동춘, 김택준, 나영신, 이광욱, 이재울, 주대형, 류병순 _ 부산광역시 상수도사업본부 덕산정수사업소

서론

정수처리과정에서 배출되는 슬러지 처리에 관한 정책방향이 해양투기 및 직매립을 지양하고 복토재, 시멘트 원료, 토지개량재 및 도로기층재 등 재활용분야로 최종 처리방향이 다각적으로 전환되고 있다. 이에 현장에서 보다 적극적인 대응 체계를 위해 일차적으로 탈수케이크 함수율 감량에 효과적이고 과학적인 슬러지 배출공정 및 탈수시스템을 연구·검토하고 있다.

그러나 정수장 슬러지 처리에 있어 높은 함수율 탈수케이크를 생산하는 이유는 배출슬러지량과 처리능력 및 특성분석을 통한 탈수율 향상 방법을 적절하게 응용하지 못하기 때문이다. 즉, 수계별 정수장 배출 슬러지는 계절별 강수량, 취수지역의 특성에 따라 성상이 변화하므로 슬러지처리 공정이 이들 슬러지의 성상변화에 적극적으로 대응하여 운영되어야 함에도 불구하고 계절별 슬러지 또는 지역별 성상변화에 관한 자료가 없어 획일적인 탈수공정이 이루어지고 있는 것이 사실이다.

슬러지 감량화와 저함수율 탈수케이크 생산은 슬러지 재활용 산업과 밀접한 관계를 갖고 있다. 하지만 슬러지의 물리·화학적 특성과 탈수율의 상관관계에 대한 규명이 선행되지 않고서는 그와 같은 산업계 및 환경정책 방향에 능동적으로 대처하기 힘든 실정이다.

따라서 본 연구에서 부산시 덕산정수장을 중심으로 슬러지 처리의 효율적인 방안을 제시하고 탈수케이크 함수율을 감량할 수 있는 과학적이고 효율적인 슬러지 처리공정을 도출하고자 다음과 같이 수행하였다.

먼저 낙동강 하류지역 상수원수를 취·정수한 후 계절별로 발생하는 슬러지의 물리·화학적 특성과 성상을 분석하여 자료화(Data base) 하였고, 이 자료를 근거로 슬러지 배출공정을 변화시켜 탈수효율을 증대시켜 생산량 감소와 처리비용 절감 등을 얻어냄으로써 합리적인 상수도 경영에 기여한 업무개선 사례를 소개하고자 한다.

실험 및 분석방법

1. 슬러지 탈수율 평가 방법

(1) 탈수 케이크의 특성 평가

슬러지 탈수와 케이크의 비저항 값의 변화에 영향을 미치는 인자는 Kozeny Constant, 케이크 입자의 밀도, 케이크의 기공, 케이크내 입자의 형상계수 등과 같은 특성에 의해 결정된다. 하지만 본 연구는 이와 같은 각 특성 변수 값에 궁극적으로 영향을 미치는 인자를 슬러지의 유·무기물 함량, 고체 입자의 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 성분 비율, 그리고 입자의 형상에 의해 결정되는 것으로 분석하였다. 따라서 이들 각 성분 분석을 통해 도출된 값과 슬러지의 탈수 실험을 통해 얻은 함수율 변화, 이를 분석한 케이크의 비저항 값과의 상관관계를 규명한다. 유·무기물의 함량은 폐기물공정시험법에 따라 전기로를 이용하여 시료를 약 $600\pm 5^\circ\text{C}$ 로 30분간 가열한 후 전·후 무게 차로 측정한다. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 성분 비율은 케이크내 고체 입자의 각 성분의 함유정도를 정량적으로 파악하기 위해 X선 형광 분석기(Phillips, PW1480, XRF: X-ray Fluorescence Sequential Spectrometer)를 이용하였다. 시료를 950°C 에서 30분간 연소한 뒤 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 과 1:5로 혼합하여 1200°C 에서 다시 용융한 뒤 측정항목(SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , TiO_2)의 수만큼 Glass Bead를 제작하였다. 분석시 40kV의 전압과 30mA의 전류측정 강도 조건에서 시료의 성분을 측정하였다. 측정된 값 중 SiO_2 와 Al_2O_3 에 대한 성분함량 비를 구한 다음 슬러지의 탈수율, 케이크 비저항성 분석과 비교하였다. 슬러지 입자의 형상은 진공증발기로 분말시료에 백금(Au)을 코팅한 시편을 만든 다음 전계방사형 주사전자현미경(FEG-SEM, S-4200, Hitachi)으로 촬영하였다. 슬러지 입자크기는 입도분포 측정장치(Malvern, Mastersizer)를 사용하여 측정하였는데, 물에 슬러지 입자를 초음파로 분산시켜 펌퍼를 이용하여 측정영역으로 이송시키면 레이저로 입자를 감지하여 투영면적(Projected Area)을 통해 입자크기의 누적분포와 질량 중앙 직경(Mass Median)을 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 덕산정수장 슬러지의 형상적 특성

그림 1은 덕산정수장 슬러지내 입자들 중 유기성 슬러지의 형상을 나타낸 것으로, 대부분의 형상은 박테리아의 형상을 하고 있으며, 이 성분들은 표면수를 많이 함유하고 있어 탈수가 어려운 특성이 있다. 더욱이 유기성 물질의 형상이 무정질형(Amorphous)이므로 기공의 형성이 어렵다.

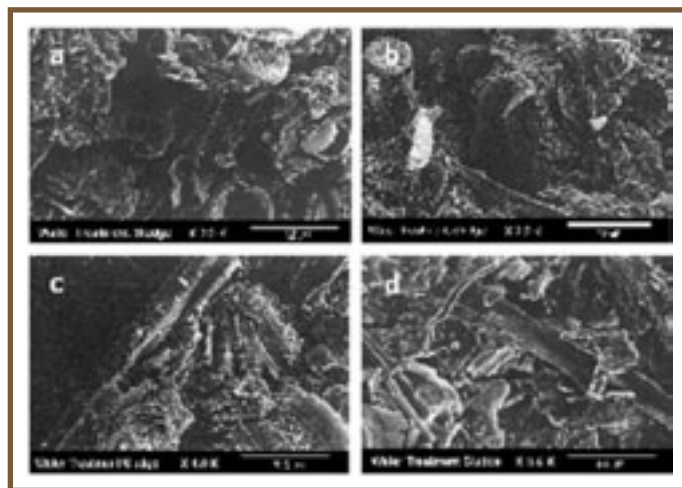


그림 1 덕산 정수장 슬러지내 유기물 입자의 형상

또한 입자의 크기가 무기질 입자에 비해 상대적으로 작기 때문에 탈수에 악영향을 미친다. 따라서 슬러지의 탈수성을 평가할 때, 슬러지내 유기성 물질의 분포 상태를 우선적으로 분석하는 것이 무엇보다 중요하다. 반면 그림 2는 덕산정수장 슬러지에 분포하고 있는 무기성 입자의 형상을 나타낸 것이다.

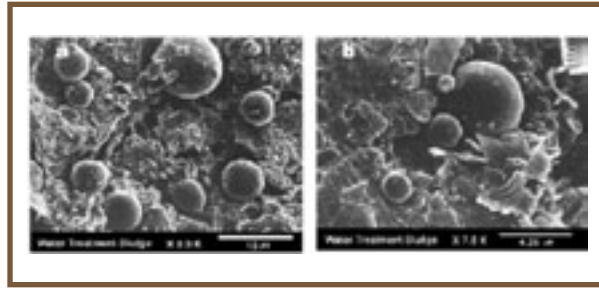


그림 2 덕산 정수장 슬러지내 무기물 입자의 형상

무기성 입자의 형상은 구형의 형상을 가지고 있을 뿐만 아니라 입자의 크기도 유기성 입자에 비해 상대적으로 크다. 그렇기 때문에 케이크층 내에 기공 형성이 용이하여 케이크의 비저항을 저하시킬 수 있다. 수계 슬러지는 항상 유기성 입자와 무기성 입자들이 일정 비율 혼합되어 있다. 혼합되어 있는 정도는 갈수기와 우수기에 따라 다르다. 우수기의 슬러지의 유기물 함량이 15~25 wt% 정도이며 이때 탈수율이 가장 좋고, 유기물 함량이 30 wt%이상인 갈수기 때의 슬러지 탈수율이 가장 낮다.

2. 슬러지 유·무기물 함량과 케이번 비

표 1은 덕산정수장에서 채취한 슬러지에 대하여 2002년 3월부터 2002년 12월까지 매월 분석한 결과를 나타낸 것이다. 슬러지의 유기물 함량은 15wt%에서 35wt%까지 다양하게 변화하고 있다. 슬러지의 유기물 함량의 변화는 강수량과 밀접한 관계가 있었다. 강수량이 많은 달의 슬러지 유기물 함량은 낮은 반면 강수량이 적은 달의 유기물 함량은 상대적으로 높게 나타났다. 그리고 이와 같은 경향은 케이번 비(SiO_2/Al_2O_3)의 변화와 동일한 궤적을 밟는다. 강수량이 많아 수계 외부로부터 토사 유입이 많아지면 SiO_2 의 함량이 증가하게 되어 케이번 비의 향상을 초래한다. 즉 케이번 비의 증대는 유기물 함량의 감소를 의미하며 탈수율이 향상될 수 있음을 나타낸다.

표 1 정수장 슬러지의 유기물 함량 및 케이번 비 분포

정수장	슬러지 채취	유기물 함량(wt%)	SiO_2/Al_2O_3	평균강수량(mm)	비고
덕산정수장	3월 19일	36.6	27.2/26.7	64.5	2002년
			1.03		
	5월 18일	20.3	42.0/25.3	253	
			1.66		
	7월 10일	33.8	32.7/25.2	190	
			1.29		
	9월 10일	15.3	46.7/24.0	536	
			1.95		
10월 8일	15.1	44.9/26.0	-		
		1.73			
11월 26일	18.8	43.7/23.6	-		
		1.85			
12월 21일	22.4	41.3/24.6	-		
		1.68			
1월 17일	34.7	-	-	-	2003년
		-			

3. 덕산정수장 슬러지 처리시설 용량 검토

정수장에 유입되는 최근 3년간의 원수탁도 자료를 이용하여 원수탁도 누적 백분율을 도식화 한 후 용량검토를 하였다. 평균탁도는 23.5NTU, 95% 확률탁도는 85.3NTU로 나타났다. 설계탁도는 평균탁도의 4배로 적용하였고, 원수취수량은 설계량 1,555,000톤/일로 기준하여 슬러지 처리시설 부하율을 검토한 결과 가 표 2에 나타난 바와 같다.

표 2 덕산정수장 슬러지 처리시설 부하율 검토

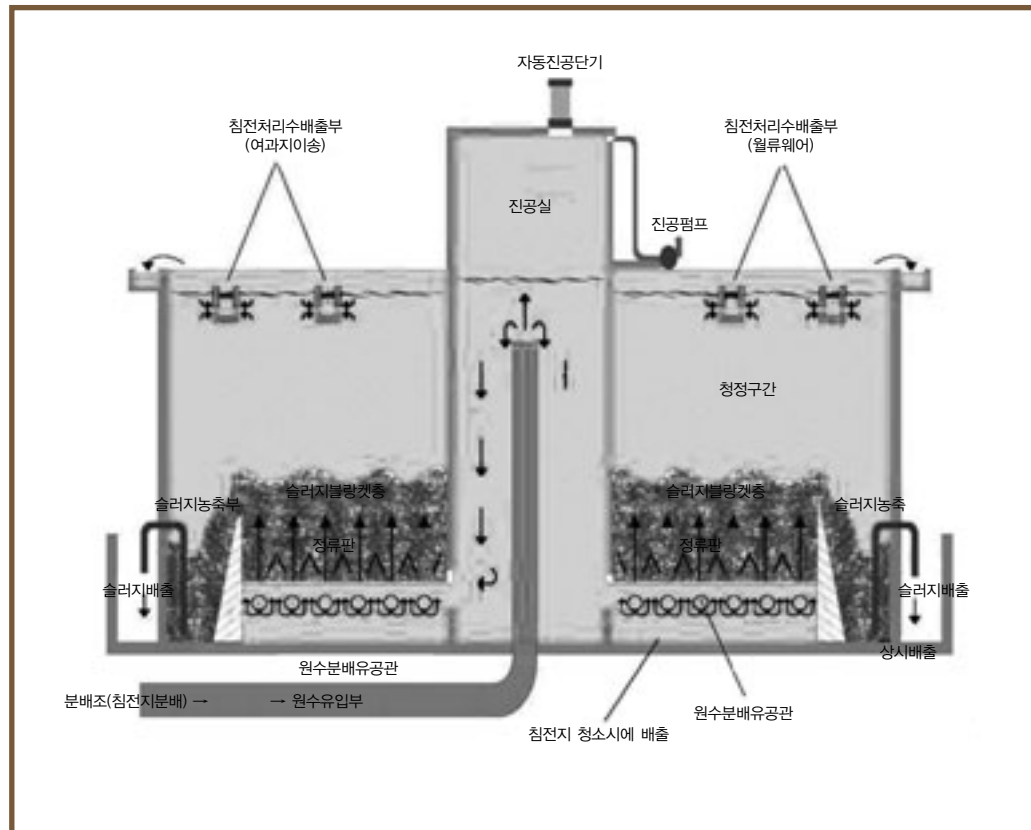
구분	고형슬러지 (t/일)	부피 (m3/일)	시설제원						체류/운전시간 (시간)	
			DIA(m)	깊이/여폭	지수/덧수	수면적(m²)	부피(m³/폭(m))	고형물부하 (kg/m²/일(hr))		
배니지	평균탁도시	46.55	22,370	24.5	4	6	5,106.8	20,427.3	9.12	21.9
	설계탁도시	155.18	38,621	22.0	4	6	5,106.8	20,427.3	30.39	12.7
농축조	평균탁도시	45.46	4,546	21.3	4	4	3,784.2	15,136.9	12.01	79.9
	설계탁도시	151.58	10,105	24.5	4	4	3,784.2	15,136.9	39.5	35.9

※ 기준 : 고형물 부하-배니지 : 없음, 농축조 10-20kg/a²/일

수리체류시간-배니지 : 침전슬러지 자동인발의 24시간 이상, 농축조 24~48시간

4. 덕산정수장 슬러지 배출 경로

그림 3 덕산정수장 침전지 구조 및 배출 슬러지 경로



덕산정수장 슬러지 주 배출원 침전지이다(그림 3). 침전지 형태는 맥동식이며, 상향유속형으로 하부 유공관에서 유출된 입자들이 플러울 형성 슬러지 블랑켓층을 이루면서 플러집단이 상승하면 슬러지호퍼로 이동한다. 이 슬러지는 상시 배출되며, 유공관 하부에 침적되어 있는 슬러지는 침전지 청소시에만 배출된다. 따라서 상시 배출되는 슬러지는 계절별로 성상이 차이를 다소 보이나, 대체로 입자가 적은 슬러지로 추정되며, 청소시에만 배출되는 슬러지는 대부분이 큰 입자로 구성되어 또는 태풍 혹은 집중 강우시에 유입되는 토사가 대부분이라서 케이번 비도 상당히 큰 것으로 판단되었다.

5. 슬러지 배출 및 처리공정 개선

이상과 같은 덕산정수장의 슬러지 배출 및 처리공정의 기술 검토를 앞서 분석된 슬러지 물성치 특성 자료로 평가한 결과, 일부 기존 처리공정을 개선하면 현재보다 나은 탈수 케이크 함수율을 얻을 수 있다는 확신 아래, 다음과 같은 개선을 시도하였다.

슬러지 처리공정인 농축조 월류수를 집수하여 반송시킨 후 재처리하여 방류하는 형태로 공정을 개선하여 배니지에서 고액 분리된 슬러지가 농축되는 것을 지향하고 농축조에서 농축되도록 하였으며(2003년 6월 완공), 슬러지 배출공정은 상시인발과 침전지 청소에 의한 인발 주기를 기존 방식에서 변경하여, 표 1에서 보는 바와 같이 상시 배출되는 슬러지의 케이번 비가 낮을 때에 침전지 하부 침적 슬러지를 섞어 케이번 비를 높이는 방법 등을 이용하여 탈수성이 좋은 슬러지 성상이 배니지를 거쳐 농축조에서 농축되어 탈수 케이크화 되도록 슬러지처리 운영과정을 개선하였다(2003년 하반기부터). 표 3는 슬러지 처리공정 운영관리를 개선한 사항을 나타내었다.

표 3 덕산정수장 슬러지 처리공정 운영관리 개선 전·후 비교

		변경전	변경후	비고
농축조 월류수 처리공정		월류수 직접 방류	월류수 집수후 재처리하여 방류	소요예산 : 1억4천만원
침전지 하부 침적 슬러지 청소 주기	1월		침전지 청소 (1월 중순~4월 말)	○ 농축조 청소는 기존 구동장치 이상시에만 청소(변경 전) ○ 5월에 기존 상승에 따른 혐기화 방지 차원 매년 실시(변경 후)
	2월			
	3월			
	4월			
	5월	침전지 청소 (5월 중순~7월 초)	농축조 청소	
	6월			
	7월			
	8월			
	9월	침전지 청소		
	10월			
	11월			
	12월			

6. 슬러지 처리공정 개선 사항에 대한 효과분석

표 3와 같이 기존 슬러지 처리공정을 2003년 10월부터 개선한 후 2004년 12월말까지 운영한 효과를 평가하기 위해 탈수기에서 생산되는 함수율(%)을 연도별로 비교하여 보았다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 개선 전·후의 생산 탈수케이크의 함수율이 확연한 차이를 보였다. 비교 연도 내에서 탈수케이크 함수율이 연

평균 5~10% 정도 감량된 것을 확인할 수 있었다.

그림 4 벨트프레스 탈수기에서 생산된 탈수케이크 함수율(%) 비교

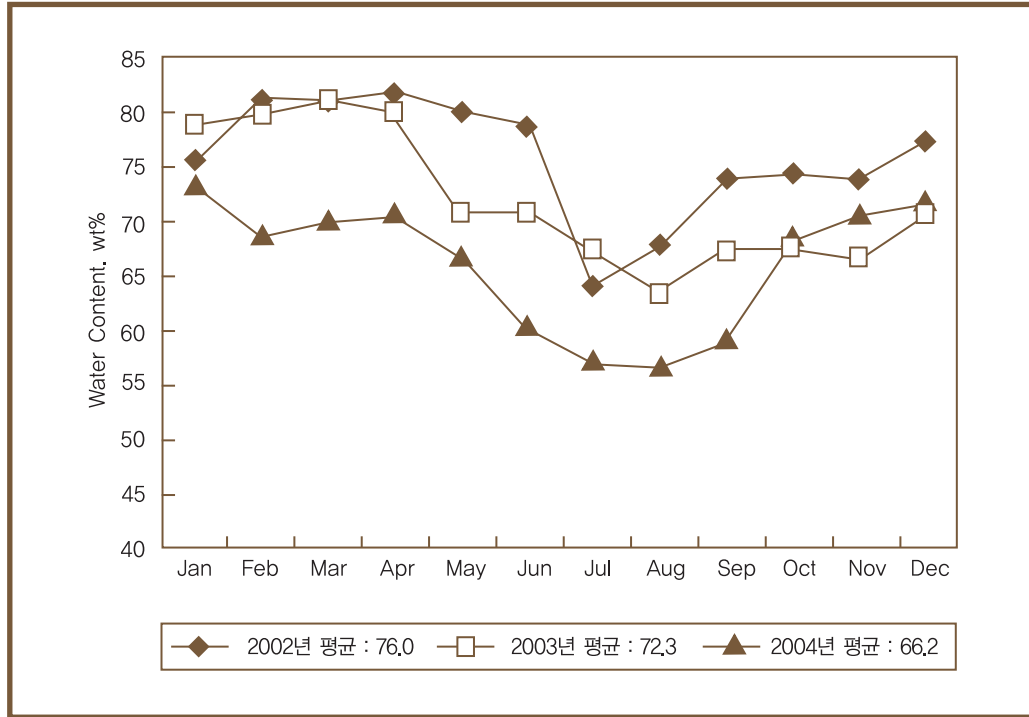
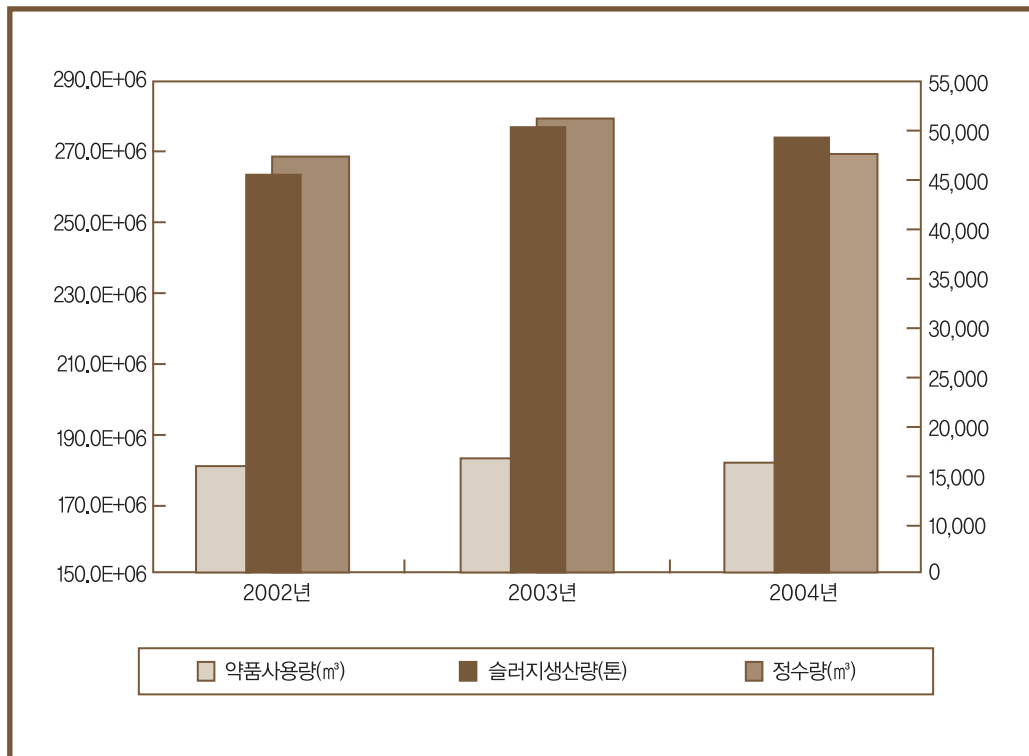


그림 5 덕산정수장 약품사용량, 정수생산량 및 슬러지생산량 비교



또한, 덕산정수장 연도별 약품사용량, 슬러지생산량 및 정수생산량을 비교하였다.

그림 5에서와 같이 운영 개선 전·후를 비교해 보면, 개선 후에 정수생산량 및 약품사용량이 다소 증가하였음에도 불구하고 슬러지생산량이 줄어든 것을 알 수 있었다. 이는 슬러지 처리공정을 보다 과학적이고 효율적인 운영관리 체계로 개선함에 따라 탈수케이크의 함수율이 감량됨으로써 슬러지 생산량이 저감된 것으로 판단된다.

7. 슬러지 처리공정 개선사항에 대한 경제성 평가

위와 같이 슬러지 함수율 저감 및 정수생산 관련인자 비교 등의 자료를 이용하여 슬러지 처리공정 개선 전·후의 경제성을 비교한 결과 개선 후의 운영관리가 효과적인 것으로 확인되었다.

따라서 연간 슬러지 생산량 저감에 따른 비용절감 등의 경제성을 평가하여 보았다. 표 4와 같이 백만톤 정수생산량을 기준으로 슬러지 생산계수를 비교 연도 별로 구한 후, 그 값을 이용하여 2002, 2003년 대비 2004년도 감량 슬러지생산량을 구하였다.

그 결과 2002년, 2003년 대비 2004년도 감량은 각각 1135톤/년, 2839톤/년으로 나타났다. 이러한 감량 슬러지생산량을 2005년도 슬러지 처리비용(26400원/톤)으로 계산하면, 2002년, 2003년 대비 2004년도 슬러지 감량에 따른 처리비용 절감은 각각 3천만원, 7천5백만원/년으로 나타났다.

표 4 덕산정수장 슬러지 처리공정 운영관리 개선 전·후 경제성 비교

덕산정수장	2002년	2003년	2004년
일 백만톤 정수량기준 슬러지 생산계수 (연 슬러지생산량/연 정수량×백만톤생산)	160	166	156
03년 대비 04년 절감슬러지 생산량	감량 생산효과 = 2839톤/년		
02년 대비 04년 절감슬러지 생산량	감량 생산효과 = 1135톤/년		

결론

본 연구에서는 덕산정수장에 발생하는 슬러지 처리공정을 개선하기 위해 슬러지의 유기물함량, 입도, 형상, 화학적 성분분포 등에 대한 분석을 수행하여 Data Base 한 후, 그 자료를 토대로 기존 슬러지 처리시설 용량을 검토하고, 친환경적 방류수 수질 구축, 농축조 및 침전지 청소주기 조율 등 과학적이고 효율적인 슬러지처리 운영관리로 기존 처리공정을 개선함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 덕산정수장 슬러지의 형상을 조사한 결과, 슬러지의 유기물 함량은 수계의 강수량과 밀접한 관련이 있었고, 강수량이 많을수록 유기물 함량이 상대적으로 작아지는 현상이 나타났다. 또한, 유기물의 함량이 높을수록 탈수율은 떨어질 것으로 판단되었다.
- (2) 슬러지의 성분 중 케이번(SiO_2 와 Al_2O_3) 비율은 탈수에 중요한 영향 인자로 작용함으로 슬러지 화학적 분석결과, 계절변화에 따라 Al_2O_3 의 함량 비율(23~26wt%)은 크게 변화하지 않은 반면 SiO_2 의 함량은 계절별 또는 강수량에 따라 변화 폭이 큼을 알 수 있었다.

- (3) 위의 슬러지의 물성치 기초 자료를 토대로 침전지에서 상시 배출슬러지와 침적슬러지와의 혼합 처리 공정으로의 개선은 2002, 2003년 대비 2004년도 탈수케이크 함수율 감량이 연평균 5~10%까지 저감됨을 확인할 수 있었다.
- (4) 슬러지 함수율 저감 및 정수생산 관련인자 비교 등의 자료를 이용하여 슬러지 처리공정 개선 전·후의 경제성을 비교한 결과 개선후의 운영관리가 효과적인 것으로 확인되었다. 2002년, 2003년 대비 2004년도 슬러지 생산량 감량은 각각 1135톤/년, 2839톤/년으로 나타났다. 또한, 2002년, 2003년 대비 2004년도 슬러지 감량에 따른 처리비용 절감은 각각 3천만원, 7천5백만원/년으로 나타났다. ㉠