

간헐포기소화의 비용 평가

Cost Estimation of Intermittent Aerobic Digestion

김운중* · 김성홍** · 김희준***

Kim, Woon Joong · Kim, Seong Hong · Kim, Hee Jun

Abstract

Cost estimation of an intermittent aerobic digestion technology was carried out in this study. Aeration ratio is one of the most important design factors and it affects installation and power consumption cost. For the purpose, digestion efficiency was fixed at 35% of SS reduction and the reactor type was assumed a 2-chamber sequencing batch reactor (SBR). Installation cost and power consumption cost were evaluated and converted in terms of present value that could reflect the rate of discount and the rate of economic growth. The lower aeration ratio needs higher installation cost but lower power consumption cost. From the point of only installation cost, conventional aerobic digestion is cheaper than intermittent aerobic digestion. But intermittent aerobic digestion is better economical for more than 10 years of estimated service life. The optimal aeration ratio was dependent on the service life and it was lower as the estimated service life increased. For the 45 years as the service life, the optimal aeration ratio was estimated 0.3 and the total cost was 64% of the conventional aerobic digestion.

Keywords : *intermittent aerobic digestion, cost estimation, economical analysis, sludge digestion, present value*

요 지

간헐포기방식의 슬러지 소화 기술에 대한 비용을 분석하였다. 포기비율은 간헐포기소화의 가장 중요한 설계인자이며, 포기비율에 따라 시설비와 동력비가 달라진다. 목표 SS 제거율을 35%로 설정하고, 철근콘크리트형식의 SBR 간헐포기소화조를 설계하였으며, 이로부터 시설비와 동력비를 산출하였다. 비용 평가는 할인율과 경제성장율을 고려하는 현재가치로 환산하는 방법을 사용하였다. 포기비율이 낮은 경우는 시설비가 높지만 동력비는 적게 소요되며, 포기비율이 높으면 반대로 시설비는 낮지만 동력비는 증가한다. 초기시설비는 호기성 소화가 간헐포기소화보다 더 저렴하다. 그러나, 총비용면에서 내용연수 약 10년 이상의 운전에서는 간헐포기소화가 호기성 소화보다 더 유리하다. 특히, 내용연수가 길수록 최적 포기비율은 낮아지며, 내용연수가 45년 정도일 때 최적포기비율은 0.3 정도이고, 이 경우 총비용은 호기성소화의 64% 수준이다.

핵심용어 : 간헐포기소화, 비용 분석, 경제성 분석, 슬러지소화, 현재가치

1. 서 론

하수처리장에서 발생하는 슬러지는 대부분 소화공정을 거쳐 감량화, 안정화된 후 탈수처리된다. 소화공정은 혐기성소화와 호기성소화로 대별된다. 간헐포기소화는 호기성소화의 한 변형으로 포기와 비포기를 적절히 배분함으로써 알칼리도 부족에 따른 pH 저하를 방지하고, 포기시간을 줄임으로써 동력비를 절감하며, 생물학적 영양염류 제거 등의 효과를 더 얻을 수 있다(김 등, 2002). 간헐포기방식에 의한 소화는 포기조와 무산소조를 별도의 반응조로 구성하고 연속유입-연속배출 시스템으로 구성할 수도 있으며(Kim and Hao, 1990), 한 반응조에서 포기와 비포기가 순차적으로 반복되는 연속회분식 시스템으로 구성할 수도 있다(Matsuda 등, 1988; 김 등, 2002). 간헐포기소화에서 가장 중요한 영향인

자는 주기시간에 대한 포기시간의 비율로 정의되는 포기비율이다. 고흡물 제거 측면에서 보면 고흡물 제거율은 포기비율에 비례하므로 포기비율이 클수록 더 빠른 고흡물 감소율을 얻을 수 있다. 이 경우는 요구되는 소화조 체류시간이 더 짧아져 소화조의 크기가 작아지는 반면, 포기에 따른 동력비는 증가하는 것을 의미한다. 반대로 간헐포기소화에서 포기비율이 작아지면 고흡물 감소율도 작아지게 되어 요구되는 소화조 체류시간은 그만큼 더 길어져야 하므로 소화조의 크기는 커져야 하지만 포기시간이 줄어들기 때문에 동력비는 절감될 수 있다.

본 연구에서는 간헐포기소화에서 최적의 포기비율이 어느 정도인지를 경제성 측면에서 파악해 보고자 하였다. 소화기술의 경제성 평가는 슬러지 성상이나 처리장 입지여건, 슬러지 처리시설의 설치비와 운전비, 최종 슬러지 케이크의 처분

*정회원 · 조선대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail: wjkim@chosun.ac.kr)

**정회원 · 조선대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail: gochamp@chosun.ac.kr)

***인하대학교 토목환경공학부 계약교수(E-mail: trizhj1@snu.ac.kr)

비, 소화조 상정액이나 탈수여액 등의 반류수에 의한 수처리 시설의 부하량 등 수많은 항목을 반영해야 한다. 하지만 본 연구에는 유기물이나 영양염류 제거, 소화슬러지의 처리/처분 비용 등은 정량화에 어려움이 있어 고려하지 못하였고, 단지 SBR반응조를 이용한 간헐포기방식의 슬러지 소화에서 포기비율을 독립변수로 하여 소화조의 건설비, 동력비 등을 산출, 비교함으로써 개략적으로나마 간헐포기소화의 비용을 예측하고, 적절한 포기비율을 제시하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 고행물제거 동력학 및 전개

간헐포기에 의한 슬러지 소화에서 고행물의 제거 동력학은 호기성소화의 동력학을 기초로 전개할 수 있다. 연속회분식 반응조에서 포기와 비포기가 반복되는 경우 고행물 분해는 크게 포기시의 분해(호기성 분해)와 비포기시의 분해로 구분할 수 있다. 비포기시의 분해는 다시 질산성질소의 존재 여부에 따라 혐기 조건에서의 분해와 무산소 조건에서의 분해로 구분할 수 있는데, 간헐포기 소화시 잔류하는 질산성 질소로 인해 절대혐기 조건은 이루어지기 어려우므로 비포기시의 분해를 무산소성 분해로 간주하기도 한다. 호기조건에서의 분해는 다음의 식(1)과 같이 생물학적으로 분해 가능한 부분에 대해서 1차 반응에 따른다고 가정하는 것이 일반적이며, 그 해는 식 (2)와 같다(Jenkins and Mavinic, 1989).

$$\frac{dX_d}{dt} = -K_d X_d \quad (1)$$

$$X_d = X_{d,0} e^{-K_d t} \quad (2)$$

여기에서 $X_{d,t}$ 는 생물학적으로 분해 가능한 고행물량을 말하며, $X_{d,0}$ 는 $t=0$ 에서의 X_d , K_d 는 분해상수이다. 비포기 조건에서의 분해 역시 1차 반응으로 간주하면 회분식 소화에서 고행물의 감소는 다음의 그림 1과 같이 도식화할 수 있다.

포기/비포기의 반복 주기를 T (day), 포기기간을 T_a , 비포기기간을 T_{na} 라 하고, 포기시의 분해상수를 $K_{d,a}$, 비포기시의 분해상수를 $K_{d,na}$ 라 하면, 그림 1과 같은 조건에서 $t=0$ 로부터 T_{na} 시간 경과 후 $X_{d,t}$ 는 다음 식 (3)과 같다. 같은 방식으로 $T_{na}+T_a$ 시간 경과 후 $X_{d,t}$ 는 식 (4)와 같다.

$$X_{d,t=T_{na}} = X_{d,0} (e^{-K_{d,na} T_{na}}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} X_{d,t=T_{na}+T_a} &= X_{d,0} (e^{-K_{d,na} T_{na}}) (e^{-K_{d,a} T_a}) \\ &= X_{d,0} [e^{-n(K_{d,na} T_{na} + K_{d,a} T_a)}] \end{aligned} \quad (4)$$

이와 같은 방법으로 전개하면 n 번째 주기 후의 $X_{d,t}$ 는 다음과 같다.

$$X_{d,t=n(T_{na}+T_a)} = X_{d,0} [e^{-n(K_{d,na} T_{na} + K_{d,a} T_a)}] \quad (5)$$

1 반복주기시간(T)에 대한 포기기간의 비(T_a/T)를 포기비율(ϕ)라 정의하면 반복주기와 포기비율 간에는 식 (6)-(8)가 성립한다. 그러므로 식 (5)를 ϕ 와 T 의 함수로 표현할 수 있으며, 회분식의 간헐포기 소화 실험에서 고행물 감소를 표현하는 식 (9)가 얻어진다.

$$T = T_{na} + T_a \quad (6)$$

$$T_a = \phi T \quad (7)$$

$$T_{na} = (1 - \phi) T \quad (8)$$

$$X_{d,t} = X_{d,0} [e^{-n(K_{d,na}(1-\phi) + K_{d,a}\phi)}] \quad (9)$$

분해상수 $K_{d,na}$ 와 $K_{d,a}$ 는 각각 비포기조건 및 포기조건에서의 분해상수로서 day^{-1} 의 차원을 갖는 값이다. 이 값들은 한 주기동안의 고행물량 변화를 측정하여 구할 수도 있었으나 T_{na} 와 T_a 동안의 농도 변화를 정확히 측정하는 것은 현실적으로 한계가 있다. 따라서 $K_{d,na}$ 와 $K_{d,a}$ 를 구할 때는 포기비율(ϕ)이 다른 회분실험을 최소한 2개 이상 실시하여 실측 데이터를 식 (9)에 적용하고, 통계적 방법으로 산출하는 것이 더 적합할 것이다.

2.2 연속회분식 반응조에 적용

2.2.1 호기성 소화

회분식 소화실험에서 구한 동력학 상수들을 연속회분식 반응조 운전에 적용하는 것은 그다지 어렵지 않다. 다만, 유입과 유출이 주기적으로 반복되고, 반응모드에서는 동력학식을 따라 분해되기 때문에 이에 대한 해석하는 불가능하다. 또한, 연속회분식 반응조 운전에 침전모드를 둘 경우 고행물이 조 내에 축적될 수 있으므로 수리학적체류시간(HRT, Hydraulic Retention Time)과 고행물체류시간(SRT, Solids Retention Time)은 다르게 된다. 본 연구에서는 주기시간, 포기비율, 최초 조 내 고행물량, 유입량 및 유출량, 축적량 등을 고려하고, 생물학적으로 분해 가능한 고행물과 분해불가능한 고행물을 포함하는 연속회분식 호기성 소화 모델을 구성하였고, 프로그램을 작성하였다.

그림 2에 연속회분식 반응조를 이용하여 슬러지를 호기성 소화할 경우 반응조가 안정화되어 가는 과정을 예시하였다. 반응조가 빈 상태에서 fed batch 방식으로 운전할 경우 운전 초기에는 유출 없이 슬러지가 조 내에 축적된다. 그러다가 평균고형물체류시간(MSRT, Mean Solids Retention Time)인 11일보다 약간 긴 14일 이후부터 슬러지 배출이 이루어지기 시작한다. 연속회분식 반응조 특성상 엄밀한 의미의 정상상태는 나타나지 않지만 약 30일 이후부터 비교적

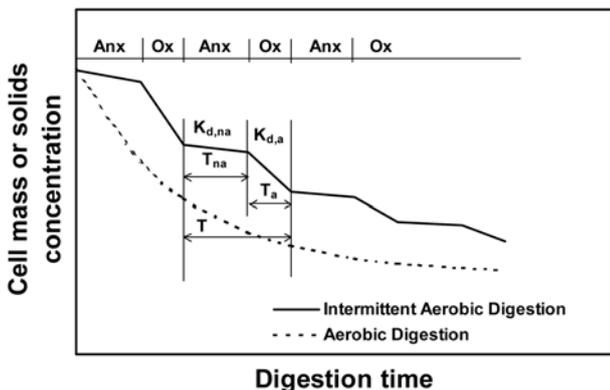


그림 1. 호기조건과 간헐포기조건에서 고행물의 분해 거동 비교 (T : cycle time, T_{na} : non-aeration time, T_a : aeration time, $K_{d,na}$: decay constant for anoxic condition, $K_{d,a}$: decay constant for aerobic condition, Anx: anoxic, Ox: aerobic)

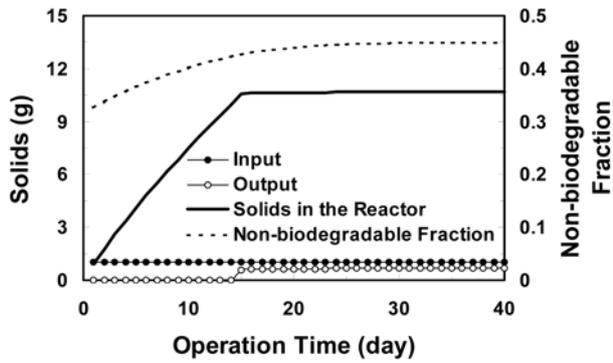


그림 2. 간헐유입에 대한 SBR 반응조의 응답(운전조건 및 동력학적 변수; $K_d = 0.1 \text{ day}^{-1}$, $T = 1 \text{ day}$, 유입농도(X_{in}) = 1,000 mg/L, 유입유량(Q_{in}) = 1 L/cycle, 조내최대농도(X_{max}) = 10,000 mg/L, 반응조용적(V) = 10 L, 유입슬러지의 분해불가능한 고형물의 비율(f_i) = 0.3).

안정된 유입 및 유출의 균형이 이뤄지며 주기적 정상상태를 보인다. 생물학적으로 분해 불가능한 고형물의 비율(f_i)은 유입슬러지의 0.3에서 점차 증가하여 소화 후에는 0.45 정도로 높아지며, 전체적인 고형물 제거율은 33% 정도가 된다.

그림 3에 연속회분식 반응조를 이용할 경우 MSRT에 따른 고형물 제거율 및 배출슬러지의 생물학적으로 분해 불가능한 고형물의 비율에 대한 모의 결과를 표시하였다. 초기 슬러지량에 따라 시스템이 안정되는데 걸리는 시간은 달라질 수 있으나 궁극적으로 긴 시간의 운전에서는 결국 의사 정상상태(pseudo-steady state)에 도달하게 된다. MSRT를 길게 운전할수록 고형물 제거율이 증가하고, 고형물 중 생물학적으로 분해 불가능한 부분은 조내 축적되므로 그 비율은 증가한다. 예를 들어, 0.1 day^{-1} 의 분해상수를 갖는 슬러지를 1일 주기의 연속회분식 반응조로 호기성 소화할 경우 약 6일 정도의 MSRT에서는 26% 정도의 고형물 제거가 이루어지며, 이 때 배출되는 슬러지의 생물학적으로 분해 불가능한 고형물 비율은 유입슬러지의 0.3에서 0.42로 증가한다.

2.2.2 간헐포기 소화

SBR 반응조를 이용하여 간헐포기방식으로 슬러지를 소화할 경우에 대한 모델은 위에서 전개한 간헐포기 동력학적 식 (9)를 SBR에 적용함으로써 가능하다. 한 주기(T) 중 침전 및 휴지기간(T_{sett})을 제외한 반응기간(T_{rx})과 T_{rx} 에 대한

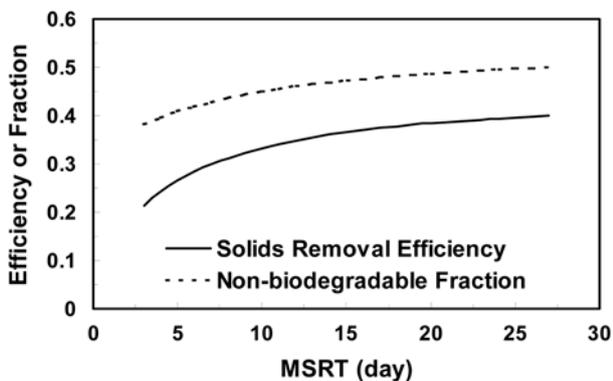


그림 3. MSRT 변화에 따른 고형물 제거율 및 생물학적으로 분해 불가능한 고형물의 비율($K_d = 0.1 \text{ day}^{-1}$, $T = 1 \text{ day}$, $X_{in} = 1,000 \text{ mg/L}$, $Q_{in} = 1 \text{ L/cycle}$, $f_i = 0.3$, $X_{max} = \text{variable}$)

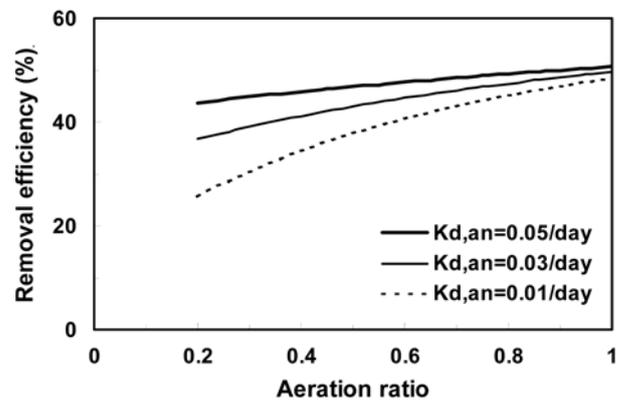


그림 4. 간헐포기소화에서 포기비율 변화에 따른 고형물 제거율 ($K_{d,a} = 0.1 \text{ day}^{-1}$, $T = 1 \text{ day}$, $T_{sett} = 4 \text{ hrs}$, $MSRT = 12 \text{ days}$, $f_i = 0.3$)

포기기간의 비율(포기비율, ϕ)로 구분하고, 침전 및 휴지기간에는 비포기조건과 같은 속도로 분해된다고 가정하면 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \text{overall } K_d T &= \left[\text{비포기모드} \right] + \left[\text{포기모드} \right] + \left[\text{침전모드} \right] \\ &= \left[\text{무산소 분해} \right] + \left[\text{호기성 분해} \right] + \left[\text{무산소 분해} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$= K_{d,na}(1-\phi)T_{rx} + K_{d,a}\phi T_{rx} + K_{d,na}T_{sett} \quad (10)$$

포기비율의 변화에 따른 간헐포기방식의 SBR 소화조의 고형물 제거 모의 결과를 그림 4에 예시하였다. $K_{d,a}$ 가 $K_{d,na}$ 보다 더 크기 때문에 동일한 MSRT라 하더라도 포기비율이 증가할수록 고형물 제거율은 더 크게 되며, 동일한 $K_{d,a}$ 에서는 $K_{d,na}$ 가 작을수록 그 차이는 더 커지게 된다.

2.3 비용 분석

2.3.1 설계조건

비용분석을 위해 설정된 설계 및 운전 조건은 다음 표 1과 같다. 연속회분식 반응조의 특성상 가급적 1주기 시간이 길수록 유리하지만, 주기 시간을 길게 하기 위해서는 SBR의 계열 수를 증가시키거나 별도의 저류탱크를 설치해야 한다. 본 연구에서는 계열수를 2계열로 하고, 주기시간은 48시간으로 하여 2일 1회 유입 및 배출의 연속회분식으로 구성하였다. 동력학 상수는 김 등(2002)의 실측 실험 자료를 사용하였는데, 다음과 같다.

$$K_{d,na} = 0.025 \text{ day}^{-1} \quad (11)$$

$$K_{d,a} = 0.150 \text{ day}^{-1} \quad (12)$$

표 1. 운전 조건과 설계 인자

Item	Value
sludge generation	50 m ³ /day
sludge concentration	20,000 mg/L as SS
Number of SBR	2
Cycle time(T)	48 hr/cycle
Reaction time(T_{rx})	44 hr
Settling time(T_{sett})	4 hr
Aeration ratio(ϕ)	0.2-1.0

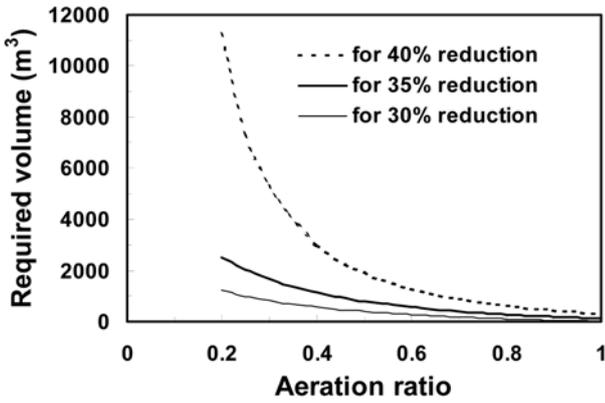


그림 5. 주어진 SS 제거율을 달성하기 위해 필요한 SBR 반응조의 용적

$$f_i = 0.38 - 0.155\phi \quad (13)$$

설정된 운전 조건과 동력학 상수들을 적용하고, 목표 SS 제거율을 얻기 위해 필요한 반응조의 용량을 앞에서 제시한 연속회분식 간헐포기 소화 모델을 이용하여 계산하였으며, 그 결과를 그림 5에 표시하였다. 포기비율을 작게 운전할수록 요구되는 반응조 용량은 기하급수적으로 증가하는데, 예로서 포기비율 0.2로 운전할 경우 40%의 SS 제거율을 얻기 위해 필요한 SBR 반응조의 용량은 무려 11,200 m³ 정도이고, HRT 기준 190일이나 되어 현실적으로 무의미하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 목표 제거율을 35%로 설정하였고, 35%의 SS 제거율을 달성하는데 필요한 반응조 탱크 및 기계장치를 설계하여 시설비와 동력비를 산정하였다.

2.3.2 시설비와 동력비 산정 기준

초기시설비는 부지조성비, 토공비, 구조물설치비, 기계장치, 배관류, 전기장치 등의 시공비로 구성된다. 본 연구에서는 초기시설비 항목으로서 구조물(반응조 탱크) 설치비와 기계장치 설치비를 계산하였고, 이외의 항목은 대체로 구조물의 크기에 비례하므로 계산에 반영하지는 않았다. SBR반응조를 이용한 간헐포기식 슬러지 소화조의 초기시설비는 위에서 산출한 반응조 용적을 기준으로 여유용량 20%를 가산한 후, 2조의 수심 4m 철근콘크리트제 탱크 구조물을 가정하였다. 소화조의 건설공사비 중 재료비 산출을 위해 구조계산을 실시하여 콘크리트 두께 및 철근사용량을 구하였으며, 일반적인 철근콘크리트 구조물 계산에서 사용하는 계수 및 안전율을 채택하였다. 송풍기의 용량은 유기물 산화와 질산화를 고려하였으며, 37 kW의 규격화된 송풍기를 선정하였다. 교반장치는 송풍기보다는 훨씬 적은 동력을 필요로 하므로 2kW를 가정하였고, SBR 반응조가 2조이므로 송풍기와 교반장치는 각각 2 세트를 적용하였다. 재료비 단가, 거푸집 사용량, 노임단가 및 일위대가는 2005년도 상반기를 기준으로 하였으며, 레미콘과 철근의 단가, 기계장치류의 가격은 2004년도 조달청의 공급가격 및 견적서를 참조하였다.

$$C_I = C_R + C_M \quad (14)$$

여기에서

C_I : 시설비(원) (Installation cost, won)

C_R : SBR반응조 건설비 (원) (Reactor construction cost, won)

C_M : 송풍기, 교반기의 기계장치 설치비 (원) (Blower and mixer cost, won)

송풍기 및 교반장치의 가동에 따라 전력 소모가 발생한다. 간헐포기이므로 포기시간에는 송풍기가 가동되고, 무산소시간에는 교반장치만 가동되며, 침전시간에는 모든 기계장치가 정지한다. 이를 기초로 소화조 가동에 따른 동력비를 산출할 수 있는데, 전력 소비에 따른 동력비는 송풍기 및 교반장치의 가동시간과 2005년 상반기의 한국전력의 산업용 전기요금을 적용하여 계산하였다.

$$C_E = W \times F \times m \times (\phi \times t) \quad (15)$$

여기에서

C_E : 전기사용료 (원) (Electric cost, won)

W : 기계장치 전력소비량 (kW)

(Electric power consumption rate of the machine, kW)

F : 전기사용요금 (원/kWh)

(Fare of electric power consumption, won/kWh)

m : 설치대수 (대) (Number of installed machine, ea)

ϕ : 포기비율 (Aeration ratio)

t : 운전기간 (시간) (Operation time, hr)

$\phi \times t$: 소화조 운전 기간 중 실제 기계장치 가동 시간의 미합

3.3.3 비용분석 방법

포기비율에 따른 소화조의 설치 및 운전 비용을 동일한 관점에서 비교하기 위하여 시설물의 잔존가치를 결정하고, 연평균사업비 및 유지관리비(동력비)를 산정한 후, 현재계수를 적용하여 연평균비용을 현재가치로 환산하는 방법을 사용하였다. 45년 후 잔존가치는 초기시설비의 10%로 가정하였고(한국개발연구원, 1999), 경제성장률과 할인율은 각각 4.7%, 6.0%를 가정하였다(건설교통부, 2004).

$$F_p = \left[\frac{1+g}{1+r} \right]^k$$

여기에서 F_p : 현재계수(Present worth factor)

g : 경제성장률(rate of economic growth)

r : 할인율(rate of discount)

k : 해당 년

3. 결과 및 고찰

포기비율이 작을수록 반응조의 크기는 커야 하기 때문에 초기시설비는 증가한다. 1년의 운전기간을 가정하면 초기시설비와 동력비는 그림 6과 같이 나타나는데, 낮은 포기비율에서는 시설비가 동력비에 비해 월등히 크므로 총비용은 시설비와 큰 차이가 없다. 그러나 포기비율이 증가할수록 동력비 증가율보다 시설비 감소율이 훨씬 커 총비용은 감소하는데, 포기비율 1.0 즉, 호기성소화에서는 1년간의 동력비가 시설비와 거의 비슷한 정도로 나타났다.

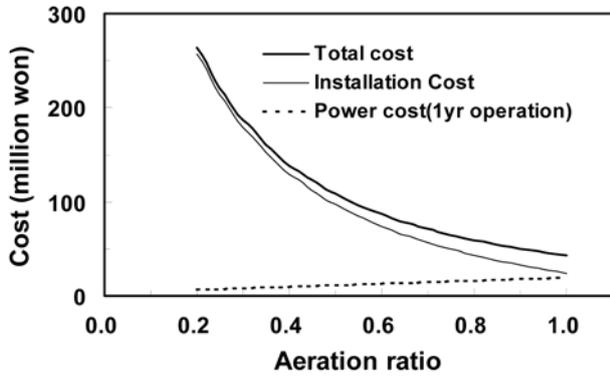


그림 6. SBR 반응조를 이용한 간헐포기소화의 초기시설비 및 동력비(1년 운전)

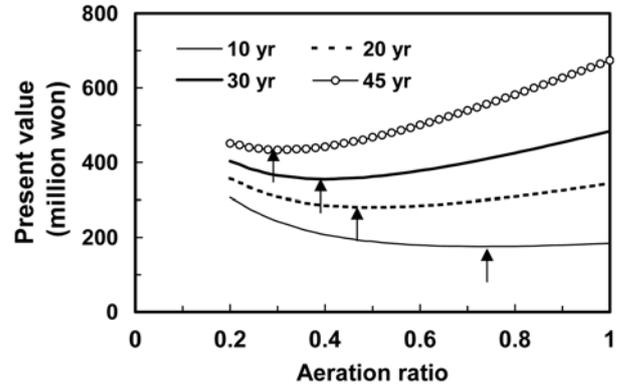


그림 8. 몇 가지 추정내용연수에서 포기비율에 따른 총비용 변화

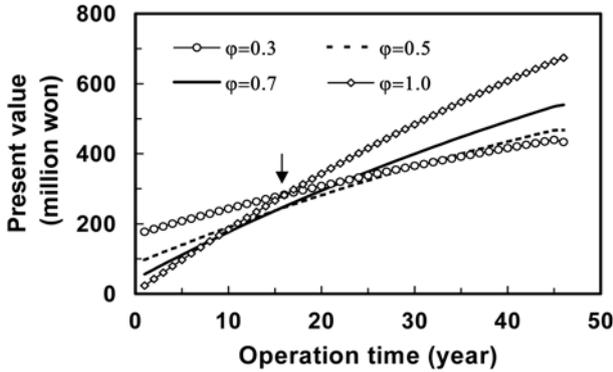


그림 7. 운전기간에 따른 총 비용의 변화(ϕ : 포기비율)

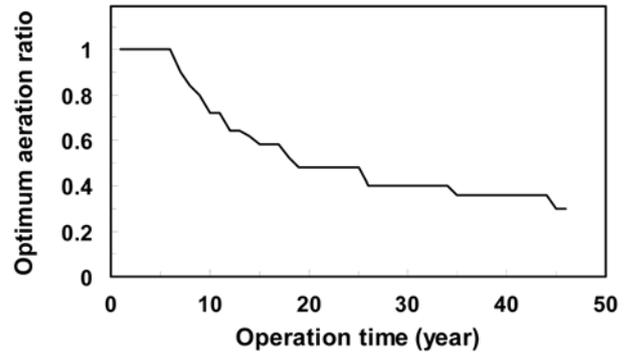


그림 9. 총비용을 최소화하는 최적포기비율

초기시설비는 변하지 않지만 동력비는 운전기간에 비례하므로 운전이 계속될수록 총비용은 증가한다. 4가지의 포기비율을 선정하여 시설비와 동력비의 합을 현재가치로 환산하여 운전기간동안의 총비용을 그림 7에 표시하였다. 현재가치는 장래에 투자될 비용을 현재가치로 환산했을 때의 비용을 말하는 것으로 현재가치가 적을수록 총비용이 적게 투자됨을 의미한다. 포기비율 0.3의 경우는 초기시설비가 높은 반면 동력비는 적기 때문에 운전기간이 경과함에 따른 총비용 증가율은 가장 낮다. 반면, 포기비율 1.0의 경우는 초기시설비는 낮지만 동력비가 높아 총비용의 증가율이 높게 나타난다. 특히, 포기비율 0.3인 경우와 1.0인 경우를 비교해 보면 화살표로 표시한 16년 이후부터는 포기비율 0.3인 경우가 포기비율 1.0인 경우보다 총비용 면에서 더 적게 평가된다. 이는 16년 이상의 운전기간을 가정하면 포기비율 0.3인 간헐포기소화의 경우가 연속포기의 호기성소화보다 더 유리함을 의미한다.

내용연수에 따라 비용최소점은 존재하였으며, 그림 8에 각 내용연수별로 총비용이 최소화 되는 점(포기비율)을 찾아 함께 표시하였다. 비용을 최소화하는 포기비율은 추정내용연수(estimated useful life)를 얼마로 보느냐에 따라 다른데, 추정내용연수를 10년으로 보았을 때는 포기비율 0.74에서 나타나며 이 때까지의 총비용은 현재가치로 176백만원 정도이다. 같은 방법으로 추정내용연수를 20년으로 보았을 때는 포기비율 0.48에서 총비용 280백만원, 30년으로 보았을 때는 포기비율 0.40에서 총비용 355백만원, 그리고 추정내용연수를 45년으로 보았을 때는 포기비율 0.30에서 총비용 434백만원으로 추정되었다. 즉, 추정내용연수가 길수록 비용을 최

소화하는 포기비율은 점점 낮아지는 것을 알 수 있다.

내용연수별로 총비용을 최소화하는 포기비율을 찾아 그림 9에 표시하였다. 총비용 측면에서 보았을 때 내용연수 6년 이하에서는 포기비율 1.0 즉, 호기성 소화가 가장 유리하다. 그러나 내용연수가 길어질수록 총비용을 최소화하는 포기비율은 점차 줄어들게 되어, 내용연수 45년 정도에서는 포기비율 0.3인 경우가 최적 설계조건임을 알 수 있다. 내용연수를 45년으로 보았을 때 총비용은 전술한 바와 같이 434백만원 정도이며, 호기성소화의 총비용, 674백만원과 비교해서 36%의 비용절감효과가 있다.

물론 이러한 현재가치법에 의한 총비용이나 최적 포기비율은 할인율이나 경제성장율, 추정내용연수나 잔존가치 등을 얼마로 보았느냐에 따라 다르게 평가될 수는 있으므로 절대적인 것은 아니다. 다만, 주어진 시점에서 간헐포기에 의한 슬러지의 소화를 계획하고, 설계할 때 포기비율을 얼마로 설계할 것이냐를 결정하는 중요한 판단 근거는 될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 간헐포기방식으로 소화하는 것이 연속포기방식의 호기성 소화와 비교해서 경제성 면에서 더 유리하며, 더구나 간헐포기 소화가 안정된 pH와 알칼리도, 탈질 반응에 의한 질소 제거 등 부가적 효과를 고려하면 연속포기방식인 호기성 소화의 대안으로서 충분하다고 판단된다.

4. 결 론

고형물 제거율을 기준으로 SBR반응조를 이용한 간헐포기소화의 시설비와 동력비를 산정하고 비용분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 포기비율이 낮을수록 초기시설비는 큰 반면 동력비는 적

게 소요된다. 또한, 목표 고형물 제거율이 같을 경우, 포기비율이 낮을수록 시설비는 지속적으로 증가하고 동력비는 산술적으로 감소한다.

2. 시설비면에서는 호기성 소화가 간헐포기소화보다 더 저렴하다. 그러나, 총비용면에서 내용년수 약 10년 이상의 운전에서는 간헐포기소화가 호기성 소화보다 더 유리하다. 특히, 내용년수가 길수록 최적 포기비율은 낮아지며, 내용년수 45년 정도일 때 최적포기비율은 0.3 정도이고, 이 경우 총비용은 호기성소화의 64% 수준이다.

기호 설명

- Anx : 무산소성(anoxic)
- C_E : 전기사용료(electric cost)
- C_I : 시설비(installation cost)
- C_M : 기계장치 설치비(machinery cost)
- C_R : 반응조 건설비(reactor construction cost)
- F : 전기사용요금(fare of electric power consumption)
- f : 할인율(rate of discount)
- f_i : 생물학적으로 분해 불가능한 고형물의 비율(fraction of non-biodegradable solids)
- F_p : 현재가치수(present worth factor)
- g : 경제성장률(rate of economic growth)
- HRT : 수리학적체류시간(hydraulic retention time)
- k : 해당 년(estimated year)
- K_d : 분해상수(decay constant)
- K_{d,a} : 포기시의 분해상수
(decay constant under aeration condition)
- K_{d,na} : 비포기시의 분해상수
(decay constant under non-aeration condition)
- m : 설치대수(number of installed machine)
- MSRT : 평균고형물체류시간(mean solids retention time)
- n : 반복주기수(number of cycle)
- Ox : 호기성(oxic, aerobic)
- Q_{in} : 유입유량(influent flowrate)
- SBR : 연속회분식반응조(sequencing batch reactor)
- SRT : 고형물체류시간(solids retention time)
- T : 반복주기(cycle time)
- t : 운전기간(operation time)

- T_a : 포기기간(aeration time)
- T_{na} : 비포기기간(non-aeration time)
- T_{rx} : 반응기간(reaction time)
- T_{sett} : 침전 및 휴지기간(settling and idling time)
- V : 반응조 용적(volume of reactor)
- W : 기계장치 전력소비량(electric power consumption rate of the machine)
- X_d : 생물학적으로 분해 가능한 고형물량
(biodegradable solids)
- X_{d,0} : t=0에서 생물학적으로 분해 가능한 고형물량
(biodegradable solids at t=0)
- X_{in} : 고형물 유입농도(influent solids concentration)
- X_{max} : 조내 최대 고형물 농도
(maximum solids concentration of reactor)
- φ : 포기비율(aeration ratio)

감사의 글

이 연구는 2002년도 조선대학교 교내연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부 (2004) 치수사업 경제성분석 방법 연구, p.A-32.
 김성홍, 김희준, 정태학 (2002) 간헐포기에 의한 슬러지의 호기성 소화기술. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제22권, 제 2-B호, pp.245-252.
 한국개발연구원 (1999) 수자원부문사업의 예비타당성조사 표준지침연구, p.39.
 Jenkins, C.J. and Mavinic, D.S. (1989) Anoxic-aerobic digestion of waste activated sludge : part I-solids reduction and digested sludge characteristics, *Env. Tech. Lett.*, 10, pp.355-370.
 Kim, M.H. and Hao, O.J. (1990) Comparison of activated sludge stabilization under aerobic or anoxic condition, *J. WPCF*, 62(2), pp.160-168.
 Matsuda, A. Ide, T., and Fujii, S. (1988) Behavior of nitrogen and phosphorus during batch aerobic digestion of waste activated sludge-continuous aeration and intermittent aeration by control of DO, *Water Research*, 22(12), pp.1495-1501.

(접수일:2005.7.4/심사일:2005.10.31/심사완료일:2005.10.31)