Research Paper

A Study on the Rational Requirement Area Estimation of Municipal Sewage Treatment Facilities Using Statistical Techniques

Donghyun Koo¹ · No-Suk Park¹ · Jeong Ik Oh² · Sukmin Yoon^{1,*}

¹Department of Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

²Land & Housing Institute, Korea Land & Housing Corporation

(Received January 22, 2020; Revised February 21, 2020; Accepted February 26, 2020)

Objectives : In this study, a adjusted sewage & wastewater treatment capacity-required area estimation methodology was proposed through various data analysis for the required area of domestic sewage & wastewater treatment, the occupancy ratio of each sub-facility, and the treatment processing method. In addition, the reduction rate of the required area according to the application of the adjustment methodology presented in this study was evaluated quantitatively by comparing the actual area with the expected area.

Methods : Statistical analysis was performed by collecting 654 data of more than 500 m³/day of treatment capacity in domestic sewage & wastewater treatment facilities. The 33 sewage & wastewater treatment facilities constructed by the LH sample groups were divided into functional areas and analyzed for occupancy rates by each facility.

Results and Discussion : A capacity-required area regression model was developed for the collected each samples. As a result, the distributions of the regression model were divided into two clusters according to the analysis sample differences. It was analyzed that the estimated required area using the local government sample group was estimated to be relatively higher than the LH sample group. In this study, a adjusted capacity-required area model based on regression model derived from LH sample was proposed by considering green site ratio and treatment processing methods in sewage & wastewater treatment plant. The results are as follows: $A = 15.638 \times Q^{0.7414} \times \alpha \times \beta$ (α : conversion factor for green site ratio, β : conversion factor for treatment processing method).

Conclusions : Recently, the wastewater treatment facilities have been in decentralization and small scale, and the introduction of the advanced treatment method that requires a relatively small area such as MBR or SBR has been accelerating. Consequently, it could be expected that the methodology proposed in this study will save about 50~60% of the required area for wastewater treatment facilities.

Key Words : Sewage & Wastewater Treatment Facility, Required Area, Statistical Analysis, Green Site Ratio, Treatment Process, Conversion Factor

* Corresponding author E-mail: gnuysm@gmail.com Tel: 055-755-8707 Fax: 055-772-1797

연구논문

통계기법을 이용한 도시 하수처리시설의 합리적 소요면적 산정에 관한 연구

구동현¹ · 박노석¹ · 오정익² · 윤석민^{1,*}

¹경상대학교 토목공학과 및 공학연구원

²한국토지주택공사 토지주택연구원

목적: 본 연구에서는 국내 하·폐수처리시설의 소요면적, 하부 시설물별 점용비율 및 처리 공법 등을 대상으로 다양한 자료 분석을 통해 합리적인 처리용량-소요면적 산정 방법론을 제시하고, 이러한 방법론을 적용하는 경우 실제 하·폐수처리시설의 예상 소요면적 절감효과를 정량적으로 평가하고자 하였다.

방법: 국내 지자체에서 건설 및 운영 중인 하·폐수처리시설 중 500 m³/day 이상 654개소 자료 및 한국토지주택공사(LH)에서 건설한 33개소 자료를 취득하여 총 687개소의 자료를 통계분석 하였다. 그리고 대상 표본 집단 중 LH에서 건설한 33개소 하·폐수처리시설에 대해서는 기능별로 구성 면적을 구분하고 각 시설별 점용비율에 대한 분석을 수행하였다.

결과 및 토의: 수집된 표본 집단들을 대상으로 처리용량-소요면적 관계식을 개발하고 기존의 연구들과 비교한 결과 관계식의 분포 형태는 분석 표본 집단 차이에 따라 2개의 군집으로 분리되었다. 그리고 전국 단위의 표본 집단을 활용한 관계식들의 추정 소요면적이 LH 단위의 표본 집단을 활용한 관계식들에 비해 상대적으로 높은 소요면적을 추정하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 LH 단위의 표본 집단 분석결과를 활용해 하·폐수처리장의 녹지부지 점용비율 및 처리공법 집약화에 따른 예상 소요 면적 감소 효과를 포함한 처리용량-소요면적관계식을 다음과 같이 제안하였다. $A = 15.638 \times Q^{0.7414} \times \alpha \times \beta$, 여기서 α 는 하·폐수처리장 내 녹지부지(녹지를 제외한 시설 면적의 10~150%)를 고려한 환산계수($\alpha = 0.44 \sim 1.0$)로 정의되며, β 는 처리공법에 따른 환산계수로서 MBR/SBR 공법 적용 시 0.75, A2O공법 및 관련 변법 적용 시에는 1.0을 적용하게 된다.

결론: 최근 계획 및 설계단계의 하수처리 시설들은 분산화 및 소규모화 추세에 있으며, 도입되는 하수 고도처리 공법이 MBR/SBR과 같이 상대적으로 작은 소요면적을 필요로 하는 공법의 도입이 가속화되고 있음에 본 연구에서는 계획 및 설계 단계에서부터 적용 가능한 개선된 소요면적 관계식을 제안하였다. 그리고 본 연구에서 제안한 처리용량-소요면적 추정 방법론을 적용하여 실제 예상 소요 면적 절감효과를 정량적으로 평가한 결과 최대 약 50~60% 정도의 규모에서 소요면적을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 하·폐수처리시설, 소요면적, 통계분석, 녹지부지 및 처리공법 환산 계수

1. 서론

국내 하·폐수처리시설의 시설용량을 산정하기 위해서는 목표연도, 하수처리구역, 하수처리인구, 연계처리계획 등을 검토하여 오수발생량 및 부하 원단위를 사용하지만, 소요면적을 산정하기 위한 정확한 산정기준은 마련되지 않았다. 그동안 부지면적 및 시설물 규모 기준은 하수종말처리시설 사업촉진에 관한 지침(환경부 훈령, 1998.04)을 참조하여 검토되어 왔다.¹⁾

국내 하·폐수처리시설은 1976년을 시작으로 대규모 처리

시설이 초기에 건설되고 점진적으로 소규모까지 건설하여 2015년 말 500 m³/day 이상 625개소, 500 m³/day 미만은 3,282개소에 이르며, 한번 건설되면 시설의 이전이나 부지의 추가확보가 어려운 실정이다.²⁾

요구되는 방류수 수질기준도 유기물, 질소/인, 대장균, 생태독성까지 수질항목이 확대되어 처리기술도 지속적으로 발전해 왔으며, 최근 강화된 총인과 초기 우수처리, 방류수 재이용, 슬러지 감량화, 에너지 자립화 등의 친환경시설과 주민 친화시설의 도입이 활발하게 진행되고 있다. 초기의 하수처리시설은 대부분 활성슬러지공법으로 건설되었으며,

수리학적으로 자연 유하 방식을 적용하였다. 또한 장래 증설을 고려하여 넓은 부지를 확보하였다. 그러나 1997년 환경부 수처리선진화 시범사업 이후 하수처리시설의 개소수도 크게 증가하였을 뿐만 아니라 개발된 신기술 등을 적용하여, 작은 부지면적에서 효과적이고 안정적인 처리가 가능하였다. 즉, 하·폐수처리시설의 소요면적 규제는 없었으나 그동안 개발되어온 신기술 등을 적용하여 처리시설을 집약화하는 방향으로 추진되어 왔다.¹⁾

하·폐수처리시설의 집약화와 관련된 국외연구를 살펴보면 Crites와 Tchobanoglous는 분산형 소규모 하수처리 및 관리 시스템을 제안하였으며²⁾ 분산형 하수관리 시스템을 작고 분산된 하수관리 시스템을 이용하여 오염 발생원 근처에서 처리함으로써 차집과 처리수를 운송하고 방류하는 비용을 최소화할 수 있는 것으로 정의하였다.³⁾ 특히, 분산형 소규모 하수처리 시스템은 오염 발생원 근처에서 처리를 원칙으로 하므로 하수원수 및 처리수의 방류를 위한 이송거리를 줄일 수 있으며, 이러한 관로에서 발생하는 하수의 누수, 맨홀 관리 등의 2차적인 문제점을 줄일 수 있는 이점이 있다.^{4,6)} 그리고 하·폐수처리시설의 집약화와 관련된 국내 연구로는 2011년 환경부에서 수행한 ‘하수처리장 집약화 방안 타당성 검토 연구’가 있으며, 당 연구에서는 국내 공공하수처리시설 중 500 m³/day 이상의 219개소에 대한 대규모 자료분석을 통해 처리시설, 공법제일 등 다양한 조건에 대한 소요면적 산정식을 제안하고 있다. 하지만 2011년 환경부에서 제안한 처리용량-소요면적 관계식과 일본의 하수도 핸드북(1997)에서 제안한 처리용량-소요면적 관계식을 비교하는 경우 처리용량 500 m³/day~1,000,000 m³/day 범위에서 소요원단위면적(m²/m³)은 1.4~2.5배 이상 높게 추정되고 있다.¹⁾

처리용량-소요면적 관계식으로부터 추정된 국내와 일본의 예상 소요면적 차이에 관해서는 해당 국가들의 관계법령, 지역적/문화적 차이 등 다양한 원인들을 고려할 수 있으나, 일본의 경우 하·폐수처리시설의 계획에서 녹지의 규모를 전체 면적에 약 10%에서 확보할 것을 제안하고 있다. 반면, 우리나라는 하·폐수처리시설의 소요면적 결정과 관련해 정량적인 기준의 부재로 인해 건설지역의 인문·사회적 요구사항 그리고 정책방향만을 고려해 소요면적 결정 방식이 상이하게 적용되고 있다. 따라서 녹지면적과 같은 간접시설의 부지가 과대하게 반영되는 등 하수처리시설의 계획단계에서부터 소요면적에 대한 최적화 과정을 만족하지 못한 만큼 기왕의 자료들로부터 추정된 소요면적 관계식은 합리적인 기준을 제시하지 못한다는 한계가 명확하다.

이에 본 연구는 그 동안 건설된 국내 하·폐수처리시설의 부지면적, 구성 시설물의 세부 면적 및 처리 공법 등을 대상으로 다양한 통계자료 분석을 통해 추가적으로 도입해야 할 시설계획과 신규로 하수처리시설을 건설하는데 지침이 될 수 있는 합리적인 처리용량-소요면적 산정 방법론을 제시하

는 것을 주요목적으로 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 자료 취득

하·폐수처리시설의 소요면적을 산정하고 부지를 확보하는 과정은 지자체 및 발주처의 상황에 따라 큰 차이가 있다. 이에 본 연구에서는 국내 지자체에서 건설 및 운영 중인 하수처리시설 중 국가하수도정보시스템(www.hasudoinfo.or.kr)에 등록된 500 m³/day 이상 654개소의 자료를 확보하고,²⁾ 이와 대분되게 한국토지주택공사(LH)에서 건설한 33개소의 하수처리장의 자료를 취득하여 총 687개소의 자료를 분석하였다.

2.2. 기존 하·폐수처리시설 처리용량-소요면적 관계식 검토

이미 2001년에 환경부(Ministry of Environment, MOE)와 한국토지공사(LH의 전신)에서는 처리시설의 단위 공정별, 단위 시설물별, 용량별 및 공법별 소요비용 산출을 위한 기준 함수식을 제시함과 동시에 2000년까지 가동 중인 국내 172개소 하수종말처리장을 대상으로 소요면적에 대한 관계식을 다음 식 (1)과 같이 제안하였다.⁵⁾

$$A = 6.084 \times Q^{0.578} ; MOE+LH(2001) \quad (1)$$

여기서, A 는 소요면적(1,000 m²)을, 그리고 Q 는 일 최대 처리수량(1,000 m³/day)을 나타낸다.

이후 LH에서는 2003년과 2007년에 상기 식 (1) 소요면적 관계식의 과다한 예측을 줄이는 차원에서 다음과 같은 식 (2)를 제안 사용하여 왔다. 특히 이 시기에 하·폐수처리시설이 지하화되면서 계획시설이 지하화되는 경우 환산계수 0.8을 곱하는 식 (3)을 제안하였다.

$$A = 3.146 \times (Q/1000)^{0.674} ; LH(2003) \quad (2)$$

$$A = 3.146 \times (Q/1000)^{0.674} \times 0.8 ; LH(2007) \quad (3)$$

여기서, A 는 소요면적(1,000 m²)을, 그리고 Q 는 일 최대 처리수량(1,000 m³/day)을 나타낸다.

이후 2011년에 LH에서는 하수고도처리 공법으로 MBR (Membrane Bio Reactor) 및 SBR (Sequential Batch Reactor)의 도입이 활성화되면서 이에 따른 추가 데이터를 수집하여 공사 내부적으로 활용하기 위한 다음 식 (4)를 개발하였다.

$$A = 5.235 \times Q^{0.842} \times 0.8 ; LH(2011) \quad (4)$$

여기서, A 는 소요면적(m²)을, 그리고 Q 는 일 최대 처리수량(m³/day)을 나타낸다.

그리고 최근 환경부에서는 하수처리장 집약화 방안 타당

Table 1. Sewage treatment plant required area, construction and operation/maintenance cost estimation function formula type.

Division	Formular	Parameters	Type
Required Area	$A = a \times Q^b$	A : Required Area Q : Capacity a, b : Constant	Exponential function
Construction Cost	$Y = m \times Q^n$	Y : Construction cost Q : Capacity m, n : Constant	Exponential function
O/M Cost	$Z = (u \times Q^2) + (v \times Q) + w$	Z : O/M cost Q : Capacity u, v, w : Constant	2 nd Exponential function

성 검토 연구(2012)를 통해 국내 총 3,014개소의 공공하수처리시설 중에서 500 m³/day 이상인 219개소의 지점을 분석하여 소요면적에 대한 관계식을 다음 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$A = 5.0833 \times Q^{0.6523} ; MOE(2012) \quad (5)$$

여기서, A 는 소요면적(1,000 m²)을, 그리고 Q 는 일 최대 처리수량(1,000 m³/day)을 나타낸다.

국의 사례 중 일본의 경우 일반적으로 처리장 부지계획은 처리시설용량에 따라 소요부지 원단위를 설정하여 단지계획시 반영하고 있으며, 2011년도 하수도 핸드북에서는 하수처리장 건설비, 유지관리비를 산정하는 함수식과 함께 식 (6)과 같이 하·폐수처리장의 소요면적을 산정하는 관계식을 제시하고 있다.⁷⁾

$$A = 14.8 \times Q^{0.7} ; Japan \quad (6)$$

여기서, A 는 소요면적(100 m²)을, 그리고 Q 는 일 최대 처리수량(1,000 m³/day)을 나타낸다.

2차 처리시설까지는 일 최대 오수량 1 m³/day 당 0.5 ~ 1.0 m², 고도처리(3차 처리)까지는 1 m³/day 당 0.8 ~ 1.5 m²의 부지면적의 확보를 권장하고 있으며, 유지관리기능 및 주변지역의 환경보전을 위해 처리수량 1 m³/day 당 1 m² 이상의 부지면적을 확보하여 상대적으로 국내보다 하·폐수처리장의 소요면적이 작게 나타나고 있다.⁸⁾ 특히 일본의 경우 완전 지하화 하수처리장 내 녹지면적은 처리장 총 면적의 10% 정도를 확보할 것을 제안하고 있다.⁹⁾

다음 Table 1은 우리나라를 포함한 선진국에서 하수처리장 소요면적, 건설비 및 운영비 산정을 위한 기본 함수식의 형태를 정리한 것이다.

상기 Table 1에서 나타난 바와 같이 하수처리장의 소요면적, 건설비 및 운영비 산정 함수식은 통상 처리용량을 독립변수로 지수함수(Exponential function)의 형태로 나타낸다. 이는 처리용량과 소요부지, 건설비 및 운영비의 관계가 직접적인 비례관계가 아니라, 규모의 경제 개념이 반영되어

대규모, 대용량으로 처리할수록 소요부지, 건설비 및 운영비가 감소한다는 가정을 전제하고 있기 때문이다.

2.3. 통계분석 방법

회귀분석(Regression analysis)은 자연적 또는 물리적 현상이 변수들의 인과관계에 의하여 설명될 때 그 관계를 수학적으로 설명하기 위하여 사용되는 통계분석 방법론이다. 회귀분석에서는 우선 변수들의 관계를 나타내는 타당한 수학적 모형을 이론적 근거나 경험에 근거하여 설정하고, 변수들의 관측된 값을 이용하여 그 모형을 추정한다. 추정된 모형에 의해 변수들 간의 관계를 설명하든지 또는 예측 등의 분석에 응용하게 된다. 회귀분석에서는 적용되는 통계적 모형을 회귀모형(Regression model)이라고 하며, 변수들 간의 관계를 나타내는 수학적 모형을 회귀식(Regression equation)이라 한다. 그리고 서로 관계를 가지고 있는 변수들 중에서 다른 변수들에 의해 영향을 받는 변수를 반응변수(Response variable) 또는 종속변수(Dependent variable), 반응변수에 영향을 주는 변수를 설명변수(Explanatory variable) 또는 독립변수(Independent variable)라 한다.¹⁰⁾

본 연구에서는 분석 표본 집단 차이에 따른 처리용량(Q)-소요면적(A) 관계를 상호 비교하기 위해 국가하수도정보시스템에 수집된 654개소(지자체 단위) 및 한국토지주택공사(LH 단위)에서 건설한 33개소를 자료를 대상으로 각각의 회귀모형을 개발하였다. 개발된 회귀모형의 설명변수는 일 최대 처리용량(Q), 반응변수는 소요면적(A)이며 회귀모형의 형태는 선행 연구들에서 주로 적용된 거듭제곱 함수식을 적용하였다. 그리고 개발된 회귀모형들에 대해 t-검정 및 F-검정을 이용하여 회귀계수 및 모형 적합도에 대한 통계적 검정을 수행하였다.

3. 연구 결과

3.1. 처리용량-소요면적 관계식 도출 및 분석

다음 Fig. 1(a ~ b)는 본 연구를 위해 수집된 국내 지자체 및 LH 단위의 표본분포 및 추정된 회귀모형을 도시한 것이다.

(a) analysis sample A: local government

(b) analysis sample B: LH

Fig. 1. Sample distributions and developed capacity - required area regression models.

그리고 **Table 2**에서 요약한 것과 같이 본 연구에서 개발한 각 집단별 회귀모형에 대한 통계검정 결과 회귀계수들에 대한 t통계량 및 추정된 회귀모형에 대한 F통계량 모두 유의수준 5% 하에서 통계적으로 유의하며, 결정계수(R^2)는 0.7 이상으로 충분한 설명력을 만족하였다.

본 연구를 통해 개발된 표본 집단별 처리용량-소요면적 관계식 및 선행연구에서 제시한 관계식(식 (1)~(5) 참조)들을 상호 비교·분석하기 위해 설명변수인 처리용량(Q)을 1,000 m^3/day ~ 100,000 m^3/day 의 범위에서 변화하여 각각의 관계식에 입력한 후 소요면적을 산정하고 그 결과를 **Fig. 2**에 함께 도시하였다.

그 결과 **Fig. 2**에 도시한 것과 같이 처리용량-소요면적 관계식의 분포 형태는 분석 표본 집단 차이에 따라 2개의 군집으로 분리되는 결과를 보이고 있다. 이는 전국 지자체 운영 하·폐수처리장의 경우 고도처리공법 도입 시 상대적으

Fig. 2. Comparison results of capacity-required area models.

로 넓은 소요 면적이 요구되는 A2O, Bardenpho공법 및 해당 공법의 변법을 주로 적용한 반면, LH에서 건설한 하수처리장의 경우 2000년대부터 지속적으로 MBR/SBR을 공법을 도입함으로써 시설물이 상대적으로 집약화 된 것이 주요 원인으로 판단된다. 그리고 500 m^3/day 이상 30,000 m^3/day 이하의 중소규모 하수처리장을 대상으로 개발된 LH 단위의 소요면적 관계식들의 분포는 경년증가에 따라 지속적으로 기울기가 감소하는 반면, 환경부가 제시한 2001년 관계식과 2012년 관계식의 분포 차이는 미소한 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 최근 하수처리 시스템에 도입되고 있는 분산화 및 집약화 방안을 고려하여 LH 단위의 소요면적 관계식을 근간으로 합리적 소요면적 산정을 위한 최적화 방안을 도출하였다.

3.2. 처리용량-소요면적 관계식 최적화 방안

환경부에서 제시한 하·폐수처리시설 부지선정 기준 및 입지계획 등에서는 하수처리시설은 도시계획 토지 및 수자원 이용목표 민원발생요인을 종합적이고 체계적으로 검토한 후 하수 및 오수처리가 용이하게 하수 처리구역에 설치하도록 규정하되, 복합 산업단지 등 주거 및 상업기능으로 구분되는 경우에는 주거 환경에 악영향을 주지 않도록 용도배분시 이격 배치해야만 한다고 명시하고 있다. 그리고 주변 시설과의 이격을 위해 차단녹지의 설치가 필요한 경우에는 공원 등을 배치하여 처리시설의 지상부 조경시설과 공원시설 등을 연계하여 활용할 수 있도록 해야 하나 불필요한 녹지의 설치를 최소화해야 한다고 보고하고 있다.¹⁾

Table 2. Capacity-required area regression model statistical test results.

Analysis sample	Estimated coefficient					ANOVA		R^2
		Estimate	SE	t	p-Value	F	p-Value	
Local government	a	63.897	0.127	32.833	0.000	1942.135	0.000	0.75
	b	0.6363	0.014	44.070	0.000			
LH	a	15.638	0.665	4.134	0.000	138.951	0.000	0.82
	b	0.7414	0.063	11.788	0.000			

Table 3. Composition ratio of sewage & wastewater treatment plant required area.

Facility	Share ratio (%)		
	Min	Max	Mean
Treatment processes	7	37	18
Buildings (Office, etc.)	2	30	10
Green site	27	85	58
Others (parks, parking lot, etc.)	0	42	14

Table 4. Derivation results of conversion factor α according to change of green site ratio.

Green site ratio	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5
α	0.44	0.48	0.52	0.56	0.60	0.64	0.68	0.72	0.76	0.80	1.0

하지만 **Table 3**에 요약한 것과 같이 LH 단위의 33개소 하·폐수처리장의 소요면적을 각 기능에 따라 수처리시설, 건축(사무동), 기타(체육시설 및 공원, 주차장 등) 및 녹지로 구분하고, 총 부지면적에 대한 점용비율을 분석한 결과 수처리에 직접 관련이 없는 녹지 및 기타 시설이 각각 58%와 14%를 차지하는 것으로 나타났으며, 수처리 운영과 직접 연관이 있는 수처리시설 및 건축물이 각각 18%와 10%로 나타났다.

앞서 언급한 바와 같이 일본의 경우 녹지는 하·폐수처리 시설 전체 면적에 약 10% 규모에서 확보할 것을 제안하고 있다. 반면, 우리나라는 정량적인 소요면적 결정 프로세스의 부재로 인해 건설지역의 인문·사회적 요구사항 그리고 정책방향만을 고려해 소요면적 결정 방식이 상이하게 적용되고 있다. 따라서 녹지면적과 같은 간접시설의 부지가 과대하게 반영되는 등 하수처리시설의 계획단계에서부터 소요면적에 대한 최적화 과정을 만족하지 못한 만큼 기왕의 자료들로부터 추정된 소요면적 관계식은 합리적인 기준을 제시하지 못한다는 한계가 명확하다.

본 연구에서는 추정된 소요면적과 실제 현장에서 요구되는 소요면적사이의 오차를 최소화(최소화)하기 위해 적정 환산계수를 도입하였으며, 본 연구에서 제안하는 처리용량-소요면적 관계식은 식 (7)과 같다.

$$A = 15.638 \times Q^{0.7414} \times \alpha \times \beta \quad (7)$$

여기서, A 는 소요면적(m^2), Q 는 일 최대처리용량(m^3/day)이며 관계식의 회귀계수($a=15.638$, $b=0.7414$)들은 LH 단위 표본들로부터 추정된 것이다. 그리고 소요면적 관계식의 최적화를 위해 도입된 α 는 녹지부지 환산계수, β 는 처리공법 환산계수이며, 각 환산계수에 대한 정의 및 적용방안은 다음 절에 상세히 기술하였다.

3.2.1. 녹지부지 환산계수(α)의 정의 및 효과 분석

Table 3에서 제시한 것과 같이 처리용량-소요면적 관계식 추정에 적용된 LH 단위 표본들의 시설별 분포를 보면 하수

처리 및 운영과 관련된 직접시설의 비율이 평균 28%인 반면, 녹지 및 주차장과 같은 간접시설의 비율은 평균 72%로서 매우 높게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 간접시설 중 녹지 부지를 절감하는 방안을 적용해 소요면적 관계식의 최적화를 수행하였으며, LH 단위 33개소에 대한 표본조사 결과를 바탕으로 녹지 점용비율을 평균 60%로 가정하고 녹지부지 환산계수인 α 를 식 (8)을 이용하여 도출하였다.

$$\alpha = \frac{(A_D + A_G)}{A_0} \quad (8)$$

여기서, A_0 는 원시 하수처리장 전체 소요면적(m^2), A_D 는 녹지를 제외한 시설물 총면적(m^2), A_G 는 녹지면적(m^2)이다.

상기의 식 (8)에서 A_D 는 녹지를 제외한 시설물의 총면적(m^2)으로서 수처리, 건축, 기타시설로 구성되며, 녹지 점용비율을 평균 60%로 가정하였기 때문에 원시 전체 소요면적 A_0 의 40% (수처리시설 20%, 건축물 10%, 기타 10%)를 기준값으로 적용하였다. 그리고 녹지 면적 A_G 의 경우 (1) 원시 전체 소요면적 A_0 에 대한 비율, (2) 녹지를 제외한 총시설면적 A_D 에 대한 비율로 설정하는 방안이 있다. 본 연구에서는 녹지부지 환산계수 α 에 대한 직관적인 이해를 위해 A_G 의 크기를 A_D 에 대한 비율값으로 정의하였다. A_G 의 크기를 A_D 에 대한 비율 0.1~1.5의 범위에서 설정하여 α 를 산정한 결과는 **Table 4**에 요약하였으며, 예를 들어 A_D 면적 대비 50%를 녹지로 구성하는 경우 환산계수 α 는 0.6을 적용하게 된다.

다음 **Fig. 3**은 식 (7)에서 β 는 1.0으로 고정하고 녹지부지 환산계수 α 를 0.4~0.8범위에서 적용한 결과들과 기존 관계식과의 비교 결과를 함께 도기한 것이다. **Fig. 3(a)**에서 도기한 것과 같이 $\alpha=0.8$ (녹지비율: A_D 대비 100%, A 대비 50%)을 적용하는 경우 2011년 LH에서 제시한 관계식(식 (4))과 유사한 분포를 나타내며, **Fig. 3(c)**에 도기한 것과 같이 $\alpha=0.4$ (녹지비율: A_D 대비 10%, A 대비 9%)인 경우 녹지비율을 10% 정도에서 제한하는 일본의 관계식(식 (6))

Fig. 3. Application results of conversion factor α according to change of green site ratio.

과 유사한 결과를 보임을 알 수 있다.

3.2.2. 처리공법 환산계수 정의 및 효과 분석

본 연구에서는 하·폐수 처리공법에 따른 환산계수 β 의 도출을 위해 LH 단위의 표본 집단을 대상으로 처리공법 차

이에 따른 직접시설의 점용비율을 분석하였다. 그 결과 A2O공법 및 변법이 적용된 12개소에서 수처리 시설 및 건축이 차지하는 평균 면적은 MBR/SBR 공법이 적용된 21개소의 평균 면적과 비교해 48% 더 소요되는 것으로 분석되었다. 또한 최근의 환경부 조사결과¹⁾ A2O공법과 비교해 MBR/SBR공법을 적용하여 하·폐수처리장을 설계하는 경우 반응조의 크기 및 설치개수가 감소함에 따라 수처리 시설의 소요 면적을 약 50% 이상 절감할 수 있다고 보고하였다. 따라서 MBR/SBR의 공법을 적용하는 경우 처리시설의 집약화 효과로 인해 수처리 시설이 평균 50% 정도 감소함에 따라 녹지를 제외한 시설면적은 약 25% 감소되며 이러한 상관관계에 따라 녹지부지 환산계수를 재산정하면 **Table 5**와 같은 결과를 얻을 수 있다.

따라서 **Table 5**에 제시된 것과 같이 MBR/SBR공법이 적용되는 경우 녹지부지 환산 계수는 평균 25% 감소하게 되며, 이러한 감소 효과를 본 연구에서는 처리공법 환산계수 β 로 정의하였으며, 그 적용 범위는 집약화 수처리 공법을 MBR/SBR공법으로 한정하는 경우 0.75를 적용할 수 있다.

3.2.3. 처리용량-소요면적 관계식 최적화에 따른 효과 분석

본 연구에서는 추정된 소요면적과 실제 현장에서 요구되는 소요면적사이의 오차를 최적화(최소화)하기 위해 녹지부지 및 처리공법 환산계수를 포함하는 처리용량-소요면적 관계식 개발 방안을 적용하였다. 이에 본 연구에서 제안하는 최적화 방안이 기존의 하수처리장에 적용되는 경우 어느 정도의 소요 면적 절감효과가 있는지에 대한 정량적 평가 과정을 수행하였다. 검정 대상은 LH 단위의 표본 집단이며, 예상 소요 면적 절감효과의 정량화를 위해 처리용량에 따른 부지 원단위 개념인 ‘원단위 면적(m^2/m^3)’개념을 적용하였다. 즉 원단위 면적은 기존의 33개 처리장을 대상으로 설계 용량을 전체 소요 면적으로 나눈 값을 기준으로 도출하였다.

식 (7)에서 녹지부지 환산계수는 지역적 특수성을 고려하여 $\alpha = 0.8$ 을 기본값으로 적용하였으며, MBR/SBR 공법이 적용된 21개소 지점에 대해서는 처리공법 환산계수 $\beta = 0.75$ 를 기본값으로 적용하였다. 다음 **Fig. 4**은 33개 하수처리장의 실제 면적, 2011년 LH에서 개발한 소요면적 관계식(식 (4)) 및 본 연구에서 도출한 관계식으로 추정한 소요 면적을 원단위면적(m^2/m^3)으로 비교한 그래프이다.

Table 5. Derivation results of adjusted conversion factor α according to change of green site ratio.

Green site ratio		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5
α	Raw	0.44	0.48	0.52	0.56	0.60	0.64	0.68	0.72	0.76	0.80	1.0
	MBR/SBR	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.75

Table 6. Reduction rate of required unit-capacity area on conversion factor according to green site ratio.

α	Required unit-capacity area (m^2/m^3)	Reduction rate	
		vs. actual area	vs. LH (2011)
0.8	0.80	0.34	0.02
0.7	0.70	0.43	0.14
0.6	0.67	0.45	0.18
0.5	0.50	0.59	0.39
0.4	0.38	0.69	0.53

Fig. 4. Comparison of required capacity-unit area.

검정 집단에 대한 원단위면적을 평균값으로 비교하면, 실제 면적은 $1.22 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 으로 산정되며, LH 관계식(2011)으로 예측한 값은 $0.82 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 본 연구에서 도출한 관계식으로 예측한 값은 $0.8 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 으로 계산되어 진다. 즉 실제 면적 대비 34%, 기존 관계식 대비 약 3%의 원단위면적을 줄일 수 있을 것으로 기대한다. 상기의 비교는 녹지부지 점용비율을 전체 예상 소요면적 대비 50%로 가정하여 $\alpha = 0.8$ 을 적용한 결과이다. 이에 다음 Table 5는 녹지부지의 점용비율을 하·폐수처리장 총면적 대비 약 10%까지 감소시키는 경우 예상 소요 면적 절감 정도를 백분율로 정리한 것이다.

Table 6에서 나타난 바와 같이 녹지부지 환산계수 α 의 범위를 0.4 ~ 0.8로 적용함에 따라 추정된 예상 원단위면적은 실면적 대비 34 ~ 69%, 기존 LH (2011) 관계식 대비 2 ~ 53% 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

이에 본 연구에서는 최근 하수처리 시설의 분산화 및 소규모화 그리고 MBR/SBR과 같은 처리시설의 집약화가 가능한 공법들이 도입되는 추세를 고려하여 계획 및 설계 단계 시 적용 가능한 최적화된 처리용량-소요면적 관계식을

제안하였으며, 이러한 방법론을 적용하는 경우 실제 하·폐수처리시설의 예상 소요면적 절감효과를 정량적으로 평가한 결과 최대 약 50 ~ 60% 정도 줄일 수 있는 것($\alpha = 0.4$, $\beta = 0.75$)으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 그 동안 건설된 국내 하·폐수처리시설의 부지 면적, 시설물의 세부 점용비율 및 처리 공법 등을 대상으로 다양한 자료 통계분석을 통해 합리적인 소요면적 산정 방법론을 제시하고, 이러한 방법론을 적용하는 경우 실제 하·폐수처리시설의 예상 소요면적 절감효과를 정량적으로 평가하였다. 이에 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 본 연구에서는 분석 표본 집단 차이에 따른 처리용량(Q)-소요면적(A) 관계를 상호 비교하기 위해 국가하수도정보시스템에 수집된 654개소(지자체 단위) 및 한국토지주택공사(LH 단위)에서 건설한 33개소를 자료를 대상으로 각각의 관계식을 개발하였다. 그 결과 전국 단위의 표본 집단을

활용한 관계식들은 LH 단위의 표본 집단을 활용한 관계식들에 비해 상대적으로 높은 소요면적을 추정하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 LH 단위의 소요면적 관계식을 근간으로 합리적 소요면적 산정을 위한 최적화 방안을 도출하였다.

2) 500 m³/day 이상 하·폐수 고도처리 시설 33개를 대상으로 한 LH 단위 표본 집단들에 대해 소요면적을 각 기능별(수처리시설, 건축, 기타, 녹지)로 구분하고, 각 부지면적의 점용비율을 분석한 결과 수처리에 직접 관련이 없는 녹지 및 기타 시설이 각각 58%와 14%를 차지하는 것으로 나타났다. 수처리와 직접 연관이 있는 수처리시설 및 건축물이 각각 18%와 10%로 나타났다.

3) 그리고 수집된 표본 집단을 대상으로 처리용량-소요면적에 대한 기본 회귀모형을 개발한 후 하·폐수처리장의 녹지부지 점용비율 및 처리공법 집약화에 따른 예상 소요면적 감소 효과를 포함한 처리용량-소요면적 관계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$A = 15.638 \times Q^{0.7414} \times \alpha \times \beta$$

여기서 α 는 하·폐수처리장 내 녹지부지(녹지를 제외한 시설 면적의 10~150%)를 고려한 환산계수($\alpha = 0.44 \sim 1.0$)로 정의되며, β 는 처리공법에 따른 환산계수로서 MBR/SBR 공법 적용 시 0.75, A2O공법 및 관련 변법 적용 시에는 1.0을 적용하게 된다.

4) 최근 계획 및 설계단계의 하수처리 시설들은 분산화 및 소규모화 추세에 있으며, 도입되는 하수 고도처리 공법이 MBR/SBR과 같이 상대적으로 작은 소요면적을 필요로 하는 공법의 도입이 가속화되고 있음에 본 연구에서는 계획 및 설계 단계에서부터 적용 가능한 개선된 소요면적 관계식을 제안하였으며, 이러한 방법론을 적용하는 경우 기존의 관계식에 의해 추정된 예상 소요면적 대비 최대 약 50~60% 정도의 규모에서 소요면적을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국토지주택연구원 ‘하폐수처리시설 소요부지 독립변수 산정DB 구축’ 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Korea Water and Wastewater Association, Study on the feasibility study of intensification of sewage treatment plant, Ministry of Environment(2012).
2. KECO, The Public Sewerage Information System, <https://www.hasudoinfo.or.kr/>

3. R. Crites, G. Tchobanoglous, Small and Decentralized Wastewater Management System, 1st ed., Mc Graw-Hill Science, New York, USA(1998).
4. G. T. Daigger, Tools for future success, Water Environment and Technology, 15, 38-45(2003).
5. Ministry of Environment, Estimation of the amount of sewage generated in a housing complex and the cost of sewage treatment facilities(2001).
6. K. Kim, S. Kim, N. Park, Feasibility Study on introduction of decentralized water supply system for improving water security and sustainability, J. Korean Soc. Water Wastewater, 28(1), 111-124(2014).
7. Japan Sewage Works Association, Statistical Handbook of Japan(2011).
8. J. Lee, A study on improvement of required area of wastewater treatment plant, Land and Technology, 16, 202-216(2003).
9. Ministry of Environment, Guidelines for public sewer facility installation business, MOE(2011).
10. C. H. Kim, G. S. Kang, Regression Analysis, 2nd ed., Kyowooosa, Seoul, Korea(2010).

Authors

Donghyun Koo

Department of Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Master Course Candidate, ORCID[®] 0000-0002-6502-2804

No-Suk Park

Department of Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Professor, ORCID[®] 0000-0002-5396-1636

Jeong Ik Oh

Land & Housing Institute, Korea Land & Housing Corporation, Principal Research Engineer, ORCID[®] 0000-0001-5928-5619

Sukmin Yoon

Department of Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Research Professor, ORCID[®] 0000-0002-5304-1207