

BNR 하수처리 최적화를 위한 평가방법론 및 Comprehensive Performance Evaluation Evaluation Methodology and Comprehensive Performance Evaluation for Optimization of BNR Wastewater Treatment

신형수¹ · 장 덕^{2*} · 유동진²

Shin, Hyung-Soo¹ · Chang, Duk^{2*} · Ryu, Dong-Jin²

1 건국대학교 신기술융합학과, 2 건국대학교 환경공학과

(2009년7월21일 접수; 2009년8월3일 수정 ; 2009년8월5일 채택)

Abstract

A BNR comprehensive performance evaluation (BNR CPE) system was established employing system-oriented evaluation methodology for biological nutrient removal (BNR) processes based on the CPE techniques developed by U.S. EPA for evaluation of conventional biological processes. The BNR CPE system applied to five domestic BNR plants adopting A²/O process confirmed that all target plants except the smallest one had not any serious defective performance and process stability was enhanced with increasing plant size. The system also clearly verified relatively poor performances in anoxic reactors without exception mainly due to influent carbon limit rather than functional defect. Consistent good performances were confirmed even during both winter season and wet weather generally known to be difficult to achieve satisfactory removals. Presentation of evaluation results by modified radar chart system simplified and clarified the evaluation and analysis procedures. The BNR CPE system could not only discover readily the causes of present and prospective poor performances but also facilitate the suggestion of their optimization options. Mutual effect and cause-and-effect among operation parameters and unit processes were also found easily using the evaluation system. The system justified that the adverse effect of defective operating parameters could be compensated by other favorable parameters, especially in anaerobic and anoxic reactors as well as during the winter season.

Key words : BNR, CPE, process evaluation, system-oriented evaluation methodology, diagnosis

주제어 : 생물학적 영양염류제거, 종합성능평가, 공정평가, 시스템지향형 평가방법론, 시설진단

1. 서론

생물학적 영양염류제거 (Biological Nutrient Removal: BNR) 하수처리공정은 유입수 성상변화에 민감하고 운전인자간 상호관계도 복잡하여 최적화에는 여러 어려움이 따를 수 있다. 따라서 BNR 공정에서는 공정운전의 최적여부를

판단하는 성능평가가 필수적이며, 하수도법 제20조에 의거 매 5년마다 하수처리장에 대한 성능평가를 실시하고 있다. 그러나, 현재 하수처리장평가들은 대부분 전문가에 의존해서 결과를 도출하는 전문가의존형 (expert-dependent) 평가방법론을 사용하기 때문에 평가자의 주관이 개입되고 개인의 능력에 따라 평가의 질이 좌우되는 단점을 지닌다.

* Corresponding author Tel:+82-2-2201-6392, Fax:+82-2-2201-6392, E-mail: dchang@konkuk.ac.kr(Chang, D.)

또한, BNR공정은 재래식 공정 평가에 비해 훨씬 더 많은 인자에 대한 검토가 필요함에도 단지 처리효율이나 방류수 질 등만을 단순평가하는 블랙박스형 평가에 그치고 있어 공정의 취약점과 최적인전방안을 도출하는데는 큰 한계가 있기 때문에 새로운 평가방법론의 적용이 필요하다.

한편, U.S. EPA에서는 1970년대 초부터 CPE (Comprehensive Performance Evaluation)로 명명된 하수처리장 및 정수장에 대한 성능평가방법을 개발, 적용하여 처리장의 개조나 최적화에 이용해오고 있으며 (U.S. EPA, 1989; U.S. EPA, 2002), 국내에서도 이를 이용한 평가가 재래식 활성슬러지공정을 대상으로 우 등(2003)에 의하여 국내 최초로 시도된 바 있다. 그러나 U.S. EPA의 하수처리장대상 CPE는 BNR을 고려하지 않은 결정적인 한계성을 가지고 있고 유입수성상과 설계운전조건이 다른 미국처리장을 기준으로 하여, 더이상 현실적인 평가방법이 될 수 없으며 대대적인 추가, 보완이 필요하다. 새로운 평가연구의 일환으로 평가인자와 방법론에 대한 연구가 수행되고 있는데 (우 등, 2003; 장 등, 2004; 김 등, 2008; 강 등, 2009), 종합적 평가시스템으로서의 현장적용은 이루어지지 않고 있다. 현장에서 공정평가를 위해 많은 자료가 수집되더라도 평가시스템이 실용적으로 규격화되지 않으면 정확한 평가가 힘들다 (Olsson and Newell, 1999). 따라서 BNR 처리장의 정확한 평가를 위해서는 기존의 전문가의존형 평가방법론을 탈피하여 보다 객관적이고 신뢰성 있는 평가가 가능한 시스템지향형 (system-oriented) 평가방법론과 이를 기반으로 한 실용적인 종합성능평가시스템이 절실히 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는, U.S. EPA의 기존 CPE 평가방법론을 기반으로 질소인 제거까지 확장하여 고도처리공정 평가가 가능한 시스템지향형 평가방법론과 BNR Comprehensive Performance Evaluation (BNR CPE) 시스템 구축에 대하여 연구하고, 국내에서 운영중인 BNR 하수처리장을 대상으로 평가를 시도하였다.

2. 연구방법

BNR 공정을 대상으로 한 시스템지향형 평가방법론과 이를 기반으로 하는 종합성능평가시스템을 구축하기 위하여, BNR 평가관련 지식의 획득, 평가방법론 연구, 평가시스템 구축, 그리고 실시설 적용까지의 단계적인 과정을 체계적으로 수행하였다. 평가관련 지식을 획득하기 위해서 BNR관련 문헌조사와 하수처리장 현장조사, 기존 CPE 관련자료 및 정부기관의 기술진단 자료 조사, 정보공개청구를 통한 처리장 운전자료 조사 등을 통하여 자료를 수집, 분석함으로써

암묵지식(tacit knowledge)들을 문서화하여 형식지식(explicit knowledge)화하였고, 품질관리기법, 안전진단기법과 같은 타분야 평가기법들에 대한 분석을 통해 최적의 평가기법을 구현하기 위한 지식을 축적하였다. 또한 기존 CPE의 평가방법론을 분석하고 이를 기반으로 하여 BNR로 확장한 시스템 구축을 위해, 보다 객관화된 평가기준 수립을 위한 알고리즘을 포함한 평가방법론을 연구하였다. 구축된 알고리즘에 따라 평가인자(evaluation parameter)의 선정, 평가기준(evaluation standard)의 등급화(grading), 인자별 가중치(weight) 결정의 단계 등을 체계적으로 수행하여 객관화되고 규격화된 평가방식의 BNR CPE시스템을 구축하고자 하였다. 최종적으로, 구축된 평가시스템을 현장 하수처리장에 실제 적용하여 평가방법론과 시스템의 적용가능성, 평가의 편리성, 실용성, 평가결과의 타당성 및 정확성 등을 확인하고자 국내 BNR 하수처리장의 성능을 평가, 분석하였다.

3. BNR 하수처리 평가방법론

3.1 문제영역 정의

본 BNR 하수처리 평가방법론의 적용상 공정의 제한성은 없지만, 인방출과 인섭취, 탈질, 질산화로 이루어지는 전형적인 BNR 반응기작이 공간적 상분리방식을 통해 명확하게 구분될 수 있는 A^2/O 공정을 연구대상 문제영역으로 정의하였다. 또한 A^2/O 공정은 그 유사공정들과 더불어 국내에서 운영중인 고도하수처리시설 중 약 38%, 82개소에서 이르며, 시설용량기준으로는 약 77%, 8,025,000 m^3 /일에 달할 뿐 아니라 (환경부, 2007), 국내의 다양한 BNR공정들의 공통점을 포괄하고 있기 때문에 연구대상 문제영역으로 정의되기에 충분한 대표성을 지니고 있다고 판단된다.

3.2 평가시스템의 구조

본 연구의 BNR CPE는 Fig. 1에서와 같이 단위 시설평가 모듈과 평가도구 및 평가알고리즘으로 구성되어 있다. 기존 CPE(U.S. EPA, 1989)에서는 폭기조, 최종침전지, 슬러지 처리시설로 구분되어 있던 주단위시설의 평가중, 본 평가시스템에서는 반응조를 혐기, 무산소, 호기로 구분하고 단위시설별로 모듈화하였다. 또한, 인자별 평가기준 설정을 위한 등급화 및 가중치 결정절차는 객관화된 알고리즘에 따라 체계적으로 수행되고, 평가작업은 규격화된 평가도구인 point system과 standard table 등에 의하여 체계적으로 수행되도록 하였다.

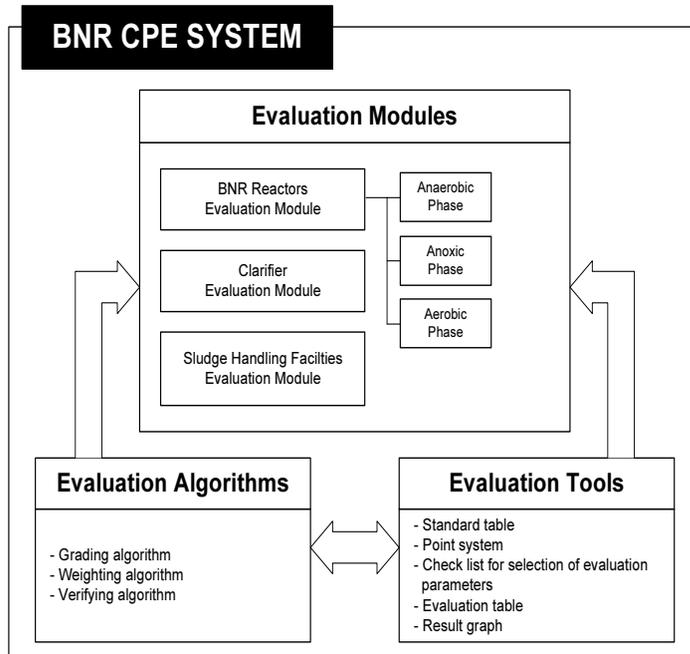


Fig. 1. Structure of BNR CPE.

3.3 평가도구

기존 CPE(U.S. EPA, 1989)의 평가는 점수화방법론인 point system과 이를 이용한 평가기준인 standard table 등의 평가도구를 이용하여 수행되는데, 본 연구에서도 이러한 평가도구개념을 기반으로 정량적인 평가방법을 구축하고자 하였다. 그러나 기존 CPE의 point system은 운전수치를 점수로 일대일 환산하기 때문에, 현장수치상의 작은 차이가 성능에 미치는 영향이 거의 없음에도 불구하고 평가상으로는 점수차가 존재하는 모순이 있었다. 또한, 별도의 가중치설정 없이 점수에 미리 반영하여 인자별 만점이 모두 상이하고 최종평가를 위해 각 시설들의 점수를 합산 후 다시 type에 따라 재분류해야 하는 단점이 존재했다. 이에 본 연구에서는 보다 객관성과 신뢰성을 높이기 위해 인자별 운전수치를 구간별 범위로 등급화하였고, 점수를 가중치와 따로 분리하여 인자별 만점을 일치시킴으로써 결과의 비교와 해석이 용이하도록 하였다. 이 경우, 기존 CPE에서의 운전수치별 일대일 점수화보다는 신뢰도가 높아지지만, 각 기준 경계상의 수치들간에 점수차가 불가피한 단점을 피할 수는 없는데, 평가기준의 등급화시 이를 최대한 고려하여 기준범위를 설정하여 평가오류가 최소화되도록 노력하였다.

본 BNR CPE의 점수화방법론인 point system의 배점방식은, 방류수수질기준(환경부, 2009)을 최소한 준수할 수 있거나 정상운전이 가능한 최소운전기준 범위에 대해 기준 점인 0점을 부여하였고, 그의 범위들을 최대 +5점에서 최소

-5점까지 2.5점 간격으로 5개 등급을 기준으로 구분하고, 양과 음의 값으로 점수를 구분하여 최소한의 정상운전 충족 여부를 쉽게 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 시설별 평가결과는 해당 평가인자들의 획득점수를 인자별 가중치를 고려한 가중평균의 개념을 이용하여 합산하도록 함으로써 인자별 영향도의 차이를 반영하도록 하였다. 반응조 평가모듈은 공정에서의 중요성을 고려하여 각 반응조별 점수의 합인 +15점을 만점으로 하였고, 전체 평가결과는 평가모듈별 점수를 합하여 최대 +25점, 최소 -25점으로 하였다. 본 평가시스템의 standard table은 상기 point system을 이용하여 평가인자별로 등급화된 평가기준을 설정하여 규격화한 것으로서 이로부터 현장운전수치들의 평가점수를 산출할 수 있다.

3.4 평가기준 수립 알고리즘

3.4.1 평가기준 등급화 알고리즘

평가는 평가기준의 범위를 어떻게 설정하고 배점화하는가에 따라 그 결과가 달라지며, 신뢰성있는 결과를 도출하기 위해서는 평가기준의 객관적 합리성, 적절성 등이 확보되어야 한다. 그러나, 기존 CPE(U.S. EPA, 1989; U.S. EPA, 2002)는 평가기준의 수립과 그 등급화에 대한 객관적 근거 제시가 모호한 채로 미국내에서 광범위하게 사용되어왔다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 Fig. 2와 같은 체계적인 평가기준 등급화 알고리즘을 구축하고 이에 따라 각 평가

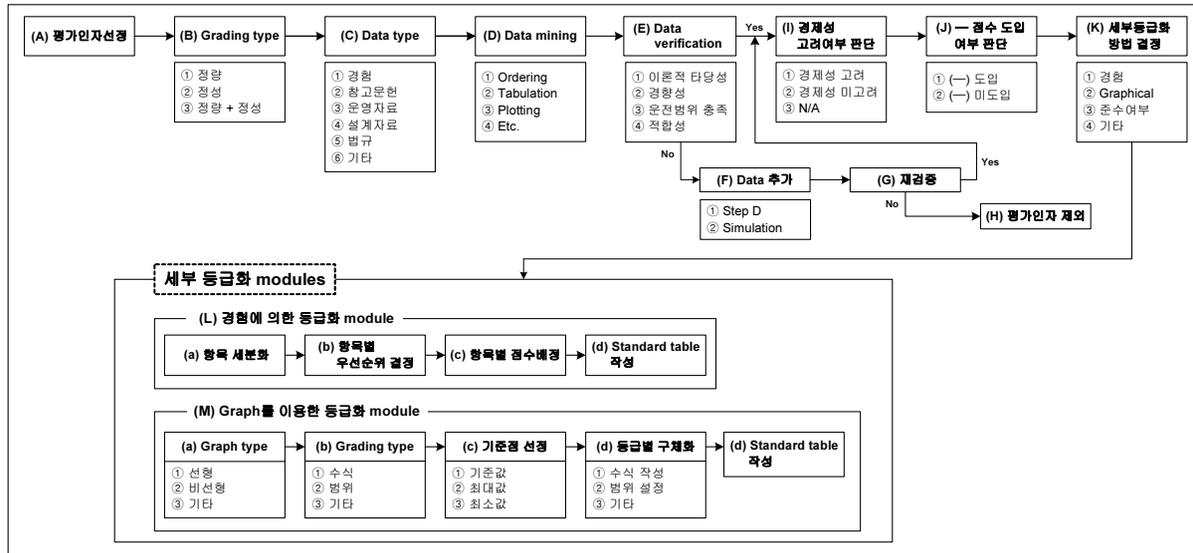


Fig. 2. Algorithm for grading of evaluation parameters.

인자별 등급화를 수행하였다. 평가기준은 공정별, 지역별, 시기별로 달라질 수 있어 장래 기준변화에 부응하기 위해서는 이러한 알고리즘의 구축이 실제 평가기준값 자체보다도 더 중요하다.

평가기준의 등급화는 해당 평가인자의 특성에 따라 등급화유형을 결정하는 것으로부터 시작한다. 정량적 등급화는 HRT와 같이 수치로 된 설계-운전자료를 일정기준에 따라 구간으로 나누어 등급화하는 것을 의미하며, 정성적 등급화는 시설형상이나 운전방법과 같은 수치로 표현하기 힘든 인자에 대한 것이다. 그 후 해당 인자의 등급화에 사용할 자료를 선정하는데, 자료형태는 연구나 운전경험상의 암묵지와 이를 문서화한 형식지로 구분되며, 형식지는 다시 참고문헌, 설계 및 운영자료, 법규 등으로 구분된다. 선정자료에 따라 평가의 신뢰도가 좌우되므로, 최대한 다양한 자료의 취합, 분석 및 합리적 선정이 필요하다. Data mining은 선정자료를 평가인자 특성에 따라 등급화가 가능하도록 가공하는 과정으로, 그 방법에는 data ordering, tabulation, plotting 등이 있으며 가공된 자료는 이론적 타당성, 경향성, 운전범위 충족여부 등에 대한 검증을 거치며 추가자료를 선정하거나 시뮬레이션에측 등을 추가할 수 있다. 검증자료는 과다설계 등의 경제성 고려와 음의 점수 적용여부 등을 판단한 후, 기준경험이나 그래프, 수질기준 준수여부에 따른 방법 등으로 구분하여 체계적인 등급화를 수행하도록 알고리즘을 구성하였다.

3.4.2 인자별 가중치 설정 알고리즘

BNR공정은 특히 운전인자가 성능에 미치는 영향 정도가 크게 상이하기 때문에 이를 보완해주기 위해서는 각 인자별 중요도, 즉 가중치를 고려해야 한다. 그러나 소수 전문가에 의한 단순한 가중치 결정은 의사결정요소의 비중분석과 인자상호관계의 체계적이고 충분한 검토과정 없이 지나치게 단순화된 직관에 의한 결론에 도달할 수 있으며 전문가마다 의견이 크게 다를 문제점을 내포하고 있다. 이에 본 연구에서는 평가인자별로 가중치를 부여할 때 사회통계학적 분석 기법인 AHP (Analytic Hierarchy Process; 계층화분석) 기법을 이용하여 이러한 오류를 최소화하고자 하였다. AHP 기법은 의사결정의 목표 또는 평가기준이 다수로 복잡한 경우 상호 배반적인 대안들의 체계적 평가를 지원하는 의사결정지원기법의 하나로 다양한 분야에서의 가중치설정에 이용되고 있다 (안, 2005). 그 특징으로는 복잡한 문제를 계층화하여 주요요인과 세부요인들로 분해하고 각 요인들 간의 중요도비교를 통해 가중치를 도출하는 데 있으므로, 인자별 관계가 복잡한 BNR공정에 매우 효과적이라고 판단된다.

AHP기법에 의한 가중치설정 주요과정은, 인자설정후 모든 인자에 대해 두 인자씩 중요도를 비교하는 쌍대비교를 전문가집단을 대상으로 한 설문조사를 통해 상대적 중요도를 결정한 후, 비교행렬식형태로 통합한 후 상대적 가중치를 추정한다 (조 등, 2007). 이때, 설문결과의 논리적 일관성 유지여부를 확인하고 의사결정의 합리성과 타당성을 높이기 위해 AHP기법의 장점중 하나인 일관성비율을 산정하여

설문결과의 재검토여부를 결정한다. 설문결과의 통합을 위해서는 권 등(2006)의 방법론에 따라 응답치들을 종합, 하나의 입력행렬을 산출하는 기하평균법을 이용, 각 설문조사 결과를 통합하고, 각 인자들의 조사결과를 비교행렬의 고유벡터법을 활용한 엑셀프로그램을 이용하여 추정된 가중치의 이론적 타당성, 적정성 등을 판단하는 피드백과정을 거쳐 최종가중치를 산정한다.

4. BNR 하수처리 평가시스템의 구축

4.1 평가인자의 선정

BNR 하수처리의 경우 공정과 운전방법이 다양하고 공정별 제거기작에 따른 운전인자에 차이가 있기 때문에 지나치게 획일, 단순화 또는 복잡화된 평가인자의 적용은 평가오류를 가져올 수 있다. 본 연구에서는 기존 BNR 연구와 현장운전경험 등의 축적된 지식을 바탕으로 한 체크리스트 기법과 각종 이론 및 경험 식 등을 활용하고, 시설별 제거기작, 인자의 보편성과 현장자료획득 용이성, 타인자들과의 상대성 및 중복성 등을 고려하여 평가인자를 선정하였다. 특히, 기존 CPE(U.S. EPA, 1989)는 총 10개의 설계운전인자들만을 대상으로 하여왔고 유출수질도 제외되었으나, 본 연구에서는 원인이 되는 input 인자(운전조건중심)뿐 아니라 그에 따른 결과인 output 인자(방류수질중심)로 구분하여 총 27개의 평가인자를 선정하여 적용함으로써, 평가결과 해석시 BNR 고유의 복합적 문제의 원인을 정확하게 추적할 수 있을 뿐만 아니라 운전조건은 양호하지만 유출수질이 나쁜 경우에도 성능이 우수하게 평가되는 기존 CPE의 오류를 최대한 방지하고자 하였다. Input 인자의 선정은 가능한 한 독립변수를 우선으로 하였다. A²/O공법을 문제영역으로 설정한 단위 시설모듈별 input 및 output 평가인자들은 **Table 1**에서와 같다.

반응조 평가모듈의 평가인자중, 현재 현장처리장의 정례 측정항목에서 제외되어 평가용으로 획득이 불가능한 호기조 암모니아농도와 일부 반응조의 DO 및 NO_x중, 암모니아는 반영할 수가 없었고 그외는 이론식에 의해 추정하였다. 유입 C/N 및 C/P 비는 일차침전지 유출수의 값이며, 수온은 호기조의 평가인자로만 선정하여 중복평가를 피하였고, 최종침전지 방류수의 BOD, TN, TP를 각 반응조별 output 인자로 선정하였다. 기존 CPE(U.S. EPA, 1989)에서 BOD 부하기준으로 이론적 공기공급량의 적절성을 평가하던 oxygen availability는 BNR공정에 맞도록 TKN부하에 따른 호기조 공기공급량 평가로 수정하였고 (WEF, 2005), 공기공급량의 종속인자인 호기조 MLDO를 output 인자로

Table 1. Evaluation parameters and weights for BNR CPE (A²/O process)

Module	Evaluation parameters	Weight
Anaerobic	HRT	1.5
	DO _{in} (estimated)	0.9
	NO _{x, in} (estimated)	0.7
	Influent C/P ratio	0.9
	Final effluent TP ●	3.0
Anoxic	HRT	1.4
	DO _{in} (estimated)	0.9
	Internal recycle ratio	1.0
	Influent C/N ratio	1.2
	Final effluent TN ●	3.0
Aerobic	HRT	1.2
	MLDO ●	1.2
	Oxygen availability	1.3
	MLSS	1.3
	pH	0.6
	Water temp.	1.3
	Final effluent BOD ●	3.0
Final clarifier	Surface overflow rate (SOR)	3.0
	Depth of weir	2.0
	Solids loading rate (SLR)	3.0
	Sludge volume index (SVI) ●	2.0
	Final effluent SS ●	3.0
	Configuration	2.0
	Return sludge removal	2.0
Sludge handling facility	Return activated sludge control	2.0
	Controllability	1.0
	Capability	5.0

● output parameters

선정하였다. 한편, SRT는 기존 CPE에서도 평가인자로 사용치 않고 있는데, 현재의 현장운전자료상의 신뢰도가 높지 않았을 뿐만 아니라 등급화를 위한 현장자료분석 결과 질소, 인 제거성능에 미치는 어떠한 일관된 경향도 파악할 수 없어서 일단 평가인자에서 제외하였고, 대신 SRT의 종속인자인 MLSS를 평가인자로 선정하여 SRT의 부재를 보완하고자 하였다. 최종침전지와 슬러지처리시설 모듈의 인자는 기존 CPE의 인자들을 대부분 이용하였으나 여기서 누락된 최종 침전지의 고형물부하율과 output 인자로서의 SVI 및 방류수 SS를 추가함으로써 보다 정확한 평가를 도모하였다.

4.2 평가기준의 등급화 및 standard table

평가기준을 등급화하는 과정, 즉 평가의 기준이 될 범위를 구분하고 point system을 이용하여 배점화하는 작업은 평가의 신뢰도와 직결되는 단계이다. 대부분의 평가에서 그렇듯이 평가기준을 구분하고 객관적으로 점수화하는 데는 한계와 논란의 여지가 많은 것이 사실이다. 그러나, BNR 공정을 평가하는데 있어서 절대적인 평가기준은 존재하지 않더라도 합리적인 근거와 절차에 기반한 등급화작업을 통해 각 기준사이의 상대성은 충분히 확보 가능하며, 이러한 상대적 객관화 과정을 거쳐 기준이 설정된다면 기존의 평가방법들보다 우위에 있다고 할 수 있는데, 기존 CPE(U.S. EPA, 1989; U.S. EPA, 2002)는 평가기준의 설정근거를 알기 힘든 실정이다. 이러한 배경하에, 본 BNR CPE에서는 평가기준 등급화 알고리즘(Fig. 2)에 따라 체계적으로 등급화작업을 수행하여 최대한 객관화에 노력하였다. 등급화는 현장 운전자료 분석결과를 바탕으로 다양한 문헌상의 연구결과, 기준들을 함께 비교, 검토하여 종합적으로 수행되었는데, 현장자료로는 A²/O 공정으로 운전 중인 4개 국내 하수처리장의 2년간의 일평균자료들을 사용하였다. 등급화작업은 Table 1에서 제시한 모든 평가인자를 대상으로 수행하여 그 과정과 근거자료가 방대하기 때문에, 그 대표적인 예로서 혐기조 HRT의 등급화를 설명하면 다음과 같다.

혐기조의 HRT가 부족한 경우 반응조유입수내 DO와 NO_x에 의한 저해와 더불어 유기물분해시간 부족으로 충분한 인 방출이 곤란할 수 있다(Randall *et al.*, 1992). 따라서, 혐기조에서의 HRT를 일정이상 유지하여 반응조유입수내 DO와 NO_x를 소비시키고 유기물이 VFA로 최대한 전환될 수 있도록 하는 것이 유리하며, 이는 본 연구에서 국내 현장자료를

이용하여 혐기조 HRT가 인제거효율 및 방류수 인농도에 미치는 영향을 알아본 Fig. 3에서도 그 경향을 확인할 수 있었다. 이와 함께 혐기조 HRT의 최소치는 0.5시간이라는 연구결과(Randall *et al.*, 1992)와 전형적 A²/O 공정의 혐기조 HRT 설계기준이 0.5~1.5시간(WEF, 2005)인 점을 종합적으로 고려하여, 0.5시간이하에 대해서 point system의 최저점인 -5점을 부여하였다. 문헌에 따른 등급화가 곤란한 0.5~2시간이하에 대해서는 현장분석자료를 이용하되 Fig. 2에서의 세부등급화 알고리즘중 그래프를 이용한 방법에 따라 Fig. 3에서와 같이 경향을 분석하여 0.5시간씩의 구간으로 나누어 점수를 부여하였다. Fig. 3에서 0.5~1시간 이하의 비교적 짧은 HRT에서도 방류수 인농도가 방류수기준을 대부분 준수하고 있음을 고려하여 그 범위는 point system의 정상운영 최소기준인 0점을 부여하였고, 그 이상에서는 인제거효율이 높아지는 경향을 보였기 때문에 구간별로 한단계씩 높은 점수를 부여하고, 대부분 문헌상의 최적치인 1.5~2시간에서 최고점인 5점이 되도록 하였다. HRT가 2시간을 넘는 경우에는, Fig. 3에서와 같이 오히려 인제거효율이 낮아지는 현장자료 분석결과를 우선으로 하고 90분이상만 유지해도 충분하다는 문헌(Randall *et al.*, 1992)을 참고하여 2시간을 초과하는 경우 과다설계된 것으로 판단, 점수를 한 단계씩 낮게 정하였다. 또한, 3시간을 초과하는 경우에는 제거효율이 악화될 수 있다는 연구(Stephens and Stensel, 1998)에 따라 최저점인 -5점을 부여하여 시설과다에 따른 비효율성 및 효율의 악화가능성이 평가에 반영될 수 있도록 하였다. 이와 같이, 과다설계에 대한 고려가 없다고 지적되었던 기존 CPE의 단점(우 등, 2003)도 동시에 보완하고자 하였다.

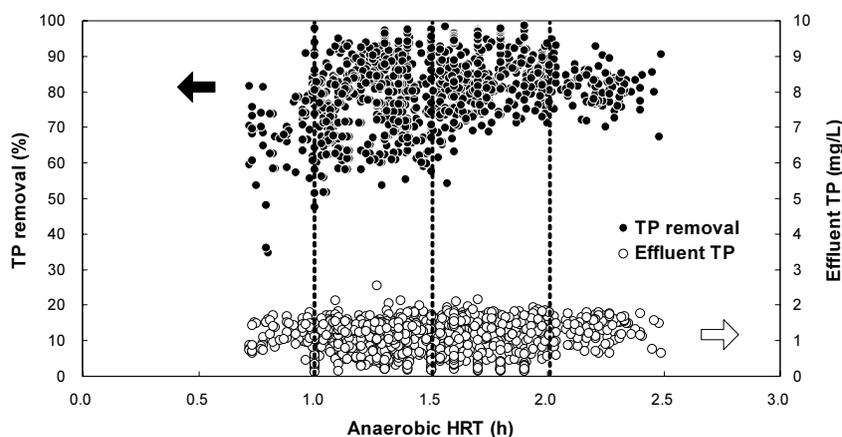


Fig. 3. Grading of anaerobic HRT using graphical method.

이러한 일련의 과정을 거쳐 혐기조 HRT 하나에 대한 정량적인 평가기준을 수립한 후, **Table 2**에서 그 체계의 일부가 제시된 규격화된 평가도구인 standard table (평가기준표) 작성에 반영하였다. **Table 1**의 나머지 26개의 평가인자들에 대하여서도 위의 등급화과정에 준하는 방법으로 각각 **Fig. 2**에서의 적합한 알고리즘에 따라 평가인자별 평가기준을 수립하여 **Table 2**와 동일한 형식으로 각각의 standard table을 작성할 수 있었다. Standard table은 기존 CPE의 형식을 본 평가시스템의 각 평가모듈에 맞게 수정한 것이다. 한편, 평가기준중 특별한 경우인 방류수수질기준은 하수도법(환경부 2009) 특별대책지역 기준에 따랐고 법적기준치를 0점, 그 50%이하를 최고점인 5점, 25%이상 초과시 최저점인 -5점으로 하고 구간별로 등급화하였다.

4.3 평가인자별 가중치 설정

각 평가인자가 공정성능에 미치는 상대적 영향의 정도를 나타내는 가중치는 해당인자들이 속하는 시설별로 성능평가점수를 가중평균으로 산출할 때 이용된다. 가중치 결정은

Table 2. Standard table for BNR CPE (example of anaerobic reactor).

Standard Table for BNR CPE	
1. Reactor	
Current Operating Condition	Points
Anaerobic	
Hydraulic Retention Time, h	Weight: 1.5
> 30	-5
above 25 ~ 30	0
above 20 ~ 25	2.5
above 15 ~ 20	5
above 1.0 ~ 1.5	2.5
above 0.5 ~ 1.0	0
≤ 0.5	-5
Influent C/P ratio (BOD/TP)	Weight: 0.9
> 30	5
above 25 ~ 30	2.5
above 20 ~ 25	0
above 15 ~ 20	-2.5
≤ 15	-5
Final effluent TP, mg/L	Weight: 3.0
≤ 1.0	5
above 1.0 ~ 1.5	2.5
above 1.5 ~ 2.0	0
above 2.0 ~ 2.5	-2.5
> 2.5	-5

- 이하생략 -

AHP기법에 기반한 알고리즘(3.4.2절)에 따라 수행하였다. 각 평가인자들간의 쌍대비교를 위해 **Table 1**의 모든 인자들간의 각각의 중요도에 대한 설문조사지를 작성, 전문가들을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 조사결과의 일관성비율을 산출한 결과 0.03으로서 논리적 일관성유지 기준인 0.1 이하(고 및 이, 2001)를 만족함을 확인한 후 AHP기법에 따라 **Table 1**에서와 같이 각 시설별로 평가인자별 상대적 가중치를 결정하였다. 한편, 기존 CPE의 평가인자들을 거의 대부분 이용한 침전지와 슬러지처리시설의 경우 기존 CPE의 point system이 가중치를 이미 포함하고 있음에 착안하여 그 해당 점수들을 미국 설계기준과 비교, 분석하여 각 평가인자별 가중치를 역으로 도출하여 사용하였다.

5. 국내 BNR 하수처리장의 종합성능평가

5.1 평가대상 하수처리장

본 연구에서 개발한 시스템지향형 평가방법론과 이에 기반한 BNR CPE 시스템의 실시설 적용성을 판단하기 위하여 본 연구의 문제영역으로 정의된 A²/O공법으로 운전중인 5개 하수처리장(A~E)을 대상으로 평가를 수행하였다. 대상처리장들은 합류식배제(E처리) 지역의 처리용량 40,000~680,000m³/d인 BNR시설들(용량 및 건설년도: **Table 3** 참조)로, 각 처리장별 24개월(E처리장은 2개월)간의 운영자료중 기존 CPE의 평가방법론(U.S. EPA, 1989)에 따라 각 월평균자료들을 이용하였고, 운영자료에서 획득 불가능한 일부 항목들에 대해서는 해당 설계보고서 및 환경부자료(환경부, 2007) 등을 참고하였다.

5.2 성능평가 결과 및 분석

5.2.1 단위모듈별 성능평가

(1) Reactor evaluation module

본 BNR CPE시스템에서 생물반응조 성능평가모듈(reactor evaluation module)은 혐기, 무산소, 호기 반응조로 구분되고, 각 반응조의 평가인자별로 standard table에 의거하여 평가가 수행되었다. 그 평가결과를 종합하여 **Fig. 4**와 같이 방사형그래프(radar chart)로 나타내어, 많은 인자들간의 상대적 점수차이를 동시에 신속하게 파악하여 한 처리장의 상황을 일목요연하게 표현할 뿐 아니라 대상처리장들을 동시에 용이하게 비교하고자 하였다. 특히 최종침전지 방류수 수질 등 output(결과) 인자 점수를 중심으로 그에 영향을 미치는 각 반응조의 input(원인) 인자 점수들을 표시, 비교하도록 하여 output 인자의 문제원인을 낮은 점수의 input 영향인자로부터 쉽게 구분, 도출할 수 있도록 하였다. 그래프상의 점수들은 월별평가점수들의 평균값을 나타낸 것이다.

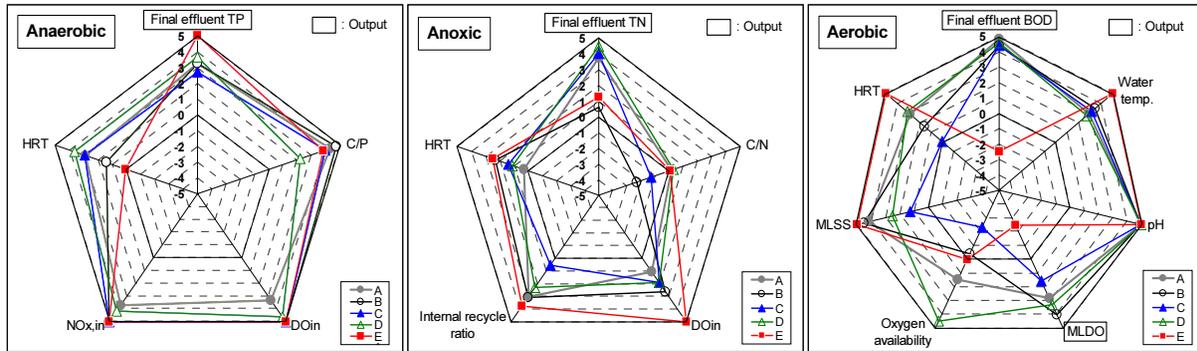


Fig. 4. Performance evaluation of BNR reactors.

우선, Fig. 4의 험기조 평가를 살펴보면, 평가인자들 점수가 대상처리장들간 차이는 존재하나 모두 정상적 인체거가 가능한 최소기준인 0점 이상임을 보여주고 있다. 화학적 인체거를 병행한 E처리장을 제외한 처리장들에서는, output 인자인 최종침전지 유출수 TP 인자의 점수가 정상적 인체거 성능을 나타내는 동시에 처리장간 점수차가 크지 않은 반면에 input 인자인 운전조건들에서는 큰 점수차가 있음을 알 수 있다. 그런데 각 처리장별 그래프에서 하나의 input 인자 점수가 낮으면 다른 인자들의 점수가 높아 성능을 보완해주는 현상, 즉 운전인자간의 상호보완 또는 약영향상해 효과를 발견할 수 있다. 대표적으로, D처리장의 경우 반응조유입수 C/P비가 타처리장에 비하여 가장 낮은 점수를 나타내고 있으나 그 외 인자들은 양호하고 특히 HRT 점수는 가장 높았으며, 반대로 B 및 E 처리장은 HRT 점수가 가장 낮으나 C/P비 등 타 인자들 점수는 가장 높은 수준이어서, 방류수 TP는 모두 유사하게 유지될 수 있었던 것으로 판단할 수 있다. 한편, 반송슬러지의 전달질을 채택한 B, C 처리장에서 그로 인한 인체거시의 상대적 장점은 특별히 관찰되지는 않았다. 현재로서는 모든 처리장에서 험기조의 최적화를 위한 특별한 조치는 필요없다고 평가되나 E처리장의 경우 험기조 HRT가 최소수준(0점)이므로 차후 증설 필요성은 있다. 이와 같이 방사형그래프를 사용함으로써 영향인자중 취약점을 신속하게 파악 가능할 뿐 아니라, 기존 평가방식으로는 찾아내기 힘든 상호보완효과 등 인자들의 복합적 영향을 용이하게 찾아낼 수 있었다.

Fig. 4의 무산소조 평가에서는, 모든 처리장에서 반응조 유입수 C/N비 인자 점수가 정상운전이 가능한 최소기준인 0점 (BOD/TKN비로서 3~4) 부근 또는 그 미만(B 및 C)으로 충분치는 않음에도 불구하고, 최종방류수 TN농도 점수는 모두 수질기준을 만족하는 것으로 평가되었고 A, C, D 처리장은 매우 양호하였다. 이는 험기조평가에서와 같이 타 운전인자들의 상호보완적 작용에 일부 기인할 수도 있으며,

B 및 C처리장의 경우는 반송슬러지의 전달질 효과도 포함된다. 또한 요구 C/N비는 SRT에 따라 달라질 수 있는데 (Randall *et al.*, 1992) 운영자료상의 SRT의 신뢰도가 낮았고 현장자료분석상 성능에 미치는 일관된 경향도 파악할 수 없었으며, U.S. EPA의 CPE에서도 SRT를 평가인자에 포함시키지 않고 있다. 비록 방류수기준을 만족하더라도 평가인자점수가 최소기준인 0점 부근인 시설은 그 최적화방안을 검토하여야 한다. 최적화가 쉽지 않은 유입수질을 제외하고 시설의 증설, 보강 뿐 아니라 운전인자 및 시설간 상호영향을 감안한 운전방식의 최적화도 검토할 필요가 있다. 또한 최적화를 위해 모든 input 인자 특히 시설용량관련 항목들이 만점을 받아야만 하는 것은 아니라 생각된다. 이러한 관점에서 탈질성능이 상대적으로 낮은 B 및 E 처리장 무산소조 평가결과를 살펴보면, B처리장은 근본적인 C/N비 증가대책 마련외에는 무산소조 최적화를 위한 특별한 조작인자의 변경대안이 없으며, E처리장의 무산소조는 상대적 운전조건은 오히려 가장 양호하다는 면에서 질산화를 위한 호기조 및 방류수질을 최종결정하는 침전지의 최적화 필요가능성이 있음을 알 수 있다.

호기조 평가에서는, 타 반응조에 비해 input 인자들의 처리장간 점수차가 매우 컸다. Input 인자중 이론적 oxygen availability의 처리장간 점수차가 가장 두드러졌는데, 이는 실제 유입질소량에 비해 이론상 산소공급량 즉 설계상의 송풍시설 용량 및 산기설비의 차이가 크다는 것을 의미하는 것이다. Fig. 4에서와 같이 이 인자와 실측된 MLDO와의 상관성이 없을 뿐 아니라 C처리장의 그 점수는 음이었음에도 MLDO점수는 양호한 것으로 보아 기존 CPE(U.S. EPA, 1989)에서 사용하는 oxygen availability보다 MLDO가 보다 직접적 의미가 있는 평가지표라 판단되었다. HRT 및 MLSS는 처리장간 점수차가 크에도 불구하고 모든 처리장에서 정상운전이 가능한 최소기준인 0점을 상회하였다. 단지, E처리장에서 output 인자인 MLDO(농도로서 평균

0.7mg/L)와 유출수 BOD(NOD포함농도로서 평균11mg/L) 점수가 음으로 낮게 나와 상대적으로 질산화가 충분치 못할 가능성이 높아 최적운전을 위해서는 공기공급시설의 개선 검토가 필요할 것이다. 한편, A²/O공법에서는 질산화 및 인 섭취를 수행하는 호기조의 성능은 슬러지가 반응되는 혐기조와 혼합액이 내부순환되는 무산소조의 성능에 영향을 주게 된다. 이러한 관점에서 세 반응조간의 상호영향을 Fig. 4를 이용하여 살펴보면, E처리장의 경우 처리장중 가장 낮은 호기조의 성능점수가 무산소조 평가에서 방류수 TN 점수만이 낮았던 점을 설명하여 주며, 호기조의 점수가 두 번째로 낮은 C처리장의 경우 혐기조에서는 input 인자들 점수는 양호한데도 불구하고 최종방류수 TP의 점수가 상대적으로 낮게 나온 이유가 상대적으로 성능이 낮은 호기조에서 인섭취도 상대적으로 낮았기 때문이라는 반응조건 인과관계를 쉽게 찾아낼 수 있다. C처리장의 최적화를 위해서는 호기조의 용량 증가는 현실성이 없다하더라도 MLSS 및 MLDO를 증가시킬 필요가 있음을 Fig. 4를 통하여 알 수 있다.

(2) Clarifier evaluation module

BNR 시스템의 최종처리시설로서의 최종침전지의 성능 저하는 각 반응조들의 성능이 우수하다 하더라도 최종방류수수질 악화로 직결된다. 따라서, 최근에는 모래여과지 등의 부속시설을 침전지 후단에 설치하는 경우가 증가하고 있으나, 본 평가시스템에서는 최종침전지까지만을 문제영역에 포함시켜 평가하였다. 최종침전지 평가모듈(clarifier evaluation module)에 대한 평가결과를 종합하면 Fig. 5와 같다.

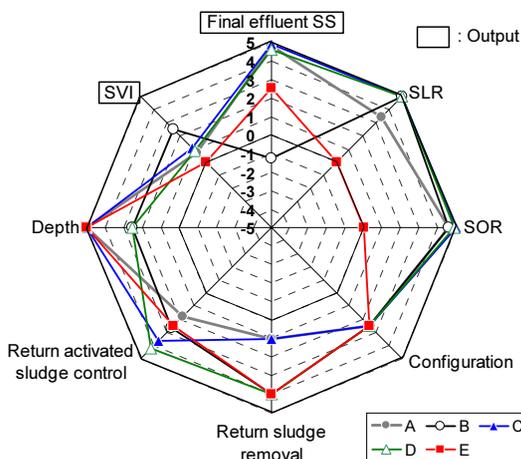


Fig. 5. Performance evaluation of final clarifier.

모든 처리장에서 input 인자들의 점수는 모두 정상운전의 최소기준(0점)이상이었으나, 침전지형상 점수를 제외하고는 처리장간에 차이를 보이고 있다. Output 인자인 방류수 SS와 SVI의 경우는, B하수처리장의 SS 점수를 제외하고는 모두 최소기준(0점)이상이었다. 소규모인 B와 E 처리장의 방류수 SS 점수가 다른 처리장에 비해 낮았는데, E처리장의 경우는, 방류수 SS농도가 수질기준을 만족하고는 있으나 침전지에의 부하를 평가하는 SOR과 SLR 인자가 모두 최소기준(0점) 수준으로 다른 처리장에 비해서는 낮은 점수로서 MLSS가 적정수준임을 감안할 때 침전지용량에 여유가 없으므로 차후 침전지의 증설 또는 여과등 후속시설을 보강할 필요가 있는 것으로 판단된다. B처리장의 경우, SOR, SLR 및 SVI 등이 매우 양호함에도 불구하고 대상처리장중 유일하게 방류수 SS 인자 점수가 음의 값(농도로서 범위 7~11.7, 평균 10.1 mgSS/L)인데, 이는 시설상의 문제라기 보다 평가인자화가 곤란한 슬러지블랭킷 높이 유지문제 등 부적절한 현장 침전지 유지관리방식에 기인하는 것으로 보여 이에 대한 재검토가 요구된다 하겠다. 또한, 평가인자에는 포함되지 않은 유입용량의 시설처리용량대비 비율 및 그 변동을 B처리장에 대해 살펴본 결과, 2년간 평균유입용량이 시설용량의 96%에 이르고 용량변동율이 평균용량대비 최대, 최소의 차가 43%로서 대상 처리장중 가장 심하였으며 용량이 시설용량을 상회하는 경우가 유일하게 발생하고 있었다. 따라서 조만간 소규모 B처리장의 운전이 어려움이 예상되며, 차후 유입용량 변동을 평가인자로 고려해야할 필요성도 시사하고 있다. 한편, Fig 4에서의 무산소조 평가중 B처리장의 방류수 TN 점수가 처리장중 가장 낮았던 이유가 가장 낮은 C/N비와 아울러 가장 낮은 방류수 SS 점수에도 기인할 수 있음을 Fig 5와의 비교를 통하여 알 수 있다.

(3) Sludge handling facility evaluation module

슬러지 처리시설 모듈(Sludge handling facility evaluation module)의 평가는 기존 CPE의 방법론(U.S. EPA, 1989)에 그대로 따라 controllability(제어성)와 capability(처리용량)의 두항목에 대한 평가를 실시하였다. Controllability의 경우 평가대상처리장 모두가 자동화 설비를 사용하기 때문에 평가점수가 같았으며, capability 점수에 의해서 슬러지처리시설의 평가결과가 지배되었다. E하수처리장을 제외한 모든 처리장의 슬러지처리능력이 +5점만점중 +3.3~4.6점 즉, 발생슬러지를 100~125% 처리가능한 수준으로 운영되고 있었다. E처리장은 발생량에 비해 처리용량이 50%이상 부족하여 처리시설의 부하가 매우 커서 확충이나 처리법변경 등의 시설개선이 시급히 요구되었다.

5.2.2 대상 처리장별 종합성능평가

평가대상 5개 하수처리장에 대한 BNR 종합성능평가 결과를 요약, 종합하면 **Table 3**과 같다. 각 처리장의 모듈별 평가점수와 처리장 평가점수를 종합하였으며, 각 모듈별 평가점수는 모듈내 각 평가인자 평균점수들에 가중치(**Table 1**)를 반영한 가중평균치이다. 5개 처리장중 D처리장의 성능이 평가총점 만점 +25점중 +18.6점(87점/100점 : -25 ~ +25점 기준)으로 가장 우수한 반면, E처리장은 +5.4점(61점/100점)으로 매우 큰 성능차이를 보였으며, 종합순위는 처리장 D, C, A, B, E 순이었다. 종합성능이 가장 우수한 D처리장은 세가지 평가모듈 즉 반응조, 침전지 및 슬러지처리시설 점수도 모두 가장 높았으며, E처리장은 모든 모듈의 점수가 최하위였고 그 슬러지처리시설은 본 연구에서 유일하게 음의 평가를 받았다. 그 외 A, C 처리장은 모든 성능상에 큰 문제가 없다고 평가된다. 모든 처리장의 침전지 및 슬러지처리 모듈별 평가 순위도 각각 종합순위와 예외없이 일치하여 그 시설들이 처리장 전체평가에 큰 영향을 끼침을 알 수 있다. **Table 3**의 종합평가와 아울러 **Fig. 4** 및 **5**의 세부평가를 종합하여 볼 때, B, E 처리장이외의 처리장들의 성능은 양호하다고 평가된다.

또한, **Table 3**의 평가결과에서 주목할 점 중의 하나는 시설처리용량 순위가 BNR CPE의 총점과 침전지 및 슬러지처리시설 점수 순위들과 완전히 일치한다는 것이며 이는 처리장 규모가 클수록 안정적인 처리성능을 확보할 수 있다는 것을 의미하고 있다. 즉, 처리장의 규모가 클수록 부하변동이나 다른 외부환경의 변화에 덜 민감하게 반응하는데, 가장 대규모인 D처리장의 경우 2년간 월별평가결과의 최소와 최대 점수차이가 4.1점인데 반해 소규모 B처리장의 경우 그 값이 6.6점인 것에서도 확인할 수 있었다.

한편, **Table 3**으로부터 처리장의 상대적 취약시설을 쉽게 찾아낼 수 있고, 그 주원인은 앞의 **Fig. 4** 및 **5**의 방사그래프로부터 추정할 수 있다. 우선 모든 처리장을 대상으로 보면, 평가대상시설중 무산소조가 예외없이 상대적으로 평가점수

가 가장 낮음이 두드러지는데, 그 이유는 **Fig. 4**의 무산소조 평가 토의에서와 같이 시설부족이라기 보다 모든 처리장의 충분치 않은 유입수 C/N비에 주로 기인함을 알 수 있다. 한편, 모든 처리장의 혐기조 평가점수는 양호한 수준에서 거의 유사하였다.

각 처리장별로 살펴보면, D 및 A 처리장은 모든 처리장에서 공통적으로 낮은 평가를 받은 무산소조를 제외하고는 모듈별 및 전체 성능상 큰 문제가 없다고 평가될 뿐 아니라, 모든 시설의 평가점수를 만점에 가깝게 하는 것이 최적화의 목표는 아니며 특히 시설용량 증대와 C/N비의 증가가 현실적으로 쉽게 해결하기 힘든 문제임을 고려할 때, D 및 A 처리장은 주어진 조건하에서는 최적화되어 운전되고 있다고 평가된다. C처리장도 A처리장과 전반적으로 유사하여 큰 문제는 없으나 호기조의 성능이 다소 부족하여 **Fig. 4**의 호기조평가 토의에서 살펴본 바와 같이 그 최적화를 위해서는 MLSS 및 MLDO를 증가시킬 필요가 있다. B처리장은 무산소조가 상당히 취약한 것으로 평가되었는데 이는 **Fig. 4**의 무산소조평가에서와 같이 가장 낮은 C/N비에 주로 기인하고 있는 것이며, 침전지성능은 타처리장에 비해 상대적으로 취약하다고 평가되었고 **Fig. 5**의 침전지평가에서 살펴본 바와 같이 현장 침전지 유지관리상의 최적화가 필요할 것이다. 따라서, B, C 처리장은 현실적으로 힘든 시설용량 증대나 C/N비 증가 없이도 상기 운영관리의 최적화라도 성능향상이 가능할 것으로 판단된다. 최하위로 평가된 E처리장은 혐기조를 제외한 평가대상 시설들이 모두 취약하였고 특히 호기조와 슬러지처리시설이 매우 취약하였는데, 호기조 문제는 **Fig. 4**에서 밝혀진 바와 같이 공기공급 부족 때문이고 슬러지처리시설 문제는 용량이 50%이상 부족한 데 기인하고 있어 해당시설의 증설이 시급한 것으로 평가된다.

본 연구결과를 비슷한 시기에 실시된 환경부의 평가결과(환경부, 2004)와 비교해보면 **Table 3**에서와 같이 순위가 다른데, 이는 본 연구에서는 본격적으로 기술적 시설성능을 평가한 반면 환경부평가는 주로 처리장의 관리측면 즉 유입

Table 3. Evaluation of target plants using BNR CPE.

Evaluation module	Reactor				Clarifier	Sludge handling facility	Points scored	BNR CPE ranking	Evaluation of MEV* (ranking)	Capacity (m ³ /day)	Construction year
	Anaerobic	Anoxic	Aerobic	Sub total							
Score range	-5~+5	-5~+5	-5~+5	-15~+15	-5~+5	-5~+5	-25~+25				
Plant A	3.3	2.1	3.7	9.1	3.2	3.5	15.8	3	1	170,000	2001
Plant B	3.4	1.0	3.3	7.7	2.8	3.3	13.8	4	5	80,000	2002
Plant C	3.4	2.0	2.3	7.7	3.7	4.5	15.9	2	2	520,000	2002
Plant D	3.6	2.6	4.0	10.2	3.8	4.6	18.6	1	3	680,000	2002
Plant E	3.8	2.1	0.9	6.8	1.9	-3.3	5.4	5	4	40,000	2001

* Ministry of Environment

부하, 방류수질, 처리단가 및 관리상태를 블랙박스 방식으로 평가하여 평가관점에서 큰 차이가 나기 때문이고, E처리장의 경우는 환경부평가는 본 연구의 평가기간이외의 비공개된 자료를 포함하고 있기 때문이다. 또한 본 연구에서는 월평균자료로 매월 평가후 2년간의 평균을 낸 반면 환경부에서는 단순히 연평균 수치를 주로 이용하였다. 두 평가 나름대로 각각 그 의의가 있겠지만, 가장 큰 차이점은 본 BNR CPE시스템은 각 시설 성능을 영향인자별로 기술적인 면에서 평가할 수 있을 뿐 아니라 이를 이용하여 각 시설 및 처리장전체의 성능저하 원인과 그 최적화방안을 도출할 수 있는 것이라 할 수 있다.

5.2.3 겨울철 및 장마철 성능 평가

(1) 겨울철 종합성능평가

BNR 하수처리시 주요 외부환경인자중 하나가 수온이며 특히 미생물반응조에서는 매우 중요한 운전인자이다. 따라서 본 연구에서는 처리장의 연중 성능평가와 별도로 겨울철에 대한 평가가 처리장 전체 성능평가 및 운영의 최적화에 필수적이라고 판단하여, 본 연구에서 구축된 BNR CPE시스템을 이용하여 겨울철 성능평가를 별도로 수행하여 보았다.

대상 하수처리장들중 2년간의 운전자료가 확보된 4개 처리장(E처리장 제외)의 유입수 수온범위는 5~25℃, 겨울철 반응조 평균수온은 12.6℃이었으며 10℃이하로 떨어지는 경우는 두 번뿐이었다. 겨울철 성능평가는 운영자료상 유입수 수온이 상대적으로 낮은 12~2월을 겨울철로 규정하고 각 처리장별로 수행하였는데, 평가인자별 겨울철 평가결과는 4개 처리장 모두에서 유사한 경향을 보였다. 따라서 각 평가인자별로 4개 처리장의 평균 평가점수를 구하여 Fig. 6에서와 같이 2년간의 해당 연평균 평가점수와 비교하였다.

우선, 반응조, 침전지, 슬러지처리시설 모듈의 각 평가점수(모듈내 평가인자들 점수의 가중평균 점수)들은 연평균과 겨울철 점수가 증감 ±1~3%로 모두 거의 차이가 없었고, 이 모듈별 평가점수들을 합한 평가총점도 전혀 차이가 없어, 겨울철 성능이 저하하리라는 일반적 예상과 다른 결과를 보여주었다.

Fig. 6을 이용하여 각 평가인자별 점수를 자세히 살펴보면, 겨울철에 수온이외에는 전체적으로 연평균과의 차이가 뚜렷하지 않아 성능저하가 거의 없음을 쉽게 알 수 있다. 특히 겨울철에 질소 및 인 특히 질소 제거성능이 낮아지리라 예상되었지만, 혐기, 무산소, 호기 반응조의 실제 겨울철 성

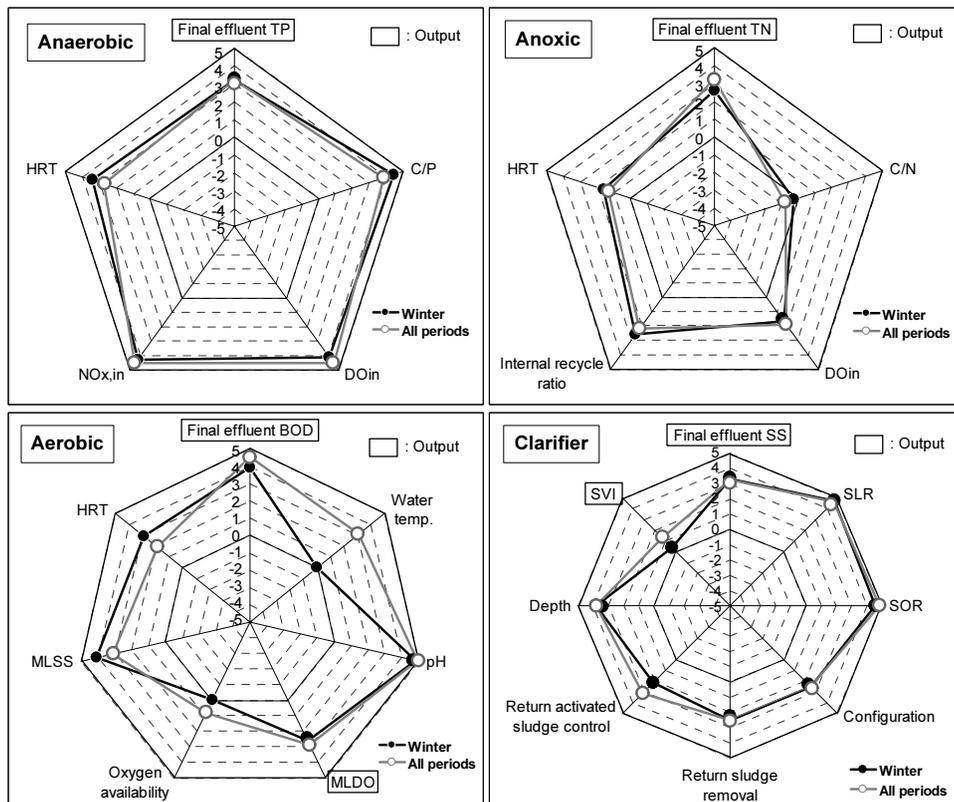


Fig. 6. Performance evaluation in winter season.

능평가 결과는 방류수질을 기준으로 연평균과 거의 차이가 없음을 뚜렷하게 보여주고 있다. 또한 겨울철에 모든 반응조의 HRT, 유입수 C/P 및 C/N 비, MLSS 등의 점수가 증가함을 볼 수 있는데, MLSS 증가는 저온에 대처하기 위한 통상적인 운전조작에 의한 것이지만, HRT와 유입수 C/P 및 C/N 비 증가는 겨울철 유입유량 감소와 유입수 유기물농도의 증가에 기인하고 있다. 겨울철에는 유입유량이 연평균대비 12%정도 감소한 반면 C/N, C/P 비는 각각 9% 및 13% 정도씩 증가하였다. 따라서 겨울철에 오히려 보다 유리한 HRT와 유기물량을 확보할 수 있어서 수온저하에도 불구하고 성능저하가 발생하지 않는 것으로 판단할 수 있다. 각 처리장별로 살펴보아도 지역특성과 용량규모에 따라 다소 차이는 있지만 이러한 경향은 뚜렷하였고, 겨울철 유입수농도 증가폭은 소규모일수록 큰 경향을 보였는데 이는 처리장 유입 하수농도 변화 즉 유기물분해의 주 지배인자가 겨울철에는 온도보다도 하수의 유달시간이기 때문이며, 또한 유입 유량 및 수질에는 관거침투량도 영향을 미치고 있다고 판단된다.

한편, 최종침전지 평가면에서도 Fig. 6에서와 같이 겨울철에 SVI 평가점수가 낮아져 슬러지침강성이 연중에 비해 저

하함을 알 수 있지만, 이는 주로 저수온에 대응하기 위해 적정수준이내에서 증가시킨 MLSS에 의한 결과일 뿐 방류수질 점수에는 영향을 미치지 않고 있으며 또한 침전지모듈 평가점수는 연평균 점수대비 2% 감소에 불과하여, 저온으로 인한 침전지 성능상 특별한 문제 발생은 없다고 평가된다. 이와같이, 본 연구의 BNR CPE시스템을 적용하여 겨울철의 처리장 성능변화를 일목요연하게 비교, 평가함으로써, 대상 처리장들이 겨울철에도 각 시설들의 성능저하 없이 적절히 운영되고 있으며 그 주된 이유는 HRT 증가와 탄소원의 증가임을 쉽게 분리, 파악할 수 있었다.

(2) 장마철 종합성능평가

합류식 하수배제지역의 하수처리장에서는 강우시 빗물이 하수처리장으로 유입되는 것을 피할 수 없으므로 허용가능량 이상의 유입은 차단 또는 바이패스 시키지만, 처리장별 유입관리방식에 따라서는 유입 유량 및 수질이 평소와 크게 달라질 수도 있다. 특히 BNR 하수처리장에서는 재래식 처리장에 비하여 유입 C/N, C/P 비와 각 반응조의 HRT 등의 소폭 변화가 처리장성능에 큰 영향을 미칠 수도 있으므로 강우시 그 영향 파악 및 최적화에 더욱 유의할 필요가 있다.

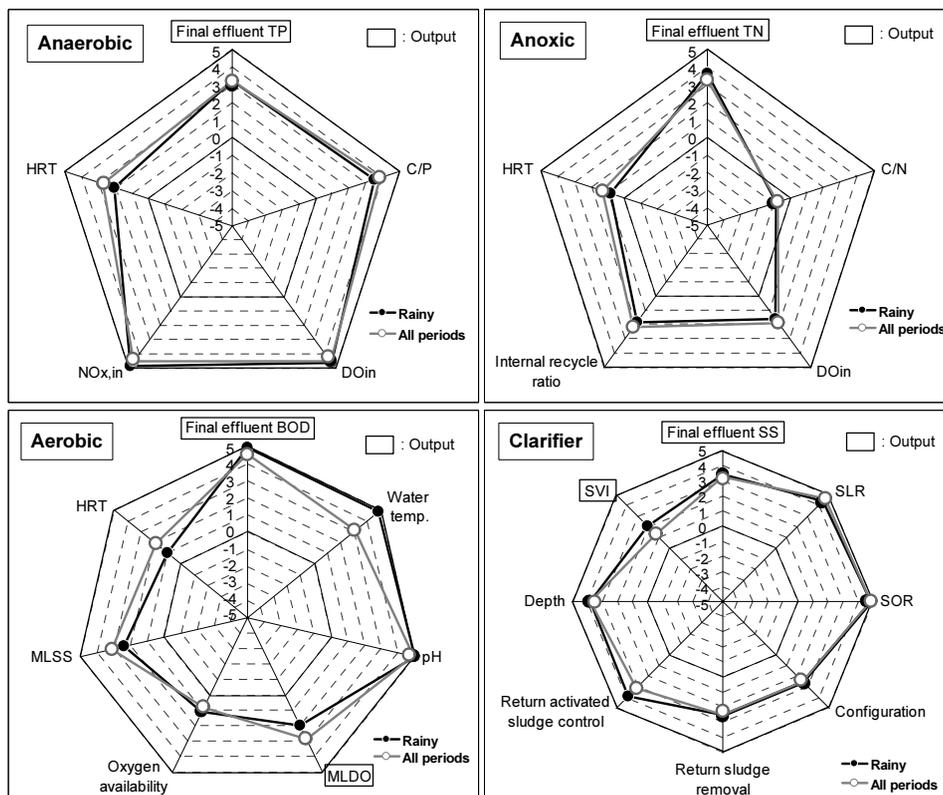


Fig. 7. Performance evaluation in rainy season.

따라서 본 연구의 BNR CPE시스템을 이용하여 강우시 처리 성능 저하에 노출될 위험성을 확인하기 위하여 장마철 성능 평가를 별도로 수행하여 보았다. 대상 처리장은 합류식 하수 배제지역내 2년간 운전자료가 확보된 4개 처리장(E처리장 제외)이며 각 해당지역의 강수량을 확인하여 5월부터 7월 까지의 3개월간을 장마철로 정하여, 각 평가인자별로 4개 처리장의 장마철 평균 평가점수를 2년간의 해당 연평균 평가점수와 비교하였다.

우선, 평가대상 모든 시설에 대한 평가총점면에서 장마철과 평소(연평균)가 차이가 없어, 예상과 달리 장마철에 처리장 종합성능 저하는 없는 것으로 밝혀졌다. 반응조 및 침전지 모듈의 평가점수도 장마철과 평소가 거의 동일하였고 단지 슬러지처리시설모듈 점수가 장마철에 평소대비 4% 감소하여, 장마철에도 수처리시설 성능상 아무 변동이 없고 슬러지처리시설도 소폭의 부하증가는 있지만 성능상 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

각 반응조 및 침전지에 대한 장마철 성능을 평가인자별로 연중성능과 비교하면 Fig. 7과 같다. 장마철에 수온의 증가 이외에는 전체적으로 평소와 점수 차이가 크지 않아 각 시설의 성능변화가 거의 없음을 쉽게 알 수 있다. 물론, 예상한 대로 장마철에 유입유량의 증가로 인하여 Fig. 7의 모든 시설에서 HRT가 연평균대비 10% 감소하여 그 점수가 다소 낮아졌으나 성능에 지장을 초래할 만한 수준은 아니었고, 빗물유입에 의해 큰 변동도 예상할 수 있는 유입수 C/N 및 C/P 비 점수도 약간 저하하였을 뿐이다. 이는 장마철에 성능 저하가 되지 않도록 처리장의 빗물유입관리면에서 유입량을 일부 차단 또는 우회시켜 적절히 관리하고 있음을 보여준다. 또한, 장마철에 반응조 및 침전지의 대부분 운전조건은 다소라도 나빠진 반면 방류수수질은 큰 차이는 아니지만 오히려 좋아지는 경향을 볼 수 있는데, 이는 반응조 수온의 증가(연평균대비 4°C) 효과와 아울러 슬러지의 침전성 향상 즉 MLSS의 감소와 SVI점수의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 각 처리장별로 장마철 평가를 살펴보면 모든 평가인자의 평가결과가 Fig. 7의 각 경향과 일치하였다. 단, 가장 대규모인 D처리장의 경우는 C/N비, C/P비, MLSS 및 유출수SS가 오히려 각각 3, 10, 1 및 14 % 증가하였지만 성능상 큰 변화는 초래하지 않았고 나머지 평가인자들은 Fig. 7의 각 경향과 동일하였다.

6. 결 론

BNR 하수처리장 종합성능평가의 도구로서 BNR CPE 시스템을 연구, 개발하고 국내 BNR 처리장 평가에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재래식 활성슬러지공정에 대한 U.S. EPA의 기존 CPE 방법론을 기반으로 평가대상을 BNR로 확장하여, 시설별로 모듈화된 평가인자별 등급화 및 가중치 설정 등을 통한 평가 기준 및 평가도구를 구축함과 아울러 객관적 평가방법 알고리즘을 연구함으로써, 처리장전체는 물론 단위시설모듈별, 운전인자별로 성능평가가 가능한 A²/O공법 대상의 BNR CPE 시스템을 구축할 수 있었다. 성능평가결과는 시설모듈별로 원인과 결과 인자가 구분된 방사형그래프로 구현함으로써, 최소화된 수로 많은 인자간 차이와 상호관계를 일목요연하게 비교할 뿐 아니라 시설별, 처리장별 평가간의 비교도 쉬워 취약 요소와 주원인의 신속한 파악이 가능하고 그 대응 방안 제시도 보다 용이하였다.

2. 본 연구에서 구축된 BNR CPE 시스템의 적용성 확인을 위하여 국내의 A²/O공법 BNR 하수처리장을 대상으로 종합성능평가를 실시한 결과, 평가대상 5개 처리장들은 최소규모 1개소를 제외하고는 성능상 양호 또는 큰 문제가 없다고 평가되었다. 규모증가에 따라 보다 양호하고 안정적인 성능 확보가 가능함을 확인할 수 있었고, 종합평가순위가 시설용량순위와 일치하였으며 침전지와 슬러지처리시설 평가 순위들과도 일치하였다. 공통적으로, 구성시설중 무산소조의 성능이 상대적으로 취약함이 발견되었는데 이는 시설상 문제라기 보다 유입수의 저C/N비에 주로 기인하고 있었다. 반면에 혐기조 성능은 양호한 수준에서 거의 유사하였다. 모든 처리장에서 구성시설의 과다설계로 인한 성능저하는 없는 것으로 평가되었다.

3. 본 BNR CPE에 의하여 단일 운전인자의 영향뿐 아니라 운전인자간 및 각 시설간의 상호영향을 용이하게 파악할 수 있었다. 5개 처리장들의 시설별 평가결과들을 비교함으로써, 인자간의 상호보완효과를 발견할 수 있었다. 이 현상은 혐기조와 무산소조에서 두드러졌는데, 상대적으로 유입수 C/P비나 C/N비가 낮은 경우에도 HRT가 증가하고 그외 인자들이 양호하면 처리성능의 큰 저하로는 이어지지 않았고, 그 반대의 경우도 동일하였다. 또한 종합성능에 미치는 시설간 영향면에서는, 호기조 성능이 상대적으로 낮은 경우 타반응조들의 자체운전조건이 양호하더라도 반응슬러지와 내부순환수가 타반응조들에 영향을 주게되어 종합적 성능을 저하시키는 반응조간의 인과관계를 용이하게 파악할 수 있었다. 이와 같이 기존의 평가방식으로는 찾아내기 힘든 인자상호간 및 시설간의 영향과 효과를 용이하고 빠르게 파악할 수 있는 장점도 본 평가시스템이 성공적으로 구축되었음을 의미한다.

4. 본 BNR CPE에 의하여 현재의 성능저하 원인과 장래의 취약인자 도출뿐 아니라 그에 대한 대응방안 제시도 용이하였다. 평가대상 국내처리장의 시설별 최적화 필요성면에서, BNR공정 고유의 혐기조 및 무산소조는 현 여간내의 성능유지상 거의 문제가 없는 반면 최적화 필요성은 오히려 일부 호기조 및 침전지에 있음을 알 수 있었다. 현재로서는 혐기조의 최적화를 위한 특별한 조치는 필요없다고 평가되었고, 무산소조도 모두 저C/N비라는 근본적 문제외에는 최적화를 위한 운전인자의 특별한 변경대안이 없었으나, 2개소에서는 호기조 및 침전지에서 비교적 용이한 유지관리 개선만으로도 현재보다는 질소제거효율이 가능하다고 판단되었다. 예외적으로 성능문제가 있는 최소규모 1개소는 폭기시설 개선과 슬러지처리시설 용량 증설이 시급히 요구되었으나 그외 시설들에 대해서는 현재로서는 특별한 개선조치는 필요없다고 평가되었다.

5. BNR 하수처리성능이 저하할 수 있는 겨울철과 장마철에 대한 별도의 종합성능평가에서, 두 기간중 모두 일반적 예상과 달리 연평균대비 처리성능의 저하가 거의 없음을 알 수 있었다. 겨울철에는 수온감소의 악영향을 유입량 감소에 따른 HRT증가와 유입 C/P 및 C/N 비의 증가가 상쇄시킴을 확인할 수 있었다. 특히 질소제거성능의 악화를 예상할 수 있지만 연평균 성능과 거의 차이가 없었다. 장마철에는 연평균대비 수온이 높은 대신 유입유량 증가에 따라 HRT가 감소하고 대부분의 처리장에서 유입 C/N, C/P 비가 약간 감소하였지만, 수처리시설 성능상 아무 변동이 없었고 슬러지처리시설도 소폭의 부하증가는 있었으나 종합성능상으로는 거의 차이가 없었다.

본 연구에서 구축한 시스템지향형 객관적 평가방법론은 각 운전인자간의 상호관계가 복잡한 BNR 하수처리공정의 종합성능을 체계적으로 신속, 정확하게 진단, 평가 및 최적화하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 생각되며, 이는 BNR 공법의 개발과 건설이 추가 되던 시기를 지나 유지관리 단계로 접어들기 시작하는 현 시점에서 그 의미가 클 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-311-D00613).

참고문헌

1. 강동완, 김효수, 김예진, 우대준, 김창원 (2009) 활성슬러지 모델을 활용한 BNR 공정의 통합 평가 지수 도출, **대한환경공학회 2009 춘계학술연구발표회 논문집**, PG-49.
2. 고길곤, 이경진 (2001) AHP에서의 응답일관성 모수의 통계적 특성과 활용방안, **한국경영과학회지**, 26(4), pp.71-82.
3. 권민영, 구본재, 이국희 (2006) AHP기법을 적용한 IT프로젝트 사전타당성 평가항목의 가중치 산출, **Information systems review**, 8(1), pp265-285.
4. 김연권, 김홍석, 서인석, 김병근, 한인선, 김진상 (2008) Dr. Wastewater program의 적용을 통한 하수처리장 운전에 미치는 유입수변동 영향평가, **상하수도학회지**, 22(6), pp647-655.
5. 안상형 (2005) **현대경영과학개론**, 박영사, 서울.
6. 우승한, 이민우, 박종익, 박종문 (2003) 미국 EPA의 CPE 기법을 이용한 국내 하수처리장 평가, **대한환경공학회지**, 25(5), pp.535-543.
7. 장윤재, 민경석, 도중호 (2004) 실규모 A2/O하수처리시설의 운전성 평가, **대한상하수도학회-한국물환경학회 2004 공동 추계학술발표회 논문집**, D-10.
8. 조인성, 오재일, 박규홍 (2007) 전문가 그룹별 AHP기법을 활용한 폐기물매립지 입지선정 인자의 가중치 분석, **한국폐기물학회지**, 24(2), pp95-106.
9. 환경부 (2004) **하수종말처리장 운영평가 결과**, 환경부.
10. 환경부 (2007) **2006 하수종말처리시설 운영실태분석보고서**, 환경부.
11. 환경부 (2009) **하수도법**, 환경부.
12. Olsson, G. and Newell, B. (1999) **Wastewater Treatment Systems, Modelling, Diagnosis and Control**, IWA publishing, London.
13. Randall, C.W., Barnard, J.L. and Stensel, H.D. (1992) **Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal**, Technomic Pub. Co., Pennsylvania.
14. Stephens, H. L., and Stensel, H. D. (1998) Effect of operating conditions on biological phosphorus removal, **Water Environment Research**, 70(3), pp.362-369.
15. U.S. EPA (1989) **Handbook: Retrofitting POTWs**, U.S. EPA, Washington.
16. U.S. EPA (2002) **Comprehensive performance evaluation(CPE): BASICS**, U.S. EPA, Washington.
17. Water Environment Federation (2005) **Wastewater Treatment Plant Design**, Water Environment Federation, Alexandria.