

ORIGINAL ARTICLE

활성슬러지 반응탱크의 풍량제어지표인 NADH에 관한 연구

정우진¹⁾ · 홍성민¹⁾ · 김한래¹⁾ · 장순웅^{2)*}

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, ¹⁾(주)아쿠아테크, ²⁾경기대학교 환경에너지공학과

Study on NADH which is the Air Volume Sensor in the Activated Sludge Reaction Tank

Woo-jin Chung, Sung-min Hong¹⁾, Han-lae Kim¹⁾, Soon-woong Chang^{2)*}

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon 16627, Korea

¹⁾Aqua Tech, Inc., Gumi 39403, Korea

²⁾Department of Environmental engineering, Kyonggi university, Suwon 16627, Korea

Abstract

Domestic sewerage treatment plant is operated by activated sludge method and its modified method by using microorganism. In most cases, a method of using microorganism is directly controlled by the operator based on individual judgment through factors of DO, pH and ORP. In addition, under aerobic condition in bioreactor, energy consumption including excessive air injection is learned to be somewhat plenty. In order to solve this problem, in most of the process, improvement of internal recycling and activated environmental factor of microorganism were researched extensively. However, as factors are changed depending on various conditions, it is not sufficient as an indicator of judgment. As such, a research on operation of bioreactor that measures metabolic change in short time by directly measuring activated condition of microorganism using NADH fluorometer is required in reality. It is considered that the method like this could supplement problem of energy consumption being occurred in the existing treatment method and operational optimization of bioreactor would be enabled by controlling optimal air volume. Therefore, in this study, in order to obtain optimal operational indicator of bioreactor, proper air volume control test was performed and through batch test and site evaluation, possibility of NADH sensor being utilized as operational control indicator of bioreactor is intended to be analyzed. In order to compare with measured value, DO, ORP that are operational control indicator of existing bioreactor were used. As MLSS concentration was increased through batch test, NADH value was increased and site evaluation also showed similar tendency to batch test. Resultantly, it could be confirmed that changing level of NADH fluorometer was a sensor that could measure bioreactor condition effectively and optimized scale of bioreactor is considered to be utilized.

Key words : NADH, Activated sludge, Sensor, Bioreactor

1. 서 론

국내 하수처리장의 대부분은 활성슬러지공법 및 그

변화 등으로 운영된다. 위 공법들은 미생물을 이용한 응집과 침전을 기초로 유기물 및 영양염류를 제거한다 (Kim et al., 2006; Park, 1997; Park and Lee, 2008;

Received 7 January, 2016; Revised 18 February, 2016;

Accepted 10 March, 2016

*Corresponding author : Soon Woong Chang, Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon 16627, Korea

Phone : +82-31-249-9739

Email : swchang@kyonggi.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Stensel and Burton, 2004). 이와 같은 생물학적 폐수처리시스템에서는 생물반응조의 상태를 파악하기 위해 pH, DO, ORP 등의 센서를 이용한다(Gwon and Kim, 1992; Holamn and Wareham, 2005; Rittman and Lageland, 1985; Trivedi and Heinen, 2000). 이와 같은 센서를 통해 얻어진 값은 공정제어에 이용되기 보다는 운전자가 식별 할 수 있는 단순한 지시치를 나타낸다. 또한, 공정제어에 이용된다 하더라도 실제 미생물의 활성에 근거한 판단지표가 아닌 수중의 상태만을 나타낸다. 따라서 외부적인 요인에 의해 수중의 상태가 변화하거나 미생물의 활성도가 저하될 경우에는 실제 수중의 반응상태와는 다른 결과 값을 나타내어, 반응조의 상태를 정확하게 판단할 수 없었다. 특히, ORP는 모든 산화환원 물질에 영향을 받으며, 전극의 표면이 오염되면 감도가 떨어지게 되어 정확한 값을 읽을 수 없다. ORP가 평형에 접근하여도 반응기 상태에 따라 평형상태가 지속되지 못하고 작은 기울기나 작은 굴곡을 가지기도 한다. 이러한 이유로 질산화 종료점 감지가 늦어져 포기 시간이 상당히 증가하기도 한다(Han et al., 2012; Lee et al., 2003). DO만을 이용하여 제어할 경우 비교적 부하가 높은 시간(18시~24시)에서는 산소비율이 증가하여 낮은 DO농도가 유지됨에 따라 송풍량이 최대로 공급되었으나 부하가 적은 시간대(02시~08시)에서는 포기조 내에 설치된 공기조절용 밸브 및 송풍기의 너무 낮은 On-Off로 인하여 질산화효율이 저하되는 현상이 발생할 수 있다(Kim et al., 2008). pH만 이용하여 탈질화 반응의 완료시점을 판단하는 방법의 경우 pH는 1분 간격으로 제어점 판단이 어렵고 좀 더 정확한 평가를 위해서 5분과 10분의 이동평균값을 이용하는 분석결과를 유도하였으나 pH의 변동이 심하여 0에 도달하는 시점을 알기 힘들다(Lee et

al., 2003).

NADH(Nicotinamide Adenine Dinucleotide Hydrogen)는 미생물의 대사, 세포합성, 유지 등의 작용에서 전자 운반체 역할을 하는 조효소로 전자를 주는 물질과 전자를 받는 물질에 의해서 영향을 받는다. NADH fluorometer를 이용하면 미생물을 직접 측정하여 짧은 시간동안 일어나는 대사 변화를 측정할 수 있어서 실질적으로 처리반응을 지배하고 있는 미생물에 대한 정확한 지표가 확립되어 다양한 생물학적 처리공정을 한 단계 개선시킬 수 있으리라 판단된다(Chang, 2005; Wos and Pollard, 2006).

본 연구에서는 회분실험과 경기도 A시 하수처리장 반응탱크 2개를 대상으로 NADH를 이용한 새로운 생물반응조 제어지표 가능성을 평가하였다. NADH의 특성 및 송풍량 제어에 따른 질산화 미생물의 변동지표를 계속하였으며, 이 결과를 통해 생물반응조의 NADH센서 적용 가능성을 확인하였다.

2. 연구방법

2.1. 회분실험 조건

실험조건을 Table 1에 나타내었다. 회분실험장치는 교반기, NADH 센서, ORP 센서, DO 센서 및 산기장치를 설치한 50 L의 용기를 준비하였다. 실험에 사용한 활성슬러지는 Table 2과 같이 경기도 A시 하수처리장 System 2의 반송슬러지이다. 실험장치에 슬러지를 넣기 전 반송슬러지와 최초침전지유출수를 더하여 전량 30L로 하고, Table 2과 같은 MLSS 농도로 조정하였다. Run 1에서는 MLSS 농도가 NADH 값에 끼치는 영향을, Run 2, Run 3에서는 각기 다른 MLSS 농도에서 질

Table 1. The experimental conditions

	Run 1	Run 2	Run 3
Researched	10/17/08	12/24/08	2/13/09
Volume(L)	30	30	30
MLSS(mg/L)	956-2300	2200	3030
NO ₃ -N(mg/L) (KNO ₃ add)	-	4.5	4.4
Stir(RPM)	175	68	68
Aeration	N	Y	Y

Table 2. Operating conditions of reactor

List	Operating	
	System 1 (A/O)	System 2 (similar A/O)
Tank capacity	2,813 m ³ (W 5.7 m × L 34.6 m × H 5.0 m × 3)	1,241 m ³ (W 4.6 m × L 23.6 m × H 6.0 m × 2)
Air diffusing aerator	Flexible tube	Ceramic aerator
Air flow rate(m ³ /h)	Waterway 1 (Stir) Waterway 2,3 each 800	Waterway 1 300 Waterway 2 800
HRT(h)	3.8	3.5
Sludge recycling ratio	0.73	0.75
Deflation of air	4.1	5.9
MLSS(mg/L)	1,330	1,620
BOD-SS load (kgBOD/kgSS/d)	0.38	0.37
SRT(d)	5.6	3.0

산갈륨을 이용하여 Table 2와 같은 NO₃⁻-N 농도로 조정
한 후 무산소, 혐기 및 호기상태로 변경하여 NADH,
ORP, DO, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N 및 NO₃⁻-N의 변화를 시간
에 따라 계측하였다.

2.2. 현장실험 조건

본 연구는 회분실험 및 경기도 A시 하수처리장 반응
탱크 2개를 대상으로 이루어졌다. 경기도 A시의 하수처
리장은 Fig. 1의 구조로 되어 있으며, 표시된 위치에 센
서를 설치하여 DO, ORP, NADH의 변화 및 NH₄⁺-N,
NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, PO₄⁻-P를 관측, 측정하였다. 각 센서의
관측과 이동은 산출한 유입수의 이동에 맞추어 유입 단

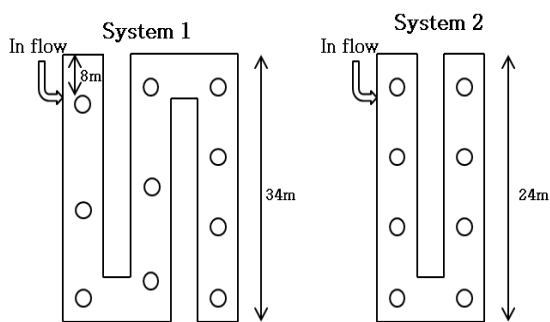
측으로부터 하류 측에 향하여 실시하였다. 각 관측점
에서의 계측시간은 System 1이 약 25분, System 2를 약
30분으로 하였다. 경기도 A시 하수처리장의 반응탱크
운전조건은 Table 2에 나타내었다.

2.3. DO, pH, ORP, NADH 측정기기

실험에 사용된 측정센서는 NADH Sensor
(Aquatech(주), BIONAD, Sensor, Korea), ORP
Sensor(Global water Co., WQ600 Sensor, USA), pH
Sensor(Wedgewood Analytical, Inc., OPS71, USA)
및 DO Sensor(Global water Co., WQ401, DO Sensor,
USA)를 사용하였다.

2.4. NADH 매커니즘

NADH는 세포의 대사작용과 세포합성에서 전자 운
반체로서 중요한 역할을 수행하는 조효소이다. 모든 살
아있는 세포들은 세포내의 대사에 주요한 중간 전달자체
로서 NAD⁺ (nicotinamide adenine dinucleotide)를 포
함하고 있다. 기질의 이용과 함께 산화된 형태인 NAD⁺
는 NADH 형태로 환원되고 NADH는 미생물의 대사,
세포합성, 유지 등의 작용에서 전자 운반체 역할을 하므
로 전자를 주는 물질과 전자를 받는 물질에 영향을 받게
된다(Chang, 2005). 일반적으로 효소는 반응과정에 관
여하는 에너지의 변화에 영향을 주지는 않는다. 물질의



※ ○ Sensor point

Fig. 1. Sectional view of reaction tank.

Table 3. Environmentally relevant type of fluorescent generating material

Fluorescent Substances	Excitation Peak(nm)	Fluorescence Peak(nm)
*tyrosine	275	303
3,4-dihydroxyphenylalanine	345	410
*tryptophan	287	348
kynuenine	370	490
5-hydroxytryptamine(senotonin)	295	330
phenylalanine	260	282
3,4-dihydroxyphenylethylamine(dopamine)	345	410
histamine	340	480
vitamin A	372	510
flavins	450	535
NADH & NAD(P)H	340	460
p-aminobenzoic acid	294	345
vitamin B12	275	305
estrogens	285	325
ATP, ADP, adenine, adenosine	272	380

* Responsible for protein fluorescence

반응에서 자유에너지는 그 반응이 정방향 또는 역방향으로 진행됨을 나타내는데, 반응과정에서 효소의 첨가는 이 값을 변화시키는 것이 아니라, 반응이 진행되는데 필요한 에너지 상태로 활성화 시키는 역할을 수행한다 (Helmo, 1996a; Lin and Ju, 2007).

환경적으로 중요한 광원 조사시 형광을 발생하는 물질은 Table 3과 같이 다양해서 각 물질별로 조사되는 빛과 검출되는 빛의 파장이 서로 다르지만 보통 250 nm 이상의 빛을 조사한 후 방출되는 형광물질의 양을 측정하게 된다(Helmo, 1996b; Isaac and Henze, 1994; Zhang and Huang, 2006). 이중 NADH의 경우 340 nm의 UV를 조사하면 460 nm의 파장에서 형광물질이 검출되게 되나, NAD⁺는 그렇지 않은 특성을 가지고 있다 (Chang, 2005; Helmo, 1996b). 이와 같은 특징을 이용하여 미생물의 대사과정 변화를 측정할 수 있게 되는 것이며 이와 같은 측정원리를 Fig. 2에 나타내었다.

하수처리과정에서는 Fig. 3과 같이 혐기, 호기, 무산소 상태에 따라 전자수용체가 다르기 때문에 NADH의 측정결과는 Fig. 3에서처럼 매우 상이하다. 이와 같은 NADH의 특성을 이용할 경우 무산소 상태에서부터 혐기 상태로의 전환시점을 파악하거나 질소산화물의 소멸 순간 등을 파악할 수 있다(Kim et al., 2008).

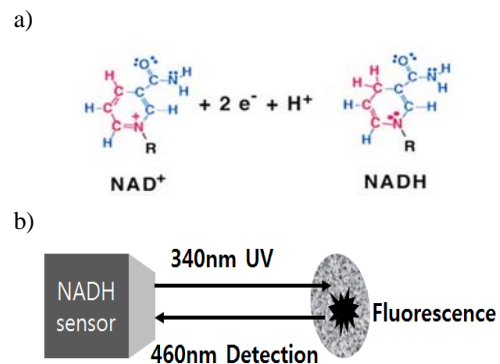


Fig. 2. The structure of (a) NAD⁺ and NADH, and (b) measuring principle.

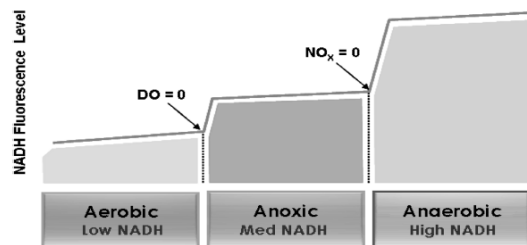


Fig. 3. NADH fluorescence level according to various reactorstate.

3. 실험결과

3.1. MLSS와 NADH의 관계

생물반응조의 송풍량 조절은 미생물의 농도와 처리효율에 따라 달라지는데, 특히 미생물의 양에 의한 부분이 생물반응조 내의 산소를 소비하는 것과 밀접한 관계가 있다. Chang(2005)에 따르면 MLSS가 증가할수록 NADH도 비례해서 증가하는 것으로 보고하였다. 그러나 농도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 관계가 확인되었으며, 이 결과는 Spectrofluorometer 안에서 NADH가 측정되는 동안 Fluorescence 빛이 일정한 면으로 비추지고, 그 구간을 지나는 미생물 플록의 밀도가 MLSS가 높을수록 커지기 때문이라고 보고하였다(Chang, 2005).

본 연구에서 생물반응조내의 MLSS의 농도와 NADH와의 상관성에 대하여 실험을 실시하였다. MLSS 농도는 1000-2500 mg/L에서 실시하였으며, 실험결과는 Fig. 4에 나타내었다(Run 1). 그림에서와 같이 MLSS 농도가 증가함에 따라 NADH 농도 또한 점차 증가하는 것으로 확인되었다. NADH 센서는 미생물의 대사계의 차이에 의해 변화하는 NADH를 직접 측정하는 원리이며, MLSS의 증가에 따라 증가 되는 추세로 나타났다. 이와 같은 결과는 Chang과의 결과와 유사하게 나타났으며, 반송슬러지의 양을 조절하는데 필요한 Control factor가 될 것으로 사료된다.

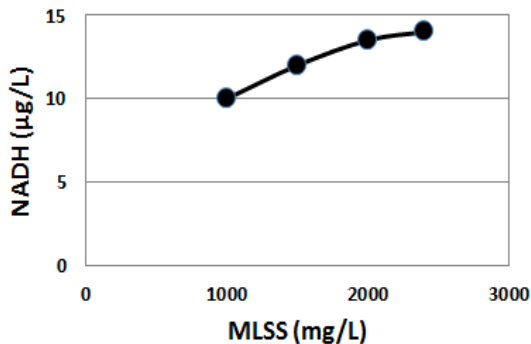


Fig. 4. Relationship between MLSS and NADP (Run 1).

3.2. 무산소, 혐기, 호기상태에 있어서 NADH, ORP 및 DO의 거동(Run 2, Run 3)

A₂O공법에서 무산소, 혐기, 호기상태에 따른 미생물

의 거동 및 상태가 각각에 조건에 따라 매우 다르게 나타나는 경향이 있다(Kim et al., 2006). 따라서 본 연구에서 이에 대한 각각의 환경적 영향인자와 NADH의 상관성 실험 결과, Run 2, 3의 실험결과를 나타내었다. 실험 초기의 NADH는 Run 2, Run 3 두 경우 모두 탈질반응의 진행에 따라 점차적으로 각각 초기 값 16.5 µg/L와 17.5 µg/L에서 감소한 후 Run 2에서는 14.0 µg/L, Run 3에서는 16.5 µg/L 정도로 일정하게 유지되었다. 그 후 탈질이 종료된 시점에서는 탈질이 종료된 시점으로부터 약 10% 정도 증가하고, 이후 일정한 농도를 유지하였다. ORP는 탈질의 진행과 함께 증가하여 탈질이 종료됨과 동시에 감소하였으며, NADH가 일정 값을 나타내는 혐기의 시간대에서도 측정치가 계속 감소하였다. DO는 무산소, 혐기상태에서는 대부분의 센서에서 0 mg/L를 나타내었다. 송풍주입에 따라 포기 개시직후에 NADH는 급격히 감소한 후 Run 2에서는 13.2 µg/L, Run 3에서는 13.8 µg/L로 일정한 농도를 유지하였다. ORP는 포기 개시와 동시에 초기값 -29 mV에서 0 mV 부근까지 급격히 증가하였으며 그 후로도 평균 약 6 mV로 증가하였다. DO는 폭기와 함께 증가하였다(Fig. 5, Fig. 6).

NADH는 탈질 및 질화반응의 경과, 또는 반응의 질환을 정확하게 나타내었다. ORP는 호기, 무산소, 혐기상태의 전환에 대해서 반응을 나타내었지만 NADH와 비교하여 응답이 늦고 혐기성 상태가 지속되는 중에도 측정치가 계속 감소하였으며 호기성 상태에서는 계속 증가하는 등의 상이점이 확인되어졌다. 또한 ORP는 측정오차 범위가 ±20 mV로 비교적 큰 계측차이로, 본 실험에서 상호비교의 목적으로 설치한 3대의 계측치가 크게 다르게 나타나는 등 송풍량제어기기로써의 정밀도상의 문제점을 재인식하는 결과가 얻어졌다. NADH의 측정치가 Run 2, Run 3의 각 공정에서 값이 다른 것은 Run 1에서의 결과로부터 명확히 알 수 있듯이 MLSS 농도의 차이에 따른 것이며, NADH는 호기, 무산소 및 혐기의 순으로 높아진다는 사실을 본 실험을 통해 확인되어졌다.

3.3. 현장측정

System 1은 혐기조이며 최초침전지 유출수의 유입부에서는 NADH가 18.8 µg/L, ORP가 -206 mV, DO가 0.55 mg/L, 혐기조 중앙부에서는 NADH가 31.1 µg/L, ORP가 -247 mV, DO가 0.29 mg/L, 혐기조 유출구

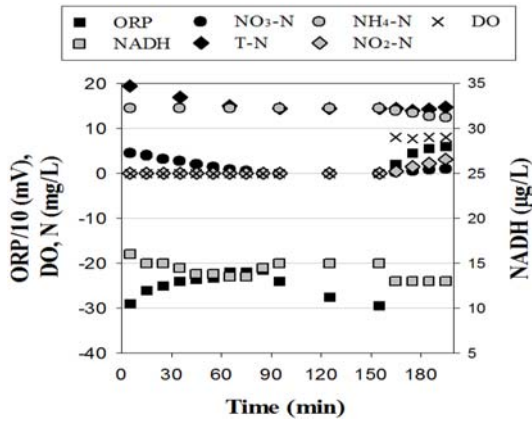


Fig. 5. Batch experiments (Run 2).

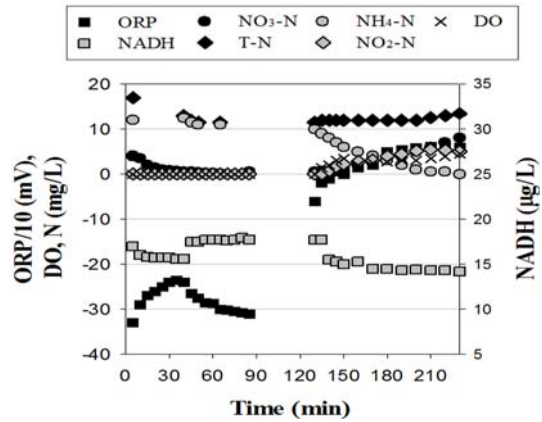


Fig. 6. Batch experiments (Run 3).

부근에서는 NADH가 20.6 µg/L, ORP가 -277 mV, DO가 0.25 mg/L NO₂-N 및 NO₃-N는 거의 0 mg/L로 ORP를 지표로 한다면 충분한 혐기상태가 유지되고 있는 것으로 확인되어졌다(Fig. 7). NADH는 혐기조 중앙부에서 최대치를 나타내었다. 혐기조와 호기조의 경계에는 격벽이 없고 Fig. 1과 같이 [ㄷ자] 형태이기 때문에 호기조로부터의 역혼합에 의해 유입부와 같은 정도의 혐기상태가 된 것으로 판단된다.

호기조에 들어와서는, NADH는 17.4 µg/L(40~50 m)까지 감소하였으며 ORP는 -95 mV, DO는 0.46 mg/L로 상승, 제 2 수로 중간지점에서 NADH는 17 µg/L 반응탱크 출구에서는 14.5 µg/L로 일정해졌다.

한편 ORP 및 DO는 혐기조로부터 호기조로의 유입과 동시에 증가하여 반응탱크 말단부까지 완만하게 증가하였다.

System 2는 Table 1의 송풍량에 나타난 비와 같이 전반부의 제 1 수로의 송풍량이 300 m³/h 후반부가 800 m³/h로 유사혐기호기운전을 실시하고 있다. 유사혐기부에서의 NADH는 11.0~11.4 µg/L, ORP는 -40~-10 mV, DO는 0.30~0.36 mg/L를 나타내었다(Fig. 8).

호기부에 들어가면 NADH는 System 1과 같은 급격한 감소는 나타나지 않았으며 반응탱크 출구에서는 9.9 µg/L로 완만한 감소를 나타내었다. ORP 및 DO는 System 1의 호기조와 같이 반응탱크 출구로 갈수록

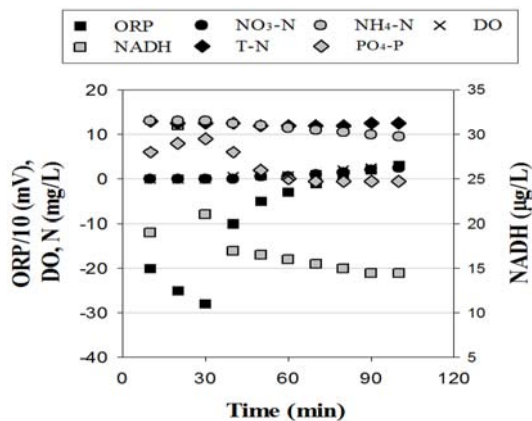


Fig. 7. The results of the survey (System 1).

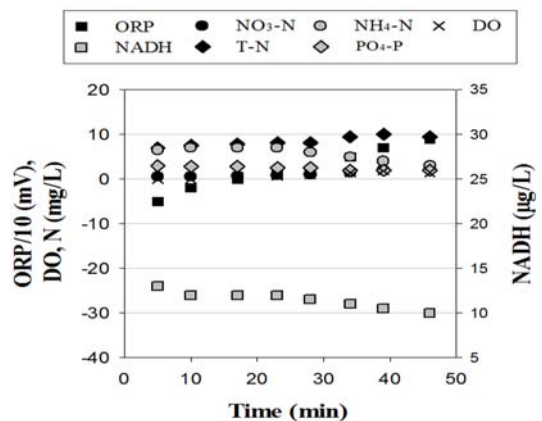


Fig. 8. The results of the survey (System 2).

증가하였다. 유사혐기조에서 ORP 값은 마이너스 값을 나타냈지만, NADH지표에는 호기상태에서의 NADH 지표와의 차이가 적게 나타나 혐기상태의 불량을 파악 할 수 있었다. 또한 System 2의 현장측정 결과로부터 NADH지표는 혐기, 호기상태가 계속되면 측정값의 변동 폭이 작은 것을 확인 할 수 있었으나, ORP는 값의 변동이 크게 나타났다. ORP는 산화되거나 환원되려는 경향의 세기를 나타내는 수치로 미생물 MLSS 뿐만 아니라 온도, pH, 전기전도도 및 산·알칼리도에 의해 값의 변화가 크고 안정화가 쉽지 않다. 결론적으로 NADH의 결과를 통해 다른 지표들 보다 비교적 정확하고 빠른 시간에 생물반응조의 상태를 파악 할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 회분실험 장치를 이용하여 NADH의 특성을 분석하고 A₂O 공법으로 운영되는 하수처리시설을 NADH 측정 장치를 사용하여 새로운 생물반응조 제어 지표로서의 가능성을 평가하기 위한 것으로 연구수행의 결과로 도출된 결론은 다음과 같다.

NADH 측정은 미생물의 대사를 직접적으로 측정하여, MLSS 플록 양의 증가에 따라 NADH 농도도 증가되었다.

회분실험의 결과 NADH는 일정한 값을 유지한 반면 ORP는 계속 감소하였다. NADH는 폭기 후 거의 일정한 농도를 유지하였지만, ORP는 개시와 동시에 0 mV 부근까지 급격히 상승하였으며 그 후로도 계속 증가하였다.

현장측정 결과 회분실험과 마찬가지로 ORP와 DO는 혐기조로부터 호기조로의 유입과 동시에 상승하여 반응탱크 말단부까지 완만한 상승을 지속하였지만, NADH의 변화는 변동폭이 적게 나타났다. 지금까지의 하수처리의 제어나 측정에 이용된 DO, pH, ORP 등은 실제 처리 반응을 할 수 있는 미생물의 활성도의 측정이 아니라 미생물의 활동에 의한 Bulk liquid의 성상변화를 간접적인 방법으로 측정하는 간접적인 방법이기 때문에 민감도가 떨어졌다. 그러나 NADH Flormeter를 이용한 측정은 짧은 시간동안 일어나는 대사의 변화를 측정하여 실질적으로 처리반응을 지배하고 있는 미생물에 대한 정확한 지표를 확립 할 수 있어 경제적인 하수처리가 가능할 것

이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임(과제번호:GT-14-B-01-004-0).

REFERENCES

- Chang, Y. S., 2005, Analysis of the NADH fluorescence in biological nitrogen removal process, Master's Degree Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Gwon, M. S., Kim, H. H., 1992, A study on the characteristics of denitrification at aerobic condition by denitrifiers, Journal of Korean Society of Environmental Engineering, 14(3), 143-148.
- Han, I. S., Kim, Y. K., Kim, H. S., 2012, Evaluation on applicability of control of air blower on aerobic phase, Korean Geo-Environmental Society, 2012(9), 319-320.
- Helmo, K., 1996a, Method for controlling and/or monitoring biological processes, Journal of Cleaner Production, 4(2), 135-135.
- Helmo, K., 1996b, Waster water treatment process for nitrogen removal controlled by NADH, vand og jord, 3, 125-129.
- Holamn, J. B., Wareham, J. B., 2005, COD, ammonia and dissolved oxygen time profiles in the simultaneous nitrification/denitrification process, Biochemical Enginnering Journal, 22(22), 125-133.
- Isaac, S., Henze, M., 1994, Fluorescence monitoring of and alternating activated sludge process, Water Science and Technology, 30(4), 229-238.
- Kim, H. L., Cho, J. B., Cho, I. H., Lee, W. J., Chang, S. W., Lee, S. J., 2008, NADH variation and process control with NADH flumeter in full scale biological nutrient removal process, Korean Journal of Environmental Health Sciences, 34(6), 423-432.
- Kim, Y. K., Kim, H. S., Seo, I. S., Moon, Y. T., Kim, B. G., Kim, J. Y., 2006, Diagnosis on sewage treatment plants using deductive diagnosis methodology, Korean Geo-Environmental Society, 2006, 255-258.
- Lee, B. H., Lee, G. P., Gang, S. J., Jo, Y. S., Gwon, S.

- H., 2003, Automatic control and characteristics of ORP for nitrogen and phosphorus removal in a SBR process, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 2003, 117-120.
- Lin, H., Ju, L. K., 2007, Sludge settling and online NAD(P)H fluorescence profiles in wastewater treatment bioreactors operated low dissolved oxygen concentrations, *Water Research*, 41(9), 1877-1884.
- Park, S. J., 1997, Characteristics of activated sludge process using float-media for municipal waste-water treatment, Master's Degree Dissertation, Donga University, Busan, Korea.
- Park, J. I., Lee, T. J., 2008, Changes of microbial community depending on different dissolved oxygen in biological nitrogen removal process, *Department of Environmental Engineering*, 30(9), 939-947.
- Rittman, B. E., Lageland, W. E., 1985, Simultaneous denitrification with nitrification in single-channel oxidation ditches, *Journal of Water Pollution Control Federation*, 57(4), 300-308.
- Stensel, H. D., Burton, F. L., 2004, *Wastewater engineering treatment and reuse*, 4th ed., Donghwapub., 1048-1248.
- Trivedi, H., Heinen, N., 2000, Simultaneous nitrification /denitrification by monitoring NAOH fluorescene in activated sludge, *Proceedings of the Water Environment Federation*, 50(17), 785-801.
- Wos, M., Pollard, P., 2006, Sensitive and meaningful measures of bacterial metabolic activity using NADH fluorescence, *Water research*, 40(10), 2084-2092.
- Zhang, S., Huang, P. S., 2006, Novel method for structured light system calibration, *Optical Engineering*, 45(8), 1-8.