

급속 OUR 모니터링을 이용한 Microbial Respiration (MR) 영향인자 평가

Factors Affecting Microbial Respiration (MR) by Rapid Oxygen Uptake Rate (OUR) Monitoring

박세용 · 모 경 · 김연권* · 김문일†
Seyong Park · Kyung Mo · Youn-Kwon Kim* · Moonil Kim†

한양대학교 건설환경공학과 · *한국수자원공사 수자원연구원
Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University
*K-water Institute, K-water

(2011년 2월 10일 접수, 2011년 9월 28일 채택)

Abstract : As this study was estimation of factors of rapid OUR (Oxygen Uptake Rate) monitoring method. Experiment for estimating factors of optimal microorganism activity was carried out in this study. In addition to comparison and estimation of SCOD variation by OUR variation using real wastewaters. In consequence OUR value was highest when F/M ratio, pH and temperature were 0.03~0.05, 6.0~8.5 and 20~30°C respectively. Oxygen consumption by nitrification was incomplete. OUR variation of SCOD was recognizable difference of degradable rate at before and after of inflection point OUR. This study used an experimental method for real time prediction of the influent of the sewage treatment plant for optimal operation is expected to be able to do.

Key Words : Rapid OUR (Oxygen Uptake Rate), Optimal Microorganism Activity, Factors

요약 : 본 연구는 급속 OUR (Oxygen Uptake Rate)방법의 영향인자 평가로서 최적의 미생물 활성도에 미치는 영향인자를 평가하는 실험을 진행하였으며, 실패수를 이용하여 OUR변화에 따른 SCOD의 변화를 비교·평가하였다. 그 결과 최적의 F/M 비는 0.03~0.05이었고, pH는 6.0~8.5, 온도는 20~30°C에서 OUR 값이 가장 높았으며, 질산화에 대한 산소소모는 미비했다. OUR 변화에 따른 SCOD (Soluble COD)의 변화는 OUR 변곡점 시간 전후로 SCOD의 분해속도에 차이가 있음을 알 수 있었다. 본 연구의 실험방법을 이용하여 하수처리장의 유입수 실시간 예측을 통해 최적의 운영을 할 수 있을 것이라 기대한다.
주제어 : 급속 OUR (Oxygen Uptake Rate), 미생물 활성도, 영향인자

1. 서론

하수처리장의 운전/관리 최적화를 위해서는 현재 유입되고 있는 유입수 특성 파악이 중요하며, 그 중에서도 유입 COD에 대한 정확하고도 신속한 사전인지여부는 하수처리장 운영모델 모사에 있어 매우 중요한 인자로서 최근에는 이러한 모니터링 기법과 실증규모 하수처리장의 적용·성공 사례가 발표되고 있다.¹⁾

하수처리장 운영모델 모사에서 가장 중요한 점은 신속하고도 정확하며 기존 이화학적 분석으로는 확인이 불가능한 COD의 분석능 확보인데, Spanjers 등²⁾에 의하면 미생물을 이용한 산소 이용률(OUR; Oxygen Uptake Rate) 측정방법은 하수처리의 각 공정을 모니터링하고 미생물의 동역학적 인자 도출을 가능하게 할 수 있다고 제시하였다. 또한 OUR은 이화학적 분석이 불가능한 이분해성 COD (RBCOD; Readily Biodegradable COD)의 분율분석에 매우 유용한 방법으로 알려져 있다.³⁾ 이는 미생물의 호흡과 성장, 그리고 유기물, 질소 제거기작에 산소가 직접적으로 관여하고 있기 때문으로,⁴⁾ 하수처리 공정을 해석하고 하수처리 모델의 구성인자를 도출하는데 매우 유용한 방법으로 활용되기 시작하였다.^{5,6)} 일반적으로 유입수내 RBCOD를 측정하기 위한

OUR 실험은 높은 F/M비(>1 mg COD/mg VSS) 조건에서 장시간 동안 기질 제거와 산소소모량, 그리고 미생물량의 변화를 통해 그 결과를 획득하였다. 하지만, 이는 미생물 성장을 고려하여야 하기 때문에 보다 복잡한 동역학적 해석이 필요하다.^{7,8)} 반면, 낮은 F/M비(<0.2 mg COD/mg VSS)에서는 기질제한으로 인해, 오염물질이 급속히 분해되고 특별한 biomass 성장이 발생하지 않기 때문에 단기간에 실험 결과를 도출할 수 있어^{7,8)} 하수 처리장 운영의 실시간 공정 제어가 가능할 것이라 판단된다.

급속 OUR 방법으로 RBCOD의 정확한 예측값을 위해서는 미생물의 활성도(Yield)가 최적화 되어야 하며, 미생물의 활성도에 영향을 주는 인자(F/M비, 온도, pH, 질산화 등)를 평가 하여 최적의 값을 도출해야 한다.

따라서 본 연구에서는 합성폐수를 이용한 급속 OUR 곡선의 변화추이를 확인할 수 있는 최적 F/M비를 도출하였고, 미생물 호흡을 변화특성에 영향을 미치는 인자(온도, pH, 질산화)들에 대하여 검토하였다. 또한 A시 하수처리장으로 유입되는 실패수를 이용하여 OUR의 변화에 따른 SCOD (Soluble COD)의 변화를 비교하였다. 본 연구를 통해 하수처리장으로 유입되는 실패수를 실시간으로 예측하여 최적의 하수처리장 운영을 할 수 있을 것이라 기대한다.

† Corresponding author E-mail: moonilkim@hanyang.ac.kr Tel: 031-400-5142 Fax: 031-502-5142

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 장치

호흡도 분석을 위하여 제작된 회분식 반응기는 Fig. 1과 같다. 두께 0.5 cm의 아크릴재질의 원통형 포기부와 DO 측정부, DO meter로 구성되어 있다. 포기부와 DO 측정부는 펌프를 통해 60초 간격으로 ON/OFF를 통해 순환되며 DO meter (YSI 5100)를 이용하여 DO 변화를 측정하였다. 연속적인 DO 변화를 측정하기 위해 DO 측정부 반응기는 2개로 설치하였고 자석 교반기에 의해 700±10 rpm으로 교반시켰으며 공기의 유출·입을 막기 위해 DO Probe와 반응기 사이를 O-ring으로 밀폐시켰다.

2.2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 슬러지는 A시 하수처리장의 생활하수 반송슬러지(MLSS 5500±100 mg/L, MLVSS 5000±100 mg/L)를 채취하여 24시간 폭기시켜 내생호흡단계에 이르게 하여 사용하였다. 합성폐수 조제는 Glucose를 사용하였는데, 김철⁹⁾의 실험결과에 의하면 Glucose의 경우 Bacto-peptone, Starch에 비해 DO 농도 변화가 매우 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다. 이는 일반적으로 알려진 바와 같이 Glucose가 미생물에 의해 쉽게 분해되기 때문이다. 실험폐수는 A시 하수처리장의 생활하수 및 공장계폐수를 사용하였는데, 생활하수의 경우 다른 하수처리장과 성상의 차이는 거의 없었다. 공장계폐수의 경우 종류 및 제조 물질에 따라 성상의 차이가 있을 수 있다. 하지만, A시의 경우 대단위 공업단지를 보유하고 있는 도시로서 각종 공장 폐수가 집수되어 유입되기 때문에 다른 도시의 하수처리장으로 유입되는 공장 폐수를 대표할 수 있다고 판단된다.

실험방법은 먼저 합성폐수의 DO 측정 전 슬러지의 내생호흡율(Endogenous)을 파악하기 위해 슬러지와 수돗물을 1:1로 섞어 폐수와 동일한 1분 간격으로 DO를 측정하였다. 내

생 호흡을 측정 후 반응기에 24시간 동안 소화시킨 슬러지와 시료(합성폐수)를 주입한 후, 1분 정도 교반시켜 충분히 혼합이 되도록 하였다. 이후 DO 변화를 측정하여 내생호흡율까지 OUR이 감소하였을 때를 반응이 끝났다고 판단하였다. OUR은 반응시간에 대한 산소의 소모량(mg O₂/L · hr)으로 계산하였다. 모든 실험에서 pH와 온도는 각각 7.0±0.5, 21±2°C를 유지하였다.⁹⁾

2.3. 분석방법

모든 분석은 Standard Methods¹⁰⁾에 준하여 DO, pH, 온도, COD_{Cr}, SS, VSS를 분석하였다. COD의 분석을 위해 시료는 3분 간격으로 반응기로부터 10 mL씩 채취하였다. 이때 반응기의 상부를 하양 압밀함으로써 반응기내에 공기층의 형성을 억제하여 용존 산소 농도의 변화를 방지하였다. SCOD 분석을 위해 GF/C filter paper (Whatman International Ltd., England)로 고액 분리하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. OUR 변화 추이에 따른 최적 F/M비 도출

급속 OUR 방법의 적합성을 평가하고 실험수의 실험 전 최적의 F/M비를 평가하기 위한 실험을 진행하였다. F/M비는 0.0045를 시작으로 점차 증가시키면서 Microbial Respiration (MR) 반응 변화와 반응 종료시간을 보았다. F/M비가 작을수록 OUR의 변곡점은 짧은 시간 내에 떨어지고, 클수록 변곡점은 긴 시간에 걸쳐 떨어지게 된다. 이것은 먹을 수 있는 기질이 많을수록 미생물이 긴 시간동안 기질을 소모하며 호흡을 하고, 기질이 적을수록 짧은 시간에 소모하며 호흡을 하기 때문이다. 본 연구에서는 적정 OUR 변곡점 시간을 15~20분으로 결정하였다. 하수처리장 운영 모델에서 중요한 점은 RBCOD 값을 정확하고 빠르게 예측할 수

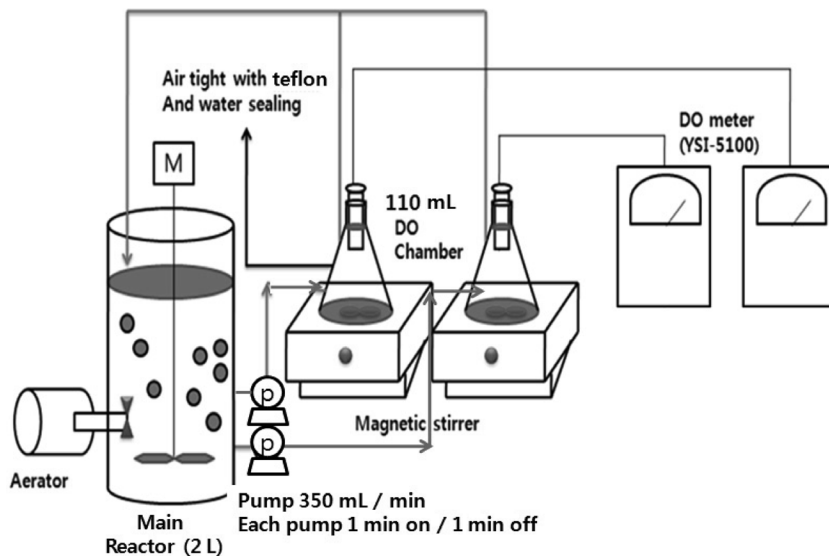
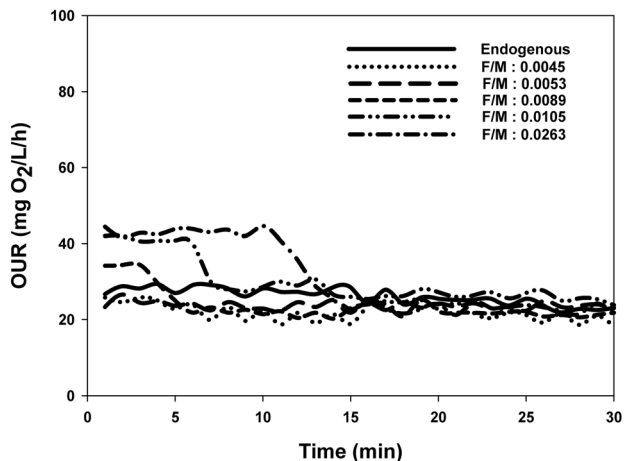


Fig. 1. Schematic diagram of OUR tester.

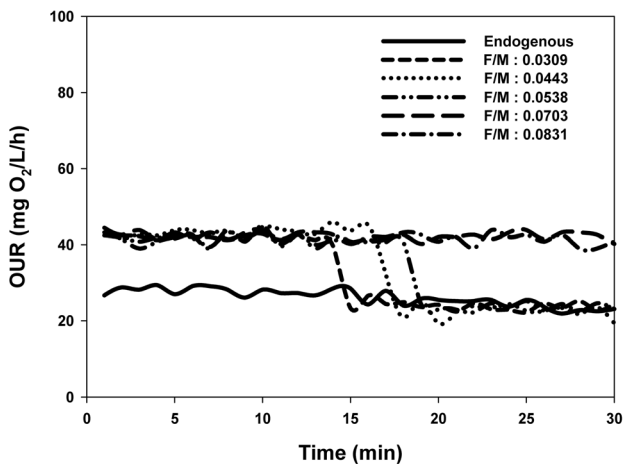
있는 능력이다. RBCOD는 쉽게 분해가 가능한 유기물로서 분해 시간이 짧기 때문에 단시간 내에 값을 판단 할 수 있어야 한다. 이에 따라 본 연구는 최적의 시간이라 판단되는 15~20분을 적용하여 평가하였다. Glucose를 이용한 합성폐수 실험 결과 Fig. 2와 같이 F/M비 0.0390, 0.04431, 0.05381일 때 OUR은 약 15~18분 사이에서 급격히 떨어지는 것을 확인 할 수 있다. 각 실험은 F/M비 값에 따라 10회의 반복실험을 하였다.

앞서 언급한 바와 같이 F/M비가 커질수록 OUR 값이 감소되는 시간도 길어짐을 알 수 있다. 일반적인 활성 슬러지 공법의 경우 F/M비는 0.10~0.35가 사용되며 생물학적 처리를 위한 적정 F/M비는 미생물종에 따라 차이가 있기는 하지만 일반적으로 0.4~1.0^{11,12)}으로 제시되고 있다. 본 연구에서의 실험결과, 제시된 최적의 시간(실험시간)에서 합성폐수의 성상을 예측할 수 있는 F/M비는 0.03~0.05로 나타났다.

합성폐수와 실험수는 정상적인 측면에서 차이가 있다. 따라서 실험수의 적용 F/M비와 합성폐수에 적용된 F/M비는 다른 값의 결과가 도출될 수 있다. 하지만, 실험수의 MR 반응 종료 시간을 15~20분에 맞추는 F/M비를 예상하기는



(a) F/M : 0.0045~0.0263, Standard deviation (0.091~7.83), n=10



(b) F/M : 0.0309~0.0831, Standard deviation (0.346~11.803), n=10

Fig. 2. Optimal F/M ratio according to both OUR and reaction time with synthetic wastewater.

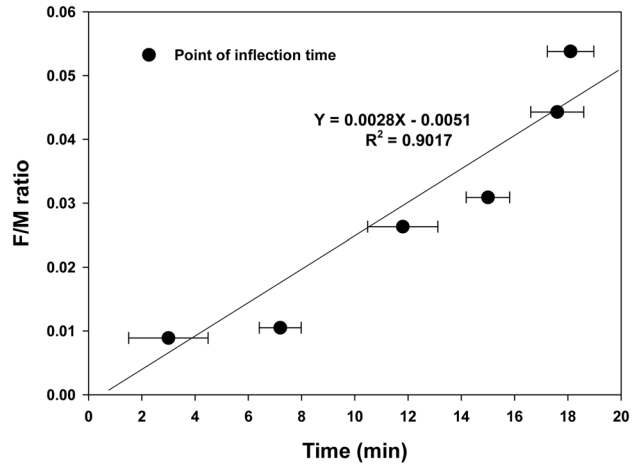


Fig. 3. F/M ratio according to point of inflection time (Standard deviation : 0.78~1.49, n=10).

어렵다. 따라서 실험수의 MR 반응 종료 시간을 적정의 시간에 맞추기 위해서 먼저 합성폐수로서 도출된 0.03~0.05의 중간값인 0.04를 적용하여 실험한 후, 적절하지 않을 경우 OUR 변화 그래프를 통해 예측이 가능한 F/M비를 적용하여 실험을 진행해야 할 것으로 판단된다.

합성 폐수를 각 F/M비에 따라 10회씩 반복하여 도출된 변곡점 시간을 Fig. 3에 나타내었다. x축은 변곡점 시간을 나타내며, y축은 F/M비를 나타낸다. F/M비 증가에 따라 변곡점 시간이 길어지는 것을 알 수 있다. 본 실험을 통해 얻어진 결과 값의 신뢰도는 90%였으며, 추세를 통해 얻어진 식으로 1시간 뒤 변곡점이 발생하는 F/M비를 예측하였을 때 0.167로 예측할 수 있었다.

3.2. 최적조건을 위한 pH, 온도 조절 및 Allylthiourea-(ATU) 주입 실험

OUR에 영향을 주는 요소는 F/M비 이외에도 미생물의 동력학적 계수 값과 다양한 환경요소가 있다. 그 중에서 특히 pH, 온도 그리고 독성물질이 OUR 값에 크게 영향을 주는 인자로 알려져 있다.^{13,14)} 본 연구에서는 pH, 온도, 그리고 질산화 영향을 확인하기 위해 각각의 조건을 변화시켜가며 OUR 특성을 비교평가 하였다. 특히, 급속 OUR 실험에서 독립영양 미생물에 의한 영향정도를 평가하기 위해 질산화 방지제인 ATU를 주입하여 그 결과를 비교하였다. 영향인자 실험을 위해 내생호흡을 측정방법과 동일한 방법으로 OUR을 측정하였으며, 사용된 sample은 Endogenous 상태인 슬러지와 수돗물을 1:1로 섞어 실험을 하였고, 3~5회 반복 실험을 하였다. Fig. 4~6 내에 반복된 실험은 "Run"으로 표현하였다.

일반적으로 하수처리장 유입수내 pH는 하수처리공정 내 미생물에 큰 영향을 준다. 하수처리 공정의 미생물은 pH 변화에 민감하여 강산 또는 강알칼리 상태일 경우 미생물의 활성도를 저하시키고, 심하면 미생물의 세포벽과 조직을 파괴하여 하·폐수 처리기능을 파괴하기도 한다.¹⁵⁾ 또한 pH

가 강산이거나 강알칼리일 때 독성물질과 유사한 특성을 나타내게 되며 이는 급격한 OUR 변화로서 알 수 있다.

Fig. 4에서 보는바와 같이, pH 6.0~8.5에서 미생물의 활성도가 가장 높은 것으로 나타났으며, pH 5.0 이하 또는 pH 9.0 이상의 구간에서는 미생물의 활성도가 1/2 이상 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 다양한 pH 범위에서 나타나는 동일 미생물의 OUR 값은 강산성과 강알칼리 영역으로 갈수록 내생호흡 상태의 OUR 값보다 급격히 감소함을 확인할 수 있었는데, 이 구간에서는 미생물이 pH 영향에 의해서 미생물이 사멸되기 때문이다. 이는 강산과 강알칼리 구간에서 pH 변화에 의한 저해(Inhibition)와 세포벽 파괴 등의 현상이 복합적으로 나타나고 있기 때문으로 사료된다.¹⁵⁾ 본 실험결과 적정 pH 범위는 6.0~8.5로 나타났으며, 이 결과는 김 등¹⁵⁾이 연구한 결과와도 유사한 것으로 판단되었다. 하지만 추후 독성물질 주입에 따른 미생물의 활성도를 직접적으로 평가하는 것이 필요하다고 판단된다. 비록 본 연구에서는 pH의 평가를 통해 독성물질 유입 시 OUR 변화를 간접적으로 평가할 수 있었지만, 직접적인 평가를 통해 미생물 거동이나, 특성 변화를 평가해 볼 필요가 있다.

Fig. 5는 다양한 온도 조건에서의 OUR 변화를 나타낸 그래프이다. 온도 변화에 따른 미생물의 활성도를 측정하기 위해 먼저 내생호흡 상태일 때 온도와 OUR을 측정하였다.

측정결과 정상적인 온도 약 20~30℃일 때, sample의 OUR 값이 가장 높았다. 온도가 약 20℃ 이하로 떨어지거나 약 30℃ 이상으로 상승하였을 때, Sample의 OUR 값은 내생호흡 상태의 값보다 1/2 이상 감소하는 결과가 나타났다. 이는 앞서 pH 실험과 동일한 이유로서 온도의 급격한 감소와 증가로 인해 미생물의 활성도를 저하시키기 때문으로 판단된다.

일반적으로 온도에 따른 미생물 성장속도는 온도가 10℃와 20℃에서 약 2배 정도의 성장 속도 차이를 보인다. 본 실험에서 15℃와 30℃에서 각각 OUR 값이 13, 25 mg O₂/L/h로서 앞서 제시한 미생물 성장속도와 거의 일치한 값이 나왔음을 알 수 있다. 이것은 OUR이 미생물의 활성도 측정용으로도 활용이 가능하지만 미생물의 성장지표로도 활

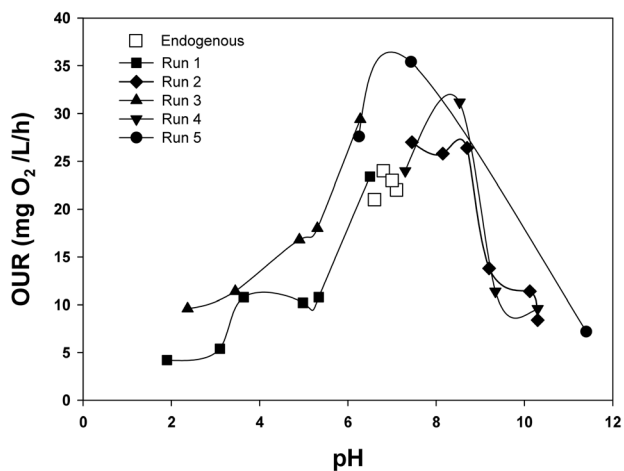


Fig. 4. Optimal pH for OUR.

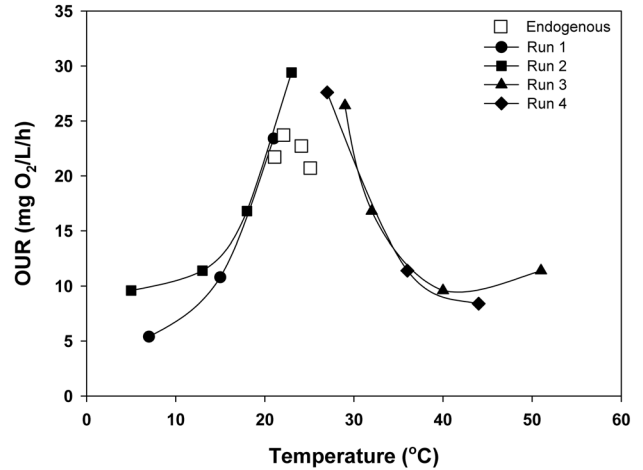


Fig. 5. Optimal temperature for OUR.

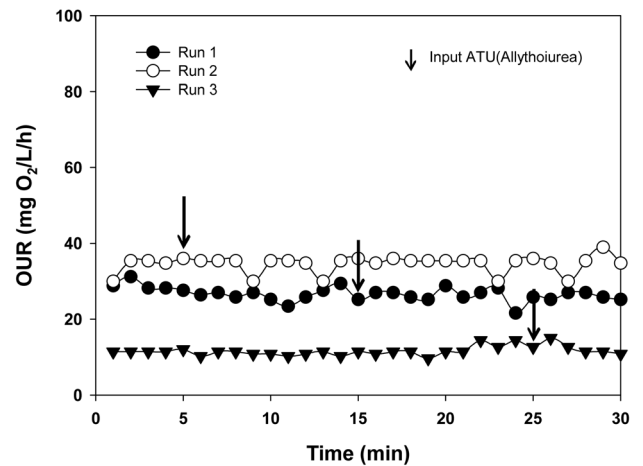


Fig. 6. Influence of ATU on OUR response.

용이 가능하다는 것을 나타낸다. 따라서 본 실험결과로 미루어 미생물의 최적 활성에 미치는 온도범위는 20℃부터 약 30℃이고, 이때 가장 활발히 활동하고 성장하는 것으로 판단되었다.

pH, 온도 두 실험을 통해 급속 미생물 호흡을 측정(OUR) 모니터링 방법은 하수처리장 공정 내 미생물의 활성도를 실시간으로 측정할 수 있는 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 6은 질산화 영향을 알아보기 위한 실험으로 질산화 방지 억제제인 ATU (1-Allyl-2-thiourea, Aldrich Chemical Company, Inc.) 주입에 따른 OUR 반응을 나타낸 것이다. ATU의 양은 기존의 문헌을 참고하여 20 mg/L로 주입하였다.¹⁶⁾ 질산화가 일어나면 독립영양 미생물의 산소소모로 인해 OUR 값은 크게 증가할 것이다. 하지만 그림에서 확인할 수 있듯이, 실험간 ATU 주입에 따른 OUR 값의 감소는 매우 미미한 것으로 나타났다. 이는 질산화에서 암모니아성 질소 및 질산염을 기질로 이용하는 질산화균은 독립영양 미생물 군으로 유기물의 분해로부터 성장하는 종속영양 미생물군보다 성장속도가 상대적으로 매우 느리기 때문이다. 따라서 본 실험의 경우 30분 동안의 짧은 반응시간으로 유기

물을 분해하는 미생물이 암모니아성 질소 및 질산염을 기질로 하는 질산화균의 성장 속도보다 빠르기 때문에 질산화에 의한 산소소모는 없거나 거의 무시할 만한 것으로 판단되었다.

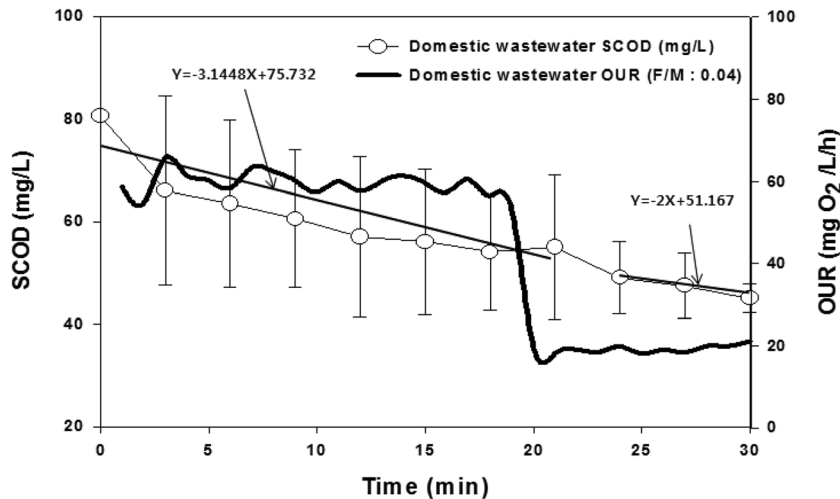
3.3. OUR 변화에 따른 SCOD 변화

Fig. 7은 A시 하수처리장으로 유입되는 생활하수와 공장계 폐수의 OUR 곡선에 따른 SCOD 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 생활하수와 공장계 폐수 모두 시간이 지날수록 미생물의 유기물 분해로 인해 SCOD 값은 감소하고 있는 것을 알 수 있다. F/M비는 앞서 3.1절의 합성폐수의 실험을 토대로 생활하수와 공장계 폐수의 다양한 F/M비 실험을 통해 20분대에서 변곡점이 발생하는 F/M비를 파악하였으며, 결과 생활하수는 0.04, 공장계폐수는 0.0075로 도출되었다.

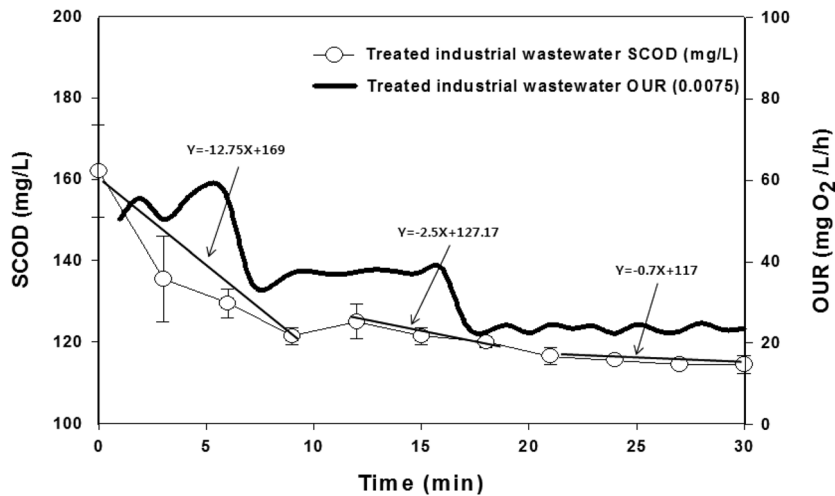
Fig. 7(a)는 생활하수의 OUR 곡선에 따른 SCOD를 나타낸 것이다. 결과 OUR 변곡점이 발생하는 20분대를 기준으

로 SCOD의 제거되는 속도를 비교했을 때, 0~20분까지의 제거 속도가 20분 후의 제거 속도보다 빠르다는 것을 알 수 있다. 이는 최초 미생물의 성장과 호흡을 통해 약 20분까지 빠르게 기질을 소모하면서 SCOD의 제거속도가 빠르게 이루어졌고, 약 20분후는 기질 소비를 모두 하여 미생물이 내생호흡 단계에 이르면서 제거속도가 느리게 이루어졌다고 판단된다.

Fig. 7(b)는 공장계 폐수의 OUR 곡선에 따른 SCOD 값을 나타낸 것으로 생활하수와 다르게 OUR 변곡점이 7분, 18분대에서 2회 발생을 하였다. 본 실험의 경우 짧은 시간에 미생물이 유기물을 분해하는 실험으로서 미생물의 호흡과 성장에 사용된 유기물은 쉽게 분해 될 수 있는 RBCOD로 판단할 수 있다. 시료는 공장계 폐수로서 각종 산업체에서 사용되는 폐수가 혼합된 것으로 최초 7분까지는 메탄올과 에탄올 등 RBCOD 중에서도 더 쉽게 분해가 될 수 있는 물질이라고 판단된다.¹⁷⁾ 유기물 분해 역시 7분대까지의 분해속도가 가장 빠른 것을 볼 수 있으며 반응 후 18분 후



(a) Domestic wastewater SCOD and OUR (F/M : 0,0400)
OUR Standard deviation (0,42~13,57, n=10), SCOD (n=5)



(b) Treated industrial wastewater SCOD and OUR (F/M : 0,0075)
OUR Standard deviation (0,30~7,63, n=10), SCOD (n=5)

Fig. 7. OUR curves of treated industrial wastewater compared with SCOD and OUR.

부터는 내생호흡단계로서 RBCOD의 분해가 가장 느린 것을 볼 수 있다. MR 반응시간이 30분 이후 실험을 더 진행할 경우 변곡점이 다시 발생할 것으로 판단이 되는데, 이때 소모되는 COD는 SBCOD (Slowly Biodegradable COD)라 사료된다.

4. 결론

본 연구는 급속 OUR 측정방법과 장치를 이용하여 최적의 F/M비를 도출했으며, OUR 변화에 미치는 영향인자를 평가하였고, 실패수를 이용한 OUR 변화와 SCOD 변화를 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) A시 하수처리장 생활하수 반송슬러지(MLVSS, 5,000 mg/L)와 합성폐수(Glucose)로 pH 7, 온도 25°C일 때, 적정 F/M 비 실험 결과 0.03~0.05로 나타났다.

2) OUR 영향인자 평가를 위한 pH, 온도, 질산화 실험 결과 pH는 6.0~8.5, 온도는 20~30°C에서 가장 활발한 미생물 활성도를 보였으며, 질산화에 대한 영향은 미비하거나 없는 것으로 판단되었다.

3) A시 하수처리장에 유입되는 생활하수, 공장계폐수를 대상으로 OUR과 SCOD의 변화패턴을 비교한 결과, OUR 변곡점 발생 전까지의 SCOD의 분해속도가 변곡점 후의 분해속도 보다 빠른 것을 알 수 있었다. 이는 본 실험의 급속 OUR 실험 시 빠른 시간 내에 실험이 종료된다. 따라서 유기물 중에서 쉽게 분해 할 수 있는 유기물을 분해하면서 미생물의 호흡과 성장을 한다는 것을 알 수 있었다.

4) 본 연구는 기존의 OUR 방법을 개선하고자 한 연구로서 급속 OUR 방법과 기존의 OUR 방법의 영향인자를 비교 검토한 연구로서 기존의 연구방법에서 도출된 영향인자들이 본 연구에서 제시하는 급속 OUR 방법에도 동일하게 적용이 된다는 것을 확인할 수 있었다.

사사

본 연구는 한국수자원공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

KSEE

참고문헌

1. 한국수자원공사, “자가진단형 하수처리장 운영관리시스템 (상용화버전)의 개발 및 실규모 하수처리장 현장적용 연구 (2차년도),” K-water 연구원(2009).

2. Spanjers, H., Takeks, I. and Brouwer, H., “Direct parameter extraction from respirograms for wastewater and biomass characterization”, *Water. Sci. Technol.*, **39**(4), 137~145(1999).

3. Vanrolleghem, P. A., van Daele, M. and Dochin, D., “Practical identifiability of a bioinetic model of activated sludge respiration,” *Water. Res.* **29**(11), 2561~2570(1997).

4. Sperandio Mathieu and Paul Etienne, “Estimation of wastewater biodegradable COD fraction by combing respirometric experiments in variors SO/XO ratios,” *Waste. Res.*, **34**(4), 1233~1246(2000).

5. Cheryl, M. Kussow, Weichang Zhou, David, M. Gryte and Wei-Shou Hu, “Monitoring of mammalian cell growth and virus production process using on-line oxygen uptake rate measurement,” *Enzyme Microb. Technol.*, **17**, 779~783(1995).

6. 정형석, “호흡률 측정법을 이용한 생물학적 질소 제거공정의 모니터링과 시뮬레이션,” 한국과학기술원 석사학위 논문, pp. 1~5(2000).

7. Chudoba, P., Capdeville, B. and Chudoba, J., “Explanation of biological meaning of the So/Xo ratio in batch cultivation,” *Water. Sci. Technol.*, **26**, 743~751(1992).

8. Wentzel, M. C., Mbewe, A. and Ekama G. A., “Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentration in municipal wastewaters,” *Water SA.*, **21**(2), 117~124(1995).

9. 김 철, “호흡도 기법을 통한 폐수내 COD 분율 예측,” 한양대학교 석사학위 논문, pp. 28~33(2000).

10. “Standard methods for the examination of water and wastewater,” *APHA, AWWA, WEF, 21th edition, Washington, D. C* (2005).

11. 성낙창 외, “폐수의 활성슬러지 처리,” 신광문화사, p. 341 (2000).

12. Bruce, E. Rittmann, Perry, L. McCarty, “Environmental Biotechnology: Principles and Applications,” *Mcgraw-Hill*, 324~326(2001).

13. Henze, M., Gujer W., Mino, T. and van Loosdrecht M. C. M., “Activated sludge models ASM 1, ASM 2, ASM 2d, and ASM 3,” *IWA Scientific and Tech Report.*, No. 9(2000).

14. Chung, J. W., “Factors affecting nitroe accumulation and process optimization in a shortcut biological nitrogen removal hybrid reactor”, ph. D. thesis. Hanyang University, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea, pp. 225~231(2001).

15. 김연권, 문용택, 김지연, 서인석, “pH 조절을 통한 폐활성슬러지의 COD 가용화 및 감량화 평가,” 상하수도학회지, **21**(5), 551~558(2007).

16. Orhon, D. and Çokgör, E. U., “COD fractionation wastewater characterization-The state of the art,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **68**, 283~293(1997).

17. Kim, Y. K., “Respirometric monitoring of microbial behavioral characteristics change through the retrofitting process,” Ph. D. Thesis. Hanyang University, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea, pp. 210~214(2003).