

Multi-Biosensor를 이용한 축산폐수의 생물화학적 산소요구량 실시간 측정방법 연구

김진경 · † 김태진
수원대학교 공과대학 화공생명공학과
(접수 : 2005. 12. 6., 게재승인 : 2006. 7. 24.)

On-Line Measurement of Biochemical Oxygen Demand of Livestock Wastewater by Multi-Biosensor System

Jin-Kyeung Kim, Chang-Bum Yang¹, and Tai-Jin Kim[†]
Department of Biochemical Engineering, College of Engineering, University of Suwon,
Suwon P. O. Box 77, Suwon 440-600, Korea
(Received : 2005. 12. 6., Accepted : 2006. 7. 24.)

The present study was intended to examine a basic scheme to determine the biochemical oxygen demand (BOD) of livestock wastewater by means of six individual dissolved oxygen (DO) sensors and its multi-measurable meter. Maximal point of the first order time derivative of the DO difference between DO distribution of sterilized livestock wastewater and that of non-sterilized livestock wastewater, was considered as the oxygen uptake rate (OUR) of microorganisms in livestock wastewater, as determined to be 0.00074 mg O₂ / l · sec. The present study showed that there was a fair linear relationship (97.72%) between maximal OUR and BOD values of livestock wastewater, the latter being determined by classical Winkler azide method. It was thus concluded that the present multi-biosensor system might be applicable to an on-line system for measurement of BOD of livestock wastewater.

Key Words : Livestock, wastewater, BOD, OUR, monitoring

서 론

수질오염 정도를 측정하는 방법은 여러 가지가 있으며 그중 폐수중의 유기물 오염의 척도로서 가장 널리 쓰이는 방법 중의 하나는 생물화학적 산소 요구량 (Biochemical Oxygen Demand; BOD)이다. BOD는 폐수 중에 유기화합물이 미생물에 의해 분해되어 안정화되는 과정에서 소모되는 산소량이다. 일반적으로 BOD는 시료를 20°C에서 5일간 배양하였을 때, 소비된 산소의 양을 배양 전의 초기 산소의 양과 비교하여서 BOD를 결정하는 것이다(1). 그러나 공정법상 BOD₅ 측정방법은 5일이라는 시간이 경과한 후에 측정값을 알 수 있으므로 폐수처리장의 실시간 운전용에 용이하지 못하고 실험자의 숙련도에 따라 재현성이 낮다는

문제점을 가지고 있다. 이와 같은 문제점을 보완하여 신속하고 재현성 있는 방법들이 요구되어지고 있다.

공정법상 BOD₅의 문제점을 개선하기 위하여 시간-온도법, 상관법, 압력법, 특수 균주 접종법, 미생물 고정화법 등이 5-day BOD 법보다 빠른 시간 내에 측정이 가능함을 보여주고 있으며 많은 연구가 진행되어 왔다(2-5). 그러나 이러한 방법도 비교적 오랜 시간이 소요되며 공정시험법과 비교할 때 정확한 값을 얻을 수 없으며 재현성 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 특수 균주 접종법과 미생물 고정화법은 다량의 미생물이 함유된 축산폐수와 같은 생물 폐수에서는 투여 및 고정화된 미생물보다 자체 미생물이 소모하는 산소량이 크기 때문에 제 역할을 할 수 없다. 또한 미생물의 활성이 시간에 따라 달라지는 문제점과 미생물을 별도 배양의 문제점이 있어 생물폐수의 적용에 부적절하였다.

본 연구에서는 위와 같이 미생물이 가지는 문제점을 제거하기 위하여 축산폐수 자체에 함유된 미생물을 이용하였다. 주어진 시간 내에 미생물이 호흡하면서 소모하는 산소의 거동을 DO 측정기로 연속 계측하여 미생물 군 고유

† Corresponding Author : Department of Biochemical Engineering, College of Engineering, University of Suwon, Suwon P. O. Box 77, Suwon 440-600, Korea
Tel : +82-31-222-6166, Fax : +82-31-223-0017
E-mail : tjkim@suwon.ac.kr

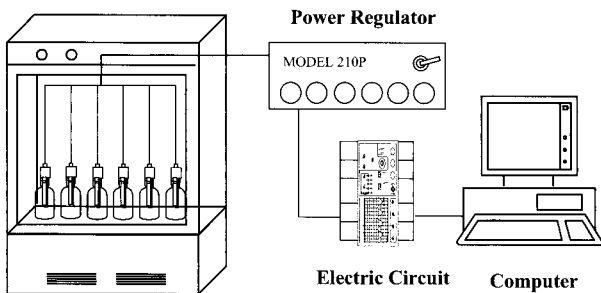
의 산소소모 거동을 확인하고 BOD 농도에 따른 산소소모 거동과의 상관관계를 밝힘으로써 실시간 BOD 연속 측정 시스템을 위한 실험실적 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

시료 채취 및 BOD 비교 측정

실험에 사용된 축산폐수의 시료는 경기도 화성군에 위치한 축산연구소 내의 축산폐수처리장에서 채취하였으며, 이 처리장에 유입되는 폐수는 돈사에서 유출된 분뇨를 일차적인 스크린 (400 × 400) 처리된 상태이다. 그러므로 돈사에 사용되는 사료 등 부피가 있는 부유물은 제거된 상태의 축산폐수이다. 폐수처리장으로 유입되는 원수 및 방류수를 채취하였다. 채취장소는 연구실로부터 10분 정도의 거리에 위치에 있으며 운반도중의 폐수의 변질은 없다고 할 수 있으며, 채취후 2시간 안에 실험이 진행되지 않는 경우에는 4℃ 냉장고에 보관하였다. 채취한 폐수의 사용기한은 24시간으로 제한하였다.

축산폐수의 BOD 측정을 하기위하여 최적 희석배율과 연속 측정에 사용될 산소센서 및 계측기의 평가를 위해 표준 방법에 명시된 Winkler Azide화 변법과 용존산소 센서법으로 비교 평가하였다.



BOD Incubator

Figure 1. Schematic diagram of hexagonal sensor system and multi-biosensor.

시스템 구성 및 제어

시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. 온도는 BOD 실험에 일반적으로 사용되는 BOD incubator (JISICO, C-1B02)를 사용하여 20℃로 항온하였다. 계측에 사용된 센서는 자체 구동모터를 내장한 DO 센서 ((주)바이오텔, 201S) 6개로서 시료 용기는 300 ml BOD병을 사용하였다. 각각의 센서는 독립적으로 용존산소 계측을 수행할 수 있으며 이 시스템에서는 양극을 병렬로 연결하여 계측시스템에서 공급되는 전압이 각 센서마다 -0.8 V값이 동일하게 전달하게 하였다. 센서에 부착된 구동형 모터는 power regulator ((주)바이오텔, 210P)로 6개 전극을 통합하여 제어할 수 있도록 고안되어 제작하였다. Regulator를 이용하여 모터의 회전 rpm 속도를 조정하였으며 rpm측정은 타코미터 (LIME, TM-2011)로 계측하였다. 계측시스템은 컴퓨터와 통신할 수 있는 프로그램을 사용하였다. 측정센서가 계측한 값을 컴퓨터가 받

아들이는 형태는 전압값이므로 이를 ppm 값으로 환산하기 위하여 교정실험을 하였다.

Fig. 1 시스템에 증류수를 채우고 Na₂SO₃를 15 g씩 넣은 후 5분의 안정화 시간을 준 후 매초마다 1분 동안 측정하여 용존산소량이 0일 때를 측정하였다. 포기 (aeration)한 증류수를 준비하여 시스템에 넣고 동일한 방법으로 측정하였으며 이때의 포기된 증류수의 ppm값을 용존산소 계측기와 센서를 사용 측정하였다.

평균기법을 이용한 시스템 보정

일반적으로 DO meter 및 센서에서 산소를 소모하는량은 극미량이므로 미생물이 저농도 폐수와 일반적인 용존산소 측정에 있어서는 무시할 수 있으나 본 연구에서 같이 1시간동안 연속적인 측정방법과 미생물만이 소모하는 산소량의 변화를 이용한 연구에서는 DO의 거동으로부터 상관관계를 도출하기 때문에 시스템에 의한 DO거동 손실 보정 실험을 수행하기 위하여 축산폐수를 autoclave (Tomy Seiko, SS-325)로 121℃, 1기압 조건에서 30분 동안 멸균함으로써 폐수 중의 미생물 활동을 중지시켰다.

산소 소모 속도 (Oxygen Uptake Rate; OUR)

산소는 미생물 뿐만 아니고 동식물의 대사과정을 유지하는데 가장 필요한 영양소이다. OUR은 미생물의 대사활성도 (metabolic activity) 과정에 소모되는 산소 소모량을 말하며 미생물을 bioreactor에서 배양할 때 또는 scale-up하는데 중요한 인자이다. OUR을 측정함으로써 미생물의 산소요구량을 구하여 bioreactor의 최적 운전조건을 찾을 수 있으며 동물세포인 *E. coli*의 경우 최고 산소요구량은 6,480 mM O₂ / ℓ · h이다(6).

일반적으로 OUR 측정은 Fig. 2와 같은 반응기에 공기를 주입시키고 반응기 내에서 미생물에 의한 산소소모 후 반응기 외부로 유출되는 산소량을 측정함으로써 구할 수 있다. Fig. 2의 공정은 다음과 같은 식(1)으로 표현되어진다(7).

$$OUR = Q_{O_2,i} \cdot C_{O_2,i} - Q_{O_2,f} \cdot C_{O_2,f} = Q_{O_2} \cdot X \quad (1)$$

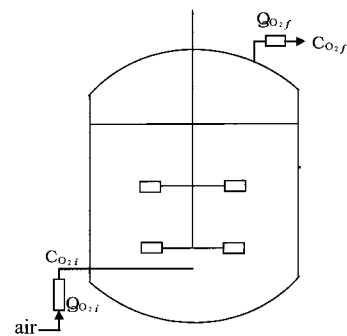


Figure 2. The basic operation involved in aerobic fermentation.

여기서 Q_{O₂}는 단위시간당 미생물이 소모하는 산소소모량을 말하며, C_{O₂} 반응기에 유입 및 유출되는 산소농도이고, X는 미생물의 농도를 나타낸다. 이 때 O_{2,i}는 초기 산

소조건이고, O_2, f 는 후기 산소조건이다. 이동적 상태 (dynamic state)에서의 OUR 측정에는 Fig. 3(a)에서와 같이 공기를 계속 공급하다가 차단했을 때 미생물이 소모하는 산소의 양이 시간에 따라 $-Q_{O_2} \cdot X$ 의 속도로 감소하며 나타나게 된다. 산소농도가 한계농도로 떨어졌을 때 다시 공기를 불어넣어 액중 산소의 농도를 원상 복귀시킨다. 이와 같은 방법을 반복적으로 실험하여 미생물의 최적 산소요구량을 측정하게 된다. 시간에 따른 미생물의 산소소모는 일반적으로 용존산소 센서를 이용하여 측정한다.

동적 상태 (dynamic state)에서의 시간에 따른 산소 농도 변화를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$OUR = -dC_L/dt = -d(DO)/dt = Q_{O_2} \cdot X \quad (2)$$

여기서 미생물의 농도 (X)가 1시간 이내에 증가하지 않는다고 가정한다면, 일정량의 미생물이 소모하는 산소량도 일정하므로 OUR은 일정하다.

$$Q_{O_2} \cdot X = OUR = Constant$$

Fig. 3(b)는 시간에 따른 산소의 거동을 미분 ($-d(\Delta DO)/dt$) 하였을 때 최고점의 기울기와 시간을 구할 수 있다. 이러한 특성은 미생물의 농도와 미생물의 종류에 따라 각각 다르게 나타내어진다. 이 특성을 이용하여 BOD와의 상관관계를 찾는다.

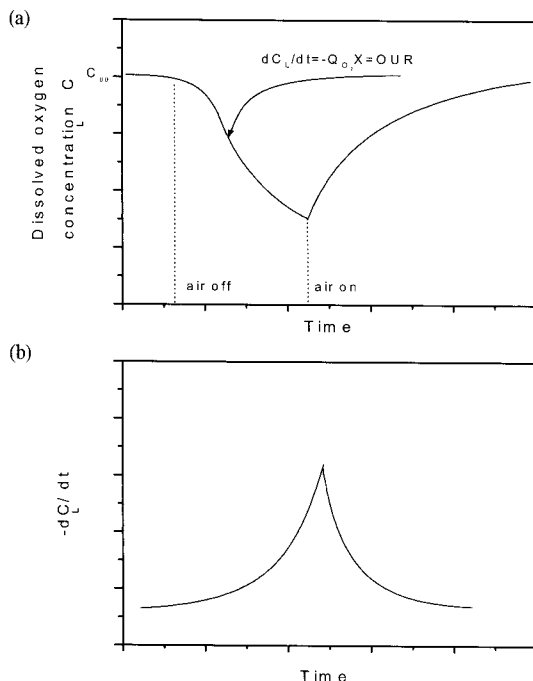


Figure 3. Dynamic measurement of oxygen uptake rate ((a) transient response of dissolved oxygen concentration under ungasged / regassed periods, (b) differentiated with time).

축산폐수 미생물의 농도

미생물의 농도가 한 시간 동안 일정하다고 가정하였다.

미생물농도가 일정해지면 산소소모량도 일정한 관계로 축산폐수 중의 미생물 농도가 1시간 안에 변화하는 지를 측정함으로써 가정을 검증할 필요가 있다. 이 연구는 같은 시료를 바탕으로 축산폐수의 최적흡수과정을 선정하고 축산폐수 접종 량별 배양액의 full range 성장곡선의 pattern을 확인하여 이를 토대로 축산폐수 배양액의 접종 량과 온도 변화에 따른 성장곡선을 측정하여 그 타당성을 보상하고 이를 근거로 하여 축산폐수 내의 존재하는 미생물의 세포 농도 증가에 따른 건조세포 무게와의 상관관계를 규명하여 흡광도와 건조세포 무게간의 검량 곡선을 구함으로써 편리하게 축산폐수의 미생물의 세포농도를 구하기 위하여 선행연구(8)를 수행한 결과에 따르면 평균 미생물 농도 (X)는 0.375g cell/l이었으며, 20°C와 37°C에서 1시간동안 미생물이 성장하지 않음을 알 수 있었다.

측정센서의 보정

시스템에 사용된 6개 센서의 특성에 따라 각각 센서의 전압 값이 다르게 나타내므로 센서의 민감도를 동일하게 유지 하기위하여 각 센서별 보정계수 (correction factor)를 구하여 적용하였으며, 이와 같이 보정한 센서는 산소분압과 안정상태 전압 값이 센서 종류에 상관없이 균일한 선형성을 유지 하게 하였다(9).

측정 방법

축산폐수 시료는 축산기술연구소 폐수처리장으로 유입되는 원수를 희석하여 다양한 범위의 BOD시료를 제조하기 위하여 희석수를 제조하였다. 이 희석수의 조건은 희석할 때 미생물이 희석수에 존재하는 산소량에 따른 변수를 줄이기 위하여 2시간 동안 질소기체로 포화시킨 증류수를 사용하였다. 축산폐수 원수 대 질소기체로 포기한 희석수의 부피를 80 : 20, 60 : 40, 40 : 60, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100으로 혼합하여 시료를 각각 제조하였다.

제조된 시료는 실험조건을 동일하게 하기 위하여 2시간 동안 공기로 포기시킨 증류수를 20°C BOD incubator에 넣고 24시간 후에 포기수로 사용하였다. 이와 같은 포기수를 제조시료와 동일 부피로 혼합하였다. 측정하기 전에 위와 같은 두 희석방법에 따라 희석을 한 후 Fig. 1에 나타난 시스템에 넣은 후 매초 1 point씩 1시간 동안 측정하였다. 이와 같은 제조 시료를 Winkler Azide화 나트륨 변법을 이용하여 BOD₅값을 각각 구하였다.

결과 및 고찰

BOD 측정법의 비교 결과

Winkler Azide화 변법과 용존산소 센서법의 비교는 각 희석비별로 DO meter의 DO거동과 Winkler Azide 방법의 DO 거동을 각각 상관지을 때 Table 1과 같다.

축산폐수 원수의 희석배율 선정실험은 Fig. 4에 각각 희석비에 따라 5회 실험의 평균을 나타냈으며 희석비 1 : 500은 0 ppm에 근접하여 적정 희석배율로 부적합하게 나타났다. 그러므로 원수에 대한 희석배율은 1 : 1000으로 희석하

는 방법이 적절하게 나타났다.

이 실험을 통하여 원수 및 방류수의 적정 희석배율을 선정하였고 원수의 DO meter를 이용한 BOD 실험에서 희석한 시료에서 각각의 거동을 알아볼 수 있었으며 이와 같은 거동의 특이성을 이용하여 시료를 희석하지 않은 원액의 DO거동은 매우 빠른 시간에 0 ppm값으로 접근할 것으로 예상되었다. 이 거동의 일정한 관계와 BOD 농도에 따라 상관관계를 도출하는 실험을 통하여 빠른 시간에 BOD on-line monitoring 실험의 초기적 자료로 제공되었다.

Table 1. Relationship between meter DO and Winkler DO

Dilution ratio	Meter DO = A + B × Winkler DO		
	A	B	R
1 : 5	-0.22	1.21	0.97
1 : 10	1.72	0.93	0.93
1 : 20	3.31	0.68	0.94

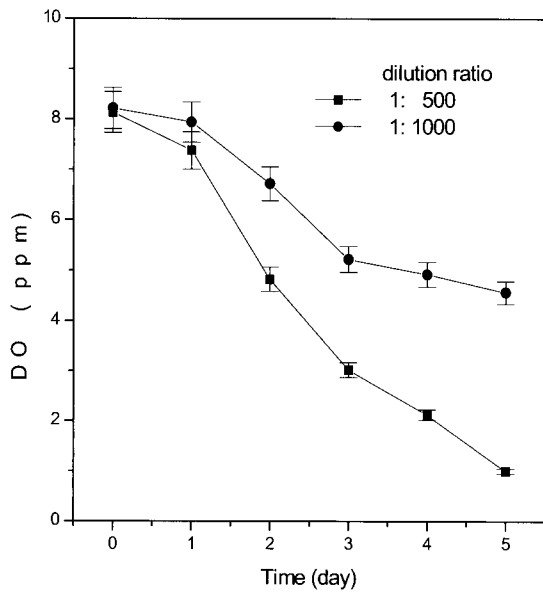


Figure 4. Time distribution of dissolved oxygen measured by DO meter method for five days with various dilution ratio.

측정 센서 시스템의 보정

측정센서를 보정하기 위해 산소농도 0 ppm시 hexagonal 센서 시스템에 시간에 따라 각각 센서별로 출력되는 값과 산소농도 8.2 ppm시 출력되는 volt 값은 시스템의 민감성이 크기 때문에 전압을 센서별로 평균을 내어 ppm 값과 상관관계를 Table 2에 나타내었다. 이 상관관계를 이용하여 센서별 측정되어지는 값을 ppm으로 환산할 수 있으며 각각 센서가 출력하는 volt 값은 서로 상이하지만 ppm으로 변환하여 센서별 차이를 보정할 수 있도록 하였다. 또한 BOD on-line 시스템의 적용을 위해서는 보다 안정적인 변환장치가 요구된다.

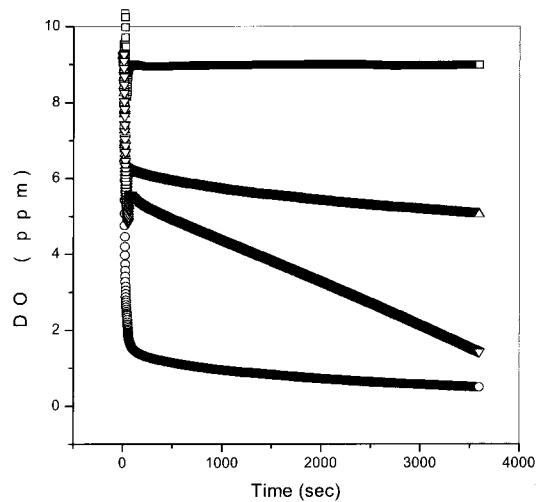
평균기법을 이용한 시스템의 보정

용존산소 센서를 이용하여 DO의 거동 측정 실험은 시스템 자체에서 소모 하는 DO거동이 존재하므로 순수 미생물 많이 소모하는 DO거동을 찾기 위하여 제조된 4개의 시료

를 단일 센서 시스템에 넣고 시간에 따른 DO 변화량을 측정 한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 시료 1과 시료 4를 통하여 두 시료의 DO 거동 차 (ΔDO)를 DO meter 자체의 전기 화학적 영향에 의한 ΔDO 거동임을 확인하였다. 평균 처리한 시료 2와 평균처리하지 않은 시료 3의 ΔDO 는 DO 센서 자체의 전기 화학적 영향과 무관하게 생물폐수 중에 존재하는 미생물에 의한 순수한 DO 거동임을 확인하였다. 즉, 시료 중에 존재하는 미생물에 의하여 소비된 산소농도 임을 확인하였다. 이러한 방법을 이용하여 DO 계측할 때 영향을 주는 전기 화학적 산소 소모요인을 제거함으로써 정확한 BOD 측정 시스템에 접근할 수 있었다.

Table 2. Relationship between average of output voltage and DO

Number of sensor	$V_{avg} = A + B \times DO$	
	A	B
1	0.023	0.265
2	0	0.229
3	0	0.254
4	0.001	0.289
5	0.025	0.268
6	0	0.229



- airation distilled water(DW)
- autoclaving wastewater 30% : N₂ bubling DW 70%
- △ autoclaving wastewater 30% : airation DW 70%
- ▽ nonautoclaving wastewater 30% : airation DW 70%

Figure 5. Transient behavior of DO of livestock wastewater at various condition.

한 지점의 축산폐수 DO변화량의 재현성

동일 지점의 폐수를 일주일 간격을 두고 채취하여 평균 한 후 DO 변화량을 측정하여 Fig. 6(a)에 나타냈으며 같은 시료를 평균하지 않고 DO 변화량 실험을 한 결과 Fig. 6(b)와 같았다. 두 그림에서 보는 것과 같이 동일지점의 폐수는 시간에 따라 평균과 관계없이 일정한 거동을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6(c)는 평균처리 전후의 DO변화량인 ΔDO 거동을 나타냈으며 동일지점의 축산폐수는 일정한 기울기 $\{-d(\Delta DO)/dt\}$ 를 갖는다는 것을 확인하

였다. 이 기울기는 곧 산소소모 속도인 OUR이며 3회의 실험값을 평균할 때 OUR은 0.00074 mg O₂/ℓ · sec이었다.

평균기법을 이용한 축산폐수의 BOD 연속 측정

각 센서별 보정한 Hexagonal 시스템을 사용하여 각각 회석비가 다른 6개 시료의 동시 측정된 결과 평균 처리한 시료의 DO 변화량은 Fig. 7에 나타냈고 비평균처리한 시료의 DO 변화량은 Fig. 8에 나타내었다. 평균처리 전후의 ΔDO의 거동은 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 농도가 가장 큰 시료의 경우 280초 부근에서 0 ppm으로 떨어졌다. 그러므로 0~280초까지의 데이터를 Fig. 10에 상세 표시하였으며 각 시료별 OUR값을 찾기 위하여 ΔDO값을 시간에 대해 미분 $\{-d(\Delta DO)/dt\}$ 한 후 얻을 수 있었다. 또한 비평균처리한 시료를 Winkler azide화 변법으

로 측정된 결과를 OUR값과 Table 3에 나타내었다. 각각 농도별 OUR값은 28~102초 사이에 나타났으며 시료의 농도가 증가할수록 빠른 시간에 OUR값이 나타남을 알 수 있었다.

선행 연구에서 평균 미생물 농도 (X)는 0.375 g cell/ℓ이었으므로 $\{-d(\Delta DO)/dt\} / X$ 에서 계산한 결과 Q_{O2} 평균값은 0.251 mg O₂ / s · g cell이었다. Table 3에서 얻은 데이터를 이용하여 OUR와 BOD₅값의 상관관계를 Fig. 11에 나타냈으며 선형성은 71.23%이었다. 따라서 multi-biosensor 시스템을 이용하여 축산폐수의 DO거동을 측정된 후 OUR를 계산함으로써 짧은 시간 내에 BOD값을 구할 수 있었다. Table 3의 축산폐수 농도별 시간 (t)에서 볼 수 있듯이 축산폐수의 BOD를 짧은 시간에 측정 가능하였다.

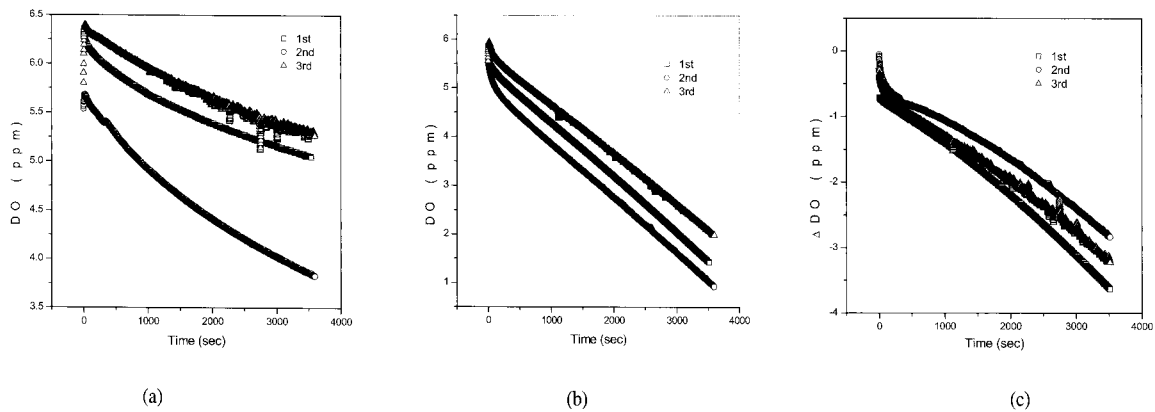


Figure 6. Time distribution of DO for sterilized (a) unsterilized (b) ΔDO (c) livestock wastewater ((livestock wastewater 50 : air-saturated DW 50) (ΔDO = DO_{unsterilized} - DO_{sterilized})).

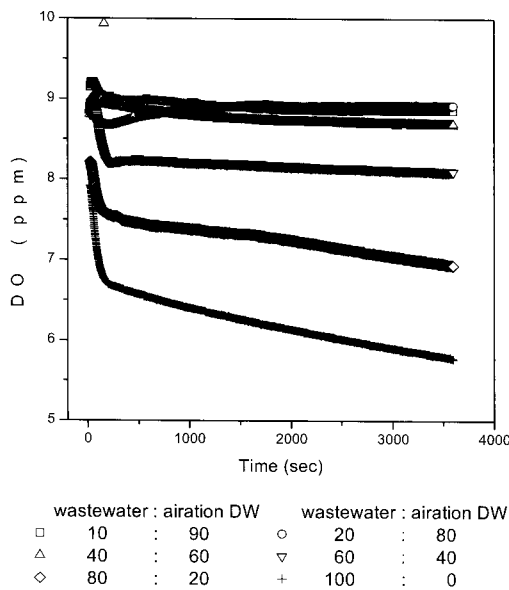


Figure 7. Time distribution of DO for sterilized livestock wastewater by hexagonal sensor system.

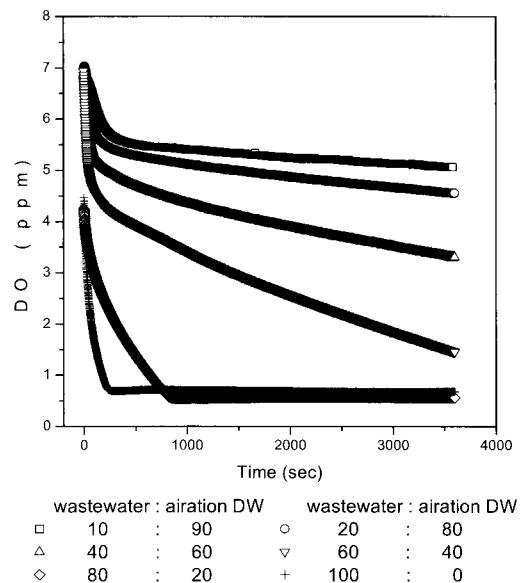


Figure 8. Time distribution of DO for unsterilized livestock wastewater by hexagonal sensor system.

Table 3. OUR vs. BOD₅ at different dilution ratio

percentage of livestock wastewater (%)	OUR [mg O ₂ /ℓ · sec] (t)	Q _{O2} [mg O ₂ / s · g cell]	BOD ₅ [ppm]
10	0.014 (102 sec)	0.360	423
20	0.023 (74 sec)	0.306	916
40	0.033 (62 sec)	0.220	1,408
60	0.072 (27 sec)	0.320	2,390
80	0.032 (28 sec)	0.106	3,652
100	0.077 (28 sec)	0.205	4,580
average	-	0.251	-

요약

용존산소 센서 및 시스템에서 손실되는 산소량을 보정하기 위해 멸균처리 기법을 도입하였다. 멸균처리 시료의 DO 거동과 비멸균처리 시료의 DO 거동차 (ΔDO)는 시스템의 영향과 무관하게 폐수 자체의 순수한 미생물만이 소모하는 산소변화량을 구하였다. 용존산소 센서로 축산폐수의 시간에 따른 DO거동 ($-d\Delta DO/dt$)을 측정하여 구한 폐수 자체의 미생물에 의한 산소소모속도는 $0.00074 \text{ mg O}_2/\ell \cdot \text{sec}$ 이었다. 축산폐수의 원액을 희석하여 다양한 BOD값을 갖도록 시료를 제조한 후 DO meter로 측정하여 구한 DO 변화량은 동일한 시료를 5일 BOD 측정방법인 Winkler Azide화 변법으로 구한 BOD값과 선형구간 (30~60분)에서 97.72%의 높은 상관 선형성을 보였다. 따라서 본 연구의 multi-biosensor 시스템은 축산폐수의 BOD를 짧은 시간에 정확하게 측정할 수 있는 가능성을 제시하였다.

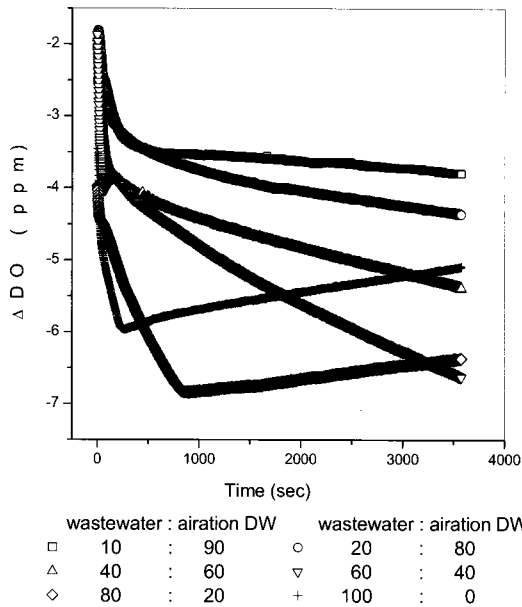


Figure 9. Time distribution of ΔDO for livestock wastewater ($\Delta DO = DO_{\text{unsterilized}} - DO_{\text{sterilized}}$).

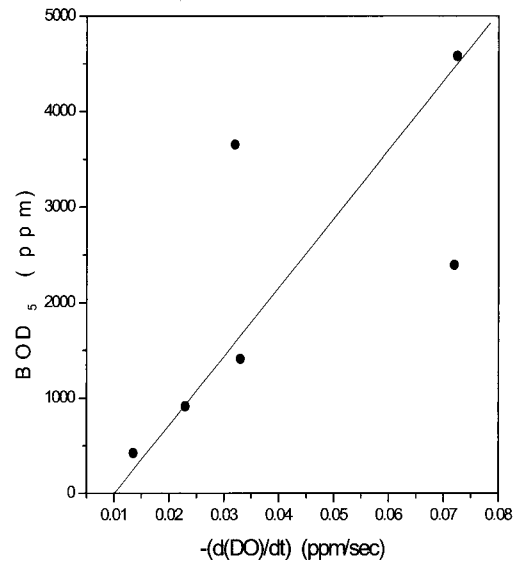


Figure 11. Relationship between BOD and OUR.

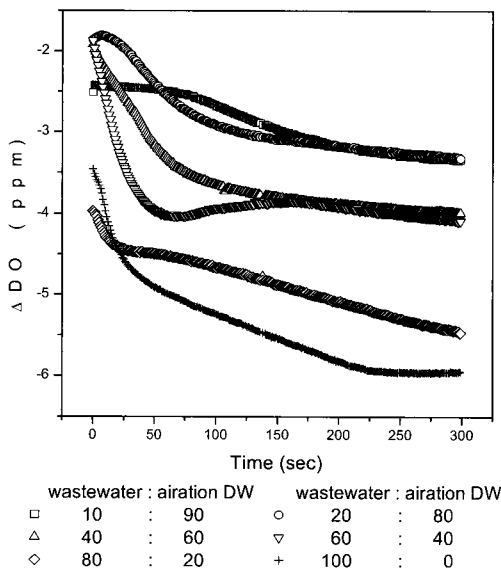


Figure 10. Time distribution of ΔDO for livestock wastewater ((0~280 sec), ($\Delta DO = DO_{\text{unsterilized}} - DO_{\text{sterilized}}$)).

감사

본 연구 결과는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업 (과제번호 : 2960325)의 재정적 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (1992), Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 18th ed., Washington, DC., 5210.

2. Ihn, G. S., Park, K. H., Pek, U. H., and M. J. Son (1992), Microbial BOD Sensor Using *Hansenula anomala*, *Bull. Korean Chem. Soc.* **13**(2), 145-148.
3. Janata, J. (1990), Principles of Chemical Sensors, Plenum Press, 83.
4. Japanese Industrial Standard Committee (1986), Testing Methods for Industrial Waste Water, JIS K 0102, 47, Tokyo, Japan.
5. Karube, I., Matsunaga, T., Mitsuda, S., and S. Suzuki (1977), *Biotechnology Bioengineering* **19**, 1935.
6. Aiba, S., Humphrey, A. E., and N. F. Millis (1973), *Biochemical Engineering* 2nd ed., Academic press, 332-345.
7. Taguchi, H. and A. E. Humphrey (1966), Dynamic Measurement of the Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Fermentation Systems, *Journal of Fermentation Technology, Japan* **44**, 881.
8. Kim, T. J., Seo, J. W., Kim, J. K., Kim, J. C., and T. H. Jung (2001), Initial Study on Behavior of Microorganisms in Livestock Wastewater, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **16**(4), 430-434.
9. Kim, T. J., Jurng, T. H., Chung, U. H., and S. I. Hong (2001), Simultaneous Determination of Oxygen Transport Characteristics of Six Membranes by Hexagonal Dissolved Oxygen Sensor System, *Sensors and Actuators B* **72**, 11-20.