

호흡률법에 의한 하수의 생분해 특성 평가:
II. 활성미생물 및 NUR

Respirometry for the Assessment of
Organics Biodegradability in Municipal Wastewater:
II. Active Biomass and NUR

김동한^{1,*} · 김규동² · 정태학²

Kim, Dong Han^{1,*} · Kim, Gyu Dong² · Chung, Tai Hak²

1 서원대학교 환경건설정보학과

2 서울대학교 지구환경시스템공학부

(2003년 8월 30일 접수: 2003년 12월 30일 최종수정논문 채택)

Abstract

The biodegradability of organics has become essential for the design and modeling of a biological nutrient removal process. Respirometry for the batch test just with wastewater has been conducted to estimate active biomass and readily biodegradable organics in municipal wastewater simultaneously. Municipal wastewater contains significant active biomass, which is estimated about 17% of COD. Compared to the batch test seeded with sludge, the batch test just with wastewater represents a little higher readily biodegradable organics. This might be due to the different environment of the logarithmic growth of active biomass. The nitrate uptake rate test has been also performed for the estimation of the readily biodegradable organics. The nitrate uptake rate test results in a little higher readily biodegradable organics compared to the batch test seeded with sludge and similar organics compared to the batch test just with wastewater. This might be caused by the different sludge of a sequencing batch reactor process. Taking the result of the previous research into account, the readily biodegradable, slowly biodegradable, active biomass, soluble inert, and particulate inert organics are estimated about 11%, 49%, 17%, 11%, and 12% of COD, respectively.

Key words: respirometry, NUR, active biomass, readily biodegradable organics

주제어: 호흡률법, 질산염섭취율, 활성미생물, 쉽게 생분해되는 유기물

*Corresponding author Tel.: +82-43-299-8721, E-mail: kdh@seowon.ac.kr (Kim, D.H.)

1. 서론

생물학적 영양염류 제거 공정에서 탈질 및 인제거를 위해서는 유기물이 요구되며, 유기물의 생분해 특성(Biodegradability)은 영양염류 제거효율에 큰 영향을 준다. 유기물은 생분해 특성에 따라 생물학적으로 분해가능한 유기물과 생물학적 난분해성 유기물로 구분할 수 있다. 생물학적으로 분해가능한 유기물도 미생물이 기질로 이용하는 반응속도에 따라 쉽게 생분해되는 유기물(Readily Biodegradable Organics, S_S)과 서서히 생분해되는 유기물(Slowly Biodegradable Organics, X_H)로 구분할 수 있다(Ekama et al., 1986). 생물학적 공정은 이와 같은 유기물의 생분해 특성에 따라서 동적인 응답을 나타내기 때문에 보다 적절한 설계 및 운전을 위해서는 생분해 특성이 고려되어야 한다. 최근 ASM(Activated Sludge Model) 모형(Henze et al., 2000)들이 개발되면서 국내외적으로 공정의 설계, 운전, 진단 및 평가에 많이 활용되고 있다. ASM 모형도 유기물의 생분해 특성을 고려하여 구성되었으며 모형을 활용하기 위해서는 하수의 생분해 특성이 필수적으로 요구되고 있다.

하수의 생분해 특성 평가에는 호흡률(Respiration Rate)을 측정하는 호흡률법(Respirometry)이 많이 사용되고 있다(Ekama et al., 1986; Sollfrank and Gujer, 1991; Spanjers and Vanrolleghem, 1995; Benes et al., 2002). 호흡률법은 일반적으로 슬러지에 하수를 주입한 후 미생물이 산소를 이용하는 속도인 호흡률을 측정한다. 그러나 Kappeler와 Gujer(1992)는 하수에 슬러지를 식중하지 않고 하수 자체만을 폭기하여 본래 하수에 존재하는 미생물의 성장을 유도함으로써 하수의 활성미생물(Active Biomass, X_H) 및 동력학계수를 추정하는 방법을 시도하였으며, Løkkegaard Bjerre 등(1995)과 Wentzel 등(1995)은 동일한 방법을 S_S 의 추정에 적용하였다. 이와 같이 하수에 슬러지를 식중하지 않고 하수 그 자체만을 폭기하는 방법은 하수에 순응된 별도의 슬러지가 필요하지 않고 동시에 많은 정보를 추정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 하수의 생분해 특성은 미생물이 기질을 이용하는 대사 과정에서 전자수용체로 질산염을 이용하는 속도인 NUR(Nitrate Uptake Rate)을 측정하는 질산염 호흡

률법으로도 평가할 수 있다(Ekama et al., 1986; Kujawa and Klapwijk, 1999).

본 연구에서는 슬러지를 식중하지 않고 하수 자체만을 폭기하는 방법과 NUR을 이용하여 하수의 S_S 및 X_H 를 추정하고, 본 논문(I)에서 추정한 결과와 비교함으로써 각 호흡률법의 특성을 고찰하고자 한다. 또한 추정한 S_S 및 X_H 를 본 논문(I)의 결과에 반영하여 종합적인 하수의 생분해 특성을 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 호흡률계

호흡률을 측정할 수 있는 호흡률계(Respirometer)를 Fig. 1과 같이 구성하였다. 호흡반응조(Respiration Chamber)는 원통형 아크릴을 이용하여 유효용적 2l로 제작하였으며, 교반기와 송풍기를 설치하였다. 온도조절장치를 이용하여 20°C로 유지하였으며, 실온의 상승으로 20°C 이상 유지된 경우는 실온상태로 유지하였다. 호흡셀(Respiration Cell)은 대기와 차단되도록 밀폐된 구조의 유효용적 100ml로 제작하였으며, DO센서를 설치하고 자기교반기로 혼합하였다.

호흡반응조의 시료를 펌프를 이용하여 250ml/min의 유량으로 호흡셀로 유입한 후 펌프의 가동을 정지한 상태에서 DO를 측정하였다. 펌프의 가동 및 정지의 주기시간은 호흡률의 크기를 고려하여 약 15분으로 하였다. 호흡률은 펌프가 정지한 후 DO가 선형으로 감소하는 시기의 자료만을 이용하여 계산하였다. 호흡셀이 대기와 차단되어 밀폐된 구조이기 때문에 수표면의 재폭기는 발생하지 않으며 따라서 DO의 감소율로 호흡률을 구할 수 있다. DO의 계측 및 펌프의 작동은 DAC(Data Acquisition and Control)시스템을 통해 컴퓨터로 제어되었다.

2.2. X_H 및 NUR

하수는 도시 생활하수를 대상으로 하였다. 청주시의 비교적 넓은 배제구역을 갖는 합류식관거에서 차집관거로 유입되는 토구에서 채취하였다. 하수는 유량 및 수질을 고려하여 도시 생활하수의 대표성을 가질 수 있는 것으로 판단되고, 신속히 실험실로 운반할 수 있는 지점을 선택하였다. 생분해 특성의 변화를 최소화하기 위하여 모든 하수는 채취, 운반, 주입

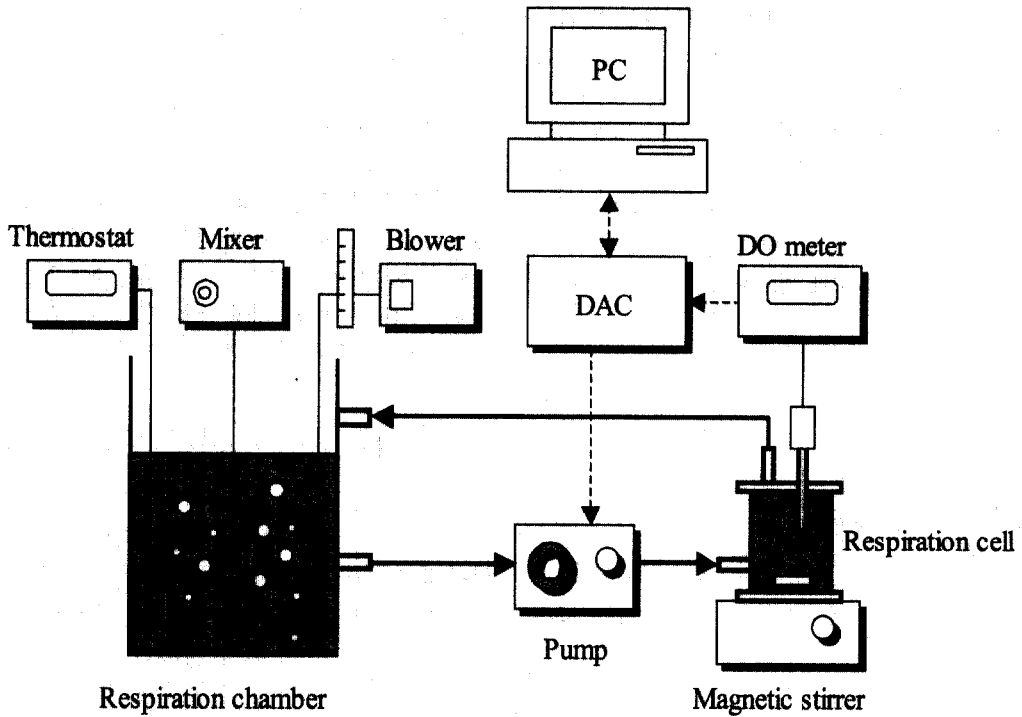


Fig. 1. Schematic diagram of a respirometer.

의 과정을 약 30분 이내에 완료하였다.

X_H 및 S_S 를 추정하기 위하여 슬러지를 식중하지 않고 하수만을 폭기한 실험에서는 하수만을 호흡반응조에 주입하고 호흡률을 측정하였다. NUR 실험에서는 실험실 규모로 운전되는 연속회분식반응조공정의 슬러지를 이용하였다. 연속회분식반응조는 원통형 아크릴을 이용하여 7l 규모로 제작하였으며, 유입수는 생분해 특성 평가를 위한 실험에 사용한 하수와 동일하였다. 8시간을 한 주기로 하여 HRT는 16h, SRT는 20d로 운전되었다. 주기내 무산소(Anoxic) 반응기에 슬러지를 채취하여 약 5배 농축한 후 질산염을 추가하고, 하수와 슬러지의 혼합비가 약 4:1의 비율이 되도록 하수를 주입하여 20°C로 유지된 수조내에서 NUR을 측정하였다.

실험과정중 하수, 슬러지, 반응조에서 시료를 채취하여 TCOD, SCOD, NO_2^- , NO_3^- , MLSS, MLVSS 등의 항목을 분석하였다. 모든 용존(Soluble) 시료는 총(Total) 시료를 0.45µm 막여과지로 여과하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. X_H 및 S_S 추정

하수의 S_S 는 일반적으로 슬러지에 하수를 주입하여 발생된 호흡률을 측정하여 추정한다. 그러나 Kappeler와 Gujer(1992), Løkkegaard Bjerre 등(1995), Wentzel 등(1995)이 시도하였던 방법은 하수에 슬러지를 식중하지 않고 하수 자체만을 폭기함으로써, 별도의 슬러지가 필요하지 않아 실험이 용이하고 하수의 생분해 특성 및 동력학계수를 동시에 추정할 수 있는 장점이 있다. 추정시 Kappeler와 Gujer(1992)는 내생호흡률을 직접 고려하였으며, Wentzel 등(1995)은 UCT(University of Cape Town) 모형을 대상으로 하였다. 따라서 ASM 모형을 기준으로 X_H 및 S_S 를 추정하기 위한 식을 전개하면 다음과 같다.

하수를 폭기하면 초기에는 S_S 가 충분하고 DO도 적절하게 유지되므로 기질과 DO가 제한되지 않는 조건이 된다. 따라서 X_H 는 최대비성장률($\hat{\mu}_H, d^{-1}$)로 식

(1a)와 같이 성장하며, 이에 따른 호흡률 r 은 식 (1b)와 같다. Y_H 는 미생물의 수율(Yield)이고, $b_H(d^{-1})$ 는 내생분해계수이다. 식 (1b)의 양변에 로그를 취하여 ($t, \ln r$)의 관계를 회귀분석하면 절편(α)과 기울기(β)를 이용하여 하수의 초기 활성미생물($X_{H,0}$)과 동력학계수를 추정할 수 있다. 즉, 식 (2a)에서 단위환산을 고려하고, 설정한 b_H 를 대입하면 $\hat{\mu}_H$ 를 추정할 수 있으며 이 결과를 식 (2b)에 대입하면 $X_{H,0}$ 를 추정할 수 있다.

$$\frac{dX_H}{dt} = (\hat{\mu}_H - b_H)X_H \quad (1a)$$

$$r = \frac{1 - Y_H}{Y_H} \hat{\mu}_H X_{H,0} e^{(\hat{\mu}_H - b_H)t} \quad (1b)$$

$$\hat{\mu}_H = b_H + \beta \quad (2a)$$

$$X_{H,0} = \frac{Y_H}{1 - Y_H} \frac{1}{\hat{\mu}_H} e^\alpha \quad (2b)$$

X_H 가 최대비성장률로 대수적으로 성장하는 동안의 호흡률인 식 (1b)는 하수의 초기 S_5 와 X_S , 그리고 X_H 의 내생분해에 의해 생성된 S_5 를 기질로 이용함에 따른 호흡률이다. 따라서 하수의 초기 S_5 를 추정하기 위해서는 X_S 에 의한 호흡률을 제외하여야만 한다. X_S 의 가수분해반응은 ASM 모형에서는 식 (3a)와 같이 표면제한(Surface-Limited)반응으로 표현하고 있다. 이 반응식은 X_S 에 비해 X_H 가 충분히 많으면 X_S 가 제한되어 가수분해는 X_S 에 비해하며, 반대로 X_S 에 비해 X_H 가 적은 상태이면 X_H 가 제한되어 가수분해는 X_H 에 비해하게 된다. 하수에 슬러지를 식중하지 않고 하수만을 폭기함으로써 하수에 이미 존재하고 있는 X_H 의 성장을 유도하는 경우는 X_S 는 높은 농도이나 X_H 는 적은 편이며, 또한 가수분해의 반포화상수(K_X)는 일반적으로 매우 작은 값이다(Henze et al., 2000). 따라서 가수분해 반응식은 (3a)와 같이 X_H 에 비해하는 것으로 단순화할 수 있으며, 가수분해에 따른 호흡률 r_X 는 식 (3b)와 같이 나타낼 수 있다. $k_b(d^{-1})$ 는 최대비가수분해율이다.

$$\frac{dX_S}{dt} = -k_b \frac{X_S / X_H}{K_X + X_S / X_H} X_H \approx -k_b X_H \quad (3a)$$

$$r_X = (1 - Y_H)k_b X_{H,0} e^{(\hat{\mu}_H - b_H)t} \quad (3b)$$

하수의 S_5 에 의한 호흡률은 식 (1b)의 r 에서 식 (3b)의 r_X 를 제외한 호흡률이며, 이 호흡률을 S_5 가 고갈되어 호흡률이 급감하는 시점까지 적분하면 S_5 의 분해에 소모된 총산소량을 구할 수 있다. 따라서 하수의 S_5 는 식 (4)와 같이 추정할 수 있다.

$$S_5 = \frac{1}{1 - Y_H} \int (r - r_X) dt = \frac{(\hat{\mu}_H / Y_H) - k_b}{\hat{\mu}_H - b_H} X_{H,0} (e^{(\hat{\mu}_H - b_H)t} - 1) \quad (4)$$

X_H 및 S_5 의 동시추정을 위해 슬러지에 하수를 주입하지 않고 하수만을 폭기하여 호흡률을 측정 한 결과는 Fig. 2와 같다. 초기에는 하수의 S_5 가 충분하고 X_H 는 상대적으로 적은 양이기 때문에 최대비성장률로 성장하며 이에 따라 호흡률도 지속적으로 상승하였다. 호흡률이 지속적으로 증가하는 기간의 자료를 이용하여 식 (1b)를 Fig. 3과 같이 회귀분석하면 $\hat{\mu}_H$ 와 하수의 초기 활성미생물인 $X_{H,0}$ 를 추정할 수 있다. b_H 는 $0.4d^{-1}$ (Henze et al., 2000)를 사용하였으며, 일반적으로 b_H 는 $\hat{\mu}_H$ 에 비해 상대적으로 매우 작은 값이기 때문에 추정에 큰 영향을 미치지 않는다고(Kappeler and Gujer, 1992). Y_H 는 추정에 일반적으로 사용되는 0.67(Henze et al., 2000)을 사용하였다. 추정결과 $\hat{\mu}_H$ 는 $8.26d^{-1}$ 이었고, $X_{H,0}$ 는 $32mgCOD/l$ 이었다.

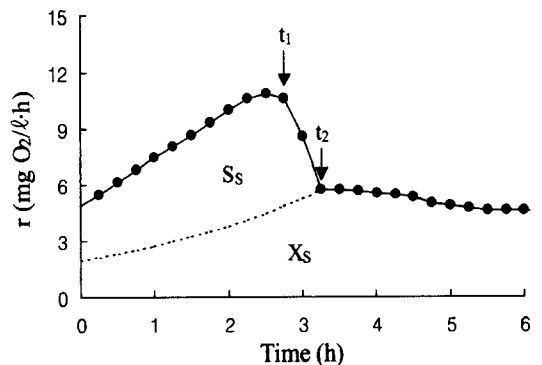


Fig. 2. Respiration rate for the estimation of X_H and S_5 (no seeding).

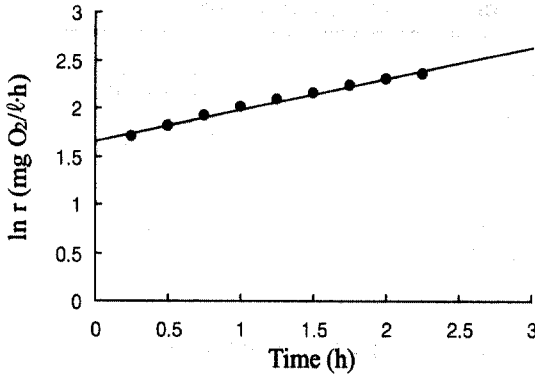


Fig. 3. Regression for the estimation of X_H

t_1 에서는 S_5 가 거의 고갈되어 호흡률이 감소하기 시작하여 t_2 에서는 호흡률이 급감하였다. 호흡률이 급감하기까지는 하수의 S_5 에 의한 호흡률과 하수의 X_5 및 X_H 의 내생분해에 의해 생성된 X_5 에 의한 호흡률의 합인 r 이 나타난다. 하수에 존재하는 초기의 S_5 를 추정하기 위해서는 X_5 에 의한 호흡률을 제외하여야 하는데 이 r_X 호흡률은 식 (3b)로 계산할 수 있다. t_2 에서의 호흡률은 S_5 가 완전히 분해되고 X_5 에만 의한 호흡률이므로 t_2 에서의 호흡률을 식 (3b)에 대입하면 k_b 를 추정할 수 있다. 추정결과 k_b 는 $4.67d^{-1}$ 로 나타났다. 이 k_b 를 이용하면 r_X 를 계산할 수 있다. 따라서 전체 호흡률 r 에서 X_5 에 의한 호흡률 r_X 를 제외한 호흡률이 하수에 존재하는 초기의 S_5 에 의한 호흡률이며 식 (4)를 이용하여 S_5 를 추정할 수 있다. 본 실험결과 하수의 S_5 는 $44mgCOD/l$ 로 추정되었으며, TCOD의 13%로 나타났다.

슬러지를 식중하지 않고 하수만을 폭기한 방법에 의하여 하수의 X_H 를 추정된 결과는 Table 1과 같다. X_H 는 $25\sim 72mgCOD/l$ 로 평균 $48mgCOD/l$ 이었으며, TCOD의 17%이었다. 따라서 TCOD 중 상당 부분이 X_H 이었으며, ASM 모형의 수행에 있어서 하수의 성분중 X_H 를 고려해야 할 것으로 사료된다. 또한 X_H 및 S_5 의 정확한 동시추정을 위해서는 하수를 채취한 후 최대한 신속히 운반하여 실험에 이용해야 함을 알 수 있다.

하수만을 폭기한 방법에 의하여 S_5 를 추정된 결과는 Table 2와 같다. S_5 는 $26\sim 60mgCOD/l$ 로 평균 $41mgCOD/l$ 이었으며, TCOD의 14%, SCOD의 28%이었다. 본 논문(I)에서 슬러지에 하수를 주입하여

Table 1. X_H in municipal wastewater

X_H	Value
Range	25-72mg COD//
Mean	48mg COD//
SD	17mg COD//
No. of data	11
$X_H/TCOD$	17%

Table 2. S_5 in municipal wastewater (no seeding)

S_5	Value
Range	26-60mg COD//
Mean	41mg COD//
SD	8mg COD//
No. of data	11
$S_5/TCOD$	14%
$S_5/SCOD$	28%

추정된 S_5 보다 하수만을 폭기하여 추정된 S_5 가 다소 크게 나타났다. 이는 하수가 동일하지 않은 것에도 원인이 있겠지만, 전반적인 경향을 고려할 때도 높은 것으로 판단된다. 따라서 하수만을 폭기한 방법은 미생물의 대수적 성장이 유도되는 환경에 따라 슬러지를 식중하는 경우에 비해 보다 많은 기질을 이용할 수 있는 것으로 사료된다.

3.2. NUR에 의한 S_5 추정

하수의 S_5 는 미생물이 무산소환경에서 전자수용체로써 질산염을 이용하는 속도를 측정하는 NUR로도 추정할 수 있다. 즉, 기질로 S_5 를 분해하는 대사과정에서 이용된 질산염을 측정하면 식 (5)에 의하여 S_5 를 추정할 수 있다(Ekama et al., 1986).

$$S_5 = \frac{2.86\Delta N}{1 - Y_H} \quad (5)$$

NUR 실험에서는 연속회분식반응조공정의 슬러지를 이용하였다. 주기내 반응기중 폭기기에 뒤이은 무산소기에 슬러지를 채취하였다. 따라서 폭기기에 S_5 는 이미 제거되었으며, 또한 무산소기중 DO가 제거된 시기에 슬러지를 채취하였고 실험과정중에도 삼각플라스크와 적절한 교반을 통해 DO의 영향을 최소화

화하였다. NUR 실험에서도 본 논문(I)의 호흡률법에 의한 S_5 추정에서와 같이 하수와 슬러지의 혼합비가 중요하였다. 즉, 단순히 하수와 반응조의 슬러지를 혼합하면 S_5 가 적은 국내 하수의 경우 혼합에 따른 희석으로 더욱 농도가 낮아져 S_5 추정이 어려워지며, 그리고 슬러지의 농도도 낮아져 작은 탈질률로 인하여 NUR 실험이 부정확해진다. 따라서 본 연구에서는 하수의 비율을 높이면서도 적절한 슬러지의 농도를 유지하기 위해 슬러지를 농축하여 사용하였다. 슬러지를 약 5배 농축한 후 하수와 슬러지를 4:1의 비율로 혼합하였고, 또한 적절한 질산염의 농도가 유지되도록 질산염을 추가하였다.

하수의 S_5 를 추정하기 위한 NUR 실험결과는 Fig. 4와 같다. NUR에 있어서 보다 정확한 추정을 위해 아질산염의 영향을 고려하여 $\text{NO}_3^- + 0.6\text{NO}_2^-$ 의 자료를 이용하여 분석하였다(Kujawa and Klapwijk, 1999). 질산염이 t_1 까지는 S_5 에 의하여 탈질되어 비교적 빠르게 감소하였고, 이후는 서서히 감소하였다. $r_{DN,1}$ 은 S_5 , X_5 , 내생분해에 의한 탈질률이며, $r_{DN,2}$ 는 X_5 와 내생분해에 의한 탈질률이다. 따라서 $r_{DN,1}$ 에서 $r_{DN,2}$ 를 제외한 탈질률이 하수의 S_5 에 의한 탈질률로서 t_1 까지만 탈질을 유도할 수 있다. 따라서 Fig. 4에서 ΔN 을 구해 식 (5)에 대입하면 혼합액의 S_5 를 구할 수 있으며, 여기에 하수와 슬러지의 혼합에 따른 희석률을 고려하면 하수의 S_5 를 추정할 수 있다. 본 실험결과 하수의 S_5 는 44mgCOD//로 추정되었으며, TCOD의 13%로 나타났다.

NUR에 의하여 하수의 S_5 를 추정한 결과는 Table 3과 같다. S_5 는 22~53mgCOD//로 평균 39mgCOD//

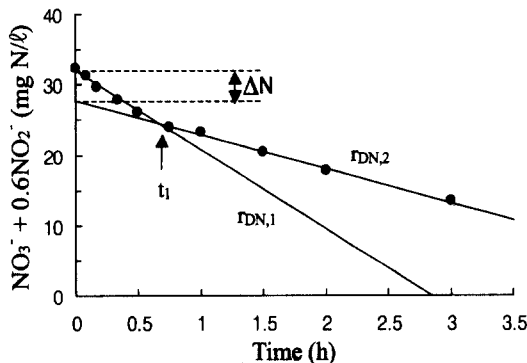


Fig. 4. NUR for the determination of S_5 .

Table 3. S_5 in municipal wastewater (NUR)

S_5	Value
Range	22-53mg COD//
Mean	39mg COD//
SD	10mg COD//
No. of data	7
S_5 /TCOD	13%
S_5 /SCOD	28%

이었으며, TCOD의 13%, SCOD의 28%이었다. 본 논문(I)에서 슬러지에 하수를 주입한 후 산소호흡률을 측정하여 추정한 S_5 보다는 다소 컸으며, 하수만을 폭기하여 추정한 S_5 와는 유사하였다. S_5 추정시 산소 호흡률을 이용한 방법과 NUR을 이용한 방법을 비교할 때 Løkkegaard Bjerre 등(1995)은 NUR이 산소 호흡률법보다 작았으며, 반대로 Ubay Cokgör 등(1998)은 NUR이 산소 호흡률법보다 컸다는 상반되는 결과를 보고하였다. 본 실험결과와 같이 NUR과 슬러지에 하수를 주입한 산소 호흡률법의 차이는 연속회분식 반응조의 슬러지와 활성슬러지라는 상이한 슬러지에 기인하는 것으로 판단된다. 고 등(2001)은 같은 NUR에서도 상이한 슬러지의 특성을 보고하였다. NUR이 슬러지에 하수를 주입한 산소 호흡률법보다 크게 추정된 것은 연속회분식 반응조의 슬러지는 회분식으로 운전되는 생물학적 영양염류 제거 공정으로서 활성슬러지와는 다른 환경 및 운전조건에 따라 기질을 이용하는 생물학적 반응의 형태가 상이한 것에 기인하며, 연속회분식 반응조의 슬러지가 활성슬러지보다는 많은 기질의 형태를 S_5 로 이용할 수 있다는 것으로 사료된다. 따라서 미생물의 대수적 성장을 유도하였을 때 슬러지를 식종하는 경우에 비해 보다 많은 기질을 이용할 수 있는 것으로 사료된 하수만을 폭기한 방법과는 유사하게 나타났다. 또한 NUR에 의한 S_5 추정은 질산염의 변화가 다소 큰 편차를 유발하여, Table 3과 같이 다른 방법에 비해 표준편차(SD)도 다소 컸다. 그러므로 S_5 추정에 있어서 NUR보다는 산소 호흡률을 이용한 호흡률법이 보다 적절할 것으로 판단된다.

3.3. 하수의 생분해 특성

본 연구결과로 하수만을 폭기한 방법과 NUR에 의

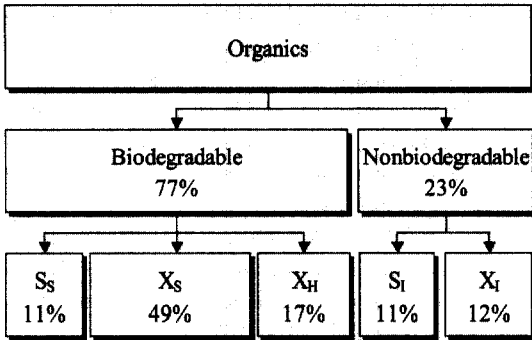


Fig. 5. Organics biodegradability in municipal wastewater.

하여 도출한 S_s 및 X_H 를 본 논문(I)에서 평가한 하수의 생분해 특성에 반영한 종합적인 결과는 Fig. 5와 같다. 하수만을 폭기한 방법 및 NUR에 의한 결과를 반영한 S_s 는 TCOD의 11%로 나타났다. X_H 는 TCOD의 17%로 나타난 바와 같이 TCOD 중 상당 부분이었다. 하수의 X_H 는 관거체계에 큰 영향을 받는 것으로 판단되며, 따라서 나라마다 관거체계에 따라 상이하리라 사료된다. X_H 는 Table 4의 문헌에서 조사된 바와 같은 외국에 비해 다소 높은 수준이었다. 본 논문(I)에서는 X_H 를 포함하여 X_s 를 추정하였는데, X_H 를 별도로 고려한 결과 X_s 는 49%로 추정되었다. 또한 S_f 는 변화없이 11%이며, 물질수지식에 의한 X_f 는 12%로 추정되었다. 본 연구결과는 생물학적 영양염류 제거 공정의 설계 및 평가 등에 필수적인 유기물의 생분해 특성이 고려된 하수의 수질자료로 활용될 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 하수만을 폭기한 방법과 NUR에 의하여 하수의 S_s 및 X_H 를 추정함으로써 하수의 생분해 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 슬러지를 식중하지 않고 하수 자체만을 폭기하여 호흡률을 측정된 방법으로 하수의 X_H 를 추정된 결과는 평균 48mgCOD//로 TCOD의 17%이었다. 따라서 생물학적 공정의 설계 및 모형에 있어서 X_H 의 영향을 고려해야 한다고 판단된다.

Table 4. Reported X_H fractions in municipal wastewater

X_H /TCOD (%)	Reference
12-25	Kappeler and Gujer (1992)
7-25	Ubay Cokgör et al. (1998)
17	This study

2. 하수만을 폭기한 방법에 의하여 하수의 S_s 를 추정한 결과 평균 41mgCOD//로 TCOD의 14%이었다. 슬러지에 하수를 주입하여 추정한 것보다 다소 크게 나타났는데, 이는 미생물의 대수적 성장이 유도되는 환경에 따라 보다 많은 기질을 이용할 수 있는 것으로 사료된다.

3. NUR에 의하여 하수의 S_s 를 추정한 결과 평균 39mgCOD//로 TCOD의 13%이었다. 슬러지에 하수를 주입한 후 산소호흡률을 측정하여 추정한 것보다는 다소 컸으며, 하수만을 폭기하여 추정한 것과는 유사하였다. 이는 연속회분식반응조의 슬러지가 보다 많은 형태의 기질을 S_s 로 이용할 수 있다는 것으로 사료된다.

4. 본 논문(I)의 결과에 반영하여 종합적으로 하수의 생분해 특성을 평가한 결과 TCOD 중 S_s 는 11%, X_s 는 49%, X_H 는 17%, S_f 는 11%, X_f 는 12%로 추정되었다.

참고문헌

고대현, 최영균, 정태학(2001) NUR 회분실험을 통한 부식도의 탈질에 대한 영향 평가, 상하수도학회지, 15(1), pp. 20-27.

Benes, O., Spanjers, H. and Holba, M. (2002) Respirometry Techniques and Activated Sludge Models, *Wat. Sci. Tech.*, 46(4-5), pp. 1-6.

Ekama, G.A., Dold, P.L. and Marais, G.v.R. (1986) Procedures for Determining Influent COD Fractions and the Maximum Specific Growth Rate of Heterotrophs in Activated Sludge Systems, *Wat. Sci. Tech.*, 18(6), pp. 91-114.

Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and van Loosdrecht, M. (2000) *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. Scientific and Technical Report No. 9, IWA Publishing, London.

Kappeler, J. and Gujer, W. (1992) Estimation of Kinetic Parameters of Heterotrophic Biomass under Aerobic Conditions and Characterization of Wastewater for Activated Sludge Modelling, *Wat. Sci. Tech.*, 25(6), pp. 125-

- 139.
- Kujawa, K. and Klapwijk, B. (1999) A Method to Estimate Denitrification Potential for Predenitrification Systems Using NUR Batch Test, *Wat. Res.*, **33**(10), pp. 2291-2300.
- Løkkegaard Bjerre, H., Hvitved-Jacobsen, T., Teichgraber, B. and Heesen, D. (1995) Experimental Procedures Characterizing Transformations of Wastewater Organic Matter in the Emscher River, Germany, *Wat. Sci. Tech.*, **31**(7), pp. 201-212.
- Sollfrank, U. and Gujer, W. (1991) Characterisation of Domestic Wastewater for Mathematical Modelling of the Activated Sludge Process, *Wat. Sci. Tech.*, **23**(4-6), pp. 1057-1066.
- Spanjers, H. and Vanrolleghem, P. (1995) Respirometry as a Tool for Rapid Characterization of Wastewater and Activated Sludge, *Wat. Sci. Tech.*, **31**(2), pp. 105-114.
- Ubay Cokgör, E., Sözen, S., Orhon, D. and Henze, M. (1998) Respirometric Analysis of Activated Sludge Behaviour-I. Assessment of the Readily Biodegradable Substrate, *Wat. Res.*, **32**(2), pp. 461-475.
- Wentzel, M.C., Mbewe, A. and Ekama, G.A. (1995) Batch Test for Measurement of Readily Biodegradable COD and Active Organism Concentrations in Municipal Waste Waters, *Water SA*, **21**(2), pp. 117-124.