

생물학적 하수처리장에서 테트라사이클린 저항 세균의 거동

김성표[†]

뉴욕주립대 버팔로 대학교 토목, 구조 환경 공학과

The Fate of Tetracycline Resistant Bacteria in Biological Wastewater Treatment Plants

Sungpyo Kim[†]

Department of Civil, Structural, and Environmental Engineering, State University of New York at Buffalo, Buffalo, New York, 14260, U.S.A.
(Received 4 January 2006, Accepted 28 February 2006)

Abstract

Tetracycline is one of the mostly used antibiotics around the world. The purpose of this study was to evaluate the fate of two different types of tetracycline resistant bacteria in biological wastewater treatment plants. Tetracycline resistant enterics and heterotrophic bacteria were monitored under two different lab-scale experimental conditions. Tetracycline resistant enteric bacteria showed the lower percentages of total enteric bacteria and net specific growth rate in the monitored activated sludge system as compared to tetracycline resistant heterotrophic bacteria. Therefore, total enterics, potentially *E.coli*, might not be the best indicator microorganism for evaluating the antibiotic resistant bacteria in biological wastewater treatment plant.

keywords : Tetracycline, Tetracycline resistant bacteria

1. 서론

항생제에 저항할 수 있는 병원균(antibiotic resistant disease bacteria)의 증가는 공중보건과학(public health science)에서 심각하게 받아드리는 주요 주제 중의 하나이다(Levy, 2002). 항생제의 남용이 이러한 항생제 저항 병원균 증가의 주요한 원인으로 제안되고 있는데(Reinthal et al., 2003), 최근 들어 수생환경에서의 항생제 잔류물이 환경 내에서의 항생제 저항세균(궁극적으로 항생제 저항병원균)을 증가시키는 역할을 하지 않을까란 의구심이 증대되고 있다(Guardabassi et al., 2002a, 2002b; Levy, 2002).

몇몇 항생제는 생활하수 중에서 최고 90%까지 인체에서 분해되지 않은 형태로 발견되고 있고(Hirsch et al., 1999), 또한 상당량의 항생제 저항세균도 함께 발견되고 있다(Kim et al., 2006; Guardabassi et al., 2002a, 2002b). 이전 몇몇 연구자들은 과연 생물학적 하수처리장이 항생제 저항세균을 적절히 처리할 수 있는지에 대한 연구를 해 왔었다(Guardabassi et al., 2002a, 2002b; Iwane et al., 2001; Mezrioui et al., 1994). 하지만, 이전 연구의 관심사는 주로 하수처리장 유출수내의 항생제 저항세균 농도나 저항유전자(resistant gene) 분리에 있었기 때문에, 실제로 하수처리장이 항생제 저항세균에 어떠한 영향을 미치는지 또는 항생제 저항 세균이 어떤 거동(fate)을 하는지에 대한 연구는 현재까지 상당히 미흡한 실정이다(Kim et al., 2006).

본 연구에서는 테트라사이클린(Tetracycline)을 항생제 저항세균의 연구대상(target) 항생제로 선정하고, 활성슬러지 system 내에서 테트라사이클린에 대한 저항세균의 거동을 연구하였다. 테트라사이클린계 항생제는 1940년 이후로 인간과 동물에 널리 쓰였고, 전 세계적으로 아직 널리 쓰이고 있는 항생제 중의 하나이다(Col et al., 1987). 또한 최근 연구에 따르면 생활하수에서도 발견되는 항생제 중 하나이다(Kim et al., 2005). 한국에서도 테트라사이클린계 항생제는 가축에 가장 많이 쓰이는 항생제 중 하나이며, 이에 대한 저항세균도 인간과 가축의 분에서 아주 높은 수치로 발견된다(Kang et al., 2005). 따라서, 한국 생활하수에서도 많은 테트라사이클린 저항세균이 발견될 가능성이 많다.

장내세균류(enterics)는 항생제 저항세균연구에서도 지표 미생물로 많이 쓰인다(Reinthal et al., 2003; Iwane et al., 2001). 지표 미생물(indicator microorganisms)이라 함은 특정 오염물에 대해 오염 되었는지를 간접적으로 알아보는 미생물을 말한다. 항생제 저항세균에 대한 장내세균류가 지표 미생물로 많이 쓰이는 이유는 다른 미생물에 비해, 항생제에 노출될 확률이 다른 항생제 저항세균보다 높으리라는 가정(인체에 항생제가 투여 되므로)하에 비롯된다(Reinthal et al., 2003). 하지만, 이러한 항생제 저항 세균 중 장내세균류(enterics)군이 활성슬러지같이 복잡다단한 미생물군집에서 과연 대표성을 가질 수 있는 미생물 군 인지는 의심의 여지가 있다. 따라서 본 연구에서는, 장내세균 중 테트라사이클린 저항세균과 종속영양세균 중 테트라사이클린 저항세균의 거동(fate)을 함께 비교함으로써 장내세균류의 항생제 저항세균의 대표성을 시험하였다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
sungpyo.kim@gmail.com

2. 재료 및 방법

2.1. 유입하수

특성이 다른 두 종류 유입 하수를 본 연구에 사용하였다. 첫 운전조건에서는(Phase-1), 유입하수에 테트라사이클린 저항세균이 존재하지 않는 합성하수를 이용하였다. Table 1은 합성하수의 성상을 보여주고 있다.

Table 1. The composition of synthetic wastewater in Phase-1

Species		Concentration (g/L)
A	Glucose	46.9
	K ₂ HPO ₄	320.0
	KH ₂ PO ₄	160.0
	NH ₄ Cl	60.0
Stock Solution	MgSO ₄ · 7H ₂ O	7.50
	FeSO ₄ · 7H ₂ O	0.25
	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.25
	MnSO ₄ · 3H ₂ O	0.25
	CaCl ₂	1.00

합성하수는 매일 A와 B의 stock solution을 1:1의 비로 수돗물에 100배 희석하였다. 하수의 COD는 500 mg/L가 유지 되었고, pH는 7.0-7.2가 유지되었다.

두 번째 운전조건에서는(Phase-2), 테트라사이클린 저항세균이 존재하는 실제 하수를 유입하수로 사용하였다. Amherst 하수처리장(뉴욕주, 버팔로 소재, 유량(Q)=약 93,000톤)의 1차 침전지 유출수가 사용되었는데, 하수는 일 주일에 두 번씩 하수처리장에서 채취하여 4°C 냉장고에 보관하여 이용하였다. 보관기간(약 3-4일간) 동안의 하수의 성상(특히 테트라사이클린 항생제저항세균 농도)은 별 변화가 없는 것으로 관찰되었다(Kim et al., 2006).

Table 2는 Phase-2 기간의 유입하수의 성상을 보여주고 있다.

Table 2. The characteristics of influent wastewater in Phase-2

Items	Concentration (mg/L)
	Ave. ± St. Dev.
pH	7 ± 0.1
TSS	87 ± 20
VSS	66 ± 13
TCOD	182 ± 18
FCOD	117 ± 32

*Ave. ± St. Dev.: Average ± Standard Deviation

2.2. 반응조 설계

5L 규모의 plexiglass 재질의 원통형 반응조(내부 직경: 13.7 cm)가 SBR(Sequencing Batch Reactor) 프로세스를 위해서 설계 되었다. 반응조의 모양에 대한 모식도는 Fig. 1에 나타나 있다.

이 반응조에 식종된 활성슬러지는 Amherst WWTP에서의 첫 번째 반응조(stage-1)에서 채취하여 실시하였다. 운전 기간은 첫 번째 실험조건에서는 (Phase-1)에서 약 두 달간

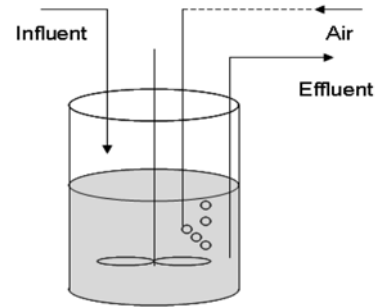


Fig. 1. The schematic diagram of sequencing batch reactor (SBR).

운전하였고, 두 번째 운전조건에서(Phase-2) 약 3개월 이상 운전하였다.

SBR 운전조건은 하수주입(2분), 포기(298분), 침전(45분), 상등액 유출(15분)로 한 싸이클(cycle)이 구성되며, 하루에 4 주기로 운전하였다. 각 Phase에서의 SBR에 관련조건이 Table 3에 제시되어 있다.

Table 3. Operating conditions of SBR during a study

Phase	HRT (hrs)	SRT (d)	Average MLSS (mg/L), (Range)
1	24	15	3,200 (2,950 - 3,350)
2	24	10	790 (690 - 960)

2.3. 실험

실험기간동안 두 가지 다른 목적의 실험을 진행하였다. 첫 번째, 실험기간 동안에 반응조가 적절하게 운전되는지를 판단하기 위하여, 반응조의 유입, 유출수를 샘플링 하여, TCOD/FCOD, TSS/VSS, pH를 일주일에 세 번 이상씩 모니터링 하였다. 또한 활성슬러지의 농도를 MLSS/MLVSS를 통해 분석하였다. 이 모든 실험방법은 Standard Method (APHA et al., 1998)에 준하여 실시하였다. 실험결과, 운전 기간(Phase-1 and 2) 동안 반응조는 안정적으로 운전 되었다(Kim et al., 2006).

두번째 실험은 채취된 시료 내에서 테트라사이클린 저항세균의 측정이다. 시료 내에서 두 가지 다른 목표세균들을 각각 다른 배지를 이용하여 동정하였다. Phase-1에서는 시료를 활성슬러지에서만 채취하였고, Phase-2에서는 물질수를 위하여 각각 유입하수, 활성슬러지, 유출수에서 채취하였다.

시료 내에서의 장내세균(enterics)의 농도(colony forming unit per mL; CFU/mL)를 산정하기 위해 MacConkey agar를 사용하였고, 종속영양세균의 농도를 측정하기 위해 R2A agar를 사용하였다. 상업적으로 구입 가능한 MacConkey agar powder(Difco)와 R2A agar powder(Difco)를 이용하여 배지를 제작, spread plate method(Standard Method 9215C) 방법을 이용하여 측정하였다(APHA et al., 1998).

배지는 테트라사이클린이 함유 된 것과 함유되지 않은 것을 따로 만들어서 목표 미생물의 총미생물(total bacteria)

의 농도(CFU/mL)와 테트라사이클린 저항세균의 농도(CFU/mL)를 산정하였다. 테트라사이클린 stock solution (60% Ethanol + 40% nano pure water; V/V)은 실험 당일 준비하여 배지에 20 mg/L의 농도가 되도록 준비하였다. 20 mg/L의 테트라사이클린이 함유된 각각의 배지(MacConkey agar 와 R2A agar)에서 자라난 균체를 테트라사이클린 저항세균이라 규정하였는데, 이는 National Antimicrobial Resistance Monitoring System를 참조하여 결정하였다 (NARMS, 2001).

배지에 시료를 배양하기 전에, blender(Waring Commercial Blender; Model 51BL31(7011), 22,000 RPM)를 이용하여 샘플을 균질화(homogenization)하였는데, 활성슬러지는 3분간, 유입하수와 유출수는 2분 및 1분으로 각각 실시하였다. 각각의 시간은 전실험을 통하여 결정 되었다(Kim et al., 2006).

각각 배양된 배지는 두 개 이상씩 만들어 재현성을 확인하고, 이에 대한 평균치를 시료에 대한 대표 값으로 선정하였다. 두 배지의 균체수가 서로 10%의 차이를 넘지 않을 때만 재현성이 있다고 보고 실험치를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Phase-1

Phase-1에서는 합성하수를 유입수로 사용하여 활성슬러지 내의 항생제 저항세균들이 성장 가능한지를 보려 하였다.

Fig. 2는 운전기간동안 활성슬러지 내에서 장내세균과 종속영양세균의 미생물농도(CFU/mL)변화를 보여주고 있다. 0 mg/L과 20 mg/L은 각각 해당미생물의 총 미생물농도(0 mg/L)와 테트라사이클린 저항세균(20 mg/L)의 농도를 나타낸다. 운전기간동안, 활성슬러지 내에서의 총 장내세균의 농도는 10^6 - 10^8 CFU/mL 범위에 있고, 총 종속영양세균의 농도는 약 10^8 - 10^{11} CFU/mL 범위에 있다.

활성슬러지에서의 테트라사이클린 저항세균의 농도는 이보다 적은 10^1 - 10^3 CFU/mL(enterics), 10^5 - 10^8 CFU/mL(heterotrophs)의 농도를 보인다.

Fig. 2로는 이들 항생제 저항세균들의 성장 추세를 보기 어려워, Fig. 2의 값을 이용하여 각각의 미생물군중의 테트라사이클린 저항세균의 변화를 식 (1)을 이용하여 비율(%)을 Fig. 3에 나타냈다.

$$\% = \frac{\text{테트라사이클린 저항세균 농도(CFU/mL)}}{\text{총 미생물농도 (CFU/mL)}} \quad (1)$$

Fig. 3에 따르면 종속영양세균중의 테트라사이클린 저항세균의 비율(Fig. 3(b); 최대 약 1%)의 약 100배 이상 정도 장내 테트라사이클린 저항 세균 비율(Fig. 3(a); 최대 0.08%)보다 높음을 알 수 있다.

일반적으로 장내세균이 항생제에 노출되었을 기회가 종속영양세균 보다 더 많았으리라고 판단하므로, 장내세균 중 항생제 저항세균의 비율이 종속영양세균 중의 항생제 저항

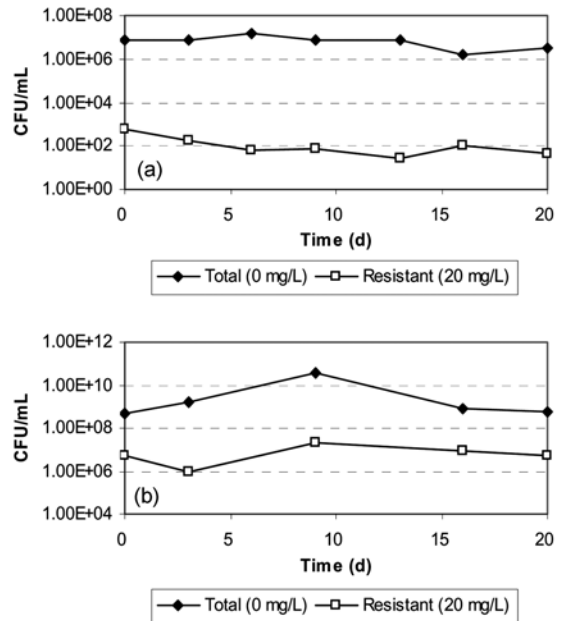


Fig. 2. (a) Enteric bacterial concentration (CFU/mL) in activated sludge at 0, 20 mg/L tetracycline concentration during Phase-1. (b) Heterotrophic bacterial concentrations (CFU/mL) in activated sludge at 0, 20 mg/L tetracycline concentration during Phase-1.

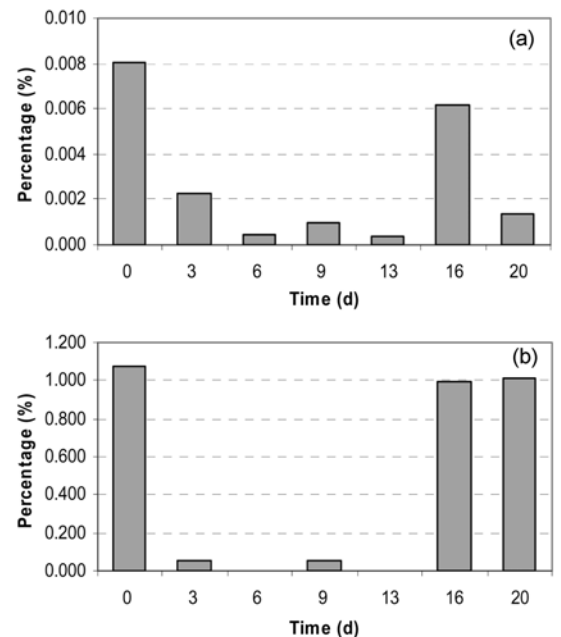


Fig. 3. (a) The percentage of tetracycline resistant enteric bacteria among total enterics in activated sludge during Phase-1. (b) The percentage of tetracycline resistant heterotrophic bacteria among total heterotrophic bacteria in activated sludge during Phase-1.

세균의 비율 보다 높으리라 예상하나(Reinthal et al., 2003; Grabow et al., 1973), 본 실험에서는 반대의 경향을 보여 주었다.

또한 활성슬러지내의 장내세균 중 테트라사이클린 저항

세균은 운전할수록 테트라사이클린 저항세균의 분율이 감소하는 경향을 보이며(Fig. 3(a)), 종속영양세균내의 테트라사이클린 저항세균의 추세는 명확하지 않았다(Fig. 3(b)). 따라서, 본 실험 결과(Phase-1)를 비추어 보았을 때, 활성슬러지내의 항생제 저항세균이 성장할 수 있는지(특히 장내 테트라사이클린 저항세균)는 본 실험 조건에서는 불분명하였다.

이러한 경향이, 테트라사이클린 저항세균이 포함되어 있는 실제 하수에서도 비슷한 경향을 보이는지를 알아보기 위해, Amherst WWTP에서 활성슬러지와 실제하수를 채취하여 항생제 저항세균거동실험을 진행하였다.

3.2. Phase-2

우선 유입하수내에서 장내세균과 종속영양세균중의 총 농도와 테트라사이클린 저항세균의 대한 농도가 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4에 따르면, 대체적으로 상당히 높은 농도의 테트라사이클린 저항세균(20 mg/L)의 농도를 하수에서 확인할 수 있다(enterics: 10^2 - 10^3 CFU/mL, heterotrophs 10^4 - 10^6 CFU/mL). 전술한 방법처럼 각각 저항세균의 분율을 식 (1)을 이용해 계산해 보면, 장내세균 중 테트라사이클린 저항세균은 0.2-1.7%, 종속영양세균 중 테트라사이클린 저항세균은 0.3-1.7%로 서로 아주 흡사한 유입수내에서의 분율을 보인다.

운전기간 동안의 활성슬러지 내에서의 장내세균과 종속영양세균중의 총 농도와 각각의 테트라사이클린 저항세균의 대한 농도가 Fig. 5에 나타나 있다.

이 기간 동안, 테트라사이클린 저항세균(20 mg/L)의 농도

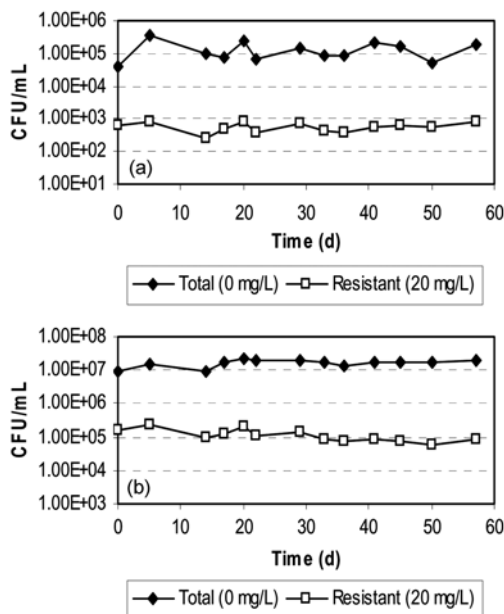


Fig. 4. (a) Enteric bacterial concentration (CFU/mL) in influent wastewater at 0, 20 mg/L tetracycline concentration during Phase-2. (b) Heterotrophic bacterial concentrations (CFU/mL) in influent wastewater at 0, 20 mg/L tetracycline concentration during Phase-2.

는 장내세균의 경우, 유입수속에 있는 농도(Fig. 4)보다 낮거나 비슷한 수준으로 유지되며(enterics: 10^1 - 10^4 CFU/mL), 종속영양 세균의 경우는 유입수의 농도 보다 높게 유지되는 것을 알 수 있다(heterotrophs: 10^5 - 10^7 CFU/mL).

Fig. 6에서는 이를 각각 저항세균의 분율을 나타낸 것으로, 장내세균 중 테트라사이클린 저항세균의 경우, 몇몇을 제외하곤 약 0.1-0.4%를 유지함으로 유입수속에서의 수치(0.2-1.7%)보다 적거나 작은 범위에 속하였고, 종속영양세균 중 테트라사이클린 저항세균의 경우 약 1-3%정도를 유

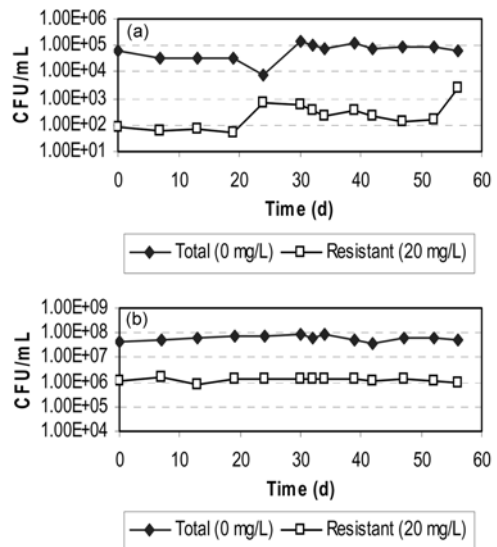


Fig. 5. (a) Enteric bacterial concentration (CFU/mL) in activated sludge at 0, 20 mg/L tetracycline concentration during Phase-2. (b) Heterotrophic bacterial concentrations (CFU/mL) in activated sludge at 0, 20 mg/L tetracycline concentration during Phase-2.

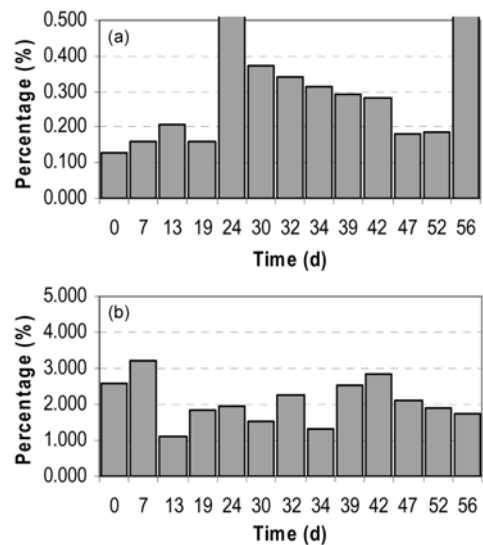


Fig. 6. (a) The percentage of tetracycline resistant enteric bacteria among total enterics in activated sludge during Phase-2. (b) The percentage of tetracycline resistant heterotrophic bacteria among total heterotrophic bacteria in activated sludge during Phase-2.

지함으로 이 수치는 유입수 중의 분율(0.3-1.7%)보다 상의 하는 범위에 있음을 알 수가 있다(Fig. 6).

유출수 중에서 테트라사이클린 저항세균의 경우는(여기서 data는 제시 되지 않았음), 약 10^1 CFU/mL이나 이 보다 적은 장내세균 중 테트라사이클린 저항세균의 농도가 관측되었고, 종속영양세균 중에서는 약 10^4 CFU/mL 이상의 테트라사이클린 저항세균농도가 관측되었다. 유출수에서의 각각의 테트라사이클린 저항세균의 분율은 활성슬러지내에서의 분율과 별 상이하지 않았다.

3.3. 물질수지식을 이용한 테트라사이클린 저항 세균의 거동

지금까지 연구된 것(Phase1과 2)을 종합해 보면, 유입수 내에 테트라사이클린 저항세균의 유무를 떠나 활성슬러지 내에서 장내세균 중 테트라사이클린 저항 세균은 종속영양 세균 중 테트라사이클린 저항세균보다 적은 수와 적은 분율(%)을 차지함을 알 수 있다. 또한 운전기간동안의 이 둘 간의 증가나 감소추세는 그리 연관성이 없어 보인다. 즉 이는 장내세균 중의 테트라사이클린 저항세균이 활성슬러지내에서 테트라사이클린 저항세균의 대표성을 가지는 균주라고 보기엔 부족할 수 있음을 시사한다.

비슷한 연구결과가 Guardabassi 등(2002b)에 의해 제시된 바 있다. 이들은 두 다른 하수처리장에서 장내세균중 테트라사이클린 저항 세균과 *Acinetobacter* 중 테트라사이클린 저항 세균을 비교 하였다. *Acinetobacter* 중 테트라사이클린 저항 세균의 분율(%)은 하수처리장내에서 단위 공정(unit process)이 지나갈수록 커지는 데 반해, 장내세균 중 테트라사이클린 저항균의 분율(%)은 차츰 감소하였다. 비록 정확한 이유는 찾지 못하였지만, 운전 조건의 차이가 이러한 경향의 차이를 보이지 않은가 추정하였다.

보통 대부분의 장내세균은 하수처리장에서 감소되는 것으로 알려져 있다(Reinthal et al., 2003; Guardabassi et al., 2002b). 이는 아마도 장내세균들이 종속영양세균과 여러 경쟁조건(유기물이나, 온도, 먹이사슬)에서 열성인 위치에 놓여있기 때문이 아닌가 사료된다.

보다 엄밀하게, 활성슬러지내에서 장내세균 중 테트라사이클린 저항세균이 종속영양세균 중 테트라사이클린 저항 세균 보다 성장조건이 열성임을 간접 증명하기위해서, 이 두 미생물의 순수 성장계수(μ_{net})를 Phase-2의 실험자료를 가지고 물질수지(Mass balance)를 통해 구해 통계적으로 비교하였다. 이를 위해, 다음과 같은 물질수지 식 (2)를 도출 하였다.

$$V \frac{dX}{dt} = Q_{in} X_{in} - Q_e X_e + \mu_{net} XV - Q_w X_w \quad (2)$$

Where,

X = Tetracycline resistant bacterial concentrations in a SBR (CFU/mL).

X_{in} = Tetracycline resistant bacterial concentrations in

influent wastewater (CFU/mL)

X_e = Tetracycline resistant bacterial concentrations in effluent (CFU/mL)

X_w = Tetracycline resistant bacterial concentrations in SBR wasting (CFU/mL)

Q_{in} = Daily influent wastewater flow rate (L/d)

Q_w = Daily wasted volume (L/d)

Q_e = Daily flow rate of treated wastewater per day (L/d) = $Q_{in} - Q_w$ (t)

V = reactor volume (L)

μ_{net} = Net specific growth rate (d^{-1})= $\mu-b$ (specific growth rate - decay rate)

본 SBR에서 SRT를 맞추기 위해 버려진 슬러지의 농도는 포기기간(aeration time) 동안 버려졌기 때문에, 활성슬러지 농도와 같고($X_w = X$), 이는 식 (2)를 식 (3)과 같이 바꿀 수 있다.

$$V \frac{dX}{dt} = Q_{in} X_{in} - Q_e X_e + \mu_{net} XV - Q_w X \quad (3)$$

식 (3)을 SBR Volume으로 나누면 식 (4)와 같이 된다.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} X_{in} - \frac{Q_e}{V} X_e + \mu_{net} X - \frac{Q_w}{V} X \quad (4)$$

여기서, “연이어진 샘플링 기간 동안(dt)의 채취된 두 활성슬러지내의 테트라사이클린 저항세균의 농도(CFU/mL) 차이(dX)”를 dX/dt 식과 거의 같다고 가정하면 식 (5)를 얻고, 이를 식 (4)에 대입하면 식 (6)을 얻을 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \frac{X_{current} - X_{previous}}{\Delta t} \\ &\approx \frac{\text{Bacterial concentration differences (CFU/mL)}}{\text{sample collection interval (days)}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mu_{net} = \frac{\frac{dX}{dt} + \frac{Q_{in}}{V} (X_e - X_{in}) + \frac{Q_w}{V} (X - X_e)}{X} \quad (6)$$

식 (5)를 통해 연이어진 시료채취 기간 동안의 순수 성장계수(μ_{net})를 구할 수 있다. 다시 말해, 시료채취수(n)-1 개의 순수성장계수를 구할 수 있다(Fig. 7).

Fig. 7에서 보는 바와 같이 장내 테트라사이클린 저항세균의 순수성장계수의 범위는 -14.19에서 -0.12 사이였고, 평균값은 -4.47이었다. 종속영양세균 중 테트라사이클린 저항세균의 순수성장계수의 범위는 -0.09에서 0.06 사이였고, 평균값은 -0.01이었다.

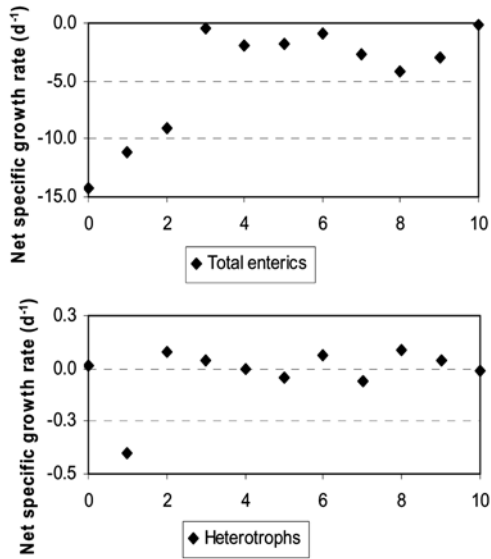


Fig. 7. (a) Net specific growth rate of tetracycline resistant enteric bacteria in activated sludge during Phase-2. (b) Net specific growth rate of tetracycline resistant heterotrophic bacteria in activated sludge during Phase-2.

95%의 신뢰성을 가지는 *t*-test를 통해 평균값을 비교한 경우에도, 두 집단의 평균값은 확연히 달랐다($p = 0.01 < 0.05$).

이 결과를 통해 보면 활성슬러지내의 장내세균 중 테트라사이클린 저항세균은 순수 증가하기 어려운데 비해(모든 순수성장계수가 마이너스 수치), 종속영양세균 중 테트라사이클린 저항세균은 경우에 따라 증가할 수 있음을 알 수 있다.

보다 분명한 사실은, 시료가 채취된 각각 그 순간에 비교된, 둘 세균간의 순수 성장계수 수치와 전체적인 성장 경향은 확연히 다르다는 사실이다.

이는 장내세균 중 테트라사이클린 저항세균이 활성슬러지내에서의 테트라사이클린 저항세균의 지표 미생물(indicator microorganism)으로 이용되기에는 불충분함을 보여준다. 여기서 비교 대상으로 보여준 종속영양생물 군 중 테트라사이클린 저항세균은 상당히 포괄적인 미생물군 이기에 어떤 특정한 균주라고 얘기 할 수 없지만, 비교대상 군으로 사용되기엔 적절하였다. 하지만 배양기간이 장내세균보다 훨씬 길기 때문에(7일 vs. 1일), 다른 종류의 지표미생물이나 다른 지표(marker)개발에 대한 지속적 연구가 필요하다.

근자에, 한국에서는 상수원수 보호를 위해 하수처리장 유출수 중의 미생물수(대장균수)를 규제하기 시작했다. 위해성 미생물의 상수원수 오염도 문제이지만, 이러한 미생물들이 항생제에 대해 저항하는 기작(resistant mechanism)을 가지게 되는 것은 공공보건학적인 관점에서 더 큰 문제를 불러일으킬 소지를 가지고 있다. 다양한 환경 내에서 항생제 저항 세균과 유전자(resistant gene)의 거동에 대해 환경공학자들이 좀 더 많은 관심을 가져야 할 시점이라 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 하수처리장에서의 두 가지 다른 형태의 항생제저항세균의 거동을 살펴보았다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 합성하수를 이용하여 SBR을 운전한 결과, 종속영양세균 중 항생제 저항세균의 분율(최대 1%)이 장내세균의 분율(최대 0.08%)보다 100배 이상 높았다.
- 2) 실제하수를 이용하여 SBR을 운전한 결과, 활성슬러지내의 종속영양세균중 항생제 저항세균의 분율은 유입하수의 분율(0.3-1.7%)보다 상회하는 범위(1-3%)에 있었고, 장내세균의 분율(0.1-0.4%)은 유입하수의 분율(0.2-1.7%)보다 적은 범위에 속하였다.
- 3) 물질수지를 이용하여 활성슬러지내의 순수성장계수를 구한 결과, 장내 테트라사이클린 저항세균의 순수성장계수의 범위는 -14.19에서 -0.12 사이였고, 평균값은 -4.47이었다. 종속영양세균 중 테트라사이클린 저항세균의 순수성장계수의 범위는 -0.09에서 0.06 사이였고, 평균값은 -0.01이었다. 통계적 분석치에서도, 두 집단 간의 평균값은 확연히 달랐다.
- 4) 이상의 연구를 통해, 하수처리장에서의 항생제 저항세균에 대한 지표미생물로 장내세균을 사용하는 것은 부적절할 수 있음을 보여주었다.

참고문헌

- APHA, AWWA and WEF., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Eds., APHA, Washington D.C., USA (1998).
- Col, N. F. and O'Connor, R. W., Estimating World-Wide Current Antibiotic Usage: Report of Task Force 1, *Rev. Infect. Dis.*, **9**(S3), S232-243 (1987).
- Grabow, W. O. K. and Prozesky, O. W., Drug Resistance of Coliform Bacteria in Hospital and City Sewage, *Antimicrob. Agents Chemother.*, **3**(2) pp. 175-180 (1973).
- Guardabassi, L. and Dalsgaard, A., Occurrence and Fate of Antibiotic Resistant Bacteria in Sewage. Danish EPA Environmental Project Report no. 722, <http://www.mst.dk/udgiv/publications/2002/87-7972-266-0/pdf/87-7972-267-9.pdf> (2002a, accessed Feb 2006).
- Guardabassi, L., Lo Fo Wong, D. M. A. and Dalsgaard, A., The effects of Tertiary Wastewater Treatment on the Prevalence of Antimicrobial Resistant Bacteria, *Water Res.*, **36**(8) pp. 1955-1964 (2002b).
- Hirsch, R., Ternes, T., Haberer, K. and Kratz, K. L., Occurrence of Antibiotics in the Aquatic Environment, *Sci. Total Environ.*, **225**(1-2), pp. 109-118 (1999).
- Iwane, T., Urase, T. and Yamamoto, K., Possible Impact of Treated Wastewater Discharge on Incidence of Antibiotic Resistant Bacteria in River Water, *Water Sci. Technol.*, **43**(2), pp. 91-99 (2001).
- Kang, H., Jeong, Y., Oh, J., Tae, S., Choi, C., Moon, D., Lee, W., Lee, Y., Seol, S., Cho, D. and Lee, J.,

- Characterization of Antimicrobial Resistance and Class 1 Integrons found in *Escherichia coli* Isolates from Humans and Animals in Korea, *J. Antimicrob. Chemother.*, **55**(5), pp. 639-644 (2005).
- Kim, S., Eichhorn, P., Jensen, J. N., Weber, A. S. and Aga, D. S., Removal of Antibiotics in Wastewater: Effect of Hydraulic and Solid Retention Time on the Fate of Tetracycline in the Activated Sludge Process, *Environ. Sci. Technol.*, **39**(15), pp. 5816-5823 (2005).
- Kim, S., Jensen, J. N., Aga, D. S. and Weber, A. S., Fate of Tetracycline Resistant Bacteria as a Function of Activated Sludge Process Organic Loading and Growth Rate, *Water Sci. Technol.*, (In press) (2006).
- Levy, S. B., Factors Impacting on the Problem of Antibiotic Resistance, *J. Antimicrob. Chemother.*, **49**(1), pp. 25-30 (2002).
- Mezrioui, N. and Baleux, B., Resistance Patterns of *E. coli* Strains Isolated from Domestic Sewage Before and After Treatment in Both Aerobic Lagoon and Activated Sludge, *Water Res.*, **28**(11), pp. 2399-2406 (1994).
- National Antimicrobial Resistance Monitoring System (NARMS), *Annual Report*, <http://www.cdc.gov/narms/annuals.htm> (2001, accessed Nov 2005).
- Reinthal, F. F., Feierl, J. P. G., Wüst, G., Haas, D., Ruckebauer, G., Mascher, F. and Marth, E., Antibiotic Resistance of *E. Coli* in Sewage and Sludge, *Water Res.*, **37**(8), pp. 1685-1690 (2003).