

# PF10) 포기 시간 변경에 따른 SBR의 영양염류 제거 특성과 MLVSS에 관한 연구

정노성<sup>1\*</sup>, 박영식<sup>2</sup>, 김동석<sup>1</sup>

<sup>1</sup>대구가톨릭대학교 환경과학과, <sup>2</sup>대구대학교 보건과학부

## 1. 서 론

SBR(Sequencing Batch Reactor)는 소규모 하수 처리에 있어 널리 사용되고 있는 하수 처리 공정이다. SBR공정은 혐기, 호기, 무산소 단계를 거쳐 유기물과 질소, 인 등을 제거한다. 이때 SBR은 포기를 통하여 미생물들이 하수 내 유기물, 질소, 인을 분해·제거하므로 포기는 생물학적 처리방법은 SBR에서 핵심적인 단계라 할 수 있다. 따라서 SBR에서 포기공정은 중요한 과정중의 하나이며, 이에 사용되는 동력비가 상당한 것으로 알려져 있다. 이번 연구에서는 호기 시간 변화에 따라 발생하는 SBR의 영양염류제거 특성과 MLVSS의 변화에 대해 관찰하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 재료

SBR 반응조는 Fig. 1과 같이 4개의 SBR을 설치하여 운전하였는데, 크게 비포기-포기-비포기의 3단계 반응으로 구성하였다.

각 반응조는 아크릴을 사용하여 150 x 150 x 250 mm의 크기로 제작되었으며, 유입 후 최대 용적량을 4 L, 최소 용적량을 2 L가 되도록 하였다. 폐수는 정량펌프를 이용하여 반응기 상부에서 매 주기마다 2 L씩 유입시켰으며, 처리수는 침전시간 30분 후 정량펌프를 이용하여 반응기 최대 유효 용적의 50%인 2 L를 유출시켰다. 비포기시 반응기 내의 혼합을 위해 반응기 하부에 자석 교반기를 설치하여 일정하게 150rpm으로 교반시켰으며, 온도는 자동온도 조절기를 이용하여 25±1℃를 유지되었다. 포기 시 공기펌프를 이용하여 0.5L/min의 공기가 반응기 하부에 설치된 산기관을 통하여 주입되었다. 기질 공급, 처리수 배출, 포기 및 혼합 등의 조작은

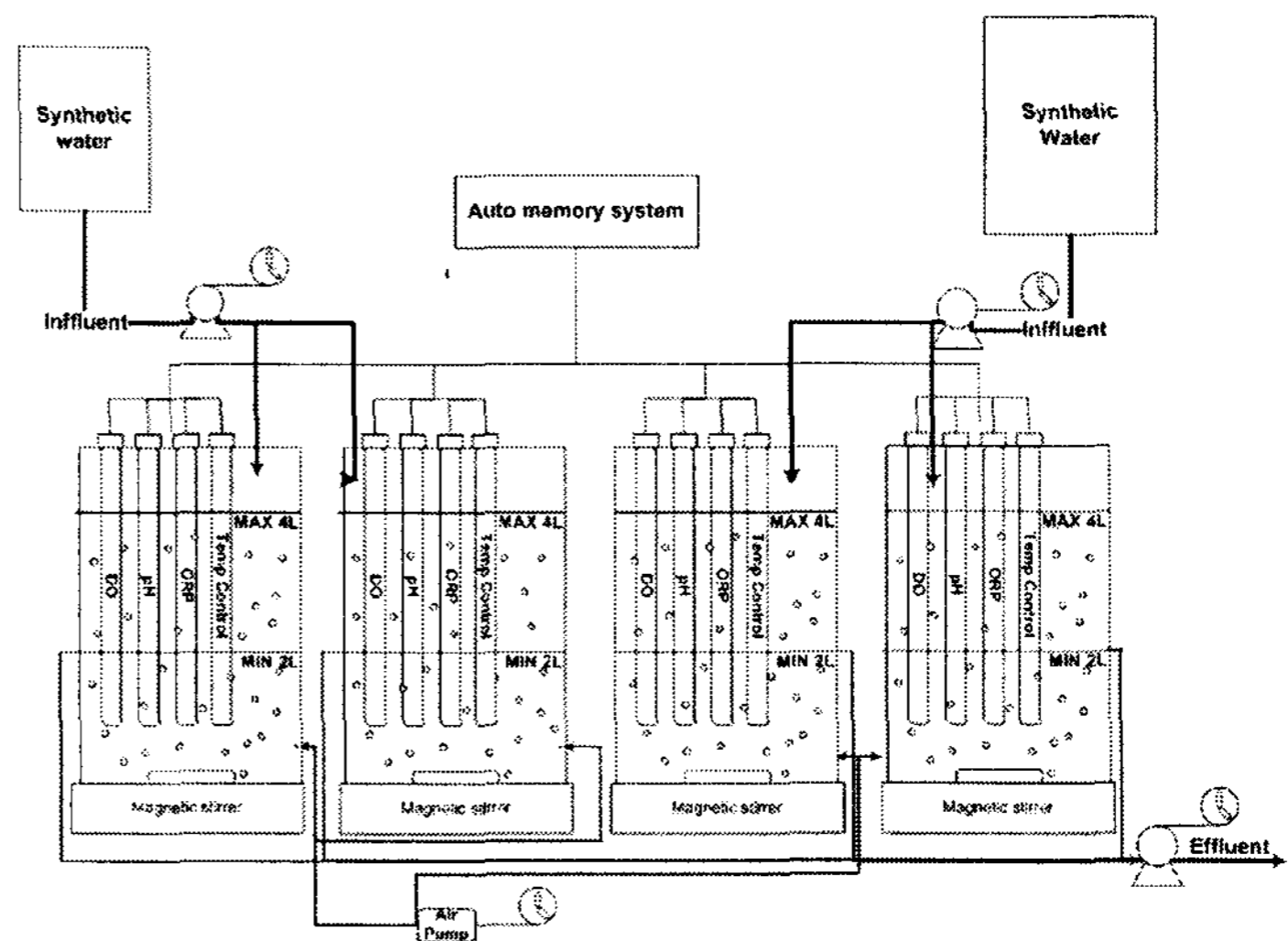


Fig. 1. Sequencing batch reactors with activated sludge.

기질 공급, 처리수 배출, 포기 및 혼합 등의 조작은

timer를 이용하여 제어하였다. 반응 주기는 12h/cycle로 하였다. 반응단계는 유입, 혐기, 포기, 무산소, 침전, 배출, 휴지단계가 이루어지도록 하였으며 반응 시간은 Table 2와 같이 하였다.

각 조당 2L의 합성폐수를 제조하여 각 반응조로 유입되었으며 그 성분은 Table 1과 같다. 유입되는 폐수의 농도는 TOC 240mg/L, NH<sub>3</sub>-N 40mg/L, PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P 15mg/L로 일정하게 유지되었다.

## 2.2. 실험 방법

각 반응기 내의 시료 채취는 약 30분내지 1시간 간격으로 채취하여 각각의 유입, 비포기 및 포기 등의 시간조건에서 3~4회 정도가 되도록 조절하여 채취하였다. 시료 채취 후 즉시 0.2 $\mu$ m인 membrane filter로 여과하여 시료 내 존재하는 미생물을 완전히 제거한 다음 분석에 들어갔다. MLVSS는 Standard Methods(APHA, 20th)에 따라 측정하였고, 유기물의 농도는 TOC(total organic carbon)를 지표로 이용하여 TOC analyzer (TOC-5000A, shimadzu, Japan)를 통하여 분석하였다. 아질산성 질소와 질산성 질소, 인산염 인은 Ion Chromatography (Metrohm, Switzerland)를 이용하여 측정하였다. 암모니아성 질소는 HS 3100 Water Analyzer (Humas, Korea)를 이용하여 측정하였다. pH, DO, ORP는 실시간 자동 측정기 (Ino lab multi level 3, WTW, Germany)를 사용하여 측정하였다.

Table 1. Compounds of Synthetic water

Compounds	Mg/L
Glucose	600mg/L
MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	50mg/L
MnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	55mg/L
FeSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	2.22mg/L
KCl	7mg/L
(NH <sub>4</sub> )SO <sub>4</sub>	188.4mg/L
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	84.2mg/L
NaHCO <sub>3</sub>	300mg/L
CaCl <sub>2</sub>	3.76mg/L

Table 2. Operation time schedule in SBRs

	유입	혐기	호기	무산소	침전	배출	휴지
Reactor 1	0.5h	3h	1h	6h	0.5h	0.5h	0.5h
Reactor 2			1.5h	5.5h			
Reactor 3			2h	5h			
Reactor 4			2.5h	4.5h			

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 호기시간 변경에 따른 MLVSS 변화

호기시간 변경에 따른 MLVSS의 변화는 Fig. 2와 같이 나타났다. 실험 초기 각 반응기의 MLVSS는 5300 $\pm$ 200 mg/L였으나, 실험 시작 10여일이 경과함에 따라 각 반응기의 MLVSS농도가 변화하기 시작했다.

전체 호기 단계의 공기 공급량이 0.03 m<sup>3</sup>인 R1은 MLVSS의 농도가 서서히 낮아지기 시작하여 실험 20일째는 4,765 mg/L를 나타내었으며, 최종 실험단계인 49일 째에서는 1,380 mg/L로 크게 감소하였다. 실험 기간 49일 동안 약 0.34 g/4L·day의 MLVSS 감소폭을 나

타내었다. 전체 호기 단계의 공기공급량이 0.045 m<sup>3</sup>인 R2는 R1과는 달리 MLVSS가 증가하는 모습을 보였다. 그러나 실험 40일이 경과되면서 MLVSS가 감소하는 모습을 보였으며, 추후 R1과 같이 지속적으로 감소하였다. 전체 호기 단계의 공기공급량이 0.06 m<sup>3</sup>인 R3는 전체 포기 단계의 포기량이 0.075 m<sup>3</sup>인 R4와 같이 지속적으로 MLVSS의 증가를 나타내었는데 상승폭이 거의 동일하였다. R3, R4의 실험 초기 MLVSS 농도가 각각 5,352 mg/L, 5,091 mg/L였으나 49일후에는 9,980 mg/L, 10,060 mg/L로 두 배가량 증가하였다. 이때 R3, R4의 단위 미생물당 공기공급량은 1.5 ml/mg과 1.8 ml/mg로 나타났으며, 최종 MLVSS가 소폭 감소하였던 R2의 단위 미생물당 공기공급량이 1.6 ml/mg을 나타내었다. 하지만 이미 상당량의 MLVSS가 감소한 R1의 경우 단위 미생물당 공기공급량이 5.4 ml/mg을 나타내었음에도 불구하고 초기 1.3 ml/mg의 낮은 공기공급량으로 인한 과도한 MLVSS의 wash-out으로 인하여 질소·인 제거능이 회복되지 않았다.

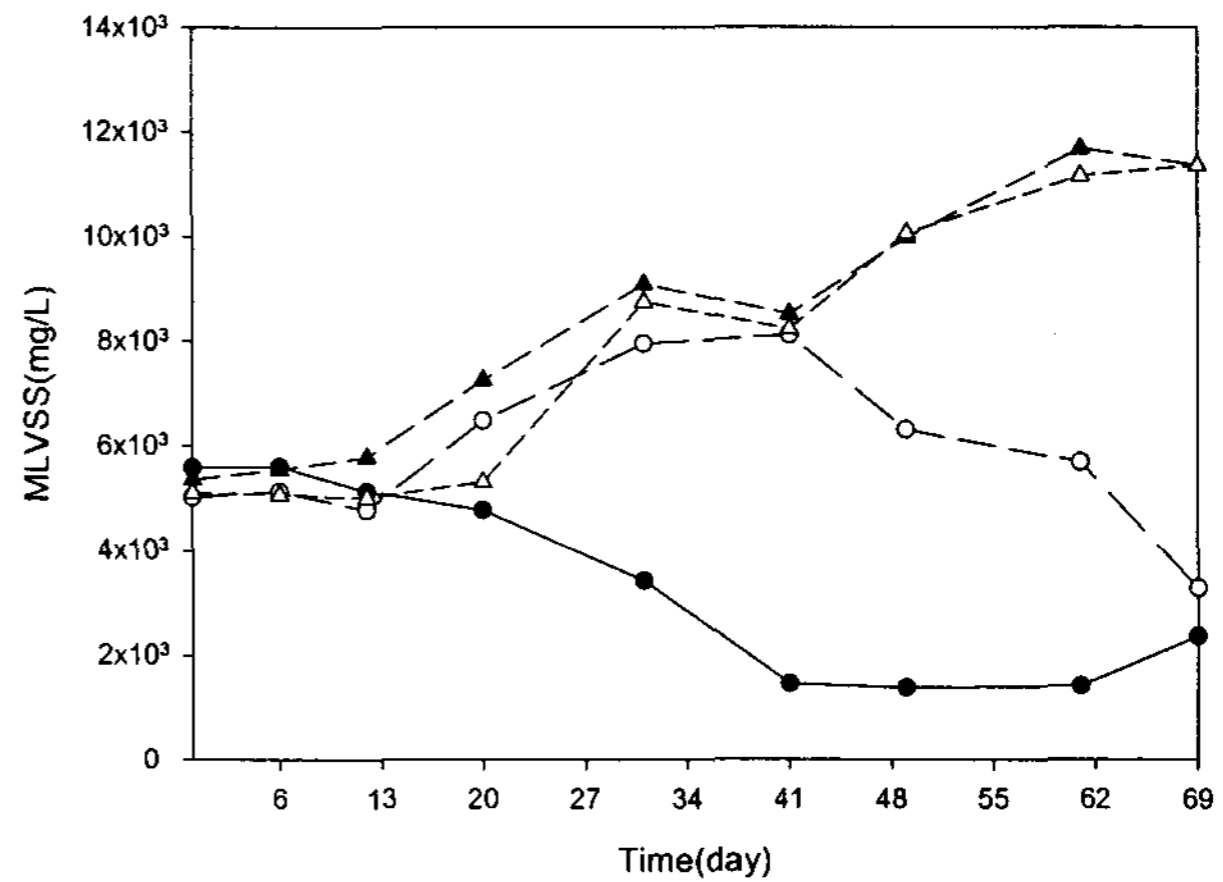


Fig. 2. The change of MLVSS concentration by the variation of aeration time. (●, R1:1h; ○, R2:1.5h; ▲, R3:2h; △, R4:2.5h)

### 3.2. 호기시간 변경에 따른 유기물 제거 변화

호기시간 변경에 따른 유기물 제거 변화는 TOC를 통하여 Fig. 3과 같이 나타났다. 초기 각 반응기의 유출 TOC 농도는 R1은 14.03mg/L, R2는 23.8mg/L, R3는 23mg/L, R4는 17.93mg/L로 나타났고 유입 TOC 농도 대비 TOC 제거 효율은 각각 90%, 82%, 82%, 87%로 모든 반응기가 80%이상의 TOC 제거 효율을 나타내었다. 53일째에는 각 반응기의 유출 TOC 농도가 R1이 41.29mg/L, R2가 39.25mg/L, R3가 34.5mg/L, R4가 34.25 mg/L을 나타내 약 70%의 TOC 제거 효율을 나타내었다. 이중 R1은 여타 반응기의 TOC 제거가 상당부분 유입 초기 30분 이내에 이루어진 반면, 실험 12일째부터 혐기 단계에서 완전히 제거하지 못하고 포기 단계에서 또 다시 감소하는 그래프를 나타내었다. 이는 줄어든 공기공급량으로 인해 상당량의 MLVSS가 wash-out됨에 따라 반응조 내의 heterotroph의 양이 줄어들었기 때문으로 판단된다. 또한 비 포기 기간 중의 TOC 이용율이 높다는 것은 탈질화 및 인의 방출에 유기물의 이용이 많았다는 의미로 해석할 수 있으므로 (박영식, 김동석, 2006), Fig. 4와 같이 혐기 단계의 반응조에 NO<sub>3</sub>-N가 검출되지 않고 것으로 볼 때, R3, R4에서의 혐기 구간에서 제거된 상당부분의 유기물은 Fig. 5에서 보는 것과 같은 인의 방출에 이용된 것으로 판단된다.

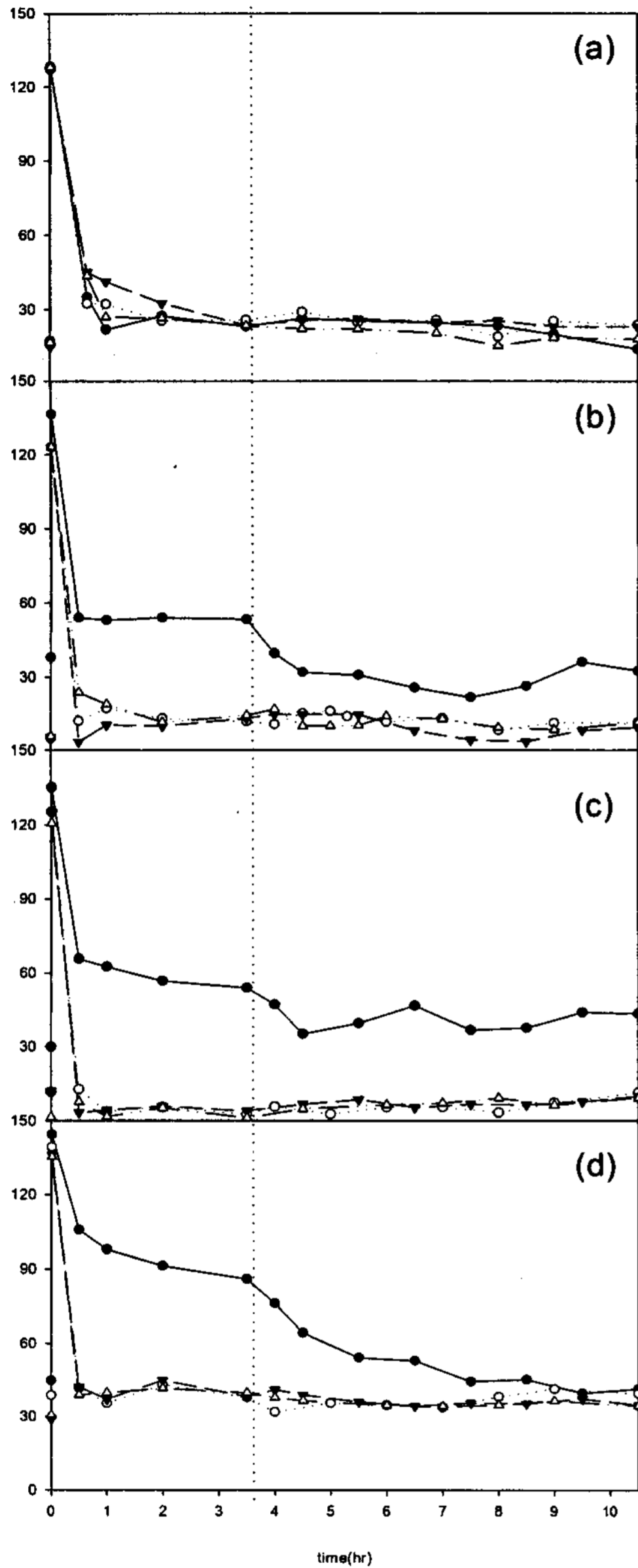


Fig. 3. The change of TOC concentration by the variation of aeration time. (●, R1:1h; ○, R2:1.5h; ▼, R3:2h; △, R4:2.5h); (a), 1day; (b), 12day; (c), 20day; (d), 53day)

### 3.3. 호기시간 변경에 따른 질소 제거 변화

암모니아와 아질산성 질소, 질산성 질소 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 호기시간의 변화에 따라 암모니아 분해 속도가 느려지는 것을 볼 수 있다. 초기 모든 반응기가 98%이상의 암모니아 제거 효율을 보였으나, 공기공급량을 줄인 R1은 아질산화를 포함한 질산화 과정

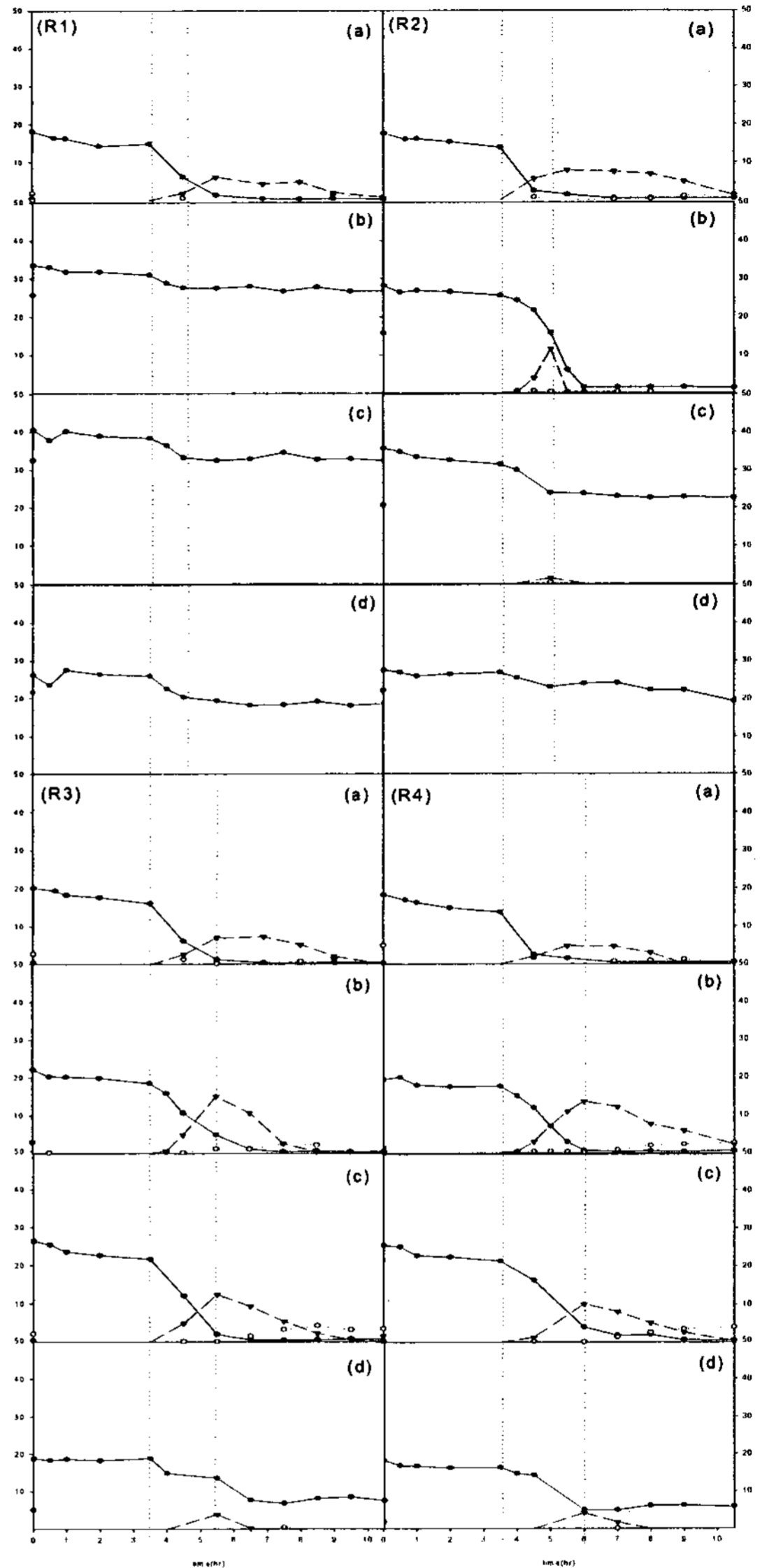


Fig. 4. The change of Ammonia concentration by the variation of aeration time. ((a), 1day; (b), 12day; (c), 20day; (d), 53day)

에 필요한 산소의 부족으로 암모니아 제거 효율은 40%로 급격히 감소하였다. R2를 보면 질산화과정에서의 산소부족현상을 볼 수 있다. 실험 첫날에는 포기과 동시에 초기 1시간동안 11.4mg/L의 암모니아를 분해하는 급격한 질산화를 보였으나 12일이 경과한 시점(Fig. 4(R2-2))에서는 포기단계 초반의 암모니아 제거 속도가 상당히 느려져 포기 1시간동안 3.9mg/L의 암모니아 제거 속도를 볼 수 있다.

그리고 21일이 경과한 시점에는 질산화가 거의 일어나지 않고 있음을 볼 수 있다. 그로 인해 공기공급량이 0.045m<sup>3</sup>인 R2의 경우, 실험 20일까지 R1보다 다소 높은 질산화 효율을 보였지만 53일째에는 30%로 R1보다 낮은 질산화 효율을 나타내었다. 이에 비해 산소가 각각 0.06, 0.075m<sup>3</sup>가 공급된 R3, R4는 실험 20일까지 약 98%에 달하는 질산화 효율을 보였으며, 실험 53일째에는 약 60%이상의 질산화 효율을 나타내었다. 전체적으로 각 반응기의 암모니아 제거 효율이 R1은 29%, R2는 20%, R3는 60%, R4는 69%로 감소하는 결과를 보였다.

#### 3.4. 포기시간 변경에 따른 인 제거 변화

인 제거에 있어서 Fig. 5와 같은 변화를 보였다. 0.03m<sup>3</sup>의 공기공급량을 가진 R1은 시간이 경과함에 따라 인 제거능이 떨어지는 결과를 보인 반면, R2, R3, R4는 상당히 높은 인 방출·섭취량을 보였다. 특히, R2는 공기공급량이 0.045m<sup>3</sup>로 R1의 공기공급량과 비슷하나, 20일째부터 높은 인 방출·섭취량을 가장 먼저 나타내었는데, R3, R4는 실험 20일까지 인 제거에 있어 별다른 차이점을 보이지 않았다가 53일째 두 반응조가 거의 동등한 인 방출·섭취량을 나타내었다. 또한 R3, R4는 빠른 인 방출·섭취경향을 보인 R2가 길어진 무산소 단계에서 인 방출이 되는데 비해 무산소 단계에서 인 방출이 거의 되지 않아 보다 안정적으로 인 방출·섭취경향을 나타내었다. 실험 최종 단계인 53일째에는 R1의 인 제거 효율이 62%, R2의 인 제거 효율이 70%인데 반해 R3, R4에서는 97%, 100%에 달하는 인 제거 효율을 나타내었다.

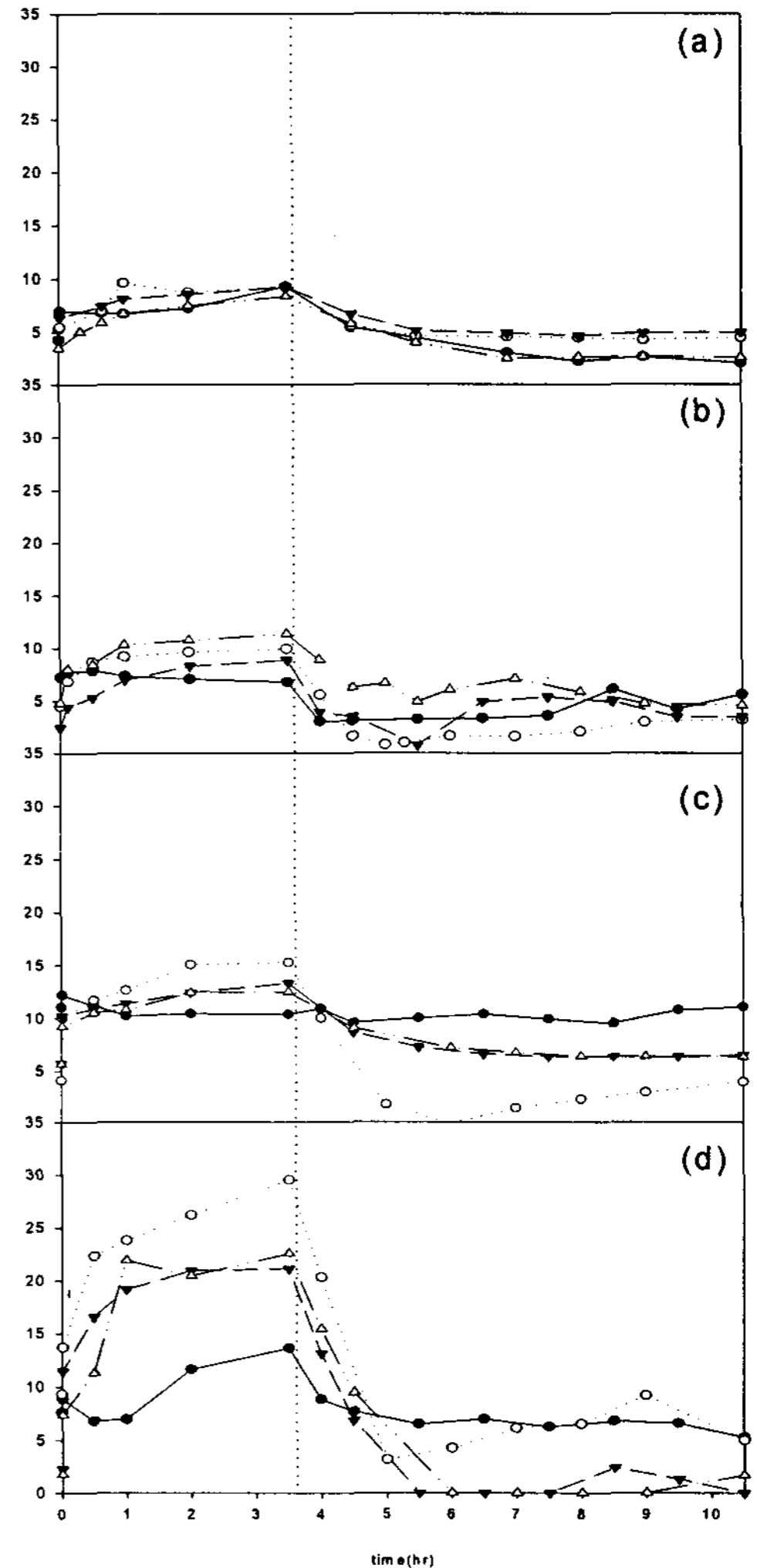


Fig. 5. The change of Phosphorus concentration by the variation of aeration time. ((●, R1:1h; ○, R2:1.5h; ▼, R3:2h; △, R4:2.5h); (a), 1day; (b), 12day; (c), 20day; (d), 53day)

### 3.5. 포기시간 변경에 따른 DO, pH, ORP 변화

DO, pH, ORP의 변화는 Fig. 6과 같다. pH profile에서 시간이 경과함에 따라 Fig. 6(a)와 같이 모든 반응기의 포기 단계의 변곡점이 사라지거나 좀 더 늦게 나타나는 것을 볼 수 있다. 초기 포기 단계 동안 유입되는 산소로 인하여 혐기 단계에서 생성된 탄산이온이 이산화탄소의 형태로 반응조에서 배출되어 상승하던 pH가 공급된 산소로 인해 암모니아가 질산형태로 분해됨에 따라 다시금 낮아지게 되는데 이후 반응조내 오르토인산이 미생물 세포내로 흡수가 되면 pH곡선은 상승하고, 흡수되는 오르토인산보다 질산화가 더 많이 이루어지면 지속적으로 떨어지면서 변곡점을 나타낸다. 때문에 암모니아가 충분히 있는데도 불구하고 변곡점이 사라지거나 출현시각이 늦어졌다는 것은 공기공급량의 부족에 따른 질산화의 부족이 원인으로 판단할 수 있다. R1에서는 시간이 경과함에 따라 전체적인 pH가 낮아져 53일째 측정에서는 다른 반응기와 비교해 전체 pH가 0.5정도 낮게 나타났다.

DO profile을 보면 시일이 경과할수록 DO의 농도가 전체적으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 호기 단계동안 공급되는 공기량이 일정함에도 불구하고 DO의 농도가 전체적으로 낮아진 것은 공급되는 산소가 질산화 및 인의 흡수에 적극적으로 소모 되고 있는 것으로 판단된다. 또한 R1의 경우 Fig. 3과 같이 호기 기간동안 TOC의 농도가 낮아지는 것을 보아 공급되는 산소가 유기물 분해에 적극적으로 소모되고 있다고 판단할 수 있다. R2의 경우, 질산화가 잘 이루어지지 않고 유기물도 유입 30분내에 대부분 제거 되는 것을 보아 공급되는 산소가 대부분 인의 흡수에 사용되고 있다고 판단된다.

ORP profile에서는 포기량에 따라 산화환원 그래프의 변동을 볼 수 있다. 호기시간이 긴 반응기일수록 ORP 그래프가 포기 단계에서 좀 더 높은 산화 전위 수치를 나타내었다. 실험의 경과에 따른 ORP 그래프는 전체적으로 값이 낮아지는 경향을 보였다. 하지만 Reactor 3,4에서는 거의 동일한 그래프를 나타냈다. 암모니아 제거에 있어 ORP 곡선은 호기 기간동안 상승곡선을 보이거나 그 ORP값이 호기 시간별로 많은 차이를 보였다. 질산성

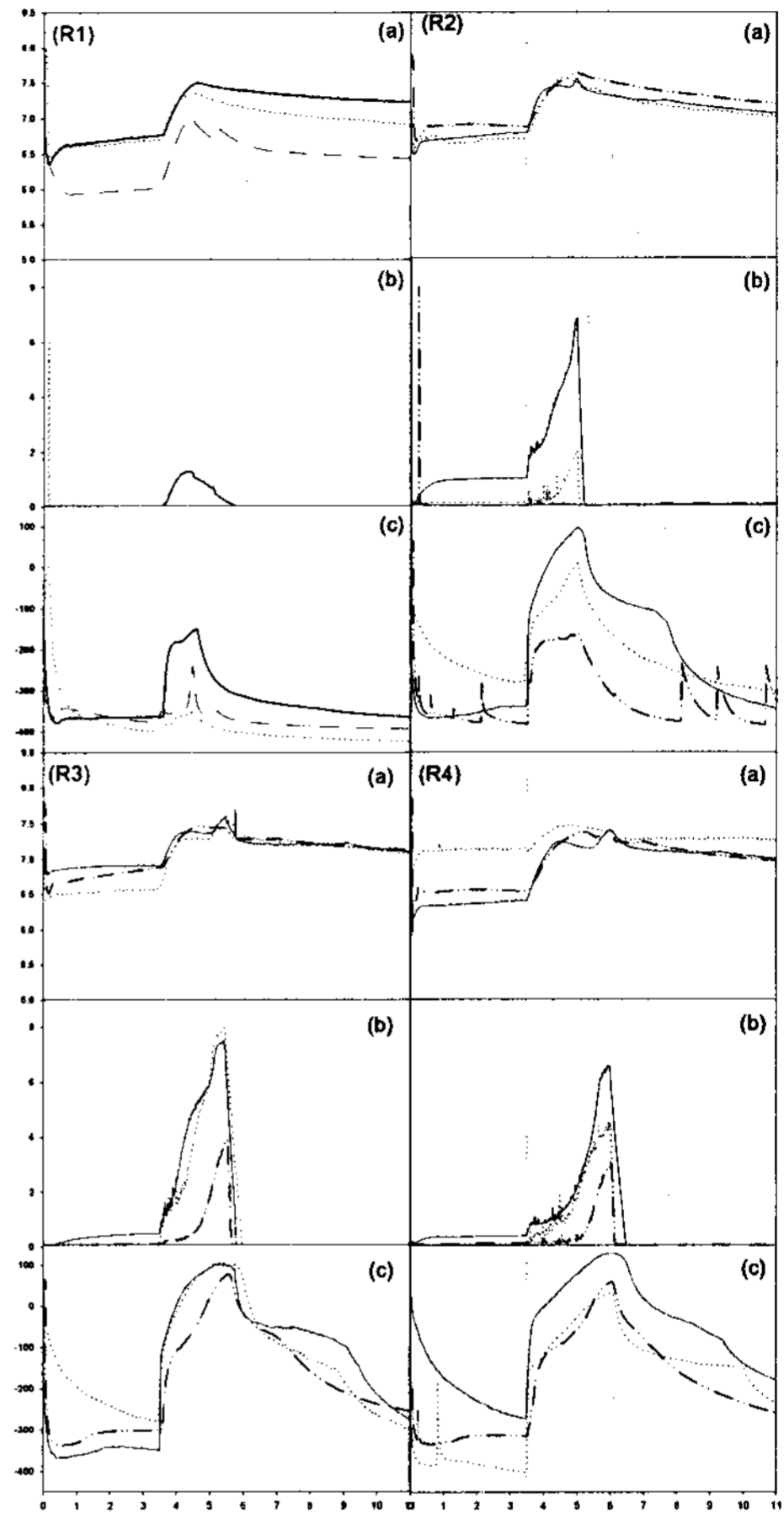


Fig. 6. The change of DO, ORP, pH by the variation of aeration time. (—, 1day; - - -, 20day; - · - ·, 53day; (a), pH; (b), DO; (c), ORP)

질소가 검출되지 않고 탈질이 된 R1의 경우, 호기 기간 내에도 ORP값이 -150이상 측정되지 않았다. R2, R3, R4의 경우에도 호기 기간 내 ORP값이 -150이상 측정되었을때 질산성 질소가 검출되었으며, 비록 ORP -100이하가 아니더라도 탈질을 확인할 수 있었다.

#### 4. 요약

호기시간 변경에 따른 SBR에서의 영양염류제거특성과 MLVSS의 변화를 본 이번 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충분하지 못한 산소의 공급은 미생물의 wash-out으로 인한 영양염류 제거 효율의 저조를 나타냈다.
- 2) 산소 공급량이 0.045m<sup>3</sup>였던 R2에서 저조산 질산화가 나타났으나, 인을 과다 축적하는 EBPR(Enhanced Biological Phosphorus Removal)을 나타냈다.
- 3) 산소 공급량이 0.06m<sup>3</sup>이상이었던 R3, R4에서는 60%이상의 질산화 및 탈질화와 약 100%에 달하는 인 제거 효율을 나타내었다.
- 4) 단위 미생물당 1.5~1.8ml/mg의 공급 산소량이 인 흡수에 유리한 것으로 나타났다.
- 5) 공급되는 산소에 있어 유기물 분해>인흡수>질산화에 우선적으로 소모되는 것으로 나타났다.

#### 참 고 문 헌

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

박영식, 김동석, 2006, (AO)<sub>2</sub> SBBR에서 운전주기에 따른 질소와 인 제거 특성 비교, 환경과학회지, 제 16권, 1호