

제올라이트 주입이 활성슬러지 플럭에 미치는 영향

이형술* · 박세진** · 윤태일**

인하대학교 서해연안환경연구센터*

인하대학교 지구환경공학부**

The effect of zeolite addition on floc in activated sludge process

Hyung Sool Lee* · Se Jin Park** · Tae Il Yoon**

Regional Research Center for Coastal Environment of Yellow Sea, Inha University*

Department of Geosystem and Environmental Engineering, Inha University**

요 약

본 연구는 zeolite를 활성슬러지 공정에 주입할 경우 zeolite가 biofloc에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 수행되었다. 두 반응기를 동일 조건으로 운전하였으며 하나는 표준 활성슬러지 공정 (CU)으로, 다른 하나는 zeolite를 폭기조내 4,000 mg/l로 유지 (ZU)하며 비교하였다. 슬러지 플럭 입경을 측정된 결과, 두 반응기 모두 SRT (Solid Retention Time)가 증가함에 따라 플럭 크기도 비례하여 증가하였으나 ZU가 모든 조건에서 CU보다 작은 평균 입경을 나타내었다. 한편, 두 반응기에 대해 슬러지 침전성을 비교한 결과, ZU는 SRT변화에 관계없이 3.4~11m/h의 침전속도를 나타내며 SVI(Sludge Volume Index)도 50~108 ml/g으로 양호한 침전상태를 보였다. 그러나 CU는 SRT 증가에 따라 슬러지 침전성이 큰 영향을 받았고 SRT 40일에서 *Sphaerotilus*가 우점종을 나타내었으며 이 결과, 슬러지가 전혀 침전하지 않았다.

ABSTRACT : This study was performed to evaluate the effect of zeolite addition on biofloc in activated sludge process. Two units were compared each other, in which one was operated as control unit (CU) and the other was managed by adding zeolite into aeration basin to sustain 4,000 mg/l (ZU). It was observed that flocs of both units were enduringly increased in medium size by extending SRT (Solid Retention Time), although their effect size of ZU was smaller than theirs of CU. Zeolite application excessively improved sludge settling property and ZU presented sludge settling velocity of 3.4 to 11 m/h regardless of SRT variation. The sludge volume index (SVI) was in the range of 50 and 108 ml/g. Conversely, the sludge settling velocity of CU seriously depended on SRT increase, and sludge sedimentation was not achieved at a 40 days of SRT due to *Sphaerotilus* appeared predominantly in reactor.

1. 서 론

활성슬러지 공정은 국내의 도시하수 처리에 가장 잘 알려진 생물학적 처리공정이다. 그러나 산업폐수의 간헐인 유입과 잦은 pH 변화 등으로 적정 처리에 어려움을 겪고 있으며, 유입부하 변동으로 인해 슬러지 침전성이 악화되어 처리수가 오염되고 있는 실정이다.

이러한 슬러지 침전성 악화 문제를 해결하기 위해 활성슬러지 폭기조 전단에 무산소조를 설치하여 슬러지 bulking 현상을 방지하거나 $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$ 등의 무기 응집제를 폭기조에 주입한다고 보고되고 있다[1,2]. 그러나 $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$ 등의 무기 응집제는 적정 농도 이상을 주입하게 되면 미생물에게 악영향을 준다고 보고되고 있으며 이 문제를 보완하기 위해 최근 분말 무기입자를 주입하는 방법이 제시되고 있다[3]. 대표적인 무기 입자로는 talc, clay, zeolite, bentonite 등의 천연 광물과 calcium alginate 등의 화학적 전처리를 거친 물질들이 있다. Cantet 등은 talc를 활성슬러지 폭기조에 주입한 결과, SVI가 3배까지 감소하였다고 보고하였으며[4], Rasmussen 등은 talc와 chlorite 혼합물 (8:2, wt)이 슬러지 침전성에 미치는 영향에 대해 연구하였는데, 슬러지 계면 침전식을 이용하여 혼합물이 침전성에 미치는 영향을 모사하였고, 실험결과 talc와 chlorite 혼합물이 침전속도를 향상시키고 전단력에 대한 높은 저항도를 나타내었다고 보고하였다[5]. 또한 Chobado와 Pannier는 pilot plant 규모의 활성슬러지 공정에 clay를 유량기준으로 80~150 mg/l 주입한 경우와 표준 활성슬러지 공정을 비교하였다. 실험 결과, clay를 적용한 시스템은 반응기내 슬러지 침전성이 향상되어 침전지 부피를 기존보다 30%까지 감소시킬 수 있다고 주장하였다[6].

한편, Olah 등은 무기입자 중 특히 zeolite를 활성슬러지 공정에 적용할 경우 슬러지 침전성 뿐만 아니라 미생물의 활성도가 증가한다고 주장하였으며, 실험결과 유기물 제거율과 질산화율이 개선되고 침전지내 슬러지 농도가 15,000~30,000 mg/l까지 증가하였으며 CST(Capillary Suction Time)가 30/s에서 10/s로 감소하였다고 주장하였다. 또한 zeolite의 주

입이 미생물 성장환경을 변화시켜 *predator ciliates*가 표준 활성슬러지보다 많이 존재한다고 보고하였다[7].

최근 질산화의 향상을 위한 zeolite의 주입에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 기존의 연구들은 슬러지 침전성에 대한 개선 여부만이 보고 되었을 뿐, 슬러지 침전성 향상 원인의 주요 인자를 파악하지 못했다. 따라서 본 연구는 zeolite가 활성 슬러지에 미치는 물리적·생물학적 특성을 동시에 파악하여 슬러지 침전성 및 슬러지 탈수성 향상의 주요 원인을 결정하기 위해 수행되었다.

2. 재료 및 방법

Zeolite가 슬러지 플럭에 미치는 영향을 비교·분석하기 위해 표준 활성슬러지 공정과 zeolite를 주입한 활성슬러지 공정을 동일 조건으로 운전하며 비교하였다. Fig. 1과 같이 활성슬러지 공정은 5L의 폭기조와 2.5L의 침전조로 이루어졌다.

시스템내 온도는 $20 \pm 3^\circ C$ 로, 폭기조내 용존산소는 5 ± 0.8 mg/l로 일정하게 유지하였다. 유입원료는 인공폐수를 사용하였고 Table 1에 그 성상을 자세히 기술하였다. 유기물 부하와 질소 부하를 각각 $1.0 \text{ kg} \cdot \text{COD}_C / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ 와 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{TKN} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ 로 고정시켰으며 SRT를 10일에서 40일로 변화시켰다. 이 때 SRT는 유출 SS(Suspended Solid)를 무시하고 폐슬

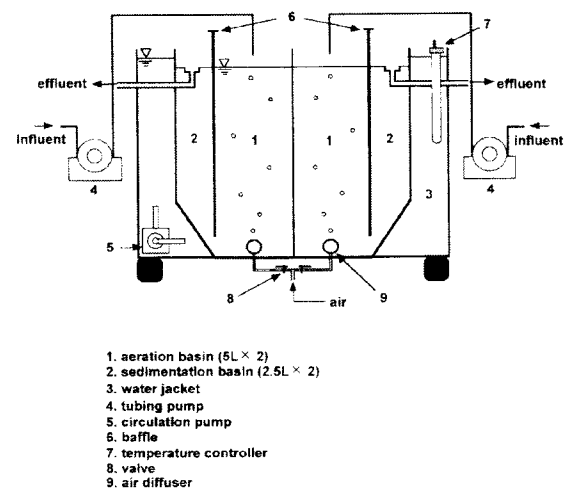


Fig. 1. Schematic diagram of activated sludge process.

Table 1. The Component of Synthetic Wastewater

Component	Concentration (mg/l)
Carbon source	
Peptone	180
CH ₃ COONH ₄	55
Glutamate	72
Ammonia source	
NH ₄ Cl	80
(NH ₄) ₂ SO ₄	20
Mineral source	
NaH ₂ PO ₄	8.3
Na ₂ HPO ₄	8.3
NaCl	10
FeCl ₃	2
MgSO ₄ · 7H ₂ O	40
CaCl ₂	25
NaHCO ₃	83

러지량에 따라 결정하였다.

Zeolite는 운전 초기에 20g을 폭기조에 주입하여 4,000 mg/l가 유지되게 하였고 SRT에 따라 폐기되는 슬러지량을 고려하여 zeolite를 보충하였으며 이 때 MLFSS (Mixed Liquor Fixed Suspended Solid) 농도가 zeolite농도와 동일하다고 가정하였다[8].

XRD(X-Ray Diffraction, Philips X'pert MPD)와 ICP(Inductively Coupled Plasma, SPQ 9000)mass를 이용하여 zeolite의 성분 및 구조를 파악하였으며 Mastersizer microplus(Mastersizer Ver. 2.15, Malvern Lns. Ltd., UK)를 이용하여 zeolite와 미생물 플럭의 입경을 측정하였다. 또한 zeolite 및 슬러지 비중은 pycnometer [9]를 이용하여 측정하였고, 슬러지 침전 속도는 직경 7cm, 높이 30cm의 메스실린더를 이용하여 분석하였다. 한편, MLFSS, SCOD_T(Soluble chemical oxygen demand), OUR(Oxygen Uptake Demand), 슬러지 비저항 측정 (Time-to-filter method)은 각각 standard method에 의해 측정하였고 [10], 미생물은 최대 600배의 배율을 갖는 사진측정용 광학현미경 (Nikkon)을 사용하여 관찰하였으며 호기성 종속영양균의 개체수 평가는 알부민 한천배지를 이용하여 평판 배양법으로 수행하였다[11].

3. 결과 및 고찰

3.1 Zeolite의 특성

Fig. 2에 나타나 있듯이 실험에 사용된 zeolite는 clinoptilolite의 주요 peak와 거의 동일한 경향을 나타내고 있었으며, 또한 ICP 분석 결과 SiO₂와

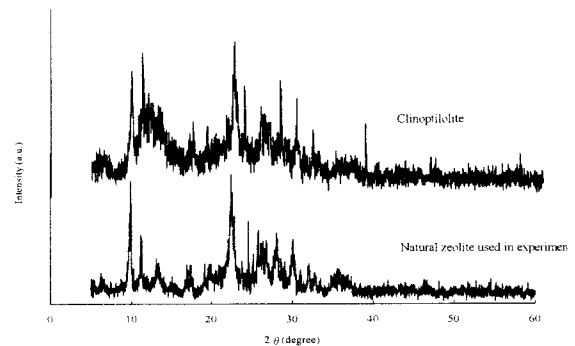


Fig. 2. XRD result of employed zeolite in the experiment.

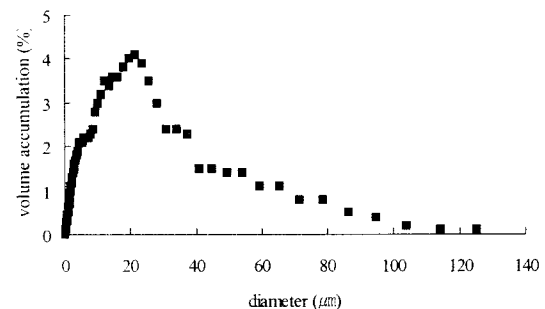


Fig. 3. Particle size distribution of zeolite.

Table 2. The Physico-chemical Characteristics of Zeolite

mean diameter (μm)	19.75
specific density	2.86
composition (% wt)	
SiO ₂	58.48
Al ₂ O ₃	15.14
Fe ₂ O ₃	3.12
PbO	0.022
MoO ₃	0.058
MnO	0.10
MgO	1.96
CaO	3.05
lg-loss*	12.84

*lg-loss: lgritration loss

Al_2O_3 가 zeolite의 대부분을 차지하였고 무게비로 각각 61.3%와 12.4%를 나타내었다. Pyconmeter 측정 결과 zeolite의 비중은 2.86을 나타내었고, 입도분포는 Fig. 3처럼 대부분 입자가 $100\mu m$ 이하였으며 평균 입경이 $19.75\mu m$ 였다. Table 2에 zeolite의 물리·화학적 특성을 자세히 나타내었다

3.2 Zeolite가 플럭 입경분포 및 미생물 활성도에 미치는 영향

활성슬러지 반응기 운전 결과, Fig. 4에 나타나 있듯이 SRT 10일에서 ZU와 CU의 평균 입경은 각각 $102\mu m$ 와 $153\mu m$ 를 나타내었고 SRT 20일에서는 $237\mu m$ 와 $294\mu m$ 를 나타내었으며 SRT 40일에서는 $286\mu m$ 와 $315\mu m$ 를 보이며 두 반응기 모두 SRT가 증가함에 따라 플럭 크기도 비례하여 증가하였다. 이러한 경향은 Knocke와 Zentkovich 실험에도 나타났으며 표준 활성슬러지 공정의 SRT를 1.1일에서 17.4일로 증가시키며 플럭의 평균 입경을 측정한 결과, SRT 1.1일에서는 $20\mu m$ 를 나타낸 반면, SRT 12일과 17.4일에서는 각각 $36\mu m$ 와 $40\mu m$ 를 나타냈다고 주장하였다[11].

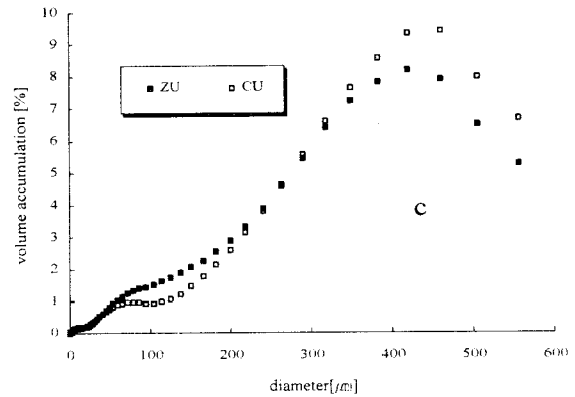
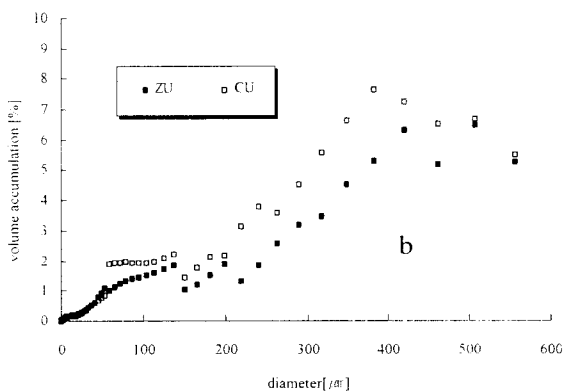
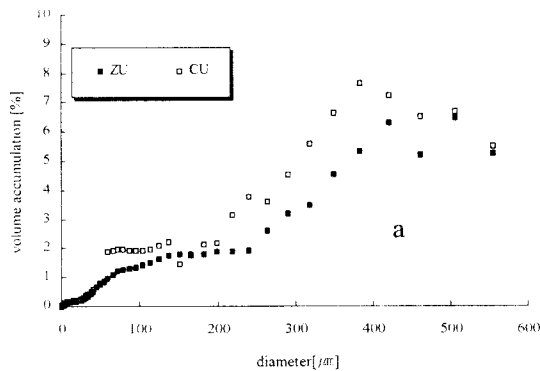


Fig. 4. Biofloc size distribution according to SRT variation; a(SRT 10 day), b(SRT 20 day), c(SRT 40 day).

그러나 SRT 10일, 20일, 40일에서 ZU의 평균입경이 CU의 평균입경보다 항상 작았는데, 이 현상은 Olah 등의 실험에서도 나타났다. 그들은 zeolite를 주입한 경우가 표준 활성슬러지 공정보다 더 작은 입경을 나타내고 이 결과 산소 및 영양분의 전달속도가 표준 활성슬러지의 경우보다 향상된다고 주장하였다[7]. 그러나 본 연구에서 두 반응기의 유기물 제거속도는 $11.1 \sim 15.8 \text{ mg} \cdot \text{SCOD}_{Cr}/\text{g} \cdot \text{MLVSS} \cdot \text{hr}$ 로 거의 유사한 값을 나타내었으며 OUR (Oxygen Uptake Rate) 결과도 $15.8 \sim 32.4 \text{ mg} \cdot \text{O}_2/\text{l} \cdot \text{hr}$ 로, 입경차이에 의한 미생물 활성도에 대해 주요한 차이를 발견할 수 없었다.

3.3 zeolite가 슬러지 침전성 및 미생물중에 미치는 영향

SRT를 변화시키며 ZU와 CU에 대해 슬러지 침전성을 비교한 결과, CU는 SRT에 큰 영향을 받았지만 ZU는 SRT변화와 관계없이 양호한 슬러지 침전상태가 유지되었다. SRT 10일에서 ZU와 CU의 슬러지 침전속도는 각각 $10 \sim 11 \text{ m/h}$ 와 $3 \sim 5 \text{ m/h}$ 를 나타내었다. 그러나 SRT를 20일로 상승시킨 후 ZU는 $10 \sim 11 \text{ m/h}$ 의 양호한 슬러지 침전속도를 보였으나 CU는 $0.1 \sim 0.7 \text{ m/h}$ 로 슬러지 침전이 매우 악화되었다. 또한 SRT를 40일로 상승시킬 경우 CU는 슬러지가 전혀 침전하지 않았고, ZU는 슬러지 침전속도가 $3.4 \sim 8 \text{ m/h}$ 로 어느 정도 감소하였으나 SVI는 $50 \sim 80 \text{ ml/g}$ 으로 양호한 고액분리가 이루어졌다. 이렇게

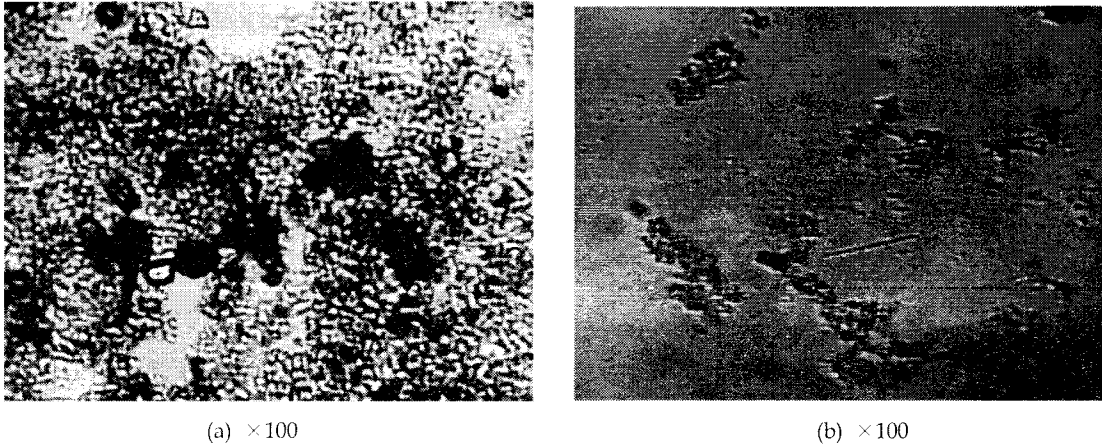


Fig. 5. Microscopic observation of sludges in both units; a(ZU), b(CU).

zeolite 주입으로 높은 슬러지 침전성이 유지되는 이유는 첫째, zeolite가 플럭의 seed 작용을 하여 플럭의 밀도를 상승시켰기 때문이며 둘째, zeolite가 미생 물종을 변화시켰기 때문이라고 판단된다. 첫 번째가

능성에 대해, Fig. 5에서와 같이 flocc 내부에 zeolite가 결합되어 있는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 zeolite가 ZU 반응기내의 biofloc을 보다 단단히 결합시키는 seed로서의 역할을 수행하는 것으로 판단된다.

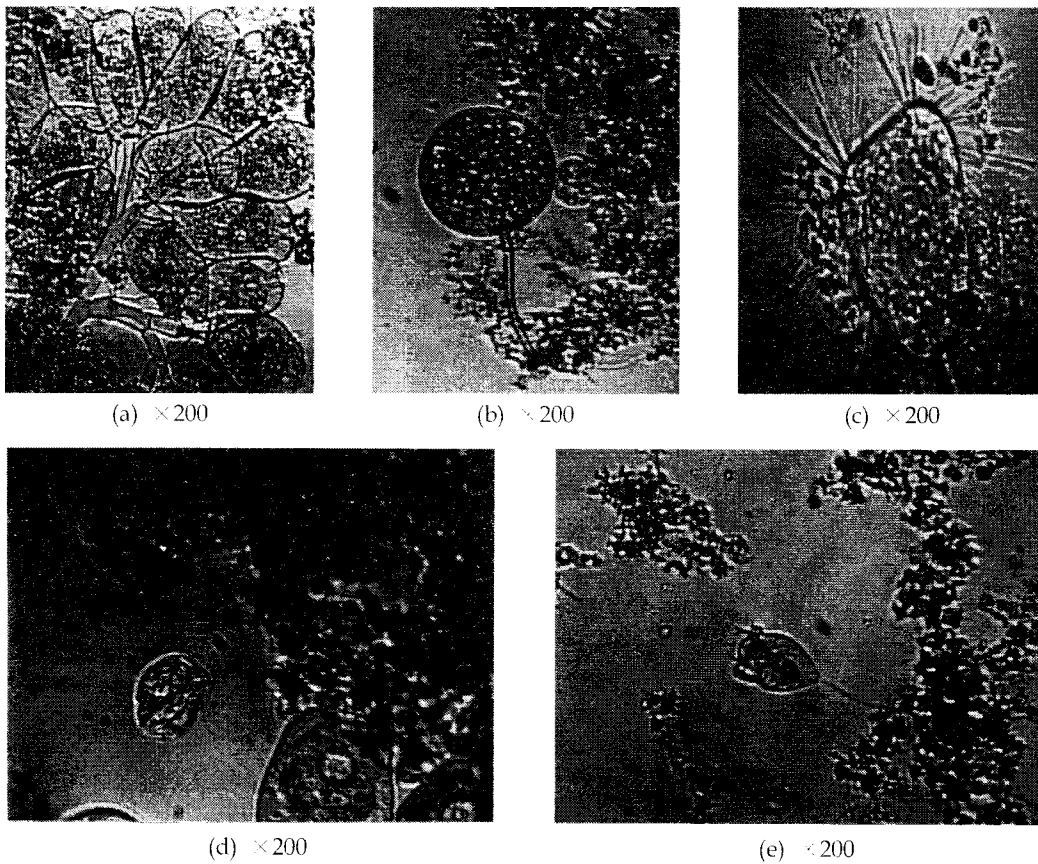


Fig. 6. The comparison of microbial sorts between ZU and CU; a(*Carchesium*), b(*Podophrya*), c(*Acineta*), d(*Aspidisca*), e(*Vorticella*).

Table 3. The Comparison of Sludge Density in Both Units

SRT (day)	ρ_s^*	
	ZU	CU
10	1.192	1.054
20	1.275	1.059
40	1.291	1.068

*specific density

육안으로 관찰된 결과를 보다 구체적으로 확인하기 위해, 두 반응기의 슬러지 비중을 측정한 결과 Table 3처럼 SRT 10, 20, 40일에서 CU의 슬러지 비중은 1.054, 1.059, 1.068를 나타내었고 ZU는 각각 1.192, 1.275, 1.291을 보였다. 따라서 주입된 zeolite는 biofloc과 결합하여 높은 침전성을 보장하는 것으로 판단된다.

다음으로 미생물 종 변화에 대해 ZU와 CU는 전혀 다른 양상을 나타내었다. ZU가 Fig. 6처럼 *Carchesium*, *Vorticella*, *Podophrya*, *Acineta*, *Aspidisca* 등의 다양한 protozoa를 나타낸 반면 CU는 *Vorticella*, *Arcella*, *Sphaerotilus*의 비교적 한정된 미생물 종이 관찰되었다. 특히 ZU에서 나타난 *Podophrya*는 먹이원으로 protozoa를 섭취하는 포식성으로 *Carchesium*, *Vorticella*속의 *telotroch*를 섭취하는 suctorida이며 protozoa가 증식할 수 없는 환경에서는 생식이 불가능한 것으로 알려져 있다. 한편, 두 반응기에 대해 호기성 중속영양균의 개체수 평가를 수행한 결과 ZU는 $12.7 \sim 15.2 \times 10^8$ CFU(Colony Forming Unit)/ml를 나타낸 반면, CU는 $6.8 \sim 7.1 \times 10^8$ CFU/ml를 나타내었다.

이러한 결과가 나타난 이유는 zeolite가 미생물에게 넓은 표면적을 제공하기 때문이라고 판단된다. 즉, Stotzky 등은 bulk내의 미생물과 soil내의 미생물 생태는 pH, 이온강도, 유기물 농도, 미량원소 농도 등의 차이가 발생하여 서로 다른 양상을 보인다고 주장하였고 [12] Olah 등도 zeolite의 표면효과로 인해 zeolite를 주입한 경우가 표준 활성슬러지보다 다양한 predator ciliates가 출현했다고 하였고 고농도의 미생물이 유지된다고 주장하였다 [7].

3.4 zeolite가 슬러지 비저항에 미치는 영향

SRT를 증가시키며 두 반응기에 대해 비저항을

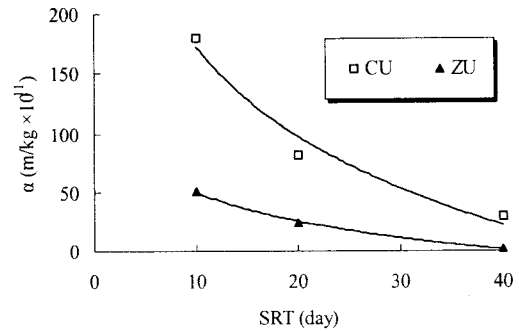


Fig. 7. Specific resistance of sludges according to increasing SRT.

측정한 결과 SRT 10일에서 ZU는 평균 5.1×10^{12} m/kg을 나타내었고 CU는 1.8×10^{13} m/kg을 나타냈다. 또한 SRT 20일과 40일에서 ZU가 2.4×10^{12} 과 2.3×10^{11} m/kg을 나타낸 반면 CU는 각각 8.2×10^{12} 과 3.0×10^{12} m/kg을 보였다. 즉 두 반응기의 경우 모두 Fig. 7처럼 SRT가 증가할수록 비저항이 감소하는 경향을 나타내었다.

이러한 현상이 나타난 이유는 SRT증가에 따라 입자크기가 비례하여 증가하기 때문이라고 판단되며 Knoke와 Zenkovich의 실험에서도 증명되었다. 그들은 SRT가 슬러지 탈수성을 결정하는 가장 중요한 인자라고 주장하였으며, SRT 증가에 따라 비저항을 측정할 결과 SRT 4일에 비해 SRT 8일의 비저항값이 최대 약 4배정도 작다고 보고하였다. 그리고, 이러한 결과는 SRT 증가에 따라 플럭 크기가 비례하여 증가하였기 때문이라고 주장하였다[12,14].

일반적으로 비저항은 식(2)처럼 압력과 유체 점도 그리고 고형물 농도의 함수로 나타낼 수 있으며 압력항은 Kozeny-Carman 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{av} \cong \frac{\Delta P}{\mu C} \quad (2)$$

여기서, α_{av} : 평균비저항 (m/kg), ΔP : 여과압력 (N/m^2), C: 입자농도 (kg/m^3), μ : 점도 ($kg/m \cdot s$)

$$\Delta P = \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \left(\frac{S_p}{V_p} \right)^2 2\mu \Delta L v_a \quad (3)$$

여기서, ϵ : 공극률, S_p : 입자의 비표면적 (m^2), V_p :

입자부피 (m_3), ΔL : 여과 깊이 (m), v_o : 평균 여과 속도 (m/s)

이때, SRT 변화에 관계없이 슬러지의 점도와 공극률이 일정하고 플럭이 완전구형이라고 가정한다면 S_p/V_p 는 $6/D_p$ 과 동일하므로 식(2)를 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{av} \cong \frac{k}{D_p^2 \mu C} \quad (4)$$

여기서, D_p : 플럭평균입경 (m), k : 상수

식(4)를 근거로 하여 입경의 증가가 슬러지 비저항에 미치는 영향을 파악하기 위해 비저항값을 SRT 10일을 기준으로 상대 평가하였다. 이때 D_p 을 제외한 3가지 parameter (C , μ , k)는 일정하다고 가정하였다. Table 4처럼 실제치와 식(4)를 이용한 이론치를 비교했을 경우 동일한 감소 경향을 확인할 수 있으며 특히, SRT 40일의 데이터는 실제치와 이론치가 거의 유사한 값을 나타내고 있다.

한편, ZU와 CU의 비저항값을 비교해보면 Fig. 7에 나타나 있듯이 zeolite를 주입한 ZU의 비저항이 CU보다 최대 약 3배정도 낮은 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 식(4)의 수식과 이론적으로 일치하지 않는데, 그 원인은 zeolite에 의한 유기물 흡착, 플럭 구조의 변화, 비저항 회석 효과 등으로 판단되며 특히, zeolite의 회석효과가 큰 영향을 끼쳤을 것이라고 판단된다. 즉, ZU에서 zeolite(α_{av} : 5.3×10^8 m/kg)를 MLSS(Mixed Liquor Suspended Solid)의 약 50%로

Table 4. The Comparison of Sludge Specific Resistances between ZU and CU

SRT (day)	α_{av} [m/kg $\times 1011$]			
	ZU		CU	
	observed	calculated	observed	calculated
10	51 (102)b	51	180 (153)b	180
20	24 (237)b	9.44a	82 (294)b	48a
40	2.3 (286)b	6.48a	30 (315)b	42a

^arelative evaluation to specific resistance at SRT 10d on the basis of equation 4, ^bParticle diameter values measured by Mastersizer

유지했기 때문에 ZU의 비저항값은 순수한 슬러지의 비저항과 zeolite의 비저항이 혼합된 값이라고 할 수 있다. 그러나 주입된 zeolite는 플럭의 seed로 작용하여 비저항 측정시 미생물 플럭과 유사하게 작용하기 때문에 단순히 양적인 개념만으로 zeolite에 의한 비저항 감소 현상을 설명할 수 없다고 판단되며, 위의 현상을 명확히 해석하기 위해서는 플럭구조, 플럭압축도, 유기물 흡착 등의 여러 인자에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

활성슬러지 공정에 zeolite를 4,000mg/l 유지하며 표준 활성슬러지와 미생물 플럭을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 두 반응기 모두 SRT 상승에 비례하여 플럭입경이 증가하였으나 zeolite를 주입한 경우가 표준 활성슬러지보다 더 작은 입경을 보였다.
2. 활성슬러지에 주입된 zeolite는 플럭의 seed 역할을 수행하여 표준 활성슬러지보다 더욱 단단하고 밀집성이 높은 플럭을 나타냈고 플럭 비중을 상승시켰으며 이 결과, 슬러지 침전성이 향상되었다.
3. ZU와 CU의 비저항값을 비교한 결과, ZU가 CU보다 더 작은 평균 입경을 나타냈음에도 불구하고 더 낮은 비저항값을 나타내었으며 이는 ZU가 CU와는 달리 zeolite가 MLSS의 약 50% 정도 포함되어 있어 비저항값을 어느 정도 회석하기 때문이라고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Argaman, Y., Barnard, J., Daigger, G. T., Enkenfelder, W. W., Hermanowicz, S. W., Jenkins, D., Polson, S. R., Sigmund, T. W.

- and Stensel, H. D., *Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater; Principles and practice.*, second edition, Sedlak, R. I.(editor), Lewis publishers, N.Y., U.S.A. (1991).
- [2] Bowen, R. B. and Dempsey, B. A., Improved performance of activated sludge with addition of inorganic solids. *Wat. Sci. Tech.* **26**, 2511-2514 (1992).
- [3] Pirtola, L., Hultman, B., Andersson, C. and Lundeborg, Y., Activated sludges ballasting in batch tests. *Wat. Res.* **33**, 1799-1804 (1999).
- [4] Cantet, J., Paul, E. and Clauss, F., Upgrading performance of an activated sludge process through addition of talqueous powder. *Wat. Sci. Tech.* **34**, 75-83 (1996).
- [5] Rasmussen, M. R., Larsen, T. and Clauss, F., Improving settling dynamics of activated sludge by adding fine talc powder. *Wat. Sci. Tech.* **34**, 11-18 (1996).
- [6] Chudoba, P. and Pannier, M., Use of powdered clay to upgrade activated sludge process. *Env. Tech.* **15**, 863-870 (1994).
- [7] Olah, J., Papp, J., Meszaros-kis, A., Mucsi, G. Y. and Kallo, D., *Simultaneous separation of suspended solids, ammonium and phosphate ions from wastewater by modified clinoptilolite. Zeolites as Catalysts, Sorbents and Detergent Builders*, Karge H.G. and Weitkamp, J. (editors), Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands (1989).
- [8] 정진영, 신항식, 정윤철, SBR내에서의 분말 제올라이트의 역할을 이용한 새로운 질소제거 공정. 한국불환경학회 · 대한상하수도학회 · 한국수도협회, 공동춘계학술발표회 논문집, 33-36 (2000).
- [9] American Society for Testing and Materials., Standard test method for specific gravity and density of semi-solid Bituminous Materials (Psychrometer Method). West Conshohocken, PA., D70-97 (1997).
- [10] APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 20th edition (1998).
- [11] Harold, J. B., *Microbial Applications a laboratory manual in general microbiology*, 5th edition, Wm. C. Brown publisher (1990)
- [12] Knocke, W. R. and Zentkovich, T. L., Effects of mean cell residence time and particle size distribution on activated sludge vacuum dewatering characteristics. *J. WPCF.* **58**, 1118-1123 (1986).
- [13] Stotzky, G., Activity, ecology and population dynamics of microorganisms in soil. *CRC Crit. Rev. Microbiol.* 59-137 (1972).
- [14] Karr, P. R. and Keinath, T. M., Influence of particle size on sludge dewaterability. *J. WPCF.* **50**, 1911-1930 (1978).