

활성슬러지에서의 미생물 성장에 대한 ZnO와 TiO₂ 나노물질의 영향 Effect of ZnO and TiO₂ Nanoparticles (NPs) on Microorganisms Growth in Activated Sludge

하민정 · 이어은 · 장 암[†]
Min Jeong Ha · Yeo Eun Lee · Am Jang[†]

성균관대학교 수자원전문대학원
Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University

(Received February 26, 2016; Revised March 3, 2016; Accepted March 9, 2016)

Abstract : Sewage treatment using microorganisms is affected by multiple factors such as microbial properties, characteristics of sewage and operating conditions, and nanoparticles inflow may cause negative effects on sewage treatment system especially on the system stability and efficiency. It was studied to assess the toxic effects of nanoparticles on microorganism growth. The activated sludge in the sewage treatment plant of university was cultured in the optimized medium for each strain. *Bacillus* (gram-positive), *Pseudomonas* and *E.coli* (gram-negative) in the activated sludge were selected as target microorganisms, and ZnO and TiO₂ were chosen as nanoparticles. For same concentration of nanoparticles, average growth inhibition rate of *Bacillus* was 60% or more, while that of *Pseudomonas* was less than 10%. The toxicity of nanoparticles was shown to be higher for gram-positive bacteria than gram-negative bacteria because of their differences on structure of cell wall, components of cell wall protein, physiology of cells and metabolism. ZnO affected 3 times more negative on the growth of microorganisms as compared to TiO₂. It was assumed that, therefore, toxicity of ZnO was found to be greater than TiO₂.

Key Words : Activated Sludge, Growth Rate of Microorganisms, ZnO Nanoparticles, TiO₂ Nanoparticles

요약 : 미생물을 이용한 하수처리의 경우 여러 요인(미생물 특성, 원수의 성상, 운전조건)의 영향을 받으며 복잡한 관계를 갖고 운영하게 되는데 이런 공정에 나노입자의 유입은 분명 공정의 안정성 및 효율성에 영향을 줄 것으로 판단된다. 본 연구에서는 교내 하수 플랜트에서 활성슬러지를 채취하여 각각의 균주에 최적화된 배지에 배양시킨 뒤, 배양된 미생물이 각각 나노물질과 나노이온 상태일 때 성장에 미치는 영향을 알아보았다. 활성슬러지에 존재하는 대표 미생물 중에 그람양성균인 *Bacillus*와 그람음성균인 *Pseudomonas*, *E.coli*를 대상 균주로 선택하여 ZnO, TiO₂ 두 가지 나노물질에 의한 독성 영향을 비교 하였다. 동일한 농도의 나노물질에서 그람양성균인 *Bacillus*균의 평균 성장 저해율은 60% 이상이고, 그람음성균인 *Pseudomonas*의 경우는 평균 성장 저해율이 10% 미만으로 나타났다. 따라서 나노물질에 대한 독성은 그람양성균이 그람음성균보다 높은 것으로 보여지는데 그 이유는, 세포벽 구조, 세포벽 단백질 구성성분, 세포의 생리기능, 물질대사 등의 차이로 그람양성균이 나노물질에 훨씬 민감한 경향을 나타내기 때문인 것으로 보여진다. 그리고 ZnO와 TiO₂ 나노물질의 농도가 같을 때 미생물 성장에 미치는 영향은 ZnO가 평균적으로 3배 정도 높았는데 이것은 ZnO 나노물질의 독성이 TiO₂ 보다 크다고 볼 수 있다.

주제어 : 활성슬러지, 미생물 성장 속도, ZnO 나노물질, TiO₂ 나노물질

1. 서론

나노기술의 발전으로 인해 해마다 더 많은 양과 종류의 나노물질을 포함하는 상품이 생산됨에 따라, 환경에 배출되는 나노물질도 비례적으로 증가하고 있는 추세이다. 예를 들면, ZnO 나노입자는 페인트, 반도체, 촉매 등에 사용되어 왔으며 최근에는 자외선 차단제, 치약, 미용용품 등에도 널리 이용되고 있다.^{1,2)} 또한 은 나노입자(AgNP)를 함유한 항균양말, TiO₂를 포함한 자외선 차단 의복, ZnO와 TiO₂가 주성분인 선크림 등은 다양한 나노물질 분야에서 응용되고 있다.³⁾ 나노물질이 다양한 분야에서 응용되는 경우가 증가됨에 따라 자연생태계에 나노물질이 노출될 가능성이 점차 증가되고 있다. 예를 들면 산업공정과 실험실에서 폐기물 방치로 인한 노출, 약품저장/이송과정에서의 노출, 농/축산업에서 수계 매질(지하수, 표층수, 음용수)로의 노출 가능

성이 높다. 특히, 나노물질의 수계 노출원은 나노물질의 제조/사용으로 인한 노출원, 비의도적 노출원, 인간 활동으로 인한 노출원 등으로 구분할 수 있다. 다양한 노출원으로부터 수계로 유입된 나노물질은 유기물에 흡착/흡수되거나 화학적 변화 또는 일부 생물학적 분해가 진행된다.⁴⁾ 일반적으로, 나노물질과 natural organic matter (NOM)의 결합은 응집을 초래할 수도 있고 더 고분산 시킬 수도 있다고 보고되고 있다.⁵⁻⁸⁾ 나노물질이 수계에 배출되면 수계에 존재하는 다양한 염들과의 반응에 의해 대부분 응집되어 마이크로미터 수준의 2차 입자로 성장한다. 응집체 중에 이온 가능한 물질로 구성된 응집체는 생물학적 장기독성을 초래할 수 있다. 또한 유기물과 결합한 나노물질을 포함한 마이크로 수준의 응집체는 침전되고 유동성이 감소하여 장기간 수계 토양 내 체류하게 되고, 먹이사슬을 통해 상위 생물종으로 대상 나노물질의 농축이동이 이루어진다.⁹⁻¹¹⁾ 이외에도

[†] Corresponding author E-mail: amjang@skku.edu Tel: 031-290-7535 Fax: 031-290-7549

수계내 다양한 수상콜로이드의 존재는 나노물질과 결합하여 다양한 복합체를 형성한다. 마이크로 수준으로 커진 수상 콜로이드입자는 하·폐수 처리장에서 필터법으로 처리가 가능하지만, 필터에 악영향을 초래할 수도 있다. 이온화가 가능한 금속성 물질은 마이크로 수준의 응집체가 되더라도 지속적인 이온 용출이 가능하여 생물독성을 유발하고, 산소가 존재하는 조건에서 활성산소종을 유발하여 산화독성을 유발하기도 한다.^{12,13)}

나노물질의 사용증가로, 환경매체에서의 나노물질 분포가 지속적으로 증가할 것이고, 결과적으로 인체와 환경이 나노물질에 지속적으로 노출될 것이다. 대다수의 나노물질은 환경에서 반응물로 방출되기 때문에 다양한 환경매체를 거치면서 주변 환경 인자에 따라 다양한 물리적, 화학적 변화를 수반하게 되므로, 나노물질의 특성을 고려한 체계적인 연구가 필요하다. 나노입자가 미생물에 미치는 영향에 대한 메커니즘 및 세포독성 검사에 대한 결과는 여러 과학자들에 의해서 언급되고 있지만 아직까지 이와 관련한 명확한 이해는 이루어지고 있지 않는 실정이다.

미생물의 세포막에 가공 처리된 나노입자를 부착한 연구 결과에서는 나노 입자가 미생물 표면에 부착된 초기에 큰 영향력을 미치는 것으로 확인되었으며, 나노입자의 미생물에 대한 부착이 독성 영향력에 큰 부분을 차지한다고 보고하였다. 그리고 ZnO 나노입자는 세포막을 파괴시켜 세포 안으로 침투하며 이런 과정에서 새로 생성된 세포들은 무질서한 형태의 세포벽이 형성되고 형태학적 구조에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.¹⁴⁾

따라서, 본 연구는 수계내로 유입되는 나노 물질이 활성슬러지 내의 미생물에 어떠한 영향을 미치는지에 관하여 알아보고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 미생물 동정

성균관대학교 자연과학캠퍼스 내 존재하는 하수처리 플랜트에서 활성슬러지를 채취하여 각각의 미생물을 동정하였다. 각각의 미생물에 최적화 된 LB agar (Difco™ LB broth, Miller (Luria-Bertani)), TSA (Difco™ Tryptic Soy Broth), MYP (Difco™ MYP (Mannitol-Egg Yolk-Polymyxin) Agar) 배지를 이용하여 활성슬러지를 각각 도말한 후 미생물을 동정하였다. 또한 각각의 배지에 최적화된 환경에서 자란 미생물을 *Bacillus*, *Pseudomonas*, *E.coli* 세가지로 지정하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 미생물종은 독성 효과 및 기작 비교의 수월성을 위해, 기존 연구에서 다수 적용된 활성슬러지에 서식하는 대표 생물종을 고려하여 선택하였다. 기존연구에서 금속계 산화 나노물질은 그람양성균과 그람 음성균에 모두 효과적으로 독성 영향을 일으키며, 나노물질에 따라 그람양성, 그람음성균의 독성영향이 다르게 나타

날 가능성이 있다고 보고되었다.¹⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 그람양성균인 *Bacillus*와 그람음성균인 *Pseudomonas*, *E.coli* 2종을 이용하여 실험을 실시하였다. 채취한 활성슬러지는 30분 이내에 직접 제조한 식염수에 희석하여 고체배지에서 도말하였으며 37℃ 인큐베이터(IL-11, Jeio Tech)에서 48시간 동안 배양하였다. 배지위에 뜬 colony-forming unit (CFU)을 개수하여 적정량(10~30 CFU/mL)의 배지를 선택한 후, 4분 할법으로 도말한 뒤 재배양시켰다.

2.2. 나노물질 여과

나노물질은 입자성 물질과 이온성 물질을 분리하기 위하여 아미콘 장치(Amicon 8200, Millipore Corporation)를 이용하여 여과시켰다. ZnO 나노물질(Zinc oxide, dispersion, nanoparticles, Sigma-Aldrich)은 3kDa 크기의 막으로, TiO₂ 나노물질(Titanium(IV) oxide, nanopowder, Sigma-Aldrich)은 1kDa 크기의 막으로 여과시켰다. 여기서 ZnO 나노입자는 35 nm, TiO₂ 나노입자는 21 nm 크기를 가진 나노물질을 이용하였다. ZnO 나노물질 50 ppm 농도를 여과시켰을 때 이온화된 Zn의 농도는 1.8 ppm 이었고, TiO₂ 나노물질은 이온화 되지 않아 농도 측정이 불가능하였다. ZnO 나노물질 여과시, 멤브레인의 크기가 3 kDa일 때 30 nm 이상의 크기를 가진 나노물질을 거를 수 있었고, 1 kDa의 크기의 막을 사용했을 때보다 시간을 단축시킬 수 있었다. 따라서 ZnO의 경우 본 실험에서는 3 kDa의 막을 실험에 이용하였다. TiO₂ 나노물질은 여과 전후의 농도 차이가 크지 않아, 여과를 시켰음에도 이온성 물질이 따로 분리되지 않은 것으로 보고 이온만의 실험은 따로 진행되지 않았다. 여기서, 여과된 물질을 이용한 실험은 이온성 물질에 의한 영향이라고 정의할 수 있지만, 여과시키지 않은 용액의 경우는 이온성 물질과 입자성 물질이 혼재되어 있다고 볼 수 있다. ZnO 나노물질을 여과시킨 이온성 물질은 Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer 분석(ICP-MS, Agilent 7500, Agilent Technologies Inc.)을 통하여 필터링 된 용액 속에 Zn 및 Ti 이온의 양을 측정하였다.

2.3. 미생물 성장속도 측정

배양하여 얻어낸 미생물 콜로니 하나를 떠서 shaking 인큐베이터(VS-8480, Vision Scientific CO., LTD.)를 이용하여 150 rpm에서 24시간 동안 배양시켰다. 각각의 미생물에 최적화 된 LB broth, TSB (Bacto™ Tryptic Soy Broth), NB (Difco™ Nutrient Broth) 액체배지를 선택하여 배양시켰다. 나노물질이 농도별로 주입된 액체배지 200 mL에 배양된 미생물 2 mL을 shaking 인큐베이터에 섞어서 1시간마다 optical density 600 nm (OD_{600nm}, DR6000, Hach)로 측정하였다. 이때 농도별 독성도를 보기 위하여 25 ppm, 37.5 ppm, 50 ppm으로 농도를 나누어 실험을 진행하였다. 나노물질이 수계 내의 미생물에 미치는 영향을 연구하기 위해서 고농도의 나노물질을 이용하였다. Control 값의 경우 나노물

질을 넣지 않은 일반 배지에 미생물을 넣고 배양시켰으며, 나머지 다른 조건은 동일하게 유지되었다. 본 실험에서의 미생물 성장속도 측정 식은 다음과 같다.

$$\frac{\text{control OD}_{600\text{nm}} \text{ (12시간 후의 값)} - \text{나노물질 넣은 OD}_{600\text{nm}} \text{ (12시간 후의 값)}}{\text{control OD}_{600\text{nm}} \text{ (12시간 후의 값)}} \times 100\% \quad (1)$$

2.4. 미생물 개수

미생물의 성장속도를 측정하는 실험은 총 24시간 동안 진행되었으며 OD_{600nm}값과 함께 살아있는 미생물을 개수하기 위하여 2시간 간격으로 고체배지에서 도말을 실시하였다. 미생물 배양 후 적정량의 CFU를 개수하였고 농도 및 미생물 종류별 성장속도를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 나노물질 농도별 미생물 성장에 미치는 독성 영향 비교

3.1.1. *Bacillus*

ZnO 나노물질의 경우 나노물질을 넣은 모든 농도에서 OD_{600nm} 값이 8시간까지는 증가하지 않다가 12시간 이후부터 증가하기 시작하였다. 이는 ZnO 나노물질이 처음에는 미생물 성장에 영향을 주다가 점차 이들이 나노물질에 적응하면서 그 값이 증가하는 것으로 사료된다. ZnO 이온은 나노물질과 달리 모든 농도에서 미생물 접종 후 바로 성장이 시작되어 12시간까지 성장속도가 꾸준히 증가하다가 일정해지는 경향을 보였다. 미생물 접종 후 12시간 이후 측정된 *Bacillus*의 성장 저해율을 비교해 보면, ZnO 나노물질은 control 값 대비 약 93%, 이온은 약 67%로 나노물질 상태일 때의 성장 저해율이 더 큰 것으로 확인되었다. ZnO를 이용한 선행 연구를 보면, ZnO 나노물질의 미생물에 대한 독성은 Zn 이온 자체에 의한 영향이 대부분인 것으로 보고되어 지고 있다.⁹⁾ 본 연구에서 ZnO 나노물질은 입자와 이온 물질이 혼합된 상태의 영향보다, 여과시켜 얻은 Zn 이온 자체에 의한 영향이 *Bacillus*의 성장에 더 큰 영향을 미치는 것으로 선행연구와 같은 결과는 나타내었다.

TiO₂ 나노물질의 경우 미생물 접종 후 12시간 동안 *Bacillus* 성장 저해율이 control 값 대비 나노물질 농도별로(25 ppm, 37.5 ppm, 50 ppm) 약 22%, 35%, 45%로 각각 나타났다. 따라서 *Bacillus* 성장에 TiO₂ 나노물질 역시 영향을 미친다고 볼 수 있었다. ZnO와 TiO₂를 이용한 선행 연구의 경우 나노물질로 Zn를 사용하였을 때의 성장 저해율이 Ti보다 10 배 정도 높게 나타났다.²⁾ 이는 Zn 나노물질의 독성이 Ti보다 훨씬 높다는 것을 의미하며, 본 연구에서도 선행 연구와 유사하게 TiO₂보다 ZnO 나노물질을 사용하였을 때 *Bacillus* 성장에 미치는 영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

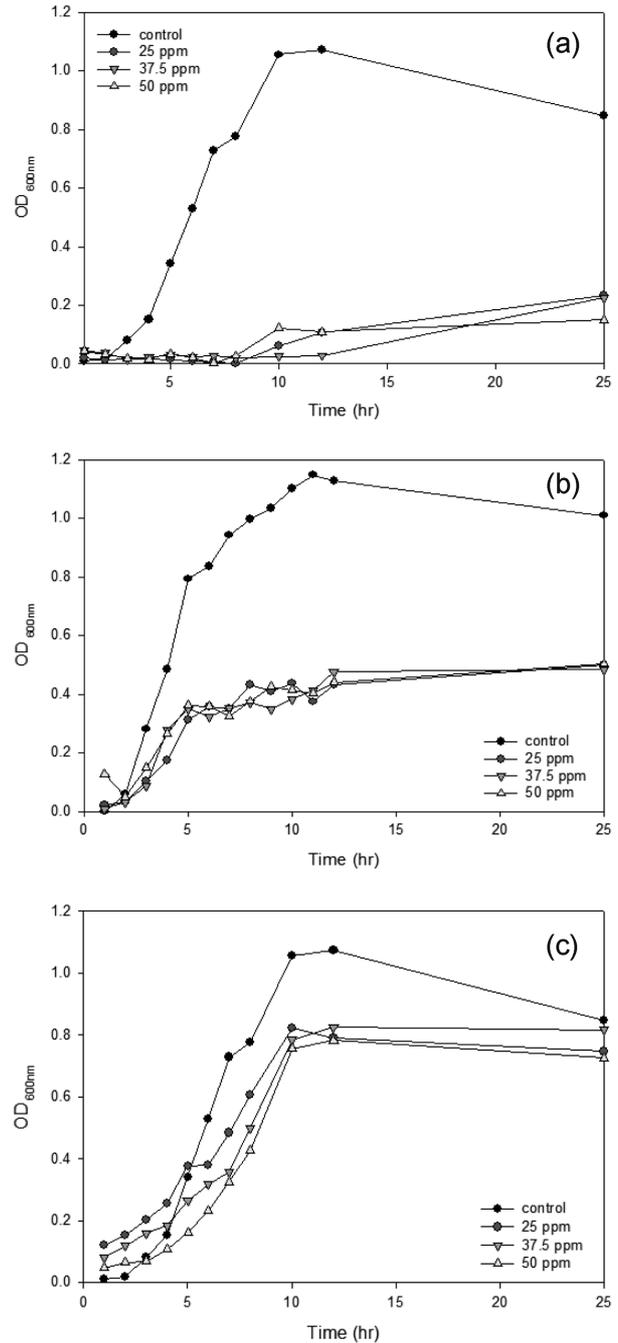


Fig. 1. *Bacillus* measurement (OD_{600nm}) depending on concentration of ZnO nanomaterials ((a) ZnO NPs, (b) ZnO ions, (c) TiO₂ NPs).

3.1.2. *Pseudomonas*

ZnO 나노물질의 경우 농도별 ZnO 나노물질과 control 값의 모든 그래프 경향이 비슷하게 나타나고 있다. 12시간 후, OD_{600nm}의 값을 비교했을 때, *Pseudomonas*의 성장 저해율은 약 2.75%로 ZnO 나노물질의 영향을 거의 받지 않는 것을 볼 수 있다. 하지만 ZnO 이온의 경우 OD_{600nm} 성장 저해율 값이 37.5 ppm과 50 ppm에서 모두 약 33% 정도로 나타났다, 25 ppm에서는 미생물 접종 후 control 값과 함께 성장이 시작되었지만, 23%의 성장 저해율을 보이며 7시간 이

후 사멸기에 접어들었다.

TiO₂ 나노물질의 경우 미생물 접종 후 5~6시간까지는 ZnO 경우와 유사하게 control 값을 따라 OD_{600nm} 값이 증가하였고, 10시간 이후부터 *Pseudomonas* 성장 저해율이 약 12%로 ZnO 나노물질의 성장 저해율 보다는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. *Pseudomonas*의 경우 *Bacillus*와 비교했을 때 평균적으로 나노물질에 의한 성장 저해율이 훨씬 낮게 나타났다. 일반적으로 미생물 종이 그람양성균(*Bacillus*)일 때가 그람음성균(*Pseudomonas*)인 경우보다 나노물질의 영향을

더 받는 것으로 보고되고 있다. 또한 세포벽 구조, 세포벽 단백질 구성성분, 세포의 생리기능, 물질대사 등의 차이로 그람양성균이 나노물질에 훨씬 민감한 경향을 나타낸다고 보고되고 있다.¹⁶⁾ 따라서 본 연구에서의 연구결과를 선행 연구와 비교해 보았을 때 같은 결론을 도출할 수 있었다.

3.1.3. *E.coli*

ZnO 나노물질의 경우 25 ppm 농도는 성장 저해율이 12%로 10시간까지 control 값과 함께 성장하는 것을 볼 수 있었

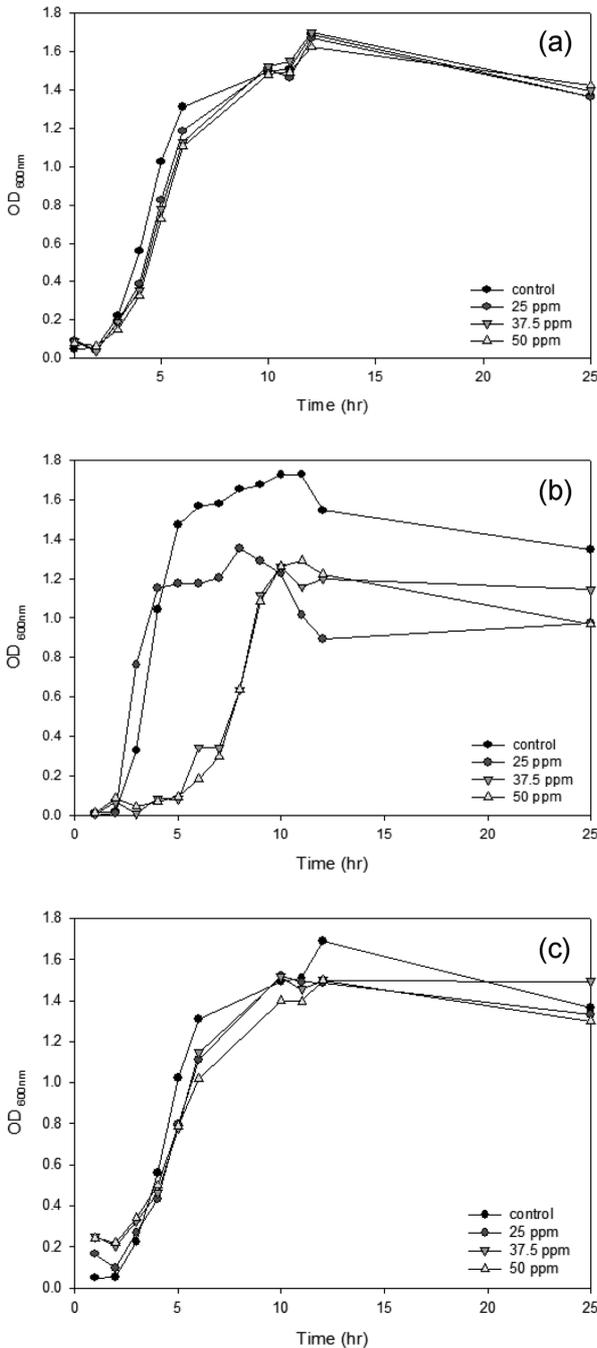


Fig. 2. *Pseudomonas* measurement (OD_{600nm}) depending on concentration of ZnO nanomaterials ((a) ZnO NPs, (b) ZnO ions, (c) TiO₂ NPs).

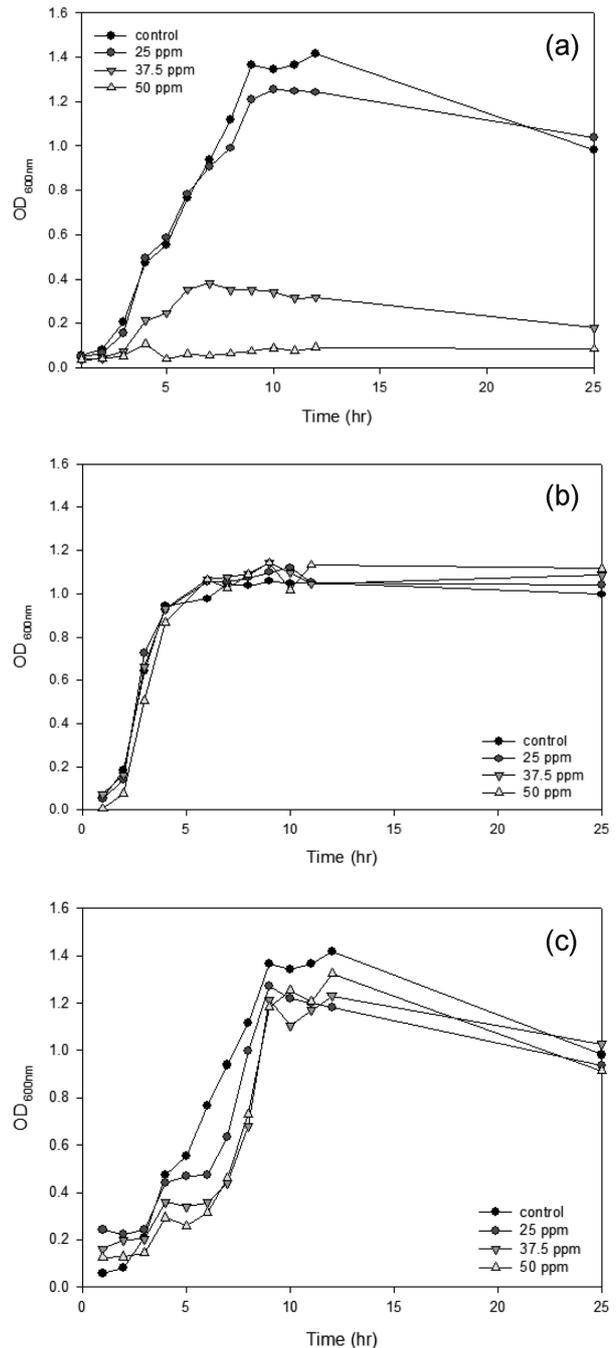


Fig. 3. *E.coli* measurement (OD_{600nm}) depending on concentration of ZnO nanomaterials ((a) ZnO NPs, (b) ZnO ions, (c) TiO₂ NPs).

다. 37.5 ppm은 control 값 대비 성장 저해율이 74%, 50 ppm은 94%로 ZnO 나노물질 농도가 37.5 ppm 이상일 경우 독성 영향이 6배 이상 커지는 것을 알 수 있었다. ZnO 이온의 경우는 농도에 관계없이 control 값의 그래프 경향과 비슷하게 나타났고 *E.coli*의 성장 저해율은 7% 미만이었다. ZnO 나노물질의 경우와는 다르게 이온 상태일 때는 *E.coli*에 미치는 독성 영향이 현저히 낮다는 것을 알 수 있었다.

TiO₂ 나노물질의 경우 미생물 접종 후 12시간 동안 *E.coli* 성장 저해율이 농도 순대로 각각 7%, 11%, 14%로 나타났는데 ZnO와 비교했을 때 TiO₂가 *E.coli*에 미치는 독성 영향은 낮다는 것을 알 수 있었다. 그리고 TiO₂에서도 ZnO와 마찬가지로 24시간 이후에 모든 농도에서 급격한 미생물 성장 속도를 나타내었다.

3.2. 나노물질 농도별 미생물 CFU 분석

3.2.1. *Bacillus*

ZnO 나노물질의 영향을 받은 *Bacillus*의 평균 CFU 값은 1.8×10^4 (CFU/mL)로 control 값의 평균 2.6×10^6 (CFU/mL)보다 100배 이상 수가 적게 나타났다. 따라서 *Bacillus*가 ZnO 나노물질의 영향을 받았다고 볼 수 있었다.

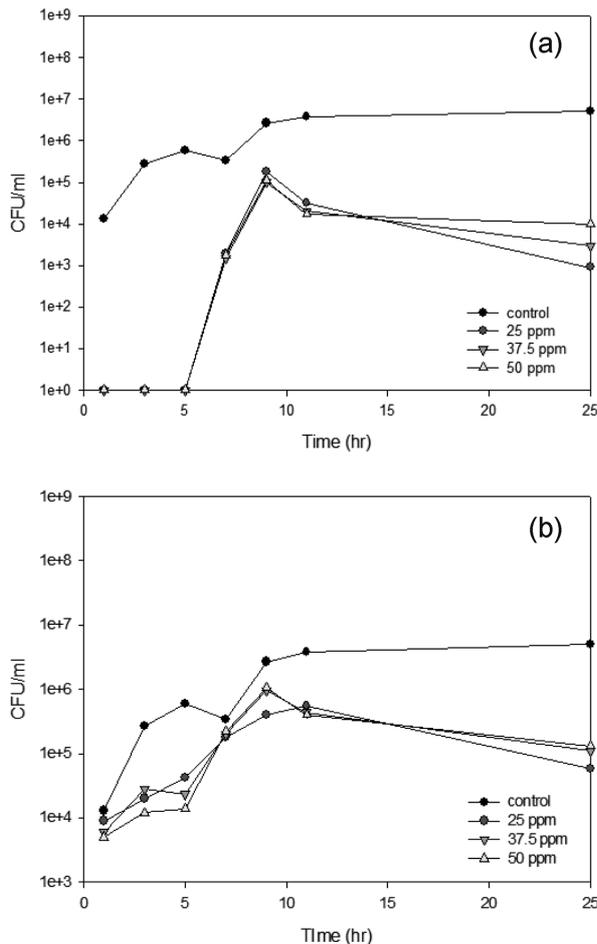


Fig. 4. *Bacillus* measurement (CFU/mL) depending on concentration of nanomaterials ((a) ZnO NPs, (b) TiO₂ NPs).

반면 TiO₂의 영향을 받은 *Bacillus*의 평균 CFU 값은 1.7×10^5 (CFU/mL)로 나타났으며, TiO₂의 값이 control 값보다 10배 이상 적었다. 결과적으로, TiO₂ 나노물질 역시 *Bacillus*에 영향을 주었다고 할 수 있지만 ZnO 나노물질에 의한 영향에 비해 약 10배 정도 영향을 덜 미쳤다는 결론을 내릴 수 있었다. 따라서 ZnO 나노물질은 CFU 결과 역시 *Bacillus* 성장에 더 큰 영향을 주므로, 이는 TiO₂ 나노물질보다 ZnO 나노물질에 더 큰 독성 영향을 받는 것으로 사료된다.

3.2.2. *Pseudomonas*

ZnO 나노물질에서 *Pseudomonas*는 control 값과 함께 시간이 지남에 따라 10시간까지 CFU가 꾸준히 증가하다가 그 이후부터는 값이 일정해짐을 볼 수 있었다. 또한 ZnO의 영향을 받은 *Pseudomonas*의 평균 CFU 값은 3.9×10^6 (CFU/ml)로 control 값의 평균 CFU 값 1.2×10^7 (CFU/mL)보다 약 3배 적게 나타났다. *Bacillus*의 경우는 control 값과 비교했을 때, CFU 값이 100배 이상 차이가 났지만 *Pseudomonas*는 값이 3배 밖에 차이가 나지 않으므로, *Bacillus*보다는 ZnO 나노물질의 영향을 적게 받는 것으로 보여진다.

TiO₂ 나노물질에서 *Pseudomonas*는 ZnO와 마찬가지로

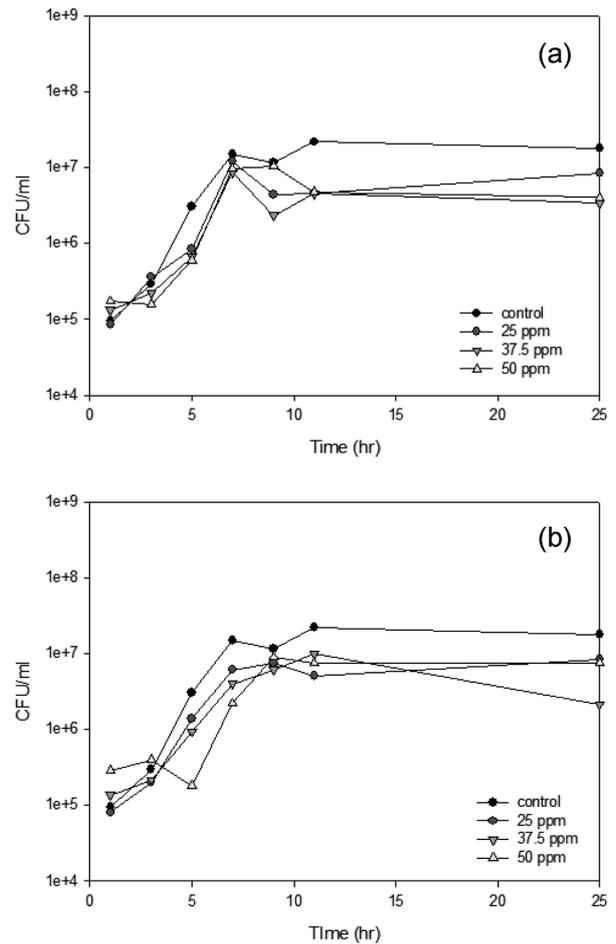


Fig. 5. *Pseudomonas* measurement (CFU/mL) depending on concentration of nanomaterials ((a) ZnO NPs, (b) TiO₂ NPs).

control 값과 함께 시간이 지남에 따라 10시간까지 CFU가 증가하다가 그 이후부터 값이 일정해진다. TiO₂의 영향을 받은 *Pseudomonas*의 평균 CFU 값은 4.8×10^6 (CFU/mL)로 control 값의 평균 CFU 값 1.2×10^7 (CFU/mL)보다 약 2.4 배 낮게 나타났다. ZnO와 마찬가지로 TiO₂역시 control 값과 비교하였을 때 *Pseudomonas*의 CFU 변화에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

결과적으로 나노물질에 의한 *Pseudomonas*의 CFU 변화를 *Bacillus*와 비교해 보면, *Bacillus*의 경우 최소 10배에서 최대 100배까지 영향을 받지만 *Pseudomonas*는 control 값 대비 큰 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.

3.2.3. *E. coli*

ZnO 나노물질 25 ppm의 경우 *E. coli*는 control 값과 함께 CFU가 5시간까지 계속 성장하다가 일정해지는 반면, 37.5 ppm 이상의 농도를 가진 경우 평균 CFU 값은 1.9×10^6 (CFU/mL)으로 평균 값인 8.5×10^6 (CFU/mL)보다 약 4배 낮게 나타났다.

TiO₂ 나노물질의 영향을 받은 *E. coli*의 경우 평균 CFU 값은 6.9×10^6 (CFU/mL)로 control 값과 비교했을 때 1.2배 밖에 차이가 나지 않기 때문에 ZnO 나노물질과 비교했을 때 TiO₂ 나노물질 역시 *E. coli* 성장에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

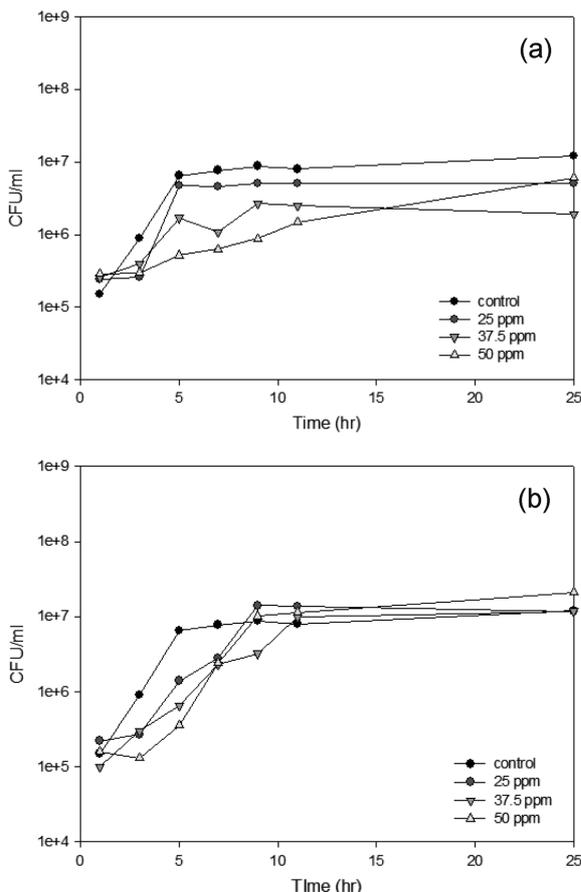


Fig. 6. *E. coli* measurement (CFU/mL) depending on concentration of nanomaterials ((a) ZnO NPs, (b) TiO₂ NPs).

4. 결론

활성슬러지 안에 존재하는 대표적인 미생물들의 독성은 나노물질의 농도와 유형에 의존하여 달라진다. 같은 농도의 나노물질에서 *Bacillus*(그람양성)의 평균 성장 저해율은 60% 또는 그 이상이며 *Pseudomonas*(그람음성)의 성장 저해율은 10% 이하로 나타났다. 따라서 나노물질의 독성은 그람양성 미생물이 그람음성 미생물 보다 대체로 더 높은 것으로 보여진다. 그람양성 미생물의 경우 나노 물질에 더 민감한 경향을 나타내며 이는 세포벽의 구조 및 구성요소, 세포의 생리화학적 특징, 신진대사의 차이점 때문인 것으로 추정된다.

미생물의 종류에 따라서도 나노 물질의 영향을 받는 정도의 차이가 있다. 미생물의 세포구조, 특징에 따라 나노물질이 세포막을 직접적으로 파괴하여 영향을 줄 수도 있으며, 미생물 표면에 부착하여 영향을 줄 수도 있다. 따라서 동일한 그람음성균이라 할지라도 미생물 종류에 따라 나노물질의 영향을 받는 정도의 차이가 있을 수 있다고 결론을 내릴 수 있다.

ZnO와 TiO₂ 나노물질은 농도가 같을 때, ZnO가 미생물의 성장에 대한 영향이 평균적으로 3배 더 높았다. 결과적으로 ZnO의 독성은 TiO₂보다 더 높은 것으로 보여진다. 이와 같은 나노물질의 독성은 나노물질의 화학적 조성, 즉 원소 고유의 성질 뿐 아니라 제조방법 등에 따라서도 달라진다. 따라서 ZnO와 TiO₂ 나노물질이 미생물 성장에 미치는 영향 차이는 각각의 원소 고유의 성질 때문인 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원 (과제번호 15IFIP-B088091-02)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

- Hui, M., Xiong, Z., Yinguang, C., Hong, C. and Kun, L., "Response of Anaerobic Granular Sludge to a Shock Load of Zinc Oxide Nanoparticles during Biological Wastewater Treatment," *Environ. Sci. Technol.*, **46**(11), 5997~6003(2012).
- Makarand, A. P. and Parimal, A. P., "Investigation on Likely Effects of Ag, TiO₂, and ZnO Nanoparticles on Sewage Treatment," *Bullet. Environ. Contam. Toxicol.*, **92**, 109~114 (2014).
- Alex, W., Paul, W., Lars, F., Kiril, H. and Natalie, G., "Titanium Dioxide Nanoparticles in Food and Personal Care Products," *Environ. Sci. Technol.*, **46**(4), 2242~2250(2012).
- Gregory, V. L., Kelvin, B. G., Simon, C. A. and Jamie, R. L., "Transformations of Nanomaterials in the Environment," *Environ. Sci. Technol.*, **46**(13), 6893~6899(2012).

5. Guoqiang, L., Demin, W., Jianmin, W. and Cesar, M. "Effect of ZnO particles on activated sludge: Role of particle dissolution," *Sci. Total Environ.*, **409**(14), 2852~2857(2011).
6. Natasha, M. F., Nicola, J. R., Simon, C. A., Graeme, E. B., Gerald, E. G. and Philip, S. C. "Comparative Toxicity of Nanoparticulate ZnO, Bulk ZnO, and ZnCl₂ to a Freshwater Microalga (*Pseudokirchneriella subcapitata*): The Importance of Particle Solubility," *Environ. Sci. Technol.*, **41**(24), 8484~8490(2007).
7. Virender, K. S., "Aggregation and toxicity of titanium dioxide nanoparticles in aquatic environment-A Review," *J. Environ. Sci. Health, Part A*, **44**(14), 1485~1495(2009).
8. Thabitha, P. D. and Hwang, H.-M., "Effect of humic acids and sunlight on the cytotoxicity of engineered zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles to a river bacterial assemblage," *J. Environ. Sci.*, **25**(9), 1925~1935(2013).
9. Sindhu, P. D., Punalur, J. S., Sudheer, K., Amitava, M. and Natrajan, C. "Toxic behavior of silver and zinc oxide nanoparticles on environmental microorganisms" *J. Basic Microbiol.*, **54**(9), 916~927(2014).
10. Emma, J., Im, W.-T., Kim, D.-H., Kim, M.-S., Kang, S.-T., Shin, H.-S. and Chae, S.-R. "Different susceptibilities of bacterial community to silver nanoparticles in wastewater treatment systems," *J. Environ. Sci. Health*, **49**(6), 685~693(2014).
11. Liu, Y., Tourbin, M., Lachaize, S. and Guiraud, P., "Nanoparticles in wastewaters: Hazards, fate and remediation," *Powder Technol.*, **255**, 149~156(2014).
12. Guy, A., Anat, L., Rachel, D., Nina, P., Yeshayahu, N., Rachel, L. and Aharon, G. "Enhanced Antibacterial Activity of Nanocrystalline ZnO Due to Increased ROS-Mediated Cell Injury," *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 842~852(2009).
13. Long, T. C., Saleh, N., Tilton, R. D., Lowry, G. V. and Veronesi, B. "Titanium dioxide (P25) produces reactive oxygen species in immortalized brain microglia (BV2): Implications for nanoparticle neurotoxicity," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(14), 4346~4352(2006).
14. Sindhu, P. D., Punalur, J. S., Sudheer, K., Amitava, M. and Natrajan, C. "Toxic behavior of silver and zinc oxide nanoparticles on environmental microorganisms," *J. Basic Microbiol.*, **54**(9), 916~927(2014).
15. Ivan, S. and Branka, S.-S., "Silver nanoparticles as antimicrobial: a case study on *E.coli* as a model for Gram-negative bacteria," *J. Colloid and Interface Sci.*, **275**(1), 177~182(2004).
16. Zarrindokht, E.-K. and Pegah, C. "Antibacterial activity of ZnO nanoparticle on gram-positive and gram-negative bacteria," *African J. Micro. Res.*, **5**(12), 1368~1373(2011).