

천연비석과 물속미생물의 호상작용에 대한 콜로이드화학적연구

김성산, 김문철

세계적으로 실용화되고있는 역삼투법에 의한 바닷물담수화에서 중요한 문제의 하나는 질 좋은 역삼투막재료를 얻어내는것과 함께 물속에 존재하는 미생물을 효과적으로 제거하는 값죽은 려과제를 해결하는것이다. 현재 나노사기막을 리용한 려과재료개발이 진행되고있으나 대규모생산에서 원가가 많이 든다.

이로부터 천연비석을 미생물려과제로 쓰기 위한 연구[1, 2]들이 진행되고있다.

우리는 천연비석을 미생물려과제로 리용하는데서 제기되는 리론적문제들을 해결하기 위하여 천연비석결면에 대한 미생물의 부착특성을 콜로이드화학적으로 고찰하였다.

1. 리론적고찰을 위한 전제

콜로이드분산계에서 립자들사이호상작용특성은 잘 알려진 DLVO리론에 따라 고찰한다.[3, 4] 이 리론에 의하면 립자들사이호상작용은 크게 정전기적호상작용에네르기 $U_{el}(h)$ 와 분자적호상작용에네르기 $U_{mol}(h)$ 의 합 $U(h)$ 로 평가된다.

$$U(h) = U_{el}(h) + U_{mol}(h) \quad (1)$$

고찰하는 계는 단순한 동종의 콜로이드립자계가 아니라 서로 다른 종 즉 다같이 결면이 음으로 대전되어있고[1, 2] 비석결면이 수 μm 크기의 미생물과 호상작용하는 헤테로분산계이다. 여기서 천연비석은 다공성물질이지만 그 기공크기가 수 nm 이므로 기공내에로의 미생물의 침투와 거기에서의 호상작용에 대해서는 논의할 여지조차 없고 오직 비석결면과 미생물결면과의 호상작용만을 생각할수 있다.

수용액속에서 립자들사이의 정전기적호상작용은 본질에 있어서 립자결면에 형성된 전기2중층들사이의 호상작용으로 볼수 있다.

문제고찰을 간단히 하기 위하여 다음과 같은 조건들이 만족된다고 본다.[3, 4]

- ① 비석과 미생물과의 호상작용은 단위면적의 두 판대기호상작용으로 본다.
- ② 두 립자결면에 형성된 전기2중층의 두께는 주어진 립자크기에 비하여 매우 작다.
- ③ 미생물결면이 음으로 대전되어있으므로 자기의 고유한 전기운동학적포텐샬을 가진다.[1]

④ 비석과 균체사이호상작용을 표면전위가 일정한 조건에서의 전기2중층으로 본다.

⑤ 결면전기적포텐샬 $\phi_0 \approx \zeta$ (전기운동학적포텐샬)이라고 본다.

2. 천연비석결면과 미생물과의 콜로이드화학적호상작용특성

계는 립자들의 전기운동학적포텐샬이 50mV보다 작으므로 립자들이 약하게 대전된 경우이고 립자종이 서로 다른 헤테로분산계라는것을 고려하면 식 (1)에서 정전기적호상작용에네르기, 분자적호상작용에네르기, 총적인 호상작용에네르기는 다음과 같이 된다.

$$U_{el}(h) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\kappa}{8\pi} [2\varphi_{01}\varphi_{02} \operatorname{cosec}\kappa h + (\varphi_{01}^2 + \varphi_{02}^2)(1 - \cot\kappa h)] \quad (2)$$

$$\kappa = \left(\frac{2nz^2e^2}{\varepsilon\varepsilon_0kT} \right)^{1/2}$$

$$U_{mol}(h) = -\frac{A}{12\pi h^2} \quad (3)$$

$$U(h) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\kappa}{8\pi} [2\varphi_{01}\varphi_{02} \operatorname{cosec}\kappa h + (\varphi_{01}^2 + \varphi_{02}^2)(1 - \cot\kappa h)] - \frac{A}{12\pi h^2} \quad (4)$$

이 식들에서 φ_{01} , φ_{02} 는 립자 1, 2의 결면정전기적포텐셜, h 는 두 립자사이거리, n 은 전해질농도, z 는 전해질이온가, e 는 전기소량, ε , ε_0 은 각각 분산매의 상대유전률과 진공속에서의 절대유전률, k 는 볼츠만상수, T 는 온도, κ 는 전기2중층의 유효두께이다.

1) 천연비석과 미생물사이 정전기적호상작용에너르기

식 (1)에 따라 천연비석과 균체사이거리에 따르는 정전기적호상작용에너르기를 계산하기 위하여 먼저 중성인 자연수속에서 천연비석과 균체의 κ 를 계산한 결과 천연비석의 경우 20nm, 미생물의 경우 16nm였다.

다음 전제조건 ⑤로부터 φ_{01} , φ_{02} 에 선행연구[1, 2]의 방법으로 결정한 비석과 미생물의 전기운동학적포텐셜 ζ_1 , ζ_2 를 넣고 식 (2)에 따라 정전기적호상작용에너르기변화를 계산한다.(그림 1)

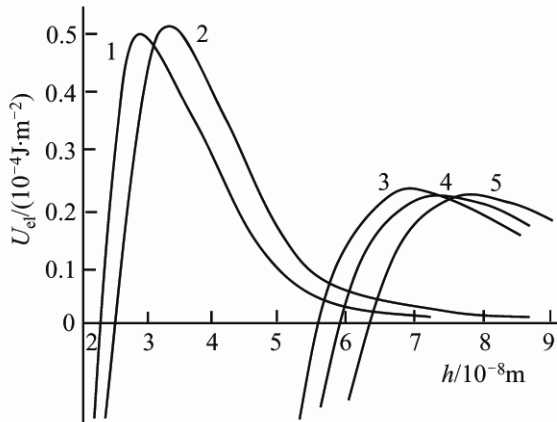


그림 1. 비석과 미생물사이의 거리에 따르는 U_{el} 변화

1- $\zeta_{bi}=-22.4\text{mV}$, $\zeta_{mi}=-14.7\text{mV}$, 2- $\zeta_{bi}=-24.7\text{mV}$, $\zeta_{mi}=-14.7\text{mV}$, 3- $\zeta_{bi}=-22.4\text{mV}$, $\zeta_{mi}=-6.32\text{mV}$,
4- $\zeta_{bi}=-24.7\text{mV}$, $\zeta_{mi}=-6.32\text{mV}$, 5- $\zeta_{bi}=-30\text{mV}$, $\zeta_{mi}=-6.32\text{mV}$

그림 1에서 보는바와 같이 결면이 음으로 대전되어있고 전기적포텐셜만이 다른 천연비석결면과 미생물사이에는 일정한 거리까지 척력이 작용하고 좀더 가까이 접근하면 정전기적척력에너르기의 극대점을 이겨내고 인력이 작용하게 된다. 이때 미생물의 전기운동학적포텐셜 $|\zeta_{mi}|$ 가 클수록 U_{el} 곡선의 극대값은 커진다. 즉 $|\zeta_{mi}|$ 가 작을수록 U_{el} 의 극대값이 작아지면서 전기적인력이 커지게 된다.

한편 그림 1로부터 $|\zeta_{bi}|/|\zeta_{mi}|$ 가 클수록 U_{el} 의 극대위치는 보다 먼거리쪽으로 이동하지만 그 극대값은 $|\zeta_{mi}|$ 가 일정할 때 비석의 $|\zeta_{bi}|$ 에는 관계없이 변하지 않는다는것을 알수 있다. 즉 비석결면에 대한 미생물의 부착성에 $|\zeta_{mi}|$ 가 큰 영향을 미친다는것

을 보여준다. 이것은 비석의 $|\zeta_{\text{비}}|$ 가 일정하게 주어진 경우 보다 작은 $|\zeta_{\text{미}}|$ 를 가진 미생물이 보다 쉽게 비석결면에 부착될수 있다는것을 보여준다. 이로부터 천연비석의 $|\zeta_{\text{비}}| = 22.4\text{mV}$ 일 때 $|\zeta_{\text{미}}| = 6.32\text{mV}$ 인 *Bacillus subtilis* 209P가 *Staphylococcus aureus* 82($|\zeta_{\text{미}}| = 14.7\text{mV}$) 보다 먼거리에서부터 전기적인력을 받으면서 우선적으로 쉽게 비석결면에 부착될수 있다는것을 알수 있다. 이와 같이 천연비석에 대한 미생물의 부착은 가능하며 이때 $|\zeta_{\text{미}}|$ 가 작을수록 전하교환현상이 보다 쉽게 일어나면서 먼거리에서부터 정전기적인력이 작용한다는것을 알수 있다.

2) 천연비석과 미생물과의 분자적호상작용 및 총호상작용에너르기

두 립자사이의 분자적호상작용에너르기는 식 (3)으로 계산할수 있다.

먼저 헤테로계에서의 분자적호상작용특성을 반영하는 합마커상수 $A_{12/3}$ 을 계산하여야 한다.

$$A_{12/3} = (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})(\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{33}}) \quad (5)$$

여기서 A_{11} , A_{22} , A_{33} 은 각각 립자 1, 2 및 매질의 합마커상수이다.

응결가결정법[3]으로 얻어낸 천연비석의 합마커상수는 $A_{11} = 15.8 \cdot 10^{-20}\text{J}$ 이며 미생물의 경우 $A_{22} = 1 \cdot 10^{-19}\text{J}$, 물의 경우 $A_{33} = 4.38 \cdot 10^{-20}\text{J}$ 이라면 식 (5)로 계산한 $A_{12/3} = 6.5 \cdot 10^{-20}\text{J}$ 이다.

이 자료에 기초하여 식 (3)에 따라 비석결면과 미생물과의 분자적호상작용에너르기를 계산한 결과 거리 h 에 따르는 $U(h)$, $U_{\text{el}}(h)$, $U_{\text{mol}}(h)$ 은 그림 2와 같다.

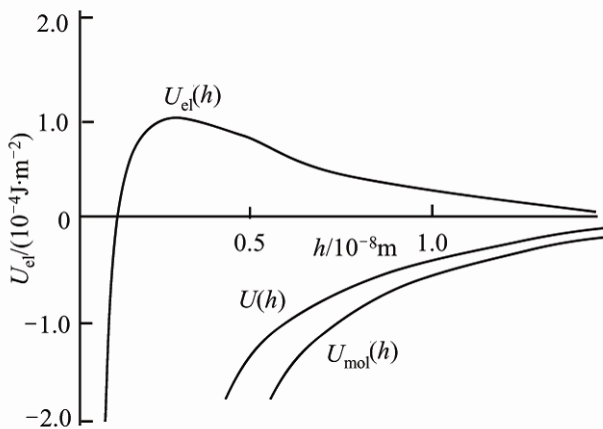


그림 2. 거리 h 에 따르는 $U(h)$, $U_{\text{el}}(h)$, $U_{\text{mol}}(h)$

$\zeta_{\text{비}} = -22.4\text{mV}$, $\zeta_{\text{미}} = -6.32\text{mV}$

그림 2에서 보는바와 같이 $\zeta_{\text{비}} = -22.4\text{mV}$, $\zeta_{\text{미}} = -6.32\text{mV}$ 일 때 비석결면과 미생물과의 분자적호상작용은 먼거리에서부터 $U(h) < 0$ 으로서 항상 인력만이 작용하며(그림 2의 U_{mol} 곡선) 정전기적호상작용은 $U_{\text{el}}(h) > 0$ 으로서 매우 가까운 거리에서 극대점을 가진다. 이것은 그것들의 결면전하부호는 같으나 전하량이 상대적으로 적고 일정한 거리까지 접근하면 가변적인 미생물의 결면전하부호가 바뀌어지는 결과라고 볼수 있다.

총호상작용에너르기는 $U(h) < 0$ 으로서 먼거리에서부터 인력만이 작용한

다. 이것은 우의 조건에서 비석결면에 주어진 미생물이 쉽게 부착될수 있다는것을 보여준다.

다음으로 비석과 미생물의 ζ -포텐셜이 각이한 경우 해당하는 거리에서 총호상작용에너르기를 계산한 결과 $\zeta_{\text{비}}$, $\zeta_{\text{미}}$ 에 따르는 $U(h)$ 변화는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 미생물의 $\zeta_{\text{미}} = -6.32\text{mV}$ 이고 비석의 $\zeta_{\text{비}} = -30\text{mV}$ 인 조건(곡선 3) 즉 $|\zeta_{\text{비}}|/|\zeta_{\text{미}}| = 4.75$ 일 때 $U(h) = 0$ 으로서 $U_{\text{mol}}(h) = U_{\text{el}}(h)$ 라는것을 알수 있다.

한편 곡선 4에서 보는바와 같이 $|\zeta_{\text{비}}|/|\zeta_{\text{미}}| = 1.68$ 일 때 $U(h) > 0$ 인 극대점을 가지며 이 경우 전기적척력이 분자적인력보다 우세하므로 미생물부착이 어렵게 된다고 볼수 있다.

다음으로 $|\zeta_{\text{비}}|/|\zeta_{\text{미}}|=3.54$ (곡선 1), 3.9 1(곡선 2)인 경우에는 $U(h)<0$ 이므로 비석과 미생물사이에는 인력만이 작용한다는것을 알수 있다. 즉 이런 조건에서는 비석결면에 미생물들이 쉽게 부착될수 있다는것을 보여준다.

그림 3의 호상작용에너지기곡선들을 해석해보면 천연비석과 주어진 미생물의 전기운동학적포텐셜비 $|\zeta_{\text{비}}|/|\zeta_{\text{미}}|$ 가 $U(h)<0$ 으로 되도록 적당하여야 비석결면에 대한 미생물부착이 일어날 가능성이 있다는것을 알수 있다. 이것은 미생물의 $\zeta_{\text{미}}$ -포텐셜이 주어진 경우 이에 알맞는 천연비석종을 선택하거나 적당한 처리를 하여 $\zeta_{\text{비}}$ -포텐셜을 조절하면 실현시킬수 있다고 본다.

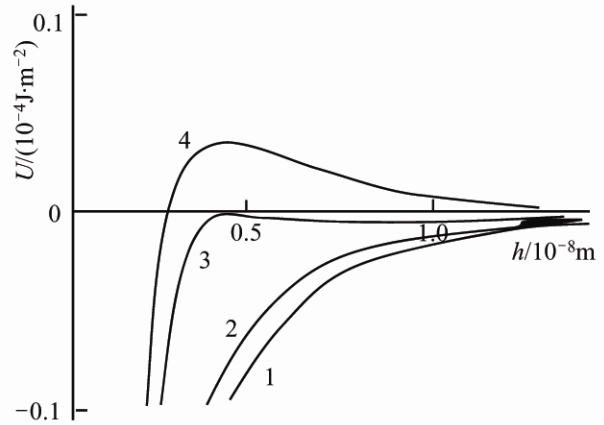


그림 3. $\zeta_{\text{비}}$, $\zeta_{\text{미}}$ 에 따르는 $U(h)$ 변화
 1- $\zeta_{\text{비}}=-22.4\text{mV}$, $\zeta_{\text{미}}=-6.32\text{mV}$, 2- $\zeta_{\text{비}}=-24.7\text{mV}$,
 $\zeta_{\text{미}}=-6.32\text{mV}$, 3- $\zeta_{\text{비}}=-30\text{mV}$, $\zeta_{\text{미}}=-6.32\text{mV}$,
 4- $\zeta_{\text{비}}=-24.7\text{mV}$, $\zeta_{\text{미}}=-14.7\text{mV}$

맺는 말

천연비석결면과 미생물사이의 부착호상작용을 DLVO이론에 기초하여 콜로이드화학적으로 고찰하였다. 결과 천연비석과 미생물의 전기운동학적포텐셜비 $|\zeta_{\text{비}}|/|\zeta_{\text{미}}|$ 가 적당할 때 총호상작용에너지는 $U(h)\leq 0$ 으로 되며 미생물의 부착이 가능하다는것을 밝혔다.

참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 51, 2, 94, 주체94(2005).
- [2] 김일성종합대학학보(자연과학), 50, 2, 87, 주체93(2004).
- [3] Ping lin et al.; Powder Technology, 342, 899, 2019.
- [4] 臼井進之助; 界面電氣現象, 共立出版株式會社, 372, 1972.

주체110(2021)년 4월 5일 원고접수

Colloidal Chemical Study on the Interaction between Natural Zeolite and the Underwater Microbe

Kim Song San, Kim Mun Chol

We considered the adhesion interaction between natural zeolite surface and the microbe by colloidal chemical method based on DLVO theory. The total interaction energy $U(h)\leq 0$ and the adhesion of microbe is possible when the ratio of electro-kinetic potential of natural zeolite and microbe $|\zeta_{\text{zeo}}|/|\zeta_{\text{mic}}|$ is proper.

Keywords: zeolite, adhesion, microbe