

미생물 고정화 담체의 물리적 특성

박 영 식 · 구 기 우 · 나 영 수 · 송 승 구
부산대학교 화학공학과
(1997년 12월 30일 접수)

Physical Characteristics of Support Media for Microbial Immobilization

Young-Seek Park, Ki-Woo Koo, Young-Soo Na, and Seung-Koo Song
Dept. of Chem, Eng., Pusan National University
(Manuscript received 30 December 1997)

In order to develop of support media for biofilm reactor, physicochemical properties and attachability of surface of activated carbon, clay mineral, non-clay mineral, and waste mold sand were examined. Measured physicochemical properties of materials were surface roughness, mean particle size, surface area, hydrophobicity, and surface charge. At a tested materials, activated carbon was the best attachable material and microorganisms were attached 20.1×10^7 CFU/cm² at surface, compared with diatomaceous earth which were attached of 9.2×10^7 CFU/cm². In our research, surface area and hydrophobicity showed more influence than any other factor on attachment of microorganisms.

Key words : support media for wastewater treatment, microbial attachment, surface area, hydrophobicity

1. 서 론

생물막 공정은 담체에 고정된 미생물을 이용하여 하·폐수를 처리하는 생물막 공정은 생물막 내의 미생물이 하·폐수와 연속적으로 접촉하거나 간헐적으로 접촉하여 폐수를 정화하는 공정이며, 최근에 질소와 인의 제거가 관심의 대상이 되면서 연구가 많이 이루어지고 있다. 그러나 생물막 발달과 생물막에 의한 기질 제거 속도에 관해 상당히 많은 연구가 진행되어 왔으나 담체와 생물막 자체에 대한 연구는 많지 않은 실정이다.

현재 하수처리 공정에는 세라믹(Kawase *et al.*, 1989), 무기 입자(Jones *et al.*, 1986), 섬유(Valentis와 Lesavre, 1990), 합성물질(Breitenbacher *et al.*, 1990), 플라스틱(Buisman *et al.*, 1990) 등을 소재로 한 담체가 적용되어 왔으며, 벌집모양, 과립모양, 나선형 등으로 제작되어 비표면적을 늘리거나, 다공성으로 설계되어 표면적거칠기를 높이고 비표면적을 늘려 생물막이 잘 형성될 수 있도록 발전되었다(박태주, 1995). 그러나 국내에서 거의 개발되지 않고 주로 외국의 기술에 의해 개발된 담체를 로알터를 주고 도입하기 때문에 생물막 공정은 여러 가지 장점에도 불구하고 쉽게 적용이 되지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 활성탄을 비롯한 여러 가지 입자의 표면적, 표면거칠기, 평균 입자 크기, 표면적, 소수성(hydrophobicity) 및 표면하전에 따른 미생물 부착을 고찰하고 부착성이 좋은 입자를 선정하여 생물막이 잘 형

성될 수 있는 새로운 담체를 개발하기 위한 기초연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 재료

실험에 규석(quartz), 규조토(diatomaceous earth)의 규산질 원료 광물과, 점토질 광물인 백운모(sericite), 활석(talc), 고령토(kaolin), 고령토 white(kaoline white), 고령토 pink(kaoline pink), 벤토나이트(bentonite), 덕유점토(clay(duckyou)), 제우스 백토(zeus whiteclay), 토성에너지(toosung energy), 경주남석(pyrophyllite(kyoungjoo)), 중국남석pyrophyllite(china) 및 제올라이트(zeolite)와 석회 원료인 석회석(lime stone), 마그네시아 원료인 백운석(dolomite), 사문석(serpentine)과 장석질 원료인 장석(feldspar), 산화인(P₂O₅)계 원료인 인회석(apatite)과 펄라이트(perlite), 경석(pumice) 등이 입자로 사용되었다.

그 외에 (주) 영화금속에서 주물 제조시 집진기에서 나오는 폐주물사인 ash(bentonite + sea coal + 분진)가 폐기물 재활용의 차원에서 담체 개발을 위한 입자로 선택되었으며, 주물 제조시 사용되는 sea coal도 입자로 선택되었다. 또한 최근 유동층 반응기에서 담체로 많이 사용되는 활성탄도 비교대상으로 선택되었다.

2.2 입자의 표면 성질 측정

Table 1. Surface roughness of support materials

Items	surface roughness(μm)	Group
Talc	2.6	C
Ash	2.9	
Perlite	3.4	
Clay(duckyou)	3.6	
Kaoline pink	3.7	
Zeus whiteclay Pyrophyllite(china)	3.9	
Kaoline white Bentonite	4.1	
Toosung energy Sericite Pyrophyllite(kyoungjoo)	4.5	
Shale	4.6	B
Zeolite Lime stone Sea coal	5.1	
Diatomaceous earth	5.2	
Pumice	5.7	
Serpentine	5.8	A
Quartz	6.3	
Feldspar	6.4	
Kaoline	6.8	
Dolomite Apatite	7.0	
Activated carbon	7.1	

입자의 표면성질을 비교 고찰하기 위하여 표면거칠기 (surface roughness), 평균 입자 크기(mean particle size), 표면적, 접촉각(contact angle) 및 표면하전 등이 측정되었다. 입자의 거칠기, 접촉각 및 평균 입자 크기는 No. 270(53 μm) 표준체(standard sieve)로 걸러서 측정하였다. 입자의 표면거칠기는 표면거칠기 측정장치 (Mitutoyo surfest-501)를 사용하였으며, 장치의 철필 (stylus)이 표면을 5mm 그어 그 표면 윤곽(profile)을 확대하여 centre line average(CLA)를 얻고, 6회 측정하여 평균한 값을 Table 1에 나타내었다.

입자의 소수성을 나타내는 접촉각은 접촉각 측정장치 (Erma contact angle meter G-1)를 사용하였으며, 각 입자를 아크릴 표면에 도포시키고 도포된 표면에 증류수를 떨어뜨려 증류수의 접촉각을 측정하였다. 각 입자마다 15회 접촉각을 측정하여 평균하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

입자의 크기와 표면적은 입자 크기 분포 분석기 (HORIBA particle size distribution analysis CAPA-700)를 사용하여 측정하였고, 분산매(dispersion solute)로 증류수를 사용하였으며, 표면적은 입자를 구형으로 가정된 값으로 Table 3에 나타내었다.

pH 7로 조절한 3차 증류수 20mL에 입자를 1, 2, 4, 6, 8 및 10g으로 단계적으로 주입하면서 pH 미터 (DMS-DP 215M)로 현탁액의 pH 변화로 표면전하를 측정하였다. 이때 현탁액의 pH가 7이하로 감소하면 입자의 표면은 양전하를 띠고, 7이상이면 음전하를 띠고 있다고 판정되며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다

Table 2. Contact angle of support materials

Items	Contact angle ($^{\circ}$)	Group
Talc	108	A
Ash	111	
Activated carbon	115	
Clay(duckyou) Zeus whiteclay Apatite	120	
Sea coal	121	
Kaoline	122	B
Bentonite	123	
Zeolite Kaoline white	124	
Diatomaceous earth Sericite	125	
Kaoline pink	127	C
Perlite	128	
Pumice Pyrophyllite(kyoungjoo)	131	
Dolomite Lime stone	132	
Shale	133	
Serpentine Toosung energy Feldspar Quartz	136	
Pyrophyllite(china)	137	

(Kida et al., 1992).

2.3 부착 실험

각 입자를 2.5cm x 2.5cm 크기의 아크릴 판에 실리 콘 접착제로 부착시켜 페트리 접시에 고정시키고 활성 슬러지 농도를 90mg/L로 조절하여 30 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지되는 shaking water bath에서 활성슬러지가 침전되지 않도록 천천히 교반하면서 3시간 동안 미생물의 부착실험을 행하였다. 일정시간이 지난 후 미생물 군집수(CFU : colony forming unit)를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 입자의 표면성질

입자의 표면거칠기 자료(Table 1)에서 활석과 ash의 표면 거칠기가 각각 2.6 μm 와 2.9 μm 로 가장 낮았으며, 7.0 μm 의 거칠기를 가지는 백운석, 인회석과 7.1 μm 의 활성탄이 가장 높았으며, 대부분의 입자들은 3.0 μm ~ 6.0 μm 사이에 분포되었다. 입자의 표면거칠기를 거친 순서대로 3 등분하여 A, B 및 C군으로 나누면, A군은 활성탄, 인회석, 백운석, 고령토, 장석, 규석, 사문석 및 경석으로, B군은 규조토, sea coal, 석회석, 제올라이트, shale, 경주납석, 백운도 및 토성에너지로 C군은 벤토나이트, 고령토 white, 중국납석, 제우스백토, 고령토 pink, 덕유점토, 필라이트, ash 및 활석 등으로 분류된다.

Table 2는 실험에 사용된 입자의 소수성을 나타낸 것으로서 활석이 108 $^{\circ}$ 로 가장 낮았고 중국납석이 137 $^{\circ}$ 로 가장 큰 소수성을 띤 입자였다. 일반적으로 접촉각이

Table 3. Mean particle size and surface area of support materials

Items	mean particle size(μm)	surface area (m^2/g)	Group
Bentonite	1.18	2.089	A
Perlite	2.45	1.306	
Zeolite	3.09	1.133	
Activated carbon	3.51	1.108	
Ash	4.74	0.716	
Pyrophyllite(china)	5.19	0.687	
Pyrophyllite(kyoungjoo)	6.54	0.604	B
Talc	6.71	0.642	
Kaoline white	6.84	0.682	
Shale	7.84	0.478	
Kaoline pink	7.85	0.561	
Sericite	7.9	0.572	
Sea coal	8.03	0.542	
Apatite	8.22	0.615	
Zeus whiteclay	8.69	0.464	C
Quartz	10.00	0.402	
Diatomaceous earth	10.51	0.432	
Lime stone	10.62	0.438	
Kaoline	11.09	0.445	
Clay(duckyou)	11.24	0.392	
Toosung energy	11.67	0.366	
Pumice	11.86	0.321	
Serpentine	12.16	0.452	
Dolomite	19.51	0.217	
Feldspar	20.46	0.248	

Table 4. Point of zero charge for support materials

Items	mean particle size(μm)	surface area (m^2/g)	Group
Bentonite	1.18	2.089	A
Perlite	2.45	1.306	
Zeolite	3.09	1.133	
Activated carbon	3.51	1.108	
Ash	4.74	0.716	
Pyrophyllite(china)	5.19	0.687	
Pyrophyllite(kyoungjoo)	6.54	0.604	B
Talc	6.71	0.642	
Kaoline white	6.84	0.682	
Shale	7.84	0.478	
Kaoline pink	7.85	0.561	
Sericite	7.9	0.572	
Sea coal	8.03	0.542	
Apatite	8.22	0.615	
Zeus whiteclay	8.69	0.464	C
Quartz	10.00	0.402	
Diatomaceous earth	10.51	0.432	
Lime stone	10.62	0.438	
Kaoline	11.09	0.445	
Clay(duckyou)	11.24	0.392	
Toosung energy	11.67	0.366	
Pumice	11.86	0.321	
Serpentine	12.16	0.452	
Dolomite	19.51	0.217	
Feldspar	20.46	0.248	

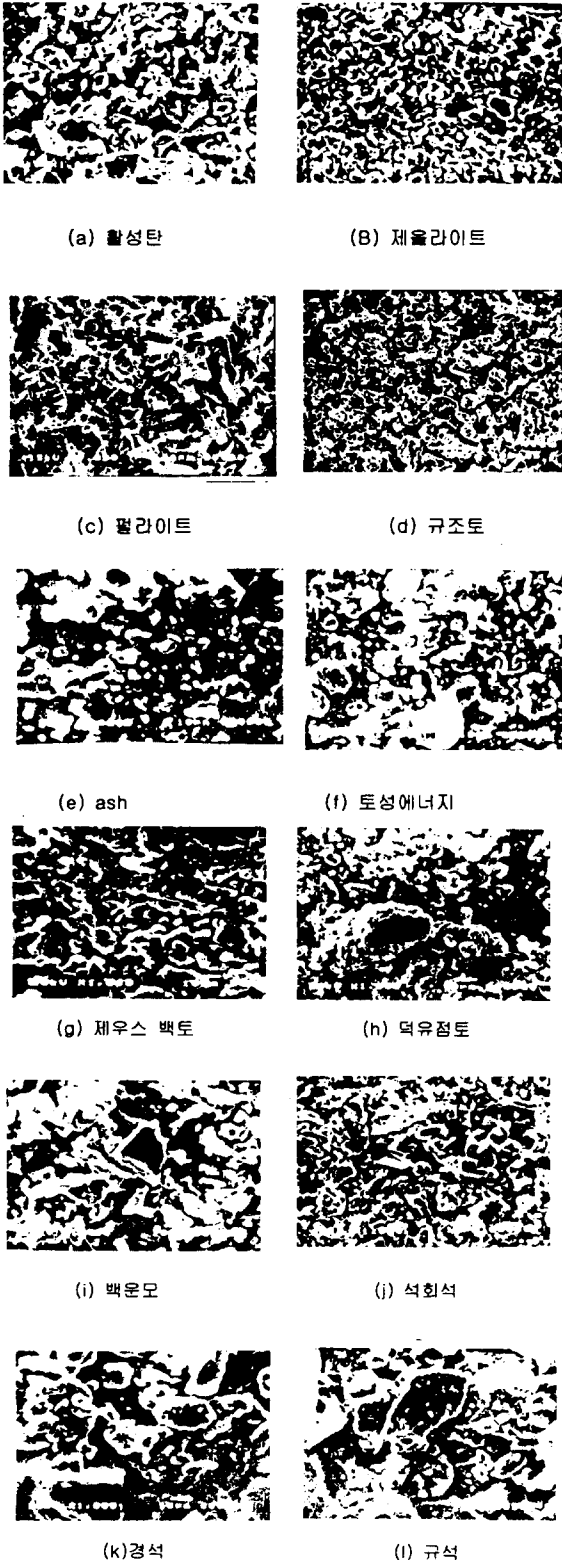


Fig. 1. The photographs of SEM of various support materials.

90° 이상이 될 때 그 입자는 젖기 어렵고 소수성이라고 한다(국윤환 등, 1993). 대부분의 점토질 광물들은 접촉 각이 108°에서 130° 정도로 분포되어 있으며, 대부분의 비점토질 광물들은 132°에서 137°의 범위에 있어 비교적 소수성이 높았으며 점토질 광물들은 비점토질 광물에 비해 상대적으로 친수성을 띄고 있었다.

입자의 소수성을 친수적인 순서대로 3 등분하여, A, B 및 C군으로 나누면 A군은 활석, ash, 활성탄, 덕유점토, 제우스백토 및 인회석 등이었으며, B군은 sea coal, 고령토, 벤토나이트, 제올라이트, 규조토, 백운모, 고령토 pink 및 고령토 white였으며, 가장 소수성인 C 군은 펄라이트, 경석, 경주납석, 백운석, 석회석, shale, 사문석, 토성에너지, 장석, 규석, 및 중국납석 등이었다.

Table 3에서 알 수 있듯이 평균 입자 크기는 벤토나이트가 1.18 μm 로 크기가 가장 작았으나 표면적은 2.089 m^2/g 로 가장 넓었으며, 장석이 20.46 μm 로 가장 큰 입자였지만 표면적은 0.248 m^2/g 로 벤토나이트에 비해 8.4배 좁았다. 평균입자 크기를 기준으로 입자를 나누면 벤토나이트, 펄라이트, 제올라이트, 활성탄, ash 및 중국납석이 입자가 작고 표면적이 넓어서 A군, 경주납석, 활석, 고령토 white, shale, 고령토 pink, 백운모, sea coal, 인회석, 제우스 백토 및 토성에너지가 B군, 규석, 석회석, 규조토, 고령토, 덕유점토, 백운석, 토성에너지, 사문석, 경석 및 장석이 입자 크기가 제일 큰 C군이었다.

본 실험에서는 점토질 광물들이 주로 6 ~ 10 μm 의 평균입자 크기를 가지는데 반해 비점토질 광물들의 평균 입자 크기는 10 μm 이상이었으며, 점토질 광물들이 0.7 m^2/g 에서 0.4 m^2/g 의 표면적을 가지고 반면 비점토질 광물들은 주로 0.45 m^2/g 에서 0.22 m^2/g 의 낮은 표면적을 가짐을 알 수 있었다.

3.2 입자 표면 조사

Fig. 1은 실험에 사용된 입자 중에서 분류계 별로 입자를 12개 선택하여 주사전자현미경(SEM : scanning electron microscopy, JOEL, JSM 5400)으로 1000배 확대하여 촬영한 것(규조토 : 500배)으로 a)는 활성탄이고 b)는 제올라이트, c)는 펄라이트, d)는 규조토, e)는 ash, f)는 토성에너지 g)는 제우스 백토, h)는 덕유점토, i)는 백운모, j)는 석회석, k)는 경석 및 l)은 규석이다. Fig. 1에서 보여지듯이 활성탄, 제올라이트 및 규조토의 입자 모양은 적고 둥근 입자가 잘 분포되어 있고 macro pore 이외에도 micro pore를 가지고 있으며, ash, 토성에너지, 제우스 백토, 덕유점토 및 백운모 등의 점토질 광물 및 석회석은 입자의 크기가 고르지 않고 날카로운 면을 가지지 않으나, 경석과 규석의 입자는 입자가 크고 매끄러운 박편으로 되어 있어, micro pore가 관찰되지 않으나, 펄라이트는 다른 입자들과 달리 뾰족 뾰족한 날카로운 면을 가지고 있다.

3.3 미생물의 부착능과 입자 표면성질과의 관계

담체 표면에 미생물이 부착되는 것은 여러 가지 물리, 화학 및 생물학적 성질에 의해 영향을 받으므로, 어느

Table 5. Classification of support materials and attachment of microorganism

Items	Attached CFU (X 10 ⁷ CFU/cm ²)	surface roughness	contact angle	surface area	charge
Activated carbon	20.1	A	A	A	-
Zeolite	19.9	B	B	A	-
Ash	16.7	C	A	A	-
Bentonite	15.8	B	B	A	-
Talc	15.7	C	A	B	-
Clay(duckyou)	15.3	C	A	C	+
Zeus whiteclay	15.0	C	A	B	neutral
Apatite	14.8	A	A	B	-
Kaoline	14.7	A	B	C	+
Sericite	14.5	B	B	B	neutral
Toosung energy	14.5	B	C	C	-
Sea coal	14.4	B	B	B	+
Feldspar	14.4	A	C	C	-
Kaoline white	14.4	C	B	B	+
Kaoline pink	14.3	C	B	B	-
Pyrophyllite(kyoungjoo)	14.2	B	C	B	+
Pyrophyllite(china)	14.0	C	C	A	neutral
Dolomite	13.7	A	C	C	-
Serpentine	13.0	A	C	C	-
Pumice	12.3	A	C	C	-
Perlite	11.4	C	C	A	neutral
Shale	11.0	B	C	B	-
Quartz	11.0	A	C	C	-
Lime stone	9.9	B	C	C	-
Diatomaceous earth	9.2	B	B	C	-

한 인자가 지배적인 인자가 되기도 하며, 여러 가지 인자가 동시에 영향을 주기도 하므로 각 인자별 부착능을 고찰하는 것은 쉽지 않다.

3시간 동안 페트리 접시에서 부착 실험한 결과 시험된 입자 중에서 활성탄이 20.1 x 10⁷CFU/cm²의 부착으로 가장 많이 부착되었으며, 미생물 부착이 가장 작게 된 규조토(9.2 x 10⁷CFU/cm²)에 비해서 2배의 차이를 나타내었다(Table 5). 이때 활성탄은 표면거칠기가 7.1µm로써 가장 거칠었으며, 입자의 크기가 작아서 입자의 표면적이 많았고, 입자의 접촉각이 115°이었으며, pH 7.0에서 증류수 20mL에 1.0g을 투입하였을 때의 pH는 9.62로써 음전하를 띄었다. 활성탄에 가장 많이 부착된 이유는 표면이 거칠어 미생물이 쉽게 부착될 수 있고, 표면적이 넓어서 미생물이 부착할 수 있는 부착점이 다른 입자들 보다 더 많기 때문이라고 판단되었다. 자연계에서 존재하는 미생물들은 주로 음전하를 띄고 있기 때문에 활성탄이 띄고 있는 음전하와 전기적으로 반발하여 미생물이 부착이 잘 안될 수 있으나 거칠기, 부착점, 소수성 및 입자의 모양 등이 더 크게 영향을 미친 것으로 판단되었다.

활성탄 다음으로 부착이 잘되는 입자들은 제올라이트, ash 및 벤토나이트 등이 있는데, 이들 입자는 표면은 거칠지 않고 음으로 하전되어 있지만 표면적이 넓기 때문에 미생물이 부착할 수 있는 부착점이 많고 접촉각이 낮은 편에 속하기 때문에 미생물이 담체에 접근하는 것을 방해하지 않는 것으로 사료되었으며, 입자의 표면

적과 소수성이 본 실험에서 미생물 부착에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

중간정도의 부착성을 나타내는 입자들은 주로 점토질 광물들이었다. 표면거칠기는 작지만 활석, 덕유점토, 제우스 백토, 인회석 등은 주로 중간 정도의 입자 크기와 표면적을 가졌으며 표면 소수성이 입자들 중에서 친수적인 경향을 띄고 있고, 표면전하는 주로 중성이거나 미생물의 음전하를 결합하여 제타전위를 떨어뜨릴 수 있는 양전하로 하전된 것도 부착에 크지는 않지만 어느 정도 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 백운석, 사문석, 경석 등은 표면거칠기는 크나 접촉각이 크므로 소수성이 커서 미생물이 접근하기에 어려운 것으로 판단되며, 표면적이 작고 Fig. 1에서 보이듯이 입자의 옆면이 매끄럽기 때문에 미생물 부착이 어려운 것으로 판단되었다.

부착이 가장 좋지 않은 펄라이트, shale, 규석, 석회석 및 규조토 등은 비점토질 광물로서 Fig. 1에서 보이는 것과 같이 표면거칠기, 접촉각, 표면적 및 표면하전 상태 등 실험에서 고찰된 물리.화학적 상태가 부착에 좋은 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되어 미생물 부착이 잘되지 않는 것으로 판단되었다.

보통 비점토 광물들의 평균 입자 크기는 점토질 광물에 비해서 커서 입자와 입자사이의 틈이나 홈에서 미생물의 피난처 역할을 하는 기능을 가지게 되나, 본 실험 범위에서는 유량속도가 낮기 때문에 큰 영향을 받지 않았으며, 점토질 광물에 비해 표면적이 낮았기 때문에 비

점토질 광물들이 부착이 잘 안되었다고 판단되었다.

점토질 광물이 비점토질 광물에 비해 부착이 잘되는 이유는 단위질량당의 비표면적이 대단히 크며, 이온교환성, 흡착성, 화학약품에 대한 반응성, 유기, 무기 복합체의 형성능, 촉매능 및 점성 등의 특성 때문으로 사료되었다.

본 실험에서는 황성탄, ash 등을 제외한 입자들 중에서 표면거칠기가 크더라도 미생물 부착이 크지 않은 것은 페트리 접시에서 실험할 때 입자에 가해진 전단응력의 크기가 크지 않아서 전단응력이 주어질 때 미생물의 피난처가 될 수 있는 거칠기 효과가 크게 나타나지 않았기 때문이라고 사료되었으며 RBC반응기에서 5rpm의 낮은 전단응력에서는 표면거칠기가 0.1 ~ 3.0 μ m 범위의 아크릴 표면에 부착되는 미생물의 수는 표면거칠기의 영향을 거의 받지 않았으나 50rpm의 높은 원판회전 속도에서는 표면거칠기에 따라 크게 차이가 났다는 이채남 등(1995)의 결과와 일치하였다.

4. 결 론

25종류의 입자를 선택하여 입자의 표면성질인 표면거칠기, 접촉각, 평균입자 크기, 표면적 및 표면전하 등과 미생물 부착능과의 관계를 고찰하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 미생물이 가장 많이 부착된 입자는 20.1 x 10⁷CFU/cm²이 부착된 황성탄으로서 미생물 부착이 가장 작게 된 구조토(9.2 x 10⁷CFU/cm²)에 비해서 2배의 차이를 나타내었다.

2) 대체로 비점토질 광물(규석, 구조토, 석회석, 장석, 사문석 및 펄라이트)보다는 점토질 광물(백운모, 활석, 카올린, 덕유점토, 제우스 백토, 토성에너지, 납석 및 제올라이트)등은 내표면을 합쳐 단위질량당의 비표면적이 대단히 크며, 이온교환성, 흡착성, 화학약품에 대한 반응성, 유기, 무기 복합체의 형성능, 촉매능 및 점성 등의 성질로 미생물 부착이 잘되었다.

3) 미생물 부착에는 표면의 형상, 거칠기, 소수성, 입자크기, 표면적, 및 표면하전 등이 모두 관여하나, 전단응력이 낮은 본 실험 조건에서는 미생물의 피난처 역할을 하는 입자크기와 표면거칠기보다는 부착점 효과를 주는 표면적이 더 큰 영향을 미치는 것으로 생각되었으며, 그 다음은 입자의 소수성으로, 입자 표면의 접촉각이 낮은 입자에 부착이 잘되었다. 입자의 표면하전은 본 실험범위에서는 부착에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 연구는 1996년도 한국과학재단지정 환경기술·산업개발 연구센터와 (주)삼환기연 및 (주)영화금속의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 국윤환, 이정매, 조형채, 1993, 콜로이드와 계면활성제, 대광서림, 70pp.
- 박태주, 1995, SAC 매체를 이용한 고정생물막 반응기에서 유기물질과 질소·인 동시제거 공정개발, 부산대학교 환경문제연구소 p. 15.
- 이채남, 박영식, 최윤찬, 송승구, 1995, 담체의 표면거칠기와 전단응력이 미생물 부착에 미치는 영향, 부산대학교 환경연구보 13권, 39-43.
- Breitenbacher, K., Stiegl, M., Knupfer, A., and Radke, M., 1990, Open-Pore Sintered Glass as a High-Efficiency Support Medium in Bioreactors: New Results and Long-Term Experiments Achieved in High-Rate Anaerobic Digestion, Wat. Sci. Tech., 22(1/2), 25-32.
- Buisman, C.J., Wit, B., and Lettinga, G., 1990, Biotechnological Sulphide Removal in Three Polyurethane Carrier Reactors: Stirred Reactor, Bioreactor Reactor and Upflow Reactor, Wat. Res., 24(2), 245-251.
- Kawase, M., T. Nomura and T. Majima, 1989, An Anaerobic Fixed Bed Reactor with a Porous Ceramic Carrier, Wat. Sci., Tech., 21, 77-86.
- Kida, K., Morimura, Y., Sonada, Y., and Yanoh, T., 1992, The Importance of the Surface Charge on Support Media for Microbial Adhesion, J. of Ferment. Bioeng., 73(4), 323-325.
- Jones, A., D.N Wood, T. Razniewska and G.M Gaucher, 1986, Continuous Production of Penicillin-G by *Penicillium chrysogenum* Cells Immobilized on Celite Biocatalyst Support Particles, Can. J. Chem. Eng. 64, 547-552.
- Valentis, G. and J. Lesavre, 1990, Wastewater Treatment by Attached -Growth Microorganisms on a Geotextile Support, Wat. Sci. Tech., 22(1/2), 43-51.