

# 하수슬러지를 이용한 생물담체 개발 - 기초물성 평가 및 황토최적혼합비 결정 -

정수일 · 손인식 · 정승현\* · 정병곤\*†

부경대학교 토목공학과

\*군산대학교 환경공학과

## Development of Biomedia using Waste Sewage Sludge - Evaluation of Basic Properties and Determination of Optimum Mixing Ratio of Sludge and Loess -

Soo Il Jeong · In Shik Sohn · Seung Hyun Jeong\* · Byung Gon Jeong\*\*†

Department of Civil Engineering, Pukyong National University

\*Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

(Received 20 August 2009, Revised 10 January 2010, Accepted 18 February 2010)

### Abstract

Dumping of waste sludge to ocean will be prohibited in Jananuary, 2012. Thus, various methods of sludge recycling are intensively studied. To present new way of sewage sludge recycling method, feasibility of making porous biological support media was investigated. Porous biological support media was made of sludge cake from sewage treatment plant and loess. They were mixed in varying ratio and burnt in high temperature to ensure sufficient mechanical strength. It was evaluated that about 67% of sewage sludge were ignitable. The ignitable portion play an important role in making pore in biomedia during ignition process. It was evaluated that optimum mixing ratio of loess to sludge cake was 25% in respect of compressive strength. In results of observation using scanning electron microscope (SEM), inner structure of biomedia become simple when the contents of loess are increased.

**keywords** : Biomedia, Compressive strength, Loess, Sewage sludge

## 1. 서론

환경부 2007년 하수도통계(환경부, 2008a)에 의하면 전국 357개 하수처리시설(500톤/일 이상)에서 연간 2,744,201톤의 하수슬러지가 발생되었으며, 그 중 해양배출로 처리되는 양이 1,868,423톤(68.1%)으로 가장 많은 것으로 나타났다. 이 밖에 재활용 382,463톤(13.9%), 육상매립 107,813톤(3.9%), 소각 350,913톤(12.8%), 기타 방식으로 처리되는 슬러지 양이 34,245톤(1.2%)인 것으로 나타났다(환경부, 2008a). 또한 공공 하수처리시설 신·증설 등으로 2011년(460개소)에는 일일 약 10,259톤에 이를 것으로 전망하고 있다(환경부, 2008b). 그러나 해양환경관리법에 의하면 런던협약 '96의정서의 발효에 따라 하수슬러지를 포함한 폐기물의 해양배출 기준이 대폭 강화되어 제1기준 초과 하수슬러지는 2008년 8월부터, 제2기준 초과 하수슬러지는 2012년 1월부터 해양배출이 금지됨에 따라 2011년 말까지 하수슬러지 육상처리 시설을 완비하여야 하는 실정이다.

따라서 최근에는 슬러지 재활용을 위한 연구가 많이 수행되고 있는데 재활용 방법 중 많이 연구되고 대량으로 소요될 수 있는 분야는 매립지 복토재로서의 재활용이다. 외국의 경우 벨기에 Flanders 지방에서는 슬러지와 혼합하여 매립지의 복토재로 이용되고 있으며 미국의 경우 탈수오수를 석회로 안정화시켜 매립지 복토재 대용으로 사용하고 있고(Rhew and Barlaz, 1995), U.S. EPA(1993)에서는 하수슬러지를 쓰레기 매립지의 일일 복토재 또는 최종 복토재의 자원으로 활용하도록 권고하고 있다. 국내의 경우 2011년 발생 예정인 10,259톤에 대하여 시·도별로 처리시설을 설치하여 재활용 7,136톤/일(69.5%), 소각 2,974톤/일(29%), 매립 149톤/일(1.5%) 처리예정이며 재활용량 7,136톤/일은 복토재 3,808톤/일(53.4%), 탄화 1,301톤/일(18.2%), 시멘트 원료 912톤/일(12.8%), 녹생토 373톤/일(5.2%), 퇴비화 368톤/일(5.2%), 연료화 308톤/일(4.3%) 등의 방법으로 운용할 계획이다(환경부, 2008b). 이러한 계획에서 보다시피 재활용 방법은 아직은 상당히 제한적이므로 경제성 있고 기술적으로 신뢰성이 있는 재활용 방법의 확대가 필요한 실정이다.

한편, 담체에 고정된 미생물을 이용하여 하·폐수를 처리하는 생물막 공정(biofilm process)은 담체에 미생물을 부착

† To whom correspondence should be addressed.

bjeong@kunsan.ac.kr

시켜 운전하는 방법으로 담체의 재질이나 종류에 따라 미생물상의 차이가 상당히 나며(김부훈 등, 1998) 또한 생물막 공정의 처리효율을 높이기 위해서는 담체 단위 표면적당 미생물량을 증가시켜야 하므로 synthetic fiber, polyurethane form 담체나 공극을 많이 가지면서 기계적 강도가 높은 세라믹 담체에 대한 연구가 진행되고 있다(양대창, 1995; Breitenbucher et al., 1990; Kawase et al., 1989; Valentis and Lesavre, 1990). 미생물 담체는 일정한 공간 내에서 미생물들이 연속적으로 산화반응을 수행할 수 있도록 하는 큰 비표면적, 높은 흡수율과 기공률을 가진 생물친화성 재료가 바람직하다.

세라믹 담체는 유기계 담체에 비해 생물친화력은 상대적으로 떨어지지만 화학적으로 안정하고 내열성 및 내구성이 우수하여 식품공정에서의 미생물 배양, 동물세포 및 식물세포의 배양의 연구에 사용되고 있다(Looby and Griffiths, 1988; Oishi and Sasaki, 1989).

지금까지 개발된 대부분의 세라믹 담체의 재료는 크게 알루미늄과 실리카의 두 부류로 나눌 수 있는데 일부는 알루미늄과 실리카가 적정비율로 혼합된 경우도 있다. 주로 소다유리를 원료로 하는 실리카 담체는 800°C 정도의 온도에서 소결시켜 제조하나, 알루미늄 원료의 담체는 1,300°C 이상의 고온에서 소결하여 제조하므로 원재료 및 제조비용이 높아 상업적 이용에 있어 경제성이 비교적 낮다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 하수슬러지 케이크와 황토를 혼합, 고온 소결하여 다공성의 생물담체를 제조함으로써 하수슬러지의 새로운 재활용 방안을 제시하고자 하는데 그 목적을 두고 있다. 이를 위하여 하수슬러지와 황토를 혼합한 생물담체의 적정 제조조건을 결정하고 제조된 담체의 내구성, 기공특성 등 기초물성을 평가하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 원료의 화학조성 분석

생물 담체 제조를 위한 원료 중 탈수슬러지 케이크는 부산 S하수처리장의 것을 사용하였으며, 함수율은 81.2%, VS 함량은 69.8%였다. 황토는 열풍 건조기를 이용하여 105°C에서 수분을 충분히 없앤 것들을 준비하여 사용하였다.

원료들의 화학조성을 파악하기 위하여 X-선형광분광기(X-ray fluorescence spectrometer, XRF ; Model : XRF-1700, Shimadzu, Japan)를 이용하였는데, 분석을 위한 재료들은 전기로를 이용하여 550°C에서 30분간 강열감량하고 45 μm 이하의 입자로 분쇄하여 준비하였다.

### 2.2. 생물담체 제조 및 물성분석

탈수슬러지 케이크와 황토의 최적 혼합비를 결정하기 위해 황토는 분쇄하여 KS-A-5101에 의한 100 mesh 표준체(150 μm 이하)를 통과한 것을 사용하였다. 제조 방법은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에 나타내어 놓은 바와 같이 탈수슬러지 케이크와 황토를 Table 1과 같은 혼합비율로 혼합한 후 혼합 및 반죽하여 직경 0.7~10 mm의 구형으로 성형한 후

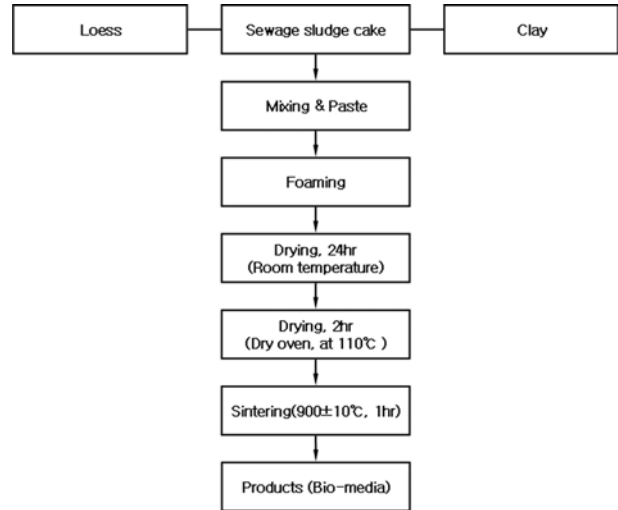


Fig. 1. Procedure for the preparation of bio-media production.

Table 1. Mixing rate of sewage sludge cake and loess

Media No.	Sewage sludge cake (%)	Loess (%)
M-1-1	90	10
M-1-2	85	15
M-1-3	80	20
M-1-4	75	25
M-1-5	70	30
M-1-6	65	35

Table 2. Experimental condition of strength measurement

Item	Compressive strength
Load cell, kg	500
XHead speed, mm/min	10
Chart speed, mm/min	10
Load range, kg	100
Target length, mm	-

24 시간동안 자연건조, 2 시간동안 110°C 열풍건조, 900±10°C 전기로에서 1 시간동안 소성하여 제조·완성하였다.

제조된 생물담체는 압축강도, 간극비, 흡수율, 비표면적을 측정하였는데, 압축강도는 Instron사의 강도 측정기(Model 1011)를 이용하여 Table 2와 같은 조건에서 측정하였다. 간극비 및 흡수율은 KSL 3114의 측정방법으로 측정하였는데 계산방법은 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$\text{Void volume ratio}(\%) = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Water absorption percent}(\%) = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

여기서, W<sub>1</sub> : 시료의 건조중량

W<sub>2</sub> : 포수시료의 수중중량

W<sub>3</sub> : 포수시료의 중량

비표면적은 미세 기공 물리 흡착 분석기(micropore physisorption analyzer, ASAP-2020M, Micromeritics, USA)를 이용하여 분석하였으며, 내약품성은 KS M 6518-01에 의해 측정하였으며, 모든 물성분석에 의해 측정된 값은 임의로 채취된 5개의 담체에 대한 평균값으로 구하였다.

또한, 제조된 생물 담체의 표면 및 내부의 형상은 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM ; DSM940A, Germany)을 이용하여 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 생물담체 제조 재료의 화학조성

생물 담체 제조를 위해 모든 재료들을 열풍건조기를 이용하여 105°C에서 수분을 충분히 없앤 것들을 준비하여 사용하였다. 준비된 재료들을 전기로를 이용하여 550°C에서 30분간 강열감량하고 45 μm 이하의 입자로 분쇄한 후 화학조성을 파악하기 위하여 XRF 분석을 수행한 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3에 나타내어 놓은바와 같이, 하수슬러지의 약 69.8%가 강열감량성분으로써 매우 높은 비율을 차지하고 있었는데, 이 강열감량성분은 담체제조를 위한 고온소성시 가스로 전량 휘발되므로 담체의 공극형성에 기여하는 중요한 성분으로써 하수슬러지가 생물담체의 공극형성에 매우 좋은 재료임을 알 수 있었다. 휘발성분을 제외한 잔류물 중 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이 주성분으로 약 64.2%를 차지하고 있었다.

또한 황토 역시 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 주성분이었으며 황토에 있어서 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 차지하는 비율은 각각 약 80.7 및 67.2%이었는데, 이는 규산질 세라믹 제조에 매우 좋은 원료임을 알 수 있었다(송종택과 이준근, 1991). 황토의 화학 성분 중 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량은 12.8%이었다.

본 결과를 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 3성분계로 표시하면 Fig. 2와 같으며, 이를 통하여 하수슬러지와 황토의 화학조성상의 차이를 쉽게 식별할 수 있다. SiO<sub>2</sub>의 경우 성형성, 결합성 및 건조강도를 좋게 하고, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 존재시 압축강도와 내한성을 좋게 한다. 반면, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 소성시 용제역할을 하여 기공률을 좋게 하지만 소성온도가 낮을 경우 기계적 강도가 낮아지는 역할을 하기 때문에 함량이 높을 경우 생물담체의 제조에 이롭지 못하다(송종택과 이준근, 1991).

따라서 하수슬러지에 황토를 첨가할 경우 황토의 특성이 슬러지에 비하여 SiO<sub>2</sub> 함량은 유사하나 상대적으로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량은 낮고 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량은 높으므로 기계적 강도 등의 측면에서 적정 혼합비가 중요한 의미를 가진다는 것을 알 수 있다.

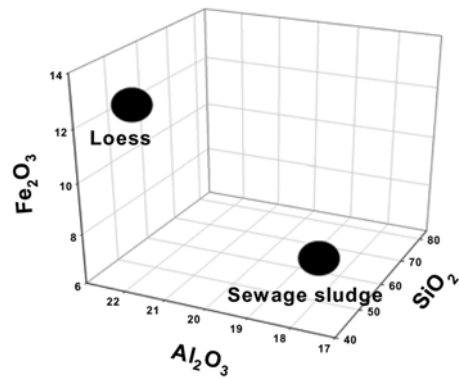


Fig. 2. Composition diagram of major oxide.

#### 3.2. 생물담체 제조시 황토 최적혼합비 결정

함수율 81.2%, VS함량 69.8%인 부산 S하수처리장의 탈수슬러지 케이크와 황토의 최적 혼합비를 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 황토는 분쇄하여 KS-A-5101에 의한 100 mesh 표준체(150 μm 이하)를 통과한 것을 슬러지 케이크와 혼합하였으며, 성형 후 900±10°C 전기로에서 1 시간 동안 소성하였다.

Table 4는 황토 최적혼합비 실험결과를 나타낸 것으로 황토의 혼합량이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 알 수 있다. 즉, 황토 혼합량 증가에 따른 압축강도 변화를 나타낸 Fig. 3에서 보면 황토의 함량 25%(M-1-4)까지는 증가 경향이 뚜렷하였으나, 그 이상의 양으로 황토를 혼합하였을 때는 압축강도 증가 정도가 크지 않은 것으로 관찰되었다. 간극비는 압축강도와는 상반되게 황토의 혼합량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었는데 Fig. 4에 나타난 바와 같이 황토의 함량 증가에 따라 거의 직선적으로 감소하는 것으로 나타났다.

Table 4. Results of experiment for optimum mixing ratio of loess

Media	Loess content (%)	Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Void volume ratio (%)	Water absorption percent (%)	Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)
M-1-1	10	9.9	74.8	65.8	11.6
M-1-2	15	11.7	70.5	62.1	10.9
M-1-3	20	17.9	68.7	59.5	9.6
M-1-4	25	22.7	67.5	55.6	8.4
M-1-5	30	24.5	64.2	48.9	6.4
M-1-6	35	25.9	62.7	43.6	6.0

Table 3. Chemical composition of sewage sludge and loess

Material	Chemical composition of ignited materials (%)										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I <sup>*1</sup>
Sewage sludge	14.1 (46.5) <sup>*2</sup>	5.4 (17.8)	0.3 (1.0)	2.5 (8.1)	0.8 (2.6)	2.7 (9.0)	0.0 (0.0)	0.7 (2.4)	0.1 (0.2)	3.7 (12.3)	69.8
Loess	45.3	22.0	1.39	12.8	1.3	2.7	0.7	1.1	0.4	0.1	12.4

\*1 L.O.I : Loss of Ignition

\*2 ( ) : Chemical composition after burning at 550°C for 30minutes

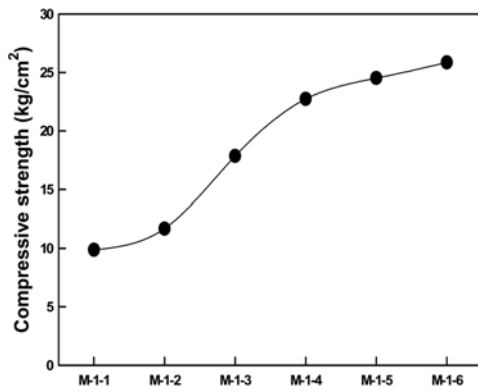


Fig. 3. Variation of compressive strength for loess content.

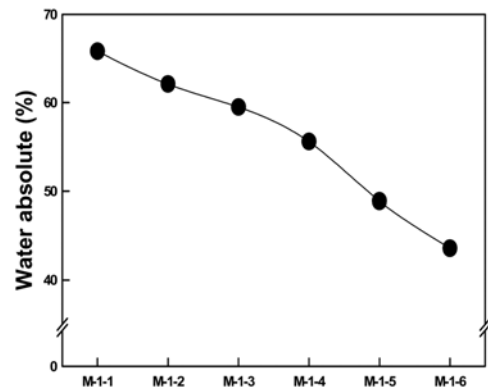


Fig. 5. Variation of water absorption percent for loess content.

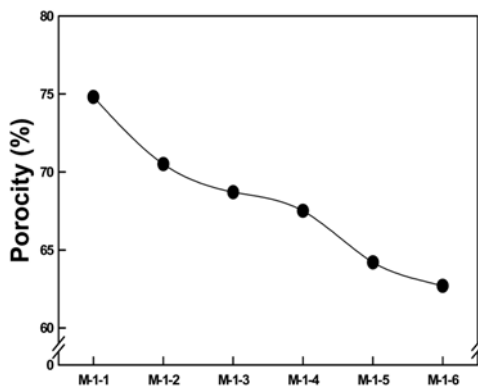


Fig. 4. Variation of void volume ratio for loess content.

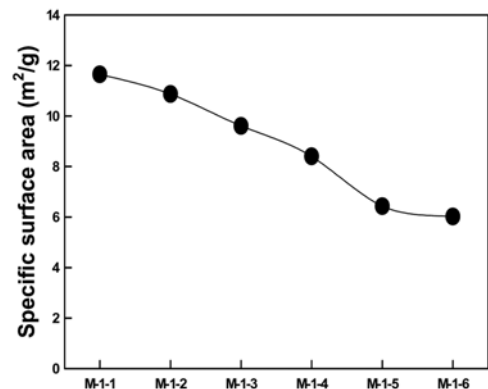


Fig. 6. Variation of specific surface area for loess content.

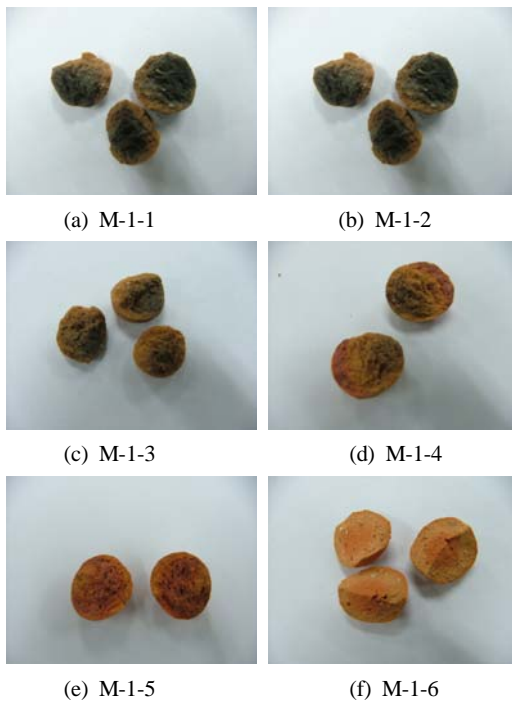


Fig. 7. Inner configurations of each bio-media.

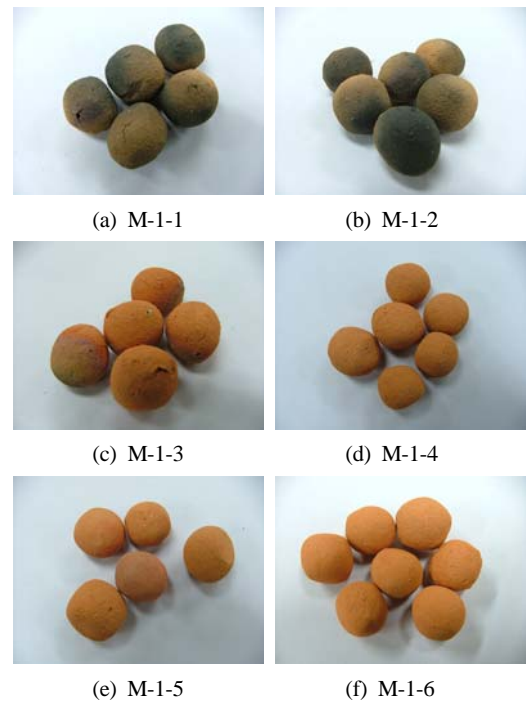


Fig. 8. Exterior configurations of each bio-media.

Fig. 5와 Fig. 6은 황토의 혼합량 변화에 따라 제조된 생물 담체의 흡수율과 비표면적을 나타낸 것이다. 여기서 황토의 양이 증가함에 따라 흡수율 및 비표면적 모두가 감소

하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있는데, 흡수율의 경우 황토함량 증가에 따라 거의 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었으며 비표면적의 경우는 황토함량 30%까지는

황토함량 증가에 따라 거의 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 황토의 혼합량 변화에 따라 제조된 생물 담체의 단면 및 외관을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보면 동일한 조건에서 소성하였음에도 불구하고 황토 함량이 낮을수록 즉, 탈수슬러지 함량이 높을수록 내부에 탄화물의 잔량이 많은 것으로 나타났다.

또한, Fig. 8에 나타난 바와 같이 탈수슬러지의 함량이 상대적으로 높은 M-1-1~3의 경우 외부에도 탄화물이 형성되어 있으며, 소성시 탈수슬러지의 연소가스가 빠르고 많이 방출됨에 따라 담체의 외부표면이 갈라지는 현상이 발생하거나 가스 분출구가 명백히 나타난 것이 관찰되었다.

Fig. 7 및 Fig. 8을 좀 더 자세히 관찰해 보면, M-1-4 및 5의 경우 외관이 매우 우수할 뿐만 아니라 내부의 공극도 잘 형성된 것으로 관찰되었으나, M-1-6의 경우 외관은 매우 우수하나 황토의 함량이 상대적으로 많아 내부의 공극형성이 잘되지 않은 것으로 관찰되었다.

Fig. 9는 주사전자현미경을 이용하여 M-1-4, 5 및 6의 내부를 관찰한 것인데, 그림에서 보는 바와 같이 M-1-4 및

5의 경우 내부 기공형성이 매우 잘 되어 비교적 큰 공극이 형성되었을 뿐만 아니라 박편이 매우 작고 복잡한 구조가 형성되어 있음을 알 수 있었으나, M-1-6의 경우 박편이 상대적으로 크고 기공 형성이 잘 되지 않아 공극이 작은 것으로 관찰되었다. 이를 통하여 일정수준 이상의 황토 혼합비율에서는 담체내부구조가 단순해지는 것을 알 수 있었다.

따라서 이상의 실험의 실험에서 관찰해 본 결과 탈수슬러지 케이크에서 황토의 적정 혼합량은 25~30%인 것으로 판단된다.

후속 실험을 위하여 최적 황토 혼합량을 결정하는 방법으로 Hirai 등(2001)이 사용한 바 있는 Fig. 10과 같은 radar graph 상에 총괄적으로 나타내었다. 여기서 각 축들은 각 담체에 대한 물성의 최대치에 대한 상대적 비(%)값으로 눈금 매겨져 있으며, 사각형의 면적이 큰 담체가 상대적으로 양호한 물성을 가진 것임을 나타내고 있다. 이를 통하여 M-1-4가 M-1-5에 비해 상대적으로 양호한 물성을 가진 것으로 판단되므로 황토의 최적 혼합량은 25%인 것으로 판단된다.

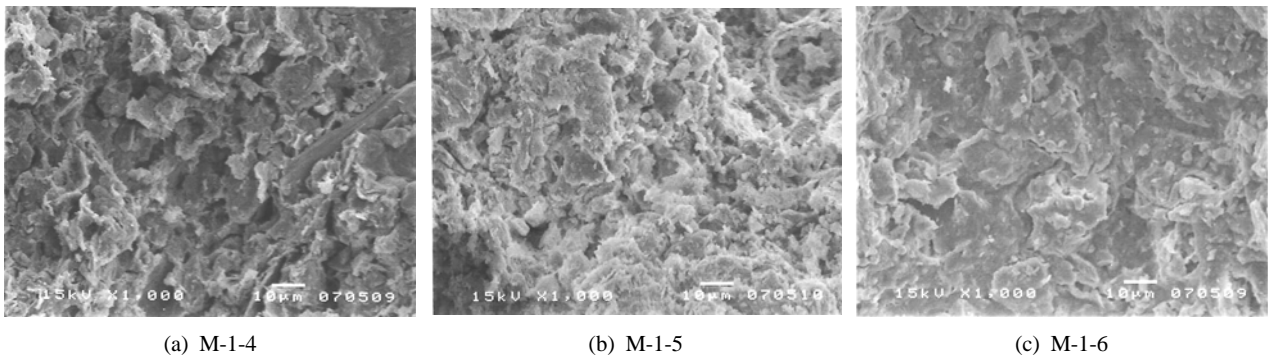


Fig. 9. Microscopic observation of bio-media using SEM.

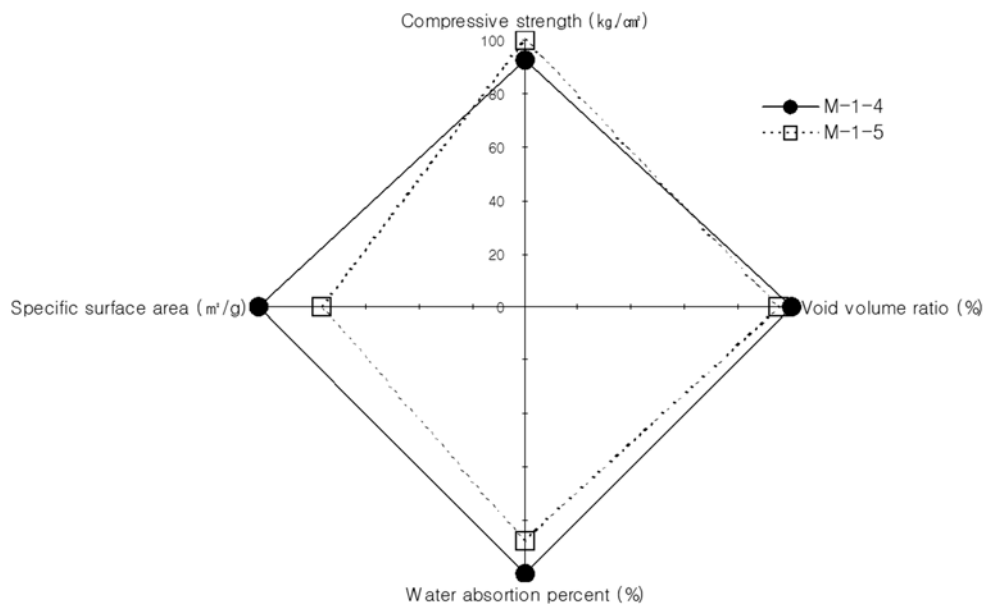


Fig. 10. Overall appraisal for M-1-4 and M-1-5.

#### 4. 결론

하수슬러지 케이크와 황토를 혼입, 고온 소결하여 다공성의 생물담체를 제조함으로써 하수슬러지의 새로운 재활용 방안을 제시하고자 본 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하수슬러지의 약 67%가 강열감량성분으로써 높은 비율을 차지하며 담체제조를 위한 고온소성시 공극형성에 중요한 역할을 한다.
- 2) 황토의 혼합량이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었는데, 황토의 함량 25%까지는 증가 경향이 뚜렷하였으나, 그 이상의 양으로 황토를 혼합하였을 때는 압축강도 증가 정도가 크지 않은 것으로 관찰되었다. 간극비는 압축강도와는 상반되게 황토의 혼합량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 주사현미경을 이용한 내부관찰 결과 일정수준 이상으로 황토 혼합량이 많아지면 내부구조가 단순해지는 것으로 나타났다.
- 4) 탈수슬러지 케이크에 대한 황토의 적정 혼합량은 25%인 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

김무훈, 조재현, 김용환, 이용우, 이원권(1998). 생활폐수 처리용 생물막 반응기에서 담체재질의 종류에 따른 미생물상의 차이. *수질보전 한국물환경학회지*, **14**(3), pp. 339-345.  
 송종택, 이준근(1991). *세라믹공학*, 반도출판사.

양대창(1995). 미생물 고정화를 위한 효율적인 담체의 개발. 석사학위논문, 서울대학교.

환경부(2008a). 2007년 하수도 통계.

환경부(2008b). *하수슬러지관리 종합대책*.

Breitenbacher, K., Siegl, 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), pp. 25-32.

Hirai, M., Kamamoto, M., Yani, M., and Shoda, M. (2001). Comparison of the biological H<sub>2</sub>S removal characteristics among four inorganic packing material. *J. Biosci. Bioeng.*, **91**(4), pp. 396-402.

Kawase, M., Nomura, T., and Majima, T. (1989). An anaerobic fixed bed reactor with a porous ceramic carrier. *Wat. Sci. Tech.*, **21**, pp. 77-86.

Looby, D. and Griffiths, J. B. (1988). Fixed bed porous glass sphere(porosphere) bioreactors for animal cells. *Cytotechnology*, **1**, pp. 339-346.

Oishi, T. and Sasaki, R. (1989). Ceramic substrate for tissue culture. *Ceramics*, **24**, pp. 643-647.

Rhew, R. D. and Barlaz, A. (1995). Effect of lime-stabilized sludge as landfill cover on reuse decomposition. *J. of Env. Eng.*, **99**, pp. 499-505.

U.S. EPA (1993). 40CFR parts 503, Standards for the use and disposal of sewage sludge rule. *Federal Register*, **58**(32), pp. 9247-9420.

Valentis, G. and Lesavre, J. (1990). Wastewater treatment by attached-growth microorganisms on a geotextile support. *Wat. Sci. Tech.*, **22**(1/2), pp. 43-51.