

## 석분슬러지를 이용한 쓰레기매립장 차수재의 적용성에 관한 연구 A Study on the Application of Landfill Liners with Stone Dust Sludge

조재형<sup>1)</sup>, Jae-Hyung Cho, 윤태국<sup>2)</sup>, Tae-Gook Yoon, 여병철<sup>3)</sup>, Byeong-Chul Yeo,  
안상로<sup>4)</sup>, Sang-Ro Ahn, 천병식<sup>5)</sup>, Byung-Sik Chun

1) (주)삼표 환경기술연구소 과장, Vice Director, SAMPYO. Co.,LTD

2) 한국시설안전기술공단 차장, Vice Director, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

3) (주)삼표 전무이사 Vice Chief, SAMPYO. Co.,LTD

4) 한국시설안전기술공단 실장 Office Chief, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

5) 한양대학교 교수 Professor, Dept. of Civil Engineering, Han Yang University

**SYNOPSIS** : At present around 50 companies have their own crushing plants, which manufacture rock into crushed sand, over around 350 different quarry throughout the nation. However, in most plants the stone dust sludge is left as it is in their plants so that they have difficulty to utilize. Furthermore, environmental pollution may be even caused due to dust generated when it is dried. Recycling is starting capturing the attention of the people working over the quarry due to the reasons described above.

This research has studied in the quarters the usability as landfill liner of the stone dust sludge, which is industrial waste. We investigated what technological properties it would have after mixing the stone dust sludge with SM(sandy soil) first and then with blast furnace slag or reject ash, which is waste, and cement as the stabilizer.

As the result of three tests; compacting test, strength test, and permeability test; to satisfy the regulatory guideline of the government that is the compress strength over 5 kgf/cm<sup>2</sup>, the flexibility over 1 kgf/cm<sup>2</sup>, and the permeability under  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec

From this research, we could confirm that stone dust sludge would be used as waste landfill liner if it were mixed with other waste by the proper mixing ratio.

**Key words** : stone dust sludge, landfill liner, compacting test, strength test, permeability test

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라와 같이 시멘트 생산량이 풍부한 경우 콘크리트 구조물의 증가는 필연적이며, 이에 따른 자갈, 모래 등의 천연골재의 수요도 날로 증가하고 있다. 그러나 사용이 가능한 천연골재는 한정되어 있고 그나마 점점 고갈되어 주변의 중국이나 북한에서 수입이 되고 있는 것이 현실이다. 따라서 이러한 천연골재의 수요에 대처하고자 최근에는 쇄석의 수요가 증가하고 있으며 이는 전국 350여개 쇄석공장 중에서 원암을 세골재화하여 생산되고 있는데, 최종 제품인 부순모래를 만드는 과정에서 대량의 석분슬러지가 발생하게 된다.

습식 탈수처리한 쇄석 미분말인 석분슬러지의 발생은 폐기물의 발생으로 이어져 대규모의 석산의 경우 표토와 섞어 복구용으로 쓰이기는 하지만, 그 양은 미미한 정도이며, 대부분의 경우 처리가 곤란하여 사업장내 방치하고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 해결하고자 최근에는 석산마다 자원화를 위한 방안을 강구하고 있으며 이와 같은 석

분슬러지를 터널 배면 공동의 충전재로 활용하기 위한 연구도 진행되고 있다.

이에 본고에서는 석산 부순모래 생산과정 중에 발생하는 석분슬러지를 모토(母土)라고 불리우는 사질토와 혼합, 여기에 폐자원인 고로슬래그 및 리젝트애쉬를 혼합하고, 다시 안정재로 시멘트를 혼합한 혼합차수재의 물리·역학적 특성을 파악하여 폐기물 매립장 차수재로서의 적용 가능성을 분석하고자 한다.



<그림 1.1> 좌 : 석산의 골재채취 전경 우 : 쓰레기 매립장의 복토재 시공

## 1.2 쓰레기 매립장에서의 차수시설

쓰레기 매립장에서의 차수시설은 매립지 내에 있는 침출수가 외부로 유출되는 것을 방지하기 위하여 매립지의 접, 사면 등에 설치하는 불투수성의 층 또는 벽을 말한다. 또한 매립지 외부의 지하수 등이 매립지 내로 유입 및 침입하는 것을 방지하기도 하며 다음과 같은 기능을 가져야 한다.

- 1) 침출수가 매립지 밖으로 유출되지 않도록 한다.
- 2) 침출수량의 저감을 위하여 매립지 내로 지하수 및 우수 등이 유입되지 않도록 한다.
- 3) 투수계수가  $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이하가 되는 차수성을 가져야 한다.
- 4) 매립작업에 지장이 없어야 한다.
- 5) 토지이용에 장애가 되지 않아야 한다.
- 6) 화학반응 및 미생물반응 등이 일어나지 않도록 저항성이 커야 한다.
- 7) 직사광선에 분해, 변색 및 경화되지 않아야 한다.
- 8) 매립 폐기물 및 장비의 중량에 견딜 수 있는 강도를 지녀야 한다.

즉, 폐기물 매립지의 차수시설은 매립폐기물로부터 흘러나온 침출수가 주변 지하수 층으로 이동하는 것을 방지하는 역할을 한다. 미국의 경우 1984년 유해 고형폐기물에 대하여 차수재의 상부 또는 이중차수재의 경우 차수재 사이에 침출수 집수시설을 설치하여 유해한 폐기물의 성분이 매립지 폐쇄 후 30년 동안은 주변환경으로 이동하는 것을 최소화하도록 규정하고 있다.

## 2. 석분슬러지의 공학적 특성

석분슬러지는 석산에서 부순모래를 생산하는 공정에서 발생하는 미립분으로 습식포집에 의해 수집된 슬러리형태의 물질로서  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 80% 이상을 차지하고 있으며, 비중 2.681, 자연상태 함수비 26.3%, 투수계수  $5.9 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 로서 고화제 및 가소제를 첨가하여 투수계수의 보정에 따라 기타재료로서 활용이 가능하다.

석분슬러지의 화학성분 및 기본 물성은 <표 2.1~2>와 같다.

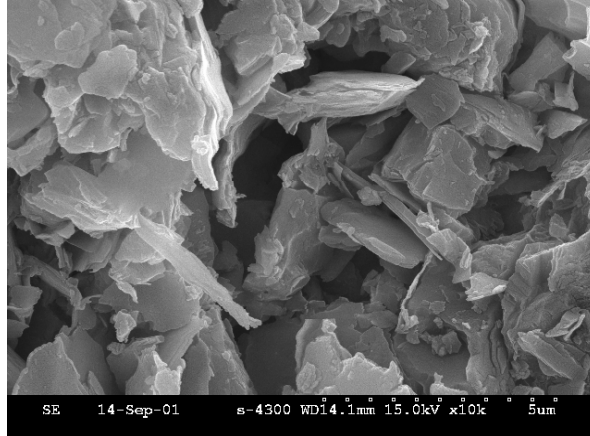
<표 2.1> 석분슬러지의 화학성분

성분	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MnO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{ZnO}$	Ig.loss
%	66.14	17.43	3.24	0.03	5.21	1.6	2.07	0.06	0.31	0.01	2.46

<표 2.2> 석분슬러지의 기본물성

비중	최대날지름 (mm)	자연함수비(%)	입도		액성한계(%)	소성한계(%)
			4번체통과율(%)	200번체통과율(%)		
2.681	0.84	26.3	100	75.8	32.2	29.5

<그림 2.1>은 석분슬러지의 입자를 전자현미경(SEM)을 이용하여 촬영한 것으로, 75 $\mu$ m이하 입도의 판형인 것으로 나타났다.



<그림 2.1> 석분 슬러지 SEM 결과

### 3. 실험재료 및 배합설계

#### 3.1 실험재료로 사용된 석분슬러지

본 실험에 사용된 석분슬러지는 S산업의 화성시에 위치한 N석산에서 채취하였으며, 본 실험을 위해 케익상의 슬러지를 건조시켜 사용하였다. 사용된 석분슬러지의 물리적특성은 <표 3.1>과 같으며, 통일분류법(Unified Soil Classification System)에 의한 ML에 속하고 비중은 2.681을 나타냈다. 역학적 특성을 살펴보면 <표 3.2>와 같으며 최적함수비가 12%, 투수계수는  $5.9 \times 10^{-6}$  cm/sec을 나타냈다.

<표 3.1> 석분슬러지의 물리적 실험 결과

시험항목	결 과	시험항목	결 과	시험항목	결 과
비 중	2.681	최대날지름	0.84mm	10번체통과율	100.0%
자연함수비	26.3 %	60%날지름	0.032mm	40번체통과율	99.6%
액 성 한 계	32.2 %	30%날지름	0.0065mm	200번체통과율	75.8%
소 성 한 계	29.5 %	10%날지름	0.0015mm	통일분류	ML
소 성 지 수	2.7 %	균등계수	21.3		

<표 3.2> 석분슬러지의 역학적 실험 결과

시 험	방 법	시 험 항 목	결 과
다 짐 시 험	D	최대습윤밀도	2.182 g/cm <sup>3</sup>
		최대건조밀도	1.948 g/cm <sup>3</sup>
		최적함수비	12.0 %
투 수 시 험	변수위 투수	투 수 계 수	5.9×10 <sup>-6</sup> cm/sec

### 3.2 배합설계

#### 3.2.1 시멘트를 첨가한 기초배합설계

본 실험에 사용된 재료는 모토인 사질토에 주배합재료로 석분슬러지와 시멘트를 혼합하여 역학적 특성을 검토하였다. <표 3.3>은 시멘트를 첨가한 기초배합설계를 나타낸다.

<표 3.3> 시멘트를 첨가한 기초배합설계

구 분 배합안	배합재료 100(%) 기준		
	사질토(SM)	석분슬러지	시멘트
C-1	0	50	50
C-2	20	48	32
C-3	40	42	18
C-4	60	32	8
C-5	80	18	2

#### 3.2.2 고로슬래그를 첨가한 배합설계

본 실험에 사용된 재료는 주배합재료로 석분슬러지와 고로슬래그를 사용하였으며 이 배합재료를 사질토에 혼합하여 역학적 특성을 검토하였다. 배합재료의 구성 배합률은 <표 3.4>와 같다.

<표 3.4> 고로슬래그를 첨가한 기본배합설계

구 분 배합안	배합재료 100(%) 기준		
	사질토(SM)	석분슬러지	고로슬래그
B-1	0	50	50
B-2	20	48	32
B-3	40	42	18
B-4	60	32	8
B-5	80	18	2

#### 3.2.3 리젝트애쉬를 첨가한 배합설계

본 실험에 사용된 재료는 주배합재료로 석분슬러지와 리젝트애쉬를 사용하였으며 이 배합재료를 사질토에 혼합하여 역학적 특성을 검토하였다. 배합재료의 한 재료로서 폐자원인 리젝트애쉬를 선정하였다. 그러나, 리젝트애쉬의 경우 화학성분이 강도에 큰 영향을 미치고 있어 5% 이상은 사용을 금지하고 있

으나, 안정처리재로서의 활용시 규정은 없으므로 이에 준하지는 않았다. 일반적으로 초기 강도는 저하하고, 장기 강도는 증가하는 것으로 알려져 있다. 배합재료의 구성 배합률은 <표 3.5>와 같다.

<표 3.5> 리젝트애쉬를 첨가한 기본배합설계

구 분 배합안	배합재료 100(%) 기준		
	사질토(SM)	석분슬러지	리젝트 애쉬
R-1	0	50	50
R-2	20	48	32
R-3	40	42	18
R-4	60	32	8
R-5	80	18	2

## 4. 분석 및 고찰

### 4.1 시멘트를 첨가한 차수재의 물리·역학적 특성

석분슬러지와 시멘트를 1:1 중량배합을 한 후 다짐실험 한 결과 최대건조밀도는 1.941g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비는 12.2%로 각기 나타났으며, 리젝트애쉬나 고로슬래그를 배합시 보다 최대건조밀도는 증가하고 최적함수비는 감소하였다. 시멘트 역시 미립분이나, 비중이 크기 때문에 밀도가 느슨해지는 현상은 매우 작았다.

사질토의 양이 많아질수록 타 배합설계에 비해 최대건조밀도가 상승하는 폭은 적으나 최적함수비는 크게 감소하는 경향이 나타났다. 또한 다짐곡선은 등간격으로 상승하였다. <표 4.1>은 시멘트를 첨가한 혼합차수재의 다짐실험결과를 나타냈다.

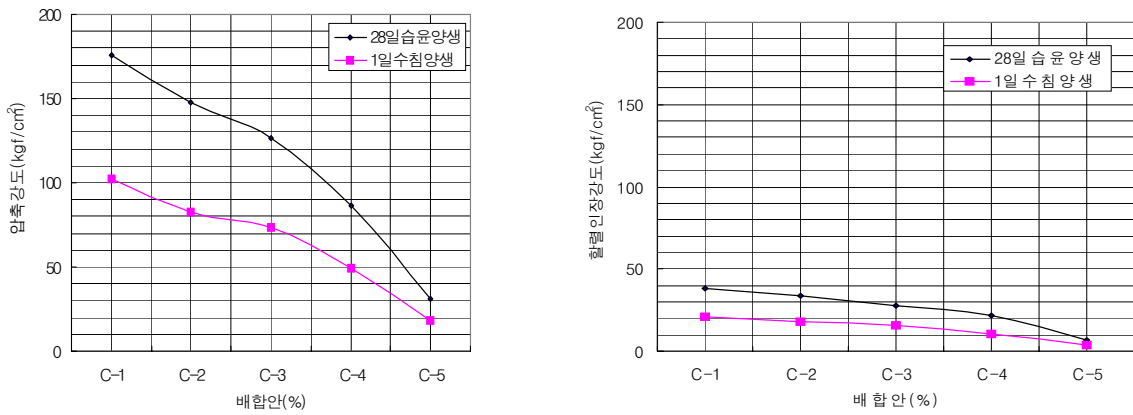
<표 4.1> 시멘트를 첨가한 기초배합 다짐실험 결과

구 분 배합안	배합설계 다짐 시험		
	최대습윤밀도(g/cm <sup>3</sup> )	최대건조밀도(g/cm <sup>3</sup> )	최적함수비(%)
C-1	2.178	1.941	12.2
C-2	2.211	1.999	10.6
C-3	2.224	2.035	9.3
C-4	2.260	2.083	8.5
C-5	2.273	2.120	7.2

한편, 습윤양생 후 일축압축강도시험 및 할렬인장강도시험을 진행한 결과 <표 4.2>에서와 같이 C-1이 가장 크게 나타났다. 이는 시멘트의 첨가량이 많은 배합에서 시멘트의 수화반응에 의한 수화생성물(C-B-H)겔이 생성되어 혼합재의 조직이 치밀화됨에 따라 강도증진에 기여한 것으로 판단된다. 사질토의 양이 증가할수록 강도는 저하하였으며, 할렬인장강도는 일축압축강도의 1/3이하로 나타났다. <그림 4.1>은 시멘트를 첨가한 혼합차수재의 일축압축강도와 할렬인장강도 그래프이다.

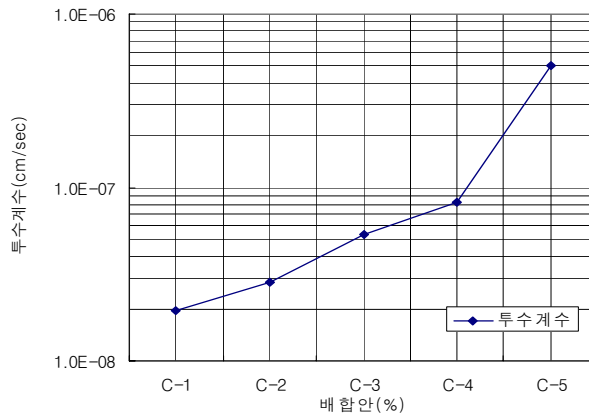
<표 4.2> 시멘트를 첨가한 기초배합 강도 및 투수실험 결과

구 분 배합안	배합설계 강도 및 투수실험				투수계수 (cm/sec)
	일축압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		할렬인장강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		
	습윤양생 (28일)	습윤양생(27일) 수침양생(1일)	습윤양생 (28일)	습윤양생(27일) 수침양생(1일)	
C-1	175.8	101.9	38.5	21.3	$1.9 \times 10^{-8}$
C-2	147.7	82.8	33.5	18.1	$2.8 \times 10^{-8}$
C-3	126.8	73.6	27.8	15.4	$5.3 \times 10^{-8}$
C-4	86.6	49.4	21.6	10.8	$8.2 \times 10^{-8}$
C-5	31.1	18.4	6.8	3.7	$5.0 \times 10^{-7}$



<그림 4.1> 시멘트를 첨가한 기초배합 일축압축강도, 할렬인장강도

<그림 4.4>와 같이 초기 시멘트량이 클수록 투수계수는 작고, 시멘트의 감소에 따라 투수계수는 상승하였다. 몰드제작 후 건조수축에 대한 영향을 최소화하기 위하여 바로 수침양생 하였으며, 이때 기포는 약 4일간 지속적으로 발생되었다. 투수계수는 시멘트의 함량이 감소됨에 따라 반대로 증가하였다. 즉, C-5가 투수계수 기준  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하 조건에 부합되므로 시멘트 첨가량은 최소 8% 정도로 첨가해야만 하는 것을 알 수 있었다.



<그림 4.2> 시멘트를 첨가한 기초배합 투수계수

이상과 같은 실험 결과로부터 차수재료 사용시 일축압축강도 기준  $5\text{kg}/\text{cm}^2$  이상과 활렬인장강도 기준  $1\text{kg}/\text{cm}^2$  이상인 조건을 모두 만족하였다. 그러나, 투수계수 기준  $1.0 \times 10^{-7} \text{cm}/\text{sec}$ 이하는 C-1, C-2, C-3, C-4가 적합함을 알 수 있었다.

#### 4.2 고로슬래그를 첨가한 차수재의 물리·역학적 특성

다짐실험 결과는 <표 4.3>과 같이 나타났다. B-1의 경우 석분슬러지와 고로슬래그를 1:1 중량배합을 한 후 다짐 한 결과 최대건조밀도는  $1.792\text{g}/\text{cm}^3$ , 최적함수비는 18.2%로 나타났다.

석분슬러지의 최대건조밀도가  $1.948\text{g}/\text{cm}^3$ 일 때, 최적함수비가 12%인 점과 비교하면 고로슬래그의 비중이 작기 때문이며, 입자의 분포가 균등한 입자에서 불균등한 입자분포를 형성하는 점에 의해 최적함수비가 커졌다. 그러나, B-2부터 사질토의 첨가량을 증가시키므로 인해 점차적으로 사질토의 특성과 유사하게 변화되었다.

<표 4.3> 고로슬래그 첨가 기본배합 다짐실험 결과

구 분 배 합 안	배합설계 다짐실험		
	최대습윤밀도( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	최대건조밀도( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	최적함수비(%)
B-1	2.118	1.792	18.2
B-2	2.160	1.903	13.5
B-3	2.185	1.981	10.3
B-4	2.201	2.032	8.3
B-5	2.258	2.100	7.5

또한, 습윤양생 후 일축압축강도시험 및 활렬인장강도시험을 진행한 결과 사질토의 양이 증가 할수록 강도도 증가 하였으며, 활렬인장강도는 일축압축강도의 50%~60% 정도로 나타났다. 여기서 석분슬러지와 고로슬래그는 공시체의 성형성과 간극을 채워주는 역할을 한 것으로 파악된다.

B-1에서 석분슬러지와 고로슬래그만으로는 강도값이 매우 작았으며, 이는 입자의 크기가 작고, 입자의 강도가 매우 작기 때문이다. B-2부터 B-4는 사질토의 배합량의 증가에 따라 강도는 점차적으로 증가하다가 B-5에서 멈추었다.

전체적으로 28일 습윤양생시 사질토의 특성상 성형성이 없으나 석분슬러지와 고로슬래그가 공시체의 성형성을 보완하였으며, 습윤상태에서의 강도는 매우 높게 나타났다. 그러나, 27일 습윤양생 후 1일 수침 양생한 결과 수중에서 공시체는 형상을 보존하지 못하였다. 이유는 고로슬래그의 수경성은 장기적인 시간을 요하므로 27일간 습윤양생한 공시체는 수경성이 완전치 못한 것으로 파악된다.

석분슬러지는 입자가 작아 초기 투수성이 적고, 시간의 흐름에 따라 입자의 연결성이 약화되므로 slaking현상이 발생하여 장기 투수성은 점점 커지며 입자분포 구조가 흐트러졌다.

그러나 고로슬래그를 첨가함으로써 석분슬러지의 slaking현상을 방지하므로써 투수계수의 저감효과가 나타났다.

#### 4.3 리젝트애쉬를 첨가한 차수재의 물리·역학적 특성

석분슬러지와 리젝트애쉬를 1:1 중량배합을 한 후 다짐한 결과 최대건조밀도는  $1.612\text{g}/\text{cm}^3$ , 최적함수비는 17.9%로 각각 나타났으며, 이는 석분슬러지 자체 다짐시험을 행하였을 때의 결과치 최대건조밀도  $1.948\text{g}/\text{cm}^3$ , 최적함수비는 12.0%와 비교시 리젝트애쉬의 입자 크기 영향을 받아 최대건조밀도는 저하하고, 최적함수비는 증가하였다.

R-2에서 사질토량을 20% 배합시  $0.195\text{g}/\text{cm}^3$  증가하고, 함수비는 3.0% 감소하였으나, R-3의 40% 배합부터 밀도의 증가폭은 약  $0.100 \sim 0.080\text{g}/\text{cm}^3$  정도 증가하였고, 함수비는 3%씩 감소하던 비율이 점차

1.5%정도씩 감소하였다. 사질토의 재료량을 증가시 점차적으로 최대건조밀도는 증가하였고, 최적함수비는 감소하였다. 리젝트애쉬는 플라이애쉬와 화학 성분은 같으나, 입자가 다소 크다. 그러나 고로슬래그의 입자크기와는 현격한 차이가 있다.

또한, 습윤양생 후 일축압축강도시험 및 할렬인장강도시험을 진행 한 결과 사질토의 양이 증가할수록 강도도 증가하였다. 그러나 고로슬래그를 적용한 배합설계강도 시험결과에 비해 다소 떨어지며 강도의 변화는 대체적으로 비슷한 양상을 띤다. 할렬인장강도는 일축압축강도의 1/4정도로 나타났다.

27일 습윤양생 후 1일 수침 양생한 결과 수중에서 공시체는 형상을 보존하지 못하였다. 즉, 자체 고결성 및 내수성이 극히 적어 손실중량이 발생하여 시험을 진행 할 수 없었다.

## 5. 결론

콘크리트 구조물의 증가에 따라 날로 증가하고 있는 쇄골재의 수요와 더불어 국내 석산에서 대량으로 발생하는 산업폐기물인 석분슬러지의 처리가 곤란하여 터널 배면 공동 채움재 등 사용과 더불어 쓰레기 매립장의 차수재로서 적용가능성을 분석하고자 여러 실험을 실시하였다. 이의 연구 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

1) 모토+석분슬러지+시멘트의 배합에서 시멘트량의 증가에 따라 압축강도, 인장강도, 투수계수는 비례적으로 증가하였으며 압축강도와 인장강도는 모든 시료에서 폐기물 매립장의 법적 기준치를 만족하였다. 반면 시멘트 첨가량이 8%인 경우를 시험한 결과 투수계수  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 의 이하 조건에 만족하지 못한 것으로 분석되었다. 따라서 석분슬러지를 쓰레기 매립장 차수재로 적용함에 있어서의 시멘트 첨가량은 최소 8% 정도가 되어야 하는 것을 알 수 있었다.

2) 모토+석분슬러지+고로슬래그 배합의 경우는 고로슬래그의 초기 수화활성도 저하에 따라 모든 시료가 투수계수에서  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 의 이하 조건을 만족하지 못했으며 27일 양생 후 1일 수침양생의 경우 공시체의 형상을 보존치 못했다. 그러므로 차수재로는 부적합하였다.

3) 모토+석분슬러지+리젝트애쉬 배합은 고로슬래그 배합의 경우와 마찬가지로 리젝트애쉬의 초기 수화활성도 저하 때문에 모든 시료가 투수계수에서  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 의 이하 조건을 만족하지 못하였다.

이상의 연구결과로부터, 석분슬러지를 포함한 기타 폐기물들의 배합에서 매립장 차수재로서의 적용함에 있어 고로슬래그 및 리젝트애쉬 등을 배합하여 사용하면 쓰레기 매립장의 차수재 기준을 만족하지 않는 반면 석분슬러지에 시멘트(함유량 8% 이상)를 혼합하면 차수재로서의 충분한 성능을 발휘함을 알 수 있었다. 따라서 향후 현장여건에 보다 적합하면서 실용화 할 수 있는 심층적인 연구가 이루어져 조만간 석분슬러지에 따른 환경문제, 쓰레기 매립장의 차수문제 등을 해결할 수 있기를 기대한다.

## 참고문헌

1. 한국건설산업연구원(2001), “골재산업의 중장기 육성방안 (골재 채취 법령의 개선 방안을 중심으로)”, pp. 57~65.
2. 서민우 외3(2002), “토목섬유 점토 차수재(GCL)와 지오멤브레인(GM)의 접촉 전단강도 평가”, 한국지반공학회논문집 제18권 4호 pp. 137~146.
3. 森山 外(1997), “高爐スラグ微粉末の品質とコンクリートの性質, 月刊生コンクリート”, Vol 16, No. 10, pp. 22~27.
4. Cadwallader, Mark and Dixon, Eric(1998), "Liner materials for waste containment", Pollution Engineering, pp. 70~73.
5. Rowe, R. Kerry (1997), “The design of landfill barrier system: should there be a choice?”, Ground Engineering, pp. 36~39.