

광산폐기물과 폴리머를 이용한 Liner 개발에 관한 연구

진호일* · 민경원** · 연규석*** · 정영욱****

A Study on Development of a Liner Manufactured by Mine Wastes and Polymer

Ho-Il Chin*, Kyoung-Won Min**, Kyu-Seok Yeon*** and Young-Wook Cheong****

ABSTRACT : Development of an effective liner by utilization of the tailings from the Imcheon mine and polymer has been tried. The tailings piled in the Imcheon mine, whose true specific gravity is about 2.86, are composed mainly of quartz, alkali-feldspar, muscovite and pyrite, and mostly (93.7% in volume) coarser than sand grain size (50 μ m). Strength, leaching and permeability tests have been performed on the test specimens of polymer concrete manufactured with various mixing proportions of tailings, unsaturated polyester resins (UPR), calcium carbonates, stone powder sludges and granite soils. Polymer concrete specimens with stone powder sludges or granite soils as fillers and aggregates indicate 2.5 to 3 fold higher flexural and compressive strengths and lower permeabilities than those with calcium carbonates, which shows their usability as a waterproof liner. Also, the polymer concrete liner with stone powder sludge fillers is more advisable in aspects of utilization of waste sludges than that with other fillers.

서 론

우리 나라의 광산산업은 '80년대 중반부터 국제 경쟁력을 상실하기 시작하여 현재에는 많은 석탄 및 금속광산이 휴·폐광되었으며, 그 동안 광산 주변에 무관심하게 방치되어 왔던 광산 폐석과 광미 등은 자연경관의 저해 및 중금속에 의한 토양과 수질오염, 산성광산배수(acid mine drainage; AMD)의 유출 등 여러 가지 많은 환경오염 문제를 야기해 왔다. 특히 광산지역의 광미적치장은 중금속에 의한 환경폐해 뿐만

아니라 침출수로 인한 산성광산배수로 많은 문제점이 발생되고 있다. 일반적으로 광산폐기물 적치장의 복구공사나 신규 조성시에는 침출수의 생성 및 확산 방지를 위한 차수시설 공사가 매우 중요하다고 할 수 있는데, 보편적으로 알려져 있는 차수막 시스템은 자연점토방벽(natural clayey deposits), 다짐점토차수막(compacting clay liner), 단일합성차수막, 다짐점토차수막과 합성차수막을 동시에 이용하는 복합차수막 등이다(오석영, 전효택, 1999). 또한 지금까지는 차수막으로 점토, 벤토나이트, 고화토 등이나 플라스틱, 고무, 아스팔트, 고밀도폴리에틸렌(high density polyethylene; HDPE) 등과 같은 합성수지를 이용하였는데, 점토나 벤토나이트의 경우 구입비가 고가이고, 합성수지는 시설시 손상을 입을 경우 침출수가 쉽게 유출되는 단점을 지니고 있으며, 점토차수막의 경우에도 부분적인 균열과 파손으로 인한 수리전도도의 국부적인 손상이 중요한 문제점으로 제시되고 있다(Keller *et al.*, 1986). 따라서 그 동안 외국의 경우 점토를 매립지의 차수벽으로 이용하기 위한 기준 설정을 위해 많은 연구가 수행된 바 있다(Daniel, 1993; Rowe *et al.*,

* 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터 (Research Center for Advanced Mineral Aggregate Composite Products, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea), E-mail: hichin@hanmail.net

** 강원대학교 지구시스템공학과 (Department of Geosystem Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

*** 강원대학교 농공학과 (Department of Agricultural Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

**** 한국자원연구소 (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Taejon 305-350, Korea)

1995; Czurda, 1993; Clark and Davies, 1996; Murray *et al.*, 1992).

최근 건설분야에 있어서 바닥재 및 접착재, 방식재, 단열재 등의 용도로 많이 이용되고 있는 폴리머 콘크리트는 폴리머와 골재를 복합시킨 것으로 용도에 따라 경화시간 및 가사시간을 제어할 수 있고, 조기에 고강도 발현이 가능하며, 수밀성, 접착성, 내마모성, 내약품성과 동결·융해에 대한 저항성 등이 기존의 시멘트 콘크리트보다 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 광산 주변에 적치되어 있는 광미는 많은 양의 점토질 및 실트질 입자를 포함하고 있어 어느 정도의 차수능력을 가지고 있으며, 이러한 광미에 폴리머를 첨가하여 침출수의 유출을 방지하는 폴리머 차수막이 개발될 경우, 현장에서 원료를 용이하게 제공받을 수 있을 뿐만 아니라, 매립장 조성시 필요한 토사질취의 확보 문제라든가, HDPE 등의 파손에 따른 문제점을 해결할 수 있고, 광산폐기물의 재활용이라는 환경 친화적인 측면에 있어서도 적지 않게 도움이 될 것이다. 이 연구는 광산주변에 적치되어 있는 광미를 골재로 하여 차수성이 양호한 폴리머 차수막의 개발 가능성을 모색하는데 그 목적이 있다.

대상광산 및 시료채취

임천광산(일명 덕명광산)은 행정구역상 충청남도 부여군 장암면 지토리에 위치하는 금·은 광산으로 광산의 형태는 흑운모편마암 및 화강암내의 열극을 충진한 함금은 석영맥 광산으로서 소량의 황철석과 방연석 등을 수반하고 있다(대한광업진흥공사, 1979; 1984). 임천광산은 1916년에 개광된 이후, 1978년 휴광 및 1988년 폐광(광구권 소멸)될 때까지 간헐적 또는 지속적으로 개발되었으며, 금 12,000 kg을 생산한 실적이 있다(대한광업진흥공사, 1979; 1984). 현재 광산 주변에는 과거 광산가동시 이용되었던 선광장과 변전시설, 자재창고 등의 시설물이 방치된 채 남아 있으며, 선광장의 인근 지점을 비롯한 광미적치장에는 주로 푸른색을 띠는 광미가 약 9,240 m²의 면적에 쌓여 있는데, 그 규모는 대략 33,000 m³로 추산되고 있다(민정식 등, 1996).

이 연구를 수행하기 위하여 임천광산 주변에 적치되어 있는 여러 색의 광미중에서 양적으로 더 많은 푸른색의 광미를 주 연구대상으로 하였으며, 구 선광장 주변의 20여 곳에서 각각의 부분시료를 취해 약 40 kg의 복합시료를 채취하였다. 채취한 광미시료는 실내에서

자연 건조한 후, 다시 건조로에서 105±5°C로 건조시켜 냉각한 다음, 밀폐 용기에 보관하여 이용하였다.

광미의 특성

광미에 대한 X선 회절분석(XRD)에 의하면 임천광산의 광미는 주로 석영과 알카리장석, 백운모, 황철석 등으로 구성되어 있고(Fig. 1), SEM/EDS 분석 결과

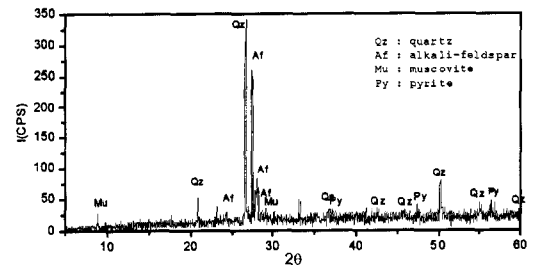


Fig. 1. XRD pattern for the Imcheon tailings.

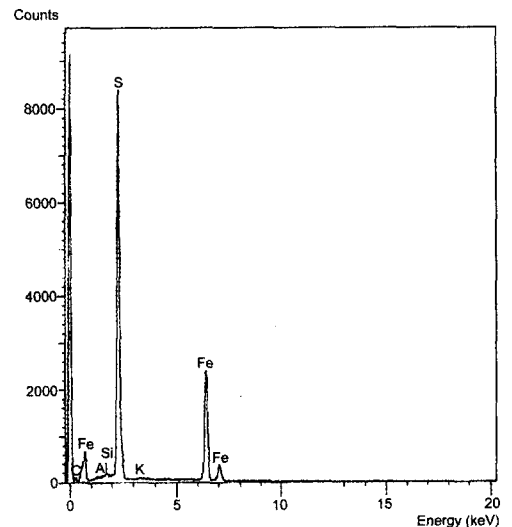
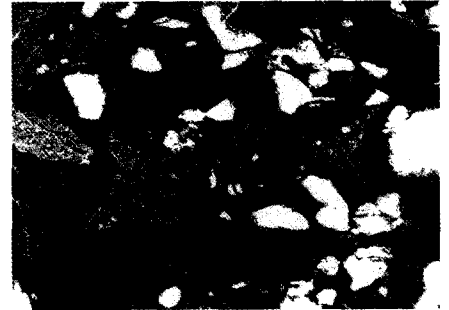


Fig. 2. SEM/EDS (× 500) for the Imcheon tailings.

Table 1. Grain size distribution of the Imcheon tailings.

Grain size distribution (vol.%)		
Clay (<2 μm)	Silt (2~50 μm)	Sand (>50 μm)
6.30		93.7

비교적 둥근 타원형 내지 약간 모가 나고 길쭉한 광물 입자가 개개로 분리되어 있는 모래질의 형태를 보이고 있으며, 주로 황철석의 입자가 잘 관찰된다 (Fig. 2).

광미의 비중은 시료의 특성상 참비중을 2회 측정하였으며, 평균 약 2.86이었다. KS F 2502의 체가름 시험 방법에 따라 수행한 광미의 입도분석 결과, 임천광산의 광미는 실트 (silt) 이하 (<50 μm)의 크기 입자가 전체의 약 6.30 vol.%에 불과하고 대부분 모래 (sand) 이상 (>50 μm)의 크기를 보여 주었다 (Table 1).

사용재료 및 성능시험

사용재료

결합제인 불포화 폴리에스터 수지는 에폭시 수지에 비해 가격이 약 1/2~1/3로 저렴할 뿐만 아니라, 물리적·화학적 특성도 우수하기 때문에 폴리머 콘크리트의 제조에 널리 쓰이고 있다. 이 연구에서 사용된 불포화 폴리에스터 수지 (unsaturated polyester resin; UPR)는 올스타입 (ortho type)으로서 성분은 Table 2와 같다.

일반적으로 불포화 폴리에스터 수지가 경화하기 위해서는 촉진제와 개시제가 첨가되어야 하나, 이 연구에서 사용된 불포화 폴리에스터 수지에는 공장에서 생산될 때, 이미 경화제와 촉진제가 첨가되어 있으므로 개시제만 첨가시키면 경화반응을 일으킬 수 있다. 이

Table 2. Characteristics of unsaturated polyester resin.

Specific gravity (20°C)	Viscosity (20°C, mpa · s)	Acid value	Styrene content (%)
1.12±0.02	412	24	38

Table 4. True specific gravity and grain size distribution of granite soils and stone powder sludges.

Sample No.	True S.G.*	Grain size distribution (vol.%)		
		Clay (<2 μm)	Silt (2~50 μm)	Sand (>50 μm)
Granite soils (GS)	2.59	5.9	29.9	64.2
Stone powder sludges (SPS)	2.61	13.3	59.3	27.4

*specific gravity

Table 3. Specifications of initiator.

Component	Specific gravity (25°C)	Active oxygen (%)
MEKPO 55%	1.12	8% or above
DMP 45%		

Table 5. Specifications of heavy calcium carbonates used in this study.

Average grain size (μm)	Specific gravity (20°C)	Absorption (%)	Water content (%)	pH
13	2.75	0.1	≤ 0.3	8.8

연구에 사용한 개시제의 특성은 Table 3과 같다.

주요 골재로 임천광산에서 채취한 광미를 사용하였으며, 일부 공시체에 대해서는 D 지역에서 산출되는 마사토 (Table 4)를 잔골재로 혼합하여 이용하였다. 또한 충전재는 국내 K사에서 제조한 중질 탄산칼슘 (heavy calcium carbonate; CaCO₃) (Table 5)과 I석산에서 석폐기물로 발생하는 석분슬러지를 사용하였다. 골재 및 충전재는 105±5°C에서 24시간 건조시킨 후 냉각하여 이용하였다.

성능시험

배합비 결정

일반적으로 폴리머 콘크리트는 결합제인 수지의 양이 증가함에 따라 강도가 증가하지만, 수지의 양이 많아질 경우 재료의 분리 및 수축 등이 커질 뿐만 아니라 교반이나 성형 등과 같은 작업성이 현저히 달라지고, 단위체적당 비용이 증가되므로 결합재의 최적량을 결정하기 위해서는 이러한 점들을 충분히 고려하여야 한다. 또한 충전재를 지나치게 사용할 경우 점도가 높아지고 작업성이 나빠지며 경화 후에 압축강도 및 휨강도가 저하되는 문제점을 야기한다 (연규석 등, 1994; 연규석 등, 1999).

광산주변에 적치되어 있는 광미를 골재로 하여 폴리

며 치수막을 개발하기 위해서는 먼저 경제성을 고려하여 치수성이 양호하도록 (보통 투수계수가 10^{-7} cm/sec 이하) 폴리머와 광미의 적절한 배합비를 산출하는 것이 우선되어야 할 것이다. 이를 위해서는 투수시험용 공시체를 제작하여 여러 배합 조건하에서의 투수시험을 통해 기준에 맞는 배합비를 도출하여 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 여러 번의 시행착오적 투수시험을 통해 폐금속광산 배수용 폴리머 치수막으로 적절한 배합비를 도출하기 위해서는 많은 시간과 경비가 소요되므로, 이 연구에서는 몇 가지 배합비로 제작한 공시체를 대상으로 투수율과 어느 정도 상관성을 가지면서 비교적 시험이 간단한 흡수율을 먼저 측정하고 후 폴리머와 골재와의 적정 배합비를 선정하여 투수시험에 이용하였다.

임천광산의 광미에 결합재인 불포화 폴리에스터 수지 (UPR)를 약 8~20 wt.%까지 배합하여 공시체를 제작한 후 흡수율을 측정하고 결과, 수지의 양이 약 8

Table 6. Absorption for polymer concrete specimens with various mixing proportions of polymer and Imcheon tailings.

Specimen No.	Mixing Proportions			Absorption (%)	Remarks
	Resin (UPR*) (wt.%)	Initiator (phr**) (phr)**	Tailings (wt.%)		
IC-A	8	8	92	n.d.***	collapsed during test
IC-B	10	10	90	10.03	
IC-C	12	12	88	3.20	
IC-D	14	14	86	2.05	
IC-E	16	16	84	1.14	
IC-F	20	20	80	0.48	

*UPR : unsaturated polyester resin

**phr : parts per hundred parts of resin

***n.d. : not determined

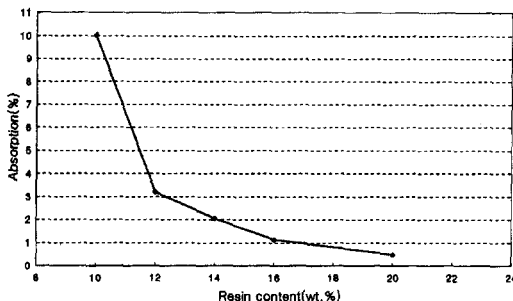


Fig. 3. Variation of absorption for the polymer concrete specimens with resin contents.

wt.%이었을 경우에는 시험 과정중 공시체가 붕괴되어 흡수율 측정이 불가능하였으며, 수지의 양이 증가함에 따라 흡수율이 급격히 감소하는 경향을 잘 나타내었다 (Table 6; Fig. 3). 이와 같은 수지의 함량에 따른 공시체의 흡수율의 변화를 고려할 때, 공시체의 흡수율이 1 이하이며 완만한 변화율을 보이는 약 20 wt.% 정도의 수지 (UPR) 함량으로 배합비를 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

이러한 과정으로 정해진 배합비로 예비 공시체를 성형, 제작한 후 증류수에 공시체를 담근 후 일어나는 변화를 육안으로 관찰하고, 폐기물 공정시험방법의 pH 측정법에 따라 공시체 무게의 2.5배에 해당하는 증류수와 30분 이상 교반후 증류수의 pH를 측정하였다. 그 결과 광미로 제작한 공시체는 증류수에 침수시킨 후, 약 1시간이 경과되기도 전에 철 산화물로 판단되는 황색의 침전물이 생기기 시작하였으며, 공시체와 반응한 증류수의 pH도 3.0 이하의 낮은 값을 나타내었다. 이와 같은 현상이 눈에 띄게 나타나는 것은 광미 자체의 화학적 특성 등 여러 가지 요인에 기인될 수 있으나, 일반적으로 폴리머 콘크리트가 내화화성에 우수하다는 점과 임천광산의 광미가 비교적 조립질로 구성되어 있다는 점 등을 감안할 때, 공시체 배합비 중 충전재의 부족으로 인한 결합력의 약화로 광미의 일부 성분이 용출되었음이 주된 이유로 판단된다.

따라서 국내 K사에서 제조한 중질 탄산칼슘 (CaCO_3)과 석산의 석폐기물인 석분슬러지 및 임천광산의 광미보다 비교적 작은 입자인 D지역의 마사토를 혼합하여 제작한 공시체에 대하여 동일한 방법으로 침전물의 유무와 pH 변화를 조사하였다 (Table 7). 충전물을 첨가한 경우에는 대체로 황색의 침전물이 거의 나타나지 않았고, 특히 충전재로 탄산칼슘을 첨가했을 경우에는 비교적 중성에 가까운 pH를 보여주었다 (Table 7).

위와 같은 예비시험의 결과를 토대로 흡수율과 용출된 침전물의 정도 및 pH 등을 고려하여, 수지 및 충전재중 탄산칼슘의 양을 각각 20 wt.%와 10 wt.%로 고정하고, 폐기물의 재활용 측면에서 석산의 석폐기물인 석분슬러지와 우리나라에 비교적 많이 분포하여 주변에서 쉽게 공급될 수 있는 마사토 등을 충전재로 이용하는 배합비를 설정하여 공시체를 제작하였다 (Table 8). 또한 공시체중 제작시 작업성과 외형의 결합상태 및 흡수율, pH 등을 고려하여, 여러 배합비 중 대표성 있는 최소한의 배합비로 상호 비교할 목적으로

Table 7. Measured pH's of solutions after immersion of polymer concrete specimens with various mixing proportions of Imcheon tailings and fillers in distilled water.

Specimen No.	Mixing Proportions						pH
	UPR* (wt.%)	Initiator (phr**)	Tailings (wt.%)	Fillers (wt.%)			
				CaCO ₃	SPS***	GS****	
ICS-01			68	-	12	-	2.7
ICS-02			56	-	24	-	2.9
ICS-03			68	12	-	-	5.1
ICS-04			56	24	-	-	6.7
ICS-05	20	20	40	-	40	-	3.2
ICS-06			30	-	50	-	3.6
ICS-07			20	-	60	-	3.8
ICS-08			50	10	-	20	6.0
ICS-09			40	10	-	30	6.8

*UPR : unsaturated polyester resin
 **phr : parts per hundred parts of resin
 ***SPS : stone powder sludges
 ****GS : granite soils

Table 8. Absorption of polymer concretes and pH's of solutions after immersion of polymer concrete specimens with various mixing proportions of Imcheon tailings and fillers in distilled water.

Specimen No.	Mixing Proportions						Absorption (%)	pH
	UPR* (wt.%)	Initiator (phr**)	Tailings (wt.%)	Fillers (wt.%)				
				CaCO ₃	SPS***	GS****		
ICM-01			70	10	-	-	0.84	5.5
ICM-02			50	10	20	-	0.20	5.8
ICM-03			40	10	30	-	0.16	6.4
ICM-04	20	20	30	10	40	-	0.29	6.6
ICM-05			50	10	-	20	0.12	6.4
ICM-06			40	10	-	30	0.21	6.6
ICM-07			30	10	-	40	0.37	6.7

*UPR : unsaturated polyester resin
 **phr : parts per hundred parts of resin
 ***SPS : stone powder sludges
 ****GS : granite soils

3종 (ICM-01, ICM-03, ICM-06)의 배합비를 선정하여 강도 측정과 용출 및 투수시험용 시편과 시료를 만들어 시험하였다.

휨강도 및 압축강도 시험

이 연구를 위한 휨강도 시험용 공시체는 KS F 2419 (폴리에스테르 레진 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 준하여 Table 9의 배합비에 따라 사용재료의 함수율을 0.5% 이하로 한 다음 믹서와는 별개의 용기에서 액상 수지에 개시제를 첨가하고 균일하게 혼합한 후, 믹서에 굵은 입자의 골재부터 가는 충전

재의 순서로 넣고 충분히 혼합하여 4×4×16 cm의 공시체 크기로 각각 3개씩 제작하였다.

KS F 2482 (폴리에스테르 레진 콘크리트의 휨강도 시험방법)에 따라 측정된 휨강도는 탄산칼슘만을 충전재로 사용하였을 경우 72.3 kg/cm², 석분슬러지나 마사토를 첨가하였을 경우에는 각각 201.4 kg/cm², 193.4 kg/cm²로, 석분슬러지나 마사토를 첨가한 경우가 탄산칼슘만을 충전재로 사용하였을 경우보다 약 2.5배 이상 휨강도의 증가를 보여 주었다 (Table 10).

압축강도는 KS F 2483 (보의 절편에 의한 폴리레스테르 레진 콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 휨강도 측정 후, 동일 시험편으로 측정하였다 (Table 11).

Table 9. Mixing proportions of polymer concrete specimens for measurement of strengths and permeability.

Specimen No.	UPR* (wt.%)	Initiator (phr**)	Tailing (wt.%)	Filler (wt.%)		
				CaCO ₃	SPS***	GS****
ICM-01	20	20	70	10	-	-
ICM-03	20	20	40	10	30	-
ICM-06	20	20	40	10	-	30

*UPR : unsaturated polyester resin
 **phr : parts per hundred parts of resin
 ***SPS : stone powder sludges
 ****GS : granite soils

Table 10. Flexural strength of some polymer concrete specimens.

Specimen No.	Flexural strength (kg/cm ²)	
ICM-01	72.3	
	n.d.	72.3 ¹⁾
	n.d.	
ICM-03	226.8	201.4 ¹⁾
	169.5	(29.2) ²⁾
	208.0	[14.5] ³⁾
ICM-06	166.5	193.4 ¹⁾
	215.8	(25.0) ²⁾
	197.9	[12.9] ³⁾

¹⁾ mean
²⁾ S.D. : standard deviation
³⁾ C.V. (%) : coefficient of variation [S.D./mean × 100]
 n.d. : not determined

압축강도는 탄산칼슘만을 충전재로 사용하였을 경우 254.8 kg/cm², 석분슬러지와 마사토를 혼합했을 경우에는 각각 749.5 kg/cm², 744.2 kg/cm²로 탄산칼슘만을 충전재로 사용했을 경우보다 약 3배의 압축강도 향상을 나타내었다 (Table 11).

용출시험

일반적으로 용출시험방법은 고상 또는 반고상 폐기물에 대하여 폐기물 관리법에서 규정하고 있는 특정폐

Table 11. Compressive strength of some polymer concrete specimens.

Specimen No.	Compressive strength (kg/cm ²)	
ICM-01	269.7	254.8 ¹⁾
	227.6	(23.6) ²⁾
	267.1	[9.26] ³⁾
ICM-03	650.3	749.5 ¹⁾
	708.9	(124.6) ²⁾
	889.3	[16.6] ³⁾
ICM-06	668.7	744.2 ¹⁾
	760.5	(68.7) ²⁾
	803.3	[9.23] ³⁾

¹⁾ mean
²⁾ S.D. : standard deviation
³⁾ C.V.(%) : coefficient of variation [S.D./mean × 100]

기물의 관정이나 중간처리방법 및 매립방법을 결정하기 위한 시험에 적용된다. 용출시험을 위하여 강도 측정 후 파쇄된 공시체를 -10 mesh (2 mm이하)로 분쇄한 다음 Fe, Al, Mn, As, Cu, Pb, Cd, CN 등의 화학성분을 폐기물 용출시험 방법 (편집부, 1998)에 따라 분석하였다 (Table 12). 분석된 원소중 Cd만이 광미와 폴리머를 혼합하여 만든 공시체에서 폐기물 관리법 시행규칙에 제시된 유해물질 함유 기준값보다 약간 더 높은 값을 보였으며, 나머지 화학성분은 대체로 그 기준값보다 낮은 값을 나타내었다 (Table 12). 또한 대부분의 화학성분은 광미 자체에서보다 폴리머를 혼합한 공시체에서 그 함량이 낮았으나, 예외적으로 Cd은 광미보다 공시체에서 같거나 또는 약간 더 높은 값을 보여 주었는데, 이는 용출시험용 시료제조시 공시체를 -10 mesh (2 mm이하)로 분쇄하는 과정에서 수지 (UPR)와 불충분하게 결합하였던 광미와 마사토 및 석분슬러지 등의 입자로부터 이러한 원소가 더 많이 용출되었기 때문으로 생각되며, 이러한 것은 폴리머 차수막의 투수계수가 1×10⁻⁷ cm/sec 보다 낮을 경우에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

이와 같은 폐기물 용출시험 결과에 의하면, 임천광

Table 12. Results of extraction test for tailings and some polymer concrete specimens (units in mg/l).

Tailings and Specimen No.	As	Cd	Pb	Cu	Fe	Al	Mn	CN
	1.5 ²⁾	0.3 ²⁾	3.0 ²⁾	3.0 ²⁾	-	-	-	1.0 ²⁾
Tailings ¹⁾	0	0.2	24.3	1	n.d.	n.d.	n.d.	0.1
ICM-01	0	0.4	2.1	0.4	0.5	0	2.8	0.06
ICM-03	0	0.2	0.8	0.2	0.4	0	5.4	0.06
ICM-06	0	0.3	1.3	0.2	0.3	0	14.7	0.08

¹⁾ Min et al., 1998
²⁾ standard values for enforcement regulation in the law of waste disposal management n.d. : not determined

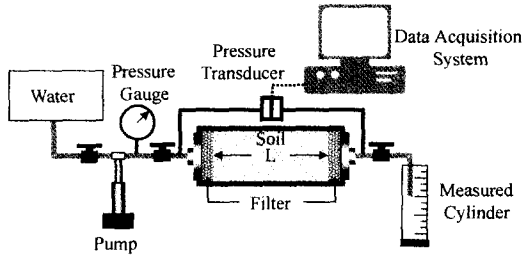


Fig. 4. Apparatus for permeability measurement.

산 광미의 경우 석분슬러지를 혼합하여 제작한 폴리머 공시체 (ICM-03)가 다른 배합비의 공시체들보다 비교적 용출되어 나오는 유해원소의 함량이 적은 경향을 보이는데 (Table 12), 이는 폴리머 차수막의 제조시 석 폐기물인 석분슬러지를 충전재로 이용하는 것이 강도의 향상뿐만 아니라 환경 친화적인 측면에 있어서도 바람직할 것으로 판단된다 (Table 10; 11; 12).

투수시험

투수시험은 직경 2.54 mm, 높이 50.4 mm의 원주형 공시체를 앞에서 선정된 배합비 (Table 9)에 따라 각각 2개씩 제작한 후, Fig. 4와 같은 장치로 한국자원연구소에서 수행하였다.

측정된 투수계수는 임천광산의 광미에 탄산칼슘만을 혼합하여 제조한 공시체 (ICM-01)만이 차수막으로서 사용할 수 있는 기준값 (1×10^{-7} cm/sec 이하)에 부적합한 평균값을 보였으며, 나머지 배합비의 폴리머 공시체에서는 모두 기준값보다 낮은 투수계수 값을 나타내었다 (Table 13).

따라서 충전재로 탄산칼슘만을 사용할 경우에는 광산폐기물인 광미를 좀 더 많이 소비할 수 있다는 장점은 있으나, 휨강도 및 압축강도 시험과 용출 및 투수 시험 결과 등을 고려할 때, 이러한 배합비로는 광미와

Table 13. Coefficients of permeability for some polymer concrete specimens.

Specimen No.	Hydraulic conductivity (cm/sec)
ICM-01	7.96×10^{-7}
	6.09×10^{-8} [4.3 × 10 ⁻⁷]*
ICM-03	1.39×10^{-10}
	1.41×10^{-10} [1.4 × 10 ⁻¹⁰]*
ICM-06	2.14×10^{-10}
	1.58×10^{-9} [9.0 × 10 ⁻¹⁰]*

[]* mean

수지와와의 충분한 결합력을 형성시키지 못해 차수막으로서 부적합한 반면에, 석분슬러지 또는 마사토를 첨가할 경우에는 이들간의 결합력이 향상되어 차수막으로서의 충분한 활용 가능성을 보여 주었다. 또한 임천광산 광미의 경우 석분슬러지를 혼합하여 제작한 폴리머 공시체가 다른 배합비의 공시체들보다 비교적 우수한 성능시험 특성을 나타내어 (Table 10; 11; 12; 13), 폐기물 처리의 환경 친화적인 측면에서도 석폐기물인 석분슬러지를 폴리머 차수막의 제조시 충전재로 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

결론

임천광산 주변에 적치되어 있는 광미를 골재로 하여 차수성이 양호한 폴리머 차수막의 개발 가능성을 모색하고자 하였으며, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 임천광산의 광미는 주로 석영과 알카리장석, 백운모, 황철석 등으로 이루어져 있으며, 참비중은 약 2.86 이고 대부분 (93.7 vol.%)이 모래크기 (50 μm) 보다 큰 입도분포를 나타내었다.
2. 임천광산의 광미를 골재로 한 폴리머 공시체에 대한 흡수율과 용출되는 침전물의 정도 및 pH 등을 고려할 때, 폴리머 차수막을 제조할 경우, 결합재인 불포화 폴리에스터 수지 (UPR) 및 충전재중 탄산칼슘을 각각 20 wt.%, 10 wt.%로 하는 배합비가 적정 배합비로 판단된다.
3. 폴리머 콘크리트 공시체에 대한 휨강도 및 압축강도는 충전재로 석분슬러지나 마사토를 첨가한 경우가 탄산칼슘만을 사용하였을 경우보다 약 2.5 내지 3 배의 증가를 나타내었다.
4. 폴리머 콘크리트 공시체로부터 용출된 Fe, Al, Mn, As, Cu, Pb, Cd, CN 등의 함량은 대체로 폐기물 관리법 시행규칙에 제시된 유해물질 함유 기준값보다 낮은 값을 나타내었고, Cd 이외의 화학성분들은 광미보다 폴리머 콘크리트 공시체에서 용출되는 함량이 현저하게 감소되었다.
5. 임천광산의 광미에 탄산칼슘만을 혼합하여 제조한 공시체만이 차수막으로서 사용할 수 있는 기준값 (1×10^{-7} cm/sec 이하)에 부적합한 투수계수를 나타내었고, 석분슬러지나 마사토를 혼합한 폴리머 공시체에서는 모두 기준값보다 낮은 투수계수를 나타내어, 차수막으로서의 충분한 활용 가능성을 보여 주었다.
6. 광미를 혼합한 폴리머 콘크리트 공시체에 대한 강도시험, 용출 및 투수시험 결과를 고려할 때, 임천광산

광미의 경우 석분슬러지를 혼합하여 제작한 폴리머 공시체가 다른 배합비의 공시체들보다 비교적 우수한 성능시험 특성을 보일 뿐 아니라 폐기물 처리의 환경 친화적인 측면에서도 석폐기물인 석분슬러지를 폴리머 차수막의 제조시 충전재로 이용하는 것이 바람직할 것이다.

사 사

이 연구는 한국자원연구소 위탁연구과제로서 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터의 일부 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 대한광업진흥공사 (1979) 광상시추보고, 제4호.
 대한광업진흥공사 (1984) 광상시추보고, 제7호.
 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남 (1996) 광산지역 광해조사 및 대책 연구. 한국자원연구소, KR-96(C)-41 연구보고서, 374p.
 연규석, 김관호, 이필호, 김동수, 박윤재 (1994) 불포화 폴리에스터 수지를 이용한 고강도 폴리머 콘크리트의 역학적 특성. 한국콘크리트학회지, 6권, p.31-141.
 연규석, 이윤수, 김철영 (1999) 철원산 현무암을 이용한 폴리머 콘크리트의 물리·역학적 특성. 석재연 논문집, 4권, p.245-254.
 오석영, 전효택 (1999) 수도권 주변 점토광물의 점토치수벽 물질로의 유용성 평가. 자원환경지질, 32권, p.151-159.
 편집부 (1998) 수질오염, 폐기물, 토양오염 공정시험방법. 동화기술, 655p.
 Clark, R.G. and Davies, G. (1996) The construction of clay liners for landfills. In Bentley, S.P. (ed.) Engineering geology of waste disposal, Geological Society Engineering Geology Special Publication n.11, p.171-176.
 Czurda, K.A. (1993) The triple multimineral barrier for hazardous waste encapsulation. Eng. Geol., v.34, p.205-209.
 Daniel, D.E. (1993) Clay liners. In Daniel D.E. (ed.) Geotechnical practice for waste disposal, Chapman & Hall, p.137-163.
 Keller, C.K., Van der Kamp, G. and Cherry J.A. (1986) Fracture permeability and groundwater flow in clayey till near Saskatoon, Saskatchewan. Canadian Geotech. J., v.23, p.229-240.
 Murray, E.J., Rix, D.W. and Humphrey, R.D. (1992) Clay linings to landfill site. Quarterly Journal of Engineering Geology, v.25, p.371-376.
 Rowe, R.K., Quigley, R.M. and Booker, J.R. (1995) Clay barrier systems for waste disposal facilities. E & FN SPON, 390p.

2000년 3월 16일 원고접수, 2000년 4월 14일 게재승인.