

재활용을 위한 전로슬래그의 투수성 고찰 (I)

Considerations of Permeability of Converter Slag for Recycling

이 광 찬^{*1}

Lee, Kwang - Chan

이 문 수^{*2}

Lee, Moon - Soo

Abstract

The permeability of converter slag, replacing material of sand mat on improving soft clay foundation, was evaluated in the laboratory. The effects of grain size, flow water time and aging were investigated using sea and fresh water. In the case of converter slag submerged with fresh water, the coefficients of permeability in A and B samples less than 10 mm grain sizes were measured as 6.52×10^{-2} cm per sec and 5.99×10^{-1} cm per sec respectively, while they were 1.88×10^{-2} cm per sec, 3.86×10^{-1} cm per sec respectively under sea water condition. Also, the condition of turbulent flow may exit and was experimentally identified from the relationship between hydraulic gradient and seepage velocity. After 100 days under sea water condition, the coefficients of permeability of A and B samples decreased ten times than initial values. The reduction of permeability coefficient was considered to result from the filling of voids in high-calcium quicklime(CaO).

요 지

연약지반 개량시 사용되고 있는 샌드매트용 모래의 대체 재료로서 이용 가능성 여부를 전로 슬래그를 대상으로 담수와 해수를 사용하여 입경별, 시간 경과별, 에이징 처리 후 투수계수 변화를 실내시험을 통해 파악하였다. 담수 사용시, 10 mm 미만의 입경을 갖는 A시료와 B시료의 투수계수는 각각 6.52×10^{-2} cm/sec, 5.99×10^{-1} cm/sec으로 측정되는 반면에 해수를 사용할 경우에는 각각 1.88×10^{-2} cm/sec, 3.86×10^{-1} cm/sec로 감소하였으며 또한 동수경사와 침투유속의 관계에서 난류흐름이 지배한 것으로 나타났다. 특히, 해수 사용시 100일 동안의 시간경과에 따른 A시료와 B시료의 투수계수는 초기 값보다 1/10배로 감소하는 경향을 보이는데 이는 유리 석회(CaO)에 의한 간극의 막힘 영향으로 확인되었다.

Keywords : Converter slag, Aging effect, Hydraulic gradient, CaO, Coefficient of permeability

*1 정희원, 전남대학교 공기연 특별연구원

*2 정희원, 전남대학교 농과대학 농공학과 교수

1. 서론

일반적으로 골재는 포장공사에 많은 양이 소요되는데 특히 최근 표층뿐만 아니라 보조기층 재료, 구조물 뒤채움 재료로 많이 이용 되어왔다. 그러나 골재의 고갈과 환경보전 강화에 따른 석산개발의 어려움으로 양질의 천연골재를 얻기가 점차 어렵게 되어가고 있는 현실에 즈음하여 90년대에는 슬래그로 대체 되어 가는 과정으로 전환되는 시기라고 할 수 있다. 그러나 전로 슬래그는 일반적으로 염기도가 높고 비중이 큰 철, 망간 등의 유기금속을 함유하고 있기 때문에 여러 슬래그들 중에서 그 자체의 강도가 높다고 할 수 있지만 제조방법에 따라 풍화에 대한 저항성이 크거나 작으며 만약, 팽창된다면 공학적으로 불안정하므로 건설재료로 이용이 제한되어 왔다고 할 수 있다. 그러나 최근 여러 학자들의 연구에 의하면 제강슬래그(일명 전로 slag)는 시멘트와 매우 유사한 물질로서 무해성 물질임이 확인되었고(방봉찬, 1997) 또한 자원으로서 유용성이 입증되어 도로용 골재, 시멘트 원료, 성토용 골재 및 혼화 재료로 널리 사용되고 있으며, 특히 일본을 비롯한 여러 선진국에서도 이를 sand mat 재료까지 확장되어 널리 활용되고 있는 것으로 필자는 인식하고 있다(原田韶二, 1997). 그러나 우리 나라와 같이 좁은 국토에 해안매립과 같은 대규모 연약지반 처리공사가 이루어지면서 개량공사에 사용되는 샌드 매트용 모래의 적절한 공급이 불가피하게 되고 공사진행에 어려움이 있고 이에 즈음하여 대체 재료의 확보는 중요한 관심사라는 이야기를 종종 들어 왔다. 이와 같은 관점에서 전로 슬래그를 연약지반 처리시 복토 겸 sand mat 대체 재료로서의 사용성 가능 여부에 대해 기초연구를 시도한 것이다. 현재까지 연구보고에 의하면 통상 사질토(암석덩어리 또는 파쇄암, 자갈, 입경이 큰 모래질)의 흐름은 Darcy

법칙이 적용되지 않고 난류 흐름이 적용된다고 보고되고 있어(Harr, 1962, Lane, 1964), 슬래그도 이러한 영향을 받을 것으로 보고 세심한 관심을 갖고 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 슬래그가 사용될 지역의 특수성을 고려해 해수와 담수에 사용될 경우의 슬래그의 투수계수 특히 시간경과에 따른 투수계수의 변화에 많은 관심을 갖고 샌드매트 대체 재료로서의 이용 가능성을 실내시험을 통해 파악하고자 한다.

2. 시험재료의 특성

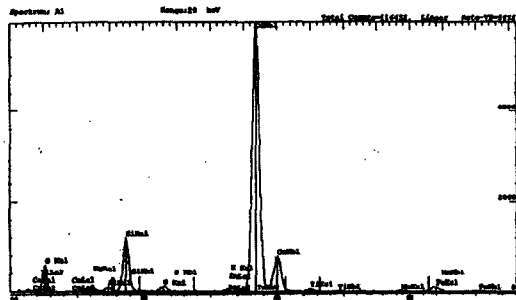
2.1 화학적 및 물리적 성질

전로슬래그의 성분중 석회는 실리케이트(silicate)상, 베스타이트(wüstite)상 등으로 구성되어 있고 일부는 미용해 상태의 Mg, Mn, Fe 등을 포함한 라임(lime)상 (일명 유리석회를 의미)으로 되어 있다. 여러 가지 화학적 구성성분을 파악하기 위해 EDXA 분석(Electron Dispersed X-ray Analysis)을 이용하였으며 분석 결과 Ca, Si는 각각 40.63%, 7.0%이고 에이징 처리 후에는 33.22%, 4.37%로 감소한 것으로 나타내었다. 반면에 해사의 경우 Si는 44.22%로 슬래그에 비해 크게 나타났다. 이를 종합한 화학적 성분 결과는 표 1과 같고 또한, 스펙트럼 파장분석결과는 그림 1에 나타냈는데 x축은 원소별 고유에너지, y축은 강도를 의미한다. 그리고 라임상의 유리석회의 EDXA성분 분석한 결과도 표 2에 나타내고, 이와 관련된 스펙트럼 파장분석결과도 그림 2에 나타낸다. 또한 전술한 표 2에서 담수를 통과한 경우 Si와 Ca는 각각 6.88%, 11.77%이고, 해수 통과시 Si와 Ca이 각각 0.31%, 5.46%로 차이를 보이는데 이들 성분 중 Ca는 물과 반응하여 팽창 가능성이 있다고 보고되어 시간의 경과에 따라 투수성을 감소시키는 원인으로 간주하

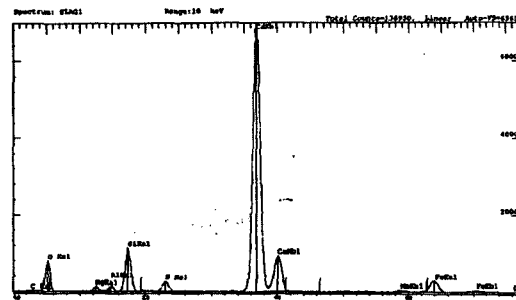
표 1. 전로슬래그의 화학성분조사 결과

(단위 : %)

종류 원소	전로슬래그		일반 해사		에이징후 전로슬래그	
	중량 백분율	원소 백분율	중량 백분율	원소 백분율	중량 백분율	원소 백분율
O	45.79	66.79	43.44	58.20	43.57	55.53
Na	-	-	0.57	0.53	-	-
Mg	0.84	0.8	1.56	1.37	0.78	0.66
Al	0.81	0.7	3.10	2.46	0.67	0.51
Si	7.00	5.82	44.22	33.75	4.37	3.17
S	0.63	0.46	-	-	0.94	0.6
Cl	-	-	1.99	1.21	-	-
K	0.35	0.21	3.17	1.74	-	-
Ca	40.63	23.65	-	-	33.22	16.90
Ti	0.73	0.36	-	-	-	-
Mn	0.35	0.15	-	-	0.43	0.16
Fe	1.91	0.8	1.95	0.75	3.27	1.20
Cu	0.41	0.15	-	-	0.27	0.09
In	0.54	0.11	-	-	-	-



(a) 에이징 처리전 전로슬래그



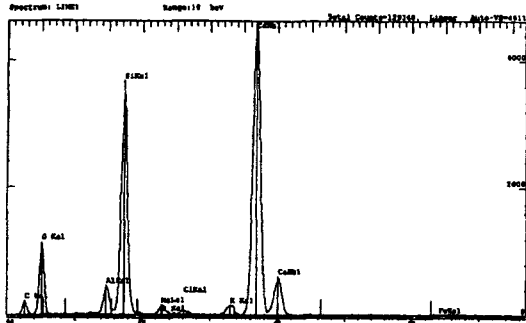
(b) 에이징 처리후 전로슬래그

그림 1. 전로슬래그 정성적 스펙트럼 분석

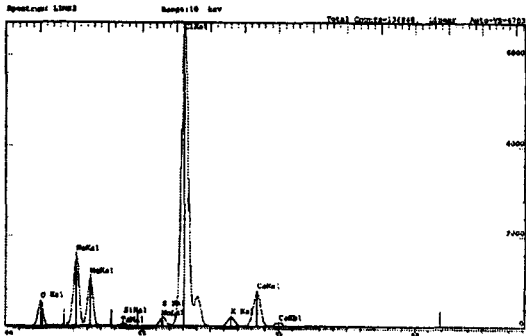
표 2. 전로슬래그 리임상의 화학성분조사 결과

(단위 : %)

종류 원소	담수사용시		해수사용시	
	중량 백분율	원소 백분율	중량 백분율	원소 백분율
O	33.16	31.87	30.08	45.16
Na	-	-	15.66	16.36
Mg	-	-	8.79	8.68
Al	1.09	0.62	-	-
Si	6.88	3.77	0.31	0.27
S	0.23	0.11	0.68	0.51
Cl	0.14	0.06	36.33	24.61
K	0.37	0.15	1.51	0.93
Ca	11.77	4.52	5.46	3.27
Ti	-	-	-	-
Mn	-	-	-	-
Fe	0.14	0.04	-	-
Cu	0.15	0.04	-	-
In	-	-	-	-



(a) 담수사용시



(b) 해수사용시

그림 2. 전로슬래그 라임상의 정성적 스펙트럼 분석

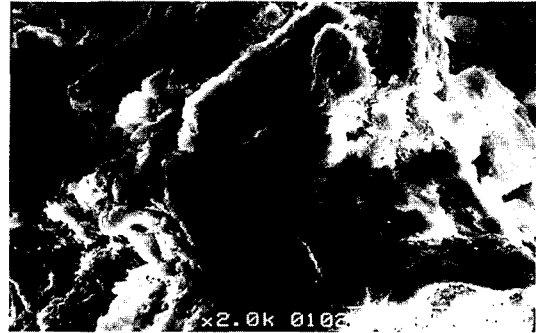
여 시험도중 많은 관심을 가져야할 인자로 판단하였다. 왜냐하면 해사에는 Ca가 전혀 검출되지 않기 때문이다.

그림 3은 슬래그의 입상구조를 확인하기 위해 입경 0.16 mm의 슬래그를 전자현미경을 이용하여 50배, 2000배 확대 촬영한 것이다. 그림을 상세히 살펴보면 슬래그의 겉표면은 다공판 모양의 단립구조의 형태를 띄며 대체로 각진 구형에 가깝다. 직경이 50 μm부터 0.072 μm까지 분쇄 과정에 따라 여러 층으로 분류되어지고 배열은 다소 차이를 보이지만 봉소구조의 형태를 보인 것 같다. 특히, 현미경 사진을 통해 보면 입자 사이에 철성분을 포함한 금속 성분이 많이 잔존하고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 4(a)는 전로 슬래그가 흡수성, 보습성을



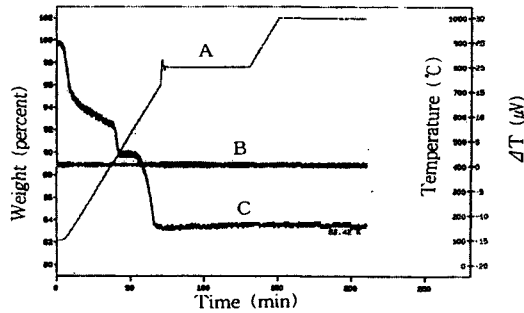
(a) 50배 확대



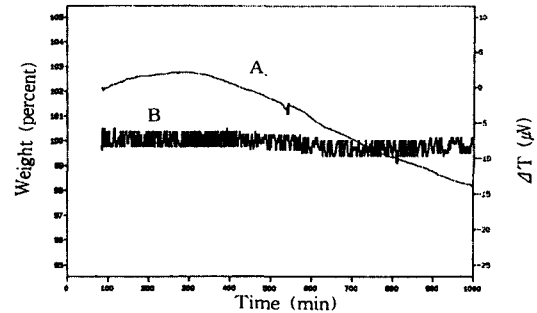
(b) 2000배 확대

그림 3. 0.16 mm 전로 슬래그 입자의 전자 현미경 사진

지닌 재료로 보고되어 있어 고열에 의한 감열감량이 어느 정도인가를 조사한 결과이며 그림 4(b)는 해사의 시험결과이다. 그림에서 slag는 강열감량이 16.27~17.43%를 나타내고 해사의 경우는 1%미만의 값을 보였으며 그림내의 A는 온도상승과정이고 B는 흡열, 발열과정을 C는 강열로 인한 감소량을 의미한다. 입경이 10 mm 미만인 슬래그의 물리적 성질은 표 3에 나타내었다. 그리고 입경을 선별하여 시험에 사용될 슬래그의 종류는 표 4와 같으며 투수성에 영향을 주는 #200체 통과량 유무와 제안된 샌드매트의 시방규정에 의거하여 입경별 A시료와 B시료로 구분, 선별하여 시험에 이용하였다. 이 시료는 제조과정에서 수냉식으로 처리된 후 공기 중에 3개월 이상 현장에서 방치하였다.



(a) 전로슬래그(6.27~17.43%)



(b) 해사(1%미만)

그림 4. 강열감량 시험 결과

표 3. 전로슬래그의 물리적 성질

구분	종류		비 중		함수비 (%)		#200통과량(%)	PI(%)	수침팽창비(%)
	5~10 mm	0~5 mm	5~13 mm	0~5 mm					
	3.20	3.25	2.61	3.69	3~7	NP	4.5		

표 4. 시험에 사용된 슬래그 종류

시험항목		종 류	A시료	B시료
통 과 백 분 율 (%)	9.60 mm		99	96
	6.30 mm		94	82
	4.75 mm		91	65
	2.36 mm		65	33
	425 μm		30	2
	75 μm		7	0
함수비(%)			3	2.3
건조단위중량(t/m³)			1.92	1.91
팽창비(%)			4.5	3.2
간극비			0.72	0.72

2.2 국내외 Sand Mat 시방규정

현재까지 국내외에서 연약지반 처리시 사용되고 시방화된 샌드매트의 입경별 범위를 표 5에 나타내었다. 이 표에서 특히, #200체 통과량이 중요한자로 평가된다. 또한 전로 슬래그, 해사 그리고 육사(land sand)의 입도시험 결과와 슬래그 A, B시료의 입도시험 결과와 기제안된 JIS과 ASTM의 규정과 함께 그림 5에 나타내었다. 입도시험에 사용되는 전로 슬래그는 200번체 통과

율이 2~7%이고 유효입경 D_{10} 은 0.1~0.15 mm 이고 그리고 D_{60} 은 1.5~2 mm이며 균등계수 평균값 C_u 는 14, 곡률계수 C_g 는 0.8~1.0의 값을 갖는다. 그림을 상세히 살펴보면 ①과 ②는 ASTM의 시방규정으로 ①은 샌드매트의 상한선이고 ②는 하한선의 입도곡선으로 규정되어 있는데 슬래그 B와 에이징 처리한 B시료의 입도곡선과 좋은 대응성을 보이며 ③과 ④는 JIS의 규정으로서 ③은 역시 상한선이고 ④는 하한선으로서 슬래그 A와 에이징 처리한 A시료와도 역

표 5. 시방화된 국내외 샌드매트의 입경범위

미도로국		일본토목학회		한국도로공사	
입 경	통과백분율(%)	입 경	통과백분율(%)	입 경	통과백분율(%)
3/8"(9.5mm)	80~100	No.4(4.75mm)	100	No.4(4.75mm)	100
No.8(2.36mm)	5~50	No.8(2.36mm)	98	No.8(2.36mm)	75~100
No.30(0.6mm)	0~20	No.16(1.2mm)	95	No.16(1.2mm)	40~85
No.50(0.3mm)	0~5	No.50(0.3mm)	56	No.50(0.3mm)	2~30
No.200(0.074mm)	5~10	No.100(0.15mm)	30	No.100(0.15mm)	0~7
		No.200(0.074mm)	5미만	No.200(0.074mm)	3미만

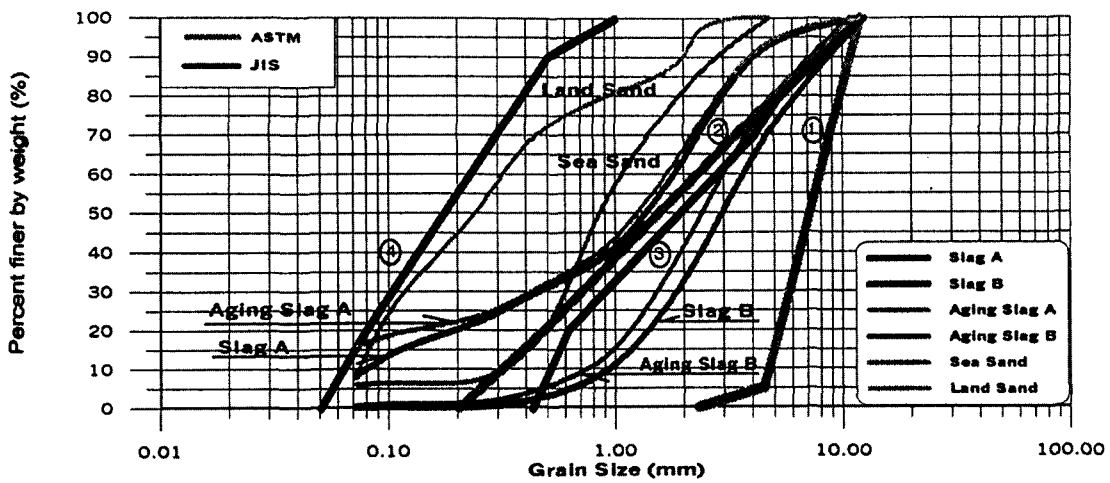


그림 5. 전로슬래그, 해사, 육사, 샌드매트의 입도곡선

시 좋은 대응성을 보이고 있으며 해사(sea sand)와 육사(land sand)도 이 범위에 들고 있어 입도 시험 결과만으로 판단할 때 슬래그 입경 제한이 이루어진다면 양호한 투수계수가 측정될 수 있을 것으로 판단된다.

3. 시 험

슬래그 입경을 최대 10 mm로 제한하고 투수용 공시체는 직경 150 mm, 높이 170 mm가 적정할 것으로 판단되어 CBR 몰드를 시험용 공시체로 준비하였다. 또한 측벽을 타고 흐르는 물의 흐름을 방지하기 위하여 수 많은 시행착오를 거친 후 황토(투수계수가 1.0×10^{-7} cm/sec 이하)

를 이용하여 몰드내 2 cm 두께의 측벽을 형성해 가면서 시험용 시료를 준비하였다. 또한 공시체의 포화는 상향 또는 하향 침투를 번갈아 반복 실시한 후 메스실린더로 1000 cc가 유출구로 나올 때 포화된 것으로 보고 시험을 실시하였다. 이러한 과정은 차후 미립분에 의한 필터의 막힘 현상 방지, 동수경사의 미세조정, 시간이 경과함에 따라 슬래그 입자사이에 기포가 발생되어 투수계수가 감소하는 것을 방지하는데도 효과가 있을 것으로 판단하였다. 특히, 동수경사의 변화를 조정하기 위해 높이 400 mm, 직경 150 mm인 ELE 표준 투수시험기도 사용되었다. 이와 같이 투수길이를 크게 한 이유는 통상 자갈 크기의 입경을 갖는 입자를 난류상태의 흐름이라고 보

표 6. 기존 경험식으로부터 투수계수 추정

제안자	적용 토질	경험식	계산치
Terzaghi	하천 모래	$k = \frac{C_T}{\mu} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2$	$C_T = 10, n = 42(\%)$ $d_{10} = 0.01, k = 10.706 \text{ cm/s}$
NAVFAC	모래 및 모래섞인 자갈	유효입경 D_{10} , Cu 이용	$k = 1.28 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$
Creager	사질토	입경 D_{20} 이용	$k = 1.4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

고되어 있어 이 흐름의 한계 입경을 찾기 위해 A시료의 슬래그를 입경에 따라 No.1 시료는 12.7mm~9.5mm, No.2 시료는 9.5mm~6.7mm, No.3 시료는 6.7mm~4.8mm, No.4 시료는 4.8mm~4.0mm, No.5 시료는 4.0mm~2.3mm, No.6 시료는 2.4mm~0.8mm, No.7 시료는 0.8mm~0.42mm, 7단계로 분류하여 투수시험을 반복 실시하였다. 현재까지 연구 보고에 의하면 통상 사질토(암석덩어리, 자갈, 입경이 큰 모래질)의 흐름은 Darcy법칙이 적용되지 않고(즉 층류에 한정) 난류 흐름이 적용된다고 보고되어 있어, 특별한 관심을 갖고 시험을 실시하였다. 또한 해수를 사용한 투수시험 결과와 담수(하천수 또는 빗물)를 사용해서 얻은 결과를 상호 비교하였으며, 6개월 후의 투수계수를 예측하기 위해 에이징 과정(항온수조에서 80℃에서 4일간 증기로서 수화반응을 촉진)후 같은 시험을 반복하여 투수계수를 결정하였고 이 때의 투수계수를 15℃로 보정하고 본문 중 K_{15} 로 기술하였다.

4. 결과 분석 및 고찰

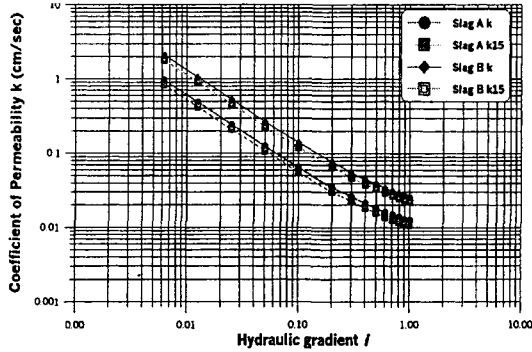
4.1 경험식에 의한 고찰

입경으로 부터 투수계수를 구하는 방법은 입경이 비교적 균질한 사질토에 대하여 사용하고 있는데 체분석을 통해 구한 입경을 중심으로 시험 전에 투수계수를 예측하기 위해서 각종 경험식과 비교해 보았다. 일반적으로 사질토는 크고 작은 입경의 입자로 구성되어 있고, 또 다짐도

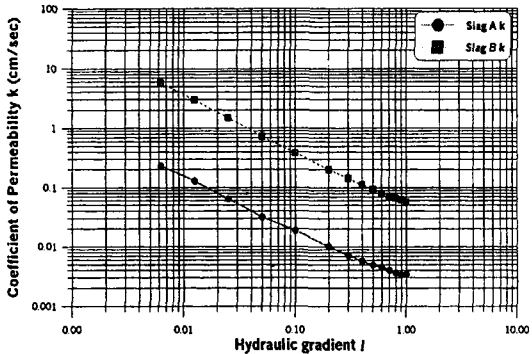
(간극비)도 다르기 때문에 입경으로 구해진 투수계수는 개략적인 값을 나타낸다. 표 6은 토립자의 입경, 간극의 크기와 관련있는 문헌상의 제안 공식과 시험실에서 구한 입도결과를 이에 적용하여 구한 투수계수 값을 나타낸 것이다. 표 6을 살펴보면 Terzaghi식(일본토질공학핸드북, 1963, 하천모래)를 제외한 NAVFAC(1982, DM-7.1, 모래 또는 모래섞인 자갈), Creager(일본토질공학핸드북, 1965, 일반 사질토)의 경험식에 의한 투수계수는 각각 $1.28 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$, $1.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 값을 나타냈다. 후술하겠지만 결과적으로 기존 경험식은 제한된 입도와 간극비를 중심으로 한 값이기는 하나 재료의 특성이 상이한 전로 슬래그의 개략적인 투수계수를 결정하는데도 적용 가능할 것으로 보고 있지만 특히 한편으로 입도 결과만을 고려하지 않고 재료의 특성만을 고려할 때는 다소 무리가 있을 것으로 본다.

4.2 담수, 해수 사용시 투수성 변화

그림 6은 슬래그의 균등계수(C_u)가 14이고 #200체 통과백분율이 7%(A시료)인 전로슬래그와 균등계수가 4이고 #200체를 통과백분율이 0%(B시료)인 시료에 대해 담수와 해수를 사용하여 얻은 투수계수 변화를 나타낸 것이다. 담수사용시 동수경사가 0.1일 때 A시료의 투수계수는 각각 $4.50 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$, $5.99 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 의 값을 보이는 반면에 해수 사용시 A시료의 투수계수는 $2.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$, B시료는 $3.9 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$ 으로 나타나 통상의 중립질 모래의 투수성을 나타냈다. 그



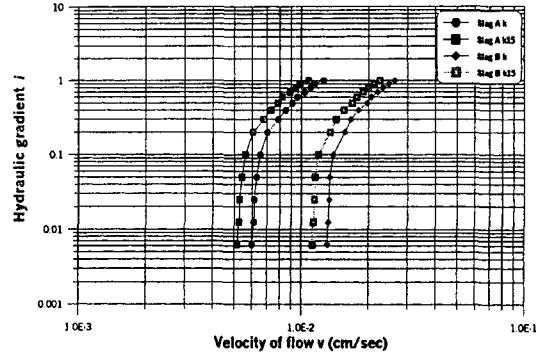
(a) 담수 사용시



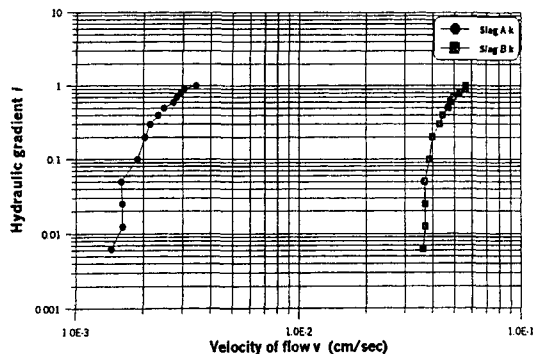
(b) 해수 사용시

그림 6. 투수계수와 동수경사의 관계

리고 동수경사(i)가 증가함에 따라 투수계수는 감소하며 특히 A시료는 담수보다 해수 사용시 다소 감소하는 경향을 보이지만 B시료는 A시료와는 반대 결과를 나타내고 있는데 #200체 통과량이 물의 흐름을 방해한 것으로 추정되며 목하 연구 중에 있다. 그림 7은 담수(a)와 해수(b)를 사용할 때 동수경사와 유속과의 관계를 나타내는 것인데 동수경사(i)가 0.1~0.2의 범위에서 굴곡되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 물에 작용되는 관성력과 점성력의 차이에 따라 천이영역에서 난류영역으로 바뀌는 경사로 지금까지의 시험결과에서 확인되고 있다. 그림 8은 그림 6과 7의 결과를 동수경사와 유속의 관계를 종합하여 나타낸 것이다. 그림내의 일반 중립질 모래에서



(a) 담수 사용시



(b) 해수 사용시

그림 7. 동수경사와 유속의 관계

의 흐름거동과 같이 직선으로 나타나지 않고 동수경사 0.2이상에서 유속 $v = k' i^{1/n}$ 의 관계가 성립되며 여기서 k' 는 흐름에 관계된 형상계수이다. 그리고 이를 양변에 log를 취하여 정리하면 $\log(i) = n \{ \log(v) - \log k' \}$ 의 관계가 성립된다. 그림에서 담수를 사용한 경우 슬래그 A와 B에서 n 은 각각 2.58, 2.32이고 해수를 사용한 경우는 2.96, 2.93이고 $1/n$ 의 값은 0.33~0.43의 범위를 갖는다. 이는 Anandakishnan, M and Varadajulu, G. H(1963)의 중립질 모래, 자갈이나 쇄석 등의 연구결과에 의하면 n 값이 1보다 크면 난류흐름이 지배된다는 보고와 일치하므로 슬래그 내의 유체흐름도 천이영역을 지나 난류상태의 흐름이 지배하지 않는가 추정된다.

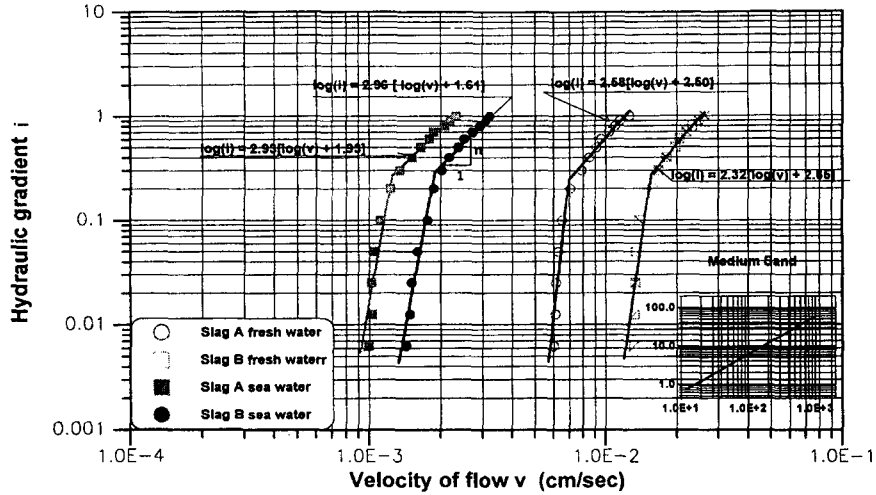


그림 8. 그림 6, 7의 결과를 모래와 비교

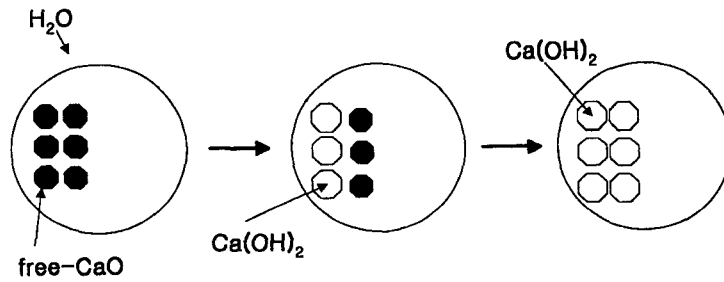


그림 9. Free CaO의 에이징 과정

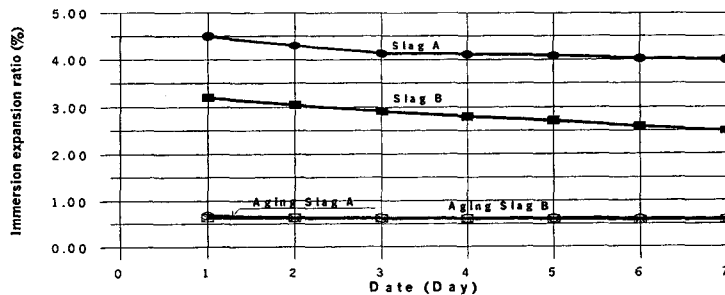
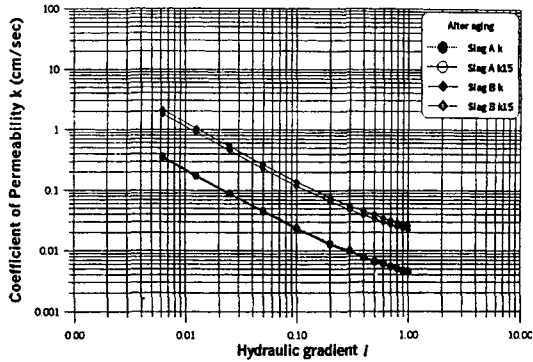


그림 10. 전로슬래그의 팽창안정성 시험결과

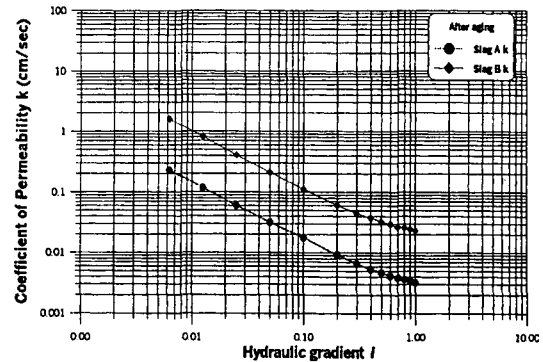
4.3 에이징 처리 후 투수성의 고찰

슬래그의 CaO 는 $2CaOFe_2O_3$, $2CaOSiO_2$, $2CaOAl_2O_3$, $3CaOP_2O_5$, 유리 CaO , 용출된 CaO 의 형태로 슬래그 내에 존재한다. 이중 수화반응에 의한 팽창붕괴를 발생하는 유리석회는 0.1~2%정

도 포함되어 있다. 또한 슬래그 표면의 유리석회는 물(H_2O)과 반응하여 전로 슬래그 입자에 미세 균열을 발생시키고 미세 균열을 통해 물이 침투하여 재차 $Ca(OH)_2$ 로 되는데 그 분화되는 과정을 그림 9에 나타내었다. 참고로 그림 10은 전로 슬래그가 투수시험도중 팽창성 여부를 확인



(a) 담수 사용시



(b) 해수 사용시

그림 11. 에이징 처리 후 투수계수와 동수경사의 관계

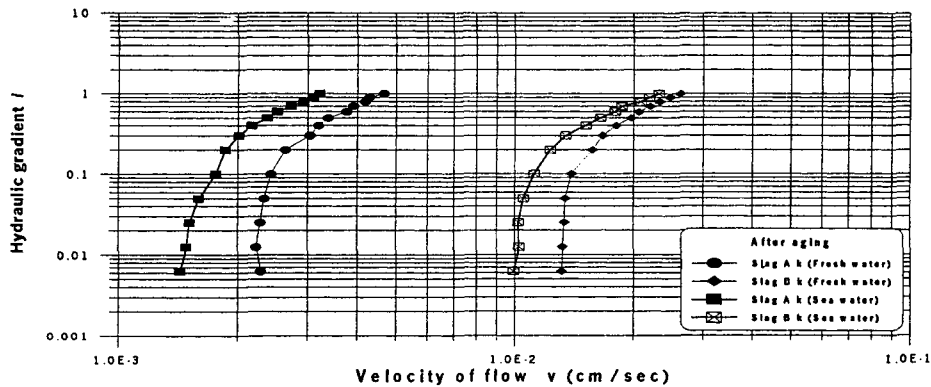


그림 12. 에이징 처리 후 유속과 동수경사의 관계

하기 위해 시험결과인데 자연상태(즉 A, B시료)에서는 3%이후에도 약간 팽창성이 감소한 것을 확인할 수 있으나 에이징 처리를 실시하면 1%이후에 안정상태임을 알 수 있다. 그림 11(a), (b)은 에이징 처리 후 담수와 해수 사용시의 투수계수와 동수경사의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 담수 사용할 때 $i=0.1$ 에서 A시료의 투수계수 K_{15} 는 $2.42 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 며 B시료의 경우는 $1.39 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 감소하였으며 해수 사용시도 A시료는 $1.76 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$, B시료는 $1.12 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 변화하였다. 그리고 그림 12는 에이징 처리 후 담수와 해수 사용시의 유속과 동수경사의 관계를 나타낸 것인데 동수경사에 따라 유속이 증가하는 경향을 엿볼 수 있다. 이는 에이징 처

리 후 흐름을 방해하는 유리칼슘이 물과 반응할 때 수산화 칼슘으로 반응이 촉진되어 나타난 것으로 판단된다.

4.4 일반 육사와 해사 그리고 Slag 투수성의 비교

그림 13은 육사와 해사의 투수성을 상호 비교한 것이다. 해사의 경우, 담수와 해수에 대하여 차이가 나타나지 않으며 동수경사 0.1일 때 투수계수는 $2.43 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 의 값을 가지고 반면에 육사의 경우에는 다소 차이를 나타냈다. 육사의 경우를 해수 사용시, A시료의 투수계수와 비교할 때 동일한 값을 보이고 다만, B시료와는 차이

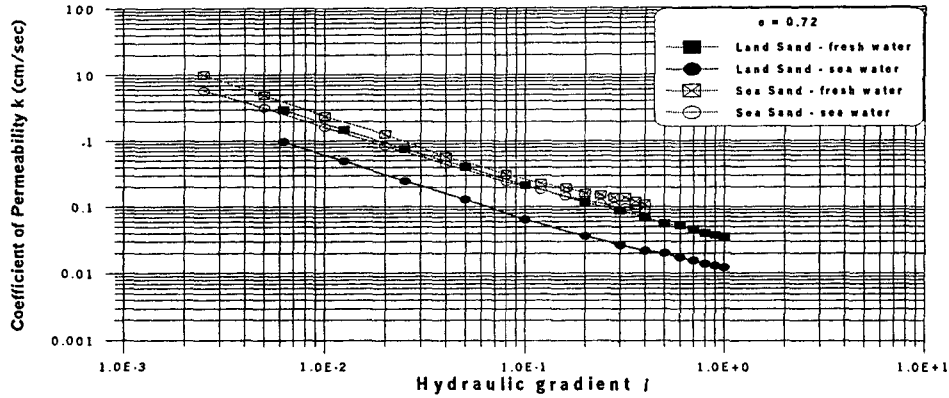


그림 13. 육사와 해사의 투수성 비교

표 7. 해사, 육사 그리고 전로슬래그의 투수계수 비교

(단위 : cm/sec)

재료	용도별	해수 사용시		담수 사용시	
		자연상태	에이징 처리후	자연상태	에이징 처리후
전로슬래그 A		1.88×10^{-2}	1.76×10^{-2}	6.52×10^{-2}	2.42×10^{-2}
전로슬래그 B		3.86×10^{-1}	1.12×10^{-1}	5.99×10^{-1}	1.39×10^{-1}
육사		6.48×10^{-2}	-	2.40×10^{-1}	-
해사		2.3×10^{-1}	-	2.43×10^{-1}	-

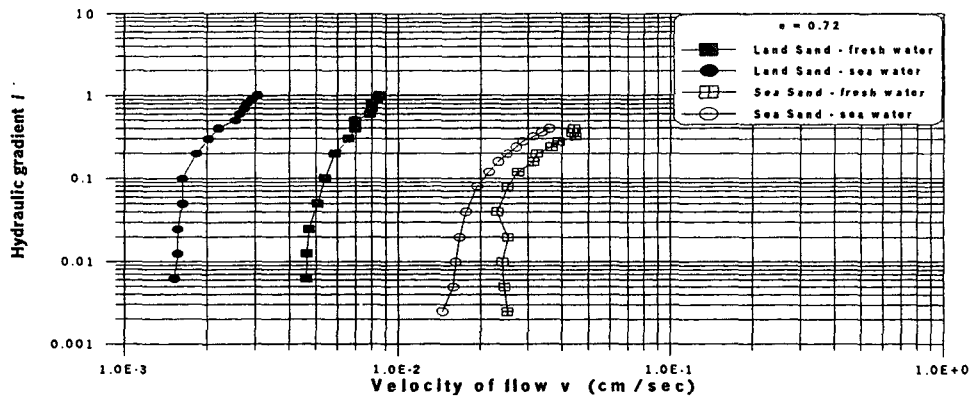
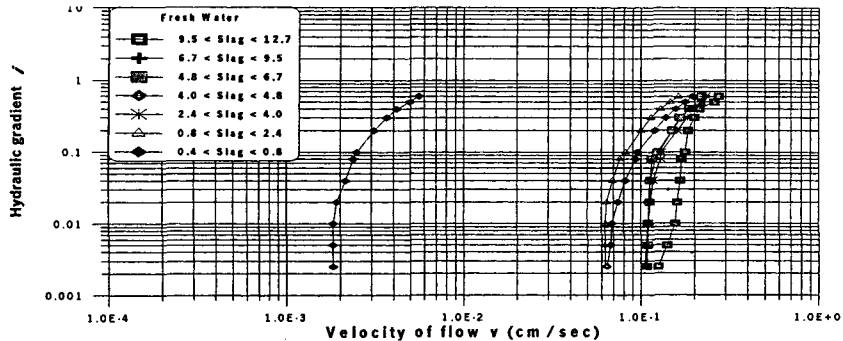


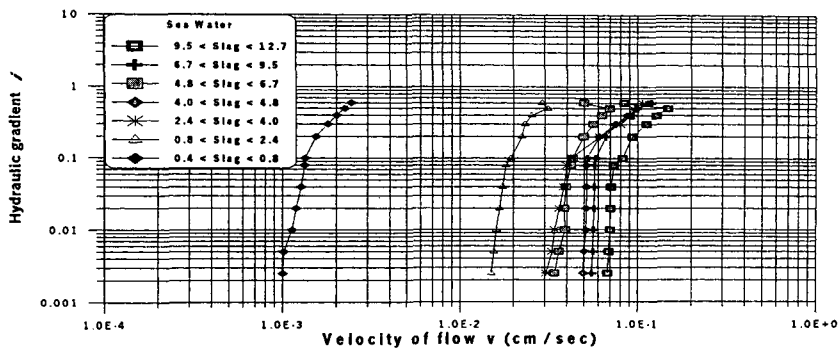
그림 14. 육사와 해사의 유속과 동수경사의 관계

를 나타낸다. 그러나 입도를 제한한 B시료의 투수계수는 해사의 투수계수와 유사함을 보였다(표 7). 그림 14는 육사와 해사의 유속과 동수경사의 관계를 상호 비교한 것이고 표 7은 해사와 육사 그리고 전로슬래그의 동수경사가 0.1에 대한 투수계수의 시험결과를 요약한 것이다. 전로

슬래그는 담수를 사용할 경우가 해수를 사용할 경우보다 투수성이 양호하고 자연상태에 존재한 경우의 시료는 수화반응이 촉진되어 에이징 처리 후에는 투수성에서 큰 차이를 나타내지 않았다. 그리고 입도를 제한한 B시료가 A시료보다 투수성이 크게 나타났으며 육사보다 입경이 큰



(a) 담수 사용시



(b) 해수 사용시

그림 15. 담수, 해수 사용시 동수경사와 유속의 관계(a, b)

해사가 해수 사용시 상대적으로 투수성이 좋았다. 특히 B시료는 해사의 그것과 유사한 투수성을 보였다.

4.5 동수경사와 유속의 관계

그림 15(a), (b)는 담수와 해수 사용시 입경별 동수경사와 유속과의 관계를 나타낸 것인데 투수시험시 동수경사(수두차 h)를 작은 값부터 변화시켜 얻은 결과이다. 입경별 시험결과를 유심히 관찰해 보면 i 가 0.1을 전후로 굴곡되는 점을 확인할 수 있다. 이 굴절점보다 작은 경사의 범위에서는 직선 경사가 이론적으로 1이 되어야 하나 12 이상의 값을 나타내며 슬래그의 투수시험시 동수경사가 변함에 따라 유속은 크게 변화하지 않음을 알 수 있으며 동수경사가 작은 부분에

서는 i 가 0.1에 가까울 때까지 마찰저항이 크게 발생하는 것으로 생각된다. 특히 전로 슬래그의 공극 자체는 매우 작고 서로 불규칙하게 연결되어 있으며 보습성이 다소 있으므로(즉 CaO 때문) 일정시간 동안 흐르지 않고(그림에서 ◆는 예외) 일정 수두차가 형성되면 동수경사와 유속의 관계에서 비례관계가 성립된 것 같다. 따라서 대부분의 슬래그내의 물의 흐름은 전술한 그림 15의 경우에서처럼 i 가 0.1이하인 범위에 있어 흐름은 층류에서 난류로 바뀌는 천이 영역으로 추정되며 동수경사 i 가 미세하게 변화하는 부분에서는 Darcy의 법칙이 성립될 것으로 추정했지만 절곡점(즉 $i > 0.1$)보다 큰 경사의 범위에서는 직선 경사가 1보다 크므로 슬래그 속의 물의 흐름은 난류상태가 되어 이미 Darcy 법칙은 성립되지 않는다는 것을 시사하고 있는 것으로

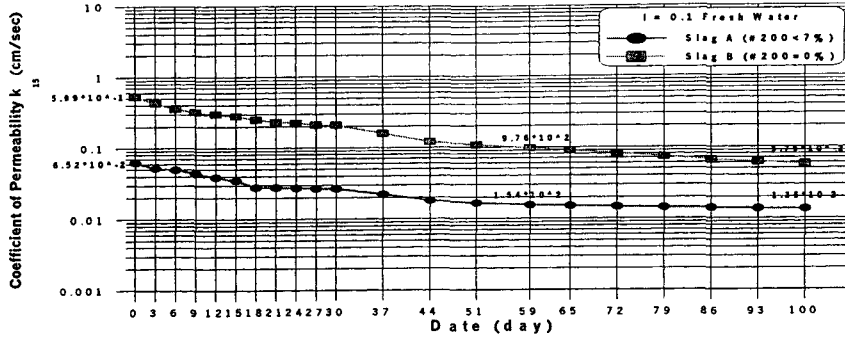


그림 16. 담수 사용시 시간 경과에 따른 투수계수의 변화

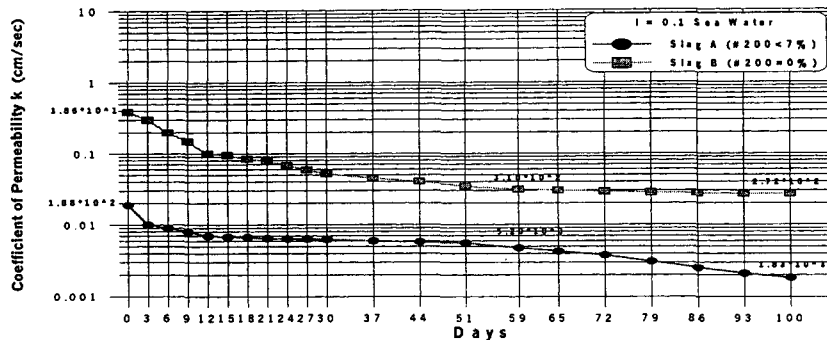


그림 17. 해수 사용시 시간 경과에 따른 투수계수의 변화

이해된다. 다만 곡선의 경사가 변화하는 점의 동수경사를 굴곡동수경사 i_c 라 하면, i_c 의 값은 10^{-1} 이 되고, 입경별 시료의 값이 변화하는 동시에 흐름도 난류상태로 바뀌는 것으로 추정할 수 있다. 즉 전로 슬래그의 흐름은 작은 동수경사에 있어 층류에서 난류영역으로 이동하기 때문에 층류와 난류 양면에서 고찰해 갈 필요가 있다고 생각한다. 해수를 이용한 시험에서도 담수에서처럼 한계동수경사는 10^{-1} 의 값을 보이지만 유속은 담수에 비해 작은 값을 보이고 있다. 추후 시험 결과가 축적되면 이러한 변화 의미가 정도 높게 판단될 것으로 생각된다.

4.6 시간경과에 따른 투수성 변화

담수와 해수를 이용하고 A시료와 B시료를 일정한 시간 간격으로 시험한 결과를 각각 그림 16

과 그림 17에 나타낸다. 시험개시 후 시간이 경과(100일 까지)되면서 투수계수의 감소하는 경향이 둔화되고 그 후 일정하게 수렴해 가는 경향을 볼 수 있다. 특히, 담수 사용시 A시료는 k 값이 $1/10$ (즉 $6.52 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 에서 $1.35 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로 감소)로 감소하고 B시료는 그 보다 작은 변화를 보이는 반면에 해수 사용시 A시료 투수계수 (k)값이 $1/10$ (즉 $1.88 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 에서 $1.83 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$)로 감소하고 B시료도 $3.86 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 에서 $2.72 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로 감소하는 경향이 확인되고 있다. 이와 같이 #200체 통과량의 유무와 시간경과에 따라 변화하는 원인은 다음과 같이 유추할 수 있다.

1) 침투압(수압)에 의하여 세립분(free CaO)이 하부로 이동하여 집적되거나 2) 관성의 법칙과 점성력의 차이, 즉 전로 슬래그의 간극에는 굴곡된 부분이 많고 상당히 복잡하기 때문에 유로도

복잡할 것으로 보며, 3) 장시간 투수시험을 행하면 기포가 투수시료에 축적되어 투수단면이 감소되거나 불포화 상태로 존재할 가능성이 있고, 4) 현탁수나 세립분이 유출될 때 투수성이 역으로 증대하는 경향이 있을 수 있다. 즉 1)의 경우는 위에서 설명한 A시료와 B시료의 차이에서 확인되며 또한 시험종료 후 공시체 내의 다공판에 CaO가 집적되었으며 2)의 경우 굴곡부에 있어서 관성력은 직진하려고 하기 때문에 부분적으로 관성력과 점성력의 균형이 깨져 난류상태 흐름(즉 $i = 0.1$ 에서 0.2 로 전환)이 발생할 것으로 판단된다. 또한, 슬래그 내의 흐름은 관속의 흐름에 비해서 작은 동수경사에 의해 난류흐름이 지배되고 그리고 유속의 차이가 발생된다는 사실을 시험 결과에서 확인되고 있다. 그리고 3)과 4)와 같은 원인들도 관여할 가능성도 있을 것으로 추론해 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 전로슬래그를 대상으로 해수와 담수를 사용하여 실내시험을 실시하고 이에 따른 투수계수와 시간 경과에 따른 투수계수의 변화를 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 담수 사용시, 10 mm미만 입경에 대해 투수시험한 결과 No.200체 통과량이 7%(A시료)인 슬래그의 동수경사 $i=0.1$ 에서 투수계수(k_{15})는 $4.50 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이고 No.200체 통과량이 0%(B시료)인 슬래그의 투수계수(k_{15})는 $1.20 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 측정되었다. 또한, 해수 사용시 10 mm미만 입경에 대해 투수 시험한 결과 A시료의 투수계수(k_{15})는 $1.88 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이고 반면에 B시료의 투수계수(k_{15})는 $3.86 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 측정되었으며 현재 샌드 매트용으로 사용되는 해사의 투수계수는 $2.3 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 측정되어 해사의 그것과 유사한 값을

보였다.

- 2) 해수 사용시 침투유속과 동수경사의 관계에서 층류에서 난류로 변하는 사실이 확인되었는데 10 mm미만의 입경에서는 동수경사가 $0.1 \sim 0.2$ 에서 난류흐름으로 전환되는 경향을 보였다.
- 3) 해수를 사용하여 100일 동안의 시간경과에 따른 투수계수의 변화를 검토한 결과, A시료의 투수계수는 $1.88 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 에서 $1.83 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 감소한 반면에 B시료의 투수계수는 $3.86 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 에서 $2.72 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로 감소한 것으로 나타나는데 이는 유리석회(CaO)에 의한 간극의 막힘 영향으로 판단되었다.
- 4) 이상의 결과를 종합해 볼 때 슬래그의 투수계수는 해수 및 담수에 따라 다소 차이를 보이므로 만약 현장에서 샌드매트의 대체 재료로 사용될 경우 투수계수에 영향을 주는 No. 200체 통과량을 제한하거나 입도 제한을 위한 공장의 생산과정을 변경하거나 그리고 시공 현장에서 예상되는 다양한 동수경사 변화를 고려해야 할 것으로 보며 현재 연구 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 1998년 산학협동 『광호개발(주)와 한국지반공학회』의 연구비 지원으로 이루어진 것으로 이에 깊은 감사의 뜻을 전하며 또한 현장 시험에 적극 지원을 해주신 한국컨테이너 부두공단 최귀봉 실장과 광호개발 최병주 부장께도 감사의 뜻을 전한다.

참 고 문 헌

1. 대한토목학회 (1985), "제강슬래그를 사용한 아스

- 팔트 포장 설계·시공지침”, pp. 53~66
2. (사)국제환경노동문화원 ILE환경연구소 (1995), 제철소 제강슬래그 제품의 환경친화성 평가, pp. 97~117.
 3. 방봉찬 (1997), “해양수산업에서의 전로슬래그의 활용”, 한국자원사이클링학회 강연집, pp. 83~96.
 4. 이문수, 오재화, 이광찬, 허준희 (1998), “제강슬래그의 투수성 연구”, 한국농공학회 학술발표회 논문집, pp. 414~418.
 5. 한국지반공학회 (1999), “제강슬래그의 투수성에 관한 학술연구 중간보고서”, pp. 13~43
 6. 原田詔二 (1997), “일본에 있어서의 제강슬래그 활용의 현황”, 한국자원사이클링학회 강연집, pp. 63~82.
 7. 酒井武郎·川北糧 (1960), “放射流式透水試験機による土の透水の測定法”, 土と基礎, Vol. 8, No. 5, pp. 274~284.
 8. 松尾新一郎·木暮敬二 (1970), “碎石の透水性に関する實驗”, 土と基礎, Vol. 18, No. 2, pp. 5~10.
 9. 且味勳·橋本保 (1976), “砂の透水試験”, 第11回土質工學研究發表會講演集, pp. 137~140.
 10. 高田直俊·小林一三 (1984), “自然堆積土層の透水性の異方性”, 日本土木學會第 39回年次學術講演 演回講演論文集, pp. 199~200.
 11. 小鯛圭一 (1985), “粒狀堆積物の透水性：間隙率と透水性の關係”, 土質工學會誌, Vol. 33, No. 3, pp. 61~64.
 12. 土質工學會 (1990), 土質試驗法の方法と解説, pp. 271~286.
 13. 大関一郎 (1997), “製鋼slagの資源化の現状と課題, 製鋼slagの發生量低減”, 日本製鋼協會, 製鋼slagの基礎と應力研究會.
 14. Harr, R. C. (1960), “Seepage requirements of filters and previous bases”, *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 86, No. 5, pp. 15~32.
 15. Harr, R. C. (1962), *Seepage, drainage & flownet* 2th, Wiley Interscience.
 16. Singh, A. (1964), “Soil Engineering in theory and Practice”, *Geotechnical testing and instrumentation*, pp. 101~105.
 17. Lane, K. S. (1964), “Laminar and turbulent flow of water through sand”, *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 90, pp. 171~176.
 18. Anadakrishnan, M. and Varadarajulu, G. H. (1963), “Laminar and turbulent flow of water through sand”, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 98, No. 1, pp. 311~325.
 19. Allan, F. R. and John, A. C. (1979), *Groundwater*, Prentice Hall, pp. 69~76.
 20. Mantel D. G. (1994), “Investigation into the hydraulic activity of five granulated blast slag and furnace slags with eight different portland cements”, *ACI Journal of Material*, Vol. 91, No. 5, pp. 471~477.

(접수일자 1999. 1. 16)