

플라이애쉬 혼합차수재의 투수특성과 미세구조 분석

Hydraulic Conductivity and Microscopic Analysis of Fly Ash Liner

정 문 경*1

Chung, Moonkyung

서 경 원*2

Seo, Kyung-Won

이 용 수*2

Lee, Yong-Soo

Abstract

The use of fly ash as a contaminant barrier material was studied. Mixing ratio of fly ash to bentonite to meet the requirements for landfill liners was determined. The hydraulic behavior exhibited by the fly ash-bentonite liner and the effects of CaO were investigated through hydraulic conductivity tests under various conditions and microscopic analyses including XRD, SEM, helium porosimetry, and image analysis.

The hydraulic conductivity of compacted fly ash decreased with the addition of bentonite, which was due mainly to the expanding of bentonite and partly to the filling of voids by chemical reaction products among constituents of the artificial liner. Because of insufficient CaO content, and rich in content but low-reactive SiO₂ contained in the fly ashes used, pozzolanic reaction and resulting effects in the artificial liner were not significant. The results of the tests with the addition of lime as a source of CaO indicated that chemical reactions among constituting materials and their resulting effects on hydraulic conductivity were controlled not by the apparent amounts of each constituent, but by reaction activities of the materials in the artificial liner.

요 지

본 논문에서는 플라이애쉬를 폐기물 매립장 차수재의 건설재료로 활용하기 위한 방안으로 실행한 일련의 실내실험연구결과를 보고한다. 폐기물 매립장 차수재의 투수계수 기준을 만족하기 위한 플라이애쉬와 벤토나이트의 적정 혼합비를 구하였다. 혼합차수재의 투수 메카니즘과 CaO가 차수층의 투수계수에 미치는 영향을 다양한 조건에 대한 투수시험과 X선 회절분석, 전자주사현미경분석, 헬륨 간극측정법, 확대영상분석기법 등의 미세구조적 접근을 통하여 연구하였다.

벤토나이트의 첨가에 따라 플라이애쉬 혼합차수재의 투수계수는 감소하였다. 이는 주로 벤토나

*1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

*2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원

이트의 팽창에 의해 간극이 충전되었기 때문이며, 플라이애쉬-벤토나이트 간 포졸란 반응 및 그에 따른 투수계수 저감효과는 시험에 사용된 국내 플라이애쉬의 CaO 성분이 적고 SiO₂의 반응성이 낮아 크지 않은 것으로 나타났다. 혼합차수재에서 구성물질간 화학반응의 효과를 높여 인위적으로 석회를 첨가하고 시행한 실험결과에 의하면 혼합차수재에서 구성성분간 화학반응성 및 그에 따른 투수계수에 미치는 영향은 구성성분의 외형적 총량보다는 구성성분의 형태와 활성도에 따라 크게 좌우되는 것으로 나타났다.

Keywords : Fly ash, Bentonite, Lime, Industrial waste, Hydraulic conductivity, Landfill liner, SEM, XRD, Porosimetry, Image analysis

1. 서 론

국내 화력발전소에서 전력생산 부산물로 연간 발생하는 석탄회는 1990년에 180만톤, 1996년에 340만톤에 달하였고, 2006년에는 550만톤에 이를 것으로 전망된다(동력자원부, 1991). 석탄회 중 집진설비에서 포집되는 미세한 연소재인 플라이애쉬(fly ash) 혹은 비회(飛灰)는 전체 석탄회 중 60~80%를 차지한다. 우리나라에서는 주로 시멘트 원료와 콘크리트 혼화재로 1991년 기준 발생 플라이애쉬의 약 16%를 재활용하였고, 나머지는 단순매립되어, 재활용율이 50%가 넘는 일본, 영국, 독일, 프랑스에 비하면 미약한 형편이다(한국건설기술연구원, 1992). 플라이애쉬의 다양한 재활용처 발굴노력은 국내외에서 꾸준히 진행되어, 현재까지 지반공학분야에서는 플라이애쉬를 성토재, 경량골재, 도로용골재, 충전재, 지반개량재, 오염물질 차단층 혹은 제거층 건설재료 등으로 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다(Bowders et al., 1990; 한국건설기술연구원, 1992; 천병식 등, 1995; 정승용 등, 1995; Lim, 1997). 특히 국토가 협소하고 매립지의 확보난이 심각한 우리나라의 실정에서 가용한 산업부산물의 응용방안을 강구하여 재활용하는 것은 매우 중요한 일이라 하겠다.

폐기물 관리법은 주변 토양 및 지하수 보호를 위해 관리형 폐기물 매립시설에 대하여 투수계수가 1×10^{-9} m/s 이하가 되는 점토·벤토나이트 등 점토류의 차수층 혹은 지오멤브레인(geomembrane)과 점토류의 복합차수층

의 설치를 정하고 있다. 차수층 건설재료로 적합한 점토의 확보가 지역적, 경제적 이유로 어려운 경우 상기 차수재와 동등한 차수효과를 지닌 대체재료의 사용이 가능하다.

폐기물 매립장 차수재 건설재료로서 플라이애쉬의 사용가능성은 이미 밝혀진 바 있다(Usmen et al., 1988). 플라이애쉬는 작은 입자가 비교적 균등 분포된 실트질의 재료로서 다짐을 가하면 10^{-7} m/s 수준의 투수성을 가지나(한국건설기술연구원, 1996; 이용수 등, 1997), 매립장 차수층의 총측요전인 1×10^{-9} m/s 이하의 투수계수를 만족하기 위해서 혼합재의 첨가가 필요하다. 저투수성 확보를 위한 혼합재료 중 벤토나이트가 널리 사용되며, 이는 벤토나이트가 물과 반응하였을 때 체적팽창율이 높을 뿐만 아니라 입자의 높은 비표면 면적과 양이온치환능(CEC)으로 인한 오염물질 차폐, 이동억제, 정화 등의 목적에도 부합하기 때문이다(Alther, 1986; Elzea and Murray, 1990). 벤토나이트는 스멕타이트(smectite)가 주성분이고 그 거동이 스멕타이트 광물의 특성에 지배받는 점토류를 말하며, 점토입자 표면의 치환가능한 이온의 종류에 따라 나트륨계와 칼슘계 벤토나이트로 구분한다. 나트륨계 벤토나이트는 칼슘계 벤토나이트 보다 전단강도는 작으나, 오염물질 차폐재로서 필요한 팽창성과 투수계수 측면에서 월등히 우수하고 화화물질에 대한 재료의 내구성에서 동등한 성능을 보인다(Reschke and Haug, 1991; Dixon et al., 1996; Gleason et al., 1997).

본 논문에서는 폐기물 매립장 차수층 건설재

료로서 플라이애쉬를 재활용하기 위한 방안을 제시한다. 실내실험을 통한 플라이애쉬 혼합 차수재의 적정 혼합비 및 투수계수 영향 인자 분석, 플라이애쉬 차수재의 투수메카니즘, 산화칼슘(CaO)이 차수층의 불투수성에 미치는 영향을 다루었다. 이를 위하여 본 연구에서는 다양한 조건에 대한 투수시험을 시행하였고 투수 메카니즘 분석을 위해 미세구조적 접근을 시도하여 X선 회절분석(XRD), 확대영상분석(image analysis), 전자주사현미경분석(SEM), 헬륨 간극측정기(helium porosimetry) 등의 기법을 사용하였다.

2. 재 료

2.1 플라이애쉬

보령과 서천 화력발전소에 발생한 두 종류의 플라이애쉬를 실험에 사용하였다. 보령 플라이애쉬와 서천 플라이애쉬는 원탄의 종류에 따라 각각 유연탄계와 무연탄계로 구분된다. 무연탄과 유연탄은 석탄의 탄화정도에 따른 분류로서 무연탄이 유연탄보다 탄화정도가 높고 휘발분이 작다.

보령과 서천 플라이애쉬의 화학구성성분은 표 1에 나타나 있다. CaO의 함량은 보령 플라이애쉬가 약 5.3%이며, 서천 플라이애쉬가 약 0.9%이다. 이들 시료에 대한 X선 회절분석결과에 의하면 보령 플라이애쉬가 구형의 물라이트(mullite), 다각형의 석영(quartz), 마그네타이트(magnetite) 광물과 미연탄소로 구성되어 있는 반면, 서천 플라이애쉬는 물라이트와 미연탄소 외에 광물의 식별이 어려운 비결정질(armorphous) 물질을 많이 포함하고 있다.

두 플라이애쉬의 비중은 약 2.3이며, 모두 4번체(4.76mm)를 100% 통과하였고, 200번체(74 μ m) 통과량은 보령 플라이애쉬가 약 72%, 서천 플라이애쉬가 85%였다. 두 시료 모두 통일분류법에 따르면 ML로 분류되었다. 플라이애쉬의 입도분포곡선은 그림 1에 나타나 있다. 폐기물 공정 시험방법에 따른 용출실험결과,

사용된 플라이애쉬에서는 대부분의 검사항목 물질은 검출되지 않았으며 허용기준보다 월등히 낮은 6가 크롬(Cr⁶⁺)과 비소(As)를 포함한 것으로 나타났다.

2.2 혼합재-벤토나이트 및 석회

플라이애쉬 차수재의 투수계수를 낮추기 위한 첨가재로서 상품화된 (주)IBM의 나트륨계 벤토나이트를 사용하였다. 벤토나이트의 입도곡선은 그림 1에 나타나 있다. X선 회절분석결과 주로 스멕타이트 그룹의 몬트모릴로나이트와 세피오라이트, 그리고 석영 등으로 구성되어 있다.

실험에서 CaO의 화학반응으로 인한 투수계수변화의 크기를 증가시키려는 노력으로 플라이애쉬 차수 시료 제작시 생석회((주)논산의 논산석회)를 혼합재로 첨가하였다. 보령과 서천 플라이애쉬를 포함하여 우리나라에서 발생하고 있는 대부분의 플라이애쉬의 CaO 함량은 약 5% 이하이다. 호남지방의 화력발전소에서 CaO 성분이 10% 이상인 플라이애쉬가 발생하나 화력발전소내 플라이애쉬 분류기(classifier)가 설치되어 있지 않아 재활용을 위한 시료의 채취가 어렵다(한국건설기술연구원, 1992). 실험에 사용된 석회는 약 74%의 CaO와 소량의 기타 성분으로 구성되어 있고, 강열감량은 약 23%였다(표 1). X선 회절분석결과 산화칼슘(CaO), 수산화칼슘(Ca(OH)₂), 방해석(calcite, CaCO₃) 등으로 구성되어 있는 것으로 나타났다으며, 이는 대기 중의 수분 혹은 이산화탄소와 반응하여 형태가 변한 것으로 보인다.

3. 플라이애쉬 혼합차수재의 투수계수

3.1 실험방법

플라이애쉬에 벤토나이트를 첨가한 혼합다짐시편에 대하여 벤토나이트의 혼합비, 양생기간에 따라 투수시험을 실시하였다. 벤토나이트는 중량비로 10~40%까지 첨가하였고, 함수비

표 1. 플라이애쉬와 석회의 구성성분

화학성분	보령 플라이애쉬(%)	서천 플라이애쉬(%)	석회(%)
SiO ₂	46.47	44.76	0.82
Al ₂ O ₃	30.09	28.47	0.36
Fe ₂ O ₃	5.07	4.10	0.10
TiO ₂	1.71	1.59	0.01
MnO	0.03	0.04	-
CaO	5.26	0.89	74.27
MgO	0.87	0.86	1.18
K ₂ O	0.71	3.98	0.02
Na ₂ O	0.38	0.20	0.17
P ₂ O ₅	1.15	0.26	0.03
강열감량	7.54	13.89	22.51
합	99.28	99.04	99.48

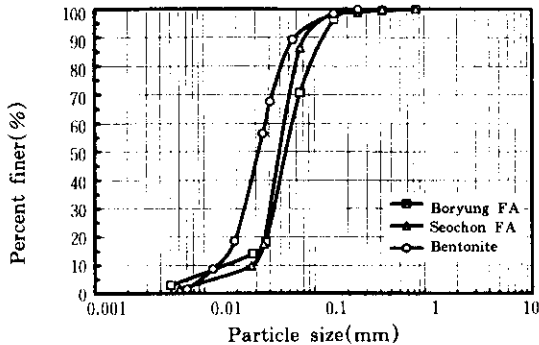


그림 1. 플라이애쉬와 벤토나이트의 입도분포곡선

를 최적함수비(w_{opt}) 2% 습윤측으로 조절한 시료를 KS F 2312의 A다짐법에 따라 최대건조 밀도($\rho_{d,max}$)의 95% 상태로 다짐하였다. 다짐된 시료는 습윤양생을 하였으며, 재령 1, 3, 7, 14, 28일 시료에 대하여 변수위투수법으로 투수계수를 측정하였다. 벤토나이트 함량이 증가할수록 혼합시료의 최적함수비는 증가하고 최대건조 밀도는 감소하였다. 벤토나이트 함량변화에 따른 w_{opt} 와 $\rho_{d,max}$ 의 관계는 표 2에 나타나 있다.

플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재의 최소 투수계수를 얻기 위한 다짐조건으로 함수비를 최적함수비보다 2% 크게 한 것은 (1) 플라이애쉬만을 대상으로 한 예비 다짐시험과 투수시험의 결과를 반영하고, (2) 혼합재로 첨가되는

벤토나이트의 투수특성을 고려하여 결정하였다. 플라이애쉬만으로 제작된 시편에 대한 투수시험에서 함수비별 투수계수는 평균 2×10^{-7} m/s ($w=w_{opt}-2\%$), 1.5×10^{-7} m/s ($w=w_{opt}$), 3×10^{-8} m/s ($w=w_{opt}+2\%$), 1×10^{-7} m/s ($w=w_{opt}+4\%$)로, 최소투수계수는 최적함수비의 습윤측 2%에서 나타났고 함수비가 더욱 증가하자 투수계수도 따라서 증가하였다. 이는 다짐된 점토의 투수계수 실험에서 나타나는 경향과 일치하는 것으로(Daniel and Benson, 1990), 점토에서는 간극수의 양에 따라 점토입자들의 배열과 구조가 달라지기 때문이다. 즉, 최적함수비 건조측에서는 점토입자가 면모화(flocculated)되고 변형된 집합체(aggregates)로 존재하여 점토내에 상대적으로 큰 간극이 연결되어 있는 반면, 최적함수비 습윤상태에서는 점토입자가 분산(dispersed)되어 간극 크기가 작아지기 때문이다(Xu, 1994). 플라이애쉬 시료의 투수시험결과로부터 플라이애쉬도 점토와 유사한 함수비에 따른 입자의 배열과 구조변화 경향을 보인 것은 사실이나, 단정적인 원인분석을 위해서는 플라이애쉬 시료에 대한 집중적인 추가 연구가 필요하다.

3.2 실험결과

플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재의 벤토

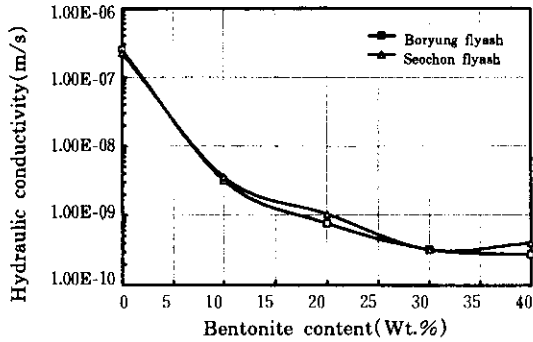


그림 2. 양생일수 28일의 플라이애쉬-벤토나이트 혼합 차수재의 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수

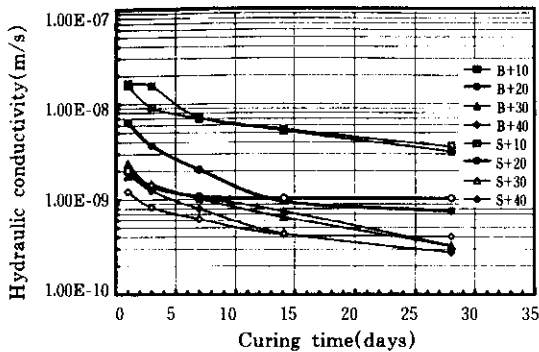


그림 3. 재령에 따른 플라이애쉬-벤토나이트 혼합 차수재의 투수계수 (B와 S는 각각 보령과 서천 플라이애쉬를 뜻하며, 숫자는 시료내 벤토나이트 중량합유비를 의미함)

나이트 혼합비와 양생기간에 따른 투수실험 결과는 각각 그림 2와 그림 3에 나타나 있다. 벤토나이트의 혼합량이 늘수록 혼합차수재의 투수계수는 감소하며, 혼합비가 20% 이상일 때, 폐기물 매립장 차수재 투수기준인 $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 를 만족한다. 혼합차수재의 투수계수는 재령이 늘수록 감소한다. 양생의 초기단계에 투수계수는 빠르게 감소하고, 그후 감소의 속도가 늦추어지며, 양생일수 14일 이후에는 투수계수의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 양생 1일후 시료의 투수계수 ($k_{t=1d}$)를 기준으로 할 때, 전체 28일 동안 투수계수의 감소량($\Delta k_{k_{t=1d}-28d}$) 중 처

음 14일간 투수계수는 전체 8가지 경우에서 평균 88.3% 감소하였고 나머지 기간 동안 11.7% 감소하였다. 특히 벤토나이트를 20% 혼합한 서천 플라이애쉬 혼합재의 경우(그림 3의 S+20) 양생기간 14일 동안 투수계수는 전체 감소량의 98.8%가 감소하였다. 벤토나이트를 10% 혼합하였을 때, 보령과 서천 플라이애쉬의 두 경우(그림 3의 B+10과 S+10) 모두 다른 혼합조건의 시료와 달리 초기 투수계수 ($k_{t=1d}$)가 컸던 만큼 감소의 폭도 컸다. 투수계수가 10^{-9}m/s 수준에 도달하게 되는 벤토나이트가 20% 이상 혼합된 경우에는 양생기간에 따른 투수계수의 변화폭도 작을 뿐 아니라, 경우에 따라 7~14일이 지나면 $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 이하의 투수계수에 도달하는 것으로 나타났다.

혼합차수재의 시간에 따른 투수계수 저감은 벤토나이트의 팽창과 혼합차수재 구성성분간 화학반응 결과물의 간극 채움 혹은 입자 구조 및 배열 변화에 기인한 것으로 추론된다.

벤토나이트의 습윤팽창은 입자표면의 치환가능한 이온의 수화작용으로 인한 입자결정구조 내부의 팽창(inner-crystalline swelling)과 입자의 전기이중층(electric diffuse double layer) 구조간의 반력에 의한 삼투팽창(osmotic swelling)으로 구분된다(Madson and Muller-Vonmoos, 1989). 입자결정구조 내부의 팽창력(400 N/mm^2)은 삼투팽창력($< 2 \text{ N/mm}^2$)보다 크지만 팽창거리는 전자가 1nm 이하인 반면 후자는 훨씬 먼거리까지 작용되어 결과적으로 벤토나이트의 실질적 팽창에 기인한다.

플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재에서는 구성성분간 화학반응이 발생하며, 이는 혼합차수재의 투수특성에도 영향을 미칠 것이다. 반응물의 생성과 영향을 다음 절에 기술한다.

4. 플라이애쉬 혼합차수재의 미세구조분석과 투수 메커니즘

4.1 실험방법

플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재의 투수특

성의 원인 규명을 위해 X선 회절분석(XRD), 전자주사현미경분석(SEM), 확대영상분석(image analysis), 헬륨 간극측정기(helium porosimetry) 등의 기법을 이용하여 미세구조분석을 실시하였다.

실험실에서 플라이애쉬와 첨가재를 섞어서 만든 혼합차수재 시료에 대하여 첨가재의 혼합비와 재령에 따른 시료내 간극의 변화 및 간극 충전물의 확인, 시료내 화학반응물의 생성 여부 및 생성물질 형태를 관찰하고자 50만배까지 확대가 가능한 Hitachi사의 S-4200을 이용하여 SEM 촬영을 하였고, 혼합차수재의 구성성분과 구성성분간 화학반응 결과물의 확인을 위하여 X선 회절분석을 수행하였다. X선 회절분석에 사용된 장비는 Philips PW1710이다.

혼합차수재의 투수계수는 간극의 크기와 분포에 영향을 받을 것이므로 이를 규명하기 위해 시료 내부의 확대사진을 디지털 정보화한 후 입자와 간극으로 구별하고 통계처리하여 시료의 간극 크기 및 크기별 분포를 구하는 확대영상분석기법을 이용하였다. SEM 사진은 먼저 Epson GT-9000으로 스캐닝하였고, 디지털화된 사진정보를 Jandel사의 Sigma-Scan 소프트웨어를 사용하여 통계해석을 하였다.

ERHP(Extended Range Helium Porosimeter)를 이용하여 시료의 전체 간극부피를 측정하였다. 시료는 직경 25mm, 높이 38mm의 실리더를 표준다짐몰드에 넣어 전술한 투수시험을 위한 시료제작과 동일한 조건으로 만들었다. 점토 시료의 간극측정을 위한 방법으로는 수은 간극측정법도 있으나, 수은 간극측정법은 간극의 크기가 작은 시료에서 아주 작은 간극과 간극을 연결하는 통로(throat) 부분을 수은이 통과하지 못하여 간극을 과소평가하는 단점이 있다. 반면 헬륨은 원자가 2번인 이상기체로서 광물 입자 표면에서 광물과 반응하지 않고 질량이 작아 확산성이 양호하여 매우 작은 간극까지 침투할 수 있다.

기술된 미세구조분석의 상세한 실험방법 및 내용은 한국건설기술연구원(1997)에서 설명되었다.

4.2 X선 회절분석 결과

그림 4는 보령 플라이애쉬에 벤토나이트를 20% 혼합하고 다짐한 시료를 7일과 28일 동안 양생한 후 실시한 X선 회절분석 결과이다. 조사된 두 시료에서 공통적으로 벤토나이트의 주구성 광물인 몬트모릴로나이트가 회절각(2θ) 5.9°에서 발견되었고, 플라이애쉬의 주구성 광물인 석영과 물라이트가 발견되었다. 28일 양생 시료에서는 21.4°에서 포졸란 반응 생성물(CSH)의 존재가 확인되었다.

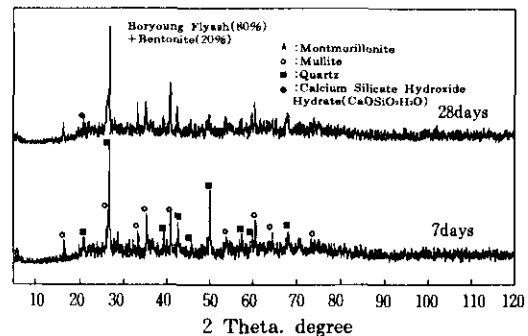


그림 4. 보령 플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재의 X선 회절분석 결과

서천 플라이애쉬와 벤토나이트 혼합차수재의 X선 회절분석 결과는 그림 5에 나타나 있다. 무연탄계인 서천 플라이애쉬는 원탄의 특성으로 석영을 함유하지 않으므로 그림 5에 나타난 석영의 출처는 벤토나이트로, 함유량은 적지만 결정성이 뛰어나 회절강도가 크게 나타났다. 재령 7일의 시료에서 회절각 20.5°에서 $\text{Na}_2\text{CaSiO}_4$ 가, 12.1°에서 $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_9$ 가 발견되었고, 재령 28일 시료에서 CSH의 일종인 $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ 의 생성을 확인할 수 있었다.

X선 회절분석에서는 대상시료를 구성하는 광물의 종류만을 확인하는 정성적 결과를 얻을 수 있으며, X선 회절분석결과와 회절강도(intensity)는 광물의 결정성에 비례한다. 플라이애쉬의 구성성분인 석영과 물라이트는 광물의 결정성이 높아 확연히 식별되나, 벤토나

이트의 성분인 점토광물은 광물특성상 회절강도가 크지 않다. CSH 수화물의 회절강도는 주변의 배경값과 유사하여 CSH의 존재를 미리 가정하고 CSH의 X선 회절강도에 대한 분석을 하지 않는다면 분석과정에서 CSH 화합물의 생성을 간과할 수 있다.

서천 플라이애쉬 시료는 미연탄소 등 비결정질 물질의 영향으로 X선 회절강도의 배경값이 높게 나타났다. 그림 5에서 7일과 28일 양생 시료의 X선 회절분석결과가 같은 동향을 나타내는 것은 양생일수 7일 이후 새로운 화학반응물 생성이 없거나 혹은 반응물이 생성되었더라도 결정성이 낮아 식별이 되지 않았기 때문이다. 비록 X선 회절분석이 정성적인 결과를 제공하지만, 일반적으로 확인대상물질의 양이 5% 정도 함유하고 있어야 감지할 수 있는 점과 문헌(Rao and Rajasekaran, 1996)에 나타난 CSH 화합물의 X선 회절강도가 뚜렷한 점을 고려할 때, 본 실험결과와 반정량적인 해석을 할 수 있다. 즉, 보령과 서천 플라이애쉬 혼합차수재에서의 포졸란 반응성과 CSH 화합물 생성은 미약하다고 사료된다. 플라이애쉬의 포졸란 반응성이 낮았던 것은 플라이애쉬에 포함되어 있는 일차적으로 CaO의 양이 5% 이하로 낮았기 때문으로 사료된다.

4.3 전자주사현미경분석 결과

보령 플라이애쉬와 서천플라이애쉬에 벤토

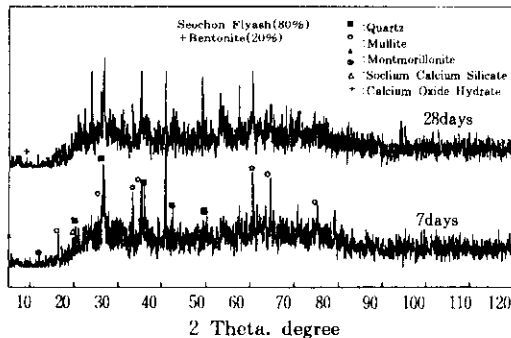


그림 5. 서천 플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재의 X선 회절분석 결과

나이트를 20% 혼합, 다짐하고 28일간 양생한 시료의 SEM 사진이 각각 그림 6과 그림 7에 나타나 있다. 그림에서 구형의 물라이트는 뚜렷이 식별되나, 그 외의 벤토나이트, 석영, 미연탄소, 포졸란 반응 수화물들은 구분이 용이하지 않다. 이는 물라이트를 제외한 물질들의 형태가 관상의 불규칙 다각형 구조를 가지기 때문이다. 더우기, 서천 플라이애쉬 28일 시료에서 발견된(그림 5 참조) 포졸란 반응물의 일



그림 6. 보령 플라이애쉬-벤토나이트 혼합시료의 28일 양생후 SEM 사진

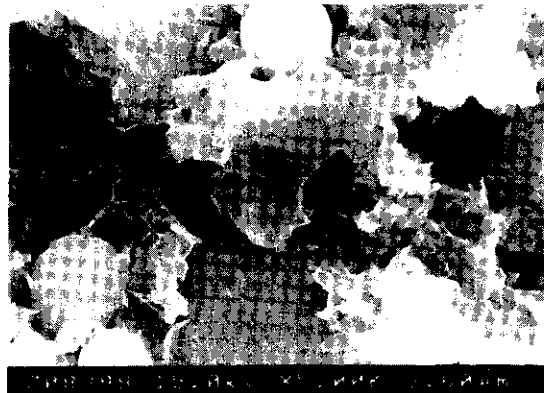


그림 7. 서천 플라이애쉬-벤토나이트 혼합시료의 28일 양생후 SEM 사진

중인 $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ 도 확인할 수 없었던 것은 반응생성물의 결정도가 낮았다는 것을 증명한다.

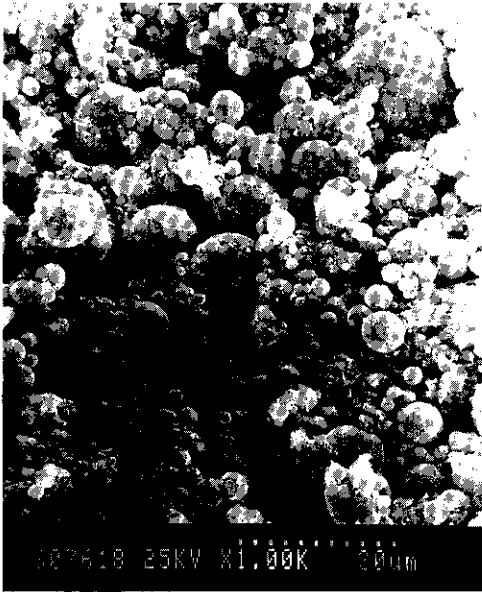


그림 8. 벤토나이트가 10%(중량비) 혼합된 보령 플라이애쉬 시료의 SEM 사진

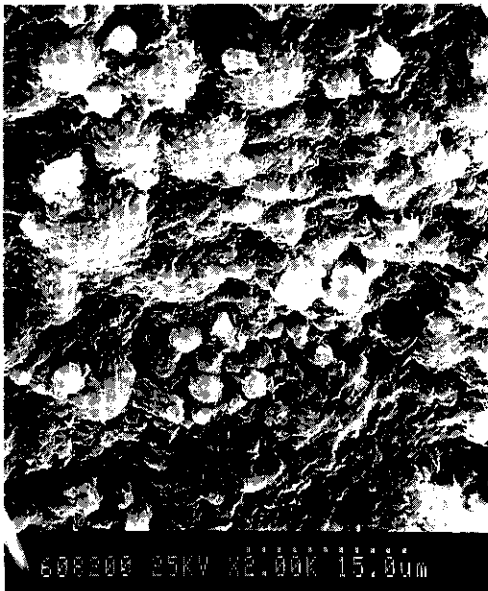


그림 9. 벤토나이트가 40%(중량비) 혼합된 보령 플라이애쉬 시료의 SEM 사진

그림 8과 9는 보령 플라이애쉬에 벤토나이트를 각각 10%와 40% 혼합한 시료에 대하여 양생 7일후 촬영한 SEM 사진이다. 벤토나이트가 40% 혼합된 경우의 SEM 사진에서 10% 혼합된 경우와 비교할 때 플라이애쉬 구성입자의 표면이 벤토나이트로 고루 덮혀있고 입자 사이의 간극도 촘촘히 채워져 있는 것을 알 수 있다.

X선 회절분석 결과와 전자주사현미경분석 결과를 고려할 때, 그림 2와 그림 3에서 나타난 바와 같은 벤토나이트 함량과 시료 재령에 따른 플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재의 투수계수 저감은 주로 벤토나이트의 팽창에 의한 것이며, 혼합재 구성성분간의 화학반응의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

4.4 간극분석 결과

헬륨 간극측정기로 측정한 보령과 서천 플라이애쉬 혼합차수재의 간극비는 표 3에 나타나 있다. 7일과 28일 양생시료의 간극률($n = V_v/V_t$)은 보령플라이애쉬의 경우 50.2 %에서 48.4 %로, 서천 플라이애쉬의 경우 53.4 %에서 50.8 %로 소폭 감소하였다. 측정된 간극률의 시간에 따른 변화 추이는 그림 3에서 지적된 바와 같이 시료의 투수계수가 양생일수가 증가함에 따라 감소하는 경향과 동일하다. 그러나 표2에서 나타난 바와 같이 보령 및 서천 플라이애쉬 혼합차수재의 투수계수와 간극률의 크기 순서가 완전히 일치하지 않은 것은 시료 제작과정에서 배제할 수 없는 오차(random error) 때문인 것으로 판단된다.

플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재에서는 세립토의 경우와 마찬가지로 간극률 뿐만 아니라 다양한 크기의 간극 분포도 투수특성을 결정하는 데 중요한 역할을 한다. 확대영상분석(image analysis)을 통해 혼합차수재의 간극 크기 및 분포를 구하여 그림 10에 나타내었다. 간극의 크기는 간극면적으로 나타내었으며, 그림 10의 범례의 설명은 표 3에 나타나 있다. 혼합차수재에는 $1\mu\text{m}^2$ 보다 작거나 $1\sim 10\mu\text{m}^2$ 사

표 2. 벤토나이트 함량에 플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재의 최적함수비와 최대건조밀도

벤토나이트 혼합비*(%)	보령 플라이애쉬		서천 플라이애쉬	
	최적함수비 $w_{opt}(\%)$	최대건조밀도 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	최적함수비 $w_{opt}(\%)$	최대건조밀도 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$
10	27.49	1.32	18.59	1.53
20	28.30	1.30	19.83	1.50
30	29.61	1.29	20.49	1.48
40	30.23	1.28	22.51	1.47

*: 중량비

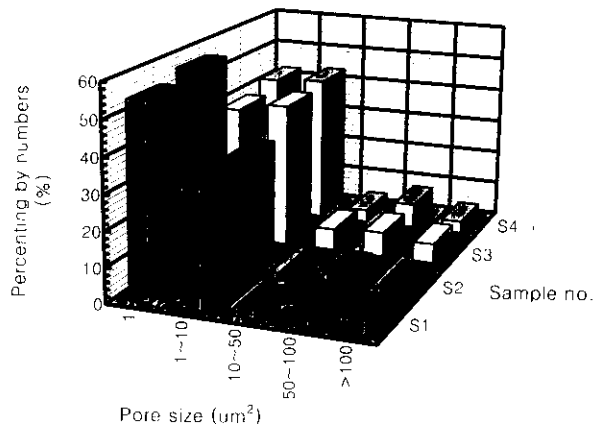


그림 10. 혼합차수재의 간극크기 분포(시료설명은 표3 참조)

표 3. 헬륨 간극측정기로 측정한 시료의 간극율

시료번호	시료설명 ¹	투수계수 ² $k(10^{-9}m/s)$	간극률(%) $n=V_{void}/V_{total}$
S1	보령 플라이애쉬+벤토나이트, 7일 양생	2.06	50.2
S2	보령 플라이애쉬+벤토나이트, 28일 양생	0.75	48.4
S3	서천 플라이애쉬+벤토나이트, 7일 양생	1.09	53.4
S4	서천 플라이애쉬+벤토나이트, 28일 양생	1.03	50.8

¹: 플라이애쉬와 벤토나이트의 혼합비는 중량비로 8 : 2
²: 그림 3 참조

이의 크기를 가진 간극이 앞도적으로 많이 분포하고 $10\mu m^2$ 이상의 크기를 가진 간극의 수는 적다. 서천 플라이애쉬 혼합차수재에는 $1\mu m^2$ 이하와 $1\sim 10\mu m^2$ 크기 영역의 간극분포가 유사한 것으로 나타났으며, 보령 플라이애쉬의 경우에는 $1\mu m^2$ 이하 크기의 간극이 더 많았다. 양생일수에 따른 크기영역별 간극분포 변화의 폭은 크지 않았다.

5. 석회가 플라이애쉬 혼합차수재의 투수 계수에 미치는 영향

5.1 실험방법

전술한 바와 같이 보령과 서천 플라이애쉬에 포함되어 있는 CaO 함량은 각각 약 5.3%와 0.9%이며, 혼합차수재에서 CaO와 다른 구성물질

간의 화학반응은 활발하지 않았고 혼합차수재의 투수계수에 대한 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 만약 포졸란 반응에 의한 생성물이 직접적으로 간극을 채우거나 간접적으로 주변 입자들의 배열/단립 형태를 바꾸어 간극크기를 감소시킨다면, 투수계수는 감소할 것이다. 석회를 혼합차수재에 첨가하여 CaO 함량을 늘리고, 이에 따른 투수시험결과와 미세구조분석 결과를 비교, 분석하였다. 혼합차수재 시료제작시 벤토나이트의 양은 10%로 고정하고 석회를 중량비에 따라 5, 10, 15% 증가시키며 플라이애쉬의 양은 조절하였다. 시료제작은 다짐시험에서 얻은 최적함수비의 습윤축 2%와 최대 건조밀도의 95%로 시행하였다.

5.2 투수실험 결과

석회 첨가량을 5~15% 조절하여 제작한 시료를 1, 3, 7, 14, 28일 동안 양생한 후 투수시험을 실시하였고, 보령 플라이애쉬를 제외한 서천 플라이애쉬의 결과를 그림 11에 나타내었다.

석회의 첨가량이 증가할수록 혼합시료의 초기투수계수($k_{t=1d}$) 및 최종투수계수($k_{t=28d}$)가 작았으며, 양생기간 28일 동안의 투수계수의 감소폭(Δk)도 석회를 5% 첨가한 경우 초기투수계수 대비 8.2배, 10%에 11.2배, 15%에 15.4 배로 다소 증가하였다. 플라이애쉬와 벤토나이

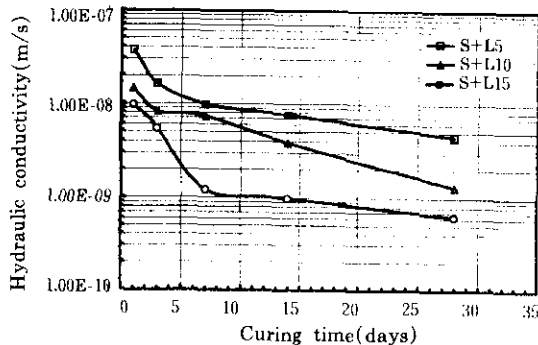


그림 11. 석회 첨가량과 재령에 따른 서천 플라이애쉬 혼합차수재의 투수계수(S=서천 플라이애쉬, L=석회, 숫자는 석회의 중량 혼합비, 시료의 벤토나이트 혼합비는 10%로 고정)

트만을 혼합한 시료에서와 마찬가지로 석회가 첨가된 시료의 시간에 따른 투수계수는 양생 초기에 빠르게 감소하고 이후에 감소속도가 더디어졌다. 석회를 5% 혼합한 시료는 비록 투수계수가 양생일수가 커질수록 감소하였으나 폐기물 매립장 차수시설의 투수계수 기준에는 도달하지 못하였다. 반면, 석회를 10% 첨가한 시료(그림 11의 S+L10)에서는 양생 14일 이후, 석회를 15% 첨가한 시료(그림 11의 S+L15)에서는 양생 7일 이후, 1×10^{-9} m/s에 근접한 투수계수를 나타내었다.

5.3 미세구조분석 결과

석회를 첨가한 플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재에서 화학반응물 확인을 위한 X선 회절분석 결과를 보령 플라이애쉬에 대해서 그림 12과 그림 13에 도시하였다.

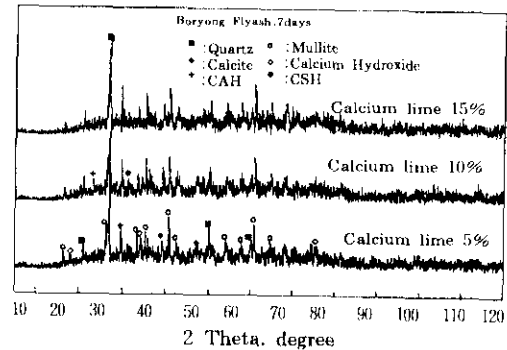


그림 12. 보령 플라이애쉬, 벤토나이트, 석회가 혼합된 차수재의 XRD결과(양생기간 7일)

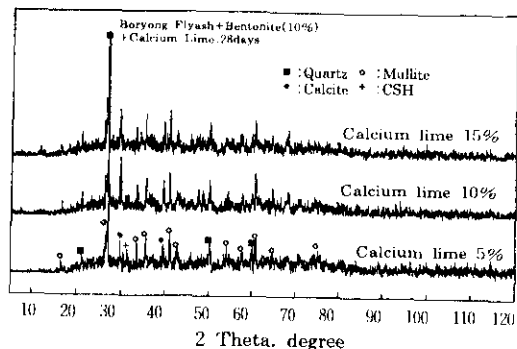


그림 13. 보령 플라이애쉬, 벤토나이트, 석회가 혼합된 차수재의 XRD결과(양생기간 28일)

재령 7일의 보령 플라이애쉬 혼합차수재(그림 12)에서 석회와 물라이트는 쉽게 식별되었다. X선 회절각(2θ) 29.6°에서 나타난 방해석(calcite)은 석회의 첨가량이 증가할수록 방해석의 회절강도가 높음을 발견할 수 있다. 석회를 10% 혼합하였을 때, 회절각 23.3°에서 $\text{CaAl}_2\text{SiO}_3\text{O}_{12}$ 가 발견되었고 31.2°에서 규산 칼슘 수화물($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot 0.3\text{H}_2\text{O}$)이 확인되었다. 위의 새로운 생성물은 회절강도가 작아 X선의 주사속도의 차이 등에 따라 다소 유동적인 회절강도를 나타내었다. 그림 13은 재령 28일의 같은 조건의 시료에 대한 X선 회절분석 결과로서 재령 7일(그림 12)과 비교하여 새로운 물질의 생성은 확인되지 않았다. 여기에서도 포졸란 반응물의 회절강도는 낮았으며 석회를 5% 혼합한 시료에서 CSH의 존재가 회절각 31.2°에서 발견되었다. 석회의 양이 증가할수록 방해석의 회절강도가 커지는 경향이 있고 석회의 양을 15% 혼합한 시료에서 회절각 18.0°, 34.2°, 37.0°에서 포졸란 반응 생성물로 생각되는 물질이 작은 회절강도로 발견되었지만 구체적인 광물명은 확인하기 어려웠다.

재령 7일과 28일의 서천 플라이애쉬 혼합차수재에 대한 X선 회절분석결과는 보령 플라이애쉬의 경우와 크게 다르지 않다. 그러나 서천 플라이애쉬 혼합차수재의 경우 반응 생성물로 생각되는 물질의 피크는 여러 회절각도에서 발견되었지만 회절강도가 주변값과 유사하여 확인하기 어려웠다. 첨가한 석회로부터 발생한 방해석의 회절강도는 석회의 양에 비례하여 높게 나타났다.

본 실험에서 사용한 플라이애쉬에 15%의 석회를 첨가하여 전체 CaO의 함량이 20%가 되어도 포졸란 반응 생성물은 소량인 것으로 판단된다. 이것은 전술한 플라이애쉬-벤토나이트 혼합재의 X선 회절분석 결과에서와 마찬가지로, X선 회절분석이 정성적인 결론을 제시하기는 하나 X선 회절분석 과정에서 재령별, 혼합비별 결과의 흐름을 관찰하면 도출할 수 있는 반정량적 해석의 결과이다.

그림 14와 그림 15은 보령 플라이애쉬에 석회의 양을 각각 5%와 15% 혼합한 경우의 재령 28일 시료에 대한 SEM 사진이다. 석회가 첨가되지 않았던 사진(그림 6)과 마찬가지로 구형의 물라이트 외의 모든 구성물질 및 새로운 화학반응물을 형상으로 구분하기는 용이하지 않다. 석회를 15% 혼합했을 때(그림 15), 다각형 기둥모양의 칼슘화합물이 생성됨을 확인할 수 있다. 또한 석회의 양을 증가 시킬 때 포졸란 반응을 하지 못한 석회가 방해석, 수산화 칼슘등의 수화물을 만들어서 판상의 물질로 존재하는 모습이 확인된다.

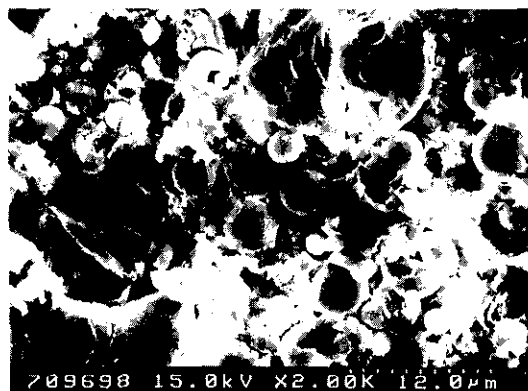


그림 14. 석회가 5% 혼합된 보령 플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재의 SEM 결과(양생기간 28일)

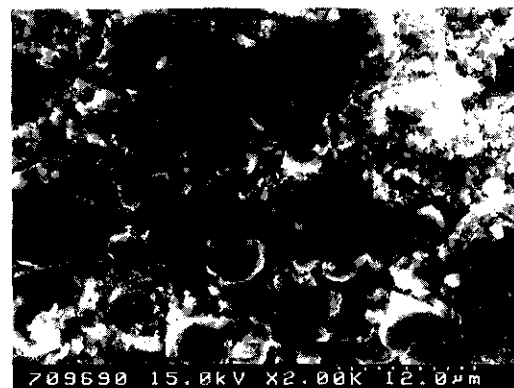


그림 15. 석회가 15% 혼합된 보령 플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재의 SEM 결과(양생기간 28일)

표 4. 석회 첨가량과 양생기간에 따른 간극크기분포 및 간극률의 변화

간극 크기 (μm^2)	보령 플라이애쉬						서천 플라이애쉬					
	재령 7일			재령 28일			재령 7일			재령 28일		
	5% ¹	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
<1	78.7	76.5	73.9	80.9	82.5	76.9	81.1	83.0	84.7	75.0	78.0	79.1
1~10	13.0	16.9	18.8	10.6	9.2	17.3	13.5	12.3	13.4	15.8	14.4	16.4
10~50	5.8	4.4	5.7	4.8	6.7	4.5	2.3	3.3	1.0	5.0	4.2	2.7
50~100	1.0	0.5	0.6	1.6	1.0	1.3	1.8	0.9	1.0	1.7	0.8	0.9
>100	1.4	1.6	1.1	2.1	0.5	0	1.4	0.5	0	2.5	2.5	0.9
간극률 ²	49.8	46.3	44.2	43.2	39.8	37.5	52.1	47.5	45.7	46.4	40.2	39.1

1: 석회의 중량 혼합비
2: 헬륨으로 측정된 시료의 간극률

표 4에는 플라이애쉬, 벤토나이트, 석회를 혼합한 시료에 대하여 헬륨으로 간극률을 측정된 결과이다. 같은 기간 동안 양생한 보령 및 서천 플라이애쉬 혼합차수재의 간극률은 석회의 첨가량이 증가할수록 감소하였고, 동일 조건으로 제작된 시료의 간극률은 양생기간이 길어질수록 감소함을 알 수 있다. 또한 시료의 간극률 감소의 폭은 석회의 첨가량이 커질수록 증가하여, 보령 플라이애쉬의 경우 초기간극률($n_{i=0}$) 대비 13.3~15.1%(석회첨가 5~15%) 감소하였고 서천 플라이애쉬의 경우 10.9~14.4%(석회첨가 5~15%) 감소하였다. 석회 첨가량에 따른 간극률의 변화 경향은 전술한 석회 첨가량에 따른 투수계수의 변화 추이와 같았다.

혼합차수재의 SEM 사진으로부터 구한 크기별 간극 분포는 표 4에 정리되어 있다. 면적이 $1\mu\text{m}^2$ 보다 작은 크기의 간극이 전체 크기별 간극 수 중 73.9~84.7%로 가장 많고, 다음으로 $1\sim 10\mu\text{m}^2$ 사이의 크기를 가진 간극 수가 9.2~18.8%로 많다. 크기가 $10\mu\text{m}^2$ 이상인 간극이 차지하는 비율은 플라이애쉬와 벤토나이트를 혼합한 시료에서와 마찬가지로(그림 10 참조) 작다. 석회가 혼합된 시료에서는 석회가 없는 시료와 비교하여 $10\mu\text{m}^2$ 보다 작은 간극이 차지하는 비율이 각각 평균 93.5%와 86.3%로 다소 높았다. 동일 조건에서 제작된 시료에서 양생일과 크기가 다른 간극이 차지하는 비율간의 관계는 뚜렷하지 않았다.

6. 토 론

6.1 혼합재에서의 낮은 포졸란 반응성

지금까지 플라이애쉬, 벤토나이트, 석회로 구성된 혼합차수재의 투수특성을 논하였다. 혼합재의 저투수성은 벤토나이트의 습윤팽창과 혼합재 구성물질간의 화학반응으로 인한 반응 결과물의 간극 채움과 결정구조의 변화에 기인하며, 저투수성에 미치는 영향은 본 실험의 조건하에서는 전자가 후자보다 지배적인 역할을 하였던 것으로 사료된다. 석회를 인위적으로 첨가한 경우를 포함해서 모든 경우에 대한 X선 회절분석 결과를 고려할 때, 기대하였던 포졸란 반응은 활발하지 않았고, 따라서 투수계수에 대한 영향도 크지 않았을 것으로 추론된다. 이는 반응을 위한 구성물질의 량과 활성도가 떨어지기 때문인 것으로 판단된다.

포졸란 반응은 산화칼슘(CaO)과 산화알루미늄(Al_2O_3)과 산화규소(SiO_2)가 반응하여 수화합물($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)을 만드는 반응을 말한다. 보령과 서천 플라이애쉬를 포함하여 국내 플라이애쉬는 소량의 CaO 를 함유하고 있어 반응에 필요한 CaO 의 량이 적다. 한편, 산화규소는 표 1에 나타난 바와 같이 성분분석에는 약 45%를 함유하고 있으나, X선 회절분석 결과를 상세히 검토하면 실험에 사용된 플라이애쉬의 산화 규소는 JCPDS(Joint Committee on Powder Diffraction Standards) 표에 의하

면 이미 자체적으로 결정화가 진행되어 다른 물질과 반응성이 매우 적은 'low quarts'로 구분된다. 실험에 사용된 플라이애쉬는 생산된지 얼마되지 않는 신선한 회가 아니고 야적장에서 오랜 기간동안 적치되는 동안 산화 규소의 결정화가 진행된 것으로 보인다. 따라서 활발한 포졸란 반응을 위해 필요한 산화규소는 플라이애쉬에서 충분히 공급되지 못하였던 것으로 보인다.

실험에서는 성분분석에 의하면(표 1) CaO가 74.3% 함유된 생석회를 구입하여 외부에서 인위적으로 혼합재 전체 중량비로 15%까지 첨가하였으나, 포졸란 반응은 역시 활발하지 못한 것으로 나타났다. 시료에 대한 X선 회절분석결과는 SiO_2 와 Al_2O_3 등과 반응하여 포졸란 반응물을 생성하여야 할 Ca 이온이 혼합전 저장기간 동안 물, 이산화탄소 등과 반응하여 수산화 칼슘(CaOH_2), 방해석(CaCO_3) 등의 형태로 변형되었음을 나타내었다. 플라이애쉬의 CaO와도 마찬가지로 대기 중의 수분과 CO_2 와 반응하여 쉽게 수산화칼슘이나 방해석으로 변하는 데, 일단 흡수되면 400°C 이상에서 소성하지 않는 한 플라이애쉬 및 석회의 반응성은 복원되지 않는다. CaO를 16% 함유한 플라이애쉬에서 수분을 첨가하지 않아도 자체적으로 규산 칼슘과 방해석이 생성될 수 있다는 연구결과도 있다(Indraratna et al., 1991). 또한 한편으로는 석회에 포함된 CaO가 플라이애쉬의 반응에 큰 영향을 주지 않았던 것은 주성분원소들이 비슷하더라도 원탄의 종류 및 연소 조건에 따라서 플라이애쉬의 반응성은 큰 차이를 보이기 때문인 것으로 판단된다(Joshi and Rosaur, 1973).

플라이애쉬, 석회 등을 점토와 혼합하여 매립장 차수층 건설재료 혹은 지반개량재 등으로 사용할 때, 혼합재 구성성분간의 화학반응의 정도를 결정하는 구성성분의 활성도는 매우 중요하다. 표 1과 같은 구성물질 성분분석 결과는 반응에 필요한 구성성분의 상대적인 총량을 산화물 형태로 나타낼 뿐 구성성분의 실제 존

재형태와 반응성에 대한 정보는 주지 못한다. 따라서 구성성분의 화학반응성을 나타내는 활성도 및 결정도를 X선 회절분석 등을 통하여 사전에 조사할 필요가 있다.

6.2 석회 첨가가 혼합재 투수계수에 미치는 영향

석회 혹은 플라이애쉬를 점토와 혼합하였을 때 발생하는 반응은 단기적으로는 (1) 혼합재의 산화칼슘과 물과의 수화반응, (2) 양이온 치환과, 장기적으로는 (3) 포졸란 반응과 (4) 혼합재의 산화칼슘과 이산화탄소가 반응하여 CaCO_3 를 형성하는 탄산화(carbonation)이다. 플라이애쉬-벤토나이트 혼합차수재에 석회를 첨가하였을 때, 석회는 혼합차수재의 투수계수에 순기능과 역기능의 두 측면에서 동시에 영향을 준다.

Ultra-sonic으로 분산된 석회 시료의 SEM 사진에서 나타난 입자크기는 1~2 μm 로서 플라이애쉬의 입자보다 작았다. 따라서 석회 입자는 플라이애쉬-벤토나이트-석회의 혼합차수재에 대한 SEM 사진에서 관찰되었던 바와 같이 플라이애쉬 입자 사이의 간극을 직접적으로 채워 투수계수를 낮추는 역할을 한다. 본 실험에서는 포졸란 반응이 활발하지는 않았지만 포졸란 반응의 발생은 충분히 확인되었다. 생성된 포졸란 반응물이 간극을 채움에 따라 혼합차수재의 투수계수는 감소하게 된다.

반면, 석회에 포함된 Ca 이온은 벤토나이트의 Na 이온과 치환하여 입자간 간격을 줄이고 벤토나이트 입자 주위의 전기이중층 두께를 줄임으로써 혼합차수재의 저투수성에 결정적 역할을 하는 벤토나이트의 팽창을 저해한다. 즉 석회의 Ca 이온은 벤토나이트 입자의 inner-crystalline 팽창과 삼투(osmotic) 팽창을 저해하게 된다. 석회 첨가에 따른 벤토나이트의 이온 치환으로 인한 면모화(flocculation)는 지반개량의 목적으로는 소성을 감소시키고 강성도(stiffness)와 강도를 증가시키지만, 투수계수의 저감 목적으로는 역기능을 발휘할 수 있

다. 벤토나이트의 면모화는 벤토나이트 입자가 조립화되는 것을 말하며 이로 인해 투수계수는 증가하게 된다.

석회가 지반개량재로 점토에 사용되었을 때 면모화 및 화학반응 진행 정도에 따라 점토의 투수계수는 증감할 수 있는 데, 이에 대한 개념적 모델(Ingles and Metcalf, 1973)과 실험적 고찰(Locat et al., 1996)은 문헌에 있다. 본 실험에서 획득한 미세구조분석 결과를 고려할 때, 실험에 사용된 플라이애쉬와 석회는 낮은 활성도로 인해 구성성분간 화학반응 및 혼합재 투수계수의 저감 효과는 크지 않았던 것으로 판단된다. 본 실험의 조건에서는 벤토나이트가 플라이애쉬 혼합차수재의 폐기물 매립지 차수층으로서의 투수기준을 만족시키는 데 가장 중요한 역할을 한 것으로 사료된다. 본 실험과 유사한 산업부산물의 이용은 물질의 화학적 상태에 따라 결과가 달라질 수 있으므로 신뢰성있는 실험결과 도출을 위해서는 실험의 제조전에 세심한 주의가 필요하다.

7. 향후 연구를 위한 제안

벤토나이트의 경우 상품화된 제품을 사용하므로 물리/화학적 특성이 비교적 일정하게 유지되나, 플라이애쉬는 원탄의 종류, 연소 조건, 회의 집진 및 처리 방식, 야적 방법 및 기간 등의 차이에 따라 특성이 유동적이다. 따라서 차수층 재료로서의 플라이애쉬의 적용에 있어 사전 조사를 통해 사안별 벤토나이트의 배합비 및 혼합방법 등을 결정할 필요가 있다.

벤토나이트를 20% 혹은 그 이상으로 혼합하는 것은 경우에 따라서 경제적 제한을 받는 선택이 될 수도 있다. 벤토나이트의 혼합비를 줄이면서 혼합차수재의 투수계수를 1×10^{-9} m/s 이하로 유지할 수 있는 방안이 필요할 것으로 보이며, 한 예로 작은 입자가 균등 분포된 혼합차수재의 입도에 변화를 시도하는 방법의 가능성을 들 수 있다.

8. 결 론

본 연구에서는 플라이애쉬를 주성분으로 하는 점토 대용 인공차수재의 투수특성을 밝히기 위해 플라이애쉬, 벤토나이트, 석회의 혼합비, 재령일수에 따른 일련의 투수시험과 제작된 시료에 대한 X선 회절분석(XRD), 전자주사현미경분석(SEM), 헬륨 간극분석기법(helium porosimetry), 확대영상기법(image analysis) 등의 미세구조분석 연구를 실시하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 실험조건하에서 플라이애쉬에 20%의 벤토나이트를 섞은 혼합차수재의 투수계수는 1×10^{-9} m/s 이하로 폐기물 매립장 차수재로서의 역할을 할 수 있다. 혼합차수재의 투수계수는 벤토나이트의 함량과 양생시간이 증가할수록 감소하였고, 시간에 따른 투수계수의 감소속도는 처음 7일 동안의 빠른 경향을 지나 14일 이후에는 크게 줄어 들었다.
- (2) 혼합차수재의 미세구조를 XRD와 SEM으로 분석한 결과 혼합차수재의 투수계수는 벤토나이트의 팽창에 의한 간극의 충전과, 플라이애쉬, 벤토나이트, 석회간의 포졸란 반응 등 반응생성물에 의한 간극의 충전 등의 원인으로 감소하였다. 투수계수 감소는 주로 벤토나이트의 팽창에 의한 것이며 그의 원인의 영향은 크지 않은 것으로 사료된다.
- (3) 여러 조건별로 제작된 시료에 대한 XRD 분석결과 주재료인 플라이애쉬와 벤토나이트가 원래 함유하고 있던 광물들은 확연히 식별되었다. 포졸란 반응의 결과물인 CSH 수화물의 발생 사실은 확인할 수 있었으나 반응생성물의 결정도는 낮았다.
- (4) 국내의 플라이애쉬에는 CaO 성분이 5% 이하의 미량이어서 플라이애쉬와 점토가 혼합되었을 때 왕성한 포졸란 반응 및 이로 인한 투수계수 저감효과는 적었다. 이를 극복하기 위해 외부에서 인위

적으로 석회를 15%까지 첨가하였으나 첨가한 석회와 플라이애쉬에 포함된 CaO의 반응성이 다르고 플라이애쉬에 포함된 SiO₂의 활성도가 낮아 포졸란 반응은 활발하지 않았으며 혼합차수재의 투수계수 저감에 큰 역할을 하지 못한 것으로 보인다.

- (5) 석회는 플라이애쉬 혼합차수재에서 간극을 채움으로써 투수계수를 저감시키지만, 과량의 석회를 사용할 경우 다른 물질과 반응하지 않은 채 존재하는 칼슘의 량도 증가시켜 이들 칼슘이 벤토나이트의 팽창을 억제하고 면모화를 촉진해 투수계수를 증가시킬 수도 있을 것으로 추론된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경공학기술개발사업 '인공 차수재 및 복토재 개발' 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 동력자원부(1991), 장기발전수급계획(1991~2001)
2. 이용수, 정문경, 정하익, 우제윤(1997), "매립지 차수재로서 플라이애쉬 재활용을 위한 기본연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 3, pp.513~516.
3. 정승용, 김선석, 김수삼(1995), "오염방지재로서 석탄비회의 재활용에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 3, pp.559~562.
4. 천병식, 최현석, 박기천, 최상훈, 조규완(1995), "석탄회의 건설재로서의 활용에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 3, pp.567~570.
5. 한국건설기술연구원(1992), 성토재로서의 석탄회 이용방안 연구, 연구보고서 KRC-90H-J06, 한국전력공사 기술연구원.
6. 한국건설기술연구원(1996), "플라이애쉬 재활용 차수재 개발", 인공차수재 및 복토재 개발,

환경부 환경공학기술개발사업, 제1차년도 연차보고서, 환경부.

7. 한국건설기술연구원(1997), "플라이애쉬 재활용 차수재 개발", 인공 차수재 및 복토재 개발, 환경부 환경공학기술개발사업 제2차년도 연차보고서, 환경부.
8. Alther, G.R.(1986), "The Effect of the Exchangeable Cations on the Physico-Chemical Properties of Wyoming Bentonite", Applied Clay Science, No.1, pp.273~284.
9. Bowders, J.J, Gidley, J.S., and Usmen, M.A. (1990), "Permeability and Leachate Characteristics of Stabilized Class F Fly Ash", Transportation Research Board Record 1288, National Research Council, Washington D. C., USA, pp. 70~77.
10. Daniel, D.E. and Benson, C.H.(1990), "Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 12, pp. 1811~1830.
11. Dixon, D.A., Gray, M.N., and Graham, J. (1996), "Swelling and Hydraulic Properties of Bentonites from Japan, Canada, and the USA", Proc. of Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, pp.43~48.
12. Elzea J.M. and Murray, H.H.(1990), "Variation in the Mineralogical, Chemical and Physical Properties of the Cretaceous Clay Spur Bentonite in Wyoming and Montana(U. S.A.)", Applied Clay Science, No. 5, pp. 229~248.
13. Gleason, M.H., Daniel, D.E., and Eykholt, G. R.(1997), "Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 5, pp.438~445.
14. Indraratna, B., Nutalaya, P., Koo, K.S., and Kuganenthira, N.(1991), "Engineering Behavior of a Low Carbon, Pozzolanic Fly Ash and Its Potential as a Construction Fill", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, pp. 542~555.

15. Ingles, O.G. and Metcalf, J.B.(1973), *Soil Stabilization*, Wiley and Sons, New York.
16. Joshi, R.C. and Rosaur, E.A.(1973), "Pozzolanic Activity in Synthetic Fly Ashes", *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 52, No. 5, pp.456~463.
17. Lim, N.W.(1997), "Reuse of Fly Ash as a Structural Filler for Asphalt Concrete", *Proc. of 12th Intl. Symposium on Coal Combustion By-Product(CCB) Management and Use*, Orlando, Florida, USA, Vol. 1, pp. 18.1~18.14.
18. Locat, J., Tremblay, H., and Leroueil, S. (1996), "Mechanical and Hydraulic Behavior of a Soft Inorganic Clay Treated with Lime", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 4, pp.654~669.
19. Madsen, F.T. and Muller-Vonmoos, M. (1989), "The Swelling Behavior of Clays", *Applied Clay Science*, No. 4, pp. 143~156.
20. Rao, S.N. and Rajasekaran, G.(1996), "Reaction Products Formed in Lime-Stabilized Marine Clays", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 5, pp.329~336.
21. Reschke, A.E., and Haug, M.D.(1991), "The Physico-Chemical Properties of Bentonites and the Performance of Sand-Bentonite Mixtures", *Proc. of 44th Annual Canadian Geotechnical Conference*, pp. 62.1~62.10.
22. Usman M.A., Bowders, J.J., and Gidley, J.S. (1988), "Low Permeability Liners Incorporating Fly Ash", *Proc. of ASCE National Convention*, Nashville, TN, USA, pp.50~65.
23. Xu, J.(1994), "Compacted Kaolinite-Chemical Interactions: Microfabric and Hydraulic Conductivity Study", PhD Dissertation, Civil Engineering Dept., Texas A&M University, College Station, Tx., USA.

(접수일자 1998. 1. 8)