

폐기물매립지 토사계 혼합 차수재의 공학적 특성에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Engineering Characteristic
of the Waste Landfill Soil Admixed Linear장 용 채¹⁾ · 김 진 춘[†] · 정 옥 기²⁾

Chang, Yongchai · Kim, Jinchun · Jeong, Ogki

ABSTRACT : Leachates resulting from the waste landfill of waste can possibly cause the second pollution, such as the underground water and environmental pollution. Accordingly, Liner layer has been installed in the reclaimed land of waste to block and purify permeation water to and prevent this second pollution. The material used as Liner layer should have water resistance and be less than permeability coefficient of 1×10^{-7} cm/sec. As it is very difficult to get this kind of natural clay with low permeability around the field, the suitable way to get the low permeable material is to use blend with good watertightness by mixing it with natural soil which is spread in the site. While this mixed soil, which can resist water, is commonly used in the site, namely, bentonite and MCG cementitious material mixed soil, which is widely used as Liner layer in the reclaimed land of waste, is recognized in Liner and durability. The study was performed to find the effect of additive of the bottom liner in the waste landfill. The aim of this paper is to explain of the field application examples as well as the data of experimental research with the engineering properties of Liner layer of the reclaimed land.

Keywords : Waste landfill, Admixed linear, MCG cementitious material

요 지 : 폐기물 매립지에서 발생하는 침출수는 주변 환경오염은 물론 지하수 오염등 2차적 환경오염을 발생시킬 우려가 매우 크다. 따라서, 쓰레기 매립지에서는 차수층을 설치하여 침출수를 차단 정화시켜서 2차적인 환경오염을 막고 있다. 차수층으로 사용되는 재료는 불투수성재료로서 일반적으로 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec 이하가 되는 재료를 사용한다. 이러한 저 투수성을 갖는 자연상태의 점성토를 현장 부근에서 대량으로 확보하기는 매우 힘들기 때문에 그에 상응하는 저투수성 재료를 확보하는 방법으로 수밀성이 좋은 혼합재를 현장에 분포하는 현장토에 혼합하여 사용한다. 즉 벤토나이트와 MCG 고화재를 이용한 혼합토는 폐기물매립지에서 차수층으로 널리 이용되는 재료로서 차수효과와 내구성에서 크게 인정받고 있는 재료이다. 본 연구는 배합재료(혼합토)에 따른 폐기물매립지 차수층의 변화를 벤토나이트, MCG 고화재를 이용하여 실험하였다. 이들 재료의 혼합비가 현장에 미치는 영향을 다양한 공학적 실험을 통하여 분석하였다.

주요어 : 폐기물 매립지, 혼합 차수재, MCG 고화재

1. 서 론

환경오염에 대한 사회적 관심과 생활의 질적 향상에 따른 토양과 지하수오염의 심각성이 높아져 이에 대한 관심을 기울이고 있으나, 아직까지 국내에서는 급속한 산업화와 도시화로 인한 토양과 지하수의 적절한 관리를 소홀히 하여 환경 파괴와 지표면 아래의 깨끗한 물자원이 오염되고 있다. 특히 이러한 오염원 중 생활에서 발생하는 쓰레기 처리문제는 그 심각성이 매우 높으며 현재 국내 쓰레기 최종처리의 대부분은 매립에만 의존하고 있는 실정이다. 현재 국내에는 이미 사용 종료된 매립지가 1,072개소에 산재해 있고 과거 불량매립으로 발생한 침출수는 지하수나 하

천 및 호소 등으로 유출되어 수질오염이나 토양오염 등의 심각한 환경문제를 유발하고 있다. 뿐만 아니라 1990년대 중반 이후 최근에 많이 설치되고 있는 위생매립 또한 시공 및 관리 경험부족으로 인해 주변 인접지역에 악취 및 가스 발생 등의 적잖은 피해를 주고 있다(한국건설기술연구원, 1998). 그러므로 이러한 문제해결을 위해서는 이미 종료된 매립지의 재정비와 위생 매립지 차수시스템의 개발이 시급한 실정이다.

일반적으로 폐기물 매립지에서 발생할 수 있는 오염물로서는 침출수와 함께 매립가스 등이 있으며 이중 침출수는 주변토양과 지하수를 오염시키는 주원인으로서 이의 효율적인 제거와 처리를 위하여 차수층시설 및 배수

1) 정희원, 목포해양대학교 해양토목공학과 교수

† 정희원, (주)한국지오택 대표이사(E-mail : kig-2000@hanmail.net)

2) 비회원, 광주광역시환경시설공단

시설이 필요하다(최우진 등, 2000). 바다 차수재로 사용되는 재료로는 주로 점토 차수재 또는 흙-벤토나이트 혼합토를 사용하고 있으나 국내 여건상 차수재로 사용되는 양질의 점토는 부족할 뿐만 아니라 시공 후 동결융해와 습윤건조에 의한 균열에 대해 관리방안이 거의 전무한 상태이다. 또한 매립장 건설의 지리적인 제한성 때문에 종전의 점토계 또는 흙-벤토나이트계 차수시스템을 이용한다면 자연환경을 훼손하는 2차적인 문제를 불러일으킬 수 있으므로 현실적으로 도입하기 어려운 경우가 빈번해지고 있다. 따라서 적절한 대안으로 현지토를 선별한 후 고화재와 혼합 처리한 고화토의 활용에 대한 관심이 높아지고 있다.

2. MCG계 고화토 및 현장토 특성평가

2.1 MCG 고화재 특성

MCG는 운모(Muscovite), 탄소(Carbon), 석고(Gypsum)의 머리글자로 이들 첨가재료의 기능성을 활용하고 있으며, 각재료별 특성을 모식화하면 그림 1과 같다.

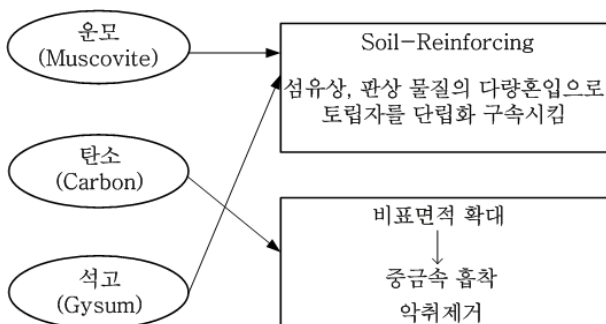


그림 1. MCG 고화재의 재료별 특성

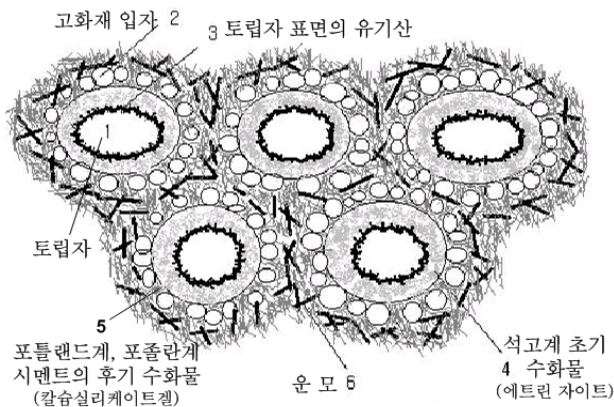


그림 2. MCG 고화토 공법의 개념

2.2 MCG 고화토 공법의 개념

MCG 고화토 공법은 시멘트 수화시 발생하는 고화재의 수축균열을 방지하고 판상섬유상의 광물과 수화물에 의해서 구속되기 때문에 종래의 포틀랜드시멘트계 고화토 공법에 비해서 균열발생량과 투수계수가 획기적으로 감소되는 특징을 가지고 있다. 고화처리 반응 개념도는 그림 2와 같으며, 그림 2에 의한 MCG 고화토의 화학적 반응단계는 다음과 같이 요약할 수 있다.

단기적으로는 흙 사이의 간극수와 시멘트계 고화재가 반응하여 표면의 물을 흡수하여 시멘트 gel을 형성하므로 토질성상의 다짐성이 좋아진다. 장기적으로는 시멘트 gel에 부착된 물분자의 시멘트가 결합된 수화반응이 생성되어 1차적으로 시멘트 수화물과 흙입자가 결합되고, 2차적으로는 시멘트 수화시 발생된 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 점토성분 중의 SiO_2 및 Al_2O_3 가 반응하여 포졸란반응이 생성되면서 장기적으로 강도증가에 기여한다.

이외에도 잔여 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 대기중의 CO_2 가 반응하여 탄산화가 진행되면서 강도가 증진되며, 점토 표면의 음이온 대전이 감소하여 물과의 친화성이 감소되면서 함수비가 낮아지므로 건조습윤에 의한 동결융해 저항성이 향상되는 것으로 알려져 있다.

2.3 현장토의 공학적 특성

재료로 사용된 흙은 통일분류법(USCS)상 SM계열로, 광주비위생매립지 현장토를 사용하였다. 흙의 물리적 성질은 표 1에 나타내었다.

표 1. 현장토의 공학적 특성

통일 분류	비중	액성 한계 (%)	소성 지수 (%)	200체 통과량 (%)	최대건조 단위중량 (g/cm^3)	최적 함수비 (%)	투수계수 (cm/sec)
SM	2.65	NP	NP	40.9	1.776	13.1	1.7×10^{-6}

3. 실내시험

3.1 실험재료의 특성

흙-벤토나이트 혼합토 차수재와 MCG 고화토 차수재의 공학적 특성을 검토하기 위하여 현장토에 벤토나이트와 MCG 고화재를 일정한 중량비로 혼합하여 각각에 대한 다짐시험, 일축압축시험, 투수시험, 동결융해저항성시험, 균열저항성시험 및 환경영향성시험등을 평가하였다.

3.2 실험조건 및 방법

3.2.1 다짐시험

흙-벤토나이트 혼합토 차수재에서 벤토나이트의 함량변화에 대한 다짐특성과 MCG 고화토 차수재에서 MCG 고화재의 함량변화에 대한 다짐특성을 분석하기 위하여 KS F 2312에 규정된 표준다짐시험 방법을 이용하였다(김상규, 1998).

다짐시험은 A다짐방법을 사용하였고, 노건조시킨 현장토에 벤토나이트를 중량비 8%, 10%, 12%로 혼합한 3종류의 흙-벤토나이트 혼합토와 MCG 고화재를 중량비 6%, 6.5%, 7%를 충분히 섞은 3종류의 MCG 고화토에 대하여 각각 다짐시험을 3회 실시하였다.

3.2.2 일축압축시험

MCG 고화토의 일축압축강도시험용 시료의 성형은 표준다짐에너지에 준한 에너지 값에 따라 다짐을 95%이상으로 하여 다짐시험에서 얻은 최적함수비보다 2~3% 습윤측에서 제조하였다. 시료의 성형방법은 동적다짐에 의한 방법과 정적다짐에 의한 방법이 있다.

동적다짐에 의한 Trimming Sample은 균질한 시료성형에 문제가 제기될 여지가 있으므로, 본 연구에서는 정적다짐에 의한 Undercompaction Method를 사용하였다.

또한 함수비를 최적 함수비보다 크게 한 것은, 이론적으로 투수계수는 최적함수비일때 최소가 되지만 실측에 의하면 최적함수비 건조측에서는 면모화(Flocculated)되고 변형된 집합체(Aggregate)로 존재하여 상대적으로 큰 간극이 연결되어 있는 반면, 최적함수비 습윤상태에서는 분산(Dispersed)되어 간극 크기가 작아지기 때문에 투수계수는 최적함수비의 습윤측에서 최소가 되기 때문이다(김상규, 2002). KS F 2314의 규정에 따라 직경과 높이를 1:2의 비로 맞추어 성형된 시료는 항온수조에서 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, 90%이상의 습도상태에서 7일, 14일간 습윤양생 하였으며, 1%/min의 변형률로 압축하면서 시험을 실시하였다.

3.2.3 투수시험

본 시험에서는 현장토와 혼합한 벤토나이트 MCG 고화재의 함량에 따른 혼합토 차수재를 KS F 2322의 규정에 의한 변수위투수시험을 실시하였다.

다짐시험에서 구한 최대건조밀도의 95%다짐도와 최적함수비보다 3% 습윤측의 함수비로 다져진 차수재에 대하여 MCG 고화토의 경우 7일, 14일간 습윤양생한 후 시험을 실시하였으며, 흙-벤토나이트 혼합토는 습윤양생을 시

키지 않고 투수시험을 실시하였다.

3.2.4 동결융해저항성시험

다짐시험으로 성형한 공시체를 KS F 2456에 규정된 방법에 의하여 습기함에 넣어 7일, 14일, 28일 양생을 실시한 후 압축강도를 측정하였다. 또한 비교를 위한 동결융해 후 시료에 대한 일축압축강도를 시험은 국내의 기후특성을 반영하기 위해 최저 -20°C 와 최고 5°C 로 유지되는 냉장, 냉동 캐비닛을 이용하여 3일 동결과 4일 융해과정을 1Cycle로 5Cycle간 반복하였다. 이때 사용한 공시체는 가습기를 통해 습도가 유지되는 습기함에서 28일간 습윤양생 후 동결융해 시험기에 투입하였으며 동결융해 시험이 지속되는동안 가습의 효과는 중단하였다.

최후 융해가 끝난 후 서서히 승온시켜 상온에서 1일간 방치시켜 냉동, 냉장의 효과를 제거한 후 일축압축 강도와 투수계수를 측정하였다.

3.2.5 균열저항성시험

고화토의 균열 저항성을 평가할 수 있는 공론화된 시험법이 제시된것은 없지만 시멘트 모르타르나 콘크리트 시편에 대한 구속균열 시험방법에 의해서 시험을 실시하였다.

즉, 길이 30cm, 상하 양단의 긴폭 8cm, 시편 중앙부 폭 4cm, 두께 2cm의 고화토 시편을 만들고, 시편의 양단을 구속시켜서 양생을 진행시키면 고화토가 양생되면서 수축이 발생하고 결국 중앙부에서 균열이 발생하게 된다. 이때 균열이 발생하는 시점과 균열의 크기에 의해서 균열발생에 대한 상대적인 저항을 평가할 수 있다.

3.2.6 환경영향성시험

고화토의 양이온 교환능력 변화를 알아보기 위하여 pH 7 ammonium acetate법을 이용하여 측정하였다. 본 ammonium acetate법은 시료내의 교환 site를 초산암모늄으로 치환한 후 다시 KCl 용액을 이용하여 NH_4^+ 를 치환, NH_4^+ 를 분석하여 정량화하는 방법이다.

고화토의 중금속 제거능 평가실험은 피흡착제로 사용된 Cu, Cd, Pb, Cr^{6+} 단일시료와 혼합시료를 제조한 후 매립지에서 볼 수 있는 가장 낮은 pH 형태인 pH 4로 조정하여 250ml를 취한 후 흡착제로 사용된 화강토와 MCG 고화재 혼합시료 5g을 넣고 25°C 항온진탕기에서 진탕시키며 시료를 채취하여 흡광광도법으로 분석하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 다짐시험

4.1.1 흙-벤토나이트 혼합토의 다짐시험 결과

현장토에 벤토나이트를 중량비 8%, 10%, 12%로 혼합한 후 A다짐시험을 3회 실시, 평균하여 혼합비에 대한 최대건조밀도와 최적함수비의 관계는 표 2에 나타내었고 다짐곡선은 그림 3에 나타내었다. 다짐시험 결과를 살펴보면 벤토나이트 혼합비가 증가할수록 최대건조단위중량은 감소하며 1.658~1.624g/cm³값을 나타내며, 최적함수비는 증가하나 17.8~19.8%정도임을 알 수 있었다. 이는 벤토나이트가 친수력이 크기 때문에 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 보유되는 물의 양이 많아지기 때문인 것으로 볼 수 있다(이용수 등, 1999). 또한 벤토나이트 혼합비 8~12% 범위에서는 최대건조단위중량과 최적함수비 증감은 미미한 것으로 나타났다.

표 2. 흙-벤토나이트 혼합토의 최대건조단위중량과 최적함수비

구분	혼합비	8%	10%	12%
최적함수비(%)		17.8	18.7	19.8
최대건조단위중량(g/cm ³)		1.658	1.637	1.624

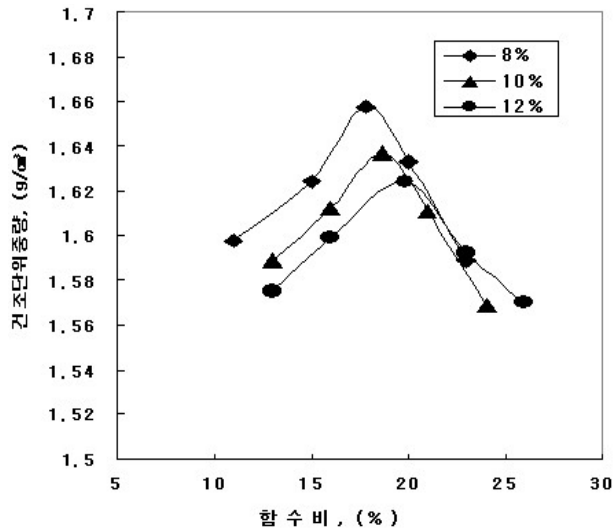


그림 3. 흙-벤토나이트 혼합토의 다짐곡선

4.1.2 MCG 고화토의 다짐시험결과

현장토에 MCG 고화재를 적정범위의 중량비 6%, 6.5%, 7%로 혼합한 후 A다짐시험을 3회 실시, 평균하여 MCG 고화재 혼합비에 대한 최대건조밀도와 최적함수비의 관계는 표 3에 나타내었고, 다짐곡선은 그림 4에 나타내었다. 다짐시험결과를 살펴보면 MCG 고화재 혼합비가 증가할

수록 최대건조단위중량은 증가하여 1.791~1.824g/cm³ 값을 나타내며, 최적함수비는 감소하나 11.7~12.8% 정도임을 알 수 있었다. 이는 MCG 고화재가 친수력은 크지만 수화작용에 의해 수화물을 생성하기 때문인 것으로 볼 수 있으며 MCG 고화재 혼합비 6~7%에서 최대건조단위중량과 최적함수비의 증감은 미미한 것으로 나타났다.

표 3. MCG 고화토의 최대건조단위중량과 최적함수비

구분	혼합비	6%	6.5%	7%
최적함수비(%)		12.8	12.2	11.7
최대건조단위중량(g/cm ³)		1.791	1.802	1.824

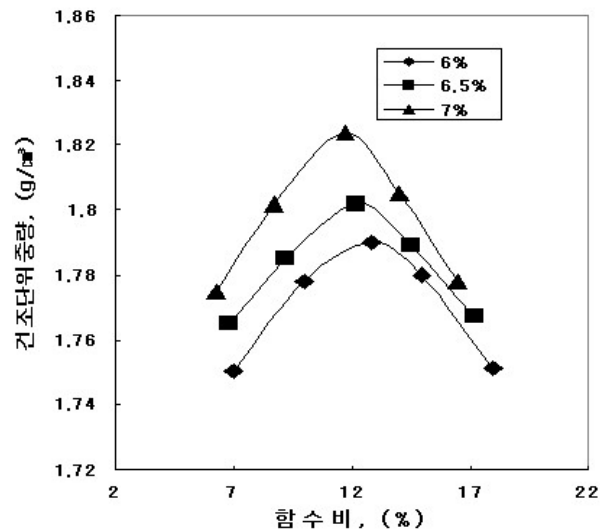


그림 4. MCG 고화토의 다짐곡선

4.1.3 흙-벤토나이트 혼합토와 MCG 고화토의 다짐시험 비교

현장토에 혼합하는 벤토나이트와 MCG 고화토의 혼합비에 따른 최대건조단위중량과 최적함수비와의 관계는 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

그림 5를 보면 MCG 고화토의 경우 혼합비가 증가할수록 최대건조단위중량은 증가하나 흙-벤토나이트 혼합토의 경우에는 감소하는 경향을 보이며, MCG 고화토의 최대건조단위중량은 흙-벤토나이트 혼합토의 최대건조단위중량보다 현저히 크게 나타났다.

그림 6에서 혼합비에 대한 최적함수비는 MCG 고화토의 경우 혼합비가 증가할수록 최적함수비는 감소하나 흙-벤토나이트 혼합토는 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 MCG 고화재의 경우 첨가된 물은 수화물 생성에 사용되며, 흙-벤토나이트 혼합토의 경우 첨가된 물은 벤토나이트에 흡착이 되었기 때문일 것으로 판단된다.

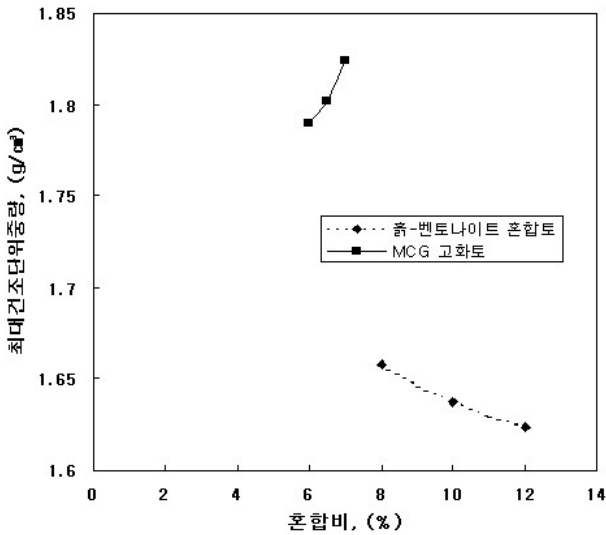


그림 5. 혼합비에 따른 최대건조단위중량

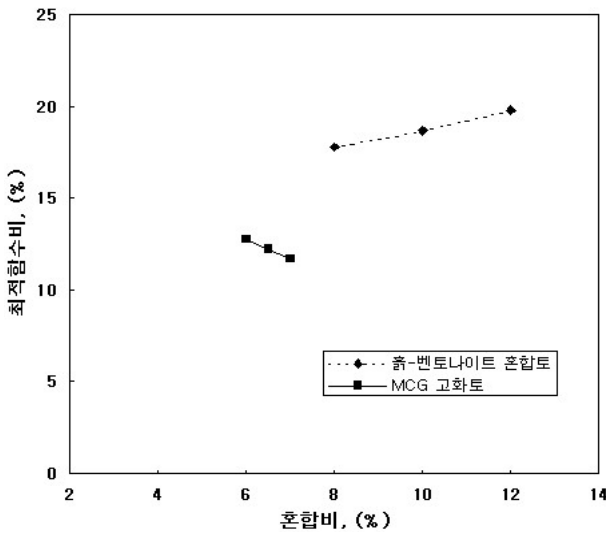


그림 6. 혼합비에 따른 최적함수비

4.2 일축압축강도시험

MCG 고화토의 일축압축강도시험은 표준다짐에너지로 다짐을 95%이상, 최적함수비보다 2% 습윤측에서 제조하였으며, 성형된 시료는 항온수조에서 7일, 14일간 습윤양생 시킨 후 일축압축강도 시험을 실시하여 표 4와 그림 7에 결과를 나타내었다.

표 4와 그림 7에서 MCG 고화토의 경우 MCG 고화재 혼합비가 증가하고, 습윤양생 기간이 증가 할수록 수화물 형성에 의하여 강도는 증가하는 경향을 나타내며, 일축압축강도는 습윤양생 7일 후 혼합비 6~7%에서 28.3~38.3kg/cm², 14일 후 37.9~48.8kg/cm²로 나타났다.

표 4. 일축압축시험 결과

구 분	혼합비(%)	양생일별 일축압축강도(kg/cm ²)	
		7일	14일
MCG 고화토	6	28.3	37.9
	6.5	32.5	40.8
	7	38.3	48.8

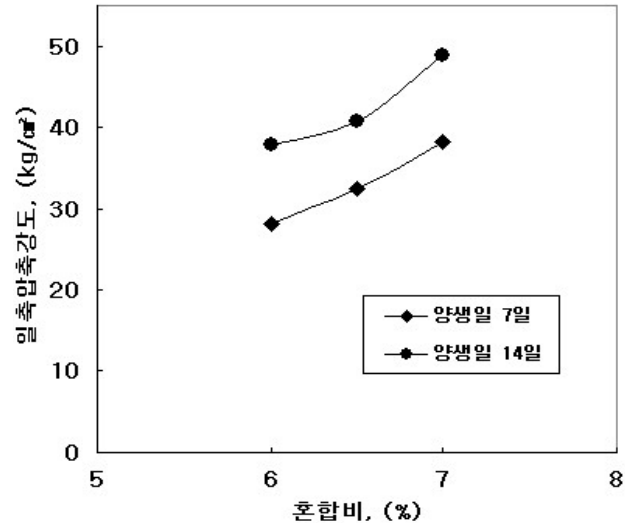


그림 7. 혼합비에 대한 MCG 고화토의 일축압축강도

4.3 투수시험

투수시험은 표준다짐에너지로 다짐을 95%이상, 최적함수비보다 2% 습윤측에서 제조하였으며, 성형된 시료는 MCG 고화토의 경우 7일, 14일간 수중양생 시킨 후 투수시험을 실시하였으며, 흙-벤토나이트 혼합토는 양생기간 없이 시험을 실시하였다.

표 5, 6과 그림 8에 나타난 바와 같이 흙-벤토나이트 혼합토의 경우 벤토나이트의 팽윤에 의한 간극 채움에 의해, MCG 고화토는 수화 생성물에 의한 흙-MCG 고화재의 내부조직 치밀화와 고화재 미세입자들의 간극 충전 및 면모

표 5. 흙-벤토나이트 혼합토 투수시험 결과

구 분	혼합비(%)	투수계수(cm/sec)
흙-벤토나이트 혼합토	8	9.8×10 ⁻⁸
	10	7.9×10 ⁻⁸
	12	6.1×10 ⁻⁸

표 6. MCG 고화토 투수시험 결과

구 분	혼합비(%)	양생일별 투수계수(cm/sec)	
		7일	14일
MCG 고화토	6	8.2×10 ⁻⁷	9.5×10 ⁻⁷
	6.5	7.9×10 ⁻⁸	8.3×10 ⁻⁸
	7	6.8×10 ⁻⁸	5.7×10 ⁻⁸

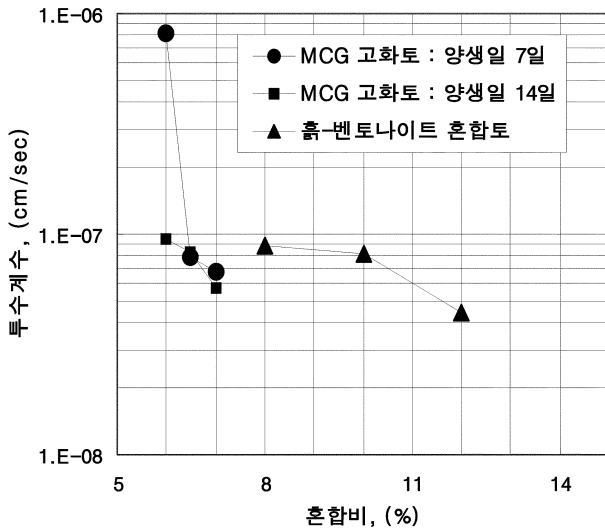


그림 8. 흙-벤토나이트와 MCG의 혼합비에 대한 투수계수 비교

구조 광물의 유로 차단에 의해 혼합비가 증가할수록 투수계수는 감소하는 경향을 나타냈다.

특히, MCG 고화토의 경우에는 양생일이 경과 할수록 투수계가 감소하는 경향을 나타낸다. 흙-벤토나이트 혼합토의 경우에는 벤토나이트 혼합비가 8%, MCG 고화토에서는 양생 7일 후 고화재 혼합비 6.5%, 14일 후 6%에서 투수계수기준을 만족시킨다.

그림 8에서 MCG 고화토의 투수계수는 고화토의 혼합비가 벤토나이트 혼합비에 비해 2~5% 정도 작지만 투수계수기준을 만족시키는 것으로 나타났다.

4.5 동결융해 저항성

MCG 고화재를 5, 10, 15, 20% 첨가한 고화토에 대해서 동결융해 전후의 압축강도와 투수계수를 KS F 2456 시험방법에 의하여 측정한 결과는 다음 표 7과 그림 9, 10에 나타내었다.

MCG를 첨가한 고화토는 동결융해 작용을 받은 후에도 압축강도가 향상되고 투수계수가 낮아지는 우수한 특성을 나타내었다. 이와같은 현상은 MCG 고화재가 기본적으로 강도 발현성이 우수하고 장기적으로는 포졸란 반응이 지

표 7. 동결융해 전·후의 압축강도와 투수계수

배합비 (현지토 : MCG)	동결융해 전		동결융해 후	
	압축강도 (kgf/cm ²)	투수계수 (cm/sec)	압축강도 (kgf/cm ²)	투수계수 (cm/sec)
95 : 5	8.0	5.24×10 ⁻⁸	10.6	1.55×10 ⁻⁸
90 : 10	22.9	5.33×10 ⁻⁸	36.8	6.01×10 ⁻⁹
85 : 15	37.2	2.87×10 ⁻⁸	47.0	2.42×10 ⁻⁹
80 : 20	40.0	1.87×10 ⁻⁹	71.4	1.34×10 ⁻⁹

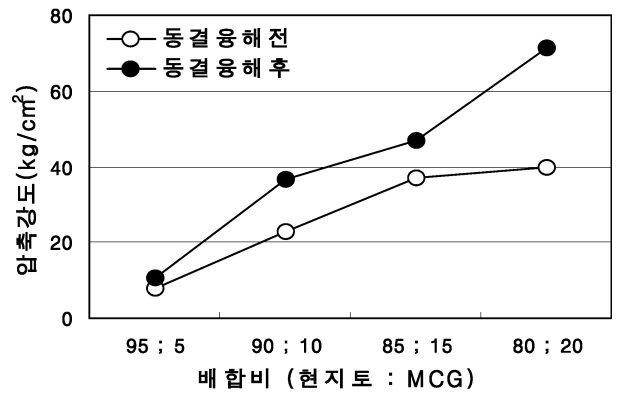


그림 9. 동결융해 전·후의 압축강도

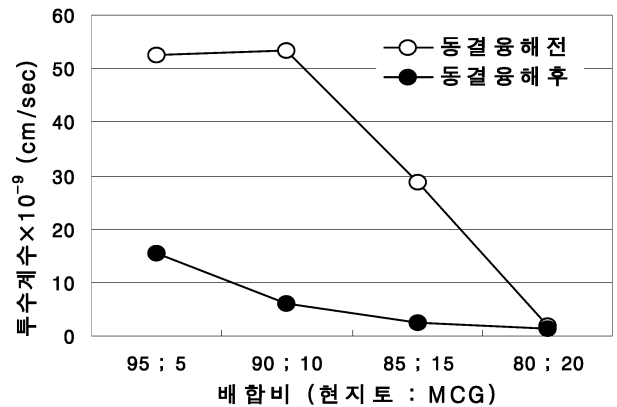


그림 10. 동결융해 전·후의 투수계수

속되어 동결융해 기간중에도 지속적으로 수화반응이 진행되기 때문인 것으로 판단된다.

4.6 균열발생 저항성

MCG계 고화토와 종래의 포틀랜드시멘트계 고화토의 균열발생 특성을 비교하기 위해서 그림 11과 같은 양단으로 구속된 대문자 I형의 얇은 공시체를 이용하여 응력이

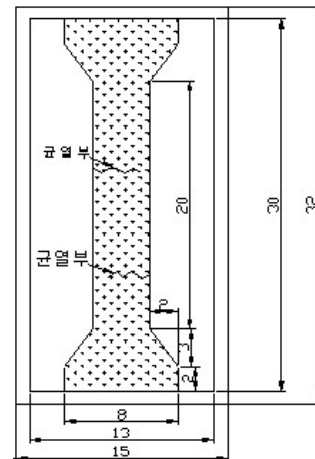


그림 11. I형 공시체

표 8. MCG계 고화토와 포틀랜드시멘트계 고화토의 균열발생 특성

	균열발생재령	28일 재령 균열폭(mm)
MCG계	5일	0.4
OPC계	2일	0.9

* 배합비-현지토:고화토=90:10, 함수비 : 22%

집중되는 취약부에서 균열이 발생하는 재령과 균열폭의 크기로 균열발생 특성을 평가하였다.

MCG계 고화재는 현지토와 혼합 후 섬유상의 광물과 섬유상의 수화물에 의해서 토립자를 단립화 시키는 효과가 우수하기 때문에 고결반응과정에서 발생하는 수축균열을 억제하는 효과가 우수하였다.

4.7 환경영향성

MCG 고화재를 5, 10, 15, 20% 첨가한 고화토에 대해서 양생 전, 후에 양이온 교환능력과 중금속 제거율 시험을 실시한 결과 환경적으로 양호한 결과를 얻었으며 그 결과는 표 9와 같다.

표 9. 양생 전·후에 양이온 교환능력과 중금속 제거율 시험

배합비 (현지토 : MCG)	양이온 교환능력CEC (meq/100g)		중금속 제거율(%) [20ppm Cd]					
	양생전	7일 양생후	양생전		일반 양생후		내산 양생후	
			0.5시간	48시간	0.5시간	48시간	0.5시간	48시간
95 : 5	9.2	13.4	97이상	99이상	약 69	95이상	약 54	95이상
90 : 10	8.5	11.6	95이상	95이상	약 85	95이상	약 70	95이상
85 : 15	7.2	11.1	95이상	95이상	95이상	95이상	95이상	95이상
80 : 20	9.5	12.3	95이상	95이상	95이상	95이상	95이상	95이상

* CEC : 양이온교환용량(Cation Exchange Capacity)

MCG계 고화토의 CEC는 kaolinite 계열 CEC값 3~15 meq/100g의 범위를 보이고 있으며, 양생일수가 장기화 될수록 CEC값이 커져서 중금속 흡착제거가 향상되었다. 카드뮴을 대상으로한 중금속제거율 평가시험에서도 볼 수 있듯이 MCG 첨가량이 많을수록, 재령이 길수록 중금속 제거율이 높아지며 장기재령에는 산성분위기에서도 중금속 제거율이 매우 높았으며, MCG계 고화토는 중금속 제거능이 우수함을 알 수 있었다.

5. 결 론

흙-벤토나이트계 혼합토와 MCG계 고화토를 사용한 폐기물 매립지용 차수재의 다짐, 일축압축강도, 투수특성, 동결융해저항성, 균열저항성 및 환경안정성 등 공학적 특성에 대한 실험적 검토결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) SM 현장토를 대상으로 벤토나이트와 MCG 고화재를 첨가하여 다짐시험을 실시한 결과 MCG 고화재는 첨가량을 증가시킬수록 고화토의 단위중량이 1.79~1.82g/cm³로 증가하며, 최적함수비는 11.7~12.8%로 감소하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 현상은 벤토나이트는 간극수를 흡착시켜 혼합토의 조직을 이완시키고 고화재는 수화물을 형성시켜 고화토의 조직을 치밀하게 만들기 때문으로 판단된다.
- (2) MCG 고화토의 압축강도는 MCG 고화재 혼합비가 증가하고, 습윤양생 기간이 증가할수록 수화물 형성에 의하여 강도가 증가하는 경향을 나타냈으며, 일축압축강도는 혼합비 6~7%에서 습윤양생 7일 후 28.3~38.3kg/cm², 14일 후 37.9~48.8kg/cm²로 나타냄으로서 낮은 고화재 함유량에도 10kg/cm² 이상 충분한 내하력을 갖는 것으로 판단된다.
- (3) 투수시험결과 벤토나이트와 MCG 고화재의 혼합비가 증가할수록 투수계수는 감소하였다. 흙-벤토나이트 혼합토의 경우에는 벤토나이트 혼합비가 8%, MCG 고화토에서는 양생일 7일 후 고화재 혼합비 6.5%, 14일 후 6%에서 폐기물매립장 투수계수기준($\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/sec)을 만족시키는 것으로 나타났다.
- (4) MCG 고화토는 동결융해 작용을 받은 후에도 압축강도가 향상되고 투수계수가 낮아지는 특성이 발휘되었으며, 이는 MCG 고화재의 포졸란반응에 의해서 장기적으로 강도발현이 진행되고 수화조직이 치밀해지기 때문으로 판단된다.
- (5) MCG 고화토는 종래의 고화토에 비해서 균열발생 폭이 0.4mm로 좁고, 균열발생 재령이 5일로 길어지는 등 균열에 대한 억제력이 우수하였으며, 이는 MCG 고화재가 갖고 있는 섬유상의 광물이나 수화물에 의해서 수축균열이 억제되는 것으로 판단된다.
- (6) MCG 고화토가 48시간이상 또는 7일 이상 양생일수가 길어질수록 카드뮴 제거율 95%이상, 양이온 교환능력 10meq/100g이상으로 환경적으로도 안전함을 입증하였다.

참 고 문 헌

1. 김상규(2002), *토질역학의 이론과 응용*, 청문각, 서울, pp. 200~205.
2. 김상규(1998), *토질시험*, 동명사, 서울, pp. 134~139.
3. 김수문, 엄희남, 임남웅(2000), 벤토나이트와 시멘트가 매립장차수층의 투수성과 압축강도에 미치는 영향(I), *대한환경공학지*, 제22권 제3호, pp. 495~504.
4. 남효석(1993), *토목섬유로 보강한 모래-벤토나이트 차수재의*

장기적 투수특성, 경북대학교 농공학과 석사논문, pp. 234~239.

5. 이용수, 정하익, 정길수, 홍승서(1999), 흙-벤토나이트 혼합 차수층의 시공품질관리를 위한 기초 연구, *대한토목학회 1999년도 학술발표회 논문집(II)*, pp. 193~196.
6. 최우진, 전성기, 하현중(2000), 폐기물매립지 침출수 누출방지용 벤토나이트 복합라이너 개발, *한국지반환경공학회 논문집*, 제1권 제1호, pp. 65~66.
7. 한국건설기술연구원(1998), *흙-벤토나이트 혼합차수재의 품질관리 시험*, 건기연 98-062, pp. 25~28.
8. 한국건설기술연구원, *폐기물 매립시설의 설계·시공 기술에*

관한 연구, 건기연 98-075, 연구보고서, pp. 43~49.

9. 한국벤토나이트(2000), *쓰레기 매립장의 벤토나이트*, 한국벤토나이트(주) 자료집, pp. 7~10.
10. ASTM(1992), Test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, D5084-90. [10]Cornell University, Final Report on Solidification Research, Ithaca, New York, 1951.
11. Das, B.M.(1998), Principles of geotechnical engineering, International Thomson Publishing, Inc.

(접수일: 2006. 8. 30 심사일: 2006. 9. 15 심사완료일: 2006. 9. 28)