creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000267285

2019년 2월

석사학위 논문

지열시스템을 위한 광미 혼입 고유동 충전재

조선대학교 대학원

건 축 공 학 과

백 정 진

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

지열시스템을 위한 광미 혼입 고유동 충전재

Controlled low-strength materials containing mine tailings for geothermal system

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원
건 축 공 학 과
백 정 진

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

지열시스템을 위한 광미 혼입 고유동 충전재

지도교수 김 형 기

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원
건 축 공 학 과
백 정 진

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

백정진의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 조교수 황 태 연 (인)

위 원 조선대학교 조교수 김 태 훈 (인)

위 원 조선대학교 부교수 김 형 기 (인)

2018년 11월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

제 1장 서 론 1
제 1절 연구 배경 및 목적 1
제 2절 연구 방법 및 범위 8

제 2장 이론적 고찰 9
제 1절 지열시스템 9
제 2절 기존 지열 설비 기술 및 문제점 11
제 3절 저강도 고유동 충전재
(Controlled Low-Strength Materials : CLSM) 15
제 4절 폐광미 17
제 5절 석탄재(Pond ash 및 Fly ash) 18

제 3장 광미를 활용한 CLSM 성능 검토 19
제 1절 실험 개요 19
제 2절 사용 재료 및 배합비 20
제 3절 실험 방법 28
제 4절 실험 결과 및 분석 32

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4장 지열시스템을 위한 열전도성 CLSM 환경영향성 및 시공비용 검토 43
제 1절 환경영향성 검토 43
제 2절 시공비용 분석 및 실제 사례 고려 비용 분석 47

제 5장 Test-Bed 57
제 1절 Test-bed 계획 57
제 2절 Test-bed 시공 과정 59
제 3절 Test-bed 성능 평가 62

제 6장 결론 65

참 고 문 헌 67

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 차례

[표 2-1] 지열히트펌프 시스템의 종류 ····· 11
[표 3-1] 광미의 화학적 구성 성분 ····· 21
[표 3-2] 광미의 물리적 특성 ····· 21
[표 3-3] 광미의 중금속 함유량 ····· 22
[표 3-4] 전처리 공정에 대한 배합비 ····· 27
[표 3-5] 골재량 및 종류에 따른 배합비 ····· 27
[표 4-1] TCLP 시험결과 ····· 43
[표 4-2] CLSM의 비용 분석 ····· 48
[표 4-3] 호남권 축산 시험장의 건물 열부하 ····· 50
[표 4-4] 호남권 축산 시험장의 지중열 교환장치 설계 변수 ····· 50
[표 4-5] 충남도립도서관의 건물 열부하 ····· 52
[표 4-6] 충남도립도서관의 지중열 교환장치 설계 변수 ····· 52
[표 4-7] 지중열 히트 펌프 건설 비용분석 (호남권 축산시험장) ····· 56
[표 5-1] 지중 열교환기 열적 성능 평가 결과 ····· 64

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 차례

[그림 3-1] 재료 입자 크기 ····· 22
[그림 3-2] 광미와 펀드애시의 XRD 스펙트럼 ····· 23
[그림 3-3] SEM으로 관측한 광미와 펀드애시의 입자 표면 ····· 24
[그림 3-4] 원심분리기를 이용해 다진 새로운 CLSM 혼합물 ····· 31
[그림 3-5] CLSM의 열전도도 측정 실험(ASTM D5334) ····· 31
[그림 3-6] 새로운 CLSM 혼합물의 밀도 및 유동성 ····· 32
[그림 3-7] 전처리 공정에 대한 침하량 ····· 34
[그림 3-8] 전처리 공정에 대한 최종 침하량 ····· 34
[그림 3-9] 전처리 공정에 대한 광미혼합 CLSM의 압축강도 측정 값 ····· 35
[그림 3-10] 골재량 및 종류에 따른 CLSM 밀도 측정 값 ····· 37
[그림 3-11] 골재량 및 종류에 따른 자유수량 측정 값(원심분리 후) ····· 38
[그림 3-12] 골재량 및 종류에 따른 침하량 측정 값(5시간 경과) ····· 38
[그림 3-13] 골재량 및 종류에 따른 단일 압축 강도 측정 값 ····· 40
[그림 3-14] 골재량 및 종류에 따른 열전도도 측정 값 ····· 41
[그림 3-15] CLSM의 열전도도와 용적 비율 (좌) 굳지않은 상태의 밀도 (우) ····· 42
[그림 4-1] 골재량 및 종류에 따른 비소 연속용출량 ····· 44
[그림 4-2] 골재량 및 종류에 따른 침출수의 pH 농도 ····· 44
[그림 4-3] 골재량 및 종류에 따른 40일 후 비소 용출량 ····· 45
[그림 4-4] 호남권 축산시험장 계획도 ····· 49
[그림 4-5] 충남도립도서관 계획도 ····· 51
[그림 4-6] CLSM을 이용한 지중열 펌프 시스템의 상대적 건설 비용 ····· 55
[그림 5-1] 전남대학교 여수캠퍼스 부지 ····· 57
[그림 5-2] Test-bed 평면도 ····· 58
[그림 5-3] Test-bed 입면도 ····· 58
[그림 5-4] 수직공을 위한 천공 작업 ····· 59
[그림 5-5] (좌)일반 수직형 열교환기 천공 (우)Spiral 코일 수직형 열교환기 천공 ····· 60
[그림 5-6] 두 가지의 수직형 열교환기 설치 과정 ····· 60
[그림 5-7] 개발 CLSM 시공 및 지반 다짐 과정 ····· 61
[그림 5-8] 기계실 시공 과정 ····· 61

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Abstract

The construction industry in Korea is being advance more than ever demanding a durable, lightweight, multipurpose and at the same time specialized and products while keeping the cost at a minimum range. Excavation and underground tunneling works in large cities are becoming major tasks to meet the evergrowing population demand of convenient infrastructure. In this study, industrial by products like pondash and mine tailing where used to investigate the mixing characteristics and the thermal conductivity of CLSM. In addition, a raw, microwaved and microwaved plus magnetic separated mine tailings were used to evaluate the performance. However, pretreatment of mine tailings does not affect the flowability, settlement and strength of the CLSM, significantly.

On the other hand, the standard settled by ACI 229R standard indicates that the flowability should be above 200 mm and the settlement being less than 1 % by volume of the mix. In addition, the standard recommends the strength to be in between 0.3 MPa or more and 2.1 MPa or less. Furthermore, the use of mine tailing by blending minimizes the effect on the environmental and also satisfies the environmental impact criteria based on the TCLP test. However, while using pond ash it is difficult to achieve the environment impact criteria. This might affect the pH of the ground water through time, but since the geothermal system itself does not use CLSM in large quantities the amount of CLSM itself is about 1/3 to 1/4 that of the total concrete so the long term pH disturbance problem is less dangerous than mortar grouts.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

As a result of designing based on the thermal conductivity, the required pipe length is reduced compared to conventional bentonite-silica grout and the depth of perforation is reduced. Therefore, considering the same level of thermal efficiency, it is expected that the construction cost to be reduced by at least 20 % from the existing bentonite-silica grout by at least 9 %.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1장 서 론

제 1절 연구 배경 및 목적

전 세계는 현재 한정 된 화석연료의 고갈, 그로인해 증가하는 유가와 화석 에너지를 사용하며, 초래한 환경오염 문제를 해결하기 위한 대책 방안중 하나로 신재생에너지에 관심을 보이며, 신재생에너지 자원에 대한 기술개발과 보급화에 힘을 주고 있는 추세이다.

우리나라의 경우 에너지에 대한 의존도가 97 %에 달하고 있으며, 전체 에너지 사용량의 약 30 % 정도가 건물부분에서 소비량이다. 또한, 냉·난방에 대부분이 사용되고 있는 현실이다. 따라서 건물의 냉·난방에 소비되는 에너지를 줄이는 것이 에너지 절감을 위한 중요한 과제이다(김남태. 2011).

미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서는 지열을 열원으로 이용하는 열펌프시스템이 현재 사용되는 냉난방시스템 중 가장 효율적이며, 환경친화적이고, 비용 효과가 우수한 시스템으로 소개한적 있다. 이런 우수한 성능을 발휘하는 지열시스템은 우리나라로서는 관심을 보이지 않을 수가 없다(남유진. 2017).

정부에서 신재생에너지에 대한 관심이 증가함에 따라, 공공기관 신축건물에 대체 에너지를 의무적으로 이용하는 제도가 현재 국내에서 시행 중에 있다. 본 제도의 목적으로는 사회적 공감대를 형성하여 신재생에너지 이용시설의 보급 확대와 관련 산업 및 시장의 육성을 통해 시공비를 저감시키는데 있다. 또한, 녹색성장 전략에 따라 신재생에너지의 주택 보급을 위해 그린 홈 100만호 사업 등을 추진하고 있으며, 2009년 5월 1일부터 지열냉난방설비에 일반요금을 적용하고 있다. 또한 주택에 신재생에너지의 보급이 추진되면서, 주택에 지열냉난방설비를 설치하는 경우 정부의 보조정책이 시행되고 있다. 주택을 대상으로 지열 냉난방 설비의 설치가 빠르게 증가하고 있는 추세이다(강병선. 2013).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

지열원 열펌프 시스템의 설치가 증가하는 가운데, 수직밀폐형의 경우 지중열교환기의 과대 설계로 인한 초기투자비가 증가하여 오히려 장기적인 관점에서 총투자비가 증가하게 된다. 따라서 지열원 열펌프 시스템의 설계 시 지중열교환기의 최적설계가 초기투자비를 줄일 뿐만 아니라 지열원 열펌프 시스템의 확대에 중요한 역할을 할 것이다.

지열 시스템에 대한 기존의 연구는 다음의 제시한 내용과 같다.

유선정 외(2007)은 냉방시 SCW를 지열원으로 하는 히트펌프 시스템을 사용했을 때 보어홀 내의 온도회복속도를 측정분석 하였으며, SCW의 심도별 온도 특성에 대한 분석을 진행하였고, 결과는 다음과 같다. 보어홀 내의 지하수의 온도는 외기의 영향을 받지 않고, 시스템의 지속적인 가동으로 보어홀 내의 지속적인 열교환이 이루어질 경우 지하수의 온도가 점차적으로 상승하게 된다. 시스템의 부하를 증가하였을 때 그에 따른 운전 시간간격의 증대로 2 ℃ 가량의 온도회복에 영향을 미친다고 발표했다.

남임우 외(2007)는 강원도 횡성군 안흥면에 위치하고 있는 민족사관고등학교 생활관에 실제로 지열 냉난방시스템을 설치하여 2005년 12월부터 2006년 6월까지 운영된 기존 보일러 난방 시스템과 2006년 12월부터 2007년 6월까지 운영된 지열 냉난방 시스템을 비교함으로서 최근 많은 주목을 받고 있는 지열 시스템에 대한 기초 자료로서 활용하고, 운영비의 절감량을 조사하여 초기 투자비에 대한 회수기간을 예측하고, 또한 두 시스템의 CO_2 발생량을 비교 분석함으로서 지열 시스템이 CO_2 발생 절감에 얼마의 효과가 있는지 연구를 수행하였다. 연구의 결과로는 운전비 절감액은 월 평균 2천300만원이었고, 초기투자비 8억6천만원을 회수하는데 걸리는 기간은 3년 8개월로 추정하였으며, 지열 냉난방 시스템 적용으로 얻어진 CO_2 절감량은 연간 419.9 tonCO_2으로 기존 보일러 대비 70 %의 절감효과를 거둘 수 있다고 평가되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

서운종 외(2008)은 지열시스템의 보급실태와 활성화를 위한 제안으로 정부의 정책개발, 에너지관리공단의 기술개발, 전문기업의 신뢰성 확보를 위한 설계, 시공의 도의적 책임, 사용자의 의식 변화 등에 힘써야 한다고 발표했다.

이종찬 외(2009)은 군 복지시설의 지열시스템과 태양열시스템 경제성 평가 사례연구를 통해 비교 분석을 진행하였고, 순수 에너지 사용량 측면에서 보면, 신재생에너지시스템 적용시 총 에너지 사용량의 약 25 %를 생산할 수 있어 에너지 수급 차원에서 매우 효과적이라 발표했다.

채호병 외(2012)는 Barrette 파일을 이용한 현장타설형 에너지 파일을 대상으로 수치시뮬레이션을 이용한 채열량 예측을 실시하였다. 깊이 17 m, 파이프 총길이 208 m의 파일을 모의한 채열 시뮬레이션 및 이론적 접근을 수행하였다. 결론으로는 파일 깊이 17 m의 Barrette 파일을 이용한 현장타설형 에너지 파일의 채열량은 약 2.5 kW로서 일반적인 수직밀폐형 형식의 약 50~63 m 길이에 상당하는 채열량을 얻을 수 있다는 결론을 얻었으며, 향후 본 기술의 설계 최적화를 위해 케이스 스터디를 통한 설계인자 검토를 실시할 예정이라고 발표했다.

박주석 외(2012)은 실제 건축현장에서 지열 히트펌프 시스템 시공시 그라우팅재의 배합비율 조정에 따른 열전도도 변화와 그에 따른 열교환기의 PE관에 미치는 영향을 분석하였으며, 결과는 다음과 같다. 국내 대다수의 현장에서 지열 히트펌프 시스템 적용시 수직밀폐형 방식으로 설계 및 시공을 진행하고 있으며, 수직밀폐형의 경우 시스템의 최적화를 위해 열전도도가 높은 그라우팅재를 사용해야한다. 또한 열전도도가 높은 그라우팅재를 제조하기 위해 벤토나이트에 규사를 첨가하면 열전도계수가 향상될 수 있으나, 기존 그라우팅재에 열전달 성능을 향상시킬 목적으로 첨가제를 혼합할 경우 재료간의 혼합능력과 그라우트 펌프의 이송 능력 및 투과성 변화 등을 동시에 고려해야하며, 규사 첨가에 따른 비중 증가로 인한 PE관 압착 등의 현상이 발생할 수 있으므로 천공심도에 따른 적절한 그라우팅재의 배합비율 조정이 필요하다고 발표했다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

오진환 외(2013)은 최적의 지중열교환기 설계를 위해, 지중채열량 예측 시뮬레이션을 이용하여 지중열교환기 심도별 채열 성능을 검토하였다. 각 Case의 채열량 분석결과 심도가 얕을수록 단위길이 당 채열량이 더 높다는 것을 확인했고, 저심도에서는 지표면의 영향으로 인해 전체적으로 낮은 온도분포를 보였으나, 심도가 깊어질수록 보어홀 주변 온도변화가 현저하게 나타남을 확인하였다.

박종일 외(2015)은 지열시스템 계획단계에 필요한 기초자료를 제시하기 위해 국내 75개소 업무용 용도 등의 공공건축물의 지열시스템 설계자료를 분석했고, 결과는 다음과 같다. 지중초기온도 분포 분석결과는 평균 값 15.8 ℃ 이고 16~17 ℃ 구간이 29.6 % 로 가장 많았다. 지중열전도도는 평균 값이 2.56 W/mK이고, 2.4~3.0 W/mK 사이가 45 %로 가장 많은 분포를 나타내었다. 지중열교환기 열저항은 평균값이 0.156 mK/W 이며, 0.116~0.164 mK/W 사이가 69 %로 가장 많은 비중을 차지하였으나 지중초기온도와 지중열전도도처럼 어느 한 구역에 집중적으로 분포되어 있지 않고 산발적인 분포를 보였다. 또한 지중초기온도나 지중열전도도는 일정 범위 내에 분포하는 것으로 파악되지만 지중열교환기 열저항은 그렇지 않다는 것을 알 수 있는데, 점 분포도로 분석한 결과 지중초기온도 14~17 ℃, 지중열전도도 1.9~3.0 W/mK, 지중열교환기 열저항 0.12~0.16 mK/W 구간이 가장 많은 분포를 나타내었다.

송재용 외(2018)은 다량의 지하수를 사용하고 있는 시설에서 지하수 자체가 가지고 있는 에너지 활용성을 높이기 위한 복합지열시스템에 관해 연구를 진행하였다. 이를 위해 실규모의 지하수정호와 결합한 소구경(Coaxial, U-type) 복합지열시스템을 실증시험부지에 설치하고 열교환기 내의 순환수의 유량을 변화시키면서 다양한 조건에서 각 시스템에 대한 열교환량을 평가하였다. 실험 결과 Coaxial형에서는 비교 수직밀폐형 대비 약 26.1배, SCW 대비 약 2.8배의 효율을 나타내며, U-tube형 복합지열시스템은 비교 수직밀폐형 대비 약 26.5배, SCW 대비 약 2.8배의 효율을 나타내는 것으로 파악되어 복합지열시스템이 기존 지열시스템에 비해 매우 우수한 성능을 가진다고 발표하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

신지현 외(2018)은 지열 시스템의 지중 순환수 정유량 제어를 통한 에너지 낭비 감소 및 효율적인 운영을 위해 지중 순환수의 변유량 제어를 활용한 지열 히트 펌프 시스템의 운영 방안을 제안했으며, 지열 시스템의 COP 및 유량 산출에 대한 이론적 고찰을 통해 지중 순환수 변유량 제어를 통한 COP 향상 및 에너지 절감 가능성을 확인 할 수 있다고 발표했다.

현재 우리나라의 건설 산업은 다기능화, 경량화, 경제성 등을 중심으로 발전되고 있으며, 이에 따른 재료 개발 및 신공법에 대한 연구는 앞으로 있을 건설 산업의 향상과 발전에 있어서 중요한 역할을 할 것이다. 또한 라이프 라인의 공간 확대 및 미관 등이 중요시 여겨지며, 대도시의 지중관로의 건설이 증대되는 추세에 있다. 따라서 도로하부에 매설되는 관은 점차적으로 증대되면서 관로 뒤채움 재료로 각광받고 있는 저강도 고유동 충전재(CLSM : Controlled Low Strength Materials)에 관한 연구는 반드시 필요한 실정에 있다.

CLSM에 대한 기존의 연구는 다음의 제시한 내용과 같다.

이용수(2001)는 화력발전소에서 석탄 부산물로 생산되어 재활용되지 못하고 매립처리되는 바텀애시를 플라이애시와 함께 저강도 고유동 충전재에 사용함으로써 폐자원인 석탄회의 재활용율을 높이고 바텀애시를 혼입한 저강도 고유동 충전재의 성질을 파악하여 현장사용가능성을 제시하였다. 연구에 대한 결과로 바텀애시의 양을 증가시킬수록 단위수량은 증가하며, 초기응결시간이 길어지는 경향을 보였다. 또한 플라이애시만을 사용한 배합에서는 초기부터 팽창이 일어났으나 바텀애시를 첨가한 배합은 초기 2~3일까지 수축이 발생했고 그 이후에는 팽창을 하여 최종적으로는 체적의 변화가 거의 없다고 밝혔다. 용출시험 결과 pH만을 제외하고 폐기물 관리법 기준을 모두 통과하였고, 이로 인해 플라이애시와 바텀애시를 혼입한 저강도 고유동 충전재의 사용은 환경적인면이나 자원재활용 측면에서 매우 이롭다고 제시하였다.

남중우(2013)는 CLSM의 비표준 재료이며, 산업 폐기물인 석탄회를 재활용하여 관거 뒤채움용 CLSM의 현장 적용성(재굴착의 용이성, 소정의 강도 발휘, 관거를 보호하는 특성)을 평가한 결과 침하량, 변형률, 지반강성 평가 시험 모두 기준치를 만족하여 현장적용성이 매우 우수한 것으로 발표했다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

또한 국내 산업이 발전함에 따라 산업부산물은 기하급수적으로 늘어가고 있는 추세이며, 대부분의 산업부산물들은 매립되어지고 있고, 자원 재활용과 환경보호 차원에서 커다란 문제로 대두되고 있는 실정이다. 앞에 제시한 문제를 해결하기 위해서 부산물에 대해 많은 연구를 거쳐 건설재료로서 효율적으로 활용하는 것도 하나의 해결 방안이다. 따라서, 본 연구에서 사용되는 광미와 펀드애시는 앞으로도 많은 연구를 통해 건설 재료로서 성능이 입증되어 사용이 이루어져야하는 재료들이다.

산업 부산물에 대한 기존의 연구는 다음의 제시한 내용과 같다.

김형석 외(2004)은 회중석 광석의 부유선별 공정에서 발생한 폐광미를 보통포틀랜드시멘트의 원료로 이용하기 위해 폐광미의 사용량에 따른 시멘트 클링커 및 조합원료의 특성을 연구한 결과, 조합원료의 소성지수는 50.7 정도이고, 클링커에 함유된 C_3S 및 $\beta-C_2S$ 의 결정크기는 15~35㎛로, 폐광미를 조합원료에 약 3.8 %까지 사용할 수 있었다고 발표했다.

정병희(2005)는 전주 일광산의 폐광미의 물리적 특성과 화학적 조성을 조사하여 폐광미에 함유된 유가 금속을 회수하고 남은 폐광미를 재활용하는 것에 대해 연구를 진행하였다. 실험 내용으로는 실제 열처리에서 일어나는 각종의 반응들을 분리해 낼 수 있는 열처리 조건을 찾아내고 열처리 후 형성된 다공체의 중량변화, 상분석, 기공률 변화, 밀도, 기공 크기 등을 관찰했고, 이 결과 열처리한 경우 발포반응의 활성화로 높은 공극률을 얻을 수 있었지만 일부 기공들이 과대 성장하여 기계적인 물성에 악영향을 주는 것으로 나타났고, 폐광미 슬라임에 대한 열처리 시간과 온도가 증가함에 따라 압축강도와 밀도는 감소하며, 공극률과 공극의 크기는 증가함을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

유승완(2006)은 입도 분급을 통해 선별과정을 거쳐 폐광미의 물리화학적 특성을 규명하기 위해 주성분 분석, pH, DTA/TG 및 SEM 분석을 실시하였고, 또한 분석 결과를 바탕으로 폐광미를 이용한 경화체를 제조하고, 폐광미를 주원료로 하여 플라이애시 일부를 대체 가능한 시멘트 혼화재료를 개발하고자, 초기강도의 보상을 위해 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 시멘트를 복합 또는 단독으로 사용하여 제조한 혼화재를 이용한 콘크리트 경화체 및 모르타르를 제조하여 그 강도특성 및 내구성을 검토하였다. 그 결과 용출실험을 통해 환경기준을 만족하여 건축 재료로의 활용이 가능하다고 판단을 내렸고, 시멘트를 대체 가능한 혼화재로 사용이 가능하다고 판단하였다.

본 연구에서는 기존 연구와 차별성을 두기 위해 입도 최적화 이론을 이용하여 높은 유동성과 열전도도를 동시에 확보가 가능하며, 단위결합재량 감소와 배합에 광미와 폐석탄회 두 가지의 부산물을 적용시켜 재료 자체의 가격을 감소가 가능한 CLSM을 개발하여 지열시스템에 적용시켜 환경영향성 및 경제성 등을 검토하고 이것들을 건설 재료로서의 활용 가능성을 제시하고자 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 연구 방법 및 범위

본 연구는 산업부산물인 폐광미와 펀드애시를 혼입한 열전도성 고유동 속채움재의 배합 특성, 환경영향성, 경제성에 대해 연구하였다. 또한 폐광미와 펀드애시를 혼입한 고유동 속채움재의 성능을 검토하여 폐광미와 펀드애시와 같은 부산물들을 건설재료로서의 활용 방안에 대해 고찰하였다. 본 연구의 진행방법은 아래에 제시하였고, 그 연구 범위는 다음과 같다.

(1) 제 1장에서는 본 연구의 배경과 목적, 그리고 연구방법 및 범위에 대하여 기술하였다.

(2) 제 2장에서는 일반적인 CLSM의 정의와 사용재료, 품질기준을 제시하였고, 본 연구에서 사용한 산업부산물인 폐광미와 펀드애시의 정의를 서술하였다.

(3) 제 3장에서는 전처리 공정을 통한 폐광미와 펀드애시를 혼입한 열전도성 CLSM의 성능을 검토하였으며, 미처리 광미를 사용한 CLSM의 골재량 및 종류에 따른 성능변화를 연구하였다.

(4) 제 4장에서는 폐광미와 펀드애시를 혼입한 열전도성 CLSM의 환경영향성 및 실제사례를 고려한 시공비용 분석과 경제성을 검토하였다.

(5) 제 5장에서는 개발된 지중열교환 시스템 최적화 기술 및 열물성 향상 초유동성 속채움재의 검증을 위해 Test Bed를 설치하고, 성능을 검토하였다.

(6) 제 6장에서는 폐광미와 펀드애시를 혼입한 CLSM의 성능 및 환경영향성, 경제성 등을 고려하여 건설재료로의 활용방안에 대해 고찰하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2장 이론적 고찰

제 1절 지열시스템

가. 지열 에너지원

지열은 지중(토양, 지표수, 지하수 등)에 저장된 태양복사 에너지이며, 지구에 도달한 태양 복사에너지 전체 중 약 47 %를 차지하고 있다. 이중에서 지반 속에 저장되는 에너지는 지표면으로부터 깊이에 따라 천부지열과 심부지열로 구분된다. 천부지열은 지표면으로부터 약 150~200 m 까지 저장된 지열로 지중온도는 지역 및 지형에 따라 다르지만 10~20 ℃ 정도의 냉난방 설비로서 기대되고, 심부지열은 지하 200 m 이하의 에너지이며 40~150 ℃ 이상의 온도를 유지한다. 일반적으로 지중온도는 지표면으로부터 깊이 5 m 이상에서 외기의 큰 영향을 받지 않다. 또한 그 이하부터는 계속 하강하는 값을 가지다가 15 m 정도에서는 더운 여름이던 추운겨울이던 상관없이 일정한 온도를 유지하고 있다(최창호. 2012).

연중 대기온도 변화에 영향을 받지 않는 지중의 온도가 15 ℃라고 가정할 때, 한겨울의 15 ℃는 별도의 난방장치가 필요 없을 만큼 따뜻한 온도이며, 한여름의 기온에서 15 ℃는 추울 정도로 서늘한 온도이다(최창호. 2012).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 지열 냉난방 시스템의 원리

지열 냉난방 시스템의 주요설비로는 지열을 회수하기 위한 열교환기와 회수한 저온의 지열을 유효에너지로 변환시키기 위한 히트펌프(heat pump)가 있다.

지열 히트펌프는 일반 가정에서 쓰는 에어컨과 같은 원리로 가동된다. 지열 냉난방 시스템의 전체 가동원리는 지표면 아래의 일정한 온도를 유지하는 열을 이용하여 여름에는 실내의 더운 열을 지반 아래로 보내고 지반의 차가운 열은 실내로 보내 냉방을 하고, 겨울은 반대로 실내의 차가운 열을 지반으로 보내고 지반아래의 따뜻한 열을 실내로 보낸다 (최창호. 2012).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 기존 지열 설비 기술 및 문제점

지열히트펌프 시스템은 지열을 추출하거나 실내에서 추출한 열을 지중으로 방출하기 위해 여러 형태의 지중에 순환회로를 설치한다. 지중 열교환기(Ground Heat Exchanger ; GHE)는 지중에서 지열을 방열하거나 흡수하여 냉난방 수요처의 열원으로 이용이 된다. 또한 지중에 설치 후에는 눈에 보이지 않으므로 정확한 설계와 시공이 요구된다.

일반적으로 지열히트펌프 시스템은 지열을 추출하는 순환회로의 형식과 열원, 열침의 종류 및 그 규모에 따라 분류할 수 있다.

개방형 시스템은 지표수나 지하수를 직접 열 교환함으로써 효율이 높으나, 토양과 지하수의 오염문제 등을 일으킬 수 있다. 반면 밀폐형 시스템은 부하수요에 따라 다양하게 시공할 수 있으나 효율이나 초기 투자 비용면에서 개방형 시스템에 비해 다소 떨어지는 단점이 있다(허정호. 2012).

표 2-1. 지열히트펌프 시스템의 종류 (허정호. 2012)

회로 형식	종류	열원
개방형시스템 (Open Loop System)	단수정 시스템 (One Well System)	천부지열, 지중공기열, 지하수, 해수, 지표수
	복수정 시스템 (Two Well System)	
	우물관정형 시스템 (Standing Column Well System)	
밀폐형 시스템 (Closed Loop System)	수평밀폐형 시스템 (Horizontal Closed Loop System)	천부지열, 지하수, 지표수
	수직밀폐형 시스템 (Vertical Closed Loop System)	
	연못형 시스템 (Pond Closed Loop System)	
복합형 지열히트펌프 시스템 (Hybrid Ground Source Heat Pump System)	기존의 냉각탑, 보일러 또는 다른 신재생 시스템과 연계된 시스템	천부지열, 지하수, 기존 시스템, 신재생에너지

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가. 복수정 시스템

복수정 시스템은 대수층에서 배수정과 취수정을 별도로 설치하여 사용하는 방식이다. 지하수가 풍부하게 존재하는 지역에서 이용이 가능하다. 본 시스템의 가장 큰 특징은 하나의 우물에서 지하수를 주변의 천공된 다른 우물로 배수 가능하므로 이용이 간편하나, 배수정 및 취수정을 설치하기 위한 선행 연구가 이루어져야 하는 단점이 있다.

이 시스템은 대수층에 설치한 취수정으로부터 지하수를 취수하며, 냉난방 대상 지역에 설치된 열교환기로 송수한 후 열에너지를 추출하여 이용하고, 이용 후의 지하수는 동일대수층 내에 설치된 배수정으로 재주입하여 지중에서 순환시키는 시스템이다. 일반적으로 가정용에서는 배수정과 취수정 사이의 거리는 평균적으로 30 m 정도이며, 복수정 시스템의 우물 설치는 소구경의 우물로부터 적정량을 공급받는 시하수량이 풍부한 기존우물의 경우에 적용 가능한 방식이다(허정호. 2012).

나. 단수정 시스템

단수정 시스템은 복수정 시스템의 주입정을 빼버린 시스템이다. 즉, 공급정에서 채수된 지하수의 열에너지를 열교환기에서 추출하고, 순환되는 가열 또는 냉각된 지하수는 주입배출정을 통하여 지하로 주입하지 않고, 인근 하수구나 다른 수체로 방류하는 경우이다. 대다수의 경우 이 기법은 도랑이나 소계류가 있는 농어촌 지역에서 널리 사용하고 있는 방법이다.

이 시스템은 주입배출정을 사용하지 않기 때문에 경비와 시간을 절약 가능하다. 그러나 지하수를 채수할 수 있는 양은 대수층의 유효공극을 통해 유동하는 지하수량에 의존하기 때문에 지열히트펌프가 필요로 하는 소요수량을 확보하기 위해서는 표준 우물 설계 방법에 따라 우물을 설치해야한다(허정호. 2012).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 우물관정형 시스템

이 시스템은 미국의 북동부지역에서 개발된 기술로서 대수층의 발달이 활발한 지역에서 주로 이용되는 시스템이다. 수직으로 천공한 우물에서 얻은 지하수를 건물 내부의 열교환기로 인입시켜 열교환을 하고 건물의 냉난방에 이용한 후, 열교환된 지하수는 다시 수직 천공된 우물 상부에 방류시켜 지중과 열교환하는 방식이다.

일반적으로 지하심부에 깊이 내려갈수록 지하수와 지중열의 온도는 상승하게 된다. 즉 우물의 하부에서 연중 일정한 지하수를 채수하여 열교환기를 통과시킨다. 그런 다음 온도의 변화가 생긴 열에너지는 난방용으로 이용하고 열을 빼앗기고나서 식은 지하수는 동일한 우물에서 재순환시킨다.

이 방법은 소요부지 및 설치비용 적게 들지만, 장소 제한 및 환경오염, 지하수 고갈 등의 문제가 있고, 주로 지하수량이 풍부한 미국, 유럽의 독일, 오스트리아 및 스위스 등에서 널리 이용되고 있는 방식이다(허정호. 2012).

라. 수평밀폐형 시스템

이 방식은 일반적으로 건물의 냉난방시 필요 부하량이 작고, 열교환기를 매설할 수 있는 공간이 충분하며, 굴착대상 지중 토양이 굴착을 하기에 용이한 곳에서 가장 경제적으로 설치할 수 있는 지열원 열펌프 시스템 설치방식이다. 대체적으로 가정용 주택이나 소규모 상업용 빌딩에 주로 설치하는 방식이지만 소요부지의 면적이 많이 필요하기에 국내에서는 많이 사용되지 않는 방식이다.

수평형 시스템에서 열교환기의 매설깊이는 최소 1~3 m 규모이며, 지면에 PE관을 수평방향으로 부설한다. 냉난방용량 1 RT당 필요한 PE관의 매설길이는 보통 120~180 m 이고, 제한된 굴착공 내에 보다 많은 PE관을 설치하기 위해 환형(Slinky)의 코일형태로 부설하는 방법도 있다. 최근에는 수평착정기를 이용하여 설치된 부분의 미관을 해치지 않고, 폐회로를 설치 할 수 있는 방법이 개발되었다. 이 시스템을 설치할 시 지열히트펌프가 필요로 하는 충분한 양의 열에너지를 흡수 및 전달을 할 수 있도록 적절한 길이의 폐회로를 지하에 매설한다(허정호. 2012).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

마. 수직밀폐형 시스템

이 방식은 천공예정부지의 지질상태가 양호하고, 열교환기 매설부지가 부족하거나, 대용량의 냉난방 부하를 필요로 하는 곳에 주로 적용하는 방식으로 현재 국내에서 가장 많이 사용하는 방식이다.

평균 150~200 m 심도의 수직천공을 건물 인근에 굴착하고, 두 개의 PE관을 U-Bend로 연결하고나서 굴착공 내에 하나 또는 두 개의 열교환기를 설치한다. 순환 파이프를 설치한 공은 적절한 채움재로 그라우팅을 하고, 수직으로 설치한 PE관을 지표면으로부터 1.5~2.5 m 아래에 매설한 상부 연결관과 서로 연결을 한다. 이들 PE관의 수평·수직 폐회로 내부는 순환유체를 채워서 순환수가 지중 암반과의 열교환을 통하여 히트펌프에 열량을 공급할 수 있도록 한다(허정호. 2012).

일반적으로 수직형의 설치비가 수평형에 비해 고가이나 연중 일정한 지중 온도를 이용하여 냉난방 부하량을 확보할 수 있기에 수평형 시스템보다 열교환 길이가 짧다(허정호. 2012).

바. 연못형 시스템

지열히트펌프의 냉난방 열원으로 호수와 저수지 및 하천수의 수온을 이용하는 시스템으로 설치비용이 저렴하다. 이 시스템은 물을 여과시키지 않고, 사용하게 되면 조류나 탁도에 의해 발생하는 막힘 현상 때문에 열교환기에 악영향을 줄 수 있다. 또한, 열원이 되는 물의 온도 변화가 심하여 환경오염의 우려가 있어 시스템의 관리가 매우 중요하다. 최근에는 기존의 수직밀폐형 시스템과 결합하여 복합형 시스템으로 사용되고 있다(허정호. 2012).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3절 저강도 고유동 충전재 (Controlled Low-Strength Materials : CLSM)

가. CLSM의 정의

CLSM은 셀프 레벨링성과 자가다짐성을 가진 재료이며, 포틀랜드 시멘트, 플라이애시, 모래 그리고 물로 구성되어 있다. 미국 콘크리트 협회 (American Concrete Institue : ACI) 116R의 “Cement and Concrete Terminolong” 에서는 저강도 고유동 충전재를 8.3 MPa 이나 그 이하의 압축강도를 발현하는 재료로 정의하였으며, 현재 대부분의 저강도 고유동 충전재의 적용분야는 2.06 MPa 또는 그 이하의 압축강도로 설계되어진다. 저강도 고유동 충전재는 집합적인 배합을 설명하기 위해 포괄적으로 사용 될 수 있는 용어이다. 예를 들어 8.3 MPa 이상의 배합은 후에 재굴착이 필요하지 않는 건물하부의 구조적 충전재 같은 분야에서 사용된다. 저강도 고유동 충전재는 콘크리트와 토양의 중간정도의 성질을 보이고, 자가다짐성의 충전재료로 압밀된 충전재를 대체하여 사용할 수 있는 충전재료로 고려되는 것이 바람직하다. 따라서 저강도 고유동 충전재는 표면침식, 동결융해, 유해한 화학물질의 침입 등을 고려하지 않고 설계된다. 일반적인 콘크리트에 비해 저강도 고유동 충전재의 장기 압축강도는 0.34~2.06 MPa로 현저히 낮다. 그러나 허용지지력의 개념에서는 토질의 하중지지력의 표준수치 0.3~0.69 MPa 강도는 잘 다져진 흙과 동일하다(이용수. 2002).

저강도 고유동 충전재의 개발로 인해 다짐이 어려운 지역에서의 시공도 가능하고, 다짐에 소요되는 비용과 노동력의 절감이 가능하게 되는 등 여러 장점이 있다. 한편, 펀드애시나 폐주물사와 같은 비표준 재료들도 사전 실험을 통해 만족스러운 성질을 보이면 저강도 고유동 충전재의 재료로 사용 될 수 있다(이용수. 2002).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. CLSM 사용 재료

CLSM에 사용되는 재료는 일반적으로 물, 골재, 포틀랜드 시멘트 그리고 플라이애시로 이루어지며, 때때로 앞에서 제시한 재료중 골재를 제외하고도 구성되어진다. 저밀도 충전재를 필요로 하는 경우에는 물, 포틀랜드 시멘트, 발포제만 사용되기도 한다. 이와 같이 저강도 고유동 충전재의 재료는 ASTM 또는 KS 같은 기준안을 만족하는 것이 바람직하지만 상황에 따라 기준안에 제시된 재료 외에 비표준재료 또한 시험을 거쳐 기준을 만족시키는 경우 사용 될 수 있다.

다. CLSM 품질기준

CLSM은 자기강도발현과 초기유동성에 의해 양생이 진행되며, 사용 용도에 따라 요구되는 품질기준에 차이가 있다. 요구품질의 설정에 있어서 시공조건이나 적용 지반의 상태 등을 고려하여 블리딩율, 플로우 값, 압축강도를 결정할 필요가 있다. 일반적으로 사용되는 기준 값으로는 압축강도 0.3~0.5 MPa, 플로우 값 200~220 mm, 블리딩율 3 % 미만으로 알려져 있다(이대영, 2018). 일축압축강도를 기준으로 인력굴착의 경우 약 0.3 MPa, 기계굴착의 경우 0.7~1.4 MPa, 굴착이 필요하지 않은 경우 8.3 MPa 이하로 규정하고 있다. CLSM의 단위중량은 약 14.1~15.7 kN/m^3으로 제안하고 있다(ACI committee 229R. 2005).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4절 폐광미

폐광미란 광산 폐기물로서 광산에서 생산 활동을 하는 동안 채광을 위해 굴진 및 유용광물을 선별적으로 회수 및 분리하는 과정에서 발생된다. 귀금속 광물의 경우에 원석 1 t에 불과 7~50 g만의 귀금속 성분이 함유되어 있어 귀금속을 회수하고 배출되어지는 폐광미의 양은 채광된 원석의 양과 거의 비슷한 수준으로 볼 수 있다(박원춘. 2009).

따라서, 유용광물의 품위에 따라 다소 차이는 있으나 광산 가행 중 생산되어진 유용광물의 양으로도 어느 정도 광산 폐기물의 발생량을 예측이 가능하다.

광산 폐기물은 유용광물의 채광을 위해 부득이하게 생산되는 주변 암석에 의한 폐석과 유용광물을 선별 및 분리하기 위해 파쇄와 분쇄 그리고 선별처리 과정에서 생성되는 선광 광미로 구분이 가능하다(박원춘. 2009).

이때, 폐석의 대부분이 자연경관을 해치는 경우가 있더라도 중금속 오염 등의 환경적인 폐해가 심각하지는 않지만, 선광 광미 같은 경우 유용광물을 회수하기 위해서 입자 크기를 1 mm 혹은 이것보다 더 작은 크기로 조절해야하고, 화학적 선별과 물리적 선별과정을 모두 적용하기에, 이러한 과정에서 여러 가지 화합물의 형태로 변형되기도 한다. 또한 금속성분이 함유되어 있는 탄산화물, 황화물 등으로 이루어진 광물들은 지표면의 환경에서 안전한 상태를 유지하기 위해 산화 혹은 환원반응이 유발되기 때문에 이들에 의한 중금속 유출 등의 문제가 발생할 수 있다(박원춘. 2009).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5절 석탄재(Pond ash 및 Fly ash)

최근 산업 발달과 함께 급속히 증가하는 전력 수요에 따라 화력발전소에서 발생되는 산업 부산물인 석탄회 처리 문제가 심각하게 대두되어 왔다(Yamanouchi. 1966). 연간 많은 양의 석탄회가 발생되고 있으나, 그 사용은 미비한 실정에 있다(천병식. 1993). 화력발전소에서 생산되는 석탄회는 석탄 연소 시 보일러 하부로 낙하되는 저회(bottom ash)와 저회보다 입경 작아 집진기에서 포집되는 미분말회인 잔사회 또는 비회(fly ash)로 크게 구분된다. 국내에서 석탄회는 연간 약 600만 톤이 발생되며, 이 중에서 58 %는 재활용하고 있지만 나머지 42 %는 매립처리를 하고 있는 실정이다. 석탄회의 발생량 중에서 비회는 전체의 약 75~80 %를 차지하며, 물리적/화학적 특성 상 알루미노 실리카 계열의 구형 입자형태와 포졸란성을 지니고 있어, 비료재료나 콘크리트의 혼화재료 등으로 상당수 재활용되고 있다. 저회는 석탄회 발생량 중 약 10 % 정도를 차지하며, 일부 경량성 골재, 인공어초, 호완블록, 벽돌 등으로 사용되고 있으나 대부분 매립장에 매립하고 있는 실정이다(김주형 등. 2010).

현재 석탄회를 재활용 할 수 있는 용도로는 시멘트 원료, 레미콘 혼화재, 성토 및 복토용으로 제한되어 있다. 또한 매립되는 저회는 매립장으로 운반할 때 바닷물을 이용하기 때문에 염분이 다량 함유되어 있고, 공학적 성질이 일정하지 않아 재활용에 어려움을 가지고 있다(공진영 등. 2010). 최근 조사에 의한 바로는 재활용율이 2004년 67.9 %, 2005년 59.4 %, 2006년 67.7 %로 전체 발생량의 약 70 % 미만으로 현재 전국적으로 회처리장에 매립된 석탄회의 총량은 2008년 기준으로 약 7,200백만 톤으로 추정된다(환경부. 2008).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3장 광미를 활용한 CLSM 성능 검토

제 1절 실험 개요

폐광미와 펀드애시를 CLSM의 재료로 이용하여 지중열교환시스템(ground-source heat-pump system)을 위한 그라우트로도 사용하고자 하였다. 이는 열효율을 고려한 지중열교환시스템의 설계 시 열전도가 우수한 그라우트를 사용하면, 열교환을 위해 필요한 파이프의 길이가 감소할 수 있으며, 이는 시공비용의 감소와 직결되기 때문이다. 이러한 점을 고려하여 폐광미와 펀드애시를 기반으로 한 CLSM에 대해 지중열교환 시스템용 그라우트로서 요구되는 성능인 유동성, 강도, 열전달율을 측정하였으며, 동시에 제조된 CLSM의 환경영향성 평가를 위해 중금속 용출량을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 사용 재료 및 배합비

가. 폐광미(mine tailings)

본 연구에서 사용한 광미는 호남권인 해남의 순신광산 광미 적치장으로부터 얻은 것으로 목적 광물은 금(Ag) 및 기타 희토류이다. 순신광미의 조성은 대부분 규사로 되어 있으며, 그 외에 일부 소량의 흑운모(Biotite)가 존재한다. 특히, 소량의 흑운모로 인해 광미의 미분은 판상인 것이 많다. X선 형광 분석기 및 X선 회절분석기를 이용해 분석한 결과는 아래와 같다. 한편, 계관석 (pararealgar), 3황화비소(arsenic trisulfide), 황비철석(arsenopyrite)과 같은 비소 기반의 결정은 XRD 패턴에서 확인되지 않았다.

본 연구에서는 중금속을 포함한 광미의 안정화 처리를 위해 두 가지 공정을 거친 광미를 동시에 사용하였다. 먼저 고주파를 이용한 가열처리 이다. 고주파를 통한 열처리를 통해 시료의 온도를 약 800 ℃ 이상 높일 수 있었고, 그 결과 황철비석(arsenopyrite)에 포함된 황과 비소를 열분해하여 기존 시료로부터 분리할 수 있었다. 광미를 왕수분해 후 피복흑연관이 장착된 원자흡광광도 측정기를 통해 얻어진 중금속 함량 결과에 따르면 비소를 99 % 이상 제거 할 수 있었다. 또한 일부 고주파에 의해 이온화된 중금속 등을 제거하기 위해 자력선별을 수행하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 3-1. 광미의 화학적 구성 성분

Sample	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	MnO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Loss of ignition (LOI)
Sun-shin tailing at raw state (SSR)	79.53	9.52	3.22	0.16	0.64	0.51	0.72	3.24	0.52	0.06	2.46
Sun-shin tailing micro waved (SSM)	80.60	9.33	3.99	0.15	0.66	0.42	0.64	3.57	0.60	0.05	0.15
Sang-dong tailing (Finer and coarser)	59.60	8.57	11.59	0.49	1.83	10.94	0.09	1.53	0.62	0.27	<1
Pond ash	62.53	20.91	8.70	1.80	0.69	0.09	0.39	1.44	1.26	-	1.85

표 3-2. 광미의 물리적 특성

Properties	Sun-shin tailing at raw state (SSR)	Sun-shin tailing microwaved (SSM)	Fine Sang-dong tailing (FSD)	Coarser Sang-dong tailing (CSD)	Pond ash	Natural sand
Specific gravity	2.62	2.48	2.60	2.60	2.15	2.60
Water absorption (%)	-	-	-	-	4.65	0.83
Fineness modulus (F.M.)	-	-	-	-	3.48	2.60
D10 (μm)	1.8	1.8	11.0	81.2	110	150
D50 (μm)	5.6	4.4	30.6	128.6	1060	710
D90 (μm)	43.67	13.0	52.0	205.4	5200	2500

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 3-3. 광미의 중금속 함유량

Sample	As	Cd	Cu	Pb	Zn	Fe
Sun-shin tailing at raw state(SSR)	282.4	N.D	75.24	195.90	78.82	325441
Sun-shin tailing microwaved (SSM)	0.84	N.D.	70.11	190.48	70.11	335221
Sang-dong tailing (Fine and coarse)	225.4	13.5	N.D	11.5	93.5	3154
Cement	1.13	0.12	3.15	6.11	N.D	35.19
Pond ash	335.11	1.45	90.74	191.89	N.M	N.M

※ N.D.: Not detected; N.M.: Not measured

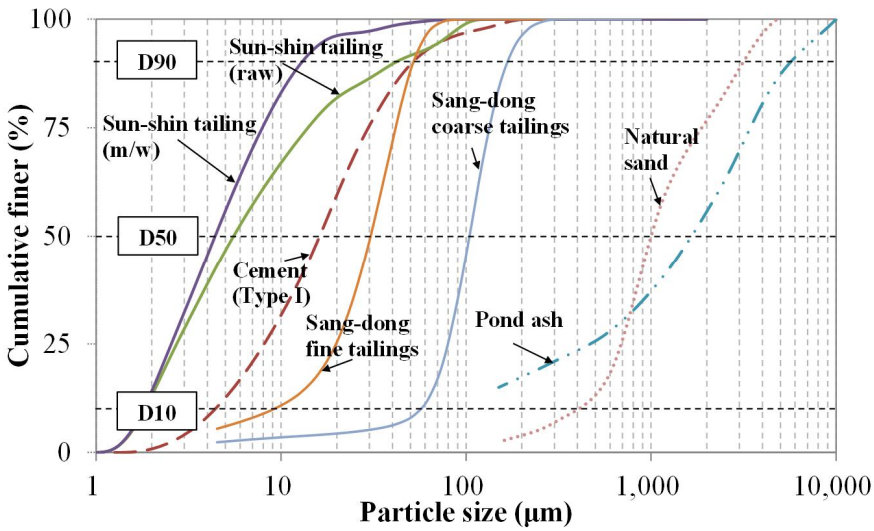


그림 3-1. 재료 입자 크기

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

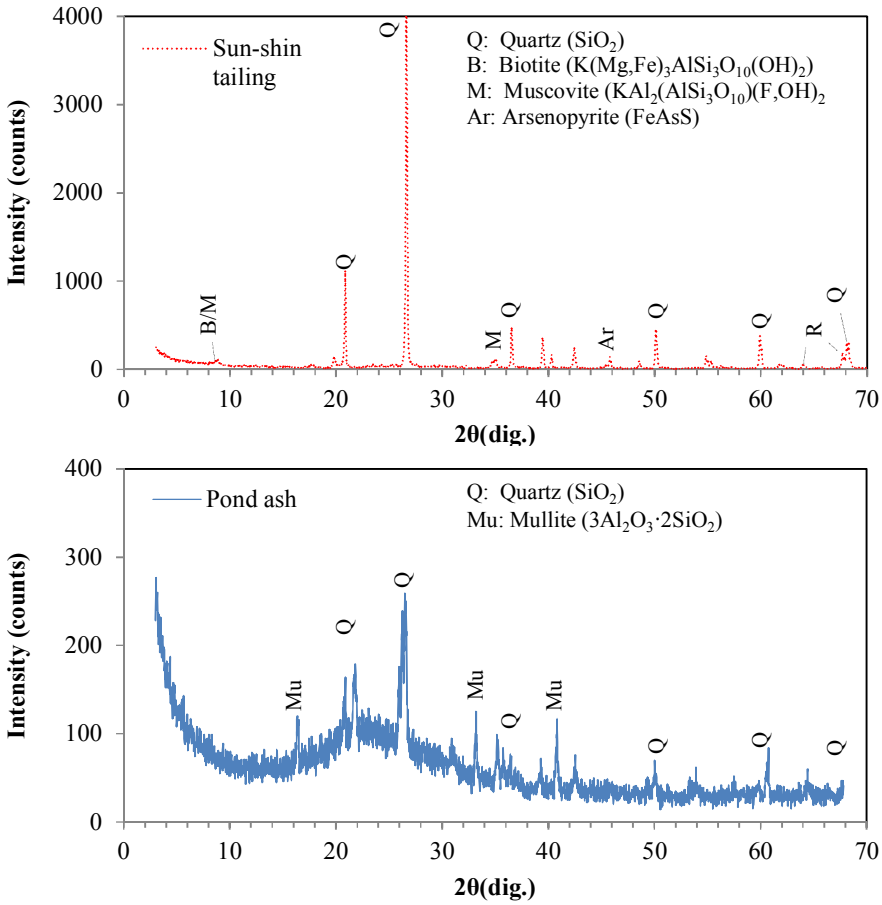


그림 3-2. 광미와 펀드애시의 XRD 스펙트럼

(reproduced from Kim, 2015 and Kim et al., 2016)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

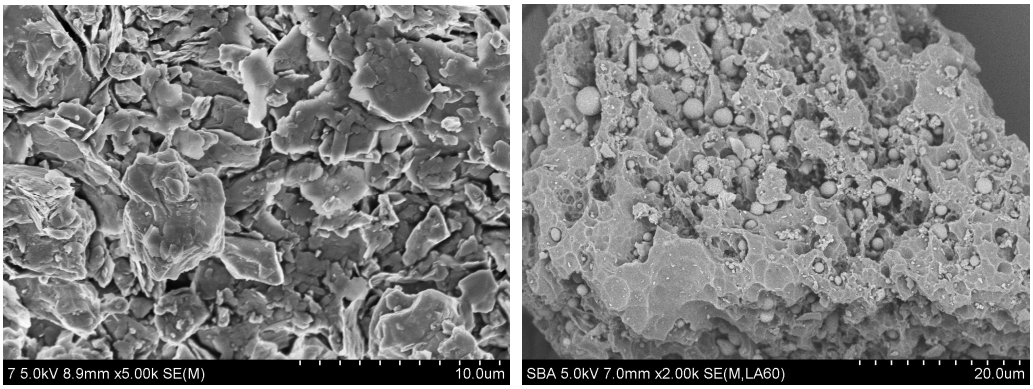


그림 3-3. SEM으로 관측한 광미와 펀드애시의 입자 표면

나. 펀드애시(Pond Ash)

펀드애시는 화력발전소 근방의 애시 펀드 혹은 애시 댐에 적재되어 있는 애시를 말한다. 보일러에서 생산된 플라이 애시 및 펀드애시, 일부 폐기된 탈황석고 등이 재활용 되지 못하고 섞여 있는 상태이므로 조성 및 입도가 균일하지 않아 재활용이 어렵다. 그 뿐만 아니라 경우에 따라 습식 회처리형 발전소에서 바닷물을 사용하는 경우 염분량이 높아, 부식을 방지한다는 측면에서 콘크리트에는 사용하기 어렵다. 본 연구에서 사용된 펀드애시는 호남권의 여수 화력발전소에서 생산된 것이다. XRD 피크는 기존의 플라이 애시와 거의 유사하며 대부분 실리카 및 알루미나로 구성되어 있다. 참고로 골재에 비해 흡수율이 높은데, 이는 SEM에 나타나 있는 바와 같이 표면 및 내부에 공극이 존재하기 때문이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 기타 재료

결합재로서 1종 포틀랜드 시멘트를 사용, 모르타르형 CLSM에는 자연산 강모래를 잔골재로 사용하였다. 모래의 비중은 2.60 이고, 흡수율은 0.83 이다. 시멘트의 입자 크기는 헬륨-네오 레이저 광학계(HELOS R1, Sympatec GmbH)를 이용해 측정하였다. 모래의 입자 크기 분포는 ASTM C 33 규정을 만족시켰다. CLSM 혼합물에는 증류수를 사용하였는데, 이는 수돗물에 비소나 중금속의 불필요한 첨가를 방지하기 위함이었다. 공기연행제와 감수제와 같은 화학혼화제는 본 연구에 사용되지 않았다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

라. 배합설계

본 연구에서는 두 종류의 배합비가 사용되었으며 이를 각각 전처리 공정에 대한 성능 변화, 골재량 및 종류에 따른 성능변화로 구분하였다. 전처리 공정에 대한 성능 변화는 순신광미를 응집제로, 일반 모래를 골재로 사용하였으며 시멘트 사용량에 따른 배합비를 사용하였다. 순신광미는 크기가 매우 작기 때문에 유동성을 얻기 위한 단위수량이 상대적으로 많고, 골재 사용 가능량도 적었다. 동일한 배합 조건하에서 광미를 세 종류 사용하였으며, 각각 미처리 (Raw states), 고주파처리 (Microwaved), 고주파처리 후 자력선별 (Microwaved and magnetic separation)이다. 골재량 및 종류에 따른 성능변화는 위의 세 가지 광미 중 미처리 광미를 사용하였으며, 단위수량은 배합 직후 CLSM의 유동성이 200~210 mm 내의 범위가 되도록 조절하여 결정하였다. 유동성 시험(Flowablity test)은 ASTM D 6103에 따라 수행하였다. 150 ㎜(직경)×75 ㎜(높이)의 실린더 몰드에 혼합물을 채우고 수직으로 들어 올린 후 흘러간 부분의 직경을 측정하였다. 참고로 200 mm 이상으로 유동성을 결정한 이유는, 이것이 ACI 229R에서 제안하는 High flowability이기 때문이다. 유동성이 과하면 재료분리가 발생하지만, 적절한 유동성은 이후 파이프와 보어홀 사이의 충진에 있어 우수할 것이기 때문이다. 참고로 1차년도 실험을 통해, 유동성이 200 mm 이상의 배합이 자연적으로 직경 1 cm 수준의 공극을 자연 통과함을 실험적으로 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 3-4. 전처리 공정에 대한 배합비

Mixture name	Materials	Mix proportion (wt. ratio)		
		Water	Powder	Cement
MR-C10	Mine tailing (Raw)	0.6	1	0.1
MR-C20		0.6	1	0.2
MR-C30		0.6	1	0.3
MM-C10	Minetailing (Microwaved)	0.6	1	0.1
MM-C20		0.6	1	0.2
MM-C30		0.6	1	0.3
MMM-C10	Minetailing (Microwaved +magneticseparated)	0.6	1	0.1
MMM-C20		0.6	1	0.2
MMM-C30		0.6	1	0.3

표 3-5. 골재량 및 종류에 따른 배합비

Mixture name	Mix proportion (wt. ratio)					w/c
	Water	Tailing	Cement	Sand	Pond ash	
S1	0.97	1	0.2	1	0	4.85
S2	1.1	1	0.2	2	0	5.5
S0.5P0.5	0.95	1	0.2	0.5	0.5	4.75
S1P1	1.19	1	0.2	1	1	5.95
P1	0.91	1	0.2	0	1	4.55
P2	1.01	1	0.2	0	2	5.05

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3절 실험방법

가. CLSM의 공학적 특성 측정

물과 고체물질을 포함한 모든 구성 재료는 10 L 용량의 믹서로 3분간 혼합하였다. 광미는 혼합하기 전에 오븐에서 완전건조 시킨 상태였다. 응결하기 전 CLSM의 부피안정성을 평가하기 위해 콘크리트 블리딩과 유사한 CLSM의 침하량을 측정하였다. 시험 절차는 콘크리트 블리딩에 대한 표준 시험 방법인 ASTM C 232를 사용한다. 본 연구에서는 굵은 골재를 사용하지 않기 때문에, ASTM C 232에 요구되는 것보다 작은 85 mm(직경) × 120 mm(높이)의 실린더 몰드를 실험에 사용하였다. 굳은 CLSM의 1축 압축강도는 ASTM C 109에 따라 측정되었다. 측정을 위해 100 KN 로드셀 압축 시험기를 사용하였다. 로드셀의 하중 감도는 ±10 KN(±0.039 MPa) 범위에 있었다. 시험을 위해 5 mm × 5 mm × 5 mm의 입방 시편을 제작하고 7일 동안 양생실에서 비닐 랩을 이용해 밀봉하여 양생하였다. (1)전처리 공정에 대한 성능 변화에서는 7일간 양생 후, 랩을 제거하여 시편을 공기중에 노출시켰다. 양생실의 온도는 20±3 ℃ 범위, 습도는 45±5 % 범위에 있었다. 한편 골재량 및 종류에 따른 성능변화에서는 동일하게 20±3 ℃에서 7일 양생 후 두 가지 온도에서 수중양생을 하였는데, 계절에 따라 온도가 변동하는 지표면부의 강도를 검토하기 위해 각각 5 ℃, 30 ℃ 로 두 가지 온도로 실험을 수행하였다. 굳은 CLSM의 열전도도는 ASTM D 5334 기준에 준하여 측정하였다. 실온에서 수중양생한 시편을 건조 및 포화의 두 가지 함수 상태로 조정하여 측정한 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 침출 시험(용출 실험, Leaching test)

용출실험은 두 가지의 실험을 수행하였다. 먼저 표준기법인 Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) 실험으로 4 가지 중금속(As, Cu, Cd, Pb)의 침출성을 평가하기 위해 수행하였다. 다음으로 네델란드의 Tank leaching test를 응용한 실험으로 As의 침출 거동을 특성화하기 위해 수행하였다. 실험 방법은 실제 자연상태에서 풍화와 침식에 의해 CLSM이 분쇄되었을 때를 고려하여 분쇄 시편을 준비하였다. 굳지 않는 배합을 3±1 mm 크기의 플라스틱 페트리 접시(plastic Petrie dish)에 붓는다. 91일 양생 후, 페트리 접시에서 경화된 배합은 10 mm × 10 mm 사이즈로 절단하여 분쇄되지 않은 시료로 사용하였다. 이를 디스크밀(Disk mill)을 이용해 입경이 100 ㎛보다 더 작게 분쇄하여 분쇄된 시료를 얻었다. 침출 용액은 세 가지 다른 초기의 pH(pH 2, 4, 7)값으로 제조하였다. 용액의 pH는 증류수에 H2SO4 및 NaOH를 사용하여 조절하였다. 시료는 30 ml의 용출용액에 침지된다. 5일 간격으로 1 ml 용액을 추출한 후 AAS를 사용해 비소의 농도를 측정하였다. 동시에 용출 용액의 pH 변화를 측정하였고, 분쇄되지 않은 시편과 분쇄된 시편의 총 비소 농도는 왕수 분해를 통해 측정하였다. 이와 같은 과정은 광미, 시멘트, 모래를 포함한 원료 내에 비소 및 중금속의 농도를 측정하기 위한 것과 동일하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 열전도도 측정

열전도도 측정은 28일 양생 후의 시편을 가지고 ASTM D 5334의 기준에 준하여 측정하였다. 열전도도 시험에 사용되는 열 침의 측정은 가열 요소와 온도 측정요소로 구성되며, 직경 75 mm, 높이 150 mm의 경화 된 실린더 시험편에 삽입되었다. 주어진 전류와 전압이 프로브에 적용되고 시간에 따른 온도 상승이 일정 기간 동안 기록된다. 열전도도는 가열 사이클 중에 시계열 데이터를 분석하여 얻어졌다. 센서를 통한 열전도도 계산을 위해서는 각 센서에 대한 저항-온도 관계의 데이터가 필요한데, 이를 얻기 위해 CLSM 시험편의 온도 범위와 일치하는 특정온도(10-60 ℃)에서 저항 값을 측정하였다. CLSM의 열전도율에 대한 건조 효과를 평가하기 위해, 오븐 건조 및 포화 상태와 같이 두 가지의 상이한 시편을 제조하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) 원심분리 전 혼합물

(b) 원심분리기

(c) 원심분리 후 혼합물

그림 3-4. 원심분리기를 이용해 다진 새로운 CLSM 혼합물

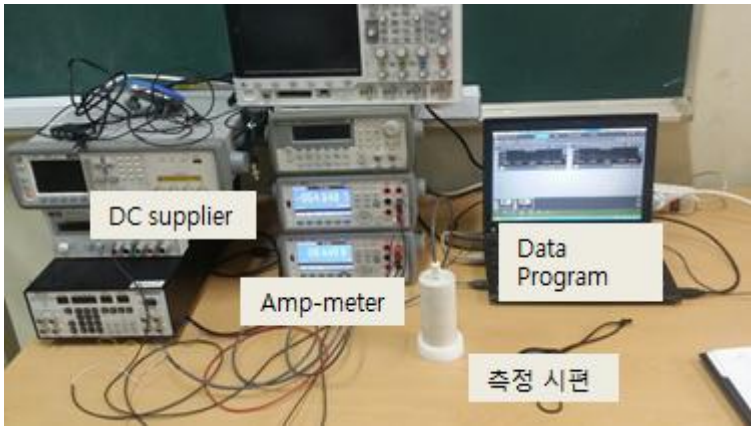


그림 3-5. CLSM의 열전도도 측정 실험(ASTM D5334)

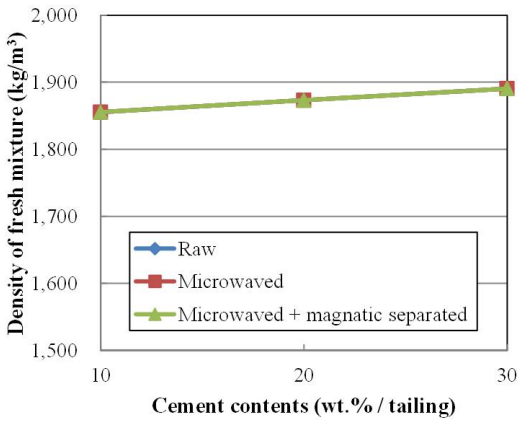
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4절 실험결과 및 분석

가. 전처리 공정에 대한 성능 변화

전처리 공정에 대해 정확히 변화를 일으킬 만한 요인은 재료 분석 자체에서는 크게 발생하지 않는다. 고주파 가열 시 발열과 황비철석의 열분해로 인한 입자 크기의 미약한 감소, 혹은 자력선별로 인한 일부의 금속성분 제거 등이 확인 되었다. 따라서 이로 인한 CLSM의 유동성, 침하량, 강도 변화는 실험적인 검증을 통해 확인이 필요하다.



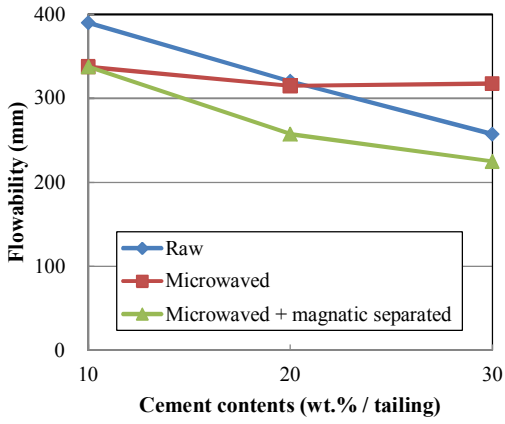


그림 3-6. 새로운 CLSM 혼합물의 밀도 및 유동성

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

실험 결과, 굳지 않은 CLSM의 유동성 변화 패턴은 크지 않았다. 위에서 언급한 바와 같이 고주파 가열에 의한 입자크기 감소가 일부 유동성을 감소시킬 수 있으나, 반복적인 실험 결과 이는 표준편차 이내인 것을 알 수 있었다. 오히려 시멘트 혼입량이 더 명확한 변화를 발생시킨다는 것을 확인하였다. 따라서 이후 골재량 및 종류에 따른 성능변화의 배합에서 전처리를 통한 중금속 제어를 수행할 경우 일부 유동성이 감소할 것을 고려해야 한다. 침하량 실험결과는 다음과 같다. 특히 부피안정성은 열교환 측면에서 매우 중요한 요인으로, 만약 보어홀에 CLSM을 투입한 후 수축 등이 발생하면 열전달 측면에서 매우 불리해 진다. 실험결과 침하량은 1 % 내외로 부피안정성이 매우 높다고 판단된다. 일반적인 침하량은 시멘트의 초결 시간인 3시간 내외에서 침하량이 수렴한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

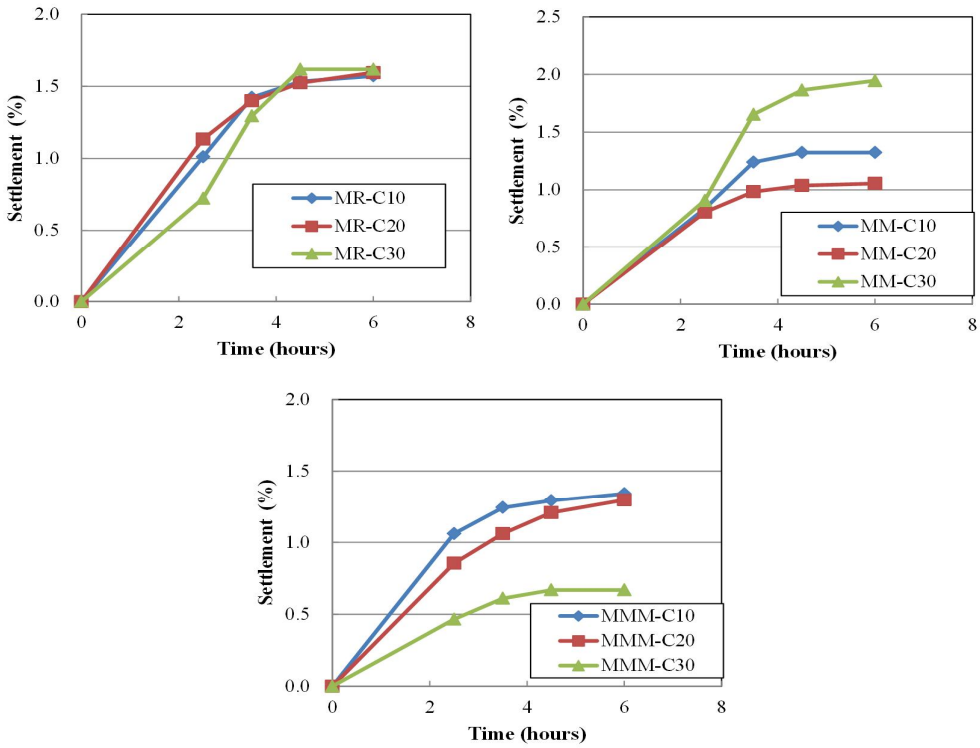


그림 3-7. 전처리 공정에 대한 침하량

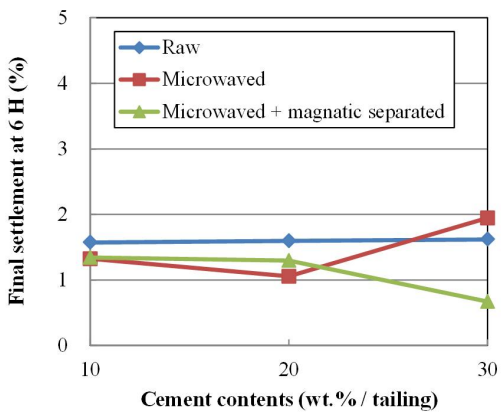


그림 3-8. 전처리 공정에 대한 최종 침하량

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

압축강도 결과, 모든 날짜에 상관없이 전처리 공정은 CLSM의 강도에 영향을 거의 미치지 않는 것을 확인하였다. 일부 표준편차 수준의 변동 폭은 발생하지만, 강도 발현의 경향성에 영향을 미치는 수준은 아니었다. 단지 시멘트 사용량에 따라 강도 발현이 크게 발생하였으며, ACI 229R의 요구강도 기준을 고려할 때 약 300 kPa 수준 이상의 강도면 작업상 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

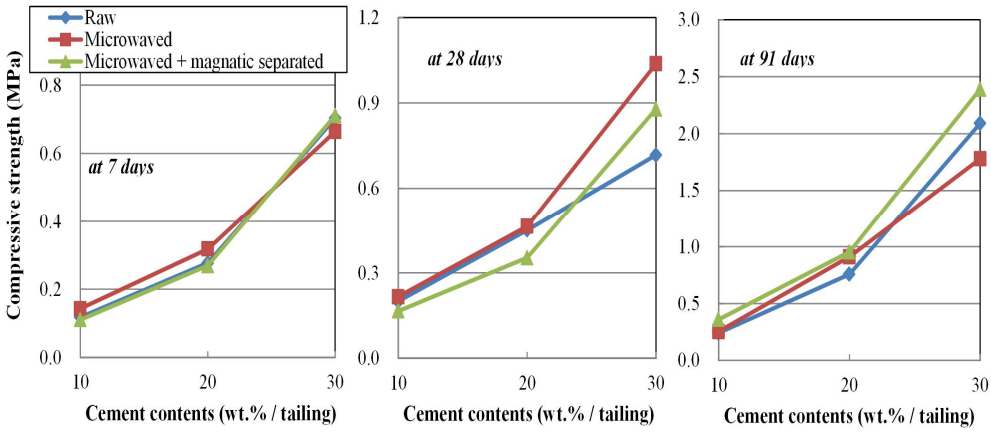


그림 3-9. 전처리 공정에 대한 광미혼합 CLSM의 압축강도 측정 값

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 골재량 및 종류에 따른 성능변화

본 연구에서 모든 성능은 배합의 골재 종류 및 골재비에 따라 단위수량이 연동되어 결정되며, 이러한 종합적인 배합 변화로 인해 CLSM의 성능이 변화한다. 단위수량은 위의 배합표에서 나타난 것과 같이, 골재량이 증가하면 단위수량이 증가하며, 동시에 모래에서 펀드애시로 무게비 치환을 하게 되면 단위수량이 감소한다. 먼저 골재량이 증가한다는 것은 CLSM 내 고체들의 평균입도가 증가하였다는 것을 의미할 뿐 아니라, 입자의 충전밀도(packing density)가 증가했음을 의미한다. 즉 입도분포가 개선되었다는 것이다. 이 경우 유동성 확보를 위한 자유수(Free water)의 양이 줄어들게 된다. 참고로, 아래 그림에서 원심분리 후 블리딩 양은 자유수량을 의미한다. 동시에 자유수량을 제외한 부피는 충전밀도(Packing density)를 의미한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

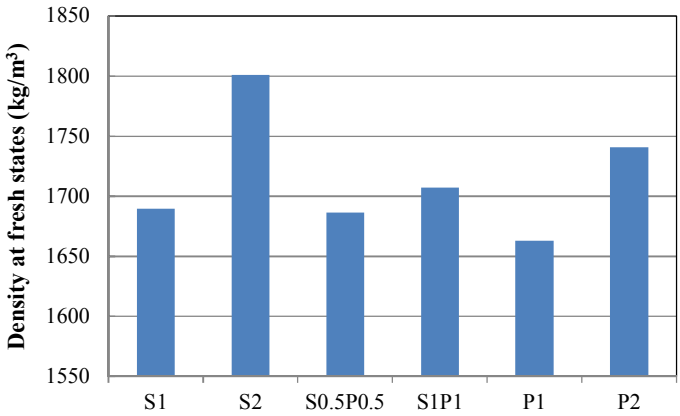


그림 3-10. 골재량 및 종류에 따른 CLSM 밀도 측정 값

한편 펀드애시로 무게비 치환 시 두 가지 측면을 고려해야 한다. 먼저 펀드애시는 일반 모래에 비해 비중이 낮기 때문에 치환에 따라 골재가 차지하는 부피가 증가하는 효과가 있다. 즉 S2 에 비해 P2 의 배합에서 골재가 차지하는 부피가 크다는 것을 의미한다. 따라서 위에서 언급한 바와 같이, 골재의 평균 입도는 증가하고 이로 인해 요구 단위수량은 감소할 수 있다. 뿐만 아니라 펀드애시는 일반 모래에 비해 입도가 상대적으로 크고 미분량이 적다. 즉, 치환에 의해 점성이 감소한다. 점성이 낮으므로 유동성 확보를 위한 단위수량 역시 감소한다. 단, P1 배합에 비해 평균입도가 더 큰 P2 배합의 경우 점성이 너무 적어 재료분리(Segregation)가 발생하기도 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

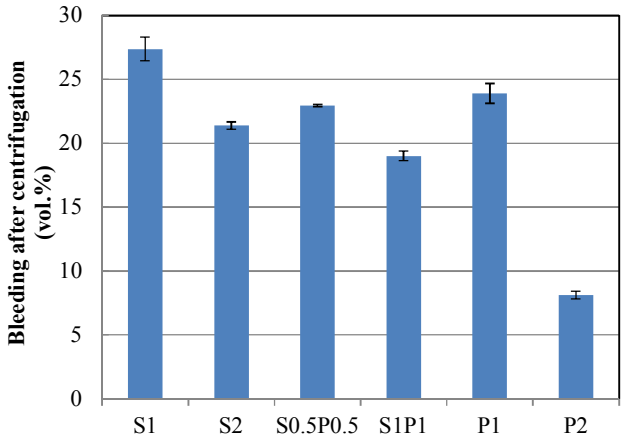


그림 3-11. 골재량 및 종류에 따른 자유수량 측정 값(원심분리 후)

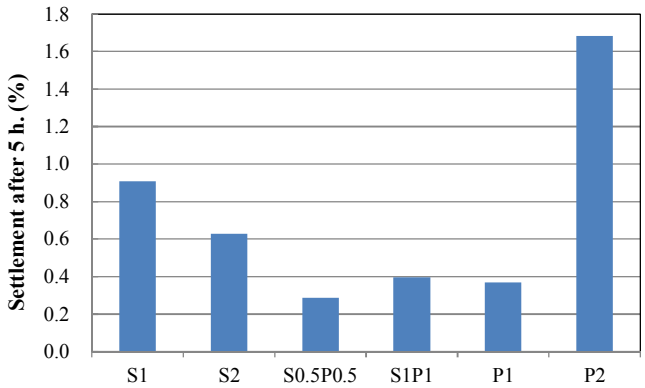


그림 3-12. 골재량 및 종류에 따른 침하량 측정 값(5시간 경과)

침하량(Settlement)의 경우 재료분리가 발생하는 P2를 제외 하고는 대부분 1 % 이하임을 확인하였다. 기존 우리의 연구결과에서 유동성이 300 mm 급 모르타르형 광미 혼입 CLSM의 침하량이 3 % 수준인 점을 고려할 때, 본 배합은 부피안정성이 개선되었다고 할 수 있다. 펀드애시를 혼입한 배합은 일반 모래만 사용한 배합에 비해 침하량이 낮다. 이는, 펀드애시 특유의 형상으로 인해 발생하는 현상이다. 펀드애시는 모래에 비해 형상이 각지기 때문에 입자들이 밀실하게 충전되지 않는다. 따라

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

서 대부분 펀드애시의 Bulk density는 1200 kg/m^3 전후이다. 따라서 모래에 비해 전반적으로 침하를 방해하는 특성이 있다. 즉, 어느 정도의 펀드애시를 사용하게 되면 침하를 개선하는 효과가 있다는 것을 의미한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

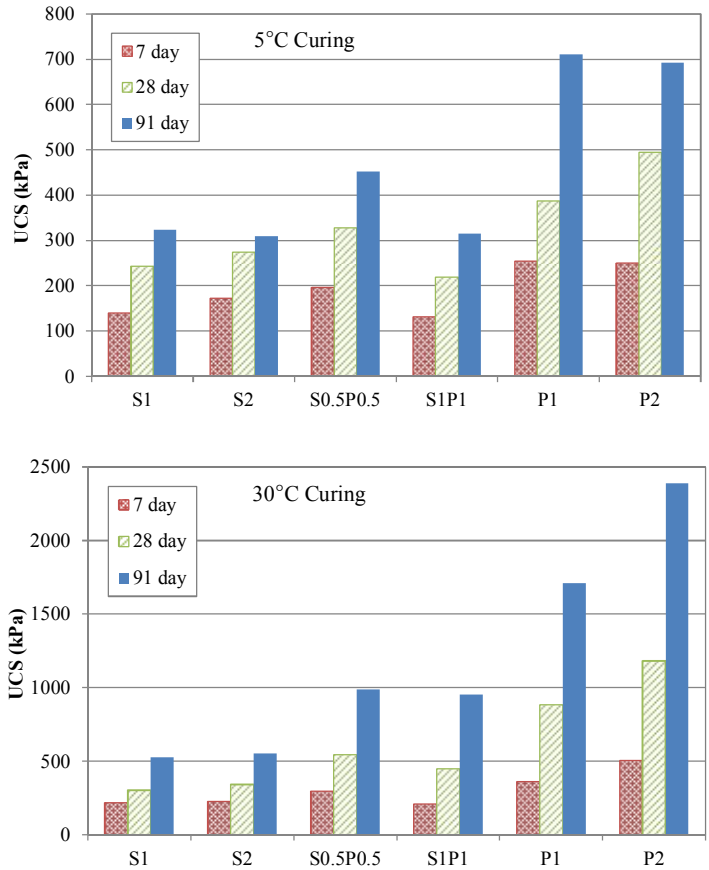


그림 3-13. 골재량 및 종류에 따른 단일 압축 강도 측정 값

압축강도 결과는 다음과 같다. 참고로 지열시스템을 위한 그라우팅이 강도를 발현해야 할 필요성은 없다. 수직밀폐형의 경우 국내 지반의 온도조건이 대부분 5 ℃ 보다는 높기 때문에 위에서 실험한 결과가 현실적인 최하치라고 판단된다. 모든 배합에서 5 ℃ 저온 양생을 때에 비해 30 ℃에서 양생 했을 때 펀드애시를 혼입한 배합의 강도 증가 폭이 약 2 배에서 최대 3 배 이상 차이가 남을 확인하였다. 모래와 광미만을 사용하면 큰 강도증가는 발생하지 않았다. 특히 본 연구에서 사용된 순신광미는 기존의 상동광미와 달리 입도가 월등히 작을 뿐 아니라 판상이라 시멘트 사이에서 강도 발현을 방해하는 특징이 있다. 또한 입자가 작기 때문에 유동성 발현을

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

위한 수량이 추가로 필요했고 이로 인해 물결합재가 더 높아져 강도 발현이 불리한 측면이 있다. 한편 펀드애시를 혼입하게 되면 기존 연구결과에서 제시한 바와 같이 포졸란 반응이 발생하여 강도를 개선한다. 이러한 포졸란 반응성은 고온에서 더 정확히 나타나는 특징이 있다. 골재를 많이 넣은 배합의 경우 물결합재비가 낮아지게 되는데, 그럼에도 불구하고 30 ℃ 양생시 P2는 P1에 비해 강도가 높다. 참고로, 기존의 연구에서는 건조상태 양생 시편을 이용해 강도를 측정했는데, 이는 지표면에 CLSM이 사용될 경우를 산정한 것이다.

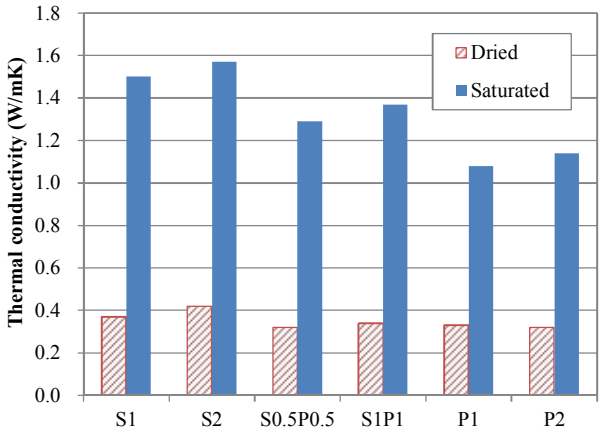


그림 3-14. 골재량 및 종류에 따른 열전도도 측정 값

재료의 열전도도는 위 그림과 같다. 경우에 따라 CLSM이 건조할 경우를 고려해 완전 건조된 시편의 열전도율도 측정하였다. 그러나 대부분 지중의 지하수위(Ground water level) 이하까지 수직형 파이프가 설치되는 점을 고려할 때 대부분의 구간은 포화된 시편의 열전도도를 갖을 것으로 판단된다. 건조조건과 포화조건 시 열전도도는 약 3배에서 4배 까지 차이가 발생 한다. 한편 열전도도는 S2가 가장 높은 열전도도를 나타내는데, 비록 S2가 S1에 비해 광미 대비 수량은 높지만, 전체 부피를 고려한 단위 수량은 낮고 자연히 열을 전도하는 고체부피가 증가하기 때문에 열전도도가 높은 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한편 펀드애시 사용에 의해 열전도도는 감소하게 되는데, 펀드애시는 모래에 비해 두 가지 측면에서 열전도에 불리하다. 먼저 모래에 비해 결정성이 낮고, 다공질이기 때문이다. 이 중에서도 다공성 측면이 열전달에 불리하게 작용할 것으로 판단된다. 일반적으로 모든 Matrix의 열전도율은 재료의 밀도 및 골재부분의 부피 등에 의해 결정되는 특징이 있다. 아래 그림과 같이 이 두 가지 측면에 대한 선형성을 추정한 결과 단순히 이 두 가지 지표만으로 열전달률이 결정되지 않는 다는 것을 확인하였다. 즉, CLSM의 열전달률은 입자의 크기 분포 및 공극의 네트워크 분포, 구성 입자 자체의 열전달률 등 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다.

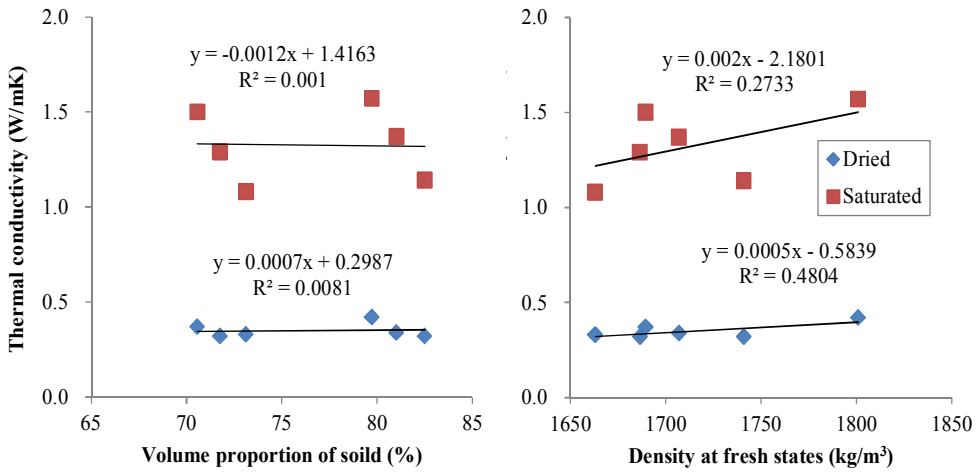


그림 3-15. CLSM의 열전도도와 용적 비율 (좌) 굳지않은 상태의 밀도 (우)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4장 지열시스템을 위한 열전도성 CLSM 환경영향성 및 시공비용 검토

제 1절 환경영향성 검토

아래 표에 순신광미-펀드애시를 기반으로 제작한 CLSM의 TCLP 실험결과가 나타나 있다. 광미-모래를 사용한 배합의 경우에는 모두 TCLP 실험 결과 환경기준을 통과한다. 그러나 펀드애시를 사용한 배합은 펀드애시의 중금속량이 비소와 유사한 수준으로 높아 환경기준을 통과하지 못한다.

표 4-1. TCLP 시험 결과

Sample	Leaching (mg/l)			
	As	Cd	Cu	Pb
Regulatory threshold	5	1	3	5
S0.5P0.5	1.2	0	1.1	0.9
S1	1.5	0	1.3	1.5
S2	1.9	0	1.5	3.1
S1P1	5.3	0.3	3.1	4.4
P1	5.9	0.3	3.3	5.6
P2	5.8	0.4	3.8	5.9

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

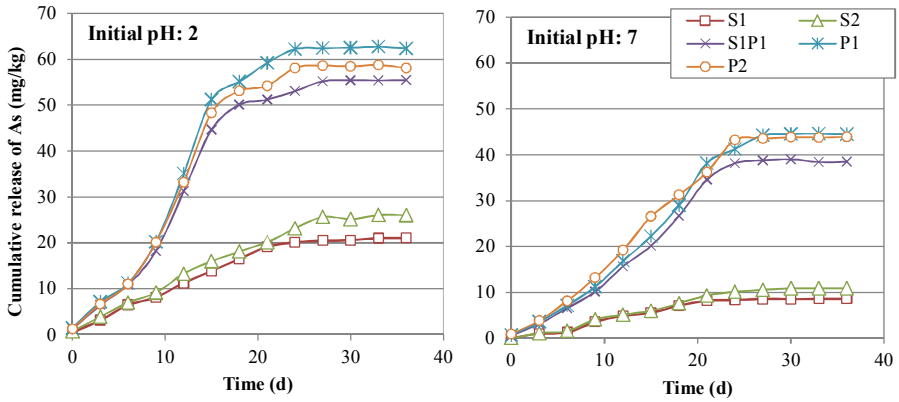


그림 4-1. 골재량 및 종류에 따른 비소 연속용출량

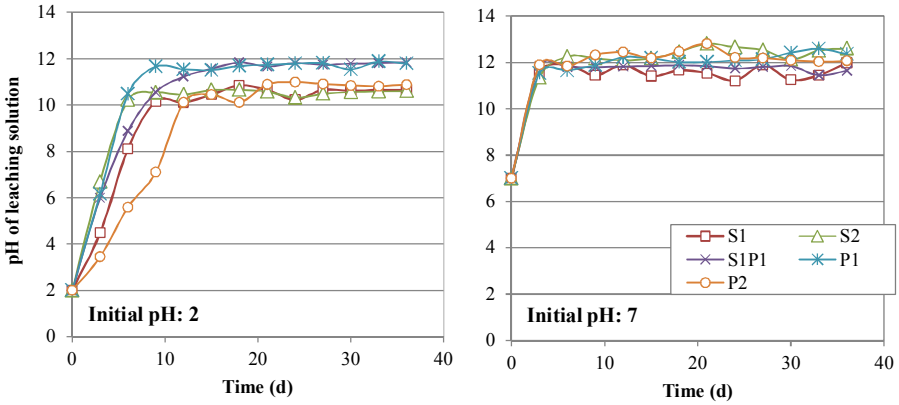


그림 4-2. 골재량 및 종류에 따른 침출수의 pH 농도

위의 그림은 시간에 따른 비소의 연속용출량을 나타낸 것이다. 대부분 30일이 지나면 크게 변화하지 않는 특징이 있다. 참고로 초기에 사용된 수용액의 pH가 용출실험에 의해 어떠한 변화를 나타내는지도 그림에 나타내었다. pH는 대부분 10 일 전후로부터 크게 변화하지 않았다. 실험 결과 위의 TCLP 실험결과와 같이 펀드애시 유무에 따라 결과가 크게 변화 하는 것을 알 수 있었다. S1과 S2 사이의 비소 용출량은 크게 차이가 없었다. 그러나 펀드애시를 사용한 배합은 대략 몇 배 비소용출량을 나타내었다. 시편이 가지고 있는 최대의 비소량 대비 용출된 비소량의 비율은 아래 그림과 같다. 먼저 pH가 7인 곳에서 용출되는 경우는 모

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

든 시료에 상관없이 20 ℃ 전후에서 동일한 비율의 비소가 용출된다. 그러나 산성용액에서 용출을 시작할 경우 광미만을 넣은 배합에 비해 펀드애시를 혼입한 배합의 용출 분률이 작다. 따라서 만약 pH가 꾸준히 산성을 유지하는 경우에는 추가적인 용출이 될 것으로 판단된다. 기존에 동일한 방법으로 상동광미를 이용한 CLSM의 용출분률을 평가했을 때, 동일한 시멘트/광미 비율 상에서 pH 2 및 7일 때 각각 3.2, 3.0 % 만이 용탈됨을 확인하였다. 즉, 본 실험에 비해 용탈 분률이 매우 작았을 뿐 아니라 pH에 의한 영향도 적었다. 본 연구에서 비소의 용탈 분률이 월등히 큰 이유는 상동광미에 비해 순신광미의 크기가 월등히 작아 비소 부분이 쉽게 노출되기 때문으로 판단된다. 비소가 이온상태로 존재하는 것보다 황비철석의 형태로 노출되는 측면에서, 노출된 비소계 광물이 산에 의해 민감하게 용해되었던 것으로 보인다.

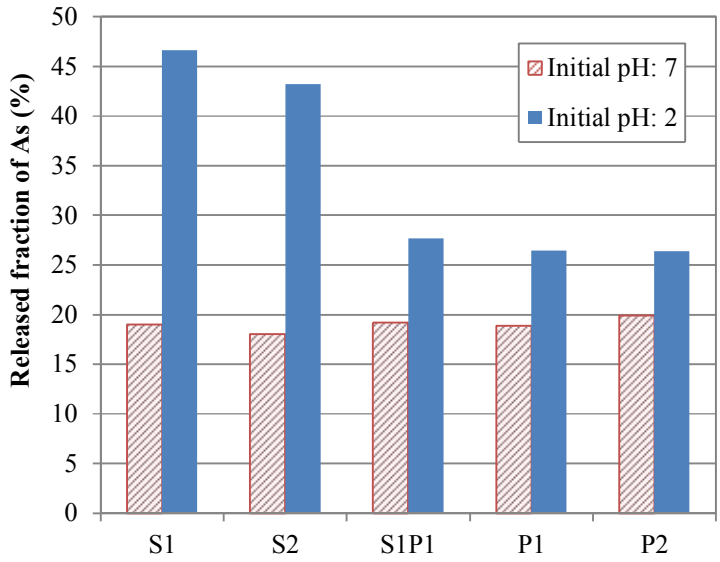


그림 4-3. 골재량 및 종류에 따른 40일 후 비소 용출량

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한편, 어떤 이유로 펀드애시 사용배합이 모래를 사용한 배합에 비해 산성 조건에서 비소 용출비율이 낮은지는 명확하지 않다. 예상하기에는 펀드애시 내에 있는 비소는 광미에 고정된 비소와 결합상태가 다르며, 산성조건에서 상대적으로 용탈이 잘 이루어지지 않을 수 있다. 또한 파쇠 된 CLSM이 담긴 수용액이 장기적으로 알칼리화 되어 수렴하게 된 이후 펀드애시의 포졸란 반응이 일어나 조직이 치밀해져 추가적인 용출을 막았기 때문으로도 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 시공비용 분석 및 실제 사례 고려 비용 분석

가. 단위 부피당 CLSM의 시공비용 분석

아래 표는 단위 부피당 CLSM의 가격분석을 수행한 것이다. 우리나라는 지역에 따라 모래, 시멘트 등의 가격이 유사하므로 일반적인 시중 단가를 확인하여 아래 계산에 사용하였다. 환경부 기준에는 그라우트에 일반 모래 혹은 정제된 규사를 모두 사용할 수 있는데, 본 경제성 분석에서는 이에 대한 가격을 동일하게 결정하였다. 한편, 벤토나이트는 대부분 수입산에 의존하고 있으므로 상대적으로 가격이 고가이다. 참고로, 환경부 고시기준에서는 가능한 지하수를 통한 염소침투가 우려되는 해안지방을 제외하고는 환경영향성을 기준으로 가능한 모르타르를 사용하지 않도록 제안하고 있는데, 이는 시멘트 사용량이 너무 높은 모르타로 인해 지하수의 알칼리화가 과도하게 진행되기 때문이다. 환경영향성 측면에서, 국내의 현장에서는 모르타르 대신 내염해성 벤토나이트-규사 그라우트를 사용하는 것이 일반적이다. 광미와 펀드애시는 전처리를 하지 않는 경우를 고려하였으므로 현장의 일반적인 운반비용만을 고려하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 4-2. CLSM 비용 분석

그라우팅 종류		단위 용적당 배합비 (kg/m^3)						열전도도 (W/mK)	가격 (USD/m^3)
		물	벤토나이트	시멘트	Sand	광미	Pond ash		
기존재료 (환경부 고시기준)	벤토나이트-규사 그라우트	925	193	0	462			0.9	67,140
	차수용 모르타르	327	6	582	1261			2.3	70,679
	일반 모르타르	356	0	668	1122			2.5	72,540
개발재료	S1	532	0	110	549	549	0	1.50	24,690
	S2	479	0	85	856	428	0	1.57	27,775
	S0.5P0.5	511	0	108	269	538	269	1.29	21,502
	S1P1	468	0	79	393	393	393	1.37	21,632
	P1	485	0	106	0	532	532	1.08	18,637
	P2	408	0	81	0	404	807	1.14	18,160

a) Cost of materials (including ransportation fee): Bentonite - 300 USD/kg, cement - 75 USD/kg, (quartz) sand - 20 USD/kg, pond ash/tailing - 10 USD/kg

b) 1 USD = 1,000 KRW

c) Swelling index of bentonite: 10 ml/ 2 g

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 호남권 축산 시험장 (전라북도 진안군 성수면 신기리) 설계조건

전북 진안군 성수면 신기리에 위한 축산시험장은 총 37만 6000 m^2의 부지에 연면적 8000 m^2의 축산교육장과 실험센터를 갖추어 2013년 기공하여 2014년 이전 준공되었다. 설계에 사용된 건물의 열부하와 지중열 교환장치 설계 변수는 다음 표 4-3과 표 4-4와 같다.

그림 4-4. 호남권 축산시험장 계획도

(http://jbkns.com/news/articleView.html?idxno=76866)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 4-3. 호남권 축산 시험장의 건물 열부하

월	냉방		난방	
	총 부하 (kWh)	피크부하 (kW)	총 부하 (kWh)	피크부하 (kW)
1월	0	0	20,422	-
2월	0	0	15,720	192
3월	0	0	16,014	159
4월	1,062	0	2,271	155
5월	12,782	0	0	-
6월	15,494	0	0	-
7월	25,602	0	0	-
8월	21,818	0	0	-
9월	14,475	0	0	-
10월	383	0	2,096	-
11월	0	0	16,465	-
12월	0	0	19,418	289
합계	449,480	159.7	193,076	121

표 4-4. 호남권 축산 시험장의 지중열 교환장치 설계 변수

Part	Input data	Value
Fluid	Ethanol	20 %
	Specific Heat(kJ/K*kg)	4.044
	Density(kg/m^3)	939.6
Heat pump	COP(Heating/Cooling)	4.4 / 4.0
	Unit inlet(Heating/Cooling)	30.0 / 5.0
	Flow rate	9.7 (L/min) / 3.5 kW
Soil	Ground temperature (℃)	14.2
	Thermal conductivity (W/mK)	2.58
	Thermaldiffusivity(m^2/d)	0.070
Pipe	Size(outer/inner diameter) (mm)	42.2 / 34.5
GHE	U-tube	Single
	Placement	Average
	Borehole separation(m)	5.0
	Configuration	17x1

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 충남도립도서관 (충청남도 이전신도시 개발사업지구) 설계조건

내포신도시 홍예공원 문화예술단지에 들어설 충남도립도서관은 2014년 건축설계가 완료되어 2016년을 목표로 시공되었으나 아직 준공완료가 되지 않았다. 총 3만 9441 m^2의 부지에 지하 1 층 지상 4 층의 연면적 1만 1000 m^2의 규모로 건출 된다. 특히, 본 건물은 건축물 에너지 효율 1등급, 녹색건축 최우수 등급 인증 등을 고려하여 지열에너지 설계가 진행되었다. 설계에 사용된 건물의 열부하와 지중열 교환장치 설계 변수는 다음 표 4-5와 표 4-6과 같다.

그림 4-5. 충남도립도서관 계획도
(http://www.goodmorningcc.com/news/articleView.html?idxno=15886)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 4-5. 충남도립도서관의 건물 열부하

월	냉방		난방	
	총 부하 (kWh)	피크부하 (kW)	총 부하 (kWh)	피크부하 (kW)
1월	-	-	52,035	240
2월	-	-	40,738	192
3월	-	-	32,179	159
4월	-	-	11,639	155
5월	25,567	310	-	-
6월	84,948	604	-	-
7월	127,009	748	-	-
8월	127,834	825	-	-
9월	70,102	529	-	-
10월	14,020	238	-	-
11월	-	-	14,720	192
12월	-	-	41,765	289
합계	449,480		193,076	

표 4-6. 충남도립도서관의 지중열 교환장치 설계 변수

Part	Input data	Value
Fluid	Ethanol	16.50 %
	Specific Heat(kJ/K*kg)	4.228
	Density(kg/m^3)	969.1
Heat pump	COP(Heating/Cooling)	4.1 / 4.1
	Unit inlet(Heating/Cooling)	30.0 / 5.0
	Flow rate	14.7(L/min)/3.5kW
Soil	Ground temperature (℃)	15.5
	Thermal conductivity (W/mK)	2.72
	Thermaldiffusivity(m^2/d)	0.038
Pipe	Size(outer/inner diameter) (mm)	42.2 / 34.5
GHE	U-tube	Single
	Placement	Average
	Borehole separation(m)	5.5
	Configuration	13x10

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

라. 시공비용 검토

본 연구에서 지중 열교환기의 설계 길이를 계산하기 위해 GLD(Ground Loop Design Software) 2012 지열시스템 설계 프로그램을 사용하여 계산하였다. 실제 설계 사례를 고려하여 두 가지 대상 지역에 대해 시공비용 분석을 실시하였다. 먼저 호남권 축산 시험장을 대상으로 적용된 지열 시스템은 수직 밀폐형으로 총 17 공의 보어홀이 설치 되었다. 설계에 사용된 대상 건물의 피크 부하는 냉방시 159.7 kW, 난방 시 121.3 kW 였으며, 총 부하는 냉방 시 449,480 kWh, 난방 시 193,076 kWh 이었다. 다음으로 두 번째 대상 지역은 충남도립도서관으로 앞서 분석한 호남권 축산 시험장과 동일하게 수직 밀폐형으로 총 130 공이 설치되었다. 공간 배치 간격은 6 m로 설계 되었으며, 대상 건물의 부하 분석 결과, 월별 피크 부하 및 총 부하가 계산되었으며, 설계를 위한 냉방 피크 부하는 825 kW, 난방 피크부하는 289 kW 이었다.

마. 시공비용 분석 결과

본 연구에서의 경제성 분석에는 환경부 고시기준 중 일반 모르타르를 사용하지 않았는데, 이는 환경부 기준에 따라 본 지역에서는 모르타르의 사용을 가급적 하지 않도록 하고 있기 때문이다. 비교대상으로 사용한 그라우트는 벤토나이트와 규사를 사용 했으며, 배합비는 환경부 고시기준을 따랐다. 또한 시공비 계산을 통해 경제성 분석이 이루어졌는데, 시공비 계산을 위해 수직형 지중 열교환기 설치의 공정을 크게 천공 공정, 파이프 설치 공정, 그라우트 공정으로 분류하였다. 그리고 2015년도 토목표준품셈을 이용하여 각각의 공정에 대한 단가를 산출했다. 각 공정에 대한 단가에는 인력, 장비 대여, 재료비가 포함되었다. 또한 파이프 설치 공정은 견적으로 처리하였다 (Yoon et al, 2016). 시간당 작업량 계산 후 일위대가를 통해 산정된 단가 및 설계 결과를 이용하여 최종적으로 시공비가 산출되었다. 호남권 축산 시험장과 충남도립도서관의 경제성 분석결과는 다음의 그림 4-6과 표 4-7과 같다. 벤토나이트-규사를 기준으로 한 상대적인 가격을 비교해보면 광미-모래 기반 CLSM의 경우 시공비용이 약 20 % 까지 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 열교환을 위해 요구되는 천공의 깊이가 줄어드는 효과가 가장 크다. 한편 열전도율이 가장 낮은 P1의 경우에도 9 % 까지 개발기술 사용에 의한 가격감소가 가능하다.

그러나 본 결과는 설계를 고려한 것으로 실제 운영 시 열효율은 여러 요인에 의해 영향을 받을 수 있으며, 이에 대한 리스크 분석 결과는 다음과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(가) CLSM의 함수율에 따른 열전도도

벤토나이트-규사 그라우트 역시 이와 동일하게 영향을 받으므로, 개발 기술과 기존 기술 간의 열효율 차이는 없다.

(나) CLSM의 충진 정도

경우에 따라 그라우팅이 완벽하게 되지 않아 파이프와 CLSM 사이, 혹은 보어 홀 벽면과 CLSM 사이에 간극이 발생하여 열교환 효율이 낮을 수 있다. 그러나 유동성은 기존 기술인 벤토나이트-규사 그라우트가 더 낮기 때문에 이러한 위험성은 기존 기술이 더 높다. (침하량은 1 % 이하이므로 비균일 침하에 의한 내부 균열은 고려하지 않는다.)

(다) 열변형에 의한 CLSM 손상

동절기 및 하절기에는 경우에 따라 재료가 열변형을 하게 되는데 강도가 과도하게 크면 자체적으로 수축 팽창을 반복하여 CLSM의 균열이 발생할 수 있다. 하지만, 본 재료에서 CLSM은 1 MPa 이하의 강도의 잘 다져진 흙 수준으로 재료강도가 결정되어 있으므로 탄성계수가 낮고 동시에 소성변형이 가능하므로 모르타르와 같은 문제는 발생하지 않을 것으로 예상된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

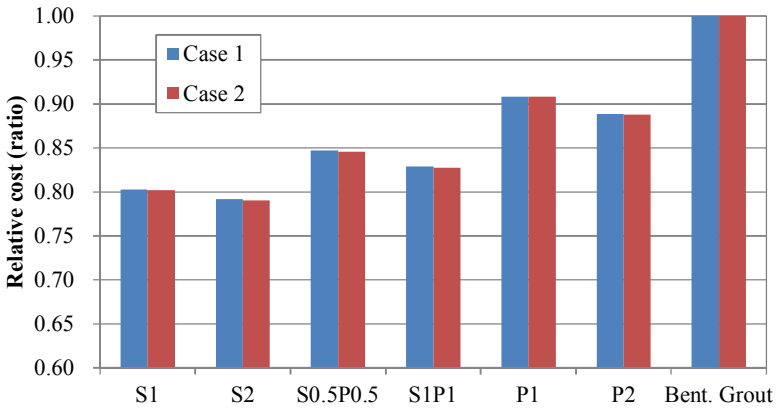


그림 4-6. CLSM을 이용한 지중열 펌프 시스템의 상대적 건설 비용

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 4-7. 지중열 히트 펌프 건설 비용분석 (호남권 축산시험장)

그라우트 재료	열전도도	1공당 길이(m)	파이프길이(m)	그라우트 부피(m^3)	천공 비용($)	파이프 비용 ($)	그라우팅 비용($)	합계 ($)
Case 1: 호남권 축산시험장								
S1	1.50	140.0	280.0	2.08	6,300	140	36	6,476
S2	1.57	137.9	275.8	2.05	6,206	137.9	43	6,387
S0.5P0.5	1.29	147.8	295.6	2.20	6,651	147.8	32	6,831
S1P1	1.37	144.6	289.2	2.15	6,507	144.6	34	6,686
P1	1.08	158.7	317.4	2.36	7,142	158.7	28	7,328
P2	1.14	155.2	310.4	2.31	6,984	155.2	29	7,169
기존 재료 벤토나이트-규사 그라우트	0.90	172.0	344.0	2.56	7,740	172	154	8,066
Case 2: 충남 도립도서관								
S1	1.50	113	226	1.68	5,076	112.80	29	5,218
S2	1.57	111	222	1.65	4,995	111.00	35	5,141
S0.5P0.5	1.29	119	238	1.77	5,360	119.10	25.7	5,504
S1P1	1.37	116	233	1.73	5,238	116.40	27.6	5,382
P1	1.08	128	256	1.90	5,756	127.90	22.8	5,906
P2	1.14	125	250	1.86	5,625	125.00	23.6	5,774
기존 재료 벤토나이트-규사 그라우트	0.90	139	277	2.06	6,242	138.70	124.5	6,505

a) 보어홀 직경: 15 cm, 파이프 직경 4.22 cm b) 천공비: 45 USD/m c) 파이프 가격: 0.5 USD/m [1)]

1) 2015년도 토목표준품셈을 이용

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5장 Test-Bed

제 1절 Test-bed 계획

개발된 지중열교환 시스템 최적화 기술 및 열물성 향상 초유동성 속채움재의 검증을 위해 여수 전남대학교 대운동장 부지에 지열시스템 이용의 Test bed를 설치하였다. 동일한 공간으로 구성된 2 개의 실험주택을 길이 6.6 x 3.3 m, 면적 21.78 m^2, 바닥부터 처마까지의 높이는 3 m 전체 높이는 4.2 m로 설계하였다. 지열시스템은 수직형 7 공과 수평형 3 공으로 총 10 공을 설치하였으며, 연구 기술을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우인 실험군과 대조군으로 나누어 계획하였다.

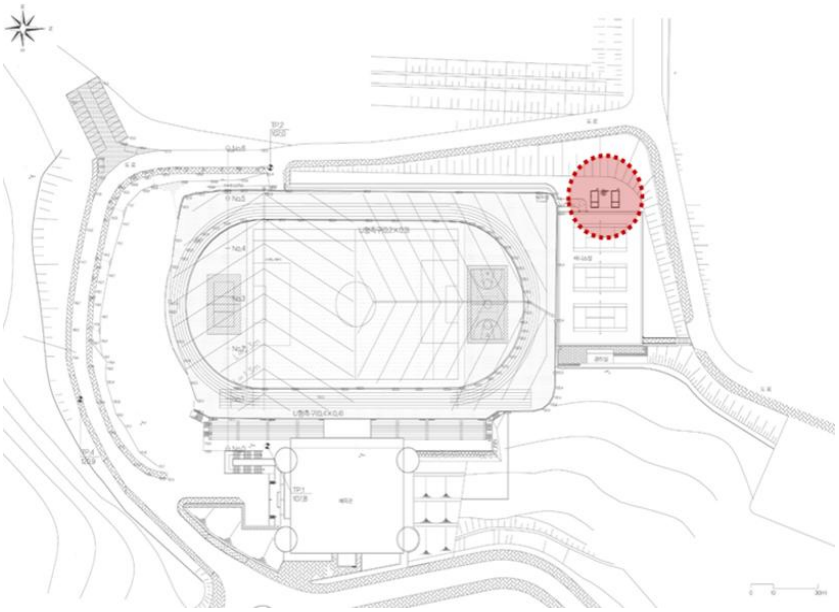


그림 5-1. 전남대학교 여수캠퍼스 부지

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

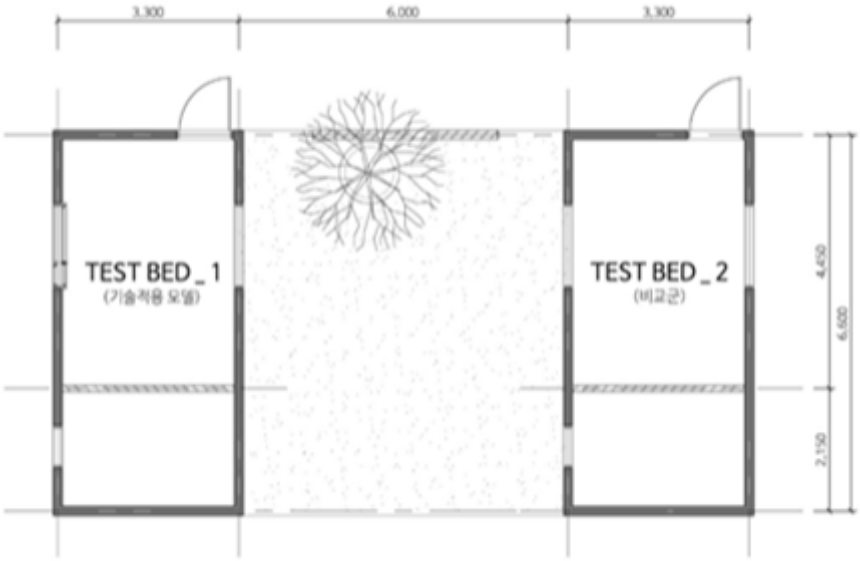


그림 5-2. Test-bed 평면도

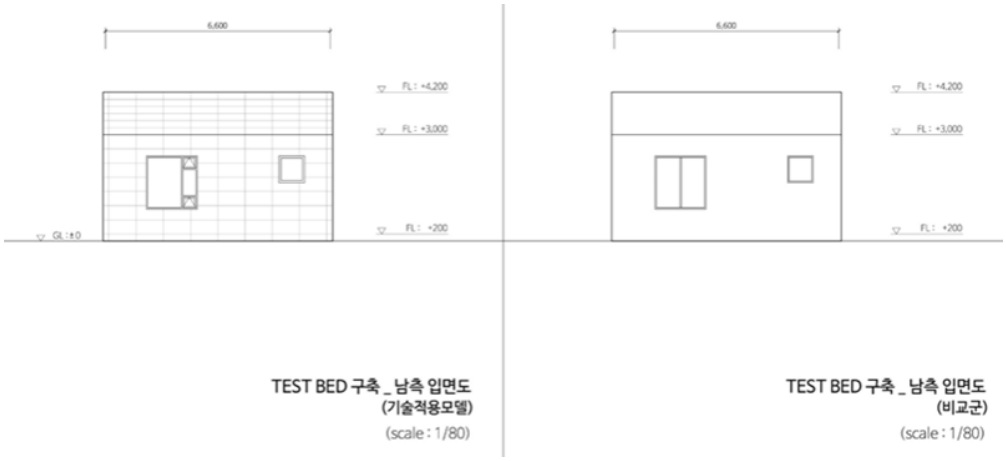


그림 5-3. Test-bed 입면도

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 Test-bed 시공 과정

2017년 7월 31일부터 총 7개의 수직공을 천공 진행하였다. Spiral 코일의 경우에는 직경 30 cm, 천공심도는 26 m를 기준으로 하였고, 직선형의 경우에는 직경 15 cm, 천공심도는 42 m를 기준으로 천공을 진행하였다. 42 m 깊이까지 천공을 진행하였을 때 예상과는 다르게 지하수위는 발견되지 않았다. 천공 후 케이싱의 경우, 일반적으로는 제거를 하나 본 연구에서는 제거를 하지 않았다. 모든 수직공에 대해 케이싱을 제거하지 않았으므로 성능 평가에는 문제가 없으며, 케이싱의 재질이 주위 암반에 비해 열전도도가 크기 때문에 성능면에서는 약간의 긍정적인 면이 존재할 것으로 예상하였다.

그림 5-4. 수직공을 위한 천공 작업

천공 완료 후 Spiral 코일형 및 일반 수직형 열교환기를 설치하였고, 열교환기의 자중에 의해, 깊이에 따라 Spiral 코일형태의 변화를 최소화하기 위해 열교환기를 철근에 결속 시켰다. 수직형 Spiral 코일형 열교환기는 피치 간격 15 cm로 설정 및 설치하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 5-5. (좌) 일반 수직형 열교환기 천공
(우) Spiral 코일 수직형 열교환기 천공

그림 5-6. 두 가지의 수직형 열교환기 설치 과정

수직형 열교환기 설치 이후, 수평형 열교환기 설치 및 기계실로 열교환 파이프 인입을 위해 트렌치를 그림과 같이 굴착하였다. 트렌치 깊이는 일반적인 지열시스템에 이용되는 깊이인 1.5 m를 기준으로 하였고, 수평형 열교환기가 설치될 트렌치는 주위 트렌치보다 50 cm 깊은 2 m로 굴착하였다. 각각의 트렌치 폭은 1 m, 길이 6 m 이다. 수평형 열교환기는 총 3 개가 설치되었으며, 최적 피치 간격 60 cm를 가지는 2 개의 수평형 열교환기와 피치간격이 5 cm인 1개의 수평형 열교환기가 대상이다. 각 트렌치 당 5 개의 RTD 센서를 설치하였으며, 이를 통해 수평형 열교환기 내 유체의 입, 출구 온도, Spiral 코일형 끝 지점에 해당하는 위치의 유체 온도, 지반의 온도를 측정하고자 하였다. 모든 열교환기 설치가 완료된 후, 뒷채움재를 배합하여 타설하였다. 수평형의 경우에는 뒷채움재 타설 이후, 일정량의 주문진 표준사를 얇게 도포하여 기존 지반과 뒷채움재의 경계를 만들었으며, 이후 원지반을 이용하여 트렌치를 메웠다. 추가적으로 지반 다짐을 실시하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 5-7. 개발 CLSM 시공 및 지반 다짐 과정

모든 수직, 수평형 열교환기의 입, 출구 파이프는 정리하여, 기계실 내 헤더(Header)로 모아져 히트펌프(HP)로 연결되었다. 이를 위해 기계실 건물을 위한 기초 타설이 이루어졌으며, 이후 헤더, 히트펌프, 열교환기 작동 유체 순환을 위한 주 펌프 및 예비펌프, 축열조, 온도 센서 및 유량계, 전기 적산계, 일정한 유량을 히트펌프로 보내주는 정유량 밸브, 전체 시스템 조작부 등을 설치하였다.

그림 5-8. 기계실 시공 과정

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3절 Test-bed 성능 평가

가. 열적 성능 평가 방법

열교환기 번호별 효율을 살펴보기 위하여 각각의 지중 열교환기에 대하여 열성능 평가를 수행하였다. 열성능 평가의 실험 원리는 그림과 같이 지중 열교환기의 입출구와 실험 장치를 연결하여 지중 열교환기의 입출구 유체 온도를 RTD 온도 센서로 측정한 뒤 온도 차이를 계산하여 열성능을 계산하였다.

$$Q = cm\triangle T$$

Q = 열교환율(W)
c = 순환수 유체의 비열(J/kgK)
m = 순환수의 질량 흐름 속도(mass flow rate, kg/s)
$\triangle T$ = 열교환기의 입구와 출구의 유체의 온도 차이(℃)

이 때 열교환율이 높을수록 지중열교환기의 열성능이 우수하다고 볼 수 있다. 유량 센서를 이용하여 열교환기 내부를 순환하는 유체의 유량을 측정하였고, 또한 데이터로거를 이용하여 온도 센서와 유량 센서를 연결하여 데이터를 기록하였다.

나. 열적 성능 평가 결과

시험기간은 수평형 지중 열교환기의 3 가지 경우에 대하여 2018.08.17.부터 4 일간 시험을 수행하였으며, 수직형 지중 열교환기 총 7 공에 대해서는 2018.09.17.부터 7 일간 시험을 수행하였다. 각각의 열적 성능 평가 시험은 약 8~10시간 동안 수행하였다. 열교환기 번호 1~6 번을 비교함으로써 수직형 지중 열교환기에서는 보어홀 깊이 40 m 의 U-type과 25 m 의 Spiral type의 성능은 비슷한 경향을 보였다. 이는 Test-bed의 설계에서 지중열교환기의 설계길이 계산 시 각각의 열교환기가 부담하는 열교환율을 비슷하게 한 것으로 설계가 잘 이루어진 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수직형의 Spiral-type에서는 광미를 뒷채움재로 사용한 경우의 열성능이 월등히 높다. 이는 수직형 지중 열교환기의 열적 성능에 뒷채움재의 열전도도보다는 열교환기와 뒷채움재 간의 접촉의 기밀성이 더 큰 영향을 미치기 때문인데, Spiral-type에서는 열교환기가 나선형으로 배치되어 있어 기존의 재료에 비해 개발된 재료의 고유동성이 기밀성을 개선하여 열교환기의 성능 향상에 영향을 미친다. 수평형 Spiral-type 지중열교환기는 동일한 열교환기 설치 면적에서 피치 간격이 좁을수록 나선의 열교환기가 조밀하게 배치되어 많은 열교환 면적 때문에 성능이 우수하나, 조밀하게 배치할수록 인접한 열교환기 사이에서 열간섭 효과가 발생하여 열교환 효율은 감소한다. 또한 피치가 커질수록 나선의 열교환기 사이의 간격이 증가하여 열교환 효율은 증가하나 열교환기의 설치 면적이 증가하며, 일정한 간격을 넘어서게 되면 더 이상 효율의 증가가 없어지게 된다. 이 두 가지의 영향을 종합하여 고려했을 때, 본 연구에서 개발된 최적의 피치가 고려된 경우와 아닌 경우를 8 번과 9 번의 실험 결과를 통해 비교해 볼 수 있다. 각각 나선형 열교환기의 길이인 113.2 m와 11.2 m로 나누어 보면 열교환기 길이당 효율은 3.89 W/m와 16.8 W/m로 열교환 효율에 있어서 매우 차이가 나는 것을 알 수 있다. 단 설치 면적에 있어서 여전히 8 번이 우수하기에 수평형 지중 열교환기의 설치 면적이 충분한 경우에는 본 연구의 개발 기술인 최적의 피치 간격을 적용이 가능하다. 9번과 10번의 비교 분석을 통해 본 연구의 개발 기술인 열 물성 향상 CLSM의 성능이 우수하다고 판단이 된다. 수직형에서 도출된 결과와 같이 뒷채움재와 열교환기의 기밀성이 열교환 성능에 영향을 미치며, 원지반을 이용하여 되메움을 실시한 경우보다 광미를 이용한 뒷채움재를 사용했을 때 열교환 성능이 28.5 % 우수하다고 나타났다. 이는 유동성이 그만큼 우수하다는 것을 의미한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5-1. 지중 열교환기 열적 성능 평가 결과

열교환기 번호	시공 방법	열교환기 형태	뒷채움재	열교환율 (W)
1	수직형	U	광미 혼입 CLSM(1.57 W/mK)	1194.4
2		U	펀드애시 혼입 CLSM(1.43 W/mK)	1204.7
3		U	벤토나이트 혼입 CLSM(0.9 W/mK)	1197
4		U	규사 혼입 CLSM(-)	1155.9
5		Spiral	벤토나이트 혼입 CLSM(0.9 W/mK)	1148.9
6		Spiral	펀드애시 혼입 CLSM(1.43 W/mK)	1178.8
7		Spiral	광미 혼입 CLSM(1.57 W/mK)	1923.3
8	수평형	Spiral	원지반 혼입 CLSM(5 cm)	439.79
9		Spiral	원지반 혼입 CLSM(60 cm)	188.04
10		Spiral	광미 혼입 CLSM(60 cm)	241.55

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6장 결 론

본 연구에서는 지중열교환 시스템 중 보어홀과 열교환유체가 흐르는 파이프 간의 간극에 광미와 펀드애시를 사용한 고유동 충전재를 사용할 수 있는지를 판단하기 위한 실험 및 경제성 분석에 대해 수행하였다. 다음과 같은 결론이 이번 연구를 통해 도출되었다.

(가) 폐광미 전처리는 CLSM의 유동성, 침하량, 강도 등에 큰 영향을 미치지 않는다. 한편 단위수량을 ACI 229R 기준 유동성 200 mm 수준으로 결정한 배합은 침하량이 1 % 이하로 부피안정성이 높고 0.3 MPa 이상 2.1 MPa 이하의 적절한 수준의 강도가 발현되는 것을 확인했다.

(나) 광미만을 사용한 배합은 TCLP 실험결과 환경영향성 기준을 만족시킨다. 그러나 펀드애시를 동시에 사용하면 이를 달성하기가 어렵다. 단, 지열시스템 자체가 기존의 뒷채움 혹은 지중 절개부위 충전재와 같이 CLSM을 대량으로 사용하지 않으므로 향후 이에 대한 고찰이 필요하다. 현재의 실험법에 따르면 지하수의 pH를 높일 위험이 있으나, CLSM 자체의 시멘트량이 일반 콘크리트에 비해 약 1/3~1/4 수준이므로 장기적인 pH 교란 문제는 모르타르 그라우트에 비해 그 위험성이 낮다고 할 수 있다.

(다) 골재량 및 골재 종류에 따른 성능 변화에서 압축강도는 5 ℃의 저온에서 양생 했을 때보다 30 ℃의 온도에서 양생 했을 때 펀드애시를 혼입한 배합의 강도 증가 폭이 약 2~3 배 이상 차이가 남을 확인하고, 모래와 광미만을 사용했을 때 강도 증가의 폭이 미미했다.

(라) 열전도율을 기반으로 설계한 결과 기존의 벤토나이트-규사 그라우트에 비해 요구 파이프 길이가 감소하여 천공부 깊이가 감소하게 된다. 따라서 동일한 수준의 열효율을 고려할 때 기존 벤토나이트-규사 그라우트에 비해 최대 20 %에서 최소 9 % 이상 시공비를 감소 할 수 있을 것으로 예상된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(마) 본 연구에서는 모든 배합에서 일축 압축강도와 열전도도를 만족하였기에 모래를 사용한 S1, S2 배합을 제외하고 나머지 4 가지의 배합이 경제적인 측면에서 이롭다고 판단 할 수 있지만, 반면 시공성 측면에서는 펀드애시만을 사용한 P1, P2 배합 보다 모래를 혼합한 두 배합이 적절하다고 판단하였다. 최종적으로 침하량 결과까지 고려한 바로는 S0.5P0.5 배합보다 S1P1 배합이 더 작은 처짐을 보였기에 최종적으로 S1P1 배합을 사용하는 것이 더 높은 효율을 기대할 수 있다고 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참 고 문 헌

1) 김남태,“수직밀폐형 지열원 열펌프 시스템의 최적설계에 관한 연구”, 한밭대학교 석사학위논문 pp. 15~16, 2011
2) 남유진,“지열 시스템 연구 및 기술 동향”, 한국생태환경건축학회 추계국제학술발표대회 논문집, 제 17권, 제 2호, 2017
3) 강병선,“지열을 이용하는 열펌프의 기술동향에 관한 연구”, 금오공과대학교 산업대학원 pp. 2~3, 2013
4) 유선정, 김주영, 홍원화, 안창환,“냉방시 SCW 지열시스템의 보어홀 온도회복 속도에 관한 연구”, 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회, pp.1~4, 2007
5) 남임우, 백기동,“지열 시스템의 난방 경제성 및 CO_2 절감 실증 연구”, 한국지열에너지학회논문집, 제 3권, 제 2호, pp. 25~30, 2007
6) 서운종, 김도규,“지열시스템의 보급실태와 활성화를 위한 제안”, 지열에너지저널, 제 4권, 제 4호, pp.27~31, 2008
7) 이종찬, 박용호, 이강, 이상호,“군 복지시설의 지열시스템과 태양열시스템 경제성 평가 사례 연구”, 한국건설관리학회 논문집, 제 10권, 제 4호, pp.111~117, 2009
8) 채호병, 남유진,“에너지파일 이용 지열시스템의 채열성능 예측수법에 관한 연구”, 추계학술발표대회, pp.215~218, 2012
9) 박주석, 김창신, 이정재,“지열시스템의 그라우팅재 배합비율에 따른 열전도도 및 PE관에 미치는 영향 분석”, 대한건축학회지회연합회 논문집, 제 14권, 제 2호, pp.183~189, 2012
10) 오진환, 남유진,“지중 채열량 예측 수법을 이용한 지열시스템의 깊이별 성능특성 분석”, 한국태양에너지학회, 제 33권, 제 2호, pp.63~66, 2013
11) 박종일, 박경순,“지열시스템의 지중 설계요소와 지중열교환기 길이 분석”, 한국지열에너지학회논문집, 제 11권, 제 3호, pp.1~6, 2015
12) 송재용, 이근춘, 박남서,“지하수정호와 결합한 복합지열시스템의 열교환 효율에 대한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집(구조계), 제 34권, 제 5호, pp.43~50, 2018

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

13) 신지현, 최동희, 조영흠,“지열시스템 순환펌프 변유량 제어를 활용한 운영 방안 개발”, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제 12권, 제 5호, pp.510~518, 2018
14) 이용수,“폐석탄회를 재활용한 저강도 고유동 충전재의 특성”, 건국대학교 석사학위논문 pp.9~11, 2002
15) 남중우,“석탄회를 활용한 관거 뒤채움용 저강도 고유동화재의 현장적용성 평가”, 한양대학교 석사학위논문, pp.1~15, 2013
16) 김형석,“보통포틀랜드시멘트 원료로서 회중석 광미의 활용”,리싸이클링 제 13권, 제 3호, pp.19~22, 2004
17) 정병희,“폐광미의 재활용을 위한 기초적인 연구”, 전남대학교 석사학위논문, pp.1~10, 2005
18) 유승완,“폐광미 미립분의 시멘트 혼화재로의 활용”, 전북대학교 석사학위논문, pp.1~15, 2006
19) 최창호,“공공도서관에 지열시스템 적용시 경제성에 관한 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, 제 32권, 제 1호, 2012
20) 허정호,“지열히트펌프 시스템의 변수와 최적 설계조건에 관한 연구”, 서울시립대학교 석사학위논문, pp. 1~25, 2012
21) 박원춘,“광산 폐광미의 건설재료 활용방안에 관한 연구”, 전북대학교 박사학위논문 pp.10, 2009
22) 이대영, “CLSM(Controlled Low-Strength Material)의 주요 현황과 적용범위”한국건설순환자원학회지, 제 13권, 제 3호 pp.10~11
23) 이승준,“석탄회를 활용한 지중관로 뒤채움용 CLSM의 열적 특성에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위논문 pp.1~2, 2013 (여기에 석탄재 천병식 포함)
24) 공진영, 강형남, 천병식,“석탄회를 활용한 저강도고유동화재의 일축압축강도와 플로우 특성”, 한국지반공학회 논문집, 제 26권, 제 1호 pp.75~83, 2010
25) 국길근, 김혜양, 천병식,“화력발전소 부산물인 석탄회의 공학적 특성에 관한 연구”, 한국지반환경공학회 논문집, 제 11권, 제 5호, pp.25~34, 2010
26) 김영일, 지성현, 천병식,“석탄회를 활용한 CLSM의 pH 저감에 관한 연구”, 한국지반환경공학회 논문집, 제 11권, 제 9호, pp.39~45, 2010

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

27) 김주형, 조삼덕, 공진영, 정혁상, 천병식, “석탄회를 사용한 저강도 고유동화재의 경화 특성 분석”, 한국지반환경공학회 논문집, 제 11권, 제 11호, pp. 77~85, 2010

28) 최남훈,“현장 발생토사 CLSM을 이용한 지하매설관의 거동특성 분석”, 한양대학교공학대학원 석사학위논문, pp.17~20

29) 환경부(2016), 하수관거등 환경시설의 누수방지 소재 및 적용기술 개발, 환경부 환경산업선진화기술개발사업 최종보고서

30) Kim, Y. S., Do, T. M., Kim, M. J., Kim, B. J., & Kim, H. K. (2018). Utilization of by-product in controlled low-strength material for geothermal systems: Engineering performances, environmental impact, and cost analysis. Journal of Cleaner Production, 172, 909-920.

31) Do, Tan Manh (2018). Beneficial use of coal ash and some industrial byproducts for improving engineering characteristics of controlled low strength material

32) Park, H. K., Lee, S. R., Yoon, S., Choi, J. C. (2013), “Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation”, Applied Energy, Vol. 103, pp. 12-24.

33) Park, S. K., Lee, S. R., Park, H. G., Yoon, S., Chung J. Y. (2013), “Characteristics of an analytical solution for a spiral coil type ground heat exchanger” Computers and Geotechnics, Vol. 49, pp. 18-24.

34) Yoon, S., Lee, S. R., Park, H. K., Park, D. W., Go, G. H. (2013), “Prediction of heat exchange rate in PHC energy piles" Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 29, No. 9, pp. 31-41.

Collection @ chosun