실내시험을 통한 송배전관로 뒤채움재용 순환골재의 열적 특성 평가
Laboratory Experiment to Characterize Thermal Properties of Recycled-Aggregate Backfill

위지혜[1], Jihae Wi, 홍성연[2], Sung-yun Hong, 이대수[3], Dae-soo Lee, 한은선[4], Eunseon Han, 최항석[5], Hangseok Choi

[1] 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
[2] 한국전력공사 전력연구원 일반연구원, Researcher, Korea Electric Power Research Institute
[3] 한국전력공사 전력연구원 책임연구원, Senior researcher, Korea Electric Power Research Institute
[4] 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
[5] 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University(교신저자)

SYNOPSIS : Recently, the utilization of recycled aggregates for backfilling a power transmission pipeline trench has been increasing due to the issues of eco-friendly construction and shortage of natural aggregate resource. It is important to investigate the physical and thermal properties of the recycled aggregates that can be used as a backfill material. This study presents the thermal properties of two types of recycled aggregates with various particle size distributions. The thermal properties of the recycled aggregate were measured using the transient hot wire method and the probe method after performing the standard compaction test using an automatic compactor. Similar to silica sand, the thermal resistivity of the recycled aggregates decreased when the water content increased. This study shows that the recycled aggregate can be a promising backfill material substituting for natural aggregate when backfilling the power transmission pipeline trench.

Key words : 뒤채움재(backfill material), 순환골재(recycled-aggregate), 송배전관로(power transmission pipeline), 열저항(thermal resistivity)

1. 서 론

순환골재는 건설폐기물을 물리적 또는 화학적 처리과정 등을 통해 적정 품질기준에 적합하도록 재생산된 골재를 의미한다. 순환골재는 건설공사에서 성토 및 복토용으로 한정적으로 사용되어왔으나 최근 환경보전 및 자원의 재활용에 대한 관심이 높아지면서 순환골재의 다양한 활용에 대한 연구가 지속적으로 늘어가고 있다(김대홍 등 2001, 오기대 등 2008). 정부에서도 순환골재의 의무사용화에 대한 법령 고시 및 건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률을 규정하여 순환골재의 사용을 장려하고 있는 추세이다. 이에 발맞춰 본 연구에서는 송배전관로의 되메움재로서 일반적으로 사용하는 모래 대신 순환골재를 사용하는 방안을 검토하여 환경적 측면뿐만 아니라 경제적 측면에서 긍정적인 효과가 나타날 것으로 기대

된다. 그러나 송배전관로 되메움재로 사용될 시료는 낮은 열저항을 유지하여 송배전 효율을 높여야 하기 때문에 순환골재의 열적 특성을 규명하는 것이 중요한 사항이며, 이와 더불어 순환골재의 물리적 특성을 파악하여 열적 특성과의 관계를 명확히 아는 것이 중요하다.

본 연구에서는 순환골재가 갖는 성상, 입도분포에 따른 열적 특성에 대해 고찰하였으며 천연규사의 열적 특성과 비교 및 평가하였다. 연구에 사용된 순환골재는 최대 골재 크기가 각각 5mm, 10mm이며 충청권에서 생산된 것이다. 순환골재와 천연규사 모두 표준다짐시험을 실시하여 함수비 변화에 따른 열저항의 변화를 관측 및 평가하였다.

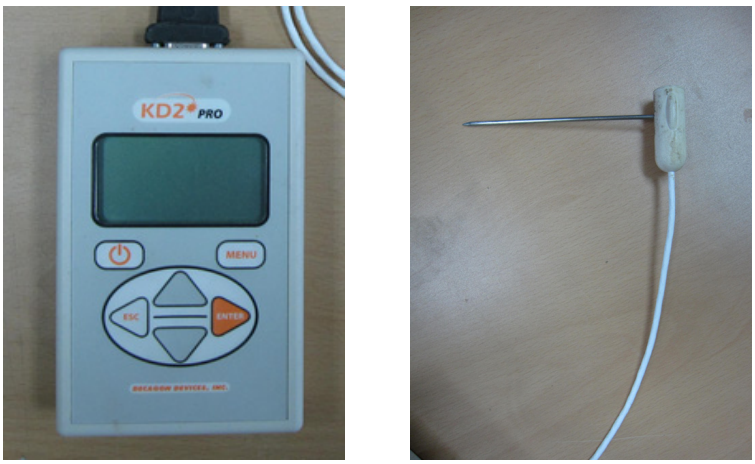
2. 입상체의 열저항 평가

2.1 열저항

열저항(℃·cm/W 또는 K·cm/W)은 한 변의 길이가 1cm인 정육면체 내부에 1W의 열이 흐를 때 정육면체 전체에 1℃의 온도상승을 일으키게 되는 흙의 열적 특성을 나타내는 것으로 흙의 열원에서 받은 열을 소산시키는 정도를 의미한다. 흙의 열저항에 영향을 미치는 인자로는 함수비(water content), 건조밀도(dry density), 입자의 형태 및 입상 자체의 열전도도 등이 있다. 함수비가 일정할 때 건조밀도가 증가할수록 열저항은 감소하며, 건조밀도가 일정할 때 함수비가 증가할수록 감소한다. 송배전관로의 되메움재는 송배전시 관로에서 발생하는 열을 효과적으로 방출시켜 열폭주에 의한 케이블의 절연파괴를 막아야하므로 열저항이 낮아야하며 일반적으로 제안되는 열저항 기준은 100℃·cm/W 이하이다.

2.2 열저항 측정장비

본 연구에서는 사용된 열저항 측정 장비는 KD2 Pro(제조사 : Decagon Devices)와 QTM-500(제조사 : Kyoto Electronics Manufacturing CO., Ltd.)을 사용하였다. KD2 Pro는 비정상 탐침법(transient hot probe method 또는 needle probe method)를 적용하여 측정하며, 3종류의 측정 프로브가 있는데 건조토나 습윤토, 입상재료 등에 사용하기 적합한 프로브 TR-1을 이용하여 열저항을 측정하였다.



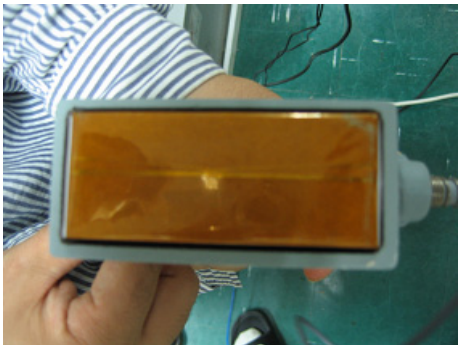
(a) 측정장비 본체 (b) 프로브 TR-1

그림 1. KD2 Pro 열저항 측정 장치

QTM-500은 비정상 열선법(transient hot wire method)을 이용하며, 프로브의 크기는 95mm× 40mm이며 시료와 직접 접촉하는 표면이 유리섬유로 구성되어 있는 PD-13를 이용하여 열저항을 측정한다. 비정상 열선법은 동일한 두 매질 사이에 열선이 놓이기 때문에 프로브가 시료 표면에 부착성이 우수해야 한다. 프로브 PD-13의 경우 케이스 내부에서 용수철로 움직이는 1kg의 가압추가 프로브 표면과 시

료 표면의 부착성을 높여준다. 탐침법을 사용할 경우, 다짐된 시료에 탐침을 관입시, 관입된 탐침 주변 시료가 교란이 되거나 관입할 때 일부 굵은 골재로 인해 비정상적인 간극이 생겨 탐침과 시료의 접촉을 불량하게 할 수 있다. 간극에 존재하는 공기의 열저항은 4000 ℃·cm/W으로 매우 높기 때문에 이 경우 실제 시료의 열저항 보다 크게 측정될 수 있다. 열선법을 이용할 경우 이런 문제점이 발생하지 않기 때문에 탐침법에 비해 정확한 측정 결과를 기대할 수 있다.

(a) 측정장비 본체



(b) 프로브 PD-13

그림 2. KD2 Pro 열저항 측정 장치

3. 시험방법

3.1 대상시료

본 연구에서 사용된 시료는 충청지역에서 생산된 순환골재로 최대골재크기가 각각 5mm(순환골재 A), 10mm(순환골재 B)이며 서로 다른 입도분포를 가진 순환골재에 대한 열적 특성을 살펴보았다. 또한 현재 뒤채움재로 일반적으로 사용하는 천연규사의 열적 특성과 함께 비교함으로서 되메움재로서 순환골재의 적합성을 평가하였다. 그림 3은 연구에 사용된 순환골재 2종류와 천연규사의 모습이다.

(a) 순환골재 A

(b) 순환골재 B

(c) 천연규사

그림 2. 열저항 측정 대상 시료

표 1은 두 종류의 순환골재와 천연규사의 기본물성을 나타내며, 이를 바탕으로 각 시료의 입도분포곡선을 그림 3과 같이 도시하였다. 순환골재 A는 통일분류법에 의해 SW(sand well-graded)로 구분되며 입도분포가 좋은, 즉 불균등한 입자로 구성되어 있다. 반면 순환골재 B와 천연규사는 SP(sand poorly-graded)로 분류되는데 이는 균등한 입자로 이루어져서 입도분포가 나쁘다는 것을 의미한다.

표 1. 기본물성 결과

구분	순환골재 A	순환골재 B	천연규사
5mm 체 통과율 (%)	99.95	63.57	100
0.08mm 체 통과율 (%)	4.93	3.12	1.02
균등계수, C_u	8.69	22.66	2.90
곡률계수, C_c	1.83	0.87	1.05
통일분류법	SW	SP	SP
비중, G_s	2.686	2.665	2.731

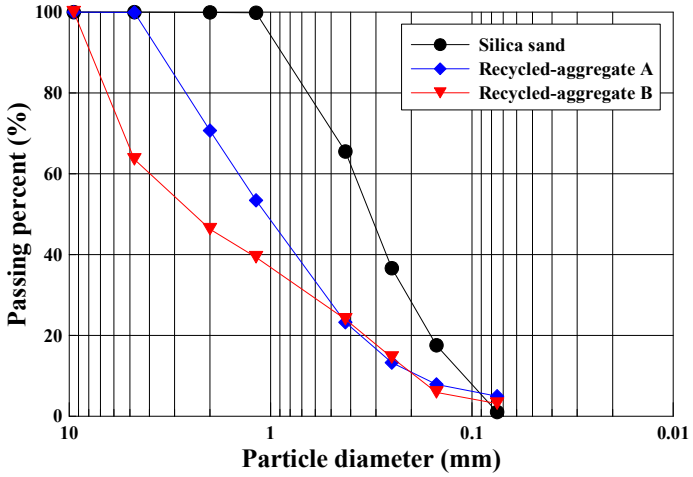


그림 3. 시료별 입도분포곡선

3.2 시료제작

현재 순환골재의 다짐도 기준이 확립되어 있지 않기 때문에 일반 토사에 적용하는 다짐도 기준으로 공압식 자동다짐기를 이용하여 다짐시험을 수행하였다. 두 종류의 순환골재의 다짐도를 구하여 상대다짐도 85%, 90%, 95%가 되도록 시료를 제작하여 함수비를 변화시키면서 열저항 측정 시험을 수행하였다. 다짐시험에 사용된 몰드는 직경 15cm, 높이 17.5cm이며 2.5kg 램머를 이용하여 표준 B다짐법(3층 55회)을 적용하였다. 천연규사의 경우, 수정 D다짐법(5층 55회)을 사용하였다(이강자, 2009). 그림 5는 각 시료의 다짐곡선이며, 다짐곡선으로부터 구한 최대건조단위중량($\gamma_{d,\max}$)에 따른 최적함수비(OMC)는 표 2와 같다. 수정 D다짐법을 사용한 천연규사가 표준 B다짐법을 사용한 순환골재보다 높은 최대건조단위중량을 나타낸다.

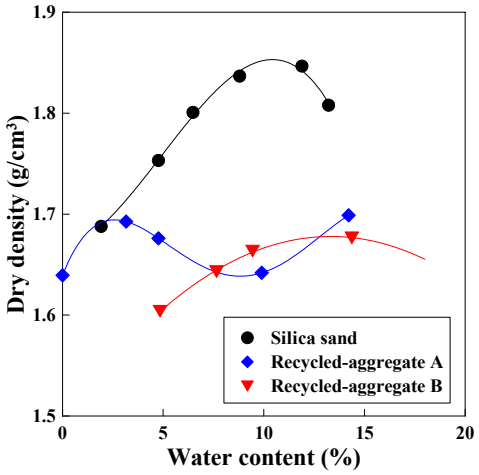


그림 4. 시료별 다짐곡선

표 2, 순환골재의 최적함수비에 따른 최대건조단위중량

구분	순환골재 A	순환골재 B	천연규사
최적함수비, OMC	2.7 %	13.3 %	10.4%
최대건조단위중량, $\gamma_{d,\max}$	1.694	1.678	1.853

그림 6는 각각 KD2 Pro와 QTM-500을 이용하여 다짐 시료의 열저항을 측정하는 모습이다. 그림 8(a)는 KD2 Pro를 이용하여 열저항을 측정하는 동안 수분의 증발을 막고자 고무판으로 시료를 덮고 측정하는 모습이다.

(a) KD2 Pro를 이용한 측정 모습 (b) QTM-500을 이용한 측정 모습

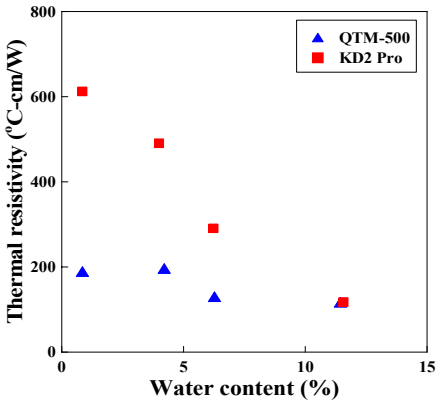
그림 5. 다짐 시료의 열저항 측정 모습

4. 시험결과

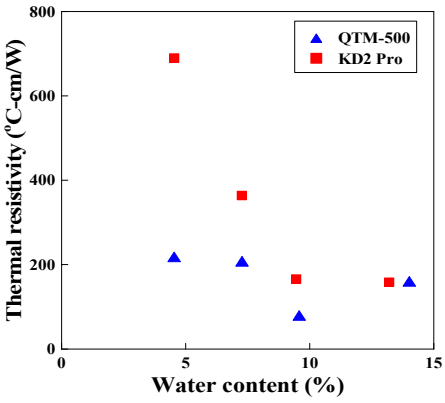
KD2 Pro와 QTM-500을 이용하여 순환골재의 함수비 및 다짐도에 따른 열저항을 측정하였다. 그림 7, 8, 9은 상대다짐도에 따른 열저항 측정결과를 도시한 그래프이다. 시험결과로 부터 일반적인 토사와 마찬가지로 함수비가 증가할수록 열저항이 낮아짐을 알 수 있다. 비정상 열선법이 적용된 QTM-500을 이용한 측정 결과는 탐침법이 적용된 KD2 Pro를 이용한 측정 결과보다 상대적으로 열저항이 낮게 측정되었다. 열선법을 이용하여 측정할 경우, 제작된 다짐시료의 표면에 프로브는 안치하고 열저항을 측정하기 때문에 탐침법에서 발생할 수 있는 프로브의 관입으로 인한 시료의 교란이 적은 편이다. 따라서 교란된 시료 사이에 존재하는 틈으로 인해 열저항이 크게 나타날 수 있는 탐침법에 비해 낮은 열저항값을 얻을

수 있음을 유추할 수 있다. 또한 시료의 교란이 적은 QTM-500에 의한 측정 결과가 실제 순환골재의 열저항을 의미할 수 있다.

상대다짐도에 따른 열저항의 변화는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 상대다짐도를 맞추기 위해서 최대건조단위중량과 다짐에너지의 비율을 이용하여 자동다짐기의 타격횟수를 조정하였다. 조정된 타격횟수는 각 46회, 50회, 52회로 기준이 된 55회와 근소한 차이여서 상대다짐도에 따른 열저항의 차이가 적음을 유추할 수 있다.

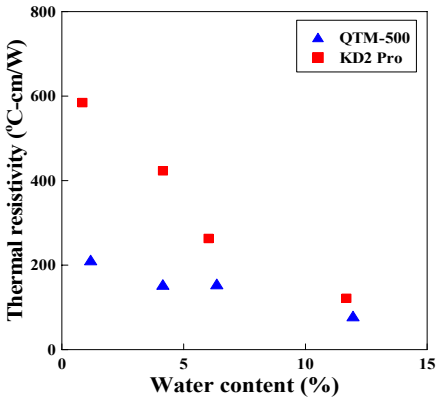


(a) 순환골재 A

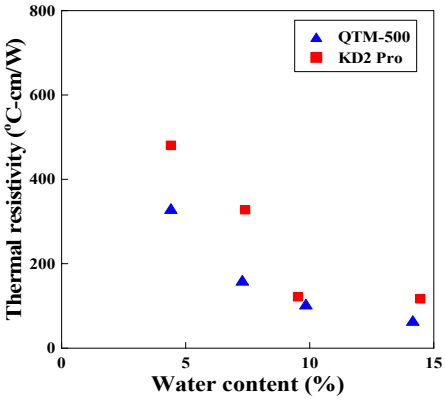


(b) 순환골재 B

그림 6. 상대다짐도 85%의 열저항 측정 결과 비교

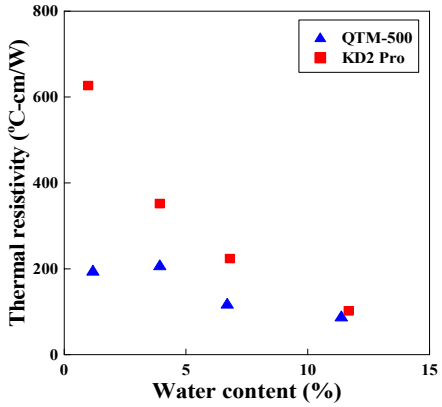


(a) 순환골재 A

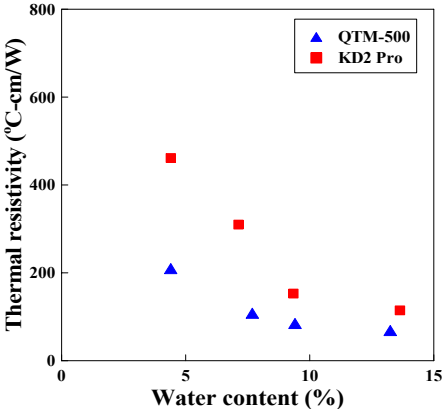


(b) 순환골재 B

그림 7. 상대다짐도 90%의 열저항 측정 결과 비교



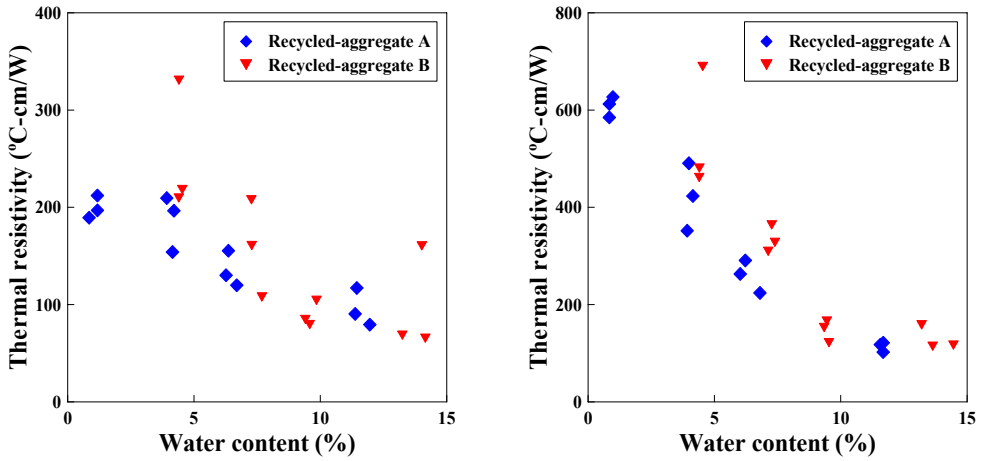
(a) 순환골재 A



(b) 순환골재 B

그림 8. 상대다짐도 95%의 열저항 측정 결과 비교

입도분포에 따른 두 순환골재의 열저항 측정 결과를 비교한 결과는 그림 10과 같으며 함수비가 낮은 구간에서는 최대골재크기가 10mm인 순환골재가 열저항이 상대적으로 크게 나타났다. 두 순환골재 모두 약 10% 함수비 이상에서는 열저항의 감소 정도가 비슷함을 보였다. 일반 토사의 경우 일정 함수비 이상에서 열적 안정 상태를 갖게 되는데 이때 함수비를 임계함수비라고 한다. 함수비가 낮은 영역에서 함수비가 증가함에 따라 열저항이 급격하게 감소하다가 임계함수비, 즉 약 10% 함수비 이상에서는 열저항값이 저하되는 정도가 적음을 볼 수 있다.



(a) QTM-500을 이용한 측정 결과 (b) KD2 Pro를 이용한 측정결과

그림 9. 순환골재의 입도별 열저항 측정 결과 비교

그림 11은 천연규사의 열저항 측정 결과를 순환골재의 결과와 비교한 그래프이다. 천연규사는 순환골재에 비해 입자의 크기가 작아 흙 입자와 탐침 사이의 접촉성이 순환골재보다 좋기 때문에 열저항 측정 결과가 낮게 나올 수 있다. 또한, 천연규사에 적용된 다짐방법이 수정 D다짐법으로 순환골재보다 높은 다짐에너지로 다짐을 했기 때문에 입자 사이의 간극이 적어 낮은 열저항이 나온 것으로 볼 수 있다. 순환골재의 경우, 재생산된 시료이므로 시멘트 페이스트와 같은 물질이 골재표면에 잔재해 있어 국부적인 열적 단락을 초래하여 비교적 높은 열저항을 유도할 수도 있다. 측정결과를 바탕으로 향후 순환골재의 송배전관로 되메움재로서 적용성을 판단할 때 전력케이블의 열 확산을 효과적으로 할 수 있는 적정 함수비 및 다짐도와 함께 입도분포에 대한 기준도 정립해야할 것이다..

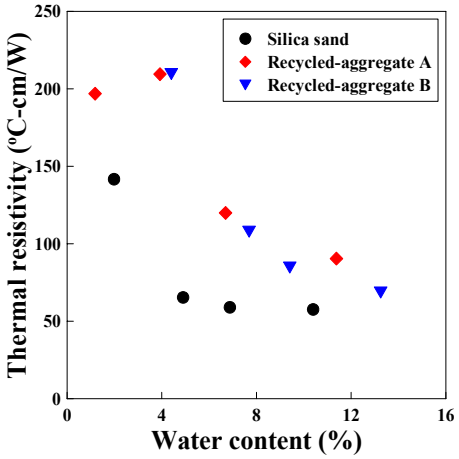


그림 10. 시료별 함수비에 따른 열저항

5. 결 론

본 연구는 송배전관로 되메움재로서 순환골재의 적용성을 알아보고자 충청지역에서 채취한 최대 골재 크기 5mm 및 10mm인 순환골재를 대상으로 실내다짐시험 및 열저항 측정을 수행하였다. 순환골재의 열저항 측정 결과와 함께 천연규사의 열저항 측정 결과와도 비교하였으면 결론은 다음과 같다.

(1) 충청권에서 채취한 순환골재를 대상으로 열저항 측정시험을 수행한 결과, 열저항 측정 장비에 따라 열저항 측정 결과가 다소 차이가 있으나 일반 토사와 유사하게 함수비가 증가할수록 열저항이 감소함을 확인할 수 있었다.

(2) 입도에 따른 열저항을 비교했을 경우, 낮은 함수비에서는 열저항의 저하가 서로 다른 경향을 보였다. 그러나 약 10% 이상의 함수비에서는 두 순환골재 모두 열저항의 낮아지는 경향이 비슷함과 동시에 감소 정도가 적어 열적 안정성을 보였다.

(3) 위 결과를 종합하면, 향후 다양한 성상 및 입도분포를 가진 순환골재에 대해 열적 특성을 규명하는 연구를 통해 순환골재가 열적 안정성을 나타내는 임계함수비와 다짐도 기준이 수립되면 송배전관로 되메움재로서의 적용가능성이 있음을 시사해준다.

감사의글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 송배전관로 되메움용 순환골재의 품질기준 수립 사업 연구지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김대홍, 이대수, 정원섭, 정범용(2001), “지중송전케이블 되메움 토사의 열저항 특성”, **대한토목학회 정기학술대회**
2. 오기대, 김대홍, 김경열(2008), “함수비 변화에 따른 순환골재 열저항 특성 연구”, **대한토목학회 정기학술대회**
3. 이강자(2009), **수평형 지중 열교환기 되메움재의 열특성에 관한 연구**, 석사학위논문, 고려대학교