



## 1. 서론

지중 전력 케이블은 관로 또는 전력구 형태로 지중에 설치되는데, 이를 덮고 있는 되메움재를 통해 케이블에서 발생하는 열을 방출함으로써 열적 안정성을 유지하여 열폭주 및 케이블의 절손을 막아야 한다. 즉, 송배전 관로를 주위의 되메움재는 관로에서 발생하는 열을 쉽게 외부로 전달할 수 있는 되메움재를 사용하는 것이 중요하다. 일반적인 송배전관로 되메움재로는 강모래를 주로 사용하여 왔으나, 환경보전 및 자원의 재활용에 대한 사회적 관심이 상승하면서 강모래의 대체자원인 순환골재의 적용성에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다(오기대 외 2008, 위지혜 외 2010). 그러나 순환골재에 관한 연구는 콘크리트용 골재로서 공학적 특성을 규명하거나(전명훈 외 2004, 전상순 외 2003) 도로건설 재료로서 사용되는 순환골재의 특성 연구(이용수 외, 2005) 등으로 순환골재의 열적 특성 규명에 대한 규명은 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 새로운 골재자원으로 관심을 받고 있는 순환골재를 송배전관로의 되메움재로 적용 방안을 검토하였다. 건설폐기물을 물리적 또는 화학적 처리과정 등을 통해 적정 품질기준에 적합하도록 재생된 골재인 순환골재는 송배전관로의 되메움재로써 역학적 특성 및 열적 특성이 규명되지 않아 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 국내 각 지역에서 채취한 13가지 순환골재와 대조군인 일반 강모래를 대상으로 성상, 입도분포, 함유 광물에 따른 열적 특성을 평가하였다. 이를 위해 순환골재와 강모래 시료에 대해 표준다짐시험을 실시하여 함수비 변화에 따른 열저항 변화를 관측하였다.

## 2. 열저항 측정

### 2.1 토양 열저항

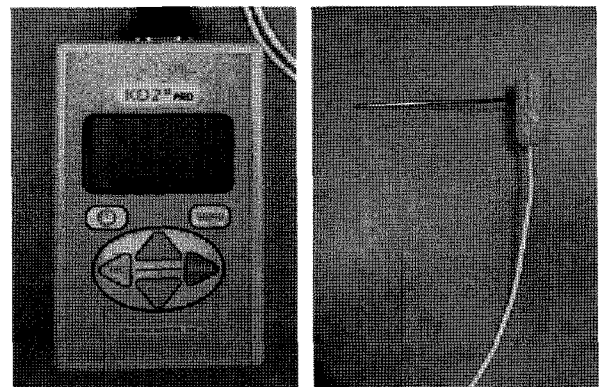
토양의 열저항( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$  또는  $\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$ )은 한 번의 길이가 1cm인 정육면체 내부에 1W의 열이 흐를 때 정육면체 전체에  $1^{\circ}\text{C}$ 의 온도상승을 일으키게 되는 흙 시료의 열적 특성을 나타내는 것으로 흙의 열원에서 받은 열을 소산시키는 정도를 의미한다. 흙 시료의 열저항에 영향을 미치는 인자로는 함수비(water content), 건조밀도(dry density), 입자의 형태 및 광물 자체의 열전도도

등이다. 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 방지하기 위해 열저항이 낮아야 하며 일반적으로 제안되는 열저항 기준은  $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$  이하이다.

### 2.2 열저항 측정 장비

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

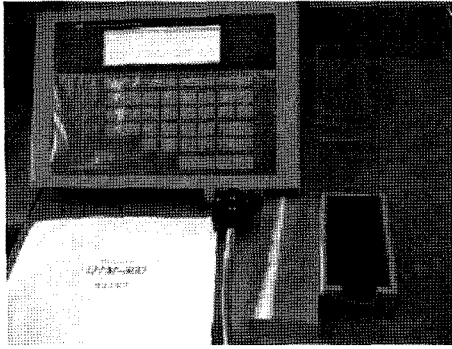
QTM-500(그림 2)은 비정상 열선법(transient hot wire method)을 이용하며, 프로브의 규격은  $95\text{mm}\times 40\text{mm}$ 이며 시료와 직접 접촉하는 표면이 유리섬유로 구성되어 있는 PD-13를 이용하여 열저항을 측정한다. 비정상 열선법은 동일한 두 매질 사이에 열선이 놓이기 때문에 프로브가 시료 표면에 부착성이 우수해야 한다. 프로브 PD-13의 경우 케이스 내부에서 용수철로 움직이는 1kg의 가압추가 프로브 표면과 시료 표면의 부착성을 높여 준다. 탐침법을 사용할 경우, 다짐된 시료에 탐침을 관입시, 관입된 탐침 주변시료가 교란이 되거나 관입할 때 일부 굵은 골재로 인해 비정상적인 간극이 생성될 수 있어 탐침과 시료의 접촉을 불량하게 할 수 있다(그림 3). 간극에 존재하는 공기의 열저항은  $4000^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$  이



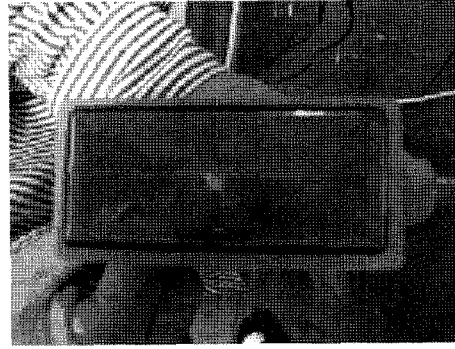
(a) 측정장비 본체

(b) 프로브 TR-1

그림 1. KD2 Pro 열저항 측정 장치

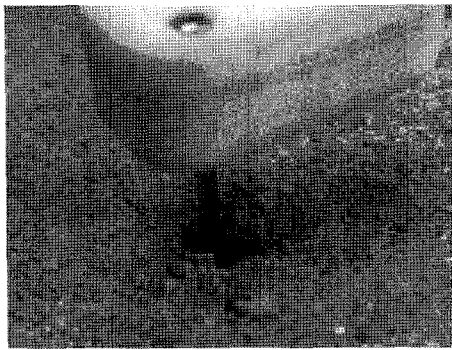


(a) 측정장비 본체

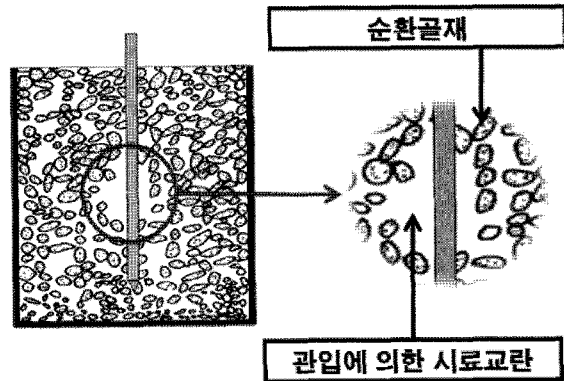


(b) 프로브 PD-13

그림 2. QTM-500 열저항 측정 장치



(a) 시료 표면 교란 모습



(b) 시료 내부 교란 모식도

그림 3. 탐침 관입시 시료 교란 모습

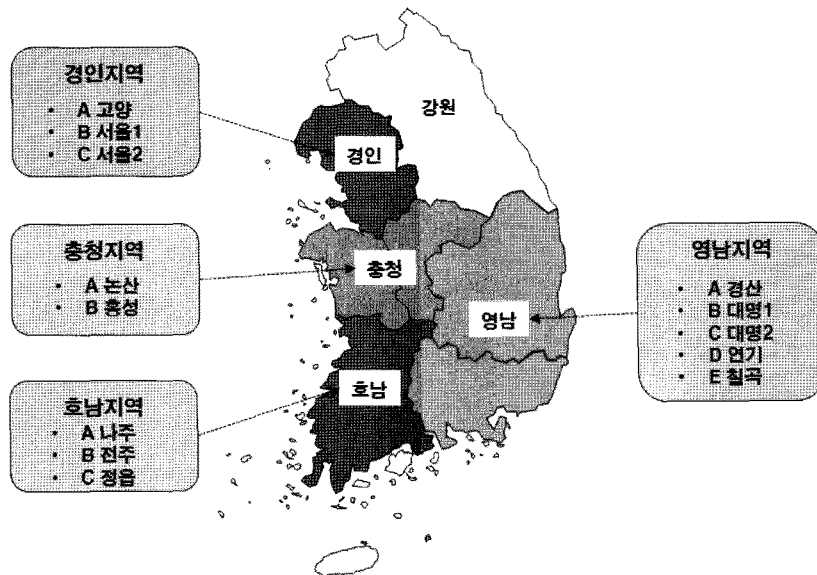


그림 4. 순환골재 채취 지역

상으로 매우 높기 때문에 이 경우 실제 시료의 열저항을 과대평가 할 수 있다. 열선법을 이용할 경우 이런 문제점이 발생하지 않기 때문에 탐침법에 비해 정확한 측정 결과를 기대할 수 있다.

### 3. 시험방법

#### 3.1 대상시료

본 연구에서 적용된 시료는 그림 4와 같이 국내 각

표 1. 기본물성 시험 결과

| 구분                   | 강모래   | 경인A   | 경인B   | 경인C   | 호남A   | 호남B    | 호남C   |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 5mm(#4)체 통과율(%)      | 98.19 | 93.64 | 99.89 | 89.19 | 99.33 | 97.73  | 94.58 |
| 0.08mm(#200)체 통과율(%) | 3.26  | 1.38  | 1.86  | 5.15  | 3.68  | 4.28   | 3.08  |
| 균등계수, Cu             | 10.17 | 5.90  | 5.05  | 10.17 | 5.67  | 5.60   | 8.79  |
| 곡률계수, Cc             | 0.99  | 1.22  | 0.91  | 0.99  | 1.60  | 1.25   | 1.34  |
| 통일분류법                | SP    | SP    | SP    | SP-SM | SP    | SP     | SW    |
| 석영 함량(%)             | 62.3  | 50.6  | 50    | 43.9  | 56.4  | 51     | 36.9  |
| 구분                   | 충청A   | 충청B   | 영남A   | 영남B   | 영남C   | 영남D    | 영남E   |
| 5mm(#4)체 통과율(%)      | 99.95 | 63.57 | 88.63 | 79.70 | 79.21 | 100.00 | 95.05 |
| 0.08mm(#200)체 통과율(%) | 4.93  | 3.12  | 4.87  | 4.70  | 3.75  | 3.72   | 1.95  |
| 균등계수, Cu             | 5.25  | 21.16 | 9.98  | 12.86 | 8.77  | 7.47   | 8.00  |
| 곡률계수, Cc             | 1.87  | 0.63  | 1.06  | 1.03  | 1.97  | 1.21   | 0.86  |
| 통일분류법                | SP    | SP    | SW    | SW    | SW    | SW     | SP    |
| 석영 함량(%)             | 46.5  | 54.2  | 40    | 32.5  | 32.5  | 47.3   | 36.9  |

지역에서 공급받은 13종류 순환골재로 최대 골재크기가 10mm인 충청B, 영남C, 영남E 시료를 제외한 나머지 10종류 순환골재는 최대 골재크기가 5mm이고, 각 순환골재는 다양한 입도분포를 갖고 있다. 순환골재의 열적 특성은 시료를 구성하고 있는 광물의 함량에 따라 달라

질 수 있다. Johansen(1975)은 다양한 흙 시료를 대상으로 열저항을 측정하여 석영 함량에 따른 열저항 예측식을 제안하였다. 따라서, 본 논문에서는 기본 물리적 특성 뿐만 아니라 순환골재를 구성하고 있는 광물 성상을 평가하기 위해 XRD 분석을 수행하였다. 표 1은 순환골재와 일반 강모래의 기본물성을 나타내며, 이를 바탕으로 각 시료의 입도분포곡선을 그림 5와 같이 도시하였다. 본 연구에서는 현재 뒤채움재로 일반적으로 사용하는 일반 강모래의 열적 특성과 함께 비교함으로써 뒤채움재로서 순환골재의 적합성을 평가하였다. 일반 강모래의 입도분포곡선도 그림 5에 함께 비교하여 나타냈다.

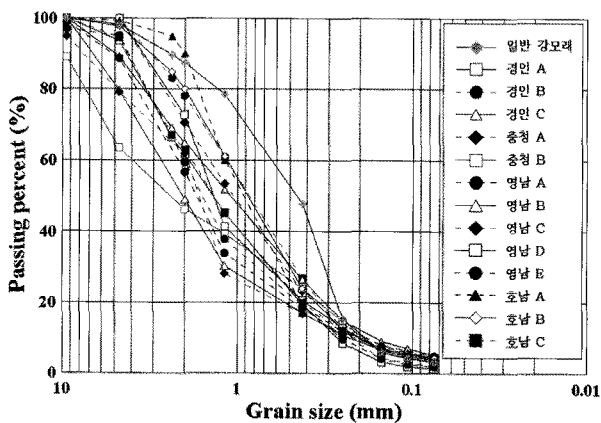
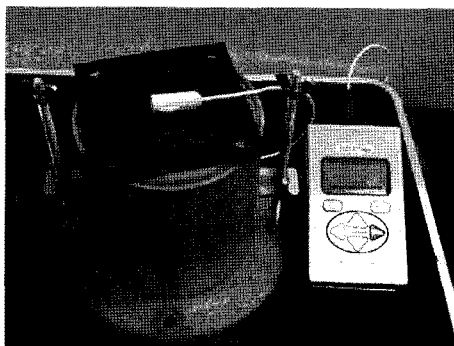


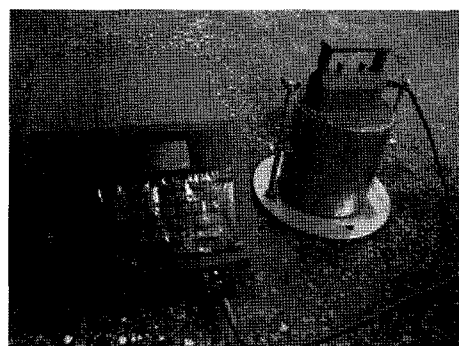
그림 5. 시료별 입도 분포 곡선

### 3.2 시료제작

현재까지는 순환골재의 다짐 기준이 확립되어 있지 않기 때문에 일반 토사에 적용하는 다짐도 기준으로 공압식 자동다짐기를 이용하여 표준다짐시험법으로 다짐



(a) KD2 Pro를 이용한 측정 모습



(b) QTM-500을 이용한 측정 모습

그림 6. 다짐 시료의 열저항 측정 모습

시험을 수행하였다. 또한, 표준다짐시험에 적용된 다짐 에너지의 95%, 90%, 85%의 다짐에너지를 적용하여 함수비를 변화시키면서 추가로 다짐시험을 실시하고 열저항 측정 시험을 수행하였다. 다짐시험에 사용된 몰드는 직경 15cm, 높이 17.5cm이며 2.5kg 램머를 이용하여

표준 B다짐법(3층 55회)을 적용하였다.

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

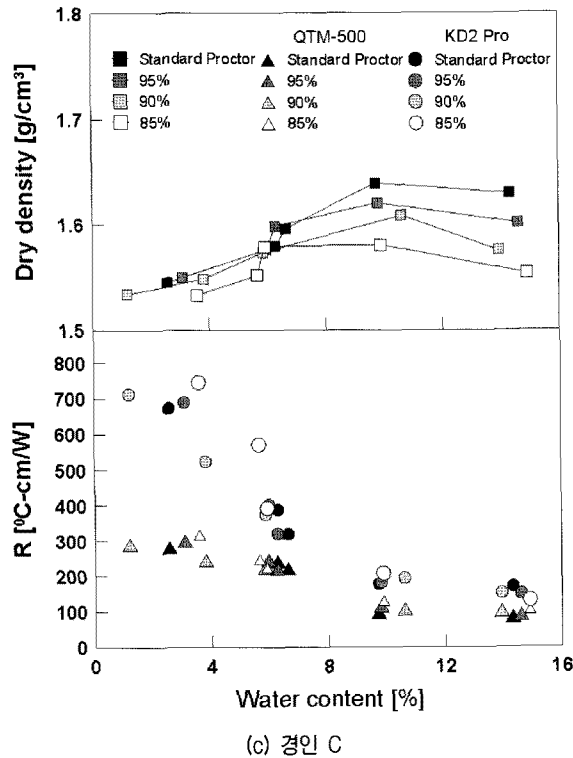
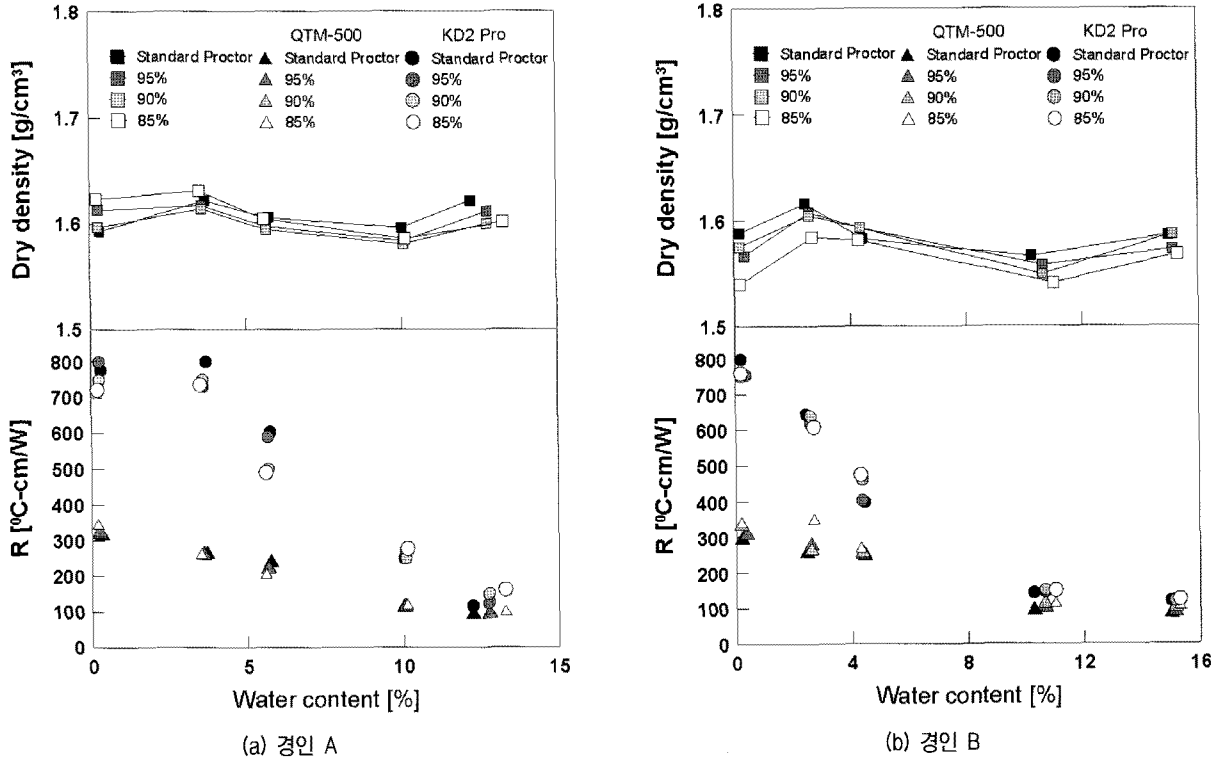


그림 7. 순환골재의 다짐 시험 및 열저항 측정 결과(경인지역)

## 4. 시험결과

### 4.1 지역별 다짐곡선 및 열저항 특성

표준다짐시험을 적용한 순환골재의 다짐 곡선과 열

저항 측정 결과는 각각 그림 7, 8, 9, 10과 같다. 또한, 순환골재와 비교를 위한 강모래의 다짐곡선 및 열저항 측정값을 그림 11에 나타냈다. 순환골재의 다짐곡선은 일반적인 토양의 다짐곡선과는 다른 형태를 보인다. 일

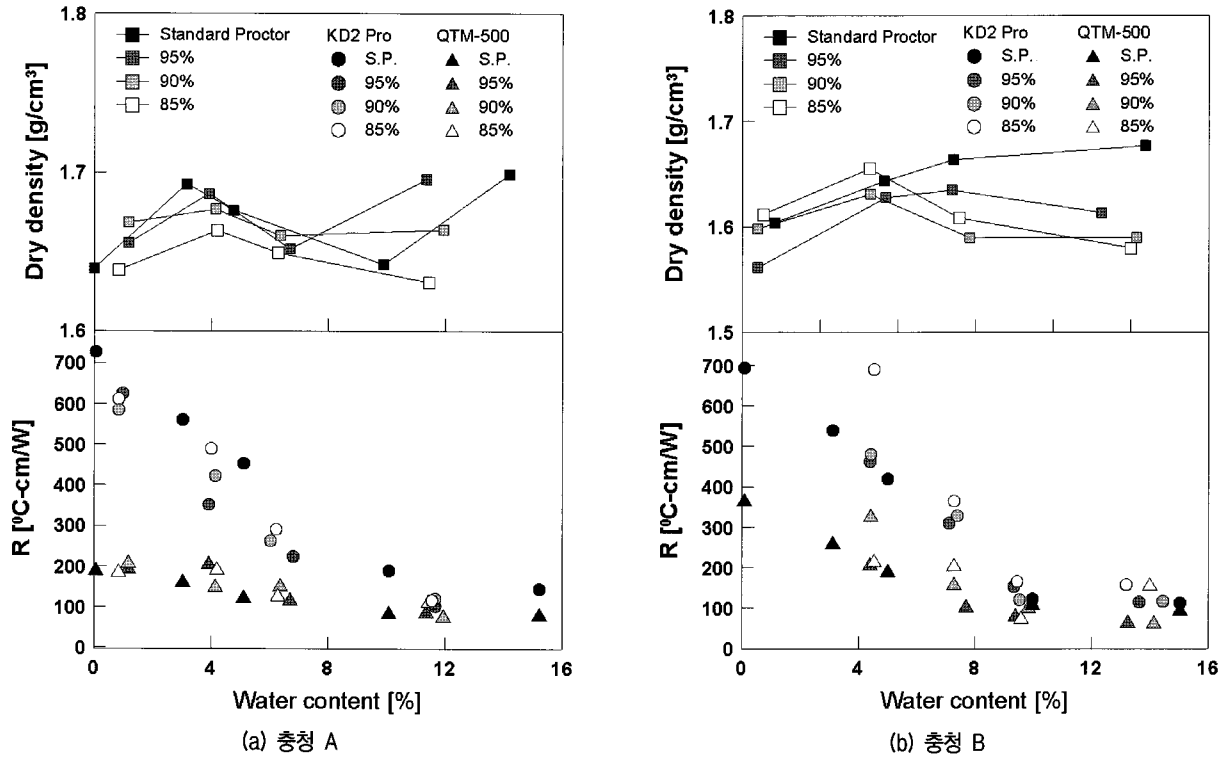


그림 8. 순환골재의 다짐 시험 및 열저항 측정 결과(충청지역)

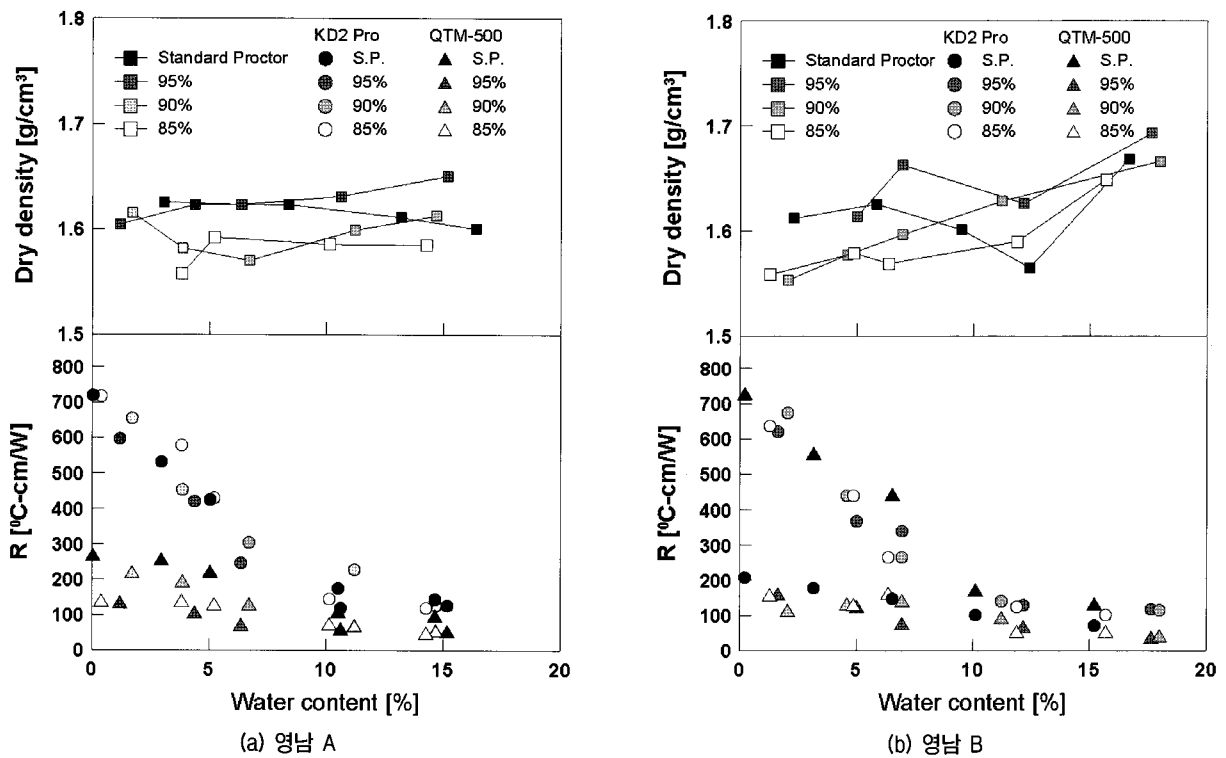
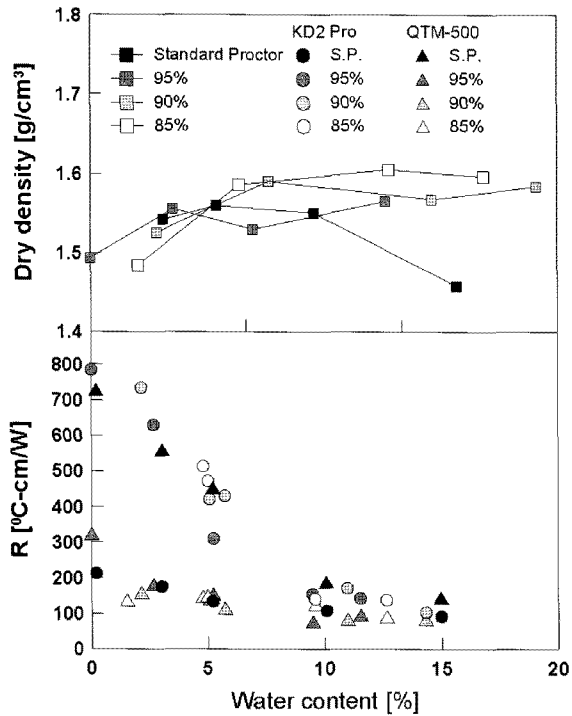


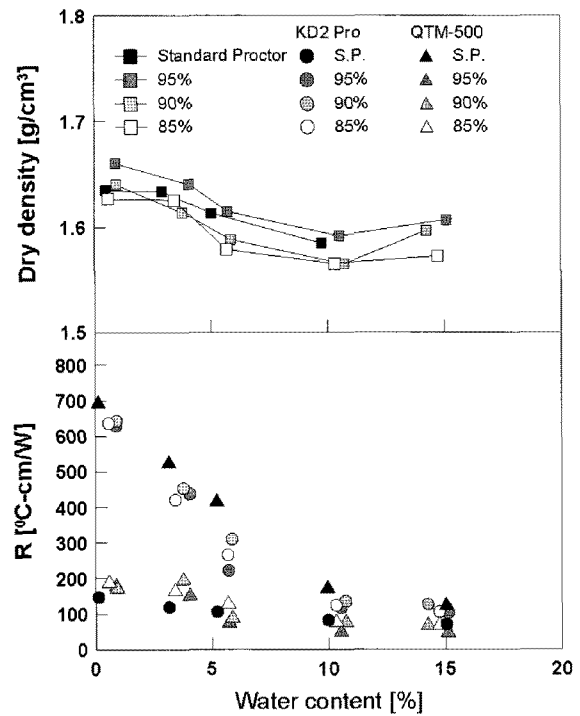
그림 9. 순환골재의 다짐 시험 및 열저항 측정 결과(영남지역)

반적인 토양은 액성한계의 범위가 30~70%이고 다짐곡선 형태가 포물선 형태를 보이므로 최적함수비와 최대 건조단위중량을 포물선의 꼭지점 값으로 산정할 수 있다. 이 함수비 범위를 벗어난 시료는 3차 또는 4차 곡선을 보이거나 최대건조중량을 명확히 파악할 수 없는 다

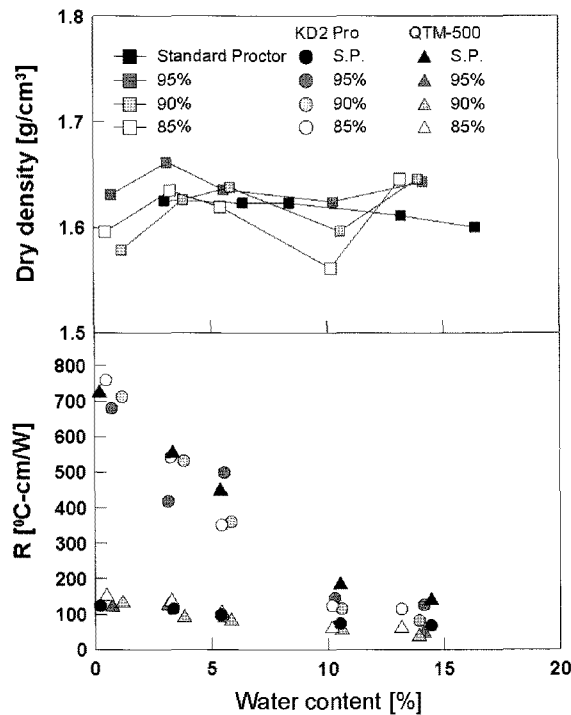
짐곡선을 보이기도 한다(Lee and Suedkamp, 1972). 콘크리트로부터 재생된 순환골재는 골재 표면에 잔류하는 시멘트 성분을 함유하여 강모래보다 물을 많이 흡수하는 성질이 있어 15% 이상의 함수비에서 강모래에 비해 상대적으로 잘 다져져 다양한 형태의 다짐곡선을 보



(c) 영남 C



(d) 영남 D



(e) 영남 E

그림 9. 순환골재의 다짐 시험 및 열저항 측정 결과(영남지역) (계속)

인다. 본 연구의 순환골재 경우, 경인 C 시료와 호남 B 시료를 제외하고 함수비가 증가할수록 건조단위중량이 증가하는 형태의 다짐곡선을 나타냈다. 또한, 각 지역별로 다짐에너지에 따른 다짐곡선의 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

열저항 측정 결과에서 순환골재는 일반 토양과 마찬가지로 함수비가 증가할수록 열저항이 감소하는 경향을 보였다. 최대골재크기가 5mm인 시료 중에서 영남 A 시료가, 최대골재크기가 10mm인 시료 중에서는 영남 E 시료가 가장 낮은 열저항값을 보였다.

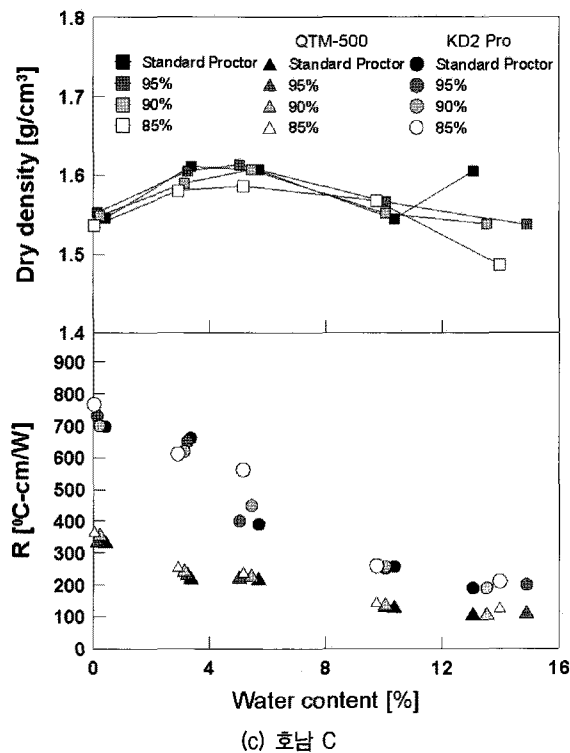
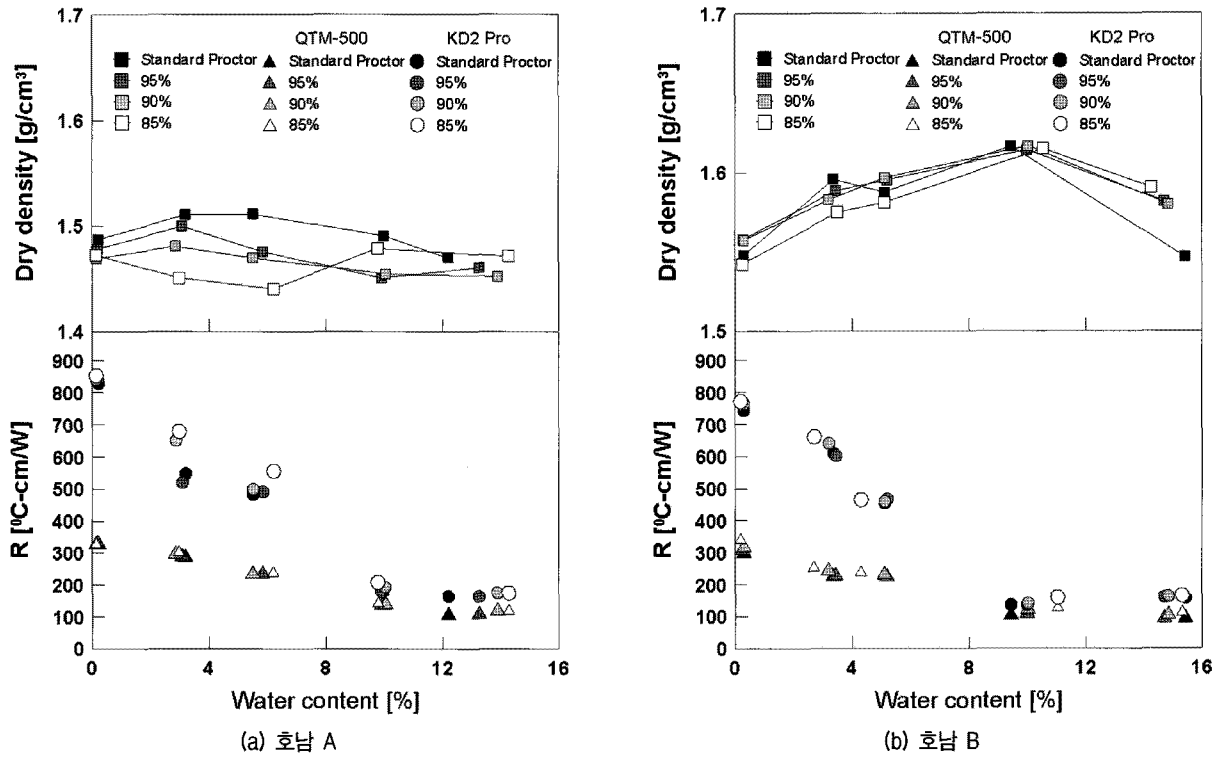


그림 10. 순환골재의 다짐 시험 및 열저항 측정 결과(호남지역)



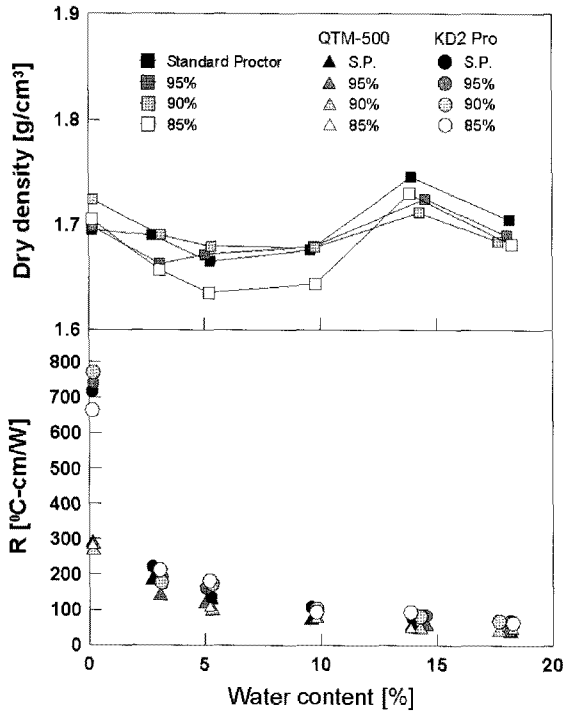


그림 11. 일반 강모래의 다짐 시험 및 열저항 측정 결과

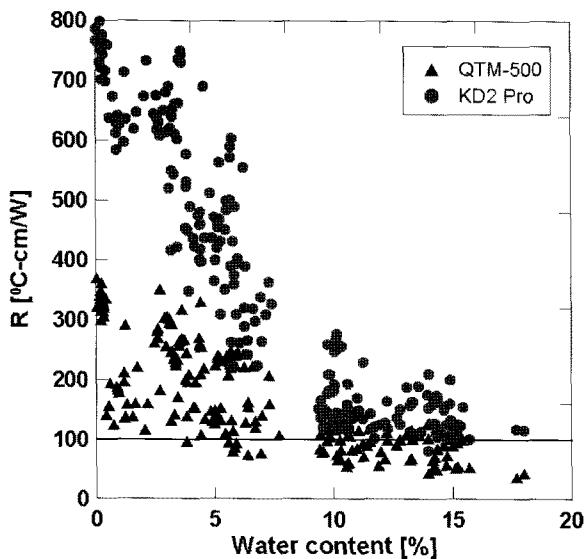
#### 4.2 측정 장비에 따른 열저항 비교

열저항 측정을 위해 사용된 비정상 탐침법인 KD2 Pro와 비정상 열선법인 QTM-500의 측정 결과를 비교하였다(그림 12). 두 측정방법 모두에서 다짐시료의 함수비가 증가할수록 열저항이 낮아짐을 알 수 있다. 하지만, 열저항 측정값 자체는 두 측정법에서 큰 차이를 보였다. 열저항이 100°C-cm/W가 될 때 함수비를 장비별로 도시

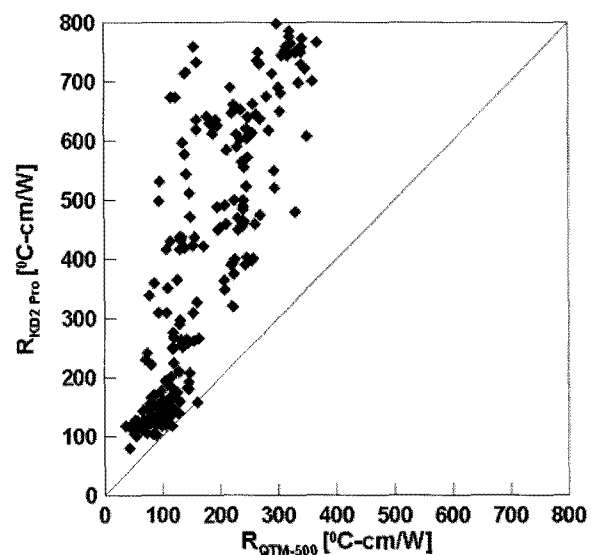
하면 KD2 Pro의 경우 15.3%이며, QTM-500은 10.6%이다. 동일한 함수비에서 비정상 열선법인 QTM-500을 이용한 측정 결과가 비정상 탐침법인 KD2 Pro를 이용한 측정 결과보다 상대적으로 열저항이 낮게 측정되었다. 열선법을 이용하여 측정할 경우, 제작된 다짐시료의 표면에 프로브는 안착하고 열저항을 측정하기 때문에 탐침법에서 발생할 수 있는 프로브의 관입으로 인한 시료의 교란이 없다. 따라서 교란된 시료 사이에 존재하는 틈으로 인해 열저항이 크게 나타날 수 있는 탐침법에 비해 낮은 열저항값을 얻을 수 있음을 유추할 수 있고, 관입에 의한 교란이 없는 QTM-500에 의한 측정 결과가 실제 순환골재의 열저항을 대표한다고 볼 수 있다. 그림 12(a)에서 함수비가 약 8.5% 이상에서는 두 방법으로 측정된 열저항값의 차이가 감소함을 확인할 수 있는데 이는 비교적 고함수비에서는 탐침법의 경우도 탐침과 시료사이의 마찰을 수분이 완화시켜 주어 관입 오차가 감소한 것으로 보인다. 이러한 경향은 그림 12(b)에서 열저항이 낮은 구간(고함수비 구간)에 대한 두 방법의 비교에서도 확인할 수 있다.

#### 4.3 일반 강모래와 순환골재의 열적 특성 비교

앞 절에서 언급했듯이 열선법의 측정치가 탐침법보다 실제 순환골재의 열저항값을 대표한다고 볼 수 있으므로 지역별 순환골재와 강모래의 열저항값 비교는 QTM-500에 의한 측정 결과만 이용하였다. 그림 13, 14, 15, 16은

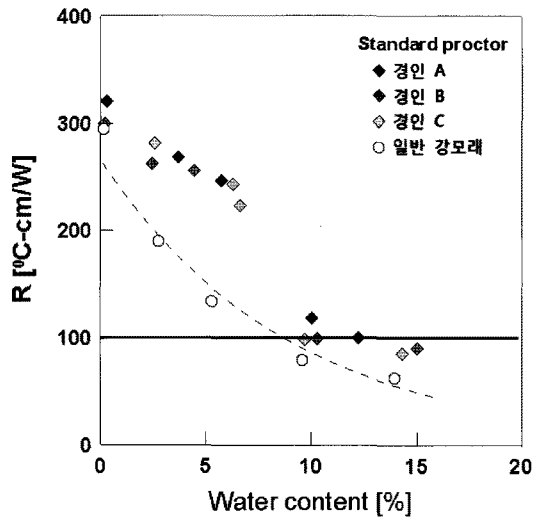


(a) 함수비에 따른 장비별 측정 결과

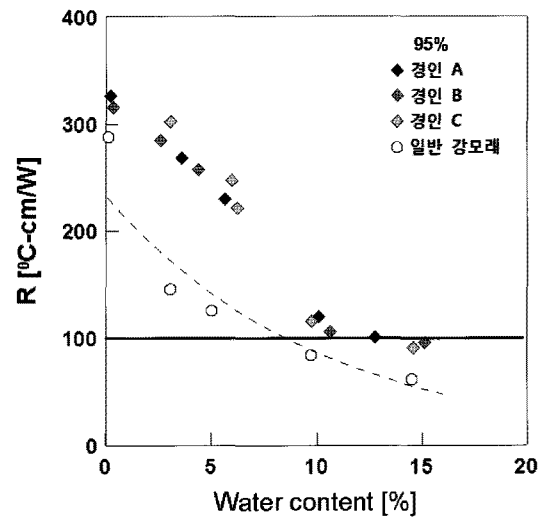


(b) 장비별 열저항 측정 결과 비교

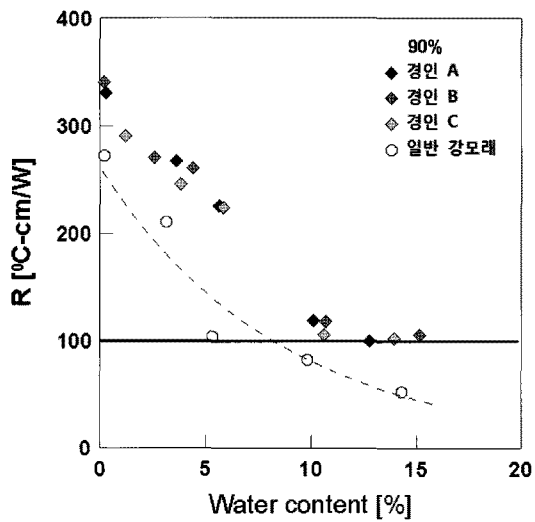
그림 12. 열저항 측정 장비에 따른 결과 비교



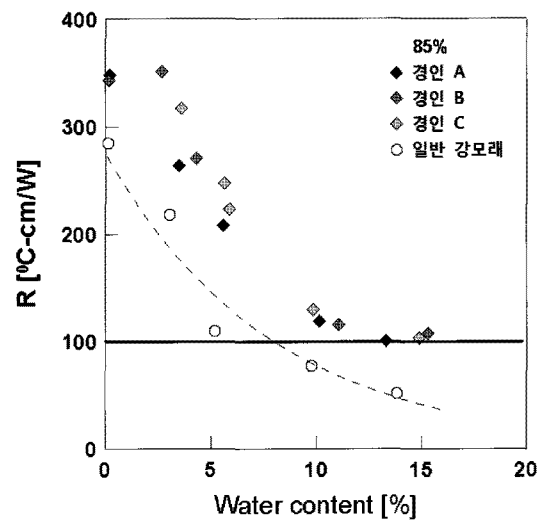
(a) 표준다짐에너지



(b) 표준다짐에너지의 95%

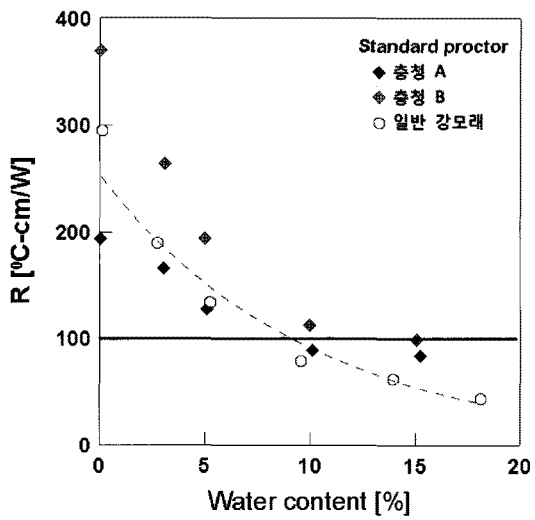


(c) 표준다짐에너지의 90%

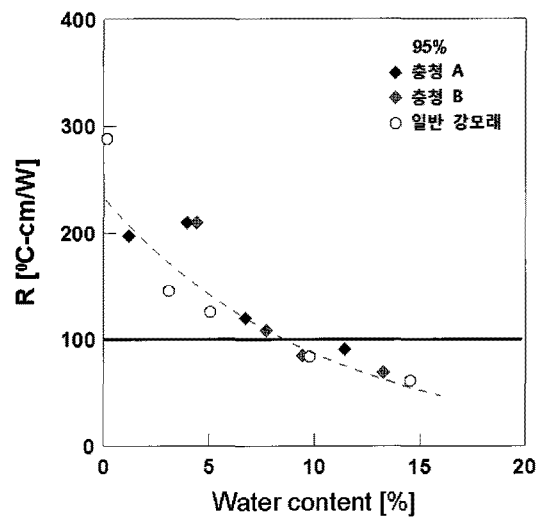


(d) 표준다짐에너지의 85%

그림 13. 다짐에너지에 따른 순환골재와 일반 강모래의 열저항 비교(경인지역)

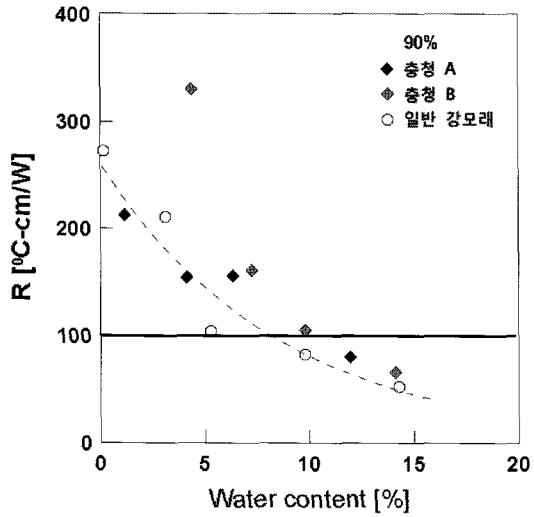


(a) 표준다짐에너지

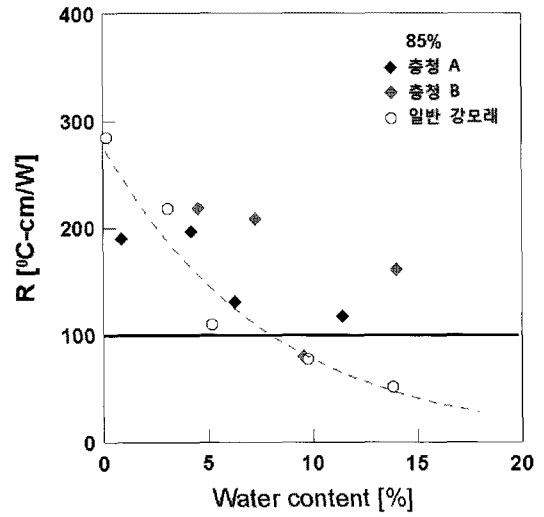


(b) 표준다짐에너지의 95%

그림 14. 다짐에너지에 따른 순환골재와 일반 강모래의 열저항 비교(충청지역)

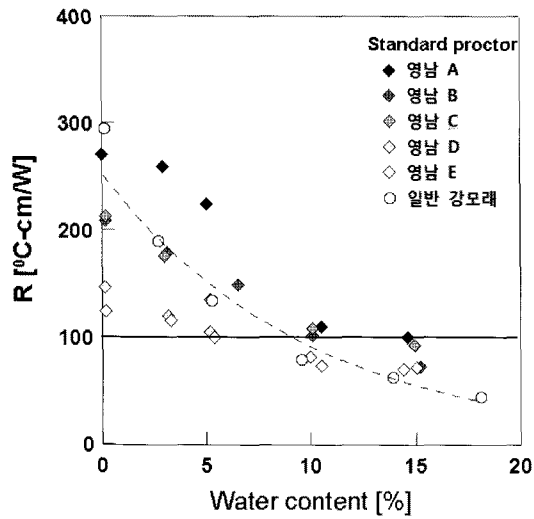


(c) 표준다짐에너지의 90%

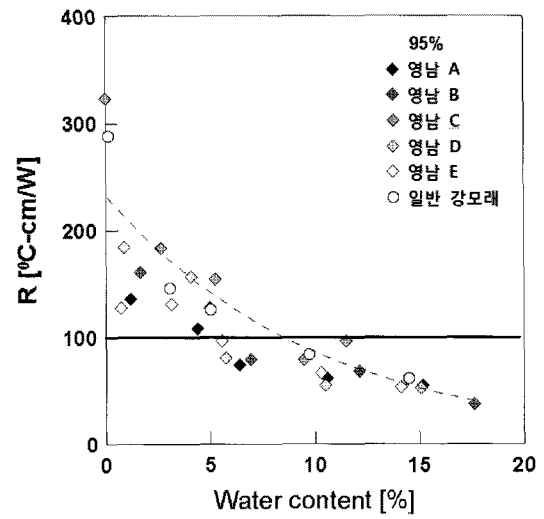


(d) 표준다짐에너지의 85%

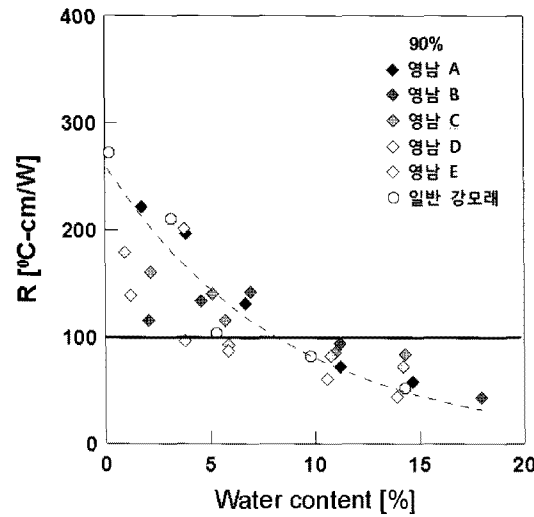
그림 14. 다짐에너지에 따른 순환골재와 일반 강모래의 열저항 비교(충청지역) (계속)



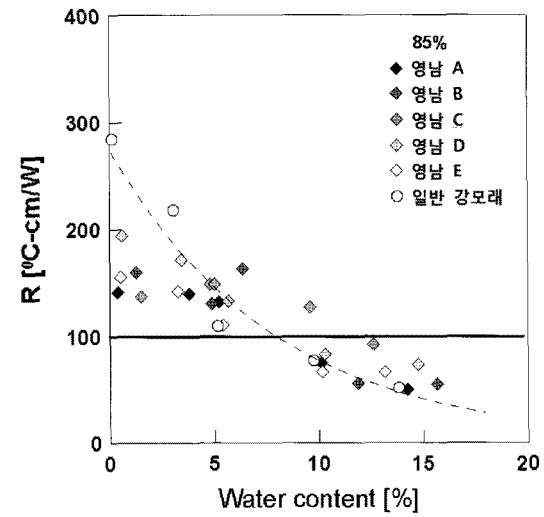
(a) 표준다짐에너지



(b) 표준다짐에너지의 95%

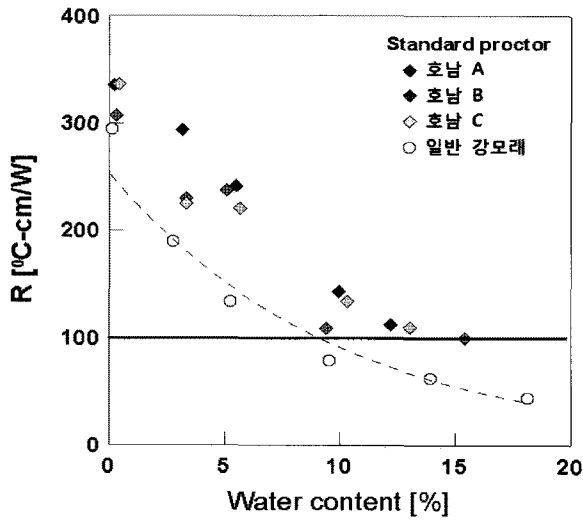


(c) 표준다짐에너지의 90%

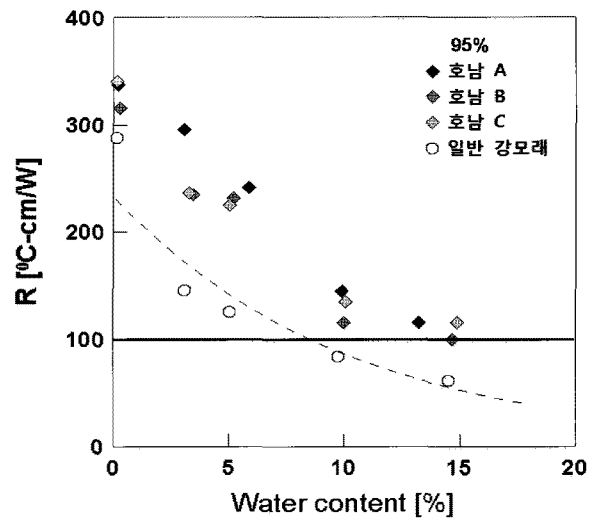


(d) 표준다짐에너지의 85%

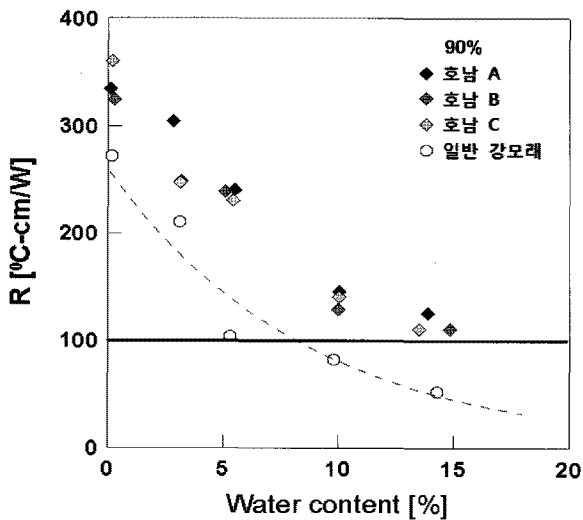
그림 15. 다짐에너지에 따른 순환골재와 일반 강모래의 열저항 비교(영남지역)



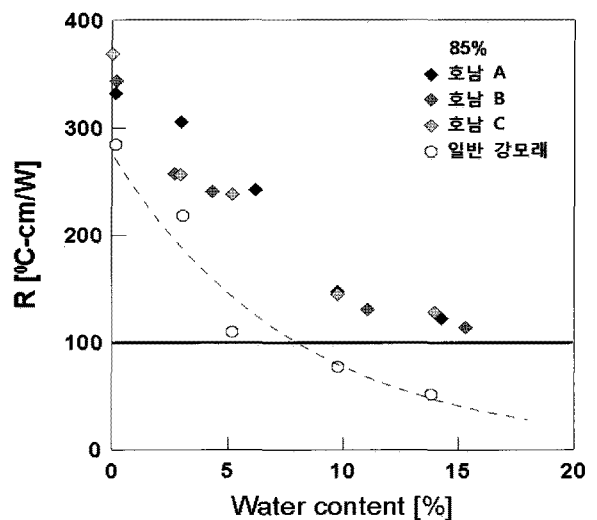
(a) 표준다짐에너지



(b) 표준다짐에너지의 95%



(c) 표준다짐에너지의 90%



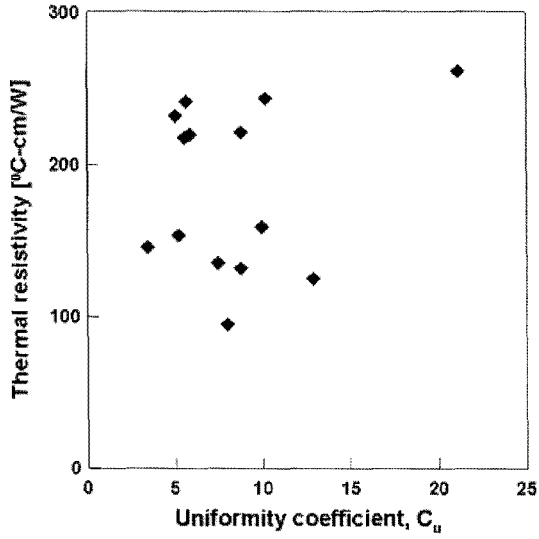
(d) 표준다짐에너지의 85%

그림 16. 다짐에너지에 따른 순환골재와 일반 강모래의 열저항 비교(호남지역)

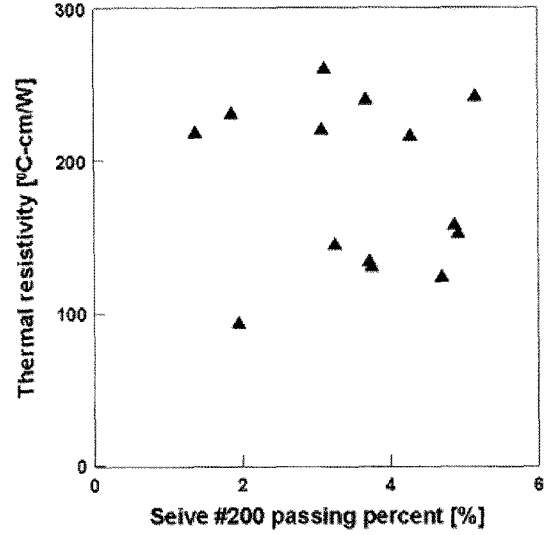
다짐에너지에 따른 각 지역별 순환골재와 강모래의 측정 결과를 함께 도시한 그래프이며 일반적인 최대 열저항 기준  $100^{\circ}\text{C-cm/W}$  일 때의 함수비는 표 2와 같다. 영남권 순환골재를 제외한 순환골재의 열저항은 강모래의 열저항보다 일반적으로 높게 측정되었다. 하지만, 순환골재가 강모래보다 고풍수비에서도 다짐이 잘 이루어지고 고풍수비에서 순환골재의 열저항이 모두  $100^{\circ}\text{C-cm/W}$  이하로 감소하는 사실은 순환골재의 적용성 측면에서 매우 중요하다. 즉, 현장에서 순환골재의 함수비가 충분히 크게 유지됨이 확인된다면, 순환골재를 강모래 대체 되 매움재로 충분히 활용할 수 있다고 사료된다. 이를 위해 순환골재의 수분이동 및 열특성에 대한 현장시험이 필요하다.

표 2. 열저항  $100^{\circ}\text{C-cm/W}$ 에서 순환골재와 일반 강모래의 함수비

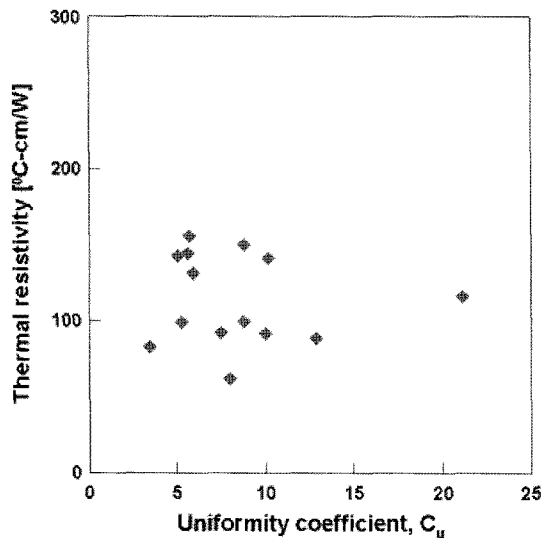
| 상대다짐도<br>시료 | 표준다짐  | 95%   | 90%   | 85%   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 일반 강모래      | 8.6%  | 8.5%  | 8.2%  | 7.5%  |
| 경인 A        | 12.4% | 12.7% | 12.6% | 12.8% |
| 경인 B        | 12.7% | 13.5% | 14.7% | 14.9% |
| 경인 C        | 12.2% | 13.0% | 13.2% | 14.2% |
| 충청 A        | 10.5% | 10.1% | 9.8%  | 14.1% |
| 충청 B        | 13.3% | 9.2%  | 10.9% | 18.3% |
| 영남 A        | 13.8% | 4.5%  | 9.2%  | 6.7%  |
| 영남 B        | 10.9% | 6.7%  | 8.2%  | 8.1%  |
| 영남 C        | 12.4% | 9.3%  | 9.8%  | 13.4% |
| 영남 D        | 7.0%  | 6.4%  | 8.9%  | 9.6%  |
| 영남 E        | 5.3%  | 5.2%  | 4.3%  | 6.7%  |
| 호남 A        | 13.9% | 14.9% | 16.2% | 16.4% |
| 호남 B        | 13.9% | 13.7% | 15.2% | 16.0% |
| 호남 C        | 14.0% | 15.7% | 14.4% | 16.1% |



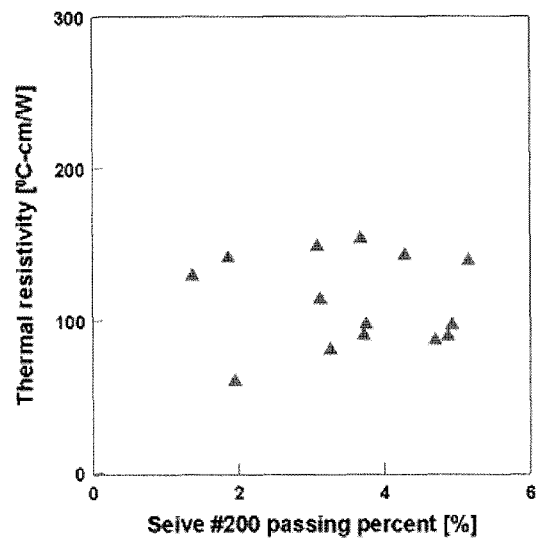
(a) 함수비 5%



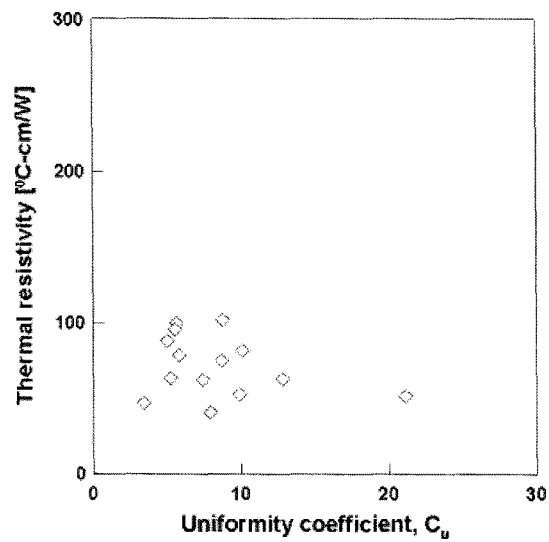
(a) 함수비 5%



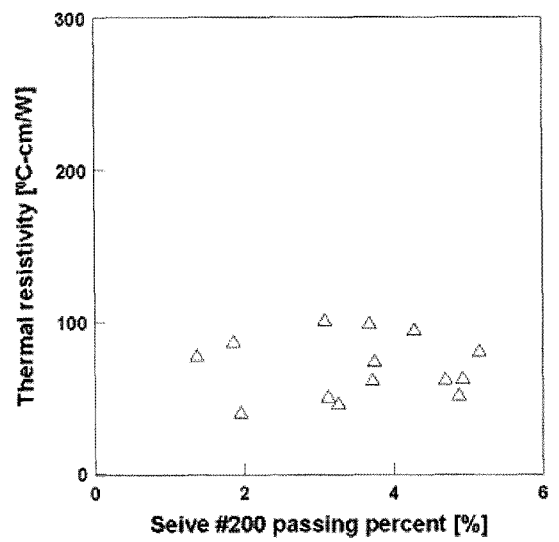
(b) 함수비 10%



(b) 함수비 10%



(c) 함수비 15%



(c) 함수비 15%

그림 17. 균등계수와 열저항 상관성 분석

그림 18. 200번체(0.075mm) 통과량과 열저항 상관성 분석

#### 4.4 순환골재 입도 특성과 열저항 상관관계

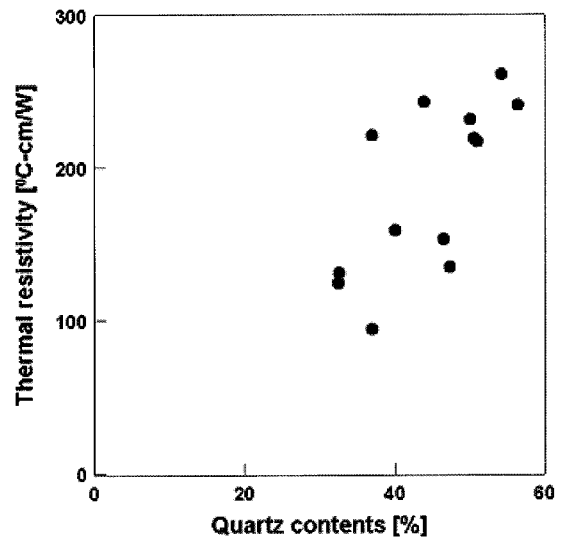
앞 절에서 순환골재의 입도분포 및 다짐시험 결과를 통해 물리적, 열적 특성을 평가하였고, 일반 강모래와 열저항 비교를 통해 송배전관로 되메움재로서 순환골재의 적용 가능성에 대해 살펴보았다. 본 절에서는 순환골재의 입도 특성과 열적 특성의 상관성에 대해 분석하였다.

그림 17, 18은 함수비가 각각 5%, 10%, 15%일 때의 전체 순환골재에 대해서 입도분석에서 얻어진 균등계수 및 200번체 통과량과 열저항 사이의 상관관계를 나타낸다. 일반적으로 균등계수가 클수록 입도분포가 좋아 우수한 다짐이 예상되고 이로 인해 낮은 열저항을 예상할 수 있다. 하지만 그림 17에서 보듯이 균등계수와 열저항 사이의 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다. 또한, 그림 18에서도 200번체 통과량과 열저항 사이의 상관관계가 명확히 나타나지 않았다. 본 연구에서 사용된 순환골재의 입도분포를 살펴보면 통일분류법에 의해 대부분 SP(Sand Poorly graded)로 분류되었으며 SW(Sand Well graded)로 구분된 순환골재의 균등계수와 곡률계수는 SP로 분류된 시료의 값과 차이가 작았다. 결국 전체 지역의 순환골재는 입도 특성에 따른 차이가 거의 나타나지 않았다. 따라서, 순환골재 입도분포 특성만을 이용하여 열저항값의 경향을 나타내는 것이 어렵기 때문에 순환골재를 구성하는 광물의 종류나 함량 등의 복합적인 요소로 열저항 관계를 도출하는 것이 적합하다고 사료된다.

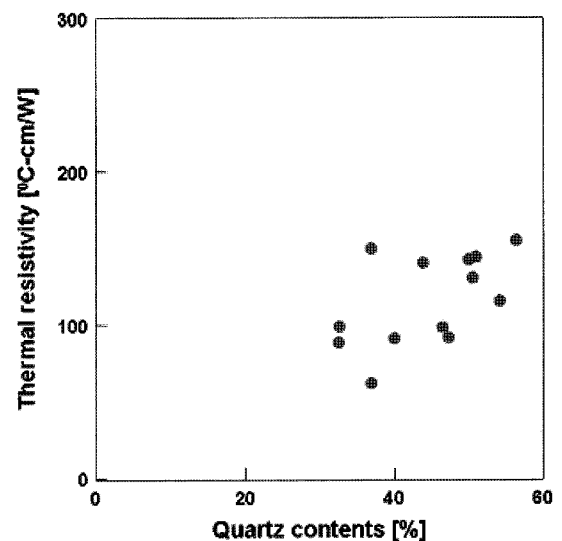
#### 4.5 광물 함량과 열저항 상관관계

순환골재의 광물구성을 XRD 분석을 통해 평가하였으며 각 구성 광물의 함량은 표 1에 나타냈다. 본 연구에서 사용된 순환골재는 석영의 함량이 약 30~50%이고, 석영의 열저항은 약 13°C-cm/W 정도로 다른 구성 광물 중 상대적으로 낮은 열저항값을 보인다. 따라서 석영함량이 순환골재의 열저항과 관련이 있을 것으로 예상되어 순환골재의 석영 함량과 열저항값의 상관관계를 분석하였다. 전체 순환골재를 대상으로 석영 함량과 열저항의 상관관계를 그림 19와 같이 특정 함수비(5%, 10%, 15%)에 따라 도시하였다.

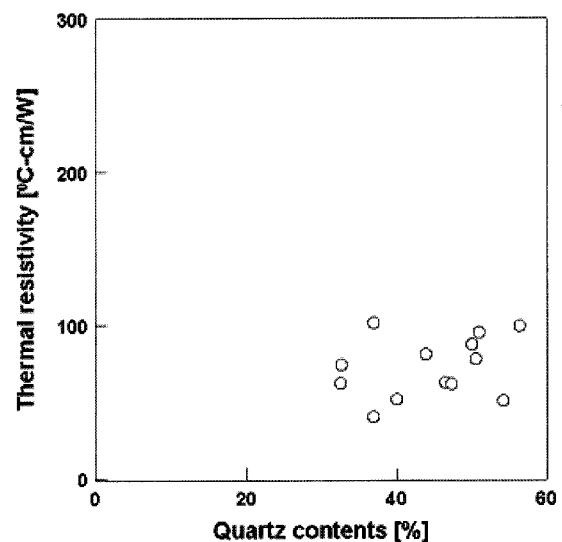
본 논문의 분석 결과, 석영함량과 열저항 사이의 뚜렷한 경향을 나타내진 않았다. 이는 각 순환골재를 구성하는 광물의 종류 및 함량이 유사하여 열저항 변화에 따른



(a) 함수비 5%



(b) 함수비 10%



(c) 함수비 15%

그림 19. 석영함량과 열저항 상관성 분석

차이를 보이지 않은 것으로 사료된다. 또한, 순환골재의 입도특성과 다짐특성, 그리고 광물함량 등 물리적 특성들이 복합적으로 작용하므로 앞에서 언급한 각각의 독립된 영향요소와 열저항 특성과의 상관관계 도출이 어렵다고 판단된다.

#### 4.6 기존 열전도도 예측식과의 비교

Kersten 모델(Kersten, 1949)은 여러 종류의 토양을 대상으로 동결 상태와 미동결 상태에서 함수비를 달리하여 열전도도를 측정 후 열전도도와 포화도의 상관관계를 경험식으로 나타낸 것이다. 열전도도[W/m-K]는 열저항[K-m/W 또는 °C-cm/W]의 역수이므로, Kersten의 상관관계로부터 열저항과 포화도 관계를 도출할 수 있다. Kersten 모델에서 입자의 크기가 0.05mm 이하인 입자의 함유량이 50% 이상일 경우 실트-점토질토(silt-clay soils)로 구분하고, 50% 미만인 경우에는 사질토(sandy soil)로 구분하였다. 본 연구에서 사용한 순환골재는 사질토 특성과 유사하므로 사질토에 대한 기존 상관식(식 (1))과 비교하였다(그림 20(a)).

$$\lambda = 0.1442 [0.71 \log(w) + 0.4] \times 10^{0.6243\rho_d} \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 토양이 열전도도(W/m·°C)이며,  $\rho_d$ 는 건조단위중량이다.

Johansen(1975)은 무차원 열전도도( $K_e$ )와 정량화된 함

수비 또는 포화도( $S_r = \theta/\theta_s$ , 여기서  $\theta_s$ 는 포화시 체적 함수비)의 관계로 흙의 종류와 상태에 따라 제시하였으며, 토양 내 석영의 함량을 토대로 토양의 열전도도와 포화도의 상관관계를 결정하는 예측식을 식 (2)와 같이 제안하였다.

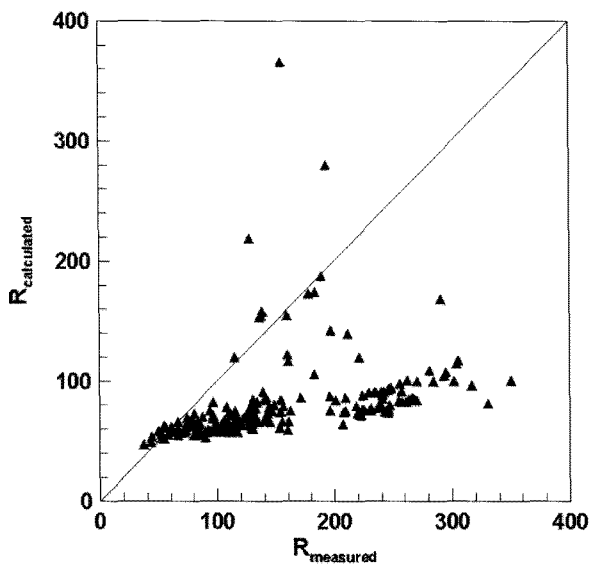
$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry})K_e + \lambda_{dry} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda_{dry}$ 와  $\lambda_{sat}$ 는 각각 건조상태와 포화상태의 열전도도(W/m·°C)이다.

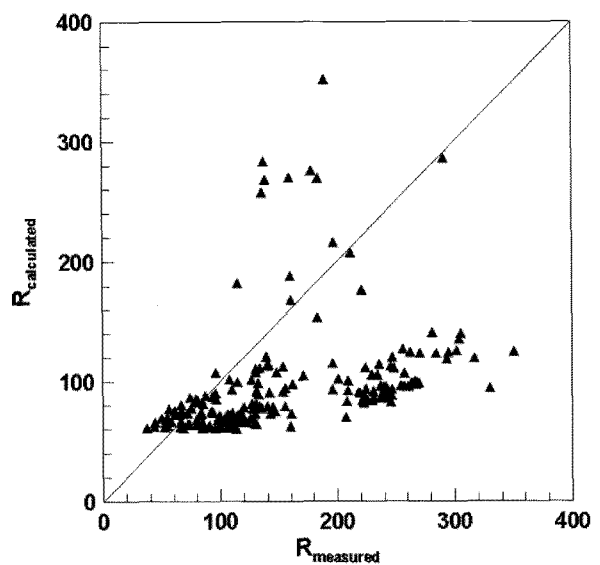
순환골재에 함유된 석영의 함량에 따른 열전도도와 의 연관성을 분석하고자 XRD 정량분석을 통해 측정된 (표 1 참조) 각 순환골재의 석영 함량을 Johansen 모델에 적용하여 그림 20(b)에 나타냈다. 그림 20에서 볼 수 있듯이 순환골재의 열저항 측정값은 기존 상관식과 많은 차이를 보였다. 따라서 순환골재에 적합한 열저항 예측식의 개발이 요구된다.

#### 4.7 순환골재의 열저항 예측식 제안

실내시험 결과를 바탕으로 각 지역의 순환골재의 다짐 및 열저항 측정 결과가 지역적 특성을 뚜렷하게 보여 주지 않았다. 또한, 폐콘크리트 순환골재의 물리적 특성이 대부분 유사하여 이에 따른 열적 특성의 도출이 어려웠다. 결국, 순환골재의 열저항값에 영향을 미치는 주요 인자는 함수비와 건조단위중량이므로 기존 열전도도 예



(a) Kersten 모델의 적용



(b) Johansen 모델의 적용

그림 20. 기존 열전도도 모델의 예측값과 측정값의 비교

측 모델인 Kersten 모델을 기반으로 순환골재의 열저항 예측식을 제안하였다. Kersten 모델에서는 저함수비에서 예측식이 잘 맞지 않고 일정 함수비 이상에서 측정값이 과소평가되므로 이를 고려하여 식 (3)과 같은 순환골재의 열저항 예측식을 제안하고자 한다. 또한, 전체 순환골재의 건조단위중량을 일정한 범위로 나누고 제안된 예측식(식 (3))에 평균 건조단위중량을 적용하여 순환골재의 열저항과 함수비 관계를 그림 21에 나타냈다.

$$R = \frac{100}{(0.05 \log_{10}(w) + 0.055) \times 10^{\gamma_d/100}} \quad (3)$$

여기서,  $R$  : 순환골재의 열저항( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ )  
 $w$  : 순환골재의 함수비(%)

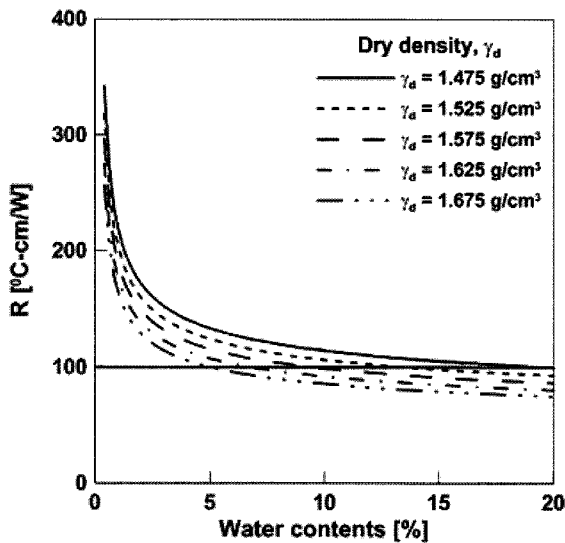


그림 21. 제안된 순환골재의 열저항과 함수비 관계

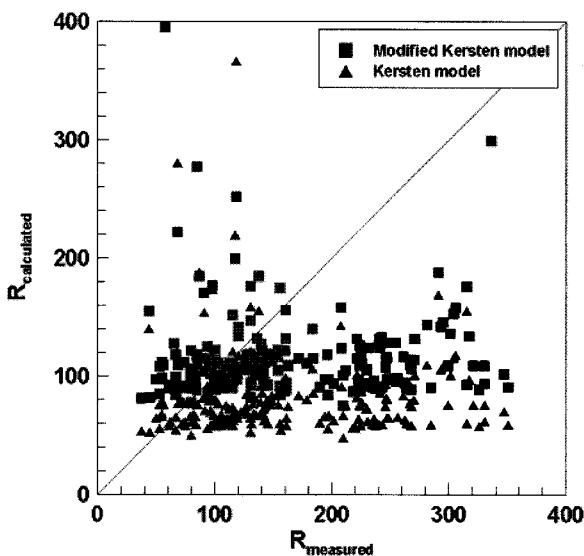


그림 22. 기존 Kersten 공식과 제안된 순환골재의 열저항 예측식 비교

$\gamma_d$  : 순환골재의 건조단위중량( $lb/ft^3$ )

기존 Kersten 모델을 이용하여 예측값과 측정값을 비교한 결과와 식 (3)에서 제시한 순환골재용 열저항 예측식을 이용한 예측값과 측정값의 비교한 결과를 그림 22에 함께 도시하였다. 비록 두 방법 모두 높은 열저항 구간(저함수비 구간)에서 측정과 예측값의 차이가 크지만, 기존 Kersten 모델을 이용한 결과보다 본 연구에서 제안한 예측식이 비교적 향상된 순환골재의 열저항 예측을 기대할 수 있다(특히 고함수비 구간). 송배전관로의 순환골재 되메움재 시공 시, 본 연구에서 제안하는 예측식을 적용하여 현장에서 필요한 열저항 수준에 따라 요구되는 함수비와 건조단위중량을 조정한다면 순환골재 되메움재의 열적 특성에 대한 현장 품질관리가 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 송배전관로 되메움재로서 순환골재의 적용성을 평가하기 위해 국내 각 지역에서 수급된 13종류의 순환골재를 대상으로 실내다짐시험 및 열저항 측정을 수행하였다. 순환골재의 열저항 측정 결과와 함께 강모래의 열저항 측정 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 순환골재와 일반 강모래의 다짐곡선은 일반 토양과 다른 다양한 형태의 다짐곡선으로 나타났다. 폐콘크리트에서 재생된 순환골재는 일반 강모래에 비해 물을 상대적으로 많이 흡수하는 경향을 보여 고함수비에서 모래에 비해 상대적으로 다짐이 잘 된다.
- (2) 비정상 열선법인 QTM-500을 적용하여 열저항 측정시, 비정상 탐침법인 KD2 Pro로 열저항 측정시 야기되는 탐침 관입에 의한 시료교란이 발생하지 않아 동일한 함수비에서 열저항값이 상대적으로 작게 측정된다. 또한, 함수비가 증가할수록 두 측정 장비에 따른 열저항의 차이가 감소하였는데 이는 탐침법을 고함수비에서 사용할 경우 탐침과 시료사이의 마찰을 물이 완화시켜 주어 관입 오차가 감소하였기 때문이다.
- (3) 송배전관로의 원활한 열 방출을 위한 적정 열저항 기준인  $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$  이하를 만족하는 함수비가 순환골재에서 강모래보다 높게 나타났다. 이는 전반



적으로 동일한 함수비에서 순환골재의 열저항값이 강모래 보다 크다는 것을 의미한다. 그러나 송배전 관로 되메움 시공시, 순환골재가 고함수비에서 다짐이 잘되는 성질을 반영하여 순환골재 되메움재의 함수비를 높게 유지하여 열저항이 100°C-cm/W 이하가 된다면 송배전관로 되메움재로서 순환골재의 활용을 기대할 수 있다.

- (4) 순환골재의 입도정수 및 광물 함량과 열저항 관계의 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 이는 각 순환골재 사이의 입도정수 차이 및 광물 함량의 차이가 작아 순환골재의 열저항 변화에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 또한, 순환골재의 열적 특성은 입도와 다짐특성, 그리고 광물함량 등 물리적 특성들이 복합적으로 작용하므로 각 각의 독립된 영향요소와 열저항 특성과의 상관관계 도출이 어렵다고 판단된다.
- (5) 기존 열전도도 예측 모델인 Kersten 모델과 Johansen 모델을 이용하여 순환골재의 열저항을 예측한 결과 실제 측정값과 상이한 결과를 나타내어 기존 상관식에 순환골재의 적용은 적합하지 않다. 따라서 실제 순환골재에 적용할 수 있는 열저항 예측식을 Kersten 모델을 기반으로 제시하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

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. 위지혜, 홍성연, 이대수, 한은선, 최항석 (2010), 실내시험을 통한 송배전관로 되메움재용 순환골재의 열적 특성 평가, *한국지반공학회 가을 학술발표회*.
4. 이용수, 권용완, 현재혁 (2005), 도로건설재료로 순환골재의 공학적·환경적 특성에 관한 기초연구, *한국지반환경공학회 논문집 제 6권 제3호*, pp.17-23.
5. 진명훈, 이세현, 이성복, 이도현 (2004), 국내 생산 재생골재의 품질 수준 평가, *대한건축학회 학술발표논문집 제24권 제1호* pp.203-206.
6. 전쌍순, 이효민, 황진연, 진치섭, 박현재 (2003), 폐 콘크리트에서 분리된 재생골재와 재생콘크리트의 공학적 특성규명을 위한 실험적 연구, *대한지질공학회 제13권 제3호*, pp.345-357.
7. Johansen, O. (1975), *Thermal Conductivity of Soils*, Ph.D. thesis, University of Trondheim, Trondheim, Norway. (CRREL Draft English Translation 637, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, US).
8. Kersten, M. S. (1949), *Laboratory research for the determination of the thermal properties of soil*, Research Laboratory Investigations, Engineering Experiment Station, Technical Report 23, University of Minnesota, Minneapolis, US.
9. Lee, P. Y., Suedkamp, R. J. (1972), "Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils", *Highway Research Record*, Issue 381, pp.1-9.

(접수일자 2011. 5. 20, 심사완료일 2011. 7. 8)