

콘크리트 재생 순환골재의 파쇄 효과에 따른 다짐 및 열저항 특성 연구

Effect of Particle Breakage on Compaction and Thermal Resistivity of Concrete-based Recycled Aggregates

강 성 철¹ Kang, Sungchul

김 경 훈² Kim, Gyeonghun

위 지 혜³ Wi, Jihae

안 태 봉⁴ Ahn, Taebong

이 대 수⁵ Lee, Dae-Soo

최 향 석⁶ Choi, Hangseok

Abstract

The strict regulations on eco-friendly construction and the significant reduction of natural aggregate resources have raised public concerns on the utilization of recycled aggregates for backfilling a power transmission pipeline trench. In this paper, the particle breakage of concrete-based recycled aggregates and river sand has been experimentally studied during the standard compaction test. The applied compaction energy does not significantly break the river sand particles down, and thus causes no change in the compaction curve, thermal resistivity, and particle gradation characteristics. On the other hand, considerable particle breakage was observed in case of the three recycled aggregates. Such particle breakage leads to enhancing compaction effort, reducing thermal resistivity, and changing particle gradation curve with finer particles that are broken during the first compaction. In addition, particle breakage is more dramatic in lower water contents because pore water may damp down the compaction energy.

요 지

최근 친환경 건설에 대한 엄격한 규제와 가용한 천연골재 자원의 고갈에 따른 대안으로 전력구 되메움재로서 순환골재에 대한 관심이 급증하고 있다. 본 논문에서는 일반적인 되메움재인 강모래와 콘크리트 재생 순환골재를 대상으로 다짐에너지가 가해질 때, 발생하는 골재의 입자파쇄를 실내다짐시험을 통해 규명하였다. 적용된 다짐에너지 수준에서 일반 강모래는 입자파쇄가 미미하여 다짐 전후 골재의 다짐특성과 열저항의 변화가 매우 적었다. 반면에 일반 강모래에 비하여 순환골재는 재생과정에서 이미 입자에 큰 응력이 가해진 상태이므로 추가 다짐에너지에 의한 입자파쇄가 발생했다. 다짐에 의한 순환골재 입자파쇄는 세립분 양을 증가시켜 전반적으로 되메움재의 열저항을 감소시키고 입도곡선의 모양을 변화시켰다. 특히, 순환골재의 입자파쇄는 다짐에너지의 댐핑이 상대적으로 적은 저함수비 구간에서 더 뚜렷하게 발생하였다.

Keywords : Recycled aggregate, Compaction, Thermal resistivity, Particle breakage

1 정회원, 유진지오(주) 대표이사 (Member, President, Yujingeo Co., Ltd.)

2 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

3 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사졸업 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

4 정회원, 우송대학교 철도건설시스템학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Railroad Civil System Engineering Woosong Univ.)

5 정회원, 한국전력공사 전력연구원 처장 (Member, Dept. Chief, Korea Electric Power Research Institute)

6 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3326, Fax: +82-2-928-7656, hchoi2@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 환경문제와 더불어 건설현장에서 가용한 천연 골재 자원의 고갈에 따른 대안으로 순환골재의 사용에 대한 관심이 급증하고 있다. 순환골재는 건설폐기물을 물리적 또는 화학적 처리과정 등을 통해 적정 품질기준에 적합하도록 재생된 골재를 의미한다. 현재 순환골재는 주로 도로의 노반재 및 보조기층재, 재생골재화 등과 같은 다양한 활용 방안에 대한 연구가 이루어졌다(Lee et al., 2005, Jun et al., 2004). 건설폐기물은 효과적인 생산공정과 효율적 활용기술의 개발여부에 따라 콘크리트용 순환골재 등과 같이 높은 부가가치를 창출할 수 있다. 매년 2천만톤 이상 발생하는 건설폐기물은 재개발, 재건축 사업의 증가로 인해 지속적으로 발생량이 급증하고 있으나 이를 처리하여 생산된 순환골재는 품질과 안전에 대한 불확실성 등을 이유로 생산된 골재중 70% 이상이 노반재, 매립재 등 극히 제한된 용도로서만 사용되고 있는 상황이다. 건설용 골재가 부족한 국내 현실에서 가치의 재창출이 가능한 건설폐기물의 적극적 활용에 대한 제도적 기반을 마련하기 위하여, 2001년 12월부터 국회(국회환경포럼)에서 건설폐기물 재활용 촉진을 위한 정책을 건설교통부, 환경부 등이 협의하여 관련 법률의 제정을 적극 추진하였으며, 그 결과 2003년 12월 “건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률”이 의원입법으로 제정되고 2005년부터 시행되어 건설폐기물에 대한 적극 재활용의 발판을 마련하였다.

최근 송배전관로 되메움재의 대체자원으로 순환골재가 관심을 받고 있으며 이에 따라 순환골재의 열적 특성에 관한 기초연구가 수행된 바 있다(Oh et al., 2008, Wi et al., 2010; 2011). 지중 전력 케이블은 관로 형태로 지중에 설치되므로, 이 송배전관로를 되메움한 되메움재를 통해 케이블에서 발생하는 열을 방출함으로써 열적 안정성을 유지하여 열폭주 및 케이블의 절손방지가 송배전관로의 주된 설계요소이다. 즉, 송배전관로 주위의 되메움재는 관로에서 발생하는 열을 쉽게 외부로 전달할 수 있는 되메움재를 사용하는 것이 중요하다. 일반적인 송배전관로 되메움재로는 강모래를 주로 사용하여 왔으나, 앞에서 언급한 환경보전 및 자원의 재활용에 대한 사회적 관심이 상승하면서 순환골재를 송배전관로의 되메움재로 활용하는 시도가 진행되고 있다. 송배전관로 되메움재로 사용하는 골재에 대한 기준은 일반적인 되메움재 골재 품질기준과 동일하고 다

만 열저항 기준은 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ 이하로 별도로 규정하고 있다.

송배전관로 시공시, 되메움재에 대한 적절한 다짐방법 및 최적 다짐도 유지가 송배전관로의 구조적, 열적 안정성 확보를 위해 중요하다. 특히, 일반 강모래에 비하여 순환골재는 재생과정에서 입자에 큰 응력이 가해진 상태이므로 다짐에 따른 순환골재의 입자파쇄 여부와 이에 따른 다짐특성 및 열저항 특성 변화에 대한 연구가 필요하다. 다짐에 의한 조립토의 입자파쇄 현상 및 파쇄 등급기준은 Lade et al.(1996)와 Son and Chang (2009)에서 제시되었다. 본 논문에서는 콘크리트 재생 순환골재를 대상으로 순환골재에 다짐에너지가 가해질 때, 발생하는 입자파쇄를 실내다짐시험을 통해 규명하고, 순환골재 입자파쇄가 다짐 및 열저항 특성에 미치는 영향을 일반 강모래와 비교 검토하였다.

2. 시험 방법

2.1 대상시료

본 논문에서 고려한 순환골재 시료는 경인지역(고양, Goyang)과 영남지역의 경산(Gyeongsan)과 칠곡(Chilgok)에서 생산한 순환골재 3종과 순환골재와 대조군으로 비교한 일반 강모래(River sand) 등 총 4종류 골재시료에 대한 다짐 및 열저항 측정시험을 수행하였다. 순환골재의 경우, 생산지역보다는 건설폐기물의 발생지역에 따라 특성이 달라지나, 현실적으로 각 지역의 건설폐기물을 발생지역별로 분류하기가 어렵기 때문에 본 논문에서는 순환골재 생산지역별로 분류하여 연구를 진행하였다. 콘크리트 재생 순환골재는 건식방식으로 페콘크

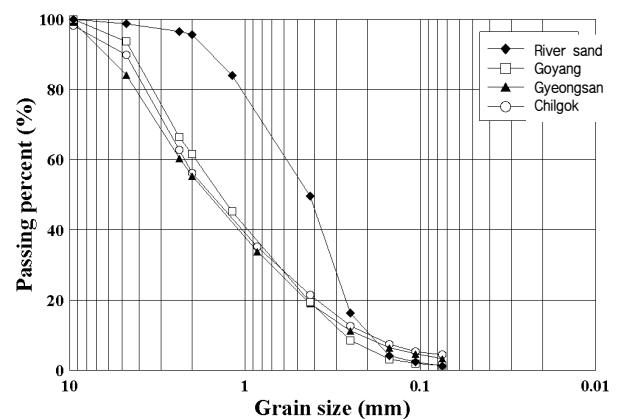


Fig. 1. Grain-size distribution curve of aggregates

Table 1. Parameters of grain-size distribution curve

Criteria	River sand	Goyang	Gyeongsan	Chilgok
Passing #4 sieve (%)	98.69	93.64	84.17	89.84
Passing #200 sieve (%)	1.24	1.38	3.34	4.47
D ₁₀ (mm)	0.20	0.27	0.22	0.20
D ₃₀ (mm)	0.32	0.73	0.74	0.69
D ₆₀ (mm)	0.55	1.92	2.33	2.20
C _u	2.79	7.03	10.42	11.10
C _c	0.95	1.03	1.05	1.08
USCS	SP	SW	SW	SW

Table 2. Mineral content of aggregate

Mineral	Goyang	Gyeongsan	Chilgok
Quartz (%)	50.6	32.5	40.0
Albite (%)	22.6	31.4	21.8
Orthoclase (%)	13.5	11.6	18.4
Muscovite (%)	3.2	11.2	7.5
Calcite (%)	2.8	6.8	8.5
Chlorite (%)	3.5	2.9	-
Biotite (%)	3.1	1.4	1.9
Magnetite (%)	0.7	2.2	1.9

리트를 1차와 2차에 거쳐 조크리셔로 파쇄를 하고, 3차 파쇄에는 콘크리셔를 적용하였다. 또한 이물질은 5단계의 선별작업을 통해 제거하였다. 순환골재 3종과 강모래의 입도분석 특성은 다음 Fig. 1과 같다. 또한, 각 시료의 입도특성은 Table 1에 정리하였다. 순환골재의 유효입경은 강모래와 유사하지만, 강모래에 비해서 상대적으로 입도가 좋은 것으로 평가되었다.

대부분의 순환골재를 구성하고 있는 광물로는 석영(quartz)이 가장 많았으며, 그 다음으로 조장석(albite)과 정장석(orthoclase) 등으로 구성되어있다(Table 2).

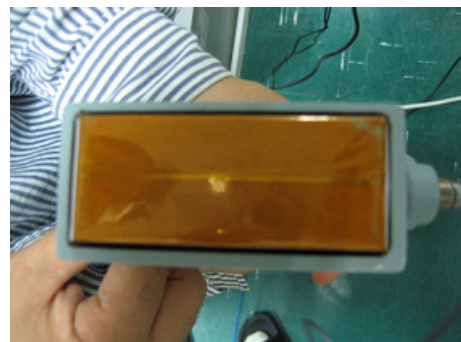
2.2 열저항 측정

골재의 열저항($^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ 또는 $\text{K}\cdot\text{cm}/\text{W}$)은 한 변의 길이가 1cm인 정육면체 내부에 1W의 열이 흐를 때 정육면체 전체에 1 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도상승을 일으키게 되는 골재의 열적 특성을 나타내는 것으로 골재가 열원에서 받은 열을 소산시키는 정도를 의미한다. 골재의 열저항에 영향을 미치는 인자로는 함수비(water content), 건조단위중량(dry unit weight), 입자의 형태 및 입상 자체의 열전도도 등이 있다. 함수비가 일정할 때 건조밀도가 증가할수록 열저항은 감소하며, 건조밀도가 일정할 때 함수비가 증가할수록 열저항은 감소한다. 송배전관로의 되메움재는 송배전시 관로에서 발생하는 열을 효과적으로 방출시켜 열폭주에 의한 케이블의 절연파괴를 방지하기 위하여 열저항이 충분히 낮아야하며 일반적으로 제안되는 열저항 기준은 100 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ 이하이다.

본 논문에서는 골재의 열저항을 QTM-500(제조사: Kyoto Electronics Manufacturing CO., Ltd.)을 이용하여 측정하였다(참조 Fig. 2). QTM-500은 비정상 열선법(Transient hot wire method)을 적용하며, 프로브의 크기는 95mm×40mm이며 시료와 직접 접촉하는 표면이 유리섬유로



(a) QTM-500 body



(b) PD-13 probe

Fig. 2. Measuring equipment for thermal resistivity (QTM-500)

구성되어 있는 PD-13 프로브를 이용하여 열저항을 측정한다. 비정상 열선법은 동일한 두 매질 사이에 열선이 존재하므로 프로브가 시료 표면에 밀실하게 부착되어야 한다. 프로브 PD-13의 경우 케이스 내부에서 1kg의 가압추가 프로브 표면과 시료 표면의 부착성을 높여준다. 탐침법을 사용할 경우, 다짐된 시료에 탐침을 관입 시, 관입 과정 중에 탐침 주변시료가 교란이 되거나 일부 굵은 골재로 인해 비정상적인 간극이 발생되어 탐침과 시료의 접촉이 불량하게 될 수 있다. 간극에 존재하는 공기의 열저항은 $4000^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ 으로 매우 높기 때문에 이 경우 실제 시료의 열저항을 과대평가 할 수 있다 (Wi et al., 2011). 열선법을 이용할 경우 이런 문제점이 발생하지 않기 때문에 탐침법에 비해 정확한 측정 결과를 기대할 수 있다.

2.3 실내다짐시험

공압식 자동다짐기(Fig. 3)로 표준B다짐(3층 55회) 규정을 적용하여 실내다짐시험을 실시하였다(KS F 2312, 2001). 표준다짐시험 시, 층별로 다짐에너지 전달이 다르므로 이에 대한 영향을 고려하기 위해 표준 B다짐물드를 Fig. 4와 같이 3층으로 나누어 각 층에서 다져진 시료의 입도 및 열적 특성을 각각 평가하였다. 즉, 다짐물드의 3층(최하층)에 위치한 시료가 1층(최상층)에 위치한 시료보다 큰 누적다짐에너지를 받는다. 또한, 순환골재는 페콘크리트를 파쇄하여 생산하기 때문에 일반 강모래와 같은 자연상태의 골재와 달리 다짐시 가해지는 다짐에너지가 순환골재에 추가 입자파쇄를 유발할 수 있다. 이는 다짐 후 순환골재의 입도분포가 변할수

있음을 시사한다.

3층으로 분리된 몰드에 다짐시험을 수행한 후 층별 함수비(w)와 건조단위중량(γ_d), 열저항(R)을 측정하여 비교하였으며, 순환골재의 입자파쇄 정도를 평가하기 위해 다짐몰드 각 층에 다져진 시료에 대해 입도분포시험을 수행하였다. 또한, 1차 다짐된 시료를 대상으로 반복 다짐시험(2차 다짐)을 수행한 후 반복다짐이 입자 파쇄와 이에 따른 다짐특성 및 열저항 특성에 미치는 영향을 추가로 검토하였다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 층별 다짐에너지에 따른 다짐곡선 및 열저항 특성

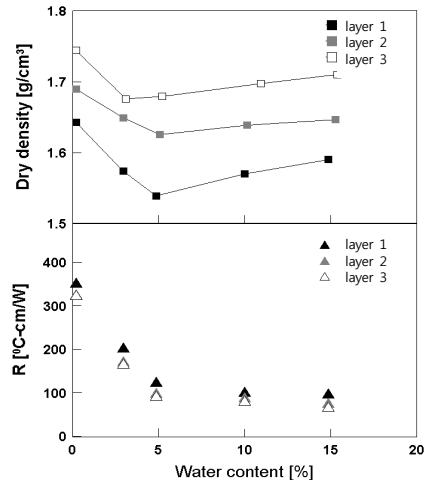
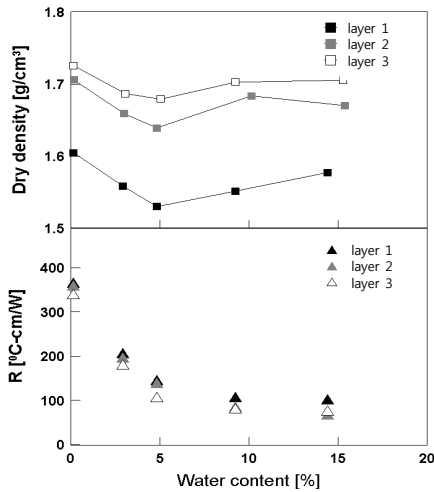
Figs. 5, 6, 7, 8은 일반 강모래(River sand), 순환골재 고양(Goyang), 순환골재 경산(Gyeongsan), 순환골재 칠곡(Chilgok)에 대해 수행한 첫 번째 다짐과 두 번째 다짐 후 측정된, 층별 다짐곡선(함수비-건조밀도)과 다짐 함수비에 따른 열저항(R) 측정값을 비교하여 보여준다. 예측한 대로, 모든 4종의 골재에서 누적된 다짐에너지가 가장 큰 다짐물드의 가장 아래층(3층)의 다짐도가 가장 높았으며, 높은 다짐도는 동일한 함수비에서 상대적으로 큰 건조단위중량과 낮은 열저항을 유발하였다. 특히, 순환골재의 경우, 저함수비 영역($< 5\%$)에서 다짐도에 따른 열저항의 차이가 강모래에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 그러나 다짐 정도 차이에 비하여 각 층별 다짐시료의 열저항의 차이는 상대적으로 작음을 알 수 있다. 첫 번째 다짐시험과 두 번째 다짐시험의 비교는 다음 절에서 비교분석하였다.



Fig. 3. Automatic compactor for standard B compaction test



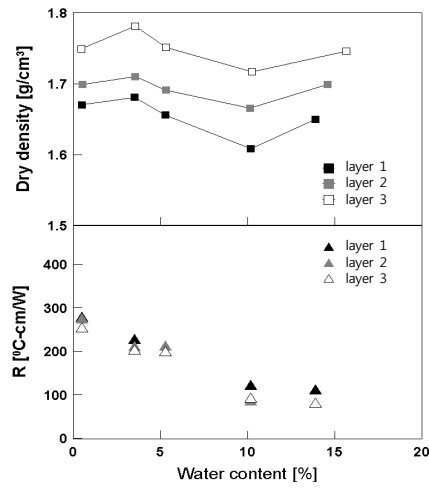
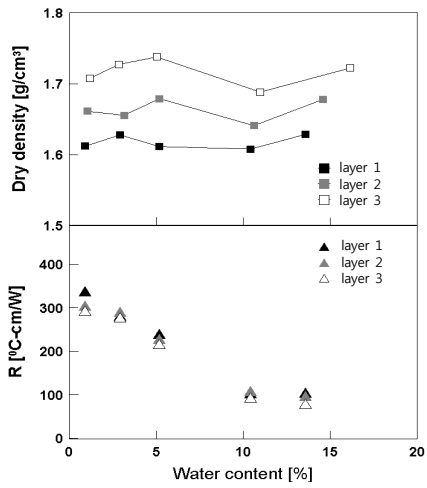
Fig. 4. Three separate layers of compaction mold



(a) 1st compaction

(b) 2nd compaction

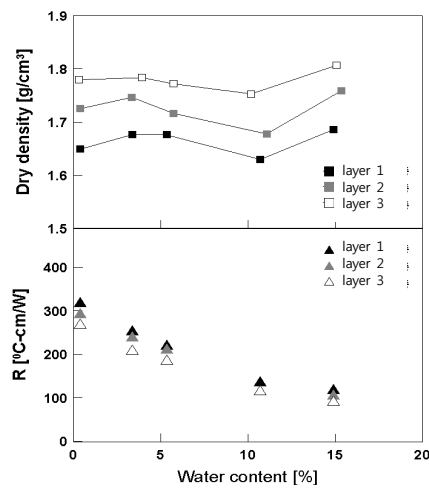
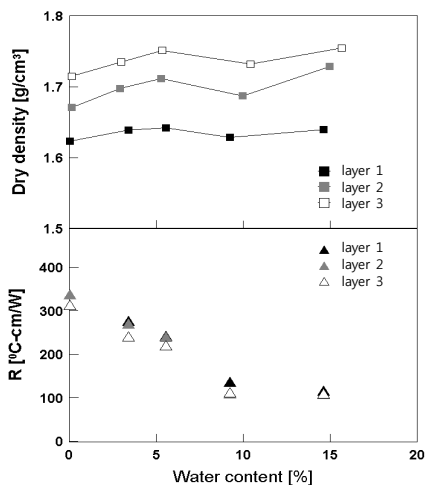
Fig. 5. Compaction curve and thermal resistivity at each layer (River sand)



(a) 1st compaction

(b) 2nd compaction

Fig. 6. Compaction curve and thermal resistivity at each layer (Goyang)



(a) 1st compaction

(b) 2nd compaction

Fig. 7. Compaction curve and thermal resistivity at each layer (Gyeongsan)

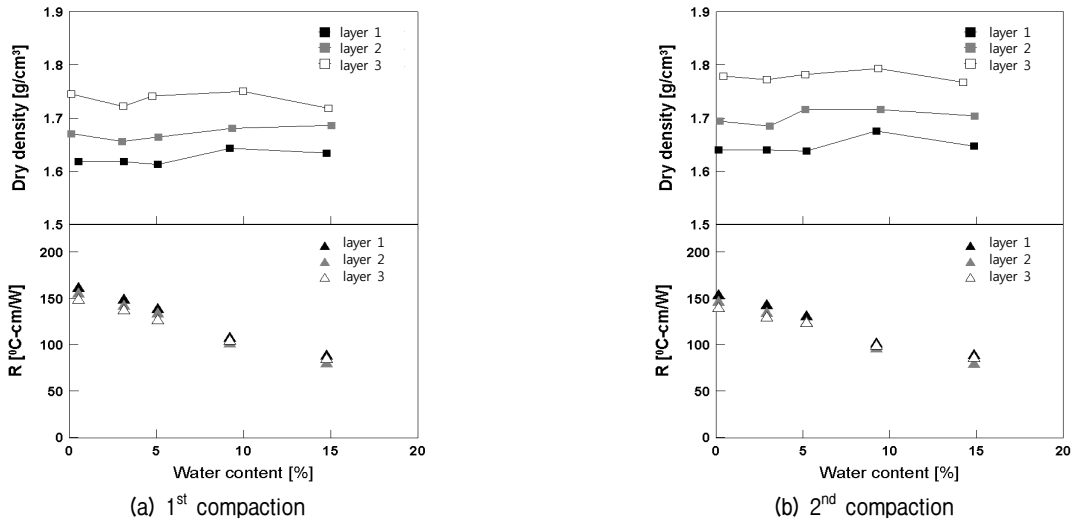


Fig. 8. Compaction curve and thermal resistivity at each layer (Chilgok)

3.2 반복다짐에 따른 다짐곡선 및 열저항 특성

Figs. 9, 10, 11, 12는 일반 강모래(River sand), 순환골재 고양(Goyang), 순환골재 경산(Gyeongsan), 순환골재 칠곡(Chilgok)에 대해 첫 번째 다짐시험결과와 첫 번째 다짐한 시료를 재다짐한 시료의 다짐곡선 및 열저항값을 다짐몰드 층별로 측정된 결과를 비교했다. Fig. 9에서 일반 강모래의 경우, 3층 모두에서 첫 번째 다짐 시료와 두 번째 재다짐 시료의 다짐도 및 열저항 특성이 거의 유사하였다. 하지만, 순환골재 3종 모두에서는 첫 번째 다짐시료와 두 번째 재다짐한 시료의 다짐 및 열저항 특성이 차이를 보였다. 즉, 첫 번째 다짐시료에 비해서 재다짐한 시료의 건조단위중량이 대부분 모든 함수

비 범위에서 컸으며 열저항은 상대적으로 낮게 측정되었다. 특히, 재다짐에 의한 건조단위중량 증가와 열저항 감소는 칠곡 순환골재의 다짐곡선을 제외하고 고함수비 영역(10%, 15%) 보다는 저함수비 영역(0%, 3%, 5%)에서 상대적으로 뚜렷했다.

첫 번째 다짐시료에 비하여 재다짐한 시료의 건조단위중량 증가와 열저항 감소는 추가 다짐에너지에 의한 순환골재의 입자파쇄 효과에 의한 것이라 유추할 수 있다. 특히, 일반 강모래는 순환골재와 달리 재다짐에 의한 다짐도 및 열저항값의 변화가 미미한 결과는 강모래에서 비하여 순환골재가 다짐에너지에 의한 입자파쇄에 취약함을 시사한다. 또한, 입자파쇄가 고함수비보다 저함수비에서 쉽게 발생했음을 알 수 있다.

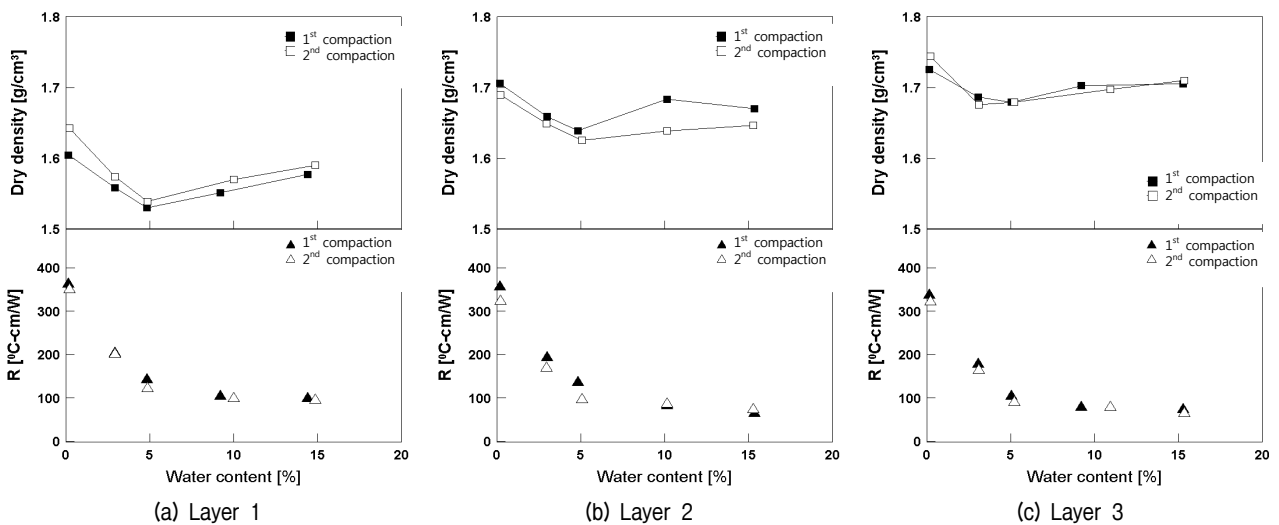


Fig. 9. Effect of repeated compaction on compaction curve and thermal resistivity (River sand)

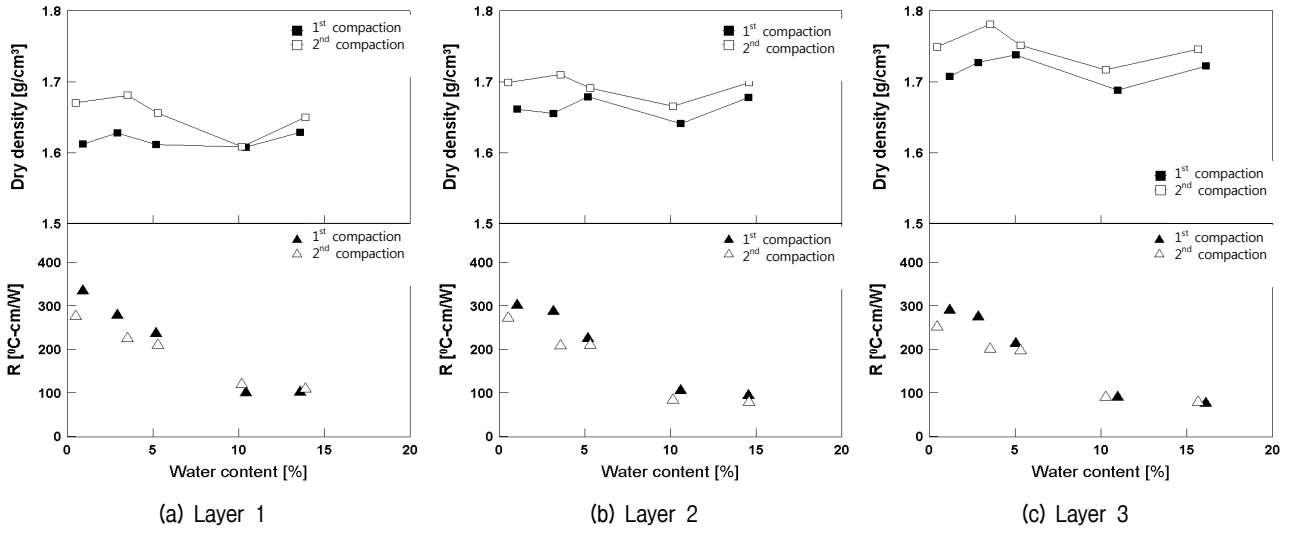


Fig. 10. Effect of repeated compaction on compaction curve and thermal resistivity (Goyang)

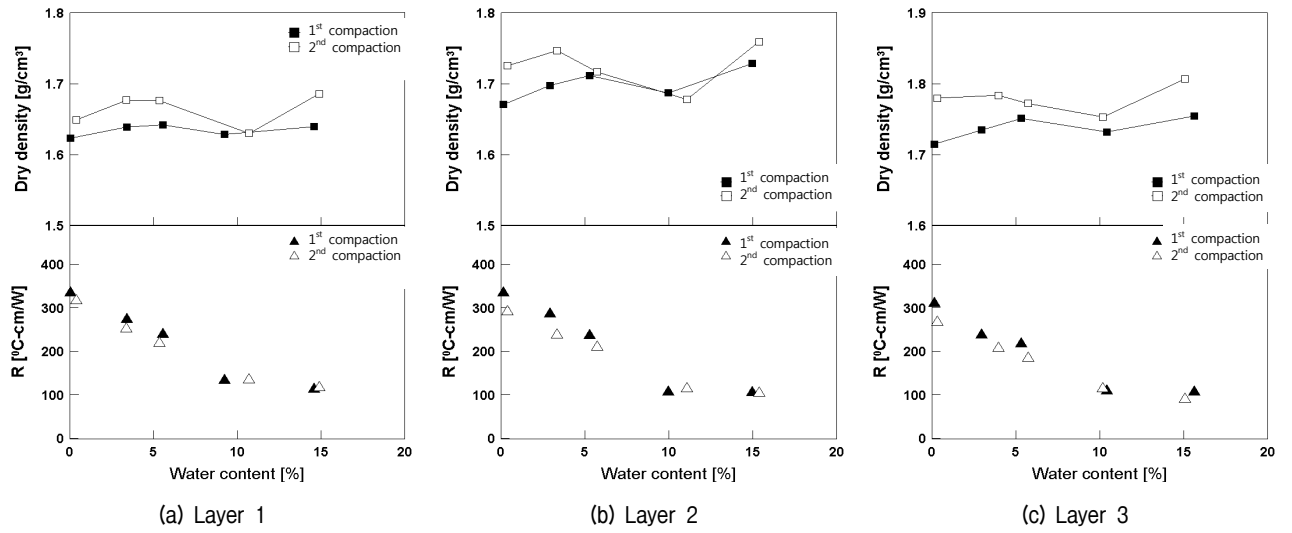


Fig. 11. Effect of repeated compaction on compaction curve and thermal resistivity (Gyeongsan)

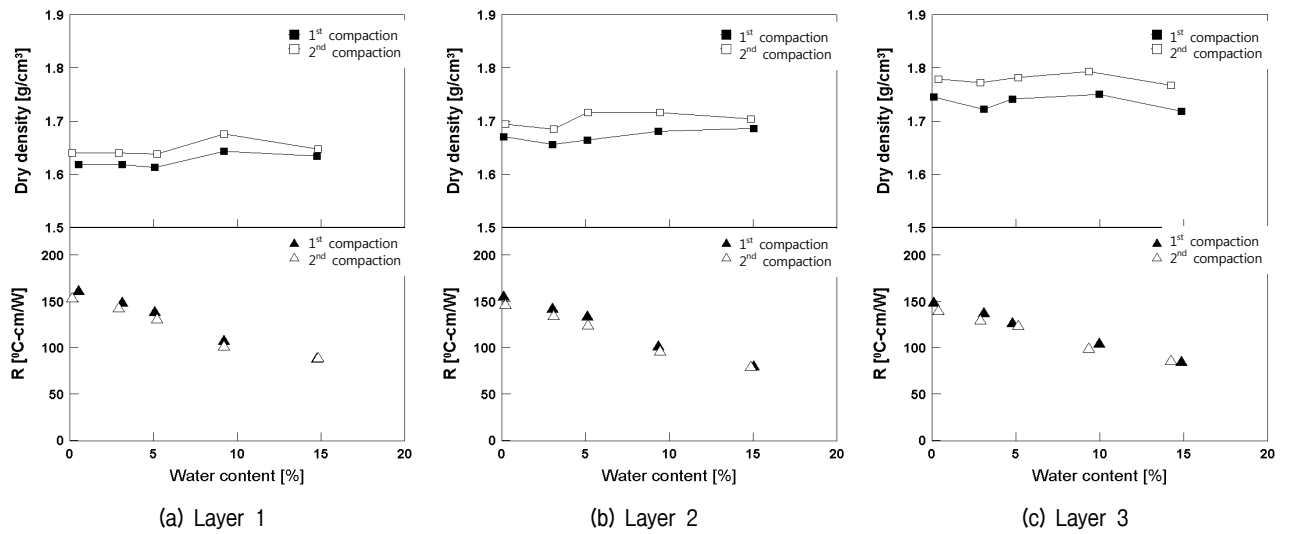


Fig. 12. Effect of repeated compaction on compaction curve and thermal resistivity (Chilgok)

본 논문의 연구결과에서 다짐에 의한 순환골재 입자 파쇄는 우수한 다짐과 낮은 열저항을 유발하고 이는 송배전관로 되메움재로서 순환골재의 사용성에 유리한 측면으로 작용한다. 하지만, 송배전관로 내 되메움재의 낮은 열저항 유지를 위하여 순환골재에 과도한 다짐에너지를 가할 경우 송배전관로의 손상을 유발할 수 있으므로, 송배전관로의 되메움 시방을 준수하여 과도한 다짐이 되지 않도록 주의해야 한다.

3.3 입자파쇄에 따른 입도특성 변화

첫 번째 다짐시료에 비하여 재다짐한 시료의 다짐도 증가에 따른 건조단위중량 상승과 열저항 감소 경향은 표준다짐시험시 다짐에너지가 누적되어 시료에 전달

될 때, 순환골재 입자파쇄가 진행되어 순환골재의 입도 특성이 변했기 때문이라고 유추할 수 있다. 또한, 자연 채취된 강모래는 인위적으로 파쇄공정을 거쳐 생산된 순환골재에 비해 다짐에너지에 의한 파쇄 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 즉, 일반 강모래에 비하여 순환골재는 재생과정에서 이미 입자에 큰 응력이 가해진 상태이므로 추가다짐에 따른 순환골재 입자파쇄가 발생할 수 있다.

다짐에 의한 입자파쇄 여부를 평가하기 위해 다짐시험 전의 초기상태 입도분포곡선과 해당시료를 첫 번째 다짐시험 후, 그리고 두 번째 재다짐 시험 후, 측정된 각 다짐 함수비에 따른 입도분포곡선을 Figs. 13에서 16에 비교하여 나타냈다. 강모래와 순환골재는 비교적 조립질로 구성되어 있으므로 입도분포곡선을 구하기 위

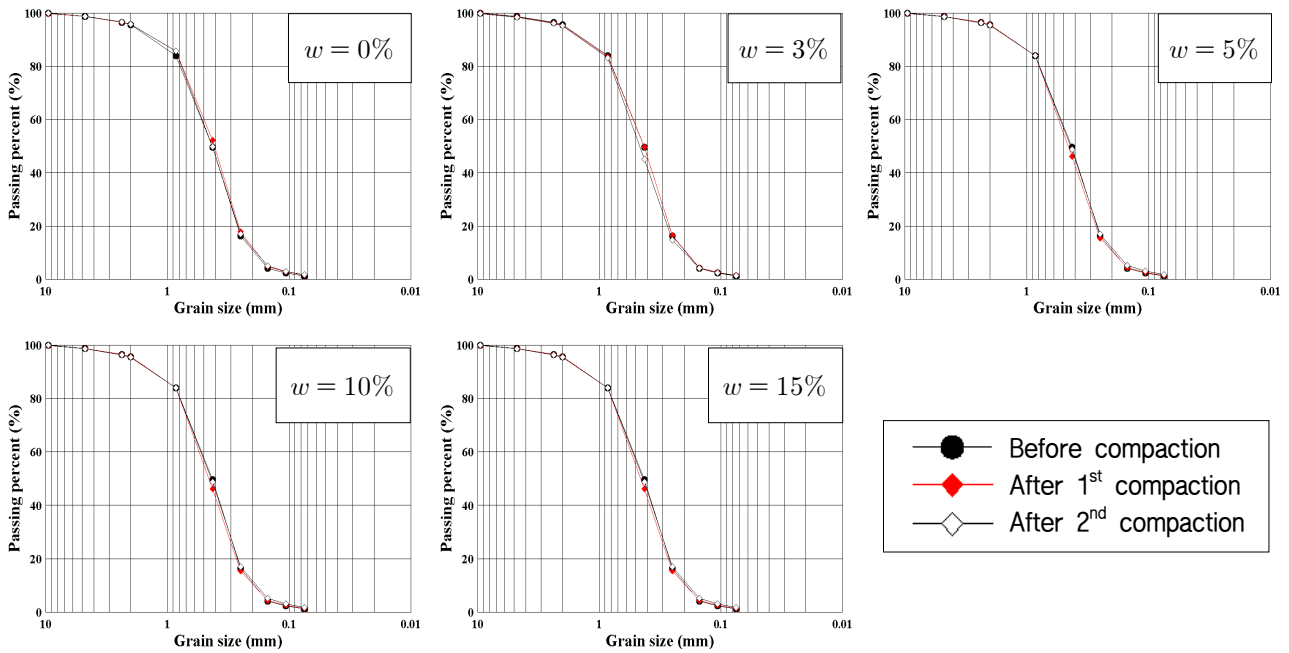


Fig. 13. Comparison of grain-size distribution curve after compaction (River sand)

Table 3. Parameters of grain-size distribution curve after compactions (River sand)

Criteria	0%		3%		5%		10%		15%	
	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.
Passing #4 sieve (%)	98.77	98.79	98.52	98.45	98.67	98.64	98.79	98.77	98.62	98.52
Passing #200 sieve (%)	1.60	1.69	1.48	1.45	1.40	1.78	1.92	1.60	1.85	1.48
D ₁₀ (mm)	0.19	0.19	0.20	0.21	0.20	0.19	0.20	0.19	0.19	0.20
D ₃₀ (mm)	0.31	0.32	0.32	0.34	0.33	0.32	0.33	0.31	0.33	0.32
D ₆₀ (mm)	0.52	0.55	0.55	0.59	0.58	0.56	0.58	0.52	0.58	0.55
C _u	2.75	2.85	2.82	2.88	2.89	2.94	2.96	2.75	2.99	2.82
C _c	0.98	0.98	0.95	0.94	0.95	0.97	0.96	0.98	0.96	0.95
USCS	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP

해 체분석 시험만을 수행하였고, 체분석 시험시 충분한 양의 시료 확보를 위하여 3층의 몰드의 전체시료에 대한 평균 입도특성을 평가하였다.

Fig. 13에서 비교한 일반 강모래의 경우, 다짐 전과 다짐 후에 입도분포가 거의 동일하여 다짐에너지에 의한 입자파쇄가 미미함을 보여준다. 이는 Fig. 9에서 나타난 첫 번째 다짐 시료와 두 번째 재다짐 시료의 다짐도와 열저항 특성이 거의 유사한 결과와 상응한다. 일반 강모래의 반복 다짐에 따른 입도변화를 정량적으로 나타내기 위해 Table 3에서 첫 번째 다짐 시료와 두 번째 다짐시료의 입도정수를 비교하여 나타냈다.

3종류의 순환골재에 대한 다짐에 의한 입자파쇄와 이로 인한 입도분포곡선의 변화는 Fig. 14에서 Fig. 16로 나타냈다. 즉, 일반 강모래에 비하여 반복되는 다짐에

의해 순환골재 입자가 세립화되는 정도가 증가함을 확인할 수 있다(즉, 입도곡선이 점차로 완만해지고, D_{50} 이 감소함). 특히, 다짐에 의한 입도곡선의 변화는 모든 순환골재에서 고함수비 영역(10%, 15%) 보다는 저함수비 영역(0%, 3%, 5%)에서 상대적으로 뚜렷하다. 이것은 Fig. 10에서 Fig. 12에 나타난 반복 다짐에 의한 건조단위중량 증가와 열저항 감소 경향과 동일하다. 이러한 결과는 고함수비 구간에서는 골재가 함유한 물이 다짐에너지 전달에 대해 완충 역할을 하여 순환골재의 입자파쇄가 적게 발생했을 것으로 판단된다. 각 순환골재에 대한 다짐에 따른 입도변화를 정량적으로 나타내기 위해 Table 4에서 9에 첫 번째 다짐 시료와 두 번째 다짐시료의 입도정수를 비교하여 나타냈다.

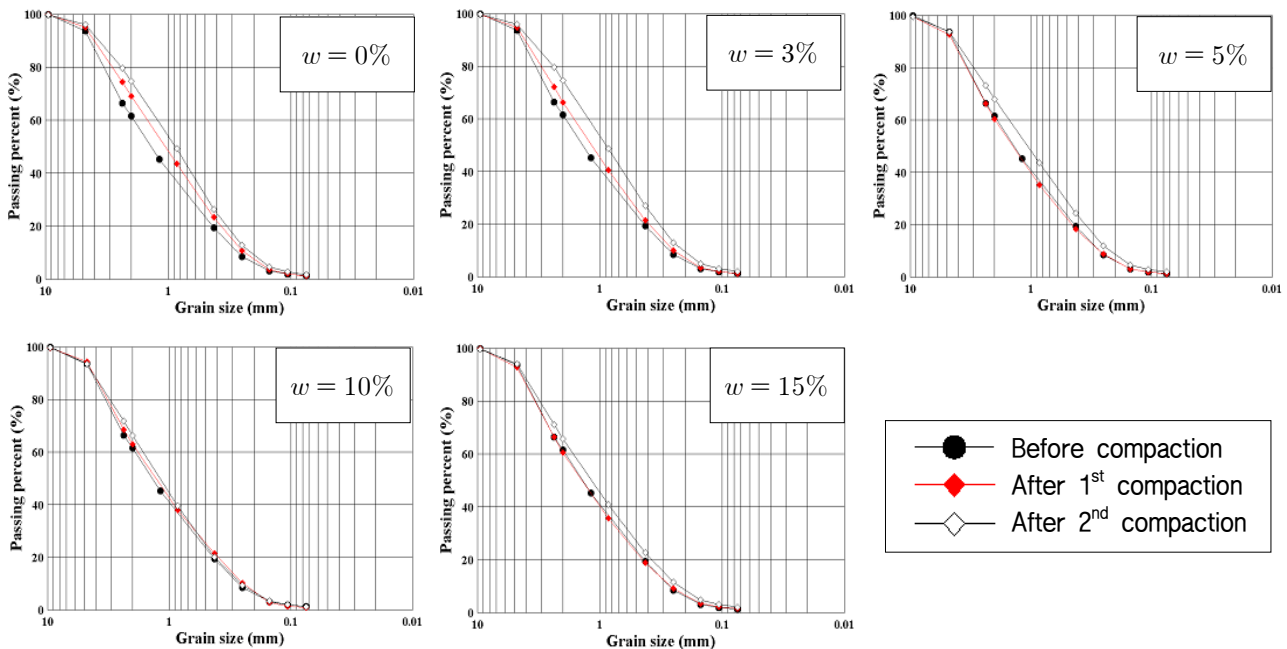


Fig. 14. Comparison of grain-size distribution curve after compaction (Goyang)

Table 4. Parameters of grain-size distribution curve after compactions (Goyang)

Criteria	0%		3%		5%		10%		15%	
	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.
Passing #4 sieve (%)	95.07	96.11	94.82	95.95	92.61	93.80	91.37	93.47	92.79	94.12
Passing #200 sieve (%)	1.17	1.73	1.22	2.14	1.24	1.99	0.90	1.28	1.49	2.12
D_{10} (mm)	0.24	0.22	0.25	0.21	0.27	0.22	0.25	0.26	0.27	0.23
D_{30} (mm)	0.57	0.49	0.61	0.48	0.72	0.55	0.64	0.64	0.71	0.60
D_{60} (mm)	1.59	1.34	1.72	1.35	1.99	1.62	1.86	1.73	1.98	1.73
C_u	6.64	6.20	6.90	6.38	7.28	7.25	7.57	6.67	7.44	7.64
C_c	0.84	0.84	0.88	0.82	0.95	0.83	0.91	0.92	0.95	0.90
USCS	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP

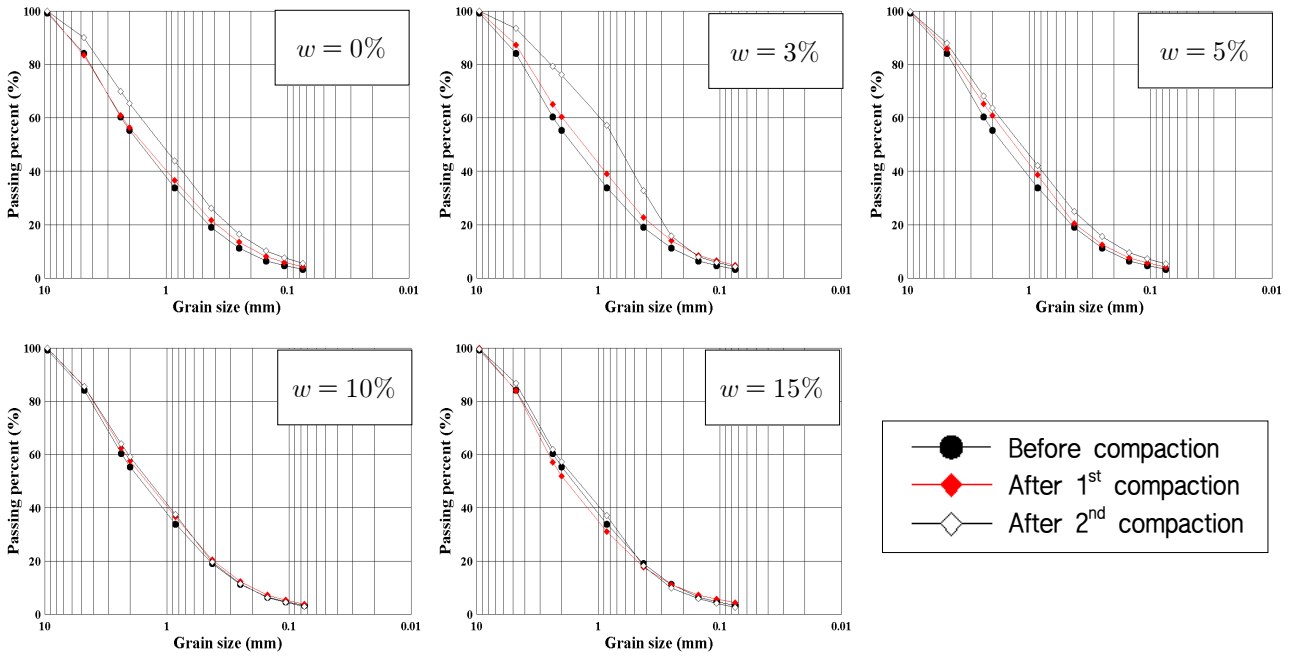


Fig. 15. Comparison of grain-size distribution curve after compaction (Gyeongsan)

Table 5. Parameters of grain-size distribution curve after compactions (Gyeongsan)

Criteria	Water content		0%		3%		5%		10%		15%	
	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.		
Passing #4 sieve (%)	84.74	90.02	88.71	92.79	85.90	88.57	85.63	85.52	83.97	86.75		
Passing #200 sieve (%)	4.25	5.60	4.81	4.92	4.15	4.68	3.79	2.93	4.38	2.62		
D ₁₀ (mm)	0.19	0.15	0.18	0.17	0.20	0.17	0.20	0.22	0.22	0.25		
D ₃₀ (mm)	0.65	0.52	0.58	0.44	0.65	0.57	0.68	0.67	0.82	0.70		
D ₆₀ (mm)	2.15	1.71	1.76	1.32	1.95	1.77	2.17	2.07	2.62	2.21		
C _u	11.60	11.59	9.97	7.87	9.83	10.48	10.62	9.32	11.86	8.72		
C _c	1.05	1.06	1.10	0.88	1.08	1.08	1.03	0.99	1.15	0.88		
USCS	SW	SW-SM	SW	SP	SW	SW	SW	SP	SW	SP		

4. 결론

본 연구는 실내다짐시험을 통해 순환골재의 입자파쇄에 따른 다짐 및 열저항 특성을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 일반 강모래와 페콘크리트 순환골재의 층별 다짐도를 평가한 결과, 누적 다짐에너지가 가장 큰 다짐물드의 가장 아래층(3층)의 다짐도가 가장 높았으며, 높은 다짐도는 동일한 함수비에서 상대적으로 큰 건조밀도와 낮은 열저항을 유발하였다. 특히, 순환골재의 경우, 저함수비 영역(<5%)에서 다짐도에 따른 열저항의 차이가 강모래에 비해 상대적으로 크

게 나타났다.

- (2) 일반 강모래의 경우는 첫 번째 다짐 시료와 두 번째 재다짐 시료의 다짐도 및 열저항 특성이 거의 유사하였으나 순환골재 3종 모두에서는 첫 번째 다짐시료에 비해서 재다짐한 시료의 다짐도가 높아 건조단위중량이 상대적으로 크고 열저항은 낮게 평가되었다.
- (3) 일반 강모래의 경우, 다짐에너지에 의한 입자파쇄가 거의 발생하지 않아 다짐 전과 후의 입도분포가 유사하였으나, 순환골재의 경우는 재생과정에서 입자에 과도한 응력이 가해진 상태이므로 실내다짐시험시 추가다짐에 의해 입자파쇄가 발생하여 다짐 전과 후에 입도분포곡선의 뚜렷한 변화를 유발하였

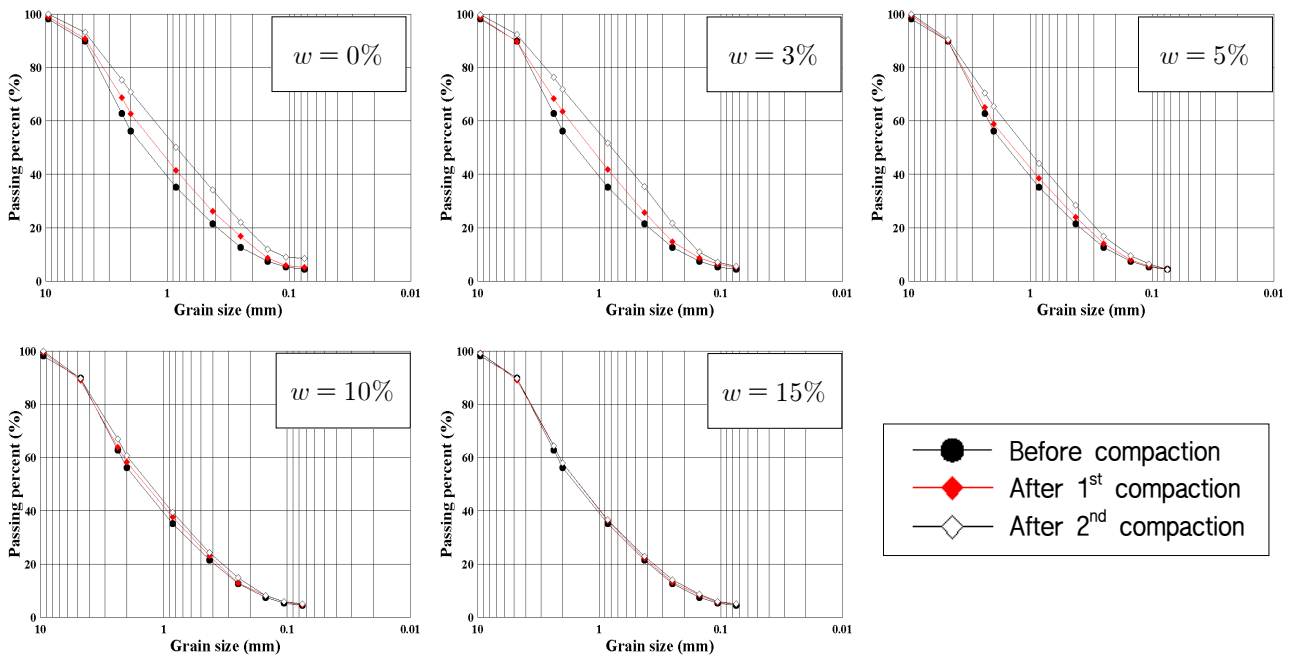


Fig. 16. Comparison of grain-size distribution curve after compaction (Chilgok)

Table 6. Parameters of grain-size distribution curve after compactions (Chilgok)

Criteria	Water content		0%		3%		5%		10%		15%	
	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.	1 st comp.	2 nd comp.
Passing #4 sieve (%)	90.77	93.14	89.71	92.24	89.82	90.48	89.04	89.65	89.07	89.73		
Passing #200 sieve (%)	5.17	8.56	5.12	5.54	4.50	4.40	4.62	5.04	4.98	5.01		
D ₁₀ (mm)	0.17	0.12	0.17	0.14	0.18	0.16	0.19	0.18	0.18	0.17		
D ₃₀ (mm)	0.53	0.36	0.54	0.36	0.60	0.47	0.63	0.59	0.66	0.65		
D ₆₀ (mm)	1.86	1.40	1.82	1.32	2.07	1.71	2.11	1.96	2.12	2.11		
C _u	11.12	11.59	10.59	9.44	11.29	10.87	11.20	11.06	11.49	12.12		
C _c	0.91	0.79	0.93	0.69	0.95	0.82	0.99	0.99	1.12	1.13		
USCS	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP	SP	SP	SP-SM	SW	SW-SM		

다. 즉, 일반 강모래에 비하여 순환골재는 반복되는 다짐에 의해 입자가 세립화되어 입도곡선이 점차로 완만해지고, D₅₀이 감소하였다.

(4) 순환골재 다짐시 입자파쇄는 골재가 함유하는 물의 완충작용으로 인하여 고풍수비 영역(10%, 15%) 보다는 저함수비 영역(0%, 3%, 5%)에서 더 많이 발생하여 반복다짐에 의한 다짐도 상승과 열저항 감소, 그리고 입도분포의 변화가 저함수비 영역에서 뚜렷하였다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2014R1A2A2A01007883)

과 한국전력 전력연구원의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Jun, M-H, Lee, S-H, Lee, S-B, and Lee, D-H (2004), "A Study on Quality Investigation of Domestic Recycled Aggregates", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.24, No.1, pp.203-206.
2. KS F 2312 (2001), Test method for soil compaction using a rammer.
3. Lade, P. V., Yamamuro, J. A., and Bopp, P. A. (1996), "Significance of Particle Crushing in Granular Materials", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.122, No.4, pp.309-316.
4. Lee, Y., Kwan, Y-W, and Hyun, J-H (2005), "The Engineering and Environmental Properties of Reclaimed Concrete Materials as Road Materials", *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, Vol.6, No.3, pp.17-23.

5. Oh, K. D., Kim, D. H., and Kim, K. Y. (2008), "Characteristics of Thermal Resistivity of Recycled Aggregate on Water Content", *Proceedings of 2008 KSCE Conference*, pp.3883-3886.
6. Son, Y. H. and Chang, P. W. (2009), "Breakage Index of Weathered Soil Reflecting Breakage Level and Weathering Degree", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.13, No.5, pp.325-332.
7. Wi, J., Hong, S-Y, Lee, D-S, Han, E., and Choi, H. (2010), "Laboratory Experiment To Characterize Thermal Properties of Recycled-Aggregate Backfill", *Proceedings of 2010 KGS Fall Conference*, pp.1231-1238.
8. Wi, J., Hong, S-Y, Lee, D-S, Park, S., and Choi, H. (2011), "Evaluation of Compaction and Thermal Characteristics of Recycled Aggregates for Backfilling Power Transmission Pipeline", *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.27, No.7, pp.17-33.

Received : August 18th, 2015

Revised : September 26th, 2015

Accepted : September 30th, 2015