

Study on the prevention methods of radial cracks generated in artificial lightweight aggregate

Jimin Kang, Kangduk Kim and Seunggu Kang[†]

Department of Advanced Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received September 23, 2015)

(Revised October 1, 2015)

(Accepted October 5, 2015)

Abstract In this study, prevention methods of radial cracks generated inside of artificial lightweight aggregate made of reject ash and dredged soil were investigated. The reject ash and dredged soil had mixed with weight ratio of 7:3 and formed to spheric shape of 5~20 mm diameter, then, the aggregates were manufactured using flash sintering method at 1200°C for 10 min. The formation of radial cracks in the aggregates were suppressed as the size of specimen decreased. Also, the addition of silica to aggregates had prevented generation of the radial cracks. As the size and the amount of silica powder added increased, the development of radial cracks was constrained. Therefore the artificial lightweight aggregate manufactured in this study expected to be applicable to many fields such as construction and environmental usages. Also it is expected to contribute greatly to increase the recycling rate of reject ash and dredged soil.

Key words Recycle, Reject ash, Dredged soil, Artificial lightweight aggregate, Radial crack, Open pore

인공경량골재 내부에 발생하는 방사형 균열의 억제 방법에 관한 연구

강지민, 김강덕, 강승구[†]

경기대학교 신소재공학과, 수원, 16227

(2015년 9월 23일 접수)

(2015년 10월 1일 심사완료)

(2015년 10월 5일 게재확정)

요약 본 연구에서는 잔사회와 준설토로 제조된 구형의 인공경량골재 내부에 생성되는 방사형 균열의 원인 및 그 억제 방법에 대하여 연구하였다. 인공경량골재는 잔사회와 준설토를 각각 7:3의 무게 비로 혼합하고 직경이 5~20 mm인 구형으로 성형한 후 1200°C에서 10분간 직화소성법으로 제조하였다. 골재 내부의 균열은 골재 지름이 작을수록 발생이 억제되었다. 또한 SiO₂ 분말을 첨가한 경우, 분말의 크기가 클수록 또는 첨가량이 증가할수록 방사형 균열 발생이 억제되었다. 균열이 억제된 인공경량골재의 비중은 1.3~1.6이고, 흡수율은 5~20%의 범위를 나타내었다. 따라서 본 논문에서 제조된 인공경량골재는 건설 및 환경소재 등 여러 분야에 적용 가능할 것으로 보이며, 더불어 잔사회 및 준설토의 재활용율을 높이는 데 크게 기여할 것으로 기대된다.

1. 서론

국내 화력발전소에서 발생하는 석탄회는 연간 835만 톤에 이른다. 석탄회는 성상 및 발생 위치에 따라 크게 비산재와 바닥재로 구분되는데, 비산재는 석탄회 중 약 82%, 바닥재는 약 18%를 차지한다[1]. 비산재는 입자 크기가 미세하고 조성이 우수하여 대부분 재활용이 가능

한 것으로 알려져 있다. 그러나 비산재 중에서도 일부 탄소함량이 많고 입도가 커서 재활용하지 못하는 것을 잔사회라고 하며 대부분 매립되고 있는 실정이다[2, 3].

한편 다양한 준설토작업 시 발생하는 준설토는 국내에서 연간 4,600만 톤이 발생하며, 폐기물 관리법 상 일반폐기물로 취급되는데, 그중 일부는 모래, 자갈 등 건설재로 재활용되고 그 외 것은 대부분 매립 처리된다[4]. 대량으로 배출되는 준설토에 대한 효과적인 재활용 방법 중 하나는 인공경량골재 제조 원료로써 사용하는 것이다. 인공경량골재는 대량생산이 가능할 뿐 아니라 건축 및 토목 재료로서 대량소비가 가능하기 때문이다. 더구나

[†]Corresponding author

Tel: +82-31-249-9767

Fax: +82-31-244-8241

E-mail: sgkang@kgu.ac.kr

인공골재는 그 미세구조 및 물성을 다양하게 변화시킬 수 있기 때문에 많은 응용 분야에 적용시킬 수 있다는 장점을 갖는다[5, 6]. 이에 따라 준설토 등 폐자원을 이용한 인공경량골재에 관한 연구는 유럽, 미국, 일본 등 선진국에서 많은 연구가 진행되어 왔고, 다양한 분야에 활발히 적용되고 있다[7-10]. 그러나 국내에서는 아직 폐자원을 이용하여 제조된 인공경량골재에 대한 실제 적용 사례가 많지 않고, 인공경량골재를 적용한 경량콘크리트의 초보적인 수준의 활용이 이루어지고 있는 것이 현실이다[11].

따라서 석탄 비산재 중 재활용이 어려운 잔사회와 연간 발생량이 매우 큰 준설토를 혼합하여 인공경량골재를 제조하는 기술을 개발한다면 폐자원 재활용 측면은 물론 국내에서 불법으로 채취되고 있는 자연 골재를 대체함으로써 환경보호에도 일조할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 이전 연구에서 잔사회와 준설토를 혼합하여 인공경량골재 소성 제조할 때, 골재 내부에 방사형 균열이 자주 발생하는 현상을 발견하였으며, 특히 잔사회 : 준설토의 무게비가 7 : 3으로 제조된 인공경량골재에서 방사형 균열이 가장 뚜렷하게 발생함을 밝히고 그 원인을 분석하였다[12].

일반적으로 소성 과정에서 구형 골재의 발포는 블랙코어(black core) 현상을 동반한다. 소성된 골재의 절단면을 관찰하면, 회색 내지 검은색을 띠고 발포된 기공들이 비교적 크고 불균일하게 분포된 부분이 중심부에 나타나는데 이를 블랙코어라 한다. 이 현상은 골재 원료에 포함되어있는 탄소의 불완전 산화에 의해 발생한다[13-18]. 잔사회와 준설토를 혼합하여 제조된 인공경량골재는 내부에 블랙코어 현상이 발생하면서도 동시에 방사형 균열이 나타난다. 방사형 균열은 직화소성 즉, 미리 예열된 전기로에 직접 시편을 넣어서 빠르게 소성한 뒤 바로 꺼내는 방식으로 제조할 때, 수 초 내에 발생한다[12]. 이는 원료에 포함되어있는 미연탄소가 산화되면서 발생한 가스량이 많고 또한 이 가스들이 빨리 골재 밖으로 빠져나가지 못하기 때문으로 밝혀졌다.

골재 내부에 발생하는 방사형 균열은 기계적 강도 저하뿐만 아니라 밀도, 흡수율 등 물리적 특성을 제어하기 어렵게 하는 원인이 된다[19]. 따라서 본 연구에서는 잔사회와 준설토를 혼합하여 제조된 인공경량골재의 내부에 발생하는 방사형 균열을 억제하는 방법에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 원료인 잔사회 및 준설토는 국내 Y 화력 발전소에서 발생한 것으로서 원료들은 체질을 통해 입도가 150 μm 이하인 것만을 선별하여 사용하였다. 인공골재 제조를 위해 잔사회 : 준설토의 무게비를 7 : 3으로 혼합한 뒤 지름이 5~20 mm인 구 형태로 성형하여 100°C의 건조기에서 24시간 동안 건조시켰다. 건조된 성형체는 1200°C에서 10분 동안 박스형 전기로에서 직화 소성하여 인공경량골재를 제조하였다.

골재 크기가 방사형 균열에 미치는 영향을 분석하기 위하여 골재 지름을 5, 7, 10, 그리고 20 mm의 4가지 종류로 제조하였다. 또한 골재 제조시 첨가제로 사용된 SiO_2 분말의 영향을 고찰하기 위하여, SiO_2 의 입도를 90 μm 이하, 90~150 μm , 150 μm 이상의 3종류를 시도하였으며, 각 입도에 대하여 첨가량을 5~15 wt% 범위로 변화시켰다.

원료의 화학적 성분과 열적특성은 각각 XRF(ZSX-100e, Rigaku, Japan) 및 TG/DTA(STA 409 C/CD, Netzsch Co., Germany)를 통하여 분석하였다. 제조된 모든 인공경량골재의 비중, 흡수율은 한국 산업규격 “KS F 2503: 굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험방법”에 의거하여 측정하였다. 그리고 인공경량골재의 표면 및 단면 사진을 촬영을 위해 각각 광학 현미경(DCS-105, Sometech-vision, Korea) 및 FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope; S-4800, HITACHI Co., Japan)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원료 분석

본 연구에서 사용된 잔사회 및 준설토의 화학적 성분을 XRF로 측정하여 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 잔사회에는 주성분으로 52.6 wt% SiO_2 , 24.1 wt% Al_2O_3 가 존재하며, Fe_2O_3 를 포함하여 총 용제(flux)량이 12.9 wt% 존재하였다. 한편 준설토에는 67.9 wt% SiO_2 , 15.5 wt% Al_2O_3 , 그리고 Fe_2O_3 를 포함하여 총 용제량이 10.8 wt%였다. 즉 준설토에는 잔사회에 비하여 실리카와 용제 성분이 더 많이 존재함을 알 수 있다. 또한 잔사회는 소성시 무게감량이 10.3 %로 가스 발생 및 골재 발포에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 이러한 무게감량은 탄소성

Table 1
Chemical compositions of reject ash and dredged soil (wt%)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Others	Ig. Loss	C
Reject ash	52.6	24.1	4.2	5.1	0.9	1.1	1.6	10.3	8.8
Dredged soil	67.9	15.5	3.6	0.9	0.8	2.6	2.9	5.9	0.6

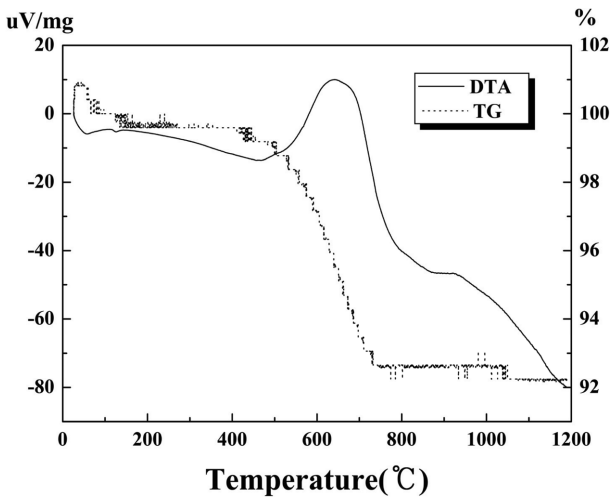


Fig. 1. Thermal analysis using DTA/TG for the mixture of reject ash and dredged soil. The ratio of reject ash to dredged soil is 7 : 3 in weight base.

분이 8.8 %로 많이 함유되어 있기 때문이다.

본 연구에서 인공경량골재를 제조하기 위한 배치(batch) 분말로 잔사회와 준설토의 무게비를 7 : 3으로 하였다. 이 배치 분말에 대하여 DTA/TG 분석을 행하여 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 570°C 부근에서 무게감량이 약 8 % 정도 발생하였으며, 450~850°C 범위에서 큰 발열피크가 나타났다. 이러한 무게감량과 발열피크는 이전 연구에 따르면 주로 잔사회에 포함된 미연탄소가 산화되면서 발생된 것으로 밝혀졌다[10].

3.2. 골재 크기 변화

인공경량골재의 직경 크기를 5~20 mm로 변화시켜 그 표면 및 단면 사진을 광학현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 우선 모든 골재 시편에서 블랙 코

어 현상을 볼 수 있다. 즉 골재 단면은 검회색의 내부(core)와 검붉은 색의 표피(shell)로 이루어져 있다. 골재의 크기는 시편 내 방사형 균열 발생 여부에 큰 영향을 주었다. 즉, 인공경량골재의 직경이 10 mm 이상인 경우 내부에 방사형 균열이 발생한 반면, 직경이 7 mm 이하인 시편에서는 균열이 발생 하지 않았다. 그러나 시편 표면에서의 균열은 모든 시편에서 관찰되지 않았다.

본 연구에서는 골재를 소성시킬 때 직화법을 사용하였다. 즉 소성온도로 미리 가열되어 있는 로에 골재를 투입하면, 액상이 골재 표면에 빠르게 형성되고 이로 인해 내부는 외기와 차단되어 환원분위기가 형성된다. 따라서 골재 원료에 존재하던 Fe₂O₃가 환원되어 골재 내부가 회색 내지 검은 색으로 변하면서 블랙코어가 형성된다. 이때 Fe₂O₃의 환원을 촉진하는 것은 골재에 존재하는 탄소의 산화반응이며 이로 인해 CO₂ 가스가 발생하면서 블랙 코어 부분을 발포시킨다[12-14].

이전 연구에 의하면 내부 균열은 골재를 소성시킬 때 발생하는 가스가 골재 밖으로 모두 빠져나가지 못하여 생성되는 것으로 밝혀졌다[10]. 따라서 골재의 크기가 작을수록 즉, 가스가 이동하는 거리가 짧을수록 가스가 쉽고 빠르게 골재 외부로 빠져나갈 수 있기 때문에 내부 균열 발생이 억제된 것으로 생각된다.

인공경량골재의 직경 크기에 따른 흡수율과 비중을 Fig. 3에 나타내었다. 제조된 인공경량골재의 직경이 커질수록 밀도 및 흡수율이 모두 증가하는 경향을 보였다. 흡수율이 증가하는 것은 시편의 절단면 미세구조(Fig. 2)로 부터 설명할 수 있다. 직경이 10 mm 이상인 골재에는 방사형의 내부 균열이 발생하였고, 균열 끝부분이 골재 껍질(shell) 부분까지 이어져 있다. 이로 인해 방사형 균열은 개기공(open pore) 특성을 갖게 되어 흡수율이 높아진 것이다. 제조된 직경 5 mm 골재에 비해 20 mm 골재의 경우, 흡수율은 약 65 % 증가하였다.

Diameter	5 mm	7 mm	10 mm	20 mm
Area				
Cross-section				
Surface				

Fig. 2. Optical-microscopic photographs of artificial aggregates of different diameters sintered at 1200°C for 10 min using flash sintering method in electric box furnace.

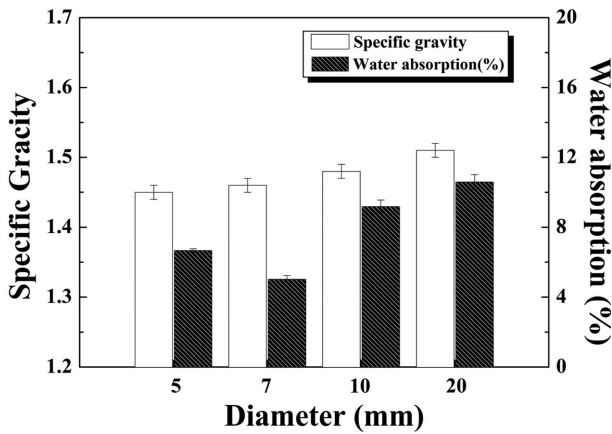


Fig. 3. Specific gravity and water absorption of artificial aggregates which have different size sintered at 1200°C for 10 min using flash sintering method in electric box furnace.

한편, 제조된 골재의 직경에 따른 비중 증가는 크지 않았다. 제조된 직경 5 mm 골재에 비해 20 mm 골재의 경우, 비중은 약 3% 증가하였다. 골재 내 방사형 균열이 발생하였음에도 비중이 약하게나마 증가하는 것은 골재 내부의 블랙 코어에서 약간의 치밀화가 발생하였기 때문이라고 사료되나 이에 대한 확실한 결론은 추가적 연구를 통해 밝힐 필요가 있다고 생각된다.

3.3. SiO₂ 분말 첨가

인공경량골재에 입도가 다른 3종류의 SiO₂ 분말을 5~

15 wt% 범위로 첨가하여 1200°C에서 10분 간 직화 소성한 시편의 절단면 사진을 Fig. 4에 나타내었다. SiO₂ 첨가량이 같은 경우, SiO₂ 입도가 클수록 내부에 방사형 균열 발생이 억제되는 것을 알 수 있다. 특히, 첨가된 SiO₂의 입도가 150 μm 이상일 때 모든 시편들에서 방사형 내부 균열이 발견되지 않았다. 또한 SiO₂ 입도에 관계없이 첨가량을 증가시키면 방사형 균열 억제효과 역시 향상되었다. SiO₂ 첨가량이 15 wt%인 시편에서는 방사형 균열이 전혀 발생되지 않았다.

이는 첨가된 SiO₂ 입자가 모상과 완전히 결합하지 못하고 주변에 기공이나 공극 등을 형성함으로써 소성 과정에서 발생한 가스의 통로역할을 했기 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 SEM으로 관찰된 Fig. 5의 미세구조에서 확실히 알 수 있다. 먼저 SiO₂ 첨가 유무에 따라 골재 표면에 생성된 액상 즉, 유리질 양이 다른 것을 알 수 있다. SiO₂를 첨가하지 않은 인공경량골재의 표면(a)에 비해 SiO₂ 분말이 첨가된 시편 표면(b)에 액상량이 더 적게 생성된 것을 볼 수 있다. 이는 골재 소성 시간이 10분으로 짧았을 뿐 아니라, 실리카 입도가 150 μm 이상으로 커서 모상과 충분한 공정반응(eutectic reaction) 등을 일으키지 못했기 때문으로 생각된다. 또한 첨가된 SiO₂로 인해 표면에 개기공(open pore)들이 많이 형성된 것을 관찰할 수 있다. 따라서 SiO₂가 첨가된 시편에서는 발생한 가스들이 개기공을 통해 쉽게 방출되어 시편에 방사형 균열이 발생되지 않은 것으로 사료된다.

SiO₂ 분말이 첨가된 시편을 절단하여 300배로 확대

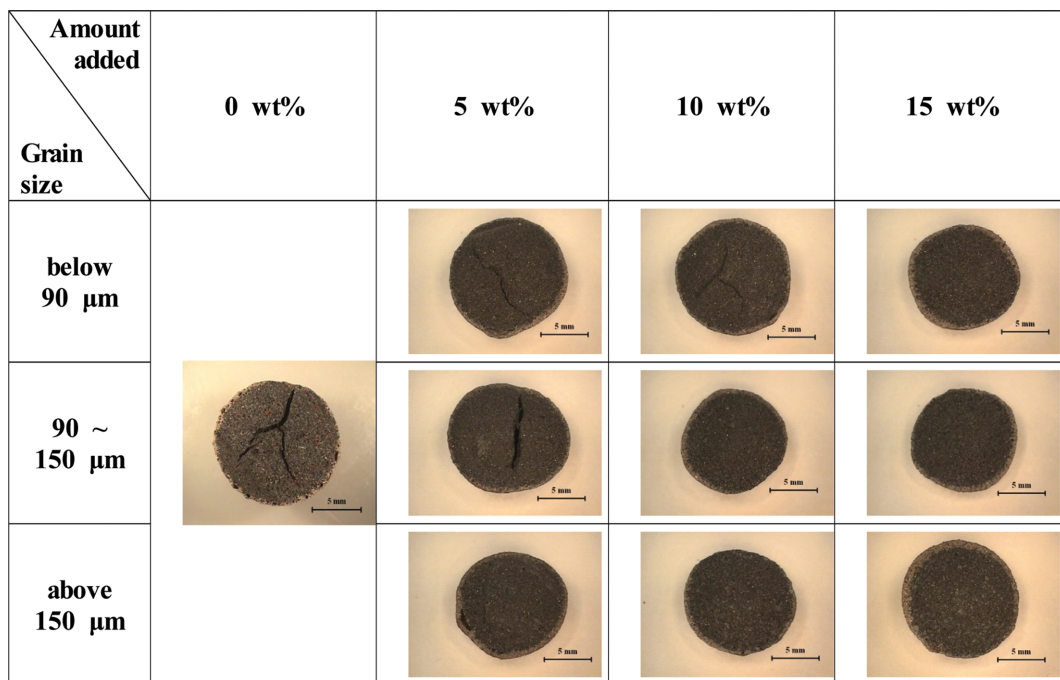


Fig. 4. Optical microscopic photographs for the cross section of artificial aggregates containing various amount of SiO₂ powders sintered at 1200°C for 10 min using flash sintering method in electric box furnace.

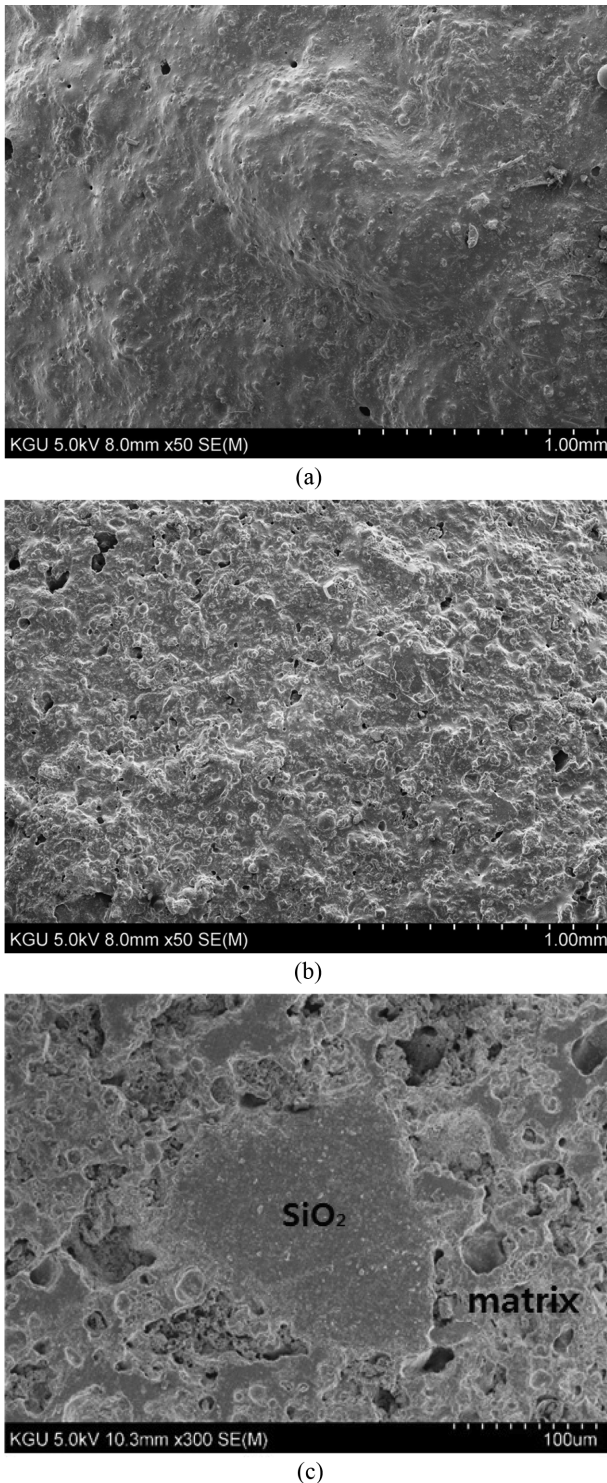


Fig. 5. SEM images of aggregates sintered at 1200°C for 10 min using flash sintering method in electric box furnace; (a) surface of no SiO₂ added, (b) surface of 15 wt% SiO₂ of 150 μm, and (c) the cross-section of specimen (b) magnified by × 300.

관찰한 사진(c)을 보면 실리카와 모상 간의 결합 상태를 더욱 확실히 알 수 있다. 첨가된 SiO₂가 입자형태가 거의 그대로 존재하면서 표면 일부만이 모상과 결합되어 있고 그 주변에는 다량의 기공이 형성되었다.

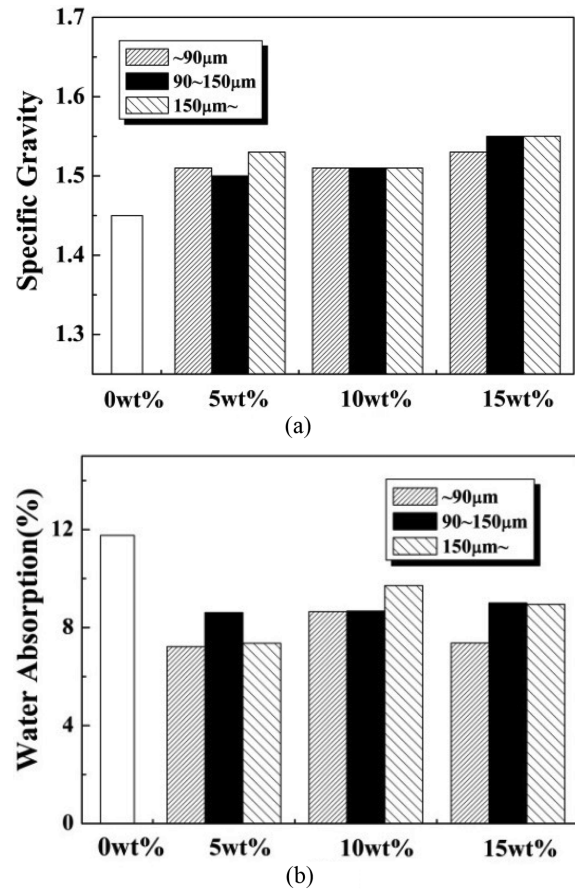


Fig. 6. Physical properties of artificial aggregates as a function of amount of SiO₂ added and diameter of aggregates, sintered at 1200°C for 10 min using flash sintering method in electric box furnace: (a) specific gravity and (b) water absorption.

SiO₂를 첨가하여 제조한 인공골재의 비중 및 흡수율을 Fig. 6에 나타내었다. SiO₂를 첨가하여 제조한 인공골재는 첨가량과 입도에 관계없이 SiO₂를 첨가하지 않은 골재보다 비중이 약 3~7% 정도 높게 나타났다. 이는 SiO₂의 비중이 약 2.2 정도로 잔사회 또는 준설토 보다 높기 때문에 SiO₂ 첨가로 인해 골재 비중이 증가된 것으로 판단된다. 또한 SiO₂ 첨가에 의해 골재 내 방사형 균열의 소멸이 비중 증가에 다소 기여했다고 생각된다. 반면 흡수율의 경우, SiO₂를 첨가한 골재는 첨가하지 않은 골재의 흡수율보다 17~25% 가량 감소된 값을 나타내었다. 방사형 균열은 그 끝단이 표면까지 연결되어 개기공 효과를 나타내므로 SiO₂ 첨가에 의해 방사형 균열 형성이 억제되어 시편의 흡수율이 크게 감소되는 효과를 나타내는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 잔사회와 준설토로 제조된 인공경량골

재 내부에 발생하는 방사형 균열을 방지하는 방법에 대하여 연구였다. 인공경량골재의 크기가 감소할수록 소성시 발생하는 가스의 배출되는 거리를 감소시켜 내부 균열 발생을 억제 할 수 있었다. 또한 입도가 90~150 μm 범위의 SiO_2 분말을 혼합하여 인공경량골재를 제조하면 내부 균열 발생이 억제되었다. 이는 첨가된 SiO_2 입자가 모상과 완전히 결합하지 못하고 주변에 기공이나 공극 등을 형성함으로써 소성 과정에서 발생한 가스의 통로 역할을 했기 때문이다.

제조된 인공경량골재의 직경이 커질수록 밀도 및 흡수율이 모두 증가하였다. 직경이 10 mm 이상인 골재에는 방사형의 내부 균열이 발생하였고, 방사형 균열은 개기공(open pore) 특성을 갖게 되어 흡수율이 높아진 것이다. 제조된 직경 5 mm 골재에 비해 20 mm 골재의 경우, 흡수율은 약 65 % 증가하였다. SiO_2 를 첨가하여 제조한 인공경량골재는 첨가하지 않은 골재의 흡수율보다 17~25 % 가량 감소된 값을 나타내었다. 이는 SiO_2 첨가로 균열이 소멸되었기 때문으로 사료된다.

결론적으로, 잔사회와 준설토를 혼합하여 인공경량골재를 직화 소성법으로 제조할 때 발생하는 내부 방사형 균열은 골재의 크기 제어 및 실리카 첨가에 의하여 억제될 수 있었으며 더불어 흡수율이 감소되는 효과도 함께 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2015학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- [1] Y.D. Jo, "Electric industry and environmental effect", Korea Electric Association, Electricity Almanac (2009) p. 343.
- [2] M.A. Kang, S.G. Kang, G.G. Lee and Y.T. Kim, "Fabrication of artificial light-weight aggregates of uniform bloating properties using a temperature-raising sintering method", J. Kor. Ceram. Soc. 49 (2012) 161.
- [3] M.A. Kang and S.G. Kang, "Effect of activated carbon on bloating properties of artificial lightweight aggregates containing coal reject ash and bottom ash", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 23 (2013) 201.
- [4] S.J. Kim and J.B. Park, "Treatment, disposal, and reuse of contaminated dredged sediment in the ocean", J. Kor. Soc. of Civil Engineers. 55 (2007) 66.
- [5] S.G. Kang, "Dependence of physical properties of artificial lightweight aggregates upon a flux and a bloating agent addition", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 19 (2009) 48.
- [6] K.G. Lee, "Bloating mechanism for coal ash with iron oxide", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 24 (2014) 77.
- [7] T.Y. Lo, W.C. Tang and H.Z. Cui, "The effects of aggregate properties on lightweight concrete", Build Environ. 42 (2007) 3025.
- [8] H.Z. Cui, T.Y. Lo, S.A. Memon and W. Xu, "Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete", Construct Build Mater 35 (2012) 149.
- [9] R.N. Swamy and G.H. Lambert, "Mix design and properties of concrete made from PFA coarse aggregates and sand", Int. J. Cement Compos. Lightweight Concr. 5 (1983) 263.
- [10] Y. Ke, A.L. Beaucour, S. Ortola, H. Dumontet and R. Cabrillac, "Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete", Construct Build Mater 23 (2009) 2821.
- [11] J.W. Moon, J.P. Won and H.K. Jeon, "The application and case of lightweight concrete", Korea Concrete Institute Conference 5 (2006) 224.
- [12] J.M. Kang and S.G. Kang, "Behavior of radial cracks generated inside artificial lightweight aggregate manufactured from reject ash and dredged soil", International Journal Precision Engineering and Manufacturing 16 (2015) 1329.
- [13] A. Escardino, A. Barba, A. Blasco and F. Negre "Oxidation of black core during firing of ceramic ware: 4 Relationship between effective diffusivity of oxygen through oxidized layer and properties characterizing its porous structure", J. Br. Ceram. Trans. 94 (1995) 103.
- [14] J.Y. Park, Y.T. Kim, K.G. Lee, S.G. Kang and J.H. Kim, "The mechanism of black core formation", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 15 (2005) 208.
- [15] V.Z. Abdrakhimov and E.C. Abdrakhimova, "Formation of the black core in high-speed firing of floor tiles", Glass and Ceramics 56 (1999) 30.
- [16] Y.P. Kareev, "Sandwich structure in the Etruscan-Padan type pottery" Appl. Clay Sci. 27 (2004) 199.
- [17] Y.R. Ryu and Y.T. Kim, "A study on the characteristics of ecological lightweight aggregates containing reject ash from the power plant", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 20 (2010) 185.
- [18] C.R. Cheeseman and G.S. Viridi, "Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash", Resources, Conservation and Recycling 45 (2005) 18.
- [19] S.N. Jo and S.G. Kang, "A study on the properties of artificial aggregates containing bottom ash from the power plant and waste catalyst slag", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 22 (2012) 200.