Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology
Vol. 18, No. 3 (2008) 125-130

Experiments of electric furnace simulator for property prediction of the artificial lightweight aggregate sintered by rotary kiln

Yugwang Ryu and Yootaek Kim†

Department of Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760, Korea

(Received May 19, 2008)
(Accepted June 2, 2008)

Abstract If the properties of artificial lightweight aggregates produced by rotary kiln can be predicted by using a simulator equipped with a small electric furnace and a specially designed device for specimen movement, large amount of raw materials and plenty of test time can be saved to produce test products of lightweight aggregates. In this study a simulator for the accurate prediction of the artificial lightweight aggregates produced by rotary kiln was assembled by our own design and the properties of lightweight aggregates produced by both the simulator and rotary kiln were compared to speculate its usefulness. The average diameter of aggregates was 8 mm and atmosphere in the furnace was controlled by the amount of carbon powders. Specific gravity, absorption rate (%), black-core area in the cross-sectional view of both aggregates were measured and compared. Unlike oxydizing atmosphere, both specific gravity and absorption rate of the aggregates sintered at reducing atmosphere were increased with increasing carbon addition. It is concluded that the sintering atmosphere was the closest to that of the rotary kiln when the carbon addition was 0.7 g to make a reducing atmosphere in the furnace and the porperties of both agreggates was also similar to each other.

Key words Rotary kiln, Lightweight aggregate, Simulator, Sintering atmosphere

로타리킬른 소성 골재 물성예측을 위한 전기로 실험

류유광, 김유택†

경기대학교 재료공학과, 수원, 442-760

(2008년 5월 19일 접수)
(2008년 6월 2일 심사완료)

요 약 소형 전기로 및 이동장치가 있는 시뮬레이터를 사용하여 로타리킬른에서 생산되는 인공경량골재의 물성을 예측할 수 있다면 대규모 로타리 킬른을 사용하여 인공경량골재 시제품 생산할 때 필요한 물자와 시간을 대폭 절감할 수 있다. 본 실험에서는 생산될 인공경량 골재의 물성을 정확히 예측할 수 있는 시뮬레이터를 제작하여 실제 로타리 킬른에서 생산된 골재의 물성과 비교함으로써 그 유용성을 검토하고자 하였다. 골재의 물성을 예측하기 위해서 8 mm 크기의 에코 인공경량 골재를 사용하였고 시뮬레이터의 분위기를 탄소를 이용해 조절하였다. 시뮬레이터와 로타리킬른에서 소성된 골재의 비중, 흡수율, 골재의 단면의 면적을 측정하고 비교하였다. 산화 분위기와 달리 환원분위기에서 소성된 시편은 탄소량이 증가할수록 비중이 증가하였으며 흡수율은 탄소 첨가량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 소성분위기는 환원 분위기 조성을 위해 탄소분말 0.7 g을 첨가 하였을 때 로라리 킬른과 가장 흡사한 분위기가 형성되는 것으로 판단되며, 두 골재의 물성 역시 비슷하였다.

1. 서 론

로타리 킬른이란 회전과 경사를 이용하여 원통형 반응기 내의 반응물이 고온에서 화학반응을 일으키면서 운반, 이송되는 장치이다[1]. 일반 적으로 산업적으로 대량의 물질을 소성 처리 시에 사용된다. 로타리 킬른을 사용하여 인공경량 골재를 제조하는 것은 일반적인 기술로서 시료의 조성 및 로타리 킬른의 운전 조건에 따라 제조된 골재의 물성이 많이 달라진다[1]. 그러나 골재의 물성을 시험하기 위해서 대형 로타리 킬른을 작동시키려면 많은 재료, 시간, 노력, 비용이 필요하다. 따라서, 소형 시뮬레이터(simulator)를 이용하여 최소한의 비용과 노력으로 로타리 킬른에서 제조될 수 있는 인공경량골재의 물성을 예측하는 것은 인공경량골재의

†Corresponding author
Tel: +82-31-249-9774
Fax: +82-31-244-6300
E-mail: ytkim@kgu.ac.kr

www.kci.go.kr

물성향상 및 특성 조절을 가능케 하는데 있어 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 튜브 전기로 및 시편이동장치를 갖춘 시뮬레이터를 이용하여 산업폐기물을 이용한 여러 가지 에코 인공경량골재를 제조하여 그 물성을 측정하고 측정된 물성이 과연 실제의 로타리 킬른에서 생산된 골재의 물성과 일치하는지 여부를 확인하여 시뮬레이터의 정확성 및 유용성을 판단하고자 하였다. 향후 대규모 로타리 킬른에서 인공경량골재 시제품을 생산하려고 할 때 본 연구에서 개발된 시뮬레이터와 실험조건을 적용하여 우리가 필요로 하는 물성을 가진 인공경량골재 시제품을 제조할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 대한 연구결과는 후속 논문에서 다룰 예정이다.

2. 원료 및 실험방법

2.1. 골재 재료

본 실험에 사용된 원료의 화학분석표는 Table 1과 같다. 적점토는 적벽돌 제조시 사용되는 적점토를 사용하였다. 석분 슬러지는 건축석재, 쇄석골재 등으로 가공하는 과정에서 발생하는 슬러지로 연간 약 300만톤의 석분 슬러지가 발생한다 석분 슬러지(stone sludge)는 Si와 Al을 주성분으로 하며 그 결정상은 장석류와 유사한 것으로 나타났다[2]. 폐백토(spent white clay)는 유류 흡착제로 사용 된 후 폐기된 것으로 벤토나이트에 기름성분이 첨가된 형태로 감열 감량이 4.4 %나 되는 특징이 있다[2].

Table 1
Composition of raw materials

Comp.	Clay	Spent White Clay (SWC)	Stone Sludge (SS)
SiO_2	64.8	41.9	66.7
Al_2O	17.7	5.4	14.9
Fe_2O_3	7.2	1.7	2.3
CaO	0.2	0.3	2.0
MgO	0.7	0.7	1.1
Na_2O	0.2	0.3	3.8
K_2O	1.8	0.6	5.2
TiO_2	1.0	0.7	0.3
P_2O_5	0.1	0.1	0.1
Ig-Loss	6.3	48.4	3.6

2.2. 골재 성형 및 소성

각 원료를 핀밀(pin mill)하여 24시간 동안 건조기에서 건조하였다. 건조된 각 원료를 점토 60 : 석분 30 : 폐백토 10의 무게비율로 습식 혼합 후 토련기를 통해 직경 8 mm의 구형으로 압출 성형하였다. 이후 건조기에서 110°C로 24시간 건조하였다. 골재의 소성은 도시가스를 원료로 하는 직화식 로타리 킬른을 이용하였다. 길이 4000 cm 내경 30 cm로 이루어진 로타리 킬른에 각 온도별로 성형체 10 *l*씩 투입하였다. 원료 투입간격은 3분당 2 *l*씩 투입하였다. 로타리 킬른의 기울기는 2.5° 회전 속도는 45 Hz로(RPM 5~6) 고정하였다. 이때 골재 채류시간은 12분 이었다. 온도는 경량골재를 제조하기 위한 최적의 내부가스 발생온도와 표면 액상 생성온도를 제어하기 위한 온도인 1150~1150°C 사이에서 25°C 간격으로 골재를 소성하였다. T1은 로타리 킬른의 버너 온도이며 T2는 골재 배출구의 온도 T3는 골재 투입구의 온도이다. 로타리 킬른을 이용한 골재 제조 조건은 Table 2에 나타내었다.

2.3. 시뮬레이터 제작

수퍼칸탈(super kanthal) 발열체를 사용하여 직경 20 mm×길이 1000 mm의 뮬라이트 튜브로를 제작하였다. 소성온도는 1000~1300°C까지 조절 가능하도록 제작하였으며, 30분~2시간/m의 속도로 이송 가능한 모터가 달린 자동 시편이송장치를 장착하여 골재의 로내 통과 시간을 조절하도록 하였다. 시뮬레이터의 설계도면(측면도)은 Fig. 1과 같다.

2.4. 골재 물성 측정

로타리 킬른의 소성 온도인 1150°C, 1175°C, 1200°C, 1225°C, 1250°C와 같은 조건에서 시뮬레이터 실험을 진

Table 2
Operation conditions of rotary kiln

Other conditions		Temperature conditions				Aggregate stay time
Angle of inclination (°)	Rotation speed (Hz)	Temp. setting (°C)	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	
2.5	45	1050	1156	1049	701	12 min
2.5	45	1075	1190	1073	698	12 min
2.5	45	1100	1234	1100	693	12 min
2.5	45	1125	1263	1125	675	12 min
2.5	45	1150	1287	1148	659	12 min

www.kci.go.kr

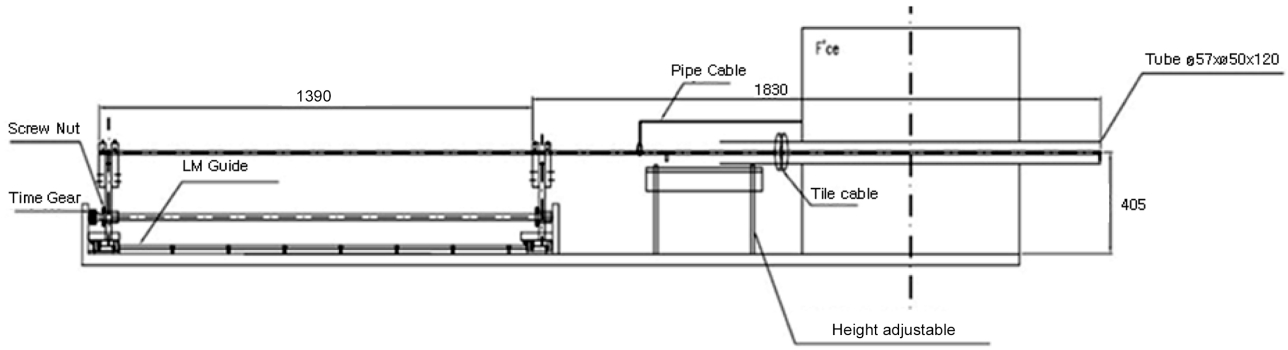

Fig. 1. Schematic diagram of the simulator.

행 하였다. 로타리 킬른이 작동할 때 일반적인 로내 분위기인 환원 분위기를 맞추기 위해서 미연탄소를 0.5, 0.7, 1.0 g을 시편홀더 내 시편의 위에 첨가 하였다. 시뮬레이터에서 골재의 이동속도는 우선 각 온도별로 로타리 킬른에서 골재를 투입한 온도 T3까지 시뮬레이터 최고 속도인 60 Hz로 이동 시킨 다음 로타리 킬른의 배출 온도인 T2까지 12분간 골재를 이동하여 소성시켰다. 이를 위해 시편 이동 속도를 18 Hz로 조절하였다. 이후 로타리 킬른과 시뮬레이터로 소성한 골재의 물성 차이를 알아보기 위해 KS F 2503(굵은 골재의 비중 및 흡수율 시험 방법)[7]에 따라 표건비중 및 흡수율을 측정하고, 분위기에 따른 표면과 단면의 형상변화를 캠스코프(Cam scope)로 관찰 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 비교 목표재료인 인공경량골재는 로타리 킬른 온도 1050, 1075, 1100, 1125, 1150°C에서 소성하였으며, 같은 온도에서 시뮬레이터를 이용해 비교할 골재 시험편을 소성하였다. 일반적으로 로타리 킬른을 사용하여 골재를 소성할 때 로내 분위기는 배출구 근처에서 환원분위기로 조성되기 때문에, 시뮬레이터에서 소성시에도 환원 분위기를 유지하기 위해 미연탄소를 0.5, 0.7, 1.0 g을 각각 시편 홀더내의 시편 위에 첨가하여 로타리 킬른 골재와 시뮬레이터 산화분위기에서 소성한 골재의 단면들을 비교하여 보았다. 또한 온도별 골재의 단면을 자른 후 블랙코어 면적을 관찰함으로써 로타리 킬른에서

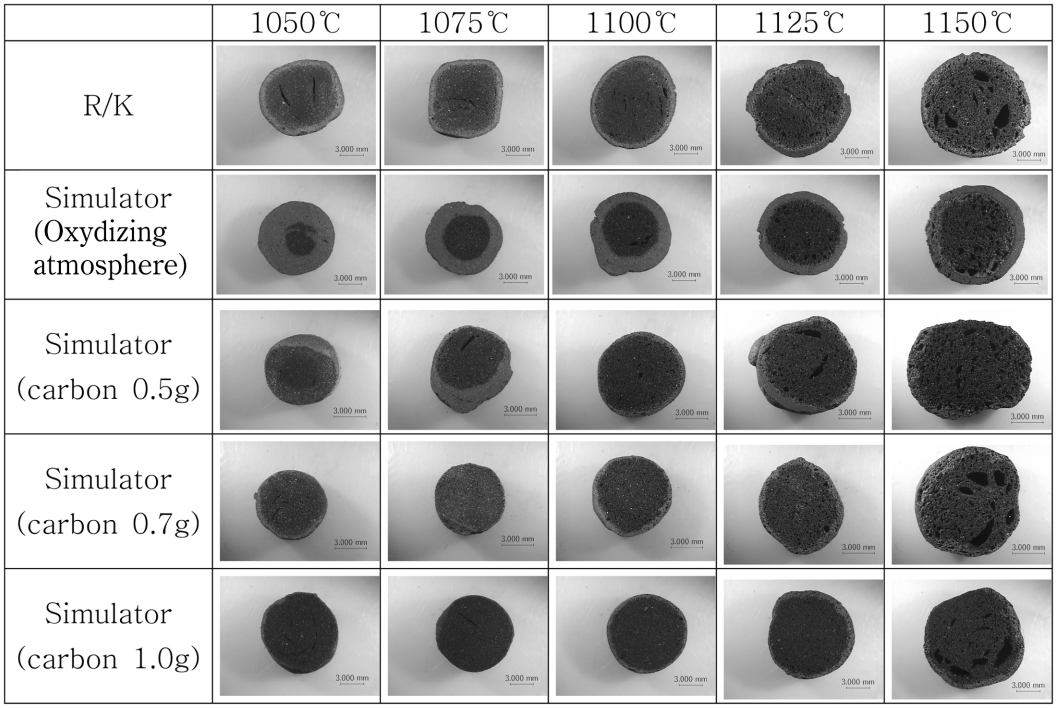

Fig. 2. Coss-sectional view of the aggregates sintered at rotary kiln and the simulator with various atmospheres (carbon contents) and sintering temperatures.

www.kci.go.kr

원 분위기의 골재는 내화 벽돌을 깍아 만든 boat에 6개의 골재를 넣고 골재 위에 탄소 양을 조절하여 첨가하였다. 이에 따른 골재의 단면을 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서처럼 산화 분위기의 골재는 골재 내부에 충분한 산소의 투입으로 인해 두꺼운 껍질(shell 층)을 갖게 된다. 이후 온도가 올라감에 따라 발포 현상으로 인해 많은 기공이 발생되며 부피가 커지게 된다[3, 6]. 반면 미연탄소로 환원분위기를 형성시킨 골재는 골재의 껍질이 산화되지 못하고 골재내부에서 금속원소의 환원 반응이 일어나게 된다[3, 6]. 결과적으로 단면을 비교하여 보면 로타리 킬른 소성 골재와 비슷한 블랙코어 형상을 보이는 골재 단면은 탄소 0.5 g과 0.7 g을 첨가한 시편인 것으로 판단되며, 0.7 g을 첨가한 시편이 보다 로타리 킬른에서 소성된 시편의 단면과 비슷하였다. 탄소 1.0 g을 첨가한 시편은 완전한 환원분위기에서 소성이 이루어져 골재 껍질층이 거의 형성되지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 3은 로타리 킬른에서 소성한 골재와 simulator를 이용해 산화분위기에서 소성한 골재의 비중, 흡수율을 비교한 그래프이다. 산화 분위기에서 소성한 골재는 로

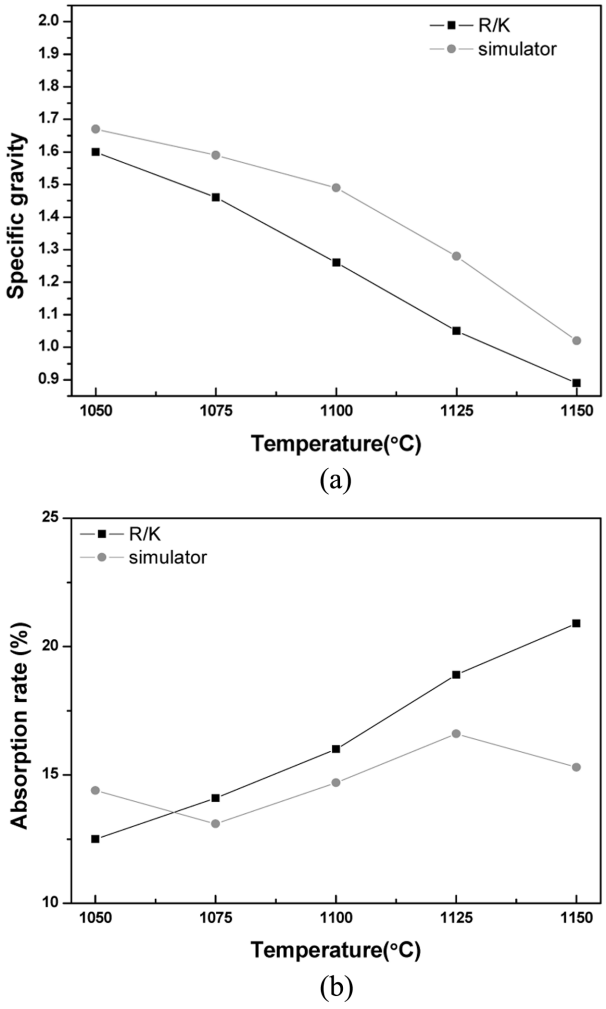

Fig. 3. Specific gravity and absorption rate of the aggregates sintered at rotary kiln and the simulator with oxidizing atmosphere. (a) Specific gravity and (b) Absorption rate.

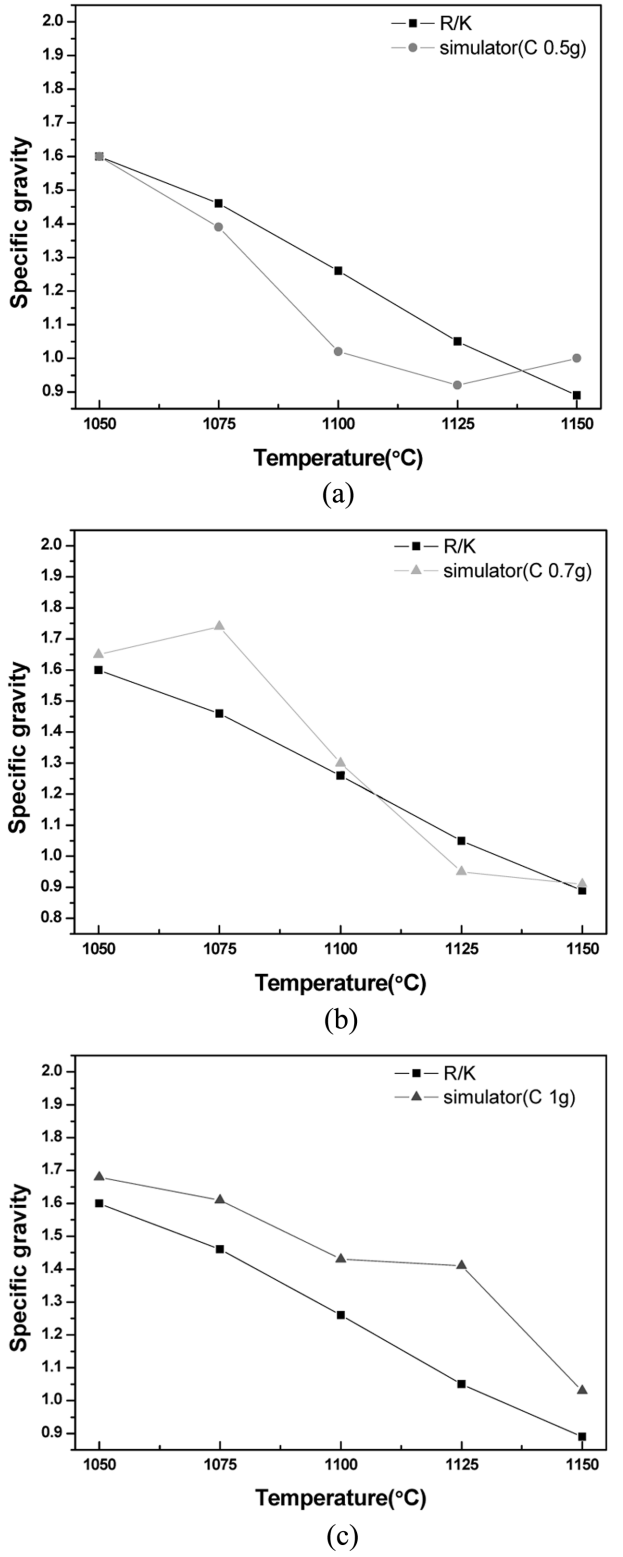

Fig. 4. The graphs of the specific gravity of the aggregates sintered at rotary kiln and the simulator with various atmospheres (carbon contents) and sintering temperatures. (a) Carbon 0.5 g, (b) Carbon 0.7 g, and (c) Carbon 1.0 g.

www.kci.go.kr

타리 킬른 골재에 비해 비중 0.1~0.25 정도 높음을 볼 수 있으며, 온도변화에 따른 비중의 변화는 비슷한 양상을 나타내었다. 시뮬레이터에서 소성된 골재의 흡수율은

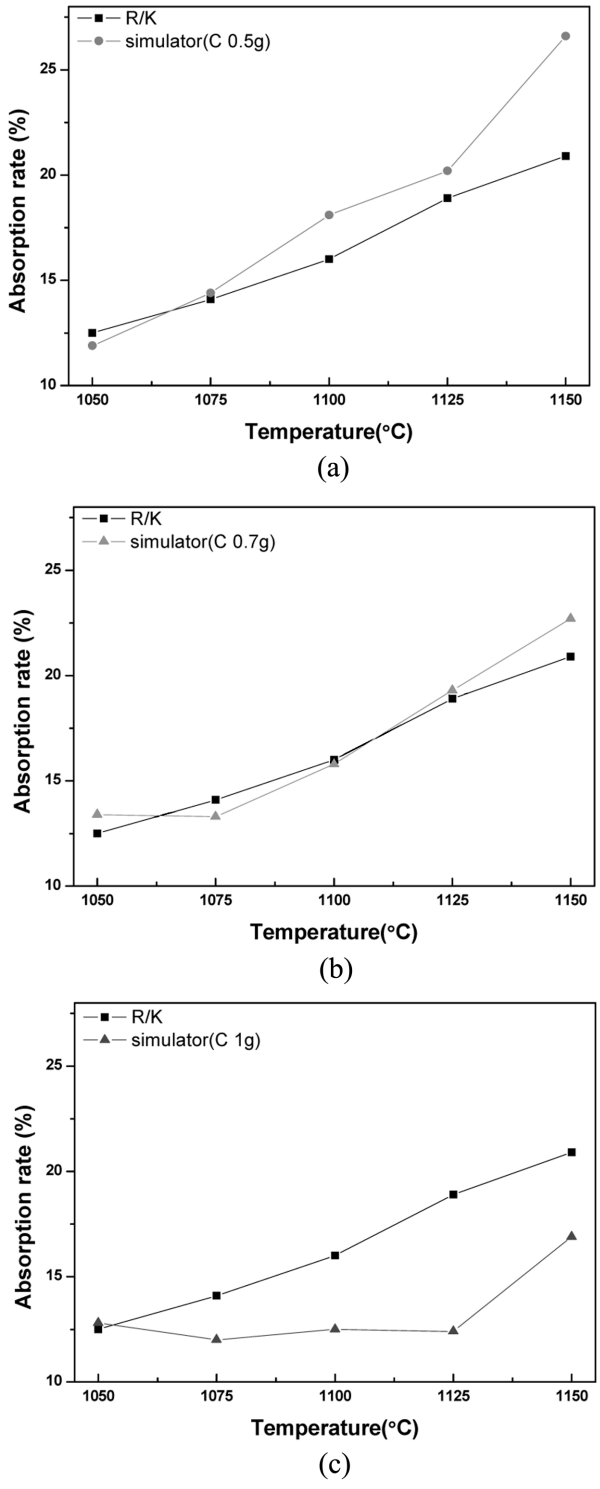

Fig. 5. The graphs of absorption rate of the aggregates sintered at rotary kiln and the simulator with various atmospheres (carbon contents) and sintering temperatures. (a) Carbon 0.5 g, (b) Carbon 0.7 g, and (c) Carbon 1.0 g.

로타리 킬른에서 소성된 골재와 비교하여 일반적으로 온도가 올라갈수록 감소하였고, 1150°C에서는 현저한 감소가 일어나는 것을 알 수 있었다. 따라서 산화분위기에서 소성된 골재는 로타리킬른 골재의 물성과는 상당한 차이를 보임을 알 수 있었다.

Fig. 4은 시뮬레이터 골재에 첨가한 탄소의양에 따른 비중을 로타리 킬른 골재와 비교한 것 이다. 그림에서 보듯이 탄소 첨가량이 늘어날수록 비중은 증가함을 볼 수 있다. 이중 Fig. 4(b)에서 즉 탄소를 0.7 g 첨가한 골재가 로타리 킬른 소성골재와 가장 비슷한 비중을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 온도 변화에 따른 비중의 감소 경향도 세가지 경우 모두 흡사하였다. 특히 탄소를 0.7 g 첨가한 시편의 경우 1100, 1125, 1150°C에서는 로타리 킬른 골재의 비중과 거의 같은 값은 같는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에서는 시뮬레이터 골재에 첨가한 탄소의 양에 따른 흡수율을 로타리 킬른 골재의 흡수율과 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 탄소 첨가량이 늘어날수록 흡수율은 감소하는 경향을 보였다. 온도 증가에 따라 흡수율은 증가하는 경향을 보였다. 비중과 마찬가지로 Fig. 5(b)에서 보듯이 탄소를 0.7 g 첨가하여 소성한 골재의 흡수율이 로타리 킬른에서 소성된 골재의 흡수율과 가장 비슷한 값을 나타내고 있다. Fig. 5(c)에서 보듯이 탄소 1 g이 첨가되어 완전한 산화분위기를 형성한 시편의 경우 로타리 킬른에서 소성된 시편의 흡수율과는 상당한 값의 차이를 보일뿐 아니라, 온도별 흡수율 변화 경향도 같지 않음을 알수 있다. 따라서 로타리 킬른에서 골재가 소성될 때 완전한 산화 분위기도 완전한 환원 분위기도 아닌 산화와 환원 중간분위기이지만, 환원분위기에 가까운 분위기로 소성됨을 예측할 수 있다. 결론적으로 탄소 첨가량이 0.7 g일때 로타리 킬른 내부와 가장 비슷한 분위기를 연출할 수 있는 것으로 사료된다. 로타리 킬른 소성체와 시뮬레이에서 0.7 g의 미연탄소를 이용해 환원 분위기를 연출한 소성체의 물성을 Table 3에서 비교 하였다. 표에서 알수 있듯이 비중과 흡수율 모두 두 시편이 비슷한 값을 보이는 것을 알 수 있다.

Table 3
Comparision of the specific gravity and absorption rate of the lightweight aggregates from the simulator with 0.7 g carbon content and rotary kiln

	Specific gravity		Absorption rate(%)	
	Rotary kiln	Simulator	Rotary kiln	Simulator
1050°C	1.6	1.65	12.5	13.4
1075°C	1.46	1.74	14.1	13.3
1100°C	1.26	1.3	16	15.8
1125°C	1.05	<1	18.9	19.3
1150°C	<1	<1	20.9	22.7

www.kci.go.kr

4. 결 론

1) 산화 분위기에서 소성된 골재는 로타리 킬른 소성 골재에 비해 비중은 높고 흡수율은 1075~1125°C에서 낮은 경향성을 보인다. 로타리 킬른 소성골재에 비해 골재의 껍질부분 두껍고 뚜렷한 경계가 보임을 알 수 있다. 로타리 킬른에서 골재는 환원분위기 아래에서 소성되었기 때문에 골재 단면전체에 블랙코어가 형성된 것으로 사료되며, 시뮬레이터 골재에 0.7 g의 탄소를 첨가한 경우 골재 단면이 로타리 킬른의 단면과 가장 유사하였다.

2) 환원분위기 조성을 위해 탄소를 골재 위에 첨가 하였을 경우 골재는 외부에서의 산소 공급을 원활히 받지 못하여 골재 내부에 환원분위기가 조성되어져 골재 내부에 존재하는 산화철을 포함한 각종 산화물이 소성 중 환원되어 그 결과 골재 단면에 블랙코어가 형성된 것으로 판단되며[3, 5], 블랙코어의 면적은 환원분위기의 정도에 따라 그 크기가 변화된 것으로 판단되었다.

3) 시뮬레이터 골재의 경우 탄소를 0.7 g 첨가 하였을 경우 단면의 형태뿐만 아니라, 비중과 흡수율 역시 로타리 킬른에서 소성된 골재의 물성과 매우 유사한 값을 보였다. 따라서 향후 로타리 킬른 골재의 물성예측을 위한 실험시 본 연구에서 개발된 시뮬레이터의 작동 조건과 탄소 함유량을 적용시킨다면 성공적인 물성예측이 가능할 것으로 예상된다.

4) 본 연구에 의해 개발된 시뮬레이터를 이용함으로써 시제품 제작시 로타리 킬른을 작동함으로써 발생되는 원료 및 연료의 막대한 비용을 절감할 수 있고 시간을 절약할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 연구자의 의도대로 시뮬레이터에서 조성 및 소성조건을 변화시켜 시험함으로써 실제 로타리 킬른에서 생산될 시제품의 물성을 쉽게 예측할 수 있기 때문에 궁극적으로 연구자가 목표로 하는 인공경량골재의 물성을 보다 용이하게 조절할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 경기대학교 산학협력단의 연구비 지원에 의한 결과물임.

참 고 문 헌

[1] C.S. Yi and B.S. Kim, “A computer simulation of transport phenomena in a roller kiln”, Journal of RIEET 5 (1999) 133.
[2] Y.M. Wie and K.G. Lee, “Correlation to the physical prorerties of green and sintered body of artificial lightweight aggregate with the pelletizing variables”, Jounal of the Korean Ceramic Society 44 (2007) 568.
[3] J.U. Park and Y.T. Kilm, “Microstructural observation of article aggregaters at various sintrring atmospheres”, J. Kor. Crystal Growth and Crystal Technology 16 (2006) 71.
[4] J. Pacini, “Bloating and black coring”, Laguna Clay Co, January (1999).
[5] Y.J. Joo and M.S. Oh, “Unbunt carbon combustion in the production of light weight sintered fly ash”, Proceeding of KSEE Conference (2002) 91.
[6] F. Negre, A. Barba, J.L. Amoros and A. Escarkino, “Oxidation of black core during the firing of ceramic ware-2. process kinetics”, Br. Ceram. Trans. J. 91 (1992) 5.
[7] KS F 2503 Absorption Rate and Density Test Method for Fine Aggregates.

www.kci.go.kr