

고강도 콘크리트 혼화재로서 국산 왕겨재의 활용 가능성: 소성 온도와 분쇄공정 유무에 따른 입도, 성분 및 흡습 성능

권양희, 홍성걸*
서울대학교 건축학과

Feasibility of Korean Rice Husk Ash as Admixture for High Strength Concrete: Particle Size Distribution, Chemical Composition and Absorption Capacity Depending on Calcination Temperature and Milling Process

Yang-Hee Kwon, Sung-Gul Hong*

Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

요약 이 연구는 제조 공정에 따른 국산 왕겨재의 재료특성 변화를 조사하는 것과 고강도 콘크리트 혼화재로서의 활용 가능성을 검토하는 것을 목적으로 수행되었다. 이를 위해 왕겨재의 소성온도 (400 °C, 650 °C 그리고 900 °C) 및 분쇄 여부를 주요 변수로 두고 그것의 입도 분포, 구성 성분, 그리고 미세구조가 분석되었다. X-ray fluorescence (XRF)를 이용한 성분 분석 결과, 650 °C 이상의 고온소성 공정을 거칠 경우, 왕겨재의 산화규소(SiO₂) 함량이 92% 이상으로 향상되는 것을 확인하였다. 또한, 주사 현미경 촬영을 통해 650 °C 에서 소성된 왕겨가 다공성 구조인 것을 확인하였으며, 이 공정이 적용된 시편의 흡습능력이 모든 시편들 중 가장 우수하였다. 분쇄 공정 적용시 공극구조가 파괴되기 때문에 흡습능력은 더 감소하는 경향을 보였다. 반면, 900 °C 에서 소성된 시편은 공극구조가 발견되지 않았고, 흡수율 역시 가장 낮게 나타났다. 분석결과를 근거로, 650 °C 에서 소성된 왕겨재는 포졸란 반응 활성화제 뿐만 아니라 흡습성능에 의한 자기수축 저감제로서 고강도 콘크리트를 위한 혼화재로서 적합한 것으로 결론 내려진다.

Abstract This study examined the material properties of Korean rice husk ash (RHA) according to the manufacturing process, and evaluated the feasibility of its use as a new admixture for high strength concrete. For this purpose, its particle size distribution, chemical composition, and microstructure were analyzed under various parameters, such as calcination temperature (400 °C, 650 °C, and 900 °C) and the inclusion of a milling process. X-ray fluorescence analysis confirmed that the silicon oxide (SiO₂) content of RHA was improved to more than 92% with a calcination process at 650 °C or higher. In addition, microstructural analysis showed that the RHA calcined at 650 °C has a porous structure. Because of this, the absorption capacity of the RHA was improved. On the other hand, when the milling process was applied, the porous structure was destroyed; thus, the absorption capacity tended to decrease further. Based on the analysis results, it was concluded that RHA calcined at 650 °C can be used as an admixture for high strength concrete, which possesses functions of both a shrinkage reducing agent and a pozzolanic activator.

Keywords : Absorbent Capacity, Calcination Temperature, Chemical Component, High Strength Concrete, Milling Process, Particle Size Distribution, Rice Husk Ash (RHA)

본 연구는 서울대학교 공학연구원으로부터 실험장비 및 장소를 제공받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Sung-Gul Hong(Seoul National Univ.)

Tel: +82-2-880-8360 email: sglhong@snu.ac.kr

Received March 9, 2017

Revised March 15, 2017

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

1. 서론

왕겨는 동남아시아는 물론 한국의 주요 식재료인 쌀의 부산물이다. 국내에서 왕겨는 현재 월동작물 보호재, 축산시설의 바닥용 깔개 및 퇴비로 사용되고 있으며, 사용 후 전량 폐기되어 왔다[1]. 그러나 이러한 농업부산물은 쌀을 생산하는 국가에서 쉽게 활용 할 수 있는 자원이 될 수 있다. 특히, 1인당 쌀 소비량 감소로 인해 벼농사의 이익창출이 점점 어려워지고 있는 현 시점에서, 이러한 부산물의 활용범위를 건설재료까지 확대한다면 국내 농가의 부가가치 창출은 물론이고, 저렴한 건설 혼화재 공급으로 인한 건설 산업 경쟁력 제고에도 기여할 수 있다.

왕겨의 75%를 유기물로 보고 있지만, 나머지 25%의 무기물들 덕분에 적합한 소성과정을 거치면 다량의 비정질 실리카 성분으로 변화된다고 알려지고 있다[2]. 콘크리트와 같은 시멘트기반 건설재료에 있어, 비정질 실리카는 결정질 실리카와 달리, 수분의 존재 하에서 1차 수화 생성물인 수산화 칼슘과 함께 반응하는, 포졸란 반응성이 매우 높으며[3-5], 이는 시멘트 수화생성물(C-S-H gel)을 추가로 형성시켜 장기적으로 강도 및 내구성 증진에 기여한다[6]. 기존 연구들에 의하면, 500-700 °C에서 소성된 왕겨재는 비정질 실리카를, 900 °C에서 소성된 왕겨재는 결정질 실리카를 주로 포함하고 있는 것으로 확인되고 있다[7-8].

시멘트 기반 건설재료에 있어 비정질 실리카의 대표적인 사용사례는 실리카 폼이며, 이는 고강도 콘크리트 제조를 위한 필수 혼화재 중 하나이다. 실리카 폼은 90% 이상이 비정질 실리카로 구성되어 있고 매우 작은 입도 범위(0.1-1 μm)를 가지고 있다. 이 때문에 포졸란 반응 촉진제뿐만 아니라, 충전재의 역할도 수행한다[9]. 그러나, 실리카 폼은 매우 고가의 재료이며(보통 포틀랜드 시멘트 가격의 10배 내외), 국내에서는 거의 전량 수입에 의존하고 있다. 왕겨재가 적합한 조건에서 소성 될 경우 SiO_2 함량이 실리카 폼의 그것과 유사한 것으로 보고되고 있다[10]. 이 때문에 새로운 친환경 건설재료로 활용하거나 실리카 폼 대체재로서의 가능성을 확인하기 위한 연구가 활발하게 수행되고 있다[2, 11-12]. 그러나 현재 국내에서 그것의 활용 또는 제품화를 위한 노력은 찾아보기 어렵다.

또한, 고강도 콘크리트 자체의 낮은 물-결합재 비와

더불어 실리카 폼에 의한 강력한 포졸란 반응은 과도한 자기수축과 같은 새로운 문제점을 유발한다. 이러한 자기수축 문제를 해결하기 위해 현재는 추가적인 화학 혼화재(수축저감제, 팽창재 등)가 첨가되고 있다. 그러나, 실리카 폼과 다르게 왕겨재는 다공질 구조를 가질 수 있으며, 이 때문에 흡습 능력 역시 견비할 수 있다[13]. 자기수축은 콘크리트 내부의 습도감소로 정의되는 자기 건조와 직접적인 관련이 있다[14]. 기존 연구에 의하면, 평균입자 크기가 5.6 μm 인 왕겨재의 흡습 능력은 고강도 콘크리트 자기수축 저감에 효과가 있는 것으로 보고되고 있다[15].

비록 적정 온도에서 소성되어 왕겨재가 대부분 비정질 SiO_2 성분으로 구성 될 경우에도, 실리카 폼의 사례와 같이, 강력한 포졸란 재료가 낮은 물-결합재 비를 갖는 콘크리트 내부에서 완전히 포졸란 반응에 참여하는 것은 거의 불가능하다[9]. 다시 말해, 상당부분의 비정질 SiO_2 입자들은 단순히 물리적 충전재로서의 역할을 수행하며 이 또한 강도 및 내구성 향상에 크게 기여한다[9]. 따라서 충전재로서의 역할을 위한 적정 입도 역시 고강도 콘크리트의 강도 및 내구성 확보를 위한 주요한 요인 중 하나이다. 기존연구들은 고강도 콘크리트의 충전효과 뿐만 아니라 포졸란 반응의 활성화를 위해, 혼화재의 적정 입자크기를 평균 10 μm 이하로 보고하고 있다[16].

왕겨재를 이용하여, 고순도 비정질 SiO_2 로 구성 되고 다공성 구조를 가지며, 충전재를 위한 적정 입도까지 동시에 만족시키는 고강도 콘크리트용 혼화재를 제조하기 위해서는 소성 및 분쇄 과정이 반드시 필요하다. 그러나, 현재까지 이러한 추가공정에 따른 왕겨재의 입도 및 흡습 능력에 관한 연구는 수행되지 않고 있다. 이러한 배경에서, 이 연구는 제조공정에 따른 왕겨재의 재료특성 변화를 조사하는 것과 고강도 콘크리트 혼화재로서의 활용 가능성을 검토하는 것을 목적으로 수행되었다. 이를 위해 국산 왕겨재를 이용하여 소성 온도 및 분쇄 여부를 주요 변수로 두고 입도, 성분 및 이미지 분석을 수행하였고, 그 결과를 고찰하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 실험변수

이 연구에서 사용된 왕겨재 시편들을 Fig. 1에 모두

나타냈다. 우선, 사용된 왕겨재 제품은 순천에 위치한 농협 미곡처리장에서 도정된 부산물인 왕겨를 국내 P사에서 400 °C 에서 소성시킨 것으로서(Fig. 1 (a)), 토양개량 및 건축단열재로 활용하기 위해 원래의 형상을 유지하는 조건하에서 탄화된 것이다. 국내 지역별(경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남), 품종별(5종) 왕겨 및 왕겨재의 화학적 조성은 크게 차이가 나지 않는다는 기존 연구결과를 근거로[8], 실험의 효율성을 고려하여 왕겨재는 한 종류만 선택되었다.

준비된 왕겨재는 평균 입도 10 μm 이하를 만족시키기 위해 다시 분쇄 공정을 거쳤다(Fig. 1 (d)). 소성 온도에 따른 재료 특성을 조사하기 위해, 분쇄 공정을 거친 것과 그렇지 않은 것 모두 최고온도 각각 650 °C(Fig. 1 (b) and (e))와 900 °C(Fig. 1 (c) and (f))에서 2시간 동안 추가로 소성되었다. 예비실험을 통해, 600 °C 이상의 소성을 거치게 되면 왕겨재의 밀도가 급격히 감소하기 때문에, 분쇄가 매우 어렵고 비효율적이 되는 것을 확인하였다. 따라서 600 °C 이상 온도에서의 추가소성은 분쇄 공정 이후에 수행되었다. Table 1은 이렇게 결정된 6 종류의 샘플 정보를 정리한 것으로, 샘플들의 이름은 소성온도(400 °C, 650 °C 그리고 900 °C)와 분쇄(G)를 포함한 것과 그렇지 않은 것으로 나타내었다.

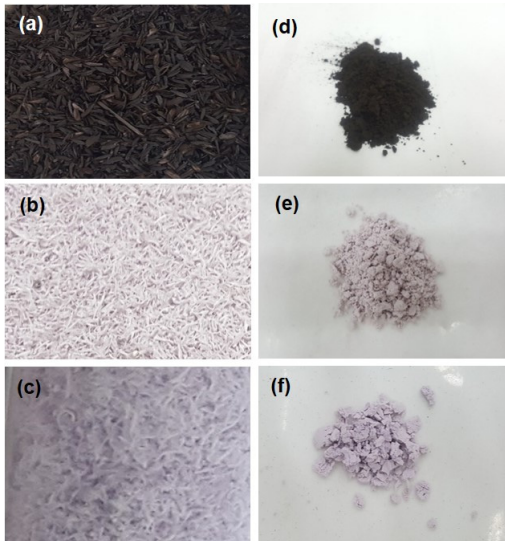


Fig. 1. Rice husk ash (RHA) used (a) RHA400 (b) RHA650 (c) RHA900 (d) RHA400_G (e) RHA650_G (f) RHA900_G

Table 1. Specimen information

Specimen name	Calcination temperature (°C)	Milling process
RHA400	400	No
RHA650	650	
RHA900	900	
RHA400_G	400	Yes
RHA650_G	650	
RHA900_G	900	

2.2 실험 방법

분쇄된 샘플들을 이용하여, 소성 온도에 따른 왕겨재의 성분 변화를 확인하기 위해 X선 형광분석(XRF)을 수행하였다. 또한, 입도분포 변화를 확인하기 위해 레이저 회절법을 이용한 입도분석을 진행하였다. 미세 구조 관찰을 위해 주사 현미경(SEM)을 이용한 이미지 촬영도 진행되었다. 이를 위해 6종의 샘플들을 탄소 테이프를 이용하여 홀더 위에 얇게 펴 바른 뒤 샘플들의 표면을 다시 탄소로 코팅하였다.

왕겨재의 흡습 능력을 측정하기 위한 실험을 수행하였다. 모르타르, 암석, 자갈 등을 대상으로 하고 있는 현행 건설재료의 흡수력 측정방법[17]은 이 연구에는 적합하지 않는 것으로 판단하였다. 이유는 분쇄 및 소성과 관계없이 왕겨재는 물과 섞이면 표면에 떠오르기 때문에 정확한 측정이 이루어질 수 없기 때문이다. 따라서 0.3 g의 샘플이 담긴 페트리디쉬를 습윤 상태인 항온-항습기(온도 20 °C, 습도 100%)에 넣은 뒤 10분, 30분, 1시간, 3시간, 6시간, 12시간 그리고 30시간째 질량을 측정하여 시간에 따른 흡습율의 변화를 산정하였다. 이러한 시간대의 결정에 있어 고강도 콘크리트에서 자기건조가 급격히 발생하는 초기 재령일이 고려되었다. 흡습율은 건조 상태인 샘플의 단위 중량대비 수분흡수로 인해 증가된 중량비로 정의되며, 단위는 % 이다. 결과 값은 3개 시료의 평균값으로 결정되었다.

3. 결과 및 토의

3.1 구성 성분

XRF 분석에 의한 각 재료의 화학적 구성 성분을 Table 2에 나타내었다. 강열감량(LOI)을 포함할 경우 구성 성분은 소성 온도에 따라 바뀌는 것으로 나타났다.

RHA400의 경우, SiO₂ 는 불과 23.8%만이 포함되어 있으며 대부분(약 75%)은 강열감광으로 손실되는 유기물로 확인되었다. 반면, RHA650과 RHA900은 SiO₂ 성분이 대부분을(각각 92.0%, 94.2%) 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 왕겨를 500 °C 이상의 고온에서 소성시켜야 고순도 SiO₂ 를 포함하는 왕겨재를 얻을 수 있다는 기존의 연구 결과와도 일치한다[18]. 그러나, 650 °C 에서 온도를 더 올려 900 °C 에서 소성시키는 것은 콘크리트 혼화재 제조를 위한 목적에는 비효율적인 것으로 확인된다. 그 이유는 추가적인 노력과 에너지 소비에도 불구하고 SiO₂ 성분 함량은 불과 2% 증가에 그치고 있고, 700 °C 보다 더 높은 온도에서 소성될 경우 비정질 SiO₂ 가 결정질로 전환되어 포졸란 반응성을 오히려 더 감소시킬 수 있기 때문이다.

한편, Table 3과 같이 LOI에 의해 제거된 유기물(또는 불순물)들을 포함하지 않으면, 400-900 °C의 소성온도 범위 내에서는 온도와 관계없이 주요 성분이 SiO₂ 인 것으로 확인된다. RHA400과 RHA650을 비교해 보면, 구성 성분들의 비율이 놀라울 정도로 동일하며 측정 오차범위를 고려할 경우 동일한 결과로 보아도 무방할 정도이다. 이와 같은 결과는 혼화재용 왕겨재의 불순물 제거를 위해서는 반드시 600 °C 이상에서의 소성과정 필요하다는 것을 보여준다. 그러나, 왕겨재가 700 °C 보다 더 높은 고온에서 소성되면, α-크리스토파라이트(cristobalite), α-석영(quartz) 및 α-트리디마이트(tridymite)와 같은 결정질들이 추가로 형성되는 것으로 보고되고 있다[5, 19]. 따라서 포졸란 반응성과 경제적인 측면 모두를 고려할 때, 고강도 콘크리트의 혼화재로 적합한 소성온도는 650 °C 가 바람직하다.

Table 2. Chemical composition of RHA with LOI* (wt.%)

Chemical component	Specimen name		
	RHA400	RHA650	RHA900
SiO ₂	23.81	92.00	94.16
Al ₂ O ₃	0.09	0.31	0.10
Fe ₂ O ₃	0.12	0.38	0.42
MgO	0.13	0.47	0.32
CaO	0.26	0.97	0.98
Na ₂ O	0.07	0.20	0.46
K ₂ O	1.02	3.87	2.17
MnO	0.07	0.28	0.32
P ₂ O ₅	0.20	0.75	0.63
LOI*	74.33	0.76	0.31

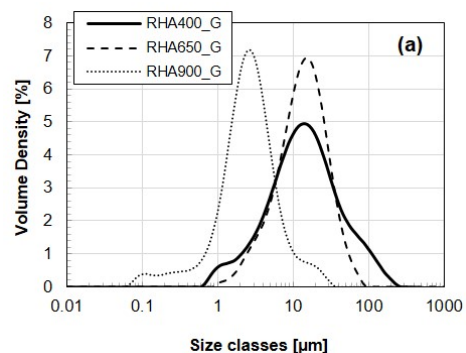
*LOI: Loss on ignition

Table 3. Chemical composition of RHA without LOI* (wt.%)

Chemical component	Specimen name		
	RHA400	RHA650	RHA900
SiO ₂	92.39	92.71	94.58
Al ₂ O ₃	0.35	0.31	0.10
Fe ₂ O ₃	0.47	0.38	0.42
MgO	0.50	0.47	0.32
CaO	1.01	0.98	0.98
Na ₂ O	0.27	0.20	0.46
K ₂ O	3.96	3.90	2.18
MnO	0.27	0.28	0.32
P ₂ O ₅	0.78	0.76	0.63

3.2 입도분포

분쇄된 왕겨재의 소성 온도에 따른 입도분포는 Fig. 2에서 확인 할 수 있다. 입도범위에 있어, RHA400과 RHA650은 주목할 만한 차이가 없다. 즉, 불순물 제거에도 불구하고 입도 분포는 유지된다. 그러나 RHA900은 다른 두 시편대비 입자들의 크기가 전체적으로 더 작아진다. 다시 말해, 650 °C 소성시 10-20 μm 사이에서 형성되었던 피크가, 그것의 크기 및 형상을 유지한 채로 900 °C 소성시 2-3 μm 사이로 이동하였다. 이와 같은 입자들의 체적감소는 900 °C 와 같은 고온에서 진행되는 결정화[8]와 관련이 있을 가능성이 높다. 즉, 비정질 SiO₂ 가 결정질로 전환되는 과정에서의 체적변화가 이러한 입도분포의 변화를 유도한 것으로 추정된다. 이와 같이 소성온도가 추가로 증가함에 따라 입자크기가 더 감소한 이 연구의 결과는, 왕겨재를 이용하여 입도가 매우 작은 결정질 고순도 SiO₂ 분말을 제조하는데 활용 될 수 있다. 즉, 분쇄를 통해 제조 될 수 있는 최소입자 크기에서 추가 소성에 의해 더 작은 입도를 갖는 SiO₂ 분말 제조가 가능하다.



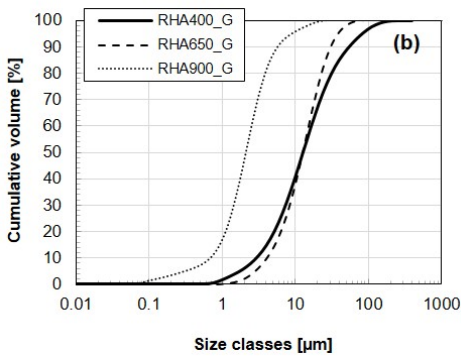


Fig. 2. Particles size distribution of used RHAs (a) Volume density (b) Cumulative volume

3.3 미세구조 분석

샘플들의 SEM촬영 결과를 Fig. 3에 나타냈다. RHA400(Fig. 3 (a))은 외부 표피의 돌기가 관찰되는 등 원재료 모양을 그대로 유지하였으며, RHA400_G(Fig. 3 (d))의 경우 분쇄공정을 거쳤기 때문에 돌기가 뚜렷이 확인되지 않았지만, 주목할 만한 점을 보이지 않았다. Fig. 3 (a)에서 확인되는 왕겨 외부 표피의 돌기 부분에 SiO₂ 성분이 집중되어 있는 것으로 보고되고 있다[5, 20]. 이를 기반으로 600 °C 이상의 온도에서 제거되는 유기물들은 주로 왕겨의 외측 표면 보다는 내측 표면에

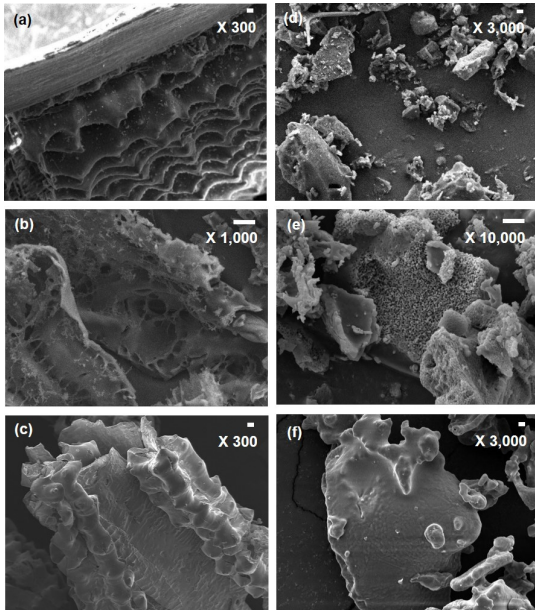


Fig. 3. SEM images of RHA samples (a) RHA400 (b) RHA650 (c) RHA900 (d) RHA400_G (e) RHA650 G (f) RHA900 G

위치한다는 것이 유도된다.

한편, RHA650에는 다공성 구조가 확인 된다(Fig. 3 (b)). 그러나 이러한 다공성 구조들은 분쇄 후 소성공정을 거칠 경우 더 줄어드는 것도 역시 확인된다(Fig. 3 (e)). 반면, RHA900과 RHA900_G에서는 공극 구조가 전혀 발견되지 않는다. 이는 아마도 고온(900 °C)에서의 결정화 및 체적변화로 인해 공극구조가 사라졌기 때문인 것으로 추정된다.

3.4 습윤 상태에서 중량 변화

왕겨재의 시간에 따른 흡습율의 측정 결과를 Fig. 4에 평균과 표준편차로 나타냈다. 소성온도와 분쇄여부와 관계없이 모든 시편들은 측정 시작 12시간 만에 수렴하는 경향을 보였다. 우선 소성온도에 관하여, 650 °C 에서 소성된 시편의 흡습율이 가장 높고, 900 °C 에서 소성된 시편이 가장 낮은 것으로 평가되었다. 이는 3.3장에서 확인되었던 다공성 구조의 형성과 일치하는 결과이다. 이러한 결과들을 정리하면, 400 °C 에서 650 °C 로 소성온도의 증가는 다공성 구조를 형성시켜 흡습 성능을 더욱 증가시킨다. 반면, 900 °C 에서 소성시킬 경우 다공성 구조를 사라지게 만들어 오히려 흡습 성능이 감소 된다.

분쇄 과정을 거치게 되면 왕겨재의 비표면적(단위 중량의 분체에 포함된 입자들의 표면적 총합)이 크게 증가한다. 그러나, 흡습 성능은 변함없거나 오히려 더 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 분쇄 과정이 왕겨 입자들의 공극 구조를 변화시키고, 결국 큰 공극들이 형성될 수 있는 환경을 더욱 불리하게 만들기 때문이다[21].

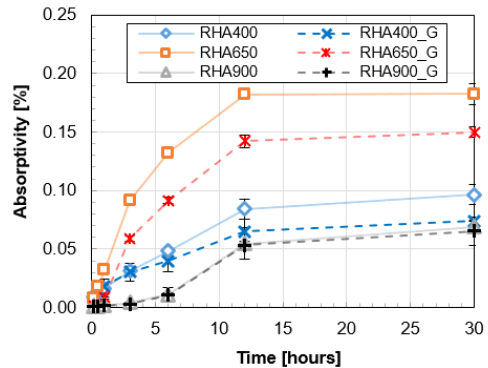


Fig. 4. Absorption capacity of RHA under saturated condition (20 °C, RH 100%)

4. 결론

고강도 콘크리트의 혼화제로 활용하기 위한 기초 연구로서, 소성 온도 및 분쇄 유무에 따른 왕겨재의 재료 특성을 실험 및 분석하였다. 이러한 연구의 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 1) 구성성분 분석 결과, 왕겨재를 650 °C 에서 소성할 경우 고순도 SiO₂ 를 가지는 혼화재를 얻을 수 있었다. 이는 400-650 °C 사이에서 불순물들이 제거 되기 때문이다. 그러나, 더 높은 900 °C 에서 소성하는 것은 순도를 더 높이는 데 효율적이지 못하였다.
- 2) 분쇄된 왕겨재들의 입도분석을 수행하였으며, 400-650 °C 의 온도범위에서는 입도분포에 주목할 만한 변화가 없었다. 그러나, 결정화가 진행되는 650-900 °C 구간에서는 입자들의 체적이 전체적으로 줄어드는 것으로 확인되었다.
- 3) 주사 현미경을 이용한 이미지 분석 결과, 650 °C 에서 소성된 샘플에 다공성 구조가 확인되었다. 이러한 다공성 구조는 분쇄 과정에 의해 사라지는 경향을 보였다. 그러나 900 °C 에서 소성될 경우 다공성 구조는 전혀 발견되지 않았다.
- 4) 흡습율을 측정 한 결과, 분쇄 여부와 관계없이 650°C 에서 소성된 시편의 흡습 능력이 가장 우수하였고, 900°C 에서 소성된 시편의 그것이 가장 낮았다. 이러한 결과는 이미지 분석에서 확인된 다공성 구조와도 일치하였다. 한편 분쇄 과정 포함 시 흡습 성능이 감소하는 것으로 나타났다.

연구의 결과를 종합하면, 왕겨를 고강도 콘크리트용 혼화제로 사용되기 위해 필요한 추가공정은 평균입도 10 μm 이하로 분쇄 후 최고온도 650°C 에서 소성하는 것으로 결론 내려진다. 이러한 소성온도 조건에서는 추가적인 입도분포의 변화 없이 불순물들이 제거될 수 있기 때문에, 순도 92%의 비정형 SiO₂ 를 확보할 수 있다. 이 뿐만이 아니라, 추가적으로 형성된 다공성 구조 덕분에 흡습 능력 역시 견비 한다. 이러한 추가공정이 적용된 왕겨재의 재료특성들은 고강도 콘크리트의 혼화제를 위한 두 가지의 핵심 성능(포졸란 반응성의 활성화, 흡습 성능에 의한 자기수축 저감효과)에 있어 충분히 긍정적이라는 것을 보여주었다.

References

- [1] Korea Rural Community Corporation, "Studies on Utilizing Rice Husk as an Admixture of Concrete", Final Report, Republic of Korea, 1997.
- [2] V. Saraswathy, S.-J. Kwon, "Durability Performance Evaluation on Early-Aged Concrete with Rice Husk Ash and Silica Fume", Journal of the Korea Concrete Institute Vol. 27, pp. 343-351, Aug. 2015. DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.4.343>
- [3] T.-Y. Chang, "Fundamental Properties of Rice Husk Ash Incorporated Concrete", Master Thesis, Kangwon National University, Republic of Korea, Feb. 2009.
- [4] A. Najigivi, S. A. Rashid, F. N. A. Aziz, M. A. M. Salleh, "Water Absorption Control of Ternary Blended Concrete with Nano-SiO₂ in Presence of Rice Husk Ash. Materials and Structures Vol. 45, pp. 1007-1017, Mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9813-y>
- [5] S. Chandrasekhar, K. Satyanarayana, P. Pramada, P. Raghavan, T. Gupta, "Review Processing, Properties and Applications of Reactive Silica from Rice Husk-An Overview", Journal of Materials Science, Vol. 38, pp. 3159-3168, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1025157114800>
- [6] Q. Yu, K. Sawayama, S. Sugita, M. Shoya, Y. Isojima, "The Reaction between Rice Husk Ash and Ca (OH)₂ Solution and the Nature of Its Product", Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 37-43, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00172-0)
- [7] D. G. Nair, A. Fraaij, A. A. Klaassen, A. P. Kentgens, "A Structural Investigation Relating to the Pozzolanic Activity of Rice Husk Ashes", Cement and Concrete Research, Vol. 38, 861-869, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.004>
- [8] S.-J. Park, M.-H. Kim, H.-M. Shin, "Agricultural Process and Food Engineering : Chemical Compositions and Thermal Characteristics of Rice Husk and Rice Husk Ash in Korea", Journal of Biosystems Engineering, Vol. 30, pp. 235-241, June, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5307/JBE.2005.30.4.235>
- [9] Y.-H. Kwon, S.-H. Kang, S.-G. Hong, J. Moon, "Acceleration of Intended Pozzolanic Reaction under Initial Thermal Treatment for Developing Cementless Fly Ash Based Mortar", Materials, Vol. 10, Feb. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10030225>
- [10] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Bruegel, A. L. Fraaij, D. Dai Bui, "The Study of Using Rice Husk Ash to Produce Ultra High Performance Concrete. Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 2030-2035, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.046>
- [11] C. Rößler, D.-D. Bui, H.-M. Ludwig, "Rice Husk Ash as both Pozzolanic Admixture and Internal Curing Agent in Ultra-High Performance Concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 53, pp. 270-278, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.015>
- [12] R.-S. Bie, X.-F. Song, Q.-Q. Liu, X.-Y. Ji, P. Chen, "Studies on Effects of Burning Conditions and Rice Husk Ash (RHA) Blending Amount on the Mechanical Behavior of Cement. Cement and Concrete Composites,

Vol. 55, pp. 162-168, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.008>

- [13] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, O. Copuroglu, "Hydration and Microstructure of Ultra High Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash", *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, 1104-1111, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.009>
- [14] A. Loukili, A. Khelidj, P. Richard, "Hydration Kinetics, Change of Relative Humidity, and Autogenous Shrinkage of Ultra-High-Strength Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 577-584, Feb. 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00022-8)
- [15] N. Van Tuan, G. Ye, K. van Breugel, "Effect of Rice Husk Ash on Autogenous Shrinkage of Ultra High Performance Concrete", *Proceedings of International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering*, Hong-Kong, Aug. 2010.
- [16] S.-T. Kang, J.-J. Park, G.-S. Ryu, S.-W. Kim, "Influence of the Filler's Particle Size on the Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC)", *Journal of The Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 28, pp. 573-580, Jul. 2008.
- [17] Korean Standards (KS), "Testing Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate (KS F 2504)", Republic of Korea, 2014.
- [18] W. Xu, T. Y. Lo, W. Wang, D. Ouyang, P. Wang, F. Xing, "Pozzolanic Reactivity of Silica Fume and Ground Rice Husk Ash as Reactive Silica in a Cementitious System: A Comparative Study", *Materials*, Vol. 9, Mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9030146>
- [19] M. Hamad, I. Khattab, "Effect of the Combustion Process on the Structure of Rice Hull Silica", *Thermochimica Acta*, Vol. 48, pp. 343-349, Apr. 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(81\)80255-9](https://doi.org/10.1016/0040-6031(81)80255-9)
- [20] A. Karera, S. Nargis, M. Patel, "Silicon-Based Materials from Rice Husk", *Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 45, pp. 441-448, 1986.
- [21] G. Ye, N. Van Tuan, H. Huang, "Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies", Kyoto, Japan, Aug. 2013.

권 양 희(Yang-Hee Kwon)

[정회원]



- 2008년 8월 : 서울대학교 공과대학원 건축학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 서울대학교 공과대학원 건축학과 (공학박사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 건축학과 박사 후 연구원

<관심분야>

건축구조재료, 전통건축, 친환경 건설재료

홍 성 곁(Sung-Gul Hong)

[정회원]



- 1994년 5월 : Lehigh Univ. 토목학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 건축학과 교수

<관심분야>

콘크리트 구조공학, 건축구조재료, 전통건축