

Kaolinite 계열의 첨가제와 알칼리염의 반응 특성

전현지^{1,2}, 최유진², 선도원², 한근희², 배달희^{2,*}, 이영우^{1,*}

¹충남대학교 응용화학공학과
34134 대전광역시 유성구 대학로 99
²한국에너지기술연구원
34129 대전광역시 유성구 가정로 152

(2020년 9월 3일 접수; 2020년 9월 16일 수정본 접수; 2020년 9월 18일 채택)

Reaction Characteristics of Kaolinite-based Additives and Alkali Salts

HyunJi Jun^{1,2}, Yujin Choi², Dowon Shun², Keun-Hee Han², Dal-Hee Bae^{2,*}, and Young-Woo Rhee^{1,*}

¹Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University
99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134 Republic of Korea
²Korea institute of energy research
152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129 Republic of Korea

(Received for review September 3, 2020; Revision received September 16, 2020; Accepted September 18, 2020)

요약

폐기물고형연료(SRF, Bio-SRF)가 보일러에서 연소 될 때, 연료에 다량 함유되어있는 알칼리 성분(Na, K) 들이 연소과정에서 문제를 발생시킨다. 알칼리 성분은 낮은 melting point를 가지고 있어 통상 연소로 온도 내에서 저융점 염을 형성하고, 생성된 저융점 염들은 전열관에 달라붙어 클링커를 형성한다. 클링커생성을 억제하기 위해 다양한 첨가제가 사용되고 있으며, 고품석 기반의 첨가제는 알칼리-알루미늄-실리카가 형성되어 클링커를 억제한다. 본 연구에서는 고품석을 기반으로 하는 첨가제의 반응성을 비교 하였다. 사용된 첨가제는 R-kaolinite, B-kaolinite, A-kaolinite를 사용하였고 비교군으로 silica와 MgO를 사용하였다. 실험은 실험실 규모의 회분식 수평형 반응기를 사용하였다. 첨가제와 알칼리염은 중량비 1 : 1로 반응토록 하였으며 반응 온도는 900 °C에서 10시간 수행하였다. 실험 중 발생한 HCl은 검지관을 사용하여 30분 후 첫 측정을 하고 이후 1시간 마다 반복하여 측정하였다. 반응 후 고체 잔여물은 특성 분석을 위하여 광학현미경으로 촬영하였다. 분석결과를 토대로 고품석의 반응특성을 확인하였다.

주제어 : 폐기물고형연료, 저융점 염, 클링커, 고품석

Abstract : When the waste solid fuel (SRF, Bio-SRF) is burnt in a boiler, a problem occurs in the combustion process involving the alkali components (Na, K) contained in large amounts in the fuel. The alkaline component has a low melting point, which usually forms low melting point salt in the temperature of the furnace, with the resulting low melting point salts attaching to the heat pipe to form a clinker. Various additives are used to suppress clinker generation, and the additive based on the kaolinite has alkali-aluminum-silica to inhibit the clinker. In this study, the reactivity of the additives based on the kaolinite was compared. The additives utilized were R-kaolinite, B-kaolinite, and A-kaolinite. Also silica and MgO were sourced as the comparison group. The experimental group was employed as a laboratory-scale batch horizontal reactor. The additive and alkaline salts were reacted at a weight ratio of 1 : 1, and the reaction temperature was performed at 900 °C for 10 hours. The first measurement of HCl occurring during the experiment was performed 30 minutes after the detection tube was used, and the process was repeated every hour after the experiment. After the reaction, solid residues were photographed for characterization analysis by means of an optical microscope. The reaction characteristics of the kaolinite were confirmed based on the analysis results.

Keywords : solid fuel, low melting point salt, clinker, kaolinite

* To whom correspondence should be addressed. § These authors contributed equally.

E-mail: ywrhee@cnu.ac.kr; Tel: +82-42-821-5688; Fax: +82-42-822-6637

E-mail: dalbae@kier.re.kr; Tel: +82-42-860-3674; Fax: +82-42-861-6224

doi: 10.7464/ksct.2020.26.3.221 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

현대사회는 인구의 증가와 기술의 급속한 발전으로 인해 화석에너지원 부족과 지구온난화 등의 심각한 문제들이 발생하고 있다. 최근 환경오염 방지를 위해 규제를 강화시켜 유기성 폐기물 배출량 감소 및 폐기물 에너지화 등의 다양한 해결책의 개발을 모색하고 있다. 이는 태양광, 지열, 바이오에너지, 풍력 등의 신재생에너지 기술에 관한 관심을 발생시키고 이로 인해 다양한 기술들이 개발되고 있다. 국가별로 신재생에너지에 대한 정의는 조금씩 다르다. 국내의 정의는 신에너지 및 재생에너지 개발, 이용 그리고 보급 촉진법에 따라 태양, 풍력, 수력, 해양, 지열, 바이오, 폐기물에너지로 정의된다[1].

국제 에너지 기구(IEA)의 “World Energy Outlook 2018”에 따르면 2017~2040년 세계 에너지 수요가 25% 이상 증가할 것이라고 보고했다. 또한, 에너지 효율 개선이 일어나지 않을 시 에너지 수요가 50%까지 치솟을 전망이다[2].

이러한 에너지 수요를 따라가기 위해서는 화석에너지원에 의존하는 것이 아닌 새로운 에너지를 찾아야 할 것이다. 다양한 재생에너지 중 본문에서는 폐기물에너지를 중점적으로 조사하였다. 폐기물은 가정생활 폐기물과 사업장 폐기물로 구분된다. 국내의 경우 폐기물의 생성량이 매년 6.3% 증가하고 있다. 폐기물을 에너지원으로 활용하는 방법에는 대표적으로 가스화, 열분해, 폐기물 고형연료(solid refuse fuel, SRF)화 등의 방법이 있다.

폐기물을 활용하는 방법 중 한가지인 폐기물 고형연료는 2013년 자원재활용법안을 통해 기존의 고형연료인 폐기물 재생 연료(refuse derived fuel, RDF), 폐플라스틱 고형연료(refuse plastic fuel, RPF) 등을 통합해 SRF와 Bio-SRF로 구분하고 있다. SRF의 제조 원료는 음식물류를 제외한 생활폐기물과 폐합성유류 그리고 폐타이어 등이 있으며 Bio-SRF는 폐기류, 농업 폐기물, 초분류, 폐목재류, 식물성 잔재물로 정의한다. 이러한 폐기물 고형연료를 기존 보일러에서 연소시킬 경우, 연료에 함유된 염소, 알칼리 성분으로 인해 과열 증기관에서 고온부식 문제를 일으키거나 클링커가 발생할 수 있다. 이는 고형연료의

주요 성분 중 하나인 알칼리 성분 때문이며 이 알칼리 성분들은 낮은 melting point를 가지고 있어 낮은 온도에서 용융되기 때문이다. 클링커는 고온에서 분해된 NaCl과 KCl이 SiO₂(유동사)와 반응해 응집이 발생하고 이 응집물들이 super heater 구간을 지날 때 상대적으로 온도가 낮은 보일러 튜브 표면에 부착된다[3,4]. 튜브에 부착된 응집물들은 점착제 역할을 하고 클링커를 생성하며, 생성된 클링커는 표면이 거칠어 미립자들이 더 잘 달라붙을 수 있게 만들어 클링커 생성을 가속화시킨다[3,5]. 생성된 클링커는 Cleaning과 관리비용 증가, 열전달효율 감소, 고온부식 발생 등의 문제를 발생시킨다[6,7].

보일러 연소에 여러 가지 영향을 끼치는 클링커들을 효과적으로 억제하기 위한 목적을 가지고 연구를 진행하였다. NaCl과 KCl의 분해로 생성되는 클링커가 생성되는 선행 연구들을 기반으로 하여 kaolinite 계열의 첨가제와 알칼리염의 반응 특성에 중점을 두고 연구를 진행하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험 장치 및 실험 방법

실험은 알칼리염과 첨가제의 반응 가능성을 테스트하기 위해 시험실 규모의 실험 설비를 Figure 1과같이 구성하였다. 실험은 시험실 규모의 회분식 수평형 반응기에서 진행되었다. 석영관 내부 직경은 0.06 m, 길이는 1.5 m이며 수평 반응기는 전기히터 및 온도 조절기를 사용해 가열하였다. 전기 히터는 전단부, 중앙부, 후단부로 구성되어 있으며, 반응 온도는 보통의 순환 유동층 보일러 연소기 출구 연도가스 온도인 900 °C로 결정하였다. 승온 속도는 7.5 °C min⁻¹으로 승온하고 승온 후 10 시간 동안 유지하였다. 반응기 온도는 후단부로부터 40 cm 떨어진 위치에서 측정된다. 또한 carrier gas로 질소를 100 ml min⁻¹ 만큼 반응기 내부로 흘려주었다. 시료는 kaolinite 계열 첨가제를 NaCl, KCl과 각각 1 : 1 중량비로 전기 히터의 중앙부에서 반응시켰다. 반응에서 생성된 HCl의 농도는 휴대용 검출기(GV-100, Gastec Japan)를 사용하여 0분 30분에서 측정된 뒤 1시간마다 반응이 끝날 때 까지 측정하였다. 실험 후 모든 벨

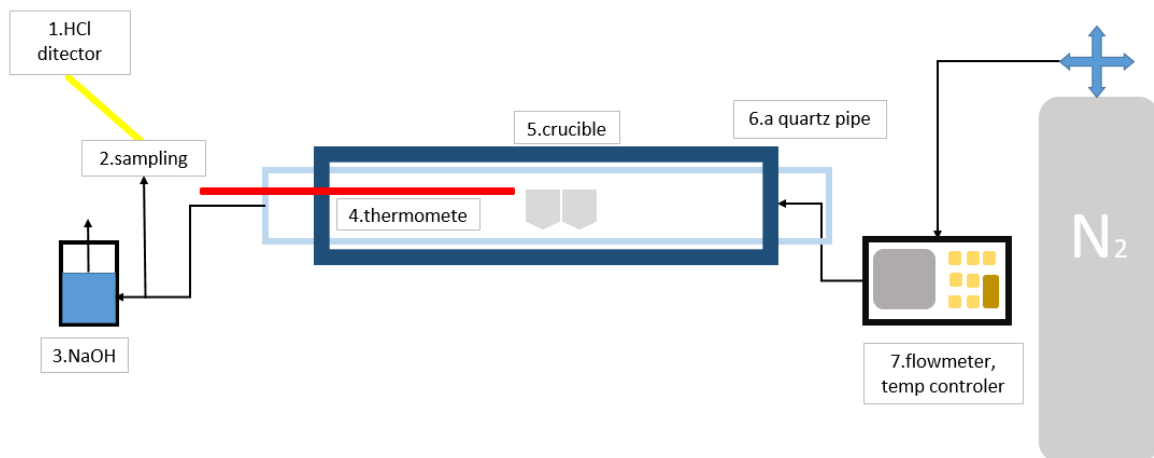


Figure 1. Experimental device.

Table 1. Materials

Name	NaCl	KCl	R-kaolinite	A-kaolinite	B-kaolinite	MgO	Silica
Production	Samchun, co., ltd	Samchun, co., ltd	Duksan pure chemicals	D-company	B-company	S-company	Junsei, co., ltd
Pure [%]	99.5	99.5	100	-	-	-	99.6

Table 2. XRF result data

[단위: wt.%]

Ingredients	R-kaolinite	A-kaolinite	B-kaolinite	MgO
Si	98.2	54.8	76.4	43.1
Al	18.9	38.5	20.6	2.2
Ti	1.1	3.4	0.7	0.0512
P	0.2	0.1	0.4	0.0095
S	0.07	0.2	0.8	0.105
Na	0.06	0.1	0	0.029
Others	1.5	2.9	1.1	54.5213

브를 24시간동안 닫고 반응기를 실온에서 자연적으로 냉각했다. 실험 후 생성된 고체 잔여물은 도가니에서 채취해 광학 현미경 분석에 이용하였다.

2.2. Materials and reagent

Table 1과 같이, 실험에 사용된 kaolinite 계열 첨가제는 제조사에 따라 R, A, B로 분류하여 명명하였다. 반응물로 사용된 NaCl과 KCl은 순도 99.5%의 시약을 사용하였다.

Kaolinite 계열의 첨가제들은 모두 Si와 Al을 함유하고 있다. Table 2의 A-kaolinite와 다른 kaolinite 계열 첨가제를 비교했을 때 A-kaolinite는 비교적 많은 Al을 함유하고 있다. 이 Al Si⁻¹ 비율은 반응성에 영향을 미치는데 이는 Figure 2과 같은 반응이 일어나기 때문이다. 분자의 OH기가 떨어져 나가고 생성된 active site에 Na⁺나 K⁺와 같은 알칼리 금속이 결합하기 때문에 Al/Si 비율이 중요한 요소이다[8,9]. 때문에 A-kaolinite의 높은 Al 함량은 첨가제의 반응성에 영향 끼칠 것으로 예상할

수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 첨가제와 알칼리염의 반응 실험 결과

NaCl과 KCl에 kaolinite 계열의 첨가제를 2.1. 실험 장치 및 실험 방법의 순서에 따라 진행 한 뒤, 나타난 시료의 무게 차이를 분석하였다. Table 3과 Table 4에 나열된 무게 차이는 반응 후 생성된 HCl이 방출되었기 때문이며 이는 알칼리염과 첨가제가 반응해 생성된 것이다. 클링커 생성 억제 반응이 Equation (1) ~ (5)와 같이 일어난 것을 알 수 있으며 KCl과 첨가제의 반응에서 가장 큰 무게 변화를 보인 kaolinite 계열 첨가제는 A-kaolintie 이다. 즉 A-kaolinite의 반응성이 높아 HCl을 많이 방출했기 때문이며, 대조군으로 사용된 MgO나 silica는 가장 적은 무게 차이를 보였다. NaCl과 kaolinite 계열 첨가제의 반응 결과는 KCl과 유사한 경향을 보여준다. 무게 차이를 보았을

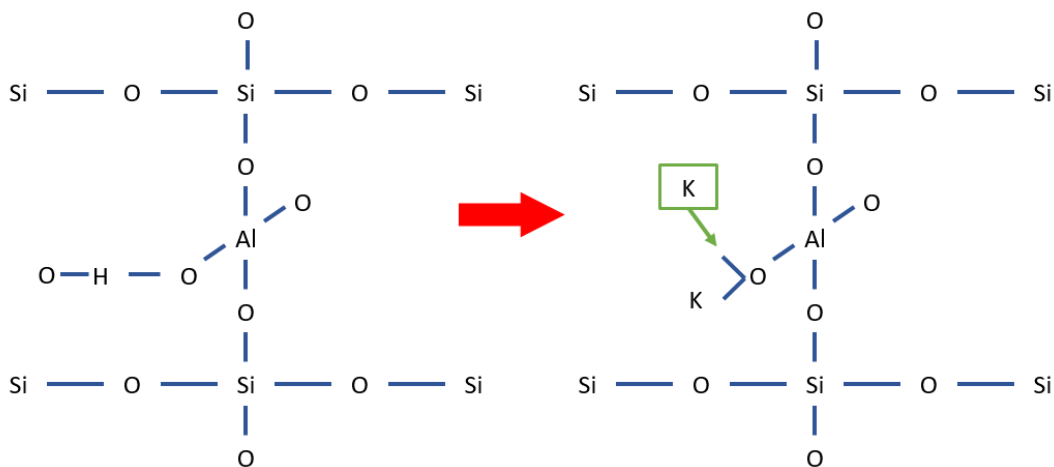


Figure 2. Active site.

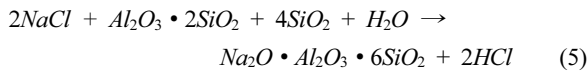
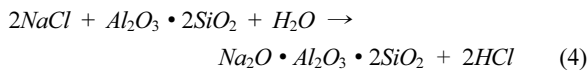
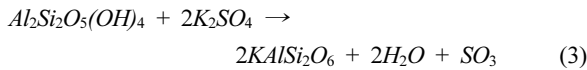
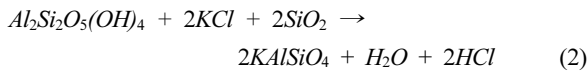
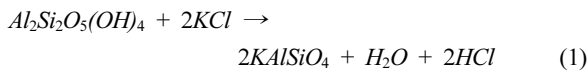
Table 3. Reaction weight of KCl and additives and weight before and after experiments

	R-kaolinite	MgO	B-kaolinite	A-kaolinite	Silica
Weight	36.71	35.42	35.83	38.21	38.32
Difference	0.42	0.33	0.685	1.16	0.21

Table 4. Reaction weight of NaCl and additives and weight before and after experiments

	R-kaolinite	MgO	B-kaolinite	A-kaolinite	Silica
Weight	36.755	31.07	35.18	33.79	36.88
Difference	0.4	0.28	0.46	0.81	0.27

때 실험에 사용된 kaolinite 계열의 첨가제는 NaCl과 KCl 두 가지 종류의 알칼리 성분 모두에 반응하며, 클링커 생성을 억제할 수 있다고 볼 수 있다.



이는 선행연구 사례 중 Linlin Xu et al. [10] 등에 따르면 알칼리염과 kaolinite 계열의 첨가제와 NaCl, KCl은 위의 Equation (1)~(5)와 같은 반응을 일으키는 것으로 보고되고 있다[10-12]. 첨가제와 NaCl, KCl의 반응 생성물로 방출된 HCl은 그래프를 그려 분석하였으며 그래프의 y축은 시간당 방출된 ppm g⁻¹, x축은 시간(min)이다. KCl, NaCl과 kaolinite 계열의 첨가제의 반응 결과로 생성된 HCl 생성량 Figure 3와 Figure 4에 도식화 하였다.

대부분 30분에서의 peak가 가장 높았으며 시간이 흐를수록 점차 감소해 0 ppm g⁻¹에 도달하는 형태의 그래프이다. HCl은 KCl과 반응했을 때 0~1300 ppm g⁻¹을 기록하며, NaCl과의 반응 결과는 0~1600 ppm g⁻¹을 나타낸다. 이 결과 kaolinite 계열의 첨가제는 K보다 Na와의 반응 효율이 더 높다는 것을 보여준다. 이는 앞선 연구인 Khanh-Quang Tran et al. [13]의 연구결과와 같은 경향을 가지며 kaolinite는 K를 잡을 때 보다 Na를 잡을 때 더 효과적이며 기체상일 때 최대 99%의 알칼리염을 잡을 수 있다고 보고하고 있다[9,13]. HCl 방출 경향은 NaCl과 KCl 모두 A-kaolinite가 가장 높은 peak를 보였다. 이는 반응 실험 결과 나타난 무게 차이와도 같은 경향이며 A-kaolinite 높은 Al 함량으로 Figure 2과 같은 active site가 많아져 반응이 활발했기 때문으로 볼 수 있다. 대조군으로 사용한 silica와 MgO는

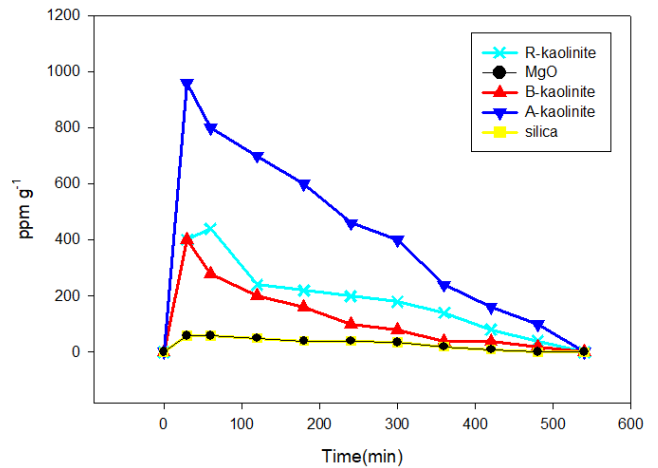


Figure 3. The amount of HCl produced by KCl and additives.

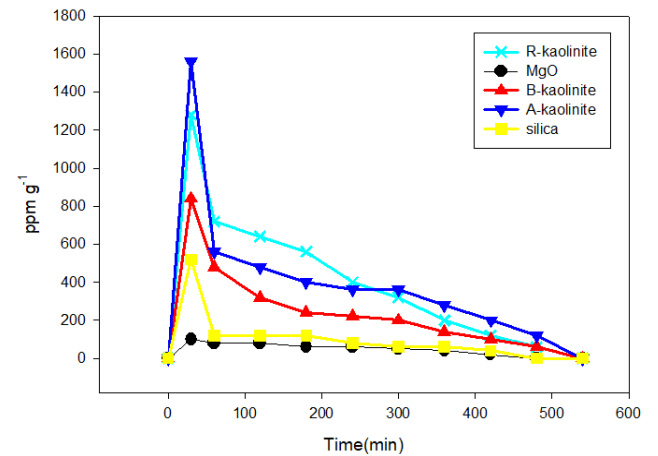


Figure 4. The amount of HCl produced by NaCl and additives.

반응이 거의 일어나지 않아 가장 낮은 HCl 생성량을 보인다.

3.2. 광학현미경

Kaolinite 계열의 첨가제는 물리적 흡착 후 Equation (1) ~ (5)의 화학적 반응이 일어난다. 반응 후 생긴 응집물을 시각화하여 관찰하기 위해 실험 후 잔여물을 도가니에서 채취해 광학현미경 220배의 배율로 실험 후 고체 잔여물을 촬영하였다. Figure 5과 Figure 6(a)는 순수한 NaCl, KCl이며, 900 °C의 실험 환경에서 모두 녹아 용융되었으며 유리처럼 깨지는 형태를 가

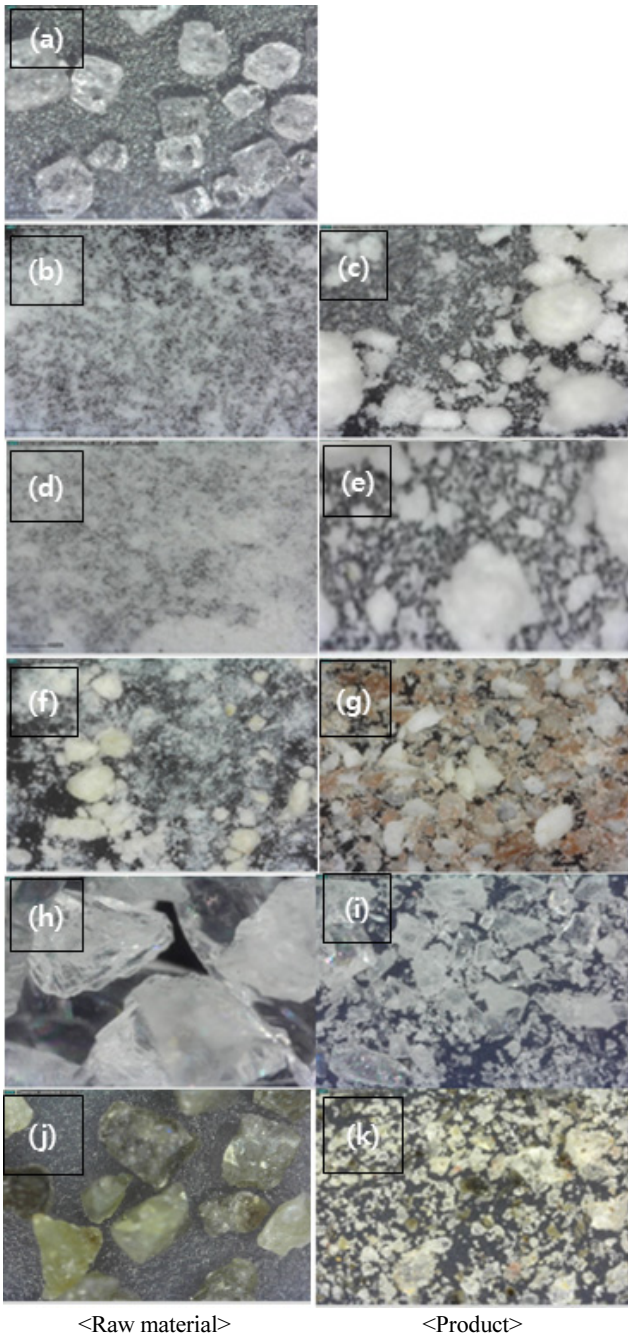


Figure 5. Optical micrograph of solid residues after reaction of KCl and additives. (a): KCl, (b): R-kaolinite, (c): KCl + R-kaolinite, (d): B-kaolinite, (e): KCl + B-kaolinite, (f): A-kaolinite, (g): KCl + A-kaolinite, (h): silica, (i): KCl + silica, (j): KCl, (k): KCl + MgO

지고 있다. Kaolinite 계열의 첨가제만 실험 하였을 때는 모두 멍치지 않고 원 시료와 같은 powder 형태를 보인다. 하지만 NaCl, KCl과 1 : 1 중량비로 섞어 반응시킨 결과는 모두 회색계열의 잔여물을 형성하고 응집물을 발생시킨 것을 관찰할 수 있다. NaCl과 KCl의 2가지 시료 모두 kaolinite 계열 첨가제와 반응시켰을 때의 반응 잔여물이 모두 유사한 경향을 띄고 있다. 또한 대조군으로 사용된 silica와 MgO는 900 °C의 실험환경에서 모두 용융되지 않고 부분적으로 용융되었으며 원 시료와 유

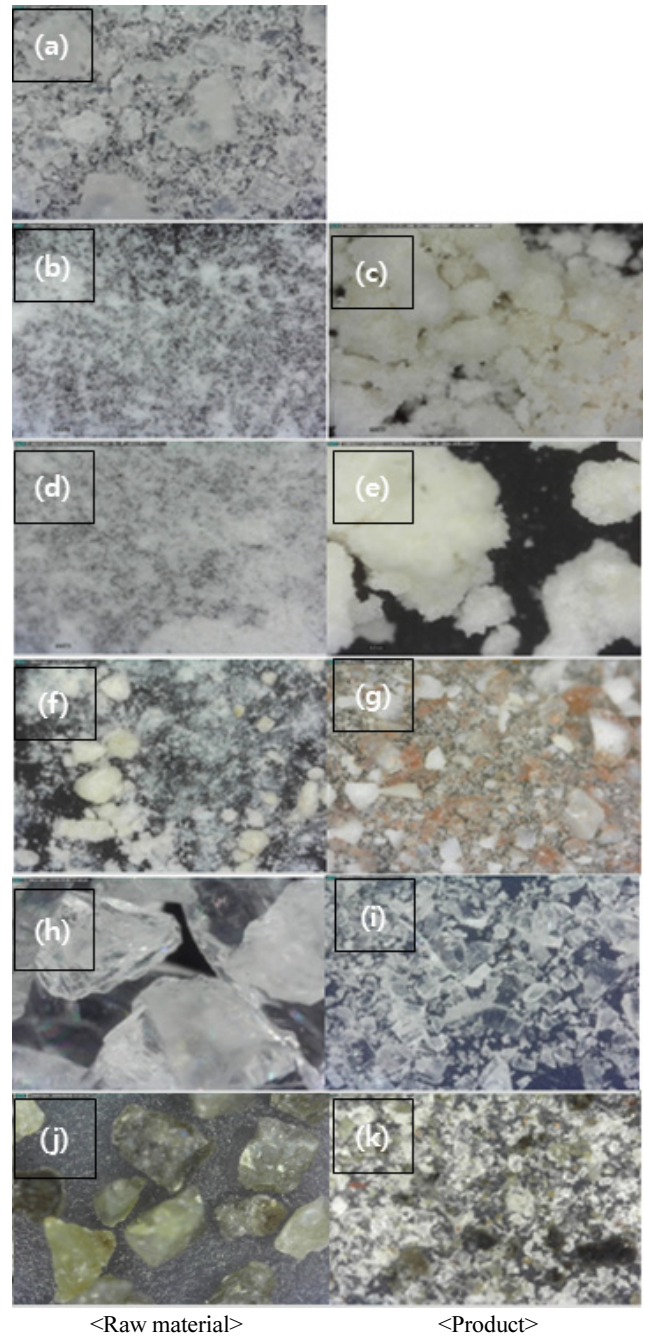


Figure 6. Optical micrograph of solid residues after reaction of NaCl and additives. (a): NaCl, (b): R-kaolinite, (c): NaCl + R-kaolinite, (d): B-kaolinite, (e): NaCl + B-kaolinite, (f): A-kaolinite, (g): NaCl + A-kaolinite, (h): silica, (i): NaCl + silica (j): MgO (k): NaCl + MgO

사한 모양이 관찰되었다. 또한 silica는 유리화된 구조를 보였으며 MgO는 아주 딱딱한 고체를 형성했다.

Kaolinite 계열의 첨가제와 KCl의 반응에서 HCl 생성량이 가장 컸던 A-kaolinite의 반응 후 잔여물 Figure 5(g)는 A-kaolinite 원 시료와는 다르게 화학적 반응이 일어난 결정들이 생긴 것을 관찰할 수 있으며 이는 kaolinite 계열의 첨가제와 알칼리염의 반응물 생성으로 만들어지는 알칼리-알루미늄-실리카이다. 선행 연구인 Britt-Marie Steenari et al.[14]과 Stella Kyi, and

Bruce L. Chadwick [16]의 연구에서 Na^+ 와 K^+ 가 kaolinite계열의 첨가제와 반응하여 $2\text{KAlSi}_2\text{O}_6$ 과 같은 생성물이 생성된다고 보고하고 있다[14-16]. Equation (1)~(5)의 반응식의 알칼리-알루미늄-실리카가 생성되어 나타나는 생성물이 A-kaolinite와 KCl의 반응 후 잔여물에서 나타나고 있으며, 물리적 흡착 반응성 보다 화학적 반응성이 더 크므로 HCl 생성량이 가장 높은 이유를 뒷받침한다. 이와 다르게 HCl 생성량이 2번째로 높았던 R-kaolinite의 실험 후 잔여물 Figure 5(c)는 화학적 반응으로 생성된 알칼리-알루미늄-실리카의 생성보다 물리적 반응에 의한 멍치는 현상이 더 크게 발생하였다. 세 번째로 HCl 생성량이 많았던 B-kaolinite의 고체 잔여물 Figure 5(e)는 A-kaolinite나 R-kaolinite에 비해 반응 핵 주변으로 물리적 반응이 더욱 크게 일어난 것을 관찰할 수 있으며 화학적 반응의 결과는 물리적 반응에 가려 잘 보이지 않는다.

대조군으로 사용한 KCl과 반응시킨 silica, MgO의 고체 잔여물 사진인 Figure 5(i), (k)는 화학적, 물리적 반응의 결과물이 관찰되지 않고 silica와 MgO가 NaCl과 반응하지 않아 두 가지 시료의 형상을 모두 관찰할 수 있다.

Kaolinite 계열의 첨가제와 NaCl의 반응과 KCl의 반응은 유사한 경향을 띠고 있다. Figure 6(g)는 NaCl과 반응시킨 A-kaolinite이다. 이는 KCl과 비슷한 형상으로 화학적 결합에 의한 생성물이 생성된 것이 보이며, 핵을 중심으로 물리적 흡착 반응이 일어난 형상이다. 이는 NaCl과 같은 결과로 화학적 반응이 물리적 반응에 비해 많이 일어났으므로 HCl 생성량이 가장 높은 이유를 설명할 수 있다. Figure 6(c), (e)는 각각 NaCl과 반응시킨 R-kaolinite, B-kaolinite로 이 역시 KCl 결과와 아주 유사한 응집핵을 중심으로 물리적 반응이 일어난 형태를 관찰할 수 있다.

대조군으로 사용된 silica와 MgO를 NaCl과 반응시킨 결과는 Figure 6(i), (k)에 나열하였으며, 원 시료의 형태를 관찰할 수 있고 응집물이 발생하지 않았다.

위의 결과는 kaolinite 계열의 첨가제들이 NaCl, KCl과 모두 반응성이 있으며 비슷한 경향을 띠고 있다고 볼 수 있다. 하지만 KCl의 응집물들은 상대적으로 NaCl의 응집물들에 비해 작은 것을 관찰할 수 있으며 이는 HCl 방출량이 KCl 보다 NaCl이 높았던 것을 뒷받침할 수 있다.

4. 결론

폐기물 고형연료 사용 시 주요 성분인 알칼리염의 낮은 melting point로 생성되며 보일러의 cleaning 비용, 열전달 효율, 고온 부식 등의 문제를 발생시키는 클링커를 효율적으로 억제하기 위해 kaolinite 계열의 첨가제와 NaCl, KCl의 반응 특성을 연구하였다. 본 연구에서는 kaolinite 계열의 첨가제 종류에 따른 Al Si⁻¹비율에 따른 반응성에 대해 연구하였다.

Kaolinite 계열의 첨가제와 KCl의 반응 결과 생성된 HCl 생성량은 0~1300 ppm g⁻¹을 기록하며, NaCl과의 반응 결과는 0~1600 ppm g⁻¹을 나타낸다. 즉 전체적으로 NaCl의 경우가 KCl 보다 많은 HCl 생성량을 가지고 있으며 NaCl의 경우가 반

응성이 더 좋게 나타났다. 이는 kaolinite 계열의 첨가제가 선행 연구와 같이 Na와의 반응성이 더 큰 것으로 보인다. Kaolinite 계열의 첨가제와 NaCl, KCl의 반응에서 생성된 HCl은 대부분 반응 후 30분에서 가장 높은 peak를 보이지만, R-kaolinite의 경우 반응 후 60분에서 가장 높은 peak를 보인다. A-kaolinite가 가장 활발한 반응을 보인 이유는 A-kaolinite의 Al Si⁻¹ 비율이 상대적으로 다른 시료들보다 높기 때문이다. 높은 Al Si⁻¹ 비율은 상대적으로 많은 active site를 만들어 반응성을 높인다. 반응 후 고체 잔여물의 응집물들은 첨가제와 NaCl, KCl이 반응해 생긴 알칼리-알루미나-실리카로 kaolinite 계열의 첨가제는 모두 유사한 경향을 띠고 있으며 KCl과 반응한 것에 비해 NaCl과 반응한 응집물의 크기가 더 크게 형성되었다. 대조군으로 사용된 silica나 MgO는 모두 반응성이 적었으며 광학현미경 사진 결과 응집물이 없고 원 시료와 비슷한 형상을 가지고 있었다.

분석 결과 A-kaolinite는 Al의 함량이 38.5 wt.%로 가장 양을 함유해 가장 많은 active site를 생성할 수 있다. 또한 실험 시작 후 30분에 가장 큰 peak를 보였을 뿐만 아니라 실험 후 무게 차이와 광학현미경 결과에서도 가장 큰 차이를 보였다. 이는 A-kaolinite가 알칼리염과 반응하여 클링커 생성 억제에 효과적으로 보인다.

감사

이 논문은 2015년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-15-07-KIER)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

1. Rhu, J. K., "Facilitation Techniques for Development, Use, Supply of Advanced and Renewable Energy," Korea Legislative Studies Institute, **16**(1), pp. 153-164 (2010).
2. "World Energy Outlook 2018," IEA, p. 38 (2018).
3. Lee, C. Y., Jeong, B.-H., and Chung, J.-D., "A Study on the Characteristics of Pollutants in CFBC Boiler with Ammonium Sulfate Injection," *J. Korea Soc., Waste Manag.*, **35**(8), pp. 754-761 (2018).
4. Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J., and Spliethoff, H., "Biomass Combustion in Fluidized Bed Boilers: Potential Problems and Remedies," *Fuel Process. Technol.*, **90**(1), 21-50 (2009).
5. Park, J. H., Lee, D.-H., Han, K.-H., Shin, J.-S., Bae, D.-H., Shim, T.-E., Lee, H. J., and Shun, D. W., "Effect of Chemical Additives on Hard Deposit Formation and Ash Composition in a Commercial Circulating Fluidized Bed Boiler Firing Korean Solid Recycled Fuel," *Fuel*, **236**, 792-802 (2019).
6. Michelsen, H. P., Frandsen, F., Dam-Johansen, k., and Larsen, O. H., "Deposition and High Temperature Corrosion in a 10 MW Straw Fired Boiler," *Fuel Process. Technol.*, **54**(1-3),

- 95-108 (1998).
7. Kim, B. J., Ryu, C. K., Lee, U. D., Kim, Y. D., Lee, J. W., and Song, J. H., "A Technical Review on the Protective Measures of High Temperature Corrosion of Boiler Heat Exchangers with Additives," *Clean Technol.*, **23**(3), 223-236 (2017).
 8. Qinyan, Y., Ying, S., and Baoyu, G., "Impact Factors and Thermodynamic Characteristics of Aquatic Humic Acid Loaded onto Kaolin," *Colloids Surf. B: Biointerfaces*, **72**(2), 241-247 (2009).
 9. Kim, S. G., and Song, T. W., "Effect of the Heating Temperature on the Alkali-activation Reaction of Calcined Kaolin Powder," *J. Korean Ceram. Soc.*, **49**(6), 601-607 (2012).
 10. Xu, L., Liu, J., Kang, Y., Miao, Y., Ren, W., and Wang, T., "Safely Burning High Alkali Coal with Kaolin Additive in a Pulverized Fuel Boiler," *Energy Fuels*, **28**(9), 5640-5648 (2014).
 11. Boman, C., Bostrom, D., and Ohman, M., "Effect of Fuel Additives Sorbents(kaolin and calcite) on Aerosol Particle Emission and Characteristics During Combustion of Pelletized Woody Biomass," 16th European Biomass Conference & Exhibition, 2-6, Valencia, Spain, (2008).
 12. Bostrom, D., Grimm, A., Lindstrom, E., Boman, C., Bjombom, E., and Ohman, M., "Abatement of corrosion and deposits formation in combustion of oat," 16th European Biomass Conference & Exhibition, 2-6, Valencia, Spain, (2008).
 13. Tran, K.-Q., Iisa, K., Hagstrom, M., Steenari, B.-M., Lindqvist, O., and Pettersson, J. B. C., "On the Application of Surface Ionization Detector for the Study of Alkali Capture by Kaolin in a Fixed Bed Reactor," *Fuel*, **83**(7-8), 807-812 (2004).
 14. Steenari, B. M., Lundberg, A., Pettersson, H., Wilewska-Bien, M., and Andersson, D., "Investigation of Ash Sintering During Combustion of Agricultural Residues and the Effect of Additives," *Energy Fuels*, **23**(11), 5655-5662 (2009).
 15. Kyi, S., and Chadwick, B. L., "Screening of Potential Mineral Additives for Use as Fouling Preventatives in Victorian Brown Coal Combustion," *Fuel*, **78**(7), 845-855 (1999).
 16. Purbasari, A., Samadhi, T. W., and Bindar, Y., "Thermal and Ash Characterization of Indonesian Bamboo and Its Potential for Solid Fuel and Waste Valorization," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, **5**(2), 95-100 (2016).