

## 석탄 보일러에서 회분 부착성향 예측 접근 방법에 대한 고찰

김대희\* · 최상민\*\*\* · 김정래\*

\*현대중공업 에너지기술연구소 · \*\*한국과학기술원 기계공학과

### Consideration on the Prediction Approach of Ash Deposition Propensity in Coal-fired Boilers

Daehee Kim\* · Sangmin Choi\*\*\* and Jung-Rae Kim\*

\*Energy Technology Institute, Hyundai Heavy Industries, Ulsan, Korea

\*\*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received 7 April 2017, Received in revised form 11 June 2017, Accepted 28 November 2017)

#### ABSTRACT

Various approaches have been proposed to predict the ash deposition (slagging and fouling) propensity of coal, which is essential in maintaining high efficiency and preventing corrosion/damage of a coal-fired boiler. The common method is to establish an index of the ash deposition propensity based on elementary coal composition and advanced characterization of ash properties, which is readily applicable to design, operation and maintenance of coal-fired boilers. Although many indexes have been developed for this purpose, their validity is still not satisfactory in actual applications to particular coal types or operating conditions. This paper reviews the status of predictive approaches for the ash deposition propensity, and assesses the performance of existing indexes by comparing the results for selected coals. This work will contribute to the development of a comprehensive and practical method for prediction of the ash deposition propensity.

**Key Words** : Deposition index, Ash deposition propensity, Slagging and fouling, Prediction approach

#### 1. 서론

전력 생산에 중요한 역할을 담당하고 있는 석탄은 전 세계적으로 매장량이 풍부하고 지역적으로 편재되어 있지 않아 수급 안정적인 에너지원이다. 이런 석탄을 사용하는 화력 발전소에서 가지고 있는 문제점 중에 하나는 석탄 속에 포함되어 있는 불연성 물질인 회분(ash)에 의해서 발생하는 문제이다. 미분탄이 보일러 내로 장입되어 연소가 일어나게 되면 회분은 연소되지 않고 연소 가스의 흐름과 함께 움직이게 된다. 이 때, 높은 연소가스 온도로 인해 연소실의 온도가 회분의 용융점보다 높게 되면 회분 입자가 용융된 상태로 수관벽에 부딪쳐 급랭, 응집되

어 수관벽에 부착 및 퇴적하게 된다. 이러한 현상을 슬래깅(slagging)이라 하며, 회분이 연소 가스와 함께 상대적으로 온도가 낮은 대류 전열면을 지나가다 과열기, 재열기 등에 응축, 부착하여 굳어지는 현상을 파울링(fouling)이라 한다. Fig. 1은 일반적인 보일러 시스템과 회분 부착 과정에 대하여 나타내고 있다[1]. 이러한 슬래깅/파울링 정도는 사용되어진 탄의 종류뿐 아니라 보일러 시스템 디자인과 운전 조건에도 영향을 받게 된다. 슬래깅은 회분의 S, Fe, Ca에 의해 주로 발생하고, 파울링은 주로 회분의 Na, K, Ca, S 등에 의해 발생한다고 알려져 있다. 특히, 저급탄을 사용하는 경우 석탄 회분에 이러한 무기물 함량이 상대적으로 높아 회분 부착이 더욱 잘 일어나게 된다. 최근 국내 대다수 대용량 발전소에서도 저급탄(아역청탄)의 사용이 늘고 있어 이러한 회분 부착문제가 더욱 중요시 되고 있다[2].

회분부착 현상은 열교환기 튜브의 열전달 감소로 인한 보일러 효율 및 용량의 저하, 내부의 유체 흐름 방해 및 튜브 관군 막힘과 기계적 손상의 유발, 열교

† Corresponding Author, [smchoi@kaist.ac.kr](mailto:smchoi@kaist.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

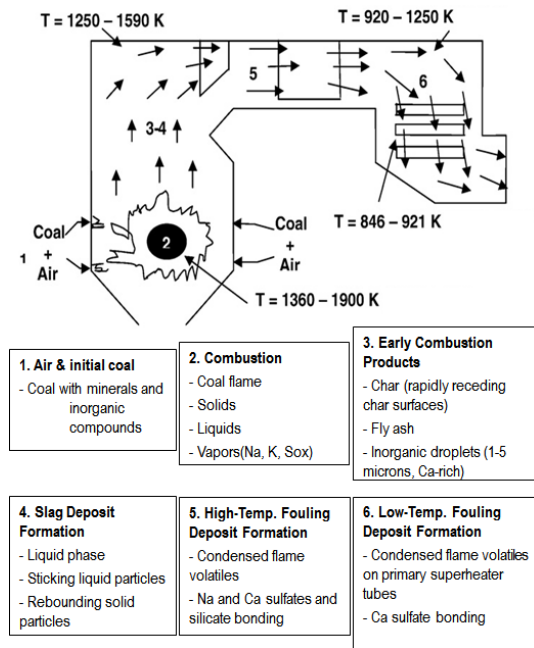


Fig. 1. Schematic of coal ash deposition process in utility boilers[1].

환기 표면 물질과의 화학적 반응으로 인한 부식 등의 문제점을 일으키게 된다. 용이하게 제거할 수 있는 퇴적물은 보일러 운전에 큰 영향을 미치지 않으나, 그렇지 않은 경우 운전 정지까지 필요할 수 있으므로, 이로 인한 에너지 손실 및 보수, 개조 공사에 소요되는 경제적 손실이 막대하다[3].

이러한 회분 부착 문제, 즉 슬래깅과 파울링은 복합적인 관계를 갖는 다양한 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 특정한 하나의 인자의 영향으로 판단하기가 매우 어렵다. 현재까지 회분 부착 현상의 예측과 문제 해결을 위해 많은 시도와 다양한 예측 기법이 시도되었으나, 실제적인 적용면에서 통합적인 예측이 쉽지 않은 실정이다[4]. 특히, 석탄 기초 성분 분석 자료 및 실험실 스케일의 실험 자료를 바탕으로 한 많은 인덱스들이 회분 부착성향 예측을 위해 제안되어 왔지만, 특정 분위기에서의 예측만을 보여주거나 서로 다른 결과를 보여주는 경우가 많다[5,6].

다양한 탄종 및 연소 분위기에서 적용 가능한 통합적이고 실용적인 회분 부착 성향 예측 방안 및 모델을 마련하기 위해 여전히 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 이를 가능하게 하기 위해서는 기존에 제시된 예측 기법 및 방안에 대한 올바른 이해와 평가가 우선적으로 필요하다. 본 논문은 회분 부착 성향 예측을 위해 제시된 다양한 접근 방법에 대한 고찰과 함께 다양한 실험 인덱스를 통한 회분 부착 성향 예측 결과간의 비교에 초점을 맞추고 있다.

## 2. 회분 형성 및 부착 메커니즘

회분 부착성향 예측을 위해 제안된 기존 접근 방법에 대하여 알아보기에 앞서 회분 형성 및 회분 부착 메커니즘에 대한 이해가 필요하다[7-10]. 회분 형성 메커니즘에 대하여 간략히 살펴보면, 미분탄이 고온의 연소 환경에 장입되게 되면 탈휘발 과정을 거치면서 미네랄 성분의 일부는 증발되고 나머지는 착(char) 또는 분쇄된 착에 남게 된다. 증발된 무기질 성분은 온도 하강에 따라 미립자 상태가 되었다가 융합하여 다시 회분 입자가 생성되거나, 찬 표면을 만나 다른 무기질 기체 성분과 함께 응축되어 회분 입자로 된다. 또한 착 또는 분쇄된 작은 크기의 착 입자에 포함되어 있던 무기질 성분은 착 연소 과정을 거치면서 회분으로 변하게 된다. 회분조성 중  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  및  $TiO_2$  등은 산성 산화물,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  등은 염기성 산화물로 분류한다. 이렇게 동일한 원탄에 존재하던 무기질 성분이지만 회분 생성 경로는 매우 다양하며, 이로 인해 연소 후 회분 입자는 다양한 입자 분포를 가지게 된다. 특히, 이러한 생성 경로는 탄의 원 성분 및 탄화 과정에 의해 크게 영향을 받게 된다. 이러한 이유로 인해 회분 부착 예측을 위한 많은 연구가 분석된 원탄 또는 회분 자체의 광물학적 특성 및 조성을 실험적으로 계측하는 것으로 시작된다. 이는 회분 부착 예측 연구의 시발점은 원탄 및 회분 자체에 대한 정량적인 분석에서 시작되어야 함을 의미한다. 보일러 내에서 앞서 설명한 슬래깅과 파울링은 온도와 주변 환경에 따라 구분되거나 같이 일어날 수 있다. 대표적인 회분 부착 메커니즘은 Bryers[10]에 의해 제안된 것으로 Fig. 2에 보여지고 있다. 전열면에서 큰 입자들은 관성 충돌에 의해 벽면에 부착되고, 1um 이하의 작은 입자들은 열영동(Thermophoresis)과 Eddy 충돌 및 확산 운동에 의해 연소 가스보다

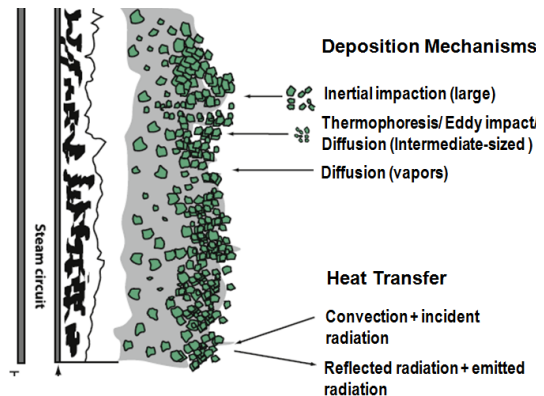


Fig. 2. Schematic of coal ash deposition mechanisms on superheater tube[10].

상대적으로 낮은 온도의 벽면에 부착된다. 증발된 무기질 물질도 확산 운동을 하다 벽면에 응축되어 부착되며, 부착된 입자의 주위 가스와의 화학반응으로 부착 현상이 나타나기도 한다.

### 3. 회분 부착성향 예측을 위한 접근 방법

IGCC 및 화력발전의 연료인 석탄에 대하여 관련 회분의 부착 문제(파울링 및 슬래깅)에 대한 연구가 국내외에서 많이 진행되었다. Fig. 3은 회분 부착성향 예측을 위하여 제시된 많은 연구를 크게 3가지 접근 방법으로 정리한 것이다. 대부분의 연구가 석탄 회분의 화학적 조성, 회용점 분석이나 이에 기초한 경험적 상관관계식(인덱스)을 통해 용융 정도 및 부착성향을 예측하고자 하는 경험적 접근 방법을 통해 이루어 졌다[6,11-15]. 이러한 접근 방법은 석탄 기초 성분에 기초한 매우 간단한 방법이지만 정밀한 실험이나 해석이 어려울 경우 이용 가능한 실질적 방법으로 설계 시나 설비의 유지 보수를 위해 빠르게 피드백 할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 실제 연소 상황을 구체적으로 고려하지 못하므로 그 신뢰성을 위해서는 관련 자료의 체계적 데이터베이스 구축이 필요하다. 최근에는 기존 회분 성분, 용융점 정보에 바탕을 둔 인덱스의 단점을 보완하고자 실험실 스케일의 실험을 연계하여 복합적 인자를 고려한 새로운 인덱스를 도출하는 연구가 진행되고 있다[2,5,16,17]. 국내 연구의 경우 대부분 이 접근방법으로 연구가 진행되었으며, 유연탄의 수입처가 다양하여 이에 대한 데이터베이스 구축의 어려움이 존재하고 있다.

또한 실험실 규모의 실험을 통해 실제 연소 환경에 가까운 조건에서 부착 모델의 도출에 목적을 둔

연구도 진행되었다[18,19]. 이러한 연구는 기존 경험적 접근 방법에서 나아가 유동에 의한 직접적인 효과도 고려하고 있다.

석탄 및 석탄 회분의 조성이 근본적으로 복잡하기 때문에 아직까지 회분의 거동을 쉽게 예측할 수 있는 적절한 모델은 개발되지 못하고 있는 실정이다. 하지만, 부착 모델을 적용한 총괄 예측 모델(CFD 모델)을 통해 회분 부착 정도 및 부착위치를 예측하고자 하는 연구가 Huang 등(1996), Wang and Harb(1997), Lee and Lockwood(1999), Ma 등(2007) 에 의해 이루어진 바 있다[20-23]. 국내에서도 최근 이러한 CFD 해석을 통한 접근 방법 연구가 시도되고 있다[24-26]. 이러한 CFD 모델들은 대부분 회분 형성, 유체 역학과 입자 수송, 위치에 따른 회분 부착 성장/부착물 조성과 그 강도 성장, 부착물을 통한 열전달, 보일러 운전 조건에 미치는 부착물의 영향 및 부착물의 구조와 유동 패턴에의 영향 등을 복합적으로 고려하고 있다. 이러한 접근은 회분 부착 메커니즘을 고려한 진보된 예측 방법이지만 다양하고 복잡한 현상 묘사를 위해 많은 가정을 포함하고 있으므로 사용 시 주의가 필요하다. 또한, 특정 경우를 위한 해석이므로 다른 경우에 적용을 위해서는 경제적 손실이 따르며, 설계에 적용 및 피드백이 쉽지 않은 단점이 있다.

이러한 회분 부착예측을 위한 접근 방법은 각각 장단점을 가지고 있으며, 연소 환경 및 목적에 따라 적절히 선택되어야만 한다.

### 4. 경험적 접근 방법

실제 보일러 설계 및 설비 유지보수에 활용을 위해서는 피드백이 빠르고 석탄 기초 성분만으로 예측이 가능한 경험적 접근 방법이 유용할 것으로 생각된다. 이러한 관점에서 매우 많은 실험적인 인덱스들이 석탄의 잠재적인 슬래깅과 파울링성 평가를 위해 개발되어져 사용되고 있다. 이러한 인덱스들은 기본적으로 석탄의 성분 분석값을 바탕으로 계산되어진다. 공통적으로 고려되는 성분 분석값은 원소분석, 공업분석, 발열량, 회분 조성, 그리고 용융 온도 등으로 볼 수 있다. 제시된 인덱스들은 과거부터 사용되던 인덱스(기존 인덱스로 명명)와 최근 기존 인덱스를 보완하여 제시된 인덱스(보완된 인덱스로 명명)로 구분 지을 수 있다.

#### 4.1. 기존 인덱스

Table 1은 파울링과 슬래깅 예측을 위해 제안되어져 공통적으로 사용되어지고 있는 기존 인덱스와 그 회분 부착성향 예측 기준을 나타낸 것이다. 인덱스의 정의에서 보이는 바와 같이 회분의 용융온도

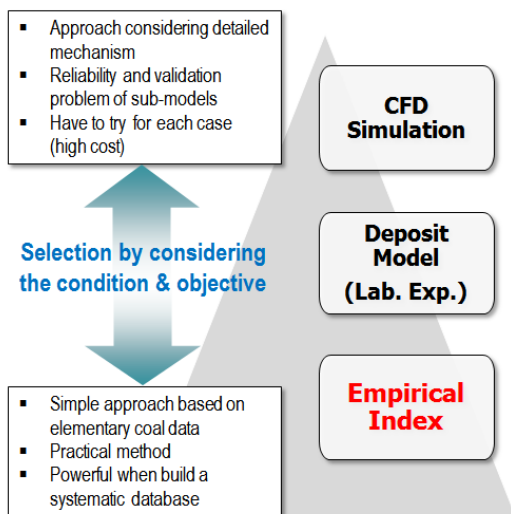


Fig. 3. Summary of ash deposition prediction approach.

**Table 1.** Existing indexes

	Index	Definition	Ash deposition propensity		
			Low	Medium	High
Slagging	IDT	Ash fusion temp	>1316℃		<1316℃
	B/A	$(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)$	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.55
	Rs	B/A x %S	<0.6	0.6~2	>2
	Dp%	$(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$	High value means low deposition.		
	Silica ratio	$\text{SiO}_2/(\text{SiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO})$	0.8~0.72	0.72~0.65	0.65~0.5
	I/C(Iron/Calcium ratio)	$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaO}$	<0.3&>3	-	0.3~3
	Silica/Alumina ratio	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	<1.4	1.4~2.8	>2.8
Fouling	IDT	Ash fusion temp	>1177℃		<1177℃
	Cl%	% Cl in coal	<0.2	0.2~0.3	>0.5
	Rf	$(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2) \times \% \text{Na}_2\text{O}$	<0.2	0.2~0.5	>0.5
	Total Alkalis	$(\text{Na}_2\text{O}+0.6589\text{K}_2\text{O}) \times \% \text{ash}/100$	<0.3	0.3~0.45	>0.45

와 회분 내 무기질 성분에 기초하여 인덱스 값들이 정의됨을 알 수 있다. 일반적으로 회분의 용융온도가 낮으면 용융성과 흐름성이 증가하여 상대적으로 단단한 용착물을 형성하게 된다. 회분의 조성 중 염기성 산화물인  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ 와  $\text{MgO}$ (Dolomite),  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  등은 용융 작용(fluxing action)에 의해 회분의 용융온도를 낮추는 역할을 하고, 산성 산화물인  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및  $\text{TiO}_2$  등은 용융 온도를 높이는 역할을 한다고 알려져 있다. 대표적으로 용융온도에 크게 영향을 미치는 물질로는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 로 알려져 있다. 이렇게 용융성에 영향을 미치는 무기질 성분의 조합으로 인덱스들이 구성됨을 알 수 있고, 슬래깅의 경우 S, Fe, Ca에 의해 파울링의 경우는 Na, K, Ca, S 등에 발생하므로, 이를 각각 고려하고 있다.

#### 4.2. 보완된 인덱스

Table 2는 기존의 인덱스를 보완하기 위해 제시되

어진 인덱스를 본 저자의 기준으로 구분하여 정리한 것이다. 염기성 산화물에 대한 산성 산화물의 비, 즉 B/A가 용융 작용에 둔감한 것을 보완하기 위해 용융온도의 함수로 정의된 Rfs가 슬래그 인덱스로 제안되었다. 또한 Watt와 Fereday의 점도예측 방법[27]으로부터 제안된 슬래그 인덱스 Rts[28]는 슬래그 제거 온도로 알려져있는 점도 25 kg/m<sup>2</sup>s의 온도 T<sub>25</sub>과 점도 1000 kg/m<sup>2</sup>s 일때의 온도 T<sub>1000</sub>으로부터 계산된다. 또한, Lawrence 등[29]은 열기계분석(Thermo Mechanical Analyzer, TMA) 실험결과, 그리고 석탄에 함유된 회 함량을 고려한 새로운 슬래깅 인덱스, BHEL(Bharat Heavy Electricals Limited)를 제안한 바 있다. 파울링을 위해서는 대표적으로 입열량당 회분내의 알칼리성분의 무게로 정의되는 인덱스가 제안되었다. 회분은 산화철과 Dolomite의 함량(I/D)에 따라 역청탄형 회분과 갈탄형 회분으로 구분 지을 수 있다. 이를 나타내는 I/D 인덱스를 통해 회

**Table 2.** New indexes

	Index	Definition	Ash deposition propensity		
			Low	Medium	High
Slagging	Rfs	$(4\text{IDT}+\text{HT}^*)/5$	1505~1615℃	1325~1505℃	<1325℃
	Rts	$(T_{25}-T_{1000})/(0.75 \times \text{fs}^{**})$	<5	5~10	>10
	BHEL	$R_m^{***}/T_m^{****} \times \% \text{ash}/\text{HHV}^{*****}$	<80		>80
Fouling	Total Alkalis Fired	$100 \times (\% \text{ash} \times (\% \text{Na}_2\text{O}+\% \text{K}_2\text{O}))/\text{HHV}$	>0.4	0.4~0.8	>0.8
Slagging/ Fouling	I/D(Iron/Dolomite)	$(\text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{CaO}+\text{MgO})$	<*: Lig. ash		>*: Bit. ash
	B/L(Bit. ash/Lig. ash)	$(\% \text{ash} \times \% \text{S})/(\% \text{K}_2\text{O} \times \% \text{Na}_2\text{O}) \times \text{I/D}$	<*: Lig. ash		>*: Bit. ash

\*HT: Hemispherical temp., \*\*fs: Severity factor according to temp., \*\*\*R<sub>m</sub>: Max. rate of shrinkage for 2<sup>nd</sup> peak, \*\*\*\*T<sub>m</sub>: Temp. corresponding to R<sub>m</sub>, \*\*\*\*\*HHV: High heating value,

분 부착이 상대적으로 잘 발생하는 탄(역청탄형)인지 아닌지(갈탄형)의 구분이 가능하다. 여기에 회분, 황 그리고  $K_2O$ 와  $Na_2O$ 의 함량의 영향을 더 고려한 B/L 인덱스도 이러한 회분 구분을 위해 제안되어 졌다[17]. 갈탄형과 역청탄형을 구분짓는 I/D 및 B/L 인덱스의 기준값은 그 상황에 따라 달라짐이 보여 졌다[17].

### 5. 인덱스를 통한 예측 및 비교 평가

Fig. 4과 Fig. 5는 Table 1과 Table 2에서 제시된 파울링 및 슬래깅 인덱스들[2,5,6,11-17] 중 일부를 다

양한 탄종[5,6,11,13,14,16]에 적용하여 회분 부착성향 예측 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4의 경우 슬래깅 인덱스 중에서 이산화규소 함량,  $R_s$ , B/L에 따른 예측 결과를 보여준다. 회분 중 이산화규소의 함량이 높으면, 염기성 산화물에 대한 산성 산화물의 비에 황 함유량을 고려한  $R_s$  값이 낮으면, 갈탄형과 역청탄형을 구분짓는 B/L 값이 20 이하이면 회분 부착성향이 낮은 것으로 예상되어 진다. 하지만, 3가지 Index를 통한 회분 성향 예측이 동일한 탄종에 대하여 다르게 나타남을 확인할 수 있다.  $R_s$ 를 통한 예측은 모든 탄종의 부착성향이 낮게 판명되고, 이산화규소 함량 및 B/L을 통한 예측도 서로 상이하게

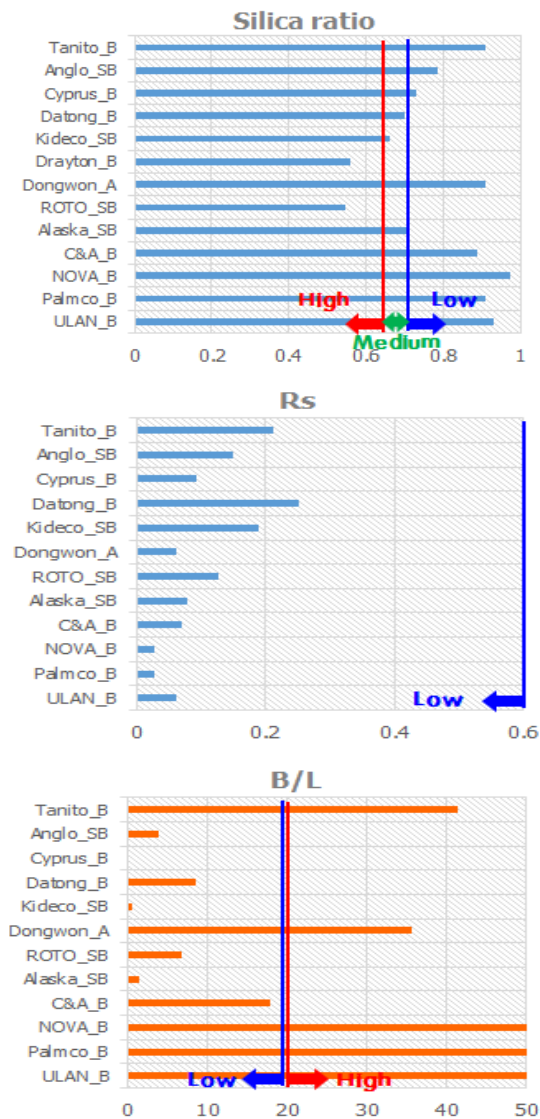


Fig. 4. Prediction of slagging propensity of various coal using slagging indexes.

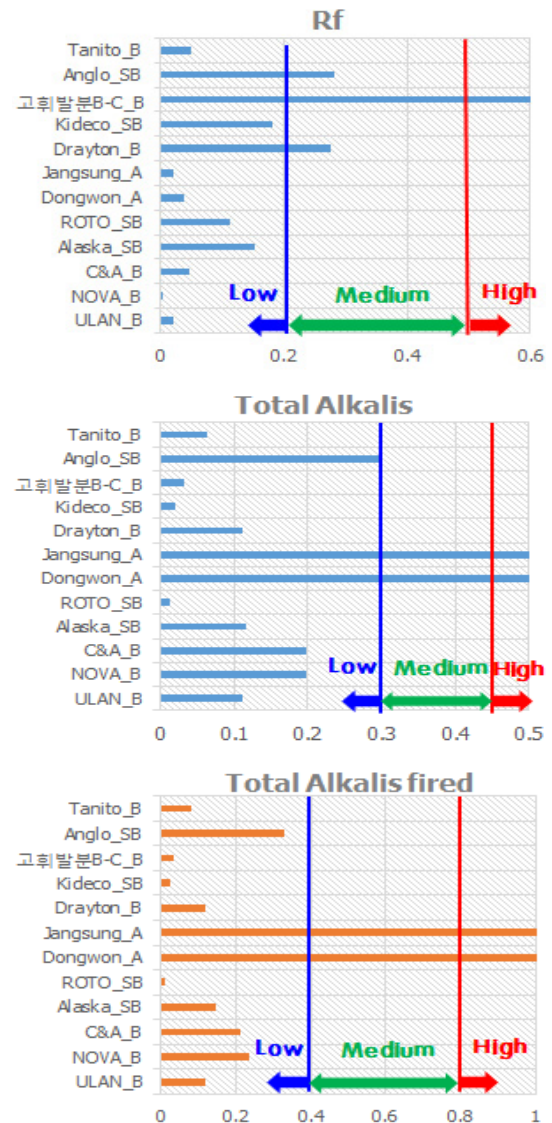


Fig. 5. Prediction of fouling propensity of various coal using slagging indexes.

**Table 3.** Slagging propensity from indexes and comparison with lab. scale experimental data

Coal	Existing index					New index	Lab. scale Exp.	
	B/A	Rs	Silica ratio	I/C	Silica/Alumina	B/L	Exp.	Comparison
Anglo (SB)	M	L	L	H	M	Lignite ash	H	Anglo<Tanito
Tanito (B)	L	L	L	H	H	Bituminous ash	H	

**Table 4.** Fouling propensity from indexes and comparison with lab. scale experimental data

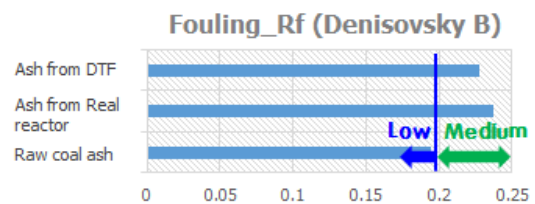
Coal	Existing index		New Index		Lab. scale Exp.	
	Rf	Total alkalis	Total alkalis fired	B/L	Exp.	Comparison
Anglo (SB)	M	M	L	Lignite ash	H	Anglo<Tanito
Tanito (B)	L	L	L	Bituminous ash	H	

나타남을 확인할 수 있다.

인덱스에 따른 다른 부착성향 예측은 파울링 인덱스를 통한 예측 결과를 보여주는 Fig. 5에에서도 동일하게 나타나고 있다. 파울링 인덱스 중에서 염기성 산화물에 대한 산성 산화물의 비에  $\text{Na}_2\text{O}$ 의 함유량을 고려한 Rf, 회분 조성중의 주 휘발성분인  $\text{Na}_2\text{O}$ 와  $\text{K}_2\text{O}$ 의 비를 나타내는 Total Alkali 그리고 입열량 당 회분 조성 중 알칼리 성분의 비를 정의한 Total Alkali Fired 인덱스를 통해 파울링 정도를 예측해 보았다. Total Alkali와 Total Alkali Fired를 통해 예측한 파울링 정도는 탄종에 따라 거의 동일하게 나왔으나, Rf를 통한 예측값과는 탄종에 따라 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

다양한 회분 부착 인덱스에 따른 예측값을 비교 평가해 보기 위해 문헌 중 실험을 통해 회분 부착 정도에 대해 제시된 2가지 탄종에 대하여 앞서 설명한 다양한 인덱스를 통해 예측해 보고 그 결과를 실험값과 비교 평가해 보았다[5]. Table 3과 Table 4는 각각 슬래깅과 파울링의 비교 결과를 나타낸 것이다. 표에서 보이듯이, 슬래깅의 경우 I/C 인덱스를 통한 예측값이 실험값과 동일하게 나타나고, Silica/Alumina 도 어느 정도 비슷하게 예측한다. 2가지 탄종의 상대적인 부착 정도에 대하여서는 B/L 인덱스를 통해 예측하고 있다. 하지만, 나머지 다른 인덱스 B/A, Rs, Silica ratio 등은 실험값과 상반된 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 파울링의 경우는 인덱스를 통한 예측 중 실험값과 동일하게 그 파울링 성향을 예측하는 것은 없음을 확인할 수 있다. 슬래깅과 동일하게 B/L을 통한 2가지 탄종의 상대적인 부착성향에 대한 정도만이 실험값과 맞음을 확인할 수 있다. 이처럼 본 논문에서 평가된 인덱스의 경우, 서로 상이한 예측 결과를 보였다.

본 연구에서 다양한 인덱스에 대한 평가를 진행함에 있어서 각 인덱스의 입력 사항에 대한 이해와 주의가 필요함을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 DTF, 실

**Fig. 6.** Different prediction through a index according to the origin of coal ash[13].

제 연소기 그리고 원탄에서의 회분 조성값을 각각 입력값으로 하여 인덱스 Rf를 통해 파울링 정도를 예측한 결과이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, DTF와 실제 연소기에서 생성된 회분의 데이터를 적용하면 부착 성향이 중간 정도인 것으로 판명되었으나, 원탄에서의 회분 정보를 통해 계산하면 부착 성향이 낮게 예측되었다. 그러므로 각 인덱스를 통해 부착 성향을 평가할 때 그 인덱스 관련 입력값에 대한 이해와 주의가 반드시 필요할 것으로 생각된다. 특히, 부착성향을 좀 더 명확하고 정확하게 판별하기 위해 제시되고 있는 보완된 인덱스의 적용 시 더욱 이러한 주의가 필요할 것이다. 보완되어 제시되는 인덱스의 경우 일반적으로 다양한 인자들, 특히 용융성에 밀접한 관련이 있는 용융온도나 다양한 회분 조성의 조합으로 이루어지기 때문에 관련 인덱스 활용 시 인자 개별에 대한 명확한 이해가 우선 시 되어야지만 실제 현상에 좀 더 가깝게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 논문을 통해 회분 부착 성향 예측을 위해 제시된 다양한 접근 방법에 대하여 고찰해 보았다. 또한 제시된 다양한 실험 인덱스들에 대해 살펴보고 이를 통한 회분 부착성향 예측 결과들을 비교 평가해 보았다. 실험을 통한 특정 탄종의 회분 부착성향에

대한 정보가 많지 않아 다양한 탄종에 대하여 인덱스를 평가해 보지는 못하였지만, 본 논문에서의 계산을 통해 가늠해 볼 때 제안된 인덱스마다 서로 상이한 회분 부착성향을 보였다. 회분의 조성과 용융점에 기반한 기존 인덱스를 보완하고자 복합적인 영향을 고려하여 제안된 인덱스 중 일부는 계산을 위해 필요한 값이 탄종 별로 제시되지 않아 평가하지 못하였다. 비록 본 논문이 새로운 예측 방안이나 인덱스를 제시하지는 않지만, 다양한 회분부착 성향 예측 인덱스에 대한 이해에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 다양한 인덱스의 탄종별 적용 및 상대적인 평가를 통해 실용적이고 통합적인 회분 부착성향 예측 방안의 틀을 마련하는데 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다.

## References

- [1] T. Moskal, S. Scott, Economic Consequences of Boiler Cheanning Effectiveness, Technical Publication, Report No. DPTP-98-1, Diamond Power International, Lancaster, Ohio, 1998.
- [2] H.D. Lee, J.K. Kim, Combustion Characteristics of Two Imported Indonesia Coals as a Pulverized Fuel of Thermal Power Plants, *Energy Engg. J.*, 19(2) (2010) 136-142.
- [3] J.G. Singer, Combustion, Fossil Power Systems: A Reference Book on Fuel Burning and Steam Generation, Combustion Engineering, Windsor, CT, 1981.
- [4] A.F. Stam, W.R. Livingston, M.F.G. Cremers, G. Brem, Review of Models and Tools for Slagging and Fouling Prediction for Biomass Co-combustion, Task 32, 2009.
- [5] H.Y. Park, E.H. Kim, Y.J. Kim, H.S. Im, K.S. Kim, J.E. Lee, Advanced Slagging Propensity of Coal and its Assessment with the Conventional Indices, *Energy Engg. J.*, 21(4) (2012) 427-434.
- [6] S.H. Lee, C.S. Park, Prediction of Slagging Propensity of Coal Ash, *Energy Engg. J.*, 4(1) (1995) 42-51.
- [7] S.K. Knudsen, Numerical Investigation of Ash Deposition in Straw-fired Boilers- Using CFD as the Framework for Slagging and Fouling Predictions, Doctoral Thesis, Technology Institute of Energy, University of Aalborg, Denmark, 2001.
- [8] K.J. An, B.H. Lee, S.I. Kim, C.H. Jeon, Study on Slagging Characteristics of Hybrid Coals using the Thermo-mechanical Analysis, The KSME Symposium, 2013, 59-61.
- [9] N. Mendes, E. Bazzo, Characterization and Growth Modeling of Ash Deposits in Coal Fired Boilers, *Powder Technol.*, 217 (2012) 61-68.
- [10] R.W. Bryers, Firing Slagging, Fouling, and High-temperature Corrosion of Heat-transfer Surface due to Impurities in Stream-raising Fuels, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 29 (1996) 29-120.
- [11] S.W. Chung, H.T. Kim, S.H. Lee, J.S. Park, A Study on the Slagging Behavior of Coal Ash in Gasifier using DTF, *Energy Engg. J.*, 4(2) (1994) 203-213.
- [12] B.J. Jung, High Temperature Viscosity Measurement of Coal Ash Slags in Oxidizing Atmosphere, *Energy Engg. J.*, 4(3) (1995) 324-330.
- [13] B.C. Choi, H.T. Kim, Phase Equilibrium Analysis of Slagging Propensity of Coal Ash in Combustion/Gasification Environments, The Korean Society for Energy Engineering Symposium, 1999, 75-81.
- [14] B. Jung, J. Yi, K.B. Lee, Y. Yun, Characteristics of Coal Ash Melting in Bench Scale Entrained Coal Gasifier, *Energy Eng. J.*, 8(1) (1999) 127-136.
- [15] K. Kang, J. Lee, T. Chae, C. Ryu, W. Yang, An Experimental Study on Slagging/Fouling Characteristics for Various Coals in a 50kWth Pulverized Coal Combustion System, The 45<sup>th</sup> KOSCO Symposium, 2012, 107-109.
- [16] B.C. Choi, H.T. Kim, W.G. Chun, A Study on the Slagging Behavior with Various Composition of Coal Ash, *Energy Engg. J.*, 8(3) (1999) 445-451.
- [17] Y.S. Kim, Y.H. Bae, J.J. Yoon, Influence of Bituminous Coal Characteristics on Thermal Utility Boiler Design, The KSME Symposium, 2002, 137-156.
- [18] B.P. Lim, B.C. Choi, H.T. Kim, Studies of Rate of Ash Deposit of Various Coals for Analysis of IGCC Fouling Effect, The Korean Society for Energy Engineering Symposium, 2000, 61-66.
- [19] B.P. Lim, B.C. Choi, H.T. Kim, Numerical Model of Ash Deposition Behavior in the Bench Scale Entrained-bed Gasifier with DTF(Drop Tube Furnace), The Korean Society for Energy Engineering Symposium, 2001, 25-32.
- [20] L.Y. Huang, J.S. Norman, M. Pourkashanian, A. Williams, Prediction of Ash Deposition on Superheater Tubes from Pulverized Coal Combustion, *Fuel*, 75(3) (1996) 271-279.
- [21] H. Wang, J.N. Harb, Modeling of Ash Deposition in Large-scale Combustion Facilities Burning Pul-

- verized Coal, Prog. Energy Combust. Sci., 23 (1997) 267-282.
- [22] F.C.C. Lee, F.C. Lockwood, Modelling Ash Deposition in Pulverized Coal-fired Applications, Prog. Energy Combust. Sci., 25 (1999) 117-132.
- [23] Z. Ma et al., A Comprehensive Slagging and Fouling Prediction Tool for Coal-fired Boilers and its Validation/application, Fuel Proc. Tech., 88 (2007) 1035-1043.
- [24] M.Y. Hwang, C.H. Jeon, J.H. Song, G.B. Kim, S.M. Kim, M.S. Park, Coal Ash Combustion Simulation for 500-MW Coal-firing Boiler, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 35(9) (2011) 939-946.
- [25] J. Hong, H.J. Jeong, J. Song, J. Hwang, Numerical Study on the 300 MW Shell-type One-stage Entrained Flow Coal Gasifier Applied with 4-Layer Slagging Model, J. Korean Soc. Combust., 17(1) (2012) 1-11.
- [26] K. Jang, K. Ham, K.Y. Huh, H. Park, Prediction of Ash Deposition Propensity in a Pilot-scaled Pulverized Coal Combustion, The 46<sup>th</sup> KOSCO Symposium, 2013, 87-90.
- [27] J.D. Watt, F. Fereday, The Flow Properties of Slags Formed from the Ashes of British Coals: Part 1 Viscosity of Homogeneous Liquid Slags in Relation to Slag Composition, J. Inst. Fuel, 42 (1969) 99-103.
- [28] T.R. Bott, Inorganic Transformations and Ash Deposition during Combustion, United Engineering Trustees Inc., 1992.
- [29] A. Lawrence, R. Jumar, K. Nandakumar, K. Narayanan, A Novel Tool for Assessing Slagging Propensity of Coals in PF Boilers, Fuel, 87 (2008) 946-950.