

Petrography 분석을 통한 고휘발 역청탄의 연소율 예측

이지환* · 이대균* · 야누아르 유디 이스워로** · 전용환*†

*부산대학교 기계공학부

**PT.SUCOFINDO, Jakarta-Indonesia

Prediction of Combustion Rate of High-Volatile Bituminous Coal through Petrographic Analysis

Ji-Hwan Lee*, Dae-Gyun Lee*, Yanuar Yudhi Isworo** and Chung-Hwan Jeon*†

*Department of Mechanical Engineering, Pusan National University

**PT.SUCOFINDO, Jakarta-Indonesia

(Received 8 December 2020, Received in revised form 21 December 2020, Accepted 4 January 2021)

ABSTRACT

The purpose of this study is to predict the combustion rate of high-volatile bituminous coal which is one of the important factors in determining the combustion conditions of a power plant. A method of predicting the combustion rate was proposed by integrating the petrography analysis elements related to the combustion rate. Since inertinite had a major effect on the combustion rate, it was possible to predict the combustion rate basically through the inertinite fraction, and petrofactor A was proposed by considering the Vitrinite reflectance value, and more accurate prediction was possible. Petrofactors B and C were proposed by additionally considering the standard deviation of vitrinite reflectance and the effect of liptinite to petrofactor A. The combustion rate could be more accurately predicted. Finally, petrofactor D was proposed considering all the previous factors, and the combustion rate was most accurately predicted.

Key Words : High-volatile bituminous coal, Prediction of combustion rate, Petrographic analysis, Maceral distribution, Vitrinite reflectance, Petrofactor

1. 서론

석탄 사용에 대한 규제가 세계적으로 늘어나고 있으며, 대한민국의 경우 전력수급계획, 에너지기본계획 등으로 규제를 하고 있다. 이에 따르면 석탄 화력발전의 설비용량 비중을 2030년까지 현재 약 70% 수준으로 감소시킬 계획이며, 반면 증가하는 에너지 수요로 인하여 절대적인 석탄 화력발전량은 현재와 비슷한 수준으로 유지할 계획이므로 화력발전은 계속적으로 주요한 역할을 할 것이다. 이로써 석탄에 대한 다양한 연구는 계속 진행되어야 한다.

각 발전소에서 사용되는 석탄은 계속적으로 변경된다.

석탄이 변경될 때마다 등급, 발열량, 기초성분 등이 변하고 연소특성이 다르게 나타나기 때문에 석탄에 따라 발전소 가동조건을 변동해야 한다. 사용되는 석탄의 연소율은 발전소의 연소조건을 결정하는 중요한 요소 중 하나임으로 연소율에 대한 예측이 필요하다.

석탄의 연소특성은 기초물성에 따라 다르며, 서로 기초물성이 비슷하더라도 입자의 광물학적 특성에 영향을 받는다. 광물학적 특성을 Petrography 분석을 통해 확인하고 연소율을 예측할 수 있을 경우, 연소실험을 진행하지 않고 각 석탄의 연소율을 알 수 있다. Petrography 분석은 실험 조건에 따라 결과 값이 변화할 수 있는 연소실험 보다 주변 환경 영향을 적게 받아 높은 재현성을 가진다. 추가적으로 연소실험을 병행할 경우 미리 Petrography 분석으로 예측된 연소율로 연소실험결과를 예측함으로써 실험 결과의 신뢰도를 높이고, 비용을 통해 더 높은 신뢰도를 갖는 연소율을 확인할 수 있다.

†Corresponding Author, chjeon@pusan.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.

Richard W. Bryers와 Atul Kumar Varma 외 4인은 DTF (Drop Tube Furnace) 등의 연소장치를 통해 연소실험을 진행하였고, 각 연구에서 Unburned char의 발생이 Inertinite 용적 분율과 Vitrinite reflectance에 비례하는 관계를 보였다[1, 2]. 또한 Inertinite와 Vitrinite의 밀도에 대한 연구도 진행되었다. 석탄 Maceral(Vitrinite, Inertinite)의 각 용적 분율에 따라 발생하는 Char의 밀도를 비교분석하였고, Inertinite가 Vitrinite보다 높은 밀도를 가지는 것을 확인하였다[1].

Nandita Choudhury 외 5인은 일반적으로 석탄의 등급의 지표로 사용하고 있는 Vitrinite reflectance와 연소성이 좋아 반응할 수 있는 Maceral의 양을 고려한 Petrofactor를 이용하여 TGA 결과 값의 경향을 나타내었다. Petrofactor는 각각의 실험 결과와 더 높은 결정계수 값을 가졌고 석탄의 등급의 지표로 사용할 수 있음을 보였다[3].

하지만 본 연구에서 예측하고자 하는 연소율은 석탄의 등급만으로 예측하기 어렵다. 또한 선행 연구들에서 각각의 Petrography 분석 결과와 연소율과의 상관관계를 확인하였지만, 각각의 결과만으로 연소율을 정확하게 예측하기 어렵다.

본 연구에서는 고휘발 역청탄의 연소율을 예측하기 위하여 DTF(Drop Tube Furnace)장치를 통한 연소실험과 광학현미경을 이용한 광물학적 분석을 수행하였다. 연소 실험 결과 연소율을 Petrography 분석 결과와 비교 분석하였으며, 연소 전 석탄의 다양한 Petrography 분석을 통합하여 새로운 Petrofactor 값을 제시하고 연소율을 더욱 정확히 예측하고자 하였다.

2. 실험

2.1 시료 물성 분석

연구에서 사용된 석탄은 국내 미분탄 보일러에서 현재 사용·연구되는 총 12종의 고휘발분 역청탄이며, 각 석탄들의 기초 물성분석을 진행하였다. 공업분석은 열중량분석기(Thermogravimetric Analyzer, TGA701, LECO, CO., USA)를 사용하여 ASTM D5142-09 기준에 따라 진행하였고, 발열량분석은 상용 열량계(5E-C5500, Automatic Calorimeter, CKIC, CO., China)를 사용하여 ASTM D5865-19 기준에 따라 분석을 진행하였으며[5,6], 분석결과를 Table 1에 나타내었다. 원소분석은 원소분석기(FLASH 2000, Organic Elemental Analyzer, Thermo Fisher Scientific, Co., U.K.)를 사용하여 ASTM D5373-16 기준에 따라 진행하였으며[7], 분석결과를 Table 2에 나타내었다.

분석결과본 연구에 사용된 석탄 12종은 석탄 분류방법

Table 1. Properties of samples (Air Dry Basis)

Samples	Proximate analysis (wt. %)				Calorific value
	Mois.	V.M	F.C	Ash	LHV (kcal/kg)
A	14.70	43.51	37.78	4.01	5,318
B	12.66	36.38	46.64	4.33	6,002
C	9.48	34.42	36.86	19.24	5,514
D	8.16	39.05	46.21	6.58	6,710
E	13.94	36.68	38.38	11.00	5,974
F	7.91	33.56	50.89	7.64	6,517
G	2.84	27.46	54.50	15.21	6,707
H	3.79	23.75	57.11	15.37	6,398
I	5.58	31.79	51.79	10.85	6,708
J	2.28	30.85	56.74	10.13	6,496
K	6.93	24.30	47.48	21.29	5,832
L	2.47	29.80	53.32	14.42	6,764

Table 2. Ultimate analysis of samples

Samples	Ultimate analysis (Dry basis, wt. %)				
	C	H	N	O	S
A	72.13	5.12	1.41	17.08	0.11
B	74.25	4.98	0.88	14.15	0.47
C	60.82	4.58	1.23	16.59	0.31
D	76.00	5.68	1.54	10.48	0.80
E	71.32	5.21	1.49	12.84	0.85
F	73.73	4.78	1.57	13.22	0.45
G	72.31	4.46	1.67	5.24	0.57
H	70.64	3.95	1.25	6.79	0.56
I	73.35	4.84	2.04	8.94	0.48
J	69.80	4.11	1.59	7.54	0.55
K	65.73	3.94	1.64	11.08	0.50
L	72.33	4.55	1.60	4.85	0.69

ASTM D388-19a[8]와 Fig. 1에 나타낸 Van-Krevelen 그래프에 따라 고휘발분 역청탄 C로 구성되어있다.

2.2 DTF(Drop Tube Furnace) 연소실험

석탄의 연소율을 확인하기 위해 국내 미분탄 보일러의 연소 환경을 모사한 DTF 장치를 사용하여 실험을 진행하였다. DTF 장치는 크게 주입부, 반응부, 포집부로 구성되

며, 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 반응부의 반응 영역 내에서 온도 및 가스 환경을 일정하게 조성할 수 있으며, 주입부에서 MFC(Mass Flow Controller)에 의해서 가스를 주입하고 시린지 피더를 이용하여 석탄입자를 투입하였다. 연소반응 후 시료를 포집부에서 수득하였으며, 이를 완전재연소하여 UBC(Unburned Carbon)를 Ash Tracer Method를 이용하여 측정하였다.

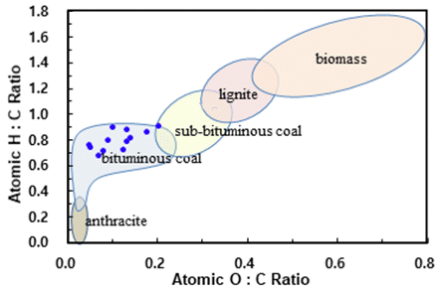


Fig. 1. Van-Krevelen diagram of each coal sample.

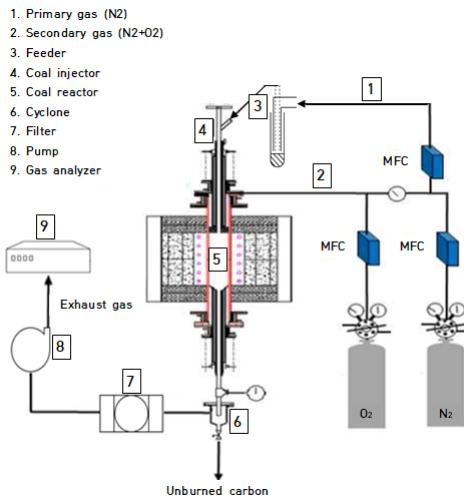


Fig. 2. Schematic diagram of DTF(Drop Tube Furnace) and flow systems.

Table 3. Experimental condition of DTF

	Condition
Injection gas	O ₂ , N ₂
stoichiometric ratio	1.16
Gas flow rate [L/min]	5
Coal feeding rate [g/min]	0.2
Temperature [°C]	1300
Residence time [sec]	2

DTF 실험조건은 Table 3에 나타내었으며, 반응부 온도, 체류시간, 가스 등의 연소 조건과 미분탄 사이즈(75-90 μm)를 국내 미분탄 보일러 조건을 모사하여 실험을 진행하였다.

2.3 Petrography 분석

본 연구에서는 석탄의 연소율을 예측하기 위하여 Petrography 분석을 진행하였으며, 분석 장치 구성을 Fig. 3에 나타내었다. 광학현미경은 백색광과 자외선을 광원으로 사용하며, 본 연구에서는 50배율 대물렌즈와 10배율 접안렌즈를 사용하여 500배율로 샘플을 분석하였다. 분석은 Fig. 4와 같이 진행되며, 미분탄과 액상 resin을 섞어 원통형 용기에서 샘플을 제작·건조하고, 연마지를 이용하여 샘플을 연마하여 광학 현미경에서 분석을 진행하였다. 분석은 Raw coal에 대하여 Maceral distribution, Vitrinite reflectance, Microlithotype 분석, Char에 대하여 classification 분석을 진행하였다.

석탄을 구성하는 각 Maceral은 크게 Liptinite, Vitrinite, Inertinite로 구성되어 있으며, 현미경에서 Fig. 5와 같이 관찰된다. Liptinite는 자외선상에서 백색 혹은 형광색으

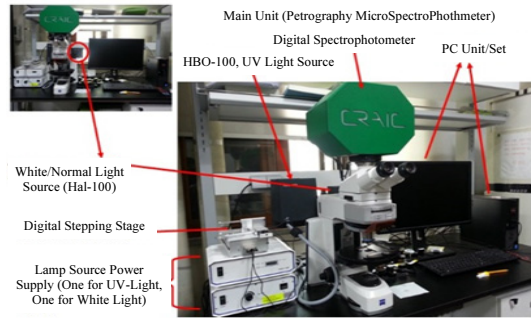


Fig. 3. Composition of electron microscope for petrography analysis.

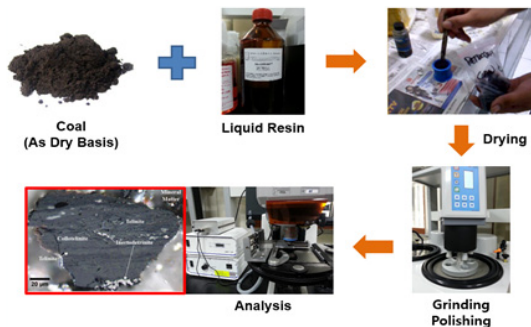


Fig. 4. Petrographic analysis process.

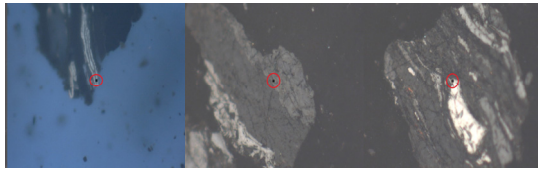


Fig. 5. Pictures of Liptinite under Ultraviolet light(Left) & Vitrinite(Mid), Inertinite (Right) under white light.

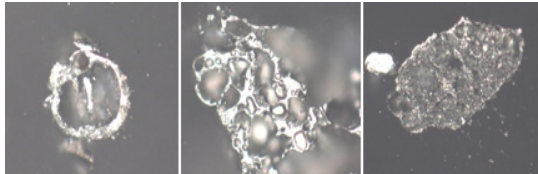


Fig. 6. Pictures of char structure.

로 관찰되며, 백색광에서 Vitrinite는 회백색, Inertinite는 밝은 백색으로 관찰된다. Maceral distribution 분석은 석탄을 구성하고 있는 각 Maceral의 구성을 확인하며, 1×1 μm 측정구역을 500회 이상 반복 이동하고 각 Maceral의 종류를 카운트한다.

Vitrinite reflectance 분석은 5×5 μm 측정구역을 100회 이상 서로 다른 Vitrinite 상을 반복 이동하며, Vitrinite에서 돌아오는 reflectance값을 측정한다. 이때, Vitrinite reflectance는 일반적으로 정규분포 값을 가지며, 평균값은 석탄의 등급을 나타내는 지표로 사용된다.

Microlithotype과 Char classification 분석은 각각 Raw coal과 Char에서 구조를 분석한다. Raw coal의 경우 Maceral이 입자를 이루고 있는 구조를 분석하며, 주로 Inertinite의 포함 정도에 따라 연소성이 좋은 구조(MPG1)와 좋지 않은 구조(MPG2)를 분류한다. Char의 경우 Fig. 6과 같이 Char의 기공분율, 벽두께 등이 발생하는 구조 등을 분석한다. Fig. 6의 좌측 2개 그림과 같이 기공이 많이 발생하고, 벽이 얇은 경우 연소성이 좋은 구조(Group1)로 분류하며, 이외 구조를 좋지 않은 구조(Group2)로 분류한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Inertinite와 Vitrinite reflectance에 의한 연소율 예측

DTF 장치를 통한 연소율(UBC) 실험 결과와 Maceral distribution 분석과 Vitrinite reflectance 분석결과를 Table 4, 5에 각각 나타내었다. 각 탄별로 UBC 실험은 각 3회씩 진행하였고, 평균값을 사용하였으며, UBC 결과는 최대

Table 4. Maceral distribution and UBC result

Samples	Maceral distribution [%]			UBC (Unburned Carbon) [%]
	Liptinite	Vitrinite	Inertinite	
A	5.4	92.6	2.0	1.0
B	3.4	88.6	8.0	4.2
C	3.2	88.8	8.0	9.1
D	5.8	90.2	4.0	9.6
E	7.2	83.8	9.0	13.4
F	0.8	90.2	9.0	18.0
G	2.2	78.8	19.0	35.2
H	0.0	85.9	14.1	36.0
I	1.8	85.2	13.0	36.2
J	1.3	79.8	19.0	38.4
K	3.2	74.8	22.0	38.5
L	2.3	88.5	9.2	38.9

Table 5. Vitrinite reflectance result with UBC

Samples	Vitrinite reflectance [%]		UBC [%]	
	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation
A	0.210	0.046	1.0	0.20
B	0.301	0.058	4.2	0.27
C	0.272	0.046	9.1	0.11
D	0.272	0.068	9.6	1.81
E	0.354	0.106	13.4	0.45
F	0.326	0.049	18.0	0.19
G	0.277	0.109	35.2	0.03
H	0.416	0.129	36.0	0.14
I	0.401	0.076	36.2	0.27
J	0.357	0.105	38.4	1.81
K	0.281	0.099	38.5	0.60
L	0.411	0.156	38.9	0.55

1.81% 표준편차 값을 가지면서 최소 1%에서 최대 약 39%까지 발생하였다. Inertinite 분율은 최소 2%에서 최대 22%까지 측정되었으며, Vitrinite reflectance의 평균값은 최소 0.21%에서 최대 0.42%까지 측정되었고, 측정값은 고휘발 역청탄이 보이는 값의 영역에 속하는 것을 확인할 수 있었다[4]. 또한 그 표준편차 값은 최소 0.046%에서 최

대 0.156%까지 다양한 값을 가졌으며, 서로 다른 분포를 가지는 점을 확인하였다.

Fig. 7, 8은 UBC 발생과 각탄의 Inertinite와 Vitrinite reflectance의 상관관계를 나타내는 각각의 그래프이다. 선행연구 결과와 같이 두 가지 요소가 모두 UBC와 비례하는 관계를 가졌으며, 각각 0.67, 0.40의 결정계수(R^2) 값을 보였고, 특히 Inertinite fraction이 Vitrinite reflectance 보다 UBC와 더욱 비례하였다. Inertinite는 석탄을 구성하고 있는 Maceral 중 가장 밀도가 높고 연소성이 현저히 떨어지기에 UBC 발생에 가장 큰 영향을 미치며, Inertinite 분율로 연소율을 예측하는 것이 가능하고 이를 본 연구에

서 연소율 예측의 기본 요소로 선정하였다.

Vitrinite reflectance의 경우, 본 연구에서는 Inertinite 값이 다양한 탄종을 선정하였기에 UBC와 비례관계가 약하게 나타났으며, 선행연구에서는 UBC와 비례관계를 보였다. Vitrinite는 석탄을 구성하는 Maceral 중 75%이상으로 가장 높은 비율을 차지하며, vitrinite reflectance가 높아질수록 Fuel ratio와 밀도가 높아져 연소성이 감소한다[2, 4]. 따라서 Vitrinite reflectance를 Inertinite fraction과 함께 고려하여 더 정확한 연소율을 예측이 가능하며 이를 본 연구에서 Petrofactor A로 제시하였다. 이때, Petrofactor는 UBC를 예측하는 지표로 사용되며, UBC는 백분율로 나타나기 때문에 100을 곱하여 값을 나타내었다.

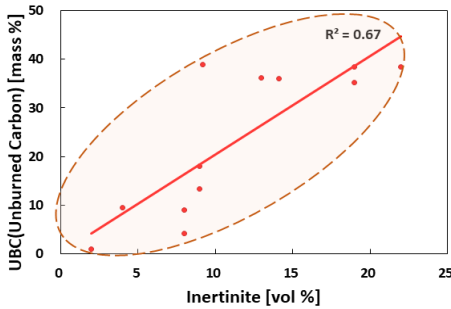


Fig. 7. Relation between inertinite fraction and UBC.

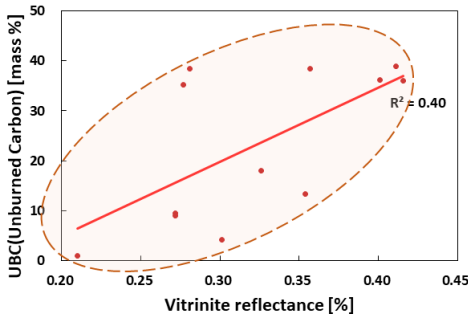


Fig. 8. Relation between vitrinite reflectance and UBC.

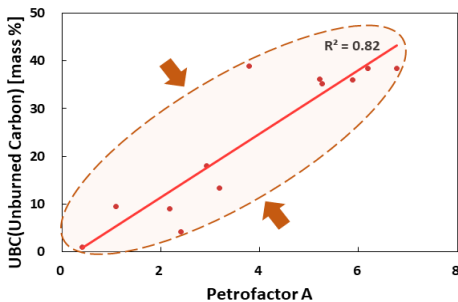


Fig. 9. Relation between petrofactor A and UBC.

Petrofactor A

$$= \text{Inertinite fraction} \times V.R_mean \times 100 \quad (1)$$

Petrofactor A와 UBC의 상관관계를 Fig. 9 그래프를 통해 나타내었다. 두 값은 0.82의 결정계수 값을 가지며 각각의 Inertinite fraction과 Vitrinite reflectance 보다 상당히 높은 상관관계를 보였다. 따라서 Inertinite fraction과 Vitrinite reflectance를 함께 고려한 Petrofactor A를 연소율을 예측하는 지표로 사용하였을 때 보다 더욱 정확하게 연소율을 예측할 수 있음을 확인하였다.

3.2 Vitrinite reflectance 표준편차를 고려한 연소율 예측

Vitrinite reflectance는 단일 탄종의 경우 일반적으로 정

Table 6. Microlithotype analysis result

[%]	C	D	G	K
Mean vitrinite reflectance	0.272	0.272	0.277	0.281
Vitrite	75	83	57	41
Inertite	3	5	7	8
Clarite	8	4	7	9
Vitrinertite-V	10	3	18	11
Vitrinertite-I	2	3	7	5
Durite	0	2	2	5
Vitrinertoliptite	0	0	1	0
Duroclarite	0	0	0	13
Clarodurite	2	0	0	8
MPG1	93	90	83	74
MPG2	7	10	17	26

Table 7. Char classification analysis result

[%]	C	D	G	K
Tenuisphere	24	15	10	1
Crassisphere	2	2	5	3
Tenuinetwork	68	70	35	36
Crassinetwork	3	10	7	33
Mixed Porous	2	3	28	22
Mixed Solid	1	0	15	5
Group 1	92	85	45	37
Group 2	8	15	55	63

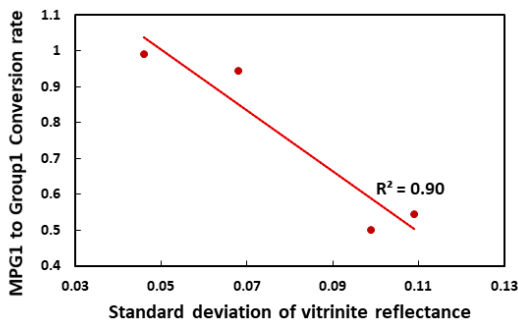


Fig. 10. Relation between standard deviation of vitrinite reflectance and MPG1 to Group1 conversion rate.

구분포 값을 가지며 탄종별 표준편차 값이 다르게 나타난다. 표준편차가 큰 석탄일수록 Vitrinite reflectance 평균값보다 높은 reflectance 값을 가지면서 연소성이 낮은 Vitrinite를 더 많이 포함한다. 따라서 연소과정에서 연소성이 떨어지고 입자 내부 벽이 두껍게 형성되어 필요한 연소시간이 길어져 UBC양이 증가할 것으로 예측하였다.

Vitrinite reflectance 표준편차의 영향을 확인하기 위하여 평균 reflectance가 비슷한 탄종 C, D, G, K의 Microlithotype과 Char classification 분석을 진행하였고, 이를 통해 Raw coal과 Char의 구조를 비교하였다. 분석결과를 Table 6, 7에 나타내었으며, 각 분석의 세부요소를 MPG1, 2와 Group1, 2로 분류하였다. 그 결과 reflectance 평균값이 비슷하더라도 표준편차가 큰 석탄일수록 Fig. 10의 MPG1 to Group1 변환율 값이 작아지며, 이를 통해 Raw coal에서 연소성이 좋은 구조(MPG1)보다 Char에서 연소성이 좋은 구조(Group1)가 비교적 적게 발생하고, 벽이 두껍게 생성되는 것을 확인하였다. 따라서 Vitrinite reflectance 표준편차를 평균값과 함께 고려하여 Petrofactor B를 제시하였다.

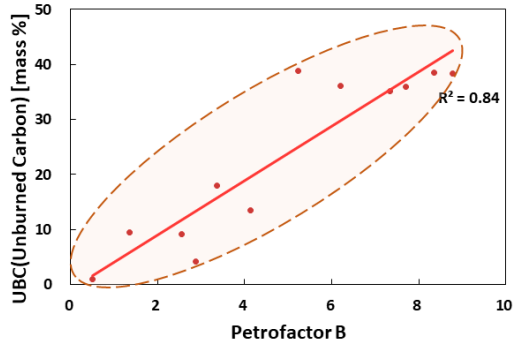


Fig. 11. Relation between petrofactor B and UBC.

Petrofactor B

$$= \text{Inertinite fraction} \times (\text{V.R.}_{\text{mean}} + \sigma) \times 100 \quad (2)$$

Petrofactor B와 UBC의 상관관계를 Fig. 11 그래프를 통해 나타내었다. 두 값은 0.84의 결정계수 값을 가지며 Inertinite fraction과 Vitrinite reflectance를 함께 고려한 Petrofactor A보다 높은 결정계수 값을 보였다. 따라서 Vitrinite reflectance의 표준편차 값을 함께 고려하여 Petrofactor B를 연소율을 예측하는 지표로 사용하였을 때 보다 더욱 정확하게 연소율을 예측할 수 있음을 확인하였다.

3.3 Liptinite를 고려한 연소율 예측

Liptinite는 석탄을 구성하는 Maceral 중 가장 연소성이 우수하여 연소시 대부분 완전 연소하며, 본 연구에서는 이를 확인하기 위해 Char에 대하여 Maceral 분석을 진행하였다. Liptinite는 자외선을 이용하여 확인가능하며 반응 후 Char를 자외선 상에서 확인하였을 때, Maceral 중 Liptinite를 발견하기 어려움을 확인하였다. 이를 통해 Liptinite는 연소반응 중 완전연소되며, 생성되는 UBC에 포함되지 않기 때문에 Liptinite를 제외하고 UBC를 예측해야한다고 판단하였다. 따라서 Liptinite 분율을 Petrofactor A와 함께 고려하여 Petrofactor C를 제시하였다.

Petrofactor C

$$= \text{Inertinite fraction} \times \text{V.R.}_{\text{mean}} \times (1 - \text{Liptinite fraction}) \times 100 \quad (3)$$

Petrofactor C와 UBC의 상관관계를 Fig. 12 그래프를 통해 나타내었다. 두 값은 0.83의 결정계수 값을 가지며 Petrofactor A보다 높은 결정계수 값을 보였다. 따라서 Liptinite의 우수한 연소성을 고려하여 UBC 발생에서 제외하고 Petrofactor C를 연소율을 예측하는 지표로 사용하

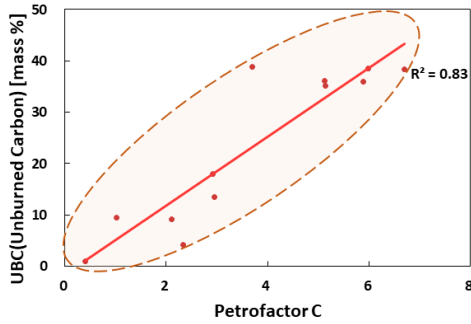


Fig. 12. Relation between petrofactor C and UBC.

였을 때 Petrofactor A를 사용하였을 때보다 더욱 정확하게 연소율을 예측할 수 있음을 확인하였다.

하지만 Liptinite를 10% 이상으로 많이 포함하는 아역 청탄 혹은 갈탄의 경우 Liptinite 분율이 높아 반응하지 못한 Liptinite가 발생할 수 있고, 이는 발생하는 UBC에 포함될 수 있기 때문에 Petrofactor C를 사용하기 적합하지 않다.

3.4 통합 연소율 예측

연소율을 가장 정확히 예측하기 위해 지금까지 사용하였던 모든 Petrography 요소 Inertinite 분율, Vitrinite reflectance 평균값 및 표준편차, Liptinite 분율을 통합하여 Petrofactor D를 제시하였다.

$$\begin{aligned} \text{Petrofactor D} \\ = \text{Inertinite fraction} \times (\text{V.R.}_{\text{mean}} + \sigma) \\ \times (1 - \text{Liptinite fraction}) \times 100 \end{aligned} \quad (4)$$

UBC와 비례관계를 보인 Petrography 요소들 Inertinite, Vitrinite reflectance, Petrofactor A, B, C, D와 연소율(UBC)과의 결정계수를 Table 8에 나타내었다.

Petrofactor D와 UBC의 상관관계를 Fig. 13을 통해 나타내었다. 두 값은 0.85의 결정계수 값을 가지며 본 연구에서 제시한 연소율 예측 지표 중 가장 높은 결정계수 값을 보였고, 모든 Petrography 요소를 통합한 Petrofactor D를 연소율을 예측하는 지표로 사용하였을 때 가장 정확하게 연소율을 예측할 수 있음을 확인하였다.

UBC 예측값이 실험값에 수렴하는 것을 보다 명확히 가시화하기 위해 Fig. 14와 같이 실험값에 대한 예측값을 그래프로 나타내었으며, 그래프에서 예측값이 대각 실선에 근접할수록 연소율이 정확히 예측되었음을 의미한다. 연소율을 예측하는 기본 요소인 Inertinite 분율과 Vitrinite reflectance 값을 추가적으로 고려한 Petrofactor A, Vitrinite reflectance의 표준편차와 Liptinite 분율을 추가적으로 고

Table 8. Coefficient of determination at each parameter

Parameter	Coefficient of determination (R^2)
Inertinite fraction	0.67
Vitrinite reflectance	0.40
Petrofactor A	0.82
Petrofactor B	0.84
Petrofactor C	0.83
Petrofactor D	0.85

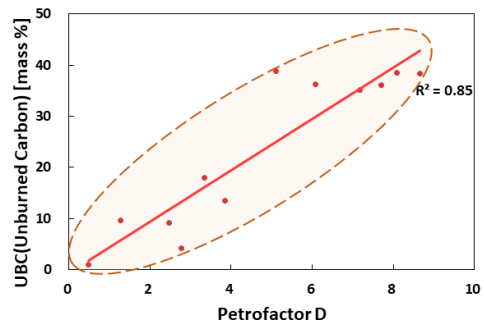


Fig. 13. Relation between petrofactor D and UBC.

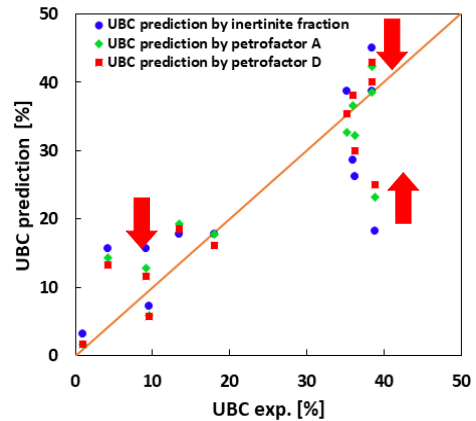


Fig. 14. Comparison of UBC experimental results and UBC prediction values.

려한 Petrofactor D에 의한 예측 연소율 값을 나타내었으며, 예측 연소율 값은 각 요소와 UBC 실험결과의 선형회기를 통해 계산하였다.

그 결과 Inertinite의 예측 연소율 파란색 표식에서 Petrofactor A의 녹색 표식, Petrofactor D의 붉은색 표식으로 갈수록 점점 대각 실선에 근접하였고, 더욱 정확히 예측되었음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 발전소의 연소조건을 결정하는 중요한 요소 중 하나인 연소율을 예측하고자 하였고, 연소 전 Petrography 분석을 통한 고휘발 역청탄의 연소율을 예측하는 방법을 제시하였으며, 연소율과 관련된 Petrography 분석 요소를 통합하여 보다 정확히 연소율을 예측하였다.

- 1) Inertinite 분율과 Vitrinite reflectance 값은 모두 UBC와 비례하는 관계를 가지며, Inertinite 분율이 보다 높은 상관관계를 보였다. 따라서 Inertinite 분율을 통해 연소율 예측이 가능하였으며, 추가적으로 Vitrinite reflectance를 함께 고려한 Petrofactor A를 제시하였고, 이를 통해 연소율을 보다 정확히 예측할 수 있었다.
- 2) Vitrinite reflectance 표준편차 값이 연소에 부정적인 영향을 미치는 점과 Liptinite가 발생하는 UBC에 포함되지 않는 점을 확인하였으며, 이를 Petrofactor A에 각각 추가적으로 고려하여 Petrofactor B와 C를 제시하였고, 보다 연소율을 정확히 예측할 수 있었다. 또한 모든 요소들을 고려하여 Petrofactor D를 제시하였고, 연소율을 가장 정확히 예측할 수 있음을 보였다.

하지만 Liptinite를 많이 포함하는 갈탄과 아역청탄의 경우 반응하지 못한 Liptinite가 발생할 수 있어 Petrofactor C와 D를 사용하는 것이 적절하지 않으며, Petrofactor B를 사용하여 연소율을 예측해야 한다.

본 연구를 통해 Petrography 분석을 진행함으로써 역청탄의 연소율을 예측할 수 있으며, 이를 통해 연소실험을 진행하지 않고 각 석탄의 연소율을 알 수 있다. 또한 연소 실험을 병행할 경우 미리 Petrography 분석으로 예측된 연소율로 연소실험 결과를 예측함으로써 실험결과의 신뢰도를 높이고, 비용을 통해 더 높은 신뢰도를 갖는 연소율을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업 위탁연구 결과입니다(본과제 번호 KIER-C02427).

References

[1] Atul Kumar Varma, Mrityunjay Kumar, Vinod Kumar Saxena, Ashish Sarkar, Santanu Kumar Banerjee, Petrographic controls on combustion behavior of

inertinite rich coal and char and fly ash formation, *Fuel*, 128 (2014) 199-209.

[2] Richard W. Bryers, Investigation of the reactivity of macerals using thermal analysis, *Fuel Process. Technol.*, 44 (1995) 25-32.

[3] Nandita Choudhury, Assessment of nature distribution of inertinite in Indian coals for burning characteristics, *Int. J. Coal Geol.*, 72 (2007) 141-152.

[4] Pearson Coal Petrography, Calorific Value Versus Vitrinite Reflectance, <http://www.coalpetrography.com/blog1/steam-coal-calorific-value-vitrinite-reflectance/>, 2018.

[5] ASTM D5142-09, Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures, ASTM International, 2010.

[6] ASTM D5865-19, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, 2019.

[7] ASTM D5373-16, Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2019.

[8] ASTM D388-19a Standard Classification of Coals by Rank, ASTM International, 2019.

[9] Sang-In Kim, Byoung-Hwa Lee, Ke-Ju An, Man-Cheol Kim, Seung-Mo Kim, Chung-Hwan Jeon, Effect of Ash Content on Unburned Carbon and NOx Emission in a Drop Tube Furnace, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, 38(12) (2014) 963-969.

[10] R. Barranco, M. Cloke, E. Lester, Prediction of the burnout performance of some South American coals, *Fuel*, 82 (2003) 1893-1899.

[11] N. Choudhury, S.G. Chaudhuri, C.C. Chakraborty, P. Boral, Studies on char morphology in relation to petrographic characteristics of some Permian coals of India, *J. Sci. Ind. Res. India.*, 63 (2004) 383-385.

[12] M. Cloke, E. Lester, Characterization of coals for combustion using petrographic analysis, a review, *Fuel*, 73 (1994) 315-320.

[13] M. Cloke, T. Wu, R. Barranco, E. Lester, Char characterization and its application in coal burnout model, *Fuel*, 82 (2003) 1989-2000.

저자정보



이지환

부산대학교 기계공학부 박사과정이며, 관심분야는 고체연료 연소특성 분석, 고체연료 광물학적(Petrography) 특성분석이다.



이대균

부산대학교 기계공학부 석·박사과정이며, 관심분야는 발전용·제철용 고체연료 연소 분석이다.



야누아르 유디 이스워로

PT.SUCOFINDO 연구원이며, 관심분야는 고체연료 연소특성 분석, 고체연료 광물학적(Petrography) 특성분석이다.



전충환

부산대학교 기계공학부 교수이며, 관심분야는 발전용·제철용 고체연료 연소 분석, 고체연료 가스화, 연소 시뮬레이션이다.