

순산소연소 조건에서 역청탄과 아역청탄 혼탄의 연소특성

성연모* · 문철언* · 안성율* · 김승일** · 서상일*** · 김태형*** · 정지환**** · 최경민***** · 김덕줄*****

Combustion Characteristics of Blended Coals with Bituminous and Sub-bituminous in Oxy-fuel Combustion Conditions

Yon-Mo Sung, Cheor-Eon Moon, Seong-Yool Ahn, Seung-Il Kim, Sang-Il Seo,
Tae-Hyung Kim, Ji-Hwan Jeong, Gyung-Min Choi and Duck-Jool Kim

ABSTRACT

This paper focuses on the combustion characteristics of blended coals with bituminous and sub-bituminous coals under air and oxy-fuel combustion conditions. The effects of oxygen concentration and blending ratio on the combustion characteristics were experimentally investigated using a thermogravimetric analyser (TGA). Characteristic temperatures including ignition, burnout temperature and activation energy were determined from TG and DTG combustion profiles. As oxygen concentration increased and the presence of sub-bituminous coal, characteristic temperatures and activation energy decreased. The ignitability, reactivity and kinetics have all been greatly improved under oxy-fuel combustion conditions. Based on this, co-firing with bituminous and sub-bituminous coals under oxy-fuel combustion conditions may be suggested as an alternative method to the fuel flexibility and cost-effective power production with carbon capture and sequestration.

Key Words : Blended coals, Ignition temperature, Activation energy, Oxy-fuel combustion, Combustion Characteristics

1. 서론

지구의 이산화탄소, 메탄 및 아산화질소의 대기 중 농도는 1750년 이래로 인간활동의 결과로써 현저하게 증가하고 있으며, 수천 년에 걸친 빙하코어 (Ice Core)에서 검출된 산업화 이전의 농도를 훨씬 초과하고 있다[1]. 산업화 이후 대기 중 이산화탄소 농도 상승의 주된 원인은 화석연료의 사용이며, 토지이용의 변화도 중요한 원인 중 하나이지만 상대적으로 영향이 적다[1]. 교토의정서 및 IPCC(International Panel on Climate Change)로부터의 정치적 규제로 인해 의무적으로 이산화탄소 배출을 저감해야 하는 현 상황에서 국내 화석연료 발전분야는 국내 총 이산화탄소 배출량의 20%를 차지하고 있으며, 그 가운데 석탄화력 발전소가 이산화탄소 배출량의 90% 정도를 차지하고 있다[2]. 현재 미분탄 화력발

전을 대상으로 제시되고 있는 이산화탄소 회수기술로서 미분탄 순산소 연소기술의 적용이 검토되고 있다. 미분탄 순산소 연소는 산화제로 기존의 공기 대신 질소를 제거한 O₂/CO₂를 공급함으로써 NO_x의 발생을 감소시킬 수 있으며, 배기가스에서 95% 이상의 고농도 이산화탄소를 쉽게 분리할 수 있는 기술이다.

국내 전력생산에 있어 가장 많은 비중을 차지하는 것은 유연탄 화력으로서 전체 전력생산의 32%를 차지하며, 유연탄은 석유, 천연가스에 비해 가장 긴 200여년의 가용연한을 보유하고 있는데다, 정치적으로도 안정된 여러 국가에서 생산된다는 측면에서 많은 장점을 보유하고 있어 미래 에너지로 주목받고 있다[3]. 하지만 우리나라는 유연탄의 전량을 수입하는 자원부족 국가로서 설계당시 기준탄 범위를 벗어난 다양한 탄종의 사용이 불가피하다. 특히 최근에는 중국, 인도 등 개발도상국들의 에너지 수요 증가로 인하여 가격상승과 수급불균형이 심화되고 있으며, 이로 인해 향후 저급탄 사용은 더욱 확대될 것으로 전망되고 있다[4]. 이러한 이산화탄소 저감 및 다양한 탄종의 사용에 대처하기 위해 현재 국내

* 부산대학교 기계공학부 대학원
** 한국남동발전 삼천포화력본부
*** 한국전력공사 전력연구원
**** 부산대학교 기계기술연구원
***** 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터
† 연락처, choigm@pusan.ac.kr

석탄화력발전소의 역청탄과 아역청탄의 혼합연소 제재에 순산소 연소기술의 적용이 요구되고 있다.

석탄등급, 석탄입자의 크기 및 산화제의 조성은 석탄입자의 연소거동, 착화온도, 연소속도 및 활성화 에너지 등의 연소특성에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 영향인자들을 고려하여 산화제 조건 및 혼탄에 관한 많은 연구들이 수행되었다. Buhre 등은 석탄 화력발전에서 순산소 연소기술의 연구 진행정도를 상세히 조사하였으며, 순산소 연소 연구의 필요성을 제안하였다[5]. Toftegaard 등은 지금까지 연구된 고체연료의 순산소 연소에 관한 연구를 기존의 공기를 대상으로 한 설비에서 순산소 연소로 retrofit 하였을 때 야기되는 변화에 대하여 고찰하였고, 지금까지 수행된 순산소 연소의 기초적인 연구를 스케일 및 연구그룹별로 정리하였다[6]. 최근에는 TGA 및 DTF 등의 실험실 규모의 장치를 이용하여 공기 및 순산소 분위기에서 연소특성을 비교하는 연구가 활발하게 수행되고 있다[7-11]. Su 등은 석탄의 혼합연소 조건에서 착화특성, 화염안정성 및 연소전환율(Carbon Burnout)에 초점을 맞추어 lab-, pilot- 및 full-scale로 나누어 연구 사례별로 정리하였다[12]. 한편, Nugroho 등은 단일탄과 혼탄의 입경에 따라, 석탄의 물리적 구조에 따라 착화특성 및 활성화 에너지에 관한 비교를 수행하였다[13]. Chi 등은 DTF(Drop Tube Furnace)에서 7개의 서로 다른 등급의 석탄을 선정하여 혼소율에 따른 착화온도 등의 특성 파라미터들을 비교하고 화염감시 기법을 도입하였다[14]. 최근에는 순산소 연소조건을 고려한 바이오매스와 유연탄 혼합시료의 연소특성을 분석한 연구사례들이 보고되고 있다[15-17]. 이러한 선행연구들에 근거하여 역청탄과 아역청탄의 혼합연소시 연소특성에 대한 경향을 예측할 수 있다. 그러나 순산소 연소조건에서 서로 다른 등급의 석탄을 혼합하여 공급하는 혼탄에 관한 실제연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 순산소 연소조건에서 역청탄과 아역청탄 혼탄의 연소특성을 비교평가하기 위하여, 국내 삼천포화력 석탄 분류기준에 따라 실제 사용 중인 석탄 중에서 양호역청탄(Arthur)과 저열량 아역청탄(KPU)을 선정하였다. 단일탄 및 일정 비율로 혼합된 혼탄 시료를 공기 및 순산소 조건에

서 TGA를 이용하여 착화온도, 연소종료온도, 활성화 에너지 등을 도출하였다. 본 연구의 목적은 순산소 조건을 고려한 역청탄과 아역청탄의 혼합연소 조건에서 혼소율과 산화제 조건의 변화가 미분탄 연소특성에 미치는 영향을 조사하여, 연료의 다양성 및 이산화탄소 저감을 위한 순산소 연소조건에 적용가능성에 대한 평가 시 필요한 실제적인 정보를 제공하는데 있다.

2. 실험

2.1. 실험시료

본 연구에서는 국내 화력발전소에서 사용 중인 호주산 역청탄(Arthur)과 인도네시아산 아역청탄(KPU)을 각각 1종씩 선정하였다. 2개의 탄종에 대한 공업분석 및 원소분석 등의 물성이 Table 1에 주어져 있다. 입수한 석탄은 분쇄기에서 분쇄한 후 200 mesh 체(Seive)를 이용하여 통과된 직경 75 μm 이하의 입자를 사용하였다. 혼합시료는 역청탄과 아역청탄의 혼소비율이 역청탄을 기준으로 100%, 75%, 50%, 25% 및 0%의 5가지 조건을 고려하였다. 시료의 분석 방법은 아래와 같다. 공업분석은 기건식 시료, 원소분석은 건식시료, 열량분석은 기건식 시료를 각각 사용하며, 공업분석 결과인 고유수분을 사용해서 건식발열량을 계산하고, 총수분을 사용해서 인수식 열량을 계산하는 과정으로 진행된다.

2.2. TGA 실험

2종의 탄에 대한 연소반응성 평가를 위하여 TA Instrument사의 SDT Q600을 사용하였다. TG 및 DTG 연소 프로파일로부터 석탄입자의 착화온도, 연소 종료온도 및 활성화 에너지를 도출하여 산화제 조성별, 역청탄과 아역청탄의 혼소비율에 따라 분석결과를 비교하였다. 대상 실험은 승온 속도를 10 K/min으로 고정하고 20 mg의 시료 샘플을 대상으로 하였다. 공기의 공급량은 100 mL/min이며, 로내 온도를 최대 1173 K으로 유지하였다. Fig. 1에 본 실험에 사용된 실험장치의 개략과 온도측정 위치를 나타내었다. 본 실험에서 산화제의 조성은 Air 조건과, 순산소 조건으로 구분하였다. 순산소 조건을 고려하기 위해 산소농도를 기준으로 10, 30, 50%의 3가지

Table 1. Properties of two coals used in this study

Coal	Proximate analysis(wt. %, air-dry)				Ultimate analysis(wt. %, dry)						HHV (MJ/kg, air-dry)
	M ¹⁾	VM ²⁾	FC ³⁾	Ash	C	H	O	N	S	Ash	
Arthur	2.36	31.78	50.08	15.8	70.2	5.09	5.87	1.71	0.97	16.16	27.69
KPU	17.49	37.51	38.8	6.91	66.6	5.77	18.86	1.19	0.07	7.5	22.68

¹⁾ M : Moisture, ²⁾ VM : Volatile Matter, ³⁾ FC : Fixed Carbon

조건으로 나누어 이산화탄소와 혼합하여 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산화제 조성 및 역청탄과 아역청탄의 혼소에 따른 TG 및 DTG 분석

Fig. 2는 단일탄(Arthur 및 KPU)에 대한 산소 농도별 TG와 DTG 연소 프로파일을 나타낸다. 산화제의 조성은 공기 및 순산소 조건을 고려하기 위해 산소농도를 10, 30, 50%로 하여 산소와 이산화탄소 분위기에서 실험을 실시하였다. 연소과정은 크게 3부분의 영역으로 나눌 수 있다. 400 K 부근까지는 수분이 증발하면서 나타나는 영역이고 400~900 K 부근까지는 휘발분과 고정탄소의 반응영역으로서 질량감소의 주된 원인이 되는 영역이다. 900 K 이후의 영역은 회분 등의 광물질의 분해영역이다. TG 커브를 보면 수분 증발영역과 회분 등의 광물질의 분해영역에서 산화제 조성별로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보아, 산소농도가 수분 및 회분영역의 반응에는 관여하지 않는 것으로 판단된다. 그러나 휘발분과 고정탄소의 반응영역에서는 KPU와 Arthur 두 탄종 모두 산소농도가 증가함에 따라 반응영역이 더 낮은 온도에서 형성되었고 반응속도 또한 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 아역청탄인 KPU의 경우 질량감소의 시작과 종료가 역청탄인 Arthur탄에 비해 빠르게 나타나며, 대체로 500~600 K 구간에서 반응이 시작되어 800~900 K 구간에서 연소가 종료되는 것으로 나타났다. 즉, 휘발성분을 많이 포함한 아역청탄인 조건과 산소농도가 높아지는 조건에서 더 빠른 연소반응을 보이며, DTG 커브에서 최대 반응율도 높아짐을 알 수 있다.

Fig. 2(a)에서 역청탄인 Arthur 탄의 경우 500~600 K 구간에서 온도상승에 따라 일시적으로 질량이 증

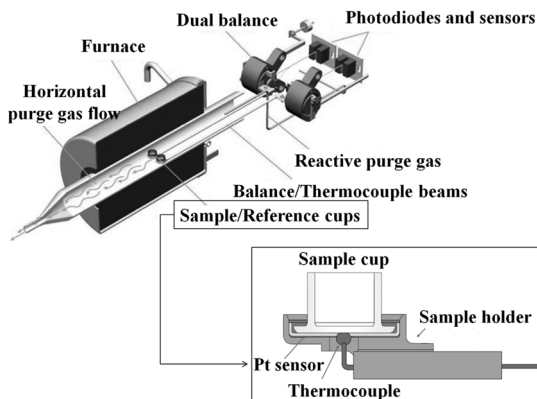


Fig. 1. Schematic diagram of test rig.

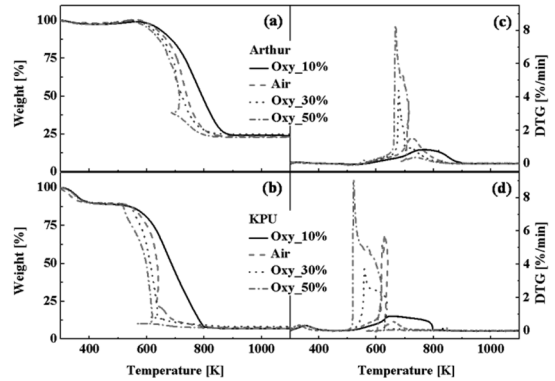


Fig. 2. TG and DTG curves for single coal with different atmosphere.

가하는 현상이 관찰되는데, 이는 Buoyancy Effect라는 일종의 스웰링 현상으로 석탄 내부에 있던 휘발분이 온도 상승에 따라 부풀어 오르면서 기체의 밀도가 낮아지며, 이 부분에서 석탄입자의 표면에 산소가 흡착되면서 일시적인 질량증가를 보이는 것으로서 석탄의 구조와 관련이 있다[18,19]. 역청탄과 아역청탄의 열분해가 시작되는 시점에서 내부 및 표면 가시화 이미지를 보면, 역청탄의 경우 열분해가 시작되어 내부 기공(pore)이 많이 형성되어 탄의 형상이 부풀어올라 있으나 아역청탄의 경우 탄 표면에 많은 균열이 발생하였고 아직 기공이 열리지 않았음을 관찰한 선행연구[20] 결과로 이와 같은 현상이 설명된다. 이러한 현상은 산소농도가 증가함에 따라 더 빨리 형성되고 더 뚜렷하게 관찰된다. Fig. 2(a)와 (b)에서 휘발분 탈휘발화 및 Char의 연소반응이 일어나는 구간 중에 반응이 거의 끝나는 지점(Fig. 2(a)에서 700 K 부근과 Fig. 2(b)에서 600 K 부근)에서 일시적인 온도강하 현상이 관찰되는데, 이는 추가적인 산소농도의 증가로 인해 석탄입자와 산화제의 연소반응 동안에 반응이 일어나는 석탄입자와 로 벽면 사이의 온도 차이에서 기인하는 과잉열 방출(excess heat release)에 의하여 설명되어질 수 있다. 10 K/min으로 프로그램화된 일정한 온도상승에 의하여 진행되는 로 내의 온도보다 탈휘발 과정 후 석탄입자의 온도는 급격한 온도상승을 일으킨다. 따라서 일정하게 증가하는 로 내의 온도와 급격하게 증가된 석탄입자의 온도가 동일하게 될 때까지 TG 커브상에서 온도강하 현상을 보인다[21]. 이러한 경향은 아역청탄인 KPU 탄종에서 두드러지게 나타나며 산소농도가 높아질수록 이러한 온도강하 현상이 반응이 끝나는 지점으로 천이되고 더 뚜렷하게 관찰된다.

Fig. 3은 산화제 조건 및 역청탄과 아역청탄의 혼소비율에 따른 TG와 DTG 연소 프로파일을 나타낸

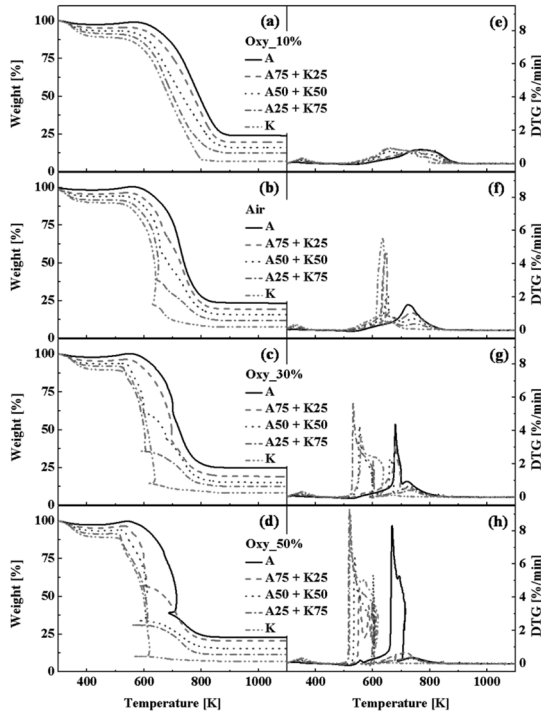


Fig. 3. TG and DTG curves for blends of Arthur coal and KPU coal with different atmosphere.

다. 4가지 산화제 조건 모두에서, 역청탄과 아역청탄의 혼소율에 해당하는 곡선이 각각 단일탄의 TG와 DTG 커브 사이에 존재하고 있다. Fig. 3(b)에서 보면, KPU에서 630 K 부근에서 나타나던 온도강하 현상이 KPU 75, 50, 25% 조건에서도 재현되었다. 하지만 Arthur의 혼소 영향으로 각각의 조건에서 온도감소 영역이 감소되다가 Arthur 조건에서는 온도강하 현상이 관찰되지 않았다. 온도강하가 관찰되는 시점 역시 질량감소 23%에서 각각 38%, 60%, 70%로 좀 더 높아진 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3(c)와 (d)에서는 산소농도가 증가함에 따라 Arthur의 조건을 포함한 모든 혼소비율 조건에서 온도강하 현상이 관찰되었으며, 이러한 온도강하가 산소농

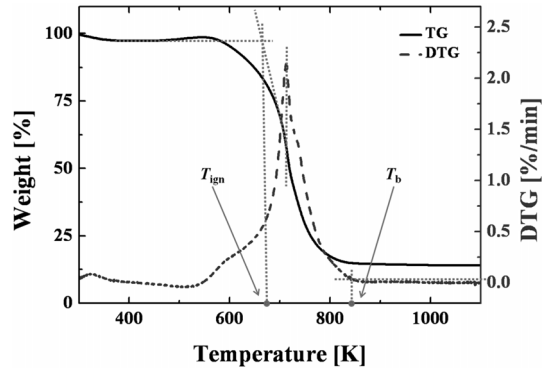


Fig. 4. Definitions of characteristic temperatures from TG and DTG curves.

도 증가에 비례하여 반응이 끝나는 지점으로 천이되고 더 뚜렷하게 나타난다. 또한, Arthur와 KPU의 원소분석 결과에 의하면 C, H, O, N, S 모든 값들이 조금씩 차이를 보이지만, 특히 ‘O’(산소)의 비율은 Arthur 5.87%, KPU 18.87%로 13%라는 가장 큰 차이를 보였다. 즉, 산소농도가 과농한 30% 이상인 조건에서는 아역청탄에서만 보이던 온도강하 현상이 역청탄인 Arthur 조건에서도 관찰되며 이러한 연소거동은 석탄입자의 산소비율 차이에 의한 반응의 활성 정도의 차이에 의한 영향으로 사료된다. 또한, Fig. 3(a)에서와 같이 Air 조건보다 희박한 산소농도 10% 조건에서는 아역청탄인 KPU 조차 온도강하 현상이 사라지는 것을 확인할 수 있기에 TG 커브상에 나타나는 온도강하 현상은 추가적인 산소농도의 증가로 인한 산화반응의 활성화로 나타나는 과잉열 방출(excess heat release)에 의한 현상으로 판단되어진다.

3.2. TG 및 DTG 연소 프로파일을 이용한 특성 온도

본 연구에서는 TG 및 DTG 연소 프로파일로부터 착화온도 및 연소종료온도를 도출하였다. Fig. 4에서 T_{ign} (Ignition temperature)는 착화온도로서 DTG 값이

Table 2. Effect of oxidizer

T[K]	Arthur		A75+K25		A50+K50		A25+K75		KPU	
	T_{ign}	T_b	T_{ign}	T_b	T_{ign}	T_b	T_{ign}	T_b	T_{ign}	T_b
$T_{i,max}^{1)} - T_{i,min}^{2)}$	57.1	78.7	100.6	80.2	78.1	82.2	86.6	70.6	81.9	192.3
$\frac{T_{i,max}^{1)} - T_{i,min}^{2)}}{T_{i,max}^{1)}}$	0.084	0.089	0.154	0.091	0.128	0.104	0.143	0.083	0.137	0.241
mean	$T_{ign, avg.}$						$T_b, avg.$			
	0.129						0.122			

¹⁾ $T_{i,max}$: Maximum ignition or burnout temperature of each oxidizer condition.

²⁾ $T_{i,min}$: Minimum ignition or burnout temperature of each oxidizer condition.

Table 3. Effect of blending ratio

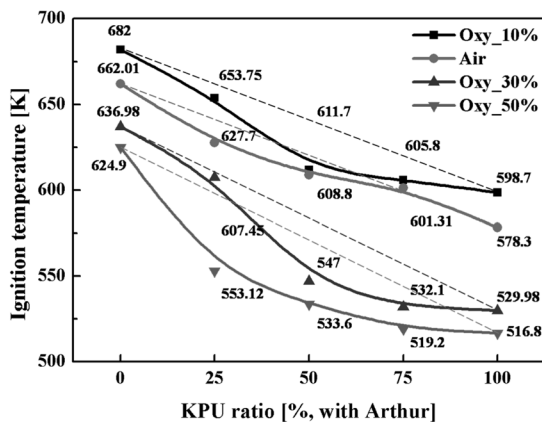
T[K]	Oxy 10%		Air		Oxy 30%		Oxy 50%	
	T_{ign}	T_b	T_{ign}	T_b	T_{ign}	T_b	T_{ign}	T_b
$T_{i,max}^{1)} - T_{i,min}^{2)}$	83.3	86.5	83.7	121	107	140.6	108.1	200.1
$\frac{T_{i,max}^{1)} - T_{i,min}^{2)}}{T_{i,max}^{1)}}$	0.122	0.098	0.126	0.145	0.168	0.171	0.173	0.248
mean	$T_{ign, avg.}$				$T_b, avg.$			
	0.147				0.166			

1) $T_{i,max}$: Maximum ignition or burnout temperature of each coal blending condition.

2) $T_{i,min}$: Minimum ignition or burnout temperature of each coal blending condition.

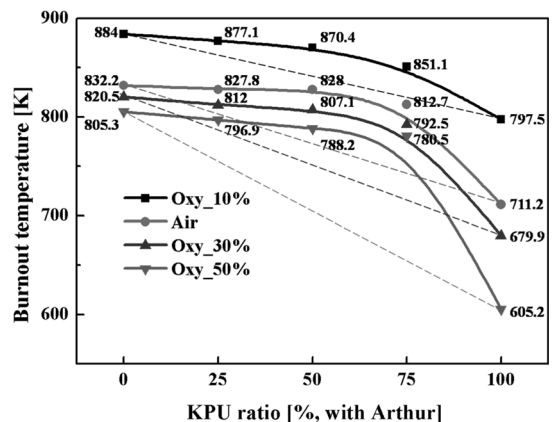
최대가 되는 TG 커브에서 접선방향으로 선을 그어 TG 커브의 수분이 증발되는 초기레벨에서 그은 직선과의 교차점에서의 온도를 나타내며, T_b (Burnout temperature)는 연소종료온도로서 질량감소의 변화가 나타나지 않는 DTG 값이 0.1 %/min 지점의 온도로 정의하였다[22-24]. 또한, 착화온도 및 연소종료온도가 산화제의 변화와 석탄의 혼소비율(휘발분) 중 어떤 파라미터에 더 의존하는지를 알아보기 위하여 각 조건에서의 최대온도와 최소온도의 차이, 그 차이에 대한 최대온도의 비 및 그에 대한 평균값을 산출하였다. Table 2 및 3은 각각 산화제 변화 및 연료의 변화에 대한 수치를 나타낸다.

Fig. 5는 공기조건과 순산소 조건에서 산소농도 및 아역청탄과 아역청탄의 혼소비율에 따른 착화온도 분포를 나타낸다. 산소농도가 증가함에 따라 모든 조건에서 착화온도가 낮아지는 경향을 보였으며, 아역청탄의 혼소비율이 증가함에 따라 공기 및 순산소 조건에서 착화온도가 감소함을 보였다. 특히, 모든 조건에서 혼소비율별 착화온도가 두 단일탄의 착화온도의 가중평균값(실선) 보다 낮은 값을 보이는데, 이는 순산소 조건에서도 공기조건에서와 동일하게

**Fig. 5.** Ignition temperature of blends of Arthur coal and KPU coal with different atmosphere.

아역청탄의 휘발분의 영향에 의존하여 더 낮은 착화온도 값을 갖는 탄종이 혼합연소 시 착화온도에 지배적인 영향을 미치기 때문이라고 판단된다. 또한, Table 2에서 공기 및 순산소 조건에서의 산화제 조건 변화에 따른 평균 착화온도의 변화율은 12.9%가 되지만, Table 3에서 혼소비율이 0~100% 사이의 연료의 변화에 따른 평균 착화온도의 변화율은 14.7% 정도로 산화제 변화가 미치는 영향 보다는 연료의 변화가 미치는 영향이 더 크다.

Fig. 6은 공기조건과 순산소 조건에서 산소농도 및 아역청탄과 아역청탄의 혼소비율에 따른 연소종료온도 분포를 나타낸다. 산소 10% 조건에서 최대 연소종료온도 값을 보였고, 산소 50% 조건에서 최소 연소종료온도 값을 보이고 있다. 이는 산소의 농도가 높아짐에 따라 화학반응 속도가 빨라짐을 의미한다. 산소농도가 증가함에 따라 모든 조건에서 연소종료온도가 낮아지는 경향을 보였으며, 아역청탄의 혼소비율이 증가함에 따라 공기 및 순산소 조건에서 연소종료온도가 감소함을 보였다. 특히, 모든 조건에서 혼소비율별 연소종료온도가 두 단일탄의 연소종료온도의 가중평균값(실선) 보다 높은 값을

**Fig. 6.** Burnout temperature of blends of Arthur coal and KPU coal with different atmosphere.

보이는데, 이는 착화온도의 경향과 상반된 결과이다. 착화온도의 경우 순산소 조건에서도 공기조건에서와 동일하게 아역청탄의 휘발분의 영향에 의존하여 더 낮은 착화온도 값을 갖는 탄종이 혼합연소 시 착화온도에 지배적인 영향을 미쳤으나, 연소종료온도의 경우 단일탄이 함유하고 있는 고정탄소의 지배를 받는다. 따라서 고정탄소 성분을 상대적으로 많이 함유한 역청탄의 성분이 조금이나마 존재하는 시점인 KPU ratio 75%를 기준으로 연소종료온도의 차이가, 산소농도가 높아질수록 더 많은 온도 차이를 보이고 있다. 즉 고정탄소가 고온부에서 연소되기 때문에 비교적 고정탄소 함유량이 많은 역청탄의 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 또한, Table 2에서 공기 및 순산소 조건에서의 산화제 조건 변화에 따른 평균 연소종료온도의 변화율은 12.2%가 되지만, Table 3에서 혼소비율이 0~100% 사이의 연료의 변화에 따른 평균 착화온도의 변화율은 16.6% 정도로 착화온도의 경우와 동일하게 산화제 변화가 미치는 영향 보다는 연료의 변화가 미치는 영향이 더 크다.

3.3. 활성화 에너지

산화제 및 역청탄과 아역청탄의 혼소비율에 따라 석탄입자의 탈 휘발과 좌의 연소를 고려한 반응속도를 도출하였다. TGA를 이용하여 반응속도를 도출하는 방법으로 등온법과 비등온법으로 나눌 수 있으며, 비등온법은 다시 미분법과 적분법으로 나뉜다[25]. 본 연구에서는 미분법 중에서 반응속도 식을 1차 반응으로 가정한 Chatterjee와 Conrad의 방법을 적용하여 활성화 에너지를 도출하였다. Fig 7은 공기 및 산소농도 30% 조건에서 역청탄(Arthur)과 아역청탄(KPU)의 혼소비율별 활성화 에너지 추이를 나타내고 있다. 동일 산화제 조건에서 비교하면 아역청탄의 혼소비율이 증가할수록 활성화 에너지가

작아지는 경향을 보였으며, 공기조건보다 순산소 조건에서 활성화 에너지가 작아지는 것을 알 수 있는데, 이는 선행연구 결과와 유사하다[14,26]. 한편, 연료혼합의 효과를 보면, Arthur 100%인 경우에 비해 KPU가 소량만 혼합되더라도 활성화 에너지가 확연히 감소함을 확인할 수 있는데, 이를 통해 순산소 조건에서도 혼소 시 활성화 에너지가 아역청탄의 휘발분 함유량에 지배적인 영향을 받는 것으로 판단할 수 있다. 일반적으로 열중량분석과 같이 가열률이 낮고 지속적인 실험조건에서는 탈 휘발 과정이 좌 연소에 선행되므로 탈 휘발의 영향이 활성화 에너지에 지배적이라 생각된다.

3. 결론

본 연구에서는 역청탄과 아역청탄 혼합연소조건에서 산화제의 조건 및 혼소비율이 연소특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 열중량분석기를 이용하여 실험적인 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 역청탄의 경우 수분증발 후 탈 휘발로 인한 질량감소가 시작되는 지점에서 온도상승에 따라 일시적으로 질량이 증가하는 현상이 관찰되는데, 이러한 현상은 산소농도에 비례하여 더 빨리 형성되고 더 뚜렷하게 나타난다.
- 2) 휘발분과 좌의 반응이 끝나는 지점에서 온도강하 현상이 관찰되며, 이러한 온도강하 현상이 산소농도에 비례하여 반응이 끝나는 지점으로 천이되고 더 뚜렷하게 나타난다.
- 3) 착화온도와 연소종료온도의 경우, 산화제의 변화보다는 연료의 변화에 지배적인 영향을 받으며, 착화온도는 아역청탄의 휘발분 함량에 지배적인 영향을 받고 연소종료온도는 역청탄이 함유하고 있는 고정탄소의 지배를 받는다.
- 4) 순산소 조건에서도 역청탄과 아역청탄 혼합연소시 아역청탄의 휘발분 함유량이 활성화 에너지에 지배적인 영향을 미친다.

후기

본 연구는 에너지관리공단 에너지·자원기술개발사업(20070912000) 및 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2007-P-EP-H-ME-03-0000).

참고문헌

[1] IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In : Cli-

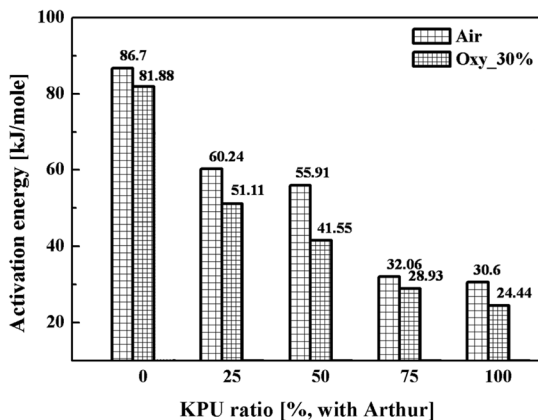


Fig. 7. Activation energy distributions of blends of Arthur coal and KPU coal with different atmosphere.

- mate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [2] 김재관, 이현동, 장석원, 김성철, “민코 아역청탄의 순산소 연소특성,” 한국연소학회지, Vol. 14, No. 2, 2009, pp. 1-9
- [3] 박호영, 김영주, 박현주, 김성철, “발전용 보일러에서의 유, 무연탄 혼소시 연소 및 환경특성,” 한국에너지공학회지, Vol. 17, No. 3, 2008, pp. 153-160
- [4] 김승일, “산화제 조건 및 혼소비율 변화에 따른 역청탄과 아역청탄의 연소특성 평가,” 석사학위논문, 부산대학교, 2010
- [5] B. J. P. Buhre, L. K. Elliott, C. D. Sheng, R. P. Gupta and T. F. Wall, “Oxy-fuel Combustion Technology for Coal-fired Power Generation,” Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 31, 2005, pp. 283-307
- [6] M. B. Toftegaard, J. Brix, P. A. Jensen, P. Glarborg and A. D. Jensen, “Oxy-fuel Combustion of Solid Fuels,” Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 36, 2010, pp. 581-625
- [7] Y. Fan, Z. Zou, Z. Cao, Y. Xu and X. Jiang, “Ignition Characteristics of Pulverized Coal under High Oxygen Concentrations,” Energy Fuels, Vol. 22, 2008, pp. 892-897
- [8] H. Liu, “Combustion of Coal Chars in O₂/CO₂ and O₂/N₂ Mixtures: A Comparative Study with Non-isothermal Thermogravimetric Analyzer (TGA) Tests,” Energy Fuels, Vol. 23, 2009, pp. 4278-4285
- [9] Q. Li, C. Zhao, X. Chen, W. Wu and Y. Li, “Comparison of Pulverized Coal Combustion in Air and in O₂/CO₂ Mixtures by Thermo-gravimetric Analysis,” J. Anal. Appl. Pyrolysis, Vol. 85, 2009, pp. 521-528
- [10] R. K. Rathnam, L. K. Elliott, T. F. Wall, Y. Liu and B. Moghtaderi, “Differences in Reactivity of Pulverized Coal in Air (O₂/N₂) and Oxy-fuel (O₂/CO₂) Conditions,” Fuel Processing Technology, Vol. 90, 2009, pp. 797-802
- [11] L. Zhang, E. Bianor, Y. Qiao and C. Li, “High-Speed Camera Observation of Coal Combustion in Air and O₂/CO₂ Mixtures and Measurement of Burning Coal Particle Velocity,” Energy Fuels, Vol. 24, 2010, pp. 29-37
- [12] S. Su, J. H. Pohl, D. Holcombe and J. A. Hart, “Techniques to Determine Ignition, Flame Stability and Burnout of Blended Coals in p.f. Power Station Boilers,” Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 27, 2001, pp. 75-98
- [13] Y. S. Nugroho, A. C. McIntosh and B. M. Gibbs, “Low-Temperature Oxidation of Single and Blended Coals,” Fuel, Vol. 79, 2000, pp. 1951-1961
- [14] T. Chi, H. Zhang, Y. Yan, H. Zhou and H. Zheng, “Investigations into the Ignition Behaviors of Pulverized Coals and Coal Blends in a Drop Tube Furnace using Flame Monitoring Techniques,” Fuel, Vol. 89, 2010, pp. 743-751
- [15] B. Arias, C. Pevida, F. Rubiera and J. J. Pis, “Effect of Blending on Coal Ignition and Burnout during Oxy-fuel Combustion,” Fuel, Vol. 87, 2008, pp. 2753-2759
- [16] 안재우, 안성율, 문철연, 성연모, 서상일, 김태형, 최경민, 김덕출, “미분탄과 목재 바이오매스 혼합 연료의 연소 및 열분해 특성에 관한 연구,” 한국연소학회지, Vol. 15, No. 2, 2010, pp. 34-40
- [17] J. P. Smart, R. Patel, and G. S. Riley, “Oxy-fuel Combustion of Coal and Biomass, the Effect on Radiative and Convective Heat Transfer and Burnout,” Combustion and Flame, Vol. 157, No. 12, 2010, pp. 2230-2240
- [18] S. Biswas, N. Choudhury, P. Sarkar, A. Mukherjee, S.G. Sahu, P. Boral and A. Choudhury, “Studies on the Combustion Behaviour of Blends of Indian Coals by TGA and Drop Tube Furnace,” Fuel Processing Technology, Vol. 87, 2006, pp. 191-199
- [19] J. W. Cumming, J. Mclaughlin, “The thermogravimetric behaviour of coal,” Thermochemica Acta, Vol. 57, 1982, pp. 253-272
- [20] 김대희, 최상민, “연소중 미분탄의 발광 분석 및 입자 채집 관찰,” 한국연소학회지, Vol. 15, No. 2, 2010, pp. 19-26
- [21] H. Haykiri-Acma, A. Z. Turan, S. Yaman and S. Kucukbayrak, “Controlling the Excess Heat from Oxy-combustion of Coal by Blending with Biomass,” Fuel Processing Technology, Vol. 91, 2010, pp. 1569-1575
- [22] F. Rubiera, A. Arenillas, E. Fuente, N. Miles and

- J. J. Pis, "Effect of the Grinding Behaviour of Coal Blends on Coal Utilisation for Combustion," *Powder Technology*, Vol. 105, 1999, pp. 351-356
- [23] C. Wang, F. Wang, Q. Yang and R. Liang, "Thermogravimetric Studies of the Behaviour of Wheat Straw with Added Coal during Combustion," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 33, 2009, pp. 50-56
- [24] 성연모, 안재우, 문철연, 안성율, 김성철, 서상일, 김태형, 최경민, 김덕줄, "역청탄과 아역청탄 혼합연소조건에서 미분탄 입자크기와 혼소율이 열물성반응과 연소특성에 미치는 영향," *한국연소학회지*, Vol. 15, No. 4, 2010, pp. 65-73
- [25] 류호정, 한근희, 진경태, 이계봉, 최정후, "가압열중량분석기를 이용한 국내무연탄의 연소특성 해석," *한국에너지공학회지*, Vol. 10, No. 3, 2001, pp. 243-252
- [26] 김성철, 최병선, 이현동, 홍성선, "TGA에 의한 유·무연탄의 연소특성과 활성화에너지 비교," *한국에너지공학회지*, Vol. 5, No. 2, 1996, pp. 170-175

접수일 : 2010. 11. 29
심사완료일 : 2011. 02. 11