

방향족 아민계 산화방지제에 의한 갈탄의 자연 발화 방지 효과

이광희¹, 장준호², 조정익², 서동주², 한수영², 정민지², 박태성³, 장현태^{2*}
¹(주)미산이앤씨, ²한서대학교 화학공학전공, ³한국에너지기술연구원

Prevention Effect of Spontaneous Combustion of Lignite by Aromatic Amine Antioxidants

Qhwang-Hee Rhee¹, Jun-Ho Jang², Jeong-Ik Cho², Dong-Ju Seo²,
Su-Young Han², Min-Ji Jung², Tae-Sung Park³, Hyun-Tae Jang^{2*}
¹Misan E&C, LTD
²Department of Chemical Engineering Hanseo University
³Korea Institute of Energy Research

요약 낮은 탄화도로 휘발분 함량이 높은 저급 석탄인 갈탄은 낮은 발열량을 나타낸다. 높은 휘발분 함량으로 저장 및 운송 과정에서 자연발화로 인하여 활용율이 낮은 탄종이었다. 휘발분 중에는 인화성이 강한 아릴 에테르 등이 포함되어 있으며, 갈탄의 열분해시 메탄과 수소가 발생하는 특성을 나타낸다. 석탄을 단순 연소만이 아닌 IGCC 공정과 같은 가스화 공정 사용시 낮은 회분 함유량과 높은 휘발분과 수분 함유량으로 낮은 발열량에 불구하고 효율적 사용이 가능하다. 갈탄의 휘발분은 다양한 방향족화합물을 함유하고 있으며, 회분에는 FeS를 비롯하여 쉽게 산화될 수 있는 성분을 함유하고 있으며, 분해시 메캡탄 형태로 배출되기도 한다. 다양한 휘발분과 환원된 금속이 대기 중에 노출되면서 산소, 수분과 접촉하여 산화되며, 열을 발생시킨다. 산화반응으로 석탄의 온도상승이 발생되며, 인화성이 강한 휘발분에 의한 발화가 발생된다. 본 연구에서는 다양한 차수 아민계를 산화방지제로 사용하여 갈탄에 도포하고, 아민의 자연발화 억제 효과를 연구하였다. 발화 온도의 상승으로 산화 방지 효과를 측정하였으며, 방향족 아민에 의하여 자연발화가 억제됨을 알 수 있었다. 연소로 조업온도에서 연소성의변화가 없음을 알 수 있었다.

Abstract Lignite is low-rank coal with a low degree of carbonization and high volatile matter content. Lignite, which has a high volatile content and spontaneous ignition characteristics during storage and transportation, is a type of coal with low utilization. Among the volatile components, lignite contains highly flammable aryl ethers, and methane and hydrogen are generated during the thermal decomposition of lignite. When coal is used in a gasification process, such as the IGCC process, instead of the combustion process, the volatile matter of lignite contains various aromatic compounds, and the ash contains reduced metal and FeS. Lignite contains easily oxidizable components. The sulfur compounds of lignite are decomposed to mercaptan. As various volatile components and reduced metals are exposed to the air, they are oxidized in contact with oxygen and moisture, generating heat. Oxidation reactions cause the temperature of coal to rise. In this study, various tertiary amines were applied to lignite using antioxidants, and the spontaneous combustion inhibitory effect of amines was studied. The antioxidant effect was measured by increasing the ignition temperature, and the aromatic amine suppressed spontaneous ignition. The combustion rate was unaffected by the operating temperature of the furnace.

Keywords : Lignite, Spontaneous Combustion, Ignition Temperature, Antioxidants, Amine Compound

본 논문은 한국서부발전(주) 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Hyun-Tae Jang(Hanseu Univ.)

email: htjang@hanseo.ac.kr

Received March 6, 2023

Revised March 22, 2023

Accepted April 7, 2023

Published April 30, 2023

1. 서론

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)는 2018년 온도상승을 1.5℃ 이내로 유지하기 위한 다양한 방안에 대하여 발표[1]하였으나, 현재 화석연료 사용은 불가피한 상황이다. 국내의 경우 2050년 탄소배출 제로를 달성하기 위한 전략과 정책을 수립하였고[2], 2050년 이전까지 석탄 사용은 불가피한 실정이다. 석탄의 친환경적 이용을 위하여 연소시 발생하는 기상 오염물질 제어와 이산화탄소 포집에 대한 연구를 수행하고 있으며, 석탄 전환 효율을 높이기 위한 IGCC공정 적용이 검토되고 있다.

최근 석탄 가격 상승에 따라 저급 석탄인 아역청탄과 갈탄의 사용이 증가하고 있으며, 가장 탄화도가 낮은 갈탄의 수입 사용도 이루어지고 있다. 갈탄에 함유된 휘발분의 경우 단핵방향족(mononuclear aromatics)으로 n-alkyl phenol, n-alkyl di-hydroxybenzene, n-alkyl benzenes과 같은 이 포함되어 있으며, 열분해시 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄, 수소, 물로 분해되는 것은 carboxyl 그룹, aryl ether 그룹, hydroxyl 그룹, methoxyl 그룹, aliphatic 결합으로 구성된 물질에 의하여 발생한다. 황화합물의 경우 열분해시 황화수소 및 메틸머캡탄으로 분해된다[3]. 상기 ether류의 경우 매우 높은 인화성을 지니고 있다[4]. 이러한 저급 석탄인 아역청탄과 갈탄에 함유된 황화철이 산소와 접촉하면서 저온에서 산화반응을 발생시키며, 방향족 탄화수소 등의 휘발성 물질이 분해 및 산화되는 것으로 해석하고 있다 [5-7]. 이러한 자연발화의 측정방법에 대하여 많은 연구자들이 다양한 측정방법과 연구 결과를 발표하였다 [8-10]. 갈탄은 아역청탄보다 높은 휘발분 농도로 인하여 자연발화 현상이 가장 빈번하게 나타난다. 자연발화는 안전에 문제점을 야기하며, 환경오염을 유발한다. 또한 연료 손실과 온실가스인 이산화탄소, 메탄, 휘발성 유기화합물을 발생시키게 된다. 자연발화에 의한 대기오염 물질과 온실가스 방출량에 대한 연구는 아직 수행된 것이 없으나 거대한 석탄더미의 온도상승과 악취 등으로 적은 양이 아님은 알 수 있다. 국내의 경우 갈탄과 아역청탄 탄광이 없으므로 채굴과정의 화재에 의한 문제는 발생하고 있지 않으나 석탄화력발전소 및 열병합발전소에서 문제를 발생시키고 있다. 최근 채산성의 문제와 수입원의 다변화에 의하여 저급탄의 수입이 이루어지고 있으며, 석탄의 저장기간 조절과 석탄 더미(pile)의 이동 등으로 열축적을 막는 방법을 사용하며, 일부 고분자를 석탄 더미 표면에 분사하여 산소 확산을 막는 방법 등을 사

용하고 있으나 효과는 매우 미미하다. 자연발화 억제제 사용에 대하여 다양한 연구가 이루어지고 있다[10-12]. 본 연구에서는 일반적으로 정유 및 석유화학산업과 고무 산업에 사용되는 아민계 산화방지제를 석탄에 적용하여 자연발화억제 특성을 연구하였다. 탄화도가 낮은 저급 석탄인 갈탄을 대상으로 산화방지제 아민의 특성에 따른 영향을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

다양한 아민자수와 방향족아민에 의한 자연발화 억제 및 지연특성을 고찰하기 위하여 사용한 실험장치는 자연발화를 규정하기 위하여 수행한 이전 연구[9,10]에서 제안된 장치와 유사하게 구성하였으며, Fig. 1과 같다. G.C. 대류오븐내 석탄시료 용기를 위치하는 방법으로 외부에서 공기를 주입하고 오븐에서 충분한 시간을 체류시켜 오븐과 동일 온도의 공기가 석탄시료 용기로 공급되게 구성하였다. 자연발화측정기의 내부에는 석탄 온도를 측정할 수 있는 열전대를 설치하고, 용기의 기상 배출구에서 배출되는 가스는 G.C.(Agilent HP-6890N) 시료 채취용 6-port valve로 유입되어 일정 시간 간격으로 배출가스 조성 농도를 측정하였다. 따라서 용기내 석탄 온도와 대류오븐 온도, 배출가스의 조성을 측정할 수 있게 구성하였다.

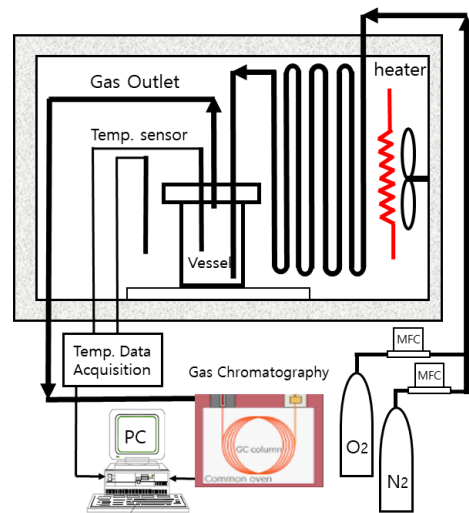


Fig. 1. Schematic diagram of measuring of sub-bituminous coal spontaneous combustion.

Fig. 1의 실험장치는 일정한 승온이 일어나는 상태에서 산화에 의한 온도 상승곡선의 변화로 자연발화를 측정하는 장치로서 열이력(thermal history)에 따른 탈휘발 특성 등을 측정할 수 없으므로 열전달과 물질전달이 우수한 유동층 반응기를 이용하여 급격한 온도 변화에 따른 휘발분의 방출과 점화 및 연소현상을 연구하였다. 열전달에 의한 열이력으로 휘발분 방출 특성이 변화하므로[13] 열이력에 대한 효과를 비교 평가하여 자연발화억제 효과를 규명하고자 시료를 회분식으로 투입할 수 있는 Fig. 2와 같은 유동층 반응기를 이용하여 연구를 수행하였다. 시료의 투입시 열전달에 의하여 시료가 가열되고 가열되면서 흡열반응인 탈휘발이 발생되고 착화에 의하여 발열반응이 일어난다. 따라서 측방향으로 설치된 열전대에서 측정된 온도의 하강과 상승곡선을 이용하여 층내부를 해석할 수 있게 구성하였다.

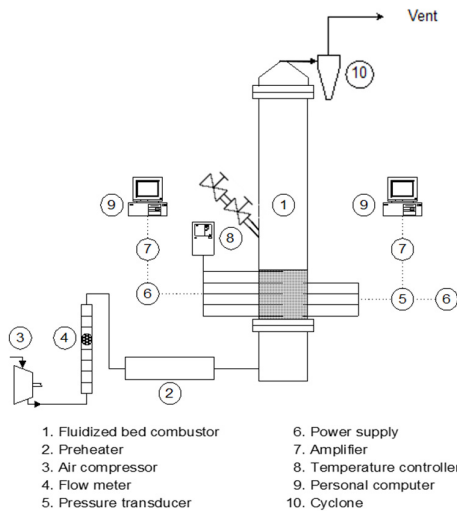


Fig. 2. Batch fluidized bed for lignite coal spontaneous combustion according to thermal history.

2.2 실험방법

오븐 내에 석탄시료 용기에 40g 충전한 후 공기를 MFC를 이용하여 일정량 공급하며, 오븐내 설치된 1/4 인치 예열관을 통과하여 일정 승온속도로 승온되는 오븐 온도와 동일한 온도로 공급된다. 석탄용기 배출가스 염화갈륨이 충전된 제습탑을 통과하여 G.C. 6-port valve 로 공급되어 일정시간 간격으로 배출가스의 이산화탄소, 일산화탄소, 산소, 질소, 메탄을 측정하였다. 또한 시료 용기와 오븐에 설치된 열전대로부터 온도를 기록하였다. 자연발화 억제 효과 실험은 오븐 온도를 40℃로 1시간

30분간 유지하여 시료와 오븐 온도를 등온으로 유지한 후 오븐 온도를 1℃/min의 승온 속도로 255℃까지 상승 시키며, 석탄시료 및 외부 온도를 측정하고 각 온도에 따른 배출가스 조성을 측정하였다.

Fig. 2 회분식 유동층 실험은 유동화 매질로 주문진 표준사 0.505 mm(30/40 mesh)를 사용하였다. L/D=1 로 층내물질을 충전하고, 유동층 외벽과 wind box에 설치된 전열기를 이용하여 석탄 주입 온도로 승온한다. 온도에 따른 층내 변화를 측정하기 위하여 실험온도에 도달한 후 공기 공급과 전열선의 전기 공급을 일정 전압으로 유지하여 층내를 등온상태로 유지한다. 각 실험 온도에서 등온 상태가 유지되어 유동층의 측방향 온도분포가 일정한 에너지 수치가 정상상태에 도달하면, 석탄 시료를 주입하였으며, 각각의 억제제 처리 및 미처리 석탄을 동일 방법으로 주입하여 측정하였다.

즉, 투입구 부분에 석탄 시료를 충전하고 약 2.5 bar 공기로 가압하고 밸브를 순간적으로 열어 유동층 내에 석탄 시료를 순간적으로 투입한다. 압력전달기와 열전대를 사용하여 석탄 시료 주입 후 10ms 간격으로 압력신호를 측정하고, 1sec 간격으로 열전대로부터 온도를 측정 기록하였다. 측정된 압력 신호로 압력요동의 표준편차를 계산하였으며, 계산식은 Eq. (1)과 같다[14,15].

$$S.D. = \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (X(t) - \mu_x)^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

2.3 시료

본 연구에 사용된 석탄은 갈탄이며, 시료 분석표는 Table 1에 나타내었다. 회분 성분 중 Fe 함량이 고품위 석탄에 비하여 매우 높게 나타나고 있으며, 휘발분과 수분 함유량으로 전형적인 갈탄의 특성을 나타내고 있다. 실험에 사용한 석탄은 휘발분의 손실을 최소화하고, 억제제 사용에 의한 수분 편차에 의한 영향을 줄이기 위하여 자연발화억제제 적용 후 25℃ 진공 오븐에서 24시간 건조 사용하여 균일한 수분의 함량을 유지하였다. 본 연구에 사용한 갈탄의 분석 결과는 Table 1, 2, 3에 나타내었다. 저위발열량이 3,800 kcal/kg으로 아역청탄보다 약 1,000kcal/kg 낮고, 아역청탄보다 낮은 인화점을 지니고 있는 석탄이다. 실험에 사용된 석탄은 유동층의 경우 16/20mesh(평균입경 1.015mm)를 사용하였으며, 자연발화측정장치 실험은 6mesh(입경 3.35mm) 이하를 체분리하여 사용하였다.

Table 1. Proximate analysis of lignite sample.

Parameters	Moisture	Ash	Volatile	Fixed Carbon
Wt.%	20.00	3.50	40.0	36.5

Table 2. Ultimate analysis of lignite sample(Dry Basis).

Elements	C	H	N	O	S
Wt.%	70.00	5.20	0.80	19.50	0.13

Table 3. Ash analysis of lignite sample.

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
Wt.%	28.00	11.00	30.00	15.00	7.00	0.14
Component	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Mn ₃ O ₄	SO ₃	
Wt.%	0.60	0.30	0.70	0.30	6.00	

3. 결과 및 고찰

3.1 온도와 압력을 이용한 발화 지연

Fig. 3은 본 연구에서 석탄시료를 자연발화온도까지 상승시키기 위한 대류오븐 온도를 1℃/min 으로 상승시킨 상태에서 시료 온도변화율 dT/dt를 나타내었으며, Eq. (2)와 같은 방법으로 계산하였다[10]. Eq. (2)는 승온율을 나타낸 식으로 오븐의 온도는 일정 기울기로 상승하며, 연소가 발생한 경우 오븐 온도 상승률을 보다 높은 기울기로 상승되어 연소 현상을 판단할 수 있다.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{s,i} - T_{s,i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

오븐 온도가 1℃/min으로 상승되고 있으므로 시료 외부인 오븐의 dT/dt 시간에 따라 수평인 직선을 나타내고 있다. 용기내 시료가 발화되어 발열이 발생하는 경우 1 이상의 값이 나타나게 된다. 실험은 40℃ 에서 1℃/min로 승온하였으며, 약 100℃에서 온도변화율이 정체되고, 이후 급격한 상승이 나타난다. 발화억제제를 사용한 경우 최대 온도변화율을 나타내는 시간이 약제가 미처리된 석탄이 가장 빠르게 나타나며, 온도변화율이 감소한다. 감소되는 이유는 공기의 공급량이 200 ml/min으로 산소공급이 충분하지 않으므로 온도변화율이 증가가 둔화되는 것으로 해석할 수 있다. Fig. 3에서 발화억제제에 의하여 발화가 지연되고 처리량 증가에 의하여 억제 효과가 상승되는 것을 알 수 있다. 온도 증가에 따른 변화를 나타낸 Fig. 3의 효과를 비교하기 위하여 Fig.

4에 단열 회분식 유동층에서 펄스로 석탄 시료를 주입한 경우 온도의 변화를 시간에 따라 측정하여 나타내었다 [16]. Fig. 4는 유동화 매질을 평균입径 0.505mm를 사용하여 L/D=1로 충전하였으며, Uo/Umf=2인 공탑속도 0.322m/sec 공기를 공급하고, 135 ℃의 일정온도를 유지한 상태에서 40g의 석탄 시료를 펄스로 주입한 후 분산판으로부터 축 방향으로 9 cm 지점에서 측정된 온도 결과이다. 그림에서 석탄 시료 주입시 석탄의 상온에서 주입된 시료의 가열에 필요한 열에너지와 함유된 수분의 증발에 의하여 온도의 감소가 일어나며, 연소에 의하여 온도가 상승하게 된다.

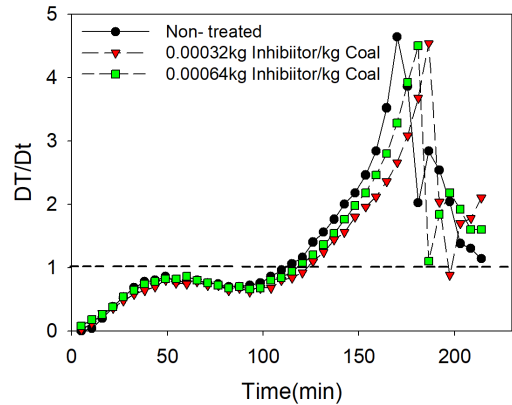


Fig. 3. Sample temperature rising rate according to antioxidants treatment.

유동층은 외부에서 일정한 전압을 공급하여 등온을 유지한 상태이므로 동일한 열에너지가 공급되고, 유동화 공기와 단열된 유동층 외벽으로 부터 배출되고 있는 상태이다. 그림에서 약제를 적용하지 않은 경우 온도 감소 속도가 약제를 첨가한 경우보다 크게 나타나고 있으며, 온도 상승도 빠르게 일어나고 있다. 이러한 경향은 억제제 적용량의 증가에 따라 동일한 경향을 나타내고 있으며, 약제에 의한 효과로 해석할 수 있다. 억제제 첨가에 의하여 유동층 주입 초기 온도편차가 작게 나타나는 현상은 흡열량이 상대적으로 낮으므로 일어나는 현상으로 연소 지연을 의미한다.

Fig. 5는 시료가 유동층에 주입된 후 초기 150초 동안 층내 압력요동의 표준편차값을 온도에 따라 나타낸 그림이다. 압력요동의 표준편차는 유동층의 기포 크기 및 빈도에 함수이며, 유동화 상태에서 입자의 탈휘발과 연소에 의한 가스 발생과 입자층에 형성된 가스 필름층에 의하여 변화된 상대효율 밀도(effective density)에 의하여 크게 영향을 받는다[13].

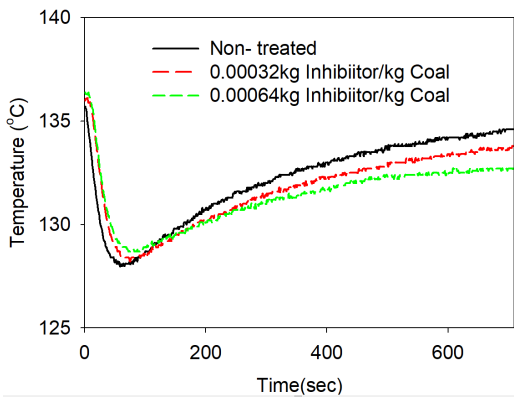


Fig. 4. Temperature profile with time according to inhibitor application(axial measuring height above distributor : 9 cm, bed temperature : 135°C).

그림에서 자연발화 억제제 적용으로 값이 감소하며, 적용량 증가에 따라 감소폭이 전 온도에서 나타나고 있다. 이는 휘발분의 방출과 연소 현상 발생이 지연되어 나타나는 현상으로 해석할 수 있다. 휘발분 방출과 연소 발생시 입장에 가스필름이 형성되어 유동화에 의한 압력변위가 감소되는 현상으로 억제 적용에 의하여 연소가 낮아지는 것을 의미한다.

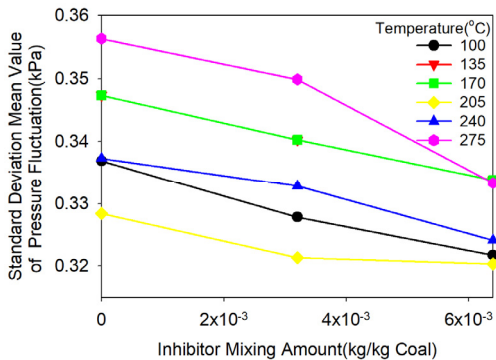


Fig. 5. Standard deviation of pressure fluctuation according to antioxidants mixing amount (axial measuring height above distributor : 9 cm).

3.2 가스 발생을 이용한 자연발화 지연

온도 상승과 온도변화율에 의하여 자연발화 지연을 해석하였으며, 발화에 의하여 발생하는 일산화탄소와 이산화탄소 및 배출되는 산소 농도로 발화지연을 해석하기 위하여 Fig. 1의 시료 용기에서 배출되는 가스를 G.C.를 이용하여 측정하였다. Fig. 6은 오븐 온도에 따라 배출되

는 산소 농도를 측정된 결과이다. 측정시간은 약 20분 간격으로 on-line 으로 G.C.에 설치된 6-port valve에 의하여 측정되었다. 발화에 의하여 공급되는 공기 중 산소가 소비되므로 산소 농도 감소가 억제제를 적용하지 않은 경우가 가장 빠르게 일어나며, 억제량의 증가가 산소 농도 감소가 상대적으로 늦게 일어나는 것을 알 수 있다. 특히, 6.4×10^{-4} kg/kg Coal의 경우 170°C까지 일정하게 나타나는 것을 알 수 있다. 산소가 연소되어 발생하는 이산화탄소와 일산화탄소의 농도를 Fig. 7, 8에 각각 나타내었다. 일산화탄소와 이산화탄소의 농도와 Fig. 6의 산소 농도를 비교하면 산화된 가스 농도 증가가 산소의 감소보다 지연되어 나타나는 것을 알 수 있다. 갈탄의 경우 높은 휘발분함량과 낮은 고정탄소를 함유하고 있다. 또한 휘발분의 경우 다양한 방향족 화합물로 구성되어[3] 있으므로 발화시 휘발분의 연소가 초기에 일어나므로 수분 발생으로 인한 것으로 해석된다[17].

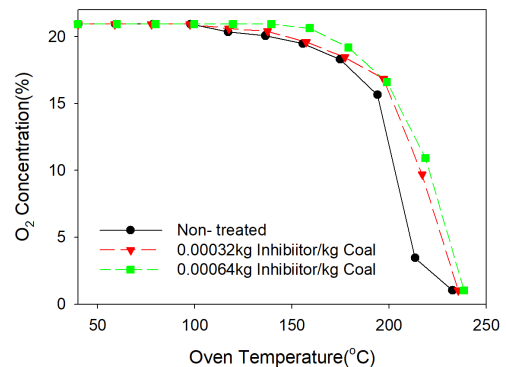


Fig. 6. Oxygen concentration of discharge gas from coal sample vessel according to oven temperature.

Fig. 7, 8에서 산소농도를 나타낸 Fig. 6의 산소 농도와 일치하는 경향을 나타내고 있다. 억제제의 첨가량의 경우 상대적으로 억제제 첨가량 증가에 따라 억제효과가 증가되는 것을 알 수 있다. 또한 온도 변화율(dT/dt)이 상승되는 지점에서 배출가스 농도 변화가 발생하는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 얻어진 결과는 실제 석탄 더미에서 얻어진 결과를 해석하기 위하여 시행하였으며, 향후 실내 저탄장에서 실증을 계획하고 있다.

자연발화억제제 사용에 의하여 연소속도가 낮아지는 것은 연소시 연소효율 감소가 나타날 수 있다. 따라서 연소성의 변화를 파악하기 위하여 800°C에서 Fig. 4의 실험과 동일한 방법으로 수행한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 억제 첨가와 관계없이 동일한 승온 속도를 나타내는 것을 알 수 있다. 연소로의 경우 800°C 이상의

온도에서 석탄이 주입되므로 약제에 의한 연소성 변화는 없는 것으로 확인되었다.

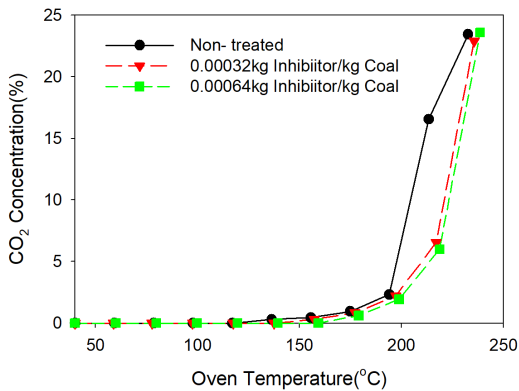


Fig. 7. Carbon dioxide concentration of discharge gas from coal sample vessel according to oven temperature.

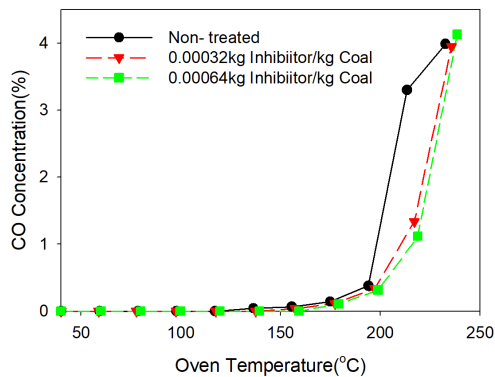


Fig. 8. Carbon monoxide concentration of discharge gas from coal sample vessel according to oven temperature.

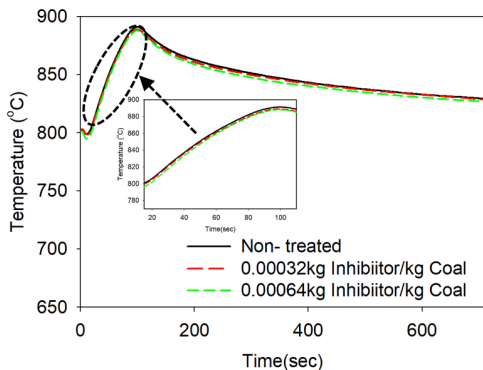


Fig. 9. Temperature profile with time according to inhibitor application(axial measuring height above distributor : 9 cm, bed temperature : 800°C).

4. 결론

아민계 침투제와 산화억제제를 계면활성제로 혼합시킨 자연발화억제제에 의한 갈탄의 발화 현상 억제를 실험하여 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 산화방지제로 사용되는 방향족 아민과 계면활성제 및 침투제를 혼합한 자연발화억제제를 갈탄에 적용한 결과 외부 온도 상승에 따른 발화가 지연되는 것을 알 수 있었다.
2. 발화 개시 후 산소, 이산화탄소, 일산화탄소의 농도 변화로 갈탄에 함유된 방향족 화합물에 의하여 착화가 발생되고, 본 자연발화억제제는 휘발분의 연소를 지연시키는 것으로 해석할 수 있었다.
3. 석탄 연소로의 운전온도인 900°C 이상에서는 발화 지연이 발생되지 않으므로 연소성의 변화가 없는 것을 알 수 있었다.

References

- [1] IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C <https://www.un.org/en/climatechange/reports>
- [2] Korea 2050 Carbon Neutral Strategy <http://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%ED%83%84%EC%86%8C&menuId=286&orgCd=&boardId=1418350&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=>
- [3] G. Lia S.-Y. Zhang L.-J. Jin, Z. C. Tang, H. Q. Hu, "In-situ analysis of volatile products from lignite pyrolysis with pyrolysis-vacuum ultraviolet photoionization and electron impact mass spectrometry", *Fuel Processing Technology*, **133**, 232 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.02.016>
- [4] A. D. Danilack, S. J. Klippenstein, Y. Georgievskii, C. F. Goldsmith, "Low-temperature oxidation of diethyl ether: Reactions of hot radicals across coupled potential energy surfaces", *Proceedings of the Combustion Institute*, **38**(1), 671, (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.07.111>
- [5] C. P. Wang, Z. J. Bai, Y. X., J. Deng, C. M. Shu, "Effects of FeS₂ on the process of coal spontaneous combustion at low temperatures", *Process Safety and Environmental Protection*, **142**, 165 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.001>
- [6] J. Deng, X. Ma, Y. Zhang, Y. Li, W. Zhu, "Effects of pyrite on the spontaneous combustion of coal", *Int. Journal of Coal Science & Technology*, **2**, 306 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1007/s40789-015-0085-y>

[7] H. Wang, B. Tan, Z. Shao, Y. Guo, Z. Zhang, C. Xu, "Influence of different content of FeS₂ on spontaneous combustion characteristics of coal, *Fuel*, **288(15)**, 119582 (2021).
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119582>

[8] D. M. Wang, X. Y. Qi, X. X. Zhong, J. J. Gu, "Test method for the propensity of coal to spontaneous combustion", *Procedia Earth and Planetary Science*, **1(1)**, 20 (2009).
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.006>

[9] Y. L. Xu, L. Y. Wang, N. Tian, J. P. Zhang, M. G. Yu, M. A. Delichatsios, "Spontaneous combustion coal parameters for the Crossing-Point Temperature (CPT) method in a Temperature-Programmed System (TPS)", *Fire Safety Journal*, **91**, 147 (2017).
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.084>

[10] J. H. Jang, Q. H. Rhee, W. T. Seo, Y. Y. Jang, H. T. Jang, "Measurement Method of Sub-Bituminous Coal Spontaneous Combustion", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **23(4)**, 268 (2022).
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.4.268>

[11] W. X. Ren, Z. H. Kang, D. M. Wang, "Causes of Spontaneous Combustion of Coal and Its Prevention Technology in The Tunnel Fall of Ground of Extra-thick Coal Seam", *Procedia Engineering*, **26**, 717 (2011).
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2228>

[12] X. X. Lu, X. Xue, C. Y. Wang, G. Y. Shi, Y. Xing, Y. Han, "Investigation on the suppression characteristic of deoxidization gel foam on coal spontaneous combustion", *Fam Fire and Materials*, **3**, 28 (2021).
DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.3013>

[13] F. Z. Li, J. Feng, X. H. Li, W. Y. Li, J. Wang, "A model of devolatilization behavior in lignite pyrolysis with solid heat carriers", *AIChE J.*, **65(6)**, (2019).
DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.16590>

[14] J. S. Bendat, A. G. Pierso, "Random data : analysis and measurement procedures", wiley, 2011.

[15] R. C. Lirag, H. Littman, "Statistical Study of the Pressure Fluctuations in a Fluidized Bed.", *AIChE Symp. Ser.*, **67**, pp. 11, 1971.
<https://www.osti.gov/servlets/purl/4711542>

[16] J. H. Jang, J. I. Cho, J. W. Kim, Y. Y. Jang, D. J. Seo, S. J. Park, Q. H. Rhee, T. S. Park, H. T. Jang, "Analysis of Anti-Oxidant effect on Bituminous Coal using Pressure Fluctuation Properties in a Batch Fluidized Bed", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **23(10)**, 738 (2022).
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.10.738>

[17] L. Ballice, "Classification of volatile products evolved from temperature-programmed pyrolysis of Soma-Lignite and S₁ irnak-Asphaltite from Turkey", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **63**, pp. 267, 2002.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(01\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00159-0)

이 광 희(Qhwang-Hee Rhee)

[정회원]



- 1987년 2월 : 성균관대학교 산업심리학과 (경영학사)
- 2004년 2월 : 성균관대학교 경영대학원 마케팅전공 (경영학석사)
- 1987년 4월 ~ 2002년 6월 : (주)현대오일뱅크 직매팀, 홍보팀
- 2002년 7월 ~ 현재 : (주)미산이앤씨 대표

<관심분야>

석탄관리, 화학안전, 소방

장 준 호(Jun-Ho Jang)

[준회원]



- 2019년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학 전공

<관심분야>

분리공정, 에너지전환공정, 환경오염제어

조 정 익(Jeong-Ik Cho)

[준회원]



- 2019년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학 전공

<관심분야>

유기공업, 환경오염제어

서 동 주(Dong-Ju Seo)

[준회원]



- 2019년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학 전공

<관심분야>

분리공정, 에너지전환공정, 환경오염제어

박 태 성(Tae Sung Park)

[정회원]



- 1994년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학석사)
- 1998년 8월 : 고려대학교 화학공학과 (공학박사)
- 2009년 12월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 책임연구원

<관심분야>

분리공정(CO2포집), 유동층반응

한 수 영(Su-Young Han)

[준회원]



- 2019년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학 전공

<관심분야>

촉매반응, 대기오염제어, 반응공학, 약물전달체

장 현 태(Hyun Tae Jang)

[종신회원]



- 1989년 8월 : 고려대학교 화학공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

분리공정, 유동층반응

정 민 지(Min-Ji Jung)

[준회원]



- 2022년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학 전공

<관심분야>

의생명공학, 촉매반응공학, 약물전달체