

회분식 유동층에서 압력요동특성치를 이용한 유연탄의 산화방지제 효과 해석

장준호¹, 조정익¹, 김지원¹, 장윤영¹, 서동주¹, 박성준¹, 이광희², 박태성³, 장현태^{1*}
¹한서대학교 화학공학전공, ²(주)미산이앤씨, ³한국에너지기술연구원

Characteristics of Organic sludge Attrition in a Fluidized bed

Jun-Ho Jang¹, Jeong-Ik Cho¹, Ji-Won Kim¹, Yoon-Young Jang¹, Dong-Ju Seo¹,
Seong-Jun Park¹, Qhwang-Hee Rhee², Tae-Sung Park³, Hyun-Tae Jang^{1*}

¹Department of Chemical Engineering Hanseo University

²Misan E&C, LTD

³Korea Institute of Energy Research

요약 유연탄의 자연발화억제제 효과를 해석하고자 회분 유동층에서 유동화 특성 변화에 따른 압력요동 특성치, 온도 곡선을 유동층 축방향 위치에 따라 측정하였다. 유연탄의 자연발화 특성을 해석하기 위하여 내경 0.109 m의 유동층 반응기에서 회분식 석탄 시료 투입에 따른 유동화 특성과 탈휘발 및 점화 특성 실험을 수행하였다. 일반적으로 점화 온도 이하에서 실험을 수행하여 산화 방지제에 의한 탈휘발 및 초기 발화점을 중심으로 연구를 수행하였다. 회분식 석탄 시료 투입시 시간에 따른 압력요동 특성치의 평균압력, 압력요동의 표준편차, power spectrum, 온도 곡선을 이용하여 회분식 유동층에서 탈휘발 및 점화 특성을 측정하였다. 회분식 유동층 온도, 자연발화 억제제 적용량, 유동화 매질의 입자 크기에 따른 영향을 고찰하였다. 유연탄에 산화방지제 혼합량 0.16g 자연발화 억제제/1kg 석탄 이상의 적용량에서 유연탄의 탈휘발 및 점화 속도의 지연이 발생하였다. 저품위 갈탄의 경우 산화 방지제에 의한 발화 지연 영향이 더욱 크게 나타났다. 이러한 지연 효과는 유동층연소로의 연소 온도에서는 거의 영향이 없음을 알 수 있었다.

Abstract The spontaneous ignition inhibitor effect on bituminous coal was analyzed by measuring the pressure fluctuation properties and temperature profiles. Characteristics of spontaneous ignition of bituminous coal, experiments on devolatilization of coal, and ignition according to batch feeding of coal were performed in a fluidized bed(I.D. 0.109m, bed height 0.9m). The bed temperature was maintained below the bituminous coal ignition temperature. The devolatilization and initial ignition temperature change by the antioxidant were measured, and the characteristics were determined in the batch fluidized bed using pressure fluctuations such as mean pressure, standard deviation of pressure fluctuations, power spectrum, and temperature profile according to operation time when the coal sample was batch feeding. We further examined the effects of spontaneous ignition inhibitor mixing fraction on the spontaneous ignition temperature and particle size of the in-bed material. The devolatilization of the bituminous coal and the ignition rate decreased at the mixing fraction of 0.16g spontaneous ignition inhibitor/1kg coal. In the case of low-grade lignite, the decreased ignition effect by the antioxidant was observed to increase. It was found that spontaneous ignition inhibitor has no effect on coal combustion at the combustion temperature of the fluidized bed combustor.

Keywords : Coal, Fluidized Bed, Spontaneous Ignition, Pressure Fluctuation, Devolatilization

본 논문은 한국서부발전(주) 연구과제로 수행되었음.

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

email: htjang@hanseo.ac.kr

Received August 22, 2022

Revised September 22, 2022

Accepted October 7, 2022

Published October 31, 2022

1. 서론

지구온난화의 심각성으로 온실가스 배출 저감을 위하여 전세계가 화석연료 사용 억제를 위한 다양한 방안을 모색하고 있다. 현재 화석연료를 대체할 수 있는 신재생 에너지의 연구개발과 시설을 늘리고 있으나 낮은 효율과 불안정한 공급으로 화석연료 사용 감축에는 많은 한계를 지니고 있다. 원자력의 경우 사용 후 핵연료의 처리 등 문제점을 해결하기 위하여 노력하고 있으며,

전체 에너지 사용량의 일정 비율 이상 증대에 제약받고 있다. 발전 부문에서는 석유의 사용은 급격히 감소되었으며, 천연가스 사용이 증가하고 있다. 천연가스의 경우 동일 전력 생산에 이산화탄소 배출량은 석탄 대비 50%로 낮지만[1] 비용과 수급 과정의 지역적 문제를 안고 있다. 반면에 석탄은 전세계적으로 고르게 매장되어 있으며, 장기적인 공급 측면에서 안정적이라 할 수 있으므로 친환경적 사용을 위한 이산화탄소 포집 저장 및 전환을 포함한 석탄 활용기술개발에 관한 연구가 지속되고 있다[2]. 산업화와 문명화에 의하여 에너지 수요가 폭발적으로 증가하는 상황에서 청정에너지인 태양력, 풍력, 조력, 수력, 지열 등 에너지원 이용기술 연구에 집중하고 있으나, 충분하고 안정적인 공급이 어려운 실정이다. 이러한 환경에너지가 개발되기 전까지 석탄의 탄소 포집, 전환 등의 기술을 적용한 효율적 이용은 매우 중요하다. 석탄 이용 과정에서 이산화탄소 발생은 연소 후 발생하는 양이 대부분을 차지하고 있으나 저장과정에서도 발생된다. 석탄 저장과정에서 발생하는 석탄 더미(pile)의 승온현상 원인은 탄화과정을 거치고 지중에 장기간 저장되었던 석탄이 산소, 수분과 접촉하는 순간부터 발생하게 된다. 탄화 과정에서 생성된 황화철, 금속이 산화되며, 더미 중심부 온도 상승이 발생되고 휘발분의 착화로 저온 연소가 일어난다. 연소과정에서 이산화탄소, 일산화탄소 및 휘발분이 방출된다[3-5]. 이러한 자연발화시 이산화탄소 발생량은 측정의 어려움으로 현재까지 정확한 발생량은 보고되고 있지 않으나 거대한 석탄 더미의 온도상승으로 추산할 수는 있다. 현재 연소 후 발생하는 이산화탄소의 분리포집 기술은 적용이 가능한 상태로 개발되어 있으며, 분리포집 공정운전에 사용되는 에너지 손실로 발전효율은 약 30% 감소되는 것으로 보고되고 있다. 특히 폐기물의 처리 과정에서 유동층연소로는 석탄과 혼합연소에 의하여 다양한 폐기물의 처리가 가능하다. 가연성 폐기물 처리과정에서 연소에 의한 안정화가 가능한 폐기물의 경우는 석탄과의 혼합 연소에 의하여 완전한

폐기물의 처리와 에너지를 획득할 수 있다. 이와같은 측면에서는 화석연료 석탄 사용이 필요하며, 연소전 석탄에서 발생되는 이산화탄소 및 환경 오염물질의 제거가 필요하다.

본 연구에서 아민계로 이루어진 산화방지제를 사용하여 기존의 자연발화 방지 방법[6-10]과 다른 새로운 방법을 제시하고 타당성을 입증하고자 하였다. 유동층 연소로의 경우 열 및 물질전달이 우수하고, 장치 소형화 및 연료 제약이 작은 장점을 지니고 있다. 열전달과 물질전달이 우수한 유동층연소로에서 기본적인 연소특성에 대한 연구를 수행한 많은 연구자가 Char의 연소모델과 연소특성에 대한 연구는 진행하였다[11]. 본 연구에서는 유동층 연소특성 실험을 응용하여 일정 온도에 석탄이 순간적으로 노출된 경우 탈휘발과 점화 특성을 유동층에서 측정하여 산화방지제에 의한 자연발화억제제 효과를 평가하고자 연구를 수행하였다.

자연발화 관련 기존 발표된 연구는 경우 일정 속도로 승온시키는 상태에서 발생하는 온도 상승률의 변화로 측정하는 방법만이 발표되었다[6,7]. 석탄의 발화가 가능한 일정온도에서 단열로 유지되는 유동층에 석탄이 투입되는 경우 발생하는 온도변화곡선과 압력요동특성치로 자연발화를 해석하고자 하였다. 유동층의 경우 빠른 전열속도와 혼합으로 자연발화억제제에 의한 석탄의 탈휘발과 점화를 온도 및 압력신호로 나타낸다. 유동층내 변화현상을 해석하여 억제제의 자연발화 억제 효과를 검증하고자 하였다. 석탄 시료의 펄스 주입에 따른 유동층 층내 현상을 해석을 압력요동 특성치와 온도 변화 곡선으로 수행하여, 자연발화억제제를 적용한 석탄의 자연발화 억제 현상을 해석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. Fig. 1은 4 인치 sus-316 파이프로 제작한 유동층으로 내경 0.102mm이다. 분산판 상부 축 방향으로 0.03m 간격으로 압력전달기와 열전대를 설치하여 온도, 압력을 측정하였다. 시료 석탄의 회분식 공급을 위한 주입구는 유동층 splash 영역 하부 위치에 설치되었으며, 1인치 파이프에 두 개의 볼밸브를 설치한 형태로 밸브 사이 시료 석탄 시료를 충전하고 약 2bar 압력을 압축공기로 가하여 빠른 주입이 되도록 하였다.

2.2 실험방법

Fig. 1의 유동층에서 실험방법은 유동화 매질로 주문진 표준사 0.505mm(30/40 mesh)를 L/D=1로 충전하고 실험온도까지 유동층 외벽에 설치된 전열기를 이용하여 승온시킨다.

시료투입에 따른 온도변화를 측정하기 위하여 층내를 등온상태로 유지한다. 등온 상태의 유지는 설치된 전열기에 일정 전압을 공급하고 층 분산판으로부터 0.09 m 지점의 온도가 일정하게 유지되어 정상상태에 도달하면, 석탄 시료를 pulse로 주입하였다. 즉, 주입구 부분에 석탄 시료를 충전하고 밸브를 순간적으로 열어 유동층 내에 석탄 시료를 투입한다. 석탄 시료가 주입되면 유동층에 설치된 압력전달기로 부터 압력요동을 측정하고, 열전대로부터 온도 변화를 측정하여 주입 후 시간에 따른 평균압력, 압력요동의 표준편차, power spectrum density function distribution, 주진동수 등을 계산하였다[12,13]. 각각의 계산식은 Eq. (1) ~ (3)과 같으며, 본 연구에서는 10 ms 간격으로 data를 측정하여 1024 개 및 256개를 1set로 계산하였다. 또한 본 실험의 조건은 Table 1에 나타내었다.

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

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (2)$$

$$G_x(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (3)$$

Table 1. Experimental conditions.

Operating variables	Operating range
Inlet air velocity(m/sec)	0.250 - 0.394
In-bed particles size(mm)	0.505, 0.715
Bed temperature(°C)	100, 135, 170, 205, 240, 310
Aspect ratio(L/D)	1
Temperature measuring position(m, above distributor)	0.03, 0.06, 0.09, 0.12, 0.18
Pressure Signal measuring position(m, above distributor)	0.03, 0.06, 0.09, 0.12
Feeding coal size(mm)	1.015

2.3 시료

실험에 사용한 유동화 매질은 Geldart 분류[14] B인 주문진 표준사이며, 유동층 온도에 따른 최소유동화속도는 Fig. 2에 나타내었다. 석탄 시료는 역청탄급 유연탄을

사용하였다. 이들 시료에 대한 공업분석, 원소분석은 Table 2에 나타내었다. 시료 석탄은 발열량이 7,074 kcal/kg, 회분량이 10.0%로 고품위 석탄이며 황 함량이 0.10 %로 매우 낮은 저유황탄이다. 가연성분은 유연탄이 89.3%이다. 석탄 회분 중에 포함된 성분은 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃가 주종을 이루고 있다.

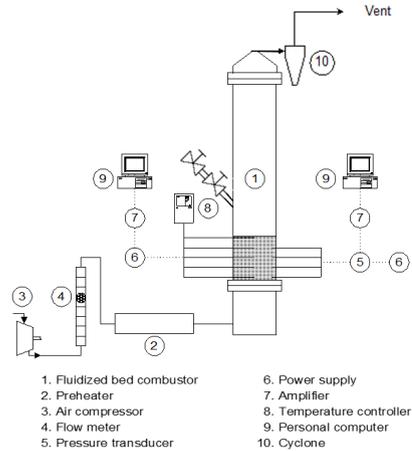


Fig. 1. Schematic diagram of batch fluidized bed for measuring coal spontaneous combustion.

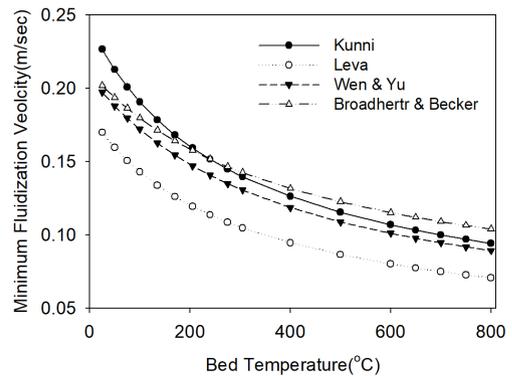


Fig. 2. Minimum Fluidization velocity of 0.505mm sand particle according to bed temperature.

Table 2. Analysis of test coal sample.

	Proximate analysis(wt.%)				
	Moisture	Ash	Volatile	Fixed Carbon	
Bituminous	0.7	10.0	31.2	58.8	
Lignite	20.0	3.5	40.0	36.5	
	Ultimate analysis(wt.% on dry basis)				
	C	H	N	O	S
bituminous	75.0	4.8	12.0	1.3	0.10
Lignite	70.0	5.2	0.8	19.5	0.13

3. 결과 및 고찰

3.1 산화방지제에 의한 유동화 특성

Fig. 3은 유동층에 종횡비(L/D) 1로 주문진 표준사 0.505mm(30/40mesh)를 충전한 후 해당 입자의 170℃에서 최소유동화속도 0.157m/s의 2배인 0.319m/s로 유동화하였다. 분산판으로부터 축방향 상부 0.09m위치 온도가 170℃를 유지하는 상태에서 역청탄급 유연탄 40g을 pulse로 주입하였다. 주입되는 석탄은 1.015mm(16/20mesh) 입경을 사용하였다. 그림은 자연발화억제제인 산화방지제를 사용한 석탄과 사용하지 않은 석탄을 각각 나타내었다. 산화방지제는 1kg 석탄에 0.016g 억제제를 물 4cc에 혼합한 상태로 현장 실험을 위한 대응량 기준양 2배로 혼합된 상태이다. 그림에서 석탄 주입과 동시에 온도가 감소한다. 상온으로 주입관에 충전된 석탄의 펄스 주입으로 층내 온도가 감소되며, 석탄의 수분과 휘발분 방출에 의하여 감소가 증가하게 된다. 산화방지제를 사용하지 않은 석탄의 온도곡선이 산화방지제를 처리한 석탄보다 급격하게 나타나며, 빠른 승온 특성을 보이고 있다. 석탄 투입온도 170℃는 아역청탄의 자연발화온도[15] 이상으로 석탄의 발화가 가능한 온도이다. 산화방지제를 처리한 석탄에 비하여 빠른 온도 감소와 증가를 나타내는 산화방지제를 처리하지 않은 석탄은 빠른 탈휘발과 점화가 일어나는 것을 알 수 있다. 따라서 발화온도보다 낮은 135℃에서 동일한 실험을 수행하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 온도 변화 곡선의 경향은 Fig. 3과 달리 유사하게 나타나 있다. 이는 산화방지제에 의한 자연발화 억제 효과가 상대적으로 작게 나타나고 있다.

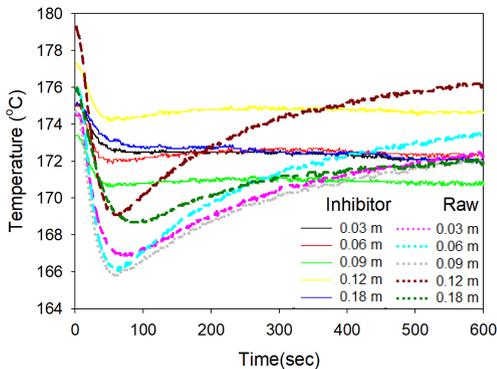


Fig. 3. Temperature profile with time at each measuring height above distributor according to inhibitor application (bed temperature : 170℃).

Fig. 5에 310℃에서 동일 실험을 수행하여 나타내었다. 그림에서 산화방지제 처리 여부에 따른 결과가 170℃보다 산화방지제의 적용에 따른 온도 곡선의 차이가 확연하게 나타나고 있다. 석탄 시료 투입 시점의 유동층 온도가 높을수록 상온에서 투입되는 석탄으로 열전달 속도가 온도차에 의하여 증가한다. 층의 온도 하강속도가 빠르게 된다. 또한 석탄에 함유된 수분과 휘발분의 탈휘발과정의 잠열에 의하여 온도하강이 일어나게 된다[11]. 산화방지제가 처리된 경우 탈휘발 속도가 지연되어 온도의 하강속도가 낮아지고 있으며, 가연성분의 휘발과 착화에 의하여 온도 상승이 급격히 일어나는 것을 알 수 있다.

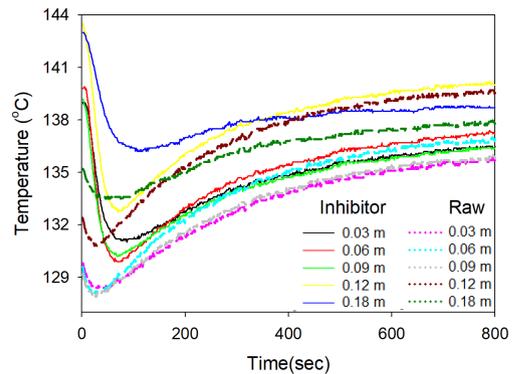


Fig. 4. Temperature profile with time at each measuring height above distributor according to inhibitor application (bed temperature : 135℃).

이러한 해석은 Fig. 5의 310℃ 실험에서 최저 온도를 나타내는 시간이 유동층 축방향 0.03, 0.06, 0.09m 지점이 동시에 나타나고 층상부 영역인 0.12, 0.18m 지점이 이후 나타나게 되며, 증가율도 동일한 순서로 나타나는 것이 착화와 탈휘발에 의한 현상을 나타낸다고 해석할 수 있다. 즉, 탈휘발 및 산소와 결합된 석탄[8]이 감소되어 일어나는 현상으로 해석할 수 있다. Fig. 6은 170℃의 Fig. 3 실험조건에서 층내 압력을 측정하여 나타낸 값이다. 유동층의 압력은 기포에 의하여 요동이 발생하게 된다. 본 실험에서 압력 측정은 10ms 간격으로 4 지점에서 하였으며, 그림은 각각 256개 측정된 압력의 평균을 나타낸 것으로 2.56초 간 측정된 압력의 평균값이다. Fig. 3의 온도 하강곡선 경향을 입증할 수 있다. 산화방지제를 적용하지 않은 석탄의 경우 약 5초 후 모든 측정 지점에서 압력의 증가를 나타내고 있다. 산화방지제를 적용하지 않은 경우는 층 중앙에 해당되는 0.06, 0.09m 지점에서 상대적으로 작은 압력의 증가를 나타내고 있다. 유동층에서 압력의 증가는 층물질량 증가, 치밀

도 증가, 탈휘발 과정에서 급격한 가스 방출 등으로 나타날 수 있다. 산화방지제 적용 여부에 따라 두 실험 조건에서 치밀도는 동일하고, 석탄 주입에 따른 층 물질의 증가도 동일하므로 휘발분 방출에 의한 영향으로 해석할 수 있다. 따라서 산화방지제에 의하여 탈휘발 속도가 낮아지므로 압력 증가폭이 작아지는 것을 알 수 있다.

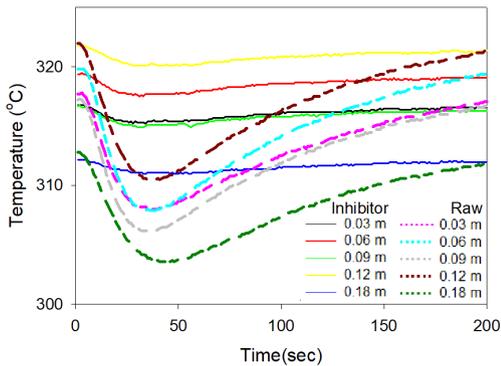


Fig. 5. Temperature profile with time at each measuring height above distributor according to inhibitor application (bed temperature : 310°C).

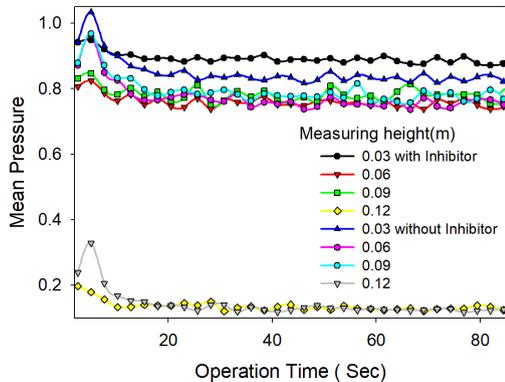


Fig. 6. Mean Pressure according to axial bed height with mixing of oxidation inhibitor (bed temperature : 170°C).

유동층 상부영역인 0.12m 지점에서 확연한 차이를 나타낸다. 산화방지제를 적용한 경우 주입과 동시에 압력이 증가한 후 압력 피크가 없이 10초 까지 감소를 나타내고 있으나 산화방지제를 적용하지 않은 경우는 주입 후 약 5초에 급격한 압력 증가를 나타내고 감소하기 시작한다. 절대 압력값은 두 경우 유사 값을 나타내고 있다. 휘발분 방출에 의한 압력의 증가를 확인하기 위하여 유동층 온도를 100, 310°C 에서 층 중상부 0.09m 지점에서 측정된 압력을 Fig. 7에 나타내었다. 310°C에서는

주입과 동시에 압력의 증가를 나타내고 감소하였으며, 이는 층온도가 산화방지제 적용 석탄의 휘발분 방출 속도가 낮은 것을 그림에서 알 수 있다. 또한 방출된 휘발분에 의한 입자 표면에 가스 필름이 형성되고 압력 절대값이 상대적으로 높게 나타나는 것을 알 수 있다[17]. 압력 절대값 차이는 100°C 실험에서도 나타나고 있으며, 170°C에서 나타나는 압력 최대지점 시간이 2.5초 지연되는 현상을 나타내고 있다. 이러한 특성으로부터 산화방지제에 의한 착화와 탈휘발이 지연되는 것을 알 수 있었다.

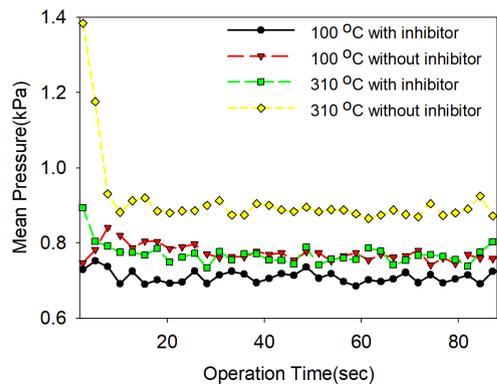


Fig. 7. Mean Pressure of axial bed height 0.09 m with mixing of oxidation inhibitor (bed temperature : 100°C, 310°C).

Fig. 8에 압력요동의 표준편차를 석탄 투입 후 20, 450초에 층 높이에 따라 나타내었다. 압력요동의 표준편차는 층내 기포에 의하여 발생되며, 기포 크기 및 빈도에 의하여 발생된다. 또한 연소 현상이 발생하는 경우 연소 입자에 형성된 가스 필름층과 가스 방출로 인하여 기포 거동에 의한 특성이 감소되어 압력요동 표준편차 값이 작게 나타난다. 연소가 발생되지 않고, 유동화 입자에서 가스 방출만 존재하는 경우도 동일하게 나타나게 된다. Fig. 8에 산화방지제를 처리하지 않은 석탄 주입 후 20초에서 나타나는 값이 가장 작게 나타나고 있다. 층높이 0.06m에서 값이 작게 나타나고 있으며, 이는 가스 방출에 의한 영향이다. 착화와 후 연소가 종료되는 시간을 상호 비교하였다. 일반적으로 반응이 없는 유동층의 경우 분산판으로부터 높이에 따라 압력요동의 표준편차 값은 증가하여 최대점을 가지며 다시 감소하게 된다. 또한 이때에 최대점을 나타내는 지점은 기포의 합체와 고체의 혼합이 가장 우수한 것으로 알려져 있다[17]. 유동층연소로에서 석탄연소의 경우 주입 석탄 입자의 탈 휘

발의 반응이 존재하므로 반응이 없는 경우와는 다를 것으로 사료된다. 그림에서 높이에 따른 압력요동의 표준편차가 층 하부에서 가장 높고 층 중상부, 층 중앙, 층 상부 순으로 나타나고 있다. 석탄의 탈 휘발 과정과 연소 과정은 석탄의 투입과 동시에 일어나고 석탄 입자는 가스 필름을 갖게 된다. 따라서 lean phase가 층 중앙에서 발생하게 되어 압력요동의 표준편차 값이 감소하게 된다[16]. 산화방지제가 처리되지 않은 석탄에서 휘발분 방출속도가 빠르므로 인하여 유동층의 압력요동의 표준편차 값이 작게 나타나고 있으나 450초 이후에 산화방지제 처리 석탄과 동일하게 나타나는 것으로 초기 휘발분 방출 속도 변화를 알 수 있다.

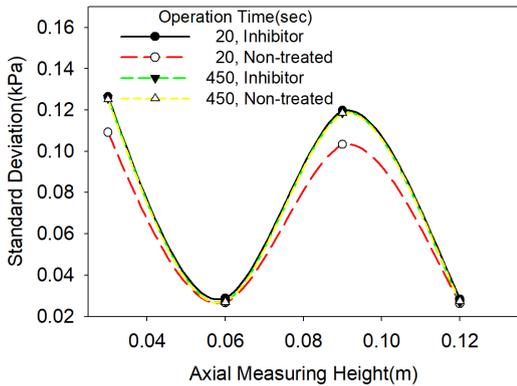


Fig. 8. The standard deviation of pressure fluctuation according to axial bed height mixing the oxidation inhibitor in the coal (bed temperature : 170°C).

Fig. 9에 산화방지제를 처리한 석탄을 170°C에서 투입시 초기 10초간 수집된 데이터 1024개로부터 계산된 power spectrum density function을 나타내었다. power spectrum은 유동층 내부 거동의 기초적인 자료를 제공할 수 있다. power spectrum은 압력요동 크기와 진동수에 따른 에너지 분포를 나타낸다. 폭이 넓게 나타나는 것은 기포 거동이 복잡하게 일어나고 있는 것을 의미하고, 일정 주기에서 나타내게 되는 것은 매우 주기적인 요소를 나타내게 된다[13]. 유동층에서 반응이 없이 단일 기포에 의한 유동화 현상이 일어나는 경우 분포가 좁고 특정 주기에서 피크가 나타난다[18]. Fig. 10에는 Fig. 9와 동일 온도 및 시간에 측정된 산화방지제를 처리하지 않은 석탄의 결과를 나타내었다. 매우 작은 피크를 나타내며, 주파 및 빈도는 유사한 값을 나타낸다. 이는 석탄 투입과 동시에 탈휘발로 인하여 기포에 의하여 발생하는 주기성이 상대적으로 약해진 것으로 해석 된다.

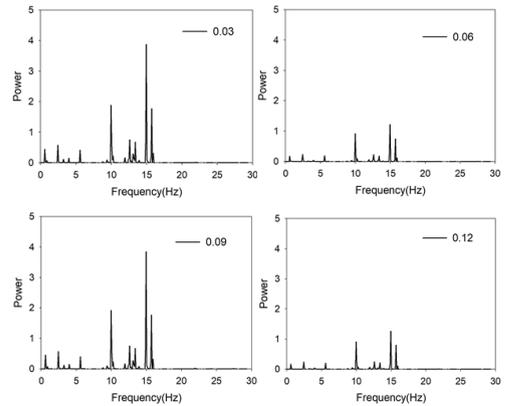


Fig. 9. The power spectrum density function according to axial bed height mixing with oxidation inhibitor in the coal.

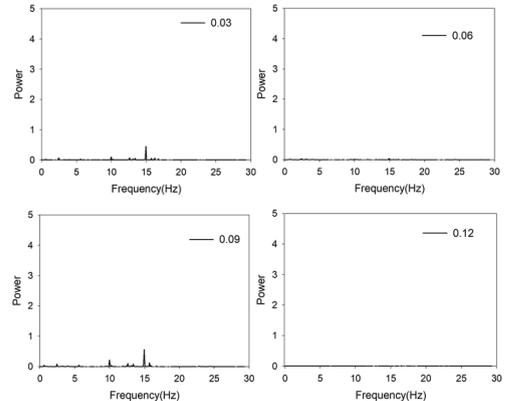


Fig. 10. The power spectrum density function according to axial bed height mixing without oxidation inhibitor in the coal.

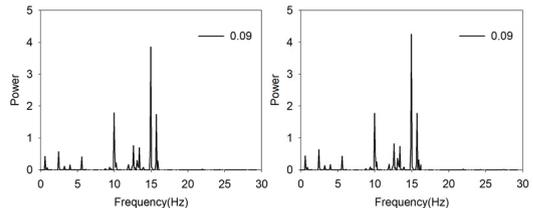


Fig. 11. The power spectrum density function according to oxidation inhibitor treatment of coal.

Fig. 11에 나타난 휘발분의 방출이 종료된 8분 후 측정된 power spectrum은 동일한 값을 나타낸다. 그림은 산화방지제를 처리한 (a)와 처리하지 않은 (b)의 경우 동일한 빈도와 세기를 나타내고 있다. 산화방지제를 처리하지 않은 경우 Fig. 10에서 유동층내로 투입 후 10초간에 나타나는 매우 약한 주기성을 보여주고 있으나, 8분 후에는

두 경우가 동일한 경향을 나타내고 있다. 즉, 압력요동의 표준편차와 평균압력 및 온도변화 곡선의 결과가 산화방지에 의한 탈휘발과 착화의 역제임을 증명한다.

3.2 산화방지에 의한 연소특성

Fig. 12는 온도조건을 800℃로 유지하고 산화방지를 처리하지 않은 석탄과 처리한 석탄을 비교한 것으로 동일한 경향을 나타내는 것으로 산화방지에 의한 연소 특성 변화는 없는 것을 알 수 있다.

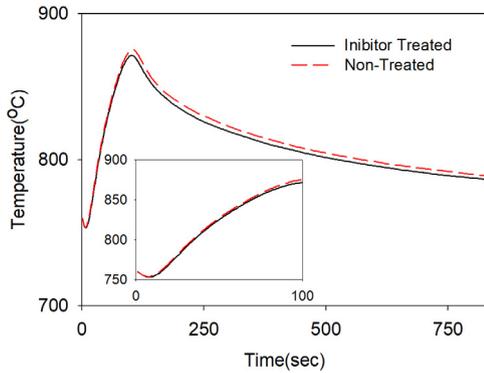


Fig. 12. Temperature profile with time at each measuring height above distributor according to inhibitor application (bed temperature : 800℃).

4. 결론

유동층에 중횡비(L/D)를 1로 주문진 표준사를 유동화시킨 상태에서 아민계 산화방지를 처리 석탄과 비처리 석탄을 펄스로 주입하는 방법으로 석탄의 자연발화 가능성을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

유동층내에 펄스로 투입된 석탄의 온도변화 곡선과 평균압력, 압력요동의 표준편차 및 power spectrum으로 자연발화 현상 해석이 가능함을 알 수 있었다.

유연탄에 산화방지제 혼합량 0.16g 자연발화 억제제 /1kg 석탄 이상의 적용량에서 유연탄의 탈휘발 및 점화 속도의 지연이 발생하였다. 산화방지제 처리한 석탄은 방지제가 석탄에 흡착되어 산화방지 효과를 나타내며, 휘발분의 탈휘발속도를 제어하는 현상에 의한 것으로 해석할 수 있었다. 산화방지제의 끓는점 이상인 310℃에서도 지연 효과가 있으며, 상용 연소로 운전온도에서는 산화방지제에 의한 연소 지연 현상은 발생하지 않았다. 따라서 아민계 산화방지제에 의하여 보관과정의 자연발화는 지연되며, 연소성에는 영향이 없음을 알 수 있었다.

References

- [1] M. Z. Jacobson, "100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything : Evaluation of Coal and Natural Gas With Carbon Capture as Proposed Solutions to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security", Cambridge University Press, New York, pp. 427, 2020.
<https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/WWSBook/WWSBook.html>
- [2] Carbon capture, utilisation and storage - Fuels & Technologies - IEA
- [3] J. D., X. Ma, Y. Zhang, Y. Li & W. Zhu, "Effects of pyrite on the spontaneous combustion of coal", *International Journal of Coal Science & Technology*, 2, 306, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40789-015-0085-y>
- [4] 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>
- [5] 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), pp. 119582, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119582>
- [6] 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), pp. 20, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.006>
- [7] 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, pp. 147, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.084>
- [8] 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, pp. 28, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.3013>
- [9] I. S. Park, D. H. Jeon, W. T. Cho, J. H. Yu, S. H. Lee, Y. W. Lee, "Stabilization Characteristics of Upgraded Coal Using Palm Oil Residues", *Clean Technology*, 19(4), pp. 469, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.7464/ksct.2013.19.4.469>
- [10] J. D. N. Pone, K. A.A. Hein, G. B. Stracher, H. J. Annegarn, R. B. Finkleman, D. R. Blake, J. K. McCormack, P. Schroeder, "The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa", *International J. of Coal Geology*, 72(2), pp. 124, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.01.001>

- [11] J. S. Dennis, A. N. Hayhurst, S. A. Scott, "The combustion of large particles of char in bubbling fluidized beds: The dependence of Sherwood number and the rate of burning on particle diameter", *Combustion and Flame*, 147(3), November, pp. 185-194, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2006.08.007>
- [12] J. S. Bendat, A. G. Pierso, "Random data : analysis and measurement procedures", wiley, 2011.
- [13] R. C. Lirag and 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>
- [14] D. Geldart, "Types of gas fluidization", *Powder Technology*, 7(5), pp.285-292, May 1973.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(73\)80037-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80037-3)
- [15] 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), pp. 268-275, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.4.268>
- [16] H. T. Jang, S. B. Kim, W. S. Cha, S. C. Hong, D. S. Doh, "Pressure fluctuation properties in combustion of mixture of anthracite and bituminous coal in a fluidized bed", *Korean J. Chem. Eng.* 20, pp. 138-144, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02697199>
- [17] S. C. Hong, B. R. Jo, D. S. Doh, C. S. Choi, "Determination of minimum fluidization velocity by the statistical analysis of pressure fluctuations in a gas—solid fluidized bed", *Powder Technology* 60(3), pp. 215-221, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(90\)80121-E](https://doi.org/10.1016/0032-5910(90)80121-E)
- [18] O. A. Jaiboon, B. Chalermisinsuwan, L. Mekasut, P. Piumsomboon, "Effect of flow pattern on power spectral density of pressure fluctuation in various fluidization regimes", *Powder Technology*, 233, pp 215-226, January 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.09.014>

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

김 지 원(Ji-Won Kim)

[준회원]



• 2020년 3월 ~ 현재 : 한서대학교
화학공학 전공

<관심분야>

의생명공학, 촉매반응공학, 약물전달체

장 윤 영(Yoon-Young Jang)

[준회원]



- 2019년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학 전공

<관심분야>

의생명공학, 촉매반응공학, 약물전달체

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

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

박 성 준(Seong-Jun Park)

[준회원]



- 2018년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학 전공

<관심분야>

촉매공정, 신재생에너지, 환경오염제어

장 현 태(Hyun Tae Jang)

[중신회원]



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

<관심분야>

분리공정, 유동층반응