

## 석탄의 열적 특성과 석탄 내부의 승온 특성과의 상관관계 연구

이현동\*\* · 김재관\*

### Study on the Correlation between Thermal Characteristics and Heat Accumulation in the Coal Pile

Hyun-Dong Lee and Jae-Kwan Kim

#### ABSTRACT

Spontaneous ignition tests of five different coals with non-iso-thermal and iso-thermal test method based on the standard test procedure of NF T20-036 were carried. These five coals included the 2 low rank coals and 3 bituminous coals. Test results showed that the ignition temperatures of all coals at the iso-thermal conditions were higher than that of non-isothermal condition, and those of low rank SM and BR coal in both non-isothermal and isothermal conditions were lower than bituminous AN and CN coals. The chemical species of coals such as oxygen and hematite also plays an important role in enhancing the ignition rate that the ignition temperature of SM coal was lowered. The heat accumulation tendency of five coals inside outdoor stack pile was monitored with emphasis on the change in the temperature of the coal depth in stack pile. In case of low rank BR coal, its temperature inside coal stack pile due to the rate of high heat accumulation and oxidation was 59 °C compared to 51 °C for other SW bituminous coal. And the heat accumulation rate inside coal stack piles was increased with increased the Cp value which it was defined as the specific heat of coal at constant pressure, whereas other factors such as thermal diffusivity and conductivity of coal relatively had less effect on heat accumulation.

**Key Words** : Spontaneous ignition, Low rank Coal, Stack pile, Functional group of oxygen

#### 기 호 설 명

##### Alphabets

TC : Thermocouple  
ISO-IT : Iso-thermal Ignition Temperature  
CPT : Cross Point Temperature

##### Subscripts

Cp : Specific Heat at Constant Pressure

### 1. 서론

최근 국내에 발전용 연료로서 수입되는 역청탄 및 아역청탄은 연간 약 5,000만 톤 이상에 이르고 있으며 발전용 석탄의 경우 거의 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 과거 발전용 석탄 연료는 설비의 설계특성에 맞는 양질의 석탄을 주로 수입하여 사용하여왔으나, 최근 들어서는 전 세계적인 에너지 수요증가 및 자원 고갈 등의 영향에 따른 가격 급등으로 기존 설비에 적합한 양질의 석탄 연료를 선택적으로 수입하여 사용할 수 있는

여건이 되지 못하고 있다. 따라서 발전용 보일러 설비 설계조건을 벗어나는 저급의 아역청탄 사용이 이전에 비해 대폭 증가한 상황이며, 향후 이러한 추세는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 이와 같이 발전설비의 설계조건과는 상이한 다양한 저급탄 사용의 증가는 연료 자체의 연소에 따른 손실 문제와 운송 및 저장과정에서 많은 문제를 일으키고 있는 상황이며, 특히 고수분, 고휘발분의 특성을 가지는 저등급 아역청탄의 특성상 저장과정에서 자연발화가 빈발하는 특성을 가진 것으로 알려져 있다[1]. 본 연구에서는 석탄의 화학적 성상 및 물리적 전열특성과 자연발화 메커니즘의 주요 단계인 석탄 내부의 축열 및 승온 특성과의 상관관계를 분석하고자 국내에 수입되어 사용되고 있는 역청탄 및 아역청탄 5

\* 한국전력공사 전력연구원

† 연락저자, hdlee@kepri.re.kr

중에 대해 발화실험을 수행하고 또한 야외 적치상태에서 석탄 파일(석탄더미; Coal Stack Pile)내부의 온도변화를 약 3개월에 걸쳐 장기간 모니터링한 후 이러한 결과들을 상호 비교분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시험탄 성상 및 열전달계수 분석

본 연구에 사용된 시험탄은 총 5종으로, 인도네시아산 아역청탄 계열의 SM 및 BR탄과 전형적인 역청탄의 특징을 보이는 호주산 AN 및 CN탄, 그리고 중국산 SW탄 등이 실험에 사용되었다. Table 1에서 보는바와 같이 특히 인도네시아산 SM 및 BR탄은 수분 및 휘발분 함량이 높은 특성을 보이고 있어 높은 자연발화 가능성을 예측할 수 있으며, AN이나 CN탄과 같은 호주산 역청탄의 경우 상대적으로 이러한 값들이 낮은 특성을 보이고 있다. 시험탄에 대한 열전달계수 분석결과 열확산계수는 SW탄이 0.098 mm<sup>2</sup>/s로서 가장 높았으나, 열전도도 및 정압

비열 값은 SM탄이 가장 높은 결과를 보였다.

고수분 저등급 석탄은 탄종 자체에 산소 관능기와 발열반응 시 증기화 되는 수분 함량이 높아 자연 발화되기 쉬운 조건을 가지고 있는 것으로 알려져 있다[1].

### 2.2. 실험장치 및 조건

#### 2.2.1. 자연발화 온도 및 석탄 파일 내부 온도증가 측정실험

석탄의 자연발화(Spontaneous Ignition)는 외부에서 아무런 착화원이 없는 상태에서 시료내부의 반응, 전도, 대류, 복사, 방열 등 발열작용에 의해 산소관능기가 공기와의 접촉 경계면에 가연성 혼합가스로 발생한 후 공기와의 혼합을 통해 산화반응이 일어나고 그 열이 장시간 축적되어 마침내 발화점에 도달되어 연소를 일으키는 현상이다. 이와 같이 자연 발화가 일어나기 위해서는 물질의 화학반응에 의해 열이 발생하고 발생한 열이 물질의 내부에 축적되어 물질의 온도가 발화온도를 상회할 경우 발생한

**Table 1.** 시험탄종의 화학적 특성

Description		Unit	S.M	BR	AN	CN	SW
Total Moisture		wt%	26.34	23.61	13.77	7.52	13.11
Proximate Analysis (As air dry basis)	Volatile Matter	wt%	42.7	39.68	30.89	31.31	34.92
	Moisture	"	12.6	12.04	3.85	4.01	8.53
	Fixed Carbon	"	40.16	42.56	49.29	49.42	50.75
	Ash	"	4.54	5.72	15.97	15.26	5.8
Calorific Value(As air dry basis)		Kcal/kg	5,304	6,155	6,516	6,417	6,673
Ultimate Analysis (As dry basis)	Carbon	wt%	62.03	68.7	73.73	72.77	75.77
	Hydrogen	"	5.21	5.23	4.43	4.29	4.85
	Nitrogen	"	0.92	1.5	1.71	1.63	1.15
	Total Sulfur	"	0.15	0.49	0.54	0.51	0.31
	Oxygen	"	26.5	17.58	2.98	4.9	11.58
	Ash	"	5.19	6.5	16.61	15.9	6.34
Ash Analysis (As dry basis)	SiO <sub>2</sub>	wt%	40.26	46.84	69.55	72.10	41.89
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	10.31	19.95	19.78	18.63	16.81
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	22.47	9.12	3.15	2.92	8.68
	CaO	"	12.01	7.64	2.02	1.91	17.74
	MgO	"	7.00	3.23	0.64	0.67	2.09
	Na <sub>2</sub> O	"	0.14	2.74	0.18	0.24	0.74
	K <sub>2</sub> O	"	0.54	1.37	0.62	0.87	1.10
	SO <sub>3</sub>	"	4.94	6.34	1.36	1.37	8.31
	TiO <sub>2</sub>	"	0.54	0.83	1.02	0.86	0.67
열전달계수	Diffusivity	(mm <sup>2</sup> /s)	0.093	0.071	0.092	0.076	0.098
	Conductivity	(W/m · K)	0.098	0.071	0.098	0.070	0.088
	Cp	(J/g/K)	1.560	1.313	1.311	1.218	1.288

다. 여기서 물질의 화학반응과 발화온도는 물질 고유의 성분 및 그것의 함량에도 관계가 되는 조건이라고 할 수 있으며, 반응열의 대소라고 하는 것은 물질고유의 성질보다도 물질이 놓여있는 환경조건에 지배받는 경우가 많다. 즉, 방열되기 쉬운 상태에 있으면 열의 발생량이 많아도 열이 축적되기 어렵고, 반면에 방열되기 어려운 상태에 있으면 발열량이 적어도 충분히 열이 축적 될 수 있기 때문이다. 따라서 자연발화의 특징은 열의 축적 과정에 있으며, 자연발화 현상은 환경조건에 깊은 관계를 가지는 현상이라고 할 수 있다[2]. 석탄이 발화가 일어나기 위해서는 최소 발화에너지(Minimum Ignition Energy)가 필요하다. 이 최소발화에너지는 가연성 물질과 공기의 혼합물을 점화시키기 위해서 착화원이 가지는 최소한의 에너지로서 각 물질마다 최저 발화온도를 가지게 되며, 자연발화점을 측정하는 방법은 다음과 같이 승온법과 등온법으로 분류된다. 승온법의 경우 시료를 정해진 가열속도로 가열하면서 측정하므로 비교적 조작성이 간단하고 실험기간이 짧은 반면 발화점 해석이 쉽지 않고 시료가 승온 과정에서 예열되어 발화점이 실제보다 낮아지는 단점이 있다. 그러나 등온법의 경우 일정온도를 유지한 곳에 시료를 갑자기 투입해 일정기간 안에 발화가 일어나는 여부를 측정하는 방식으로 조작성이 매우 까다롭고 발화점을 정확하게 측정하기 위해서는 실험을 여러 번 반복해야 하는 단점도 있으나 결과의 해석이 매우 쉬운 장점이 있다. 승온법의 표준시험법은 석탄과 같은 고체일 경우 NF T20-036(프랑스 규격협회 표준시험법; Chemical product for industrial use. Determination of relative temperature of spontaneous flammable of solids)에 의해 상온에서 공기와 접촉하여 순간적으로 발화하는 폭발성 물질은 제외하고 적용된다[2].

이 승온법의 목적은 고형물질의 기초적인 스크린 테스트에 유용하고 상승된 온도에서 자연 발화하는

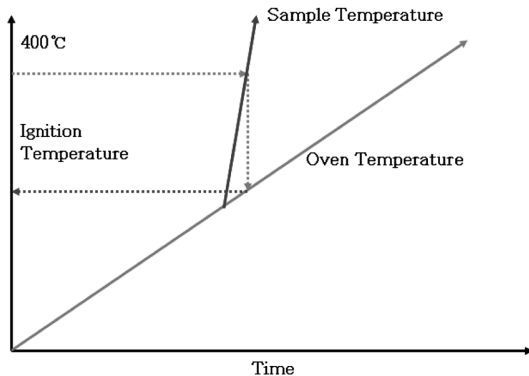


Fig. 1. 승온법 발화온도 측정.

고형물의 기초정보를 습득하는데 사용된다. 측정방법은 특정부피의 물질을 규정된 용기에 넣고 400℃까지 가열한다. 시료의 온도가 오븐 온도와 같아지는 시점을 분기점(CPT:Cross Point Temperature)라고 하며[3], 시료가 연소되면서 발생한 시료 내부의 온도가 400℃에 도달할 때 오븐의 온도를 발화온도(IT: Ignition Temperature)라고 한다(Fig. 1). 또한, 등온법은 일정온도를 유지한 용기에 시료를 갑자기 투입하여 4초 이내에 발화가 일어나는지를 측정한다. 발화가 일어나면 용기의 온도를 낮추어 가면서 발화가 일어나지 않는 온도를 기준으로 최소발화온도를 규명한다.

한편, 아역청탄 및 갈탄과 같은 고수분 저등급 석탄은 높은 수분함량 때문에 낮은 발열량을 가지고 있다. 그러나 이들 저등급 석탄은 건조 상태에서 산소와의 높은 반응성으로 인해 산화, 수분 재흡착 및 자연발화에 민감하다. 석탄 내 존재하는 총 수분함량, 산소농도 및 산소관능기의 분포는 자연발화에 큰 영향을 미치는 주요 인자로서 석탄의 산화에 대한 석탄 내 산소농도 및 습도의 영향은 민감하게 검토되었다. Blom과 Schaffer 등이 석탄 내 평형 수분농도(23℃에서 상대습도 70%, 20℃에서 상대습도 52%) 및 석탄 내 존재하는 카르복실(Carboxyl) 및 하이드록실(Hydroxyl) 관능기의 농도에 대해 연구하였다[4,5].

본 연구에서는 등온법과 승온법에 의한 자연발화 측정 실험을 병행하였다. 실험결과는 Table 2와 같으며, 실험결과를 석탄의 성분 중 특별히 산화반응과 관련이 있을 것으로 예상되는 산소의 함량과 산화철의 함량 및 열전달 계수와 비교분석하였다. 또

Table 2. 탄종별 발화온도 측정결과

탄종	등온법발화점 (ISO-IT;4s, ℃)	탄종	승온법 발화점(IT;400℃)
SM	298	SM	274.25
BR	389	BR	324.01
AN	471	AN	352.70
CN	456	CN	325.60
SW	442	SW	326.51

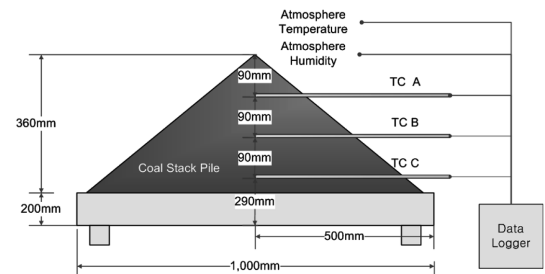


Fig. 2. 파일 내부온도 측정 장치 구성도.

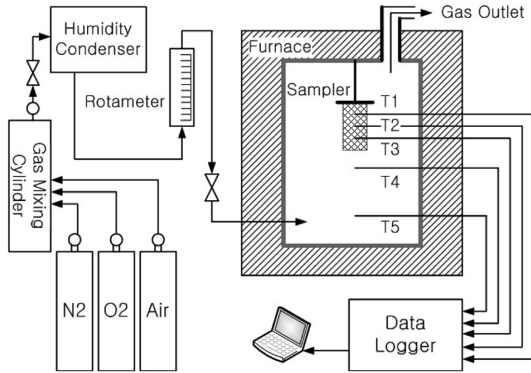


Fig. 3. 자연발화 실험장치(승온법).

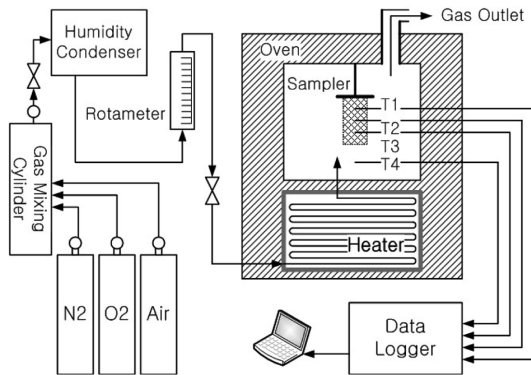


Fig. 4. 자연발화 실험장치(등온법).

한, 5개 탄종에 대하여 실외에서 약 300 kg으로 동일한 무게의 석탄시료를 Fig. 2와 같이 동일한 형태로 야적한 다음 야적된 석탄에 일정간격으로 온도계를 삽입하여 외부 대기의 온도 및 습도 변화에 따른 파일 내부의 온도변화를 약 3개월간 연속적으로 모니터링 하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1. 발화실험

두 가지 방식의 발화측정 시험결과 Fig. 5, 6에서와 같이 시험탄의 발화점은 등온법 보다 강제적으로 외부에서 열을 가해주는 승온법의 경우가 낮게 나타났으며, 특히 탄 자체의 자연발화성이 높을 것으로 예상되는 고수분 저등급탄인 SM 및 BR탄에서는 등온법과 승온법에 의한 발화점 측정결과의 차이가 상대적으로 적게 나타나 탄 자체의 높은 발화성을 판단할 수 있는 결과를 보였다. 또한 발화점 측정결과와 시험탄의 산소함량 및 산화철(Hematite)의 함량과의 상호 비교결과 반비례 관계가 뚜렷이 관찰되었다(Fig. 5, 6). 이는 탄 자체의 산소함량이 높을수록 산화반응에 의한 발열 가능성이 높음을 예

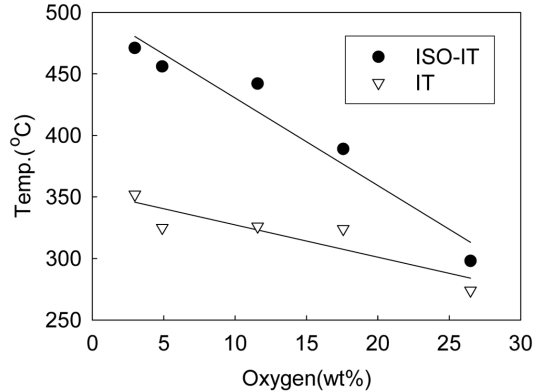


Fig. 5. 산소 함량과 발화온도와와의 관계.

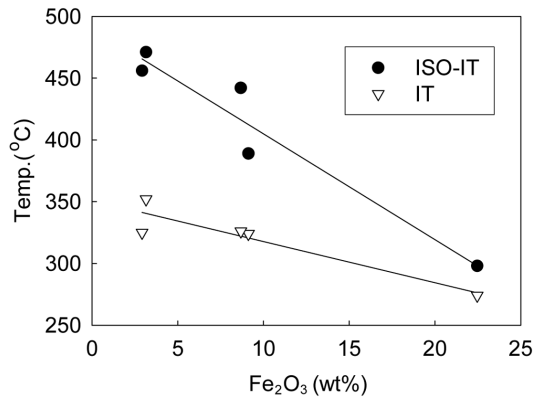


Fig. 6. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량과 발화온도와와의 관계.

상할 수 있게 하는 결과이며, 산화철과의 관계는 산화반응에 있어 산화철의 촉매 역할을 예측해 볼 수 있는 결과로 사료된다.

또한 Fig. 7에서와 같이 시험탄의 발화온도와 정압비열과의 상호 관계를 비교분석한 결과, 시험탄의 정압비열과 발화온도와의 관련성이 관찰되었다. 이는 다른 열전달계수인 열전도도 및 열확산계수에

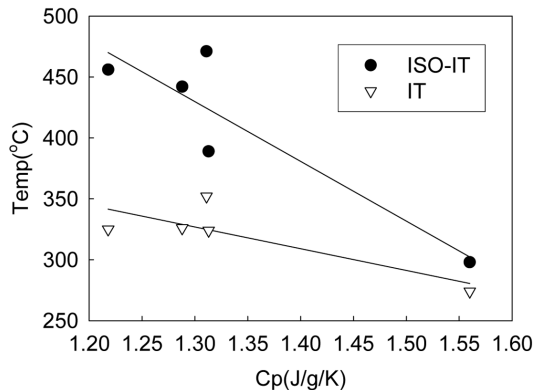


Fig. 7. 석탄의 정압비열(Cp)과 발화온도와와의 관계.

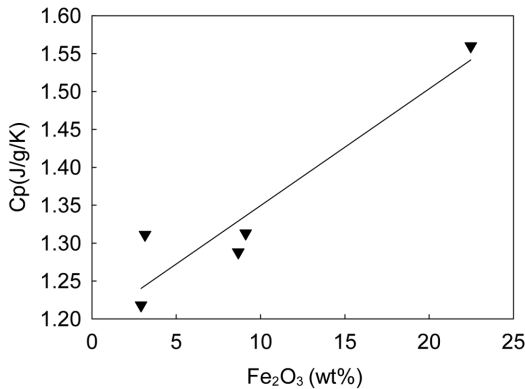


Fig. 8. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량과 석탄의 정압비열과의 관계.

서는 관찰되지 않는 특성으로서 상대적으로 높은 비열은 석탄 내부의 열 축적량을 높여 석탄이 발화점 이상으로 가열되는데 기여하는 것으로 파악되며, Fig. 8에서와 같이 시험탄의 정압비열은 석탄의 산화철함량과 비례하는 경향을 나타내고 있어, 석탄의 황화철이 산소 및 수분과 반응하는 과정에서 높은 열이 발생하는 것으로 알려진 반응메커니즘과 연관성이 있는 것으로 사료된다[6]. 따라서 이러한 관계를 석탄의 자연발화성을 예측하는 지표로서 활용하는 방안에 대해 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다.

### 3.2. 실외 석탄 파일 내부 온도증가 특성

실외에 시험탄을 적치해놓고 파일 내부의 온도를 모니터링 한 결과 주간과 야간의 경우 태양열에 의한 복사 효과로 인해 특히 파일 내부의 온도상승이 매우 크게 나타났으며, 온도의 변화가 가장 심한 지점은 파일 표면에서 가까운 상부 지점(Fig. 2 참조)이었고, 내부로 깊이 들어갈수록 온도변화는 상대적으로 미미했다(Fig. 9). 이러한 현상은 실제 발전소 현장에서 자연발화 발생 시 파일 표면 근처 약 1 m 지점 이내에서 자연발화 현상이 주로 관찰되는 결과와 일치하는 결과로서 수분의 흡착탈과 산소에 의한 산화열의 누적 등으로 설명되는 석탄의 자연발화 메커니즘과도 일치하는 결과이다[7]. 5개 탄종의 내부 온도변화 측정결과 Fig. 10에서와 같이 상대적으로 수분함량이 높은 인도네시아산 BR 및 SM 탄의 표면 최상부 지점의 온도 상승이 가장 높게 관찰되었다.

또한 외부의 온도 및 습도변화에 따른 파일 내부 온도상승의 높은 연관성이 관찰되었다. Fig. 9의 경우와 같이 외부의 온도 상승과 이때 감소하는 상대 습도 변화와 더불어 파일 내부의 온도가 급상승하는 결과를 보이고 있는데, 이는 태양 복사에너지의 증가와도 일치하는 결과이다. 따라서 자연 상태에서 파일 내부온도의 급격한 상승시점은 일출시부터 시

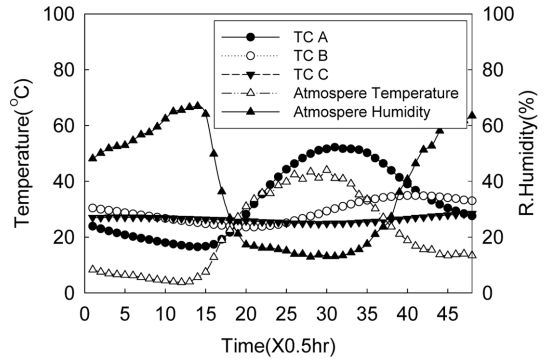


Fig. 9. 실외 온도, 습도 변화와 파일 내부 승온패턴(BR탄).

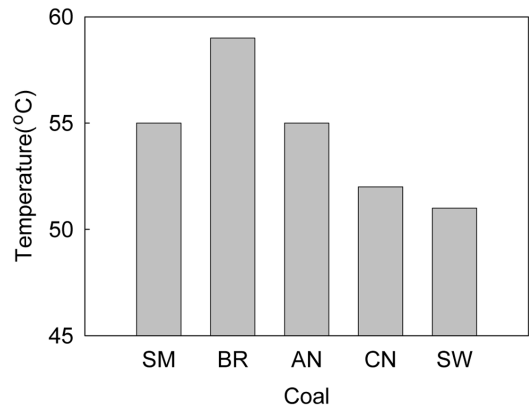


Fig. 10. 탄종별 최고 승온 비교.

작되는 것을 알 수 있으며, 주간과 야간의 경우 야간에 비해 약 30°C 이상의 높은 온도 상승이 관찰되었다. 따라서 대량의 야적 조건에서 이러한 파일 내부의 온도 증가에 따른 축열 현상이 지속적으로 진행될 것이 예상되며, 이러한 과정이 반복될 경우 수분의 흡착탈 현상과 탄화수소 계열 가연성분의 증발 및 산화가 지속되어 결국 발화에 이르도록 내부의 온도 상승이 더욱 급속히 진행되는 것으로 파악된다.

또한, 5개 탄종에 대하여 내부 온도상승이 가장 높았던 시기의 파일 최상단 표면의 온도상승율을 구하여 상호 비교분석하였다. 즉 각탄의 일일 온도상승 곡선에서 최저점과 최고점 구간을 잘라 플로팅한 후 이 구간에 대하여 1차방정식 형태의 회귀분석 직선을 구하고 이 직선의 기울기를 통해 각 탄종별 승온율(°C/hr)을 구하였다. 분석결과 Fig. 11과 같이 BR탄과 SM탄의 온도 상승률이 가장 높은 결과를 보여 인도네시아산 고 수분, 고 휘발분 석탄의 높은 자연발화 특성과 일치하는 결과를 나타냈으며, 승온율이 낮은 호주산 석탄의 결과는 통상적으로 발전소 현장에서 낮은 자연발화 특성을 보이는 특성과 일치하는 결과를 나타냈다. 또한 각 탄의 열확산계수, 열전도도 및 정압 비열 분석결과와 승온시험 결과

와의 연관성을 분석하였다. 분석결과 열확산계수 및 열전도도계수는 석탄의 승온특성과 뚜렷한 상관성을 보이지 않았으나 Fig. 12에서와 같이 정압비열의 경우 상관성이 있는 결과를 보여 파일의 내부온도 상승은 탄의 비열과 관련성이 있는 것으로 파악된다. 이는 파일의 내부온도 상승, 즉 자연발화가 내외부적인 조건에 의해 연료 내부에 열에너지가 축적되는 메커니즘과 밀접한 관련성이 있음을 보여주는 결과로 해석된다[6]. 한편 SM, BR탄의 경우 전반적으로 열확산계수 및 열전도도가 높아 외부의 열전달이 잘 일어나는 특성과 함께 자체적으로 비열도 높아 많은 열에너지를 상대적으로 빠르게 축적할 수 있는 특성을 가지게 되어 빠른 내부온도 상승을 유발함으로써 결과적으로 자연발화 특성이 높게 나타나는 것으로 파악된다. AN탄의 경우는 열확산계수 및 열전도도가 상대적으로 높은 특성을 보여 승온온도는 높으나 정압비열이 낮고 상대적으로 휘발분 함량이 적어 발화온도는 높은 특성을 보이는 것으로 파악되며, SW탄의 경우 열확산계수는 높은 편이지만 열전도도는 AN탄에 비해 다소 낮고, 정압비열 역시 상대적으로 낮은 특성을 보여 발화온도는

높은 특성을 보이는 것으로 파악된다. 따라서 파일 내부의 온도상승 및 축열효과와 석탄의 비열과 관련성은 보다 심도 있게 검토해볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

수입산 석탄 5종을 대상으로 한 등온법 및 승온법에 의한 자연발화 특성평가와 야외 장기 저탄 상태에서의 파일 내부의 온도 변화 특성을 석탄의 물리화학적 특성과 비교하여 상관성을 분석하였다. 분석결과 시험탄의 발화점은 등온법 보다 강제적으로 외부에서 열을 가해주는 승온법의 경우가 낮게 나타났으며, 고수분 저등급탄인 SM 및 BR탄의 경우 절대 발화온도가 낮게 나타나 탄 자체의 높은 발화성을 보였다. 또한 탄의 발화점 측정결과와 시험탄의 산소함량 및 산화철(Hematite) 함량과의 비교결과 반비례 관계가 뚜렷이 관찰되었다. 이는 탄 자체의 산소함량이 높을수록 산화반응에 의한 발열 가능성이 높음을 예상할 수 있게 하는 결과이며, 석탄 내부의 산화반응 시 산화철의 촉매 역할을 예상할 수 있는 결과로 사료된다. 또한 시험탄의 발화시험 결과와 열전달계수와 상호 관계를 비교분석한 결과 특히 시험탄의 정압비열과 발화온도와의 관련성이 다소 관찰되었다. 이는 열전도도 및 열확산계수와의 관계에서는 관찰되지 않는 특성으로서 상대적으로 높은 비열은 석탄 내부의 열축적량을 높여 석탄이 발화점 이상으로 가열되는데 기여하는 것으로 예측되어 보다 많은 자료의 검토를 통한 확인이 필요할 것으로 사료되며, 시험탄의 정압비열과 산화철함량과는 상호 비례하는 경향을 보이고 있어 역시 향후 보다 다양한 사례에 대한 검토가 필요할 것으로 보인다. 한편 실외에 시험탄을 적치해놓고 내부의 온도를 모니터링 한 결과 주간외의 경우 태양열에 의한 복사효과로 인해 특히 파일 내부의 온도상승이 크게 나타났으며, 온도변화가 가장 심한 지점은 파일 표면에서 약 90 mm 지점이었고, 내부로 깊이 들어갈수록 온도증가는 상대적으로 미미했다. 또한 탄종별 내부 온도 변화 측정결과 상대적으로 수분함량이 높은 인도네시아산 BR 및 SM탄의 표면 최상부 지점 온도 상승이 가장 높게 관찰되었으며, 외부의 온도 및 습도변화에 따른 파일 내부 온도상승의 높은 연관성이 관찰되었다. 자연 상태에서 파일 내부온도의 급격한 상승시점은 일출시부터 시작되는 것을 알 수 있었으며, 주간외의 경우 야간에 비해 약 30℃ 이상의 온도 상승이 관찰되었다. 또한 파일 내부 최상단 표면의 온도 상승율을 구해 비교 분석한 결과 BR탄과 SM탄의 온도 상승률이 가장 높은 결

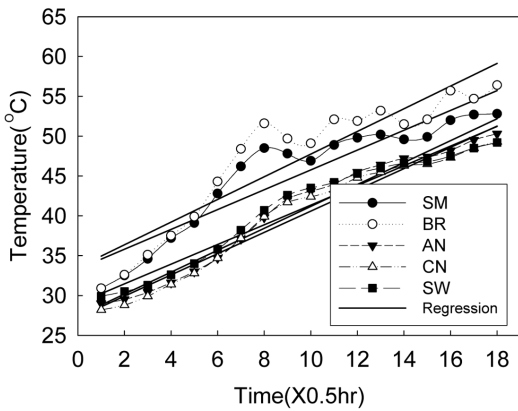


Fig. 11. 탄종별 승온률 비교(8월 기준).

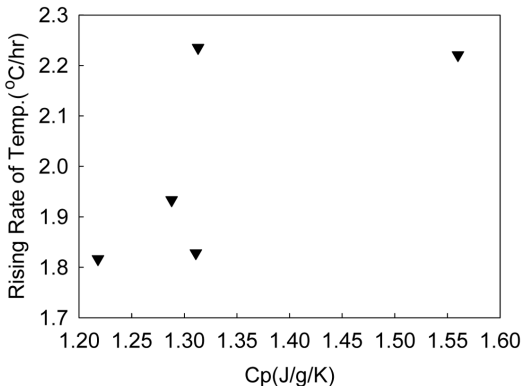


Fig. 12. 정압비열과 온도 승온율과의 관계.

과를 보여 인도네시아산 고 수분, 고 휘발분 석탄의 높은 자연발화 특성과 일치하는 결과를 나타냈다.

### 참고문헌

- [1] Taufer, A. and Jasek, P. Glueckauf, "Measures to prevent the spontaneous ignition of coal", Fuel and Energy, 2001, Vol. 137, No. 9, pp. 498-501
- [2] Yun-Soo Mok, Jae-Wook Choi, "A Study on Autoignition of Granulated Activated Carbon with Change of Ambient Temperature", 한국안전학회지, 1992, Vol. 7, No. 4, Startpage 45, Endpage 53, Totalpage 9
- [3] T.N. Roy, S.P. Nandi, "Some studies in the prevention of spontaneous ignition of coals in stacks", J. of Mines, Metals & Fuels, Nov. 1976, p. 358
- [4] L. Blom, L. Edelhausen and W. Van Krevelen. Fuel, Vol. 36, 1957, p. 135
- [5] H.N.S. Schaffer, Fuel, Vol. 51, 1972, p. 4
- [6] 권용준, 양협, "일정 주위온도 조건에 놓인 구형 유연탄 시료의 중심온도 거동 및 자연발화", J. of the Korean Institute of Plant Engineering, Vol. 14, No. 1, Mar. 2009, pp. 99-100
- [7] Williamson, R. T., "Coal Handling-An Operations View Point", Coal Technology '82, 1982, Vol. 2, 117

접수일 : 2010. 05. 13

심사완료일 : 2010. 10. 06