

## 산소농도 변화에 따른 입상활성탄의 자연발화에 관한 연구

### A Study on the Autoignition of Granulated Activated Carbon with Change of Oxygen Concentration

목연수\*·최재욱\*·류동현\*\*·최일곤\*\*\*·김상렬\*\*\*\*

Y. S. Mok·J. W. Choi·D. H. You·I. G. Choi·S. Y. Kim

#### ABSTRACT

The characteristics of critical spontaneous ignition of granulated activated carbon were investigated in atmospheres of differing oxygen concentration. At the same concentration the larger vessels yielded the lower critical spontaneous ignition temperature. At the same vessel, as the concentration of oxygen was reduced, ignition occurred later and at higher ambient temperature, and critical spontaneous ignition temperature increased. The apparent activation energy calculated from the Frank-Kamenetskii's ignition theory appeared to be the slight different value respectively and the mean apparent activation energy was 19850cal/mol.

#### 1. 서 론

오늘날의 산업사회는 새로운 화학물질의 개발과 합성 등으로 화학공업도 복잡화, 다양화, 대형화 되고 있으며, 모든 부분에서의 에너지 사용량이 증대되어 가연성물질을 대량으로 수송, 저장하는 기회가 빈번해짐에 따라 자연발화가 원인이 되어 화재·폭발을 일으키는 사고가 발생하고 있다.

또한 유기용제를 사용하는 산업현장에서는 유기 용제 증기를 발산하는 작업장의 쾌적한 환경을 유지하기 위하여 활성탄을 사용하는 흡착탑을 설치하여 유기용제의 증기를 흡착 제거하고 있다.

그러나 이 흡착탑에서 입상활성탄의 산화에 의한 자연발화로 인하여 화재가 종종 발생하고 있으므로 이에 대한 기초 연구가 필요하다.

일반적으로 자연발화는 외부에서 아무런 착화원

\* 부산공업대학교 산업안전공학과

\*\* 한국산업안전공단 부산지도원

\*\*\* 동광화학(주)

\*\*\*\* 동아대학교 화학공학과

이 없는 상태에서 물질이 공기중의 상온에서 자연적으로 발열하고, 그 열이 장기간 축적되어 마침내 발화점에 도달되어 연소를 일으키는 현상이다.<sup>1,2)</sup> 또한 외부에서 화염·전기불꽃 등의 착화원을 주지 않고 물질을 공기중에서 가열을 행한 경우에도 발화점에 도달하는 과정이 주로 반응열의 축적에 의한 경우에는 자연발화에 포함시키는 것이 보통이다. 자연발화는 물질고유의 성질, 양 및 물질이 놓여있는 환경조건의 지배를 받는 경우가 많다. 즉, 방열되기 쉬운상태에 있으면 열의 발생량이 많아도 열이 축적되기 어렵고, 반면에 방열되기 어려운 상태에 있으면 발열량이 적어도 충분히 열이 축적될 수 있기 때문에 낮은 온도에서도 발화가 일어난다. 따라서 자연발화의 특징은 열의 축적과정에 있으며, 자연발화 현상은 환경조건에 깊은 관계를 가지는 현상이라고 할 수 있다.

다공성 고체의 자연발화에 관한 연구로는 Sagauchi와 Uehara<sup>3)</sup>의 분위기 온도변화에 의한 분말활성탄의 자연발화 연구, Mok등<sup>4)</sup>의 입상활성탄의 자연발화에 관한 연구, Choi등<sup>5)</sup>의 주위온도 변화에 따른 입상활성탄의 자연발화에 관한 연구 및 Bowes와 Thomas<sup>6)</sup>의 톱밥을 사용한 산소농도 변화에 따른 자연발화에 관한 연구 등이 있으나 입상활성탄에 대한 산소농도 변화에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 산소농도를 변화시켰을때 입상활성탄의 자연발화에 대한 발화한계온도를 구하여 자연발화 특성을 파악함으로써 이와 유사한 형태에 대한 자연발화 원인 규명의 기초자료로 제공하여 화재예방에 기여하고자 한다.

## 2. 이 론

입상활성탄의 자연발화에는 계내의 온도분포를 고려한 Frank-Kamenetskii's<sup>7)</sup>의 열발화 이론을 적용하였다.

Fourier의 열전도식에 Arrhenius형의 반응식을 조합시켜 축대칭 1차원의 형상을 고려하고, 열전도도가 온도와 장소에 의존하지 않고, 온도분포를 고려한 0차 반응으로 보면 에너지방정식은 식(1)로 된다.

$$C_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{J}{X} \frac{\partial T}{\partial X} \right) +$$

$$QA_0 \exp^{-E/RT} \dots \dots \dots (1)$$

식(1)을 해석하기 위해 무차원변환을 행하여 무차원온도  $\theta$ , 무차원좌표  $\xi$ , 무차원시간  $\tau$ 를 도입한다.

$$\theta \equiv \frac{E}{RT_a} (T - T_a) \dots \dots \dots (2)$$

$$\xi \equiv \frac{X}{a} \dots \dots \dots (3)$$

$$\tau \equiv \frac{Kt}{C_p \rho a^2} \dots \dots \dots (4)$$

식(2)~(4)를 사용하여 식(1)을 풀면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{J}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} + \delta \exp(\theta) \dots (5)$$

여기서  $\delta$ 는 식(1)을 푸는 과정에서 발열속도 항에 도입되어야 하는 무차원반응속도로서 Frank-Kamenetskii's parameter라고도 하며 식(6)과 같다.

$$\delta = \frac{EQa^2A_0 \exp(-E/RT)}{KRT_a^2} \dots \dots \dots (6)$$

식(5)를 풀기 위한 경계조건은 다음과 같다.

$$\xi=0 \text{에서 } \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = 0 \dots \dots \dots (7)$$

$$|\xi|=1 \text{에서 } \theta=0 \dots \dots \dots (8)$$

식(5)에서 정상상태를 가정하여  $\partial \theta / \partial \tau = 0$ 로 두고, 무한평판의 경우  $j=0$ 로 하면 식(9)와 같이 간단하게 할 수 있다.

$$\frac{d^2 \theta}{d\xi^2} + \delta \exp(\theta) = 0 \dots \dots \dots (9)$$

식(9)를 변수분리하고 적분하여 정리하면, 식(10)과 같이 된다.

$$\frac{1}{\sqrt{\exp \theta_m}} \ln \left| \frac{\sqrt{\exp \theta_m - 1} - \sqrt{\exp \theta}}{\sqrt{\exp \theta_m - 1} + \sqrt{\exp \theta}} \right| = -\sqrt{2\delta} \dots \dots \dots (10)$$

식(10)을 도시하여  $\theta_m$ 의 해를 구하면 정상상태가 존재하는 조건이 얻어지고, 그 결과 발화가 일어나는 한계조건은 식(11)과 같이 된다.

$$\delta_c = 0.88 \dots \dots \dots (11)$$

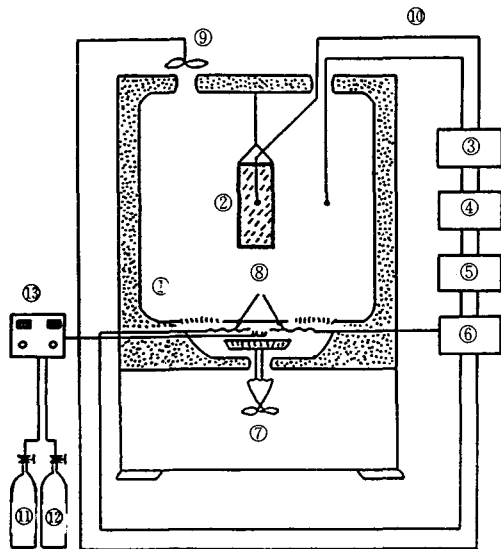
이상의 해석이 Frank-Kamenetskii's가 풀이한 무한평판에서 자연발화가 일어날 수 있는 조건으로 본 연구에 적용하였으며, 식(6)을 정리하면 식(12)로 된다.

$$\ln \frac{\delta_c T_c^2}{a^2} = -\frac{E}{R} \frac{1}{T_c} + \ln \frac{QA_0 E}{KR} \dots\dots\dots (12)$$

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3.1 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치의 개요는 Fig. 1과 같으며 항온조, 열전대, 온도제어장치, 기록계, 시료용기와 Oxygen index meter로 구성되어 있다.



- ① Electric furnace
- ② Sample
- ③ Cold junction
- ④ Program controller
- ⑤ Temperature recorder
- ⑥ Relay switch
- ⑦ Sirocco fan
- ⑧ Heater
- ⑨ Fan
- ⑩ Chromel-Alumel thermocouple
- ⑪ O<sub>2</sub> Bomb
- ⑫ N<sub>2</sub> Bomb
- ⑬ Oxygen index meter

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for granulated activated carbon

항온조는 시판의 항온조를 개량한 내용적 90L (45cm×45cm×45cm)의 열풍순환식 항온조로서 내부의 온도분포를 일정하게 유지하기 위하여 Sirocco fan을 부착하여 내부공기를 강제 순환시켰으며, 이 항온조의 가열에는 1000W의 히터 2개를 설치 하였다.

항온조 상부의 배기구에는 팬을 설치하여 설정

온도보다 내부온도가 높을때는 릴레이 스위치에 의해 팬이 작동하게 하였다. 열전대는 2조의 Chromel-Alumel 열전대로서 직경은 0.35mm이고 주위온도의 제어 및 측정용과 시료의 중심온도 측정용으로 사용하였으며, 전자는 시료용기와 항온조의 벽면중심에 설치하고, 후자는 시료용기의 중심에 설치하였다.

온도제어장치(Konics제 EC-5600)는 프로그램의 설정에 의해 주위온도를 제어하는 방식으로 냉접점을 거친 보정된 온도를 제어할 수 있도록 하여 설정온도와 비교하고, 그 차이에 의해 2개의 히터 전류치를 제어하고 릴레이 스위치로서 상부팬의 작동을 ON-OFF로 제어한다. 온도기록장치는 Yokogawa제 pen type 기록계(Model 4151)로 설정 온도 및 시료의 중심온도를 기록한다. 시료용기에는 형상을 입방체로 하여 무한평판에 접근하도록 하였으며, 이 용기는 300mesh의 stainless제 금망으로 만들고 일차원 방향 이외의 면은 약 1cm의 석면판으로 단열시켰다. 또한 시료용기의 크기는 A용기(20cm×20cm×3cm), B용기(20cm×20cm×5cm), C용기(20cm×20cm×7cm)를 각각 제작하여 사용하였다.

Oxygen index meter(Toyoseiki제 S-III)는 항온조 내부에 산소와 질소의 유량을 조절하여 필요한 산소의 농도를 항온조 내에 주입하는데 사용하였다.

#### 3.2 실험재료

시료는 산업체의 유기용제 흡착용으로 많이 사용되고 있는 식물계 원료로 부활도가 낮은 입상활성탄(-4/+8 mesh)을 사용하였고, 성분표를 Table 1에 나타내었으며, 이들은 신광 화학공업(주)의 data<sup>8)</sup>를 그대로 사용하였다.

Table 1 Composition of the used granulated activated carbon

Ash	Fixed carbon	Volatile material	Iodine value
1.95%	83.16%	14.89%	235mg/g

#### 3.3 실험방법

실험은 온도제어 장치의 프로그램을 미리 설정하여 소정의 온도로 가열된 항온조의 중심에 활성

탄을 충전한 시료용기를 장치내에 걸고, 열전대를 시료용기의 중심부 및 시료용기와 벽면과의 공간 중앙부에 같은 높이가 되도록 설치한다.

시료용기를 실험장치에 넣은 후 시료의 중심온도 변화를 관찰하여 중심온도가 200℃ 이상으로 되었을 때를 발화로 판정하고, 중심온도의 최대치를 확인한 후 실험을 중지하였으며, 중심온도가 200℃를 넘지 않으면 비발화로 판정하고 실험을 중지한다.

200℃를 발화기준으로 선정한 것은 많은 실험을 행한 경험에서 200℃를 초과 했을때는 단시간에 400℃이상의 고온으로 되어 발화에 이르게 되는 것이 확인되었고, 200℃를 넘지 않은 것은 모두 설정온도 부근으로 온도가 접근하는 것에 근거하였다.

동일한 조건으로 실험을 반복하여 시료가 발화한 최저온도와 발화하지 않았던 최고온도와의 차이가 1℃이하로 되는 곳에서 실험을 종료하고, 양자의 평균온도를 발화한계온도로 하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 시료용기 변화에 따른 자연발화

부활도가 낮은 식물계원료의 입상활성탄 -4/+8mesh의 시료를 용기의 크기별로 충전하여 산소농도의 변화에 따라 시료의 발화유도시간, 시료중심의 최고온도에 도달하는 시간 및 발화한계온도를 측정하였다.

A용기를 사용하여 산소의 농도를 변화시켰을 때의 실험결과를 Table 2에 나타내었으며, Fig. 2와 3은 산소의 농도가 21%일때의 비발화 및 발화를 시간변화에 따른 용기내의 온도변화 관계로 나타내었다.

Fig. 2는 비발화의 경우로서 항온조내의 설정온도를 177℃로 일정하게 하고 시료용기를 실험장치에 넣은 후 실험을 시작한 시간부터 온도가 서서히 상승하여 3시간 16분이 경과하였을때 최고온도 190℃까지 상승하여 설정온도 보다 약간 상회는 했지만 결국 발화가 되지 않고 설정온도 부근으로 접근하였다.

Fig. 3은 발화의 경우를 나타낸 것으로서 항온조내의 설정온도를 178℃로 하여 실험을 행한 결

Table 2 Experimental results for oxygen concentration change with constant ambient temperature (vessel size : 20cmX20cmX3cm)

Oxygen con.	Ambient temp. (°C)	Ignition distinction	Sample center temp. (°C)	Maximum temp. recording time(min)	Ignition induction time(min)	CSIT (°C)
12%	182	Non.	186	178	----	183.5
	183	Non.	194	184	----	
	184	Ign.	438	325	169	
	186	Ign.	442	304	178	
16%	178	Non.	182	186	----	180.5
	180	Non.	189	198	----	
	181	Ign.	419	326	183	
	182	Ign.	417	301	162	
21%	176	Non.	186	192	----	177.5
	177	Non.	190	196	----	
	178	Ign.	476	326	177	
	180	Ign.	458	304	172	
25%	174	Non.	178	182	----	176.5
	176	Non.	185	189	----	
	177	Ign.	372	388	194	
	178	Ign.	458	298	158	
30%	178	Ign.	410	302	136	174.5
	170	Non.	170	194	----	
	174	Non.	178	196	----	
	175	Ign.	410	342	188	
	176	Ign.	498	323	173	
178	Ign.	450	319	178		

Where Non. : non-ignition  
 Ign. : ignition  
 CSIT : critical spontaneous ignition temperature

과 용기내의 온도가 서서히 상승하여 약 3시간이 경과함에 따라 시료용기내의 온도는 급상승하게 되어 발화가 일어나고 있다. 이때 5시간 26분에서 최고발화온도 476℃를 기록하였으며, Fig. 2와 3에서 구한 비발화와 발화의 평균온도인 177.5℃를 발화한계온도로서 구하였다.

B용기를 사용하여 산소의 농도를 변화시켰을 때의 실험결과를 Table 3에 나타내었으며, 산소의 농도가 21%일때의 발화와 비발화를 Fig. 4와 5에 각각 나타내었고, 발화한계온도는 비발화와 발화의 평균온도인 156.5℃를 구하였다. 또한 C용기를 사용한 실험결과를 Table 4에 나타내었으며, 산소의 농도가 21%일때의 발화와 비발화를 Fig. 6과 7에 각각 나타내었고, 발화한계온도는 비발화와 발

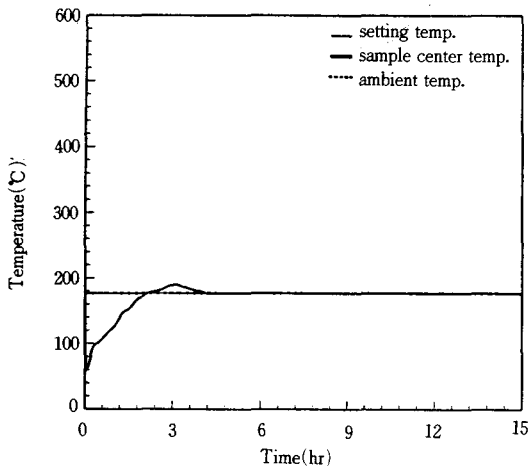


Fig. 2 Temperature records for non-ignition of activated carbon (sample vessel size : 20cm×20cm×3cm)

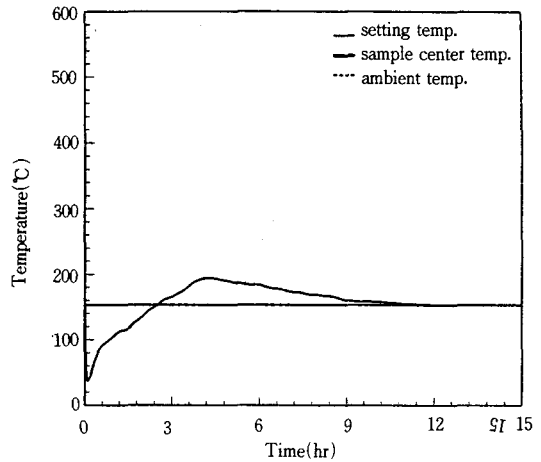


Fig. 4 Temperature records for non-ignition of activated carbon (sample vessel size : 20cm×20cm×5cm)

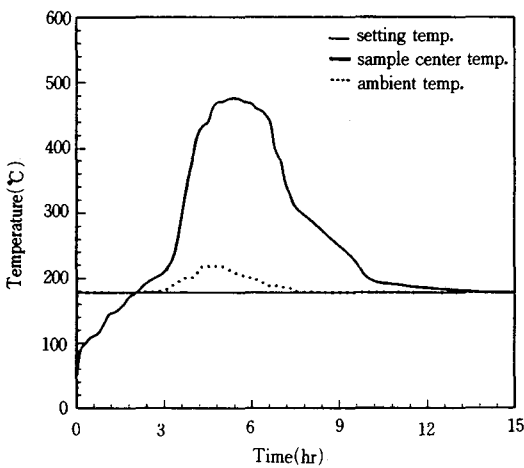


Fig. 3 Temperature records for autoignition of activated carbon (sample vessel size : 20cm×20cm×3cm)

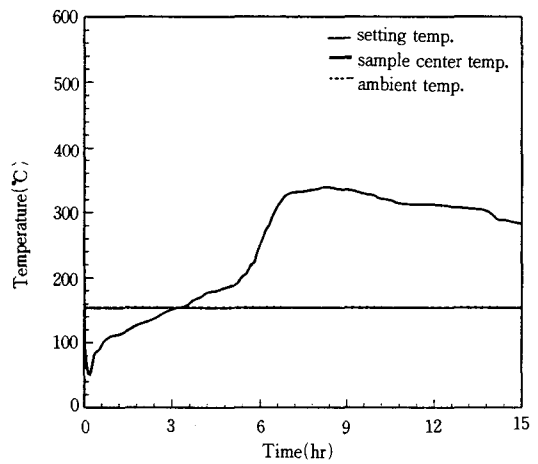


Fig. 5 Temperature records for autoignition of activated carbon (sample vessel size : 20cm×20cm×5cm)

화의 평균온도인 143.5°C를 구하였다.

Table 2~4에서 동일한 산소농도에서 용기의 두께가 두꺼울수록 발화유도시간과 시료 중심의 최고온도에 도달하는 시간이 길어지고 있다. 이것은 시료층의 두께가 두꺼울수록 시료표면에서 중심까

지의 열전달이 느리기 때문인 것으로 생각된다. 또한 시료용기의 두께가 두꺼울수록 발화한계온도가 낮아지고 있는데 이것은 용기내에 충전된 시료량에 비례하여 시료중심에서의 방열이 나쁘므로 열의 축적이 용이하기 때문인 것으로 생각된다.

Table 3 Experimental results for oxygen concentration change with constant ambient temperature (vessel size : 20cm×20cm×5cm)

Oxygen con.	Ambient temp. (°C)	Ignition distinction	Sample center temp. (°C)	Maximum temp. recording time(min)	Ignition induction time(min)	CSIT (°C)
12%	160	Non.	174	284	----	161.5
	161	Non.	177	294	----	
	162	Ign.	477	480	258	
	163	Ign.	453	636	366	
	164	Ign.	509	462	298	
16%	157	Non.	186	269	----	158.5
	158	Non.	194	277	----	
	159	Ign.	358	516	290	
	160	Ign.	331	366	292	
21%	155	Non.	180	249	----	156.5
	156	Non.	194	262	----	
	157	Ign.	339	508	330	
	158	Ign.	379	563	300	
	159	Ign.	478	525	291	
25%	152	Non.	165	306	----	155.5
	154	Non.	168	294	----	
	155	Non.	172	252	----	
	156	Ign.	479	534	330	
	158	Ign.	482	564	316	
30%	152	Non.	181	312	----	153.5
	153	Non.	189	294	----	
	154	Ign.	529	426	285	
	156	Ign.	528	450	258	
	158	Ign.	543	438	292	

Where Non. : non-ignition  
 Ign. : ignition  
 CSIT : critical spontaneous ignition temperature

#### 4.2 산소농도 변화에 따른 발화한계온도

산소농도의 변화는 실험장치의 oxygene index meter를 통하여 산소와 질소의 유량을 조절하여 실험하고자 하는 산소농도의 분위기가스를 만들어 항온조내에 주입하여 입상활성탄의 산소농도 변화에 의해 구하여진 발화한계온도를 Fig. 8에 나타내었다.

산소의 분위기농도는 발화과정에 중요한 역할을 한다는 것을 명확하게 하였으며, 산소의 농도가 낮아짐에 따라 발화는 늦게 일어나며 주위온도가 더 높을데서 발생한다. 산소농도가 보다 높은 경우에 시료의 온도는 발화 후 상대적으로 급속하게

Table 4 Experimental results for oxygen concentration change with constant ambient temperature (vessel size : 20cm×20cm×7cm)

Oxygen con.	Ambient temp. (°C)	Ignition distinction	Sample center temp. (°C)	Maximum temp. recording time(min)	Ignition induction time(min)	CSIT (°C)
12%	145	Non.	176	508	----	147.5
	147	Non.	179	462	----	
	148	Ign.	560	702	426	
	150	Ign.	542	668	387	
16%	144	Non.	177	468	----	145.5
	145	Non.	186	510	----	
	148	Ign.	538	612	327	
21%	140	Non.	170	462	----	143.5
	142	Non.	172	438	----	
	143	Non.	178	414	----	
	144	Ign.	535	540	309	
	146	Ign.	548	536	348	
25%	140	Non.	168	468	----	142.5
	142	Non.	177	480	----	
	143	Ign.	537	570	349	
30%	144	Ign.	546	585	360	139.5
	138	Non.	163	563	----	
	139	Non.	169	516	----	
	140	Ign.	540	612	385	
	142	Ign.	552	608	378	

Where Non. : non-ignition  
 Ign. : ignition  
 CSIT : critical spontaneous ignition temperature

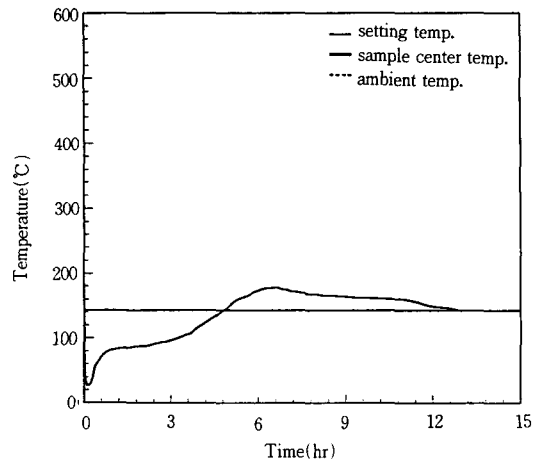


Fig. 6 Temperature records for non-ignition of activated carbon (sample vessel size : 20cm×20cm×7cm)

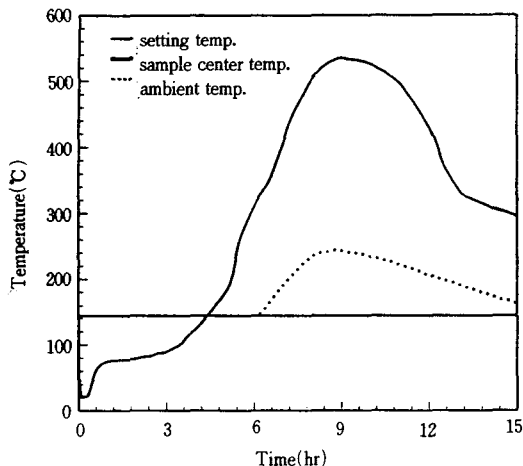


Fig. 7 Temperature records for autoignition of activated carbon (sample vessel size : 20cm×20cm×7cm)

상승하였다.

동일한 용기에서 산소의 농도가 12%에서 30%로 증가함에 따라 발화한계온도가 약 8~9°C 정도 낮게 나타나고 있다.

이것은 산소의 농도가 높을수록 용기내의 연소에 필요한 산소가 잘 접촉함으로서 보다 낮은 온도에서 발화가 일어나게 되어 발화한계온도가 낮아지는 것으로 생각된다.

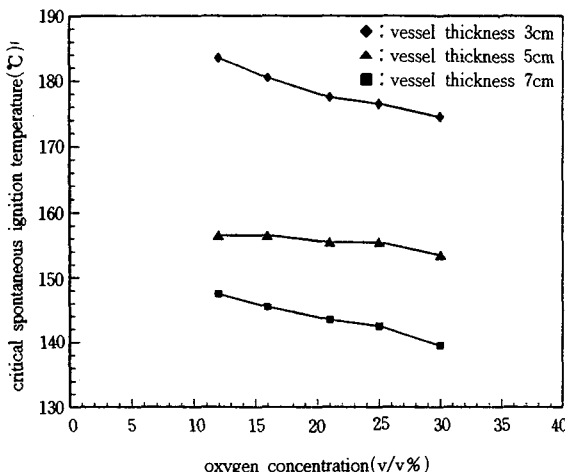


Fig. 8 Relation between oxygen concentration and critical spontaneous ignition temperature

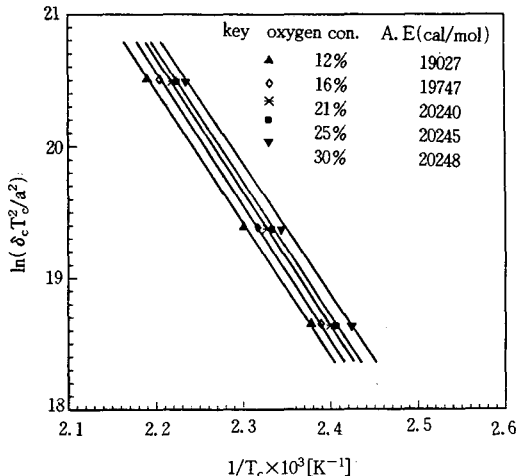


Fig. 9 Determination of activation energy

### 4.3 겉보기 활성화에너지

시료용기의 크기를 용기A, 용기B, 용기C로 변화시키면서 구한 발화한계온도와 Frank-Kamenetskii's parameter의 식으로부터 얻어지는 식(12)에서 겉보기 활성화에너지를 구하였다. 식(12)에서  $\ln(QA_0E/KR)$ 와  $E/R$ 는 언제나 상수가 되므로, 시료용기의 크기변화에 대하여 산소농도를 변화시킨 결과를  $\ln(\delta_c T_c^2/a^2)$ 와  $1/T_c$ 에 대하여 도시하면 Fig. 9에서와 같이 직선이 얻어지고, 이 직선의 기울기로 부터 각각 겉보기 활성화에너지를 구하였다. 산소농도가 다른 직선들에 있어서 기울기의 약간의 차이는 별 의미가 없다고 생각된다. 그러므로 이 결과를 최소자승법으로 정리하면 식(13)을 얻을 수 있다.

$$\ln \frac{\delta_c T_c^2}{a^2} = 42.610 - 9.990 \times 10^3 \times \frac{1}{T_c} \dots\dots (13)$$

식(13)으로부터

$$\frac{E}{R} = 9.990 \times 10^3 [K] \dots\dots\dots (14)$$

가 얻어지고 평균 겉보기 활성화에너지

$$E = 19850 \text{ cal/mol} \dots\dots\dots (15)$$

로 된다.

## 5. 결 론

입상활성탄을 시료로 사용하여 산소농도의 변화

에 따른 발화한계온도와 겉보기 활성화에너지를 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 산소농도에서는 시료용기의 두께가 두꺼울수록 발화한계온도가 낮게 나타나고 있으며, 발화유도시간과 시료중심의 최고온도에 도달하는 시간이 길어지고 있다.
- 2) 동일한 용기에서는 산소농도가 증가함에 따라 발화한계온도는 감소하였으며, 산소농도가 12%에서 30%로 증가함에 따라 발화한계온도가 8~9°C 정도 낮게 나타났다.
- 3) Frank-kamenetskii's parameter의 식으로 부터 구한 산소농도 변화에 따른 겉보기 활성화에너지는 약간의 차이는 있으나, 그 평균값은 19850cal/mol을 얻었다.

### 기 호 설 명

a	: half thickness of sample vessel	[cm]
A <sub>0</sub>	: pre-exponential factor of Arrhenius equation	[-]
C <sub>p</sub>	: specific heat	[cal/g·K]
E	: activation energy of reaction	[cal/mol]
j	: shape parameter	[-]
K	: heat conductivity of body	[cal/cm·s·K]
Q	: heat of reaction per unit mass	[cal/g]
R	: universal gas constant	[cal/mol·K]
t	: time	[sec]
T	: temperature of system	[K]
T <sub>a</sub>	: temperature of surround	[K]
T <sub>c</sub>	: critical spontaneous ignition temperature	[K]
X	: coordinate	[-]

### 그 리 스 문 자

δ	: dimensionless reaction rate	[-]
δ <sub>c</sub>	: critical Frank-Kamenetskii parameter for constant ambient temperature	[-]
θ	: dimensionless temperature	[-]
θ <sub>m</sub>	: critical ignition temperature rise	[-]
ξ	: dimensionless distance	[-]
ρ	: packing density	[g/cm <sup>3</sup> ]
τ	: dimensionless time	[-]

### 참 고 문 헌

- 1) 北川徹三, 化學安全工學, 日刊工業新聞社, pp. 48~51, 1971.
- 2) 金坂 武雄, 自然發火性 物質, 安全工學, Vol. 10, No. 2, pp. 105~112, 1971.
- 3) 坂口義孝, 上原陽一, 霧圍氣溫度 變動の 活性炭の 限界發火溫度に 及ぼす 影響, 安全工學, Vol. 27, No. 2, pp. 70~75, 1988.
- 4) 목연수, 최재욱, 김상렬, 최광재, 입상활성탄의 자연발화에 관한 연구(1), 한국산업안전학회, Vol. 6, No. 4, pp. 66~72, 1991.
- 5) 최재욱, 목연수, 주위온도 변화에 따른 입상활성탄의 자연발화에 관한 연구, 한국산업안전학회, Vol. 7, No. 4, pp. 45~53, 1992.
- 6) P.C Bowes and P.H. Thomas, Ignition and Extinction Phenomena Accompanying Oxygen dependent Self-Heating of Porous Bodies, Combust and Flame, Vol. 10, pp. 221~230, 1966.
- 7) D.A. Frank-Kamenetskii, Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetiss, Plenum Press, 2nd edn., 1969.
- 8) Sin Kwang Chem. Ind. Co., LTD Data, 1992.