

활성탄의 자연발화 특성과 발화온도 예측에 관한 연구

A Study on the Spontaneous Ignition Characteristics and Ignition Temperature Estimation of Activated Carbon

최재욱*

Jae-Wook Choi

ABSTRACT

The critical spontaneous ignition temperature for activated carbon were observed by performing experiments for granulated activated carbon with varying the period.

As the results of the experiments, the critical spontaneous ignition temperature according to period of 0.5hr, 1.5hr and 2.5hr was 177.5°C, 176.5°C and 172.5°C respectively, and the approximate expression of the critical spontaneous ignition temperature obtained for ambient temperature amplitudes was as follow;

$$\delta_c(\chi, \omega) = \delta_c \{ 1 - 0.381 \exp(-0.930 \cdot \omega^{0.811}) \}$$

1. 서 론

현대 산업사회는 새로운 화학물질의 개발과 합성 등으로 화학공업도 복잡화, 다양화, 대형화되고 있으며, 가연성물질을 대량으로 수송, 저장하는 기회가 빈번해짐에 따라 자연발화가 원인이 되어 화재 폭발을 일으키는 사고가 발생하고 있다.

일반적으로 자연발화는 외부에서의 화염, 전기 불꽃 등의 착화원이 없는 상태에서 물질이 공기중의 상온에서 자연적으로 발열하거나, 가연성기체 또는 공기를 포함하는 고체, 분체 등을 외부에서

가열하게 되면 혼합계 내의 화학반응에 의해서 발생하는 열이 내부에 축적된다. 이로 인해 반응의 가속을 가져와 내부온도를 상승시키고, 그 열이 장기간 축적되어 마침내 발화점에 도달하여 연소를 일으키는 현상이다^{1,2)}. 그러므로 자연발화의 특징은 열의 축적 과정에 있기 때문에 내부에서의 발열속도와 외부로의 방열속도의 평형의 문제이다³⁾. 즉, 방열되기 쉬운 상태에 있으면 열의 발생이 많아도 열이 축적되기 어렵기 때문에 가열온도가 높아야 되고, 반면에 방열되기 어려운 상태에 있으면 발열량이 적어도 충분히 열이 축적될 수 있기 때문에 낮은 온도에서도 발화가 일어난다. 따라서

* 부산공업대학교 산업안전공학과

자연발화 현상은 주위의 조건과 깊은 관계를 가지는 현상이라고 할 수 있으며 위험성이 잠재되어 있기 때문에 소홀히 다루면 큰 피해를 초래하는 경우가 있다^{4,5)}.

오늘날 유기용제를 많이 사용하는 산업현장에서는 작업장의 쾌적한 환경 유지와 화재 및 폭발을 예방하기 위하여, 유기용제에서 발산되는 증기를 제거할 목적으로 입상활성탄을 사용한 흡착탑을 많이 설치하여 가동하고 있다. 그러나 이러한 흡착탑에서 자연발화가 일어나는 경우가 가끔 있으며, 부산시 소재 D기업에서의, 흡착탑내에 충전된 활성탄이 자연발화한 사고가 그 예이다⁶⁾. 이것은 활성탄이 흡착탑내에서 주위의 기체를 흡착하여 흡착열의 축적이 일어남과 동시에 산화발열이 가해져서 발화하는 경우이다⁷⁻¹¹⁾.

다공성고체의 자연발화에 관하여 주위온도를 일정하게 유지한 연구로서 Bowes와 Thomas¹²⁾의 톱밥을 사용한 산소농도 변화에 따른 자연발화에 관한 연구와, Taketa와 Akita¹³⁾의 분말활성탄을 사용한 자연발화시의 산소확산의 영향에 관한 연구 등이 있다. 또한 Adler등^{14,15)}은 Frank-Kamenetskii의 이론을 응용하여 주기적인 온도변화를 정현곡선으로 나타내고, 이러한 온도변화가 발화한계온도를 저하시키는 것을 이론적으로 도입하였고, Bowes와 Cameron¹⁶⁾은 Adler등의 연구를 바탕으로, 한계온도에 대한 근사식을 전개시켰다. 그러나 실험적 연구는 Sagaguchi와 Uehara¹⁷⁾의 분위기 온도변화에 의한 분말활성탄의 자연발화 연구와 Cameron과 MacDowall¹⁸⁾의 기온변화에 따른 활성탄의 자연발화에 대한 연구 등이 있다.

본 연구에서는 실제로 자연발화 현상은 1일간의 기온변화에 의해 많은 영향을 받으므로 최근 산업현장 등의 유기용제 흡착탑에서 발생하고 있는 입상활성탄의 자연발화 현상을 구명하기 위하여 주위온도를 정현곡선상으로 변화시켰을 때의 주기변화에 따른 자연발화 현상에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 또한 입상활성탄의 자연발화가 일어날 수 있는 한계온도를 예측하기 위하여 주기적인 온도변화에 의한 Adler등¹⁵⁾의 근사식을 바탕으로 발화한계온도의 예측치를 구하여 실험치와 비교하여 자연발화현상에 미치는 발화특성을 파악함으로써, 자연발화에 의한 화재 폭발 예방의 기초자료를 제공하여 산업안전에 기여하고자 한다.

2. 이론(발화한계온도 예측)

Frank-Kamenetskii의 열발화이론에서 무차원온도를 θ , 무차원좌표를 ξ , 무차원시간을 τ , 무차원반응속도를 δ 로 하면 무차원열수지식은 식 (1)로 된다^{19,20)}.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \delta \exp(\theta) \dots\dots\dots (1)$$

또한 경계조건은 대칭으로 가열한 경우를 생각할 때 무한평판의 중심에서는 식 (2)와 같이 되고, 표면에서의 온도는 정현곡선으로 변화하는 시간의 함수로 되므로 $\xi=1$ 에서의 경계조건은 식 (3)과 같이 된다.

$$\xi=0 \text{에서 } \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\xi=1 \text{에서 } \theta(1, \tau) = \varepsilon \sin \omega \tau \dots\dots\dots (3)$$

식 (3)중의 ε 는 무차원진폭으로서 온도변화의 크기가 진폭이므로 무차원온도상승에 해당한다. 따라서 식 (4)로 나타내어지고, 각속도=거리/시간이므로 Frank-Kamenetskii 이론에서 무차원시간으로 나타내면, $Kt/C_p \rho a^2$ 이고, 주기를 $2\pi/P$ 로 하면 거리가 $2\pi t/P$ 로 된다.

그러므로 무차원각속도 $\omega = (2\pi t/P)/(Kt/C_p \rho a^2)$ 가 된다.

여기서 열확산계수로서의 $\kappa = K/C_p \rho$ 를 대입하면 ω 는 식 (5)와 같이 된다.

$$\varepsilon = \frac{E}{RT_a^2} (T - T_a) \dots\dots\dots (4)$$

$$\omega = \frac{a^2}{\kappa} \cdot \frac{2\pi}{P} \dots\dots\dots (5)$$

Adler등^{14,15)}은 식 (1)로부터 주기적 온도변화에 의한 열발화이론을 전개하여 한계 Frank-Kamenetskii파라미터 $\delta_c(\varepsilon, \omega)$ 를 진폭 ε 과 각속도 ω 의 함수로서 구하였고, 또한 Adler와 Herbert¹⁵⁾는 $\delta_c(\varepsilon, \omega)$ 와 온도변화가 없는 경우의 Frank-Kamenetskii파라미터 δ_c 의 관계식을 유도하여 ε 과 ω 의 함수로 나타내고, $\varepsilon \ll 1, \omega \gg 1$ 의 경우에 있어서 근사식을 식 (6)과 같이 구하였다.

$$\frac{\delta_c(\varepsilon, \omega)}{\delta_c} = 1 - \left(\frac{1}{4} + \frac{\theta_{mc}^6}{2\omega^2} \right) \left\{ \sinh^2 \left(\frac{1}{2} \omega \right)^{1/2} + \cos^2 \left(\frac{1}{2} \omega \right)^{1/2} \right\}^{-1} \varepsilon^2 + \frac{1}{32} \left(1 + \frac{31 \theta_{mc}^6}{4\omega^2} \right)$$

$$+ \frac{13 \theta_{mc}^{12}}{\omega^4} + \frac{7 \theta_{mc}^{18}}{\omega^6} \left\{ \sinh^2 \left(\frac{1}{2} \omega \right)^{1/2} + \cos^2 \left(\frac{1}{2} \omega \right)^{1/2} \right\}^{-2} \epsilon^4 + \dots \quad (6)$$

여기서 $\delta_c = 0.88$ 이며, 이때의 발화한계온도상승 $\theta_{mc} = 1.2$ 이다.

식 (6)을 본 연구에 적용하기 위하여 식 (7)과 식 (8)을 Bowes의 근사식¹⁶⁾을 기초로 하면 식 (7)로 된다.

$$\omega \rightarrow \infty : \delta_c(\epsilon, \omega) = \delta_c \dots \dots \dots (7)$$

$$\omega \rightarrow 0 : \delta_c(\epsilon, \omega) = \delta_c \exp(-\epsilon) \dots \dots \dots (8)$$

$$\delta_c(\chi, \omega) = \delta_c \{ 1 - \chi \exp(-A \cdot \omega^B) \} \dots \dots (9)$$

여기서 A 및 B는 상수이고, χ 는 식 (10)과 같다.

$$\chi = 1 - \exp(-\epsilon) \dots \dots \dots (10)$$

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용할 실험장치의 개요는 전보⁵⁾와 같으며, 항온조, 열전대, 온도제어장치, 기록계와 시료용기로 구성되어 있다.

항온조는 시판의 항온조를 개량한 내용적 90L (45cm×45cm×45cm)의 열풍순환식 항온조(신한공업제작소에서 제작)로서 내부의 온도분포를 일정하게 유지하기 위하여 Sirocco fan을 부착하여 내부공기를 강제 순환 시켰으며, 이 항온조의 가열에는 1000W의 히-터 2개를 사용하였다. 항온조 상부의 배기구에는 팬을 설치하여 설정온도보다 내부온도가 높을 때는 릴레이 스위치에 의해 팬이 작동하게 하였다. 열전대는 2조의 Chromel-Alumel 열전대로서 직경은 0.35mm이고, 주위 온도의 제어 및 측정용과 시료의 중심온도 측정용으로 사용하였으며, 전자는 시료용기와 항온조의 벽면 중심에 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 1000W의 히-터 2개의 전류치를 제어하고 릴레이 스위치로서 상부 팬의 작동을 on-off로 제어한다. 온도기록 장치는 Yokogawa제 pen type 기록계(Model 4151)로 설정온도 및 시료중심온도를 기록한다.

시료 용기는 형상을 입방체로 하여 무한평판에 접근하도록 하였으며, 이 용기는 300mesh의 stainless제 금망으로 만들어, 일차원 방향 이외의 면은 약 1cm의 석면판으로 단열시켰다.

3.2 실험재료

산업체의 유기용제 흡착용으로 많이 사용되고 있는 입상활성탄은 그 종류가 상당히 많으나, 본 실험에서는 식물계 원료로 부활도가 낮은 입상활성탄(-8/+12mesh)을 사용하였으며 성분표를 Table 1에 나타내었고, 물리적 성질을 Table 2에 나타내었으며, 이들은 신광화학공업(주)의 data를 그대로 사용하였다²¹⁾.

Table 1 Composition of the used granulated activated carbon

Ash	Fixed carbon	Volatile material	Iodine value
1.94%	83.43%	14.63%	216.00mg/g

Table 2 Physical properties of the used granulated activated carbon

Heat conductivity	K	3.9×10^{-5}	Kcal/m.s.K
Specific heat	C_p	0.25	Kcal/kg.K
Packing density	ρ	5.2×10^2	Kg/m ³
Thermal diffusivity	κ	3.0×10^{-7}	m ² /s

Where, $\kappa = K/C_p \cdot \rho$

3.3 실험방법

실험은 온도제어 장치의 프로그램을 미리 설정하여 소정의 온도로 가열된 항온조의 중심에 활성탄을 충전한 시료용기(20cm×20cm×3cm)를 장치 내에 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 「발화」로 판정하고, 중심온도의 최대치를 확인한 후 실험을 중지하고 중심온도가 200℃를 넘지 않으면 「비발화」로 판정하고 실험을 중지한다. 200℃를 발화 기준으로 선정하는 것은 많은 실험을 행한 경험에서 200℃를 초과했을 때는 단시간에 400℃ 이상의 고온으로 되어 발화에 이르게 되는것이 확인 되었고, 200℃를 넘지 않은것은 모두 설정온도 부근으로 온도가 접근하는

것에 근거하였다.

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

4. 실험결과 및 고찰

4.1 주기변화에 따른 발화한계온도

주기의 변화를 0.5, 1.5 및 2.5시간으로 변화시키고 진폭을 10°C로 했을 때의 실험결과를 Table 3에 나타내었으며, 각 주기 변화에 따른 비발화, 발화 및 발화한계온도를 Fig. 1에 나타내었다.

Table 3 Experimental results for sinusoidally varying temperature at amplitude 10°C (vessel size : 20cm×20cm×3cm)

Exp. No.	Period (hr)	Period average temp. (°C)	Ignition disinction	Sample center temp. (°C)	Maximum temp. recording time(min)	Ignition induction time(min)	CSIT (°C)
1	0.5	177	Non.	183	236	—	177.5
2		178	Ign.	428	378	218	
3		180	Ign.	447	312	214	
4	1.5	176	Non.	189	264	—	176.5
5		177	Ign.	441	343	265	
6		178	Ign.	434	320	279	
7	2.5	170	Non.	177	291	—	172.5
8		172	Non.	187	277	—	
9		173	Ign.	433	371	272	
10		174	Ign.	442	368	268	

where, Non. : non-ignition
 Ign. : ignition
 CSIT : critical spontaneous ignition temperature

Fig. 2는 주기가 0.5시간일 때 1주기의 평균온도가 177°C일 경우의 비발화로 시료의 중심온도가 설정온도보다 약간 상회해 했지만 결국 주위온도 부근에 이르게 되어 발화가 일어나지 않았다. Fig. 3은 1주기의 평균온도가 178°C일 때에 발화가 일어난 경우로서 실험개시 후 3시간 38분이 경과함에 따라 시료 내부의 온도가 급상승하게 되어 발화가 일어나고 있으며, 6시간 18분에서 최고발화온도를 나타내었다.

주기 1.5시간일 때의 비발화와 발화를 시간변화에 따른 용기내의 온도변화곡선으로 나타낸 것이 Fig. 4, 5이다. Fig. 4는 1주기의 평균온도가

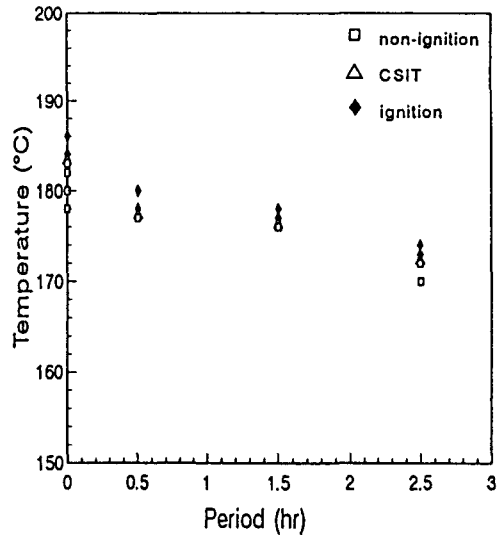


Fig. 1 Relation between period and temperature (sample vessel size : 20cm×20cm×3cm, sample size : -8/+12mesh, amplitude : 10°C)

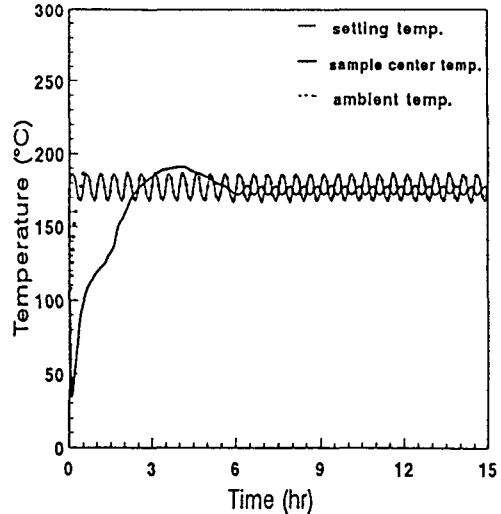


Fig. 2 Temperature records for non-ignition of activated carbon (sample vessel size : 20cm×20cm×3cm, sample size : -8/+12mesh, period : 0.5hr, amplitude : 10°C, average temp. : 177°C)

176°C일 때의 비발화를 나타낸 것으로 시료의 중심온도가 설정온도보다 약간 상회해 했지만 결국 주위온도 부근에 이르게 되어 발화가 일어나지 않

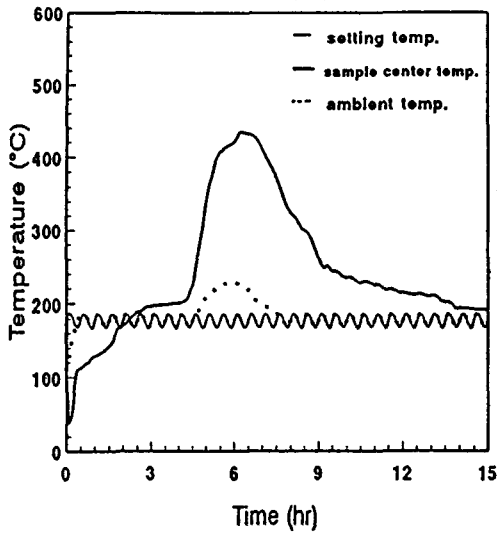


Fig. 3 Temperature records for autoignition of activated carbon
(sample vessel size : 20cm×20cm×3cm,
sample size : -8/+12mesh, period : 0.5hr,
amplitude : 10°C, average temp. : 178°C)

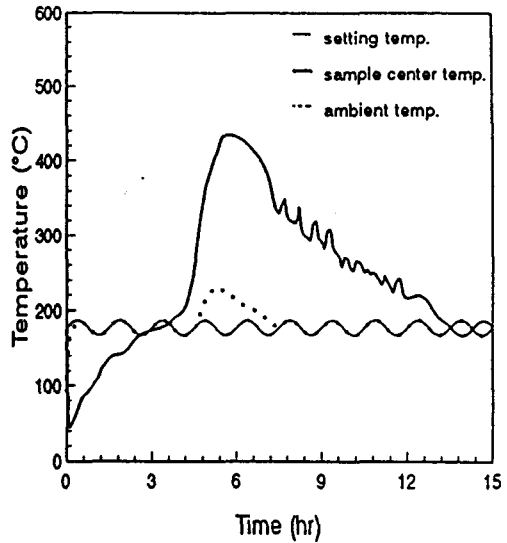


Fig. 5 Temperature records for autoignition of activated carbon
(sample vessel size : 20cm×20cm×3cm,
sample size : -8/+12mesh, period : 1.5hr,
amplitude : 10°C, average temp. : 177°C)

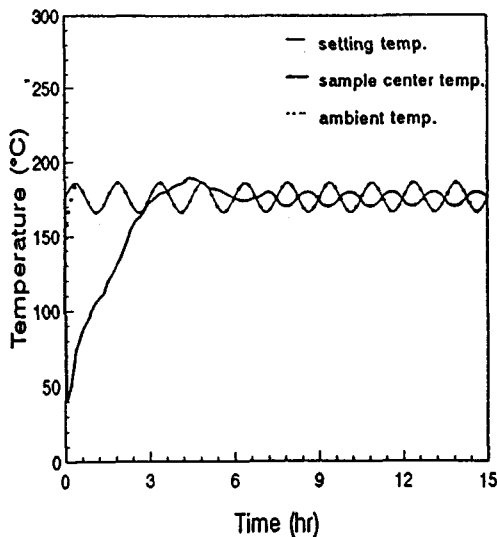


Fig. 4 Temperature records for non-ignition of activated carbon
(sample vessel size : 20cm×20cm×3cm,
sample size : -8/+12mesh, period : 1.5hr,
amplitude : 10°C, average temp. : 176°C)

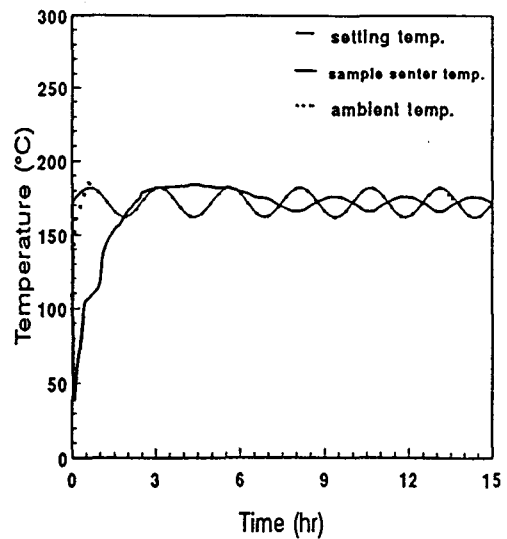


Fig. 6 Temperature records for non-ignition of activated carbon
(sample vessel size : 20cm×20cm×3cm,
sample size : -8/+12mesh, period : 2.5hr,
amplitude : 10°C, average temp. : 172°C)

았다. Fig. 5는 실험을 개시한 후 4시간 25분이 경과함에 따라 시료의 발열로 인하여 주위온도를 제어할 수 없게 되고, 시료의 중심온도가 200℃를 상회하여 순식간에 급상승함으로써 발화가 일어났으며, 5시간 30분에서 최고발화온도를 나타내었다.

또한 Fig. 6, 7은 주기를 2.5시간으로 했을 때 172℃에서 발화가 일어나지 않았고, 1주기의 평균온도가 173℃일 때 4시간 32분에서 발화가 일어났으며 6시간 11분에서 최고발화온도를 나타내었다.

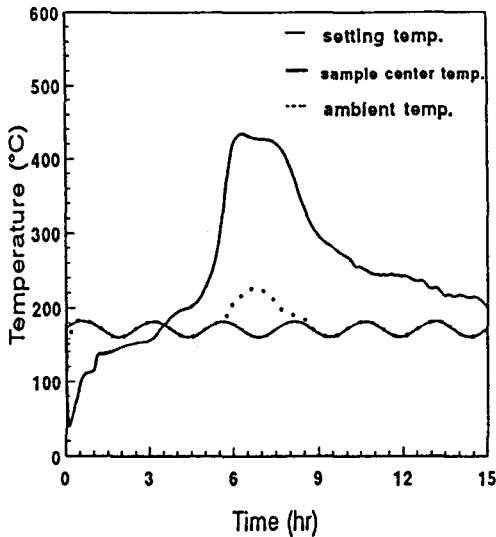


Fig. 7 Temperature records for autoignition of activated carbon
(sample vessel size : 20cm×20cm×3cm,
sample size : -8/+12mesh, period : 2.5hr,
amplitude : 10°C, average temp. : 173°C)

진폭을 10℃로 하고 주기를 0.5, 1.5 및 2.5시간으로 변화시켰을 때의 발화한계온도는 각각 177.5, 176.5 및 172.5℃를 구하였으며, 주기가 길수록 발화한계온도가 낮아지고 있는데 이것은 주위온도 변화폭이 최고온도에서 열이 완전히 방산되지 못하여 열의 축적이 용이하기 때문에 발화한계온도가 낮아지는 것으로 생각된다.

4.2 발화한계온도의 실험치와 예측치 비교

주위온도를 정현곡선상으로 변화시켜 실험을 행한 경우에 있어서의 발화한계온도와 Frank-Kamenetskii과라미터 $\delta_c(\epsilon, \omega)$ 를 무차원진폭 ϵ

과 무차원각속도 ω 의 함수관계에 대하여 이론적으로 예측한 발화한계온도와 비교하였다.

시료용기의 크기 20cm×20cm×3cm를 사용하여 진폭을 10℃로 행한 실험에 있어서 식 (9)로부터 χ , A 및 B를 구하고 각각의 조건에 대하여 근사식을 구하면 다음과 같다.

$$\delta_c(\chi, \omega) = \delta_c \{ 1 - 0.381 \exp(-0.930 \cdot \omega^{0.811}) \} \dots (11)$$

식 (11)로부터 발화한계온도 T_c 의 예측치와 실험치의 관계를 Fig. 8에 나타내었으며, 실험에서 구한 발화한계온도가 예측치 보다 다소 낮게 나타나고 있으나, 자연발화 예방을 위한 예측의 적용이 가능하다.

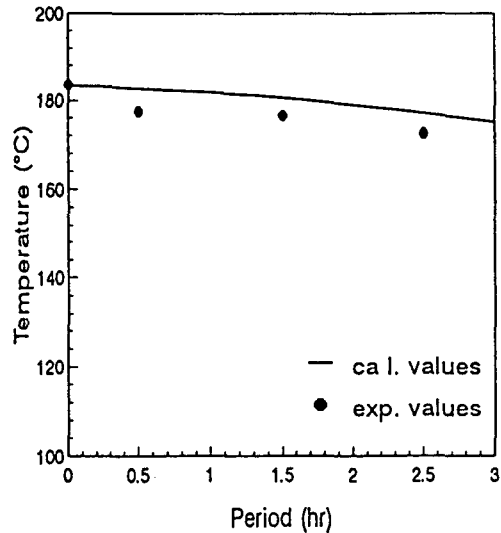


Fig. 8 Relation between period and critical temperature
(sample vessel size : 20cm×20cm×3cm,
sample size : -8/+12mesh, amplitude : 10°C)

5. 결 론

입상활성탄을 시료로 사용하여 주기의 변화에 따른 발화한계온도를 구한결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주기의 변화가 0.5시간, 2.5시간일 때의 발화한계온도는 각각 177.5℃, 176.5℃, 172.5℃를 구하였다.
- 2) 주위온도 변화에 따른 발화한계온도는 주기가 증가할 수록 낮아졌다.

- 3) 진폭이 10°C일 경우의 주기변화에 대한 발화한 계온도의 근사식을 다음과 같이 구하였다.

$$\delta_c(\chi, \omega) = \delta_c \{ 1 - 0.381 \exp(-0.930 \cdot \omega^{0.811}) \}$$
- 4) 실험치와 근사식에서 구한 예측치를 비교한 결과 실험치가 예측치 보다 다소 낮게 나타났으나, 이 근사식에 의한 자연발화 온도를 예측하여 사용하는 것이 가능하였다.

기 호 설 명

a	: half thickness of sample vessel	[cm]
A	: constant obtained from experimental value	[-]
B	: constant obtained from experimental value	[-]
C _p	: specific heat	[cal/g.K]
E	: activation energy of reaction	[cal/mol]
K	: heat conductivity of body	[cal/cm.s.K]
P	: period	[hr]
R	: universal gas constant	[cal/mol.K]
t	: time	[sec]
T	: temperature of system	[K]
T _a	: temperature of surround	[K]

그리스 문자

δ	: dimensionless reaction rate	[-]
δ_c	: critical Frank-Kamenetskii parameter for constant ambient temperature	[-]
$\delta_c(\epsilon, \omega)$: critical Frank-Kamenetskii parameter for ambient temperature variation	[-]
ϵ	: dimensionless amplitude	[-]
θ	: dimensionless temperature	[-]
θ_{mc}	: critical ignition temperature rise	[-]
κ	: thermal diffusivity	[cm ² /s]
ξ	: dimensionless distance	[-]
ρ	: packing density	[g/cm ³]
τ	: dimensionless time	[-]
χ	: values obtained from (Eq. 10)	[-]
ω	: dimensionless angular velocity	[-]

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) 疋田 強, 火の科學, 培風館, pp. 67~71, 1987.
- 4) 金 鴻, 陸演洙, 李謹悟, 鄭國三, 防火工學, 東和技術, pp. 40~48, 1991.
- 5) 목연수, 최재욱, 주위온도 변화에 따른 어분의 자연발화에 관한 연구, 한국산업안전학회지, Vol. 7, No. 1, pp. 47~56, 1992.
- 6) 목연수, 활성탄 흡착장치에 있어서 화재사고에 관한 의견서, 1991.
- 7) P.H. Thomas and P.C. Bowes, Some Aspects of the Self-Heating and Ignition of Solid Cellulosic Materials, Br. J. Appl. Phys., Vol. 12, No. 5, pp. 222~229, 1961.
- 8) P.C. Bowes, Self-Heating, Evaluating and Controlling the Hazards, Chapter 10, Elsevier, 1984.
- 9) T. Takeno and K. Sato, Effect of Oxygen Diffusion on Ignition and Extinction of Self-Heating Porous Bodies, Combust and Flame, Vol. 38, pp. 75~87, 1980.
- 10) 上原 陽一, 清野 典子, 環境溫度を變動させたとき 週期の 自然發火溫度に 及ぼす 影響, 災害の 研究, 第20巻, pp. 215~224, 1988.
- 11) 野田重良, 鈴木長成, 村山友直, 活性炭層への 燈油蒸氣 吸差時の 發熱, 安全工學, Vol. 14, No. 2, pp. 83~85, 1975.
- 12) 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.
- 13) 武田久弘, 秋田一雄, 炭素粉末の 自然發火の 關する 研究, 安全工學, Vol. 14, No. 3, pp. 131~135, 1975.
- 14) J. Adler, P.A. Barry and M.J.M. Bernal, Thermal Explosion Theory for a Slab with Time Periodic Surface Temperature Variation, Proc. Roy. Soc., A370, pp. 73~88, 1980.
- 15) J. Adler and D.M. Herbert, The Stability of Thermal Oscillations in a Reactive Slab,

- Proc. R. Soc. Lond., A384, pp.455~462, 1982.
- 16) P. C. Bowes and A. Cameron, Self-Heating and Ignition of Chemically Activated Carbon, J. Appl. Chem. Biotechnol., Vol. 21, pp.244~250, 1971.
- 17) 坂口義孝, 上原陽一, 雰囲気温度變動の活性炭の限界發火温度に及ぼす影響, 安全工學, Vol. 27, No. 2, pp.70~75, 1988.
- 18) A. Cameron and D. MacDowall, The Self Heating of Commercial Powdered Activated Carbons, J. Appl. Chem. Biotechnol., Vol. 22, pp.1007~1018, 1972.
- 19) 安全工學協會編, 火災, 海文堂, pp.26~30, 1983.
- 20) D. A. Frank-Kamenetskii, Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics, Plenum Press, 2nd edn., 1969.
- 21) Sin Kwang Chem. Ind. Co., LTD Data, 1992.
-