報 文
화학공학 제4권 제3호
J. KIChE, Vol. 4 No. 3
Dec. 1966

灰分이 많은 無煙炭의 瓦斯化 反應速度 測定*

柳 重 基**·趙 東 滿**

On the Gassification Rate of Anthracite Coal Abundant in Ash

Dongman, Cho*, Choongki, Yoo*

*Electoric laboratory, Korea Electric Company

With CO_2 gas and steam, gassification rate of anthracite coal containing various of ashes were measured. The reaction of $C+CO_2$ and $C+H_2O$ in this work is followed the rate of chemical reaction, and was expressed as two stage reaction like M. A. Mayer's work.

$C+CO_2$ Reaction

$$kc_2=\frac{2.24\times10^{10}}{\sqrt{T}}e^{-\frac{55.790}{RT}} \quad (900\sim1070^\circ C)$$

$$kc_2=\frac{5.89\times10^{6}}{\sqrt{T}}e^{-\frac{33.520}{RT}} \quad (1070\sim1250^\circ C)$$

$C+H_2O$ Reaction

$$kc_3=\frac{8.77\times10^{8}}{\sqrt{T}}e^{-\frac{43.160}{RT}} \quad (800\sim1000^\circ C)$$

$$kc_3=\frac{2.249\times10^{6}}{\sqrt{T}}e^{-\frac{28.590}{RT}} \quad (1000\sim1150^\circ C)$$

緖 言

灰分이 적은 黑鉛質에 대한 gas化反應速度論的 硏究는 일찌기 M. A. Mayer[1)2)]의 연구가 있었고, 灰分이 있는 coke에 관한 연구는 切刀[4)] 등의 연구가 있었다. 우리는 灰分이 많은 國産無煙炭의 gas化反應速度에 관하여 실험하고 그 灰分이 미치는 영향을 검토하였다.

既往의 Gas化反應速度式

1. 黑鉛質의 gas化反應速度式： M. A. Mayer는 黑鉛棒에 CO_2 gas를 반응시켜서 黑鉛棒 單位表面積當 CO gas生成率 A[1)] [cm^3-CO · cm^{-2}C · sec^{-1} · atm^{-1} -CO_2 N. T. P]를 기초로 하여 다음 (1)식과 같이 표시하였고,

$$\left.\begin{aligned}\log A_1&=3.4-\frac{32.360}{4.575}\frac{1}{T} \quad (850\sim950^\circ C)\\ \log A_2&=5.07-\frac{38.700}{4.575}\frac{1}{T} (950\sim1,300^\circ C)\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

다시 黑鉛棒에 steam을 반응시켜서 單位表面積當 黑鉛重量減少率 G[2)] [10^{-3}mol-C cm^{-2}·sec^{-1}]를 기초로 하여 다음 (2)식과 같이 표시하였다.

$$\left.\begin{aligned}\log G_1&=8.42-\frac{49.720}{4.575}\frac{1}{T} \quad (850\sim1,000^\circ C)\\ \log G_2&=6.2-\frac{35.130}{4.575}\frac{1}{T} (1,000\sim1,160^\circ C)\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

한편 두 식 중 A_1A_2 및 G_1G_2는 $C+CO_2$ 반응이나

* 1966年 10月 31日 수리
** 韓電 電氣試驗所

$C+H_2O$ 반응에 다 함께 兩段階의 化學反應速度가 있다 하고 이는 炭素表面에 surface oxide complex 의 영향이라고 설명하였다.

$$\left.\begin{aligned} &C+CO_2\rightarrow CO+\underset{(solid)}{C-O}\rightarrow 2CO \\ &C+H_2O\rightarrow H_2+\underset{(solid)}{C-O}\rightarrow H_2+CO \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

2. Coke의 gas化反應速度式： 切刀[4] 등은 粉 coke의 pellet를 만들어 이에 CO_2 gas를 반응시켜서 1,100°C까지가 化學反應速度支配下에 반응이 진행되며, 이를 다음 (4)식과 같이 표시하였고, 이 이상의 온도에서는 灰層內 gas 擴散速度抵抗을 받는다 하였다.

$$kc=\frac{8.9\times 10^5}{\sqrt{T}}\,e^{-\frac{53.000}{RT}} \quad (4)$$

3. 反應速度式의 整理： 炭素의 反應速度式에 대하여 각 연구자마다 표시하는 방법과 사용하는 單位가 各異하므로 國井[5] 등은 固體粒子 反應速度段階에 관한 速度式을 세우고 各 反應速度式의 單位를 換算하여 정리하여 두었다.

前記한 (1)식에 대하여는 反應速度 V[gmol. cm^{-2}. sec^{-1}]에 입각하여 다음 식과 같이 표시하였다.

$$V_{CO}/2=-V_{CO2}=-V_C \quad (5)$$

$$V_C=\frac{-dN}{Ard\theta_P}=k\Delta C=\frac{-dr}{\alpha.d\theta_P} \quad (6)$$

$$cm^3-CO/cm^2\cdot sec\cdot atm-CO_2\ N.T.P$$
$$=\frac{gmol-CO}{22.4\times 10^3}\Big/cm^2\cdot sec\cdot\frac{gmol-CO_2}{22.4\times 10^3}\ \frac{273}{T}$$
$$=\frac{T}{273}cm/sec$$

$$k=\frac{T}{273\times 2}A \quad (7)$$

4. 本實驗에서는 $C+CO_2$ 반응(記號 2)이나 $C+H_2O$ 반응(記號 3)을 다 같이 炭素重量減少率 $\frac{-dN_C}{Ard\theta_P}$로 표시할 수 있다고 보고, (6)식을 引用하여 (8)식 및 (9)식과 같이 표시하여 總括反應速度定數 $\bar{k}$를 구하였다.

$C+CO_2$ 반응

$$V_2=\frac{-dN_C}{Ard\theta_P}=\frac{-dr_2}{\alpha d\theta_P}=\bar{k}_2\Delta C_2 \quad (8)$$

$C+H_2O$ 반응

$$V_3=\frac{-dN_C}{Ard\theta_P}=\frac{-dr_3}{\alpha d\theta_P}=\bar{k}_3\Delta C_3 \quad (9)$$

N_C는 炭素重量減少 gmol 數, Ar은 粒子反應界面面積[cm^2], θ_P는 經過時間 [sec], r은 粒子反應界面半徑 [cm], ΔC는 反應할 gas의 有效濃度差 [g-mol·cm^{-3}], α는 gas 1 gmol과 反應할 試料의 體積[cm^3·$gmol^{-1}$]이다.

灰分이 많은 無煙炭의 總括反應速度定數 $\bar{k}$는 化學反應速度定數 k_c[cm·sec^{-1}]와 灰層內 gas 擴散速度抵抗定數 k_d[cm·sec^{-1}]만이 관여되어 다음 관계를 갖는다함은 前報[3] 燃燒反應速度測定에서 實測되었다.

$$\frac{1}{\bar{k}}=\frac{1}{k_c}+\frac{1}{k_d} \quad (10)$$

化學反應速度定數 k_c는 Arrhenius식을 인용한 (11)식을 이용하고, 灰層內 gas 擴散速度抵抗定數 k_d는 Hellinkx식인 (12)식과 無煙炭燃燒測定에서 얻는 (13)식을 이용하여 (10)식의 관계를 구명하고저 하였다.

$$k_c=\frac{a}{\sqrt{T}}\exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (11)$$

$$k_d=\frac{12}{D_P}D_{vf}\cdot e \quad (12)$$

$$e=1-\left(\frac{W_a}{3.2V}\right)^{2/3} \quad (13)$$

a는 頻度回數, E는 活性 energy[cal·$gmol^{-1}$] D_{vf}는 gas의 擴散速度定數 [$cm^2\cdot sec^{-1}$], e는 試料粒子의 細孔比 [—], W_a는 試料 pellet中 灰分의 重量[g], V는 試料 pellet의 體積[cm^3], D_P는 試料 pellet의 相當徑[cm] 등이다.

實驗裝置 및 實驗方法

1. 裝置： 英國 Stanton社製 熱天秤을 이용하고 爐上部에 gas 豫熱裝置를 附設直結하였다.

2. 試料： 國產無煙炭의 各 地區別 代表的인 炭礦 10個試料를 이용하고 60 mesh 이하 粉炭으로 高 1.0~1.5 cm, 徑 1.3 cm 程度의 pellet를 만들었다.

3. Gas化反應速度測定： Gas 豫熱裝置에서 CO_2를 豫熱 또는 물을 蒸發豫熱시켜서 爐內로 CO_2는 5.0[cm·sec^{-1}] 程度, 물은 0.08[ml·sec^{-1}] 程度로 送入하여 爐內에서 배출되는 gas를 분석하여 공기의 逆流 또는 漏入이 없음을 확인하고 溫度는 700°C에서 부터 100°C/15 min의 率로 상승시키며, CO_2 反應은 1,250°C, $C+H_2O$ 반응은 1,150°C까지 實測하였다.

試料의 揮發分은 온도가 700°C에서 800°C까지 상승하는 동안에 완전히 제거되었으며, 試驗 pellet에는 純炭素分 W_c[g]와 純灰分 Wa[g]만이 殘存하며 여기서 gas化反應開始溫度를 測定하고, 이 온도에서 부터 反應完結時까지 實測하였으며 各試料에 대한 실측결과는 Table 1과 Table 2와 같다.

記錄 chart上에서 每 2.5分間의 平均溫度와 重量減少量을 實測하고, 各其 溫度別 反應速度는 減量曲線을 解折하여 구하는 簡易法을 이용하였다.

이 방법에 의한 各 溫度別 反應速度의 正確性을 기하기 위하여 950°C 및 1000°C에서 온도를 일정히 유지하고, 그 反應完結時間 θ_B[sec]를 얻고, (6)식을 積

Table 1. Experimental data of sample for C+CO_2(Pellet dia=1.3 cm)

	Jungsung	Homyung	Hamtai	Macha	Hambaik	Kangnung	Hukyun	Eunsung	Baikjai	Sanan
H (cm)	1.48	1.34	1.30	1.24	12.4	1.24	1.24	1.24	1.32	1.20
D_P (cm)	1.554	1.503	1.488	1.465	1.465	1.465	1.465	1.465	1.495	1.449
V (cm^3)	1.764	1.777	1.725	1.645	1.645	1.645	I.645	1.645	1.751	1.592
W_a (g)	0.827	1.105	0.401	1.031	0.800	0.528	0.410	0.530	1.000	0.561
W_c (g)	1.918	1.420	1.804	1.168	1.475	1.568	1.822	1.509	1.254	1.508
W_{VM} (g)	0.129	0.155	0.103	0.166	0.103	0.088	0.136	0.116	0.086	0.074
ρ_c (g/cm^3)	1.63	1.503	1.338	1.439	1.446	1.328	1.44	1.316	1.314	1.345
α	11.032	15.45	11.475	16.87	13.383	12.587	10.179	13.024	17.304	12.672

Table 2. Experimental data of sample for C+H_2O(Pellet dia=1.3 cm)

	Jungsung	Homyung	Hamtai	Macha	Hambaik	Kangnung	Hukyun	Baikjai	Sanan	Eunsung
H (cm)	1.40	1.20	1.24	0.88	1.24	1.26	1.34	13.6	1.12	1.28
D_P (cm)	1.525	1.449	1.463	1.306	1.465	1.473	1.503	1.51	1.416	1.48
V (cm^3)	1.857	1.592	1.645	1.167	1.645	1.672	1.777	1.804	1.804	1.698
W_a (g)	0.844	1.015	0.360	0.743	0.800	0.535	0.451	1.057	0.526	0.535
W_c (g)	1.653	1.258	1.653	0.900	1.475	1.578	1.945	1.295	1.448	1.595
W (g)	0.167	0.088	0.094	0.118	0.103	0.089	0.147	0.091	0.069	0.155
ρ_c (g/cm^3)	1.434	1.483	1.28	1.45	1.440	1.32	1.43	1.35	1.373	1.345
α	13.48	15.186	12.20	16.89	13.359	12.69	11.57	16.77	12.34	12.86

分한 (14)식의 $\bar{k}$의 값과 비교하여 相互近似함을 確認하고 本實驗을 진행하였다.

$$\theta_B=\frac{R}{\alpha\cdot\Delta C\cdot\bar{k}} \tag{14}$$

사용한 CO_2 gas 成分은 CO_2 98 %, O_2 0.4 %, N_2 1.6 %인 CO_2 gas 를 썼었다.

實驗結果 및 考察

1. $\overline{k_2}$ 및 $\overline{k_3}$ 測定： 本實驗中 pellet에 灰分離脫은 없었으며, gas化反應이 表面에서 시작하여 未反應部가 점차 球形으로 감소되어지고 이 gas化反應이 化學反應速度의 支配下에서 진행될 때는 試料의 灰分含有率에 無關함이 實測되어졌으므로 gas化反應開始溫度에서부터 反應完結時까지 2.5分間의 平均溫度와 重量減少量 ΔW[g]를 기초로 하여 다음 식들을 써서 各溫度別 $\overline{k_2}$, $\overline{k_3}$ 등을 實測하였다.

$$W_r=W_c-\sum_{\theta P=0}^{\theta P=\theta p}\Delta W \tag{15}$$

$$(W_r/W_c)^{1/3}=r/R \tag{16}$$

$$V=\bar{k}\Delta C=\frac{-dr}{\alpha d\theta_P} \tag{6}$$

$$\alpha=\frac{\mathbf{M}}{\rho_c f_c}=12V/W_c \tag{17}$$

2. 實測結果와 計算結果의 한 例는 Table 3과 Table 4와 같다： 各試料別 $\overline{k_2}$와 $\overline{k_3}$의 값을 plot 하면 각기 약간식 各異한 曲線이 그려지나 이들을 종합하면 Fig.

Table 3. Experimental data for C+CO_2 reaction CO_2+Homyng
(H: 1.34 cm D_P: 1.503 cm V.M: 0.155 g
W_c: 1.420 g W_a: 1.105 g)

θ_P	T	ΔW	W_r	r	Δr	$\overline{k}$	$[kc_2]_1$
[min]	[°C]	[mg]	[mg]	[cm]	[cm]	[cm/s]	[cm/s]
0	780	0	1,420	0.7565	0	0	0
5	810	7.0	1,421	0.7553	0.0012	0.0213	0.0064
10	850	6.0	1,415	0.7542	0.0011	0.0203	0.0130
15	880	8.0	1,407	0.7528	0.0014	0.0265	0.0228
20	915	12.0	1,395	0.7506	0.0022	0.0430	0.0240
22.5	935	7.0	1,388	0.7495	0.0011	0.0436	0.0256
25.0	950	9.0	1,379	0.7477	0.0018	0.0723	0.0270
27.5	960	11.0	1,368	0.7458	0.0019	0.0773	0.0876
30.0	980	14.0	1,354	0.7432	0.0026	0.107	0.1100
	995	17.0	1,337	0.7401	0.0031	0.129	0.134
35	1,010	19	1,318	0.7366	0.0035	0.147	0.164
	1,025	25	1,293	0.7319	0.0047	0.200	0.210
40	1,040	27	1,266	0.7267	0.0052	0.224	0.245
	1,060	37	1,229	0.7196	0.0071	0.311	0.336
45	1,070	40	1,189	0.7116	0.0080	0.353	0.376
	1,085	48	1,141	0.7020	0.0096	0.428	0.482
50	1,100	55	1,086	0.6904	0.0118	0.532	0.537
	1,120	60	1,026	0.6775	0.0129	0.591	
55	1,135	65	961	0.6629	0.0146	0.675	
	1,150	70	891	0.6464	0.0165	0.772	
60	1,160	75	816	0.6278	0.0196	0.923	
	1,177	75	741	0.6079	0.0199	0.946	
65	1,185	75	666	0.5871	0.0208	0.996	
	1,195	73	593	0.5644	0.0227	1.09	
70	1,200	72	521	0.5406	0.0238	1.15	
	1,210	63	458	0.5178	0.0228	1.16	
75	1,215	62	396	0.4971	0.0207	1.012	
	1,220	58	338	0.4680	0.0291	1.43	
80	1,225	55	283	0.4410	0.0270	1.33	
85	1,235	92	191	0.3869	0.0540	1.34	
90	1,240	68	123	0.3341	0.0528	1.31	
95	1,250	45	78	0.2871	0.0470	1.176	
100	〃	33	45	0.2389	0.0482	1.20	
105	〃	19	26	0.1990	0.0399	0.998	
110	〃	5	21	0.1854	0.0136	0.9	
115	〃	10	11	0.1494	0.0360	0.9	
120	〃	7	4	1.1066	0.0428	1.13	
125	〃	4	0.0	0.00	0.1066		

Table 4. Experimental data for $C+H_2O$ reaction
H_2O+Macha

(H: 0.88 cm W_c: 0.900 g
W_a: 0.743 g V.M: 0.118 g)

θ_P	T	ΔW	W_r	r	Δr	$\overline{k_3}$	$[kc_3]_1$
[min]	[°C]	[mg]	[mg]	[cm]	[cm]	[cm/s]	[cm/s]
0	690	0	900	0.6530	0	0	
2.5	705	3.0	897	0.65228	0.00072	0.0240	
5.0	720	3.0	894	0.65165	0.00072	0.0251	
7.5	735	3.0	891	0.65086	0.00071	0.0251	0.1750
10.0	750	4.0	887	0.64980	0.00105	0.0376	0.0240
12.5	765	5	882	0.64863	0.00117	0.0420	0.0274
15	780	5	877	0.64738	0.00125	0.0462	0.0405
	800	5	872	0.64614	0.00124	0.0461	0.0580
20	810	6	866	0.64464	0.00150	0.0570	0.0727
	825	10	856	0.64216	0.00248	0.0960	0.091
25	845	13	843	0.63896	0.00320	0.126	0.127
	860	15	828	0.63511	0.00385	0.153	0.147
30	875	20	808	0.62995	0.00516	0.208	0.158
	895	24	784	0.62368	0.00617	0.253	0.272
35	910	30	754	0.61558	0.00810	0.331	0.341
	925	35	719	0.60592	0.00968	0.408	0.406
40	940	42	677	0.59390	0.01202	0.512	0.510
	960	49	628	0.57921	0.01469	0.636	0.630
45	970	57	571	0.56112	0.01809	0.790	0.743
	990	59	512	0.54108	0.02004	0.889	0.955
50	1,005	61	451	0.51868	0.02240	1.00	1.14
	1,020	66	385	0.49203	0.02665	1.21	
55	1,030	67	318	0.46167	0.03037	1.39	
	1,045	65	253	0.42778	0.03389	1.57	
60	1,065	60	193	0.39088	0.03690	1.73	
	1,080	55	138	0.34929	0.04159	1.98	
65	1,090	46	92	0.30534	0.04395	2.10	
	1,105	39	53	0.25401	0.05133	2.48	
70	1,120	32	21	0.18591	0.06810	3.34	
	1,130	17	4	0.10735	0.07856	3.87	
75	1,130	4.0	0.0	0.0	0.10735	—	

1과 같이 서로 隣接한 曲線群이 되어 이들의 平均曲線을 구할 수 있었다.

이 平均値에 의한 $\overline{k_2}$와 $\overline{k_3}$의 곡선과 M. A. Mayer의 値와 비교하면 Fig. 2와 같다.

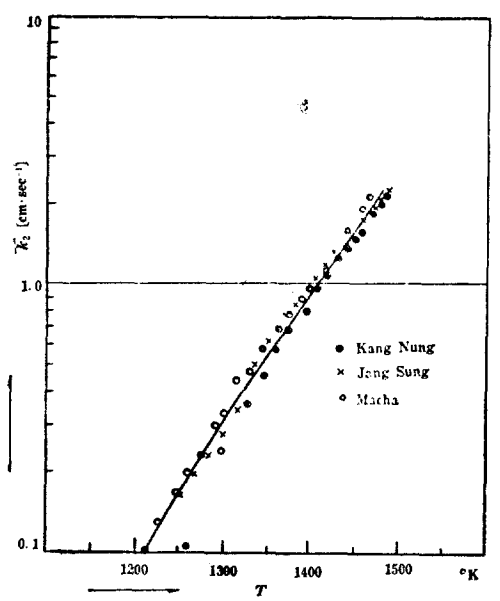

Fig. 1. $\overline{k}_2$ vs Temperature.

여기서 實測된 $\overline{k}$의 값으로써 $\overline{k}\sqrt{T}$와 $\frac{10^4}{T}$의 관계를 plot하면 Fig. 3과 같이 兩段의 直線이 존재함은 M. A. Mayer의 실험과 같으므로 本實驗 溫度範圍內에서는 $C+CO_2$ 및 $C+H_2O$ 반응이 다 같이 化學反應速度의 支配下에서 진행되었다고 볼 수 있다.

다시 上段의 直線이 혹 k_c와 k_d의 共同支配로 진행된 결과가 아닌가 하여 $\overline{k}$의 값과 下段直線 k_c의 값을 (10))식 및 (12)식에 대입하여 灰層內 gas 擴散速度抵

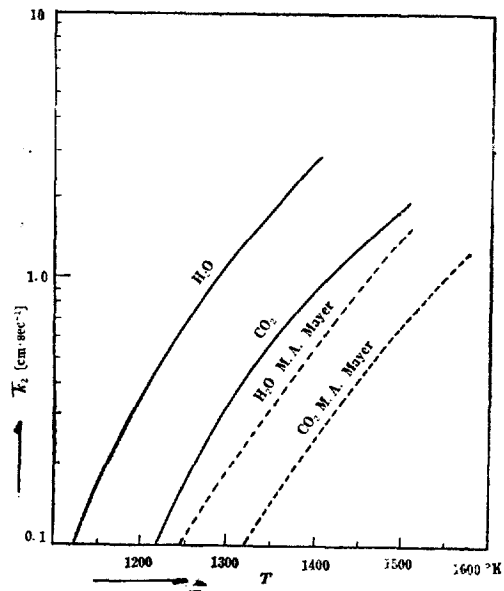

Fig. 2. $\overline{k}$ vs Temperature.

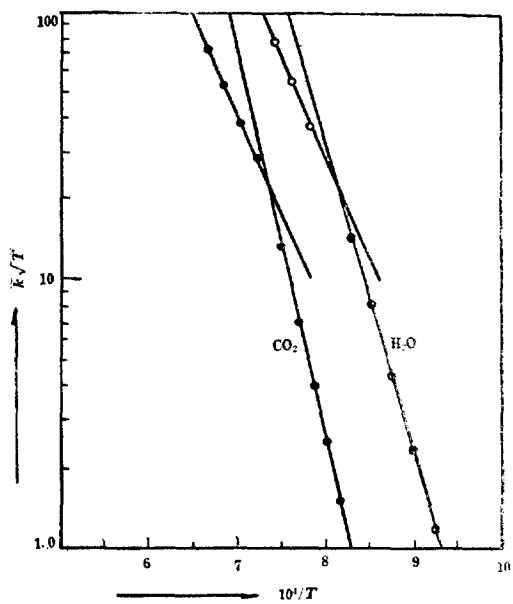

Fig. 3. $\overline{k}\sqrt{T}$ vs $\frac{10^4}{T}$

抗을 검토하였던 바 $D_{vf}=D_o\left(\frac{T}{273}\right)^m$의 관계에서 D_{vf}의 값과 $\frac{T}{273}$의 관계가 log-log 紙上에 直線關係가 성립되지 않으므로 이 上段直線 즉 第2段反應速度 역시 化學反應速度임을 알 수 있었다.

그러나 有煙炭을 乾溜한 coke에서는 이 第2段反應速度가 나타나지 않음을 보아서 석탄의 炭素構造가 1000°C 부근에서 변화를 이르킨 결과라고 보아 진다.

Table 5. Activation energy data

Sample	$C+CO_2=2CO$		$C+H_2O=H_2+CO$	
	E 1 Cal/mol	E 2 Cal/mol	E1 Cal/mol	E2 Cal/mol
Hongyung	49.190	35.190	53.800	24.100
Hamtai	49.730	33.150	53.800	38.200
Macha	40.670	—	40.670	31.600
Hambaik	61.000	40.490	48.300	33.900
Kangnung	61.000	39.690	60.500	35.200
Hukyun	60.160	22.880	51.200	38.200
Eunsung	55.790	25.140	51.200	39.800
Sanan	55.500	24.700	60.500	45.750
Baikjai	48.160	38.100	53.800	39.800
Jangsung	48.250	33.020	48.300	35.200

2. k_{c2} 및 k_{c3}: 各 試料마다의 개별적인 Fig. 3과 같은 兩段直線을 얻고 (11)식 Arrheneus식의 a와 E의 값을 각기 구하여 종합하면 Table 5와 같으며, E_1의 값이 各 試料炭의 炭化程度를 보여 주고 있다.

한편 同一한 試料 pellet를 1,100°C로 一定溫度로 유지하고 air로 燃燒시킬 때와 CO_2 및 H_2O로 gas化시킬 때 그 燃燒完結時間 θ_B[sec]가 거이 유사하여 짐을 알 수 있었다.

이는 air로 燃燒될 때는 灰層內酸素擴散速度抵抗의 支配 즉, k_d의 支配下에서 반응이 진행되며, 그 k_d의 값이 10[cm·sec^{-1}] 程度이므로 air에 대하여는 2.1 [cm·sec^{-1}] 程度이며, CO_2나 H_2O에 의한 gas化反應이 비록 化學反應速度의 支配下에서 반응이 진행된다 하더라도 k_{c2} 및 k_{c3}의 값이 1.5~2.0[cm·sec^{-1}] 정도임에 基因함이라고 본다.

結 論

總括的인 gas化反應速度式은 역시 國井 등의 연구와 같으며 國產無煙炭의 gas化反應速度는 M. A. Mayer의 실험과 같이 兩段階의 化學反應速度의 支配下에서 진행되었다.

이 兩段階反應速度가 존재함은 1000°C 부근에서 석탄의 炭素構造變化에 의한 결과라고 본다.

本驗實의 溫度範圍內에서는 國產無煙炭의 gas化反應速度定數 平均値를 다음 식들로써 표시할 수 있다.

$C+CO_2$ 反應

$$k_{c2}=\frac{2.24\times10^{10}}{\sqrt{T}}e^{-\frac{55.790}{RT}} \quad (900\sim1070°C)$$

$$k_{c2}=\frac{5.89\times10^{6}}{\sqrt{T}}e^{-\frac{33.520}{RT}} \quad (1070\sim1250°C)$$

$C+H_2O$ 反應

$$k_{c3}=\frac{8.77\times10^{8}}{\sqrt{T}}e^{-\frac{43.160}{RT}} \quad (800\sim1000°C)$$

$$k_{c3}=\frac{2.24\times10^{6}}{\sqrt{T}}e^{-\frac{28.590}{RT}} \quad (100\sim1150°C)$$

記號說明

A; CO gas formation rate (cm^3-CO, cm^{-2}-CO, sec^{-1}, atm^{-1}-CO_2 N. T. P.)

A_r; Surface area of reacted core (cm^2)

ΔC_2; ΔC_3, Mean value of concentration CO_2 and steam. (mol cm^{-3})

D_p; Particle diameter. (cm)

D_{vf}; Diffusivity in fluid (cm^2. sec^{-1}.)

E; Activation energy (Cal. mol^{-1})

F_c, F_a; Fraction of carbon and ash in sample.

K_2, K_3; Overall reaction rate coefficient of CO_2 and steam. (cm, sec^{-1})

K_{c2}, K_{c3}; Chemical reaction rate coefficient of CO_2 and steam. (cm. sec^{-1})

K_d; Mass transfer coefficient through solid layer. (cm. sec^{-1})

H; Height of sample (cm)

R; Radius of sample (cm)

V; Reaction rate (g. mol. cm^2. sec^{-1})

W_d; Weight of dry sample (g)

W_a; Weight of ash in sample (g)

W_c; Weight of carbon in sample (g)

W_r; Weight of unreacted carbon in sample (g)

α; Volume of particle corresponding for 1 mol of carbon (cm^3. mol^{-1})

ρ_c; Density of particle (g. cm^{-3})

REFERENCE

1. M. A. Mayer, J. Amer. Chem. SOC, 56-70-1934.
2. M. A. Mayer, J. Amer. Chem. SOC, 56-1879-1934
3. Namkoong. Yoo. J. Korea Inst. Chem. Eng. Vol. 3-2 166-1965.
4. 澤井切刀; 工業化學誌 54-301-1951.
5. 矢木國井; 化學工學 19-401-1955.