

〈논 문〉 SAE NO. 953779

벽-유동(Wall-Flow) 모노리스(Monolith) 디젤 입자상물질 필터 트랩의 재생모델에 의한 수치 시뮬레이션

Computational Simulation by One-Dimensional Regeneration Model of Wall-Flow Monolith Diesel Particulate Filter Trap.

김 광 현*, 박 정 규**
G. H. Kim, J. K. Park

ABSTRACT

A mathematical model for wall-flow monolith ceramic diesel particulate filter was developed in order to describe the processes which take place in the filter during regeneration. The major output of the model comprises ceramic wall temperature and regeneration time(soot reduction). Various numerical tests were performed to demonstrate how the gas oxygen concentration, flow rate and the initial particulate trap loading affect the regeneration time and peak trap temperature. The model is shown to be in reasonable agreement with the published experimental results. This model can be applied to predict the thermal shock failure due to high temperature during combustion regeneration process.

주요기술용어 : DPF(디젤입자상물질필터), Trap System(트랩 시스템), Particulate(입자상물질), Regeneration(재생), wall-flow(벽유동)

1. 서 론

디젤 엔진은 NO_x와 입자상물질의 배출에 문제가 있지만 열효율이 높기 때문에 자동차 엔진뿐만 아니라 고정용 동력원으로도 널리 사용되어 왔다. 그러나 최근 들어 강화되는 디젤 엔진 배기 규제에 대응하기 위해서 엔진 개량 및 전자

제어의 연구가 실시되고 있지만 대폭 강화되는 규제에는 배기계에 필터 트랩 시스템과 같은 후처리 장치의 장착이 현실적인 방안으로 제기되고 있다.

디젤 입자상물질 트랩 시스템은 기본적으로 필터, 재생 장치, 전자 제어장치의 3부분으로 구성되어 있다. 디젤 입자상물질 필터는 디젤엔진의 배기계에 부착되어 배기가스가 필터를 통과할 때, 입자상물질은 필터에 포집·퇴적된다. 시간 경과와 함께 엔진 배압이 상승하므로 엔진 허용

* 정회원, 건국대 대학원 기계공학과

** 정회원, 건국대 기계공학과

배압을 초과하지 않도록 필터 내에 포집된 입자 상물질을 연소시켜서 제거함으로써 필터를 재생시킨다.

이 재생 과정 동안에는 다공성 세라믹 물질로 되어 있는 필터 안에서 연소에 의한 많은 열이 발생하므로 열적 문제를 발생시킨다. 주된 열적 문제는 재생 과정 동안의 열응력에 의해 일어나는 필터 크랙(Crack)과 필터 원주 가장자리에 생기는 미연 부분의 존재이다. 재생과 관련된 인자들이 매우 많기 때문에 실험만으로 이 문제를 풀기는 매우 어렵다.

재생에 대한 이해와, 제어된 재생 기술의 설계는 탄소량, 산소량, 초기 온도, 트랩 형상, 물성치, 대류 유동 등의 영향을 받게 되는 재생율과 다공성 물질의 wall-flow 등, 복잡한 특성 때문에 완전한 2차원 모델링은 매우 어렵다. 그러나 실험적으로 연구하기에는 포함된 변수가 많고, 필터 내에서의 정확한 측정이 어렵기 때문에 실험 개발들의 기초 자료가 되는 재생 모델의 개발이 필요하다^{1)~4)}.

본 연구에서는 Bissett 등이 제시한 1차원 모델¹⁾을 근거로 시뮬레이션 프로그램을 개발해, 재생에 있어서의 중요한 재생인자의 변화가 재생에 어떻게 영향을 미치는가를 이해하고자 한다.

2. 수학적 모델

세라믹 모노리스 필터 트랩은 다공성 벽을 갖

는 긴 채널의 허니콤(honeycomb)으로 이루어져 있다. 허니콤의 열려 있는 채널은 고온 프리그로 막혀 있어서 채널에 들어간 배기가스가 트랩을 나가기 전에 세라믹 벽을 통과하도록 되어 있다(Fig.1). 필터 전면으로 유입되는 가스의 모든 성질이 반경 방향으로 일정하며, 모노리스(monolith)의 원주벽이 단열 되어 있다고 가정하면 입구·출구 채널과 그 사이의 다공성(porous) 벽을 포함하는 한 쌍의 셀(cell)을 대표적인 것으로 선택할 수 있다. 입구·출구 채널 사이의 다공성벽은 길이에 비해 두께가 얇기 때문에 다공성 벽 내부에서의 길이 방향의 속도를 무시하고 1차원 유동으로 단순화시킬 수 있다. 마찬가지로 입구와 출구 채널내의 유동은 축방향의 속도 성분만을 갖는 1차원 층류 유동으로 근사시키면, 필터내의 모든 유동은 공간상에서 단일 변수를 갖게 되어 수학적 모델은 간단해진다.

Fig.2은 한 쌍의 셀(cell)에 대한 개략도이다. z 는 채널을 따른 축방향의 거리이고, r 은 반경방향의 거리이고, x 는 벽을 통한 거리이다. 입, 출구 채널 내에서의 가스의 속도, 밀도, 온도는 반경방향으로 분명히 적지 않은 변화가 있다. 따라서 v_z , ρ , T 은 일차원 채널 유동에서 일반적으로 그러하듯 단면적에 걸쳐 평균한 값을 뜻한다. v_z 는 z -방향의 속도를 말한다. 채널 단면적에 걸쳐 압력의 차이가 무시할만 하므로 P_i 는 r 에 독립적이라고 볼 수 있다. 벽시스템(particulate+porous wall)내에서의 기체와 고체 상간의 열전

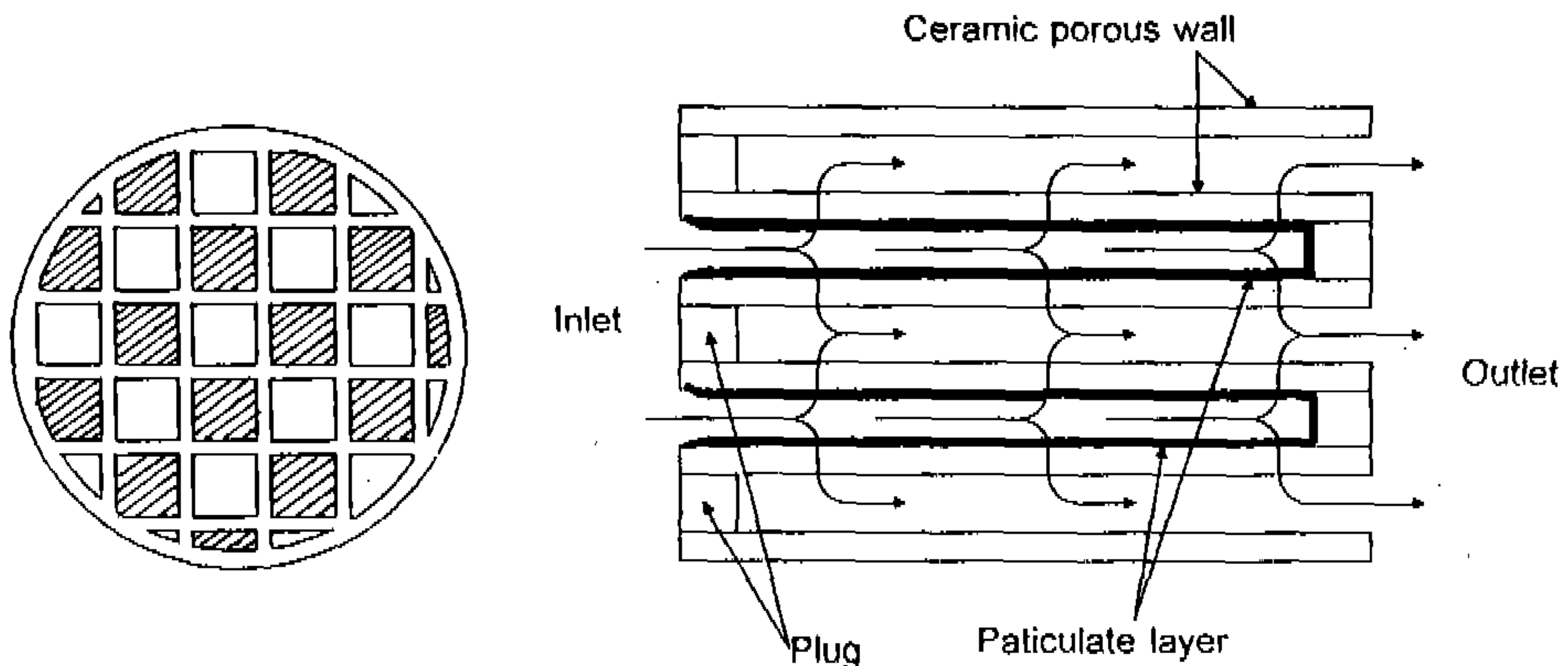


Fig.1 Schematic diagram of monolith channel

달은 매우 크기 때문에 가스와 고체의 온도가 같다고 가정한다. 벽시스템의 고체상에서의 온도는 얇은 x-방향으로의 열전도가 지배적이므로 반응열이 침전물 층내에서 생성된다 하더라도 x-방향으로 독립적이라고 간주할 수 있다. 다공성 벽을 통과하는 유동은 벽을 수직으로 통과하는 가상의 속도 v_w 로 정의한다. 압력 차이가 크지 않다면 ρ_x 도 x에 독립적이므로 질량보존으로부터 v_w 도 또한 x에 독립적이다. 따라서 Y_w 를 제외하고는 x에 대해 독립적이다. 또한, 연소에 중요한 영향을 미치는 입구 채널에서 산소 농도는 축방향으로 변하지 않는다고 가정한다. 가스상에서는 시간에 따라 축적되는 내부 에너지의 변화를 무시하고 정상 상태의 해석을 하며, 고체상에서만 비정상 상태의 해석을 한다.

상태 방정식 : 압력의 차이가 밀도와 온도에 영향을 미칠 만큼 크지 않고, 벽유동(wall flow)에만 영향을 준다고 하면, 국소 압력 대신에 대기압으로 쓸 수 있다.

$$P_{atm} = R\rho_i T_i \quad (1)$$

$$P_{atm} = R\rho_w T_w$$

채널 가스의 질량 보존식 : 좌변은 각각 입구 ($i=1$)와 출구 ($i=2$)에서의 z방향의 질량의 변화를 나타내고, 우변은 벽으로, 또는 벽으로 부

터의 질량의 출·입량을 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_i v_i) = (-1)^i \left(\frac{4}{D_L}\right) \rho_w v_w \quad (2)$$

D_L 은 사각채널의 한 변의 길이를 나타낸다.

채널 가스의 z-방향 운동량 보존식 : 벽으로의 유동의 입·출입은 수직으로 이루어지므로 z방향의 운동량은 없다. 그러나 벽에서 z-방향 속도가 영으로 줄어들므로 우변에 표시된 점성 저항(viscous drag)이 생긴다. 완전 발달 층류 유동의 사각 채널에서의 관계식을 이용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_i v_i^2) = -\frac{a_3 \mu(T_i) v_i}{D_L^2} \quad (3)$$

a_3 는 상수로 28.45이다⁵⁾.

채널 가스의 에너지 보존식 : 가스에 축적되는 에너지와 점성의 영향을 무시하고 고체상과의 대류 열전달을 포함하면 다음과 같다.

$$C_{pg} \rho_i v_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \left(\frac{4}{D_L}\right) \{h_i + (-1)^i C_{pw} \rho_w v_w\} (T_w - T_i) \quad (4)$$

C_{pg} 는 가스의 비열이며, h_i 는 열전달계수이다.

입자상물질의 질량보존식 : 입자상물질 층의 bulk density를 ρ_p 로 정의하고 반응을 계산에 있어서 표면 반응 속도 관계식을 도입하면 식은 다음과 같다.

$$\rho_p \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{M_c}{M_{ox}} Y_1(0, t) \rho_w v_w \times \left\{1 - \exp\left[-\frac{S_p k(T_w) w}{v_w}\right]\right\} \quad (5)$$

M_c 와 M_{ox} 는 각각 탄소와 산소의 분자량이며, Y_1 은 채널내의 산소농도, S_p 는 퇴적된 입자상 물질과 가스가 접촉하는 면적이고, k 는 반응율이다.

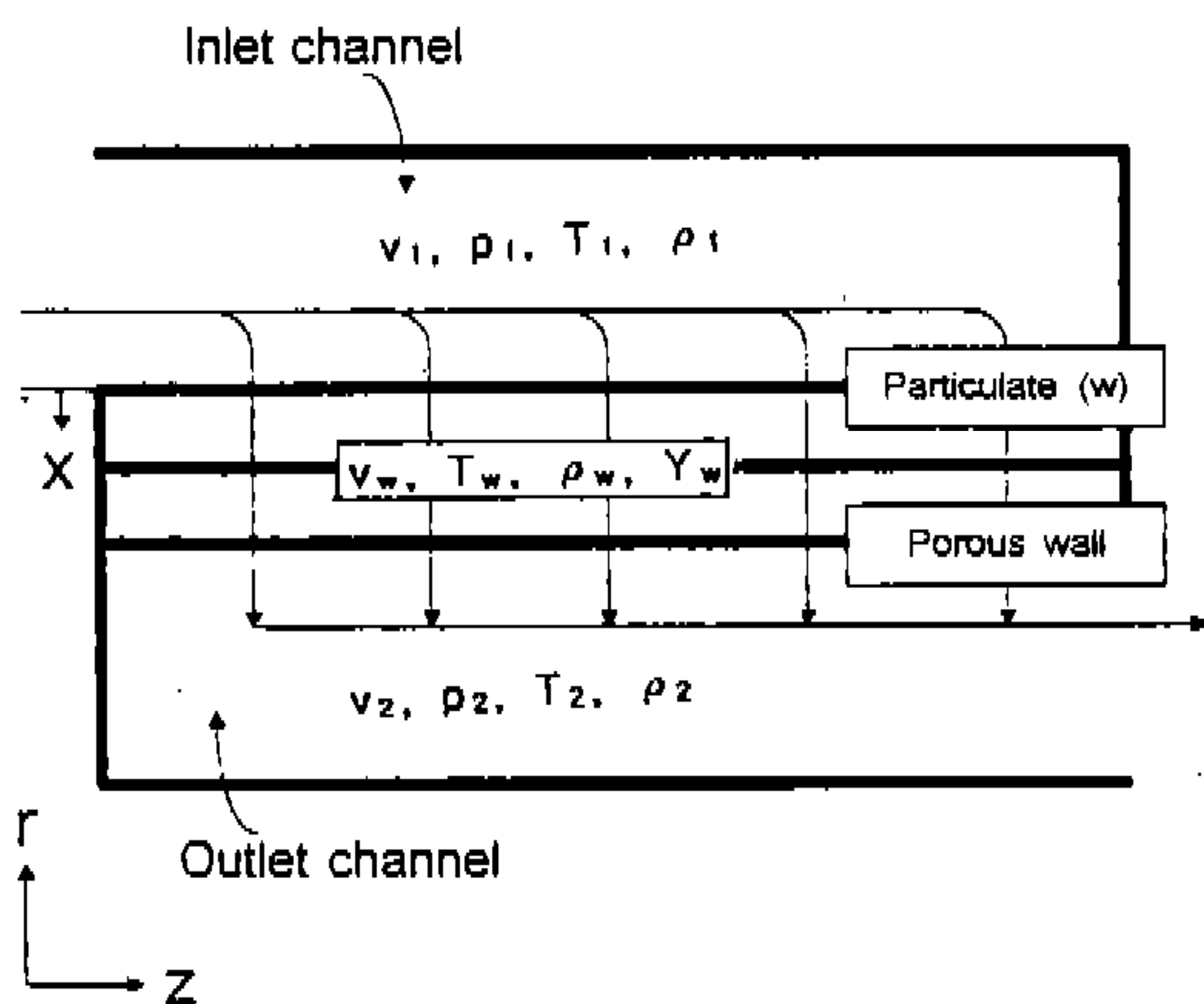


Fig.2 Monolith filter trap model geometry

고체상의 에너지 보존 : 고체상의 입자상물질 층과 다공성 벽으로 나누어 생각하고, 앞서 언급한 것처럼 고체상 내부에서의 가스와 벽의 온도를 같다고 가정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho_p w C_{pp}(T_w) T_w + \rho_s w_s C_{ps}(T_w) T_w \} \\ & = h_1(T_w - T_1) - h_2(T_w - T_2) - \frac{\Delta H}{M_{ax}} \rho_w \nu_w(0, t) \\ & \left\{ 1 - \exp \frac{-S_p k(T_w) w}{\nu_w} \right\} + \lambda_p \frac{\partial}{\partial z} \left(w \frac{\partial T_w}{\partial z} \right) \\ & + \lambda_s w_s \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (6)$$

벽에서의 유동 저항 : 다공성 벽에서의 유동 저항에 관한 상관식은 일반적으로 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$-\nabla p = \alpha \mu \nu + \beta \rho \nu^2 \quad (7)$$

일렬로 있는 다공성물질을 통한 유동에 대해서는 다음과 같은 식이 제안된다.

$$\begin{aligned} p_1 - p_2 = & \{ \alpha \mu(T_w) \nu_w + \beta \rho_w \nu_w^2 \} \\ & + \{ d' \mu(T_w) \nu_w + \beta \rho_w \nu_w^2 \} \end{aligned} \quad (8)$$

여러 유동조건에 대한 실험데이터가 $w=0$ 일때 α 와 β 를 결정하기 위해 사용되었다. $w \neq 0$ 일때 따로 d' 과 β 의 데이터가 부족해서 간단한 근사관계를 제안한다.

$$\beta / d' = \beta / \alpha \quad (9)$$

실험적 관찰은 침전층이 이루어진 후에 식 (9)의 w 에 대한 선형적 의존성을 뒷받침하지만, w 가 영으로 감에 따라 관찰된 ΔP 의 극한값을 주지 않는다. 이것은 깨끗한 벽에 최초로 침전된 입자는 substrate pore를 메워서 ΔP 의 급격한 상승을 일으키기 때문이다. 이 초기 침전층이 이루어진 후에는 잘 발달된 다공성 매질의 전형적인 선형성이 유지된다. 그러므로 식 (9)의 $w(\alpha$

$/d')$ 를 함수 $\phi(w)$ 로 대체한다. 이 함수는 w 가 예측된 값 ω_1 보다 크면 선형성이 잘 일치하지만 $w < \omega_1$ 이면 $w=0$ 으로 부드럽게 연결되는 quadratic한 형태를 취한다. 그러므로 입·출구 채널의 압력차는 다음과 같다.

$$P_1 - P_2 = \{ \alpha \mu(T_w) \nu_w + \beta \rho_w \nu_w^2 \} \{ \omega_s + \phi(w) \} \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} \phi(w) = & \begin{cases} (2\omega_2 - \omega_3) \left(\frac{w}{\omega_1} \right) - (\omega_1 - \omega_3) (\omega_2 - \omega_3) \left(\frac{w}{\omega_2} \right), & w < \omega_1 \\ \omega_2 + \omega_3 \left(\frac{w}{\omega_1} - 1 \right), & w \geq \omega_1 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 는 실험¹⁾으로 부터 얻은 상수이다. 입, 출구 채널의 압력차는 다음과 같다.

기타 관계식 : 열전달 계수는 Eucken's식⁶⁾에 의해 결정하였다.

$$h_i = \frac{N_U}{D} (C_{pr} + \alpha_1) \mu(T_i) \quad (12)$$

가스의 점성계수는 다음 식에 의해 결정된다⁶⁾.

$$\mu(T) = a_2 \sqrt{T} \quad (13)$$

탄소의 반응열식은 다음과 같다⁷⁾.

$$k(T_w) = k_0 T_w \exp \frac{-E}{RT_w} \quad (14)$$

cordierite substrate의 비열(C_{ps})⁸⁾과 흑연의 비열(C_{pp})⁹⁾은 다음식과 같이 fitting 시켜서 사용한다.

$$C_{ps}(T) = c_1 + c_2 T + c_3 T^{-2} \quad (15)$$

$$C_{pp}(T) = c_4 + c_5 T + c_6 T^{-2}$$

경계조건 및 초기조건 : 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

입구채널에서	출구채널에서
$T_1(0, t) = T_f(t)$	$T_2(0, t) = T_w(0, t)$
$G_1(0, t) = G_f(t)$	$G_2(0, t) = 0$
$G_1(L, t) = 0$	$P_2(L, t) = P_{atm}$

고체상에서

$$\frac{\partial T_w(0)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial T_w(L)}{\partial z} = 0$$

$$T_w(z, 0) = T_b$$

$$w(z, 0) = w_b(z) \quad (17)$$

재생조건으로 초기 퇴적량(w_b)과 필터 입구의 가스온도(T_f) 및 유량(Q_L) 그리고 산소 농도(Y_f) 등을 입력하면, Table 1로 부터, 경계조건과 초기조건에 사용되는 $T_f(t)$, $G_f(t)$, $w_b(z)$ 등을 구할 수 있다. 또한 재생이 시작되지 않았을 때의 일반적인 평균배기 가스의 온도(T_b)를 벽온도(T_w)의 초기조건으로 설정한다.

3. 수치 해석

앞서 살펴본 바와 같이 wall-flow의 압력강하식 등의 대수방정식을 제외한 8개의 미분 방정식 중 7개가 상미분 방정식이고, 고체상의 에너지식은 편미분 방정식이다. 8개의 비선형 연립 미분 방정식을 풀기 위해 가스상의 z 에 관한 상미분 방정식과 고체상의 t, z 에 관한 편미분 방정식의 결합을 풀어서(uncouple) 푼다. Fig.2에 알고리즘을 보면, 초기 벽온도, $T_w(z, 0)$ 와 초기 퇴적두께, $w_b(z, 0)$ 가 주어지면, 이 초기조건에 만족하는 가스상의 6개 방정식과 벽유동(wall-flow) 속도를 구하고, 가스상의 계산에서 구해진, $T_1(z)$, $T_2(z)$, $v_w(z)$ 를 이용해 다음 시간에

Table 1 Input Function for Model

Thickness of Initial Particulate Deposit Layer, w_b [cm]	$= \frac{w_g}{2N_{ch}D_L L \rho_p}$
Inlet Gas Temperature, T_f [°K]	$= T_g + 273$
Inlet Mass Velocity Per Unit Channel Area, G_f [g/cm ² ·sec]	$= \frac{Q_L \rho_0 \times 10^6}{60 \times N_{ch} D_L}$
Oxygen mass fraction, Y_f	
where	
w_g : initial mass of particulate [g]	
N_{ch} : number of filter cell	
D_L : length of square channel [cm]	
L : length of filter [cm]	
Q_L : Inlet gas flow rate [m ³ /min]	
ρ_p : bulk density of particulate [g/cm ³]	
ρ_0 : p_{atm}/RT_f [g/cm ³]	
T_g : inlet gas temperature [°C]	[at $t=0$, $t_g=250$ [at $t \neq 0$, $t_g=600$

서의 고체상의 방정식을 푼다.

가스상의 상미분 방정식은 화염면(flame front)에서 급격한 변화가 있기 때문에 stiff한 문제가 생긴다. 이 문제를 해결하기 위해 화염면 근처에서 충분히 작은 grid를 사용하고 다른 부분에서는 큰 grid를 사용하는 adaptive step size control을 포함하는 4th Runge-Kutta scheme을 발전시킨 Rosenbrock 방법을 이용한다¹⁰⁾. Grid가 변하기 때문에 보간법을 이용해 다음 반복계산(iteration)의 grid에서의 값을 계산한다.

앞서 살펴본 것처럼 압력에 대한 경계 조건이 주어지지 않는다. 그래서 펄터 전면의 압력을 가정해서 풀고, 후면에서의 출구 압력이 대기압과 같아야 하고, 입구 채널의 끝에서 질량 유량이 0이 되어야 하는 조건을 만족하도록 반복해서 계산한다. Fig.2의 안쪽 루프가 이에 해당한다. 즉 $P_2(z=L)$ 가 0보다 크게 되면 $P_2(z=0)$ 의 압력이 크게 가정된 것이고, $G_1(z=L)$ 이 0보다 크게 되면 $z=0$ 에서 압력차가 너무 작게 가정된 것이다. 그래서 $G_1(z=L)$ 에 해당하는 압력차이 만큼을 더하거나 빼고, P_2 에 대해서도 마찬가지로 방법을 사용해 반복 계산한다.

암시법(implicit)을 이용해 고체상의 편미분 방정식을 풀기 위해서는 비선형항이 포함되어 있기 때문에 선형화시키는 routine을 포함해야 하며, 또한 $t+\Delta t$ 에서의 기체상의 미지수들을 가정해야 한다. 그러므로 암시법의 無條件 安定性(unconditional stability)에도 불구하고 전체적인 program이 지나치게 복잡해지며, 완전한 암시법의 사용이 거의 불가능하다. 대표적인 현시법(explicit)인 FTCS scheme을 이용해 고체상의 에너지 보존식과 질량 보존식을 차분화(Discretization)한다. 가스상의 결합된 6개의 방정식을 풀때와는 달리 고체상의 편미분 방정식을 풀 때는 일정 격자를 사용한다 가스상의 격자를 고체상에도 그대로 적용해 보았지만 격자 간격이 아주 작은 부분이 생기면서 FTCS scheme의 안정도 조건을 만족시키기 위해 시간 간격도 그에 맞추어 줄여 주어야 하는 문제가 생긴다. 가스상과는 달리 화염면에서의 급격한 변화의 영향이 고체상에서는 적기 때문에 일정한 격자를 사용하

는데 무리가 없었다. 또한 FTCS scheme의 오차 $[O(\Delta t, \Delta z^2)]$ 를 고려해 고체상에서의 격자는 100개를 사용하고, 시간간격을 0.5(무차원 시간)로 하면, Δz 와 Δt 로 인한 오차는 전체적인 결과에 영향을 미치지 않을 만큼 작다.

프로그램의 수렴 조건은 $1.0 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-4}$

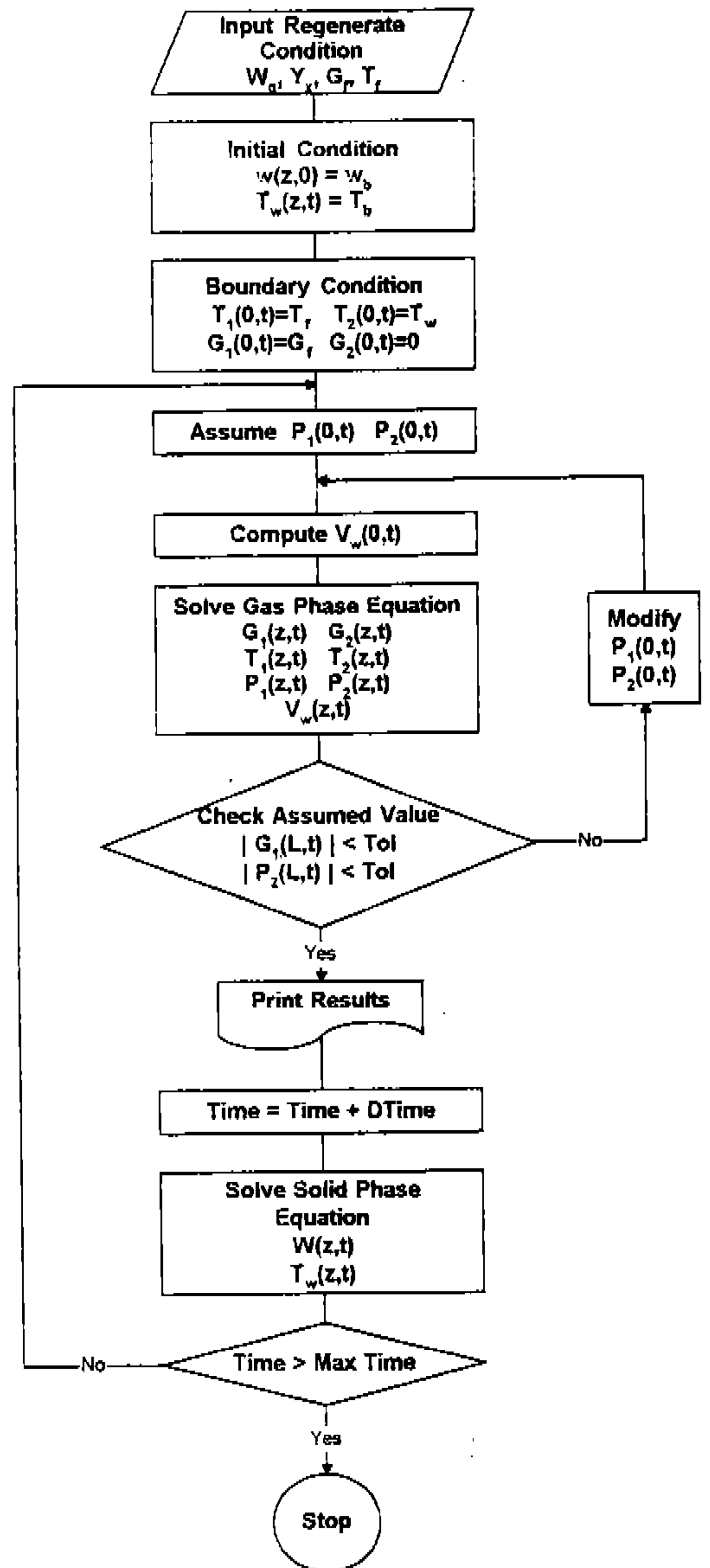


Fig.3 Algorithm

이며, 재생 조건 등에 따라 다르지만 IRIS INDY(R4000, 52MIPS) 기종에서 보통 30~60 분 정도의 수행 시간을 필요로 한다.

4. 결과 및 토론

4.1 모델검증

해석에 사용된 D.P.F의 제원은 Table 2에 주어지고, 주요 상수들은 Table 3에 나타나 있다. 활성화에너지(activation energy)가 70,000~420,000 kJ/kg-mol의 넓은 범위로 다른 여러 모델^{3), 4)}에서 사용되고 있다. 또한 빈도인자(Frequency factor)도 여러 값들이 사용되어 지고 있다⁴⁾. Arrhenius식에 의해 주어지는 화학 반응율을 결정하는 이 두값들에 의해 연소의 형태가 매우 달라지기 때문에 이 값의 적절한 선택이 매우 중요하다. 입구 공기질량은 기준 상태(293°K, 1atm)의 공기로 가정하여 계산 하였다.

Fig.4에서 Fig.6는 재생조건을 임의의 기준상태(초기 입자상물질 질량 : 60 g, 산소 농도 : 10%, 공기량 : 1.5m³/min, 입구가스온도 : 600 °C)로 해서 벽온도, 초기 입자상물질 질량, 벽유

Table 2 Specification of Ceramic monolith filter(Corning, EX-47)

Diameter	22.86	cm
Length	30.48	cm
Cell density	15	cells/cm ²
Wall thickness	0.44	mm
Square channel side length	0.211	cm

Table 3 Data Used for Model(Bissett [1])

Activation energy/gas constant	1.8×10^4	°C
Frequency factor	5.96×10^4	cm/s°C
Nusselt number	2.975	.
Bulk density of particle and substrate	0.55	g/cm ³
	1.29	w/m·°C
Thermal conductivity of particle and substrate	0.84	
	2.09	

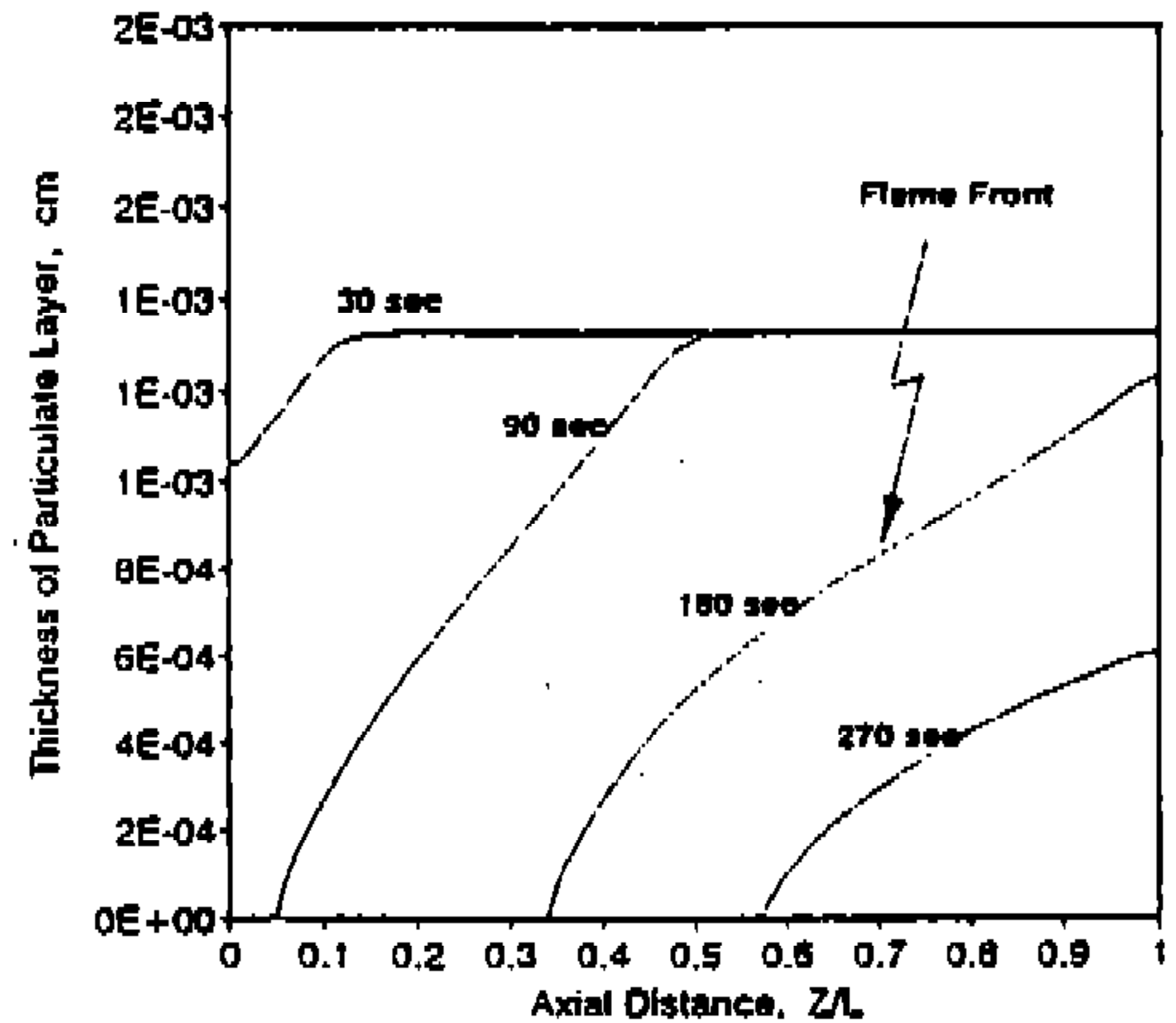


Fig.4 Axial distribution of particle layer thickness at selected times

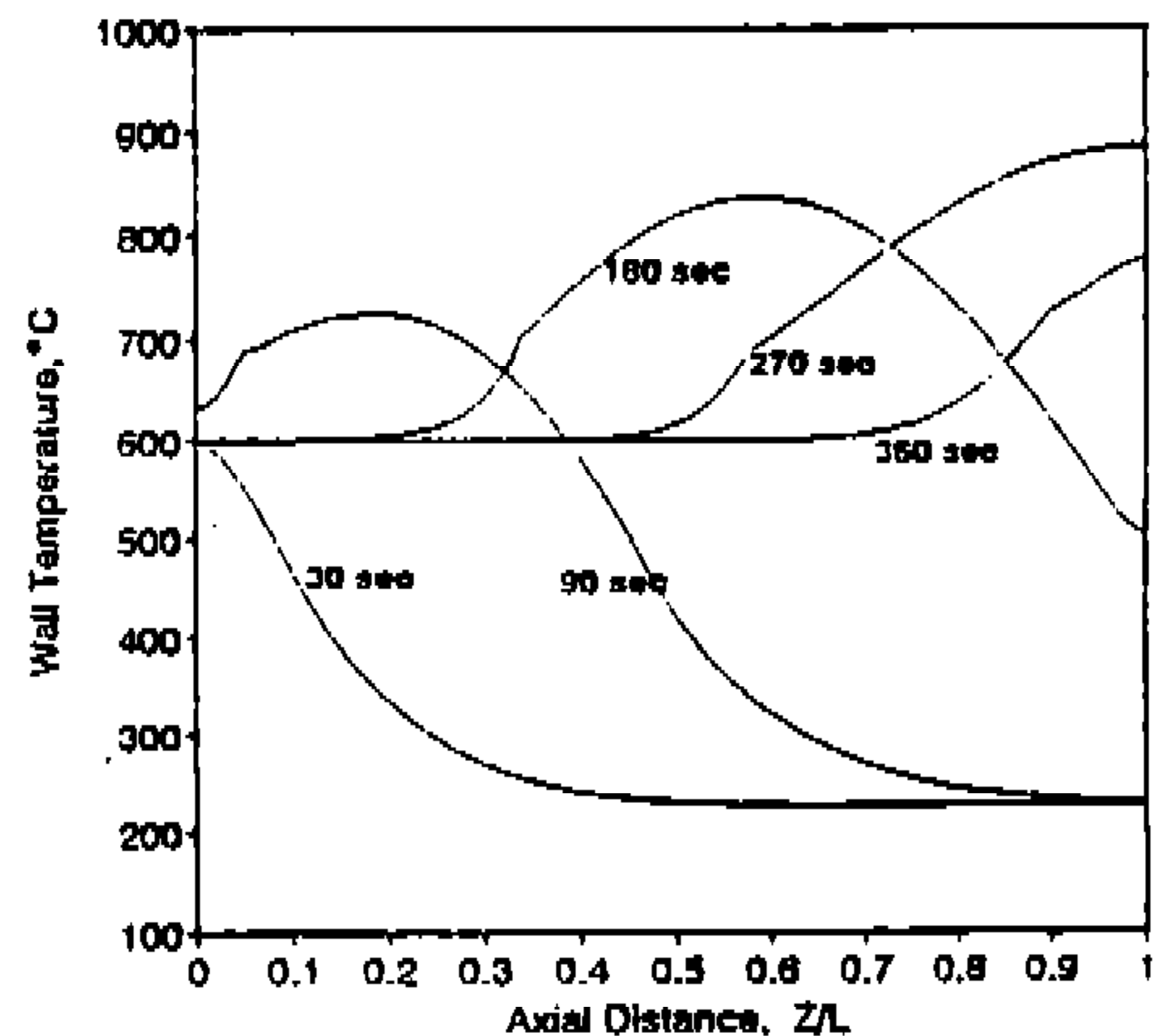


Fig.5 Axial distribution of wall temperature at selected times

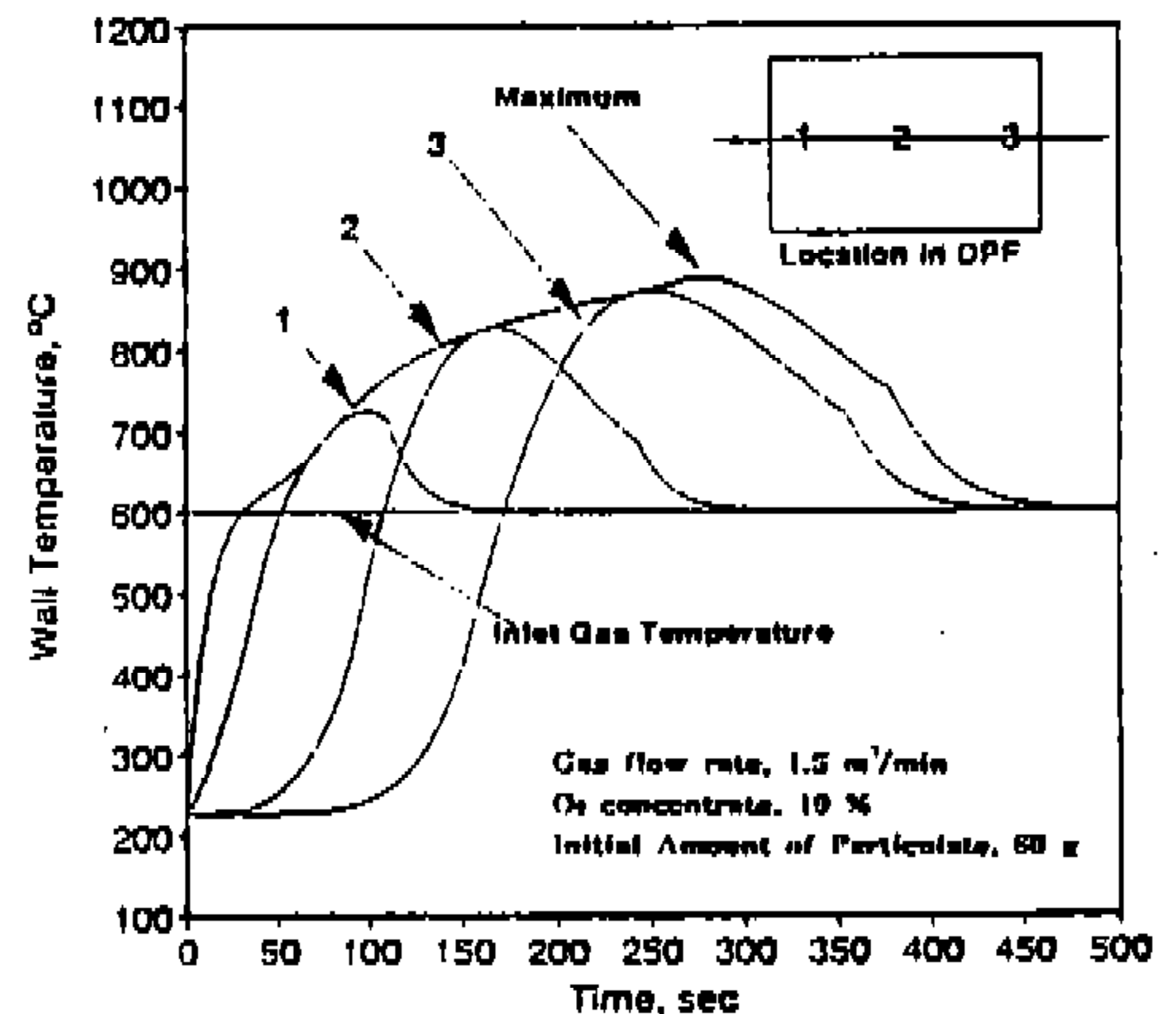


Fig.6 Transient behavior of wall temperature

동(wall-flow)속도 등에 대해 시간상, 공간상의 변화를 보여준다. Fig.4에서는 채널에서의 입자상물질이 시간에 따라 줄어드는 모습과 화염면이 잘 나타나 있다. 재생초기에 시간이 지나면서 화염면의 기울기가 완만해 지는것을 볼 수 있다. 연소가 활발해지면서 화염면이 넓어지기 때문이다. Fig.5는 각 시간에서의 축방향의 벽온도분포를 나타낸다. 초기에 뜨거운 입구온도는 모노리스의 전면 부분을 가열하고(30초), 거기서 입자상 물질을 태우기 시작한다(90초). 전면에서의 입자가 소모되면서 화염면이 형성되어서 안쪽으로 전파하면서 채널 내의 가스온도는 더욱 상승하게 되어 뒤쪽으로 갈 수록 최고온도는 올라간다(180,270초). 입자상물질이 거의 소모되면 입구가스온도로 떨어진다(360초). Fig.4와 관련지어 생각해 보면 입자상물질이 연소되어 재생이 된 곳에서 벽속도가 빨라지게되고, 벽속도가 급격하게 변하는 곳에서 온도곡선의 smooth하지 못한 점이 나타난다. Fig.4와 5의 90초와 180초의 곡선을 보면, 화염면의 중간부분에서 벽온도의 최대값이 나타나는 것을 보아 최고온도는 화염면과 관련이 있음을 알 수 있다. Fig.6은 축방향의 세 점($z/L=0.13, 0.5, 0.83$)에서의 시간에 따른 온도변화와 필터의 최고온도를 나타낸다.

실험치와의 비교 : 많은 재생인자를 고려한 다공성 물질 필터의 재생과정의 실험, 특히 채널내에서 산소농도를 정확하게 측정하는 것은 기술적으로 매우 어렵다. Higuchi 등은¹¹⁾ 연소실에 연

결된 세라믹 monolith trap(4.66"×6", 30 cells/cm²)을 가지고 비교적 유용한 실험 데이터를 제공했다. 그들도 입구 산소 농도를 변화시키고 3 지점의 세라믹 벽에서 온도를 측정했다. 사용된 조건은 Table 4에 주어지고, 열전대의 위치는 각각 $z/L=0.13, 0.5, 0.83$ 이다. Fig.7, 8은 모델에 의해 예측된 결과와 비교한 것이다. 현 모델에서는 복사열전달을 포함하고 있지 않기 때문에 필터 가열기간이 길어져서 모델에 의해서 계산된 최대값이 일어나는 시간이 조금 지연되는 것으로 사료된다. 또한 10%의 경우는 낮은 온도를 예측하고 3%의 경우에는 약간 높은 온도를 예측하는 것을 볼 수 있다. 이것은 현 모델에서 산소 농도를 축방향으로 일정하게 가정한 것에서 생기는 오차와 정확한 활성화에너지 및 빈도인자의 선택 등과 같은 연소모델 구축의 어려움 때문인 것으로 추정된다. 그러나 정성적인 경향은 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

4.2 재생인자의 영향

앞서 언급한 것처럼 재생의 중요한 인자는 초기 입자상물질의 질량, 채널내의 산소 농도, 입구 가스유량, 입구가스온도의 상승속도 등이다. 이 네 가지 인자의 변화가 재생에 어떤 영향을 미치는가를 보기 위해 각각을 변화시키면서 최고 온도와 재생시간을 살펴본다. 또한 필터의 다공성벽 두께의 영향도 살펴본다. 이때 사용한 필터는 100/EX-47형(9"×12")이고 입구가스 온도 상승 영향을 알아보는 경우를 제외하고, 입구가

Table 4 Regeneration Condition and Filter Size Used by Higuchi et [11]

	Fig.7	Fig.8	Unit
Regeneration Gas Temperature	590	580	°C
Gas Flow Rate	0.6	0.6	m ³ /min
O ₂ Concentration	10.0	3.0	%
Amount of Accumulated Particulate	14.4	14.9	g
Filter Diameter	14.38		cm
Length	15.24		cm
Wall Thickness	0.3048		mm
Cell Density	15		Cells/cm ²

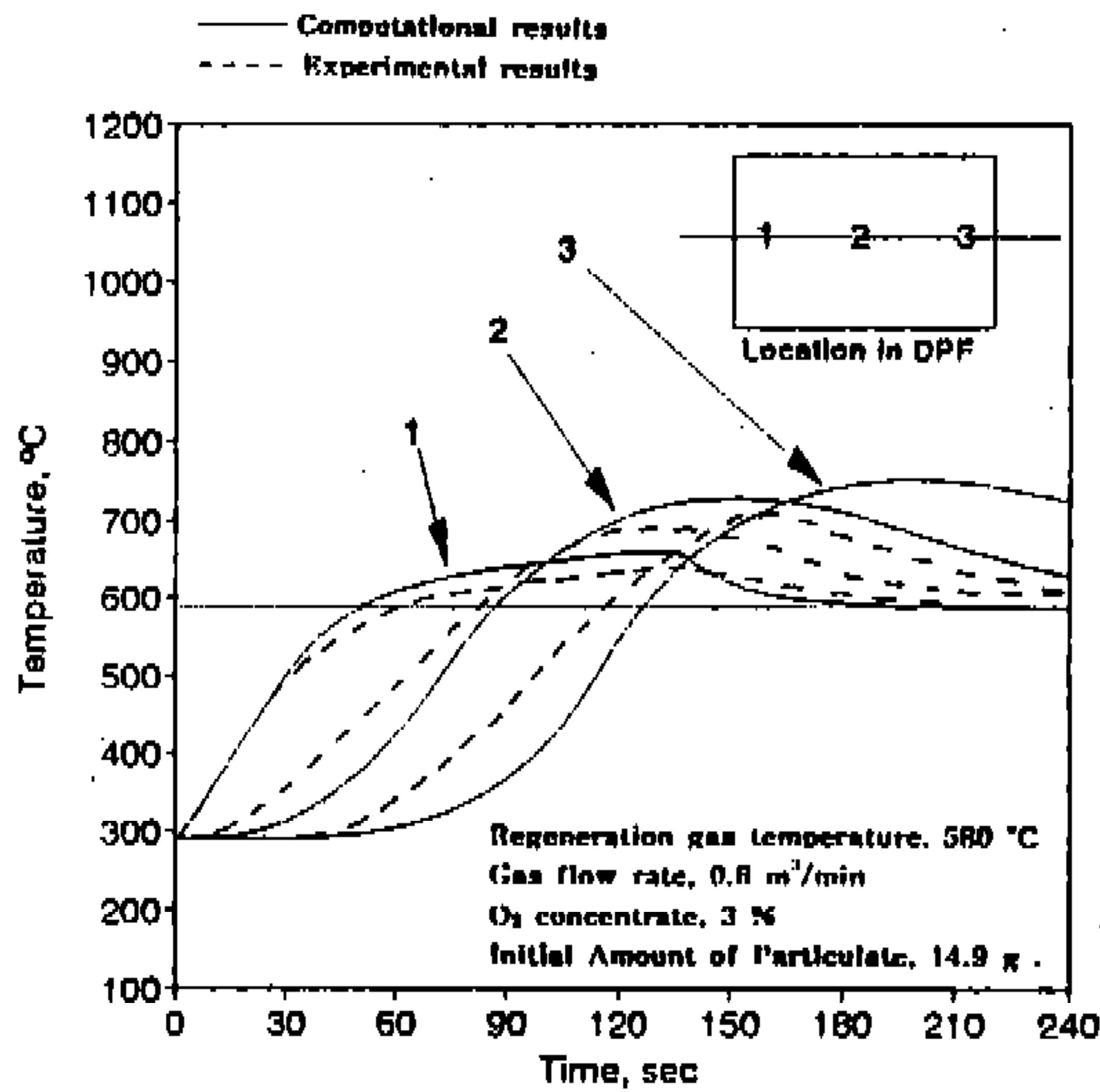


Fig.7 Comparison with experimental results of low oxygen concentration

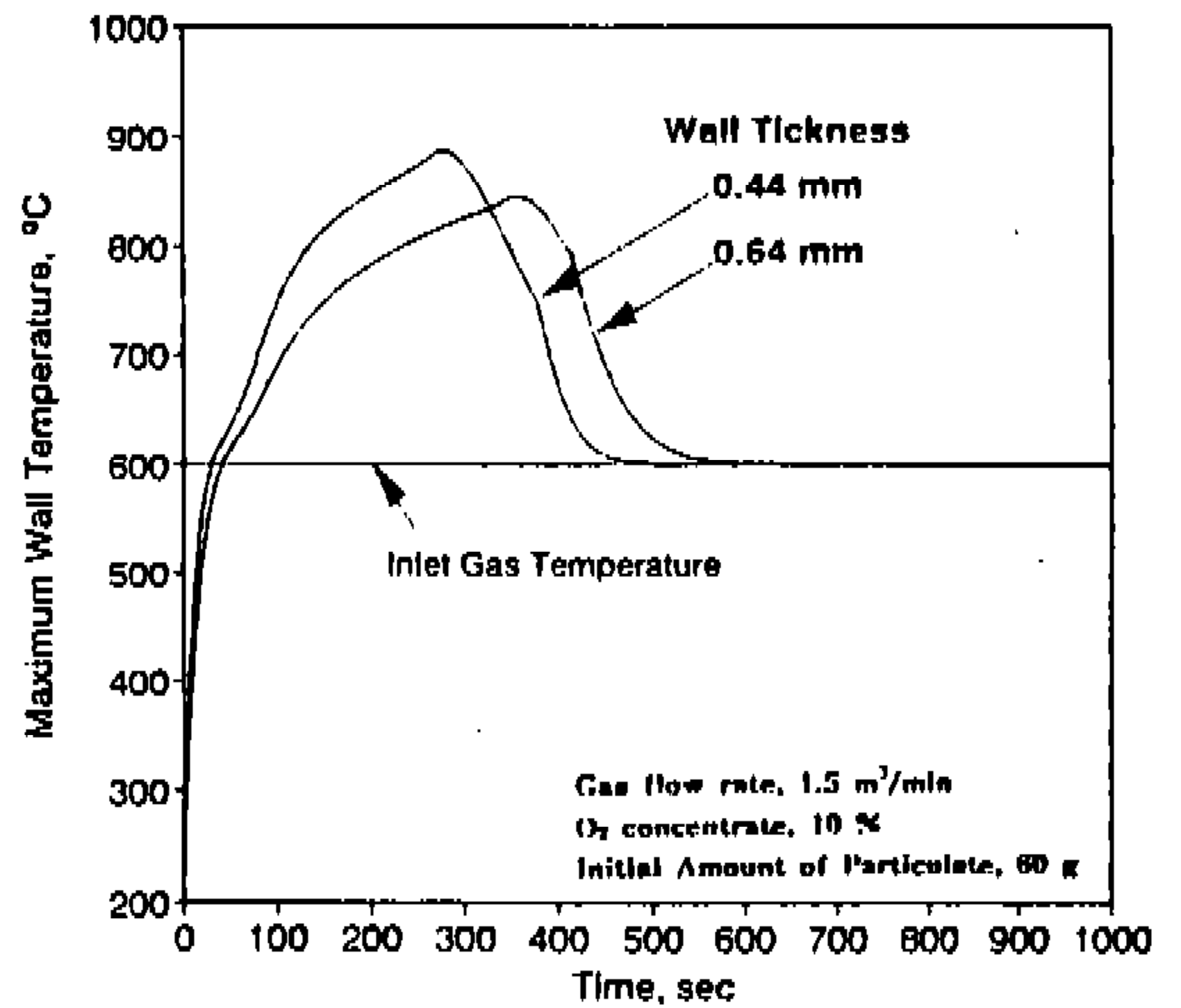


Fig.9 Effects of porous wall thickness on maximum wall temperature

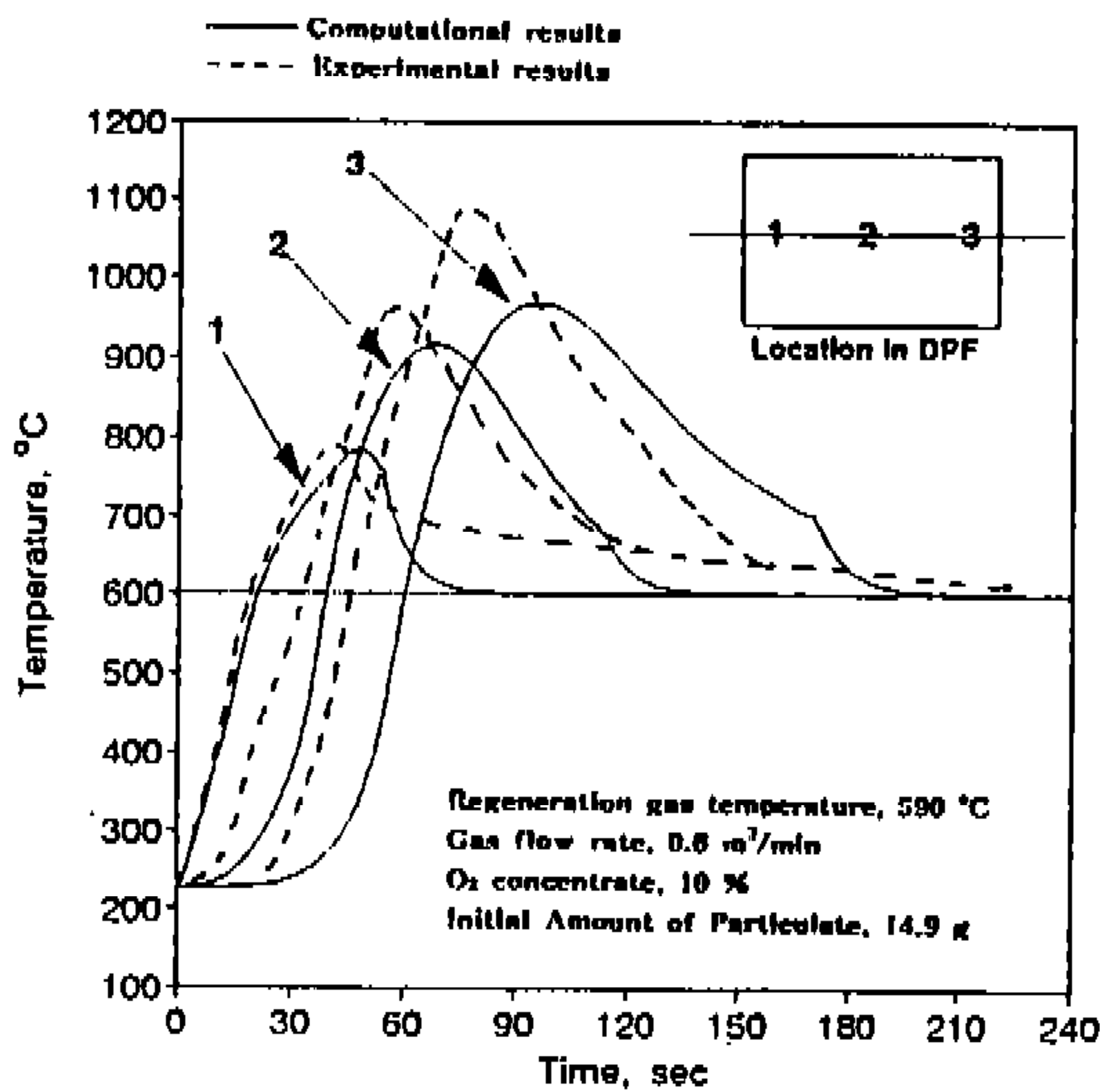


Fig.8 Comparison with experimental results of high oxygen concentration

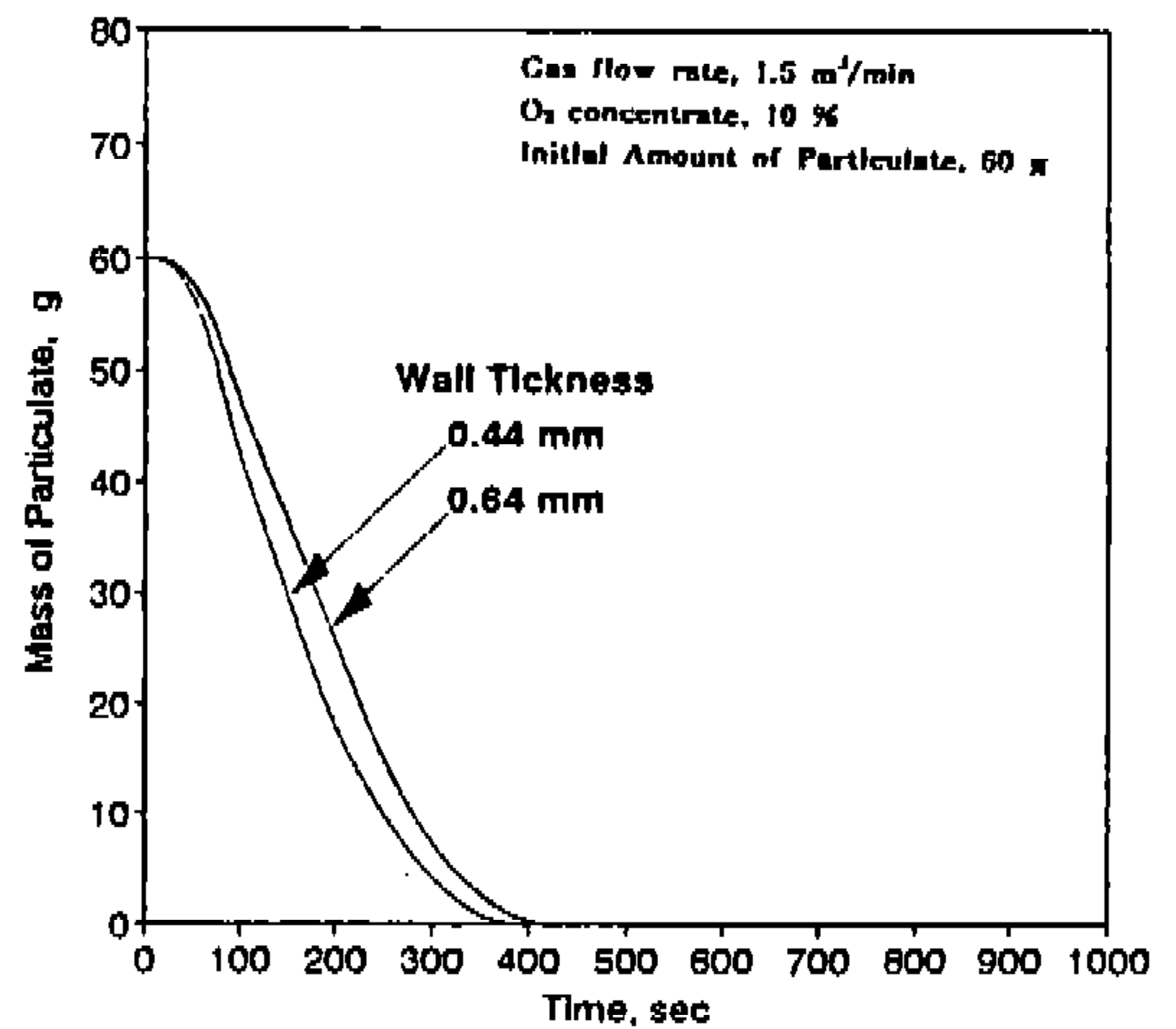


Fig.10 Effects of porous wall thickness on variation of particulate mass

스 온도는 급격히 상승하는 경우이다.

다공성벽 두께의 영향 : 네 가지 재생인자는 기준상태로 고정하고, 벽두께를 0.44mm와 0.64 mm로 변화시켜 최고벽온도(Fig.9)와 재생시간(Fig.10)을 나타낸다. 벽두께가 0.44mm인 경우가 0.64mm인 경우보다 약 30°C정도 높은 결과를 보이고 있다. 재생시간은 높은 온도를 보이는 0.

44mm인 경우가 약간 빠르게 나타났다. 두꺼운 쪽이 열용량이 높기 때문에 최고벽온도가 낮다. 다공성벽 두께는 재생과정에서 그 영향이 작았다.

입구 가스온도 상승속도의 영향 : 히터를 작동한 입구가스 온도의 상승속도가 어떠한 영향을 미치는 가를 알아보기 위해서 재생이 시작되면서

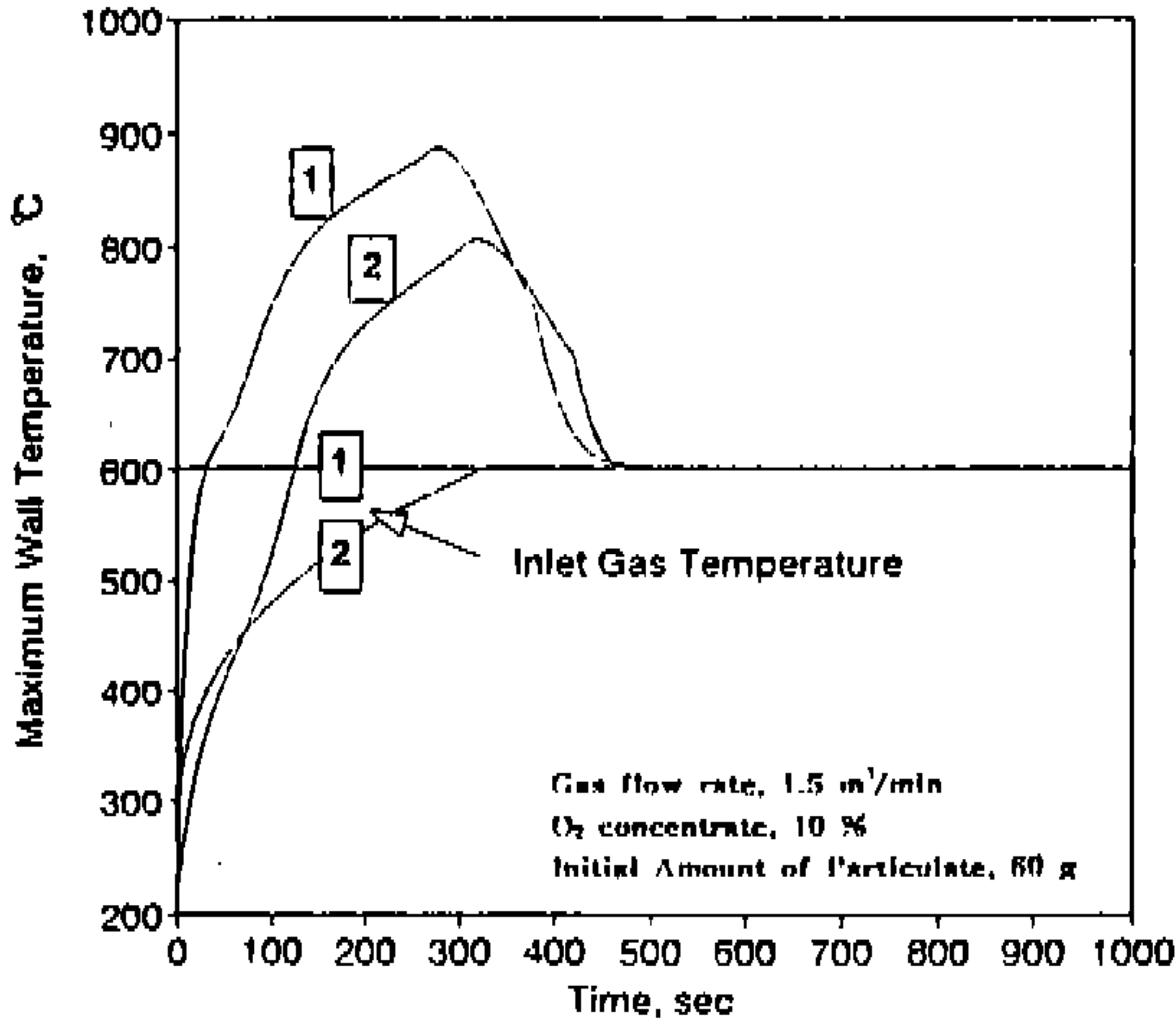


Fig.11 Effects of inlet gas temperature on maximum wall temperature

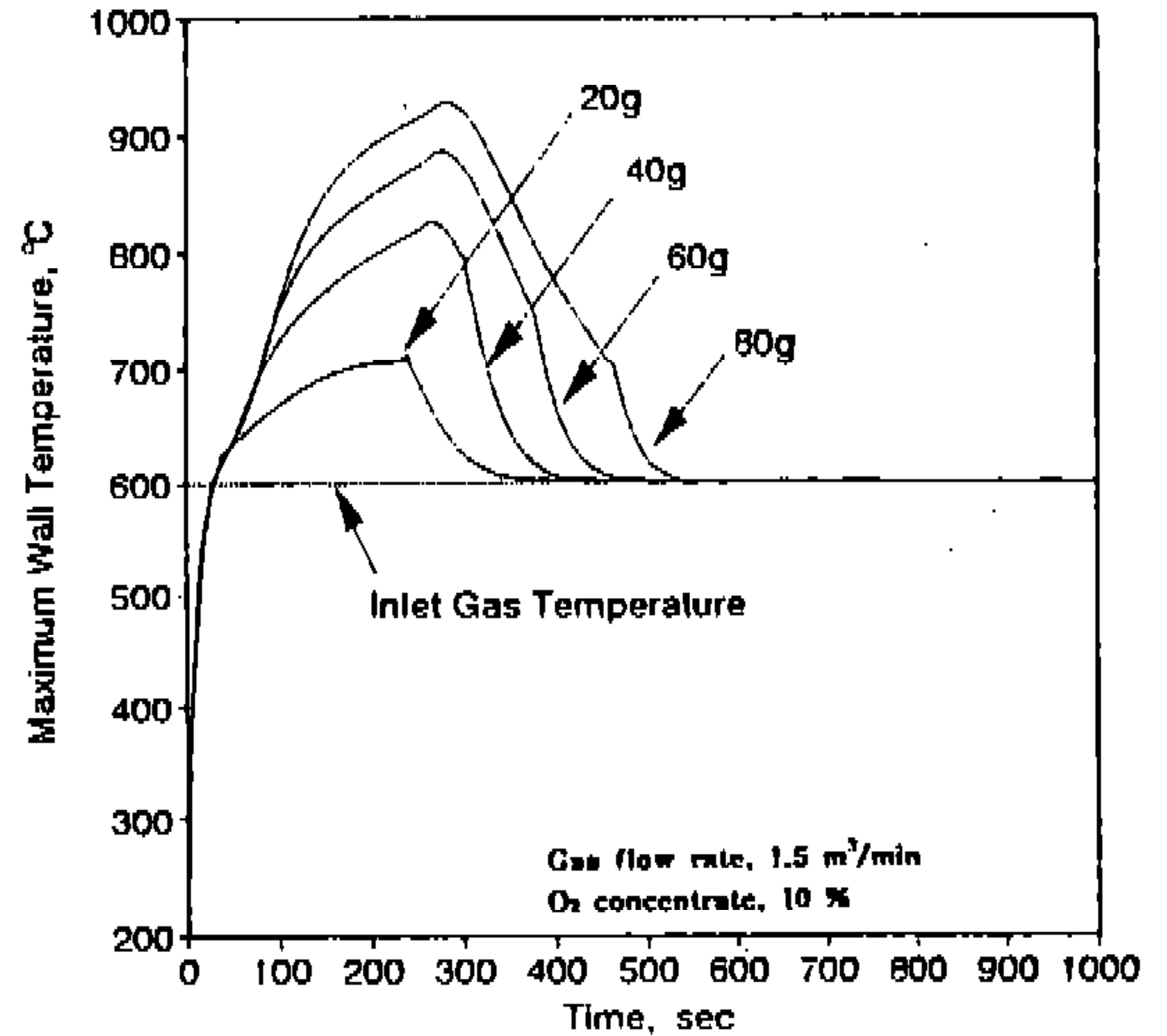


Fig.13 Effects of soot load on maximum wall temperature

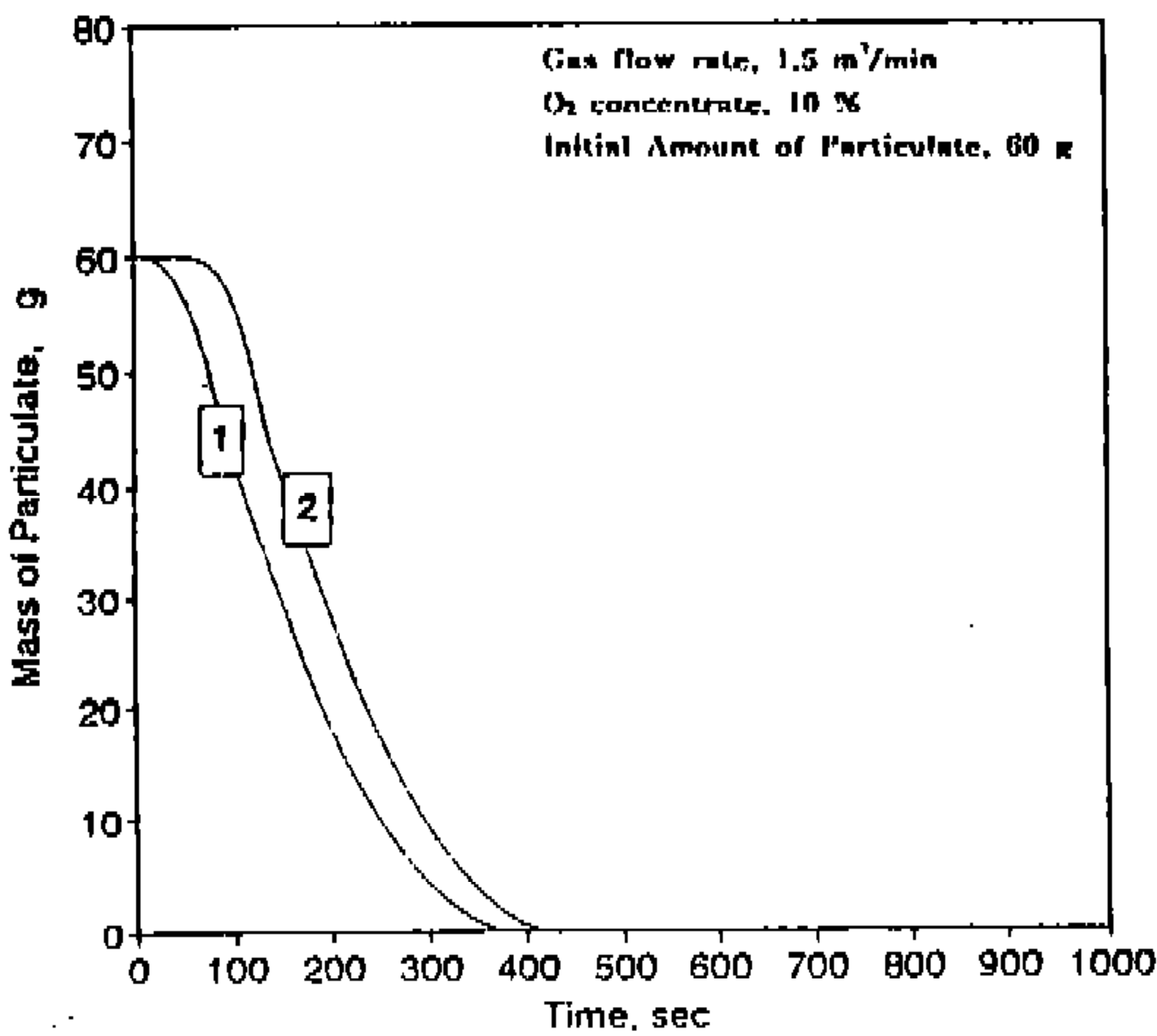


Fig.12 Effects of inlet gas temperature on variation of particulate mass

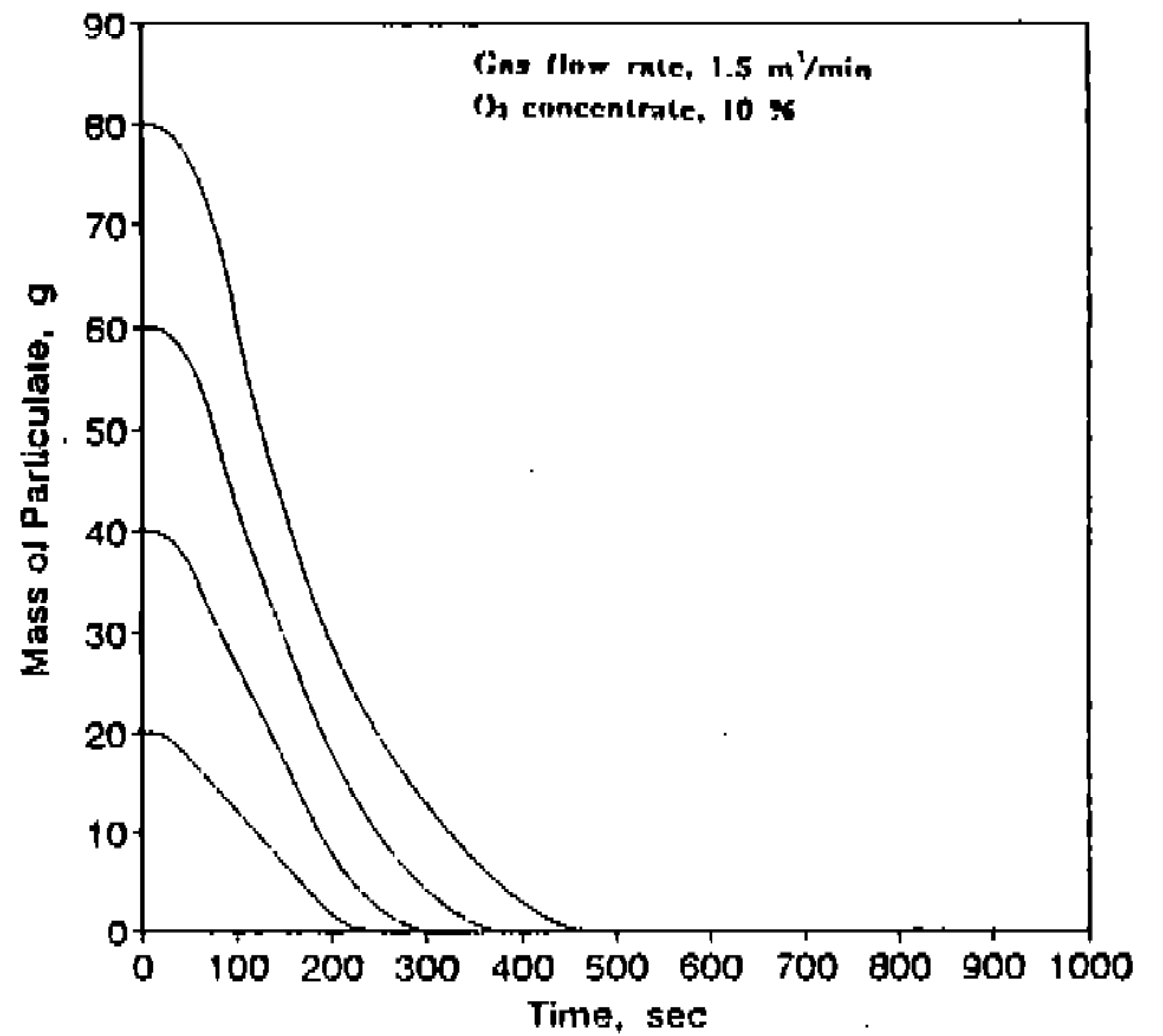


Fig.14 Effects of soot load on variation of particulate mass

바로 600°C까지 올라가는 경우 ①과 서서히 정상온도까지 5분이 걸려서 올라가는 경우 ②에 대한 결과가 Fig.11, 12에 나타난다. 이때 다른 재생인자는 기준상태이다. 벽온도는 급격히 올라가는 경우가 훨씬 높은(100°C 정도) 결과를 보이나 재생시간은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 필터의 가열이 천천히 일어남으로 급격한 온도상승이 줄어드는 것으로 생각된다.

초기 입자상물질의 질량의 영향 : Fig.13, 14는 산소농도와 유량을 10%와 1.5m³/min(S.T.P)으로 고정하고, 초기 입자상물질의 질량을 20~80g으로 변화시켰다. 초기 입자상물질 질량이 증가하면서 더 높은 온도를 보이지만, 재생시간은 그다지 큰 차이를 보이지는 않는다. 그 이유는 산화시켜야할 입자상물질 질량은 많지만 온도가 높아지면서 산화율이 증진되기 때문이다.

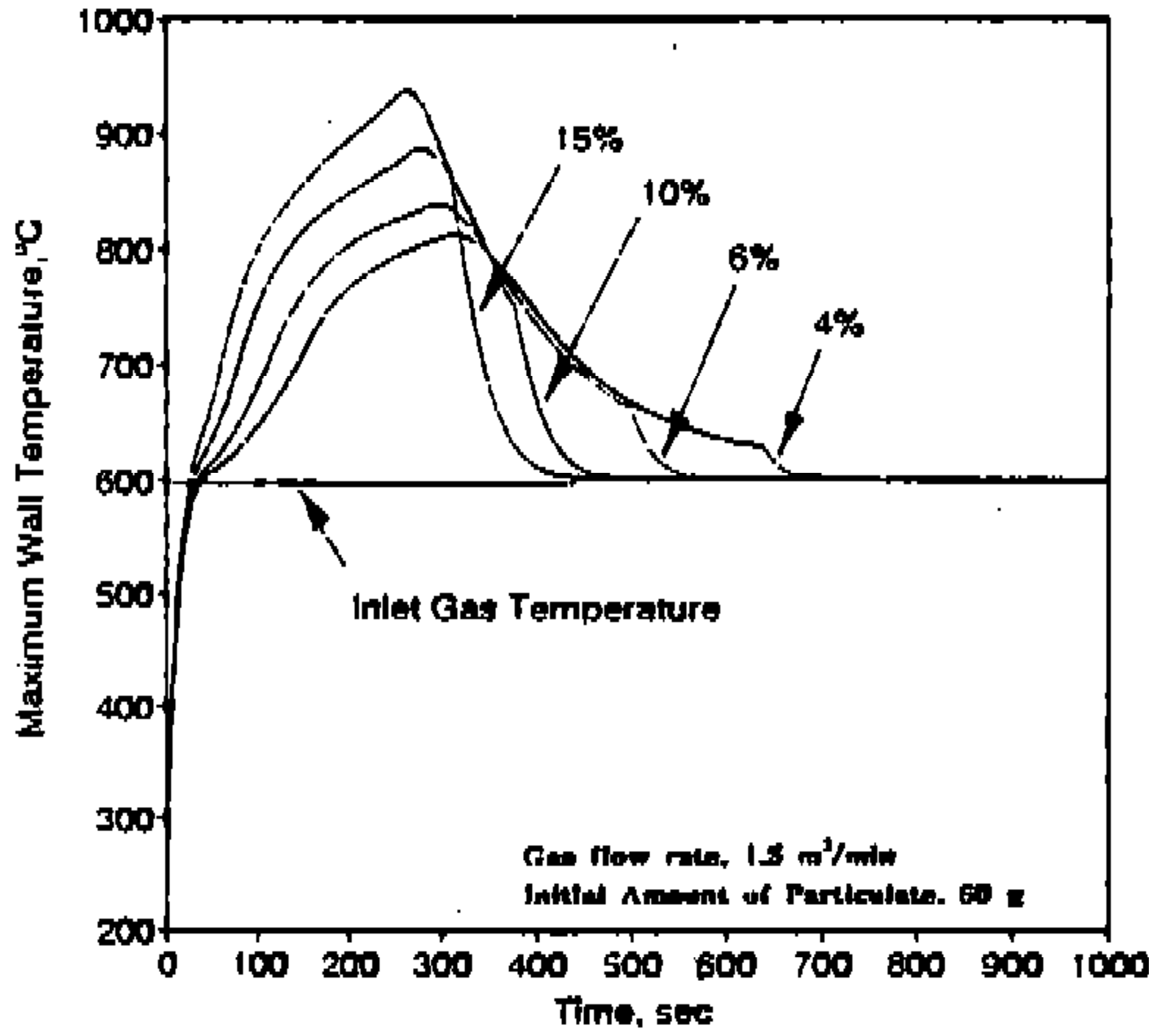


Fig.15 Effects of oxygen concentration on maximum wall temperature

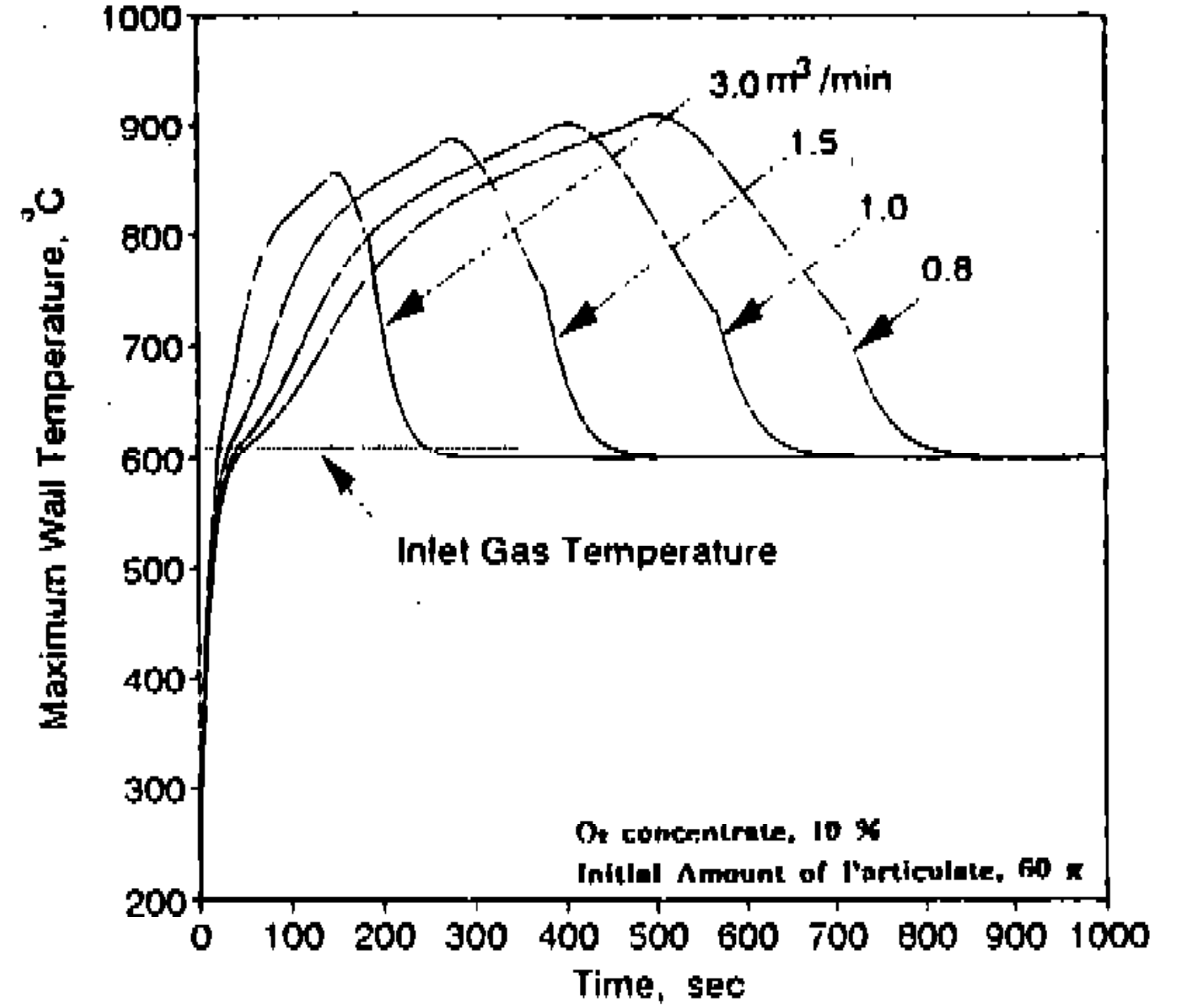


Fig.17 Effects of gas flow rate on maximum wall temperature

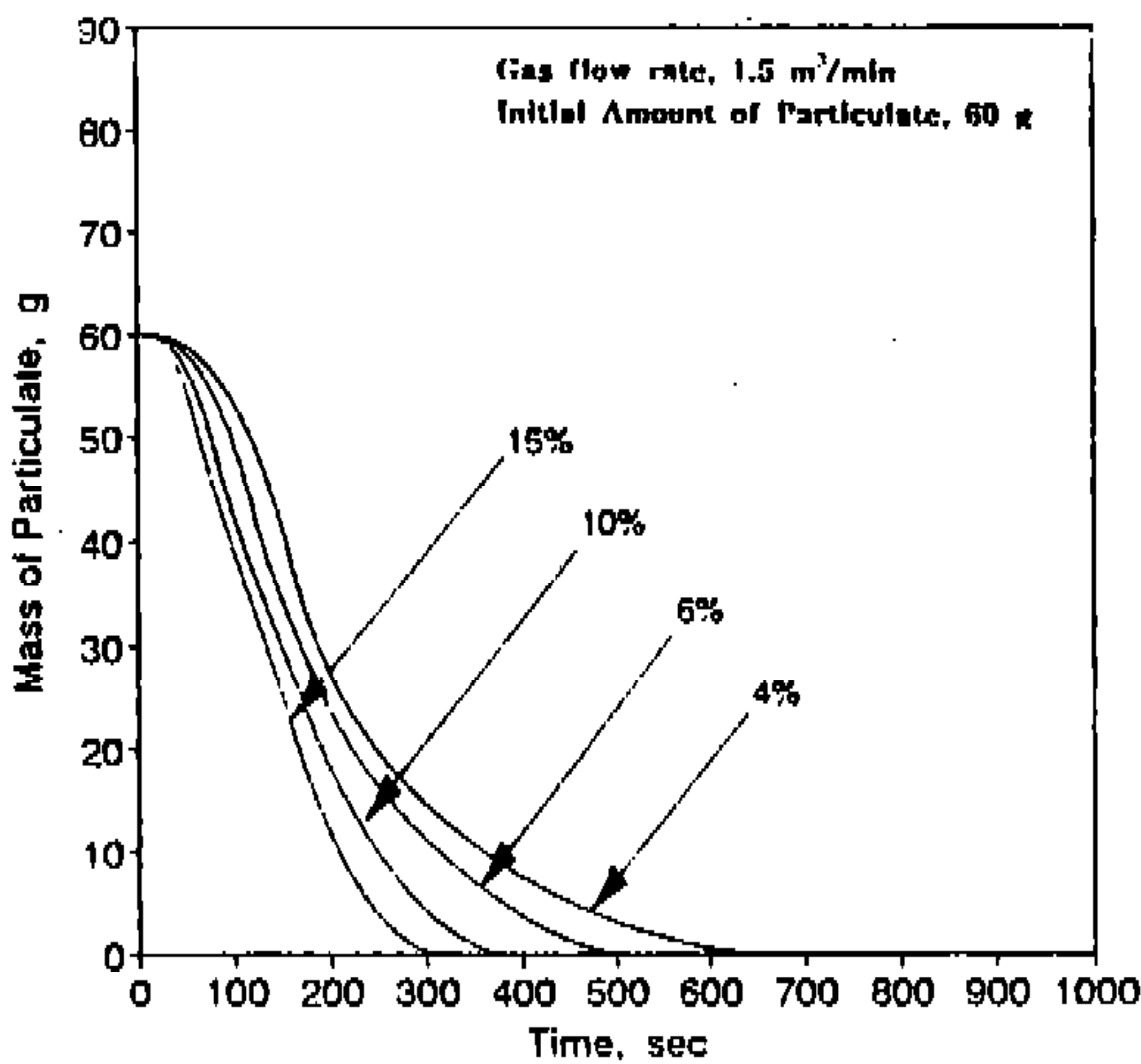


Fig.16 Effects of oxygen concentration on variation of particulate mass

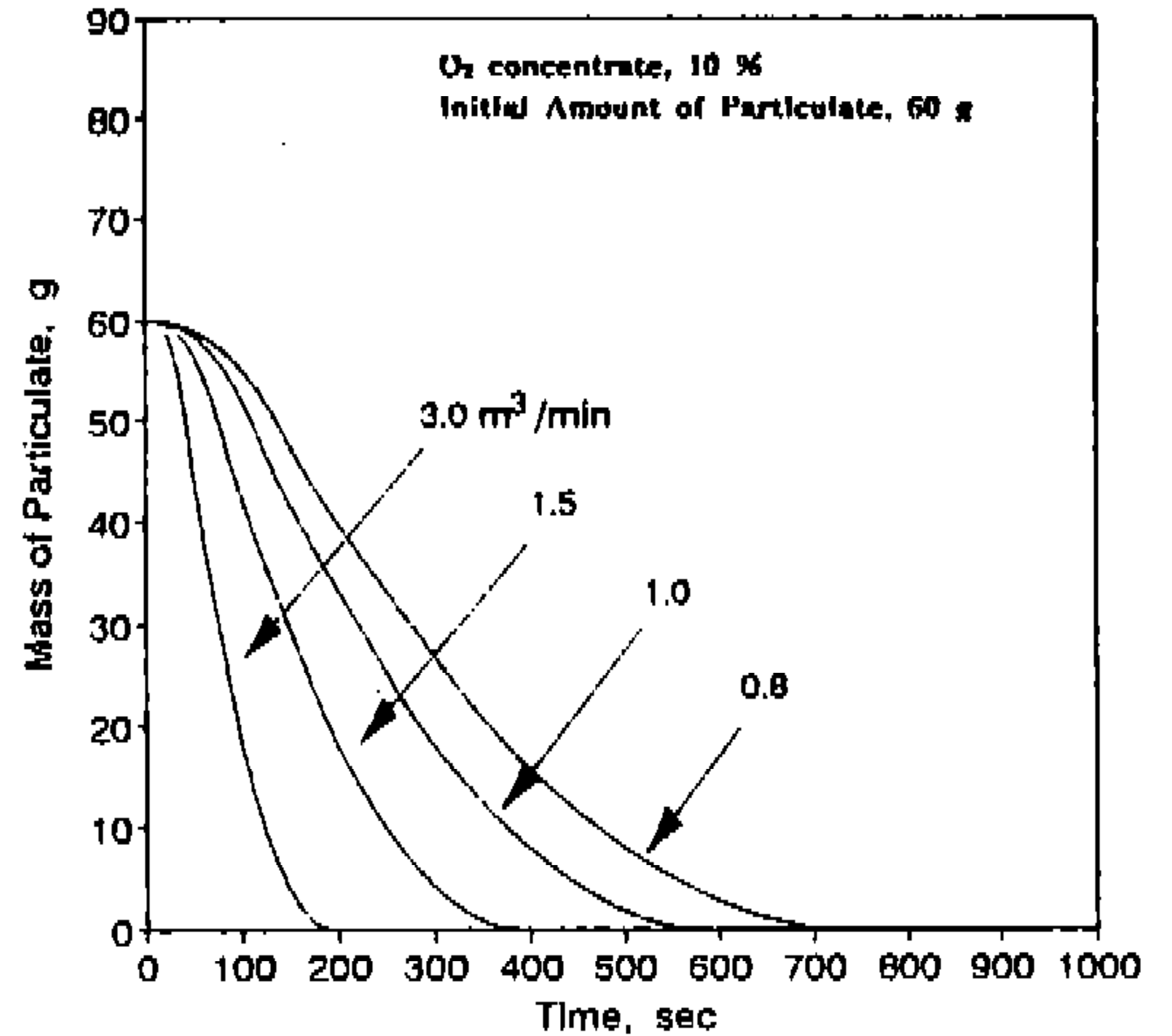


Fig.18 Effects of gas flow rate on variation of particulate mass

산소 농도의 영향 : Fig.15, 16은 초기 입자상 물질 질량과 유량은 각각 60 g 과 1.5m³/min로 고정하고 산소 농도를 변화시켰다. 높은 산소 농도에서 높은 온도를 보이고 재생 시간도 짧은 것을 볼 수 있다. 이것은 산소농도가 높을때 연소율이 증가하기 때문이다. 그러나, 낮은 산소농도(4%)에서도 재생은 일어난다. 본 해석에서는 입구의 산소농도가 재생과정 동안 축방향으로 일정하다. 그러나 실제의 재생과정에서는 산화가

활발히 일어나는 화염면에서 산소의 농도는 급격하게 감소할 것으로 생각된다. 좀 더 정확한 결과를 얻기 위해서는 산소 농도의 산화와 확산에 의한 축방향의 변화를 계산할 수 있는 미분관계식을 세워야 한다.

공기 유량의 영향 : Fig.17, 18은 산소 농도를 10% 초기 입자상물질 질량을 60 g 으로 고정하고, 입구 가스 유량을 3.0m³/min(S.T.P)에서 0.5m³/min(S.T.P)로 변화시켰다. 유량을 감소

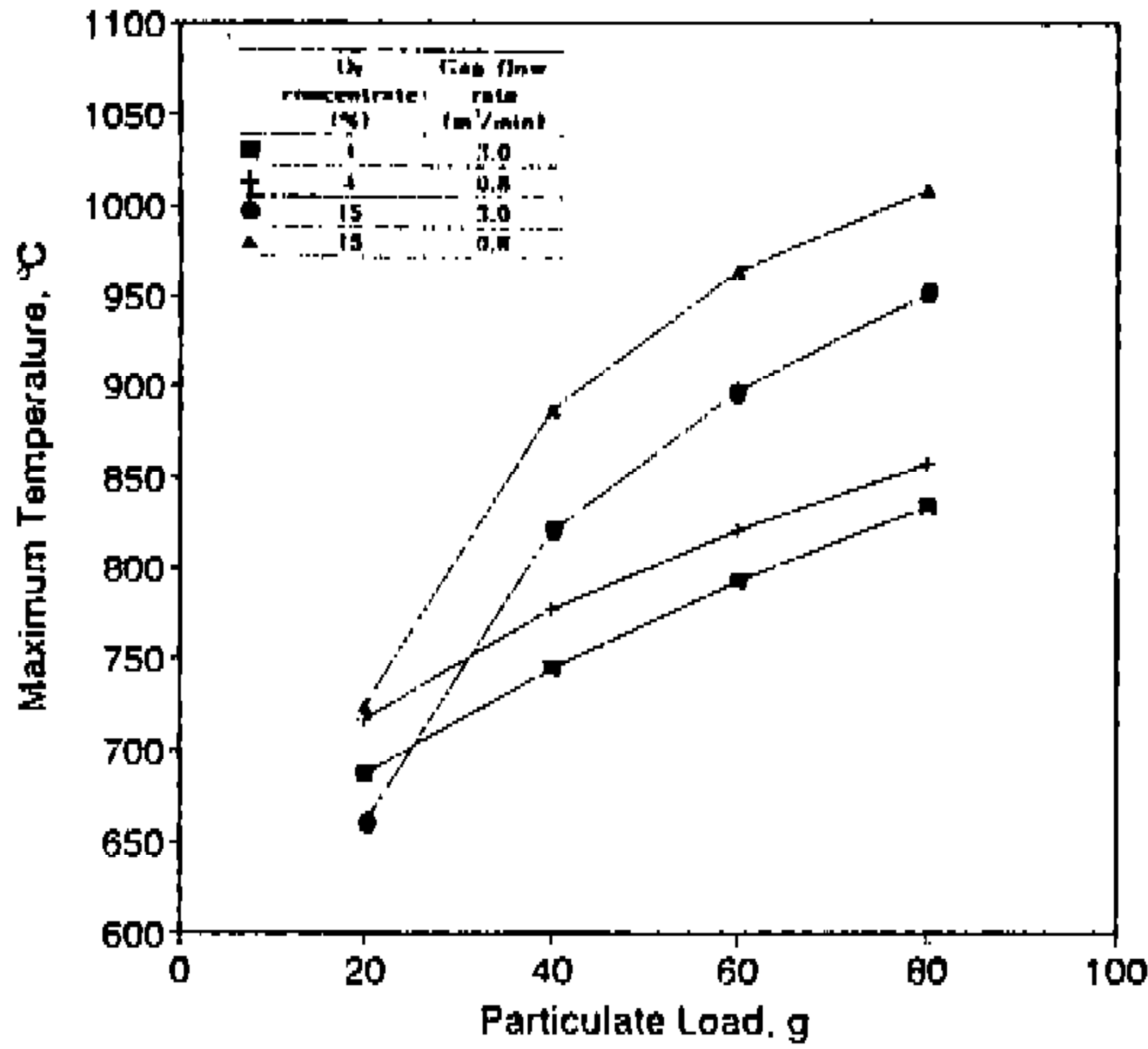


Fig.19 Regeneration condition VS. maximum wall temperature

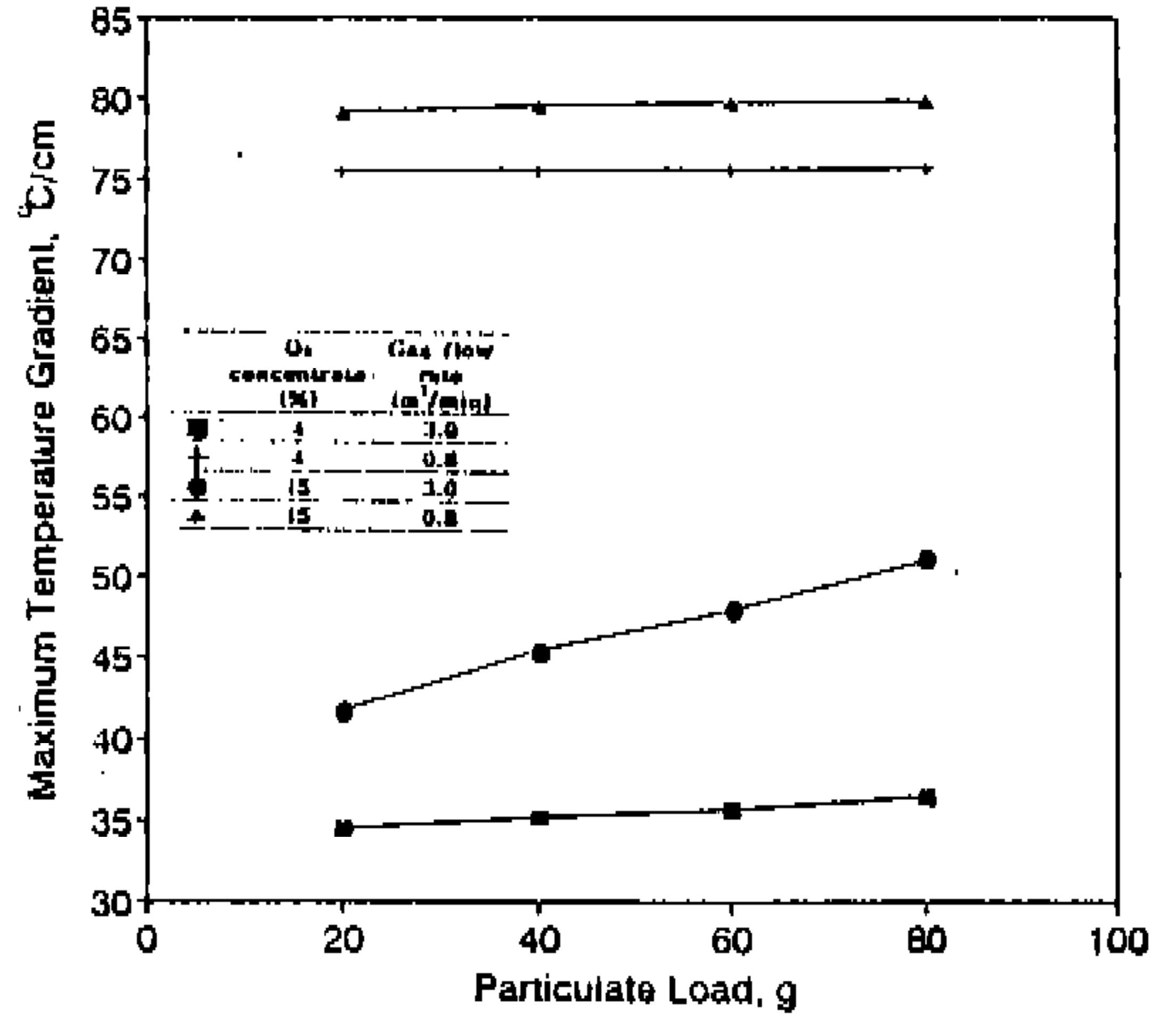


Fig.21 Regeneration condition VS. maximum wall temperature gradient

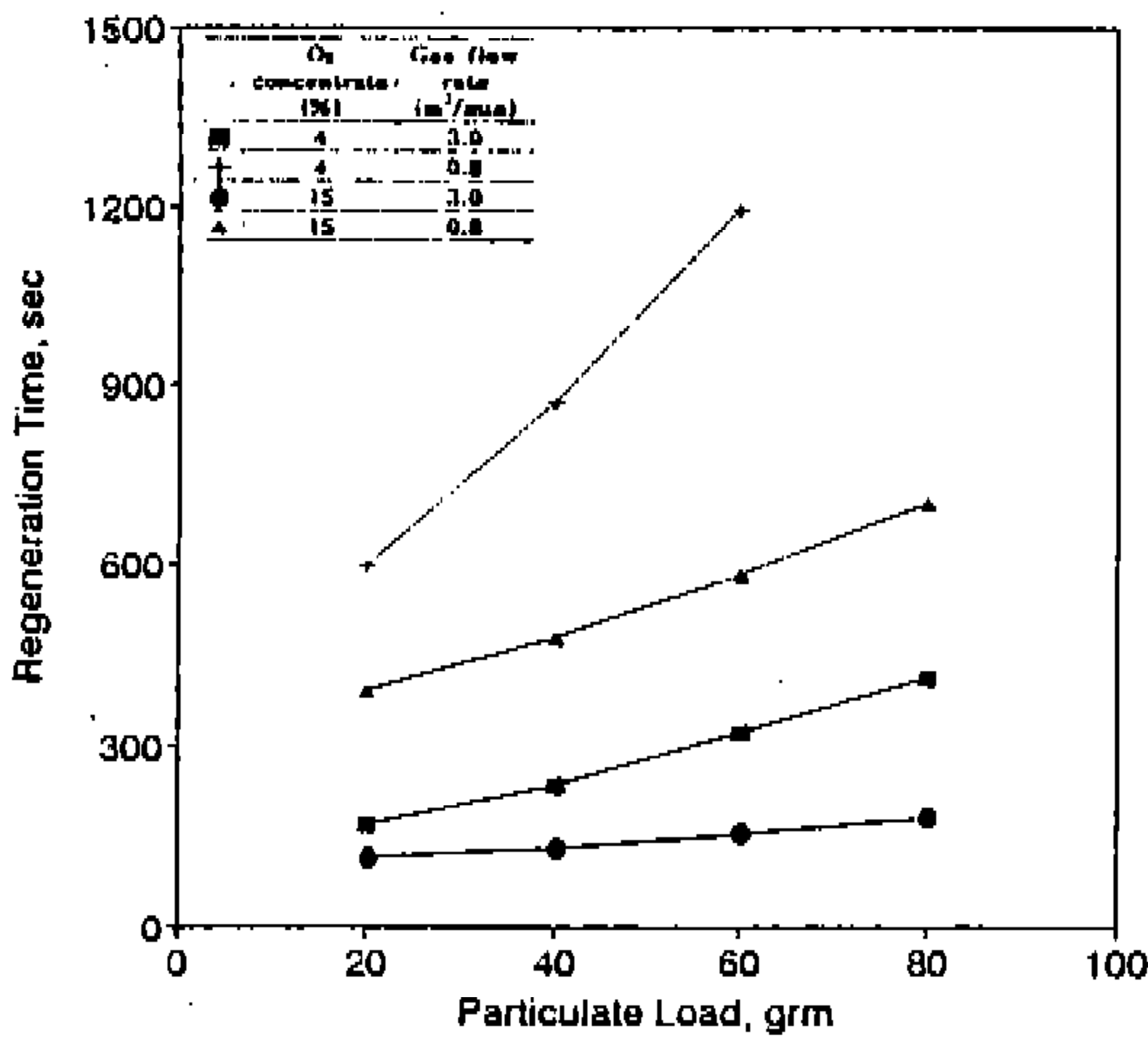


Fig.20 Regeneration condition VS. regeneration time

시키면 최고온도는 약간 상승하지만, 재생 기간은 매우 길어지는 것을 볼 수 있다. 공기유량의 증가에 따라 공기유속이 빨라지면, 연소율이 빨라져 재생시간이 줄어들지만 최고벽온도는 유속의 증가에 따른 열전달의 증가 때문에 오히려 온도는 약간 낮아진다.

Fig. 19, 20, 21은 각각 세가지 재생인자(초기 입자상물질 질량, 산소농도, 공기유량)들이 최고 벽온도, 재생시간, 최고벽온도구배에 미치는 중

합적인 영향을 보여준다. Fig.19를 보면 산소농도가 클 때, 초기 입자상물질 질량이 증가함에 따른 최고온도의 상승이, 산소농도가 작을 때 보다 급격한 것을 볼 수 있다. 유량의 감소에 따른 최고벽온도의 상승도 산소농도가 큰 경우가 크지만 큰 영향은 보이지 않는다. 따라서 높은 산소농도와 큰 초기 입자상물질 축적량에서의 재생은 매우 높고 위험한 트랩의 최고온도에 이르게 한다. 필터의 제조회사에서 권장하는 사용온도는 보통 1000°C 이하이다. 본 시뮬레이션이 약간 낮은 온도를 예측하는 것을 고려하면 산소농도 15% 이상과 초기 입자상물질 축적량 60g 이상은 필터의 크랙을 일으킬 수 있다. Fig.20을 보면 앞서 언급한 것처럼 재생시간에 가장 큰 영향을 미치는 것은 공기유량인 것을 알 수 있다. 산소농도와 공기유량이 클 때에는 초기 입자상물질 질량의 영향은 거의 없으나, 산소농도가 낮을 수록 그리고 공기유량이 적을 수록 초기 입자상물질 질량의 증가에 따른 재생시간의 증가가 큰 것을 볼 수 있다. 산소농도와 공기유량이 클 때에는 초기 입자상물질량이 증가하면서 온도가 상승해 산화율이 증가되어 초기 입자상물질량에 따른 재생시간의 변화가 적지만, 산소농도와 유량이 작을 때는 입자상물질 질량이 증가하면 온도는 상승하더라도 충분한 공기량이 공급되지 않으면,

산화율은 감소되어 재생시간이 길어진다. Fig.21의 y축은 최고 온도구배를 나타내는데, 최고온도와는 달리 초기 입자상물질 질량이 최고온도구배에 미치는 영향은, 산소농도가 크고 유량이 큰 경우에 약간 증가하는 것을 제외하고는, 작은 것으로 나타났다. 산소농도가 증가하면서 온도구배가 커지는 것을 볼 수 있지만 큰 영향은 없는 것으로 나타났다. 최고온도구배는 유량이 감소하면 크게 증가한다. 벽에서의 온도구배는 산소농도가 큰 경우 연소속도의 증가에 의한 열발생량의 증가로 커지며, 유량이 감소하는 경우 입·출구 채널과 다공성 벽사이의 대류열전달량이 감소해서 더욱 크게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 입자상 물질필터에 대한 1차원 재생모델을 이용해 프로그램을 개발하여 여러 재생인자에 대한 영향을 고찰해 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 최고 벽온도는 다공성 벽두께, 초기 입자상 물질, 산소농도에 따라서 크게 변한다. 특히 높은 산소농도에서 초기 입자상물질의 증가는 트랩의 크랙이나 용융을 일으킬 수 있는 매우 높은 온도에 이르게한다. 또한 히터에 의한 입구 가스온도의 상승속도를 완만하게 하면 급격한 온도상승을 막을 수 있다.
- 2) 재생시간에 가장 큰 영향을 미치는 것은 유량이고, 산소농도도 상당한 영향을 미친다. 그러나 다른 인자들은 큰 영향을 미치지 않는다.
- 3) 온도구배는 유량이 감소하면 매우 크게 증가하고, 산소농도가 증가하면 증가하며, 입자상물질 퇴적량에 의한 변화는 거의 없다.

본 연구의 이론적 모델은 아직 재생기간 동안의 입자상물질 연소의 특성과 관련해서 불확실한 점이 있지만, 재생을 제어하기 위한 인자들을 이해하는데 매우 도움이 될 것이며, 신뢰성 있고 유효한 시스템 설계의 도구가 될 것이다. 최고온

도는 필터의 크랙이나 용융등 열적인 부하에, 그리고 재생시간은 히터 가열에 필요한 에너지와 관련된다. 그러나 이 두가지는 서로 상반되는 경향을 갖는다. 즉, 최고온도를 낮추기 위해서는 재생시간이 길어지고, 재생시간을 줄이기 위해서는 최고온도를 올려야 하는 경향이 있다. 안정성과 경제성의 두마리 토끼를 모두 잡아야한다.

후 기

본 연구는 만도기계의 위탁연구로 수행하였으며, 특히 정인승 박사의 조언과 도움에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Edward J. Bissett, "Mathematical Model of The Thermal Regeneration of A Wall-Flow Monolith Diesel Particulate Filter" "Chemical Engineering Science Vol.39, Nos.7/8, pp.1233~1244(1984)
2. Kiyoshi Kobashi and Hiroshi Sami, "Numerical Simulation Model for the Regeneration Process of a Wall-Flow Monolith Diesel Particulate Filter" "SAE Paper 930364
3. K. N. Pattas and Z. C. Samaras, "Computational Simulation of the Ceramic Trap Transient Operation" "SAE Paper 890403
4. C. P. Garner and J. C. Dent, "A Thermal Regeneration Model for Monolith and Fibrous Diesel Particulate Traps", SAE Paper 88007
5. R. K. Shah and A. L. London, Laminar Flow Forced Convection in Ducts: a Sourcebook for Compact heat Exchanger Analytical Data, pp. 196~205, Academic Press, New York 1978.
6. R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, Transport Phenomena, pp. 23, 257, Wiley, New York 1960.
7. M. A. Field, D. W. Gill, B. B. Morgan and

- P. G. W., Combustion of Pulverized Coal, pp. 329~345, BCURA Leatherhead, Cheroy and Sons, Ltd., Banbury 1967.
8. I. Barin, O. Knacke and Kubaschewski, Thermochemical Properties of Inorganic Substances, Supplement, p. 392, Springer-Verlag, Berlin 1977.
9. Y. S. Touloukian and E. H. Buyco, Specific Heat, Nonmetallic Solids, pp. 9~14, IFI/Plenum, New York 1970.
10. William H. Press and Saul A. Teukolsky, Numerical Recipes, Cambridge Univ. 2nd Edition
11. Noboru Higuchi and Shigeru Mochida, "Optimized Regeneration Conditions of Ceramic Honeycomb Diesel Particulate Filters", SAE Paper 830078