〈논 문〉

디젤엔진 관련 Soot 부착 및 재유입에 대한 화염에서의 연구

김성근* · 박종인* · 황정호**

(1996년 2월 1일 접수)

A Flame Study of Soot Deposition and Reentrainment in Application to Control of Diesel Soot Emission

Sung-Keun Kim, Jong-In Park and Jung-Ho Hwang

Key Words: Soot(매연입자), Particle Deposition(입자 부착), Particle Reentrainment(입자 재유입), Thermophoresis(열영동), Brownian Diffusion(브라운 확산)

Abstract

A study of soot deposition and reentrainment was carried out both theoretically and experimentally to understand behavior of soot formed by incomplete combustion in a diesel engine. Theoretically, soot deposition on engine cylinder wall and/or piston head was studied with a stagnation point flow approximation. Soot reentrainment occured upon exhaust gas blowdown was also studied by assuming a log-normal shear velocity distribution. Experimentally, a LPG/O_2/N_2 flame impinging on a disk, produced by a concentric tubular burner, was chosen as deposition configuration and a shear flow unit with compressed air was installed for the study of reentrainment. For selected flame configuration, soot deposition measurements were conducted and showed that the dominant deposition mechanism was thermophoresis. Distributions of gas temperature and soot number density were estimated by combining data obtained by a B-type thermocouple with a thermophoretic transport theory. Disk temperature distributions were directly measured using a K-type thermocouple. Soot size and morphology were estimated from a TEM photograph. Ratios of soot deposit to reentrained amount were measured for a wide range of shear flow velocities, which showed that the reentrainment model was resonable.

1. 서 론

디젤 엔진은 높은 효율을 가지고 있음에도 불구하고 가솔린 엔진보다 그 사용에 제약을 받는데 가장 큰 이유는 디젤엔진에서 배출되는 매연입자(Diesel soot) 때문이다. 일반적인 soot은 탄소 원자를 12-22개 정도 가지고 있고 H/C 비가 2 정도 되는 연료 분자들로부터 산화와 열분해를 통해 생성된다. 이런 생성물은 soot의 precursor라 불리우는 불포화 탄화수소, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAH)를 포함하며 이러한 기체상태의 물질들이 응축과정을 겪으면서 핵이라고 불리우는 최초의 soot 입자가 나타나게 된다. 연료 분자로부터 soot 입자가 생기는 이 과정동안에 실린더내 soot의 수밀도는 증가한다. 일단 생성된 입자들은 표면

*회원, 연세대학교 대학원 기계공학과
**회원, 연세대학교 기계공학과

성장을 하게 되는데 이 과정동안에 수밀도는 변하지 않지만 부피비는 증가한다. 표면성장이 끝나면 soot은 응집(coagulation) 등의 과정을 거치면서 크기가 증가하며 수밀도는 감소한다. 그리고 soot은 산화되어 CO나 CO_2가 되는데, 엔진 밖으로 배출되는 soot은 산화과정이 끝나고 남은 것이다. 배출된 soot은 배기가스들이 냉각되고 공기에 의해 희석되면서 배기가스에서 soot 입자 표면으로의 흡착(adsorption)과정과 기체상 탄화수소와의 응축과정 등의 질량부착과정을 겪는다.

디젤기관에서 soot은 엔진의 폭발행정에서 생성되므로 soot이 생성되는 동안에 연소실의 온도는 매우 높고 실린더 벽은 상대적으로 온도가 낮아서 열경계층이 형성된다. Lucht 등[1]이 측정한 결과를 보면 실린더 벽의 온도는 399-406K이고 열경계층의 두께는 연소가 일어난 직후 약 2~3 mm 정도가 된다. 이처럼 연소실 안에 온도구배가 있고, 입자가 존재하게 되면 입자가 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하는 열영동(thermophoresis)이 발생하며 엔진내 soot 부착의 주 메커니즘이 된다.[2,3] 실린더벽과 피스톤헤드에 부착된 soot의 일부는 배기과정 초기에 생기는 유동(blowdown)시 강한 전단유동에 의해 다시 실린더 안에서 떠다니게 되는데 이를 재유입(reentrainment)이라 한다. Blowdown은 피스톤이 하사점(BTDC)에 도달하기 전에 배기 밸브가 열릴 때 실린더 내부의 압력이 배기 포트의 압력보다 훨씬 높기 때문에 피스톤은 아래로 움직임에도 불구하고 실린더내의 기체들이 배기 밸브를 통해 외부로 나가는 유동을 의미한다.

Fig. 1에는 연소실내에서 soot의 생성, 부착, 재유입 과정을 크랭크 각을 기준으로 도시하였다. 일단 연료가 분사되어(−15 CAD) 연소가 시작되면(약 −2 CAD) soot이 생성되고 약 80 CAD까지 생성된 대부분의 soot은 벽에 부착된다.[4] 이 soot은 배기과정 초기 배기밸브가 열리면서 생긴 blowdown에 의해 재유입되고 그 이후의 배기과정에서는 피스톤이 벽을 긁으면서 soot이 재유입된다. Fig. 2는 엔진 운전 시간에 대한 soot 부착량을 보여주는데 soot 부착량이 처음에 급격히 증가하다가 시간이 지난 후 정상 상태 값으로 접근함을 알 수 있다. 운전 초기에는 실린더 벽에 부착된 soot의 양이 적기 때문에 벽과 가스 사이의 온도구배가 크게 되고 따라서 열영동에 의한 부착이 blowdown 시 재유입의 영향보다 크다. 그러므로 일단 층류 내층에 들어온 soot은 모두 벽에 부착된다는 가정이 성립하며 이때의 soot 부착률은 열영동 모델에서 계산된 결과와 잘 일치했다.[6] 시간이 지나면서 soot 부착과 재유입의 반복과정을 겪게 되며 점차적으로 실린더 벽에 부착되는 soot의 양이 증가하게 된다. 이와 같이 soot 층을 이루게 되면 이 층이 절연체의 역할을 하여 실린더벽의 온도를 높이게 되므로 온도구배를 감소시켜서 열영동에 의한 부착량은 점차로 줄어들게 된다. 이때 상대적으로 재유입되는 양은 점차 증가하게 되어 결국 벽에 부착되는 soot의 양과 벽으로부터 재유입되는 양이 같게 되어 더 이상 soot 부착량이 증가하지 않고 정상상태의 값에 도달함을 알 수 있다. Fig. 2에서 t^*는 재유입의 영향이 시작되는 임계부착시간을 의미한다. 재유입을 고려하지 않은 엔진 실린더 표면에서의 soot 부착에 대한 기존의 연구는 최근에 Kittelson 등,[2] Suhre와 Foster[3]에 의해 진행되어 왔으며 두 연구 모두 열영동이 주 soot 부착 메커니즘이라고 규명하였다. 그들은 간단한 이론 모델을 설정하여 계산결과와 실험결과를 비교하였으며 상당한 일치를 보였다.

soot이 엔진 내벽에 부착되는 과정에 대한 기존의 연구는 재유입의 영향을 고려하지 않았기에 부착초기에는 실험과 이론이 잘 일치하나 시간이 흐름에 따라 차이가 난다. 결국 대기로 배출되는 soot은 재유입 입자들이기 때문에 soot 배출을 줄이기 위해서는 재유입 현상은 자세히 고찰되어야 한다. 엔진내 연소가스의 높은 온도(1000-2800K)와 압력(50-100 기압), 복잡한 연료 조성, 난류 혼합, 3차원 기하학적 형상 등으로 인한 복잡함으로 인하여 지금까지 soot에 대한 연구는 주로 버너화염 등에서 진행되어 왔다.[5,6] soot 부착에 대한 재유입의 영향을 고려한 화염 연구로 Makel와 Kennedy[7]는 가스터빈엔진 또는 액체추진기관과 관련하여 연구를 수행하였다. 그들은 연소실에서 생성된 soot을 함유한 연소가스가 실린더형상의 물체에 부착하고 다시 재유입되는 메커니즘을 이론적 실험적으로 규명한 바 있다. 그들은 연소가스 유동을 실린더 외부로 흐르는 층류정체점 유동으로 가정하였다. 본 연구에서는 먼저 Kittelson 등[2]이 언급한대로 엔진 내벽을 원판으로 간주하여 유동장을 원판에 수직한 층류정체점 유동으로 가정하였으며 soot의 열영동과 브라운 확산을 고려한 부착 모델을 소개한다. 그리고 이 부착모델에 Makel과

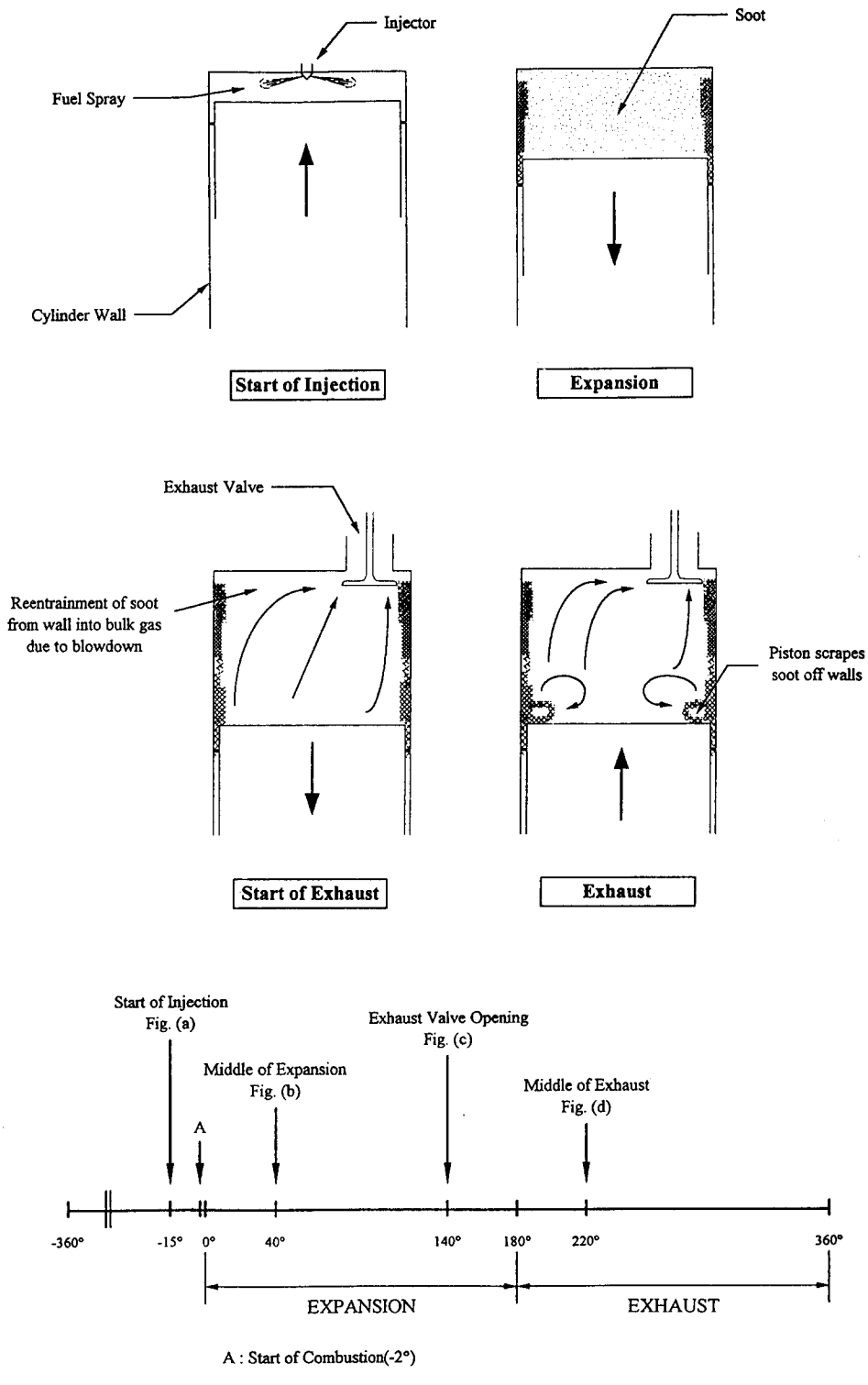

Fig. 1 Soot deposition and reentrainment in a diesel engine with respect to stroke and crank angle

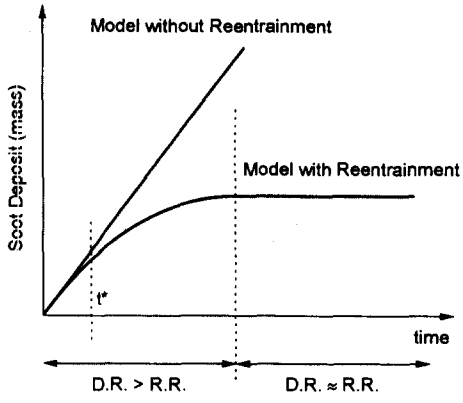

Fig. 2 Soot deposit on engine wall with respect to engine operation time
(D. R. : deposition rate, R. R. : reentrainment rate)

Kennedy,[7] Barengoltz,[8] Taheri과 Bragg[9], Matsusaka와 Masuda[10]에 의해 설정된 재유입 모델을 첨가하여 새로운 모델을 확립하고 모델의 타당성을 이론 및 실험을 통하여 확인해 보기로 한다.

2. 모델설정

본 연구는 엔진내에서 충분히 성장한 일정 크기의 soot이 엔진 벽면으로 부착 및 재유입에 초점을 맞추고 있으므로 soot의 생성, 성장, 산화에 따른 크기 변화는 고려되지 않았다. 먼저 재유입과정을 고려하지 않고 soot 부착에 대해서 논하면 다음과 같다. 벽면으로의 soot 이동은 주로 대류에 의해 이루어지며 벽면 근처 열경계층내에 들어선 soot은 열영동과정을 거치고 다시 농도경계층내에서 브라운확산이 추가된다. soot의 벽면으로의 최종부착은 이 브라운확산에 의해 이루어지며 한번 부착된 soot은 떨어지지 않는다고 가정하였다. soot 부착에서의 이론적인 세부사항은 김성근 등[11]을 참고하기 바라며 축대칭 정체점 유동조건에서 반경 R_w의 원판으로의 soot 부착질량 M의 시간 t에 대한 변화율은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{dM}{dt}=N_\infty m_p v_d \pi R_w^2 \tag{1}$$

여기서 v_d는 열영동과 확산에 의한 입자부착속도이며 N_∞는 경계층 밖 자유유동조건에서의 soot 수밀도를 의미한다. m_p는 soot의 질량이며 soot 형상이 구형이라고 가정할 때 $\pi\rho_p d_p^3/6$(ρ_p는 soot의 고유밀도, d_p는 soot의 직경)가 된다. 따라서 주어진 v_d에서 dM/dt는 일정하게 되어 시간이 증가함에 따라 원판에 부착되는 질량 M은 Fig. 2에서와 같이 선형적으로 증가하게 된다. 그러나 서론에서도 언급했듯이 엔진벽면에서 soot의 순수 부착량의 시간에 대한 변화를 예측하기 위해서는 재유입이 고려된 모델을 설정해야만 한다. 재유입을 설명하기 위해서는 soot의 벽면에서의 부착력(adhesion force)을 이해해야 하는데 부착력이란 입자와 입자, 또는 입자와 벽표면 사이의 결합력의 세기를 일컫는다. 입자의 부착력은 주로 Vander Wall's 힘, 정전기력, 표면장력 등으로 이루어져 있으며[12] 표면에 부착된 고체 입자는 유동에 의해 생기는 힘이 부착력보다 클 때 표면으로부터 떨어져 나가게 되는데 이를 재유입이라고 한다. 입자의 부착력 F와 입자의 직경과의 관계는 다음과 같이 표현된다.[8]

$$F=kd_p^2 \tag{2}$$

k는 비례상수이며 Makel와 Kennedy[7]에 의하면 F는 경험적으로 로그-정규 분포되어 있다. 부착된 입자의 총 질량이 M_o라 할 때 분포함수 $n(F)$는 다음과 같이 표시된다.

$$n(F)=\frac{M_o}{\sqrt{2\pi}\,ln\sigma_g F}\exp\left[-\frac{(lnF-ln\bar{F})^2}{2ln^2\sigma_g}\right] \tag{3}$$

$$M_o=\int_0^\infty n(F)\,dF \tag{4}$$

이때 σ_g는 기하학적 표준편차이고 $\bar{F}$는 평균부착력으로 부착된 입자의 50%가 떨어져 나가는데(또는 남아 있는데) 필요한 힘으로 정의된다. 즉

$$\frac{M_o}{2}=\int_0^{\bar{F}} n(F)\,dF \tag{5}$$

이와같이 분포함수가 결정되면 입자부착층에 가해진 임의의 힘 F^*가 부착력 F보다 작아서 부착상태를 계속 유지하는 입자량 M의 $F^*=0$인 경우의 입자량 M_o에 대한 비는 다음의 확률로 표시된다.

$$P(F^*<F)=1-\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\frac{(lnF^*-ln\bar{F})}{ln\sigma_g}}\exp\left(-\frac{f^2}{2}\right)df \tag{6}$$

따라서 일단 부착된 입자들 중에서 표면으로 부터 떨어져 나가는 질량은 $M_o(1-P)$가 됨을 알 수 있다. 유동장이 존재하는 경우에 입자에 작용하는

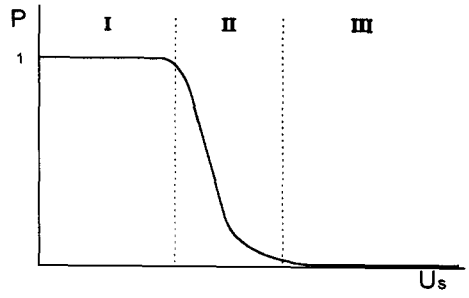

Fig. 3 Fraction of soot deposit with respect to shear flow velocity

외력은 유동에 의해 생기는 전단력이 대부분이며 부착된 입자가 받는 평균전단력 F^*는 전단유동속도 U_s의 α승에 비례한다.[10] 따라서 입자부착층에 가해진 임의의 유동속도 U_s^*에 대하여 M의 M_o에 대한 비 역시 식 (7)과 같이 표시된다.[9]

$$P(U_s^* < U_s) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{(\ln U_s^* - \ln \bar{U}_s)}{\sigma}} \exp\left(-\frac{f^2}{2}\right) df \qquad (7)$$

이때 σ는 $\frac{1}{\alpha} ln\sigma_g$이며 $\bar{U}_s$는 부착된 입자의 50%가 떨어져 나가는데 필요한 유동속도로 정의된다. 그러므로 M_o는 유동속도가 0일 때의 입자 부착량이며 임의의 유동속도 U_s에 대해 부착을 유지하려는 soot의 질량 M의 M_o에 대한 비 P는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 즉 유동속도 U_s가 증가할 때 임계치를 넘으면 재유입 현상이 시작되고 결국은 초기 부착된 양이 모두 재유입된다. Fig. 3에서 세 개의 영역 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ이 표시되었는데 영역 Ⅰ은 재유입의 영향이 무시될 수 있는 전단유동조건이고 영역 Ⅲ은 부착량과 재유입되는 양이 같게 되는 조건이며 영역 Ⅱ는 중간조건을 의미한다. 이 세 영역에 대하여 시간에 대한 부착량의 변화를 도시하면 Fig. 2가 얻어진다.

3. 모델인자 결정

앞 절에서 선정된 모델을 이용하여 부착률을 계산하기 위해서는 원판으로의 유동속도, 유동온도, 원판표면온도, 유동장내 soot 수밀도를 알아야 한다. 유동온도와 soot 수밀도를 알기 위하여 본 연구에서는 Eisner와 Rosner[13,14]에 언급된 열전대법을 사용하였다. 유동속도와 원판표면온도에 대해서는 뒤의 실험부분에서 언급하기로 한다. 연소가스 내의 soot이 열전대 비드로 부착할 때 열영동이 지배 메커니즘인 경우 비드의 직경과 가스와 열전대 비드 사이의 온도차에 대한 정량적인 관계식을 찾을 수 있다면 soot 거동에 대한 정보를 알 수 있다. 먼저 원하는 위치에 열전대를 집어넣고 비드가 가리키는 온도를 측정하는데 soot이 비드에 점차 부착되므로 비드직경과 비드온도가 시간에 따라 변하게 된다. 비드직경의 변화는 각 시간마다 연소개스내에서 열전대를 꺼내서 정밀계측기기를 사용하여 측정할 수 있지만 비드의 표면 방사율(emissivity) ε_b을 안다면 비드와 연소가스 사이의 에너지 평형식을 이용하여 비드직경을 이론적으로 구할 수 있다. Eisner와 Rosner[13,14]에 의하면 이 두 방법이 잘 일치하는데 본 연구결과 이를 다시 확인하였다.[15] 이때 후자의 방법을 사용하면 주기적으로 연소가스 온도를 구할 수 있다는 장점이 있으므로 이를 간략히 소개한다.

만일 비드와 연결된 선을 통한 전도 열전달, 비드에 부착된 매연입자의 산화에 의한 열발생을 무시하면, 주위가스의 전도 및 대류에 의한 비드로의 열전달은 비드의 복사에 의한 열손실과 같다는 에너지 평형식을 얻게 된다. 여기서 열전대 비드를 구로 가정하고 주위기체의 온도가 비드온도보다 매우 작다면 다음 식을 얻는다.

$$K \frac{T_\infty}{d_b(t)} \frac{Nu}{1+x} \left[1 - \left(\frac{T_b(t)}{T_\infty}\right)^{1+\kappa}\right] = \varepsilon_b \sigma_B T_b^4(t) \qquad (8)$$

이때 K는 열전도계수, T_∞는 개스온도, $d_b(t)$와 $T_b(t)$는 각각 비드의 직경과 온도, σ_B는 스테판-볼츠만 상수, x는 개스온도에 대한 열전도율의 비로 정의되며 0.84이다. Nusselt 수 Nu는 $A+Bd_b^{1/2}$로 표시되며 $A=2$, $B=0.552Pr^{1/3}(U_\infty/\nu)^{1/2}$, ν는 연소가스의 동점성 계수, Pr은 Prandtl수, U_∞는 가스의 유동속도이다. 식 (8)에서 비드표면 방사율 ε_b가 T_b^{n-4}에 비례한다고 가정하고(n은 정수), $\Delta \equiv T_b/T_\infty$라고 하면 T_b와 d_b의 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$d_b = A\tau \left\{\left[1 + \left(\frac{B\tau^{1/2}}{2A^{1/2}}\right)^2\right]^{1/2} + \frac{B\tau^{1/2}}{2A^{1/2}}\right\}^2 \qquad (9)$$

$$\tau(\Delta) \equiv \left(\frac{KT_\infty}{\varepsilon_b(T_\infty)\sigma_B T_\infty^4}\right) \Delta^{-n} \left[\frac{1}{1+x}(1-\Delta^{1+\kappa})\right] \qquad (10)$$

식 (9)와 (10)으로부터 측정된 비드온도에 대하여 비드직경이 구해질뿐 아니라 연소가스 온도 T_∞

가 산출된다. 또한 주어진 연소가스 온도에 대하여 열전대 비드에서의 soot의 질량보존식을 이용하면 soot의 수밀도가 계산된다.[15] soot의 크기가 일정하다면 수밀도는 다음과 같다.

$$N_\infty = \frac{6 f_v}{\pi d_p^3} \tag{11}$$

soot의 체적분율 f_v는 다음과 같이 결정되는데

$$m = 2(\rho_p/\rho_d)\nu K_T f_v \tag{12}$$

여기서 ρ_d는 비드표면의 soot 부착밀도, K_T는 열영동계수를 의미한다. m은 X, Y의 관계식의 기울기이며 ($Y=mX$), νK_T가 입자의 크기나 입자의 전도계수에 영향을 받지 않고, ρ_d가 크게 변화하지 않는다는 가정을 이용하면 X, Y는 다음과 같이 표현된다.

$$X = \frac{1}{(1+\chi)}\int_0^t \left[1-\left(\frac{T_b(t)}{T_\infty}\right)^{1+\kappa}\right]dt \tag{13}$$

$$\begin{aligned} Y &= \int_{d_b(0)}^{d_b(t)} \frac{d_b dd_b}{(A+Bd_b^{1/2})} \\ &= \frac{2}{3B}(d_b^{3/2} - d_{b,0}^{3/2}) - \frac{A}{B^2}(d_b - d_{b,0}) \\ &\quad + \frac{2A^2}{B^3}(d_b^{1/2} - d_{b,0}^{1/2}) \\ &\quad - \frac{2A^3}{B^4} ln\left(\frac{A+Bd_b^{1/2}}{A+Bd_{b,0}^{1/2}}\right) \end{aligned} \tag{14}$$

이때 $d_{b,0}$는 $d_b(0)$를 의미한다.

4. 실험장치

실험장치의 전체적인 개략도는 Fig. 4와 같다. 화염을 만들기 위해 외경 25.4mm 스테인리스강 버너를 사용하였는데 버너는 네 개의 동심원관으로 구성되어 있다. 버너 중앙 원관에서 연료 LPG가 공급되고 그 주위로 N_2, O_2, N_2가 각각 공급된다. 두번째 원관의 N_2는 화염을 버너출구에서 약간 떨어진 곳에서 생성시켜 고온의 화염으로부터 버너로의 열전달 효과를 줄이고 생성된 soot이 버너 표면을 오염시키는 것을 방지하기 위함이며, 마지막 원관의 N_2는 주위 공기중의 산소와의 반응으로 인해 야기될지 모르는 화염의 불안정성을 줄이기 위한 목적으로 사용된다. 각종 조건에 맞는 화염을 만들기 위해서는 연료와 산소의 양을 조절해 주어야 하는데 이를 위해 로터미터 유량계를 사용하였으며 각각의 유량계들은 비누방울법을 사용하여 보정하여 주었다. 실험 중에 발생하는 soot과 배기가스가 실험실로 유입되는 것을 막기 위해 버너 주위를 아크릴 박스로 차단하고 후드를 통하여 배기시켰다. 또한 후드의 배기로 인해 박스내부의 유동이 불안정해지고 화염이 흔들리는 것을 방지하기 위해 배기 후드 쪽으로의 박스출구에는 철망을 설치하여 박스내부의 유동을 균일하게 만들어주었다.

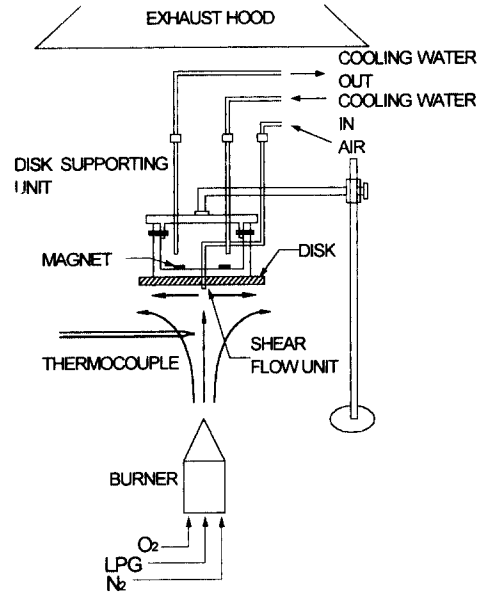

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

soot 부착타겟으로는 버너출구로부터 높이 56 mm 위치에 직경 110mm의 스테인리스강 재질의 원판을 설치하였으며 soot의 원판으로의 열영동 효과를 높이기 위해 원판이 상온의 냉각수에 접하도록 설치하였다. 원판은 부착된 soot의 무게를 측정하기 위해 착탈가능한 기능을 가져야 하는데 이를 위해 냉각장치안에 자석을 넣어주어 원판을 고정시켜 주었으며 부착시험이 완료되면 쉽게 분리되어 다음 실험으로의 전환이 용이하게 하였다. 원판에 부착된 soot의 양은 0.01mg까지 측정할 수 있는 정밀저울을 이용하여 측정하였다.

재유입 모델에 관한 실험을 위해서는 부가적인 전단응력이 필요한데 이를 위해 전단유동 장치를 만들어 주었다. 공기 압축기를 통해 압축된 공기는 압력조절기와 유량계를 거쳐 8개의 구멍(직경 1 mm)으로 이루어진 출구를 통해 나온다. 이때 간단한 연속식을 통하여 전단 유동의 속도를 구할 수 있고, 이를 이용하여 부가되는 전단 유동을 구할

수 있다. 버너 형상과 전단유동장치에 대한 자세한 사항은 김성근[15]을 참조하기 바란다.

연소가스 온도를 측정하기 위해서 와이어의 직경이 0.5mm이고 비드의 직경이 1.05mm인 B형 열전대를 사용하였고, 비교적 저온의 원판표면의 온도를 측정하기 위해서 K형 열전대를 사용하였다. B형 열전대의 기전력의 변화는 0-50℃에서 3μV 이하로 매우 작아 기준점의 온도가 상온으로 유지된다면 0℃ 기준점을 가정하지 않더라도 약 1100℃ 이상의 고온에서는 0.3℃정도의 오차 밖에 발생하지 않으므로 얼음을 이용한 별도의 저온기준점을 생략하여 사용하였다.[16] K형 열전대의 경우도 별도의 저온기준점 없이 상용 열전대 계기를 이용하여 온도를 측정하였다. 열전대 비드의 직경을 측정하는 방법은 광학 현미경을 사용하거나 사진 촬영을 통한 방법이 있는데 본 실험에서는 30배율의 광학 현미경을 이용하였다.

5. 결과 및 토의

본 연구를 진행시키기 위한 선행조건 중 하나는 타겟원판으로의 균일한 입자부착을 이루는 화염조건을 얻는 것이다. 이는 실험적으로 균일한 입자부착이 이루어졌을 때에만 앞 절에서 서술한 1 차원 부착이론의 적용이 가능하고 따라서 실험결과와 계산결과의 비교가 가능하기 때문이다. 여러 시행착오를 거친 뒤에 안정된 화염이 얻어졌으며 예비실험 결과 이 화염에서 균일한 입자부착이 가능하였다. 이때의 화염은 연료유량 0.467lpm, 산소유량 0.569lpm, 질소 유량 1.585lpm(당량비 4.34)로 운전되었고 시행착오를 통해 두번째 버너튜브로의 질소유량이 네번째 버너튜브로의 질소유량에 비하여 매우 적을 때에 안정된 화염이 얻어졌으므로 사용된 질소유량 1.585lpm은 모두 네번째 버너튜브로 공급되었다. 따라서 버너에서 분사되는 연료, 산소, 질소의 속도는 각각 247.8, 10.7, 20.1cm/s 이다.[15] Fig. 5는 이 화염조건에서 부착된 soot 입자의 형태와 크기 및 부착밀도를 보여주는 TEM 사진이며 (배율 10^5) 기존의 연구결과[5,6]에서 언급된 바와 같이 soot이 구형의 주입자(primary particle)로 연결된 체인 형태를 이루고 있는 것을 볼 수 있다. 주입자의 크기는 약 20-50nm 로서 Flagan과 Seinfeld[17]에 언급된 크기와 일치한다.

이와같이 원하는 화염조건이 형성되었으므로 부착실험이 수행되어야 하며 부착이론을 적용하기에 앞서 화염온도, 타겟원판의 온도와 입자 수 밀도 등에 대한 정보가 필요함은 이미 논한 바 있다. Fig. 6은 여러 축방향 (버너출구로부터 높이 H= 17.2, 27.2, 32.2, 37.2, 42.2mm) 위치에서의 반경방향 온도분포를 보여준다. 이 결과는 송산종 등[18]의 온도측정 결과와 그 경향이 매우 유사함을 볼 수 있다. Fig. 6의 연소가스 온도 측정을 위해

Fig. 5 Transmission electron microscope (TEM) photograph of soot deposit

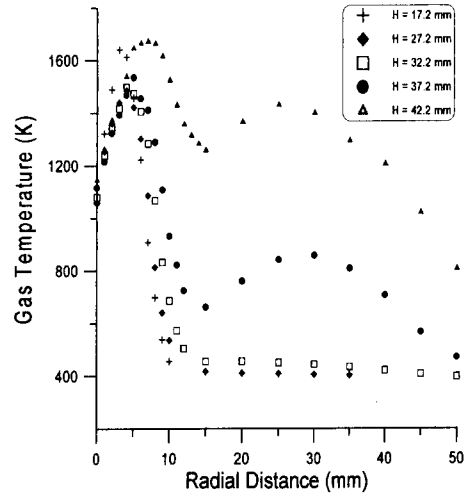

Fig. 6 Temperature distribution in a flame

서는 soot이 화염내에 거의 존재하지 않는 버너중심선 근방에서는 열전대 비드의 방사율을 0.16으로 놓았으며, soot이 많은 부분에서는 0.9로 가정하였다.[11,13,14] Fig. 6에서 보는 바와 같이 버너 중심선 부근에서는 가스 온도가 약 1000~1100K 정도였다가 점차 반경방향으로 증가하여 반경방향 약 3~8 mm 위치에서 대략 1400~1700K 까지 도달함을 알 수 있다. 이 최고온도를 가리키는 위치는 LPG와 산소가 만나는 경계부근으로 추측되며 이 반경방향 위치가 버너 출구로부터의 높이가 증가함에 따라 점차 커지는 것으로 미루어 보아 화염이 점차 반경방향으로 팽창하는 under-ventilated 확산 화염임이 잘 설명된다. 참고로 송상종 등,[18] Santoro 등,[19] Flower[20]의 연구에서는 버너로 주입되는 연료의 속도가 그 주위로 주입되는 공기의 속도보다 작아서 화염이 over-ventilated 형이었지만 본 연구에서는 이와 반대로 버너로 주입되는 연료의 속도가 산소의 속도보다 매우 컸다. 버너출구로부터 높이가 37.2mm보다 낮은 곳에서는 반경방향의 거리가 더 증가할수록 온도가 최고점에 도달한 후, 급격히 감소하여 주위의 대기 온도와 비슷해지지만, 37.2mm보다 높은 곳에서는 온도가 최고점에 도달한 후 천천히 감소하다가 다시 증가 후 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 다음과 같이 설명된다 : 버너출구와 타겟원판과의 거리가 약 56mm 임을 고려할 때 화염이 원판에 충돌된 후 원판 반경방향으로 화염이 흐르게 되는데 이와같은 주변 화염의 영향 때문에 원판에 가까운 H=37.2mm, 42.2mm에서는 반경방향으로의 거리가 증가하더라도 온도가 다시 높아지는 부분이 존재한다.

본 연구에서는 또한 버너출구로부터 52mm 높이(원판으로부터 4mm 아래)에서 버너중심선으로부터 반경방향 위치에서(r=15, 30, 35mm) soot 입자의 수밀도를 계산하였다. 앞에서 설명하였듯이 먼저 식 (13), (14)를 통해 기울기 m을 얻은 후 식 (12)를 이용하여 체적분율 f_v을 구한다. 이때 필요한 조건은 soot 입자 밀도 ρ_p, 열전대에 부착된 soot의 평균부착밀도 ρ_d, 동점성계수 ν, 열영동상수 K_T이다. 본 계산에서는 $\rho_p=2.0 g/cm^3$[2),(13)]을 사용하였고, ν와 K_T는 Table 1에 나타낸 각각의 연소가스 온도에서 구하였고 그 값들은 약 0.2~0.22 cm^2/s, 0.56이다. ρ_d에 대해서는 실험결과 5~6×$10^{-2} g/cm^3$가 얻어졌으며 이는 Eisner와 Rosner[13]에 언급된 1.4×$10^{-2} g/cm^3$와 정성적으로 일치하였다. 본 계산에서는 평균값인 5.75×$10^{-2} g/cm^3$을 사용하였다. 계산된 soot 체적분율은 2~5×10^{-7}으로 Makel과 Kennedy[7]의 측정값 8×10^{-7}과 유사하다. 이와 같이 f_v가 구해지면 식 (11)로부터 화염의 수밀도를 구하기 위해서 입자의 직경을 알아야 하는데, Eisner와 Rosner[13]와 Santoro 등[19]의 연구결과에 의하면 화염에서 충분히 성장한 soot 입자의 직경은 0.05~0.1μm 가 된다. 이 값을 통해 계산된 수밀도는 Table 1에 나타난 바와 같이 약 4×10^8~ 8×10^9#/cm^3이다.

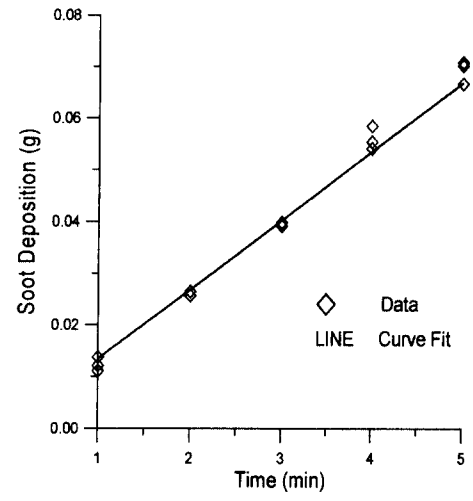

Fig. 7 Soot deposit on a disk with respect to time

Fig. 7은 정밀저울을 이용하여 측정된 soot 부착질량 M의 시간변화를 보여준다. 시간변화율 dM/dt가 거의 일정함으로(약 13.7mg/min) 재유입을 고려하지 않은 본 연구에서의 주 입자부착 메커니즘이 Fig. 2에 설명된 바와 같이 열영동임을 입증한다. 이와같이 측정된 시간변화율은 앞에서 언급된 축대칭 정체점유동 모델계산 결과와 비교될 수 있다. 본 모델계산을 수행하기 위해서는 연소가스 온도, 유동 속도, 타겟원판 표면 온도, 초기 유동 수밀도를 결정하여야 한다. 타겟원판의 표면 온도를 구하기 위해 K형 열전대를 사용하여 원판 중심으로 부터 20, 40, 50mm 떨어진 곳의 온도를 측정하였으며 각각의 위치에서 479, 387, 351K 였다. 본 연구에서는 이 값들의 평균값인 406K를 계산에 사용하였다. 연소가스 온도 T_∞ 역시 Table 1에 나타낸 값들의 평균값인 1383K를 이용하였으며 자유유동에서의 soot의 수밀도 N_∞는 Table 1에서 4×10^8~8×10^9#/cm^3의 범위를 택하였다. 유동 속도 U_∞

Table 1 flame temperature, slope, volume fraction, and number density at H=52mm

r(mm)	T_∞(K)	m	f_v	N_∞(#/cm^3) for d_p=0.05μm	N_∞(#/cm3) for d_p=0.1μm
15	1421.9	1.86×10^{-5}	2.39×10^{-7}	3.28×10^{9}	4.10×10^{8}
30	1358.76	5.50×10^{-5}	5.52×10^{-7}	7.59×10^{9}	9.49×10^{8}
35	1368.87	2.75×10^{-5}	4.16×10^{-7}	5.72×10^{9}	7.14×10^{8}

는 층류 확산화염에 대해 송상종 등,[18] Santoro 등,[19] Flower[20] 에서 소개한 계산식 $U_\infty=\sqrt{(2\beta(H-z)}$ (z=원판으로부터의 수직거리, β=25~30m/sec^2)을 이용하면 약 165cm/s가 되는데 본 화염조건은 그들의 조건과는 달리 연료 유속이 매우 빠르기 때문에 이 식을 이용하는 것은 적당하지 않다. 본 계산에서는 간단한 연속식으로부터 유동속도를 150-300cm/sec의 범위를 갖는 값으로 가정하였다. 이와같은 인자선정을 통해 축대칭정체점 유동 모델계산을 수행한 결과 입자 부착량의 시간변화율 dM/dt는 6~20mg/min으로 실험에서 구한 값 13.7mg/min와 정성적으로 일치하였다.

앞서 설명한 재유입 모델의 타당성을 확인하기 위해 4절에서 설명한 전단유동 장치로 실험을 수행하였다. 먼저 5분동안 원판에 soot을 부착시킨 뒤 화염을 끄고 전단유동 속도를 증가시키면서 재유입되지 않고 남아 있는 soot의 무게를 측정하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 본 연구에서 사용한 전

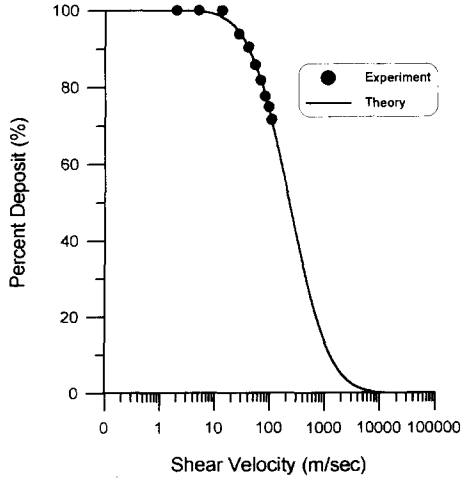

Fig. 8 Fraction of soot deposit with respect to shear flow velocity

단유동 장치의 기계적 한계 때문에 실험가능한 최대 전단유동 속도는 약 100m/s 였고 이때 재유입된 입자의 양은 약 28% 정도이기 때문에 Fig. 3의 영역 Ⅲ의 결과는 실험을 통해 확인할 수 없었다. 실험 결과만을 이용하여 식 (7)로 보간(extrapolation)한 결과가 Fig. 8에 또한 나타나 있는데 이때 평균전단속도 $\bar{U}_s$는 224m/s이고 표준편차 σ는 1.3임이 산출되었다. Fig. 8을 보면 영역 Ⅲ의 결과를 얻기위해 필요한 전단유동 속도가 현실적으로 불가능할 정도로 매우 큼을 알 수 있는데 이는 다음과 같이 설명된다: 원판의 중심에서 반경방향으로 흐르는 유동의 전단속도는 실제로는 θ방향에 무관해야 하지만 본 실험에서 사용한 전단장치로는 단지 8개의 작은 구멍을 통해 전단유동이 야기되므로 (8개 이상의 구멍 제작은 불가능하였음) 아무리 유동속도를 증가시키더라도 원판중심근처에서 8개의 홈이 파짐을 피할수 없었다. 그러므로 Fig. 8의 전단속도는 원판중심으로부터 원판에 평행하게 흐르는 유동의 경우라기 보다는 본 연구에서 사용한 실험장치에 국한되어 있음을 알 수 있다. 주어진 입자크기에 대해 재유입을 야기시키는 임계 전단유동 속도에 대한 이론적 연구가 Soltani와 Ahmadi[21]에 요약되어 있다.

6. 결 론

디젤엔진 내에서의 soot 부착과 재유입 현상을 이해하기 위해 엔진벽면을 원판으로 가정하여 대기상태에서 버너화염에 대한 연구를 이론과 실험을 병행하여 수행하였다. 이론적으로는 축대칭 정체점 유동, 열영동, 브라운 확산을 고려한 부착모델을 확립하였고, 부착력 또는 전단속도가 부착된 입자에 미치는 재유입 현상을 로그-정규분포 가정하에 설명하였다. 실험적으로는 화염내의 soot 수밀도와 온도, 입자 부착률, 재유입되는 입자의 분율 등을

측정하였다. 이러한 연구의 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. (1) soot 부착의 시간 변화율을 측정한 결과와 입자부착 모델 계산 결과가 정성적으로 일치하였다. (2) 전단유동 장치를 이용한 재유입 실험 결과 본 연구에서 설정된 모델의 타당성을 유추할 수 있었다. (3) 또한 부수적으로 TEM 사진을 통해 soot의 형태를 살펴본 결과 주입자가 구형이며 크기가 약 20~50nm 정도이고, soot이 주입자 체인형태를 이루고 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학재단 목적기초(과제번호 94-1400-01-01-3) 지원의 일부로 진행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Lucht, R. P., Dunn-Rankin, D., Walter, T., Dreier, T. and Bopp, S. C., 1991, "Heat Transfer in Engines: Comparison of CARS Thermal Boundary Layer Measurements and Heat Flux Measurements," *SAE Technical Paper* 910722.

(2) Kittelson, D. B., Ambs, J. L. and Hadjkacem, H., 1990, "Particulate Emissions from Diesel Engines: Influence of In-Cylinder Surface," *SAE Technical Paper* 900645.

(3) Suhre, B. R. and Foster, D. E., 1992, "In-Cylinder Soot Deposition Rates Due to Thermophoresis in a Direct Injection Diesel Engine," *SAE Technical Paper* 921629.

(4) Alkidas, A. C. and Cole, R. M., 1983, "Thermal Loading of the Cylinder Head of a Divided-Chamber Diesel Engine," *SAE Technical Paper* 831325.

(5) Haynes, B. S. and Wagner, H. G., 1981, "Soot Formation," *Progress in Energy and Combustion Science,* Vol. 7, pp. 229~273.

(6) Smith, O. I., 1981, "Fundamental of Soot Formation in Flames with Application to Diesel Engine Particulate Emission," *Progress in Energy and Combustion Science,* Vol. 7, pp. 275~291.

(7) Makel, D. B. and Kennedy, I. M., 1990, "Experimental and Numerical Investigation of Soot Deposition in Laminar Stagnation Point Boundary Layers," *23rd Symposium (International) on Combustion,* The Combustion Institute, pp. 1551~1557.

(8) Barengoltz, J. B., 1989, "Particle Adhesion to Surfaces Under Vacuum," *Journal of Spacecraft,* Vol. 26, pp. 103~108.

(9) Taheri, M. and Bragg, G. M., 1992, "A Study of Particle Resuspension in a Turbulent Flow Using a Preston Tube," *Aerosol Science and Technology,* Vol. 16, pp. 15~20.

(10) Matsusaka, S. and Masuda, H., 1996, "Particle Reentrainment from a Fine Powder Layer in a Turbulent Air Flow," *Aerosol Science and Technology,* Vol. 24, pp. 69~84.

(11) 김성근, 박종인, 황정호, 1995, "디젤엔진내 Soot 부착현상 이해를 위한 화염에서의 연구," 제13회 한국연소학회 심포지움 논문집, pp. 55~72.

(12) Zimon, A. D., 1969, *Adhesion of Dust and Powder,* Plenum Press, New York.

(13) Eisner, A. D. and Rosner, D. E., 1985, "Experimental Studies of Soot Particle Thermophoresis in Nonisothermal Combustion Gases Using Thermocouple Response Techniques," *Combustion and Flame,* Vol. 61, pp. 153~166.

(14) Eisner, A. D. and Rosner, D. E., 1986, "Experimental and Theoretical Studies of Submicron Particle Thermophoresis in Combustion Gases," *PhysicoChemical Hydrodynamics,* Vol. 7, pp. 91~100.

(15) 김성근, 1996, "디젤엔진 관련 Soot의 부착 및 재유입에 대한 연구," 연세대학교 기계공학과 석사논문.

(16) Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., 1976, *Measurement in Heat Transfer,* 2nd Ed., Harper & Row.

(17) Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H., 1988, *Fundamentals of Air Pollution Engineering,* Prentice-Hall.

(18) 송상종, 박성호, 김상수, 1993, "방사와 투과를 이용한 층류확산화염내 매연입자의 온도 및

농도 측정," 대한기계학회논문집 제17권, 제10호, pp. 2563~2573.

(19) Santoro, R. J., Yeh, T. T., Horvath, J. J. and Semerjan, H. G., 1987, "The Transport and Growth of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames," *Combustion Science and Technology,* Vol. 53, pp. 89~115.

(20) Flower, W. L., 1989, "Soot Particle Temperatures in Axisymmetric Laminar Ethylene-Air Diffusion Flames at Pressures up to 0.7 MPa," *Combustion and Flame,* Vol. 77, pp. 279~293.

(21) Soltani, M. and Ahmadi, G., 1994, "On Particle Adhesion and Removal Mechanisms in Turbulent Flows," *Journal of Adhesion Science and Technology,* Vol. 8, pp. 763~785.