

## 自動車 排出가스와 그 対策(Ⅲ)

### Automotive Exhaust Gas and Its Preventive Measures

李 載 淳\*

Jae Soon Lee

#### 5. 디젤 機關의 排氣對策

에너지 절약의 時代에 들어서 排氣와 熱效率이 동시에 요구될 때 디젤機關을 乘用車에 널리 使用하는 方向은 容易하게 생각되어 유럽에서는 오래 전부터 상당히 널리 使用되었고, 最近 그 수가 한층 증대되고 있다.

排氣對策上 디젤 機關이 가솔린 機關과 다른 점을 열거하면,

1) 元來 全体的으로 稀薄混合氣로서 層狀的 燃燒을 하기때문에 CO 및 HC는 적고 NO<sub>x</sub>도 일본의 1976年 規制까지는 비교적 간단한 대책으로 合格된다.

2) 그러나 1978年 規制의 合格은 困難하다. 왜냐하면 그것은 酸化觸媒는 煤煙때문에 劣化가 쉽게 되고, NO還元觸媒는 CO가 부족하고, 또 劣化가 쉽게 되기 때문이며 EGR은 排氣中の 매연 등 때문에 耐久性이 현저하게 떨어진다는 등의 이유 때문이다.

3) 매연에 의한 黑煙, 惡臭 및 騒音 등의 公害가 있다.

그러나 일본에서는 美國보다 가솔린車에 대한 디젤車(주로 트럭 및 버스)의 排出 가스量的 비율이 크기때문에, 그 排氣淨化對策은 重要한 研究課題가 되고 있다. 이하에 가솔린 機關과 상이한 주요한 점을 들겠다.

#### (1) NO<sub>x</sub> 및 매연의 生成 메카니즘

디젤 燃燒에서는 원래 일반적으로 稀薄燃燒

이기 때문에 CO의 生成은 대단히 적어 거의 문제가 되지 않는다. 다음에 악취는 일종의 HC에 의한 것이라고 하지만 아직 그 本質과 測定法, 評價法도 確立되어 있지 않다. 따라서 이 둘에 대하여서는 생략하고, 또 HC는 주로 다른 메카니즘에 의한 것이므로 뒤로 미루기로 한다.

디젤 機關의 매연 發生은 從來부터 피하고 있는 것으로서 最大出力 限界가 煙의 濃度(smoke limit)로서 억제되어 왔다. 그것은 燃燒室, 피스톤, 潤滑油 등의 劣化를 쉽게 하고 터널내 또는 일반 路上에서의 公害問題 때문이다.

그리고 NO<sub>x</sub> 發生의 基本特性은 가솔린機關의 경우와 똑같아 가스의 溫度가 높고, 酸素가 충분하여 反應時間이 길다는 3條件이 NO<sub>x</sub>를 增大시킨다는 것에는 변함이 없다. 다음에 煤煙生成에 대하여는 아직 不明한 部分은 남아 있으나, 그 원인은 酸素가 대단히 적은 高溫 霧團氣中에서 燃料蒸氣가 熱分解 하는 것이다. 즉, 燃料의 炭化水素分子가 복잡한 化學反應을 거쳐, 그 대부분의 水素는 탈거되고, 200~300Å의 매연粒子가 되어, 그것이 0.5~2.0μ의 덩어리로 뭉치게 되는데 過濃混合比와 高溫의 정도가 매연의 量과 質을 결정한다.

이러한 NO<sub>x</sub> 및 매연이 燃燒室內에서 生成되는 過程이 디젤에서는 副室 뿐만이 아니라 直接噴射式에서도 場所에 따라 混合比 및 溫度의 分布가 均일하지 않는 것이 가솔린 機關과 크게 다르며, 燃燒의 經過를 化學反應과 熱力學的計

算에서 구하기 위한 그 進行의 모델화가 아직 충분한 것은 없다. 그러나 最近 실린더內의 火災發生과 그 擴大되어 가는 모양을 直接 高速度寫眞으로 촬영하는 기술이 보급되어 많은 지식이 얻어지고 있으므로 점차 精確한 모델이 만들어질 것으로 期待되지만, 여기서는 비교적 단순한 直接噴射式 機關의 燃燒에 의한 Kahn 등의 고찰과 그 實驗結果를 주로 소개하겠다.

그림 21(a)는 燃燒中의 燃料噴霧의 當量比(空氣過剩率  $\lambda$ 의 逆數 즉  $\phi = \frac{1}{\lambda}$ )  $\phi$ 의 분포를 나타낸다. 이것은 주로 燃料噴射系와 가스 流動에 의하여 결정된다. (b)는 그중  $\phi$ 와 T의 분포로서,  $\phi = 1$  가까이에서 최고 온도가 되고, 이보다 좌측은 過濃域으로 火災가 주위로부터 이 部分을 포위하면 (c)와 같이 매연이 發生할 가능성이 있다. 반대로 右側은 稀薄하고 고온이기 때문에 NO의 生成이 많다. 더우기 最外周部는 空氣를 取入하여 대단히 稀薄하게 되어 있다. 또 (d)는 (a)의 噴霧가 한층 연장되어 피스톤의 凹部 등의 壁에 衝突하였을 때의 모양을 나타낸 것이다. 이 衝突에 의해 wall jet라 불리는 壁에 沿한 흐름이 생기므로 대량의 공기를 취입하여 燃燒을 促進할 수 있다. 그러나 그 中心部 C는 결국 空氣不足과 高溫때문에 매연이 發生하기 쉬운 部

이고 반대로 A는 거의 空氣뿐이고, B가 火災層으로 NO는 여기에서 주로 生成된다. 이들 중 B內에서의 NO 生成 카이네틱 計算은 불충분한 점은 있으나 式 (5)의 擴大 Zeldovich 機構가 應用된다.

한편 C內에서 일어나는 脫水素 過程에서 매연 입자가 생기는 化學的 經過의 詳細한 것은 명확하지 않으나, 最終的으로는 이러한 反應을 總合하여, 燃燒가스層 中에서 未燃燃料과 未使用 空氣와의 비율을 나타낸  $\phi_u$ 에 의하여 좌우된다. 매연 發生速度  $ds/dt$ 는 Arrhenius의 反應式의 形으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{ds}{dt} = C_s \frac{V_u}{V_c} (\phi_u)^n P_u (e^{-E_s/RT_u}) \text{ g/m}^3 \cdot \text{s} \quad (11)$$

여기에서 S는 標準狀態에서 단위체적당 매연의 發生量,  $V_u, P_u, T_u, \phi_u$ 는 각각 같은 條件層의 體積, 未燃燃料蒸氣의 分壓, 絕對溫度, 未燃當量比,  $V_c$ 는 실린더內 가스의 標準狀態에서의 體積이고, Khan 등은 實驗에서  $n = 3$  (煤煙發生速度는  $\phi_u$ 의 3乘에 比例),  $E_s = 40,000 \text{ Cal/mol}$ 을 구하고, 排氣中의 實測値와 計算에 의한 S의 値가 合致하도록 一連의 實驗에서 定數  $C_s$ 를 결정하여 煤煙生成 特性을 說明하였다.

또 이상의 經過를 時間的으로 보면 豫混合 燃

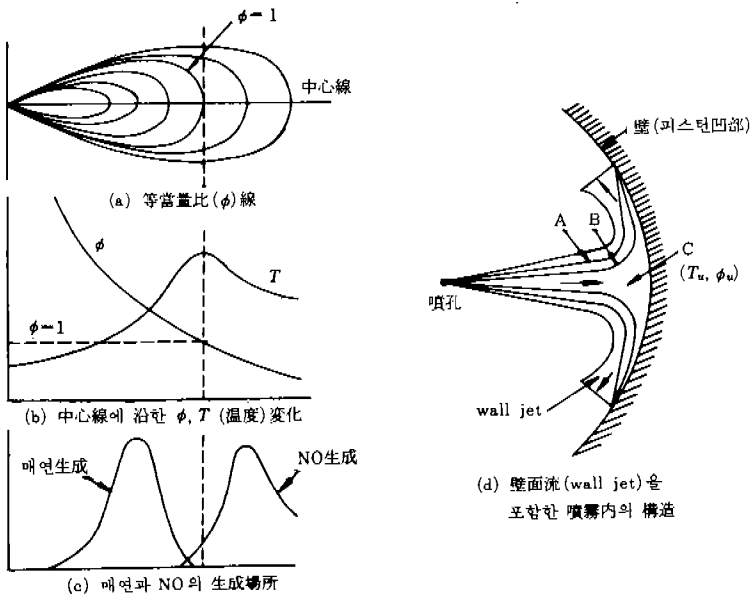


그림 21. 燃燒中에서 燃料噴霧內의 어떤時刻 및 場所에 다른 狀態의 變化

燒는 噴霧가 空氣와 混合하는 時間(發火遲延)後 燃燒하므로 이 部分은 NO의 主生成 期間이며, 그 후 擴散燃燒에서는 燃料는 豫混合 燃燒에서 酸素가 적어져 高温의 氣中에 直接噴射되므로 加열하는 現象때문에 發生하기 쉽게된다.

(2) NO<sub>x</sub> 및 매연의 排出特性

(a) 燃燒室 形狀에 의한 차이

그림22는 디젤 機關의 諸性能에 가장 깊은 關係를 가진 인자의 하나인 燃料噴射時期의 直接噴射式(OC 및 M) 및 副室式(PC 및 SC)에 주어지는 影響을 나타낸 것이다. 여기서 排出有害氣量의 表示法으로서 g/ps·h가 사용되는 것은 디젤車는 一般적으로 大型이므로 實走時와 유사한 出力, 速度에서 테스트할 차시 다이 나모메터(chassis dynamometer)에 負荷가 대단히 크게 걸리기 때문에, 加減速의 過度期의 排氣도 各時刻에서 出力·速度의 定常運轉時의 排氣를 合計한 것과 가까운 값이 되어야 하므로 엔진단을 動力計로써 數種의 回轉速度와 負荷를 組合시켜 運轉시켰을때의 값을 사용하는 것이 일반적이다. 따라서 ppm과 g/ps·h로 表示된다. 또 트럭등에 대한 캘리포니아州의 規制値는 NO<sub>x</sub>.

HC는 光化學스모그의 原因이 되는 氣이기 때문에 兩者의 値를 規制하고 있으나, 一般적으로 디젤 機關에서는 NO<sub>x</sub>쪽이 크다. 즉, 엔진의 출력수와 같은 速度의 km/h로서 車가 走行할 때는 g/ps·h와 g/km의 表示는 같은 수가 된다. 그래서 그림에 나타난 주요한 것은

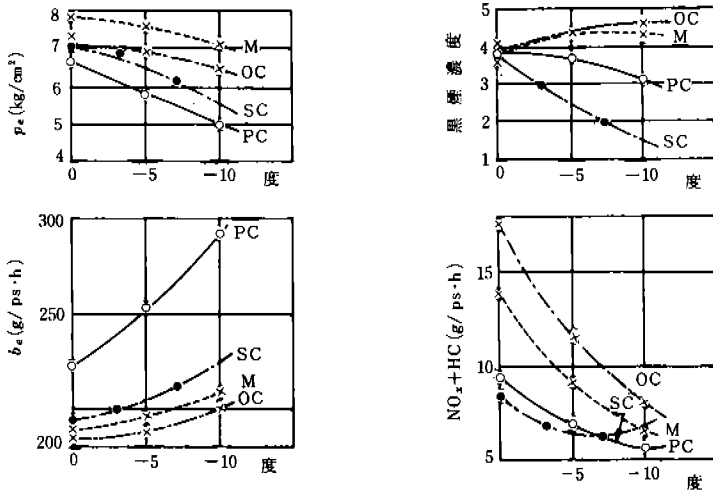
1) 직접분사식은 연료소비율이 가장 낮고 高出力이지만 NO<sub>x</sub>生成은 最大가 된다. 그러나 분사지연에 의해 性能低下를 어떤 범위로 억제시켜 NO<sub>x</sub>를 대폭적으로 떨어뜨리는 性質도 있으므로 유럽에서는 이진부터 直接噴射形의 改良에 注力하고 있다.

2) 이것과 대조적으로 豫燃燒室式은 排氣는 양호하나, 燃料經濟 및 出力은 뒤떨어진다. 특히 噴射遲延에 의해 性能의 惡化가 크다. 단 매연은 減少한다.

NO<sub>x</sub>가 적은 原因은 副室에서는 過濃, 主室에서는 過薄하기 때문이다.

(b) 噴射系의 影響

發生 메카니즘에서 알 수 있는 바와 같이, NO<sub>x</sub> 生成層 및 매연發生層도 噴霧粒子의 크기 및 分布 또는 貫徹性에 밀접한 關係가 있다는 것으로 알 수 있다.



$p_e$ : 制動平均有効壓力  
 $b_p$ : 燃料消費率  
 NO<sub>x</sub>+HC: 캘리포니아  
 베스트모드에 의한  
 度: 噴射時期를 正規보다 지연시킨.

OC: 直接噴射式  
 PC: 豫燃燒室式  
 SC: 副室式  
 M: M方式

그림22. 燃燒室의 차이에 의한 特性에의 影響

그림 23은 그 一例로 噴射時期가 빠른 수록 發火遲延이 길어 豫混合 연소부가 크기 때문에 NO<sub>x</sub>는 증대하고, 火炎中으로 분사하면서 연소하는 擴散燃燒部가 적으므로 매연은 감소한다. 그러므로 특성시기(그림에서는 약 5° BTDC)에서 發火遲延이 最小가 되고 그 때가 NO<sub>x</sub> 最低, 매연 濃度가 最高가 된다. 이것은 또 분사가 늦어지면 연소가스 溫度가 내려가는 것으로도 說明할 수 있다.

또 噴射期間을 짧게 하기 위하여 고압으로 분사시켜 분사율을 높이면 霧化와 貫直性도 증대하므로 공기의 利用率이 양호하여 早期에 燃燒가 끝나기 때문에, 噴射를 지연시켜서 NO<sub>x</sub>를 떨어뜨려도, 매연이 증가되지 않고 燃料 消費率의 惡化도 적어질 수 있다는 연구 결과가 있다. 1000기압에 가까운 고압분사가 권장되는 이유는 여기에 있다.

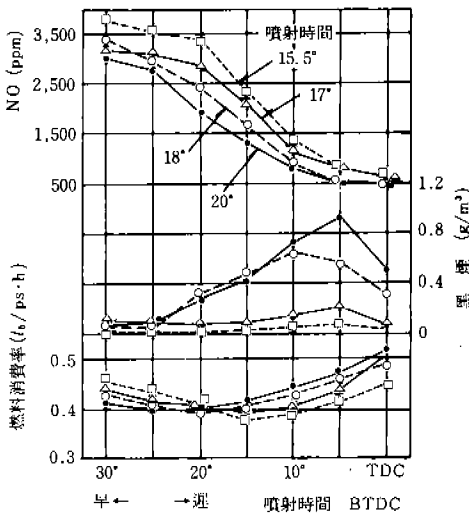


그림 23. 直射時期와 期間의 影響(直接噴射式)

(c) 渦流의 영향

噴射系와 같이 연소실內的 渦流의 강도는 燃料의 공기이용에 중요한 관계가 있으므로, 당연히 排氣組成에도 깊은 관계가 있다. 그림 24는 슈라우드의 크기가 다른 3개의 吸氣밸브를 사용하여 그 위치를 옮겨서 渦流강도를 변화시켜 실험한 것으로 스월(swirl)比는 모터링에 의한 測定值이고 이것에 의한 渦流는 NO<sub>x</sub>를 증대시키

나 매연을 적게하고 연료소비를 개선할 수 있음을 알 수 있다. 이 이유는 噴霧의 中心部로의 공기의 吹入作用에 의해  $\phi_u$ 를 떨어뜨리는 효과가 크기 때문이다. 그러나 渦流가 강해지면 연료소비가 증가하고 NO<sub>x</sub>가 떨어지며 매연이 증가하는 傾向이 된다. 즉, 最適 渦流 강도가 존재한다고 推定된다. 이것은 와류가 대단히 강해지면 분무가 구부러져 壁에 到達할때 까지의 시간이 길고 wall jet에 의한 공기의 取入이 적어지기 때문이라고 생각할 수 있다.

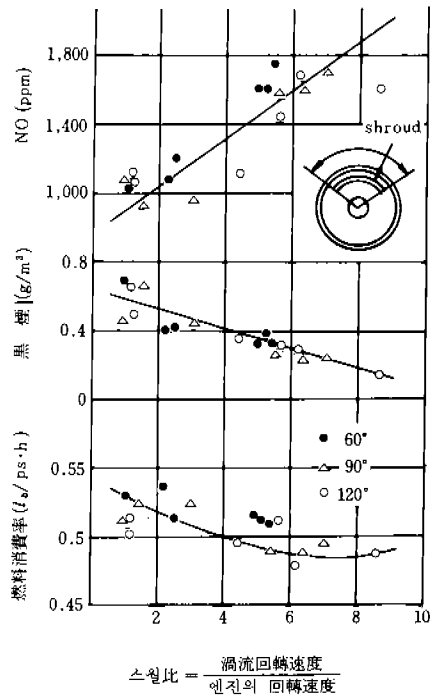


그림 24. 渦流強度의 影響

(d) 過給에 의한 効果

디젤 機關의 연소의 특징은 혼합비가 均一하지 않고 層狀의으로 되어 부분적으로 過濃에서 매연發生이 많은 부분과 고온에서 NO發生이 쉬운 부분 및 가스 溫度가 낮은 동시에 완전 연소하는 부분이 장소적으로나 시간적으로 분포되어 있다는 것이다. 그러나 전체적으로는 部分負荷에서는 가솔린보다 대단히 稀薄燃燒이며 그림 25의 예와 같이 高負荷時에 매연이나 NO의 濃度가 增大한다. 또 副室式에서는 副室內는 過濃

하고 主室은 너무 稀薄하므로 어느 쪽도 NO發生을 抑制하기 때문에 直接噴射式보다 NO는 낮다. 또 副室이 적을 수록 그 傾向은 강하다.

또 稀薄域에서 HC가 增大하는 것은 가솔린機關의 特性과 共通이다. 거기서 전체적 혼합비를 희박화 하는것은 NO<sub>x</sub> 및 매연의 低下에 유용하다는 것을 堆察할 수 있다. 이 原理를 應用한 것이 過給에 의한 대량의 공기를 도입하는 방법이다. 이 과급에 의하여 出力增加도 계획되어 있으며, 騒音에도 유리한 長點도 있다. 그러나 이때 일반적인 過給의 目的과 같이 출력증가에 注力을 들수록 연료분사를 증대 (λ을 無過給과 동일하게 한다)하면 NO<sub>x</sub>가 增大하는 것이 당연하므로 출력증가는 조심스럽게 할 필요가 있고, 또 過給機內에서 斷然壓縮하여 고온이 된 공기를 도입하면 출력증가도 低下함과 동시에 燃燒 最高溫度가 그다지 떨어지지 않아 高壓 때문에 反應分子數가 증가하므로 NO<sub>x</sub> 低下는 期待되지 않는다. 그러므로 실린더로 도입하기 전에 냉각기 (中間 冷却器)를 通해 온도를 내릴 필요가 있다.

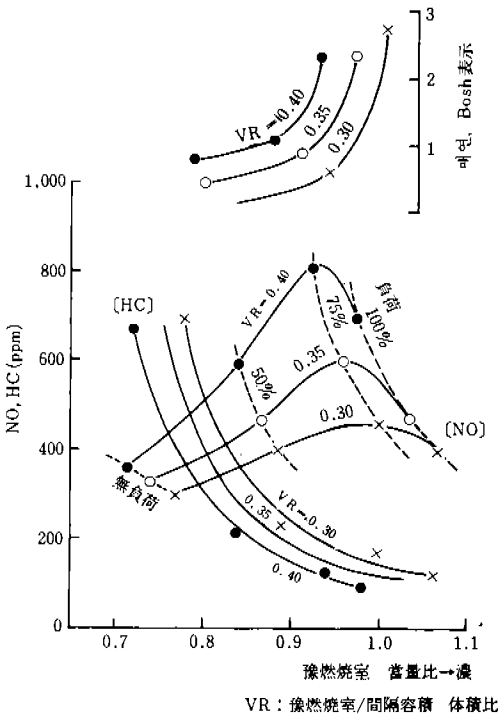


그림 25. 豫燃燒室의 크기, 混合비의 影響

그러기 위하여서는 自動車用에서는 引擎室이 高 라디에터 같은 열교환기를 별도로 取付하는 것은 實用적으로 강력한 制限을 받으므로 차량용 小型, 高熱交換率의 冷却器 開發이 必要하다.

(3) HC

디젤機關의 排氣 HC生成은 가솔린機關의 경우가 주로 壁面부근의 低溫層 및 피스톤 톱랜드 (top land)部 등의 凹部에 있는 混合氣의 未燃에 의한 것에 대하여, 이러한 低溫部는 대부분 공기 뿐이므로 그 主要原因이 다소 달라 다음과 같이 볼 수 있다.

- 1) 壁으로의 衝突噴霧 중 그림 21 (d)의 C層과 같이 濃混合氣가 低溫壁에 接觸되어 그 部分이 未燃으로 남는다.
- 2) 같은그림 (a)의 φ가 큰 部分에서도 매연 中에 불완전 酸化 HC가 生진다. 1), 2) 다같이 전체 混合비가 희박하여 가스온도가 낮을 때 많이 發生한다.

3) 噴霧의 霧化가 나쁠 때, 특히 「後噴霧」의 噴射에서, 後期에 霧化되지 않은 燃料가 나오는 것은 未燃 또는 불완전 酸化의 HC로서 排出되는 率이 크다. 그 첫째 原因은, 그림 26에서 니이들 밸브의 끝과 噴孔사이의 「색크 体積」에서 밸브가 닫힌 후에 流出하는 燃料로서 이 体積은 가능한 한 작게 할 필요가 있다.

둘째 原因은, 분사관이 壓力波의 낮은 反射로 일단 닫힌 밸브가 다시 열려 「後噴出」분사된 연료로써 어느 쪽이나 影響은 크다.

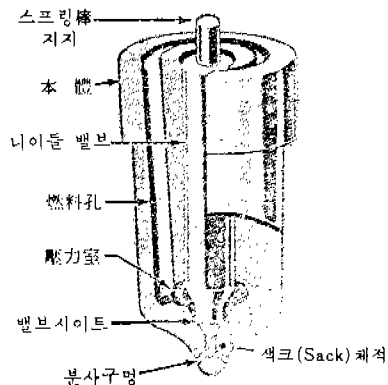


그림 26. 噴射노즐 (多噴孔 : 주로 眞噴射式)의 斷面