

## 小型 高速 디젤機關의 排氣 排出物에 미치는 排氣 再循環率의 影響에 관한 實驗的 研究

林載根\* · 裴明煥\*\* · 金鐘一\*\*\*

An Experimental Study on Effects of EGR Rate upon Exhaust  
Emissions in Small High-Speed Diesel Engines

J.K. Lim, M.Wh.Bae, J.I. Kim

### Abstract

The effects of exhaust gas recirculation(EGR) on the characteristics of exhaust emissions and specific fuel consumption have been investigated using an eight-cylinder, four cycle, direct injection diesel engine operating at several loads and speeds. The experiments in this study are conducted on the fixed fuel injection timing of 38° BTDC regardless of experimental conditions.

In conclusion, it is found that NO<sub>x</sub> emission is markedly reduced with the drop of burnt gas temperature at high speeds and loads especially as the EGR rate increases, while the soot particulate rises with EGR rate and load at a given engine speed, especially high loads. The reduction of exhaust emissions within the Korea heavy duty diesel engine emission standards can be roughly achieved by the optimal EGR rate without degrading the specific fuel consumption, based on the correlations between exhaust emissions.

**Key words** : Exhaust Gas Recirculation(排氣 再循環 : EGR), Diesel Engine(디젤機關), Fuel Injection Timing(燃料噴射時期), Optimal EGR Rate(最適 EGR 率), NO<sub>x</sub> Emission(NO<sub>x</sub> 排出物), Soot Particulate(煤煙 微粒子), Diesel Engine (디젤機關)

### 1. 緒 論

最近 環境汚染, 酸性비, 오존層破壞, 地球溫  
暖化 등 環境保護에 관한 問題가 地球村 絶對

絶命의 課題로 浮刻됨에 따라 大氣汚染에 대해  
서 重大한 關心을 갖고 있다. 大氣汚染源의 주  
된 因子는 燃燒機關에서 排出되는 有害成分物  
質인데, 디젤機關을 搭載하는 버스나 트럭은

\* 正會員, 群山大學校 水産大學 機關學科

\*\* 正會員, 韓國技術教育大學 動力機械工學科

\*\*\* 朝鮮大學校 工科大學 機械工學科

大都市 및 그 周邊部에 있어서 排氣規制가 점점 強化되고 있고, 最近에는 熱併合用, 建設機械用, 船舶用 등의 디젤機關에서도 많은 汚染物質을 排出시키기 때문에 排氣規制가 施行 또는 提案되고 있다<sup>1,2)</sup>. 어떤 意味에 있어서는 디젤機關의 存立自體가 問題視 되고 있지만, 이 機關은 小型 動力源으로서 追從을 不許하는 高效率, 耐久性, 信賴性을 갖고 있을 뿐만 아니라, CO<sub>2</sub>의 排出이 적기 때문에 에너지 節約 및 地球溫暖化 抑制立場에서도 바람직한 動力源임이 立證되고 있기에, 今後의 課題로서는 디젤機關의 汚染物質 低減對策을 推進해 나아가야 할 必要가 있다.

지금까지 多角度的의 努力을 기울인 結果, 燃燒機關에서 排出되는 汚染物質의 低減對策에 많은 進展이 있어 왔지만, 現在 디젤機關에서의 汚染物質 排出程度는 同一 發生일량의 汽油린機關에 비해 아직도 相當히 높다. 汽油린機關의 排出가스 對策은 3元觸媒에 의한 後處理 技術이 主流인데, 디젤機關의 境遇는 理論混合比보다 稀薄한 狀態에서만 運轉 可能하다는 점, 排氣溫度가 낮다고 하는 점, 炭素狀 微粒子 附着, SO<sub>3</sub>生成 등의 問題때문에 後處理 技術은 實用化되고 있지 않다. 따라서 機關自體에 의한 排出物의 大幅的인 低減이 困難한 現段階에서는 現在 使用되고 있는 燃料에 의지하는 한, 汚染物質을 그 發生過程인 燃燒過程에서 阻止하든가, 아니면 새로운 排氣 後處理 方法을 開發해서 對應해 나아가야 한다.

燃燒機關에서 排出되는 主汚染物質로서는 一酸化炭素(CO), 未燃炭化水素(HC), 窒酸化物(NO<sub>x</sub>), 炭素狀 微粒子(Soot) 등인데, 이 들 중 HC 및 CO의 低減對策은 燃料의 完全燃燒와 關係되어 出力 增加, 燃料消費率 減少 등을 期待할 수 있기에 實用的인 各種의 處理方法이 開發되고 있다. NO<sub>x</sub>의 低減對策은 一般的으로 出力 低下, 燃料消費率 增加, HC·CO·炭素狀 微粒子(以下 煤煙 微粒子라 稱한다.) 등의 排出物이 增加하기 때문에, NO<sub>x</sub>를 燃燒機關에서 排出한 후의 段階에서 處理하는 實用的인 方法의 開發이 簡單하지는 않다. NO<sub>x</sub>의

低減對策으로는 燃料噴射 時期遲延<sup>3,4)</sup>, 물 噴射<sup>5-8)</sup>, 물-輕油 乳狀燃料, 排氣 再循環<sup>9-13)</sup> 등의 前處理와 後處理 方法이 있는데, 이 들 중 機關의 吸氣에 排氣의 一部를 混入하는 排氣 再循環(Exhaust Gas Recirculation, EGR)이 排氣中 NO<sub>x</sub>濃度를 低減시키는 高效率의인 方法 중의 하나라고 생각된다. 그러나 EGR率의 增加에 따라 NO<sub>x</sub>以外的의 排出物이 增加하는 傾向이 있는 高負荷 領域에서는 NO<sub>x</sub>以外的의 排出物이 相當히 增加하고, 燃料消費率도 增加할 뿐더러, 煤煙微粒子 및 SO<sub>x</sub>의 循環에 의한 機關內部的 摩耗나 浸蝕이 發生하기 때문에, 디젤機關에 EGR을 適用시켜 NO<sub>x</sub>排出物을 效果的으로 低減시킨다는 것은 簡單하지 않다.

汽油린機關에 있어서는 NO<sub>x</sub>排出物에 미치는 EGR의 影響이 火炎溫度 低下에 의한 것으로 알려졌다.<sup>14)</sup> 그런데, 直接噴射式 및 副燃燒室式 디젤機關에 있어서는 NO<sub>x</sub>와 煤煙微粒子의 排出物에 미치는 EGR의 影響에 관한 研究들이 이전부터 廣範圍하게 進行되어 왔지만<sup>5),15)~21)</sup>, EGR이 NO<sub>x</sub> 및 煤煙微粒子 排出物에 미치는 影響에 관한 過程이 아직도 滿足스럽게 把握되고 있지는 않다. Wilson 등<sup>16)</sup>은 擴散火炎에 있어서 最高 火炎溫度에 따른 NO<sub>x</sub>排出物에 미치는 EGR率의 影響에 관한 相關關係를 調査했고, Wade<sup>21)</sup>는 EGR率과 噴射時期가 最適일 境遇, EGR率이 煤煙微粒子에는 별로 影響을 미치지 않지만, NO<sub>x</sub>排出物을 50%程度 減少시킬 수 있고, 噴射時期를 固定시킬 境遇에는 一般的으로 NO<sub>x</sub>排出物의 減少가 煤煙微粒子 排出物의 增加를 招來한다고 했다<sup>5),15)~21)</sup>. 이후의 研究에 있어서 Tsunemoto 등<sup>20)</sup>은 EGR率에 따른 NO<sub>x</sub>의 減少가 火炎溫度 減少보다는 吸氣의 低酸素濃度 影響때문임을 밝혔다. 또한 同 研究者들은 EGR率에 따른 煤煙微粒子 排出物의 增加가 排氣酸素濃度 減少 및 火炎構造 變化때문임을, Hiroyasu 등<sup>22)</sup>은 燃燒領域에 있어서 煤煙微粒子의 滯留期間 變化때문임을 밝히고 있다. 最近의 研究에서 Narusawa 등<sup>13)</sup>은 定常狀態下的 直接噴射式 大型 디젤機關을 使用하여

NO<sub>x</sub> 및 其他의 排氣物質에 관한 EGR의 影響을 實驗·分析했는데, EGR調節方式이 瞬間的 機關運轉 中에도 相當한 NO<sub>x</sub>排出物을 減少시킬 수 있다고 했다.

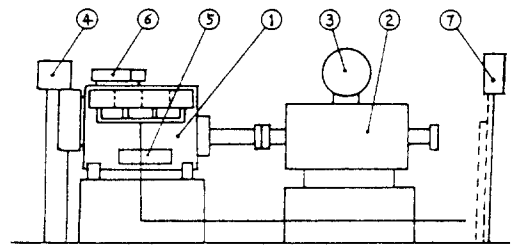
EGR이 排氣 排出物에 미치는 影響에 관한 過程을 調查한다고 하는 것은 簡單하지 않는데, 그 理由는 瞬間的이고 亂流的인 흐름의 條件下에서 液體燃料의 噴霧燃燒인 디젤燃燒 過程의 複雜性 때문이다. Lyn<sup>23)</sup>에 의하면 디젤燃燒 過程은 初期의 豫混合 燃燒段階와 뒤따르는 擴散 燃燒段階로 이루어져, 豫混合 燃燒段階는 化學的 反應力學이 速度를 調節하고 火炎은 非輝炎인데 반하여, 擴散 燃燒段階는 亂流 擴散混合이 速度를 調節하고 火炎은 輝炎인데, 大部分의 에너지가 放出되는 것은 이러한 異質 燃燒期間 中이라고 했다.

本 論文에서는 小型 高速 디젤機關을 使用하여 負荷 및 機關回轉速度(rpm)을 파라미터로 해서 EGR率의 變化가 燃料消費率, CO<sub>2</sub>·CO·HC·NO<sub>x</sub>·煤煙微粒子의 排出物에 미치는 影響을 實驗的으로 調查한 후 分析·考察하여 最適 EGR率을 推定하였다.

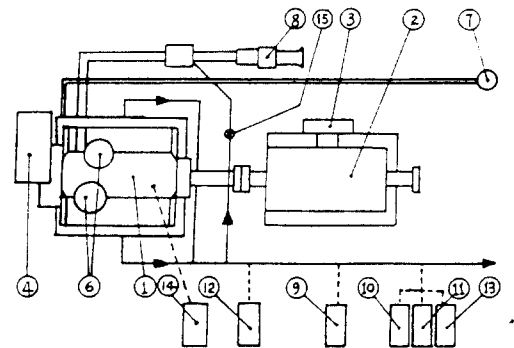
## 2. 實驗裝置 및 方法

### 2.1 實驗裝置

Fig. 1은 本 實驗에 使用된 裝置의 概略圖를 나타낸 것인데, 實驗에 使用된 機關은 獨逸의



(Front View)



(Top View)

- ① Engine
- ② Dynamometer
- ③ Torque Indicator
- ④ C. W. Cooler
- ⑤ L. O. Cooler
- ⑥ Air Filter
- ⑦ F. O. Meter
- ⑧ Air Flow Meter
- ⑨ HC Analyzer
- ⑩ O<sub>2</sub> Analyzer
- ⑪ CO<sub>2</sub>/CO Analyzer
- ⑫ Smoke Meter
- ⑬ NO<sub>x</sub> Analyzer
- ⑭ Oscilloscope
- ⑮ EGR Valve

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

MAN B&W의 舶用機關으로 水冷·8氣筒 直接噴射式의 4行程 디젤機關이며, 主要 諸元은 Table 1과 같다.

Table 1. Specifications of Test Engine

Item	Specification
Engine/Model	MAN-M (V8)/D-1548 M
Type	8 Cylinder, V Type, Water-Cooled, 4 Cycle, Direct Injection, Natural Aspiration
Piston Displacement	11.63l
Bore×Stroke	115(mm)×140(mm)
Compression Ratio	17: 1
Fuel Injection Timing	BTDC 38°
Max. Power	113kW/2000rpm
Valve Timing	Intake Open: 4° 30' BTDC, Close: 27° 30' ABDC Exhaust Open: 40° BBDC, Close: 8° ATDC

**Table 2. Compositions & Properties of Diesel Oil**

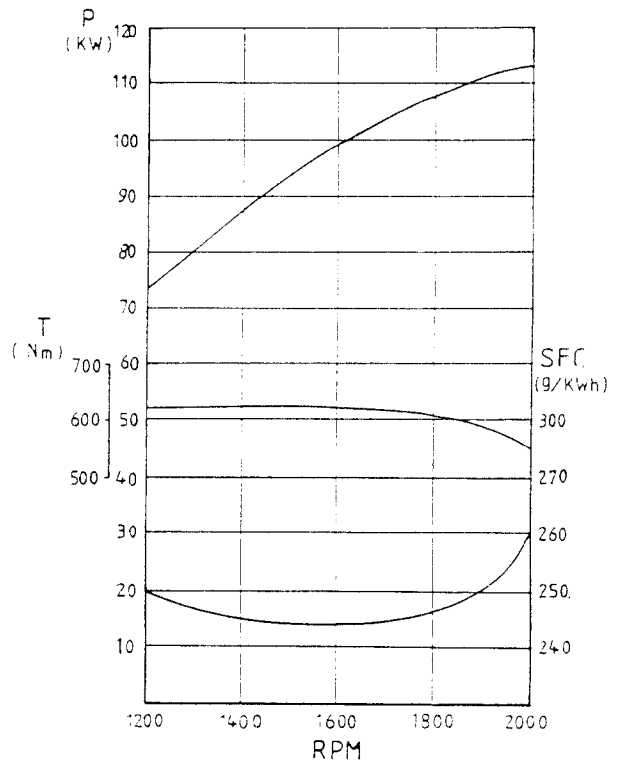
Item	Value
Carbon/Hydrogen	85.86%/13.20(%)
Nitrogen/Oxygen	<0.10%/0.70(%)
Sulfur/Chlorine	0.14(%) / <0.10(%)
Ash	<0.01(%)
Gravity(288 K)/Viscosity(293 K)	831kg/m <sup>3</sup> /4.5mm <sup>2</sup> /s
Higher Calorific Value	45.6MJ/kg
Lower Calorific Value	42.7 MJ/kg
Flash Point (Closed Pot)/Pour Point	338K/261K

振子式(Pendulum) 直流 動力計를 使用하여 機關負荷를 測定하였고, 燃燒室 壓力을 測定하기 위하여 第 2番 시린더에 피에조(Piezo-electric)型的 壓力變換器를 裝着하였다. 排氣 排出物을 測定하기 위하여 獨逸 Hartmann & Braun AG의 排가스 分析器와 보쉬(Bosch)式 스토크 計測器를 使用하였고, 機關運轉에 必要한 燃料消費量은 Seppler의 容積式 流量計를 設置해서 光트리거(Optical Trigger)에 의해 作動되는 時計로 一定量의 消費時間을 計測하여 計算하였다. 또한 Aerzerner-Maschinen의 로타리 피스톤 가스計測器를 使用하여 吸入空氣量을 測定하였다. 本 實驗에 使用된 디젤油의 化學的 成分 및 物理的 性質은 Table 2와 같다.

Fig. 2는 EGR을 시키지 않은 狀態의 實驗機關에 대한 全負荷에서의 出力, 토크 및 燃料消費率을 機關回轉速度 1200rpm부터 2000rpm 까지 200rpm씩 增加시키면서 나타낸 값이다.

**2.2 實驗方法**

本 研究에서는 機關回轉速度, 負荷 및 EGR 率을 파라미터로 하여 機關回轉速度和 負荷를 固定한 狀態에서 EGR率만 바꾸는 實驗을 試圖했는데, 機關回轉速度는 1200rpm에서 2000 rpm까지 200rpm 間隔으로, 負荷는 25%에서 100%까지 25%間隔으로, EGR率은 0에서 40 %까지 10%間隔으로 實驗을 行하였다. 本 實驗에서는 同一 條件의 機關回轉速度和 負荷를 갖는 境遇일지라도 EGR率의 變動率은 ±6% 이고, 負荷를 바꾸었을 境遇의 負荷 變動率



**Fig. 2 Full load characteristics of test engine**

은 ±5%程度이다. 實驗에 있어서 機關回轉速度 2000rpm · 負荷 25% 狀態에서는 正常的 運轉이 어려울 뿐더러, 데이터의 信賴性 때문에, 또한 機關回轉速度 2000rpm · EGR率 40% 狀態에서는 排氣量 過多(특히 煤煙微粒子)로 인해 實驗 및 데이터 整理의 對象에서 除外시켰다. 이렇게 해서 全體 實驗條件은 91種이 된다. 이 때 點火時期는 BTDC 38°로 했는데, 本 研究에서는 點火時期를 實驗條件에 關係없

이 固定해서 實驗을 했다. 實驗을 하는 동안 機關의 冷却水와 潤滑油는 水冷式 熱交換器를 使用하여 溫度를 調節하였으며, 機關 各部에 裝着된 T型 熱電對(CC)와 壓力計를 利用하여 溫도와 壓力를 測定한 후 機關의 作動狀態를 수시로 點檢하면서 實驗을 하였고, 各 燃燒室의 排氣管에도 T型 熱電對를 附着하여 排氣溫度로 燃燒狀態를 判斷했다.

實際 實驗에 있어서 EGR率을 구하기 위해서는 吸氣管과 排氣管에서 CO<sub>2</sub>濃도를 測定하여 使用하기도 하지만<sup>24~26)</sup>, 本 研究에서는 EGR率을 計算할 때 全體 燃燒室 吸氣量에 대한 EGR된 排氣量, 즉 새로운 吸入空氣量의 減少率로서 다음 式을 使用했다<sup>10,12,13)</sup>.

$$EGR率(\%) = \frac{V_o - V_a}{V_o} \times 100 \quad (1)$$

여기서 V<sub>o</sub>는 EGR을 하지 않았을 境遇의 吸入空氣量(m<sup>3</sup>/h), V<sub>a</sub>는 EGR을 했을 境遇 새로운 吸入空氣量(m<sup>3</sup>/h)이다.

디젤機關의 EGR方式에서는 給氣(EGR계 出口에서 機關入口사이의 가스) 및 排氣(機關出口에서 EGR系 入口사이의 가스) 流量이 排氣循環量에 關係없이 一定하지만, 新氣(空氣清淨器에서 吸入되는 空氣) 및 排기가스(排氣管에서 排出되는 가스) 流量은 EGR가스(EGR系 入口에서 出口사이의 循環가스) 流量에 따라 增減한다. 또한 디젤機關의 EGR에서는 高濃도의 殘留酸素가스가 再循環되므로 給氣中の 酸素濃도가 가솔린機關의 EGR과 比較해 높기 때문에 NO<sub>x</sub>濃도 低減效果를 높이기 위해서, 특히 低負荷 領域에 있어서 EGR率을 높일 必要가 있다. 그러나 EGR時에 排기가스 流量이 減少한다고 하는 점에 비추어 보면 排出量 基準에서는 濃도低減效果와 排기가스 流量의 減少效果가 複合적으로 나타나기 때문에 排出量 減少效果는 濃도 減少效果보다 높게 나타난다. 역으로 濃도增加가 생기는 成分에 대해서는 排出量 增加가 濃도增加에 比較해서 낮게 抑制된다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 燃料消費率

Fig. 3은 燃料消費率을 調査한 結果로서 機關負荷를 25%씩 增加시키면서 機關回轉速度를 1200rpm부터 200rpm씩 2000rpm까지 變化시킨 境遇, EGR率 變化에 따라 나타난 것이다. 그림으로부터 同一 負荷·機關回轉速度에서는 EGR率의 增加에 따른 燃料消費率의 增加·減少 傾向이 不規則의이며, 그 變動幅도 아주 작아 燃料消費率이 增加한 境遇에도 그 增加量은 大部分 3%未滿으로 環境汚染의 深刻性에 비하면 대단한 값이 아니라고 생각된다.

小高<sup>12)</sup>, Narusawa 등<sup>13)</sup>은 直接噴射式 大型 디젤機關을 使用한 研究에서 吸入酸素量이 18%以上인 領域에서는 燃料消費率이 吸入酸素量의 減少, 즉 EGR의 增加에 의해 약간 떨어진 다 할지라도 大幅의인 減少는 觀察되지 않는다고 했다. 또한 Stumpp 등<sup>9)</sup>의 論文에서는 디젤機關에 있어서 BMEP 1MPa, 機關回轉速度 1600rpm인 境遇, EGR率 35% 程度까지는 燃料消費率이 變化하지 않으나, 그 以上에서는 실린더內 吸入酸素量의 減少로 인해 燃料消費率의 增加한다고 했다. 其他 研究結果<sup>5,27)</sup>에서도 EGR率이 燃料消費率에 미치는 影響은 별로 크지 않는 것으로 나타났으나, Nagai 등<sup>28)</sup>은 中速 디젤機關을 使用한 實驗 및 시뮬레이션 計算結果에서 EGR率의 增加함에 따라 燃料消費率도 增加한다고 했다.

本 論文 및 以前 研究들의 結果를 綜合해 보면, EGR率 30~40%程度까지는 燃燒에 必要한 酸素量이 不足하지 않기때문에 燃料消費率에는 별로 影響을 미치고 있지 않지만, EGR率이 40%를 超過하면 吸入酸素量 不足으로 인해 燃料消費率의 增加하는 傾向을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

#### 3.2 排氣 排出物

##### 3.2.1 CO<sub>2</sub>排出物

燃燒性 物質이 大氣中の 酸素와 結合하여 完

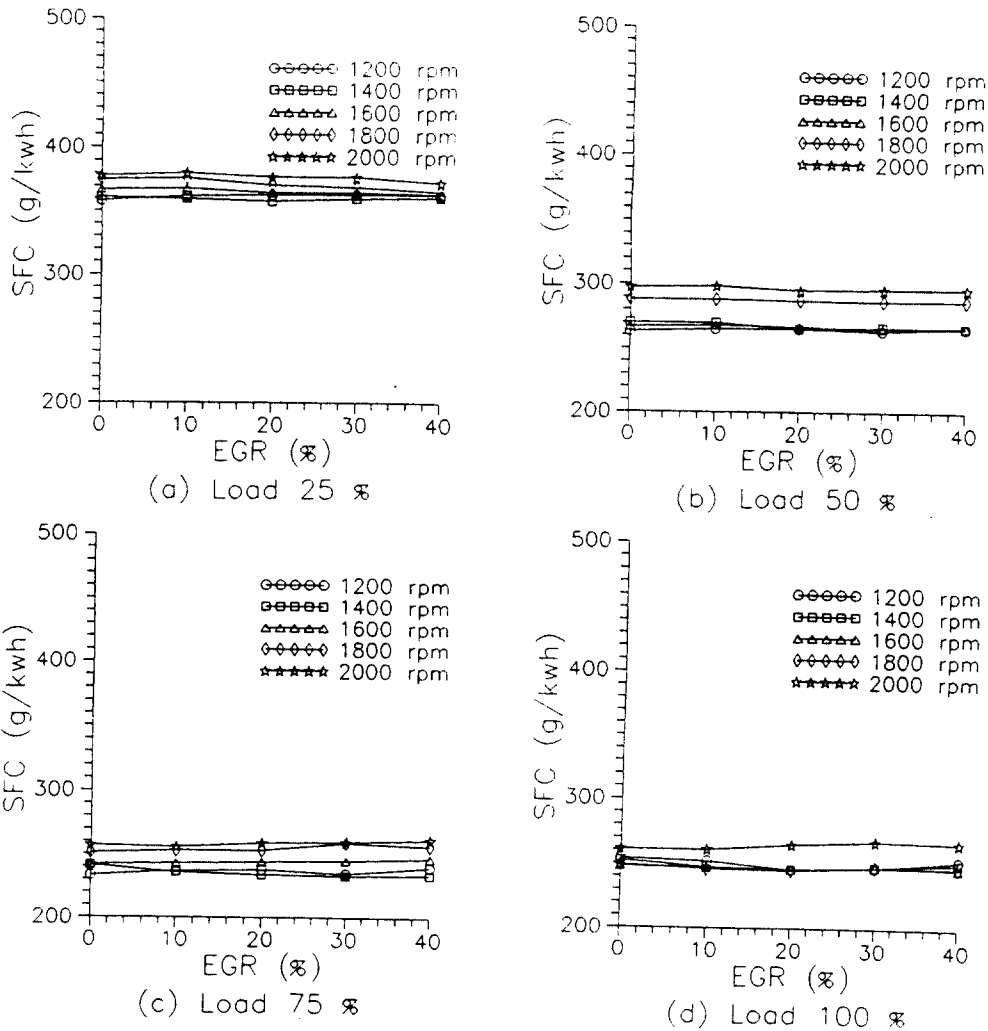


Fig. 3 Effect of EGR on specific fuel consumption(SFC) as a parameter of engine speed (rpm) at a given engine load

全燃燒하면 生成物質 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 發生하는데 實際 完全 燃燒는 이루어지지 않기 때문에, 이 境遇 燃燒機關에서의 主要 目的은 低燃費·低CO<sub>2</sub>의 利點을 살리면서 有害排出가스를 低減시키는 것이다. 그런데 디젤機關은 가솔린機關에 비해서 燃料의 經濟性이 良好하고, CO<sub>2</sub>의 排出量도 아주 적은 性能을 갖고 있다. CO<sub>2</sub>는 現在 大氣汚染物質로 規定되어 있지만 地球의 溫暖化에 많은 影響을 주는 物質<sup>2)</sup>로 유럽共同體 에너지環境 閣僚會議에서

CO<sub>2</sub>稅 導入方針이 처음 合議되어 1993年度부터 課稅額이 賦課되며, 最近 閉幕된 리우環境會議에서도 이 問題가 公式 論議되어 머지 않아 規制의 對象이 되리라 생각된다.

本 論文에서는 實驗機關에 EGR을 適用하여 다른 排氣 排出物 測定과 同時에 CO<sub>2</sub>排出量을 測定해 機關回轉速度를 파라미터로 해서 負荷와 EGR率을 變化시켰을 境遇에 대하여 Fig. 4에 나타내 보았다. Fig. 4에 의하면 同一 機關回轉速度에서는 EGR率이 높을수록, 負荷가

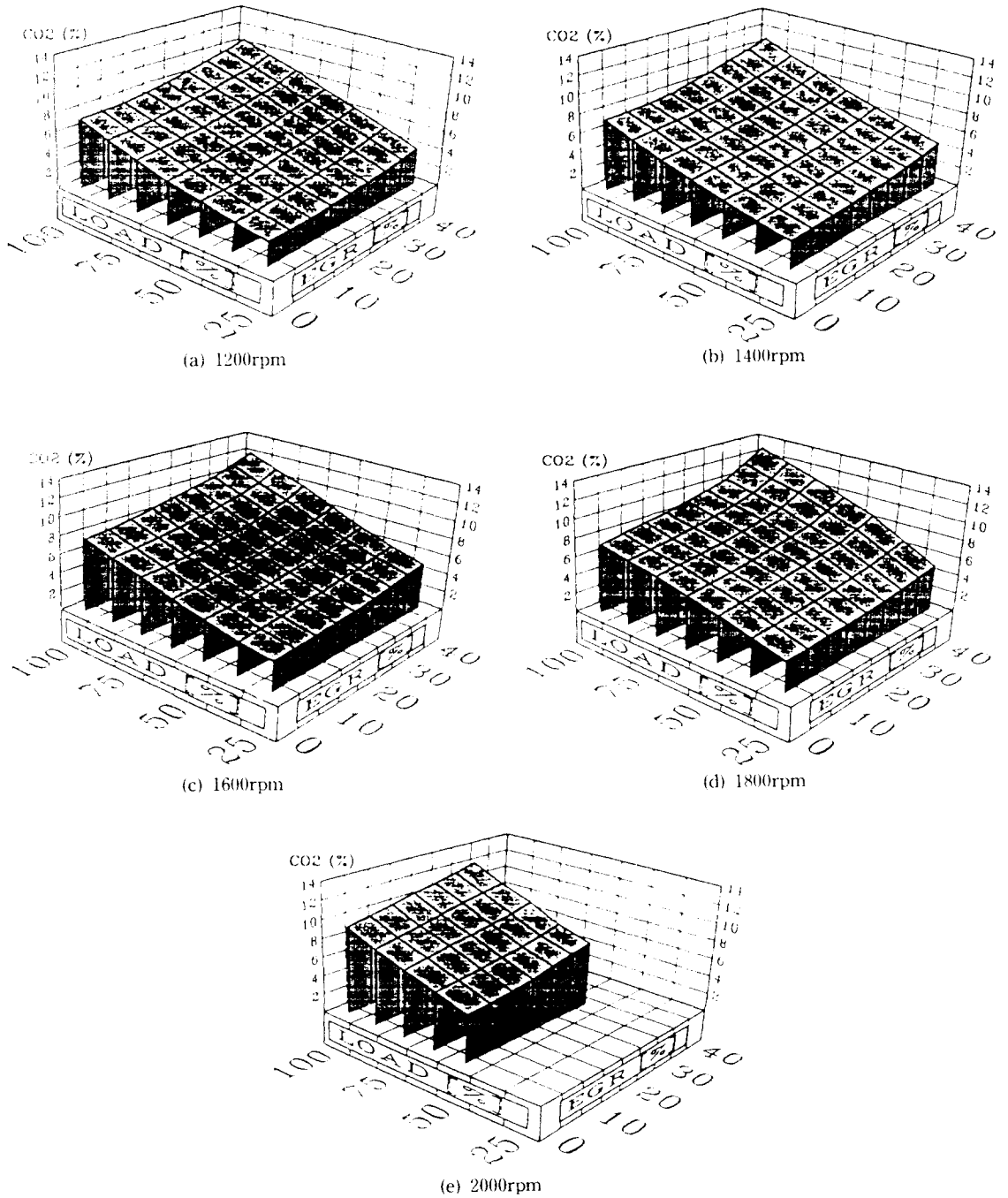


Fig. 4 Effect of EGR on CO<sub>2</sub> emission characteristics with engine load at a given engine speed

클수록 CO<sub>2</sub>배출물이 증가하는데, 특히 100% 負荷에서 EGR率의 影響이 큼을 알 수 있다. 이런 傾向은 機關回轉速度가 높아 질수록 增加

幅이 약간씩 더 커지고 있다. EGR率 增加에 따른 CO<sub>2</sub>배출量의 增加 理由로서는 完全燃燒로 인한 CO<sub>2</sub>生成物의 增加보다는 再循環되는

CO<sub>2</sub>排出量의 增加때문일 것으로 推定된다. 이것은 本 研究의 EGR率 範圍內에서는 燃燒에 必要한 空氣가 不足하지 않는다 할지라도 燃燒 效率로 인한 CO<sub>2</sub>生成物의 增加는 생각할 수 없고, 오히려 EGR率 增加로 인해 燃燒가스溫度가 낮아져 燃燒效率는 떨어지지만, 再循環되는 CO<sub>2</sub>排出量의 影響때문에 CO<sub>2</sub>排出量이 약간 增加하는 傾向이 나타나고 있다. 이것은 吸氣管과 排氣管에서 CO<sub>2</sub>濃度を 測定한 값을 使用하여 EGR率을 구하는 式<sup>24~26</sup>에서도 알 수 있다.

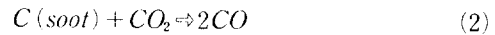
### 3.2.2 CO排出物

Fig. 5는 CO 排出物 特性을 各 機關回轉速度에 대한 負荷 및 EGR率 變化의 平面上에 나타낸 것이다. 그림에 따르면 同一 機關回轉速度에서는 高負荷와 低負荷에서 EGR率이 增加함에 따라 CO排出量이 顯著하게 增加하고, 高EGR率에서는 負荷에 대한 CO排出量 曲線이 오목한 形態로 나타나는데, 이 때 增加率은 低負荷時보다 高負荷時에 더욱 크다. 이러한 傾向은 機關回轉速度를 變更시키어도 類似하다. 그러나 低EGR率에서는 負荷가 낮을수록 CO 排出量이 많음을 알 수 있다. 同一 負荷에서는 어느 機關回轉速度에서나 EGR率 增加에 따라 CO排出量이 增加하는데, 負荷의 크기에 關係없이 同一한 傾向을 나타내고 있다.

CO排出物 特性曲線은 뒤에 考察하는 煤煙 微粒子 排出物 特性曲線과 함께 高負荷에서는 어느 機關回轉速度에서나 EGR率 變化에 따른 傾向이 類似하다. Plee 등<sup>10</sup>은 CO와 煤煙微粒子 排出物 特性이 거의 一對一 正比例 對應關係를 나타내고 있다고 했는데, 이것은 CO排出物에 관한 EGR의 影響이 煤煙微粒子 排出物에 미치는 影響에서와 類似한 相關關係가 있음을, 또한 이들 두 排出物을 決定하는 動力學的 過程도 類似함을 暗示한다. 그들은 同 研究에서 EGR率이 0에서 50% 增加됨에 따라 斷熱火炎溫度는 2560K에서 2060K程度로, 燃燒 가스溫度는 1570K에서 1540K程度로 減少하고, 이 때 排氣酸素 濃도는 0.131에서 0.057程度로, 吸氣酸素 濃도는 0.149에서 0.074程

度로 減少하는데, 이러한 O<sub>2</sub>濃度 및 燃燒가스溫度 減少가 CO濃度 增加의 原因이 된다고 했다.

平衡論的 面에서 考察해 보면 酸素가 充分한 高溫 燃燒가스인 境遇는 式(2)와 같은 表面反應에 의해 生成된 CO가 氣相反應帶에서 式(3)처럼 氣相으로 變化되어 CO<sub>2</sub>가 發生되기 때문에 表面反應과 氣相反應이 同時에 일어난다. 한편, 低溫 燃燒가스의 境遇에는 式(2)의 表面



反應이 主이지만 式(3)의 氣相反應도 일어난다<sup>35</sup>.

CO는 燃燒되어야 할 燃料에 대해 O<sub>2</sub>不足 狀態에서 發生한다. 一般的으로 디젤機關에서는 全負荷時 CO濃도가 急增하지만, 部分負荷에서도 CO濃도가 增加하는 境遇가 있는데, 이것은 디젤機關燃燒가 全體의으로는 O<sub>2</sub>過剩 狀態일지라도 局部的으로는 噴霧擴散燃燒로 인해 混合이 좋지 않기 때문에 O<sub>2</sub>가 不足하여 CO濃도가 發生하고, 發生한 CO濃도는 燃燒가스溫度가 低下해서 完全燃燒하지 못한 狀態에서 排出되기 때문이다<sup>30</sup>. 많은 研究 結果들<sup>5,9,11~13,27</sup>에 의하면, EGR率의 增加에 隋伴하여 실린더 吸氣內的 酸素濃度 減少로 인해 CO排出物이 增加한다고 했다.

그러나 鈴木<sup>3</sup>는 內部 EGR法을 利用한 渦流 燃燒室型 디젤機關에 있어서 CO濃度 特性에 미치는 EGR의 影響은 거의 없다고 했다.

### 3.2.3 HC 排出物

Fig. 6은 機關回轉速度를 파라미터로 해서 負荷와 EGR率을 變化시켜 實驗한 HC排出物 特性의 結果이다. 同一 機關回轉速度에서는 負荷가 낮을수록, EGR率이 높을수록 HC排出量은 增加하고 있지만, 機關回轉速度를 增加시키면 傾向은 같으나 全般的으로 排出量이 顯著하게 減少하고 있음을 알 수 있다. 이 境遇, EGR率 增加에 따른 HC排出量 增加는 EGR率 이 낮은 範圍內에서는 緩慢한 增加를 보이나, 大體的으로 EGR率 20%를 넘으면 增加速度가



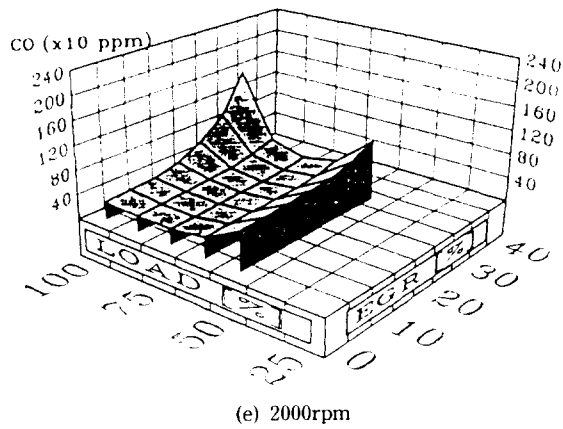
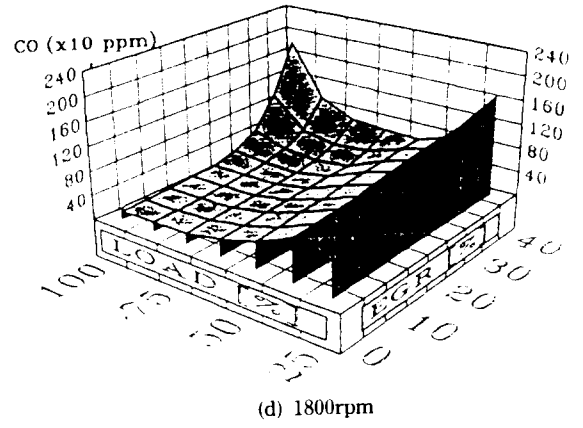
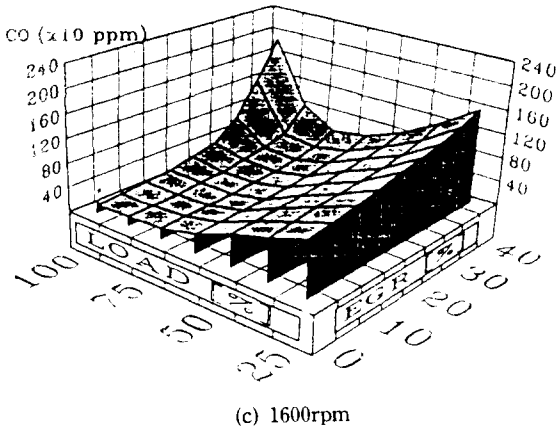
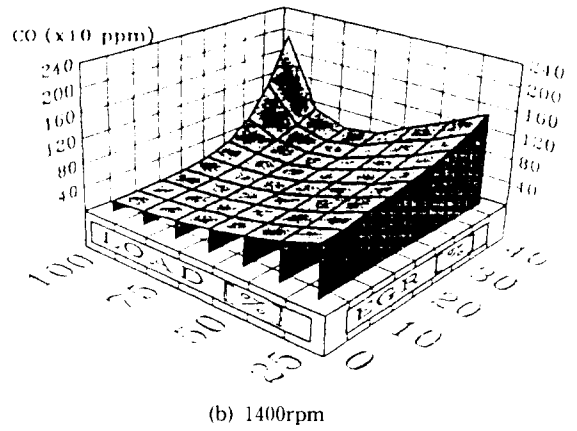
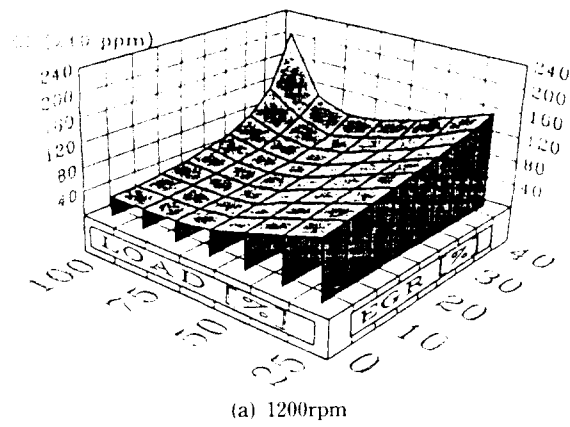
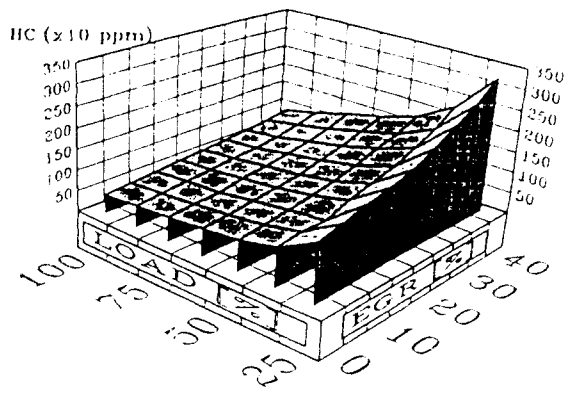
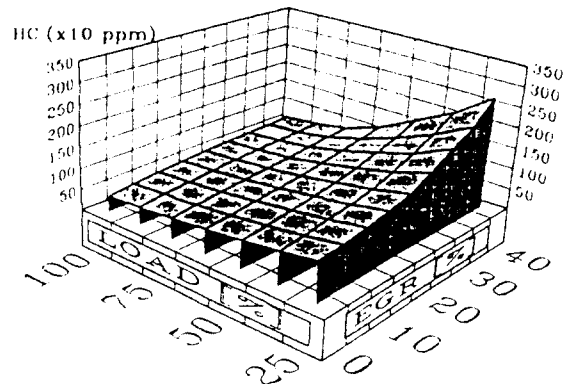


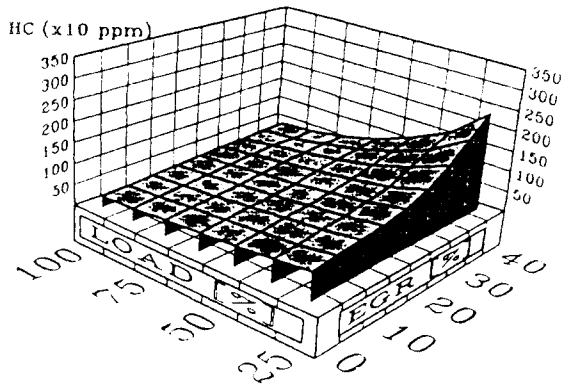
Fig. 5 Effect of EGR on CO emission characteristics with engine load at a given engine speed



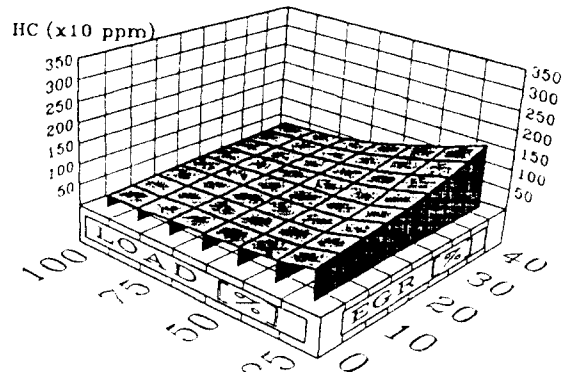
(a) 1200rpm



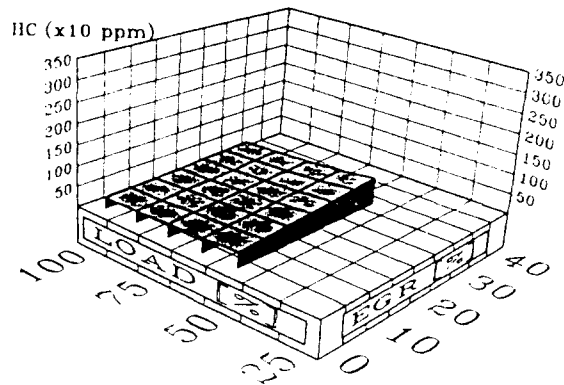
(b) 1400rpm



(c) 1600rpm



(d) 1800rpm



(e) 2000rpm

Fig. 6 Effect of EGR on HC emission characteristics with engine load at a given engine speed

빠름을 볼 수 있다. 이러한 EGR率이 HC排出量에 급격한變化를 일으키는 限界點은 同一機關回轉速度에서는 負荷가 클수록 거의 存在하지 않지만, 反對로 負荷가 작아지면 明白히 나타나고 있다.

小高<sup>12)</sup>, Narusawa 등<sup>13)</sup>의 研究에서는 直接噴射式 大型 디젤機關을 使用한 加速時 및 定速時의 狀態에서, Mayer 등<sup>27)</sup>의 研究에서는 過給 디젤車輛機關에서, Walder<sup>5)</sup>의 研究에서는 6氣筒 直接噴射式 디젤機關에서 EGR을 시킬 境遇 HC濃도가 약간 增加한다고 했다. 특히 Narusawa 등의 論文에서는 HC濃도가 增加하는 것은 排出量 增加速度가 濃도 增加速度에 비해 낮은 값으로 抑制되기 때문이라고 했다. HC排出量은 失火, 消炎, 不良 噴射, 不均一 噴射 등으로 인해 燃料가 完全燃燒되지 않고 排出되는 物質로서 실린더內가 低溫인 低負荷時에 많이 發生한다<sup>29)</sup>. EGR을 採用하는 境遇는 酸素濃도가 낮아지고, 燃燒가스의 熱容量이 增加하여 火炎溫度가 낮아지므로, 低溫運轉狀態에서 發生하기 쉬운 HC가 增加한다. 이러한 傾向은 低負荷 領域에서 더욱 深化된다<sup>30)</sup>.

### 3.2.4 NO<sub>x</sub>排出物

Fig. 7은 各 機關回轉速度에 대해 負荷와 EGR率을 變化시킨 境遇, NO<sub>x</sub>排出物 特性을 나타낸 것이다. NO<sub>x</sub>排出物은 EGR率 增加에 따라 顯著하게 減少하는데, 특히 高速·高負荷의 境遇에 減少率이 커서, 機關回轉速度 1800 rpm의 全負荷時에는 10% EGR率에서 NO<sub>x</sub>排出物 30%, 20% EGR率인 境遇는 60%, 30% EGR率인 境遇는 80%, 40% EGR率인 境遇는 NO<sub>x</sub>排出物 95%以上の 減少效果가 있다. 機關回轉速度 2000rpm에서는 이보다 더 큰 減少效果를 나타내고 있다.

EGR率의 影響에 따른 NO<sub>x</sub>排出物의 減少現象을 알아보기 쉽게 Fig. 8에 各各의 機關負荷에 있어서 機關回轉速度를 파라미터로 해서 가로軸에 EGR率, 세로軸에 NO<sub>x</sub>濃도를 表示해 보았다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 同一 負荷·同一 機關回轉速度에서는 EGR率의 增加

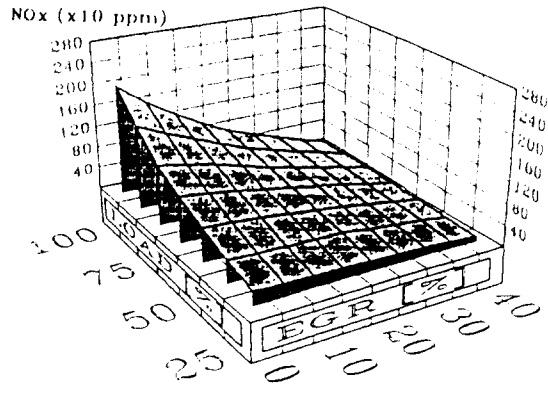
에 따라 NO<sub>x</sub>濃도가 거의 直線的으로 減少하고, 全般的으로 同一 負荷에서는 機關回轉速度가 낮을수록, 同一 機關回轉速度에서는 負荷가 작을수록 NO<sub>x</sub>濃도는 減少한다. 그러나 減少幅은 機關回轉速度가 높을수록, 負荷가 클수록 減小할 수 있다.

田代<sup>29)</sup> 등의 研究에 의하면 EGR量이 增加하면 急激히 NO<sub>x</sub>濃도가 減少하는데, 高負荷로 될수록 NO<sub>x</sub>濃도의 低減率은 크지만, 酸素濃도 減少現象 때문에 出力減少 및 煤煙微粒子濃도의 增加가 顯著하게 되며, 豫燃燒室 및 直接噴射式 디젤機關과 比較하면 모두 같은 程度의 EGR效果가 있지만, 豫燃燒室 機關의 煤煙微粒子濃도가 더욱 顯著하게 크다고 했다. 또한 鈴木<sup>3)</sup>는 4사이클 渦流燃燒室型 디젤機關에 EGR가스量의 貯藏室을 設置한 內部 EGR法에 의해 EGR率이 2~9%인 境遇 NO<sub>x</sub>濃도 減少率은 20~30% 程度인데, 이것은 最高 燃燒가스溫度의 低下 때문임을 밝히고 있다.

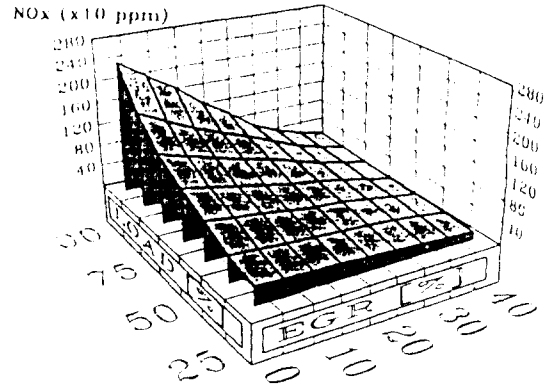
NO<sub>x</sub>濃도를 減少시키려면 燃料의 噴射時期를 늦추지 燃燒가스溫度를 낮출과 同時에 高溫維持時間을 줄이는 것이 有效하지만, 이 境遇 反對로 煤煙微粒子濃도가 增加한다. 低速·全負荷時에 NO<sub>x</sub>濃도가 增加하는 것은 低速이기에 膨脹行程에 時間이 길러 高溫維持時間이 길어지기 때문이다. EGR率 變化에 따른 디젤機關의 NO<sub>x</sub>排出量에 미치는 影響을 調査한 많은 研究報告들<sup>5,9~13,25,27,28,30,33,34)</sup>에 의하면, EGR을 採用하면 燃燒室에 들어가는 吸入空氣一部分이 낮은 酸素濃도의 排가스로 置換되어 燃燒가스溫度가 낮아지고 燃燒速度가 늦어져 NO<sub>x</sub>濃도가 顯著하게 減少되지만, 高負荷에 있어서는 出力이 制限되므로 負荷에 따라서 循環量을 加減하는 制御機構가 必要하다고 했다.

### 3.2.5 煤煙微粒子 排出物

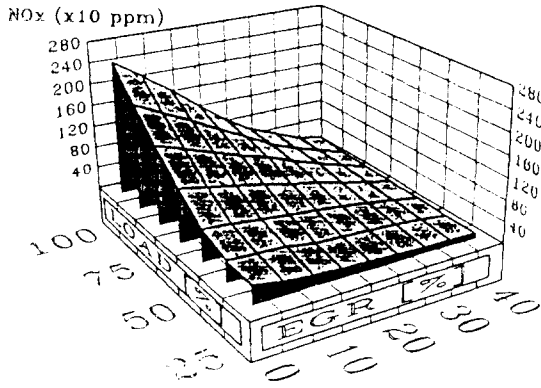
Fig. 9는 各 機關回轉速度에 있어서 負荷와 EGR率을 變化시켰을 때 煤煙微粒子濃도를 나타낸 것이다. 그림에 의하면 同一 機關回轉速度에 있어서는 負荷가 增加할수록, EGR率이 增加할수록 煤煙微粒子濃도가 增加하는데, 低負荷率에서는 EGR率의 影響이 별로 크지



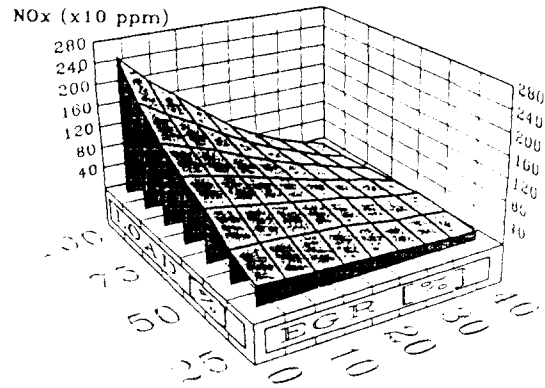
(a) 1200rpm



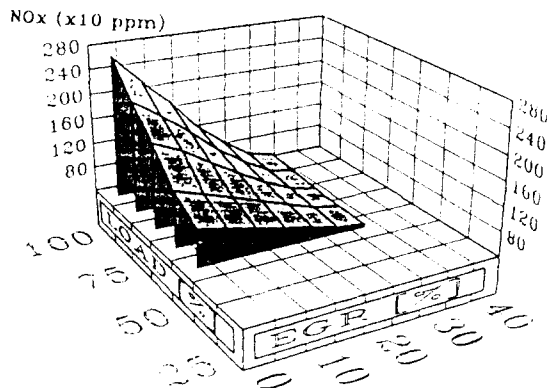
(b) 1400rpm



(c) 1600rpm



(d) 1800rpm



(e) 2000rpm

**Fig. 7** Effect of EGR on NO<sub>x</sub> emission characteristics with engine load at a given engine speed

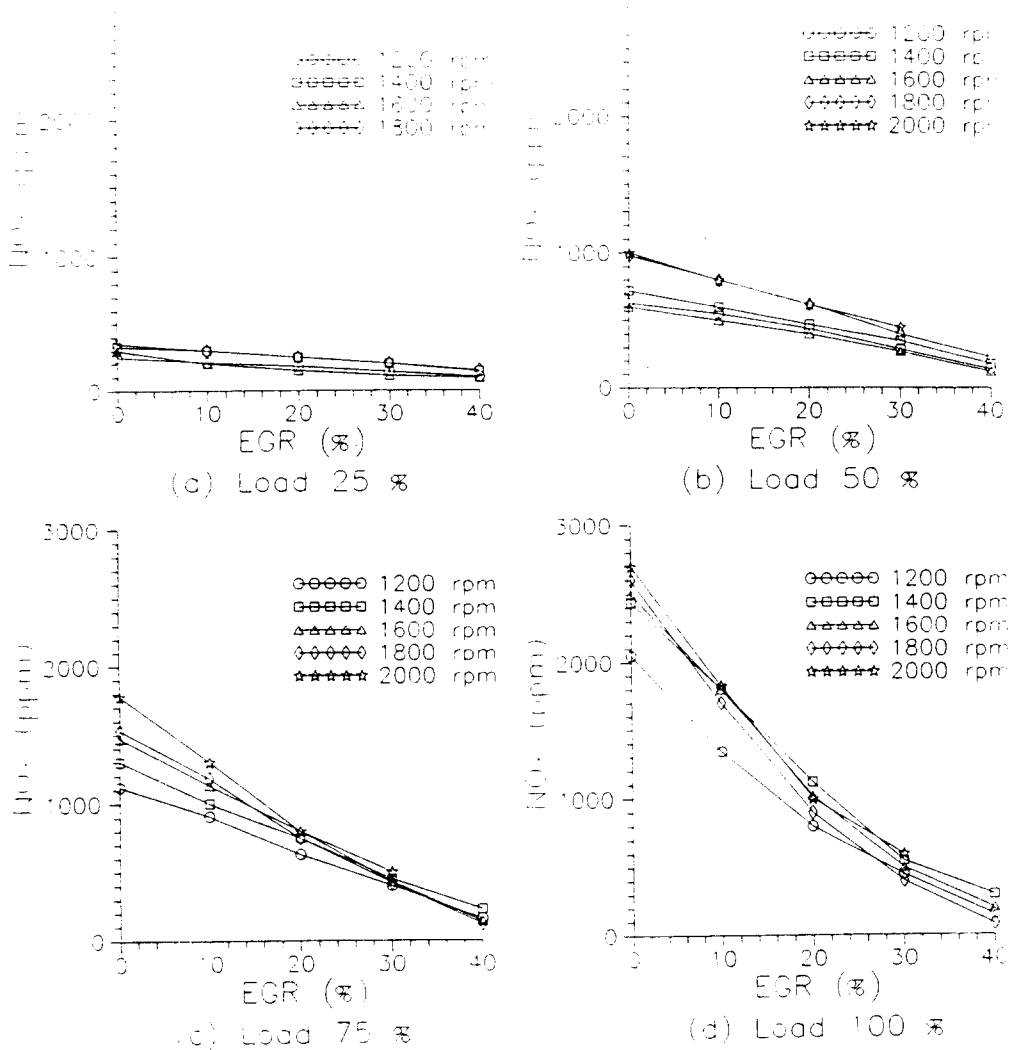


Fig. 8 Effect of EGR on NO<sub>x</sub> emission characteristics as a parameter of engine speed (rpm) at a given engine load

않지만, 負荷가 높아 질수록 EGR率의 影響이 顯著하게 큰을 알 수 있다. 그런데 機關回轉速度 1200rpm의 低EGR率·高負荷率일 境遇 煤煙微粒子 濃도가 다른 機關回轉速度의 境遇보다 增加하는데, 이것은 機關回轉速度 1200rpm이 아이들링 狀態에서 急加速되는 速度에 對應하는 狀態로 低速 全負荷時는 燃料컴프의 回轉數가 낮아서 높은 噴射壓力을 얻을 수 없기때문에 燃料의 微粒化와 燃料·空氣의 混合이 나빠서 煤煙微粒子 濃도가 增加한다<sup>30)</sup>.

이러한 現象을 알아 보기 위하여 機關回轉速度 1000rpm일 境遇의 煤煙微粒子 濃도에 대해서 同-한 條件의 實驗을 행한 후, 같은 方法으로 데이터를 整理하여 나타낸 것이 Fig. 9의 (f)이다. 이 그림에서도 1200rpm의 境遇와 同-한 傾向을 보이는데 定量的으로 더욱 增加하는 現象을 보이고 있다. 이것은 運轉 可能的한 低速·高負荷일수록 煤煙微粒子의 濃도가 增加함을 暗示한다. 그러나 어느 限界點에서 不完全燃燒量이 增加되어 排出되는 煤煙微粒子 濃

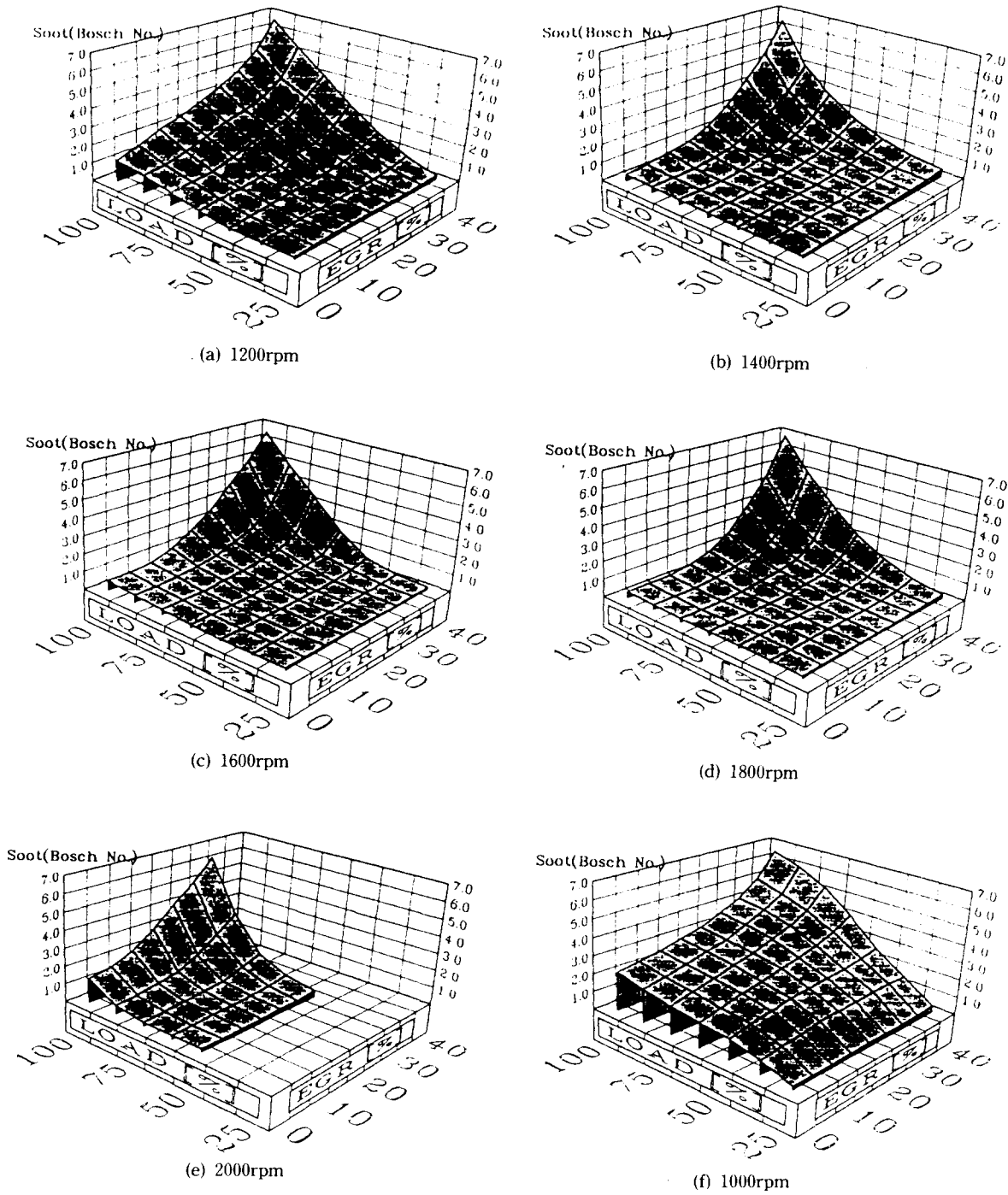


Fig. 9 Effect of EGR on soot emission characteristics with engine load at a given engine speed

도는 減少할 것으로 豫想된다.

機關回轉速度가 2000rpm인 境遇 EGR率 40%에 대한 實驗에서는 排氣量, 특히 煤煙微粒子 排出量의 過多로 데이터를 취하지 않았지만, 2000rpm의 高EGR率·高負荷率인 境遇에서도 煤煙 微粒子 濃도가 急速하게 增加되는데, 이것은 衝擊波管의 非火炎 熱分解 및 酸化에 대한 實驗結果인 soot鐘(soot bell) 現象<sup>31,32)</sup>으로 說明할 수 있다. 즉, 機關回轉速度 2000rpm에서는 高速運轉狀態이기에 EGR率에 의해 燃燒가스溫度가 다소 低下되더라도 煤煙微粒子生成의 最適溫度狀態로 되어 酸化보다는 熱分解가 加速되기 때문에 煤煙微粒子 濃도가 增加되었다고 생각된다. 全般的으로 高EGR率·高負荷率에서 煤煙微粒子 濃도가 增加하는데, 이것은 soot鐘 現象 및 相對的인 酸素量의 減少現象 때문일 것으로 推定된다.

EGR率의 增加가 煤煙微粒子 濃도에 미치는 影響에 관하여서는, 6氣筒 스윙燃燒室의 디젤機關에 負荷를 變化시켜 實驗한 境遇<sup>9)</sup>, 單氣筒 豫燃燒室의 디젤機關에 負荷와 機關回轉速度를 變化시켜 適用한 境遇<sup>10)</sup>, 單氣筒 實驗用 디젤機關에 스윙比, 노즐形態 등을 變化시켜 實驗한 境遇<sup>11)</sup>, 실린더 內徑 160mm 및 機關回轉速度 1500rpm인 小型 高速 디젤機關에 負荷를 變化시켜 實驗한 境遇<sup>28)</sup>, 小型 乘用車의 디젤機關에 適用한 境遇<sup>33)</sup> 등에서 EGR率의 增加는 煤煙微粒子의 排出量 增加를 招來한다고 했다.

그러나 鈴木는 디젤機關의 渦流形 燃燒室에 內部 EGR法을 採用한 結果<sup>3)</sup>, EGR率이 煤煙微粒子 濃도特性에는 거의 影響을 미치지 않는다고 했고, 小高<sup>12)</sup> 및 Narusawa 등<sup>13)</sup>은 6氣筒 4사이클 直接噴射式 大型車의 디젤機關을 使用한 實驗 結果, 어떠한 走行패턴에 있어서도 EGR率에 의해 煤煙微粒子의 濃도가 顯著하게 增加하지 않는다고 했다. 또한 그들은 全負荷 加速時에 있어서 煤煙微粒子 濃도의 舉動을 調査한 結果, 스파이크(spike)形狀의 增加가 보였는데, 이것은 EGR配管系의 無用體積(dead volume)에 의한 循環가스의 遲延에 基

因한다고 했다.

디젤機關의 煤煙微粒子 濃도는 溫度 函數로서 高溫域에서는 燃燒가스溫度가 增加할수록 減少하는데<sup>31,36)</sup>, 특히 燃燒가스溫度가 上昇하면 O<sub>2</sub>, OH 등에 의해 煤煙微粒子 및 CO의 酸化가 促進된다<sup>37~40)</sup>. EGR率을 높이면 煤煙微粒子와 相關關係가 있는 排氣 酸素濃도가 낮아서 燃燒가스 熱容量이 增加하여 燃燒가스溫度가 낮아지기 때문에<sup>10,13)</sup>, 本論文 및 其他 研究結果처럼 EGR率이 增加하면 煤煙微粒子 濃도는 增加한다.

### 3.3 最適 EGR率의 推定

EGR率 增加에 따른 各 排出物의 增減關係는 相互 다른 現象을 나타내고 있는데, 특히 NO<sub>x</sub>低減은 煤煙微粒子의 增加와 相互交換條件(Trade off)의 關係가 있기 때문에, NO<sub>x</sub>와 煤煙微粒子 濃도를 同時에 低減시키기 위해서는 運轉狀態에 適合한 精密하고도 應答성이 좋은 EGR率制御가 必要하다. 특히, 高負荷에 있어서는 出力이 制限되므로 負荷에 따라서 排氣 循環量을 加減할 수 있는 制御機構가 必要하게 된다. 이러한 EGR率 制御機構를 考慮하는 觀點에서 지금까지 考察한 各種 排氣 排出物 生成에 미치는 EGR率의 影響을 中心으로 韓國 大型 디젤機關車의 排出物 規制基準<sup>42)</sup>에 可能한 限 適合하도록 NO<sub>x</sub>의 境遇는 850 ppm, 煤煙微粒子의 境遇는 3(Bosch NO<sub>x</sub>)<sup>2,42)</sup>, CO의 境遇는 980ppm, HC(Total)의 境遇는 670ppm을 基準으로 하여 最適 EGR率을 推定했다.

Fig. 10은 機關回轉速度 1800rpm인 境遇에 대해서 가로軸에 EGR率, 세로軸에 負荷率을 表示하여 各種 排出物의 基準에 대한 境界領域을 나타낸 것이다. 그림에서 排出物濃도의 許容範圍內에서 最適 EGR率을 適用할 수 있는 領域이 存在함을 알 수 있다. 同 方法으로 本 實驗 範圍內의 다른 機關回轉速度에 대해 排出物 規制基準值에 可能한 限 벗어나지 않도록 하고, 벗어날 境遇에는 全體 汚染物質의 排

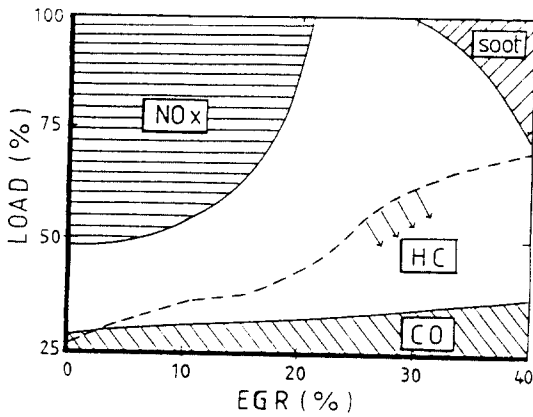


Fig. 10 Boundary regions of respective exhaust emission limits at engine speed 1800 rpm

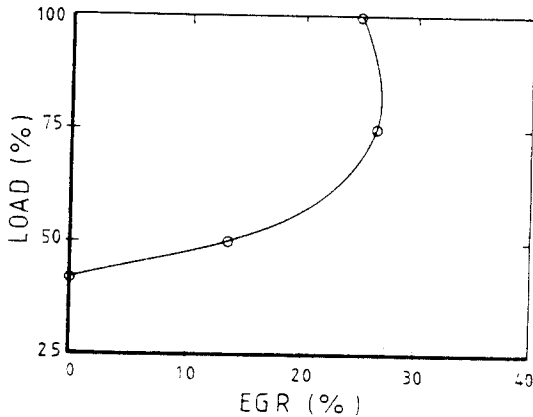


Fig. 11 Optimal EGR rate

출량을 줄일 수 있는 방향으로 EGR率을 推定한 結果가 Fig. 11과 같다. 그림에서 最適의 EGR率은 負荷 25~42%에서는 0%, 負荷 50%에서는 13%, 負荷 75%에서는 27%, 負荷 100%에서는 25%로 推定된다.

#### 4. 結 論

水冷·8氣筒 直接噴射式의 4行程 디젤機關에 있어서 EGR率, 負荷率 및 機關回轉速度의 3個 要素中 하나의 파라미터를 바꿔가면서 EGR率이 燃料消費率 및 各種 排出物에 미치는 影響에 대해 實驗的으로 調査하여 얻은 主要한 結果는 다음과 같다.

(1) EGR率의 增加에 따른 燃料消費率 變化

는 아주 작은데, 이것은 本 實驗의 EGR率 範圍內에서는 燃燒에 必要한 酸素量이 不足하지 않기 때문인 것으로 推定된다.

(2) CO<sub>2</sub>排出物은 同一 機關回轉速度에서는 EGR率이 높을수록, 高負荷일수록 增加하는데, 이런 傾向은 機關回轉速度가 빠를수록 增加幅이 더 커진다.

(3) CO排出物은 同一 機關回轉速度에서 高負荷와 低負荷의 境遇 EGR率이 커짐에 따라 顯著하게 增加하고, 高EGR率에서는 負荷에 대한 CO排出物 曲線이 오목한 形態로 나타나는데, 이 때 增加率은 低負荷時보다 高負荷時에 더욱 크다.

(4) HC排出物은 同一 機關回轉速度에서는 負荷가 낮을수록, EGR率이 높을수록 增加하지만, 機關回轉速度를 增加시키면 傾向은 같으나 全般的으로 排出量이 顯著하게 減少한다.

(5) NO<sub>x</sub>排出物은 EGR率을 增加시킴에 따라 燃燒가스溫度의 低下로 인해 顯著하게 減少하는데, 특히 高速, 高負荷에서 減少率이 크다.

(6) 煤煙微粒子 排出物은 同一 機關回轉速度에서는 負荷가 클수록, EGR率이 增加할수록 增加하는데, 高負荷率에서 EGR率의 影響이 크다.

(7) EGR率의 增加에 따른 NO<sub>x</sub>와 煤煙微粒子 排出物 特性은 서로 反對 現象인데, 本 研究 範圍內에서 各種 排出物 特性을 考慮하여 最適 EGR率을 推定하면 負荷 42%에서 0%, 負荷 50%에서 13%, 負荷 75%에서 27%, 負荷 100%에서 25%이다.

#### 參 考 文 獻

- 1) "USA - Code of Federal Regulations," Protection of Environment Agency, Title 40, Part 86, Card 41~50.
- 2) Bastenhof, D. and Lausch, W., 1991, "Environmental Aspects in Medium-Speed Four-Stroke Diesel Engines," The Motor Ship, 13th International Marine Propulsion Conference, pp. 1~23.



- 3) 鈴木邦男, “ディーゼル機関の低排出化を圖る燃焼制御,” 1980, 内燃機関 19, pp. 32~40.
- 4) Needham, J. R., May, M. P., Doyle, D. M., Faulkner, S. A. and Ishiwata, H., 1990, “Injection Timing and Rate Control - A Solution for Low Emissions,” SAE 900854, pp. 1~11.
- 5) Walder, C. J., 1973, “Reduction of Emissions from Diesel Engines,” SAE 730214, pp. 1~17.
- 6) Kruggel, O., 1987, “Research into the Reduction of Nitric Oxides in High-Speed Diesel Engines, CIMAC '87(Warsaw),” D-19, pp. 1~20.
- 7) Henein, N. A., 1967, “Analysis of Pollutant Formation Control and Fuel Economy in Diesel Engines,” Progress Energy and Combustion Science, Vol. 1, pp. 165~207.
- 8) 盧相舜, 裴明煥, 1984, “물-가스홀 混合物을 燃料로 使用한 가솔린機關의 性能 및 排氣成分에 關한 實驗的 研究,” 韓國舶用機關學會誌 8, pp. 25~38.
- 9) Stumpp, G. and Banzhaf, W., 1978, “An Exhaust Gas Recirculation System for Diesel Engines,” SAE 780222, pp. 1~12.
- 10) Plee, S. L., Ahmad, T. and Myers, J. P., 1981, “Flame Temperature Correlation for the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate and NO<sub>x</sub> Emissions,” SAE 811195, pp. 75~91.
- 11) Chan, T. T. and Borman, G. L., 1982, “An Experimental Study of Swirl and EGR Effects on Diesel Combustion by Use of the Dumping Method,” SAE 820359, pp. 193~202.
- 12) 小高松男, 1989, “大型ディーゼル車のEGRによる實用運轉時NO<sub>x</sub>抑制方策とその効果,” 内燃機関 28, pp. 17~23.
- 13) Narusawa, K., Odaka, M., Koike, N., Tsukamoto, Y. and Yoshida, K., 1990, “An EGR Control Method for Heavy Duty Diesel Engines under Transient Operations,” SAE 900444, pp. 1~14.
- 14) Quader, A. A., 1971, “Why Intake Charge Dilution Decreases Nitric Oxide Emission from Spark Ignition Engines,” SAE 710009.
- 15) Pischinger, R. and Cartellieri, W., 1972, “Combustion System Parameters and Their Effect upon Diesel Engine Exhaust Emissions,” SAE 720756.
- 16) Wilson, R. P., Muir, E. B. and Pellicciotti, F. A., 1974, “Emissions Study of a Single-Cylinder Diesel Engine,” SAE 740123.
- 17) Marshall, W. F. and Fleming, R. D., 1971, “Diesel Emissions as Related to Engine Variables and Fuel Characteristics,” SAE 710836.
- 18) Parker, R. F. and Walker, J. W., 1972, “Exhaust Emission Control in Medium Swirl Rate Direct Injection Diesel Engines,” SAE 720755.
- 19) Bascom, R. C., Broering, L. C. and Wulfhorst, D. E., 1971, “Design Factors That Affect Diesel Emissions,” SAE 710484.
- 20) Tsunemoto, H. and Ishitani, H., 1980, “The Role of Oxygen in Intake and Exhaust on NO Emission, Smoke and BEMP of a Diesel Engine with EGR System,” SAE 800030.
- 21) Wade, W. R., 1980, “Light-Duty Diesel NO<sub>x</sub>-HC-Particulate Trade-Off,” Studies, SAE 800335.
- 22) Hiroyasu, H., Arai, M., Nakanishi, K., 1980, “Soot Formation and Oxidation in Diesel Engines,” SAE 800252.
- 23) Lyn, W. T., 1963, “Study of Burning Rate and Nature of Combustion in Diesel Engines,” Ninth Symposium (International) on Combustion, Academic Press, New York, PP. 1069~1082.
- 24) Gumbleton, J. J., Bolton, R. A. and Lang, H. W., 1974, “Optimizing Engine Parameters with Exhaust Gas Recirculation,” SAE 740104.
- 25) 野平英隆, 小端喜代志, 1977, “EGRの研究(第1報) - 筒内燃焼ガス割合(BGR)と筒ガス内 - 燃料比(G/F)による評價 -, ” トヨタ技術 第26巻第2號, pp. 156~166.
- 26) Nakajima, Y., Sugihara, K. and Muranaka, S., 1981, “Effects of Exhaust Gas Recirculation

- on Fuel Consumption," Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 195, pp. 369~376.
- 27) Mayer, A. and Pauli, E., 1988, "Emissions Concept for Vehicle Diesel Engine Supercharged with COMPREEX," SAE 880008, pp. 77~89.
- 28) Nagai, T. and Kawakami, M., 1989, "Reduction of NO<sub>x</sub> Emission in Medium-Speed Diesel Engines," SAE 891917, pp. 1~15.
- 29) 田代實, 辻村欽司, 1972, "ディーゼル機關の排氣對策," 内燃機關 Vol. 11 (自動車用機關の燃燒と氣), pp. 120~127.
- 30) 池上詢, 1992, "燃燒改善の展望," 日本機械學會誌, Vol. 95, pp. 47~50.
- 31) 藪明煥, 1989, "高壓下の豫混合氣燃燒におけるすす生成に関する研究," 東京工業大學博士學位論文, pp. 2~6.
- 32) Frenklach, M. and Clary, D. W., 1984, "Detailed Kinetic Modeling of Soot Formation in Shock-Tube Pyrolysis of Acetylene," 20th Symposium(International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 887~901.
- 33) 小西正己, 1992, "小型乗用車の課題解決に向けて," 日本機械學會誌, Vol. 95, pp. 64~67.
- 34) 水澤雅武, 1992, "建設機械の排出ガス對策," 日本機械學會誌 Vol. 95, pp. 72~75.
- 35) Gaydon, A. G. and Wolfhard, H. G., 1970, "Flames, Their Structure, Radiation and Temperature," Chapman and Hall LTD., pp. 175~210.
- 36) Kamimoto, T. and Bae, M. H., 1988, "High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines," SAE 880423, pp. 1~10.
- 37) Glassman, I., 1977, "Combustion," Academic Press, New York.
- 38) Fenimore, C. P. and Jones, G. W., 1967, "Oxidation of Soot by Hydroxyl Radicals," J. Phys. Chem., Vol. 71, pp. 593~597.
- 39) Neoh, K. G., Howard, J. B. and Sarofim, A. F., 1981, "Soot Oxidation in Flames," Particulate Carbon, Formation During Combustion, pp. 261.
- 40) Fristrom, R. M. and Westenberg, A. A., 1965, "Flame Structure," McGraw-Hill, New York.
- 41) 大氣環境保全法 施行規則, 製作車 排出許容基準(第52條 關聯).
- 42) "Zusammenhang Zwischen Ruß gehalt und Anzeigewert und Bosch ETD020.00/ETD 020.50," Bosch - Schwarzungszahl SZ mit Geräten ETD 020.00/ETD 020.50.