

<論 文>

Wiebe의 燃燒函數에 의한 디젤機關의 燃燒騒音低減에 관한 研究

李盛魯* · 宮本 登** · 村山 正** · 盧相舜***

(1985年 5月 10日 接受)

A Study for Reduction of Combustion Noise in Diesel Engine by Wiebe's Combustion Function

Sung-Ro Lee, Nobori Miyamoto, Tadaci Murayama and Sang-Soon Ro

Key Words: 熱發生速度(Heat Rrelease Rate), 燃燒特性值(Combustion Property), 豫混合燃燒
(Pre-mixed Combustion), 擴散燃燒(Deffusive Combustion), *CPL*(Cylinder Pressure
Level)

Abstract

This research is to find a means of reducing diesel engine combustion noise with none or minimum sacrifice of engine performance by investigating the influence of Cylinder Pressure Level (*CPL*).

For this purpose, modified Wiebe's combustion function, considering the heat release curve as a combination of both premixed and diffusive combustion portion, was exclusively used to obtain the indicator diagram and computer codes were developed for the numerical analysis.

Following are the results of this research.

(1) *CPL* increases almostly with lag of ignition timing increasing α and decreasing θ_d , but at the crank angle with the maximal efficiency, *CPL* is independent of α and θ_d with constant value of 200 *dB* especially at the low frequency.

(2) For the constant ignition timing, the effects of α and θ_d on *CPL* were the most significant at the frequency of about 1KHz and 300Hz respectively.

(3) For the constant value of α and θ_d , *CPL* increases lineary with load but thermal efficie-ncy increase very rapidly with maximum value of load $Q_T=30\sim 40$ MJ/Kmol, then starts to decrease slowly.

(4) The most effective way of reducing combustion noise without sacrificing thermal efficie-ncy, is to decrease α . In the case of constant α , there always exists a optimum value of θ_d with respect to he various compression ratio.

* 正會員, 忠南大學校 工科大學 機械工學科

** 日本北海道大學 工學部 機械工學科

*** 正會員, 全北大學校 工科大學 機械工學科

記 號 說 明

CPL : Cylinder pressure level(*dB*)

*CPL*₁₈₃, *CPL*₁₁₈₃ : 周波數 183 및 1183에서의 *CPL*

- (dB)
- θ : 燃燒期間(°CA)
- $P(\theta)$: 壓力變化(P_a)
- a_0 : Fourier級數의 常數
- a_n, b_n : Fourier級數의 係數
- n : Fourier級數의 次數(order)
- S_n : n 次의 周波數成分
- Q_T : 總發生熱量(J/kmol)
- Q_p, Q_d : 豫混合 및 擴散燃燒部分의 供給熱量(J/kmol)
- Q_p, Q_d : 豫混合 및 擴散燃燒部分의 燃燒期間(°CA)
- M_p, M_d : 豫混合 및 擴散燃燒部分의 燃燒特性值
- θ_{i_r} : 着火時期(°CA)
- α : 豫混合燃燒率
- η_i : 圖示熱效率
- ϵ : 壓力比

1. 序 論

現在, 디젤機關의 騒音 가운데에서 排氣音은 消音器에 의하여 대폭적으로 低減시킬 수 있기 때문에 機關本體로 부터의 音이 最大의 問題이다.

이 音은 실린더內의 壓力을 強制力으로 하여 생기는 燃燒騒音과 그 外의 各 運動部分으로부터 發生하는 機械騒音으로 大別할 수 있는데, 前者는 燃燒에 따른 壓力의 急上昇에 의하여 機關構造가 勵振됨에 따른 것이다.

디젤機關에 있어서는, 특히 燃燒騒音의 比率이 크고, 지금까지 그 原因의 解明과 低減에 관하여 많은 勞力이 기울여져 왔지만^(1,2), 그래도 아직 충분치 못한 實情이다. 따라서 本研究에서는 디젤機關의 燃燒騒音의 低減을 最終目標로 하여 Wiebe의 燃燒函數에 의해 近似시킨 熱發生速度의 變化가 디젤機關의 燃燒騒音 및 圖示熱效率에 미치는 影響에 關하여 數值實驗을 通하여 解析檢討하였다.

그 結果 熱發生速度曲線의 形狀과 cylinder pressure level(CPL)과의 關係가 어느정도 밝혀지게 되었고, 또 圖示熱效率을 低下시키는 일이 없이 低騒音을 實現하기 위한 熱發生速度의 調節에 대한 指針을 밝힐 수가 있었다.

2. 計算方法

Wiebe의 燃燒函數로 부터 燃燒壓力經過 $P(\theta)$ 또는 圖示熱效率等을 구하기 위한 計算方法에 관한 구체적 內容은 이미 報告했기 때문에⁽³⁾, 여기에서는 그 記

述을 省略한다. 한편 燃燒騒音에 關해서는, CPL이 燃燒騒音과 一義的인 相關을 갖고 있는 것으로부터⁽⁴⁾, 本研究에 있어서의 騒音評價는 CPL에 있어서 行하기로 했다. CPL의 計算方法은 아래와 같다.

실린더內의 壓力變化 $P(\theta)$ 를 Fourier級數로 展開하면 다음식이 된다. 즉

$$P(\theta) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_n (a_n \cos \frac{n}{2}\theta + b_n \sin \frac{n}{2}\theta) \quad (1)$$

여기에서

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{4\pi} P(\theta) \cos \frac{n}{2}\theta d\theta \\ b_n &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{4\pi} P(\theta) \sin \frac{n}{2}\theta d\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

이 경우, 4 사이클機關을 想定하고 있기 때문에 식 (2)에 表示하는 바와 같이 機關回轉의 $\frac{1}{2}$ 次가 order의 基準으로 되어 있다. 지금 n 次의 周波數成分을 S_n 이라 하면, $S_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ 으로 되고, 이것을 音壓레벨로 한 값이 CPL이다.

즉

$$(CPL)_n = 20 \log_{10} (S_n / 2.8861) + 200 \text{ (dB)} \quad (3)$$

단 식 (3)에 있어서 基準音壓 $P_0 = 2 \times 10^{-4} \text{ dyne/cm}^2$ 이고, $P(\theta)$ 의 單位는 kg/cm^2 이다.⁽⁴⁾

식 (2)의 計算은 Simpson의 數值積分에 의해 行하였다.

燃燒에 의해 發生한 熱量의 時間比率로서 定義되는 熱發生速度(heat release rate)는 이미 前報에서 報告한 Wiebe의 燃燒函數를 利用했다⁽³⁾.

그리고 대개의 경우 壓縮比 $\epsilon = 20.6$, 回轉數 $n = 2000$ rpm. 總發生熱量 $Q_T = 50 \text{ MJ/kmol}$ 一定으로 하여, 크랭크角度 0.1°CA 마다 計算했다. 機關諸元으로서 bore \times stroke = $102 \times 106 \text{ mm}$, stroke volume = 860 cc 의 4 사이클豫燃燒室式水冷單機筒機關을 상정했다.

3. 解析結果 및 考察

3.1. 豫混合燃燒率 α 의 影響

Fig. 1은 燃燒期間 $\theta_s = 60^\circ \text{CA}$ 및 着火時期 $\theta_{i_r} = -10^\circ \text{CA}$ 로 하여, α 를 變數로 한 경우의 周波數에 대한 CPL을 表祈한 것이다. 그림으로부터 α 의 어느 값에 있어서도 周波數의 增加에 따라 CPL은 減少하지만, 그 程度는 高周波數일수록 현저하게 되는 것을 알 수 있다. 한편 總發生熱量에 대한 豫混合燃燒率 α 의 增大에 의해 CPL은 增大되지만, 그 程度는 1KHz 附近에서 현저하다.

Fig. 2는 着火時期에 대한 熱效率 및 183Hz 및 118

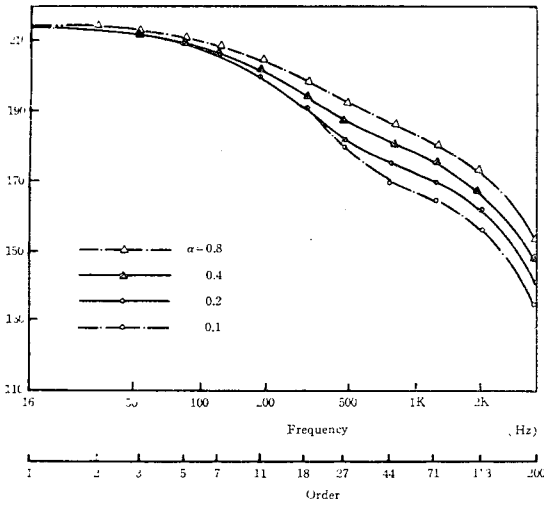


Fig. 1 Relation between α and CPL

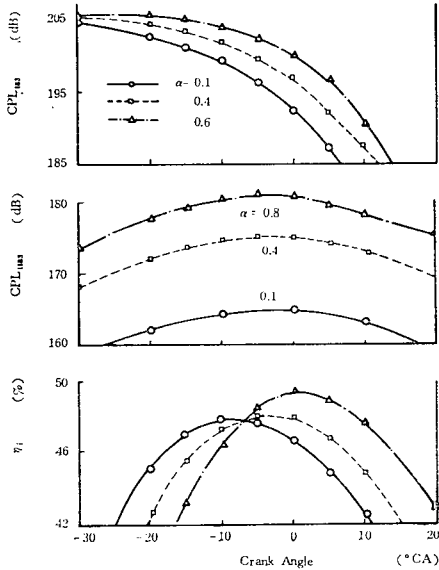


Fig. 2 Influence of α on thermal efficiency and CPL
3Hz에서의 CPL 즉 CPL_{183} 과 CPL_{1183} 을 表示한 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 CPL_{183} 은着火時期의 遲延에 따라 減少하는데 反하여, CPL_{1183} 및 圖示熱效率 η_i 에 關해서는 各各 最大로 되는 着火時期가 存在하고, 그 時期보다도 着火時期가 遲延됨에 따라 低下하는 것을 알 수 있다.

한편 α 의 增大에 의해 어느 CPL도 增大되지만, 특히 着火時期가 遲延되는 경우에는 η_i 가 上昇하고 있다. 역시 η_i 가 最高로 되는 着火時期는 α 의 增加에 따라 遲延되는데, 高周波數에서의 CPL_{1183} 이 最大로 되는

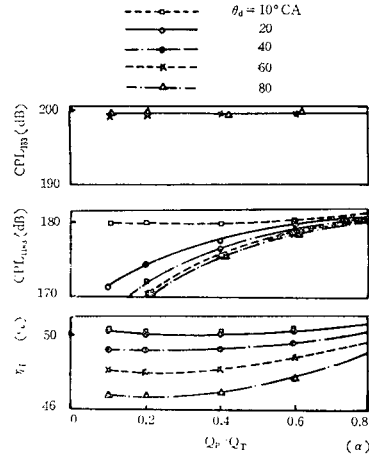


Fig. 3 Influence of α and θ_d on thermal efficiency and CPL

着火時期는 α 에 의해 크게 변하지 않는다. Fig. 3은 熱效率最高의 着火時期에서의 α 와 CPL의 關係를 表示한 것이다. 즉 CPL_{183} 은 α 및 θ_d 에는 無關係로 거의 一定值를 나타내는데, CPL_{1183} 은 α 의 增大 및 θ_d 의 短縮에 의해 增大된다. 그러나 CPL_{1183} 은 θ_d 가 작든가 또는 α 가 增大되는 경우에는 거의 一定值에 수렴하는 現象이 있다. 즉 $\theta_d=10^\circ CA$ 에서는 α 에 無關係로, 또 $\alpha=0.8$ 附近에서는 θ_d 에 無關係로 CPL_{1183} 은 一定值를 表示하고 있다. 역시 最大의 圖示熱效率는 α 의 增大에 의해 약간 上昇하고, 또 θ_d 의 短縮에 의해 上昇하지만, θ_d 가 $20^\circ CA$ 以下에서는 거의 一定值로 된다.

3.2. 擴散燃燒期間 θ_d 의 影響

Fig. 4는 $\alpha=0.1$ 및 $\theta_{i2}=-10^\circ CA$ 에 있어서 θ_d 를 變數로 한 경우의 周波數에 대한 CPL의 關係를 表示한 것이다.

또 Fig. 5에서는 $\alpha=0.1$ 一定으로 하여 θ_d 를 變數로 한 경우의 크랭크角度에 대한 CPL_{183} , CPL_{1183} 및 圖示熱效率의 關係를 表示하고 있다.

Fig. 4로부터, θ_d 의 短縮에 의해 CPL은 增加하지만, 低周波數 즉 300Hz 附近에서 현저한 것을 알 수 있다. 한편 θ_d 를 바꿀 때의 着火時期가 圖示熱效率 η_i 및 CPL에 미치는 影響은, α 를 바꾼 경우와 定性的으로 거의 一致하고 있다. 즉 θ_d 의 短縮에 따라, η_i 가 最大로 되는 着火時期는 變化하지 않는다. 또 着火時期의 遲延에 따라서 CPL_{183} 은 一定한 모양으로 減少하는데 CPL_{1183} 및 η_i 는 最大值를 나타낸 후 減少된다

Fig. 6은 熱效率이 最高로 되는 着火時期에 있어서

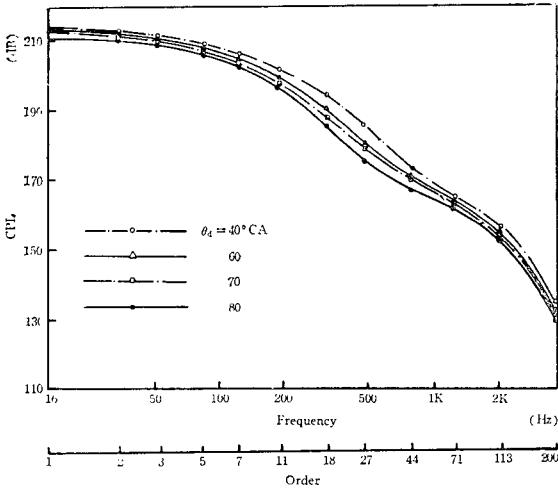


Fig. 4 Relation between θ_d and CPL

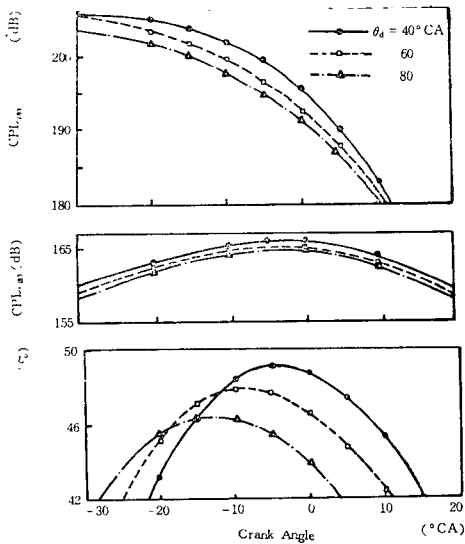


Fig. 5 Influence of θ_d on thermal efficiency and CPL

의 θ_d 와 CPL 및 $(\eta_i)_{max}$ 와의 關係를 表示한 것이다. 즉 θ_d 의 增加에 따라, CPL_{183} 은 α 의 경우와 마찬가지로 거의 一定值를 表示하는데, CPL_{1183} 및 η_i 는 減少하고, 그 程度는 α 가 작을수록 顯저하다.

以上の 結果로부터 α 의 增大 및 θ_d 의 短縮은 η_i 를 改善하는 한편, 低 및 高周波數에서의 CPL은 增大되는데, η_i 가 最高로 되는 着火時期에 있어서는 低周波數地域에서의 CPL은 α 및 θ_d 에 의해 變化하지 않고, 오히려 高周波에서의 CPL이 變化하는 것이 밝혀지게 되었다.

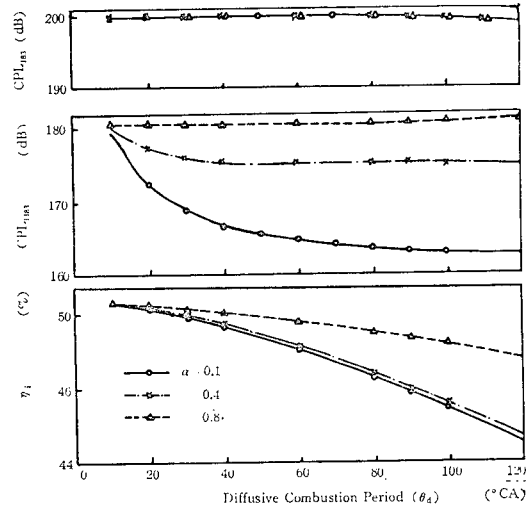


Fig. 6 Influence of θ_d and α on thermal efficiency and CPL

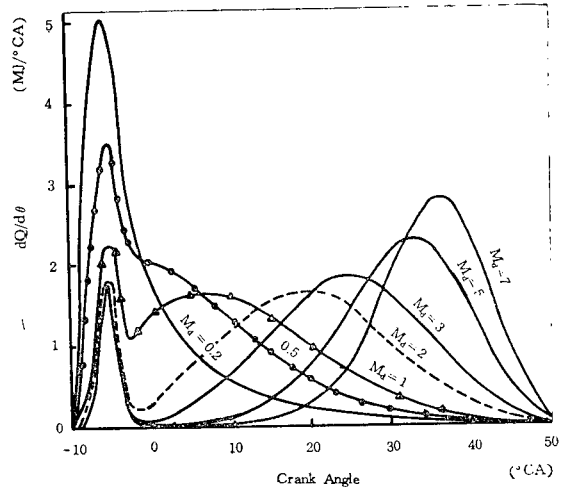


Fig. 7 Relation of θ_{ix} and $dQ/d\theta$ for combustion property M_d

3.3. 擴散燃燒特性值 M_d 의 影響

Fig. 7은 $\alpha=0.1$, $\theta_d=60^\circ CA$ 一定으로 한 경우의 M_d 와 熱發生速度와의 關係를 나타낸 것이다⁽³⁾.

또 Fig. 8은 $\alpha=0.1$, $\theta_d=60^\circ CA$ 및 $\theta_{ix}=-10^\circ CA$ 一定으로 한 경우의 M_d 의 變化에 따른 圖示熱效率 및 兩周波數에 대한 CPL을 表示한 것이다. 이 경우 M_d 의 減縮에 따라 η_i 는 上昇하나, CPL_{183} 은 M_d 의 變化에 따른 影響이 거의 없고, CPL_{1183} 은 $M_d < 2$ 인 경우에는 상당한 影響을 받고 있음을 알 수 있다.

3.4. 負荷 Q_T 의 影響

Fig. 9는 α 및 θ_d 를 一定으로 하여 Q_T 를 變化시킨

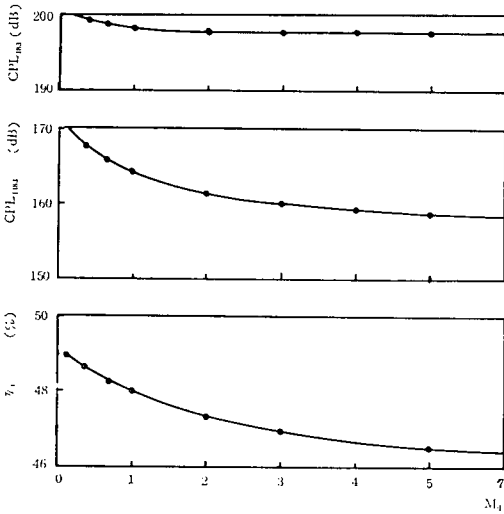


Fig. 8 Influence of M_a thermal efficiency and CPL

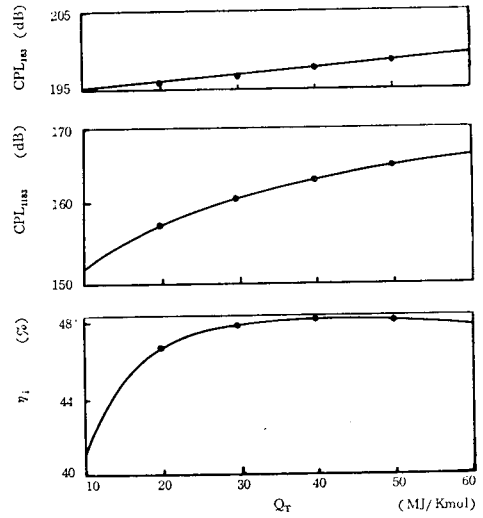


Fig. 10 Influence of Q_r on thermal efficiency and CPL

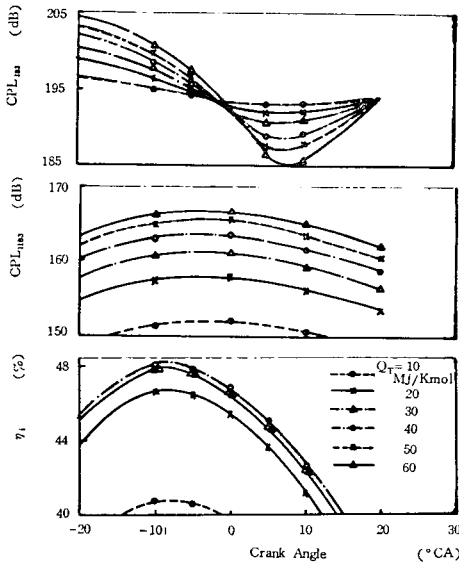


Fig. 9 Influence of Q_r and ignition timing on thermal efficiency and CPL

때의着火時期가 η_i 및 CPL 에 미치는 영향을表示한 것이다. 그림으로부터 Q_r 가增加하는 경우 CPL_{1183} 은着火時期의變化에 불구하고增大됨에 대하여, CPL_{183} 은着火時期가 비교적 빠른 경우에는增大되지만 늦은 경우에는 오히려減少하는 경향을 나타내고 있다.

한편 Fig. 10은 $\alpha=0.1$ 및 $\theta_a=60^\circ CA$ 및 $\theta_{i\alpha}=-10^\circ CA$ 에 있어서의 Q_r 에 대한 CPL_{183} , CPL_{1183} 및 η_i 와의關係를 각각表示한 것이다. 역시 이 경우着火時期로서는圖示熱效率이最高로 되는點을選定했다. 즉 Q_r 의增加에 따라 CPL_{183} 및 CPL_{1183} 모두 단조롭게

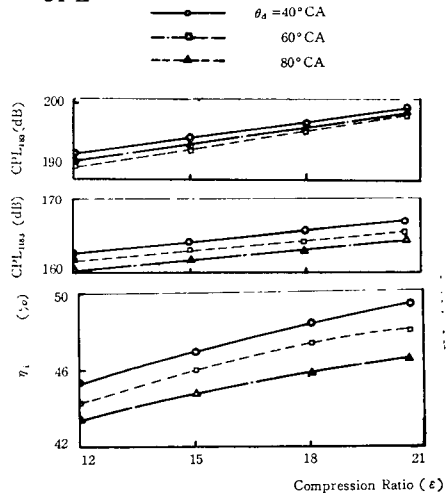


Fig. 11 Influence of compression ratio on thermal efficiency and CPL

增大됨에 반하여 η_i 는 대폭적으로上昇하고, $Q_r=30\sim 40 MJ/kmol$ 이附近에서 最大值를表示한 후 완만하게減少하고 있다.

Fig. 11은 $\alpha=0.1$ 에서 θ_a 를變數로 하여壓縮比 ϵ 과 CPL_{183} , CPL_{1183} 및 η_i 와의關係를表示한 것이다. 역시 이 경우着火時期로서는 η_i 가最高로 되는點을選定했다. 그림에서壓縮比의增大에 따라 CPL_{183} , CPL_{1183} 및 η_i 는 모두 거의直線的으로增大되는 것을알 수 있다.

3.5. 圖示熱效率과 CPL 의關係

Fig. 12는 α 및 θ_a 가 $(\eta_i)_{max}$ 과 CPL_{1183} 에 미치는

영향에 대하여 表示한 것이다. 最高의 圖示熱效率 (η_i)_{max}은 α 의 增大과 θ_d 의 短縮에 의해 大게 上昇하고 있다. 한편 高周波數域의 CPL_{1183} 은 α 의 增大에 따라서 大폭적으로 增大되는데, 그 程度는 θ_d 가 $20^\circ CA$ 以下로 되면 大폭적으로 減少하고 있다. 역시 (η_i)_{max}에서의 着火時期에 있어서의 CPL_{183} 은 α 와 θ_d 에 거의 無關係하고, 一定值 $200dB$ 을 나타내고 있다.

Fig. 13 및 14는 η_i 에 대한 CPL_{183} 및 CPL_{1183} 의 關係를 表示한 것이다.

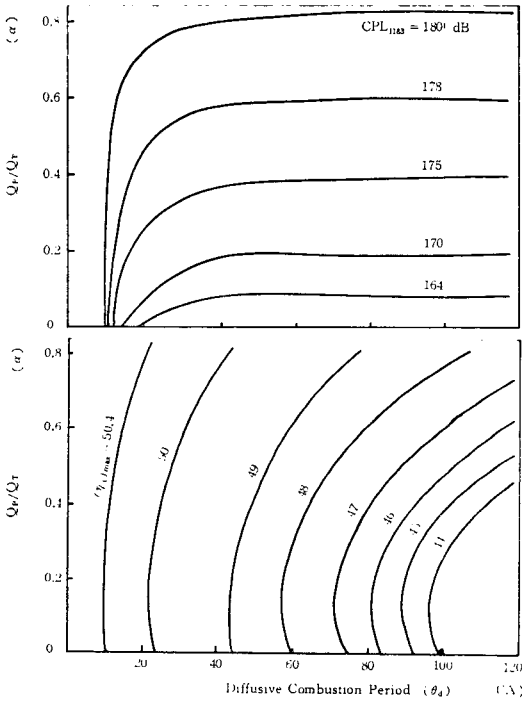


Fig. 12 Relation between α , θ_d maximum of thermal efficiency and CPL

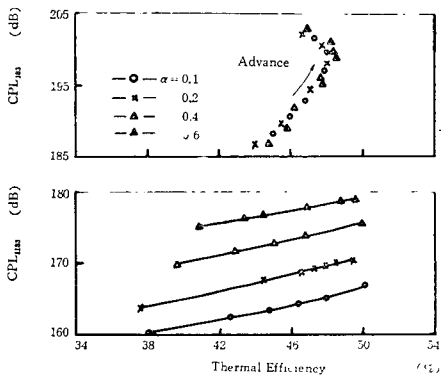


Fig. 13 Relation between thermal efficiency, α and CPL

그림으로부터 η_i 와 CPL 과의 사이에는 低周波數域에 있어서는 着火時期가 大도로 前進하지 않는 범위에 있어서, 또 高周波數域에서는 着火時期의 如何에 불구하고, 各各 正의 相關이 存在하는 것을 알 수 있다. 역시 η_i 와 CPL 과의 關係는 α 와 θ_d 에 의해 약간 다르다 해도 특히 低周波數域에서의 CPL 과 η_i 는 α 에 의해서는 거의 影響을 받지 않는 것이 밝혀지게 되었다.

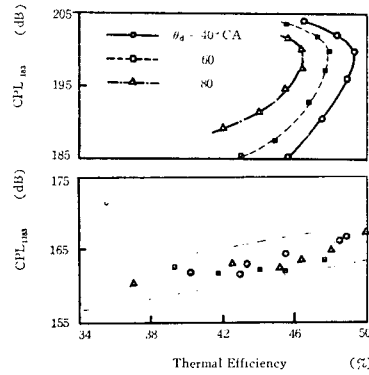


Fig. 14 Relation between thermal efficiency, θ_d and CPL

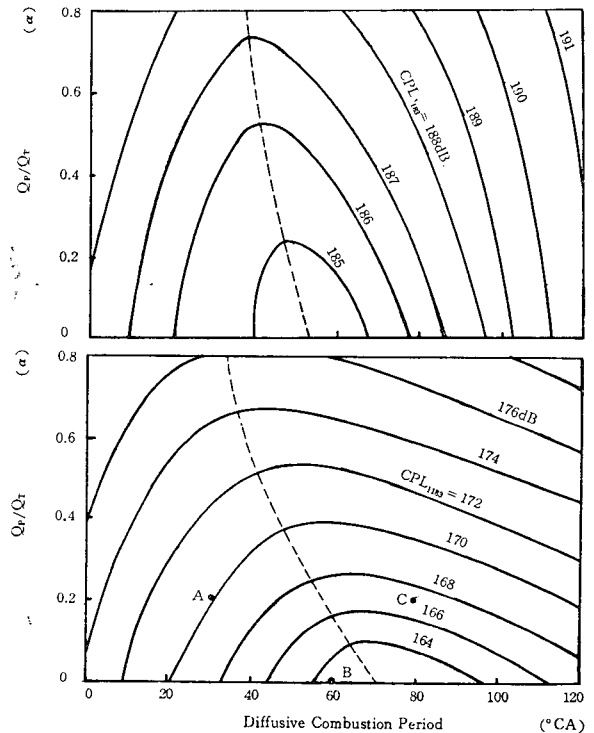


Fig. 15 Relation between α , θ_d and CPL under the constant of thermal efficiency

3.6. 圖示熱效率를 犧牲하는 일 없이 低騒音을 實現하기 위한 熱發生速度에 대한 指針

Fig. 15는 $\eta_i=44\%$ 一定에 있어서 α 및 θ_d 가 CPL 에 대하여 미치는 영향을 表示한 것이다. 低 및 高周波地域에서의 CPL은 α 의 增大에 의해 增大되는데, 어느 일정한 α 에 대해서는, 各各 最少로 되는 θ_d 가 存在하고, $\alpha=0$ 에 있어서 CPL의 最少値는, 低周波數의 경우에는 $\theta_d=50^\circ\text{CA}$, 高周波數에서는 $\theta_d=70^\circ\text{CA}$ 인 것이 밝혀지게 되었다.

Fig. 16은 Fig. 15에 있어서의 거의 最少値의 CPL인 點 B($\alpha=0, \theta_d=60^\circ\text{CA}$)와 다른 典型的인 點 A와 C와의 熱發生速度를 比較한 線圖이다⁽³⁾. 그림으로부터 $\alpha=0, \theta_d=60^\circ\text{CA}$ 에 있어서는 매우 圓滑한 指壓線圖이 얻어지고 있는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 17은 $\theta_d=60^\circ\text{CA}$ 및 $\eta_i=44\%$ 一定의 條件下에서 壓縮下에서 壓縮比에 대한 CPL을 表示한 것이다. 그림으로부터 CPL₁₈₃은 α 보다도 오히려 壓縮比의 영향을 크게 받고 $\epsilon=15\sim 18$ 에서 最少値를 表示하는 것을 알 수 있다. 한편 CPL₁₁₈₃은 壓縮比에 의

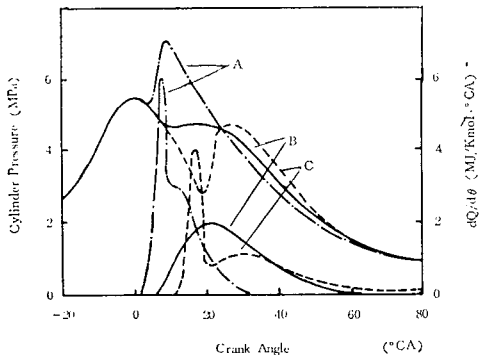


Fig. 16 Optimum rate of combustion in terms of $(dP/d\theta)_{\max}$ under the constant thermal efficiency

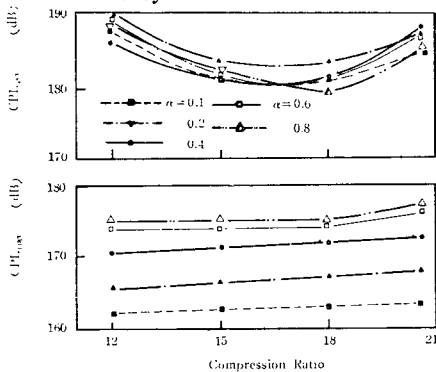


Fig. 17 Relation between compression ratio and CPL and the constant of thermal efficiency

해서는 거의 變化하지 않고, α 의 增大에 따라서 增大되는 것이 밝혀지게 되었다.

4. 結 論

Wiebe의 燃燒函數에 의하여 豫混合燃燒部分과 擴散燃燒部分을 고려한 燃燒室內的 熱發生速度의 近似가 可能하므로, 이를 土臺로 하여 디젤機關의 CPL에 미치는 各因子들의 影響에 대하여 檢討한 解析結果는 다음과 같다.

(1) CPL은 着火時期의 遲延, 豫混合燃燒率 α 의 增大 또는 擴散燃燒期間 θ_d 의 短縮에 따라 대개 增大되는데, 圖示熱效率이 最高로 되는 着火時期에 있어서는 특히 低周波數域에서의 CPL은 α 및 θ_d 의 影響을 거의 받지 않고 일정한 값 200dB을 나타낸다.

(2) 한편 圖示熱效率이 最高로 되는 着火時期에 있어서는 高周波數域에서의 CPL은 α 의 增大 및 θ_d 의 短縮에 의해 增大되는데, 그 程度는 前者의 경우에는 θ_d 가 클수록, 또 後者의 경우에는 α 가 작을수록 현저하다

(3) 着火時期가 一定한 경우에 있어서 α 및 θ_d 의 變化가 CPL에 미치는 영향은 前者에서는 1KHz 부근에서 또 後者에서는 300Hz 부근에서 各各 현저하다.

(4) 熱效率의 低下없이 燃燒騒音을 低下시키는 데는 α 의 減少가 有效하고, α 를 一定하게 할 경우 壓縮比에 대한 θ_d 의 最適値가 存在한다.

後 記

本 計算에 있어서는 北海道大學大型計算機센터를 利用했다.

參 考 文 獻

- (1) 池上 詢, 壓縮着火機關의 燃燒騒音의 發生機構, 自動車機關의 燃燒と排氣, 騒音, 內燃機關編集部編, pp. 128, 1975
- (2) H. List, The Development of Modern Diesel Engine, 日本機械學會 H. List 及び A.M. Scheiterlein 特別講演要旨集, pp. 1~92, 1968
- (3) 李盛魯外, Wiebe의 燃燒函數에 의한 디젤機關의 燃燒와 性能의 解析, 大韓機械學會論文集, 第9卷 第3號, pp. 353~359, 1985
- (4) 小嶋直哉, 디젤機關의 燃燒騒音에 關する研究 日本機械學會論文集, 第42卷 第358號, pp. 1877~1881, 1976
- (5) 村山正外, 디젤機關의 定常および加速運轉時における性能と燃燒特性, 第四回 日本內燃機關合同シンポジウム講演論文集, pp. 265~269, 1984