

<論 文>

디젤機關의 燃燒騒音에 관한 研究

—燃燒壓力變動因子的 影響—

朴 喜 大\* · 李 盛 魯\*\*

(1986年 10月 8日 接受)

A Theoretical Study on Combustion Noise of Diesel Engine

—Influence of Combustion Pressure Variable Factors—

Hee-Dae Park and Sung-Ro Lee

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

Abstract

Cylinder pressure level is defined the value of sound pressure level derived from relations of pressure and frequency which are obtained Fourier series expansion of cylinder pressure.

CPL is alone in general use in combustion analysis without regarding attenuation coefficient determined by engine structure because it is almost constant in various kinds of engines.

Combustion pressure fluctuation and influence on CPL was investigated in this paper using Wiebe combustion function superposition to obtain the effect of premixed and diffusive combustion. the results are as follow.

(1) Influence of combustion maximum pressure( $P_{max}$ ) on CPL is correspond with total energy per cycle well.

(2)  $P_{max}$ ,  $\Delta P_{max}$ ,  $(dp/d\theta)_{max}$  and  $(d^2p/d\theta^2)_{max}$  are very effective on CPL in the range of low frequency, mid-low frequency, mid-high frequency and high frequency respectively.

記 號 說 明

CPL : 실린더압력레벨 (cylinder pressure level)

CPL<sub>183</sub>, CPL<sub>1183</sub> : 周波數 183Hz 및 1183Hz에서의 CPL (dB)

$M_p, M_d$  : 豫混合 및 擴散燃燒部分의 燃燒特性值

$P(\theta)$  : 壓力變化 (Pa)

$Q_p, Q_d$  : 豫混合 및 擴散燃燒部分의 供給熱量 (J/Kmol)

$Q_T$  : 線發生熱量 (J/Kmol)

$\alpha$  : 豫混合 燃燒率

$\Delta P$  : 燃燒壓力과 모우더링 (motoring) 壓力과의 差 (Pa)

$\epsilon$  : 壓縮比

$\eta_i$  : 圖示熱率

\* 正會員, 韓國에너지研究所

\*\* 正會員, 忠南大學校 工科大学 機械工學科

- $\theta$  : 燃燒期間(°CA)
- $\theta_{12}$  : 着火時期(°CA)
- $\theta_p, \theta_a$  : 豫混合 및 擴散燃燒部分의 燃燒期間(°CA)
- $\int Pd\theta$  : 指壓線圖의 크랭크각도에 대한 積分値

1. 序 論

機關騒音은 실린더내의 壓力經過에 의하여 影響을 받는 燃燒騒音과 機關回轉만에 의하여 影響을 받는 機關騒音의 合이라 할 수 있으나, 兩者를 明確하게 區別하는 일은 상당히 어려운 일이다. 그래서 指壓線圖를 Fourier 級數로 展開하여 壓力波形에 대한 周波數成分을 求하고, 그 周波數成分의 레벨(dB)을 실린더 壓力 레벨(CPL)이라 定義하고 있다.

池上<sup>(1)</sup>, Austen 와 Priede<sup>(2)</sup> 등에 의하면, 燃燒騒音은 CPL로부터 그 周波數에 對應하는 減衰係數를 뺀 것이다. 여기서 減衰係數는 燃燒室內의 燃燒波形을 周波數分析함으로서 CPL을 구함과 동시에 또한 SPL(sound pressure level)을 구하여 각 周波數別로 減衰係數 即 CPL-SPL을 구할 수 있다. 이 減衰係數는 엔진에 固有한 것이므로, 機關構造에 의해서만 決定되고, 運轉條件에 의해서는 거의 影響을 받지 않는다고 報告하고 있다. 특히 Huber<sup>(3)</sup> 등은 各種의 機關에 對하여 減衰係數를 實測한 結果, 어느 機關에 있어서도 거의 差異가 없음을 밝히고 있다. 따라서 燃燒騒音의 解析에 있어서는 減衰係數를 既知의 사실로 하여 CPL을 燃燒騒音의 尺度로 利用한다.

以上 언급한 바와 같이 燃燒騒音과 CPL과는 직접 對應하는 것으로서 Craig<sup>(4)</sup>, List<sup>(5)</sup> 등은 CPL에 影響을 주는 燃燒壓力變動의 特性因子로서 壓縮壓力, 燃燒自體 및 燃燒室의 振動등을 들고 있다. 壓縮壓力은 단지 低周波數域에 影響을 미치고, 燃燒스펙트럼(spectrum)은 매우 낮은 周波數에서 燃燒壓力經過의 積分面積에, 低周波域에서 最大壓力과 壓縮壓力과의 差  $\Delta P$ 에, 中周波數域에서 壓力上昇速度  $dp/dt$ 에, 그리고 高周波數域에 있어서는  $d^2p/dt^2$ 에 의존한다고 報告하고 있으며 이들 關係를 圖式的으로만 提示하고 있다.

以上과 같은 定性的인 關係에 關하여 本 研究에서는 理論的인 方法에 의하여 CPL과 周波數(order)사이의 關係를 定量的으로 밝혔다.

2. 解析方法

機關의 燃燒室內의 壓力經過는 熱發生時의 時間的

比率 즉 熱發生速度에 의하여 決定되므로 指壓線圖를 解析하므로써 燃燒室內의 動作가스가 時間에 따라 熱力學的 상태량이 어떻게 變化하는가를 考察할 수 있다. 그러나 指壓線圖의 解析을 위한 基礎理論으로서는 Wiebe의 燃燒函數로부터 燃燒壓力經過  $P(\theta)$  또는 圖示熱效率등을 구하기 위한 計算方法에 關한 구체적 인 내용은 이미 前報<sup>(6)</sup>에 報告했기 때문에 여기에서는 記述을 생략한다. 한편 燃燒騒音에 關해서는 CPL이 燃燒騒音과 一義의인 相關을 갖고 있는 것으로부터 本 研究에서는 燃燒騒音의 評價를 CPL에 關해서 行하기로 하며 CPL의 計算方法은 실린더內의 壓力經過  $P(\theta)$ 를 Fourier 級數로 展開하므로써 구하여지고, 이 方法에 關해서도 前報<sup>(7)</sup>에서 報告했기 때문에 생략하기로 한다. 이와같이 하여 구하여진 CPL과 燃燒壓力變動의 스펙트럼(spectrum)과의 相關關係에 關하여 理論的 方法을 통하여 究明해 보고자 한다.

燃燒壓力變動의 諸因子로서는 燃燒最高壓力  $P_{max}$ , 最高壓力上昇速度  $(dp/d\theta)_{max}$ , 燃燒壓力 二次微分의 最大値  $(d^2p/d\theta^2)_{max}$  燃燒壓力과 모우터링(motering)壓力과의 差  $\Delta P$  및 指壓線圖의 時間에 대한 積分値  $\int Pd\theta$  또는 크랭크각도에 대한 積分値  $\int Pd\theta$ 를 들 수 있다. 1968년 List<sup>(5)</sup>는 各 周波數域의 CPL을 각각 지배하는 諸因子를 Fig. 1에 表示하는 바와 같이 圖示的으로만 提示하고 있다.

本 研究에서는 위의 因子들 중  $\int Pd\theta$  대신에 계산의 편의상  $\int Pd\theta$ 로,  $\Delta P$ 는 最高壓力差의 影響이 가장 크다고 생각되어  $(\Delta P)_{max}$ 를 대상으로 하여 이들 諸因子와 各 周波數成分과의 相關關係에 對하여 檢討하고, 周波數域에 對하여 미치는 影響을 定量的으로 解析하기 위하여 보조 프로그램을 作成하였다.

對象機關은 bore×stroke=102×106mm, stroke volume=860cc의 4 사이클 豫燃燒室式水冷單機筒機關으로

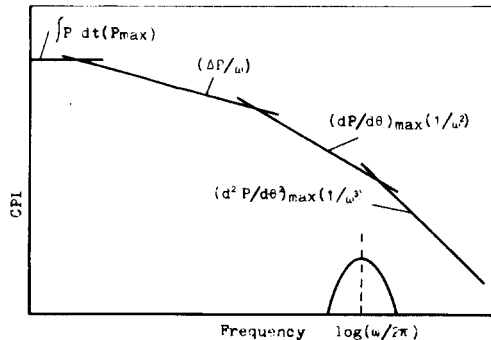


Fig. 1 Relation between CPL and all factors by H. List

로서 運轉條件 및 燃燒函數特性值의 變化는 回轉數를 1000과 2000rpm, 供給熱量  $Q_T$ 를 30과 50MJ/Kmol 그리고 壓縮比를 15와 20.6의 경우에 대하여 着火時期  $\theta_{ix}$ 는  $-20, -10, 0, 10, 20^\circ\text{CA}$ , 豫混合燃燒率  $\alpha$ 는 0.1, 0.4, 0.8 및 擴散燃燒期間  $\theta_d$ 는 30, 70,  $120^\circ\text{CA}$ 로 하여 諸因子가 各 周波數에 對한 CPL에 미치는 영향에 關하여 調査해 보았다.

### 3. 解析結果 및 檢討

#### 3.1 $P_{max}$ 의 影響

Fig. 2는  $P_{max}$ 에 對한  $CPL_{183}$ 의 影響을  $\alpha=0.1$  및  $\alpha=0.4$ 의 경우에 對하여 着火時期와 燃燒期間  $\theta_d$ 를 變數로 하여 表示한 것이다.

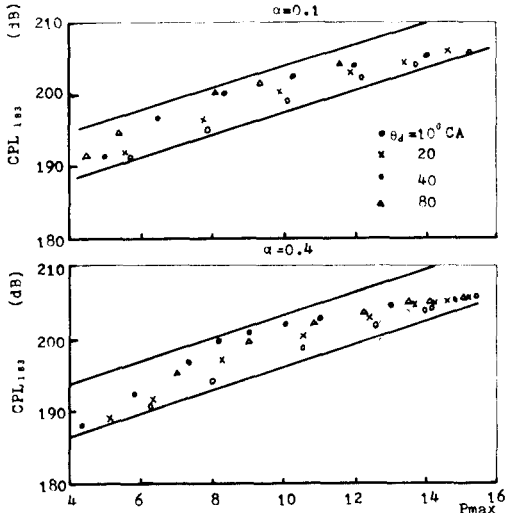


Fig. 2 Influence of  $P_{max}$  on  $CPL_{183}$  in case of parameters of  $\theta_d$  and  $\theta_{ix}$

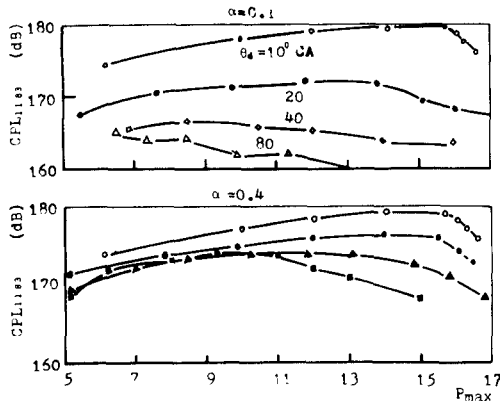


Fig. 3 Distribution of  $CPL$  vs.  $P_{max}$

양쪽 모두  $P_{max}$ 의 增大에 의해  $CPL_{183}$ 도 增加하는 現象을 보이며, 強한 相關關係를 갖고 있는 것을 알 수 있다. 또 Fig. 3은  $P_{max}$ 에 對한  $CPL_{183}$ 의 影響을 Fig. 2와 같은 경우에 對하여 表示한 것이다.

여기서는  $P_{max}$ 와  $CPL_{183}$ 과의 相關關係가 그다지 보이지 않는 것을 알 수 있기 때문에  $P_{max}$ 는 高周波數成分보다 低周波數成分의 CPL에 크게 影響을 미친다고 말할 수 있다. 따라서  $P_{max}$ 와 CPL과의 相關係數와 次數(order)와의 關係를 運轉條件 및 燃燒特性值를 大幅의으로 變化시켜 調査한 結果를 Fig. 4에 表示했다.

여기에서 周波數는 機關回轉數와 次數에 對한 函數이므로 機關回轉數가 變數일 때의 表示方法으로서 周波數에 對應하는 次數로 表示한 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 16~18次까지는 어떠한 경우에 對해서도 거의 一定하여 0.9以上이고 여기에서 28~30次까지 急激히 떨어져 다시 200次까지 거의 一定한 값을 나타내고 있다.

高周波數成分에 있어서는 運轉條件의 變化에 의하여 약간의 影響을 받는 것을 알 수 있으나  $P_{max}$ 는 CPL의 17次 以下의 低周波數成分에 強한 影響을 미치는 것이 밝혀졌다.

#### 3.2 $\int Pd\theta$ 의 影響

Fig. 5는 사이클당 前에너지  $\int Pd\theta$ 에 對한  $CPL_{183}$ ,  $CPL_{1183}$ 의 影響을  $\alpha=0.1$ 의 경우에 對하여 着火時期와 燃燒期間  $\theta_d$ 를 變數로 하여 表示한 것이다. 低周波數成分의 경우에는  $\int Pd\theta$ 의 증가와 더불어 上昇하는 傾向을 보이며 強한 相關關係를 나타내고 있다. 그러나 高周波數成分에 있어서는  $P_{max}$ 의 경우와 마찬가지로 그다지 相關關係가 없는 것을 알 수 있다.

또한  $\int Pd\theta$ 와 CPL과의 相關係數와 次數와의 關係

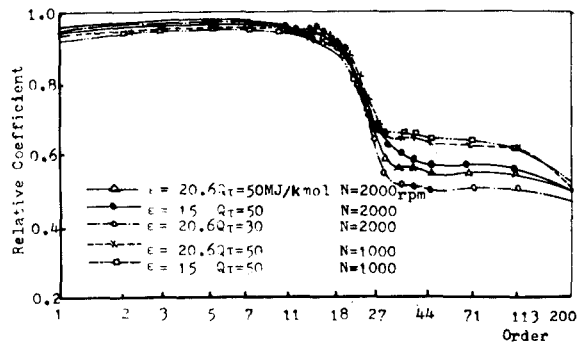


Fig. 4 Correlation between  $CPL$  and  $P_{max}$

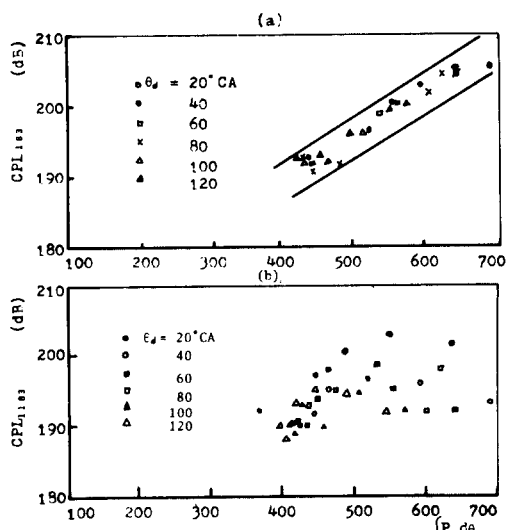


Fig. 5 Distribution of CPL vs.  $\int P d\theta$  ( $\alpha=0.1$ )

를 調査한 結果는 Fig. 4의  $P_{max}$ 의 경우와 전혀 똑같은 結果를 얻게 되었다.

따라서 H. List가 提唱한  $\int P d\theta$ 가 CPL에 대하여 미치는 影響이  $P_{max}$ 의 경우와 같을 것이라는 點을 밝히게 되었다. 그러므로 다음부터는  $\int P d\theta$ 를 除外한  $P_{max}$ ,  $(\Delta P)_{max}$ ,  $(dP/d\theta)_{max}$ ,  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ 의 4개의 因子에 대하여 考察하기로 한다.

3.3  $(\Delta P)_{max}$ 의 影響

Fig. 6은  $(\Delta P)_{max}$ 에 대한  $CPL_{183}$ ,  $CPL_{113}$ 의 影響

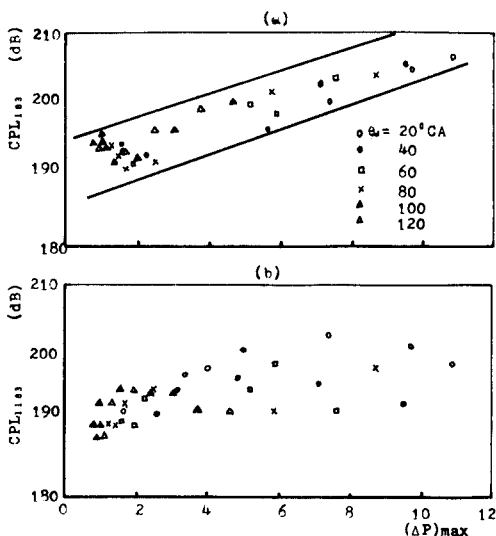


Fig. 6 Distribution of CPL vs.  $(\Delta P)_{max}$  ( $\alpha=0.1$ )

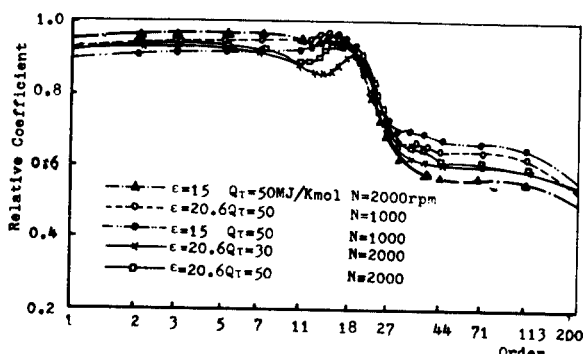


Fig. 7 Correlation between, CPL and  $(\Delta P)_{max}$

을 着火時期와 燃燒期間  $\theta_d$ 을 變數로 하여  $\alpha=0.1$ 의 경우에 대하여 表示한 것이다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이  $(\Delta P)_{max}$ 의 증가와 함께 CPL도 모두 上昇하면서 강한 正의 相關關係를 나타내고 있다.

한편  $(\Delta P)_{max}$ 에 대한  $CPL_{113}$ 의 影響은 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 低周波數의 경우에 비하여 그다지 강한 相關關係는 보이지 않는다. 역시  $(\Delta P)_{max}$ 도 高周波數成分보다 低周波數成分에 더욱 影響을 미치는 因子로 豫상할 수 있다.

따라서  $(\Delta P)_{max}$ 와 CPL과의 相關係數와 次數와의 關係를 Fig. 7에 表示하였다. 그림에서 살펴보면 17~24次 附近까지 0.9程度의 相關係數를 나타내고, 그 이상에서는  $P_{max}$ 의 경우와 거의 같은 樣相을 나타낸다. 한편 低周波數域의 16~17次 附近까지는  $(\Delta P)_{max}$ 보다 낮은 값을 나타내지만 그 이상의 次數에서는 더 높은 값을 나타내고 있다. 이는 中周波數域에 影響이 강한 것을 밝혀주고 있다.

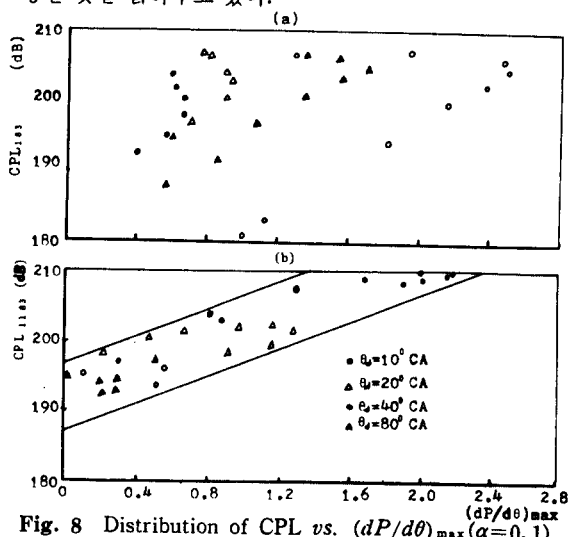


Fig. 8 Distribution of CPL vs.  $(dP/d\theta)_{max}$  ( $\alpha=0.1$ )

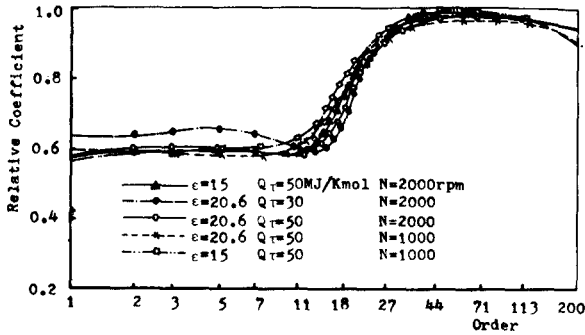


Fig. 9 Correlation between CPL and  $(dP/d\theta)_{max}$

3.4  $(dP/d\theta)_{max}$ 의 影響

Fig. 8은  $(dP/d\theta)_{max}$ 에 대한  $CPL_{183}$ ,  $CPL_{1183}$ 의 影響을  $\alpha=0.1$ 의 경우에 대하여 表示한 것이다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이  $(dP/d\theta)_{max}$ 와  $CPL_{183}$ 과는 相關關係가 적은 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 8(b)는  $(dP/d\theta)_{max}$ 에 대한  $CPL_{1183}$ 의 影響을 表示한 것인데, 여기에서는  $(dP/d\theta)_{max}$ 가 증가함에 따라,  $CPL_{1183}$ 도 上昇하는 傾向을 나타내어 강한 正의 相關關係를 보이고 있다.

따라서  $(dP/d\theta)_{max}$ 와 CPL과의 相關係數와 次數와의 關係를 Fig. 9에 表示했다. 그림에서 살펴보면 11次 附近까지는 0.6 정도의 낮은 相關係數를 나타내고, 여기서부터 40次 附近까지 急上昇한 후 0.96 정도의 높은 값을 維持하다가 점차 低下하고 있다. 이는 高周波數域에 강한 影響을 미치는 것을 알 수 있다.

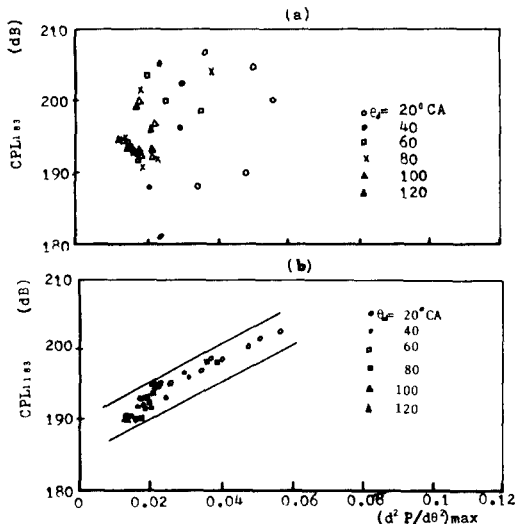


Fig. 10 Distribution of CPL vs.  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$  ( $\alpha=0.1$ )

3.5  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ 의 影響

Fig. 10은  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ 에 대한  $CPL_{183}$ ,  $CPL_{1183}$ 의 影響을  $\alpha=0.1$ 의 경우에 대하여 表示한 것이다. Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ 와  $CPL_{183}$ 과의 相關關係는 極히 적은 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 10(b)는  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ 에 대한  $CPL_{1183}$ 의 影響을 表示한 것인데 이 경우에는  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ 가 증가함에 따라  $CPL_{1183}$ 도 上昇하는 傾向을 나타내면서 특히 강한 正의 相關關係를 보이고 있다.

따라서  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ 와 CPL과의 相關係數와 次數와의 關係를 Fig. 11에 表示하였다. 그림에서 살펴보면 10~14次 附近까지 0.4 정도의 낮은 값을 나타내고, 여기에서부터 45次 附近까지 急上昇하여 0.99 정도의 높은 相關係數를 나타낸 후 以後에도 거의 一定한 것을 알 수 있다. 따라서  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ 는 高周波數域에 특히 강한 影響을 미친다고 생각된다.

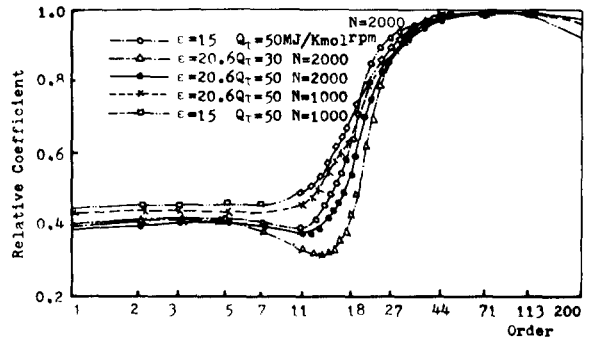


Fig. 11 Correlation between CPL and  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$

3.6 CPL과 各 要因과의 相互關係

Figs. 12~14는 回轉數 1000과 2000rpm,  $Q_r$ 를 30과 50MJ/Kmol 그리고 壓縮比를 15와 20.6의 경우에 대하여, 모두 着火時期는  $-20, -10, 0, 10, 20^\circ CA$ ,  $\alpha$ 는 0.1, 0.4, 0.8 및  $\theta_d$ 는  $30, 70, 120^\circ CA$  등 大幅으로 變化시켜 燃燒壓力變動의 諸要因이 CPL의 周波數成分에 대하여 미치는 影響을 各各 表示하고 있다.

모든 경우에 있어서 次數에 대한 係數의 差異는 약간 보이나, 어떠한 運轉條件 및 燃燒特性值의 變化에도 불구하고 같은 傾向을 보이고 있으며, 특히 各 要因이 CPL에 대하여 가장 강하게 影響을 미치는 범위는 거의 일정한 것을 알 수 있다. 即  $P_{max}$  또는  $\int Pd\theta$ 는 17次 以下의 低周波數에,  $(dP)_{max}$ 는 17~24次의 中低周波數成分에,  $(dP/d\theta)_{max}$ 는 24~41次의 中高周

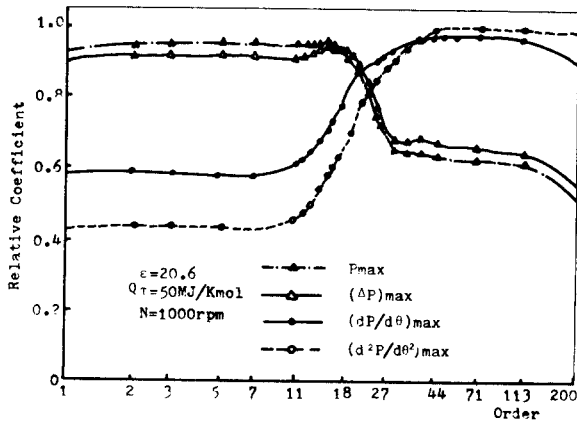


Fig. 12 Correlation between CPL and all factors connected with combustion pressure

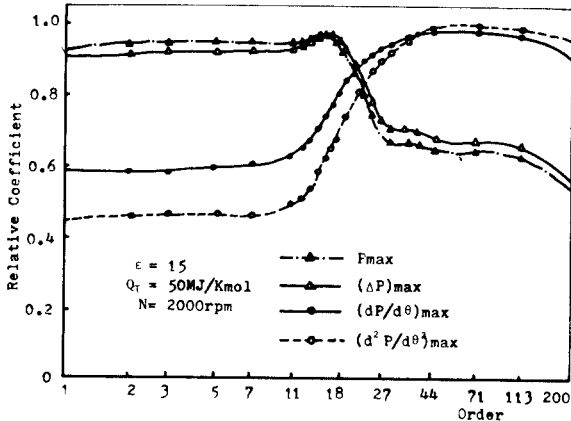


Fig. 13 Correlation between CPL and all factors connected with combustion pressure

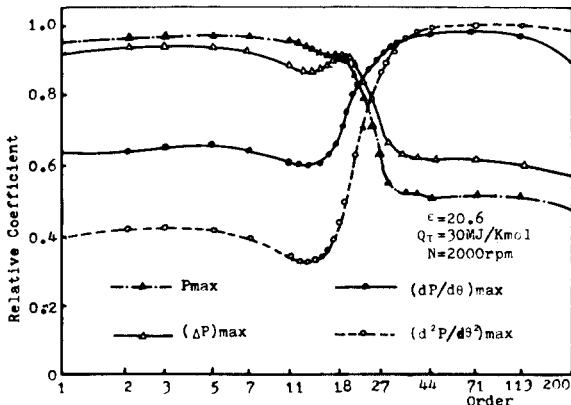


Fig. 14 Correlation between CPL and all factors connected with combustion pressure

波數成分에, 그리고  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$  는 41 次 以上의 高周波數成分에 특히 강한 影響을 미치는 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에서의 熱發生速度의 函數近似方法에 의하여, 디젤기관 燃燒室內의 燃燒特性과 機關運轉條件의 광범위한 변화에 의하여 燃燒室內의 壓力變動成分의 周波數特性에 關하여, 數值實驗에 의한 解析結果는 다음과 같다.

(1) 燃燒最高壓力  $P_{max}$  와 한 사이클당의 轉에너지  $\int Pd\theta$  가 CPL에 미치는 影響은 일치한다.

(2) 燃燒壓力變動에 關連하는 諸因子가 CPL의 各周波數成分에 相當하는 次數成分에 미치는 影響에 대하여 定量的으로 分析할 수 있었으며, 그 結果는 다음과 같다.

$P_{max}$  는 17 次 以下の 低周波數成分에,  $(\Delta P)_{max}$  는 17~24 次의 中低周波數成分에,  $(dP/d\theta)_{max}$  는 24~41 次의 中高周波數成分에, 그리고  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$  는 41 次 以上の 高周波數成分에 특히 강한 影響을 미친다.

#### 參 考 文 獻

- (1) 池上 詢, 1975, “壓縮着火機關の發生機構”, 自動車機關の燃燒と排氣, 騒音 內燃機關編集部編, p. 128.
- (2) A.E.W. Austen, T. Priede, 1965, “Noise of Automotive Diesel Engines: Its Cause and Reduction”, SAE Trans.
- (3) E.W. Huber, E. Wodiczka, 1972, “Bestimmungdes Verbre Nungsgerauschesvon Diesel Moto Ren Mit-verschiedenen Verbrennungs Verfahren”, MTZ, 33/9, p. 351.
- (4) W.S. Craig, 1963, “Theoretical Relationship between Combustion Pressure and Engine Vibration”, SAE Paper, p. 253.
- (5) H. List, 1968, “The Development of Modern Diesel Engines”, 日本機械學會, H. List おれ A.M. Scheiterlein 特別講演要旨集, p. 1.
- (6) 李盛魯外, 1985, “Wiebe의 燃燒函數에 의한 디젤기관의 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.
- (7) 李盛魯外, 1985, “Wiebe의 燃燒函數에 의한 디젤기관의 燃燒騒音低減에 關한 研究”, 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第5號, pp. 548~554.