

〈論 文〉

## 스파크노크 발생에 대한 이론적 예측방법

이내현\* · 오영일\*\* · 이성열\*\*\*

(1994년 6월 1일 접수)

### Theoretical Prediction Method on Occurrence of Spark Knock

Naehyun Lee, Youngil Oh and Songyol Lee

**Key Words:** Autoignition Period(자발 화기 간), Normal Combustion Period(정상연소기 간), Critical Compression Ratio(임계압축비)

#### Abstract

To theoretically predict knock occurrence in S. I. engine as a function of engine design and operating parameters, transient local temperature and pressure, mixture density of flame front in combustion period are calculated. We next determined normal combustion period and auto ignition period of end gas using the prediction method on occurrence of spark knock which we suggested. We predict knock occurrence in S. I. engine by comparing consecutively normal combustion period with the auto ignition period of end gas in combustion period. Engine design and operating parameters such as compression ratio, engine speed, spark timing, inlet temperature and pressure are taken into account in this calculations. The predicted results are well matched with the experimental results in turbocharged engine. Therefore, this method will provide the systematic guideline for designing engines in view of knocking limits.

#### 1. 서 론

노크는 S. I 기관의 열효율 및 출력성능을 개선하는데 장애요인이 되고 있다. 따라서 S. I 기관의 설계변수 및 운전변수와 노크와의 함수관계를 알아내는 것은 기관의 열효율, 출력 등을 개선하는데 필요한 문제라 하겠다. 그러나 기관의 설계변수 및 운전변수 중 노크인자인 압축비, 점화진각, 기관회전속도 및 흡입되는 혼합기의 상태량 등이 노크발생에 미치는 영향은 노크인자들이 서로 상호 보완적 혹은 상쇄적으로 노크발생에 영향을 미치기 때문에 매우 복잡하다. 따라서 기관의 설계변수 및

운전변수와 노크와의 함수관계를 찾는 것은 매우 어려운 문제가 된다.

이와같은 어려움을 본 연구에서 다음과 같이 노크인자와 노크와의 관계를 좀더 본질적으로 해석하여 해결하고자 한다.

S. I 기관에서 노크인자가 되는 기관의 설계변수 및 운전변수들이 물리화학적으로 어떻게 노크에 영향을 주는가에 관해서는 잘 알려져 있다.<sup>(1-4)</sup> 따라서 이들 관계를 토대로 기관설계변수 및 운전변수와 노크에 대한 물리화학적 인자(노크에 영향을 주는 혼합기의 물리화학적 상태량)사이의 함수 관계를 구하고, 이들 물리화학적 인자가 노크발생에 미치는 영향을 함수적으로 찾으면 노크인자들의 복합적인 변화에 따른 노크 발생여부를 이론적으로 예측할 수 있을 것이다.<sup>5)</sup>

이와같이 기관의 설계변수 및 운전변수의 변화에

\*정회원, 기아기술센터

\*\*정회원, 대림공업전문대학 기계과

\*\*\*정회원, 성균관대학교

따라 노크 발생여부를 판단할 수 있는 수단이 마련된다면 노크라는 장애요인 때문에 기관의 열효율, 출력개선 등의 문제 해결에 쉽게 접근할 수 없었던 부분도 좀더 체계적으로 해결해 갈 수 있으리라 생각되어 본 연구를 수행한다.

## 2. 노크발생 여부에 관한 이론적 예측

S. I 기관에서 노크인자로는 압축비, 점화진각, 기관회전속도, 흡입되는 혼합기 상태량 등이 있는데 이들 노크인자들의 변화는 점화직전의 혼합기 온도, 압력 등과 같은 혼합기의 열역학적 상태량과 혼합기의 유동상태를 변화시키며, 이와같은 변화는 정상연소기간(점화시기로부터 정상화염이 전파되어 전혼합기가 연소되는 기간)과 말단가스 자발화기간(점화시로부터 정상화염이 전파되는 중에 말단가스가 자발화되는 기간)을 변화시킨다. S. I 기관에서의 노크 발생여부는 이들 두 기간의 장 단에 달려 있다. 즉, 정상연소기간이 말단가스 자발화기간보다 길면 흡입된 혼합기중 일부 혼합기가 정상화염이 도달되기 전에 순간적으로 자발화하여 노크가 발생하게 된다.<sup>(1-6)</sup> 따라서 노크인자 변화에 따른 노크발생여부를 이론적으로 예측하기 위해서는 정상연소기간과 말단가스 자발화기간을 노크인자 변화에 따라 예측할 수 있는 수단이 개발되어야 한다.

### 2.1 점화지연기간과 난류연소속도

말단가스 자발화기간을 예측하는데 필요한 연료-공기 혼합기의 점화지연 기간  $\tau$ 와 열역학적 상태량 사이의 관계는 식(1)과 같은 형의 함수관계를 갖는 것으로 잘 알려져 있다.<sup>(1,5,6)</sup>

$$\tau = C \cdot P^{-a} \cdot \exp(b/T) \quad (1)$$

여기서,

$a, b, c$ : 상수

$P$ : 압력

$T$ : 온도

그리고 식(1)에서 상수  $a, b, c$ 에 관해서는 여러종류의 연료에 대하여 기존의 학자들의 실험적 연구를 통하여 보고되고 있다.<sup>(1,4,6)</sup> 따라서 말단 가스부의 혼합기 온도와 압력을 연소기간중 순간순간 이론적으로 예측할 수 있는 수단이 개발되면, 상수  $a, b, c$ 에 관한 기존의 자료를 이용하여 말단가스

자발화기간을 결정할 수 있다.

또한 정상연소기간을 예측하는데 필요한 연료-공기 혼합물의 난류연소속도는 층류연소속도  $S_L$ 에 관한 식(2)와 난류연소속도  $S_b$ 에 관한 식(3)을 이용하여 예측할 수 있다.

$$S_L = S_{L,0} \cdot \left\{ \frac{T}{T_0} \right\}^\alpha \left\{ \frac{P}{P_0} \right\}^\beta \quad (2)$$

여기서,

$S_{L,0}, \alpha, \beta$ : 연료종류 및 공기연료비에 따른 상수

$T_0, P_0$ : 표준상태 온도, 압력

$T, P$ : 혼합기 온도, 압력

$$S_b = ff \cdot S_L \quad (3)$$

$ff$ : 난류화염계수

따라서 연소기간 중 화염에 인접한 미연가스의 온도, 압력을 순간순간 예측할 수 있는 수단이 개발되면 식(2)에서의 상수들은 기존의 학자들이 실험적으로 구한 자료<sup>(1,4,6,7)</sup>를 이용하고, 연구대상 기관의 연소실내 난류화염계수에 관한 정보<sup>(8)</sup>를 얻어 난류화염속도를 구하므로써 정상연소기간을 예측할 수 있다.

### 2.2 연소실내 국부의 온도 및 압력

말단가스 자발화 기간과 정상연소기간을 연소기간 중에 순간순간 예측하여 노크발생여부를 이론적으로 예측하기 위해서는 결국 연소기간 중 화염 전면의 미연 혼합기의 국부적 온도, 압력 및 농도를 정확히 예측할 수 있어야 하겠다.

S. I 기관에서의 연소과정은 혼합기가 점화된 후 화염대가 이웃한 미연가스를 점화하여 새로운 화염대가 형성되고 이웃한 미연가스를 점화하는 일련의 화염대 이동과정으로 생각할 수 있다.

화염대에서의 연소는 폭발적이므로 화염대 반응층은 주위보다 에너지밀도가 매우 높다. 따라서 화염대로부터 주위로 압력파가 전파되면서, 주위가스에서의 음속의 속도로 화염대는 주위와 압력평형을 이룬다.

이와 같은 압력평형과정을 화염대로부터 전파된 압력파 위치  $r$ 과 시간  $t$ 에 따라 압력파사이의 가스압력  $P_2$ 로 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서의 평형압력  $P_2$ 를 압력파 위치  $r$ 과 시간  $t$ 에 따라 구할 수 있다면, 연소과정 중 미연가스부의 국부적 압력 및 온도 경과를 순간순간 예측할 수 있을 것이다.

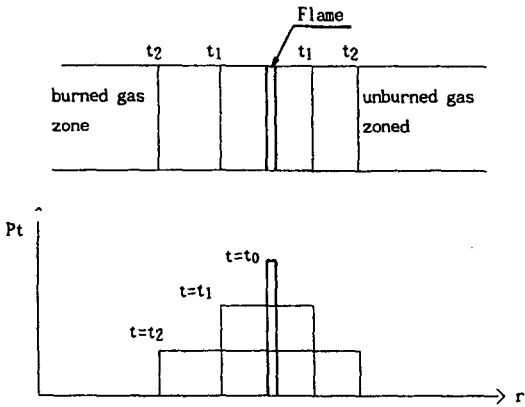


Fig. 1 Curves of transient pressure  $P_t$  vs. pressure wave travel distance,  $r$  shortly after thermal explosion of reaction zone in flame

화염대가 연소한 후 전파된 압력파를 경계로 하는 계 내의 평형압력을 압력파 위치에 따라 구하는 방법은 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

어떤 계내의 압력  $P$ 를 통계 열역학적으로 표현하면 식(4)와 같으며 식(4)의 우변의 partition function  $Z$ 는 식(5)와 같이 표현된다.

$$P = N \cdot K \cdot T (\partial \ln Z / \partial V)_{T, c} \quad (4)$$

$$Z = \left[ \int_1^\infty \text{EXP} \{ - (n^2 - 1) h^2 / 8mL^2KT \} dm \right]^3 \quad (5)$$

여기서,

- $P$  : 압력
- $K$  : Boltzman 상수
- $V$  : 계의 체적
- $m$  : 입자의 질량
- $g$  : Plank 상수
- $N$  : 입자수
- $T$  : 온도
- $n$  : 양자수
- $L$  : 정육면체 계의 한변의 길이

식(4)과 식(5)을 연립하여 정리하면 계의 압력은 식(6)과 같이 표현된다.

$$P = \frac{2}{3} \left( \sum_j N_j \epsilon_j^f \right) / V \quad (6)$$

$N_j$  : 계내의 병진운동에너지 준위가  $\epsilon_j^f$ 인 입자수

Fig. 1에서  $t = t_1$ 일 때, 기연가스층과 미연가스층으로 각각 전파된 압력파를 경계로 한 계의 압력  $P_{t1}$

은 식(6)으로부터 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{t1} = \frac{2}{3} \left( \sum_j N_j \epsilon_j^f \right) / V_{wave} \quad (7)$$

$V_{wave}$  : 상, 하류쪽으로 전파된 압력파를 경계로 한 혼합기 체적

그리고 압력이 평형되는 과정이 가역 단열과정이 라면, 식(7)의 우변의  $\sum_j N_j \epsilon_j^f$  항은 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_j N_j \epsilon_j^f = \left( \sum_j N_j \epsilon_j^f \right)_f + \left( \sum_j N_j \epsilon_j^f \right)_b + \left( \sum_j N_j \epsilon_j^f \right)_u \quad (8)$$

식(8) 우변에서 첨자  $f$ 는 화염대 내의 상태를 나타내며, 첨자  $b, u$ 는 각각 화염대에서 연소가 시작되기 직전의 기연가스층과 미연가스층의 상태를 나타낸다. 식(8) 우변의 각 항은 다음과 같이 각각 표현된다.

$$\left( \sum_j N_j \epsilon_j^f \right)_f = N_f \bar{\epsilon}_f^f = N_A \bar{n}_f V_f \bar{\epsilon}_f^f \quad (9)$$

$$\left( \sum_j N_j \epsilon_j^f \right)_b = N_b \bar{\epsilon}_b^f = N_A \bar{n}_b V_b \bar{\epsilon}_b^f \quad (10)$$

$$\left( \sum_j N_j \epsilon_j^f \right)_u = N_u \bar{\epsilon}_u^f = N_A \bar{n}_u V_u \bar{\epsilon}_u^f \quad (11)$$

여기서,

- $N_A$  : Avogadro 수
- $\bar{n}$  : 분자밀도

식(9), (11)에서의 첨자는 식(8)에서의 첨자와 같으며,

$$N = \sum_j N_j, \quad \bar{\epsilon}_j^f = \frac{1}{M} \left( \sum_j N_j \epsilon_j^f \right)$$

이다.

따라서 식(7)~(11)으로부터 임의시간  $t$ 에서의 압력파를 경계로 한 계내의 평형 압력  $P_t$ 는 식(12)와 같이 표현된다.

$$P_t = \frac{2}{3} N_A (\bar{n}_f V_f \bar{\epsilon}_f^f + \bar{n}_b V_b \bar{\epsilon}_b^f + \bar{n}_u V_u \bar{\epsilon}_u^f) / V_{wave} \quad (12)$$

식(12)에서  $V_b, V_u$ 는 각각 시간  $t$ 에서 압력파가 기연가스부 및 미연가스부로 전파한 체적을 나타내며,  $V_f$ 는 화염대의 체적을 나타낸다.

식(12)를 미연가스쪽으로 전파되는 압력파의 위치  $r_u$ 의 변화에 따른  $P_t$ 의 변화율  $dP_t/dr_u$ 로 나타내면 식(13)과 같다.

$$\frac{dP_t}{dr_u} = \frac{1}{V_{wave}} \left[ \left( \frac{2}{3} N_A \bar{n}_b \bar{\epsilon}_b^f - P_t \right) A_b \frac{a_b}{a_u} \right]$$

$$+\left(\frac{2}{3}N_A\bar{n}_u\bar{\epsilon}_u^t - P_t\right)A_u\right] \quad (13)$$

여기서,

$a$  : 음속

$A$  : 압력파 표면적

따라서 식(13)과 압력파의 위치변화에 관한 식(14), 완전가스에 관한 상태방정식(15) 및 가역단열 변화에서의 과정식(16)을 연립하면, 화염대로부터 전파된 압력파를 경계로 하는 제내의 압력, 온도 및 혼합기 밀도를 압력파 위치에 따라 구할 수 있기 때문에

$$dr_u = \sqrt{KR T} dt \quad (14)$$

$$PV = nRT \quad (15)$$

$$TP^{\frac{1-k}{k}} = \text{const.} \quad (16)$$

at  $t = t_0$  :  $V_{wave} = V_r$ ,  $V_b = 0$ ,  $V_u = 0$

$t_0$  : 화염대가 정적단열 연소한 직후 시간

화염대로부터 말단가스 영역까지의 화염전파거리를 알면 압력파가 말단가스에 도달될 때의 말단가스 압력, 온도 및 혼합기 각 성분의 농도를 구할 수 있다.

그런데 실제 기관에서의 연소과정은 Fig. 1과 같이 정해진 영역의 화염대가 연소하는 것으로 연소가 종료되는 것이 아니라, 연속적으로 화염이 전파되어 가기 때문에 화염전파과정 중 순간순간 식(13)~(16)을 만족하는 엄밀해를 구하는 것이 매우 어렵다.

따라서 다음과 같은 가정을 두고 연소실 내 국부적 온도 및 압력을 예측한다.

(1) 연소실 내 혼합기는  $j$  개의 등 질량 요소로 구성되어 있다.

(2) 각 요소의 연소과정은 정적단열 과정이다.

(3)  $j$  번째 요소가 정적단열 연소한 후 팽창하는 기간은  $j$  번째 요소가 연소하는 기간과 같으며, 이 기간이 지나면  $j+1$  번째 요소가 연소를 한다.

(4)  $j$  번째 요소가 연소하는 기간동안 실제로 하게되는 피스톤 행정은  $j$  번째 요소가 연소한 직후 순간적으로 이루어진다.

(5) 화염면과 압력파는 평행하다.

(6) 연소실 공간내 입자들의 병진운동에너지(translational kinetic energy), 진동에너지(vibrational energy), 회전에너지(rotational energy)는 매순간 에너지 등배(equipartition)가 이루어진다.

(7) 화염면의 층류 연소면적(laminar burning area)과 구상화염면적(spherical flame front area)의 비는 주연소기간 중 일정하다.

(8) 연소실 벽면에서 반사된 압력파의 강도는 음파(sound wave)로 감소하여 연소실내 국부온도 및 압력에 영향을 주지 않는다.

(9) 연소기간 중 열전달은 없다.

각 요소가 순차적으로 연소하면서 전파되는 압력파들 각 층사이의 가스의 압력 및 온도를 압력파 위치  $r_{j,k}$ 에 관한 식으로 표현하면 식(17)~(19)와 같이 표현된다.<sup>(9,10)</sup>

$$\begin{aligned} P(r_{j,k}) &= P(r_{j-1,k}) + \frac{1}{(V_{wave})_{j,k}} \left[ \left\{ \left( \frac{2}{3} N_A \bar{n}_b \bar{\epsilon}_b^t \right)_{j-1,k} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - P(r_{j-1,k}) \right\} \bar{A}_{j,k}^b \left( \frac{a_{j-1,k}^b}{a_{j-1,k}^u} \right) + \left\{ \left( \frac{2}{3} N_A \bar{n}_b \bar{\epsilon}_b^t \right)_{j-1,k} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - P(r_{j-1,k}) \right\} \bar{A}_{j,k}^u \right] (r_{j,k} - r_{j-1,k}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$T(r_{j,k}) = T(r_{j-1,k}) \cdot \left\{ P(r_{j,k}) / P(r_{j-1,k}) \right\}^{(k-1)/k} \quad (18)$$

$$r_{j,k} = r_{j-1,k} + a_{j-1,k}^u \Delta t_j \quad (19)$$

식(17) 및 식(19)에서의  $\Delta t_j$  및  $(V_{wave})_{j,k}$ 은 식(20)과 식(21)로부터 구한다.

$$\Delta t_j = \Delta m_j / (\rho_{j-1,j-1}^u \bar{A}_{j,k}^u ff S_j) \quad (20)$$

$$(V_{wave})_{j,k} = V_{j,k}^b + V_{j,k}^u + \delta_{j,k} V_{j,k}^f \quad (21)$$

$$\text{at } r_{j,k} = \text{wall}; a_{j,k}^b = 0, a_{j,k}^u = 0$$

$$j \geq k$$

여기서,

$r$  : 압력파 위치

$V_{wave}$  : 압력파간의 체적

$n$  : 몰수

$\epsilon_b^t$  : 입자 병진에너지

$N_A$  : 아보가드로수

$k$  : 비열비

$A$  : 압력파 표면적

$\Delta m_j$  : 요소질량

$t$  : 시간

$\Delta t_j$  :  $j$  번째 요소의 연소기간

$\rho_{j-1,j-1}^u$  :  $j$  번째 요소가 요소하기 직전의

$r_{j-1,j-1}$  위치의 압력파후류의 미연

가스 밀도

$S_j$  :  $j$  번째 요소의 층류 연소속도

$ff$  : 난류화염계수

$\delta_{j,k}$  : Kroncecker Delta

참자:

- $u$ : 미연가스
- $b$ : 기연가스
- $j$ : 요소번호, 1, 2, 3, ……
- $k$ : 압력과 번호, 1, 2, 3, …….,  $j$

식(17)~(21)은 각 요소가 순차적으로 연소하면서 전과되는 압력과들 각 층 사이의 가스 압력을 압력과 위치  $r_{j,k}$ 에 관하여 표현한 것이다.

피스톤 행정에 의한 국부적 온도 및 압력의 변화에 대하여는 가정(4)를 토대로 식(17)~(21)로부터 구한 국부적 온도 및 압력에 대하여 단일 압축과정식을 적용하여 구한다.

2.3 노크발생 예측방법

앞절의 식들로부터 노크발생여부를 이론적으로 예측하는 방법은 다음과 같으며, 노크 발생예측 프로그램의 flow chart는 Fig. 2와 같다.

점화직전의 혼합기 온도, 압력 및 농도는 흡입끝의 혼합기 온도, 압력, 공기연료비, 흡입밸브 닫힘시기 및 점화진각을 알면 폴리트로프 압축과정식이

로부터 구할 수 있다.

점화직전의 혼합기 상태량이 결정되면 연소기간 중 연소실내 국부적 온도, 압력, 농도 등은 다음과 같이 구한다.

첫번째 요소가 연소되는 기간  $\Delta t_1$ 을 식(20)으로부터 구하여, 식(19)에 대입하면 이 기간 중 전과된 압력과  $r_{1,1}$ 가 구해지며,  $r_{1,1}$ 과 식(17) 및 식(21)로부터 압력과 상, 하류의 혼합기 압력이 결정된다.

압력과 상, 하류의 온도는 식(18)로부터 구한다.

이와같이 압력과 상, 하류 혼합기의 압력, 온도가 결정되면 상태방정식으로부터 혼합가스의 밀도 및 미연가스 각 성분의 농도를 구할 수 있다.

이상과 같은 계산을 각 요소에 따라 순차적으로 실행하면 연소기간 중 연소실 내 국부 압력, 온도 및 미연가스 각 성분의 농도를 순간 순간 구할 수 있다.

이와같은 계산과정 중 각 요소  $j$ 가 연소한 직후의 말단가스부의 혼합기 온도, 압력을 식(1)에 대입하여 말단가스의 점화지연 시간  $\tau_j$ 를 구하고,  $j+1$ 번째 요소가 연소한 기간  $\Delta t_{j+1}$ 에 대한  $\Delta t_{j+1}/\tau_j$ 를 구하여  $\sum_j \Delta t_{j+1}/\tau_j$  값이 각 요소가 연소한 때에 1이 되는가를 검토해 간다.

모든 요소가 연소를 종료하기 전에  $\sum_j \Delta t_{j+1}/\tau_j$  값이 1이 되면 노크가 발생하는 것으로 판단한다.

3. 계산결과 및 검토

이론계산을 위한 모델기관으로 채택된 기관의 bore 및 stroke는 71 mm 및 83.6 mm 이고 connecting rod의 길이는 136 mm이며 흡입밸브 닫힘시기는 하사점 후 50°이고, 사용한 연료는 가솔린으로 옥탄가가 93이며 공기연료비는 15로 한다.

Fig. 3은 압축비를 파라미터로 하여 기관회전속도에 따라 노크강도를 나타내는 말단가스 질량비(정상화염이 도달되기 전에 자발화하는 미연혼합기 질량의 연소실내 전혼합기 질량에 대한 비)를 백분율로 계산한 결과이다.

이 계산에서 흡입끝 혼합기 온도, 압력은 각각 290 K, 100 kpa로 하였으며, 점화시기는 상사점 전 30°이다.

Fig. 3에서 보여주듯이 각 기관회전속도에 있어서 압축비가 높을수록 말단가스 질량비는 크며, 기

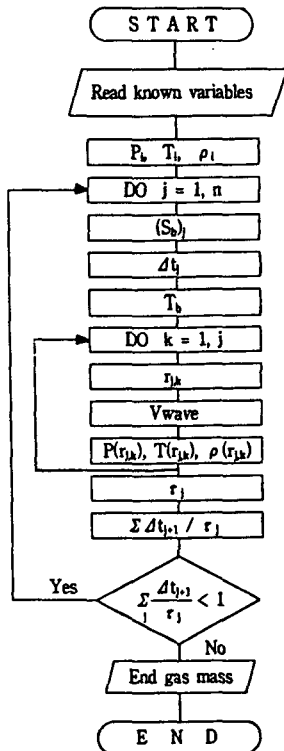


Fig. 2 Flow chart of knock prediction program

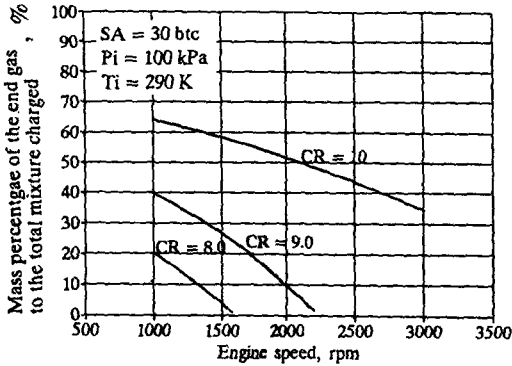


Fig. 3 Mass percentage of the end gas to the total mixture charged vs. engine speed at each compression ratio

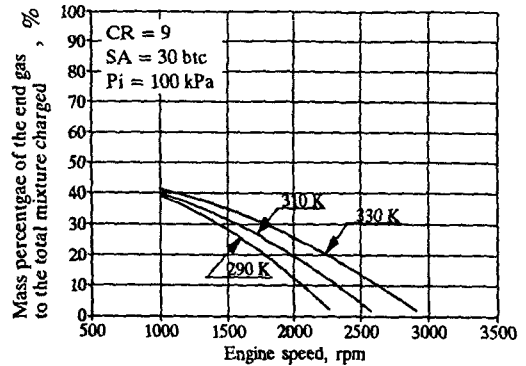


Fig. 5 Mass percentage of the end gas to the total mixture charged vs. engine speed at each inlet temperature

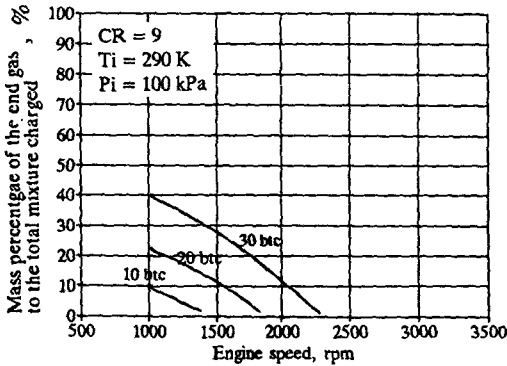


Fig. 4 Mass percentage of the end gas to the total mixture charged vs. engine speed at each spark advance

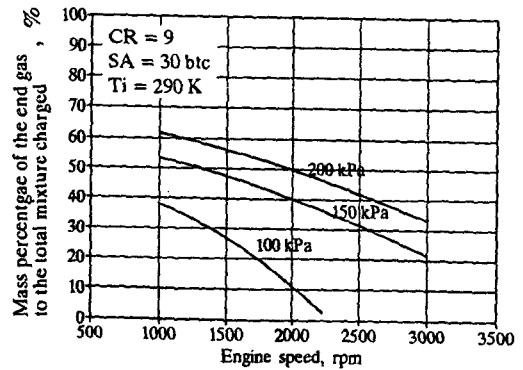


Fig. 6 Mass percentage of the end gas to the total mixture charged vs. engine speed at each inlet pressure

관회전속도가 낮을수록 말단가스 질량비가 큼을 알 수 있다. 즉 압축비가 높고 기관회전속도가 낮을수록 노크강도는 높아진다.

Fig. 4는 압축비가 9.0인 경우, 점화진각을 파라미터로 하여 기관회전속도에 따라 말단가스 질량비를 계산한 결과이다.

Fig. 4에서 나타나듯이 점화진각을 크게 할수록 노크가 일어나는 기관회전속도의 범위는 넓어지며, 노크강도도 높아진다.

Fig. 5는 압축비 9.0, 점화시기는 상사점 전 30°이고, 흡입끝의 혼합기 압력이 100 kPa인 경우, 흡입되는 혼합기 온도를 파라미터로 하여 기관회전속도에 따라 말단가스 질량비를 계산한 결과이다. Fig. 5의 결과는 흡입되는 혼합기 온도가 높을수록 노크가 쉽게 일어날 수 있음을 보여준다.

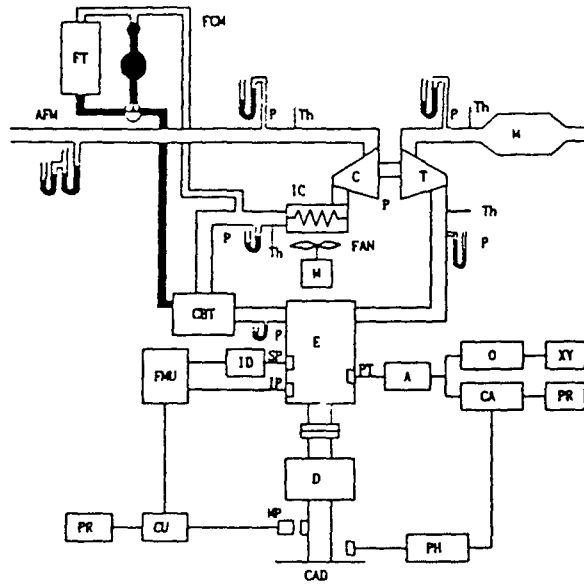
Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서 흡입되는 혼합

기 압력을 파라미터로 하여 말단가스 질량비를 계산한 결과이다. 흡입되는 압력이 높을수록 노크가 일어나는 기관회전속도의 범위가 넓어지며, 노크강도도 높아짐을 알 수 있다.

이상과 같이 기관회전속도, 압축비, 점화시기, 흡입되는 혼합기 온도 및 압력 등과 같은 노크발생 인자들의 변화에 따른 노크발생 유무를 저자들에 의해 제안된 예측방법을 통해 이론적으로 예측한 결과는 일반 실용 S. I 기관에서의 노크발생 경향과 잘 일치하고 있다.

이러한 노크발생 예측방법을 통한 예측이 실제 실험적 결과와 일치하는지를 검토하기 위하여 Fig. 7과 같은 실험장치를 구성하였다.

Table 1은 실험기관의 제원을 나타내며 Fig. 8은 이 기관의 연소실 geometry를 나타낸다. 실험기관은 1300 cc 가솔린기관으로 이 기관에 turbochar-



- A : Charge amplifier
- AFM : Air Flow Meter
- C : Compressor
- CA : Combustion Analyzer
- CAD : Crank Angle Detector
- CBT : Carburetor
- D : Waterbrake dynamometer
- E : Test engine
- FCM : Fuel Consumption Mector
- FMU : Flame arrival time mesuring unit
- FT : Fuel tank
- IC : Intercooler
- ID : Ignition Detector
- IP : Ignition Prodbe
- O : Oscilloscope
- PR : Printer
- PT : Pressure Transducer
- SP : Spark Plug
- T : Turbine
- TH : Thermocouple
- XY : X-Y plotter

Fig. 7 Schematic diagram of experimental apparatus

ger (Garrett, T15)을 장착하여 터보과급하였으며 과급시 중간냉각효과가 노크발생유무에 미치는 영향을 파악하기 위하여 상용의 중간냉각기 (Garrett, IC1501)를 압축기 하류에 장착하였다.

Table 1 Specification of test engine

|                     |                                   |
|---------------------|-----------------------------------|
| Engine type         | 4 Stroke cycle, overhead cam type |
| No. of cylinder     | 4                                 |
| Cooling             | Watercooling                      |
| Fuel supply system  | Carburetor                        |
| Bore × stroke       | 71.0 × 83.6 mm                    |
| Displacement volume | 1.323 l                           |
| Length of con. rod  | 136 mm                            |

따라서 흡입공기 온도 및 압력 상승으로 노크발생이 쉬운 터보과급 가솔린기관을 대상으로 과급압력비의 변화가 노크발생에 따른 기관의 임계압축비 (critical compressin ratio)에 대한 실험 및 이론적 계산을 수행하였다.

이때 실험조건에 있어서 과급압력비는 터보과급기 waste gate의 열림시기를 조절하여 1.1에서 1.5까지 변화시켰으며, 압축비는 실린더헤드 가스켓의 두께를 변화시켜 9.5에서 7.0까지 0.5씩 6단계로 변화시켰다. 기관회전속도는 wide open throttle 상태에서 동력계의 하중조절로 2000 rpm으로 유지하였으며 점화시기는 배전기의 contact braker의 위상각을 조절하여 각 과급압력비에 있어서 25°btc로 고정하였다.

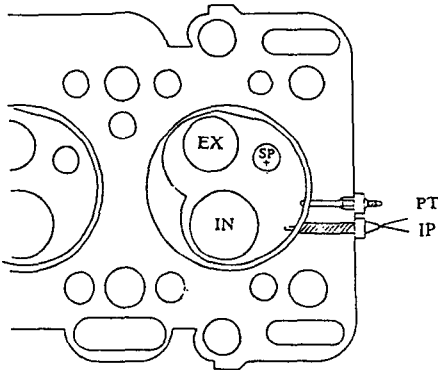
또한 노크발생을 이론적으로 예측하기 위한 계산 조건은 압축비는 5~10까지 0.1 step씩 변화시켰으며 기관회전속도 및 점화시기는 실험조건과 동일한

2000 rpm 및 25°btc이며 과급기 입구의 온도 및 압력은 290 K 및 100 kPa이다. 또한 압축기 효율은 실험에 사용된 터보과급기의 압축기 성능곡선으로부터 압축기 등엔트로피 효율은 65% 정도이므로 이를 적용하였다.

Fig. 9는 중간냉각을 한 경우와 하지 않은 경우, 터보과급 가솔린 기관의 과급압력비에 대한 임계압축비에 대해 실험으로부터 얻어진 결과와 저자들이 제안한 방법에 의해 이론적으로 계산한 결과와의 비교선도이다. 계산에 사용된 조건중 Fig. 9에 표시된 온도  $T_i$ 와 압력  $P_i$ 는 과급기 입구의 온도 및 압력을 나타낸다. 그리고, 이론계산에서 노크발생 판정의 기준으로 설정한 자발화 미연가스의 최소질

량분율은 실험용 터보과급 가솔린기관에서 과급압력비를 변화시켜 최초로 노크가 감지된 압력비에서의 실험조건들을 이론계산 프로그램에 입력시켜 계산된 미연가스 질량분율로 정하였다.

그림에서 보여주듯이 실험 및 계산결과 모두 과급압력비를 증가시키면 임계압축비는 낮아지며, 중간냉각의 유무에 대한 상대적 비교결과에 있어서도 실험 및 계산결과가 정성적으로 잘 일치하고 있다. 이 경우 임계압축비에 대한 중간냉각효과는 과급압력비가 증가할 수록 크게 나타나며, 이것은 압축비 출구의 과급공기온도가 과급압력비 증가에 따라 단열압축온도로 높아지고 이에 따라 점화직전의 혼합기 온도가 급격히 높아지므로 말단가스 자발화 기간이 단축되어 노크가 쉽게 발생하기 때문이다.



PT : Pressure Transducer  
IP : Ionization Probe  
SP : Spark Plug

Fig. 8 Geometry of combustion chamber of test engine

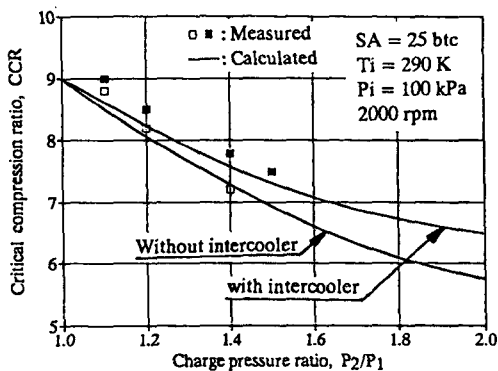


Fig. 9 Critical compression ratio vs. charge pressure ratio in case of turbocharged engine with and without intercooler

#### 4. 결 론

S. I 기관에서의 노크발생 여부에 대하여 2장에서 제시된 이론적 방법으로 예측한 결과가 실험 결과와 상당히 일치하고 있음을 알았으며, 저자들이 제시한 노크발생에 대한 이론적 예측방법이 신뢰성을 갖는 것으로 판단된다. 따라서 S. I 기관의 열효율, 출력등을 개선하기 위하여 수정되는 설계 및 운전조건에서 노크가 발생하게 되는지를 저자들이 제안한 방법을 통하여 이론적으로 진단하므로써 설계 및 운전조건의 결정에 있어서 좀더 체계적으로 접근할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

- (1) Heywood, J. B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGRAW Hill, New York, pp. 450~485.
- (2) Kirsch, L. J. and Hirst, S. L., 1980, "The Application of a Hydrocarbon Autignition Model in Simulating Knock and Other Engine Combustion Phenomena," *Combustion Modeling in Reciprocating Engines*, pp. 193~223.
- (3) Maly, R. and Ziegler, G., 1982, "Thermalcombustion Modeling-Theoretical and Experimental Investigation of the Knocking Process," *SAE Paper No. 820759*.
- (4) Hilliad, J. C. and Springer, G. S., 1984, *Fuel Economy in Road Vehicles Powered by Spark-*



- Ignition Engines*, Plenum Press, pp. 220~281.
- (5) 오영일, 이성열, 1991, "Spark Knock에 관한 연구방향," 한국자동차공학회지, 제13권, 제1호, pp. 3~8.
- (6) Lewis Von Elbe, 1987, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, ACADEMIC Press, pp. 196~208.
- (7) Glassman, I., 1987, *Combustion*, ACADEMIC Press.
- (8) 이내현, 이성열, 1992, "과급엔진 성능 및 최적조건정립에 관한 연구," 기아자동차 연구보고서, pp. 60~65.
- (9) 오영일, 이성열, 1993, "노크이론 확립을 위한 말단가스 온도 및 압력경과 이력," 한국자동차공학회지, 제15권, 제1호, pp. 28~36.
- (10) 이내현, 오영일, 이성열, 1993, "노크인자에 따른 Spark Knock 발생여부에 대한 이론적 예측방법," 대한기계학회 '93 춘계학술대회논문집, pp. 48~51.