

〈논문〉 SAE NO. 943713

DOHC 가솔린기관의 연소실 난류특성이 기관성능에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Influence of Turbulent Intensity on DOHC Engine Performance

김 철 수*, 최 영 돈**
C. S. Kim, Y. D. Choi

ABSTRACT

In order to investigate the effect of turbulent intensity on combustion characteristics, new flame factor model was developed. The principal study is the evaluation of interaction of swirl, tumble and unstructural component of flow characteristics and correlation between turbulent intensity and flame factor. Computational and experimental study has been performed such as quasi-dimensional cycle simulation, three dimensional flow analysis, engine performance test and diagnostic simulation. From these studies, it was found that flame factor was a function of engine speed and turbulent intensity.

주요기술용어 : Mean Kinetic Energy(평균유동운동에너지), Turbulent Intensity(난류강도), Flame Factor Model(화염계수모형), Swirl, Tumble and Unstructural Component(스윙, 텀블, 비구조적 성분), Engine Performance(기관성능)

기 호 설 명	P
a, b, c, d : 화염계수모형상수	: 연소실의 내부압력
C_{inp} : 초기치 상수	P_s, P_t, P_{us} : 난류운동에너지생성을
C_β : 난류모형상수	Pr_t : 난류프란틀수
FF : 화염계수	S_R : 스윙계수
K : 평균유동운동에너지	T_R : 텀블계수
G_i : 각운동량	u' : 난류강도
L, l : 길이척도	U_e : 화염전단면 유입속도
m_e : 화염전단면 유입질량	U_L : 층류화염속도
\dot{m}_{inp} : 흡기밸브로 들어오는 질량	U_T : 난류화염속도
\dot{m}_{ex} : 배기밸브로 나가는 질량	V_i : 축방향속도
	V_T : 접선방향속도
	V_{pin} : 피스톤순간속도

* 정회원, 대우자동차(주)

** 정회원, 고려대학교 기계공학과

V_{imp} : 흡입유속
 $V_{imp,s}, V_{imp,l}, V_{imp,us}$: 흡입평균유속의 스윙 성분, 텀블 성분, 비구조성분

(그리스 문자)

μ : 점성계수
 ϵ_v : 외열확산도
 ν : 외점성계수
 τ : 특성연소시간
 ϵ : 난류운동에너지소멸율
 θ : 크랭크각

(하 첨 자)

u : 미연혼합물
 b : 기연혼합물
 ex : 연소실 유출
 inp : 연소실 유입
 s : 스윙성분
 t : 텀블성분
 us : 비구조성분

1. 서 론

본 연구는 난류특성과 연소특성의 관계성을 규명하기 위해서 난류성분을 측정된 스윙계수와 텀블계수를 이용하여 스윙, 텀블 및 회전하지 않고 방향성이 없는 비구조적 성분(unstructural component)으로 나누고 유사차원 기관성능시뮬레이션(quasi-dimensional cycle simulation)을 사용하여 난류특성과 연소특성의 관계성을 규명하였다. 흡입과 압축 유동해석은 평균유동운동에너지방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소멸율방정식으로 구성되는 k- ϵ 모형을 사용하였고 연소과정은 1영역 k- ϵ 모형과 2영역 k- ϵ 모형을 동시에 해석하였다. 해석을 통하여 얻어진 스윙, 텀블 및 비구조성분의 난류강도와 길이척도는 연소특성 해석에 사용된다. 본 연구는 연소기간 동안 변하는 난류강도와 길이척도를 사용하고 화염계수(flame factor)를 피스톤순간속도,

난류강도, 길이척도, 화염속도의 함수로 나타내었으며 성능진단실험에 의해 측정된 화염계수(experimental flame factor)와 비교하여 모형 화염계수(modelling flame factor)의 상수값을 결정하였다. 흡입과 압축과정 동안 k- ϵ 모형의 해석에 사용되는 난류상수값은 4밸브기관의 비직교 3차원 연소실 유동해석¹⁾을 통하여 결정하였다. 개발된 화염계수모형에 의해 난류연소속도, 화염전파속도, 화염계수등을 계산하여 연소특성을 고찰하였고 기관성능에 관계되는 변수의 상호관계도 연구하였다. 또한 기관성능결과의 타당성을 검증하기 위해 기관성능실험을 하였고 실험은 연소실 압력, 흡배기관의 압력 및 기관성능 측정실험으로 구성된다. 본 연구는 난류강도를 길이척도가 서로 다른 성질을 이용하여 스윙성분, 텀블성분 및 비구조적 성분으로 분리하여 해석하여 세가지 성분이 연소특성에 미치는 영향도 고찰하였다.

2. 난류모형

2.1 속도분리 방법

흡입유동성분인 축방향속도(V_{imp})를 측정 스윙과 텀블계수를 이용하여 스윙성분($V_{imp,s}$), 텀블성분($V_{imp,t}$), 비구조성분($V_{imp,us}$)으로 분리하였다. 속도를 분리하는 방법은 다음과 같다. 스윙계수의 정의로부터 각운동량은 식(1)과 같다.

$$G_t = V_j^{2m} \rho r^2 V_T dr d\theta = \frac{2}{3} \pi \rho V_i V_T R^3 \quad (1)$$

여기서 V_i 는 축방향속도이다. 접선속도 V_T 는

$$V_T = \frac{3G_t}{2\rho n V_i R^3} \quad (2)$$

가 된다. 각운동량과 스윙계수의 관계로부터 다음의 식이 얻어진다.

$$G_t = \frac{mRV_S R}{4} \quad (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하고 밸브입구속도와 축방향속도의 비를 곱하면 속도의 스윙성분과 스윙계수의 관계식이 얻어진다.

$$V_{imp, s} = V_T = \frac{3}{8} V_{SR} \frac{V_{imp}}{V_i} = \frac{3}{8} V_{imp} S_R \quad (4)$$

같은 방법으로 측정 텀블계수를 이용하면 텀블속도는 다음과 같다.

$$V_{imp, t} = \frac{3}{8} V_{imp} T_R = \frac{3}{8} V_{SR} \frac{V_{imp}}{V_i} \quad (5)$$

식(5)을 식(6)에 대입하면 비구조성분 $V_{imp, us}$ 는 식(7)로 된다.

$$V_{imp, us} = \sqrt{V_{imp}^2 - V_{imp, s}^2 - V_{imp, t}^2} \quad (6)$$

$$V_{imp, us} = V_{imp} \sqrt{1 - \left(\frac{3}{8} S_R\right)^2 - \left(\frac{3}{8} T_R\right)^2} \quad (7)$$

$$V_{imp, us} = V_{imp} \sqrt{1 - (\text{swirl portion})^2 - (\text{tumble portion})^2} \quad (8)$$

2.2 난류모형

난류유동해석에 사용되는 난류모형은 Polous²⁾의 대수 ϵ 모형 I, Arici³⁾의 대수 ϵ 모형 II, Daneshyar⁴⁾의 k- ϵ 모형으로 나누어진다. 대수 ϵ 모형은 난류운동에너지소멸율방정식을 해석하지 않고 모형화하여 사용하며 k- ϵ 모형은 난류운동에너지방정식과 난류운동에너지소멸율방정식을 해석한다. 본 연구에서 사용한 모형은 Polous²⁾의 대수 ϵ 모형과 Daneshyar⁴⁾의 2영역 k- ϵ 모형을 다차원 ϵ 방정식을 확산항을 제외한 대류항, 난류운동에너지생성항을 유사차원 형태로 정리하여 사용하였다. 연소과정은 1영역 k- ϵ 모형과 2영역 k- ϵ 모형을 동시에 해석하였다. 또한 스윙, 텀블 및 비구조성분에 의한 난류운동에너지 거동을 해석하기 위하여 평균유동운동에너지방정식, 난류운동에너지방정식 및 난류운동에너지소멸율방정식을

세가지 성분별로 분리하였다. 이의 분리에는 스윙, 텀블, 비구조성분의 길이척도가 서로 다른 성질을 이용하였다. 각 행정에 대하여 해석한식을 정리하면 다음과 같다.

2.2.1 흡입행정

이 시기는 배기밸브가 닫히는 시기부터 흡기밸브가 닫히는 시기까지이다. 따라서 흡기밸브를 통한 평균유동운동에너지와 난류운동에너지의 흡입이 있고 배기밸브가 열려 있는 소기과정도 고려하여 배기밸브를 통한 질량유출도 고려하였다.

1) 평균유동운동에너지방정식

$$\frac{dK_s}{dt} = m_{imp, s} \frac{V_{imp, s}}{2} - P_s - K_s \frac{m_{ex}}{m} \quad (9)$$

$$\frac{dK_t}{dt} = m_{imp, t} \frac{V_{imp, t}}{2} - P_t - K_t \frac{m_{ex}}{m} \quad (10)$$

$$\frac{dK_{us}}{dt} = m_{imp, us} \frac{V_{imp, us}}{2} - P_{us} - K_{us} \frac{m_{ex}}{m} \quad (11)$$

2) 난류운동에너지방정식

$$\frac{dk_s}{dt} = P_s - m\epsilon_s + \frac{m_{imp}}{m} k_{imp, s} - \frac{m_{ex}}{m} k_{ex, s} \quad (12)$$

$$\frac{dk_t}{dt} = P_t - m\epsilon_t + \frac{m_{imp}}{m} k_{imp, t} - \frac{m_{ex}}{m} k_{ex, t} \quad (13)$$

$$\frac{dk_{us}}{dt} = P_{us} - m\epsilon_{us} + \frac{m_{imp}}{m} k_{imp, us} - \frac{m_{ex}}{m} k_{ex, us} \quad (14)$$

3) 난류운동에너지소멸율방정식

$$\frac{d\epsilon_s}{dt} = C_1 P_s \frac{\epsilon_s}{k_s} - C_2 \frac{m\epsilon_s^2}{k_s} + \frac{m_{imp}}{m} \epsilon_{imp, s} + C_3 \epsilon_s \frac{V_{pm}}{S} \quad (15)$$

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = C_1 P_i \frac{\varepsilon_i}{k_i} - C_2 \frac{m\varepsilon_i^2}{k_i} + \frac{m_{imp}}{m} \varepsilon_{imp,i} + C_3 \varepsilon_i \frac{V_{pin}}{S} \quad (16)$$

$$\frac{d\varepsilon_{us}}{dt} = C_1 P_{us} \frac{\varepsilon_{us}}{k_{us}} - C_2 \frac{m\varepsilon_{us}^2}{k_{us}} + \frac{m_{imp}}{m} \varepsilon_{imp,us} + C_3 \varepsilon_{us} \frac{V_{pin}}{S} \quad (17)$$

2.2.2 압축행정

이 시기는 흡기밸브가 닫히고 배기밸브도 닫혀있는 시기이다. 따라서 밸브를 통한 에너지의 출입과 질량유출이 없는 과정이다.

1) 평균유동운동에너지방정식

$$\frac{dK_s}{dt} = -P_s \quad (18)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -P_i \quad (19)$$

$$\frac{dK_{us}}{dt} = -P_{us} \quad (20)$$

2) 난류운동에너지방정식

$$\frac{dK_s}{dt} = P_s - m\varepsilon_s \quad (21)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = P_i - m\varepsilon_i \quad (22)$$

$$\frac{dK_{us}}{dt} = P_{us} - m\varepsilon_{us} \quad (23)$$

3) 난류운동에너지소멸율방정식

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = C_1 P_s \frac{\varepsilon_s}{k_s} - C_2 \frac{m\varepsilon_s^2}{k_s} + C_3 \varepsilon_s \frac{V_{pin}}{S} \quad (24)$$

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = C_1 P_i \frac{\varepsilon_i}{k_i} - C_2 \frac{m\varepsilon_i^2}{k_i} + C_3 \varepsilon_i \frac{V_{pin}}{S} \quad (25)$$

$$\frac{d\varepsilon_{us}}{dt} = C_1 P_{us} \frac{\varepsilon_{us}}{k_{us}} - C_2 \frac{m\varepsilon_{us}^2}{k_{us}} + C_3 \varepsilon_{us} \frac{V_{pin}}{S} \quad (26)$$

2.2.3 연소행정

연소과정은 흡입과정, 압축과정의 1영역 k-ε모형을 그대로 적용하여 스웰성분, 텀블성분, 비구조성분의 난류유동이 계산되고 연소실내 점화에 의한 Daneshyer의 2영역 k-ε모형도 함께 해석하였다. 1영역 k-ε모형과 2영역 k-ε모형의 해석은 1영역 k-ε모형의 비구조성분의 방정식에 2영역 k-ε모형의 방정식을 첨가하고 2영역 k-ε모형의 방정식에 1영역 k-ε모형의 난류운동에너지생성율을 미연영역과 기연영역의 체적비로 첨가하여 길이척도가 난류운동에너지생성율을 통하여 직접 작용하도록 Daneshyer의 2영역 k-ε모형을 수정하였고 각 영역간의 난류운동에너지와 난류운동에너지소멸율이 교환되게 하였다.

1) 1영역 모형

① 평균유동운동에너지방정식

$$\frac{dK_s}{dt} = -P_s \quad (27)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -P_i \quad (28)$$

$$\frac{dK_{us}}{dt} = -P_{us} \quad (29)$$

② 난류운동에너지방정식

$$\frac{dK_s}{dt} = P_s - m\varepsilon_s \quad (30)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = P_i - m\varepsilon_i \quad (31)$$

$$\frac{dK_{us}}{dt} = P_{us} - m\varepsilon_{us} + \frac{2}{3} \left[\frac{k_u}{\rho_u} \frac{d\rho_u}{dt} + \frac{k_b}{\rho_b} \frac{d\rho_b}{dt} \right]$$

$$-\frac{2}{3} \left[\frac{k_u}{v_u} \frac{dv_u}{dt} + \frac{k_b}{v_b} \frac{dv_b}{dt} \right] + \frac{1}{m_b} \frac{dm_b}{dt}$$

$$\left(\frac{\rho_b}{\rho_u} \right)^{2/3} k_u - \frac{1}{m_b} \frac{dm_b}{dt} k_b \quad (32)$$

③ 난류운동에너지소멸방정식

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = C_1 P_s \frac{\varepsilon_s}{k_s} - C_2 \frac{m\varepsilon_s^2}{k_s} + C_3 \varepsilon_s \frac{V_{psn}}{S} \quad (33)$$

$$\frac{d\varepsilon_l}{dt} = C_1 P_l \frac{\varepsilon_l}{k_l} - C_2 \frac{m\varepsilon_l^2}{k_l} + C_3 \varepsilon_l \frac{V_{psm}}{S} \quad (34)$$

$$\frac{d\varepsilon_{us}}{dt} = C_1 P_{us} \frac{\varepsilon_{us}}{k_{us}} - C_2 \frac{m\varepsilon_{us}^2}{k_{us}} + C_3 \varepsilon_{us} \frac{V_{psn}}{S} + \frac{4}{3}$$

$$\left[\frac{\varepsilon_u}{\rho_u} \frac{d\rho_u}{dt} + \frac{\varepsilon_b}{\rho_b} \frac{d\rho_b}{dt} \right] + \frac{5}{12} \left[\frac{\varepsilon_u}{v_u} \frac{dv_u}{dt} +$$

$$\frac{\varepsilon_b}{v_b} \frac{dv_b}{dt} \right] + \frac{1}{m_b} \frac{dm_b}{dt} \left(\frac{\rho_b}{\rho_u} \right)^{4/3} \varepsilon_u - \frac{1}{m_b}$$

$$\frac{dm_b}{dt} \varepsilon_b \quad (35)$$

2) 2영역 모형

① 미연영역 방정식

$$\frac{dK_u}{dt} = -\frac{V_u}{Vol} (P_s + P_l + P_{us}) \quad (36)$$

$$\frac{dk_u}{dt} = \frac{2}{3} \frac{k_u}{\rho_u} \frac{d\rho_u}{dt} - \frac{2}{3} \frac{k_u}{v_u} \frac{dv_u}{dt} - m\varepsilon_u +$$

$$\frac{V_u}{Vol} (P_s + P_l + P_{us}) \quad (37)$$

$$\frac{d\varepsilon_u}{dt} = \frac{4}{3} \frac{\varepsilon_u}{\rho_u} \frac{d\rho_u}{dt} + \frac{5}{12} \frac{\varepsilon_u}{v_u} \frac{dv_u}{dt}$$

$$-C_2 m_u \frac{\varepsilon_u^2}{k_u} + \frac{V_u}{Vol} \left(P_s \frac{\varepsilon_s}{k_s} + P_l \frac{\varepsilon_l}{k_l} + P_{us} \frac{\varepsilon_{us}}{k_{us}} \right) \quad (38)$$

① 기연영역 방정식

$$\frac{dK_b}{dt} = -\frac{V_b}{Vol} (P_s + P_l + P_{us}) \quad (39)$$

$$\frac{dk_b}{dt} = \frac{2}{3} \frac{k_b}{\rho_b} \frac{d\rho_b}{dt} - \frac{2}{3} \frac{k_b}{v_b} \frac{dv_b}{dt} - m\varepsilon_b +$$

$$\frac{V_b}{Vol} (P_s + P_l + P_{us}) + \frac{1}{m_b} \frac{dm_b}{dt}$$

$$\left(\frac{\rho_b}{\rho_u} \right)^{2/3} k_u - \frac{1}{m_b} \frac{dm_b}{dt} k_b \quad (40)$$

$$\frac{d\varepsilon_b}{dt} = \frac{4}{3} \frac{\varepsilon_b}{\rho_b} \frac{d\rho_b}{dt} + \frac{5}{12} \frac{\varepsilon_b}{v_b} \frac{dv_b}{dt} - C_2 m_b$$

$$\frac{\varepsilon_b^2}{k_b} + \frac{1}{m_b} \frac{dm_b}{dt} \left(\frac{\rho_b}{\rho_u} \right)^{4/3} \varepsilon_0 +$$

$$\frac{V_u}{Vol} \left(P_s \frac{\varepsilon_s}{k_s} + P_l \frac{\varepsilon_l}{k_l} + P_{us} \frac{\varepsilon_{us}}{k_{us}} \right) \quad (48)$$

사용된 난류모형상수, 생성항 및 길이척도는 다음과 같다.

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.99, C_3 = -0.34 \quad (42)$$

$$P_s = 0.3307 C_{\beta} \left(\frac{K_s}{l_s} \right) \left(\frac{k_s}{m} \right)^{1/2} \quad (43)$$

$$P_l = 0.3307 C_{\beta} \left(\frac{K_l}{l_l} \right) \left(\frac{k_l}{m} \right)^{1/2} \quad (44)$$

$$P_{us} = 0.3307 C_{\beta} \left(\frac{K_{us}}{l_{us}} \right) \left(\frac{k_{us}}{m} \right)^{1/2} \quad (45)$$

$$l_s = 0.085 \frac{Bore}{2} \quad (46)$$

$$l_l = 0.085 \frac{2 * Cylinder Volume}{2\pi Bore} \quad (47)$$

$$l_{us} = 0.085 \frac{V_L}{2} \quad (48)$$

전체 난류장도는 각각의 합인 다음의 식으로 구하였다.

$$u' = \left[\frac{2k}{3m} (k_s + k_l + k_{us}) \right]^{1/2} \quad (49)$$

길이척도는 생성과 소멸의 변화가 적은 스월 성분은 연소실의 반지름을 사용하였고 피스톤의 왕복운동에 의해 변화를 받는 텀블성분은 피스톤과 연소실헤드 사이 길이의 1/2을 사용하였다. 비구조성분은 가장 작은 값인 밸브양정의 1/2 평균값을 사용하여 난류소멸이 가장 빠르다. 따라서 식(45)의 l_{us} 가 가장 적어 P_{us} 는 P_s , P_l 보다 훨씬 커지고 식(11)의 dK_{us}/dt 값이 빨리 소멸된다. 소멸율이 빠른 것은 K_{us} 성분이 적어지는 율이 K_s , K_l 보다 큰 것을 나타내며 따라서 K_s , K_{it} , K_{us} 의 감소에 의해 상승하고 상승의 최대값은 압축말기부터 나타난다. 난류운동에너지생성율의 난류 모형상수(C_p)는 연소실 3차원 유동해석을 이용하여 결정하였다. 해석에 사용된 k 와 ε 의 초기 조건은 $k_{inp,s} = C_{inp} V_{inp,s}^2$, $\varepsilon_{inp,s} = C_{\mu} \frac{3}{4} \frac{k_{inp,s}^2}{0.045U_l}$ 을 사용하였다.

3. 화염계수모형

(1) Blizard와 Keck의 질량연소율 모형

Blizard와 Keck⁵⁾은 난류화염전파에 관한 식으로 난류화염속도를 이용한 식(50)을 사용하였다.

$$\frac{dm_{\varepsilon}}{dt} = \rho_w A_f U_{\varepsilon} \quad (50)$$

$$U_{\varepsilon} = (u + U_L) \quad (51)$$

(2) Annand의 화염계수모형

Annand⁶⁾는 다음과 같이 화염계수를 표시하였다.

$$\frac{U_T}{U_L} = \sqrt{1 + \frac{\varepsilon_a}{\alpha}} \quad (52)$$

ε_a 는 와열확산도계수이고 α 는 분자확산계수이다. 덕트유동에서의 와점성계수와 동점성계수와 의 비는 다음의 식으로 계산된다.

$$\frac{\varepsilon}{\nu} = b RE^a \quad (53)$$

와열확산계수는 다음과 같다.

$$\varepsilon_v = \frac{\nu_l}{Pr_l} = \frac{vbRE^a}{Pr_l} \quad (54)$$

ν 는 동점성계수, Pr_l 는 와점성계수와 동점성계수의 비로 표시되는 난류프란틀수, a 와 b 는 상수이다. 연소실유동을 다음의 두가지 형태로 정의하였다.

① 화염전단면 후면의 유체팽창으로 인하여 생성되는 난류

$$RB_1 = \frac{U_{pr}}{\nu} \quad (55)$$

② 피스톤운동에 의해 생성되는 난류

$$RB_2 = \frac{V_{pr}}{\nu} \quad (56)$$

U_T 는 난류화염속도, V_p 는 피스톤순간속도, r 은 연소실의 반경이다. Annand모형식을 정리하면 다음의 식과 같다.

$$\frac{U_T}{U_L} = \left[1 + \frac{vb}{\alpha Pr} \left[\frac{r(U_L + V_p^2)}{\nu} \right] \alpha \right]^{1/2} \quad (57)$$

사용된 화염계수모형상수는 다음과 같다.

$$a = 1.42 \quad (57a)$$

$$b = 1.823 \times 10^8 \quad (57b)$$

$$c=1.2 \quad (57c)$$

$$d=1.75 \quad (57d)$$

(3) 본 연구의 질량연소율 모형

본 연구에서는 식(50)의 BK모형의 질량연소율을 다음의 식으로 수정하여 사용하였다.

$$\frac{dm_e}{dt} = \rho_u A_f U_T \quad (58)$$

즉 BK모형에서 $U_e = u + U_L$ 대신에 난류화염속도(U_T)를 사용하고, 특성연소시간은 Tabaczynski⁷⁾의 식(59), 특성길이척도는 Tennekes와 Lumley⁸⁾의 식(60)을 각각 사용하였다.

$$\tau = 1.8 \left[\frac{\lambda}{U_L} \right]^{2/3} \left[\frac{L}{u} \right]^{1/3} \quad (59)$$

$$\lambda = L_o \left[\frac{15}{C} \right]^{1/2} \left[\frac{u L_o}{v} \right]^{-1/2} \quad (60)$$

(2) 본 연구의 화염계수 모형

본 연구는 Annand⁶⁾의 화염계수모형에 식(61)과 같은 흡입유동에 의해 압축상사점까지 축적되는 난류운동을 추가하여 화염계수모형을 수정하였다.

$$RE_3 = \frac{ul}{v} \quad (61)$$

난류강도는 식(55), 식(56)과 같이 Annand모형에서 해석되지 않았고 본 연구에서는 흡입과 압축행정 동안의 난류강도를 k-ε모형으로 구하여 연소과정의 화염계수계산에 사용하였다. 스윙, 텀블 및 비구조 성분의 난류강도와 길이척도를 이용하여 레이놀즈수를 만들어 화염계수모형에 사용하였다. 피스톤속도를 $U = cV_p^*$ 로 하고 식(61)을 식(55), 식(56)에 추가하여 Annand모형식을 수정하면 다음의 식이 얻어진다. 속도를 기본으로 하는 레이놀즈수와 난류강도를 기본으로 하는 레이놀즈수는 서로 비례 관계에 있으므로 화염

계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{U_T}{U_e} = [1 + RE_{11} + RE_{22}]^{1/2} \quad (62)$$

RE_{11} 과 RE_{22} 의 정의는 다음과 같다.

$$RE_{11} = \frac{vb}{aPr_t} RE^a \quad (63)$$

$$RE = \frac{c[V_p + \frac{A_f}{A_p} U_p]^{1/2} l_2}{v} \quad (63a)$$

$$RE_{22} = C_p^{1/4} \frac{k^{1/2} l_1}{aPr_t} \quad (64)$$

l_1 은 $0.045 V_p^{1/3}$, l_2 는 $0.5 \times V_p^{1/3}$ 를 사용하였고 V_p 는 피스톤순간속도, A_p 는 피스톤면적, V_e 는 미연가스체적이다. Annand모형에서 사용된 난류화염속도(U_T) 대신에 화염전파속도(U_p)를 사용하였고 화염전파속도에 화염과 피스톤의 면적비를 곱하여 화염반경에 따라 난류화염속도의 크기를 변화시켰다. 길이척도는 연소실반경 대신에 체적을 이용하여 피스톤운동과 미연과 기연가스의 체적변화가 길이척도의 계산에 이용되어 길이척도의 성분이 화염계수 모형해석에 최대로 반영이 되도록 하였다. 식(64)에 의해 계산되는 모형화염계수는 성능진단실험에서 구해지는 측정된 화염계수와 비교하여 화염계수모형상수값 b 를 정하였다. 화염계수상수는 다음과 같다.

$$a=1.42 \quad (65a)$$

$$b=0.5417 \times 10^6 \quad (65b)$$

$$c=1.2 \quad (65c)$$

$$d=1.75 \quad (65d)$$

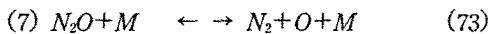
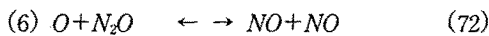
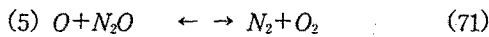
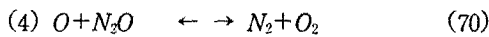
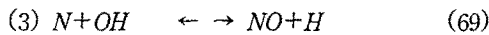
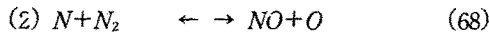
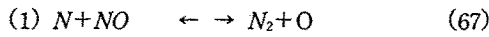
Annand모형은 난류강도를 고려하지 않은 모형이므로 Annand모형과 난류강도를 사용한 본 모형의 결과를 비교하였다. 층류화염속도는 Rho-

des와 Keck⁹⁾이 제시한 다음과 같은 멱승형태의 관계식을 사용하였다.

$$U_L = U_{L_0} \left(\frac{T_U}{T_0} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_0} \right)^\beta \quad (66)$$

4. NO의 비평형이론 계산법

연료-공기 혼합기의 연소생성물로서 고려된 12개 화학종 중 NO의 반응속도는 평형농도라고 가정할 수 있을 만큼 빠르지 못하며 많은 실험에서도 NO의 비평형농도는 평형농도보다 많은 것으로 나타났다. 그러므로 농도는 반응속도론을 사용하여 비평형농도로서 계산되어야 타당하다. NO의 비평형농도를 계산하기 위하여 확장된 Zel'dovich모형에 N_2O 에 관한 4개의 반응식을 부가한 다음의 7개의 반응식을 NO생성기구로 사용하였다.



위 반응식들로 부터 NO의 정미변화율 $d[NO]/da$ 는 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$\frac{1}{V} \frac{d}{dt} ([NO]V) = 2(1-\alpha_2) \left[\frac{R_1}{1+\alpha_2 \frac{R_1}{(R_2+R_3)}} + \frac{R_6}{1+\alpha_2 \frac{R_6}{(R_4+R_5+R_7)}} \right] \quad (74)$$

여기서 α_2 는 NO의 평형농도에 대한 비평형농도 비를 나타낸다.

$$\alpha_2 = [NO]/[NO]_e$$

NO의 비평형농도는 평형열역학으로 부터 구한 NO의 평형농도 $[NO]_e$ 를 이용하여 식(74)를 적분하여 구할 수 있다.

5. 결과 및 고찰

Fig.1은 혼합기가 연소실로 유입될 때 정상상태 유동실험에서 본 연구에서 측정된 흡입밸브의 양정에 따른 스윙계수와 텀블계수를 나타낸다. 스윙계수는 밸브양정에 따라 증가현상을 보이는 반면 텀블계수는 밸브양정 2-3mm부근에서 회전방향이 바뀌고 있다. Fig.2는 송출계수를 측정하고 연소실 압력 및 흡기포트 압력을 측정하여 계산식에 의해 흡입유량을 계산하고 기관성능실험에서 오리피스에 의해 측정된 한 사이클당 공기량으로 보정한 연소실로 흡입되는 혼합기의 질량을 유입속도로 환산한 그림이다. 유입속도는 흡입초기와 말기에서 높게 나타났고 흡입행정 중간부분은 적게 나타났다. Fig.3은 주어진 조건에서 Annand모형과 본 연구에서 개발된 화염계수모형으로 계산한 화염계수를 나타낸 그림이다. Annand모형은 화염 및 핵생성 기간이 길게 예측되었고 화염발달구간은 비슷한 경향을 보이지만 화염소멸기간에서는 급격한 감소를 보인다. Fig.4(a), 4(b)는 측정된 스윙 및 텀블계수를 사용하여 구한 기관회전속도에 따른 평균유동난류운동에너지와 난류강도를 나타낸 그림이다. 평균유동운동에너지는 흡입유속분포를 따르며 흡입과정 동안 증가를 보이다가 최대값에 도달한 후 감소하고 다시 속도가 빨라지는 190°부근에서 증가한 후 압축행정 동안 계속 감소한다. 난류운동에너지도 비슷한 결과이지만 흡입말기에서는 값이 많이 적어진다. Fig.5-Fig.6은 주어진 경우에 대하여 난류운동에너지를 나타낸 그림이다. 난류운동에너지는 스윙과 텀블양이 30%와 70%이어서 텀블이 스윙보다 크고 스윙에 비해 텀블은

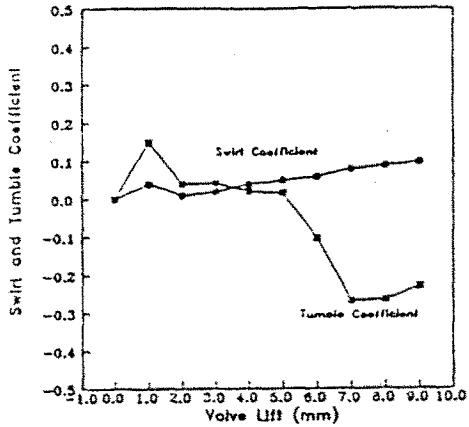


Fig. 1 The measured swirl and tumble coefficient of intake valve as a function of valve lift.

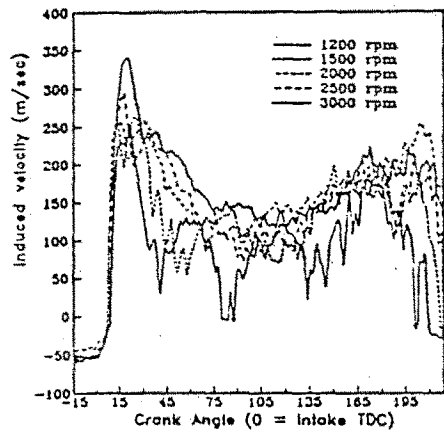


Fig. 2 Velocity induced into cylinder through intake valve for five different engine speeds.

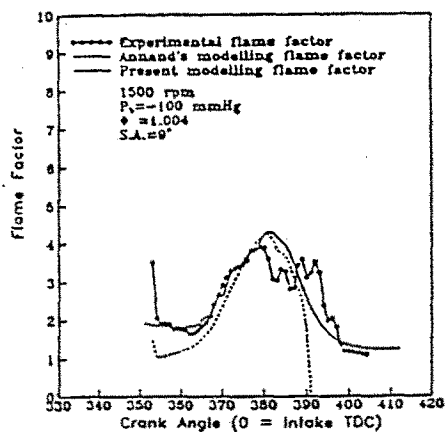
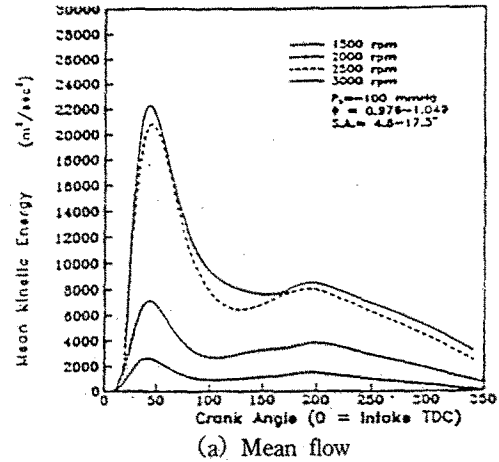
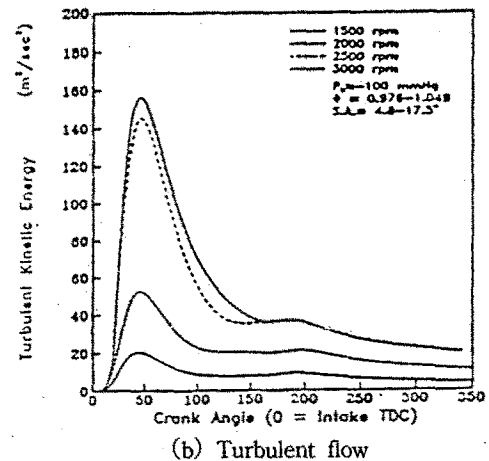


Fig. 3 Comparison of experimental, Anand's and present modelling flame factor.



(a) Mean flow



(b) Turbulent flow

Fig. 4 Kinetic energy as a function of crank angle for four different engine speeds using measured swirl and tumble coefficient.

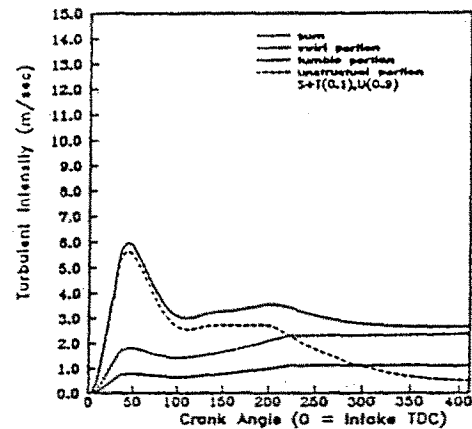


Fig. 5 Comparison of swirl, tumble and unstructural portion of turbulent intensity.

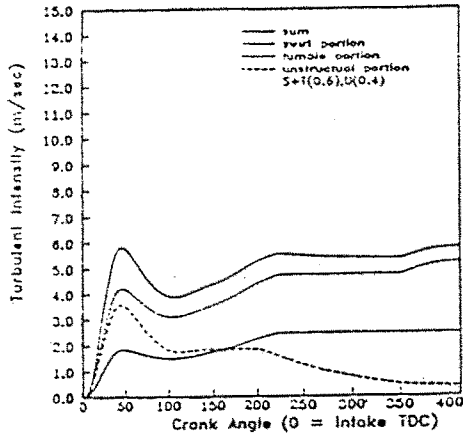
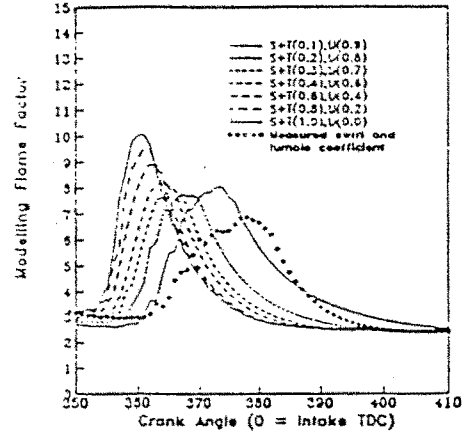
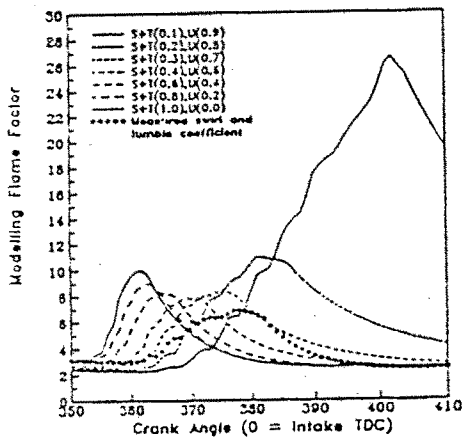


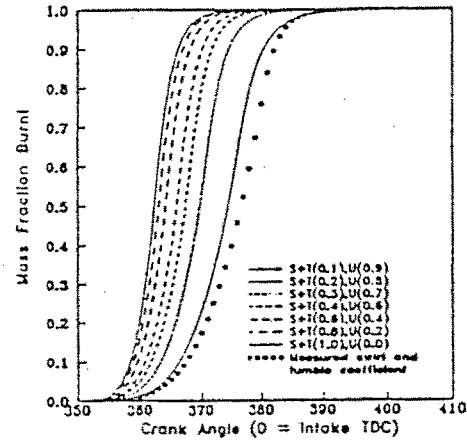
Fig. 6 Comparison of swirl, tumble and unstructural portion of turbulent intensity.



(a) Flame Factor

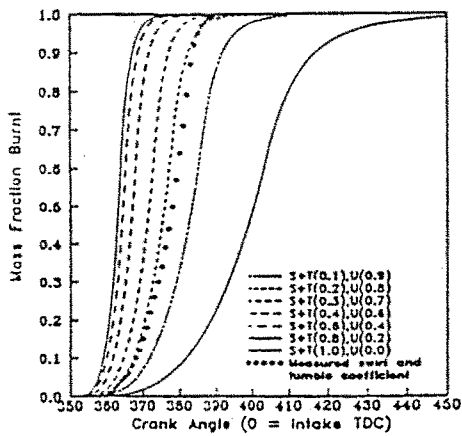


(a) Flame Factor



(b) Mass Fraction Burnt

Fig. 8 Flame factor and mass fraction burnt as a function of crank angle.



(b) Mass Fraction Burnt

Fig. 7 Flame factor and mass fraction burnt as a function of crank angle.

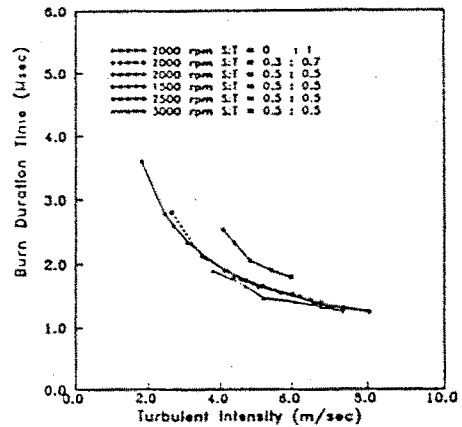


Fig. 9 Burn duration time as a function of turbulent intensity.

흡입말기에서 부터 증가되는 율이 크다. 이는 텀블이 많아지면 평균유동운동에너지의 난류운동에너지로의 전환이 스월보다는 텀블에 의해 이루어지기 때문이며 스월과 텀블양이 적을 때는 전체 난류강도는 비구조성분에 의해 좌우되지만 스월과 텀블양이 증가하면 비구조성분에 의한 영향은 적어지고 텀블의 영향이 많아져 전체 곡선형태도 변하게 된다. Fig.7(a), 7(b)는 주어진 조건에 대한 연소시간 동안의 화염계수와 질량연소율을 나타낸 그림이다. 이 경우는 텀블만 100%이며 스월강도의 영향은 없는 경우이다. 텀블 양이 0.1일 때는 비정상연소가 발생하였다. 텀블 양이 증가할수록 정상상태 연소가 되며 화염크기도 증가하고 연소시간도 짧게 된다. 이러한 비정상연소 현상은 텀블강도가 약하여 연소 초기에 난류화염을 발생치 못하여 연속적인 난류와의 생성에 난류강도가 작용되지 못하였기 때문이다. Fig.8(a), 8(b)는 주어진 조건에 대한 연소시간동안의 화염계수와 질량연소율을 나타낸 그림이다. 이 경우는 스월양이 30%, 텀블 양이 70%이다. 이 경우는 앞서의 경우와는 다르게 스월과 텀블양이 0.1일 때도 비정상적인 연소가 발생하지 않으며 정상적인 연소형태를 보인다. 화염계수의 최고치는 큰 변화가 없지만 연소속도는 빠르게 된다. 이는 스월과 텀블만이 존재할 때보다 스월과 텀블이 같이 존재하는 것이 연소특성을 좋게 한다. 스월양이 70% 및 텀블양이 30%인 경우는 스월양이 30%, 텀블양이 70%인 경우보다 조금 화염계수가 낮고 연소속도는 느리지만 나머지 경우의 거의 같은 현상을 보여 주었다. Fig.9는 난류강도와 연소시간과의 관계를 나타낸 그림이다. 곡선의 형태는 난류강도의 증가에 따라 연소시간은 반비례적으로 감소한다. 기관회전속도에 따라서는 2000, 2500, 3000rpm의 경우는 비슷한 연소시간을 갖지만 1500rpm은 연소시간이 크게 된다. Fig.10은 스월과 텀블 양에 따른 질소산화물의 농도를 그린 그림이다. 기관회전수에 따라 배기농도는 높아지고 스월과 텀블강도의 증가에 따라 저속에서보다 고속에서 더 많은 감소현상을 보이고 있다. Fig.11는 난류강도와 화염계수의 관계를 나타낸 그림이다. 연소

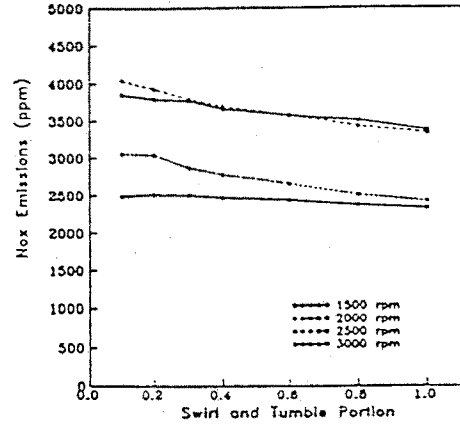


Fig.10 Nitric oxide concentration as a function of swirl and tumble portion for four different engine speeds.

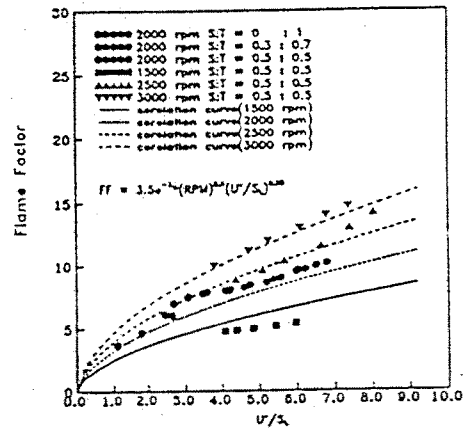


Fig.11 Flame factor as a function of turbulent intensity at 50% mass burnt point.

과정 중 질량의 연소율이 50%에 도달할 때의 기관의 회전수에 따른 화염계수를 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 기관회전속도에 따라 계산된 화염계수의 상관관계방정식을 기관회전속도와 무차원 난류강도의 곱의 함수로 하여 구하였다. 그 방정식은 다음과 같다.

$$FF = \rho \cdot RPM^q \left(\frac{U}{U_L} \right)^r \tag{75}$$

$$p = 3.5 \times 10^{-3} \tag{75a}$$

$$q = 0.9 \tag{75b}$$

$r=0.55$

(75c)

참 고 문 헌

계수 p 는 화염계수의 크기를 결정하는 인자이고 q 는 화염계수의 곡선이 기관회전속도에 따라 직선적으로 변화하지 않고 지수함수로 변하는 것을 나타내며 r 은 난류강도에 따라 변하는 화염계수를 따르는 상관계수를 나타낸다.

6. 결 론

본 연구를 통해서 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 개발한 화염계수모형이 Annand모형보다 측정된 화계수를 더 잘 예측해 주었다.
- 2) 4밸브기관에서는 스윙 혹은 텀블만이 존재할 때보다 스윙과 텀블이 동시에 존재할 때 기관성능이 좋아지며 일정하게 난류강도가 유지되는 스윙성분보다 피스톤운동에 의해 영향을 받는 텀블성분이 연소특성을 좋게 한다. 비구조 성분의 빠른 소멸은 스윙과 텀블의 연소에의 영향을 크게하는 원인이 되었다.
- 3) 화염계수와 난류강도의 상관관계식은 기관회전속도와 무차원 난류강도의 곱의 함수로 표현되었다.
- 4) 스윙과 텀블강도가 상승하면 기관성능이 상승하고 질소산화물 농도는 낮게 예측되었다.

1. 최영돈, 김철수, "4밸브엔진의 압축상사점 부근의 난류특성에 관한 수치해석적 연구", 한국자동차공학회 논문집, Vol.1, No.1, pp1-13, 1993.
2. Polous,S.G., and Heywood,J.B., "The Effect of Chamber Geometry on Spark-Ignition Engine Combustion", SAE Paper No. 830334, 1983.
3. Arici,O.,Tabaczynski,R.J., and Arpacı,V.S. "A Model for the Lean Misfire Limit in Spark-Ignition Engine", Combustion Science and Technology, Vol.30, pp31-45, 1983.
4. Daneshyar,H., and Hill,P.G., "The Structure of Small-Scale Turbulence and Its Effect on Combustion in Spark Ignition Engine", Progress in Energy and Combustion Science, Vol.13, pp 47-73, 1987.
5. Blizard,N.C. and Keck,J.C. "Experimental and Theoretical Investigation of Turbulent Burning Model for Internal Combustion Engines" SAE Paper 740191, 1974.
6. Annand,W.J.D. and Benson,R.S., "A Model for Turbulent Burning Speed in Spark-Ignition Engine" pp195-200, ImechE, 1979.
7. Tabaczynski,R.J., Trinker,F.H. and Shannon,B. A.S." Further Refinement and Validation of a Turbulent Flame Propagation Model for Spark-Ignition Engines", Combustion and Flame, Vol. 39, pp111-121, 1980.
8. Tennekes,H. and Lumley,J.L. "A First Course in Turbulence", MIT Press, 1972.
9. Rhodes,D.B. and Keck,J.C., "Laminar Burning Speed Measurements of Indolene-Air-Diluent Mixture at High Pressure and Temperature" SAE paper 850047, 1985.