

박용 디젤기관에서 스월유동이 연소특성에 미치는 영향

김병현* · 박권하* · 이상수** · 성낙원**

The Effect of Swirl Flow on Combustion Characteristics in a Marine Diesel Engine

B. H. Kim · K. Park · S. S. Lee · N. W. Sung

Key words : Marine engine(박용 엔진), Swirl flow(스월유동), Combustion(연소), Simulation(시뮬레이션)

Abstract

A diesel engine has been studied for many years to improve fuel economy and to reduce emissions as important factors governing the emission performance of diesel engines. This study addresses to swirl effects on combustion characteristics in a large diesel engine. The transport equations of flows and chemical reactions are given for fully compressible fluid. The simulations have been done for compression and expansion strokes and the results are given at several crank angles which are the angles at just before injection start, TDC, ATDC 90 and just before exhaust valve open. The results show that the strength of the swirl flow makes many effects on burning fuel and forming emissions.

기호설명

ρ_m : mass density of species
 ρ : total density of species
 u : fluid velocity
 D : diffusion coefficient
 δ : Dirac delta function
 P : fluid pressure

σ : viscous stress tensor
 μ : first coefficients of viscous
 λ : second coefficients of viscous
 k : kinetic energy
 g : specific body force
 I : specific internal energy
 J : heat flux vector
 h_m : specific enthalpy of species m

* 한국해양대학교(원고접수일 : 99년 5월)
 ** 성균관대학교

- \dot{Q}_c : chemical heat release
- \dot{Q}_s : source from spray interactions
- K : thermal conductivity coefficient
- T : fluid temperature

1. 서 론

대기환경에 대한 인식과 관심이 급증되고 있는 가운데 선박용 디젤기관으로부터의 배기 배출의 문제는 IMO 대기오염방지협약 등 국제적인 법적 규제의 단계에 접어들고 있다. 하지만 디젤기관은 열효율 및 내구성이 우수하기 때문에 소형자동차에 사용하는 등 그 적용이 증가되고 있는 실정으로 배기 저감에 대한 기술의 개발이 요구되고 있으며 많은 연구들이 수행되고 있다. 엔진운전특성에 따른 NOx 배출에 관한 연구⁽¹⁾, 물혼합연료사용에 의한 배기 저감 및 연비향상에 관한 연구, 고압분사에 의한 질소산화물저감 등 디젤기관으로부터의 배기저감에 관한 연구가 본격화되고 있다^(2,3,4,5). 본 연구에서는 2행정 유니플로우 소기식 디젤기관의 연소실에서 스웰비가 연소특성과 배출물에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 알아보고자 한다.

2. 수학적 모델

전달방정식은 다음과 같이 모델링된다. 화학종 m에 대한 질량보존방정식은,

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left[\rho D \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \dot{\rho}_m^c + \dot{\rho}_m^s \delta_{m1} \quad (1)$$

여기에서 ρ_m , ρ 는 각각 화학종 m과 전체밀도, μ 는 유속, D 는 확산계수를 나타낸다.

모멘텀보존식은,

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p - A_0 \nabla (2/3 \rho k) + \nabla \cdot \sigma + F^* + \rho g \quad (2)$$

여기에서, p 는 유체의 압력이며 σ 는 점성전단응력으로서, 다음과 같이 Newtonian형식으로 쓴다.⁽⁶⁾

$$\sigma = \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] - \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \quad (3)$$

에너지방정식은

$$\frac{\partial (\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} I) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot J + \rho \epsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s \quad (4)$$

이며, I 는 단위내부에너지이며, 열 유속 J 는

$$J = -K \nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla (\rho_m / \rho) \quad (5)$$

으로 나타난다.

난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며 난류운동에너지(k)에 관한 보존식은 다음과 같다.

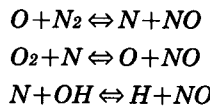
$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = -\frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} + \sigma : \nabla \mathbf{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_k} \right) \nabla k \right] - \rho \epsilon + \dot{W}^* \quad (6)$$

그리고 난류운동에너지 소산을 ϵ 에 관한 보존식은

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \epsilon) = -\left(\frac{2}{3} C_1 - C_3 \right) \rho \epsilon \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} [C_1 \sigma : \nabla - C_2 \rho \epsilon + C_3 \dot{W}^*] \quad (7)$$

으로 표시된다.

화학반응계산에서는 Arrhenius 형태의 반응율을 사용하며 NO의 생성은 확장된 Zel'dovich 메커니즘을 이용한다.



여기서 전후방향의 평형상수값은 Bowman⁽⁷⁾에 의하여 제시된 값을 사용하며, 기타 화학반응과정은 Meintjes와 Morgan⁽⁸⁾에 의한 알고리즘을 사용한다.

3. 계산조건

Table 1에 주어진 사양을 갖고 있는 2행정 디젤

기관에서 스윙유동의 영향을 평가하기 위하여 Eq.(8)과 같이 정의되는 무차원 함수인 초기 스윙비를 0에서 5까지 변화시키면서 계산한다. 보다 정밀한 계산을 위하여 프로그램의 한계에 가까운 50000개의 격자를 사용하였으며 이는 Fig. 1에서 보여 준다.

$$\text{Initial Swirl Ratio} = \frac{\text{Air rpm}}{\text{Crankshaft rpm}} \quad (8)$$

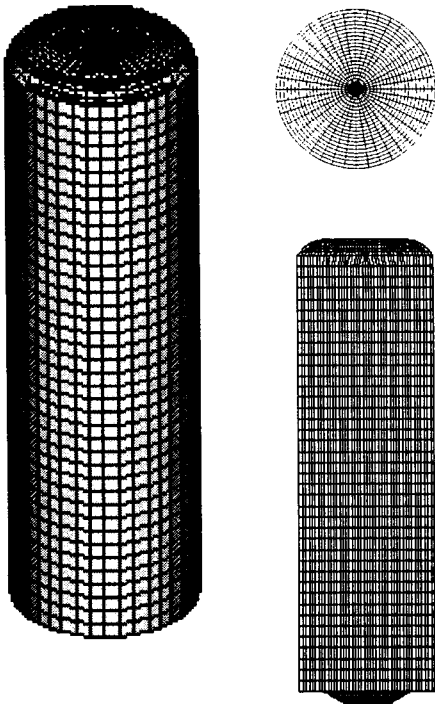


Fig. 1 Calculation grids

Table 1. Engine specification

Items	Values
Spec.	2-s uni-flow
Bore[cm]	42
Stroke[cm]	136
Eng. speed[rpm]	176
Comp. ratio	23.5
Inj. amount per stroke[g]	15.75
Inj. timing[deg]	BTDC 5

4. 결과 및 고찰

4.1 유동특성

Fig. 2-a, b는 연소실내의 수직, 수평단면에서 스윙비가 0인 경우와 5인 경우의 공기유동을 보여 준다. 분사가 시작되는 -5° 인 경우에는 초기 스윙의 영향이 절대적임을 보여 주는데 이는 연소실헤드 형상이 반구형으로 압축와류가 거의 존재하지 않으며 피스톤 운동에 따른 기타 유동도 적기 때문이다. 0° 인 경우 즉 피스톤이 상사점에 있을 때에는 분사가 본격적으로 진행되고 있는 상태로서 분무액적들의 유동이 연소실내의 전반적인 유동형상을 결정함을 알 수 있다. 스윙이 없는 경우에는 분사밸브가 위치하고 있는 우측상단에서 분무의 진행방향인 좌측으로 유동이 형성되는 것을 알 수 있으며 다른 유동은 볼 수 없다. 스윙비가 5인 경우에는 잔류와류의 영향으로 분무유동이 시계방향으로 선회하며 분사방향인 연소실 안으로의 진행은 감소됨을 나타낸다. 90° 인 경우에도 스윙에 의한 선회유동이 계속적으로 나타나며 분무유동에 의한 영향은 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 압축행정 동안에는 실린더 벽과의 점성저항에 의해 스윙비가 적어짐을 확인할 수 있다.

4.2 온도분포

Fig. 3은 크랭크각 $0^\circ, 90^\circ, 130^\circ$ 에서 스윙비에 따른 온도분포의 변화를 보여 준다. 모든 스윙강도에서 각도의 증가와 함께 고온 부분이 증가되는 것을 보여 주지만, 스윙강도에 따라서 그 분포가 많이 변화하는 것을 알 수 있다. 초기스윙이 없는 스윙비 0인 경우에는 분사밸브의 반대쪽에 높은 온도분포를 보여 주는 반면 스윙이 증가하면서 그 분포부위가 전체의 영역으로 변화되어 간다. 크랭크각 0° 인 경우에는 분사된 연료의 이론공연비 근처의 연료에서부터 연소가 진행됨을 알 수 있는데, 연소부분인 고온영역이 스윙이 없는 경우에는 분사위치에 정체되며 스윙강도의 증가와 함께 스윙의 방향으로 이동되는 것을 보여 준다. 각도의 증가와 함께 온도가 높은 영역이 스윙증가에 비례하여 크게 증가됨을 보여 주는데 이는 적당한 스윙유

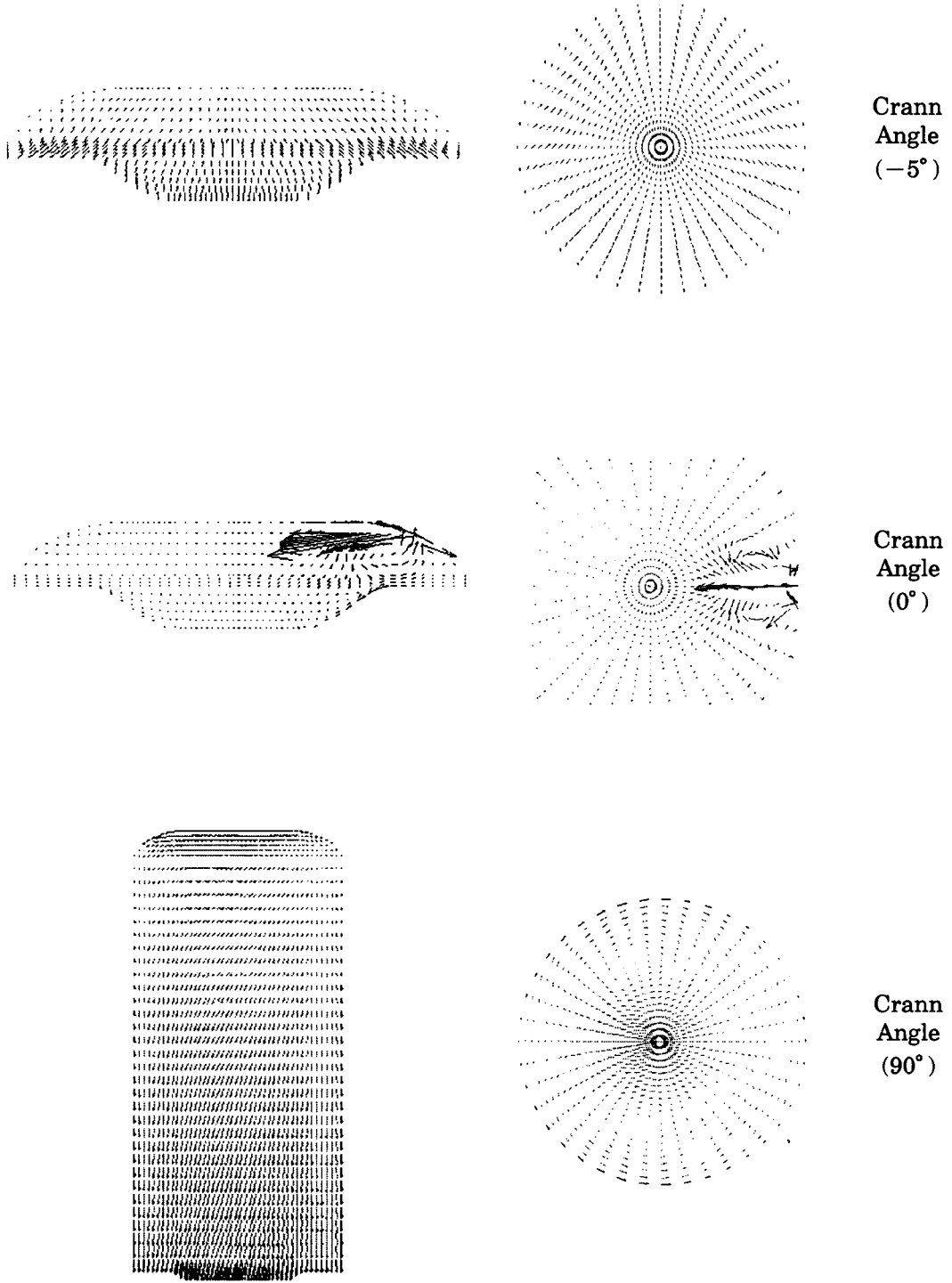


Fig. 2-a. Gas flow fields with swirl ratio [Swirl ratio is '0']

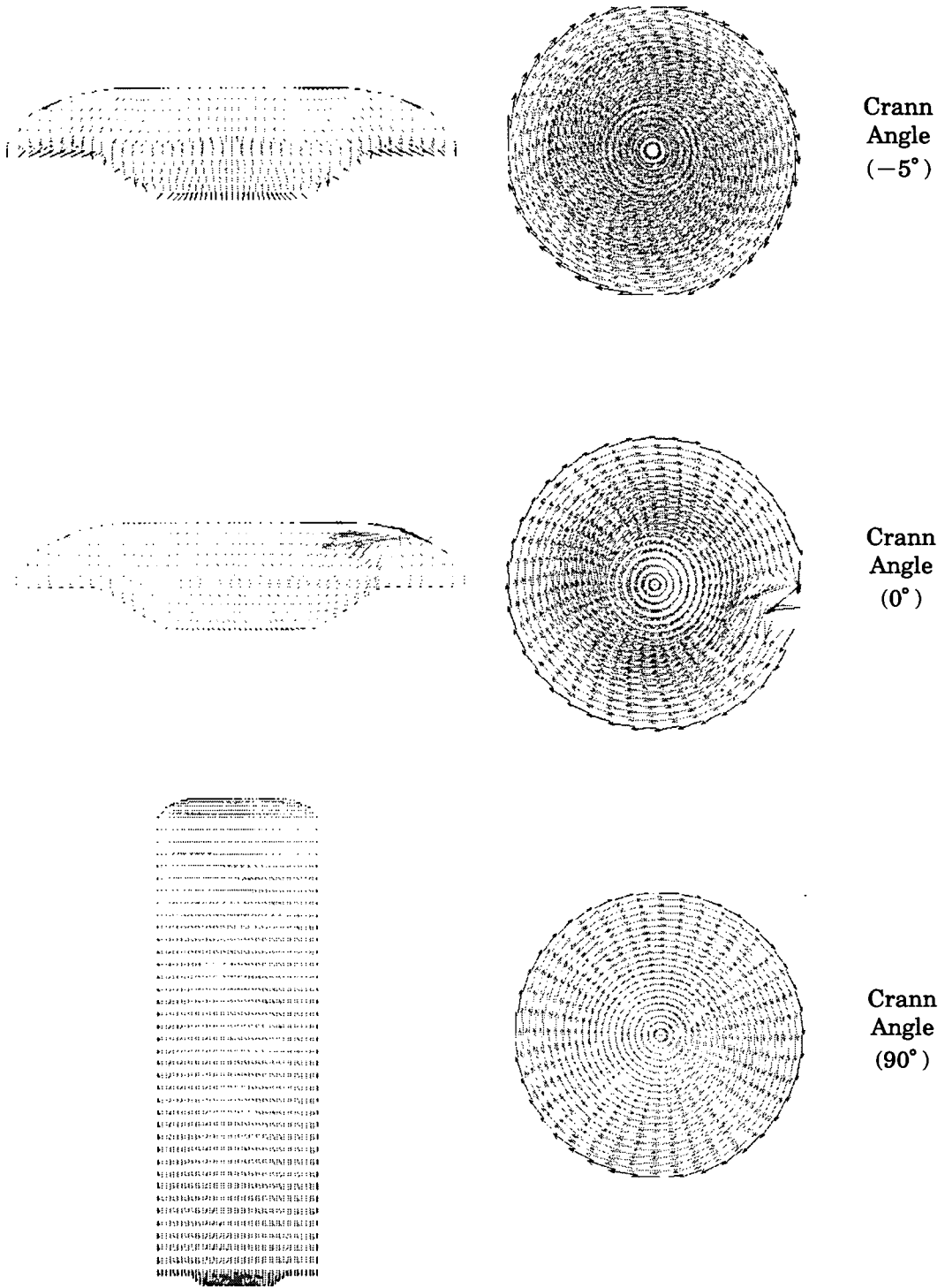


Fig. 2-a. Gas flow fields with swirl ratio[Swirl ratio is '5']

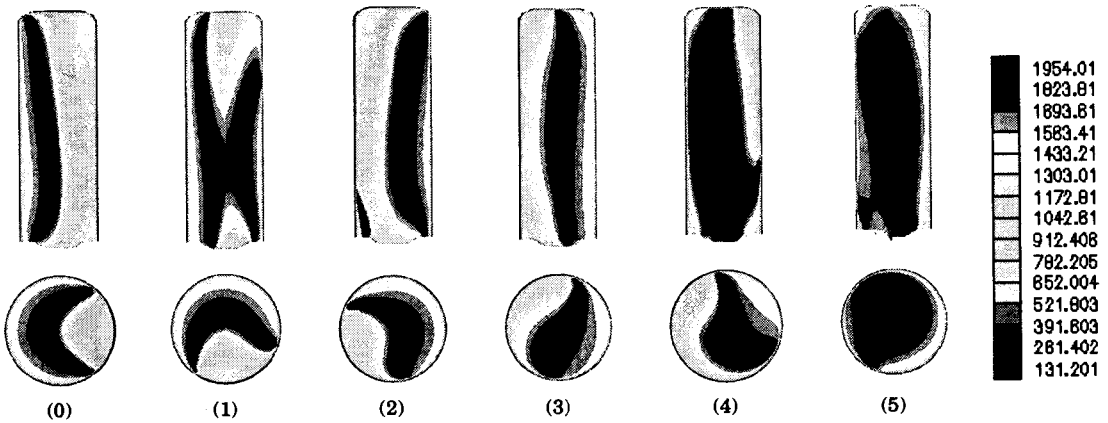
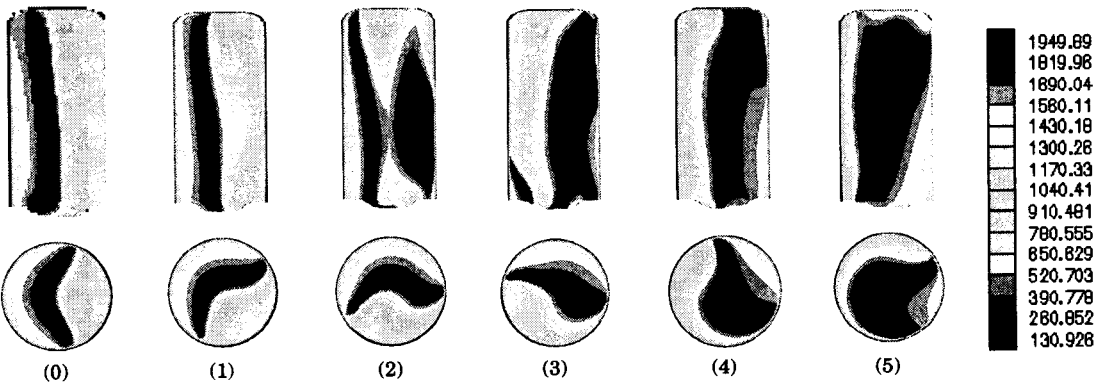
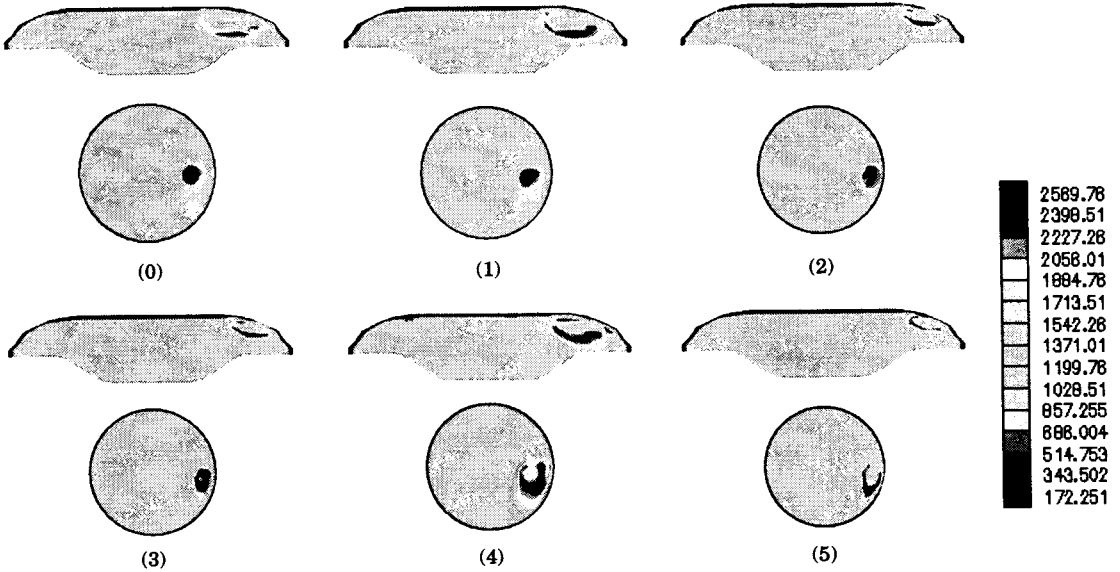
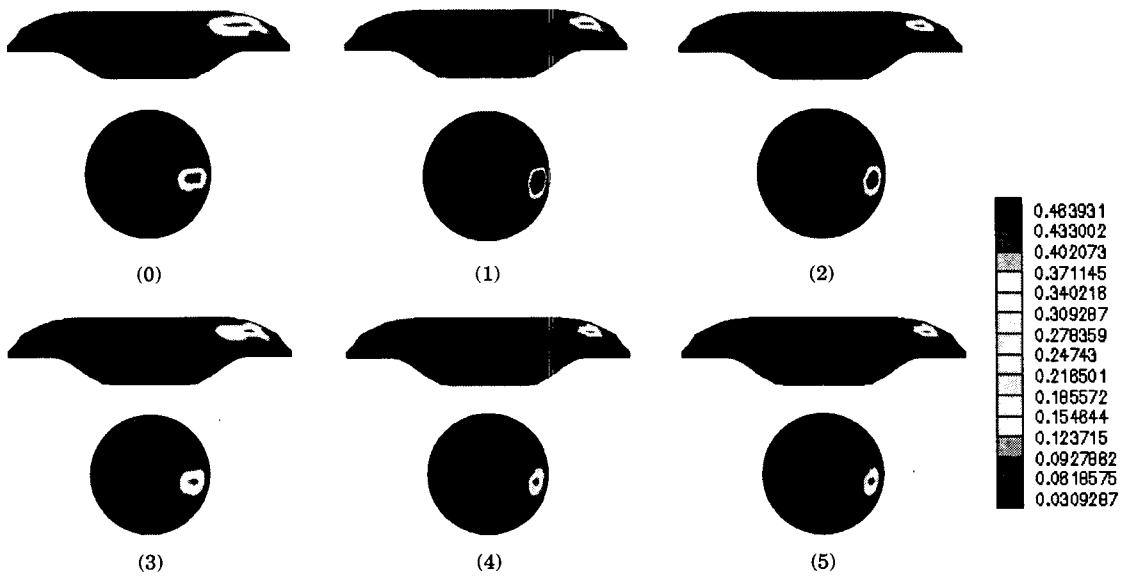
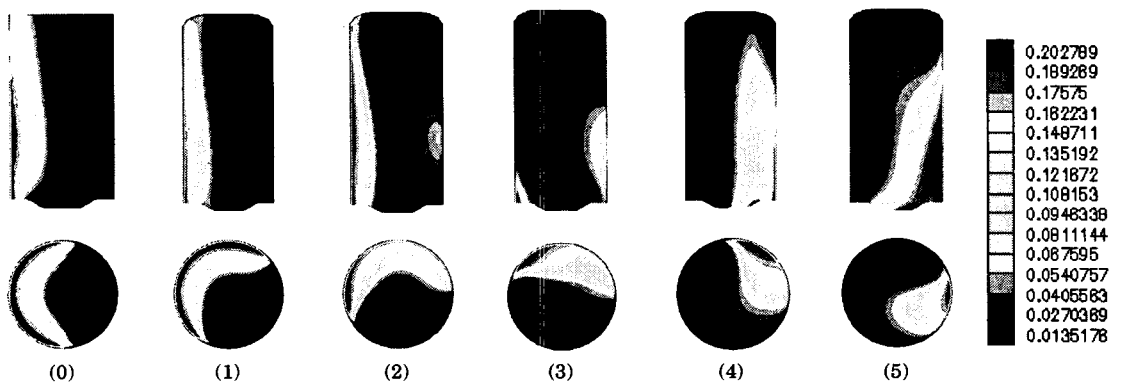


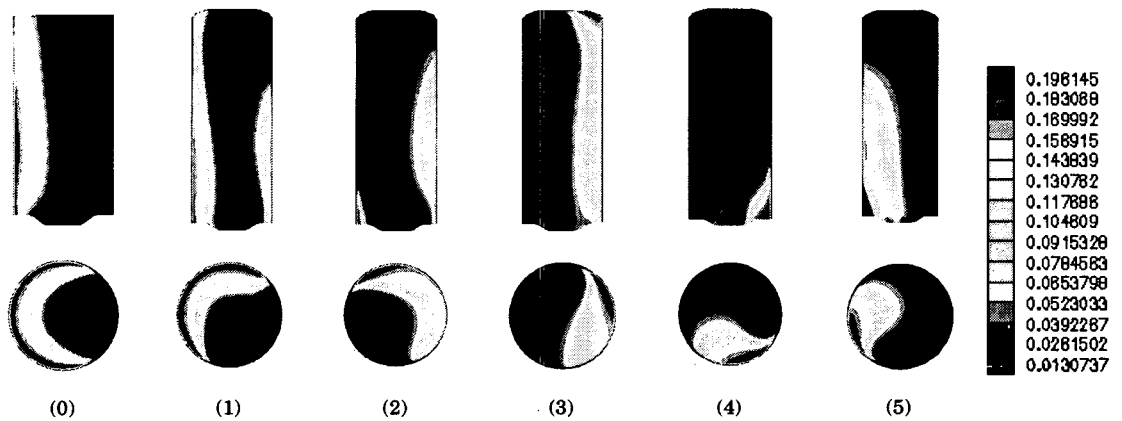
Fig. 3 Temperature distribution with swirl ratio[() is swirl ratio]



Crank Angle : 0°



Crank Angle : 90°



Crank Angle : 130°

Fig. 5 Fuel vapor mass fractions with swirl ratio[() is swirl ratio]

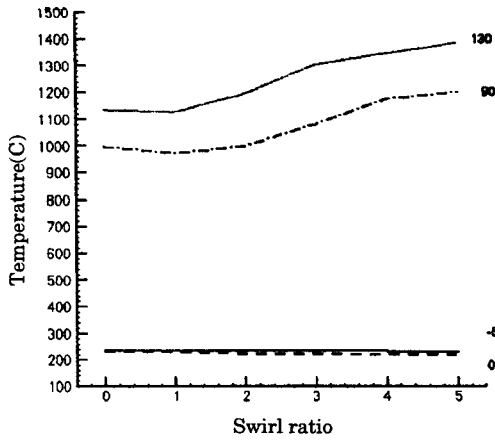


Fig. 4 Temperatures with swirl ratio variation

동은 연소의 범위를 넓게 하여 준다는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 크랭크각 -5, 0, 90, 130도에서 스웰에 따른 실린더내의 평균온도변화를 보여주는 데, 연소가 시작된 직후인 0도에서는 초기연소의 열공급에도 불구하고 분사된 연료의 증발에 의한 온도감소를 보여주며 스웰이 증가하면서 더욱 크게 감소함을 보여 준다. 이는 스웰이 연료의 증발에 큰 영향을 미친다는 것을 말한다. 연소가 충분히 진행된 130도인 경우에는 스웰의 증가와 함께 평균온도의 증가를 보여준다.

4. 3 연료분포

Fig. 5에서 알 수 있는 것처럼 연료의 분포는 온도의 분포와 유사함을 보여주며 연소실내의 유동에 크게 영향을 받는다. 스웰이 없는 경우에는 대부분의 연료가 분사밸브 반대편 벽면부근에 집중적으로 분포됨을 보여주지만 스웰의 증가와 함께 연료가 스웰방향으로 선회함을 보여주며 동시에 농후한 영역이 감소함을 보여준다. 이는 크랭크각 130도에서 스웰비 3인 경우와 0 일때의 연료분포를 비교할 때 명확히 알 수 있다.

4. 4 산소농도분포

크랭크각 0, 90, 130도에서 스웰비 변화에 따른 산소농도분포는 Fig. 6에서 보여 주는 것처럼 연료가 분포하는 반대편에 나타난다. 스웰이 없는 경우에는 연료분포의 반대편인 우측벽면에 집중되고

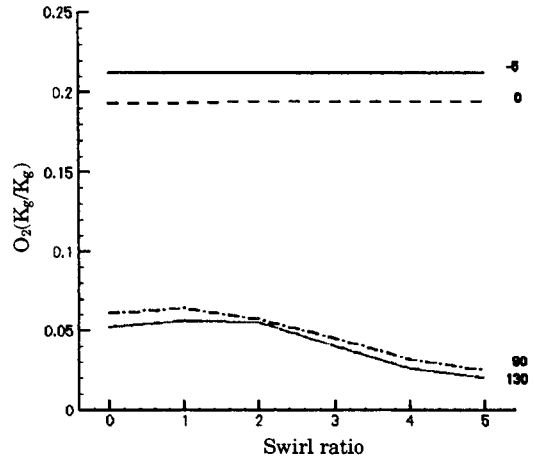


Fig. 7 O₂ concentrations with swirl ratio variation

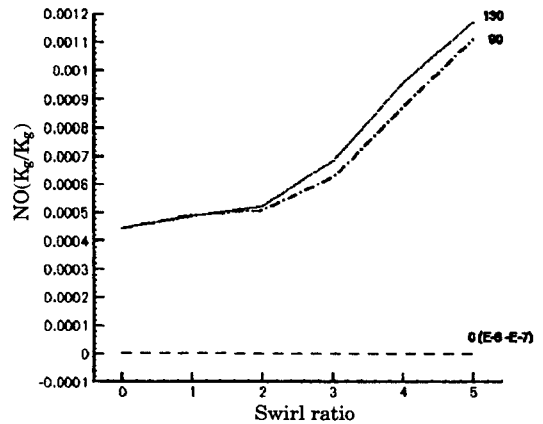


Fig. 9 NO concentrations with swirl ratio variation

있음을 보여 주며 질량분을 20%이상 즉 거의 연소에 참여하지 않은 공기부분이 크랭크각 130도 까지 넓게 분포됨을 알 수 있다. 스웰이 증가함에 따라서 농후한 산소영역이 감소됨을 알 수 있는데 스웰비 4 이상인 경우에는 매우 작아짐을 보여준다. Fig. 7은 스웰비에 따른 평균산소질량분율의 변화를 보여준다. 스웰비 2까지는 큰변화가 없지만 스웰비 4, 5인 경우에는 스웰이 없는 경우와 비교하여 1/3정도까지 감소함을 알 수 있다.

4. 5 질소산화물

Fig. 8은 스웰비 증가에 따른 NO농도의 분포변화를, Fig. 9는 실린더내 평균 NO 질량분율을 보여준다. NO농도는 이온과 같이 온도 분포와 유사한 분포

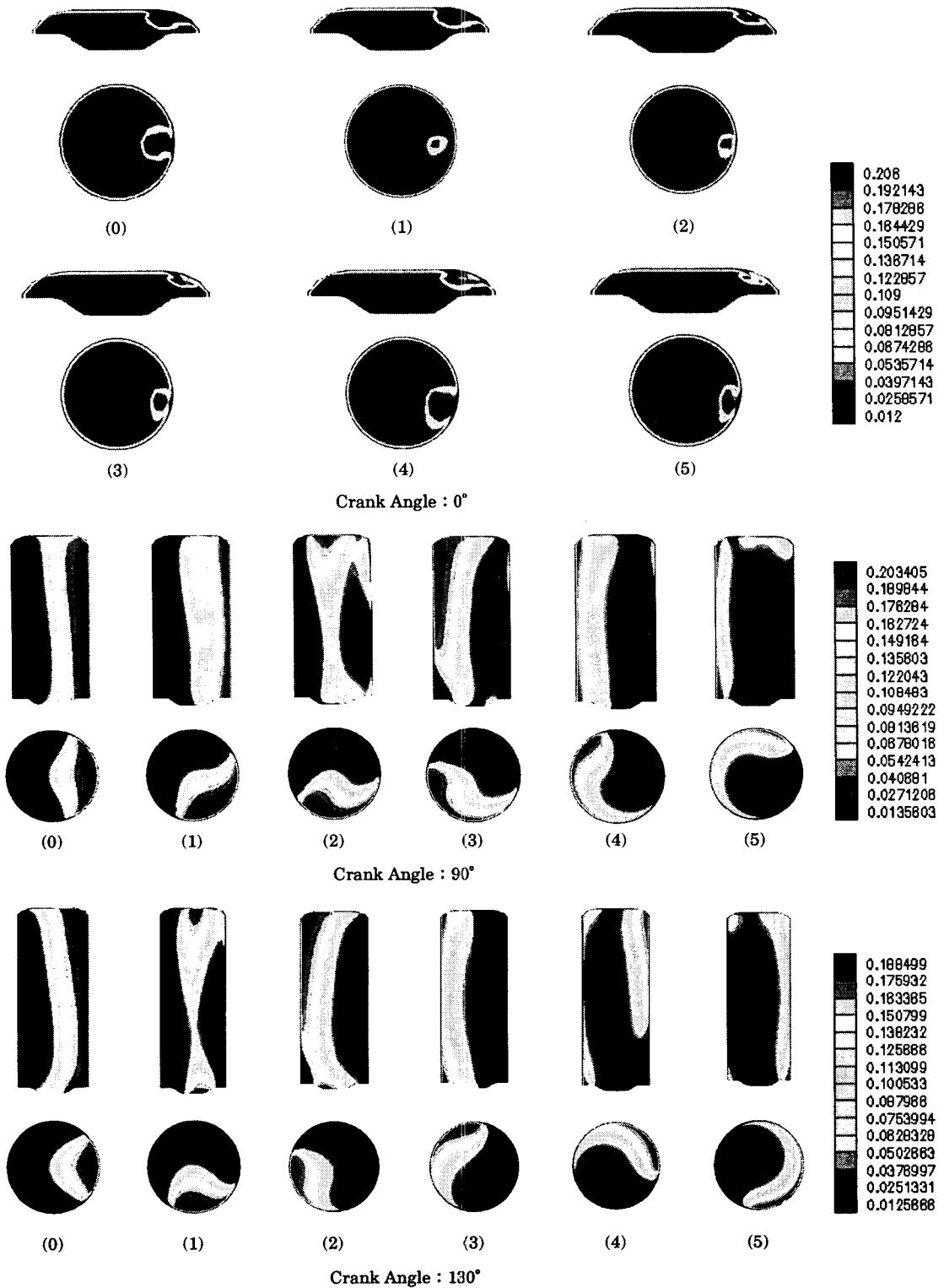
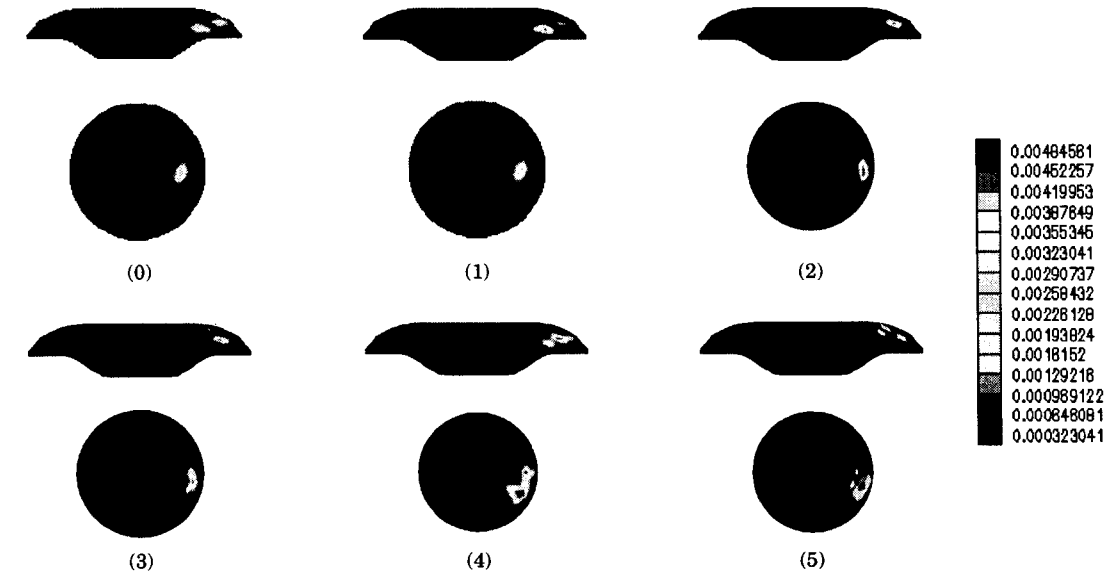
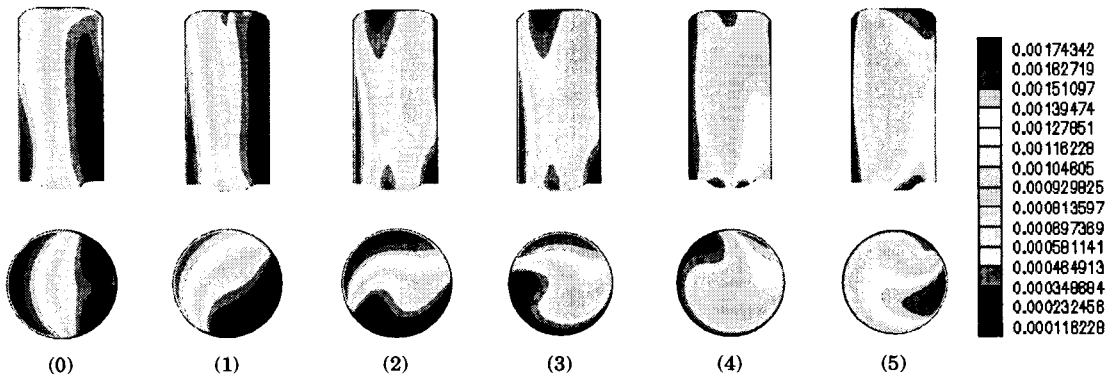


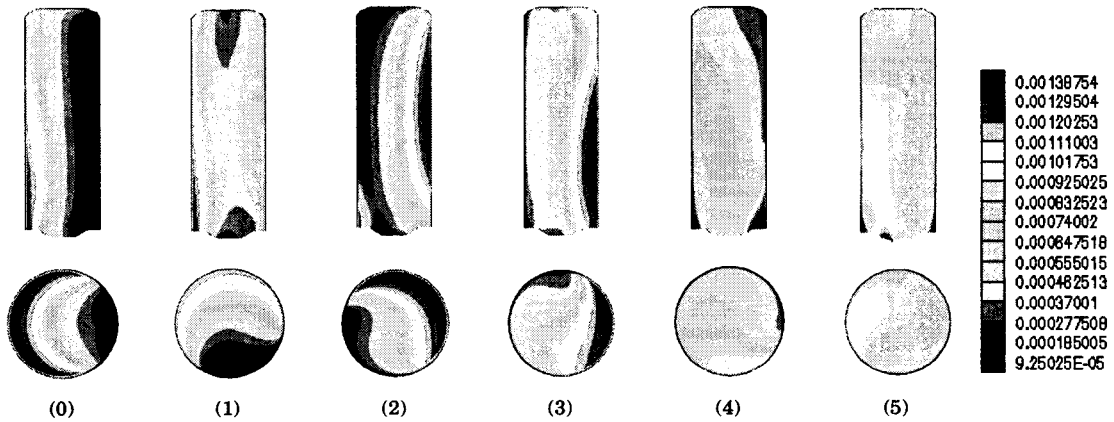
Fig. 6 O₂ concentrations with swirl ratio[() is swirl ratio]



Crank Angle : 0°



Crank Angle : 90°



Crank Angle : 130°

Fig. 8 NO concentrations with swirl ratio(() is swirl ratio)

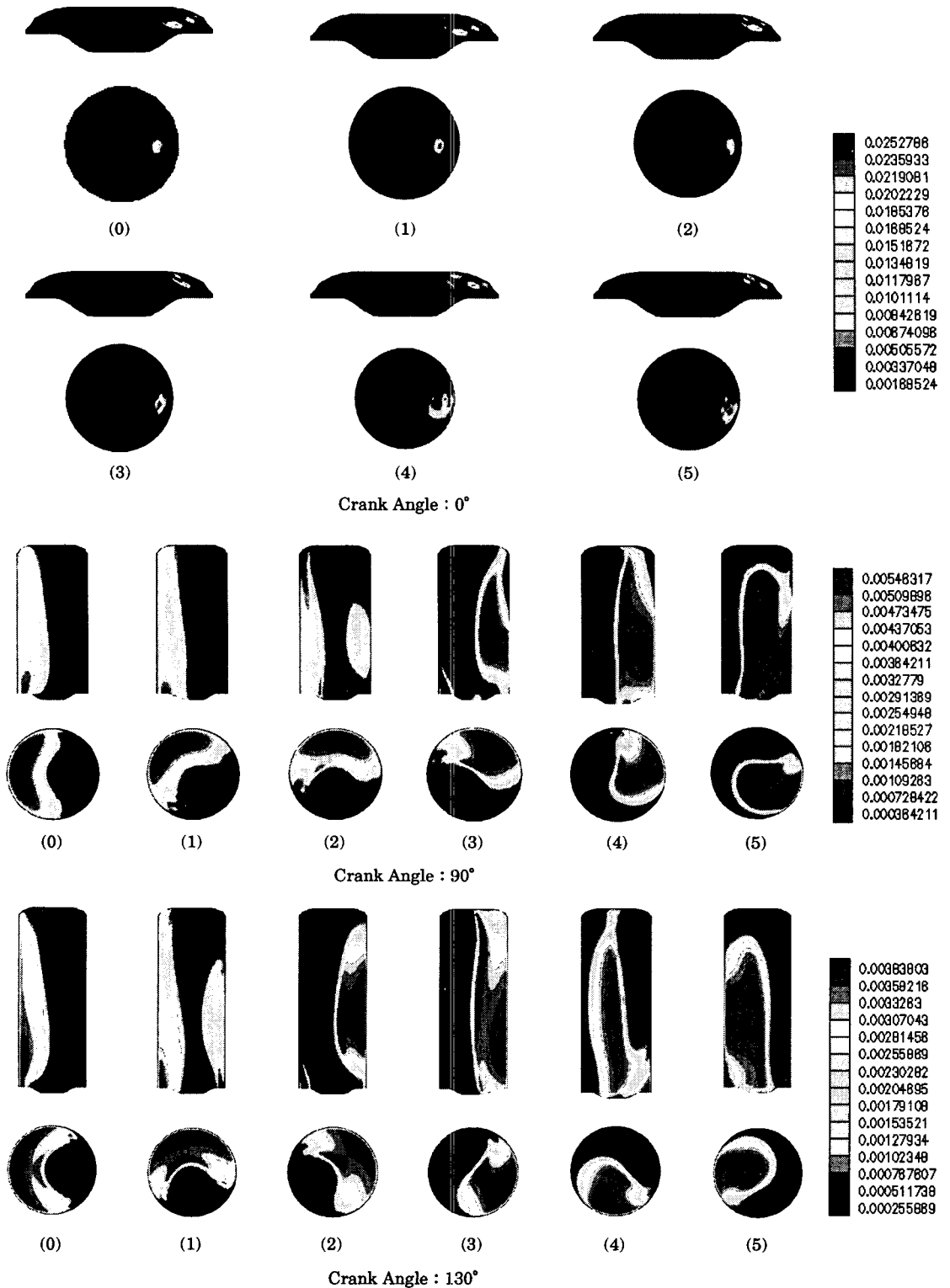


Fig. 10 CO concentrations with swirl ratio() is swirl ratio

로 고온영역에 높은 것을 알 수 있다. 스월이 없는 경우에는 집중적으로 고온부분에 분포함을 보여주지만 스월의 증가와 함께 농후한 영역이 감소되면서 전 실린더내에 넓게 분포함을 나타내는데 전체 농도는 스월의 증가와 함께 증가되는 것을 알 수 있다.

4.6 일산화탄소분포

일산화탄소는 연소초기인 0도에서는 거의 나타나지 않지만 크랭크각 증가와 함께 급속히 증가하는데 연료가 많고 산소가 부족한 영역에 집중된다 (Fig. 10). 분포영역의 넓이는 스월의 영향이 크게 작용하지 않음을 보여준다.

5. 결 론

이상의 고찰에서 볼 때 연소초기인 0도(TDC)에서는 스월이 증가할 때 분사연료가 스월유동을 따라 이동, 확산되면서 활발히 증발되지만 아직 연소가 본격화되지 못하기 때문에 스월이 없는 경우와 비교할 때 온도와 산소의 소모량이 낮은 수준을 유지한다. 크랭크각이 증가하면서 스월유동은 연료를 더욱 넓게 분포시키며 증발, 혼합시킴으로써 연소특성을 향상시킨다. 이는 산소량 감소와 온도상승으로 알 수 있으며 연소효율향상에 크게 영향을 미칠 것으로 생각된다. 단 스월비가 증가할 때 온도의 상승과 더불어 NO가 증가되는 문제가 있는데, 이러한 연비와 NO의 상호교환관계에 대한 연구가 더욱 요구된다. 스월의 증가와 분사시기의 적절한 지연은 이러한 대안으로서 제시될 수 있다.

참고문헌

1. 안숙헌, 최재성 등, "박용 디젤기관의 NOx · COx 배출특성과 NOx 측정법에 관한 실험연구", 한국박용기관학회지, 23권 1호, pp.19~24, 1999.
2. Park, K. and Park, T. I., "Injection characteristics of emulsified fuel and the effects of EGR and emulsified fuel on diesel combustion, Proc. of 22nd CIMAC Int. Con on Combustion Engines, Vol. 4, pp.867~877, 1998.
3. Yoshimoto, Y. et al, "NOx reduction with EGR in a diesel engine using emulsified fuel", SAE

982490, 1998.

4. Yoshimoto, Y. et al, "Improvement of BSFC by reducing diesel engine cooling losses with emulsified fuel", SAE 962022, 1996.
5. 김철순, 김기형, 박태인, 류정인, "흡기 포트내 물 분사에 의한 디젤 기관의 배기 유해배출 및 기관 성능 변화에 관한 실험적 연구", 한국박용기관학회지, 23권 1호, pp.25~32, 1999.
6. 손병진 외, 상설 유체역학, 회중당, 1992.
7. Bowman, C. T., "kinetics of pollutant formation and destruction in combustion", Prog. Energy Combust. Sci, pp33~45, 1975.
8. Mientjes, K. and Morgan, A. P., "Element variables and the solution of complex chemical equilibrium problems", General Motors Research Publication GMR-5827, 1987.
9. Pulkrabek, W.W., "Engineering fundamental of the internal combustion engine", Prentice-Hall Inc, 1997.

저 자 소 개



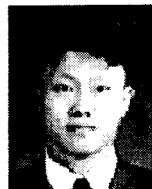
김병현(金秉鉉)

1971년생, 1998년 성균관대학교 기계설계학과 졸업. 1999~현재 한국해양대학교 기계공학과 석사과정



박권하(朴權夏)

1960년생, 1982년 성균관대학교 기계공학과 졸업. 1991년 영국 맨체스터대학(UMIST) 졸업(석사). 1995년 동대학원 졸업(박사). 현재 한국해양대학교 전임강사



이상수(李相洙)

1974년생, 1996년 성균관대학교 기계설계학과 졸업. 1998년 동대학원 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정



성낙원(成洛元)

1948년생, 1973년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1976년 텍사스대학(Uni of Texas) 졸업(석사). 1981년 미시간대학(Uni of Michigan) 졸업(박사). 현재 성균관대학교 교수