工學碩士 學位論文

라디칼 인젝터를 적용한 연소시스템에서 부연소실의 신기유입 특성에 관한 계산적 연구

Numerical Study on Inflow Characteristics of Fresh Gas to the Subchamber in the Combustion System having a Radical Injector

指導敎授 朴 權 夏

2004年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 계 工 學 科

田 宰 赫

本 論文을 田宰赫의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委 員 長　崔 在 星 ㊞

委　　員　趙 權 回 ㊞

委　　員　朴 權 夏 ㊞

2004年　2月

韓國海洋大學校　大學院

機 械 工 學 科

田　宰　赫

목 차

ABSTRACT iii

Ⅰ. 서론

1.1 연구배경 5

1.2 연구개요 8

Ⅱ. 연구 방법

2.1 수학적 모델 10

Ⅲ. 계산조건 및 결과 I

3.1 경계조건 및 초기조건 13

3.2 연결공 형상에 따른 시기유입특성에 따른 계산조건 14

3.3 부연소실로의 신기유입 특성 18

3.4 주연소실로 유출되는 잔류가스의 유출특성 25

3.5 전체적 신기유입 및 잔류가스의 유출특성 27

Ⅳ. 계산조건 및 결과Ⅱ

4.1 부연소실에서의 당량비 계산에 관한 조건 59

4.2 부연소실에서의 당량비 특성 60

Ⅴ. 결론 65

참고문헌 66

ABSTRACT

Numerical Study on Inflow Characteristics of Fresh Gas to the Subchamber in the Combustion System having a Radical Injector

Jaehyeuk Jeon

Department of Mechanical Engineering, Graduate School
Korea Maritime National University
Busan, Korea

(Supervised by Professor Kweonha Park)

Automobile technologies for high performance have been developed since automobile appeared about 100 years ago. Among the technologies, the engine technology is one of the critical technologies. Especially high technology for engine combustion concentrating on the reduction of CO_2 appears nowadays.

Diesel engine used in the present time has many problems on environmental pollution, and gasoline engine is also has some problems on thermal efficiency and CO_2 emission. Therefore, developing the novel technology to solve the problems from both type of engines, which are reducing energy consumption and exhaust emissions.

To correspond to this trend, homogeneous charged compression ignition (HCCI) engine has studied to supplement the existing diesel and gasoline engine. Various kinds of research about homogeneous charged compression ignition engine are performed but HCCI engine is just in the beginning because there are some problems about control of power generating and combustion

timing.

To complement the defects of HCCI engine, HCCI engine having a radical injector is proposed. There are two chambers in the HCCI engine having a radical injector and a large quantity of radical from sub-chamber is injected to main chamber instantaneously and inducing self ignition on multi-points that makes homogeneous profile in lean mixture and performs rapid combustion at the same time. The performance of radical injector brings high thermal efficiency and reduces harmful exhaust gases at the same time.

Although radical injector has several merits, there are several problems. One of them is predicted as characteristics of the gas flow through narrow cylindrical connectors between main chamber and sub-chamber. Therefore, computer simulation under various geometries is important to predict characteristics of the gas flow that greatly effects on the next combustion process.

In this thesis, the characteristics of gas flow according to the number, shape of the connecters and the engine speed are simulated using KIVA-3V code.

The result shows that the gas inflow and outflow are greatly effected from the shape of connectors, which will be considered as a important design factor.

Ⅰ. 서 론

1.1 연구배경

자동차가 본격적으로 등장한 후 100여년 동안 자동차 기술은 많은 발전을 이룩하였다. 성능 위주의 초기 개발에서 석유파동에 의한 효율향상 기술개발 이후 환경친화적인 자동차 개발이 이루어지고 있다. 그 중에서도 엔진 기술은 이러한 자동차 발전의 핵심기술이며 고도의 연소기술들이 등장하고 있다. 최근에는 이산화탄소 저감을 위한 효율향상기술과 환경오염 저감기술이 중점적으로 연구되고 있다.

현재 사용되고 있는 디젤엔진의 경우에는 연료가 직접 분사되므로 분사된 연료분무 주위에는 불균일한 공연비 분포가 발생되어 연료가 농후한 영역에서는 입자상물질(Particulate Matter: P.M.)이 생성되며, 이론공연비 영역에서는 질소산화물(NOx)의 배출이 증가한다.[1] 가솔린 엔진은 디젤엔진에 비하여 질소산화물이나 매연미립자와 같은 배출가스가 적으므로 환경적 측면만 고려한다면 유리하지만 디젤엔진에 비하여 열효율이 낮기 때문에 연료소비율이 높고 이산화탄소의 배출량이 많아서 지구에너지 고갈과 온난화 문제에는 좋지 못한 특성을 갖는다. 최근에 들어서 기존의 석유에너지의 고갈과 환경적 측면이 대두되고 있어 이러한 석유에너지를 사용한 단점들을 보완하기 위하여 연료전지 자동차의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 하지만 아직까지 실용화 단계까지는 많은 시간이 걸릴 것으로 예상되며 기존 엔진의 개발로 인해 현시점의 단점들이 많이 보완될 것이다. 이러한 추세에 부응하여 기존의 디젤엔진과 가솔린엔진의 장단점을 상호보완하기 위해 진행되고 있는 연구가 예혼합 압축착화 엔진이다. 이러한 예혼합 압축착화 (HCCI : Homogeneous Charged Compression Ignition) 엔진은 현재 강화되고 있는 배기가스 규제와 고효율, 고출력에 대한 상반적 요구를 동시에 실현하기 위한 방법으로 연구되고 있으며 이미 예혼합 압축착화 엔진 중에는 연료의 흡기관 분사와 함께 착화원으로서 연소실내에 소량의 연료를 분사하는 방식인 HCDC(Homogeneous Charge Diesel Combustion)와 흡기관 내에서 주분사가 이루어지는 연소특성의 단점을 보완하여 연소실내에서 직접 예혼합기를 형성하는 방식인 PREDIC(Premixed Lean Diesel

Combustion) 등의 이름으로 연구가 활발히 진행되고 있다.[2)~5)] 하지만 이러한 시스템에도 연료의 흡기관내 분사에 의한 유막형성 (Wall Wetting), 조기분사에 따른 저압분위기 내에서의 분무관통거리등 실용화에 어려운 점이 많다. 무엇보다도 이러한 시스템의 큰 문제점은 출력 제어를 위한 당량비의 가변폭이 좁고 연소시기의 제어가 어렵기 때문에 아직까지 연구단계에 있다. [6,7)]

이러한 현대적 엔진개발의 연구에 부합하여 넓은 엔진의 작동 영역에서 희박혼합기의 연소안정성 및 착화 시기의 안정된 제어를 위해서 라디칼 인젝터를 장착한 예혼합 압축착화 엔진이 제시되고 있다. 라디칼 인젝터를 장착한 예혼합 압축착화 엔진은 연소실에 구성된 초희박혼합기에 다량의 라디칼(활성화학종)을 순간적으로 공급하여 다점 자기 착화를 유발하여 희박한 조건에서 균일한 분포의 연소와 급속연소를 동시에 실현함으로써, 높은 열효율을 얻음과 동시에 유해 배기가스는 저감되며, 안정된 착화시기의 제어를 통해 사이클 변동이 매우 낮은 것으로 보고 되고 있다. 하지만, 이러한 라디칼 인젝터를 장착한 예혼합 압축착화 엔진에서는 라디칼의 생성과 화학적 반응을 상세히 고려하는 화학적 측면이 아직 미흡하며 안정된 착화시기와 유동의 영향에 의해서 야기되는 결과를 예측하기 위한 열유체역학적인 측면 또한 더욱 연구되어야 한다. [2,3)]

라디칼 인젝터를 장착한 예혼합 압축착화 엔진에서는 연소과정에 있어서 반응물과 생성물의 중간단계에서 생성되는 활성화학종이 중요한 역할을 하며 CH계 연료의 연소반응에서 생성되는 활성화학종으로는 CH, OH, H, O 등이 있다. 이러한 활성화학종은 화학적으로 고온고압의 불안정한 상태이므로 연소 중간단계에서 화학반응을 촉진시켜주며 다른 화학종들과 결합하여 많은 화학연쇄반응을 유발시킨다. 그러므로, 에너지의 평형상태에 있던 다른 화학종들이 활성화학종의 반응에너지에 의해 여기되며 에너지 준위를 깨고 순간적으로 평형상태에서 벗어난다고 알려져 있다. 이러한 개념을 엔진에 도입하여 연소실에 도입된 초희박 예혼합기에 다량의 라디칼을 광범위한 영역에 순간적으로 공급하여 희박한 예혼합기의 동시다점착화를 유발함으로써, 당량비의 가변폭이 넓어지며 착화시기를 임의로 제어할 수 있다.

전체적으로 희박한 예혼합기를 가진 주연소실과 과농한 예혼합기를 형성하며

다수의 연락공을 가진 미소한 체적을 구성하고 있는 부연소실이 동시에 연소실을 형성하고 있다. 라디칼 인젝터를 장착한 예혼합 압축착화 엔진의 연소실 형상은 기존의 가솔린 엔진과 디젤 엔진의 연소방법을 동시에 구성하는 것과 유사하다. 하지만 그 연소방법과 개념에 있어서는 다소 차이를 보이고 있다. 라디칼 인젝터를 가진 예혼합 압축 착화 엔진의 연소의 개념은 Fig. 1.1에서 보여진다. 우선 흡입행정시 주연소실로 희박한 예혼합기가 유입되며, 압축 행정 말기에 부연소실에서 과농한 예혼합기의 형성을 위해 적절한 양의 연료를 분사시켜 예혼합기를 형성한 후에 스파크 점화로 점화시킨다. 이때 부연소실에서 연소가 되면 연소압에 의해 라디칼을 포함하고 있는 기연 및 미연가스를 연결공을 통해서 주연소실로 분사하게 된다. 피스톤이 상사점에 이르게 되면 부연소실로부터 주연소실로 분사된 라디칼들은 고온 고압의 상태이므로 주연소실의 희박한 예혼합기와 화학적 결합을 일으켜 다점자기착화를 유발하므로 연소를 시작한다. 이러한 과정의 연소에 관한 연구에서 화학적 부분과 열유체역학적인 부분에 관한 수치 해석적 방법을 연구하는 것은 매우 중요하다.

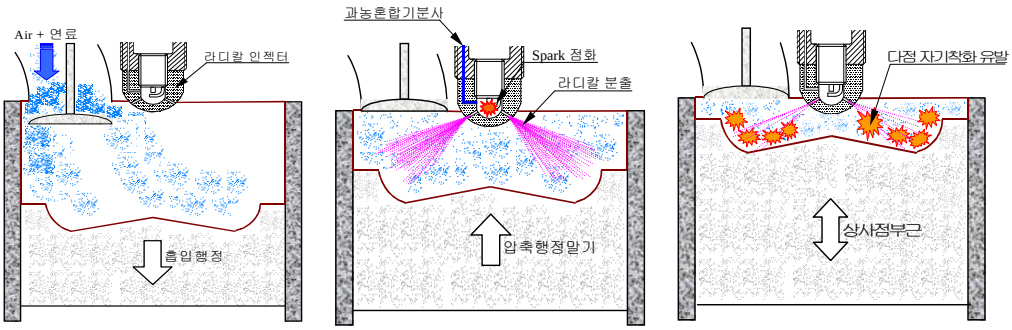


Fig. 1.1 Combustion process in premixed self-ignition engine having radical injector

내연기관에서의 수치해석적 연구는 엔진 내부 유동 및 연소 현상의 이해와 연소실 내부의 현상에 대한 물리적 모델의 개발을 중심으로 이루어지며, 수치해석 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 각 요소 모델에 대한 다양한 실험 결과와 상호 보완하는 검증작업이 요구된다.[8~10] 이러한 수치해석적 연구는 컴퓨터 발전과 더불어 발전하고 있으며 연소실내의 분무유동연소현상을 보다 사실적으로 모사하기 위해서 다차원 코드가 널리 이용되고 있다. 다차원 코드는 기존의 코드에 실험적으로 얻어진 결과 데이터들을 모델링하여 실제현상을 예측할 수 있도록 하고 있다. 이러한 다차원 계산은 Watkins가 1973년에 최초로 수행하였다.[11] 특히 실험 결과로 나온 결과 값들의 물리적 특성에 부합하기 위해서는 보다 정확하고 실제의 물리적 특성을 모사할 수 있는 모델들의 개발이 중요시되며 이러한 모델을 모사할 수 있는 컴퓨터 프로그램 중에서 KIVA-3V는 다차원모델을 모사할 수 있는 상용 컴퓨터 코드로써 미국국립연구소인 Los Alamos 연구소에서 개발되어 계속 발전되고 있는 엔진 성능 해석용 프로그램이다. KIVA-3V는 연소, 분무, 유동 등의 해석에 모두 적용되며 본 연구에서 라디칼인젝터를 장착한 예혼합압축착화 엔진의 유동과 연소를 동시에 계산하기 위하여 사용되었다.[12,13]

본 연구에서는 라디칼 인젝터를 장착한 엔진에서 실제 피스톤이 움직이는 동안 유동을 해석하고 이러한 유동에서 발생되는 현상들을 분석하여 라디칼 인젝터 내부에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

1.2 연구개요

연소의 과정 중에서 연소되기 이전까지의 압축행정시 주연소실에서 부연소실로의 신기유입 특성은 다음 단계에 발생할 연소에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러한 부연소실로의 신기유입 특성은 연결공의 크기와 각도 등 형상에 따라서 다양한 결과를 나타낼 것으로 예측된다. 실제적인 실험에서도 부연소실 내부로의 신기유입과 잔류가스의 유출이 용이하지 않아 활성 라디칼 및 배기가스의 유출유입이 원활하지 못할 것으로 보여진다. 특히 고속운전시 신기유입 및 잔류가스 유출은 더욱 어려울 것으로 예상된다. 부연소실의 형상은 신기유입의 유동특성뿐만 아니라

부연소실에서 점화에 의해 발생되는 연소가스가 연결공을 통하여 주연소실로 분출되는 것을 고려해야 하므로 적절한 연결공의 형태가 제시되어야 한다.

압축 행정시 유입되는 공기의 유동과 유량을 최적화하고 연소 후 배출되는 활성기의 주연소실 유동을 최대화하기 위해서, 본 논문에서는 연결공의 숫자와 연결공의 크기 및 피스톤 속도에 따른 신기유입 특성을 분석하고 이에 따른 부연소실의 연소특성을 분석하고자 한다.

Ⅱ. 지배 방정식

2.1 수학적 모델

화학 반응 및 유동해석에서 전달방정식은 다음과 같이 모델링된다.

화학종 m종에 관한 연속방정식은,

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \boldsymbol{u}) = \nabla \cdot [\rho D \nabla (\frac{\rho_m}{\rho})] + \dot{\rho}_m^c \qquad (1)$$

여기에서 ρ_m, ρ는 각각 화학종 m과 전체밀도, u는 유속, D는 확산계수를 나타낸다. 그리고 $\dot{\rho}_m^c$는 화학종 m의 화학반응에 의해 생성되는 생성항이다.

이것을 전체에 관한 질량 보존식을 사용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}) = \dot{\rho}^s \qquad (2)$$

모멘텀보존식은,

$$\frac{\partial (\rho \boldsymbol{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}\boldsymbol{u}) = -\frac{1}{\alpha^2} \nabla p - A_0 \nabla (2/3 \rho k) + \nabla \cdot \sigma + \rho \boldsymbol{g} \qquad (3)$$

여기서, p는 유체의 압력이며 무차원 계수 α는 낮은 마하수 유동에서 계산 효율을 증가시키는 방법인 PGS (Pressure Gradient Scaling) Method와 관련되어 있다. 그리고 A_0는 층류에서는 0 난류에서는 1을 선택적으로 하여 계산하는 계수이며 g는 단위체적력이며 상수로 가정한다. σ는 점성전단응력으로 다음과 같이 Newtonian형식으로 쓴다.

$$\sigma = \mu [\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T] - \lambda \nabla \cdot \boldsymbol{u} \boldsymbol{I} \qquad (4)$$

여기서, μ,λ는 각각 다른 점성계수이다.

에너지방정식은

$$\frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} I) = -p\nabla \cdot \boldsymbol{u} - \nabla \cdot J + \rho\varepsilon + \dot{Q}^c \qquad (5)$$

이며, I는 화학적 에너지를 배제한 에너지인 단위내부에너지이며 $\dot{Q}^c$는 화학반응에 의해 생성되는 생성열이고, 열전도와 엔탈피 확산에 의한 열 유속 J는

$$J = -K\nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla(\rho_m/\rho) \qquad (6)$$

으로 나타난다.

$k-\varepsilon$ 모델에 대하여, 난류운동에너지 k에 관한 보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} k) = -\frac{2}{3}\rho k \nabla \cdot \boldsymbol{u} + \sigma : \nabla \boldsymbol{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{\mathrm{Pr}_k}\right) \nabla k \right] - \rho\varepsilon + \dot{W}^s \qquad (7)$$

그리고 난류운동에너지소산율 ε에 관한 보존식은,

$$\frac{\partial \rho\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} \varepsilon) = -\left(\frac{2}{3}C_1 - C_3\right)\rho\varepsilon \nabla \cdot \boldsymbol{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{\mathrm{Pr}_\varepsilon}\right) \nabla \varepsilon \right]$$

$$+ \frac{\varepsilon}{k}\left[C_1 \sigma : \nabla - C_2 \rho\varepsilon + C_s \dot{W}^s \right] \qquad (8)$$

으로 표시된다.

$k-\varepsilon$ 난류모델에서 사용한 상수값들은 다음과 같다.

Table 2.1 Values of the turbulence model constants

Cμ	C1	C2	C3	Pr_k	Pr_ε	Cs
0.09	1.44	1.92	-1.0	1.0	1.3	1.5

전체의 점성은

$$\mu = (1.0 - A_0)\rho\upsilon_0 + \mu_{air} + A_0 c_\mu k^2/\epsilon \qquad (9)$$

$$\lambda = A_3 \mu \qquad (10)$$

A_3는 실험상수이며 난류에서는 $-\frac{2}{3}$의 값을 취하며, 층류에서는 임의로 특정값을 취한다.

$$K = \frac{\mu c_p}{\mathrm{Pr}} \qquad (11)$$

공기의 점성은 Sutherland의 식

$$\mu_{air} = \frac{A_1 T^{3/2}}{T + A_2} \qquad (12)$$

으로 나타내며, A_1, A_2는 상수이다.
점성은 확산도를 고려하여

$$D = \frac{\mu}{\rho Sc} \qquad (13)$$

D는 Fick's Law에서의 물질확산계수로서, $\frac{\mu}{\rho Sc}$로 구해지며, Sc는 Schmidt수로서 0.11로 주어지며, 운동량확산과 질량확산의 비를 나타낸다.

Ⅲ. 계산조건 및 결과 Ⅰ

현재 사용되고 있는 엔진 열유동 및 연소의 계산에서 수치해석적 방법으로는 FVM (Finite Volume Method)을 사용하고 있으며, 이러한 계산을 하기 위해서는 여러 단계의 작업을 거쳐야한다. 전처리(Pre-processing), 주 계산(Calculating in main code), 후처리(Post-processing)의 크게 세 가지 단계의 작업으로 구분되며 Pre-processing에서는 계산하고자 하는 형상의 CAD 데이터를 형성하고 그 데이터를 바탕으로 계산격자를 나누는 단계이다. 이 단계에서의 계산격자생성은 결과의 정확도를 결정하는 중요한 요인중의 하나이다. 형상이 복잡해질수록 격자생성에 많이 시간이 소요되며, 사실상 전체적 해석에서 가장 많은 시간이 소요되는 단계이다. 격자의 형상은 많은 종류가 있으며 본 연구에서는 계산의 정확도를 위하여 육면체 격자(Hexa mesh)를 사용하였다. 이러한 전처리를 바탕으로 실질적인 계산을 위하여 엔진 열유동 및 연소해석에 널리 사용되고 있는 KIVA-3V를 주 계산 코드로서 사용하였다. 마지막 단계인 후처리에서는 주 계산 코드에서의 계산결과를 바탕으로 가시화하는 단계이다. 위의 모든 계산과정에서는 계산결과에 영향을 미치는 많은 변수요인들이 있으며 그러한 변수요인들을 계산 조건에 맞게 적절히 선택하는 것이 계산 속도와 계산의 정확도를 향상시키는 방법이다.

3.1 경계조건 및 초기조건

계산 격자의 경계조건은 KIVA-3V의 경계조건에 따라서 주어지며 개괄적으로 연소실의 벽면은 Wall, 피스톤면은 Move의 경계조건으로써 주어진다. 연소실 내부는 유체조건이며 주연소실과 부연소실은 각각 다른 블록으로 지정하여 다른 종류의 유체를 초기조건으로 선택할 수 있도록 하였다.

3.2 연결공 형상에 따른 신기유입특성에 관한 계산조건

본 연구에 사용된 RI-Chamber(Radical Injector Chamber)의 일반적인 형상과 계산격자는 Fig. 3.1, Fig. 3.2와 같으며 형상은 아래의 주연소실에 위에 있는 작은 체적의 부연소실이 미세한 관의 연결공으로 연결된 형상이다. 형상의 상세한 크기는 Table 3.1에 나타나있다. 그리고 총 계산격자 수는 32000개이다.

화학종의 주연소실로부터 부연소실로의 흡입특성을 살펴보기 위하여 압축과정인 BTDC 150° ~ ATDC 30°동안 계산을 수행하였으며 크랭크각 2°간격으로 계산 데이터를 취득하였다.

계산은 다음과 같이 수행하였다. 첫 번째로는 연결공의 각도, rpm, 연결공 면적의 세 가지 경우를 중심으로 여러 가지 변화에 따라 계산을 수행하였으며, 두 번째로는 연결공 면적에 따른 신기유입 특성을 고려하기 위하여 두 가지의 다른 연결공 면적을 우선 계산한 후에 서로 다른 각도의 연결공의 경우를 각각 계산하여 연결공의 최적 각도를 선택하여 최적의 연결공 각도와 면적을 결정하였다.

계산에 사용된 연결공의 개수는 1개와 2개이며 연결공의 각도는 실린더 중심 축을 각도 0°로 하였다. 연결공 각도의 변화에 따른 유동특성을 비교하기 위하여 연결공이 1개일 때는 0° 1가지의 경우, 2개일 때는 중심 축으로부터 각각 0°, 30°, 45°, 60°의 각도로 계산을 수행하였으며, 연결공의 개수가 1개인 경우와 2개인 경우에 직경은 다르지만 유량이 통과하는 단면적(0.0113cm^2)을 동일하게 구성하였다. 연결공의 면적이 다른 경우는 단면적을 동일하게 구성하기 위하여 연결공이 1개일 때 직경 0.17cm, 0.254cm, 연결공이 2개일 때 직경 0.12cm, 0.18cm 각각 2가지의 경우에 따라서 계산을 수행하였고, rpm에 따른 유동특성을 비교하기 위해 1000, 3000, 5000rpm의 3가지 경우에 관하여 각각 계산을 수행하였다. 상세한 연소실의 크기는 Table 3.1과 같다.

블록을 부연소실, 연결공, 주연소실 3개로 나누어서 각 블록마다 화학종의 조건을 따로 주었으며 각 블록마다의 독립된 계산 결과를 취득할 수 있게 하였다. 사용연료는 C_8H_{17}이며 부연소실에는 연소 후 발생하는 배기가스 중에서 대표적인 화학종인 CO_2, H_2O, 그리고 N_2를 조건으로 두고, 주연소실은 공기의 대표적 화학종인

O_2와 N_2를 초기조건으로 계산을 수행하였다. 최초계산의 BTDC 150°일 때 연소실 전체 체적은 665cm^{3}이며 이때에 주연소실에 질량분율(21%)로써 주어지는 산화물인 O_2가 0.1866g으로 초기조건에 주어진다. 화학종의 질량분율은 Table 3.2와 같이 주어지며 당량비가 1인 경우의 이론 반응식은 다음과 같다.

$$4C_8H_{17} + 49O_2 + 184.24N_2 \quad \leftrightarrow \quad 32CO_2 + 34H_2O + 184.24N_2 \qquad (\ \Phi = 1.0\ )$$

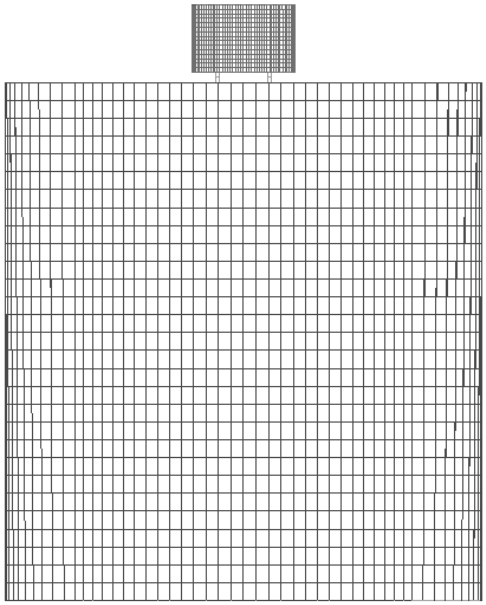


Fig. 3.1 Sectional view
of calculation grids

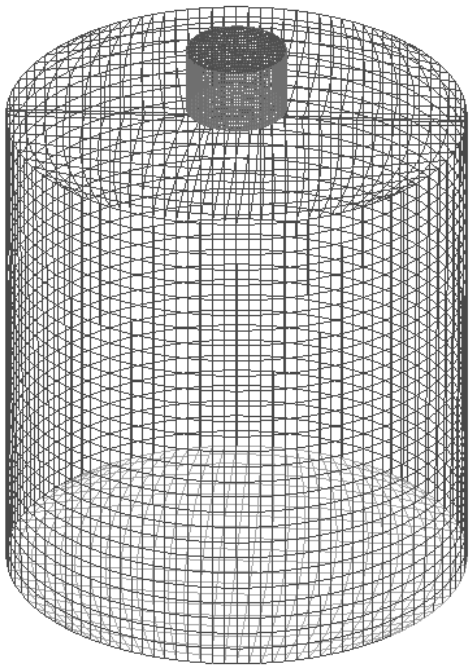


Fig. 3.2 3-D calculation grids

Table 3.1 Size of the combustion system

	Height(cm)	Radius (cm)
Sub-chamber(4cc)	1.3	1.0
Main-chamber(665cc)	10	4.6
1 hole (small)	0.2	0.085
1 hole (big)	0.2	0.127
2 holes (small)	0.2	0.060
2 holes (big)	0.2	0.090
Stroke(cm)	9.5	
Top Clearance(cm) (Squish)	2.0	
Compression Ratio	17	

Table 3.2 Mass fraction of each chamber

	Mass fractions of sub-chamber(%)	Mass fractions of main-chamber(%)
N_2	71.8	79.0
O_2	0	21.0
H_2O	8.5	0
CO_2	19.7	0

3.3 부연소실로의 신기유입 특성

압축행정동안 부연소실로의 신기유입이 이루어지므로 크랭크 각 BTDC 150°~ ATDC 30°까지 계산한 결과는 Fig. 4.1 ~ 4.8과 같은 특성을 보인다.

Fig. 4.1 ~ 4.5는 각 연결공의 개수와 연결공 각에 따라 1000, 3000, 5000 rpm의 경우에 부연소실로 유입되는 산소질량을 나타낸다. 전반적으로 보면 모든 경우에 1000rpm에서 다른 rpm일 때보다 산소유입이 월등히 높은 것으로 나타났으며, 3000, 5000rpm의 빠른 속도에서는 산소유입이 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4.1은 연결공이 1개이며 수직축을 기준으로 각이 0°일 때, 크랭크 각 -140° ~ 30°까지 부연소실내의 산소질량을 나타낸다. 모든 경우의 계산은 -150°부터 시작하였으나 압축초기의 -150°과 -140°의 O_2질량 차이가 거의 미세하므로 -140°의 데이터부터 시작하는 그래프로 나타내었다. 초기에 부연소실에는 연소가스만 존재하고 O_2가 없는 것으로 가정하였기 때문에 O_2의 질량은 모든 피스톤 속도에서 동일하게 압축이 시작되는 -150°에서 0이다. 피스톤 속도가 가장 낮은 1000rpm에서는 압축의 시작과 함께 O_2의 질량이 증가된다. -40°이후로 급격한 증가를 보이며 상사점을 지나 대략 20°에서 최대가 된다. 이후 연소실의 팽창과 함께 줄어드는 경향을 보인다. 3000rpm, 5000rpm의 빠른 속도에서도 유사한 현상을 보이고는 있지만 O_2의 질량이 급격히 증가되는 점이 -20° ~ -10°로 늦게 나타나고 있으며 O_2의 최대질량은 1000rpm에서의 최대질량인 0.013g에 비해 매우 낮은 0.005, 0.003g에 머무르고 있다.

Fig. 4.2는 Fig. 4.1과 동일 조건이며 연결공의 개수만 2개이다. 연결공 개수의 변화에 따른 효과를 알아보기 위하여 연결공의 단면적의 합은 개수에 상관없이 동일하다. 전체적인 그래프의 형상과 산소의 유입량은 연결공의 개수에 상관없이 거의 비슷한 경향을 나타낸다.

Fig. 4.3과 Fig. 4.4에는 연결공의 개수가 2개이며 각각 수직축으로부터 30°과 45°의 기울기를 가진다. 전체적인 형상이 Fig. 4.1과 Fig. 4.2와는 약간 다른 경향을 나타내고 있다. 1000rpm을 보면 연결공의 각도가 있는 경우에도 연결공의 각이 없는 경우와 유사하게 -40°에서부터 급격한 산소유입을 보이며 그 기울기가 연결공의 각이 없는 Fig. 4.1과 Fig. 4.2보다 다소 급하다. 그리고 급격히 증가하다가 10° 부근에서 최대값이 거의 0.015g을 나타내며 다시 급격히 감소한다. 3000, 5000rpm의 경우에는 Fig.4.1과 Fig.4.2보다는 다소 높

은 질량유입을 보이지만 상사점을 지나 30°가 되어도 계속적으로 질량이 유입되고 있는 상태를 나타내고 있다.

Fig. 4.5는 연결공의 개수가 2개이며 연결공의 각이 60°인 경우이다. 다른 경우보다 가장 낮은 질량 유입을 나타내며 그래프의 형상은 Fig. 4.3과 Fig. 4.4와 유사하다. 1000rpm에서는 -40°이후로 급격히 증가하는 산소유입을 보이며 10°에서 최고 산소량인 0.01g을 나타내다가 다시 급격히 감소한다. 3000, 5000rpm에서도 다른 연결공과 마찬가지로 -20°이후에 증가를 보이다가 30°까지도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 피스톤 속도가 신기유입에 매우 큰 영향을 미치고 있다는 것을 말하며 피스톤의 관성이 유체의 관성보다 크므로 고속으로 갈수록 유체의 유동이 피스톤의 속도를 따르지 못하여 발생하는 것이다. 특히 부연소실로 연결되는 연결공의 단면적이 실린더 단면적에 비해 매우 미소하므로 대부분의 유체가 연결공을 통하여 유입되지 못하고 주연소실 내에서 압축되고 있는 것으로 여겨진다. Fig. 4.12 ~ 4.41의 그림에서도 O_2가 -10°가 되면 부연소실에 흡입된 O_2의 밀도보다 주연소실에서 압축되고 있는 O_2의 농도가 큰 것을 볼 수 있다.

각 rpm에서의 연결공 개수와 각도 변화에 따른 신기유입 특성이 Fig. 4.6 ~ 4.8에 나타나있다. 특히 1000rpm의 경우는 연결공의 크기를 직경 0.12cm, 0.18cm의 두 가지의 경우에 관하여 계산을 수행하였고 나머지 rpm에서는 직경 0.12cm 한 가지 경우만을 계산하였다.

Fig. 4.6은 연결공의 단면적을 다르게 하여 두 가지 경우를 동시에 그래프에 나타내었다. 1000rpm의 경우는 대체적으로 산소가 상사점 전까지 급격히 흡입된 후 빠져나가며 연결공의 단면적이 큰 경우에는 더욱 급한 산소 흡입량을 나타내며 연결공 2개에 0°인 것을 제외하고는 모두 상사점에서 산소의 흡입량이 가장 크게 나타난다. 하지만 상사점까지의 산소흡입 경향은 거의 유사하다. 연결공의 단면적이 작은 경우에는 단면적이 큰 경우보다 연결공의 형태에 따라 다소 다른 경향을 보이고 있다. 연결공의 각이 있는 경우와 연결공의 각이 없는 두 가지 경우로 나누어서 유사한 형태를 보이며 각각 흡입량은 연결공 각 45°, 30°, 0°, 60°의 순서이다.

Fig. 4.7과 Fig. 4.8은 각각 3000, 5000rpm에서 각 연결공의 형태에 따른 산소의 흡입량을 나타낸다. 3000rpm의 경우에는 1000rpm에 비해 흡입되는 최대 산소질량이

상당히 낮으며 어떠한 연결공의 형태에서도 TDC 이후 30°까지 최대값을 나타내지 않는다. 하지만 연결공의 각이 있는 30°, 45°, 60°의 경우에는 20°이후로 다소 완만한 그래프의 형태를 나타낸다. 5000rpm의 경우에는 TDC 이후 30°까지도 질량이 계속해서 흡입되려는 경향이 더욱 심하게 나타난다. 3000rpm과 5000rpm의 경우에는 연결공 각도 45°에서 가장 좋은 질량흡입량을 나타내고 있다. 빠른 속도에서는 상사점 이후에도 흡입되는 질량이 유출되는 질량보다 더 크기 때문에 질량이 계속해서 증가하는 경향을 보인다. 이와 같이 빠른 속도에는 모든 경우에 흡입 이후 유출되는 배기가스에 악영향을 미친다.

모든 경우에 연결공 각이 45°인 경우에 가장 큰 흡입량을 나타내었고 연결공 각이 45°와 30°를 제외한 나머지는 확연히 차이를 보이고 있다. 연결공이 2개이며 연결공 각 0°와 60°는 연결공이 1개일 때보다 더 낮은 산소 흡입량을 나타내며 특히 연결공 60°일 때 가장 낮은 흡입량을 나타내고 있다. 연결공 단면적이 작은 경우보다 산소질량이 더욱 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 3000, 5000rpm과 같은 고속의 경우에는 연결공의 단면적이 작게되면 부연소실 내에서 연소를 발생시킬 수 있는 당량비의 조건을 충족시킬 수 없으므로 잔존가스의 유출과 연소시 라디칼의 빠른 분출을 고려하여 연소를 가능하게 하는 연결공의 최소 단면적을 예측할 수 있다.

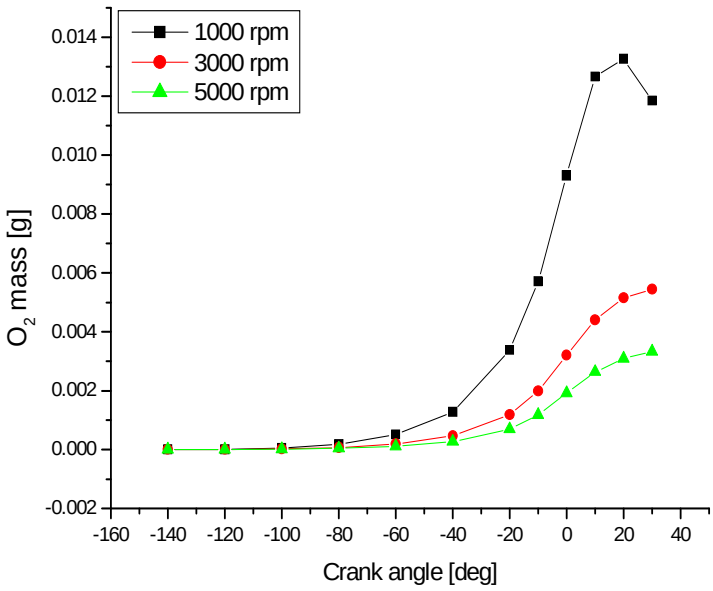


Fig. 4.1 O_2 mass in sub-chamber (1-noz)

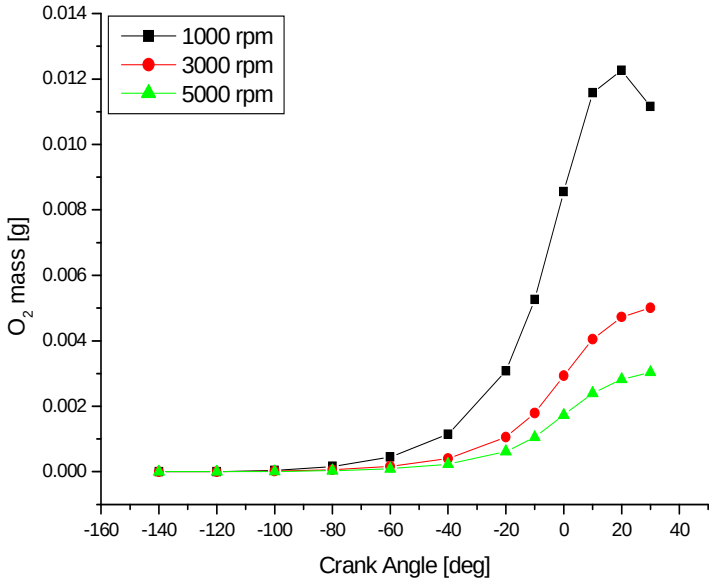


Fig. 4.2 O_2 mass in sub-chamber (2-noz) [0°]

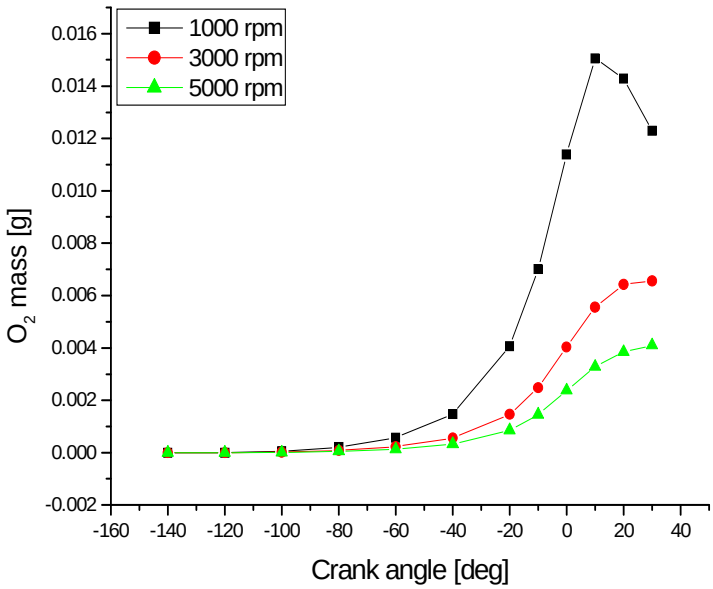


Fig. 4.3 O_2 mass in sub-chamber (2-noz) [30°]

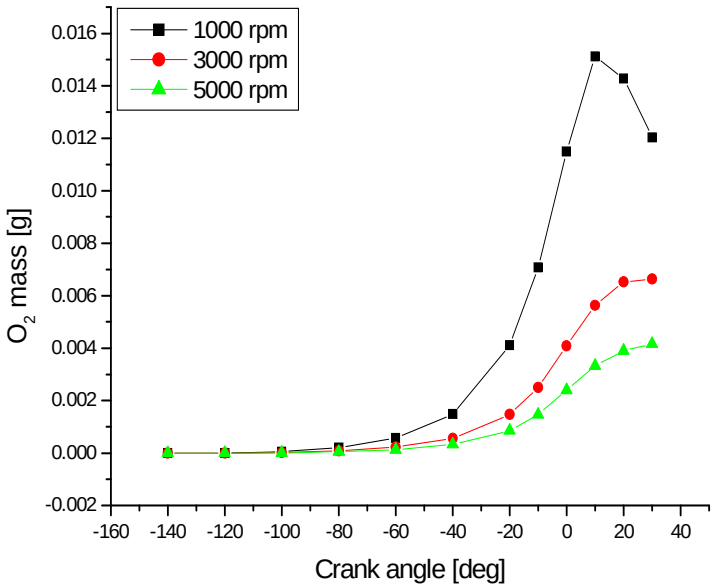


Fig. 4.4 O_2 mass in sub-chamber (2-noz) [45°]

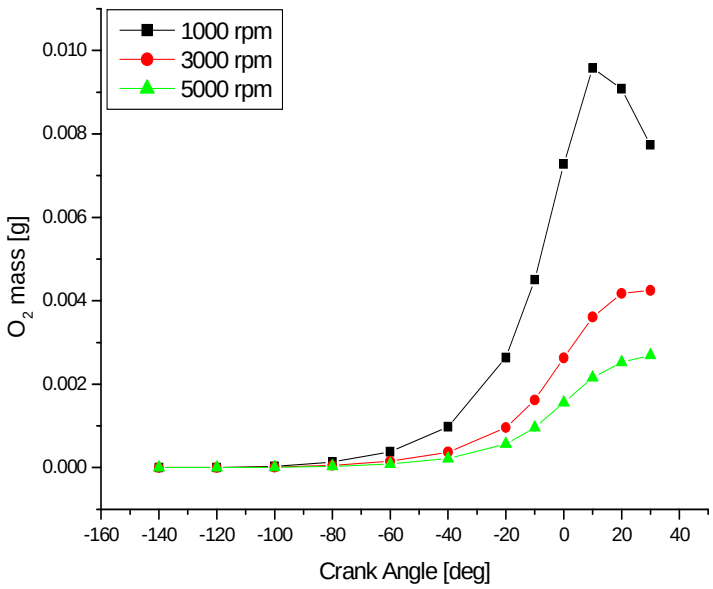


Fig. 4.5 O_2 mass in sub-chamber (2-noz) [60°]

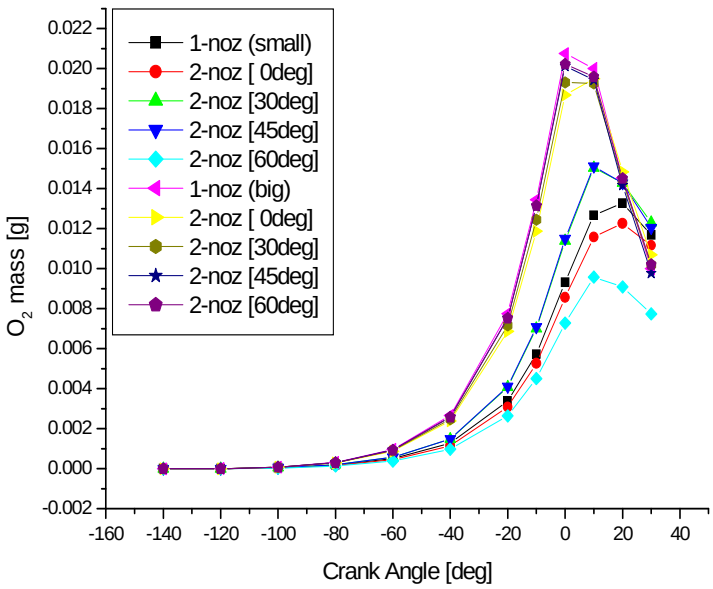


Fig. 4.6 O_2 mass in sub-chamber (1000rpm)

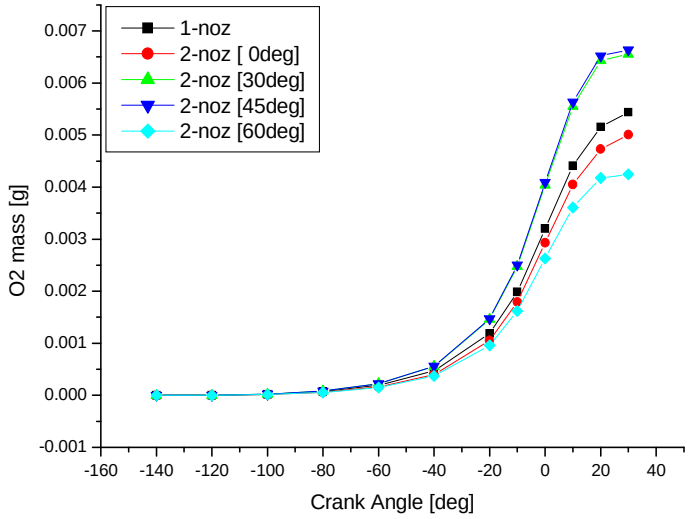


Fig. 4.7 O_2 mass in sub-chamber (3000rpm)

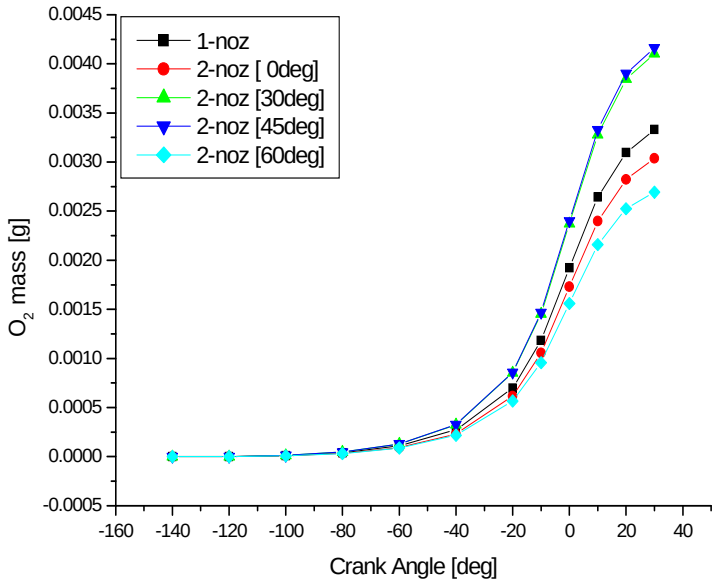


Fig. 4.8 O_2 mass in sub-chamber (5000rpm)

3.4 주연소실로 유출되는 잔류가스의 유출특성

연소 후 연소압력에 의하여 배기가스와 라디칼들이 동시에 유출되겠지만 좁은 연결공으로 인하여 유출되지 못한 일부 배기가스가 잔존해 있을 것이라고 생각된다. 부연소실에서의 연소압이 없다는 가정 하에 연결공의 형태로만 유출되는 특성을 고려해 보았다. 부연소실에서 주연소실로 유출되는 잔류가스의 유출특성을 살펴보기 위해 부연소실에 배기가스가 일부 잔존해있다고 가정하고 초기조건으로 주었던 CO_2를 대표 화학종으로 하여 계산하였다. 각 1000, 3000, 5000rpm에 따라 0°~ 30°의 범위 안에서 CO_2의 질량을 Fig. 4.9, Fig. 4.10, Fig. 4.11 과 같은 그래프로 나타내었다. 대체적으로 연결공이 2개일 경우가 1개일 경우보다 유출특성이 좋게 나타나며 연결공이 2개일 경우에도 연결공의 각이 커질수록 유출 특성이 좋게 나타내는 경향을 띄고 있다.

Fig. 4.9는 1000rpm일 때 이산화탄소의 유출량을 나타내며 1000rpm의 경우에는 모든 형태가 유사한 유출특성을 보이며 특히 연결공 2개에 각이 있는 형태가 ATDC 10°이후에 급격히 유출하고 있다. 유출되는 양은 연결공 2개에 각 30°, 45°, 60°가 거의 유사하며 각이 0°에 연결공이 1개와 2개인 것이 유사한 경향을 보인다.

3000rpm의 경우에는 연결공의 각이 없는 연결공 1개와 연결공 2개의 0°는 오히려 30°까지도 CO_2의 질량이 감소하지 못하고 있으며 그 이외 다른 각을 가진 연결공들은 모두 유사하게 20°이후로 급격히 감소하고 있으며 연결공 각이 클수록 감소하는 비율이 크다.

고속인 5000rpm의 경우에는 모든 경우에 30°까지도 CO_2의 질량이 증가하고 있다. 결국 5000rpm에서는 잔류가스가 유출되지 못하고 계속 부연소실에 잔존해있을 것으로 보인다. 5000rpm에서는 형태에 영향을 받지 않고 모든 경우에 유사한 경향을 보이며 절대적 CO_2의 값 또한 그렇게 차이가 나지 않는다.

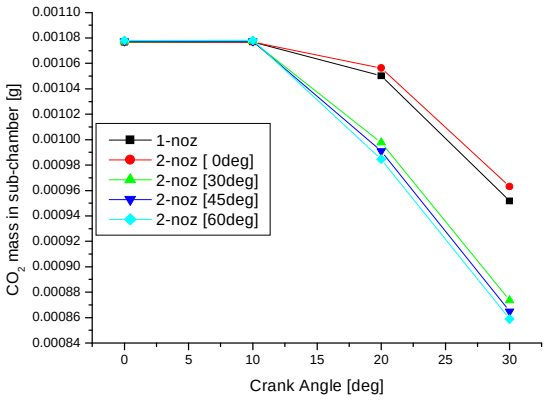


Fig. 4.9 Outflow mass of CO_2 at 1000 rpm

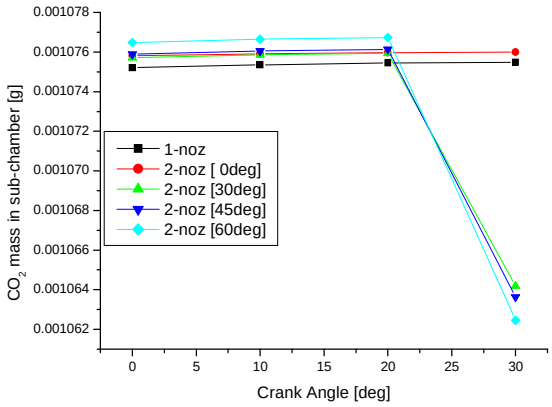


Fig. 4.10 Outflow mass of CO_2 at 3000 rpm

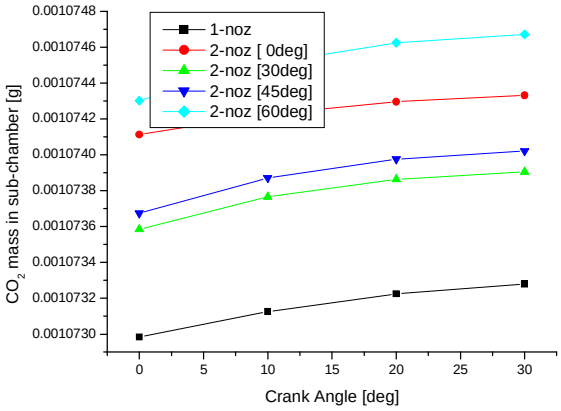


Fig. 4.11 Outflow mass of CO_2 at 5000 rpm

3.5 전체적 신기유입 및 잔류가스 유출 특성

Fig. 4.12 ~ 4.41은 주연소실과 부연소실에 존재하는 대표적인 화학종 O_2과 CO_2의 전 계산시간 동안의 밀도 변화를 각 rpm과 연결공의 형태에 따라 나타내었다. 각 O_2의 유입을 나타내는 그림으로부터 크랭크 각도에 따라 산소가 부연소실로 유입되는 것을 확인할 수 있다. TDC까지 주연소실에서만 크게 압축되다가 대부분의 경우에 ATDC 10° 근처에서 부연소실로 산소가 가장 많이 유입된 후에 피스톤이 하강할 때 산소가 다시 유출되어 다소 밀도가 낮아지는 것을 볼 수 있다.

CO_2의 유출을 나타내는 그림으로부터 크랭크 각도에 따라 BTDC 60°가 지나면서 부연소실로 유입되는 산소 유입의 효과로 부분적으로 낮아지는 것을 볼 수 있으며 연결공의 형상에 따라 CO_2의 밀도가 분포되는 형태가 달라지는 것을 볼 수 있다. 피스톤이 상승할수록 부연소실 중심부를 제외한 나머지 부분에서는 CO_2의 밀도가 점점 높아지다가 BTDC 10°부터 O_2의 유입량이 높아지면서 전체적으로 고루 섞이게 되어 CO_2의 상대적 밀도가 낮아지고 ATDC 20°를 넘어서면 CO_2가 주연소실 쪽으로 분출됨을 확인할 수 있다.

Fig. 4.42는 점화가 발생하는 TDC 근처를 기준으로 각 연결공의 각도에 따른 부연소실 내에서의 유동벡터를 나타낸 것이다. 연결공이 1개일 때는 일단 단일 유입면적이 크므로 한꺼번에 많은 양이 빠른 속도로 연결공을 통과하여 윗면에 부딪치면서 부연소실 내부에서 큰 와유동을 형성하고 있다. 연결공이 2개인 경우에는 Fig. 4.42에서 볼 수 있듯이 45°에서 가장 크고 고른 와유동을 보여주며 각도가 작아질수록 유동이 작은 와유동을 이루거나 거의 수직방향으로만 유동을 하고 있다. 60°에서는 부연소실 입구에서 두 유동이 만나 합쳐지면서 위로 유동하는데 유체들이 충돌하면서 운동량이 감소하여 전반적으로 큰 유동을 일으키지 못하는 것으로 보여진다. 부연소실 내부로 연료를 분무할 경우에 부연소실내의 유동은 다음단계에 발생할 연소에 큰 영향을 줄 것으로 보여진다.

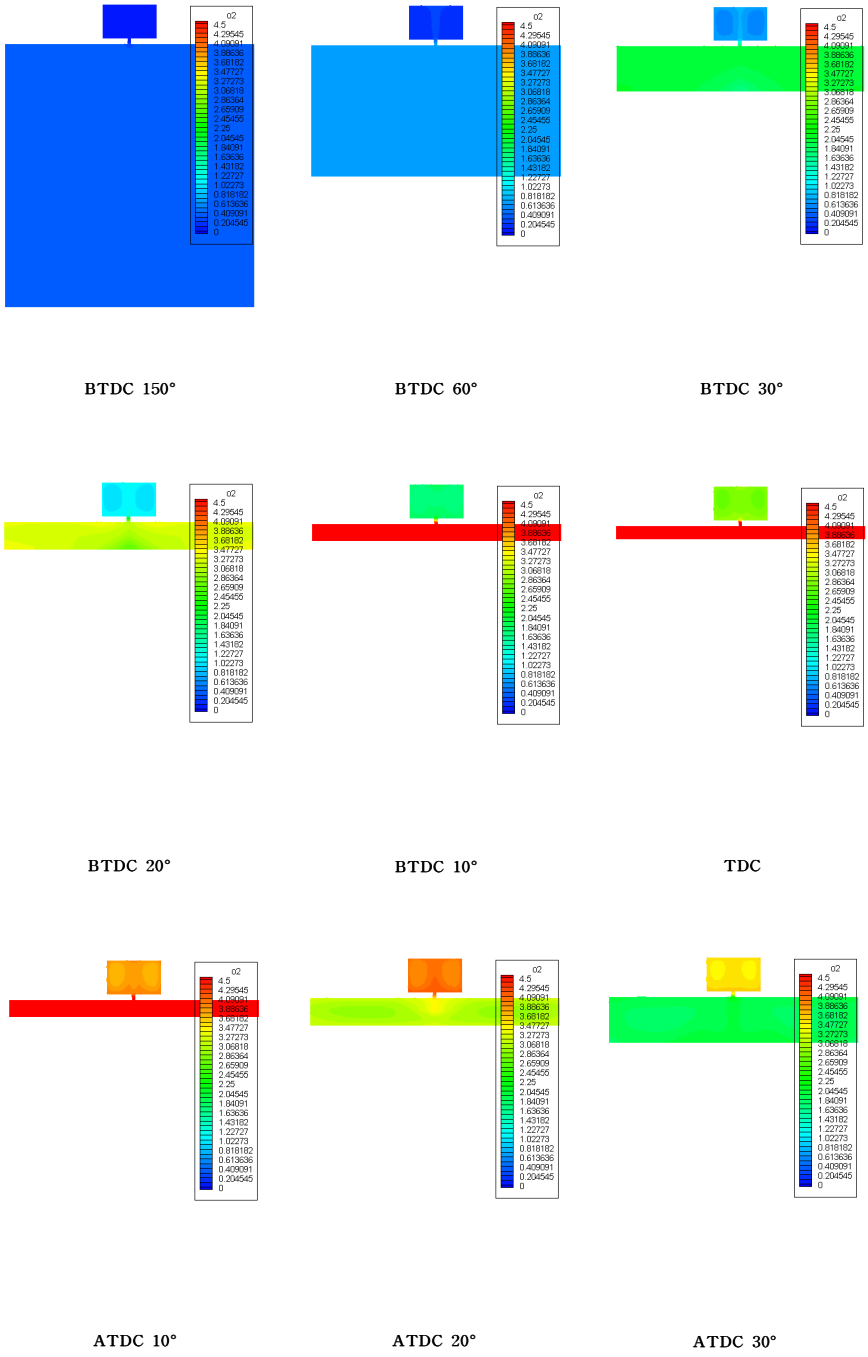
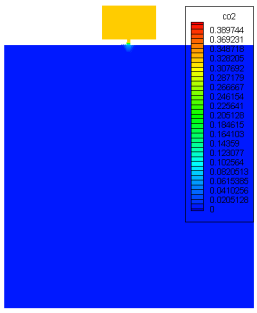
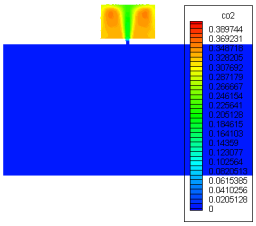


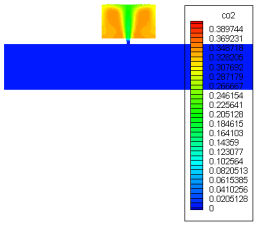
Fig. 4.12 O_2 density with 1 nozzle at 1000rpm



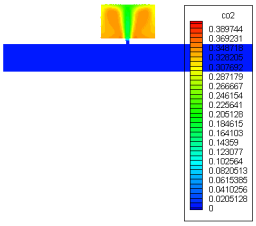
BTDC 150°



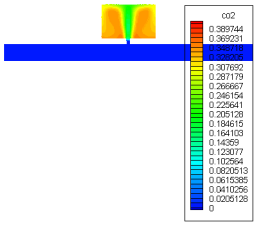
BTDC 60°



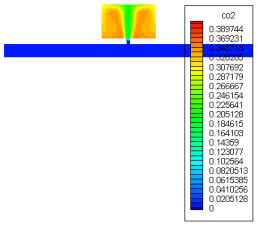
BTDC 30°



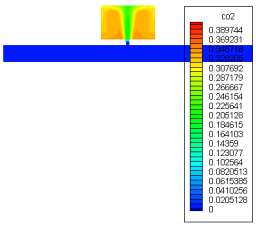
BTDC 20°



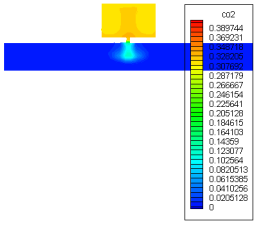
BTDC 10°



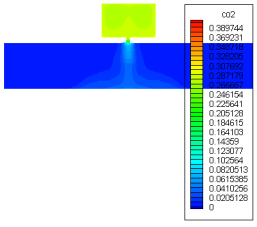
TDC



ATDC 10°



ATDC 20°



ATDC 30°

Fig. 4.13 CO_2 density with 1 nozzle at 1000rpm

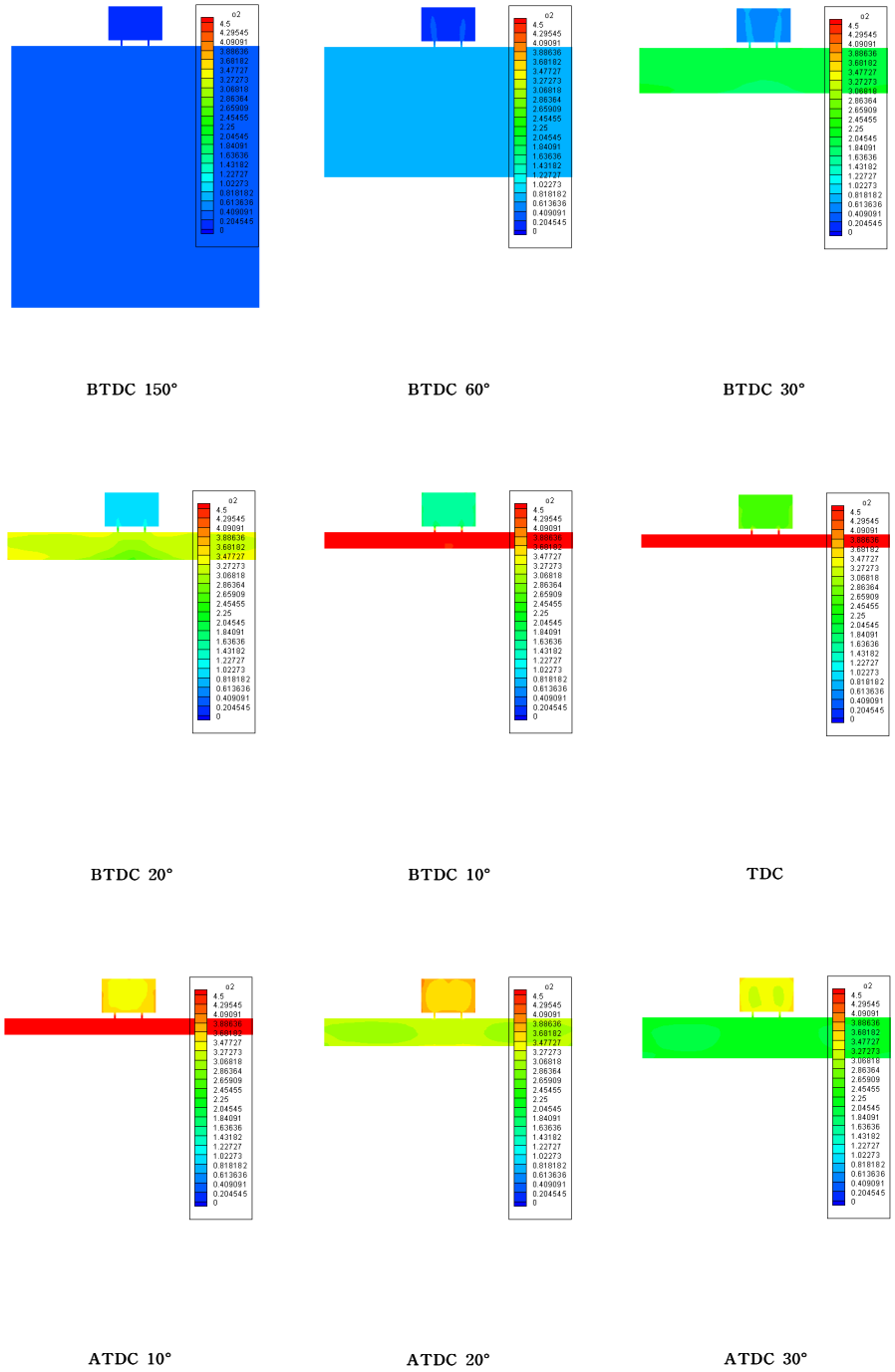
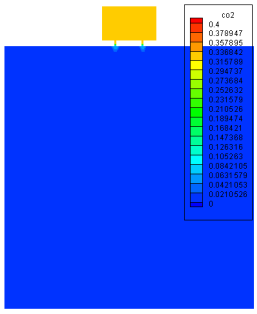
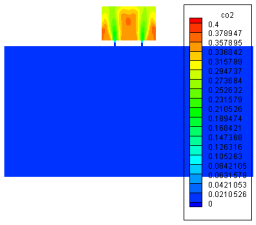


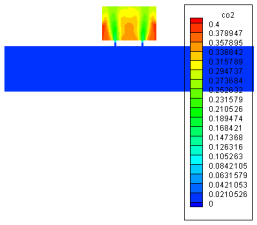
Fig. 4.14 O_2 density with 2 nozzle (0°) at 1000rpm



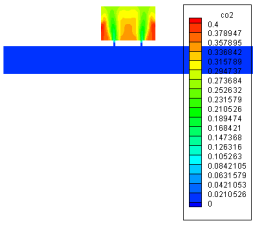
BTDC 150°



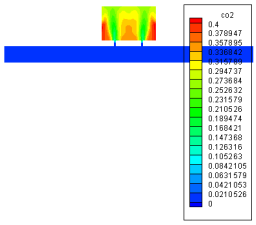
BTDC 60°



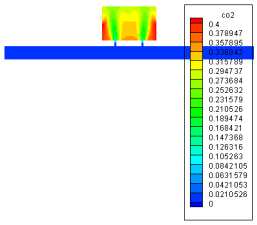
BTDC 30°



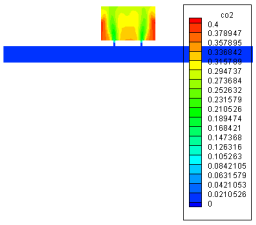
BTDC 20°



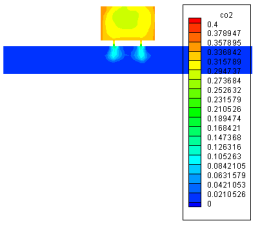
BTDC 10°



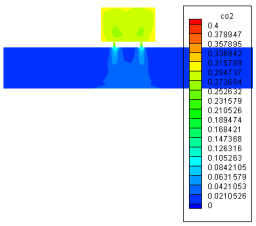
TDC



ATDC 10°



ATDC 20°



ATDC 30°

Fig. 4.15 CO_2 density with 2 nozzle (0°) at 1000rpm

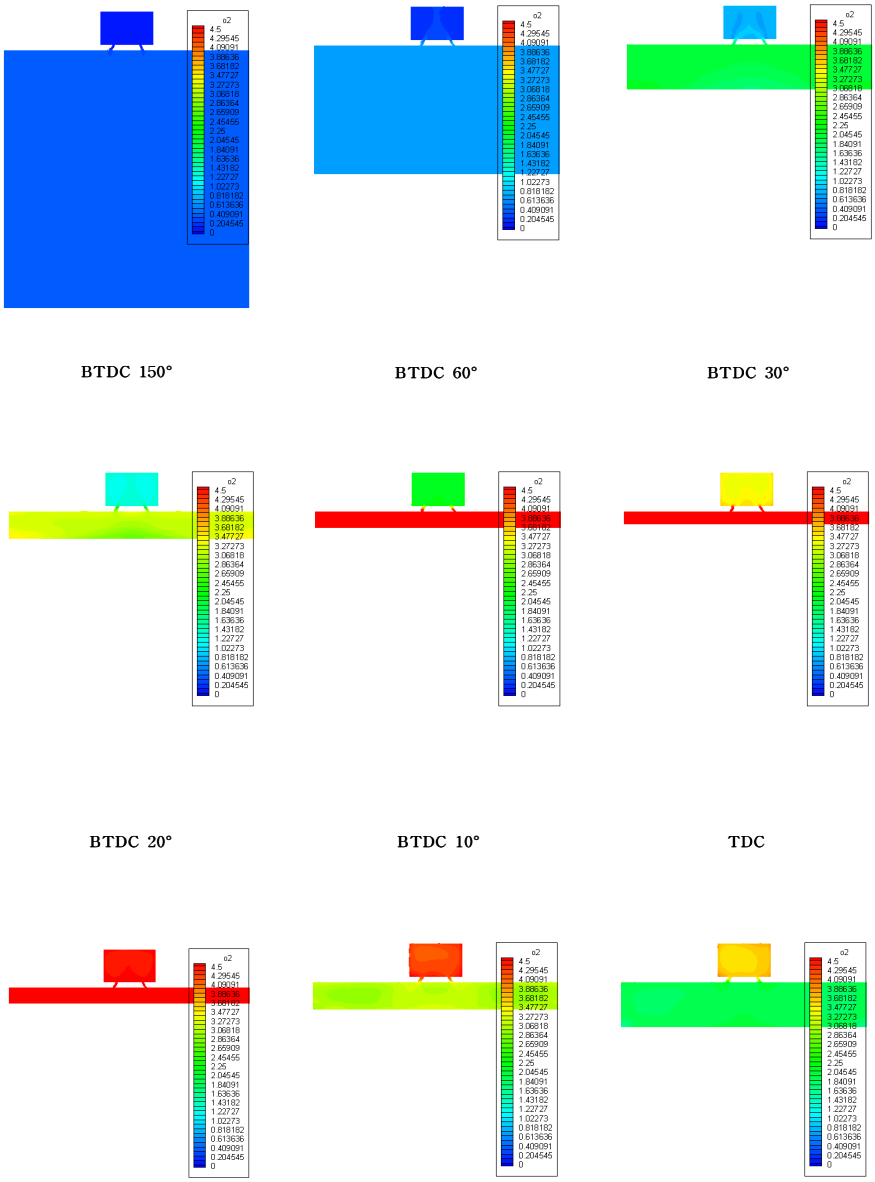


Fig. 4.16 O_2 density with 2 nozzle (30°) at 1000rpm

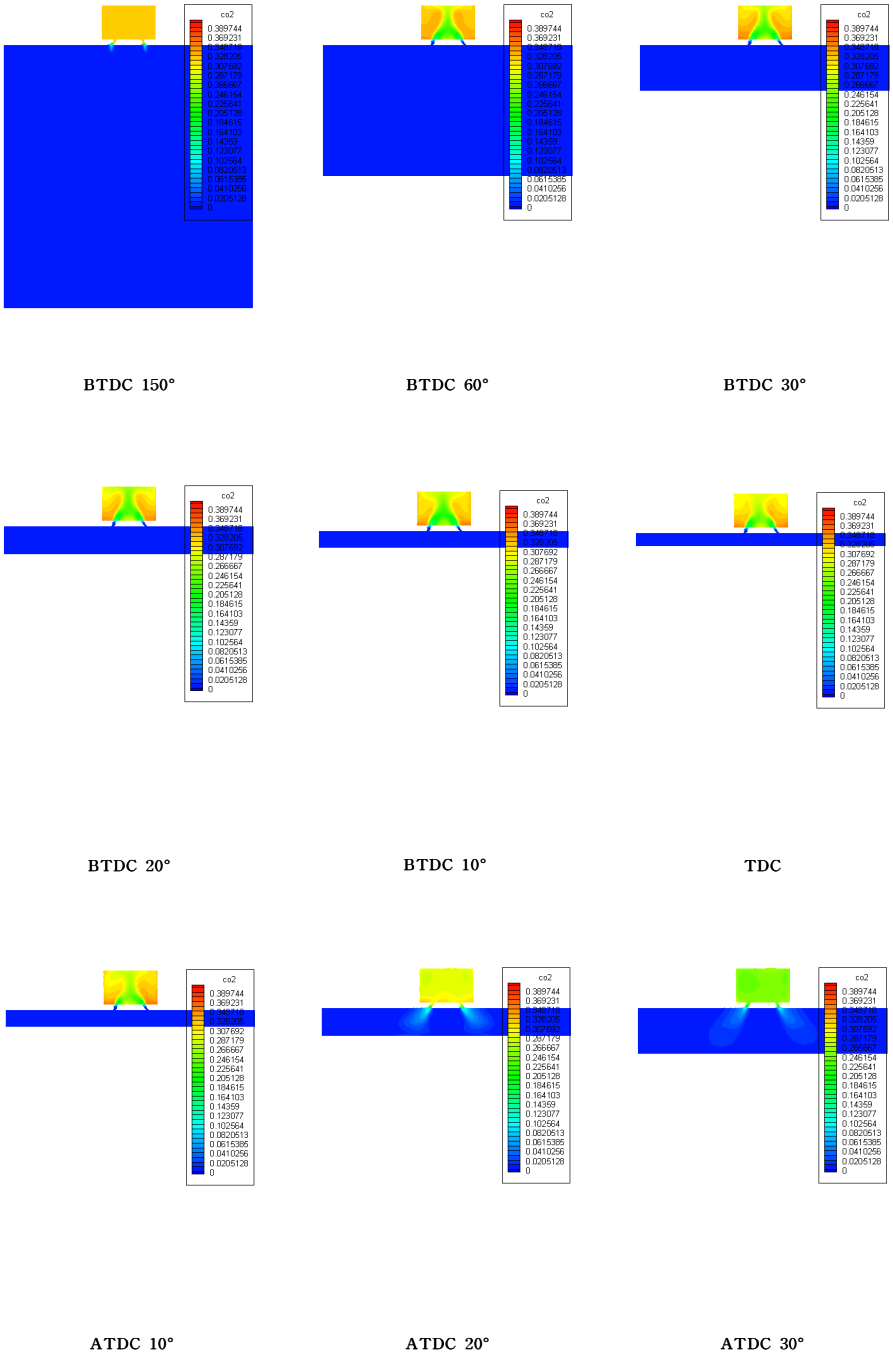


Fig. 4.17 CO_2 density with 2 nozzle (30°) at 1000rpm

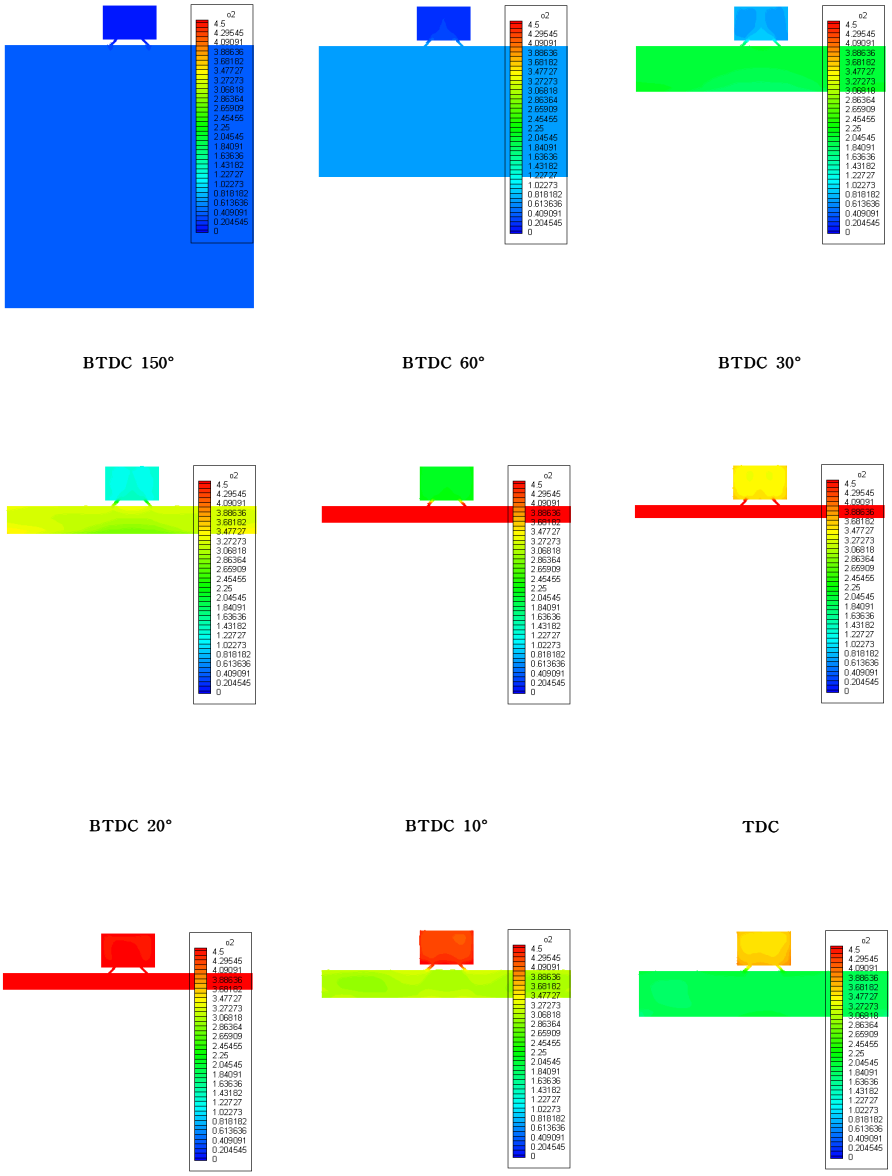


Fig. 4.18 O_2 density with 2 nozzle (45°) at 1000rpm

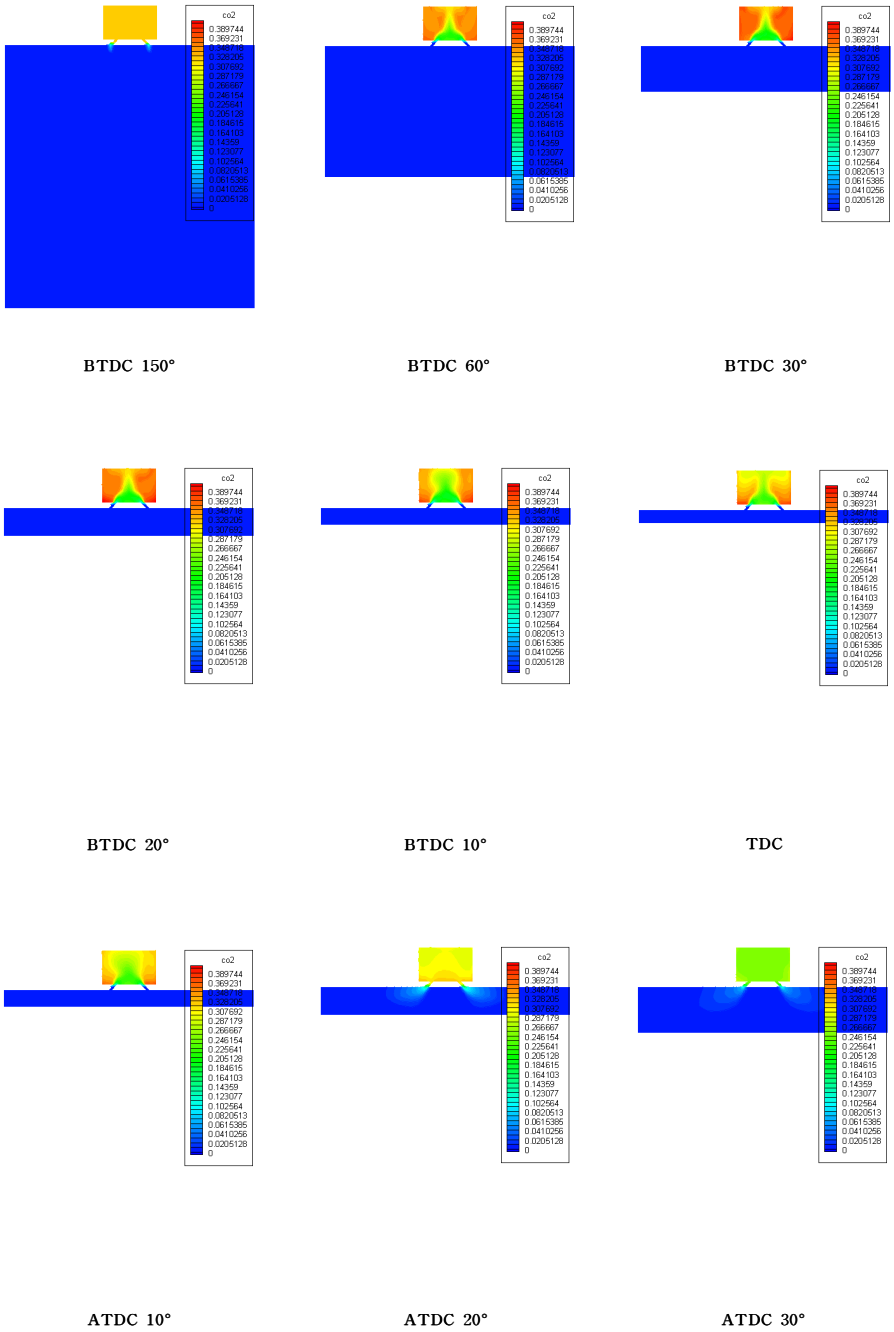
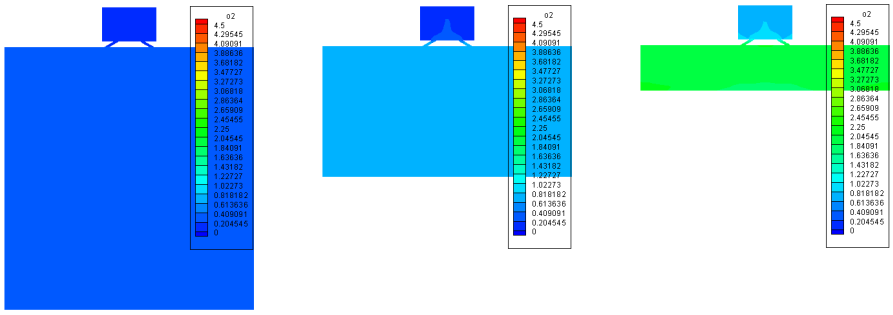


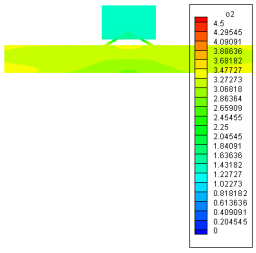
Fig. 4.19 CO_2 density with 2 nozzle (45°) at 1000rpm



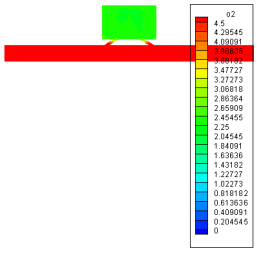
BTDC 150°

BTDC 60°

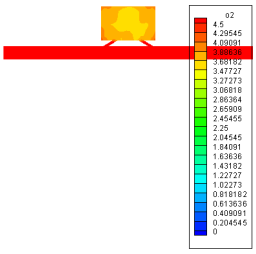
BTDC 30°



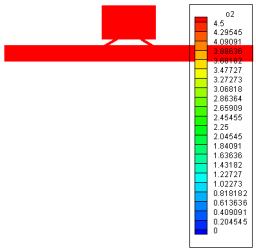
BTDC 20°



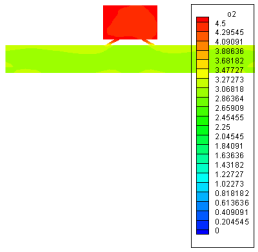
BTDC 10°



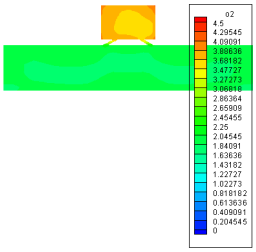
TDC



ATDC 10°



ATDC 20°



ATDC 30°

Fig. 4.20 O_2 density with 2 nozzle (60°) at 1000rpm

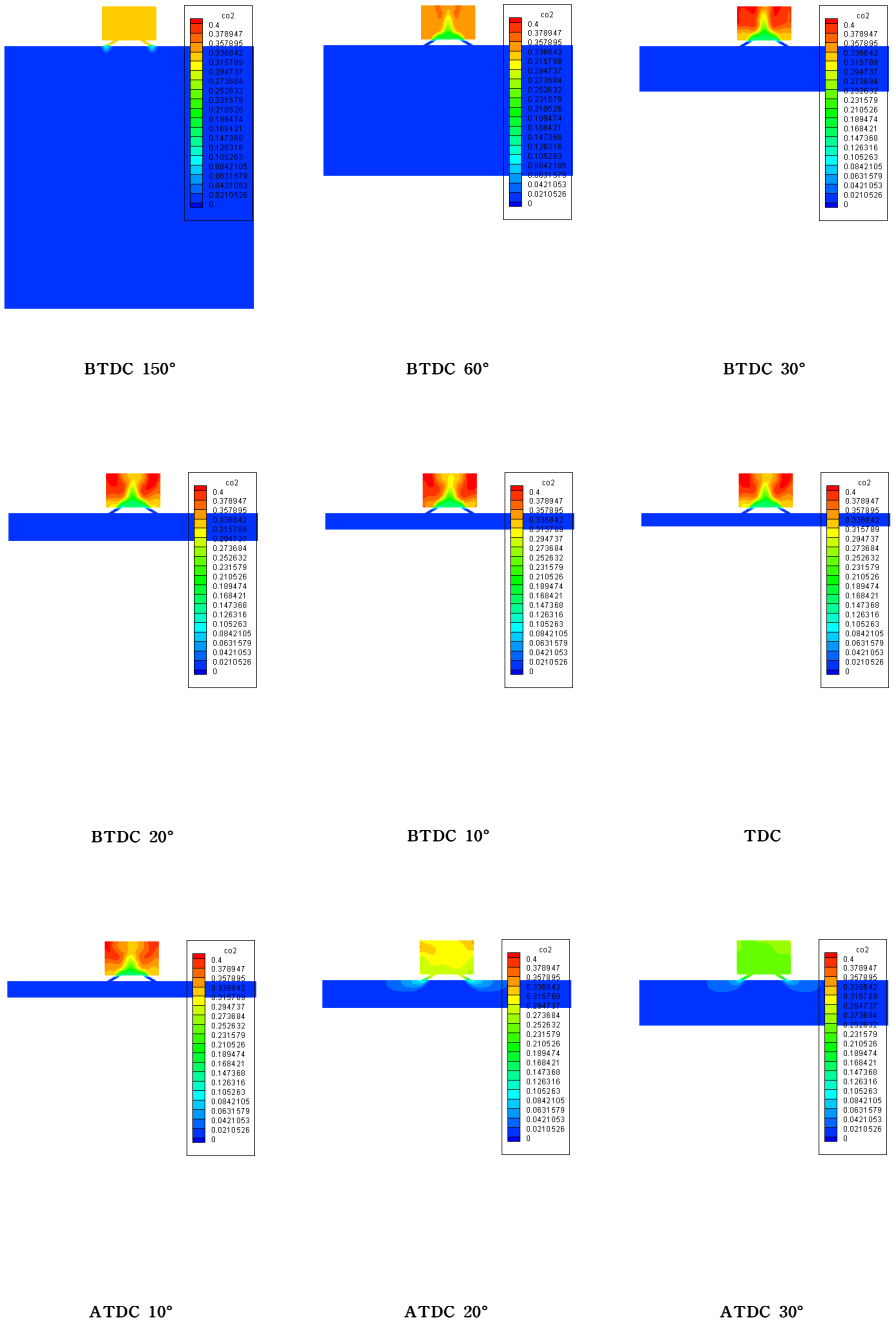


Fig. 4.21 CO_2 density with 2 nozzle (60°) at 1000rpm

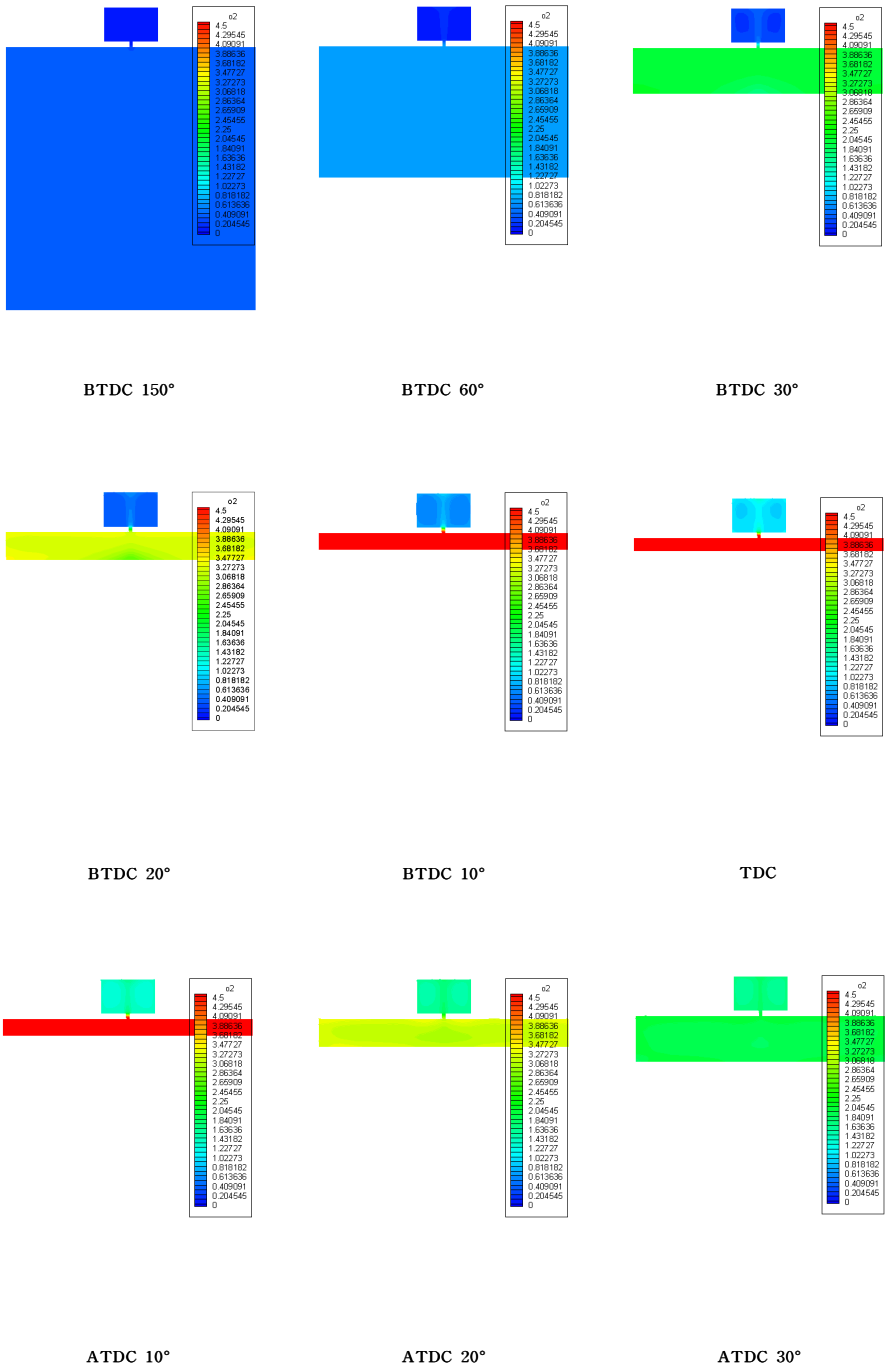


Fig. 4.22 O_2 density with 1 nozzle at 3000rpm

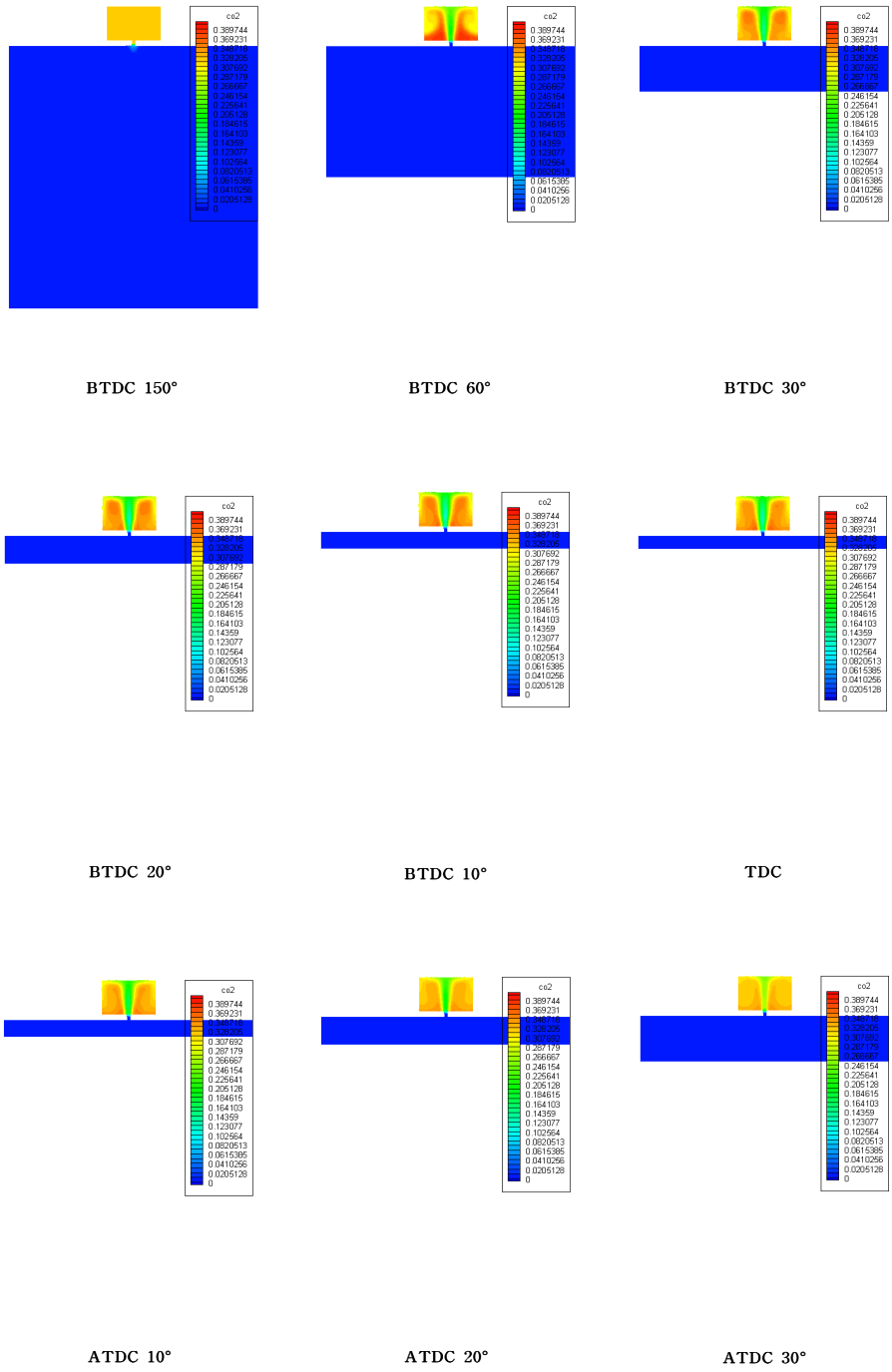


Fig. 4.23 CO_2 density with 1 nozzle at 3000rpm

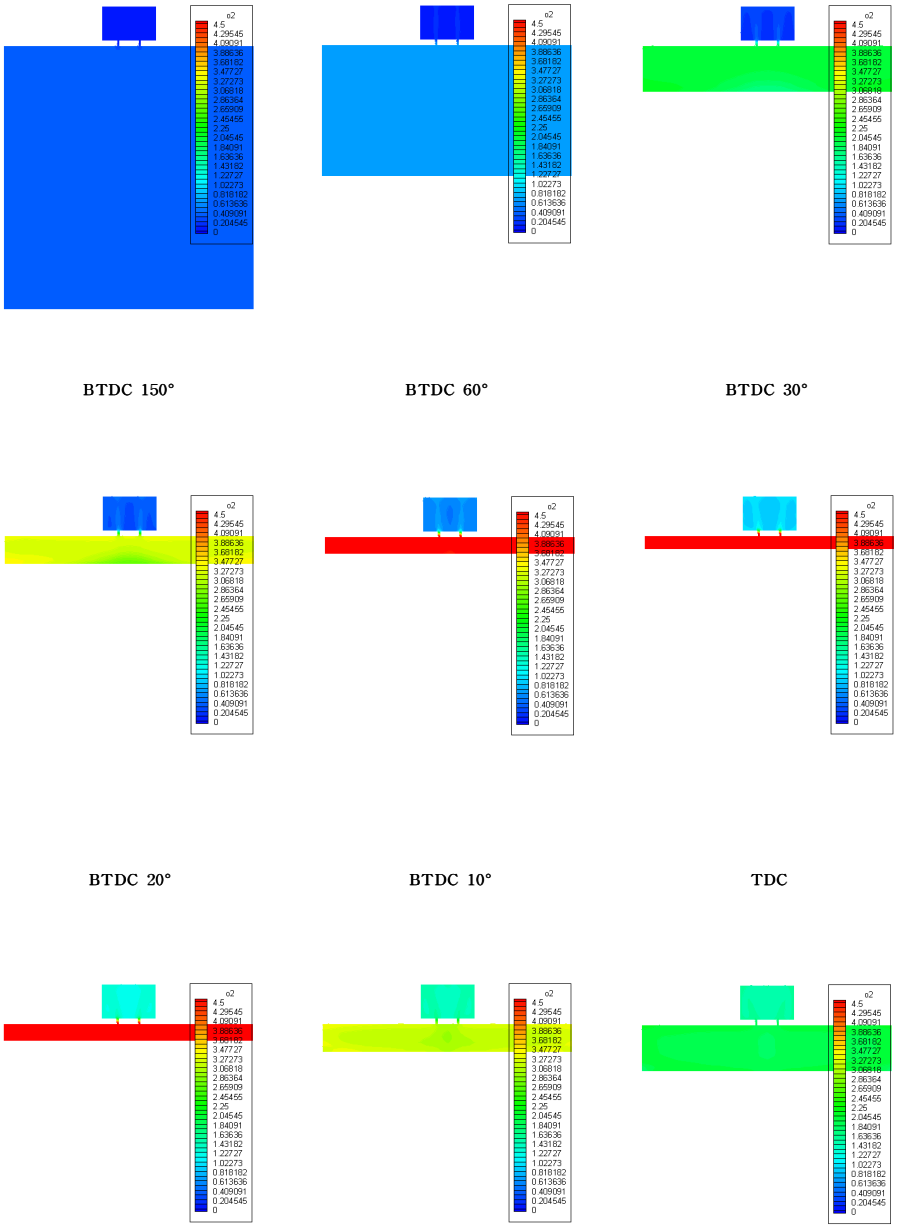


Fig. 4.24 O_2 density with 2 nozzle (0°) at 3000rpm

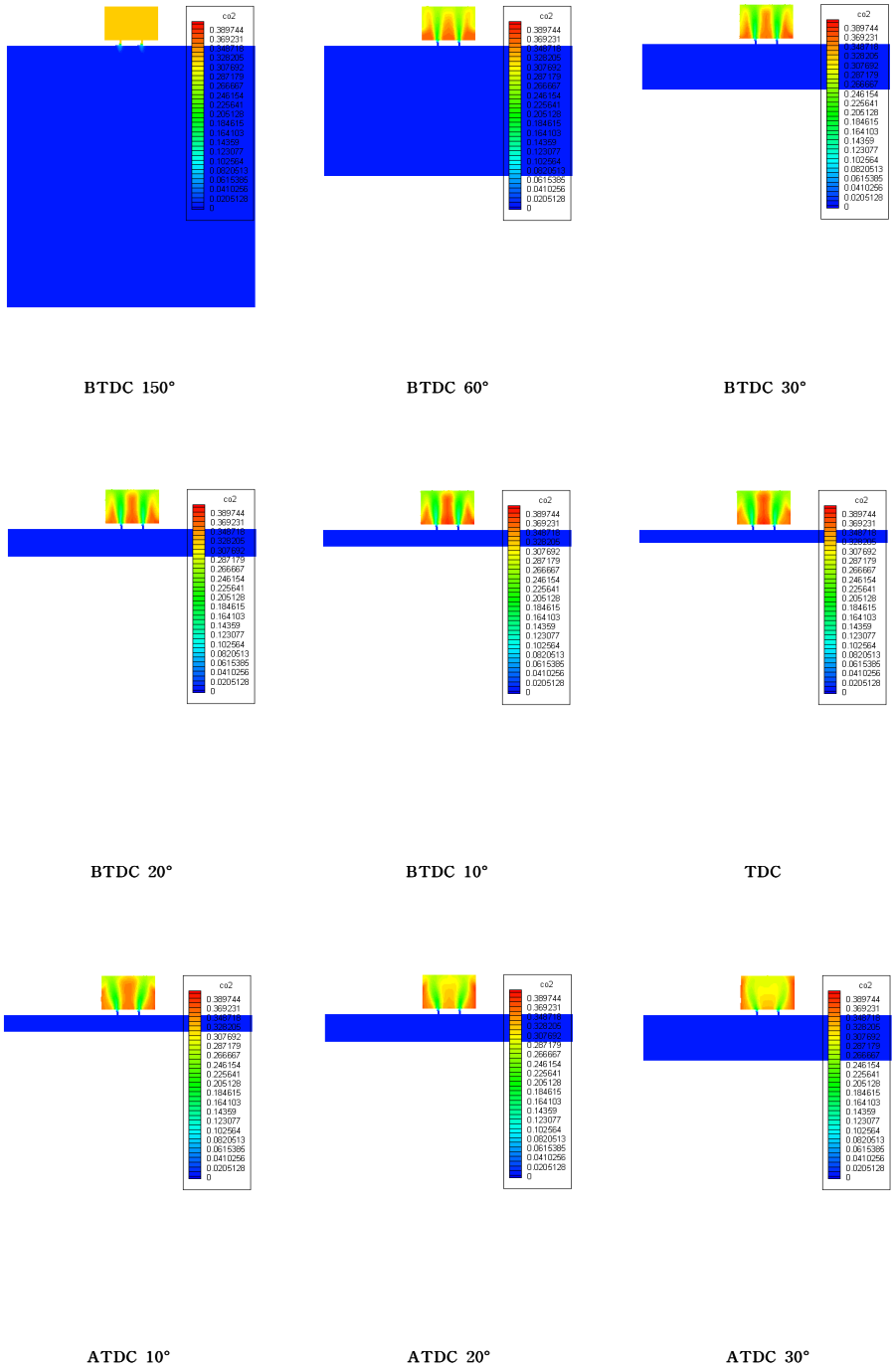
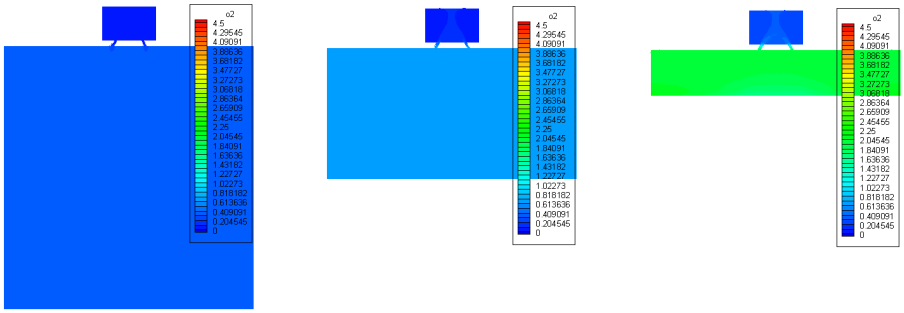


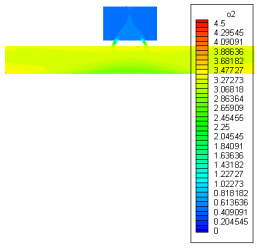
Fig. 4.25 CO_2 density with 2 nozzle (0°) at 3000rpm



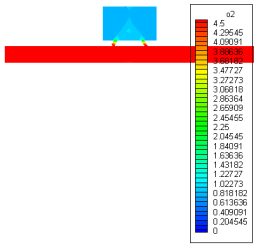
BTDC 150°

BTDC 60°

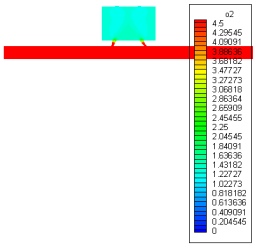
BTDC 30°



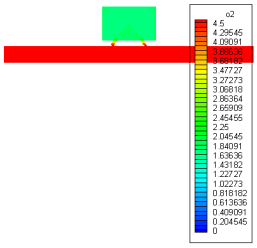
BTDC 20°



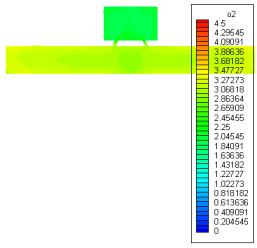
BTDC 10°



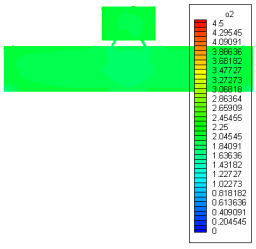
TDC



ATDC 10°



ATDC 20°



ATDC 30°

Fig. 4.26 O_2 density with 2 nozzle (30°) at 3000rpm

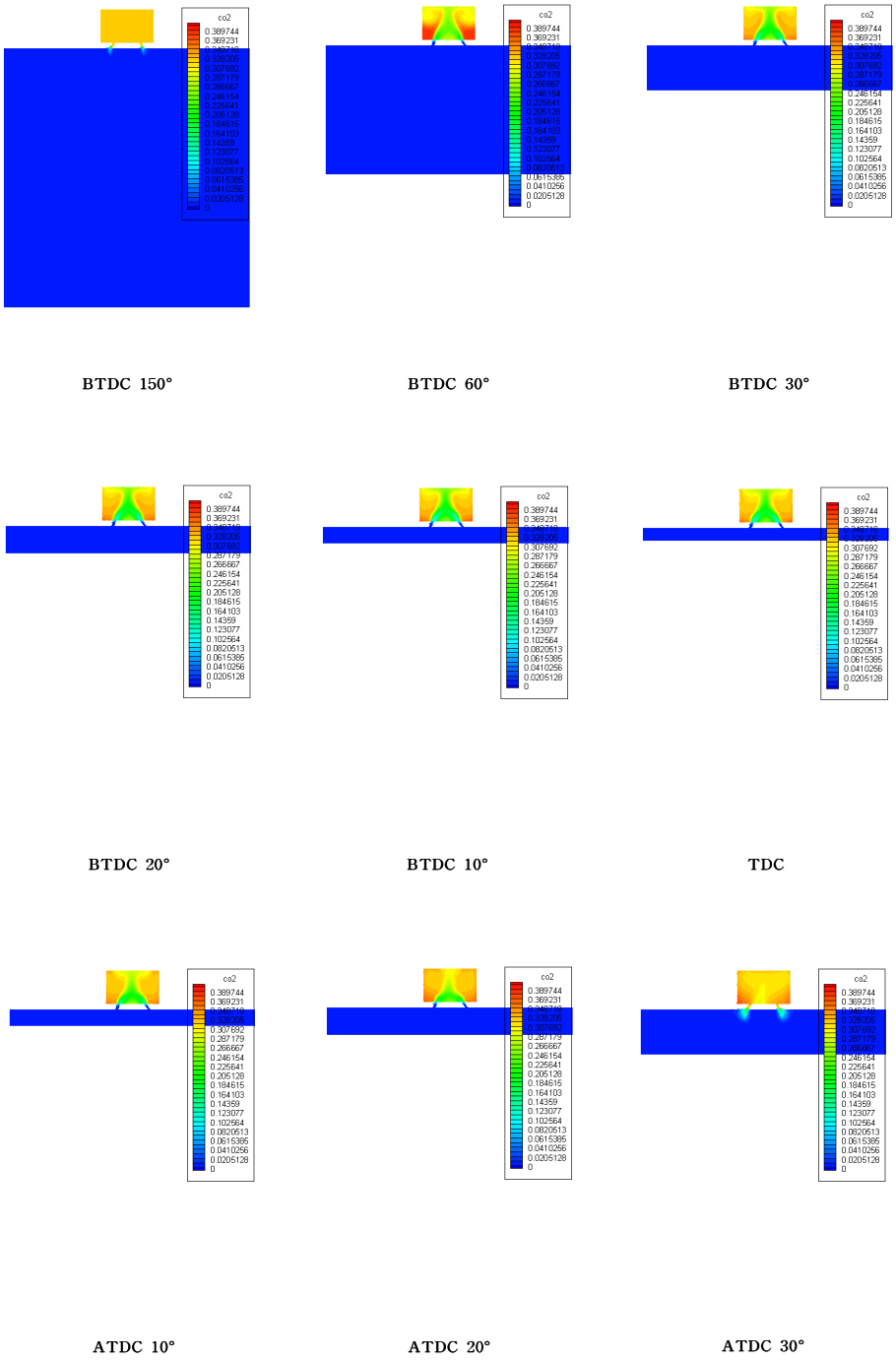


Fig. 4.27 CO_2 density with 2 nozzle (30°) at 3000rpm

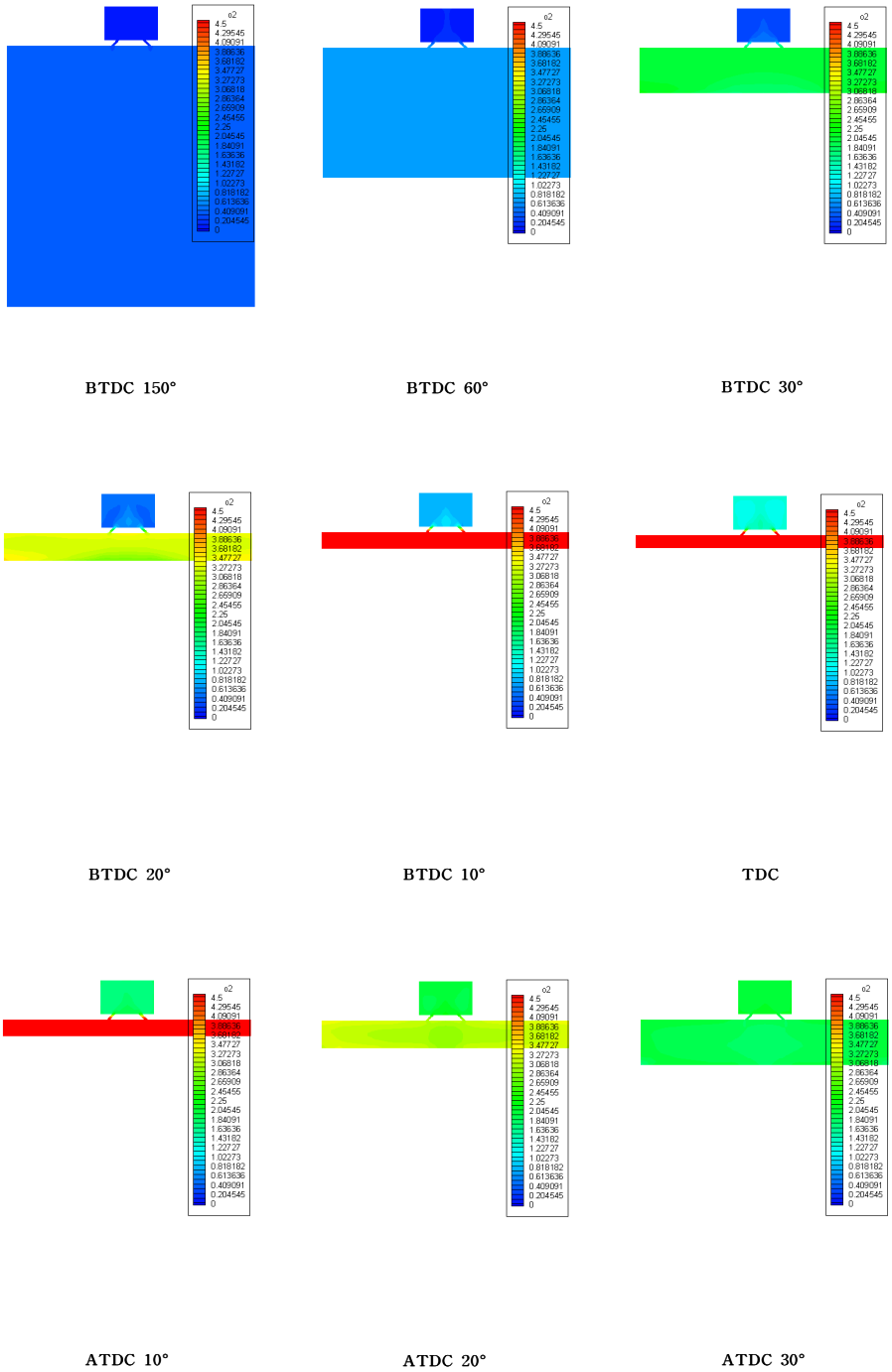
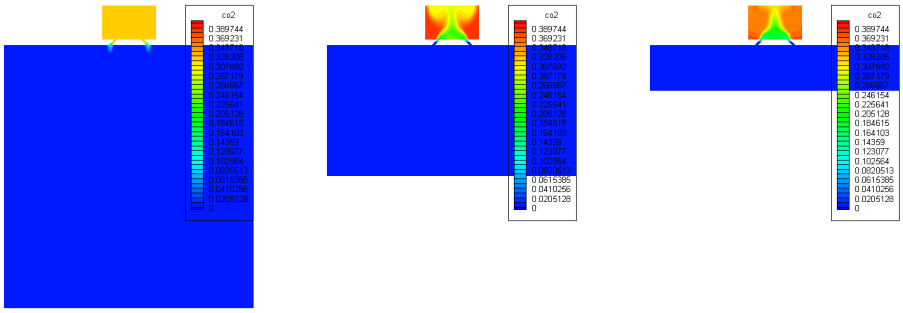


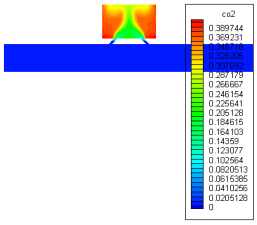
Fig. 4.28 O_2 density with 2 nozzle (45°) at 3000rpm



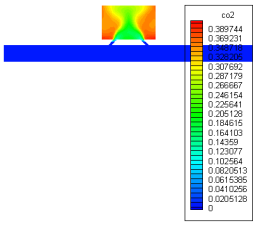
BTDC 150°

BTDC 60°

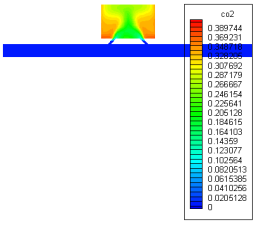
BTDC 30°



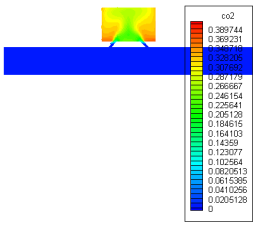
BTDC 20°



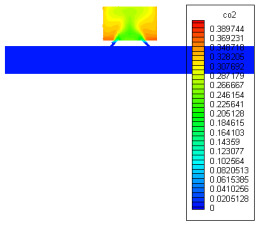
BTDC 10°



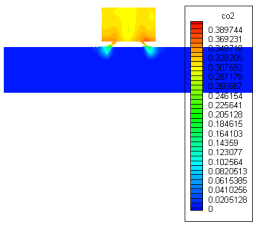
TDC



ATDC 10°



ATDC 20°



ATDC 30°

Fig. 4.29 CO_2 density with 2 nozzle (45°) at 3000rpm

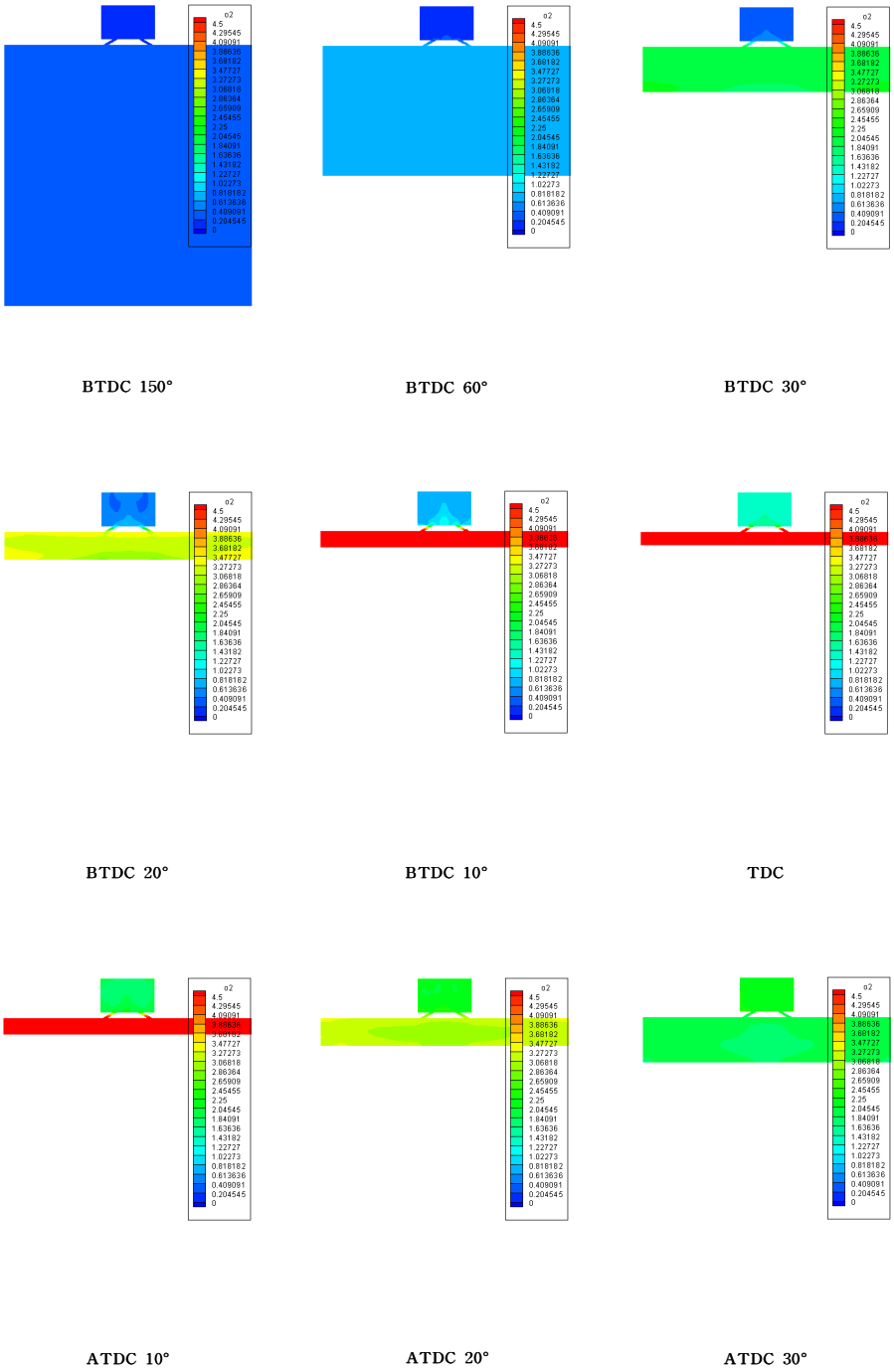
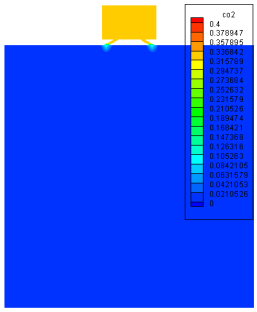
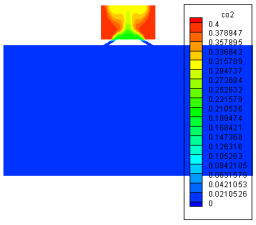


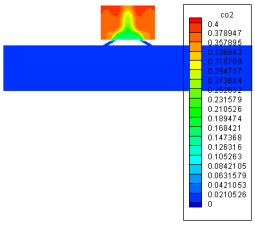
Fig. 4.30 O_2 density with 2 nozzle (60°) at 3000rpm



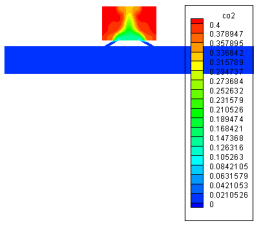
BTDC 150°



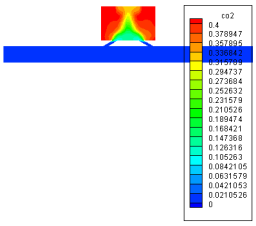
BTDC 60°



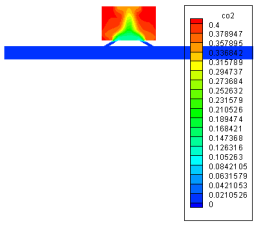
BTDC 30°



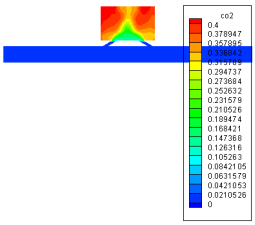
BTDC 20°



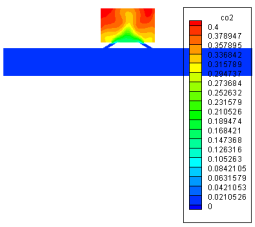
BTDC 10°



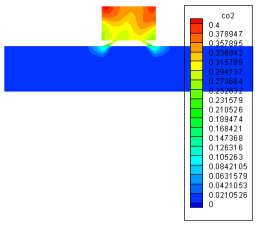
TDC



ATDC 10°



ATDC 20°



ATDC 30°

Fig. 4.31 CO_2 density with 2 nozzle (60°) at 3000rpm

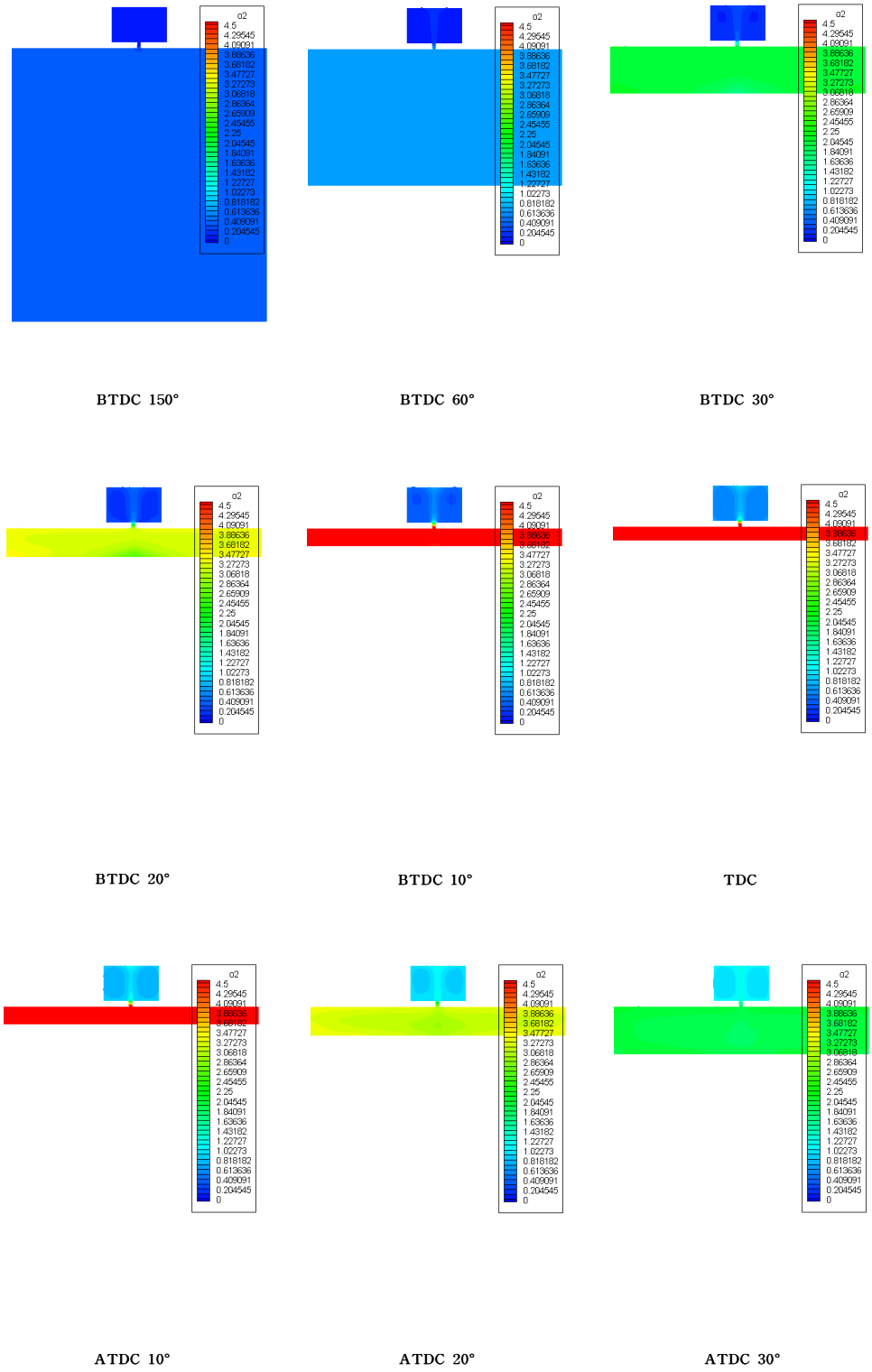
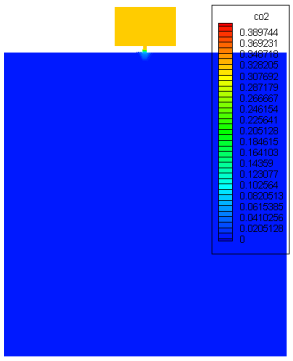
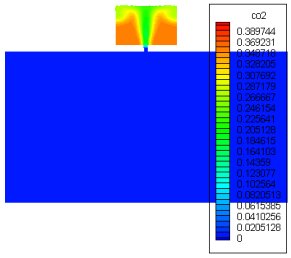


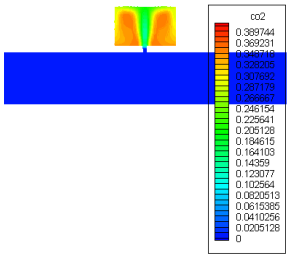
Fig. 4.32 O_2 density with 1 nozzle at 5000rpm



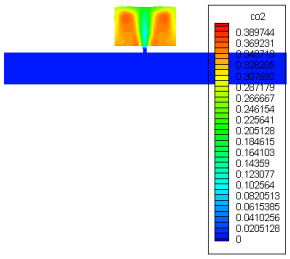
BTDC 150°



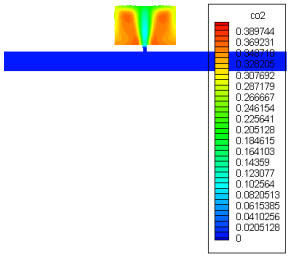
BTDC 60°



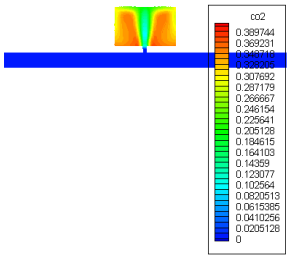
BTDC 30°



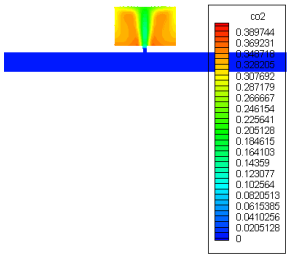
BTDC 20°



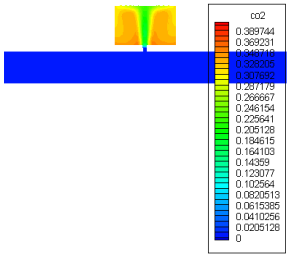
BTDC 10°



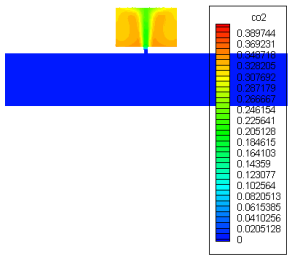
TDC



ATDC 10°

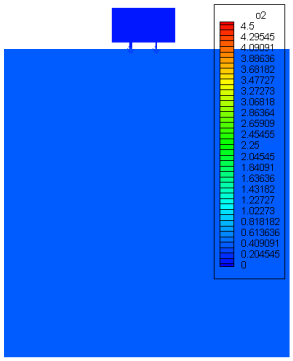


ATDC 20°

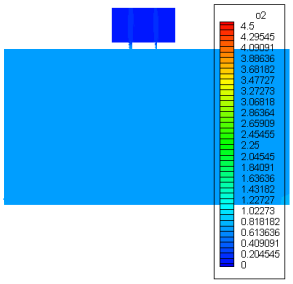


ATDC 30°

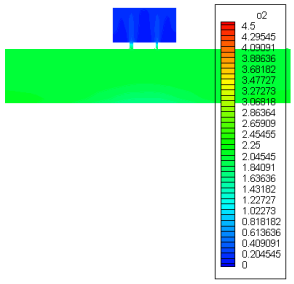
Fig. 4.33 CO_2 density with 1 nozzle at 5000rpm



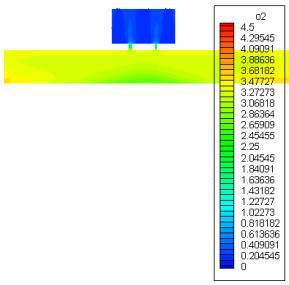
BTDC 150°



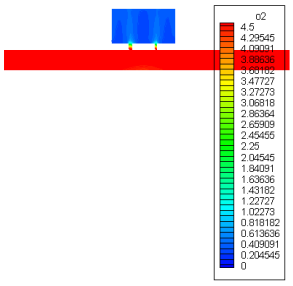
BTDC 60°



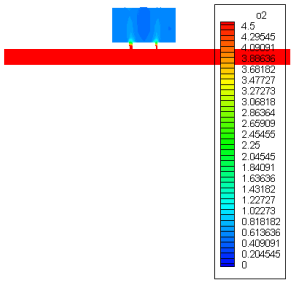
BTDC 30°



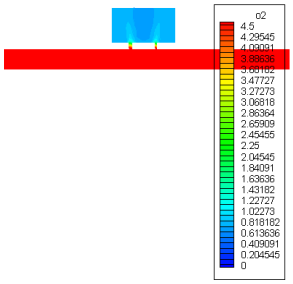
BTDC 20°



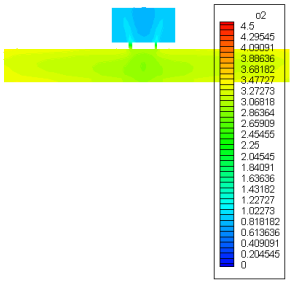
BTDC 10°



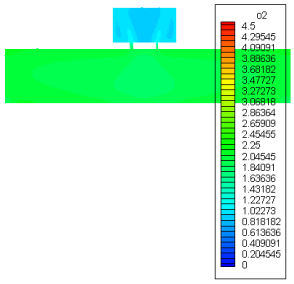
TDC



ATDC 10°

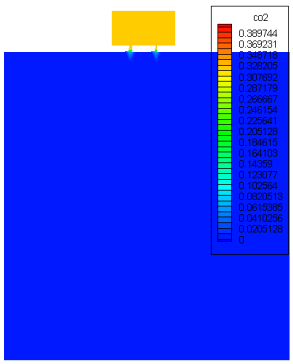


ATDC 20°

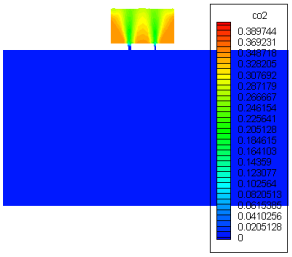


ATDC 30°

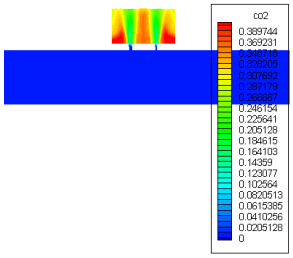
Fig. 4.34 O_2 density with 2 nozzle (0°) at 5000rpm



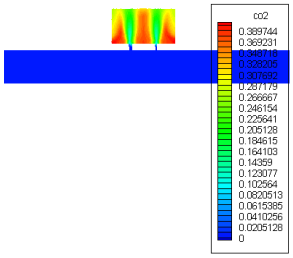
BTDC 150°



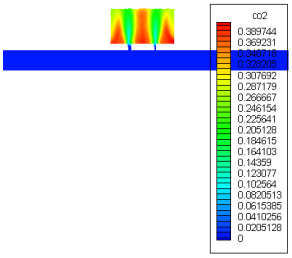
BTDC 60°



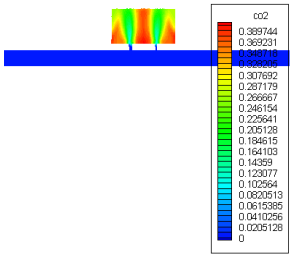
BTDC 30°



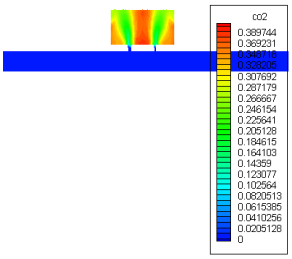
BTDC 20°



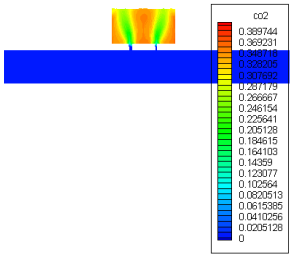
BTDC 10°



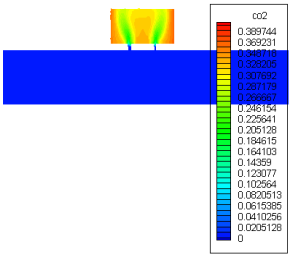
TDC



ATDC 10°



ATDC 20°



ATDC 30°

Fig. 4.35 CO_2 density with 2 nozzle (0°) at 5000rpm

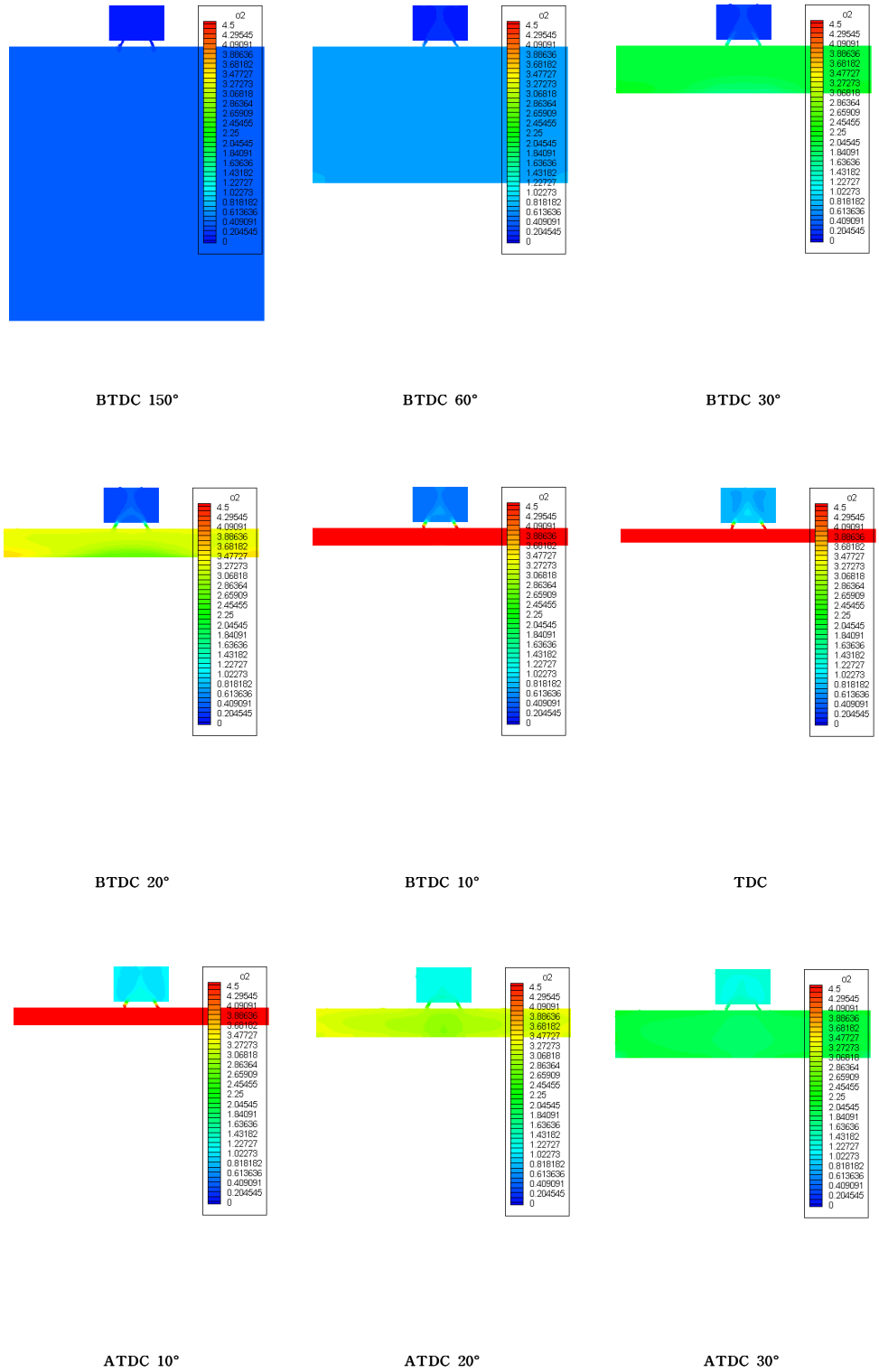
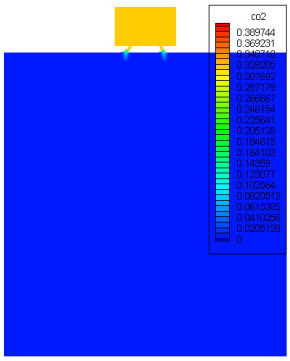
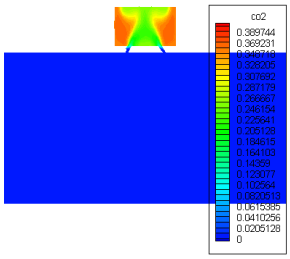


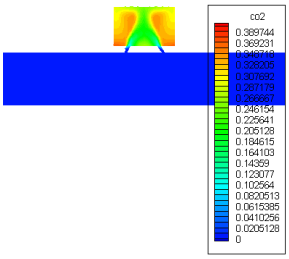
Fig. 4.36 O_2 density with 2 nozzle (30°) at 5000rpm



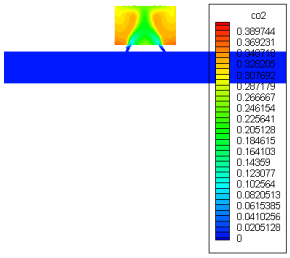
BTDC 150°



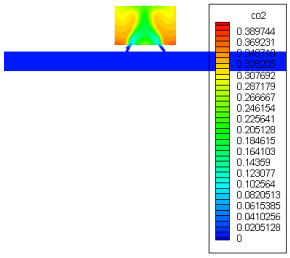
BTDC 60°



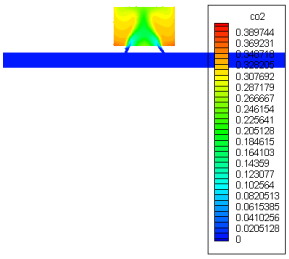
BTDC 30°



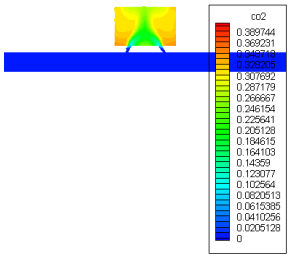
BTDC 20°



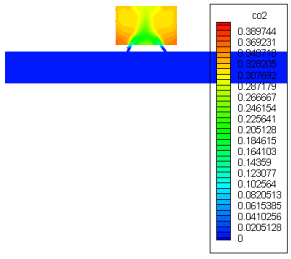
BTDC 10°



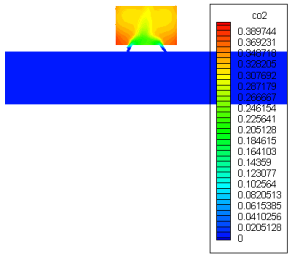
TDC



ATDC 10°

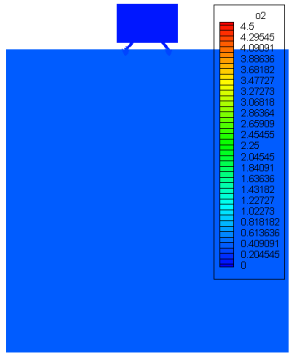


ATDC 20°

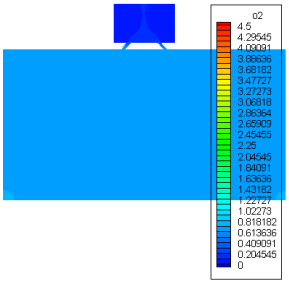


ATDC 30°

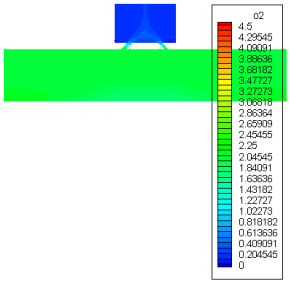
Fig. 4.37 CO_2 density with 2 nozzle (30°) at 5000rpm



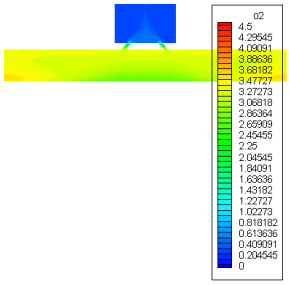
BTDC 150°



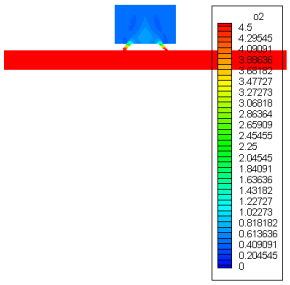
BTDC 60°



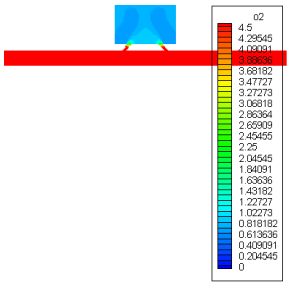
BTDC 30°



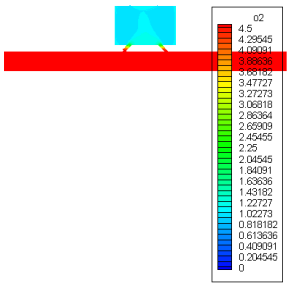
BTDC 20°



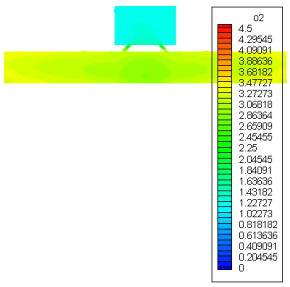
BTDC 10°



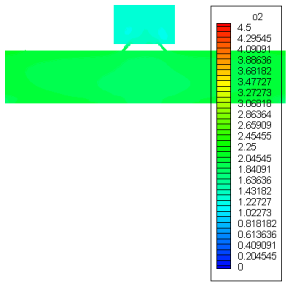
TDC



ATDC 10°

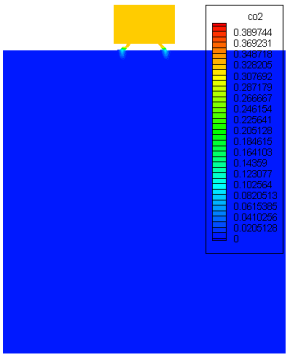


ATDC 20°

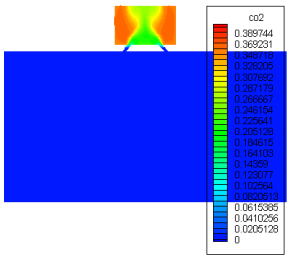


ATDC 30°

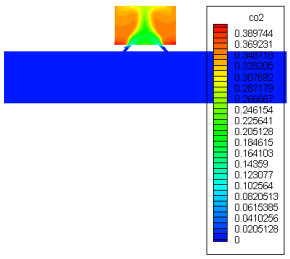
Fig. 4.38 O_2 density with 2 nozzle (45°) at 5000rpm



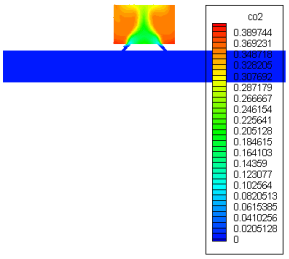
BTDC 150°



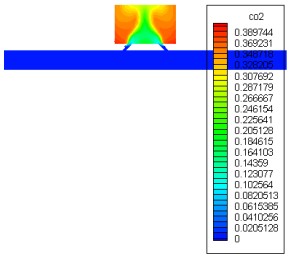
BTDC 60°



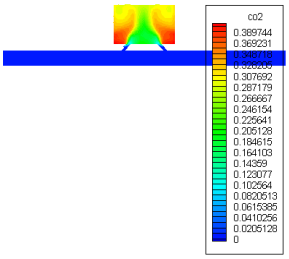
BTDC 30°



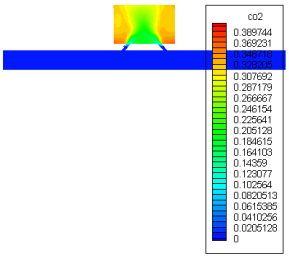
BTDC 20°



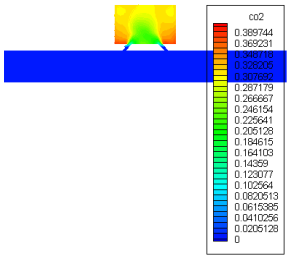
BTDC 10°



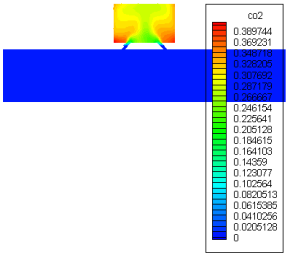
TDC



ATDC 10°

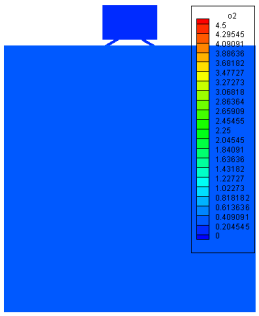


ATDC 20°

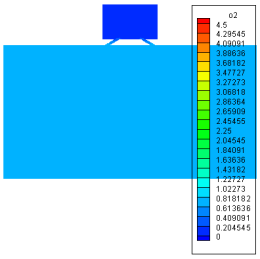


ATDC 30°

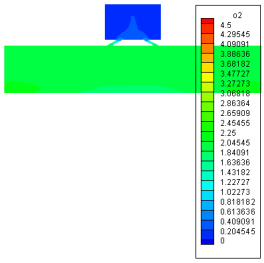
Fig. 4.39 CO_2 density with 2 nozzle (45°) at 5000rpm



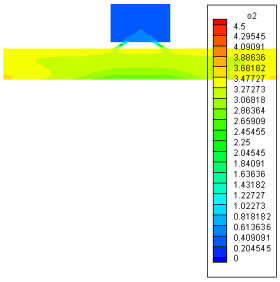
BTDC 150°



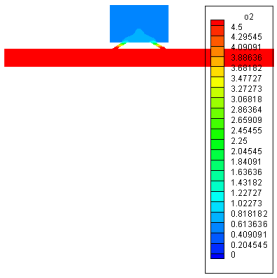
BTDC 60°



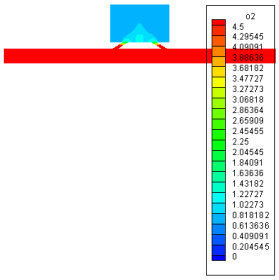
BTDC 30°



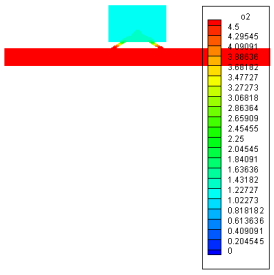
BTDC 20°



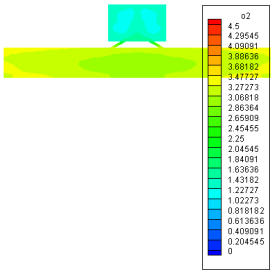
BTDC 10°



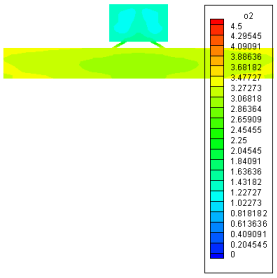
TDC



ATDC 10°



ATDC 20°



ATDC 30°

Fig. 4.40 O_2 density with 2 nozzle (60°) at 5000rpm

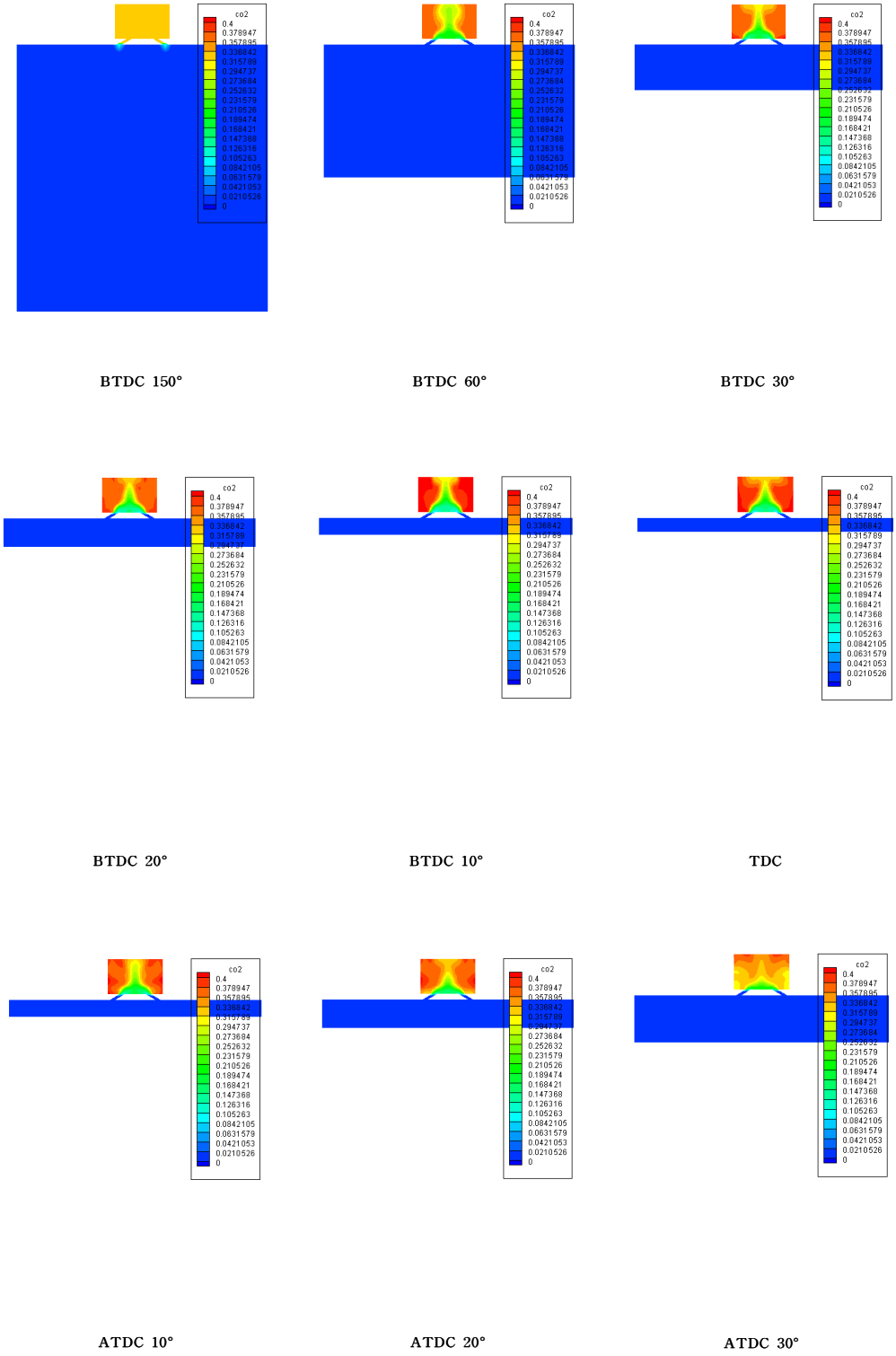
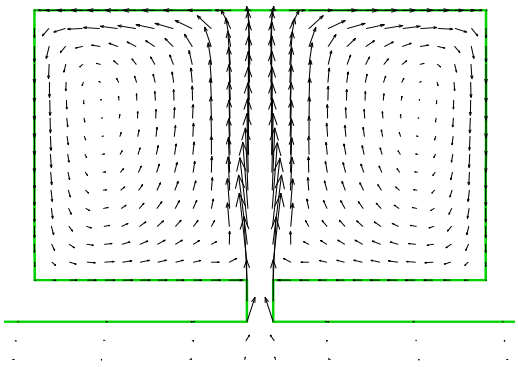
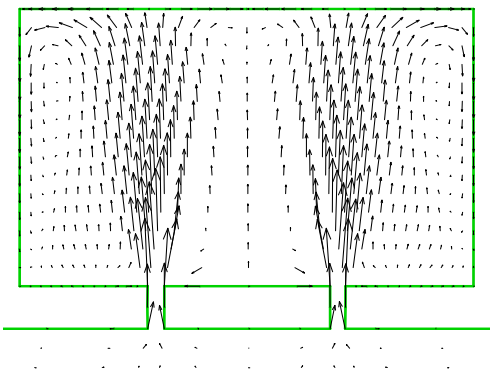


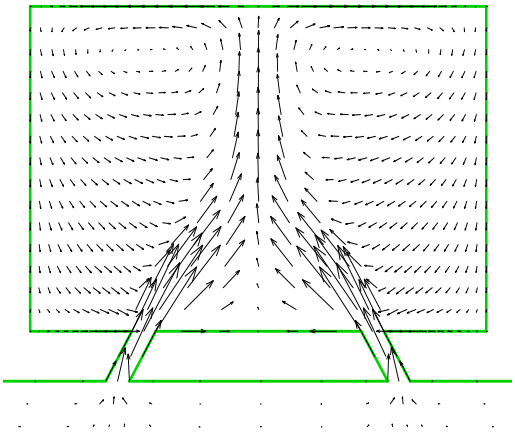
Fig. 4.41 CO_2 density with 2 nozzle (60°) at 5000rpm



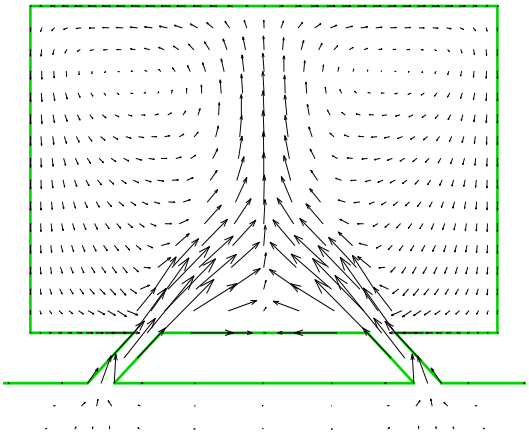
1 nozzle 0°



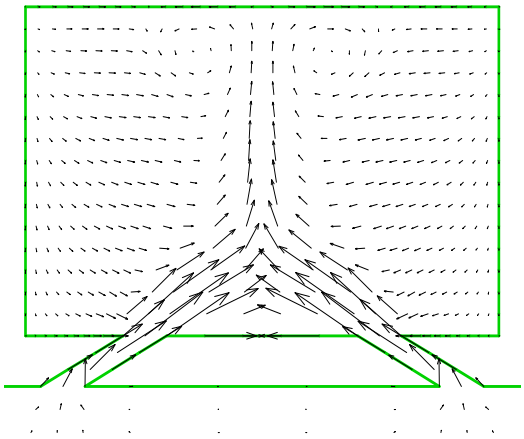
2 nozzle 0°



2 nozzle 30°



2 nozzle 45°



2 nozzle 60°

Fig. 4.42 Vectors into sub-chamber though nozzle

Ⅳ. 계산조건 및 결과 Ⅱ

4.1 부연소실에서의 당량비 계산에 관한 조건

당량비 0.6인 화학식을 살펴보면 아래의 식과 같고 주연소실의 당량비를 0.6으로 맞추어 산소와 연료의 질량을 주연소실의 조건으로 두고 전체 연소실의 당량비가 0.62와 0.65가 되도록 부연소실에 적절한 연료와 배기가스를 초기조건으로 두어 전체 연소실의 당량비가 0.62와 0.65의 두 가지 경우에 관하여 계산하였다. 여기에서의 당량비는 공기와 연료의 비율이 아닌 산소와 연료의 비율로 계산하였다.

모든 계산의 경우는 Table 3.3에 주어져 있으며 부연소실에서의 당량비 계산은 최적의 신기흡입 및 잔류가스 배출 각도인 연결공 각도 45°를 기준으로 각 rpm에 따라 연결공 직경 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8mm의 다섯 가지 경우에 따라 계산하였다.

다음은 당량비 0.6인 경우의 화학반응식이다.

$$4C_8H_{17} + 81.67O_2 + 307.07N_2 \quad \leftrightarrow \quad 32CO_2 + 34H_2O + 307.07N_2 + 32.67O_2$$

$$(\Phi = 0.6)$$

Table 3.3 Each variable of calculation

	Calculation range
Crank angle	BTDC 150° ~ ATDC 30°
Hole number	2
Hole angle	45°
rpm	1000, 3000, 5000
Hole diameter	1.0 mm~1.8 mm (0.2 mm interval)

4.2 부연소실에서의 당량비 특성

4.1, 4.2, 4.3에서의 결과를 바탕으로 신기의 유입과 배기가스가 배출되는 특성을 고려할 때 연결공 각도가 45°일 때를 최적 각이라고 두고 연결공 각도 45°일 때를 중심으로 부연소실의 당량비를 계산하였다. 압축과정에서 주연소실에 있는 산소와 연료의 혼합기가 동시에 부연소실로 흡입되므로 이러한 흡입의 특성을 모두 고려하여 계산한 값을 각 Table 4.1, 4.2, 4.3에 두었으며, Table 4.1, 4.2, 4.3은 각 rpm에서 연결공 단면적이 변화할 때, 점화를 일으키는 시점의 각도를 BTDC 4°라고 두고 BTDC 4°에서 TDC사이의 부연소실에서의 당량비를 계산한 것이다. 각 rpm에서 전체 당량비가 0.62일 때 모든 연결공 단면적에 관하여 연소 가능한 당량비가 도출되며 0.65의 경우는 3000rpm 이상이 되면 연결공의 지름이 1.8mm 이하에서는 연소가 가능하지 않을 것이다. 부연소실에서의 연소시 연소에 의해 발생하는 높은 압력으로 라디칼이 분출할 경우, 가능한 단면적이 작은 연결공을 통과할 때 노즐의 역할을 충분히 할 수 있으므로, 신기의 흡입과 가장 효율적인 노즐의 효과를 동시에 만족시킬 수 있는 단면적 및 각 rpm에 따라 연소가 가능한 최적 단면적을 예측할 수 있다.

Fig. 4.43 ~ 4.48은 다른 연결공 면적을 가지는 부연소실에서 크랭크 각도에 따른 당량비의 변화를 그래프로 나타내었다. 모든 경우에 전체 당량비와 rpm에 따라서 당량비는 다르지만 거의 TDC 근처까지 급격히 떨어지다가 TDC 이후에는 완만한 곡선의 경향을 가지며 연결공의 단면적이 작을수록 TDC 근처까지 더욱 급격히 감소한다.

Table 4.1 Change of equivalence ratio in sub-chamber at 1000rpm

Whole equivalence ratio		0.62				
Connection hole dia. (mm)		1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
Crank Angle (deg)	-4	**1.202**	1.014	0.909	0.864	0.824
	0	**1.107**	0.947	0.861	0.824	0.793
whole equivalence ratio		0.65				
Crank Angle (deg)	-4	2.105	1.632	**1.371**	1.255	1.158
	0	1.857	1.465	**1.251**	1.159	1.082

Table 4.2 Change of equivalence ratio in sub-chamber at 3000rpm

Whole equivalence ratio		0.62				
Connection hole dia. (mm)		1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
Crank Angle (deg)	-4	2.377	1.779	**1.426**	1.257	1.086
	0	2.084	1.586	**1.291**	1.149	1.009
whole equivalence ratio		0.65				
Crank Angle (deg)	-4	5.039	3.538	2.659	2.239	1.812
	0	4.305	3.056	2.317	1.970	1.615

Table 4.3 Change of equivalence ratio in sub-chamber at 5000rpm

Whole equivalence ratio		0.62				
Connection hole dia. (mm)		1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
Crank Angle (deg)	-4	3.648	2.623	2.000	1.702	**1.394**
	0	3.128	2.284	1.764	1.522	**1.264**
whole equivalence ratio		0.65				
Crank Angle (deg)	-4	8.162	5.618	4.092	3.349	2.582
	0	6.917	4.780	3.508	2.897	2.255

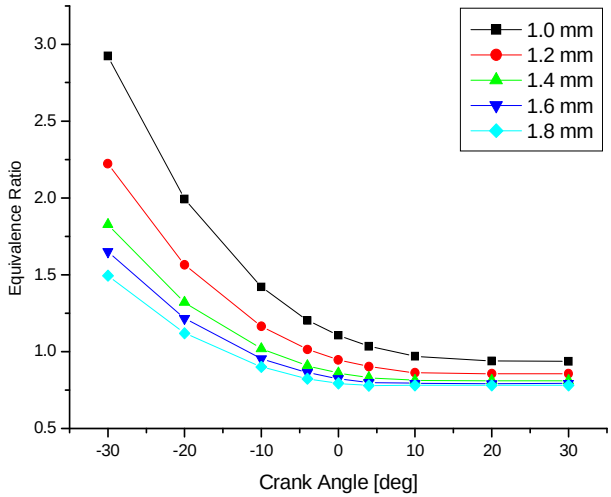


Fig. 4.43 Whole equivalence ratio 0.62 at 1000rpm

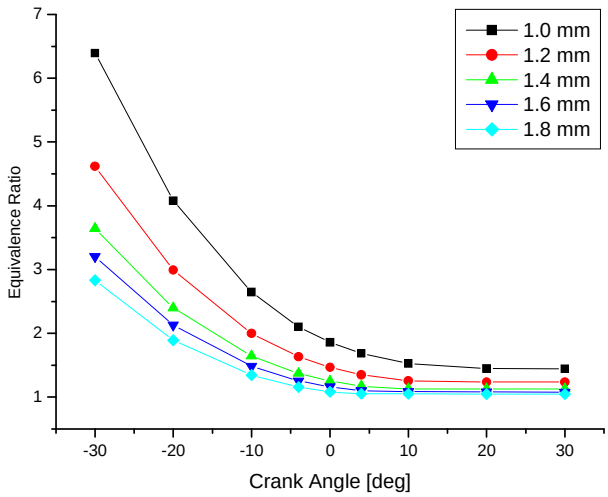


Fig. 4.44 Whole equivalence ratio 0.65 at 1000rpm

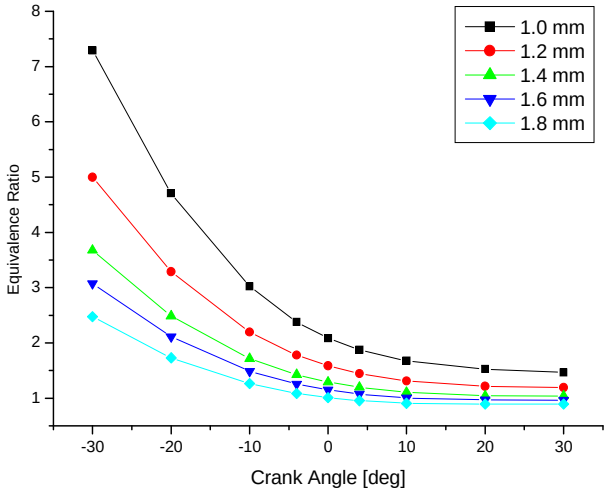


Fig. 4.45 Whole equivalence ratio 0.62 at 3000rpm

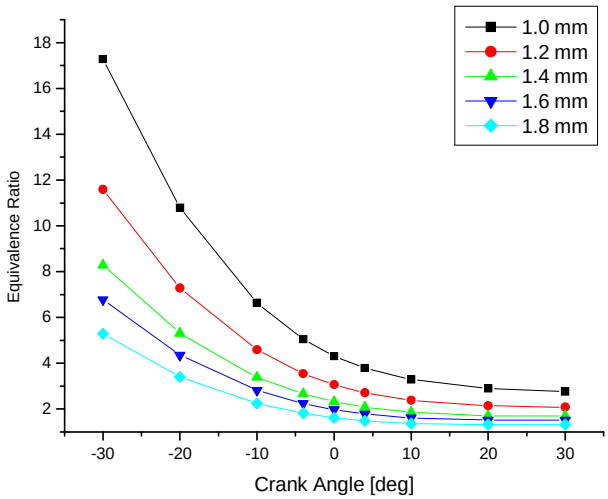


Fig. 4.46 Whole equivalence ratio 0.65 at 3000rpm

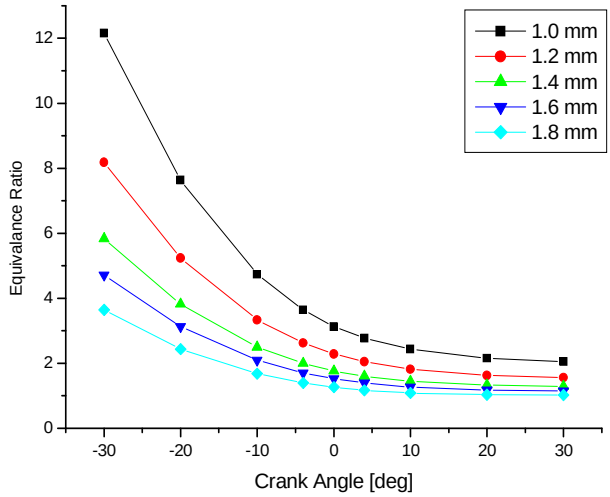


Fig. 4.47 Whole equivalence ratio 0.62 at 5000rpm

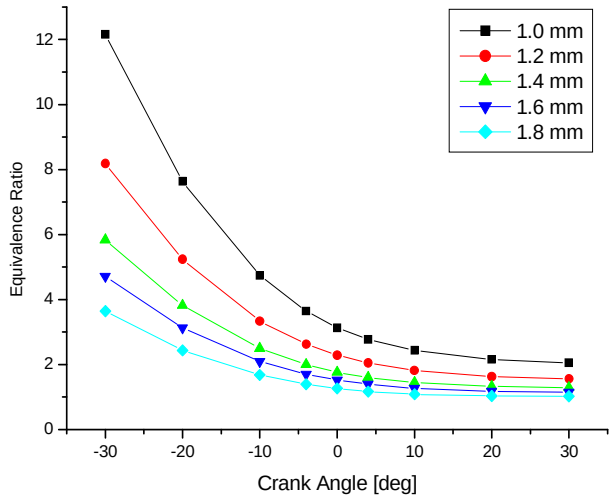


Fig. 4.48 Whole equivalence ratio 0.65 at 5000rpm

V. 결　　론

라디칼 인젝터가 있는 연소시스템에서 부연소실의 신기유입 특성과 연소가 가능한 최적 당량비는 다음과 같이 요약된다.

1) 피스톤이 고속으로 움직일수록 신기의 유입량과 잔류가스의 유출이 감소하므로 연소의 어려움이 있을 것으로 예측된다. 또한 부연소실에서의 연소압력은 주연소실로 라디칼을 분출하는데 큰 역할을 하므로 피스톤의 속도가 연소에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

2) 연결공의 각도가 45°에서 가장 크고 고른 와유동의 형성이 발생하여 부연소실 전체에 신기가 고루 퍼지게 하며 연결공 각도 0°에서 45°까지 유입량이 많아지다가 45° 이후에는 유입량이 감소한다. 신기의 유입과 잔류가스의 유출을 모두 고려할 때 연결공의 각도는 45°가 가장 적합할 것으로 보여진다.

3) 당량비를 고려할 때, 조그만 당량비 변화(0.62, 0.65)에도 상당히 세밀하게 변화하지만 일반적으로 연결공의 직경은 중속 기준(1000～3000rpm)으로 1.4mm, 각도는 45°가 적합하며 속도와 부하의 증가로 더 필요한 공기는 강제공급 되어야할 것으로 판단된다.

모든 사항을 고려해보면 라디칼 인젝터에서 신기의 유입 및 잔류가스의 유출은 연결공의 형태에 많은 영향을 받고 있음을 확인할 수 있었다. 연소단계 이전의 신기 유입은 연소에 큰 영향을 미치므로 위의 모든 사항을 라디칼 인젝터가 있는 연소실의 설계시 고려해야 한다. 그리고 고속이 될수록 잔류가스의 유출에 특히 어려움이 있으므로 설계시 고려대상이 되어야 한다.

참고문헌

1) Kelly-Zion, P.L., and Dec. J." A Computational Study of the Effects of Fuel-Type on Ignition Time in HCCI Engines", Proceeding of the 28th International Symposium on Combustion, Vol. 28, pp. 1187-1194, 2000.

2) Gaydon, A.G. and Wolfhard, H.G. Flames, their structure, radiation and temperature (3rd edition), London, Chapman and Hall Press, 1970.

3) Gaydon, A.G., Spectroscopy of flames, Waily Press, 1957.

4) Kawabata, Y. Nakagawa, K. and Shoji, F., "Operating Characteristics of Natural Gas Fueled Homogeneous Charge Compression Ignition", Energy Technology Research Institute Vol.8, 1998.

5) Gentili, R., Stefano F., Leonardo T., Patrice H. and Jacques L., "Experimental Study on ATAC (Active Thermo-Atmosphere Combustion) in a Two-Stroke Gasoline Engine", SAE Paper 970363, 1997.

6) S. Kong, Craig D. Marriott, Rolf D. Reitz, and Magnus Christensen, "Modeling and Experiments of HCCI Engine Combustion Using Detailed Chemical Kinetics with Multi Dimensional CFD", SAE 2001-01-1026, 2001.

7) W. Easley et al., "Modeling of HCCI Combustion and Emissions Using Detailed Chemistry", SAE 2001-01-1029, 2001.

8) Kong, S. and Ricart, L.M. and Reitz, R.D., "In-cylinder diesel flame imaging compared with numerical computations", SAE 950455, 1995.

9) Nagaoka M., Kawazoe, H. and Naomi N., "Modeling fuel spray impingement on a hot wall for gasoline Engines", SAE 940525, 1994.

10) Stephenson, P.W. and Rutland, C.J., "Modeling the effects of intake flow characteristics on diesel engine combustion", SAE 950282, 1995.

11) Zellat, M., Rolland, T.h. and Poplow, F., "Three dimensional modeling of combustion and soot formation in an indirect injection diesel engine", SAE 900254, 1990.

12) Kuo, T.W., "Multidimensional port-and-cylinder gas flow, fuel spray, and combustion calculations for a port-fuel-injection engine", SAE 920515, 1992.

13) Gosman, A.D., Tsui, Y.Y. and Watkins, A.P., "Calculation of Three-Dimensional Air Motion in Model Engines", FS/83/29, 1980.

감사의 글

우선 2년 간의 대학원 생활을 무사히 마치게 이끌어주신 하나님의 은혜에 감사드리고 이렇게 논문을 완성하기까지는 많은 사람들의 도움과 조언이 있었습니다. 석사기간동안 부족한 저를 도와주시고 이끌어주신 모든 분께 부족하지만 이 짧은 글로 감사를 드리려고 합니다.

가장 먼저 학부와 대학원 생활동안 훌륭하신 인품과 한결같은 관심으로 곁에 있는 것만으로도 저에게 많은 배움이 되며 특별히 이 논문을 무사히 쓸 수 있게 많은 부분을 세심하게 도와주신 박권하 교수님께 특별히 감사를 드립니다. 그리고 바쁜 업무에도 시간을 내어 끝까지 논문을 완성할 수 있도록 도와주신 조권회, 최재성 교수님께도 진심으로 감사를 드립니다.

또한 저의 실험실 생활에 활력을 주었고 친구로써 부족하지만 많은 도움을 주었던 저의 동기 상무, 진희, 석민이, 실험실 선배로서 저에게 배려와 격려로 도와주었던 현철, 병두, 인석 선배, 항상 실험실에 오시면 저희 실험실 식구들에게 따뜻한 밥과 격려로 저희에게 기쁨을 주셨던 이화순 교수님, 송영호 이사님, 박홍일 원장님께 감사의 글을 올립니다. 그리고 저의 부족한 리더쉽과 많은 실수에도 눈감아 주고 선배를 올려주는 승우, 제 뒤에서 묵묵히 저를 도와준 착한 인선, 늦게 합류하여 즐거움을 주었던 성윤, 비록 옆 실험실이지만 우리와 생활하며 웃음을 잃지 않고 항상 사기를 북돋아 주었던 종식, 민수, 학부생으로써 실험실에 들어와 선배들의 일을 열심히 도와주고 자기 일에 충실하며 선배들의 기분을 올려주는 우리 귀염둥이 후배 혜민, 은영, 창우, 영환, 마지막으로 일이 바쁜 가운데에서도 학업에 충실하여 모범이 되고 있는 병철, 명석이에게도 감사의 뜻을 전합니다.

항상 저를 신뢰하시며 묵묵히 저의 뒷바라지를 해주신 사랑하는 부모님과 동생 재원, 재우, 멀리서 그리고 가까이서 나를 위해 기도해주고 좋은 조언들과 사랑을 아끼시지 않으시는 삼촌, 고모, 이모, 사촌 모두들 그리고 저에게 말씀으로 인도하여 하나님을 알게 하여 주신 천홍승 형제, 천홍아 자매 그 외에도 저를 위해 지금 이 순간에도 기도로써 힘을 주시는 교회의 모든 형제 자매들에게 깊은 감사를 드립

니다.

5년 동안 영어예배에서 예배드리며 많은 격려와 저의 힘이 되었던 영어예배 식구들에게도 감사하며 지금 이 순간에도 서로를 축복하며 서로를 위해 기도하고 있는 저의 특별한 친구 지영에게도 깊은 저의 고마움을 전하고 싶습니다.

마지막으로 이 글을 통해 언급하지는 못했지만 저에게 많은 격려와 따뜻한 도움을 준 친구, 선배, 후배들에게도 감사를 드리며, 다시 한번 저의 하나님께 모든 영광을 드리며 앞으로 제 주위에 있는 모든 사람들에게 이 감사를 사랑으로 베풀고 싶습니다.

2004년 1월 5일

전 재 혁