

라디칼 인젝터를 적용한 연소실의 신기유입특성에 관한 연구

박권하[†] · 전재혁^{*}

(원고접수일 : 2008년 1월 18일, 심사완료일 : 2008년 4월 23일)

The Inflow Characteristics of Fresh Air in the Combustion Chamber having the Radical Injector

Kweon-Ha Park[†] · Jae-Hyeuk Jeon^{*}

Abstract : The engine containing a radical injector has been studied to improve the performances of efficiency and to reduce the exhaust emissions recently. The engine is far different from general compression ignition engines or spark ignition engines for the concept of combustion process. The inflow characteristic from main chamber into radical chamber during compression stroke is important because the radical chamber must have enough fresh air to generate appropriate radicals. The numerical simulation is performed in each specific shape and the engine speed by using KIVA code. The result shows that the fresh air inflow from main chamber into the radical chamber is the best at 45 degree of the hole angle.

Key words : Radical injector(라디칼 인젝터), Combustion chamber(연소실), Inflow characteristics (유입특성), Numerical analysis(수치해석)

1. 서 론

내연기관에서 수치해석적 연구는 엔진 내부 유동 및 연소 현상의 이해와 연소실 내부의 현상에 대한 물리적 모델의 개발^{(1), (2)}을 중심으로 이루어지며, 수치해석 결과의 신뢰도를 높이기 위해서 각 요소 모델에 대한 다양한 실험 결과와 상호 보완하는 검증 작업이 요구된다⁽³⁾⁻⁽⁵⁾. 본 연구에서 사용되는 연소시스템인 예혼합 압축착화 엔진은 디젤엔진과 가솔린엔진의 단점을 상호 보완하여 저배기, 고효율, 고출력을 동시에 실현할 수 있으며 이미

PREDIC, HCDC, HCCI, ATAC 등의 이름으로 연구가 활발히 진행되고 있다⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾. 이러한 엔진은 부연소실을 가진 디젤 엔진과 유사하나 연료공급이나 연소의 개념에 있어서 큰 차이를 나타내고 있다.

이러한 연소 시스템은 주연소실 상단에 라디칼 연소실을 두고 있다. 주연소실에 희박한 예혼합기를 유입시키고 부연소실에 과농한 예혼합기를 별도로 형성하여 부연소실을 스파크플러그로 점화시킨 후 높은 압력과 온도를 가진 라디칼이 라디칼 인젝터를 통하여 주연소실로 급격히 분출된다. 이렇게 분출된 라디칼은 불안정한 상태로써 빠르게 안정화

[†] 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부, E-mail: khpark@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4367)

^{*} Texas A&M University, Department of Mechanical Engineering

되려는 성질을 가지고 있으므로 연소의 중간과정에서 연소속도를 촉진시키고 다점자기착화를 유발하여 급속연소를 실현함으로써 고효율과 배기가스의 절감을 동시에 실현할 수 있다. 그러므로 연소의 과정 중에서 연소되기 이전까지의 압축행정시 주연소실에서 부연소실로의 공기유입의 유동특성은 다음 단계에 발생할 연소에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되지만, 부연소실에 유입되는 공기유동에 대한 연구가 부족하다. 본 논문에서는 압축행정시 부연소실로의 유동현상을 계산하였으며, 이러한 계산을 통하여 라디칼 연소실내의 유동현상과 신기유입특성을 분석하고자 한다.

2. 계산조건

2.1 계산격자 및 형상

본 계산에 사용된 계산격자는 라디칼 분사홀을 중심으로 조밀한 격자를 형성하여 계산의 정도를 향상하였으며 계산 격자 수는 32000개이다. 그 형상은 Fig. 1과 같으며 구체적 치수는 Table 1 과 같다.

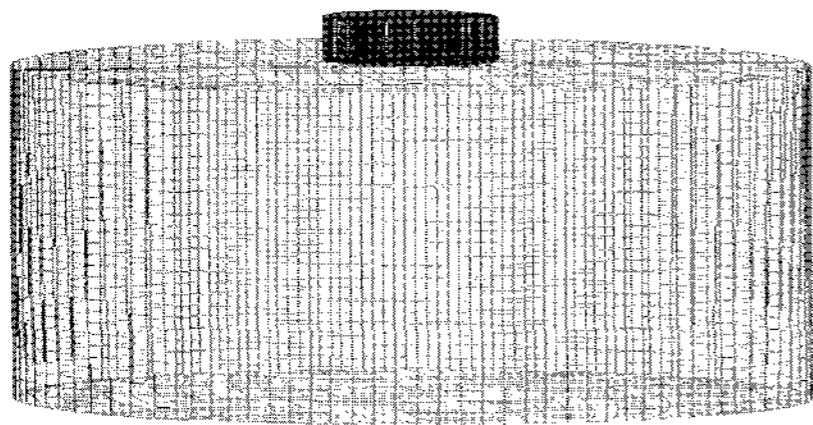


Fig. 1 Calculation grids

Table 1 Size of the combustion system

	Height (mm)	Radius (mm)
Sub-chamber(4cc)	13	10
Main-chamber(664cc)	100	46
1-injector(small)	2	0.85
1-injector(big)	2	1.27
2-injector(small)	2	0.6
2-injector(big)	2	0.9
Stroke	95	
Squish clearance	20	
Compression ratio	16.9	

2.2 계산의 초기조건 및 경계조건

2.2.1 신기유입 특성에 관한 계산조건

계산의 범위는 흡기밸브가 열리는 BTDC 150° 부터 흡기밸브가 닫히는 ATDC 30°까지 수행하였으며 크랭크 각 2°간격으로 계산데이터를 취득하였다.

본 계산에서는 크게 2가지에 관하여 계산을 수행하였다. 첫 번째로는 연결공의 각도, rpm, 연결공 면적의 3가지 경우를 중심으로 여러 가지 변화에 따라 계산을 수행하였으며, 두 번째로는 연결공 면적에 따른 부연소실의 최적 당량비를 고려하기 위하여 연결공 면적은 2가지 경우를 우선 계산한 후에 연결공의 최적 각도를 선택하여 다시 연결공 면적의 5가지의 경우에 관하여 계산하였다.

계산에 사용된 연결공의 개수는 한개와 두개이며 연결공의 각도는 실린더 중심축을 0°로 하여 나타낸다. 연결공 각도의 변화에 따른 유동특성을 비교하기 위하여 연결공이 한 개일 때는 0°, 두개일 때는 중심축으로부터 각각 0°, 30°, 45°, 60°의 각도로 계산을 수행하였으며 연결공의 개수가 1개인 경우와 2개인 경우에 직경은 틀리지만 유량이 통과하는 단면적(1.13 mm²)을 동일하게 구성하였다. 연결공의 면적이 다른 경우는 직경 1.2mm, 1.8mm 2가지의 경우에 따라서 계산을 수행하였고, rpm에 따른 유동특성을 비교하기 위해 1000, 3000, 5000rpm의 3가지 경우에 관하여 계산을 수행하였다.

블록을 부연소실, 연결공, 주연소실 3개로 나누어서 각 블록마다 화학종의 조건을 달리 주었으며 각 블록마다의 독립된 계산 결과를 취득할 수 있게 하였다. 부연소실에는 연소 후 발생하는 배기가스 중에서 대표적인 화학종인 CO₂, H₂O, 그리고 N₂를 두고, 주연소실은 공기의 대표적 화학종인 O₂와 N₂를 초기조건으로 계산을 수행하였다. 그리고 BTDC 150°일 때 연소실 전체 체적은 665072mm³이며 주연소실에서만 산화물인 0.186622g의 O₂가 초기조건으로 주어진다. 화학종의 질량분율은 Table 2와 같이 주어진다.

Table 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 ₂ O	8.5	0
CO ₂	19.7	0

2.2.2 부연소실에서의 당량비 계산에 관한 조건 주연소실의 당량비를 0.6으로 유지하면서 부연소실에 적절한 량의 연료를 넣어서 전체 연소실의 연료산소 당량비가 0.62와 0.65가 되도록 하였다. 모든 계산의 경우는 Table 3에 주어져 있으며 부연소실에서의 당량비 계산은 연결공 각도 45°를 기준으로 각 rpm에 따라 연결공 직경 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8mm의 5가지 경우를 모두 계산하였다.

Table 3 Variables of calculation

	Range of calculation
Crank angle	BTDC 150° ~ ATDC 30°
No. of holes	1개, 2개
Hole angles	0°, 30°, 45°, 60°
Eng. speed(rpm)	1000, 3000, 5000
Hole dia.	1.0 mm~1.8 mm

3. 계산결과 및 고찰

3.1 부연소실로의 신기유입 특성

압축행정동안 부연소실로의 신기유입이 이루어 지므로 크랭크 각 BTDC 150°~ATDC 30°까지 계산한 결과는 다음 도표 및 그래프와 같은 특성을 가진다.

Fig. 2~Fig. 6은 각 연결공의 개수와 연결공 각에 따라 1000, 3000, 5000 rpm의 경우에 부연소실에서의 산소질량을 나타낸다. 3가지 경우 모두 1000rpm에서 산소량이 월등히 높은 것으로 나타났으며, 모든 경우에 3000, 5000rpm으로 rpm이 증가하면서 산소량이 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 1000rpm인 경우에는 연결공이 0°일 때에는

연결공의 개수에 관계없이 ATDC 20°부근에서 가장 큰 산소량을 나타내었으며 나머지 연결공이 2개인 경우는 0°을 제외하고 ATDC 10°부근에서 가장 높은 산소질량을 나타내고 있으며 전체적인 그래프의 경향도 유사하다. 각 연결공의 3000rpm과 5000rpm에서는 최대가 되는 변곡점이 없이 BTDC 30°까지 계속해서 부연소실의 산소질량이 증가하는 경향을 보이고 있다.

각 rpm에서의 연결공 개수와 각 변화에 따른 신기유입 특성이 Fig. 7, Fig. 8과 Fig. 9에 나타나 있다. Fig. 7을 살펴보면 1000rpm의 경우는 산소

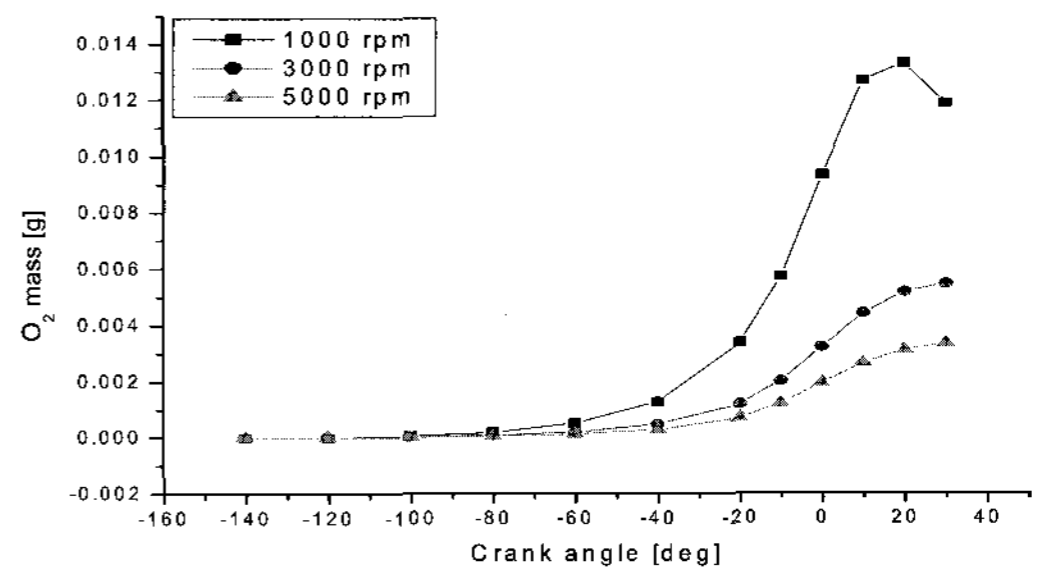


Fig. 2 Inflow mass of O₂ through 1-noz

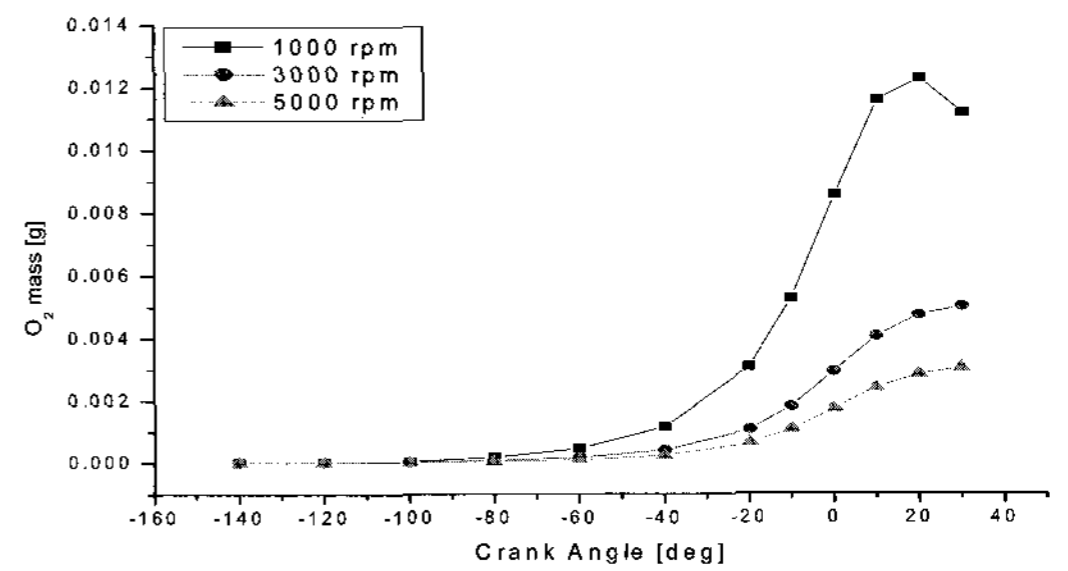


Fig. 3 Inflow mass of O₂ through 2-noz [0°]

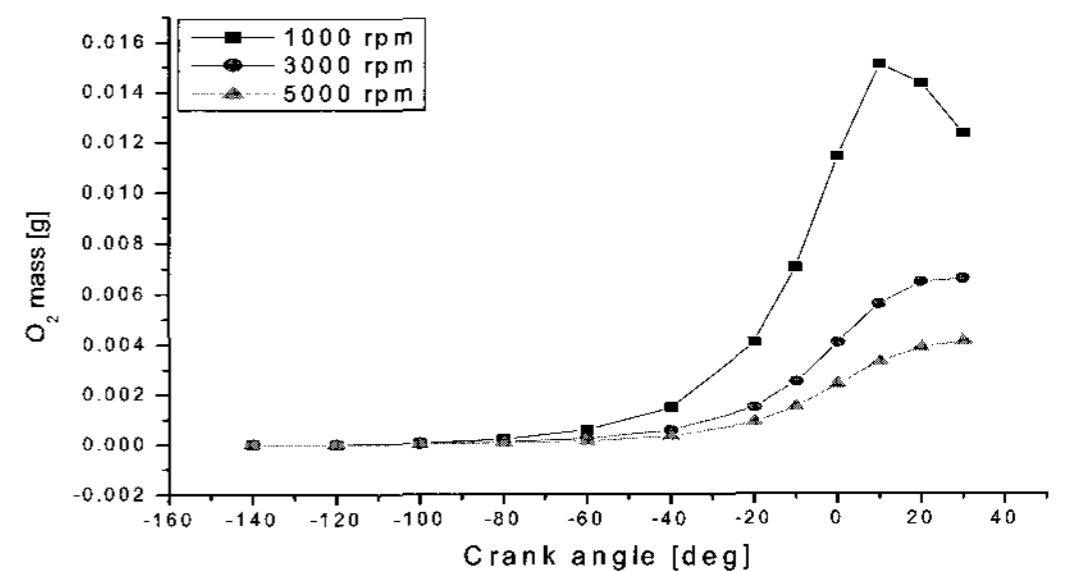


Fig. 4 Inflow mass of O₂ through 2-noz [30°]

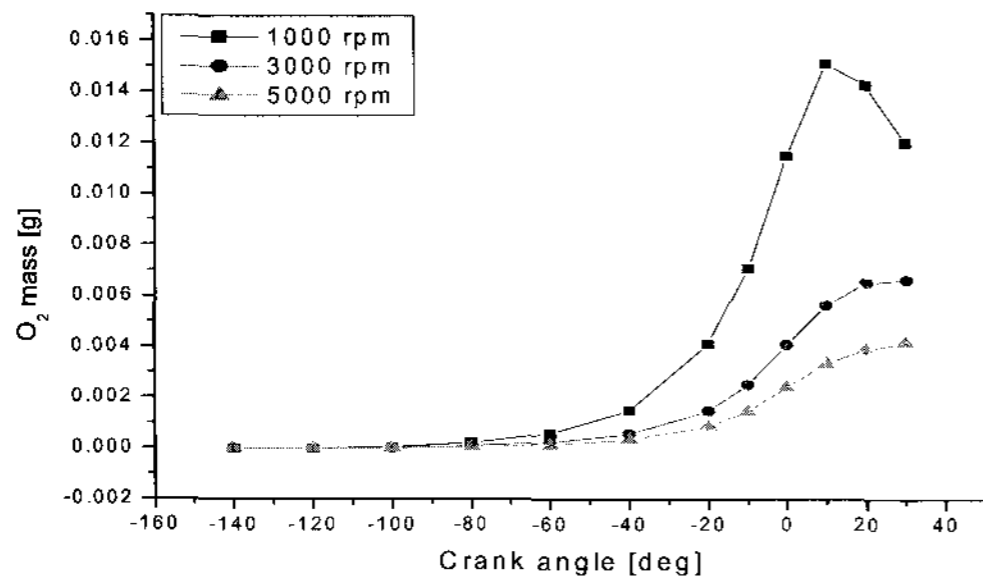


Fig. 5 Inflow mass of O₂ through 2-noz [45°]

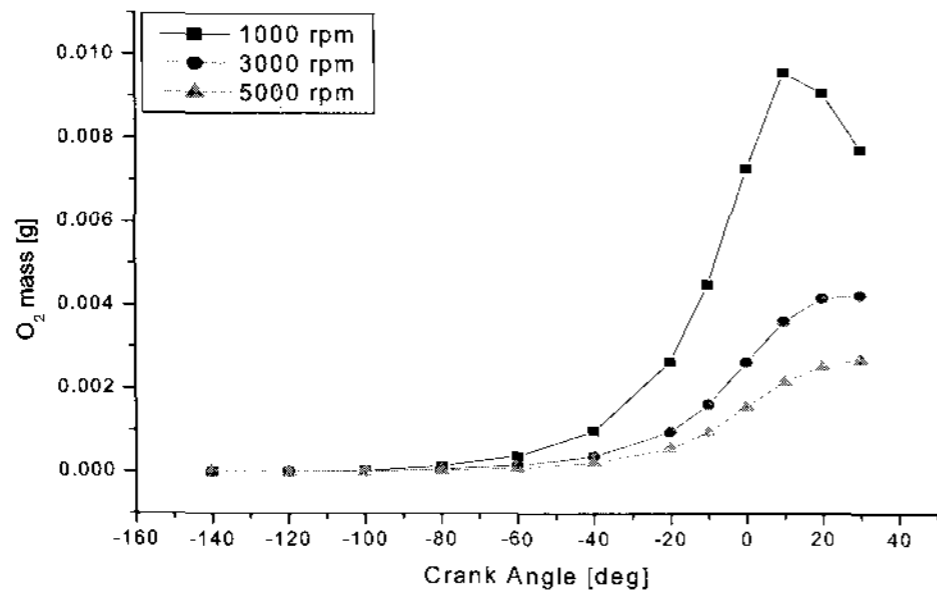


Fig. 6 Inflow mass of O₂ through 2-noz [60°]

가 TDC전까지 급격히 흡입된 후 빠져나가지만 3000과 5000rpm은 TDC 이후에도 흡입되는 질량이 유출되는 질량보다 더 크기 때문에 질량이 계속해서 증가하는 경향을 보인다. 1000rpm에서 노즐 한 개의 경우보다 약간 낮은 것을 제외하면 모든 경우에 연결공 각이 45°인 경우에 가장 큰 흡입량을 나타내었고 연결공 각이 45°와 30°를 제외한 나머지는 확연히 차이를 보이고 있다. 연결공이 2개인 연결공 각 0°와 60°는 연결공이 1개일 때보다 더 낮은 산소 흡입량을 나타내며 특히 연결공 60°일 때 가장 낮은 흡입량을 나타낸다. 1000rpm의 경우에는 단면적이 다른 2가지의 경우에 확연히 다른 두 경향을 보이며 단면적이 큰 경우에는 연결공 각도에 거의 영향을 받지 않고 유사한 경향을 보이고 있으며 오히려 연결공이 1개인 경우에 가장 큰 최대값을 보이고있다. 연결공 단면적이 큰 경우 연결공 1개, 연결공이 2개인 경우 45°, 60°는 모두 TDC에서 최대값을 보이며 30°, 0°의 경우는 그 이후에 최대값을 나타낸다. 단면적이 커지면 산소의 유입량이 커져서 TDC에서의 산소질량이 커

지지만 TDC 후 산소 배출량이 흡입량보다 많아져서 산소질량이 급격히 감소하여 ATDC 20°이후에는 연결공 단면적이 작은 경우보다 산소질량이 더욱 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

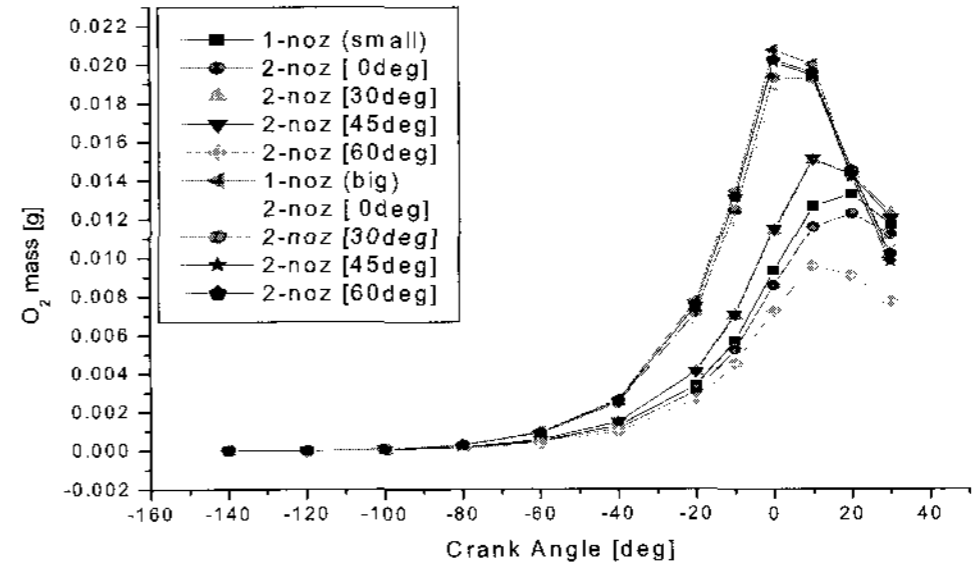


Fig. 7 Inflow mass of O₂ at 1000 rpm

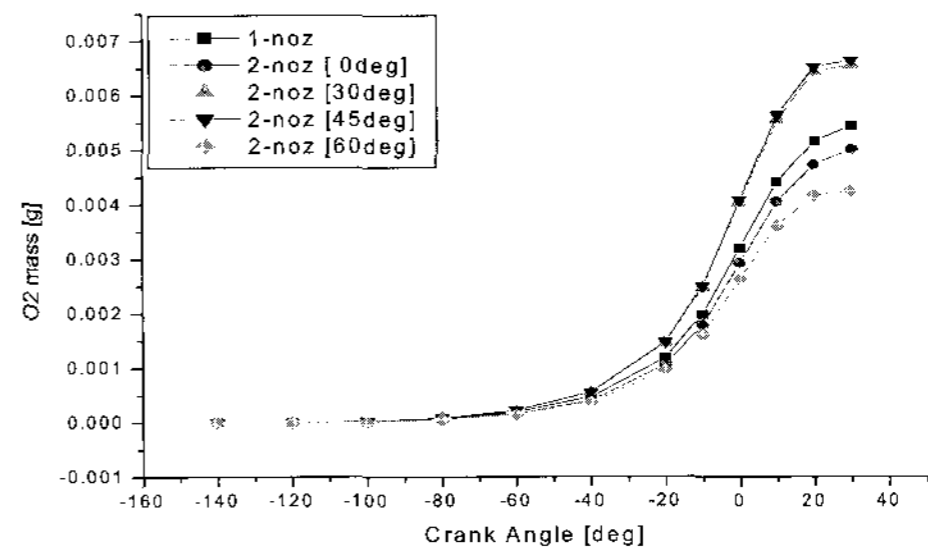


Fig. 8 Inflow mass of O₂ at 3000 rpm

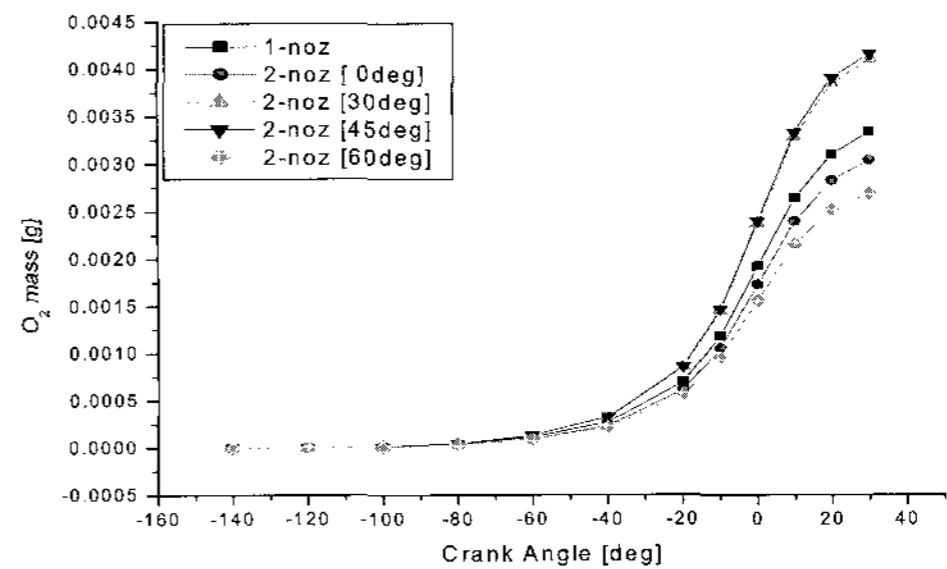


Fig. 9 Inflow mass of O₂ at 5000 rpm

Fig. 10은 점화가 일어날 때인 TDC를 기준으로 각 연결공의 각도에 따른 부연소실 내에서의 유동벡터를 나타낸 것이다. 연결공이 1개일 때는 유입 면적이 크므로 높은 속도로 연결공을 통과하여 윗면에 부딪치면서 부연소실 내부에서 큰 와류동을 형성하고 있다. 연결공이 2개인 경우에는 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.

Fig. 11은 O₂의 밀도 변화를 나타낸다. 크랭크 각도에 따라 산소가 부연소실로 유입되는 것을 확인할 수 있다. TDC까지 주연소실에서만 크게 압축되다가 ATDC 10°에서 부연소실로 산소가 가장 많이 유입된다.

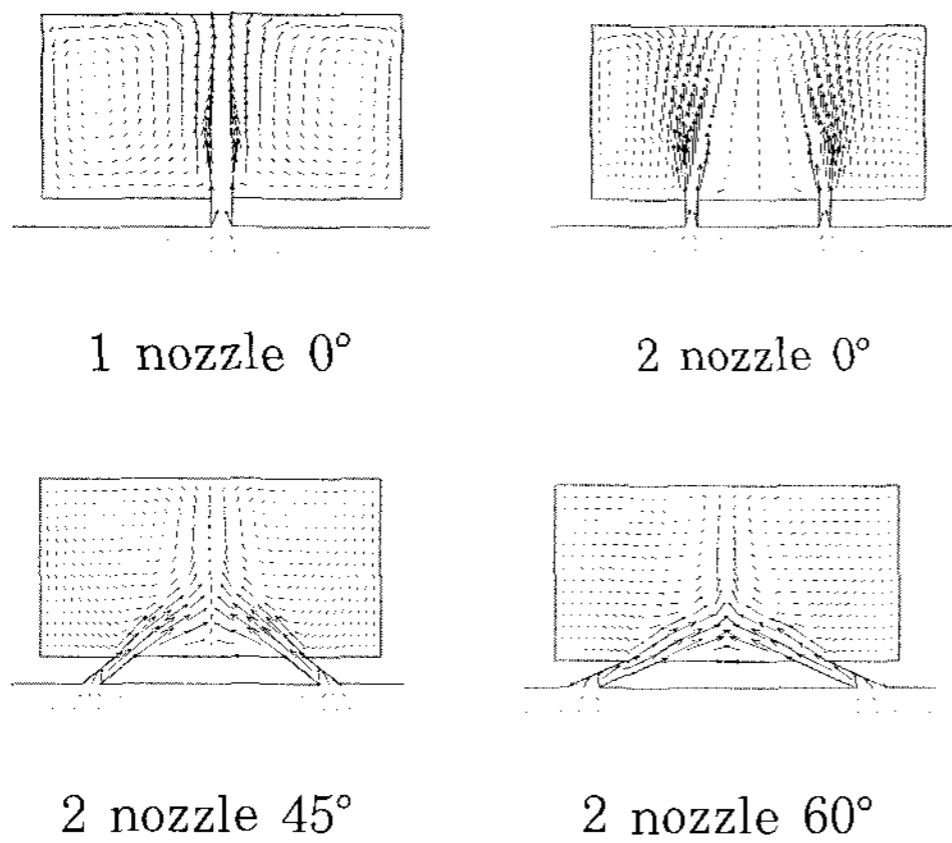


Fig. 10 Vectors into sub-chamber though nozzle

3.2 부연소실에서의 당량비 특성

연결공 각도에 따른 분석결과 고속의 rpm구간에서 가장 많은 신기 유입량을 나타내는 45°인 경우를 대상으로 홀직경에 따른 부연소실의 당량비 변화특성을 분석하였다. Table 4, Table 5, Table 6은 각 rpm에서 연결공 단면적이 변화할 때 화염 전파가 급속히 이루어지는 BTDC 4°에서 TDC사이의 부연소실에서의 당량비를 나타낸다. 각 rpm에서 전체 당량비가 0.62일 때 모든 연결공 단면적에 관계없이 연소 가능한 당량비를 유지하였으며, 부연소실에 많은 양의 연료를 공급하는 0.65의 경우는 3000rpm 이상에서 연결공의 지름이 1.8mm 이하가 되면 부연소실로의 신기유입량이 부족하여 적절한 연소가 이루어지지 못할 것으로 판단된다.

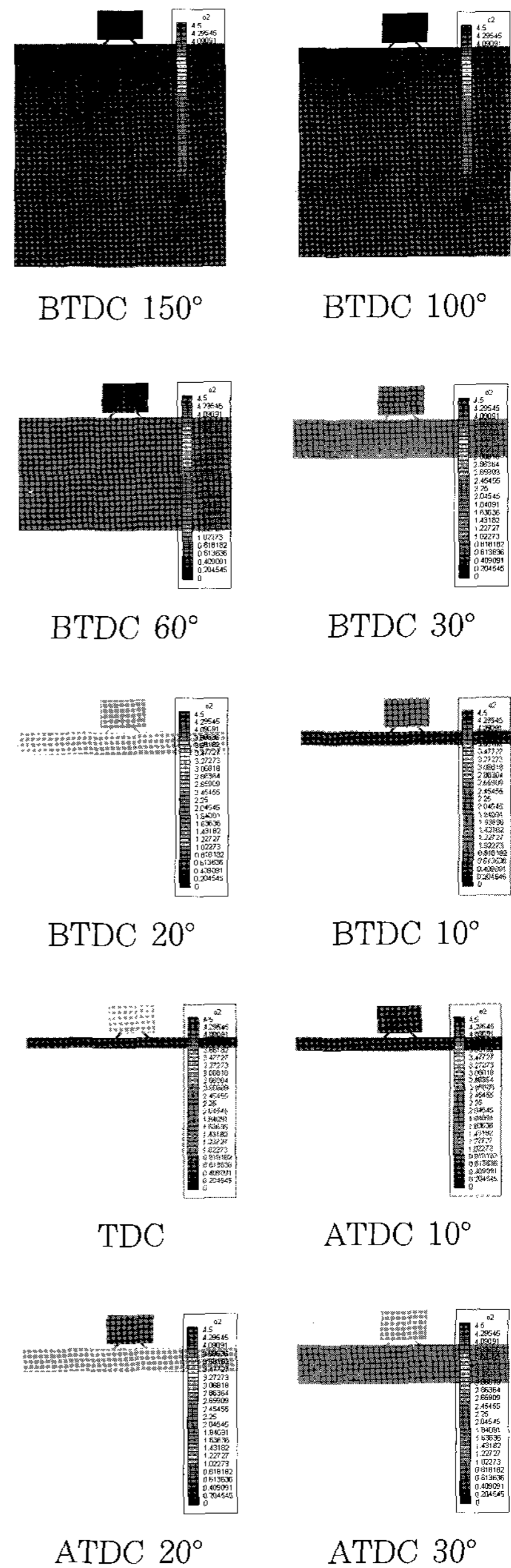


Fig. 11 O₂ density with nozzle 45° at 1000rpm

Fig. 12~Fig. 17은 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. 이는 TDC 근처에서 많은 신기유입이 이루어짐을 나타낸다. Table 4~6은 엔진속도에 따른 부연소실 당량비 변화를 나타낸다. 라디칼 인젝터라 불리는 부연소실은 점화가 가능하면서 농후한 상태가 요구된다. 이러한 조건을 만족하기 위해서 엔진 속도가 1000rpm에서 5000rpm으로 증가함에 따라 연결공 직경도 1.0mm에서 1.8mm로 증가되어야 한다. 그러나 제작된 연소실에서 연결공의 크기를 변경하는 것은 불가능하기 때문에 중간 영역인 3000rpm을 기준으로 하여 1.4mm의 연결공 직경을 선택할 수 있으며, 저 rpm에서는 $\Phi=1.0$ 의 당량비로 운전하고, 3000rpm 이상에서는 농후한 혼합기가 된다.

Table 4 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 5 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 6 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

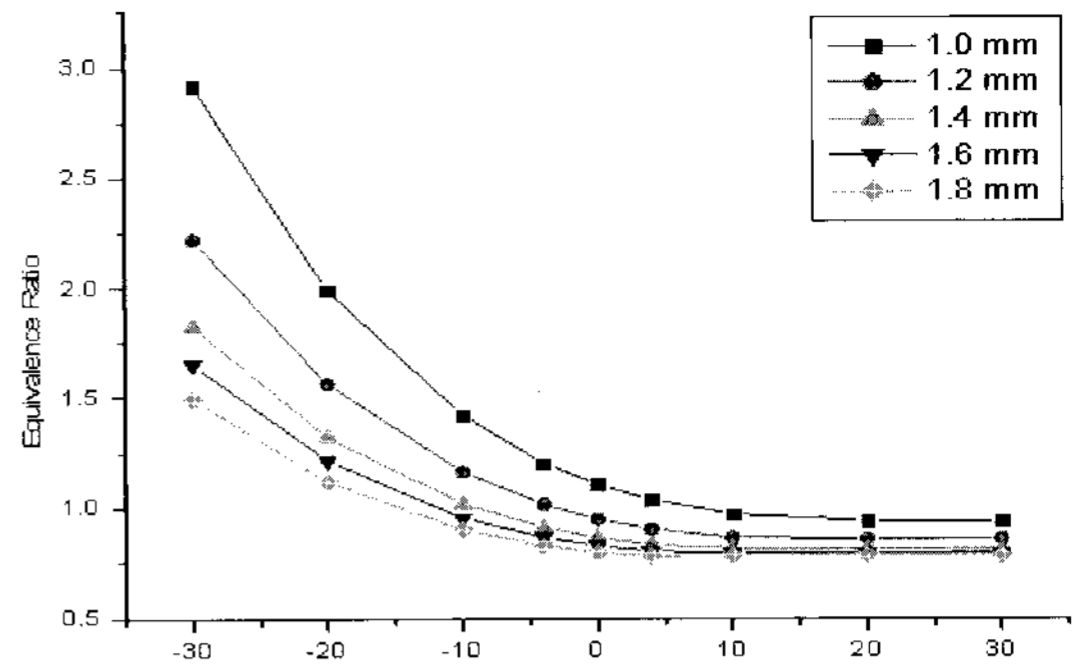


Fig. 12 Total equivalence ratio 0.62 at 1000rpm

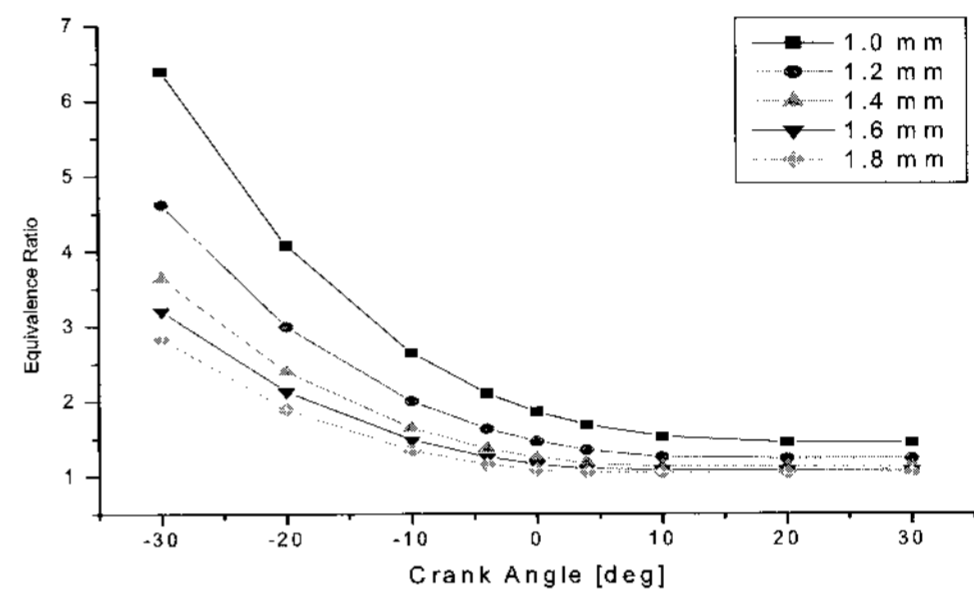


Fig. 13 Total equivalence ratio 0.65 at 1000rpm

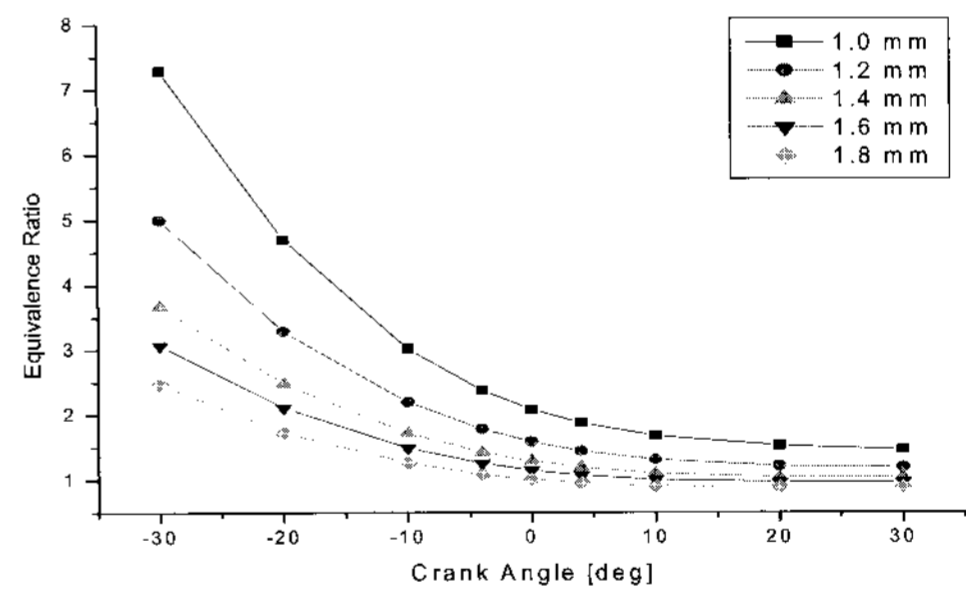


Fig. 14 Total equivalence ratio 0.62 at 3000rpm

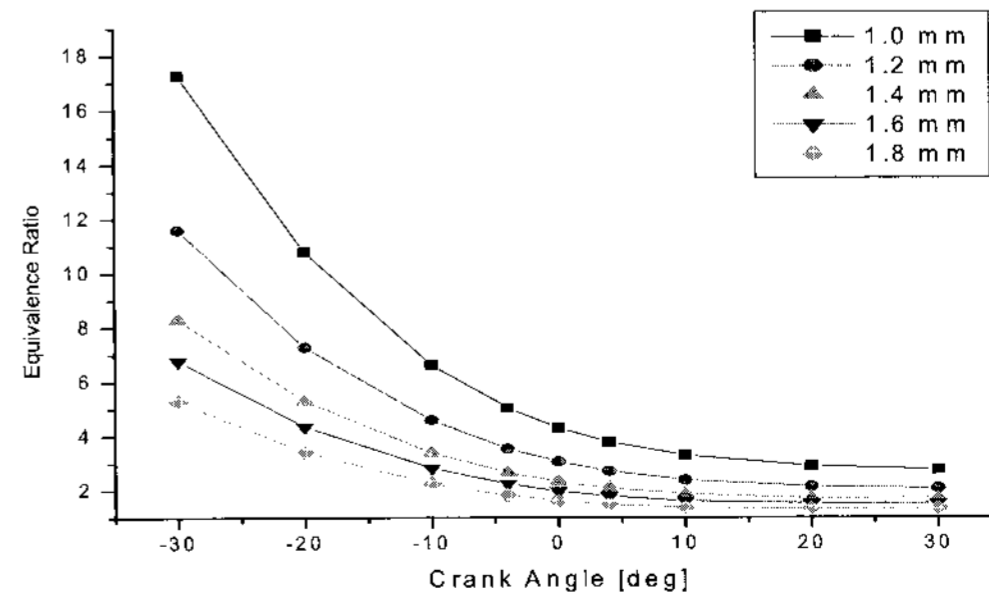


Fig. 15 Total equivalence ratio 0.65 at 3000rpm

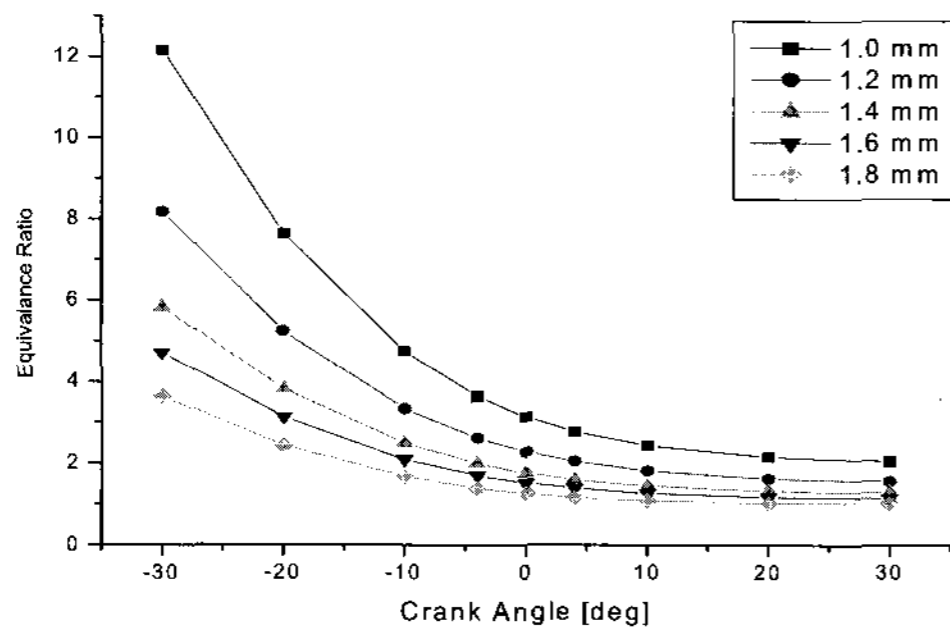


Fig. 16 Total equivalence ratio 0.62 at 5000rpm

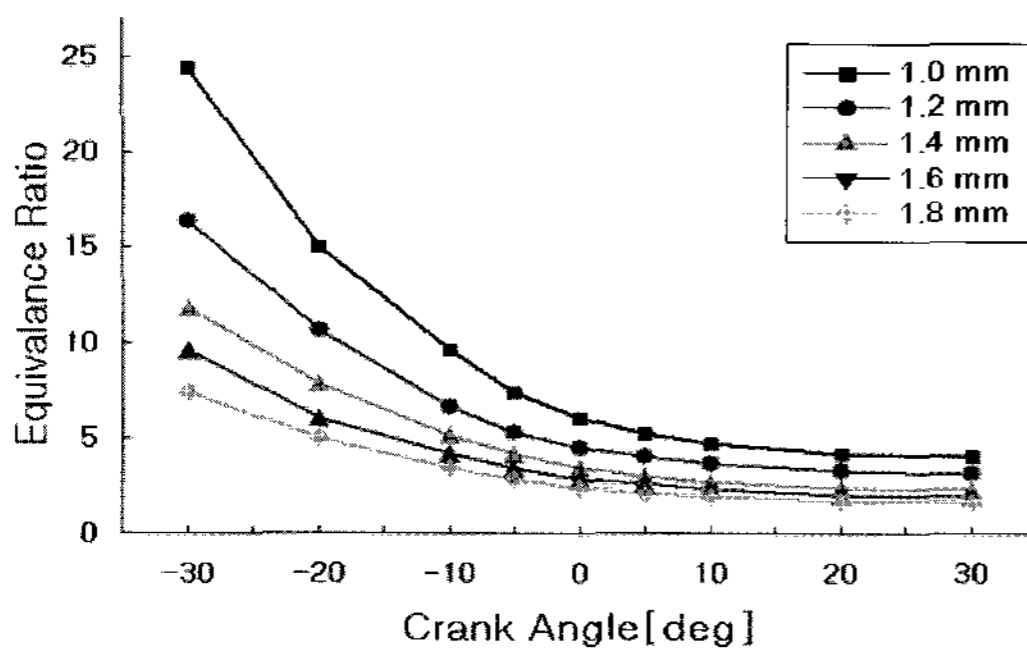


Fig. 17 Total equivalence ratio 0.65 at 5000rpm

4. 결 론

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

(1) 피스톤이 고속으로 움직일수록 신기의 유입량이 감소하여 연소의 어려움이 있을 것으로 예측된다.

(2) 연결공의 각도가 45°일 때에 신기유입량이 엔진속도의 영향을 가장 적게 받으며 속도가 증가하면서 가장 많은 유입량을 나타낸다.

(3) 실린더용적이 668cc인 대상엔진에서 연결공의 직경은 1.4mm, 각도는 45°가 적합한 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] Gaydon, A. G. and Wolfhard, H. G., *Flames, Their Structure, Radiation and*

Temperature(3rd edn), London, Chapman and Hall Press, 1970.

[2] Gaydon, A.G., *Spectroscopy of flames*, Wiley Press, 1957.

[3] Kong, S. and Ricart, L.M. and Reitz, R.D., "In-cylinder Diesel Flame Imaging Compared with Numerical Computations", SAE 950455, 1995.

[4] Nagaoka M., Kawazoe, H. and Naomi N., "Modeling Fuel Spray Impingement on a Hot Wall for Gasoline Engines", SAE 940525, 1994.

[5] Stephenson, P.W. and Rutland, C.J., "Modeling the Effects of Intake Flow Characteristics on Diesel Engine Combustion", SAE 950282, 1995.

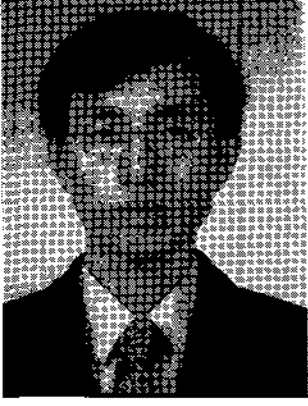
[6] Kawabata, Y. Nakagawa, K. and Shoji, F., "Operating Characteristics of Natural Gas Fueled Homogeneous Charge Compression Ignition", Energy Technology Research Institute, Vol.8, 1998.

[7] 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.

[8] 박세익, 국상훈, 배충식, "고온흡기를 적용한 예혼합 압축착화 디젤 엔진에서 EGR 율에 따른 엔진효율 및 배기가스 변화", 춘계학술대회 논문집 1호, pp. 478-483, 2006.

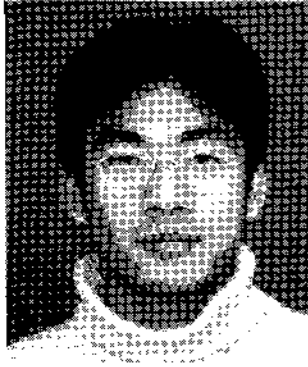
[9] 김형민, 류재덕, 이기형, "예혼합 압축착화 엔진의 혼합기 형성 및 연소 특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집 14권 3호, pp. 1-9, 2006.

저 자 소 개



박권하

1995년 UMIST(맨체스터대학) 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1995-1998년 한국기계연구원 엔진환경연구부 선임연구원, 1998-현재 한국해양대학교 부교수, 내연기관 연구



전재학

2002년 한국해양대학교 기계정보공학부 졸업, 2004년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 현재 Texas A&M University 대학원(박사과정)