

## CFD를 이용한 직접 분사식 스파크 점화 엔진의 실린더 내부 유동 해석

### In-Cylinder Flow Analysis in a Spark-ignited Direct Injection Engine using CFD

김명환\*, 이내현\*, 최규훈\*\*  
Myunghwan Kim, Naehyun Lee, Kyuhoon Choi

#### Abstract

Optimization of in-cylinder flow is regarded as one of the most important factors to realize stable stratified charge combustion in a Spark-ignited Direct Injection(SDI) engine. Therefore, Computational Fluid Dynamic(CFD) simulation technique were used to clarify the characteristics of in-cylinder flow of a SDI engine with top entry intake port. Also, CFD results were compared to experimental results using Laser Doppler Velocimetry(LDV), Particle Image Velocimetry(PIV) and good validations were met. As the results, reverse tumble flow generated during intake process was preserved by configuration of curved piston while base and reverse tumbles were diminished at the end of compression stroke in case of flat top piston. In addition, it will be needed to optimize the fuel mixture distribution based on these results.

주요기술용어 : SDI(직접 분사식 스파크 점화엔진), CFD(전산유체역학), Top entry port(직립 포트), LDV(레이저 도플러 유속측정기), PIV(입자화상 유속측정기)

#### 1. 서 론

최근 적극적인 연비향상 기술로서 주목받고 있는 직접 분사식 스파크 점화 엔진(SDI : Spark-ignited Direct Injection)은 최대 20 % 이상

의 연비향상을 얻을 수 있는 것으로 보고 되고 있으며 연료경제성에 대한 기대효과에 의해 2000년 이후에 유럽시장을 선두로 DI 디젤엔진과 더불어 승용 자동차의 상당부분 탑재가 예상되고 있다(1). 이러한 직접 분사식 엔진을 개발하기 위해서는 공 연비 40 이상의 희박혼합기 상태에서 안정된 연소를 실현하여야 하며 이를 위해서는 흡기계와 연소실 및 분사계의 최적화를 통한 흡입공기 유동 최적화, 연소실 내 연료 거동 최적화, 유동과 연료분무

\* 기아자동차(주)

\*\* 정회원, 기아자동차(주)

의 상대매칭이 필수적이다(2-6).

통상 엔진의 연소최적화를 위한 유동장 개발을 위해서는 정상류 장치나 가시화 엔진을 이용한 유동장 평가에 이어 연소실험을 통해 여러 설계 변수를 결정하고자 많은 노력들을 기울여 왔다. 그러나 연료를 실린더내 직접 분사하는 SDI 엔진의 경우 피스톤 형상 및 포트 형상, 분사계 위치 및 분무특성 등 설계인자가 연소에 미치는 영향이 상대적으로 매우 민감하고 그 관계가 복잡하므로 안정된 초회박 연소실험을 통해 연비향상을 달성하기 위해서는 많은 기초 실험과 함께 CFD(Computational Fluid Dynamics) 이용한 예측 기법의 활용이 특히 요구된다. 이러한 CFD의 활용은 시제품이 필요한 LDV(Laser Doppler Velocimetry)와, Particle Image Velocimetry (PIV)와 같은 실험적 가시화 기법과 달리 컴퓨터 상에서 구현된 3차원 CAD geometry만을 가지고도 어느 정도 결과 예측이 가능하나 해석 초기 단계에서의 CFD 결과의 신뢰성의 향상을 위해서는 실험 기법에 의한 결과와의 검증이 요구된다.

본 논문에서는 흡기밸브 사이에 인젝터가 위치하여 흡기쪽 사이드에서 분사하는 경우, 역탐블 유동을 이용하여 분사된 연료를 효과적으로 모아줌으로써 스파크 플러그 주위에 층상혼합기를 형성시키기 위한 top entry 포트를 대상으로 Ricardo社에서 개발한 VECTIS를 이용하여 CFD 해석을 수행하였다. 이 경우 정상 상태에서 top entry 포트를 통해 형성되는 실린더내 유동형태를 파악하였으며 또한 피스톤과 밸브의 움직임을 고려한 비정상 상태인 경우는 피스톤 형상 변화에 따라 흡입, 압축 과정중의 유동을 해석하였으며 각각의 결과를 LDV와 PIV와 같은 실험적 기법들로부터 얻어진 결과와 비교하고자 하였다.

## 2. 해석 방법 및 조건

해석은 Conventional Tumble Port를 갖는 엔진으로 부터 GDI용으로 개조된 엔진을 대상으로 하였으며 상세 제원은 아래와 같다.

Table 1 Engine Specifications

엔진 형식	DOHC 4Valve 4Cylinder
배기량	1793 cc
보어× 스트로크	81 mm× 87 mm
압축비	9.4
밸브 타이밍	IVO : BTDC 6 ° IVC : ABDC 46 °
최대 밸브 리프트	7.6 mm
밸브 협각	45 °
Inner Seat Dia.	29 mm

### 2.1 해석 방법 및 Geometry Modeling

CATIA에서 설계된 3차원 surface 데이터(밸브 포함)를 VDA 또는 STL 형식으로 변환하여 VECTIS의 전처리기로 입력하였으며 이에 의한 해석 모델은 Fig. 1과 같다.

격자는 전체 Domain을 Rectangular Cell로 Subdivision하여 생성하는 자동 격자 생성 기능을 이용하였으며 Port와 연소실의 형상을 정확히 추종하고 해석의 정확성을 향상시키기 위하여 Valve Gap 부근에 Local Mesh Refinement를 행하였다. 이러한 자동 격자 생성 기능을 이용함으로써 본 해석에 사용된 Curved Top Piston같이 TDC 근처에서 Piston이 연소실 안으로 Protrude 하는 특별한 경우에 대해서도 다른 Code에 비해 쉬운 접근이 가능하였다. Piston과 Valve Motion에 따른 격자의 움직임은 기본적으로 Mesh Distortion으로써 Boundary의 움직임에 따라 변화된 Domain 내에서 Mesh가 Stretch 혹은 Compress 하여 새로운 Mesh가 만들어지는데 Crank Angle의 진행에 따라 Mesh Distortion량이 과다하다고 평가될 경우 중간에 새로운 Mesh를 생성하여 삽입하는 형태로 통상 CA 20 ° 간격으로 밸브와 피스톤의 위치를 이동시킨 후 각각의 CA에 대한 독립적인 격자를 생성하였다. Fig. 2는 CA 180 ° 에서의 격자 구조를 나타내며 비정상 상태 해석에 사용된 격자의 개수는 최대 약 20만개(BDC)이며 최소 8만개(TDC)였다.

## 2.2 정상 상태 해석 조건

경계 조건은 입·출구 영역사이의 압력차 ( $\Delta P$ )를 250 mmAq로 하여 LDV 실험 결과와 비교할 수 있도록 하였으며 정상류 실험과의 Cf, TR 비교를 위하여 450 mmAq 조건을 추가하였다. 밸브 리프트는 각각 최대 리프트인 7.6mm와 8mm로 설정하였다. 또한 포트의 입구에는 균일한 공기유입을 위하여 입구 유효반경의 3배 정도의 길이와 반경을 갖는 실린더 형태의 reservoir를 설치하였다.

## 2.3 비정상 상태 해석 조건

입구 경계 조건은 상온 대기압으로 하여 흡입과 정 중에 일어나는 피스톤의 하강 운동에 의해 공기가 유입되도록 하였으며 운전 조건은 3000 rpm 이었다. 직분식 엔진의 경우, 고부하 영역외에는 모두 충상혼합기 형성에 의한 초회박연소를 목표로 하는 것으로 대부분의 영역이 Unthrottling 조건에서 운전하므로 펌핑 loss를 대폭적으로 줄일 있다. 따라서 입구조건은 피스톤 운동에 따라 Unsteady하지만 부분부하 조건의 일반 엔진에 비해 Unthrottling 운전에 의해 압력의 변동폭도 작을 것으로 생각되어지며, 대기압에 보다 가까우리라 생각되어 대기압으로 설정하였다. 향후의 해석에서는 1-D Flow Code를 이용한 포트 입구에서의 비정상 조건을 획득하여 보다 실제에 가까운 경계조건을 설정할 예정이다. 또한 Time Step은 1/8 CA로 설정하였으며 계산구간은 CA 10° ~ 350° 로써 해석에 소요된 총 계산시간은 SGI OCTANE (R10000/250MHz, 512 MB) 에서 약 50시간 정도였다.

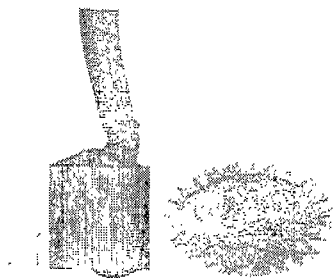


Fig. 1 Configuration of geometry (Intake port and piston)



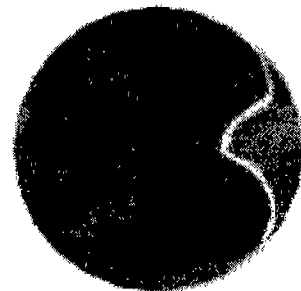
Fig. 2 Mesh structure

## 3. 해석 결과

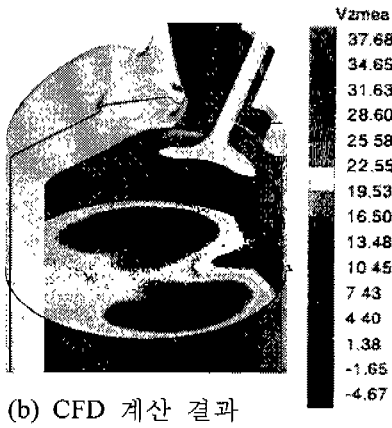
### 3.1 정상 상태 해석

정상상태에서 top entry 포트를 통해 형성되는 흡기 유동 형태를 파악하기 위해 CFD 계산을 수행하였으며 계산결과의 비교를 위해 정상류 장치를 대상으로 밸브 리프트에 따른 유량계수(Cf)와 무차원 텀블비(NR)의 계산과 LDV를 이용하여 유동분포를 파악하였다.

LDV 측정은 실린더 내 수평 단면에서의 normal 속도 분포를 통하여 역텀블 유동의 형태를 파악하는데 목적을 두었으며 결과로써 1/2 stroke 단면에서의 normal 속도 분포를 비교하였다. 이러한 normal 속도 성분은 흡기 밸브를 거쳐 유입되는 역텀블(Fig. 3(b) 우측)과 순텀블(Fig. 3(b) 좌측) 유동의 세기를 나타내는 것으로 LDV 실험 및 CFD 계산 결과가 잘 일치함을 보여준다.



(a) LDV test result



(b) CFD 계산 결과

Fig. 3 Normal velocity profile at 1/2 stroke section

두 경우 모두 상대적으로 밸브 근방에 넓게 역턴블이 분포함을 보이며 실린더 중간에 존재하는 때는 순턴블 유동이 회전한 후 위쪽으로 향하고 있는 성분이다. 이러한 분포 분석 결과는 다른 형상을 가진 흡기 포트에 적용되어 순턴블 유동을 억제하고 역턴블 유동을 최적화하기 위한 흡기 포트 설계 과정에 피드백 되었다.

Table. 2는 정상류 실험 결과와의 유량계수와 무차원 턴블비 비교를 보여준다.

Table 2 실험과의 Cf, NR 비교 (Lift=8mm)

Port Type	Cf		NR	
	실험	CFD	실험	CFD
GDI Port	0.5444	0.5256	-0.3188	-0.2735
Conventional Tumble Port	0.5284	0.4982	0.4751	0.4144

실험 결과와의 상관성을 확인하기 위하여 Base Port인 Conventional Tumble Port에 대해서도 해석을 수행하였다. NR 항목에서 턴블의 방향에 따라 (-)는 역턴블, (+)는 통상적인 순턴블을 나타낸다. 실험결과와 차이는 Cf는 약 4.5%, NR은 약 13% 정도로써 어느정도 일치함을 알 수 있다. 따라서 초기 역턴블 유동장 개발에 있어서 포트 형상 변경에 따른 역턴블 포트 특성을 파악할 수 있으므로

Flowbox에 의한 사양평가의 축소를 통해 시간과 비용을 절감할 수 있었다.

### 3.2 비정상 상태 해석

흡입, 압축 과정을 포함하는 비정상 상태의 실린더 내 유동 해석은 밸브와 피스톤의 움직임을 고려해야 하기 때문에 상당한 어려움이 있어왔다. 더욱이 본 해석에 사용된 피스톤 모델은 기존의 가솔린 엔진용 피스톤이 갖는 flat 형상뿐만 아니라 curved 피스톤이기 때문에 이런 어려움이 가중될 수밖에 없지만 전술한 바와 같이 VECTIS의 Mesh Distortion을 이용한 Boundary Motion을 활용하여 비정상 상태 해석을 수행할 수 있었다. Fig. 4와 Fig. 5는 비정상 해석 결과로 flat 피스톤과 curved 피스톤에 대한 흡입과정과 압축과정에서의 실린더 내 유동을 연소실 중심단면과 흡기밸브 단면을 대상으로 비교한 그림이다.

#### 3.2.1 Flat 피스톤의 유동 현상

Fig.4와 Fig.5의 좌측 그림은 flat 피스톤을 채용시 흡입과정과 압축과정의 유동패턴을 보여주는 것이다. 흡입 초기에 top entry 흡기포트를 따라 순턴블과 역턴블 유동이 동시에 실린더 안으로 유입되는데 순턴블 유동은 헤드 면을 따라 회전하며 역턴블 유동은 실린더 라이너를 따라 유입한다. 흡입 중반까지 순턴블 유동은 소멸되지 않고 계속 유지되고 있으며 실린더 라이너를 타고 피스톤 상면까지 내려온 역턴블 유동은 flat 피스톤 형상에 의해 유지됨이 없이 피스톤 면에 깔리는 경향을 보인다. 이때부터 순턴블 유동은 두개의 vortex를 형성하면서 역턴블 유동과 결합되는 모양이다. 하나는 밸브 아래쪽으로 모멘텀이 작은 순턴블 유동에 의해 형성되며 다른 하나는 피스톤 근처에서 상대적으로 큰 모멘텀을 갖는 순턴블 유동이 피스톤 부근에서 세기가 약해진 역턴블 유동과 합쳐지면서 발생한다. 압축이 시작되고 흡입밸브가 닫히면 흡입 유동의 감소와 피스톤 하강으로 인하여 실린더 내부의 순턴블과 역턴블 모두 세기가 약해지는 경향을 보이며 피스톤 면 부근의 vortex는 어느 정도 유지된

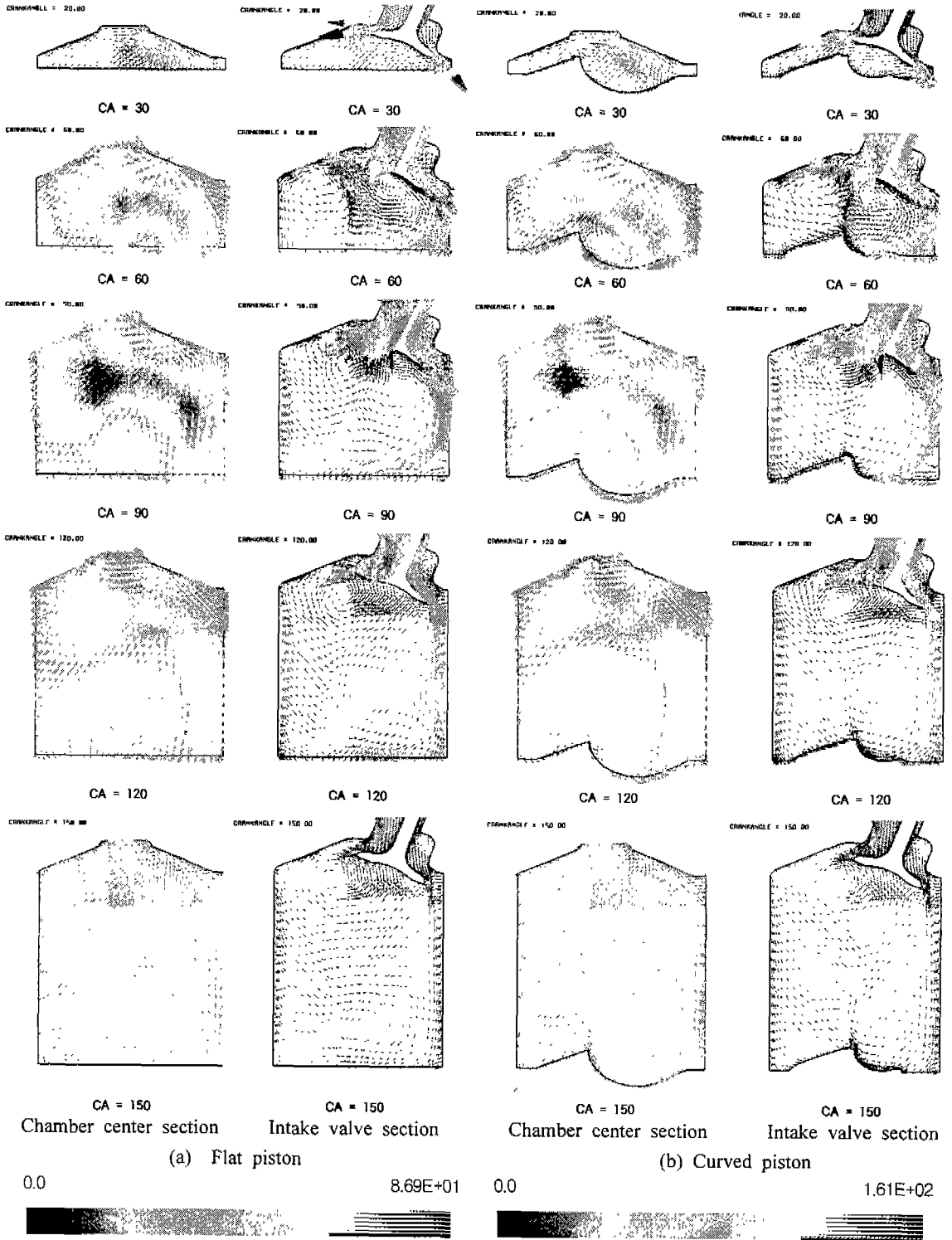


Fig. 4 Comparison of in-cylinder velocity vector fields during intake stroke with flat piston and curved piston

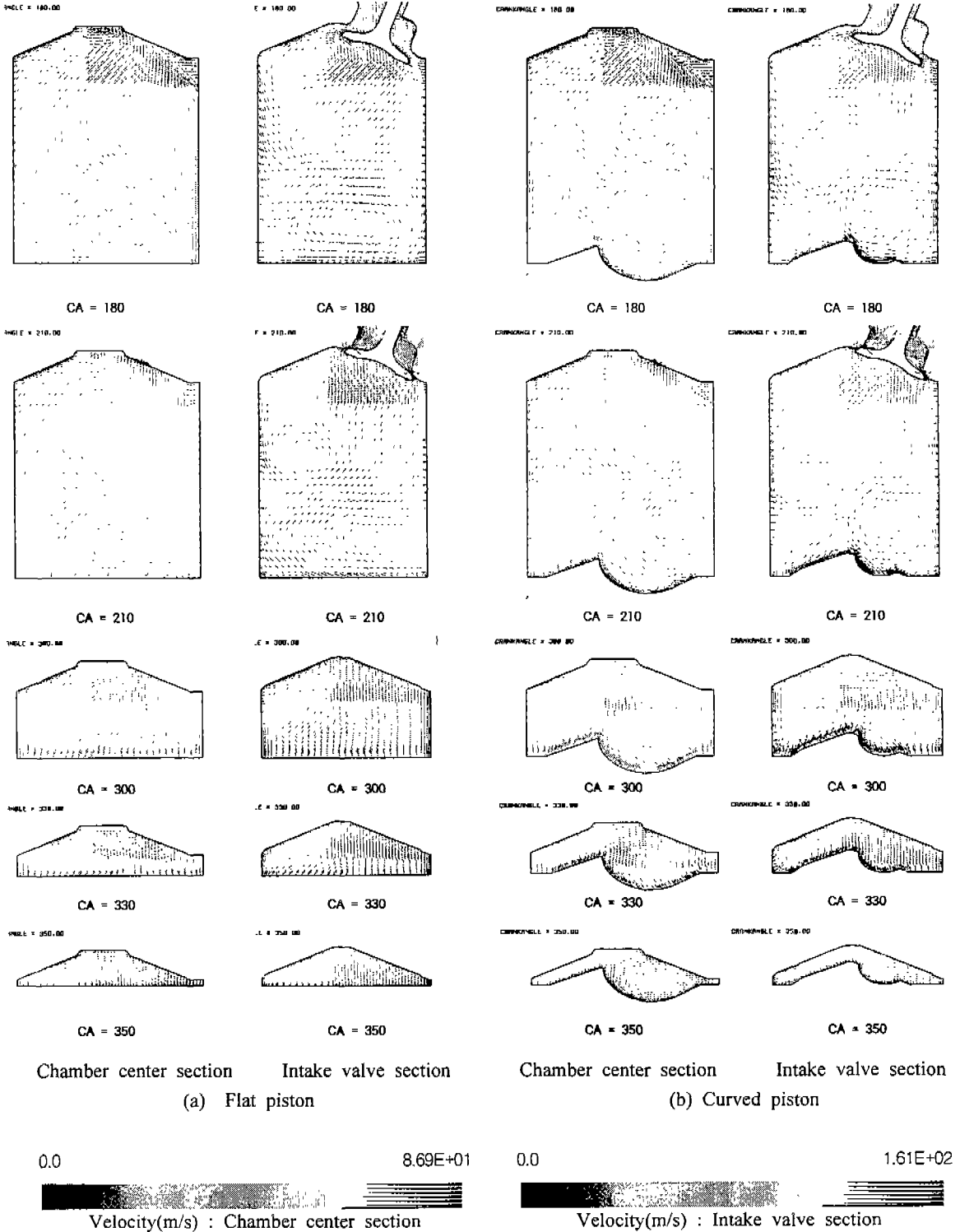


Fig. 5 Comparison of in-cylinder velocity vector fields during compression stroke with flat piston and curved piston

다. 압축 말기에 이르면 기존의 유동 형태는 사라지게 되며 실린더 좌측에서의 밀려나오는 스퀴시 유동에 의해 시계 방향으로의 vortex가 형성된다.

이상과 같이 flat 형상을 가진 피스톤의 경우, top entry 포트에 의해 형성되는 역턴블 유동이 압축후기까지 전혀 보존되지 않음으로 볼 때 역턴블 유동을 주 유동으로 이용하여 흡기쪽에서 분사된 연료를 스파크 플러그 주변에 층상화하는데 적합하지 않음을 알 수 있다.

### 3.2.2 Curved 피스톤의 유동 현상

Fig.4와 Fig.5의 우측 그림은 curved 피스톤을 채용시 흡입 및 압축과정의 유동패턴을 보여주는 것이다. 흡입 초기에 flat 경우와는 다르게 역턴블 유동은 피스톤 면을 따라 회전하게 되며 피스톤에 의해 치켜올려진 역턴블 성분은 순턴블 유동의 실린더 내 확산을 방해하며 vortex를 형성한다. 피스톤이 계속 하강하며 흡입 과정이 진행되면 flat 피스톤과는 달리 역턴블 유동이 약해지는 것이 아니고 피스톤 bowl이 역턴블 유동을 치켜 올려주기 때문에 계속 유지된다. 또한 실린더 중심 단면에서 보듯이 bowl에 의해 치켜올려진 역턴블 유동은 순턴블 유동의 실린더 내 확산을 방해하며 주성분과 합쳐지며 vortex를 형성한다. 이 경우에도 실린더 내부에는 두개의 vortex가 형성되며 밸브 부근의 vortex는 flat 피스톤의 경우와 같은 모양이지만 피스톤 부근의 vortex는 역턴블 유동의 상승 성분에 의한 것임을 알 수 있다. 피스톤이 상승하는 압축 과정이 진행되면 피스톤 상승에 의한 영향으로 내부 유동의 상승 성분이 강해지므로 실린더 상부의 vortex는 세기가 약해지게 되고 피스톤 부근의 vortex 역시 세기는 약해지지만 피스톤의 bowl 형상에 의해 그 특성은 유지된다. 결국 압축 말기의 유동 형태는 Fig.6에 보여주는 것과 같이 flat과 curved 피스톤에 따라 큰 차이를 보인다. flat 피스톤일 경우의 압축 말기 유동은 특성이 없이 소멸되지만 curved 피스톤의 경우는 피스톤 bowl 면을 회전하는 역턴블에 의한 유동 성분이 존재함을 알 수 있다.

전술한바와 같이 curved 형상을 갖는 피스톤은 흡입 및 압축 과정 중에서 역턴블 유동을 발달, 유지시키는 기능을 하는 것을 확인하였다. 본 해석결과를 검토할 때 순턴블 유동의 세기가 무시할 수 없을 정도이기 때문에 이 순턴블을 억제하고 역턴블 유동의 영역의 확대를 위하여는 피스톤 top의 형상 즉, bowl의 중심을 배기 쪽으로 더 이동하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다. 그러나 이런 검토는 층상혼합기 형성을 위해 압축후기에 분사하는 경우, 분사시기에 따라 피스톤 충돌분무의 거동 및 경로에 영향을 줄 수 있으므로 실린더 내 유동과 fuel spray에 관한 검토가 동시에 이루어져야 할 것이다(7-8).

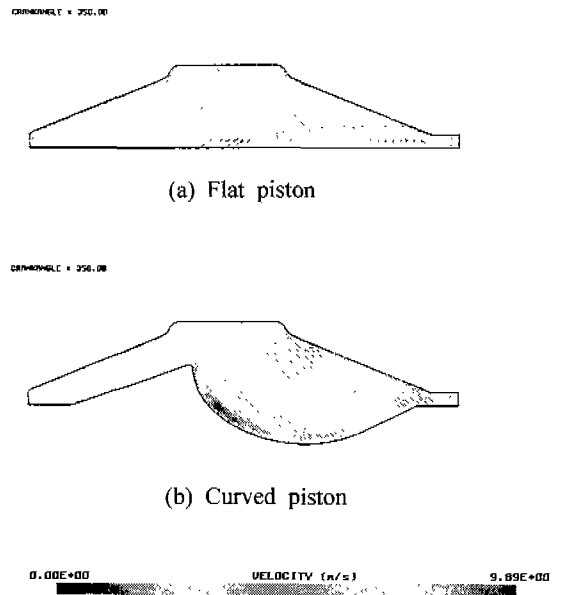


Fig. 6 Comparison of velocity vector field on flat and curved piston at compression stroke BTDC 10 °

### 3.3 PIV 측정 결과와의 비교

피스톤 형상 변화에 대한 실린더내 유동을 비교 하기 하기 위해 가시화 단기통 엔진을 대상으로 PIV 실험을 수행하였다(9).

화상 이미지로부터 2차원 공간 속도분포의 측정이 가능한 PIV (Particle Image Velocimetry)는

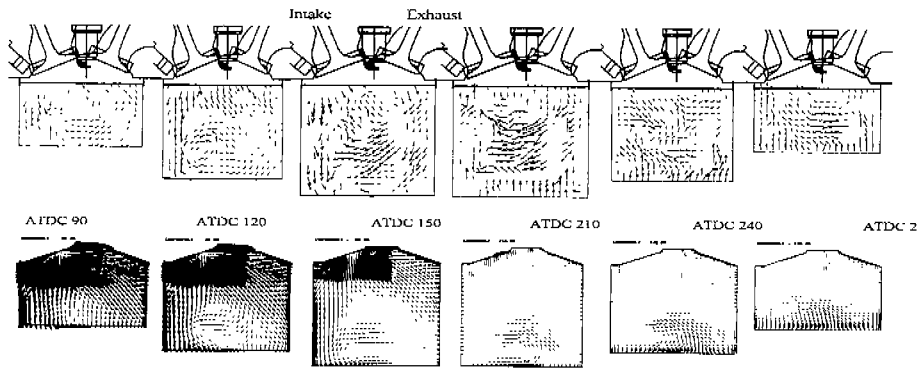


Fig. 7 Comparison of PIV and CFD results on in-cylinder flow with flat top piston

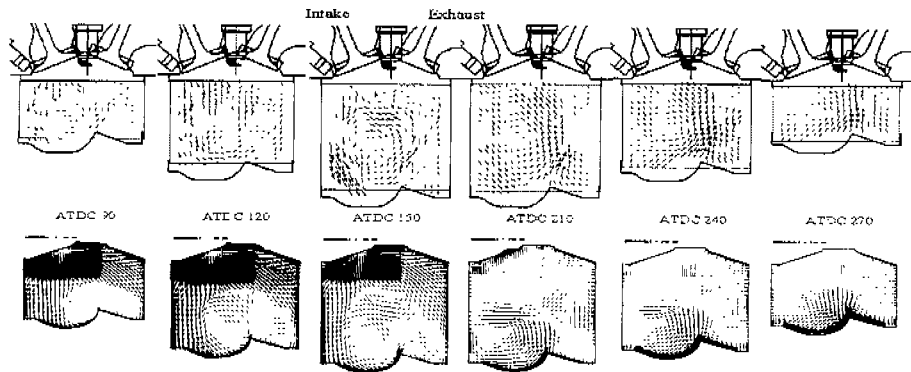


Fig. 8 Comparison of PIV and CFD results on in-cylinder flow with curved top piston

PTV (Particle Tracking Velocimetry)와 달리 고밀도의 입자 영상들이 필요하므로, 입자의 궤적 움직임이 측정되어 입자의 정확한 위치를 찾지 못하는 것을 방지하기 위해 10 ns의 매우 짧은 펄스 폭을 갖는 Nd-YAG 레이저 평면 빔을 이용하여 유동장 속도에 맞게 일정 시간간격을 두고 연속으로 두번 조사하였다. 화상취득은 입자의 쌍 및 유동방향의 모호성을 해소하기 위한 frame straddling 기법을 이용하여 CCD로부터 2 프레임 이미지를 취득하였으며, 얻어진 고밀도의 입자 영상들로부터 개별 입자들의 영상찍을 찾아 상호상관(Cross-Correlation) 처리하여 속도를 구하는 통계 기법을 이용하였다(10).

또한 화상의 correlation 처리에 충분한 고밀도의 입자영상을 얻기 위해서 0.3-0.7 $\mu\text{m}$ 의 boron nitride를 산란 입자로 사용하였다. 그밖에 유동장의 속

도와 영상찍의 변위 등을 고려한 조사구간의 선정, 실린더 라이너에 의해 생기는 화상 왜곡의 보정, 측정속도의 신뢰성 및 대표성을 위해 cycle 변동을 고려 다수사이클에 대한 속도의 ensemble 평균 등을 수행하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 flat 피스톤과 curved 피스톤을 채용시 연소실 중심단면에서의 PIV에 의한 턴블 유동 구조를 가시화한 결과와 CFD 결과를 비교한 그림이다. PIV에 의한 유동측정 결과를 보면 flat 피스톤을 채용한 경우는 흡기밸브 통과시 실린더 라이너를 타고 형성되는 역턴블 유동이 흡입과 정 말기에 피스톤 상면에 의해 부딪치면서 발달이 둔화되고 배기쪽으로부터 생성되어 실린더 중심을 가로지르는 순턴블 유동에 의해 충돌되어 깨짐을 알 수 있다. 그러나 CFD 계산결과에 비해 흡입말



기 및 압축초기 역턴블 유동에 비해 순턴블 유동성분의 세기가 더 강하게 나타나나 압축후기로 진행됨에 따라 bulk 유동구조는 CFD 계산 결과와 잘 일치함을 보여준다. 한편 curved 피스톤의 경우는 CFD 계산결과에 비해 상대적으로 순턴블 유동의 발달이 작고 역턴블 유동이 실린더 내 유동을 좀더 크게 지배하고 있으나 피스톤 bowl에 의해 압축과정 후기까지 역턴블 유동의 보존되는 것으로 보아 CFD 계산결과와 대체로 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

SDI 엔진의 최적유동장 개발을 위해 CFD를 적용하여 top entry 포트에 의해 형성되는 정상상태 및 비정상상태의 실린더 내부 유동해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Top entry 흡기포트에 의해 흡기쪽 벽면의 타고 내려오는 역턴블 유동과 헤드 면을 따라 회전하여 2개의 vortex를 갖는 순턴블 유동의구조 및 발달을 확인하였으며, 피스톤 형상에 따라 흡입 중반 이후의 턴블 유동의 구조 및 보존이 크게 달라짐을 알 수 있었다. 또한 LDV 및 PIV 실험결과와의 비교를 통해 정량적인 속도나 일부 유동구조는 다소 상이하나 정성적인 bulk 유동 구조에 있어서 CFD 계산 결과와 일치함을 확인 할 수 있었다.

2) 따라서 초회박 층상혼합기 연소를 위해서는 압축후기에 분사되는 연료 분무를 효과적으로 스파크 플러그 주변에 모아 주어야 하므로 이를 위해서는 역턴블을 갖는 흡기포트에 의한 유동소질 뿐만 아니라 bowl 구조를 갖는 피스톤 형상에 의해 역턴블 유동을 압축 과정까지 유지, 발달시켜야 함을 알 수 있었다. 그리고 이 경우 피스톤 형상은 실린더 내 유동 분포와 fuel spray 거동을 고려하여 적절한 검토가 이루어져야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. Leopold Mikulic, "Diesel 2000-Future Trends and Technologies for Passenger Car Diesel

Engines", 97 AVL Conference proceeding, 1997.

2. M. Wirth, W. F. Ploock, G. K. Fraod, "Gasoline DI Engine:The Complete System Approach by Interaction of Advanced Development Tools", SAE Paper No.980492, 1998.

3. Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi and H. Ando, "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE Paper No.970541, 1997.

4. F. Zhao, M. Lai, D. Harrington, A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark Ignited Direct Injection Gasoline Engines, SAE Paper 970627, 1997.

5. Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi, H. Ando, "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE Paper 970541, 1997.

6. J. Harada, T. Tomita, H. Mizuno, Z. Mashiki, Y. Ito, "Development of Direct Injection Gasoline Engine", SAE Paper 970540, 1997.

7. Joh Miok, Kang Y. Huh, S. H. Noh and K. H. Choi, "Numerical Prediction of Charge Distribution in a Lean Burn Direct-Injection Spark Ignition Engine", SAE Paper No.970626, 1997.

8. T. H. Lake, S. M. Sapsford, J. Stokes and N. S. Jackson, "Simulation and Development Experience of a Stratified Charge Gasoline Direct Injection Engine", SAE Paper No. 962014, 1996.

9. J. H. Park, N. H. Lee, K. H. Choi, "Analysis of In-Cylinder Flow Fields Using Particle Image Velocimetry", KSAE Paper 9838028, 1998.

10. R. Adrian, Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, Annu. Rev. Fluid Mech. 23, pp.261-304, 1991.