

(논문) SAE NO. 953783

## 소형 가솔린 가시화엔진의 내부유동 특성연구

### Characterization of In-Cylinder Flow of a Small Gasoline Optical Engine

김 중 선,\* 정 경 석,\*\* 정 인 석,\*\*\* 조 경 국\*\*\*  
J. S. Kim, K. S. Jeong, I. S. Jeung, K. K. Cho

#### ABSTRACT

A commercial DOHC four valve engine was modified to make a single-cylinder optical model engine with replaceable head. Three kinds of head were used to generate swirl, tumble, and combined swirl/tumble motion. Schlieren visualization technique was applied to characterize the in-cylinder flow qualitatively. Particle Image velocimetry has been developed and applied for the quantitative flow measurements.

Axial and tangential flow motion inside the cylinder has been characterized. The swirl/tumble port shows beneficial results in terms of turbulence generation for the initial flame propagation and mean swirl motion for the overall flame propagation

주요기술용어 : In-cylinder Flow(실린더 내부 유동), Optical Engine(광학 측정용 엔진), Schlieren Visualization(쉴리엔 가시화), Particle Image Velocimetry(입자 영상 유동장 계측)

#### 1. 서 론

자동차용 내연기관은 지난 1세기 동안 기술·성능면에서 많은 진전을 보여왔다. 그러나 최근 들어 대기오염과 지구온난화 등이 사회문제화되면서 자동차로부터 배출되는 유해물질의 저감과 기관의 성능향상을 도모하기 위해 엔진 내부유동

을 이해하고자 하는 많은 연구들이 수행되고 있다.

그 동안의 많은 연구들을 통해 실린더 내부유동은 전기점화(SI)엔진에서 점화 및 연소과정, 압축착화(CI)엔진에서 연료와 공기의 혼합 및 연소과정과 실린더 벽면으로의 열전달에 중요한 역할을 한다는 사실이 밝혀졌다.<sup>1),2)</sup> 또한 엔진 성능에 영향을 미치는 새로 유입된 공기와 잔류 가스의 혼합, NOx 저감을 위해 사용되는 배기가스 재순환(EGR)시의 혼합 등과 같은 유동 메커니즘이 중요한 관심사가 되고 있다<sup>3)</sup>. 특히 희박

\* 서울대학교 항공우주공학과 대학원

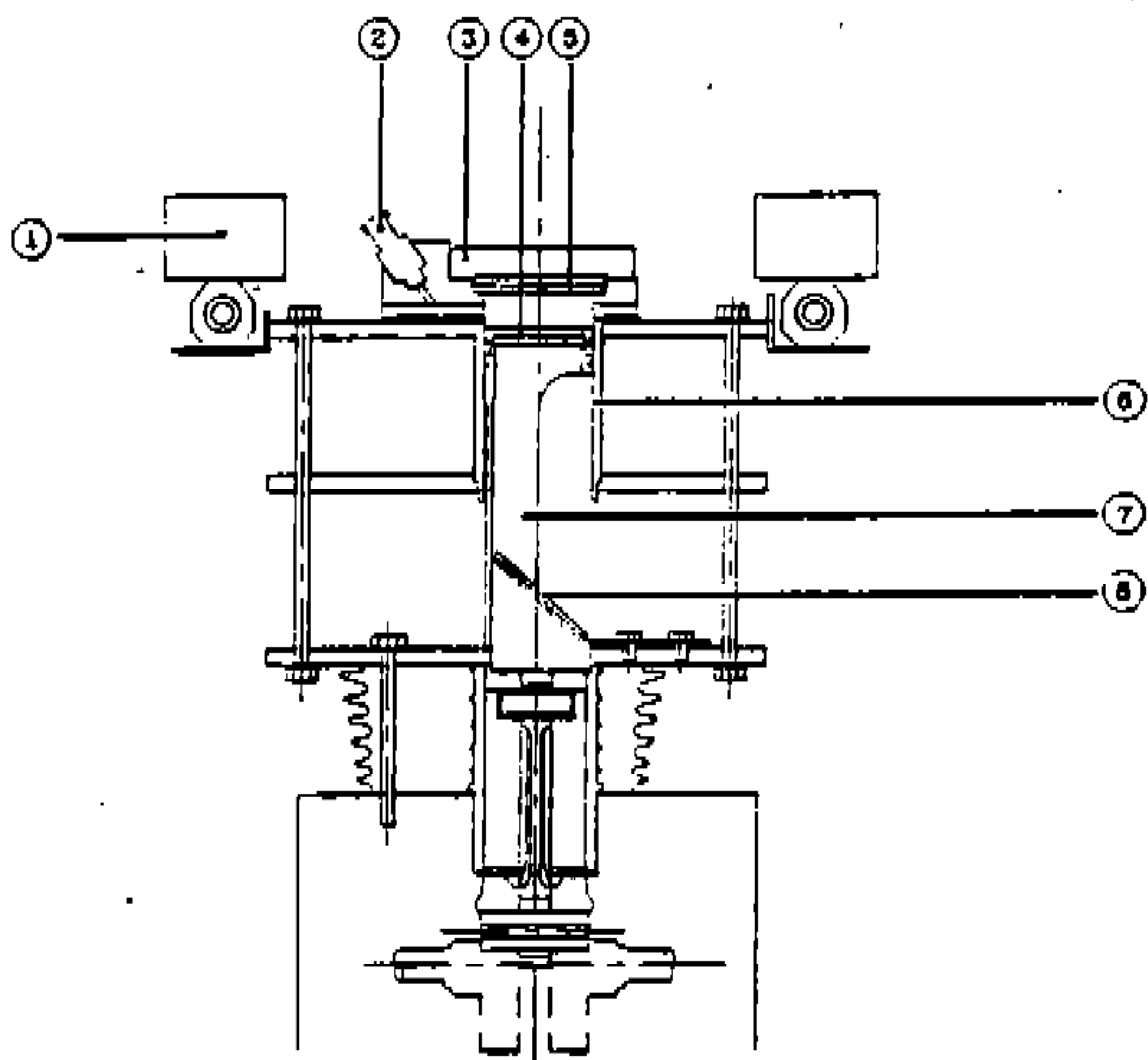
\*\* 정회원, 한국기술교육대학교 동력기계공학과

\*\*\* 정회원, 서울대학교 항공우주공학과

연소엔진의 경우, 흡기계에 의해 유도되는 실린더 내부유동이 궁극적으로 압축말기의 실린더내 혼합기 분포를 결정하는 중요한 인자로 작용하므로 흡기유동이 연소에 미치는 영향에 대한 정확한 이해는 희박연소엔진의 흡기계 설계에 있어서 매우 중요하다.<sup>4),5)</sup>

이러한 이유들 때문에 실린더 내부유동을 측정하고자 하는 많은 노력들이 기울여지고 있지만 엔진내부유동에는 매우 복잡한 물리적·화학적 현상이 복합되어 나타나기 때문에 그 특성의 규명에는 어려움이 많다. 특히 상용엔진을 대상으로 엔진 내부유동을 파악하고자 할 때에는 각종 주변장치로 인해 실린더 내부에 대한 광학적인 접근이 어려웠다.<sup>6),7)</sup>

따라서 본 연구에서는 실물엔진의 연소실 형상을 가능한 한 유지하며 연소실내의 유동을 가시화할 수 있는 엔진을 제작하였으며, 쉘리렌법을 이용하여 가시화하고 Particle Image Velocimetry (PIV)를 개발하여 3종류의 특징적인 흡기유동을 유도하도록 고안된 포트가 있는 헤드에 의해 생성되는 실린더 내부유동의 특성을 조사하고자 한다.



- ① 솔레노이드 밸브
- ② Injector
- ③ 실린더헤드
- ④ 피스톤 창
- ⑤ 헤드장착 반사거울
- ⑥ 석영실린더
- ⑦ 피스톤
- ⑧ 하단 반사거울

Fig.1 Optical Engine

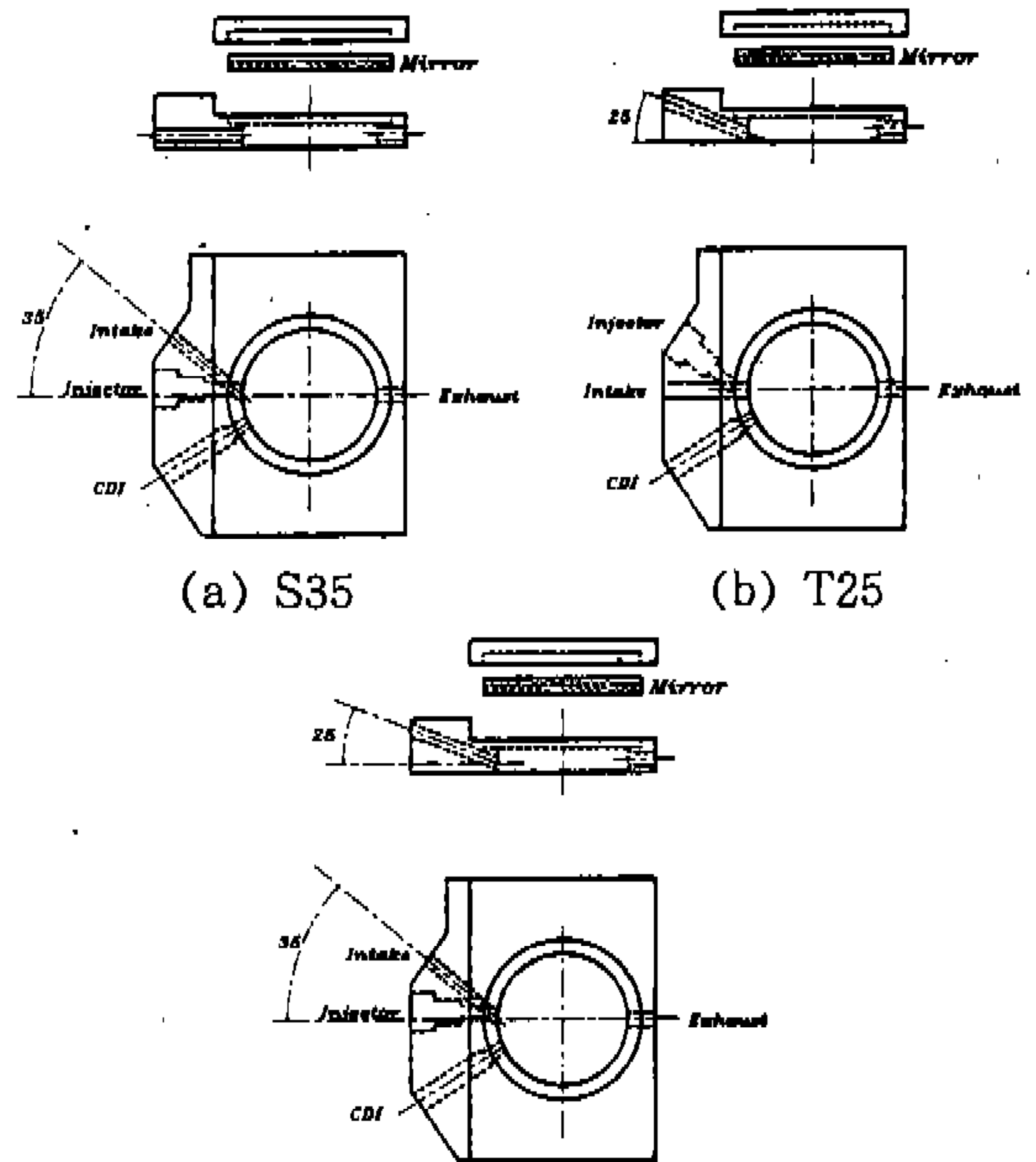
2. 실험장치

본 연구에서는 엔진 내부유동의 관측하고 레이저를 이용한 계측이 가능하도록 소형 단기통 DOHC 4밸브 가솔린엔진을 개조하여 가시화엔진을 제작하였다. 엔진의 크랭크 케이스 부분은 기존의 상용엔진 부분을 이용하였으나 실린더와 피스톤, 실린더헤드 부분은 실험상의 요구조건에 따라 재설계되었다. 그림 1은 완성된 가시화엔진의 개략도이다.

실린더로는 측면을 통한 광학적 접근이 가능하도록 두께 5mm의 투명한 석영관을 사용하였다.

Table 1 Optical Engine Specification

보어	56.5mm
행정거리	50.5mm
압축비	6.0
행정체적	150cc
흡기체적	25cc



(c) S35/T25

Fig.2 Intake Ports Used

실린더헤드는 쉐리렌법에 의한 가시화를 위해 거울의 설치가 용이하도록 디스크 타입으로 하였다. 포트에 의해 유도된 유동이 실린더 내부유동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 각각 스윙, 텀블, 스윙/텀블을 유도할 것으로 예상되는 3종류의 실린더헤드를 제작하여 교환하며 사용하였다.

그림 2는 실린더헤드의 포트형상을 보인 것이다. 스윙헤드의 포트(S35)는 실린더의 법선에 대해 원주방향으로 35°의 각을 이루고, 텀블포트(T25)는 실린더의 법선에 대하여 실린더헤드면으로부터 상방향으로 25° 되도록 하였다. 스윙/텀블포트(S35/T25)는 원주방향으로 35°, 축방향으로 25°를 이루도록 하여 스윙헤드와 텀블헤드의 성질을 동시에 갖도록 하였다.

원주방향 유동을 가시화하기 위해 피스톤 헤드면에 석영창을 설치하였으며 이를 통해 실린더단면의 74% 영역의 관측이 가능하였다. 또한 측면이 절개된 원통형 연장피스톤을 기존의 피스톤과 결합하고 절개된 곳에 하단 반사거울을 설치하여 입사광과 반사광이 지날 수 있도록 하였다.

가시화엔진에서 기밀의 유지를 위해 피스톤링을 사용할 때 상용엔진과 같은 방식으로 오일을 사용하여 윤활을 하게 되면, 실린더 내부에 형성되는 유막으로 인해 광학적 방법을 이용한 유동의 측정시 왜곡이 발생하게 된다. 또, 상용엔진용 금속제 피스톤 링을 이용하면서 적절한 윤활이 이루어지지 않으면 실린더 내벽면을 손상시켜 유동의 가시화가 어려워진다. 따라서, 본 연구에서

는 테프론 60%와 탄소 40%를 합성하여 내열성, 강도 및 윤활성능을 높인 피스톤링 2개, 100% 테프론링 1개, 금속링 1개 등 세종류 4개의 피스톤링을 사용하여, 테프론-탄소 합성링과 순수 테프론링은 혼합기의 밀봉과 윤활의 역할을 하고, 금속링은 피스톤의 운동성을 높이며 피스톤의 중심을 유지시켜 주는 역할을 하도록 하였다.

엔진의 제어는 그림 3과 같이 엔코더에 의해 검출되는 크랭크각 신호를 입력으로 하여 PC에서 적정시기에 제어명령을 출력하는 방법으로 이루어진다.

### 3. 실험방법

실린더 내부유동을 쉐리렌법에 의해 가시화하여 고속도 카메라를 이용하여 기록하는 방법으로 원주방향 유동의 정성적 특성을 파악하고 Particle Image Velocimetry(PIV)를 이용하여 원주방향과 축방향 유동의 정량화를 시도하였다.

#### 3.1 쉐리렌법에 의한 유동의 가시화

그림 4는 쉐리렌 시스템의 개략도이다. 광원으로부터 나온 빛의 1/2은 Beam Splitter를 통과하여 렌즈쪽으로 보내지고 나머지 입사광량의 1/2은 고속도 카메라의 반대방향으로 반사되어 실험에 이용되지 않는다. Beam Splitter를 통과한 빛은 점광원으로부터 초점거리에 위치한 쉐리

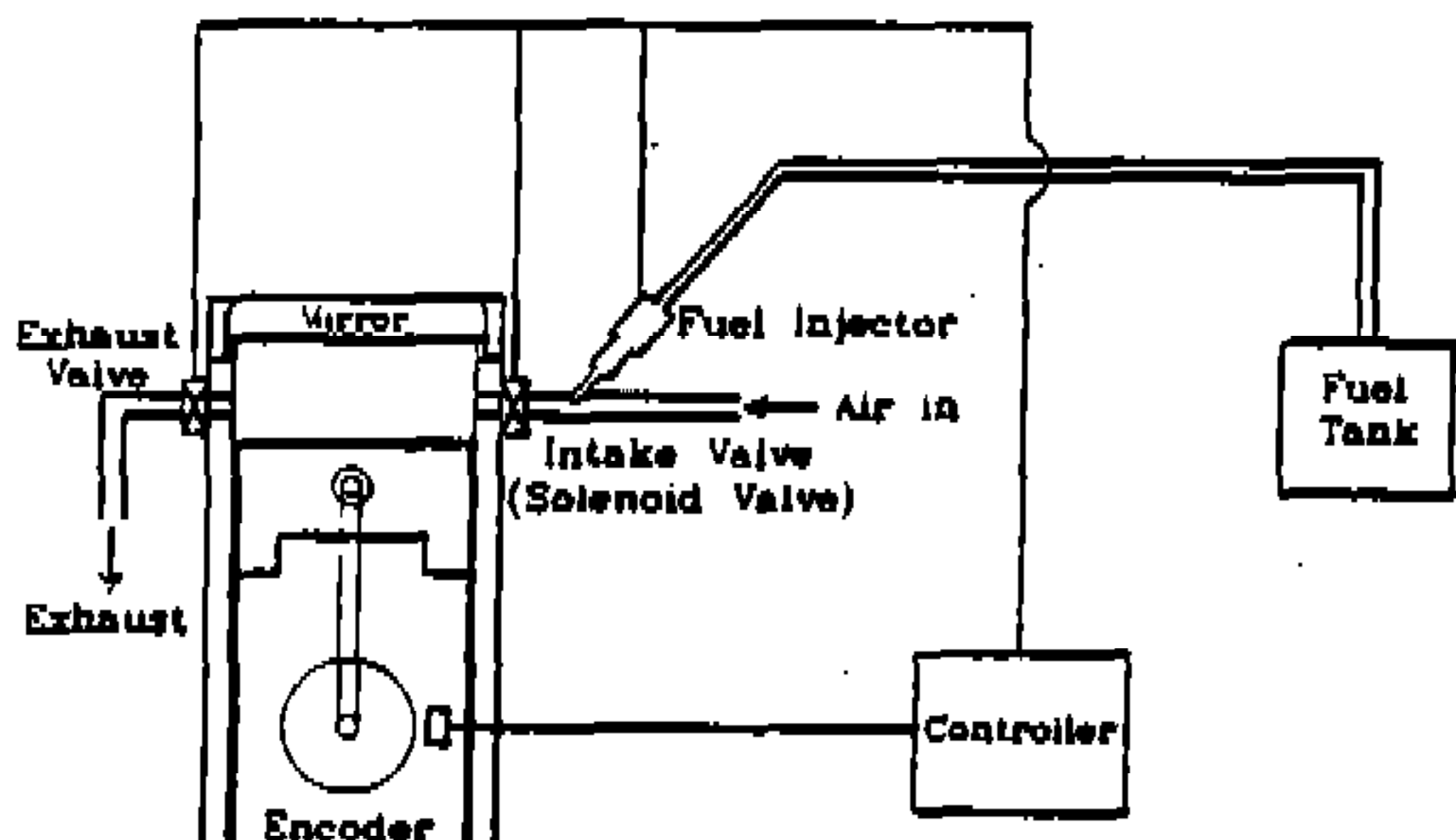


Fig.3 Engine Control System

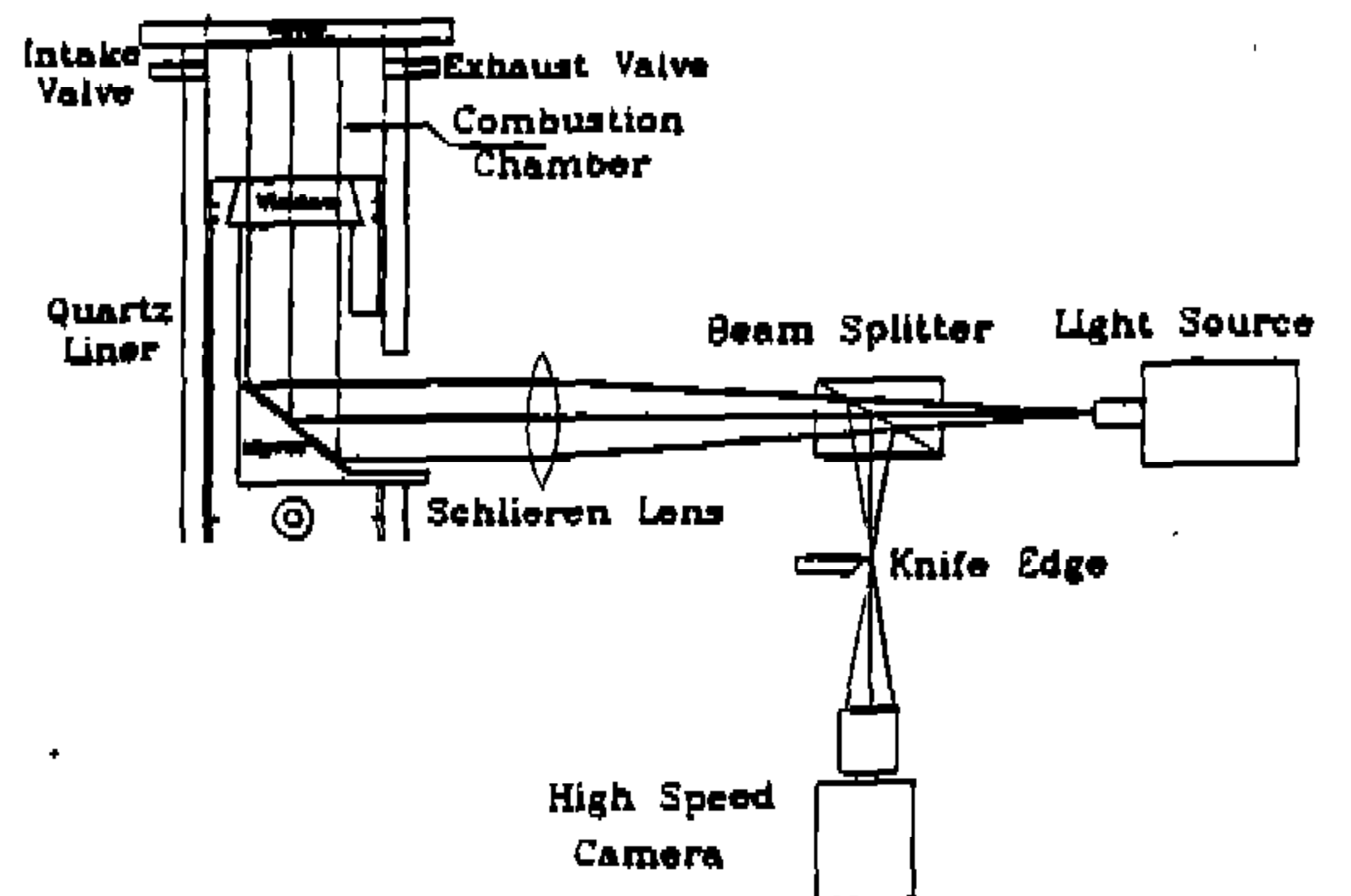


Fig.4 Schlieren System



렌즈에 의해 평행광으로 되고 하단거울에 의해 반사되어 실린더 내의 연료-공기 혼합유동을 지나는 동안 밀도차에 의한 굴절을 겪게 된다. 이 빛은 다시 실린더헤드에 장착된 상단거울에서 반사되고 하단거울, 렌즈, Beam Splitter를 거쳐 고속카메라 내의 필름(EI 80)을 감광한다.

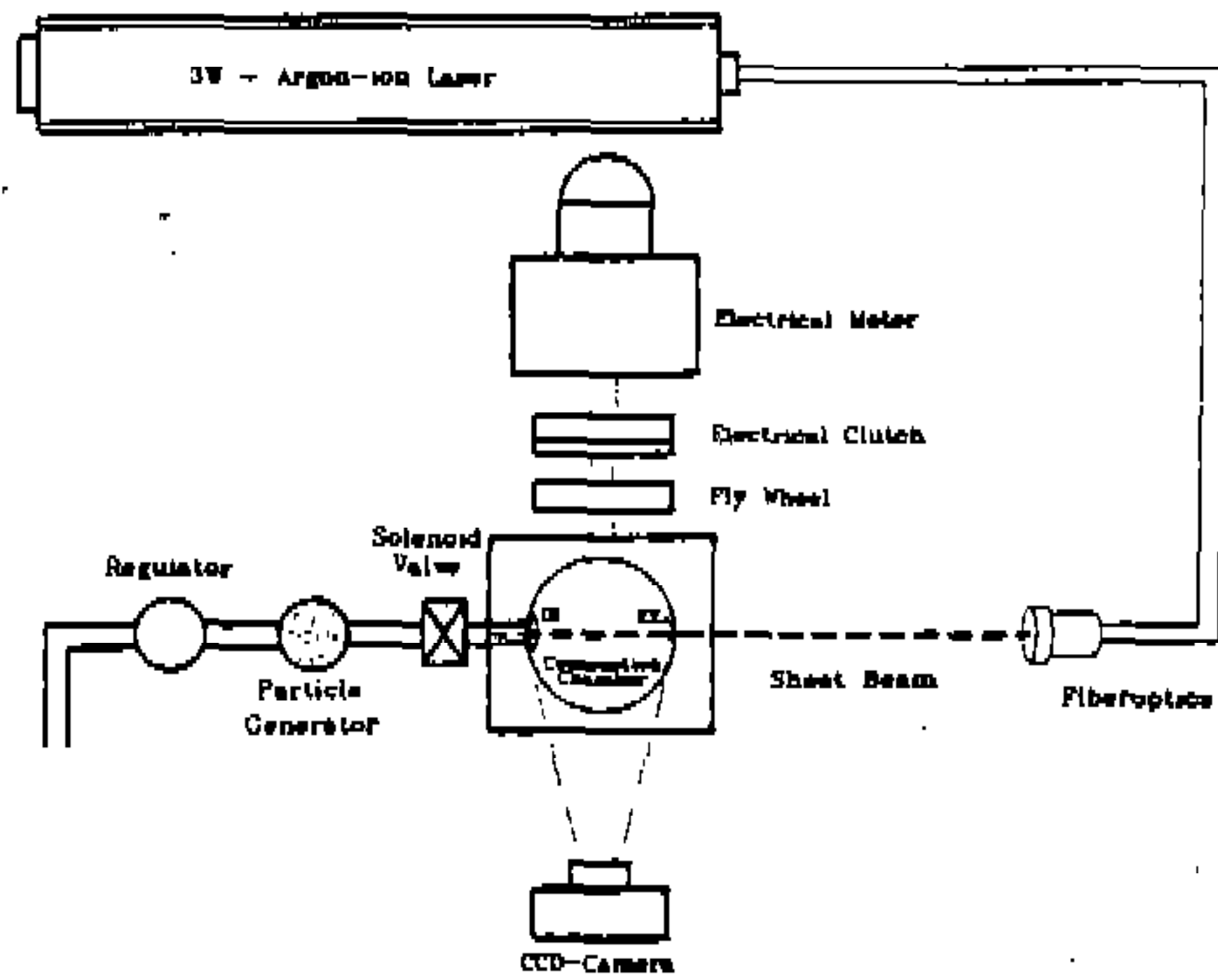


Fig.5 Application of PIV

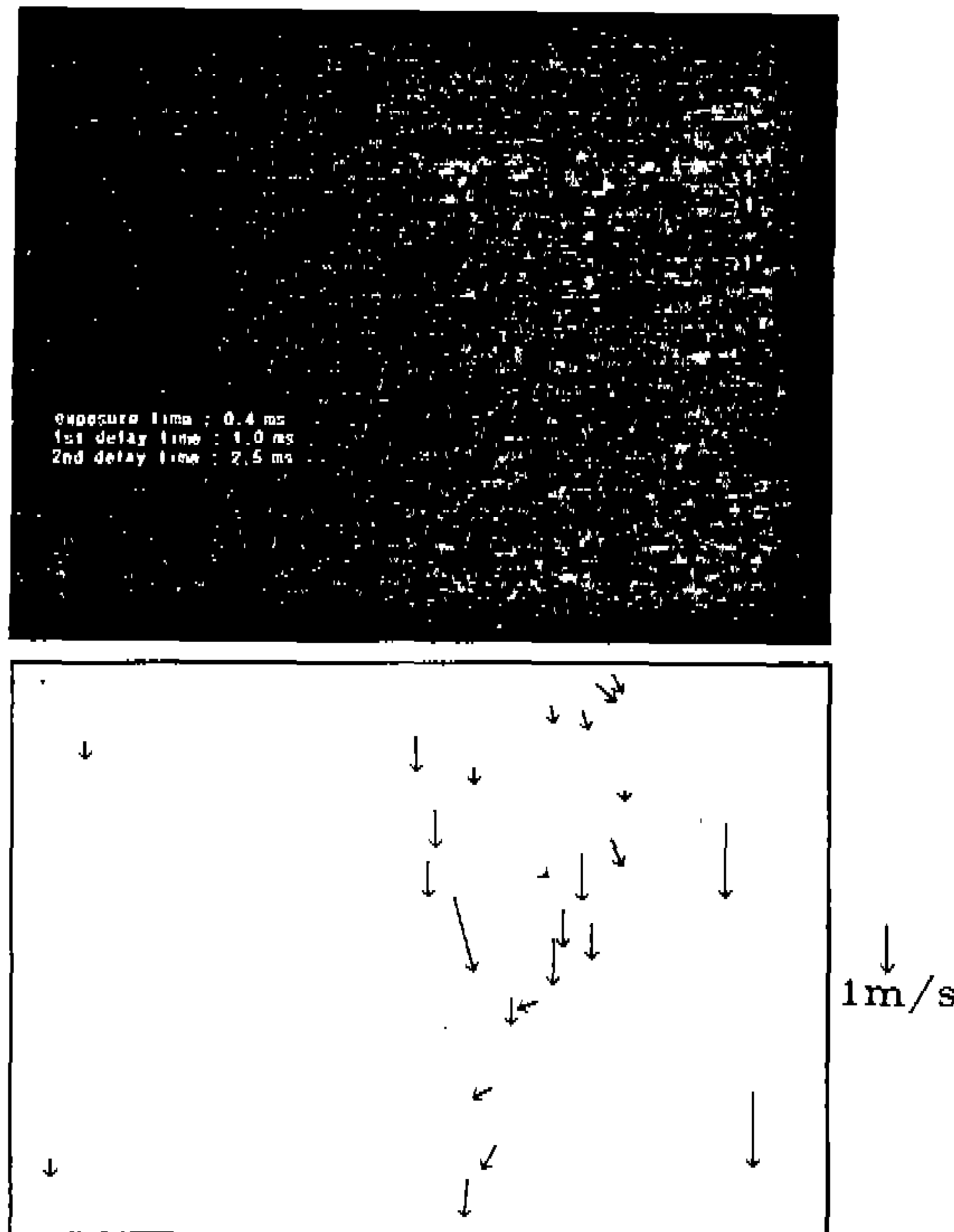


Fig.6 Example of Flow Measurement by Triple-Exposure Method

### 3.2 PIV를 이용한 유동장 측정

Laser 광원으로부터 출력된 빛은 광섬유의 내부를 전반사에 의해 이동하여 광섬유 끝단에 도달한다. 광섬유 끝에 장착된 실린더렌즈에 의해 만들어진 평면광을 측정단면에 조명하고 흡입공기에 혼입되어 유동을 추종하는 산란입자( $SiO_2$ )에 의한 Mie 산란광을  $90^\circ$  위치에서 ICCD 카메라로 기록한다.

PIV를 이용한 유동장의 측정시 유동의 방향을 판별하기 위하여 여러가지 방법이 시도되고 있으나<sup>8)</sup>, 본 연구에서는 속도측정을 위한 2중 노출과 방향 구분을 위한 1회의 노출을 더한 3중노출법을 이용한 PIV를 적용하였다. 평면광을 조사하고 일정한 시간 간격으로 복수노출시키면 산란입자의 운동경로가 기록되는데 각 입자간의 거리를 노출지연시간으로 나누면 입자의 유동속도를 알 수 있다.

그림 6은 PIV의 타당성을 검토하기 위하여 자유 낙하하는 산란입자에 대하여 측정한 것이다. 처음의 노출시간 0.4ms동안 입자궤적 1이 기록되고 1.0ms 지연 후 입자 1을 0.4ms 동안 기록한다. 이 두 입자중심 간의 거리를, 각각의 노출시간의 1/2에 지연시간을 더한 값( $0.2+1.0+0.2=1.4ms$ )으로 나누면 1과 1' 사이의 평균속력이 구해진다. 그리고 처음 지연시간보다 지연시간을 길게 하여 세번째 영상을 기록하여 그 방향을 판별할 수 있게 된다. 이러한 방법으로 입자 1의 속도벡터가 구해진다.

실험에서 사용된 평면광의 두께가 약 2mm로 매우 작기때문에 산란입자가 그면에 수직인 방향의 속도에 의해 평면광을 벗어나지 않도록 지연시간을 적절히 조절하여야 한다.

축방향유동은 흡기구와 배기구의 중심을 지나는 축방향단면에서, 원주방향유동은 실린더 상단으로부터 10mm 떨어진 원주방향단면에서 각각 측정되었다.

## 4. 결과 및 검토

### 4.1 원주방향 유동의 가시화

설리렌법에 의한 원주방향 유동의 가시화 결과

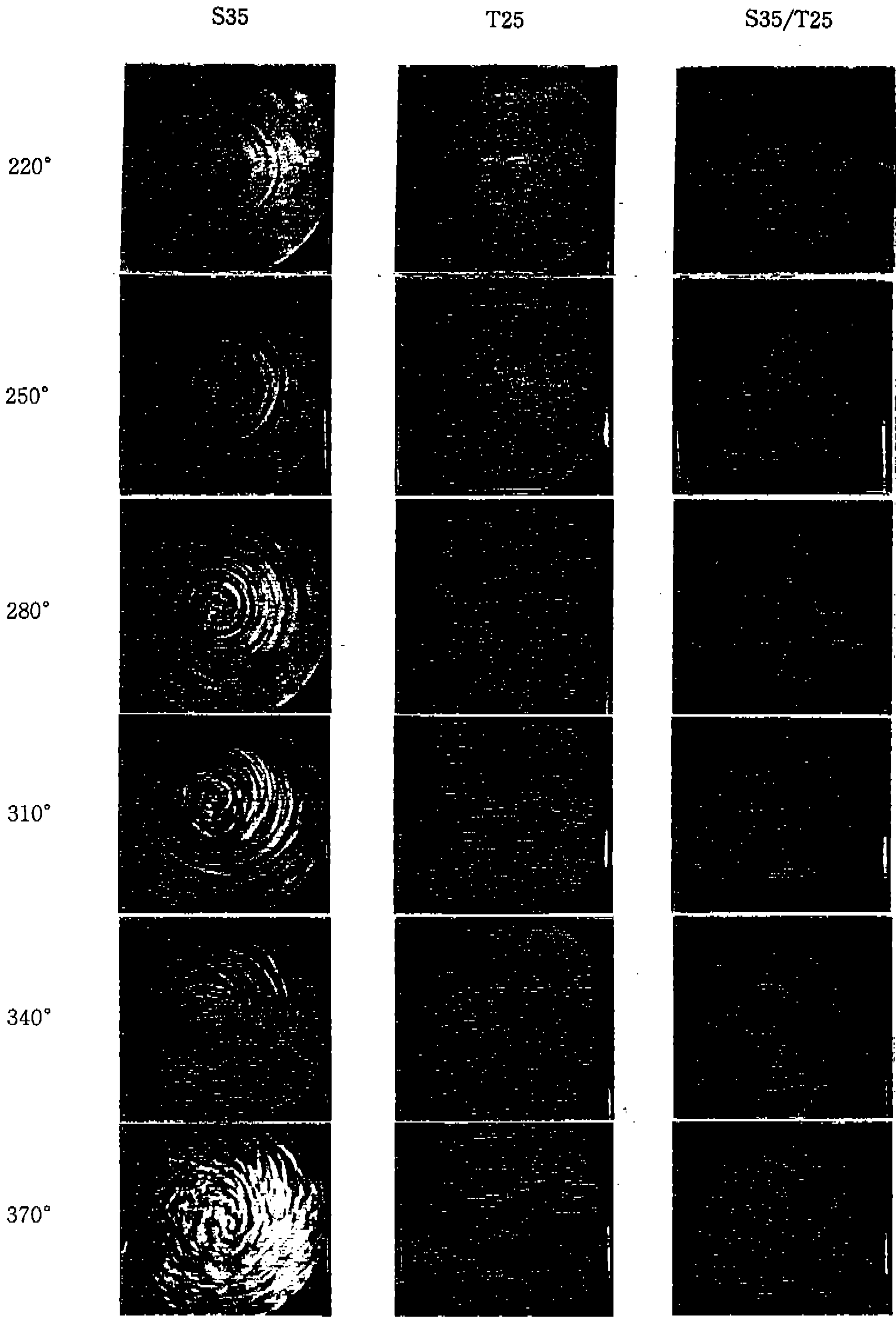


Fig.7 Schlieren Visualization of Circumferential Flow

는 그림 7과 같다. 실험조건은 엔진속도 240RPM, 흡기압력 1.3bar, 연료(LPG) 분사압력 2 bar이며, 흡기밸브의 개폐시기는 각각  $-20^\circ$ 와  $180^\circ$  CA이며, 배기밸브의 개폐시기는 각각  $515^\circ$ 와  $10^\circ$  CA이다.

스윙포트(S35)의 경우 흡기에 의해 유도된 큰 규모의 스윙유동이 압축행정 동안 강화되어 스윙형상이 뚜렷해지지만 TDC부근기에 이르면 점차 작은 에디로 분화되기 시작하는 것을 볼 수 있다.

텀블포트(T25)의 경우 스윙의 생성은 관찰되지 않고, 흡기밸브와 배기밸브를 연결하는 단면과 나란한 유동만이 관찰되는데, 이는 텀블운동의 가능성을 보여준다. 압축중기( $310^\circ$  CA)부터는 중심단면과 실린더 벽면주위에 작은 스케일의 에디가 형성되기 시작하여 TDC부근에서는 전유동영역에 분포되는 것을 볼 수 있다.

스윙/텀블포트(S35/T25)의 경우 스윙포트와 비교하여 약  $30^\circ$  CA 지연된 시기에 스윙이 형성되기 시작하고 스윙의 강도도 작다. 그러나, 작은 스케일의 에디로 분화되기 시작하는 시기도 동일한 정도 지연되기 때문에 화염전파에 좋은 영향을 미칠 것으로 기대된다.

4.2 유동단면의 속도분포

그림 8, 그림 9 및 그림 10은 흡기구와 배기구를 지나는 축방향단면의 유동과 상사점에서 아래로 10mm 떨어진 단면에서의 원주방향 유동의

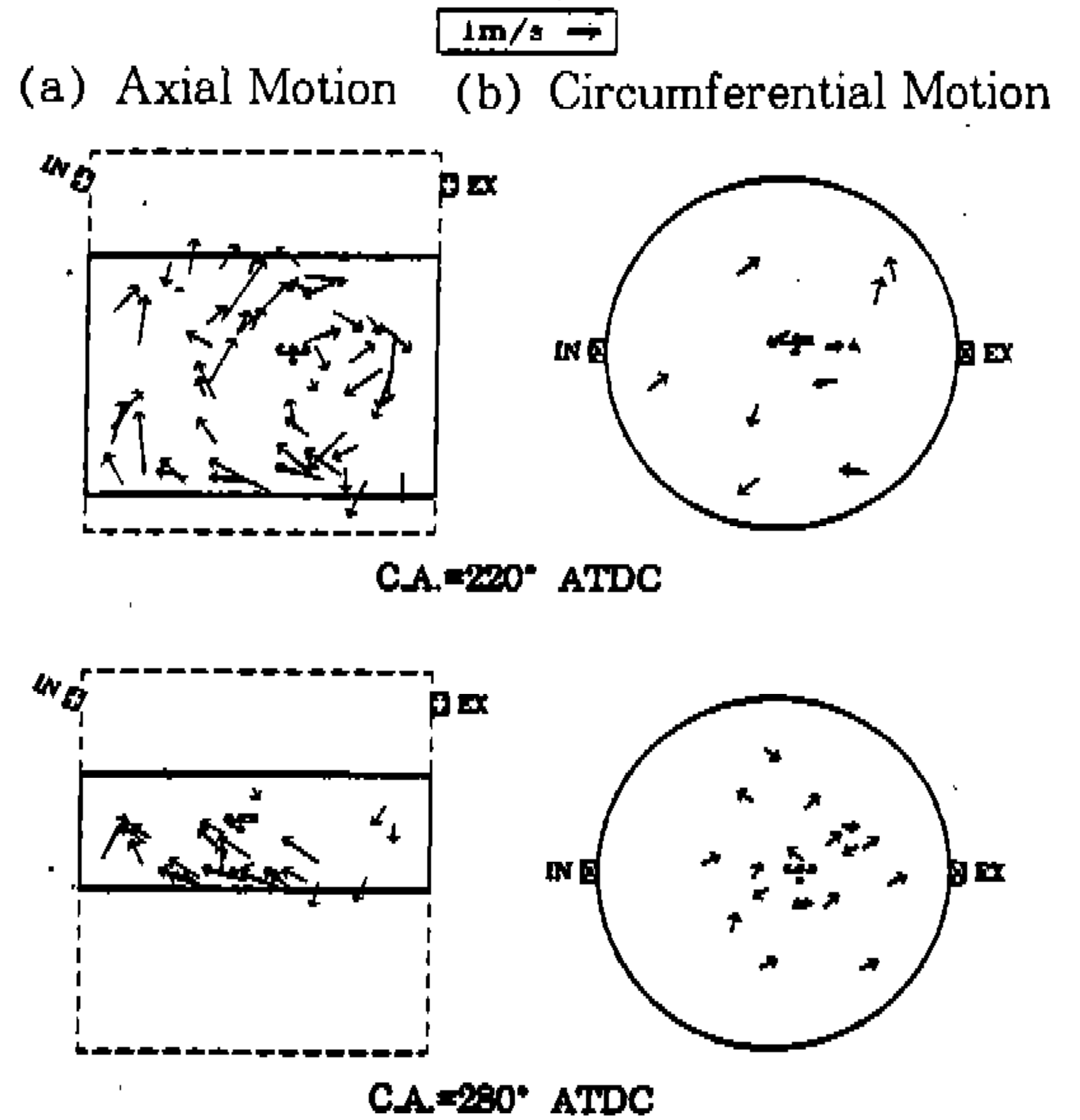


Fig.9 Flow Field Induced by the Tumble Port

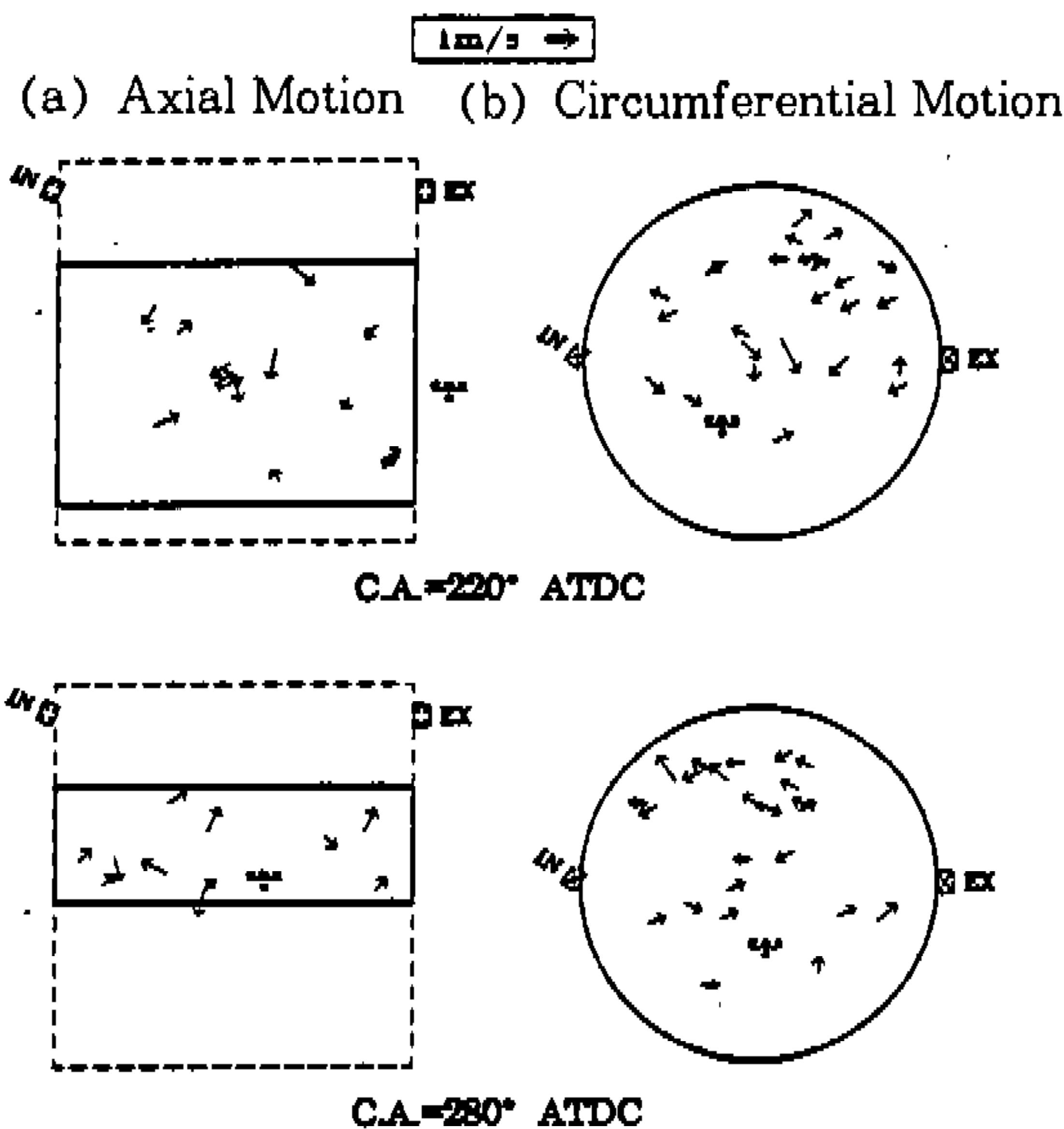


Fig.8 Flow Field Induced by the Swirl Port

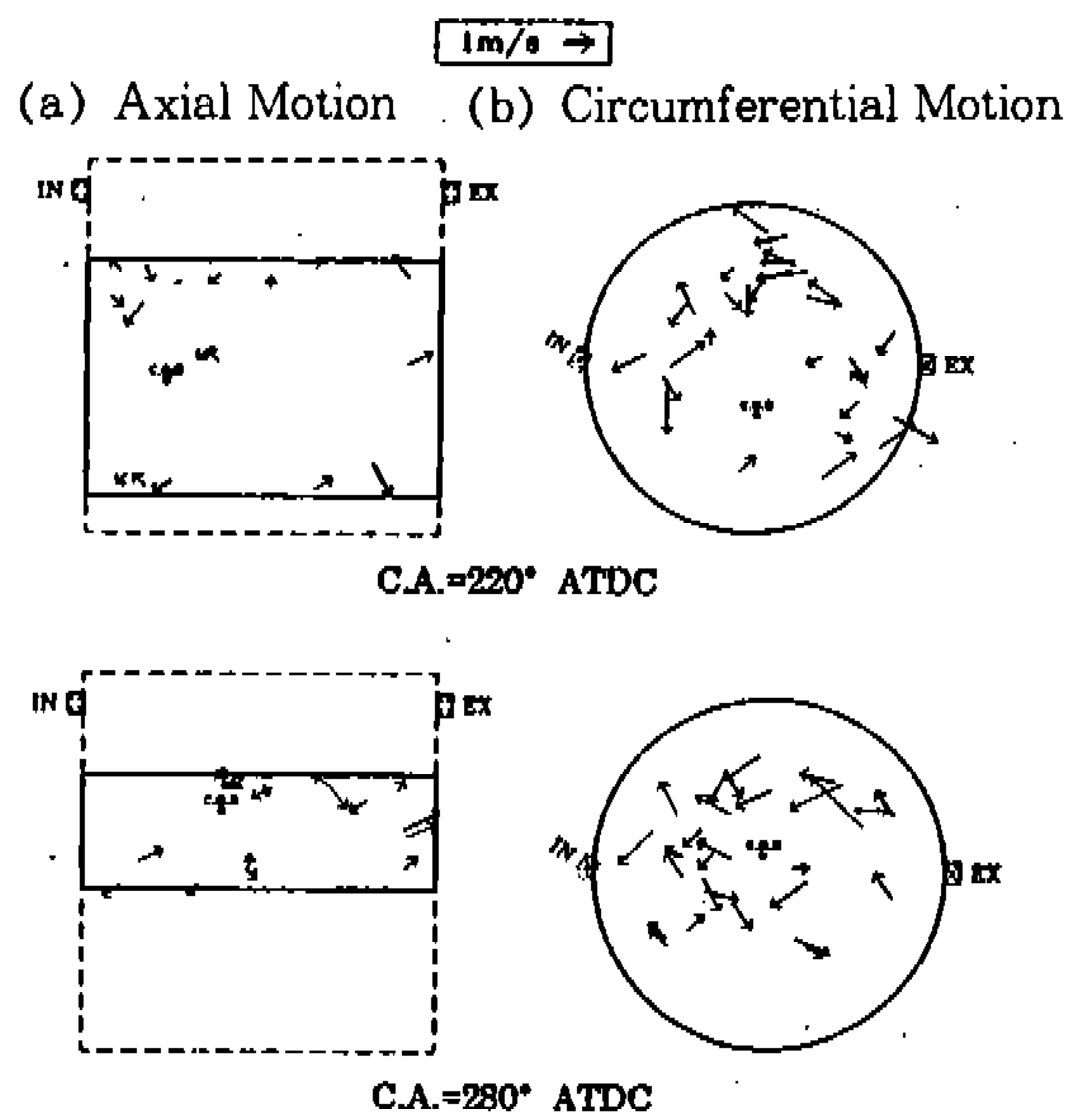


Fig.10 Flow Field Induced by the Swirl/Tumble Port

속도분포이다.

각 그림의 왼쪽과 오른쪽에는 각각 흡기구와 배기구의 위치와 상대적인 각도가 표시되어 있다. 축방향 유동 측정단면과 점선부분은 실린더 전체를 나타낸 것이므로 그 크기는 56.5mm×60.5mm이며, 실선부분은 유동장의 측정이 가능한 영역이다. 원주방향유동 측정단면은 창을 피스톤에 장착하는 부분때문에 실린더직경보다 작은 직경 48.5mm인 영역이다. 또한, C. O. R은 텀블 또는 스월의 회전중심(Center of Rotation)을 의미하며 이것을 구하는 방법은 뒤에 기술한다.

스월포트의 경우 텀블운동은 관찰되지 않고 전체 유동장에 걸쳐 단일 스월이 관찰된다. 이는 윌리렌법에 의한 가시화와 동일한 결과이다.

텀블포트에서의 유동은 배기구의 아래쪽 방향으로 유입되어 벽면을 따라 흐르다 피스톤의 존

재로 인하여 속도의 방향이 바뀌어 흡기구쪽으로 상승하는 회전류를 형성한다. 압축말기에 이르면 회전운동이 소멸되는 것을 볼 수 있다. 또, 텀블포트의 원주방향 유동은 지배적인 평균유동이 나타나지 않는다.

스월/텀블포트의 경우, 텀블포트에 비해 약한 텀블운동과 아울러 반시계방향으로 회전하는 스월이 관찰된다.

그림 11 과 그림 12 는 앞의 측정결과들로부터 각 크랭크각에서의 대표적인 속도를 나타낼 수 있는 무차원 평균속도를 구한 것으로, 다음과 같이 정의한다.

$$(\text{무차원 평균속도}) = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} / \bar{V}, \quad (1)$$

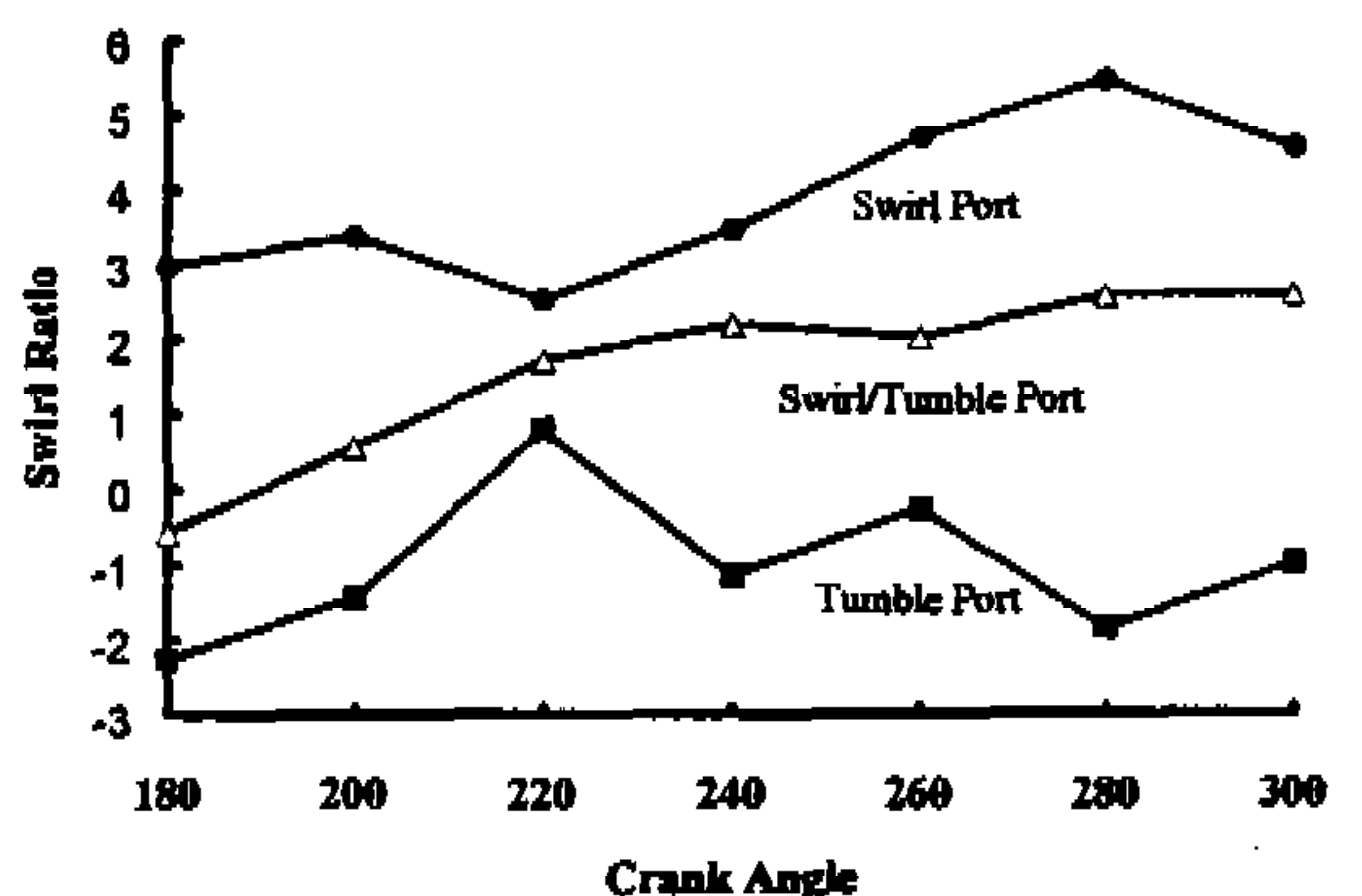
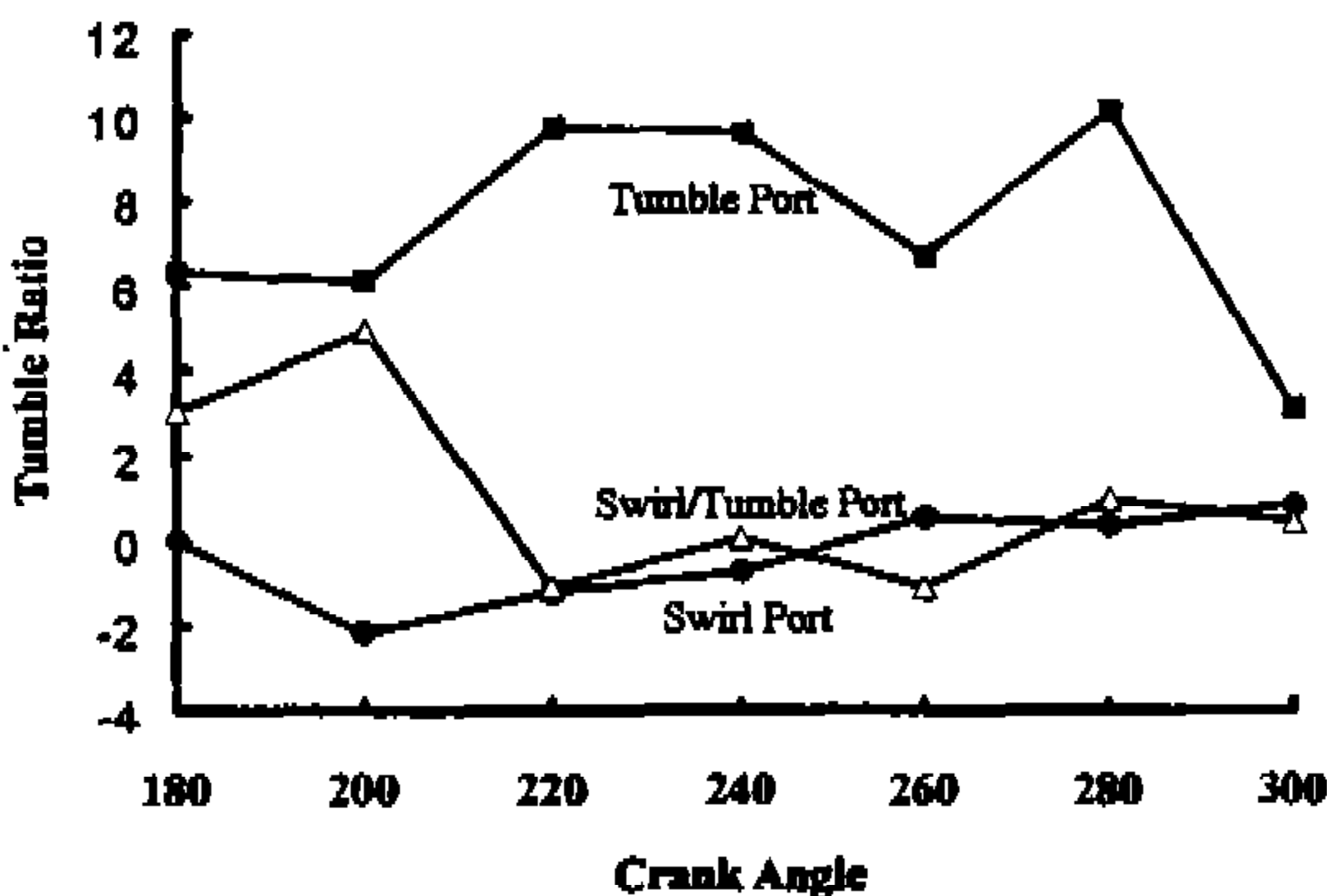
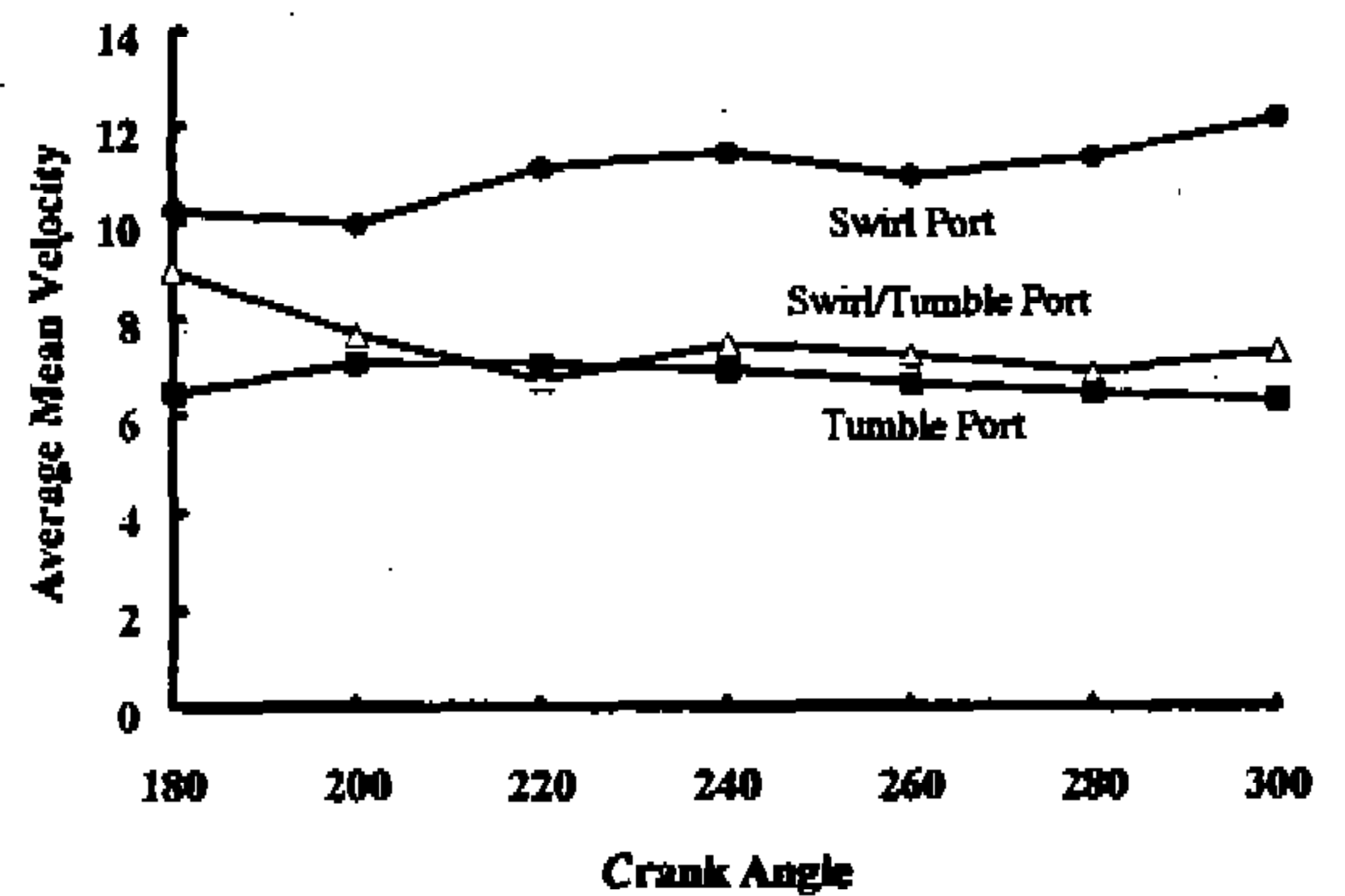
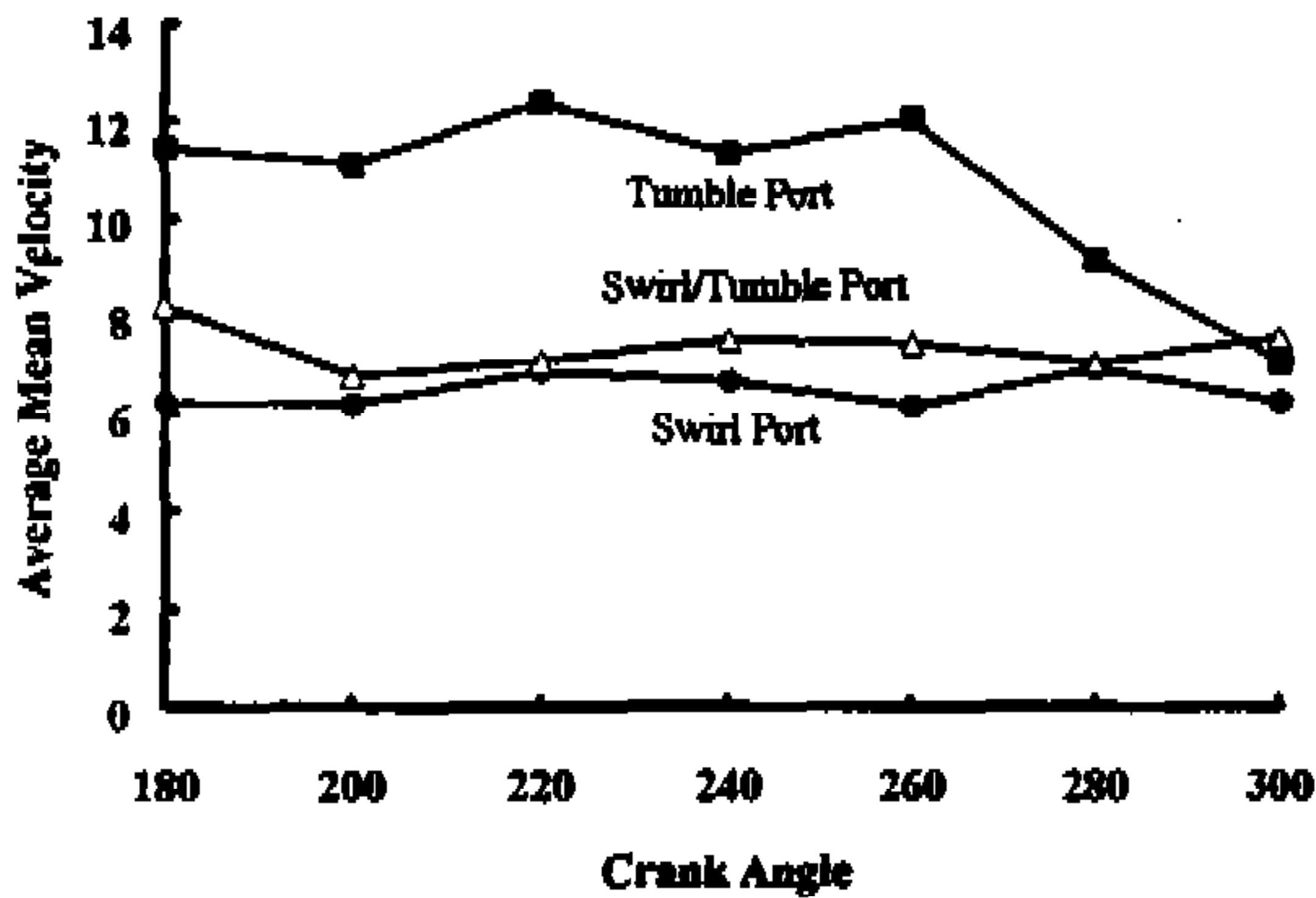


Fig.11 Average Mean Velocity and Tumble Ratio of Axial Flow

Fig.12 Average Mean Velocity and Tumble Ratio of Radial Flow



- $V_i$  : 측정된 유동장의 속도  
 $V_p$  : 평균 피스톤 속도  
 $N$  : 유속 측정점의 수

또, 스월비와 텀블비는 다음과 같은 방법으로 정의하여 각 포트의 특성의 비교에 이용하였다. 각 속도 벡터를  $x, y$  성분으로 분해하고 각 성분에 대한 3차 근사함수를 구하여 속도가 0인 점을 찾아 스월이나 텀블의 회전중심(Center of Rotation : 그림 8 ~ 그림 10 에서 C.O.R)으로 한 후, 이점에 대한 각속도의 평균값을 크랭크축의 각속도로 나눈 값을 스월비 또는 텀블비로 정의하였다.

$$(\text{스월비 또는 텀블비}) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{V_{i,\theta}}{\gamma_i}}{N} / \omega_c \quad (2)$$

- $V_{i,\theta}$  : 회전중심에 대한  $V_i$ 의 접선방향 속도성분  
 $\gamma_i$  : 회전중심에서 측정점  $i$ 까지의 거리

이때, 스월비는 반시계방향을, 텀블비는 시계방향을 양으로 하였다.

그림 11은 각포트에서의 크랭크각 변화에 따른 유동평균속도와 텀블비를 나타낸 것이다. 텀블포트인 경우의 평균속도와 텀블비가 260°C CA까지는 스월 또는 스월/텀블포트에 비하여 약 1.5~2배의 값을 가지지만, 그 이후 감소하여 300° CA에는 거의 동일한 값이 된다. 이는 피스톤의 상승으로 인해 유동공간이 디스크형태로 되면서 평균유동이 소멸하며 축방향 회전운동에 에너지가 캐스케이드되어 작은 에디를 형성하기 때문인 것으로 판단된다.

스월/텀블포트의 경우는 압축초기에 스월포트에 비해 약간 큰 텀블비를 가지지만 곧 스월포트와 마찬가지로 0에 가까운 값으로 된다.

그림 12는 크랭크각에 따른 각포트의 원주방향 유동평균속도와 스월비를 나타낸 것이다. 스월포트인 경우 압축이 진행됨에 따라 평균속도가 약간 증가하는 경향을 보이며, 스월비는 압축초기의 3으로부터 지속적으로 증가한다. 스월/텀

블 포트의 경우는 스월포트에 비해서는 작지만 압축이 진행됨에 따라 스월비가 꾸준히 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 가시화를 통하여 관찰된 바와 같이 스월이 형성되기 시작하는 시기와 평균유동이 소멸되기 시작하는 시기 모두가 지연되기 때문인 것으로 보인다.

이상의 결과들을 종합하면 텀블성분은 압축후기 실린더내부의 기하학적 형상으로 인해 에너지가 캐스케이드되어 작은 난류에디로 변화하고, 스월성분은 압축말기까지 그 강도가 증가하며 유지되는 특징을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 Arcoumanis 등에 의한 관찰과 유사한 결과로, 스월/텀블 포트에 의해 유도된 텀블운동은 TDC 부근에서 작은 스케일의 난류로 되어 초기 화염의 생성에 유리한 영향을 미치고, 스월성분은 TDC이후까지 평균유동이 남아있어서 화염의 전파속도를 증대시킬 수 있는 가능성을 보여준다.

## 5. 결 론

상용엔진을 개조하여 내부유동의 가시화와 레이저를 이용한 광학계측법의 적용이 가능한 가시화엔진을 제작하고, 흡기시 특정유동성분을 유도하는 3종류의 헤드에 의해 형성된 내부유동이 압축과정동안 변화하는 양상을 쉐리렌법을 이용하는 고속촬영에 의한 가시화와 ICCD 카메라를 이용하는 PIV방법을 응용한 단면 유동속도분포 측정을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스월포트에 의해 압축초기에 스월이 형성되기 시작하여 압축이 진행됨에 따라 스월 현상이 더욱 뚜렷해지고 그속도도 증가하며, TDC부근에서 평균운동이 소멸하여 작은 에디로 분화하기 시작한다.
- 2) 텀블포트에 의해 유도된 텀블운동은 압축 후반 TDC부근에서 실린더 내부의 기하학적 형상으로 인해 회전운동을 잃게되면 평균유동에너지가 캐스케이드되어 작은 에디로 분화된다.
- 3) 스월/텀블포트의 경우, 스월 또는 텀블포트에 비하여 각 성분의 절대값은 작지만 복합된 유동이 유도된다. 특히, 스월이 생



성되기 시작하는 시기가 스윙포트에 비해 약 30° CA 지연되고, 에디로 분화되기 시작하는 시점 또한 동일 기간만큼 지연되기 때문에, 압축 TDC부근에서는 텀블운동으로부터 생성되는 난류에 의해 점화성능이 향상되고, 점화이후까지 존재하는 스윙성분에 의해 화염전파속도를 증대시키는 것이 가능함을 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 기아자동차(주)의 지원으로 이루어진 것이며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill
2. F. O. Edward, "Internal Combustion Engines and Air Pollution", Intext Educational Publishers, 1973.
3. 安東, 三林, 岩知道, 桑原, "タンブルによって生成される亂れの特質と燃焼への影響", 三菱自動車 テクニカルレビュー, No.3, pp. 58~69, 1990
4. C. Arcoumanis, Z. Hu, C. Vafidis and J. H. Whitelaw, "Tumbling Motion: A Mechanism for Turbulence Enhancement in Spark-Ignition Engines", SAE Paper 900060
5. In-Young Ohm, Hee-Seok Ahn, Woo-Jik Lee, Woo-Tae Kim, Sim-Soo Park And Dae-Un Lee, "Development of HMC Axially Stratified Lean Combustion Engine", SAE Paper 930879
6. 한영민, "가시화 엔진 설계 및 엔진내부 유동 가시화에 관한 연구", 서울대학교 석사학위논문, 1992
7. M. Namazian, S. Hansen, E. Lyford-Pike, J. Sanchez-Barsse, J. Heywood and J. Rife, "Schlieren Visualization of The Flow and Density Fields in The Cylinder of A Spark-Ignition Engine", SAE Paper 800044
8. Grant and A. Liu, "Directional Ambiguity Resolution in Particle Image Velocimetry by Pulse Tagging", Experiment in Fluids 10, 71-76, 1990