

## PIV를 이용한 Uni-flow 소기방식 프리피스톤 수소기관의 실린더내 유동가시화

조형욱<sup>†</sup>, 윤재성\*, 이종태\*\*, 임희수\*\*\*

\*성균관대학교 대학원, \*\*성균관대학교 기계공학부, \*\*\*(주)효성

## Flow visualization used PIV of hydrogen fueled free piston engine with uni-flow scavenging

H. W. Cho<sup>†</sup>, J. S. Yoon\*, J. T. Lee\*\*, H. S. Lim\*\*\*

*\*Grad. School of Sungkyunkwan Univ.,*

*300 Cheoncheon-dong Jangan-gu Suwon-si Gyeonggi-do 440-746, Korea*

*\*\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.,*

*300 Cheoncheon-dong Jangan-gu Suwon-si Gyeonggi-do 440-746, Korea*

*Hyosung Co. 450, Gondeok-dong, Mapo-Gu, Seoul, Korea*

### ABSTRACT

In order to improve scavenging performance of free piston hydrogen fueled engine, this study estimate compatibility of uni-flow scavenging. The scavenging flow characteristics in the cylinder is investigated by flow visualization and PIV method.

Consequently it has been found that the scavenging performance decreased with abnormal expansion of piston and delay of the exhaust valve opening timing. And the scavenging performance of exhaust valve located center in cylinder head is better than that of exhaust valve located side in cylinder head.

**KEY WORDS** : free piston engine(프리피스톤 기관), visualization(가시화), uni-flow scavenging(유니플로우 소기), PIV(입자영상유속계), abnormal expansion(비정상팽창)

### 1. 서 론

프리피스톤 기관은 크랭크 기구가 없어 구조가 간단하고 스트로크 변화가 가능하여 열에너지를 최대한 팽창일로 변환할 수 있고 빠른 팽창속도에 의한 열손실 감소로 고효율의 달성이 가능하다.<sup>1,3)</sup> 반면에 프리피스톤 기관은 관성에너지를 저장할

수 있는 플라이휠의 설치가 힘든 구조이므로 매 사이클 연소를 수행하는 2행정 dual type을 일반적으로 사용한다.<sup>4)</sup> 이러한 프리피스톤 수소기관의 성능은 기연가스를 배출시키고 다음 행정에 필요한 신기를 공급하는 소기성능에 따라 크게 좌우된다.<sup>5)</sup> 소기작용이 원활하지 않으면 사이클 변동이 증가하고 비정상 팽창 및 압축에 의한 유동양상과 신기 도입의 변화로 운전이 정지될 수 있다.<sup>6)</sup> 따라

<sup>†</sup>Corresponding author : akff181@skku.edu

서 프리피스톤 기관의 정상운전을 위해서는 기관에 적합한 소기시스템의 도출이 요구된다. 대표적인 소기방식에는 루프 및 uni-flow 소기 등이 있다. 저자들은 루프소기방식 프리피스톤 기관의 경우 신기와 배기가 상호 간섭을 일으키고 비정상팽창시의 소기성능이 저하되는 것을 해석하였다. 이러한 문제들은 실린더 헤드에 배기밸브가 위치하는 uni-flow 소기방식인 경우에 개선될 수 있을 것으로 판단된다. Uni-flow 소기방식은 배기밸브 열림 시기와 밸브 리프트 및 위치 등이 소기성능을 좌우하는 인자가 된다.<sup>7)</sup> 그러나 uni-flow 소기방식을 갖는 프리피스톤 기관의 실린더 내 유동양상 및 상기 인자들에 대한 소기성능은 보고되지 않은 상황이다.

본 연구에서는 uni-flow 소기방식 프리피스톤 수소기관의 소기성능 향상의 일환으로 실린더 내 소기 유동양상을 가시화 할 수 있는 프리피스톤 기관의 uni-flow 소기 가시화 장치를 개발하여 PIV 기법으로 실린더 내 유동을 가시화하고 그 특성을 해석하였다. 실험변수는 밸브 리프트, 배기밸브 열림 시기, 배기밸브 위치 및 비정상팽창에 의한 스트로크 변화이다.

## 2. 실험장치 및 방법

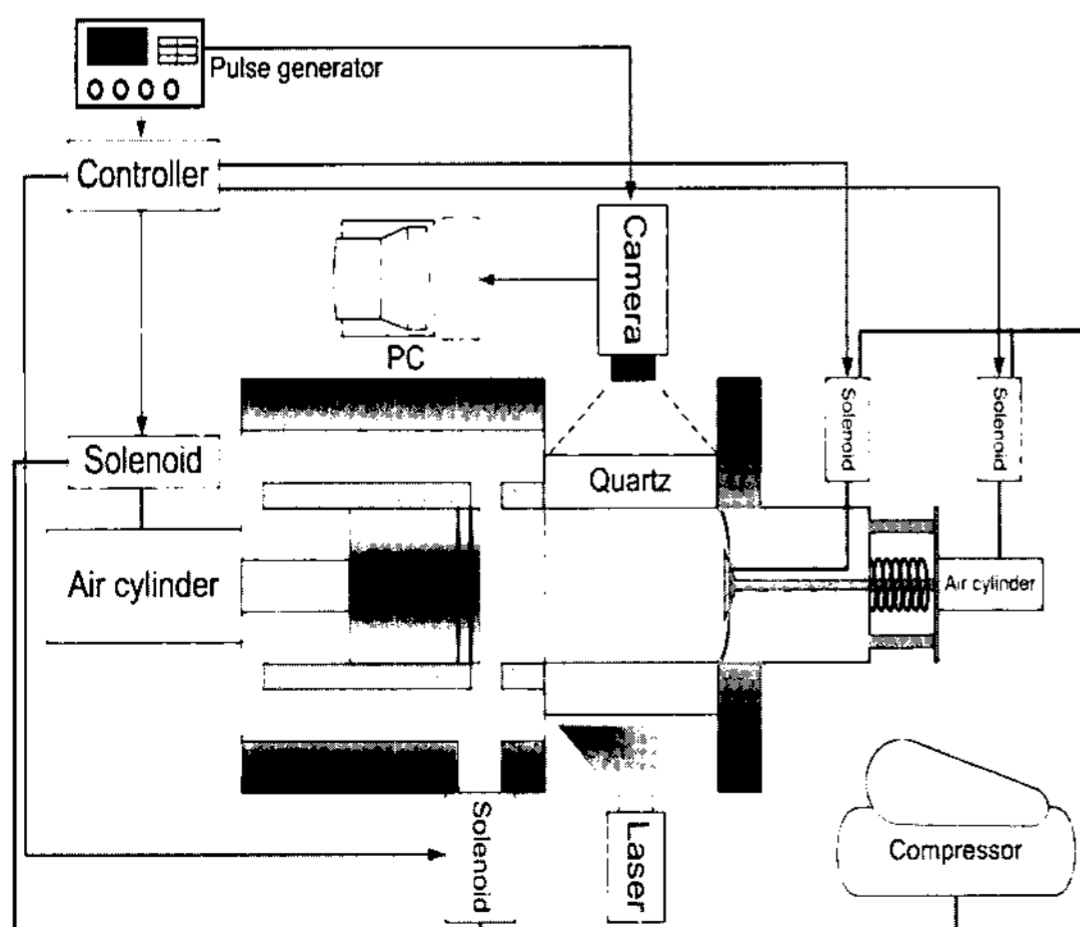


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

## 2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 uni-flow 소기방식을 갖는 프리피스톤 소기가시화 장치, 광학 장치부, 제어부로 구성된다. 프리피스톤 가시화 장치의 실물사진은 Fig. 2에 나타낸다. 가시화 장치는 실린더 헤드, 가시화부, 흡기포트, 배기밸브, 피스톤 구동부 등으로 구성된다.

실린더 헤드는 반구형으로  $\varnothing 34$ 의 상용 배기밸브가 위치한다. 또한 유동을 가시화하기 위하여 석영 가시화창(내경 82mm, 높이 68mm)이 실린더 헤드와 흡기포트 사이에 실린더 라이너의 일부로 설치되어있다. 흡기 포트는 원주방향으로 30°의 스윙각도를 가지고 균일하게 흡기가 들어가도록 실린더 라이너 둘레에 일정하게 6개가 배치되어있다. 배기밸브는 솔레노이드 밸브와 공압실린더로 구동된다. 피스톤 구동부는 솔레노이드 밸브, 공압실린더 및 구동센서로 구성된다. Flat형의 테프론 피스톤은 빠른 속도로 압축 및 팽창하도록 복동공압실린더로 구동되며 구동압력은 8bar이다. 또한 피스톤은 솔레노이드 밸브의 제어신호에 따라 BDC까지 50mm 팽창하며 광화이버센서의 신호를 받아 다시 초기 위치까지 압축되도록 구성된다. 각각의 솔레노이드 밸브, 공압실린더, 카메라의 동작 신호의 시간지연 및 동기화는 펄스 제네레이터로 제어된다.

실린더내의 유동장은 레이저광(He-Ne, 500mW)

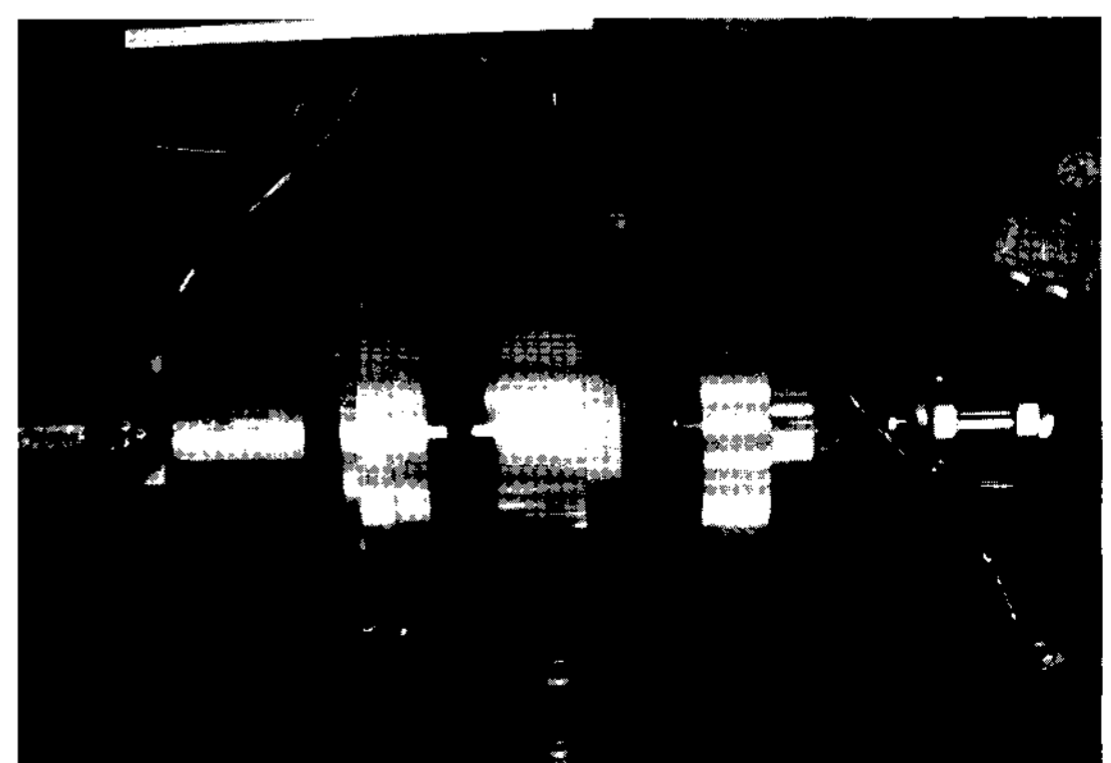


Fig. 2 Photograph of linear power system with uniflow scavenging for visualization

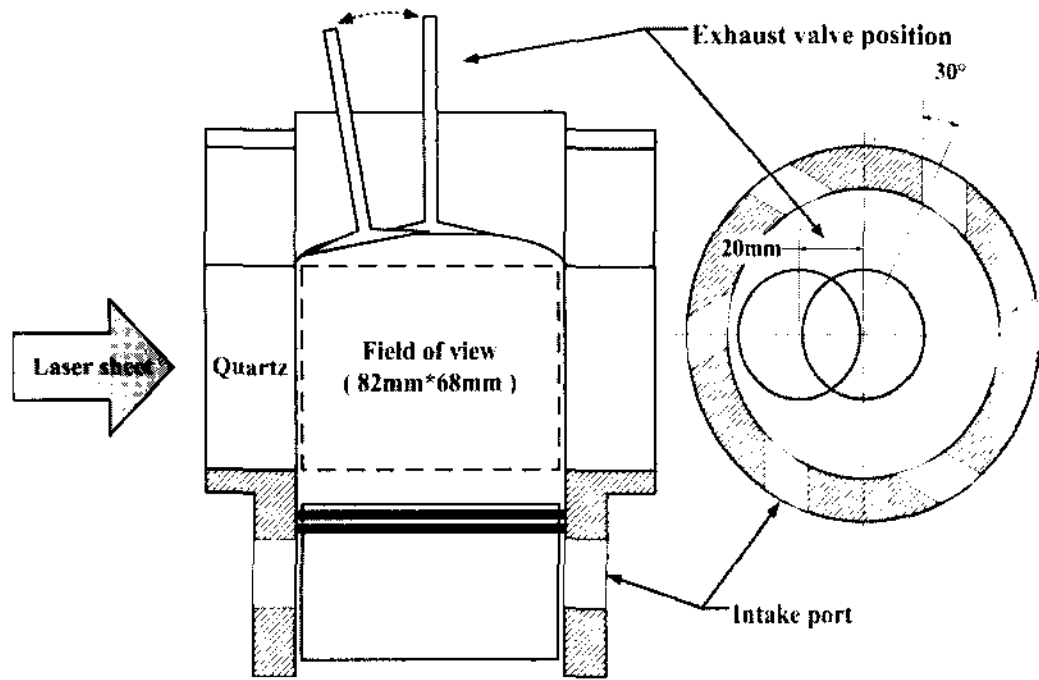


Fig. 3 Visualization field and parameters of inlet ports

이 원주형 렌즈를 통해 실린더의 원주방향과 수직 하도록 중심축에 평면광으로 조사되어 나타난다. 레이저 광원으로부터 입자들에 의해 산란된 유동 단면은 고속카메라(Kodak EktaPro HG imager Mo-2000)에 의해 일정 시간간격으로 촬영된다. PIV용 산란입자는 실린더 헤드부에 장착된 슬레노이드의 개폐에 의해 공급된다.

## 2.2 실험방법

실험은 배기밸브와 관련하여 배기밸브의 위치, 리프트 및 배기밸브의 열림 시기 변화와 비정상팽창을 의미하는 스트로크 변화에 따른 프리피스톤 기관의 실린더 내 소기양상을 가시화하는 것이다. 이를 위해 피스톤은 팽창후기에서 압축초기 과정까지의 과정을 모사한다. 구동초기에 피스톤 헤드는 흡기포트 34.4mm 전방에 위치시키며 프리피스톤이 해당위치에 도달되었을 때의 압력을 고려한 3bar의 압력으로 실린더 내에 산란입자가 공급된다. 일정시간 지연 후 피스톤은 공압실린더에 의해 급속히 왕복 구동되며 그때의 소기과정을 가시화하여 개별입자 추적 PIV법으로 해석한다. 본 연구에서 피스톤의 위치 및 밸브의 열림 시기 등은 프리피스톤 기관의 특성상 일반적인 기관에서와 같이 크랭크 각으로 나타낼 수 없으므로 전체 스트로크에 대한 피스톤 위치의 비율로 나타낸다. 이 경우 배기밸브 열림 시기는 피스톤이 63.5% 팽창한 위치부터 68.2%에 해당하는 위치까지 1mm씩

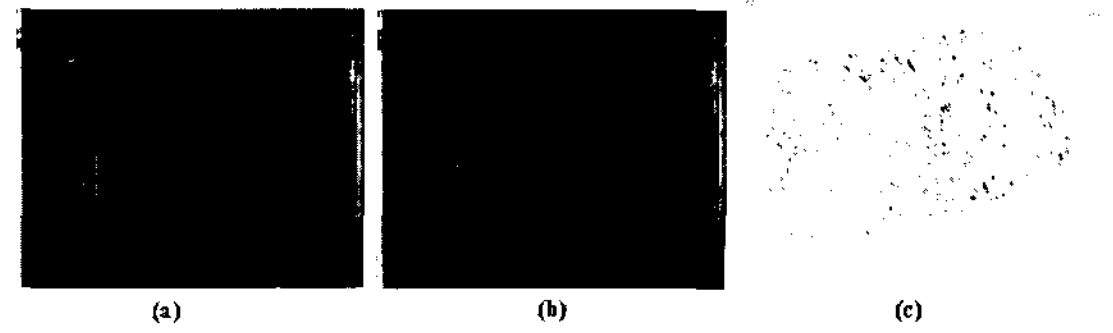


Fig. 4 Calculation of velocity by discrete particle tracking

지연된다. 밸브 리프트는 7mm부터 9mm까지 1mm씩 변화된다.

Fig. 3은 유동장이 보이는 가시화 영역과 배기밸브 위치를 나타낸 것이다. 배기밸브 위치는 실린더 헤드의 중앙에 위치한 것과 중심에서 20mm 떨어진 두 종류이다. 비정상팽창에 따른 스트로크 변화는 1mm 단위의 스페이서를 피스톤 구동용 공압 실린더 내부에 삽입하여 8mm까지 변화된다.

## 2.3 가시화 결과에서 속도벡터의 산출

유동장의 입자추적은 개별입자의 미소궤적을 추적하여 속도벡터를 검출하는 개별입자추적 PIV 기법을 사용하였다.<sup>8)</sup> 개별입자추적 PIV 기법은 개별입자를 독립적으로 인식하고 이들의 변수를 부여하는 라벨링 작업과 함께 개별입자의 미소궤적을 추적하여 속도벡터를 검출하는 방법이다.<sup>9)</sup> Fig. 4는 가시화된 화상으로부터 속도벡터를 구하기 위한 화상처리의 절차를 나타낸다. 화상처리절차는 thresholding, 입자추적 및 속도벡터의 계산으로 구분된다. 얻어진 가시화 이미지는 (a)와 같이 입자의 궤적 이외에도 여러 원인에 의한 잡광성분들이 발생한다. 이러한 잡광에 의한 해석상의 오류를 방지하기 위해 thresholding 으로 (b)와 같은 2진화된 화상을 만들어 잡광성분을 제거한다. 명암으로 구성된 화상으로부터 입자를 판별하고, 입자의 궤적을 추적하여 카메라의 노출시간과 변위의 관계로부터 (c)와 같은 속도벡터를 (1)식과 같이 구할 수 있다.

$$V_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad V_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (1)$$

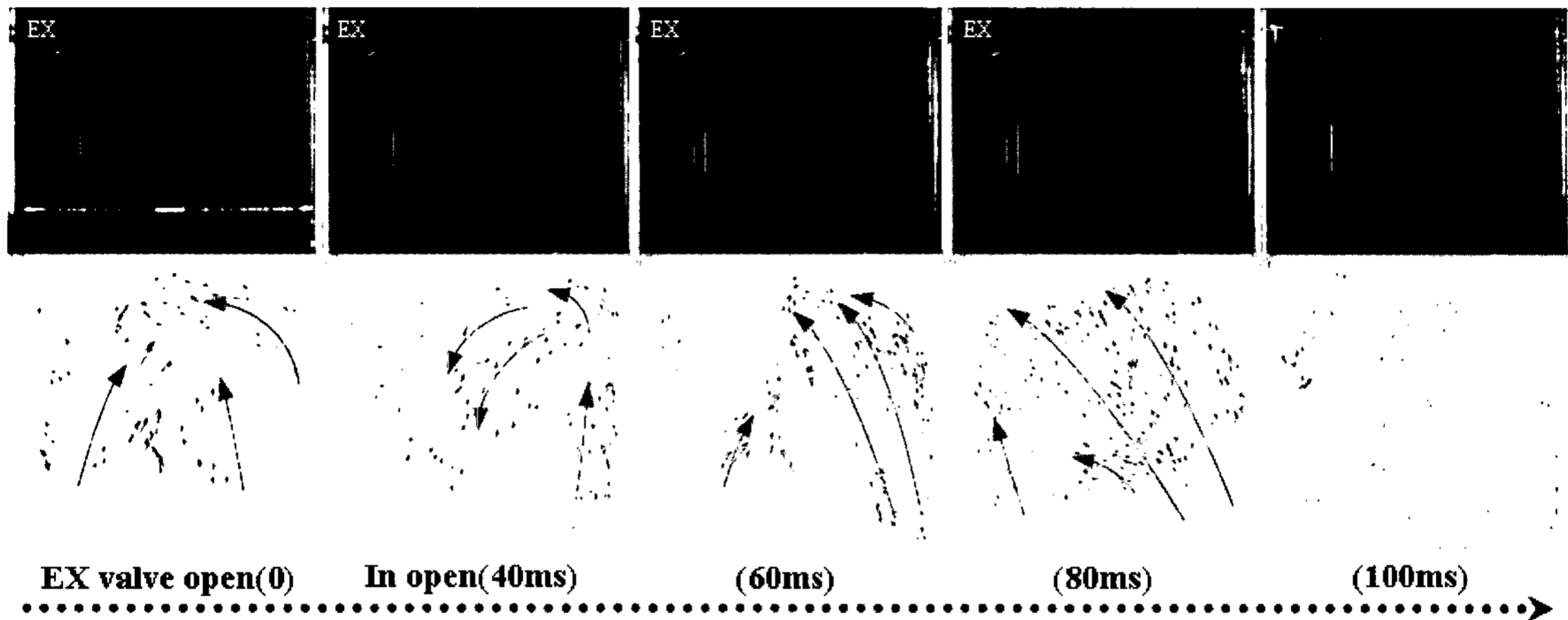


Fig.. 5 Raw images and velocity vector of in cylinder flow with normal expansion

### 3. 프리피스톤 기관의 uniflow 소기특성

#### 3.1 Uni-flow 소기방식의 유동양상

Fig. 5는 배기밸브가 피스톤이 63.5% 팽창한 위치에서 8mm 개방된 경우의 소기과정을 가시화 한 이미지와 이를 바탕으로 구한 속도벡터를 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 여기서 스트로크는 피스톤이 100%로 팽창하는 85mm이다. 그림에서와 같이 피스톤이 구동된 이후 배기밸브가 개방되면 실린더내의 입자들이 배기밸브 방향으로 빠른 속도로 배출되기 시작한다. 연속적으로 피스톤이 팽창하면서 흡기포트가 열리고 신기가 유입된다. 흡입초기에는 실린더내로 유입되는 신기의 유입각도가 크기 때문에 실린더 벽면으로 강하게 배기가스를 배출시키는 양상을 보인다. 피스톤이 BDC까지 팽창하면서 흡기포트가 완전히 개방되면 신기가 실린더 중심부의 기연가스를 밀어 배출되는 것으로 보인다. 루프소기방식을 갖는 프리피스톤 기관의 경우에는 실린더 헤드 영역의 모서리와류 등에 의해 충분한 소기가 이루어지지 못하는 것이 확인된바 있다.<sup>10)</sup> 이에 반해 uni-flow 소기방식에서는 유입되는 신기에 의한 기연가스의 배기작용 간섭이 배제됨으로서 상대적으로 원활한 소기작용이 이루어지는 것을 나타낸다.

#### 3.2 배기밸브에 대한 uni-flow 소기특성

배기밸브 열림 시기 Fig. 6은 배기밸브가 열린 시점의 실린더 내 유동평균속도를 배기밸브 열림 시기 변화에 따라 나타낸 것이다. 배기밸브 열림 시기의 변화는 유동패턴에 큰 영향을 주지 않음으로 유사한 양상을 보이거나 배출되는 유동속도에서 차이가 나는 것을 보인다. 유동평균속도는 피스톤이 63.5% 팽창한 지점에서부터 68.2% 지점까지 배기밸브 열림 시기가 지연될수록 감소하는 것을 나타낸다. 배기밸브 열림 시기는 피스톤의 팽창이 약 4% 증가된 시점으로 지연됨에 따라 평균속도가 약 26%정도 감소되는 것을 나타낸다. 이것은

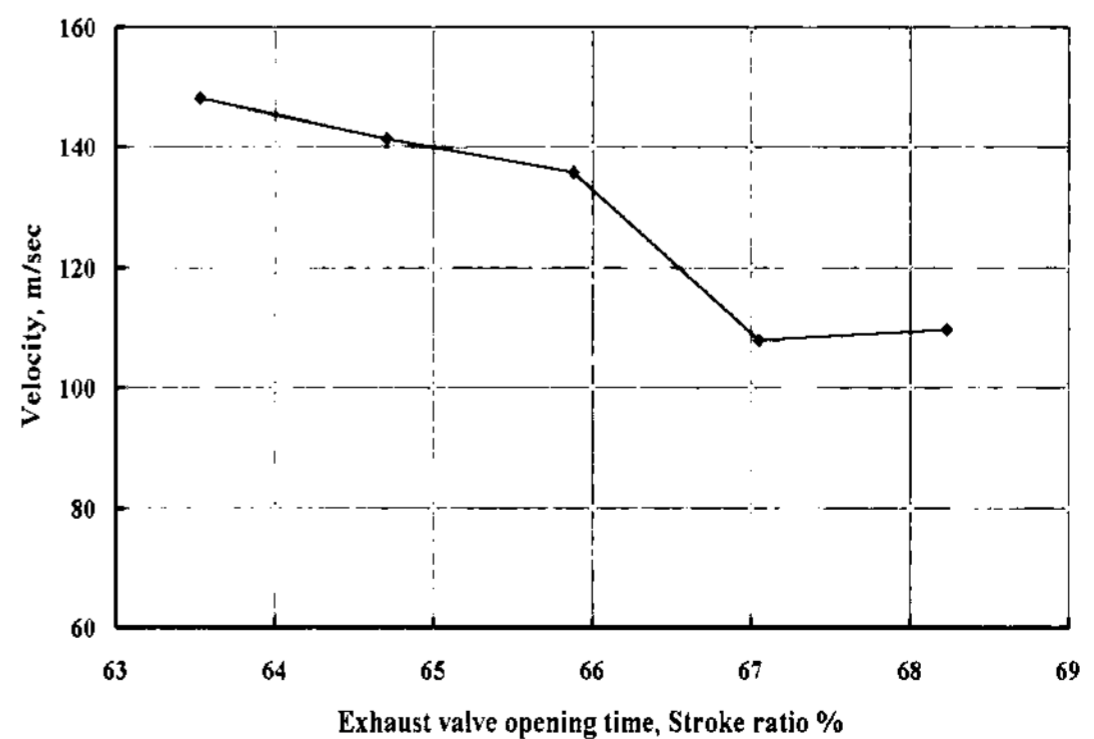


Fig. 6 Mean velocity according to exhaust valve opening time

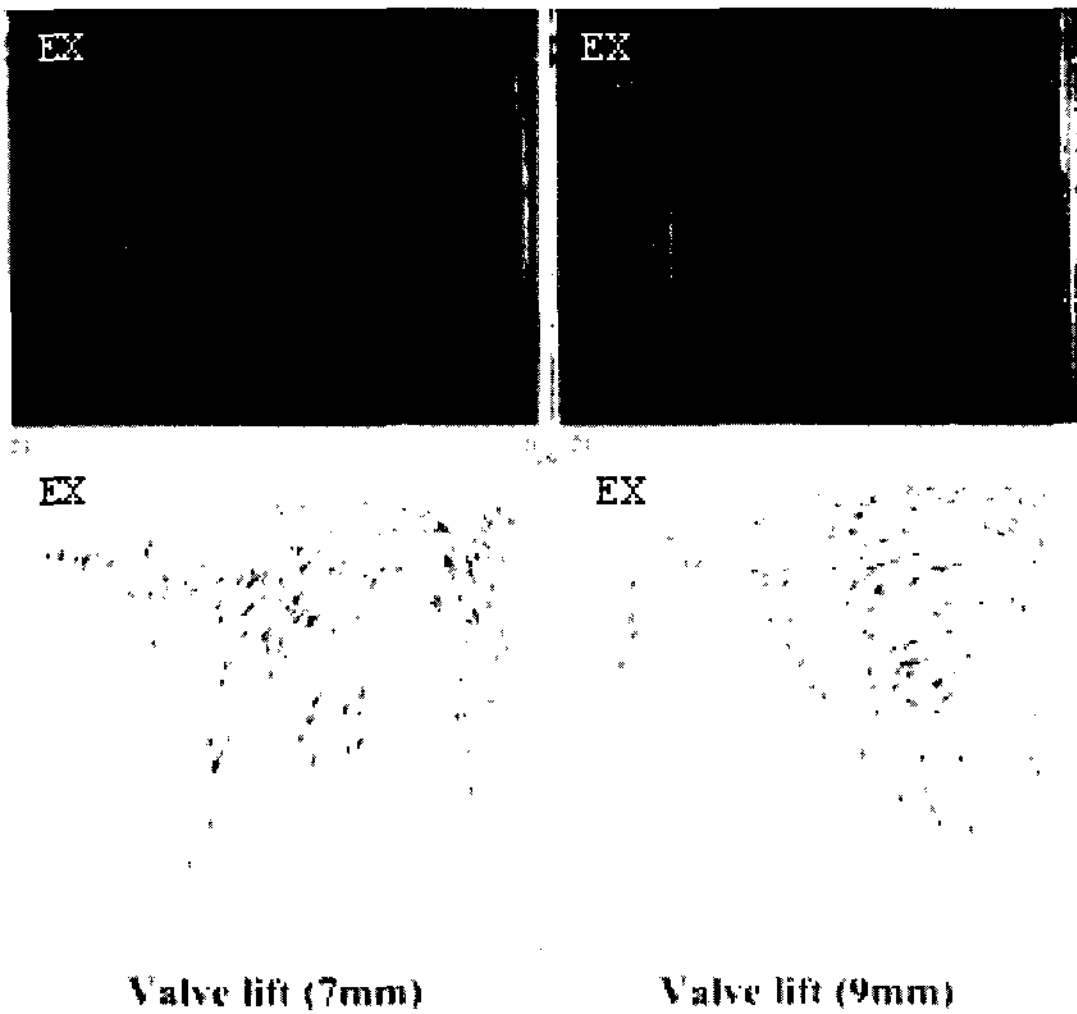


Fig. 7 Raw images and flow pattern of the different valve lift

배기밸브 열림 시기가 지연될수록 피스톤의 팽창에 의해 배기밸브가 열리는 시점에서 실린더 압력이 낮아지는데 의한 것으로 볼 수 있다. 하지만 배기밸브가 너무 일찍 개방되면 출력감소가 발생할 가능성이 클 것으로 보인다.

**배기밸브 리프트** Fig. 7은 배기밸브 리프트 변화에 대한 가시화 사진과 속도벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 것과 같이 리프트 변화에 따른 유동패턴의 변화는 크지 않으나 배기밸브로 나가는 입자의 유동은 리프트가 가장 큰 9mm에서 7mm보다 활발히 배출되는 것으로 보인다. 이와 같은 결과는 리프트가 커짐에 따라 밸브의 유효단면적이 증가하여 배출이 원활히 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 9mm의 경우 유입되는 신기가 실린더 내에 머무르지 못하고 배기밸브로 빠져나가는 단락유동이 증가하는 것을 보인다. 이는 효율감소의 원인으로 작용할 가능성이 있으므로 밸브 리프트는 단락유동이 적고 배기가스의 배출이 원활하게 이루어지는 8mm가 적절할 것으로 판단된다.

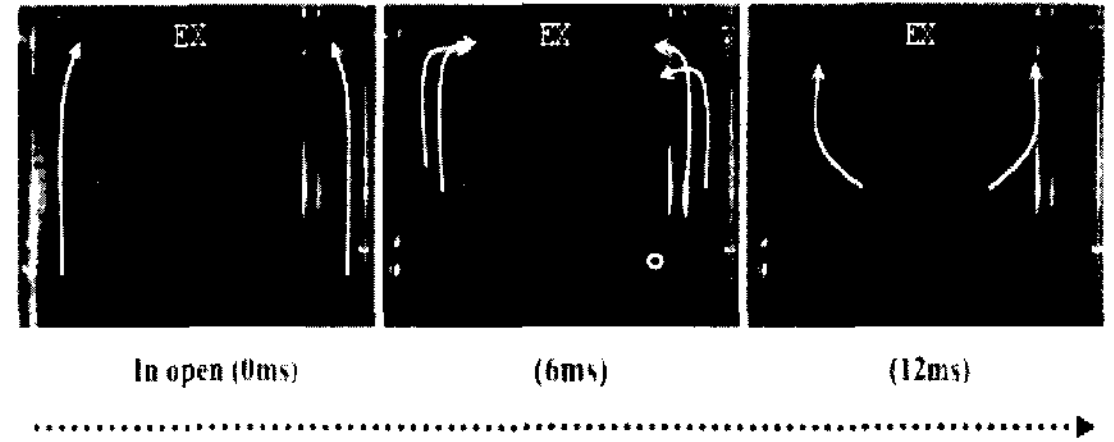


Fig. 8 Raw images of in cylinder for a exhaust valve location

**배기밸브 위치** Fig. 8은 배기밸브를 실린더 헤드 중앙에 위치한 경우의 가시화 사진을 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 사진에서 보는바와 같이 흡입초기에 신기가 큰 유입각도로 실린더 벽면을 타고 배기가스를 강하게 밀어내는 것을 볼 수 있다. 중앙 점화플러그 위치를 고려하여 배기밸브가 중앙에서 20mm 치우쳐 있는 경우에는 배기밸브 반대편의 실린더 벽면과 헤드사이에서 모서리와류가 발생하여 소기작용이 저하되는 것을 보인다. 이에 반해 배기밸브가 중앙에 위치하면 실린더 벽면에서 배기밸브에 이르는 유동이 대칭형을 나타내며 모서리와류의 발생이 감소하는 것을 보인다. 배기밸브가 중앙에서 치우쳐 있는 경우는 모서리 영역에서 배기밸브에 이르는 거리가 길어지게 된다. 반면에 배기밸브가 중앙에 위치한 경우 모서리와류가 발생하는 영역에서 밸브까지의 거리가 단축된다. 이로 인해 와류형태로 나타나는 유동 또한 배기밸브로 배출될 수 있어 소기에 부정적인 모서리와류가 감소되는 것으로 판단된다.

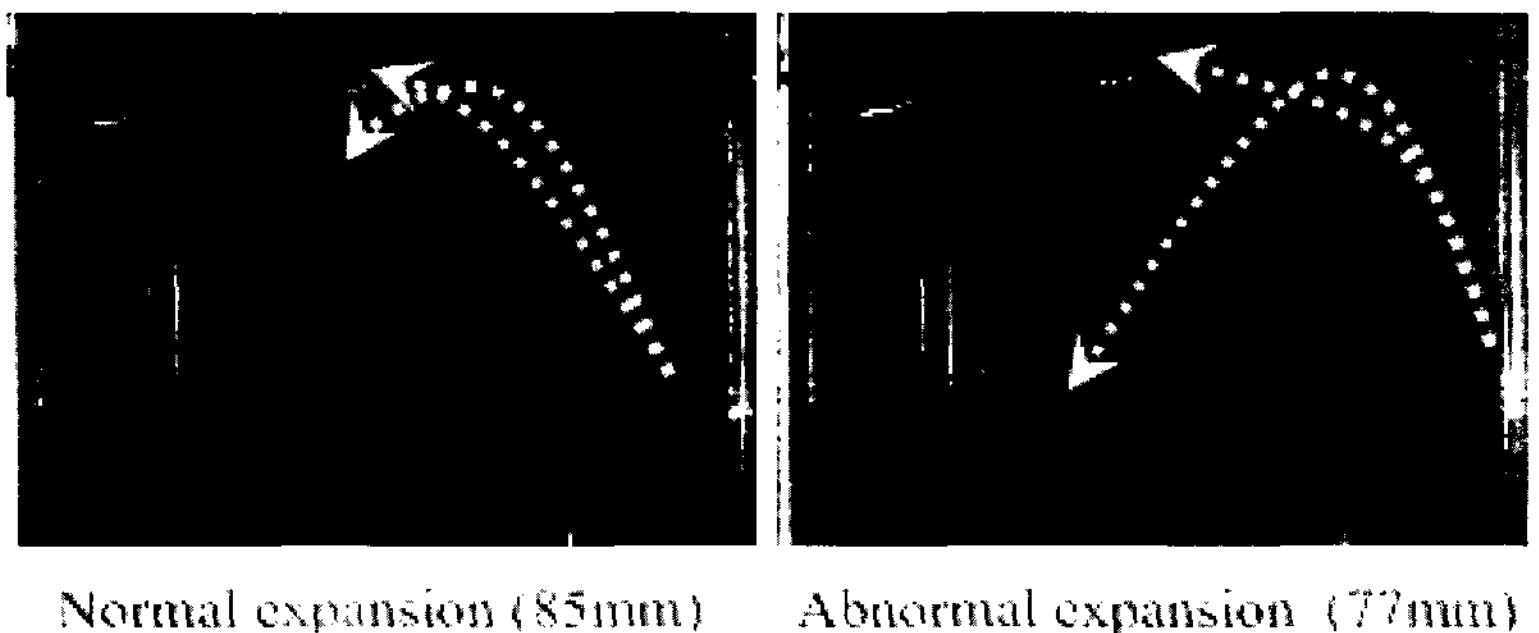


Fig. 9 Characteristics of the flow according to expansion

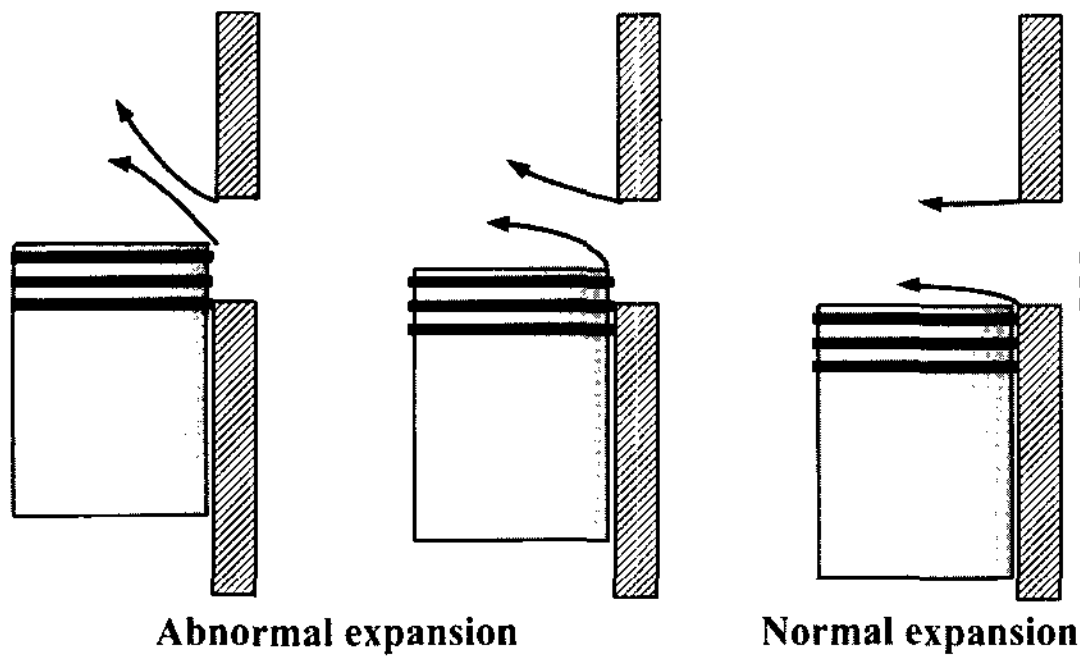


Fig. 10 Flow pattern through piston-controlled inlet port

### 3.3 비정상 팽창에 따른 소기양상

Fig. 9는 피스톤이 BDC까지 팽창한 정상 운전 상태와 BDC전 8mm까지 팽창한 비정상 팽창의 유동양상을 나타낸 가시화 사진이다. 피스톤이 정상 팽창한 경우에는 흡입되는 신기의 유동이 확산되면서 실린더내의 배기가스를 배기밸브 쪽으로 원활하게 밀어내는 유동 양상을 보인다. 이 경우 밸브 반대 방향의 실린더 라이너와 헤드사이에서는 모서리 와류의 발생이 보여진다. 그러나 그 크기가 크지 않아 배기밸브로 나가는 배기가스의 유동간섭이 크지 않은 것으로 보인다. 이에 반해 비정상 팽창에서의 유동양상은 흡입되는 신기의 유동이 실린더 벽면으로 치우쳐 강하게 배기가스를 밀어 내는 것을 볼 수 있다. 또한 배기밸브 반대방향에서 발생하는 모서리 와류의 크기가 매우 커서 배기밸브 쪽으로 나가는 배기가스의 유동을 방해하는 것을 나타낸다. 이것은 다음과 같이 피스톤의 팽창이 달라지는데 따른 흡입되는 신기의 유입각도에 의한 것으로 판단된다. 피스톤이 이상연소 등에 의해 BDC까지 도달하지 못하는 비정상 팽창의 경우에는 그림에서와 같이 흡기포트의 개구율이 감소하고 신기가 실린더내로 유입되는 각도가 커지게 된다. 따라서 실린더 중앙에 있는 배기가스는 신기가 밀어내지 못하여 배출이 어렵게 되어 잔류가스 생성 가능성이 높아질 것으로 생각된다. 또한 흡기포트 개구율의 감소와 신기의 흡입기간이 짧아져 공급열량 감소로 이어질 가능성이 있다. 상기의 결과와 같이 비정상 팽창이 이루어질 경우 다

음 행정에서 불안정한 연소가 이루어질 가능성이 크므로 uni-flow소기방식의 프리피스톤에서는 임의의 방법으로 피스톤을 최소 스트로크이상 움직여야 된다. 이것은 프리피스톤과 리니어 발전기를 시스템화 하는 경우 비정상팽창이 발생하면 발전기가 피스톤을 전체 스트로크까지 팽창시켜주는 것이 바람직하다는 것을 의미한다.

## 4. 결 론

Uni-flow 소기방식의 프리피스톤 수소기관의 소기유동 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Uni-flow 소기방식에서는 루프소기방식에서 발생하는 배기와 신기간의 상호간섭이 일어나지 않으므로 잔류가스에 의한 연소불안정 가능성이 적고 상대적인 소기성능이 우수함을 확인하였다.
- 2) 배기밸브 열림 시기가 피스톤이 63.5% 팽창한 시점보다 지연될수록 실린더 내 압력강하에 의해 소기성능이 떨어지는 것을 볼 수 있었다.
- 3) 배기밸브 위치가 중앙에서 20mm 치우친 경우 모서리 와류에 의해 소기성능이 저하되며 중앙으로 위치를 변경시키면 모서리 와류 감소와 함께 소기작용이 개선되는 경향이 보여졌다.
- 4) 비정상팽창에 의한 스트로크 변화 결과 프리피스톤 기관은 비정상팽창 시 잔류가스의 생성가능성이 높기 때문에 연소안정화를 위해 일정한 스트로크를 유지할 수 있는 방법의 강구가 요구된다.

## 후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

## 참 고 문 헌

- 1) R. Mikalsen, A.P. Roskilly, "Performance simulation of a spark ignited free-piston engine generator", Appl. Therm. Eng., 2008

- 2) R. Mikalsen, A.P. Roskilly, "A review of free-piston engine history and applications", Appl. Therm. Eng 27, 2339-2352, 2007
- 3) Csaba Toth-Nagy, Nigel N.Clark, "The Linear Engine in 2004", SAE 2005-01-2140
- 4) 윤재성, 조형욱, 이종태, 이용균, "프리피스톤 리니어 동력시스템의 루프소기성능 향상을 위한 유동해석", 한국수소 및 신에너지 학회 논문집
- 5) 고대권, 최재성, "저속 2행정 디젤 기관의 소기특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지 제19권 3호, 1995, pp. 202-210
- 6) 김윤영, 이종태, "프리-피스톤 수소기관의 동적 운전특성에 관한 기초연구", 한국수소 및 신에너지 학회 논문집, Vol. 14, No. 4, 2003, pp. 183-290
- 7) S. Scott Goldsborough, Peter Van Blarigan "Optimization the Scavenging System for a Two-Stroke Cycle, Free piston engine for High Efficiency and Low Emissions", SAE, 2003-01-0001, 2003
- 8) 임경수, 김희산, "PIV SYSTEM의 개발과 응용", 제3회 광계측기술 워크샵 논문집, 1994
- 9) 노기철 "가스기관의 연소실내 유동강화를 위한 실험적 연구", 박사학위논문, 2004, pp. 182-187
- 10) 윤재성, 조형욱, 노기철, 이종태, "프리피스톤 리니어 동력시스템의 연소안정화를 위한 소기성능에 관한 연구", 한국수소 및 신에너지 학회 2007년 춘계 학술대회 논문집, 2007, pp. 14-19
- 11) John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mcgraw-Hill, pp. 246-247