

프리피스톤 리니어 동력시스템의 루프소기성능 향상을 위한 유동해석

윤재성[†], 조형욱*, 이종태**, 이용균***

*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부, ***(주)엔진텍

A Flow Analysis for Improvement of the Loop Scavenging Performance of a Free Piston Linear Power System

Jaeseong Yoon[†], Hyoungwook Cho*, Jongtai Lee**

**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

****Engine Tech Co., LTD*

669-6 Yangno-li Bibong-myun Hwaseong-si Gyeonggi-do ,Korea

ABSTRACT

The focus of this research is that the scavenging aspect of in-cylinder is visualized by the PIV method and its characteristic is analyzed so that the scavenging performance of the free piston hydrogen fueled engine can improve with loop scavenging. As the results, the piston of convex type shows the best scavenging performance among the presented pistons. In case of the abnormal expansion, the scavenging of area between cylinder head and cylinder wall doesn't operate well.

KEY WORDS : free piston engine linear power system(프리피스톤 리니어 동력시스템), improvement of scavenging performance(소기), flow visualization(유동가시화)

1. 서 론

프리피스톤 리니어 동력시스템은 직선운동을 회전운동으로 변환하는 크랭크 기구가 없어 구조

가 간단하다. 또한 스트로크를 자유롭게 변화시키면서 실린더의 열에너지를 최대의 팽창일로 변환하므로 크랭크 기관에 비하여 효율이 증가하는 특징이 있다. 반면에 관성에너지를 저장할 수 있는 플라이휠을 설치할 수 없어 매 사이클당 연소를 수행하는 2행정 dual 피스톤을 일반적으로 채택하

[†]Corresponding author : hawk46@skku.edu

고 있다.^{1,2)}

저자들은 고효율의 수소기관개발을 위한 일환으로 루프소기를 갖는 2cycle 프리피스톤 수소기관을 연구 중이다. 주지의 사실과 마찬가지로 2cycle 기관의 성능은 소기특성에 따라 좌우되어 사이클 변동이 증가한다. Dual type 프리피스톤 기관의 경우에는 각 피스톤이 불완전팽창 및 압축에 의한 신기도입과 유동양상의 변화로 기관이 정지하거나 피스톤이 실린더 헤드에 충돌할 수 있다.^{3,4)} 따라서 프리피스톤 수소기관의 소기성능향상은 기관의 정상운전 뿐만 아니라 효율증가에 중요한 과제이다. 소기특성의 해석에는 여러 가지 방법이 있지만 유동가시화가 가장 신뢰성 있는 해석 방법으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 루프소기를 갖는 프리피스톤 수소기관의 소기성능을 향상시키기 위한 기초연구로서 실린더 내의 소기양상을 PIV에 의해 가시화하고 그 특성을 해석하였다. 이를 위해 프리피스톤 기관의 실린더 헤드로부터 소기포트 사이의 루프소기 유동양상을 가시화할 수 있는 단발 구동형 소기가시화장치를 개발하였다. 실험변수는 피스톤 헤드형상과 비정상팽창에 해당하는 스트로크의 변화이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 단발 구동형 프리피스톤 소기가시화 장치

Fig. 1은 루프소기를 갖는 단발 구동형 소기가

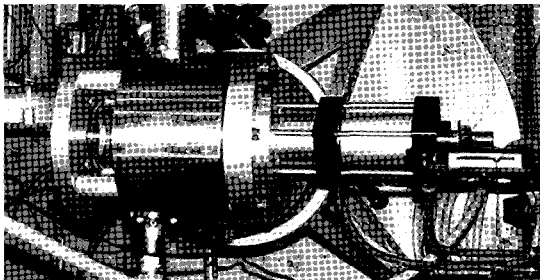


Fig. 1 Photograph of linear power system for visualization

시화용 프리피스톤 리니어 장치의 실물사진을 나타낸다. 가시화 장치는 스트로크 가변형 실린더 헤드, 가시화부, 실린더 블록, 피스톤 구동부, 흡·배기포트 등으로 구성된다. 실린더 헤드는 나사구조를 갖는 이동형으로 가시화창 안으로 실린더 헤드가 움직여 스트로크가 변화되는 구조로 되어있다. 소기유동을 가시화하기 위하여 가시화창(내경 50 mm, 두께 15 mm, 높이 48.1 mm)을 실린더 블록과 실린더 헤드 사이에 설치하였다. 흡·배기포트는 원주방향으로 5개의 흡기구와 1개의 배기구가 배치되어 있다. 각 포트의 형상은 상용의 2행정기관의 형상을 고려하여 결정하였다. 배기포트는 흡기포트 상단 4 mm 전에 개방되도록 하였다.

피스톤 구동부는 솔레노이드 밸브, 공압실린더 및 구동센서로 구성된다. 피스톤은 빠른 속도로 압축 및 팽창하도록 복동공압실린더를 사용하여 구동되며, 구동압력은 7.5~8bar이다. 피스톤은 팽창말기에서 압축 초기까지의 과정을 모사하기 위해 구동초기에 피스톤 헤드를 배기포트 전 18 mm에 위치하도록 하였다. 솔레노이드 밸브의 제어신호에 따라 BDC까지 40 mm 팽창하며 광화이버센서의 신호를 받아 다시 초기 위치까지 압축되도록 구성되어있다. 초기신호 이후의 솔레노이드 밸브, 공압실린더, 카메라의 동작신호의 시간지연 및 동기화는 펄스 제네레이터를 이용하여 제어한다.

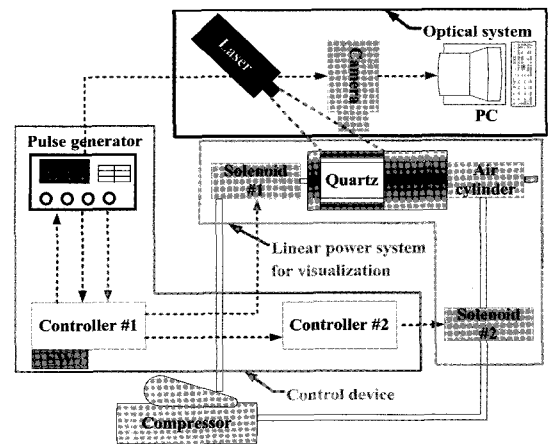


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

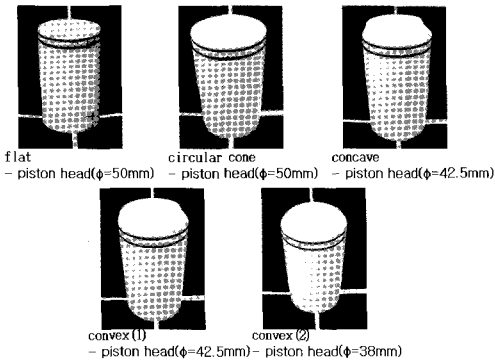


Fig. 3 Shape of piston

2.2 실험 장치

실험 장치는 전술한 단발 구동형 프리피스톤 가시화장치, 광학장치부, 제어부로 구성되며 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다.

실린더 내의 유동장은 레이저광원(He-Ne, 500mW)이 원주형 렌즈를 통해 실린더의 원주방향과 수직하도록 중심축에 평면광으로 조사되어 나타난다. 레이저 광원으로부터 입자들에 의해 산란된 유동단면은 고속카메라(Kodak EktaPro HG imager Model-2000)에 의해 일정 시간간격으로 촬영된다. PIV용 산란입자는 50 μ m의 PSP (Polyamid Seeding Particles)를 사용하며 실린더 헤드부에 장착된 솔레노이드의 개폐에 의해 공급된다. 산란입자의 공급압력은 3bar이다. 이 압력은 실험초기압력으로서 팽창말기 피스톤이 배기포트 18mm전방에 도달되었을 때의 압력을 고려한 것이다.

2.3 실험 방법

실험은 피스톤의 형상 및 비정상팽창을 의미하는 스트로크의 변화에 따른 리니어 동력시스템의 소기성능을 평가하는 것이다. 먼저 실린더 내에 3bar의 산란입자를 공급하여 일정시간 지연 후 피스톤을 공압실린더에 의해 급속히 왕복 구동시켜 그때의 소기과정을 고속카메라로 가시화하여 개별 입자추적 PIV기법으로 해석하였다. 피스톤 형상은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 5종이다. Flat형은 피스

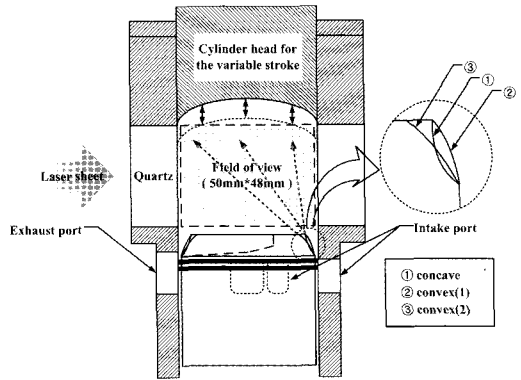


Fig. 4 Visualizing field and configuration of piston

톤 헤드 면이 평평한 것이다. Circular cone형의 피스톤은 원추형상이며 원활한 배기를 위하여 피스톤 헤드의 배기포트 쪽 면을 bathtub 형상으로 하였다. 이것은 flat형을 제외한 4개의 피스톤에 모두 적용하였다. Concave와 convex형의 피스톤은 각각 피스톤 톱 랜드부가 피스톤 안쪽으로 볼록한 것과 바깥으로 볼록한 형상이다. Fig. 4는 실린더 내로 유입되는 신기의 유동방향을 추정한 것이다. Convex형은 이 추정 제적을 실현시킬 수 있도록 피스톤 헤드 상단면의 직경을 다르게 하여 도입각도의 변화를 준 두 종류이다.

3. 프리피스톤 기관의 루프소기 특성

3.1 피스톤 형상의 차이

Fig. 6은 피스톤 헤드가 flat형인 경우의 소기과정을 PIV한 실제 이미지와 이를 바탕으로 해석한 속도벡터를 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 여기서 실린더 초기압력은 3bar이며 스트로크는 피스톤이 완전히 팽창되는 77mm이다. 그림에 나타난 바와 같이 피스톤 구동으로부터 배기포트가 개방되면 실린더 내의 입자들이 배기포트 방향으로 빠져나가기 시작한다. 피스톤이 팽창하면서 연속적으로 흡기포트가 열리면(3ms의 사진) 신기가 유입된다. 신기는 흡기포트에서 대각방향으로 도입되며 실린더 벽면을 따라 확산된다. 이중 일부는 실린더 내로 진입하지 못하고 바로 배기포트로 빠

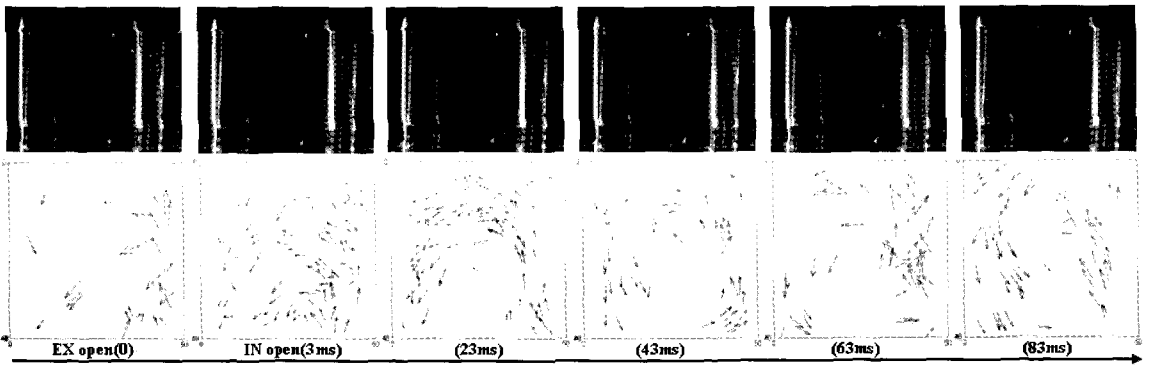


fig. 5 Raw images and velocity vector of in cylinder flow with flat piston

져나가는 단거리 통과유동(short circuiting flow)을 보인다. 이후에 bulk flow와 루프를 형성하며 피스톤이 팽창함에 따라 유동은 점차 약화되는 양상을 보인다. 전체적인 실린더 내 유동은 반시계방향의 회전유동이 bulk flow를 이루지만 실린더 내로 진입된 신기가 원활한 루프형성을 하지 못하고 흡기유동의 방향성 및 재현성을 보이지 않는다. 이로 인해 실린더 헤드 쪽의 배기가스를 완전하게 밀어내는 작용이 약화됨으로써 충분히 소기가 되지 않는 양상을 보인다.

Fig. 6은 flat형을 제외한 4가지 형상의 피스톤에 대한 PIV이미지와 유동특성을 나타낸다. 여기

서 각각의 실험조건은 모두 동일하다. Circular cone형의 경우 실린더 헤드 쪽의 일부 배기입자가 배기포트로 가기 이전에 흡기와 충돌하여 배출이 차단되는 현상을 나타내었다. 이 영향으로 흡기의 실린더 내 진입 방향성 또한 저하됨으로써 일정한 bulk flow가 보이지 않았고 이로 인해 루프형성이 이루어지지 못함을 나타낸다. 이후에는 단거리 통과유동을 보이며 실린더 중앙부에서 약한 와류형태가 나타난다.

Concave형 피스톤의 가시화 결과에서는 흡기와 배기사이의 충돌이 보이지 않으나 일정기간 동안 흡기유동의 일부가 분리된 방향성을 나타낸다. 이것은 2차원 가시화에 의해 나타나지 않은 측면 흡기포트를 통해 완만하게 유입된 신기의 상호 간섭에 의한 것으로 판단된다. 이후의 유동형태는 flat형의 경우에서와 같이 반시계방향으로 회전하는 bulk flow가 형성되는 것을 보인다. 단거리 통과유동은 circular cone에 비해 미미한 수준을 나타낸다. 또한 루프형성까지 나타나는 유동양상을 보이지만 그 형태가 불확실하고 실린더 벽면과 헤드사이의 영역까지 원활한 소기를 이루어줄 만큼 충분한 형태의 것이 아님을 보이고 있다.

상기의 피스톤에 비해 상대적으로 톱 렌드부의 경사도가 큰 convex(1)형의 흡·배기유동은 그 양상이 다소 상이하게 나타난다. 신기입자가 피스톤 형상을 추종하여 실린더 벽면을 따라서 유입되고 상기 피스톤 형상에서 나타난바와 같이 신기와 배

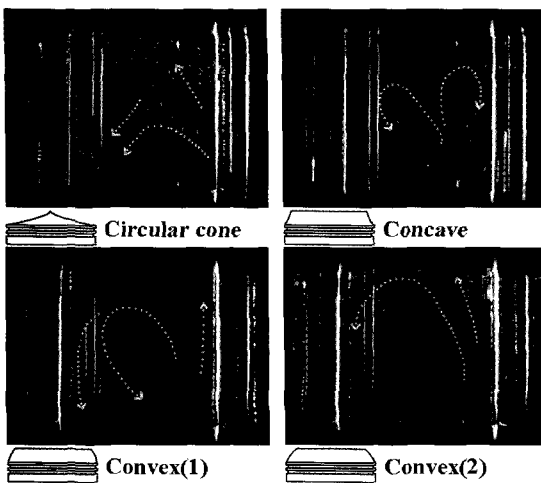


fig. 6 Characteristic of the flow according to configuration of the piston

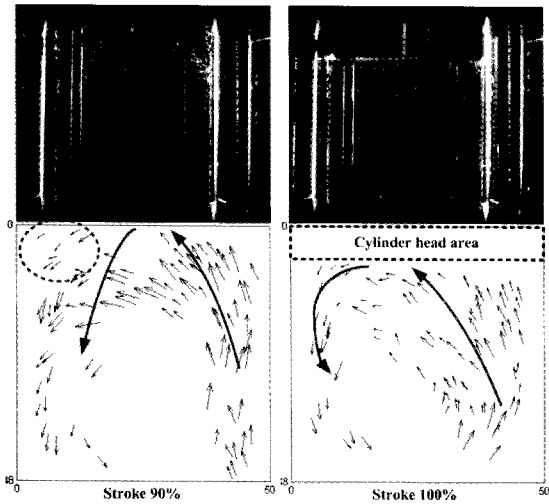


Fig. 7 Raw images and flow pattern of the different stroke in case of the abnormal expansion

기가스가 충돌하거나 분리되는 현상이 보이지 않는다. 이와 동시에 흡기포트에서 대각방향으로 진입하면서 반시계방향의 bulk flow를 형성하는 것을 볼 수 있다. 이후 루프의 중심이 실린더 중앙에서 다소 편향된 양상을 보이지만 비교적 원활하게 소기가 되는 것을 보인다.

피스톤 헤드 상단면의 직경이 convex(1)보다 작은 형태의 convex(2)의 가시화 결과는 전체적인 형태가 convex(1)과 유사한 양상을 보이지만 유입된 신기가 배기를 감싸는 형태로 단속하여 배출시키는 흐름을 나타낸다. 이것은 convex 피스톤형상 설계 예측한 유동(Fig. 4)과 동일한 양상이다. 또한 이 경우의 루프 형태가 더 안정적이며 입자분포가 확산되어 가장 긍정적인 소기형태를 보인다.

전술한 결과들은 흡기포트를 통해 공급되는 유동의 종방향 성분이 상대적으로 강하기 때문인 것으로 보인다. 이는 팽창과정 중에 피스톤링이 포트를 지나 흡기유동이 개시되는 시점에 피스톤 톱랜드부의 좁은 틈을 통해 입자가 빠른 속도로 유입되는 것에 기인하는 것으로 생각된다. 그러므로 flat, circular cone, concave 등과 같이 피스톤 헤드의 형상이 횡방향으로 완만한 경우에는 bulk flow 및 루프의 형성에 있어 바람직하지 못한 것

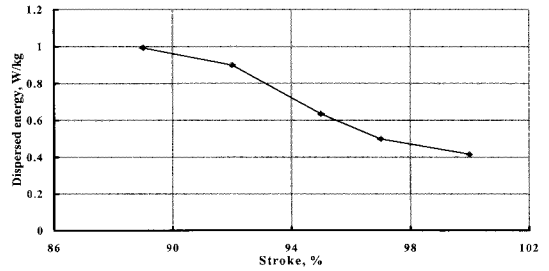


Fig. 8 Dispersed energy for the different stroke in case of the abnormal expansion

으로 판단된다. 또한 모서리 와류가 피스톤 형상에 대해 다소 차이는 있으나 모든 피스톤 형상에 대해 공통적으로 생기는 것은 흡기포트로부터 대각방향의 실린더 헤드 부근까지 이동하는 동안 운동에너지가 감소하는데 의한 것으로 생각된다. 이것은 배기가스의 일부가 실린더 내에 잔류할 가능성이 있는 것을 의미한다.

3.2 비정상팽창시의 소기양상

Dual type 프리피스톤 기관에서 연소불안정에 의해 한쪽 피스톤이 불완전하게 팽창하면 반대쪽 피스톤은 불완전압축을 하게 된다. 이로 인한 실린더내 유동양상의 변화는 다음 사이클의 소기양상을 좌우하게 되므로 비정상팽창의 유동양상을 해석하였다. Fig. 7은 비정상팽창을 의미하는 스트로크 변화에 대한 PIV사진과 속도벡터를 나타낸 일레이다. 그림에 나타난 바와 같이 피스톤이 완전하게 팽창하는 스트로크 100%의 경우에는 안정적인 루프를 형성하며 원활한 소기양상을 나타낸다. 그런데 피스톤이 비정상팽창하여 스트로크가 90%인 경우에는 실린더 헤드 영역에서 형성된 모서리 와류가 상대적으로 크게 발생하여 bulk 소기유동이 작아진 것을 나타낸다. 상기의 결과로부터 구한

$$dE = \nu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, dE : 유동의 에너지분산
 ν : 유체의 동점성계수
 u, v : x, y 방향의 유동속도

에너지 분산을 스트로크 변화에 대해 나타낸 것이 Fig. 8이다. 여기서 에너지 분산(dE)은 식(1)과 같이 도시되며 x,y방향의 유동속도는 속도벡터로부터 결정하였다. 에너지 분산은 피스톤이 완전하게 팽창하는 스트로크 100%보다 적게 움직이면 대체로 비례하여 증가하는 것을 보인다. 에너지 분산의 크기는 유동에너지 분포와 붕괴정도를 나타내므로 에너지 분산이 큰 것은 붕괴정도가 빠르다는 것을 의미한다. 프리피스톤 기관의 실린더내 유동은 소기과정에 의해 생성된 후, 피스톤의 움직임에 따라 생성 및 붕괴된다. 이러한 유동붕괴가 적으면 소기를 원활하게 하는 유동의 강화 및 보존에 유리하다. 따라서 에너지 분산의 측면에서 유동강화 및 보존은 비정상팽창이 증가할수록 감소되는 것을 알 수 있다. 또한 비정상팽창시 에너지 분산이 증가하는 것은 Fig. 7에서 설명한 바와 같이 실린더 헤드 영역에 형성되는 모서리 와류가 커지는데 의한 것으로 볼 수 있다. 상기의 결과와 같이 불안정한 기관운전으로 비정상팽창이 발생되면 반대편 피스톤의 연소상태 또한 중속적으로 불안정하게 되므로 임의방법으로 피스톤을 최소 스트로크 이상으로 움직여야 된다. 이것은 프리피스톤 기관과 리니어 발전기를 시스템화 하는 경우 비정상팽창이 발생되면 순간적으로 발전기가 모터로 전환되는 것이 바람직하다는 것을 의미한다. 또는 통상의 흡·배기밸브와 같이 별도의 장치로 임의 시점에 개폐시켜 소기를 원활히 하는 방안도 적절한 것으로 생각된다.

4. 결 론

프리피스톤 리니어 동력시스템의 피스톤 형상 및 비정상팽창시의 스트로크에 따른 소기특성의 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 흡기 유동의 방향성이 상대적으로 크게 보임으로서 피스톤 헤드 면의 경사각이 큰 convex형 피스톤의 소기가 가장 원활히 이루어졌고 bulk flow형성에도 바람직한 것을 나타냈다.

- 2) 상대적으로 스트로크가 짧아지는 비정상팽창의 경우에 실린더 헤드와 벽면사이 모서리 영역의 소기작용이 원활하지 못하여 연속적인 연소불안정을 초래할 수 있는 것으로 보인다.
- 3) 본 실험 결과는 루프소기방식의 상대적인 결과로서 잔류가스의 존재 가능성이 있으므로 향후 다른 소기방법에 대한 검토도 요구된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) S. Scott Goldsborough and Peter Van Blarigan(Sandia National Laboratories), "A Numerical Study of a Free Piston IC Engine Operating on Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion", SAE 1999-01-0619, 1999.
- 2) Peter Van Blarigan Sandia National Laboratories Livermore, "Advanced Internal Combustion Engine Research", Proceedings of the 2000 DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-570-28890, 2000.
- 3) 김윤영, 이종태, "프리-피스톤 수소기관의 동적 운전특성에 관한 기초연구", 한국 수소 및 신에너지 학회 논문집 Vol. 14,2003.12, No.4, pp. 283~290.
- 4) 노태석, 김강출, 우영민, 이용균, 류정인, 이영재, "수소연소 리니어엔진의 동적특성에 대한 연구", 한국자동차공학회 2006년 춘계 학술대회 논문집 Vol. III, 2006. 6, pp. 1841-1846.
- 5) 노기철, "가스기관의 연소실내 유동강화를 위한 실험적 연구", 성균관대학교 박사학위논문, 2004