

역단류 소기방식을 갖는 2행정 프리피스톤 수소기관의 열효율 향상에 관한 연구

변창희*[†], 백대하*, 이종태**

*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부

An Investigation on Enhancing Thermal Efficiency of a Hydrogen Fueled 2 Stroke Free-piston Engine with Reverse Uni-flow Scavenging

CHANGHEE BYUN*[†], DAEHA BAEK*, JONGTAE 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

ABSTRACT

A hydrogen fueled 2 stroke free-piston engine with reverse uni-flow scavenging have a advantageous structure for the backfire occurrence, but it can reduce thermal efficiency by the circuit-flow to go through a exhaust-port. In this research, varied boost pressure, SVOT and exhaust pressure are used in a 2stroke free-piston engine with hydrogen fueled for studying the possibility of increasing thermal efficiency of free-piston hydrogen engine. As a result, to increase thermal efficiency of free-piston are suitable to supply the mixture after port closed the exhaust rater than to use the scanvenging. And it was increased by the exhaust pressure, to achieve it must be used the lean-mixture at SVOT aBDC 34°.

KEY WORDS : Free-piston engine(프리피스톤 기관), Hydrogen(수소), Reverse uni-flow(역단류 소기), Circuit-flow(단락유동), COV_imep(연소변동율)

1. 서 론

2행정 프리피스톤 수소기관은 구조가 간단하며 가연한계가 넓고 비열비가 큰 무탄소의 수소연료를 사용하므로 고효율과 저배기를 동시에 실현시킬 가능

성이 있다¹⁾. 상기 프리피스톤기관에 적용 가능한 소기방식은 loop(회단), uni-flow(단류), reverse uni-flow(역단류) 소기방식이 대표적이다. 이 중에서 역단류소기방식은 크레비스 볼륨 내에 잔존하는 미연 화염에 의해 발생하는 역화역제에 있어서 가장 유리한 구조를 가진다. 하지만 실린더헤드에 장착된 poppet형 소기밸브의 기하학적 형상에 의해 실린더

[†]Corresponding author : bch1979@skku.edu

[접수일 : 2011.4.15 수정일 : 2011.5.26 게재확정일 : 2011.6.20]

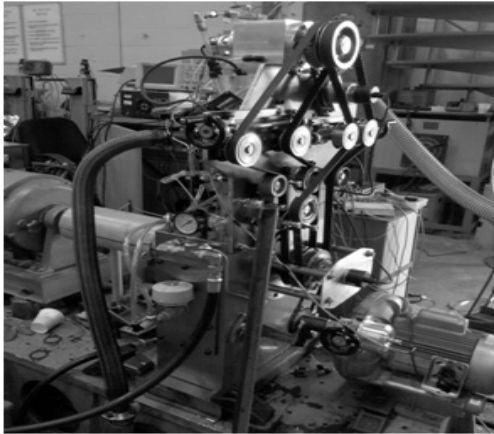


Fig. 1 Cross head-offset hydrogen engine

벽면유동이 발달하면서 중심부근에 vortex가 형성되고 배기포트로 신기가 바로 유출되는 단락유동이 증가되는 것이 선행연구에서 관찰된바 있다²⁻⁵⁾. 주지의 사실과 마찬가지로 실린더내로 공급되는 신기의 단락유동은 열효율을 감소시키는 주된 원인이 된다.

단락유동은 기연가스를 불어내는 신기의 공급압력, 즉 소기압력과 소기밸브의 열림시기를 변화시켜 감소시킬 수 있다. 또한 배기압력의 증가로 감소시킬 수 있으나 프리피스톤기관을 대상으로 이 인자들에 대해 해석한 것은 아직 명확히 보고되지 않은 상황이다.

본 연구에서는 역단류 소기방식을 갖는 2행정 프리피스톤 수소기관의 열효율을 향상시키기 위하여 소기압력, 소기밸브 열림시기 및 배기압력 변화에 따른 열효율 및 제반성능에 대해 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 역단류 소기방식 프리피스톤 상사기관

2행정 프리피스톤 수소기관의 연소 안정성을 확보하여 데이터의 신뢰성을 높이고자 프리피스톤 상사기관을 설계 및 제작하였다. 프리피스톤 상사기관의 실물사진 및 기관제원을 각각 Fig. 1 및 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Specification of test engine

Bore×Stroke (mm)	80×85
Scavenging type	Reverse uniflow
Displacement volume	427cc
Compression ratio	8.47
Exhaust port open/close	BBDC 34°/ABDC 34°

프리피스톤 상사기관은 프리피스톤기관의 자유로운 행정 변화에 의한 연소 불안정을 해소하기 위해 크랭크 타입을 적용하면서 가능한 프리피스톤기관의 특성을 상사시켰다. 피스톤 slap의 최소화에는 cross head 방식을 채택하였다. 또한 프리피스톤기관의 피스톤속도를 추종하기 위해 25.3mm (positive offset)의 크랭크축 편심량을 가지는 crank offset 방식을 적용하였다. Over head 캠축 선단에는 소기밸브 열림시기 및 기간을 변화시킬 수 있는 기계식 연속 가변밸브 타이밍시스템(MCVVT : mechanical continuous variable valve timing)을 장착하였다.

2.2 실험장치

실험장치는 전술한 상사기관, 소기압력을 변화시키는 과급장치, 연료공급장치, 배기압력 조절장치 및 각종 성능측정장치 등으로 구성된다. 과급장치는 외부과급방식으로 링블로워(DongBu,, DBR-1002)를 사용

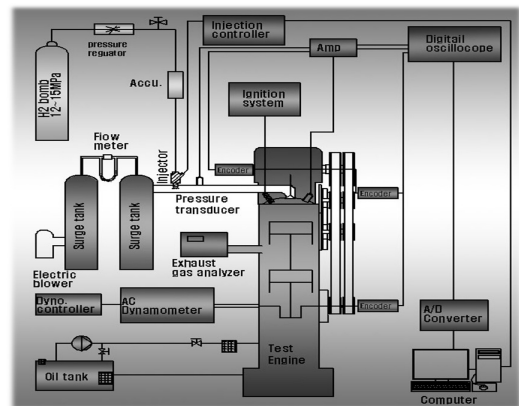


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

하였다. 소기압력을 제어하기 위해 링블로워 출구 쪽과 서지탱크 입구 쪽에 bypass 밸브를 각각 부착하였다. 수소연료는 고압 수소분배에서 1, 2차 감압기를 통하여 8bar의 감압하여 소기밸브 50mm 전방의 솔레노이드방식의 저압인젝터를 통해 분사된다. 수소분사량은 인젝터 콘트롤러(Mobiltek, MT2010)로 제어되며 캠축에 부착된 로터리 엔코더의 Z상 펄스를 기준신호로 구동된다. 배기압력 조절장치는 배기관의 면적변화를 통해 배기압력을 조절하는 장치이다. 또한 각각의 센서로부터 받은 센서신호들은 증폭과 필터링을 거쳐 A/D변환기에 전송되며 데이터의 sampling rate는 10kHz이다. 실험장치의 전체 개략도를 Fig. 2에 나타낸다.

2.2 실험방법

역단류 소기방식을 갖는 프리피스톤 수소기관의 열효율 향상을 위한 실험변수는 소기밸브 열림시기, 소기압력과 배기압력이다. 소기밸브 열림시기(추후 SVOT라 칭함) 변화범위는 배기포트가 개폐되는 bBDC 34°~aBDC 34°이다. 소기압력은 1.1bar에서 정상운전이 힘들어지는 1.6bar까지 0.1bar간격으로 변화시켰다. 배기압력은 1cycle 동안 배기관에 발생된 평균값이며 1.19~1.275bar까지 0.015bar 간격으로 조절된다. 기관회전수는 800rpm (13.33Hz 상당), 점화시기는 MBT(Minimum spark advance for best torque)이며 냉각수온도는 70°C이다. 소기밸브의 열림기간은 34°CA이며 수소인젝터 분사시기는 소기밸브가 열린 후 0.1ms 지연시킨 시점이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열효율 향상을 위한 소기밸브 열림 시기와 소기압력의 영향

Fig. 3은 소기압력 1.3bar에서 SVOT 변화에 따른 실린더 내 압력경과를 나타낸 것이다. SVOT가 지각됨에 따라 실린더내 연소최고압력은 증가하며 BDC 이전 SVOT의 경우에 비해 BDC 이후가 급격히 증가하는 경향이다. 또한 배기포트가 닫히는

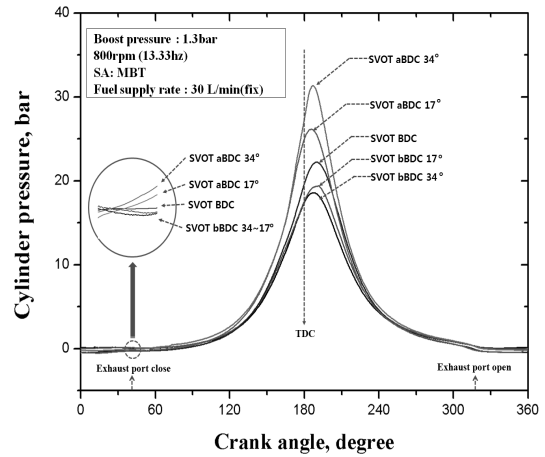


Fig. 3 Pressure in cylinder (firing) according to SVOT

bBDC 34°CA 이후 SVOT 지각에 따라 압축초기의 압력이 증가하는 것을 보인다. 이는 소기가 이루어지는 bBDC 34°CA~ aBDC 34°CA에서 신기의 공급시점 지연을 지각시킴으로써 배기포트로 빠져 나가는 신기의 단락유동이 감소되는데 기인한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 4는 전술한 실험조건하에서 측정된 도시열효율, 실린더내로 공급되는 공기유량 및 배기압력을 나타낸 것이다. SVOT가 지각됨에 따라 실린더

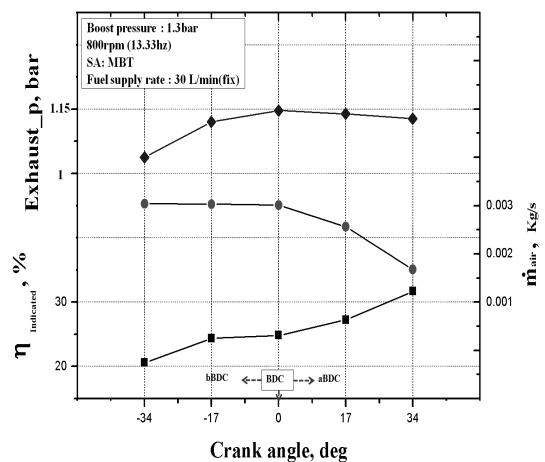


Fig. 4 Indicated thermal efficiency and air mass flow rate and exhaust pressure according to SVOT

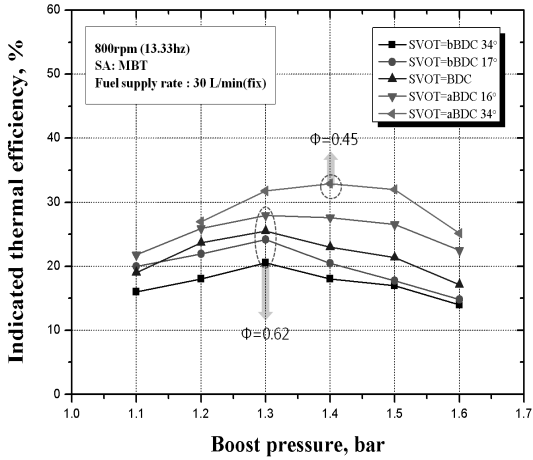


Fig. 5 Indicated thermal efficiency according to boost pressure and SVOT

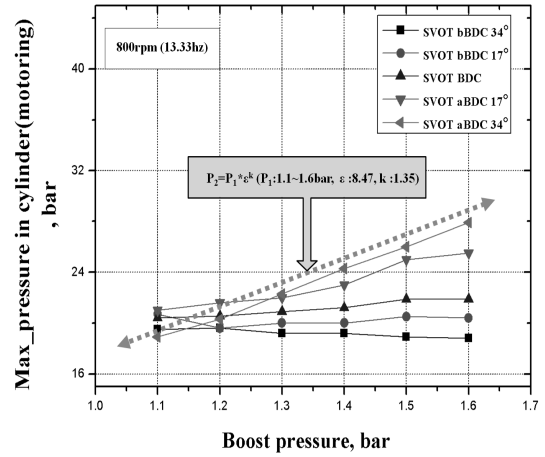


Fig. 6 Maximum pressure in cylinder (motoring) and boost pressure according to SVOT

내로 유입되는 공기량은 BDC까지 일정하지만 그 이후 감소하며 배기압력은 BDC를 정점으로 증가하다가 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 SVOT가 지각됨에 따라 도시열효율이 증가되는 것을 볼 수 있다. BDC 이전 영역에서는 실린더내로 공급된 신기와 실린더내의 기연가스의 배기포트로 배출이 용이해지면서 배기압력이 증가된 것으로 보인다. 한편 실린더내로 공급된 혼합기의 양이 일정함에도 도시열효율이 증가하는 것을 보인다. 이는 기연가스의 배출량은 증가하지만 실린더내로 공급된 신기의 단락유동이 점차 감소되면서 신기의 실린더내 잔존량이 증가하는데 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 소기압력변화에 따른 도시열효율을 각각의 SVOT에 따라 나타낸 것이다. 소기압력이 증가함에 따라 도시열효율은 증가하며 SVOT aBDC 34°CA를 제외한 나머지에서 1.3bar를 정점으로 감소하는 경향을 보인다. RICEM을 사용한 선행연구에서 신기의 단락유동이 없을시 $\Phi=0.5$ 근방에서 프리피스톤 수소기관의 최고열효율이 발생됨을 확인한바 있다⁶⁾. SVOT aBDC 34°의 경우 소기압력 1.4bar에서 최고 도시열효율을 보이며 이때의 실린더내로 공급된 신기의 연료공기당량비는 $\Phi=0.45$ 에 해당된다. 이는 약간 희박한 영역이지만 기연가스에 의한 혼합기 온도증가를 고려하면 거의 유사한

것으로 볼 수 있다. 한편 이를 제외한 나머지의 SVOT에서는 소기압력이 1.3bar일때 최고 도시열효율을 보이며 이때의 연료공기당량비는 $\Phi=0.62$ 에 해당된다. 이는 다소 농후한 혼합기가 실린더내에 공급되지만 혼합기의 단락유동에 의해 실제 실린더내에서는 연료공기당량비 $\Phi=0.5$ 근방의 혼합기가 형성된 것으로 보인다.

Fig. 6은 소기압력에 따른 모터링시의 실린더내 최고압력을 소기밸브 열림시기변화에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 실린더내 최고압력은 SVOT가 지각됨에 따라 전반적으로 증가하는 것을 나타낸다. 또한 소기압력이 증가함에 따라 대체적으로 증가하지만 SVOT가 BDC 이전의 경우 증가폭이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 이 경향은 피스톤의 하향운동에 의해 배기포트의 열림면적이 증가하면서 실린더내 잔존한 가스와 공급된 신기의 배기포트로의 유출이 증가되는 것으로 설명될 수 있다. 한편 SVOT가 지각됨에 따라 모터링 압력이 점차 이론적인 모터링 압력(점선)에 근접하며 특히 SVOT aBDC 34°CA에서는 거의 동일한 기울기 값을 가진다. Fig. 5에서 눈한바와 같이 이 SVOT에서 최고열효율($\Phi=0.45$)이 발생된 결과를 종합하면 본 실험조건하에서 SVOT aBDC 34°CA는 단락유동이 거의 발생치 않으며 열효율 향상에 있어서 가장 적절한

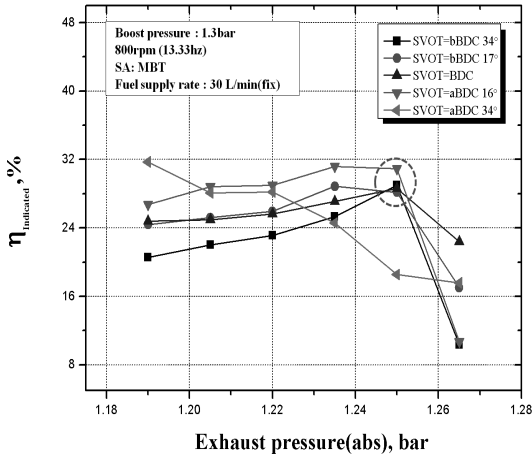


Fig. 7 Indicated thermal efficiency according to exhaust pressure

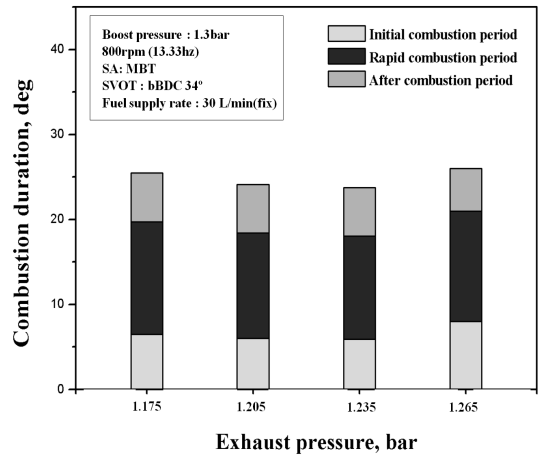


Fig. 8 combustion duration according to exhaust pressure

SVOT인 것으로 판단된다.

3.2 배기압력변화

Fig. 7은 소기압력 1.3bar일때 배기압력변화에 따른 도시열효율을 각각의 SVOT 따라 나타낸 것이다. 배기압력이 증가함에 따라 도시열효율이 점차 증가 하는 경향이며 SVOT bBDC 34°CA에서 최대 45% 증가되는 것을 나타낸다. 이는 배기압력이 증가함에 따른 신기의 단락유동 감소와 고온의 잔류가스량 증가에 의한 연소촉진효과에 의한 것으로 보인다^{7,8)}. 하지만 배기압력이 1.25bar 보다 높을 경우에는 잔류가스의 과대로 인한 연소 불안정에 의해 열효율이 감소하는 것을 나타낸다. 한편 SVOT aBDC 34°CA의 경우 배기압력을 증가하여도 도시열효율은 지속적으로 감소하는 경향이다. 이는 앞서 Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 소기밸브가 지각됨에 따라 실린더 내 기연가스량이 증가함에 따른 기연가스의 잔류압력으로 인해 실린더내로 공급되는 신기양이 감소하기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 8은 배기압력 증가에 의한 잔류가스의 증가가 연소에 미치는 영향을 파악하기 위해 소기압력 1.3bar, SVOT bBDC 34°CA에서의 배기압력 변화에 따른 혼합기의 질량 연소율을 나타낸 것이다. 연소기간은 질량연소율의 0~10%를 초기연소기간,

10~90%를 주연소기간, 90~100%를 후연소기간으로 정의하였다. 배기압력이 증가함에 따라 총 연소기간은 감소하다가 배기압력 1.265bar에서 다소 증가하는 경향을 나타낸다. 주연소기간과 후연소기간도 비슷한 경향이지만 초기연소기간은 배기압력 증가와 더불어 증가하는 것을 보인다. 이는 앞서 언급한 비교적 고온의 잔류가스에 의해 연소 전 혼합기 온도가 증가하면서 혼합기 분자들의 활성화 에너지가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 9는 단락유동이 발생치 않는 SVOT aBDC

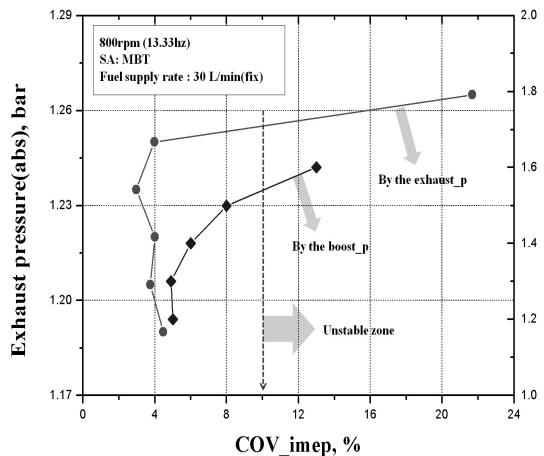


Fig. 9 COV_imep according to exhaust pressure and boost pressure

34°C에서 소기압력과 배기압력의 변화에 따른 연소안정성을 파악하기 위해 사이클 변동율을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 대체적으로 배기압력이 증가함에 따라 사이클 변동율은 5%미만으로써 소기압력변화시의 5%~8%의 사이클 변동율에 비해 약간 낮았다. 이 두 가지 경우 모두 10%이하의 안정된 연소를 보이지만 도시열효율 향상 측면에서 소기압력 증가를 통한 희박 혼합기를 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

4. 결 론

2행정 수소연소 프리피스톤 상사기관을 사용하여 과급압력, 소기밸브 열림시기 및 배기압력의 변화에 대해 열효율 등을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 역단류 소기방식을 갖는 프리피스톤 수소기관의 고효율 달성을 위한 적정 소기압력은 1.3bar~1.4bar이며 SVOT는 지각되어 져야한다. 특히 SVOT가 aBDC 34°C에서는 소기압력 변화에 대해 이론적인 모터링 최고 압력과 거의 동일한 기울기 값을 보였으며 단락유동이 발생치 않는 것으로 판단된다.
- 2) 배기압력 증가에 의해 단락유동은 어느 정도 제어 가능하며 최대 45%의 도시열효율 증가 효과를 보이며 잔류가스에 의한 연소축진으로 초기 및 총 연소 기간이 감소하였다.
- 3) 단락유동이 발생치 않는 SVOT aBDC 34°C에서는 잔류가스 증가에 의한 연소 안정화보다는 과급을 통한 희박 연소를 하는 것이 바람직하다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- 1) R. Mikalsen, A. P. Roskilly, "A review of free-piston history and applications", Appl. Therm. Eng., Vol. 27, 2007, pp. 2339-2352.
- 2) Jakob Fredriksson, Ingemar Denbratt, "Simulation of a Two-Stroke Free Piston Engine", SAE Paper NO.2004-01-1871, 2004.
- 3) G. P., Blair, "Correlation of Theory and Experiment for Scavenging Flow in Two-Stroke Cycle Engine", SAE Paper NO. 88125, 1988.
- 4) H. W. Cho, J. S. Yoon, J. T. Lee, "Backfire Occurrence of Uni-flow scavenging Type Two-stroke Free-Piston Hydrogen Fueled Engine", Proceeding of the KSME Annual Spring Meeting 2008, pp. 44-49,
- 5) H. W. Cho, K. Y. Cho, J. T. Lee, "Flow characteristics in a hydrogen fueled free piston engine with reverse uniflow scavenging", Proceeding of the KSAE Annual Autumn Meeting 2008.
- 6) K. Y. Cho, C. H. Byun, J. T. Lee, "The characteristics of backfire for a hydrogen fueled free-piston engine with reverse uniflow scavenging", Proceeding of the KSAE Annual Autumn Meeting 2009.
- 7) C. W. Park, C. H. Kim, "A Study on Performance and Emission Characteristics for Gasoline-Hybrid Engine with EGR", Proceeding of the KSAE Annual Spring Meeting 2007, Vol. 4, pp. 1777-2439.
- 8) D. W. Nam, Tran dang quoc, J. T. Lee, "A Study on Lean limit and Emission Characteristic in Heavy-duty Direct Injection CNG Engine with EGR", Proceeding of the KSME Annual Spring Meeting 2008, pp. 1-239.