

## 프리-피스톤 엔진의 현황과 전망 Current Status and Prospects of Free-Piston Engine

### 이 종 태

성균관대학교 기계공학부

#### 1. 서론

피스톤타입의 내연기관은 고비출력, 고열효율이 가능하며, 구조가 간단하여 신뢰성이 있고 경제적인 동력시스템이다. 수소연료를 사용하는 경우는 특이한 수소연소특성에 의해 보다 열효율이 높아지는 장점이 있다. 또한 탄소성분의 배출가스가 전혀 없고 유일하게 배출되는 NO<sub>x</sub>도 회박연소 및 저온촉매 등으로 저감 가능하므로 거의 무공해에 가까운 동력시스템이다. 단지 수소인프라와 내연기관 특유의 부분부하 및 급격한 천이 영역에서의 상대적인 열효율 저하로 인하여 수소엔진은 수송용 동력시스템으로서의 잠재성가가 제대로 평가되지 않았다.

그러나 산업용 동력시스템의 저공해화 요구와 차량의 하이브리드화 및 우수한 경제성으로 인하여 수소엔진이 재평가되고 있다. 특히 최근에 50%이상의 고효율을 달성할 수 있는 프리피스톤 수소엔진과 리니어 발전기를 결합시킨 수소연소 리니어 발전시스템이 제시되어 실용화 가능성이 보다 높아지고 있다. 프리-피스톤엔진은 기존의 엔진과 달리 왕복운동을 회전운동으로 변환하는 장치가 없어 단순한 구조이고 고효율의 실현이 가능하다. 다만 리니어운동하에서 동력을 흡수하는 방식에 따라 구조 및 제어가 다양해진다.

여기에서는 프리-피스톤 수소엔진에 관한 인식을 높이고자 프리-피스톤엔진의 구조 및 특성, 개발현황과 수소연소 리니어 발전시스템의 개발전망에 대해 소개하고자 한다.

#### 2. 프리-피스톤 엔진의 기본구조 및 특징

프리-피스톤엔진의 기본구조 : Fig. 1은 기존의 왕복구동식엔진과 대표적으로 dual 피스톤 방식의 프리-피스톤엔진의 구조를 개략적으로 나타낸 것이다.

왕복구동식 엔진은 고온 고압의 연소가스에 의한 피스톤의 직선운동을 커넥팅로드 및 크랭크기구에 의해 회전운동으로 변환시킨다. 반면에 프리-피스톤엔진은 크랭크 기구없이 양쪽 피스톤이 서로 연결되어 실린더내 압력차이와 피스톤 판성력에 의해 직선적인 왕복운동을 발생한다. 따라서 왕복구동식 엔진은 회전판성력으로 2사이클 또는 4사이클의 적용이 용이하지만 프리-피스톤 엔진은 구조상 2사이클을 적용하는 것이 바람직하다. 단 multi 실린더나 별도의 피스톤 구동장치를 사용하면 4사이클의 실현이 가능하다.

프리-피스톤엔진의 분류 : Fig. 2와 같이 피스톤의 개수와 배열에 따라 크게 single

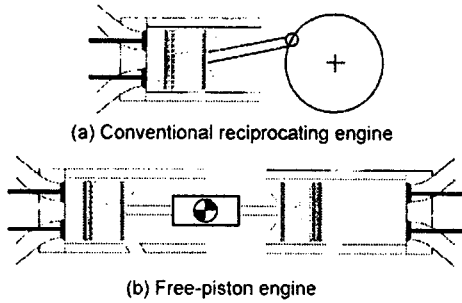


Fig. 1 Basic structures of reciprocating and free-piston engines

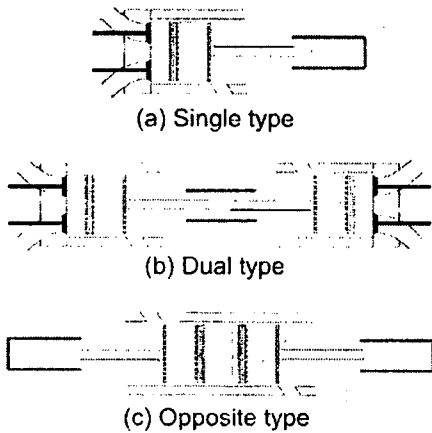


Fig. 2 Free-piston engine types

다양한 청정대체연료를 사용할 수 있는 장점도 있다.

프리-피스톤엔진은 회전관성을 흡수하는 플라이휠이 없으므로 각 사이클마다 마찰력, 발생열량 및 부하율이 일정하지 않을 경우 불안정한 운전이 야기된다. 또한 시동이 어려우며, 피스톤이 구속장치 없이 자유롭게 움직이는 것은 실린더내 누설과 밸브 오작동시 피스톤과 실린더 헤드가 충돌하여 극단적인 파손 원인이 된다. 프리-피스톤엔진의 운전성과 제어성 확보가 주요 단점이다.

### 3. 연구 개발 동향

**내연기관의 개발은 프리-피스톤 및 수소연료** : 세계최초로 내연기관에 가스연료를 사용한 1805년의 Rivaz엔진은 Fig. 3과 같은 무압축 프리-피스톤 수소엔진이다. 또한 세계 최초로 자동운전에 성공한 Cecil의 엔진도 수소엔진이므로 프리-피스톤엔진 및 수소엔진의 개발은 내연기관 초기로 거슬러 올라갈 수 있다. 이것은 수소의 연소특성이 우수하여 당시의 내연기관 개발기술에 적용하기 용이하였기 때문으로 생각된다. 이후

피스톤, dual 피스톤, opposite 피스톤 방식으로 분류된다. Single 피스톤 방식의 프리-피스톤엔진은 팽창일 후 압축과정에 외부의 동력을 이용하여야 한다. 이에 반해 dual 피스톤 방식은 반대쪽의 피스톤이 팽창일을 하므로 시동 후 별도의 부가장치 없이 자력운전이 가능하다.

Opposite 피스톤방식은 한 실린더내의 연소에 의해 대향의 두 실린더가 팽창일을 하는 것으로 압축과정은 single 피스톤 타입과 동일하게 외부일에 의존한다.

**주요 특징** : 프리-피스톤엔진은 크랭크 기구가 없어서 피스톤의 행정길이가 임의로 변화되며 기계손실이 왕복구동식에 비해 적은 특징이 있다. 행정길이가 변화하는 것은 실린더내 압력에너지를 최대한 팽창일로 전환시키는 아트킨슨 사이클의 실현이 가능하고 피스톤 관성력에 의한 압축증대 효과를 얻을 수 있다. 또한 운전조건에 따라 압축비를 가변시킬 수 있고 기계손실이 작으므로 고효율을 얻을 수 있다. 그리고 구조가 간단해 소형이고 고비출력의 실현이 가능하며 수소 등

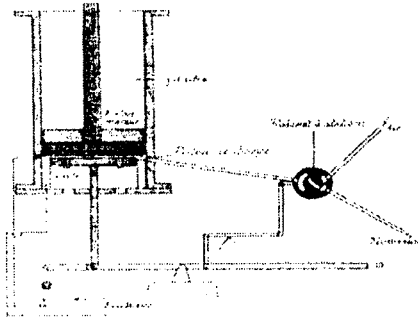


Fig. 3 Rivaz free-piston engine

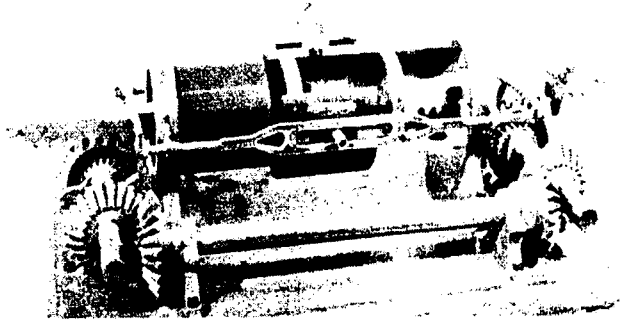


Fig. 4 Free-piston engine of Barsanti &amp; Matteucci

실용화된 엔진은 석탄가스 및 석유계연료를 사용하였지만 프리-피스톤엔진은 1857년 Barsanti와 Matteucci에 의해 특허 출원 된바 있다(Fig. 4). 프리-피스톤엔진은 당시의 왕복동기관에 비하여 열효율이 높고 신뢰성이 높아 1867년 Otto와 Langen에 의해 실용화되어(Fig. 5) 1876년 Otto 자신의 4사이클 엔진이 성공할 때까지 약 10년간 유럽의 시장을 석권한 바 있다. Otto와 Langen의 프리-피스톤엔진은 피스톤이 폭발에 의해 자유로이 상승하고 진공압에 의해 하강할 시 rack과 pinion에 의해 축을 회전시킨다. 당시의 프리-피스톤엔진은 회전이 궁극적인 목표이므로 크랭크 및 커넥팅로드 기구가 성공한 이후 압도되어 자리를 감추게 되었다.

**프리-피스톤기관의 응용** : 프리-피스톤엔진은 구조가 우수하므로 왕복운동의 특성을 적극 활용할 수 있는 분야에 응용되어 프리-피스톤을 이용한 타항기(pile hammer), 공기압축기(compressor), 가스터빈과 유압발생장치 등이 개발되었다.

프리-피스톤 타항기는 증기 또는 연소가스에 의한 힘으로 피스톤을 자유로이 상승시킨 후 중력에 의해 낙하되는 충격을 이용해 파일을 박고 또는 물건을 부수는 장치이다(Fig. 6). 디젤연소에 의한 방식은 증기 및 전기원치방식보다 시스템이 간결하다.

프리-피스톤 공기압축기는 고압의 압축공기가 요구되는 분야에 적합하다. 1930년대에 Mitsui 정기 등이 어뢰에 공급할 300bar정도의 4단 프리-피스톤 압축기를 생산하였다(Fig. 7). 이 압축기는 프랑스의 SIGMA(Sosiete d' Etudes Mecaniques et Energetiques)사에서 1941년부터 약 1300대(60PS) 정도 생산되어 건설장비로도 활약하였다. 프리-피스톤공기압축기는 회전부품이 없으므로 분해하여 운반하기 편리하다.

프리-피스톤 가스터빈은 가스터빈의 터보압축기의 저성능 저효율을 탈피하고자 프리-피스톤 압축기를 접목하여 시스템 전체의 효율 향상을 도모하는 것이다. 이 엔진의 원리는 프랑스의 R. P. Pescara에 의해 1934년 특허 출원되었다. 미국의 GM 및 Ford에서는 1950년대 중반부터 프리-피스톤 가스터빈을 자동차에 탑재하려는 시도를 하여 양산판매의 단계까지 달한 것으로 알려지고 있다. GM에서 개발한 프리-피스톤 가스터빈인 HYPREX 엔진은 실험용 차량 XP-500에 탑재되어 주행 테스트한 결과 비출력이

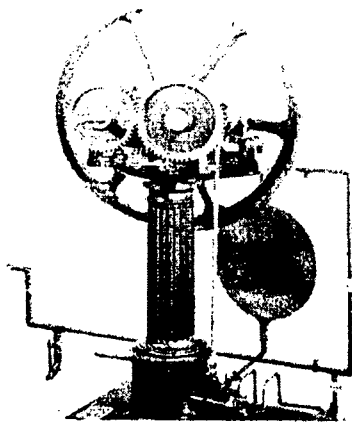


Fig. 5 Otto & Langen engine

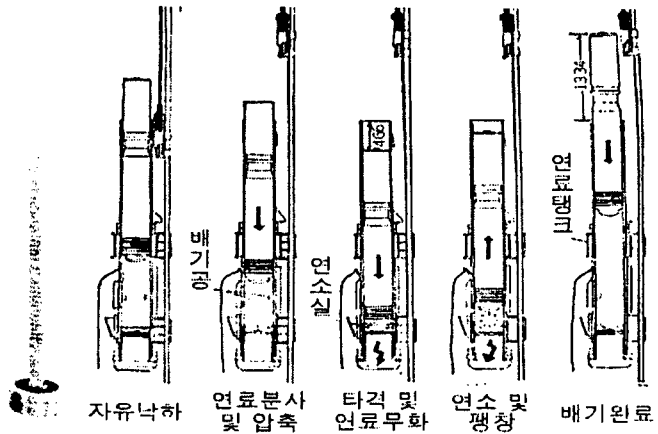


Fig. 6 Free-piston pile hammer

커서 차량용에 적합하다는 자체 평가를 받았다. Ford에서 개발한 농업용 프리-피스톤 가스터빈 엔진은 경제적 측면에서 디젤기관과 동등한 수준에 이를 수 있으며, 다중연료 사용이 가능하고 용량변화가 용이하다고 밝힌바 있다.

프리-피스톤엔진 유압발생장치로서 일본 Toyohashi대학에서는 1980년부터 연구개발을 수행하여 Fig. 8과 같은 배기량 1,600cc의 경유 직접분사 압축화확방식의 프리-피스톤 유압펌프 시스템을 개발하였다. 열효율은 간헐운전에 의해 모든 부하에 대하여 최고 50%를 달성할 수 있다는 것을 밝혔다. 네델란드의 INNAS B.V.에서는 1987년부터 지게차, 시내버스, 건설장비 등의 디젤 유압 구동 장치를 프리-피스톤 유압펌프로 대체할 계획을 추진하였다. 개발한 유압발생용 프리-피스톤 기관 CHIRON은 싱글 피스톤방식의 1,400cc 2행정 디젤 커먼레일 직접분사식으로서 연료분사시기, 분사량, 압축비등을 전자 제어하고 PPM 방식으로 출력제어하여 30kW의 출력을 발생한다(Fig. 9). 연구결과 유압펌프로의 적용에는 싱글피스톤방식이 엔진 제어, 진동, 가격 등의 측면에서 유리하다고 밝혔다.

상기와 같이 프리피스톤엔진은 여러 분야에서 유리한 점이 많고 프리-피스톤 가스터

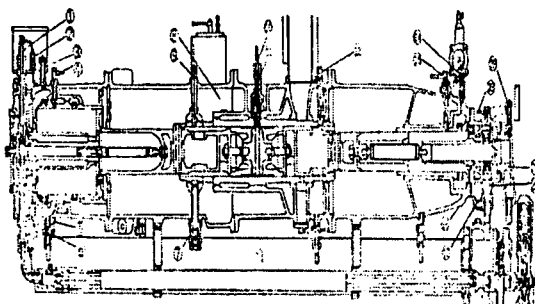


Fig. 7 Free-piston pneumatic compressor

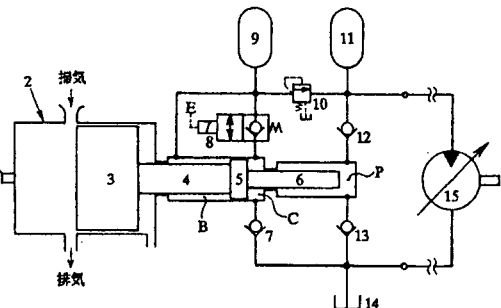


Fig. 8 Free-piston hydraulic system

빈은 상용화 단계에 이른 적이 있지만 시동의 어려움, 부속장치의 증가, 윤활유 소비증대 및 신뢰성 미확보 등으로 인하여 대중화에 이르지 못하였다.

**프리-피스톤 수소엔진 리니어발전기의 재인식** : 대체에너지 및 배기공해저감의 측면에서 고효율의 hybrid자동차 및 산업용의 발전시스템이 요구되고 있다. 고효율의 달성에는 프리피스톤엔진이 적합하고 저공해달성에는 수소연료를 사용하는 것이 바람직하다. 이러한 관점에서 프리-피스톤 수소엔진으로 구동되는 리니어 발전기가 유망한 기술로 제시되고 있다

2000년 DOE에서는 수소연료를 압축착화시키는 프리-피스톤엔진의 도시열효율이 56%까지 향상됨을 밝히고 흡배기, 윤활시스템 및 , 요소부품을 개발하고 있다. 특히 미국의 Sandia National Lab. 에서는 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 선형 발전기와 결합된 2사이클 예혼합 압축착화 방식(HCCI)의 프리-피스톤 수소엔진을 개발하였다. 그리고 고효율 연소기술인 HCCI를 수소연료에 적용하여 희박 연소로 인한 NOx 저감과 압축비 증가로 인한 효율향상 등을 통해 도시열효율 56%를 목표로 하고 있다. 에너지 변환 효율이 96%인 선형 발전기와 결합하여 2010년까지 총 발전효율 50% 달성하는 것이 최종목표이다.

기타 프리-피스톤엔진 리니어 발전시스템에 관련된 연구로서 2000년 Galileo research Inc.에서는 프리-피스톤엔진의 잠재적 열효율이 65%까지 달성 가능하다고 밝히고 proto-type의 프리-피스톤 리니어발전시스템을 시연하였다(Fig. 11). 호주의 Pempek Systems Pty. Ltd.에서는 Fig. 12와 같은 새로운 개념의 하이브리드자동차용 프리-피스톤엔진을 제시하였다. Pempek의 엔진의 주요제원은 2사이클 8기통 배기량 2820cc이며 20Hz의 직접분사식 스파크점화 엔진과 발전기가 일체화되어 최대출력 100kW를 발생한다. 또한 passive intake valve, 실린더 헤드에 장착한 electro-pneumatic exhaust valve에 의해 Uniflow 가스교환을 실현할 수 있는 특징이 있다. 미국의 Sunpower Inc.에서는 moving coil 방식, moving iron 방식 및 moving magnet 방식의 linear generator를 프리-피스톤 stirling엔진과 결합하여 400W 및 10kW급의 발전시스템 개발에 성공하였다.

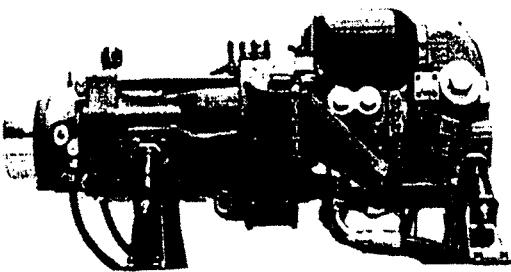


Fig. 9 CHIRON hydraulic system

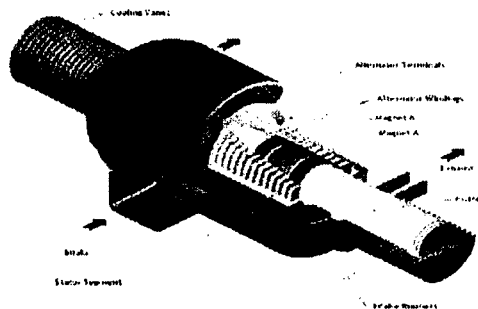


Fig. 10 HCCI free-piston engine

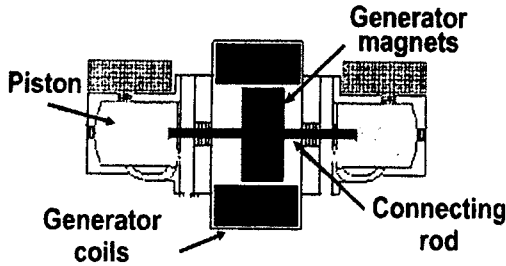


Fig. 11 Free-piston generation system

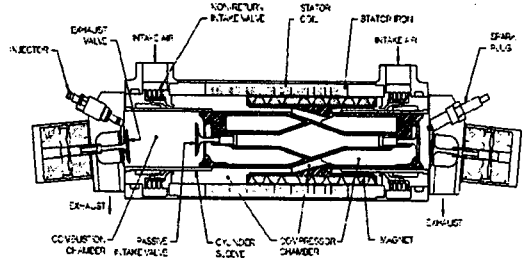


Fig. 12 Pempek free-piston engine

스웨덴의 Royal Institute of Technology 에서는 50kW급 프리-피스톤엔진 리니어 발전시스템을 시리즈 방식의 하이브리드 차량에 적용하는 시도를 하였다. 있다. 하이브리드 차량용 프리-피스톤 리니어 발전기는 고효율, 저중량, 내구성, 압축비 제어 용이성, 다양한 연료 사용가능 등의 장점이 있다. 또한 모듈화 개발이 가능하기 때문에 향후 하이브리드 차량의 동력원으로 유망할 것으로 판단하고 있다. 그리고 matlab 환경의 시뮬레이션 모델을 개발한 결과, 열효율이 기존 디젤엔진에 비해 25% 이상 증가할 수 있다는 결론을 얻었다. 2000년 FEV에서는 디젤엔진, 가솔린엔진, 스팀엔진, 로터엔진, 가스터빈, 연료전지, 프리-피스톤엔진 등의 출력, 열효율, 배기성능, 생산가격, 총중량, 안정성 등을 다방면에서 비교 평가한 결과, 프리-피스톤엔진이 미래의 차량용 동력원으로 가장 경쟁력이 높다고 평가하였다.

#### 4. 맺음말

수소연료를 사용하는 프리-피스톤엔진 리니어 발전시스템은 연료전지의 단점을 보완하면서 연료전지와 동등한 수준의 특성 및 성능을 달성할 수 있는 차세대 발전시스템이며, 중단기적으로 실현 가능성이 큰 기술로 평가된다. 이로 인해 미국의 DOE 등에서 차세대발전시스템의 개발의 일환으로 연구개발을 추진하고 있다. 그러나 이 기술은 연구초기 단계로서 개발을 위해 프리-피스톤 수소기관의 연소방식, 이상연소억제, 적절한 전 제어조건 확립, 프리-피스톤기관의 시동 및 압축비 제어를 위한 linear모터 제어, 부하에 대한 linear 발전기 제어, 실린더내 H<sub>2</sub>O 발생, 초저공해를 달성하기 위한 배기가스 정화시스템 및 총합제어시스템 등의 개발에 관한 다방면의 연구가 필요한 상황이다. 상기와 같이 프리-피스톤 수소기관은 무공해 또는 저공해자동차의 개발뿐 만 아니라 GHP등과 같은 산업용 발전시스템으로 활용될 것으로 예측되므로 대체에너지, 에너지절약, 배기공해저감의 측면에서 반드시 연구를 병행하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.