



Air hybrid 엔진의 구동 특성에 관한 실험적 연구

†이용규 · 김용래 · 김영민 · 박철웅 · 최교남 · 정동수

한국기계연구원 환경기계연구본부 그린동력연구실
(2011년 6월 9일 접수, 2011년 10월 28일 수정, 2011년 10월 28일 채택)

Experimental Study on the Performance Characteristics of Air Hybrid Engine

†Yonggyu Lee · Yongrae Kim · Youngmin Kim

Chulwoong Park · Kyonam Choi · Dongsoo Jeong

Engine Research Team, ECO-machinery Division, Daejeon 305-343, Korea

(Received June 9, 2011; Revised October 28, 2011; Accepted October 28, 2011)

요 약

엔진의 제동시의 유효일을 이용하여 고압의 압축 공기를 저장하고 운전 시에는 저장된 압축 공기를 동력원으로 사용하는 신개념의 Air hybrid 엔진의 구현 가능성 검토를 위한 실험적인 연구를 진행하였다. Air hybrid 엔진 시스템의 구현을 위하여 연구용 단기통엔진을 개조하였고, 배기 밸브 중의 하나에 독립 가변 밸브리프트 시스템을 장착하여 압축 행정 동안에 고압의 공기를 저장할 수 있도록 하였다. 또한, 엔진의 구동을 위하여 점화플러그 위치에 공기 분사 모듈을 장착하여 팽창행정 중에 고압의 공기를 분사할 수 있도록 하였다. 압축 공기 저장 모드에서는 800rpm 아이들 조건에서 800 사이클 동안 30리터의 공기 저장 탱크를 최대 13 bar 까지 충전할 수 있었고, 충전된 고압의 공기를 이용하여 800rpm 아이들 조건에서 0.41 bar의 평균도시유효압력의 일을 얻을 수 있었는데 이것은 정상적인 아이들 조건보다 1.1 bar의 유효일이 증가한 것이다.

Abstract - A preliminary experimental study of new concept air hybrid engine, which stores compressed air in the tank during braking and re-use it to propel vehicle during cruising or acceleration, was carried out in this study. A single cylinder engine was modified to realize the concept of air hybrid engine. Independent variable valve lift system was adopted in one of the exhaust valves to store the compressed air into the air tank during compression period. An air injector module was installed in the place of spark plug, and the stored compressed air was supplied during the expansion period to realize air motoring mode. For air compression mode, the tank with volume of 30 liter could be charged up to more than 13 bar. By utilizing this stored compressed air, motoring work of 0.41 bar of IMEP(Indicated mean effective pressure) at maximum can be generated at the 800rpm conditions, which is higher than the case of normal idle condition by 1.1 bar of IMEP.

Key words : air hybrid engine, compressed air, air compression mode, air motoring mode, variable valve lift, variable valve timing

†주저자:ylee@kimm.ac.kr

I. 서론

고효율과 친환경성이 강조되고 있는 자동차 분야에서 활발히 추진되고 있는 전기 하이브리드 자동차나 수소 연료전지 자동차 관련 기술은 미국과 일본을 중심으로 하는 선진국의 높은 기술적인 장벽으로 인해 이와 관련된 원천기술의 확보를 통한 기술 개발이 힘든 실정이다. 또한, 전기 모터와 배터리 등과 같이 새롭게 적용되는 동력원들은 부수적으로 발생하는 경제성, 내구성, 친환경성 등의 문제를 고려할 경우, 기술적으로 극복해야 할 부분들을 여전히 내포하고 있다. 따라서, 현재에도 개발이 한창 진행 중인 전기 하이브리드 자동차와 연료전지 자동차의 이러한 기술적, 환경적인 문제점들에 대응하기 위한 새로운 개념의 엔진 구동 시스템에 대한 연구들이 진행되고 있다[1-4].

이 중에서도 air hybrid 엔진은 전통적인 방식의 내연 기관 구동 동력과 엔진의 유효일을 통해 저장된 압축공기를 혼용하여 사용하는 신개념의 하이브리드형 엔진 기술로서, 압축공기는 차량이 타력 주행을 하거나 제동 과정에 있을 때 모터링 상태가 되는 엔진의 압축 과정을 활용하여 저장된다. 이렇게 저장된 압축공기를 이용하여 차량의 출발이나 저속 운전 시에 저장된 공기만으로 운행함으로써 기존 전기 하이브리드 자동차와 유사한 기능을 가진다. 따라서, 효율 및 친환경적인 측면에서도 유사한 특성을 나타낼 것으로 기대되는 반면, 별도의 에너지원과 동력 장치의 추가없이 압축 공기 저장을 위한 탱크 추가와 독립적인 밸브 제어 장치의 부분 개조만 필요하기 때문에 기존의 전기 하이브리드 자동차에 비하여 구조가 간단하고 제작비용을 줄일 수 있다는 장점을 가진다.

미국의 경우, UCLA 와 Volvo 자동차의 협동 연구로 10.8 리터 급 디젤 엔진에 200 리터 급의 압축 공기 저장 탱크를 장착한 air-power assisted 엔진을 개발하여, 압축 공기의 저장 및 구동을 통해 4~18%의 연비 향상을 목표로 연구 개발을 수행하였다. 압축 공기 저장 및 공기 구동 시에 엔진은 2 행정으로 구동되는 방식을 택하였으며, 4행정에서 2행정으로의 전환을 위해 camless 밸브시스템을 적용하였다[5]. Brunel 대학은 2리터 급 가솔린 엔진에 로터스사의 Active valve train 기술을 적용하여 배기 밸브 중 하나를 압축 공기의 저장과 공급을 위한 밸브로 사용함으로써 30리터의 압축 공기 저장 탱크에 최대 압력 22bar 까지 저장하는 결과를 보고하였다[6,7]. 스웨덴의 Lund 대학은 EPVA(Electro Pneumatic valve actuation) 시스템을 적용한 air-hybrid 엔진 개발을 위

하여 2리터급 단기통 디젤 엔진에 압축 공기 저장 탱크를 장착하여 기초 실험을 수행한 결과, 압축 공기 저장 탱크의 용량 최적화를 통해 44% 수준의 압축 공기 이용 효율을 달성하였다[8-10].

Air hybrid 엔진의 실효성에 대한 가장 주목할 만한 연구 결과는 스위스 쥐리히 공대의 프로토타입 엔진 개발을 통해 달성되었다. 2기통 0.75 리터의 가솔린엔진에 독립밸브시스템을 장착한 air hybrid의 엔진 제작을 통해 시내 운전 모드 모사 주행을 테스트한 결과, 기존 가솔린 엔진 대비 최대 32%의 연료 절감 효과가 나타남을 발표하였고 이를 이용한 실제 차량 개발을 위한 연구를 진행 중에 있다[11].

위에서 설명한 바와 같이 Air-hybrid 엔진 기술은 전 세계적으로 기술적 태동기로서 아직까지 국내에서 이와 관련된 연구를 진행한 사례가 없다. 따라서 본 연구에서는 Air-hybrid 엔진의 적용 타당성 검증을 위한 선행 연구를 위하여 실험용 단기통 엔진을 개조하여 압축 공기의 저장 및 이를 이용한 엔진 구동이 가능한 시스템을 구축하였다. 이를 통하여 Air-hybrid 엔진의 주요 성능 인자를 실험적으로 확인하고, 그 적용을 위한 제어 변수의 분석과 실제 차량 적용 시 핵심 기술 개발을 위한 실험적 데이터베이스 구축을 하고자 한다.

II. Air hybrid 엔진 구성

본 연구에서 air hybrid 엔진의 구현을 위하여 제작한 단기통 엔진과 주변 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었으며 엔진의 상세 제원은 Table 1에 표기하였다. 엔진 개조에서 가장 중요한 부분은 밸브 기구의 변경이다. 본 연구에 사용된 엔진의 경우, 두 개의 배기 포트가 완전히 분리되어 있는 구조이기 때문에 하나의 배기 포트를 압축되는 공기를 저장하기 위한 통로로 이용하였다. 또한 이 배기 포트와 연결된 배기 밸브(이하, 공기 저장 밸브)를 독립적으로

Table 1. Specifications of air hybrid engine

Item	Specifications
displacement volume(cc)	499
bore × stroke (mm)	86 × 86
compression ratio	10.5
valve train system	4 valves DOHC
intake valves (2EA)	Non- CVVT with max lift 9.0mm
exhaust valve(1EA)	Non- CVVT with max lift 8.2mm
air-storage valve(1EA)	CVVT(40CA deg) + CVVL(5mm)

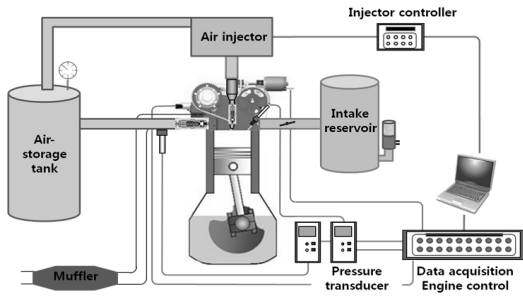


Fig. 1. Experimental setup of air hybrid engine.

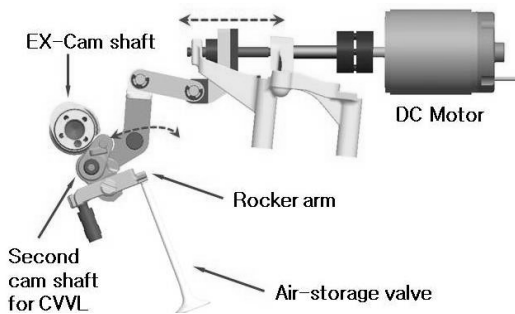


Fig. 2. Operating principle of air-storage valve.

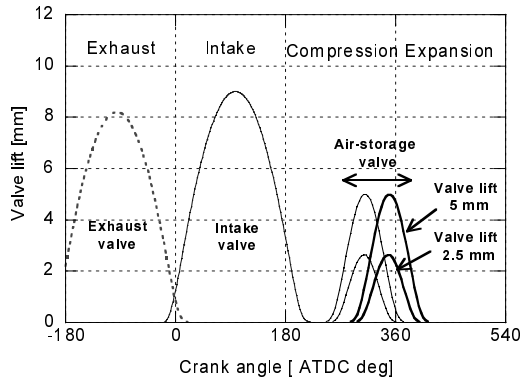


Fig. 3. Intake, exhaust and air storage valve timings.

구동하기 위하여 가변밸브 타이밍 및 리프트 기구를 적용하였다. 공기 저장 밸브의 작동 구조를 Fig. 2에 나타내었으며 CVVT(Continuous variable valve timing) 시스템은 유압으로 작동되는 캠샤프트 회전 방식을 적용하여 최대 40 CA deg만큼 가변되도록 하

였고, CVVL(Continuous variable valve lift) 시스템은 DC 모터의 작동이 2차 캠축을 회전할 수 있도록 제어함으로써 배기 캠축과 로커암 사이의 간극을 조절하는 방식으로 최대 5mm의 리프트 이내에서 제어되도록 하였다. 위와 같은 원리로 구동되는 흡기 및 배기 밸브와 공기 저장 밸브의 타이밍 및 리프트를 Fig. 3에 표기하였다.

압축공기를 저장하기 위하여 공기 저장 밸브가 장착된 배기 포트를 연장하여 30리터 용량의 공기 저장 탱크와 연결하였고, 배기 포트와 공기 저장 탱크 사이에는 연소실의 압력보다 공기 저장 탱크의 압력이 높아서 역류하는 것을 방지하기 위하여 체크 밸브를 장착하였다.

압축된 공기를 사용하여 엔진을 구동하는 모드를 구현하기 위해서는 원하는 시점에 저장된 공기를 엔진으로 공급할 수 있는 장치가 필요하다. 엔진 개조 초기에는 공기 저장 밸브를 사용하여 구동 모드를 구현하고자 하였으나, 체크 밸브를 제거하고 실시한 사전 테스트 결과에서는 공기 저장 밸브가 엔진으로 유입되는 압축 공기의 힘을 이기지 못하고 닫히지 않는 현상을 보였다. 따라서 압축 공기를 엔진으로 공급하는 위치를 기존의 스파크 플러그가 있는 곳으로 변경하고, 압축 공기의 분사 타이밍 제어가 유리한 인젝터를 적용하였다. 충분한 공기량 공급을 위하여 대형 CNG 엔진에 사용되는 인젝터(Woodward社) 8개를 하나의 모듈로 제작하고, Peak and hold 방식의 인젝터 드라이버를 ECU와 동기시켰다.

III. 실험 결과

3.1. 공기 저장 모드 실험 결과

Air hybrid 엔진의 공기 저장 모드는 차량이 주행 중에 가속 페달을 놓았을 때의 타행 주행 과정 또는 브레이크를 밟는 과정에서 이루어진다. 즉, 이 순간은 연소실로 연료가 공급되지 않는 모터링 상태이므로 실험 조건도 동력계로 엔진을 구동시키는 모터링 상태에서 진행하였다.

공기 저장 밸브를 압축 행정의 적절한 타이밍에서 개폐하면 연소실 내부에서 압축 행정 시에 압축되는 공기가 저장 탱크로 전달된다. 공기 저장 모드의 전형적인 연소실 압력 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 공기 저장 포트 압력은 공기 저장 밸브와 체크 밸브 사이의 압력을 의미하며, 공기 저장 밸브가 개폐되는 경우의 압력을 표기하였다. 공기 저장 밸브가 열린 동안은 포트 압력도 연소실 내부와 동일하다가 공기 저장 밸브가 닫힌 이후에는 압력과의 맥동현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

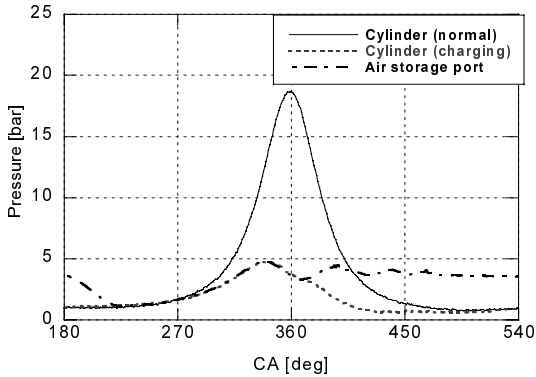


Fig. 4. Cylinder and air storage valve port pressure histories during normal and air compression mode.

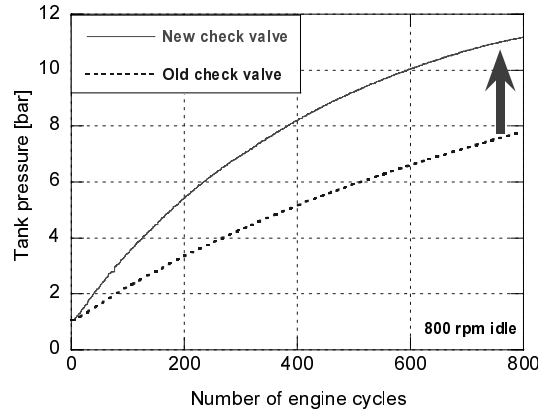


Fig. 6. Comparisons of air tank pressure history with check valve layout (800rpm, WOT).

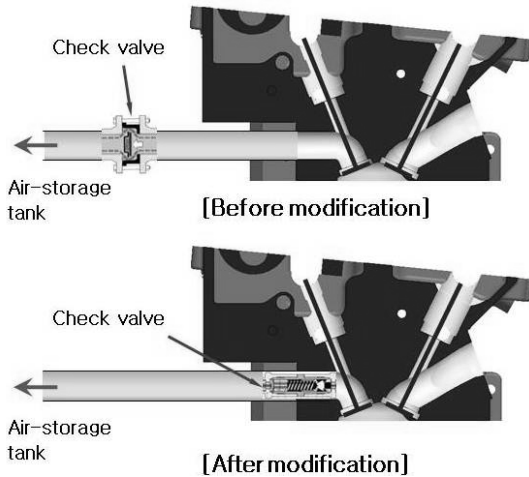


Fig. 5. Modification of check valve layout.

한편, 공기 저장 밸브가 작동하는 경우의 압축 압력이 정상적인 모터링 시의 최고 압력보다 다소 낮은 수준으로 측정되었는데, 이것은 공기 저장 밸브가 열림으로 인해 연소실의 유효 압축비가 저감하기 때문이다. 보다 높은 압력의 압축 공기 압력을 얻기 위하여 Fig. 5에 나타난 것과 같이 체크 밸브의 위치를 공기 저장 밸브의 후단 지점으로 최대한 근접이동시킴으로써 공기 저장 밸브가 열리는 순간 체크 밸브가 있는 지점까지의 공간을 최소화하여 유효압축비의 저감을 최소화시켰다. Fig. 6에는 체크 밸브 위치 변경 전후에 탱크 압력 변화를 동일한 조건에서 비교하여 나타내었다. 체크 밸브의 위치 변경을 통한 유효 압축비의 상승으로 저장 탱크 압력이 약 25% 정도 증가된 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Air tank pressures after 800 cycle running with the variation of air storage valve lift and timing (800rpm, throttle position=0/12/100%, unit=bar)

Lift	Timing	Base	20CA advance	40CA advance
		3mm	0%	5.8
3mm	12%	8.2	8.1	5.8
	100%	11.1	11.0	7.9
	4mm	0%	5.1	5.4
4mm	12%	7.7	8.2	8.3
	100%	10.6	11.1	11.2
	5mm	0%	5.1	5.0
5mm	12%	7.4	8.6	8.2
	100%	10.4	10.7	11.2

변경된 체크 밸브 사양을 적용하여 엔진 구동 변수 변화에 따른 공기 저장 탱크에 저장되는 최고 압력을 측정하기 위하여 공기 저장 밸브의 리프트와 타이밍을 변경시키면서 시험을 수행하였다. 엔진 회전 속도 800rpm과 1500rpm 조건에서 800 사이클 이후의 공기 저장 탱크의 압력을 비교한 결과를 Table 2와 3에 각각 나타내었다. 엔진 회전 속도 800rpm에서는 쓰로틀 개도를 0, 12, 100%로 변경한 세 가지 조건에서 시험을 수행하였는데, 모든 조건에서 공통적으로 4mm의 리프트와 40CA 진각된 타이밍 조건에서 가장 높은 탱크 압력을 얻을 수 있었다. 1500rpm

Table 3. Air tank pressures after 800 cycle running with the variation of air storage valve timing and lift (1500rpm, WOT, unit=bar)

Lift \ Timing	Base	20CA advance	40CA advance
4mm	12.2	12.3	12.5
5mm	11.7	12.2	12.4

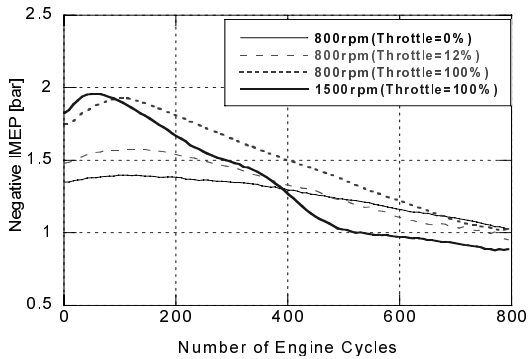


Fig. 7. IMEP histories with cycle at air compression mode with engine speed and throttle positions

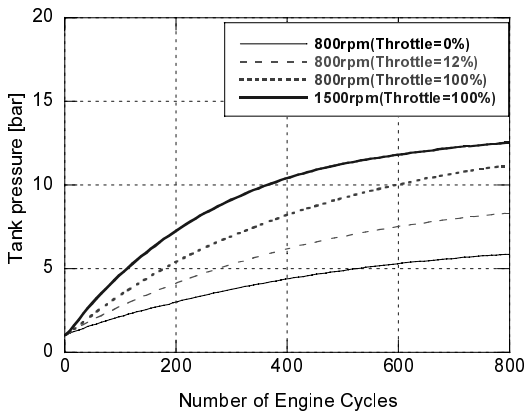


Fig. 8. Comparisons air tank pressure history with engine speed and throttle positions at air compression mode.

의 경우에도 동일한 밸브 타이밍과 리프트 조건에서 최대 압력을 얻을 수 있었다. 일반적으로 공기저장 탱크의 저장 압력을 높이기 위해서는 연소실의 압력이 높은 시간동안 공기 저장 탱크에 저장되는 최대

한의 유량을 확보해야 한다. 그러나 본 연구에 사용된 밸브시스템이 기계적인 구동방식으로 밸브리프트 변화에 따라서 밸브 개폐시간이 변하기 때문에 밸브 리프트 4 mm에서 최적의 저장압력이 나타난 것으로 판단된다.

상기의 실험을 통해 결정된 최적 리프트와 타이밍 조건에서 공기의 저장을 위한 유효일의 변화를 살펴보기 위하여 사이클에 따른 IMEP를 계산하여 Fig. 7에 나타내었다. 이 경우, 고압의 공기 저장을 위해 엔진에 유효일을 전달해야 하기 때문에 IMEP 값은 음수로 나타나게 된다. 초기 탱크의 압력이 낮은 경우에는 압축 공기의 저장을 위한 유효일이 상대적으로 많이 필요하며, 사이클이 진행될수록 탱크의 압력이 증가할수록 유효일이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이 경우의 탱크 내부 압력 변화를 Fig. 8에 나타내었는데, 사이클 초반에 압력 증가율이 높다가 후반부에서는 연소실의 최고 압력으로 수렴이 되는 것을 알 수 있다. 엔진 속도 800rpm 조건에서 스로틀 개도에 따른 결과의 경우, 스로틀 전개 조건(WOT)에서 압축에 필요한 유효일 즉, IMEP값도 크고 탱크 압력도 높게 나타났다. 동일한 스로틀 전개 조건이라도 800rpm 보다는 1500rpm 인 경우에 비슷한 수준의 IMEP값에서 최대 탱크 압력을 높일 수 있었다. 위와 같은 사실로부터 실제 차량의 공기 저장 모드에서는 엑셀 페달을 밟고 있지 않기 때문에 전자식 스로틀을 사용하는 엔진의 경우, 강제로 ECU가 WOT 조건을 제어하는 로직이 필요할 것으로 판단되며, 엔진 회전수의 경우에도 가능하면 높은 회전수를 유지하는 것이 더 높은 탱크 압력을 얻는데 유리하기 때문에 자동변속기가 적용된 경우라면 기어단수를 낮추는 전략이 도움이 될 것으로 생각된다.

3.2. 공기 구동 모드 실험 결과

공기 구동 모드의 경우에는 공기 저장 모드 중에 저장된 공기를 연소실로 분사하여 팽창 과정 중에 유효일을 얻는 모드로서, 최대의 유효일을 얻기 위한 공기 인젝터의 분사 시기를 찾을 필요가 있다. Fig. 9에는 엔진 회전 속도 800rpm인 경우, 공기 분사 시기 변화에 따른 연소실 내부의 압력 변화를 나타내었다. 최대 유효일을 얻기 위하여 분사 시작점(SOI)은 변화시켰으나 분사 종료 시점은 배기밸브가 열리는 시점(EVO)에 고정하였으며, 실험 중에 탱크의 압력은 공기압축 모드에서 최대로 가능한 수준이었던 13bar로 설정하였다. 연소실 내부로 공기가 추가 공급되기 때문에 모터링 조건에 비하여 연소실 압력이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 특히 팽창 과정에

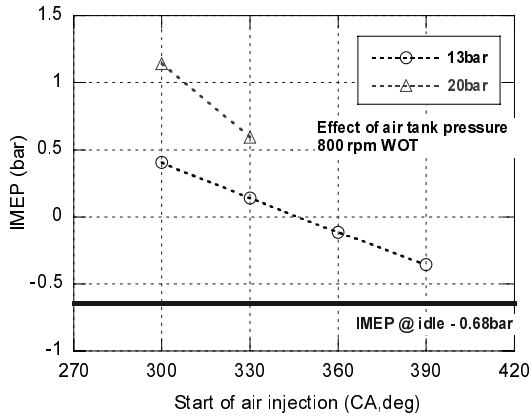


Fig. 10. Comparisons of IMEP with air injection timing and air tank pressure at the engine speed of 800 rpm and WOT.

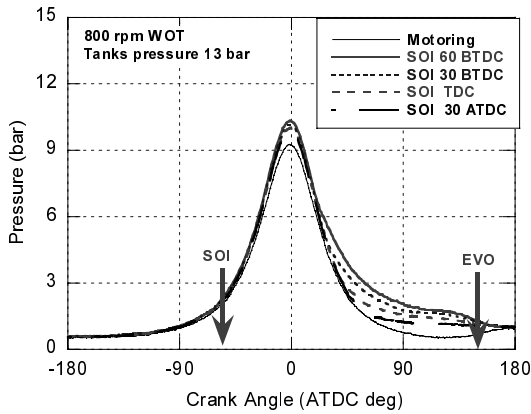


Fig. 9. Cylinder pressure histories with air injection timing at the engine speed of 800 rpm and WOT.

서의 증가가 확연하게 나타난다.

공기 분사 시기 변화를 통하여 얻어지는 유효효율을 Fig. 10에 IMEP 값으로 나타내었다. 분사시기가 BTDC 60 CA 조건이 가장 높은 IMEP를 보이고 있으며, 분사 시기가 지각될수록 감소하는 경향을 보인다. 엔진 회전 속도 800rpm 조건에서 모터링 시 IMEP값은 -0.68bar 이므로, 공기 분사로 인한 IMEP 값이 가장 높은 0.41bar의 조건에는 실제로 1.1bar의 유효압력의 일이 발생했음을 의미한다. 즉, 압축 공기를 사용하여 엔진을 충분히 모터링시킬 수 있는 수준임을 알 수 있다. 탱크의 충전 압력을 20bar로 증가시킨 경우에는 IMEP값이 1.14bar로 모터링 조건

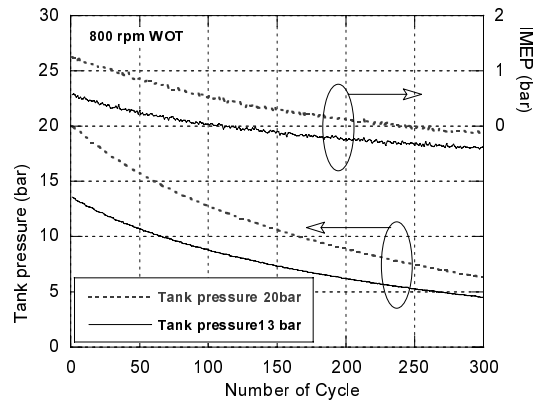


Fig. 11. Comparisons of IMEP and air tank pressure with cycles at the engine speed of 800 rpm and WOT.

대비, 1.82bar의 유효 압력이 발생한다. 즉, 탱크의 충전 압력을 증가시킬수록 유효효율이 증가함을 의미한다.

본 연구에서 사용한 30리터급 탱크의 용량으로 엔진을 구동시킬 수 있는 시간이 어느 정도인지 확인해 보았다. 800rpm, WOT 조건에서 공기 분사 시기는 BTDC 60 CA를 적용하였고 탱크 압력이 13bar와 20bar 인 경우에 대하여 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 11에 탱크 압력의 변화와 IMEP값으로 나타내었다. 공기 구동 모드를 시작하게 되면 Fig.10에 나타난 IMEP 수준에서 출발하여 사이클이 지날수록 탱크 압력의 감소함에 따라 IMEP 값도 감소하게 된다. IMEP가 양의 값을 가지는 구간은 탱크 초기 압력이 13bar 인 경우에 약 115 사이클까지, 20bar 인 경우에는 230 사이클까지 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 13bar 조건의 경우 약 15초에 해당하는 시간이므로 차량 출발 초기에 충분히 이용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 엔진의 구동으로 인해 IMEP가 0의 값을 가지는 순간의 탱크 압력은 약 7.5bar 정도 되는 것을 알 수 있는데, 이것은 공기 구동 모드를 실제 엔진에 적용할 경우, 압축 저장 압력이 최소 7.5bar 이상이 되어야 함을 의미한다.

V. 결론

Air hybrid 구동 시스템의 적용 가능성을 파악하기 위하여 연구용 단기통 엔진을 개조함으로써 air hybrid 엔진 시스템을 구성하였고, 기초 실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 배기 밸브를 가변 시스템으로 개조하고 공기를 분사할 수 있는 공기 인젝터를 추가함으로써 air hybrid 엔진에서 공기 저장과 구동 모드의 구현이 가능함을 확인하였다.

2) 공기 압축 모드에서 탱크 압력이 최대값을 가지는 공기 저장 밸브의 리프트 및 타이밍 조건은 엔진 회전수와 스로틀 개도 조건과 무관하게 일정한 조건으로 나타났다. 이 최적의 공기 저장 밸브 타이밍과 리프트에서 엔진을 1500rpm, WOT 조건으로 작동하는 경우 800 사이클 동안 30리터 용량의 공기 저장 탱크를 최대 12.5 bar 까지 충전할 수 있었다.

3) 공기 구동 모드에서는 최적의 공기 인젝터 분사 타이밍을 적용함으로써 공기 탱크 압력이 13bar 및 20bar 인 경우, 각각 IMEP 1.1bar 와 1.82bar 의 유효일이 발생함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부 차세대 그린머신 개발 사업으로 수행된 연구로서 연구비 지원으로 감사를 드립니다.

주요 약자

CVVT (Continuous variable valve timing)
 CVVL (Continuous variable valve lift)
 CA (Crank angle)
 WOT (Wide open throttle)
 IMEP (Indicative mean effective pressure)
 SOI (Start of injection)
 EVO (Exhaust valve open)
 BTDC (before top dead center)

참고 문헌

[1] Schechter M., "New Cycles for Automobile Engines", *SAE paper No. 1999-01-0623*, (1999)
 [2] Higelin P., Charlet A., and Chamailard Y., "Thermodynamic Simulation of a Hybrid Pneumatic Com-

bustion Engine Concept", *International Journal of Applied Thermodynamics*, 5(N1), 1-11, (2002)
 [3] Tai C., Tsao T.C., Levin M. B., and Schechter M., "Using Camless Valvetrain for Air Hybrid Optimization", *SAE paper No. 2002-01-0038*, (2003)
 [4] Andersson M., "An Air Hybrid For High Power Absorption and Discharge", *SAE paper No. 2005-01-2137*, (2005)
 [5] H. Kang, C. Tai, E. Smith, X. Wang, T. Tsao, J. Stewart and P. N. Blumberg, "Demonstration of Air-Power-Assist(APA) Engine Technology for Clean Combustion and Direct Energy Recovery in Heavy Duty Application", *SAE paper 2008-01-1197*, (2008)
 [6] J. W. G. Turner, M. D. Bassett, R. J. Pearson, G. Pitcher and K. J. Douglas, "New Operating Strategies Afforded by Fully Variable Valve Trains", *SAE paper 2004-01-1386*, (2004)
 [7] C. Y. Lee, H. Zhao and T. Ma, "Analysis of a Cost Effective Air Hybrid Concept", *SAE paper 2009-01-1111*, (2009)
 [8] S. Trajkovic, P. Tunestal and B. Johansson, "Investigation of Different Valve Geometries and Valve Timing Strategies and their Effect on Regenerative Efficiency for a Pneumatic Hybrid with Variable Valve Actuation", *SAE paper 2008-01-1715*, (2008)
 [9] S. Trajkovic, P. Tunestal and B. Johansson, "Simulation of a Pneumatic Hybrid Powertrain with VVT in GT-Power and Comparison with Experimental Data", *SAE paper 2009-01-1323*, (2009)
 [10] S. Trajkovic, P. Tunestal, B. Johansson, U. Carlsson and A. Høglund, "Introductory Study of Variable Valve Actuation for Pneumatic Hybridization", *SAE paper 2007-01-0288*, (2007)
 [11] C. Donitz, I. Vasile, C. Onder and L. Guzzella, "Realizing a Concept for High Efficiency and Excellent Driveability: The Downsized and Supercharged Hybrid Pneumatic Engine", *SAE paper 2009-01-1326*, (2009)