

2기통 소형 터보가솔린엔진에서 배기 밸브 타이밍 제어에 따른 LIVC, EIVC 상태에서의 엔진 효율 영향

장진영^{*†} · 우영민^{*} · 신영진^{*} · 고아현^{*} · 정용진^{*} · 조종표^{*} · 김강출^{*} · 표영덕^{*} · 한명훈^{**}

Effect of Controlling Exhaust Valve Timing on Engine Efficiency in LIVC and EIVC States in a 2-Cylinder Small Turbo Gasoline Engine

Jinyoung Jang, Youngmin Woo, Youngjin Shin, Ahyun Ko, Yongjin Jung, Chongpyo Cho,
Gangchul Kim, Youngdug Pyo, and Myunghoon Han

Key Words: Engine, Gasoline, LIVC (Late Intake Valve Close), EIVC (Early Intake Valve Close), IVT (Intake Valve Timing), EVT (Exhaust Valve Timing)

Abstract

This study examines whether engine fuel efficiency is improved by optimization of the exhaust valve timing in a state where the intake valve timing has been optimized in a small turbo gasoline engine that has intake cams and exhaust cams with fixed valve opening periods. When the exhaust valve is opened late, the expansion stroke is longer, and the efficiency can be improved. A 2-cylinder turbo gasoline engine with 0.8 liters of displacement and an MPI (Multi Point Injection) fuel system was used. The engine was operated at 1,500 and 3,000 rpm, and the load conditions included a partial load of 50 N·m and a high load of 70 N·m. Data was recorded as the exhaust valve timing was controlled, and this was used to calculate the efficiency of combustion using a heat release, the fuel conversion efficiency, and the pumping loss. Results and the hydrocarbon concentrations in the exhaust gas were compared for each condition. Experiment results confirmed that additional fuel efficiency improvements are possible through exhaust valve timing control at 1,500 rpm and 50 N·m. However, in other operating conditions, fuel efficiency improvements could not be obtained through exhaust valve timing control because cases where the pumping loss and fuel/air mixture slip increased when the exhaust valve timing changed and the fuel efficiency declined.

기호설명

BSFC : Brake Specific Fuel Consumption
COV : Coefficient of Variation

EIVC : Early Intake Valve Close
EVT : Exhaust Valve Timing
GDI : Gasoline Direct Injection
IMEP : Indicated Mean Effective Pressure
IVT : Intake Valve Timing
LIVC : Late Intake Valve Close
MPI : Multi Point Injection
PV : Pressure Vs. Volume
THC : Total Hydrocarbon
VVT : Variable Valve Train

(Received: 20 Jun 2022, Received in revised form: 1 Jul 2022,
Accepted: 12 Jul 2022)

^{*}한국에너지기술연구원

^{**}블루플래닛

[†]장진영 (한국에너지기술연구원)

E-mail : jy.jang@kier.re.kr

TEL : (042)860-3091

1. 서 론

엔진의 효율을 향상시키기 위해 가솔린 엔진에서는 다운사이징 기술을 많이 사용하고 있다. 다운사이징은 자연흡기방식의 엔진배기량을 줄이고 대신 터보차저를 사용하여 줄어든 배기량 만큼을 보상하는 방식인데, 엔진이 소형/경량화 되면서 얻는 이득과 고효율 운전 범위에서의 엔진 운전 시간을 늘려 연료 소비량을 줄이는 것이다^(1,2). 터보차저를 사용하는 경우 직접분사방식을 함께 사용하는데, 이는 터보차저 사용시 흡입공기의 온도와 압력이 상승하여 고부하 운전시 노킹발생 가능성이 높아지기 때문이다⁽³⁾. 연소실에 직접분사하여 연료가 증발하면서 혼합기 온도를 떨어뜨려 노킹을 발생을 줄일 수 있기 때문이다^(4,5).

흡/배기 밸브 제어는 흡/배기 효율을 운전조건에 따라 변경하여 효율을 향상시킬 수 있는 방법으로 최근에 개발되는 가솔린엔진에는 대부분 장착되는 기술이다⁽⁶⁾. 밸브 제어는 열리고 닫히는 시기를 제어하는 밸브 열림기간 제어 기술과 밸브의 열림 정도를 제어하는 밸브 양정제어 기술이 있다⁽⁷⁻⁹⁾. 밸브 양정제어 방식 사용시 밸브 열림기간 이 함께 변하게 되어 밸브타이밍이 함께 변하게 된다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 밸브타이밍 변경은 흡/배기 효율을 변경시켜 주게 되고 이로 인해 잔류가스량을 다르게 하기 때문에 연소에도 영향을 미칠 수 있다⁽⁸⁾. 또한 흡기 밸브 타이밍 변화는 PV(Pressure Vs. Volume) 선도상에 나타나는 pumping loss를 줄일 수도 있다^(8,9). 이러한 점을 이용하여 최근에는 밀러사이클 등 고효율 사이클을 만드는데 사용되기도 한다⁽⁸⁾.

밀러사이클은 팽창행정을 길이를 압축행정보다 길게 하여 더 많은 일을 얻어내는 사이클인데, 이를 구현하기 위하여 흡기 밸브 열림시기를 늦게 하거나 빠르게 한다^(11,12). 흡기밸브 열림시기를 늦게하는 경우를 LIVC(Late Intake Valve Close), 빠르게 하는 경우를 EIVC(Early Intake Valve Close)라고 한다. 하지만 LIVC와 EIVC 적용으로 인하여 실제적인 압축비가 감소되는 반대적인 현상이 나타나 효율이 감소될 수 있어 터보차저를 통한 압력보상이 함께 적용되고 있다⁽¹¹⁾. 하지만 터보차저를 이용한 압축비 보상이 충분하지 않을 수 있기 때문에 가변압축비기술을 적용하는 사례도 있다⁽¹³⁾. 가변압축비기술은 기계적으로 압축비를 바꾸는 것으로 운전중에도 압축비변경이 가능하여 운전조건에 따라 최적화를 시켜줄 수 있다. 이를 이용하여 가솔린엔진에서 압축착화 연소와 스파크점화 연소를 상황에 따라 사용할

수 있다.

위에 언급한 고효율 엔진 제작을 위한 기술들을 모두 소형엔진에 적용하는 것은 가격적인 문제로 인해 어렵다. 특히 농기계에서는 적용된 사례를 찾기 어렵다. 하지만 환경 및 장비 가격으로 인해 소형 농기계에서 스파크 점화기관을 사용하는 고회전 소형 엔진에 대한 요구가 있기 때문에 터보차저와 VVT(Variable Valve Train) 기술을 적용하는 경우는 많지만, 상대적으로 GDI(Gasoline Direct Injection) 기술을 적용하는 경우는 드물다.

본 연구는 자연흡기방식의 1리터급 디젤 엔진을 대체할 수 있는 농기계용 고효율/저배기의 가솔린 엔진의 개발을 위하여 VVT 기구를 이용한 흡기 밸브 타이밍 제어에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 밀러사이클 구현을 위해 LIVC, EIVC 상태에서 배기밸브 타이밍 제어가 팽창행정을 변경시킴으로써 어떤 추가적인 효과를 가져올 수 있는지에 대한 연구가 부족하다 판단되어 연구를 수행하였다. 연구를 위하여 MPI(Multi Point Injection) 연료시스템을 가지는 배기량 0.8 리터의 2기통 터보 가솔린 엔진을 실험에 사용하였다. 본 연구 결과는 소형 가솔린 엔진에서 배기 밸브 타이밍 효과에 대한 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 실험 장치

Figure 1은 실험에 사용된 엔진의 설치 모습과 실험장치 구성의 개략도이다. 실험에 사용된 엔진의 제원은 Table 1에 기록한 것과 같이 전체 배기량이 0.8리터이며, 실린더 개수가 2개인 엔진이다. 터보차저를 장착하였으며, 흡기와 배기 밸브의 열림/닫힘 시기의 변경이 가능하도록 VVT를 적용하였다. VVT를 이용하여 변경 가능한 흡기/배기 밸브 타이밍은 Fig. 2와 같다. 흡기 밸브의 경우에는 제어값이 커질수록 밸브 타이밍이 진각되고, 배기 밸브의 경우에는 제어값이 커질수록 밸브 타이밍이 지각된다. 따라서 제어값이 커질수록 흡기밸브와 배기밸브가 모두 열려있는 밸브 오버랩기간이 길어지게 된다. 그리고 상대적으로 보았을 때, 흡기 밸브의 제어값이 가장 작은 경우를 LIVC가 되고, 제어값이 가장 큰 경우에 EIVC가 된다.

엔진 제어는 Woodward 사의 MotoHawk programmable ECU를 사용하였다. 엔진 회전수와 부하제어는 EC 동력계를 사용하였으며, 배기가스 분석은 Horiba사의

배기분석기(MEXA-9100D)를 사용하였다. 실시간 연소 압력과 흡기/배기 매니폴드에서의 압력 측정은 Kistler사의 센서와 KiBox 장비를 이용하여 0.1도 간격으로 100 사이클을 저장하였다. 흡입공기량 측정은 Onosokki air flow meter를 사용했으며, 가솔린 연료 소모량 측정은 Onosokki FP-214와 DF-312를 사용했다.

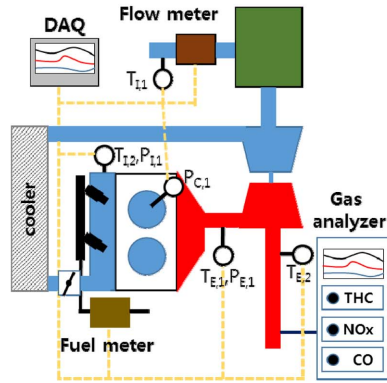
2.2 실험 조건

본 연구는 EIVC, LIVC 에서 배기 밸브 타이밍 변화

의 영향을 살펴보는 연구이므로, 우선 배기 밸브를 제어값이 0인 상태에서 흡기 밸브를 제어하여 그 기본 특성을 살펴보고, 그 후 EIVC 또는 LIVC 상태에서 배기 밸브 제어값을 변경해가며 실험을 진행하였다. 그리고 이때 엔진 회전수는 1500, 3000 rpm 이었으며, 부하는 50, 70 N·m 였다. 자세한 사항은 Table 2에 나타내었다.



(a) Test engine set-up



(b) Schematic diagram

Fig. 1 (a) Test engine set-up, (b) Schematic diagram

Table 1 Engine specification

Item	Value
Displacement volume (L)	0.8
Number of cylinders	2
Bore size (mm)	77.4
Stroke length (mm)	88.8
Compression ratio	9.5
Induction system	Turbo Intercooler
Fuel	Gasoline
Valve train	Intake & Exhaust VVT

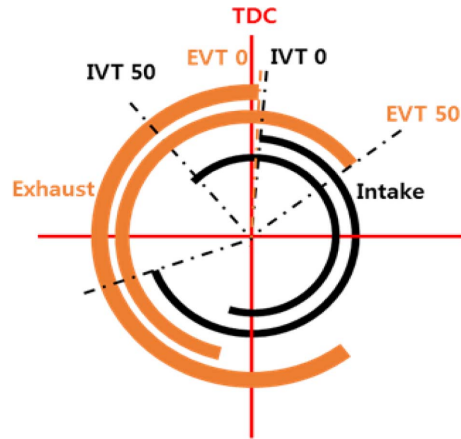


Fig. 2 Valve timing as IVT and EVT control

Table 2 Test condition

Engine speed (rpm)	Torque (N·m)	IV control	EV control
1500	50, 70	0, 10, 20, 30, 40, 50	0
1500	50, 70	0, 50	0, 10, 20, 30, 40, 50
3000	50, 70	0, 10, 20, 30, 40, 50	0
3000	50, 70	0, 50	0, 10, 20, 30, 40, 50

3. 실험결과

3.1 흡기 밸브 제어에 따른 엔진 효율 비교

각 조건에서의 에너지 사용 및 소모 실태를 살펴보기 위하여 Fig. 3과 같이 각 운전조건에 대하여 Fuel Conversion Efficiency를 나타내었다. Fuel Conversion Efficiency는 투입된 연료의 에너지 대비 뽑아낸 일에너지에 대한 비율이므로, 동일한 일에너지가 발생하도록 엔진을 제어하였기 때문에 Efficiency가 높을수록 더 효율적으로 일을 한 것으로 판단할 수 있다. IVT(Intake Valve Timing) 제어값이 큰 조건에서 열효율이 감소한 것은 잔류가스 증가에 의한 것으로 판단된다. IVT 제어값이 커지면서 흡기 밸브 열림시기가 진각되어 밸브오버랩이 증가하기 때문이다.

Figure 4는 각 운전조건에서의 BSFC (Brake Specific Fuel Consumption, g/kWh)를 각 조건의 IVT 제어를 하지 않은, 즉 IVT 제어값이 0인 LIVC 조건에서의 값으

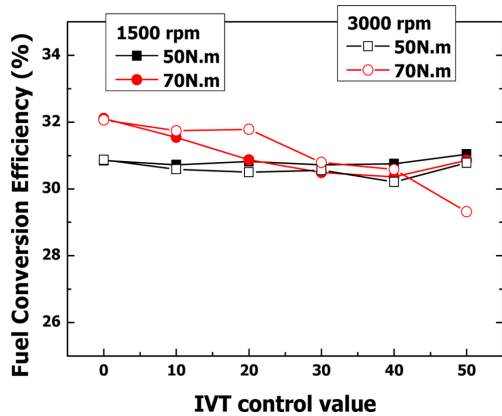


Fig. 3 Fuel conversion efficiency as IVT control value

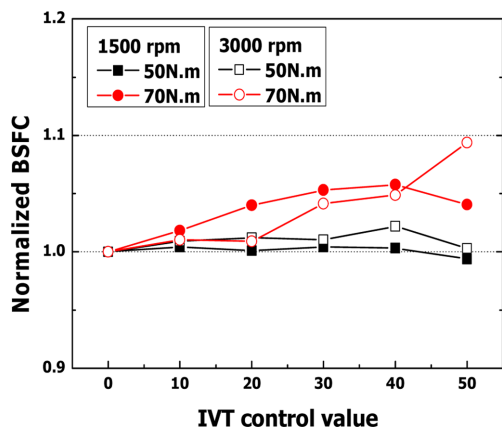


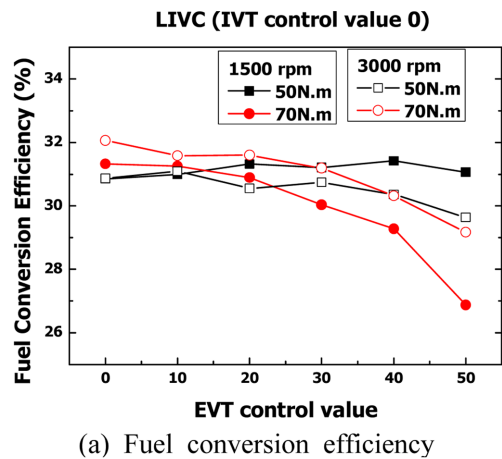
Fig. 4 Normalized BSFC as IVT control value

로 나눈 결과이다. 1보다 작으면 LIVC 일때 보다 연료 소모가 적은 것이고, 크면 연료소모가 많은 것이다.

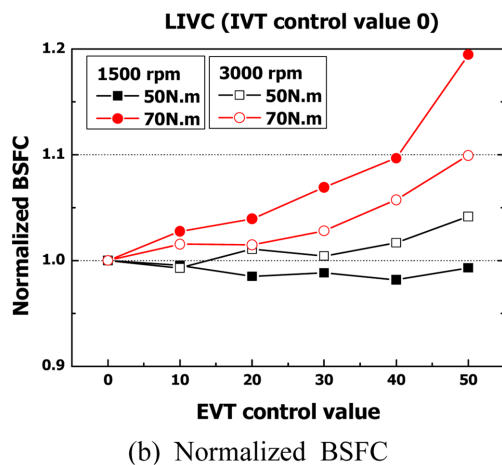
1500 rpm, 50 N.m 조건에서는 IVT 제어값이 50일 때 즉 EIVC인 조건에서 가장 연료소모가 적었고, 3000 rpm, 50 N.m 조건에서는 IVT 제어값이 커지면서 연료소모량이 많아졌다가 EIVC 조건으로 되면서 다시 감소하는 모습을 보였으나, 이것 역시 LIVC 조건보다는 좋지 않았다. 그리고 나머지 조건에서는 LIVC 조건에서 연료 소모가 가장 적은 결과를 보였다.

3.2 LIVC에서 배기 밸브 타이밍 제어에 따른 엔진 효율 비교

앞서 보았듯이 IVT 제어값이 0 이거나 50 일때 연료 소비율이 좋게 나타나기 때문에 우선 IVT 제어값이 0인 LIVC 상태에서 배기 밸브 제어값을 변경시켜가며 실험



(a) Fuel conversion efficiency



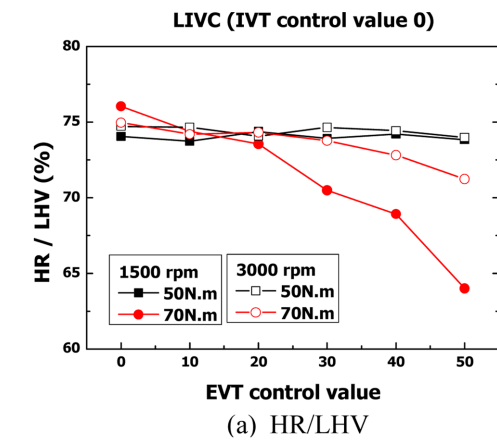
(b) Normalized BSFC

Fig. 5 (a) Fuel conversion efficiency and (b) Normalized BSFC as EVT control at IVT 0

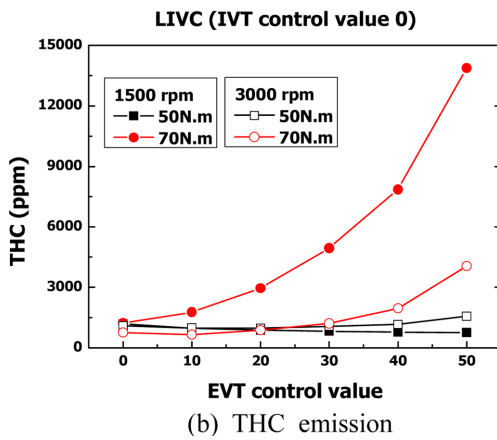
을 진행하였다. 배기 밸브의 열림/닫힘 시기에 따라 흡기와 배기 밸브가 동시에 열려있는 밸브 오버랩 기간이 달라지며, 배기 효율 변화 등이 나타나 엔진 효율에 영향을 줄 수 있다.

Figure 5는 각 운전조건별 (a) Fuel Conversion Efficiency와 (b) Normalized BSFC를 나타내었다. 1500 rpm, 50 N·m 조건에서 EVT (Exhaust Valve Timing) 제어값 증가시 EVT 제어값이 0일 때와 비교하여 Fuel Conversion Efficiency가 증가한 모습을 보이고 있으나, 나머지 조건들에서는 EVT 제어값 증가시 효율이 감소한 모습을 보이고 있다. 따라서 Fig. 5(b)와 같이 각 rpm과 부하 조건에서 IVT와 EVT 제어값이 모두 0일 때의 BSFC로 나눈 Normalized BSFC 값을 보면 Fuel Conversion Efficiency와 반대의 경향을 보이고 있다. 즉 1500 rpm, 50 N·m 조건을 제외하고는 EVT 제어값 증가에 따라 연료소모가 많아지고 있는 것이다.

EVT 제어값 변화에 의해 연비가 변화한 이유는 크게 2가지가 있을 수 있다. 첫째는 연소효율 변화이며, 둘째는 밸브타이밍 변화에 의한 펌핑손실의 변화이다. 본 연구에서는 연소효율과 직접적인 관련을 가지고 있는 열방출비율, 즉 분사된 연료에 의한 발열량과 연소압력을 이용하여 계산한 열방출량⁴⁾의 비를 이용하였다. Fig. 6은 (a) 열방출비율과 (b) 배기가스중 THC(Total Hydrocarbon) 농도 그래프이다. 열방출비율을 보면, 50 N·m에서는 rpm에 따른 변동이 크지 않은 것을 확인 할 수 있다. 하지만 자세히 살펴보면 EVT 제어값이 증가했을 때 열방출비율이 조금 상승한 것을 확인 할 수 있다. 하지만 부하가 높은 70 N·m에서는 EVT 제어값 상승시 열방출비율이 감소한 것을 볼 수 있다. EVT 제어값이 증가하게 되면서 열방출비율이 감소하는 이유는 Fig. 6(b)의 THC 농도 그래프로 설명이 가능할 것으로 판단된다. EVT 제어값 증가

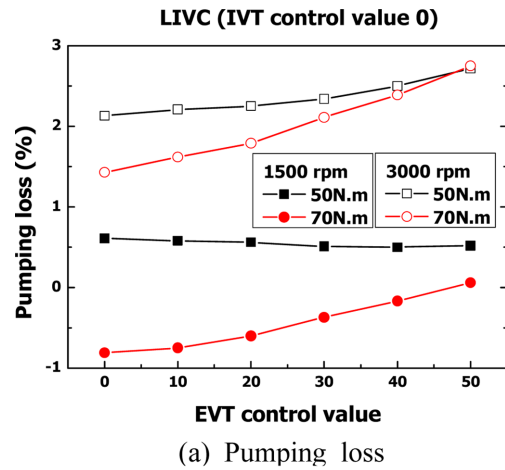


(a) HR/LHV

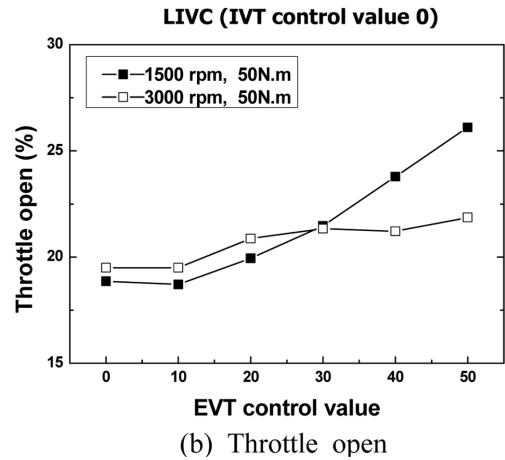


(b) THC emission

Fig. 6 (a) HR/LHV and (b) THC emission as EVT control at IVT 0



(a) Pumping loss



(b) Throttle open

Fig. 7 (a) Pumping loss and (b) Throttle open as EVT control at IVT 0

시 밸브오버랩 기간이 증가하게 되는데, 이때 흡기압력이 배기압력보다 높게 되면 연료/공기 혼합기가 그대로 배기 관으로 나가게 된다⁽¹⁵⁾. 이렇게 슬립된 혼합기는 연소에 참여하지 못하여 연비를 떨어뜨리게 된다. 불완전연소량이 증가한 것으로 판단하지 않는 것은 연소불안정성을 평가할 때 많이 사용하는 COV_IMEP (Coefficient of Variation in Indicated Mean Effective Pressure)를 계산해 보았을 때 그 값이 3을 넘지 않았기 때문이다.

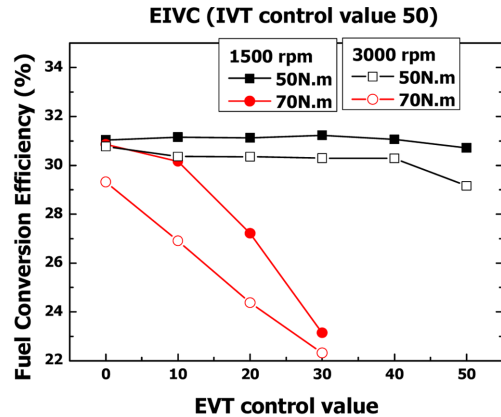
Figure 7은 (a) pumping loss와 (b) Throttle open 을 나타내었다. Fig. 7(a) pumping loss는 연소압력을 이용하여 계산한 펌핑에너지와 연료에 의한 발열량 비로 나타낸 것이다. 배기와 흡기행정에서 나타나는 실린더 내부의 압력에 의해 발생하는 손실이므로 마이너스 값을 보이는 것은 일을 받은 것이다⁽¹⁴⁾. 1500 rpm, 70 N·m 조건에서 마이너스 값을 보이고 있는데 이는 배기행정보다 흡기행정에서의 압력이 더 높기 때문이다. 1500 rpm, 50 N·m 조건을 제외하고 모든 조건에서 EVT 제어값이 증가할수록 pumping loss가 커지고 있다. 50 N·m 조건에서는 부분부하 영역으로 스톱들이 Fig. 7(b)에서 처럼 전부 열려있지 않은 상태이다. 그런데 EVT 제어값이 변화하게 되면 충전효율 변화로 인하여 공기량이 작아져서 부하와 공연비를 맞추기 위해 Throttle open 값이 더 커지게 된다. 따라서 pumping loss가 변하게 되는데, 1500 rpm, 50 N·m 조건에서는 throttle open 값의 증가율이 커서 pumping loss가 작지만 감소되면서 연비 향상에 도움을 주었다.

EVT 제어값이 변하는 저부하 조건에서 연비는 연소 효율과 pumping loss에 영향을 받아 변하게 되며, 고부하 조건에서는 연소효율의 영향이 더 크게 연비에 영향을 미치고 있는 것을 확인할 수 있다.

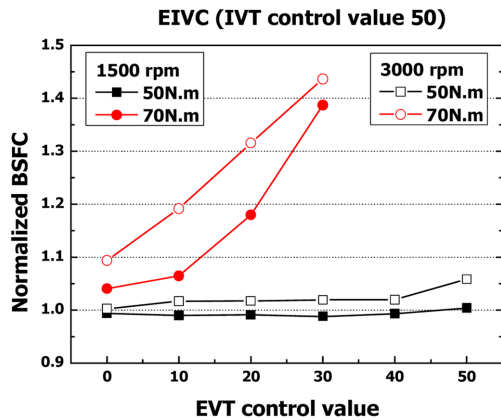
3.3 EIVC에서 배기 밸브 타이밍 제어에 따른 엔진 효율 비교

IVT 제어값이 50인 EIVC 상태에서 배기 밸브 제어값을 변경시켜가며 실험을 진행하였다.

Figure 8은 각 운전조건별 (a) Fuel Conversion Efficiency와 (b) Normalized BSFC를 나타내었다. 70 N·m 조건에서는 과도한 연비하락으로 인해 EVT 제어값을 30까지만 실험하였다. 1500 rpm 50 N·m 조건에서 EVT 제어값 증가시 EVT 제어값이 0일 때와 비교하여 Fuel conversion efficiency가 미미하게 증가했다가 EVT 제어값 40 이상에서는 다시 감소하는 모습을 보이고 있다. 나머지 조건들에서는 EVT 제어값 증가시 효율이 감소



(a) Fuel conversion efficiency



(b) Normalized BSFC

Fig. 8 (a) Fuel conversion efficiency and (b) Normalized BSFC as EV control at IVC 50

한 모습을 보이고 있으며, 70 N·m 조건에서는 급격히 효율이 감소하는 모습을 보이고 있다. Normalized BSFC 에서도 효율이 상승한 1500 rpm, 50 N·m 조건을 제외하고는 모두 EVT 제어값 증가에 따라 연료소비가 증가하고 있다.

연소효율에 대하여 확인하기 위하여 열방출비율을 Fig. 9(a)에 나타내었으며, 연료 슬립에 대하여 확인하기 위하여 배기가스중 THC 농도를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 열방출비율을 보면, 50 N·m 에서는 rpm과 EVT 제어값에 따른 열방출비율이 비슷하고 변동이 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 하지만 자세히 살펴보면 1500 rpm 조건에서는 EVT 제어값이 증가했을 때 열방출비율이 조금 상승한 것을 확인할 수 있다. 하지만 부하가 높은 70 N·m 에서는 EVT 제어값 상승시 열방출비율이 급격

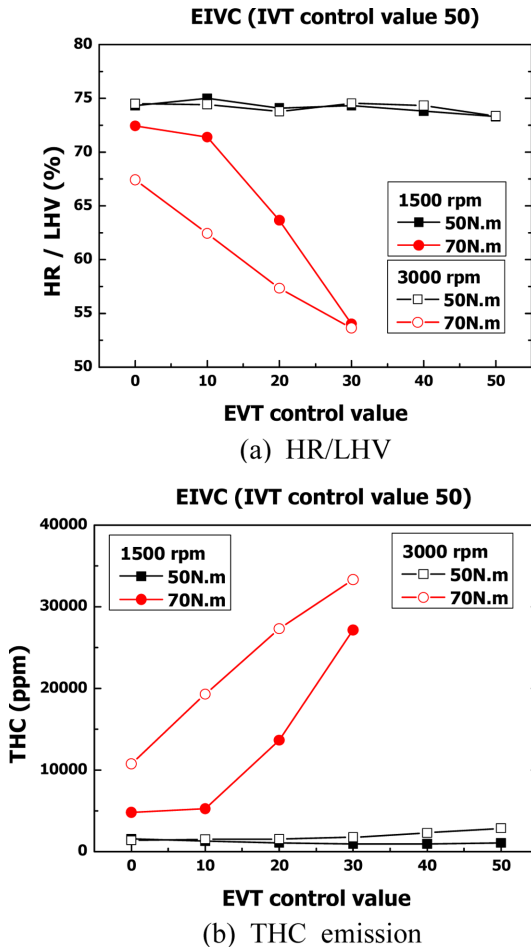


Fig. 9 (a) HR/LHV and (b) THC emission as EVT control at IVT 50

히 감소하는 것을 볼 수 있다. 앞장에서도 설명한 바와 같이, EVT 제어값 증가시 밸브오버랩 기간이 증가하게 되는데, 이때 흡기압력이 배기압력보다 높게 되면 연료/공기 혼합기가 그대로 배기관으로 나가게 된다. 이렇게 슬립된 혼합기는 연소에 참여하지 못하여 연비를 떨어뜨리게 된다. 그리고 Fig. 6과 Fig. 9를 비교해 보면 70 N·m에서 EVT 제어값 증가에 따른 열방출비율 감소와 THC 증가량이 Fig. 9에서 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 IVT 제어값이 50인 상태에서 EVT 제어값이 증가하게 되면 IVT 제어값이 0인 상태에서 보다 밸브오버랩기간이 증가하기 때문에 흡기행정 초반에 많은 공기/연료 혼합기가 배기로 빠져나간 것이다.

Figure 10는 pumping loss와 throttle open 을 나타내었다. EVT 제어값 증가에 따라 pumping loss가 감소하는

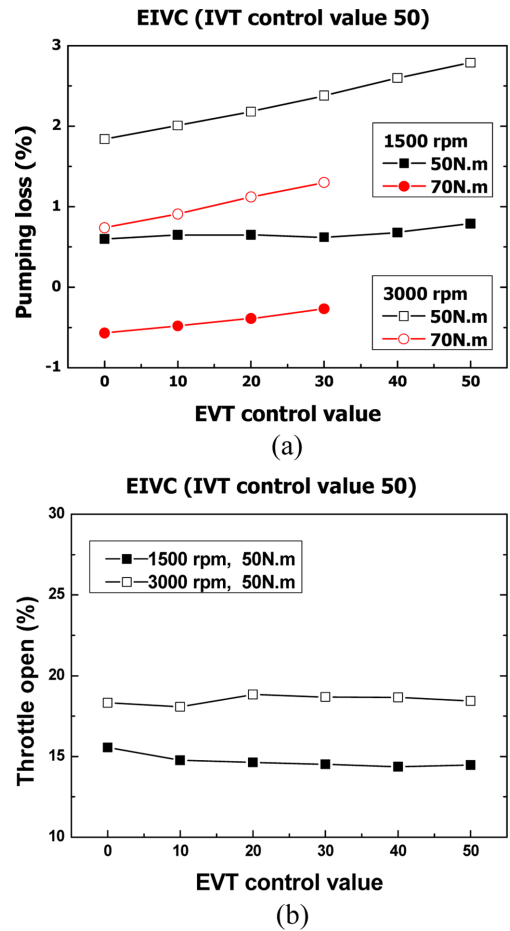


Fig. 10 Pumping loss and Throttle open as EVT control at IVT 50

실험 결과는 없었다. 50 N·m 조건에서 IVT 제어값이 0인 상태에서 EV 제어값을 변경하였을 때는 Throttle open 값이 증가하여 pumping loss를 줄여주는 효과를 얻었는데, Fig. 10(b)에서 처럼 IVT 제어값이 50인 상태에서 EVT 제어값을 제어하는 경우에는 Throttle open 값이 비슷하거나 감소시켜 엔진을 제어하였다.

EVT 제어값이 변하는 저부하 조건에서 연비는 연소 효율과 pumping loss에 영향을 받아 변하게 되며, 고부하 조건에서는 연소효율의 영향이 더 크게 연비에 영향을 미치고 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 2기통 터보 가솔린엔진에서 흡기 밸브와

배기 밸브 제어에 따른 연비 변화에 대하여 살펴보았다. 특히 배기 밸브 제어에 따른 효과에 대하여 자세히 살펴 보았다. 이를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 흡기밸브의 경우 운전조건에 따라 늦게 열거나 일찍 열 때 연비가 최대 20% 좋았다.

(2) 배기밸브의 경우 1500 rpm, 50 N·m 조건에서 연비가 향상되는 운전점을 찾을 수 있었으며, 이는 연소효율 개선과 pumping loss 감소에 의한 것이었다. 하지만 다른 운전 조건에서는 연비가 나빠졌으며, 특히 70 N·m 조건에서는 밸브오버랩 기간 증가와 공기/연료 혼합기 슬립량 증가로 인해 연비가 급격히 나빠지는 조건도 있었다.

(3) IVT 제어값이 50일 때 보다 IVT 제어값이 0 일때 EVT 제어에 따른 연비 향상이 더 많이 되었다. 이는 IVT 제어값이 0인 상태에서 EV를 제어할 때 펌핑일이 마이너스가 되도록 PV 다이어그램이 만들어졌으며 동시에 Throttle open 값이 커지면서 흡기행정 중에 압력이 상승하여 pumping loss가 감소되도록 하였기 때문이다.

(4) Throttle open 이 커진 1500 rpm, 50 N·m 조건을 제외하고는 상승된 배기압력으로 인해 펌핑일 증가가 커져 연비손실일 발생하였다.

(5) EVT 제어의 영향에서, 50 N·m 조건에서는 연소효율과 pumping loss가 비슷한 수준으로 연비에 영향을 미치고 있었으나, 70 N·m 조건에서는 혼합기 슬립에 의한 연소효율 감소가 연비손실에 가장 큰 영향을 주고 있었다.

마지막으로, 밸브열림기간이 일정한 배기캠을 이용한 배기밸브 열림시기 지각은 팽창행정의 기간을 증가시켜 연비를 향상시킬 것으로 기대되었으나 흡기행정 동안의 압력을 함께 올려주지 못하면 pumping loss의 증가와 밸브오버랩 증가로 인한 공기/연료 혼합기 슬립량 증가로 연비가 감소함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) J. Su, M. Xu, T. Li, Y. Gao and J. Wang, "Combined

effects of cooled EGR and a higher geometric compressions ratio on thermal efficiency improvement of a downsized boosted spark-ignition direction-injection engine", *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, 2014, pp. 65~73.

(2) B. Lecointe and G. Monnier, "Downsizing a gasoline engine using turbo-charging with direct injection", SAE paper 2003-01-0542, 2003.

(3) C. Schwarz, E. Schunemann, B. Durst, J. Fischer and A. Witt, "Potentials of the spray-guided BMW DI combustion system", SAE Paper 2006-01-1265, 2006.

(4) T. Lake, S. Sapsford, J. Stokes and N. Jackson, "Simulation and Development Experience of a Stratified Charge Gasoline Direct Injection Engine", SAE 962014, 1996.

(5) J. Yang and R. Anderson, "Fuel Injection Strategies to Increase Full-Load Torque Output of Direct-Injection SI Engine", SAE 980495, 1998.

(6) G. Fontana and E. Galloni, "Variable valve timing for fuel economy improvement in a small spark-ignition engine", *Appl Energy*, Vol. 86, 2009, pp. 96~105.

(7) Y. Moriya, A. Watanabe, H. Uda, H. Kawamura, M. Yoshioka and M. Adachi, "A Newly Developed Intelligent Variable Valve Timing System - Continuously Controlled Cam Phasing as Applied to a New 3 Liter Inline 6 Engine", SAE Technical Paper 960579, 1996.

(8) P. Kreuter, P. Heuser, R. Joachim, R. Erz, U. Peter and O. Bocker, "Variable Valve Actuation-Switchable and Continuously Variable Valve Lifts", SAE paper 2003-01-0026, 2003.

(9) R. Pierik and J. Burkhard, "Design and Development of a Mechanical Variable Valve Actuation System", SAE paper 2000-01-1221, 2000.

(10) T. Li, B. Wang and B. Zheng, "A comparison between Miller and five-stroke cycles for enabling deeply downsized, highly boosted, spark-ignition engines with ultra expansion", *Energy Conversion and Management*, Vol. 123, 2016, pp. 140~152.

(11) T. Li, Y. Gao, J. Wang and Z. Chen, "The Miller cycle effects on improvement of fuel economy in a highly boosted, high compression ratio, direct-injection gasoline engine: EIVC vs. LIVC", *Energy Conversion and Management*, Vol. 79, 2014, pp. 59~65.

(12) J. Zhao, "Research and application of over-expansion cycle (Atkinson and Miller) engines - A review", *Applied Energy*, Vol. 185, 2017, pp. 300~319.

- (13) A. Boretti and J. Scalzo, "Exploring the advantages of Atkinson effects in variable compression ratio turbo GDI engines", SAE paper 2011-01-0367, 2011.
- (14) J. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw-Hill, 1988.
- (15) J. Totmanen, "Variable Valve Actuation and Dual-Fuel Combustion", 2015, Master's Thesis, Aalto University.