



실린더 비활성 제어의 연비 개선 효과에 관한 시뮬레이션

박 경 석¹⁾ · 이 난 규²⁾ · 박 진 일^{*2)} · 이 종 화²⁾

금오공과대학교 기계시스템공학과 · 아주대학교 기계공학과

Simulation of Fuel Economy Improvement by Using Cylinder Deactivation Control

Kyoungseok Park¹⁾ · Nankyu Lee²⁾ · Jinil Park^{*2)} · Jonghwa Lee²⁾

¹⁾Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 39177, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 16499, Korea

(Received 31 January 2017 / Revised 6 April 2017 / Accepted 1 May 2017)

Abstract : The engine CDA(Cylinder DeActivation) is one of the promising technologies that can help improve vehicle fuel economy by reducing the pumping loss of a spark ignition engine. CDA deactivates several cylinders to generate the required power, and results in higher load operations of active cylinders, which reduce the total pumping loss of the engine. The effect of CDA on improved fuel economy depends on the number of active cylinders on a given driving condition. In this study, modeling and simulation were carried out to estimate the effect of CDA on the vehicle fuel economy of 4-cylinder and 6-cylinder gasoline vehicles. CVS-75 and HWFET driving cycles were chosen as the driving conditions of the vehicles, and the efficiency and pumping loss of each cylinder were modeled after experimental data. The results showed improved fuel economy of up to 7 % for a 6-cylinder vehicle on a CVS-75 driving condition.

Key words : Cylinder deactivation(실린더 비활성화), Vehicle fuel economy(차량 연비), Vehicle modeling(차량 모델링), Pumping loss(펌핑 손실)

1. 서론

차량 연비 향상에 관한 연구는 규제 대응과 상품성 제고를 위한 가장 중요한 연구 분야 중 하나이다. 차량 각 요소별 에너지 소모량 상세 분석과 이를 바탕으로 한 연료 소모량 최소화는 현재 매우 고도화되어 있으며 수많은 연구자들은 연비 개선을 위해 지속적으로 다양한 기술을 개발하고 있다.

1981년 GM사에 의해 최초로 양산 적용되었고 현재도 많은 자동차 제작사로부터 주목받고 있는 기술 중 하나로 펌핑 손실 저감을 위한 실린더 비활성화(Cylinder DeActivation, 이하 CDA) 기술¹⁾이 있다.

CDA 기술은 운전 조건에 따라 하나 이상의 실린더에서 동력 생산을 차단하여 나머지 실린더의 부하를 높임으로써 가솔린엔진의 단점인 펌핑 손실을 줄이는 기술이다. 현재 CDA 기술은 비활성 실린더의 개수가 고정된 고정패턴 CDA^{2,3)}와 비활성 실린더가 동적으로 결정되는 CDA^{4,5)}로 구분할 수 있다.

CDA 관련 연구는 CDA 제어로직 외에도 CDA 기술의 연비 개선 효과를 극대화하기 위한 다양한 연구, 즉 배기계 변경,⁶⁾ 과도상태 공연비제어,⁷⁾ 흡배기 밸브제어⁸⁻¹⁰⁾ 등 매우 광범위하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 CDA 기술을 적용하는 경우, 기존 엔진에서 펌핑 손실을 얼마나 줄일 수 있으며, 이로 인한 연비 향상 효과가 어느 정도일지를 예측해 볼 수 있

*Corresponding author, E-mail: jpark@ajou.ac.kr

는 시뮬레이션을 수행해 보았다. 이를 위해 실차 시험을 통한 엔진 및 차량 모델링을 수행하였다.

엔진의 기통수가 높을수록 CDA에 의한 연비 향상 효과는 클 것으로 예상되므로 본 연구에서는 6기통, 4기통 엔진 차량에 대해 기존에 확보된 도심 연비 모드(CVS-75) 및 고속도로 연비 모드의 시험 데이터를 이용하여 CDA 효과를 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 시뮬레이션을 위한 공기량 모델

CDA에 따른 연비 차이를 비교하기 위해서는 CDA 동작을 전후로 동일한 엔진토크 상태를 유지해야 하는 것이 전제 조건이라고 볼 수 있다. 이 조건을 만족하려면 CDA 전후 사이클 당 흡입 공기량이 같아야 한다. 이 때 공연비는 이론공연비, 점화시기 최대토크 점화시기로 제어된다고 가정하였다.

Fig. 1은 4기통 엔진에서 1사이클 동안 최대 3개의 실린더가 CDA로 작동하는 경우를 표현한 것으로서 CDA 작동 전(a)과 후(b)의 실린더 신기 충전상태를 모델링한 것이다. 그림에서 아래 부분 0.1 bar의 기체는 배기 후 연소실에 남아있던 1 bar의 배기가스가 흡기 시에 팽창하면서 차지하는 양을 표현한 것으로서 압축비를 10으로 본다면 대략 0.1 bar 정도의 분압을 차지하는 것으로 볼 수 있다.

빛금 친 부분의 공기량은 동일한 양을 가져야 한다.

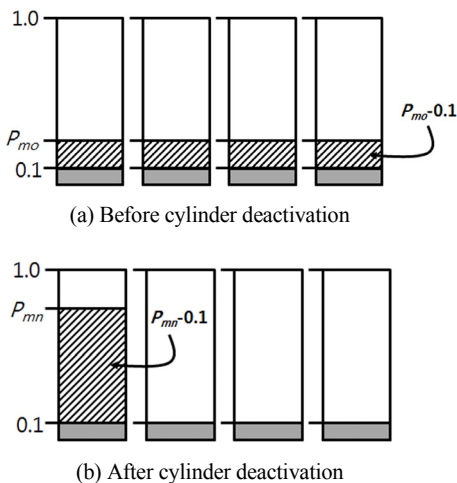


Fig. 1 Cylinder air charging model by cylinder deactivation in 4 cylinder engine

그러므로 그림에서 매니폴드 압력(실린더 흡기 완료 시 압력과 거의 동일)을 각각 P_{mo} , P_{mn} 이라고 한다면 이 두 매니폴드 압력 사이의 관계를 다음의 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$P_{mn} = P_{mo} + \frac{(n_{tot} - n_{act})(P_{mo} - 0.1)}{n_{act}} \quad (1)$$

$$P_{mn} < 1.0 \quad (2)$$

식 (1)에서 n_{tot} 은 전체 실린더 개수이고, n_{act} 는 동작 실린더 개수이다. 이 식은 비활성 실린더에 들어가야 할 공기량만큼을 동작 중인 실린더로 보낼 때 달라져야 하는 매니폴드 압력을 표현한 것이다.

Fig. 1(b)에서 흡, 배기가 이루어지는 실린더의 흡기압력은 원래 흡기압력보다 훨씬 높아져서 펌핑손실이 줄어들고, 나머지 비활성 실린더들은 별도의 밸브제어 기구에 의해 개폐 동작이 멈추어 펌핑손실이 0이 되므로 전체적으로 펌핑손실이 상당히 줄어들게 된다.

식 (2)는 흡, 배기가 이루어지는 실린더의 충전압력은 대기압인 1 bar보다는 절대 클 수 없다는 조건이다. 이 식을 CDA 모드 진입 전 전체 실린더 평균 흡기압력 P_{mo} 으로 다시 정리하면 아래의 식 (3)과 같다.

$$P_{mo} < \frac{0.9n_{act} + 0.1n_{tot}}{n_{tot}} \quad (3)$$

위 식 (3)을 이용하면, CDA로 진입할 때 작동시키는 실린더 개수를 변경하는 경우, 그에 따른 흡기압력 P_{mo} 의 범위를 여러 경우로 나누어 계산할 수 있다. 6기통과 4기통에 대한 계산 결과를 나타내면 다음의 Table 1과 같다.

Table 1(a)을 보면, 매니폴드 압력이 6기통의 경우 0.85 bar, 4기통의 경우 0.775 bar 이상에서는 비활성화 운전 모드로 진입이 아예 불가능하다.

6기통의 경우, 1 기통이라도 CDA를 할 수 있는 매니폴드 압력 한계가 4기통보다 좀 더 높으므로 상대적으로 큰 범위에서 CDA 동작이 가능함을 알 수 있다.

6기통에서 1개의 실린더만 동작(5개 CDA)시킬 수 있는 조건은 매니폴드 압력이 0.25 bar 이하여야

Table 1 Possible range of manifold pressure with active cylinder numbers in a CDA engine
(a) 6 cylinder engine case

No. of active cyl.	1~6	2~6	3~6	4~6	5~6	6
P_{mo}	<0.25	<0.4	<0.55	<0.7	<0.85	>=0.85

(b) 4 cylinder engine case

No. of active cyl.	1~4	2~4	3~4	4
P_{mo}	<0.325	<0.55	<0.775	>=0.775

하는데, 이것은 실제 운전 시 거의 공회전상태에 가까운 조건이다. 공회전 시에 5개의 실린더를 비활성화 시키면 엔진의 시동 유지가 거의 불가능하리라 예상할 수 있다. 이런 경우는 하이브리드 차량 같은 경우가 아니면 현실적으로 불가능하리라 판단된다.

3. 모드 연비 시뮬레이션

본 연구에서는 차량 연비 시험을 통해 취득한 연소압력 및 ECU의 OBD 데이터를 이용하여 CDA 연비 시뮬레이션을 수행하였으며 그 과정을 설명하면 다음과 같다.

(1) 측정된 매니폴드압력(P_{mo})을 이용하여 미리 계산된 Table 1의 범위에 따라 비활성 실린더 개수와 CDA 후의 매니폴드압력(P_{mn})을 계산한다.

(2) 차량 시험을 통해 확보한 PMEP와 매니폴드압력(P_{mo})사이의 관계식을 커브피팅으로 구한다. 가솔린엔진의 경우 매니폴드압력에 따라 PMEP는 거의 선형적인 경향을 보이므로 1차식으로 관계식을 만들 수 있다.

(3) 과정(1)에서 계산된 매니폴드압력(P_{mn})과 과정(2)의 PMEP 관계식으로 CDA에 의한 PMEP를 계산한다. 계산된 PMEP는 측정 PMEP보다 낮은 값을 가지게 되는데, 이 두 PMEP의 차이를 계산하면 펌핑손실 이득치가 계산된다.

(4) 펌핑손실이 감소하게 되면 IMEP는 그 이득만큼 감소해야 동일한 토크를 유지할 수 있다. 따라서 과정(3)에서 구한 펌핑손실 감소분을 IMEP에 반영하여 CDA 작동 시 IMEP를 계산한다.

(5) 모드 시험에서 측정된 순시연료량(ECU OBD 데이터)과 측정된 IMEP 사이의 관계식을 커브피팅

으로 구한 다음, CDA 작동 시 계산된 IMEP를 적용하여 CDA 시의 연료량을 역산한다.

(6) CDA 작동 시 순시연료량의 총합을 구하여 CDA 작동 전의 순시 연료량 총합과의 차이를 구하면 연료 절감치를 구할 수 있고, 이로써 연비 향상을 계산한다.

3.1 CVS-75 모드 6기통 시뮬레이션

본 연구에서는 CVS-75 전체 연비시험 모드 중 Phase 3(약 550초)을 시뮬레이션 구간으로 설정하였다. 이는 1) 엔진 워업 전 온도 효과를 배제하고, 2) 모드 전체 평균 매니폴드 압력(0.51 bar)과 Phase 3 평균 매니폴드 압력(0.54 bar)이 동등 수준이므로 Phase 3 연비 변화로도 충분히 전체 연비 개선효과를 대표할 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다.

Fig. 2에서 실선은 연비시험에서 측정된 매니폴드압력(P_{mo})을 나타낸 것이다. 점선으로 표시된 여러 라인들은 활성 실린더 수에 따른 P_{mo} 의 경계선을 표시한 것이다(Table 1(a) 참조).

Fig. 3은 CDA 모드로 운전하는 경우 최고 연비를 위해 최소한으로 운전해야 하는 실린더 수를 나타낸 것이다.

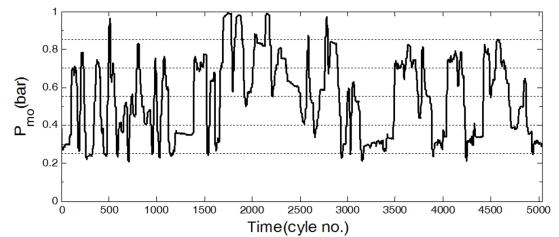


Fig. 2 Measured manifold pressure(P_{mo}) and boundary lines by eqn. (1) in CVS-75 mode of a 6 cyl. engine

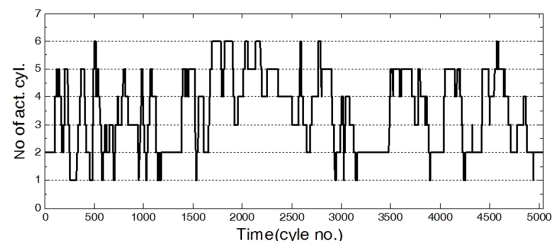


Fig. 3 Calculation of minimum activation cylinder no. by manifold pressure(P_{mo}) and eqn. (3)

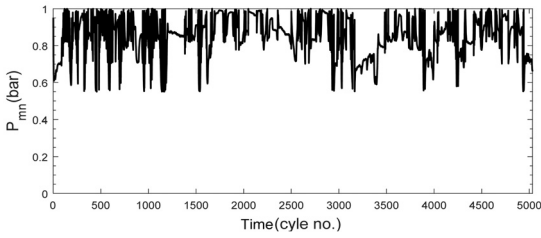


Fig. 4 Calculated manifold pressure(P_{mn}) in case of CDA operation with maximum deactivation

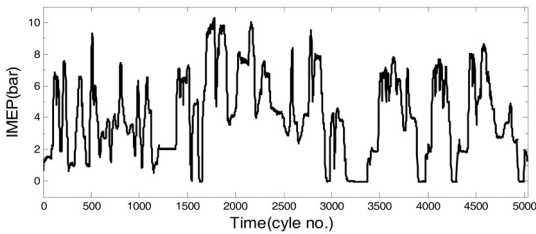


Fig. 5 Measured IMEP data in CVS-75 mode of a 6 cyl. engine

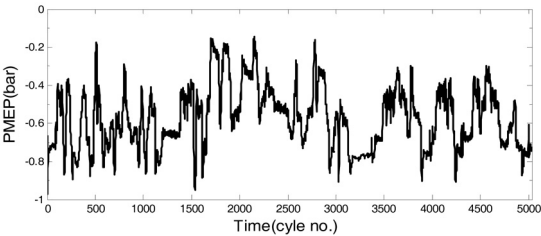


Fig. 6 Measured PMEP data in CVS-75 mode of a 6 cyl. engine

Fig. 4는 엔진의 불안정성을 무시하고 매니폴드 압력 조건이 허용하는 한 최대의 기동수를 비활성화할 경우 나타나게 될 매니폴드 압력(P_{mn})을 계산한 것이다. Fig. 2에 비해 매니폴드 압력이 전반적으로 많이 상향되었음을 볼 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 모드 시험에서 측정된 IMEP와 PMEP 값으로서 각각은 6기통 엔진의 실제 도시일과 펌핑 손실을 측정한 것이다. Fig. 2의 매니폴드 압력과 Fig. 6의 PMEP 사이의 관계와 선형 피팅식을 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다.

Fig. 8은 시험에서 측정된 IMEP와 사이클당 연료량 사이의 관계와 커브피팅한 곡선을 그래프로 나타낸 것이다. 1차식으로 피팅할 수도 있으나 정확성

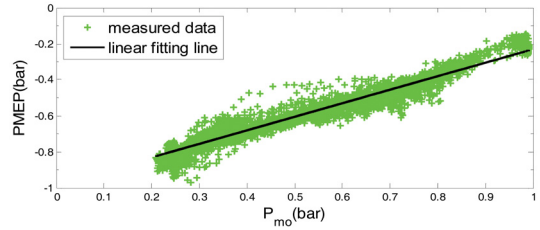


Fig. 7 Linear fitting of PMEP as a function of manifold pressure(P_{mo})

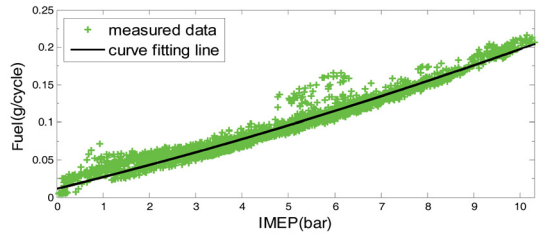


Fig. 8 Curve fitting of fuel rate as a function of IMEP

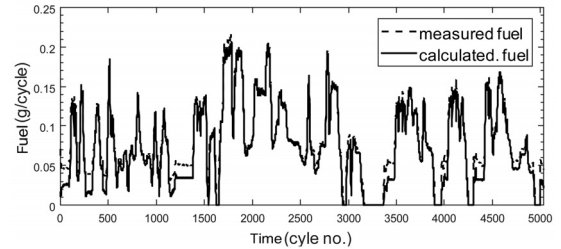


Fig. 9 Comparison between measured fuel rate and calculated fuel rate

을 높이기 위해 2차식으로 커브피팅하여 계수들을 구하였다.

이를 이용하여 원래 측정된 IMEP값으로 다시 순시연료량을 계산하여 두 연료량을 비교하여 오차를 확인해 보았다. Fig. 9의 그래프에서 점선은 원래 측정된 순시 사이클당 연료량이고, 실선은 2차식으로 계산된 연료량이다.

계산된 연료량이 일부 구간에서 낮게 나오는 경향을 보이는 것은 커브피팅 오차가 큰 영역이기 때문이다. 적산된 총 연료량을 구해보면, 측정연료량은 411.6 g, 계산식에 의한 연료량은 406.5 g으로 오차는 1.24 %이다. CDA 시뮬레이션에서 연비 향상율이 과대평가가 되지 않도록 두 연료량 중에서 적은 편인 계산 연료량 406.5 g을 CDA 효과 비교를 위한 기준 연료량으로 사용하였다.

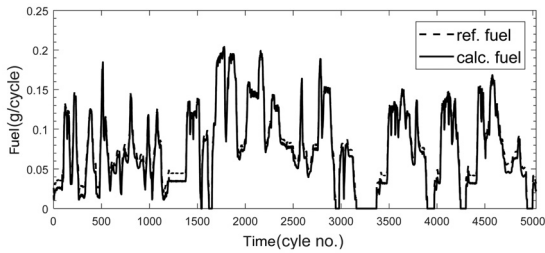


Fig. 10 Comparison between reference(no CDA) fuel rate and calculated(CDA operated) fuel rate

그 다음 Fig. 3의 CDA 실린더 수를 이용하여 펌핑 손실 감소분을 계산하고, 이를 다시 IMEP에 반영하여 CDA 작동 시 IMEP값을 계산하였다. 이를 이용하여 CDA 시 추정 연료량을 계산한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

예상할 수 있는 바와 같이 중, 저 부하에 해당하는 연료량의 절감이 크게 보인다. 총 연료량은 CDA 시에 약 378 g으로서 앞서 406 g을 기준으로 했을 때 연료 절감율은 약 6.97%로 계산된다.

이 결과는 가장 이상적인 CDA 동작을 기준으로 한 것이다. 즉, 1기통 운전도 가능하다는 가정을 포함하는 것으로 실제로 적용하기는 거의 불가능하다. 따라서 최대 CDA 동작 실린더 수를 제한하여 운영하는 경우를 계산해 보는 것이 상당히 의미가 있다.

Table 2는 이를 위해 작동 실린더 수에 따른 결과를 정리한 것이다. 작동(Active) 실린더 수를 나타낸 행에서 3~6으로 표시한 부분을 예로 들어 설명하면, 매니폴드 압력으로 볼 때 1 또는 2개의 실린더로도 운전이 가능한 영역이라 하더라도 엔진 시동의 불안정을 고려해서 최소 3개의 실린더로 제한하여 운전한다는 것을 뜻한다. 계산 결과를 보면 6.11% 정도의 연료 절감 효과가 나오는데, 이는 굳이 최대한으로 CDA를 사용하지 않더라도 연비 향상 효과가 충분함을 보여준다.

Table 2 Summary of fuel reduction by CDA in CVS-75 mode test of a 6 cyl. engine

No. of active cyl.	1~6	2~6	3~6	4~6	5~6
Fuel consumption (g)	378.2	378.5	381.7	386.8	394.9
Fuel saving (%)	6.97	6.88	6.11	4.84	2.86

3.2 CVS-75 모드 4기통 시뮬레이션

4기통의 경우도 동일한 방식으로 CDA에 따른 연비 시뮬레이션을 수행해 보았다. Fig. 11은 4기통 가솔린 차량으로 연비시험을 진행하여 측정된 매니폴드 압력을 그린 것이다. 이 그래프에서 점선은 Fig. 2에서 설명된 CDA 실린더 개수에 따른 운전 영역을 표시한 것이다. 6기통 엔진과 비교하면 매니폴드 압력이 대체적으로 높고 변동폭도 크게 나타나고 있다. 중간 과정은 6기통의 경우와 동일한 과정을 거쳐서 계산하였다. 커브피팅에 의한 연료량 피팅 오차는 1.03%로서 6기통의 경우와 거의 비슷한 수준으로 나왔다.

Fig. 12는 최종 연료량 계산 결과를 보여준다. 6기통 경우와 비슷하게 저 부하 부근에서 연료량의 절감효과가 크게 나타난다. 기준 연료량의 총합은 327 g, CDA 적용 시 연료량 총합은 309 g으로 5.37%의 연료절감 효과가 계산되었다. 이 절감효과에는 CDA를 최대한으로 이용했을 경우이므로 실제 경우 이 정도의 연비 향상 효과를 기대하기는 어렵다.

6기통의 경우와 마찬가지로 4기통에서도 최대 CDA 실린더 수를 제한하여 운영하는 경우 연비가 어떻게 달라지는 지를 계산하였고, 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

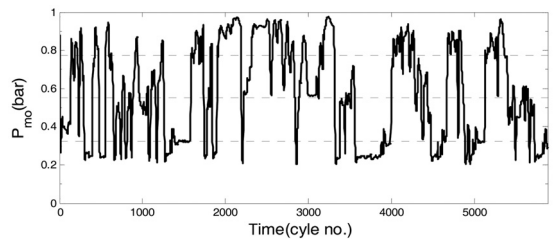


Fig. 11 Measured manifold pressure (P_{m0}) and boundary lines calculated by eqn. (1) in a 4 cyl. engine

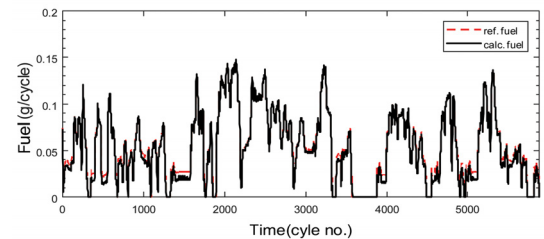


Fig. 12 Comparison between reference(no CDA) fuel rate and calculated(CDA operated) fuel rate

Table 3 Summary of fuel reduction by CDA operation in CVS-75 mode test of a 4 cyl. engine

No. of active cyl.	1~4	2~4	3~4
Fuel consumption (g)	309.5	312.1	317.8
Fuel saving (%)	5.37	4.59	2.84

결과를 보면, 4기통의 경우 CDA에 의한 최대 효과는 5 % 정도에 불과하지만, 1기통이라도 CDA 모드로 사용하면 최소 2.8 % 정도의 연료절약 효과를 볼 수 있다는 것은 주목할 만하다.

3.3 Highway 모드 시뮬레이션

앞 절에서는 도심 모드에 초점을 맞춰 설명하였는데, 같은 방식으로 고속도로 모드에 대해서도 적용해 볼 수 있다. Table 4와 Table 5에 그 결과를 나타내었다.

고속도로 모드에서는 도심 모드에 비해 저부하 구간이 적고 매니폴드 압력도 높으므로(Table 6 참조) CDA에 의한 연료 절감 효과가 그리 크지 않음을 볼 수 있다.

Table 4 Summary of fuel reduction by CDA in Highway mode test of a 6 cyl. engine

No. of active cyl.	1~6	2~6	3~6	4~6	5~6
Fuel consumption (g)	775.6	775.7	771.1	782.1	821.5
Fuel saving (%)	6.02	6.00	5.83	5.21	3.27

Table 5 Summary of fuel reduction by CDA operation in Highway mode test of a 4 cyl. engine

No. of active cyl.	1~4	2~4	3~4
Fuel consumption (g)	705.7	706.5	710.0
Fuel saving (%)	2.50	2.39	1.91

Table 6 Summary of average engine performance parameters in mode tests

mode	para.	eng. speed (rpm)	P_{mo} (bar)	IMEP (bar)	PMEP (bar)
CVS-75	6 cyl.	1349	0.54	4.10	-0.57
	4 cyl.	1538	0.57	3.99	-0.56
HWY	6 cyl.	1455	0.61	4.77	-0.53
	4 cyl.	1678	0.72	4.98	-0.46

4. 결과 정리

앞 절에서 수행한 시뮬레이션과 관련하여 엔진 성능 파라미터들을 Table 6에 정리하였고, 연료 절감 효과를 종합하여 Fig. 13에 나타내었다.

고속도로 모드에서 4기통 엔진의 경우 원래 매니폴드압력이 높아서 펌핑손실이 작은 값이기 때문에 연비 상승효과가 매우 낮은 것으로 나타났다. 반면에 6기통 엔진의 경우 4기통 엔진보다 매니폴드 압력이 낮아 펌핑손실 감소량이 커서 연비 상승효과가 더 높은 것을 알 수 있다.

나머지의 경우 CDA 실린더 수를 증가시키면 효과가 확실하게 나타나기는 하지만 CDA 기통수가 많아지더라도 연료 절감율은 정체를 보인다. 이것은 모드 주행에서 부하가 낮은 영역이 그리 많지 않다는 것과 관련이 된다.

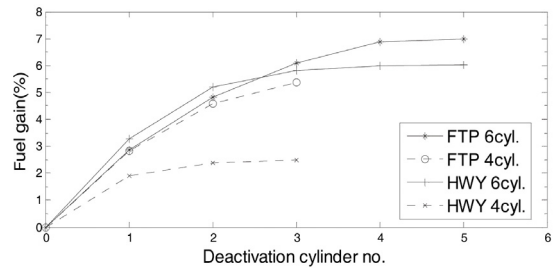


Fig. 13 Comparison of the fuel savings between mode test conditions and deactivation cylinder numbers

5. 결론

본 연구에서는 실린더 비활성화 방식을 도입할 경우 얼마나 연비 향상에 기여를 할 수 있을 것인가를 알아보았다. 연비는 운전 조건에 따라 많은 차이가 발생하므로 공인된 도심 모드와 고속도로 모드를 이용하여 수행하였다. 6기통과 4기통 엔진에 대해 주행시험 데이터를 기반으로 시뮬레이션 연구를 수행하였고, 이를 통해 실린더 비활성화 방식을 도입할 경우 최소 2 %, 최대 7 % 정도의 연비개선 효과를 기대할 수 있음을 알 수 있었다. 현재 발전된 엔진 수준에서 이 정도의 연비 개선을 얻을 수 있는 방법은 그리 많지 않음을 고려한다면 비용 상승에도 불구하고 충분히 시도해 볼 만한 가치가 있는 방식이라고 판단된다.

다만, 전체 기통 수 중에서 1/2이상 기통 수를 CDA로 작동시킨다고 하더라도 얻을 수 있는 효과의 증가는 그리 크지 않음을 알 수 있었다. 또한, CDA 기통수를 많이 하면 엔진의 시동 안정성은 크게 낮아질 것이라는 예상은 모두가 우려할 만한 예상이다.

따라서 실제 CDA를 사용하더라도 무리하게 과반 이상 기통수로 제어를 수행할 필요는 없을 것이라고 판단된다.

본 논문에서 CDA 제어 방법론에까지 구체적으로 다루지 않았으므로 연비 향상 측면에서 실제로는 다소 달라질 수도 있을 것이라 생각되는데, 이러한 문제는 실제 엔진 시험을 통해서 앞으로 계속 연구해야 할 주제라고 판단된다.

후 기

본 연구는 금오공과대학 학술지원사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) A. Falkowski, M. McElwee and M. Bonne, "Design and Development of the Daimler-Chrysler 5.7L HEMI® Engine Multi-Displacement Cylinder Deactivation System," SAE 2004-01-2106, 2004.
- 2) B. Vinodh, "Technology for Cylinder Deactivation," SAE 2005-01-0077, 2005.
- 3) M. Fujiwara, K. Kumagai, M. Segawa, R. Sato and Y. Tamura, "Development of a 6-Cylinder Gasoline Engine with New Variable Cylinder Management Technology," SAE 2008-01-0610, 2008.
- 4) M. Wilcutts, J. Switkes, M. Shost and A. Tripathi, "Design and Benefits of Dynamic Skip Fire Strategies for Cylinder Deactivated Engines," SAE 2013-01-0359, 2013.
- 5) K. Eisazadeh-Far and M. Younkins, "Fuel Economy Gains through Dynamic-Skip-Fire in Spark Ignition Engines," SAE 2016-01-0672, 2016.
- 6) Y. Bemman, T. Frei, C. Jones and M. Keck, "Passive Exhaust System With Cylinder Deactivation," SAE 2005-01-2351, 2005.
- 7) M. Kwon, M. Lee, J. Kim and M. Sunwoo, "Transient Air-fuel Ratio Control of the Cylinder Deactivation Engine during Mode Transition," Transactions of KSAE, Vol.19, No.2, pp.26-34, 2011.
- 8) M. Muhamad Said, A. Abdul Aziz, Z. Abdul Latiff, A. Mahmoudzadeh Andwari and S. Mohamed Soid, "Investigation of Cylinder Deactivation (CDA) Strategies on Part Load Conditions," SAE 2014-01-2549, 2014.
- 9) C. Kuruppu, A. Pesiridis and S. Rajoo, "Investigation of Cylinder Deactivation and Variable Valve Actuation on Gasoline Engine Performance," SAE 2014-01-1170, 2014.
- 10) Y. Shiao and L. V. Dat, "Efficiency Improvement for an Unthrottled SI Engine at Part Load," Int. J. Automotive Technology, Vol.13, No.6, pp.885-893, 2012.