

배기 압력 상승률에 의한 실화 검출

김 세 응^{*1)} · 최 민 호²⁾ · 심 국 상¹⁾

금오공과대학교 기계공학부¹⁾ · 금오공과대학교 대학원 자동차공학과²⁾

The Misfire Detection by the Exhaust Pressure Ascent Rate

Sewoong Kim^{*1)} · Minho Choi²⁾ · Kooksang Sim¹⁾

¹⁾School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk, 730-701 Korea

(Received 27 December 2001 / Accepted 23 January 2003)

Abstract : This paper proposes a method to detect misfired cylinders by the exhaust pressure ascent rate. The misfire is generated by faults of electric system or faults of fuel delivery system. It is one of the abnormal combustions. Therefore, it increases the unburned hydrocarbon and the carbon monoxide and affects a bad influence to the 3-way catalyst. The misfire causes to decrease the power of the engine and increase the consumption of the fuel. Early detection and correction of the misfired cylinders can prevent these unusual phenomena. The misfired cylinders can be detected by the comparison of exhaust pressure ascent rate during each cycle. The exhaust pressure ascent rate is defined as pressure rise per time. Our experimental results showed that the proposed method is effective in the detection of the misfired cylinders on a gasoline engine regardless loads and revolutions of the engine.

Key words : Exhaust pressure ascent rate(배기 압력 상승률), Misfire(실화), Unburned hydrocarbon(미연탄화수소), Carbon monoxide(일산화탄소), 3-way catalyst(3원 촉매)

1. 서 론

지구 환경 보존에 대한 인식이 제고됨에 따라 대기 오염을 비롯한 환경 오염은 전 세계적인 문제로 부각되고 있으며, 선진국뿐만 아니라 자동차 1000만대 시대에 진입한 우리나라에서도 자동차에서 배출되는 유해 물질에 의한 대기 오염을 최소화하기 위하여 배출가스 규제를 더욱 강화해 나가고 있다.

이러한 규제를 만족시키기 위해 여러 가지 유해 배출가스 저감 장치들이 개발되었고, 이들 장치의 성능을 향상시킬 수 있는 방안들이 지속적으로 연

구되고 있다.

가솔린 기관에서 사용되는 3원 촉매는 자동차 배출가스 정화장치로 산화와 환원 반응에 의해 유해 물질을 정화하고 있다. 그러나 3원 촉매도 정상적인 기능을 수행하기 위해서는 적절한 촉매 온도 유지, 이론 공연비 운전, 실화 등에 의한 촉매의 손상 방지가 필요하다.

3원 촉매의 정상적인 기능을 저해할 수 있는 실화는 연료 공급 장치, 전기 장치의 결함 등에 의해 발생된다. 실화가 발생되면 탄화수소, 일산화탄소 등의 유해 배출물이 급격하게 증가되고, 3원 촉매의 손상, 동력 손실, 연료 소비 증가, 토크 불균일에 의한 기관 진동 등 바람직하지 못한 현상들이 발생한다.

*To whom correspondence should be addressed.
ksw@kumoh.ac.kr

그러므로 실화를 명확하게 검출하여 기관을 정비할 수 있도록 예고해 주는 장치의 개발이 필요하다.

실화 검출에 대한 연구는 연소실 내의 압력이나 온도를 측정하여 직접 실화를 검출하는 방법¹⁾ 크랭크축 각속도 변동,^{2,5)} 산소 센서의 출력 전압 변동,⁶⁾ 산화-환원 촉매기의 온도 변화⁷⁾ 등 연소에 의해 영향을 받는 인자들을 분석하여 간접적으로 검출하는 방법에 집중되어 있다.

본 연구에서는 가솔린 기관의 실린더 내에서 발생하는 연소 상태에 따라 변화하는 배기압력 파형의 특성을 분석하여 실화 발생의 유무와 실화 실린더를 명확하게 판별해 낼 수 있는 실화 검출 지수를 개발하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 4 행정 4 실린더 DOHC 가솔린 기관, 기관 동력계, 동력계 제어기, 배기압력 취득 장치, 해석 장치, 기타 장치 등으로 구성되어 있으며, 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

기관의 회전속도와 토크를 제어하기 위해 사용된 기관 동력계는 속도 측정을 위한 마그네틱 픽업(magnetic pick-up)과 부하 측정을 위한 로드 셀(load cell)이 설치되어 있어서 일정 속도 및 일정 부하 제어가 가능하며, 최대 회전속도 10000rpm, 최대 흡수 동력 130kW의 와전류 동력계이다.

기관에서 배출되는 배기계의 압력 변화를 측정하

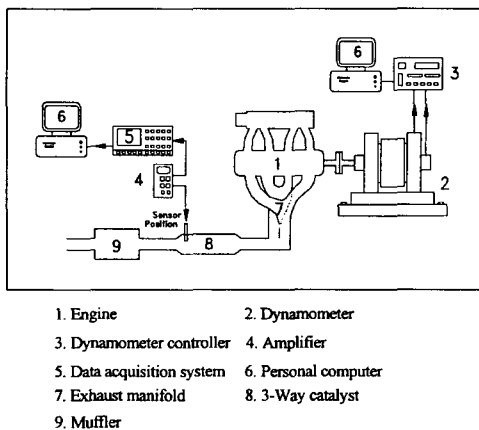


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

기 위해 Kistler사의 압전 저항형 절대 압력 변환기 (piezoresistive absolute pressure transducer)를 사용하였다.

압력 센서에서 측정된 신호는 증폭기를 사용하여 증폭시키고, 기관의 상사점 신호와 동기시켜 자료로 활용하였다.

기관의 배기계에서 형성되는 배기압력 파형은 배기 다기관을 기하학적 형상과 길이, 배기계를 구성하고 있는 구성품의 종류와 수량, 센서의 설치 위치에 따라 배기압력 파형이 달라지게 된다.

주어진 배기계에서는 압력 센서의 설치 위치에 따라 배기압력 파형이 달라지므로 가장 양호한 배기압력 파형을 얻을 수 있는 위치를 예비 실험을 통하여 파악하였다. 본 연구에서는 3원 촉매 직후에 압력 센서를 설치하였을 때 최적의 압력 파형을 얻을 수 있었다.

또한, 압력 센서를 보호하고 측정 효과를 높이기 위하여 Fig. 2와 같은 보조 기구를 사용하였다.

보조 기구 내경과 길이 변화에 따른 압력 파형의 변화를 실험을 통하여 확인하여, 최적 압력 파형이 형성되는 내경 6mm, 길이 500mm의 보조 기구를 설계하였다.

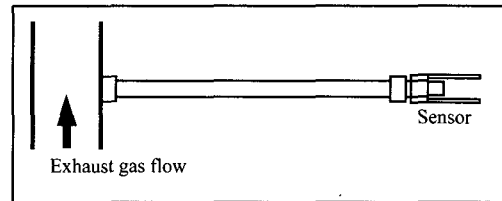


Fig. 2 Schematic diagram of the additional device

2.2 실험 방법

실험에 사용된 기관은 MPI 방식의 기관으로 초기 운전 조건을 동일하게 만들어 주기 위하여 기관을 충분히 예열시켜 냉각수 온도를 $85 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.

기관의 공연비 제어는 산소 센서의 피드백 제어(feedback control)에 의해 운전 조건과 부하에 따라 ECU에서 조정되도록 하였다.

기관의 운전은 동력계의 일정 속도 운전 모드에 의해 1000rpm에서 2500rpm까지 500rpm 간격으로

회전속도를 일정하게 유지하면서 실험을 하였다.

적용된 부하는 흡기관 내 부압을 이용하여 무부하에서 고부하까지 여러 단계로 나누어 정상 연소 및 실화에 대한 실험을 하였다.

특정 실린더의 실화 조작은 ECU에서 연료 분사 밸브로 전달되는 연료 공급 신호를 차단하는 방법과 점화 코일이나 배전기의 신호를 차단하는 방법이 있다.

본 실험에서는 3원 촉매의 손상을 막기 위하여 연료 공급을 차단하는 방법으로 실화를 조작하였으며, 실화 실린더는 단수 실린더 실화와 복수 실린더 실화로 나누어 실화를 발생시켰다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 배기 압력 특성

Fig. 3은 기관의 회전속도가 1500rpm일 경우, (a)는 보조 기구를 장착하지 않았을 때, (b)는 길이 500mm의 보조 기구를 장착하였을 때의 부하 변동에

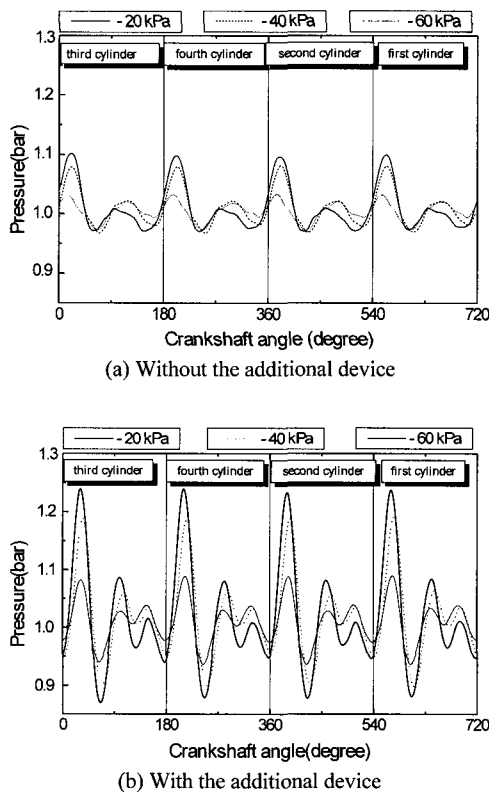


Fig. 3 Comparison of pressure fluctuations with and without the additional device at an engine speed of 1500 rpm

따라 측정된 배기압력 파형을 나타낸 것이다.

그림에서 흡기 다기관 내의 압력이 -60 kPa인 저부하 운전의 경우에는 드로틀 밸브의 개도량이 작기 때문에 흡기 다기관의 압력이 낮아 사이클당 실린더 내로 유입되는 공기-연료 혼합기량도 적다. 따라서, 실린더 내에서 연소가 정상적으로 일어나더라도 발생하는 배출가스의 양이 많지 않으므로 배기 밸브 개방 직후의 블로다운에 의한 1차 압력 파형은 약하게 나타나게 된다.

기관의 부하가 증가하게 되면 실린더 내로 유입되는 혼합기의 양이 증가되어 연소에 의한 압력이 커지고, 배출가스의 양이 많아지기 때문에 블로다운에 의한 1차 압력 파형의 진폭이 커진다.

실린더로부터 블로다운에 의해 배출되는 배기는 배기 다기관과 배기관을 거쳐 압력 센서 위치에 도달되기 때문에 압력 센서에서 측정되는 블로다운에 의한 1차 압력 파형은 실린더의 배기 밸브가 개방되는 시점보다 지연되어 전달되며, 1차 압력 피크가 나타나는 크랭크 각은 운전 조건의 영향을 받게 된다.

압력이 전달되는 속도나 전달에 소요되는 시간은 배출가스의 조성, 온도 등에 의해 결정되나 그 편차는 크지 않다. 그러나 주어진 시간에 상응하는 크랭크 각은 기관 회전속도에 비례한다. 그러므로 1차 압력 피크가 나타나는 크랭크 각은 기관의 부하보다 기관 회전속도에 따라 달라지게 된다.

3.2 단수 및 복수 실린더 실화

Fig. 4에서 보여주는 것처럼 정상적으로 연소가 이루어지고 있는 기관의 특정 실린더에서 실화가 발생되면 실화가 발생된 실린더의 블로다운에 의한 압력 상승이 상실된다. 따라서, 실화가 발생되면 정상적인 연소 사이클의 주기적인 배기압력 파형과는 다른 형태의 압력 파형이 나타나므로 그 특성을 분석하여 실화를 검출할 수 있다.

극히 제한적으로 실화가 발생하는 경우에는 배기 배출물에 큰 영향을 미치지 않지만, 특정 실린더에서 실화가 계속하여 발생되면 미연이나 불완전 연소 생성물의 배출이 급격하게 증가된다. 본 연구에서는 특정 실린더에서 연속적으로 실화가 일어난 경우에 대하여 검토하였다.

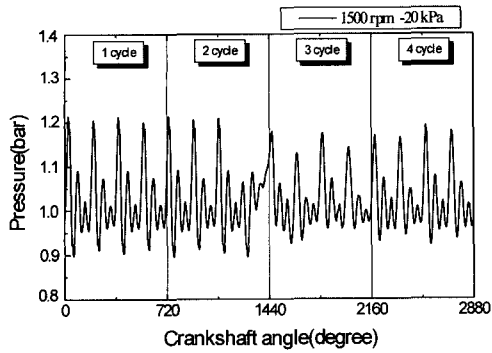


Fig. 4 Exhaust pressure fluctuations as the first cylinder was momentarily misfired

3.2.1 단수 실린더 실화

Fig. 5는 1500rpm에서 1번 실린더에 연속적으로 실화를 발생시켰을 때의 압력 파형을 나타낸 것이다.

그림으로부터 정상 연소를 행하는 실린더에서는 1차 압력 파형이 형성되고 있으나, 실화가 발생된 실린더에서는 연소에 의한 압력이 형성되지 못하기 때문에 블로다운에 의한 1차 압력 파형이 정상적으로 상승되지 않는 현상을 확인할 수 있었다. 기관의 부하가 증가할수록 실린더 내로 유입되는 혼합기의 양이 많아지기 때문에 연소 압력의 증가에 따라 배기압력의 진폭도 더욱 커진다.

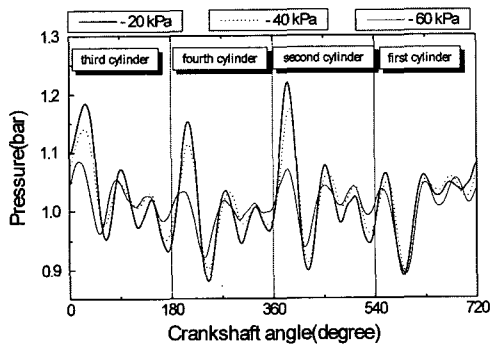


Fig. 5 Exhaust pressure fluctuations at an engine speed of 1500rpm as the first cylinder was continuously misfired

3.2.2 복수 대칭 실린더 실화

Fig. 6은 1500rpm에서 1번 실린더와 4번 실린더에 실화를 일으킨 경우의 배기압력 파형이다.

4개의 실린더 중 동시에 2개의 실린더에 실화가 일어나므로 실화-정상-실화-정상 연소를 반복하는

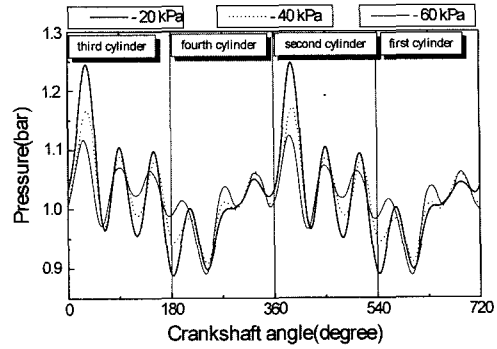


Fig. 6 Exhaust pressure fluctuations at an engine speed of 1500rpm as the first and fourth cylinders were continuously misfired

360°를 주기로 압력 파형이 형성되고 있으며, 단수 실화의 경우와 같이 실화가 발생된 실린더에서 블로다운에 의한 1차 압력 상승이 일어나지 않는 것을 확인할 수 있다.

3.2.3 복수 연속 실린더 실화

Fig. 7은 기관의 회전속도가 1500rpm에서 연속하여 연소가 일어나는 4번 실린더와 2번 실린더에 실화를 일으킨 경우에 대한 것이다.

1번 실린더에 이어서 연소하는 3번 실린더의 1차 압력 피크가 1번 실린더의 1차 압력 피크보다 약간 높게 나타나고 있다.

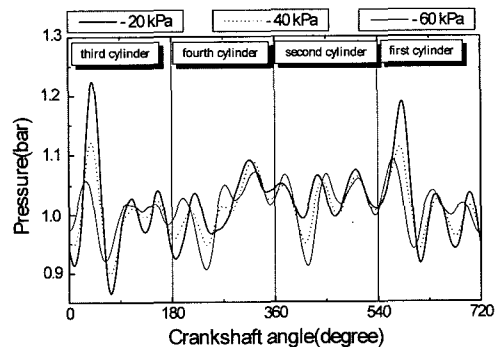


Fig. 7 Exhaust pressure fluctuations at an engine speed of 1500rpm as the second and fourth cylinders were continuously misfired

3.3 실화 검출 지수 설정

배기계로 배출되는 배기는 블로다운에 의한 1차 압력 파형과 피스톤 상승 운동에 의한 2차 압력 파

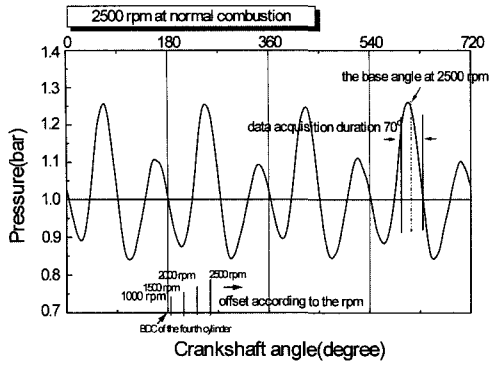


Fig. 8 Data acquisition duration for the detection of misfired cylinder

형으로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 배기압력의 1차 압력곡선의 상승률을 이용하여 실화를 검출하기 위한 지수를 설정하고자 한다.

분석 구간은 각 실린더의 배기 행정 기간 중의 하사점을 기준 각도로 하여 기준 각도 전 30°에서부터 기준 각도 후 40°까지 전체 70°구간으로 설정하였다.

기관의 회전속도 증가에 따른 압력 센서까지의 전달 지연을 고려하기 위하여 기관의 회전속도가 1000rpm에서는 6°, 1500rpm에서는 32°, 2000rpm에서는 58°, 2500rpm에서는 84° 지연시켜 기준 각도를 설정하였다.

또한 분석 구간 내에 블로다운에 의한 피크 압력이 기준 각도를 지나서 나타나면 그 피크를 최고 압력으로 설정하고, 피크 압력이 각 회전속도에 따른 기준 각도 이전에 나타나면 기준 각도에서의 압력을 최고 압력으로 설정하였다.

배기압력 상승률 지수는 분석 구간 동안의 설정 최고 압력과 크랭크 각도의 비이며, 다음 식으로 나타내었다.

$$EPAR = \frac{P_{max, \theta_{rpm}}}{\Delta t_{rpm}}$$

여기에서

$P_{max, \theta_{rpm}}$: 설정 최고 압력

θ_{rpm} : 분석 구간 내에서 최대 압력이 발생하는 크랭크 각도

Δt_{rpm} : 분석 시작으로부터 최고 압력 설정까지의 시간

위 식에서 구한 배기압력 상승률 지수로부터 각각의 실린더에서 실화 유무는 다음과 같은 방법으로 구하였다.

먼저, 정상적인 연소를 행하는 기관에서도 사이클 변동에 의해 각각의 실린더에서 발생하는 EPAR의 값에 미소한 차이가 발생할 수 있기 때문에 아래의 식으로 사이클을 분석하였다.

$$EPAR_{max} - EPAR_{min} \geq \text{허용오차} : (\text{실화사이클})$$

$$EPAR_{max} - EPAR_{min} < \text{허용오차} : (\text{정상사이클})$$

위 식과 같이 한 사이클 동안 각각의 실린더에서 발생된 EPAR 값 중에서 $EPAR_{max} - EPAR_{min}$ 의 값 차이가 2.5bar/s 이상이면 특정 실린더에서 실화가 발생되었다고 간주할 수 있으며, 실화가 발생된 사이클에 대해서만 실화를 판별하면 된다.

$$EPAR - EPAR_{min} \geq \text{허용오차} : (\text{정상실린더})$$

$$EPAR - EPAR_{min} < \text{허용오차} : (\text{실화실린더})$$

실화가 발생된 사이클로 판정이 되면 위 식과 같이 해당 사이클 각각의 실린더에서 발생될 수 있는 EPAR 중 최소 압력값($EPAR_{min}$)을 기준으로 하여 각 실린더의 EPAR과 비교하여 그 차이가 허용 오차 이상이면 정상 실린더로 판정하였으며, 그 미만이면 $EPAR_{min}$ 값을 가지는 실린더와 위 식에서 판정된 실린더를 실화가 발생된 실린더로 판정하였다. 본 연구에서 허용 오차의 값은 2.5bar/s로 예비 실험을 통하여 설정하였다.

3.4 배기 압력 상승률에 의한 실화 판정

Table 1과 Table 2는 기관의 운전 조건에 따라 본 실험에서 정의한 배기압력 상승률 지수를 이용하여 실화를 판정한 결과이다.

Table에서 세로축의 실린더 번호는 실화가 발생된 실린더 번호이며, 가로축의 실린더 번호는 기관의 실린더 번호이다. 각각의 회전속도에서 음영으로 처리된 부분은 실화가 발생된 실린더의 지수값으로 정상적인 연소 실린더의 EPAR 값과 차이가 많음을 알 수 있다. 또한 대칭적으로 실화가 발생된 사이클에서도 실화가 발생된 실린더간의 EPAR 값의 편차가 작게 나타나지만 정상적인 연소를 행하는 실린더의 EPAR 값과 차이가 많음을 알 수 있다.

Table 1 EPAR at the intake boost pressure of -60 kPa

Intake pressure	Engine speed	Misfired cylinder	Exhaust pressure ascent rate			
			1st	2nd	3rd	4th
-60kPa	1000 rpm	1st	113.77	116.42	116.53	117.12
		2nd	118.61	112.93	118.99	119.29
		3rd	121.78	120.53	113.20	121.20
		4th	118.04	118.80	117.66	113.11
		1st & 4th	112.58	119.40	119.01	112.58
	1500 rpm	1st	112.42	120.90	123.27	118.21
		2nd	130.44	114.68	119.25	129.20
		3rd	129.16	119.71	112.47	131.28
		4th	124.22	125.25	121.99	115.81
		1st & 4th	115.08	127.02	126.86	114.08
	2000 rpm	1st	110.47	116.49	119.06	118.09
		2nd	119.94	107.17	115.10	116.72
		3rd	116.79	115.31	106.18	119.69
		4th	113.54	120.74	116.91	108.05
		1st & 4th	105.03	118.84	118.53	105.32
	2500 rpm	1st	109.53	120.39	129.70	123.61
2nd		131.20	104.02	124.08	108.61	
3rd		111.47	128.57	102.42	128.40	
4th		131.11	133.34	112.38	103.60	
1st & 4th		108.83	130.82	120.87	109.36	

Table 2 EPAR at the intake boost pressure of -20 kPa

Intake pressure	Engine speed	Misfired cylinder	Exhaust pressure ascent rate			
			1st	2nd	3rd	4th
-20kPa	1000 rpm	1st	112.08	126.548	122.73	128.47
		2nd	129.02	115.14	126.13	127.94
		3rd	128.28	128.13	112.07	127.59
		4th	128.30	126.69	125.99	114.63
		1st & 4th	114.23	126.80	123.18	114.24
	1500 rpm	1st	117.45	137.28	134.59	142.32
		2nd	158.85	119.93	132.91	161.91
		3rd	165.49	138.49	118.90	159.46
		4th	150.85	138.32	140.12	125.18
		1st & 4th	113.29	140.93	141.25	111.73
	2000 rpm	1st	106.34	139.37	144.97	136.16
		2nd	145.44	104.26	131.19	123.49
		3rd	124.29	131.85	103.23	142.86
		4th	127.41	144.16	127.05	101.79
		1st & 4th	101.55	140.60	142.19	101.00
	2500 rpm	1st	102.81	139.68	156.23	139.66
2nd		161.84	99.35	140.14	143.75	
3rd		146.31	150.62	98.50	161.76	
4th		156.76	162.40	127.75	101.59	
1st & 4th		104.83	151.38	129.60	107.45	

따라서 한 사이클 내에서 가장 작은 값을 나타내는 EPAR_{min}을 기준으로 다른 실린더의 EPAR을 비

교하면 실화가 발생된 실린더를 판별할 수 있다. Table에서 볼 수 있는 것처럼 배기압력 상승률을 이용하면 기관의 회전속도나 부하에 관계없이 정확하게 실화 실린더를 판별할 수 있었다.

3.5 배기 압력 상승률에 의한 실화 판정의 검증

배기압력 상승률 지수를 검증하기 위하여 특정 실린더에서 실화가 일어나고 있는 기관의 배기압력을 20 사이클 동안 측정하여 각 실린더별로 배기압력 상승률 지수를 구하고 그 지수들을 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 9와 Fig. 10의 가장 왼쪽 부분은 정상적인 연소가 이루어지는 사이클이지만 EPAR의 값이 조금씩 다르게 나타나는 것은 연소 변동에 의한 것으로

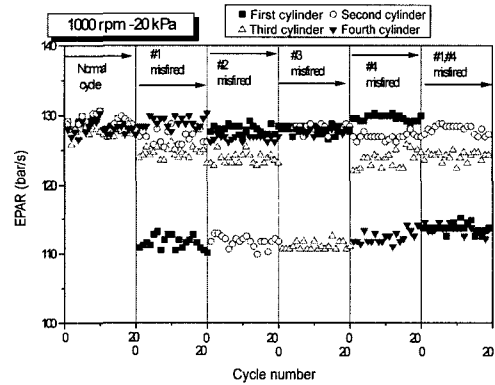


Fig. 9 Comparison of exhaust pressure ascent rates of the normal and the misfired cylinder

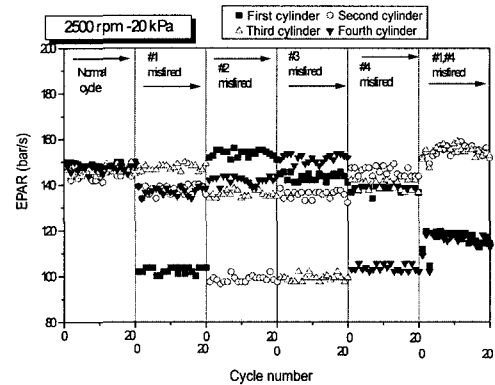


Fig. 10 Comparison of exhaust pressure ascent rates of the normal and the misfired cylinder

사료되나 전반적으로 미소한 차이를 나타내고 있다.

그러나 특정 실린더에서 실화가 발생된 경우에는 실화가 발생된 실린더의 EPAR 값과 정상적인 연소를 행하는 실린더의 EPAR 값의 차이가 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있다. 이와 같은 EPAR 값의 특성을 이용하여 실화 실린더를 정확하게 판정할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 실린더 내의 연소상태에 따른 배기압력 파형을 분석하였으며, 정상적인 연소를 행하는 실린더와 실화가 발생된 실린더의 압력 파형이 확실하게 구분되는 것을 확인할 수 있었다.

정상적인 연소를 행하는 실린더에서는 한 사이클 당 4번의 주기적인 폭발에 의해 180° 위상의 맥동적인 압력 파형이 형성되지만, 실화가 발생되면 해당 실린더의 1차 압력 파형이 형성되지 못하고 배기압력 특성도 달라지게 된다.

이와 같은 배기압력의 파형 특성을 이용하여 실화의 발생 유무와 실화가 발생된 실린더를 명확하게 검출할 수 있는 실화 검출 지수를 개발하였다.

개발된 배기압력 상승률 지수를 이용하면 정상 연소를 행하는 실린더와 실화 실린더를 정확하게 판별할 수 있다.

후 기

본 연구는 2001년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 결과로 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) Youngsuk Yoon, "A Study on the Misfire Detection Using Surface Temperature Variation of Combustion Chamber in S. I. Engine," MS Thesis, Seoul National University, 1996.
- 2) S. J. Citron, J. E. O'Higgins, L. Y. Chen, "Cylinder by Cylinder Engine Pressure and Pressure Torque Waveform Determination Utilizing Speed Fluctuation," SAE 890486, 1989.
- 3) K. Iida, K. Akishino, K. Kido, "IMEP Estimation from Instantaneous Crank Shaft Torque Variations," SAE 900617, 1990.
- 4) Sewoong Kim, "Misfire Detection of the Automotive Engine by Analysis of the Crankshaft Speed," Ph.D Thesis, Seoul National University, 1996.
- 5) Sangsoo Pae, Byeongjin Lim, Sewoong Kim, Eungseo Kim, "Misfire Detection by Using the Crankshaft Speed Fluctuation(1)," Transactions of KSAE, Vol.4, No.2, pp.23-31, 1996.
- 6) C. D. Tyree, "Emission Levels Catalyst Temperatures as a Function of Ignition-Induced Misfire," SAE 920298, 1992.
- 7) G. Flapp, M. Klenk and W. Moser, "Methods of On Board Misfire Detection," SAE 900232, 1990.