

기동 모터의 전류 파형과 실린더 압력 분석을 통한 기관의 압축 압력 균일도 및 밸브 개폐 시점 이상 여부 분석

김 인 태^{*1)} · 박 경 석²⁾ · 심 범 주^{1,3)}

경희대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 경희대학교 기계공학과²⁾ · 쌍용자동차 제어개발팀³⁾

Analysis of Cylinder Compression Pressure Uniformity and Valve Timing by Start Motor Current and Cylinder Pressure during Cranking

Intae Kim^{*1)} · Kyoungsuk Park²⁾ · Beomjoo Shim^{1,3)}

¹⁾Graduate School, Kyunghee University, Gyeonggi 446-701, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Gyeonggi 446-701, Korea

³⁾EMS Application Team Reference, Ssangyong Motor Company, 150-3 Chilgoi-dong, Pyungtaek-si, Gyeonggi 459-711, Korea

(Received 1 June 2010 / Accepted 26 August 2010)

Abstract : Compression pressure of individual cylinder and valve timing have big influence on combustion pressure, indicated mean effective pressure (IMEP), emission, vibration, combustion noise and many other combustion parameters. Therefore, uniformity of compression pressure and valve timing became one of most important engine design and production standard. Conventional method to evaluate compression pressure uniformity is to measure each cylinder pressure by mechanical pressure gage during cranking. This conventional method causes inaccuracy of cylinder pressure measurement because of different cranking speed results from battery status and also causes high manhour and cost. To check valve timing, related FEAD parts should be disassembled and timing mark should be checked manually.

This study describes and suggests new methodology to measure compression pressure by analysis of start motor current and to check valve timing by cylinder pressure with high accuracy. With this new methodology, possibility to detect leaky cylinder and wrong valve timing was observed.

Key words : Compression pressure(압축압력), Start motor(기동 모터), Analysis of current(전류 파형 분석), Pumping loss(펌프 손실), Motoring power(모터 기동 동력), FEAD(전면 보기류, Front End Accessory Drive)

1. 서 론

다기통 기관의 기통별 압축 압력 및 밸브 개폐 시점은 연소 시 폭발 압력, 기통별 출력, 배기성상, 연소음, 진동 등 다양한 종류의 기관 성능 파라미터에 직접적인 영향을 미치기 때문에 엔진 설계 단계부터 생산 공정까지 주요한 관리 기준으로 작용하고 있다.^{1,2)} 그러나 기관의 내구가 진행됨에 따라서 기

관의 압축 성능 관련 인자, 즉 밸브와 밸브 시트 (valve seat) 사이의 기밀도, 개스킷(gasket)의 열화, 점화 플러그(가솔린 엔진의 경우) 또는 예열 플러그 (디젤 엔진의 경우) 장착 부위에서의 기밀 불량 등에 의해서 기통간의 압축 압력 편차가 발생하게 되고 이로 인하여 상기한 기관 성능상의 문제가 발생하게 된다.

또한 타이밍 벨트의 노화 및 정비 불량 등으로 인하여 벨트 이격이 발생한 경우에도 상기의 문제가

*Corresponding author, E-mail: ks2507@khu.ac.kr

발생 할 수 있다.^{3,4)}

종래에는 기관의 기통별 압축 압력을 평가하기 위하여 점화 플러그 또는 예열 플러그를 탈거하고 기계식 압력 측정기를 이용하여 기관을 모터 기동으로 작동 시키면서 압축 압력을 측정하였다. 그러나 이 방식은 기관마다 상이한 형상의 점화 또는 예열 플러그가 적용되기 때문에 별도의 어댑터(adapter)를 사용해야 하는 번거로움이 있으며, 기통 수만큼 관련 부품의 탈 장착 작업이 수반되고, 기통 수만큼의 모터 기동을 수반해야 하기 때문에 상당량의 전기 에너지를 소모하여 각 기통 측정 시마다 모터 기동 속도가 상이하여 결과적으로 정확도가 떨어지게 된다.

또한 밸브 개폐 시점 측정 시에도 종래에는 엔진 전면부의 벨트 구동 부품을 탈거하고 육안으로 밸브 개폐 시점 표식을 확인하였기 때문에 낮은 정확도 뿐 아니라 관련부품의 탈 장착 공정에 많은 공수(manhour)가 투입되어야 하는 단점이 있다.⁵⁾

따라서 엔진 개발 과정 또는 운행 차량 정비과정에서 복잡한 엔진 주변 부품의 탈 장착 과정 없이, 신속하고 정확하게 개별 기통의 압축 압력과 밸브 개폐 시점을 측정하는 신공법의 필요성이 날로 대두 되고 있음에도 불구하고 현재까지는 이를 해결하기 위한 체계적인 연구가 진행되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 전술한 기관 부품의 탈 장착 없이 모터 기동시에 기동 모터에 의한 전류 소모량을 분석하여 각 기통별 압축 압력의 균일 도를 평가하고 일부 기통의 실린더 압력을 측정하여 밸브 개폐 시점의 정상 여부를 평가하는 연구를 시도하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

본 실험에서는 모터 기동 운전 시에 기동 모터의 소요 전류를 이용하여 각 기통의 압축 압력을 예측하고 압력 센서를 이용하여 타이밍 벨트의 이격 여부를 판단하는 실험을 시도하였다.

우선, 2,000cc급 가솔린 기관을 사용하였으며, 1번 기통의 점화 플러그를 탈거하고 압력 센서를 장착하여, 모터 기동 시 실린더 내부의 압력을 측정하

Table 1 Specification of test engine

Items	Specification	
Cylinder	4	
Bore	85mm	
Stroke	88mm	
Displacement	1997cc	
Compression ratio	10 : 1	
Ignition order	1-3-4-2	
Ring gear	110 tooth	
Intake valve	open	BTDC 15°
	close	ABDC 53°
Exhaust valve	open	BBDC 51°
	close	ATDC 17°

Table 2 Specification of start motor & battery

Items	Specification	
Start motor	Voltage	12V
	Power	1.2kW
	Ampere	90A
	Pinion	8 tooth
Battery	Type	MF60AH
	Reserve capa.	122 min
	CCA	550A
	Ampere Hr	48AH

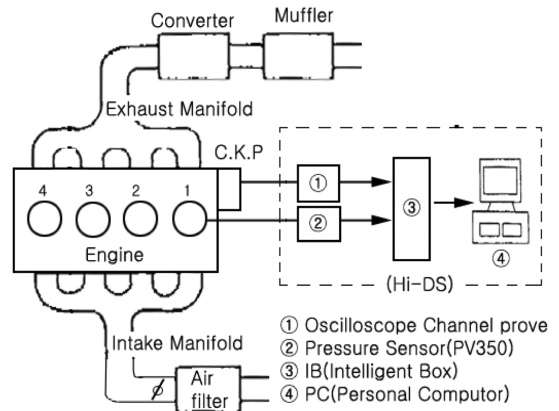


Fig. 1 Schematic diagram of test engine

였다. 본 실험에 사용된 기관과 기동 모터 및 배터리의 상세 사양을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

한편, 모터 기동 시 실린더 압력 및 기동 모터의 소요 전류를 측정하기 위하여, Fig. 1과 같이 캠 센서와 크랭크 위치 센서 신호를 이용하여 기통을 인식하도록 하였고, 동시에 기동 모터의 소비 전류 및 1

번 기통의 압력은 데이터 취득 장치를 통하여 실시간으로 측정되도록 하였다.

본 실험에 사용된 데이터 취득 장치는 G사(社)의 데이터 파형 측정 장비로, CAN 통신으로 통합되어 있는 각종 제어 장치의 센서 신호를 자기 진단 통신 장치 통하여 취득하였고, 1번 기통에 적용된 압력 센서 신호는 별도의 신호 연계 장치를 통하여 차량 센서로부터의 신호와 동기화 되도록 하였다.

2.2 실험 방법

모터 기동시의 실린더 압력은 모터 기동 속도, 냉각수 온도, 펌핑 일 손실, 기관 각부의 마찰, 흡기 온도 등에 의해서 편차가 발생할 수 있기 때문에, 본 실험에서는 상기한 편차 발생 요인을 최소화하기 위하여 흡기 온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 냉각수 온도는 $90 \pm 5^\circ\text{C}$, 엔진 윤활유는 신폴 상태(5W30), 펌핑 손실을 균일화하기 위하여 흡입 공기 여과기는 제거 상태 그리고 모터 기동 속도 및 기동 모터에 공급되는 전력을 일정하게 유지하기 위하여 모터 기동 중에 외부에서 배터리 충전을 지속하면서 실험하였다.⁶⁾

1번 기통의 점화 플러그를 탈거하고 어댑터(adapter)를 이용하여 압력 센서를 설치하였으며, 이를 이용하여 1번 기통이 압축일 수행 중에 기동 모터에 의해서 소요된 전력과 실린더의 압축 압력을 비교하여 소요된 전력과 압축 압력과의 상관관계를 조사하였다.

또한 1번 기통에서 압력 센서를 제거하여 대량의 압축 공기 누설을 유지하면서 모터 기동을 시도하였고, 배기 캠축의 조립 위치를 변경하여 배기 밸브를 진각(advance), 지각(retard) 시키면서 모터 기동시 실린더 내부 압력 거동을 관찰하였다.

3. 실험 결과

기관이 모터 기동 운전 시에 1번 기통에 장착한 압력 측정값과 1번 기통이 압축일 수행 중에 소비한 전류량을 측정하여 상관관계를 도출하였다. 기관의 압축비가 10:1이므로, 압축일 수행이 등 엔트로피 과정이라고 가정하면, 실린더 내부의 압력은 아래와 같이 나타낼 수 있다.^{7,8)}

$$\frac{p_2}{p_1} = C_r \frac{C_p}{C_v} = C_r^k$$

P1: 압축행정 초기(BDC)의 압력

P2: 압축행정 말기(TDC)의 압력

Cr: 압축비, Cv: 정적 비열, Cp: 정압 비열

K: 비열비

여기서 작동 유체는 이상기체의 공기라고 가정하면 압축 말기의 실린더 내부의 압력은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_2 = p_1 \cdot C_r^{1.4}$$

따라서 압축 행정 중에 외부와의 열 교환이 없고, 압축 공기의 누설이 없다면 압축 행정 말기의 실린더 압력은 모터 기동 속도에 상관없이 25.4 bar 수준임을 알 수 있다.

그러나 실제 기관에서는 밸브 오버랩, 피스톤 링에서의 압축 공기의 누설, 흡배기시의 펌핑 로스(pumping loss) 등에 의해서 상당량의 압축 압력 손실이 발생하며, 본 실험에서 측정된 1번 실린더의 압축 압력은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 11 bar 수준인 것으로 관찰되었다.

Fig. 2에서 압력 센서가 적용된 1번 기통의 기동 모터 소요 전류가 타 기통 대비 다소 낮은 것으로 관찰되었는데, 이 이유는 압력 센서 장착 시 점화 플러그의 형상과 동일한 압력 센서를 적용해야 하지만 본 실험에 사용된 압력 센서는 관(tube) 형태로, 압력 센서가 관 끝단에 위치하고 있어 관의 체적으로 인해서 1번 기통의 유효 압축비가 감소된 영향일 것으로 사료된다.

Fig. 3은 1번 기통이 압축 행정 시에 실린더 압력과 기동 모터에 의해서 소요된 전류 및 모터 동력과 관계를 나타낸다. 모터 동력과 실린더 압력은 비교적 선형성의 비례관계에 있기 때문에 이 관계식을 이용하여 소요된 전류량을 압축 압력으로 환산할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 상기한 방법으로 산출한 각 기통별 압축 압력을 나타낸다. 압력 센서가 적용되지 않은 2,3,4번 기통의 압축 압력은 13.4~14.3 bar 수준이었으며

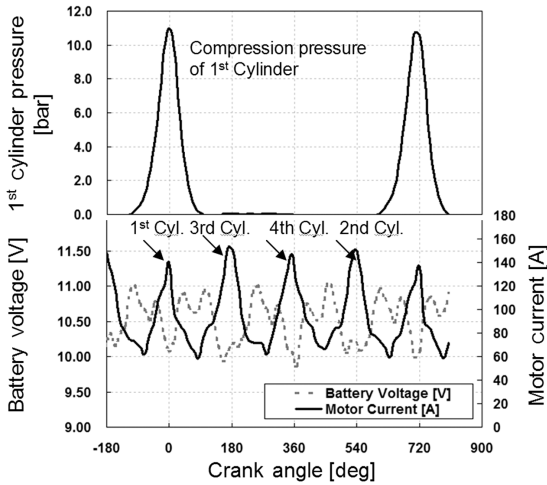


Fig. 2 Measured cylinder pressure & motor current

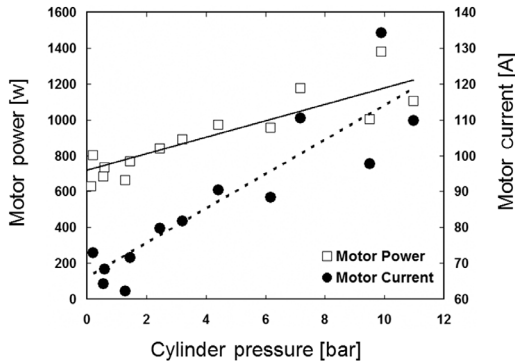


Fig. 3 Relation of motor current & cylinder pressure

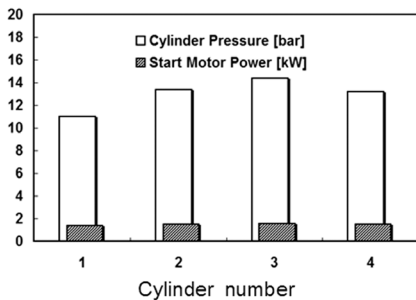


Fig. 4 Estimated cylinder pressure by motor power

기통별 편차는 $\pm 5\%$ 이내 수준으로 비교적 균일한 것으로 관찰되었다.

운행 차량 정비 시에 일반적으로 적용되는 가솔린기관의 압축 압력 기준은 압축비를 10 ± 1 수준이라고 가정하면 약 12 ± 3 bar 수준이며, 제작사에서 제

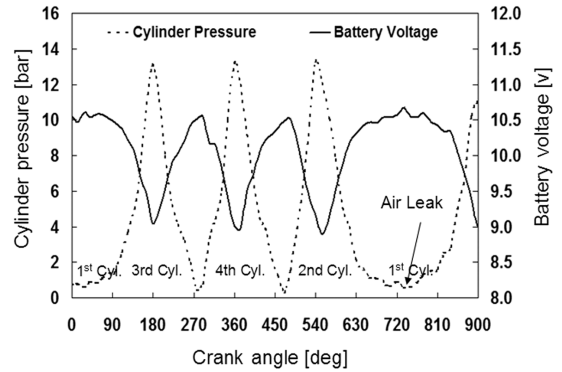


Fig. 5 Cylinder pressure & battery voltage drop

시하는 규정 값의 90% 이상, 그리고 각 기통의 편차가 $\pm 10\%$ 이하이면 각 기통의 기밀 상태는 일반적으로 정상이라고 판단한다.

그러나 이 기준은 관형 압력 측정기를 적용했을 경우이고 실제 기관의 모터 기동시의 압축 압력 보다는 낮게 된다. 따라서 모터 기동 시 전류 소모량 분석을 이용하여 압축 압력을 측정할 경우에는 그 기준을 모터 소요 동력 또는 이를 이용하여 환산한 압축 압력으로 제시할 필요가 있다고 판단된다.

기동 모터에 의해 소요되는 전류량을 이용해서 기밀 불량 기통을 검출할 수 있는지를 판단하기 위하여 1번 기통의 압력 센서를 탈거한 상태에서 모터 기동을 시도하면서 배터리 전압과 기동 모터 소요 동력을 이용하여 산출한 기통별 압력을 Fig. 5에 나타내었다.

점화 순서(1-3-4-2)에 따라 3번, 4번, 2번 기통은 정상적으로 압축일을 수행하지만, 1번 기통에서는 압축 행정 시 소요 동력 증가로 인한 배터리 전압 저하, 즉 압축 압력의 증가가 전혀 발생하지 않는 현상이 명확히 관찰되었다.

따라서 기밀 불량 기통의 검출을 위해서 관련 부품의 탈거 후 기존의 기계식 압축 압력 측정기를 기통마다 삽입하여 직접 측정하지 않고, 모터 기동 시 기동 모터에 의해 소비되는 전류를 이용하여 기통수에 상관없이 신속하고 정확하게 기밀 불량 기통을 검출해 낼 수 있음이 확인되었다.

밸브 개폐 시점이 모터 기동 시에 실린더 압력에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 배기 캠축을 12.9° 와 25.7° 진각 및 지각 시킨 상태에서 기관을 모터 기

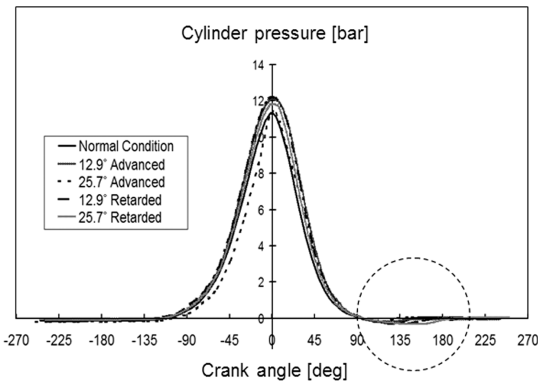


Fig. 6 Effect of valve timing on cylinder pressure

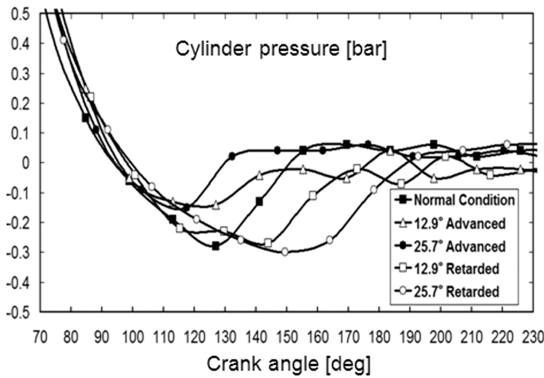


Fig. 7 Cylinder pressure around exhaust valve open

동으로 작동시키면서 1번 기통의 압력을 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, 배기 밸브 열림 시점인 BBDC 51° 부근은 실린더 압력을 확대하여 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6과 같이 배기 밸브 개폐 시점이 상사점에서의 최대 압축 압력에 미치는 영향은 없는 것으로 관찰되었으나, 배기밸브가 열리는 시점인 BBDC 51° 부근의 실린더 내부 압력은 Fig. 7과 같이 밸브 개폐 시점이 지각 될수록 최저 압력 출현 시기 또한 지각 되는 것으로 관찰 되었다.

따라서 밸브 개폐 시점의 정상 여부 판단시에도 관련 부품의 탈장착 공정 없이 한기통의 실린더 내부 압력을 이용하여 판별할 수 있음이 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 모터 기동시 기동 모터의 소요 동

력을 분석하여, 기밀 불량 기통을 검출하고, 실린더 압력을 이용하여 밸브 개폐 시점의 정상 여부 판단하는 시도를 하였으며 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 모터 기동 시 실린더의 압축 압력과 소요 전류량 및 소요 동력은 선형성의 비례관계에 있기 때문에 이 상관관계를 각 기통별로 적용하여 기관의 분해 공정 없이 소요 전류량 분석을 통하여 개별 기통의 압축 압력 측정이 가능한 것으로 확인 되었다. 즉 압축 압력 누설 기통은 압축일의 저하로 인하여 주변의 정상 기통 대비 현저히 낮은 기동 모터 동력 소요되는데 이 기통별 소요 동력의 차이를 이용하여 누설 기통의 검출이 가능하다.
- 2) 모터 기동시 모터의 소요 동력 및 실린더 압력은 기동 속도, 냉각수 온도, 윤활유의 온도, 펌핑일 손실등에 의해 영향을 받기 때문에 기동 모터의 소요 전류량을 통한 개별 기통의 압축 압력 평가 시에는 일정한 냉각수 및 윤활유의 온도, 외부 배터리 충전, 흡입 공기 여과기 상태 등을 일정하게 유지 하여야 한다.
- 3) 기존의 관형의 압축 압력 측정기는 관의 체적으로 인하여 측정 대상 기통의 압축비가 다소 낮아지는 현상이 발생한다. 제작사에서 제시하는 압축 압력 규정 또한 관형 기계식 압력 측정기 사용을 기준으로 하였기 때문에 기동 모터의 소요 동력을 이용한 압축 압력 측정 시에는 최대 모터 동력, 전류량, 배터리 전압 강하 또는 이를 환산한 압축 압력 등과 같은 새로운 기준의 제시가 필요 할 것으로 판단된다.
- 4) 배기 밸브 개폐 시점과 최저 실린더 압력 생성 위치는 크랭크 각 기준으로 비례 관계에 있다. 따라서 크랭크 각도에 따른 한 기통의 압력을 측정함으로써 배기 밸브 개폐 시점의 진각, 지각 여부의 판단이 가능한 것으로 확인되었다.
- 5) 모터 기동 시 기동 모터의 소요 전류량 분석을 통하여 대량 압축 공기 누설 기통의 검출 가능성이 확인 되었고, 개스킷 불량, 밸브 시트부의 기밀 불량, 타이밍 벨트의 위치 불량 등 소량의 압축 압력 누설 요인의 검출 가능성 확인을 위한 보다 정밀한 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다. 또

한 흡기 밸브 개폐 시점의 정상 여부를 판단하기 위한 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구의 공동 저자는 2009년도 연구년 기간부터 참여되었으며 도움을 준 경희대학교에 사의를 표 합니다

References

- 1) J.-Y. Kim and J.-Y. Ha, "Performance Characteristics of CNG Engine at Various Compression Ratios," Transactions of KASE, Vol.13, No.4, pp.145-141, 2005.
- 2) I. T. Kim, K. S. Park, B. J. Shim and S. H. Park, "Evaluation of Cylinder Compression Pressure Uniformity by Analysis of Motoring Current," KSAE10-B0001, pp.7-11, 2010.
- 3) Y. S. Cho, S. W. Lee, I. K. Jang, J. K. Park, Y. B. Yoon, Y. J. Park, H. C. Kim and B. C. Na, "Volumetric Efficiency and Pumping Loss with Continuous Variable Valve Lift System in an SI Engine," Transactions of KSAE, Vol.18, No.2, pp.7-13, 2010.
- 4) J. H. Lee, C. H. Lee, D. S. Kim and Y. S. Cho, "Numerical Analysis of Flow Characteristics of Residual Gas due to Change of Valve Timing during an Idle Operation in an SI Engine," KSAE05-F0011, pp.68-73, 2005.
- 5) S. R. Choi, K. S. Park, I. T. Kim and C. P. Han, "An Experimental Study on the Fault Diagnosis of Automotive Engine by Waveform Analysis of Intake Manifold Pressure Sensor," KSAE04-S0039, pp.239-244, 2004.
- 6) H.-I. Kim, W. J. Cho and K. H. Lee, "A Fundamental Study of Friction Characteristics according to Temperature of Engine Oil," KSAE07-S0012, pp.69-74, 2007.
- 7) John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw Hill, New York, pp.161-163, 1988.
- 8) Willard W. Pulkrabek, "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine," Prentice Hall, New Jersey, pp.68-81, 1991.