Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 5, pp.45-50 (2011)

Copyright Ⓒ 2011 KSAE
1225-6382/2011/113-07

모터링시 전류 파형과 크랭크각 센서를 이용한 기관의 압축압력 및 밸브 타이밍 분석

김 인 태[*1,3] · 박 경 석[2] · 심 범 주[1,4]

경희대학교 대학원 기계공학과[1] · 경희대학교 기계공학과[2] · 경기도기술학교[3] · 쌍용자동차 기술연구소[4]

Analysis of Cylinder Compression Pressure & Valve Timing by Motoring Current & Crank Signal during Cranking

Intae Kim[*1,3] • Kyoungsuk Park[2] • Beomjoo Shim[1,4]

[1]Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyunghee University, Gyeonggi 446-701, Korea
[2]Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Gyeonggi 446-701, Korea
[3]Gyeonggido Technical Training Institute, Gyeonggi 445-300, Korea
[4]R&D Center, Ssangyong Motor Company, 150-3 Chilgoe-dong, Pyeongtaek-si, Gyeonggi 459-711, Korea
(Received 19 October 2010 / Accepted 12 April 2011)

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. Conventional method, however, to check compression pressure uniformity is done by mechanical pressure gage and valve timing is checked manually. This conventional method causes inaccuracy of cylinder pressure measurement because of different cranking speed results from battery status and temperature. Also to check valve timing, related FEAD parts should be disassembled and timing mark should be checked. 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. Results, it is found that detection of bulky as well as small leaky cylinder is possible by cranking motor current analysis and wrong valve timing can be detected by cylinder pressure analysis and cam and crank sensor signal.

Key words : Compression pressure(압축압력), Motoring power(모터링 동력), Pumping loss(펌프 손실), Analysis of current(전류 파형 분석), Motoring current(모터링 전류), Valve timing(밸브 개폐 시기)

1. 서 론

다기통 기관에서 기통별 압축 압력 및 밸브 개폐 시점은 연소시 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)] 그러나 기관의 내구가 진행됨에 따라서 기관의 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 발생 할 수 있다.[1-3)]

[*]Corresponding author, E-mail: kimintae@gg.go.kr

종래에는 기관의 기통별 압축 압력을 평가하기위하여 점화 플러그 또는 예열 플러그를 탈거하고 기계식 압력 측정기를 이용하여 기관을 모터 기동으로 작동시키면서 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 탈장착 작업과, 기통 수만큼의 모터 기동을 수반해야 하기 때문에 상당량의 전기 에너지를 소모하여 각 기통 측정시 마다 모터 기동 속도가 상이하여 결과적으로 정확도가 떨어지게 된다. 최근의 전자 제어 엔진에는 각 기통별 출력 균일화를 위한 제어가 수행되는 것으로 알려져 있으나 정비 차원에서의 이러한 전자 제어 공법의 활용은 아직 미비한 수준이다.

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 탈장착 공정에 많은 공수(manhour)가 투입되어야 하는 단점이 있다.[4)]

이와 같이 엔진 개발 과정 또는 운행 차량 정비과정에서 복잡한 엔진 주변 부품의 탈장착 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. 이에 본 연구에서는 부품의 탈 장착 없이 모터 기동시에 기동 모터에 의한 전류 소모량을 분석하여 각 기통별 압축 압력의 균일도를 평가하고 실린더 압력 및 캠과 크랭크 각 센서 신호 분석을 통하여 밸브 개폐 시점의 정상 여부를 평가하는 연구를 시도하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험 엔진으로 2L급 가솔린 기관을 사용하였으며, 한 기통의 점화 플러그를 탈거하고 압력 센서를 장착하여, 모터링시 실린더 내부의 압력을 측정하였다. 또한 실린더의 누설 정도에 따른 시동 모터의 소요 동력을 파악할 목적으로 한 기통에 가변 밸브를 적용하여 기밀 누설량을 조절 할 수 있도록 하였다. 본 실험에 사용된 기관의 상세 사양을 Table 1 나타내었다. 모터링시 실린더 압력 및 시동 모터의 소요 전류를 측정하기 위하여, Fig. 1과 같이 캠 센서와 크랭크 위치 센서 신호를 이용하여 기통를 인식하도록 하였고, 동시에 기동 모터의 소비 전류 및 실린더 압력은 데이터 취득 장치를 통하여 실시간으로 측정되도록 하였다.

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
Intake valve	Open	BTDC 15°
	Close	ABDC 53°
Exhaust valve	Open	BBDC 51°
	Close	ATDC 17°

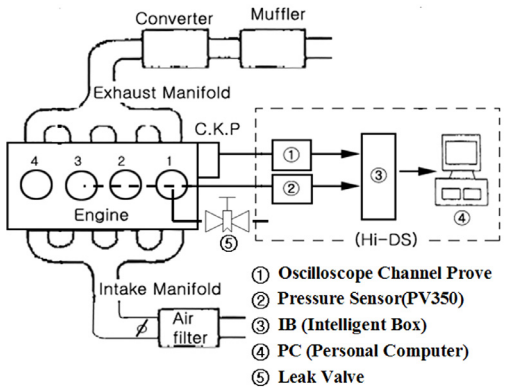

Fig. 1 Schematic diagram of test engine

2.2 실험 방법

모터링시의 실린더 압력은 엔진 회전 속도, 냉각수 온도, 펌핑일 손실, 기관 각부의 마찰, 흡기 온도 등에 의해서 편차가 발생될 수 있기 때문에, 본 실험에서는 상기한 편차 발생 요인을 최소화하기 위하여 흡기 온도는 20±2°C, 냉각수 온도는 90±5°C, 엔진 윤활유는 신품 상태(5W30), 펌핑 손실을 균일화기 위하여 흡입 공기 여과기는 제거 상태 그리고 엔진 회전 속도 및 시동 모터에 공급되는 전력을 일정하게 유지하기 위하여 모터링 중에 외부에서 배터리 충전을 지속하면서 실험하였다.[5)]

1번 기통의 점화 플러그를 탈거하고 압력 센서를 설치하였으며, 이를 이용하여 1번 기통이 압축일 수행 중에 시동 모터에 의해서 소요된 전력과 실린더 압력을 비교하여 소요된 전력과 압축 압력과의 상관관계를 조사하였다.

또한 1번 기통의 압력센서를 제거하여 대량의 압축 공기 누설을 유지하면서 모터링 동안의 모터의 소요 동력을 관찰하였고, 이후 가변 밸브를 적용하여 압축 공기 누설량을 조절하면서 이에 따른 모터의 소요 동력을 관찰 하였다.

모터링시 실린더 압력과 밸브 타이밍과의 관계를 조사하기 위하여 배기 밸브를 진각(advance), 지각(retard) 시키면서 실린더 내부 압력 거동과 캠과 크랭크각 센서 시그널의 변동을 관찰하였다.

3. 실험 결과

우선, 기관의 압축비가 10:1이므로 압축일 수행이 등 엔트로피 과정이라고 가정하면, 실린더 내부의 압력은 아래와 같이 나타낼 수 있다.[6,7]

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

P_1 : 압축행정 초기(BDC)의 압력
P_2 : 압축행정 말기(TDC)의 압력
C_r : 압축비, C_v : 정적 비열, C_p : 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 열교환이 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 펌핑로스(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.

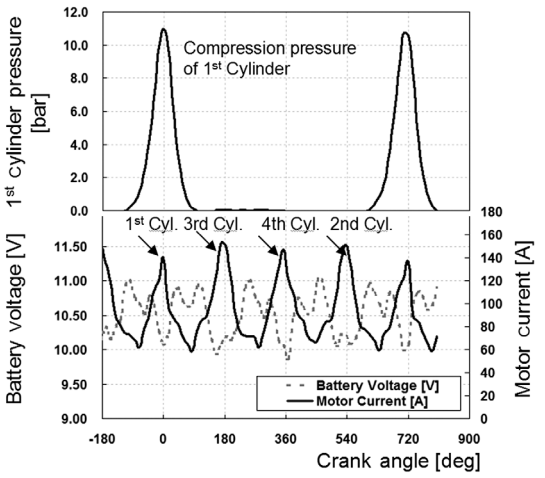

Fig. 2 Measured cylinder pressure & motor current

Fig. 2에서 압력 센서가 적용된 1번 기통의 시동 모터 소요 전류가 타 기통 대비 다소 낮은 것으로 관찰되었는데, 이 이유는 압력 센서 장착시 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 행정시에 실린더 압력과 기동 모터에 의해서 소요된 전류 및 모터 동력과의 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 기통별 편차는 ±5% 이내 수준으로 비교적 균일한 것으로 관찰 되었다.

운행 차량 정비시에 일반적으로 적용되는 가솔린 기관의 압축 압력 기준은 압축비를 10±1 수준이라고 가정하면 약 12±3 bar 수준이며, 제작사에서 제시하는 규정값의 90% 이상, 그리고 각 기통의 편차가 ±10% 이하이면 각 기통의 기밀 상태는 일반적으로 정상이라고 판단한다.

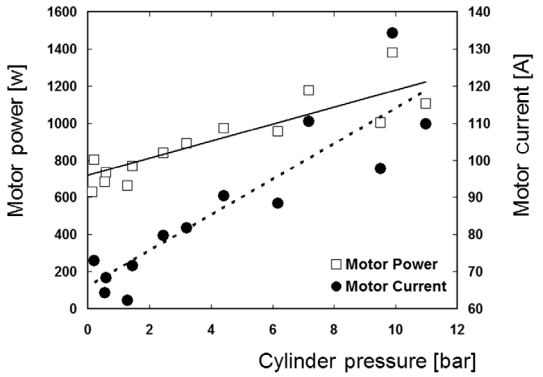

Fig. 3 Relation of motor current & cyl. pressure

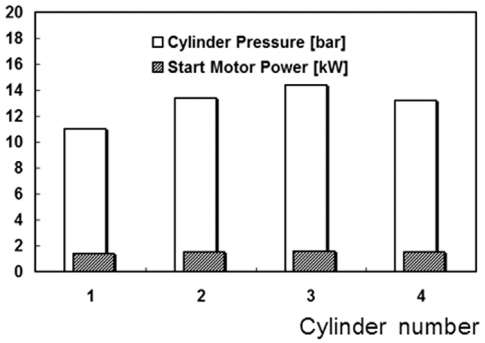

Fig. 4 Estimated cylinder pressure by motor power

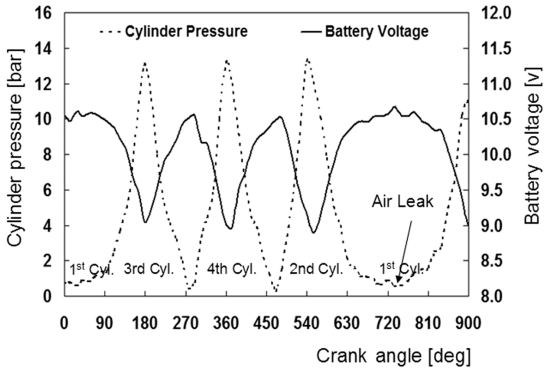

Fig. 5 Cylinder pressure & battery voltage drop

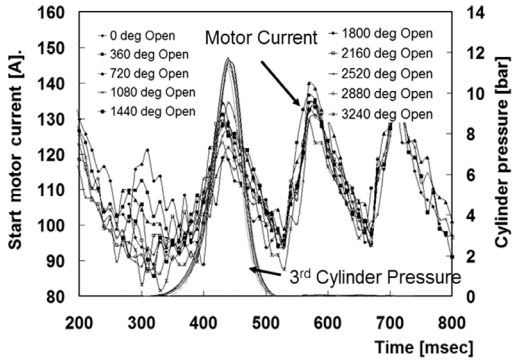

Fig. 6 Motor current on various cylinder leak

그러나 이 기준은 관형 압력 측정기를 적용했을 경우이고 실제 기관의 모터 기동시의 압축 압력 보다는 낮게 된다. 따라서 모터 기동시 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 검출 할 수 있는지를 판단하기 위하여 1번 기통의 압력 센서를 탈거한 상태에서 모터링을 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 행정시 소요 동력 감소로 인한 배터리 전압 저하, 즉 압축 압력의 증가가 전혀 발생하지 않는 현상이 명확히 관찰되었다. 또한 가스킷(gasket)에서의 누설과 같은 소량의 압축 압력 누설 검출 가능성을 평가하기 위하여 1번 기통에는 가변 밸브를, 3번 기통에는 압력 센서를 장착하고 모터링시의 압력과 시동 모터의 소요전류를 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. 실험에 사용된 가변 밸브는 10회전(3600°)에 전개되는 사양으로 전폐조건(0°)에서 전개조건(3600도) 까지 각 360도 간격으로 조절하였다. 3번 기통에서 측정한 실린더 압력과 2, 3, 4 기통이 압축 행정중에 소요된 시동 모터 전류은 모두 동일한 수준인 것으로 관찰되었으나 1번 기통이 압축 행정중에 소요된 모터 전류은 가변 밸브의 개도량에 따라 크게 차이나는 것으로 확인되었다.

가변 밸브를 적용한 1번 기통의 압축 행정 과정인 250~350msec 영역내의 한 시점에서 밸브 개도량에 따른 소요 전류와의 상관 관계를 확인하기 위하여 300msec 시점에서의 소요 전류량과 밸브 개도량과의 상관 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 특정 시점에서의 시동 모터 소요 전류량은 실린더의 기밀 상태에 따라서 직선적인 비

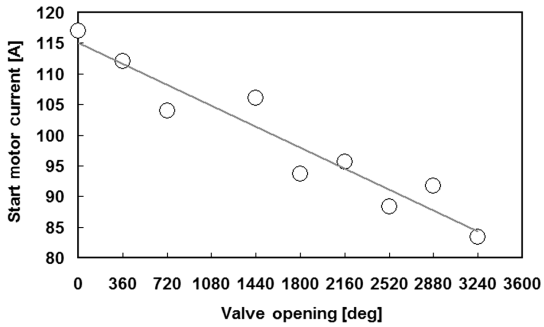

Fig. 7 Relationship of motor current and valve opening

례관계가 있는 것으로 관찰되었다. 따라서 누설 정도에 따른 실린더의 기밀 불량 수준도 모터링시 시동 모터의 소요 전류량을 이용하여 측정할 수 있음이 확인되었다.

밸브 개폐 시점이 모터 기동시에 실린더 압력에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 배기 캠축을 12.9° 와 25.7° 진각 및 지각 시킨 상태에서 기관을 모터 기동으로 작동시키면서 1번 기통의 압력을 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었으며, 배기 밸브 열림 시점인 BBDC 51° 부근은 실린더 압력을 확대하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 8과 같이 배기 밸브 개폐 시점이 상사점에서의 최대 압축 압력에 미치는 영향은 없는 것으로 관찰되었으나, 배기밸브가 열리는 시점인 BBDC 51° 부근의 실린더 내부 압력은 Fig. 9와 같이 밸브 개폐 시점이 지각될수록 최저 압력 출현 시기 또한 지각되는 것으로 관찰 되었다.

한편, 배기 밸브 개폐시기와 캠과 크랭크 센서 신

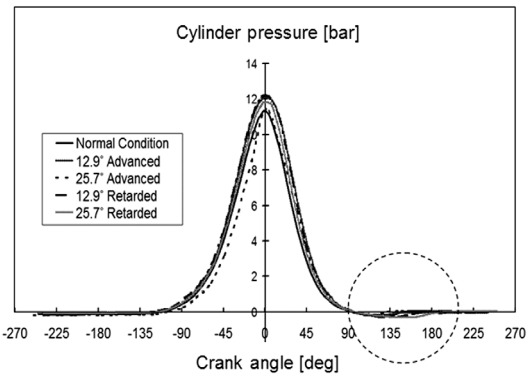

Fig. 8 Effect of valve timing on cylinder pressure

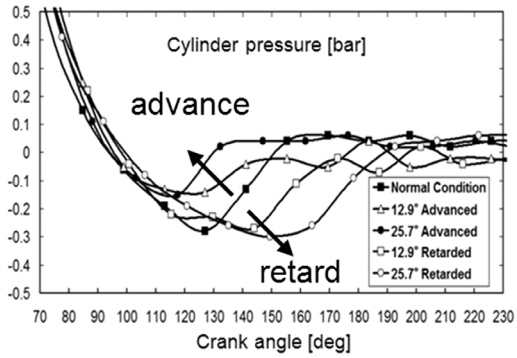

Fig. 9 Cylinder pressure around exhaust valve open

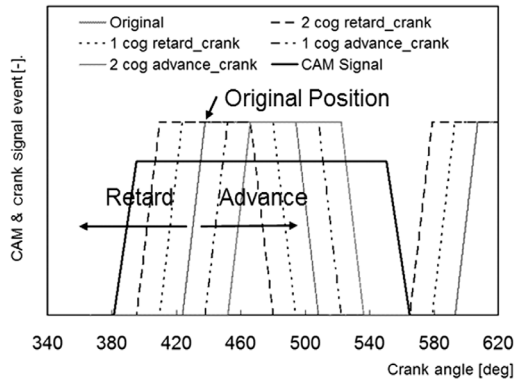

Fig. 10 Cam & Crank signal on various valve timing

호와의 상관 관계는 Fig. 10에 나타낸 바와 같다. 즉, 밸브 타이밍이 지각 될수록 크랭크 센서 신호의 출현 시기는 이르며, 반대로 밸브타이밍이 진각 될 수록 크랭크 센서 신호의 출현이 지연되는 것으로 관찰 되었다.

따라서 실린더 압력과 캠과 크랭크 신호를 이용하여 기관 관련 부품의 탈장착 공정 없이 밸브 타이밍의 정상 여부 검출이 가능할 것으로 판단 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 모터링시 시동 모터의 소요 동력을 분석하여, 기밀 불량 기통를 검출하고, 실린더 압력과 캠, 크랭크 신호를 이용하여 밸브 개폐 시점의 정상 여부 판단하는 시도를 하였으며 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

1) 모터링시 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. 특정 시점에서의 기동 모터 소요 동력을 분석하면 미약한 누설의 검출 뿐 아니라 누설 수준까지 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 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 측정시에는 최대 모터 동력, 전류량, 배터리 전압 강하 또는 이를 환산한 압축 압력 등과 같은 새로운 기준의 제시가 필요할 것으로 판단된다.
3) 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.
4) 배기 밸브의 개폐 시점은 캠과 크랭크 센서 신호를 분석하여 진,지각 여부를 판단 할 수 있는 것으로 확인되었다. 즉, 배기 밸브가 지각 될 수록 캠 신호 인지시점보다 크랭크 센서 신호의 출현 시기가 빨라지며 배기 밸브가 진각 될 수록 크랭크 센서 신호의 출현 시기는 지연되는 관계이기 때문에 이 상관 관계를 이용하면 기관의 분해 공정 없이 밸브 타이밍의 정상 여부 판단이 가능할 것으로 판단된다.
5) 기관의 모터링 성능에 영향을 미치는 블로 바이, 윤활유의 점도, 냉각수 온도 등의 조건을 변화 시켜 보다 다양한 조건에서의 실린더의 압축 압력과 시동 모터의 소요 전류량과의 상관관계를 규명할 필요가 있다고 사료된다.

References

1) I. T. Kim, K. S. Park, B. J. Shim and S. H. Park, “Evaluation of Cylinder Compression Pressure Uniformity by Analysis of Motoring Current,” 2010 Annual Conference Proceedings, KSAE, KSAE10-B0001, pp.7-11, 2010.
2) 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.
3) 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,” Fall Conference Proceedings, KSAE, KSAE05-F0011, pp.68-73, 2005.
4) 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,” Spring Conference Proceedings, KSAE, KSAE04-S0039, pp.239-244, 2004.
5) H.-I. Kim, W. J. Cho and K. H. Lee, “A Fundamental Study of Friction Characteristics according to Temperature of Engine Oil,” Spring Conference Proceedings, KSAE, KSAE 07-S0012, pp.69-74, 2007.
6) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, New York, pp.161-163, 1988.
7) W. W. Pulkrabek, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Prentice Hall, New Jersey, pp.68-81, 1997.