

밸브 거동 특성 파악을 위한 hole 센서의 적용에 관한 실험적 연구

문 건 필¹⁾ · 이 용 규^{*2)} · 이 승 진²⁾ · 최 교 남²⁾ · 정 동 수²⁾ · 박 성 영³⁾

과학기술연합대학원¹⁾ · 한국기계연구원²⁾ · 공주대학교³⁾

The Experimental Study on Characteristics of Valve System using Hole Type Valve Lift Sensor

Gunfeel Moon¹⁾ · Yonggyu Lee^{*2)} · Seongjin Lee²⁾ · Kyonam Choi²⁾ · Dongsoo Jeong²⁾ · Sungyoung Park³⁾

¹⁾Department of Clean Environmental System, UST, Daejeon 305-343, Korea

²⁾Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

³⁾Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju University, Chungnam 330-717, Korea

(Received 9 August 2007 / Accepted 12 December 2007)

Abstract : Recently, controlled auto ignition(CAI) in gasoline engines are drawing more attentions due to its extremely low level of NOx emissions and potentials in lowering the fuel consumption rate. The one of the key techniques for realizing CAI combustion in engines is the control of valve system. Since the valve linkage system with higher complexity, or even cam-less valve systems, such as electro-hydraulic and electro-magnetic system, are adopted in CAI engines, it is not easy to estimate the valve lift profile from cam profiles. Therefore new measurement techniques for valve lift in CAI engines have been tried and tested. In this paper, hole type valve lift sensor was developed and tested to check the applicability in CAI engines. The valve lifts could be obtained from the sensor signal, which depends on the distance from the sensor to magnet attached to valve. Various engine speeds, ranging from 2,000 to 6,000 rpm, and valve lifts, maximum up to 9.7 mm, were tested. It was found that the sensor output for valve lift had accuracy of 98% in comparison with the basic specifications of valve lift through improvements of sensor driving circuit.

Key words : Controlled auto ignition(CAI, 제어자발화), Spark ignition(전기 점화), Compression ignition(압축 착화), FFT(고속 푸리에 변환), Valve lift sensor(밸브 리프트 측정 센서), Valvetronics(밸브 트로닉스)

1. 서론

제어 자발화(Controlled auto ignition) 연소 기술은 기존 엔진 연소방식인 전기 점화(Spark ignition) 방식과 압축 착화(Compression ignition) 방식의 장점들을 조합한 연소 방식으로, 연료와 공기를 균일하게 혼합하여 압축과 정 중에 연소실 내에서 동시다발적으로 자발화(Simultaneous autoignition)를 발생시키는 연소 방식이다. 이러한 연소 기술은 기존의 점화 플러그에서 발생하는 방전에너지를 이용하는 엔

진 연소 방식에 비해 희박 연소를 통한 높은 연료 경제성과 저온 연소를 통한 낮은 배기 배출물 특성으로 인해 고유가, 환경 친화적 시대에 주목받고 있다.¹⁾

CAI 연소 방식은 Onishi²⁾와 Noguchi³⁾에 의해 2행정 가솔린 엔진에 처음 적용되었으며, Najt⁴⁾ 등에 의해 4행정 기관에 적용되었다. 그러나 기존 가솔린 엔진에서 CAI 연소 방식의 적용을 위해 압축비의 증가, 흡입공기 예열 등이 시도되었으나, 노킹 발생의 우려, 그리고 예열 시스템의 적용시의 온도 제어의 어려움, 제작비용의 상승 등으로 그 적용이 어려

*Corresponding author, E-mail: gumpu822@kimm.re.kr

운 실행이다.⁵⁾

이러한 일련의 연구들 중에, 최근 CAI 연소 구현을 위하여 내부 배기가스 재순환(Internal exhaust gas recirculation)을 적용하여 고온의 배기가스를 연소실내에 잔류하게 하는 방식이 가장 주목받고 있다.⁶⁾ 이것은 흡배기 밸브 개폐시기의 극단적인 제어를 통해 연소실 내부 혼합기의 온도와 잔류가스량을 제어하는 방식으로, 그 핵심적인 기술은 밸브 타이밍과 밸브 리프트의 자유로운 제어에 있다.^{7,9)} 그러나 이러한 밸브 기구 시스템은 아직 양산 엔진에 실용화가 되어 있지 않은 상태이고 전 운전영역에서 성능과 연비 향상을 위해 어떠한 방식으로 제어가 되어야 할지에 대한 기준이 정립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 이러한 제어 시스템의 특성 분석과 작동 제어 로직의 개발에 대한 연구는 향후 CAI 연소 엔진의 개발 과정에서 필수 불가결하게 병행되어야 한다.

현실적으로 CAI 연소 구현에서 밸브 리프트와 밸브의 동적 특성을 알아보기 위해서, 구동 캠과 밸브 사이의 링크 기구가 복잡한 경우에는 밸브 리프트에 대한 정보를 유추해내기 어렵다.¹⁰⁾ 또한 현재 연구가 진행 중인 전자 유압식(Electrohydraulic) 시스템과, 전자 기계식(Electromechanical) 시스템 등과 같은 cam-less 형 시스템의 경우, 캠 형상으로부터 밸브 리프트를 유추하는 것 자체가 불가능하기 때문에 새로운 방식의 측정방법이 요구되고 있다. 레이저를 이용한 밸브의 특성 측정¹¹⁾ 또한 빔 정렬의 어려움, 특히 고가의 장비로 인해 경제적인 측면에서도 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 CAI 연소 엔진 구현을 위한 가변 밸브 시스템의 분석을 위해 상대적으로 밸브 리프트의 제어가 용이하고 기계적으로 안정된 BMW사의 Valvetronics system¹²⁾을 선정하고, 밸브 리프트 측정을 위한 리그 장치를 구성하였다. 이러한 리그 장치의 구성을 통하여 기존의 가변 밸브 시스템뿐만 아니라, 캠이 없는 차세대 밸브 트로닉스 시스템의 특성 또한 분석할 수 있도록 설치와 측정이 용이한 홀 타입(Hole type) 센서를 개발하였으며 이를 통하여 밸브 리프트 제어성 확인 및 밸브 구동 특성에 대하여 알아보았다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

밸브 특성 실험을 위한 리그 장치의 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 캠 축의 구동을 위하여 30kW 급, 정격 속도 1,750 rpm의 AC 모터를 사용하였으며, 모터의 회전축과 캠샤프트의 회전축을 1:2의 기어비를 가지는 풀리를 이용하여 벨트와 텐셔너(Tensioner)를 두어 연결하였다. 즉, 캠샤프트의 정격 속도는 최대 3500 rpm(엔진 회전 속도의 경우 최대 7000 rpm)까지 구동할 수 있도록 설계하였다. 본 연구에 사용된 엔진의 경우, 최고 엔진 출력이 5500 rpm에서 발생하고, 연료 차단(Cutoff) 엔진 속도가 6500 rpm 인 것을 고려할 경우 모터의 구동 영역은 위 엔진의 실험 조건을 충분히 만족시켰다. 밸브 리프트 측정을 위하여 모터는 흡기 캠축만을 구동하므로, 밸브 타이밍 제어를 위한 CVVT(Continuous Variable Valve Timing) 장치에 커플링(Coupling)을 체결하여 연결하였다. 그리고 엔진 헤드에 공급되는 오일의 유량과 온도 제어를 위하여 오일 펌프와 히터를 장착하였고, 공급 오일의 온도는 별도로 설치된 오일 저장용기(Reservoir)에서 모니터링 하여 항상 80 ~ 85°C를 유지되도록 하였다.

밸브 리프트 변화를 위하여 기존의 엔진에 장착되어 있는 위상 제어 모터(Phasing motor) 대신 스텝 모터(Step motor)를 장착하여 제어하였다. 본 연구에 사용된 엔진의 경우, CAN(Controller Area Network) 방식으로 밸브의 위상과 리프트 신호가 모터에 전달되어 피드백 제어가 되지만, 리그 시험 장치에서

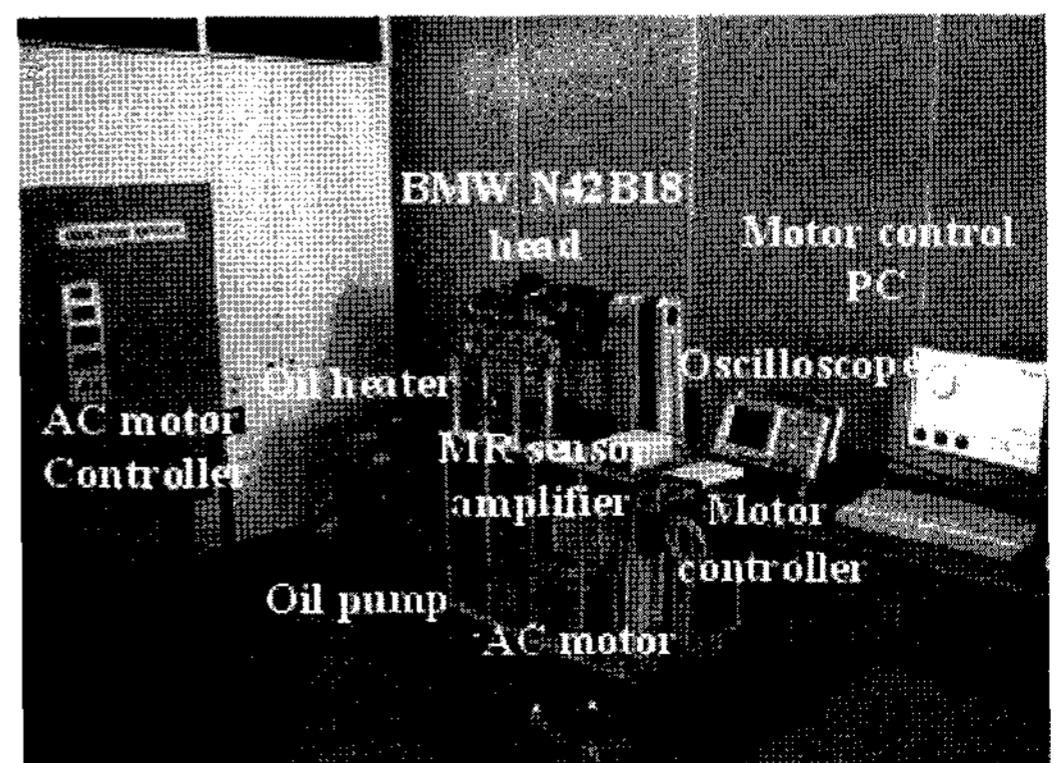


Fig. 1 Photo of the experimental setup

는 CAN 신호를 사용할 수가 없기 때문에 독립적으로 위치 제어가 불가능하다. 따라서 밸브 리프트 제어를 위하여 별도의 모터를 장착하여 제어하였다.

2.2 밸브리프트 측정센서

본 연구에서는 밸브 리프트의 측정을 위하여 hole 타입의 센서를 사용하였다. 이 밸브 리프트 센서는 자기장 소스로부터 측정 센서 사이 거리에 따른 자장의 크기 변화를 감지하는 센서로서, 이론적으로 자장 소스와 센서 사이 거리의 제곱에 비례하여 그 출력값이 감소하는 특징을 가지고 있다.

Fig. 2는 헤드 하단부에 장착된 밸브 리프트 센서의 사진을 나타낸 것으로, 엔진 헤드의 하단부에 밸브 리프트 측정을 위하여 밸브 리프트 센서를 밸브 경사각과 일치하게 장착하였다. 그림에 나타난 것과 같이 리프트 센서와 밸브간의 자기장 형성을 위하여 연소실 쪽 밸브 면에 자석을 부착하여 충분한 전압 출력이 발생하도록 하였다. 또한 리프트 센서와 평행하게 다이얼 게이지를 부착하고, 실제 밸브의 이동 거리와 이에 따른 센서의 출력 전압과의 관계를 측정하여, 그 상관관계로부터 밸브의 리프트를 얻었다. Table 1에 본 연구에 사용된 리프트 센서의 사양을 나타내었다.

센서의 측정 분해능을 높이기 위해 밸브 리프트 센서 모듈에 고안정/저노이즈 선형전원 공급기를 사용하여 센서 구동을 위한 입력 전원을 ±15 V로 공급하였다. 그리고 측정부의 입력전원을 15 V DC에서 리플(Ripple)이 0.03%인 고안정화 선형 전원을

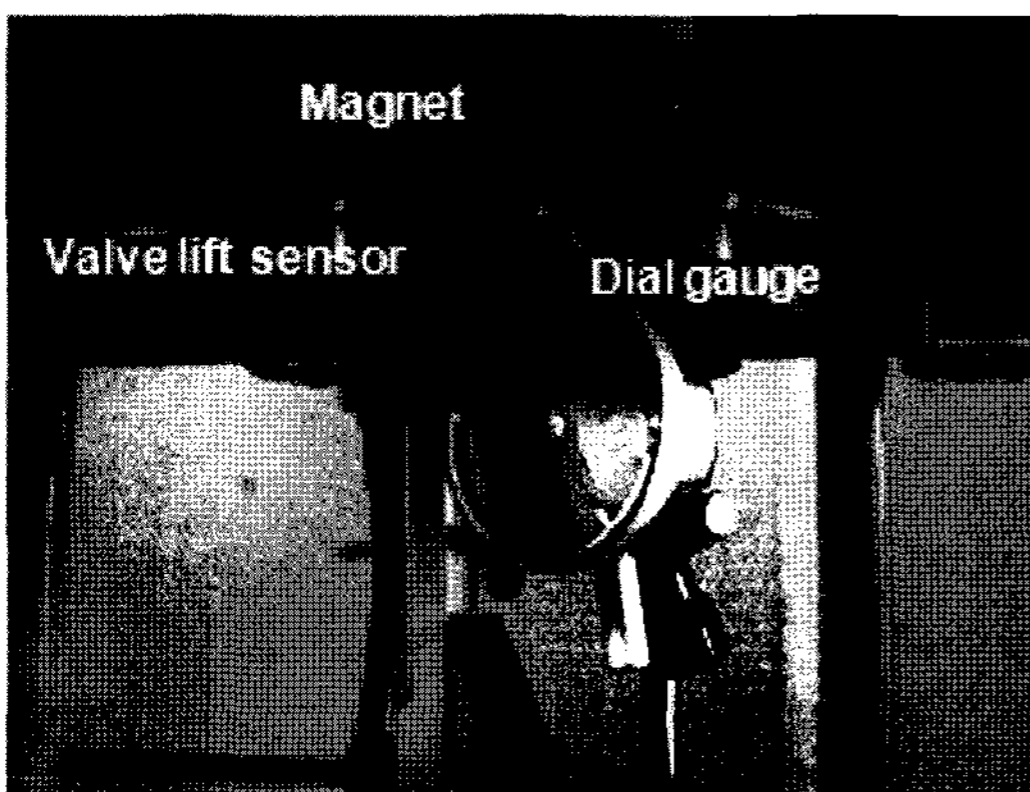


Fig. 2 Photo of the valve lift sensor

Table 1 Specifications of valve lift sensor

Item	Specifications
Model	Honeywell SS946A hall sensor
Sensitivity drift	Maximum 8.7 mA
Driving current	Constant current driving type
Temperature error	± 0.048%°C
Linear frequency range	20 kHz
Supply voltage	5.0 V
Temperature range	-40 ~ 125°C

사용하였다. 또한, 엔진의 구동을 위한 인덕션 모터와 밸브의 리프트 조절을 위한 스텝 모터에서 발생하는 노이즈를 감쇄시키기 위하여 이들 접지를 서로 연결하여 입력 전원을 안정화시켰다. 그리고 밸브 리프트 센서의 입력 전류를 OP 앰프를 활용한 정전류원(Constant current source)의 feedback 저항을 정밀 조정하여 밸브 리프트 센서에 5 mA의 전류가 안정적으로 공급될 수 있도록 하였다.

2.3 센서의 특성 및 보정

CAI 연소 구현을 위한 리그 실험에서 제어 변수는 캠축의 회전수, 즉 엔진 회전 속도 제어를 위한 캠축 구동 모터의 회전수와 밸브 리프트 제어를 위한 위상 제어 모터의 듀티 비(Duty ratio) 제어이다. 스텝 모터의 경우, 밸브 리프트의 최소 위치에서 최대 위치까지 변화시키는 위해서는 총 25 회전을 필요로 하는데, 이러한 25 회전을 듀티 비 100%로 설정하여 1% 단위로 즉, 스텝 모터를 1/4 회전씩 제어할 수 있도록 하였다. 또한 밸브 리프트 센서를 밸브의 경사각과 같은 각도로 밸브 중앙에서 11.4 mm 떨어진 곳에 설치하여, 캠축 구동 시 리그 장치의 진동에 의해 발생할 수 있는 센서와 밸브의 충돌 문제를 배제하였다.

Fig. 3은 자성체(5 Mega Gauss)가 장착된 밸브와 센서와의 거리에 따른 센서 신호크기를 나타낸 것이다. 자성체와의 거리에 따라, 즉 밸브 리프트가 감소함에 따라 로그 스케일로 선형적인 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 밸브가 닫혀 있는 경우, 센서는 0.56 V의 기본 값을 나타내며, 센서와 밸브의 거리에 따른 신호로부터 9.5 mm의 최대 밸브 리프트를

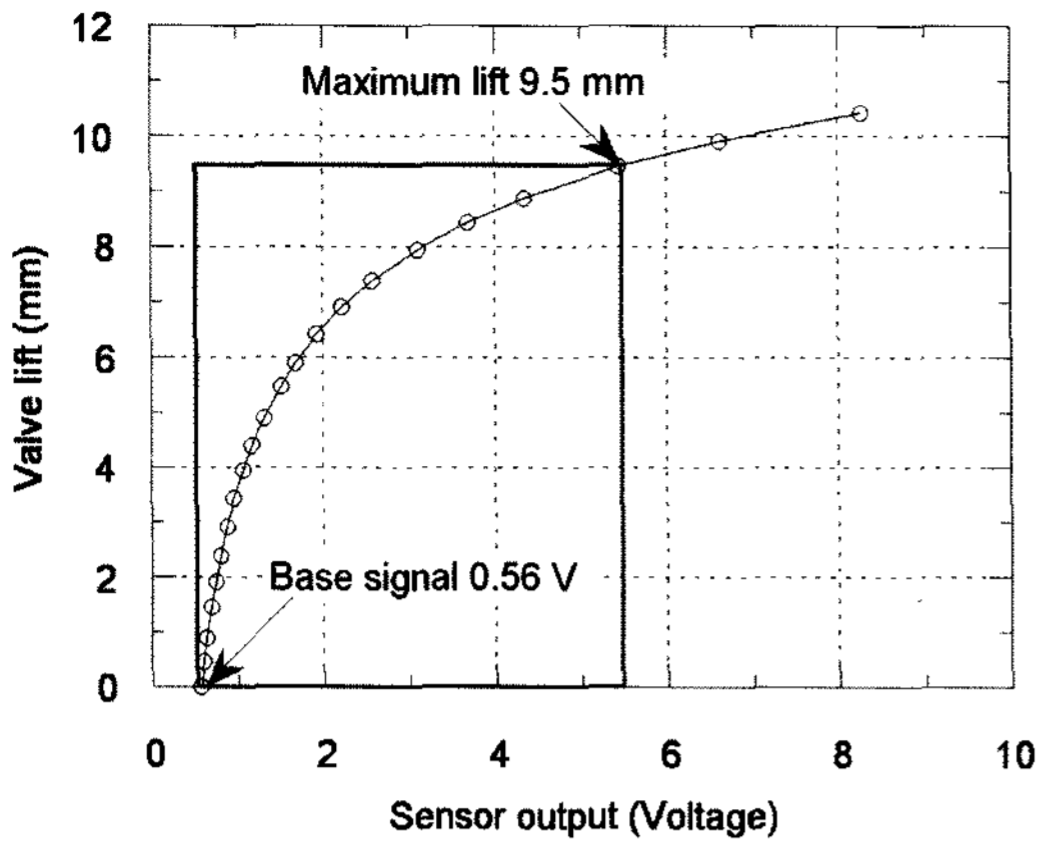


Fig. 3 Correlation between sensor output and valve lift

측정할 수 있었다. 이는 본 연구에 사용된 엔진의 최대 밸브 리프트 공인발표치인 9.7 mm 대비, 98% 정확도에 해당하는 측정값으로, 센서의 정확도나 모터와 제어 장치에서 발생할 수 있는 노이즈 등에 의한 영향을 감안하면, 상당히 정확한 값을 나타내었다. 그러나 거리의 제곱에 반비례하는 신호 특성에 따라 밸브 리프트가 낮은 경우, 즉 밸브 리프트 2 mm 이하의 영역에서는 밸브 리프트의 변화에 따른 신호 변화가 상대적으로 적어 측정 노이즈에 민감한 특성을 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

3. 실험결과

엔진 회전 속도 2000 rpm 조건에서 스텝 모터 듀티 비, 즉 최대 밸브 리프트에 따른, 밸브 리프트 센서 신호를 FFT (Fast Fourier Transform) 필터링한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. FFT 필터링 방법은 시간영역에서 측정된 신호를 주파수 영역으로 변화하는 방법으로서 주파수 영역으로 변환된 데이터의 노이즈 성분, 즉 고주파 성분을 제거한 후, 다시 시간영역으로 역변환시키면 측정 데이터의 왜곡 없이 노이즈 성분만을 제거할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는, 엔진 회전 속도에 따라 필터링주파수를 2 ~ 10 kHz로 선택하였다. 듀티 비가 증가할수록, 즉 최대 밸브 리프트가 증가할수록 그 센서의 최대 신호의 크기도 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 밸브 리프트 센서로부터 측정된 Raw 신호를 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 FFT 변환을 이용하

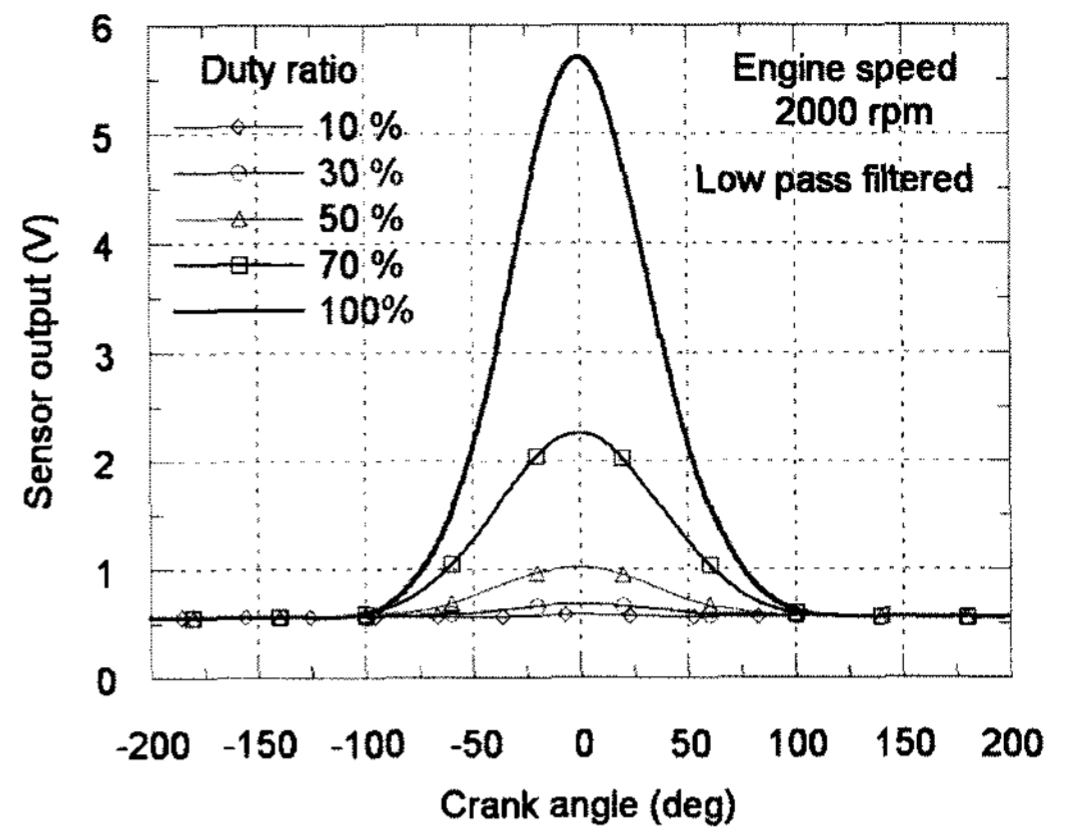


Fig. 4 Low pass filtered sensor output according to duty ratio at the engine speed of 2000 rpm

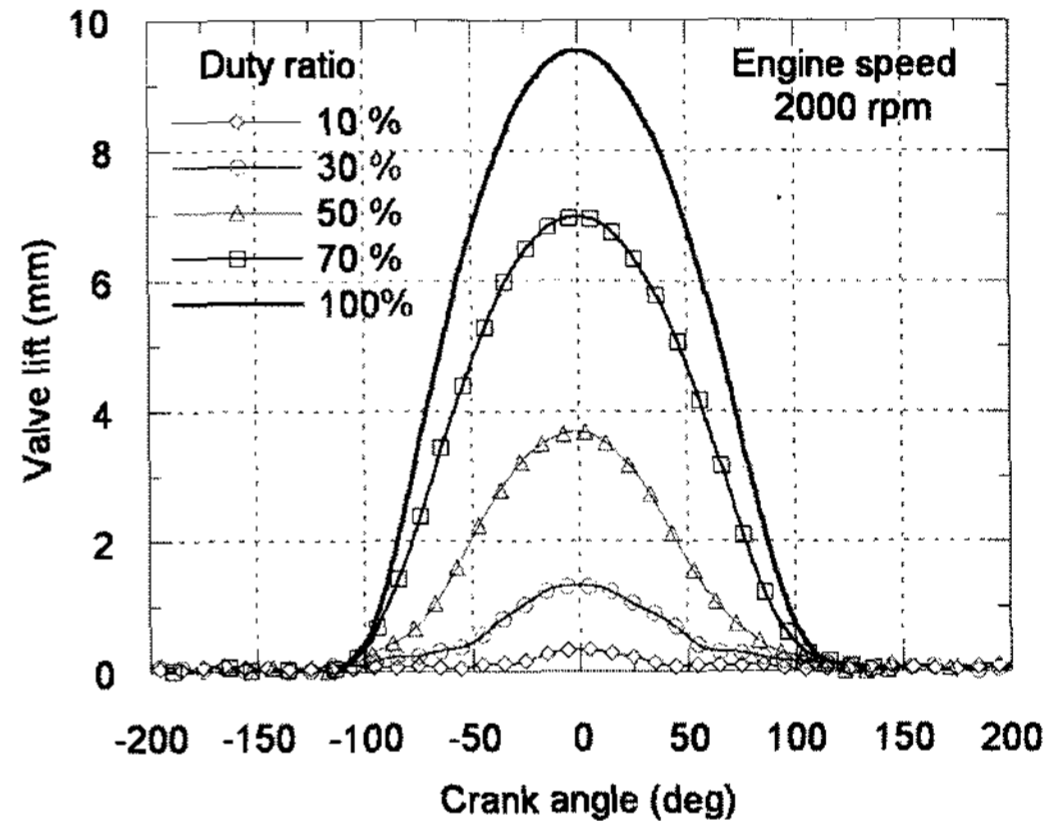


Fig. 5 Valve lift profile according to duty ratio at the engine speed of 2000 rpm

여 노이즈 성분을 제거한 후, Fig. 3에 나타난 것과 같이 신호와 밸브 리프트와의 상관관계를 이용하여 밸브 리프트를 얻은 것이다. 이러한 방법을 통하여 엔진 회전 속도 2000 rpm에서 최대 리프트 9.5 mm를 측정할 수 있었다. 앞서 설명하였듯이, 리그 장치 상에서 측정된 결과는 발표치의 98% 수준으로서 본 연구에 사용된 밸브 리프트 센서의 높은 측정 정확성을 확인할 수 있었다. 그러나 최저 리프트 0.3 mm의 경우, 노이즈와 센서 신호의 크기가 대등하여 측정값과 노이즈를 구별하기에는 역부족이었고, Fig. 3에 나타난 것과 같이 센서의 특성 상 밸브 리프트가 낮은 운전 조건에서는 밸브 리프트 변화에 따른 센서 신호의 변화폭이 너무 작아 낮은 리프트에서의 센서의 분해능의 한계가 있음을 알 수 있었다.

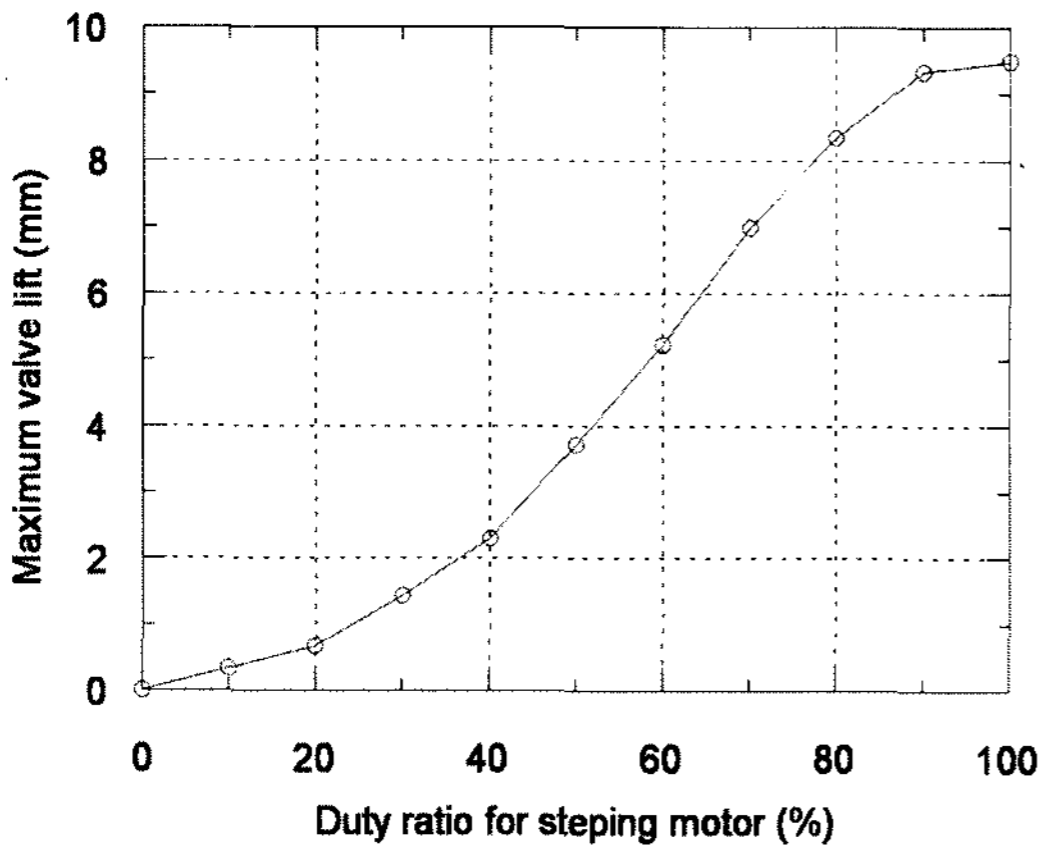


Fig. 6 Maximum valve lift with respect to the duty ratio for stepping motor control

Fig. 6은 스텝 모터 제어를 위한 듀티 비에 따른 최대 밸브 리프트를 나타낸 것이다. 듀티 비 20% 이하의 영역에서는 밸브 리프트의 변화가 극히 적고, 20 ~ 90% 영역에서 듀티 비에 따른 선형적인 밸브 리프트 특성이 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 듀티 비와 리프트의 정보를 바탕으로, 스텝 모터의 듀티 비 제어를 통해 밸브 리프트를 제어하였다.

밸브의 동특성 해석을 위해 엔진 회전 속도 2000 rpm에서 스텝 모터의 듀티 비에 따른 밸브의 속도 프로파일을 Fig. 7에 나타내었다. 일반적으로 측정된 밸브 프로파일로부터 얻어지는 밸브 개폐시의 속도와 가속도는 엔진에서 밸브 시스템의 내구 수명 및 밸브계의 소음, 엔진의 PMEP(Pumping Mean Effective Pressure) 손실과 관계된 연료소모율 등에 영향을 미친다. 속도 프로파일의 경우, 실제 측정 데이터의 미분을 통해서 얻어진 것이기 때문에 이산적인 실험 데이터의 미분에 의한 오차와 노이즈 성분 등에 의한 오차 등을 고려할 경우, 밸브 열림 구간과 닫힘 구간에서의 속도 프로파일이 대칭성을 잘 유지하고 있는 것을 알 수 있었다. 하지만 낮은 리프트 구간의 경우, 측정 신호 크기 한계로 인해 밸브 램프 구간에 대한 정보를 얻을 수 없다는 한계를 보였다. 2000 rpm에서 최대 밸브 속도는 듀티 비 100%에서 0.15 mm/CA deg, 즉, 1.8 m/s 정도의 속도를 나타냈으며, 최대 운전 속도, 즉 연료 차단 시점에 해당하는 6600 rpm에서의 밸브 최대 속도는 5.94 m/s 정도가 됨을 알 수 있었다.

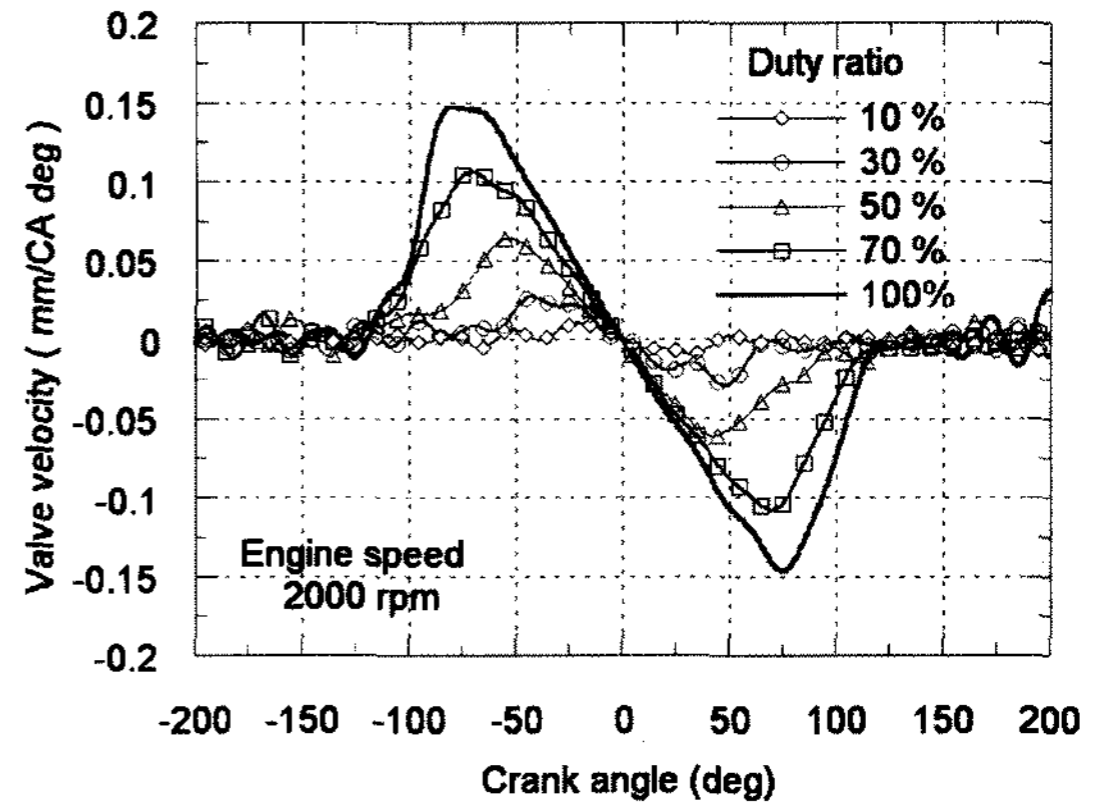


Fig. 7 Valve velocities according to duty ratio at the engine speed of 2000 rpm

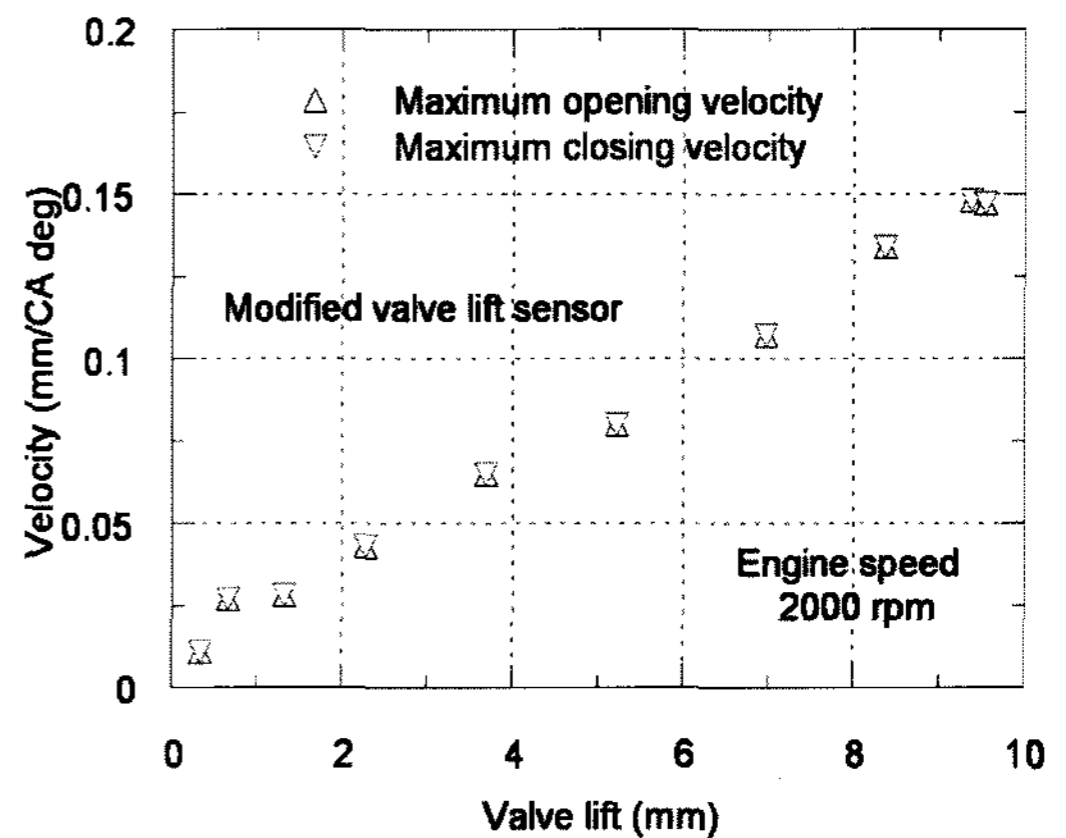


Fig. 8 Comparisons of maximum opening and closing velocities according to valve lift

Fig. 8은 밸브의 열림 구간과 닫힘 구간에서의 최대 속도를 밸브 리프트에 따라 나타내었다. 밸브의 열림 구간과 닫힘 구간에서의 최대 속도가 일치하는 대칭성이 확보되고 있음을 알 수 있었고, 밸브 리프트와 무관하게 항상 일치함을 알 수 있었다. 이는 센서 공급 전류의 불안정으로 인해 동일한 자성체와 센서와의 거리에서도 공급 전류의 미세한 변화에 의해 센서 출력이 다르게 나타날 수 있지만, 센서부에 5 mA의 전류를 안정적으로 공급함으로써 속도 프로파일의 대칭성을 확보할 수 있었다.

Fig. 9는 듀티 비 100% 조건, 즉 최대 밸브 리프트에서 엔진 회전 속도에 따른 센서 신호를 나타낸 것이다. 최대 밸브 리프트의 경우, 신호 크기가 엔진 회전 속도에 따라 다소 상이하게 나타남을 알 수 있

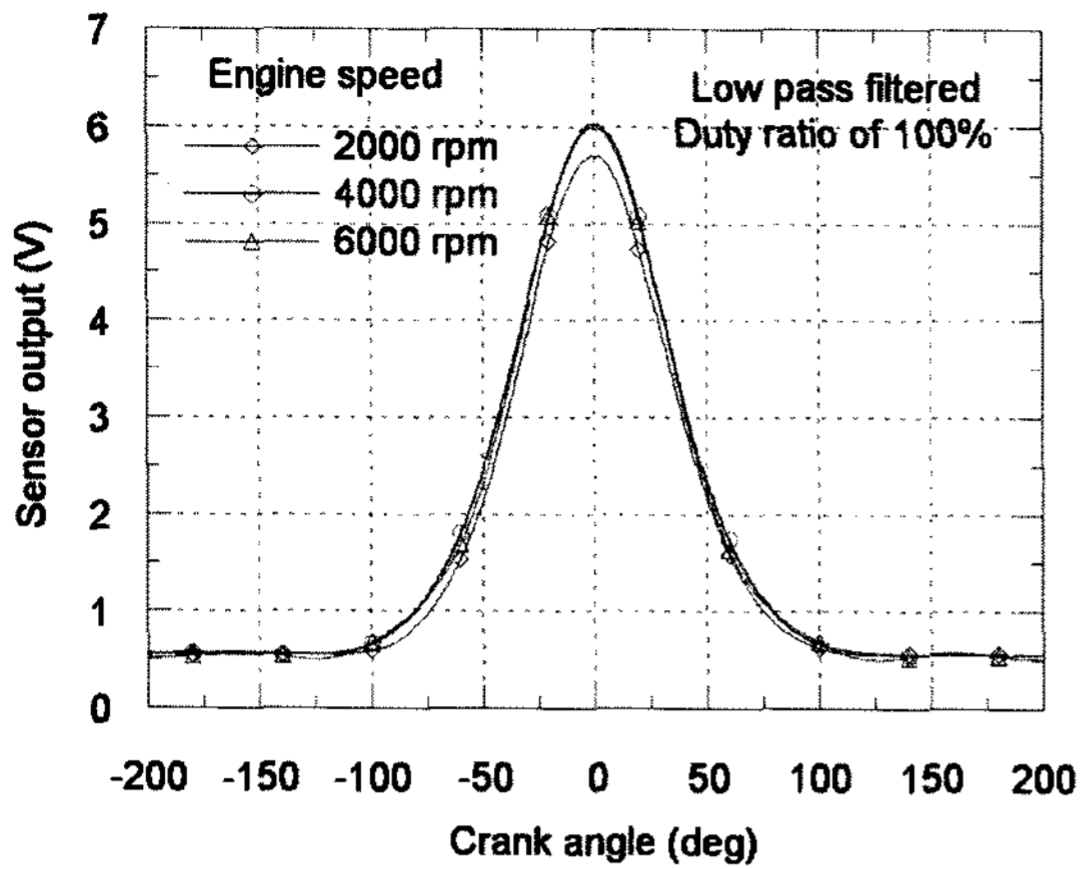


Fig. 9 Comparisons filtered sensor signal according to engine speed at the duty ratio of 100%

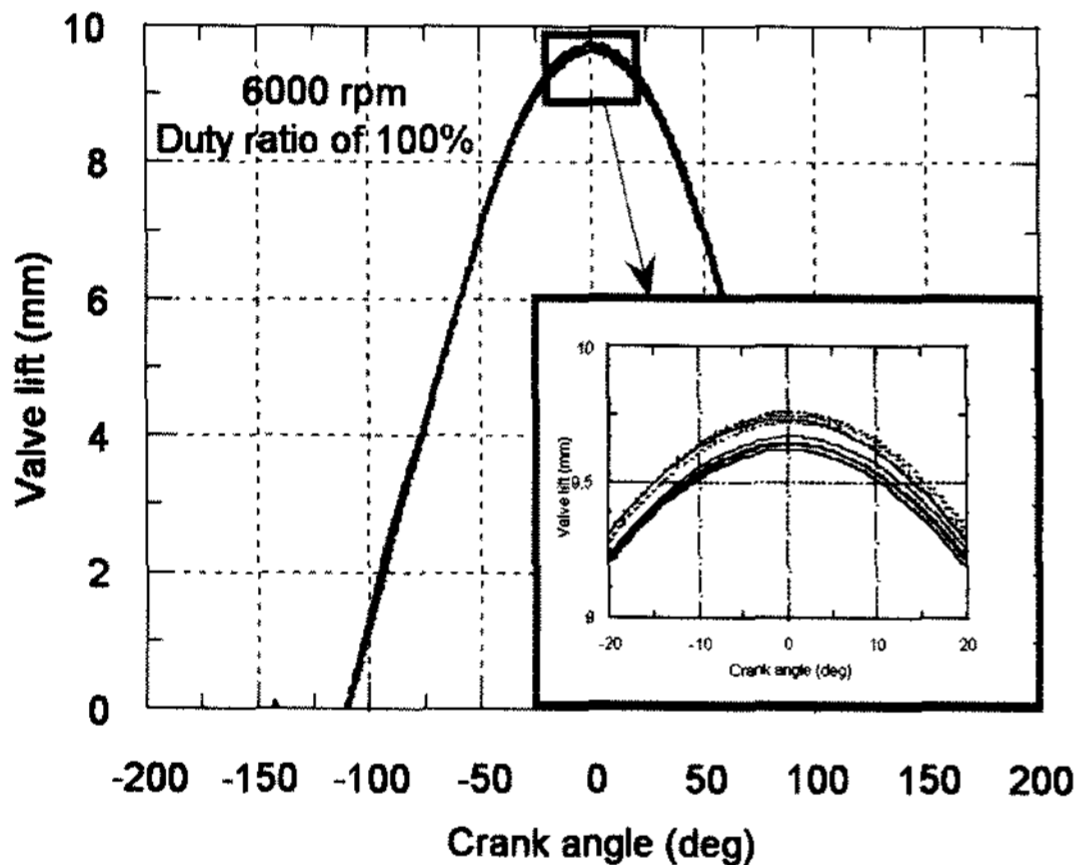


Fig. 10 Variations of valve lift profile at the engine speed of 6000 rpm with the duty ratio of 100%

었다. 이러한 현상의 원인은 고속 운전 영역에서 밸브는 상하 운동뿐만 아니라, 밸브 스템 축을 중심으로 하는 회전/진동 운동을 병행하여, 밸브 면 중심에 장착된 자성체가 밸브 축을 중심으로 회전함에 따라 센서에서 감지하는 자성의 크기가 미소하게 변하기 때문이다. 이 회전/진동 운동으로 인해, 측정 전압의 크기는 고속 영역에서 최대 0.5 V 정도의 편차를 보이고 있지만, 밸브 최대 리프트 위치에서 0.5 V 전압은 밸브 리프트로 환산할 경우, 0.2 mm 이내로서 Fig. 10에 나타낸 것처럼 밸브 리프트 측정상의 오차는 상대적으로 적게 나타났다. 향후 이러한 회전/진동에 의한 밸브 거동 특성에 대한 추가적인 연구가 필수적이라 할 수 있겠다.

4. 결론

본 연구에서는 가변 밸브 시스템의 밸브 구동 특성 및 CAI 연소 구현을 위한 제어성 및 작동성 확인을 위하여 밸브 리그 장치를 구성하였고, 밸브 동특성 측정을 위하여 밸브 리프트 센서를 개발하여 그 적용성을 시험하였다. 이를 통하여 밸브 리프트 센서로부터 운전 조건과 밸브 리프트에 따른 동특성 해석을 수행하였으며, 이와 같은 연구 수행을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 밸브 리프트 측정을 위하여 밸브 면에 자성체를 장착하고 자성체와 센서와의 거리 차이를 감지하는 홀 타입의 센서와 이를 구동하기 위한 회로를 설계/제작 하였다.
- 2) 센서 신호와 밸브 리프트와의 상관관계로부터 실제 구동되는 밸브의 프로파일을 획득하였으며, 밸브 프로파일로부터 밸브 속도와 듀티 비에 따른 밸브 동특성에 대한 분석을 수행하였다.
- 3) 밸브의 열림 구간과 닫힘 구간에서의 최대속도를 비교해 본 결과, 센서부에 5 mA의 전류를 안정적으로 공급함으로써, 밸브리프트의 크기와 상관없이 항상 일치하는 결과를 얻었다.
- 4) 밸브 리프트가 크고, 엔진의 회전 속도가 고속 영역으로 갈수록 밸브의 스템 축을 중심으로 한 회전운동에 의해 최대 밸브 신호가 최대 0.5 V 정도의 차이를 보이는 현상이 나타났지만, 이러한 차이는 밸브 리프트로 환산할 경우, 0.2 mm 이내로서 고속영역에서도 높은 측정 정확도를 나타내었다.

후 기

본 연구는 홀 타입의 센서만을 이용하여 밸브 거동 특성에 대한 연구에 국한되어 있지만, 차후 다양한 비접촉 변위센서, laser 변위 센서의 적용을 통한 비교/검토 실험을 수행하여 차세대 밸브 시스템에서의 밸브 거동 특성을 보다 정확하게 측정할 수 있고, 또한 측정이 용이한 센서 개발에 중점을 둘 것이다.

References

- 1) H. Zhao and J. Li, "Performance and Analysis

- of a 4-stroke Multi-cylinder Gasoline Engine with CAI Combustion,” SAE 2002-01-0420, 2002.
- 2) S. Onishi, S. Hong Jo, K. Shoda, P. Do Jo and S. Kato, “Active Thermo-atmosphere Combustion (ATAC) - A New Combustion Process for Internal Combustion Engines,” SAE 790501, 1979.
 - 3) M. Noguchi, Y. Tanaka, T. Tanaka and Y. Takeuchi, “A Study on Gasoline Engine Combustion by Observation of Intermediate Reactive Products during Combustion,” SAE 790840, 1979.
 - 4) P. M. Najt and D. E. Foster, “Compression Ignited Homogeneous Charge Combustion,” SAE 830264, 1983.
 - 5) C. Li, Z. Hua, X. Jiang and K. Navin, “Effects of Intake Valve Timing on Tremixed Gasoline Engine with CAI Combustion,” SAE 2004-01-2953, 2004.
 - 6) C. Rui, M. Nebojsa, T. Jamie and B. Dave, “The Thermal Effect of Internal Exhaust Gas Recirculation on Controlled Auto Ignition,” SAE 2003-01-0751, 2003.
 - 7) J. Stokes, T. H. Lake, R. D. Murphy, R. J. Osborne, J. Patterson and J. Seabrook, “Gasoline Engine Operation with Twin Mechanical Variable Lift Valvetrain Stage 1: SI and CAI Combustion with Port Fuel Injection,” SAE 2005-01-0752, 2005.
 - 8) O. Lang, W. Salber, J. Hahn, S. Pischinger, K. Hortmann and C. Bucker, “Thermodynamical and Mechanical Approach Towards a Variable Valve Train for the Controlled Auto Ignition Combustion Process,” SAE 2005-01-0762, 2005.
 - 9) N. Frey and K. Kramer, “Der DE-Ottomotor: Quovadis - Wohin Fuhrt der Weg,” 20th International Vienna Engine Symposium, 1999.
 - 10) N. Kosuke, K. Hiroyuki and K. Kazuya, “Valve Timing and Valve Lift Control Mechanism for Engines,” Mechatronics, Vol.16, pp.121-129, 2006.
 - 11) www.polytec.com
 - 12) B. Hofmann and M. Schmidt, “Der BMW 4-Zylinder Motor-Das Erste Mitglied der Neuen Ottomotoren-Generation,” 22nd International Vienna Engine Symposium, 2001.