

밸브 양정의 연속 변화에 의한 준정상 유동 조건에서의 엔진 실린더헤드 유량계수 특성

오대산·이충훈[†]

서울과학기술대학교 자동차공학과
(2010. 7. 6. 접수 / 2010. 11. 29. 채택)

Characteristics of Flow Coefficients in an Engine Cylinder Head with a Quasi-steady Flow Condition by Continuous Variation of the Valve Lift

Dae-San Oh · Choong-Hoon Lee[†]

Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology
(Received July 6, 2010 / Accepted November 29, 2010)

Abstract : Flow Coefficients of intake port in an engine cylinder head were measured by a newly designed flow rig. In measuring the flow coefficient with traditional method, the valve lift was manually varied by technician with adjusting a micrometer which is directly connected to the intake valve of the cylinder head. The cam shaft of the cylinder head is directly rotated by a step motor and the valve lift was automatically varied with cam shaft profile in the newly designed flow rig. The measurement of the flow coefficient was automated by rotating the cam shaft with the step motor. Automatic measurement of the flow coefficient could be safely measured by separating a technician from the noise and vibration of the traditional flow rig. Also, the automatic measurement of the flow coefficient reduce the measurement time and provide meaningful statistical data.

Key Words : flow coefficient, cylinder head, intake port, valve seat diameter, valve lift, cam profile, automation

1. 서론

엔진 실린더 헤드 흡기 포트의 공기 흡입 과정에서 유동 손실을 평가하는 중요한 인자가 유량계수이다¹⁾. 유량계수 측정의 기존 방법은 엔진의 실린더 헤드를 단품으로 탈거하여 리그(rig)에 장착한 상태에서 밸브 리프트를 수작업으로 조절하면서 이루어졌다. 실린더 헤드의 밸브를 고정하는 코터핀과 스프링을 탈거한 후 밸브와 마이크로미터를 직접 연결하여 마이크로미터를 돌려서 밸브 리프트를 여러 위치로 조절하면서 유량계수를 측정하는 방식이다^{2,3)}. 그러나 이와 같은 방식은 수작업으로 인해 정확성이 떨어지고 밸브 리프트 조절을 위해서 작업자가 매번 마이크로미터를 조작하므로 측정 시간이 오래 걸릴 수밖에 없다. 유량계수 측정을 위해 실린더 헤드의 4-6개 포트에 대해 시험 장치를 직접 조작하여야 하기 때문에 작업자가 장

치로부터 발생하는 소음 및 진동에 장시간 노출되어 안전상 문제가 있다. 최근에는 레이저 장치를 이용하여 직접적으로 유속을 측정하여 흡기 포트의 성능을 측정하는 방법이 개발되었으나⁴⁾ 측정 과정이 복잡하고 고도의 측정 기술이 필요한 것이 문제이다.

기존의 수동 방식 밸브리프트 조절에 의한 유량계수 측정 방법을 개선하기 위해서 직접 캠축을 스텝모터로 회전시킴으로써 캠프로파일에 의한 연속적인 밸브리프트 제어가 가능하며 압력 센서를 함께 사용하면 측정을 자동화 할 수 있다. 작업자가 장치를 직접 조작할 필요가 없으며 결과적으로 작업자를 장치의 소음과 진동으로부터 격리함으로써 안전하게 유량계수를 측정할 수 있다. 밸브리프트 제어를 자동화하기 위한 연구는 이충훈⁵⁾에 의해 이루어진 바가 있는데 밸브를 1-차원 이송장치에 직접 연결하여 밸브리프트를 제어하였다. 이 장치는 밸브리프트를 엔진 회전 각도 타이밍에 맞추어 연속적으로 제어하는 데는 어려움이 있다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
chlee5@snut.ac.kr

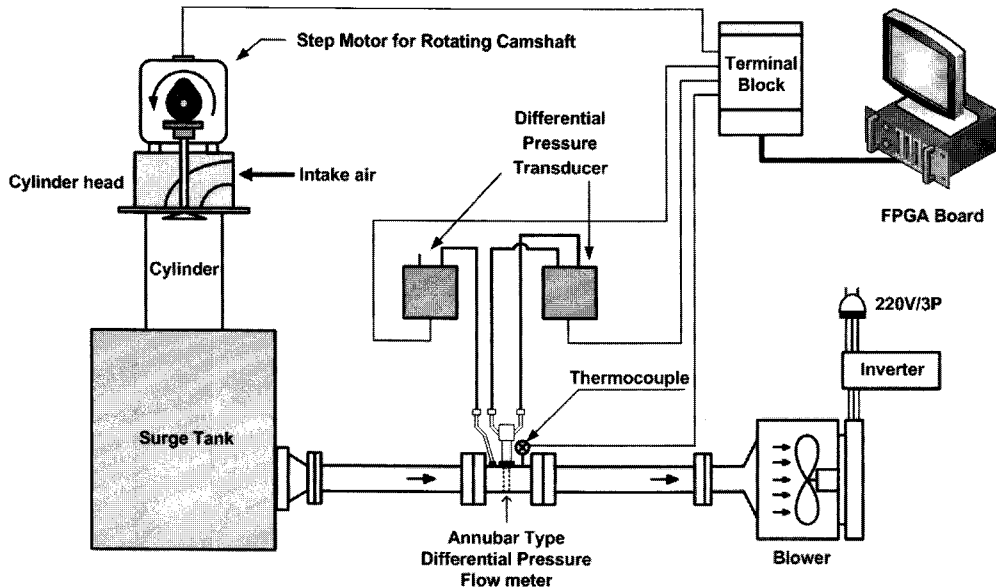


Fig. 1. Experimental setup for measuring the flow coefficients of intake port in an engine cylinder.

엔진실린더 헤드 흡기 포트의 유량계수를 측정하는데 있어서 밸브리프트를 연속적으로 제어하기 위해 기존의 방식과 달리 캠축을 직접 모터로 회전시키는 방식을 새로이 고안하였다. 캠축을 직접 회전시키면 밸브 리프트 제어가 실제 엔진의 구동 조건과 동일하며 이러한 조건에서의 유량계수 측정은 실제 엔진의 공기 흡입 조건과 보다 더 가깝다. 캠축을 직접 구동하면서 엔진 흡기 포트의 유량계수를 측정하는 기존의 연구는 거의 없었다. 캠축의 회전 속도를 제어하면서 유량계수 특성을 측정하기 위해서 밸브 후류부(downstream of the valve) 압력의 동적 특성 및 유량계에서의 차압을 측정하고 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

엔진 실린더 헤드 흡기 포트 유량계수를 측정하기 위한 실험 장치는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 밸브 리프트 제어를 위한 캠축 구동 장치, 실린더, 서지탱크, Annubar[®]형 차압유량계⁶⁾, 송풍기, 송풍기 회전 속도 제어를 위한 인버터, 차압센서, U-자관 등으로 구성되어 있다. 실차 상태의 엔진이 공기를 흡입하는 과정을 구현하기 위하여 캠축을 직접 스텝모터로 회전시켜 밸브리프트를 제어하였다. Annubar[®]형 차압유량계 검정은 층류유량계⁷⁾(laminar flow meter: Meraim사 제작)로 검정하였다. 송풍기는 3상 220V 7.5kw의 AC 유도 전동기를 사용하였으며 인

버터 용량은 7.5kw 급을 사용하였다. 송풍기를 가동하면 흡입 공기는 엔진 실린더 헤드의 흡기 포트를 지나고 밸브와 밸브 시트 사이의 틈새를 통과하여 실린더로 들어가서 서지 탱크를 거쳐 직선 파이프 구간에 이어 차압유량계를 통과하게 된다.

유량 계수 측정에 필요한 데이터를 얻기 위해서는 송풍기를 가동한 후 스텝모터를 일정 회전 속도로 돌도록 제어한다. 스텝모터를 회전 시키면 스텝모터에 직결된 캠축이 회전하면서 캠 프로파일에 맞게 밸브리프트가 자동으로 제어되며 실제 엔진의 흡기 조건과 일치되게 흡입 밸브 개폐가 이루어진다. 캠축이 일정 속도로 회전하는 조건에서 캠 각도 9° 간격으로 서지탱크 압력, 유량계에서의 차압, 흡입공기온도 등을 데이터 수집 장치를 이용하여 측정하였다. 캠축의 회전 속도는 5, 10, 15rpm으로 각각 제어하였으며 이 정도의 회전 속도는 실제 엔진의 회전속도와 비교하여 매우 저속이나 기존의 전통적인 방식의 유량계수 측정이 정상 상태(steady state) 조건에서 이루어지고 있다는 것을 고려하였다. 이 정도의 캠축 회전 속도는 유동조건이 준정상 상태(quasi steady)로 알려져 있다¹⁾. 이러한 조건에서 측정된 유량계수는 기존의 전통적인 측정 방식으로 얻어진 것과 유사한 특성을 보인다고 볼 수 있다. 따라서 자동측정법이 측정값은 기존의 전통적인 방식에 의한 것과 유사하면서, 측정 시간을 획기적으로 줄일 수 있다. 5, 10, 15rpm인 조건에서 40회 반복 측정을 하여 유량계수의 평균 및

표준 편차를 구하였다.

3. 결과 및 검토

밸브리프트를 측정하기 LVDT를 설치하였다. 캠 축을 5, 10, 15rpm으로 각각 회전시키면서 밸브리프트의 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다. LVDT에서 나온 전압값에 대응하는 밸브리프트 관계식을 이용하여 캠각도 9° 간격으로 측정하였다. 캠각도 120°까지는 흡기 밸브가 최저의 리프트 즉, 밸브가 거의 닫힌 조건이다. 최저 리프트 위치에서 실제 엔진과 다르게 완전히 밸브를 닫지 않은 것은 완전히 닫을 경우 순간적으로 서지 탱크에 진공압력이 과도하게 걸려 측정에 어려움이 있어 약 0.5mm 정도의 프리리프트(pre-lift) 상태를 유지하였다. 캠각도가 120°에서부터 증가하기 시작하며 180°에서 최대값을 나타낸 후 그 후 다시 감소하여 240°에서 다시 최소값을 보였다. 캠축회전 속도 변화에 대해 밸브리프트가 거의 동일한 위치를 나타냈다. 다만 밸브가 닫히는 캠 각도 240° 위치에서 캠축 회전 속도가 증가함에 따라서 밸브 관성 운동에 의한 약간의 변동이 있음을 알 수 있다. 240° 위치에서 밸브가 프리리프트 상태에 있기 때문에 캠 회전 속도가 빠른 경우 밸브 운동의 관성에 의해 리프트가 상대적으로 더 작은 값을 가지게 된 것으로 사료된다.

캠축의 회전속도를 5, 10, 15rpm으로 증가시키면서 서지 탱크에서의 부압($P_{atm} - P_{surge\ tank}$) 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 총 40회 연속으로 반복

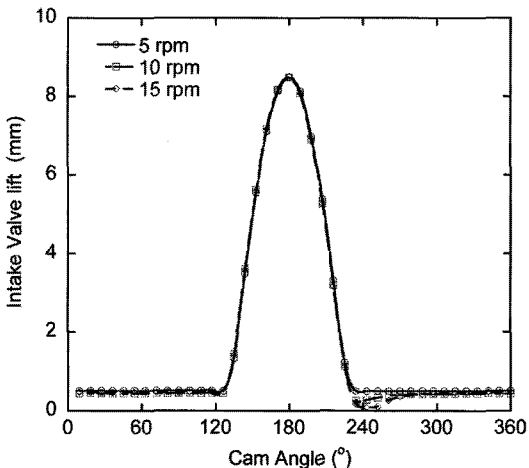


Fig. 2. The measured valve lift according to the cam angle using an LVDT.

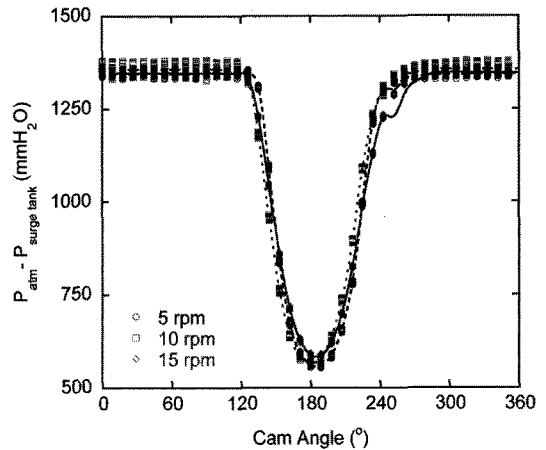


Fig. 3. The vacuum pressure below atmospheric pressure at the surge tank.

측정하였으며 심볼로 나타낸 것은 실험 결과이며 평균값은 선으로 연결하여 나타내었다. 반복 측정에 따른 측정 데이터 변동은 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 3의 y-축 값은 서지 탱크의 압력이 대기압보다 얼마나 낮은지 즉, 진공도가 얼마나 큰지를 나타낸다고 볼 수 있다. y-축 값이 크다는 것은 서지탱크 압력이 대기압보다 상대적으로 많이 낮다는 것을 의미한다. 캠각도 0~120°, 240~360° 구간에서는 밸브가 거의 닫힌 조건이기 때문에 서지탱크의 진공압력 크기가 상대적으로 크고 또한 일정한 값을 나타내었고 밸브가 열리기 시작하는 구간인 120°부터는 서지 탱크의 부압이 점점 작아지기 시작해서 최대 열린 위치에서는 크기가 550mm H₂O 정도로 가장 작은 값을 나타내었다. 캠축의 회전속도가 5, 10rpm에서는 캠축 회전 위치에 따른 서지 탱크 부압이 거의 동일한 값을 나타내었으며 15 rpm에서는 부압의 크기가 상대적으로 약간 작은 값을 나타내었는데 이는 캠축 회전 속도가 증가할수록 서지탱크의 압력 회복 속도가 늦어지기 때문으로 사료된다.

실린더 헤드의 흡기 포트 유량계수를 계산하기 위해서는 흡입 공기 유량을 측정해야 하는데 본 연구에서는 Annubar® 형 차압유량계⁶⁾를 이용하여 측정하였다. Annubar® 형 차압유량계의 유량 계산은 식 (1)에 나타낸 것과 같은 H 파라미터를 사용한다. H 값은 Annubar® 형 유량계에서 측정된 상류압(up stream pressure)과 후류압(down stream pressure)의 차압, 공기 온도, 정압 등을 조합한 파라미터로 온도 및 압력에 따라서 변화하는 배기가스의 밀도 값을 반영한다고 볼 수 있다.

$$H = \frac{P_{exh}}{101.3(kPa)} \times \frac{293.15(K)}{T_{exh}} \sqrt{\frac{h_w}{\gamma}} \quad (1)$$

여기서, P_{exh} : 배압(kPa)
 T_{exh} : 공기 온도(K)
 γ : 표준상태(293.15K, 101.3kPa) 공기밀도
 h_w : 유량계 차압(kPa)이다.

Fig. 4는 Annubar® 형 차압 유량계에서의 상류 압과 후류압의 차압을 나타낸 것이다. Fig. 3에 나타낸 실험 결과와 마찬가지로, 총 40회 연속으로 반복 측정하였으며 실험값과 평균값을 각각 심볼과 선으로 나타내었다. 유량계에서의 차압은 측정 결과는 서지 탱크에서의 부압 측정 결과와는 달리 변동성이 크을 알 수 있다. 서지 탱크의 부압의 변동성이 작은 것은 서지 탱크 부압은 정압을 측정했기 때문이다. 유량계 차압은 유동의 유동 특성 즉 동압을 포함한 측정 결과이기 때문에 변동성을 수반에 없다고 사료된다. 밸브가 거의 닫힌 조건인 캠각도 0~120°, 240~360° 구간에서는 차압이 작게 측정되었고 밸브가 열리기 시작하는 캠각도 120°부터는 유량 증가에 따라서 점차 차압이 증가하고 캠각도 180° 근처에서 최대값을 나타내고 그 이후 밸브가 점차 닫히면서 차압이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 캠축 회전 속도가 5, 10, 15rpm으로 증가함에 따라 동일 캠축 각도 위치에서 5rpm 일 때의 차압이 상대적으로 가장 크고 15rpm일 때 가장 작았는데 이는 캠축의 회전 속도가 증가함에

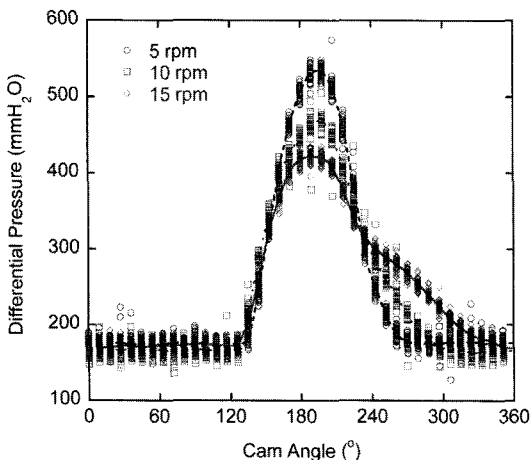


Fig. 4. Differential pressure between upstream and downstream taps at the Annubar® type differential flow meter.

따라 밸브가 움직이는 속도가 증가하여 실린더 내의 압력이 평형 상태에 충분히 도달하지 못하였음을 의미한다.

식 (1)에 Fig. 4의 차압 결과를 대입하여 H 파라미터 값을 계산하고 H값을 Annubar® 형 차압 유량계의 질량 유량 관계식에 대입하여 얻은 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 캠각도 변화에 따른 질량 유량 특성을 캠축 회전속도가 5, 10, 15rpm으로 각각 변화시키면서 얻은 결과이다. Fig. 4와 마찬가지로 40회 반복 측정한 결과를 심볼(symbol)로 나타내었으며 평균값을 선으로 연계하여 나타내었다.

유량계수 C_F 는 식 (2)로부터 구할 수 있다¹⁾.

$$\dot{m} = \frac{C_F A_V P_0}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left(\left(\frac{P_d}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_d}{P_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} \quad (2)$$

여기서, \dot{m} 은 특정 밸브리프트 위치에서 측정한 질량 유량, A_V 는 밸브 시트 단면적이며, P_0 는 밸브 입구에서의 압력으로 대기압을 사용할 수 있다. R은 공기 기체 상수, k는 공기의 비열비, P_d 는 밸브를 통과한 위치에서의 압력 즉, 밸브 후류압력으로 본 실험에서 측정한 서지 탱크 압력을 사용하였다.

Fig. 5에 나타낸 질량 유량과 그 밖의 데이터를 식 (2)에 대입하여 유량계수 C_F 를 구할 수 있었다. 캠축 회전 속도를 5rpm, 10rpm, 15rpm으로 각각 변화시키면서 캠각도 변화에 따른 유량계수 측정값을 Fig. 6에 나타내었다. 각각의 캠축 회전속도에 대해 총 40회에 걸쳐 반복 측정된 유량계수 값을 심볼로 나타내었고 평균값은 선을 연결하여 나타

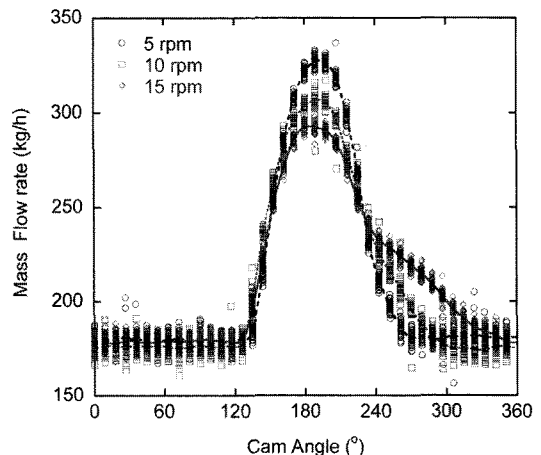


Fig. 5. Mass flow rate measured with the Annubar® type differential flow meter according the cam angle.

내었다. 밸브가 열리기 시작하는 캠위치 120°에서부터 최대 열린 위치인 180°에 이르기까지 유량계수 값이 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며 이는 밸브가 많이 열릴수록 공기가 밸브를 통과하는 과정에서 유량 손실이 줄어들기 때문이다. Fig. 5에 나타난 것과 같이 반복 측정된 질량 유량값 변동이 크기 때문에 유량계수 변동폭이 크게 나타났음을 알 수 있다.

현재 자동차 제조업체의 유량계수 측정은 정상 상태에서 이루어지고 있으며 측정 캠 각도 구간도 밸브가 열리는 위치로부터 캠각도 9° 내외의 등간격으로 8개 내외의 밸브리프트 위치에서 측정된 유량계수들의 평균값을 사용하고 있다. Fig. 5의 유량계수 측정 결과 중 캠각도 120~180° 부근 구간에서의 평균 유량계수 값을 확대하여 Fig. 7에 나타내었다. 캠각도 9° 간격으로 8개의 위치에서 측정된 유량계수 평균값을 심볼로 나타내었으며 이들 실험 데이터를 바탕으로 구한 추정곡선(curve fitting)을 나타내었다. 캠축 회전 속도에 따라 약간 다르게 나타났으며 특히 캠각도 180° 위치에서는 캠축 회전속도가 빠를수록 유량 계수값이 작아지는 경향을 보이고 있으며 이는 밸브의 이송 속도가 빠르면 서지탱크의 압력의 회복이 느려져 유량이 줄어들기 때문으로 사료된다. Fig. 7에 나타난 각각의 평균 유량계수는 각각의 캠축 위치에서 40회 반복 측정된 것을 평균한 값이다. Fig. 8은 동일한 각각의 평균 유량계수에 대응하는 표준 편차를 나타낸 것이며 대체로 1~3%의 편차를 보이고 있다. 캠축 회전 위치가 180°에 가까울수록 편차가 줄어드는

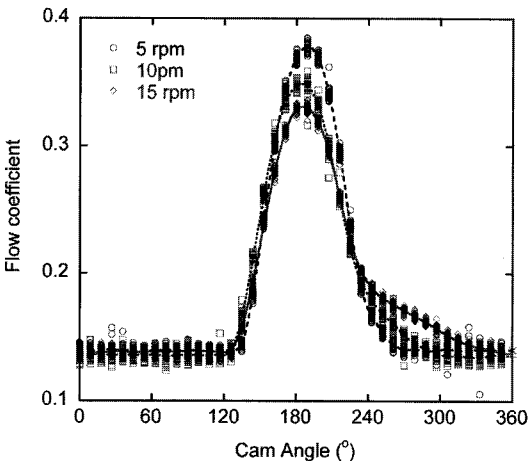


Fig. 6. Flow coefficient of the intake port in the engine cylinder head according to the cam angle.

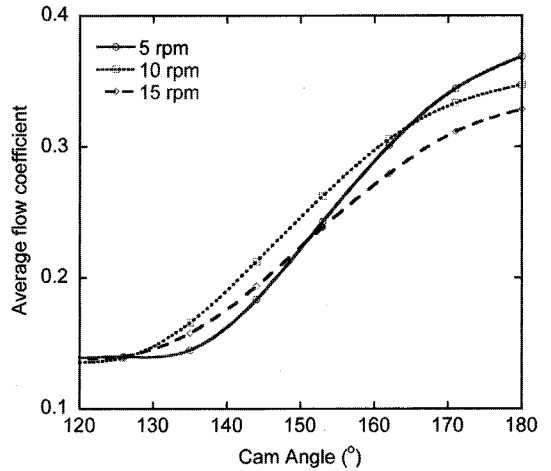


Fig. 7. Average flow coefficients of the intake port from cam angle 117° to 180° with 9° interval.

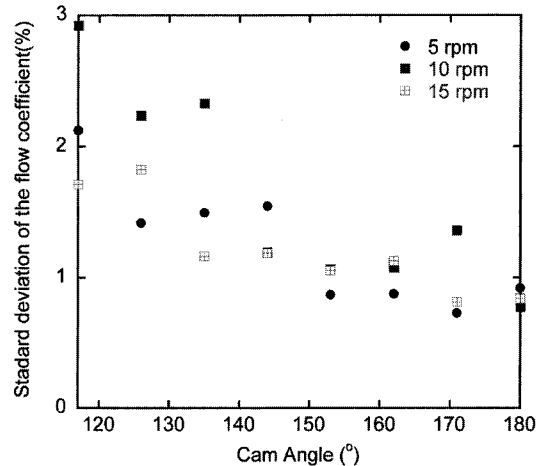


Fig. 8. Standard deviation of the flow coefficients of the intake port from cam angle 117° to 180° with 9° interval.

경향을 보이고 있으며 이는 캠축회전 위치가 120°에 가까울수록 밸브가 열린 정도 매우 작아서 유동 변동이 크기 때문으로 사료된다.

평균 유량계수는 식 (3)에 나타난 것과 같이 캠각도 구간(α_1 - α_2)에서 유량계수를 적분하여 구할 수 있다³⁾.

$$C_F = \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F(\alpha) d\alpha}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (3)$$

일반적으로 자동차 제조업체에서는 밸브리프트 위치를 수동으로 조작하여 정상 상태에서 총 8내외

의 캠 회전각도 위치에서 유량계수를 측정된 후 평균값을 실린더 헤드의 평균 유량계수로 사용하고 있다. 식 (3)을 이산 적분하여 평균 유량계수를 구하였으며 캠축 회전속도 5rpm, 10rpm, 15rpm에서 각각 0.23, 0.23, 0.22였다. 캠축회전 속도가 저속이기 때문에 평균 유량계수 값이 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 캠축회전 속도를 5~15rpm을 유지함으로써 흡입 유동 과정이 준정상 상태에 가깝고 그 평균 유량계수 측정 결과도 거의 동일한 값을 나타냈다고 사료된다. 이러한 결과는 본 연구에서 개발한 캠축 구동에 의한 자동 유량계수 측정방법이 기존의 수동 조작에 의한 유량계수 측정 방법을 대체할 수 있음을 보여 주고 있다. 캠축 구동 방식에 의한 유량계수 측정은 기존의 수동 방식과는 비교할 수 없을 정도로 신속하게 유량계수를 측정할 수 있는 장점이 있다. 밸브 리프트 수동 조작에 의한 유량계수 측정은 실린더 흡기 포트 1개당 30분 이상의 시간이 걸린다. 반면에 캠축 구동방식은 2~3분 이내에 측정할 수 있으며 반복 측정을 기본으로 하기 때문에 측정 결과의 평균 및 표준 편차를 구함으로써 측정 결과에 대한 통계적 분석이 가능하다는 장점이 있다.

4. 결론

- 1) 저속(5, 10, 15rpm)으로 캠축을 회전 시켜 측정한 평균 유량계수가 캠축 회전수에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내었으며 이러한 결과는 기존의 정상 상태 조건에서 수동 조작에 의한 유량계수 측정 방법을 대체할 수 있음을 의미한다.
- 2) 캠축 구동 방식에 의한 유량계수 측정은 측정 속도를 기존의 수동 방식과 비교하여 1/10의 시간으로 유량계수를 측정할 수 있음을 보여주었다.

3) 캠축 구동 방식에 의한 유량계수 측정 방식을 사용함으로써 유량계수의 평균 및 표준편차를 손쉽게 얻을 수 있으므로 측정 데이터의 통계적 처리가 가능하여 측정 결과의 신뢰도를 높일 수 있다.

참고문헌

- 1) T. Uzkan, C. Borgnakke, T. Morel, "Characterization of Flow Produced by a High Swirl Inlet Port", SAE paper No. 830266, 1983.
- 2) J. Kawashima, H. Ogawa, Y. Tsuru, "Research on a Variable Swirl Intake Port for 4-Valve High Speed DI Diesel Engines", SAE paper No. 982680, 1998.
- 3) C. R. Stones and N. Ladammatos, "The Measurement and Analysis of Swirl in Steady Flow", SAE paper No. 921642, 1992.
- 4) S. Zuelch, K. Behnk, R. Deepe, B. Findeisen, T. Seidel, L. Stiegler and A. Sommer, "A New Hardware-Assisted Inlet Port Development Process for Diesel Engines Using Doppler Global Velocimetry", SAE paper No. 2005-01-0640, 2005.
- 5) K. I. Kim and C. H. Lee, "Development of a new swirl measurement method for an engine cylinder head by automating the swirl measuring process", Proc. IMechE Vol. 223, Part D: J. Automobile Engineering, pp. 375~387, 2009.
- 6) 이충훈, "삼각 분리 막대형 차압유량계 압력탭 조건이 유량측정에 미치는 영향", 한국안전학회지, 제25권, 제2호, pp. 1~6, 2010.
- 7) Meriam Process Technology, Meriam Laminar Flow Meter Flow Elements, F/N. 501:215TECH-1, www.meriam.com, 2009.