

IEEE-1394 카메라와 스텝모터를 이용한 엔진 실린더헤드의 흡기포트 스윙 측정 자동화에 관한 연구

이충훈*

(논문접수일 2005. 9. 6, 심사완료일 2005. 10. 6)

A Study on the Automatic Measurement of Swirl Generated from Intake Port of Engine Cylinder Head Using an I-IEEE-1394 Camera and Step Motors

Choong-Hoon Lee*

Abstract

A swirl ratio of a charge in the cylinder could be calculated by measuring both the rotary speed of paddle and the intake air flow rate in the swirl measurement apparatus for several positions of valve lift. The automation of the swirl ratio measurement for a cylinder head is achieved by controlling both the valve lift of cylinder head and a suction pressure of the surge tank, instead of controlling them manually. PID control of the surge tank pressure and positioning a valve lift of the cylinder head are also achieved by using two step motors, respectively. Rotating speed of a paddle are measured using an optical sensor and a counter. Flow rate are measured from ISA 1932 flow nozzle by reading a differential pressure gauge position using IEEE-1394 camera. Time to measure the swirl ratio for a port in the cylinder head is drastically reduced from an hour to 3 minutes by automation control of the apparatus.

Key Words : Automation(자동화), Swirl(스윙), Intake port(흡기포트), I-IEEE1394, PID Control(비례적분미분제어)

1. 서론

디젤 엔진은 열기관 중에서 열효율이 높아 연료 경제성이 뛰어나기 때문에 입자상 물질 및 질소 산화물의 과다 배출에도 불구하고 중요한 동력원의 하나로 지속적으로 사용될 것이 확실하다. 특히 최근에 지구 온난화의 주원인이 화석연료

의 연소과정에서 배출되는 CO₂로 밝혀지면서 CO₂배출을 나라별로 규제하려는 움직임이 활발하다.

화석연료연소로부터 발생하는 CO₂의 대부분은 차량으로부터 배출되고 있으며 이를 줄이기 위해서는 초저연비엔진 개발이 필요하며 이것을 충족할 수 있는 엔진이 디젤엔진, 그 중에서도 고속소형직분식(HSDI) 디젤엔진이다.

* 서울산업대학교 자동차학과 (chlee5@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

소형 디젤엔진의 경우 중대형 엔진에 비해 회전수가 1.5~2배 정도이므로 직분식 연소실을 채용하려면 연료-공기의 빠른 혼합이 요구되는데, 엔진 실린더 헤드의 헬리컬(Helical) 포트로부터 생성되는 적절한 스윙 유동의 역할이 매우 중요하다^(1,2). 따라서 엔진 실린더 헤드 특히 디젤엔진 실린더 헤드의 흡기포트에 의해 생성되는 스윙 강도를 측정하는 것이 매우 중요하다. 자동차회사에서는 연구용 및 양산 실린더 헤드의 각각의 포트의 스윙값을 측정하여 제품의 품질을 모니터링 한다. 대부분의 자동차회사, 학교, 연구소 등에서 사용되는 스윙 측정장치는 실린더 내의 스윙 유동을 실린더 내에 패들(paddle)을 설치하여 측정하는 방식⁽³⁾(패들 방식)과 실린더 내에 벌집모양의 하니콤(honeycomb) 구조물을 설치하고 스윙 유동이 가하는 운동량을 토오크로 측정하는 방식⁽⁴⁾(임팩트 방식)이 가장 많이 쓰이고 있으며 본 연구에서는 패들방식을 사용하여 연구를 수행하였다. 패들 방식과 임팩트 방식외에도 LDA(laser doppler anemometer)^(5~7), 열선유속계⁽⁸⁾, 피토힐⁽⁴⁾ 등을 이용하여 직접 실린더 내의 유속 패턴을 측정하는 방식 등이 있다. 실린더 내에 패들을 설치한 후 블로어(blower)를 가동하여 공기를 강제로 흡입하면 흡기 포트에 의해 스윙유동이 생성되어 패들이 회전하며 이 때 패들회전수와 흡기 유량을 측정하여 하나의 밸브 리프트 위치에서 스윙값을 계산하며, 전술한 것을 실린더 헤드 밸브 리프트 위치를 바꾸어 가면서 반복 계속하여 구한 스윙값들

을 평균하면 평균 스윙비를 구할 수 있다.

밸브리프트를 바꾸어 가면서 스윙값을 측정하는 과정은 현재 대부분의 회사 및 연구소에서 수동으로 이루어지고 있어서 1개 포트 측정시간이 약 1시간 내외이다. 또한 작업자가 직접 밸브리프트를 마이크로미터를 사용하여 조절하고, 흡기 유량을 측정하기 위해 차압유량계의 압력차를 읽는다. 이러한 스윙 강도를 측정하는 과정이 유발하는 소음 및 진동으로 인해 측정 환경이 매우 열악하다. 유해한 작업환경으로부터의 작업자 보호와 측정시간을 획기적으로 줄이기 위해 전술한 스윙 측정 과정 즉, 밸브리프트 조정, 유량 측정, 서지탱크 흡입 부압 조절을 위한 바이패스 밸브 개폐 제어, 패들 회전수 측정 등을 모두 자동화하는 연구를 수행하였다. 스윙 측정 자동화 관련된 기존의 연구는 거의 이루어지지 않았으며 패들타입 스윙측정 장치의 자동화하기 위하여 밸브리프트 위치 제어와 서지탱크 흡입부압의 제어를 위하여 각각 스텝모터를 사용하였으며, ISA 1932 플로우 노즐의 상류부 하류부의 차압을 측정하기 위해 IEEE-1394 카메라를 사용한 화상처리 방법을 이용하였다.

2. 패들 방식 스윙 측정 장치

Fig. 1은 패들 방식 실린더 헤드 흡기 포트 스윙 측정 장치의 개략도를 나타낸 것으로 기존의 수동식 측정 장치를 자동

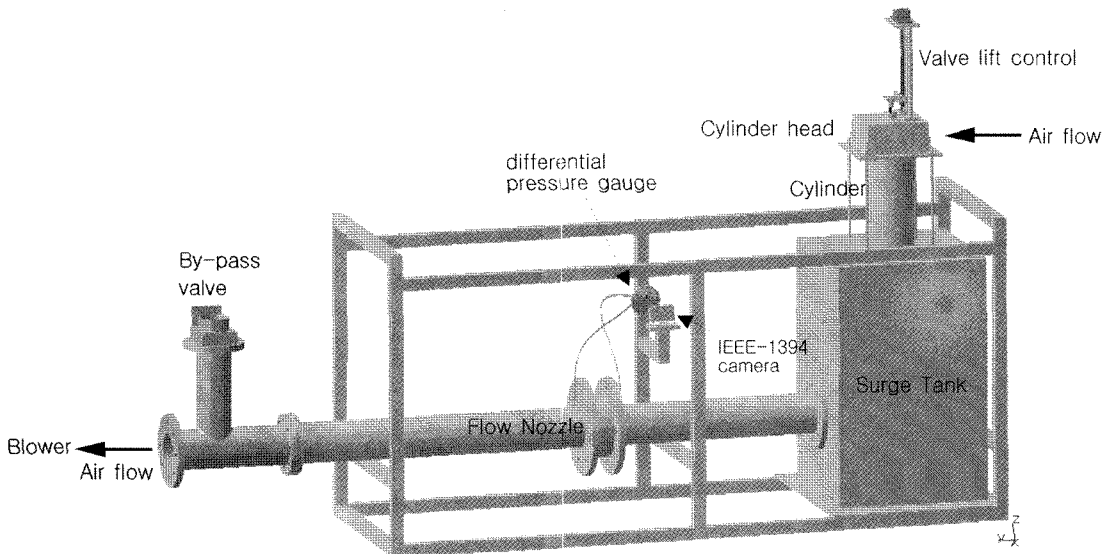


Fig. 1 A Schematic diagram of swirl measurement system of paddle type

화한 것을 나타낸 것이다. 스윌 측정 장치는 밸브 리프트 제어부, 실린더, 서지탱크, 플로우 노즐, 바이패스밸브, 블로어 등으로 구성되어 있다. 패들 방식 스윌 측정 장치를 사용한 스윌 측정 과정을 기술하면, 우선 밸브 리프트 위치를 조절하여 정해진 위치로 설정하는데 기존의 수동식은 보통 마이크로미터와 밸브 로드를 연결하여 작업자가 조절하였으나 자동화 하면서 이 부분을 스텝모터를 이용한 이송장치에 연결하여 밸브를 이동시켰다.

밸브 리프트 위치 설정이 된 후 블로어를 가동하여 실린더 헤드 흡기 포트를 통해 공기가 흡입되어 실린더, 서지탱크, 플로우 노즐, 블로워 출구를 차례로 거치면서 흐르게 된다. 이 때 서지 탱크의 압력을 미리 정해진 압력으로 유지하는 것이 중요한데 기존의 수동식은 이것을 직접 작업자가 수동으로 바이패스 밸브 개폐를 조작하여 서지탱크 압력을 조절하였으나 이것을 자동화 하기 위하여 스텝모터를 이용하여 바이패스 밸브의 개폐를 제어하는 방식으로 바꾸었다. 일단 밸브리프트 위치조절, 서지탱크 압력 설정이 끝나면 스윌값 측정과 관련된 파라미터의 측정이 필요한데 우선, 실린더 내의 패들이 스윌 유동에 의해 회전할 때 시간당 회전수를 측정하고, 흡기 유량을 계속하기 위해 플로우 노즐의 차압을 계속하며 이를 자동으로 계속하도록 시스템을 개발하였다. 진술한 바와 같이 특정 밸브리프트 위치에서의 스윌 측정과 관련된 파라미터의 측정이 종료되면 밸브리프트 위치를 바꾸어 가면서 여러 위치에서 스윌값을 계속하여 이를 평균하면 평균 스윌값을 자동으로 계산할 수 있다. 자동 측정 및 제어에 사용된 프로그램은 내쇼날인스트루먼트사의 LabView와 Vision을 사용하였다.

3. 스윌값 측정 자동화를 구성 요소

3.1 밸브리프트 이송장치와 패들

Fig. 2 는 서지탱크 상단부에 설치되어 있는 실린더, 실린더 헤드, 밸브 리프트 자동 이송 장치를 상세히 나타낸 것으로 실린더 내에는 흡기 포트를 통해 공기를 흡입할 경우 실린더 내의 접선방향의 공기흐름 즉, 스윌 유동의 크기를 정량화하기 위한 회전 패들이 설치되어 있는 것을 볼 수 있다. 스윌 측정의 자동화를 위해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 밸브 로드와 이송장치가 어댑터를 통해 연결되어 있고 이송 장치의 구동은 스텝모터에 의해 이루어지도록 하여 밸브 이송이 컴퓨터 프로그램에 의해서 자동으로 가능하도록 하였다. 스텝모터 제어를 위해서는 DAQ(data acquisition) 보드의 디

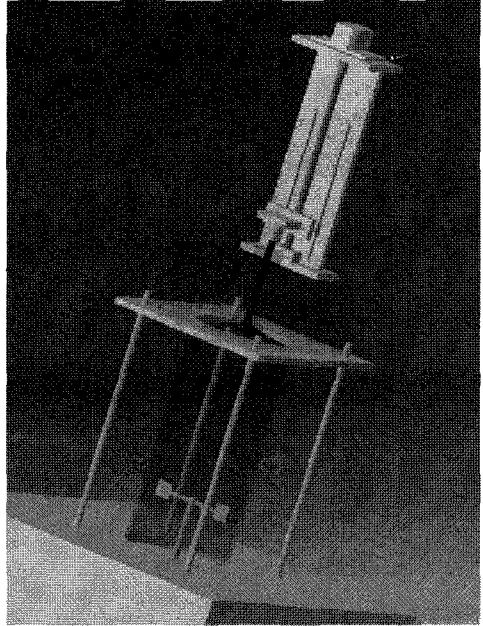


Fig. 2 Details of valve lift control system and paddle in the cylinder

지털 I/O 라인을 사용하여 펄스 신호를 내보내 원하는 위치로 이동하도록 제어하였다. 실린더 내의 패들 회전수는 광센서로 회전을 감지하여 이를 DAQ 보드의 카운터로 입력하여 회전속도를 계산하였다.

3.2 IEEE-1394 카메라를 이용한 유량 측정

스윌값을 계산하기 위해서는 앞 절에서 측정된 실린더 내의 패들회전 속도 외에 흡기 포트를 통해 흘러 들어간 공기 유량을 측정하여야 한다.

4. 결론

흡입 공기량은 Fig. 1에 나타내 바와 같이 ISA 1932 플로우 노즐로 측정하였으며 Fig. 3에 는 플로우 노즐의 내부 구조를 자세히 나타내었다. 흡입공기질량은 한국 공업 규격 조임기구에 의한 유량측정방법 KSA 0612⁽⁹⁾에 의거 계산하였으며 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$G_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P \rho_1} \quad (1)$$

$$C = 0.99 - 0.2262\beta^{4.1} - (0.00175\beta^2 - 0.033\beta^{4.15}) \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{1.15}$$

$$\varepsilon = \left[\left(\frac{\kappa\tau^{\frac{2}{\kappa}}}{\kappa-1} \right) \left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4\tau^{\frac{2}{\kappa}}} \right) \left(\frac{1-\tau^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1-\tau} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

여기서,

C : 유출계수

β : 노즐 직경비 d/D

ε : 기체 팽창 보정 계수

κ : 비열비 (C_p/C_v)

ρ_1 : 플로우 노즐 상류쪽 밀도

τ : 노즐 하류/상류 압력비 P_2/P_1 이다.

플로우 노즐 차압을 측정하기 위해서는 일반적으로 차압 변환기로부터 발생하는 전압신호를 DAQ 보드의 아날로그 입력단자로 읽어 들이는 방식을 사용하고 있으나 본 연구에서는 카메라 비전기술을 스월 측정 자동화에 적용하기 위해 IEEE-1394 카메라와 게이지 방식의 아날로그 차압계를 사용하여 차압을 읽어 들었다. 즉, Fig. 3에 나타난 바와 같이 바늘침을 가지고 있는 아날로그 차압계를 1394 카메라로 화상을 캡처한 후 차압계의 바늘침의 각도 위치를 읽어 내어 디지털이징함으로써 컴퓨터가 차압을 읽어 내도록 하는 방식을 사용하였다.

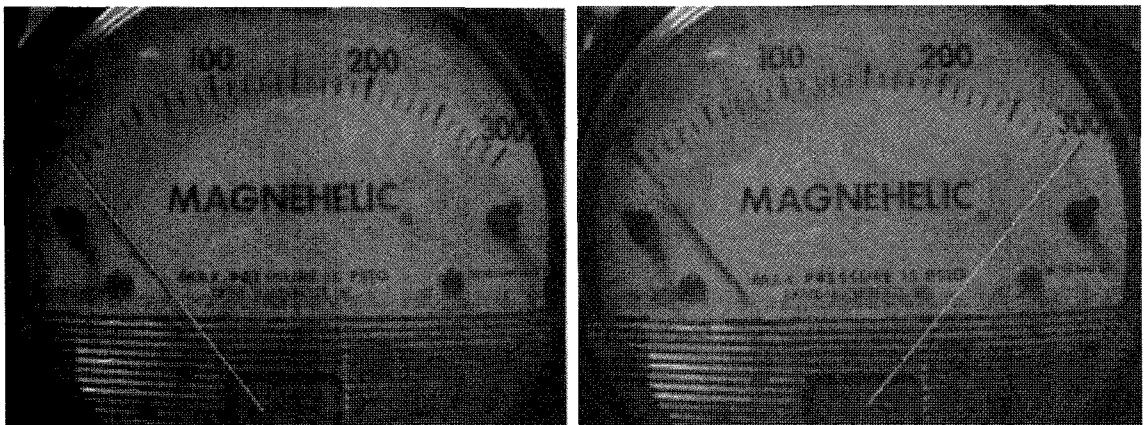
IEEE-1394 카메라의 화상 처리를 위해 여러 기능의 화상

처리 함수를 제공하는 NI-Vision을 사용하여 프로그램을 작성하였다. 기본적인 원리를 보면 IEEE-1394카메라를 통해 얻어진 이미지는 초기 스냅함수를 이용하여 ROI(region of interest)를 지정하는데 이는 Fig. 4에 나타난 것과 같이 아날로그 차압계의 초기 바늘 위치의 시작점, 중심점 그리고 바늘의 끝점의 세 점을 기본으로 게이지 시작점과 끝점이 이루는 각을 기본으로 환산하여 게이지의 눈금의 위치를 그 비율로써 측정값으로 변환한다.

Fig. 5는 게이지 바늘의 위치를 읽어 내는 프로그램을 테스트하기 위하여 압력단자에 차압을 일시적으로 가하였을 때 읽어낸 차압을 그래프로 나낸 것을 보여 주고 있다.

3.3 스텝 모터를 이용한 서지탱크 압력 제어

스월 측정을 위해서는 전술한 바와 같이 밸브리프트 위치를 조정된 후 서지 탱크의 압력을 일정하게 제어하는 조건에서 스월값과 관련된 파라미터를 측정하여야 한다. Fig. 1에 나타난 서지 탱크의 압력을 일정하게 제어하기 위해서는 일정한 유량을 계속해서 흡입하는 블로어 직전에 바이패스 밸브를 설치하고 서지탱크의 압력을 측정하면서 서지탱크의 압력이 목표압력을 유지하도록 바이패스 밸브의 개폐를 지속적으로 제어하였으며 PID 제어를 하였다. 본 장치에서는 스텝모터 축을 바이패스 밸브에 연결하여 스텝모터의 회전 위치를 제어하여 바이패스밸브의 개폐량을 조절하였다. 바이패스밸브는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 버티플라이 타입의 스톱 밸브를 사용하였다.



(a) initial position

(b) end position

Fig. 4 Reading reference information of gauge needle using IEEE-1394 camera

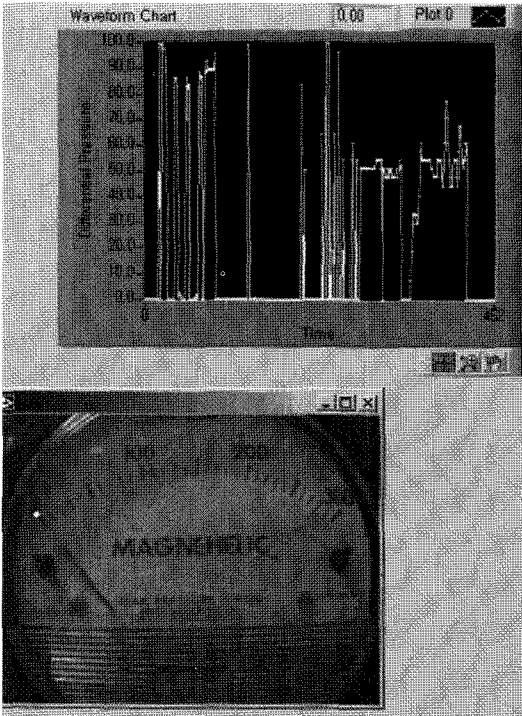


Fig. 5 Reading results of needle position with IEEE-1393 camera and NI-Vision

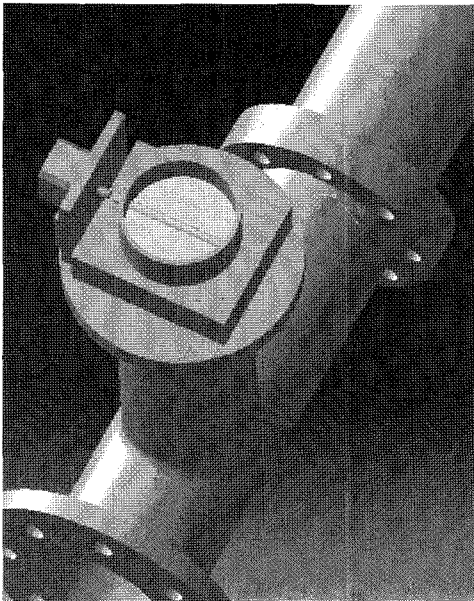


Fig. 6 By-pass valve to control the surge tank pressure

4. 스월값 계산

엔진 실린더로 흡입되는 유동의 스월 강도를 엔진 실제 운전 조건에서 측정하는 것은 매우 어려운 문제이기 때문에 대부분의 자동차 메이커에서는 정적 유동 조건(stationary flow condition)에서 엔진 실린더 헤드 흡기포트의 스월 생성능력을 평가하여 대략적으로 실차 조건에서의 흡기 유동의 스월 강도를 추정하고 있다. 본 연구에서 사용한 실험 장치도 정적 유동조건에서 제측하였으며 제측된 데이터로부터 스월값을 계산하였다. 실린더로 충전 되는 공기가 강제스월 유동으로 보고 특정 밸브리프트 위치에서 실린더 내에 설치된 패들의 회전속도와 엔진속도의 비로 정의하였다. 이 때, 엔진속도의 계산은 패들의 회전속도를 측정하는 동일한 조건에서 흡입공기량을 측정하고 이에 해당하는 흡입 공기량을 엔진 회전으로 충전할 수 있는 등가 엔진 속도를 계산하면 된다. 이러한 정의에 따라 스월값을 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{N_D}{N} = \frac{N_D}{G_m} \cdot \frac{\rho \cdot A_k \cdot S}{30} \quad (2)$$

여기서,

- ρ : 공기 밀도
- N_D : 패들 회전수
- N : 흡입 공기량으로부터 계산된 엔진 회전수
- G_m : 흡입공기질량
- A_k : 피스톤 면적
- S : 행정 거리를 나타낸다.

식 (2)에서 정의한 스월값은 특정 크랭크 각도 위치에서의 스월값을 나타낸 것으로 이것을 전체 흡입행정 과정에서 엔진 실린더 내로 흡입되는 유동에 적용하기 위해서 평균 스월값을 정의할 필요가 있다. 평균 스월값 계산은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다⁽¹⁰⁾. 하나의 밸브리프트 위치에서의 정적 스월비에 해당 크랭크 각도 위치에서의 피스톤 속도비의 제곱을 가중함으로써 정적인 스월 측정값에 실제 엔진 운전 조건을 고려한 스월값을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{N_D}{N}\right)_m = \frac{1}{\pi} \int_{x=0}^{a=\pi} \frac{N_D}{N} \left(\frac{V}{V_m}\right)^2 d\alpha \quad (3)$$

$$\frac{V}{V_m} = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\lambda \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}}\right) \cdot \sin \alpha$$

여기서,

- V : 피스톤 속도
- V_m : 피스톤 평균속도
- α : 크랭크 각도
- λ : 엔진 스트로크(stroke)/커넥팅 로드(connecting rod) 길이 이다.

5. 스월값 자동화 측정 결과 및 검토

Fig. 7에 스월 측정 장치 자동화 프로그램의 실행 윈도우 화면을 보여 주고 있다. 좌측에는 스텝모터를 이용한 이송장치가 제어하는 8개의 밸브리프트 값을 나타내고 있으며 각각의 밸브리프트 위치에 대응하는 엔진 크랭크 각도 값을 보여 주고 있다. 크랭크 각도로 측정 간격이 13°임을 알 수 있으며 밸브리프트 위치와 크랭크 각도 입력 값을 다르게 하고 싶으면 바꿀 수 있다. Fig. 7의 중앙 상단부에는 서지탱크 압력 값 (upstream pressure)을 나타내고 있는데 처음 2개의 밸브리프트 위치에서는 서지탱크의 부압력을 400mmH₂O로 유지하고 나머지 밸브리프트 위치에서는 200mmH₂O로 제

어하였다. 이것은 블로어가 동일한 유량을 흡입할 때, 밸브리프트 량이 작을 때에는 공기가 실린더로 들어가는 밸브의 열림 간극이 작기 때문에 실린더 내의 부압이 높게 되고 밸브가 어느 정도 크게 열린 경우에는 부압이 낮아지기 때문에 차등을 두어 압력을 제어하였다. Fig. 7의 중앙 하단의 그림에는 밸브 리프트 위치(측정시간대) 변화에 따른 흡입 공기 질량을 나타내고 있으며 밸브 열림이 클수록 흡입공기 질량이 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 7의 우측 상단에는 밸브리프트 위치 변화에 따른 실린더 내의 패들 회전수 변화를 나타내고 있다. 예상대로 밸브열림(밸브리프트 위치) 이 클수록 회전수가 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 7의 우측 하단부에는 8개의 밸브 리프트 위치에서 스월값을 평균하여 구한 값을 나타내고 있다. 즉, 식 (3)에 정의된 평균 스월값을 계산하기 위해서 보통 이산합을 구하며 본 연구에서의 스월비 계산은 Simson's Rule⁽¹¹⁾을 사용하였으며 평균 스월값은 2.4194를 얻었다.

기존의 수동식 패들형 스월 측정 장치를 자동화한 결과, 작업자가 실린더 헤드를 측정 장치에 장착한 후 자동측정 프로그램을 실행하면 약 3분 정도면 평균 스월 측정을 측정할 수 있었다. 이것은 기존의 수동 방식과 비교하여 획기적

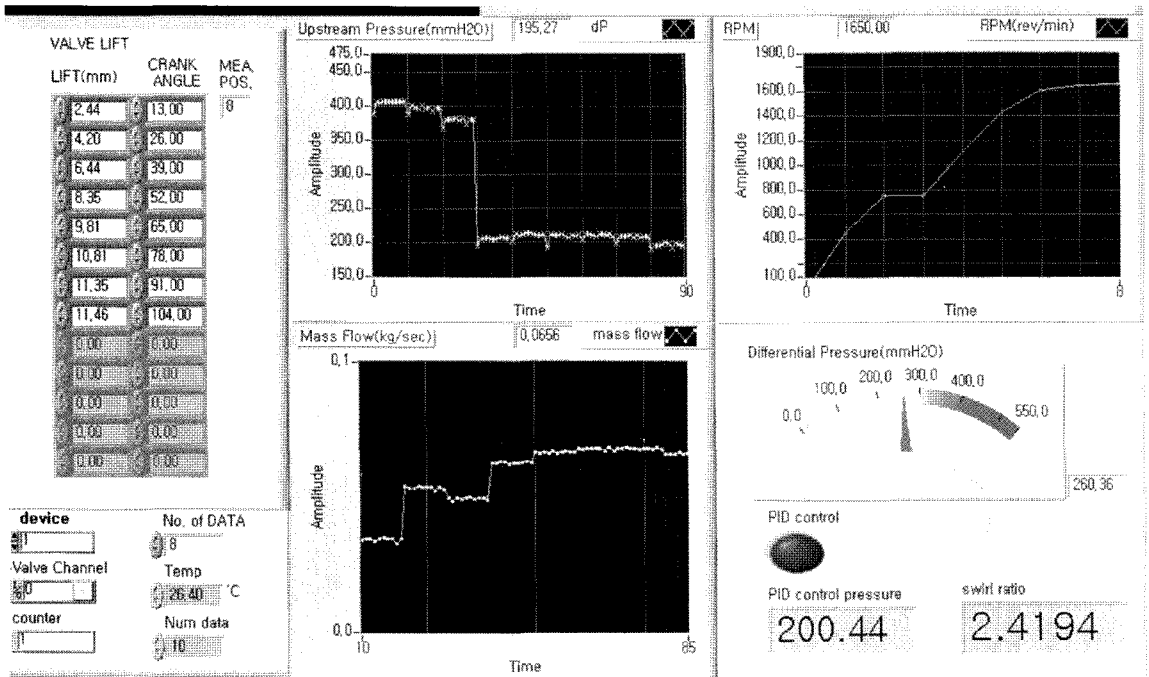


Fig. 7 Execution window of swirl measurement program

으로 측정 시간을 줄인 것이며 작업자가 스웰 측정을 위해 장치 옆에 있을 필요가 없으므로 작업자를 소음 진동의 산업 공해로부터 보호할 수 있다.

6. 결론

IEEE-1394 카메라와 스텝모터를 사용하여 엔진실린더 헤드 흡기 포트 스웰 측정의 자동화를 위한 연구를 수행한 결과, 기존에 작업자의 수동 조작 및 측정에 비교하여 측정 시간이 1/20 수준으로 단축할 수 있었고 측정을 자동화함으로써 스웰비 측정을 작업자가 직접하지 않아도 되어 소음 공해 및 측정시 위험으로부터 보호 받을 수 있는 효과도 있다. 실린더헤드 벨브이송 서지 탱크 압력제어를 자동화함으로써 수작업에 의한 제어와 비교하여 정밀도를 높일 수 있었고 측정의 재현성 및 안정화에 크게 기여하는 효과를 얻을 수 있다.

참고 문헌

- (1) Deslandes, W., Dupont, A., Xavier, B., Charnay, G., and Boree, J., 2003, "PIV Measurements of Internal Aerodynamic of Diesel Combustion Chamber," *SAE paper* 2003-01-3083.
- (2) Lee, C. H., 2001, "Dispersion Characteristics of Sprays under the Condition of Solid Body Rotating Swirl," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 9, No. 6, pp. 16~23.
- (3) Pischinger, F., 1962, "Development work on a Combustion System for Vehicle Diesel Engines," *FISITA Congress*.
- (4) Tippelmann, G., 1977, "A New Method of Investigation of Swirl Ports," *SAE paper* 770404.
- (5) Monaghan, M. L. and Pettifer, H. F., 1981, "Air Motion and its Effect on Diesel Performance and Emissions," *SAE paper* 810255.
- (6) Vafidis, C., 1984, "Influence on Air Flow in a Four-Stroke Model Engine," *Proc. Instn. Mech Engrs*, Vol. 198C, No. 8, pp. 71~97.
- (7) Arcoumanis, C., Bicen, A. F., and Whitelaw, J. H., 1983, "Squish and Swirl-Squish Interaction in Motored Model Engines," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 105, pp. 105~112.
- (8) Desantes, J. M., Benajes, J. V., and Lapuerta, M., 1989, "Intake Port Pipes Evaluation: Comparison between Paddle Wheel and Hot-Wire Anemometry Method," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 203A, pp. 105~111.
- (9) Korea Standard, 1997, "Measurement of fluid flow by means of orifice, Nozzle and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-section Conduits Running Full," A0612.
- (10) Kowalewicz, A., 1984, *Combustion Systems of High Speed Piston I.C. Engines*, Elsevier Science Publishers, pp. 240~243.
- (11) Kuo, S., 1972, *Computer Applications of Numerical Methods*, Addison-Wesley Publishing, pp. 274~283.