

플레넘 챔버 내의 유동 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Flow Characteristics in the Plenum Chamber

정재우*, 이기형**, 이창식**
Jaewoo Chung, Gihyung Lee, Changsik Lee

ABSTRACT

The MPI engine becomes increasingly popular because it meets two requirements of stringent pollutant emission and the lower fuel consumption. Even though MPI engine supplies the same amount of fuel to each cylinder, it is hard to precisely control the air-fuel ratio due to the different amount of air flowing into each cylinder. The uniformity of air-fuel ratio in each cylinder is considerably affected by the plenum chamber configuration. This study is focused on experimentally analyzing the flow characteristics within the plenum chamber. In the present experiment, steady and valve dynamic state flow tests are performed and the flow field inside the plenum chamber is visualized and measured by utilizing a laser sheet visualization technique and a PTV method. These measured results indicate that the flow structure in the plenum chamber is highly influenced by the plenum chamber configurations, suction flow rates, crank speeds and so on.

주요기술용어 : MPI(다점분사), Plenum chamber(플레넘 챔버), PTV(입자 추적 속도 계측법), Flow visualization(유동 가시화), Steady state flow test(정상유동실험)

Nomenclature

θ_i : 밸브 열림 시기 (°CA)	μ_i : 크랭크각에 대한 정적 유량 계수
θ_c : 밸브 닫힘 시기 (°CA)	γ : 공기의 비중량(kg/m ³)
F_i : 크랭크각에 대한 기하학적 열림 면적 (mm ²)	G_a : 실제로 흡입되는 공기유량(kg/s)
g : 중력 가속도 (m/s ²)	ϵ : 공기의 압축계수
	ΔP_i : 흡송차압 (mmAq)

* 정희원, 한양대학교 대학원

** 정희원, 한양대학교 기계공학과

1. 서론

최근 자동차용 가솔린 엔진에 대한 고출력, 저연비의 요구뿐만 아니라 배기가스 규제

한층 강화됨에 따라 환경 오염의 대응 방안으로 다점 분사 방식(MPI) 엔진이 점차적으로 일반화되어 가고 있는 추세이다. 이러한 MPI 엔진은 정밀한 공연비 제어를 위하여 전자 제어식 연료 분사 방식을 채용하여 각 실린더마다 같은 양의 연료를 공급하게 되는데^{(1),(2)}, 이때 각각의 실린더로 유입되는 공기의 양이 균일하지 못하게 되면 일정한 양의 연료를 공급하더라도 공연비가 달라지므로 목적에 부합되는 정밀한 공연비 제어를 할 수 없게 된다. 이러한 이유로 MPI 엔진은 기존의 기화기식 엔진에는 없는 플레넘 챔버(plenum chamber)를 흡기 시스템에 설치하여 각 흡기관에서 발생하는 맥동효과를 완화시킴과 동시에 각 실린더로 일정한 양의 공기를 공급할 수 있도록 설계되어 있다. 그러나 이 플레넘 챔버는 엔진룸에 설치되어지므로, 그 크기와 모양에 많은 제약을 받을 뿐만 아니라 플레넘 챔버 내의 유동이 복잡한 비정상 3차원 유동이므로 목적에 부합되는 최적의 플레넘 챔버 형상 개발을 위하여는 많은 어려움이 따르고 있는 실정이다. 또한 부적절하게 설계된 플레넘 챔버는 각 실린더로 불균일한 공기를 유입하게 되므로 각 실린더마다 연소 압력의 변동으로 인하여 진동이 발생할 뿐만 아니라 정확한 공연비 제어가 불가능하게 된다. 따라서 플레넘 챔버 내의 정확한 유동 특성 분석에 의한 플레넘 챔버의 형상 설계 기술에 대한 필요성이 증대되고 있다.

본 실험에서는 상용 DOHC 가솔린 엔진의 플레넘 챔버 형상과 유사한 아크릴제 플레넘 챔버를 제작하여 형상 변화에 대한 정상 유동 및 밸브 구동 상태에서의 실린더 간 흡입 유량 분포 특성을 측정하였다. 또한 정상 유동 상태와 비정상 유동 상태에 대한 플레넘 챔버 내의 유동장을 레이저 슈트에 의한 가시화 방법과 PTV법을 이용하여 정성적이며 정량적으로 측정하였다. 이러한 실험 결과들을 토대로 플레넘 챔버 형상과 엔진 회전수 변화 및

실린더내 흡입 압력이 챔버내의 유동과 각 실린더로 유입되는 유량에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 실험장치 및 실험 방법

2.1 유량 측정 실험

정상유동 상태에서의 실험은 Fig.1과 같은 정상유동 실험장치를 이용하였으며, 실린더 헤드에 Fig.2에 나타낸 바와 같은 4가지 형상의 플레넘 챔버를 부착하여 실험을 수행하였다.

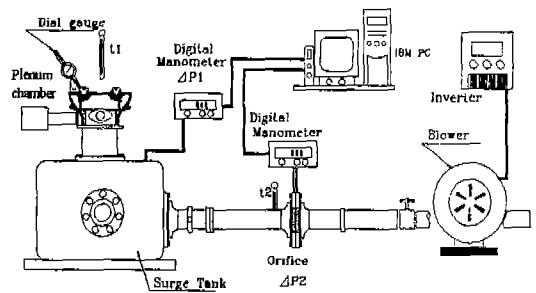


Fig.1 The schematic diagram of steady state flow test rig

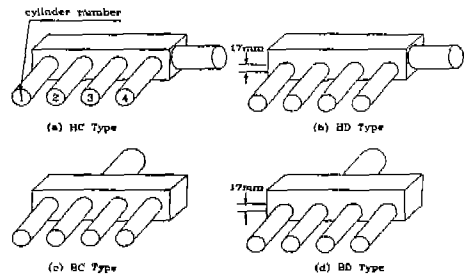


Fig. 2 Test model configurations of plenum chamber

실험시 밸브 리프트는 다이얼 게이지를 이용하여 1mm에서 10mm까지 1mm씩 변화시켰으며, 서어지 탱크 내의 압력과 대기압과의 차압(ΔP_1)은 300mmAq를 유지하도록 하였다. 유량의 측정은 오리피스 유량계를 사용하였다.

본 실험에 사용된 플레넘 챔버의 형상은 기본 체적을 1600cm³(65×75×335mm)로 고정하였고

공기 유입구가 측면에 부착된 형태(H Type)와 전면에 부착된 형태(B Type)를 기본으로 하여, 흡기 매니폴드의 부착 위치가 플레넘 챔버 중앙에 위치한 형태와 중앙에서 하단으로 17mm 아래에 위치한 형태 등 합계 4종류의 형상을 두께 5mm의 투명 아크릴을 사용하여 제작하였다.

다음으로 밸브가 작동되는 비정상 상태에서의 각 실린더별 흡입 유량 특성을 측정하기 위하여 Fig.3에 나타낸 바와 같은 밸브 구동 실험장치를 구축하였다.

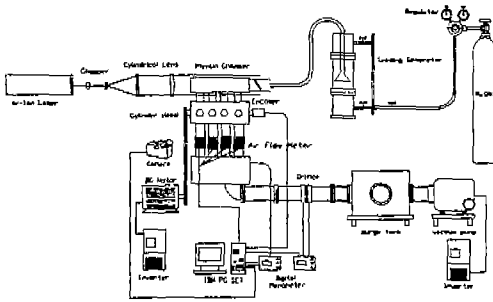


Fig.3 Experimental apparatus for flow visualization and flow rate measurement

밸브 구동 상태에서의 유량 측정 실험은 크랭크 회전속도가 각각 400과 800rpm인 상태에서 실린더내 흡입 차압을 세가지 경우(100, 200, 300mmAq)로 변화시켜 가면서 흡입 유량 측정을 수행하였다. 이때 유량 측정은 각 실린더별로 부착한 유량 센서(Hitachi AFM70-14)를 사용하였다. 이 유량계는 유속변화에 대하여 응답성이 비교적 우수한 바이패스형 열선형 유량계⁽³⁾로서, 보정실험을 수행하여 4개의 실린더에 부착된 유량계 각각의 보정곡선식을 구하여 그 결과를 Fig.4에 나타내었다. 이 보정실험 결과에서 알 수 있는 바와 같이 4개의 유량계는 유사한 보정값을 가지며, 4개의 유량계는 모두 0.98%이내의 오차 범위내에 존재하였다.

이와 같이 검증 과정을 거친 유량 센서의 출력 결과를 챔 각도에 대하여 위상 평균을 한 결과를 Fig.5에 나타내었다. Fig.5의 (a)는 한 개의 실린더에 대한 질량 유동율(g/s)의 측정 결과

이며, Fig.5의 (b)는 4개 실린더의 유량 출력을 동시에 취득한 결과를 보여준다. Fig.(5)의 (a)에서 알 수 있는 바와 같이 유량신호는 본 실험에 사용된 엔진의 흡기 밸브 열림 챔 각도인 136°에 해당하는 기간 동안 발생되어지고 있으며, Fig.5의 (b)에서는 실험 엔진의 흡입 순서인 1-3-4-2 실린더 순서와 동일한 실린더 순서로 흡입 유량이 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 유량 센서의 동특성도 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 4개 실린더의 흡입 유량을 나타내는 Fig.5의 (b)를 살펴보면 각 실린더별로 흡입 유량의 최대값에 차이를 보이고 있으며, 유량에 해당되는 흡입 폭선의 적분 면적도 차이가 있음을 알 수 있다.

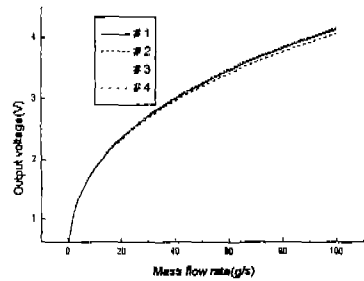
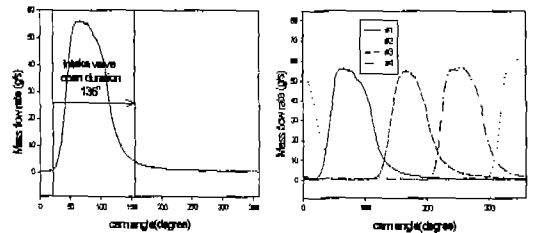


Fig.4 Calibration curves of hot-wire air flow sensors in experiment



(a) Air flow rate (1 cylinder) (b) Air flow rate (4 cylinder)

Fig.5 Example of air flow signal

본 연구에서는 이와 같은 실린더간 유량차이의 원인을 흡입 유속의 측정 결과로부터 파악하기 위하여 다음에 설명하는 유동 실험 방법을 사용하였다.

2.2 유동장 계측 실험

본 실험에서는 밸브 리프트를 일정하게 고정시킨 정상 상태와 변속 모터링한 비정상 상태에 대하여 임의의 크랭크 각도에서 화상을 취득할 수 있도록 캠 샤프트에 엔코더를 부착하고 Add-on Card(ACL-720)를 이용하여 원하는 크랭크 각도에서 플레넘 챔버내의 유동을 획득하였다.

2.2.1 유동 가시화 실험 방법

플레넘 챔버내의 유동 가시화를 위하여 Fig.3에 제시된 바와 같이 레이저 광원부로는 아르곤 이온 레이저(5W, LEXEL사)를 이용하였고, 광원부에서 발진된 레이저 빔을 슈트 형상으로 만들기 위해 원통형 렌즈(cylindrical lens), 초점 렌즈(focal lens), 구형 렌즈(spherical lens)를 이용하여 측정 영역(test section)에 조사하였고, 정성적인 유동 가시화를 위해서는 스틸 카메라(Nikon, F3)와 비디오 카메라(LG, GS-V32)를 이용하여 산란 입자의 궤적을 획득하여 분석하였다. 이때 산란 입자의 유선을 적절한 크기로 획득하기 위해서 카메라 노출 시간을 1/125초로 하였다.

2.2.2 속도 측정 방법

PTV법을 이용한 플레넘 챔버 내의 정량적인 속도 계측을 위해서, 연속 발진광을 다공회전판(chopper)를 이용하여 적절한 펄스로 단속하였으며, 스틸 카메라로 획득한 화상은 수감부의 크기가 6.55mm×4.87mm이고, 공간 분해능이 682(H)×492(V)의 화소수를 가진 CCD 카메라(Toshiba, Model 536)와 공간 분해능이 512(H)×480(V)의 화소수를 가진 화상 취득 장치(DT-Transration, DT-2853)를 이용하여, 디지털 신호로 변환시킨 후 화상 처리 장치에 입력하였다.

2차원 속도 정보가 입력된 화상으로부터 실제 속도 벡터를 산출하기 위해서 단일 화상 입자 추적법(Single-Frame PTV)^{(4),(5)}을 이용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 정상 유동상태에서의 플레넘 챔버 형상에 따른 유동 특성

다음의 Fig.6에 4가지 형상의 플레넘 챔버에 대한 정상 유동 실험 결과를 제시하였다. 제시된 결과는 비교의 편의를 위하여, 식(1)과 같이 정의되는 정적 평균 유량계수⁽⁶⁾ μ_{sm} 으로 나타내었다.

$$\mu_{sm} = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \mu_i F_i d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} F_i d\theta}$$

$$= \frac{\text{흡기시 밸브 유효 연면적}}{\text{흡기시 밸브 기하학적 열림 면적}} \quad (1)$$

$$\mu_i \cdot F_i = \frac{G_a}{\varepsilon \times \sqrt{2 \times g \times \gamma \times \Delta P_1}} \quad (2)$$

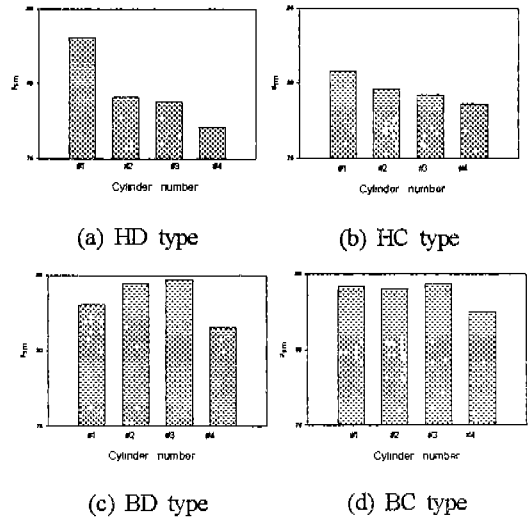


Fig.6 μ_{sm} of each cylinder with various pleenum chamber types

실험 결과 정상유동 상태에서 H type(HC, HD)의 경우는 B type(BC, BD)에 비하여 실린더간 흡입유량의 변동이 크게 나타났으며, 흡기구의 반대편에 있는 1번 실린더에 제일 많은 유량이 편중되는 현상을 보였고, 4번 실린더가 가장 적은 유량을 가지는 것으로 평가 되어졌다. H type중 실린더간 유량 불균일도는 HC type에 비하여 HD type이 더욱 크게 나타났다.

B type은 대부분의 경우 유입구의 위치에 가까운 2번과 3번 실린더의 유량이 큰 경향을 나타내고 있으며, H type 보다는 실린더 간 유량 분포가 균일함을 알 수 있다. B type의 경우에도 BC type 보다는 BD type의 실린더간 유량 불균일도가 큰 경향을 보이고 있다.

이와 같이 플레넘 챔버의 형상에 따라서 실린더 간 흡입 유량의 차이가 발생하는 원인을 분석하기 위하여 먼저 유입구 위치가 좌측인 경우(H type)에 대한 각 흡기관으로 유입되는 유동장을 가시화하여 그 결과를 Fig.7에 나타내었다.

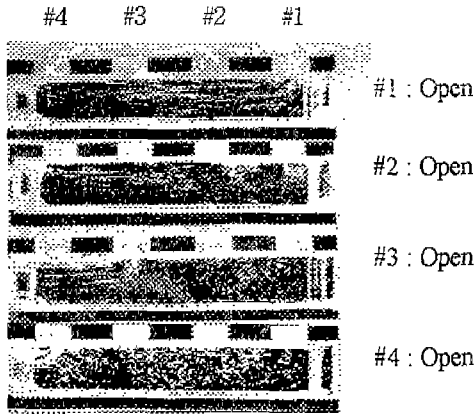


Fig.7 Visualization of flow pattern in the H type plenum chamber (Steady state)

Fig.7에서 알 수 있듯이 1번 밸브가 개방되어 있을 때는 우측 벽면 효과에 의한 일부 정체점을 제외하고는 모두 완만한 곡률로 1번 포트에 유입되어지지만, 2번 밸브가 개방되어 있을 때는 흡입 포트 주위의 압력강하와 벽면에 의한 압력상승으로 재순환 영역이 벽면을 타고 1번 포트 주위에 발생하여 주유동과 다시 충돌하는 양상을 보여주고 있다. 마찬가지로 3, 4번 실린더 쪽의 밸브가 개방되어 있으면 유동의 곡률은 점점 급격해지며 우측 벽면 쪽의 정체 유동이 증가하고, 재순환 유동도 개방 포트 쪽으로 이동하며 그 수도 증가한다. 이 가시화 결과로부터 챔버 내의 유동 저항이 가장 적은 위치인 1번 실린더로의 유

입이 가장 원활함을 알 수 있으며, 이러한 이유로 인하여 Fig.6에 나타낸 흡입 유량 측정 결과 1번 실린더의 흡입 유량이 가장 크게 나타났다고 여겨진다.

다음은 공기 유입구 위치가 중앙에 설치된 플레넘 챔버(B type)에 대한 유동 가시화 실험을 수행하여, 그 결과를 Fig.8에 나타내었다.

본 실험에 사용된 플레넘 챔버의 형태는 공기 유입구의 위치가 흡기 매니폴드 중앙에 부착되어진 좌우 대칭 구조를 하고 있으므로, 1번과 2번 실린더에 대한 유동 패턴만을 나타내었다.

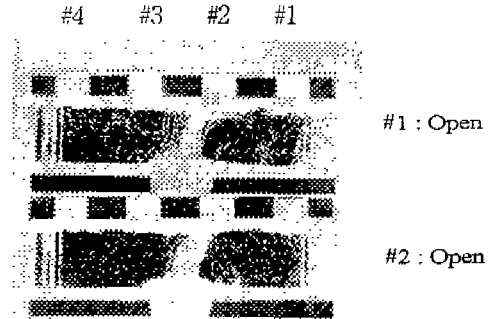


Fig.8 Visualization of flow pattern in the B type plenum chamber (Steady state)

가시화 사진을 분석하면, Fig.7에 나타낸 H type과 달리 1번 실린더의 밸브가 최대로 개방되어 있을 때, 주유동은 흡기 매니폴드 부착 위치의 정면에 충돌하여 흡기관 부착면을 따라 급격한 곡률로 우측의 1번 포트에 유입되는데 이때 우측 벽면 효과에 의한 압력 상승과 포트로의 흡입에 의한 압력 강하로 주유동과 충돌하며, 주유동의 좌측에서는 재순환 유동과 정체점이 발생한다. 2번 실린더의 밸브가 개방되어 있을 때는 공기 유입구로 유입된 주유동이 정면에 충돌하여 일부는 직접 2번 포트에 유입되어지고 다시 우측에 큰 재순환 영역을 형성하여 역회전함으로써 주유동과 재결합하여 2번 포트에 흡입되어지므로, 흡입 유동이 원활하게 이루어져서 2번 실린더의 흡입 유량이 1번 실린더보다 증가됨을 알 수 있다.

3.2 밸브 구동에 따른 비정상 유동 특성

이상과 같은 정상 유동 실험을 통하여 플레넘 챔버 내의 유동 특성과 실린더 간의 흡입 유량 변동 특성과의 상호 관계를 파악하였다. 그러나 실제 엔진의 경우 흡배기 밸브의 개폐 작용에 따른 흡기관 내의 맥동 유동으로 각 흡기 매니폴드 사이에 압력차가 발생하여 흡입 유량에도 영향을 미칠 것으로 생각된다. 따라서 본 실험에서는 밸브 구동 상태에서의 각 실린더에 대한 흡입 유량 특성과 플레넘 챔버 내의 유동 특성을 측정하였다.

3.2.1 비정상 상태에서의 유입구 위치에 따른 흡입 유량 특성

HC 및 HD type의 두가지 플레넘 챔버의 각 실린더 별 흡입 유량 분포 특성을 엔진 회전수 변화에 대하여 측정된 결과를 Fig.9에 나타내었다. 실험 결과 플레넘 챔버의 형상에 관계없이 흡입 차압과 엔진 회전수가 증가할수록 모든 실린더에서의 흡입 유량은 증대되는 경향을 알 수 있다.

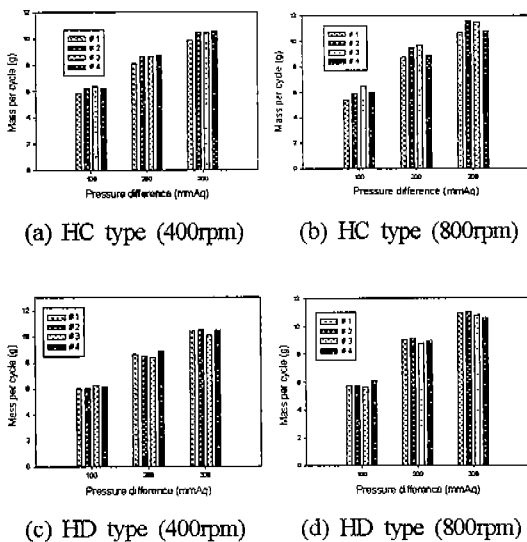


Fig.9 Mass distribution of intake air in the HC, HD type plenum chambers

HC type 플레넘 챔버 형상의 경우 저회전 영역(400rpm)에서는 실린더 간 흡입 유량의 차이가 적게 나타나지만, 고회전 영역(800rpm)에서는 실린더 간 흡입 유량의 분포가 불균일하게 되는 현상을 볼 수 있으며, 최대 유량 및 최소 유량 실린더 간의 차이를 나타내는 불균일도는 HC type이 7.4%로서 HD type의 2.22%보다 더욱 큰 결과를 얻었다.

또한 비정상 상태의 경우 각 실린더로 흡입되는 유량의 확보 순위도 정상 상태일때의 순서 (Fig.6)와는 차이를 보이고 있으며, 운전 조건에 따라서는 순서가 바뀌어지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 실험 결과로부터 모든 운전 조건에 적합한 플레넘 챔버 형상의 최적화는 매우 어려운 기술 과제를 확인하였다.

다음은 중앙공기 유입구 형태의 플레넘 챔버 부착시 흡입 유량 분포를 Fig.10에 나타내었다. 이 플레넘 챔버의 형상의 경우는 정상유동 실험 결과와 유사하게 플레넘 챔버 흡기구 근처의 2번 또는 3번 실린더의 흡입 유량이 상대적으로 크게 나타나는 결과를 보여 주고 있다. B type의 플레넘 챔버 역시 흡입 차압과 회전수 증가에 따라

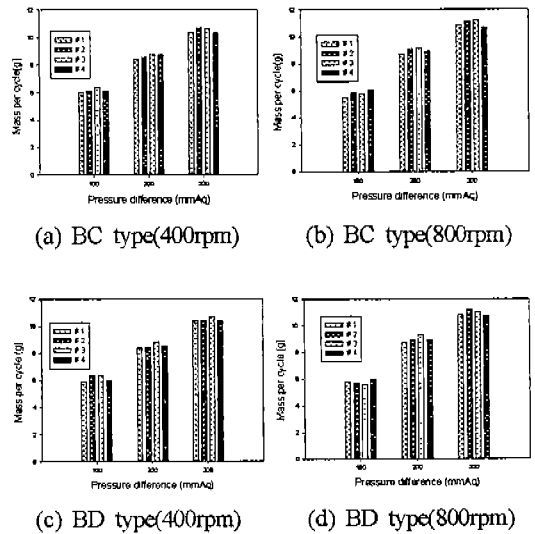


Fig.10 Intake air mass distribution in the BC, BD type plenum chamber

흡입 유량이 증대되는 경향을 나타내고 있으며, 고회전 영역(800rpm)에서의 실린더간 흡입 유량 편차가 크게 나타나고 있다.

B type의 플레넘 챔버 역시 흡입 차압과 회전 수 증가에 따라 흡입 유량이 증대되는 경향을 나타내고 있으며, 고회전 영역(800rpm)에서의 실린더간 흡입 유량 편차가 크게 나타나고 있다.

실린더간 유량 편차를 실린더간 유량 평균에 대하여 백분율로 나타내었을때, 최대 및 최소 유량 확보 실린더간의 유량차이는 BC type에서 최대 2.95%였으며, BD type에 있어서는 3.36%였다. 위 실험 결과로부터 B type이 H type에 비하여 흡기 유입구의 부착 높이에 변화에 대한 영향을 적게 받음을 알 수 있다.

3.2.2 비정상 유동시 플레넘 챔버 내 유동 특성

밸브 구동 상태에 대한 공기 유입구가 측면에 위치한 플레넘 챔버(HC type) 내의 유동장을 가시화하여 그 결과를 Fig.11에 나타내었다.

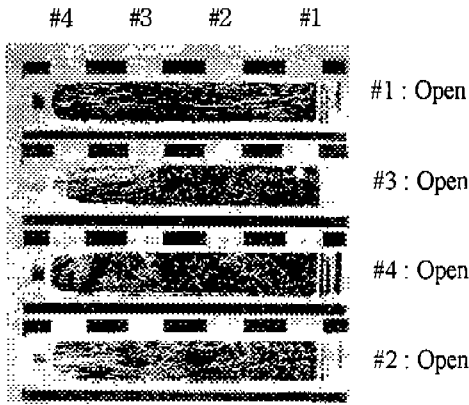


Fig.11 Visualization of flow pattern in the HC type plenum chamber (Valve dynamic state: 400rpm, 100mmAq)

실제 엔진의 폭발 순서(1-3-4-2)에 따라 흡입 유동이 생성되고 있음을 알 수가 있으며, 밸브를 구동시키지 않은 경우와 달리 플레넘 챔버 내의 유동장이 복잡해지고 변동 성분이 증가되고 있음

을 알 수 있다. 이러한 현상의 원인으로서는 비정상 상태인 경우 짧은 시간 간격으로 각 실린더의 흡기 행정이 반복되므로 열려있는 실린더 방향으로 계속해서 흡입하려는 관성보다는 맥동 효과의 영향이 크기 때문으로 판단된다.

3.3 정적인 상태와 동적인 상태의 속도 분포 비교

이상과 같은 정상상태와 비정상 상태에서의 흡입 유동 특성의 차이를 정량적으로 파악하기 위하여 PTV법을 이용하여 플레넘 챔버 내의 속도 분포를 측정된 결과를 Fig.12에 나타내었다.

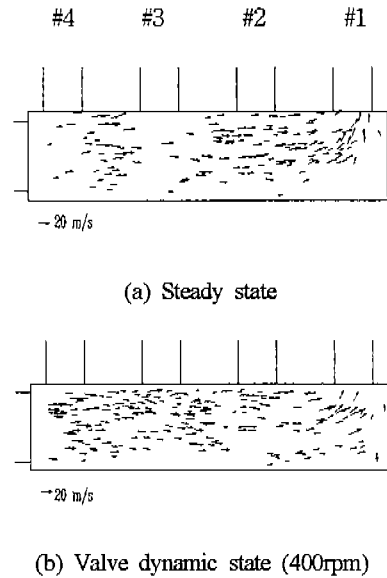


Fig. 12 Flow field in plenum chamber

이 경우 유량 측정 결과 엔진 회전속도 및 흡입압력에 대하여 가장 불규칙한 결과를 나타내었던 HC type의 플레넘 챔버를 선정하였으며, 비정상과 정상 유동 상태에서의 유동 패턴이 상이하게 나타날 것으로 예상되는 1번 흡기 매니폴드 흡입시의 유동장을 측정하였다. 속도 분포를 비교해 보면 정상 상태에서는 1번 실린더 쪽으로 완만한 곡률을 가지고 원활히 흡입되고 있는 속도 패턴을 보여주고 있으나, 밸브 구동시는 유동

의 급격한 변화와 흡입 공기의 관성으로 1번 실린더 쪽 벽면으로의 유동의 쓸림 현상이 나타나 흡기 매니폴드로 유입되는 속도 패턴이 감소하는 현상을 관측할 수 있다. 이 측정 결과로부터 비정상 상태의 경우 정상 유동시와는 다른 유동 특성을 보이는 것을 정량적으로 확인할 수 있었다.

4. 결 론

플레넘 챔버 내의 복잡한 비정상 유동을 분석한 본 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 레이저 쉬트법과 PTV법을 이용하여 플레넘 챔버내의 유동 현상을 정성적일 뿐만 아니라 정량적으로도 파악할 수 있었으며, 정상 상태와 비정상 상태에 대한 유동 패턴의 차이를 정량적으로 확인하였다.

(2) 정상유동 실험 결과 중앙 유입구(Btype)의 플레넘 챔버가 측면 유입구(Htype)의 플레넘 챔버에 비하여 비교적 균일한 실린더별 흡입 유량 특성을 보였다.

(3) 밸브 구동시 4가지 형상의 플레넘 챔버를 부착하여 흡입 유량을 측정한 결과, HD Type의 플레넘 챔버가 다른 Type의 챔버에 비하여, 각 실린더별 유량 분배 특성이 가장 양호하게 나타났으며, HC type은 가장 불량한 분배 특성을 나타내었다.

(4) B type은 H type에 비하여 흡기구 위치 높이의 영향을 적게 받는 결과를 나타내었다.

후 기

본 논문은 한국 과학 재단의 핵심 연구 과제(981-1005-033-2) 연구비에 의해 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. John B.heywood, "Internal combustion engine fundamentals", Mc-Graw Hill, 1988.
2. H.J. Benber, H. Endres and M. Breuer, "New Variable Intake and Mixture Formation for Multi-Valve S.I Engines", SAE paper No.940449, 1994.
3. 西村, 大山, 大須賀, 藤枝, "ガソリン噴射システム用の熱線式空気流量計の吸気脈動特性", 第10回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, pp.109~114, 1992.
4. 이창식, 이기형, 전문수, 임경수, "단일 프레임 입자 추적법을 이용한 흡입 2밸브 가솔린 기관의 실린더내 정상 유동 해석", 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제5호, pp.650~658, 1997.
5. Bahram Khalighi, "Intake-generated swirl and Tumble Motions in a 4-Valve Engine with Various Intake Configuration -Flow Visualization and Particle Tracking Velocimetry ", SAE paper No.900059.
6. 福谷 格, "機關吸氣系の設計指針-限界容積效率(限界給氣比)曲線の豫測", 日本内燃機関工學會論文集, 32卷 4号, 1993.4.