

〈技術論文〉

## 연소실내의 난류강도에 미치는 각종 인자의 영향

한성빈\* · 이상준\*\* · 정연중\*\*\* · 이종태\*\*\*\* · 이성열\*\*\*\*\*

(1993년 10월 11일 접수)

### The Influences of Factors on Turbulence Intensity in Combustion Chamber

Sung Bin Han, Sangjoon Lee, Yon Jong Chung, Jongtai Lee and Songyol Lee

**Key Words :** Turbulence Intensity(난류강도), Ensemble Averaged Mean Velocity(앙상블 평균 속도), Piston Speed(피스톤속도), Inlet Flow Velocity(흡입유동속도), Squish Velocity(스퀴시속도)

#### Abstract

Turbulence intensity caused by piston movement was almost as same tendency as the piston speed. The turbulence intensity was increased from 0.39 m/s to 0.79m/s when mean piston speed increased from 2.33 m/s to 4.67 m/s. In this case the maximum turbulence intensity caused by piston speed was decreased about 82 per cent near the top dead center at the end of compression stroke. The maximum turbulence intensity was created from 12 m/s to 22 m/s when inlet flow velocity was increased from 22 m/s to 45 m/s. Also turbulence intensity caused by inlet flow velocity was linearly increased from 0.97 m/s to 1.96 m/s at top dead center at the end of compression stroke. The ratio of turbulence intensity and mean inlet flow velocity was about 3 per cent for inlet flow velocity.

#### 1. 서 론

스파크 점화기관의 연소과정은 화염전파에 의해 형성되며, 화염전파는 연소실내의 난류유동에 의해 난류 화염전파가 된다.<sup>(1~3)</sup> 또한 연소실내에 생성되는 난류유동은 피스톤속도, 흡입유동속도 및 스퀴시속도의 영향을 받고 있고, 기관의 연소과정에 대한 해석을 하기 위해서는 근본적으로 난류유동에 대한 해석이 이루어져야 하며, 이를 위해서는 난류의 세기인 난류강도에 대한 해석이 필수적이다.<sup>(4)</sup>

따라서, 본 연구에서는 난류유동의 생성에 영향을 미치는 인자, 즉, 피스톤속도, 흡입유동속도, 스

퀴시속도의 변화에 대한 난류유동의 거동을 각각 분리하여 평가하고자 한다.

#### 2. 실험장치

##### 2.1 무윤활기관 및 열선 프로브 이송장치

열선 유속계를 사용하여 난류유동을 측정하기 위해서는 열선 프로브를 연소실에 삽입하고 기관을 모터링 운전하여 측정해야 한다. 그러나 피스톤의 왕복운동으로 인해 연소실로 누출되는 윤활유는 열선 프로브에 손상을 주므로 정상적인 난류유동의 측정이 곤란하다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 실험에 사용된 기관은 연소실로 윤활유가 누출되지 않도록 제작하였다.<sup>(5)</sup>

실험에 사용된 기관은 Fig. 1과 같이 기존의 실린더와 피스톤위에 또 하나의 실린더와 피스톤을 설치하여 2단으로 연결함으로써 상단의 연소실에

\*정회원, 인덕전문대학 기계과

\*\*정회원, 성균관대학교 과학기술연구소

\*\*\*정회원, 경북실업전문대학 자동차과

\*\*\*\*정회원, 성균관대학교 기계공학과

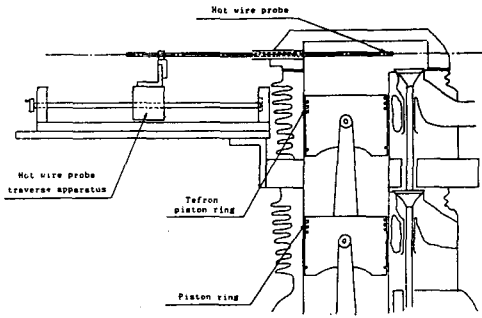


Fig. 1 Schematic diagram of modified engine

윤활유의 누출이 없도록 하였다. 이와 같은 경우 연소실내로 윤활유의 누출은 막을 수 있었지만, 상단의 피스톤운동에 대한 윤활유의 부족으로 인해 상단의 피스톤링과 실린더 사이의 마찰에 대한 문제가 발생된다. 따라서 상단의 피스톤링은 마찰계수가 작고, 내열성이 우수한 테프론으로 제작한 피스톤링을 사용함으로써 상단 피스톤의 무윤활운동이 가능하도록 하였다.

연소실내의 난류유동을 생성하는 인자로는 피스톤속도, 흡입유동속도 및 스퀴시속도이다. 이와 같은 3인자에 대한 난류유동의 생성을 고찰하기 위하여 두 종류의 연소실이 필요하다. 즉, 스퀴시가 없는 L-head 연소실과 스퀴시가 있는 L-head 연소실이다. 이와 같은 필요에 따라 두 종류의 연소실을 아크릴로 가공하여 사용하였는데, 스퀴시가 있는 L-head 연소실은 Fig. 2(a)와 같으며, 또한 스퀴시가 없는 L-head 연소실은 Fig. 2(b)와 같다.

피스톤속도와 흡입유동속도의 영향을 파악하고자 하는 경우는 스퀴시가 없는 L-head 연소실을 사용하였고, 스퀴시속도의 영향을 파악하고자 하는 경우는 스퀴시가 있는 L-head 연소실을 실험에 사용하였다.

또한 연소실내의 여러 위치에서의 난류유동을 측정하기 위하여 열선 프로브를 이동시킬 수 있는 열선 프로브 이송장치를 제작하여 모사기관에 부착

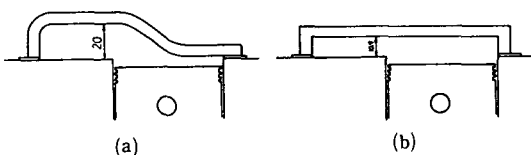


Fig. 2 Combustion chamber with squish area (a) and without squich area (b)

하였다. 열선 프로브 이송장치에는 이송 핸들을 부착하여 열선 프로브의 측정위치를 연속적으로 변화시킬 수 있도록 하였다. 이송장치의 나사부는 피치가 1mm인 나사를 사용하여 이송 핸들 1회전에 열선 프로브를 1mm 이동시킬 수 있으므로 열선 프로브의 위치를 정밀하게 조절할 수 있다.

2.2 실험장치 및 데이터처리장치

Fig. 3은 연소실내의 난류유동을 측정하기 위한 실험장치의 전체적인 개략도를 나타낸다.

실험장치는 크게 나누어서 모사기관, 구동부 및 각 측정부로 나눌 수 있다. 전술한 모사기관은 가변속도 모터(3.7kw)에 직결되어 모사기관의 운전속도를 자유로이 변화시킬 수 있도록 되어 있다.

연소실내의 난류유동은 열선 유속계에 연결된 열선 프로브에 의해서 측정되며 열선 유속계의 출력은 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력되도록 하였다. 이 때 컴퓨터에서는 유속에 비례하는 열선 유속계의 출력신호를 순간 유동속도로 바꾸며 데이터를 저장하도록 하였고, 필요한 경우 프린터를 통하여 출력할 수 있도록 하였다. 이 때 연소실내의 난류유동에 대한 열선 유속계의 출력은 온도와 압력에 영향을 받으므로 연소실의 온도와 압력에 대한 보상을 해 주어야 한다. 온도보상은 열선 유속계에 내장되어 있는 온도보상기에 의해서 이루어지므로 고려할 필요가 없고, 압력보상을 하기 위해서는 연소실내의 압력 채취가 필요하므로 연소실에 압력변환기(KISTLER, 601A)를 삽입하여 측정된 압력신호를 증폭기와 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력시켜야 한다. 이 때 컴퓨터에서는 열평형식을 고려하여 구한 압력 보상에 압력 변환기에서 채취한 압력을 입력하여 열선 유속계 출력에 대하여 압력보상을 할 수 있도록 한다.<sup>(6)</sup>

또한 열선 유속계의 출력전압과 압력변환기에서 채취한 압력을 동기시키기 위하여 기관의 크랭크각에는 피스톤 상사점 위치를 두어 마그네틱 픽업으로 기관의 상사점 시기를 입력시킴으로써 상기 두 신호를 동기시켰다.

열선 프로브로 측정된 순간 유동속도는 앙상블 평균기법을 사용하여 앙상블 평균속도와 난류강도를 구하였다. 이 처리된 결과는 프린터로 출력된다. 이와는 별도로 이들 각각의 신호를 오실로스코프에 입력시켜 크랭크각에 대한 순간 유동속도의 파형을 관찰할 수 있으며, 이것을 X-Y 레코더로

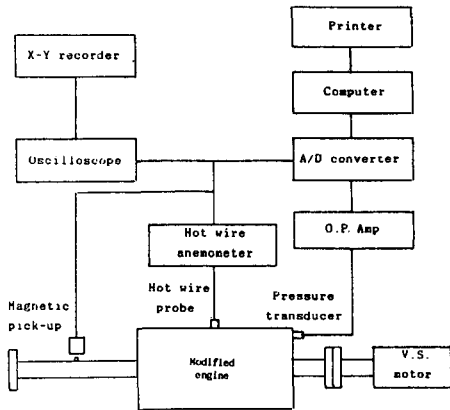


Fig. 3 Schematic diagram of air flow measurement system

기록할 수 있도록 하였다.

### 3. 실험방법

연소실내의 난류유동에 영향을 주는 피스톤속도와 흡입유동속도의 영향을 파악하기 위해서 연소실은 스퀴시가 없는 L-head 연소실을 사용한다. 또한 스퀴시속도의 영향을 파악하기 위해서는 스퀴시가 있는 L-head 연소실을 사용한다. 이 때 유입되는 공기는 실온, 대기압하에서 유입된다. 또한 실험에 사용한 열선 프로브는 I형이며, 이 때의 열선 프로브의 난류유동 측정방향은 피스톤운동방향에 직각방향이다. 각 실험변수에 대하여 앙상블 평균기법을 사용하여 앙상블 평균속도와 난류강도를 구하여 각 인자를 해석하였다. 한 사이클에 대하여 측정된 앙상블 평균속도와 난류강도를 흡입, 압축, 팽창, 배기과정으로 나누어서 난류유동을 분석하였으며, 각 과정에 대하여 특징을 파악하였다.

#### 3.1 피스톤속도를 변수로 하는 경우

연소실내의 난류유동의 생성에 관한 피스톤속도의 영향을 파악하고자 하는 경우에는, 스퀴시속도의 영향을 없애기 위하여 스퀴시가 없는 L-head 연소실을 사용하고, 흡입유동속도의 영향을 없애기 위하여 흡·배기밸브를 닫은 상태에서 피스톤만의 왕복운동이 이루어지도록 한다.

따라서 기관의 운전은 흡·배기밸브를 닫아 놓은 상태이므로 피스톤에 의한 압축행정과 팽창행정만이 반복된다. 이 경우 피스톤속도의 변화는 가변

속도 모터의 회전수 변화에 의하여 가능하다.

기관 운전속도의 변화는 1000 rpm로부터 2000 rpm까지 200 rpm씩 6단계로 변화시킨다. 이 때 변수로 취한 피스톤속도는 각 기관 운전속도에 상당하는 피스톤속도가 된다. 이 경우 연소실에 생성되는 난류유동은 피스톤속도만의 영향이 된다.

#### 3.2 흡입유동속도를 변수로 하는 경우

흡입유동속도를 변수로 하는 경우는 스퀴시가 없는 L-head 연소실을 사용하며, 드로틀 밸브를 전개로 하고 흡·배기밸브의 동작을 정상적으로 동작시켜 기관을 회전시킨다. 이 경우 기관회전수는 피스톤속도를 변수로 하는 경우에서의 기관회전수와 같게 한다.

이 경우 연소실내에 생성되는 난류유동은 피스톤속도와 흡입유동속도의 영향이 복합되어 나타나게 될 것이므로 흡입유동속도의 영향에 의해서 생성되는 난류유동을 파악하기 위해서는 앞에서 이미 파악된 피스톤속도에 의해서 생성되는 난류유동을 감해주면 된다.

#### 3.3 스퀴시속도를 변수로 하는 경우

스퀴시속도를 변수로 하는 경우는 스퀴시가 있는 L-head 연소실을 사용하고 흡·배기밸브를 정상적으로 작동시키면서 연소실내에 생성되는 난류유동을 측정한다. 스퀴시가 있는 L-head 연소실의 체적은 스퀴시가 없는 L-head 연소실과 같으며 흡입유동속도를 변수로 하는 경우의 실험조건과 동일하게 시행한다. 이 때 스퀴시가 있는 L-head 연소실내에 생성되는 난류유동은 피스톤속도의 영향, 흡입유동속도의 영향 및 스퀴시속도의 영향이 복합되어 나타날 것이다. 따라서 스퀴시속도의 영향을 파악하기 위해서는 피스톤속도 및 흡입유동속도의 영향을 제거하여 주면 결과적으로 남는 것은 스퀴시속도에 의하여 생성되는 난류 유동이다.

#### 3.4 측정위치와 측정 사이클수의 결정

연소실내의 순간 유동속도는 측정위치 및 시간에 따라 불연속적으로 변화할 것이므로 연소실내의 난류유동을 파악하기 위해서는 연소실내에서 공간적, 시간적인 변화에 대해서 측정하여야 한다. 그러나 많은 지점의 측정은 데이터의 양이 너무 방대하므로 처리시간과 비용이 많이 든다. 그러나 Fig. 4와 같이 연소실내 25개 점을 측정한 평균 유속과 연소

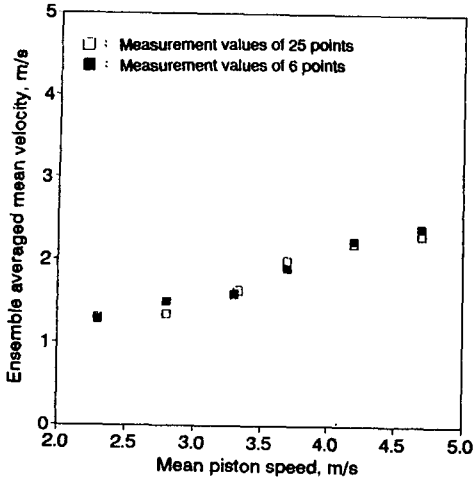


Fig. 4 Ensemble averaged mean velocity as a function of piston speed at measurement values of 25 points and 6 points

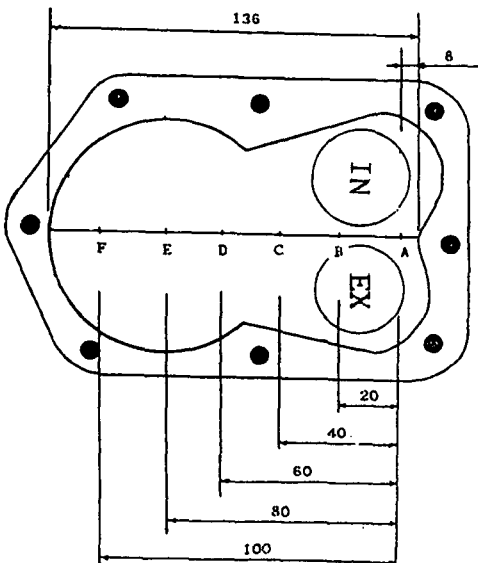


Fig. 5 Configuration of combustion chamber and measurement points

실의 중심선을 따라 6개 점에서 측정된 평균 유속이 큰 오차없이, 거의 일치하여 나타나고 있으므로, Fig. 5 와 같이 연소실 중심선을 따라 등간격으로 연소실내의 난류유동을 측정하였고, 또한 이 6개 점을 연소실의 대표 측정위치로 결정하였다.

위한 적절한 측정 사이클수를 결정해야 한다. 측정 난류유동의 측정 데이터는 오차범위를 결정하기 한 사이클수를 5사이클, 10사이클, 20사이클, 40사이클, 80사이클, 160사이클 등 6단계로 변화시켜

난류강도를 측정하여 각 측정 사이클 수의 변화에 대한 난류강도의 표준편차를 구한 결과, 측정 사이클수가 20사이클 이상에서는 표준편차가 약 10% 정도로 일정하며, 측정 사이클수를 증가시킨다 하더라도 표준편차는 일정하다. 이와 같은 결과로 보아 난류강도를 결정하는 데에 있어서 20사이클 정도를 측정하여도 무방하다고 판단한다. 그러므로 각 변수 및 각 측정위치에 대하여 20사이클씩 측정하였으며, 각 사이클에 대해서는 크랭크각 1°마다 순간 유동속도를 측정하였다.

#### 4. 난류강도에 미치는 각종 인자의 영향

##### 4.1 앙상블 평균속도와 난류강도

기관 연소실내에 생성되는 유동패턴은 비정상 유동이며, 시간의 경과에 따라, 즉, 크랭크각의 경과에 따라 순간 유동속도가 변화한다. 또한 같은 시기에 대하여도 사이클마다 유속의 변동이 있으므로 시간평균기법(time averaged technique)으로는 처리될 수 없으며, 측정된 순간 유동속도는 임의의 크랭크각에 따라 앙상블 평균기법(ensemble averaged technique)으로 처리되어야 한다.<sup>(7,8)</sup> 따라서 앙상블 평균속도 및 난류강도는 사이클마다의 변동이 크므로 20사이클 측정에 의한 순간 유동속도의 측정치로부터 처리된다.

앙상블 평균속도(ensemble averaged mean velocity)  $U(\theta)$ 는 다수 사이클 측정에 의하여 크랭크각 1°마다에 대한 순간 유동속도  $U'(\theta)$ 에 의하여 다음 식으로부터 처리된다.<sup>(9)</sup>

$$U(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U'(\theta + i\pi n) \quad (1)$$

여기서,

$N$  : 데이터를 채취한 사이클수

$n$  : 기관 행정수(4행정기관  $n=4$ )

이다. 그리고 연소실내의 난류강도는 순간 유동속도와 앙상블 평균기법에 의하여 구한 앙상블 평균속도로부터 구할 수 있으며, 앙상블 평균속도와 순간 유동속도로부터 식(2)를 사용하여 난류강도를 결정한다.

$$u'(\theta) : \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U'^2(\theta + i\pi n) - U^2(\theta)]} \quad (2)$$

여기서,

$u'(\theta)$  : 임의의 크랭크각에 대한 난류강도

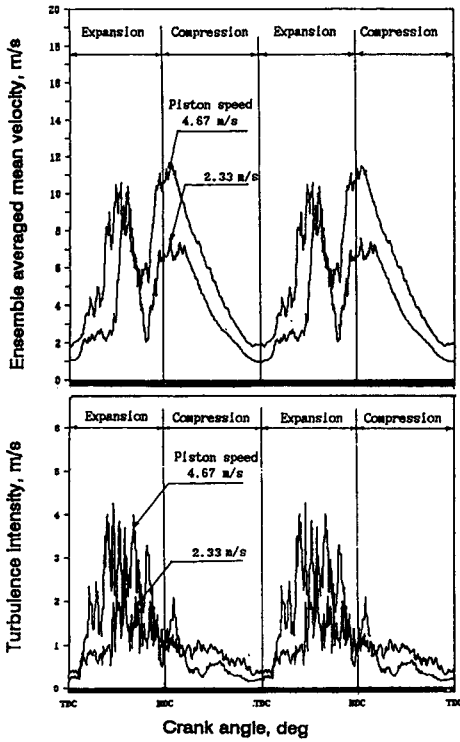


Fig. 6 Ensemble averaged mean velocity and turbulence intensity as a function of crank angle without valve operation

이상과 같이 결정한 난류강도는 연소실내의 화염 속도에 미치는 난류강도의 영향을 해석하는데 사용된다.

Fig. 6은 피스톤속도의 영향을 파악하기 위한 예로서, 흡·배기밸브를 닫은 상태에서, 크랭크각에 대한 앙상블 평균속도와 난류강도를 피스톤 속도의 변화에 대해서 나타낸 것이다. 이 때 연소실내에 생성되는 난류유동은, 피스톤속도의 영향으로 나타날 것이므로, 한 사이클이 팽창행정과 압축행정만이 반복된다. 이 그림은 대표적으로 피스톤 속도가 2.33 m/s일 때와 4.67 m/s일 때를 나타내고 있으며, 측정위치는 Fig. 5에서 스쿼시가 없는 L-head 연소실의 D 점이다.

앙상블 평균속도는 피스톤이 상승하는 압축행정 및 피스톤이 하강하는 팽창행정에서 증가하다 감소한다. 난류강도는 팽창행정에서 앙상블 평균속도와 같은 경향으로 증가하다 감소하고 압축행정에서는 약간씩 감소하는 경향이 된다. 팽창행정에서 난류강도는 앙상블 평균속도와 유사한 경향으로 나타나

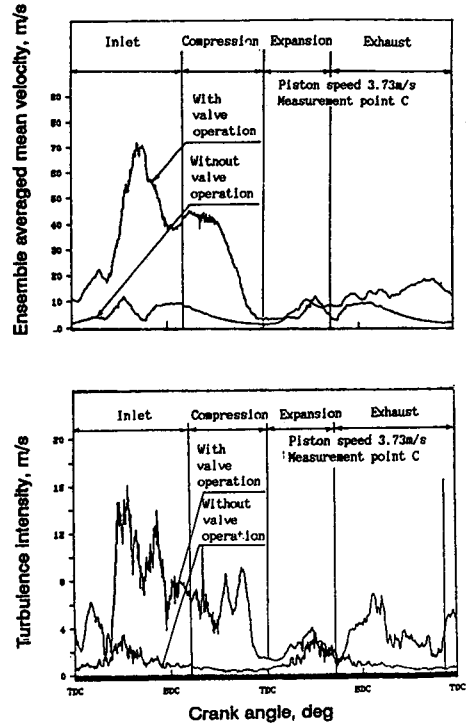


Fig. 7 Ensemble averaged mean velocity and turbulence intensity as a function of crank angle with valve operation and without valve operation

고 있는 것으로 보아 난류강도가 앙상블 평균속도에 비례하여 생성된다는 것을 알 수 있다. 압축행정에서 난류강도가 평균속도와 다른 경향으로 나타나는 이유는, 연소실내의 공기가 압축되는 과정에서 공기의 온도와 압력이 상승함에 따라 공기의 밀도가 상승하게 되고 동점성계수의 증가로 난류강도의 생성이 감소되는 것으로 판단된다. 또한 피스톤 속도에 의하여 생성된 앙상블 평균속도 및 난류강도는 압축행정 끝 상사점에서 감쇄되어 가장 작은 값을 나타낸다.

Fig. 7은 흡입유동속도를 변수로 한 경우에 대한 그림으로서, 크랭크각에 대한 앙상블 평균속도와 난류강도를 나타낸 그림이다. 흡·배기밸브를 닫고 피스톤속도의 영향에 의한 경우와 흡·배기밸브를 정상적으로 동작시켜 흡입유동속도 및 피스톤속도의 영향이 복합적으로 고려된 경우를 비교하고 있다.

이 때의 흡입유동속도를 변수로 하는 경우에 대한 난류유동에서는 피스톤속도의 영향과 흡입유동

의 영향이 복합되어 나타난다. 이 경우의 기관 운전 조건은 피스톤속도가 3.73 m/s이고, 난류유동의 측정점은 Fig. 5의 D점이다.

흡·배기밸브 동작이 있는 경우와 없는 경우와의 차이는 흡입유동속도의 영향에 의한 앙상블 평균속도 및 난류강도가 된다. 흡입유동속도의 영향은 흡입과정의 중반에서 최대가 되고 흡입과정 중반 이후에 점차 감소되며, 압축행정에서 계속 감소된다.

그림에서 보는 바와 같이 흡·배기밸브가 작동하는 경우의 앙상블 평균속도를 피스톤속도의 영향만을 받는 경우와 비교하면, 흡입유동이 있는 경우가 피스톤운동만에 의한 경우보다 월등히 크게 나타나므로, 흡입유동속도의 영향이 연소실내의 난류유동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

그러나 팽창행정에서는 흡입유동속도의 영향이 크게 감소된다.

또한 난류강도는 앙상블 평균속도와 대체로 같은 경향으로 변화하여 흡입과정에서 난류강도의 생성을 보이지만, 압축행정의 끝에서 현저히 감소하여 상사점 부근에서의 난류강도는 다른 구간에 비하여 흡입유동속도의 영향이 크게 나타나지 않는다고 판단된다.

각각의 난류유동 생성인자에 대한 난류강도의 특성을 파악하는 기준으로 압축행정 끝 상사점에서의 앙상블 평균속도 및 난류강도를 파악하고자 한다.

## 4.2 각종 인자의 영향

### 4.2.1 피스톤속도의 영향

피스톤속도의 영향에 대한 난류유동을 평가하기 위하여 난류유동의 측정시기는 압축행정 끝 상사점을 선택하였고, 난류유동의 측정위치는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 연소실의 중심선을 따라 등간격으로 6점을 선택하였다.

Fig. 8은 피스톤속도의 변화에 대한 앙상블 평균속도를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가함에 따라 6점에서 측정된 앙상블 평균속도는 선형적으로 증가하고 있다. 또한 측정위치 변화에 따른 앙상블 평균속도는 피스톤에서 가장 멀리 떨어진 A점에서 가장 작게 나타나고, 피스톤에 점점 가까워질수록 점차 증가하여 F점에서 가장 큰 값을 나타내고 있다. 피스톤속도가 2.33 m/s일때 앙상블 평균속도가 가장 크게 나타나는 F점과 가장 작게

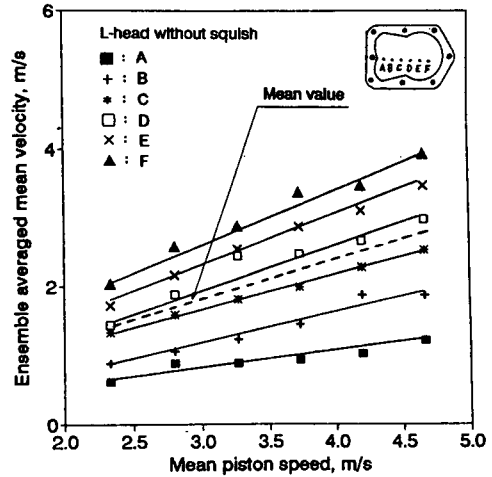


Fig. 8 Ensemble averaged mean velocity at the end of compression stroke as a function of mean piston speed without valve operation

나타나는 A점과의 차이는 1.6 m/s로 나타나고 있다. 또한 피스톤속도가 4.67 m/s일 때는 앙상블 평균속도가 가장 크게 나타나는 F점과 가장 작게 나타나는 A점과의 차이가 2.8 m/s로서 피스톤속도가 증가할수록 최대 측정값을 나타내는 F점과 최소 측정값을 나타내는 A점과의 차이는 점차 증가한다.

Fig. 9는 피스톤속도의 변화에 대한 난류강도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가함에 따라 6점에서 측정된 난류강도는 모두 선형적으로 증가하고 있으며, 앙상블 평균속도의 경향과 같이 F점에서의 난류강도가 가장 크고 A점에서의 난류강도가 가장 작다. 피스톤속도가 2.33 m/s일때 최대 난류강도가 생성되는 F점과 최소 난류강도가 생성되는 A점과의 차이는 0.8 m/s이다. 또한 피스톤속도가 4.67 m/s로 증가함에 따라 최대 난류강도가 생성되는 F점과 최소 난류강도가 생성되는 A점과의 차이는 1.3 m/s가 되며, 피스톤속도가 증가함에 따라 최대 난류강도와 최소 난류강도의 차이는 증가하고 있다.

각각의 피스톤속도에 대하여 6점에서 측정된 앙상블 평균속도 및 난류강도를 산술 평균하여 Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 점선으로 표시하였다. 이 때 점선으로 표시한 산술 평균값이 D점에서의 앙상블 평균속도와 난류강도의 측정값과 거의

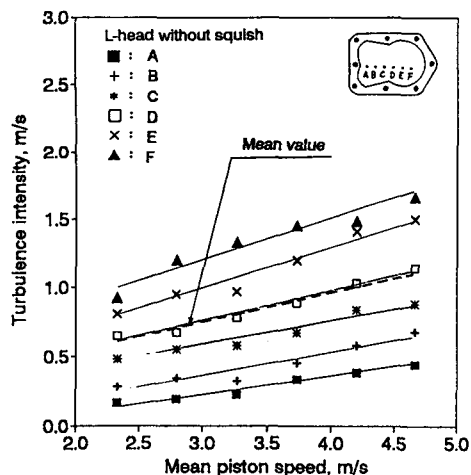


Fig. 9 Turbulence intensity at the end of compression stroke as a function of mean piston speed without valve operation

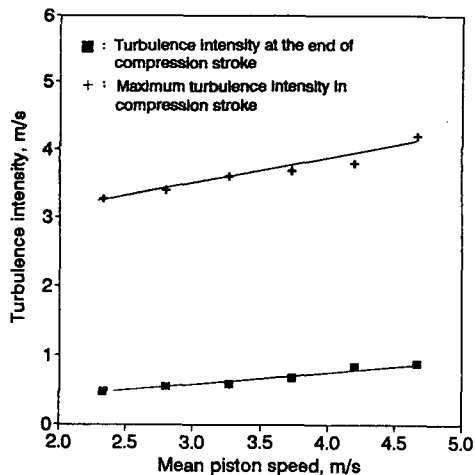


Fig. 11 Maximum turbulence intensity in compression stroke and turbulence intensity at the end of compression stroke as a function of mean piston speed without valve operation

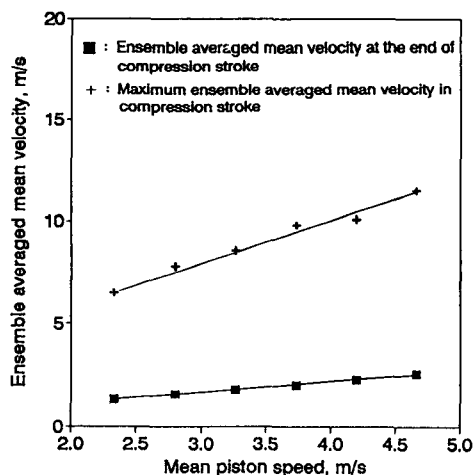


Fig. 10 Maximum ensemble averaged mean velocity in compression stroke and ensemble averaged mean velocity at the end of compression stroke as a function of mean piston speed without valve operation

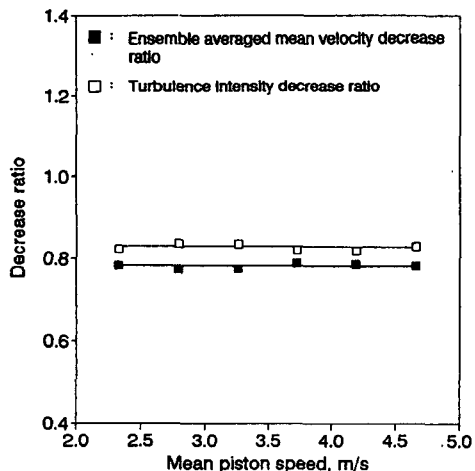


Fig. 12 Ensemble averaged mean velocity decrease ratio and turbulence intensity decrease ratio as a function of mean piston speed without valve operation

비슷한 값을 가지므로 D점의 측정치를 이 연소실의 대표치로 하여도 무방할 것이다.

피스톤속도의 영향에 대한 난류 유동을 해석하는데 있어서 Fig. 10은 압축행정에서 생성되는 최대의 앙상블 평균속도와 압축행정 끝 상사점에서의 앙상블 평균속도를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가할 때 피스톤속도의 영향에 의하여 생성되

는 최대의 앙상블 평균속도는 6.5 m/s로부터 11.5 m/s까지 증가하고 있으며, 압축 행정 끝 상사점에 있어서는 1.4 m/s로부터 2.5 m/s까지 증가하고 있다. 이것은 피스톤속도의 영향에 의하여 6.5 m/s로부터 11.5 m/s까지 생성된 앙상블 평균속도가 압축행정 끝 상사점에 이르러서는 1.4 m/s로부터 2.5 m/s까지 감소된다는 것을 나타내고 있다.

이와 같이 피스톤속도의 영향에 의하여 생성되는

최대의 앙상블 평균속도가 압축행정 끝 상사점에서 감쇄되는 정도를 파악하기 위해 앙상블 평균속도 감쇄율을 식(3)과 같이 정의 하였다.

$$\delta = (U(\theta)_{\max} - U(\theta)_{\min}) / U(\theta) \quad (3)$$

여기서,  $U(\theta)_{\max}$ : 최대의 앙상블 평균속도

$U(\theta)_{\min}$ : 압축행정 끝 상사점에서 최소의 앙상블 평균속도

피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가함에 따라 나타나는 앙상블 평균속도 감쇄율은 Fig. 12과 같이 나타나며 0.78 정도를 나타내고 있다. 이것은 피스톤속도의 영향에 의하여 생성된 앙상블 평균속도가 압축행정 끝 상사점에 이르러서는 78% 정도 감소하고 약 22% 정도 남아있다는 것을 나타내는 것이다.

Fig. 11은 피스톤속도의 영향에 의하여 압축행정에서 생성되는 최대의 난류강도와 압축행정 끝 상사점에서의 난류강도를 나타낸다. 이 그림에서 보면 피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가함에 따라 피스톤속도의 영향에 의하여 생성되는 최대의 난류강도는 3.25 m/s로부터 4.12 m/s까지 선형적으로 나타나고 있으며, 압축행정을 통하여 감쇄하고 남은 압축행정 끝 상사점에서의 난류강도는 0.39 m/s로부터 0.79 m/s까지 선형적으로 증가하고 있다.

이와 같이 피스톤속도의 영향에 의하여 생성된 최대의 난류강도가 압축행정 끝 상사점에서 감쇄되고 남은 최소의 난류강도를 식(4)와 같이 난류강도 감쇄율로 정의하였다.

$$\delta_{ur} = (u'_{\max} - u'_{\min}) / u'_{\max} \quad (4)$$

$u'_{\max}$ : 최대의 난류강도

$u'_{\min}$ : 압축행정 끝 상사점에서 최소의 난류강도

식(4)와 같이 정의한 난류강도 감쇄율은 피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가함에 따라 Fig. 12에 나타나는 바와 같이 약 0.82가 된다. 이것은 피스톤속도의 영향에 의하여 생성된 최대의 난류강도가 압축행정 끝 상사점에 이르러서는 약 82%가 감쇄되고 18%만큼 남아있다는 의미가 된다.

또한 압축행정 끝 상사점에서 피스톤속도의 증가에 대한 난류강도의 증가를 파악하기 위하여 피스톤속도의 변화에 대한 난류강도 생성계수  $\alpha_p$ 를 식

(5)와 같이 정의하였다.

$$\alpha_p = du'_p / dV_p \quad (5)$$

$du'_p$ : 피스톤속도에 의하여 생성되는 난류강도의 변화량

$dV_p$ : 피스톤속도의 변화량

식(5)와 같이 계산되는 압축행정 끝 상사점에서 피스톤속도의 변화에 대한 난류강도 생성계수  $\alpha_p$ 은 0.17이다. 이것은 압축행정 끝 상사점에서의 난류강도는 피스톤속도의 변화에 대하여 난류강도의 기울기가 0.17이 된다는 것을 나타낸다.

그리고 압축행정 끝 상사점에서 피스톤속도의 변화에 대한 난류강도의 생성률을 식(6)과 같이 정의 하였다.

$$\beta_p = \alpha_p / \alpha_{total} \quad (6)$$

$\alpha_p$ : 피스톤속도에 의한 난류강도 생성계수

$\alpha_{total}$ : 전체의 난류강도 생성계수

식(6)을 이용하여 피스톤속도의 변화에 대한 난류강도 생성률  $\beta_p$ 를 구하게 되면 0.31이 되며, 이것은 연소실에 생성되는 전체의 난류강도에서 피스톤속도에 의하여 생성되는 난류강도의 비율이 31%가 된다는 의미이다.

#### 4.2.2 흡입유동속도의 영향

흡입유동속도의 영향을 파악하기 위하여 스쿼시 가 없는 L-head 연소실에서 흡·배기밸브를 작동시키면서 난류유동을 측정하였다. Fig. 13은 흡입유동속도가 22 m/s에서 45 m/s까지 증가함에 따라 흡입유동속도의 영향에 의하여 생성되는 최대의 앙상블 평균속도와 압축행정 끝 상사점에서의 앙상블 평균속도를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면 흡입유동속도가 22 m/s로부터 45 m/s까지 증가함에 따라 흡입유동속도에 의하여 생성되는 최대의 앙상블 평균속도는 55 m/s로부터 83 m/s까지 증가하고 있지만, 압축행정 끝 상사점에서는 2.5 m/s로부터 7.2 m/s까지 감쇄되어 선형적으로 나타나고 있다.

그러므로 식(3)과 같이 정의한 앙상블 평균속도 감쇄율에 의하여, 흡입유동속도가 22 m/s로부터 45 m/s까지 증가함에 따라 앙상블 평균속도 감쇄율은 약 0.93 정도이다.

흡입유동속도에 의하여 생성된 최대 난류강도 및 압축행정 끝 상사점에서의 난류강도를 나타낸 것이 Fig. 14이다. 이 그림에서 보면 흡입유동속도에 의



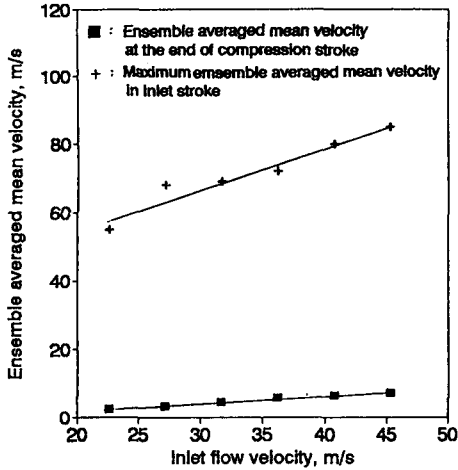


Fig. 13 Maximum ensemble averaged mean velocity in inlet stroke and ensemble averaged mean velocity at the end of compression stroke as a function of inlet flow velocity with valve operation

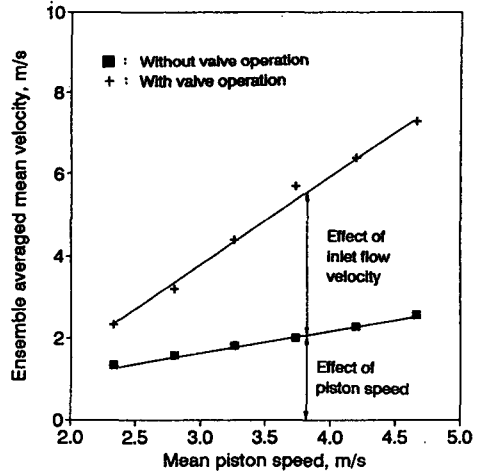


Fig. 15 Ensemble averaged mean velocity at the end of compression stroke as a function of mean piston speed with valve operation and without

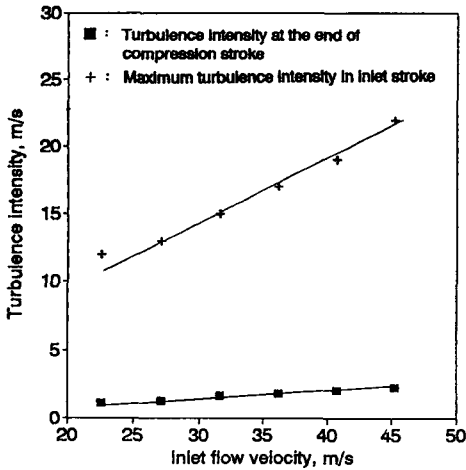


Fig. 14 Maximum turbulence intensity in inlet stroke and turbulence intensity at the end of compression stroke as a function of inlet flow velocity with valve operation

하여 생성된 최대의 난류강도는 12 m/s로부터 21.8 m/s까지 선형적으로 증가하고 있으며 압축행정 끝 상사점에서의 난류강도는 0.97 m/s로부터 1.96 m/s까지 선형적으로 증가하고 있다. 식(4)와 같이 정의한 난류강도 감쇄율에 의하여 흡입유동속도가 22 m/s로부터 45 m/s까지 증가함에 따라 흡입유동속도의 변화에 의한 난류강도의 감쇄율은

0.90이다.

이와 같이 구한 이상불 평균속도 및 난류강도는 흡입유동속도에 의한 영향뿐만 아니라 피스톤속도에 의한 영향도 포함되어 있다. 그러므로 순수한 흡입유동속도의 영향에 의해 생성되는 이상불 평균속도와 난류강도의 영향을 평가하기 위해서는, 스쿼시가 없는 L-head 연소실에서 흡·배기밸브를 정상적으로 작동시킨 경우에서 측정된 이상불 평균속도와 난류강도에서 피스톤속도만에 의해 생성되는 이상불 평균속도와 난류강도의 값을 감해 주어야 한다.

Fig. 15에서와 같이 피스톤속도와 흡입유동속도의 영향이 복합되어 나타나는 이상불 평균속도와 피스톤속도만의 영향에 의하여 생성되는 이상불 평균속도는 모두 피스톤속도의 변화에 대하여 선형적으로 나타나고 있다.

피스톤속도의 영향에 의하여 생성된 이상불 평균속도는 피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가함에 따라 1.3 m/s로부터 2.5 m/s로 증가하고 있으며, 피스톤속도와 흡입유동속도의 영향이 복합되어 나타나는 이상불 평균속도는 2.3 m/s로부터 7.2 m/s까지 증가하고 있다. 그러므로 흡입유동속도만에 의하여 생성되는 이상불 평균속도를 구하기 위하여 피스톤속도와 흡입유동속도의 영향이 복합되어 나타나는 이상불 평균속도에서 피스톤속도에 의하여 생성되는 이상불 평균속도를 빼주면

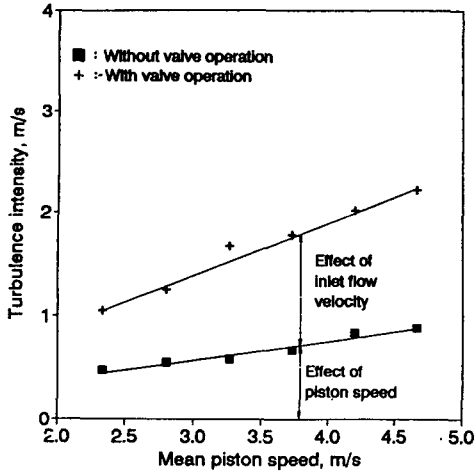


Fig. 16 Turbulence intensity at the end of compression stroke as a function of mean piston speed with valve operation and without

흡입유동속도의 영향에 의하여 생성되는 앙상블 평균속도는 1 m/s에서 4.7 m/s만큼 나타난다.

그리고 Fig. 16에서 보는 바와 같이 압축행정 끝 상사점에서 피스톤속도만의 영향에 의하여 생성되는 난류강도는 0.39 m/s로부터 0.79 m/s까지 증가하고 있고, 피스톤속도의 영향 및 흡입유동속도의 영향이 복합되어 나타나는 난류강도는 0.97 m/s로부터 1.96 m/s까지 증가하고 있다. 그러므로 흡입유동속도가 22 m/s로부터 45 m/s까지 증가함에 따라 흡입유동속도의 영향에 의하여 생성되는 난류강도는 0.58 m/s에서 1.7 m/s만큼 생성되며, 또한 식(7)과 같이 정의한 흡입유동속도의 난류강도 생성계수  $\alpha_i$ 를 이용하여 흡입유동속도에 의해 생성되는 압축행정 끝 상사점에서의 난류강도 생성계수  $\alpha_i$ 를 나타내면 0.03이 된다. 이것은 압축행정 끝 상사점에서의 난류강도는 흡입유동속도의 변화에 대하여 난류강도의 기울기가 0.03이 된다는 것을 나타낸다.

$$\alpha_i = du'_i / dV_i \quad (7)$$

여기서,

$du'_i$ : 흡입유동속도에 의하여 생성되는 난류강도의 변화량

$dV_i$ : 흡입유동속도의 변화량

그리고 압축행정 끝 상사점에서 흡입유동속도의 변화에 대한 난류강도의 생성률  $\beta_i$ 을 식(8)과 같이

정의하였다.

$$\beta_i = \alpha_i / \alpha_{total} \quad (8)$$

여기서,

$\alpha_i$ : 흡입유동속도에 의한 난류강도 생성계수

$\alpha_{total}$ : 전체의 난류강도

식(8)을 이용하여 흡입유동속도의 변화에 대한 난류강도 생성률  $\beta_i$ 을 구하게 되면 0.46이 되며, 이것은 연소실에 생성되는 전체의 난류강도에서 흡입유동속도에 의하여 생성되는 난류강도의 비율이 46%가 된다는 의미이다.

#### 4.2.3 스쿼시속도의 영향

연소실에 생성되는 난류유동은 피스톤운동과 가스교환을 하기 위한 흡·배기밸브의 개폐에 의해서 이루어진다. 그러나 난류유동이 연소실내의 화염전파과정에 영향을 미친다는 것이 밝혀진 후, 연소실형상의 설계는 난류유동을 촉진시키는 방향으로 이루어지고 있다. 이와 같은 연구의 결과로 나타난 것이 스쿼시속도이고 연소실내의 난류유동을 증가시키는 연소실의 설계인자이다.

Fig. 17은 대표적으로 스쿼시가 있는 L-head 연소실에서의 난류강도와 스쿼시가 없는 L-head 연소실에서의 난류강도를 비교해서 나타내고 있으며, 스쿼시가 압축행정 끝 상사점에서 난류강도의 생성에 영향을 미치고 있음을 알 수가 있다.

Fig. 18은 스쿼시가 있는 L-head 연소실에서 측정된 앙상블 평균 속도와 스쿼시가 없는 L-head 연소실에서 측정된 앙상블 평균속도를 나타낸다. 이 그림에서 보면 피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가함에 따라 스쿼시가 있는 L-head 연소실에서의 앙상블 평균속도 3.7 m/s로부터 6.7 m/s까지 선형적으로 증가하고 있으며, 스쿼시가 없는 L-head 연소실에서의 앙상블 평균속도는 2.3 m/s로부터 5.2 m/s까지 증가하고 있다. 따라서 이 경우 스쿼시효과에 의한 앙상블 평균속도의 증가분은 스쿼시가 있는 L-head 연소실에서 생성되는 앙상블 평균속도에서 스쿼시가 없는 L-head 연소실에서 생성되는 앙상블 평균속도를 감하면 된다. 그러므로 스쿼시효과에 의하여 생성되는 앙상블 평균속도는 피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가함에 따라 1.3 m/s로부터 2.5 m/s까지 증가한다.

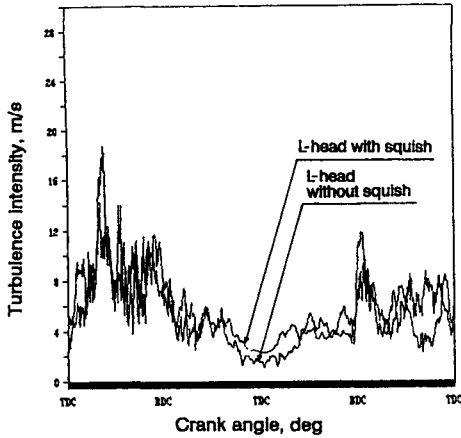


Fig. 17 Turbulence intensity as a function of crank angle(L-head with squish, L-head without squish)

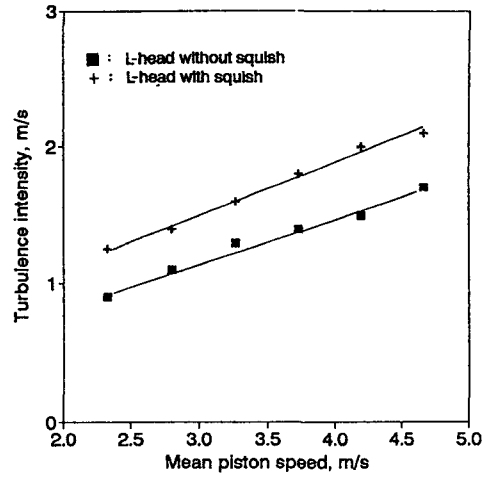


Fig. 19 Turbulence intensity at the end of compression stroke as a function of mean piston speed (L-head with squish, L-head without squish, L-head without squish)

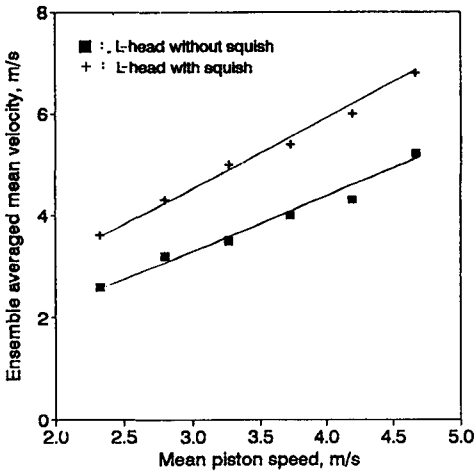


Fig. 18 Ensemble averaged mean velocity at the end of compression stroke as a function of mean piston speed (L-head with squish, L-head without squish)

또한 Fig. 19는 스쿼시가 있는 L-head 연소실에서 측정된 난류강도와 스쿼시가 없는 L-head 연소실에서 측정된 난류강도를 나타낸다. 피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가함에 따라 스쿼시가 있는 L-head 연소실에서의 난류강도는 0.28 m/s로부터 0.56 m/s까지 생성되고 있다. 스쿼시효과에 의하여 생성되는 난류강도 생성계수  $\alpha_s$ 를 식(9)로부터 구하면 0.12가 되어 스쿼시 면적이 연소실내의 난류강도의 생성을 촉진시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

L-head 연소실에서 측정된 난류강도에서 스쿼시가 없는 L-head 연소실에서 측정된 난류강도를 감해 주면 되므로, 피스톤속도가 2.33 m/s로부터 4.67 m/s까지 증가함에 따라 난류강도는 0.28 m/s로부터 0.56 m/s까지 생성되고 있다. 스쿼시효과에 의하여 생성되는 난류강도 생성계수  $\alpha_s$ 를 식(9)로부터 구하면 0.12가 되어 스쿼시 면적이 연소실내의 난류강도의 생성을 촉진시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

$$\alpha_s = du'_s / dV_p \quad (9)$$

여기서,

$du'_s$ : 스쿼시에 의하여 생성되는 난류강도의 변화량

$dV_p$ : 피스톤속도의 변화량

이것은 압축행정 끝 상사점에서의 난류강도는 스쿼시속도의 변화에 대하여 난류강도의 기울기가 0.12가 된다는 것을 나타낸다.

그리고 압축행정 끝 상사점에서 스쿼시속도의 변화에 대한 난류강도의 생성률  $\beta_s$ 를 식(10)과 같이 정의하였다.

$$\beta_s = \alpha_s / \alpha_{total} \quad (10)$$

여기서,

$\alpha_s$ : 스쿼시속도에 의한 난류강도 생성계수

$\alpha_{total}$ : 전체의 난류강도

식(10)을 이용하여 스퀴시속도의 변화에 대한 난류강도 생성률  $\beta_s$ 를 구하게 되면 0.23 이 되며, 이것은 연소실에 생성되는 전체의 난류강도에서 스퀴시속도에 의하여 생성되는 난류강도의 분율이 23%가 된다는 의미이다.

## 5. 결 론

열선 유속계를 사용하여 피스톤속도, 흡입유동속도 및 스퀴시속도의 변화에 대한 연소실내의 난류유동을 측정하였다. 그리고 앙상블 평균속도, 난류강도, 난류 강도 감쇄율, 난류강도 생성계수 및 난류강도 생성률을 구하여 그 특성을 파악하였으며, 각종 인자의 영향에 대한 결과는 다음과 같다.

압축행정 끝 상사점에서 난류강도는 피스톤속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하고, 피스톤속도의 영향에 의하여 생성된 앙상블 평균속도의 감쇄율은 0.78 이고, 난류강도 감쇄율은 0.82 이다. 또한 흡입유동속도의 변화에 의하여 생성되는 앙상블 평균속도의 감쇄율은 0.93이며, 난류강도의 감쇄율은 0.90이다.

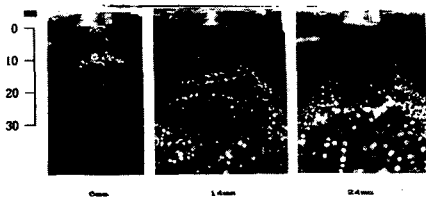
연소실내의 난류유동에 영향을 주는 인자에 대한 각각의 난류강도 생성계수는 피스톤속도의 변화에 대하여 0.17, 흡입유동속도의 변화에 대하여 0.03, 스퀴시 속도에 대하여 0.12 가 되며, 난류강도의 생성계수는 아래와 같이 1차식으로 표현할 수 있다.

연소실내에 난류강도를 생성시키는 인자는 피스톤속도의 영향, 흡입유동속도의 영향 및 스퀴시 영향이 있으며, 난류강도의 생성에 영향을 미치는 난류강도 생성률  $\beta$ 는 피스톤속도의 영향에 의한 난류강도 생성률  $\beta_p$ 이 31%, 흡입유동속도의 영향에 의한 난류강도 생성률  $\beta_i$ 이 46%이고 스퀴시 영향에 의한 난류강도 생성률  $\beta_s$ 이 23%로 나타난다.

## 참고문헌

- (1) Hall, M.J. and Bracco, F. V., 1987, "A Study of velocities and Turbulence Intensities Measured in Firing and Motored Engines," *SAE Paper*, No. 870453, pp. 1~28.
- (2) 浜本嘉輔, 富田榮二, 泉政明, 1986, "密閉容器内燃料-空氣均一混合氣の燃焼に及ぼす亂れの効果," *日本機械學會論文(B編)*, 53卷 488號, pp. 1395~1401.
- (3) Borgnakke, C. Davisand, G. and Tabaczynski, R. J., 1981, "Predictionsof In-Cylinder Swirl Velocity and Turbulence Intensity for an Open Chamber Cup in Piston Engine," *SAE Paper*, No. 810224, pp. 964~978.
- (4) Tabaczynski, R. J., 1977, "A Turbulent Entrainment Model for Spark Ignition Engine Combustion," *SAE Paper* 770647, pp. 2414~2433.
- (5) 이상준, 정연중, 이종태, 이성열, 1989, "내연기관 연소실내의 난류유동에 관한 피스톤운동, 흡입유동 및 스퀴시효과," *대한기계학회 춘계학술대회 초록집(II)*, pp. 196~200.
- (6) 脇坂知行, 浜本嘉輔, 1984, "熱線流速計," *內燃機關*, Vol. 23, No. 295, pp. 21~28.
- (7) 八田桂三, 淺沼強, 松木正勝, 1979, "內燃機關計測ハンドブック," *朝倉書店*, pp. 11~68, 270~278.
- (8) Hinze, J. O. 1959, *Turbulence and Introduction to ItsMechanism and Theory*, McGraw Hill Book Co., pp. 85~95.
- (9) Witze, P. O. 1977, "Measurements of the Spatial Distribution and Engine Speed Dependence of Turbulent Air Motion in an I. C. Engine," *SAE Paper*, No. 770220, pp. 1012~1023.

◎ 바로 잡습니다. (1993년 12월호에 게재된 논문(p. 3179~3186)의 p. 3182, Fig. 6이 인쇄과정중 누락되어 첨부합니다.



Injection pressure : 1.6 kgf/cm<sup>2</sup>  
Pulse width : 5 ms

Fig. 6 Disintegration shape after Injection