

〈論 文〉

## 흡입포트형상에 따른 모터링엔진내 압축과정 난류특성 연구

강건용\* · 이진욱\* · 정동수\* · 정석용\*\* · 백제현\*\*\*

(1993년 8월 12일 접수)

### The Effect of Intake Port Configurations on the Turbulence Characteristics During Compression Stroke in a Motored Engine

Kern-Yong Kang, Jin-Wook Lee, Dong-Soo Jeong, Seok-Yong Jeong and Jae-Hyun Baek

**Key Words :** Seeding Particle(산란입자), Optically Accessed Engine(가시화엔진), Laser Doppler Velocimetry System(LDV장치), Tumble Flow(툼블유동), Turbulence Intensity(난류강도), Cutoff Frequency(컷오프주파수), Turbulence Kinetic Energy(난류 운동에너지), Cyclic Variation(사이클변동), Cycle Resolved Analysis(사이클리졸브드 해석), Integral Time Scale(적분시간척도), Integral Length Scale(적분길이척도), Frequency Analysis(주파수해석)

#### Abstract

The combustion phenomena of a reciprocating engine is one of the most important processes affecting performance and emissions. One effective way to improve the engine combustion is to control the motion of the charge inside a cylinder by means of optimum induction system design, because the flame speed is mainly determined by the turbulence at compression (TDC) process in S. I. engine. It is believed that the tumble and swirl motion generated during intake breaks down into small-scale turbulence in the compression stroke of the cycle. However, the exact nature of their relationship is not well known. This paper describes cycle resolved LDV measurement of turbulent flow inside the cylinder of a 4-valve engine under motoring(non-firing) conditions, and studies the effect of intake port configurations on the turbulence characteristics using following parameters ; Eulerian temporal autocorrelation coefficient, turbulence energy spectral density function, Taylor micro time scale, integral time scale, and integral length scale.

#### 1. 서 론

연소과정에 중요한 영향을 미치는 압축말기 연소실내 난류강도는 흡입과정시 생성된 유동의 에너지

가 압축과정을 거치면서 작은 스케일의 에디(eddy)로 깨지면서 발생되며,<sup>(1)</sup> 연소과정시 이러한 에디들이 초기 화염생성속진과 화염전파속도를 증진시킨다. 흡입과정이 실린더내 생성되는 유동은 연료입자 미립화에 효과적이며, 압축과정동안 깨어지면서 난류를 생성시킬 수 있기 때문에 엔진설계에 있어 중요한 인자가 된다. 흡입과정은 흡입포트형상에 따라 다르겠으나, 실린더의 점선방향으로

\*정회원, 한국기계연구원 동력기계실

\*\*정회원, 경상대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*정회원, 포항공과대학교 기계공학과

선회하는 스윙유동과 실린더헤드와 피스톤윗면을 경계로 하는 실린더 축방향 선회운동인 텀블유동으로 크게 나눌 수 있다. 흡기밸브가 두개인 4밸브 엔진의 연소실형상에서는 스윙과 같은 비대칭유동의 생성이 어렵고, 두개의 흡기밸브를 나란히 위치시키는 팬트루프(pent-roof)형태로 만듦으로서 텀블유동을 생성시키는 것이 효과적인 것으로 알려져 있다.<sup>(2~6)</sup>

실린더내 난류유동 측정은 초기에는 열선유속계(hot wire anemometry)를 이용하였으나,<sup>(7,8)</sup> 근래에는 엔진난류측정에 있어서 열선유속계의 적용이 어려움으로 인해,<sup>(9)</sup> LDV(laser doppler velocimetry)를 이용한 측정연구가 대부분을 차지하고 있다.<sup>(10~13)</sup> LDV를 이용한 엔진유동 측정은 유동장을 교란시키지 않으면서 정확한 순간속도 측정이 가능한 장점을 갖지만, 산란입자 공급기술과 가시화엔진 제작등 기술적으로 어려움이 따르는 등 사용에 많은 시간이 소요된다. 더구나 엔진 실린더내 난류유동은 비정상 유동특성을 가지면서, 정확한 사이클의 주기적 유동특성을 갖지 않고, 유동의 생성 및 소멸시간이 매우 짧은 유동특성을 갖기 때문에 측정에 어려움이 많다.

측정된 데이터로부터 평균속도와 난류강도를 산출하는 방법에 있어서는 크랭크각도 폭내에서 앙상블평균을 이용해 평균속도를 구하고, 이에 대한 변동성분의 rms(root mean square)값을 난류강도로 정의하는 앙상블평균(ensemble average)방법<sup>(14)</sup>과, 난류정의에 있어서 사이클변동을 배제하기 위해 매사이클당 평균속도와 난류를 구해 처리하는 사이클리졸브드해석(cycle resolved analysis)방법<sup>(15~17)</sup>이 있다. 엔진난류의 정확한 특성규명을 위해서는 사이클리졸브드 속도해석이 필수적인데, 이를 위해서는 크랭크각도에 대해서 거의 연속적인 속도 신호가 필요하기 때문에 LDV측정시, 높은 데이터 발생률(data rate)을 요구함으로 고도의 기술이 요구된다.

본 연구에서는 4밸브 엔진의 텀블유동변화에 따른 난류특성변화를 규명하기 위하여, 흡입과정으로서 다른 두개의 흡기포트형상 변화에 따른 압축말기 난류특성을 사이클리졸브드 LDV측정을 통하여 연구하고자 한다. 난류속도측정은 데이터발생률을 높이기 위하여 전방산란모드(forward scattering mode)를 이용한 LDV실험을 하였고, 측정된 데이터로부터 주파수특성을 분석하여 엔진난류특성 변

화를 고찰하였다. 엔진난류 속도해석에서는 디지털 필터링 방법을 이용한 컷오프주파수(cutoff frequency)결정방법에 대한 연구와, 엔진난류 주파수특성 해석으로는 시간 자체상관계수(eulerian temporal autocorrelation coefficient), 난류에너지 스펙트럼(turbulence energy spectral density function), 미소시간척도(taylor micro time scale), 적분시간척도(integral time scale), 그리고 적분길이척도(integral length scale)을 분석함으로서 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

단기통 가시화엔진 모터링실험을 위한 실험장치는 Fig. 1과 같이 LDV시스템과 가시화엔진으로 크게 구성된다. 단기통 가시화엔진을 원하는 회전수로 빠르게 구동되게 하는것은 광학창의 산란입자부착 가능성을 줄이는데 효과적이므로, DC모타의 장점을 이용하여 단기통 가시화엔진을 10마력의 DC모타로 벨트구동하였으며, 속도변동은 2 rpm이내로 조절할 수 있도록 하였다. 엔진크랭크축에 회전당 720개 펄스가 발생되는 엔코더를 설치하여, 크랭크각도 0.5도 해상도를 갖도록 하였으며, 전자회로모듈을 제작하여 1사이클 1번씩 흡입 TDC신호를 발생시키고 LDV 데이터가 필요한 크랭크각도

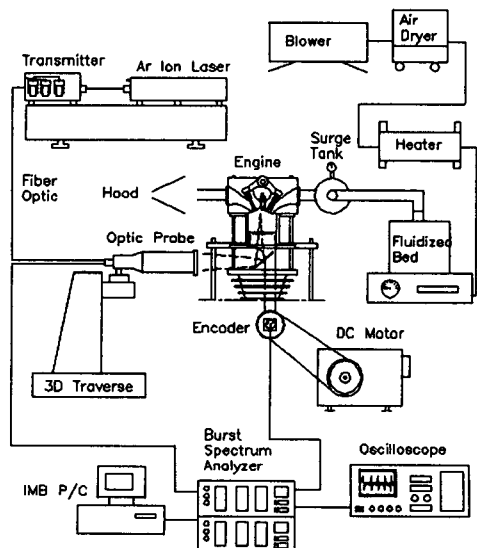


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

범위를 선택할 수 있도록 하였다.

LDV(Dantec Co.)는 5와트의 아르곤-이온 레이저와 광섬유 전송 트랜스미터, 3차원 이송장치, 그리고 신호처리기인 BSA(burst spectrum analyzer)로 구성된다. BSA는 PM튜브로부터 들어오는 플린지(fringe) 통과신호를 고속으로 FFT하여 주파수 영역에서 도플러신호를 판별하는 것으로서, 80 MHz의 해상도와 -5 dB의 S/N비를 갖는다.<sup>(18)</sup> 속도의 방향성검지와 페데스탈 노이즈제거를 위해 브라그셀(bragg cell)을 사용하여 주파수편이를 하였으며, 1차원 속도측정을 위해 파장 514 nm의 초록색 레이저빔을 사용하였다. 초점길이 310 mm의 수광렌즈를 사용하였고, 측정체적내의 플린지 간격은 2.12 μm이다.

가시화엔진은 직경 56.5 mm, 행정길이 49.5 mm, 압축비 8.5의 소형 가솔린엔진으로서, 흡기밸브와 배기밸브가 각각 2개씩인 팬트루프형태의 연소실을 갖고 있다. LDV측정을 위해 피스톤을 연장하여 표면에 코팅된 반사거울을 설치할 수 있도록 하였고, 피스톤윗면은 두께 12 mm의 석영유리(quartz)를 장착하여 레이저광선이 연소실내로 들어올 수 있도록 하였다. 또한 피스톤의 기밀과 윤활을 위해 바이톤링과 테프론-카본링을 중첩하여 사용하였다. 가시화엔진의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다.

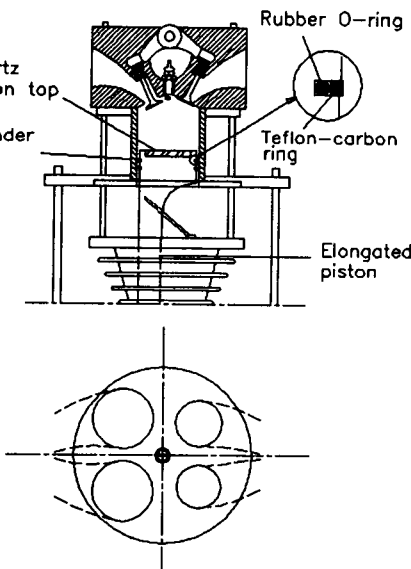


Fig. 2 Single cylinder optically accessed engine

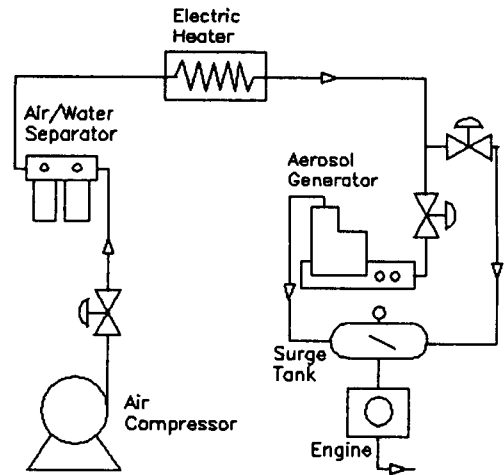


Fig. 3 Schematic diagram of particle seeding line

LDV측정을 위한 산란입자공급은 Fig. 3에서와 같이 공기를 건조시킨 후, 입자부유대(fluidized bed: TSI Co.)에서 산란입자를 부유시켜 서지탱크를 통하여 엔진에 효율적으로 공급되도록 하였다. 흡입 공기를 건조시키는 것은 산란입자의 관측창 부착방지에 효과적이므로, 송풍기를 통해 나온 공기를 냉동형제습기(Arrow Co.)를 통과시켜 -2°C 이슬점(dew point)을 갖는 건조한 공기로 만든 후, 전기히터를 통해 50°C까지 가열하여 건조공기의 질을 높여 공급하였다. 실험에 사용한 산란입자는 평균입경이 1 μm의 산화알루미나 분말이다.

2.2 실험방법

LDV실험은 전방 산란모드로 수행하였다. 전방 산란모드는 측정체적에서의 데이터발생률 및 유용률은 매우 높은 반면, 측정점에서의 광학조정(optic align)이 매우 어려워져서, 정교한 조정이 요구된다. 따라서 레이저빔의 통과매체인 초점렌즈, 관측창, 반사거울을 엔진진동으로부터의 분리가 필수적이므로, 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 이들을 배치하였다. 여기서 틸트체적의 양면에 길이 20 mm, 높이 5 mm, 두께 4 mm의 관측창 2개를 부착함으로써 레이저빔이 들어가고 산란광은 반사거울을 거쳐 렌즈로 포집되도록 하였다.

흡기포트내 유동변화를 위해 Fig. 5와 같은 기존 포트(conventional port) 및 텀블포트(tumble port)에 대해 실험을 수행하였다. 측정점은 TDC로부터 2 mm 윗면의 실린더중심의 1점이며, 엔진회전수는

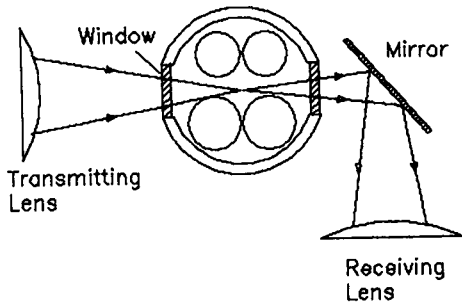


Fig. 4 Engine-LDV optics arrangement(forward scattering mode)

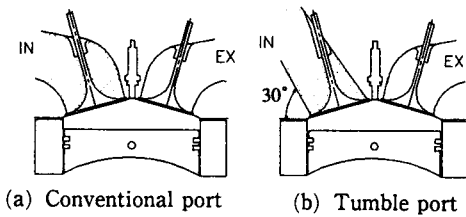


Fig. 5 Intake port configurations

1000 rpm이다. 이때 데이터발생률은 40~60 KHz였고, 데이터유용률은 60%이상의 조건이었다. 1점에서 측정데이터수는  $4 \times 10^5$ 개로 하여 측정값의 사이클수가 40이상이 되도록 하였다. 측정된 데이터는 노이즈제거를 위해 매 크랭크각도에서 표준편차 4 이상의 값을 버린후, 사이클리졸브 해석의 초기 단계로 인터폴레이션과 디지털필터링을 통해 각 사이클별 난류성분을 얻었다.

2.3 실험오차 해석

엔진모터링시 엔진속도변동으로 인한 오차는 0.2%이내이다. 엔진 크랭크각도는 0.5도의 해상도로서, TDC세팅시 전체사이클에 대한 오차는 0.1%이내이다. LDV측정시 속도바이어스 측정에 대한 약간의 오차가 있다. 속도바이어스는 낮은속도의 산란입자보다 더 큰 속도의 입자들이 측정체적을 통과하기 때문에 발생한다.<sup>(13)</sup> 본 연구에서의 측정된 데이터의 노이즈제거를 위해 표준편차 4이사의 데이터는 버려졌고, 이들은 통상적으로 100개 이내이다(0.05%). 앙상블평균과 rms변동량의 산출은 제한된 수의 사이클값으로 계산되어 통계학적 샘플링오차가 발생한다. 일반적으로 평균에 있어서 오차는 상대 rms변동을 측정데이터수의 제곱근으로 나눈 값에 비례한다. 마찬가지로 rms변동에 있

어서 오차는 측정데이터수의 제곱근에 역비례한다. 평균속도와 난류강도 산출에 대해 3.2%이내, 사이클변동량 산출에 대해 22%이내의 오차를 갖는 것으로 예측된다.

3. 엔진난류 정량화

3.1 난류속도 해석

사이클리졸브 해석은 매 사이클내에서 평균속도인 벌크속도(bulk velocity)의 계산이 요구된다. 벌크속도  $\bar{U}$ 는 속도  $U$ 와 아래와 같이 관계된다.

$$U(\theta, \Delta\theta, i) = \bar{U}(\theta, \Delta\theta, i) + u(\theta, \Delta\theta, i) \quad (1)$$

여기서,  $\theta$ 는 크랭크각도,  $\Delta\theta$ 는  $\theta$ 에 대한 크랭크각도 폭, 그리고  $i$ 는  $i$ 번째 사이클을 의미하고,  $u$ 는 벌크속도에 대한 순간속도의 변동, 즉 난류이다. 크랭크각도 계산폭은 LDV 측정값이 산란입자가 측정체적을 통과할 때마다 시간에 대해 불규칙하게 발생되기 때문에, 폭  $\theta \pm \Delta\theta/2$ 내에서 측정된 속도값을 크랭크각도  $\theta$ 의 값으로 인정하기 위해서 필요하다.

앙상블평균속도와 다르게 사이클리졸브 해석의 벌크속도는 사이클마다 변할수 있다. 크랭크각도에 대한 속도데이터로부터 매 사이클에서의 벌크속도를 결정하는데 사용되는 몇가지 방법이 있다. 짧은 시간간격에서의 시간평균을 수행하는 시간평균방법,<sup>(7)</sup> 다항식을 이용한 커브피팅 방법,<sup>(14)</sup> 그리고 디지털 저역역통과 필터링<sup>(15)</sup>의 3가지 방법이다. 결국 위 3개의 모든 방법들은 순간 속도데이터를 저역역필터링하는 기능을 한다. 본 연구에서는 매 사이클의 벌크속도를 구하는데 디지털 저역역통과 필터링(digital low pass filtering)을 사용하였다.

디지털필터링에서는 사이클내 순간속도값을 벌크속도와 난류로 나누는 컷업주파수(cutoff frequency)선정이 매우 중요하다. 컷업주파수가 너무 높을때 벌크속도에 고주파성분인 난류가 포함되어 난류량의 감소와 더불어 난류에 저주파성분인 벌크속도 성분이 포함되어 난류계산에 오차를 유발한다. 따라서 컷업주파수는 실린더내 유동특성에 따라 그 값이 변해야 한다. Liou 등<sup>(15)</sup>은 컷업주파수는 연소특성과 매우 밀접한 관계가 있음을 제시하였으며, 기타 많은 논문에서는 순간속도 데이터의 앙상블평균된 평균속도에 존재하는 최대주파수를 컷업주파수로 정하고 있다. 그리고 컷업주파수를 결정

하지 않고 몇가지 경우로 변화시키면서 그에 따른 영향을 검토한 많은 논문이 있다.<sup>(5,20)</sup> 지금까지 알려진 컷업주파수에 대한 주요 사실은 실린더내 유동이 스웰이나 텀블유동 등 뚜렷한 평균유동이 생성되지 않을때가 뚜렷한 유동이 있을때 보다 컷업주파수가 다소 크게 나타난다는 것이다.<sup>(15)</sup>

Catania 등<sup>(16,21)</sup>은 컷업주파수 결정에 있어서 보다 체계적인 방법을 제안하고 있다. 본 연구에서는 이 방법을 이용했는데, 다음의 두 단계로 설명된다. 첫번째 단계는 벌크속도의 컷업주파수에 대한 정보를 알기위해 측정된 LDV 데이터셋을 시간평균(time average)과 앙상블평균(ensemble average)을 통해 필터링된 평균속도곡선을 만든다. 여기서, 시간평균하는 크랭크각도 폭은 8도로 하였다. 두번째 단계는 첫번째 단계에서 얻어진 필터링된 평균속도의 주파수특성 분석을 통해 이 곡선에 존재하는 최대 주파수를 찾아서 컷업주파수로 결정한다. 디지털필터링을 수행하기 위해 측정데이터를 0.5도 간격으로 보간(interpolation)하였으며, 이 과정에서 같은 각도위에 있는 LDV 속도데이터들은 산술평균된다.

엔진의 매 사이클에 대해 벌크속도를 결정하후, 벌크속도의 앙상블평균  $\bar{U}_{EA}$ , 벌크속도의 rms변동  $\bar{U}_{rms}$ 는 다음식으로 계산된다.

$$\bar{U}_{EA}(\theta, \Delta\theta) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \bar{U}(\theta, \Delta\theta, i) \quad (2)$$

$$\bar{U}_{rms}(\theta, \Delta\theta) = \left[ \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} [\bar{U}(\theta, \Delta\theta, i) - \bar{U}_{EA}(\theta, \Delta\theta)]^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

벌크속도의 앙상블평균된 rms변동은 벌크운동내 사이클변동의 크기를 나타낸다. 사이클리졸브해석에서 다음 계산은 앙상블평균 난류강도  $u'_{EA}$ 이다.

$$u'_{EA}(\theta, \Delta\theta) = \left[ \frac{1}{N_M(\theta)} \sum_{i=1}^{N_c} u(\theta, \Delta\theta, i)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기서,  $N_c$ 는 사이클수,  $N_M(\theta)$ 는  $N_c$ 사이클에 걸쳐 크랭크각도  $\theta$ 에서 측정된 데이터개수를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 크랭크각도 계산폭은 0.5도이다.

## 3.2 난류주파수 특성

### 3.2.1 시간 자체상관계수

시간 자체상관계수는 유동의 불규칙과정의 통계

적 척도이며, 비정체흐름(nonstationary flow)의 시간 자체상관함수(autocorrelation function)  $\rho$  및 자체상관계수  $R$ 은 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$\rho(t, \tau) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} u_i(t) u_i(\tau) \quad (5)$$

$$R(t, \tau) = \rho(t, \tau) / u'_{EA}(t) u'_{EA}(\tau) \quad (6)$$

여기서,  $\tau$ 는 임의시간  $t$ 에 대한 시간변수를 나타낸다.

### 3.2.2 난류에너지 파워스펙트럼

난류에너지 스펙트럼은 난류에너지가 서로 다른 주파수 또는 에디크기에 대해 어떻게 분포되는가를 보여주며, 이것은 유동장내의 난류에너지 생성 및 소멸메카니즘을 이해하는데 유용하다. 유동이 비정체흐름일 때 파워스펙트럼은 시간 자체상관함수  $\rho(t, \tau)$ 의 Fourier 변환으로부터 얻을 수 있다.

$$E(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(t, \tau) w(\tau) e^{-j\pi f \tau} d\tau \quad (7)$$

여기서,  $w(\tau)$ 는 스퀘어타입(square type)의 윈도우함수(window function)이다.

### 3.2.3 미소시간척도

미소시간척도는 시간  $t$ 에서 시간 자체상관계수  $R(t, \tau)$ 의 2차 미분에 의해 정의된다.

$$\lambda_t = \left[ \frac{-2}{\partial^2 R(t, \tau) / \partial \tau^2} \right]^{1/2} \quad (8)$$

이 미소시간척도는 난류유동장의 변동변형률의 척도이며, 점화지연과정 문제에서 매우 중요한 파라미터로 여겨지고 있다.<sup>(22)</sup>

### 3.2.4 적분시간척도

적분시간척도는 속도가 그 자체와 상관되어질 수 있는 시간의 척도로서, 평균운동이 없는 유동에 대해서는 적분시간척도는 큰 에디(eddy)의 대략적인 생존시간(life time)을 나타내는 척도이고, 평균운동이 있는 유동에 대해서는 에디 통과시간의 척도를 나타낸다. Taylor의 정의에 의하면 시간 자체상관계수 곡선밑에 있는 면적에 해당하는 시간간격으로 나타낼 수 있다.

$$L_t = \int_0^{\infty} R(t, \tau) d\tau \quad (9)$$

그러나 엔진난류의 시간 자체상관계수곡선이 음의

값으로 변동하면서 감쇄하는 특성을 갖기 때문에, Taylor의 정의에 따라 적분시간척도를 계산할 수 없다. 따라서 엔진난류의 적분시간척도의 산출을 위한 몇가지 알고리즘이 제안되고 있지만, 그 크기에 있어서 약간 차이를 보일뿐 같은 경향을 가진다.<sup>(23)</sup> 본 연구에서는 자체상관계수의 경험식,  $R(t, \tau) = \text{Exp}(-\tau/L_t)$ 에 근거해서 곡선이  $1/e$ 까지의 감쇄기간을 적분시간척도로 정의하였다.<sup>(24)</sup>

### 3.2.5 적분길이척도

적분길이척도는 적분시간척도가 시간 자체상관계수곡선을 이용해 구한 것처럼, 공간 자체상관계수곡선을 이용해 같은 방법으로 구할 수 있으나,<sup>(25)</sup> 동시에 두점에서의 속도측정이 어렵기 때문에 통상적으로 적분시간을 이용해 Taylor가설로 적분길이척도를 계산한다.

$$L_x = \bar{U}L_t \tag{10}$$

그러나 Taylor가설은 평균속도가 일정하고, 균질한 등방성의 난류(homogeneous isotropic turbulence) 상태에서 평균속도  $\bar{U}$ 에 비해 난류성분  $u$ 가 매우 작은 경우 ( $u/\bar{U} \ll 1$ )에만 적용할 수 있으므로, 엔진내부 유동과 같은 난류유동장에는 적용하기 어렵다. 본 연구에서는 엔진유동의 이러한 특성을 고려해 Tabaczynski<sup>(26)</sup>가 제안한 평균속도 대신 난류강도  $u'$ 를 이용한 아래 관계식을 사용하였다.

$$L_x = Cu'L_t \tag{11}$$

여기서,  $C$ 는 상수이며 1에서 10사이(order of 1)의 값을 갖는다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 컷업주파수

Fig. 6은 기존포트와 텀블포트에 대해 시간평균 및 앙상블 평균곡선의 주파수 스펙트럼을 로그스케일(logarithm scale)로 보여주고 있다. 텀블포트의 경우를 보면 주파수 변화에 따라 스펙트럼 변화가 거의 나타나지 않는 지점, 즉 기울기가 영(zero)이 되는 곳이 300 Hz와 650 Hz의 두지점인데, 이 두개의 주파수가 모두 컷업주파수로 될 가능성이 있다. 마찬가지로 기존포트에서 예상되는 컷업주파수는 400 Hz와 700 Hz로 나타나고 있다. 이렇게 각 포트에 대해서 나타난 두개의 컷업주파수 중, 올바른 하나를 결정하기 위해서 각 컷업주파수를

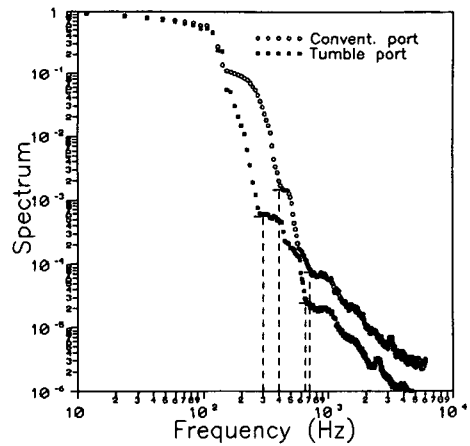


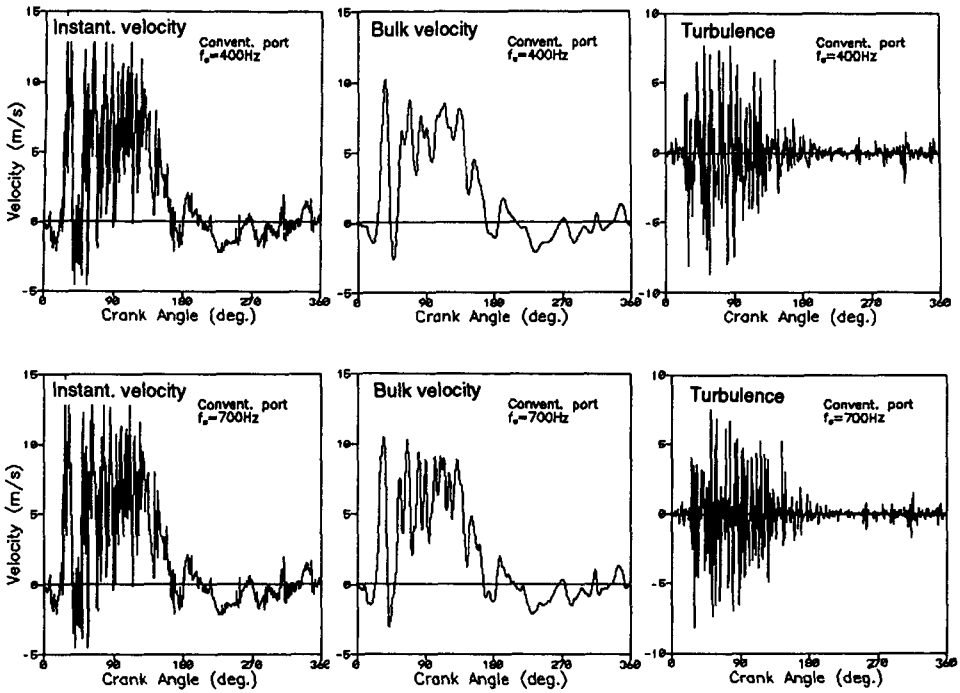
Fig. 6 Frequency spectra of smoothed velocities for two intake ports

사용하여 디지털필터링을 한 후, 나타나는 결과인 벌크속도와 난류성분 변화를 검토하였다.

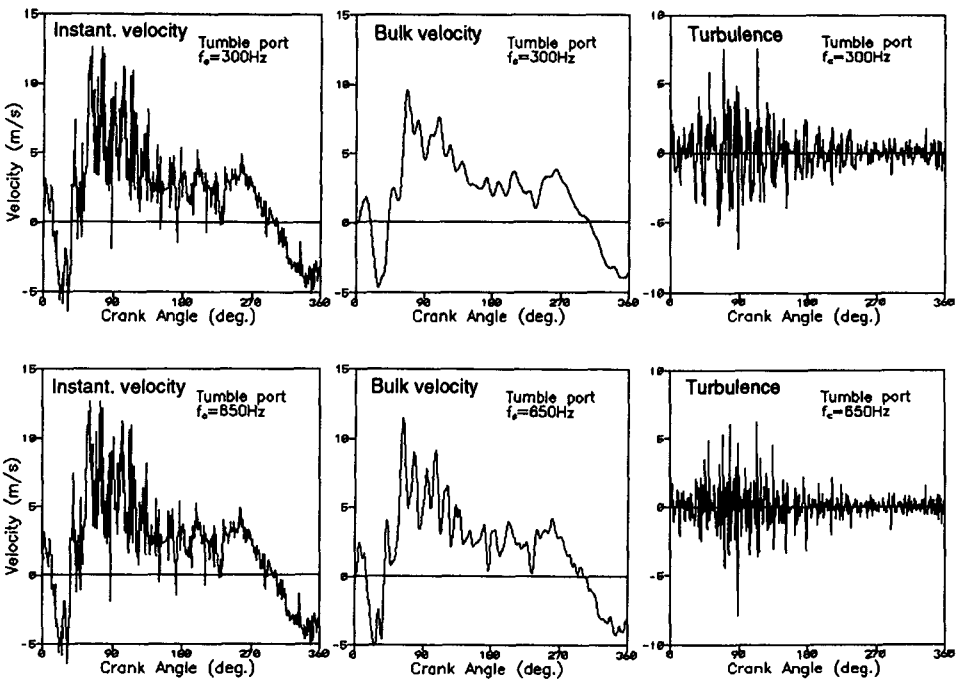
Fig. 7은 기존포트와 텀블포트에 대해서 대표적인 사이클내 순간속도 데이터를 각각 두개의 컷업주파수를 가지고 벌크속도와 난류성분으로 분해한 결과를 보여준다. 두 포트 모두에 대해서 높은 컷업주파수(650 Hz와 700 Hz)에서는 벌크속도에 고주파성분이 포함되어 있으며 난류성분도 그 크기가 약간 감소하고 있다. 반대로 낮은 컷업주파수의 경우(300 Hz와 400 Hz)에서는 난류성분에 저주파성분인 벌크속도성분이 포함되지 않음을 알 수 있다. 따라서 각 포트에 대해서 높은 컷업주파수보다는 낮은 컷업주파수의 경우, 난류성분에 벌크속도를 포함하지 않으면서 난류성분을 감소시키지 않는 결과를 보이므로, 낮은 주파수를 최종 컷업주파수로 결정하였다. 즉, 기존포트의 컷업주파수는 400 Hz이고, 텀블포트의 컷업주파수는 300 Hz가 된다.

### 4.2 평균속도와 난류강도

Fig. 8은 기존포트와 텀블포트에서의 텀블유동방향 평균속도와 그 사이클변동량을 보여준다. 기존 포트에서의 평균속도는 흡입과정 초기 크랭크각도 60도 부근에서 역방향흐름이 잠시 발생한 후 점차 감쇄되어 압축과정 후반으로 감에 따라 유동이 정체됨을 보인다. 이는 텀블유동이 압축과정 중반에서 와해됨을 의미한다. 사이클변동량은 흡입과정시 역방향흐름이 발생하는 부분에서 약 4.5 m/s로 크게 나타나고, 압축과정 동안에서는 0.5 m/s정도의



(a) Conventional port



(b) Tumble port

Fig. 7 Instantaneous velocity, bulk velocity, turbulence with two cutoff frequencies in a typical cycle

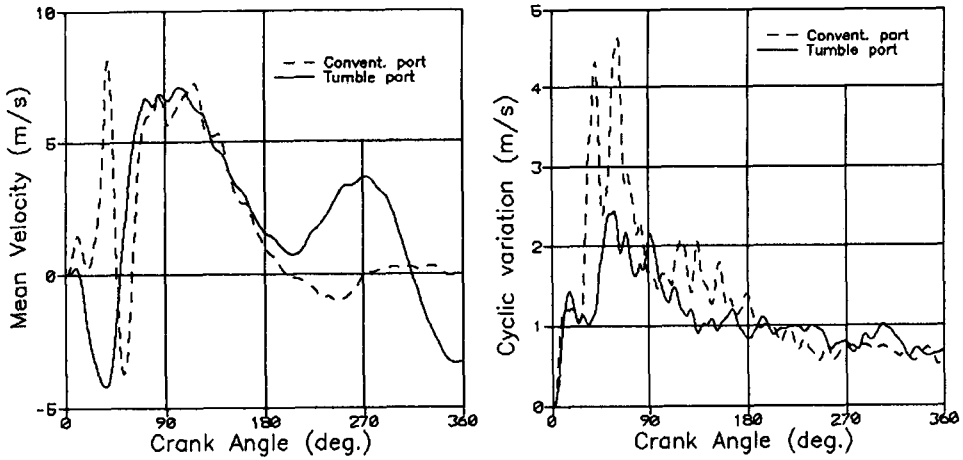


Fig. 8 Mean velocities and cycle variations of bulk velocity for two intake ports

일정한 값을 가진다. 텀블포트에서의 평균속도는 기존포트에 비해 뚜렷한 텀블유동이 존재함을 보인다. 피스톤이 TDC 가까이에 있을때(크랭크각도 0~50도, 310~360도)에 평균속도의 유동방향이 바뀌는 것은 속도측정점의 위치가 텀블유동의 아래쪽에 위치하기 때문에 발생하는 것이며, 피스톤이 이 지점보다 내려갔을 때(크랭크각도 50-310도)는 측정점의 위치가 텀블중심 보다 위에 있어 정방향 속도가 나타나고 있다. 텀블포트의 평균속도는 흡입과정 중반이후, 감소하다가 압축과정이 시작되면서 다시 증가되는 현상을 보이는데, 이를 텀블유동의

각 운동량보존법칙에 의한 경향이다.<sup>(2,27)</sup> 사이클변동량은 흡입과정시 기존포트보다 적게 나타나고 있으며, 압축과정 동안에는 기존포트와 비슷하게 약 0.5 m/s의 크기로 일정하게 유지됨을 볼 수 있다.

Fig. 9는 기존포트와 텀블포트에 대해서 앙상블 평균된 난류강도의 변화를 보여주고 있다. 기존포트는 흡입과정 초기에 텀블유동 평균속도의 방향성이 뚜렷하지 않음으로 인해 난류강도가 4 m/s 이상으로 나타나고, 그 후부터 압축과정 중반까지 계속 감소되어 TDC에서는 0.2 m/s 정도의 값을 가진다. 텀블포트에서는 흡입과정이 진행되면서 난류강도가 점차 증가하여 크랭크각도 70도 부근에서 약 2.7 m/s의 값을 가진 후, 흡입과정이 끝날때까지 계속 감소한다. 압축과정이 시작되면서 평균속도 증가와 마찬가지로 난류강도도 다시 증가하여 압축과정이 계속되는 동안 거의 일정한 값을 유지하고 TDC에서 0.5 m/s의 난류강도값을 갖는다.

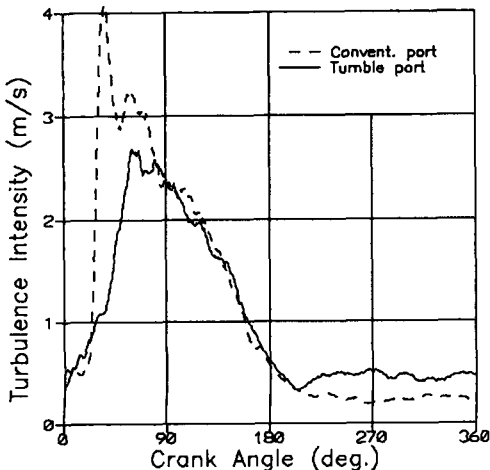


Fig. 9 Ensemble averaged turbulence intensities for two intake ports

### 4.3 난류의 주파수 특성해석

Fig. 10은 기존포트와 텀블포트에서 압축과정 중반부터 TDC까지인 크랭크각도 270도, 300도, 330도, 360도에서의 시간 자체상관계수를 나타낸다. 정확하게 Y축을 중심으로 대칭이 아닌것은 엔진유동의 비정체유동 가정에 의한 것이고, X값이 커질수록 음의 값이 변동하는 것은 엔진유동의 저주파 성분인 평균속도가 난류감쇄 기간동안 심하게 나타나기 때문이다. 시간 자체상관계수 곡선은 초기에 급속히 감소되며, 그뒤에 변동하면서 점차적으로



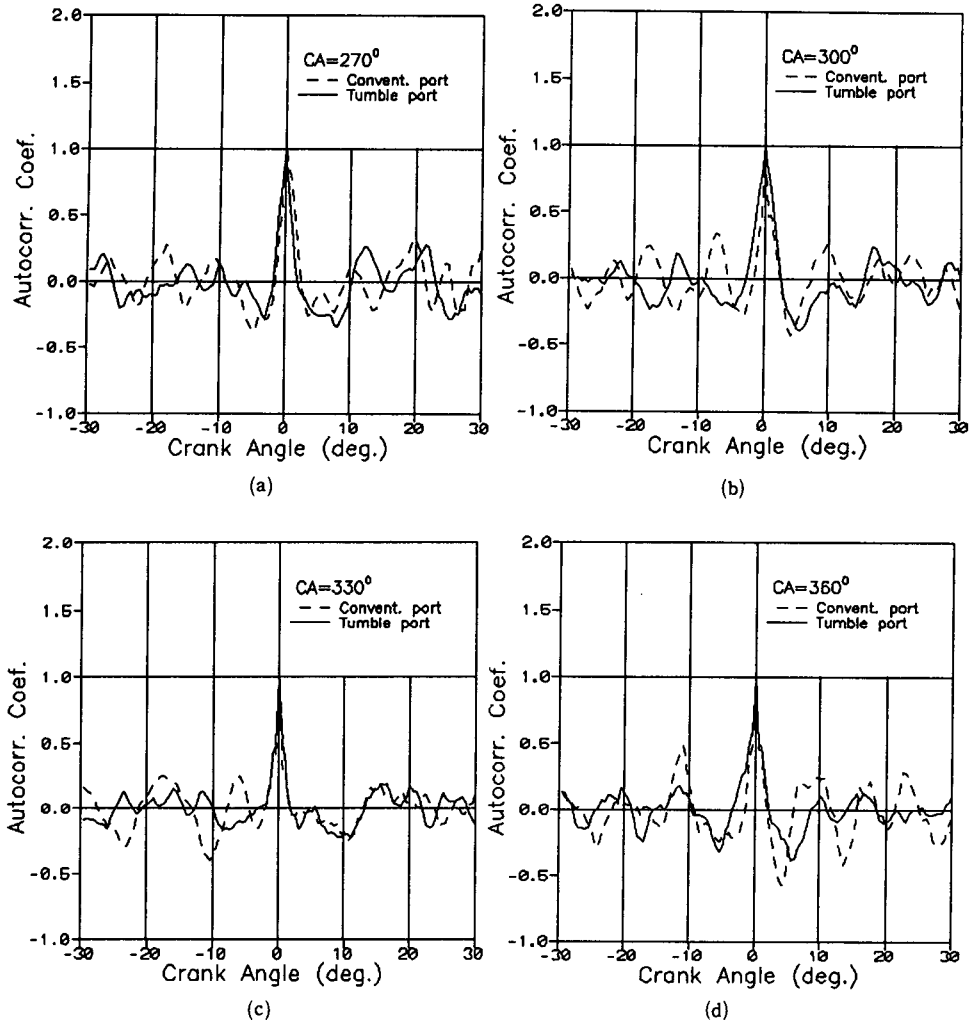


Fig. 10 Temporal autocorrelation coefficients at four crank angles for two intake ports

감쇄되는 특성을 보인다.

Kolmogorov<sup>(24)</sup>는 국소등방성(local isotropy) 개념을 이용해 난류에너지 스펙트럼에 대한 이론적인 식을 유도하였으며, 그때 작은 에디들은 국소조건에서 대략 평형상태에 있고, 난류에너지는 주파수의  $-5/3$ 승에 비례한다. Fig. 11은 주파수에 대한 난류에너지 스펙트럼을 로그스케일로 나타내고, Kolmogorov의 이론식의 기울기인  $-5/3$ 직선과 비교하고 있다. 텀블포트에서는 압축말기 크랭크각도에 대한 난류에너지 스펙트럼 분포가 Kolmogorov 이론식( $-5/3$  기울기)과 비슷한 경향을 갖는 주파수 영역들이 존재함을 알 수 있다. 기존포트에서도 크랭크각도 300도를 제외하고는 대체로 Kolmogorov

ov 기울기를 만족하는 주파수 영역들이 있다. 이 사실은 많은 엔진난류 실험결과에서 확인된 바와 같이,<sup>(23,26)</sup> 압축말기 난류가 국부적인 등방성(local isotropy)의 특성을 갖고 있음을 말한다.

#### 4.4 난류의 특성척도

Fig. 12는 압축과정 말기시, 기존포트와 텀블포트에 대한 크랭크각도 변화에 따른 미소시간척도의 변화를 보여준다. 미소시간척도는 두 포트 모두에서 피스톤이 TDC에 가까워짐에 따라 점차 감소되는 경향을 보인다. 기존포트에서의 난류 미소시간척도가 텀블포트에서 보다 다소 작게 나타나고 있으며, 텀블포트에서는 크랭크각도 300도에서 0.18

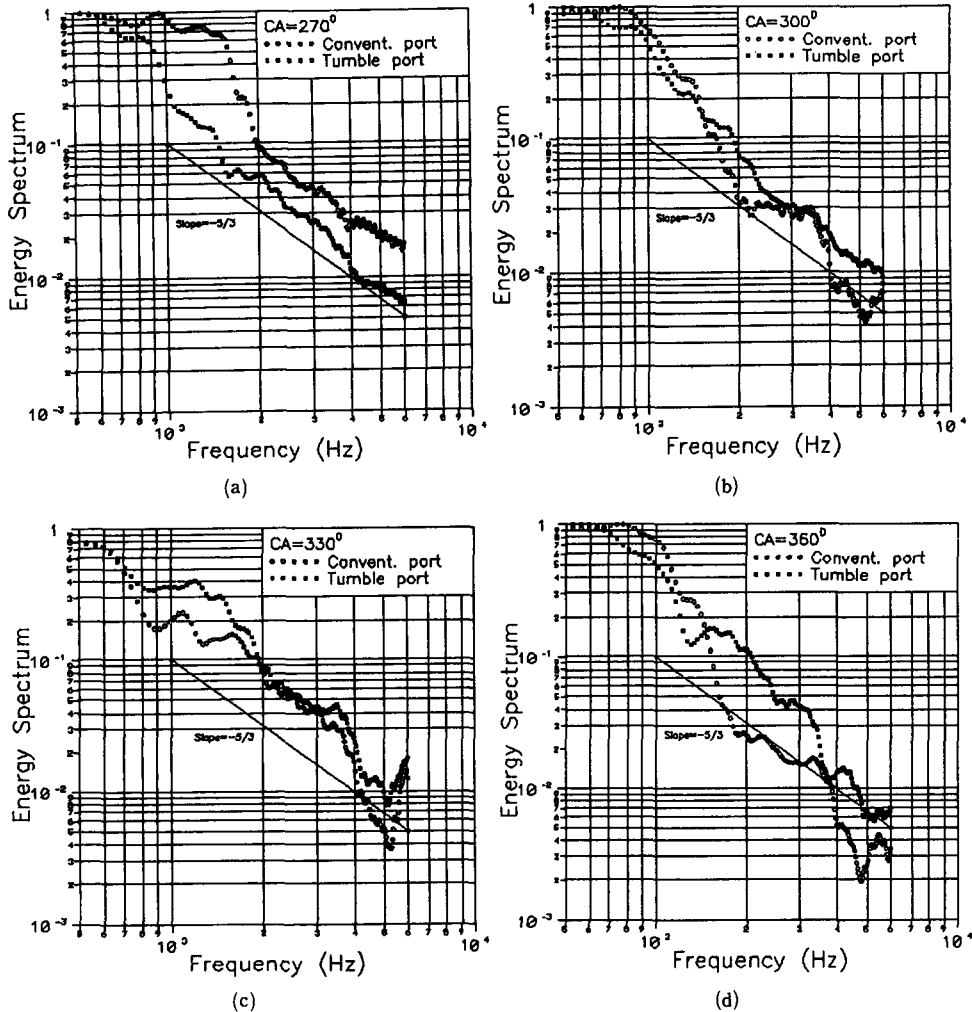


Fig. 11 Normalized logarithmic turbulence energy spectrum at four crank angles for two intake ports

msec를 갖고 그 이후 계속 감쇄되는 데 비하여, 기존포트에서는 0.11 msec로 거의 일정한 값을 가짐을 보인다. 텀블포트의 TDC에서 미소시간척도는 0.11 msec이다.

Fig. 13은 두 포트에 대해 압축과정 말기시, 크랭크각도에 대한 적분시간척도의 변화를 나타낸다. 적분시간척도는 텀블포트에서는 크랭크각도 320도까지는 다소 큰값을 갖다가, 그 이후 계속 감소하여 크랭크각도 350도에서 0.15 msec, TDC에서 0.21 msec의 크기를 갖는다. 기존포트에서는 크랭크각도 변화에 따라 변동하면서 약간씩 감소하는 특성을 갖는다. 크랭크각도 350도에서 0.21 msec,

TDC에서 0.17 msec의 크기를 갖는다. 이 결과를 Fig. 11과 비교해 보면, 대부분의 에너지는 큰 스케일 에디운동(large-scale eddy motion)과 관련되며, 저주파수 영역의 거동을 갖는 와도(vorticity)는 작은 스케일 에디운동(small-scale eddy motion)과 관련됨을 알 수 있다. 특히, 이러한 결과는 텀블포트에서 명확히 나타남을 알 수 있다.

Fig. 14는 두 포트에 대해 식(10)과 식(11)로부터 계산된 적분길이척도를 압축말기 크랭크각도 변화에 보여주고 있다. Taylor가설(식(10))을 이용하여 계산한 적분길이척도는 유동이 평균속도가 매우 작아지는 영역(텀블속도에서 크랭크각도 310도

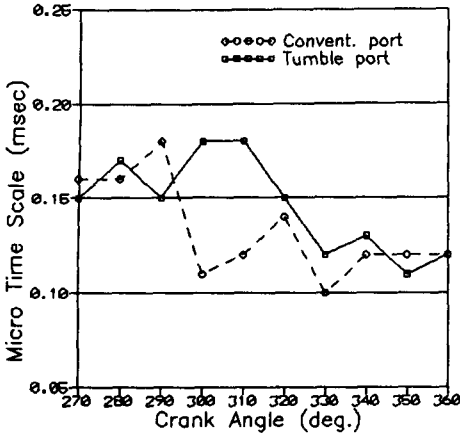


Fig. 12 Taylor micro time scales for two intake ports

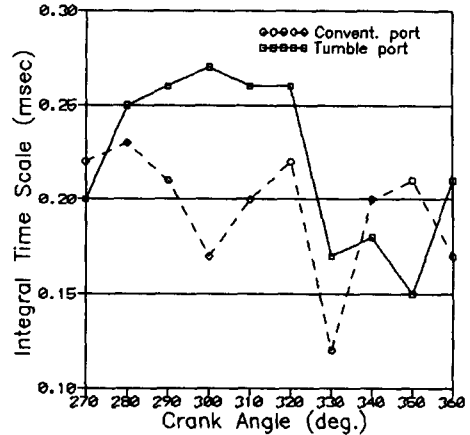
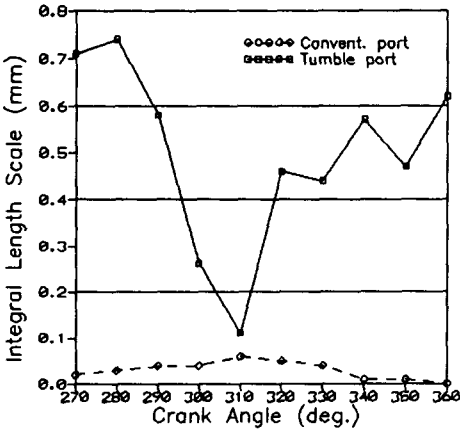
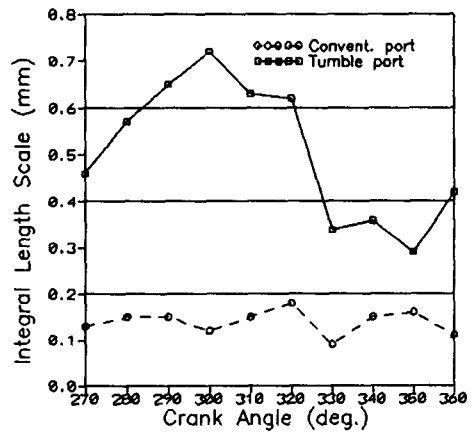


Fig. 13 Integral time scales for two intake ports



(a) Taylor's hypothesis



(b) Tabaczynski's hypothesis

Fig. 14 Integral length scales for two intake ports

부근, 기존포트에서 크랭크각도 270~360도)에서 너무 작은 값을 나타낸다. 이는 Taylor가설의 중요한 가정인  $u/\bar{U} \ll 1$  과 일정한 평균속도 가정이 만족하지 않음으로 인한 필연적인 결과이다. 따라서 이러한 경우 Taylor가설의 적용은 불가능하다. 여기에 대해 보완적 방법으로 제시된 Tabaczynski 식(식(11))을 적용시킨 경우( $C=3$ 을 적용), 텀블 포트에서의 적분길이척도가 기존포트에 비해 3배 정도 큰값을 갖음을 보인다. 텀블포트에서는 피스톤이 TDC로 접근함에 따라 점차 감소되는 경향을 보이고 있으나, 기존포트에서는 변동하면서 거의 일정한 값을 가진다. TDC에서 적분길이척도는 기존포트에서 0.12 mm, 텀블포트에서 0.41 mm의 크기를 갖는다.

### 5. 결 론

4-밸브 단기통 가시화엔진에 LDV 전방 산란모드를 적용하여 속도 데이터발생률을 40~60 KHz까지 높일 수 있었으며, 크랭크각도에 대한 거의 연속적인 속도신호를 얻음으로서 사이클리졸브드 난류해석을 수행할 수 있었다. 엔진난류해석의 어려움은 시간 자체상관계수가 급속 감쇄영역과 변동영역을 포함하는 특이성에 있었으며, 이 두영역에 대한 해석에 따라 적분시간척도와 난류에너지 스펙트럼이 영향을 받는다. 또한 LDV 측정 데이터발생률을 계속 증가시키지 못함에서 발생하는 고주파영역의 난류특성해석이 제약을 받는 어려움이 있다. 이

러한 문제들은 차후 계속되는 연구를 통하여 개선될 수 있으리라 믿으며, 본 연구를 통해 얻어진 난류특성의 정성적 해석 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 텀블유동방향 평균속도는 기존포트에서는 압축과정 동안 거의 정체되는데 비해, 텀블포트에서는 압축과정 초기 증가하면서 계속 높은 평균속도를 가진다. 사이클변동량은 흡입과정시 기존포트에서 다소 높은 값을 가지며, 압축과정 동안에는 두 포트 모두 0.5 m/s이하의 낮은 값을 가진다.

(2) 난류강도는 기존포트에서 흡입과정 초기 높게 나타나고 그 이후 계속 감소되는데 비하여, 텀블포트에서는 흡입과정 중반에서 최대값을 갖고 감소하다가 압축과정 초기에 다시 증가되는 특성을 가진다. TDC에서 난류강도는 기존포트는 0.2 m/s, 텀블포트는 0.5 m/s의 크기를 갖는다. 또한 압축말기 엔진난류는 Kolmogorov의 국소등방성이론을 만족시키는 주파수영역이 존재함을 확인할 수 있었다.

(3) 텀블포트에서 미소시간척도와 적분시간척도는 기존포트에서 보다 큰 값을 가지며, 시간 자체 상관계수의 급속감쇄 영역만을 고려했을 때, TDC에서 적분시간척도는 기존포트는 0.17 msec, 텀블포트에서는 0.21 msec의 크기를 갖는다.

(4) 평균유동의 크기가 작은 압축과정 말기에서 적분길이척도 계산시 Taylor가설 적용은 타당치 않다. 난류강도와 시간척도를 이용하여 구하는 Tabaczynski식으로 계산했을 때, 텀블포트에서 적분길이척도가 기존포트에 비해 3배 정도 크며, TDC에서 기존포트는 0.12 mm, 텀블포트는 0.41 mm의 크기를 갖는다.

### 참고문헌

- (1) Fansler, T. D., 1993, "Turbulence Production and Relaxation in Bowl-in-Piston Engines," *SAE Paper* 930479.
- (2) Arcounmanis, C., et al, 1990, "Tumbling Motion : A Mechanism for Turbulence Enhancement in Spark-Ignition Engines," *SAE Paper* 900060.
- (3) Hadded, O. and Denbratt, I., 1991, "Turbulence Characteristics of Tumbling Air Motion in Four-valve S. I. Engines and Their Correlation with Combustion Parameters," *SAE Paper* 910478.
- (4) Lee, K. and Too, S., et al, 1983, "An Experimental Study of In-Cylinder Air Flow in a 3,5L Four-Valve S. I. Engine by High Speed Flow Visualization and Two-Component LDV Measurement," *SAE Paper* 930478.
- (5) Le Coz, J., et al, 1990, "An Experimental and Computational Analysis of the Flow Field in a Four-Valve Spark Ignition Engine-Focus on Cycle-Resolved Turbulence." *SAE Paper* 900056.
- (6) Omori, S., et al, 1991, "Effect of Intake Port Flow Pattern on the In-Cylinder Tumbling Air Flow in Multi-Valve S. I. Engine," *SAE Paper* 910477.
- (7) Lancaster, D. R., 1976, "Effects of Engine Variables on Turbulence in a Spark-ignition Engine," *SAE Paper* 760159.
- (8) Witze, P. O., 1977, "Measurements of the Spatial Distribution and Engine Speed Dependence of Turbulent Air Motion in an I. C. Engine," *SAE Paper* 770220.
- (9) Witze, P. O., 1980, "A Critical Comparison of Hot-wire Anemometry and Laser Doppler Velocimetry for I. C. Engine Applications," *SAE Paper* 800132.
- (10) Rask, R. B., 1979, "Laser Doppler Anemometer Measurements in an Internal Combustion Engine," *SAE Paper* 790094.
- (11) Kent, J. C., et al, 1987, "Effect of Intake Port Design and Valve on In-Cylinder Flow and Burnrate." *SAE Paper* 872153.
- (12) Aldo Coghe, et al, 1988, "Effet of Intake Ports on the In-Cylinder Air Motion Under Steady Flow Condition." *SAE Paper* 880384.
- (13) Zur Loye, A. O. and Siebers D. L., et al, 1990, "Cycle-Resolved LDV Measurements in a Motor-ed Diesel Engine and Comparison with  $k-\epsilon$  Model Predictions," *SAE Paper* 900023.
- (14) Rask, R. B., 1981, "Comparison of window, Smoothed-Ensemble, and Cycle-to-cycle Data Reduction Techniques for laser Doppler Anemometer Measurements of In-cylinder Velocity." *ASME Sumopsium on Fluid Mechanics of Combustion System*, Boulder, Colorado, June.

- (15) Liou, T. M. and Santavica, D. A., 1983, "Cycle Resolved Turbulence Measurements in a Ported Engine with and without Swirl." *SAE Paper* 830419.
- (16) Cantania, A. E. and Mittica A., 1989, "Extraction Techniques and Analysis of Turbulence Quantities Form In-Cylinder Velocity Data." *J. E. for Gas Turbines and Power*, Vol. 111, July.
- (17) Witze, P. O., Hall M. J. and Bennett M. J., 1990, "Cycle-Resolved Measurements of Flame Kernel Growth and Motion Correlated with Combustion Duraion," *SAE Paper* 900023
- (18) *User's Guide Manual on 57N10/57N14/57N25 Burst Spectrum Analyzer*, Dantec Co.
- (19) McLaughlin, D. K. and Tiederman, W. G., 1973, "Biasing Correction for Individual Realization of Laser Anemometer Measurements in Turbulent Flows," *The Physics of Fluids*, Vol. 16, pp. 2082~2088.
- (20) Arocumanis, C., Enotiadis, A. C. and Whitelaw, J. H., 1991, "Frequency Analysis of Tumble and Swirl in Motored Engines," *J. of Automobile Engineering*, IMECHE.
- (21) Cantania, A. E. and Mittica, A., 1987, "Induction System Effects on Small Scale Turbulence in a High-Speed Diesel Engine," *J. E. T. P.* Vol. 109, pp491~502.
- (22) Blizard, N. S. and Keck, J. C. 1974, "Experimental and Theoretical Investigation of Turbulent Burning Model for Internal Combustion Engines," *SAE Paper* 740191.
- (23) Liou, T. M. and Santavicca, D. A., 1985, "Cycle Resolved LDV Measurements in a Motor-ed IC Engine," *Trans. of ASME*, JFE Vol. 107, June.
- (24) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill.
- (25) Tennekes, H. and Lumley, J. L., 1972, *A First Course in Turbulence*, MIT Press, Cambridge.
- (26) Tabaczynski, R. J., 1983, "Turbulence Measurements and Modeling in Reciprocating Engines-an Overview," *IMECHE C51/83*.