



- $\alpha_1$  : IVC시의 크랭크 각도  
 $\alpha_2$  : IVO시의 크랭크 각도  
 $N_v$  : 실린더당 밸브數  
 $\eta_v$  : 체적 효율

## 1. 서 론

디젤 엔진의 연소 과정에서 흡입공기와 분사된 연료의 최적 혼합기 형성이 배기성분, 연료 효율등 엔진의 성능을 향상시키는데 있어 매우 중요한 과제중의 하나이다. 이를 위하여 연료분무 현상에 대한 연구와 더불어 연소실내 공기 유동 현상에 대한 연구가 주요 관심대상이 되어왔다. LDV를 이용한 3-D 유속측정 및 각종 CFD Code를 이용한 유동해석등의 방법으로 엔진 실린더 내부의 유동 현상을 이해하는데 많은 도움이 되고 있으나 아직도 엔진연소실설계 등 엔진 개발에 있어서는 종래의 방법에 의한 실린더내 와류 강도의 비교평가에 크게 의존하고 있으므로 여기에서는 디젤 엔진의 와류를 측정 평가하는 방법으로 Paddle Wheel회전을 이용한 Paddle Wheel식 Swirl Meter방식과 실린더내 흡입공기의 각 운동량을 측정하는 Impulse식 Swirl Meter 방식에 대해 고찰하고자 한다.

## 2. 흡기와류

엔진에서의 흡기와류는 실린더의 중심 축방향에 대한 흡입공기 선회유동을 말하며 와류강도는 흡입행정 기간중에 발생된 흡입공기의 선회회전수 또는 각 운동량을 엔진 회전수에 대한 무차원수로 나타난다. 흡기행정중에 충분한 시간 여유를 갖고 연료와 공기가 혼합되는 가솔린 엔진과는 달리 디젤 엔진에서는 압축 행정 말기에 연료가 분사되어 곧바로 연소가 시작되므로 극히 짧은 시간내에 연료와 공기의 혼합이 이루어져야 하며 이를 위해 실린더 내로 흡입된 공기의 와류운동이 필요하게 된다.

엔진의 와류 발생은 흡기 포트의 형상과 또한 흡기 포트와 실린더 중심축과의 상대위치등에 의해 이루어진다. 즉 나선형 형상을 한 나선형

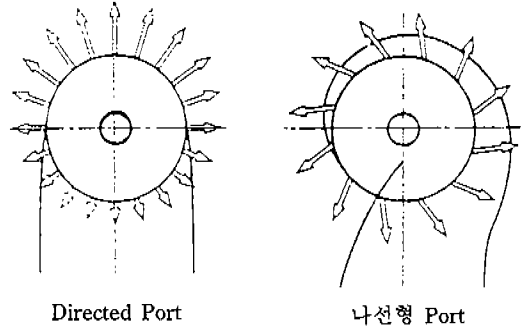


Fig.1 흡기 Port 형상

포트에 의하여 와류 발생을 유도하거나 Directed Port(또는 Tangential Port)와 같이 실린더벽의 내면의 접선방향으로 흡입공기의 흐름을 유도, 와류를 발생시키게 된다.

다시말하면 나선형 포트는 흡입유로 상에서 공기에 각 운동량을 가하여 와류를 발생시키는 Pre-Valve 생성 와류인데 비해 Directed Port방식에서는 실린더의 중심과 밸브축의 편심에 의해 흡입 공기를 실린더 벽면에 대한 충돌로 얻어지는 Post-Valve 생성 와류라고 할수 있다. 나선형 포트는 중(中), 저(低)밸브 리프트에서, Directed Port는 고(高)밸브 리프트에서 와류발생의 효과가 크다. 따라서 실린더 헤드 포트 설계시 두가지 와류 발생 메카니즘을 적절히 효과적으로 조화시켜 전체 흡입행정중 와류발생이 효율적으로 이루어 지도록 한다.

엔진 성능 향상에 바람직한 흡기 포트설계에는 우선 연료 분사 노즐과의 관계에서 적절한 와류강도가 정해지면 이에 따라 실린더 헤드의 볼트 위치, 냉각수 통로와 연료 분사 노즐등의 간섭을 피하여 좁은 공간 내에서 효과적으로 와류를 발생시킬 수 있도록 3차원적인 포트형상이 고안되어야 한다. 또한 동일한 와류를 내는데 있어서도 실린더까지의 흡기유로상의 저항이 적어야 하며 실린더 내의 접선방향의 속도분포가 엔진 성능향상에 유리한 것으로 알려진 강체(剛體), 회전이 되도록 설계가 이루어져야 한다.

이를 위하여 CAD/CAM을 이용한 3차원적인 포트형상의 설계제작과 제작된 헤드 포트에 대

해 定常流 측정장치 상태상에서 와류등 주요 인자에 대한 비교평가를 거치고 이를 다시 포트형상설계에 반영시키는 반복적인 과정을 통하여 최종적으로 실린더 헤드 포트개발이 이루어진다.

### 3. 흡기와류의 측정

실린더 헤드에서 흡기 포트의 와류발생 능력 및 유로저항을 판단하기 위하여 정상류 조건의 측정장치 상태에서 모든 측정이 이루어진다. 포트의 유동특성은 무차원 와류값, 유량계수등으로 나타내며 밸브 리프트, 흡기 포트형상과 편심량, 와류 측정면의 위치등에 따라서 달라진다. 정상류 조건에서 흡기 포트 전후의 압력차를 증가시켜 유동상태가 난류영역에 이르게 되면 측정된 포트의 유동특성치가 안정된 값이 되며, 실제 엔진의 운전 조건도 같은 영역에 속하므로 모든 측정은 난류 영역에서 이루어지도록 한다. 이를 위하여 포트 전후의 압력차(4P)를 일정하게 하는 일정차압방식과 포트통과 유량을 일정하게 하는 일정유량방식이 있으나, 보통 일정 차압식을 많이 사용한다.

일정차압 방식을 사용할 경우 포트 전후의 압력차를 250mmH<sub>2</sub>O가 유지되도록 하는데 이는 통상 정격 회전수의 50%에 해당되는 엔진흡기 유량에 해당된다.<sup>3)</sup> 정상류 측정장치 상태에서 와류 강도를 측정할 경우 실린더 헤드의 밀면 즉 Gas Face로부터 거리가 멀어질수록 실린더 벽면과의 표면마찰로 인해 와류 강도가 감소된다.

따라서 흡기행정 중의 최대 밸브 리프트시에 생성된 와류가 연소가 시작되기 시작하는 압축행정중에 피스톤이 상사점에 근접할때까지 소요시간과 거의 일치하도록 와류 측정면을 Gas Face로부터 엔진 실린더 내경의 1.75배 떨어진 위치에서 와류강도를 측정한다.<sup>4)</sup>

포트의 유량계수는 흡기 유로상의 최소단면적인 밸브와 밸브 시트(Seat)간의 단면에서의 유효통과 면적을 나타내는 인자이다. 포트의 특성을 나타내는 와류와 평균 유량계수의 관계를 보면 그림 (2)와 그림 (3)에서 알 수 있듯 와류

발생은 포트를 통과하는 공기유동에 대한 유로 저항의 증가를 필연적으로 수반하게 되므로 와류가 증가하면 유량계수는 감소하고 와류가 감소하면 유량계수가 증가하여 와류와 유량계수는 역(逆)비례 관계가 있음을 알 수 있다.

동일한 포트를 개조하여 와류 강도를 변경시키면 그 포트에 대한 Conventional Port Line(와류 개조시 평균 유량계수가 최대가 되는 선)을

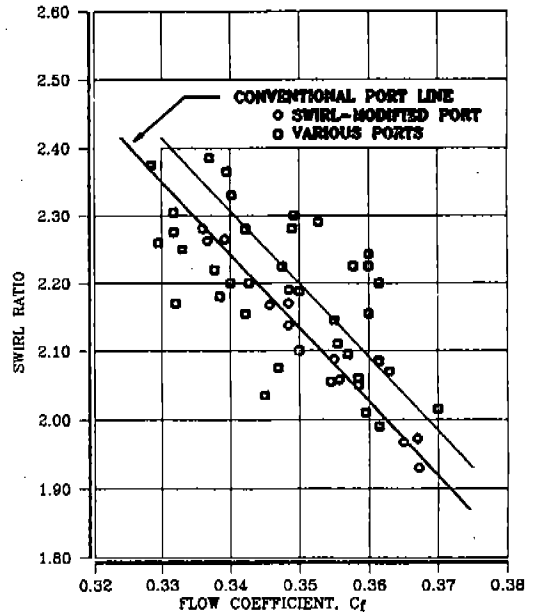


Fig.2 The Correlation Between Swirl and Flow Coefficient

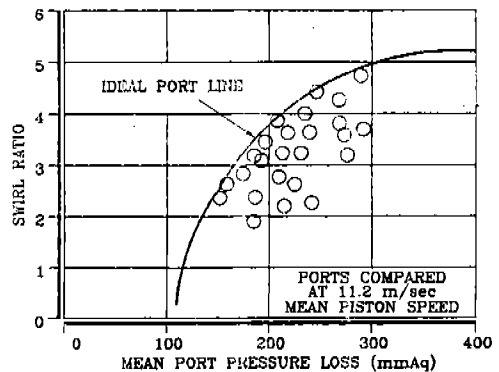


Fig.3 The Correlation of Swirl Over Mean Port Pressure Loss<sup>4)</sup>

얻을 수 있다. 따라서 엔진 성능에 더 효과적인 흡기 포트를 제작하기 위해서는 흡기 포트개발 과정에서 흡기 포트의 특성이 Conventional Port Line(Ideal Port Line)상에 있도록 개발하여야 한다.

### 3.1 Paddle Wheel식 Swirl Meter

이 방법은 실린더내의 설치된 Paddle Wheel(또는 Vane)의 회전수로써 와류강도를 측정하는 것으로 그림(4)와 같이 측정하고자 하는 엔진의 실린더 직경과 같은 실린더 위에 실린더 헤드를 설치하고 실린더 헤드 밑면에서부터 실린더 직경의 1.75배 위치에 Paddle Wheel을 설치한다. Paddle Wheel은 볼 베어링을 이용하여 회전하도록 되어 있으며, 회전수는 Stroboscope를 이용한 주파수 동조(同調)로 회전주파수가 검출기에 의하여 검출된다. Paddle Wheel의 크기, 형상 등이 측정결과에 영향을 미치므로 일반적으로 엔진 메이커별로 고유 규정에 준해 제작된다. 실린더 하부에 Surge 탱크가 설치되고 Surge 탱크와 충분한 거리에 떨어져 진공펌프를

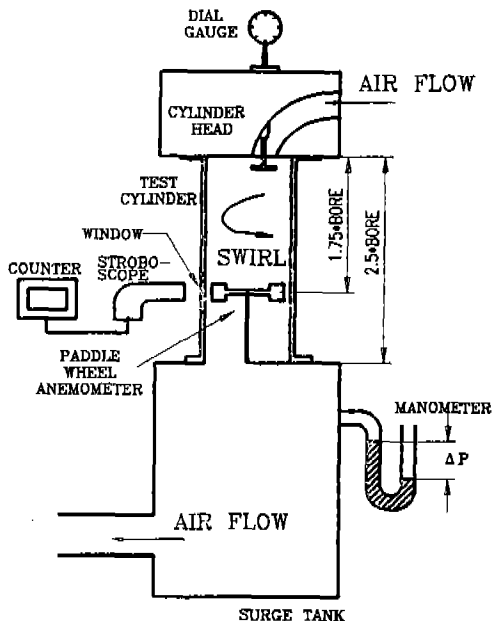


Fig.4 The Schematic of Paddle Wheel Swirl Meter

설치하여 대기로부터 흡기 포트를 통하여 공기가 흡입되도록 되어 있으며 실린더 내의 압력 또는 유량은 진공펌프 직전에 설치된 바이패스(by-pass)밸브로써 조절한다. 흡기 밸브는 다이알 게이지를 사용하여 밸브의 개도(開度)를 조절하도록 하여 측정하고자 하는 밸브 리프트를 맞춘다. Paddle Wheel(또는 Vane)식 Swirl Meter는 가장 오랜전부터 사용되어온 와류 측정방법으로 여기에는 포트전후의 압력치를 일정하게 하는 일정 차압 방식과 포트를 통과하는 공기 유량을 일정하게 하여 측정하는 일정유량 방식이 있으나, 극히 일부를 제외하고는 대부분의 일정차압방식을 많이 채택하고 있다.

#### 3.1.1 일정 차압식

최초 이론적인 배경은 G. Thien<sup>3)</sup>에 의하여 제안되었으며, 와류 측정 및 계산에 도입된 기본 가정은 다음과 같다.

- 1) 유동은 비압축성이며, 단열적이다.
- 2) 축방향 속도성분은 일정하며, 접선방향속도성분은 강체 회전으로 가정한다.
- 3) 각 운동량은 보존된다.
- 4) 체적효율은 100%이다.
- 5) 포트를 통과하는 순간적인 유량은 피스톤의 배기 유량과 같다.
- 6) 흡입과정은 TDC에서 BDC까지이다.

유동특성은 밸브 리프트,  $h_v/d$ 를 일정간격으로 변경하면서 측정된다. 측정된 유량,  $Q$ 를 이용하여 가상 엔진 회전수,  $N$ 은 다음과 같이 예측된다.

$$N = 30 Q / V_b \quad (1)$$

특정 밸브 리프트에서의 무차원된 와류값은 가상 엔진 회전수,  $N$ 에 대한 Paddle 회전수의 비로 표현하면 다음과 같다.

$$N_D / N = (N_D / Q) \cdot (V_b / 30) \quad (2)$$

무차원된 와류값,  $N_D / N$ 를 이용하여 TDC에서 BDC까지 적분하면 Swirl Number(또는 Swirl Ratio, Swirl Index라 표현)가 얻어진다.

$$S_N = 1/\pi \int_0^\pi (N_D/N) (C/C_m) d\alpha \quad (3)$$

적분은 크랭크각을 기준하여 15도 간격으로 나누어 Simpson법을 사용하여 수행하고, 특정 크랭크각에서의 유동특성치는 측정된 값으로부터 내삽법을 이용하여 계산된다. 캠 선도는 일관성을 주기 위하여 최소 시트(Seat)경,  $d_v$ 에 비례하는 곡선을 이용한다.

특정 밸브 리프트에서의 유량계수는 측정된 공기량과 이론적인 공기량의 비로 표현된다.

이론적인 공기량은 다음과 같다.

$$Q_{m1} = A \cdot V_c \quad (4)$$

따라서 유량계수는 다음과 같이 표현된다.

$$C_f = Q/Q_{m1} \quad (5)$$

### 3.1.2 일정 유량식

Paddle Wheel식의 일종인 일정유량식 Swirl Meter도 일정차압식과 측정 장치의 구성 및 원리는 동일하나 포트를 통과하는 흡입공기량을 일정하게 유지시키면서 밸브 리프트를 변화시키며 와류의 측정이 이루어진다. 유량 계수는 포트전후의 압력차를 이용하여 계산할 수 있다.

독일의 Vogel에 의해 최초 고안되어 특허를 취득한바 있는 이 방법은 와류 측정에 있어서 고전적인 방법중의 하나이다. 평면모양의 Paddle Wheel대신 원형의 Vane을 부착한 십자형의 Anemometer를 사용하기 때문에 일명 Vane식 Swirl Meter라고도 불리워진다. 평균 와류값을 계산하는 과정도 일정 차압식과 약간 다르다. 표준상태하에서의 실린더내 축방향 평균속도를 10m/sec가 되도록 Orifice통과유량을 조정한다.

Valve Opening Area는 밸브 Lift에 따라서 다르지만 다음과 같다고 가정한다.

$$F_v = \pi(d_v + h_v \cos\theta \sin\theta) h_v \cos\theta \quad (6)$$

$\theta$ : 밸브 시트 각도

엔진에서 체적 효율이 100%라고 가정하면 Port를 통과하는 공기량은 오리피스 통과유량과 같으므로 포트를 통해 실린더로 유입되는 공기량은 다음과 같이 표현된다.

$$Q = Q_p = CF_p \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (7)$$

$C$ : Port 전체의 유량계수

$Q_p$ : Port를 통과하는 공기유량

포트를 통과하는 이론공기량은 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$Q_{m1} = F_v \sqrt{V_c} \quad (8)$$

$$V_c = 2g \gamma / (\gamma - 1) R \cdot [1 - \{P/(P - 4P)\}^{(\gamma-1)/\gamma}] T_n \quad (9)$$

$P$ : Port전 압력

$T_n$ : 표준 온도, (20°C)

포트의 유로 저항을 유효면적 (Effective Area)으로 표시하면 다음과 같다.

$$A_0 = CF_v = Q/\sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (10)$$

포트의 유로저항을 유량계수로 표시하면 다음과 같다.

$$C_f = Q_N/Q_{m1} \quad (11)$$

$Q_N$ : 표준상태 하에서의 유량

특정 밸브 리프트에서의 무차원 와류값,  $K_s$ 은 Paddle Wheel 또는 Vane의 회전수,  $N_D$ 와 엔진 회전수,  $N$ 의 비로 표현한다.

$$K_s = N_D/N \quad (12)$$

일정차압 방식과 달리 포트통과유량을 일정하게 하는 일정유량방식은 저(低) 밸브 리프트

상태에서는 밸브와 밸브 시트부간의 유로면적이 극히 적어지게 되므로 유동저항이 커지고 Choked Flow에 근접하기 때문에 와류측정이 부정확해진다. 따라서 이 방식으로 저(低) 밸브 리프트시의 와류평가에는 한계가 있다.

### 3.2 Impulse식 Swirl Meter

Impulse식 Swirl Meter는 1970년대 독일의 G. Tippelmann<sup>6)</sup>에 의해 고안되어 H.F. Pettifer에 의하여 발전되어졌다. 그림 (5)처럼 와류를 측정하기 위하여 정상류 실린더 내에 실린더 축에 수직인 알루미늄 Honeycomb를 실린더 헤드로부터 아래로 실린더 직경의 1.75배 떨어진 위치에 설치하여, 흡입공기가 알루미늄 Honeycomb Grid를 통과하도록 되어 있다.

Impulse식 Swirl Meter는 축 방향 및 접선방향 속도분포에 관계없이 알루미늄 Honeycomb에 의해 흡입공기의 와류강도는 실린더축방향의 토오크로 변환되며 이를 Load Cell을 이용 나타내게 된다. 여기서 측정된 토오크는 흡입 공기의 총 각 운동량의 시간 변화율이 된다. 포트전후 압력차는 포트 유동이 완전 난류가 되도록 254 mmH<sub>2</sub>O 부근에 설정한다.

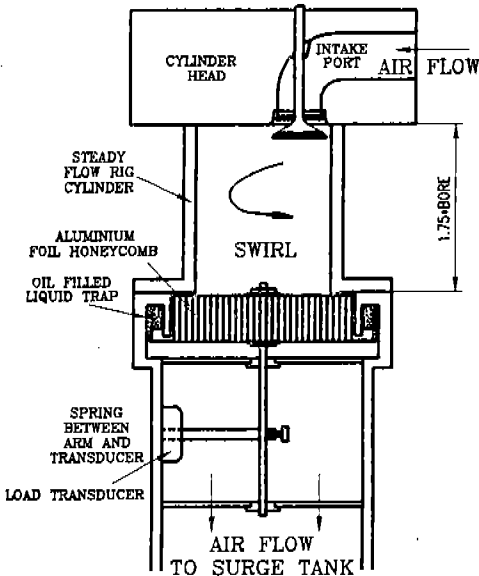


Fig.5 Schematic of Impulse Swirl Meter

따라서 포트유동은 밸브 리프트에 따라서 변화하므로 측정은 밸브 리프트를 1mm씩 증가시키면서 실시하고 포트를 통과하는 공기유량은 Orifice 공기유량계를 이용하여 측정한다.

여기서 도입된 가정은 다음과 같다.

- 1) 유동은 비압축성이고 단열적이다.
- 2) 정상류 측정 장치상태에서 포트유동측정은 실제 엔진의 비정상류 상태와 동일하다.
- 3) 각 운동량은 보존된다.
- 4) 체적효율은 100%이다.
- 5) 포트유동은 IVO와 IVC사이에서 발생하고 한 순간의 유량은 오직 밸브 리프트만의 함수이다.
- 6) 포트 전후의 압력강하는 일정하다.

무차원 와류값은 측정된 토오크,  $\tau$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$N_R = 8\tau / (mDV_0) \quad (13)$$

유량계수는 다음과 같다.

$$C_f = Q / (AV_0) \quad (14)$$

Impulse식 Swirl Meter에 의한 Swirl Ratio,  $R_s$ 를 엔진회전수에 대한 흡기행정 말기 와류 각속도로 표현하면 다음과 같다.

$$R_s = \omega_c / \omega_E \\ = L_D \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_d N_R d\alpha \left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_d d\alpha \right]^2 \quad (15)$$

$L_D$ : 엔진 형상 계수 ( $DS/Nvdv^2$ )

평균유량계수는 다음과 같다.

$$C_{f0} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_d d\alpha / (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (16)$$

식 (15)으로부터 와류강도는 엔진설계형상의 영향을 받으며 유량계수는 역비례관계에 있음을 알 수 있다. 적분은 사용될 엔진의 캠 형상 (크랭크 각과 밸브 리프트와의 관계)을 이용하

여 수행한다.

피스톤의 평균속도는 다음과 같다.

$$C_m = 30S\omega_E/\pi \quad (17)$$

평균 흡기공기속도는 다음과 같다.

$$V_1 = (D/d_v)^2 (C_m/N_v) \quad (18)$$

Gulp Factor,  $G_F$ 는 최소 밸브 시트 직경에 기준한 흡입 공기속도의 음속에 대한 비로서 다음과 같이 표현된다.

$$G_F = (D/d_v)^2 [C_m/(N_v \cdot a \cdot C_c)] \quad (19)$$

a : 음속

일반적으로 Gulp Factor가 0.6부근 이상이 되면 체적효율이 급격히 떨어진다고 알려져 있다.

#### 4. Swirl Meter의 특성 비교

정상류 측정장치 상태에서 측정되는 평균 와류값은 와류의 측정 평면에 유입되는 각 운동량을 나타내며 와류 측정 평면에 유입되는 각 운동량은 실린더 축방향 공기속도와 각 운동량의 積으로써 표현된다.<sup>1)</sup> Paddle Wheel(또는 Vane)식의 Swirl Meter는 흡입공기의 접선방향 속도성분에 대해 강제와류에 의한 강체(剛體) 회전으로 보며 실린더 축 방향 속도성분은 균일하게 분포한다는 가정에서 출발한다.

그러나 실제의 실린더내부의 공기유동을 보면 접선방향 공기유속은 강체회전에는 상당히 근접하고 있으나 축 방향의 공기 유속 분포는 포트에 따라 다양하게 나타난다. 예를들면 나선형 포트에 비해 실린더 벽면에 흡입 공기를 유도하는 Directed Port의 경우 특히 축방향 속도 불균일이 심하게 나타난다. 그림 (6)에서 같이 실린더 중심에서의 포트 편심량을 변화시켜 가며 와류값을 측정할 경우 Impulse식 Swirl Me-

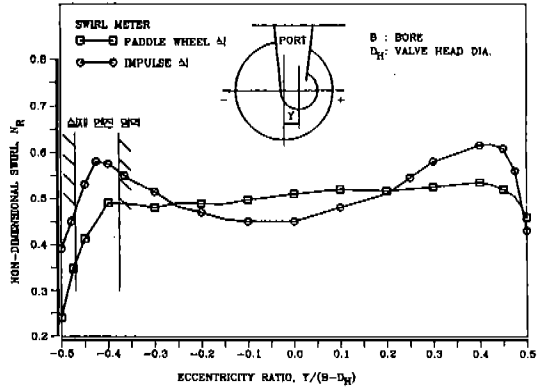


Fig.6 Effect of Port Eccentricity Upon Measured Swirl Values<sup>7)</sup>

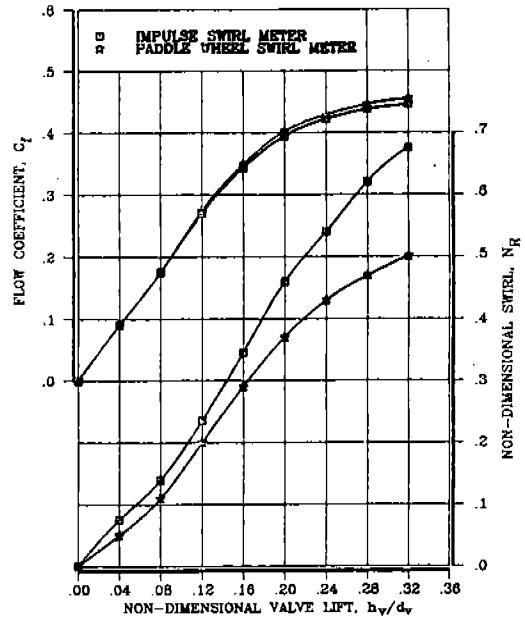


Fig.7 Comparison of Impulse and Paddle Wheel Swirl Meter Along Valve Lift<sup>7)</sup>

ter에서는 크게 변하는 반면 Paddle Wheel식에서는 별 변화가 없다. 이는 벽면과의 떨어진 거리에 의해 흡입공기의 축 방향 속도 분포가 달라지나 이로 인한 Directed Port 영향의 와류값 변화가 Paddle Wheel식에서는 잘 나타나지 않음을 알 수 있다. 동일한 포트에서도 그림 (7)과 같이 Directed Port의 와류값이 우세한 고 밸브 리프트시에는 Impulse식과 Paddle Wheel식 Swirl

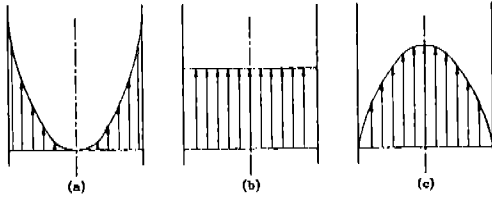


Fig.8 Axial Velocity Profiles Assuming Equal Amount of Flow Rate

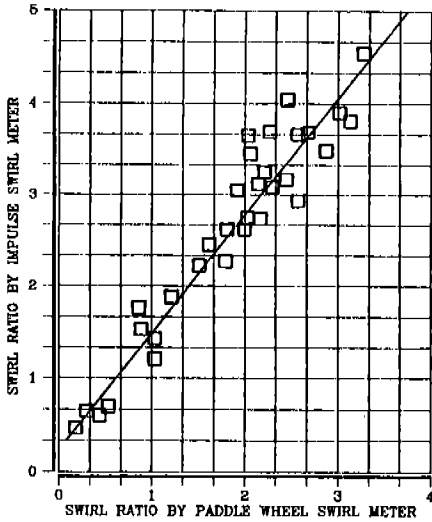


Fig.9 The Correlation Between the Impulse and The Paddle Wheel Swirl Meter<sup>7)</sup>

Meter간의 편차가 발생하며 이는 축방향 속도분포의 불균일에 기인한 것으로 볼 수 있다.

즉, 이론상으로 축 방향 속도분포가 균일할 경우 양 측정방법에 의한 와류값은 같아야 하기 때문이다.

단면 통과 유량이 동일하다고 할 경우 그림(8)에서의 3가지 형태의 속도분포를 생각할 수 있는데 (b)와 같이 동일 유속분포일 경우 Impulse식과 Paddle Wheel식에서 측정된 와류값은 같으며 (a)와 같이 중심에서의 속도가 낮은 경우에는 각 운동량이 커지게 되며 따라서 Impulse식에서 측정된 와류값이 높게 나타난다. 실제로 실린더내의 속도분포를 LDA를 이용하여 측정한 M. L. Monaghan에 의하면 축방향 속도분포는 실린더 벽 부근에서 속도가 최대가 되고

실린더 중심 부근에서 최소가 되는 것으로 나타났다.<sup>2)</sup>

따라서 균일한 속도 분포를 가정한 Paddle Wheel식 Swirl Meter에서 측정된 값보다도 Impulse식 Swirl Meter에서 측정된 와류값이 대체로 20~30% 정도 높게 나타나게 된다. 이는 물론 포트의 종류에 따라서 Helical 포트 와류성분이 우세한 포트에서는 두방법의 측정결과가 근접하나 벽면에서 축 방향 속도가 높은 Directed 포트에서는 Impulse식 Swirl Meter 값이 높게된다. 또한 Impulse식 Swirl Meter값이 축방향 속도분포가 변함에 따라서 흡입공기의 각운동량이 달라지기 때문에 이에 민감하다는 것을 알 수 있다. 이는 곧 연료혼합 및 연소과정에서 흡입 공기의 각운동량의 변화가 어느 정도까지 실제 엔진 성능에 영향을 미치느냐에 따라서 각 운동량의 변화에 민감한 Impulse식 Swirl Meter의 Paddle Wheel식 Swirl Meter에 대한 우열비교가 가능하리라고 본다.

## 5. 결 론

1. 실린더 헤드 포트의 특성을 나타내는 흡기 와류강도를 측정하는 방법으로 Paddle Wheel의 회전을 이용하는 Paddle Wheel식은 Paddle Wheel자체의 형상과 크기에 따라 측정 결과가 크게 좌우될 수 있으나 아직까지 이에 대한 표준화가 되어있지 않은 상태이기 때문에 이 방식에 의한 측정 결과치에 대해 절대 비교가 힘들며 보편 적용성이 결여되어 있다.
2. 또한 Paddle Wheel 식은 기본가정에서 실린더내 흡입 공기의 축방향 속도 분포를 일정하다고 보기 때문에 이 방향 속도 분포의 변화에 대해서 둔감하게 나타낸다.
3. 반면 흡기의 각운동량을 측정하는 Impulse식 Swirl Meter는 Paddle Wheel식의 결점을 보완하며 이론적인 측면에서 앞서있는 방법이기도 하나 여기에서 얻어지는 실린더내 흡기의 각운동량이 엔진의 연소과정에서 직접 영향을 미치는 절대적인 대표인자라고 곧바로 단정하기 어렵다.



4. 그럼에도 지금까지 실린더 헤드의 흡기포트의 특성인 와류 강도, 유량계수등에 대해 측정평가 할 수 있는 시험기법으로써 두가지 방법 모두 엔진연구 및 개발에 널리 효과적으로 사용되고 있다.
5. 앞으로 엔진의 성능과 배기저감등의 개선을 위해서는 흡기의 와류 강도 이외에도 실린더 내 난류강도 등 유동현상에 좀 더 이해를 넓힐 수 있는 3차원 유동에 대한 전산해석과 최신 시험측정기술의 응용이 필수적이다.

### 參 考 文 獻

1. M. J. Tindal T.J. Williams, "Aa Investigation of Cylinder Gas Motion in the D.I. Diesel Engine", Sae Paper 770405, 1977.
2. M.L. Monaghan and H.F. Pettifer, "Air Motion and its Effect on Diesel Performance and Emissions", Sae Paper 810255, 1981.
3. G.D. Partington, "Analysis of Steady Flow Tests on Inlet and Exhaust Ports, Ricardo Report, Dp. 80/1123.
4. Nigel F. Gale, "Diesel Engine Cylinder Head Design : The Compromise and the Techniques", Sae Paper 900133, 1990.
5. G. Thien, "Entwicklungsarbeiten an Ventilkannalen Von Viertakt-Dieselmotoren", Osterreichische Ingenieur Zeitschrift, 8, Jahrgang, Heft 8.
6. G. Tippelman, "A New Method of Investigation of Swirl Ports", Sae Paper 770404, 1977.
7. N.F. Gale, "The Impulse Swirl Meter", Ricardo Report, dp. 79/1232.