

흡기 밸브 주위의 정상 상태 유동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Steady Flow around an Intake Valve Exit

이 상 석*, 이 석 재*, 김 응 서**
S. S. Lee, S. J. Lee, E. S. Kim

ABSTRACT

In order to investigate the characteristics of flow around the intake valve exit, discharge coefficient and the velocity near the valve exit in steady state were measured using X-type hot-wire. Valve and valve seat insert used in experiment were constructed as the same shape of production engine and the flow characteristics at various flow rates and valve lifts were investigated.

From the results of discharge coefficient measurements, it is observed that there exists a similarity between the flow characteristics around the production engine valve and the typical poppet valve. Measurement of the velocity at the valve exit shows that the normalized radial velocity distribution is independent of the flow rate. When the mass flow rate is small, the difference between the primary direction of flow and the valve angle is large, but the difference becomes smaller as the flow rate increases.

1. 서 론

왕복형 내연 기관에서 흡기 밸브를 통과하는 유동은 체적 효율에 직접적인 영향을 미치므로 기관 성능과 관련되는 중요한 인자이다. 또한 압축시 상사점 근처의 유동장은 밸브 커튼 면적 (valve curtain area) 을 통과하는 유동장에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유에서 밸브의 유량 계수 (discharge coefficient) 를 측정하거나^{1,2)}, LDA (laser doppler anemometry) 또는 열선 유속계를 이용하여 밸브 주위의 속도를 측

정하는^{3,4,5)} 등 밸브 주위의 속도장을 규명하기 위한 많은 노력들이 진행되어 왔다.

본 연구에서 행한 실험은 유량 계수를 결정하기 위한 실험과 열선 유속계를 사용하여 밸브 커튼 면적에서의 속도장을 측정하는 실험의 두 부분으로 이루어져 있다.

측정은 정상 상태에서 수행하였으며, 밸브를 통과하는 유량과 밸브 리프트의 변화에 따른 유동 특성을 알아보았다. 이들 두 인자는 흡기 과정의 유동을 결정하는 가장 중요한 인자로 알려져 있으며, 흡기 과정 중에도 변하는 인자이므로 흡기 과정의 모델링에도 중요하다.

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 공대 기계공학과

이 연구의 주된 목적은 밸브 주위의 유동장을 결정하고, 또한 이들 유동장에 영향을 미치는 인자들을 알아내는 것이다. 이러한 노력은 앞으로 흡기 포트와 밸브의 기하학적 형상을 최적화하는데 많은 도움이 될 것이며, 또한 유사한 실린더 헤드 형상에 대한 실린더 내 유동 계산의 경계조건으로 사용될 수도 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 송풍장치, 시험부, 열선 유속계와 기타 부속장치, 유량계수 측정장치로 이루어진다. Fig.1은 실험장치의 전체적인 구성을 나타낸 것으로 유동은 송풍기에 의해 흡입되며, 유량 측정용의 오리피스와 서지 탱크를 거쳐 시험부로 유입되도록 하였다.

시험부의 설계는 보어 75.5mm, 스트로크 82mm, 흡기 포트 지름 29mm의 기관을 대상으로 하였으며, 이를 단순화하여 실험에 사용하였다. 밸브 리프트를 변화시키고 열선 프로브를 고정시켜 이송시킬 수 있는 장치를 부착하였으며, 그 단면도를 Fig.2에 나타내었다. Fig.3은 실험에 사용된 밸브와 밸브 시트의 형상을 나타낸 것이다. 사용된 밸브 시트는 링 인서트형(ring insert type)으로 여러개의 밸브 면으로 이루어져 있다.

Fig.4는 유량 계수의 측정을 위한 측정점의 위치를 나타내며, 디지털 압력계(YEW 2654)를 사용하여 정체압을 측정하였다.

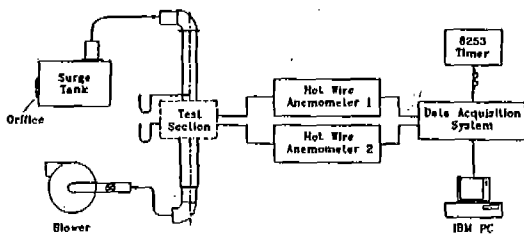


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

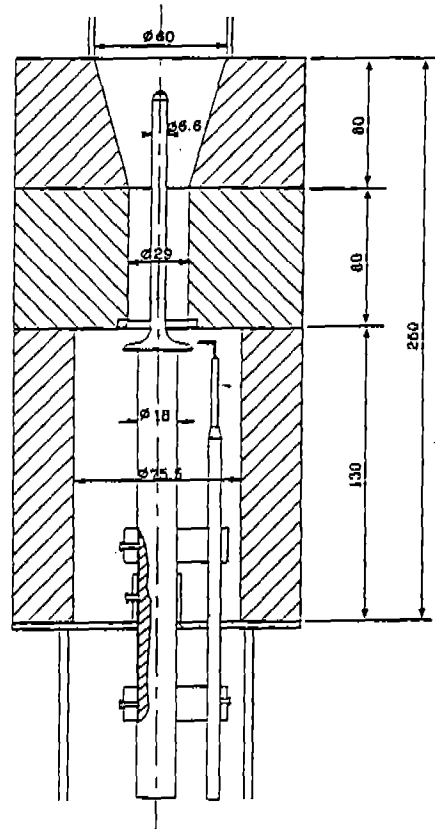


Fig.2 Details of test section

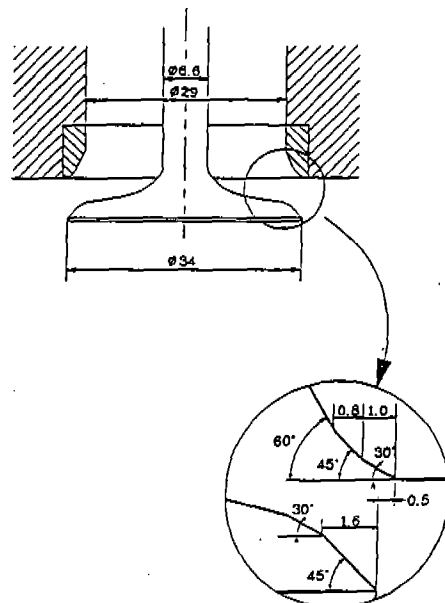
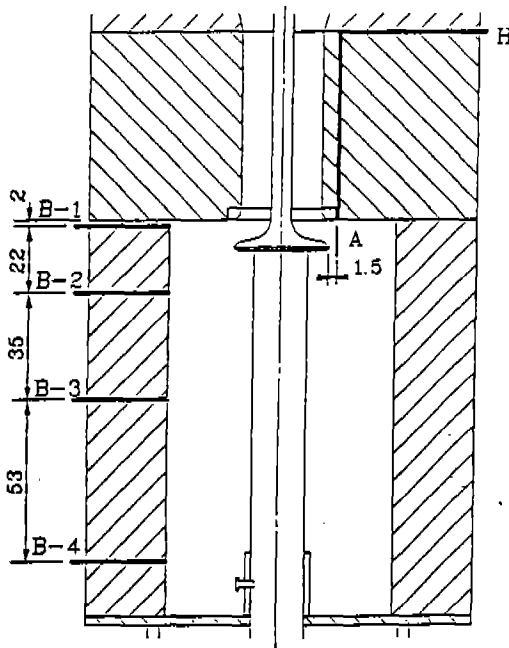


Fig.3 Geometry of valve and valve seat



Static Pressure Measurement ;
H, B-1, B-2, B-3, B-4
Velocity Measurement ; A

Fig. 4 Pressure measuring points

속도의 측정에는 X형 열선 프로브(DANT-EC 55P 63)를 이용하였고, 열선은 직경 $5\mu\text{m}$ 의 백금 도금 텅스텐 선이다. 열선의 교정에 있어서는 Göttingen형의 폐쇄 순환식 풍동에서 외경 1.8mm의 정압-정체압 피토포를 이용하였다. 열선 유속계는 사용 범위가 2m/s 이상이고 50kHz 의 주파수 특성을 가진 것으로 그 제원은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험방법

열선 유속계는 정온도형이며 프로브의 과열비는 1.5로 설정하였다. 열선 유속계의 교정에 있어서는 Göttingen형의 풍동에서 최대 유속의 10, 20, 50 및 100%인 경우와 정지 상태의 신호 전압을 기준으로 보정 곡선을 작성하였으며, 열전달 관계식을 사용하지 않고 실험에 의해 보정 곡선을 결정하였다.⁶⁾

열선 유속계에서 나오는 신호는 자료 취득 장치에 저장하고, 이 저장된 신호는 컴퓨터(IBM-PC)에서 선형화 및 가감 계산, RMS

Table 1 Specification of hot-wire anemometer

Item	Specifications
Hot-wire resistance range	$\leq 7\Omega$
Cable length	$\leq 10\text{m}$
BR. TOP terminal	
Output impedance	100Ω
Output voltage when flow velocity is 0.	$\cong 2\text{V}$
OUT. terminal	
Output impedance	$1\text{k}\Omega$
Output voltage	15V
Frequency characteristics	50kHz
Measuring velocity range	$\geq 2\text{m/s}$

계산을 실행하여 속도 및 난류 강도를 구하였다. 자료 취득 장치는 8253 타이머의 트리거 신호에 의하여 2ms 간격으로 두 채널의 열선 유속계에서 나오는 신호를 동시에 저장하도록 하였으며, 각 측정점에 대하여 2500개의 신호를 평균하여 속도와 난류 강도를 구하였다.

밸브와 프로브는 블록에 부착된 이송장치에 고정하여 실린더의 중심축과 평행하게 이송시켰다. 밸브 리프트 및 프로브의 이송 위치는 서로의 상대 위치를 측정하여 결정하였으며 장치의 조작은 유동의 하류에서 이루어지도록 하여, 장치 조작에 의한 유동의 영향을 최소화 하였다.

실험은 정상 상태에서 수행하였으며, 유량은 각각 0.35 및 0.53kg/min 로 설정하였다. 이들 유량은 각각 사용된 모델 기관의 400 및 600rpm 에서의 평균 흡입 유량에 해당한다.

유량 계수의 측정에 있어서는 각 유량에 대하여 밸브 리프트를 2mm 에서 13mm 까지 0.5mm 간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 밸브 출구에서 측정된 값과 비교하기 위하여 실린더 블록의 정압 측정용 구멍에서도 각각 압력을 측정하였다. 이때 열선 유속계 관련 장치들을 분리하여 이들이 유동에 미치는 영향을 제거하였다.

속도의 측정에 있어서는 유량이 0.35kg/min 인 경우에는 밸브 리프트를 각각 4, 6, 9 및 12 mm로 하여 실험하였으며, 유량이 0.53kg/min 인 경우에는 밸브 리프트를 각각 6, 9, 12mm로 하여 실험하였다. 측정 위치는 각 밸브 리프트에서 밸브에 대하여 반경 방향으로 1.5 mm 떨어진 위치에서 축 방향으로 1.0mm간격으로 변화시켰으며, 밸브 리프트가 4mm인 경우에는 실험 간격을 0.5mm로 하였다.

3. 결과 및 검토

밸브를 지나는 유동은 연소실과 흡기 포트의 형상, 밸브와 밸브 시트 각, 각 부분 모서리의 형태, 밸브와 밸브 시트면의 폭, 레이놀즈 수, 밸브 리프트 등의 여러가지 변수에 의하여 영향을 받는다. 실제 밸브를 지나는 유동은 여러가지 유동 변수들의 영향이 복합된 현상으로, 그 해석에는 이러한 여러 요인들에 대한 고려가 있어야 한다.

Fig. 5는 모델기관 내의 여러 지점에서 측정된 정압으로 계산한 유량 계수를 표시한 것으로 각 측정점의 위치는 Fig. 4에 나타낸 것과 같다. 유량 계수의 정의에 적합한 압력 측정점은 H 지점이므로, H의 측정값을 이용한 유량 계수의 산출이 합리적이다. B-1 지점의

경우 밸브 리프트 1.5mm에서 3.0mm인 영역을 제외한 밸브 리프트 영역에서 H에서의 측정값과 일치하는 결과를 보이고 있으며, 측정값이 일치하지 않는 영역에서는 실린더 모서리 부분의 유동이 다른 리프트와는 다른 형태로 일어남을 간접적으로 보여주고 있다. B-3과 B-4 지점의 측정값은 H 지점의 측정값과 비교적 잘 일치하며, 밸브 리프트가 증가할수록 오차가 커짐을 보여주고 있다. B-2 지점의 측정값은 H 지점의 측정값과는 상당히 다른 경향을 보여주고 있는데, 이는 이점이 밸브 출구의 주 유동 방향에 위치하여 올바른 정압 측정이 이루어질 수 없기 때문이다. 일반적인 실린더 헤드의 경우, 밸브 출구쪽의 정압 측정 구멍은 가공이 어려운 경우가 많은데, 위의 결과는 밸브 출구에서의 주 유동 방향을 제외한 실린더 블록에서 측정한 정압을 이용할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 6은 최소 유로 면적을 기준으로 한 유량 계수를 밸브 리프트에 따라 표시한 것이고, Fig. 7은 밸브 커튼 면적을 기준으로 한 유량 계수와 유효 밸브 리프트를 밸브 리프트에 따라 표시한 것이다. 이때 유효 밸브 리프트는 다음의 관계에 의해 정의하였다. 여기에서 C_l 은 밸브 커튼 면적에 의한 유량 계수이며, D_v 와 L_v 는 각각 밸브 지름과 밸브 리프트이다.

$$Effective\ Lift = C_l \frac{\pi D_v L_v}{\pi D_v} = C_l L_v$$

밸브 리프트가 매우 작은 경우 점성의 영향이 유동을 지배하게 되어, 점성의 영향이 증가할수록 속도 계수가 감소하고, 이에 따라 유량 계수가 감소하게 된다.⁷⁾ 이 경우 밸브 리프트의 증가는 점성의 영향을 감소시켜, 밸브 리프트가 증가하면 유량 계수가 증가한다. 이 영역은 Fig. 6과 Fig. 7에서 $Lift/D_v$ 가 0.06 이하인 영역이다. 밸브 리프트가 더 증가하면 밸브와 밸브 시트에서 박리가 일어나게 되어 그 박리 영역이 증가하면서 유량 계수가 감소하고, 박리 영역의 증가가 둔화되면서 유량 계수는 다시 증가한다. Fig. 6과 Fig. 7에서

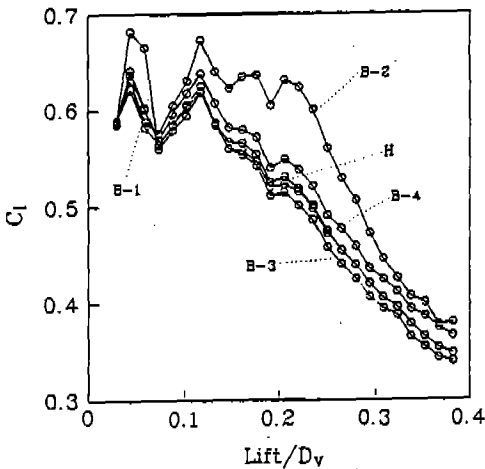


Fig. 5 Variation of discharge coefficient along valve lift at each measuring point

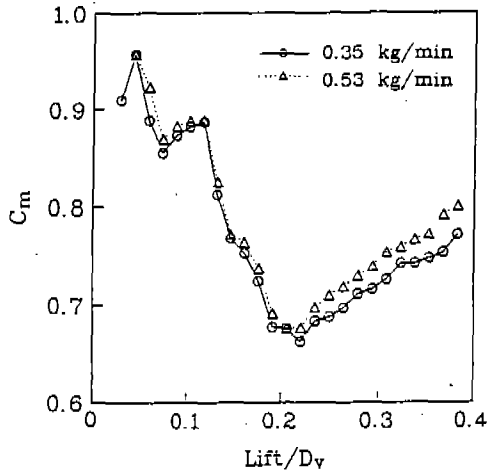


Fig. 6 Variation of discharge coefficient based on minimum area along valve lift and mass flow rate

$Lift/D_v$ 가 0.06에서 0.13의 영역이 여기에 해당한다. 밸브 리프트를 더욱 증가시키면 밸브 시트 면에서의 박리가 유동을 지배하면서 유효 유로 면적을 감소시켜 유량 계수는 급격히 감소하게 된다. Fig. 6과 Fig. 7에서 $Lift/D_v$ 가 0.13 이후인 영역에서 유량 계수가 급격히 감소하는 현상은 이러한 이유 때문이다. $Lift/D_v$ 가 0.22 이후 Fig. 6과 Fig. 7이 서로 다른 결과를 보이는 것은 밸브 커튼 면적과 최소 유로 면적이 서로 다른 형태를 보이기 때문이다. 밸브 커튼 면적은 리프트에 따라 선형적으로 변하게 되나 최소 유로 면적은 일정하기 때문이다. 실제의 유동은 Fig. 7(b)의 유효 밸브 리프트와 $Lift/D_v$ 의 관계에서 잘 알 수 있다. $Lift/D_v$ 가 0.22보다 커지면 유동이 통과하는 면적의 증가는 급격히 둔화된다. 이는 유동이 더 이상 밸브 리프트에 지배되지 않고, 최소 유로 면적인 흡기 포트 면적에 의존함을 의미한다.

Fig. 8은 밸브 출구면에서 열선 유속계로 측정된 반경 방향 속도 성분과 반경 방향 난류 강도 성분을 유량에 해당하는 평균 피스톤 속도로 무차원화 하여 표시한 것이다. 이때 유량은 0.35 kg/min이며 이는 400rpm의 평균 흡입 유량에 해당하고 이때의 평균 피스톤 속도는 1.09 m/s이다. 4mm의 밸브 리프트에

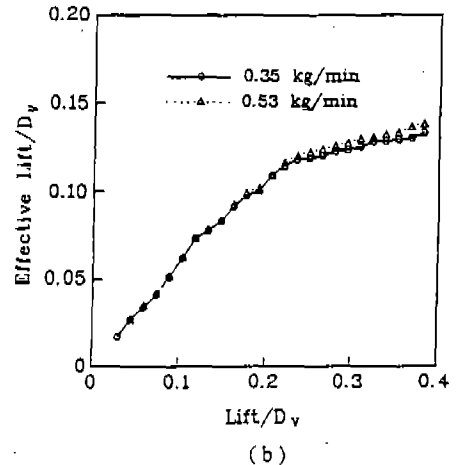
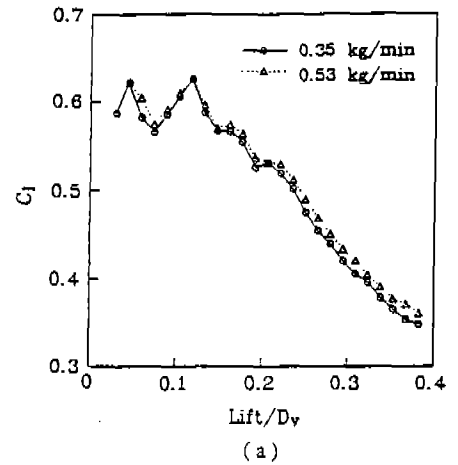


Fig. 7 Variation of discharge coefficient and effective lift based on valve curtain area along valve lift and mass flow rate

(a) discharge coefficient
(b) effective lift

서부터 밸브 시트 면에서 박리가 나타나며, 밸브 리프트가 증가함에 따라 박리의 영역이 증가함을 볼 수 있다. 밸브 리프트 9mm와 12mm의 경우 유효 리프트의 변화가 거의 나타나지 않고 있는데 이는 부록에서 설명한 경우 4에 해당하는 밸브 리프트이기 때문이며, Fig. 7의 (b)와도 일치하는 결과를 보인다.

Fig. 9는 600rpm의 평균 유량에 해당하는 0.53 kg/min에 대한 반경 방향 속도 성분과 반경 방향 난류 강도 성분을 평균 피스톤 속

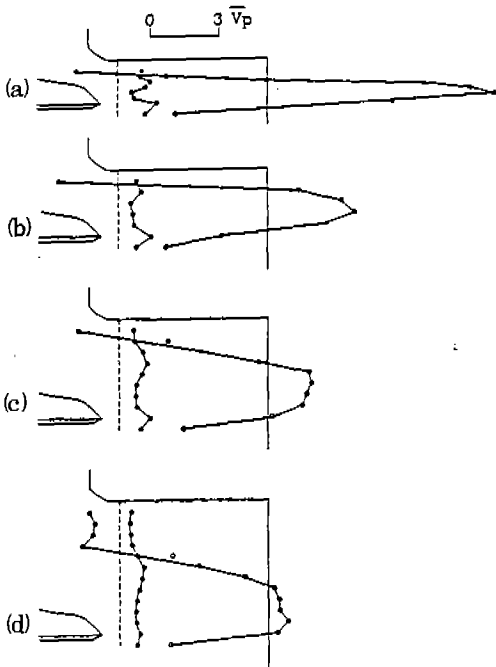


Fig. 8 Radial velocity profile at valve exit for mass flow rate of 0.35 kg/min

- = rms velocity,
- = mean velocity, $\bar{v}_p = 1.09\text{m/s}$
- (a) $L_v = 4\text{mm}$ (b) $L_v = 6\text{mm}$
- (c) $L_v = 9\text{mm}$ (d) $L_v = 12\text{mm}$

도로 무차원화한 결과이며, 이때의 평균 피스톤 속도는 1.64m/s이다. 이 결과는 Fig. 8의 것과 유사하다.

Fig. 10은 두 유량에 대한 반경 방향 속도 성분과 반경 방향 난류 강도 성분을 비교한 것으로, 각각의 평균 피스톤 속도로 무차원화시킨 반경 방향 속도 분포는 유량에 관계없이 일정하다. 그러므로, 이러한 관계에 의해 다른 유량에 대한 속도 분포를 예측할 수 있다. 물론 이러한 예측은 여러가지 동적 효과에 대한 영향을 무시할 수 있다는 전제가 있어야 한다.

Bicen 등³⁾에 의하면 밸브에 의한 박리 영역이 밸브 말단 근처에 존재하지만, 반경 방향의 속도 성분에서는 이러한 현상을 예측하기가 어렵다. 이는 열선 프로브가 약 1.3mm의 영역에 대한 평균 값을 측정하므로 명확히 박리 영역을 제시하지 못하기 때문이다.

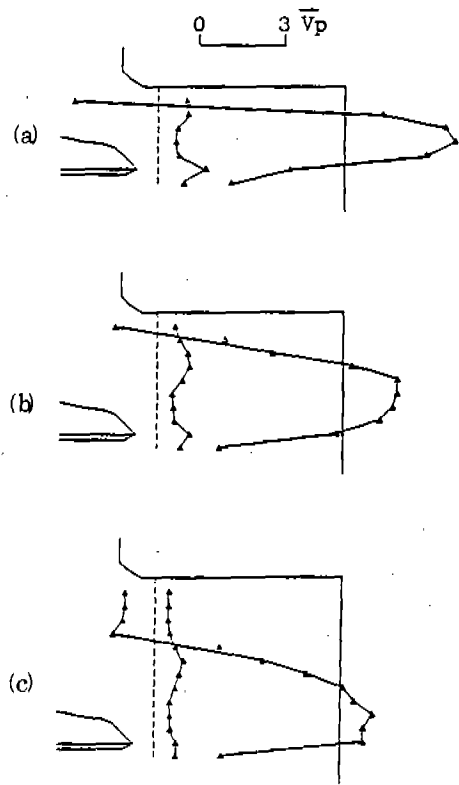


Fig. 9 Radial velocity profile at valve exit for mass flow rate of 0.53 kg/min

- △ = rms velocity,
- ▲ = mean velocity, $\bar{v}_p = 1.64\text{m/s}$
- (a) $L_v = 6\text{mm}$ (b) $L_v = 9\text{mm}$
- (c) $L_v = 12\text{mm}$

Fig. 11에서 유동의 방향을 검토하면 박리의 존재를 짐작할 수 있다. 그림에서 역류는 유동의 연속성과 물리적 의미를 고려하여 해석한 것이다.

Fig. 11은 0.35kg/min의 유량에 대한 속도 측정 결과를 평균 피스톤 속도로 무차원화하여 벡터 형식으로 표현한 것으로, 밸브 출구를 통과하는 속도의 방향을 잘 나타내고 있다. 단순화된 포핏 밸브는 한개의 면을 가지며, 그 유동 방향이 밸브 각과 일치하는 것으로 알려져 있다.³⁾ 그러나, 이 실험에서 사용된 밸브 시트와 밸브는 여러개의 면으로 이루어져 있고, 유동의 최소 면적을 형성하는 것은 45°의 각을 가진 면으로, 이를 밸브 각으로 정의할 수 있다. 실험의 결과는 여러개의

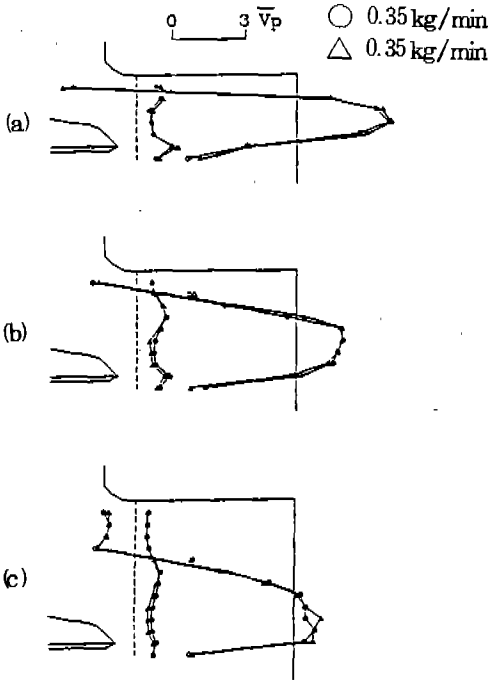


Fig.10 Radial velocity profiles at valve exit with valve lift and mass flow rate

○, △=rms velocity,
●, ▲=mean velocity
(a) $L_v=6\text{mm}$ (b) $L_v=9\text{mm}$ (c) $L_v=12\text{mm}$

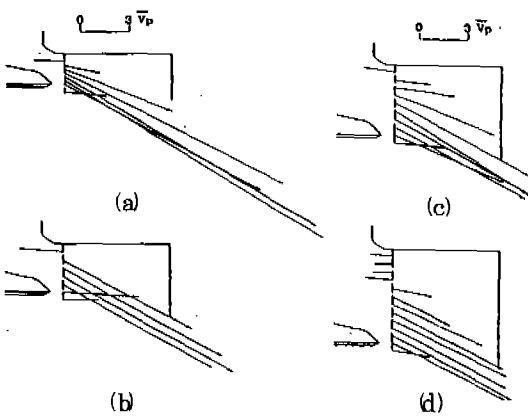


Fig.11 Velocity profile at valve exit for mass flow rate 0.35 kg/min

$\bar{V}_p = 1.09\text{m/s}$
(a) $L_v=4\text{mm}$ (b) $L_v=6\text{mm}$
(c) $L_v=9\text{mm}$ (d) $L_v=12\text{mm}$

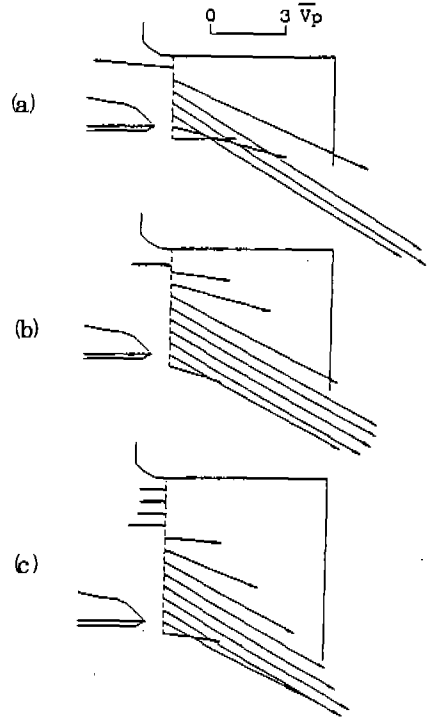


Fig.12 Velocity profile at valve exit for mass flow rate of 0.53 kg/min

$\bar{V}_p = 1.64\text{m/s}$
(a) $L_v=6\text{mm}$ (b) $L_v=9\text{mm}$
(c) $L_v=12\text{mm}$

밸브 시트 면을 가진 경우, 최소 유로 면적을 형성하는 면과 유동의 방향이 일치하지 않음을 보여 주고 있다. 이는 밸브와 시트의 여러 면들이 유동에 큰 영향을 미친다는 것을 시사한다. 그리고, 밸브 리프트가 작아져 유속이 증가하면 유동의 방향이 밸브 각에 좀 더 접근하는 경향을 보인다. 이러한 특성은 서로 다른 유량을 비교한 Fig.13에서 더 명확히 볼 수 있다.

Fig.13은 모든 밸브 리프트에 대해서 0.35 kg/min에서 보다 0.53 kg/min에서의 유동 방향이 밸브 각에 더 접근하는 것을 보여 주고 있다. 이는 밸브를 지나는 유속이 빨라질수록 유동 방향에 대한 최소 유로를 형성하는 면의 영향이 증가한다는 것을 의미한다. 그러나, 이러한 결과는 유동의 방향에 대해서만 의미를 가지며, Fig.8 Fig.9 및 Fig.10에

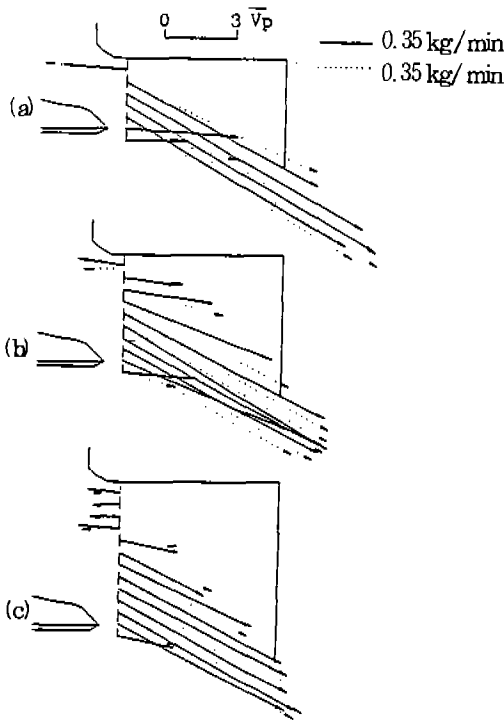


Fig.13 Velocity profiles at valve exit with valve lift and mass flow rate
 (a) $L_v=6\text{ mm}$ (b) $L_v=9\text{ mm}$
 (c) $L_v=12\text{ mm}$

나타낸 반경 방향의 속도 분포가 유량에 따라 변해야 함을 의미하지는 않는다. 그리고, 밸브 말단에서의 유동의 방향이 반경 방향을 향하는 것은 이 영역에서 유동의 박리가 존재함을 시사한다. 이는 Bicen 등³⁾의 결과와도 일치한다. Fig.12는 0.53 kg/min에 대한 속도를 평균 피스톤 속도로 무차원화 하여 벡터 형식으로 나타낸 것으로 Fig.11과 유사한 경향을 보여주고 있다.

4. 결 론

실제 기관에서 사용되는 밸브와 밸브 시트를 이용하여 흡기 밸브 주위의 유동 특성을 알아보기 위해 밸브 리프트와 흡입 유량을 변화시키면서 이들이 유동에 미치는 영향에 대하여 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 실제 기관에서 사용되는 밸브의 유량 계수는 밸브 리프트의 변화에 대해 단순화된 포핏 밸브의 유량 계수와 유사한 결과를 나타낸다.

(2) 낮은 기관 회전 속도에 해당하는 유량의 경우, 그 평균 피스톤 속도로 무차원화된 반경 방향 속도 성분의 분포는 유량에 무관하다.

(3) 낮은 기관 회전 속도에 해당하는 유량의 경우, 밸브를 통과하는 유동의 방향은 유량이 증가함에 따라 밸브 각에 접근한다.

참 고 문 헌

1. Annand, W.J.D., "Engine Breathing," *Automobile Engineering*, pp. 50-55, Feb. 1969.
2. Fukutani, I. and Watanabe, E., "Air Flow through Poppet Inlet Valves-Analysis of Static and Dynamic Flow Coefficients," *SAE Paper No. 820154*, 1982.
3. Bicen, A.F., Vafidis, C. and Whitelaw, J.H., "Steady and Unsteady Air Flow through an Intake Valve of a Reciprocating Engine," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, 1985.
4. Vafidis, C. and Whitelaw J.H., "Intake Valve and In-Cylinder Flow Development in a Reciprocating Model Engine," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 200, No. 41, 1986.
5. Khalighi, B., El Tahry, S.H. and Kuziak, W.R., "Measured Steady Flow Velocity Distributions around a Valve/Seat Annulus," *SAE Paper No. 860462*, 1986.
6. Comte-Bellot G., "Hot-wire anemometry," *Annual Review in Fluid Mechanics*, pp. 209-231, Vol. 8, 1976.
7. Deckker, B.E.L., "Compressible Flow through Square Edge Rectangular Orifices," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 192, No. 26, 1978.