

흡기포트 및 밸브 형상에 따른 정상 유동 특성

이상진* · 김성철* · 김득상* · 엄인용* · 조용석**

Numerical analysis of flow characteristics with intake port and valve design

Sangjin Lee*, Seongcheol Kim, Duksang Kim*, Inyong Ohm*, Yong-Seok Cho**

Key Words : Steady flow rig(정상유동장치), Valve curvature(밸브곡률), CFD (전산유체역학), Valve inner seat diameter(밸브시트 내경), Valve lift(밸브양정), Non-Dimensional Valve Lift(무차원화된 밸브양정), Mean Flow Coefficient(평균유량계수), Non-Dimensional valve Curvature(무차원화된 밸브곡률), Flow coefficient(유량계수).

Abstract

Steady flow bench test is a practical, powerful and widely used test in most engine manufacturers to give a design concept of a new engine. In order to use steady data as a performance index, it is necessary to build some database, which can correlate the port characteristics with engine data. However, it is very hard to investigate all port and valve shapes with experimental tools. The steady flow scheme is relatively simple and its results are bulk ones such as flow rate and momentum of flow. Therefore a CFD code can be easily applied to the port evaluation. In this study, the steady flow test was simulated through two and three-dimensional analysis on intake port design for comparing with experimental data and confirming the feasibility of applying analytic method. For this purpose, the effect of valve curvature on flow rate was estimated by a CFD code. There results were compared with those of real steady flow tests. As a result, the 2-D analysis described the phenomena qualitatively well, and also the results of 3-D analysis were almost consistent with experimental data.

기호설명

- C_f : flow coefficient
- D : valve inner seat diameter, m
- \dot{m} : mass flow rate, kg/s
- v_0 : characteristic velocity, m/s
- L_v : valve lift, m

1. 서론

흡기 포트 및 밸브 형상은 4 행정 기관의 흡입 유동 특성에 영향을 미치는 주요 변수로서, 이들의 형상 개선을 통한 실린더내 유동 개선은 엔진 성능 향상에 매우 효과적임이 널리 알려져 있다.^{[1][2]} 이를 위해 흡기 포트 및 밸브는 체적 효율이 최대가 되는 형상을 갖추어야 하며, 이는 엔진 출력 향상에 직접적으로 지대한 역할을 하게

된다.

실제 작동 엔진에서 흡입 유동 특성을 측정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 흡기 포트 및 밸브의 최적화 평가를 위해서는 일반적으로 정상 유동 장치를 이용, 유량계수와 와류 또는 텀블의 측정을 통해 평가되어진다. 이 정상 유동 장치의 실험 결과를 통해 얻어진 밸브 및 포트 특성과 엔진 성능과의 상관 관계는 데이터 베이스화하여 신엔진 개발에 매우 중요하게 사용되고 지고 있다. 그러나 정상 유동 장치 실험의 경우 그 장치비용 및 실험 대상물의 제작비용이 상당하고 실험 자체에도 많은 시간이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 게다가 제조 오차와 실험 오차로 인한 data의 부정확성도 문제로 지적될 수 있다.

이에 대하여 진보된 컴퓨터 기술을 바탕으로 해석 code가 매우 빠르게 발달하고 있어, 이를 이용한 수치해석 기법은 다양한 형상 변화를 고려한 실험용 흡기계통을 설계 및 제작하는 것에 비해

* 회원, 국민대학교 자동차공학과 전문대학원

** 회원, 국민대학교 기계자동차공학부

경제적으로나 시간적으로 유리하다. 또한 매우 작은 형상 변화에 대해서도 표현이 자유롭고 물리적으로도 타당한 결과를 낼 수 있기 때문에, 설계 변수 변화에 대한 정성적 및 정량적인 결과를 예측하기 위해 효과적으로 사용되어질 수 있다.

이에 본 연구에서는 상용 CFD 코드를 이용한 포트 및 밸브 평가의 첫 단계로서 흡기밸브 및 포트의 형상변수 중 밸브 곡률의 변화에 따른 흡입 효율의 특성을 CFD 해석적 기법을 통해 평가하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 밸브곡률(valve curvature)

일반적 흡기포트 및 밸브의 형상은 Fig. 1 과 같다.

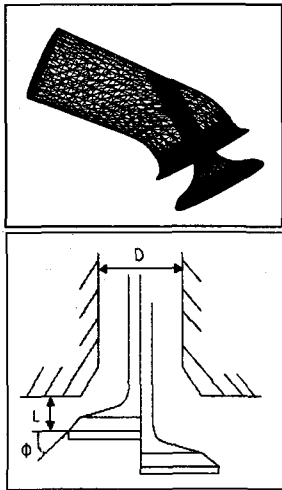


Fig. 1 Port and valve area with conical seat

통상 밸브곡률은 밸브시트 지름의 25%정도 설정하는 것으로 알려져 있으나 이는 모든 흡기 형상에 대한 최적값은 아니다. 이 곡률 변화는 흡기밸브를 통해 유입되는 공기의 유선(streamline)에 직접적 영향을 미치고, 특히 밸브의 열림 정도에 따라 흡입되는 공기의 유로 형상을 변화시킴으로 흡입 유량에 대하여 각기 다른 특성을 나타내게 된다. 따라서 각 곡률에 따라 총 유입 공기량 및 저양정과 고양정에서의 유량계수 특성이 달라질 수 있다고 생각된다.

2.2 정상유동장치

흡기계 유동 특성을 파악하기 위하여 사용하고 있는 정상유동장치는 정상 상태에서 내부 유동을

측정하여 실제 엔진의 내부유동 상태를 이해하는데 매우 유용하게 이용되고 있다. 일반적으로 사용되는 정상유동장치는 일정 압력하에서 엔진의 흡입 매니폴드, 포트 및 밸브 등의 유동 특성을 측정한다.

흡입 유동 시험시, 공기는 실린더 헤드 및 밸브를 거쳐 들어와 유량 측정용 오리피스, 블로어를 통해 밖으로 배출된다. 시험압력계는 시험중인 실린더 아래 부분의 압력 또는 진공 정도를 측정하는데 이때 시험압력은 실험장치 앞부분에 있는 조절기를 조작하여 일정하게 표준화된 값으로 설정된다. 여기서 시험압력이란 블로어에 의해 발생하는 대기압과 실린더 어댑터 사이의 차압, 즉 압력수두값을 말하며 이것을 실험 조건으로 사용한다. 밸브 양정은 실린더 헤드에 장착된 밸브양정 변화기를 이용하여 변화시키며 유량은 경사 마노메타 등으로 측정한다. Fig.2 는 상용의 정상유동장치의 개략도를 나타낸다

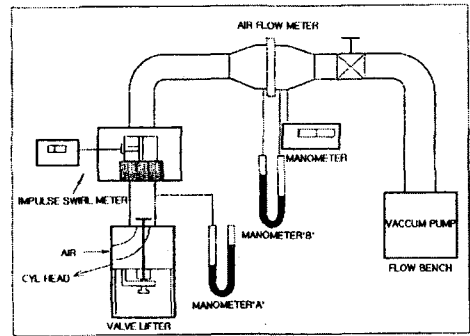


Fig. 2 Schematic diagram of steady flow rig

2.3 수치해석기법

균일 점성유체인 공기의 유동은 질량, 운동량 및 에너지의 보존식에 의하여 기술된다. 해석하려고 하는 유동이 난류일 경우에는 시간적으로 평균화한 Navier-Stoke 의 식, 즉 레이놀드 방정식을 난류모델을 사용해서 풀게 된다. 난류모델로서는 일반적으로 난류에너지 K 와 소산율 ϵ 에 대한 지배방정식을 추가하여 닫힌문제를 해결하는 $K-\epsilon$ 방정식을 사용하게 된다. 흡기포트 안의 유동을 해석하려는 경우 통상적으로 흡기포트, 흡기밸브 및 실린더로 구성된 3 차원 모델에 의하여 계산이 이루어진다.

3. 실험 및 해석

3.1 정상유동장치 실험

실험에 사용된 실린더 및 실린더 헤드의 제원은 실린더 지름 75.5mm, 흡입 밸브 지름 25.2mm, 밸브 수 3 개(흡입 2, 배기 1)이고 실린더 축에 대한 밸브의 각도는 흡기 및 배기 밸브에 대하여 22°, 20° 이다.

실험은 시험압력을 15 in.H₂O(3733Pa)로 일정하게 유지되도록 하고 실린더 헤드에 장착된 밸브양정 변환기를 이용하여 1mm부터 8mm 까지 1mm 간격으로 변화시키며 각각에서의 흡입 유량을 측정하였다. 시험 밸브로는 현재 상용되고 있는 곡률 6mm, 9mm 인 밸브를 선정하여 각각에 대하여 반복 실시하였다. 실제로는 밸브곡률 변화에 대한 흡입 유량 뿐만 아니라 흡입 과정의 스웰 및 텀블에 미치는 영향까지도 고려하는 것이 타당하나 본 연구에서는 우선적으로 밸브 곡률에 의한 유량의 차이에 초점을 맞추었다. Fig.3 은 실린더 헤드의 개략도를 나타낸다.

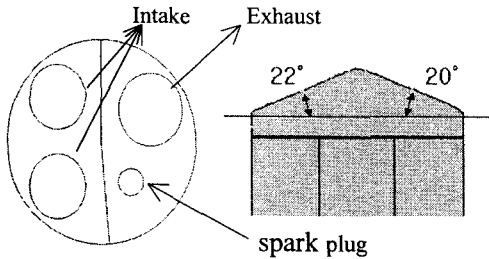


Fig. 3 Schematic diagram of test cylinder head

3.2 2차원 및 3차원 해석

여러 다양한 조건에 대한 많은 계산을 빠르게 수행하여 해석의 가능성을 일차적으로 검증하고 정성적 특성을 파악하고자 일차적으로 2 차원 단면 모델을 통해 해석을 수행하였다. 그리고 기하학적인 상사성을 일차시키기 위해 실험에서 사용된 실린더 헤드 및 실린더 치수로부터 구현된 모델을 3 차원 해석하여 그 정량성을 실험치와 비교 분석함으로써 정상상태 실험에 대한 CFD 해석 기법의 접근 가능성을 확인해 보았다

3.2.1 2차원 해석 모델

2 차원 해석에 있어서 해석 대상으로 사용한 밸브 형상은 현재 양산되고 있는 흡기밸브의 형상을 기본 골격으로 하여, 밸브곡률 3, 6, 9, 12, 15mm 에 대하여 밸브양정을 2, 4, 6, 8, 10mm 로 변화시키며 유량 계수의 변화를 관찰하였다. 연소실의

형상은 약 22° 경사의 펜트루프 형상 단면을 사용하였다. 해석에 사용된 조건은 정상유동장치에서의 실험 조건과 일치시키기 위해 경계조건으로 상대압력 기준, 입구 3733Pa(total pressure), 출구는 0Pa(fixed pressure)로 설정하였다. 난류모델로 $K-\epsilon$ mode 을 사용하였다.

경계 조건 및 초기 조건을 위한 설정값은 다음과 같다.

$$\Delta P = 3733 \text{ Pa for total pressure}(15\text{in.H}_2\text{O})$$

$$v_{inlet} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \times 3733}{1.1563}} = 80.36 \text{ m/s} \quad (1)$$

$$\text{난류강도} \quad I = 0.02$$

$$\text{난류에너지} \quad K = \frac{3}{2}(I * V)^2 \quad (2)$$

$$= \frac{3}{2}(0.02 * 80.3)^2$$

$$= 3.8 \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

$$\text{소산률} \quad D = \frac{C_{\mu}^{0.75} K^{1.5}}{\kappa L} = 1333 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{s}) \quad (3)$$

Fig.4 은 2 차원모델의 기본 형상 및 밸브곡률 3, 6, 9, 12, 15mm 를 가진 밸브 모델을 나타낸다. 실린더 길이는 내경의 약 3 배 정도로 구성하였으며 포트 형상은 직립구조로 구성하였다.

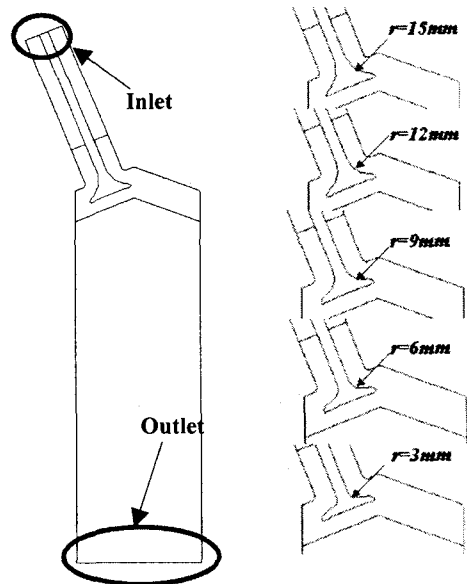


Fig. 4 Curvature model geometry and valves

Fig.5 는 2 차원 모델에 대한 대표 격자구조를 나타낸다.

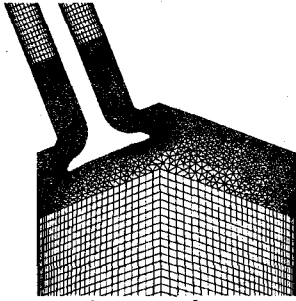


Fig. 5 Unstructure and structure for curvature model

Fig.5 의 격자구조를 살펴보면 포트 입구 영역과 실린더 영역은 structure 구조로 격자를 구성하였고 밸브, 포트 및 실린더가 결합하는 영역은 그 형상의 특성상 unstructured 구조로 하는 hybrid 격자를 구성하였다. 격자수는 structure는 약 7000 개, unstructure 구조는 약 5000 개로, 총 12000 개 cell로 구성하였다. 수렴시간은 Pentium III 700Hz, 256Mb memory 컴퓨터로 약 30 분 소요되며, 이때 소산율을 제외한 나머지 변수들에 대하여 잉여치값(residual)이 10^{-3} 이하로 수렴하였다.

3.2.2 3차원 해석 모델

3 차원 해석 모델 형상은 흡입 유량의 정량적인 값을 실험 데이터와 비교하고 동시에 실린더내 공기 유동 형상을 분석하기 위해 실험에서 사용된 포트, 실린더 및 실린더 헤드의 실제 형상 데이터를 이용하여 구현하였으며 밸브 형상은 실험에서 사용한 6mm 및 9mm 의 곡률을 가진 밸브를 구현하였다. 밸브양정 변화와 해석 조건은 실험 조건을 모사한 2 차원 해석 조건과 동일하게 구성하였다.

Fig.6 은 해석 대상인 밸브 6mm 와 9mm 에 대한 surface model 을, Fig.7 은 해석 모델의 전체 형상과 격자구성을 나타낸다.

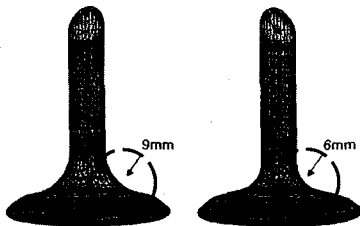


Fig. 6 Valves with 6 and 9mm curvature

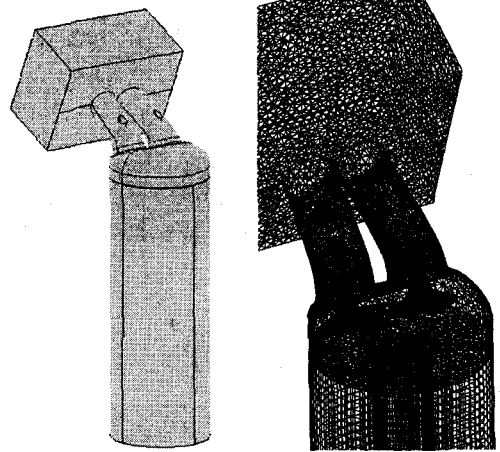


Fig. 7 Curvature model geometry and mesh structure

격자구성에 있어서 포트와 밸브 및 실린더가 만나는 영역은 그 형상의 복잡성으로 인해 tetrahedral grids 로 구성하였고 실린더 영역에 대해서는 structure grids 로 구성하였다. 격자수는 structure grid 영역은 약 50000 cell, tetrahedral grid 영역은 각 모델에 대해서 약간의 차이가 있으며 약 170000 cell로 구성하였다. 수렴시간은 Pentium III 700Hz, 256Mb memory 컴퓨터로 각 모델에 따라 차이가 있으며 약 15 시간 계산 후 잉여치 값이 약 10^{-3} 이하로 수렴하였다.

2D 해석과 3D 해석 모두 상용 해석 code 인 CFDRC 사의 CFD-ACE 6.4 를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

밸브 평가를 위한 무차원 변수를 정의하면 다음과 같다.

$$\text{Non-Dimensional Valve Lift: } L_{\text{non_dim}} = \frac{L_v}{D_i} \quad (4)$$

여기서 L_v = 밸브 리프트, D_i = 흡입 밸브인너시트 지름

$$\text{Flow Coefficient: } C_f = \frac{4m}{\rho v_0 \pi D^2} \quad (5)$$

여기서 $v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}$, ΔP = 시험압력,

D = 흡입 밸브시트 안쪽지름, ρ = 밀도

$$\text{Mean Flow Coefficient: } \text{Mean } C_f = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} C_f d\theta}{\theta_2 - \theta_1} \quad (6)$$

여기서 θ_1 ; 흡기밸브가 열리는 크랭크각

θ_2 ; 흡기밸브가 닫히는 크랭크각

Non-Dimensional valve Curvature : $R_{non-dim} = \frac{R}{D_v}$ (7)

등의 정의가 사용되었다.

4.1 실험 결과

Fig. 8은 밸브 곡률 6, 9mm에 대한 정상유동장치 실험 결과이다.

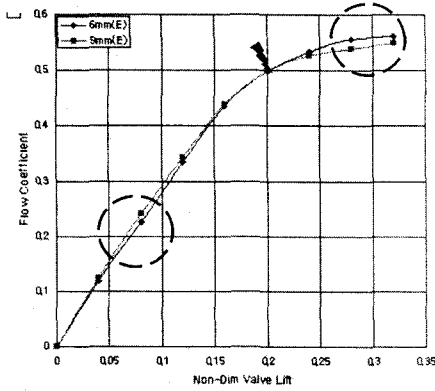


Fig. 8 Flow coefficients variation compared with valve curvature

그래프 특성을 살펴보면 저양정에서는 밸브 곡률 9mm일 때가 유리하며, 고양정에서는 곡률 6mm일 때가 더 효과적인 것으로 나타났다. 무차원 밸브 양정 0.2 근방에서 두 곡률에 대한 효율이 역전되는 것을 살펴볼 수 있다. 위 결과를 통해 valve lift에 따라 각 곡률에 의한 유동 특성의 차이가 발생함을 확인할 수 있고, 이에 밸브 곡률은 유량계수 특성에 영향을 미치는 인자로 볼 수 있다.

4.2 해석결과

4.2.1 2차원 해석 결과

Fig. 9과 Fig.10은 2차원 해석 25개 모델 중 밸브곡률 9mm에 대한 밸브양정 8mm의 해석결과로서 각각 유동 속도 및 압력 분포를 나타낸다

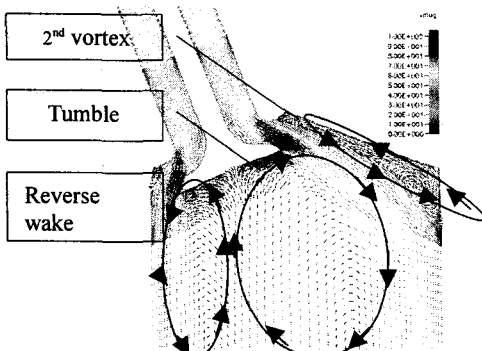


Fig. 9 Flow velocity view of curvature model

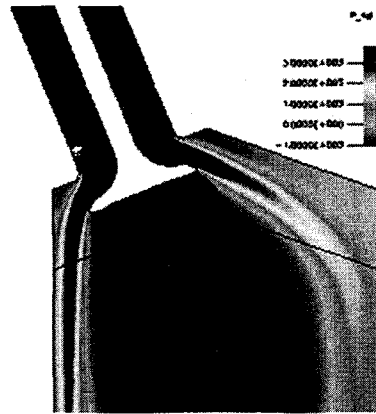


Fig. 10 Total pressure distribution of curvature model

그래프가 나타내는 와류, 턴블 형상 및 압력 분포 등의 유동 특성들이 실험적으로 증명된 일반적인 경향과 일치하는 경향을 보이며 이를 통해 계산의 유효성을 검증해 볼 수 있다.

Fig.11은 밸브 곡률 3,6,9,12,15mm에 대한 각 밸브양정에서의 유량계수 및 평균유량계수를 나타낸다.

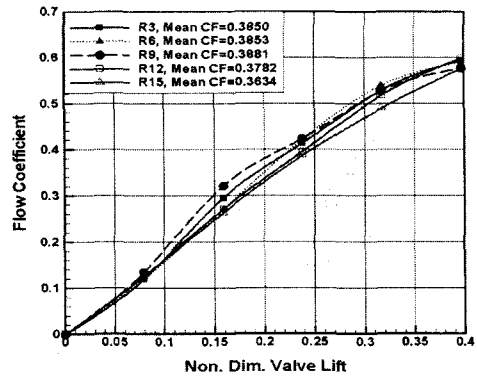


Fig. 11 Flow coefficient variation compared with valve curvature in numerical analysis

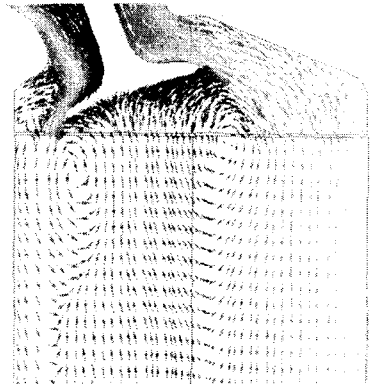
각 곡선의 정성적인 경향과 값들이 대체적으로 실험 결과와 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 특히 곡률 6mm와 9mm에 대한 고양정 특성 및 저양정 특성이 실험에서의 경향과 정성적으로 일치함을 알 수 있다. 즉 저양정에서는 9mm 곡률을 가진 밸브가 유리하고 고양정에서는 6mm 곡률을 가진 밸브가 유리함을 구별할 수 있다.

평균유량계수를 비교해 보면 9mm, 6mm, 3mm 가 높은 밸브 효율을 나타내고 있으며 12mm, 15mm에서는 상대적으로 낮은 효율을 보이고 있다. 이것은 곡률의 증가에 따라 흡입 공기를 실제로 받아들일 수 있는 흡입 유효 면적이 작아짐과 동시에 유동 형태의 변화로 인한 손실에서 기인한 것으로

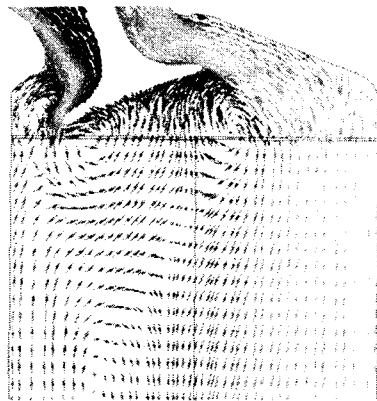
사려된다.

4.2.2 3차원 해석 결과

Fig.12 는 밸브 곡률이 각각 6mm 와 9mm 인 모델에 대해 밸브 양정 10mm 일 때의 유동 형상을 한쪽 밸브 축을 기준으로 단면을 잘라 나타낸 그림이다. (a)와 (b)를 비교해 보면 밸브 곡률 6mm 과 9mm 일 때 유동 형상이 크게 차이가 남을 알 수 있고, 이에 해석 결과를 통해서도 밸브 곡률의 변화는 유동 특성에 큰 지배 인자임을 확인할 수 있다.



(a) Y-cut view for curvature 6mm



(b) Y-cut view for curvature 9mm

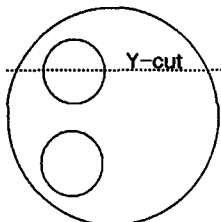
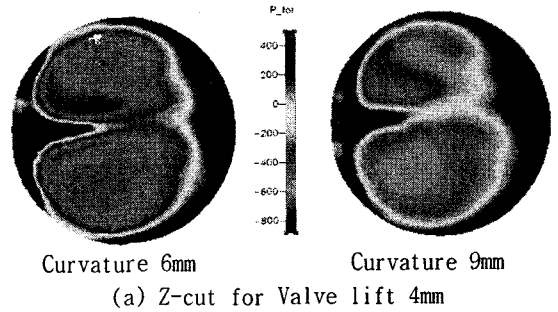
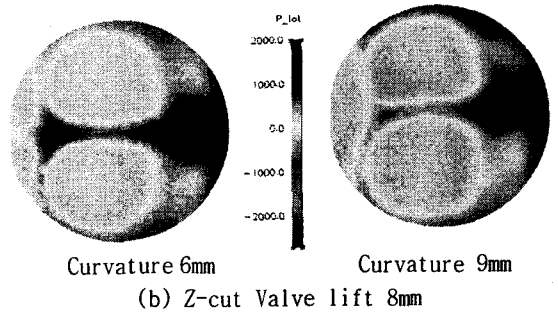


Fig. 12 Flow pattern of Y-cut section centering one valve axle when valve lift is 10mm

Fig.13 은 밸브 곡률이 각각 6, 9mm 인 모델에 대해 상사점 부근에서의 압력 분포를 나타내고 있다. (a)는 밸브 양정 4mm, (b)는 밸브양정 8mm 일 때의 결과이다.



(a) Z-cut for Valve lift 4mm



(b) Z-cut Valve lift 8mm



Fig. 13 Pressure distribution for curvature models

(a)의 밸브양정 4mm 일 때의 압력분포를 분석해 보면 곡률 9mm 일 때가 곡률 6mm 때에 비하여 high pressure 면적(그림에서 보면 실린더 외각)이 더 넓은 것을 확인할 수 있다. 이것은 저양정에서는 곡률 9mm 를 가진 밸브가 6mm 밸브보다 흡입 효율에 있어 더 유리하다는 것을 암시해 준다. 같은 방법으로 (b)의 그림들을 비교해 보면 고양정(8mm)에 있어서의 흡입 효율은 곡률 6mm 일 때가 9mm 일 때보다 더 효과적임을 알 수 있다.

Fig.14 는 곡률 6mm 와 9mm 에 대하여 밸브 양정에 따른 유량계수를 나타낸 그래프이다.

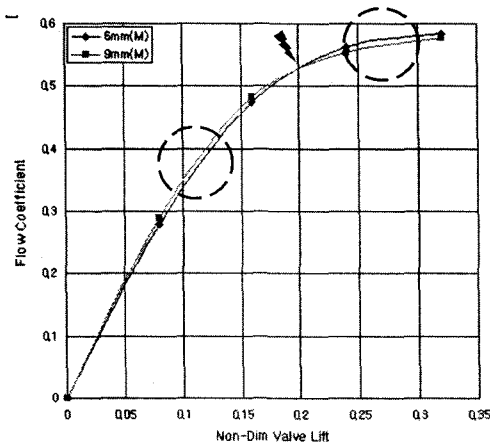


Fig. 14 Flow coefficients variation compared with valve curvature

그래프를 통해 각 무차원 밸브 양정에 따른 유량계수 값이 실험치(Fig.8)와 정성적 및 정량적으로 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 즉 밸브양정 따른 유량계수의 증가 기울기가 일치하고, 저양정에서는 9mm 가 유리하고, 고양정에서는 6mm 가 더 효과적으로 나타난 실험 특성값도 일치하며, 또한 두 곡률에 대한 효율의 변환 시점도 실험결과와 동일한 무차원 밸브양정 0.2 근방에서 이루어짐을 확인할 수 있다.

5. 결론

이상의 정상유동장치의 실험과 2 차원 및 3 차원 해석 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 상용 CFD 코드를 사용한 정상 유동 해석은 실제 실험과 정성적 및 정량적으로 매우 유사한 결과를 보였으며 이를 통해 상용 코드를 이용한 정상유동 해석은 중요한 개발 수단이 될 수 있음이 확인되었다.
- 2 차원 계산 결과를 토대로 보면 무차원 밸브 곡률($R_{non-dim}$) 0.119, 0.238, 0.357(본 실험에서는 곡률 3, 6, 9mm)에서 상대적으로 높은 흡입 능력을 나타내며 곡률이 더 크면 흡입 효율을 떨어지는 것을 알 수 있다.
- 밸브 곡률의 변화는 흡기 유동 특성에 영향을 미치며 각 곡률에 따라 다른 특성을 나타낸다.
- 각 곡률에 대한 흡입 효율은 밸브 양정에 따라 다른 특성을 나타낸다.

참 고 문 헌

1) Taylor, C.F. "The Internal Combustion Engines in Theory and Practice", MIT Press, Vol. 1, 1979.

2) Gosman, A.D. "Flow Processes in Cylinders" in Thermodynamics and Gas Dynamics in Internal Combustion Engines, Horlock, J.H. and Winterbone, D., Oxford University Press, Vol. 2, 1986.

3) John B.Heywood "Internal Combustion Engine Fundamentals", pp. 220-221, Mcgraw-Hill, 1988

4) G. Cussion LTD. Flow bench "SuperFlow 600" Manual, 1993

5) L. S. Kastner, T. J. Williams And J. B White, "Poppet Inlet Valve Characteristics and Their Influence on the Induction Process", Proc.I.Mech.E, Vol 178, No 955, 1963

6) 배충식, 정경석, "실린더헤드 형상에 따른 정상유동특성", 한국자동차공학회 추계학술대회는문집, 1225-6832, Vol. 4, No. 5, pp.197-205, 1996

7) 지명석 "흡기포트 형상에 따른 밸브주위의 3 차원 유속측정" 한국자동차공학회 추계학술대회 학술강연초록집(제 2 회장) 1989, 11 pp.57-62

8) 하대진, 박경석 "흡기밸브 형상이 흡입유동에 미치는 영향" 자동차공학회지 서울, 한국자동차공학회, 1989 v.11, n.6, pp.57-67 1225-3073

9) CFD-ACE Manual v. 6.4, CFD research Corporation, 1998