

# PCV(Positive Crankcase Ventilation) 밸브 최적화 설계 Optimal Design of Positive Crankcase Ventilation Valve

이종훈 · 이연원 · 김재환

J. H. Lee, Y. W. Lee and J. H. Kim

**Key Words** : PCV system(강제 크랭크케이스 환기시스템), Blowby gas(블로우바이 가스), Spool(스풀)

**Abstract** : In the development of new automobiles, the efforts to reduce environmental problems like air pollution have been risen. Blowby gas consists of about 20~35% of total amount of Hydrocarbon (HC), one of dangerous pollutants issuing from automobiles. A PCV valve is a very small component in an automotive engine but it is a very important part. Because that a PCV valve is used to control blowby gas and to recirculate it into a manifold automatically. Although it has very simple operating principle, designing a PCV valve is so difficult due to interaction between fluid and solid. In this study, our purpose is to develop a design program for a PCV valve and to verify its efficiency. Both Bernoulli equation and 4th order Runge-Kutta method were adopted to predict spool displacements and flow patterns. Comparing with experiments, it was found that both spool diameters and displacements were predicted well, however, flow rates showed a little differences because of the assumption of non viscous flow.

## 1. 서 론

최근에 들어 자동차의 대수의 급격한 증가로 인해 환경 문제가 대두되기 시작하면서, 세계 각국에서 환경 규제를 강화하고 있는 실정이다. 또한, 자동차가 대중화되면서 신차의 출시기간이 빠르게 되고 있어 PCV 밸브의 설계를 보다 빨리 행하여야 하지만, 실제 이와 같은 설계는 주로 1차 밴드인 중소기업에서 이루어지므로 설계 단계에서는 설계인력의 부족 등 많은 어려움을 가지고 있다.

PCV 밸브는 엔진의 매니폴더 흡입관에 부착되는 부품으로서, 블로우바이 가스의 유량을 제어하면서 이 가스를 다시 연소실로 보내는 역할을 수행한다. 블로우바이 가스라 함은 연소 후 가스가 실린더 내벽과 피스톤 사이의 미세한 틈을 통해 크랭크케이스 내부로 유입되는 것을 말하며, 이것은 크랭크케이스 내의 엔진오일과 화학반응을 통해 엔진오일의 혼탁에 따른 성능저하 및 부식을 촉진하며, 크랭크케이스 내부 압력을 상승시키므로 엔진의 성능저하

및 폭발을 야기한다. 이 블로우바이 가스는 자동차에서 배출되는 전체 HC(탄화수소)의 20~35%의 차지한다.<sup>[1]</sup>

따라서, 본 연구에서는 PCV 밸브 설계 단계에서 설계자들이 쉽게 사용할 수 있도록 윈도우 환경 하에서 작동하는 설계 프로그램을 Bernoulli 방정식과 4차 Runge-Kutta법을 이용하여 개발하고, 현재 양산되고 있는 제품과 비교 평가를 하여 타당성을 검증한다.

## 2. 설계 프로그램

### 2.1 설계 개요

PCV 밸브는 엔진의 블로우바이 가스를 처리하는 회로에 있어 유량을 제어하는 중요한 부품이다. 그러나 각 입, 출구 차압 별 유량제어가 제대로 이루어지지 않아 실제 공정상에서 높은 불량률을 보이고 있는 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 시제품 개발 시 밸브의 기하학적 형상 설계 공정을 개선하기 위한 선행 연구로서 외부 조건에 따른 고정된 밸브의 바디 형상에 있어 유량을 직접적으로 제어하는 내부의 스푼 형상 설계로 한정한다.

Fig. 1은 전형적인 PCV 밸브의 단면을 보여주는 것으로서, 그 구조가 메인 바디, 스푼, 리턴 스프링

접수일 : 2005년 12월 15일  
이연원(책임저자) : 부경대학교 기계공학부  
E-mail : ywlee@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1417  
이종훈 : 부경대학교 대학원 기계공학부  
김재환 : (주)이원정공 기술연구소

(Return spring) 그리고 쿠션 스프링(Cushion spring)으로 구성되어 있음을 보여준다.

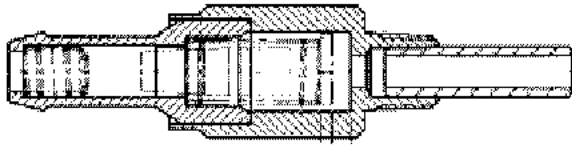


Fig. 1 Schematic diagram of a PCV valve

PCV 밸브는 엔진의 사양에 따라 Fig. 2와 같이 여러 가지 유량특성을 가진다. 밸브의 입 출구 차압에 의해 유동이 야기되고, 유체에 의한 유체력과 리턴 스프링의 탄성력 간의 힘의 평형 관계에 의해 스톱이 움직이게 되고 이에 따라 오리피스 부분의 유로변화로 유량을 제어한다. 그러므로 가장 중요한 설계변수는 스톱의 이동변위와 그 변위에서 요구 유량특성을 만족하는 스톱의 직경이라 할 수 있다. 여기에서는 현재 양산되고 있는 MX, X3, LZ-MPI, ALPHA-D, LX3.0의 5가지 PCV 밸브 모델에 대해서 얻어진 실험값과 같은 조건에서 새로 설계된 모델 간의 스톱 직경 및 이동변위를 비교하였으며, X3 모델에 대해서는 설계 프로그램으로 새로 설계된 제품을 직접 가공하여 기존의 모델과 유량을 실험 비교하였다.

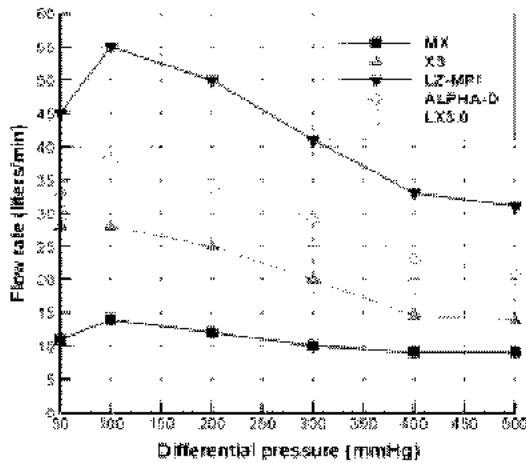


Fig. 2 Flow rates required for PCV valves

### 2.2 설계 이론

선행 연구를 통해서 스톱에 작용하는 압력이 점성력에 비해 약 100배정도 크므로, 점성력을 무시하여도 됨을 알 수 있었다. 또한, 입, 출구 차압이 오리피스를 지나는 스톱의 단면에 작용한다는 가정을

사용하여도 무방함을 알 수 있었다.<sup>[2][3]</sup>

PCV 밸브는 엔진의 종류에 따라 여러 가지 유량 특성을 요구하므로, Fig. 3의 오리피스 B지점에서 유량특성을 만족하도록 유로면적을 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 1차원 비압축성 무마찰 단열유동으로 가정하고 구간 A, B에 대해 베르누이 방정식을 적용하면 식(1)과 같이 된다.

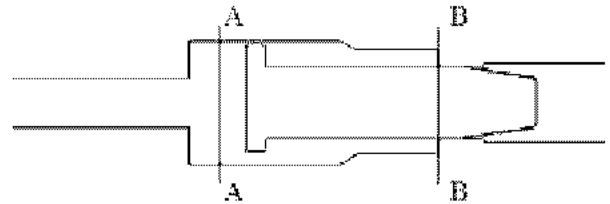


Fig. 3 Two sections for applying Bernoulli equation

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{v_A^2}{2} = \frac{p_B}{\rho} + \frac{v_B^2}{2} + \alpha \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 는 수정 항으로서, 기하학적 형상, 유체의 압축성 효과 및 점성효과 등에 기인하며 실험에 의해 경험적으로 정해진다.

비압축성 유체의 연속방정식은 식(2)와 같다.

$$a_A v_A = a_B v_B \quad (2)$$

여기서,  $a$ 는 단면적을 나타낸다. 식(1)과 식(2)를 이용해서 B지점에서의 속도는 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$v_B = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a_B}{a_A}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

이 때의 오리피스 유량은 식(4)와 같고, B지점에서의 면적은 식(5)와 같이 된다.

$$Q_B = v_B a_B \quad (4)$$

$$a_B = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (5)$$

여기서,  $D$ 는 오리피스의 직경,  $d$ 는 스톱의 직경이다.

식(3), (4) 그리고 (5)를 이용하여 스톱의 직경은 최종적으로 다음과 같이 얻어진다.

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{Q_B^2}{\frac{2\Delta p}{\rho} + \frac{Q_B^2}{a_A^2}}} \quad (6)$$

스풀에 작용하는 외력의 자유물체도는 Fig. 4와 같다. 스푼의 이동변위  $x$ 는 Newton의 운동법칙에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$m \frac{dv}{dt} = \Delta p A - k_1 x \quad (7)$$

$$m \frac{dv}{dt} = \Delta p A - k_1 x_c - (k_1 + k_2) x \quad (8)$$

여기서,  $m$ 은 스푼의 질량,  $v$ 는 스푼속도,  $\Delta p$ 는 입 출구 차압,  $A$ 는 오리피스를 관통하는 스푼의 단면적,  $k$ 는 스프링 상수이고, 첨자 1, 2는 각각 리턴 스프링과 쿠션 스프링을 나타낸다. 또한,  $x_c$ 는 초기 상태의 스푼 끝단과 쿠션 스프링 사이의 거리를 의미한다.

식(7)은 스푼의 변위  $x$ 가  $x_c$ 보다 적을 때, 식(8)은  $x_c$ 보다 클 때 각각 적용된다. 이 식은 초기치 문제로서 4차 Runge-Kutta법을 이용하여 풀 수 있다.

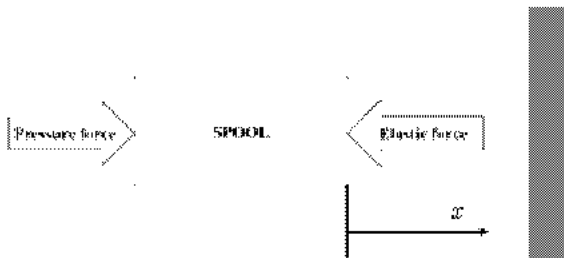


Fig. 4 Free body diagram of a spool

설계 프로그램의 순서도를 Fig. 5에 나타내었다. 입력값으로 초기에 차압 케이스의 개수, 각 차압의 요구유량, 바다, 스푼 및 리턴 및 쿠션 스프링의 기초적인 형상정보를 주면, 스푼의 끝단과 쿠션 스프링 사이의 거리  $x_c$ 를 계산한 후에 먼저 베르누이 방정식을 이용하여 각 차압의 요구유량을 만족하는 스푼의 직경을 계산하고, 이 직경의 위치선정을 위해 스푼의 이동변위를 계산하여 전체적인 스푼형상이 설계된다. 여기서,  $i$ 는 현재 차압 케이스의 순번을 의미하고  $n$ 은 초기에 주어진 전체 차압 케이스의 개수이다.

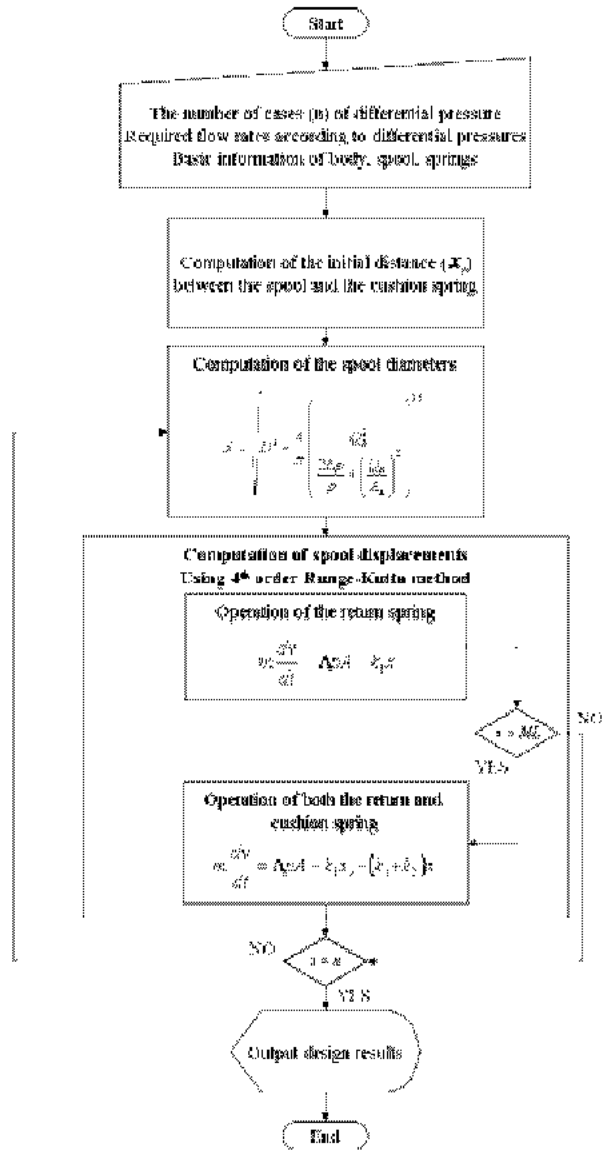
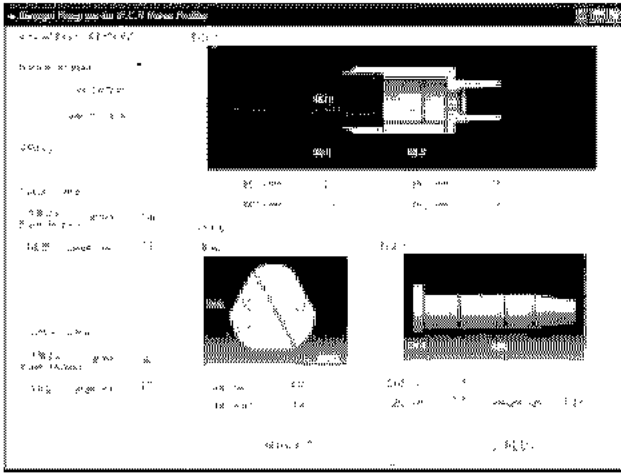
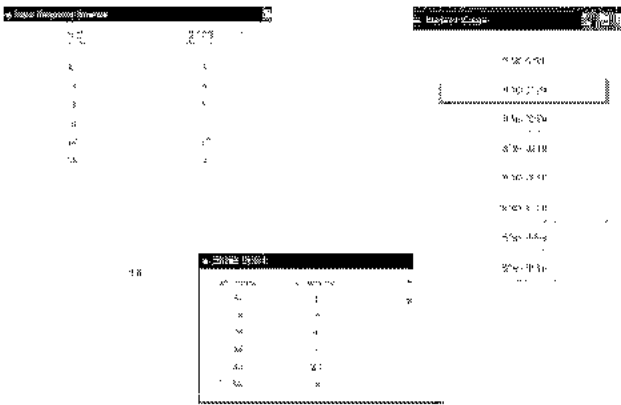


Fig. 5 Flow chart of design program

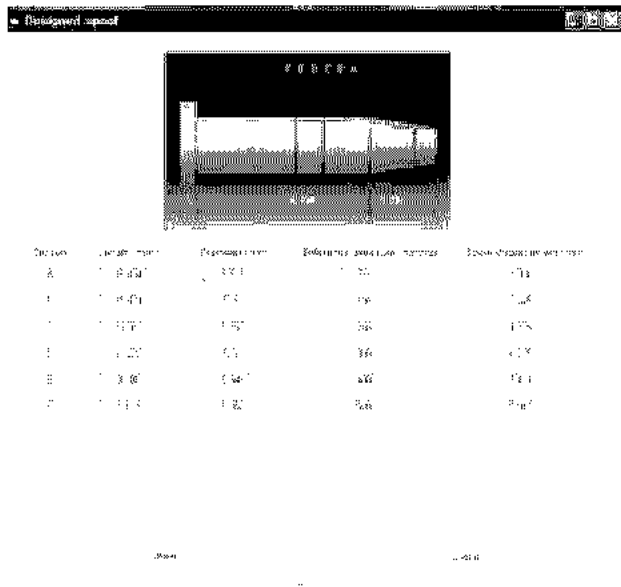
Fig. 6은 윈도우 환경으로 구축된 설계프로그램을 보여준다. (a)는 주 입력창으로서 기본적인 밸브의 형상정보를 입력하도록 하였고, 좌측 상단에서 차압의 개수를 결정한 후에 "User Define" 버튼 또는 "Select Case" 버튼을 누르면 (b)와 같은 창이 생성되어 사용자가 차압별 요구유량을 직접 입력 또는 기존의 정보를 이용할 수 있게끔 하였다. 기본적인 정보의 입력이 이루어지고 난 후에 하단의 "ANALYSIS" 버튼을 누르면, 스푼의 직경 및 변위를 산출하게 되고, "SCREEN" 버튼을 누르면 (c)와 같이 각 차압별 요구유량을 만족하는 스푼의 형상정보와 스푼의 이동변위를 화면창에 도시한다. 또한, 사용자가 결과를 문서화 할 경우 하단의 "Print" 버튼을 누르면 프린터를 통해 인쇄할 수 있다.



(a) Main input window



(b) Input windows for flow rates according to various differential pressures



(c) Output window

Fig. 6 Window platform for spool design

### 3. 설계 결과 및 실험과의 비교 고찰

설계 프로그램에 의한 설계 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 현재 양산되고 있는 5가지 모델에 대해서 실험값과 같은 조건에서 설계 프로그램에 의해 재차 설계된 모델들 간의 스톱 직경 및 이동변위를 비교하고, 이 모델들 중에 X3 모델은 설계 프로그램에 의해 새로 설계된 제품을 직접 가공하여 기존의 모델과 유량을 실험 비교하여 보았다. 결과를 비교한 그래프 상에서 적색선은 기존의 모델, 녹색선은 설계프로그램에 의해 기존 모델과 동일한 조건에서 새롭게 설계된 모델을 의미한다.

아래의 Fig. 7은 실험 장치의 구성도를 보여준다. PCV 밸브 입구(좌측)의 압력은 대기압 상태이고, 출구(우측)측에 진공 펌프를 설치하여 차압을 발생시켰고, 차압의 크기를 제어하기 위하여 제어밸브를 부착하였다. 또한 발생된 입출국 양단의 차압을 측정하기 위하여 압력계를 설치하였다. 그리고, 입구측에 유량계를 설치하여 밸브를 통과하는 공기의 유량을 측정하였다.

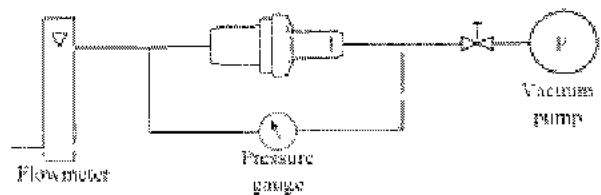
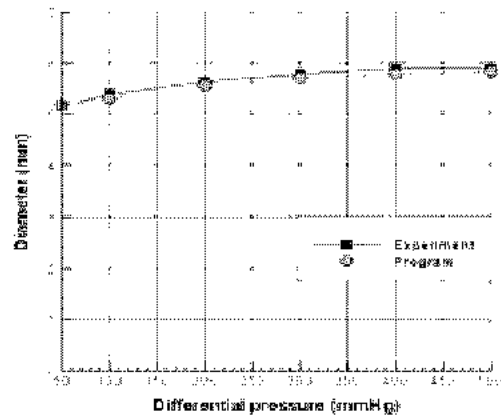


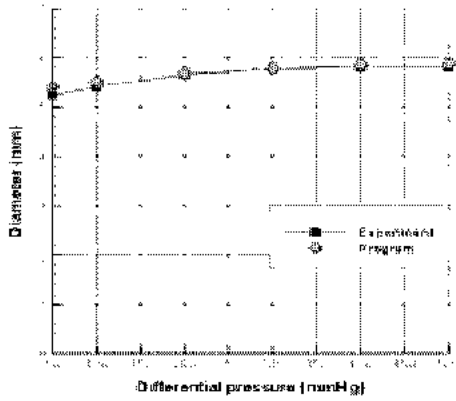
Fig. 7 Experimental equipment for PCV valves

#### 3.1 스톱직경 비교

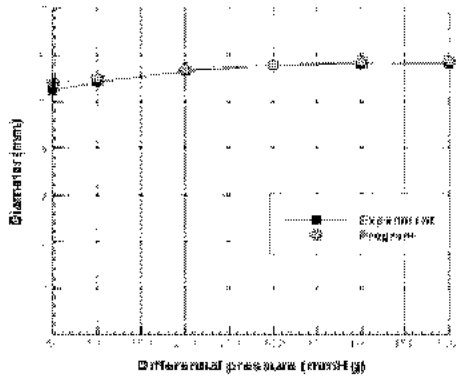
Fig. 8은 설계프로그램을 통해 계산된 스톱과 현재 양산되는 모델들의 직경을 비교한 것이다.



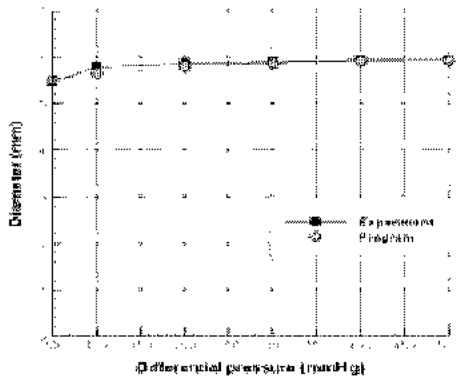
(a) LZ-MPI



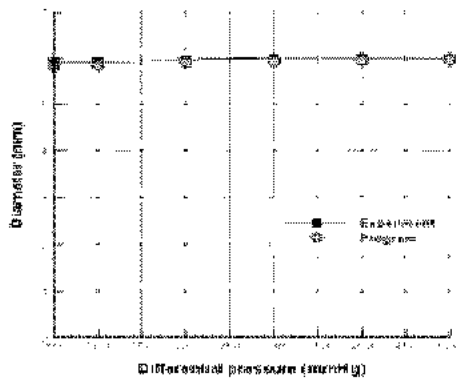
(b) ALPHA\_D



(c) LX\_3.0



(d) X3



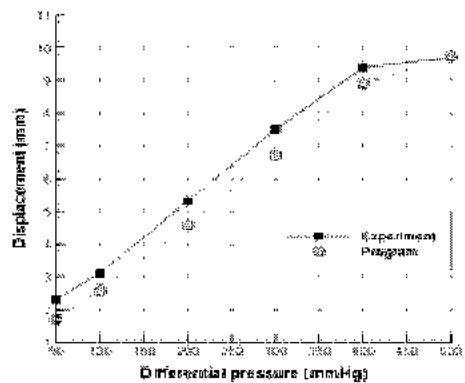
(e) MX

Fig. 8 Comparison of spool diameters between commercial PCV valves and new ones

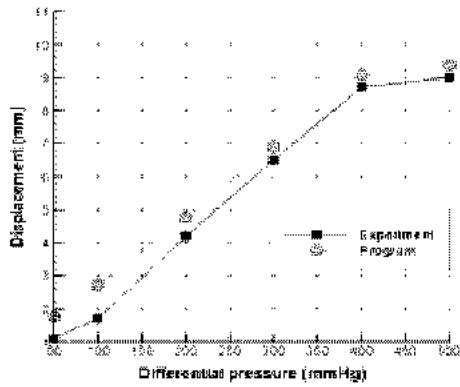
LZ-MPI, X3, MX 모델에서는 조금 작게, ALPHA-D, LX3.0에서는 약간 크게 직경이 설계되었으나, 전체적으로 차압이 높을수록 오차가 적고, 차압이 낮은 50, 100 mmHg에서 오차가 크게 발생하는 것을 볼 수가 있다. 이것은 낮은 차압에서는 구동력의 약화로 유속 또한 작아지기 때문에, 유체의 점성효과가 상대적으로 증가함을 의미한다. 따라서 본 연구에서 적용한 베르누이 방정식이 점성효과를 고려하지 않음으로서 일어날 수 있는 결과로 판단된다. 그러나 차압의 증가와 더불어 구동력이 크게 되면 유속은 증가하고, 따라서 유체의 관성력이 상대적으로 점성력에 비해 커지게 되므로 그 오차는 줄어든다.

### 3.2 스톨 이동변위 비교

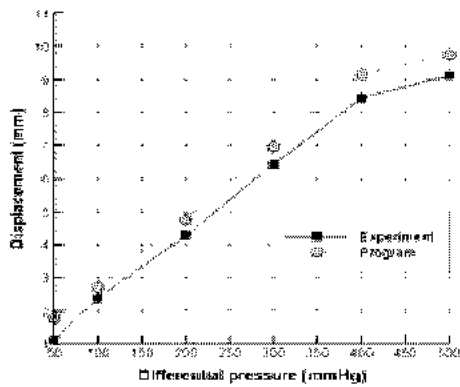
Fig. 9는 스톨의 이동변위를 기존 양산 모델과 동일 조건에서 새롭게 설계된 모델에 대해서 각각 비교한 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, LZ-MPI 모델을 제외한 나머지 모델에서는 보다 크게 측정되었다. 실제 밸브 내에서의 스톨 이동은 약 차압 400 mmHg까지는 차압의 증가와 더불어 스톨이 단지 리턴 스프링을 수축 시키면서 선형적인 증가를 하지만 약 차압 500mmHg에서 출구측에 있는 스톨의 끼임 방지를 위한 쿠션 스프링을 수축시키므로 이동증가의 폭이 크게 감소한다. 또한, 차압 100 mmHg를 제외한 나머지 차압들에서 스톨은 작동유체의 맥동현상에 의해 캐터링 현상이 일어나며 측정 오차범위는 약  $\pm 0.5\text{mm}$  이다. 이것을 감안하면, 이번 연구에서 개발되어진 설계 프로그램은 정성적인 면에서나 정량적인 면에서 기존 모델들과 유사한 양상을 보여주고 있음을 알 수 있다.



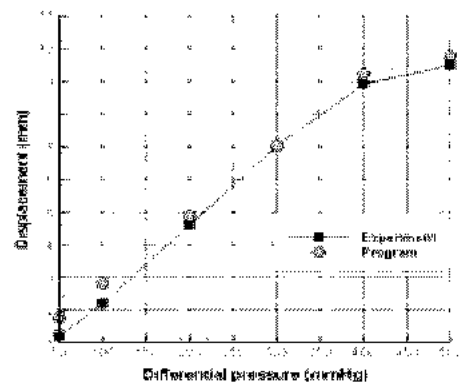
(a) LZ-MPI



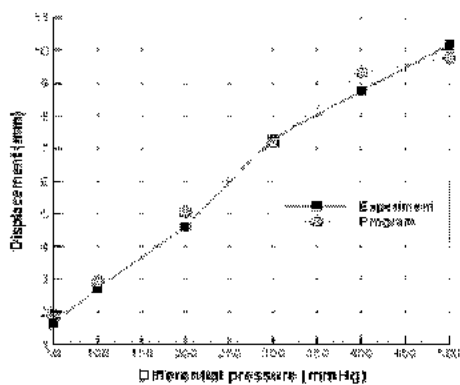
(b) ALPHA\_D



(c) LX\_3.0



(d) X3



(e) MX

Fig. 9 Comparison of spool displacements between commercial PCV valves and new ones

### 3.3 유량특성 비교

PCV 밸브는 주어진 차압조건 하에서 요구되는 유량특성을 만족하여야 한다. 요구 유량조건들은 Fig.10의 적색선과 같이 각각의 차압구간에서 상한과 하한값으로 주어진다. 개발된 설계프로그램을 이용하여 설계되어진 PCV 밸브와 양산 모델과의 유량특성을 비교하기 위해 현재 상업적으로 많이 이용되고 있는 X3 모델을 채택하였다. 그 결과는 Fig. 10과 같다. 차압 50 mmHg를 제외하고는 전반적으로 유량이 조금 많게 측정되었다. 이것은 Fig. 8(d)의 X3모델의 스톱 직경과 비교해서 차압 100 mmHg에서 직경오차가 가장 큼에 따라 유량특성에서도 오차가 이와 대응해서 발생하였으며, 차압 300 mmHg에서 500 mmHg까지는 스톱 직경 오차가 아주 작은 것에 반해 큰 차압이 입, 출구 양단에 작용함에 따라 오리피스를 지나는 유속이 매우 높게 되어 계측 유량이 요구유량의 상한치보다 조금 높게 나타난다.

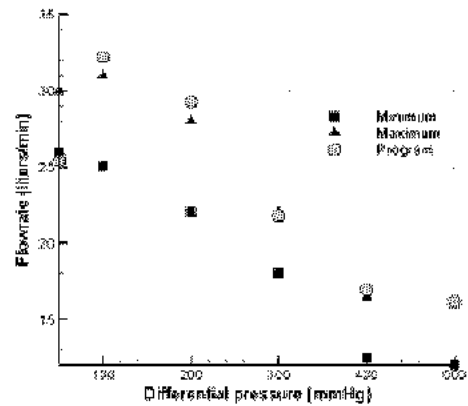


Fig. 10 Comparison of outlet flow rates between X3 valve and new X3

## 5. 결 론

본 연구에서 PCV 밸브 설계를 위해 유동을 비압축 단열 유동으로 가정하여 베르누이 방정식을 기반으로 하는 설계 프로그램을 개발하였다. 스톱의 동적 거동 해석은 4차 Runge-Kutta법을 이용하여 수행하였고, 설계 제작된 PCV 밸브를 현재 양산되고 있는 모델들과 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 베르누이 방정식을 이용한 스톱의 직경계산은 차압 100 mmHg를 기준으로 차압이 증가할수록 실제 모델과 가까워짐을 알 수 있었다.

- 2) 스톱의 동적 거동 계산에서 유체력을 단지 입, 출구 차압만을 고려하였지만, 실제 모델의 측정 결과와 비교를 하면 정성적/정량적으로 유사하게 예측함을 알 수 있었다.
- 3) 유량 측정 결과를 통해 스톱의 직경계산에서 밸브의 기하학적 형상 및 스프링의 영향들을 고려한 수정 항을 도입하여 좀 더 정확한 설계를 도모해야 할 필요성이 있다.

## 후 기

이 논문은 2003년도 부경대학교발전기금재단의 지원에 의하여 연구되었음. 또한 비교실험은 (주)이원정공 기술연구소에서 행하여졌음을 밝혀 사의를 표함.

## 참고 문헌

1. H. C. Dhariwal, 1997, "Control of blowby emissions and lubricating oil consumption in I.C. engines", Energy Convers. Mgmt, Vol. 38, No. 10-13, pp. 1267-1274
2. 이종훈, 최윤환, 이연원, 2005, "PCV(Positive Crankcase Ventilation) 밸브의 유동특성에 관한 수치해석", 자동차공학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 66-73
3. 이종훈, 최윤환, 이연원, 2005, "Moving Mesh를 이용한 PCV 밸브의 내부유동 수치해석", 한국동력기계공학회지, 제9권, 제2호, pp. 40-44
4. 손병진, 맹주성, 이상환 편저, 1994, "詳設 流體力學 (上)", 喜重堂
5. 홍준표 저, 2004, "C 및 FORTRAN에 의한 컴퓨터 수치해석", 문운당
6. 이장무, 이종원, 박영필 공역, 1995, "기계진동 제3판", 喜重堂