수평력을 받는 Plastic type PCV 밸브 내부 유동 가시화

최윤환* · 이연원†

Flow Visualization of Plastic type PCV Valve with Horizontal Force

Yoon Hwan Choi and Yeon Won Lee

Abstract. PCV(Positive Crankcase Ventilation) system is designed to remove blowby gas. In this system, a PCV valve is attached in a manifold suction tube to control the flow rate of blowby gas which generates various operating conditions of an automotive engine. As this valve plays a crucial role, the demand in its design is high owing to the small size and high velocity. For this reason, a numerical investigation was carried out to understand both the spool dynamic motion and internal fluid flow characteristics. As a result, the spool dynamic characteristics(i.e. displacement, velocity, acting force), increase in direct proportion to the magnitude of the pressure difference and indicate periodic oscillating motions. Moreover, the velocity at the orifice region decreases according to the increase in differential pressure due to energy loss caused by the sudden decrease of flow area at the orifice region and the increase of flow volume in front of the spool head. Finally, the mass flow rate at the outlet decreases with the increase of spool displacement.

Key Words: Flow Visualization (유동가시화), Plastic type PCV Valve (플라스틱형 PCV 밸브), Horizontal force (수평력), Blow-by gas (미연소가스), Dynamic motion (동적거동)

1. 서 론

자동차에서 발생하는 배기가스는 대기오염의 주범으로 꼽히고 있으며 최근 엄격해진 배기가스 규제와 더불어 배기가스의 질을 중요하게 생각하고 있는 실정이다. 비슷한 관점에서 엔진 연소실 내에서 발생한 연소 후 가스는 대부분 배기관을 통해 배출되지만, 피스톤에 부착되어져 있는 피스톤링이 장시간 운전으로 인한 마모로 실린더와 피스톤 사이의 틈새로 연소 후 발생하는 배기가스 중 일부가 크랭크 케이스로 유입되며 이것은 크랭크케이스 내부의 엔진오일과 화학반응을 일으켜 크랭크케이스 내부의 부식을 가속화하고, 압력 상승으로 인해 엔진 효율을 저감시킨다⁽¹⁾.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 PCV (Positive crankcase ventilation) 밸브는 자동차 엔진의 rocker

cover에 장착되어 연소실에서 발생한 미연소가스 (Blow-by gas : HO, CO, NOx 등)가 대기로 방출되는 것을 방지하고 엔진의 구동조건에 따라 발생량이 다른 블로우바이 가스를 제어하여 엔진 연소실로 피드백하여 재연소가 가능하도록 한다^(2, 3).

현재 자동차용 PCV 밸브의 재질은 탄소강이 대부분을 차지하고 일부 차종에는 플라스틱 재질을 채용한 제품이 개발 및 상용화되고 있는 실정이다. 플라스틱 재질의 PCV 밸브는 탄소강 재질에 비하여 제작이나 운전시 발생하는 소음 및 수명이 우수한 것으로 알려져 있으며 향후에는 플라스틱 재질을 채용한 PCV 밸브가 주종을 이룰 것으로 판단된다.

지금까지 수행된 PCV 밸브에 대한 연구는 탄소강 재질에 대한 연구가 대부분이며 이^(4, 5, 6) 등은 탄소강 재질의 PCV 밸브 내부의 유동장 및 크랭크케이스 차압에 따른 밸브의 유량을 수치해석적으로 구한 바 있다. 그러나 이 등의 연구는 차압에 따른 밸브의 동적거동을 모두 해석하지는 못하였고 준정상 상태를 가정한 해석을 통하여 밸브의 특성을 파악하였다.

†부경대학교 기계자동차공학과

E-mail : ywlee@pknu.ac.kr

*부경대학교 기계자동차공학과

이^(4, 5, 6) 등이 연구한 준정상 상태의 해석은 해석의 편의나 해석시간의 단축 등의 이점이 있으나 동적인 해석을 실시간으로 수행하지 못하기 때문에 보다 정확한 예측을 위해서는 밸브의 거동을 실시간으로 파악하여 동적특성을 해석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 플라스틱 재질의 PCV 밸브에서 차압에 따른 밸브의 동적거동을 실시간으로 계산하여 밸브의 특성을 파악하고자 한다. 본 연구를 통한 결과는 추후 플라스틱 재질 PCV 밸브 개발에 있어 기초자료가 될 것이다.

2. 해석모델 및 수치해석 방법

2.1 해석모델

PCV 밸브의 작동구조는 Fig. 1과 같이 밸브 입·출구 양단의 압력차에 의해 유체력이 스톱에 가해져 스톱이 출구 방향으로 움직이게 되고, 스톱의 변위에 따라 내부 오리피스스의 단면적이 변화함으로서 출구 유량이 달라진다. 그림에서 스톱을 제외한 구조는 축대칭이지만 스톱헤드의 형상이 비대칭이기 때문에 본 연구에서는 3차원 유동장에 대하여 유동해석을 수행하였다. 수치해석에 있어서 유동에 의해 스톱에 발생하는 압력과 점성력의 총합과 유량제어 스프링의 변형에 의해 발생하는 탄성력의 차이에 의해 스톱이 동적으로 이동하게 된다.

스톱에 작용하는 힘의 경우, 아래의 식 (1)을 통해서 구할 수 있다. +X방향으로 미연소가스의 압력에 의한 힘과 스톱의 무게가 작용한다. 그리고 -X 방향으로 스프링의 탄성력이 작용한다. 스톱에 작용하는 힘을 나타내는 식 (1)의 좌변은 스톱에 실제적으로 작용하는

힘의 합을 통해서 구할 수 있다. 스톱에 작용하는 힘은 작동유체를 통해서 작용하는 유체력에 해당하는 F_{flow} 가 있고, 스톱을 지지하고 있는 스프링에 의해 작용하는 힘인 F_{spring} 이 작용하게 된다. 밸브 내로 유체가 이동하면 이 두 힘이 균형을 이루는 지점에 스톱이 위치한다.

$$m \frac{dv_s}{dt} = F_{flow} - F_{spring} \quad (1)$$

여기서 m 은 스톱의 질량, v_s 는 스톱의 이동속도, t 는 시간이다. 식 (1)에서 좌변을 이산화하면 아래의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m \frac{V_{\neq w} - V_{old}}{t_{step}} = F_{flow} - F_{spring} \quad (2)$$

다시 스톱의 새로운 위치에서의 스톱의 속도를 나타내는 $V_{\neq w}$ 는 아래의 식 (3)에 나타난 것과 같이 이산화가 가능하다.

$$m \frac{d_{\neq w} - d_{old}}{t_{step}} = F_{flow} - k \times d_{\neq w} \quad (3)$$

위의 식 (3)을 새로운 변위를 나타내는 $d_{\neq w}$ 에 대해서 정리하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$d_{\neq w} = \left[-F_{flow} - m \frac{V_{old}}{t_{step}} + m \frac{d_{old}}{t_{step}^2} \right] \left[\frac{m}{t_{step}^2} - k \right] \quad (4)$$

식 (4)를 통해서 시간 $t + \Delta t$ 때의 스톱의 변위를 계산할 수 있다. 다음 시점에서는 계산된 변위가 예전 값으로 치환($(d_{\neq w} = d_{old})$)되어 위의 식을 반복적으로 계산하여 시간에 따라 변하는 변위를 계산할 수 있다.

Fig. 2에 스톱변위를 계산하는 순서도를 제시하였다. 그림에서 우선 초기의 변위를 설정하고 초기 시점에 대하여 내부 유동장(N-S 방정식)을 계산한다. 계산된 유동장의 정보를 사용하여 스톱에 작용하는 유체력과 스프링력을 조합하여 각 시점에 스톱이 이동한 변위를 계산한다. 스톱 변위가 정해지면 스톱이 변위된 유동장에서 스톱의 이동으로 인하여 유동장의 형태가 변하게 되고 계산 격자계에서 격자가 늘어나거나 줄어들어 변화된 유동장을 표현한다. 이렇게 변화된 유동장을 다시 계산하는 과정을 반복하여 최종적으로 이동하는

Fig. 1. Flow direction and geometry of the PCV valve.

Fig. 2. Flow chart for spool displacement.

변위를 구할 수 있다.

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 해석을 위하여 열유체해석 범용코드인 CFX-13을 사용하였으며 격자생성은 해석의 정밀도와 수렴성을 향상시키기 위하여 전용격자 생성프로그램인 ICEM-CFD13을 사용하여 육면체 격자계를 생성하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 격자계이며 절점의 수는 약 400,000개이다.

유동해석은 비정상상태로 수행했으며 밸브 양단의 압력차는 현재 양산되는 국산차(H, K사)의 설계기준에 따라 50, 100, 200, 300, 400, 500 mmHg로 설정하였다. 해석에 사용된 난류모델은 k- ω 계열의 SST 난

Fig. 3. Computational hexahedral grid system.

Fig. 4. Horizontal force on the spool for various pressure differences.

류모델이며 스풀의 이동속도가 매우 빠르기 때문에 시간간격은 10^{-5} 초로 충분히 작도록 설정하였다. 8CPU, 16GB memory의 시스템을 사용하여 병렬프로세싱을 수행했으며 계산에 소요된 시간은 각 차압에 대하여 평균 24시간 정도이다.

3. 해석결과 및 검토

3.1 스풀의 동적거동

스풀의 이동변위는 차압에 따라 달라지며 스풀의 변위에 따라 출구 유량이 결정되므로 이동변위는 중요한 변수가 된다. 스풀의 변위에 직접적인 영향을 주는 수평력은 차압이 증가하거나 감소하게 되면 스풀이 받는 수평력도 그에 비례하여 증가하거나 감소하게 된다. Fig. 4에 각 차압에 따른 스풀이 받는 수평력을 제시하였다. 수평력은 차압에 비례하여 선형적으로 증가하며 각 차압에서 스풀이 받는 수평력은 50, 100, 200, 300, 400, 500 mmHg에서 각각 0.1, 0.197, 0.389, 0.596, 0.653 그리고 0.756N이다. 스풀이 받는 수평력은 300 mmHg까지는 급격하게 증가하고 이후는 오리피스 유로가 좁아짐에 따라 유체 마찰 및 점성력의 증가로 인하여 완만하게 증가하는 경향을 보인다.

스풀이 받는 수평력의 차이는 스풀의 변위에 직접적인 영향을 준다. Fig. 5는 각 차압에 따른 스풀의 이동변위를 도시한 것이다. 그림에서 차압이 낮을수록 스풀의 이동거리가 짧아지고 차압이 증가하면 이동거리가 늘어나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3의 결과와 유사하게 차압 50~300 mmHg 구간에는 스풀의 변위가 선형적이지만 다소 급격하게 증가하며 그 이후 구간인

Fig. 5. Spool displacement for various pressure differences.

400~500 mmHg에서는 완만하게 증가함을 알 수 있다. 각 차압에서 최대 이동거리는 50, 100, 200, 300, 400, 500 mmHg에서 각각 4.1, 4.76, 6.06, 7.36, 7.68 그리고 8.03 mm이다.

스풀의 동적거동에 따른 PCV 밸브 내부 유동의 가시화는 PCV 밸브 설계자에게 시각적인 정보를 제공함으로써 실제 밸브를 설계함에 있어 많은 도움이 될 것으로 판단된다. Fig. 6에 작동시간에 따른 스풀의 동적거동을 파악하기 위하여 차압 300 mmHg에 대하여 각 시점에 따른 내부 유동장을 마하수 분포로 나타내었다.

Fig. 6에서 차압이 작동한 후 0.001초가 지난 시점에서 스풀은 출구 방향인 오른쪽으로 이동하며 밸브 입구쪽의 속도는 낮고 출구를 통과한 일부분의 속도만 높게 형성되고 있다. 시간이 경과하면 스풀은 오른쪽으로 점차 이동하고 밸브 내부의 유동도 전체적으로 빨라지고 있음을 확인할 수 있으며 시간이 0.004초일 때 속도가 가장 높게 형성되고 이후 0.0045초에서는 속도가 0.004초 일 때와 비슷하게 유지된다. Fig. 6에서는 0.0045초 이후에는 스풀이 거동하지 않고 균형을 이루게 된다.

3.2 밸브 내부유동특성

차압에 따른 PCV 밸브 내부의 속도장을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 속도장은 스풀이 이동하여 정상 위치로 이동한 경우에 대한 것이며 Fig. 5에서 설명한 바와 같이 차압에 따라 스풀의 최종 변위가 달라지므로 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 차압이 증가하면 증가된 차압으로 인하여 밸브를 통과하는 유체의 속도가 빨라진다. 스풀헤드를 통과한 부분에서

Fig. 6. Contour plot of Mach number for pressure difference 300 mmHg.

재순환 영역이 존재하고 이 재순환 영역은 스풀을 반대방향으로 당기는 힘으로 작용한다. 그리고 오리피스 앞 영역에도 재순환 영역이 존재하는데 이 영역은 스풀에 큰 힘을 가하지는 못한다.

스풀이 우측으로 이동하면 스풀 끝부분 오리피스의 유로가 좁아지게 되므로 변위가 커지는 경우에 해당하는 차압이 커지게 되면 오리피스를 통과하는 유속이 커지는 것을 알 수 있다. 오리피스를 통과하는 유동의 형태는 일반적인 이중 제트유동의 양상을 보이는데 이로 인하여 오리피스를 지난 후에 제트유동이 형성되고 제트유동 사이에는 재순환 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

차압에 따른 오리피스를 통과하는 최고속도는 차압 50, 100, 200, 300, 400, 500 mmHg에서 각각 110,

Fig. 7. Velocity distributions for various pressure differences.

153, 196, 223, 249 그리고 255 m/s 이다. 여기서 차압 300, 400 그리고 500에서는 최고속도가 다른 경우에 비해 크지 않는데 이는 300에 비해 400과 500인 경우 오리피스 면적이 크게 좁아져 유체 마찰로 인하여 차압이 증가하여도 유속은 그에 비례하여 증가하지 않은 것으로 생각된다.

각 차압에 따른 속도장 계산 결과를 이용하여 Fig. 8에 차압에 따른 질량유량을 계산하였다. 질량유량은

Fig. 8. Mass flow for various pressure differences.

차압이 증가하면 비례적으로 증가함을 확인할 수 있는데 Fig. 7의 설명에 따르면 최고속도는 차압 300 mmHg 이상에서는 크게 변하지 않지만 Fig. 8의 결과는 최고 속도에 관계없이 질량유량은 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 등온조건하에서 압축성유동해석에 의해 압력이 증가하면 유체가 압축되어 유체 밀도가 증가하고 이에 따라 질량유량이 증가한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 플라스틱형 PCV 밸브에 대하여 차압에 따른 유동해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 차압 50~300 mmHg 구간에는 스톱의 변위가 선형적이지만 다소 급하게 증가하며 그 이후 구간인 400~500 mmHg에서는 완만하게 증가한다.
- 2) 차압이 커지면 오리피스를 통과하는 유속은 차압 300 mmHg 까지는 비례적으로 증가하지만 300 mmHg 이상에서는 점성작용에 의해 증가폭이 감소한다.
- 3) 차압 300 mmHg 이상에서는 유체가 압축되어 유체 밀도가 증가하고 이에 따라 오리피스를 통과하는 질량유량은 증가한다.

후 기

본 연구는 부산테크노파크가 주관하고 교육과학기술부, 부산광역시가 지원한 지방과학연구단지육성사업 R&D 역량강화지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Dhariwal, H. C., 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) Hoekstra, R. L., Collier, K., Mulligan, N. and Chew, L., 1995, "Experimental Study of a Clean Burning Vehicle Fuel," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol.20, No.9, pp.737-745.
- 3) White, F. M., 1974, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, pp.163-189.
- 4) Lee, J. H., Choi, Y. H. and Lee, Y. W., 2005, "A numerical analysis for internal fluid flow of a PCV valve by using moving mesh," *KSPSE*, Vol.9, No.2, pp.40-44.
- 5) Lee, J. H., Lee, Y. W. and Kim, J. H., 2005, "A Study on Flow Characteristics in a PCV valve according to Various Differential Pressures," *KOSME*, pp.30-31.
- 6) Lee, J. H., Choi, Y. H. and Lee, Y. W., 2005, "Computational Analysis of Flow Characteristics of a PCV Valve," *KSAE*, Vol.13, No.4, pp.66-73.