

Moving Mesh를 이용한 PCV 밸브의 내부유동 수치해석

이 종 훈*1, 리 리*1, 김 영 국*1, 최 윤 환*2, 이 연 원*2

A numerical analysis for internal fluid flow of a PCV valve by using moving mesh

J. H. Lee*1, L. Li*2, Y. G. Kim*2, Y. H. Choi*3, Y. W. Lee*3

A great deal of exhaust gas inside a combustion room goes out through exhaust pipe but residual gas, is called "Blow by gas", enters the crankcase through a small gap between the piston and the cylinder wall. Here, if the crankcase isn't vented, this causes many bad effects such as lubricant oil contamination, corrosion by that and crankcase explosion by rising pressure. So most automobiles are constituted with a PCV(Positive Crankcase Ventilation) system to prevent previous problems. PCV valve is the most important part in this ventilation system. When companies are manufacturing new cases, engineers are designing it depending on their experiments than theoretical knowledges. Much efforts and times are needed for new development. This study will show quantitative results to increase the possibilities.

Key Words: PCV(Positive Crankcase Ventilation), 블로우바이가스(Blow-by gas), 오리피스(Orifice), 준정상상태(Quasi-Steady state), 스펴(Spool), MDM(Moving Dynamic Mesh)

1. 서 론

PCV 밸브는 승용엔진 전 차종에 들어가는 부품으로서 엔진에서 미연소된 가스를 엔진의 조건에 의해 변화하는 유량을 제어하여 미연소 가스(블로우바이 가스)를 재순환시켜 재 연소를 할 수 있게 하는 부품이다. 블로우바이 가스는 피스톤에 부착되어져 있는 피스톤링이 장시간 운전으로 인한 마모로 인해 발생하는 실린더와 피스톤 사이의 틈새로 연소실에서 연소 후 발생하는 배기가스 중 약 25%정도가 크랭크케이스로 유입되는 것을 말한다. 블로우바이 가스는

실제 자동차 엔진의 작동에 있어서 많은 악영향들을 미친다.

블로우바이 가스는 대부분 HC, CO로 구성되어 있으며, 이것은 엔진오일과 화학적 반응을 일으켜 엔진 오일의 윤활 및 냉각의 기본적인 성능을 저하시키고, 또한 이러한 화학반응물들은 엔진 내부 부식을 촉진시킨다. 또한, 크랭크케이스로 유입되는 블로우바이 가스를 적절히 배출하지 않으면, 크랭크케이스 내부의 압력상승에 의한 피스톤 왕복운동의 효율저하로 엔진 성능이 감소하고, 최악의 경우에는 크랭크케이스의 폭발을 야기하기도 한다[1].

현재 세계에서 양산되는 모든 자동차에는 이러한 문제를 방지하기 위해서 블로우바이 가스 처리회로가 구성되어 있다. 이 회로는 크게 개방 시스템과 밀폐 시스템으로 구분된다(Fig. 1 참조). 전자는 팬으

*1 학생회원, 부경대학교 기계공학부 대학원

*2 정회원, 부경대학교 기계공학부

로 신선한 외기를 크랭크케이스에 불어 넣어서 드래프트 튜브에서 외기로 방출하는 것이고, 후자는 블로우바이 가스를 INTAKE MANIFOLD로 보내어 실린더 내에서 재연소시키는 것이다. 밀폐 시스템에서는 크랭크케이스와 INTAKE MANIFOLD를 연결하는 MANIFOLD SUCTION TUBE 사이에 PCV 밸브를 장착하고 블로우바이 가스가 흡인되는 양과 신선한 혼합기의 양이 균형을 이루도록 자동적으로 제어하고 혼합기가 농후해 지는 것을 방지하는 작용을 행한다.

본 연구의 목적은 차압의 변화에 따른 PCV 밸브 내부 스펴의 거동을 비정상적으로 해석하고, 밸브작동시 재순환되는 가스의 양을 조사하여, PCV 밸브 설계에 사용될 기본 자료로 활용함이다.

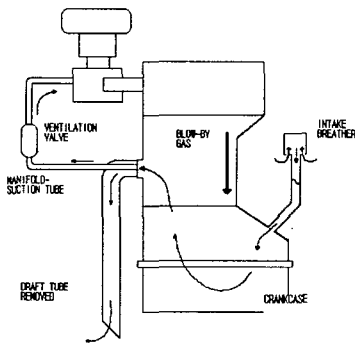


Fig. 1 Schematic diagram of positive crankcase ventilation

2. 해석 모델 및 수치 해석 방법

2.1 해석 모델

엔진의 실린더와 피스톤 틈새 사이로 크랭크실에 유입되는 blow-by gas가 PCV 밸브를 통해 연소실로 재순환되는 과정을 Fig. 1에 도시하였다.[2] 재순환과정은 서론에서 설명한 바와 같다.

본 연구에서는 현재 양산되고 있는 PCV 밸브 중 X3 모델에 대해서 우선적으로 수치해석을 하였다. X3모델의 구조는 Fig. 2와 같이 바디, 스펴, 유량제어 스프링 그리고, 출구측에 스펴의 끼임방지를 위한 쿠션스프링으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 스펴의 형상이 내부유동에 미치는 영향은 무시하였다.

PCV 밸브의 작동구조는 입·출구 양단의 압력차에 의해 스펴이 출구측으로 움직이게 되고, 이 때 스펴의 이동에 따라 내부 오리피스 단면적이 변함으

로서 요구유량을 얻게 된다. 수치해석을 함에 있어서 유동에 의해 스펴에 발생하는 압력과 점성력의 총합과 유량제어 스프링의 변형에 의해 발생하는 탄성력의 차이에 의해 스펴이 동적으로 이동하게 된다.

계산영역의 격자는 스펴의 이동변위에 따라 격자생성을 하였으며, 대표적으로 이동변위가 1mm 일 때 Fig. 5에서 보는 바와 같이 육면체격자로 구성하였으며, 전체 격자수는 평균적으로 20만개를 사용하였다.

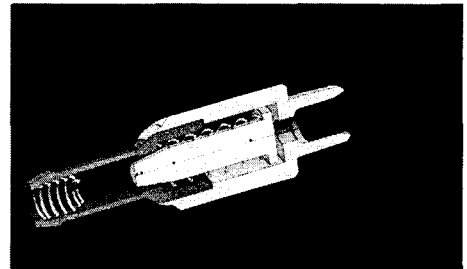


Fig. 2 Geometry of X3 model

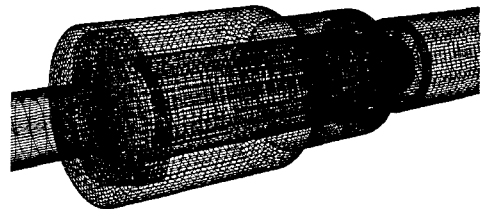


Fig. 3 Grid generation of PCV valve

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 열유체해석 상용코드인 Fluent를 사용하여 유동을 해석하였고, 해석에 사용된 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델이며, 밸브 내부의 최대유속이 $0.3Ma$ ($102m/s$)보다 크면 압축성 고려를 위해서 이상기체 상태방정식($\rho = p/RT$)을 적용하였다. 이때의 입구온도 조건은 상온($300K$), 출구온도 조건은 Neumann 조건($\partial T/\partial s = 0$), 벽에서는 단열조건 그리고, 난류운동에너지의 점성소산에 의한 열은 무시하여 압축성 효과가 단지 압력에 의해서 일어나도록 하였다.

스프링이 차압에 대하여 이동하는 것을 해석하기 위하여 스펴표면에 걸리는 힘을 합하여 스펴을 이동시켰으며, 계산에 사용된 방정식은 Fluent에서 UDF 파일을 이용하여 직접 코딩하였다.

3. 수치해석 결과 및 검토

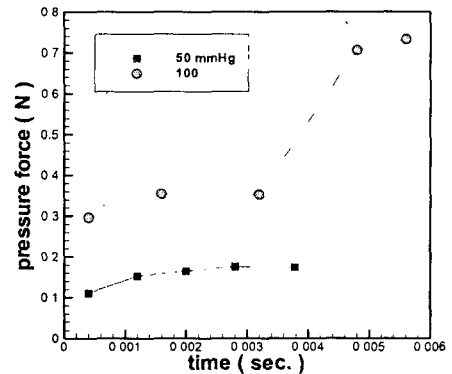
3.1 PCV 밸브의 동적특성

밸브 양단에 차압이 걸리면, 밸브 내부 스푼 표면에는 압력에 의한 힘과 유체의 점성에 대한 힘이 작용한다. 따라서 스푼의 동적거동은 표면에 걸리는 힘과 내부 스프링의 힘이 균형을 이루는 방향으로 진행된다. 또한 스푼이 이동하면 오리피스 면적이 변화되므로 밸브를 지나가는 가스의 유량이 변화되고 밸브 내부 유동이 시간에 따라서 변화하게 된다.

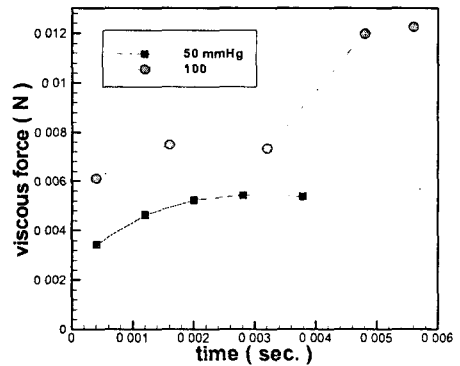
Fig. 4는 스푼이 차압을 받을 때 표면에 걸리는 힘들을 시간의 변화에 따라 도시한 것이다. Fig. 4 (a)는 압력에 대한 힘을 나타낸 것이고, (b)는 점성에 대한 힘 그리고 (c)는 이 두 힘들의 합을 나타낸 것이다. 그림에서 힘의 변화는 차압 50 mmHg인 경우에 선형적으로 변하는 반면에 차압 100 mmHg인 경우에는 시간 0.003초 이후에 크게 증가하는 모습을 보인다. 이는 이 때에 오리피스의 단면적이 급격히 줄어들어 오리피스를 지나가는 가스의 유속이 급격히 증가함으로 압력차가 크게 발생하기 때문에 나타난 현상이다.

그림에서 힘의 크기는 압력힘이 점성력에 비하여 500배 정도 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 스푼이 받는 전체힘은 Fig. 4 (c)에 나타난 것처럼 압력에 의한 힘이 지배적이라고 할 수 있다.

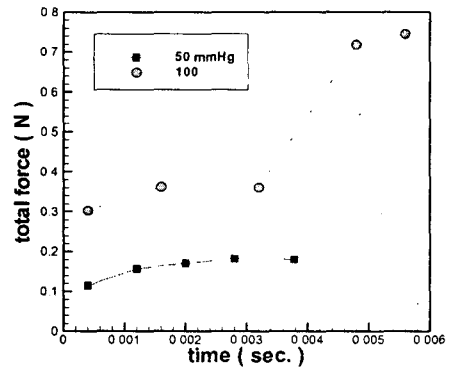
Fig. 5은 스푼이 이동하여 정상상태에 도달했을 때 스푼 표면에 걸리는 압력분포를 나타낸 것이다. 차압 50 mmHg인 경우 스푼 왼쪽에는 거의 대기압 상태를 유지하고 오른쪽에는 약 -50 mmHg가 작용하는 것을 확인할 수 있고, 수치해석 시 부여한 입 출구 경계조건과 합당한 결과를 보여준다. 차압 100 mmHg인 경우는 왼쪽의 압력은 0(대기압)이고 오른쪽의 압력은 약 -100 mmHg로서 차압 50 mmHg인 경우와 비슷한 양상을 나타낸다. 차압 50 mmHg에서는 최저압이 -70 mmHg로 떨어지고, 차압 100 mmHg에서는 -150 mmHg까지 압력이 떨어진다. 이것은 오리피스부분에서 유로의 급감으로 유속이 증가함에 따라 이 부분에서 압력이 급격히 떨어지게 된다.



(a) Pressure force

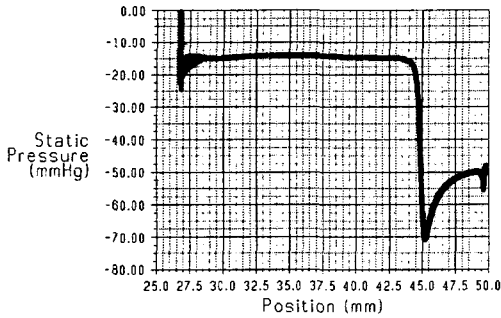


(b) Viscous force

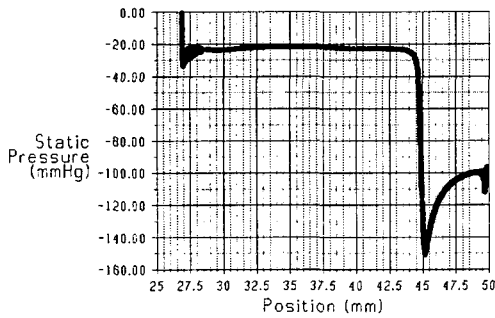


(c) Total force

Fig. 4 History of total forces on the spool for various pressure



(a) $\Delta p = 50 \text{ mmHg}$



(b) $\Delta p = 100 \text{ mmHg}$

Fig. 5 Pressure distribution on the spool for various Δp

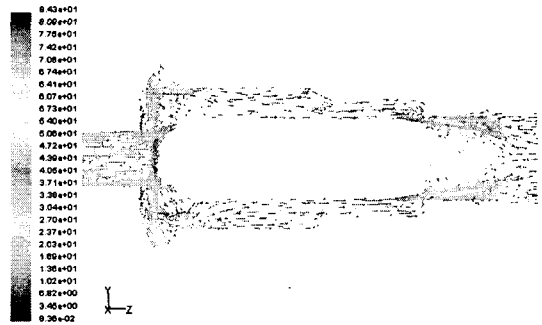
3.2 스펴거동에 따른 내부 유동특성

Fig. 6은 밸브양단의 차압이 50 mmHg인 경우에 대하여 스펴이 거동하여 힘의 균형이 이루어지는 시점까지 시간에 따른 밸브 내부의 유동을 나타낸 것이다. 그림에서 스펴 양단에 차압이 걸린 후 0.0004초가 지나면 유동은 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고, 밸브 입구쪽 스펴헤드부분에서 두개의 와류가 존재하고, 스펴 왼쪽의 헤드부분에 의해 유로가 좁아져 밸브 벽면부분으로 빠른 제트유동의 양상을 보인다. 이때 발생한 제트유동은 밸브의 1/2 지점까지 진행되고 제트유동 하단에는 여러 개의 와가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

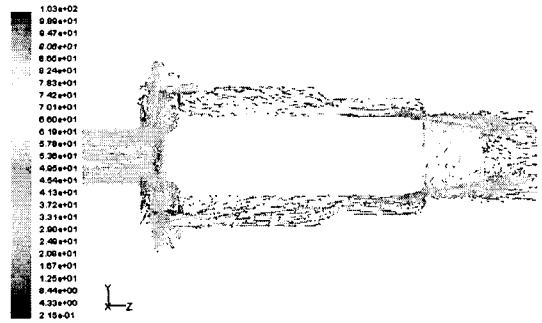
밸브의 1/2지점을 지나면 유로는 다시 좁아지고 좁아진 유로를 지나면 스펴과 밸브의 틈새인 오리피스 영역이 나타난다. 오리피스 영역은 스펴의 이동에 의하여 영역의 크기가 결정된다. 즉 스펴이 오른쪽으로 이동하면 오리피스의 면적은 작아지고 반대로 왼쪽으로 이동하면 오리피스 면적은 커지게 된다. 오리피스의 전과 후는 각각 확대 축소관의 형태를 가지

며 이러한 형태로 인하여 차압이 증가하면 유속이 초음속 영역에 도달할 수 있는 구조이다.[3]

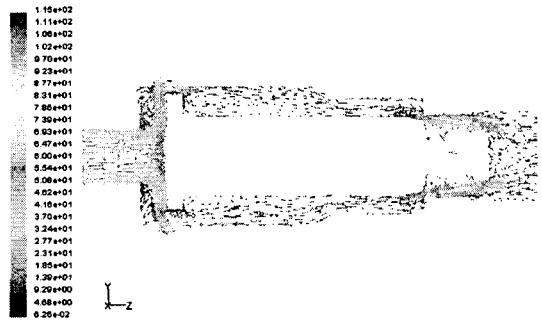
시간이 지나면 스펴은 오른쪽으로 이동하고 오리피스의 단면적은 줄어들게 된다. 따라서 오리피스를 지나는 유동은 빨라지게 된다. 시간 0.0004초 일 때의 오리피스를 지나는 유속은 약 84 m/s이고 0.0012초 에서는 약 100 m/s의 유속을 보인다. 시간이 좀 더 지나게 되면 유속은 120 m/s에 도달하게 된다. 시간 변화에 따른 전체적인 유동의 형태는 유속의 증가가 지배적이고 내부유동양상의 변화는 크지 않은 것으로 판단된다.



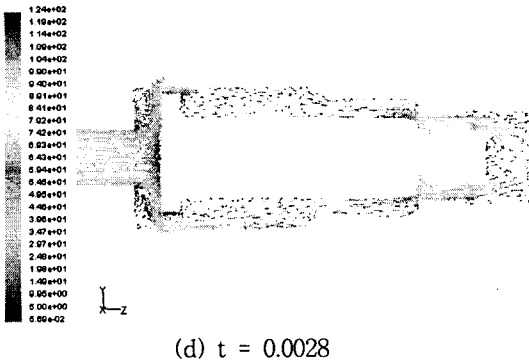
(a) $t = 0.0004 \text{ sec.}$



(b) $t = 0.0012$



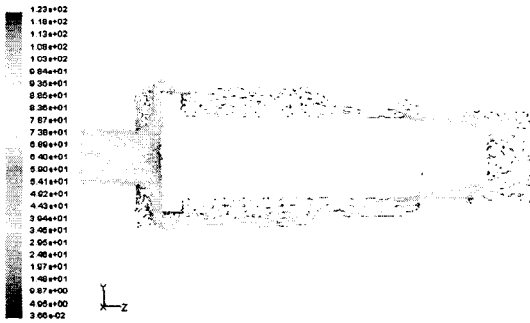
(c) $t = 0.002$



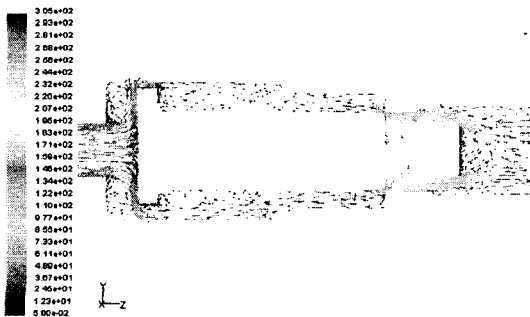
(d) $t = 0.0028$

Fig. 6 Velocity distributions for various time at $\Delta p = 50\text{mmHg}$

Fig. 7은 차압이 각각 50, 100 mmHg 인 경우에 대하여, 시간이 경과하여 스프링의 거동이 거의 없는 정상상태일 때 밸브 내부의 유동을 나타낸 것이다. 차압 50 mmHg에 비하여 100 mmHg인 경우의 스프링의 위치는 오른쪽으로 이동했다는 것을 확인할 수 있으며, 스프링의 이동으로 인하여 오리피스 단면적이 급격하게 좁아져 오리피스를 통과하는 최고 유속이 300 m/s에 도달하게 된다.



(a) $\Delta p = 50 \text{ mmHg}$



(b) $\Delta p = 100 \text{ mmHg}$

Fig. 7 Velocity distributions for various Δp

Fig. 8은 차압 50, 100mmHg인 경우의 시간에 따른 질량유량의 변화를 도시한 것이다. 일반적으로 관 내부유동에서 유량을 구하여 통과하는 유체의 양을 구하지만, 본 연구에서는 유동이 마하수 0.3 이상이므로 압축성 유동으로 유동해석을 수행하였고, 따라서 밀도변화를 고려하여 질량유량으로 밸브를 지나가는 가스의 양을 구하였다. 그림에서 차압 50 mmHg인 경우는 약 0.00055 kg/s 정도의 질량유량이 나오고, 차압 100mmHg에서는 약 0.0007 kg/s의 유량이 나오는 것을 확인할 수 있고, 이 결과는 실험을 통하여 얻은 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

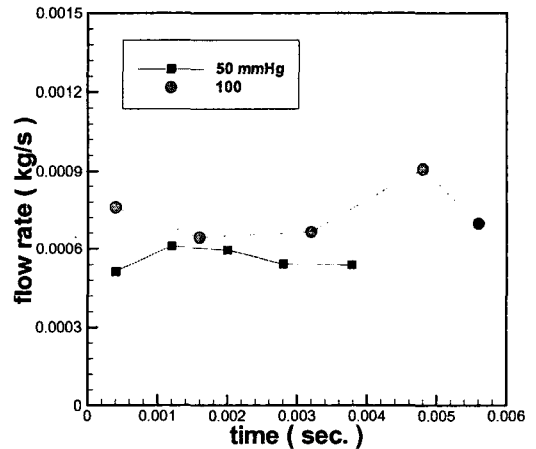


Fig. 8 History of Mass flow for various pressure

5. 결론

PCV 밸브의 동적거동을 수치해석적으로 구하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 밸브 내부에 작용하는 힘은 압력에 의한 것이 지배적이며 점성에 의한 힘은 미세하다.
- (2) 오리피스를 지나가는 유속은 마하수 0.3을 초과하므로 PCV밸브 해석은 압축성 효과를 고려해야 한다.
- (3) 차압 50, 100mmHg 일 때의 PCV밸브를 통과하는 질량유량은 각각 0.00055, 0.0007 kg/s이다.



후기

본 연구는 산업자원부 산업기술재단 지원 “지역 혁신인력양성사업”으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] R.L. HOEKSTRA, K. COLLIER, N. MULLIGAN and L.CHEW, "EXPERIMENTAL STUDY OF A CLEAN BURNING VEHICLE FUEL," Int. J. Hydrogen Energy Vol.20, No. 9, (1995), p.737-745
- [2] H.C. Dhariwal, "CONTROL OF BLOWBY EMISSIONS AND LUBRICATING OIL CONSUMPTION IN I.C. ENGINES," Energy Convers. Mgmt Vol.38, No. 10-13, (1997) p.1267-1274.
- [3] 이종훈, 이연원, " PCV(Positive Crankcase Ventilation) 밸브의 유동특성에 관한 연구," 제 3 회 한국유체공학학술대회, (2004)