

주유중 증발가스제어 필러넥 체크밸브의 유동해석

김성훈*, 이재천#

An Analytical Investigation on Fluid Dynamics of Filler Neck Check Valve for On-board Refueling Vapor Recovery

Sung-Hoon Kim*, Jae-Cheon Lee#

ABSTRACT

ORVR filler neck check valve, which is one of the essential components of the vapor fuel control system, should diminish the evaporation by maintaining laminar fluid flow on refueling process. This study presents numerical results of pressure and velocity distributions of the fluid flow in a ORVR filler neck check valve on refueling process. CFD-ACE+ has been employed for numerical analysis based on the information of experimental results of valve position as a function of inlet flow rate. No abrupt pressure change, which may causes vaporization of fuel, has been confirmed to take place on the concave surface of the valve spool. However, it is clear that some possibility exist at the mid-position of surface of valve spool and downstream according to the opening of valve.

Key Words : On-board Refueling Vapor Recovery(ORVR, 주유중 증발가스제어), Filler Neck Check Valve(필러넥 체크밸브), Evaporation gas(증발가스), Forming(포밍)

1. 서론

최근 들어 지구 환경 보존에 대한 관심이 고조되면서 저공해 차량의 개발은 자동차 산업의 사활을 좌우하는 가장 중요한 과제로 등장하고 있다. 특히 1990년대 중반부터 미국을 중심으로 기존에 배기가스로 규제되었던 HC, CO, NOx와 함께 차량에서 발생하는 증발가스(Evaporative Gas)의 배출량에 대한 규제가 강화되고 있다.¹ 증발가스의 탄화수소(HC)는 대기중의 산소와 화합하여 오존을 발생

시킴으로써 인체의 폐 기능 악화, 산성비 유발 등의 사회적 문제를 유발한다. 이러한 증발가스의 대기노출을 감소시키기 위하여, 미국 환경처(EPA)는 기존 법규사항인 차량 주행 및 정차시의 증발가스 외에, 차량 증발가스의 절반 이상을 차지하는 주유시 증발가스제어(ORVR: On-board Refueling Vapor Recovery)를 법규로 확정하여 시행 중에 있으며 그 규제치 또한 점차 강화되고 있다.² 이 같은 증발가스에 대한 규제는 환경친화 차원뿐만 아니라 대기로 방출되는 HC가스를 포집, 엔진에서 재 연소 시

접수일: 2003년 5월 12일; 게재승인일: 2003년 7월 11일

* 계명대학교 기계자동차공학부

교신저자: 계명대학교 기계자동차공학부

E-mail: ljeds@kmu.ac.kr, Tel: (053) 580-5921

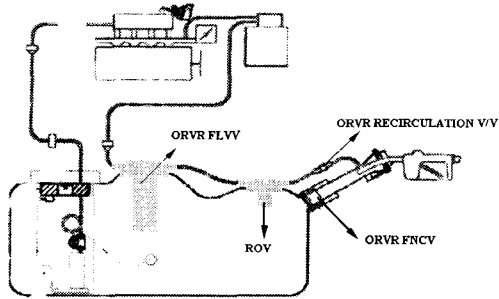


Fig. 1 Layout of vapor fuel control system

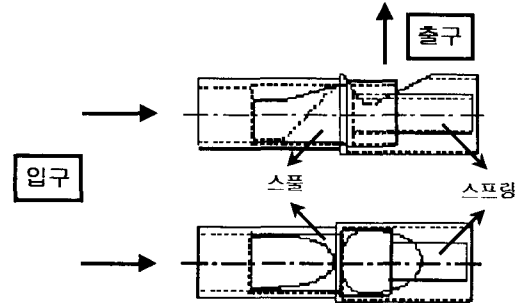


Fig. 2 Configuration of the check valve

김으로써 연료 절감효과도 거둘 수 있어 유럽연합국(EU) 등으로 점차 확대되고 있다.

자동차 증발가스제어 연료시스템의 구성부품은, 미국의 GT^{3,4}와 Walbro, 이스라엘 Raval, 국내 유니크^{5,6}사 등에 따라 차이가 난다. Raval의 경우, 캐니스터^{7,8}외에, Fig. 1과 같이 ORVR 급유한계밸브(FLVV: Fill Limit Valve), ORVR 필러넥 체크밸브(FNCV: Filler Neck Check Valve), 순환밸브(Recirculation Valve)와 롤-오버 밸브(ROV: Roll Over Valve) 등의 핵심부품으로 구성된다.

이 중 ORVR 필러넥 체크밸브는 제조사에 상관없이 증발가스 제어시스템에 적용되는 필수부품으로서, 연료탱크 내, 주유 튜브(Filler Tube) 끝에 위치하여 주유 건(Gun)으로부터 공급되는 연료의 역류를 방지한다. 특히 주유 시 연료유동의 흐름을 원활히 하여 충류 유동을 유도함으로써 연료탱크 내 기포발생을 최대한 억제할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 Raval사 ORVR 필러넥 체크밸브를 기준으로 밸브 스푼의 단면 형상에 따른 유동해석을 실시하고 실험 확인함으로써 차종별 주문형 필러넥 체크밸브 형상설계를 위한 기본 데이터를 확보하고자 한다.

2. 해석 및 결과

2.1 밸브 해석 모델

Fig. 2는 ORVR 필러넥 체크밸브의 기하학적 형상을 보여준다. 밸브어셈블리는 밸브스풀과 바디로 구성되어 있으며 밸브스풀은 하부에 고정된 바디와 스프링으로 연결되어 있다. 주유 건에 의해 자동차 연료(휘발유)가 주입됨에 따라 유체력에 의해 스프링은 압축되고 원통형 바디에 형성된 타원형의 출

구로 연료가 배출되어 연료탱크로 유입된다. 연료를 주입하지 않는 정상시에는 스프링이 스푼을 상부로 밀어올려 연료탱크로부터 증발가스의 누출을 방지하며, 주입 시에도 스푼의 단면형상으로 인해 증발가스의 누출을 최소화하게 된다. 스푼의 단면 형상은 Fig. 2에서 보듯이 3차원 곡면으로 형성되어 있다. 이와 같은 구조를 하고 있는 밸브를 통해 연료를 주입하게 되면 연료의 주입속도와 체적력에 의해 밸브 스푼은 하부로 이동하게되며 원통형 바디에 형성된 출구를 통해 나가게되는 과정을 하나의 해석과정을 거쳐야 하므로 밸브스풀의 위치와 유동현상은 서로 연관(Couple)되어 있게 된다. 그러나 이론해석에 앞서 밸브스풀의 위치를 먼저 실험적으로 파악하고 그 결과를 이용하여 전산유동해석을 진행하고자 한다.

2.2 실험 해석

Fig. 3은 유체로서 물을 이용한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 밸브를 스탠드에 장착하고 물을 유량계를 거쳐 일정 속도로 주입하는 조건에서 스푼의 위치 변화와 출구에서의 유체의 유출 형태를 조사하였다.

Fig. 4는 밸브 출구에서의 유체 유출의 대표적인 모습을 보여준다. 유출되는 모습은 크게 2가지로 구분되어, 밸브 스푼의 단면 모양을 따라 모양이 형성되어 유출되는 경우(포밍, Forming)와 형태를 유지하지 못하고 흩어지며 유출되는 경우(랜덤, Random)로 대분된다. 이런 경우 스푼의 이동 거리에 약간의 차이를 보이며 이는 유체의 유동현상이 스푼에 가해지는 힘의 차이로 나타난 결과라고 판단된다. 유동 패턴이 다른 경우 유량에 따른 밸브 스푼의 위치 변화를 Fig. 5에 제시하였다.

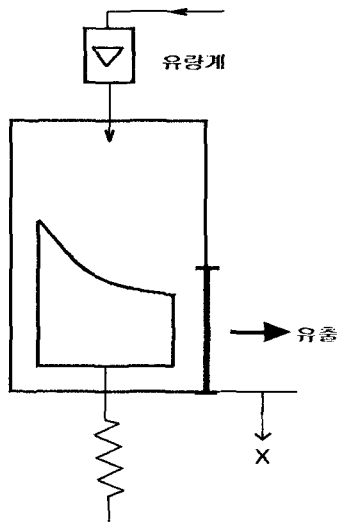


Fig. 3 Layout of valve test

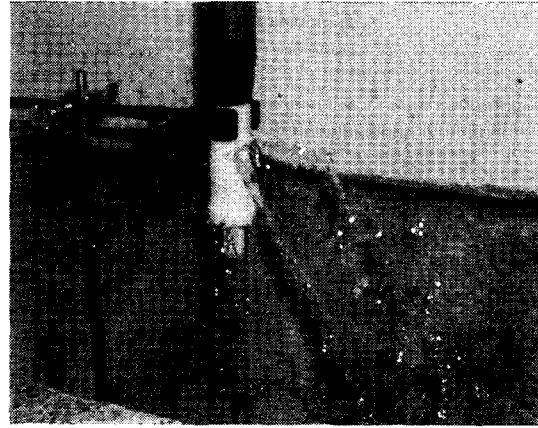
실험은 유량을 변화시켜가면서 총 50-60회를 실시하였으며 출구의 유동 패턴에 따라 대분하여 결과를 제시하였다. 두 경우(Forming과 Random) 모두 유량이 증가할수록 밸브의 위치 변화량은 거의 선형적으로 증가하는 결과를 보이고 있다. 또한 유량 패턴에 따라 같은 유량에 대해 밸브 스펴의 위치는 차이를 보이고 있으며, 일반적으로는 흠어지는 유동패턴의 경우가 큰 위치변화를 보이고 있다. 두 경우 유량과 밸브 스펴의 위치변화를 선형 식으로 표시하면 각각 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$\text{포밍 패턴: } y = 1.8217 x + 3.1362 \quad (1)$$

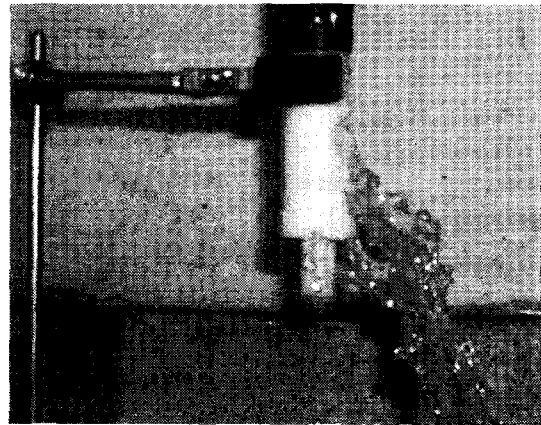
$$\text{랜덤 패턴: } y = 5.5885 x + 3.0971 \quad (2)$$

식(1)과 식(2)에서 x 유량으로써 단위는 gpm 이며 y 는 스펴의 변위으로써 mm 의 단위를 사용하였다.

한편 물을 사용한 실험결과를 휘발유로 전환하기 위해 휘발유의 비중을 고려하여 밸브스펴의 변위와 유량과의 관계식을 Fig. 6과 같이 변환하였다. Fig. 6의 결과는 전산해석 시 휘발유의 유량을 입력 조건으로 사용할 때 밸브스펴의 위치를 결정하는데 사용하였다.



(a) Forming flow



(b) Random flow

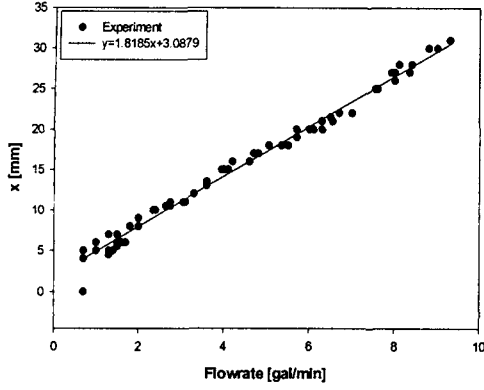
Fig. 4 Fluid flow at valve outlet

2.3 수치 해석

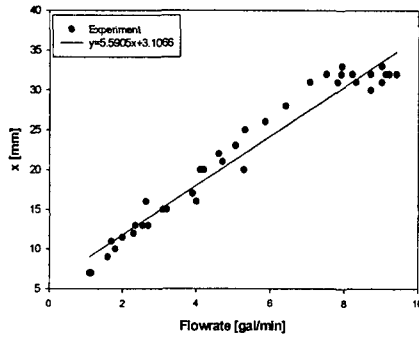
본 연구의 유동해석에 이용된 유체는 휘발유로서 뉴턴유체, 비압축성 유동으로 가정하여, 식 (3) 과 식 (4)의 지배방정식(Governing equation)을 사용하였으며 종속 변수는 속도와 압력이다.

연속체 방정식 :

$$\frac{\partial(U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$



(a) Forming flow



(b) Random flow

Fig. 5 Variation of valve spool's displacement on flow rate

운동량 방정식 :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (4)$$

식 (3), 식 (4)의 x_i 는 x, y, z 의 3차원에 대한 해석을 나타내며 유동의 진행방향을 x 방향으로 지정하여 유동장을 해석하였으며, 이때 사용된 ρ 와 μ 는 각각 300 °K 기준의 가솔린 오일의 밀도와 점성계수를 이용하였다. 본 연구에 사용된 물성치는 Table 1에 제시하였다.

한편 본 연구에서는 유체 및 열전달 해석의 상

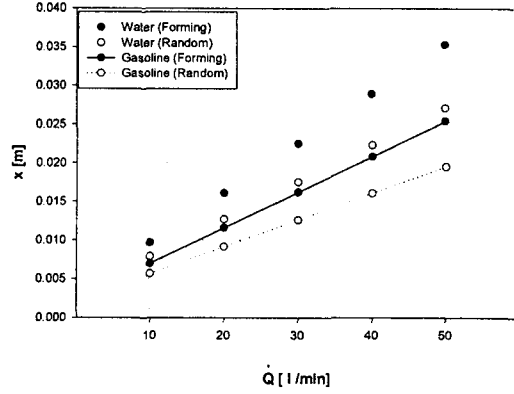


Fig. 6 Variation of valve spool's displacement of gasoline and water

Table 1 Gasoline property

Gasoline	Property
density	720 [kg/m ³]
Dynamic Viscosity	1.5x10 ⁻³ [m ² /s]

용 프로그램인 CFD-ACE+⁹를 사용하였으며, 하드웨어로는 LG PC의 Dual CPU 프로세스를 이용하였다.

수치해석을 위한 경계조건으로서 밸브 입구에서는 일정유속 조건을, 밸브출구에서는 재순환 유동이 예견됨으로서 일정압력 조건을 주었다. Fig. 7은 정상상태에서 밸브가 열린 경우에 대하여 수치해석을 수행하기 위하여 메쉬(Mesh)를 만든 모습을 보여주고 있다.

Fig. 7에서 보듯이, 복잡한 3차원 형상으로서 비정렬격자를 사용하였으며 출구부분의 좁은 영역에는 많은 메쉬(Mesh)를 적용하였다. 본 해석에서는 3개의 도메인(Domain), 160,398개의 셀(Cell) 및 30,325개의 노드(Node)를 사용하였다. 대류항의 처리방법은 파워법칙(Power law)¹⁰을 사용하였고 운동량 식에서 속도-압력의 커플링(Coupling)은 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 방법을 택하였다.¹¹

반복계산 시 수렴조건에 대한 각 종속변수의 상대값을 연속 식의 경우 1x10⁻³, 운동량(Momentum) 식의 경우 1x10⁻⁴을 각각 책정하였다.

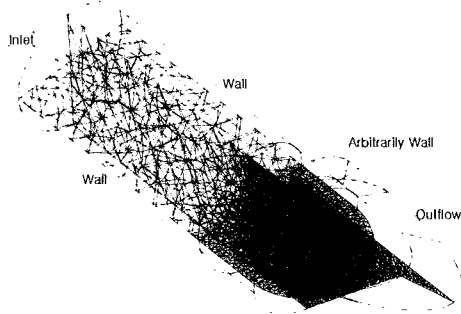


Fig. 7 3-D meshes and boundary conditions

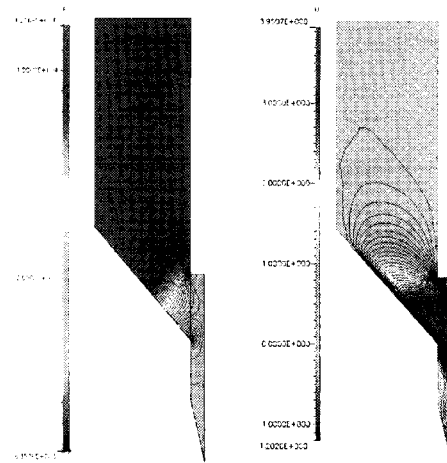
수치해석 결과는 각각 출구의 유동패턴이 포밍 인 경우와 랜덤인 경우에 대해 수행하였으며 밸브의 위치를 중간개방 및 완전개방의 경우를 설정하여 앞서 실험결과로부터 얻어진 유량(유속)을 입구 조건으로 입력하였다. Table 2는 수치해석에 사용된 입력 조건을 정리한 것이다.

Table 2 Inlet velocities

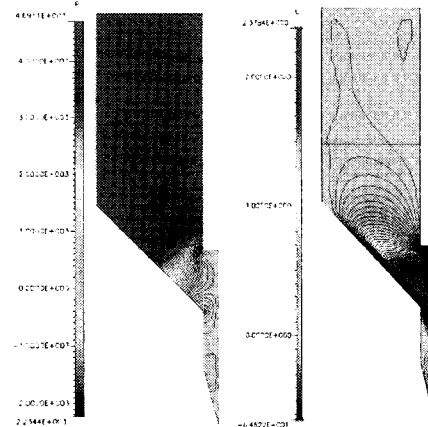
	Random	Forming
Half Open	1.47 [m/s]	0.88 [m/s]
Fully Open	2.78 [m/s]	1.6627 [m/s]

Fig. 8은 밸브를 중간 개방하였을 경우 압력 분포와 속도 분포를 나타낸 것이다. 먼저 유출 유동패턴에 따른 압력 분포와 속도분포는 정성적으로 매우 비슷하며 밸브의 출구 직전에 고압력이 형성되고, 출구하류에 급격한 압력 강하가 발생한다. 밸브의 특성상 밸브의 스톱과 바디 사이에 형성된 오리피스 내의 유동과 비슷한 경우이다. 특히 밸브의 개구(Opening) 근처의 밸브 스톱의 표면에서 압력강하가 급격히 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 속도 분포를 살펴볼 때 밸브의 개구에서 가장 크며, 특히 밸브 스톱의 표면에서 가장 큰 것으로 나타나 있어 밸브의 개구 부분의 스톱 표면에서 유체가 가장 많이 가속됨을 알 수 있다.

개방도를 증가시켜 완전 개방을 한 경우의 압력 및 유속 분포를 Fig. 9에 도시하였다. 각각의 분포는 앞의 중간 개방의 경우와 정성적으로 비슷하나 고압이 형성되는 부분은 밸브 개구의 좁더 상부에



(a) Random flow($V_{in}=1.47$ m/s)

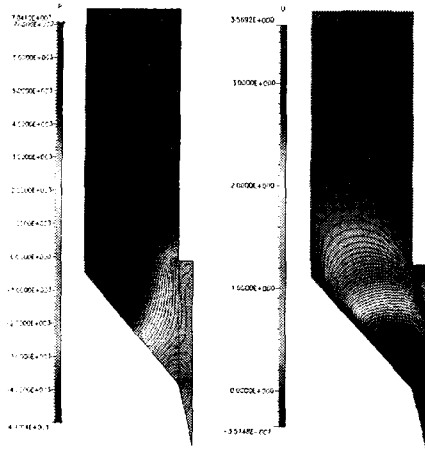


(b) Forming flow($V_{in}=0.88$ m/s)

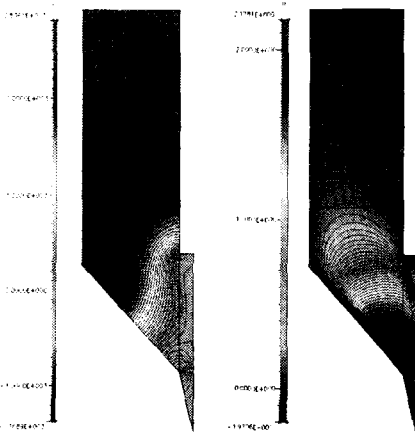
Fig. 8 Half-open case

넓게 나타나고 있다. 또한 압력강하가 발생하는 부분도 개구 안쪽에 위치하고 있으며 속도분포에서도 같은 경향이 나타나 밸브 스톱의 표면은 물론 상부까지 넓은 부분에서 가속됨을 알 수 있다

한편 속도 분포에 대한 정보를 보다 정확히 분석하기 위해 Fig. 10에 제시한 밸브의 스톱 상부에 위치를 고정하여 속도의 크기와 분포를 살펴보았다.



Pressure Velocity
(a) Random flow($V_{in}=2.78$ m/s)



Pressure Velocity
(b) Forming flow($V_{in}=1.66$ m/s)

Fig. 9 Fully-open case

Fig. 11(a)는 반 개방 시, 입구로부터 출구로 진행함에 따라(라인(line) 5 → 라인 1) 속도의 크기를 위치에 따라 제시한 것이다.

유체는 밸브 스톱의 면을 따라 가속됨을 볼 수 있으며 이는 랜덤 및 포밍의 경우 거의 정성적으로 비슷하게 나타나고 있다. 중앙부의 유속이 크게 가속되며 스톱 양단에는 거의 유체가 흐르지 않음은 본 연구에서 사용된 스톱 표면의 3차원 형상에 의해 결정된다. 설정된 위치가 등 간격임에도 불구하고

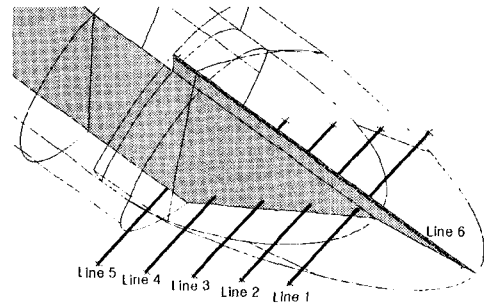
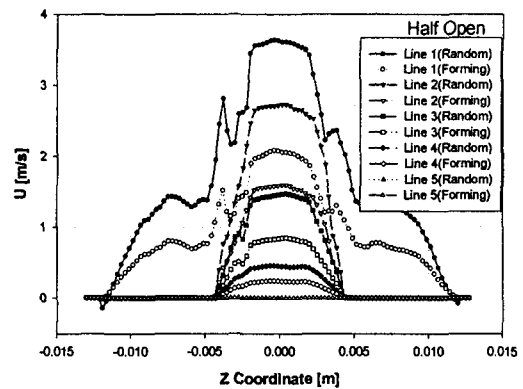
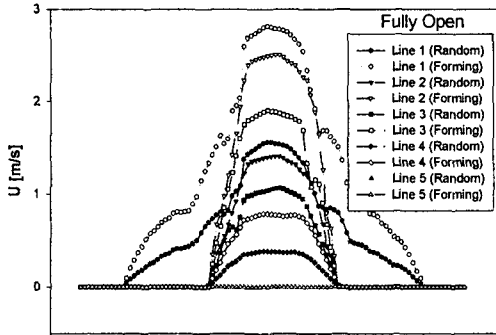


Fig. 10 Velocity measuring points on the valve surface

고 라인 3에서 라인 2까지 가장 큰 속도의 증가를 나타내고 있어 이 부분에서 압력 강하가 가장 크게 일어남을 예측할 수 있으며, 압력강하 후의 압력이 휘발유의 증기압 이하로 감소할 수 있는 예상 영역임을 알 수 있다. 한편 완전개방의 경우 위치에 따른 속도 분포를 Fig. 11(b)에 제시하였다. 정성적인 면은 중간개방의 경우와 비슷하나 속도의 증가가 가장 크게 일어나는 부분은 오히려 좀 더 상류에 위치한 부분에서(라인 4에서 라인 3) 일어남을 알 수 있어 이 부분 압력감소를 주의해야 할 것으로 사료된다. 따라서 현재 본 연구에 사용된 밸브 스톱 단면의 형상으로는 개방도에 따라서 압력강하가 급격히 발생하는 영역은 보이지 않았다. 그러나 영역 압력강하에 의한 기포발생은 밸브 스톱의 단면 중 중간 부분 이하에서 발생할 확률이 있으며 개방도에 무관하게 이 부분의 속도 증가와 압력 강하가 가능하면 일정하게 유지하도록 개선해야 할 것이다.



(a) Half Open



(b) Fully Open

Fig. 11 Velocity distribution on spool surface

3. 결론

증발가스 제어 시스템 중 ORVR 필터백 체크밸브의 주유 시 연료유동의 흐름을 실험과 수치해석을 통해 압력분포와 유속분포를 제시하였다. 해석 결과 현재 밸브스풀의 3차원 단면 형상으로는 급격한 압력강하가 발생하는 부분은 보이지 않음을 확인 할 수 있었다. 그러나 압력분포와 속도분포의 결과로서 스푼의 단면 중 중간 부분 이하에서 개방도에 따라 약간의 급격한 압력강하를 보이고 있으며 이는 스푼 단면의 형상을 조정함으로써 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 본 연구결과는 차종에 따라 주유관(Filler tube)의 경사각과 주유 유량이 변할 때, 최적의 필터백 체크밸브의 형상설계 및 시스템 설계에 응용이 기대된다.

후 기

이 논문은 한국기계연구원과, 과학기술부 · 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Park, J.-G., "Introduction of Fuel Vapor Emission Reduction Technology," Magazine of J. of KSAE, Vol. 22, No. 6, pp. 34-37, 2000.
2. SWRI Report, Overview of Evaporative Emissions Requirement for 2004 Vehicles, 2001.

3. Ford Motor's Documents, Fuel System Modeling and Analysis Seminar using HyPneu, BarDyne Inc., 1996.
4. Lavoie, G. A., Philip J. Johnson, Fuel Vapor System Model, Draft Manuscript, Ford Motor Co., 1996.
5. Lee, H.-W., Ahn, I.-S., "The Development of ORVR Control Parts and System technique," Proc. 9th Next Generation Vehicle Workshop, KATECH, pp. 112-119, 2001.
6. Kang, W., Suh, Y.-H., Kim, H.-C., Park, S.-H., "Development of Analysis Technique for the Core Components of Evaporative Emission Control System," Proc. 9th Next Generation Vehicle Workshop, KATECH, pp. 120-125, 2001.
7. Chung, S.-J., Kim, W.-S., "CFD Analysis of Automotive Canister for Evaporative Emission Reduction," J. of KSAE, Vol. 9, No. 6, pp.85-93, 2001.
8. Cho, K.-S., Chung, Y.-J., Jin, H.-K., "Development of Automotive Vapor Gas Recovery Canister," Proc. KSAE Spring Conference, pp.231-236, 2002.
9. CFDRC manual (CFD-GEOM, CFD-ACE, CFD-VIEW), 2000.
10. Schlichting, H., Boundary Layer Theory, G. Braun GmbH, Karlsruhe, pp. 637-648, 1979.
11. Hinze, J. O., Turbulence, McGraw-Hill, pp. 573-690, 1987.