

# 유량 제어장치인 가변스로틀밸브의 기하학적 형상변화에 따른 공기역학 특성분석 연구

조현성<sup>1</sup> · 김철호<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2013년 3월 22일, 원고수정일 : 2013년 4월 19일, 심사완료일 : 2013년 4월 26일)

## A numerical study on the aerodynamic characteristics of a variable geometry throttle valve(VGTV) system controlling air-flow rate

Hyun-Sung Cho<sup>1</sup> · Chul-Ho Kim<sup>2†</sup>

**요약:** 가솔린엔진의 출력제어를 위해 나비형(butterfly-type) 스로틀밸브가 응용되고 있다. 그러나 기존의 나비형 스로틀밸브는 밸브 후방에서 발생하는 강한 와류현상으로 인해 매우 큰 흡입 유로의 저항을 유발하게 된다. 이러한 유로저항은 엔진의 체적효율(volumetric efficiency)을 떨어뜨려 궁극적으로 엔진의 출력과 효율에 부정적인 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 CFD수치해석 기법을 이용하여 기존 나비형 스로틀밸브의 문제점 개선을 위해 제안한 벤투리형(venturi-type) 가변스로틀밸브(VGTV)의 공기역학적 작동특성에 관해 알아보았으며, 본 장치의 유량과 저항계수( $K_L$ )의 변화특성 분석을 통해 가솔린엔진의 체적효율 개선효과를 평가하는데 연구의 목적을 두고 있다. 본 연구를 통해 기존의 나비형 스로틀밸브에 비해 새롭게 제안된 벤투리형 가변스로틀밸브의 유로저항이 평균 49.0%정도 개선된다는 사실을 알 수 있었으며, 이는 엔진의 체적효율과 출력에 매우 큰 영향을 줄 것으로 기대된다.

**주제어:** 가변스로틀 밸브, 흡기저항, 전산유체동역학, 체적효율

**Abstract:** A butterfly throttle valve has been used to control the brake power of an SI engine by controlling the mass flow-rate of intake air in the induction system. However, the valve has a serious effect on the volumetric efficiency of the engine due to the pressure resistance in the induction system. In this study, a new intake air controlling valve named "Variable Geometry Throttle Valve(VGTV)" is proposed to minimize the pressure resistance in the intake system of an SI engine. The design concept of VGTV is on the application of a venturi nozzle in the air flow path. Instead of change of the butterfly valve angle in the airflow field, the throat width of the VGTV valve is varied with the operating condition of an SI engine. In this numerical study, CFD(computational fluid dynamics) simulation technique was incorporated to have an aerodynamics performance analysis of the two air flow controlling systems; butterfly valve and VGTV and compared the results to know which system has lower pressure resistance in the air intake system. From the result, it was found that VGTV has lower pressure resistance than the butterfly valve. Especially VGTV is effective on the low and medium load operating condition of an SI engine. The averaged pressure resistance of VGTV is about 49.0% lower than the value of the conventional butterfly throttle valve.

**Keywords:** Variable Geometry Throttle Valve(VGTV), Induction resistance, CFD(Computational Fluid Dynamics), Volumetric efficiency

<sup>†</sup> 교신저자: (139-743) 서울시 노원구 공릉로 232,

서울과학기술대학교 기계자동차공학과, E-mail: profchkim@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-6347

1 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원, E-mail: joedaniel@hanmail.net, Tel: 02-970-6389

## 1. 서론

엔진의 흡기계통에 장착되어있는 다양한 부품들은 흡기계통의 유로저항을 증가시켜 엔진의 체적효율을 떨어뜨리게 되며 궁극적으로 엔진의 출력과 효율에 부정적 영향을 미치게 된다. 특히 엔진의 소형화(downsizing)를 통한 연비개선과 유해배기 저감을 이루기 위해서는 유로저항을 최소화시켜 엔진의 체적효율을 극대화하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 가솔린엔진의 흡기유량 조절장치인 스로틀밸브의 유로저항을 최소화하고 엔진의 체적효율을 극대화하는 방법으로 벤투리방식의 가변스로틀밸브(variable geometry throttle valve, VGTV)를 제안하였으며, 제안한 VGTV의 공력특성인 유로저항계수와 흡기유량의 값을 기존의 나비형 스로틀밸브 값과 비교를 통해 제안한 VGTV의 유효성을 판단해 보았다.

## 2. 본론

가솔린엔진의 출력제어를 위해 사용되고 있는 나비형 스로틀 밸브는 조작이 간편한 반면 기하학적인 측면에서 매우 높은 유로저항을 발생시키며 흡기의 엔진 유입을 방해하게 된다. 특히 엔진의 저 회전 운전영역에서는 흡기계통에 걸리는 유로저항의 80%이상이 스로틀 밸브를 통과할 때 발생하게 된다[1]. 본 연구에서는 이러한 문제 개선을 위해 새로운 방식의 공기제어 밸브를 제안하였으며 CFD해석기법을 이용하여 개선된 벤투리형 가변스로틀 밸브의 공기역학적 성능특성을 분석해 보았다.

본 연구를 위해 국내 H사에서 생산되는 1.6리터급 승용차량에 장착되는 가솔린 엔진의 작동조건을 활용하였으며[2], 기존 나비형 스로틀밸브와 벤투리방식의 가변스로틀밸브(VGTV)의 유로저항과 흡기유량 값의 비교분석을 통해 새로 고안된 VGTV의 유효성을 판단해 보았다.

### 2.1 스로틀밸브의 형상과 제원

본 연구에서 제안된 VGTV장치는 실린더 내부로 공급되는 흡기 유량의 조절기능과 더불어 유로

저항을 최소화하기 위해 벤투리의 원리를 적용하여 설계된 흡기 유량조절 장치이다.

Figure 1은 기존의 나비형 스로틀밸브와 새로 고안된 VGTV의 제원과 형상을 보여준다.

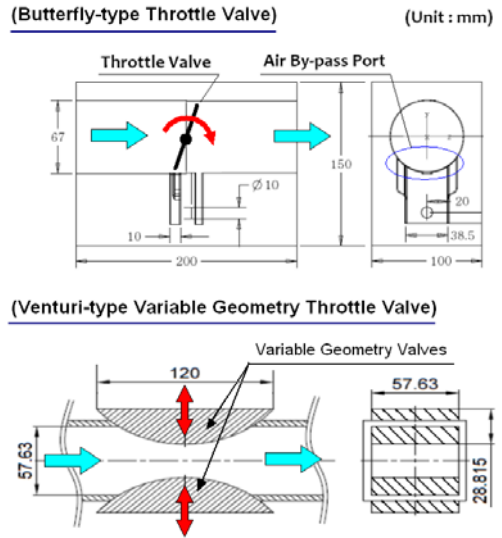


Figure 1: 2-dimensional views of the butterfly type throttle valve and VGTV

기존의 나비형 스로틀밸브는 1.6리터급 승용차 엔진에 장착되는 밸브 모델이며[2], 개발된 VGTV 모델의 형상은 기존 밸브와 동일한 유량조절이 가능하도록 설계되어졌다. 두 모델이 동일한 작동조건을 갖도록 하기 위해 스로틀밸브 개도의 변화에 따른 밸브의 개방정도를 나타내는 개방 면적비(opening area ratio, %)를 다음과 같이 정의하였다.

$$AR_{open} = \frac{\text{밸브의 개방된 면적}}{\text{밸브유로의 전체단면적}} \times 100(\%) \quad (1)$$

## 3. 수치해석을 위한 기법 및 조건

### 3.1 해석 기법

스로틀밸브의 개도변화에 따라 밸브 주위에서의 공기 유동현상을 해석하기 위하여 유한체적법(Finite Volume Method)[3]을 적용하는 영국 CHAM사의 CFD 프로그램인 PHOENICS[4]를 사용하였으며 밸브시스템 내부에서의 공기 유동은 다음과 같

이 정의하였다.

- 정상유동(steady flow)
- 비압축성유동(incompressible flow)
- 난류유동(turbulent flow)
- 3차원 유동(3-D flow)

유동장 해석을 위해 3차원 나비아-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 풀었으며 난류 유동해석을 위한 표준 난류모델인 Standard ( $\kappa$ - $\epsilon$ ) 모델을 적용하였다[3]. 표면 마찰력에 의한 대류 열전달의 현상은 무시하여 등온 유동으로 가정하여 에너지 방정식은 풀지 않았다. 비압축성, 난류 유동장의 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다[5].

1) 연속 방정식(Continuity equation)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial y_j} + \frac{\partial U_k}{\partial z_k} = 0 \quad (2)$$

2) 운동량방정식(Momentum equation)

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] - g_i \quad (3)$$

3) 난류운동방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \epsilon \quad (4)$$

4) 소산방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \epsilon) \quad (5)$$

여기서  $-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$   
 $G = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ ,  $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$

$(C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0,$

$\sigma_\epsilon = 1.0)$

해석공간의 격자생성을 위해 CAD-to-CFD 방식을 적용한 정방격자(structured grid) 생성법을[4] 이용하였으며, CFD 해석을 위한 스톨바디 모델의 격자수는 약 123만개의 해석 격자로 구성하였다. 특히 스톨 밸브 후방 주위에서는 유동현상이 매우 복잡하기 때문에 계산 오차를 줄이기 위하여 격자 간격을 더욱 미세하게 삽입하여 격자의 밀도를 높였다. 계산 결과의 수렴성을 높이기 위해 변수들의 계산 잉여율(residual fraction)이  $10^{-2}$  %이하로 떨어질 때 까지 반복 계산하였다.

Figure 2는 나비형 스톨밸브와 VGTV의 해석을 위한 해석격자의 예를 보여준다. 연구 초기 수렴성을 고려한 격자시험을 통해 최적격자의 수는 나비형 밸브의 경우는 (121x96x106), VGTV의 경우 (105x86x74)로 격자수를 각각 결정하였다.

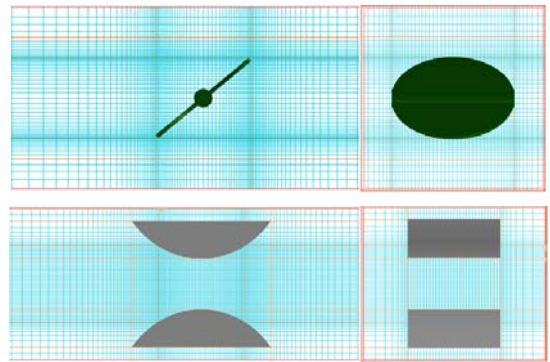


Figure 2: The numerical grids of the butterfly-type throttle valve and VGTV;  $AR_{open} = 41.2\%$

3.2 해석의 경계 및 초기조건

유동장 내의 압력 계산을 위해 SIMPLE알고리즘 [3]을 적용하였으며, 운동방정식과 난류 방정식의 대류 항(convection term)을 계산하기 위해 하이브리드방법을(hybrid scheme) 사용하였다. 본 연구를 위한 계산영역의 경계 및 초기조건은 1.6리터급 승용차에 장착된 스톨밸브의 엔진 다이내모 실험을 통해 획득한 실험값[6]을 작동 조건으로 활용하였다.

- 1) 엔진 작동 회전수 : 2,850rpm
- 2) 실린더 내의 펌핑압력 : 진공압(-55kPa)[4]

- 3) 부하조건변화에 따른 흡입유량 : **Table 1** 참조
- 4) 스로틀밸브 내부벽면 : No-slip 경계조건

### 3.3 주요 연구변수

본 연구에서는 두 종류의 스로틀밸브를 대상으로 개도 변화에 따른 밸브장치의 유로저항계수와 유량 값을 산출하여 상호 비교해 보았다. 스로틀밸브 유로의 개방 면적비를 동일하게 유지하고 공기의 유입속도를 다음과 같이 변화시켰다.

**Table 1:** Important operating variables of the throttle valve [6]

Variables	Operating Range			
	11.6%	25.4%	41.2%	77.7%
Opening area ratio of the valve(%)	11.6%	25.4%	41.2%	77.7%
Mass flow(kg/s)	0.021	0.024	0.029	0.03
Volume flow(m <sup>3</sup> /s)	0.018	0.02	0.024	0.027
Inlet velocity(m/s)	5.68	6.27	6.81	7.66

### 3.4 수치해석결과의 분석기법

스로틀밸브의 개도변화에 따른 흡입공기의 체적 유량과 밸브의 유로저항계수 산출을 위해 아래 식 (6), 식 (7)을 이용하였다[5].

- 1) 체적 유량

$$\sum \dot{Q} = \sum (v_{i,j} \times A_{i,j}) \tag{6}$$

- 2) 스로틀밸브의 저항계수(resistance coefficient)

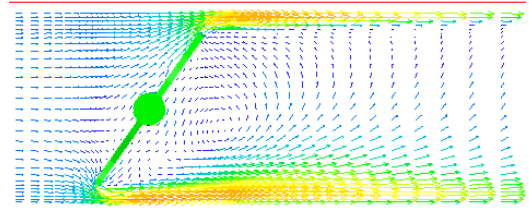
$$K_L = \frac{h_L}{v^2/(2g)} = \frac{\Delta P_L/\rho g}{v^2/(2g)} = \frac{2\Delta P_L}{v^2\rho} \tag{7}$$

## 4. 연구 결과 및 분석

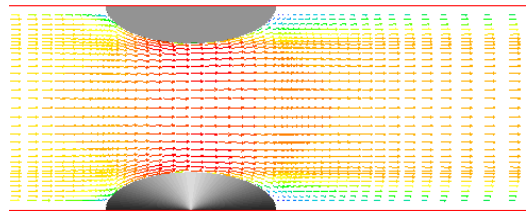
### 4.1 해석결과의 정성적 분석

스로틀 밸브의 개도가 작아질수록 기존 밸브의 경우 공기가 통과할 수 있는 밸브와 관사이의 간극이 줄어들어 유입 공기는 가속화되며 이로 인하여 스로틀 밸브의 후방에서는 강한 와류(vortex)가

발생하게 된다. **Figure 3**에서는 기존의 나비형 스로틀밸브와 새로 고안된 VGTV장치 주변에서 일어나는 유동현상을 비교해 보여준다.



(Butterfly Throttle Valve)



(VGTV)

**Figure 3:** Air flow phenomena in the two different models of the throttle valves

기존의 나비형 스로틀 밸브의 경우 밸브 후방에서 매우 강한 와류가 발생하게 되며, VGTV의 경우는 밸브의 중앙부위는 매우 강한 직선흐름이 발생하고 있으며, 양 끝단에 소규모의 와류영역이 존재함을 확인할 수 있었다. 이러한 밸브 후방에서의 와류현상은 공기의 흐름을 방해하여 유로저항을 증가시키는 역할을 하게 되며, 또한 통과하는 유량을 감소시키게 된다. 결과에서 알 수 있듯이 기존 나비형 밸브의 경우가 매우 높은 유로저항을 유발한다는 사실을 이해할 수 있다.

### 4.2 해석결과의 정량적 분석

**Figure 4**은 스로틀밸브 개도의 변화에 따른 밸브 입·출구에서 차압(ΔP)의 변화를 보여준다. 기존의 나비형 스로틀밸브에 비해 VGTV의 경우가 밸브개

방의 전 영역에서 압력 저하가 작다는 사실을 알 수 있으며, 밸브의 개도가 클수록 압력 강하의 차이가 줄어든다는 사실도 알 수 있다. 그러나 엔진의 주 작동 영역인 중간 개도영역( $AR_{open}=41.2\%$ ) 이하에서는 VGTV 압력강하의 크기가 기존 밸브에 비해 평균 66%이상 개선이 된다는 사실을 알 수 있다. 압력 강하가 클수록 밸브를 통과하는 공기흐름은 난류특성을 가지게 되며 유로저항의 증가로 인해 유동손실이 커지는 원인이 된다.

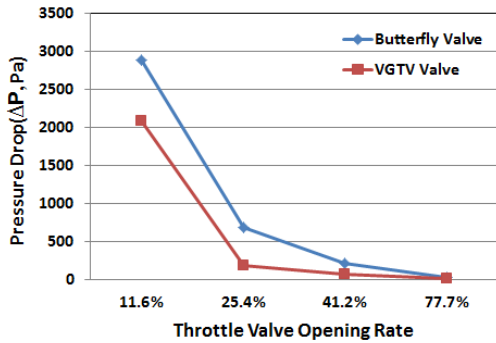


Figure 4: Comparison of the pressure drop of the throttle valves with the valve opening rate

Figure 5는 밸브 개도의 변화에 따른 밸브 출구에서의 유속 변화를 나타내는 선도이다. 전 개도영역에서 VTGV의 경우가 나비형 밸브의 결과에 비해 밸브 출구의 유속이 빠르다는 사실을 보여준다. 이는 동일 개도의 조건에서 VGTV의 경우가 흡입공기의 유량이 증가한다는 사실을 의미한다.

Figure 6은 밸브개도의 변화에 따른 밸브의 유로저항 계수의 변화를 보여준다. 밸브 개도가 작을수록 밸브를 통과하는 공기의 유동현상이 복잡해지고 동시에 압력손실이 증가하게 된다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 개도 영역에서 VGTV밸브가 기존의 나비형 밸브에 비해 유로저항이 낮다는 사실을 알 수 있으며, 전체 평균 약 49%정도로 낮게 저항이 산출되었다. 이는 자연흡입식 엔진의 체적효율을 높이는데 매우 큰 효과가 있을 것으로 기대된다.

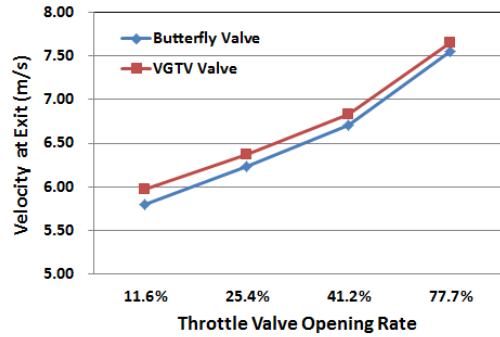


Figure 5: Comparison of the exit air velocity of the throttle valves with the valve opening rate

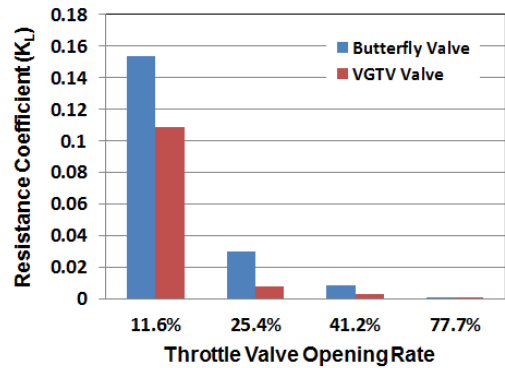


Figure 6: Variation of the valve resistance coefficient( $K_L$ ) with the valve opening rate

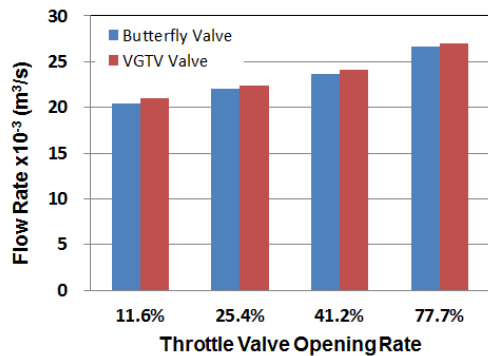


Figure 7: Variation of the air volume flowrate with the valve opening rate

Figure 7은 밸브개도의 변화에 따른 밸브 출구에서의 공기유량 변화를 보여준다. 모든 영역에서 VGTV형 밸브가 유량이 높게 나온다는 사실을 알 수 있으며 전체 평균 약 2%의 유량이 증가하는 것으로 산출되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 가솔린 엔진의 출력제어를 위해 응용되는 스로틀밸브 장치의 공기역학적 작동 특성에 대하여 알아보았다. 흡입 공기유량 제어를 위해 적용되고 있는 기존의 나비형 스로틀밸브와 현재 개발 중인 벤투리형 가변스로틀밸브(VGTV)의 공기역학적 작동특성의 비교를 위해 유로 내부에서 공기가 스로틀밸브를 통과할 발생하는 압력손실과 흡입되는 공기유량의 값을 산출하였으며 밸브가 흡입유로에 미치는 압력 저항과 그에 따른 체적유량의 변화를 비교해 보았다.

- 스로틀밸브 유로저항의 경우 기존의 나비형 스로틀밸브에 비해 VGTV가 엔진의 주 작동범위인 중간 개도영역( $AR_{open}=41.2\%$ ) 이하에서는 VGTV 압력강하의 크기가 기존 밸브에 비해 평균 66%이상 개선이 된다는 사실을 알 수 있다. 이 결과를 통해 VGTV장치의 압력저항이 밸브의 전 작동범위에서 평균 48%정도 개선됨 확인함.
- 흡입 유로를 통과하는 공기의 체적유량의 경우 엔진의 주 작동범위인 저·중 개도영역에서 VGTV 밸브가 기존 나비형 밸브에 비해 평균 2.5%정도 증가하는 것을 알 수 있었으나 고부하 영역에서는 다소 낮은 평균 1.5% 정도의 체적유량이 증가하는 것으로 산출되었다. 즉 체적 유량이 측면에서도 VGTV 밸브가 엔진의 체적효율에 유리한 것으로 산출됨.

두 가지 스로틀밸브 모델의 공기역학적 특성 비교를 통해 VGTV가 기존의 나비형 스로틀밸브에 비해 흡입 공기량을 안정적으로 엔진 실린더로 공급하여 엔진의 체적효율 증대에 기여할 것으로 판단되었다.

## 후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원 사업으로 수행된 연구결과이다.

## 참고문헌

- [1] J. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill book company, pp. 207-208, 1986.
- [2] Auto Tech, Engine Training Manual, page 96, 2000. (in Korean)
- [3] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., 1980.
- [4] CHAM, PHOENICS User Guide Version 3.6, pp.24.2-24.4 and pp.26.1-26.3, 2006.
- [5] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, Fluid Mechanics (Fundamentals & Applications), 2nd ed, McGraw-Hill, pp. 446-451, 2006.
- [6] C. H. Kim, General Performance Analysis of a Gasoline Engine, Technical Report No.1, Department of Automotive Engineering, Seoul National Univ. of Technology, 2008 (in Korean).