

엔진 흡기시스템 개발 시 사용하는 텀블유동 시험장치의 고찰

윤정익^{*1)} · 김명환¹⁾ · 남현식¹⁾ · 민선기²⁾ · 심대곤²⁾ · 박병완²⁾

강원대학교 메카트로닉스공학부¹⁾ · GM 대우자동차²⁾

A Study on the Tumble Flow Test Rig Used to Developing Engine Induction System

Jeong-Eui Yun^{*1)} · Myung-Hwan Kim¹⁾ · Hyeon-Sik Nam¹⁾ · Sun-Ki Min²⁾ ·

Dae-Gon Sim²⁾ · Pyeong-Wan Park²⁾

¹⁾Division of Mechatronics, Kangwon National University, Gangwon 245-711, Korea

²⁾Department of Powertrain, Technical Center, GM Daewoo Auto & Technology Co., 199-1 Cheongcheon-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

(Received 4 May 2006 / Accepted 30 May 2006)

Abstract : Tumble flow test rig has been used as the useful tool in the developing intake system because major flow pattern induced by intake port of DOHC engine is tumble. Angular momentum of in-cylinder tumble flow can not be directly measured by impulse torque meter in the test rig like that of in-cylinder swirl flow due to rotational axis of the flow. Therefore the adaptor to transform tumble to swirl flow must be adapted in the test rig. In this study, using the commercial CFD code STAR-CD, we studied the effects on measured results due to the variation of the major design variables in the adaptor, tube length (L), tube diameter (D) and cylinder height(H). The effect of the attached angle(θ) of the test head to the adaptor also was simulated.

Key words : Tumble flow(텀블유동), Swirl flow(스월유동), Intake system(흡기시스템), Tumble flow test rig(텀블유동시험장치)

Nomenclature

B	: bore diameter, m	τ	: angular torque, Nm
\dot{m}	: mass flow rate, g/sec	ω_z	: angular velocity in z-direction, rad/sec
U_x, U_y	: x, y velocity components in cell center, m/sec		
\vec{U}	: velocity vector in cell center, m/sec		
v_{cell}	: cell volume, m ³		
x_{cell}, y_{cell}	: x, y coordinate of cell center, m		
ρ_{cell}	: cell density, kg/m ³		

1. 서론

엔진에 있어서 흡기시스템은 엔진성능의 대부분을 지배하므로 개발과정에 있어서 흡기시스템이 차지하는 비중은 매우 크다. 그러므로 엔진 개발과정의 초기 단계에서부터 여러 가지의 시제품(Mock-up)을 사용하여 다양한 형태의 유동시험을 수행하며, 이러한 일련의 시험을 통한 평가과정은 엔진 개발이 끝나는 시점까지 지속적으로 이루어지고 있

*Corresponding author, E-mail: jeyun@kangwon.ac.kr

다. 이러한 흡기시스템의 개발과정에 있어서 가장 대표적으로 사용되고 있는 시험장치는 흡기시스템 유동특성을 평가하는 정상유동시험장치(steady flow test rig)이다.

정상유동 시험장치를 이용한 시험법(steady flow rig test)은 오랜 역사를 갖고 있다. 1963년 Pischinger 등에 의해 실린더 내로 유입되는 공기의 회전 유동을 패들 휠을 사용하여 계측한 값으로부터 스웰강도를 유도한 이후, 복잡한 실린더의 유동특성을 충분히 반영하지 못하는 패들 휠 방법을 개선한 Impulse Swirl Meter가 1977년 Tiplermann에 의해 소개되었다.¹⁾

Tiplermann은 실린더 내로 유입되는 공기의 실제적인 스웰 유동은 흡입조건에 따라 급격히 변하기 때문에 특정 위치의 회전 유동에만 대응하는 Paddle Wheel을 대신하여 Honeycomb Flow Straightener를 사용하여 전체 회전 유동(Bulk Motion)에 의한 회전 모우멘트(τ)를 측정함으로써 실린더 내 유입되는 공기의 순간적인 회전 유동지수인 스웰강도를 계측할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다.

80년대에는 엔진의 성능향상과 함께 4밸브형태의 엔진개발이 주류를 이루면서 텀블유동이 중요한 연구의 주제가 되었다. 이러한 텀블유동의 경우는 엔진의 실린더 축을 중심으로 단순히 회전하는 스웰 유동과는 근본적으로 다른 형태의 유동으로, 흡입공기가 피스톤의 윗면과 충돌하면서 생성되기 때문에 실린더 끝부분이 개방된 기존의 스웰 유동 장치를 사용하여 측정하는 것은 불가능하다. 이러한 까닭으로 텀블유동 측정에서는 텀블-스웰변환장치(tumble adaptor)를 사용하여 실린더내로 유도되는 텀블유동을 스웰형태의 유동으로 바꾸어 강도를 측정하는 방법을 사용하고 있다.

엔진흡기시스템의 개발과정에서 이러한 텀블 유동측정시스템을 사용한 텀블강도 값의 측정엔 개발하고자 하는 흡기시스템에 의해 유도되는 흡입공기의 유동특성뿐만 아니라 변환 장치의 형상 및 측정 위치 등에도 영향을 받게 된다.²⁾

본 연구에서는 흡기시스템의 텀블 유동강도를 측정하는 과정에서 나타나는 텀블-스웰 변환장치가 측정값에 미치는 영향을 살펴보고자 수치해석용 상

용코드인 STAR-CD를 사용하여 정상유동시험장치에 대한 전산 해석을 수행하였다.

2. 해석 모델링 및 변수

본 연구에서 사용한 흡기시스템의 제원은 Table 1과 같다. 그리고 Fig. 1은 우리가 관심을 가지고 있는 텀블유동 측정을 위한 정상유동시험장치에 있어서 측정결과에 영향을 미칠 수 있다고 판단되는 중요한 변수를 나타낸 그림이다. 중요한 변수로는 흡입실린더의 높이(H), 텀블-스웰 변환 유도관의 길이 및 굵기(L, D) 등이다. 이와 함께 유도관에 부착된 실린더 헤드의 회전각(θ)은 Fig. 1의 경우 $\theta=90^\circ$ 를 나타냄- 또 다른 중요한 의미를 부여한다. 최근 개발되고 있는 다양한 형태의 VVT(variable valve timing) 시스템 및 PDA(port deactivation) 시스템 등과 같은 가변흡기시스템의 경우에 있어서 가변흡기시스템의 개폐 방식에 따라 흡입되는 텀블유동의 최대값은 θ 의 각도에 따라 달라지므로 최대값 평가를 위한 θ 값의 결정방법은 매우 중요하다.³⁻⁷⁾ 이러한 이유로 해석의 중요변수로 흡입실린더의 높이(H), 텀블-스웰변환 유도관의 길이와 굵기(L,D) 및 실린더 헤드의 회전각(θ)을 설정하였다.

Table 1 Specifications of simulation engine

Engine Type	4-stroke DOHC
Intake Port	Dual Symmetric
Bore[mm]	77
Stroke[mm]	89.2
Valve Lift [mm]	10

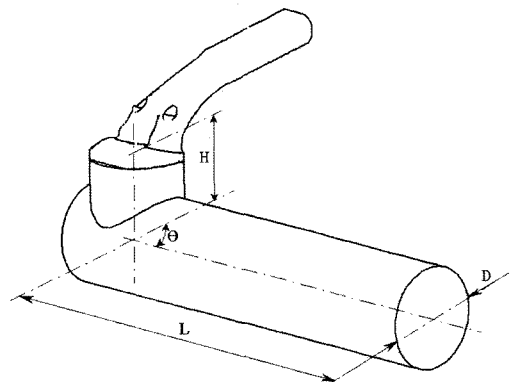


Fig. 1 Simulation variables in steady flow test rig

Fig. 2는 텀블 유동해석을 위한 전체적인 유동해석 격자모델의 외부형상을 보여주고 있다. 해석은 정상 유동시험과 동일한 형태의 텀블 시험 장치와 시험헤드의 형상을 바탕으로 CAD작업을 거쳐 유동격자 생성 및 전산해석을 수행하였다. 격자생성은 전문 격자 생성 프로그램인 Pro-Am과 함께 부분적으로는 수작업(manual meshing)을 하였다. 그리고 Impulse Meter에 상응하는 부분은 Porous로 모델 처리하였다. 해석 시 해의 안정을 위해 Fig. 1에서처럼 흡입측에 Bell-Mouth와 함께 Pressure Box 형태의 Reservoir를 부착하였다. 해석은 시험결과를 바탕으로 일정유량이 공급되는 조건에서, 온도는 24°C로 일정한 값으로 하였다. 그리고 난류모델로는 $k-\epsilon$ High Reynold 모델을 채택하였으며, 작동유체는 공기를 사용하였다.

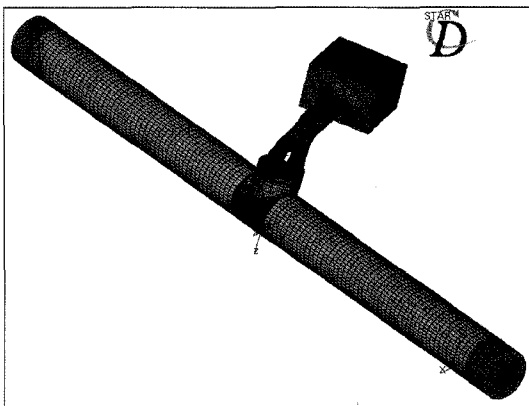


Fig. 2 Simulation model of steady flow rig for tumble test

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 Fig. 2와 같은 텀블유동 시험장치의 좌우에 위치한 텀블-스윙변환 유도관의 각각의 위치 L에 있는 단면에서 계산한 속도 벡터를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 유도관에 부착된 실린더 헤드의 회전각(θ)이 60°인 경우에 대해 계산한 결과 이므로 회전 모우멘텀을 간직한 공기가 우측보다는 좌측으로 더 많이 공급되므로 인해 좌측 튜브의 각 단면에서 계산한 회전속도는 우측의 각 단면에서 계산한 회전속도보다 큰 값을 가지게 된다는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 회전 모우멘텀(angular

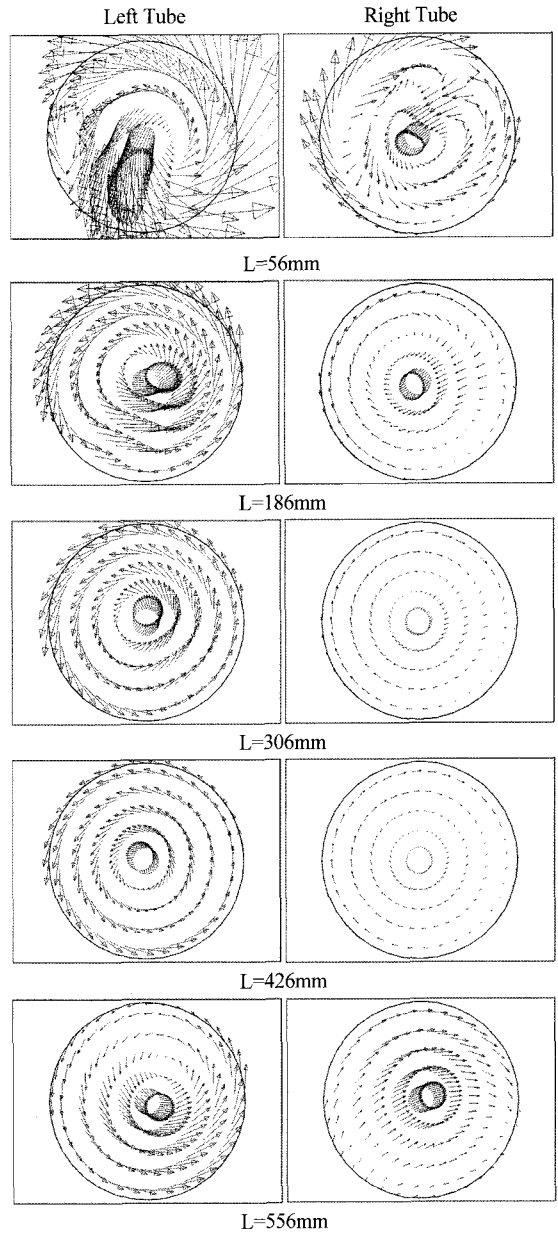


Fig. 3 Vector plot of angular velocity along adaptor tube. Left means left tube and right means right tube of tumble flow test rig. Simulation cond.: right and left valve lift = 10/10[mm], cylinder height(H)=70[mm], tube diameter(D)=85[mm], rotation angle (θ)=60°, mass flow rate=82[g/sec] ($\Delta P=6kPa$)

momentum)에 의한 각속도는 하류로 내려가면서 급격하게 감소하는 경향을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 유도관에 부착된 실린더 헤드의 회전각

(θ)이 60°인 경우(Fig. 3 경우)에 대해 각 단면의 각속도를 (1)식에 의해 계산한 결과 그림이다.

$$\omega_z = \frac{\int \rho(\vec{r} \times \vec{U}) \cdot \vec{k} dv}{\int \rho(\vec{r} \cdot \vec{r}) dv} \quad (1)$$

$$= \frac{\sum_i \rho_{cell} v_{cell} (x_{cell} U_y - y_{cell} U_x)}{\sum \rho_{cell} v_{cell} (x_{cell}^2 + y_{cell}^2)}$$

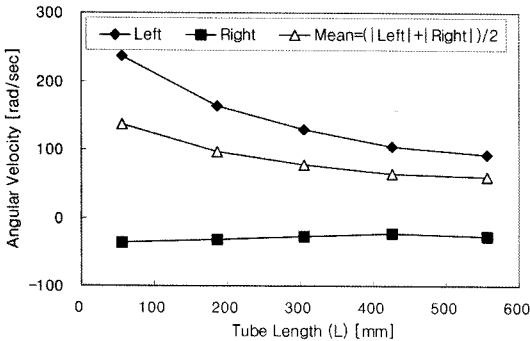


Fig. 4 Variation of angular velocity along adaptor tube length(L). Left means left tube and right means right tube of tumble flow test rig. Simulation cond.: right and left valve lift=10/10[mm], cylinder height(H)=70 [mm], tube diameter(D)=85[mm], rotation angle (θ) =60°, mass flow rate=82[g/sec]($\Delta P=6KPa$)

그림에서 알 수 있듯이 흡기포트를 통해 실린더로 공급된 공기는 텀블-스윙변환기의 좌우 유도관으로 나누어져 흘러 들어가게 된다. 그리고 이러한 흡입공기의 회전 모우멘텀(angular momentum)은 유도관의 하류로 흘러내려가면서 점차 모우멘텀을 잃으면서 회전성분이 약화되어져 간다는 것을 보여주고 있다. (그림에서 각속도의 부호는 단지 회전 방향을 의미함.) 그리고 흡기포트를 통해 유도되는 공기의 텀블유동에 의한 각속도는 양쪽으로 나가는 공기의 각속도 값을 절대치로 하여 평균한 것으로 정의하였다.

Fig. 5는 텀블-스윙변환 유도관의 직경이 변화되었을 때 텀블유동에 의해 유도관으로 유도되는 흡입공기의 각속도를 계산한 그림이다. 그리고 그림에서 나타낸 측정결과(measured result)값은 실제로 텀블유동 실험장치를 사용하여 L=578mm에서 측정된 공기의 회전유동에 의한 토크 값을 사용하여 (2)식에 의해 계산한 각속도 값이다.

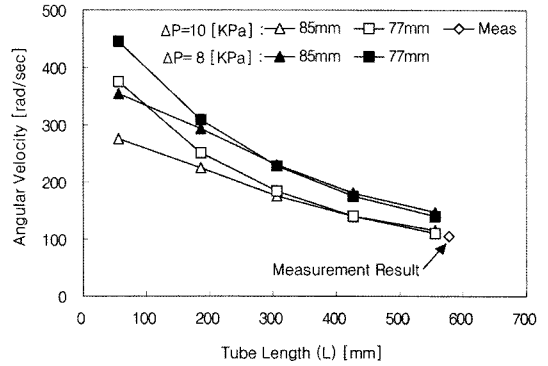


Fig. 5 Effects of tumble adaptor tube diameter(D) on measured angular velocity. Simulation cond.: right and left valve lift=10/10[mm], cylinder height(H)=70[mm], rotation angle (θ)=90°, $\Delta P=8KPa$ (mass flow rate=82[g/sec]), $\Delta P=10KPa$ (mass flow rate=106[g/sec])

$$\omega_z = \frac{8\tau}{B^2 m} \quad (2)$$

그림에서 알 수 있듯이 두 조건 모두 동일한 유량 82 [g/sec], 106 [g/sec]를 흘려보냈을 때 유도관으로 유도되는 흡입공기의 각속도는 유도관의 하류로 흘러가면서 점차 줄어드는 경향을 보인다. 그리고 각각 동일한 유량을 흘려보냈을 때 상대적으로 직경이 작은 유도관(D=77mm)에 처음에 유입되는 공기의 회전각도는 상대적으로 큰 값을 가지지만 하류로 가면서 빠르게 줄어든다. 그러므로 유도관 끝단에 설치된 토크미터를 사용하여 회전유동에 의한 토크 값을 측정하여 이로부터 간접적으로 텀블유동의 회전속도를 (2)식에 의해 측정하는 텀블유동 시험장치의 경우 유도관의 길이(L)에 따라 측정되는 값이 달라진다는 것을 알 수 있다. 그러나 유도관의 직경(D)의 변화에 따른 회전각속도의 변화는 유도관의 길이가 특정길이 이상이 되는 위치에서는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러므로 텀블유동 측정 장치에서 유도관의 직경에 의한 영향을 가능한 한 없애려고 한다면 텀블유동 시험장치의 유도관 길이를 직경의 5배 이상의 값이 되도록 설계하는 것이 타당하다. (참고로 텀블유동 시험에서는 일반적으로 6KPa 이상의 차압에 의해 시험헤드의 흡기시스템으로 공급하도록 하고 있다.)

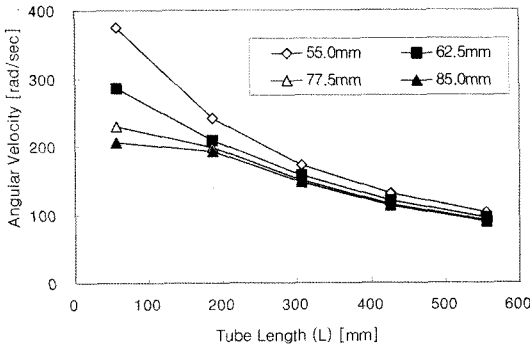


Fig. 6 Effects of cylinder height(H) on measured angular velocity. Simulation cond.: right and left valve lift = 10/10[mm], tube diameter(D)=85[mm], rotation angle (θ)=90o, mass flow rate=82[g/sec]($\Delta P=6KPa$)

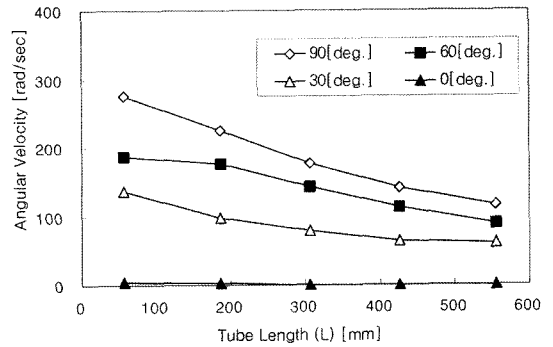


Fig. 7 Effects of head attached angle(θ) on measured angular velocity. Simulation cond.: right and left valve lift = 10/10[mm], tube diameter(D)=85[mm], cylinder height (H)=70[mm], mass flow rate=82[g/sec]($\Delta P=6KPa$)

Fig. 6은 흡입실린더의 높이(H)의 변화에 따른 유도관의 각 위치에서 계산한 회전유동의 각속도 값이다. 그림에서 알 수 있듯이 흡입실린더의 높이(H)가 작으면 실린더로 흡입되는 공기의 텀블유동성분이 텀블-스윙 변환 유도관을 거쳐 스윙유동 성분으로 변환되는 값이 커진다는 것을 보여준다. 특히 유도관의 입구 쪽에서는(L 값이 작은 곳) 이러한 영향이 상당히 크게 나타나지만 하류로 흘러감에 따라 이러한 영향이 상대적으로 감소한다는 것을 보여주고 있다. 해석에 사용한 엔진의 경우 Table 1에서 표기하였듯이 실린더 직경이 77mm로 해석결과를 보면 실린더 직경보다 다소 큰 값을 가지는 경우에는 관 직경(D)의 5배 이상의 위치에서 측정되는 회전속도는 유사한 결과를 보여준다. 그러므로 흡입실린더의 높이(H)값은 실린더 직경 값을 가지거나 또는 그보다 큰 값을 갖도록 설계하는 것이 타당하다.

Fig. 7은 Fig. 1에서 정의한 텀블-스윙 유도관에 부착된 실린더 헤드의 설치 회전각(θ) 변화에 따른 유도관내의 각 단면에서 계산한 각속도를 계산한 결과이다. 그림을 살펴보면 회전각(θ)의 변화에 따라 유도관내로 들어오는 공기의 텀블유동 값은 상당히 달라진다는 것을 보여준다. 시험헤드가 좌우대칭형의 DOHC 헤드를 사용하기 때문에 θ 가 90°일 때 가장 큰 값을 갖게 된다. 그러나 θ 값을 줄여가면서 텀블-스윙 변환 유도관으로 유도되는 텀블유동에 의한 회전속도를 계산해보면 그 값이 급격하게 줄어가는 현상을 보인다. 그러므로 텀블유동 시험 시 특

정 위치에서 텀블 값을 측정하고자 할 때는 정확한 θ 값의 위치에 시험헤드를 설치해야한다는 것을 의미한다. 그리고 물리적인 측면에서 이러한 현상은 텀블유동이 하나의 벡터성분(방향성을 갖는다는 의미)을 가지는 물리량을 보여주는 결과로서, 가변 흡기시스템처럼 흡입되는 공기의 텀블유동 값이 $\theta=90$ o 일 때 최대가 되지 않는 경우에는 θ 값의 위치를 바꾸어 가면서 최대의 텀블유동이 흡입되는 설치각 및 그때의 텀블유동 강도 값을 찾는 것은 엔진의 흡기유동특성을 규정하는데 매우 중요한 의미를 가지게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 엔진흡기시스템의 개발과정 사용되는 텀블 유동측정시스템을 사용한 텀블강도 값의 측정과정에 있어서 측정값이 가지는 물리적인 의미와 함께 측정하는 과정에서 나타나는 텀블-스윙 변환장치가 측정값에 미치는 영향을 살펴보고자 수치해석용 상용코드인 STAR-CD를 사용하여 정상유동 시험장치에 대한 전산해석을 수행하였다. 이러한 일련의 연구과정을 통하여 아래의 결론을 얻었다.

- 1) 텀블-스윙 유도관 끝단에 설치된 토크메터를 사용하여 회전유동에 의한 토크 값을 측정하여 이로부터 간접적으로 텀블유동의 회전속도를 계측하는 텀블유동 시험장치의 계측 값은 유도관의 길이(L)에 따라 측정되는 값이 달라진다.
- 2) 텀블-스윙 유도관의 직경(D)의 변화에 따른 회전

각속도의 변화는 유도관의 길이가 특정길이 이상인 위치에서는 크게 영향을 미치지 않으며, 이러한 특정길이는 공급유량이 많으면 많을수록 짧아진다.

- 3) 실린더 헤드의 설치 회전각(θ)은 어떠한 변수보다 결과 값에 민감한 영향을 주므로 텀블유동 시험 시 특정 위치에서 텀블 값을 측정하고자 할 때는 정확한 θ 값의 위치에 시험헤드를 설치해야한다.

References

- 1) G. Tippelmann, "A New Method of Investigation of Swirl Ports," SAE770404, pp.1745-1757, 1977.
- 2) K. Y. Kang, J. W. Lee and J. H. Baek, "Effects of Tumble Adaptor Configurations on the intake Tumble Characterization," Transactions of KSAE, Vol.2, No.5, pp.66-73, 1994.
- 3) B. Johansson and F. Soderberg, "The Effect of Valve Strategy on In-Cylinder Flow and Combustion," SAE960582, pp.33-48, 1996.
- 4) T. G. Baker and C. J. E. Nightingale, "Port Throttling and Port De-activation Applied to a 4-Valve SI Engine," SAE960587, pp.87-99, 1996.
- 5) J. E. Yun, "New Evaluation Index for Bulk Motion of In-Cylinder Flow through Intake Port System in Cylinder Head," ImechE, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol.216, pp.513-521, 2002.
- 6) J. E. Yun, "In-Cylinder Flow Characteristics varying Intake Valve Lift," Transactions of KSAE, Vol.7, No.9, pp.82-88, 1999.
- 7) J. E. Yun, "A Study on Combined Effects between Swirl and Tumble Flow of Intake Port System in Cylinder head," Transactions of KSAE, Vol.7, No.8, pp.76-82, 1999.