

SI 엔진의 스로틀 밸브에서 유동장 특성에 대한 실험해석

김성초*.김 철* .최종근*.이석정**
 (2001년 1월 20일 접수, 2001년 5월 10일 심사완료)

An Experimental Study on a Flowfield Characteristics in a Throttle Valve of SI Engine

Sungcho Kim, Cheol Kim, Jonggeun Choi and Seokjeong Lee

Key Words: Butterfly valve(나비형 밸브), Throttle Valve(스로틀 밸브), Turbulent Intensity(난류강도), Valve Opening Angle(밸브 개도), Pressure Loss Coefficient(압력손실계수)

Abstract

Experimental investigations on the flow characteristics of downstream region of a butterfly valve, which is used in SI engine, have been conducted according to Reynolds number and valve angle. Measurement programs of the flowfield using x-type of hotwire anemometry include the mean and fluctuating velocity, turbulent intensity, shear stress, power spectrum and pressure loss coefficient. Experimental results show that flow characteristics are independent of relatively high Reynolds number; 60,000 and 80,000. It is also seen that streamwise mean velocities have relatively large velocity gradient around the butterfly valve with increasing the valve opening angle and this trend appears even in the far downstream region. The distributions of turbulent intensity and shear stress show irregular behavior regardless of the valve opening angle and those of the case of the valve opening angle of 4 5° are the largest. The pressure loss coefficient of the body surface of the throttle valve increases mildly with the increase of Reynolds number and increases rapidly with the reduction of the valve opening angle.

기호설명

C_p : 압력손실계수 $(p - p_r) / 2\rho U_\infty^2$
 D : 나비밸브 직경(mm)
 D_c : 원통형 파이프 내경(mm)
 p : 스로틀 밸브내의 평균압력(Pa)
 p_r : 입구 평균압력(Pa)
 U_i : 평균속도벡터(m/s)
 U_∞ : 자유흐름속도(m/s)
 u'_i : 변동분의 속도벡터(m/s)
 \overline{uw} : 레이놀즈 전단응력

x_i : 직교좌표 성분
 α : 밸브 개도각(deg)
 μ : 점성계수(kg/m·s)
 ρ : 밀도(kg/m³)

1. 서론

SI엔진의 흡기 시스템은 공기 여과기, 유량 조절용 스로틀 밸브, 흡기 다기관 및 흡기 밸브로 구성되어 있다. 이중 스로틀 밸브(throttle valve)는 유량의 제어가 쉽고 구조가 간단하며, 특히 유동의 차단이나 스로틀링(throttling)에 적합하고 상대적으로 낮은 압력에서 많은 유량을 처리할 수 있다. 이러한 이유로 엔진내의 공기와 연료의

* 책임저자, 회원, 순천제일대학 차량기계학부
 E-mail: wanpar@suncheon.ac.kr
 TEL : (061)740-1317, FAX : (061)742-3027
 * 회원, 순천대학교 기계·자동차공학부
 ** 회원, 순천대학교 대학원

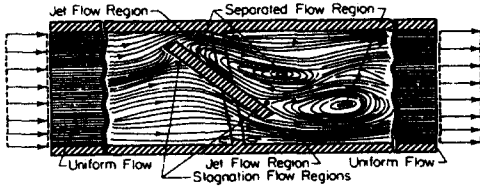


Fig. 1 Qualitative flow field of a partially opened butterfly valve

혼합가스를 만드는데 필요한 흡입 공기량을 조절하기 위하여 사용될 뿐만 아니라, 공기조화 시스템이나 송유관 및 상수도 시스템에서 유량을 분배하거나 제어하기 위해서도 널리 쓰이고 있다. 일반적인 나비형 밸브 주위의 유동형태는 Fig. 1⁽¹⁾과 같다. 밸브 판의 상류 쪽 아래 면에 정체 흐름 영역(stagnation region)이 형성되고, 이 정체 영역을 기준으로 위쪽의 유체는 나비형 밸브와 원통 사이를 통과하여 하류로 이동하게 된다. 반면에 정체 영역 아래쪽의 유동은 경사진 나비형 밸브를 따라 가속되면서 하류로 이동하게 된다. 일반적으로 밸브 주위에는 벽제트(wall jet)흐름과 박리흐름(separation flow) 영역이 형성되는데, 이러한 유동이 하류로 이동하면서 서로 병합(merging)되므로 하류의 유동영역에는 벽제트와 박리에 의한 혼합유동(mixed flow)이 발생하게 된다. 밸브 상부와 하부에서 발생한 두 벽제트의 상호작용이 일어나는 혼합유동 영역에서는 거대 구조(large structure)의 유동특성이 우세하게 작용하여 난류구조(turbulent structure)가 크게 변화하게 된다. 위와 같은 유동 현상은 밸브의 개도에 따라 크게 변화를 보인다. 그러나 지금까지 스로틀 밸브에 대한 유동특성 연구는 주로 밸브에 의한 압력손실, 다공성과 무공성 밸브의 성능 비교, 유량제어 특성 등에 대해서 이루어졌으며,⁽¹⁻⁹⁾ 밸브 개도의 변화에 따른 밸브 하류 유동특성에 대한 실험 연구는 거의 없는 실정이다.

스로틀 밸브의 유동특성이 엔진의 성능에 영향을 미치는 주요 원인은 압력손실에 따른 흡기저항의 증가이다. 스로틀 밸브가 완전히 열리는 것을 제외하고는 밸브 개도에 따라 최소의 유동면적을 만들어 큰 압력차를 형성하지만 압력손실이 커서 흡기저항을 유도하게 된다. 이를 개선하기 위하여 밸브판에 작은 구멍을 적당히 뚫음으로써 밸브판의 후면에 형성되는 재순환영역을 제거하

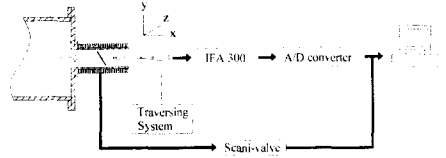


Fig. 2 Experimental apparatus

거나 축소시켜 압력손실을 줄이면서 공기와 연료의 혼합을 개선할 수 있다.⁽⁸⁾

따라서 본 논문에서는 밸브 개도에 따른 밸브 하류의 유동특성을 규명하여 스로틀밸브의 구조 변경 및 흡기다기관내의 입구조건에 대한 기초자료를 제공하여 흡기시스템 설계시 도움을 주고자 한다. 이를 위하여 밸브의 개도를 변화시키면서 밸브 하류에서의 평균속도, 난류강도와 난류용력 측정 실험을 실시하였으며, 스로틀 바디의 표면 압력을 측정하여 밸브 개도로 인한 압력손실을 정량적으로 규명하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험 장치의 개략도는 Fig. 2에 나타났다. 본 실험에 사용된 풍동은 송출식(blowing), 개방형(open type)으로 모터의 출력은 11Kw이고, 축소부(contraction body)의 수축비(contraction ratio)는 7:1이다. 작동 유체인 공기는 시험부의 상류에 위치되어 있는 축류형 송풍기에 의해 송출되고 공기가 유입되는 입구에 촘촘한 망을 설치하여 불순물이 유입되는 것을 방지하였다. 또한 팬의 진동이 시험부에 전달되지 않도록 축류 송풍기와 도관(duct) 사이가 유연하게 연결되어 있고, 확산부(diffuser)와 축소부 사이에는 세 개의 스크린(screen)과 한 개의 허니콤(honey-comb)을 놓아 흐름을 충분히 안정시킬 수 있도록 하였다. 스로틀 바디 모형은 단면 변화가 없는 원통으로 아크릴로 제작하여 풍동의 시험부에 설치하였으며, 지름 10mm의 축을 사용하여 스로틀 바디 안에 91mm의 원형판(circular plate)을 고정하였다. 원형판 단면에 대한 원형판의 폐쇄비(blockage ratio)는 99.3%이며, 실험 모형을 실제 스로틀 바디(가솔린 엔진배기량 2,000cc)와 유사하게 1.82 배 확대하여 만들었고, Fig. 3에 도시하였다.

된다. 스로틀 바디의 상단 지점을 기준으로 10° 씩 증가시키면서 하단의 180° 지점까지 정압공을 설치하였으며, 유동 방향으로 $|x/D| \leq 0.4$ 인 곳은 5mm 간격으로 설치하고 그 외의 지점은 10mm로 하여 총 608개를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 X-형 열선으로 측정된 주유동방향 속도의 분포를 나타낸 것으로, 45° 일 때 주유동방향의 속도분포를 레이놀즈 수의 변화에 따라 비

교한 것이다. $z/D=0$ 일 때 $y/D=0$ 근처에서의 국부적인 속도분포를 제외하면 z축 방향의 벽면으로 접근할수록 그리고 하류로 진행할수록 속도는 레이놀즈 수의 변화에 비의존적인 특성을 갖음을 알 수 있다.

Fig. 7은 레이놀즈 수가 60,000일 때 개도에 따른 주유동방향 속도분포를 비교한 것이다.

개도가 15° 일 경우 밸브 중앙부분의 속도가 매우 작은 영역이 넓게 분포하며, 상부와 하부에서는 밸브의 끝단을 중심으로 큰 속도구배가 분포하는 것을 알 수 있다. 하류에서 중앙부분의 작은 크기의 영역은 사라진다. z/D 가 0.31보다 큰 영역에서는 횡방향 박리영역의 영향으로 상부의 속도가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 하부에서는 밸브의 경사면을 따라 유동이 가속되기 때문에 상부에서와 같은 특징이 관찰되지 않는 것으로 보인다. 개도가 45° 로 증가하면 상부와 하부는 급격하게 속도가 커지며, 전유동장에 걸쳐 속도구배도 커진다. 속도는 하류로 진행함에 따라 상부와 하부의 벽 부근에서 조금 감소한다. z/D 가 0.15보다 큰 영역에서 상부의 속도가 감소하는 것을 관찰할 수 있고, 15° 에 비해 횡방향 박리영역의 영향이 더 커진 것을 관찰할 수 있다. 개도가 확대되어 75° 가 되면 밸브의 끝

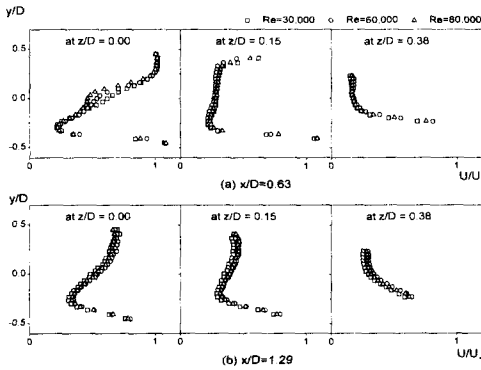


Fig. 6 Streamwise velocity profiles at 45°

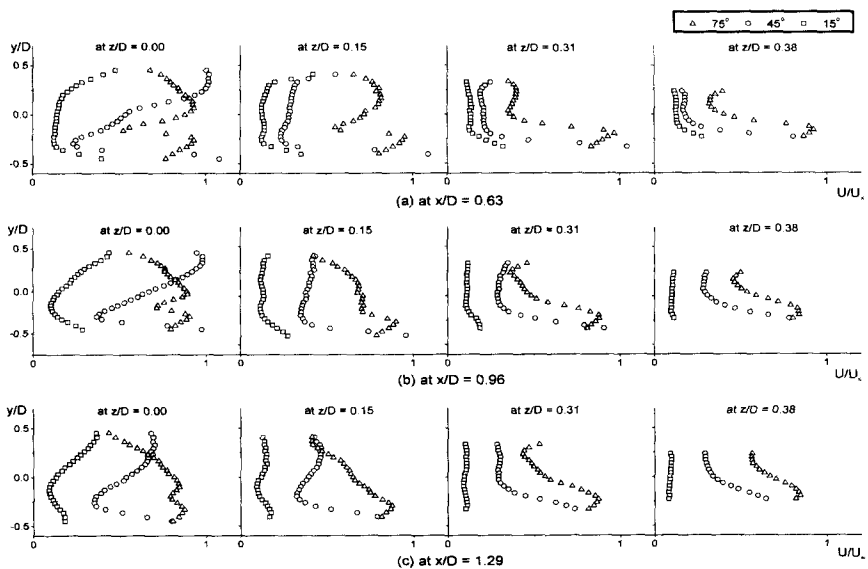


Fig. 7 Streamwise velocity profiles at Re=60,000

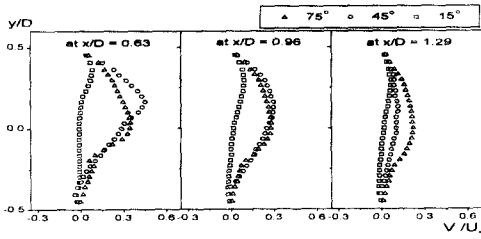


Fig. 8 Vertical velocity profiles at $z/D=0$ & $Re=60,000$

단을 중심으로 큰 속도구배가 형성된다. 45° 에 비해 중앙부분의 속도는 커지고, 열린면적의 증가로 상부와 하부의 속도는 작아진다.

Fig. 8은 레이놀즈 수가 60,000일 때 개도에 따른 수직방향 속도를 비교한 것이다. $x/D=0.63$ 에서 수직방향 속도는 45° 일 때 중앙부분에서 가장 크며, 하류에서는 급격하게 감소하게 된다. 반면에 75°의 경우 하류에서도 비슷한 속도의 크기를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 45° 일 때 혼합유동이 가장 활발하게 일어나는 것으로 생각되며, 75°의 경우 밸브의 개도가 매우 커지게 되고 밸브에 의한 유동의 교란이 하류까지 지속되는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 9는 레이놀즈 수가 60,000일 때 개도에 따른 난류강도 분포를 비교한 것이다. 난류강도를 계산하기 위하여 속도 \tilde{u}_i 는 식 (1)과 같이 평균 속도 U_i 와 변동속도 u_i 로 나눌 수 있다.

$$\tilde{u}_i = U_i + u_i \quad (1)$$

여기서 평균속도 U_i 는 식 (2)와 같이 시간평균 속도를 의미하며, 변동분 속도의 자체 시간평균 값은 0이다.

$$U_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t \tilde{u}_i dt \quad (2)$$

$$u_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t \sqrt{(\tilde{u}_i - U_i)^2} dt \quad (3)$$

난류강도는 식 (3)에서 구한 주유동방향 및 수직방향 속도성분의 변동값을 자유흐름속도(U_∞)로 나누어 각각 무차원화 하였다. 난류강도는 평균 속도의 크기 변화와 밀접한 관련이 있으며, 속도구배가 급격하게 변하는 곳에서 난류강도의 분포도 크게 변하는 것을 알 수 있다. (a)그림과 같이

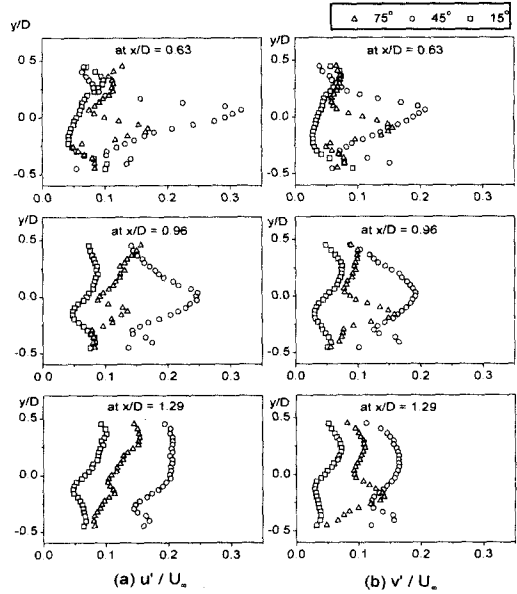


Fig. 9 Turbulent intensity profiles at $Re=60,000$

주유동방향의 난류강도는 45° 일 때 $x/D=0.63$ 인 지점의 중앙부분에서 약 30% 정도로 가장 크며, 하류로 갈수록 중앙부분의 크기는 감소하고 상부와 하부의 크기는 증가하여 약 20%정도의 난류강도 크기를 갖는다. 이는 45° 일 때 벽체와의 상호작용으로 인하여 스로틀 밸브 후류에서 박리와 재부착에 따른 혼합유동이 가장 크게 나타나기 때문에 불균일한 난류구조를 형성하고 있다. 그리고 개도가 15°와 75°경우에 난류강도의 크기는 밸브의 끝단과 벽면 부근에서 15% 미만의 값을 갖는다. 한편 수직방향의 난류강도를 보면 45° 일 때 20% 정도로 (a)에 비해 다소 작은 값을 갖으며, 75° 일 때 밸브 끝단 부근에서 18% 정도의 값이 하류까지 유지된다. 따라서 45° 일 때 혼합유동이 가장 활발하게 일어남을 알 수 있다.

Fig. 10은 레이놀즈 수가 60,000일 때 개도에 따른 전단응력 분포를 비교한 것이다. Kiya⁽¹²⁾는 난류전단 유동에 대한 연구에서 주유동방향 속도성분의 난류강도가 최대값을 갖는 점을 전단층의 중심으로 가정하였는데, Fig. 9의 주유동방향 난류강도와 비교해보면 주유동방향 속도성분의 난류강도가 최대값을 갖는 위치에서 최대 전단응력

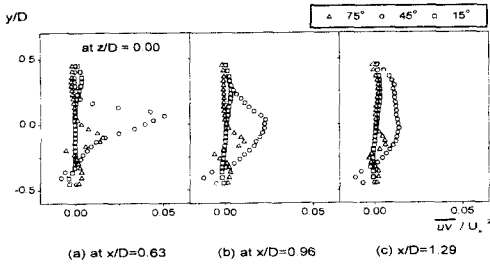


Fig. 10 Shear stress profiles at Re=60,000

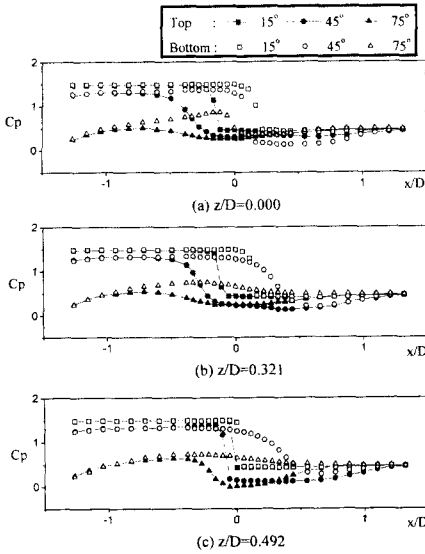


Fig. 11 Pressure distribution of throttle valve at Re=60,000

이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 밸브를 15° 개도했을 때 벽면 부근에서 작은 크기의 전단응력이 나타나고, 45° 개도한 경우 중앙에서는 15° 에 비해 5배가 큰 전단응력이 나타나며 하부에서는 음의 전단응력이 나타난다. 그리고 75° 가 되면 밸브의 끝단을 중심으로 부호가 반대인 전단응력이 관찰된다. 한편 45° 의 경우 유동이 하류로 진행될수록 전단응력은 급격하게 감소한다.

스토틀 바디 표면에서의 정압분포는 압력 손실 계수 C_p 를 사용하여 나타내었다.

$$C_p = \frac{p - p_r}{0.5\rho U_\infty^2} \quad (4)$$

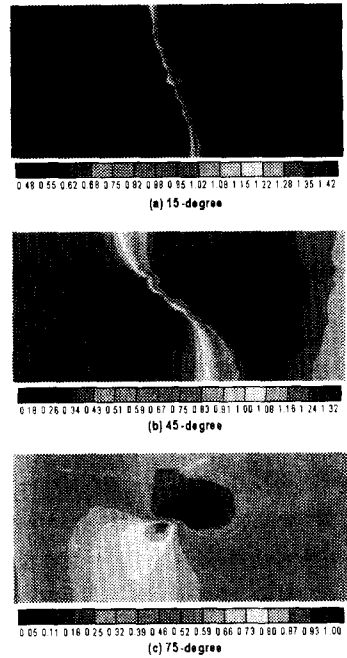


Fig. 12 Pressure contours of throttle valve at Re=60,000

여기서 p 와 p_r 은 각각 스토틀 바디 표면과 입구에서의 정압이고, U_∞ 는 자유유동속도이다.

Fig. 11은 레이놀즈 수가 60,000일 때 개도에 따른 압력손실계수를 비교한 것이다. (a)그림에서 15° 와 45° 의 압력손실계수는 각각 1.5와 1.2로 거의 비슷하며, 밸브의 상부와 하부의 압력손실계수는 거의 유사한 값을 갖는다. 단지 밸브의 개도로 압력회복 지점의 차이만 발생하며, 15° 일 때가 45° 일 때보다 압력회복이 빠르게 일어난다. 75° 의 경우 열린면적이 증가하여 $x/D=0$ 부근을 제외하면 압력손실은 거의 없다. (b)와 (c)는 횡방향 벽면 부근의 압력손실계수를 나타낸 것으로 (a)와 비교해 보면 압력손실계수의 크기의 차이는 없으나, 압력회복이 좀 더 빠르게 발생한다.

Fig. 12는 레이놀즈 수가 60,000일 때 개도에 따른 압력손실계수를 등가선을 사용하여 나타낸 것이다. 스토틀 바디의 표면 정압분포를 x - y 평면에 투영한 것이다. 15° 의 경우 등압선이 조밀한

부분은 나비형 밸브의 위치와 일치하며, 그림의 중앙부분으로 갈수록 벽면에 접근하기 때문에 열린면적의 감소로 밸브 주위의 속도가 증가하게 되고 등가선의 폭은 좁아진다. 밸브의 개도가 45°가 되면 정체속도 영역은 15°보다 감소하고, 밸브의 개도로 상부와 하부에서 압력회복은 느려진다. 밸브를 75°로 개도하면 정체영역은 거의 사라지고, 구동축 부근에만 좁게 생성된다.

4. 결 론

본 연구에서는 나비형 밸브의 개도와 레이놀즈 수 변화에 따른 SI 엔진의 스로틀 밸브의 유동현상에 대하여 연구하였다. 각각의 레이놀즈수(30,000, 60,000, 80,000)에 대하여 개도(15°, 45°, 75°, 90°)를 변화시키면서 하류에서 속도분포와 압력손실계수 등의 측정 실험을 하였다. 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 측정된 물리량들은 비교적 큰 레이놀즈 수(60,000, 80,000)에서 비의존성을 갖는다.

(2) 레이놀즈수가 60,000인 경우 밸브의 개도가 작은 15°와 45°의 경우 상부의 주유동방향 속도는 중앙부분을 제외하면 횡방향 박리영역의 영향으로 중앙부분에 비해 크게 감소하고, 밸브의 개도가 큰 75°의 경우 밸브의 개도로 인한 유동의 국부적인 교란이 하류까지 나타났다.

(3) 난류강도는 45°일 때 중앙부분에서 30%로 가장 크고, 하류로 진행함에 따라 전유동장에 걸쳐 20%정도의 난류강도가 형성된다. 또한 전단 응력도 45°일 때 중앙부분에서 다른 개도조건의 경우보다 약 5배 정도 큰 값을 가지며 하류에서 급격하게 감소하여 비슷한 크기를 갖는다.

(4) 압력손실계수는 75°, 45°, 15°일 때 각각 0.3, 0.4, 1.2로 개도가 작아지면 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

(5) 스로틀밸브 하류의 압력손실은 SI엔진의 흡기다기관내의 흡기저항을 유발하여 엔진의 효율을 저하시킬 수 있다. 따라서 본 연구결과를 기초로 향후 흡기포트내의 흡입저항 및 연소효율에 미치는 영향에 대하여 좀더 면밀한 연구를 실시하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 순천대학교 자동차부품 및 소재연구 개발센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Eom, K., 1998, "Performance of Butterfly Valve as a Flow Controller," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 110, pp. 16~19.
- (2) Addy, A. L., Morris, M. J. and Dutton, J. C., 1985, "An Investigation of Compressible Flow Through Butterfly Valves," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 512~517.
- (3) Morris, M. J. and Dutton, J. C., 1989, "Compressible Flowfield Characteristics of Butterfly Valves," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 111, pp. 400~407.
- (4) Morris, M. J. and Dutton, J. C., 1991, "An Experimental Investigation of Butterfly Valve Performance Downstream of a Elbow," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 113, pp. 81~85.
- (5) 김철호, 최정명, Behnia, M. and Milton, B. E., 1992, "Computation of the Flow Field around a Butterfly Valve," 한국자동차공학회지, Vol. 14, No. 1, pp. 47~53.
- (6) Chendong Huang and Rhyun H. Kim, 1996, "Three Dimensional Analysis of Partially Open Butterfly Valve Flows," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, pp. 562~568.
- (7) 이창식, 조병옥, 1996, "다공스로틀밸브의 2차 미립화 특성과 장착기관의 성능에 관한 연구," 한국액체미립화학회지, Vol. 1, No. 1, pp. 55~62.
- (8) 이창식, 조병옥, 1996, "흡기관 내의 혼합기 유동 특성에 관한 연구," 한국자동차공학회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp.218~228.
- (9) Caille, V. and Laumonier, J., 1998, "Effect of Periodic Aerodynamic Pulsation on Flow over Confined Butterfly Valve," *Experiments in Fluids*, Vol. 25, pp. 362~368.

- (10) 김성초, 김철, 1999, "엔진의 흡기 공기량 조절용 스로틀 밸브에서의 유동 특성," 한국자동차 공학회논문집, Vol. 7, No. 8, pp. 91~98.
- (11) 김성초, 김철, 2000, "불꽃 점화 엔진용 스로틀 밸브의 유동해석," RRC 공동학술 세미나, pp. 3~12.
- (12) Kiya, M. and Sasaki, K., 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech*, Vol. 137, pp. 83~113.
- (13) 박상원, 이상우, 2000, "공기조화용 버티플라이 밸브 하류에서의 3차원 유동특성," 대한기계학회논문집 B편, 제24권, 제2호, pp. 260~269.