

(論 文)

# LDV측정을 통한 엔진내 텀블감쇄 메카니즘 해석

강건용\* · 이진욱\*\* · 백제현\*\*

(1994년 4월 18일 접수)

## Analysis of Tumble Decay Mechanism through LDV Measurement in an Engine

Kern-Yong Kang, Jin-Wook Lee, Je-Hyun Baek

**Key Words :** Tumble Flow(텀블유동), Four-Valve Engine(4-밸브엔진), LDV(레이저유속계), Turbulence Intensity(난류강도)

### Abstract

Tumbling motion is very effective for turbulence enhancement during compression process in the cylinder of 4-valve engines. In this paper the tumble decay mechanism for different intake port configurations were measured using laser Doppler velocimetry. Analysis of the tumble decay mechanism was achieved by means of two non-dimensional parameters, defined as tumble eccentricity and shape factor in tumble velocity profile, in addition to the tumble moment.

### 1. 서 론

왕복식 엔진에서 연소를 증진시키는 압축과정 말기의 실린더내 난류는 주로 흡입 및 압축과정을 거치는 동안 살아남은 큰 스케일의 유동이 깨짐으로서 생성된다. 흡입과정시 생성되는 큰 스케일의 운동으로 스웰유동이 종래의 2-밸브 엔진에서 사용되어 왔으나, (1,2) 최근 엔진출력 향상을 위해 팬트루프 연소실을 갖는 4-밸브방식이 채택되면서 텀블유동을 많이 이용하고 있다. (3-5) 그 이유는 텀블유동이 곧 바로 큰 대칭인 2개의 흡기포트에 의해 유동손실 없이 효과적으로 생성될 수 있고, 스웰유동에 비해 압축과정 말기 실린더헤드 천정부근의 형상을 이용해 쉽게 깨뜨릴 수 있기 때문이다. 그러나 실린더내 텀블유동은 그중심이 피스톤 운동과수직으로 움직이기 때문에 그 깨짐시키는 피스톤운동에 직접적인 영향을 받고, 이것을 효과적으로 엔진설계에 이용하기 위해서는 그 복잡한 특성이 충분히 이해되

어야 한다. 실제로 대부분의 자동차 메이커에서, 개발된 흡기포트의 텀블생성 특성을 정상상태 조건에서 패들휠이나 임펄스미터를 이용하여 측정하고 있지만, 연소에 영향을 주는 난류는 흡입 및 압축과정 동안 발생하는 텀블의 감쇄특성에 지배되므로, 효과적으로 흡기포트를 설계하기 위해서는 텀블의 생성 뿐 아니라 소멸 메카니즘도 동시에 고려되어야 한다.

본 연구팀은 4-밸브의 팬트루프 연소실을 갖는 엔진내 텀블 메카니즘에 대한 이해를 보다 넓히기 위하여 단기통 가시화엔진에 3개의 서로 다른 흡기포트 형상을 제작하여 모터링 상태에서 LDV를 이용하여 텀블속도장의 변화를 측정하여 그 실험결과를 발표한 바 있다. (6) 저자들은 그 연구에서 흡기포트 형상에 따라 실린더내 생성되는 텀블유동의 형태가 변하고, 흡입과정시 실린더 상단에 존재하는 2개의 벽면 와류가 텀블생성을 방해하는 원인이며, 텀블깨짐양과 그 시기가 난류강도 생성량과 관계가 있음을 LDV측정 결과를 이용해 밝혔다. 본 논문은 그와 같은 연구에 이은 계속된 연구결과로서, 난류생성에 직접 영향을 미치는 텀블의 감쇄특

\*정회원, 한국기계연구원

\*\*정회원, 포항공과대학교 기계공학과

성을 텀블유동 형태에 상호 관련시켜 해석하고자 한다. 이를 위해 텀블속도 분포 및 생성방법이 다른 경우에 대해 피스톤 움직임에 따른 텀블감쇄 과정을 텀블모멘트를 비롯한 2개의 새로운 무차원 파라메타인 텀블 편심도와 텀블속도분포의 형상인자를 정의하여 해석하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 LDV시스템(Dantec Co.)은 5와트의 아르곤-이온 레이저와 광섬유 전송 트랜스미터, 3차원 이송장치, 그리고 신호처리기인 BSA(burst specturm analyzer)로 구성되며, 1차원 속도측정을 위해 파장 514 nm의 초록색 레이저를 사용하였다. 프로브렌즈의 초점길이는 310 mm이고, 측정체적내의 플린지(fringe) 간격은 2.12  $\mu\text{m}$ 이다. 가시화엔진은 직경 56.5 mm, 행정길이 49.5 mm, 압축비 8.5의 소형 가솔린엔진으로서 흡기밸브와 배기밸브가 각각 2개씩인 팬루프(pent-roof) 형태의 연소실을 갖고 있다. LDV측정을 위해 피스톤을 연장하여 반사거울을 설치할 수 있도록 하였고, 피스톤윗면은 두께 12 mm의 석영유리(quartz)를 장착하여 레이저광선이 연소실내로 들어올 수 있도록 하였다. 또한 피스톤의 기밀과 윤활을 위해 바이톤링과 테프론-카본링을 중첩하여 사용하였다. LDV측정을 위한 산란입자는 평균입경이 1  $\mu\text{m}$ 의 산화알루미늄 분말이며, 입자공급은 공기를 건조시킨 후 입자부유기(fluidized bed, TSI Co.)에서 산란입자를 부유시켜 서지탱크를 통하여 엔진에 효율적으로 공급되도록 하였다. LDV장치 및 가시화엔진의 세부사양과 모터링 실험장치 구성에 관한 내용은 참고문헌<sup>(6)</sup>에 나타내었다.

LDV측정은 엔진회전수 1000 rpm, 전부하(WOT) 상태에서 수행하였다. 본 연구에서는 4밸브엔진의 흡입 텀블유동 변화를 위해 Fig. 1과 같이 기존포트, 포트 I, 포트 II의 3가지 흡기포트에 대하여 실험하였다. 포트 I은 실린더헤드면에 대해 30도 경사지게 흡입포트가 직선으로 되어 있고, 포트 II는 10도 경사지게 되어있다. 흡기포트의 밸브측 유동 단면적은 기존포트가 2.54  $\text{cm}^2$ , 포트 I, II가 각각 2.01  $\text{cm}^2$ 이며, 흡기포트를 지나는 동안 단면적의 변화율은 기존포트가 48%, 포트 I, II가 각각 28% 감소되는 형상을 갖는다. 각 포트엔진에 대해 텀블속도측정을 위해 실린더측을 따라 3 mm 간격으로

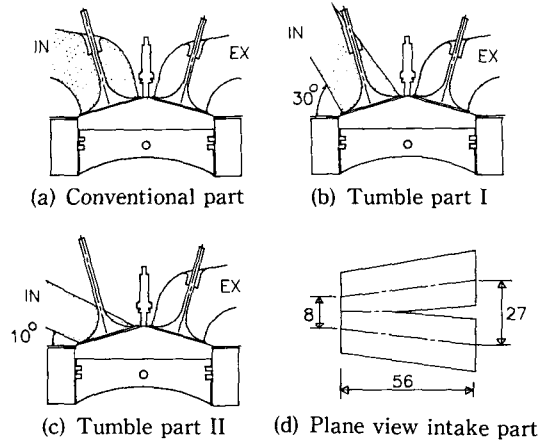


Fig. 1 Intake port configurations

20개의 측정점에서 LDV측정실험을 하였다. 한 점에서 측정데이터 수는 16000개로 하였고, 각 크랭크각도에서 평균속도는 앙상블 평균방법을 이용하여 계산하였으며, 이때 크랭크각도 폭은 4도로 하였다.<sup>(7)</sup>

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 기존포트와 포트 I, 포트 II의 실린더 종단면에서 흡입 및 압축과정 동안 변화되는 텀블유동의 속도분포를 보여준다. 흡입과정 동안 텀블유동의 생성원은 흡기밸브로부터 공기가 유입되어 배기밸브 방향으로 흐르는 유동이다. 기존포트에서는 흡입과정 중반 이후 점차 감쇄되던 실린더 상단의 텀블생성원이 흡기밸브단면(크랭크각도 210도) 부근에서 완전히 사라지고, 하단의 텀블유동은 피스톤 상단의 마찰로 인해 약화되어 압축과정 중반(크랭크각도 270도)에서 완전히 소멸된다. 포트 I의 경우 텀블유동은 흡기포트를 통해 유입된 공기가 급한 포트각도로 인해 실린더헤드를 따라 흐르지 않고 실린더벽면에 충돌하면서 형성된다. 그림의 흡입과정 중반 실린더 종단면 속도분포는 위의 사실을 잘 나타내고 있다. 포트 II의 경우 텀블유동은 포트 I에 비해 흡입포트각도가 완만함에 따라 흡입공기가 실린더헤드면을 따라 흐른 후, 실린더벽면에 충돌함으로써 생성된다. 이 현상은 그림에 나타나듯이 흡입과정 중반에 실린더 종단면속도 분포에서 헤드 근처에 큰 속도성분이 존재하는 것에서부터 알 수 있다. 또한 같은 조건에서 측정된

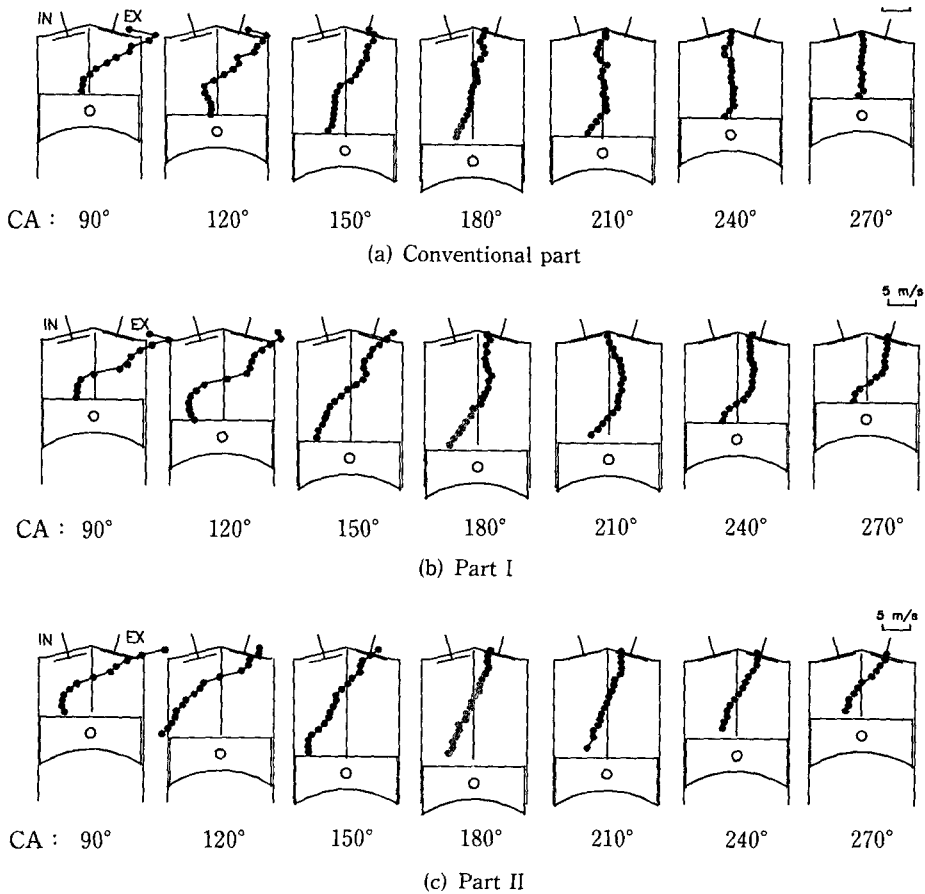


Fig. 2 Comparison of tumble velocity profiles for the three intake ports

실린더 횡단면 속도분포<sup>(6)</sup>를 보면, 3가지 포트 모두에 대해 흡입과정시 3차원 유동특성을 갖지만, 압축과정 동안 실린더 단면속도가 균일하게 되어 텀블속도 성분만이 존재하게 된다.

크랭크각도에 따른 텀블특성의 변화를 정밀하게 분석하기 위하여, 텀블소멸 메카니즘을 해석할 수 있는 파라메타로서, 텀블모멘트<sup>(8)</sup>를 포함해 텀블편심도 및 형상인자를 새로히 정의하였다. 텀블모멘트는 텀블와류 중심에 대한 각 측정점(Fig. 3 참조)에서의 공기의 운동모멘트이며, 아래와 같이 나타낸다.

$$M = \int_0^{R_1} r_1 V_1 dr_1 + \int_0^{R_2} r_2 V_2 dr_2 \quad (1)$$

여기서, 첨자 1은 텀블중심 위에 존재하는 측정점을 가르키며, 2는 텀블중심 아래 존재하는 측정

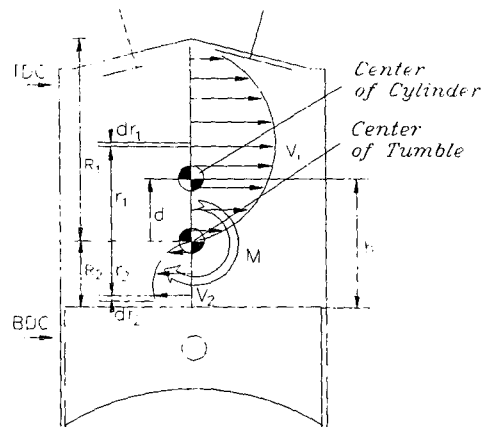


Fig. 3 Definition of tumble characteristic parameters

점을 나타낸다.

텀블편심도,  $e$ , 는 텀블와류의 중심(속도가 영인 지점)에서 순간 실린더중심까지의 길이, 즉 업셋거리  $d$ 를 실린더 중심길이  $h$ 로 나눈 값이다. 즉

$$e = d/h \quad (2)$$

여기서,  $d = h - R_2$ 이다. 텀블편심도가 양의 값을 갖는 것은 텀블와류 중심이 순간 실린더중심 보다 아래 있을 때를 의미한다.

두번째 무차원수인 텀블유동 속도분포의 형상인 자는 속도분포 형태에 따른 텀블소멸 특성을 검증하기 위하여 도입되었다. 텀블의 감쇄특성은 텀블모멘트와 그 편심도에 의해 영향을 받을 뿐 아니라, 텀블속도 분포내 형상프로파일에 의해서도 영향을 받는다. 즉 두개의 텀블운동이 같은 텀블모멘트와 편심도를 갖더라도, 그들의 속도분포가 다르면 텀블유동의 감쇄특성이 다를 수 있다. 텀블속도 분포의 형상인자는,  $S_f$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$S_f = \frac{w_1 \int_0^{R_1} r_1^2 V_1 dr_1}{R_1 \int_0^{R_1} r_1^2 V_1 dr_1} + \frac{w_2 \int_0^{R_2} r_2 V_2 dr_2}{R_2 \int_0^{R_2} r_2 V_2 dr_2} \quad (3)$$

여기서  $w_1, w_2$ 는 형상가중치(weighting factor)이고,

$$w_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad w_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

이다.

텀블유동이 완전히 선형속도분포일 경우, 이 파라미터는 0.75가 된다. 텀블속도분포가 불룩한 형상을 가질수록, 이 파라미터는 0.75보다 작은 값을 가지면서 작아지며, 텀블속도분포가 오목한 현상을 가질수록 0.75보다 큰 값을 갖게 된다.

변경되지 않은 기존포트의 경우, 흡입과정 중반에 일정하던 텀블모멘트는 흡입과정 말기에 감쇄하기 시작하여 흡기밸브가 닫히 후에 완전히 소멸된다. (Fig. 4) 포트 I과 포트 II의 경우에, 크랭크각도 180도(BDC)에서 텀블모멘트는 거의 같은 값을 갖는다. 피스톤이 상승하기 시작하면서 두 포트의 텀블모멘트는 크랭크각도 240도까지 점차 증가하며, 포트 I의 텀블모멘트 증가는 포트 II의 경우보다 크게 나타난다. 그후 계속 진행되는 압축과정 동안, 두 포트의 텀블모멘트는 감소되어 포트 II에서는 300도에서, 포트 I에서는 330도에서 각각 영이 된다. 포트 II에서 텀블모멘트가 포트 I의 경우

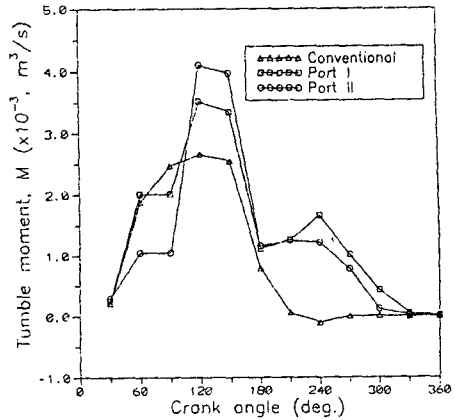


Fig. 4 Tumble moments for the three intake ports

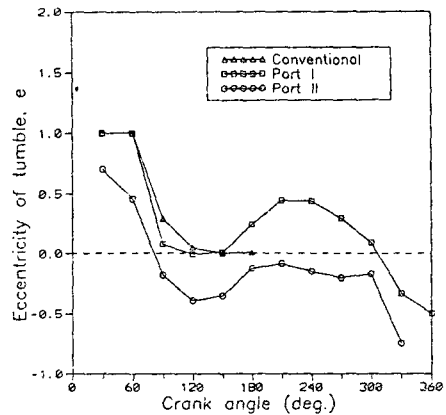


Fig. 5 Tumble eccentricities for the three intake ports

보다 흡입과정 동안 크게 나타나지만, 압축과정이 진행되면서 빨리 감쇄된다. 이것은 정상상태 흡입유동조건에서 측정된 텀블모멘트가 항상 압축과정 말기의 텀블모멘트와 상관되어질 수 없음을 말한다. 따라서 흡입과정 동안 텀블유동을 얼마나 많이 생성시킬 것인지도 중요한 문제지만, 어떠한 형태의 텀블유동을 만들어 주는 것이 압축과정 동안 효과적으로 난류로 깨어질 것인지를 아는 것이 더욱 중요한 문제이다.

기존포트의 경우에, 텀블와류의 중심이 Fig. 5에 나타난 것과 같이 흡입과정 중반부터 순간 실린더중심 가까이에 머물고 있다. 포트 I과 포트 II에서, 텀블편심도는 그 크기에 있어서 약간의 편차는 갖지만 크랭크각도에 대해 S자형태를 보이고 있다. S자형의 전반부는 흡입과정 동안 나타나고 후

반부는 압축과정 동안 나타난다. 이것은 크랭크각도에 따른 피스톤 가속도와 텀블 관성력의 변화에 기인한다. 포트 I에서, 텀블중심은 초기에서 순간 실린더중심 밑에 위치하면서 흡입과정 동안 텀블유동을 생성하고, 피스톤이 계속 하강함에 따라 점차 실린더중심으로 움직인다. 피스톤속도가 비교적 낮은 크랭크각도 150도에서 텀블중심은 생성된 유동장의 관성력 때문에 실린더중심 아래 머문다. 텀블편심도는 압축과정 동안 최대 모멘트 발생지점에 해당하는 240도까지 계속 증가한다. 그후 텀블유동의 중심은 실린더중심에 보다 가까워지고, TDC 근처에서 팬트루프 연소실의 틈새체적으로 움직이기 때문에 그 크기가 감소한다.

포트 II에서는, 텀블중심이 초기에는 순간 실린더 중심위에 위치하는데, 이것은 실린더 아래부분의 텀블속도성분이 윗부분 보다 크기 때문이다. (Fig. 5 참조) 압축과정 동안 텀블중심은 텀블유동의 강제운동을 하면서 순간 실린더중심을 거의 추종하며, 피스톤이 TDC에 접근 할 때 포트 I에서와 같이 텀블은 완전히 소멸되고 만다. 팬트루프 연소실 엔진의 실린더에 존재하는 텀블유동에 대하여, 피스톤 윗면을 따라 흐를때의 유동은 실린더헤드를 따라 흐를때의 유동보다 많은 마찰손실을 포함한다. 그 이유는 피스톤 윗면으로 부터 실린더 벽면쪽으로 유체가 흐를때, 이 두개면의 모서리는 유동에 대해 급격한 장애물로 작용해 운동에너지의 손실을 유발시키기 때문이다. 그러므로 피스톤 윗면 근처에 많은 속도성분들이 존재함으로써 텀블와류의 중심이 순간 실린더중심 위에 위치하게 되는 유동이 텀블유동 에너지보다 빨리 소멸되어 진다. Fig. 5는 포트 II 경우의 텀블편심도가 압축과정 동안 항상 음의 값을 갖고 포트 I의 경우 보다 그 모멘트가 급속히 감쇄되고 있음을 보여준다.

Fig. 6은 3개 포트의 경우에 대해서 크랭크각도에 대한 형상인자,  $S_f$ 의 변화를 보여준다. 기존포트에서, 텀블속도는 선형분포 특성을 갖다가 피스톤이 압축말기 TDC로 감에 따라 점차 불룩한 속도분포 형상을 갖는다( $S_f < 0.75$ ). 포트 II에서는 텀블속도 분포가 흡입과정 초기부터 강한 선형운동 특성을 갖고 있음을 말하며, 그 반면에 포트 I에서는 텀블속도 분포가 압축과정 중반까지 일정한 선형분포 특성을 유지하다가, 그후 상대적으로 속도분포가 보다 불룩한 형태를 갖는 경향을 보인다. 포트 II에서, 압축과정 동안 텀블속도 분포는 포트

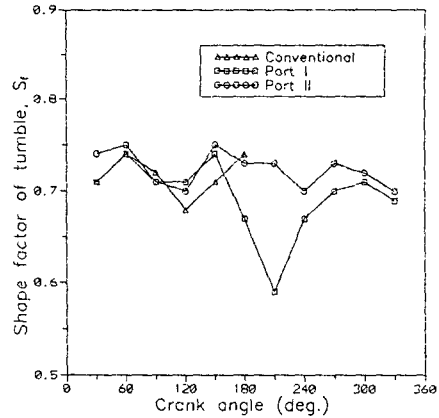


Fig. 6 Shape factors in the tumble velocity profile for the three intake ports

I에서 보다 계속적으로 높은 선형분포 특성을 갖는다.

#### 4. 결론

4밸브 팬트루프 연소실의 흡입과정시 생성되는 텀블유동의 압축과정 동안 감쇄특성을 규명하기 위해, LDV측정을 통해 텀블모멘트를 비롯한 2개의 새로운 무차원 파라미터를 정의하여 해석을 시도한 결과, 아래와 같은 결론을 요약할 수 있다.

(1) 실린더내에서 텀블중심의 크랭크각도에 따른 위치변화, 즉 텀블편심도는 텀블생성 형태에 관계없이 텀블의 관성력과 피스톤의 가속도로 인해 S자 형태의 특성을 갖는다.

(2) 흡입과정시 높게 나타난 텀블모멘트가 압축과정 동안 반드시 계속 높은 모멘트를 갖지 않는 경우가 있으며, 이것은 정상유동 실험을 통한 텀블 특성화에 한계가 있음을 드러냈다. 따라서 텀블유동 메카니즘은 텀블모멘트 하나로 정의되는 것이 불충분하고, 텀블편심도 및 형상인자의 새로운 무차원 파라미터의 정의가 요구되었다.

(3) 실린더내 텀블유동에 대해 텀블편심도가 음의 값을 가질 때, 즉 텀블중심이 순간 실린더중심 보다 위에 존재할 때, 그리고 텀블속도가 선형분포 특성이 강할때(불룩한 형상이 아닐 때), 압축과정시 텀블의 감쇄특성이 커지는 경향을 갖는다.

이와같은 텀블유동 해석을 위해 도입된 새로운 무차원 파라미터는 텀블의 운동 메카니즘에 대한 이해를 보다 넓히는 데 효과적으로 이용될 수 있을

것으로 기대한다.

### 참고문헌

- (1) Liou, T. M. Santavica, D. A., 1983, "Cycle Resolved Turbulence Measurements in a Ported Engine with and without Swirl," *SAE Paper* 830419.
- (2) Aldo Coghe, et. al., 1988, "Effect of Intake Ports on the In-Cylinder Air Motion Under Steady Flow Condition." *SAE Paper* 880384.
- (3) Arcoumanis, C., et al., 1990, "Tumblinmg Motion: A Mechanism for Turbulence Enhancement in Spark-Ignition Engines." *SAE Paper* 900060.
- (4) Hadded, O., Denbratt, L., 1991, "Turbulence Characteristics of Tumbling Air Motion in Four-valve S. I. Engines and Their Correlation with Combustion Parameters." *SAE Paper* 910478.
- (5) Lee, K., Too, S., et. al., 1983, "An Experimental Study of In-Cylinder Air Flow in a 3, 5L Four-Valve S. I. Engine by High Speed Flow Visualization and Two-component LDV Measurement." *SAE Paper* 930478.
- (6) 강건용 외, 1994, "모터링엔진의 흡기포트 유동변화에 따른 덩블생성 및 소멸에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제4호, pp. 912~919.
- (7) Rask, R. B., 1981, "Comparison of Window, Smoothed-Ensemble, and Cycle-to-cycle Data Reduction Techniques for Laser Doppler Anemometer Measurements of In-cylinder Velocity," *ASME Symposium on Fluid Mechanics of Combustion System*, Boulder, Colorado, June.
- (8) Omori, S., et. al., 1991, "Effect of Intake Port Flow Pattern on the In-Cylinder Tumbling Air Flow in Flow in Multi-Valve S. I. Engine," *SAE Paper* 910477.