

## 스윙유동이 분무특성에 미치는 영향에 관한 연구

## Study on the Effect of Swirl Flow on Spray Characteristics

최승환\*, 전충환\*\*, 장영준\*\*

S. H. Choi, C. H. Jeon, Y. J. Chang

## Abstract

It is well known that the flow and spray characteristics is critical factor on the performance and emission of a direct injection diesel engine. So this study aims to investigate the interaction of flow and spray characteristics. At first, in-cylinder flow distributions in swirl adaptor for 4-valve cylinder head of DI Diesel engine were investigated under steady conditions for different SCV angles mounted on the cylinder head with steady rig test and 2-D LDV. And the in-cylinder flow was quantified in terms of mean flow coefficient and swirl ratio/tumble ratio. It was found that the swirl ratio is controlled between 2.3 and 3.8.

Then spray characteristics of the intermittent injection were investigated. PDA system was utilized for measurement of a droplet size and velocity. The analyses of the PDA results are carried out with Time Dividing Method. It was found that there is a correlation between the swirl flow and SMD. The droplet size and the velocity were nearly constant value with each SCV angle. And the swirl ratio is higher, SMD smaller. The swirl ratio was helpful factor to the atomization of droplet.

**Key Words** : SCV(swirl control valve, 스윙제어밸브), 2D LDV(2-dimentional laser Doppler velocimetry, 2차원 레이저 도플러 유속계), PDA(phase Doppler anemometry, 위상 도플러 입자분석기), T.D.M.(time dividing method, 시간분해법)

## 1. 서론

최근 엔진개발의 주제는 저연비와 저배기의 동시 실현이다. 이에 대해 세계 주요 선진기술국 및 자동차업체는 가장 적합한 대상기술로

소형 직분식 디젤엔진과 관련된 기술을 선정하였으며, 많은 연구가 진행되고 있다<sup>(1)~(3)}</sup>.

직분식 디젤엔진 개발에서 가장 핵심적이고 어려운 기술과제 중의 하나는 NOx와 PM의 배출저감으로, 이를 위해서 실린더 내 유동의 최적화<sup>(4)}</sup>, 연료의 개선, 연료 분사장치의 전자제어 및 고압화<sup>(5)}</sup>, 후처리 장치의 개발 및 성능향상, 새로운 디젤연소과정의 개발<sup>(6)}</sup> 등에 많은 연구가 이루어지고 있다. 이와 같은 다양한

\* 부산대학교 기계공학과 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

NOx 및 PM의 저감기술 분야 가운데 디젤엔진의 연소현상을 정확히 이해하여 새로운 디젤연소 과정을 개발하는 기술은 NOx 및 PM을 줄이는 근본이 되는 기술일 뿐만 아니라, 여타 기술분야에 비해 실용화에도 보다 접근되어 있는 것으로 평가되고 있다.

아울러 이러한 연소과정은 분무입자의 증발과 미립화에 의한 연료와 공기의 상호작용에 밀접한 관련이 있다<sup>(7)</sup>. 이에 따라 유동현상과 연료 분무현상에 대한 연구가 주요 관심대상이 되어 왔다. 특히 유동 현상은 LDV, PIV 등을 이용한 3차원 유속측정 및 CFD 코드를 이용한 유동해석 등의 방법으로 실린더 내부의 유동현상을 이해하는데 많은 도움이 되고 있다<sup>(8)</sup>.

이러한 유동 현상과 분무 현상에 대한 독립적인 연구 또는 유동 현상이 연소에 미치는 영향에 대한 연구는 많이 보고된 바가 있지만, 실린더내 유동이 분무특성에 미치는 영향에 관한 연구는 상대적으로 적어서 여전히 이에 대한 체계적인 연구가 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 SCV를 이용한<sup>(9),(10)</sup> 정상유동 실험으로 스웰비 등의 유동관련 파라미터들을 구하고<sup>(11),(12)</sup>, 이를 바탕으로 2차원 레이저 유속계로 스웰비에 따른 유동장의 형태를 가시화 하였으며, 유동에 따른 분무특성을 PDA를 이용<sup>(13)~(15)</sup>하여 살펴봄으로써 흡입되는 스웰 유동이 분무특성에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 SCV 형상 및 실험조건

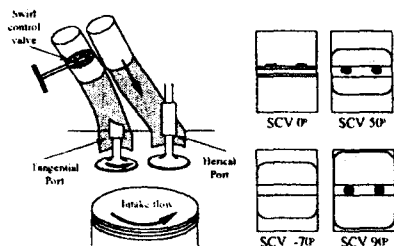


Fig. 1 Geometry and definition of SCV opening angle

본 연구에서 사용된 직분식 디젤엔진의 흡기 포트는 tangential 포트와 helical 포트에 구성되며 tangential 포트에 SCV를 장착하여 흡기 와류비의 변화를 살펴보았다. 그림 1은 흡기 포트의 개략도와 SCV의 모양과 각도의 정의를 나타내고 있다. SCV는 10° 간격으로 제어되며 완전히 개도가 열린 경우를 SCV 0°로 정의하고 ±10°씩 조절하였으며, 상용엔진 원래의 상태를 Base로 정의하여 총 20개의 조건에 대해 실험을 수행하였다. 이때 흡기밸브양정은 1.5mm 간격으로 9mm까지 변화시켰다.

### 2.2 가변 흡기스웰비 및 LDV 유동특성

그림 2는 정상유동실험 장치도이다. 흡입공기를 발생시키기 위한 520 l/min 용량의 압축기와 맥동방지를 위한 서지탱크, 160 CFM 용량의 증류유량계를 이용하여 흡입공기량을, 스웰 임펄스미터를 이용하여 토크를 측정하였다. 이로부터 흡기스웰비로 대표되는 유동 파라미터<sup>(6)</sup>를 구할 수 있었다.

2차원 유속 측정시스템은 크게 흡입유동공급장치, LDV 시스템, 입자부유장치, 데이터 취득장치부로 구성된다.

LDV 시스템(Dantec Co.)은 수냉식 5와트 아르곤-이온 레이저와 광섬유전송기, 3차원 이송장치, 그리고 신호처리기인 BSA로 구성된다. 측정은 후방산란 모드를 이용하였으며, 초점거리는 310mm이다. 산란입자는 평균입경 1μm의 산화알루미늄을 사용하였으며, 데이터 취득장치는 BSA와 데이터 처리용 PC로 구성된다.

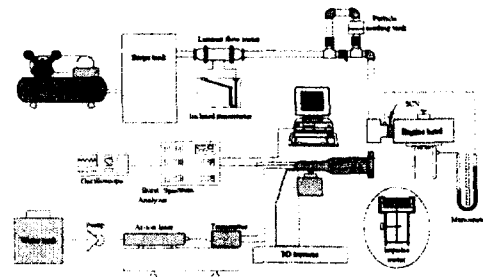


Fig. 2 Schematic diagram of steady state test rig and 2D-LDV experiment.

### 2.3 분사노즐 및 PDA 분무특성

그림 3은 유동에 따른 분무특성을 조사하기 위한 PDA 실험장치의 개략도이다. 흡입유동공급장치, PDA 시스템, 연료공급부로 구성된다.

연료는 로터리 타입의 플린저 펌프와 DC 모터를 벨트 체결로 구동하여 공급하였다. 1000 펄스 해상도의 엔코더를 이용하여 플린저 펌프의 회전수를 측정하였으며, 사용된 노즐은 6공 V.C.O (Valve Closed Orifice) 노즐로 218 bar의 1차 스프링 개변압과 324 bar의 2차 스프링 개변압으로 설정되어 있다. 정확한 실험을 수행하기 위해서 노즐 캡을 제작하여 6개의 홀 중 하나의 홀만을 관측 할 수 있게 하였다.

### 2.4 실험방법

SCV에 따라 가변되는 흡기스월강도를 정량화하기 위해 정상유동 실험장치에서 일정차압 방식을 적용하였으며, 실린더 직경의 1.75 배 위치에 스월 임펄스미터를 설치하여 모두 20개의 SCV 개구율에 대해 측정하였다<sup>(8)</sup>. 그림 4는 흡기포트의 위치와 정상유동장치 내 전반적인 스월유동의 거동을 보여준다.

2D LDV에 의한 스월유동해석은 정상실험 결과로부터 선정된 SCV 각도 0°, 50°, -70°, 90°에 대해 수행하였다. 측정위치는 실린더 헤드면을 기준으로 40mm와 100mm 하단의 두 단면을 선정하였다.

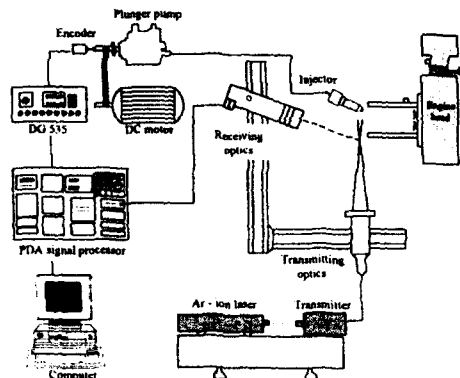


Fig. 3 Schematic of PDA experiment.

측정점은 횡단면의 중심을 기준으로 10mm 간격으로 한 단면에 대해 57 포인트를 측정하였으며 한 포인트에 대해 12000 개의 데이터를 취득하였다. PDA 실험은 유동의 유·무에 따라서 동일한 4개의 SCV의 각도 조건에 대해 임경의 평균속도와 SMD를 측정하였다. 한 포인트에 대해 5500개의 데이터를 취득하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 가변흡기스월비 정량화

그림 5는 평균유량계수와 스월비와의 상관관계를 구한 것이다. 흡기밸브가 닫힐 때의 스월 생성능력으로 정의되는 스월비는 SCV 각도의 절댓값에 비례하며, 2.3~3.8 사이의 범위 내에서 제어된다.

T. Sato 등의 연구결과에 따르면 일반적으로 높은 엔진회전수에서 안정된 성능을 위한 - 스월임펄스미터로 측정된 - 스월비의 범위는 3~4라고 한다<sup>(16)</sup>. 본 실험의 스월비는 많은 경우가 이를 만족함을 알 수 있다. 평균유량계수와 스월비는 서로 반비례함을 알 수 있는데 이는 SCV 개구량이 작아질수록 흡입유량은 감소되지만 스월유동의 생성능력은 증가함을 의미하고 있으며, 이로부터 스월비와 평균유량계수는 trade off 관계임을 확인할 수 있다.

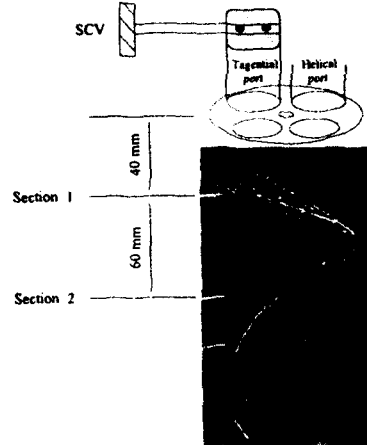


Fig. 4 Path-line of particle for swirl flow and measurement section

### 3.2 LDV 유동 특성

그림 6은 SCV 0° (스윙비 2.4), SCV 50° (2.8), SCV -70° (3.2), 그리고 SCV 90° (3.8)에 대한 단면 유동장을 2D LDV로 측정한 결과를 보간한 것이다. 기준 속도는 10m/s이다.

그림 6의 (c)와(d)에서 단면 1의 경우 초기에는 스윙의 모습이 잘 보이지 않지만 단면 2에서는 완전한 스윙의 형태를 보임을 볼 수 있다.

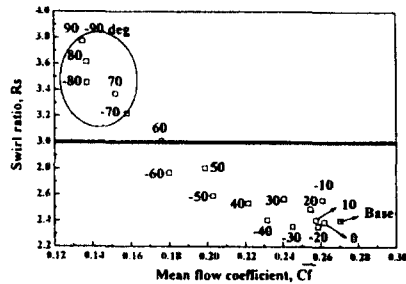


Fig. 5 Correlation between swirl ratio and mean flow coefficient

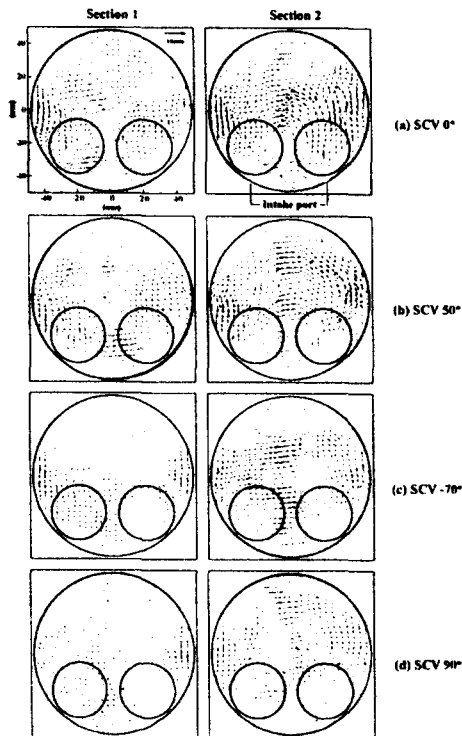


Fig. 6 Swirl flow patterns for different SCV

상대적으로 유량계수가 큰 SCV 0° 와 50°의 경우, 단면 1에서 이미 스윙유동이 형성되지만 더 이상 발달하지 않음을 알 수 있다. 이는 스윙비는 상대적으로 작지만 유량계수가 크기 때문에 각각의 측정점에서의 속도는 큰 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 이러한 스윙유동은 그림 4에서와 같이 강제회전에 가깝고 회전축이 피스톤 중심축과 거의 일치하기 때문에 폭발과정 후기까지 난류생성원이 된다고 한다<sup>(17)</sup>

### 3.3 PDA 분무특성

#### 3.3.1 인가전압에 따른 분무특성

PDA 실험에서 인가전압은 아주 중요한 파라미터로 작용을 한다. 실험시 실험자가 결정하는 조건으로 각 광증배관에 공급되는 인가전압은 0V에서 2000V까지 8V의 간격으로 선택할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 최적의 인가전압을 결정하기 위해, 1100V에서 1600V까지 100V 간격으로 총 6종류의 인가전압에 대해 그 영향을 살펴보았다.

그림 7은 인가전압에 따른 취득 데이터의 결과를 나타낸다. 먼저 데이터 레이트의 경우 인가전압이 증가함에 따라 1100V에서 1400V까지는 거의 선형적으로 증가하다가 1400V 이후에서는 거의 변화가 없음을 보여주고 있다. 또 속도와 SMD는 1100V에서 1400V까지는 급격히 감소하다가 1400V 이후부터는 다소 완만하게 감소하는 경향을 보이거나 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 인가전압의 증가에 따라 작은 액적들이 산란하는 신호를 많이 받아 들여져 평균속도와 입경에 영향을 미치게 되기 때문이다. 본 연구에서는 데이터 레이트, 속도와 SMD가 일정한 경향을 보이기 시작하는 1400V 부근 영역을 인가전압으로 결정하였다.

#### 3.3.2 유동이 없는 경우

먼저 유동이 없는 경우에 대해 실험을 실시하였다. 데이터 해석은 시간분해법<sup>(14)</sup>을 이용하였다. 시간분해법은 그림 8과 같이 5개의 영역으로 나뉘게 된다. 최대속도의 1/2이 되는 지점의 시간( $t_{0.5}$ )을 3등분하여 앞부분은 Fore(F), 중간을 Central(C), 그리고 뒷부분을 Rear(R)로

명명한다. 이때 C는 최고의 속도를 갖는 구간이 될 것이다. 그리고  $t_{0.5}$ 의 3배가 되는 구간을 Tail(T), 나머지를 Wake(W)로 정의한다. 이러한 시간분해법은 좁은 크랭크 각도 영역에서 액적의 속도와 SMD에 대한 정보를 취득할 수 있다는 장점이 있다.

그림 9는 풀러저펌프 회전수 400 rpm, 노즐하단 130mm 위치에서의 속도와 입경의 상관관계를 나타낸 것이다. (a)~(e)는 각각의 정의된 영역에서의 데이터를, (f)는 전체 데이터를 중첩시킨 결과이다.

(a)는 Fore 부분으로 속도와 입경이 (b)~(e)에 비해 넓은 범위로 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 분사초기 구간이다. (b)는 Central 부분으로 속도는 큰 값의 영역에 존재하지만 액적의 크기는 다소 작은 값을 보여주며 분사중기구간이다. (c)는 분사말기에 해당하는 Rear로 속도값이 약간 감소되는 경향을 보인다. (d)는 분사종료 직후인 Tail으로 속도값이 작아지며 (e)는 Wake 부분으로 나머지 크랭크 각도를 모두 포함하는데 분사종료 후 6~7ms 이후

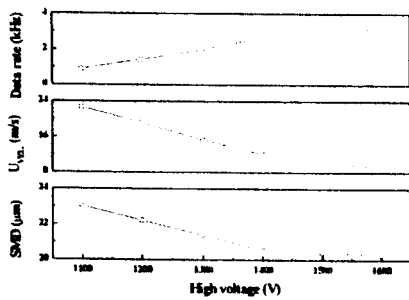


Fig. 7 Effect of different high voltage on data rate, average velocity and SMD.

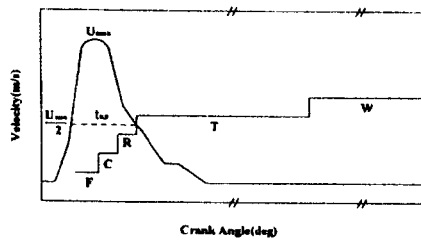


Fig. 8 Concept of time dividing method.

의 결과로 속도는 거의 0에 근접하며 SMD는 아주 넓은 범위에서 존재함을 알 수 있다.

### 3.3.3. 유동이 있는 경우

그림 10은 여러 가지 조건들 중 가장 스윙비가 큰 SCV 90°의 경우에 대해 유동이 분무미립화에 미치는 영향을 보여준다. 그 결과가 유동이 없는 경우와는 완전히 다른 양상을 나타내고 있다.

(a)는 Fore의 경우로 유동이 없는 경우와는 반대로 낮은 속도값을 갖는 액적들이 많이 관찰되는데 이는 분사되는 액적이 유동의 영향을 받아 모멘트를 잃어버리기 때문으로 사료된다. 이는 Central 부분과 Rear 부분에서도 동일한 경향을 보이고 있다. Tail과 Wake 부분에서는 노즐을 통과하여 미립화된 액적들이 스윙 유동의 영향으로 높은 속도값을 갖는 액적들이 관찰된다.

이러한 결과들은 각 조건에 대한 평균속도와 평균 SMD로 표현한 것이 그림 11과 그림 12이다.

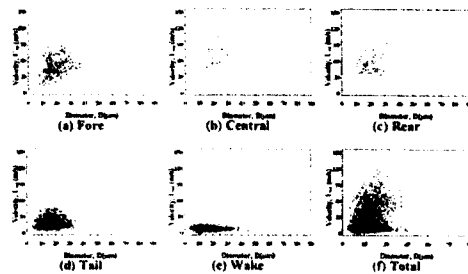


Fig. 9 Temporal spray characteristic with non-flow condition at 400rpm.

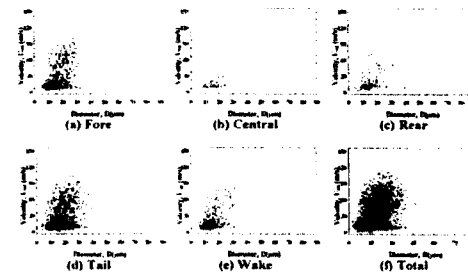


Fig. 10 Temporal spray characteristic with SCV 90° condition at 400rpm.

그림 11은 각 영역에서의 속도 변화를 나타낸다.

먼저 유동이 없는 경우 분사기간동안 큰 속도값을 가짐을 볼 수 있고, 특히 Central 부분에서 가장 큰 속도값을 갖게됨을 알 수 있다. 그리고 분사종료 후에는 작은 속도값을 갖게됨을 알 수 있다.

유동이 있는 경우는 유동이 없는 경우와는 달리 전 영역에서 일정한 범위의 값을 갖게됨을 알 수 있었다.

SCV 각도에 따른 유동의 영향은 Central 부분과 Wake 부분에서 약간의 차이를 보이고 있지만, 전반적으로 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 유동에 의해 전반적으로 높은 범위의 속도값을 가지기 때문으로 사료된다.

그림 12는 각 영역에 대한 SMD의 변화를 나타낸 것이다. 유동이 없는 경우, 초기에는 고속으로 분사되는 분무특성 때문에 액적들이 충돌 메커니즘에 의해 큰 SMD 값을 갖게되며 분사가 종료되면서 주위기체와의 모멘텀 교환 등에 의해 SMD가 작아지는 전형적인 특성을 가짐을 알 수 있다. 유동이 있는 경우에는 SCV 각도에 대해 전체적으로  $1\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$  범위 내에서 일정한 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 이는 분무특성이 유동에 지배되어 SMD 분포는 일정해지고, 전반적으로 스월비가 증가함에 따라 SMD는 약간 감소되는 경향을 보이고 있다. 따라서 유동에 의한 SMD의 감소보다는 고압 분사등과 같은 비유동적인 효과가 SMD에 보다 지배적인 것으로 사료된다.

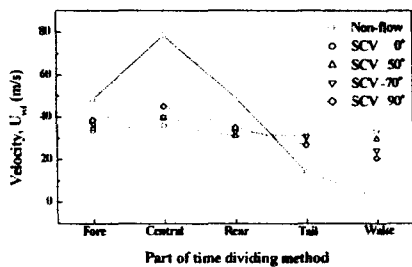


Fig. 11 Effect of swirl flow on temporal velocity characteristic.

#### 4. 결론

소형 직분식 디젤엔진의 흡기포트에 장착한 SCV의 개구율 변화에 따른 가변흡기 스월비의 정량화를 통해 유동특성을 알아보았고, 이를 바탕으로 2D-LDV를 이용한 유동가시화 실험과 유동의 유·무에 따른 분무미립화 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SCV 개구율이 감소할수록 스월비는 증가하였고, 본 연구에 사용된 스월비는 2.3~3.8까지 제어되었다. 그리고 스월비와 평균유량계수는 상호 trade-off 관계임을 확인하였다.
- 2) 2D-LDV를 이용한 2차원 유동가시화 한 결과 스월비가 3이상이 되는  $-70^\circ$  와  $90^\circ$  의 경우 초기에는 스월유동이 잘 보이지 않다가 하류로 이동하면서 완전한 스월의 형태를 나타내고 있음을 관찰할 수 있었다. 스월비가 적은  $0^\circ$  와  $50^\circ$  의 경우는 상단면에서 이미 스월유동이 형성은 되지만 더 이상 발달되지는 않았다.
- 3) 유동이 없는 경우 속도와 입경이 넓은 범위에 걸쳐 분포하였고, 분사초기에서 분사말기로 갈수록 급격히 입경과 속도가 작아지지만, 분사가 종료된 후 전체적으로 액적은 넓은 입경 범위에 걸쳐서 분포하였다.

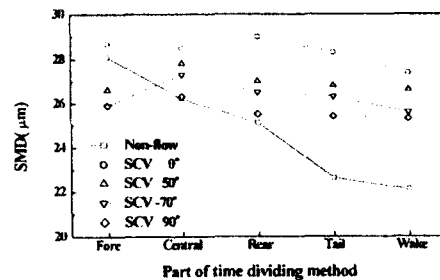


Fig. 12 Effect of swirl flow on temporal SMD characteristic

- 4) 유동이 있는 경우 SMD는 시간에 관계없이 일정한 범위에 분포하며, 스웰비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

### 참고문헌

1. Hikosaka. N., "A View of the Future of Automotive Diesel Engines", SAE paper 972682, 1997
2. Y. Kakoi, Y. Tsutsui, K. Umezawa and N. Kondo, "Emission reduction technologies applied to high speed direct injection diesel engine", SAE paper 980173, 1998
3. T. Hasegawa, K. Matsui, T. Iwasaki, T. Kobayashi and Y. Matsumoto, "Injection characteristics and spray features of the Variable Orifice Nozzle(VON) for direct injection diesel engines", SAE paper 980807, 1998
4. Obokata T., Long W. and Ishima T., "PDA and LDA Measurements of Large Angle Hollow Cone Spray Proposed for Hot-Premixed Combustion Shape Diesel Engine", SAE paper 960772, 1996
5. Arai M., Tabata M. and Hiroyasu H., "Disintegrating Process and Spary Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle", SAE Trans., vol. 93, 1984
6. D. W. Kickey, T. W. Ryan III, and A. C. Matheaus, "NOx Control in Heavy-Duty Diesel Engines - What is the Limit?", SAE paper 980174, 1998
7. Payri F., Desantes J. and Arregle J., "Characterization of D.I. Diesel Sprays in High Density Conditions", SAE paper 960774, 1996
8. 조동현, 구영곤, "엔진 흡기 Swirl의 측정에 대하여", 자동차공학회지 Vol.15, No.3, 1993
9. K. Lee, T. Urushihara, et al., "Analysis of Gas Flow Fields Generated by Butterfly type Swirl Control Valve", JSAE paper 9304365, 1993
10. S. Furuno, S. Iguchi, et al., "The Effects of 'Inclination Angle of Swirl Axis' on Turbulence Characteristics in a 4-Valve Lean-Burn Engine with SCV ", SAE paper 902139, 1990
11. 김재웅, 최영돈, "선회류 생성 DOHC 흡기 포트 형상의 실험적 최적화에 관한 연구", 자동차 공학회 추계학술대회, 1995
12. T. Urushihara, T. Murayama, K. Lee, et al., "Turbulence and Cycle-by-Cycle Variation of Mean Velocity Generated by Swirl and Tumble Flow and Their Effects on Combustion", SAE paper 950813, 1995
13. H. X. Quoc, M. Brun, "Study on Atomization and Fuel Drop Size Distribution in Direct Injection Diesel Spray", SAE paper 940191, 1994
14. T. Ishima, T. Obokata, "Time Dividing Analysis of Intermittent Fuel Spray Flows Measured by PDA", ICLASS-97, Seoul, 1997
15. F. D. Giorgio, D. Laforgia, "Investigation of Drop Size Distribution in the Spray of a Five-Hole, V.C.O. Nozzle at High Feeding Pressure", SAE paper 950087, 1995
16. Y. Mase, J. Kawashima, T. Sato et al., "Nissan's New Multivalve DI Diesel Engine Series", SAE paper 981039, 1998
17. 강건용, 이진욱, 백제현, "텀블-스웰 변환장치 형상이 흡입텀블 특성화에 미치는 영향", 한국자동차공학회논문집 제 2권 제 5호, PP 66~73, KSAE No. 943756, 1994