

## 가솔린 직분식 엔진의 연소실 개발을 위한 분무 및 유동장 해석

### Analysis of Spray and Flow Fields for Development of Spark-ignited Direct Injection Engine

최 규 훈\*, 박 종 호\*, 이 내 현\*\*  
K. H. Choi, J. H. Park, N. H. Lee

#### ABSTRACT

For development of SDI(Spark-ignited Direct Injection) engine, stratified mixture formation with adequate strength at spark plug was required in wide range of engine operating conditions. So, spray structure under high ambient pressure and spray distribution after impingement on piston bowl in motoring engine was visualized by using laser equipments. Also, in-cylinder bulk flow structure was measured by using PIV (Particle Image Velocimetry) system. Counter-rotating tumble port and bowl piston was found effective to conserve bulk motion directed to spark plug in compression stroke. In addition, mask attached near valve seat in intake port was proposed to attenuate conventional tumble component and enhance counter-rotating tumble component.

주요기술용어 : Spark-ignited Direct Injection(가솔린 직접분사), Stratified Charge(층상급기), Spray Visualization(분무가시화), Particle Image Velocimetry(PIV)

#### 1. 서 론

직접 분사식 가솔린 엔진(SDI)은 연비 저감을 위한 가장 주목받는 기술중의 하나로 여겨지고 있다.<sup>1~3)</sup> 최근들어, 고압 분사장치의 개발에 따라 분사압력까지 제어하는 것이 가능해졌으며, 또한 분무내부에 스월을 형성시키는 고압 Hollow Cone

인젝터의 개발로 인해 연료를 효과적으로 미립화하는 것도 가능해졌다. 한편, SDI 엔진은 냉시동 시나 고부하 운전시에는 연료를 흡입과정중에 분사하여 이른 공연비 수준의 균일혼합기를 이용하고, 저부하 운전시에는 압축과정 중에 분사하여 피스톤과의 충돌 분무와 실린더 내부 유동장을 최적하게 이용한 후 점화플러그 주위에 층상화된 혼합기를 조성하여 초회박 운전을 실현하고 있다.<sup>4,5)</sup>

SDI 엔진의 개발을 위해 우선적인 과제는 미립화 증진 및 wall wetting 을 최소화하기 위해 스

\* 정회원, 기아자동차 기술센터

\* 기아자동차 기술센터

월 인젝터의 분사특성 파악을 통한 인젝터 사양 및 분사압력의 결정이며<sup>6,7)</sup>, 다음은 충돌분무와 설치성등을 반영한 인젝터의 최적위치 선정과 피스톤 형상의 결정이다.<sup>8)</sup> 또한, 넓은 운전 속도영역에서 충돌된 분무를 안정하게 점화플러그 주위로 전달하여 화염 성장의 변화가 적도록 유동장을 최적화시키는 것도 중요하다.<sup>9,10)</sup>

따라서 본 논문에서는 인젝터 위치의 최적 선정과 피스톤 형상의 결정을 위한 분무 거동연구와 적합한 유동장 조성을 위한 PIV 이용 실린더내 유동계측 결과를 소개하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

레이저를 이용한 연료분무 가시화 및 PIV 유동장 측정 실험을 위하여 Fig.1과 같은 실험장치를 구성하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

#### 2.1.1 가시화엔진

가시화 엔진은 주철재 Base 라이너가 삽입된 Base Block과 실린더헤드와 광학접근을 위한 Quartz 재질의 연장 라이너를 지지하는 지지 Block 및 연장 피스톤으로 구성되었다. 연장피스톤은 Quartz 재질의 Flat 한 피스톤 Window를 설치하여 하방관측을 할 수 있도록 하였고, 최적의 피스톤형상 결정을 위한 실린더내 분무가시화 및 PIV 유동측정시에는 곡면화된 형상(Bowl)의 피스톤 Top Adapter를 제작하여 Flat Window 대신 사용할 수 있도록 하였다.

#### 2.1.2 분무 가시화용 고압 Chamber

분위기압 변경에 따른 분무의 크기 변화와 구조 변화 및 Penetration 등을 파악하기 위한 고압 Chamber는 광원의 접근과 수직 및 수평 단면 촬영을 위해 측면 및 하면에 가시화창을 설치하였다. 각 가시화창은 고압조건에서 견딜 수 있도록 두께 20mm의 BK7을 사용하였으며, Chamber 내의 고압유지와 Purging을 위해서 N<sub>2</sub> 가스와 Blower를 이용하였다.

#### 2.1.3 분무 가시화장치

분무 가시화를 위한 광원은 Nd:YAG 레이저 (Dual Beam Type, 최대출력 200mJ)를 사용하였으며, 레이저 출력부에서 나오는 원형빔은 Cylindrical Lens 및 Spherical Lens 가 설치된 다관절팔 형태의 광전달기구를 통해 측정부에 길이 120mm, 두께 0.2mm의 평면빔을 형성한 후 Beam Stopper에 도달하도록 하였다. 광원의 지속시간은 10ns로 매우 짧고, 암실조건에서 연료의 가시화에 충분한 이미지 강도를 유지하도록 광원의 출력을 50mJ로 하였다. 연료분무의 가시화는 CCD 카메라(TSI社, PIVCAM 10/30)에 의해 직접촬영을 하였다.

#### 2.1.4 PIV 측정장치

분무 가시화 장치와 동일하게 Nd:YAG 레이저와 광전달기구 그리고 평면광 발생장치를 사용하였으며, 카메라는 Frame Straddling 기법을 이용하여 최소 시간간격 25 $\mu$ s까지 2 Frames의 Cross-Correlation이 가능한 CCD를 이용하였다. 또한 화상의 Correlation 처리에 충분한 고밀도의 입자영상을 얻기 위해서 0.3~0.7 $\mu$ m의 Boron Nitride<sup>12)</sup>를 산란 입자로 사용하였다.

## 2.2 실험조건 및 계측방법

고압 Chamber내의 분무가시화는 먼저 Chamber 내 분위기 압력을 대기압과 5기압으로 설정하여 각각 수행하였다. 두 경우 모두 분무 중심부의 수직 종단면과 인젝터 선단을 기점으로 분무축 방향으로 Z=30mm에서 수평한 횡단면을 가시화 대상으로 하였다.

가시화 엔진에서의 분무가시화는 층상연소를 실현하기 위해 압축과정 후반에 분사하는 경우 분무의 진행과 확산을 관찰하기 위한 수평횡단면의 가

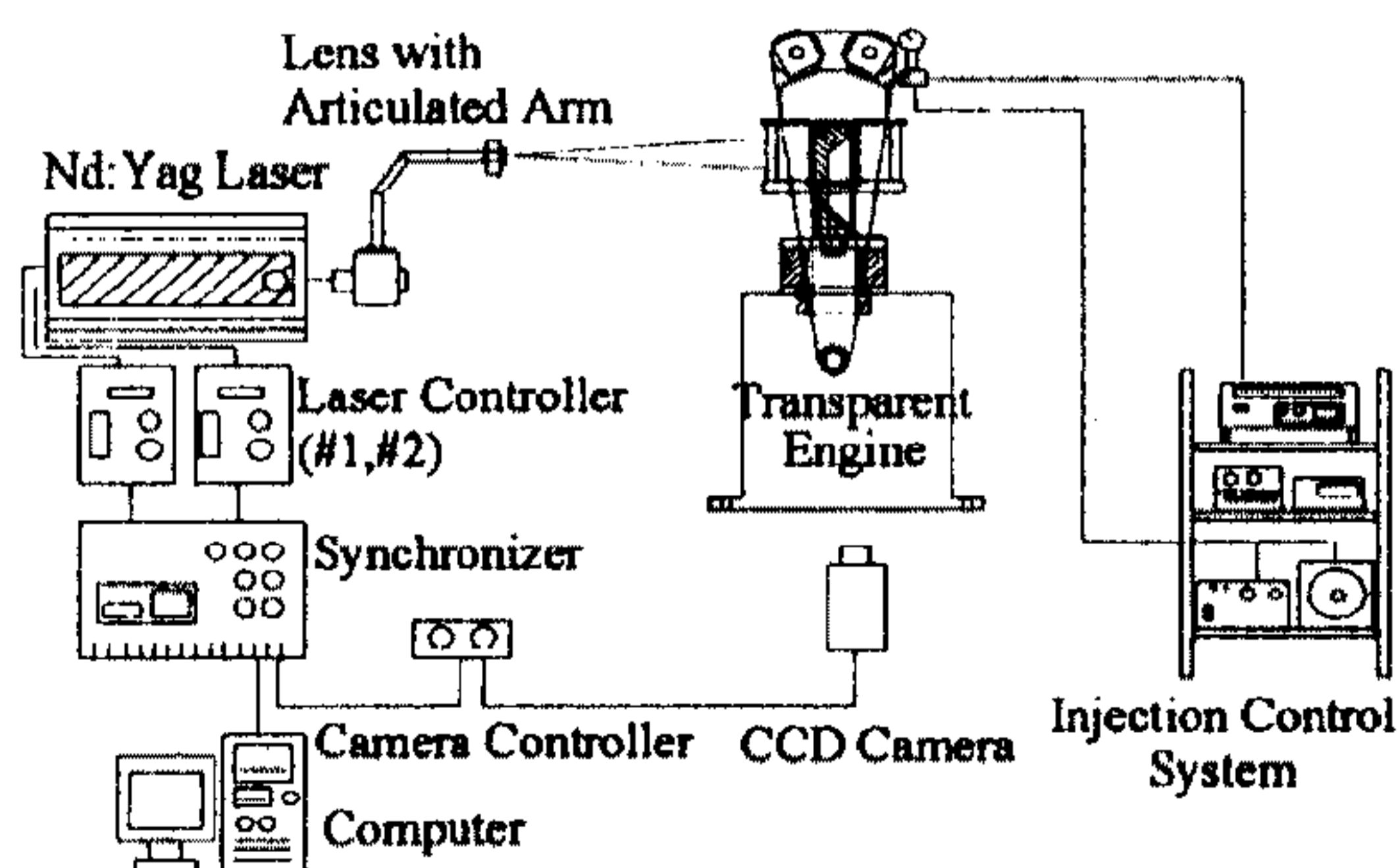


Fig.1 Experimental apparatus

시화과 함께 유동장과 피스톤형상에 의해 분무가 충돌되어 연소실내에 분포되는 과정을 효과적으로 보고자 연소실 중심의 텀블단면을 대상으로 하였으며, 이 경우 기관회전속도는 800rpm이었다. 분사조건은 고압 Chamber 및 가시화엔진 모두 실엔진에서의 분사기간과 동일한 1ms로 분사하였으며 0.5ms 간격으로 2.5ms까지 촬영하였다.

PIV는 PTV(Particle Tracking Velocimetry)와 달리 고밀도의 입자 영상들이 필요하므로, 입자의 궤적 움직임(Streak Motion)이 측정되어 입자의 정확한 위치를 찾지 못하는 것을 방지하기 위해 10ns의 매우 짧은 펄스 폭을 갖는 Nd:YAG 레이저 평면 빔을 이용하여 일정 시간간격을 두고 연속으로 두 번 조사하였다. 두 레이저의 펄스 간격은 30~70 $\mu$ s 범위에서 유동장 속도에 맞게 최적값을 설정하였다. 한편, 조사구간의 설정시에는 유동장의 속도와 영상작의 변위등을 고려하여 Co-

relation 결과가 잘 처리되는 64 pixel\*64 pixel (약 6mm\*6mm)로 하였다.

또한 PIV 측정시 둥근 곡률을 갖는 실린더 라이너에 의해 생기는 화상의 왜곡은 눈금종이를 이용하여 왜곡량을 계산하여 Correlation 처리 후 속도크기를 보정하였으며<sup>13)</sup>, 측정속도의 신뢰성 향상 및 대표성을 위해 Cycle 변동을 고려, 30 Cycle 이상을 연속 측정하여 Ensemble 평균하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분무 가시화

Fig.2는 인젝터 삽입위치 및 Port 형상 결정을 위해 제작된 연소실 형상을 보여준다.

각 연소실은 베이스 헤드의 변경을 최소화하기 위해 연소실 중앙에 스파크 플러그를 설치하였으며, 텀블을 갖는 기존 Base Port에 인젝터의 삽입위치를 연소실 중심부근에 설치한 경우(중심분사)와 흡배기밸브 사이에 설치한 경우(Side 분사) 및 반회전 텀블(Counter-rotating Tumble)을 이용키 위한 직립 흡기포트에 흡기밸브사이에 인젝터가 삽입된 경우(흡기쪽 Side 분사)등 3 Type을 대상으로 실험을 수행하였다.

Fig.3과 Fig.4는 Flat 피스톤을 채용한 중심분사 및 Side 분사의 경우 압축과정 BTDC 60° 분사시 충돌분무의 기동을 보여주는 사진이다. 중심분사의 경우 충돌분무는 피스톤 중심을 기준하여

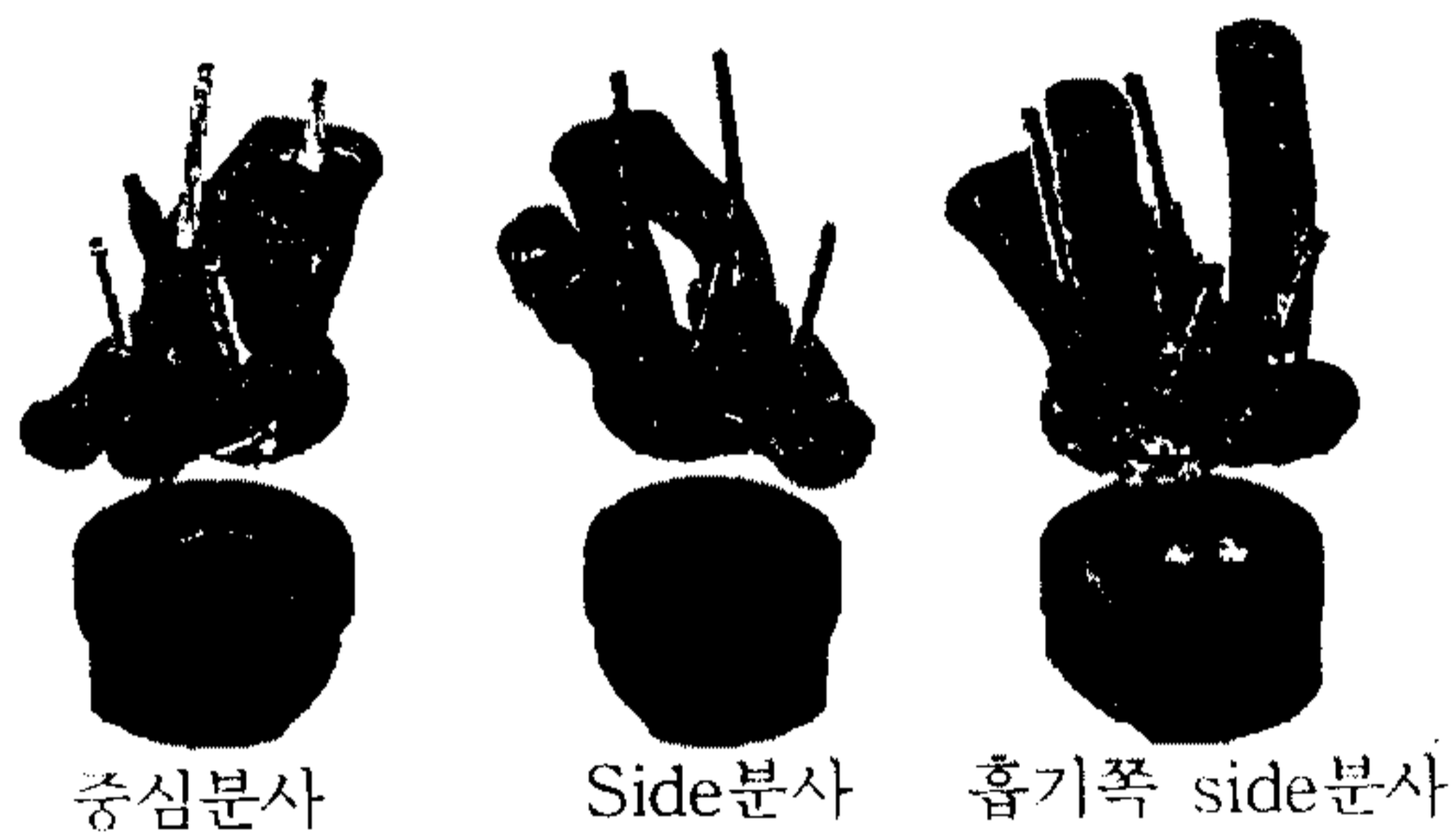


Fig.2 Cylinder head configurations

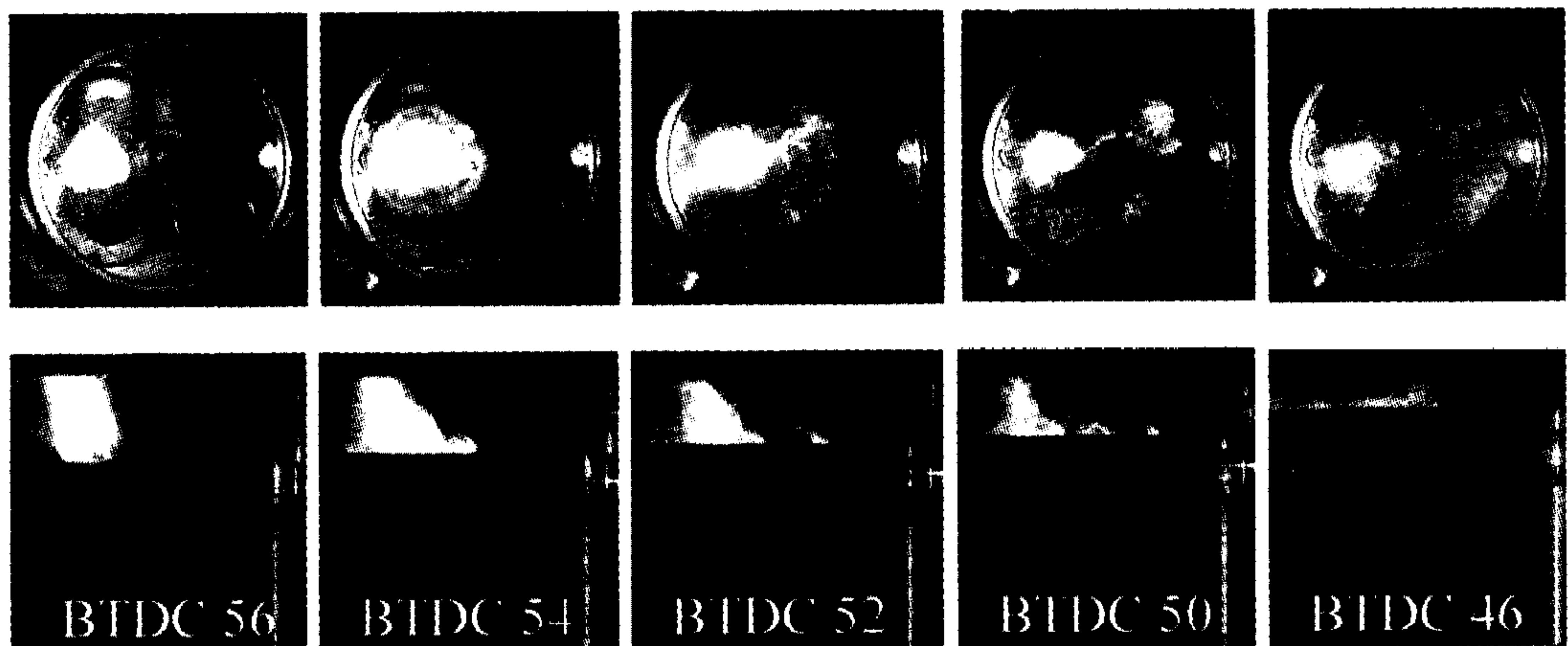


Fig.3 Behaviour of spray impingement on flat piston in central Inj.(SOI: BTDC 60)

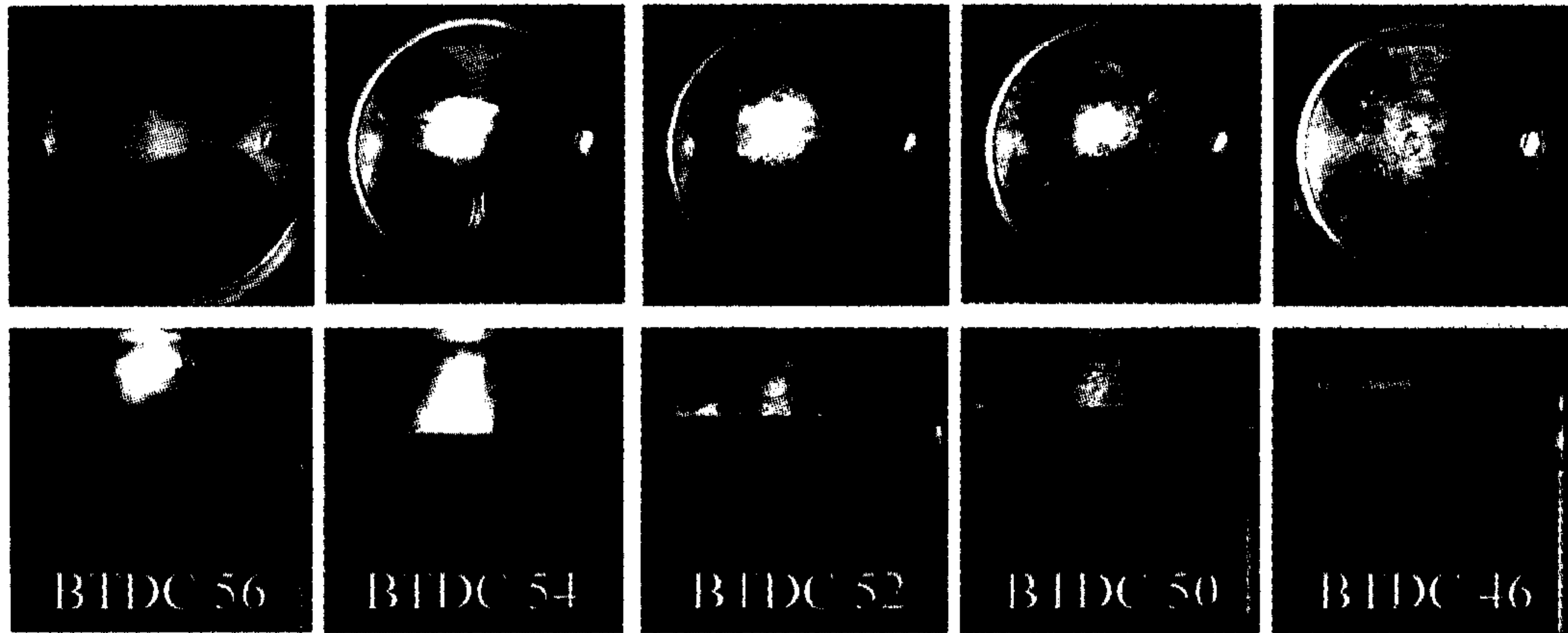


Fig.4 Behaviour of spray impingement on flat piston in side Inj.(SOI: BTDC 60)

좌우로 균일하게 충돌분무의 확산이 되므로 피스톤 Bowl 위치를 중심축에 놓을 수 있어 스파크플러그 주변에 극단적인 층상혼합기를 형성하는 것이 가능하지만, 충돌분무 주류가 스파크 플러그까지 진행하는 거리가 짧아져 기화에 주어지는 시간은 상대적으로 적어져 층상운전 회전수범위에 한계가 있고, 텀블유동장을 채용하는 경우 유동장의 도움을 받기가 어렵다고 판단된다. 반면 Side 분사의 경우 충돌분무의 확산경로로 볼 때 충돌된 분무가 스파크플러그에 도달하는 거리중대로 미립화 및 기화에 주어지는 시간확보면에서 유리함을 알 수 있었지만, 분무의 진행방향이 텀블유동과 직각으로 교차되어 유동장의 변동에 의해 분무

주류가 영향을 받으리라 예측되며, 스파크 플러그 주위에 안정된 층상혼합기를 얻기 위해서는 흡기 쪽 Side 에서 분사하는 방식을 채용하여 피스톤 Bowl의 형상을 유동의 Bulk Flow Motion과 함께 최적화하면 층상 혼합기 형성에 효과적이라 판단된다.

Fig.5는 피스톤과의 충돌예상시기에서의 분무의 횡방향 확산(Dispersion) 정도를 고려 충돌분무를 적절히 모아줄 수 있는 피스톤 상면 Bowl의 크기 및 형상 결정에 참고하기 위하여, 고압 Chamber 내에서 분위기 압력을 대기압 및 5기압 조건에서의 분무진행을 가시화한 결과이다. Fig.6은 이때의 분무의 penetration과 dispersion 정도를 보

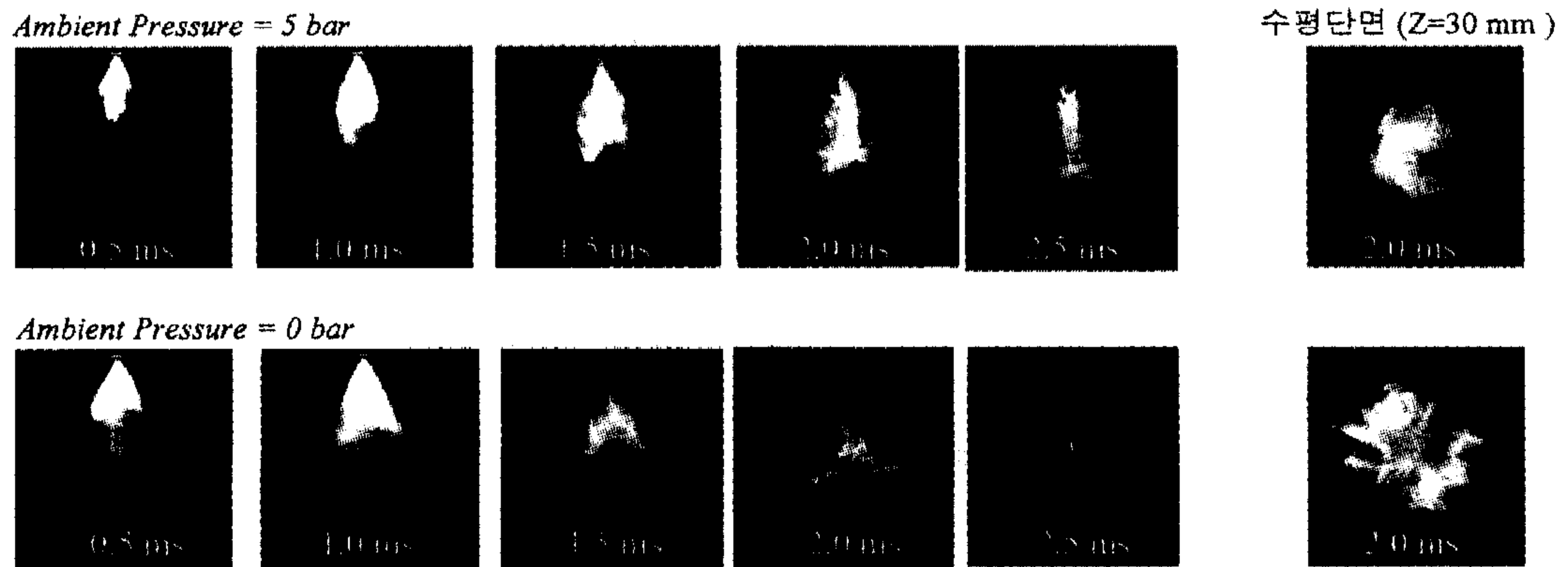


Fig.5 Dependence of spray distribution on ambient pressure

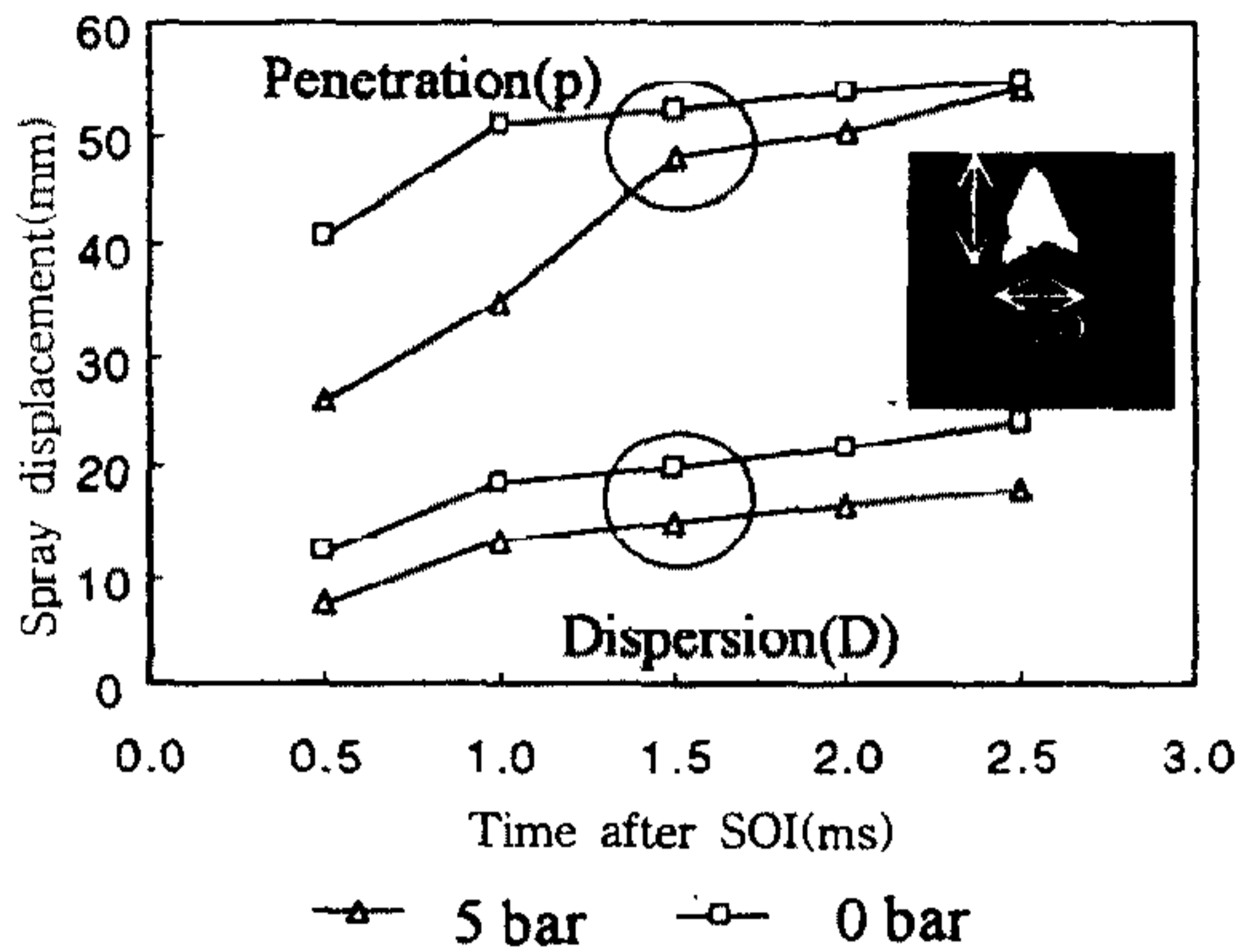


Fig.6 Dependence of spray penetration and dispersion on ambient pressures

여주고 있다. 대기압 분위기에서의 시간에 따른 분무의 형태는 분사 종료 후에 분무 중심축의 Penetration 진행은 크게 느려지고, 스웰 인젝터의 분무에서 적극적인 공기 유입이 생기는 것으로 알려진 Ring Vortex 구조가 점차 활성화되어 가면서 중심이 빈 Hollow Cone 구조를 보인다. 이것은 스웰 인젝터의 특성으로 인젝터 내부에 설치되어 있는 스웰 형성 돌기 구조에 의해 발생하는 것으로<sup>8,9)</sup>, Penetration 을 감쇄 시키는 동시에 공기와의 접촉면 증가와 적극적인 공기 유입 촉진으로, 미립화 및 기화 촉진에 유리함을 알 수 있다.

한편, 5기압에서의 분무형태를 보면, Ring Vortex 구조의 발생은 동일하고, Penetration도 시간이 경과할 수록 차이가 줄어든다.

그러나, Divergence는 크게 작아져 시간이 경과해도 일정한 차이를 유지하고, 수평 단면 구조에서도 중심이 채워진 Solid Cone 구조를 보여 대비된다.

Fig.5의 가시화 결과로부터 분사시기에 따라 피스톤 상승운동에 따른 인젝터 팁 선단으로부터 분무의 피스톤과의 충돌 포인트를 계산한 결과가 Fig. 7로 분사시기에 따라 분무의 충돌지점은 피스톤의 상승운동에 의해 다르게 됨을 알 수 있다. 따라서 분무의 가시화 충돌분무의 해석을 통해 피스톤 Bowl 위치 및 형상과 그 크기를 결정할 수 있었다.

Fig.8은 충돌분무의 확산을 효과적으로 모아 층상연소를 실현하기 위해 Bowl이 형성된 Bowl 피스톤을 채용하고 반회전 텀블 포트에 흡기밸브 사이에서 분사하는 경우(흡기쪽 Side 분사)의 가시화 결과이다. 흡기쪽 Side에서 분사되어 충돌 확산된 분무는 피스톤 Bowl의 형상 및 반회전 텀블 운동에 의해 그 주류가 연소실 중앙으로 모아짐을 볼 때 층상 연소 실현에 유리하리라 판단된다. 이러한 분무가시화를 통한 정성적인 결과는 초기 설계 자료에 중요한 참고자료로 이용되었다. 그러나 안정된 층상 연소의 실현을 위한 최적 매칭에는 한계가 있으므로 연소실험을 통해 분사각도, 피스톤 Bowl의 크기, 형상 변경, 분사시기 등을 변경하면서 세부 매칭을 수행 하였으며, 특히 연소 안정성을 개선하는데는 유동장의 Bulk Motion 계측을 통한 흡기 포트의 최적화가 무척 중요함을

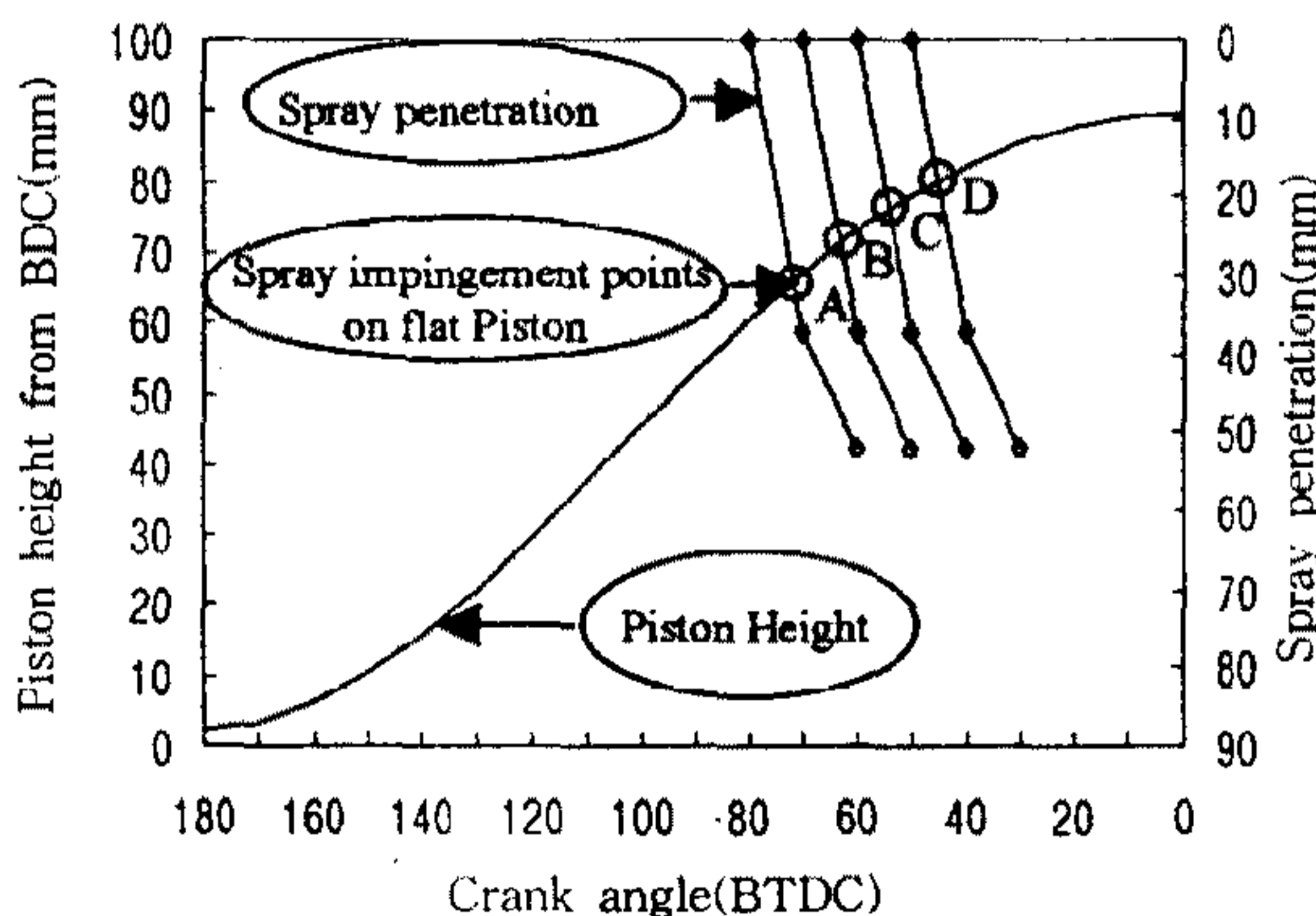
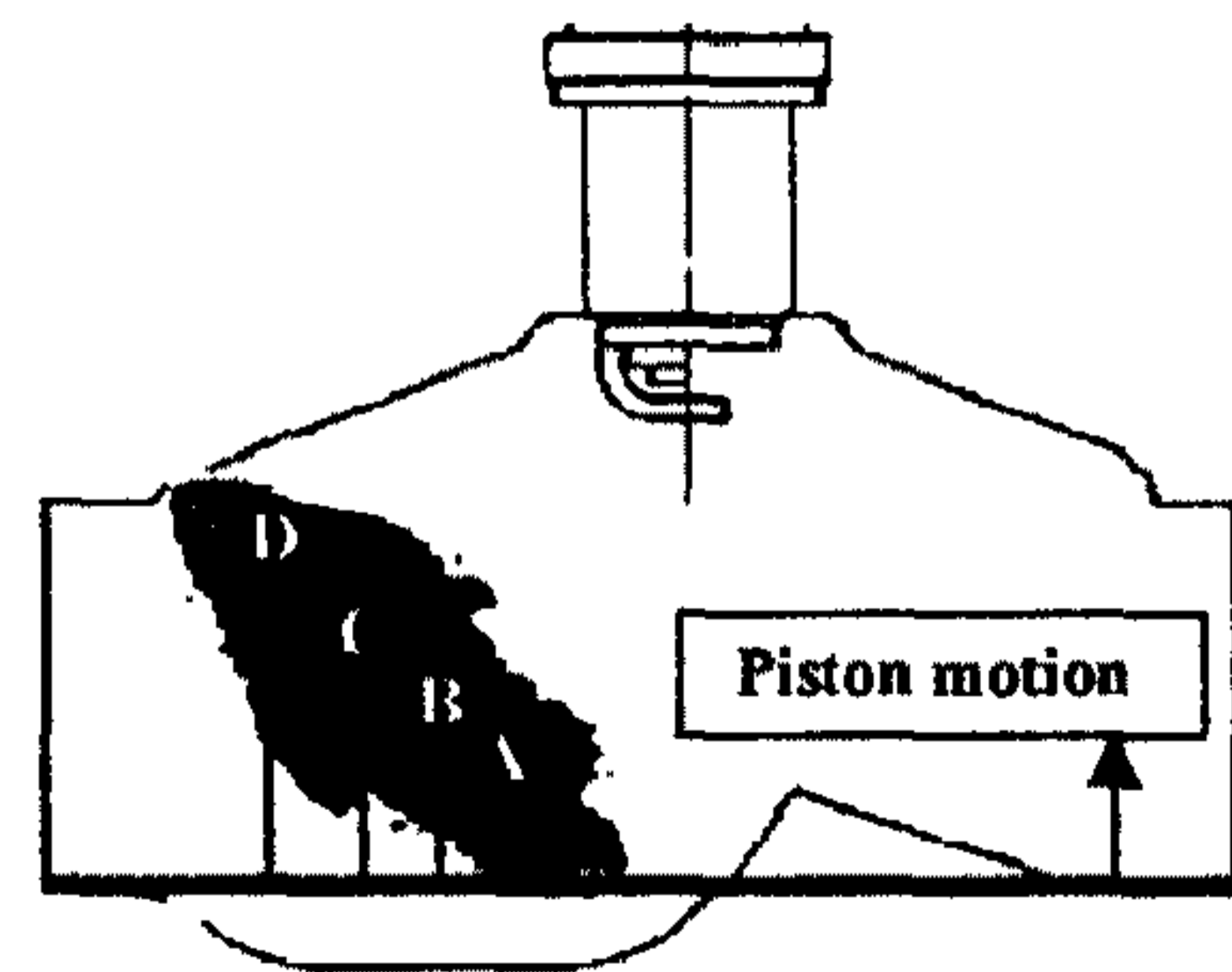


Fig.7 Analysis of spray impingement on flat piston and design of adequate bowl geometry



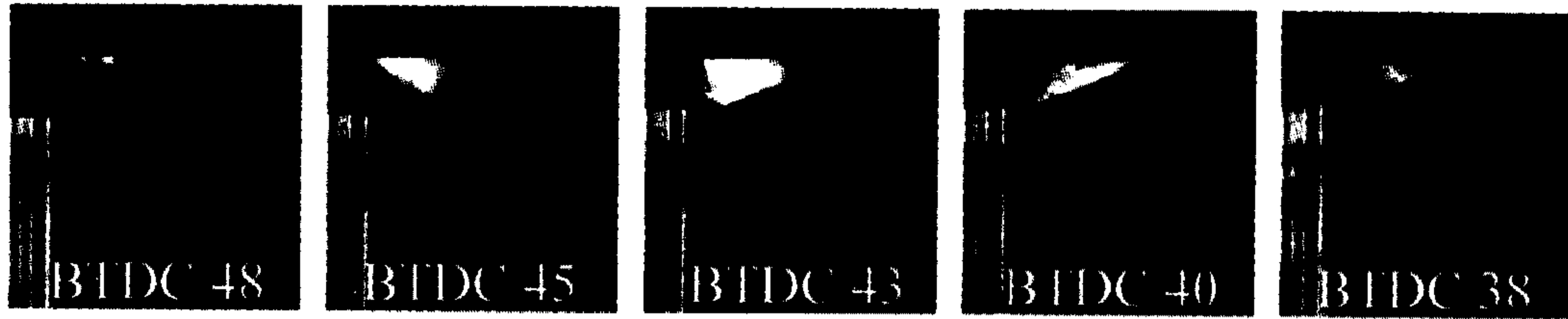


Fig.8 Behavior of spray impingement on bowl piston in intake side Inj.(SOI: BTDC 50)

알게 되었다.

### 3.2 PIV를 이용한 유동장 계측

Fig.9 및 Fig.10은 분무가시화 실험으로부터 결정된 반회전 텀블 포트( $T_R = -0.15$ )를 갖는 Side 분사 헤드에 Flat 피스톤 및 Bowl 피스톤을 채용시 흡입 및 압축과정에서의 Bulk Flow를 계측한 것으로, Interpolation을 사용하지 않고, 유효하게 측정된 벡터들만 도시하였다

Fig.9의 Flat Top 피스톤을 사용한 경우를 보면 흡기밸브 통과시 반회전 텀블 및 텀블 속도성

분을 갖는 유동이 존재하며, 흡입과정이 진행됨에 따라 생성된 반회전 텀블 유동은 흡입 말기부터 압축 과정이 진행됨에 따라 Flat 피스톤으로 인해 발달이 둔화됨과 함께 배기쪽으로 부터 생성된 텀블 유동에 의해 깨져 압축과정 후기에 연소실 중심에서의 반회전 텀블 유동이 보존되지 않음을 알 수 있다.

따라서 이러한 결과로 볼 때 압축 과정 후기의 반회전 텀블 유동의 보존을 위해서는 반회전 텀블 유동의 강화와 함께 피스톤의 Bowl 구조가 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

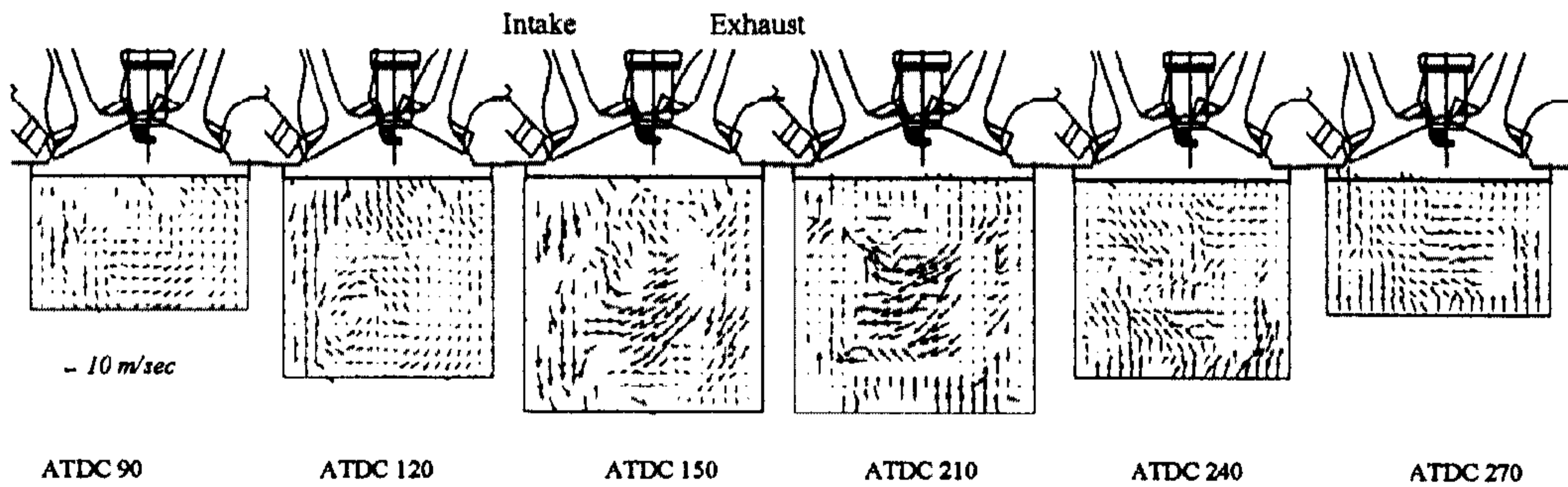


Fig.9 Flow patterns in cylinder in case of flat piston

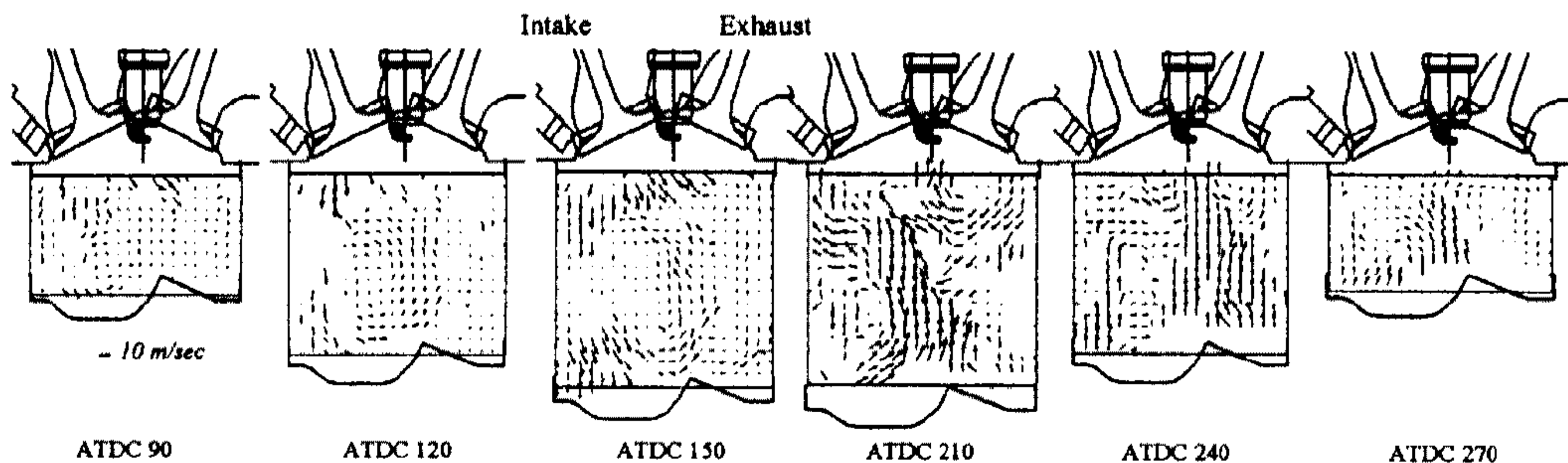


Fig.10 Flow patterns in cylinder in case of bowl piston(without mask)

Fig.10의 Bowl 피스톤 채용경우를 보면 흡입 과정 시에 흡기 밸브의 개구면을 통과한 상대적으로 속도가 큰 성분들이 일부는 실린더의 흡기 쪽 벽면을 따라서 피스톤을 향해서 내려오면서 반시계 방향의 반회전 텀블을 조성하고, 일부는 실린더 중심축을 통과하여 배기쪽 벽면으로 향함을 알 수 있다. 반회전 텀블 유동은 중심이 피스톤 Bowl의 중심축에 가깝게 편심되어 있으며, 흡입과정이 진행될수록 회전의 크기는 원형에서 타원형으로 찌그러지면서 보다 커지는 경향을 보인다. 반면, 압축과정중의 실린더 내부 유동은 배기벽면을 타고 내려오는 텀블의 영향으로 반회전 텀블 유동의 규모가 작아지며, 피스톤에 의한 스퀴시 영향으로 인해 압축후기로 갈수록 실린더 중심축을 기준으로 반회전 텀블 유동과 텀블 회전 유동이 대칭적으로 존재함을 알 수 있다.

따라서 스파크 플러그 근처에 층상 혼합기를 형성키 위해서는 반회전 텀블 유동의 강화가 좀더 필요하리라 생각된다. 텀블 유동을 줄이고 반회전

텀블 유동( $T_R = -0.47$ )을 강화시키기 위해 Fig. 11 오른쪽에서 보듯이 타원형 표식내 굵게 칠해진 위치(흡기포트 내부 밸브 Seat 직전)에 작은 Mask를 설치하였고, 이 경우 PIV로 계측한 결과는 Fig. 12와 같다.

실험결과, Fig.10의 Mask를 설치하지 않은 경우에 비해 흡입과정은 유사하지만 압축과정이 진행됨에 따라 실린더중심 부근에 원형의 반회전 텀블 유동이 전체 유동장을 지배하며, 압축후기에도 연소실 중심을 향해 반회전 텀블 유동이 계속 보존되는 것을 볼 때 피스톤 Bowl에 충돌된 분무를 스파크 플러그 주변으로 안정되게 전달시켜 층상 혼합기를 형성하는데 보다 효과적이라 판단된다.

#### 4. 결 론

직접분사식 엔진의 연소실 개발을 위한 분무 가시화 및 PIV를 이용한 유동장 계측을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 엔진내 분무 가시화로부터 텀블 유동을 갖는 연소실의 경우, 스파크 플러그 주변에 층상 혼합기 형성을 위해서는 중심분사의 경우보다 Side 분사의 경우가 충돌분무의 확산경로로 볼 때 유리하였으며 이 경우 충돌분무를 효과적으로 모을 수 있는 피스톤 Bowl 및 유동의 최적화가 필요함을 알 수 있었다.
- 2) 고압 Chamber에서의 분무 가시화를 통해 분무 발달 및 그 구조 해석으로부터 충돌 확산 분무를 효과적으로 모아줄 수 있는 피스톤 Bowl의 위치 및 형상과 그 크기 결정

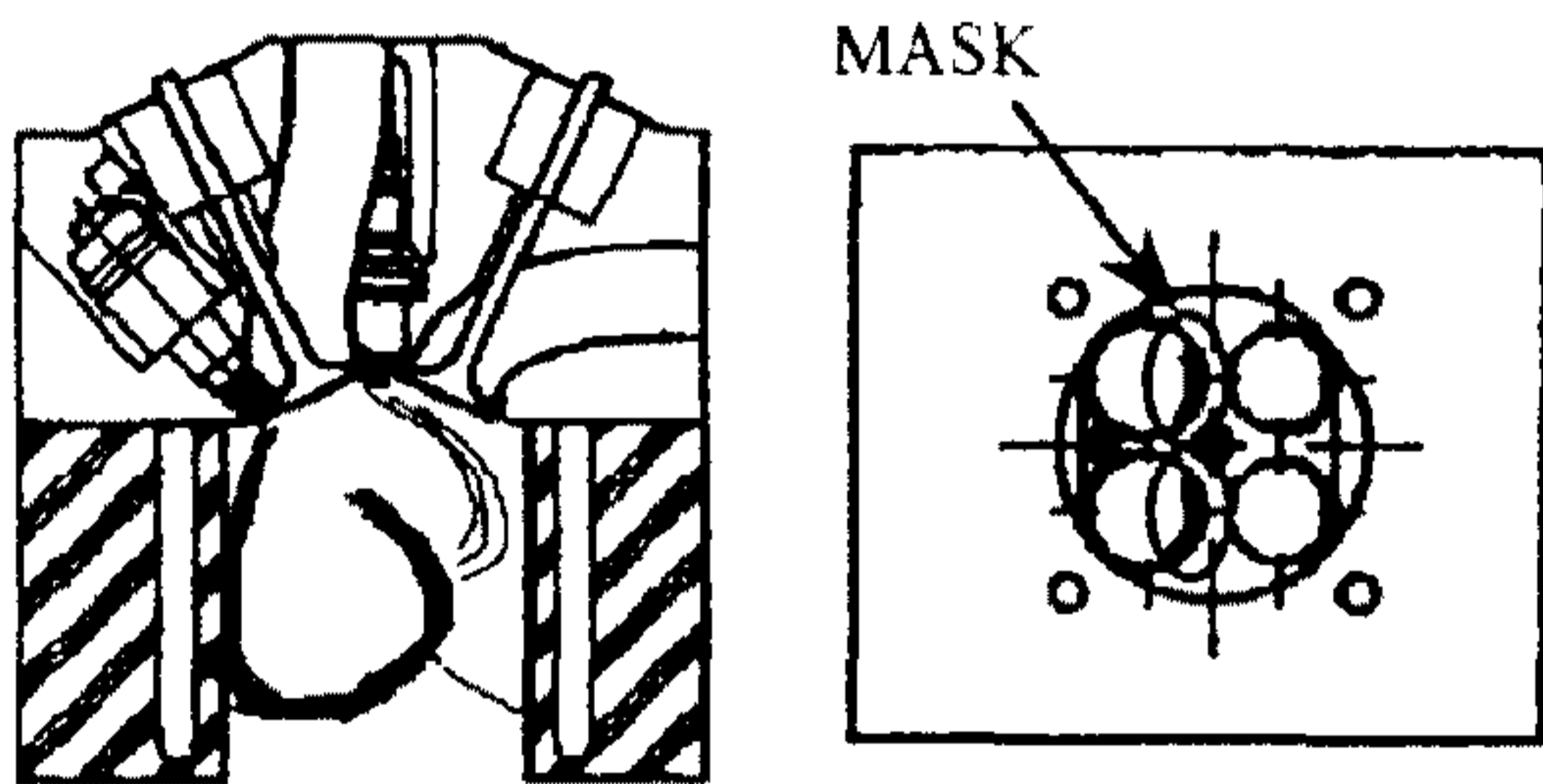


Fig.11 Adapted position of mask for strengthening counter-rotating velocity component of intake flow

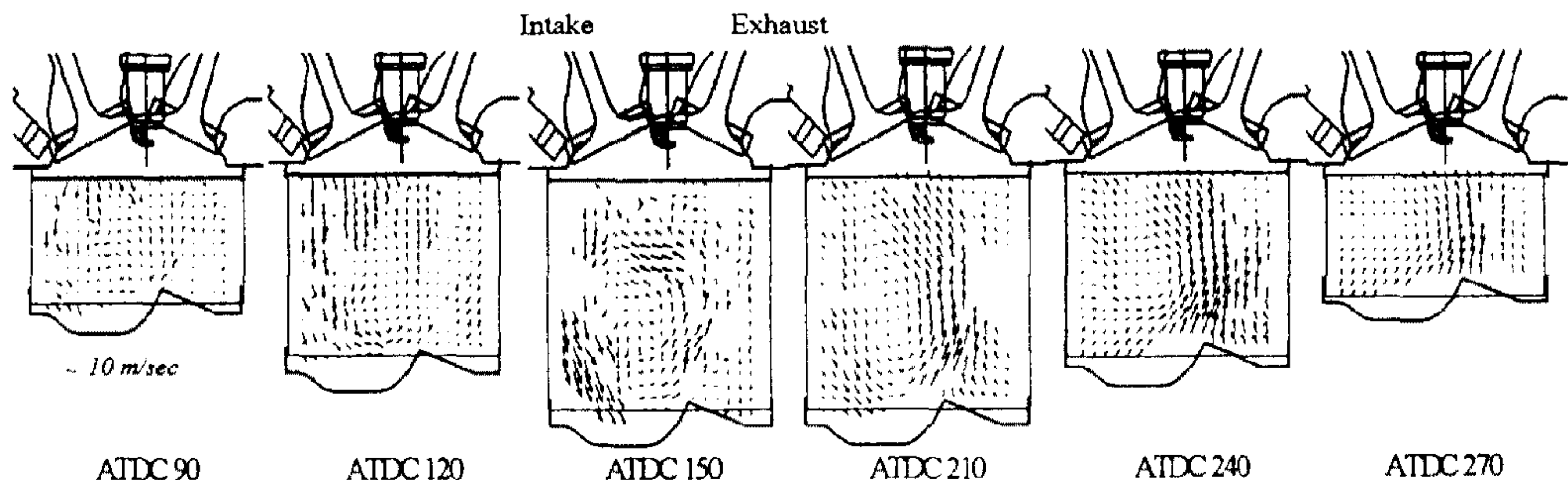


Fig.12 Flow fields in cylinder in case of bowl piston(with mask)

에 관한 설계자료를 제공할 수 있었다. 또한 유동과 분무와의 효과적인 매칭을 위해 반회전 텀블 포트에 Bowl 피스톤을 채용하고 흡기쪽 side에서 분사시 충돌확산된 분무는 피스톤 Bowl의 형상 및 반회전 텀블유동에 의해 그 주류가 연소실 중앙에 모여져 층상혼합기 형성에 좀더 유리함을 알 수 있었다.

- 3) 반회전 텀블포트를 갖는 직분식 엔진의 연소실내 유동 방향 및 크기등 유동패턴의 매칭을 위해 PIV를 이용 가시화 엔진에서의 2차원 Bulk Flow를 측정할 수 있었으며, 피스톤 형상에 의해 반회전 텀블유동 구조가 크게 영향받으며 흡기 포트끝단에 Mask를 설치하여 반회전 텀블 유동을 강화시킨 결과, 압축과정 후반에 반회전 텀블유동이 보존됨을 확인 할 수 있었다. 따라서 층상혼합기 형성을 위해 압축과정 후반에 분사하는 직분식엔진의 적절한 유동구조 유지를 위해서는 피스톤 Bowl의 형상과 압축과정 후반의 유동 최적화가 필요함을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. F. Zhao, M. Lai, D. Harrington, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark Ignited Direct Injection Gasoline Engines", SAE Paper 970627.
2. Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi, H. Ando, "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE Paper 970541.
3. J. Harada, T. Tomita, H. Mizuno, Z. Mashiki, Y. Ito, "Development of Direct Injection Gasoline Engine", SAE Paper 970540.
4. T. Kume, Y. Iwamoto, K. Iida, M. Murakami, K. Akishino, and H. Ando, "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine", SAE Paper 960600.
5. N. S. Jacson, J. Stokes, P. A. Whitaker, T. H. Lake, "A Direct Injection Stratified Charge Gasoline Combustion System for Future European Passenger Cars", I.Mech E. Lean Burn Combustion Engines Seminar, 1996.
6. 신민규, 박종호, 유철호, 이내현, 최규훈, "가솔린 직분식 인젝터의 분무 및 연소특성에 관한 연구", KSAE paper No. 97370098.
7. 유철호, 박종호, 이내현, 최규훈, "가솔린 직접 분사 인젝터의 분무 및 연소특성 연구", 자동차공학회 추계학술대회, 1996.
8. G. K. Fraidl, W. F. Piock, and M. Wirth, "Gasoline Direct Injection; Actual Trends and Future Strategies for Injection and Combustion Systems", SAE Paper 960465.
9. T. H. Lake, S. M. Sapsford, J. Stokes, N. S. Jackson, "Simulation and Development Experience of a Stratified Charge Gasoline Direct Injection Engine", SAE Paper 962014.
10. A. McLandress, R. Emerson, P. McDowell, C. Rutland, "Intake and In-Cylinder Flow Modeling Characterization of Mixing and Comparison with Flow Bench Results", SAE Paper 960635.
11. 박종호, 신민규, 이내현, 최규훈, "가솔린 직분식 엔진의 연소실 개발을 위한 분무 및 유동장 해석", 자동차공학회 추계학술대회, 1997.
12. D. Reuss, M. Bardsley, P. Felton, C. Landreth, J. Adrian, "Velocity, Vorticity and Strain-Rate ahead of a Flame Measured in an Engine using Particle Image Velocimetry", SAE paper No. 900053.
13. M. Reeves, C. Gamer, J. Dent, and N. Halliwell, "Particle Image Velocimetry Measurements of Barrel Swirl in a Production Geometry Optical IC Engine", SAE Paper 940281.