

〈논 문〉 SAE NO. 943756

텀블-스윙 변환장치 형상이 흡입텀블 특성화에 미치는 영향

Effects of Tumble Adaptor Configurations on the Intake Tumble Characterization

강 건 용, 이 진 옥, 백 제 현
K. Y. Kang, J. W. Lee, J. H. Baek

ABSTRACT

The configuration effects of a tumble adaptor which transforms tumble into swirl on the intake tumble characterization under steady flow condition have been investigated by LDV measurement. The following parameters were involved to test their effects on tumble-swirl conversion characteristics; the cylinder height and its bottom shape, measuring position in the swirl induction pipe, and the relative direction of the induction pipe.

The short cylinder height and the flat bottom of the tumble adaptor were found effective for the generation of tumble in the cylinder, allowing higher tumble-swirl conversion efficiency.

주요기술용어 : Tumble Adaptor(텀블-스윙변환장치), Intake Port(흡기포트), 4-valve Engine(4-밸브기관), Tumble Flow(텀블유동), Swirl Flow(스윙유동), LDV System(LDV장치), Steady Flow Test(정상유동 실험)

1. 서 론

엔진 연소성능을 지배하는 연소전 실린더내 유동장은 흡입과정시 생성된 평균유동에 의해 다시 지배되므로, 흡입과정시 효과적인 평균유동이 생성될 수 있도록 흡기포트를 설계하는것이 매우 중요하다.^{1, 2)} 흡입시 평균유동은 실린더내 접선방향속도인 스윙유동(swirl flow)과 실린더 헤드와 피스톤윗면을 경계로 하는 실린더내 축방향 회전속도성분인 텀블유동(tumble flow)으로

구분될 수 있다. 최근엔진의 고성능화에 따라 흡기밸브가 2개인 펜트루프(pent-roof) 연소실 형상이 많이 이용되면서 텀블유동의 중요성이 더욱 커지게 되고 있다. 텀블유동은 피스톤의 움직임에 따라 그 강도와 운동중심이 변하는 복잡한 특징을 가지며, 따라서 피스톤의 운동방향과 수직방향의 중심축을 갖는 스윙유동보다 압축말기에 깨어짐의 효과가 크다.^{3, 4)} 본 연구팀에서는 텀블유동의 흡입 및 압축과정시 생성되고 감쇄되는 메카니즘을 엔진 모터링시 LDV측정을 통

* 정회원, 한국기계연구원 동력시스템 연구부
** 정회원, 한국기계연구원 동력시스템 연구부
*** 포항공과대학교 기계공학과

하여 해석한 바 있다.^{5,6)} 그러나 실제 많은 자동차 회사를 비롯한 연구실에서는 흡기포트의 초기 설계시 모터링하에서의 텀블유동 측정정보는 흡입정상상태 조건에서 임펄스메타(impulse meter)나 혹은 패들 휠(paddle wheel)을 사용하고 있다. 텀블유동의 경우 흡입공기가 피스톤 윗면과 충돌함으로 생성되기 때문에 실린더 끝단이 개방된 상태로 측정하는 기존의 방향을 통해서 텀블유동의 강도를 정확히 측정할 수가 없다. 따라서 피스톤의 역할을 대신하기 위한 방법으로 개발된 실린더 대신 T자형의 텀블-스윙 변환장치(tumble adaptor)를 이용하여 스윙유동으로 바뀐 상태의 각운동량을 스윙메타를 사용하여 측정하고 있다. 그러나 이런 경우 실린더내에서 생성된 텀블유동이 제대로 텀블-스윙 변환장치의 상대위치에 따른 스윙값의 민감성 여부에 관한 기초 데이터가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 서로 다른 텀블생성 강도를 갖는 4밸브 팬트루프형 연소실 엔진에 대한 흡입정상상태에서 LDV실험을 통하여 텀블유동이 텀블-스윙 변환장치를 통해 스윙유동으로 바뀌는 효율과 측정위치에 따른 스윙의 발전정도, 그리고 실린더헤드와 텀블-스윙 변환장치 회전각에 따른 스윙속도 변화의 민감성등을 규명하고자 한다.

2. 흡입 텀블유동 측정원리

정상상태 흡입과정시 실린더내 생성되는 텀블유동을 정량화하기 위하여 Fig.1과 같이 텀블-스윙변환장치를 이용한다. 흡기밸브를 통해 흡입된 공기는 실제엔진의 피스톤-윗면 기능을 하는 실린더 밑면과 충돌하여 텀블유동을 생성하고, 텀블유도관(induction pipe)를 통해 텀블의 각운동량이 전달되면서 유도관내 접선방향속도인 스윙로 변환되어 빠져나간다. 이때 유도관내 접선속도의 각운동량을 측정하여 실린더내 텀블강도의 크기를 정량화하는 것이 그 원리이다. 그러나 위와 같은 텀블-스윙변환장치를 이용하여 흡기포트형상에 따른 실린더내 텀블강도를 정량화하는데 있어서 고려되어야 할 몇가지 중요한 인자

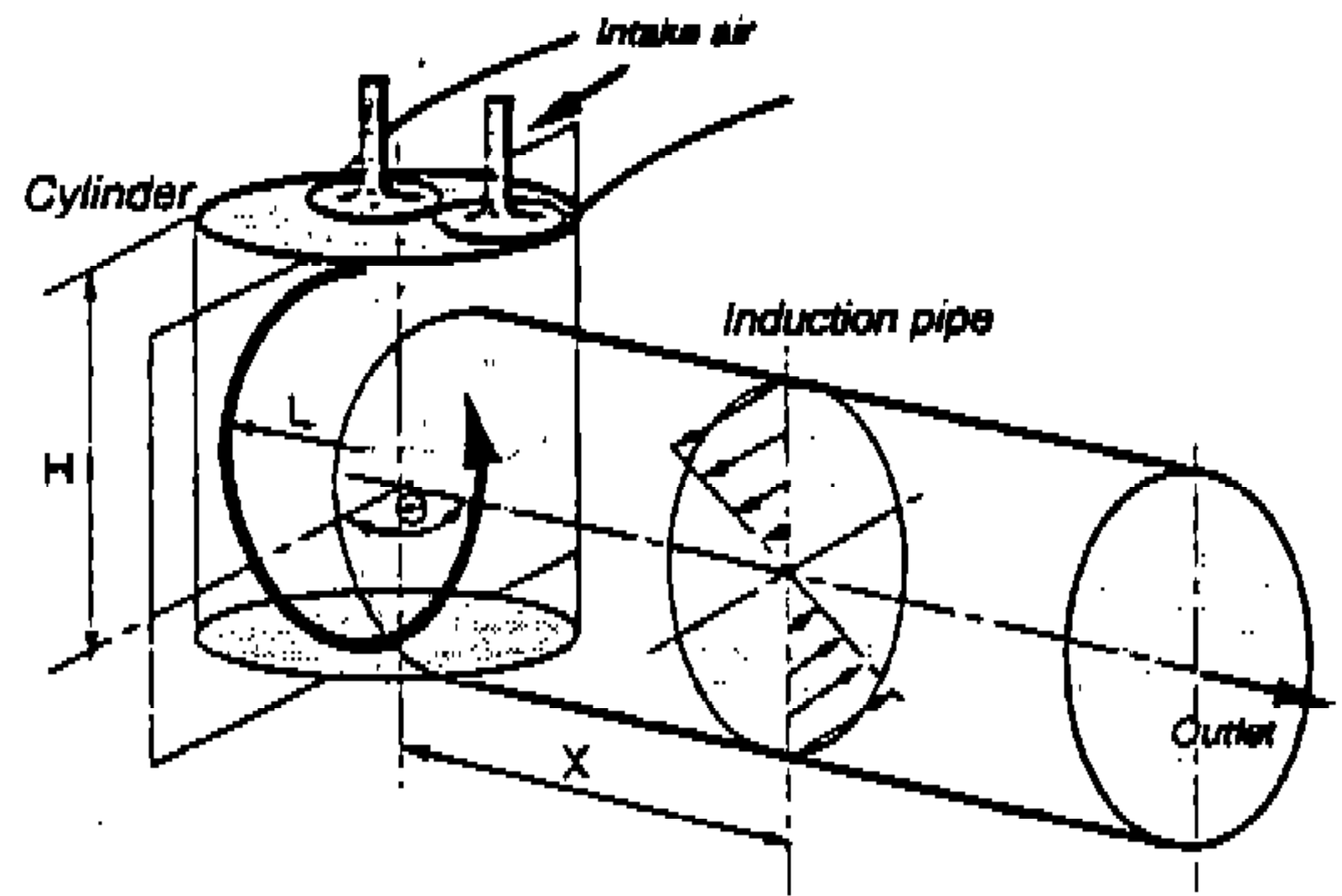


Fig.1 Principle of tumble measurement using a tumble adaptor under steady condition

들이 있다.

첫째는 유도관의 높이(H)로서 이것은 텀블반경(L)과 관계된다. 텀블반경은 흡기포트형상에 따라 변할수 있으며, 실린더직경(B)과 유도관의 직경이 같기 때문에 유도관의 높이는 0.5B보다 작을수는 없다. 둘째는 유도관내 단면속도의 측정위치(X)로서, 유도관에서 접선속도의 각운동량은 임펄스메타나 패들휠을 사용하여 측정하기 때문에 측정되는 값은 유도관중심에 대한 모멘트값이어야 하기 때문이다. 따라서 각운동량의 측정은 실린더내 텀블유동이 유도관에 전달되어 안정된 스윙속도로 변환된 후 이루어져야 한다. 셋째는 실린더내 텀블유동의 운동 면과 유도관의 방향(θ)이다. 이것은 실린더내 텀블유동이 유도관 축방향으로 각운동량을 완전하게 전달해야 하기 때문이다. 정확한 텀블유동면이 주어진 경우 유도관의 방향은 이 면에 90도인 경우가 가장 이상적이다. 그리고 또 하나의 중요한 인자는 실린더 밑면의 형상이다. 실린더 밑면은 실제 피스톤의 윗면을 대신하는 것으로 생각하면 플랫폼형(flat type)이 되어야 하며, 텀블-스윙변환장치의 기능을 중시하여 텀블유도관내 전달하려고 하면 실린더밑면은 유도관과 같은 라운드형(round type)으로 해야하기 때문이다.

다음장에서는 위와같은 흡입 정상유동시 텀블-스윙변환장치를 이용해 흡기포트에 대한 텀블강도를 정량화하는데 중요한 영향을 미치는 4개의

인자에 대해서 두가지 흡기포트(약한 텀블, 강한 텀블)의 LDV측정결과를 이용해 그 영향을 분석하고자 한다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

흡입정상유동을 LDV측정하기 위한 실험장치는 Fig2와 같이 구성하였다. 엔진의 흡입상태 모사를 위해 공기압축기로부터 흡기포트를 통해 실린더로 공기를 불어넣는 방식을 사용하였다. 텀블-스윙 변환장치를 빠져 나온 공기는 후드를 통해 실험실 밖으로 배출된다. 흡입공기 유량측정을 위해 흡기관에 층류 유량계(Laminar Flow Meter, Meriam Co.)를 설치하였으며, 흡기포트와 실린더내의 압력차를 U자 마노메타를 사용하여 측정하였다. 흡기밸브의 양정은 나사를 이용해 조정할 수 있도록 하였고, 높이 측정은 다이알 게이지를 사용하였다. LDV측정을 위한 산란입자공급은 입자부유기를 이용하여 흡기관으로 불어 넣었다. 실험엔진의 실린더헤드는 125cc 소형 단기통 가솔린엔진에 사용되는 것으로, 엔진은 실린더 직경(B) 56.5mm, 행정길이 49.5mm, 최대밸브양정 6mm이며, 4-밸브 팬트루프 연소실 형상을 갖는다.

산란입자는 평균입경이 1 μ m의 산화알루미나 (Al₂O₃)를 사용하였다. 실린더내 속도측정을 위해 사용한 LDV는 5W 아르곤-이온 레이저와 광섬유 전송장치, 3차원 이송장치와 초점렌즈 푸르브, 그리고 FFT방식의 신호처리기인 BSA(Burst Spectrum Analyzer, Dantec)로 구성된다. LDV측정은 후방산란방식으로, 1차원 속도성분측정을 위하여

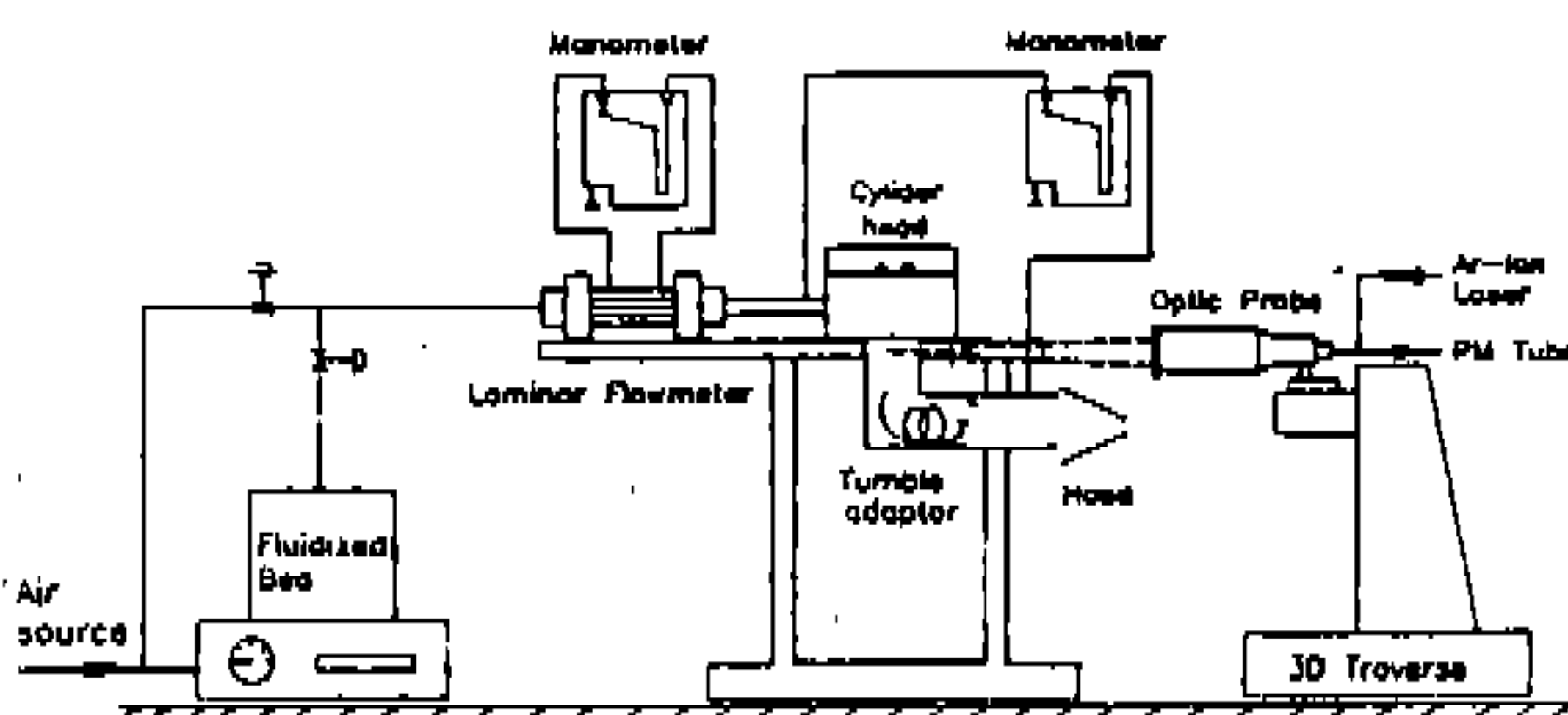


Fig.2 Schematics of the steady flow test rig

사용된 빔은 파장 514nm의 초록색 빔이며, 초점 거리 310mm의 푸르브를 사용하여 측정체적의 플랜지 간격을 2.12 μ m으로 하였다.

3.2 텀블-스윙 변환장치

엔진의 정상유동실험을 위한 텀블-스윙 변환장치의 형상은 Fig3과 같으며, 아크릴로 만들어졌다. 흡입시 실린더내에 생성된 텀블유동이 효과적으로 유도관을 통해 스윙유동으로 바뀔 수 있도록 L자형으로 만들었다.⁷⁾ 실린더내 텀블유동속도측정을 위해 실린더헤드로부터 10mm 아래 길이 20mm, 높이 20mm의 광학유리를 2방향으로 설치하였다. 또한 스윙 유도관을 통해 전개되는 스윙유동 속도측정을 위해 실린더 중심축으로부터 각각 B, 2B, 3B 지점에 길이 20mm, 높이 10mm의 광학유리를 설치하였다. 변환장치의 실린더 밀면은 피스톤과 같이 편평한 면인 플랫폼형(flat type)과 유도관의 곡률과 같은 곡면을 갖는 라운드형(round type)의 2종류로 하였고, 유도관의 높이도 실린더직경의 0.5배되는 것과 1.0배되는 2개의 종류로 하였다. 그리고 텀블유도관의 텀블운동면(motion plane)과의 각도는 실린더헤드에 대한 변환장치의 상대위치를 회전 시킴으로 조절할 수 있도록 하였다.

3.3 실험방법

실험에 사용된 흡기포트형상은 기존엔진에 장착된 흡기포트와 텀블유동이 생성되도록 흡기포트의 각도를 20도 경사지도록 만든 텀블포트에 대해서 수행하였다. 흡기포트형상에 대한 자세한 내용은 참고문헌^{5,6)}에 기술되어져있다. 흡입정상상태시, 실제 엔진의 3000rpm, 전부하(WOT)상태에서 흡입되는 공기량을 흡기밸브 최대양정에서 흐르도록 유량을 조절하였다. 이 조건에서 공기유량은 187L/min이다. 이때 측정된 흡기포트와 실린더내의 압력수두 차이는 기존포트에서는 0.806mm, 텀블포트에서는 1.67mm인데, 실험 동안에 이 상태의 압력차이가 항상 유지되게끔 흡입공기유량을 조절하였다.

텀블-스윙 변환장치에 장착된 각 광학창에서는 단면속도측정은 3mm 간격으로 측정점의 위치를

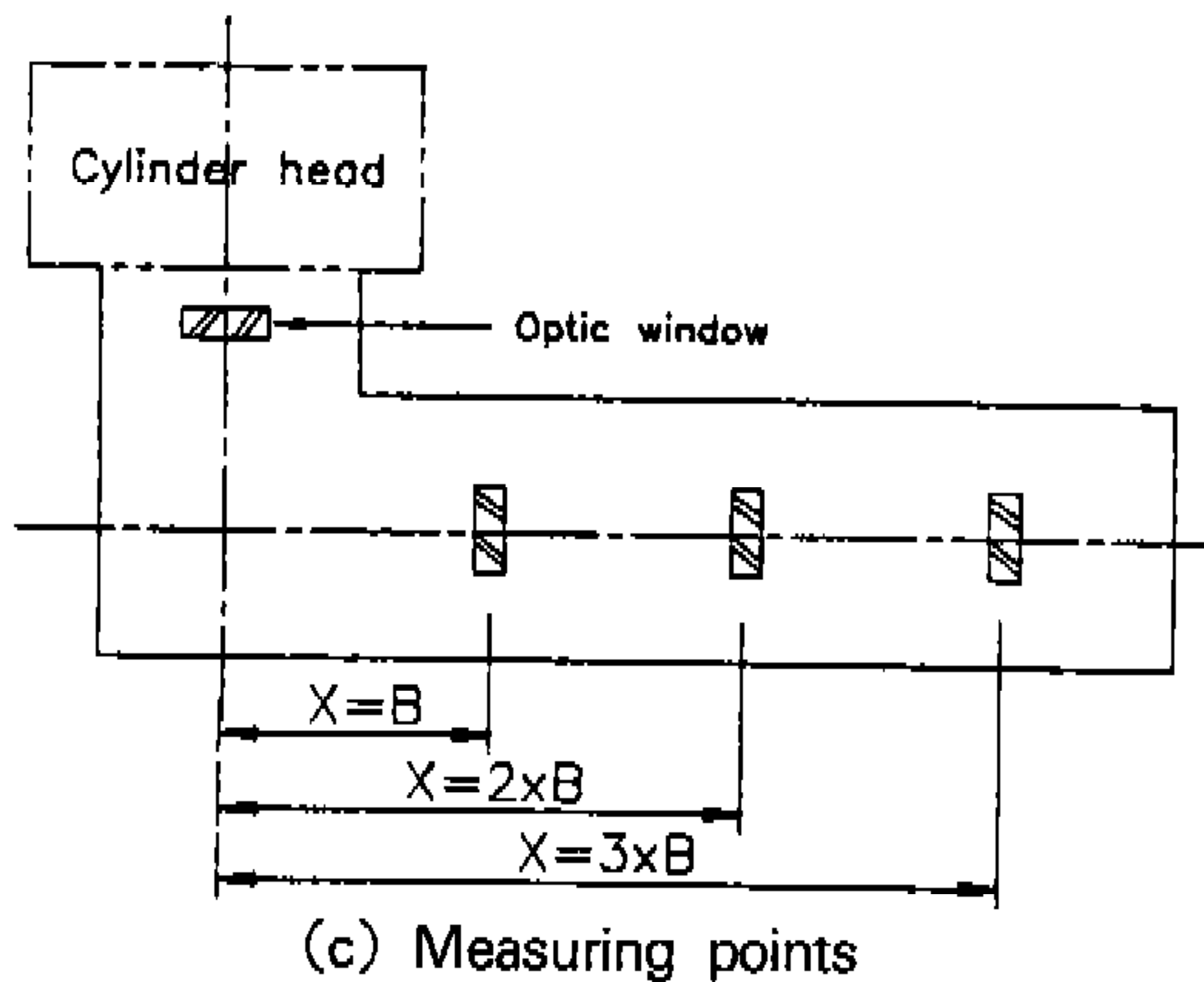
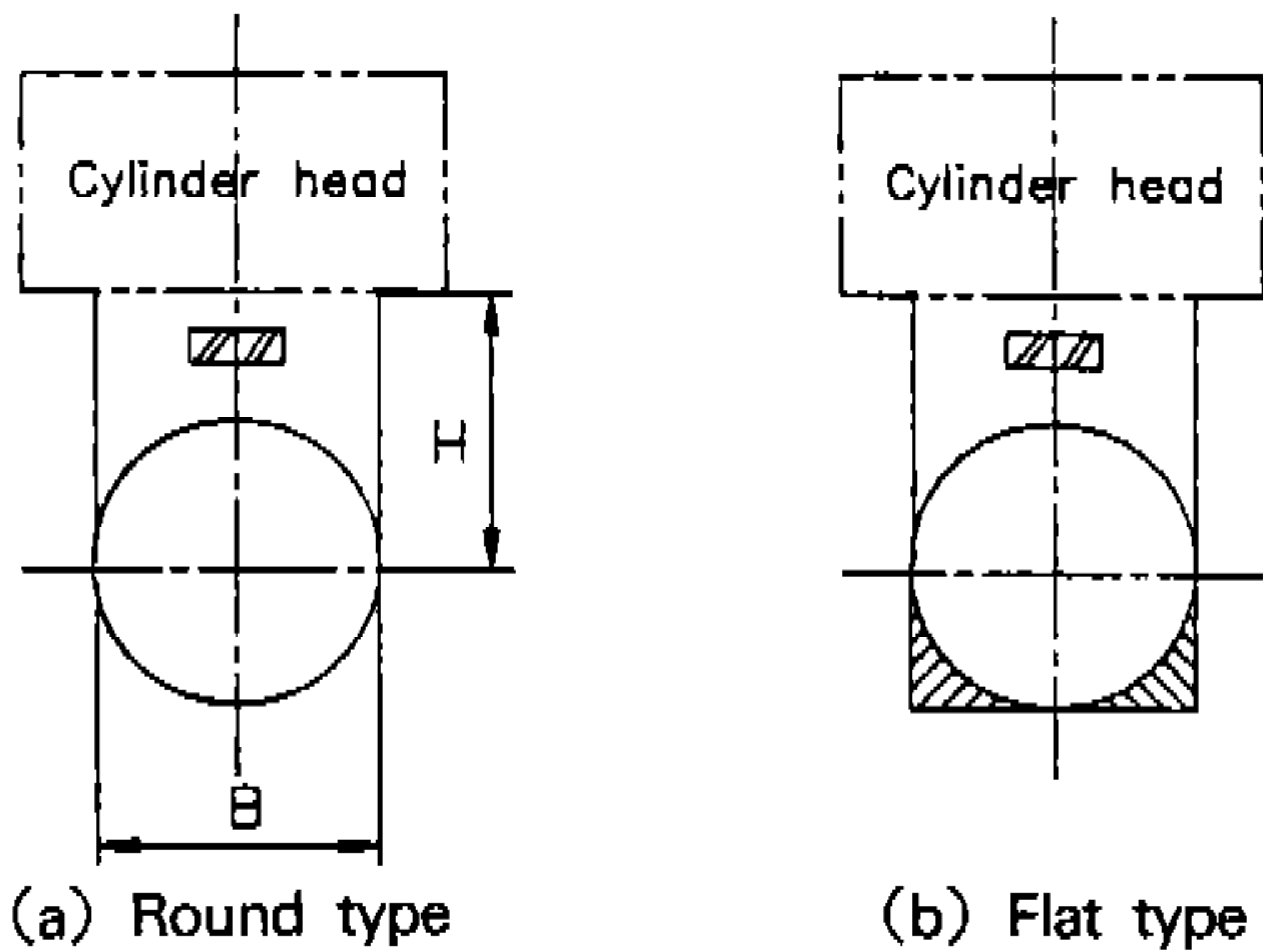


Fig.3 Tumble adaptor geometry and measuring points

조밀하게 하였고, 각 점에서의 속도데이터 샘플링은 통상적인 경우에 3000개, 실린더벽면 근처에서는 데이터 발생율의 감소로 인해 1000개로 하였다. 따라서 앙상블평균으로 계산한 속도값의 통계학적 오차는 벽면근처에서는 4%이하, 그 외 위치에서는 2%이하이다.

유도관내 스윙변환특성을 정량화하기 위하여 측정된 단면속도로부터 유도관 중심에 대한 각 운동량을 계산하였고, 스윙의 유도관중심과의 편심도는 스윙속도중심(단면속도가 제로인 지점)과 유도관 중심과의 편차를 유도관반경으로 무차원화시킨 값으로 정의하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실린더내 텀블유동 생성

Fig4는 유도관의 높이 $H=1.0B$, 실린더밀면의

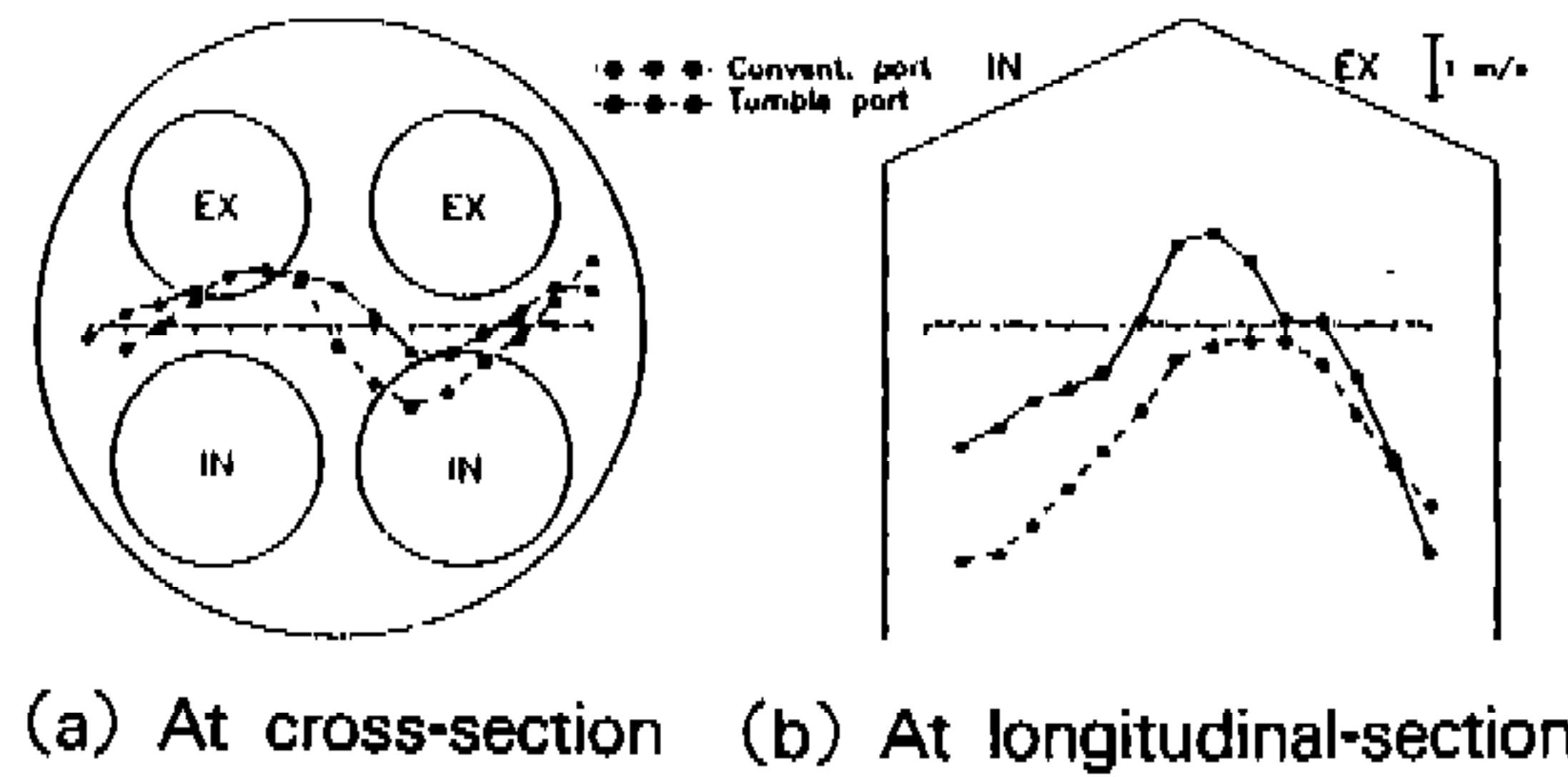


Fig.4 In-cylinder tumble flows for two intake ports using the round type tumble adaptor

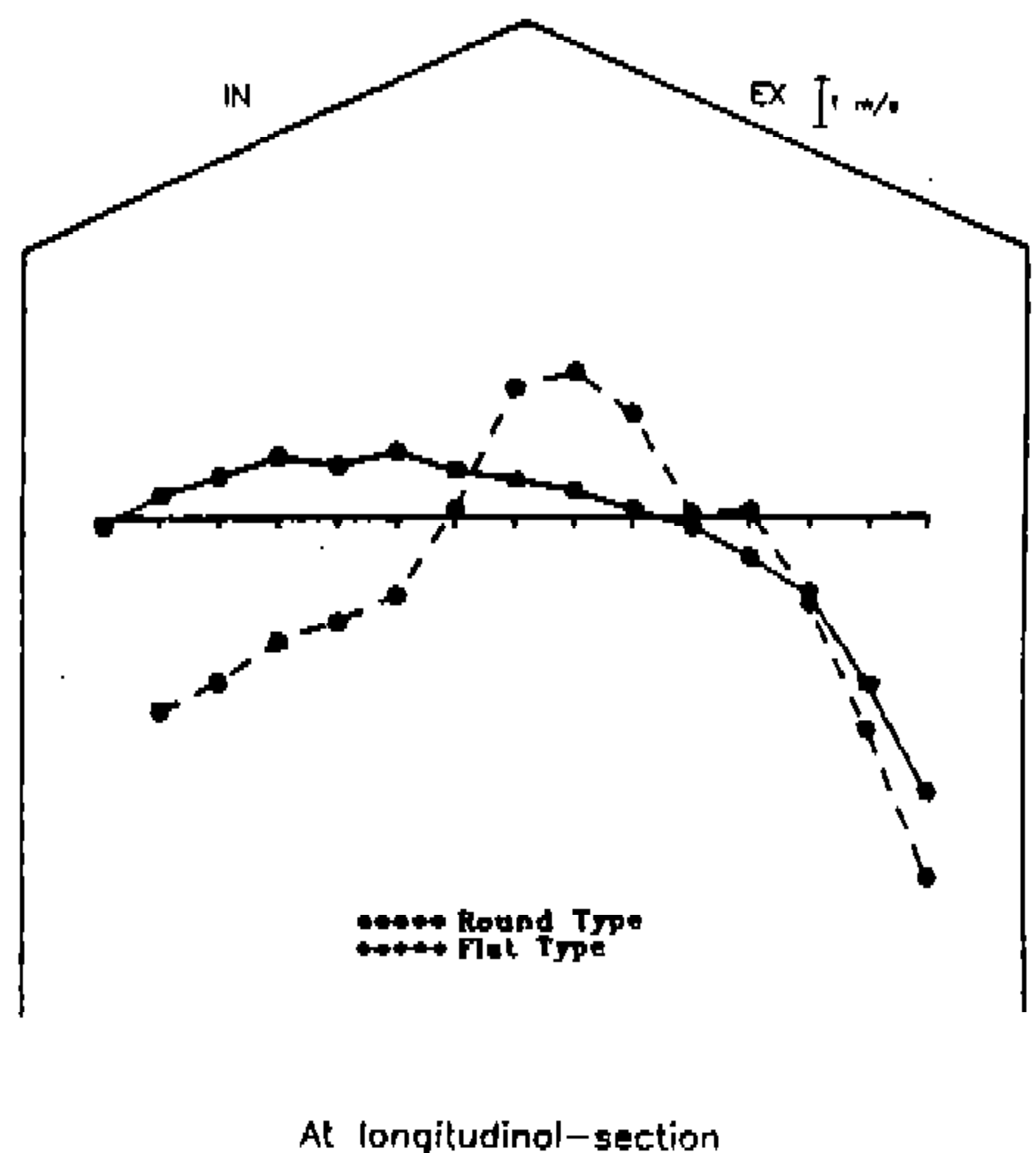


Fig.5 In-cylinder tumble flows for two adaptor types in the tumble port variations

형상이 라운드형의 텀블-스윙 변환장치에서 두 포트에 대해 실린더 횡단면 및 종단면에서의 속도분포를 보여준다. 실린더 횡단면에서 보면 두 개의 포트에 대해 흡기밸브에서 배기밸브쪽으로 흐르는 텀블유동 생성원이 비대칭으로 나타나고 있고, 실린더 종단면에서도 완전한 텀블유동의 형태가 되지않고 흡기밸브쪽 실린더쪽 실린더벽면 근처유동이 모두 아래방향으로 향하고 있다. 이와같이 실린더 종단면에서 텀블유동의 크기가 실린더 전체에 나타나지 않는 것은 유도관을 통해 빠져나가는 공기로 인해 실린더 하단면에서의 반사된 유동이 실린더헤드 쪽으로 올라오지 않기 때문이다.

실린더내 텀블유동생성이 실린더 밑면의 형상에 따라 변하는 특성을 보기 위하여 Fig.5에 실린더 밑면이 라운드형과 플랫폼형의 결과를 비교하였다. 같은 유동조건에 대해서 플랫폼형의 경우가 실린더내 텀블유동을 보다 완전하게 생성시킴을 볼 수 있다. 라운드형의 경우는 실린더내 텀블을 완전히 생성시키지 못하고 텀블유도관을 통해 각운동량을 전달하고 있다.

4.2 유도관높이의 영향

Fig.6는 유도관의 높이변화에 따른 텀블-스월 변환특성을 보기 위하여 실린더 밑면이 플랫폼형과 라운드형인 경우에 대하여 유도관내 측정거리에 따른 스월속도분포와 각운동량, 그리고 스월중심의 편심도를 보여준다. 유도관의 높이는 큰것 ($H=1.0B$)과 작은것($H=0.5B$)의 두경우로 변화시켰다. 플랫폼형 실린더밑면의 경우 유도관의 높이가 클때 유도관내 스월생성이 작게 나타나고 있다. 이것은 실린더내 텀블유동생성이 효과적으로 발생되지 않기 때문으로, 유도관의 높이가 텀블유동의 반경보다 커서 실린더내 한개의 뚜

렷한 텀블유동이 생성되지 않은데 기인한다. 결국 유도관내 스월의 각운동량은 유도관의 높이가 작은 경우보다 큰경우가 약 반정도로 작게 나타나고 있고, 스월중심의 편심량은 유도관 상류에서 높게 나타나다가 하류로감에 따라 점차 줄어들고 있다. 유도관의 높이가 큰 경우는 유도관내 스월변환이 초기에 완성되어 하류로 감에 따라 각운동량이 감소되고 스월중심의 편심량도 약간씩 크게 나타나고 있다.

실린더 밑면이 라운드형인 경우는 유도관의 높이변화에 따른 영향이 그다지 심하게 나타나고 있지 않다. 유도관의 높이가 큰 경우 각운동량이 높게 나타나고, 스월중심의 편심량은 유도관 하류로 감에 따라 줄어들고 있으나 유도관의 높이가 작은 경우보다는 큰값을 갖는다. 유도관의 높이는 실린더내 생성된 텀블유동의 반경과 관계되므로, 실제엔진의 하사점근처에 모사 피스톤윗면을 위치시키려면 유도관의 높이는 변환장치 구조상 가장 작게 할수 있는 크기, 즉 $H=0.5B$ 의 경우가 바람직하다.

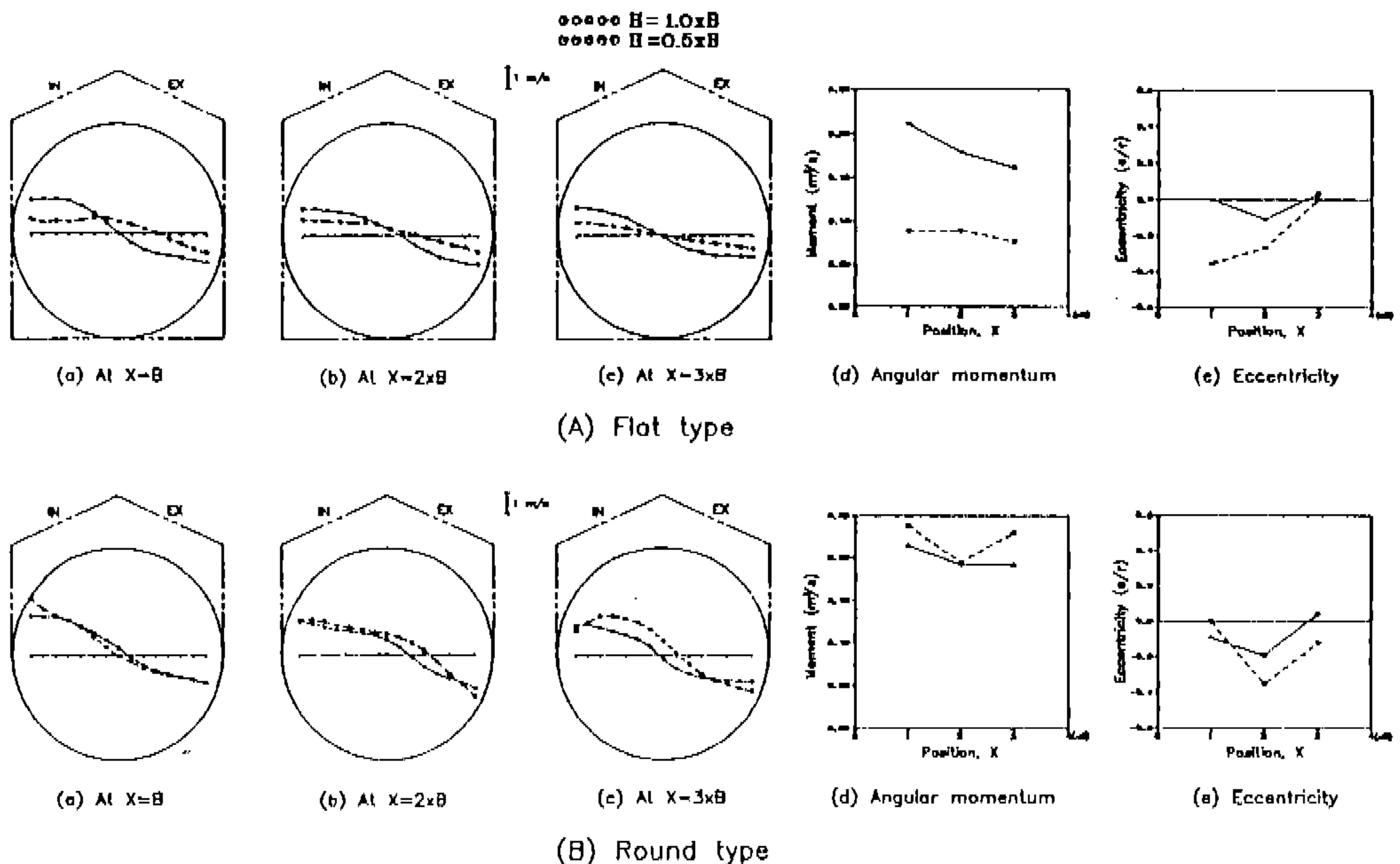


Fig.6 Swirl characteristics in the induction pipe for induction pipe height variations

4.3 실린더밀면 형상의 영향

Fig.7은 두개의 흡기포트에 대해 유도관의 높이가 작을때 실린더 밀면의 형상이 라운드형과 플랫폼형에 대해서 비교하고 있다. 텀블포트에서 보면 유도관내 변환되는 스윙유동의 속도분포 특성은 비슷한 경향을 보이고 있으나, 각운동량은 실린더 밀면형상이 라운드형의 경우가 다소 크게 나타나고 있고, 스윙중심의 편심량은 플랫폼형의 경우가 다소 작게 나타나고 있다. 그러므로 라운드형은 유도관내 스윙변환 특성을 크게 만들지만, 실린더내 안정된 텀블유동이 발생되지 않은 상태에서 유도관으로 각운동량을 전달하기 때문에 스윙의 중심의 편심도가 크게 나타난다. 텀블생성이 작은 기존포트에서는 유도관 하류로 감에 따라 라운드형의 경우가 각운동량이 약간 증가하고 있고, 스윙중심의 편심량도 플랫폼형에서 보다 많이 나타난다.

결국 변환장치의 실린더밀면 형상은 플랫폼형이나 라운드형 모두 사용이 가능하지만, 플랫폼형의 경우는 텀블유동이 실린더내에서 완전히 생성되어 유도관에 각운동량을 전달하므로 유도관 상류에서부터 안정된 스윙유동이 존재하게 되고,

따라서 유도관 상류에서 각운동량 측정이 가능하다. 반면, 라운드형은 실린더내 텀블 유동이 덜 발전된 상태에서 유도관에 각운동량을 전달하기 때문에 유도관을 따라 흐르면서 안정된 스윙로 변환된후 측정이 가능하다. 각운동량의 크기는 유도관의 하류로 갈수록 라운드형의 경우가 높은 값을 갖으며, 텀블포트의 경우 $X=3B$ 되는 지점에서는 약 16%의 크기차이를 보인다.

4.4 유도관 방향의 영향

2개의 흡기밸브가 대칭이고, 연소실형상이 팬트루프인 경우에는 실린더내 텀블유동의 운동면을 쉽게 예측할 수 있으나, 그외 흡기포트형상에서는 텀블의 주 운동면을 예측하기 어려우므로, 유도관의 방향을 조금씩 회전시키면서 유도관내 각운동량이 제일 큰 값을 갖는 조건에서 측정하고 있다. 특히 흡입 유동특성이 텀블과 스윙유동이 복합한 형태로 존재하게 되는 경우는 더욱 텀블 유동의 주운동면 예측이 어렵다. 이때 텀블유동의 주운동면이 유도관의 방향과 직각이 되지 않았을 경우에는 유도관내 전달되는 각운동량의 감소는 기하학적으로는 그 엷셋각의 cosine값 만큼 감

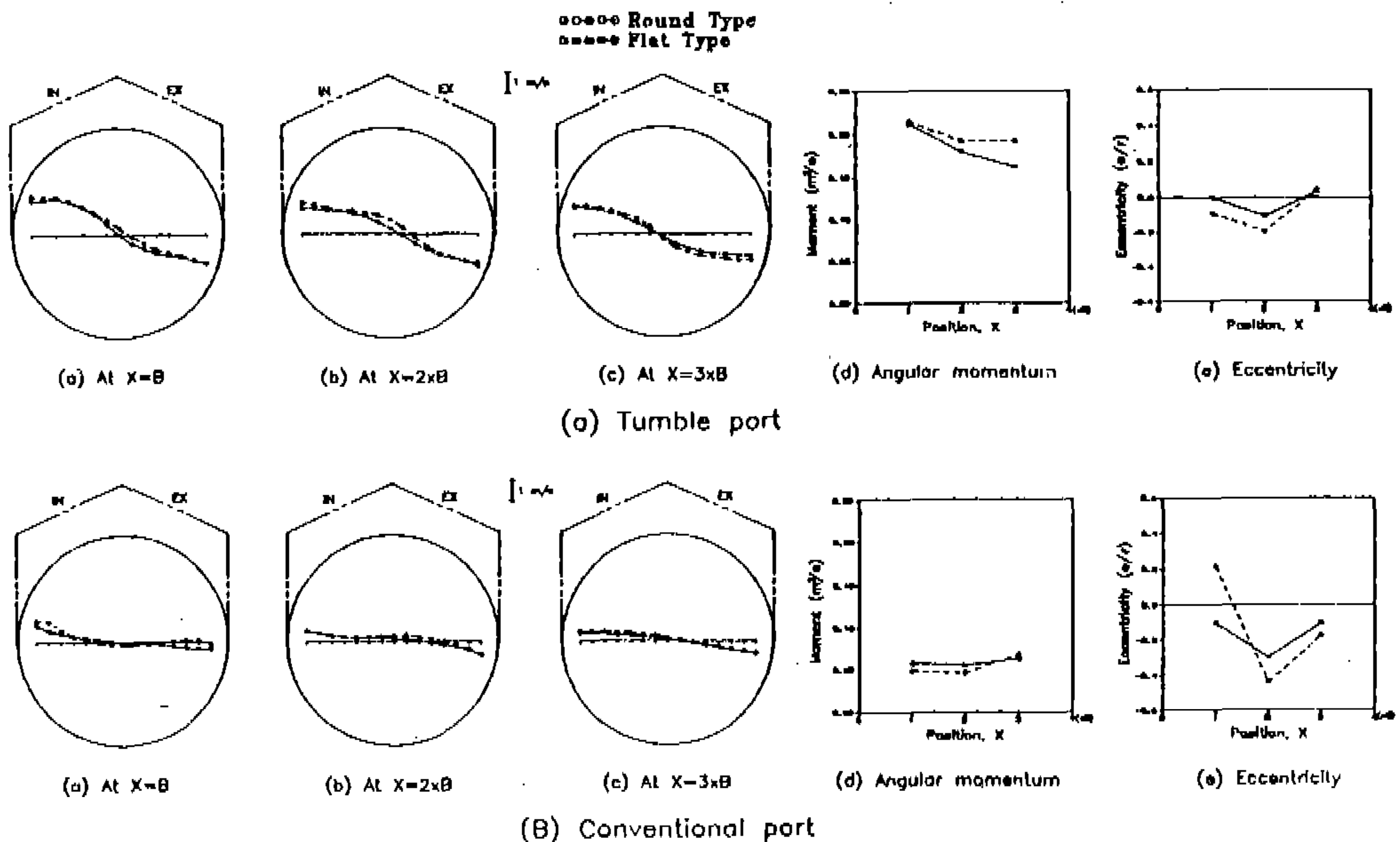


Fig.7 Swirl characteristics in the induction pipe for two adator types

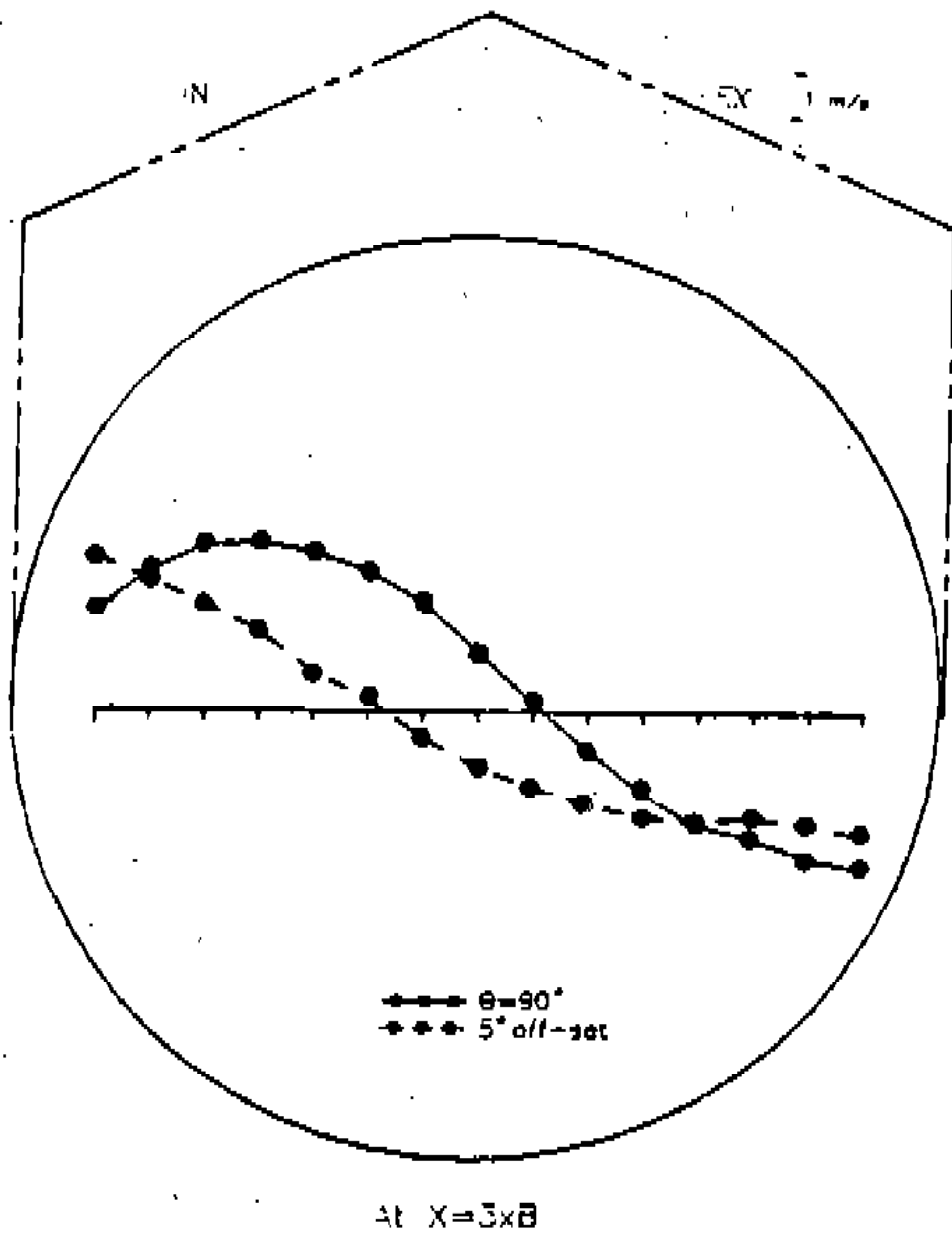


Fig.8 Effect of offset angle on swirl velocities in the induction pipe

소되지만, 실제 실린더내 2차류(secondary flow) 생성등의 유동손실로 그 감소폭이 커지게 된다.

Fig.8은 텀블포트에 대해 실린더밀면이 라운드형 일때 실린더내 텀블운동면과 유도관이 직각 일때와 5도 엽셋되었을때에 대한 유도관하류($X=3B$)에서의 스윙속도분포를 비교하고 있다. 예상대로 5도 엽셋된 경우 스윙속도의 크기가 감소되고, 스윙중심의 편심량도 증가되는 것을 볼 수 있다. 기하학적으로 5도 엽셋된 경우 0.5%의 감소효과가 있지만, 실제 측정된 값은 유도관 중심에 대한 각운동량은 5도 엽셋된 경우가 $0.186 \text{ m}^2\text{s}$, 엽셋이 안된 경우 $0.229 \text{ m}^2\text{s}$ 로 나타나서, 5도 엽셋으로 인한 각운동량의 감소가 약 19%이다.

5. 결 론

흡입 정상유동실험에서 텀블-스윙 변환장치를 이용해 흡기포트형상에 따른 텀블유동 특성실험을 할때 중요한 변수로 작용하는 유도관의 높이, 유도관내 측정위치, 실린더밀면의 형상, 유도관의 방향 등에 관한 영향을 LDV측정을 통해 연구한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 텀블-스윙 변환장치의 유도관 높이는 실린더내 생성되는 텀블유동의 반경크기에 관계되며, 텀블유동의 직경이 실제엔진에서 피스톤하사점 높이보다 크지 않으므로 유도관의 높이는 가능한 짧은것($H=0.5B$)이 좋다.
- 2) 텀블-스윙 변환장치의 실린더밀면 형상은 라운드형이 유도관내 스윙변환 특성이 좋으나 실린더내에서 텀블유동이 완전히 생성되지 않은 상태로 유도관에 각운동량을 전달하기 때문에 스윙중심의 편심도가 크게 나타나서 유도관하류($X=3B$)에서 모멘트를 측정해야한다. 반면 플랫폼형은 각운동량이 다소 작게 나타나지만 실린더내에서 텀블유동이 충분히 완성된후 각운동량을 유도관에 전달하기 때문에 유도관 상류($X=2B$)에서도 모멘트 측정이 가능하다.
- 3) 흡입 정상유동시 유도관의 방향은 실린더내 텀블운동면에 수직이 되도록 위치되어야 하며, 5도 엽셋되었을때 유도관내 각운동량은 약 19% 감소된다.

본 연구에서는 텀블-스윙 변환장치의 형상에 따른 텀블강도 측정치의 상대적 비교결과를 보였지만, 흡입 정상유동 실험의 궁극적 목표는 실제 피스톤이 하강하는 흡입과정동안 실린더내 텀블유동의 강도를 평가하는데 있으므로, 이 실험의 정확도는 실제 모터링 실험의 결과와 비교함으로써 검증 될 필요가 있다. 향후 이분야에 대한 지속적인 좋은 연구결과가 발표되기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. J.C. Kent, M.Haghoie, A.Mikulec, et al., "Effects of Intake Port Design and Valve Lift In-Cylinder Flow and Burnrate", SAE Paper 872153, 1987.
2. A. Coghee, G.Brunello, E.Tassi, "Effects of Intake Ports on the In-Cylinder Air Motion under Steady Flow Conditions", SAE Paper 880384, 1988.

3. Arcoumanis, C., Hu, Z., Vafidis, C. and Whitelaw, J.H., "Tumble Motion : A Mechanism for Turbulence Enhancement in Spark-Ignition Engines", SAE Paper 900060, 1990.
4. Hadded, O., Denbratt, I., "Turbulence Characteristics of Tumbling Air Motion in Four-valve S.I. Engines and their Correlation with Combustion Parameters", SAE Paper, 1991.
5. 강건용, 이진욱, 정동수, 정석용, "가시화 모터링 엔진의 흡기포트형상에 따른 텀블유동 LDV측정" 한국자동차공학회 춘계학술대회, 아시아 자동차, 1993.
6. 강건용, 이진욱, 정동수, 정석용, 백제현, "모터링 엔진의 흡기포트유동변화에 따른 텀블 생성 및 소멸에 관한 실험적 연구" 대한기계학회 논문집, 18권, 4호, 1994.
7. Arcoumanis, C., Hu, Z. and Whitelaw, J.H., "Steady Flow Characterization of Tumble-generating Four-valve Cylinder Head" Proc. IME-CHE, vol.207.