

## SCV형상별 경사텀블유동의 난류증가 특성 해석

### Turbulence Enhancement Characteristics Analysis of Inclined-Tumbles for Various SCV Configurations

이 진 욱\*, 강 건 용\*, 최 승 환\*\*, 박 승 철\*\*\*  
J. W. Lee, K. Y. Kang, S. H. Choi, S. C. Park

#### ABSTRACT

It has been demonstrated that the in-cylinder turbulence is enhanced by inclined swirl with a SCV(swirl control valve). The inclined-tumble flow measurement and analysis were performed for various types of intake systems that generated several different combinations of swirl ratio and tumble ratio in the cylinder. Experiments were conducted in a 4-valve optically accessed transparent research engine using a backward-scatter LDV mode under motoring condition at 1,000rpm. The influence of swirl/tumble levels on the characteristics of turbulence was analysed. This study presents experimental results of the inclined-tumble flow structure, including the flow motion phenomena, angular momentum and turbulence intensity.

주요기술용어 : Turbulence Intensity(난류강도), Inclined-Tumble Flow(경사텀블유동), Transparent Engine(가시화엔진), LDV(레이저유속계)

#### 1. 서 론

강화되는 자동차배기가스 규제에 대응하기 위해 엔진의 설계기술은 더욱 더 고도화되며, 가솔린엔진의 경우 전자화 도입이후 급격히 배기가스 배출이 격감되어 있으나 향후 이산화탄소 규제 등

으로 인해 연비를 고려한 저배기엔진기술이 요구되는 시점에 있다. 이러한 요구에 대응하기 위해 성층연소에 의한 직접연료분사식 엔진의 실용화로 초회박연소가 가능해지므로서 연비와 저배기 규제를 동시에 만족시키는 방법으로 활용되고 있다. 이러한 기술의 핵심은 실린더내 유동을 최적으로 조절하여 불안정한 연소를 향상시키는 것으로서, 점화플러그 주위의 유동 및 난류강도의 매칭이 지배적인 인자이다. 이와같은 체계적인 흡기포트에 따른 실린더내 유동 특성을 효율적으로 해석하기

\* 정회원, 한국기계연구원  
\*\* 부산대학교 기계공학과 대학원  
\*\*\* 한국산업기술대학교

위해<sup>1)</sup>, 특히 본 연구에서는 엔진 운전중에 흡기유동을 가변시키기 위한 목적으로 흡기포트와 엔진 헤드 사이에 SCV(스윙조절밸브)를 장착<sup>2,3)</sup>하여 실린더내 흡기포트의 개구형상과 크기에 따른 텀블유동과 스윙유동이 조합된 경사텀블유동(엔진실린더 헤드와 피스톤의 윗면을 경계로 하는 실린더내 축방향 회전속도성분인 순수텀블<sup>4)</sup>에 대하여 일정하게 경사진 유동)을 생성시키도록 하여 다양한 SCV형상에 대해 유동특성을 평가하였다.

경사텀블유동에 있어서 텀블비의 증가는 흡기포트 단면적에서의 낮은 부분에서 높은 부분까지의 단면적의 감소에 의해 이루어지며, 스윙유동<sup>5)</sup>은 2개의 흡기포트중 1개를 단음에 의해 생성되는데, 이때 스윙강도는 흡기포트의 단면적의 감소에 의해 증가된다. 본 연구에서는 4-밸브엔진<sup>6,7)</sup>을 대상으로 흡기포트의 개구율이 서로 다른 4개의 형상을 제작하여 스윙유동과 텀블유동간의 상호작용 해석 및 경사텀블유동의 구조 및 난류특성을 밝히고자 하였다.

## 2. 실험장치

### 2.1 LDV-가시화엔진

엔진 실린더내의 경사텀블유동을 측정하기 위하여 Fig.1과 같이 LDV(laser Doppler velocimetry)측정 가능한 단기통 가시화 엔진과 최대출력이 5Watt인 아르곤-이온레이저 그리고 획득한 신호처리를 위한 BSA(Burst Spectrum Analyzer)로 크게 구성된다. LDV 측정시스템부는 30마력 DC모터로 벨트구동되는 팬트루프형 가시화엔진을 대상으로 하였으며, 엔진크랭크축에 0.5도의 해상도를 가지는 엔코드를 설치하였다. LDV시스템은 5Watt의 Ar-Ion레이저원으로, 광섬유 전송트랜스미터, 3차원 이송장치, 신호처리기인 BSA로 구성된다. 그리고 LDV측정을 위해 피스톤을 연상하여 표면에 코팅된 반사거울을 설치할 수 있도록 하였고, 피스톤윗면은 두께 12mm의 석영유리(quartz)를 장착하여 레이저광선이 연소실내로 들어올 수 있도록 하였다. 또한 피스톤의 기밀과 윤활을 위해 바이톤링과 테프론-카본링을 중첩하여 사용하였다. 사용된 링은 엔진회전수 1,000rpm 기준 평균 약 1시간 모터링구동 실험 후, 교체하

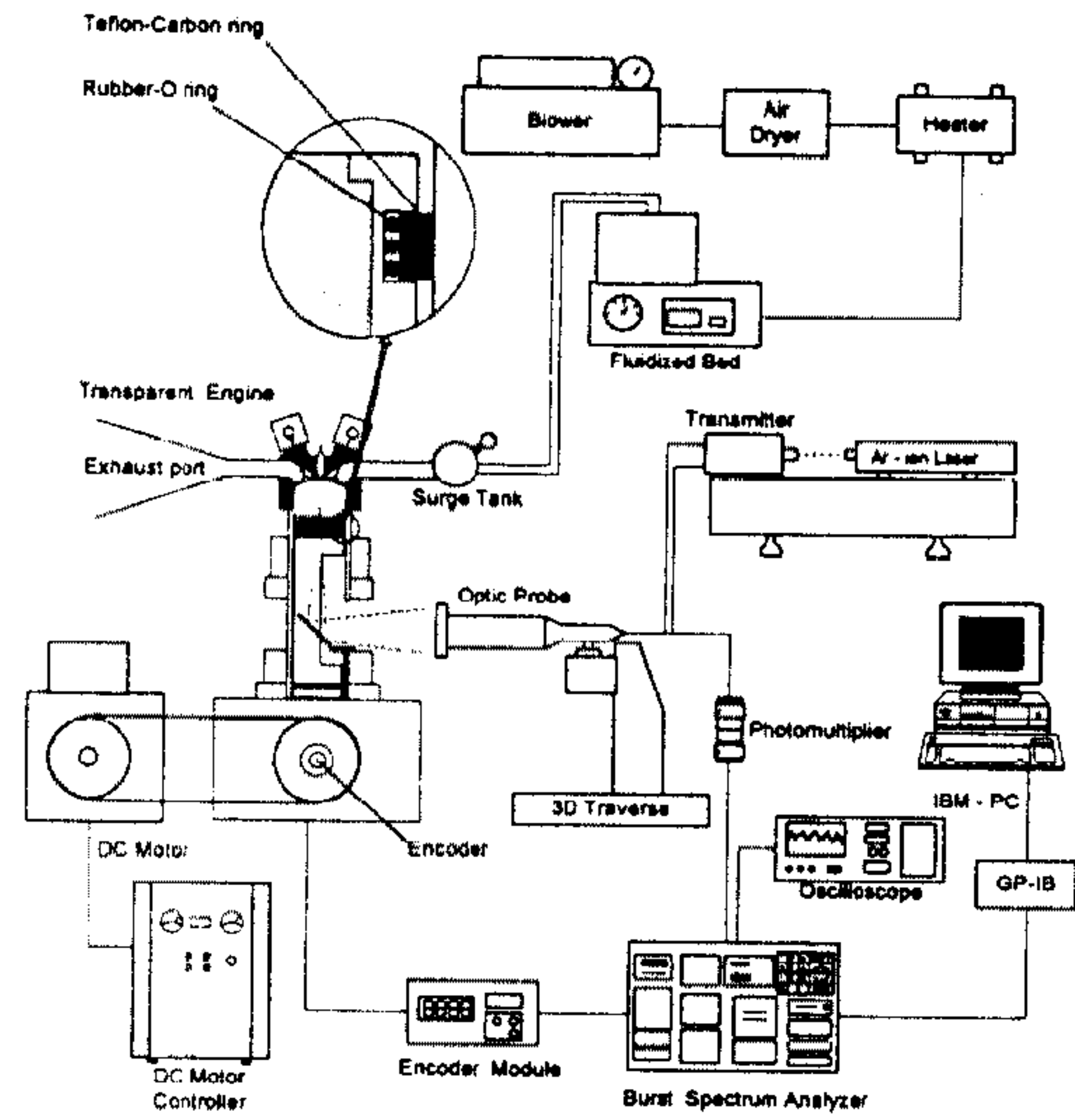


Fig.1 가시화엔진-LDV 실험장치 개략도

였다. LDV측정에 필수적인 산란입자의 공급은 공기를 건조시킨 후, 입자 부유대(fluidized bed : TSI co.)에서 산란입자를 부유시켜 서지탱크를 통하여 엔진에 효율적으로 공급되도록 하였다. 실험에 사용한 산란입자는 평균입경이 1 $\mu$ m의 산화알루미늄 분말이다.

### 2.2 적용된 SCV(스윙조절밸브)형상 특징

본 연구에서는 흡기포트를 통한 스윙/텀블비에 따른 경사텀블의 변화를 위하여 20° 유입각의 흡기포트와 엔진헤드 사이에 두께가 3mm인 3가지의 SCV장치를 설치하였다. 사용된 장치의 명칭은 정상유동실험결과<sup>8)</sup>에 따라서 먼저, SCV가 부착되지 않은 순수텀블생성형은 HT, 고텀블·중스윙 생성형은 HTMS, 중텀블·중스윙생성형은 MTMS 그리고 고텀블·고스윙생성형은 HTHS로 하였

Table 1 정상유동실험결과

	텀블비	스윙비	평균유량 계 수	텀블각 (°)	개구율 (%)
HT	2.408	0.0	0.234	90	100
HTMS	2.363	0.594	0.173	75.9	55
MTMS	1.540	0.837	0.137	61.5	37
HTHS	2.386	1.088	0.178	65.5	55



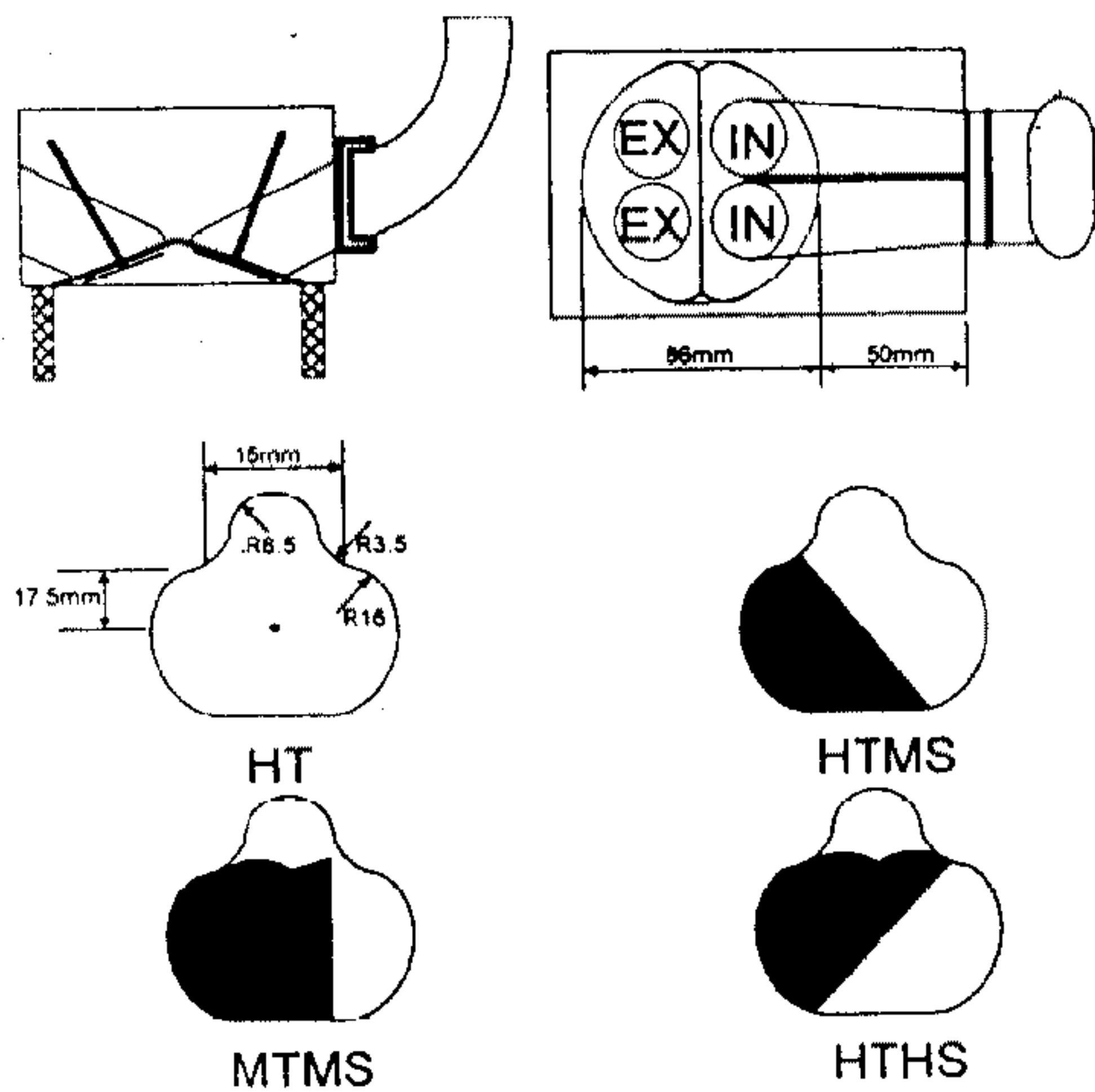


Fig.2 SCV 장착위치와 형상

으며, 이에 대한 형상크기 및 부착위치는 Fig.2에 나타내었다. 고려한 SCV형상별 스웰/텀블비, 유량계수 그리고 개구율에 대하여 Table 1에 나타내었다.

여기서, 측정된 토오크( $\tau$ )를 이용하여 구한 와류값과 유량계수 그리고 평균유량계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_R = \frac{8\tau}{(mBV_0)} \quad C_f = \frac{Q}{AV_0}$$

$$\overline{C_f} = \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f d\alpha}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad [\alpha_1 : IVO, \alpha_2 : IVC]$$

밸브양정에 따라 계산된 이들 값들은 다음과 같이 대표값인 스웰비와 텀블비로 정의한다.

$$R_S = \frac{L_D \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f N_R d\alpha}{\left\{ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f d\alpha \right\}^2}$$

$$L_D : \text{엔진 형상계수, } L_D = \frac{DS}{N_V d_V^2}$$

그리고 스웰과 텀블비를 이용하여 실린더내 유동의 경사각도를 다음과 같이 계산할 수 있다. 여기서,  $90^\circ$ 는 순수 텀블을,  $0^\circ$ 는 순수 스웰을 나타낸다.

$$\theta = \tan^{-1}(R_T/R_S)$$

### 3. 실험방법

가시화엔진 실린더내 경사텀블유동의 평균속도 측정을 위하여 LDV 측정모드로는 후방산란모드를 적용하였다. 후방산란모드 실험에서는 레이저빔이 연장피스톤 하단부에 설치된 반사거울과 피스톤 크라운부에 설치된 광학유리(quartz)의 크기를 시스템에 맞게 적절한 크기를 유지해야 하는데, 본 실험에 있어서는 측정영역을 전체 실린더 직경의 70%로 하여, 축방향 속도성분은 실린더축을 따라 5mm 간격으로 18개 지점, 단면방향 속도성분은 TDC 기준 하단 13mm, 33mm 그리고 53mm 지점에서 반경방향으로 u방향 9개 지점에 대하여 측정하였는데, 한 점에서의 측정데이터수는  $12 \times 10^3$ 개로 하였고, 실험시 데이터 발생율(data rate)은 평균 약 0.8KHz 정도로 하였으며, 실린더 벽근처와 하사점 부근에서는 이보다 낮아서 데이터수를 약간 감소시켰다. 그리고 압축말기의 경사텀블유동장에 대한 이해를 위해서 TDC기준 상단 7mm에서 실린더 중앙단면뿐만 아니라, 흡기밸브중심과 배기밸브중심단면에 대하여서도 측정을 수행하였다. 이상블 평균속도와 rms변동량을 크랭크 각도별로 정량화시키기 위해 사용된 크랭크 각도의 계산폭은 4도이며, 노이즈의 제거를 위하여 크랭크 각도 40도 단위로 직접 그래픽화면을 통하여 노이즈를 필터링하였다.

그리고 산란 입자의 균일한 공급을 위해 흡기 포트전 서지탱크내의 입력을 일정하게 하였으며, 엔진회전수는 1,000rpm, 엔진부하는 전부하영역(WOT)에서 실험을 수행하였다.

### 4. 실험결과

#### 4.1 SCV형상별 유동특성

##### 4.1.1 텀블유동장(종단면의 경우)

Fig.3은 흡입 및 압축과정동안의 실린더내 텀블유동의 생성 및 소멸과정을 보여준다. 기존 흡기포트와 엔진헤드사이에 SCV장치를 부착함에 의해 텀블유동장과 아울러 스웰유동장이 생성되어 압축과정시 실린더 하단에서부터 기존의 순수텀블



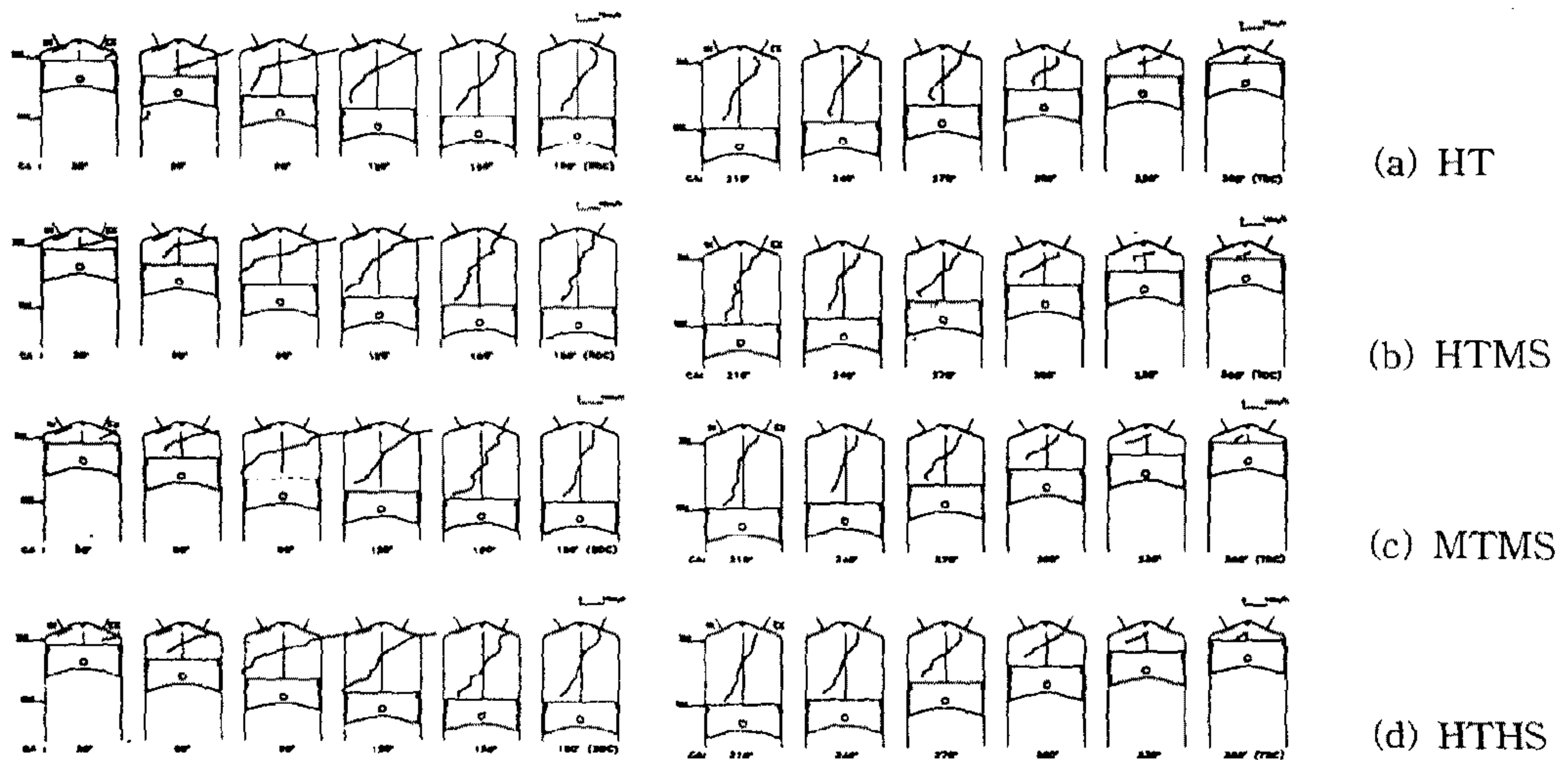


Fig.3 SCV형상별 흡입/압축과정시 텀블유동장

유동의 감쇄를 유발하여 경사텀블유동장을 생성시킴을 알 수 있었다. 텀블유동의 경우, 흡입초기에는 BTDC 10도에서 흡기밸브가 열리고 이어서 연소실 상단에서부터 큰 흡입공기가 제트의 형태로 유입되어 반대편 실린더 벽면에 충돌되면서 텀블유동을 생성하기 위한 주흡입 벌크 유동이 발달하기 시작한다(기존 HT포트는 120도, HTMS, MTMS, HTHS는 90도 부근). 이후 피스톤이 하사점으로 하강하면서 피스톤상단에 텀블유동에 상충되는 와류가 존재하면서 텀블유동을 깨뜨리기 시작하여 압축과정부터는 거의 소멸되는 특성을 보인다. 이때는 피스톤의 움직임 속도는 느리지만 운동방향이 바뀌는 시점이고 실린더 공간도 커지는데, 기존 HT포트에 비해 SCV를 장착한 경우, 지금까지 실린더내 존재해있던 주텀블(main tumble)은 불규칙한 와류의 영향으로 불안정해짐을 알 수 있다. 그리고 압축말기에서의 텀블유동은 팬트루프형인 실린더 헤드의 형상과 압축비, 그리고 엔진회전수등과 같은 관련 인자들의 복합적인 영향으로 소멸되지 않은채, 임의의 방향으로 급격한 속도변화를 일으킨다. 특히 SCV를 장착한 경우 흡입과정에서 생성된 텀블유동의 변형으로 에너지가 한쪽 방향으로 치우쳐 보존됨을 알 수 있었다.

#### 4.1.2 TDC하단 단면스월유동장 (횡단면의 경우)

Fig.4는 TDC아래 3가지 단면에서의 흡입·압축과정동안의 단면유동형태를 보여준다. 기존 HT포트의 경우, 점차 흡입과정이 진행되면서 TDC기준 하단 13mm와 53mm에서의 유동패턴은 서로 반대 방향성을 나타내는데, 이는 실린더내 주위의 소규모적인 텀블유동 방해원인 와류의 미영향으로 실린더내 텀블유동이 뚜렷한 형태로 보존되어짐을 의미한다. SCV를 장착한 경우, 흡입유로 단면적의 감소로 인한 비대칭이고 불규칙적인 강한 흡입초기 유동이 실린더내로 유입된다. 이 경우 단면적이 감소된 흡기밸브편으로 실린더에 접선방향의 속도 성분이 증가하여 급격한 S자형 유동패턴이 생성된다. 이러한 유동은 실린더내 주텀블유동성분에 영향을 미쳐 주텀블유동장을 경사텀블유동장으로 변화시키는 주요인자임을 알 수 있게 해 준다.

#### 4.1.3 TDC상단(7mm) 단면스월유동장 (횡단면의 경우)

실린더직경 기준 중앙단면과 배기밸브측 단면에서는 측정이 가능하나, 그림에서 보듯이 흡기밸브측 단면에서는 흡기밸브의 open으로 인해 측정이 불가능하여 실린더전체의 유동파악에는 다소 어려움이 있었다. TDC 7mm 상단에서의 실린더직경



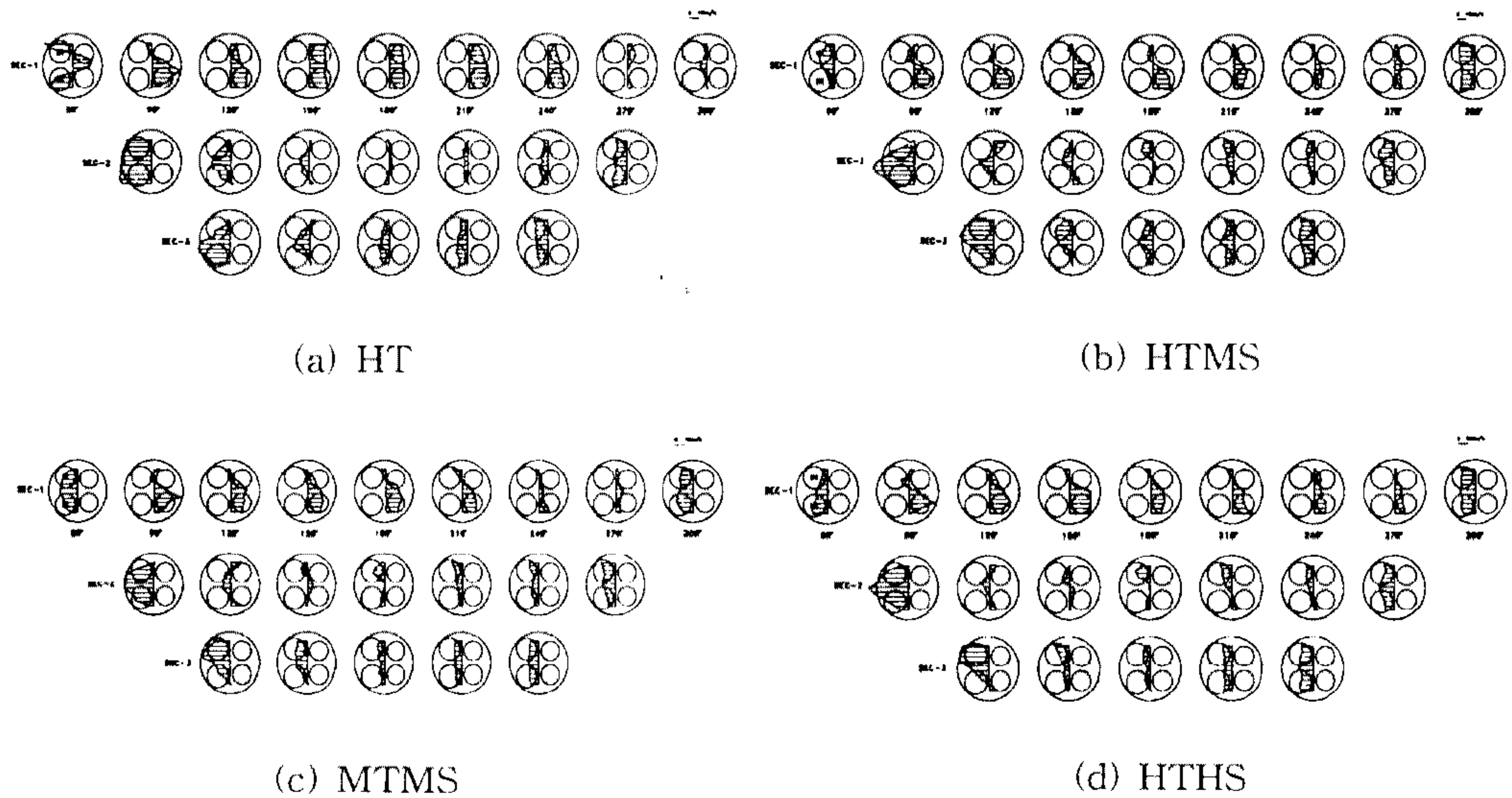


Fig.4 SCV형상별 TDC아래 3단면에서의 단면 스윙유동장

기준 중앙단면, 흡기밸브측 단면 그리고 배기밸브측 단면에서 측정된 유동특징은 다음과 같다.

압축과정 중반까지는 3가지 경우 모두 중앙단면에서는 텀블유동특성인 흡기측에서 배기측으로 진행되는 유동이 생성된다. HTMS의 경우(Fig. 5), 흡기밸브측 단면과 배기밸브측 단면유동을 보면 아래쪽에 위치한 흡기밸브부근에서 빠른 유동이 존재하는데, MTMS와 HTHS에서는 이러한 유속분포의 기울기가 보다 급격함을 알 수 있다. 배기밸브측 단면에서는 유속분포가 거의 일정하나, 아래배기밸브쪽에서는 오히려 속도가 느린 유동이 있음을 알 수 있다. 압축과정말기(300~360도)에서는 HTMS의 경우, 320도 부근에서 흡기밸브측 단면과 배기밸브측 단면유동은 급격히 소멸되며, 330도에서는 스윙유동분포를 보이는데, 흡기밸브측 단면과 배기밸브측 단면에서 더욱 뚜렷해진다. 340도에서는 배기밸브측 단면유동에 비해 흡기밸브측 단면에서 보다 강화된 유동장이 형성된다. 350도에서는 지금까지 중앙단면에서 중심적인 역할을 한 스윙유동분포가 흡기밸브측 단면으로 이동하면서 서서히 소멸되어져 360도에서는 배기측에서 흡기측으로의 유동이 존재함을 알 수 있다. MTMS의 경우, 320도에서 중앙단면에서의 유동이 급격히 소멸되는 대신에 흡·배기밸브측 단면유

동이 상대적으로 큰 유동분포로 존재한다. 330도에서는 3단면에서 전반적으로 뚜렷한 스윙유동이 생성된다. 이후에는 스윙유동의 소멸로 인해 텀블유동만이 연소실내 존재함을 알 수 있다. HTHS에서는 330도에서부터 중앙단면과 배기밸브측 단면유동에서 뚜렷한 스윙유동이 생성되나, 이후에서는 MTMS, HTHS과는 흡기밸브측 단면에서의 유동은 소멸된 채, 중앙단면과 배기밸브측 단면에서 보다 뚜렷한 유동장이 형성됨을 알 수 있다.

## 4.2 해석 파라미터별 유동특성

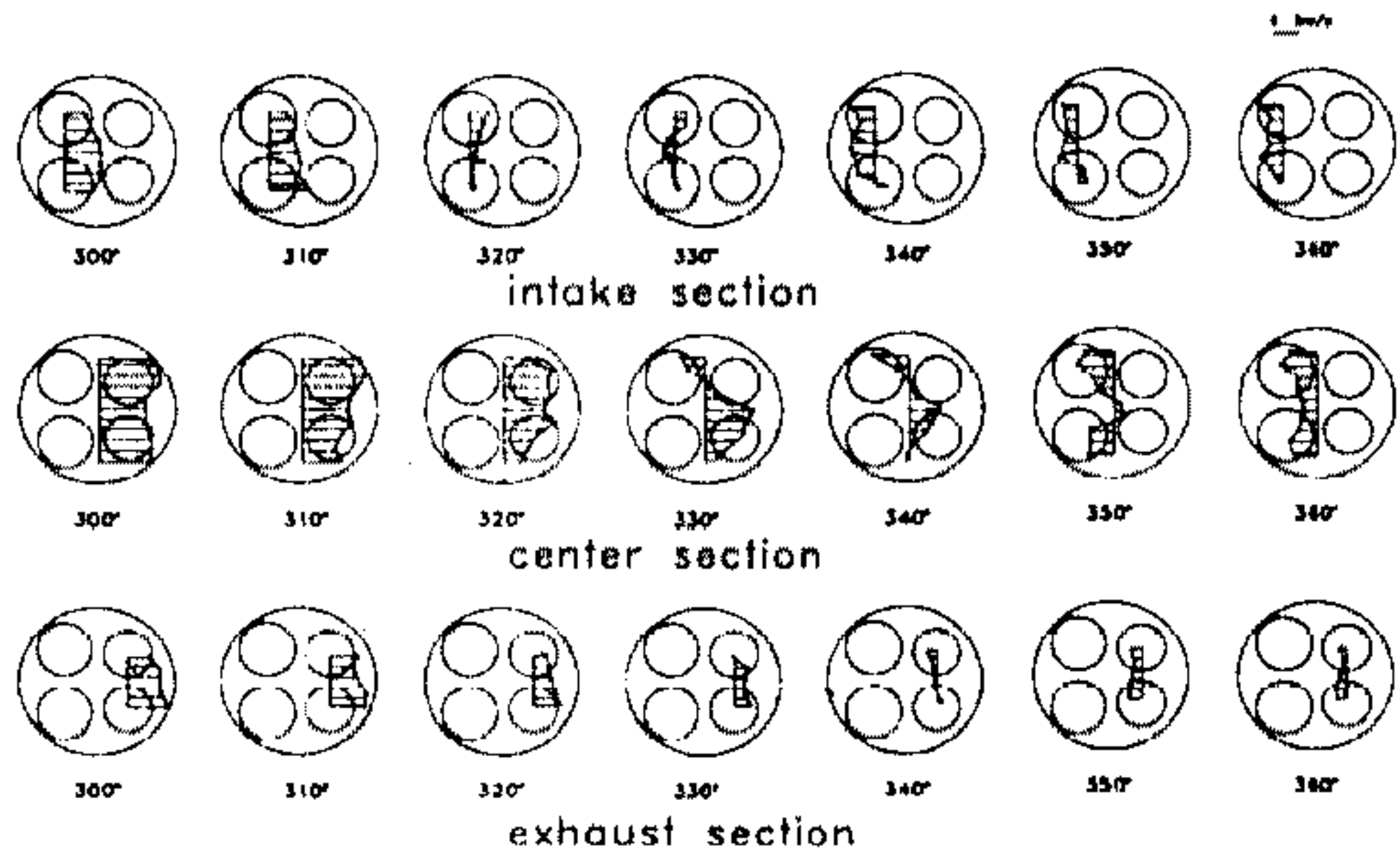
### 4.2.1 스윙모멘트 변화

Fig.6은 4개 포트에 대한 스윙모멘트를 계산한 결과이다. HT의 경우, TDC하단에서는 거의 스윙모멘트가 0부근에 위치하여 스윙유동의 존재가 미약함을 알 수 있다. 그리고 HTMS는 실린더하단 33mm아래에서 뚜렷히 S자형으로 스윙모멘트의 분포를 볼 수 있으며, MTMS는 TDC상단에서 스윙모멘트가 비교적 큰 값을 보이며, HTHS는 TDC하단 13mm 지점에서 큰 스윙모멘트를 나타냄을 알 수 있다.

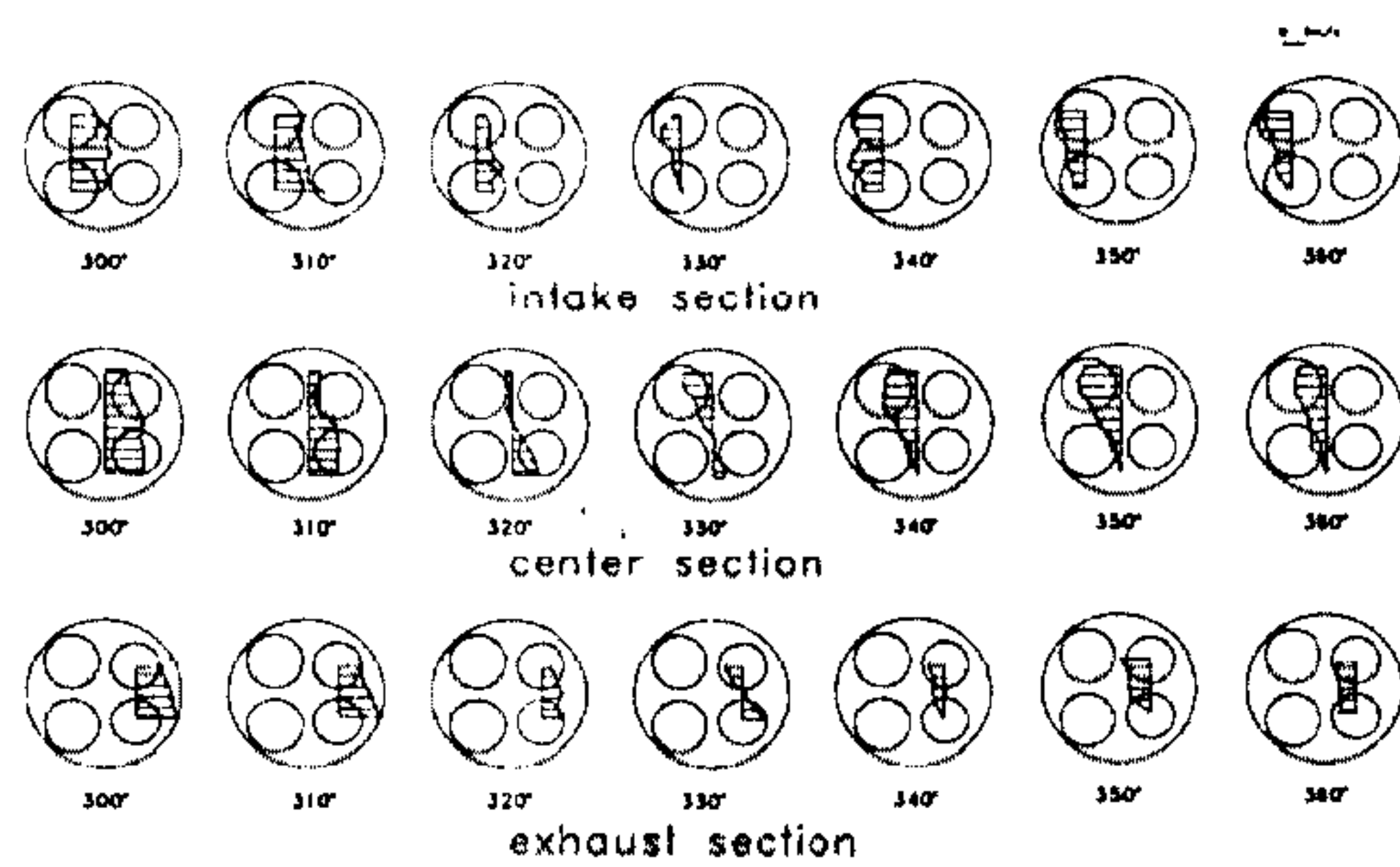
### 4.2.2 경사텀블각도 변화

경사텀블각 산출에 사용된 텀블모멘트는 구해진 텀블속도의 각운동량값으로, 그리고 스윙모멘

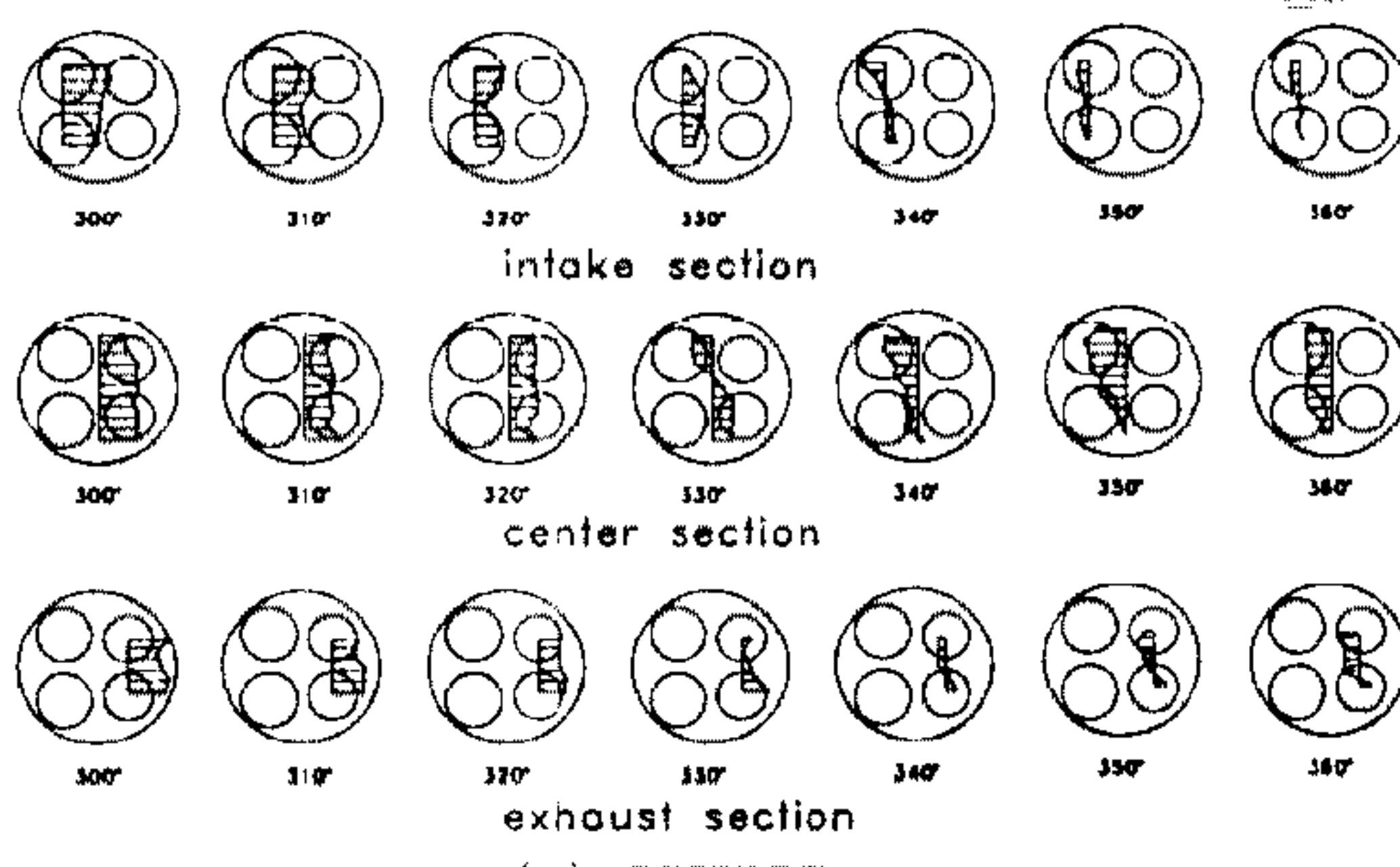




(a) HTMS



(b) MTMS

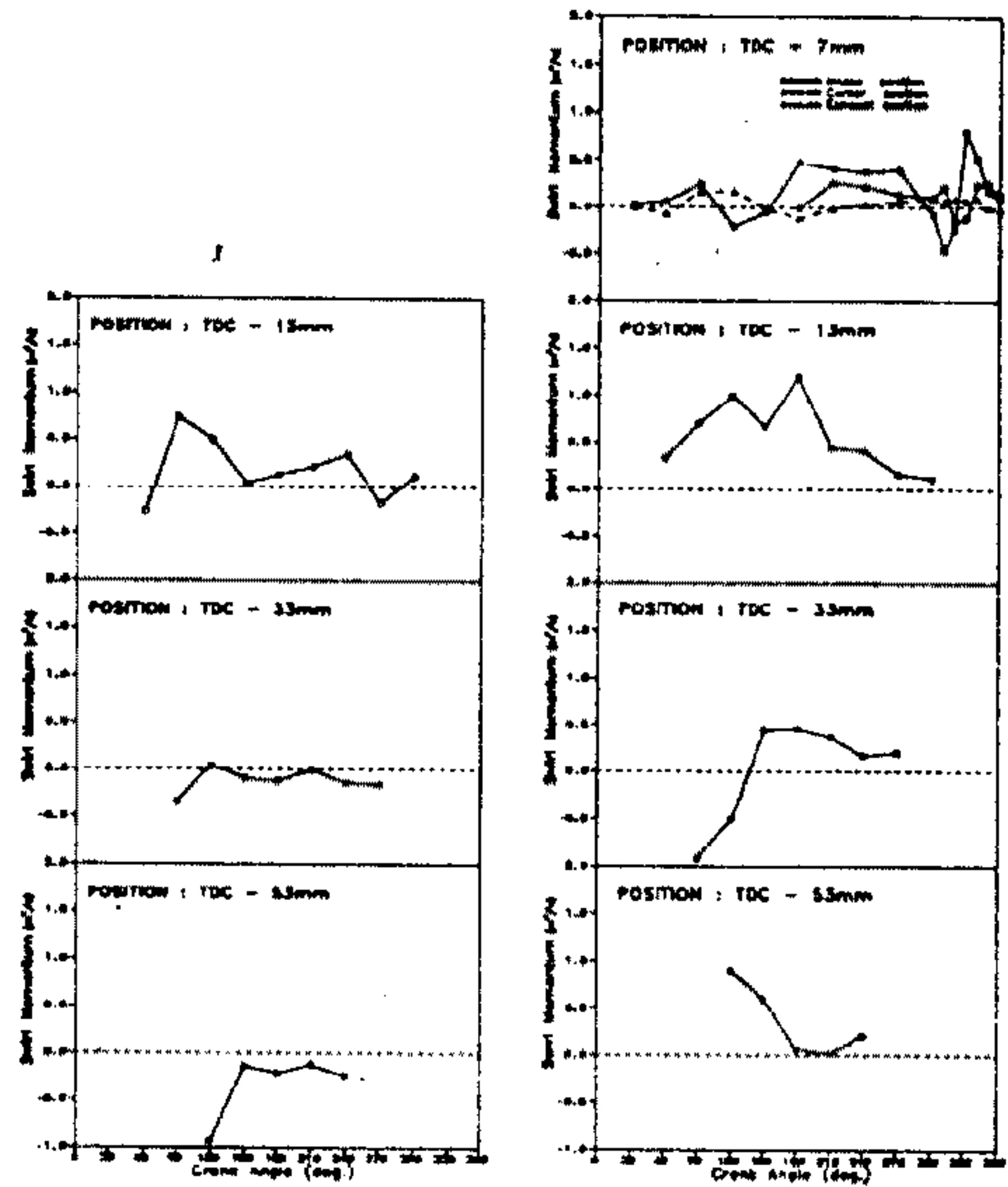


(c) HTHS

Fig.5 압축말기시 TDC 상단에서의 단면스윙 유동장

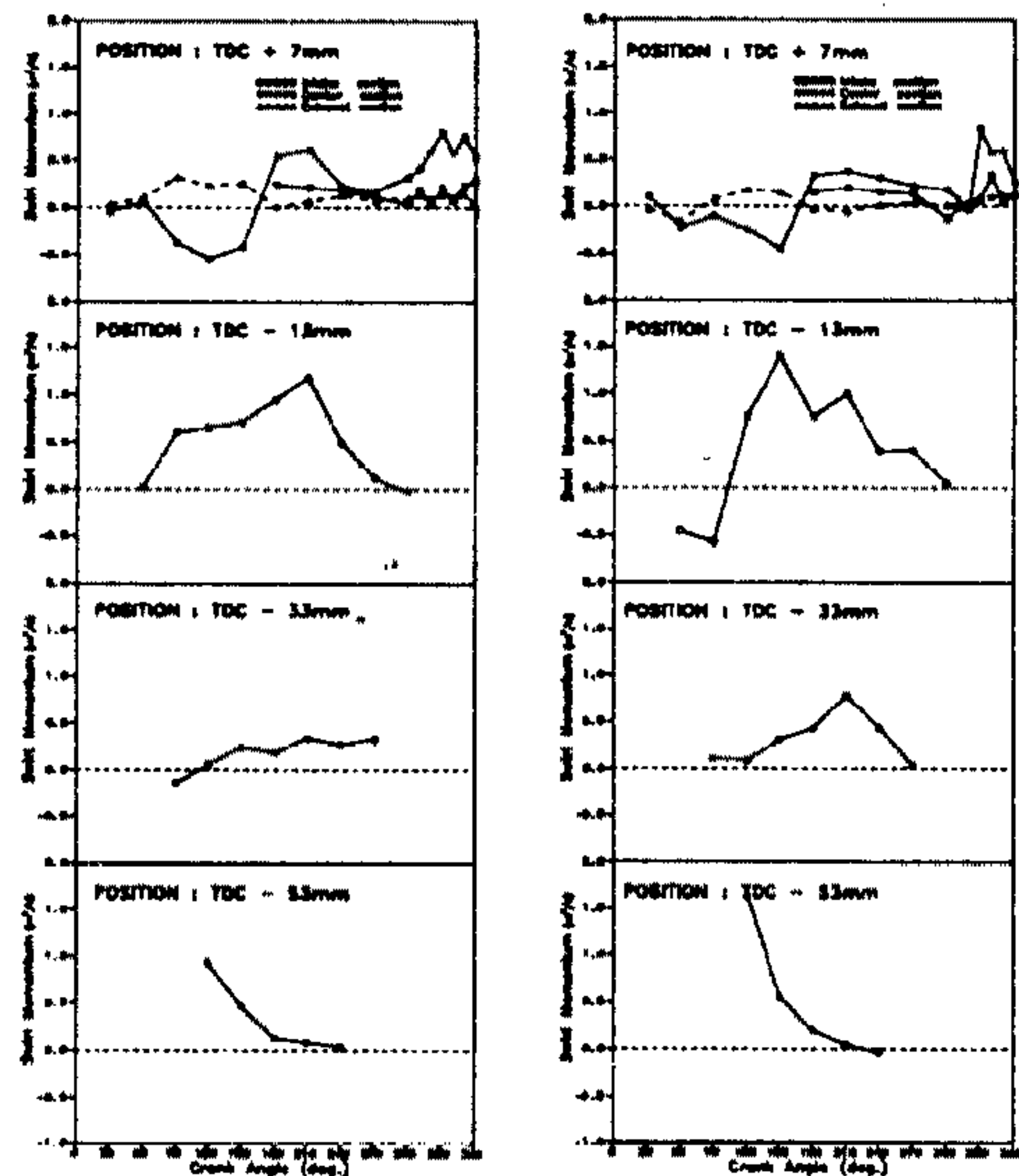
트는 주 스윙유동 단면인 TDC하단 13mm지점에서 스윙속도의 각운동량값으로 구하였으며, 이들의 역tangent값을 경사텀블각도로 정의하였다.

Fig.7은 4개포트에 대한 텀블유동의 체계적인 해석을 위해 실린더내 텀블속도중심에 대한 텀블모멘트를 계산한 결과이다. 4개포트 모두 흡입과정 중반이후에서는 소멸되고 있는데, SCV를 장착한 경우는 기존HT포트에 비해 다소 완만하게 감쇄되어 조금 큰 값의 텀블모멘트값을 유지함을 알 수 있다. 특히 최대 텀블모멘트가 나타나는 시



(a) HT

(b) HTMS



(c) MTMS

(d) HTHS

Fig.6 SCV형상별 스윙모멘트 변화

점은 4개포트 모두 120도부근이며, 이때 상대적으로 보다 큰 값을 가질수록 감쇄 기울기도 완만해짐을 알 수 있는데, 이는 흡입유량과 피스톤에 의한 관성작용 그리고 실린더내 이미 유입된 유동의 거동상태 등 복합적 요인들로 인한 것으로 판단된다.

Fig.8은 4개포트에 대한 TDC하단 13mm지점

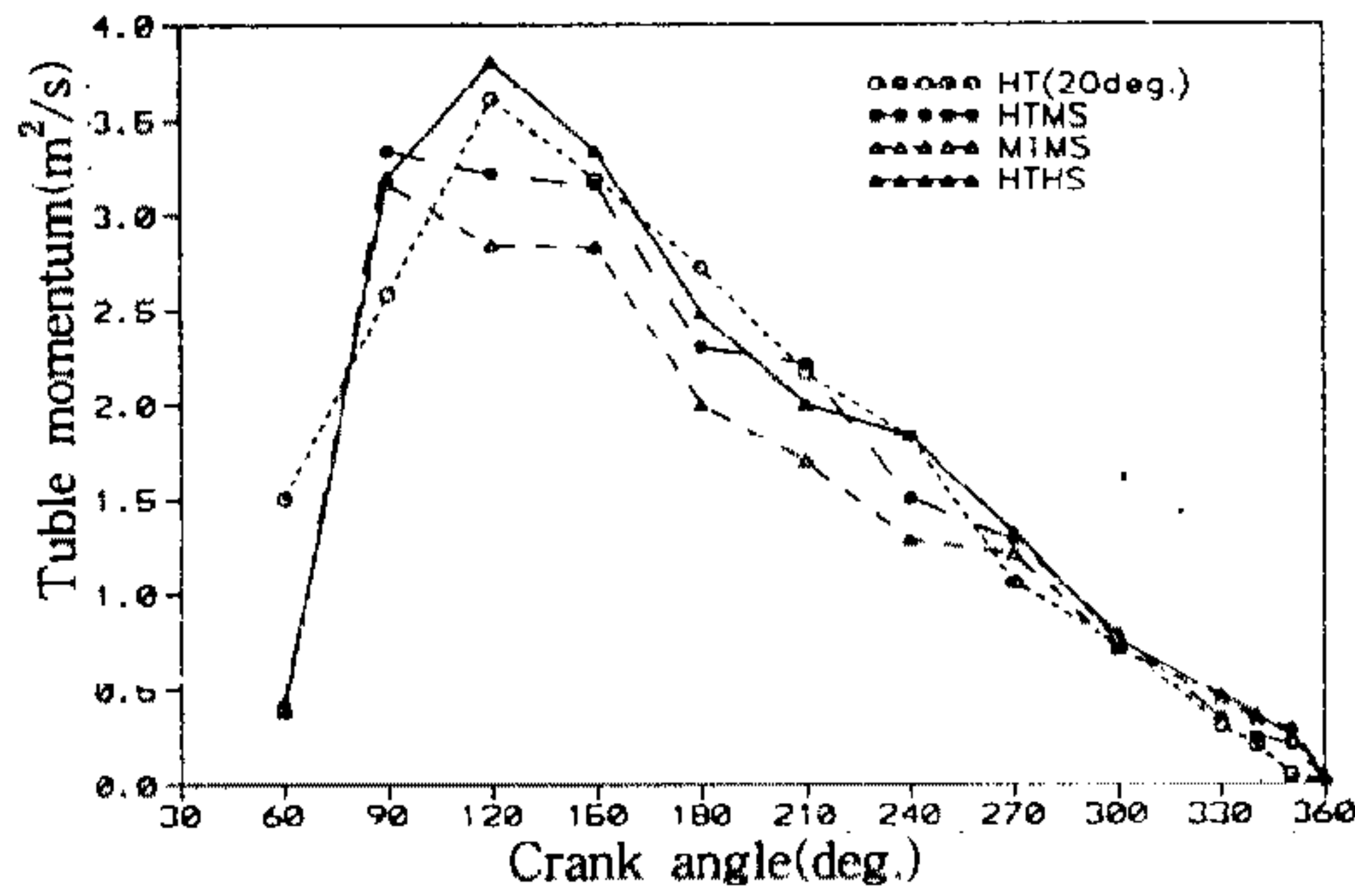


Fig.7 SCV형상별 텀블모멘트 변화

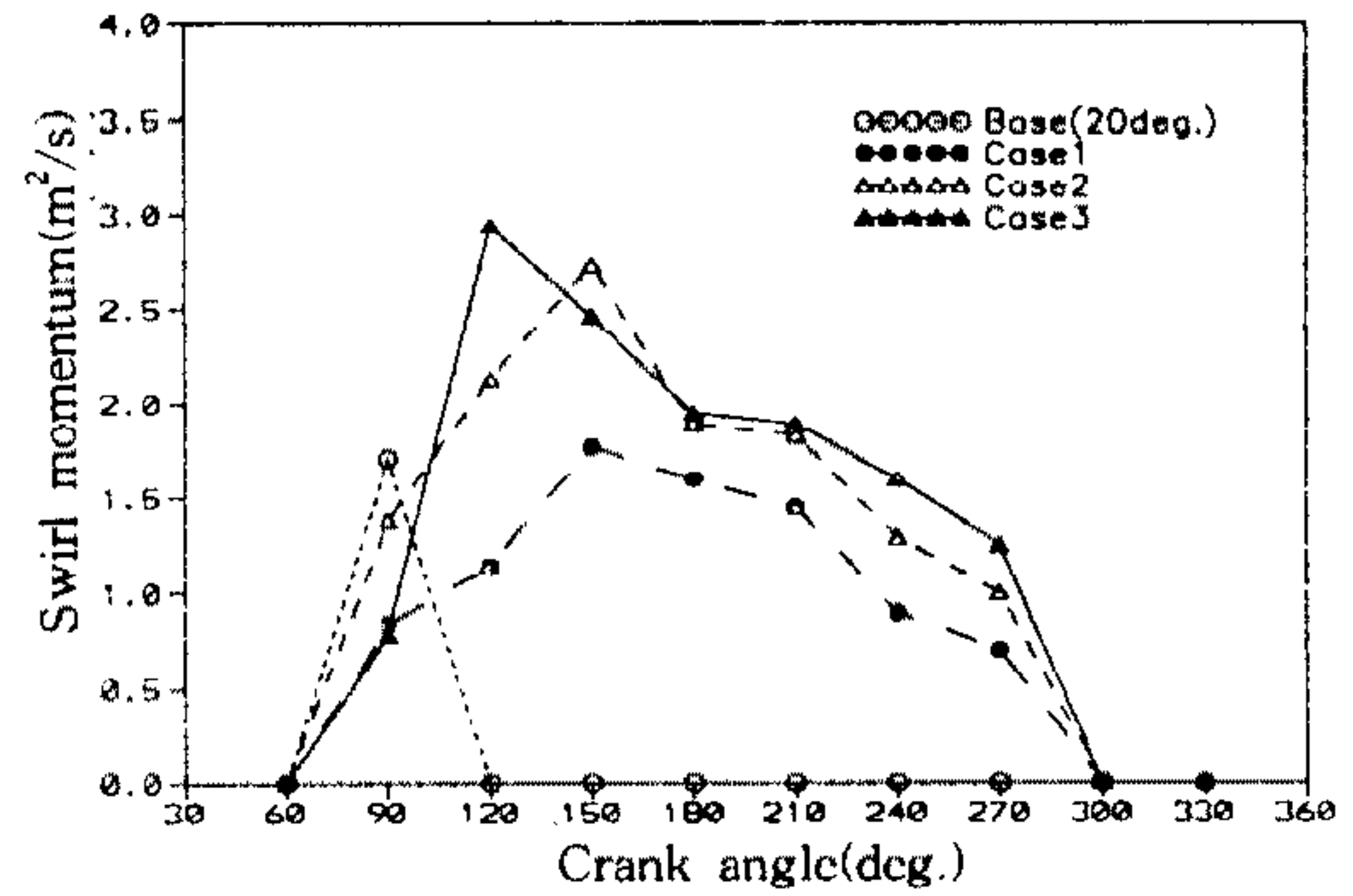


Fig.8 SCV형상별 스윙모멘트 변화

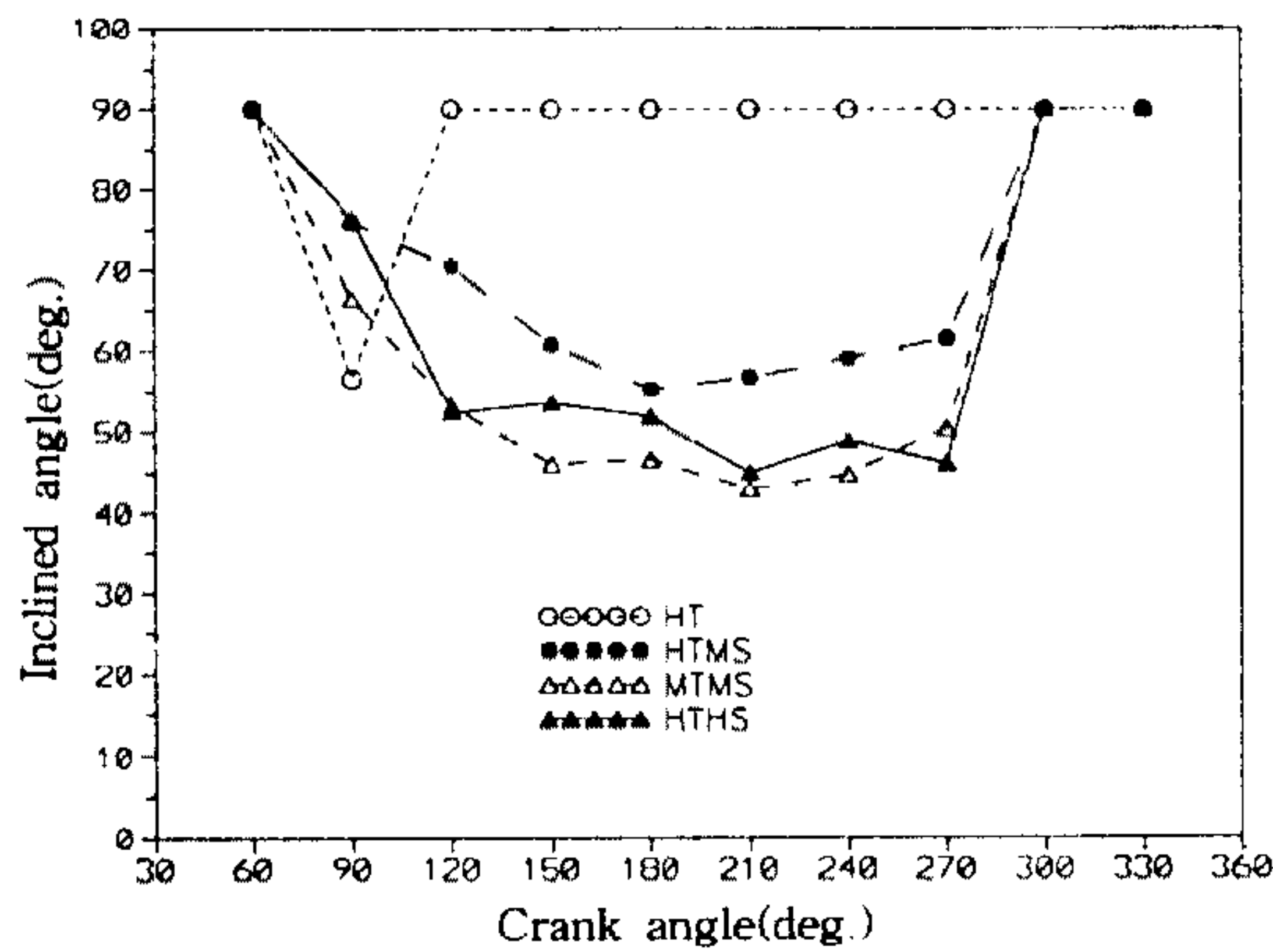


Fig.9 SCV형상별 경사텀블각 변화

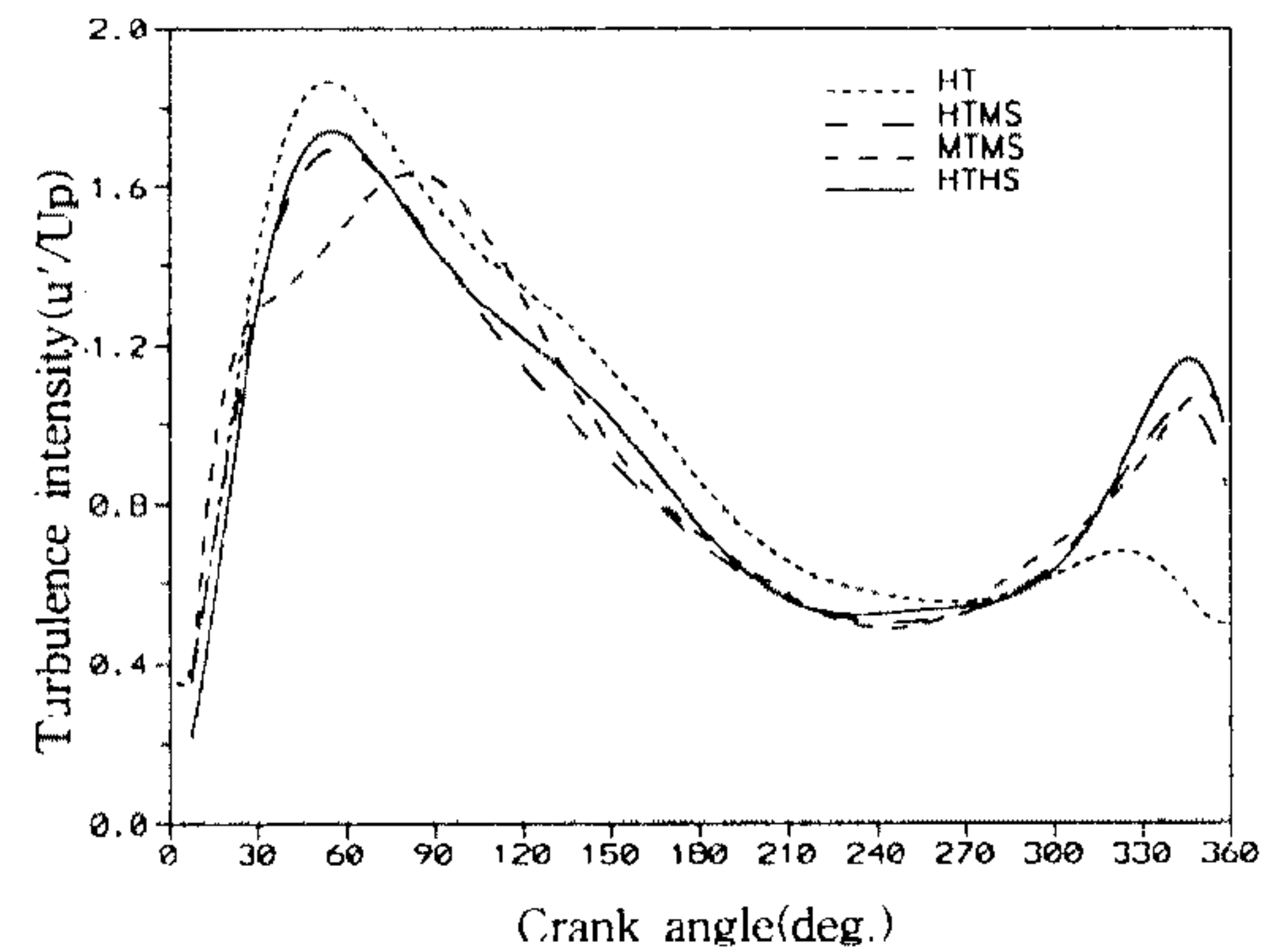


Fig.10 SCV형상별 공간평균된 난류강도 변화

의 스윙모멘트를 비교한 결과이다. SCV장치의 영향을 뚜렷이 알 수 있게 해 주는데, HTHS, MTMS, HTMS 그리고 HT포트순으로 스윙모멘트가 강하게 존재하고 있다.

Fig.9는 4개포트에 대해 구해진 텀블 및 스윙모멘트에 의한 경사텀블각을 계산한 결과이다. 흡입초기(60도)부터 압축중반(270도)사이에서의 평균 경사텀블각도는 HT, HTMS, MTHS 그리고 MTMS포트순으로 점점 더 경사진 스윙유동장을 형성시킴을 알 수 있다.

#### 4.2.3 공간평균화된 난류강도 변화

Fig.10은 4개포트에 대한 크랭크각도에 따른 난류강도의 변화를 나타낸 것이다. 여기서의 난류강도는 평균텀블속도의 변동속도값에 대한 rms (root mean square)값을 전체 텀블측정점에 대

하여 공간 평균화한 것으로 해당 피스톤속도로 무차원하였다. 흡입과정시 난류강도의 변화는 4개 모두 비슷한 경향을 유지하다가 흡입과정 말기에서는 급격히 빠른 속도로 소멸됨을 볼 수 있다. 이후 압축과정이 진행되면서 피스톤의 상승과 실린더헤드의 형상의 상호작용으로 점차 증가되어, SCV장치를 부착한 경우가 그렇지 않는 경우에 비해 약 2배 정도의 증가를 보이는데, 이후 증가된 난류강도는 TDC를 지나면서 완전히 소멸됨을 알 수 있다. 특히 스윙비가 최대인 HTHS의 경우는 압축과정 후반부에 난류생성이 뚜렷이 나타나는데, 이는 텀블유동 중심의 이동에 따른 강한 불규칙적인 와류의 존재와 스윙강도에 의한 경사텀블이 압축과정 동안의 난류증가에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.



## 5. 결 론

4-밸브 펜트루프형 연소실내 경사텀블유동 변화를 위하여 서로 다른 4가지 SCV를 제작하여 유동장을 LDV를 이용하여 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 엔진모터링 실험결과, 4가지 SCV형상별 구해진 SCV흡입초기(60도)부터 압축중반(330도)사이에서의 평균 경사텀블각도와 압축중반(270도)부터 압축말기(360도)사이에서의 평균 난류강도값은 다음과 같다.

SCV형상 파라미터	HT	HTMS	MTMS	HTHS
평균 경사텀블각도(°)	86.7	74.1	65.9	71.3
평균 난류강도(m/s)	0.60	0.79	0.81	0.83

흡기포트 유입각 20도에 대한 4가지 SCV형상별 장착에 따른 효과는 스월비와 텀블비가 상대적으로 큰 값을 유지하면서 약 50% 정도 조합될 경우, 가장 최적의 유동장이 형성될 수 있음을 알 수 있었다.

- 2) HT포트의 경우, 구해진 단면스월모멘트값이 상대적으로 적음을 알 수 있는데, 이것으로 실린더내 텀블유동이 스월유동보다 훨씬 지배적임을 확인할 수 있었고, SCV를 가진 경우, 경사텀블유동장의 변환요인인 흡기유로 단면적감소 및 초기 편심유동으로 스월모멘트가 S자형으로 분포되어 주텀블유동장을 변형시킴을 알 수 있었다. HTMS포트의 경우, 흡기유로 단면적 감소 및 초기 편심유동으로, 주텀블유동에 대한 불규칙한 와류에 의한 영향으로 변형텀블유동장이 형성되며, TDC상단에서의 스월유동의 중심은 흡기측으로 치우침을 알 수 있었다. MTMS포트의 경우, TDC상단에 단면 스월모멘트값이 뚜렷이 분포되는 현상으로부터 안정화된 스월유동이 존재함을 유추할 수 있으며, TDC상단에서의 스월유동의 중심은 실린더 중앙부에 위치함을 알 수 있었다. HTHS포트의 경우, 다른 포트에 비해 초기에 스월유동이 TDC하단 13mm아래에 뚜렷이 분포됨을 알 수 있으

며, TDC상단에서의 스월유동의 중심은 배기측에 위치함을 알 수 있었다.

- 3) 위에서 언급한 압축말기시, 경사텀블유동중심의 위치해석은 이후의 연소현상해석에 중요한 파라미터인데, 이것으로서 중앙단면에서만 측정했을때에는 알 수 없었던 다른 2차적인 에디의 존재 및 이러한 비대칭 유동장의 경사짐을 흡·배기단면의 측정을 통해 확인하였다.
- 4) SCV를 이용한 경사텀블의 경우, 압축말기 피스톤이 상승함에 따라 스월유동이 나타나게 되어 순수텀블의 경우보다 압축말기 난류강도를 현저히 증가시켰다. 또한 경사텀블의 형태 및 강도에 따라 난류 생성에 다른 영향을 주며, MTMS와 HTHS의 형태가 난류생성에 가장 유리함을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

1. T. M. Dyer, "New Experimental Techniques for In-Cylinder Engine Studies", SAE Paper 850396, 1985.
2. K. Lee, T. Urushihara, et al., "Analysis of Gas Flow Fields Generated by Butterfly Type Swirl Control Valve.", JSAE Paper 9304365, 1993.
3. 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.
4. K. Y. Kang, J. W. Lee and J. H. Baek, "Effects of Tumble Adaptor Configurations on the Intake Tumble Characterization", Transactions of Journal of Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 2, No. 5, pp. 66~73, 1994.
5. J. C. Kent, et al., "Observations on the Effects of Intake Generated Swirl and Tumble on Combustion Duration", SAE Paper 892096, 1989.



6. K. Kuwahara, et al., "TDC Flow Field Structure of Two-Intake-Valve Engines with Pentroof Combustion Chamber", JSME Series B, Vol. 36, No. 4, 1993.
7. C. Arcoumanis, Z. Hu and J. H. Whitelaw, "Steady Characterization of Tumbling-Generating Four-valve Cylinder Head", Proc. IMechE, Vol. 207, 1993.
8. 강건용 외, "흡기포트 및 연소실 설계기술개발", G7차세대자동차기술개발사업, 한국기계연구원 보고서, 1997.