

〈논 문〉 SAE NO. 953727

## 배기관 형상에 따른 2행정기관의 소기효율 및 성능 예측

A prediction of the scavenging efficiency and the performance of a two-stroke SI engine with the different exhaust systems

정진은\*  
J. E. Chung

### ABSTRACT

In this paper, the numerical simulation of the method of characteristics for a two-stroke SI engine was carried out, and the scavenging efficiency and the performance of single engine with two types of exhaust system, that is, a pipe exhaust system and a tuned exhaust system, were predicted and compared. The conclusions are obtained as follows. (1) The method of characteristics of homotropic flow considering the friction and the variation of area is useful to predict the scavenging efficiency and the performance of the two-stroke engine. (2) The shape of exhaust system effects directly on the scavenging and the trapping efficiency. (3) A tuned exhaust system consisted of the diffuser and the convergent nozzle makes the plugging pulse and therefore enhances the scavenging and the trapping efficiency. (4) It may be possible to design the optimum exhaust system by using the plugging pulse.

주요기술용어 : Two-stroke Engine(2행정기관), Method of Characteristics(특성방법), Scavenging Efficiency(소기효율), Tuned Exhaust System(조율 배기시스템), Plugging Pulse(플러깅 펄스)

### 1. 서 론

현대 산업사회의 근간이 되는 동력을 발생시키는 원동기로써 내연기관의 역사는 1세기가 넘어가고 있다. 이러한 내연기관은 21세기를 바라보는 현재에는 GR(Green Round) 시대를 대비하는 획기적인 기술 변화가 요구되고 있다. 이러한 기술 변화 가운데 부각되고 있는 것 중에 하나가 2행정 기관이다.

2행정 기관은 새로운 개념의 기관이 아니라 19세기 말 영국의 Dugald Clerk 경에 의하여 발명되었고 1981년 Joseph Day에 의하여 전통적인 크랭크케이스 압축 형태의 2행정 기관이 제작되었다.<sup>1)</sup> 2행정 기관은 기관중량당 출력이 높으며 구조가 간단하여 제조비용이 절감되는 장점이 있어서 대형 선박, 소형 모터사이클, 특수 목적용 차량 등에 광범위하게 사용되어 왔다. 그러나 자동차용으로는 연료소비율이 나쁘고 미연 탄화

\* 정회원, 한국기술교육대학 기계공학과

수소 배출이 많은 단점으로 사용이 제한되었다. 1986년 Ralph Sarich이 Orbital Combustion Process Engine<sup>2)</sup>을 개발하므로 자동차용 기관으로 2행정 기관이 다시 부각되고 있다. 이 Orbital Engine은 압축공기 인젝터(low cost compact pneumatic direct injector), 조율 배기시스템(low thermal inertia tuned exhaust system) 등을 채택하여 2행정 기관의 장점을 그대로 유지하면서 연료소비율 및 유해배기가스 배출량을 선진국의 까다로운 규제치를 만족시키도록 설계하여 제작하므로 2행정 기관의 새로운 가능성을 제시하고 있다. 이와 함께 미국의 GM, FORD, CHRYSLER, 유럽의 DAIMLER-BENZ, VOLKSWAGEN, PEUGOET, RENAULT, FIAT, 그리고 일본의 TOYOTA, HONDA, SUBURU 등에서 2행정 기관에 대한 연구를 진행하고 있다.<sup>3)</sup>

2행정 기관에서는 흡기과정과 배기과정이 동시에 일어난다. 이것은 이 기관의 특징인 동시에 단점이 된다. 동시 흡배기 방식은 소기포트(transfer port)와 배기포트(exhaust port)가 동시에 열리는 기간이 존재하므로 완벽한 흡입 및 배기 작용이 어렵다. 이러한 동시 흡배기 작용을 소기(scavenging)이라 부르고 소기효율은 2행정 기관의 성능 및 배기가스 성분에 절대적인 영향을 끼친다. 그러므로 소기효율에 직접 영향을 주는 배기시스템의 설계는 특히 2행정 기관에서 중요하다. 이에 대한 연구는 Blair,<sup>4)</sup> Benson,<sup>5)</sup> Landfahrer<sup>6)</sup> 등에 의하여 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 크랭크케이스 압축 형태의 단기통 2행정 기관에 대하여 특성방법(Method of Characteristics)을 사용하여 가스역학적으로 해석하므로 소기효율 및 성능을 예측하고 배기관 형상이 이들에 미치는 영향을 분석한다.

## 2. 사이클 시뮬레이션

### 2.1 밀폐 사이클

압축, 연소 및 팽창과정의 실린더에서 소기 및 배기포트가 닫혀있는 기간과 압축과정의 크랭크케이스에서 흡입 및 소기포트가 닫혀져 있는 기

간을 밀폐 사이클이라 한다. 압축 및 팽창과정에서는 등엔트로피 과정으로 가정한다. 연소과정에 대하여 다음과 같은 간단한 열발생모델<sup>7)</sup>(heat release model)을 사용한다.

$$q = 3 \frac{q_{max}}{\alpha_p} (\alpha - \alpha_{ign})$$

$$; \alpha_{ign} < \alpha < \alpha_{ign} + \frac{1}{3} \alpha_p$$

$$q = -\frac{5}{2} \frac{q_{max}}{\alpha_p} (\alpha - \alpha_{ign}) + \frac{11}{6} q_{max}$$

$$; \alpha_{ign} + \frac{1}{3} \alpha_p < \alpha < \alpha_{ign} + \frac{2}{3} \alpha_p$$

$$q = -\frac{1}{2} \frac{q_{max}}{\alpha_p} (\alpha - \alpha_{ign}) + \frac{1}{2} q_{max}$$

$$; \alpha_{ign} + \frac{2}{3} \alpha_p < \alpha < \alpha_{ign} + \alpha_p$$

여기서  $q$ 는 열발생율(heat release rate, J/deg),  $q_{max}$ 는 최대열발생율,  $\alpha$ 는 크랭크각도,  $\alpha_{ign}$ 는 점화시기,  $\alpha_p$ 는 열발생기간을 나타낸다.

### 2.2 개방 사이클

실린더, 크랭크케이스, 흡기관, 소기관 및 배기관에서 흡입, 소기 또는 배기포트가 열려져 있는 기간을 개방사이클이라 한다. 실린더와 크랭크케이스에서는 정압비열과 정적비열을 온도의 함수로 가정하고 에너지보존 및 질량보존법칙을 사용하며 흡기관, 소기관 및 배기관에서는 비정상(unsteady) 가스유동을 특성방법으로 해석한다. 이때 마찰 및 단면적 변화를 고려한 homentropic flow에 대한 방법으로 Riemann variables  $\lambda, \beta$ 에 대하여 다음과 같은 관계식을 사용한다.

$$\lambda_R' = \lambda_p + d\lambda$$

$$\beta_R' = \beta_p + d\beta$$

여기서 하첨자  $R, P$ 는 공간좌표이고 상첨자 '는 시간좌표이며  $d\lambda$ 와  $d\beta^s$ 는 다음과 같다.

$$d\lambda = -\frac{(k-1)}{2} \frac{2fL}{D} U^2 \frac{U}{|U|} \left\{ 1 - (k-1) \frac{U}{A} \right\} dZ$$

$$-\frac{(k-1)}{2} \frac{AU}{F} \frac{dF}{dX} dZ$$

$$d\beta = +\frac{(k-1)}{2} \frac{2fL}{D} U^2 \frac{U}{|U|} \left\{ 1 + (k+1) \frac{U}{A} \right\} dZ$$

$$-\frac{(k-1)}{2} \frac{AU}{F} \frac{dF}{dX} dZ$$

이때  $k$ 는 비열비,  $f$ 는 마찰계수,  $L$ 은 길이,  $D$ 는 직경,  $F$ 는 면적이고,  $U, A$ 는 속도와 음속의 무차원수이며  $dX, dZ, dF$ 는 각각 공간, 시간, 면적의 변화량이다.

소기효율  $\eta_s$ 에 대하여 실험에 근거하여 얻어진 다음과 같은 Benson-Brandham 모델<sup>7)</sup>을 사용한다.

$$\eta_s = 1 - e^{(M * SR + C)}$$

여기서  $SR$ 은 소기율(scavenge ratio)이고,  $M$  및  $C$ 는 각각 실험으로부터 얻어진  $-1.6325$ 와  $0.1397$ 을 사용한다.<sup>7)</sup>

### 2.3 모델 기관 및 배기 시스템

크랭크케이스에서 압축되고 피스톤 운동에 의하여 흡입, 소기 및 배기 포트의 개폐가 조절되는 전통적인 2행정 기관의 특징을 갖는 400cc의 단기통 기관을 모델 기관으로 선정한다. 기관의 상세제원은 Table 1에서 보여준다. 또한 이 기관은 공연비가 13이며 WOT(wide open throttle) 상태로 운전된다.

2행정 기관은 특히 소기 및 배기 과정이 기관 성능에 절대적인 영향을 미친다. 그러므로 포트 개폐시기, 포트 형상 및 배열, 배기시스템 형상 등이 중요하다. 본 연구에서는 이 중에서 배기 시스템의 형상이 소기효율 및 기관 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 서로 다른 형태의 2가지 배기시스템을 채택한다. 하나는 소음기형 상자가

Table 1 Specifications of model engine

item	specification
bore × stroke(mm)	85.0×70.0
connecting rod(mm)	125.0
trapped compression ratio	6.7
crankcase compression ratio	1.45
port	
exhaust, open(°ATDC)	96.0
close(°ATDC)	264.0
no. of ports	1
transfer, open(°ATDC)	118.0
close(°ATDC)	242.0
no. of ports	6
inlet, open(°BTDC)	60.0
close(°ATDC)	60.0
no. of ports	1
pipe	
transfer, length(mm)	90.0
area ratio	1.35
inlet, length(mm)	200.0
carburetter diameter(mm)	34.0

Table 2 Specifications of two exhaust systems

item	type	pipe	tuned
		exhaust system	exhaust system
length			
L1(mm)		400.0	75.0
L2(mm)		400.0	500.0
L3(mm)			200.0
L4(mm)			560.0
L5(mm)			75.0
diameter			
D1(mm)		43.0	43.0
D2(mm)			86.0
D3(mm)			38.0

부착된 단순 배기관 시스템이며 Fig.1에서 개략도를 보여준다. 다른 하나는 파이프, 디퓨저(diffuser) 및 수축노즐(convergent nozzle)으로 구성된

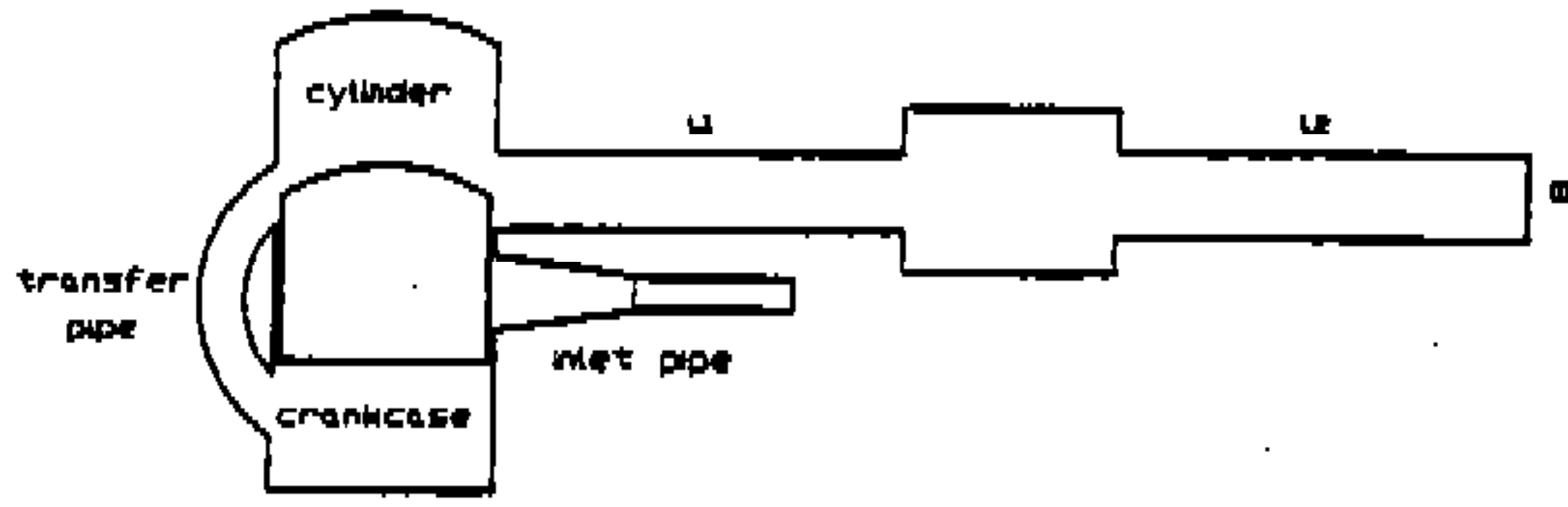


Fig.1 Schematic representation of a pipe exhaust system

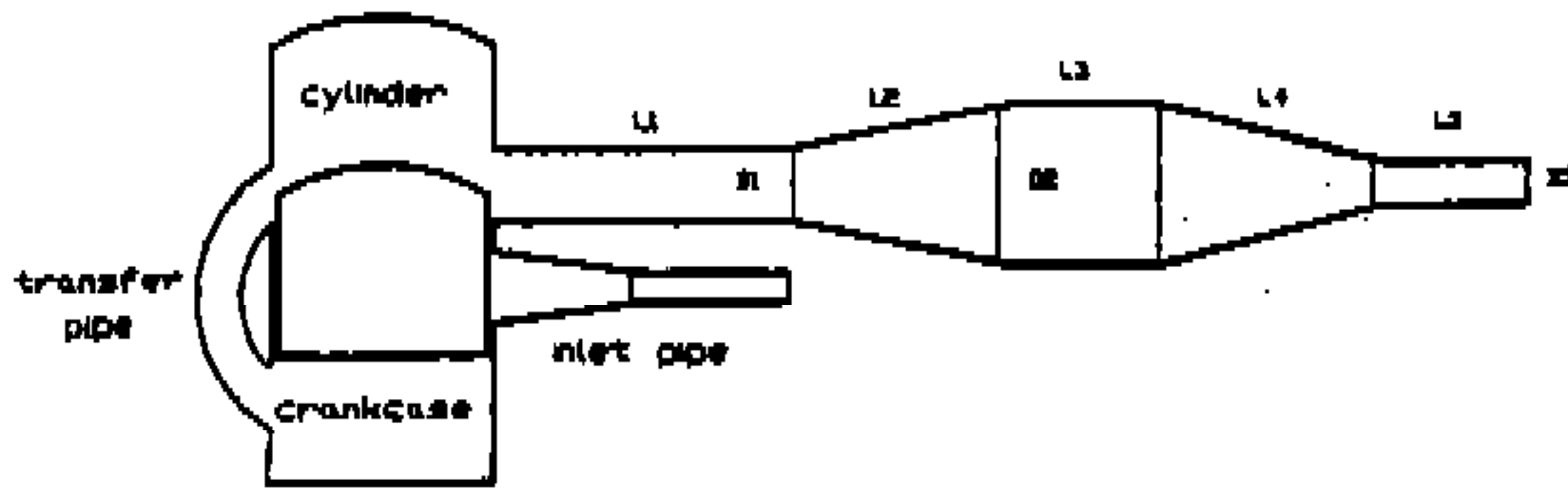


Fig.2 Schematic representation of a tuned exhaust system

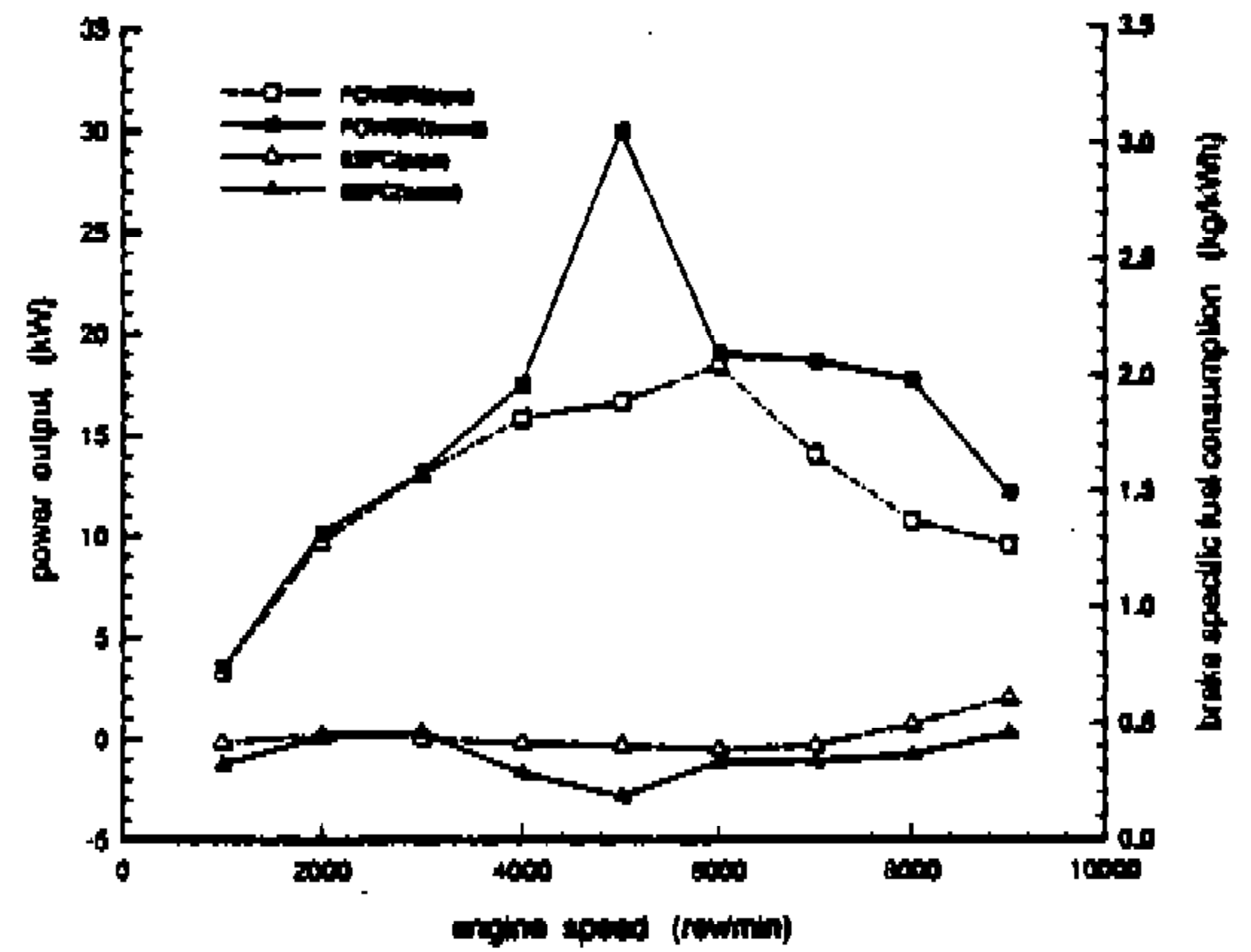


Fig.4 Comparisons of predicted performance of two exhaust systems

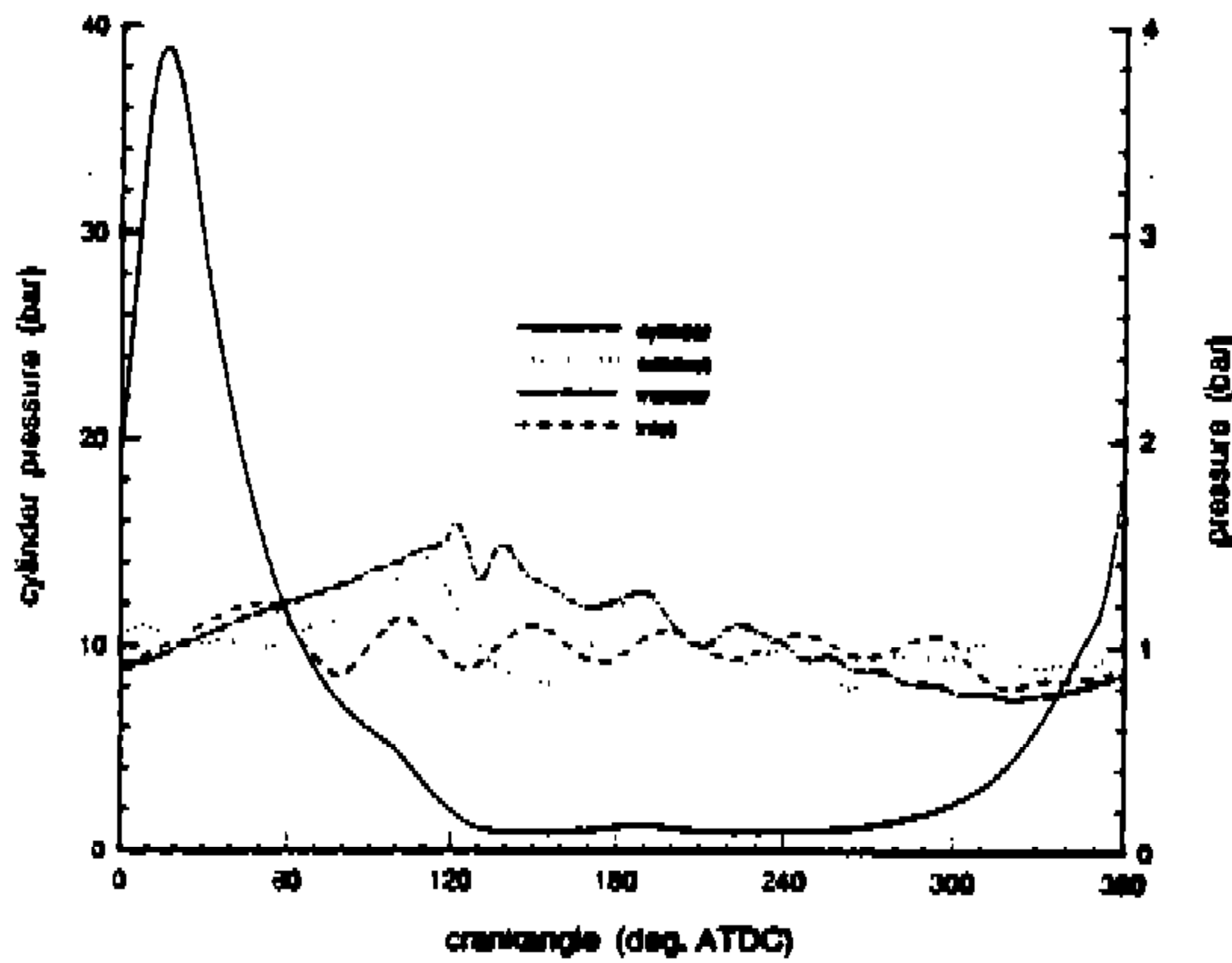


Fig.3 Predicted pressures of cylinder, and exhaust, transfer and inlet pipe at 3000 rpm

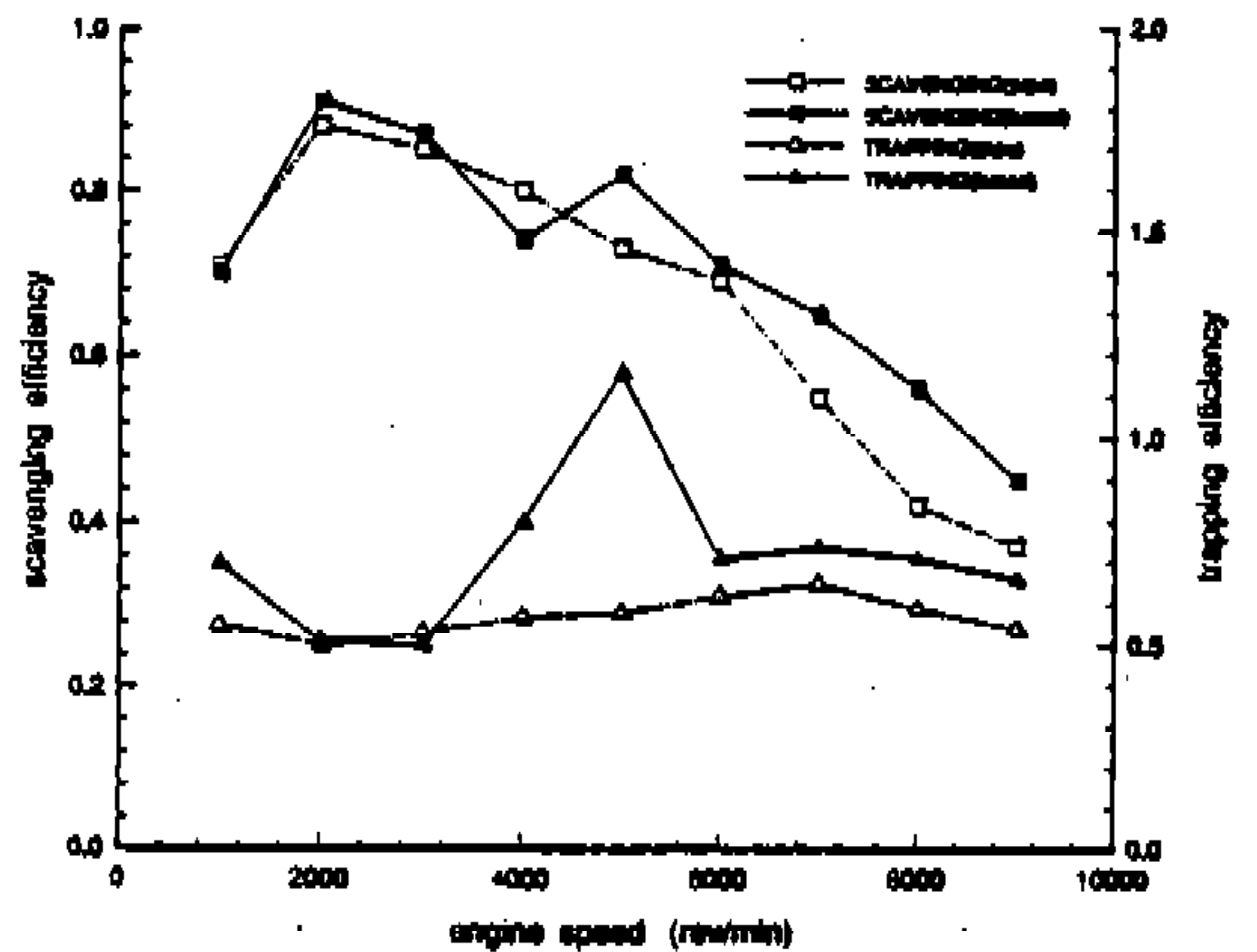


Fig.5 Comparisons of predicted scavenging and trapping efficiency of two exhaust systems

조울 배기시스템이며 Fig.2에서 개략도를 보여준다. 각 배기시스템의 제원은 Table 2와 같다.

### 3. 수치해석 결과 및 토론

Fig.3은 기관회전수 3000rpm에서 조울 배기시스템을 갖는 기관의 실린더, 배기관, 소기관 및 흡입관에서의 압력을 나타내고 있다. 실린더의

최대압력은 37.3bar이고 16.4°ATDC에서 발생하며 배기관, 소기관 및 흡입관의 압력은 대기압인 1 bar 전후의 값을 가지고 맥동하는 모습을 보여주고 있다. Fig.4에서는 기관회전수에 따른 출력 (power output) 및 제동연료소비율 (brake specific fuel consumption)을 단순 배기관 시스템과 조울 배기시스템에 대하여 나타내고 있다. 단순 배기관 시스템에 비하여 조울 배기시스템의 출력이 최소



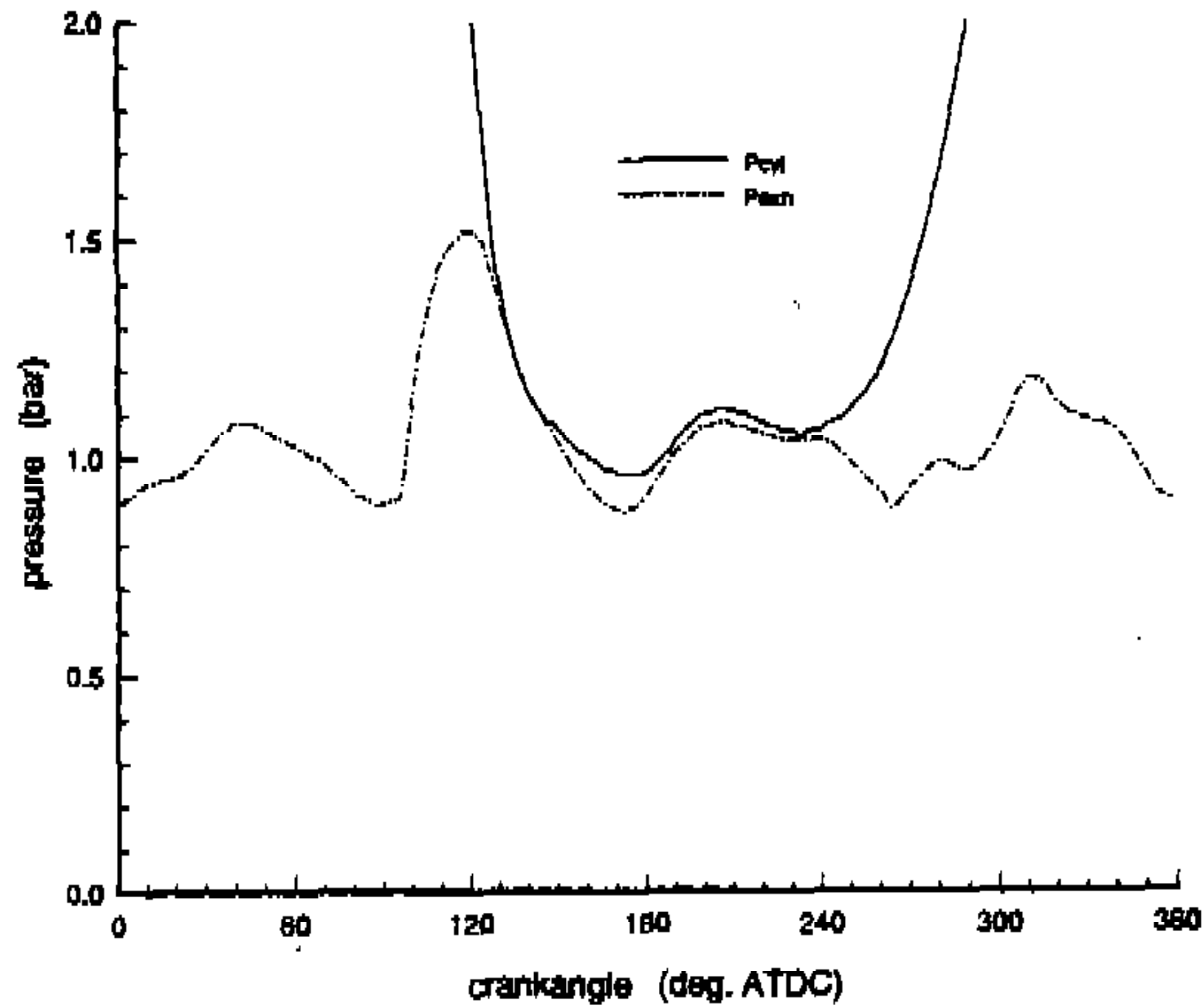


Fig.6 Predicted pressures of cylinder and exhaust pipe of a pipe exhaust system at 5000rpm

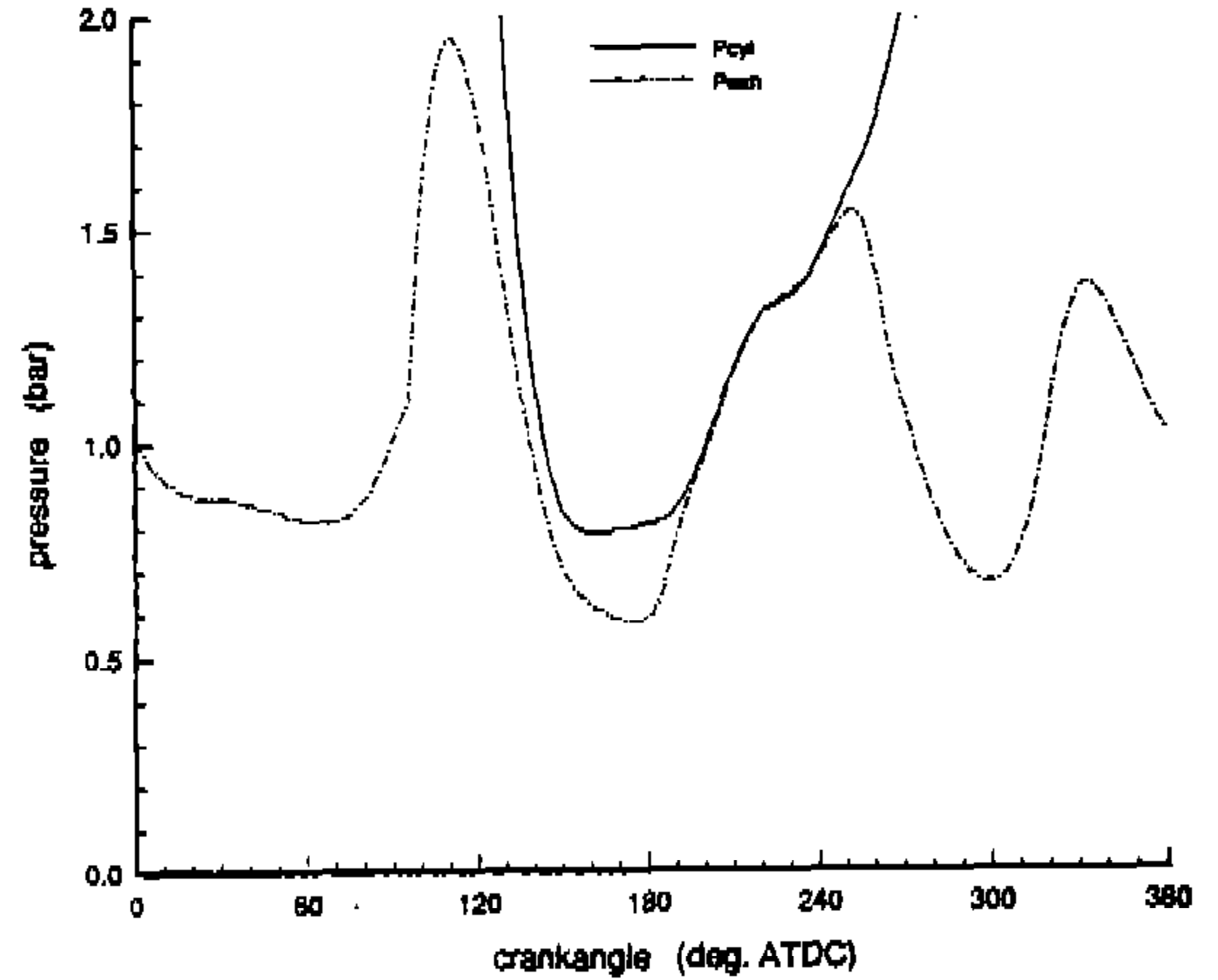


Fig.7 Predicted pressures of cylinder and exhaust pipe of a tuned exhaust system at 5000rpm

0.9%에서 최대 79.7% 높은 수치를 보이고 있으며 제동연료소비율은 300rpm을 제외한 전영역에서 최대 53.7% 낮은 수치를 보이고 있다. 이와 같은 자료로 보아 전반적으로 조율 배기시스템이 단순 배기관 시스템에 비하여 우수한 성능을 보이고 있으며 특히 5000rpm 이상의 고속 영역에서 상당히 좋은 결과를 보이고 있다.

그리고 Fig.5에서는 기관회전수에 따른 소기효율(scavenging efficiency)과 급기효율(trapping efficiency)을 보여준다. 조율 배기시스템의 기관은 저속영역에서는 특별한 향상을 보이고 있지 않으나 4000rpm 이상의 고속영역에서는 상당한 향상을 보이고 있다. 특히 5000rpm에서는 소기효율보다 급기효율이 급격히 상승함을 보이고 있다. 이와 같은 상승은 효과적인 급기와 함께 급기비의 감소에 따른 급기효율의 증가가 더하여졌기 때문이다.

Fig.6은 단순 배기관 시스템을 갖는, 그리고 Fig.7는 조율 배기시스템을 갖는 기관의 5000rpm에서의 실린더 및 배기관의 압력을 상사점 후의 크랭크 각도로 나타내고 있다. Fig.6과 7에서 배기관에서 압력의 맥동과 실린더 내의 압력이 배기 및 소기 포트의 개폐에 따라 변하는 모습을 선명하게 보여 준다. 먼저 96°ATDC에 배기포트가

열림에 따라 연소가스가 배기관으로 배출되며 실린더 내 압력이 급격히 강하하고 배기의 맥동 현상에 의하여 배기관의 압력도 함께 감소하여 연소가스의 배출을 도와 준다. 다음 118°ATDC에 소기포트가 열림에 따라 소기가 시작된다. 242°ATDC에 소기포트가 닫히고 264°ATDC에 배기포트가 닫힌다. 소기포트가 닫히고 배기포트가 열려 있는 기간은 피스톤의 압축에 의하여 실린더 내의 신기(fresh charge)가 배기관으로 배출되는 바람직하지 않은 현상이 일어난다. 이 현상은 고전적인 단순 피스톤 포트형의 2행정 기관이 갖는 고유의 특징이며 이로 인하여 연료소비율 증가, 미연탄화수소 배출 증가 등의 문제점이 발생한다. 그러므로 이 기간 동안 이러한 배출을 감소시킬 수 있는 방법이 요구된다. 이를 위한 효과적인 방법 중 하나가 이 기간 동안 배기관의 맥동 압력을 조절하여 실린더 내의 압력과의 차이를 줄여 배출되는 유량을 적게 하는 것이다. Fig.6에서는 242°ATDC를 지나면서 배기관의 압력이 하강하지만 Fig.7에서는 242°ATDC와 253°ATDC사이에서 배기관의 압력이 상승한다. 이러한 압력분포는 소기포트가 닫히고 배기포트가 열려 있는 동안 신기가 배출되는 것을 방지하므로 소기효율 및 급기효율을 증가시키는 역할을 할

것이다. 이 현상을 플러깅 펄스(plugging pulse)<sup>9)</sup>라고 한다. 단순 배기관 시스템에서는 플러깅 펄스가 전혀 나타나지 않으며 조율 배기시스템에서는 Fig.7에서 보는 바와 같이 5000rpm에서는 뚜렷하게 보이고 다른 영역에서는 조금 나타난다. 이러한 플러깅 펄스 현상은 조율 배기시스템의 형상, 즉 디퓨저와 수축노즐의 길이, 직경 등에 따라 발생하는 기관회전수, 크기 등이 변하므로 일반적인 결론을 내리기는 어렵다. 그러므로 최적의 배기시스템 설계는 적절한 조율 배기시스템을 이용하여 원하는 영역에서 플러깅 펄스를 생성하는 것이라고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 특성방법을 이용하여 2행정 기관을 가스역학적으로 해석하고 단순 배기관 시스템과 조율 배기시스템을 갖는 기관의 소기효율 및 성능을 비교, 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 마찰 및 면적변화를 고려한 특성방법 해법은 2행정 기관의 소기효율 및 성능을 예측하는 데 효과적이다.
- 2) 소기효율 및 급기효율은 2행정 기관의 성능에 큰 영향을 미친다.
- 3) 배기관의 형상과 소기효율 및 급기효율은 직접적인 관계를 갖는다.
- 4) 디퓨저 및 수축노즐로 구성된 조율 배기시스템은 플러깅 펄스를 생성하여 소기효율 및 급기효율을 향상시킨다.
- 5) 조율 배기시스템을 이용하여 원하는 영역에서 플러깅 펄스를 생성하므로 최적 배기시스템을 설계할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. G.P. Blair, The Basic Design of Two-Stroke Engines, SAE, pp.1-6, 1993.
2. L. Brooke and P.J. Mulins, "To Stroke... Or not Two Stroke?", *Automotive Industries*, May, 1988.
3. P. Duret, "A New Generation of Two-Stroke Engines for the Year 2000", *Proc. of Int. Seminar on the Two-Stroke Engines*, pp.181-193, Nov., 1993.
4. G.P. Blair and M.B. Johnston, "Unsteady Flow Effects in Exhaust Systems of Naturally Aspirated, Crankcase Compression, Two-Cycle Internal Combustion Engines", *SAE Paper* 700125, 1970.
5. R.S. Benson, "A Comprehensive Digital Computer Program to Simulate a Compression Ignition Engine Including Intake and Exhaust System", *SAE Paper* 710173, 1971.
6. K. Landfahrer, D. Plohberger, H. Alten, and L.A. Mikulic, "Thermodynamic Analysis and Optimization of Two-Stroke Engines", *SAE Paper* 890415, 1989.
7. G.P. Blair, The Basic Design of Two-Stroke Engines, SAE, pp.135-183, 1993.
8. R.S. Benson, The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal-Combustion Engines, Vol. I, *Clarendon Press*, pp.329-397, 1982.
9. J.H. Horlock F.R.S. and D.E. Winterbone, The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal-Combustion Engines, Vol.II, *Clarendon Press*, pp.1059-1147, 1986.