

# 가변 흡기시스템에 의한 디젤기관의 체적효율 향상에 관한 연구

## A Study on the Amelioration of Volumetric Efficiency by Variable Induction System in a Diesel Engine

강 희 영  
H. Y. Kang

**Key Words** : Three Degree of Freedom Model(3자유도 모델), Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공진기), Depression Peak(흡기 압력강하 피크), Inertia Ram Effect(관성 램 효과), Volumetric Efficiency(체적효율), VIS(가변 흡기 시스템)

**Abstract** : A three-degree of freedom model of intake system was contrived and investigated in various ways for the purpose of the amelioration of the volumetric efficiency in a low and transient engine speed for a multi cylinder diesel engine. The basic concept beyond this model started from the theory that each degree of freedom model has volumetric efficiency peak as many as its number of the degree of freedom. The volumetric efficiency affects significantly to the engine performance; torque characteristics, fuel economy and emission level. For commercial vehicles and stationary engines, the engine is designed so as to produce their best performance near the normal engine speeds, thus the low engine speed area has a tendency of poor volumetric efficiency. The aim of this study was highlighted on the amelioration of volumetric efficiency of low engine speed area in a multi cylinder diesel engine matched with an additional Helmholtz resonator. By the use of VIS(variable induction system) volumetric efficiency at low engine speed range was significantly improved. The availability of control by combination of VIS and CIS(conventional induction system) will be proposed as a variable induction system that would be an appropriate model for amelioration of the volumetric efficiency at low engine speed.

### 1. 서 론

산업화와 대도시의 발달로 대기오염이 심해지자 각국 정부는 엔진으로부터 방출되는 오염물질의 양을 엄격하게 규제하기 시작하였다. 특히 교통이 혼잡한 지역이 많아지고 저속으로 운전하는 구간이 늘어나면서 다량의 오염물질이 방출될 뿐 아니라 성능도 저하된다.<sup>1)</sup> 이는 보통 엔진을 설계할 때에 그 엔진의 용도에 따라 상용 회전수 부근에서 최대 출력이 나오도록 설계가 이루어지기 때문이다. 한 흡기 기간 중에 실린더 안에 채워지는 공기의 질량을 행정용적을 채우는 공기의 질량으로 나눈 것을 체적효율이라고 하는데 디젤기관의 체적효율은 엔진

으로 유입되는 평균 공기 유동률과 비례하며 토크 특성 및 배기오염물 방출에 중대한 영향을 미친다. 디젤기관의 체적효율은 흡기 매니폴드와 배기 매니폴드의 형상에 지대한 영향을 받는다.<sup>2)</sup>

Farmer에 의하면 1893년에 이미 4행정 디젤기관의 체적효율이 배기관의 길이에 의하여 영향을 받는다는 것을 알았다.<sup>3)</sup> 세계대전 기간 중에 체적효율 향상에 관한 연구는 주로 고출력, 고효율의 엔진개발을 목적으로 집중되었고, 1970년 오일쇼크이후에는 저 연비, 고효율 엔진개발에 주력하다가 현재에는 환경 친화적이면서도 경제적인 저 공해, 저 연비 그리고 고효율 엔진에 대한 연구가 활발하다. 오염물 방출 수준을 낮추기 위한 기술개발은 전자제어의 발달과 이 기술이 엔진제어에 접목되면서 고압연료 전자 분사가 가능해졌고 흡·배기 밸브의 전자제어도 부분적으로 이루어지고 있다.

흡·배기 매니폴드에 대한 기초 설계는 음향이론을 이용하여 구성 요소의 전체적인 배치를 한 다음,

접수일 : 2005년 12월 23일  
강희영(책임저자) : 부경대학교 대학원 제어기계공학과  
Tel : 051-620-6936  
E-mail : cosmopolitankhy@hotmail.com

각 요소에 대한 정확한 해는 비정상 1차원 유동의 수치해석에 우수한 특성곡선법, 유한 차분법등을 이용하여 구한다.

흡기 과정 중에는 피스톤의 움직임과 밸브의 개폐 작용으로 인하여 흡기관으로 유입되는 공기는 주기적으로 진동하면서 압력 변동을 일으키는 맥동류가 되는데 이 맥동류가 흡기의 유입을 촉진하거나 방해한다. 이러한 맥동류에는 합성과 형태의 복잡한 압력파<sup>4)</sup>가 존재하는데 이때의 파동을 계측하여 맥동 압력파의 물리적 현상을 잘 이해하고 해석하면 파급기 없이도 파동을(wave action) 이용하여 대기압 이상의 높은 압력으로 급기를 실현할 수 있는 흡기 시스템을 설계할 수 있다고 알려져 있다.<sup>5)~8)</sup>

Engelman에<sup>9)</sup> 의하여 시작된 헬름홀츠 공진기 유사 모델에 의한 흡기관 설계 이론은 흡기 기간 중에 일어나는 관성 램의 피크의 위치를 BDC 부근에 오도록 하는 것으로서 많은 발전을 거쳐서 Pearson에<sup>10)</sup> 이르러서는 2자유도 스프링-질량계 모델(2degree of freedom mass-spring model)이 연구되었고 D. Bortoluzzi에<sup>11)</sup>는 2차 흡기관-플리넘-1차 흡기관-실린더로 구성된 흡기시스템에 1차 흡기관에 공진기를 부가한 3자유도 스프링-질량계 모델을 이용하여 고속에서 고효율을 내기위한 연구를 하였다.

본 연구에서는 저속에서의 체적효율을 향상시키기 위하여 2자유도 스프링-질량계에 공진기를 2차 흡기관에 공진기를 병렬로 부착하여 3자유도 스프링-질량계를 구성하여 가변 흡기시스템<sup>4),12)</sup>에 의한 저속에서의 체적효율을 조사하였으며 흡기시스템 제어의 가능성을 조사 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험의 실험 장치도이다. 실험에 사용된 기관은 A사의 트랙터용 3기통 직분식 디젤기관으로 그 규격은 Table 1과 같다. 동력계는 와전류식 동력계(흡수 동력 132kW)를 사용하였다.

흡기관의 구성은 2차 흡기관, 병렬공진기, 트로틀 밸브, 플리넘, 그리고 1차 흡기관이 기관 블록에 직결되어 있고 2차 흡기관 끝에 흡기 서지탱크와 층류유량계(Sokken)를 연결하였다.

흡기시스템 제원을 Table 2에 나타내었다. 1차 흡기관은 15도로 굽힌 스테인리스강관을 기관 블록에

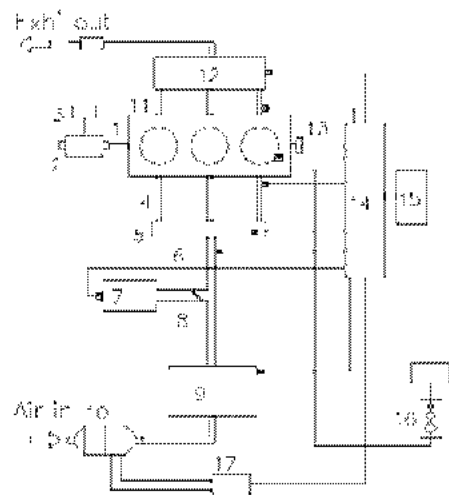
연결하고 배기시스템은 기관블록과 배기 서지탱크 사이에 직경 40mm, 길이 625mm 직관을 연결하였다.

Table 1 Specification of test engine

Item Description	Specification
Type	4 stroke DI
Swept volume(cm3)	2591
Bore x Stroke	$\phi 100 \times 110\text{mm}$
Charging method	Naturally aspirated
Number of cylinder	3
Power	35 kW(at 2600rpm)
Compression ratio	17.6
Valve Timing	EVO 133 deg/EVC 375 deg IVO 345 deg/IVC 576 deg

Table 2 Dimension of intake system

Item	Diameter(mm)	Length(mm)
Resonator, S:1230cc	48	220
Resonator, L: 2460cc	48	440
Secondary pipe	59	452, +100, +200, +300
Primary pipe	39	354
Plenum: 2060cc	97	280



- 1. Diesel engine
  - 2. Dynamometer
  - 3. Dynamometer controller
  - 4. Primary pipes
  - 5. Plenum(manifold)
  - 6. Secondary pipe
  - 7. Resonator
  - 8. Throttle valve
  - 9. Intake surge tank
  - 10. Laminar flow meter
  - 11. Exh. gas pipe
  - 12. Exh. surge tank
  - 13. Rotary encoder
  - 14. Terminal block
  - 15. DAQ(PXI) system
  - 16. Flow meter for F.O.
  - 17. Differential transmitter for flow meter
- : Pressure transducer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

흡·배기 압력을 측정하기 위하여 피에조 저항식 저압 압력변환기와 증폭기를 흡기 서지탱크, 2차 흡기관, 헬름홀츠 공진기, 플리넘, 그리고 1차 흡기관에 설치하였으며, 배기측은 배기관, 배기 서지탱크에 설치하여 압력 변동을 측정하였다. 데이터 획득은 LabVIEW VI를 이용하여 수행하였다.

## 2.2 실험 방법

실험은 2차 흡기관-플리넘-1차 흡기관-실린더로 구성된 기존의 흡기시스템에 2차 흡기관에 가변 공진기(Small, S: 1230cc, Large, L: 2460cc)를 각각 병렬로 연결한 2종류의 공진기의 개폐와 2차 흡기관의 길이 100mm, 200mm, 300mm 및 기관의 회전속도 1000에서 2600rpm 운전영역에서 100rpm 간격으로 무 부하 상태, 고정 밸브 타이밍 조건에서 수행하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 공진기 개폐에 의한 영향

Fig. 2의 SRS(small resonator shut)와 LRS(large resonator shut)는 공진기를 닫았을 때(CIS에 해당)의 기관회전속도 1000~2600rpm 구간사이의 체적효율 변화를 보여주고 있다. 2차 흡기관, 플리넘(고정체적), 1차 흡기관, 피스톤(가변체적)으로 구성된 헬름홀츠 공진기 모델은 2자유도 스프링-질량계로서, 2자유도 스프링-질량계는 2개의 공진 주파수를 갖고 그 결과, 2개의 피크(1600, 2000rpm)를 갖는다. 피크 체적효율은 2000rpm에서 일어나고 있고 2000rpm을 중심으로 회전 속도가 느려지거나 빨라질수록 체적효율은 낮아진다. 따라서 1600rpm 구간도 피크로 볼 수 있다. 본 실험장치는 최적설계가 이루어지지 않았기 때문에 1600rpm의 피크는 그렇게 크지는 않다.

Fig. 2의 SRF(small resonator full open)와 LRF(large resonator full open)는 공진기를 열었을 때 기관회전 속도 1000에서 2600rpm 구간에서의 체적효율의 변화를 보여주고 있다. 2차 흡기관에 병렬로 부착한 공진기를 열을 경우, 본 흡기계는 2차 흡기관, 가변 공진기(체적), 플리넘(고정체적), 1차 흡기관, 피스톤(가변체적)으로 구성된 가변 흡기계로서 3자유도 스프링-질량계가 된다. 이 흡기계는 3개의 피크 공진 주파수를 갖는데, 그 중에는 1개의 저속 회전 영역(1000rpm 부근)에서의 피크 공진회전수를 포함한(타원 표시), 3개의 피크 공진회전수가 존재

하는 것을 보여주고 있다.

공진기를 닫았을 때는 2000rpm에서 체적효율 피크 값을 가졌다. S(1230cc) 공진기를 열었을 때는 1900rpm에서 체적효율 피크 값을 가졌다.

L(2460cc) 공진기를 열었을 때는 1700rpm에서 체적효율 피크 값을 가졌다. S를 열었을 경우 피크 체적효율 회전수가 100rpm 떨어진 1900rpm 부근이었고, L 공진기를 열었을 경우 1700rpm 부근에서 나타났다. 피크의 위치가 변하는 이유는 공진기의 체적 변화와 공진기 목 부분의 공기의 질량이 진동할 때 기관 공진회전수에 영향을 주기 때문이다. 한편 본 실험의 저속회전속도 영역인 1000rpm 부근에서 약 13%의 체적효율 차이(약 18.2%의 체적효율 개선효과)를 기록하였다(1700 rpm에서는 약 7.6% 정도의 체적효율 개선효과). 1900rpm 이하에서는 공진기를 열어주는 것이 2000rpm 이상에서는 공진기를 닫아주는 것이 체적효율을 좋게 나타났다. 따라서 저속 운전 시에 공진기를 열어줌으로써 체적효율을 향상시키고 이에 비례하여 연료 소비율과 오염물질 배출을 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

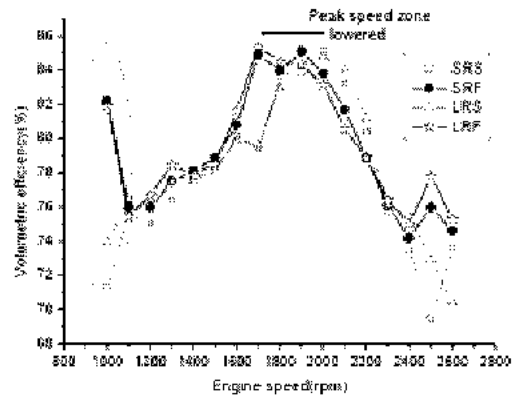


Fig. 2 Variation of measured volumetric efficiency with engine speed and resonator open & shut mode

### 3.2 흡기관 길이에 의한 영향

Fig. 3에 2차 흡기관 길이를 100, 200, 300mm로 연장하고, 공진기는 닫았을 때, 각 기관 회전수에 따른 체적효율 변화를 보여준다. 1000rpm에서 200 > 100 > 300mm 순서로 체적효율이 달라진다. 1100 rpm에서 체적효율이 감소하다가 1200rpm에서부터는 모두 상승하고 있다. 300mm는 1600rpm에서 최대 피크를 200mm와 100mm는 1700rpm에서 나타나고 있다. 1900~2300rpm 사이는 100mm가 가장 좋다.

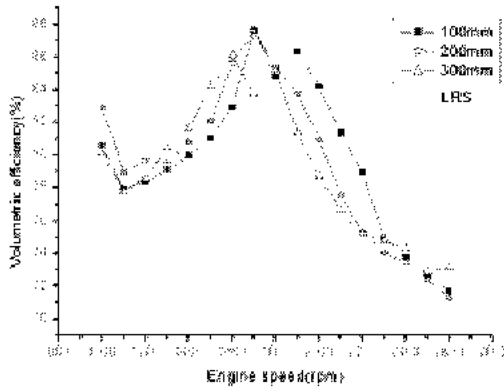


Fig. 3 Variation of measured volumetric efficiency with engine speed and 2nd pipe variation, resonator shut mode

Fig. 4는 2차 흡기관 길이를 100, 200, 300mm로 연장하고, 공진기를 열었을 때, 각 기관 회전수에 따른 체적효율의 변화를 나타내고 있다. 저회전속도인 1000rpm에서 100 > 300 > 200mm 순서로 체적효율이 특별하게 향상된다. 1100rpm에서 체적효율이 감소하다가 1200rpm부터는 모두 상승하고 있다. 300mm는 1600rpm에서 200mm와 100mm는 1700rpm에서 중속도 구간의 피크를 나타내고 있다. 1900에서 2300rpm까지는 100mm가 가장 좋다. 그러한 이유는 엔진 회전수와 관 길이에 따라서 피스톤과 흡기관 사이에 공진이 일어나기 때문이다.

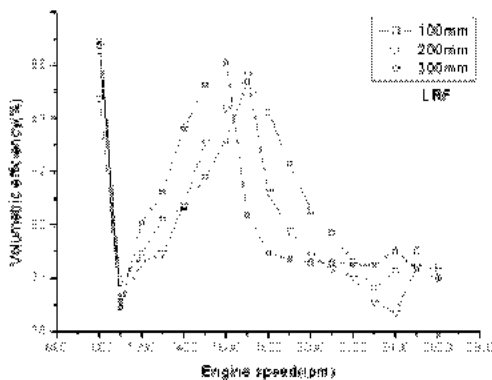


Fig. 4 Variation of measured volumetric efficiency with engine speed and 2nd pipe variation, resonator open mode

Fig. 5는 2차 흡기관 길이를 연장하고 공진기를 열거나 닫았을 때의 경우를 합성한 그림이다. 1000rpm 부근의 뚜렷한 대조를 보여주고 있다. 또한 300mm LRF의 경우 1200~1600rpm의 중속도 구간에서 체적효율이 높다.

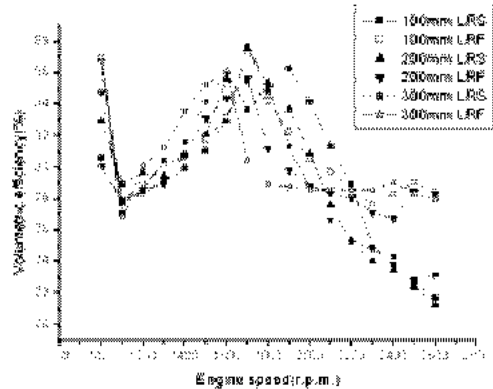


Fig. 5 Variation of measured volumetric efficiency with engine speed and 2nd pipe variation, resonator open & shut mode

Fig. 6은 2차 흡기관 길이를 고정했을 때와 2차 흡기관 길이를 100, 200, 300mm로 변화시키고 공진기 제어로 가변 흡기시스템에 의한 체적 효율을 비교한 그림이다.

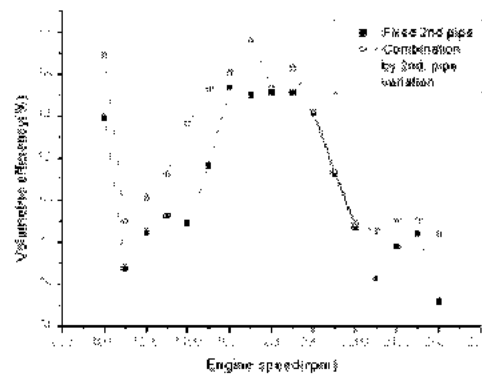


Fig. 6 Variation of measured volumetric efficiency with engine speed and 2nd pipe fixed and combination of variable induction system

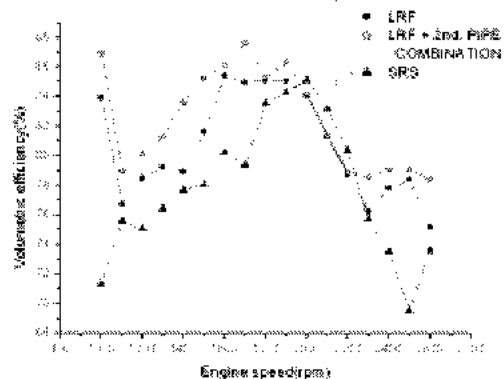


Fig. 7 Variation of measured volumetric efficiency with engine speed and LRF, VIS(LRF+2nd pipe combination) and conventional(SRS)

Fig. 7은 고정 2차 흡기관에 공진기를 닫은 경우, 공진기를 열은 경우, 2차 흡기관을 가 변화하고 공진기를 열은 가변 흡기시스템(Variable Induction System)과의 체적효율을 비교한 그림이다.

1900rpm이하는 VIS를 작동하고 2000~2200rpm까지는 기존 흡기시스템을 사용하고 2300~2600rpm 구간은 VIS를 사용할 수 있음을 보여준다. 이는 VIS를 채용하여 엔진 용적을 늘리지 않고도 저속에서 토크 특성 및 엔진성능 그리고 배기오염물 방출 수준을 향상시킬 수 있음을 의미한다.

### 3.3 VIS vs. CIS(Conventional Induction system)의 영향

Fig. 8은 기존의 흡기 시스템에 대한 가변 흡기시스템의 체적효율 증가를 나타내고 있다. 1000rpm에서 21.9%가 향상되었음을 나타내고 있다. 1100~1700rpm 사이에서 약 7.5%, 2300~2600rpm 사이에서 약 7.9% 향상되었다. 따라서 2000~2200rpm 사이에서는 기존 시스템을 쓰고 그 이외 지역에서는 가변 시스템을 이용하여 제어를 할 수 있다.

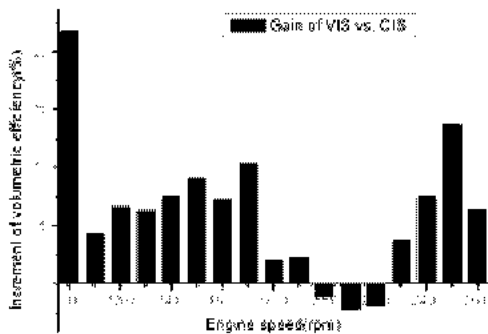


Fig. 8 Gain of volumetric efficiency between VIS vs. CIS

Fig. 9는 유사 단기통 효과를 갖는 엔진에서 1700rpm 일 때 흡기관 안의 교란되지 않은 흡기 맥동류 파형의 진화과정을 보여주고 있다. 흡기 밸브가 열리면서 압력강하(depression)가 시작되고 압력강하 피크(depression peak)를 갖은 다음 압력이 상승하기 시작한다.<sup>5),6),13)</sup> 흡기관 끝에서 위상이 반전되어 정압이 되어 돌아온 파가 중첩되면서 진폭이 커진다.<sup>14)</sup> 이 관성 램 효과(inertia ramming effect)는 파의 영향으로 늦게 나타난다. 흡기 밸브가 닫히면서 흡기공간에는 정상파 형태의 잔류파<sup>15)</sup>가 감쇠를 겪으면서 다음 흡기 밸브가 열리는 순간에 위상과 진폭의 지문을 남김으로써 다음 흡기과정에 영

향을 준다.<sup>15)</sup> 이것을 맥동효과(pulsation effect)라고 한다.

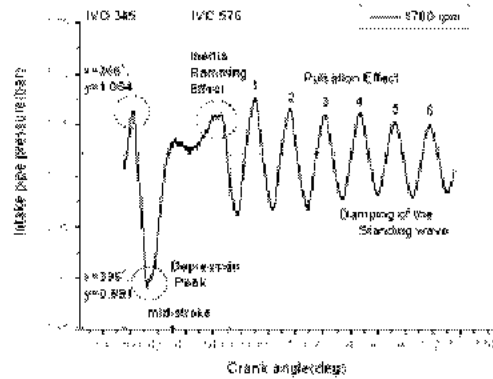


Fig. 9 Evolution of the undisturbed wave in intake pipe of the semi-single cylinder effect engine

Fig. 10은 압력강하 피크의 위상이 관성 램 피크에 영향을 주는 것에 기초하여 흡기시스템 요소제원에 대한 평가를 제공해주는 그림이다. 흡기 밸브 열림 초기의 위상과 진폭이 압력강하 피크의 위상과 진폭에 영향을 주고 결국 관성 램 피크에 영향을 끼친다.

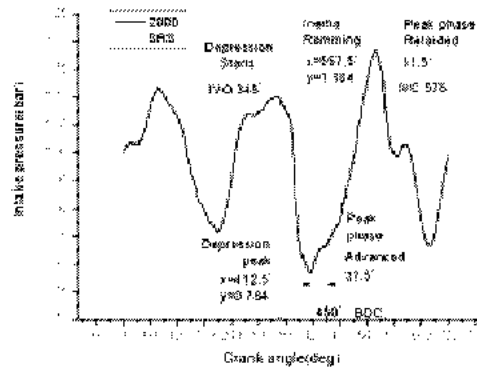


Fig. 10 Intake Pulsating flow caused by wave action during intake process

Fig. 11은 1000rpm에서 기존흡기 시스템과 2차 흡기관을 300mm 연장한 조건을 비교한 그림이다. 흡기 밸브가 열리고 나서 금방 압력이 떨어지지 않는 것은 무효각(the difference between the geometric and fluid dynamic valve aperture)<sup>16)</sup>이 존재하기 때문이다. 관성 램 피크의 모양이 현저하게 차이가 남을 알 수 있다. 흡기 밸브 열림 이전 잔류파의 세기가 압력강하 피크에도 영향을 주는 것을 볼 수 있다.

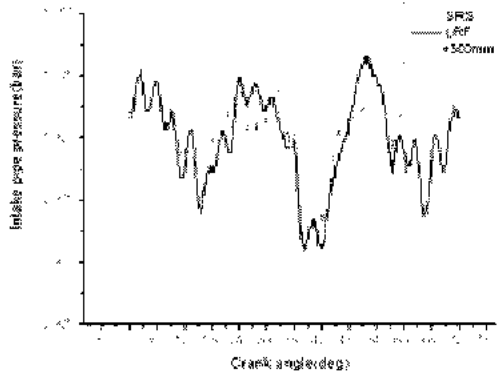


Fig. 11 Comparison of intake pulsating flow between LRF+300mm vs. SRS in intake pipe at 1000rpm

#### 4. 결 론

가변 흡기시스템에 의한 디젤기관의 저속에서의 체적효율 향상과 제어 가능성에 관한 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 가변 흡기시스템을 이용하여 1000rpm 부근에서 약 22%의 체적효율 향상을 얻을 수 있었다.
- 2) 2차 흡기관과 공진기를 조작한 가변 흡기시스템을 이용하여 1000-1700rpm 구간에서 평균 7.5%의 체적효율 향상이 있었다.
- 3) 가변 흡기시스템에 의하여 상용구간의 체적 효율 피크 공진 회전수가 저속으로 이동하는 것을 알 수 있었다.
- 4) 1900rpm을 기준으로 VIS와 기존 흡기시스템 제어로 저속 및 중속에서 성능 향상이 가능함을 알 수 있었다.

따라서 VIS와 전자 연료분사 및 전자 제어 밸브시스템이 가능하게 되면 저속에서의 배기오염물 방출 수준을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

#### 참고 문헌

1. Kihyung Lee, Jeaduk Ryu and Changsik Lee, 2004, "The Characteristics of Combustion and Exhaust Emission According to Operating Condition and Fuel Composition in a Direct Injection Type HCCI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 1, pp. 10-16.
2. D. E. Winterbone, and R. J. Pearson, 1999, "Design Techniques for Engine Manifolds, Wave Action Methods for IC Engines,"

Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St. Edmunds, UK. p. 1.

3. H. O. Farmer, 1938, "Exhaust System of Two-Stroke Engines," Proc. Instn. Mech. Engrs., v.1381938, pp. 367-390.
4. H. Heisler, 1995, "Advanced Engine Technology," Edward Arnold, London, pp. 258-261.
5. D. Broome, 1969. "Induction Ram, Part Three: Wave Phenomena and the Design of Ram Intake Systems," Automobile Engineer, pp. 262-267.
6. P. C. Vorum, 1980 "Short Pipe Manifold Design for Four-Stroke Engines: Part II," ASME paper No. 80-DGP-6.
7. C. F. Taylor, J. C. Livengood, and D. H. Tsai, 1955, "Dynamics in the Inlet System of a Single-Cylinder Engine," Trans. ASME, pp. 1133-1145.
8. A. Ohata, Y. Ishida, 1982, "Dynamic Inlet Pressure and Volumetric Efficiency of Four Cycle Cylinder Engine," SAE paper 820407.
9. H. W. Engelman, 1973, "Design of a Tuned Intake Manifold," Proceedings of the ASME Conference on Diesel and Gas Power, Houston, Texas, ASME paper 73-WA/DGP-2.
10. R. J. Pearson, 1989, "A Rapid Synthesis Technique for Intake Manifold Design," Int. J. of Vehicle Design, Vol. 10, No. 6.
11. D. Bortoluzzi, V. Cossalter and A. Doria, 1998, "The Effect of Tunable Resonators on the Volumetric Efficiency of an Engine," SAE paper 983045.
12. I. Matsumoto and A. Ohata, 1986, "Variable Induction System to Improve Volumetric Efficiency at Low and/or Medium Engine Speeds," SAE paper 860100.
13. P. H. Azoury, 1992, "Engineering Applications of Unsteady Fluid Flow," John Wiley & Sons. West Sussex. UK. pp. 168-177.
14. J. Benajes, E. Reyes, J. Galindo, and J. Peidro, 1997, "Predesign Model for Intake Manifolds in Internal Combustion Engine," SAE 970055.
15. M. Morse, R. H. Boden and H. Schecter, 1938, "Acoustic Vibrations and Internal Combustion Engine Performance. I. Standing waves in the

Intake Pipe System, J. Applied Physics, 9, pp. 16-23.

16. S. M. Hamriot, M. A. Franco de Medeiros and J. Ricardo Sodre, Ramon M. Valle, 2000, "An Experimental and Numerical Study from Pulsating Flow in Intake Manifold," SAE Brasil. Technical Paper series 2000-01-3162.