

가변 헬름홀츠 공진기가 대기통 디젤기관의 체적효율에 미치는 영향

The Effects of Tunable Helmholtz Resonators on the Volumetric Efficiency in a Multi-cylinder Diesel Engine

강희영 · 고대권 · 안수길

H. Y. Kang, D. K. Koh and S. K. Ahn

Key Words : Helmholtz Resonator(헬름홀츠공진기), Volumetric Efficiency(체적효율), Wave Action(파동), Depression Peak(피크 압력강하), Acoustic Vibration(음향학적 진동)

Abstract : The volumetric efficiency is significantly affected by the behavior of pressure wave in induction system and exhaust pipe. By the motion of the piston, there exist pressure fluctuation in induction system which produce waves. Waves are propagated along a pipe bi-directional as they propagated through it, making compression wave and rarefaction(expansion) wave. These wave phenomena can affect to the volumetric efficiency. As a method of improvement of the volumetric efficiency, fuel economy and pollutant emission reduction particularly in low engine speeds, a side-branch additional tunable helmholtz resonator on the secondary pipe of intake system is proposed by use of their acoustic vibrations. Some of results are presented which deal with their physical phenomena for the wave action of intake system in a four-stroke three cylinders diesel engine.

1. 서 론

디젤기관의 체적효율은 기관으로 유입되는 평균 공기유동율과 비례하며 토크 특성 및 배기오염물 방출에 중대한 영향을 미친다. 체적효율 향상과 관련한 이전의 많은 연구는 주로 고속회전 영역에서의 고속, 고출력을 발생하기 위한 연구¹⁾는 많이 있으나 저속회전 영역에서의 체적효율과 그에 따른 배기오염물 절감에 관한 연구는 그렇게 많지 않다. 또한 컴퓨터를 이용하여 특성곡선법이나 유한차분법과 같은 복잡한 수학적 모델을 적용하여 엔진회전수에 대한 충전효율을 계산할 수 있었지만 기체동력학적 현상에 대한 올바른 이해 없이는 많은 다른 해를 구하기 위하여 정확한 지침 없이 무수히 많은 무작위의 실험을 해야 한다¹⁾.

흡·배기관 속을 진행하는 파는 양방향성을 갖고 동시에 앞과 뒤로 진행하며 전파된다. 크랭크축 회전으로 인한 피스톤의 하강으로 흡기관의 압력은 압

력강하가 시작되면서 부압파가 형성되며 이 파가 흡기관의 열린 끝에서(찌그러들은 거의 없으나 약간의 감쇠를 수반한다) 반사되어 되돌아올 때는 위상이 뒤 바뀌어 정압파가 되고 두 파가 중첩되어 사인곡선 형태(sinusoidal)의 파를 형성하며²⁾, 이 파의 특성은 압력이 맥동하는 압력파이다. 이러한 흡기계의 파동(wave action)의 특성은 흡기관을 통하여 1차원 선형파인 음파가 전파될 때 공기의 관성과 압축성 사이의 균형에 기인한다³⁾. 파동의 결과 주기적 음향학적 진동(cyclic acoustic vibration)⁴⁾인 압력파가 발생하는데 그 생성과정이 매우 복잡하며 많은 인자가 상호작용과 중첩 등을 하게 된다. 이 파는 1차원 선형으로 간주되며 이 때의 흡기관 안에서 일어나는 물리적 현상에 대한 올바른 이해는 최대성능 흡기관설계⁵⁾, 최적 배기관설계⁶⁾, 컴먼레일 연료분사 및 FVVT(fully variable valve train)⁷⁾에 선행하여 획득하여야 할 실험 자료로서 매우 중대하고도 필수적인 것이다.

체적효율은 흡기관 길이와 엔진회전수에 의한 피스톤 주파수의 함수이다. 여기에 더하여 흡기밸브가 열림 기간동안의 개구면적에 따라서 공기유동률이 달라진다. Vorum 과 Engelman등에 의하면 흡기밸브가 열리면서 피스톤이 하강함에 따라 실린더내

접수일 : 2005년 7월 1일
강희영(책임저자) : 부경대학교 대학원 제어기계공학과
E-mail : cosmopolitankhy@hotmail.com Tel : 051-620-6936
고대권, 안수길 : 부경대학교 공과대학 기계공학부

압력이 변동하고 그 결과 흡입관내의 압력강하(depression)⁸⁾가 일어나는데 피스톤 속도가 최대인 행정의 중간부근에 피크 압력강하(depression peak)가 오면 최대 체적효율을 얻을 수 있다고 알려져 있다.^{9,10,11,12)}

Daniele Bortoluzzi 등에 의하면 2차 흡기관(secondary pipe) - 플리넘(plenum) - 1차 흡기관(primary pipe) - 피스톤으로 구성된 흡기계는 2자유도 스프링-질량계로 2개의 체적효율 피크를 갖고 여기에 공진기를 추가할 경우에 이 계는 3자유도 스프링-질량계로 간주되며, 3개의 체적효율 피크를 갖게 된다¹³⁾. 1차 흡기관 요소는 고속회전영역에서 2차 흡기관요소는 중·저속에서의 체적효율에 영향을 미친다. 교통 혼잡 지역에서 차량이 저속 운전시 많이 발생하는 배기오염물의 양을 절감시키고 연료소비율을 개선하기 위해서는 저속 회전영역에서의 체적효율 향상에 관한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 엔진회전수와 2차 흡기관 부착 공진기의 개폐에 따른 가변 헬름홀츠공진기가 다기통 디젤기관의 체적효율에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

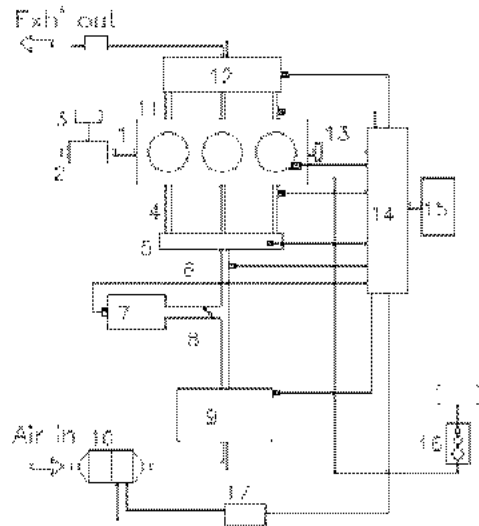
Fig. 1은 본 실험의 실험 장치도이다. 실험에 사용된 기관은 A사의 트랙터용 3기통 직분식 디젤기관으로 그 규격은 Table 1과 같다. 동력계는 와전류식 동력계(흡수 동력 132kW)를 사용하였다.

Table 1 Specifications of test engine

Item Description	Specification
Type	4 stroke DI
Swept volume(cm ³)	2591
Bore x Stroke	φ100 x 110mm
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

Fig. 1의 4, 5, 6, 7, 8, 9 그리고 10은 실험에 사용하기 위하여 제작된 흡기관계를 나타낸 것이다. 흡기관의 구성은 2차 흡기관, 병렬공진기, 트로틀 밸브, 플리넘, 그리고 1차 흡기관이 기관 블록에 직결되어

있고 2차 흡기관 끝에 흡기서지탱크와 측류유량계를 연결하였다. 흡기관계 제원을 Table 2에 나타내었다. 1차 흡기관은 스테인리스강관으로 15도 굽어져 엔진블록에 연결하였다.



- 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

배기관 계는 기관블록과 배기서지탱크(체적 약 90 liters로 기통 간 배기 간섭을 없애기 위하여 설치하였다) 사이에 직경 40mm, 길이 625mm인 직관을 연결하였다.

흡·배기 압력을 측정하기 위하여 피에조 저항식 저압 압력변환기(Kistler, 4045A5, Switzerland)와 증폭기(Kistler, 4603)를 흡기 서지탱크, 2차 흡기관, 헬름홀츠 공진기, 플리넘, 그리고 1차 흡기관에 설치하였으며, 배기는 배기관, 배기서지탱크에 압력 변환기를 설치하여 압력 변동을 측정하였다. 체적효율은 측류유량계(Sokken, LFE-100B, Japan) 입·출구에서 발생하는 차압을 이용하여 구하였다.

데이터 획득 장치는 National Instrument사의 PXI(Peripheral Component Interconnect Extensions for Instrumentation, U.S.A.)를 사용하였으며 PXI사

시(PXI-1000B)에 제어기(NI 8174)와 DAQ 보드(NI 6025E) 그리고 I/O 연결단자를 연결하여 시스템을 구성하였다. 데이터 취득 및 계산은 LabVIEW VI를 이용하여 수행하였다.

Table 2 Dimension of intake system

Item	Diameter(mm)	Length(mm)
Secondary pipe	59	452
Plenum, (2069cc)	97	280
Primary pipe	39	354
SR(Small Resonator) (volume : 1230cc)	48	220
LR(Large Resonator) (volume: 2460cc)	48	220

2.2 실험 방법

실험은 2차 흡기관에 가변 공진기(SR : small resonator; 1230cc, LR: Large resonator; 2460cc)를 각각 병렬연결하고 엔진회전수와 공진기에 의한 체적효율 변화에 대한 영향을 평가하기 위하여 엔진회전수 1000에서 2600rpm 운전영역에서 100rpm 간격으로 무 부하 상태에서 2 종류의 공진기의 개폐(F: Full open, S: Shut)에 따른 체적효율의 변화를 실험하였다. 공진기 도관의 단면적은 일정(constant duct section)하며 밸브 타이밍은 고정된 조건하에서 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 파동에 의한 흡기행정중의 압력파

흡기행정기간 동안 발생하는 물리적 현상을 크게 3 구간으로 나누면 아래와 같다.

- 1) IVO 부근의 압력파의 위상 파 진폭.
- 2) 중간행정(mid-stroke)부근의 압력강하와 위상.
- 3) BDC부근의 압력파의 위상과 진폭.

압력진동에 의한 파동의 아-현상(sub-phenomena)으로는 관성효과(inertia effect), 간섭효과(interference effect), 공진효과(resonance effect), 파 효과(wave effect)로 세분할 수 있다.

튜닝(tuning)이 잘된(공진주기가 일치된)흡기관에서 흡기 유입행정 중 1차 흡기관(primary pipe)에서의 압력변동은 IVO 직후 압력파의 위상과 진폭이 흡기 행정 초반의 압력강하에 영향을 준다. 위상이

일치할 경우 진폭이 클수록 압력강하의 피크 값이 커지게 된다. 한편 이때의 압력강하는 피스톤의 위치가 흡기중간 행정에 도달했을 때 최고속도에 도달하고 피크 압력강하는 TDC이후 90도 부근에 위치한다고 문헌에 알려져 있다^{9,10}. 피크 압력강하의 위상은 연이어지는 관성 램에 의한 흡기행정말기의 압력파의 위상과 진폭 형성에 직접적인 영향을 준다. 피크 압력강하를 넘어서면 유입 공기의 관성력 증가에 따른 운동량의 증가로 실린더 안의 가스유동은 관성력에 의한 램 작용(inertia ramming)을 받게 되고 이때의 압력파는 급격한 압력 상승을 하게 된다. 결과적으로 흡기행정 초기의 압력파의 위상과 진폭 및 피크 압력강하의 위상은 체적효율에 중대한 영향을 미침을 알 수 있다. 그러므로 흡기 압력파의 발달과정을 보고 다음과 같은 판별이 가능해진다.

1) 피크 압력강하의 위상이 빠를 때: 불충분한 급기를 가져오고 그 결과 관성 램 작용기간에 급기 부족에 의한 운동량 감소로 인하여 흡기압력파가 발달하지 못하게 된다. 그 결과 진폭이 작아져서 공기 유동률이 낮아지게 된다.

2) 피크 압력강하의 위상이 늦을 때: 충분히 발달하지 못한 부압 압력파(negative pressure wave)를 형성하게 된다. 따라서 흡기행정 말기에 실린더로부터 흡기관으로 가스가 역류할 수 있다.

Fig. 2에서 이론적 흡기 표준 피크 압력강하는 450도에 위치해야한다. 본 실험 조건 2000rpm, SRS (Small Resonator Shut)에서의 그림은 피크 위치가 412.5도로서 위상차가 37.5도 빠름을 알 수 있다. 피크 압력강하의 위상이 빠르다는 것은 공기가 충분히 흡입되지 않았다는 것을 의미하며, 그 결과로 흡기행정 말기의 압력상승률을 나타내는 압력파의 피크의 위치(위상)는 표준상태보다 늦게 나타나게 된다. 따라서 피크 압력강하의 위치가 표준모델인 450도에 오게 하려면 설계시에 2차 흡기관 길이와 플리넘 체적에 대한 보정이 이루어져야함을 알 수 있다. IVC 밸브 무효각^{14,15}(기하형상학적 밸브 닫힘각과 유체역학적 밸브 닫힘각 사이의 차이, the difference between the geometric and fluid dynamic valve aperture)을 약 30도(546도)로 잡았을 때 11.5도(557.5-546.0)의 위상 지연이 있음을 알 수 있다.

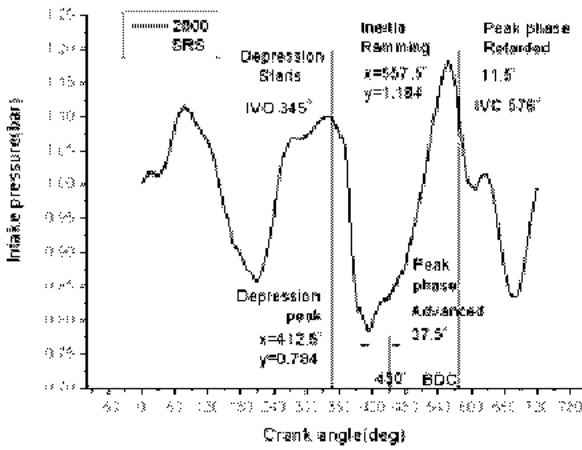


Fig. 2 Intake pressure-time wave profile during depression and inertia ramming periods

3.2 엔진회전수가 체적효율에 미치는 영향

Fig. 3은 엔진회전수가 2000, 2400 및 2500rpm으로 변할 때 그에 따르는 밸브의 개폐시기와 파의 거동을 보여주고 있다. 흡기밸브가 실제로 열리는 각도가 2000rpm의 경우는 약 370도 이고 2400 및 2500rpm의 경우는 약 375도 부근으로 무효각이 25-30도 정도 된다. 이것은 공진회전수가 증가하면서 각속도증가와 크랭크축과 밸브 개폐장치(푸시로드 및 로커-아암)에 해로운 공진이 일어나 흡기밸브가 열리는 시간이 늦어진다. 2400, 2500rpm의 경우 375도 부근에 뚜렷하고도 진폭이 큰 정상파(standing wave)가 오고 있으나 위상 지연에 의한 피크 압력강하가 450도 보다 25-27도 늦게 나타나 있다. 그 결과 관성 램에 의한 최대 피크의 위상이 약 30도 정도 늦게 나타나고 결국 Fig. 6에서 보는 바와 같이 체적효율 저하로 귀착된다.

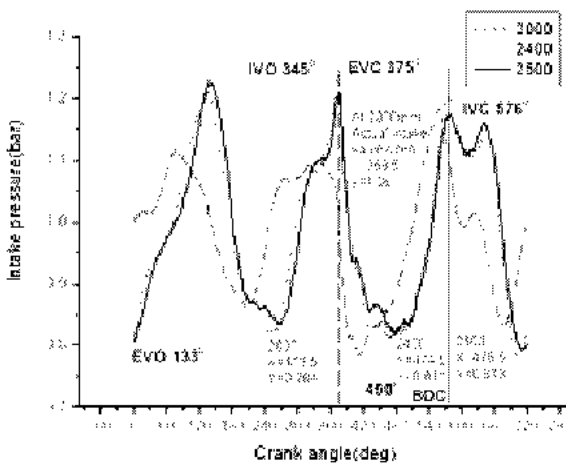


Fig. 3 Phase difference and valve timing delay with variation of engine speed without resonator

3.3 공진기가 체적효율에 미치는 영향

Fig. 4는 엔진회전수 1900rpm에서 공진기 SR을 개폐하였을 때 흡기 압력파에 미치는 영향을 비교한 그림이다. 흡기 압력강하 초기의 진폭이 피크 압력강하의 위상 및 충전효율에 영향을 주는 것을 알 수 있다. IVO직전의 위상차이는 3도이며 피크 압력강하의 위상도 3도 차이가 난다. 관성 램에 의한 최대 피크의 위상은 5도 차이가 난다.

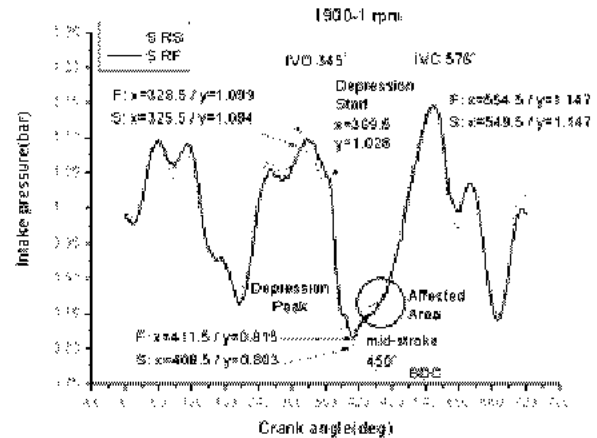


Fig. 4 Comparison of pressure wave-profile with and without resonator at 1900rpm

Fig. 5는 엔진회전수 증가에 따른 공진기 안의 압력파의 변천과정을 한눈에 볼 수 있는 그림이다. 진폭은 1700rpm에서 진폭이 커지기 시작하여 2300rpm에서 최대가 되었다가 감소하기 시작하였다. 엔진회전수가 증가함에 따라 위상과 진폭 및 파형이 일정한 경향을 갖고 변하고 있음을 알 수 있다.

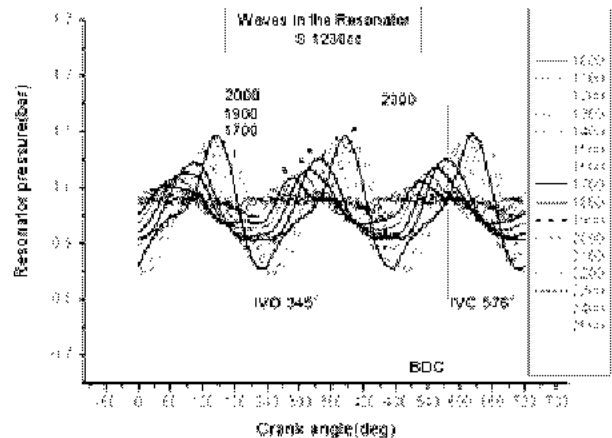


Fig. 5 Pressure wave profile of the Helmholtz resonator with various engine speed

Ohata 등에 의해서 알려진 2차 흡기관 길이의 변화가 저속회전 영역에서의 피크 체적효율에 영향을 미친다¹⁶⁾는 것과 Bies 등에 의한 2차 흡기관에 공진기를 부착 할 경우에 공진기 안의 공기의 일부가 공기유동에 관여하여 그 결과 체적효율에 영향을 미치게 된다^{13,17)}는 이론들을 토대로 2 자유도 스프링 질량계의 2차 흡기관에 공진기를 병렬로 부착할 경우 3 자유도 스프링-질량계를 구성 할 수 있고(음의 파장이 흡기관 길이와 체적의 치수보다 훨씬 작을 때) 이 흡기시스템은 3개의 피크 공진회전수를 갖게 되며¹³⁾ 여기에는 저속회전 영역에서의 피크 공진 회전수를 포함하게 된다. 이러한 가정으로부터 출발하여 엔진회전수와 2차 흡기관에 병렬 부착된 가변 헬름홀츠공진기가 저속회전 영역에서의 체적효율에 미치는 영향에 대한 실험 결과는 아래와 같다.

Fig. 6의 SRS와 LRS는 엔진회전수 1000-2600 rpm 운전영역에서 공진기를 닫았을 때의 체적효율 변화를 보여주고 있다. 2차 흡기관, 플리넘(고정체적), 1차 흡기관, 피스톤(가변체적)으로 구성된 헬름홀츠 공진기 모델은 2 자유도 스프링-질량계로서, 2 자유도 스프링-질량계는 2 개의 공진 주파수를 갖고 그 결과, 2개의 피크를 갖는다¹³⁾. 체적효율 피크는 2000 rpm에서 일어나고 있고 2000rpm을 중심으로 회전 속도가 느려지거나 빨라질수록 체적효율은 작아진다. 따라서 1600rpm 구간도 피크로 볼 수 있다. 본 실험장치는 최적설계가 이루어진 것이 아니기 때문에 1600rpm은 피크 값이 그렇게 크지는 않다.

Fig. 6의 SRF와 LRF는 공진기를 열었을 때 엔진회전수 1000에서 2600rpm 사이의 체적효율의 변화를 보여주고 있다. 2차 흡기관에 병렬로 부착한 공진기를 열었을 경우 본 실험기관은 2차 흡기관, 가변 공진기(체적), 플리넘(고정체적), 1차 흡기관, 피스톤(가변체적)으로 구성된 가변 헬름홀츠 공진기 모델로서 3 자유도 스프링-질량계이며, 거기에는 저속회전 영역에서의 피크 공진회전수를 포함한(타원표시 안쪽), 3개의 피크 공진회전수가 존재하는 것을 보여주고 있다.

공진기를 닫았을 때는 2000rpm에서 체적효율 피크 값을 가졌다. SR(1230cc) 공진기를 열었을 때는 1900 rpm에서 체적효율 피크 값을 가졌다. LR(2460cc) 공진기를 열었을 때는 1700rpm에서 체적효율 피크 값을 가졌다. SR을 열었을 경우 체적효율 피크는 100rpm 떨어진 1900rpm 부근이었고,

LR 공진기를 열었을 경우 1700rpm 부근에서 나타났다. 이것은 공진기의 체적변화가 피크 엔진 공진회전수 대역을 낮춰서 중속 엔진성능이 개선된 것을 의미한다. 한편 본 실험의 저속회전 영역인 1000rpm 부근에서 약 13%의 체적효율 차이(약 18.2%의 체적효율 개선효과)를 기록하였다(1700rpm에서는 약 7.6% 정도의 체적효율 개선효과). 따라서 1900rpm 이하에서는 공진기를 열어주고 2000rpm 이상에서는 공진기를 닫아주는 개폐조작에 의하여 체적효율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 결과적으로 저속 운전시에 공진기를 열어줌으로써 체적효율이 향상되고 여기에 비례하여 토크특성과 연료소비율을 개선하고 또한 오염물질 배출량을 줄일 수 있을 것으로 생각된다¹⁸⁾.

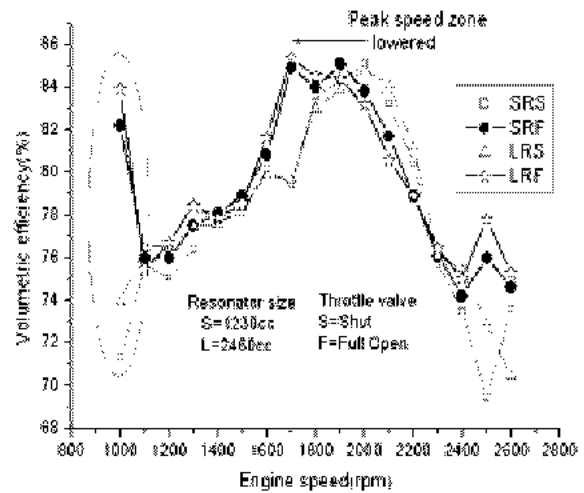


Fig. 6 Variation of measured volumetric efficiency with engine speed and open & shut modes of Helmholtz resonator

Fig. 7은 1000rpm 구간에서의 흡기 압력파의 위상과 진폭의 발달 양상을 보여주고 있다.

체적효율은 LRF > SRF > SRS 순서이다. IVO 직후 압력파의 진폭은 LRF > SRF > SRS 순서이다. IVO 직후의 압력파의 진폭이 체적효율에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 2차 피크 압력강하는 위상이 약 30도 빠른 420도 부근에 위치하고 있다. 이는 2차 흡기관의 길이가 짧아서 위상차가 있는 것으로 생각된다. 관성 램 기간에 위상과 진폭 모두 거의 비슷하나 진폭의 크기에 있어서 505도 부근의 흡기 유효성분을 비교할 때에 LRF > SRF > SRS 순서이다(밸브의 개구면적이 클 때일수록 유량이 더욱 증가하기 때문에). 피크의 위상은 553.5도로

IVC 무효각을 30도로 가정하면 약 8도 정도 늦다. 관성 램 피크는 1.02 bar이다. 따라서 압축력을 더 높으려면 1차 흡기관 직경을 39mm에서 35mm로 축소하는 것이 바람직한 것으로 생각된다¹⁵⁾.

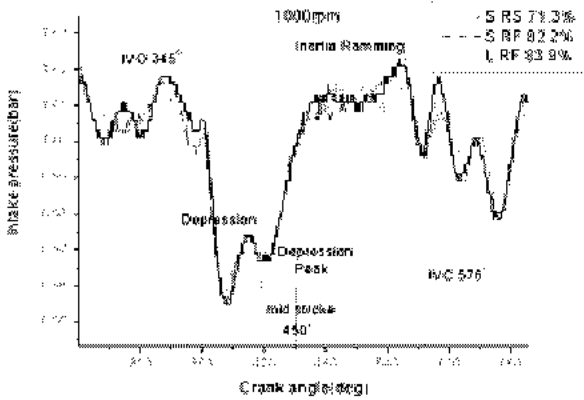


Fig. 7 Pressure wave profile with variation of Helmholtz resonator at 1000rpm

Fig. 8은 1700rpm 구간에서의 흡기 압력파의 위상과 진폭의 발달 양상을 보여주고 있다.

체적효율은 LRF > SRF > SRS 순서이다. IVO 직후 압력파의 진폭은 LRF > SRF > SRS 순서이다. IVO 직후의 압력파의 진폭이 체적효율에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 2차 피크 압력강하는 위상이 450도 부근에 위치하고 있다. 공진기의 체적이 커질수록 피크의 폭이 넓어지는 것을 알 수 있다. 관성 램 기간동안의 위상과 진폭 모두 거의 비슷하나 진폭의 크기에 있어서 흡기 유효성분을 비교할 때에 LRF > SRF > SRS 순서이다. BDC 부근의 압력과 피크의 위상은 LRF : 540도, SRF : 541도, SRS : 543도이다.

본 실험 조건에서 가장 정숙한 운전이 가능하였다.

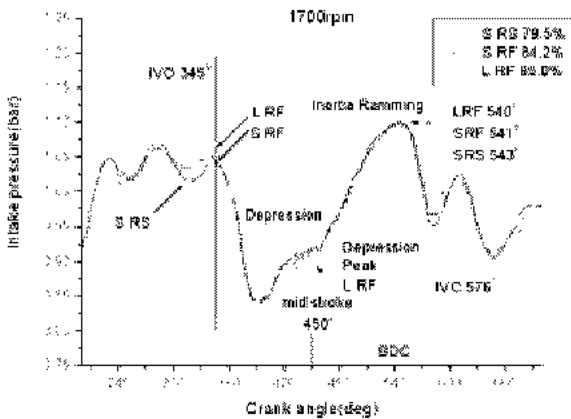


Fig. 8 Pressure wave profile with variation of Helmholtz resonator at 1700rpm

Fig. 9는 2400rpm 구간에서의 흡기 압력파의 위상과 진폭의 발달 양상을 보여 주고 있다.

체적효율은 LRF > SRF > SRS 순서이다. IVO 직후 압력파의 진폭은 SRS > SRF > LRF 순서이다. IVO 직후의 압력파의 진폭이 상승하다가 하강하기 시작한다. 위상이 어긋나 있는 것을 알 수 있다.

피크 압력강하는 위상이 473-475도 부근에 위치하고 있다. 공진기의 체적이 커질수록 피크의 폭이 좁아지는 것을 알 수 있다. 관성 램 기간에 위상과 진폭 모두 거의 비슷하나 진폭의 크기에 있어서 흡기 유효성분을 비교할 때에 LRF > SRF > SRS 순서이다. BDC 부근의 압력과 피크의 위상은 LRF: 569도, SRF: 574도, SRS: 576도이다. 관성 램 피크의 위상이 늦음을 알 수 있다. 따라서 실린더로부터 흡기관으로의 가스의 역류 가능성이 있음을 알 수 있다. 2400rpm을 넘어서면서부터 난조(off-tuning)에 의한 소음이 현저하게 커지기 시작하였다.

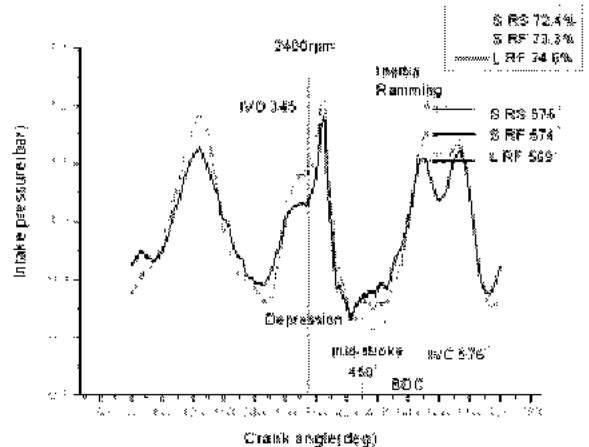


Fig. 9 Pressure wave profile with variation of Helmholtz resonator at 2400rpm

4. 결 론

2차 흡기관에 병렬로 부착된 가변 헬름홀츠 공진기가 다기통 디젤기관의 체적효율에 미치는 영향을 평가하기 위하여 2차 흡기관, 병렬 공진기, 플리넘, 1차 흡기관으로 이루어진 3 자유도 스프링-질량계를 구성하여 엔진회전수와 체적이 다른 2개의 공진기에 의한 실험 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 피스톤 운동에 의한 공진주파수와 공진기 고유진동수가 동조되었을 때 체적효율 피크가 1000, 1700, 2500rpm 부근에 존재함을 확인하였다.
- 2) 저 엔진회전수 영역인 1000rpm 부근에서 공진기를 열었을 때 체적효율이 약 18.2% 향상되었다.

- 3) 중간 엔진회전수 영역인 1700rpm 부근에서 공진기를 열었을 때 체적효율이 약 7.6% 향상되었다.
- 4) 1900rpm 이하에서는 공진기를 열어주고 2000rpm 이상에서는 공진기를 닫아주는 개폐조작에 의하여 체적효율을 향상시킬 수 있음을 알았다.
- 5) 공진기의 의하여 체적효율 피크 엔진 공진회전수 대역이 2000에서 1700rpm 으로 낮아져 중속 운전성능이 좋아졌다.

이상으로부터, 본 연구 모델이 특별히 저속 운전 영역에서 체적효율 개선하는데 1)에서 그 가능성과 2), 3), 4)에서 그 유효성이 있음을 입증하였다. 따라서 저속 운전 영역에서의 체적효율 향상에 비례하여 연료 소비율도 낮추고 배기오염물의 양도 줄일 수 있을 것으로 생각되며, 피크 압력강하의 위상을 기초로 하여 흡기관계 요소 제원에 대한 최적설계의 예측이 가능할 것으로 생각된다. 공진기를 열었을 때 엔진회전수 1000rpm 부근과 1700rpm 부근의 특정구간에서의 체적효율 향상을 얻을 수 있어서 향후 가변 흡기계의 흡기압력을 입력 값으로 하여 FVVT와 컴먼레일 전자연료 분사계를 제어하는 더욱 진보한 엔진 제어계의 적용에 유용 할 것으로 생각한다.

참고 문헌

1. Massimo Ceccarani, Corrado Rebottini, 1994, "Optimization of the charge efficiency and relationship with emission control for a high performance engine", ATA conference 94A1066.
2. D. Broome, 1969, "Induction ram, part three: wave phenomena and the design of ram intake systems", Automobile engineer, June. 1969, pp. 262-267.
3. James Lighthill, 1978, "Waves in fluid", Cambridge university press, cambridge. pp. 1.
4. M. Morse, R. H. Boden and Harry Schecter, 1938, "Acoustic vibrations and internal combustion engine performance. I. Standing waves in the intake pipe system", J. Applied Physics, 9, pp. 16-23.
5. Badih Jawad, Alin Dragoiu, Lorne Dyar, Kerry Zellner and Chris Riedel, 2003, "Intake design for maximum performance", SAE paper 2003-01-2277.
6. Badih Jawad, Christopher Biggs and Bradley Klein, 2002, "Exhaust system design for a four cylinder engine", SAE paper 2002-01-3316.
7. J. W. G. Turner, M. D. Bassett, R. J. Pearson, G. Pitcher and K. J. Douglas, 2004, "New operating strategies afforded by fully variable valve trains", SAE paper 2004-01-1386.
8. P. H. Azoury, 1992, "Engineering applications of unsteady fluid flow" John Wiley & sons Ltd, west Sussex, pp.170-171.
9. P. C. Vorum, 1975, "Short pipe manifold design for four-stroke engines", A.S.M.E., Paper 76-WA/DGP-4.
10. P. C Vorum, 1980, "Short pipe manifold design for four-stroke engines: Part II", A.S.M.E., Paper 80-WA/DGP-6.
11. Helmut W. Engelman, 1953, "The tuned manifold : Supercharging without blower", ASME 53-DGP-4.
12. Helmut W. Engelman, 1973, "Design of a tuned intake manifold", ASME 73-WA/DGP-2.
13. Daniele Bortoluzzi, Vittore Cossalter and Alberto Doria. 1989, "The effect of tunable resonator on the volumetric efficiency of an engine", SAE paper, 983045.
14. Sergio M. Harriot, Marcello A. Faraco de Medeiros and Jose Ricardo Sodre, 2000, "An experimental and numerical study from pulsating flow in intake manifold", SAE paper 2000-01-316
15. L. J. Castner, 1943, "Induction ramming effects in single-cylinder four-stroke engine", Proc. Instn Mech Engrs, 153, pp. 206-214.
16. A. Ohata, Y. Ishida, 1982, "Dynamic inlet pressure and volumetric efficiency of four cycle cylinder engine", SAE paper 820407.
17. David A. Bies & Colin H. Hansen, 1988, "Engineering noise control", Unwin Hyman Ltd. London.
18. Shizo Yagi, Akira Ishizuya, and Isao Fujii, 1970, "Research and development of High-speed", high-performance, small displacement Honda engine, SAE paper 700122.